T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

ENERJİ SİSTEMLERİNDE HARMONİK ANALİZİ ve HARMONİK AZALTMA TEKNİKLERİ

Faruk KÜRKER

ELEKTRİK ELEKTRONİK ANABİLİM DALI

ŞANLIURFA
2017

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZ …….. i
ABSTRACT …….. ii
TEŞEKKÜR ……... iii
ŞEKİLLER DİZİNİ …….. iv
ÇİZELGELER DİZİNİ …….. viii
SİMGELER DİZİNİ ……... x
1. GİRİŞ ……..... 1
1.1. Elektrik Enerjisi ve Harmonikler …..……... 5
1.2. Elektrik Enerji Kalitesi ….……... 6
1.3. Elektrik Enerji Kalitesinin Sınıflandırılması ...…… 7
1.3.1. Geçici olaylar (transients) ……..…….. 8
1.3.2. Gerilim yükselmesi (swell) ……..…….. 10
1.3.3. Gerilim düşmesi (voltage sag)……..…….. 11
1.3.4. Kesinti (interruption)…..……..…….…….. 12
1.3.5. Gerilim dengesizliği (voltage imbalance) ……..…….. 14
1.3.6. Dalga biçimi bozulması (waveform distortion) ……..…….. 16
1.3.6.1. DC offset ……..……..……... 16
1.3.6.2. Harmonikler (harmonics)……..……..... 16
1.3.6.3. Ara harmonikler (interharmonics).……..……..……... 19
1.3.6.4. Çentik (notche)……..……..... 19
1.3.6.5. Gürültü (noise)……..……..... 20
1.3.7. Gerilim dalgalanması (voltage fluctuation, flicker) ..……..…….. 21
1.3.8. Güç frekans değişimleri (power frequency variation) ...……..…….. 24
1.4. Elektrik Enerjisi Problemlerinin Kaynakları ve Kalite Problemi ……...……. 26
1.5. Harmonikler ……..……..……. 27
1.6. Harmoniklerle İlgili Tanımlar ve Kavramlar …..……..……. 29
1.6.1. Toplam harmonik distorsiyonu (THD-THB) ……..……..…….. 29
1.6.2. Toplam talep distorsiyonu (TTD-TTB) ……..……..…….. 30
1.6.3. Form (Şekil) faktörü ……..……..…….. 31
1.6.4. Tepe (Crest) faktörü ……..……..…….. 31
1.6.5. Telefon etkileşim faktörü (TEF) ……..……..…….. 32
1.6.6. Transformatör K faktörü ……..……..…….. 33
1.6.7. Distorsiyon güç faktörü ……..……..…….. 36
1.7. Harmonik Üreten Kaynaklar ...……..……..……. 37
1.7.1. Transformatörler ……..……..…….. 39
1.7.2. Jeneratörler ……..……..…….. 39
1.7.3. Doğrultucular (Konverterler) …..……..……..…….. 40
1.7.4. Ark fırınları ……..……..…….. 41
1.7.5. Gaz deşarjı prensibi ile çalışan aydınlatma elemanları ve balastları ……..…….. 41
1.7.6. Statik VAR kompanzatörleri ……..……..…….. 42
1.7.7. Kesintisiz güç kaynakları (UPS) ……..……..…….. 43
1.7.8. Fotovoltaik sistemler ……..……..…….. 44
1.7.9. Doğru akım ile enerji nakli (HVDC- High voltage direct current) ..……..…….. 44
1.7.10. Bilgisayarlar ……..……..…….. 45
1.8. Harmoniklerin Meydana Getirdiği Etkiler ..……..……..……. 46
1.8.1. Harmoniklerin transformatörler üzerindeki etkisi ....……..…….. 48
1.8.2. Harmoniklerin motorlar ve jeneratörler üzerindeki etkisi …...……..…….. 50
1.8.3. Harmoniklerin direnç üzerindeki etkisi ……..……..…….. 52
1.8.4. Harmoniklerin reaktanslar üzerindeki etkisi ..……..……..…….. 53

1.8.5. Harmoniklerin devre kesicileri ve sigortalar üzerindeki etkisi ……..…….. 54
1.8.6. Harmoniklerin elektronik elemanlar üzerindeki etkisi ……...…….. 55
1.8.7. Harmoniklerin ölçü aletleri üzerindeki etkisi ……...……...…….. 55
1.8.8. Harmoniklerin röleler üzerindeki etkisi ……...……...…….. 56
1.8.9. Harmoniklerin aydınlatma elemanları üzerindeki etkisi ……...…….. 57
1.8.10. Harmoniklerin yalıtıma olan etkisi ……...…….. 58
1.8.11. Harmoniklerin iletkenler üzerindeki etkisi ……...…….. 58
1.8.12. Harmoniklerin elektrik tesisatlarına etkisi ……...…….. 59
1.8.13. Harmoniklerin enerji iletim sistemi üzerindeki etkisi ...……..…….. 59
1.8.14. Harmoniklerin iletişim hatları üzerindeki etkisi ……...…….. 60
1.8.15. Harmoniklerin kondansatör üzerindeki etkisi ……..…...……. 60
1.8.16. Harmoniklerin sebep olduğu rezonans olayları ……...……. 61
1.8.16.1. Paralel rezonans (kondansatör gerilimi büyür) ……..…….... 62
1.8.16.2. Seri rezonans (kondansatör akım büyür) ……..……..... 70
1.9. Sistemdeki Harmoniklerin Belirlenmesi ……..……..……..……. 76
1.10. Harmoniklerin Kontrolü ...……..……..……..……. 77
1.10.1. Tasarım aşamasında alınabilecek önlemler .....……...…….. 78
1.10.2. Harmoniklerin azaltılması için kullanılan cihazlar ..……...…….. 80
1.11. Harmonik Filtreleri ……....……..……...……. 81
1.11.1. Pasif harmonik filtreleri ……...……...…….. 84
1.11.1.1. Seri pasif filtreler ……...…….... 85
1.11.1.2. Paralel (şönt) pasif filtreler ….…..……..... 86
1.11.1.2.1. Tek ayarlı (bant geçiren) filtreler ……..... 87
1.11.1.2.2. Çift ayarlı filtreler ….……..... 90
1.11.1.2.3. Otomatik ayarlı filtreler ….……..... 92
1.11.1.2.4. Yüksek geçiren sönümlü filtreler ….……..... 92
1.11.2. Aktif Filtreler ……...……...…….. 96
1.11.2.1. Paralel aktif filtre ……..……..... 98
1.11.2.2. Seri aktif filtre ……..... 100
1.11.3. Hibrid (hybrid) filtreler ..……...……...…….. 101
1.11.4. Reaktif güç kompanzasyon sistemine seri endüktans (harmonik filtre reaktörü) bağlamak ……..……...……..…….. 105
1.12. Harmonik Filtre Reaktörü Seçim Kriterleri ……..……..... 113
1.13. Harmonikli Devrelerde Kompanzasyon …..…..……..……. 114
1.14. Güç Kalitesinin Bozulması ile İlgili Standartlar ……..……..……. 118
1.15. Transformatörlerin Harmonik Yüklenmesi ……..……..……. 121
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR ……..……..... 126
3. MATERYAL ve YÖNTEM ……..……..... 144
3.1. Materyal ..……...…..……...……. 144
3.1.1. Ölçümde kullanılan ekipmanlar .....……...…….. 144
3.2. Yöntem ...……...…..……...……. 148
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA ……..... 152
4.1. Araştırma Bulguları ….……..... 152
4.2. Lazer Torna Tezgahına Sahip Tesiste Filtre Takılmadan Önce Harmonik İncelemesi ….. 152
4.3. 2500 kVA ve 1600 kVA ile Beslenen Tesiste Filtre Takılmadan Önce Harmonik İncelemesi ……...……..…….. 165
4.4. 40 W ve 150 W'lık LED Projektör Harmonik İncelemesi ...……..... 173
4.5. Dört Farklı İplik Üretimi Yapan Tesiste Harmonik İncelemesi ….…..... 179
4.6. 1600 kVA ve 1250 kVA ile Beslenen Tesiste Filtresiz, Seri Endüktanslı ve Pasif Harmonik Filtreli Harmonik İncelemesi ……..... 207
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER ……...……..... 223
5.1. Sonuçlar ……..... 223
5.2. Öneriler ……... 227
6. KAYNAKLAR ...……...……..... 229

7. EKLER 236
Ek 1: Fourier Analizi 236
Ek 2: Tepe, Rms, Ortalama ve Ani Değer 239
Ek 3: Reaktif Güç ve Reaktif Güç Kompanzasyonu 242
Ek 4: Reaktif Güç Kompanzasyonunda Kondansatör Gücünün Hesabı 249
Ek 5: Reaktif Güç Kompanzasyonunda Kondansatör Değerinin Hesabı 252
Ek 6: EPDK Tarafından Yayınlanan Reaktif Güç Yönetmelikleri ve Reaktif Enerji Tarifesi ... 262
Ek 7: Bobinde Kullanılacak Toroid Nüve, Kondansatör Önüne Bağalanacak Seri Endüktans ve Örnek Hesaplamaları 265
Ek 8: Elektrik Piyasasında Dağıtım Sisteminde Sunulan Elektrik Enerjisinin Tedarik Sürekliliği, Ticari ve Teknik Kalitesi Hakkında Yönetmelik 272
Ek 9: Transformatörlerde Kaçak Reaktans Hesabı Ve Transformatörlerde Kritik Kondansatör Gücü Hesabı 277
Ek 10: Lazer Torna Tezgahına Sahip Tesisin Kompanzasyon, Harmonik Filtre Reaktörü ve Pasif Harmonik Filtre Hesaplamaları 282
Ek 11: 1250 kVA ve 1600 kVA'lik Trafodan Beslenen Tesisin 1250 kVA'lik Trafo, Kompanzasyon ve Harmonik Filtre Reaktörü Hesaplamaları 285
Ek 12: 1250 kVA ve 1600 kVA'lik Trafodan Beslenen Tesisin Pasif Harmonik Filtre Hesapları 290

ÖZET

Doktora Tezi

ENERJİ SİSTEMLERİNDE HARMONİK ANALİZİ ve HARMONİK AZALTMA TEKNİKLERİ

Faruk KÜRKER

Harran Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof.Dr. Ramazan TAŞALTIN
Yıl: 2017, Sayfa: 293

Elektrik kullanan tesislerde veya enerji sistemlerinde üretimin sağlıklı bir şekilde yapılabilmesi için tesise kaliteli enerji sağlanması oldukça önem arz etmektedir. Elektrik enerjisinin kalitesini belirleyen ana faktörlerden biri olan akım ve gerilimin sinüs eğrisine çok benzer bir biçimde ve 50 Hz frekansında olmasıdır. Fakat doğrusal olmayan yük kullanımının yaygınlaşması sonucunda bu yüklerin ürettiği harmoniklerden dolayı, akım ve gerilimin dalga şekli sinüs halden uzaklaşır ve sonuç olarak işletmede istenmeyen elektrik sorunları meydana gelir. Yarı iletken elemanların kullanıldığı cihazlar, kesintisiz güç kaynakları, transformatörler, jeneratörler, redresörler, motor hız kontrol sistemleri şebekede harmoniklerin meydana gelmesine sebep olmaktadır. Güç faktörünün şebekede 1'e yakın olmasının ekonomiye olan katkısından dolayı kanunlarla yapılması zorunlu hale getirilen reaktif güç kompzanzasyonu, harmonikler nedeniyle rezonans halinde kompanzasyonda kullanılan kondansatörleri tahribata uğramakta ve hatta patlatabilmektedir. Ayrıca harmonikler yalıtkan kablolarda delinme oluşmasına sebep olabilmekte ve bu durum büyük bir sorun oluşturmaktadır. Elektrik enerji sistemlerinde harmoniklerden kaynaklı olarak işletmelere kaliteli bir elektrik enerjisi sunulamadığı için sistemde kullanılan cihazları olumsuz etkilemesinden dolayı ek kayıplara yani endüstriyel işletmelerde önemli ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Harmoniklerin şebekelerde azaltılması, EPDK (Enerji Piyasası Denetleme Kurulu) tarafından belirtilen değerlerin altında tutulması tesislerde hem teknik hem de ekonomik açıdan fayda sağlar. Harmoniklerin azaltılması için farklı yöntemler kullanılabilir. Bunlardan ilki harmoniklerin giderilmesi için işletmelerde harmoniklere sebebiyet veren cihazlar tasarlanırken harmonikleri düşük seviyede ya da hiç oluşturmayacak filtre ile birlikte tasarlanması, diğeri ise filtreler vasıtasıyla sistemde bulunan harmoniklerin süzülerek azaltılmasıdır. Elektrik tesislerinde reaktif güç kompanzasyonu yapılırken harmoniklerin de göz önünde bulundurulması, tesislerde ve dağıtım sistemlerindeki harmoniklerin incelenmesi, harmonik sınırlara uyumluluğu sağlamak üzere atılacak adımlara rehberlik etmesi açısından oldukça önemlidir. Bu tez çalışmasının asıl amacı harmoniklerin güç sistemindeki etkilerini ve harmoniklerin azaltılmasının sanayinin istifadesine nasıl sunulacağını göstermektir. Yapılan bu çalışmada, harmonik bozulmanın, güç kalitesiyle ilgili en önemli sorunlardan biri olduğu ve güç sistemine çeşitli bozulmalar oluşturduğu açıklanmaktadır. Bu doktora tezinde birçok tesisin akım, gerilim ve güç gibi parametreleri ölçülmüştür. Ölçümler sonucunda veriler bilgisayara aktarılarak harmonik analizi yapılmıştır. En son ölçüm yapılan tesis 1250 kVA ve 1600 kVA'lik trafolardan beslenmekte olup, bu tesiste önce filtresiz olarak, daha sonra reaktif güç kompanzasyon kondansatörleri önüne harmonik filtre reaktörü bağlayarak ve en son pasif harmonik filtre bağlayarak ölçümler gerçekleştirilmiştir. Ölçümler sonucunda harmonik güç oranı filtresizde %31.92, harmonik filtre reaktörlü bağlantıda %13.82 ve pasif harmonik filtreli bağlantıda %8.81 olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar doğrultusunda uygulamaya yönelik öneriler geliştirilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Harmonik, güç kalitesi, harmonik bozulma, harmonik azaltma

ABSTRACT

PhD Thesis

HARMONIC ANALYSIS AND HARMONIC REDUCTION TECHNIQUES IN ENERGY SYSTEMS

Faruk KÜRKER

Harran University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical Electronics Engineering

Supervisor: Prof.Dr. Ramazan TAŞALTIN
Year: 2017, Pages: 293

In order to achieve an efficient production in plants using electricity, it is vital to use quality energy. One of the main factors determining the quality of electric energy is that the current and voltage are very similar to the sinusoidal curve and at the frequency of 50 Hz. However, due to the expanded usage of nonlinear load and harmonics produced by these loads, the current and voltage lose their sinusoidal characteristics and result in electric problems in the plant. Devices using semiconductor elements, uninterruptible power supplies, transformers, generators, rectifiers, motor speed control systems cause harmonics in the mains. Because of its contribution to the economy when the power factor is close to 1, reactive power compensation which was made obligatory may cause deterioration in capacitors used in reactive compensation system even to explode them. In addition, harmonics can cause perforation in insulated cables, which is a major problem. Because of the harmonics in the electric energy systems, it is not possible to present a quality electric energy to the enterprises and it causes significant losses in the industrial loss due to the negative effects on the devices used in the system. Reduction of harmonics in networks, below the values specified by EPDK (Energy Market Regulatory Board), is beneficial both in terms of technical and economic aspects. Different methods can be used to reduce harmonics. One of these methods to remove harmonics is to design the devices to be used in plants with low harmonics or with a filter removing totally and another one is to minimize the harmonics in the system through filters. Consideration of harmonics in reactive power compensation in electrical installations, examination of harmonics in installations and distribution systems is very important in terms of guiding the steps to be taken to ensure compliance with harmonic boundaries. The main purpose of this thesis is to explore the effects of harmonics in power systems and provide the industry with the results of reduced effect of harmonics. In this study, it is explained that harmonic distortion is one of the most important problems related to power quality and that it causes various deterioration in the power system. In this thesis, the parameters such as current, voltage and power of several installations were measured. As a result of the measurements, harmonics analyses were performed by transferring the data to the computer. The most recent measured plant was fed from 1250 kVA and 1600 kVA transformers. The measures sequenced as following: at first without filter, later with harmonic filter reactors before reactive power compensation and last with passive harmonic filter. The result figures were 31.92% in the filterless measurement, 13.82% in the measurement with harmonic filter reactor and 8.81% in the measurement with passive harmonic filter. Certain suggestions were made in the light of those results

KEY WORDS: Harmonic, power quality, harmonic distortion, harmonic reduction

TEŞEKKÜR

Doktora çalışmamın başlamasından, en verimli şekilde tamamlanmasına kadar geçen süre içerisinde yardımlarını hiç bir zaman benden esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ramazan TAŞALTIN'a teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim. Çalışmalarım boyunca çok büyük yardımlarını gördüğüm Yük.Tek.Öğrt. Aydemir KALEBEK'e ve Elk. Tek. Öğrt. Kayhan KALABEK'e teşekkür ederim. Ayrıca destekleri ile her zaman yanımda olan aileme, O'nunla tanıştıktan sonra hayatımın her aşamasında bana desteklerini esirgemeyen eşime, çocuklarıma ayrıca tez izleme komitesinde ve tez savunma sınavımda jüri üyesi olarak bulunan Dicle Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümünden Sayın Yrd. Doç. Dr. Bahattin KURT'a değerli katkılarından dolayı çok teşekkür ederim.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1. Elektrik enerjisinin dağıtımı ……. 5
Şekil 1.2. Normal (ideal kalitede) sinüsoidal şebeke eğrisi ……. 6
Şekil 1.3. Üç fazlı bir sistemde geçici salınım …….. 9
Şekil 1.4. Yıldırım darbe akımı kaynaklı oluşan geçici olay 9
Şekil 1.5. Arka arkaya kondansatör anahtarlanması nedeniyle oluşan salınım biçimindeki geçici olay ……. 10
Şekil 1.6. Gerilimin yükselmesi (swell) …….. 10
Şekil 1.7. Üç fazlı bir sistemde simetrik gerilim yükselmesi …… 11
Şekil 1.8. Gerilim düşmesi (dip sag) …….. 11
Şekil 1.9. Üç fazlı gerilim çökmesi, simetrik durumda …….. 12
Şekil 1.10. Uzun süreli enerjinin kesintisi ……. 13
Şekil 1.11. Kısa süreli enerjinin kesilmesi …….. 13
Şekil 1.12. Üç fazlı sistemde voltaj kesintisi …….. 14
Şekil 1.13. Şebekelerde faz dengesizliği 14
Şekil 1.14. Gerilim dengesizliği ……. 15
Şekil 1.15. Nonlineer bir yükün sebep olduğu harmonik bozulma …….. 17
Şekil 1.16. Harmonikler tarafından bozulmuş üç fazlı sinyal …….. 17
Şekil 1.17. Çeşitli cihazların akım formları ve spektrumları şematik diyagramı …….. 18
Şekil 1.18. Çentik (notch) …… 20
Şekil 1.19. Üç faz konverter nedeniyle gerilim çentiğine örnek ……. 20
Şekil 1.20. Anahtarlamalı rezonansdan dolayı 480 v.'daki gürültü ……. 21
Şekil 1.21. Uzun süreli gerilim dalgalanması ……. 22
Şekil 1.22. Kısa süreli gerilim dalgalanması …….. 22
Şekil 1.23. Üç fazlı bir sistemde gerilim flicker'ı 23
Şekil 1.24. Ark ocağı çalışması nedeniyle voltaj dalgalanmaları örneği 23
Şekil 1.25. Güç sistemi üzerindeki bozulmalara sebep olan cihazlar ve dalga formları …….. 26
Şekil 1.26. Harmoniklerin akımlarının sisteme etkisi, sinüsoidal bozukluk, temel 50 Hz sinüsoidal akım, 3.,5. harmonik ve toplam harmonikli dalga ……. 28
Şekil 1.27. Sinüsoidal ve kare dalga için crest faktörü ……. 32
Şekil 1.28. Temel HVDC devresi …….. 45
Şekil 1.29. Sinüsoidal 220 V besleme gerilimi için PC'nin gerilim ve akım dalga biçimleri ve akım harmonik spektrumu..... 45
Şekil 1.30. Ortalama ve rms değer gösteren ölçü aletlerinin ölçüm sonuçları arasındaki fark 56
Şekil 1.31. Paralel rezonans devresi …….. 63
Şekil 1.32. Paralel rezonans devresi akım fazör ve empedans fazör diyagramları 64
Şekil 1.33. Rezonans frekansında empedans ve akım grafiği …….. 66
Şekil 1.34. Harmonik kaynağının kompanzasyon ve tranformatör üzerine akışı ……. 67
Şekil 1.35. Rezonans devresinin örnek tek hat şemaları ……. 68
Şekil 1.36. Seri rezonans devresi ……. 70
Şekil 1.37. Seri rezonans devresi fazör gerilim-akım ve fazör empedans diyagramları …….. 72
Şekil 1.38. Rezonans frekansında empedans ve akım grafiği …….. 73
Şekil 1.39. Seri ve paralel rezonans frekansları 75
Şekil 1.40. Seri ve paralel rezonansta bir devrenin frekans cevabı 76
Şekil 1.41. Doğrultucuların çeşidine göre harmonik distorsiyonun değeri …….. 79
Şekil 1.42. Doğrultucuların türleri ve harmonikli dalga şekilleri ..…… 79
Şekil 1.43. Doğrultucuların darbe sayısına göre harmonik spektrumunun değişimi …….. 79
Şekil 1.44. Doğrusal olmayan yüklerin toplam gücü ile yüklü bir transformatör ……. 83
Şekil 1.45. Pasif filtrenin çalışma prensibi ……. 85

Şekil 1.46. (a) seri pasif filtre prensip şeması, (b) örnek seri pasif filtre ….…….…. 86
Şekil 1.47. Pasif filtre için bir örnek (tek ayarlı paralel pasif filtre) ……..... 87
Şekil 1.48. Tek ayarlı paralel pasif filtre ve frekansa bağlı olarak empedans karakteristiği ..….. 88
Şekil 1.49. Tek ayarlı paralel pasif filtre için frekans-empedans ilişkisi 89
Şekil 1.50. Çift ayarlı paralel pasif filtre şeması …….…..... 91
Şekil 1.51. Çift ayarlı filtre impendence -frekans karakteristik eğrisi …..…….. 91
Şekil 1.52. Yüksek Geçiren Sönümlü Filtreler (a) Birinci Derece, (b) İkinci Derece, (c) Üçüncü Derece, (d) C Tipi …...…… 92
Şekil 1.53. Yüksek geçiren sönümlü paralel pasif filtre için frekans-empedans ilişkisi …….. 95
Şekil 1.54. C tipi yüksek geçiren sönümlü filtre şeması ……..…… 95
Şekil 1.55. Aktif filtre çalışma prensibi ……..…. 98
Şekil 1.56. Paralel aktif filtrenin prensip şeması ……..……..…. 99
Şekil 1.57. Tek başına paralel aktif filtre ..……...……..……... 99
Şekil 1.58. Paralel aktif filtre ağ yapılandırması ..……..…….. 99
Şekil 1.59. Seri aktif filtrenin prensip şeması 100
Şekil 1.60. Tek başına seri aktif filtre ……..…….... 101
Şekil 1.61. Seri aktif filtre ağ yapılandırması ……..…….. 101
Şekil 1.62. Hibrid filtre çalışma prensibi ……..…… 102
Şekil 1.63. Seri aktif filtre ve pasif filtre kombinasyonu …….. 103
Şekil 1.64. Paralel aktif filtre ve pasif filtre kombinasyonu ….……..…… 103
Şekil 1.65. Paralel pasif filtre ile seri aktif filtre ……..…. 104
Şekil 1.66. Pasif, aktif ve hibrid filtrelerin karşılaştırma tablosu ...……..…. 104
Şekil 1.67. Kompanzasyon sistemine seri endüktans bağlamak ...…….……... 105
Şekil 1.68. Manyetik nüve kesiti, sipir sayısı ve sarılacak olan telin kesit alanı hesabı yapılan reaktörün bağlantısı …….……..……..... 110
Şekil 1.69. Kondansatör nominal gerilimi ve kondansatör reaktif gücü …..... 110
Şekil 1.70. Harmonik filtre rektörünün kondansatör bağlantısı 112
Şekil 1.71. Harmonik filtre rektörünün kondansatör bağlantısı ve eşdeğer devresi ..…….. 112
Şekil 1.72. 1000 kVA'lık bir transformatörün olduğu bir tesiste hesaplanmış olan reaktif gücün tek hat gösterimi ……..……..…….. 117
Şekil 1.73. Transformatora bağlanan lineer yükün toplam yüke oranına göre transformator azalma faktörü …….…….. 122
Şekil 3.1. Amprobe energy test 2020 harmonik analizör …….…….…… 145
Şekil 3.2. Amprobe energy test 2020 ölçüm aparatları …..……..…. 145
Şekil 3.3. Amprobe energy test 2020 ölçüm aparatları ……. 146
Şekil 3.4. Amprobe energy test 2020 bilgisayar bağlantı kablosu ..…….. 146
Şekil 3.5. Amprobe energy test 2020 harmonik analizör bağlantı şeması 146
Şekil 3.6. İlk ölçümün yapıldığı tesiste kullanılan lazer torna tezgahı ……. 149
Şekil 3.7. Harmonik analizör ile panoda yapılan bağlantı, ölçme1-besleme1 noktası …….. 150
Şekil 3.8. Birinci ölçüm noktasında yapılan ölçümler …....…… 150
Şekil 3.9. En son ölçümün yapıldığı tesiste kullanılan open-end makinalarından görünüm……. 151
Şekil 4.1. Lazer torna tezgahına sahip tesiste ölçme noktaları …….…… 153
Şekil 4.2. Birinci ölçüm noktasında işletmedeki gerilimler grafiği ……..…. 154
Şekil 4.3. Birinci ölçüm noktasında işletmedeki akımlar grafiği ……..……...…. 154
Şekil 4.4. Birinci ölçüm noktasında I_1, I_2 ve I_3 akımlarının harmonik değerleri …..……..….. 155
Şekil 4.5. İkinci ölçüm noktasında işletmedeki gerilimlerin grafiği 157
Şekil 4.6. İkinci ölçüm noktasında işletmedeki akımların grafiği …… 158
Şekil 4.7. İkinci ölçüm noktasında U_1, U_2 ve U_3 gerilimlerinin harmonik değerleri ……..…..... 158
Şekil 4.8. İkinci ölçüm noktasında I_1, I_2 ve I_3 akımlarının harmonik değerleri ……..……. 159
Şekil 4.9. Üçüncü ölçüm noktasında işletmedeki gerilimler grafiği ...…….. 161
Şekil 4.10. Üçüncü ölçüm noktasında işletmedeki akımlar grafiği ….……..…… 161
Şekil 4.11. Üçüncü ölçüm noktasında U_1, U_2 ve U_3 gerilimlerinin harmonik değerleri ……..…. 162
Şekil 4.12. Üçüncü ölçüm noktasında I_1, I_2 ve I_3 akımlarının harmonik değerleri ……...….... 163
Şekil 4.13. 2500 kVA ve 1600 kVA ile beslenen tesisisin tek hat şeması …… 165

Şekil 4.14. Water şebeke girişinde işletmedeki gerilimler grafiği ..…….. 166
Şekil 4.15. Water şebeke girişinde işletmedeki akımlar grafiği ...…… 166
Şekil 4.16. Water şebeke girişinde gerilim grafiği U_1, U_2 ve U_3 geriliminin harmonik değerleri.. 167
Şekil 4.17. Water şebeke girişinde, akım grafiği I_1, I_2 ve I_3 akımının harmonik değerleri …..…. 168
Şekil 4.18. Water invertör girişi işletmedeki gerilimlerin grafiği ……... 170
Şekil 4.19. Water invertör girişi işletmedeki akımların grafiği ……..…….. 170
Şekil 4.20. Water invertör girişi gerilim grafiği U_1, U_2 ve U_3 geriliminin harmonik değerleri 171
Şekil 4.21. Water invertör girişi akım grafiği I_1, I_2 ve I_3 akımının harmonik değerleri 172
Şekil 4.22. 40 W'lık LED armatürde yapılan ölçüm sonucunda gerilim grafiği …….. 174
Şekil 4.23. 40 W'lık LED armatürde yapılan ölçüm sonucunda akım grafiği ……..…… 175
Şekil 4.24. 40 W'lık LED armatürde yapılan ölçüm sonucunda I akımının harmonik değerleri .. 175
Şekil 4.25. 150 W'lık LED armatürde yapılan ölçüm sonucunda gerilim grafiği ...…… 177
Şekil 4.26. 150 W'lık LED armatürde yapılan ölçüm sonucunda akım grafiği ……..…. 178
Şekil 4.27. 150 W'lık LED armatürde yapılan ölçüm sonucunda I akımının harmonik değerleri. 178
Şekil 4.28. İplik üretim tesisinde hazırlama (ısıtıcı) kısmında yapılan ölçümde gerilimler grafiği 180
Şekil 4.29. İplik üretim tesisinde hazırlama (ısıtıcı) kısmında yapılan ölçümde akımlar grafiği.. 181
Şekil 4.30. Hazırlama (ısıtıcı) kısmında U_1, U_2 ve U_3 geriliminin harmonik değerleri …..... 181
Şekil 4.31. Hazırlama (ısıtıcı) kısmında I_1, I_2 ve I_3 akımının harmonik değerleri 182
Şekil 4.32. İplik üretim tesisinde hazırlama (sürücü) kısmında yapılan ölçümde gerilimler grafiği …….. 184
Şekil 4.33. İplik üretim tesisinde hazırlama (sürücü) kısmında yapılan ölçümde akımlar grafiği. 184
Şekil 4.34. Hazırlama (sürücü) kısmında U_1, U_2 ve U_3 geriliminin harmonik değerleri …….. 185
Şekil 4.35. Hazırlama (sürücü) kısmında I_1, I_2 ve I_3 akımının harmonik değerleri ……..…… 186
Şekil 4.36. Büküm kısmında yapılan ölçüm sonucunda gerilimler grafiği ...……..…. 188
Şekil 4.37. Büküm kısmında yapılan ölçüm sonucunda akımlar grafiği ……..…. 188
Şekil 4.38. Büküm kısmında U_1, U_2 ve U_3 geriliminin harmonik değerleri …..……... 189
Şekil 4.39. Büküm kısmında I_1, I_2 ve I_3 akımının harmonik değerleri …..……..…….. 190
Şekil 4.40. Fikse (buhar) kısmında yapılan ölçümde gerilimler grafiği 192
Şekil 4.41. Fikse (buhar) kısmında yapılan ölçümde akımlar grafiği ……..... 192
Şekil 4.42. Fikse (buhar) kısmında U_1, U_2 ve U_3 geriliminin harmonik değerleri ……..…….. 193
Şekil 4.43. Fikse (buhar) kısmında I_1, I_2 ve I_3 akımının harmonik değerleri …....…… 194
Şekil 4.44. Kompresör (hava) kısmında yapılan ölçümde gerilimler grafiği ……..…….. 196
Şekil 4.45. Kompresör (hava) kısmında yapılan ölçümde akımlar grafiği ……...…… 196
Şekil 4.46. Kompresör (hava) kısmında U_1, U_2 ve U_3 geriliminin harmonik değerleri …… 197
Şekil 4.47. Kompresör (hava) kısmında I_1, I_2 ve I_3 akımının harmonik değerleri …...……. 198
Şekil 4.48. Kompresör (kurutucu) kısmında yapılan ölçümde gerilimler grafiği ...…….. 200
Şekil 4.49. Kompresör (kurutucu) kısmında yapılan ölçümde akımlar grafiği ……..…… 200
Şekil 4.50. Kompresör (kurutucu) kısmında U_1, U_2 ve U_3 geriliminin harmonik değerleri ..…… 201
Şekil 4.51. Kompresör (kurutucu) kısmında I_1, I_2 ve I_3 akımının harmonik değerleri …...…….. 202
Şekil 4.52. Kompanzasyon off konumunda yapılan ölçümde gerilimler grafiği ...…….. 204
Şekil 4.53. Kompanzasyon off konumunda yapılan ölçümde akımlar grafiği ..…..…… 204
Şekil 4.54. Kompanzasyon off konumunda U_1, U_2 ve U_3 geriliminin harmonik değerleri ..…… 205
Şekil 4.55. Kompanzasyon off konumunda I_1, I_2 ve I_3 akımının harmonik değerleri …...…….. 206
Şekil 4.56. Ölçüm yapılan tesiste Trafo 1 ve Trafo 2 bağlantıları ……...…… 208
Şekil 4.57. Ölçüm yapılan tesiste 1600 kVA ve 1250 kVA bağlantıları ……....……. 208
Şekil 4.58. 152 kW ve 185 kW'lık iplik eğirme makinaları ……..…..…….....…….. 209
Şekil 4.59. 5. Harmonik filtre reaktörlerinin kondansatörlere bağlantısı …..…..…….....…….. 212
Şekil 4.60. 152 kW iplik eğirme makinalarının sürücülerine bağlanan pasif harmonik filtreleri .. 215
Şekil 5.1. Önerilen sistemin blok şeması ……..…… 224
Şekil Ek.1. Tepe (maximum), ortalama (average) ve rms değerinin sinüs dalga üzerinde gösterimi) ……... 241
Şekil Ek.2. Görünür güç (S), aktif güç (P), reaktif güç (Q), hat akımı (I), reaktif akım (Iq) ….. 243
Şekil Ek.3. Kompanzasyon öncesi ve sonrası aktif güçler eşit .....……..…….…… 249

Şekil Ek.4. Kompanzasyon öncesi ve sonrası görünür güçler eşit 251
Şekil Ek.5. Trafoya bağlı yükün tek hat gösterimi 254
Şekil Ek.6. Şekil 8.5'de hesaplanmış olan reaktif gücün tek hat gösterimi 259
Şekil Ek.7. Kurulu gücü P=140 kW olan tesisin hesaplanmış olan reaktif gücün tek hat gösterimi 261
Şekil Ek.8. Yıllara göre reaktif tarife değişimi tg φ 262
Şekil Ek.9. 50 kVA'den küçük olan reaktif tarife değişimi tg φ 262
Şekil Ek.10. 50 kVA'den büyük olan reaktif tarife değişimi tg φ 263
Şekil Ek.11. Bobinde kullanılacak toroid nüve 265
Şekil Ek.12. Bağlanacak olan bobinin sipir sayısına göre değerleri 265
Şekil Ek.13. Oluşan harmoniği bastıracak olan örnek bir filtre 266
Şekil Ek.14. Tesisinin tahmini reaktif güç tek hat şeması 267
Şekil Ek.15. Oluşan harmoniği bastıracak olan pasif filtre bağlantısı 269
Şekil Ek.16. Transformatör devresinin tek hat elektroteknik şeması 277
Şekil Ek.17. Lazer tesisinin tahmini reaktif güç tek hat şeması 282
Şekil Ek.18. Bobinin sipir sayısına göre değerleri 284
Şekil Ek.19. Oluşan harmoniği bastıracak olan filtrenin bağlantısı 284
Şekil Ek.20. Tesisin tahmini reaktif güç tek hat şeması 286
Şekil Ek.21. Kompanzasyon kondansatörlerinin yeni değerleri ve seri endüktans bağlantısı 287
Şekil Ek.22. Antimanyetik toroid ferit nüve 290
Şekil Ek.23. Antimanyetik toroid ferit nüve üzerine 70 mm^2 ve 2 sipir sarılı bobin 291
Şekil Ek.24. 152 kW iplik eğirme makinası harmonik filtresi monofaz bağlantısı 291
Şekil Ek.25. Tasarlanan harmonik filtrenin monofaz 50 Hz ve 150 Hz frekans spektrumu 291
Şekil Ek.26. Tasarlanan harmonik filtrenin monofaz 250 Hz ve 350 Hz frekans spektrumu 292
Şekil Ek.27. Filtre, 4 adet ferit nüve üzerine 2 sipir 70 mm2 kablo ile kondansatör bağlantısı 292
Şekil Ek.28. 152 kW iplik eğirme makinası harmonik filtresi üçfaz bağlantısı 292
Şekil Ek.29. 152 kW iplik eğirme makinası harmonik filtresi 293
Şekil Ek.30. 152 kW iplik eğirme makinasına bağlanan harmonik filtresi 293

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 1.1. Güç sistem bozuklukların tanımı ……..……..... 24
Çizelge 1.2. Güç sistemi üzerindeki bozulmaların nedenleri, sonuçları ve bozulmaları hafifletici çözümler ……..... 25
Çizelge 1.3. UL (Underwriters Laboratories Inc.) standartları, yüklere göre K-faktör trafo dereceleri …..…….……..... 36
Çizelge 1.4. Tristör kontrollü reaktörde harmonikler ve genlikleri …….……..….. 43
Çizelge 1.5. Harmoniklerin ekipmanlar üzerinde etkisi ...……..… 48
Çizelge 1.6. Kompanzasyon tesislerinde yük ve yükün bağlandığı yerdeki kısa devre gücü esas alınarak harmonik etkilerinin belirlenmesi ve alınabilecek pratik tedbirler ... 84
Çizelge 1.7. Harmonikli şebekelerde reaktör bağıl empedans hesabı ……..……... 107
Çizelge 1.8. Çeşitli ülkelerin harmonik standartları …..…...……..…… 121
Çizelge 2.1. Bazı yüklerin toplam harmonik bozulma ve yük akımlarının simülasyon sonuçları. 137
Çizelge 3.1. Amprobe energy test 2020 harmonik analizör ölçüm parametreleri …...……... 147
Çizelge 4.1. Birinci ölçüm noktasındaki tüm fazların değerleri ...…… 154
Çizelge 4.2. Birinci ölçüm noktasındaki harmonik hesapları ...……..……... 156
Çizelge 4.3. İkinci ölçüm noktasındaki tüm fazların değerleri ...…….... 157
Çizelge 4.4. İkinci ölçüm noktasındaki harmonik hesapları …….…….. 160
Çizelge 4.5. Üçüncü ölçüm noktasındaki tüm fazların değerleri ...…….. 161
Çizelge 4.6. Üçüncü ölçüm noktasındaki harmonik hesapları ..……..... 164
Çizelge 4.7. Water şebeke girişinde yapılan ölçüm sonucunda tüm fazların değerleri …… 166
Çizelge 4.8. Water şebeke girişinde yapılan ölçümün harmonik hesapları …… 169
Çizelge 4.9. Water invertör girişi tüm fazların değerleri ……...…….…….. 170
Çizelge 4.10. Water invertör girişi harmonik hesapları ……...…….…….. 173
Çizelge 4.11. 40 W'lık LED armatürde yapılan ölçüm sonucunda faz değerleri ……..… 174
Çizelge 4.12. 40 W'lık LED armatürde yapılan ölçümün harmonik hesapları ……..... 176
Çizelge 4.13. 150 W'lık LED armatürde yapılan ölçüm sonucunda faz değerleri ……... 177
Çizelge 4.14. 150 W'lık LED armatürde yapılan ölçümün harmonik hesapları ...……..…….. 179
Çizelge 4.15. Hazırlama (ısıtıcı) kısmındaki ölçüm sonucunda tüm fazların değerleri ...…… 180
Çizelge 4.16. Hazırlama (ısıtıcı) kısmında yapılan ölçümün harmonik hesapları ……...……... 183
Çizelge 4.17. İplik üretim tesisinde hazırlama (sürücü) kısmında yapılan ölçüm sonucunda tüm fazların değerleri …..…...…...……..…… 184
Çizelge 4.18. Hazırlama (sürücü) kısmında yapılan ölçümün harmonik hesapları …….…….. 187
Çizelge 4.19. Büküm kısmında yapılan ölçüm sonucunda tüm fazların değerleri …….…….. 188
Çizelge 4.20. Büküm kısmında yapılan ölçümün harmonik hesapları ……...…….. 191
Çizelge 4.21. Fikse (buhar) kısmında yapılan ölçüm sonucunda tüm fazların değerleri ...…….... 192
Çizelge 4.22. Fikse (buhar) kısmında yapılan ölçümdeki harmonik hesapları …….…... 195
Çizelge 4.23. Kompresör (hava) kısmında yapılan ölçüm sonucunda tüm fazların değerleri 196
Çizelge 4.24. Kompresör (hava) kısmında yapılan ölçümdeki harmonik hesapları ..……..…….. 199
Çizelge 4.25. Kompresör (kurutucu) kısmında yapılan ölçüm sonucunda tüm fazların değerleri. 200
Çizelge 4.26. Kompresör (kurutucu) kısmında yapılan ölçümdeki harmonik hesapları ……..… 203
Çizelge 4.27. Kompanzasyon off konumunda yapılan ölçüm sonucunda tüm fazların değerleri.. 204
Çizelge 4.28. Kompanzasyon off konumunda yapılan ölçümdeki harmonik hesapları ..……..… 207
Çizelge 4.29. Filtresiz olarak iplik eğirme 1 makinasında yapılan ölçüm değerleri ..……... 210
Çizelge 4.30. Filtresiz olarak iplik eğirme 1 makinasında yapılan ölçümün harmonik hesapları . 211
Çizelge 4.31. Kondansatörlere seri endüktans bağlantıktan sonra yapılan ölçüm değerleri ….... 213
Çizelge 4.32. Kondansatörr seri endüktans bağlanarak yapılan ölçümün harmonik hesapları …. 214
Çizelge 4.33. Filtre takılmış olarak iplik eğirme 1 makinasında yapılan ölçüm değerleri ……... 216
Çizelge 4.34. Filtre takılarak iplik eğirme 1 makinasında yapılan ölçüm harmonik hesapları …. 217

Çizelge 4.35. Çalışmalardan elde edilen sonuçların tamamı ……..……..... 222
Çizelge Ek.1. Tepe (maximum), ortalama (average) ve rms (etkin) dönüşüm değerleri …….... 241
Çizelge Ek.2. Güç faktörünün 0,7'den 1'e çıkarılmasıyla transformatör çıkışında artan kullanılabilir güç ……..…….. 247
Çizelge Ek.3. EPDK tarafından düzenlenen reaktif enerji tarifesi ……..…….. 264
Çizelge Ek.4. 3. harmonikte hesaplanan değerler …….……....……..…….. 268
Çizelge Ek.5. Kompanzasyon sistemi için endüktans seçim tablosu …….…….. 271
Çizelge Ek.6. Gerilim için harmonik distorsiyon sınırları …….…….. 273
Çizelge Ek.7. Gerilim harmonikleri için sınır değerler …….…….…….. 274
Çizelge Ek.8. Harmonikleri için maksimum yük akımına (I_L) göre sınır değerler …….…..….. 274
Çizelge Ek.9. Flicker şiddeti için sınır değerler …….…….. 274
Çizelge Ek.10. Kullanıcı başına yıllık maksimum kesinti süresi hedefleri …..……..…….. 275
Çizelge Ek.11. Kullanıcı başına yıllık maksimum kesinti sayısı hedefleri ……..….. 275
Çizelge Ek.12. Eşik kesinti süresi ve sayıları ……..…….…….…….. 275
Çizelge Ek.13. 400 kVA. ve 400 kVA.'dan büyük transformatörlerde rezonans oranları …..…. 279
Çizelge Ek.14. 3., 5. ve 7. harmonikte hesaplanan değerler ..…….…….. 283
Çizelge Ek.15. 3., 5. ve 7. harmonikte hesaplanan C değerleri ...…….……..…….. 284
Çizelge Ek.16. 1250 kVA trafo ve kondansatör gücü hesabı …….…….. 285
Çizelge Ek.17. 5. harmonikte hesaplanan değerler ……...…….…….. 288
Çizelge Ek.18. Harmoniğe göre trafo seçimi ……...……..…….. 289
Çizelge Ek.19. 1250 kVA trafo ve kondansatör gücü hesabı …….….. 285
Çizelge Ek.20. 5. harmonikte hesaplanan değerler ……...……..…….. 288

SİMGELER DİZİNİ

AC	Alternative Current
ADALINE	Adaptive Linear Neuron/Uygulamalı Doğrusal Eleman
AG	Alçak Gerilim
ANSI	American National Standards Institute
ASD	Motor Hız Kontrol Düzenleri
CAD/CAM	Computer-Aided Design And Computer-Aided Manufacturing
CENELEC	European Committee for Electrotechnical Standardization
CNC	Computer Numerical Control
DC	Direct Current
Dpf	Displacement Power Factor (Harmoniksiz sinüsoidal dalga formuna göre ölçülen güç faktörü)
Dyn	Üçgen, Yıldız, Nötr
EMC	Electromagnetic Compatibility
EN	European Norm
EPDK	Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
FFT	Fast Fourier Transform
HVDC	High Voltage Direct Current
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IGBT	Integrated Gate Bipolar Transistor
KGK	Kesintisiz Güç Kaynağı
LABVIEW	Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench
MATLAB	Matrix Laboratory
MSP	MATLAB Server Pages
NEC	National Electric Code
OG	Orta Gerilim
PAGF	Paralel Aktif Güç Filtresi
PLC	Programmable Logic Controller
PSCAD/EMTDC	Power Systems Computer Aided Design/ Electro-Magnetic Transients For DC
Pf	Power Factor (Harmonikleri ve diğer bozulmaları içeren güç faktörü)
Pfc	Capacitive Power Factor
P_{lt}	Long Term Flicker Effect
P_{st}	Short Term Flicker Effect
PWM	Pulse Width Modulation-Darbe Genişlik Modülasyonlu
RLC	Resistor, Inductor, Capacitor
RMS	Root Mean Square
TEDAŞ	Türkiye Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi
TEF	Telefon Etkileşim Faktörü
TEİAŞ	Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
THD/THB	Total Harmonic Distortion/Toplam Harmonik Bozunumu
THD_I	Total Harmonic Current Distortion-Toplam Harmonik Akım Bozunumu
THD_V	Total Harmonic Voltage Distortion-Toplam Harmonik Gerilim Bozunumu
TSE	Türk Standardları Enstitüsü
TTD/TTB	Toplam Talep Distortion/Toplam Talep Bozunumu
TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
UL	Underwriters Laboratories Inc.
UPS	Uninterruptible Power Supply
VDE	West German Standarts
YSA/ANN	Yapay Sinir Ağı/Artificial Neural Network

1. GİRİŞ

Gelişmiş toplumlarda, diğer enerji kaynaklarına nazaran kullanım kolaylığından dolayı elektrik enerjisi tüketimi sürekli olarak artmaktadır. Teknolojik gelişmelerden dolayı her geçen gün yeni bir elektrik enerjisi tüketen yükler elektrik sistemlerimize dahil olmaktadır. Bu yüklerin özellikleri sebebiyle elektrik enerji sistemimizde ek yüklenmeler oluşmaktadır. Ek yüklenmeler nedeniyle cihazlar zarar görmekte ve hatta kullanım ömürleri kısalmaktadır.

Elektrik şebekesinin belirli bir noktasındaki güç kalitesi, gerilimin frekans ve genliğinin nominal değerlerini koruması ve gerilim dalga şeklinin sinus formunda olmasıdır. Güç kalitesi bozulması, kısa süreli arızalar nedeniyle veya güç sisteminde ani değişiklikler nedeniyle oluşan dalga halinin geçici bir sapmasıdır. Aynı zamanda, dalga biçimi bozulmaları örneğin harmonikler, voltaj dalgalanması ve titreşim gibi durumlar güç kalitesinin bozulmasını açıkça gösterir.

Genel olarak güç kalitesi dış nedenler, doğal nedenler veya yük sebebiyle bozulur. Doğrusal olmayan yükler elektrik şebekesinden sinüs formunda olmayan akımlar çekerler ve bu akımlar şebekede sinüs formunda olmayan gerilim düşümleri meydana getirerek gerilimin dalga şeklinin bozulmasına neden olurlar. Elektrik enerjisi, üretiminden en son kullanıcıya ulaşıncaya kadar geçtiği aşamaların tümünde, gerilim ve akım büyüklüklerinin sinüsoidal formda olması istenmektedir.

Güç kalitesi; şebeke frekansında, sinüsoidal biçimli ve sabit gerilim sunulmasıdır. Diğer bir ifadeyle güç kalitesi; sürekli bir enerjinin olması, gerilim ve frekansın sabitliği, bire yakın güç faktörü, dengeli faz gerilimlerinin olması, akım ve gerilim harmoniklerinin belirli değerlerde kalması gibi durumların göz önünde bulundurulması olarak tanımlanabilir (Dugan ve ark., 2004).

Kaliteli enerjinin güç sistemlerine bağlanan cihazların oluşturduğu problemlerden dolayı her zaman sağlanması mümkün olamamaktadır. Güç kalitesinin bozulmasında, nonlineer yükler ve yarı iletken elemanlar bulunduran cihazlar büyük oranda paya sahiptirler. Bu yükler, hem enerji kalitesini düşürür hemde elektronik cihazları önemli ölçüde etkilerler. Tesislerde nonlineer yükler, harmoniklere sebep olduklarından güç kalitesi bozulmuş enerjiye neden olurlar (Güntürkün, 2003).

Temel frekans haricindeki dalgalara harmonik adı verilir. Bu dalgalar, ek 1'de belirtildiği üzere fourier analizi kullanılarak, temel frekans ve farklı frekanslardaki bileşenler olarak tanımlanabilir. Fourier analizi ile nonsinüsoidal şekle sahip olan dalgalar, farklı frekanslardaki dalgaların toplamı olarak yazılabilir. Böylece harmonikler kolayca analiz edilebilir (Kakilli ve ark., 2008).

Avrupadaki güç kalitesi ile ilgili yapılan araştırmaya göre 25 avrupa birliği ülkesinde güç kalitesinden kaynaklı sorunların maliyeti tahmini olarak yıllık 150 milyar euro'yu bulmaktadır (Targosz ve Manson, 2007). Bahsi geçen değer, güç kalitesi ile ilgili problemlerin meydana getirdiği maliyetin ne kadar fazla olduğunu göstermektedir. 150 milyar euro'luk tutarın yaklaşık olarak %29'luk miktarı gerilim yükselmeleri ve darbe gerilimlerinden, %23.6'sı kadarı gerilim çökmelerinden, %18.8'lik miktarı kısa kesintilerden, %12.5 kadarı uzun kesintilerden, %10.7'lik miktarı diğer nedenlerden ve %5.4'lük miktarının ise harmonikler kaynaklandığı tespit edilmiştir. (Manson ve Targosz, 2008).

Bazı gelişmiş ülkelerde elektrik dağıtım şirketleri akımdaki harmonik bozulma miktarı %6'yı geçtiğinde, tesislerdeki elektrik enerjisini uyarı yapmadan kesebilmektedir. Mesela Almanya'da harmoniğe sebep olan tesis ile aynı trafodan beslenen diğer tesisler şikâyetçi olursa ve elektrik dağıtım şirketi bunu tespit ederse, 1 ay içinde harmonik seviyesini standart düzeye çekmesi için müsaade ediliyor. Aksi takdirde elektrik dağıtım şirketi gerekli cezai müeyyideyi uyguluyor. Yaklaşık 10 yıldır bu sistem Almanya'da uygulanmaktadır (Kürker ve Tasaltin, 2016).

Türkiye'de hem gerilimde hemde akımda 5. harmoniğin yaygın olarak tespit edildiği görülmüştür (Küçük ve ark., 2009).

Ülkemizde Gaziantep, Osmaniye, Kilis, Hatay, Mersin ve Adana gibi illerde belirlenen 142 noktada 15'er saniye aralık periyotlarında bir günde yapılan ölçüm sonuçlarının ortamasına göre akım için toplam harmonik bozulma Gaziantep ilinde I_{THD} %2.66, Osmaniye ilinde I_{THD} %3.21, Kilis ilinde ilinde I_{THD} %1.32, Hatay ilinde I_{THD} %2.23, Mersin ilinde I_{THD} %1.5 ve Adana ilinde I_{THD} %6'dan büyük olarak tespit edilmiştir. Gerilim için toplam harmonik bozulma U_{THD} ise %3'den küçük ölçülmüştür. Harmoniklerden kaynaklanan kayıpların ülkemizde, yukarıdaki ölçümlerden daha fazla olduğu tahmin edilmektedir (Kürker ve Tasaltin, 2016).

Güç kalitesini arttırmak için reaktif güç kompanzasyonu, harmonikler göz önünde bulundurularak yapılmalıdır. Böylece güç kalitesi arttırılmasının yanı sıra gerilim ve akım arasındaki faz farkı azaltılmasıyla, gerilim ve akım dalga şekli sinüsoidal hale yaklaştırılmış olur. Harmonikli kompanzasyon, harmonik filtre reaktörü kullanımı yanı sıra harmonik filtreler ile de yapılmaktadır. Fakat en verimli sonuçlar harmonik filtre kullanılmasıyla elde edilmektedir. Sistem için en uygun çözüm yönteminin uygulanabilmesi ve rezonans frekanslarının belirlenmesi için sistemde detaylı bir harmonik analizinin yapılması gerekir. Analiz yapıldıktan sonra sistemde harmoniklerin etkilerinin azaltılması için en uygun filtre uygulanması gerekir.

Elektrik tesislerinde, harmoniklerin filtrelenmesinde harmonik filtre reaktörü (seri endüktans), pasif, aktif ve hibrid filtre kullanılmaktadır. Tesislerde genellikle pasif filtre kullanılmaktadır. Bunun sebebi aktif filtreye göre maliyetinin daha az ve kullanımının kolay olmasıdır.

Elektrik tesislerinde reaktif güç kompanzasyonunun yanında harmonik kompanzasyonun da yapılması gerektiğinden dolayı, tesislerde ve dağıtım sistemlerindeki

harmoniklerin incelenmesi, harmonik sınırlara uyumluluğu sağlamak üzere atılacak adımlara rehberlik etmesi açısından oldukça önemlidir.

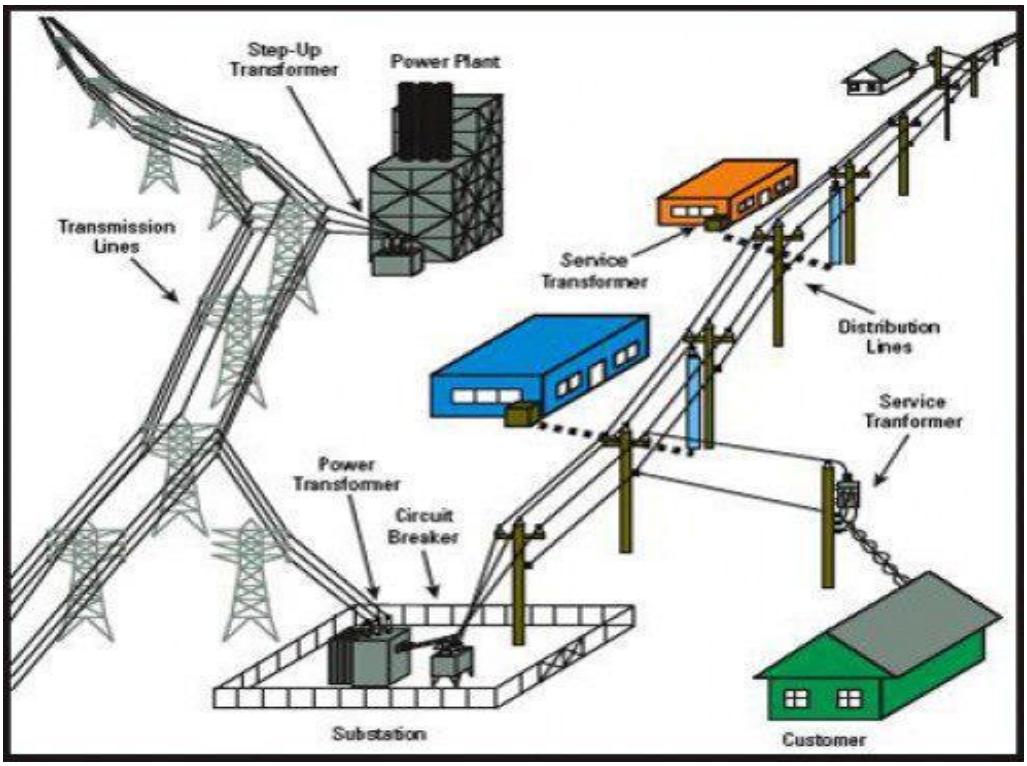
Bu tez çalışmasında birçok tesiste ölçümler yapılmıştır. Ölçüm yapılan tesislerde bulunan kompanzasyon sistemlerine bağlanacak olan harmonik filtre reaktörü, baskın olan harmoniği azaltmak için tasarlanan pasif filtre ve harmonik güç oranı hesapları ayrıntılı olarak yapılmıştır. En son ölçüm yapılan tesiste bulunan trafonun harmoniklerin etkisinden dolayı yüklenme durumu başka bir ifadeyle uygunluğu, kompanzasyon kondansatörlerine harmonik filtre reaktörü bağlama, harmonik kaynağına pasif harmonik filtre bağlama ve hesapları yapılmıştır. Literatürde, pratik uygulama, simülasyon uygulamalarına nazaran oldukça az olduğu için bu çalışmada pratikte meydana gelecek problemleri çözmeye çalışılmıştır. Tezdeki nihai amacımız uygulamasını yapmış olduğumuz harmonik azaltma yönteminin otomatik olarak devreye alınması yani otomatik bir sistem kurmaktır. İleriki hedefimiz aktif filtre uygulaması gerçekleştirmek.

Tezin birinci bölümünde tez çalışmasının amacı, elektrik enerjisinin kalitesi, reaktif güç kompanzasyonu, harmonikler, harmonik azaltma yöntemleri, harmonik filtreler, harmonikli tesislerde kompanzasyon, harmonikli tesislerde trafonun durumu, örnek hesaplamalar ve EPDK tarafından yayınlanan reaktif güç yönetmeliği ile harmoniklerin sınır değerleri hakkında bilgiler verilmiştir. İkinci bölümde elektrik enerji kalitesi ve harmonikleri konu alan daha önce yapılmış olan araştırmalara yer verilmiştir. Üçüncü bölümde, tezde kullanılan materyal ve yöntemden bahsedilmiştir. Materyal kısmında ölçümde kullanılan ekipmanlardan bahsedilmiş ve yöntem kısmında kullanılan yöntemden bahsedilmiştir. Dördüncü bölümde, araştırma bulguları ve tartışma kısmından bahsedilmektedir. Ölçüm yapılan tesislerin elektriksel parametreleri (akım, gerilim ve güç) kaydedilmiştir. Bu parametreler güç analizinin yapılabilmesi için elektronik ortama aktarılmıştır. Analiz sonucuında akım ve gerilim harmonik güç oranları hesabı yapılmıştır. En son ölçüm yapılan tesis 1250 kVA ve 1600 kVA'lik trafolardan beslenmekte olup, bu tesiste filtresiz ve filtreli ölçümler gerçekleştirilmiştir. Beşinci olarak ölçüm yapılan tesiste filtresiz, kompanzasyon kondansatörlerine harmonik filtre reaktörü bağlayarak ve

harmonik kaynağına pasif harmonik filtre bağlandıktan sonra harmonik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Filtresiz ve filtreli ölçümler karşılaştırılmıştır. Beşinci bölümde, sonuçlar ve öneriler kısmından bahsedilmektedir. Sonuçlar kısmında elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve öneriler kısmında ise tesislerde harmoniklerden kaynaklanan kayıpların en aza indirilmesi ile ilgili önerilerden bahsedilmiştir.

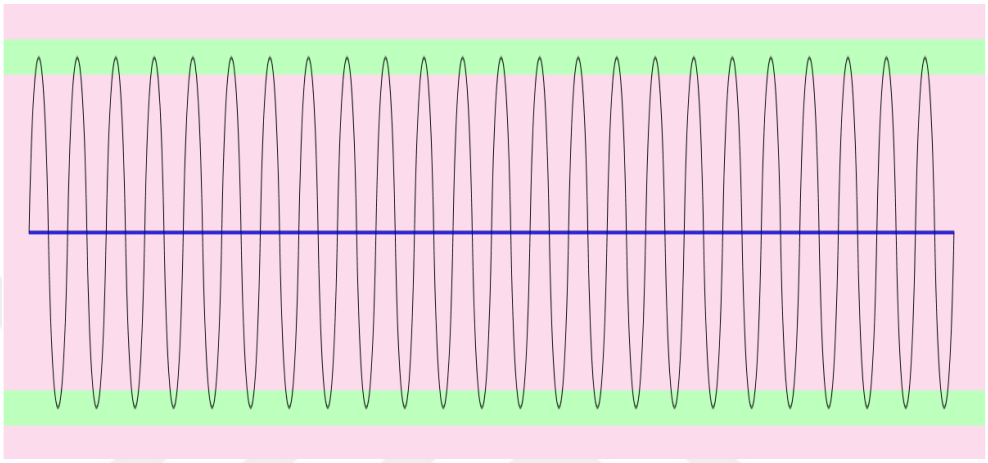
1.1. Elektrik Enerjisi ve Harmonikler

Harmonikler, elektrik dağıtım sistemleri ve beslediği tesisler üzerinde önemli bir etkiye sahiptirler. Şekil 1.1'de görüleceği üzere, elektrik santrelleri tarafından üretilen elektrik enerjisi gerilim düşümlerine ve akım taşıma kapasitesine göre seçilen kesitlerde iletilir ve dağıtılır. Doğrusal olmayan yükler tarafından üretilen harmonikler, son kullanıcıların güç sistemi ısı kayıplarını ve enerji faturalarını artırır. Bu harmonik kayıplar sistem verimliliğini düşürür, cihazın aşırı ısınmasına neden olur ve güç giderlerini arttırır.



Şekil 1.1. Elektrik enerjisinin dağıtımı

Harmoniksiz normal (ideal kalitede) sinüsoidal şebeke eğrisi Şekil 1.2'de görüldüğü gibidir. Sinüsoidal eğride tepe (maximum değer), rms (root mean square), ortalama (mean value) ve ani değer ifadeleri ek 2'de verilmiştir.



Şekil 1.2. Normal (ideal kalitede) sinüsoidal şebeke eğrisi (http://www.datakom.com.tr)

1.2. Elektrik Enerji Kalitesi

Elektrik enerji kalitesizliği, tüketicilerin kullandıkları cihazların sorunlu olmasına veya güç sisteminin çalıştırılmasında hataya neden olan, gerilim, akım ve frekanstaki bozulmalar olarak tanımlanabilir (Dugan ve ark., 2004).

Elektrik enerjisinin kaliteli olması için kalite kriterlerinin belirlenmesi ve sağlanması gerekmektedir. Enerji ve sistem kalitesinin elverişli olarak kullanılmasını sağlamak için, enerji kalitesi problemleri giderilmeli ve kalitenin iyileştirilmesi için problemler kaynağından başlayarak çözülmelidir. Kaliteli bir elektrik enerjisi sağlamak için, enerjinin sürekliliği (kararlı halde olması), gerilim ve frekans sabitliği, güç faktörü (Cosφ) yükseltilmesi yani 1'e yakın olması, faz gerilimlerinin (U_R-U_S-U_T) dengeli olması gerekmektedir. Özellikle akım ve gerilimdeki harmonikleri EPDK'nın belirlediği sınırlar içinde kalması gibi birtakım kriterlerin göz önüne alınması gerekir.

Elektrik kalitesinin ekonomik etkileri göz ardı edilmeyecek seviyededir. Avrupa Birliği ülkelerinin, araştırmalara göre kalite problemlerinin endüstri ve ticaretteki zararının yılda 10 milyar euro olduğu tahmin edilmektedir. Belirtilen kalite probleminin giderilmesi için yapılan harcamalar ise tahminen %5 civarındadır (Yüksel, 2011).

Elektrik enerji kalitesi, tüketici odaklı bir konudur ve bakış açısı olarak son kullanıcı temel alınmalıdır. Enerji sağlanmasında yukarıda saydığımız maddeler tüketici tesisat ve enerji dağıtımında işletme esnasında problemler meydana getireceğinden elektrik enerji kalitesinin iyileşmesine yardımcı olacak önlemler alınmasına azami önemin gösterilmesinin önemle ele alınması ve çözümler üretilmesi kaçınılmazdır. Elektrik enerji kalitesi hem elektrik şirketleri hem de onların müşterileri açısından büyük bir ilgi odağı haline gelmiştir. Çünkü elektrik enerji kalitesindeki düşüş hem enerji ağımızı hem de kullanıcılarımızı olumsuz etkilemekte ve ekonomik kayıplara sebep olmaktadır. Eğer elektrik kullanan tesisler elektrik enerji kalitesini arttırma girişimlerinde bulunmazlar ise kendi kurumlarındaki elektrik sistemlerinde güç kalitesinin bozulmasına yol açabilir hatta bu bozulmalar şebekeyi de etkileyerek diğer tesislere de zarar verebilir. Uzun vadede, tesislerde kullanılan aletlerin zarar görmeleri, artan enerji kayıpları, iş kayıpları, kalite bozulmaları sebebiyle işletme istenilen performansı vermeyeceğinden büyük zararlarla karşılaşılabilir.

1.3. Elektrik Enerji Kalitesinin Sınıflandırılması

Kaliteli elektrik enerjisi, voltaj yükselmeleri ve düşmeleri olmayan elektrik enerjisidir. Gerilim dalgalanması veya ideal sinüs dalgası dışında olan gürültüye elektrik kirliliği denir. Kirli elektrik, elektroniklerin, özellikle mikroelektriğin, kötü performans göstermesine neden olabilir. Elektriğin kalitesi, elektrik sağlayıcısı ile elektronik ekipman arasındaki ve onun arasındaki her şeyden etkilenir. Elektrik enerji kalitesi genellikle yük tarafından, doğal etkenlerden veya dış etkenlerden dolayı bozulur. Elektrik enerji kalitesi, tüketici odaklı bir sorun olmasına rağmen çözümü üretici, iletici, dağıtıcı ve tüketici firmalarının yapacağı çalışmalar ve uluslararası standartları destekleyen yönetmelikler ile

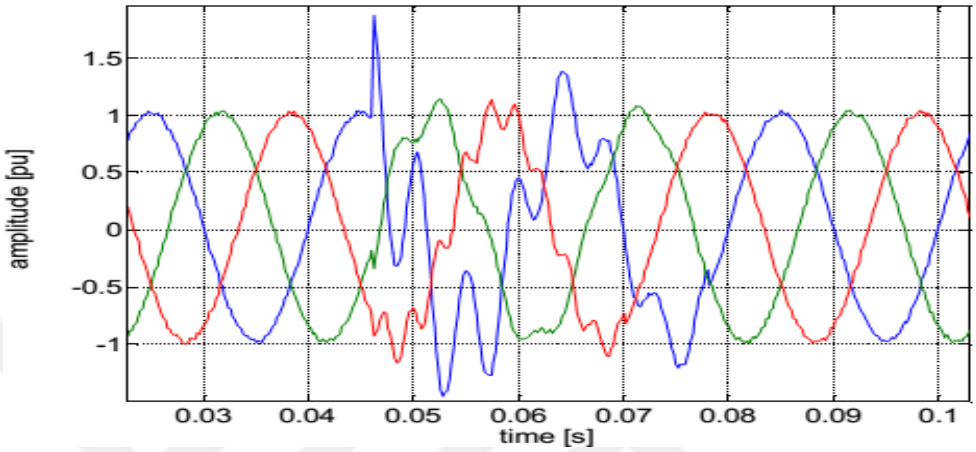
çözüleceğinden dolayı, ülkemizde TEDAŞ, TEİAŞ ve EPDK tarafından çeşitli yönetmelikler yayınlanmıştır. Gücün kalitesi son kullanıcılar tarafından kararlaştırılır. Güç teçhizatı, verilen arz için tatminkâr çalışıyorsa, güç iyi kalitede demektir. Eğer iyi çalışmazsa elektrik kalitesi kötü olur. Kötü güç kalitesi veya güç kalitesi sorunları için nedenler aşağıda verilmiştir.

a) Geçici olaylar (transients),
b) Gerilim yükselmesi (swell)
c) Gerilim düşmesi (voltage sag),
d) Kesinti (interruption),
e) Gerilim dengesizliği (voltage imbalance),
f) Dalga biçimi bozulması (waveform distortion)
   DC offset
   Harmonikler (harmonics)
   Ara harmonikler (interharmonics)
   Çentik (notch),
   Gürültü (noise)
g) Gerilim dalgalanması (voltage fluctuation, flicker),
h) Güç frekans değişimleri (power frequency variation).

1.3.1. Geçici olaylar (transients)

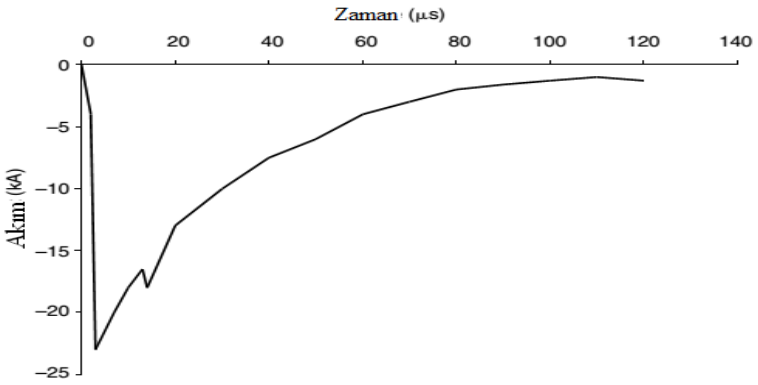
Gerilim düşmeleri ve gerilim yükselmelerinden daha kısa olan gerilim bozuklukları transient olarak sınıflandırılır ve güç sistemindeki ani değişikliklerden kaynaklanır. Dalgalanmalar, direkt olarak veya anahtarlama cihazlarıyla ilişkili rezonant devrelerin bir sonucu olarak güç sistemi anahtarlama bozukluklarından kaynaklanan yüksek enerji darbeleridir. Kapasitör anahtarı, rezonans salınımlarına neden olabilir ve nominal değerin üç ila dört katı kadar bir aşırı voltaja neden olabilir, bu da açma ve hatta zararlı koruyucu cihaz ve ekipmanlara neden olur. Bu geçici olaylara karşı koruma, normalde dalgalanmalarla ve yüksek voltajlarda ark boşlukları ve düşük voltajlarda çığ diodları ile

sağlanır. Üç fazlı bir sistemde geçici salınım örneği, Şekil 1.3'de gösterilmiştir. Geçici olaylara darbesel ve salınımsal olarak rastlamak mümkündür.



Şekil 1.3. Üç fazlı bir sistemde geçici salınım (Janik and Sikorski, 2011)

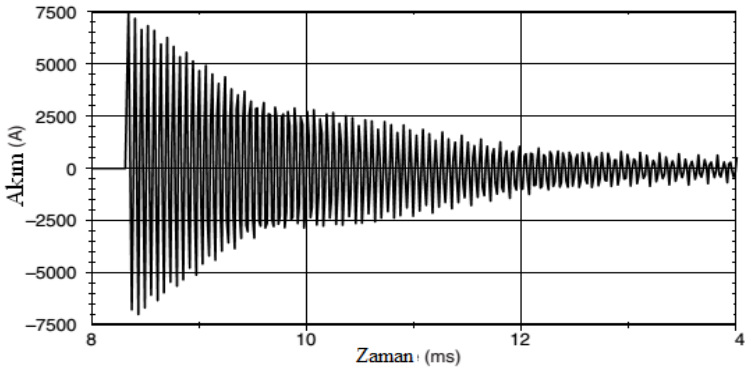
Darbesel geçici olay, frekansın ve gerilimin veya her ikisinin kutuplarının ayrı olması durumunda ani bir frekans değişimidir. Şekil 1.4'de yıldırım darbe akımı kaynaklı oluşan geçici olay görülmektedir.



Şekil 1.4. Yıldırım darbe akımı kaynaklı oluşan geçici olay (Dugan ve ark., 2004)

Salınımsal geçici olay, akımın ve gerilimin yada her ikisinin negatif ve pozitif değerler aldığı durumda ani bir frekans değişimidir. Salınımsal geçici olaylar güç sistemlerinde uygulama anahtarları, kapasitör gruplarının anahtarlamaları, hızlı aşırı

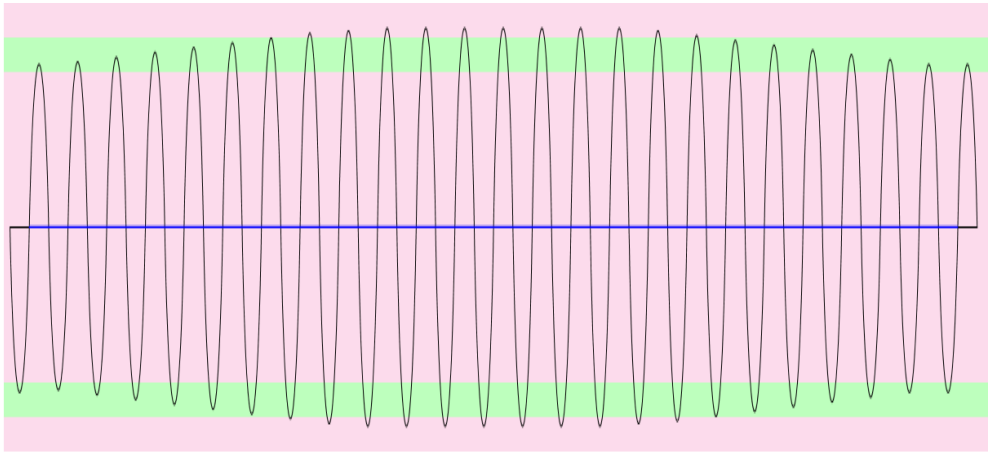
akım koruma cihazları ve ferrorezonans gibi değişik nedenlerle oluşur. Şekil 1.5'de arka arkaya kondansatör anahtarlanmasıyla oluşan geçici olay görülmektedir.



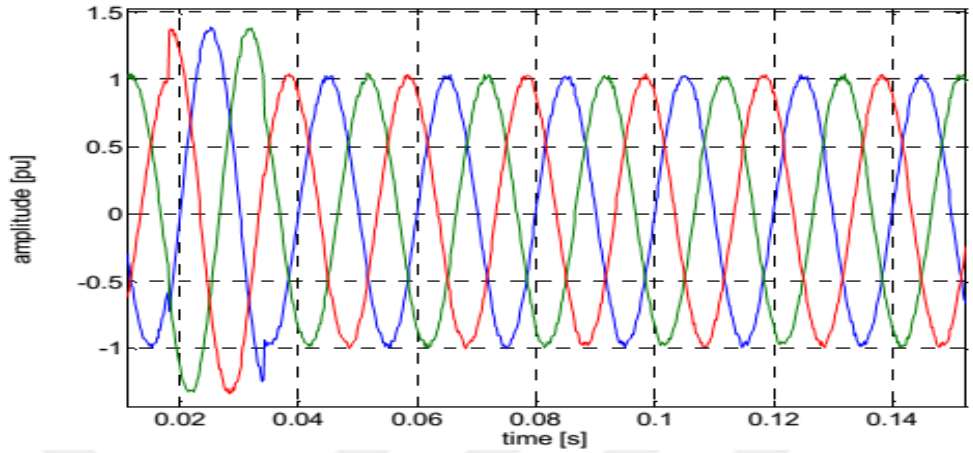
Şekil 1.5. Arka arkaya kondansatör anahtarlanması nedeniyle oluşan salınım biçimindeki geçici olay (Dugan ve ark., 2004)

1.3.2. Gerilim yükselmesi (swell)

Voltaj yükselmesi gerilim düşmesinin tam tersidir. Gerilim yükselmesi, 0.5 çevrimden birkaç saniyeye kadar sürelerde pu cinsinden 1.1 ila 1.8 arasında bir artış olarak tanımlanır. Voltaj yükselmesi de büyüklüğü ve süresi ile karakterizedir. Tek fazlı bir arıza meydana geldiğinde arızasız fazlarda simetrik olmayan voltaj yükselmesi sıklıkla görülür. Şekil 1.6'da monofaz ve Şekil 1.7'de trifaz sistemde gerilim yükselmesi örneği verilmiştir.



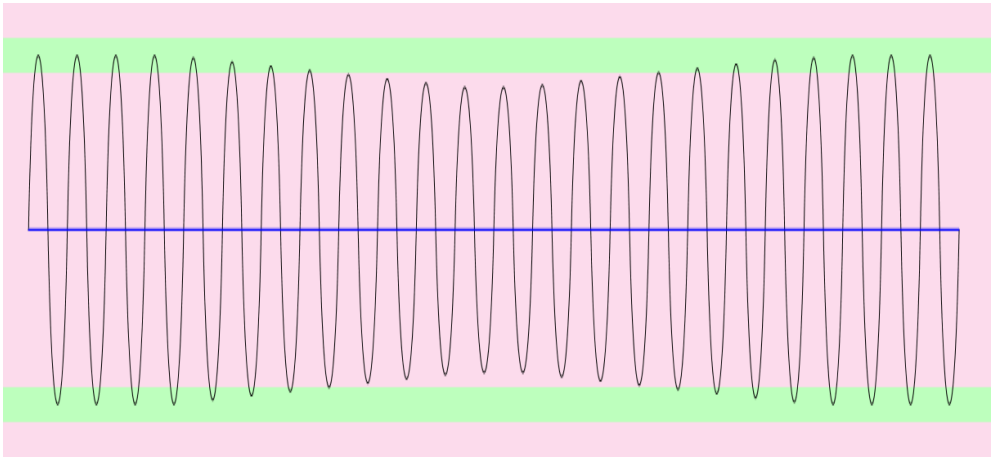
Şekil 1.6. Gerilimin yükselmesi (swell) (http://www.datakom.com.tr)



Şekil 1.7. Üç fazlı bir sistemde simetrik gerilim yükselmesi (Janik and Sikorski, 2011)

1.3.3. Gerilim düşmesi (voltage sag)

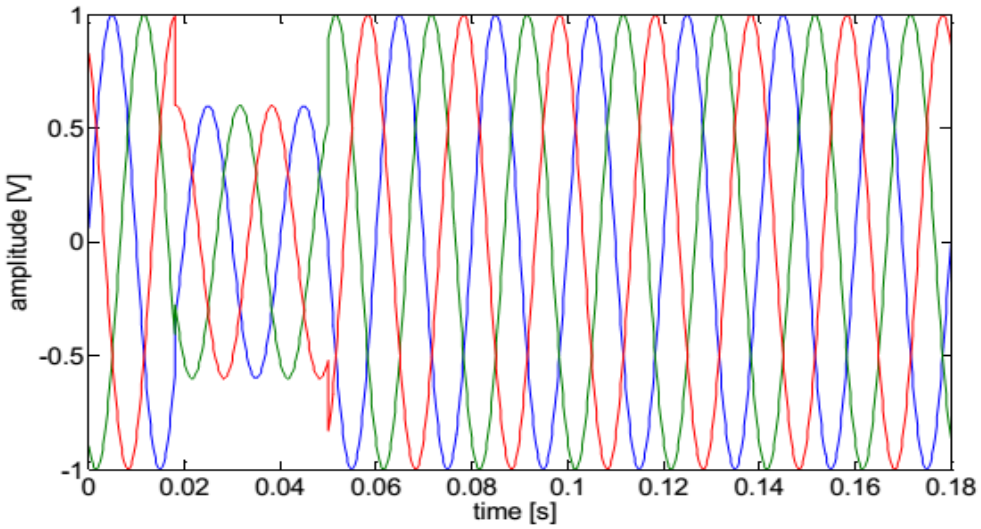
Gerilim düşmesi (bazen daldırma olarak adlandırılır) nominal voltajın % 10 ila % 90'ı arasında değişen voltajın ani bir azalması olarak tanımlanır. Bir sarkmanın süresi 0.5 devirden birkaç saniyeye kadardır. Voltaj düşüşlerinin ekipman üzerindeki olası etkisi, boşaltma lambalarının, kontrol cihazlarının yanlış çalışması, motorların hız değişimi ve durdurulması, kontaktörlerin açılması, bilgisayarların arızalanmasına ve veri kayıplarına neden olur. Gerilim düşüşüne karşı sistemi korumak için küçük yüklerde kesintisiz güç kaynakları UPS oldukça etkilidir.



Şekil 1.8. Gerilim düşmesi (dip sag) (http://www.datakom.com.tr)

Daha büyük yükler için, empedans üzerindeki voltaj kayıplarını azaltmak için elektrik şebekesinin yeniden yapılandırılması önerilir.

Şekil 1.8'de gerilim düşmesi (dip sag) ve Şekil 1.9'da üç fazlı bir sistemde simetrik bir voltaj çökmesinin örneği görülmektedir.



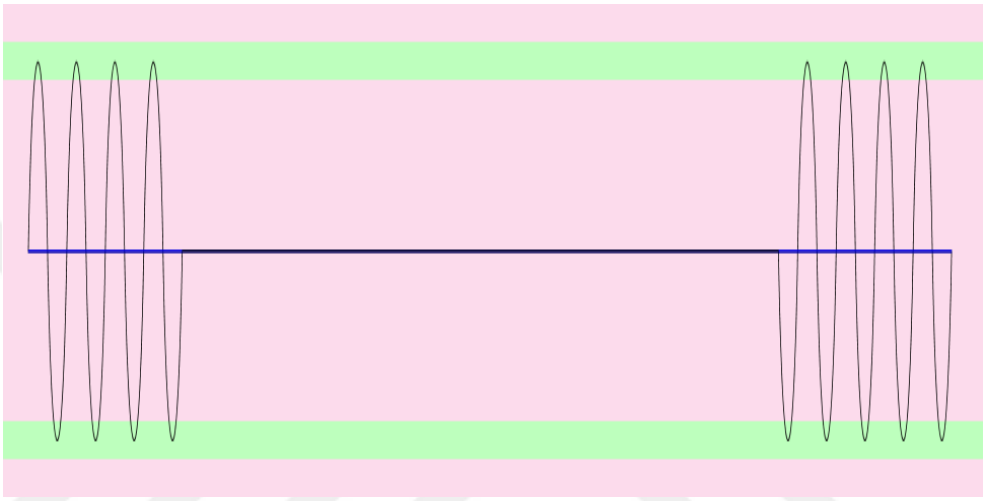
Şekil 1.9. Üç fazlı gerilim çökmesi, simetrik durumda (Janik and Sikorski, 2011)

1.3.4. Kesinti (interruption)

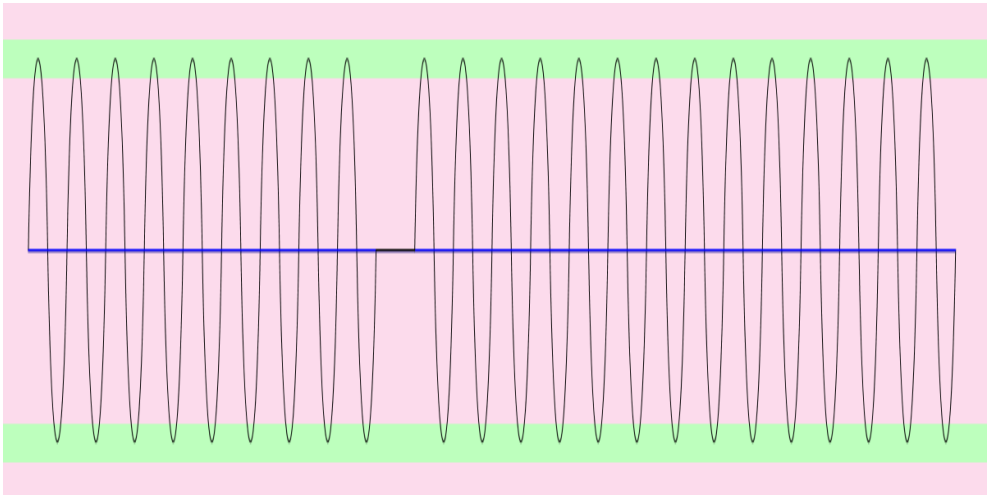
En az 1/2 dalga boyu süresince gerilimin sıfır değeri almasıdır. Sebesi ise güç sistemindeki hatalar, donanımdaki arızalar ve kontrol sistemlerindeki bozulmalar yani kısaca şebeke arızalarıdır. Bu kesintiler Şekil 1.10'da görüldüğü gibi uzun süreli de olabilir, Şekil 1.11'deki gibi kısa sürelide olabilir.

Elektrik kesintileri kullanıcıların tamamını etkilemektedir. Yerleşim bölgesindeki tüketicilerin, ev alet ve onarımları veya yenilenme maliyeti olan birkaç yüz dolar maliyetinde olabileceği gibi endüstriyel üretici firmalar açısından ürün ve üretim kaybı, kalite kayıpları milyonlarca dolar seviyesine kadar çıkabilir.

Çeşitli özeliklere sahip işletmelerde bu kayıplar daha da büyürler. Bilgi işlem merkezlerinde bu tür gerilim çöküntüleri çok yüksek kayıplara yol açabilir. Bir kaç saniyeden birkaç saate kadar devam edebilen elektrik kesintileri, gerilim çok düşük veya çok yüksek değerlere çıktığında oluşur.

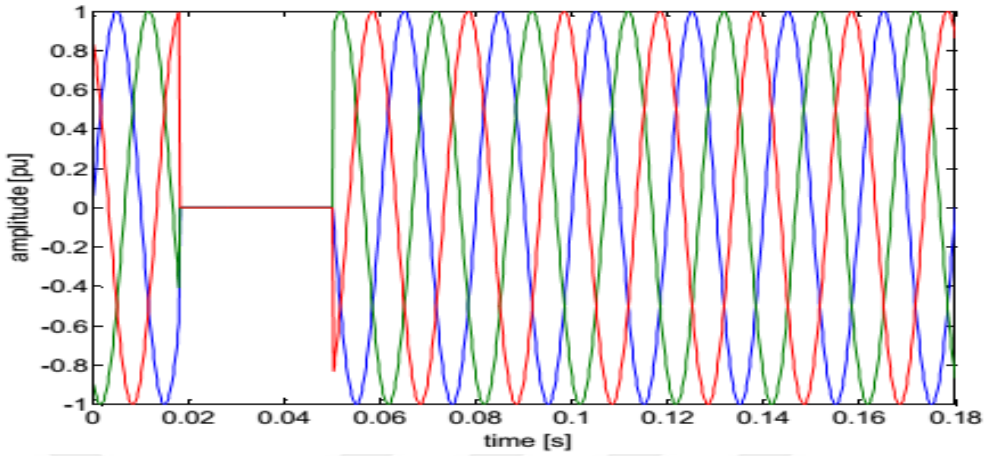


Şekil 1.10. Uzun süreli enerjinin kesintisi (http://www.datakom.com.tr)



Şekil 1.11. Kısa süreli enerjinin kesilmesi (http://www.datakom.com.tr)

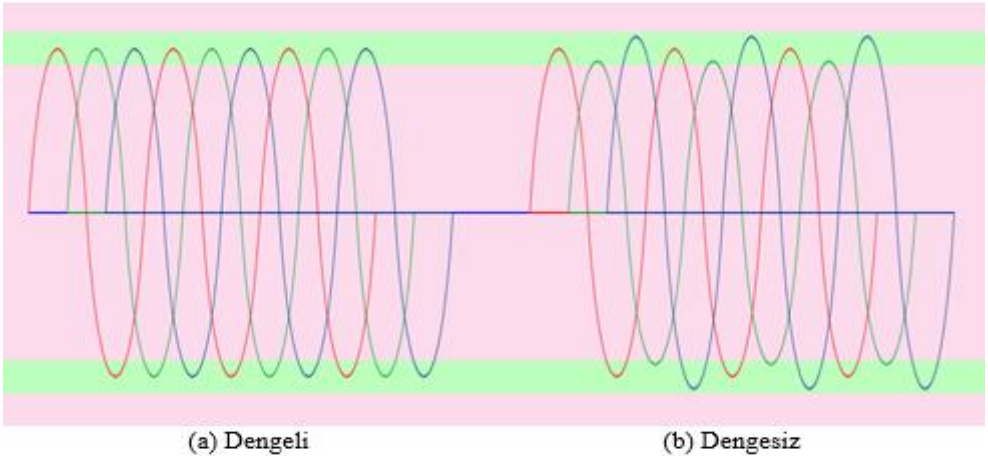
Şekil 1.12'de üç fazlı sistemde voltaj kesintisi görülmektedir. Birkaç saniyelik gerilim kesintisi neticesinde ise cihazlar resetlenebilir, cihazların çalışmasında aksamalar olabilir, ses ve görüntü sistemleri hatalı çalışabilir.



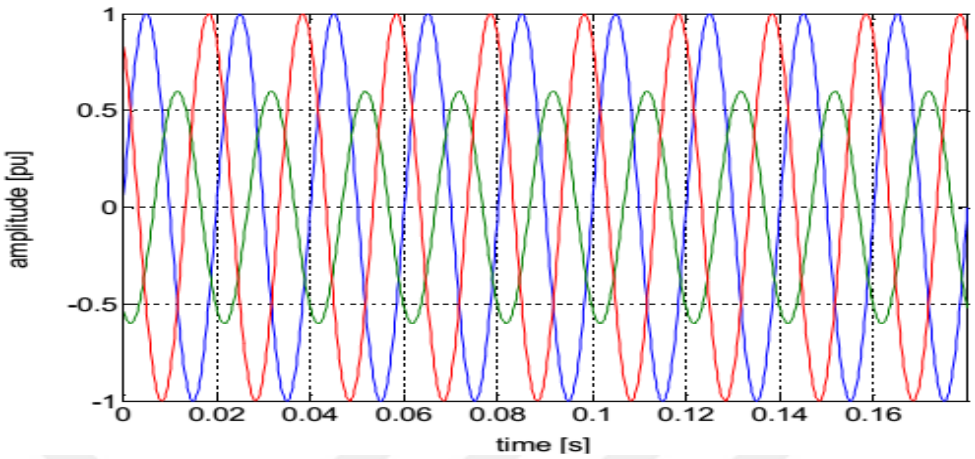
Şekil 1.12. Üç fazlı sistemde voltaj kesintisi (Janik and Sikorski, 2011)

1.3.5. Gerilim dengesizliği (voltage imbalance)

Dengesizlik, üç fazlı gerilim kaynağının gerilimlerinin büyüklüğü aynı olmadığı veya aralarındaki faz farklarının aralarında 120 derece elektriksel derece olmadığı bir durumu açıklamaktadır. Dengesizliğin başlıca sebepleri, tek fazlı yükler ve nakledilmemiş havai nakil hatlarıdır. Faz dengesizliği sonucunda motorlarda sirkülâsyon akımları dolaşır, zorlama ve aşırı ısınmalar meydana gelebilir, güç ve verimlilik kaybı olabilir. Üç fazlı şebekelerdeki faz dengesizliği Şekil 1.13 ve Şekil 1.14'de verilmiştir.



Şekil 1.13. Şebekelerde faz dengesizliği (http://www.datakom.com.tr)



Şekil 1.14 Gerilim dengesizliği (Janik and Sikorski, 2011)

Müsaade edilen dengesizlik oranı EPDK yönetmeliği'ne göre;

"Dağıtım sisteminin işletilmesinde, AG seviyesi için kararlı durumlarda gerilim dengesizlikleri TS EN 50160:2011 standardında tanımlanan aşağıdaki değerlere uygun olmalıdır:

1) Ölçüm periyodu boyunca ölçülen gerilim negatif bileşeni etkin değerlerinin 10'ar dakikalık ortalamalarının en az %95'inin pozitif bileşenlere oranı en fazla %2 olmalıdır.

2) Tek fazlı veya iki fazlı yüklerin beslendiği noktalarda bu oran %3'e kadar çıkabilir.

Dağıtım şirketinin gerilim dengesizliğine ilişkin performansı esas olarak bağlantı noktasından veya dağıtım şirketinin uygun görmesi durumunda tüketici tesisi tarafındaki herhangi bir noktadan ölçülür. Gerilim dengesizliği ile ilgili bu şartın ihlal edilmesi durumunda, dağıtım şirketi hakkında Kanunun 16. maddesi hükümleri çerçevesinde işlem yapılır." şeklinde ifade edilmektedir. (http://www.epdk.org.tr/TR/DokumanDetay /Elektrik/Mevzuat/Yonetmelikler/Elektrik DagitimiPerakendeSatisinaHizmetKalitesi).

1.3.6. Dalga biçimi bozulması (waveform distortion)

Dalga şeklindeki bozulmalar, güç sistemindeki sinüsoidal dalga şeklinde oluşan bozulmalardır. Dalga biçimi bozulmasının beş ana türü vardır. Bunlar DC offset,

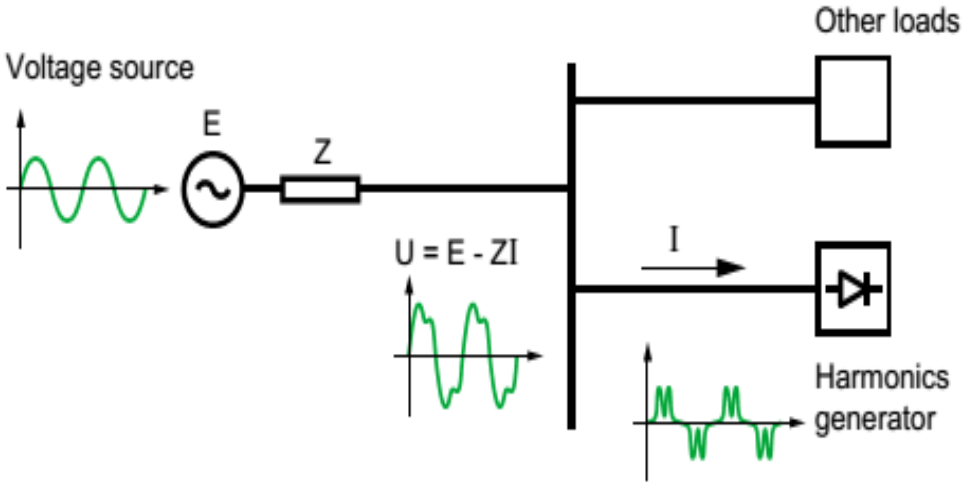
harmonikler (harmonics), ara harmonikler (interharmonics), çentik (notch), gürültü (noise)'dür.

1.3.6.1. DC offset

DC offset, bir AC sistemde bir DC akımının veya voltaj bileşeninin varlığıdır. DC offsetinin analizi için AC dalgasının Fourier serisi ile genişletilmesi kullanılmaktadır. Güç sistemlerinde DC ofsetinin başlıca nedeni, doğrultucuların ve diğer elektronik anahtarlama cihazlarının çalıştırılmasıdır. Alternatif şebekelerde DC offseti'nin başlıca zararlı, trafo çekirdeğinin yarım döngü doygunluğu, trafoların, dönen makinelerin ve elektromanyetik cihazların kullanım ömrünü azaltabilecek cihazlarda ilave ısınmalara neden olabilir. Topraklama elektrotlarının ve diğer konnektörlerin elektrolitik erozyonuna sebep olabilir.

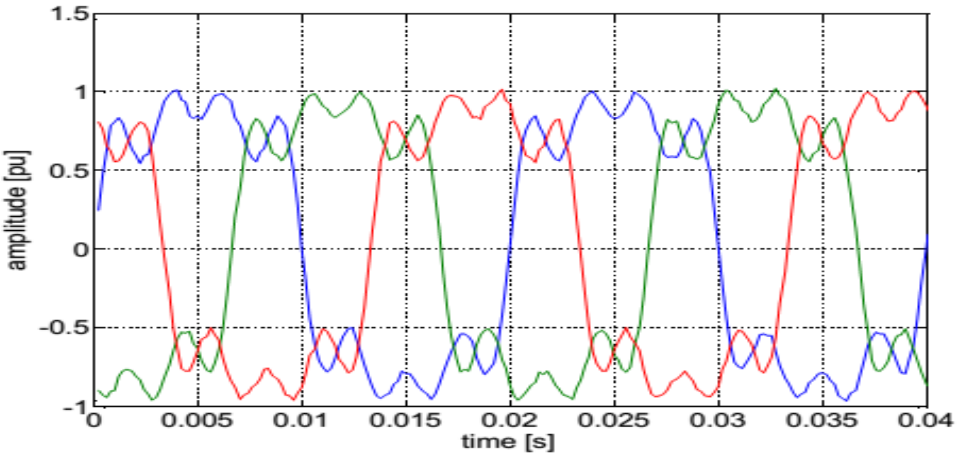
1.3.6.2. Harmonikler (harmonics)

Dalga formu bozulması genellikle harmonikler bakımından incelenir. Genellikle, doğrusal olmayan herhangi bir yük, elektrik sisteminde bir akım harmonik kaynağıdır. Harmonik kaynakları, ev ve konut aletleri, ark fırınları, kaynakçılar, statik konvertörler, HVDC iletimi şeklinde sayılabilir. Harmoniklerin başlıca zararlı etkileri: kontrol cihazlarının, sinyalizasyon sistemlerinin, koruyucu rölelerin arızalı çalışması, kondansatörler, transformatörler ve dönen makinelerde ekstra kayıplar, motorlardan ve diğer cihazlardan gelen ek gürültü, telefon paraziti, güç faktörü düzeltme kondansatörlerinin ve kablo kapasitansının varlığı, şönt ve seri rezonansların potansiyel bir nedeni olup gerilim yükselmesi ile sonuçlanır. Harmonik gerilim içeriğini önerilen seviyelerde tutmak için, yüksek darbeli doğrultmanın kullanılması (örneğin HVDC iletim sistemlerinde), harmonik filtre reaktörleri, bireysel frekanslara veya bant geçirme türüne göre ayarlanmış pasif filtreler, aktif ve hibrid filtreler. Şekil 1.15'de nonlineer bir yükün sebep olduğu harmonik bozulma görülmektedir.



Şekil 1.15. Nonlineer bir yükün sebep olduğu harmonik bozulma devresi (Schneider Electric-Cahier Technique Power Quality)

Harmonik distorsiyon değeri, her bir harmonik bileşeni kullanılarak elde edilir. Fourier serisi yardımıyla bileşenlerine ayrılarak temel frekans bileşenin toplamı olarak ifade edilebilir. Şekil 1.16'da harmonikler tarafından bozulmuş üç fazlı sinyal örnek olarak verilmiştir.

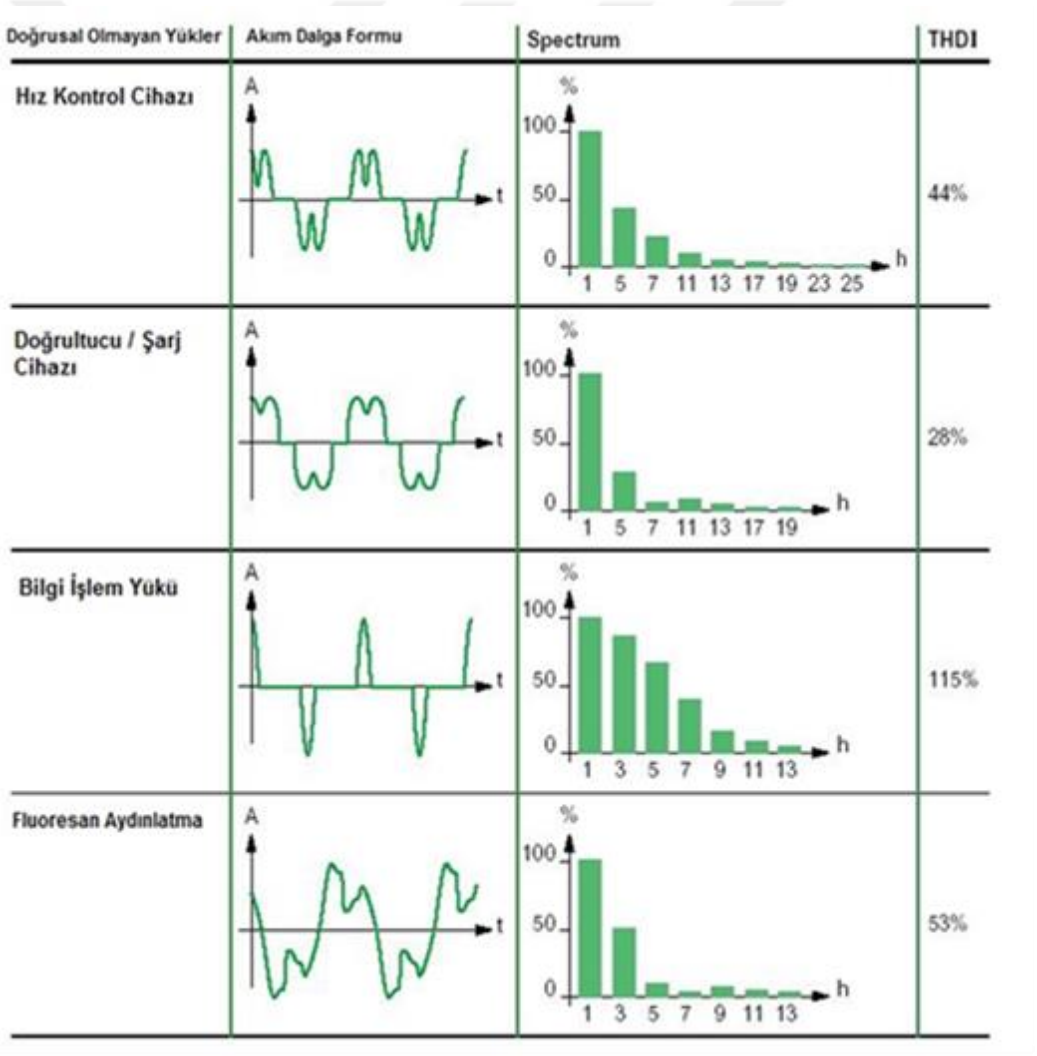


Şekil 1.16. Harmonikler tarafından bozulmuş üç fazlı sinyal (Janik ve Sikorski, 2011)

Harmoniklerin seviyeleri, harmonik kaynağı olarak kullanılan cihazın kullanım moduna, gece, gündüz ya da mevsimlerin durumuna (ısınma ve soğumaya) göre farklılık gösterir. Harmonik kaynakları doğrusal olmayan yüklere göre çok farklı harmonik

bileşenler üretirler. Çeşitli cihazların akım formları ve spektrumlarının şematik diyagramı Şekil 1.17'de görülmektedir.

Yarı iletken teknolojisinin her alanda yaygınlaşması ve güç katsayısı Cos faktörünün en az endüktif Cosφ=0.980 **(**tgφ=0.20**),** kapasitif Cosφ=0.988 **(**tgφ=0.15) istenmesi ile daha da belirginleşen harmonik bileşenlerin, şebekelerde reaktif bileşenlerle hesaplanmasını mecbur kılmaktadır.



Şekil 1.17. Çeşitli cihazların akım formları ve spektrumları şematik diyagramı (Schneider Electric-Cahier Technique Power Quality)

1.3.6.3. Ara harmonikler (interharmonics)

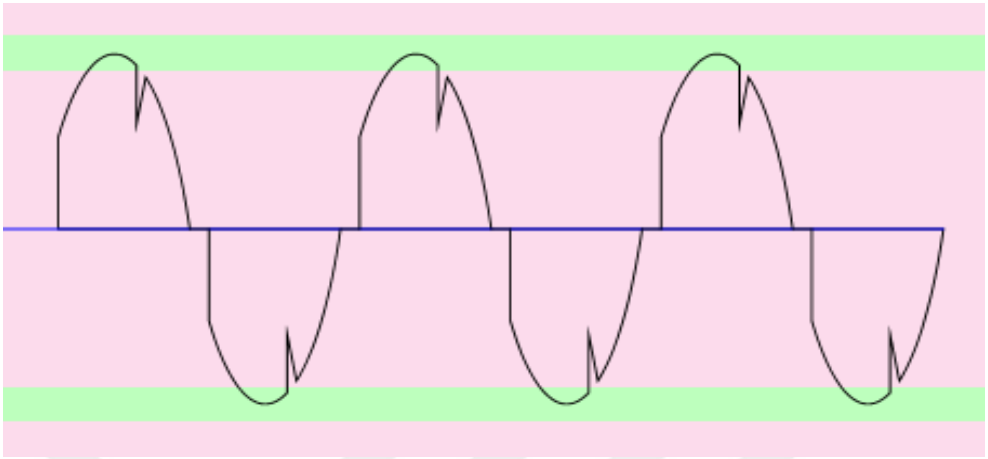
Güç frekans gerilimi ve akımının harmonikleri, bir tamsayı olmayan başka frekanslar da gözlemlenebilir. Ayrık frekanslar veya geniş bant spektrumu olarak görülebilirler. Bir dalga formunun harmonikleri ve ara harmonikleri, bir dizi frekans üzerinde yarı kararlı durumda spektral bileşenleri ile tanımlanabilir. Ara harmonik spektrumunu, genel olarak frekans değişiminin sonucu olarak ortaya çıkar ve çoğunlukla sabit değildir. Yük değişimi ile birlikte değişim göstermektedir.

Ark fırınları, endüksiyon ocakları, kaynak makinaları ve statik frekans çeviriciler (kesintisiz güç kaynakları KGK veya UPS gibi) temel frekans ile eşzamanlı olmayan donanımlar ara harmonik oluşumuna sebep olmaktadır. Güç sistemlerinde iletim hattı ile frekans bindirmesi tekniği ile taşınan sinyallerde ara harmonikler olarak ele alınabilir. Sonucunda ise kondansatörler aşırı ısınır, motorlarda zorlama ve aşırı ısınmalar meydana gelir, cihazlar hatalı çalışır.

1.3.6.4. Çentik (notche)

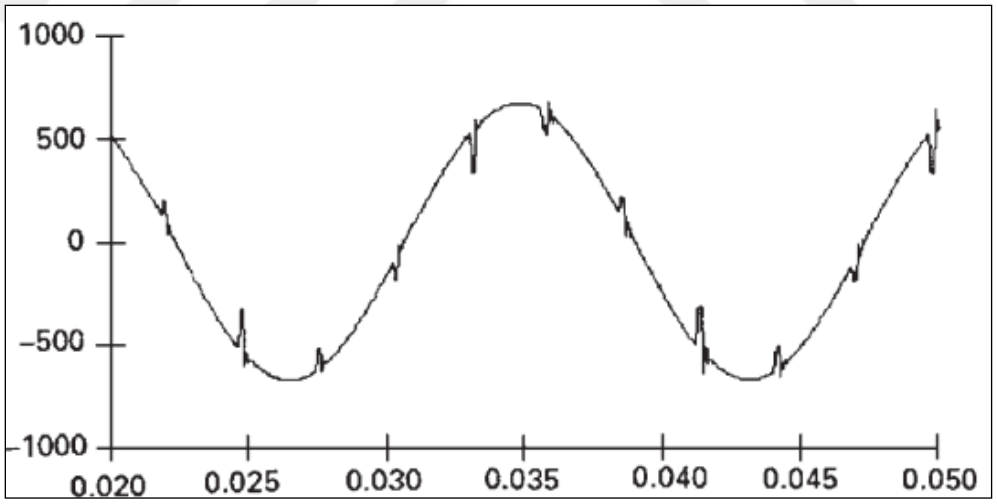
Akım bir fazdan diğerine doğru akıtıldığında güç elektroği cihazlarının normal çalışması nedeniyle tekrar eden bir güç kalitesi bozukluğu olarak tanımlanmaktadır. Geleneksel olarak, akım dalga formu harmonik analiz için başlangıç noktası olarak kullanılır.

Gerilim çentiklemesi, harmonikler ve geçici maddeler arasında kalan olağandışı bir durumu karakterize eder. Bunun nedeni, çentik, kararlı durumda gerçekleştiğinden etkilenen voltajın harmonik spektrumu ile ayırt edilebilir. Öte yandan, gerilim çentiklenmesiyle ilgili frekans bileşenleri biraz yüksektir ve harmonik analiz için yaygın olarak kullanılan bir ölçüm cihazı ile derhal sınıflandırılamaz. Şekil 1.18’de çentik için bir örnek görülmektedir.



Şekil 1.18. Çentik (notch) (http://www.datakom.com.tr)

Çentik nedeniyle çalışmakta olan cihazlar resetlenebilir, ses ve görüntü sistemleri hatalı çalışabilir. Şekil 1.19'da üç faz konverter nedeniyle gerilim çentiğine örnek görülmektedir.



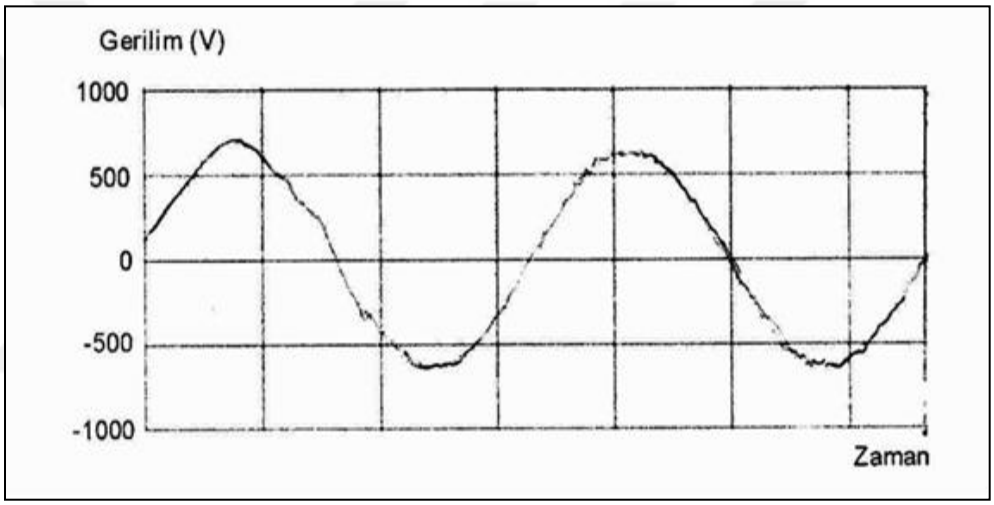
Şekil 1.19. Üç faz konverter nedeniyle gerilim çentiğine örnek (Dugan ve ark., 2004)

1.3.6.5. Gürültü (noise)

Gürültü veya parazit, orijinal (veya istenen) bir sinyali bozan veya müdahale eden istenmeyen elektrik sinyalleri olarak tanımlanabilir. Elektriksel gürültü, normal sinüs

dalgalarının gücünün bozulmasıdır. Elektriksel parazit, anahtarlama, radyo vericileri ve endüstriyel cihazlardan kaynaklanabilir.

Bir güç hattı ve ona eşlik eden nötr tel arasında görülen gerilim farkından kaynaklandığı gibi toprak ile nötr tel arasında görülen gerilim farkından da kaynaklanabilmektedir. Şekil 1.20'de anahtarlamalı rezonansdan dolayı 480 V'daki oluşan gürültü görülmektedir.



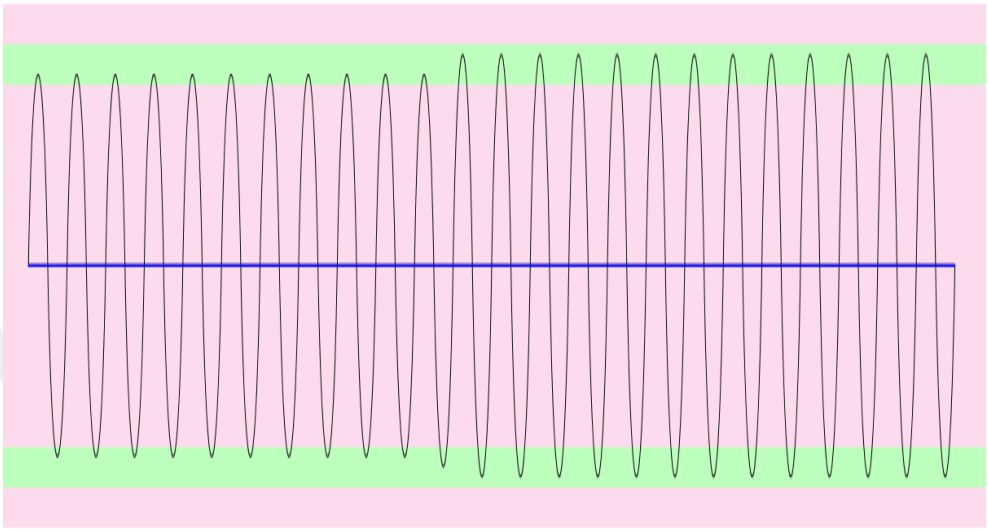
Şekil 1.20. Anahtarlamalı rezonansdan dolayı 480 v.'daki gürültü

1.3.7. Gerilim dalgalanması (voltage fluctuation, flicker)

Sistem voltajının dalgalanması varyasyonun büyüklüğüne ve frekansına bağlı olarak algılanabilir ve (düşük frekanslı) ışık titremesine neden olabilir. Titreşimin ana nedenleri, büyük ve oldukça değişken akımlar çeken yüklerdir. Titreşim kaynağı, güç sisteminin empedansı (jeneratörler, transformatörler ve iletim hatları) ve elektrikli motorların çalıştırılmasıdır.

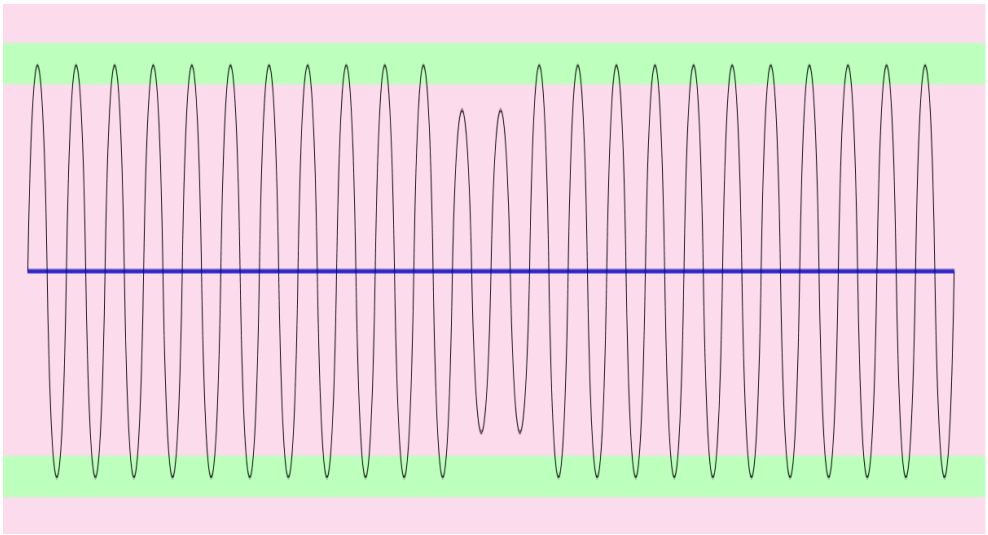
Başka bir ifadeyle gerilim dalgalanmasının ana nedeni darbesel güç çıkışları, direnç kaynakçıları, sürücülerin açma kapama yapması, ark fırınları, hızlı değişen yüklü

sürücüler ve dönen millerdir. Bu titreşim kaynakları, amplitüd ile elektrik lambası parlaklık dalgalanmalarına yol açar.

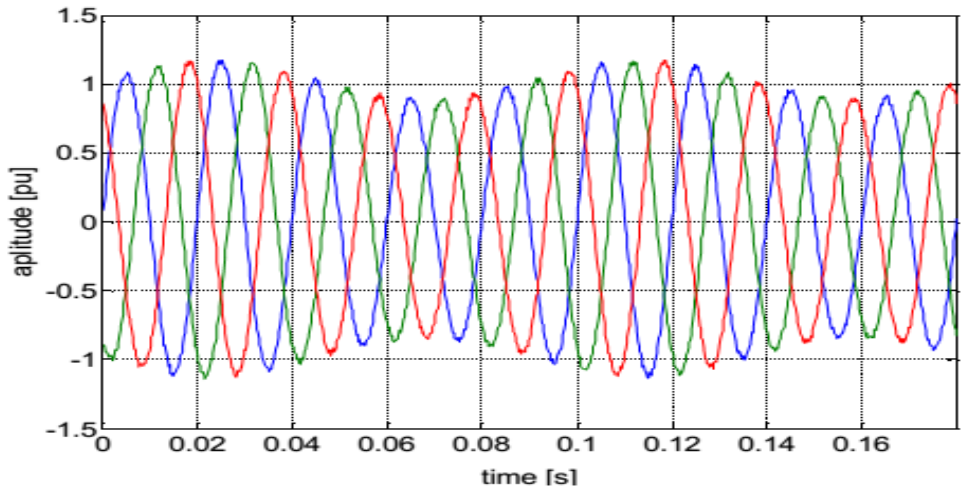


Şekil 1.21. Uzun süreli gerilim dalgalanması (http://www.datakom.com.tr)

Şekil 1.21'de ve Şekil 1.22'de uzun süreli ve kısa süreli, Şekil 1.23'de üç fazlı gerilim dalgalanmaları görülmektedir.



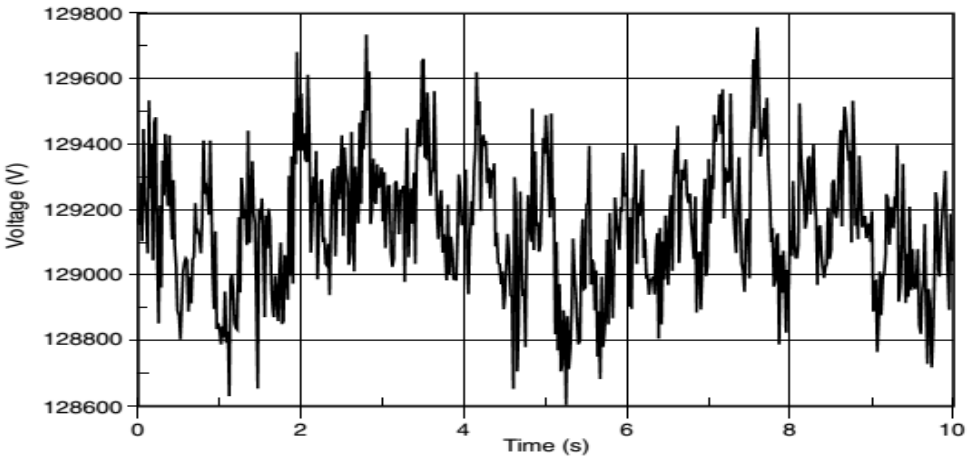
Şekil 1.22. Kısa süreli gerilim dalgalanması (http://www.datakom.com.tr)



Şekil 1.23. Üç fazlı bir sistemde gerilim flicker'ı (Janik ve Sikorski, 2011)

Gerilim dalgalanmaları cihazların performansını olumsuz etkiler ve elektronik cihazların akım ve gerilimlerinin kararsızlığına neden olur. Buna karşın gerilim dalgalanmaları ±%10'dan az olursa elektronik cihazları etkilemez. Bu değer aşıldığı takdirde kondansatör kullanan cihazların performansında azalma, kontrol sistemlerinde bozulma ve elektronik cihazların iç akım ve gerilimlerinde kararsızlıklar oluşturur.

Ayrıca elektrik ışığının titremesi insan gözlerinde sıkıntı yaratır. Şekil 1.24'de ark ocağı çalışması nedeniyle voltaj dalgalanmaları örneği görülmektedir.



Şekil 1.24. Ark ocağı çalışması nedeniyle voltaj dalgalanmaları örneği (Dugan ve ark., 2004)

1.3.8. Güç frekans değişimleri (power frequency variation)

Güç frekansı değişimleri, güç sisteminin temel frekansından belirtilen nominal değerden (örneğin 50 veya 60 Hz) sapması olarak tanımlanır. Güç sistemi frekansı direkt olarak sistemi besleyen jeneratörlerin dönme hızı ile ilgilidir. Yük ve üretim değişiklikleri arasındaki dinamik denge frekansında ufak değişiklikler vardır. Frekans kaymasının boyutu ve süresi, yük karakteristiklerine ve yük değişimlerinde kontrol sisteminin tepkisine bağlıdır. Güç sisteminin normal kararlı durum çalışması için kabul edilen sınırların dışında kalan frekans değişimleri, toplu güç iletim sistemindeki arızalar, büyük bir yük bloğu kesildiğinde veya çevrim dışı giden büyük bir kaynaktan kaynaklanabilir. Frekans değişimleri günümüzde kontrol altında tutulduğu için tüketiciler açısından önemli bir güç kalitesi sorunu olmaktan çıkmıştır. Bahsedilen güç sistem bozukluklarının kısa tanımları Çizelge 1.1'de özetlenmiştir.

Çizelge 1.1. Güç sistem bozuklukların tanımı (Chattopadhyay ve ark., 2011)

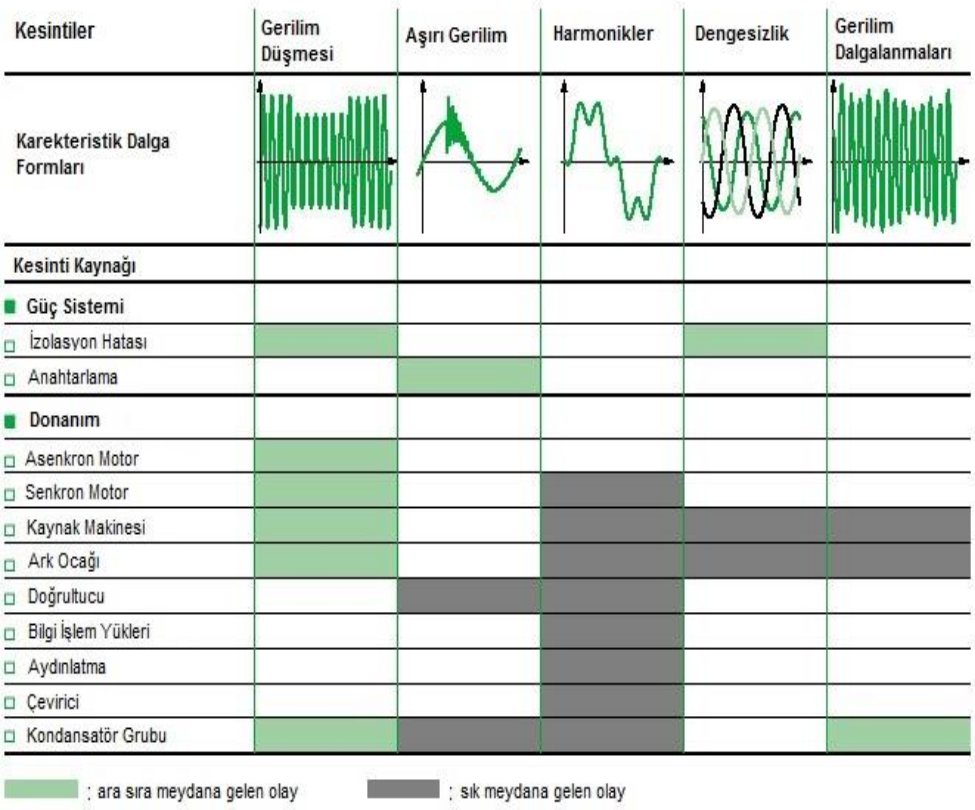
Disturbance	**Kısa Tanımı**
Interruption	Gerilim büyüklüğü sıfırdır.
Under Voltage	Gerilim büyüklüğünün nominal değerin altında olmasıdır.
Over Voltage	Gerilim büyüklüğünün nominal değerin üzerinde olmasıdır.
Voltage Sag	1 saniyeden az, 10 milisaniyeden büyük süre için 0.1-0.9 birim aralığında Rms voltajında meydana gelen azalmadır.
Voltage Swell	1 saniyeden az, 10 milisaniyeden büyük süre için 0.1-0.9 birim aralığında Rms voltajında meydana gelen artıştır.
Flicker	Bir sistem içinde gerilimin frekans değişiminin görsel etkisidir.
Voltage/Current Unbalance	Üç fazın herhangi biri ya da ikisinin gerilim/akım büyüklüğündeki sapmadır.
Outage	60 saniyeden uzun olmayan güç kesintisidir.
Transients	Sinyalin ani yükselişidir.
Harmonics	Sinüsoidal olmayan dalga formlarıdır.

Güç sistemi üzerindeki bozulmaların nedenleri, sonuçları ve bozulmaları hafifletici çözüm örnekleri Çizelge 1.2'de güç sistemi üzerindeki bozulmaların nedenleri, sonuçları ve bozulmaları hafifletici çözümler verilmiştir.

Çizelge 1.2. Güç sistemi üzerindeki bozulmaların nedenleri, sonuçları ve bozulmaları hafifletici çözümler

Kesinti tipi	Nedenleri	Sonuçları	Hafifletici çözüm örnekleri, (Özel cihaz ve değişiklikler)
Gerilim değişiklikleri ve dalgalanmaları	Büyük yük dalgalanmaları (kaynak makineleri, ark fırını, vb.).	Lambaların parlaklığında dalgalanma (gidip gelme).	Elektromekanik reaktif güç dengeleyici, gerçek zaman reaktif dengeleyici, seri elektronik güçlendirici, kademe değiştirici.
Gerilim düşüklükleri	Kısa devre, büyük yüklerin anahtarlaması (motor yol verme, vb.).	Prosesin kesilmesi veya kapanması: veri kaybı, yanlış veri, kontaktörlerin açılması, tahriklerin kilitlenmesi, motorların yavaşlaması veya durması, gaz deşarjlı ampullerin sönmesi.	UPS, gerçek zaman reaktif dengeleyici, dinamik elektronik gerilim regülatörü, yumuşak yol verme, seri elektronik güçlendirici. Kısa devre gücünün attırılması Koruyucu cihazların seçiciliğinin değiştirilmesi.
Kesintiler	Kısa devre, aşırı yük, bakım, istem dışı açılma.		UPS, mekanik kaynak transferi, statik transfer anahtarı, sıfır zaman seti, şönt devre kesici, uzaktan kumanda.
Harmonikler	Doğrusal olmayan yükler (hız kontrol cihazları, ark fırınları, kaynak makineleri, gaz deşarjlı ampuller, flüoresan lambaları,vb.)	Aşırı yükler (nötr iletken, kaynaklar, vb), istem dışı açılma, hızla eskime, enerji veriminin düşmesi, verimin düşmesi.	Anti-harmonik şok bobini, pasif veya aktif filtre, hibrid filtre, şok bobini. Kısa devre gücünün arttırılması. Kirletici yükleri denetim altına alınması. Cihazın güç değerinin azaltılması.
İç harmonik	Dalgalanma yükleri (ark fırınları, kaynak mak., vb), frekans değiştiriciler.	Gidip gelme (titreme), ölçüm sinyallerinin kesilmesi.	Seri direnç.
Geçici aşırı gerilimler	Bağlama donanımının ve kondansatörlerin çalışması, aydınlatma.	Tahriklerin kilitlenmesi, istem dışı açılma, bağlama donanımının bozulması, yangın, çalışma kayıpları.	Parafudur, yıldırım yönlendirici, ön ekleme resistörü, şok bobinleri, statik otomatik dengeleyici.
Gerilim dengesizliği	Dengesiz yükler (büyük tek fazlı yükler, vb.).	Ters motor torku (vibrasyon) ve asenkron makinelerin aşırı ısınması.	Yükleri dengelenmesi. Şönt elektronik dengeleyici, dinamik elektronik gerilim regülatörü. Kısa devre gücünün arttırılması.

Şekil 1.25'de güç sistemi üzerindeki bozulmalara sebep olan cihazlar, dalga formları ve hangi sıklıkta oldukları görülmektedir.



Şekil 1.25. Güç sistemi üzerindeki bozulmalara sebep olan cihazlar ve dalga formları (Schneider Electric-Cahier Technique Power Quality)

1.4. Elektrik Enerjisi Problemlerinin Kaynakları ve Kalite Problemi

Güç sistemlerinde akım ile gerilim arasında daima bir ilişki bulunmaktadır. Her ne kadar jeneratör ve trasformatörler sinüs dalgasına benzer gerilim üretseler de sistemin empedansı üzerinden geçen akımlar, gerilimlerde de bozulmalara sebep olabilirler. Kısa devre nedeniyle oluşan akım, gerilim çökmesine veya gerilim düşmesine neden olabilir. Yıldırım darbeleri sonucunda oluşan akımlar, yüksek darbe gerilimine neden olabilir. Harmonikli yükler, oluşan bozulmuş akımları, sistem empedansından geçmek suretiyle

gerilim bozulmalarına sebebiyet verirler ve böylece diğer alıcı müşteriler de bozuk gerilimle beslenirler.

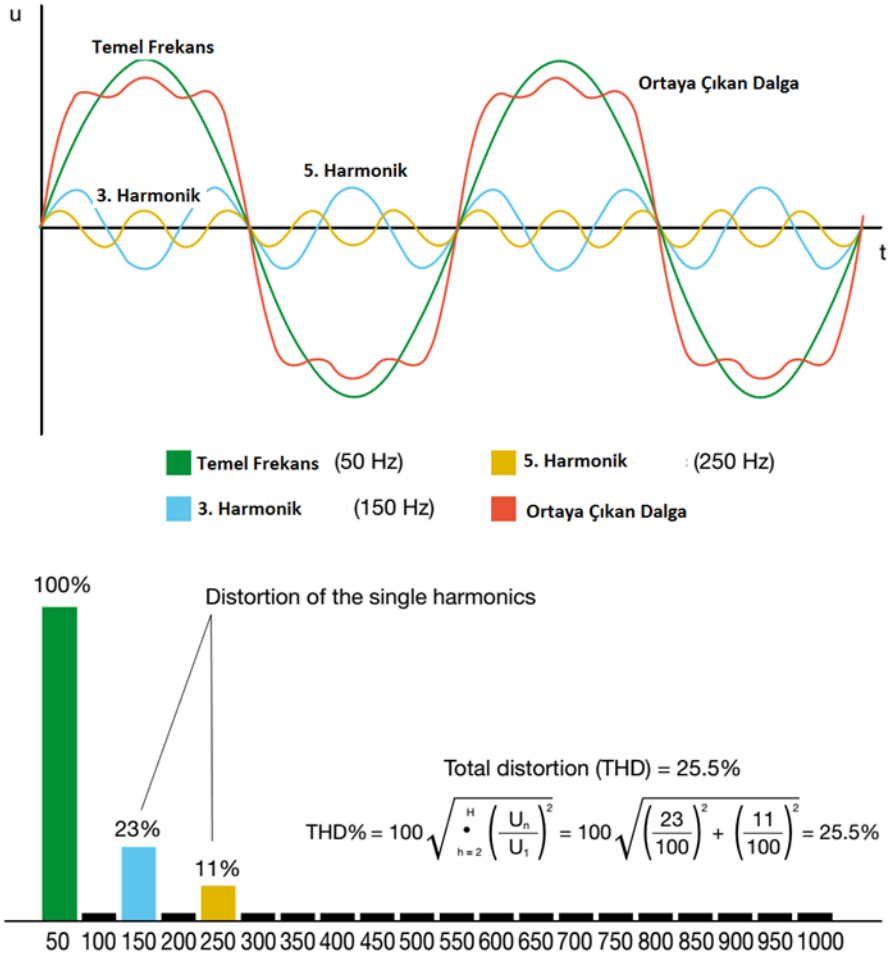
National Electric Code'nin yapmış olduğu araştırmada, elektrik enerjisi kalite problemlerinin büyük bir bölümününün uygun olmayan topraklama sistemi ve elektrik tesisatından kaynaklandığını göstermektedir. Bahsi geçen durum, yanlış topraklamalardan, gevşek yapılan bağlantılardan ve küçük kesitli nötr iletkenlerinden kaynaklanmaktadır.

Elektrik kesintileri kullanıcıların tamamını etkilemektedir. Yerleşim bölgesindeki kullanıcıların; ev alet ve onarımları veya yenilenme maliyeti, yüzlerce lira olabileceği gibi endüstriyel üretici firmalar açısından ürün ve üretim kaybı, kalite kayıpları milyonlarca lira seviyesine kadar da çıkabilir. Çeşitli özelliklere sahip işletmelerde bu kayıplar daha da büyürler. Bilgi işlem merkezlerinde gerilim çöküntüleri çok yüksek kayıplara yol açabilir. Enerji dağıtım sisteminin tipi de, bozucu etkilerin tesiri üzerinde önemli rol oynamaktadır. Bu bozucu etkilerin meydana gelme yüzdesinin yer altı şebekelerinde, havai hat sistemlerine göre önemli ölçüde az olduğu görülür.

1.5. Harmonikler

Harmonikler, dağıtım sistemine bağlı doğrusal olmayan yüklerden kaynaklanmaktadır. Elektrikli cihazlar (amplifikatörler, bilgisayarlar) doğrusal olmayan bileşenlerden üretilmiştir. Bir yük, uygulanan gerilim ile empedansı değişirse "lineer olmayan" olarak kabul edilir. Bu değişen empedansa bağlı olarak, doğrusal olmayan yük tarafından çekilen akım doğrusal değildir yani bir sinüsoidal gerilim kaynağına bağlandığında bile sinüsoidal değildir. Sinüsoidal olmayan bu akımlar, hem dağıtım sistemi ekipmanını hem de ona bağlı yükleri etkileyebilecek gerilim bozulması oluşturmak için güç dağıtım sisteminin empedansı ile etkileşime giren harmonik akımları içerir. Harmonik akımların sistem empedansı boyunca akışı, gerilim harmoniklerini oluşturur ve bu da besleme gerilimini bozar. Harmonikler, temel frekansın katları olan

frekanslarda voltajlar veya akımlar olarak tanımlıyoruz. Çoğu sistemde temel frekans 50 Hz'dir. Bu nedenle, harmonik sıra 100 Hz, 150 Hz, 200 Hz vb. (60 Hz sistemli ülkeler için, harmonik sırası 120 Hz, 180 Hz, 240 Hz vb.). Harmonikli dalgalar, temel dalga ve bunların toplamı olan harmonikli dalga Şekil 1.26' da görülmektedir. Periyodik sinüsoidal olmayan dalga formları Fourier serileri ile formüle edilebilir. Fourier analizi teorisine göre (ek 1), sabit genlikteki sinüs biçiminde bir dalga şeklinden ayrılan herhangi bir periyodik dalga şekli, temel frekansın tam katlarındaki harmonikleri içerir. Bozulmuş periyodik bir dalga şeklinin harmoniği bir Fourier serisi ile açıklanabilir.



Şekil 1.26. Harmoniklerin akımlarının sisteme etkisi, sinüsoidal bozukluk (harmonik bozulmasında bir akım dalgası), temel 50 Hz sinüsoidal akım, 3.,5. harmonik ve toplam harmonikli dalga (ABB-Technical Application Papers)

1.6. Harmoniklerle İlgili Tanımlar ve Kavramlar

Enerji kalitesindeki bozulmaların sınırlandırılabilmesi ve ölçülebilmesi için öncelikle gerilimden ve akımdan kaynaklanan harmoniklerinin tanımlanması gerekmektedir.

1.6.1. Toplam harmonik distorsiyonu (THD-THB)

Her bir harmonikli bileşenin karelerinin toplamının karekökünün etkin değerlerinin, temel bileşenin etkin değerine bölünmesiyle elde edilir. Harmonikli bileşenlerin toplanması ile temel bileşene göre ne derece sinüs dalgasının değiştiği görülebilir. Yalnızca temel frekanstan oluşan sinüs dalgasının toplam harmonik distorsiyonu sıfırdır. Başka bir ifadeyle harmonik bileşenlerin mevcut olmasığı durumlarda denklem (1) ve denklem (2)'den de anlaşılacağı üzere toplam harmonik bozulma oluşmayacaktır (Kocatepe, 2003).

Hem akım, hem de gerilim için verilebilir. Gerilim için toplam harmonik distorsiyonu denklem (1.1)'de verilmiştir.

$$THD_V = THB_V = U_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + ... + V_n^2}}{V_1} \qquad (1.1)$$

Burada;

THD_V (THB_V): Toplam harmonik bozunumu (distorsiyonu) gerilim için,
V_n: n'inci mertebedeki harmoniğinin efektif değeri gerilim için,
V_1: Temel frekanstaki efektif değer gerilim için,

Toplam harmonik distorsiyonu akım için denklem (1.2)'de verilmiştir.

$$\left.\begin{aligned} THD_I = THB_I = I_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 ... + I_n^2}}{I_1} \\ THD_I = THB_I = I_{THD} < \%p = \frac{X_L}{X_C} = \frac{1}{n^2} \end{aligned}\right\} \quad (1.2)$$

Burada;

THD_I (THB_I): Toplam harmonik bozunumu (distorsiyonu) akım için,

I_n: n'inci mertebedeki harmoniğinin efektif değeri akım için,

I_1: Temel frekanstaki efektif değer akım için,

% p: Bağıl empedans yüzdesi,

n: Harmonik sıralaması ($n=f_r/f_1$),

X_L: Endüktans empedansı,

X_C: Kondansatör empedansını ifade etmektedir.

Harmonik Yüzdesi; $\%H_{Dn} = \frac{H_n}{H_1}.100$. Ayrıca % THD < % p.

1.6.2. Toplam talep distorsiyonu (TTD-TTB)

Enerji sisteminden beslenen bir yükün çektiği değer olup, toplam harmonik akım distorsiyonu olarak, denklem (1.3)'de verilmiştir.

$$TTD(TTB) = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_L} = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 ... + I_n^2}}{I_L} \quad (1.3)$$

Burada;

TDD (TTB): Toplam Talep Distorsiyonunu (Toplam Talep Bozunumu),

I_n: n'inci mertebedeki harmoniğinin efektif değeri akım için,

I_L: Besleme sisteminin ortak noktasından yük tarafından çekilen, temel frekanslı maksimum akımını ifade etmektedir.

1.6.3. Form (Şekil) faktörü

Nonsinüsoidal bir dalganın bozulma değerini verir. Şekil faktörü sinüsoidal bir dalganın 1.11 değerine eşittir ve deklem (1.4)'de verildiği gibi hesaplanır.

$$FormFaktörü = \frac{RMS}{OrtalamaDeğer} = \frac{I_{rms}}{I_{ort}} = 1.11 \quad (1.4)$$

1.6.4. Tepe (Crest) faktörü

Bozulmuş sinüsoidal akım veya gerilimin temel bileşenin efektif (etkin) değeri ve tepe değeri ile arasında tanımlanır. Bu faktör harmonik bileşenlerin en basit biçimde ortaya konmasını sağlar ve denklem (5)'deki eşitlik ile hesaplanır. Sinüsoidal bir dalga için $\sqrt{2}$, kare dalga için ise bu değer Şekil 1.27'de görüldüğü gibidir.

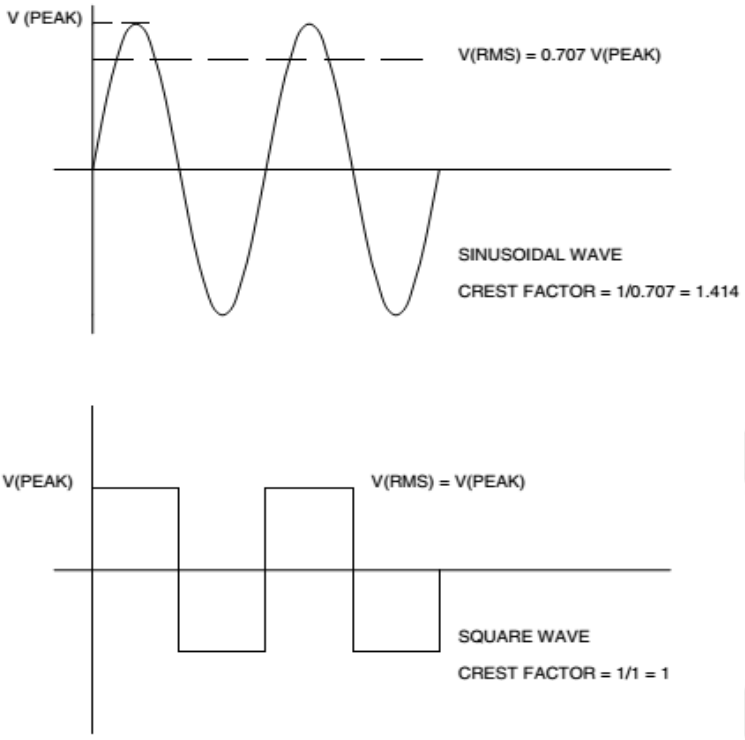
$$CrestFaktörü = \frac{Peak}{RMS} = \frac{I_{\max}}{I_{rms(etkin)}} = \sqrt{2} = 1.414 \quad (1.5)$$

Farklı yükler için crest faktörü değerleri:

Lineer yükler için F_C=1.41

Bilgisayar yükleri için F_C=2~2.5

Doğrultucu (Redresör) yükler için F_C=2.2~3.5 arasındadır.



Şekil 1.27. Sinüsoidal ve kare dalga için crest faktörü

1.6.5. Telefon etkileşim faktörü (TEF)

Telefon etkileşim faktörü elektrik enerji sistemindeki harmonikli gerilim ve akımlardan kaynaklanan telefon gürültü miktarının belirlenmesini sağlayan bir büyüklüktür. TEF değeri, insan kulağının ve telefon sisteminin farklı frekanslardaki gürültüye olan duyarlılığına dayalı olarak ayarlanır. Bu büyüklük gerilim için denklem (1.6)'da ve akım için denklem (1.7)'de verilmiştir.

$$TEF_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty}(w_n V_n)^2}}{V_{Efektif(Etkin)}} \tag{1.6}$$

$$TEF_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty}(w_n I_n)^2}}{I_{Efektif(Etkin)}} \tag{1.7}$$

Burada;

TEF_V: Gerilim için telefon etkileşim faktörünü,

TEF_I: Akım için telefon etkileşim faktörünü,

w_n: n'inci mertebeden harmonik frekansı için işitsel ve endüktif kuplaj etkisini, yapılan hesaba dahil eden katsayıyı,

$V_{Efektif}$: Gerilimin efektif (rms) değerini,

$I_{Efektif}$: Gerilimin efektif (rms) değerini ifade etmektedir.

1.6.6. Transformatör K faktörü

Kuru tip transformatörlerin sinüsoidal olmayan akımlar çeken yükü besleyebilme kapasitesinin bir ölçütü olarak kabul edilen ve standart transformatörlerin harmonik akımlarına bağlı olarak nominal gerilim ve akım değerlerinde oluşan düşüşlerin belirlenmesine yarayan bir büyüklüktür. Gücü genellikle 500 kVA'nın altındaki doğrusal olmayan yükle yüklenen trafolarda yüklenme kapasitesinin ölçüsüdür. Transformatör k-faktörü diğer bir değişle, harmonik akımlar mevcut olduğu zaman standart transformatörlerin yüklenme kapasitesindeki azalma miktarlarını hesaplamak için kullanılan bir kavramdır (Kocatepe, 2003).

Lineer olmayan yükleri besleyen transformatörün K faktörü denklem (1.8)'deki şekliyle tanımlanır.

$$K = \frac{\sum_{n=1} (nI_n)^2}{\sum_{n=1} I_n^2} \tag{1.8}$$

Burada;

K: Transformatörün K faktörünü,

I_n: n. harmonik bileşen akımını,

Standart transformatörün anma değerindeki düşümünün hesaplanmasında, IEEE C57.110-1986'da, denklem (1.9)'da verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$D = \frac{1.15}{1+(0.15)K} \tag{1.9}$$

Harmonikli akımla yüklenen transformatörün verebileceği en büyük güç değeri, denklem (1.10)'daki gibidir.

$$S_H = DS_N \tag{1.10}$$

Burada;

D: Transformatör gücündeki azalmayı,
S_H: Transformatörün verebileceği en büyük güç değerini,
S_N: Transformatörün nominal gücünü ifade etmektedir.

Yeni Transformatörün gücü $N_{kVA}=S_N+S_H$ (kVA) olur.

Bu durumu bir örnek ile açıklayacak olursak;

160 kVA'lık bir transformatör 400 V'luk gerilim altında I_n = 231 A ise ve bu transformatörde enerji analizörü ölçü aletiyle ölçümlerde I_1=180 A, I_5=75 A, I_7=32 A, I_{11}=17 A, I_{13}=6 A ise yeni transformatör gücünü hasaplayacak olursak;

$$K = \frac{(I_1)^2 + (5I_5)^2 + (7I_7)^2 + (11I_{11})^2 + (13I_{13})^2}{I_1^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_{11}^2 + I_{13}^2}$$

$$K = \frac{(180)^2 + (5x75)^2 + (7x32)^2 + (11x17)^2 + (13x6)^2}{180^2 + 75^2 + 32^2 + 17^2 + 6^2} = 6.7116$$

$$D = \frac{1.15}{1 + (0.15)x(6.7116)} = 0.5731$$

$$S_H = (0.531)x(160) = 92kVA$$

N_{kVA}=160+92=252 kVA bulunur.

Transformatör gücü 400 kVA olan transformatör temin edilmelidir.

UL (Underwriters Laboratories Inc.) standartları 1561; kuru tip genel maksat ve güç transformatörleri için standart 1562; kuru tip 600 volt üstü dağıtım transformatörleri için, harmonik içeriği %5'ten yüksek olan yüklerde standart transformatör kullanımını sınırlandırmıştır.

K faktörlü transformatörler Çizelge 1.3'de (UL standartları, yüklere göre K-faktörü trafo dereceleri) olduğu gibi yüklerin meydana getirdiği harmonik akımların ısıtma etkilerini azaltmak için tasarlanmıştır.

K-faktör bugün piyasada bulunan cihazlarda doğrudan ölçülerek belirlenebilir. K-faktör dikkate alınarak imal edilen trafolarda K-faktör katsayıları 1, 4, 9, 13, 20, 30, 40, 50 olarak belirlenmiştir.

K-faktörünün bir olması lineer yükü yani harmonik akımlarının olmaması durumunu işaret eder. Hangi tür yüklere, hangi k-faktörlerinin uygun olduğu ise Çizelge 1.3'de görülmektedir.

Çizelge 1.3. UL (Underwriters Laboratories Inc.) standartları, yüklere göre K-faktör trafo dereceleri (Gouda ve ark., 2011)

Yükler	K-Factors
Akkor aydınlatma. direnç ısıtma. motorlar. motorlu jeneratörler ve elektromanyetik kontrol cihazları.	K-1
Giriş filtreleme ile ups, hıd aydınlatma. plc ve (değişken hız sürücüleri hariç) katı hal kontrolleri. Endüksiyon ısıtıcıları ve kaynak makinaları.AC sürücüler.	K-4
DC sürücüler.	K-9
Giriş filtreleme olmadan ups. telekomünikasyon (örneğin pbx). genel sağlık tesislerinde çoklu priz devreleri. okul tesisleri ve üretim hattı ekipmanları.	K-13
Hız sürücüleri, kritik bakım tesisleri (hastane ameliyathane),özel veri işleme ile ana bilgisayarlar ve devreleri.	K-20
Ticari küçük main-frames ve multiwire receptacle devreleri. sanayi. tıbbi ve eğitim laboratuvarları.	K-30
Harmonikleri çok yüksek miktarda üreten diğer yükler.	K40

1.6.7. Distorsiyon güç faktörü

Harmonik içeren akım ve gerilimin etkin değeri, denklem (1.11) ve (1.12) eşitliği ile hesaplanır. Toplam güç faktörü, akım ve gerilimin toplam harmonik distorsiyonu olarak denklem (1.13)'de verilmiştir.

$$V = V_1\sqrt{1+(\frac{THD_V}{100})^2} \tag{1.11}$$

$$I = I_1\sqrt{1+(\frac{THD_I}{100})^2} \tag{1.12}$$

Tek fazlı doğrusal olmayan yüklerin çektiği akım yüksek distorsiyonlu ise, toplam güç faktörü daha da düşer. Rezonans olayına sebebiyet vereceğinden dolayı bu yükler için

güç faktörünü iyileştirici elemanlar kullanılmalıdır. Pasif ve aktif filtre kullanarak nonlineer yükler tarafından üretilen harmonikleri yok etmek mümkündür (Kocatepe, 2003).

$$\left.\begin{aligned} pf_{toplam} &= \frac{P}{S} = \frac{P}{VI} = \frac{P}{V_1 I_1 \sqrt{(1+(\frac{THD_V}{100})^2)(1+(\frac{THD_I}{100})^2)}} \\ DistortionPowerFactor &= \frac{1}{\sqrt{1+(THDi)^2}} \\ Cos\varphi = DisplacementPowerFactor &= \frac{P}{S} \\ TruePF = (DistortionPF)x(DisplacementPF) &= \frac{1}{\sqrt{1+(THDi)^2}} Cos\varphi \end{aligned}\right\} \quad (1.13)$$

Burada;

Cosφ (dpf-displacement power factor): Mevcut şebeke frekansındaki akım ile gerilim arasındaki faz farkı,

PF: Harmonikli akım ile harmonikli gerilim arasındaki faz farkı.

THD_i: Toplam akım harmonik bozulması.

1.7. Harmonik Üreten Kaynaklar

Ülkemizde ideal enerji dağıtımı sinüsoidal dalga biçiminde ve 50 Hz temel frekanstadır. Fakat tesislerdeki bir takım yükler farklı frekanslarda akım ve gerilim meydana getirirler.

Buna sebep olan etkenlerin önde gelenleri manyetik ve elektrik devrelerdeki lineer olmayan yani nonlineer'lik gelir. Harmonik kaynakları genel olarak şu şekilde verilebilir:

- Kesintisiz güç kaynakları (UPS),
- Yarı iletken elemanlarının kullanıldığı cihazlar,
- Jeneratörler, Motorlar, Biyomedikal sistemler,
- Redresörler, Motor hız kontrol sistemleri,
- Metalleri eritme işinde kullanılan ark fırınları,
- Bilgisayarlar, TV verici sistemleri,
- Statik VAr kompanzatörleri,
- Transformatörler, Döner makinalar,
- Elektronik balastlar, Anahtarlamalı güç kaynakları, Kaynak makinaları,
- Elektrik makinalarındaki olukların meydana getirdiği harmonikler,
- Tristörlü dinamik kompanzasyon,
- Doğru akım ile enerji taşıma (HVDC- High Voltage Direct Current),
- Enerji tasarrufu amacıyla aygıt ve yöntemler,
- Manyetik devrelerde doyma (doyma bölgesinde çalışan transformatörlerin) mıknatıslanma akımları,
- Gaz deşarjlı aydınlatma elemanları, Güç kontrol elemanları, Frekans çeviriciler,
- Çıkık kutuplu senkron makinalarda hava aralıkları (relüktans değişimleri oluşturduğu),
- Senkron makinalarda ani yük değişimlerinin manyetik dalga şekillerindeki bozulmalar,
- Momenti büyük hızı küçük direkt frekans çevirici ile beslenen makinalar,
- Fotovoltaik sistemler,
- Elektrikli ulaşım sistemleri,
- Şebekeye bağlantılı rüzgar türbinleri,
- Statik dönüştürücüler (Konvektörler),
- Gerilim regülatörleridir (Sucu, 2003).

1.7.1. Transformatörler

Transformatörlerin yapısında demir çekirdeğe sahip bobinler vardır. Bobinlerin çekirdekleri lineer olmayan mıknatıslanma karakterine sahip olduğu için transformatörler doyuma ulaşmakta ve bunun neticesinde transformatörler harmoniklere sebep olmaktadır. Transformatörler sinüsodial çıkış verecek şekilde tasarlanmaktadır.

Transformatör nüvesinin daha fazla doyuma geçmesi belirlenen nominal değerinin üstünde veya altında çalışması nedeniyle olur. Bunun sonucu olarak harmonik akımları hızlı bir şekilde artar. Mıknatıslanma akımındaki harmoniklerin şebekeye geçip geçmemesi ise;

- Transformatör sargılarının bağlanışlarına (bağlanma grubuna),
- Primeri yıldız olarak bağlanan sargılarda, şebekenin nötürünün yıldız noktasına bağlanıp bağlanmamasına,
- Transformatördeki manyetik kısmın geometrik yapısına bağlıdır.

Şebekeden 5. ve 7. harmoniklerin geçmesi rezonansa sebep olur. Bunu önlemek için şebekedeki mıknatıslanma akımını düşük ve magnetik endüksiyonu minimumda tutmak gerekir (Kocatepe ve ark., 2003).

1.7.2. Jeneratörler

Harmonik üreten kaynaklar içinde en geniş yer tutan jeneratörlerdir. Jeneratörler, alan şekline ve manyetik kısmın doyuma ulaşmasına veya magnetik dirençteki değişime bağlı olarak harmonik üretmektedirler. Jeneratör sargılarının bağlanışı harmonik sorunu azaltması veya ortadan kaldırması için oldukça önem arzetmektedir. Jeneratörün bağlanış şekli harmonik frekansı için belirleyici bir özelliğe sahiptir.

- Statorun sargıları yıldız bağlanmışsa eğer, üç ve üçün katı harmonikler fazlarda olduğu halde fazlar arasında olmazlar.
- Jeneratör sargıları üçgen bağlanırsa eğer sargılardan üçün katı frekansa sahip bir sirkülasyon akımı geçer. Sirkülasyon akımı yüke bağlanmamasına rağmen sargılarda oldukça fazla kayıplara neden olur.
- Yıldız bağlı bir jeneratöre üç faz ve dengeli bir sistem bağlanır; ve bu sistemin yıldız noktası jeneratör yıldız noktasına bağlanmazsa eğer, üç ve üçün katı harmonikler geçmez. Yıldız noktası nötüre bağlanmış bir sistemde ise, fazlardan üç ve üçün katı frekansa sahip akım, nötr üzerinden bunların toplamı, üç katı kadar akım geçişi olacaktır. Bütün bu sebeplerden dolayı, jeneratör sargılarının yıldız olarak bağlanması ve yıldız noktasının yalıtılması gerekmektedir (Kocatepe ve ark., 2003).

1.7.3. Doğrultucular (Konverterler)

Basitçe tanımlanmış olan doğrultma, alternatif akımın (AC), direkt akıma (DC) dönüştürülmesidir. Bu sadece tek yönlü elektron akışına izin veren bir cihazı içerir. Elekrik enerji sistemlerimizde bulunan en önemli harmonik kayanaklarından biri de tek ve üç fazlı doğrultuculardır. Günümüzde alternatif enerji kaynaklarının daha çok önem kazanmasıyla DC kavramı hayatımıza önemli bir yer tutmaya başlamıştır. Tek fazlı doğrultucular, üç ve üçün katı harmoniklerin meydana gelmesine sebep olduğundan dolayı üç fazlı doğrultucular tek fazlı doğrultuculardan daha üstündür.

Tek fazlı doğrultucuların üç fazlı doğrultuculara göre dezavantajı, tek fazlı doğrultucuların üç ve üçün katı harmoniklere neden olmasıdır. Karakteristik harmonikler bir devrede kullanılan doğrultucu sayısına (darbe sayısı) dayanır ve $n=k.p\pm1$ ile hesaplanır. Burada n harmonik seviyesi, k=1, 2, 3, ... bir tam sayı olmak üzere, p=6, 12, … olmak üzere darbe sayısını ifade etmektedir. Örneğin, 6 darbe doğrultucu kullanarak, karakteristik harmonikler $n=6k\pm1$ mertebesinde akım harmonikleri üretir. Aynı şekilde 12 darbe doğrultucu kullanarak, karakteristik harmonikler $n=12k\pm1$ mertebesinde akım

harmonikleri üretir. Doğrultucularda darbe sayısını artırdıkça, sinüsoidal forma benzer bir dalga şekli elde edilir (Kocatepe ve ark., 2003).

1.7.4. Ark fırınları

Elektrik ark ocakları, çelik üretiminde esas olarak demir olan metallerin eritilmesi ve rafine edilmesi için kullanılır. Günümüzde ark fırınları, çok yüksek güç girişi derecelendirmeleri için tasarlanmıştır ve her ikisinin, elektrik arkının ve eritme sürecinin doğası gereği, bu cihazlar, elektrik netinde, özellikle harmonikler, araharmonikler, titreşim gibi büyük güç kalitesi sorunlarına ve gerilim dengesizliklerine neden olabilmektedir. Ark fırınlarının gerilim-akım özelliği lineer olmadığından dolayı harmonik akımlara neden olurlar. Bu harmonik akımlar, elektrik şebekesi vasıtasıyla dolaşırken, diğer kullanıcıları etkileyebilecek harmonik voltajlar üretebilirler. Bir elektrik ark fırını, fırın tarafından tutulan hammaddeleri eritmek için elektrik enerjisini bir elektrik arkı şeklinde termal enerjiye aktarır. Ark, bir elektrot ile eritme banyosu arasında kurulur ve düşük voltaj ve yüksek akım ile karakterize edilir. Ark ocakları indüksiyon fırınlarından farklıdır, çünkü yük materyali doğrudan elektrik arkına maruz kalır ve fırın terminallerindeki akım yüklü materyalden geçer.

Ark fırınlarında akımın aniden başlatılması ve kesilmesi harmonik akım kaynağı sağlar ve yüksek empedans devrelerinde önemli ölçüde bozulmaya neden olur. Gerilim ve akım dalgaları simetrik sinüsoidal desenlerden büyük ölçüde sapmaktadır. Erken erime sırasında rahatsızlıklar daha da kötüdür ve değişik frekanslarda meydana gelir. Harmoniklerin üretilmesi, titreşim sorunlarının ortaya çıkmasına ve güç sistemindeki donanımın hasar görmesine neden olabilir(Kocatepe ve ark., 2003).

1.7.5. Gaz deşarjı prensibi ile çalışan aydınlatma elemanları ve balastları

Gaz deşarjı prensibi ile çalışan aydınlatma elemanları ve balastları bir şebeke dağıtım şebekesindeki yükün büyük bir yüzdesi olduğunda, artan harmonik akıma bağlı

olarak cihazların nominal ömrünün azalmasına ve böylece bakım ve değiştirme maliyetinin artmasına neden olur. Yüksek güçteki deşarj lambaları ile balastlar için hat beslemesinden çekilen akımın toplam harmonik bozulması düşüktür. Tam tersi olarak düşük güçlü lambalarla, özellikle kompakt floresan lambalarla ilişkili cihazlar çarpık bir akım çekmektedir. Toplam harmonik bozulma yüksek sevide olabilmektedir. Farklı fazlar arasındaki yükü dengelemek için, aydınlatma devreleri genellikle fazlar ve nötr arasında dengeli bir şekilde bağlanır (Kocatepe ve ark., 2003). Bu koşullarda, 3'ün katı olan yüksek harmonik ve harmonik seviyeleri, nötr iletkenin aşırı yüklenmesine neden olabilir. En az olumlu durum, her fazda akımın 1.73 katı kadarına erişebilen nötr bir akıma neden olur. Elektrik veya elektronik sistemler için harmonik emisyon sınırları, IEC standardı 61 000-3-2 ile belirlenir.

1.7.6. Statik VAR kompanzatörleri

Tristör kontrollü reaktörleri kullanan statik VAR kompansatörleri, yüksek gerilim iletim sistemlerinde ve bazı endüstriyel tesislerde elektrik ark fırınlarında ortak kullanımdadır. Temel amacı, titreşim azaltma, güç faktörü iyileştirme, faz dengeleme ve güç sistemi kararlılığı gibi hızlı voltaj kontrol edilebilirliği ve diğer etkileri sağlamaktır.

Geleneksel kompanzasyon sistemleri ile çok hızlı değişen reaktif güç ihtiyacı karşılanamaz. Ark fırınlarında fırının devreye girmesi ile sitemden çok hızlı reaktif güç çekmekte ve devreden çıkması ile bu ihtiyaç ortadan kalkmaktadır. Geleneksel kompanzasyon sitemlerinde kullanılan röle ve kontaktör elemanları bu hıza cevap veremez ve sistemin ihtiyaç duyduğu reaktif güç karşılanamaz. Bu gibi sistemlerde anahtarlama elemanı olarak yarı iletken elemanlar kullanılmakta ve reaktif güç talebi, kondansatör gruplarının çalışması gerektiği hızda devreye sokup çıkarmak ile karşılanmaktadır. Genellikle yarı iletken anahtar olarak yüksek akım kapasiteleri nedeniyle tristörler kullanılır. Çok hızlı sistemlerde ise anahtarlama elemanı olarak IGBT kullanılmaktadır.

Statik VAR kompanzatörleri genel itibari ile sinüsoidal dalganın belirli açılarla kesilmesine neden olur. Böylece dalga şekli sinüsoidalden uzaklaşır. Çalışma prensibi, L ve C elemanları üzerinden kesilen bu dalgalar ile reaktif gücün ayarlanma prensibine dayanır. Çizelge 1.4'de 25. mertebeye kadar olan harmoniklerin en büyük genlikleri verilmiştir. Tam iletimde temel bileşen genliğinin yüzdesi olarak verilen değerler, faz ve hat akımlarının her ikisi için de aynıdır (Adak, 2003).

Çizelge 1.4. Tristör kontrollü reaktörde harmonikler ve genlikleri (Adak, 2003)

Harmonik Mertebesi	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	25
Harmonik Genliği	13.8	5.05	5.29	1.57	1.05	0.75	0.57	0.44	0.35	0.29	0.24

1.7.7. Kesintisiz güç kaynakları (UPS)

Kesintisiz güç kaynakları, elektrik kesintisinde bilgisayarlar, tıbbi yaşam destek sistemleri ve iletişim sistemleri gibi kritik yükler için bekleme gücü olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. Genellikle KGK, özellikle doğrusal olmayan yükler altında ve ani yük değişimi altında düşük bozulma ile yüksek kaliteli AC voltaj üretmek üzere tasarlanmıştır.

Harmonik kirlilik artan bir sorundur ve biri de KG'nin (kesintisiz güç kaynakları) üreticileri ve güç sürekliliği tasarımcılarının gözardı edemediği bir konudur. Tipik harmonik problemler şebeke güç kaynağı voltajının bozulması, kablolamanın aşırı ısınması, nötr iletkenler, besleme transformatörleri ve şalterlerin açılmasıdır. Harmonikler ekipmanın bozulmasına ve rasgele arızalara neden olabilir.

UPS sistemi doğrusal olmayan yükler için yüksek THD'ye sahiptir, örneğin, dikdörtgen şekilli bir akım çizen doğrultucu yükü, AC çıkışında gerilim çöküntüsüne ve çentiklere neden olur. Uygulamada, filtrelenmesine rağmen, doğrusal olmayan yük enjekte edilen harmonik akım nedeniyle gerçek çıkış gerilimi bozulabilir. Bir KGK bazen bir harmonik filtre ile donatılabilir (kurulum sonrası) ancak geniş dahili kablolama

değişiklikleri gerekebileceğinden, maliyetli bir çözüm olabilir. Transformatör tabanlı bir KGK için, 6 pulslı bir set yerine 12 darbeli bir doğrultucu kullanmak THD_i seviyelerini (toplam harmonik bozulma) azaltacaktır.

1.7.8. Fotovoltaik sistemler

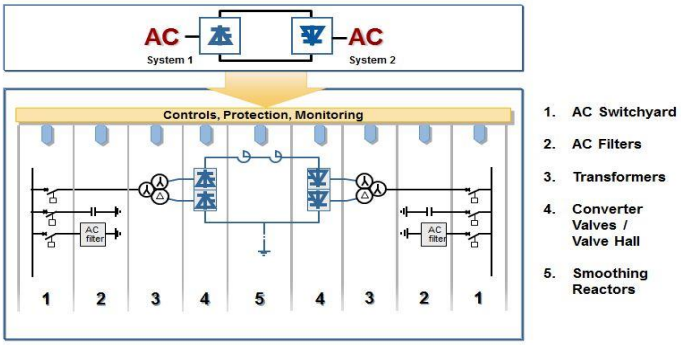
Fotovoltaik sistemler doğru gerilim üreten sistemlerdir. Genel olarak güç sistemine bağlanarak ya da doğrudan bir AC ile çalışan bir yükü yada sistemi beslemek için kullanılırlar. Bu yüzden fotovoltaik sistemlerde evirici ve doğrultucu gibi güç elektroniği donanımları bulundurmaları sebebiyle harmoniklere sebep olur (Uzan, 2013).

1.7.9. Doğru akım ile enerji nakli (HVDC- High voltage direct current)

Elektrik enerjisi normal olarak üretilir, iletilir ve alternatif akım (AC) olarak dağıtılır. HVDC elektriğin iletimi, geleneksel AC iletimine kıyasla bazı avantajlar sağlamakta ve bu da belirli uygulamalarda seçimine neden olmaktadır.

HVDC ile enerji iletimin tercih edilebilir olmasının başlıca nedenleri, eşzamansız veya farklı frekanslarda çalışan ağları birbirine bağlama yeteneğinin olması, teknik sınırlamalar olmaksızın uzun mesafelerde güç iletme yeteneğinin olması, tüm sistem geçmişleri için HVDC bağlantısında güç akışlarını kontrol etme yeteneğinin olması, şebeke operatörü tarafından istenilen şekilde her iki yönde güç iletebilme özelliğinin olması ve bazı durumlarda AC sisteminin kararlılığını iyileştirme olanağının olmasıdır. Tipik bir HVDC sisteminin tek hat şeması

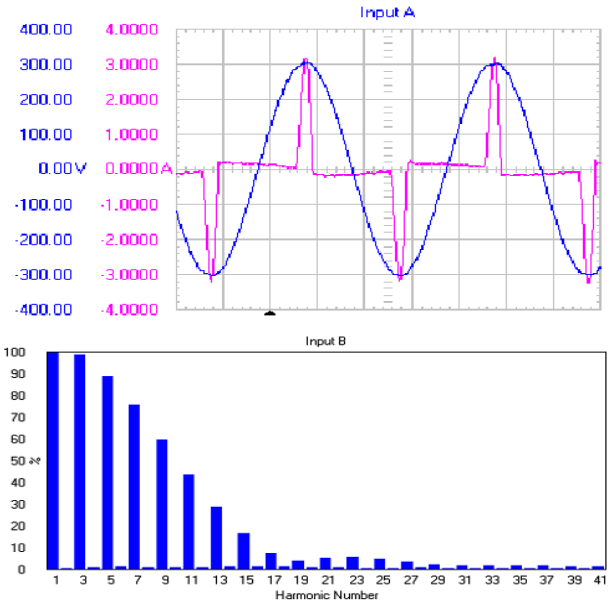
Şekil 1.28'de gösterilmektedir. Bu tip sistemlerde doğrultucular ve eviriciler kullanılmaktadır. AC gerilim DC gerilime çevrilmekte ve iletim hattının sonunda yeniden AC gerilime çevrilmektedir. Harmonik bileşenlerin derecesi ve genliği kullanılan doğrultucu ve eviricinin darbe sayısı ile ilişkilidir.



Şekil 1.28. Temel HVDC devresi (SİEMENS)

1.7.10. Bilgisayarlar

Bilgisayar sistemleri, güç kaynağına sahip oldukları için harmonik kaynağı olmasının yanısıra harmoniklerden oldukça fazla etkilenmektedirler. 220 V'luk sinüsoidal ve şebeke besleme gerilimine karşılık 200 W'lık anahtarlamalı güç kaynağına sahip masaüstü bilgisayara ait gerilim ve akım dalga biçimleri Şekil 1.29'da verilmiştir.



Şekil 1.29. Sinüsoidal 220 V besleme gerilimi için PC'nin gerilim ve akım dalga biçimleri ve akım harmonik spektrumu (Acarkan ve ark., 2011).

1.8. Harmoniklerin Meydana Getirdiği Etkiler

Harmonikler nonsinüsoidal kaynaklar ile nonlineer elemanlardan herhangi biri veya her ikisinin sistemde olmasından kaynaklanır (harmonikli gerilim ve akımın güç sistemlerinde bulunmasından meydana gelir). Harmonikler tesislerde; gerilim düşümlerine, güç faktörünün azalmasına, kayıplara vb. gibi ekonomik ve teknik sorunlara neden olur.

Sinüsoidal AC verilen bir cihazın şebekeden harmonik akımı alması bu cihazın yapısından kaynaklanmaktadır. Harmoniklere neden olan cihazlar da vardır. Bu durum cihaza uygulanan gerilimin nonsinüsoidal olmasından ya da cihazın kendisinden kaynaklanabilmektedir. AC elektrik enerjisi üretilirken jeneratörlerde yapılan iyileştirici tedbirler ile elektrik enerjisi sinüsoidal'a mümkün olduğunca yaklaştırılmaktadır. Elektrik sistemlerinde harmonikler nedeniyle akım ve gerilim dalga Şekillerinde meydana gelen bozulmalarbir çok soruna neden olmaktadır. Bunlar:

- Jeneratör ve şebeke geriliminin bozulması,
- Gerilim düşümünde meydana gelen artmalar nedeniyle cihazlarda arızaların oluşması,
- Reaktif güç kompnzasyonu yapılan tesiste oldukça fazla reaktif yüklenme ve dielektrik zorlanması nedeniyle zarar görmesi,
- Reaktif güç kompanzasyonunda kullanılan güç kondansatörlerinde kayıplar, patlamar ve delinmeler,
- Kompanzasyonda kullanılan sigortalarının atması ve endüktiften cezaya girmeler,
- Elektrik enerji sisteminde bulunan yüklerde ve cihazlarda kayıpların artması,
- Kesici ve şalterlerde açmalar,
- Senkron ve asenkron motorlarda moment salınımları ve aşırı ısınmalar,
- Endüksiyon tipi sayaçlarda hatalı ölçmeler,

- Yük kontrolünün ve uzaktan kumandanın kullanıldığı yerlerde çalışma ile ilgili sorunları,
- Harmonik bileşenlerle kapasitif reaktanslar nedeniyle oluşabilecek rezonanslar nedeniyle sistem oldukça fazla akım ve gerilime maruz kalır,
- Kontrol ve koruma devrelerinde sinyalden kaynaklı hatalar, mesafe koruma rölesinde hatalı çalışma görülür,
- İzolâsyon malzemesinin zorlanması ve izolesinin delinmesi,
- Elektrik cihazlarında ömür kısalması,
- Görüntülü ve sesli iletişim araçlarında meydana gelen anarmal çalışmalar ve parazitlenmeler,
- Mikroişlemcilerin sorunlu veya yanlış çalışması,
- Elektromekanik cihazlarda ve kablolarda ısınma,
- Makinalarda mekanik olarak oluşan titreşimler (vibrasyonlar),
- Ateşleme devrelerinin normal olmayan çalışması,
- CAD/CAM terminallerinin hafızalarında silinmeler,
- Elektronik kartlarda meydana gelen arızalar ve üretim kayıplarında artışlar,
- Güç üretiminde iletiminde ve dağıtımında verimin düşmesi, enerji taşıma hatlarında dalgalanmalar meydana getirmesi,
- Toprak kısa devre akımlarının harmoniklerden kaynaklı olarak daha yüksek değerlere artması,
- KGS'nın verimlerinde azalma,
- Harmonikler nedeniyle aydınlatmada ve monitör görüntüsünde titreşimlerin oluşması,
- Otomasyon cihazlarında hatalı çalışma,
- Haberleşmede endüktif etkiler oluşturması,
- Bilgisayarlara gelen beslemenin oldukça fazla dalgalanmaları nedeniyle kapasitelerinin bu durumu dengeleyememesi,
- Küçük devir ile kontrol edilen elemanların anormal bir şekilde çalışması olarak sıralanabilir (Sucu, 2003).

Harmoniklerin diğer etkisi ise; gerilim ve akım ölçen klasik ölçü aletleri 50 Hz frekanstaki gerilim ve akımları ölçer. Fakat farklı frekanslardaki gerilim ve akımlar ölçülemez. Bu nedenle tüketilen gerilim ve akım ile ilgili doğru bilgiye ulaşılamaz. Bunun yanısıra diğer frekans seviyelerinde yani temel frekans dışındaki gerilim ve akımlar, enerji tüketiminin artmasına neden olurlar.

Elektrik tesisatının iyi ve düzgün çalışmasını sağlamak için güç faktörü düzeltme ekipmanını seçerken harmonik seviyesi dikkate alınmalıdır. En önemli parametrelerden biri, harmonik akımlara neden olan doğrusal olmayan yüklerin toplam gücüdür. Çizelge 1.5'de harmoniklerin ekipmanlar üzerindeki etkisi verilmiştir (Schneider Electric-AG kompanzasyon panosu tasarım ve üretim klavuzu).

Çizelge 1.5. Harmoniklerin ekipmanlar üzerinde etkisi

Ekipman	Harmoniklerin Etkileri
Motor	Aşırı ısınma, tek biçimli olmayan tork üretimi, daha fazla titreşim
Transformatör	Aşırı ısıtma ve yalıtım arızası, gürültü
Anahtarlama donanımı ve kablolar	Doğal bağlantı arızası, deri etkisi nedeniyle daha fazla kayıp ve kabloların aşırı ısınması
Kondansatörler	Harmonik aşırı yüklenme nedeniyle kullanım ömrü ciddi şekilde düşer
Koruma Röleleri	Arıza ve istenmeyen açmalar
Güç elektronik ekipmanı	Tristörlerin yanlışlıkla ateşlenmesi ve yarı iletken cihazlar
Kontrol ve donanım Elektronik ekipman	İstenmeye açmalar ve bozulmalara neden olan istikrarsız çalışma
Haberleşme ekipmanı / bilgisayarlar	Parazit
Nötr kablo	3. harmonik frekansla daha yüksek Nötr, Nötr aşırı ısınma ve/veya açık nötr durumu
Telekomünikasyon ekipmanı	Telefonik parazit, kullanılan hassas elektroniklerde arıza, telekom donanımlarında arıza

1.8.1. Harmoniklerin transformatörler üzerindeki etkisi

Transformatörlerde meydana gelen bakır ve demir kayıplarında harmonikler nedeniyle artmalar görülür. Frekanstaki artış kayıp artışı olarak görülür. Bu nedenle

yüksek mertebedeki harmonikler düşük mertebedeki harmoniklere göre daha çok etki gösterebilmektedir. Akım harmonikleri bakır kayıplarında, gerilim harmonikleri ise demir kayıplarında artışa neden olurlar. Her iki durumda, magnetik çekirdekteki magnetik alanın yönünü değiştirmesi, yüksek frekanslarda düşük frekanslara göre daha hızlı olmasından dolayı, çekirdekteki histerezis kayıplarında bir artma görülür.

Bunun yanısıra zamanla değişmiş olan magnetik akı, iletkenleri kestikçe değişen magnetik alan çelik dilimlerde girdap (eddy) akımlarını meydana getirir. Bu akımlar ise ek kayıplara sebep olurlar. Kısaca frekansta meydana gelen artma transformatör kayıplarınıda arttırır. Bu nedenle transformatörün ısınmasında yüksek frekanslı harmonik bileşenler düşük frekanslı harmonik bileşenlerden daha önemlidir.

Anahtarlama modu güç kaynaklarının doğrusal olmayan doğası, transformatörler ve sistem nötrlerinin aşırı ısınmasına ve yok olmasına neden olan harmonik akımlar üretir. Yükler tarafından oluşturulan harmonik akımların ısıtma etkilerini azaltmak üzere, özellikle harmonik akımları barındıracak şekilde transformatörlerde K-Faktör tasarlanmıştır. K-Faktörü derecelendirmesi, trafonun yalıtım sisteminin sıcaklık sınırları dahilinde çalışırken harmonik içeriğe dayanma kabiliyetinin bir endeksidir. K-faktörlü transformatörler, nominal değer kaybına uğramadan plakaya kadar çalışma imkânı tanır.

Transformatör sistemde iken etiketindeki değerde ise, harmoniklerden kaynaklı olarak etiket değerinden daha yüksek değerde çalışacak ve oldukça fazla yüklenmesine neden olacaktır. Bunun yanısıra artan etkin (rms) akım nedeniyle iletkende kayıplar artacaktır. Transformatörlerde magnetik akıdan dolayı oluşan eddy akımları transformatörde ısınmaya neden olurlar.

Normalde tam yükte çalışırken yüzde on olan eddy akım kayıpları aktif olan harmoniğin karesiyle orantılı bir şekilde artar. Bu yüzden harmonik mertebesi daha çok olan harmoniklerin meydana getirdiği kayıp ve ısınmalarda çok olur.

Transformatörlerde harmonik mevcut ise çekirdekten kaynaklı kayıp gerilimin bozulmasına ve çekirdeğin yapısına bağlı olarak farklılık göstermektedir. Gerilim bozulmasındaki artış çekirdekte eddy akımlarının artışına neden olmaktadır. Bu etki tabakaların kalınlığına ve nüvenin yapısındaki malzemenin kalitesine bağlıdır. Bu kayıplar diğer kayıplara nazaran daha azdır. Üç ve üçün katı olan harmonikler üçgen sargıda iken, bu harmonikler aynı faz üzerinde sargı içinde dolanırlar, etkili bir şekilde absorbe oldukları için besleme kısmına geçemezler. Sargısı üçgen olan transformatörler izoleli olduğu için oldukça yararlıdırlar. Fakat, üç ve üçün katı olmayan harmoniklerde bu hal biraz farklıdır. Üç ve üçün katı olmayan harmonikler sistemde dolaşırlar. Bu yüzden transformatör anma değerleri, sirkülasyon akımları dikkate alınarak yapılmalıdır (Şahin ve ark., 2014).

Genel olarak transformatörler üzerine etkisi özetlenecek olursa; joule kayıplarının artması, yükün RMS akım değerinin artması sonucu ısı kayıpları artar. Demir kayıplarının artması, hysteresis fukolt kayıplarından dolayı ve buna bağlı olarak transformatör üzerinde fazladan ısınmalar meydana gelir. Aşırı yüklenme durumunda transformatör ömründe azalma meydana gelir.

1.8.2. Harmoniklerin motorlar ve jeneratörler üzerindeki etkisi

Değişken frekanslı sürücülerin artan uygulaması, geleneksel denetleyicileri kullanmaya kıyasla motorları önemli ölçüde daha yüksek harmonik seviyelere tabi tutmuştur. Girdap akımı ve histerezis kayıpları gibi demir kayıpları, alternatif manyetik alan nedeniyle motorların ve jeneratörlerin göbeğinde üretilmektedir.

Girdap akımı kaybı frekansı karesi olarak değişirken, histerezis kaybı frekansla doğru orantılıdır. Böylece, daha yüksek frekanslı voltaj bileşenleri (yani harmonik voltajlar) ek kayıplar üretir; bu da çekirdeğin ve çevreleyen sargıların daha yüksek çalışma sıcaklığına neden olur. Başka bir ifadeyle, jeneratörler transformatörler için benzer problemlere sahiptir. Boyutlandırma ve eşgüdüm, voltaj regülatörünün ve kumandalarının

çalışması için kritik önem taşır. Aşırı harmonik gerilim bozulması, akım dalga formunun çoklu sıfır geçişlerine neden olacaktır. Birden fazla sıfır geçişi voltaj regülatörünün zamanlamasını etkiler, parazit ve çalışma kararsızlığına neden olur.

Bununla birlikte, sarım kayıpları demir kayıplarına göre daha fazladır. Temel olarak, makine sargılarındaki I^2R kayıpları, RMS akımının karesi olarak değişir. Bu nedenle, harmoniklerden dolayı RMS akımında bir artış en aza indirilmelidir, çünkü bu durum daha yüksek sargı kayıplarına yol açacaktır. Dahası, gerçek kayıplar deri etkisi nedeniyle hesaplanan değerlerden biraz daha yüksek olur. Ayrıca, sarmal girdap akımı kayıpları, yüksek frekanslı rotor ve stator yüzey kayıpları, harmonik gerilimler ve akımlar nedeniyle artmaktadır.

Elektrikli makinelere uygulanan nonsinüsoidal voltajlar, aşırı ısınmaya, titreşen torklara veya gürültüye neden olabilir. Hat uygulamalarının yanında, ayarlanabilir hız tahrik motorları önemli voltaj distorsiyonu üreten invertörlerden beslenir.

Rotor aşırı ısınması gerilim bozulması ile ilişkili ana problem olmuştur. Elektrikli makinelerde meydana gelen kayıplar, uygulanan voltajın frekans spektrumuna bağlıdır. Çekirdekli ve süratli kayıplar, yüksek harmonik frekanslar üreten bir invertörden çarpık rotorlu bir indüksiyon motorunda önemli hale gelebilir. Motor çalışma sıcaklığında bir artış, motor çalışma ömrünün azalmasına neden olacaktır. Tek fazlı motorlar en çok etkilenen motorlardır.

Sıcaklık artışı motor boyunca aynı değildir; sıcak noktalar demir çekirdek kısımlarındaki iletkenlerin yakınında görünür. Harmonikler zamanla değişiyorsa, motor sıcak nokta sıcaklığını arttırmadan yüksek pik distorsiyon seviyelerine tolerans gösterebilir. Bunun nedeni motor termik zaman sabitinin harmonik değişim periyodundan çok daha uzun olmasıdır.

Doğrusal olmayan yüklerin jeneratörler üzerindeki ısıtma etkisi, transformatörlere kıyasla daha fazladır. Bunun nedeni, bir jeneratörün daha yüksek reaktans ve empedansa sahip olmasıdır; yüksek frekanslı akı değişiklikleri ile birlikte stator ısıtmasına neden olabilir. Ayrıca, yüksek frekanslı akımlar kutup yüzeylerinde rotorun ısınmasına neden olur. Ardından, doğrusal olmayan yükler sağlayan jeneratörler, jeneratör reaktansına bağlı olarak azaltılmalıdır.

1.8.3. Harmoniklerin direnç üzerindeki etkisi

Güç sistemindeki harmonik bileşenlerinin mertebesinin yüksek olması ve deri etkisi (skin effect) nedeniyle iletkende kesit kullanımı azalır. DC akımdaki iletkenin direnci AC akımdaki direncinden daha düşüktür ve bu değer harmoniklerin etkisiyle artış göstermektedir. Bu nedenle temel bileşen omik direnç (R_t) değerine harmonikler nedeniyle oluşan direnç (R_h) ilave edilir. Bu durumda harmonikli akıma gösterilen omik direnç değeri $R=R_t+R_h$ olur. Çok hassas hesaplamaya ihtiyaç olmadığında, harmoniğin olsuğu yerlerde harmonikten kaynaklanan akımının dirence etkisi yokmuş gibi kabul edilmektedir. Deri etkisi ile oluşan direnç değeri Arnold tarafından verilmiş olan denklem (1.14)'deki formül ile hesaplanmaktadır (Kocatepe ve ark., 2003).

$$\left.\begin{array}{ll} 0 \le \mathrm{X} \le 3 & R = R_0 K_1 \\ \mathrm{X} > 3 & R = R_0 K_2 \\ K_1 = \left[\left(1 + \dfrac{\mathrm{X}^4}{48} \right)^{\frac{1}{2}} + 1 \right] & \\ K_2 = \left[\dfrac{\mathrm{X}}{2.828} + 0.26 \right] & \\ \mathrm{X} = 1.585 x 10^{-4} \sqrt{\dfrac{f}{R_0}} & \end{array}\right\} \qquad (1.14)$$

Burada;

x: DC'de iletken direncine ve frekansa göre hesaplanabilen sabit bir sayıyı ifade eder,

f : Frekansı ifade eder (Hz),

R_0: DC direncini ifade eder,

R : Deri etkisiyle birlikte direnç değerini ifade eder,

R_h: Harmonikler nedeniyle oluşan direnci ifade eder,

K_1: x'e bağlı sabit bir sayıyı ifade eder,

K_2: x'e bağlı sabit bir sayıyı ifade eder.

1.8.4. Harmoniklerin reaktanslar üzerindeki etkisi

Elektrik sistemlerinde kullanılan makine ve cihazların (kablolar, motorlar, transformatörler, manyetik balastlar, vb.) modellenmesinde reaktanslar oldukça fazla yer tutar. Harmoniklerin olmaığı bir sitemde endüktif reaktans X_L denklem (1.15)'de, n. mertebeden harmonikli akımı içeren sistemlerde ise denklem (1.16)'deki gibi olur.

$$X_L = \omega L = 2\pi f L \tag{1.15}$$

$$X_{Ln} = nX_L \tag{1.16}$$

Burada;

X_L: Temel frekans için endüktif reaktansı ifade eder (Ω),

w: Açısal hızı ifade eder (Rad/sn),

L: Endüktansı ifade eder (Henry),

f: Frekansı ifade eder (Hz),

X_{Ln}: n. harmonikte endüktif reaktansı ifade eder (Ω),

n: Harmonik derecesini ifade eder.

Kapasitif reaktans, endüktif reaktans gibi elektrik sistemlerinin modellenmesinde çok sık kullanılır. Harmonikli akım barındırmayan bir sistemde kapasitif reaktans X_C denklem (1.17)'de ve n. mertebeden harmonikli akımı içeren sistemlerde ise denklem (1.18)'deki gibi olur. Her iki durumda da reaktansların lineer eleman olduğu kabul edilmektedir.

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \tag{1.17}$$

$$X_{Cn} = \frac{X_C}{n} \tag{1.18}$$

Burada;

X_C: Temel frekans için kapasitif reaktansı ifade eder (Ω),

w: Açısal hızı ifade eder (Rad/sn),

C: Kapasitansı ifade eder (Farad),

f: Frekansı ifade eder (Hz),

X_{Cn}: n. Harmonikte kapasitif reaktansı ifade eder (Ω),

n: Harmonik derecesini ifade eder.

1.8.5. Harmoniklerin devre kesicileri ve sigortalar üzerindeki etkisi

Akım harmonik bozulması da devre kesicilerin ve sigortaların kesme kapasitesini etkileyebilir. Olası nedenler sıfır geçişlerde daha yüksek di/dt, termal manyetik ayırıcıların mevcut algılama kabiliyeti ve solenoidin ekstra ısıtılması nedeniyle açma noktasında bir azalmadır. Isıtıcı olarak aktive edilen sigortalar doğal olarak rms aşırı akım cihazlarıdır; sigorta şeritleri ayrıca harmonik frekansların ekstra cilt etkisine duyarlıdır. Sigortalar genellikle, harmoniklere karşı daha az hassastırlar; burada, korunacak ekipmanın ilave

sıcaklık artışı göz önüne alındığında, nominal değere göre sadece erken kapanma gerçekleşir.

1.8.6. Harmoniklerin elektronik elemanlar üzerindeki etkisi

Harmonik bozulmanın elektronik ekipmanı etkilediği çeşitli mekanizmalar vardır. Dikkat edilmesi gereken ilk harmonik bozulma sonucunda çoklu voltaj sıfır geçişi. Elektronik devrelerde, zamanlama amaçları için temel güç frekansının voltaj sıfır geçişini kullanmak yaygın bir durumdur.

Yarı iletkenler genellikle elektromanyetik paraziti ve atıl akımı azaltmak için sıfır voltaj geçişinde devreye girer. Geçişler, cihazın anahtarlama sürelerini değiştirebilir ve ekipmanın çalışmasını bozabilir. Elektronik güç kaynakları, filtre kondansatörlerini tam şarjda tutmak için dalga formunun tepe voltajını kullanır.

Temel harmonik frekans ve faz ilişkisine bağlı olarak, harmonik gerilim bozulması dalga formu zirvesini artırabilir veya düzleştirebilir. Sonuç olarak, güç kaynağı, rms giriş voltajı nominal olabilse bile, giriş voltajının üzerinde veya altında olacak şekilde etkili bir şekilde çalışacaktır. Kesirli ve alt harmonikler video görüntülerini veya televizyonları etkileyebilir. Kesirli harmonikler, temel frekansın tamsayılı katları olmayan frekanslardır ve alt harmonikler, temelin altındaki frekanslardır. Kesirli harmonik, temel frekansın genlik modülasyonunu üretir.

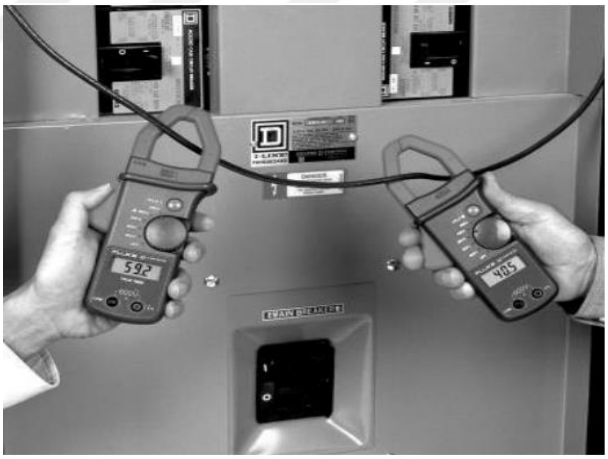
1.8.7. Harmoniklerin ölçü aletleri üzerindeki etkisi

Harmonik bileşenlerin (özellikle yüksek derecedeki harmonik akım ve gerilimler sonucu) sistemde rezonansa neden olması durumunda, ölçü aletlerini olumsuz bir şekilde etkilemektedir. Genel olarak harmonikler ekipmanlarda ısıtma ve izolasyon stresini artırırlar, çünkü harmonikler direk bağlantı veya endüktif veya kapasitif kuplaj vasıtasıyla bir devre veya sistemden diğerine aktarılabilir. Endüktif cihazlar belirli bir frekansta

çalışacak şekilde tasarlandığından, yüksek frekansların harmonikleri, verimliliğin kaybolmasına neden olur ve kayıplar ısıya dönüştürülür.

Güç hatlarına rahatsız edici yükler uygulandığında, aktif enerji artık teslim edilen toplam enerjiyi temsil etmemektedir. Elektronik faturalama sayaçları, harmonikler veya dengesiz yükler olduğunda farklı sonuçlar verebilir. İndüktif devreler, akım dalgasındaki harmonik amplitüdlerini neredeyse sinüsoidal dalga şeklinde azaltmakta, buna karşın kapasitif yükler temel harmoniğe göre akım harmoniklerinin genliğini arttırmaktadır.

Şekil 1.30'da iki adet ölçü aleti görülmektedir. Sağdaki ölçü aleti ortalama değer ölçmekte ve soldaki ölçü aleti etkin değer (Rms) ölçmektedir. Etkin değer ölçen soldaki ölçüm cihazı doğru değeri ölçerken, ortalama değeri ölçen sağdaki ölçüm cihazı %31.58 daha düşük değer göstermiştir (Şahin ve ark.,, 2014).



Şekil 1.30. Ortalama ve rms değer gösteren ölçü aletlerinin ölçüm sonuçları arasındaki fark (Şahin ve ark., 2014).

1.8.8. Harmoniklerin röleler üzerindeki etkisi

Harmonikler nedeniyle dalga biçimi bozulması koruyucu rölelerin performansını etkiler ve rölelerin düzgün veya gerektiği zaman çalışmamasına neden olabilir. Çoğu durumda, yük akımının dalga biçimi bozulması arıza akımı üzerinde çok az etkiye sahiptir.

Bununla birlikte, düşük büyüklükteki arızalar için yük, yük akımının büyük bir bölümünden oluşabilir ve bozulma önemli bir faktör olabilir. Ayrıca, bozulan yük akımlarıyla bile röle düzgün çalışmalıdır. Her röle dalga formu bozulması durumunda farklı performans gösterir.

Aynı röle türlerinin farklı üreticilerin modelleri aynı çarpıklığa çok farklı tepki verir. Bir üreticiden aynı tip ve model röleler aynı çarpıklığa farklı şekilde cevap verebilir. Bozulma, bir rölenin arıza koşulları altında açmasına neden olabilir veya herhangi bir arıza olmadığında arıza sorununa neden olabilir.

Bir gerilim veya akım dalga formunun temel ve harmonik bileşenleri arasındaki faz açısının değiştirilmesi, bir röle tepkisini önemli ölçüde değiştirebilir. Çift girişli röleler için, performans ilgili giriş harmonikleri arasındaki faz ilişkisinden etkilenebilir.

1.8.9. Harmoniklerin aydınlatma elemanları üzerindeki etkisi

Flouresan lambalarda, harmonikli bilişenlere sahip bir gerilim uygulandığında kulağın duyabileceği gürültülerde ve demir kayıpların da artışa neden olur. Flouresan aydınlatmalarda tekil harmoniklerin seviyesi önemli oranda devreyi etkiler. Harmonikli gerilim ayrıca elektronik balast gibi yarı iletken anahtarlama elemanlarından oluşan devrelerin ömürlerinin kısalmasına neden olmaktadır.

Akkor flamanlı lambalar, harmonik etkiye maruz kalmış gerilimle çalıştırıldıklarında ömürleri azalmaktadır. Lambaların içindeki flamanın çok fazla ısınması nedeniyle bu durum olmaktadır. Eğer çalışma gerilimi, harmonik bozulma nedeniyle normal etkin gerilime oranla yüksekse, flamanın daha çok ısınmasına ve lamba ömrünün kısalmasına neden olacaktır. Harmonikler sebebiyle oluşan gerilimdeki yükselmenin küçük değerde olması durumunda bile akkor flamanlı lambanın ömrü oldukça azalmaktadır. Örneğin normal çalışma gerilimlerinin yüzde beş üstünde

kullanıldıkların zaman akkor lambaların ömürleri ortalama olarak yüzde elli kadar azalabilmektedir (Kocatepe ve ark., 2003)

1.8.10. Harmoniklerin yalıtıma olan etkisi

Sinüsoidal bir gerilime dahil olan gerilim harmoniklerinin oluşturduğu çok kısa süreli sivri uçlu ani gerilim yükselmeleri, mesela gerilim rezonansı gibi hallerde transformatör ve makina sargılarının izolasyonu ve kondansatörlerin dielektrik maddesi için çok büyük bir tehlike oluşturulurlar ve bazen izolasyonda delinmeye yol açabilirler. Buna karşılık mesnet, askı ve geçiş izolatörleri için bu gibi aşırı gerilimler hemen hemen hiçbir tehlike yaratmazlar. Ayrıca aşırı gerilimin, koronanın başlamasına, yalıtımın bozulmasına ve çalışma arızasına neden olduğu bilinmektedir. Bunlara ek olarak harmonikler güç hattı taşıma sistemlerinde kullanılan hat filtrelerinin kötü çalışmasına neden olmaktadır (Özcan, 2006).

1.8.11. Harmoniklerin iletkenler üzerindeki etkisi

Harmonik akımları alçak gerilim dağıtım sisteminde kullanılan iletkenleri üzerinde iki şekilde ısınmaya neden olur. İlki harmoniklerin direnç üzerindeki etkisinde değinildiği üzere deri etkisi (skin-effect)'dir.

Akımın iletkenin dışına doğru yoğunlaşması sonucu iletkenin direncinin büyümesidir ve bu direnç frekansla artış göstermektedir. Diğeri ise harmoniklerin (özellikle 3. harmoniğin), tek fazlı yükleri besleyen üç fazlı dört telli sistemlerin nötr iletkenlerinde yüksek akımlara neden olmasıdır.

Bazı nonlineer elemanlar önemli oranda üç ve üçün katı harmonikler üretir. Temel frekanstaki dengeli üç fazlı akımlar nötr iletkeninde akım yaratmazlar. Ancak üç fazlı sistemlerde üçüncü harmonikler nötr iletkeninde birbirini zayıflatmaz, tam tersine güçlendirir. Hatta nötr akımı faz akımının 1.7 katına kadar çıkabilir. Nötr iletkenleri faz

iletkenleri ile aynı boyutlarda olduğundan, bu durumda nötr iletkeni aşırı yüklenebilir. Bu soruna en çok üç fazlı dağıtım sisteminin, tek fazlı büyük yükleri beslendiği ticari ve ofis şeklindeki binalarda rastlanmaktadır. Bu durumda alınabilecek önlemlerden biri nötr iletkeninin faz iletkenlerinin iki katı büyüklüğünde seçilmesidir (Kocatepe ve ark., 2003).

1.8.12. Harmoniklerin elektrik tesisatlarına etkisi

Elektrik tesisatlarında harmoniklerin bulunması, akım ve gerilimin bozulduğu ve sinüsodal dalga şekillerinin saptığı anlamına gelir. Harmonik akımlar, şebekelerde dolaşan ve frekansları besleme frekansının bir tam katı olan akımlardır. Harmonik akımların nedeni, dağıtım sistemine bağlı doğrusal olmayan yüklerdir. Akım dalga şekli, besleme gerilimi dalga şeklinden farklı olan yüklere doğrusal olmayan yükler denir. Harmonik akımların sistem empedansında dolaşması, şebeke gerilimini bozan gerilim harmonikleri oluşturmaktadır.

Harmonik akımlara neden olan en yaygın doğrusal olmayan yükler, hız kontrol cihazları, doğrultucular, invertörler gibi güç elektroniği kullanan cihazlardır. Doymuş reaktörler, kaynak makineleri ve ark fırınları gibi yükler de harmonik üretirler. Endüktanslar, dirençler ve kondansatörler gibi diğer yükler doğrusal yüklerdir ve harmonik üretmezler.

1.8.13. Harmoniklerin enerji iletim sistemi üzerindeki etkisi

Harmonik akımların bir şebekedeki akışı, iki temel etkiyi oluşturur. Birinci etkisi, akım dalga şeklinin artan rms değerinin neden olduğu ek kayıplardır ve denklem (1.19)'da verilmiştir. Burada I_n, n. Harmonik akımını ve R_n ise n. Harmonikte iletim sisteminin omik direncini ifade eder.

$$P_h = \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 R_n \qquad (1.19)$$

Diğer etkisi, iletim hattında bazı elemanlarda gerilim düşümleri oluşturmasıdır. Akımın n. harmonik bileşeninin oluşturduğu gerilim düşümü denklem (1.20)'de verildiği gibi ifade edilir.

$$|\Delta V_n| = |I_n \| Z_n| \tag{1.20}$$

1.8.14. Harmoniklerin iletişim hatları üzerindeki etkisi

Çok yüksek dereceli harmonikler, genliklerinin küçük olması nedeniyle kuvvetli akım tesislerinde zararsız oldukları halde, haberleşme tesislerine parazitler oluşturarak zarar verirler.

Harmonik akımları iletişim hatlarına endüksiyon veya doğrudan iletim yoluyla girerler. Hem endüksiyon yoluyla hem de doğrudan iletim yoluyla akım geçmesine neden olan, sistemin nötr hattı akımıdır.

1.8.15. Harmoniklerin kondansatör üzerindeki etkisi

Güç faktörünü ve gerilimi arttırmak için kapasitörlerin kullanılması harmonik seviyelerde de önemli bir etkiye sahiptir. Kondansatörler harmonikleri üretmez, ancak olası rezonans koşulları için ağ döngüsü sağlar. Kondansatör ilavesi, sistemi, yük akımı veya sistem voltajında bulunan bir harmonik frekansın yakınında rezonansa ayarlıyorsa, o frekansta büyük akımlar veya voltajlar üretilecektir.

Kondansatörleri, harmonikler gibi olağandışı koşullar için aşırı yüklemeye yönelik girişimlere rağmen, birçok harmonik problem ilk önce şönt kapasitör banklarında patlamış sigortalar veya kapasitör ünitesi arızaları olarak görülür. Kondansatördeki problemlerin nedeni, kondansatörün rezonans halkanın bir parçası olması ve o yerde akım veya voltaj büyütmede en yüksek değer olmasıdır.

Xc=1/ωC=1/2πfC formülü ile kondansatör empedansı bulunur. Frekans artarsa eğer kondansatörün empedansında azalmaya sebep olacaktır. Mesela, 50 Hz şebeke frekansında 21 Ω değerindeki bir kondansatör empedansı, 7. harmonikte 350 Hz de yedi kat azalacak ve 3 Ω değerinde olacaktır.

Bir elektrik güç sisteminde kondansatörlerin kullanılmasından kaynaklanan ciddi bir endişe sistemin rezonans olasılığıdır. Bu etki, rezonans olmaksızın daha yüksek voltaj ve akımlar empoze eder. Bir güç sisteminde harmonik rezonans paralel veya seri rezonans olarak sınıflandırılabilir ve her iki model de harmonik açıdan zengin bir ortamda bulunur. Paralel rezonans, akım çoğalmasına neden olurken, seri rezonans voltaj büyütme üretir.

Rezonans koşullar sırasında rahatsız edici frekansın genliği yeterince büyükse kondansatör bankalarına önemli hasar meydana gelir. Ayrıca, sistemdeki diğer elektrikli aygıtların da hasar görme ihtimali yüksektir. Bu nedenle, rezonans frekanslarının akımlarda ve voltajlarda bulunan belirgin harmoniklerle eşleşmediğinden emin olmak için bir güç faktörü iyileştirme kapasitör bankının kurulumundan önce harmonik analiz yapılmalıdır.

Kondansatörler harmoniğe neden olmazlar fakat var olan harmoniğin artmasına neden olurlar. Sistemde harmonikten en başta etkilenen elemanlardandır. Bu yüzden harmonikler kondansatörlerin kapasitesinin azalmasına, ömürlerinin kısa olamsına ve hatta patlamasına neden olmaktadır.

1.8.16. Harmoniklerin sebep olduğu rezonans olayları

Güç sistemlerinde kapasitif reaktans, frekans ile ters orantılı iken endüktif reaktans frekans ile doğru orantılıdır. Kapasitif reaktansın (X_C) endüktif reaktansa (X_L) eşit olduğu frekansa rezonans frekansı denmektedir. Harmonik frekanslardan biri sistem rezonansına yakın yada eşit bir değerde olursa, oldukça fazla harmonik gerilim ve akımları meydana gelecektir.

Harmonik seviyelerini etkileyen en önemli etkenlerden birisi rezonans durumudur. Bilindiği gibi elektrik devrelerinde, paralel ve seri rezonans olmak üzere iki çeşit rezonans oluşur. Seri rezonans harmonik akımının dolaşmasına düşük bir empedans gösterirken, paralel rezonans yüksek empedans göstermektedir. Rezonans anında $X_L=X_C$ olduğundan dolayı rezonans frekansı (f_0) denklem (1.21)'deki gibidir.

$$\left.\begin{aligned} & X_L = X_C \\ & \omega L = \frac{1}{\omega C}, \\ & 2\pi f L = \frac{1}{2\pi f\sqrt{LC}}, \\ & f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \ \text{Hz} \end{aligned}\right\} \qquad (1.21)$$

1.8.16.1. Paralel rezonans

Paralel rezonansda kondansatör gerilimi büyür. Harmonik filtre reaktörleri, kondansatörler ve trafo empedansları arasında paralel rezonans meydana gelir. Paralel rezonans ferekansı genel olarak denklem (1.22)'de verilmiştir.

$$\left.\begin{aligned} & f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_N C}} \ \text{Hz.} \\ & f_r = 50\sqrt{\frac{S_T 100}{Q_C u_k}} \ \text{Hz.} \\ & Qc < \frac{S_T 100}{f_R^2 u_k} \end{aligned}\right\} \qquad (1.22)$$

Burada;

f_r : Kritik rezonans frekansı,

S_T : Trafo gücü,

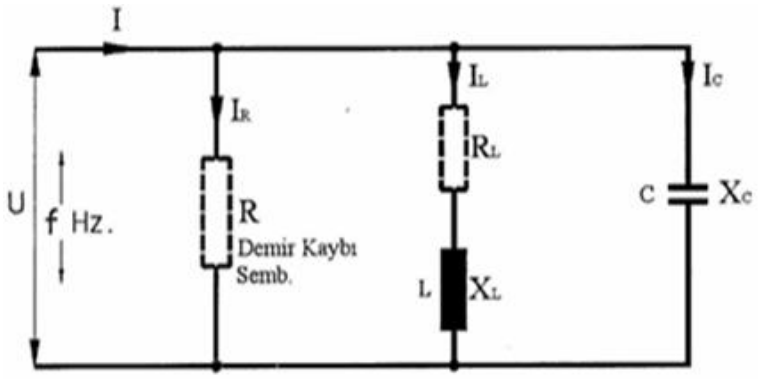
Q_C : Kompanzasyon kondansatör gücü,

u_k : Kısa devre gerilimi.

Paralel devrelerde, devre elemanlarındaki gerilim düşümleri ve kaynak gerilimleri eşittir. Kol akımlarının toplamı ise devre akımına I'ya eşittir. Paralel elemanların reaktans değerlerine göre her bir koldan geçen akım değişecektir. Paralel RLC devresinde faz farkı nedeniyle toplam devre akımı vektörel olarak bulunur. Denklem (1.23)'de endüktif ve kapasitif devrede, devre akımı görülmektedir.

$$\left.\begin{aligned} I^2 &= I_R^2 + (I_L - I_C)^2 \quad \text{(Endüktif Devrede } X_L > X_C\text{)} \\ I^2 &= I_R^2 + (I_C - I_L)^2 \quad \text{(Kapasitif Devrede } X_C > X_L\text{)} \end{aligned}\right\} \qquad (1.23)$$

Paralel devre elemanlarının bağlantı prensibine göre empedans yazılabilir. Bir devrenin kapasitif yada endüktif reaktaslarının matematiksel işareti kapasitif veya endüktif olma durumuna göre değişir. Şekil 1.31'de örnek bir paralel rezonans devresi görülmektedir.



Şekil 1.31. Paralel rezonans devresi (akım teorik olarak I = 0'dır)

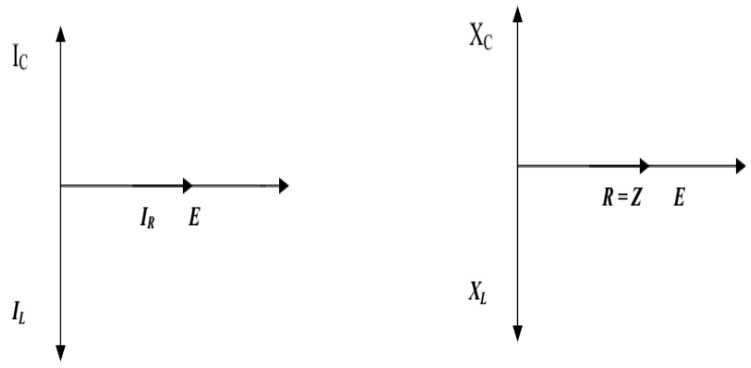
Şekil 1.31'deki devrenin eşdeğer empedansı denklem (1.24)'de verilmiştir.

$$\frac{1}{Z^2}=\frac{1}{R^2}+\left(\frac{1}{X_L}-\frac{1}{X_C}\right)^2 \text{ ya da } Z=\frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R^2}+\left(\frac{1}{X_L}-\frac{1}{X_C}\right)^2}} \quad (1.24)$$

Rezonans esnasında kondansatörün kapasitif reaktansı bobinin endüktif reaktansına eşit (X_L=X_C) olmasından dolayı paralel kollar üzerindeki akımlar I_L ve I_C eşit olacaktır. Dolayısıyla rezonans üstü ve rezonans altı çalışmasına göre geçen akımlar da değişecektir. Paralel devre için rezonans frekansı (f_0) denklem (1.21)'de verildiği gibi bulunur. Kondansatör ve bobinlerden geçen I_L ve I_C akımları arasında 180° faz farkı bulunur. Bu nedenle bu akımlar vektöriyel olarak birbirini götürür. Dolayısıyla I_L ve I_C akımları vektöriyel olarak birbirini götürdüğü için devreden geçen akım I_R'dir ve resitiftir.

Sonuç olarak kondansatörün kapasitif reaktansı ile bobinin endüktif reaktansı birbirine eşit ve devreden geçen akım I_R olduğu devrenin empedansı direnç değerine eşittir (Z = R). Devre akımı ve empedansı ise denklem (1.25)'deki şekliyle hesaplanır. Paralel RLC devresinin rezonans esnasında akım ve empedans durumu Şekil 1.32'de görülmektedir.

$$I=\frac{U}{Z} \quad \text{ve} \quad Z=\frac{U}{I} \quad (1.25)$$



Şekil 1.32. Paralel rezonans devresi akım fazör ve empedans fazör diyagramları

Paralel RLC'de, rezonans esnasında devrenin empedansının maksimum olması devre akımının minimum değere ulaşmasına sebep olmaktadır. Rezonans frekansında meydana gelen değişme akıma ve devre elemanlarına da yansıyacaktır. Fakat rezonans frekansında meydana gelen değişmenin I_R'ye bir etkisi bulunmamaktadır. Denklem (1.26)'da temel dalga ve tekil harmonik frekans değerleri verilmiştir.

1. Temel dalga $f_1 = 50$ Hz.
3. Harmonikte $f_3 = 150$ Hz.
5.Harmonikte $f_5 = 250$ Hz.
7. Harmonikte $f_7 = 350$ Hz. (1.26)
.
.
n. Harmonikte $f_n = nf_1$

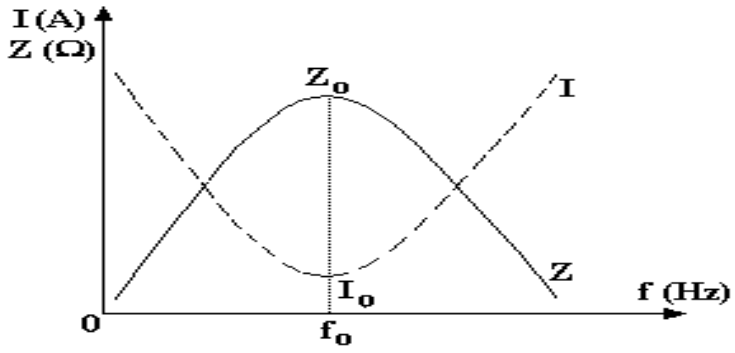
Rezonans anında, $X_L = X_C$, $X_L - X_C = 0$ ve eşdeğer empedans $Z = R$ olur.

Demir kayıpları çok küçük olduğundan R çok büyük olur denklem (1.27)'de ve R çok büyük olduğu için denklem (1.28)'de görüldüğü üzere akım küçülür. R sonsuza (∞) yaklaşırsa akım sıfır (0) kabul edilir.

$$N_{fe} = \frac{U^2}{R} \text{ Watt (W)} \tag{1.27}$$

$$I = \frac{U}{R} \text{ Amper (A)} \tag{1.28}$$

Dolayısıyla paralel rezonans devresinde akım teorik olarak I = 0'dır. Bunun için bu devreye paralel rezonans devresi de denir. Şekil 1.33'de rezonans frekansında empedans ve akım grafiği görülmektedir.



Şekil 1.33. Rezonans frekansında empedans ve akım grafiği (I_0 = Min.) & (Z_0 = Max.)

Şebekeden akım geçmediği halde devrenin içinden; LμH ve CμF arasında nω=n2πf rezonans frekanslı bir akım geçer. Bu devreye bu sebepten akım rezonans devresi de denir.

$$n^2 U^2 Q_{Cr} = U^2 S_k \tag{1.29}$$

Denklem (1.29)'dan kritik kondansatör gücü, denklem (1.30)'daki gibidir.

$$Q_{Cr} = \frac{S_k}{n^2} \text{ kVAr} \tag{1.30}$$

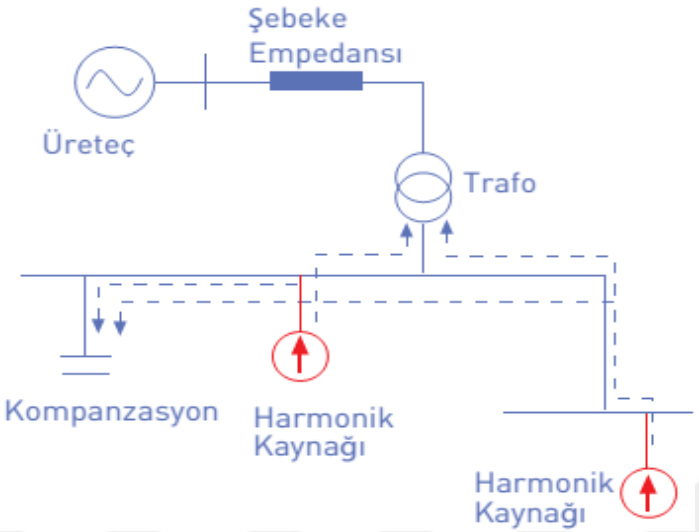
Burada;

S_k: Kondansatör grubunun bulunduğu noktadaki kısa devre gücü,

Q_{Cr}: Kritik kondansatör gücü,

n: Rezonans frekansına ait harmonik mertebesi.

Eğer şebeke kaynağa bağlı bir endüktans gibiyse, kondansatör paralel rezonans devresini meydana getirir. Bu kondansatörler devreye alındığında bir rezonans frekansı ve sirkülasyon akımı meydana gelir. Bahsi geçen harmonik akımları kondansatörlere ve şebekeye doğru yönelirler.



Şekil 1.34. Harmonik kaynağının kompanzasyon ve tranformatör üzerine akışı (aktif mühendislik)

Frekansın yükselmesine bağlı olarak kondansatör empedansının düşmesi, yüksek frekanslı harmonik akımlarının en düşük direnci (empedansı) gösteren kondansatörlere akmasına neden olmaktadır. Transformatör empedansı frekans ile doğru orantılı bir şekilde artmakta, kondansatör empedansı ise frekansa bağlı olarak azalmaktadır. Paralel rezonans frekansının herhangi bir değerinde bahsi geçen reaktans değerleri birbirine eşit olabilmekte ve bu frekansta kondansatör ile transformatör arasında Şekil 1.34'deki gibi, paralel rezonans etkisiyle harmonik akımları artmaktadır.

Kurulu gücü 1000 MVA olan bir işletmede n = 3, 5, 7, 9, 11, 13 ve 15. harmoniklerde rezonans meydana getirecek kondansatör güçlerini hesaplayacak olursak;

3. Harmonikte $Q_{Cr} = \frac{S_k}{n^2} = \frac{1000}{3^2} = \frac{1000}{9} = 111.1 MVAr$

5. Harmonikte $Q_{Cr} = \frac{S_k}{n^2} = \frac{1000}{5^2} = \frac{1000}{25} = 40 MVAr$

7. Harmonikte $Q_{Cr} = \frac{S_k}{n^2} = \frac{1000}{7^2} = \frac{1000}{49} = 20.4 MVAr$

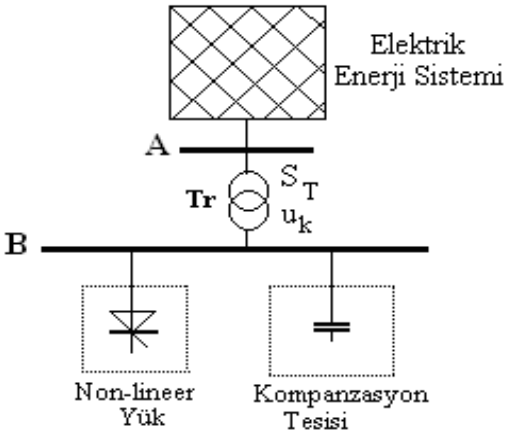
9. Harmonikte $Q_{Cr} = \frac{S_k}{n^2} = \frac{1000}{9^2} = \frac{1000}{81} = 12.34 MVAr$

11. Harmonikte $Q_{Cr} = \frac{S_k}{n^2} = \frac{1000}{11^2} = \frac{1000}{121} = 8.26MVAr$

13. Harmonikte $Q_{Cr} = \frac{S_k}{n^2} = \frac{1000}{13^2} = \frac{1000}{169} = 5.91MVAr$

15. Harmonikte $Q_{Cr} = \frac{S_k}{n^2} = \frac{1000}{15^2} = \frac{1000}{225} = 4.44MVAr$

Sonuçları elde edildiğinden dolayı bu işletmeye 2.5 MVAr kondansatör bağlanırsa rezonans meydana gelmez. Şekil 1.35'de rezonans devresinin örnek tek hat şeması görülmektedir.



Şekil 1.35. Rezonans devresinin örnek tek hat şemaları

A barasına göre, rezonans frekansına ait harmonik mertebesi (n) denklem (1.31)'de verilmiştir.

$$n = \sqrt{\frac{S_T(MVA)}{Q_C u_k}} \qquad (1.31)$$

Burada;

S_T: Nominal transformatör gücü,

Q_C: Kondansatör gücü,

u_k: Trf. bağıl kısa devre gerilimi,

B barasına göre, rezonans frekansına ait harmonik mertebesi (n) denklem (1.32)'de verilmiştir.

$$n = \sqrt{\frac{S_k(MVA)}{Q_C(MVar)}} \tag{1.32}$$

Burada;

S_k: Kondansatör grubunun bulunduğu noktadaki kısa devre gücü,

Q_C: Kondansatör gücü.

Şekil 1.36'daki paralel RLC devresinde rezonans halinde harmonik mertebesi denklem (1.33)'deki formül ile hesaplanır.

$$n = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \tag{1.33}$$

Rezonansda endüktans ve kondansatörün reaktansları çarpımı denklem (1.34)'de görülmektedir. Rezonanstaki endüktans ve kondansatöre ait reaktans X_r hesaplanmıştır.

$$\left.\begin{aligned} X_{Cn} &= \frac{X_C}{n} \\ X_{Ln} &= nX_L \\ X_r^2 &= \frac{X_C}{n} nX_L = X_C X_L = \frac{L}{C} \\ X_r &= \sqrt{\frac{L}{C}} \end{aligned}\right\} \tag{1.34}$$

Paralel rezonansda devrenin toplam empedansı Z=R olup sadece dirençten oluşur. Buradan sonuç olarak Q kalite faktörü denklem (1.35)'deki gibi olur.

$$Q_P = \frac{\text{Re}\,aktifGüç}{OrtlamaGüç} = \frac{V^2/X_L}{V^2/R} = \frac{R}{X_r} = \frac{R_L}{X_L} = \frac{R}{X_C} = \omega_P.C.R \qquad (1.35)$$

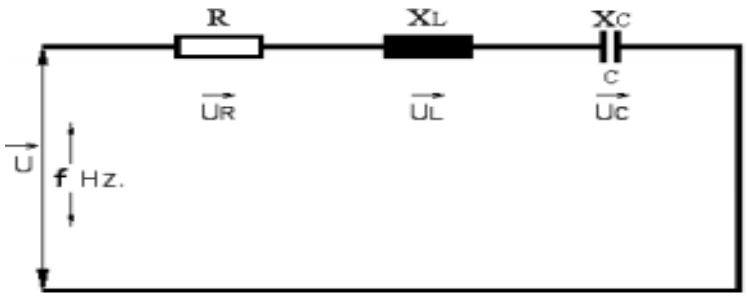
Burada;

Q_p: Kalite föktörü (Q),

X_r: Rezonanstaki endüktans ve kondansatöre ait reaktans değeri.

1.8.16.2. Seri rezonans

Seri rezonans halinde kondansatör üzerindeki akım büyür. Harmonik filtre reaktörleri ile kondansatörler arasında seri rezonans frekansı oluşur (seri rezonans frekans değerleri 134 Hz, 189 Hz ve 210 Hz'tir). Seri RLC devresi Şekil 1.36'da görülmektedir. Şekil 1.36'daki RLC devreye DC gerilim uygulanırsa; belli bir zamandan sonra, kondansatör DC' ye open circuit (açık devre) özelliği gösterir ve devreden akım geçmez. Bu durumda kaynak gerilimi U_C olur. Fakat devreye AC gerilim uygulandığında devreden geçen akım; tüm devre elemanlarına (direnç, bobin ve kondansatör) göre değişir. Devrede direnç ve reaktansların vektöriyel toplamı devrenin toplam empedansını verir. AC bir devrede empedans, reaktans ve dirençlerin göstermiş olduğu toplam zorluğa denir.



Şekil 1.36. Seri rezonans devresi (akım teorik olarak I = ∞)

Bobin ve kondansatörün kullanıldığı AC devrelerde, bahsedilen bobin ve kondansatörün akım ve gerilim depolamaları nedeniyle, gerilim ve akım arasında faz farkı meydana gelmektedir. Buna göre, Şekil 1.36'daki devredeki gerilim ve devrenin toplam empedansı denklem (1.36)'daki şekliyle yazılır.

$$\left.\begin{aligned} \vec{U} &= \vec{U}_L + \vec{U}_C + \vec{U}_R \\ Z &= R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} = R + j(X_L - X_C) \end{aligned}\right\} \quad (1.36)$$

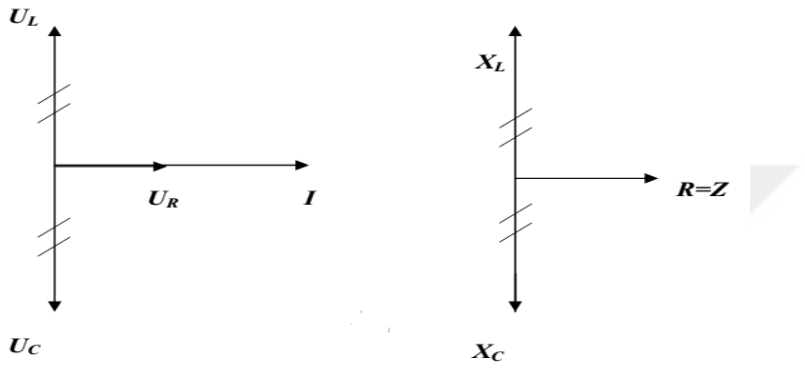
Kondansatör ve bobindeki akım ile gerilim arasındaki faz farkından dolayı, gerilim düşmeleri vektöriyel olarak toplanır. Başka bir ifadeyle U_L ve U_C aynı fazda değildir. Bu yüzden bilinen klasik toplama yapılamaz. Aralarında faz farkı olması nedeniyle gerilimler denklem (1.37)'deki gibi yazılır.

$$\left.\begin{aligned} U_R &= IR \\ U_L &= IX_L \\ U_C &= IX_C \end{aligned}\right\} \quad (1.37)$$

Rezonans anında, kapasitif reaktans ile endüktif reaktans değerleri birbine eşittir ($X_L = X_C$). Yani $X_L = X_C$ ise devre rezonanstadır denir. Rezonans anında kondansatör ve bobinin gerilimleri birbirine eşittir. Fakat U_C ve U_L arasında 180º'lik faz farkı nedeniyle, U_C ve U_L gerilimleri birbirini götürür. Bu yüzden devre gerilimi U_R'ye ve devre direnci R'ye eşittir. Bu nedenle devre rezistif çalışır. Bunun sonucu olarak devrenin empedansı minimum değerde, devreden geçen akım ise maksimum değerde olur. Şekil 1.36'daki akım maksimum seviyeye ulaşması, seri rezonans devresinin önemli özelliklerindendir. Özetlenecek olursa; seri rezonans devresinde akım maksimum değerde, gerilim ve empedans değeri minumumdur. Seri rezonans anında da, rezonans frekansı paralel rezonansda ki gibi denklem (1.38)'deki formül ile bulunur.

$$f_0 = f_S = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{1.38}$$

Şekil 1.37'de seri rezonans devresinin fazör diyagramı görülmektedir.



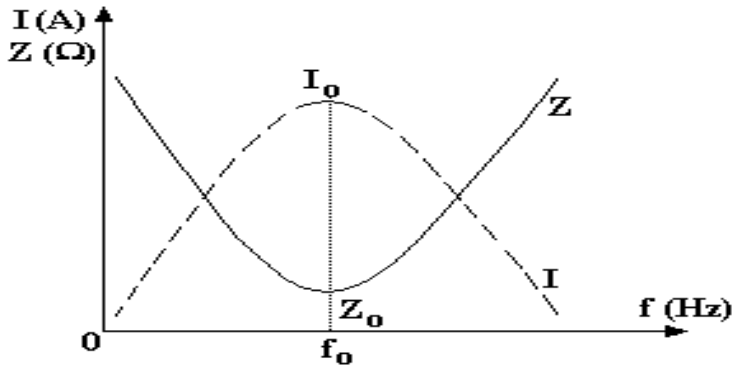
Şekil 1.37. Seri rezonans devresi fazör gerilim-akım ve fazör empedans diyagramları

Seri RLC devresinin rezonansa gelme durumunda aşağıdaki sonuçlara varılır:

1.Devre rezistif öaellik gösterir,
2. $U_L = U_C$ ve $X_L = X_C$'dir,
3. Gerilim ve empedans değeri minimumdur,
4.Devrenin empedansı Z=R' den bulunur,
5.Devreki akım maksimum değerdedir.

Yukarıda da bahsedildiği üzere devrenin eşdeğer empedansı Z=R olur. Rezonans anında R çok küçük olduğundan, R=0 kabul edilir. Devreden direnç R=0 kabul edildiği için yaklaşık olarak devreden I=∞ bir akım geçtiği kabul edilir. Devre üzerinden geçen bu yüksek akım kondansatörü tahrip eder akım çok büyük olur bu sebeple seri rezonans anında çok büyük akımlar geçer. Kondansatör üzerindeki gerilim, akım büyük olduğu için Uc=I/(ωC) görüldüğü üzere büyür. Görülüyor ki kondansatör üzerinden geçen akım da kondansatör üzerinde büyük gerilim oluşturur. Gerilim yükselmesinden dolayı buna

gerilim rezonansı da denir. Şekil 1.38'de rezonans frekansında empedans ve akımın grafiği görülmektedir.



Şekil 1.38. Rezonans frekansında empedans ve akım grafiği (I_0 = Max.) & (Z_0 = Min.)

Kondansatör veya buna paralel bağlı olan transformatörler veya asenkron motorlar veya DC motorlar bu rezonans akımlarından dolayı çok yüklenirler. Yüksek harmonik açısından incelendiğinde, kondansatör hem tüketici ve hem de şebeke reaktansına paralel bağlıdırlar. Kuvvetli akım tesislerinde, temel harmonikte rezonans çok nadiren görülür. $\omega_{öz} = 2.\pi.f_n = 150 \approx 750$ Hz arasındadır. Bu da 3. ~ 15. harmonikler mertebesindedir.

Ayrıca denklem (37)'deki gibi rezonans anında kondansatör üzerinde de büyük gerilim oluşturur. Şekil 1.36'daki seri RLC devresinde rezonans halinde harmonik mertebesi paralel rezonans devresindeki gibi denklem (1.39)'daki formül ile hesaplanır.

$$n = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \tag{1.39}$$

Şekil 1.37'deki devre elemanlarının durumu ve rezonans halinde endüktans ve kondansatörün reaktansları çarpımı denklem (1.40)'da görülmektedir. Buradan rezonanstaki endüktans ve kondansatöre ait reaktans X_r hesaplanmıştır. Harmonik frekansları nedeniyle deri etkisi sonucu direnç artış değeri olan R_0 eşitliklerde ihmal

edilmiştir. Dolayısıyla harmonikli direç değeri R ile temel bileşen direnç değeri R_1 birbirine eşittir. X_C ve X_L temel bileşen için kapasitif ve endüktif reaktans değerleridir.

$$\left.\begin{aligned} R &= R_0 + R_1 \\ X_{Cn} &= \frac{X_C}{n} \\ X_{Ln} &= n.X_L \\ X_r^2 &= \frac{X_C}{n} nX_L = X_C X_L = \frac{L}{C} \\ X_r &= \sqrt{\frac{L}{C}} \end{aligned}\right\} \qquad (1.40)$$

Devrenin çıktısı bant genişliği (Bw) ile ölçülür. Bant genişliği yarı güç frekanslarının farkına eşittir. Rezonansın seçiciliği veya kalitesi, kalite faktörü (quality factor) ile ölçülür. Kalite faktörü (Q_S) rezonans frekansının bant genişliğine oranı olarak tarif edilir. Bant genişliği azaldıkça, Q_S artar.

Seri rezonans esnasında devre sadece dirençten meydana gelmekte ve empedansı Z=R'dir. Buradan sonuç olarak Q kalite faktörü denklem (1.41)'deki gibi olur.

$$\left.\begin{aligned} Bw &= f_2 - f_1 = \frac{\omega_2}{2.\pi} - \frac{\omega_1}{2.\pi} = \frac{R_L}{2.\pi.L} = \frac{f_S}{\omega_S}\frac{\omega_S}{Q_S} = \frac{f_S}{Q_S} \\ \omega_S &= \sqrt{\omega_1\omega_2} \Rightarrow f_S = \frac{\omega_S}{2\pi} \\ Q_S &= \frac{f_S}{f_2 - f_1} = \frac{\omega_S.L}{R_L} = \frac{1}{\omega_S C R_L} = \frac{X_r}{R_L} \end{aligned}\right\} \qquad (1.41)$$

Burada;

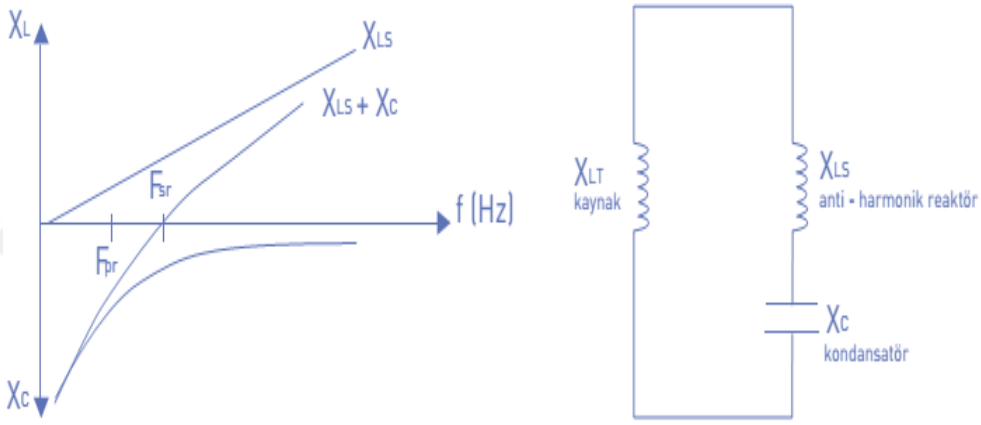
Q_S: Kalite föktörü (Q),

X_r: Rezonanstaki endüktans ve kondansatöre ait reaktans değeri,

Bw: Bant genişliği,

f_S: Seri rezonans frekansı.

Seri rezonans frekansının altındaki frekans noktalarında kondansatör ve reaktör seri devresi kapasitif etki gösterir ve kompanzasyonu sağlar. Seri rezonans frekansının üstündeki frekans noktalarında reaktör ve kondansatör seri devresi endüktans etkisi göstererek 3. 5. 7. … harmonik frekanslarında paralel rezonans riskini ortadan kaldırır. Şekil 1.39'da ise seri ve paralel rezonans frekansları görülmektedir.



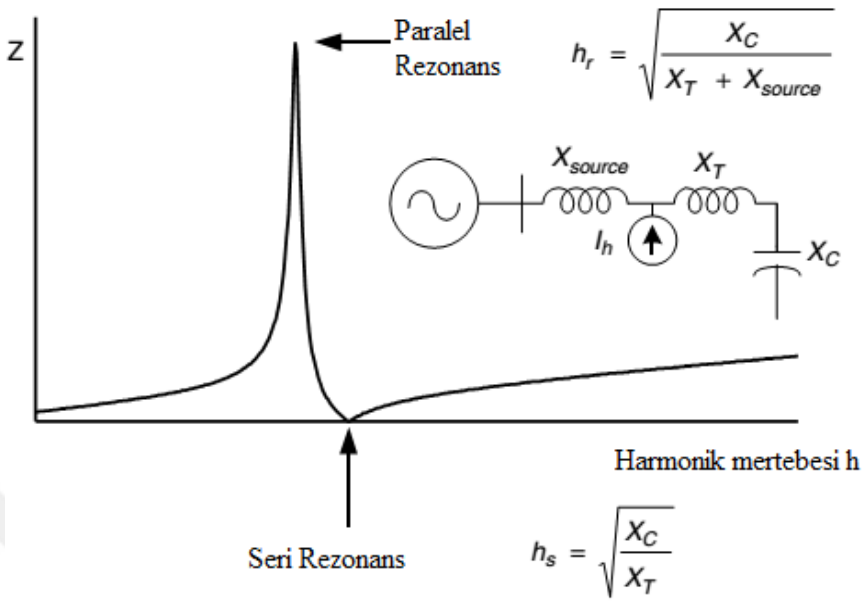
Şekil 1.39. Seri ve paralel rezonans frekansları (Aktif mühendislik)

Burada;

F_{pr}: Harmonik filtre reaktörleri, kondansatörler ve trafo empedanslarının meydana getirdiği paralel rezonans frekansı.

F_{sr}: Kondansatör ve harmonik filtre reaktörleri arasında oluşan seri rezonans frekansı.

Şekil 1.40'da ise seri ve paralel rezonansta bir devrenin frekans cevabı görülmektedir.



Şekil 1.40. Seri ve paralel rezonansta bir devrenin frekans cevabı (Dugan ve ark., 2004).

1.9. Sistemdeki Harmoniklerin Belirlenmesi

Harmoniklerin belirlenmesinde aşağıdaki ölçüm ve bulgular yardımcı olabimesi açısından önemlidir.

- En iyi metot arızalara ihtimal vermeden sistemde harmonik ölçümü yapılması,
- Çok sık kondansatör ve ilgili ekipmanlar değiştirmek zorunda kalınıyorsa,
- Besleme şalterleri rezonans olayları ile belirsiz zamanlarda açma yaparak işletmeyi durduruyor ise,
- Ölçüm cihazları hatalı ölçüm yapıyorsa,
- Nötr kablosu çok yükleniyor ve ısınıyorsa,
- Senkron ve asenkron motorlarda moment salınımları ve aşırı ısınmalar meydana geliyorsa,
- Uzaktan kumanda, yük kontrolü v.b. yerlerde çalışma bozuklukları varsa, izolasyon malzemelerinde delinme oluyorsa,
- Sesli ve görüntülü iletişim araçlarında parazit ve anormal çalışma varsa,

- Ateşleme devrelerinde anormal çalışma varsa,
- Kompanzasyon sigortalarında atmalar oluyorsa,
- Elektrik cihazlarının ömürlerinde kısalma varsa, sistemdeki harmoniklerin varlığını göstermektedir (Eroğlu, 2009).

1.10. Harmoniklerin Kontrolü

Sistem üzerine olumsuz etkisi görülen harmoniklerin azaltılması veya zararsız hale getirilmesi için bazı önlemler alınabilir:

- Zararlı genliğe sahip harmonik mertebeleri kesinlikle filtreler vasıtasıyla süzülmelidir.
- Elektrik enerjisinin üretimi sırasında harmonik gerilimi üretimine sebebiyet vermemek için gerekli önlemler alınmalıdır (jeneratör kutup tasarımının uygun yapılması gibi).
- Harmonik akımları üreten transformatör gibi elemanların demir çekirdek kesitlerinin yeterli büyüklükte seçilerek manyetik devresinde doyma meydana gelmesine engel olunmalıdır.
- Transformatörlerde uygun bağlantı şekilleri kullanılarak en çok zararlı etkisi görülen 3., 5. ve 7. harmonikler sisteme verilmeyebilir.
- Harmonik akımları talep eden çeviricilerin darbe sayıları arttırılarak (mesela 6 yerine 12, 30 gibi) bu olumsuz etkileri kısıtlanabilir.
- Harmonik değerlerine kısıtlamalar getirilmelidir. Belirli değerlerin üzerine çıkan harmonikli yüklerin kullanılmasına izin verilmemelidir.
- En çok harmonikli akım çeken alıcıların bulunduğu sanayi kesiminde yılın belirli zamanlarında periyodik olarak yapılacak harmonik ölçümlerle kontroller yapılmalıdır. İstenilen değerlerin dışına çıkan alıcılara müsaade edilmemelidir.

- Elektrik dağıtım şirketi tarafından sistemden harmonikli akım talep eden alıcılara özel fiyat uygulaması getirilmelidir. Böylelikle alıcılar harmonikleri önleyici tedbirleri almaya zorlanacaktır.
- Harmonikli devrelerde kullanılacak trafoların bağlantı grupları: Dyn 11 yerine Dyn 5 kullanılmasında yarar vardır. Çünkü, Dyn 11 trafonun OG girişi ile AG çıkışında 330° Dyn 5 trafonun OG girişi ile AG çıkışında 150° faz farkı vardır. Bu da harmoniklerin absorbe edilmesinde büyük önem taşır.
- Zikzag veya Dyn5 bağlantı grubu tranformatörlerin kullanılması.

Trafonun bağlantı tipine bağlı olarak harmonikler ortadan kaldırılır. Bunlar,

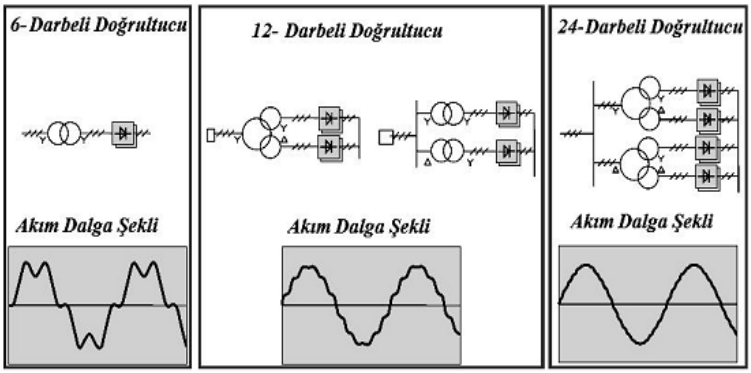
- Üçgen-yıldız-üçgen bağlantı, 5. ve 7. harmonikleri ortadan kaldırır.
- Üçgen-yıldız bağlantı 3. harmoniği ortadan kaldırır.
- Üçgen-zikzak bağlantı 3. harmoniği ortadan kaldırır (Schneider Electric-Harmonic Detection and Filtering).

1.10.1. Tasarım aşamasında alınabilecek önlemler

Kurulumu tasarım aşamasındaki elektrik tesisleri, kurulmadan önce sistemin daha az harmoniklerle çalışması için, kurulumunda kullanılacak olan malzemelerin seçiminde harmonikler göz önünde bulundurulmalıdır.

Jeneratörlerde alınabilecek tedbirler; senkron jeneratörlerde endüklenen elektromotor kuvvetini belirleyen faktör hava aralığındaki manyetik alanın şeklidir. Manyetik alanın şekli sinüsoidal ise endüklenen elektromotor kuvveti de sinüsoidal şekilde olacaktır (Eroğlu, 2009).

Şekil 1.41'de doğrultucuların çeşidine göre harmonik distorsiyonun değeri, Şekil 1.42'de doğrultucuların türleri ve harmonikli dalga şekilleri ve Şekil 1.43'de ise doğrultucuların darbe sayısına göre harmonik spektrumunun değişimi görülmektedir.

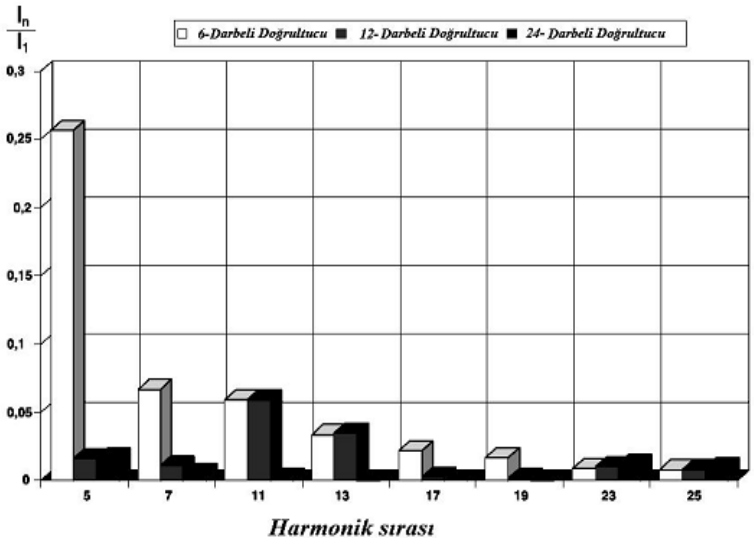


Şekil 1.41. Doğrultucuların çeşidine göre harmonik distorsiyonun değeri (Eroğlu, 2009)

Kaynak Tipi	Akım THD(%)	Gerilim THD(%) RSC=20	Gerilim THD(%) RSC=100	Akım Dalga Şekli
6- Darbeli Doğrultucu	30	10	2	
12-Darbeli Doğrultucu	10	6	1.2	
IGBT Kaynak Birimi	4	8	1.8	

Bozulma RMS Değerinin % Değerindedir.

Şekil 1.42. Doğrultucuların türleri ve harmonikli dalga şekilleri (Eroğlu, 2009)



Şekil 1.43. Doğrultucuların darbe sayısına göre harmonik spektrumunun değişimi (Eroğlu, 2009)

Dönüştürücülerde alınabilecek tedbirler; darbe sayısı p olan bir doğrultucuda, harmonik mertebesi n=k.p±1 formülü ile bulunur. Bu formülde k=1, 2, 3…gibi tam sayılardır. Küçük dereceli harmoniklerin giderilmesi darbe sayısının artırılması ile mümkündür. Dönüştürücülerde n=5, 7, 11, 13 olduğu için, harmonik akımlar $I_5 = I_1/5$ ve $I_7 = I_1/7$ gibi değerler almaktadır. Bundan dolayı harmonik mertebelerinin küçük olması için darbe sayısının büyük olması gerekmektedir.

Transformatörlerde alınabilecek tedbirler; demir çekirdekten en büyük yarar sağlamak için büyük transformatörlerde magnetik endüksiyon değerinin büyük tutulması ile olur. Endüksiyon değeri büyük olduğunda doyuma ulaşacağından dolayı mıknatıslanma akımında harmonikli bileşenler artar. Manyetik endüksiyonu düşük tutarak mıknatıslanma akımının harmonik bileşenlerini azaltmak için alınabilecek en iyi tedbirdir (Adak, 2003).

1.10.2. Harmoniklerin azaltılması için kullanılan cihazlar

Harmoniklerin azaltılması için birden çok cihaz kullanılmaktadır. Bunlar; hat reaktörleri ve tıkaçları, harmoniklerin azaltılması için basit fakat genelde başarılı bir yöntemdir. ASD (Motor hız kontrol düzenleri uygulamalarında hat girişi tarafına bağlanır.

Genellikle PWM (Pulse Width Modulation-Darbe genişlik modülasyonu) tipi sürücülerde sonuç vericidir. Daha düşük genlikli ve daha düşük harmonik bileşenli akım elde edilmesini aynı enerji ile sağlar.

Zigzag transformatörleri, sıfır sequens harmonik bileşenlerin elimine edilmesi için genelde ticari binalarda kullanılırlar. Zigzag transformatörleri nötr üzerinden akması için sıfır sequens bileşen akımlarının düşük bir empedans değeri göstermesiyle harmonik filtre etkisi yapmaktadır (Eroğlu, 2009).

Zigzag transformatörleri üçüncü harmoniklerin bulunduğu, nötr hattında ısınmaların olduğu ve transformatörlerin yıldız noktalarında problemlerin olduğu yerlerde kullanılır (Dugan ve ark. 2004).

12 fazlı doğrultucu kullanmada, 5 ve 7 gibi düşük mertebedeki harmonik akımlar birleştirilerek şebeke vasıtasıyla ortadan kaldırılmaktadır. Bu çözüm iki sekonder sarım (yıldız ve üçgen) ile bir trafo gerektirmektedir ve sadece 12k±1 sayılı harmonikleri üretmektedir. Harmonik filtreler kullanılarak harmoniklerin etkileri azaltılabilir. Devreye yerleştirilen ve harmoniklerin süzülmesini sağlayan devrelere "Harmonik filtresi" adı verilir.

Harmonik filtrelerin amacı bir ya da daha fazla frekanstaki akımların etkisini yani harmonik içeriğini azaltmak veya yok etmektir. Akım harmoniği etkisi azalırsa, gerilim harmoniği de azalacaktır. Burada uygulanacak sınır IEEE tarafından belirlenmiştir. Sistemdeki toplam gerilim tekil harmonik değerin %3 ve toplam akım harmoniğinin %5 değerini geçmemesi istenir.

1.11. Harmonik Filtreleri

Nonsinüsoidal yüklerin artmasıyla problem kaynağı olmaya başlayan akımlardaki harmonikli bileşenler, değişik yöntemlerle süzülerek elimine edilmekte ve standartlarda olması istenilen seviyelere çekilmektedir.

Harmonik akımlarının şebekeye geçmesinin engellenmesi gerekmektedir, bunun için ek devrelere ihtiyaç vardır. Devreye yerleştirilen ve istenen harmonik akımının süzülerek elimine edilmesini gerçekleştiren bu devrelere harmonik filtre adı verilir (Kocatepe ve ark., 2003).

Harmonik akımlarının süzülmesi ya da azaltılması sayesinde; gerilimin sinüsoidal dalga şeklindeki bozulmaların düzelmesi, güç faktöründe iyileşme, enerji verimliliği, trafo

ve kablolardaki gerilim düşümü ve ısıl kayıplarda azalma, kompanzasyon ve sisteme bağlı diğer yüklerde arızaların azalması gibi kazançlar sağlamaktadır. Harmonik filtreler, istenen frekanstaki akım ve gerilim değerlerinin, güç sistemi üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmakta ya da yok etmektedir. Pasif, aktif, ve hibrid harmonik filtreler olmak üzere çeşitleri vardır.

Aktif harmonik filtreler, negatif harmonikleri ağa sokarak istenmeyen harmonikleri ortadan kaldıran elektronik cihazlardır. Aktif filtreler normal olarak alçak gerilim şebekeleri için mevcuttur. Aktif filtreler, IGBT-transistörler gibi aktif bileşenlerden oluşur ve birçok farklı harmonik frekansı ortadan kaldırır. Sinyal türleri, tek fazlı AC, üç fazlı AC olabilir.

Öte yandan, pasif harmonik filtreler, dirençler, indüktörler ve kapasitörler gibi pasif bileşenlerden oluşur. Yalnızca düşük voltajlar için kullanılan aktif filtrelerin aksine, pasif filtreler yaygın olarak kullanılır ve farklı voltaj seviyeleri için mevcuttur.

Doğrusal olmayan yükler ağırlıklı olduğunda ve harmoniklerin filtrelenmesi gerektiğinde kullanılır. Tesisteki ölçümler ve şebekenin bilgisayar simülasyonlarına dayanarak genelde özel bir tasarım yapmak gerekir. Harmonikler, doğrusal olmayan yüklerden kaynaklandığı için harmoniklerin şiddetinin bir göstergesi, doğrusal olmayan yüklerin toplam gücünün, besleme transformatörünün nominal gücüne oranıdır. Bu oran, N_{LL} olarak adlandırılır ve ayrıca denklem (1.42)'deki gibi bilinir. Besleme transformatörü değeri (Schneider Electric-AG kompanzasyon panosu tasarım ve üretim klavuzu).

$$N_{LL} = \frac{G_h}{S_n} \tag{1.42}$$

Burada;

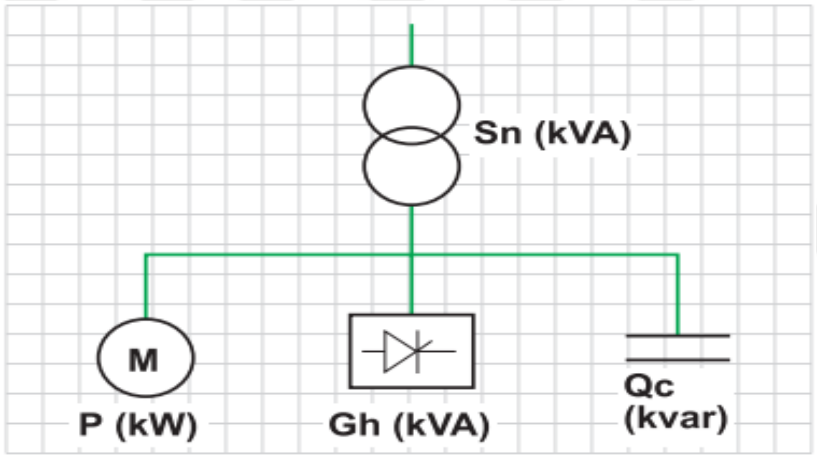
G_h: Doğrusal olmayan yüklerin toplam gücü,

S_n: Yüklü transformatör değeridir.

Besleme transformatörü değeri S_n=630 kVA, doğrusal olmayan yüklerin toplam gücü: G_h = 150 kVA'dır. N_{LL} değerini hesaplayacak olursak;

N_{LL}= (150/630) x 100 = %24'dür.

Şekil 1.44'de doğrusal olmayan yüklerin toplam gücü ile yüklü bir transformatör görülmektedir. Harmoniklere karşı en etkili çözüm aşağıdaki parametreler göz önünde bulundurularak yapılır.



Şekil 1.44. Doğrusal olmayan yüklerin toplam gücü ile yüklü bir transformatör (Schneider Electric-AG kompanzasyon panosu tasarım ve üretim klavuzu)

- G_h harmonik kaynaklarının nominal güçlerinin toplamı (kVA), eğer bu cihazların nominal güçleri kW ise güç faktörü 0.7 kabul edilerek güçler kVA ya çevrilecektir.
- S_{sc} reaktif güç kompanzasyon gruplarının bağlantı terminallerindeki kVA olarak kısa devre gücünü ifade etmektedir.
- S_n (S_{Tr}) devreye bağlı olan transformatorların nominal güçlerinin toplamı (kVA).

Kompanzasyon tesislerinde yük ve yükün bağlandığı yerdeki kısa devre gücü esas alınarak harmonik etkilerinin belirlenmesi ve harmonıklere karşı alınabilecek pratik tedbirler Çizelge 1.6'da verilmiştir.

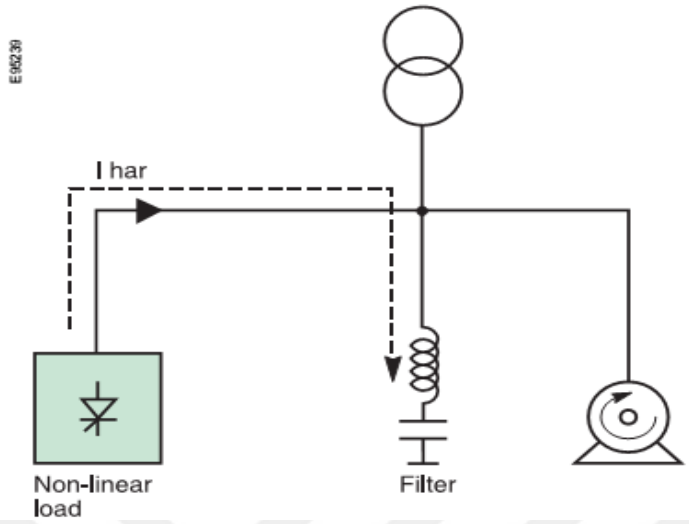
Çizelge 1.6. Kompanzasyon tesislerinde yük ve yükün bağlandığı yerdeki kısa devre gücü esas alınarak harmonik etkilerinin belirlenmesi ve alınabilecek pratik tedbirler

<table>
<tr><td colspan="4">Transformatör veya transformatörler üzerinden beslenen kompanzasyon grupları
Herhangi bir güçte transformatör için geçerli genel kural</td></tr>
<tr><td>$G_h \le \frac{S_{SC}}{120}$</td><td>$\frac{S_{SC}}{120} < G_h \le \frac{S_{SC}}{70}$</td><td colspan="2">$G_h > \frac{S_{SC}}{70}$</td></tr>
<tr><td>Standart kondansatör</td><td>Kondansatör gerilim değeri %10 arttırılır (230 V üniteler hariç)</td><td colspan="2">Kondansatör gerilim değeri %10 arttırılır ve harmonik bastırıcılı bobin kullanılır</td></tr>
<tr><td colspan="4">$S_n \le 2MVA$ değerdeki transformatörler için basitleştirilmiş kurallar</td></tr>
<tr><td>$\frac{G_h}{S_n} \le 0.15$</td><td>$0.15 < \frac{G_h}{S_n} \le 0.25$</td><td>$0.25 < \frac{G_h}{S_n} \le 0.60$</td><td>$\frac{G_h}{S_n} > 0.60$</td></tr>
<tr><td>Standard kondansatör (standart tip yani 400V' luk kondansatörler kullanılır)</td><td>Kondansatör gerilim değeri %10 arttırılır (230V üniteler hariç)</td><td>Kondansatör gerilim değeri %10 arttırılır ve harmonik bastırıcı bobin (reaktör) kullanılır</td><td>Filtreler</td></tr>
</table>

1.11.1. Pasif harmonik filtreleri

Pasif filtreler, kaynak ile yük arasına yerleştirilen ve temel frekans dışındaki harmonik bileşenleri yok eden omik direnç (R), endüktans (L) ve kondansatör (C) gibi pasif devre elemanlarından oluşmuş filtrelerdir. Amaç, yok edilmek ya da süzülmek istenen harmonik bileşen frekansında, rezonansa gelecek L ve C değerlerini belirlemektir. Her bir harmonik için onu rezonansa getirecek ayrı bir filtre uygulanması gerekir (Kocatepe ve ark., 2003).

Filtreleme gerektiren harmonik frekansların her birine ayarlı bir LC devresi, harmonik bozulmaya neden cihaza paralel bağlanır (Şekil 1.45). Bu devre harmonikleri çeker. Böylece güç kaynağına harmonik akışını önler.



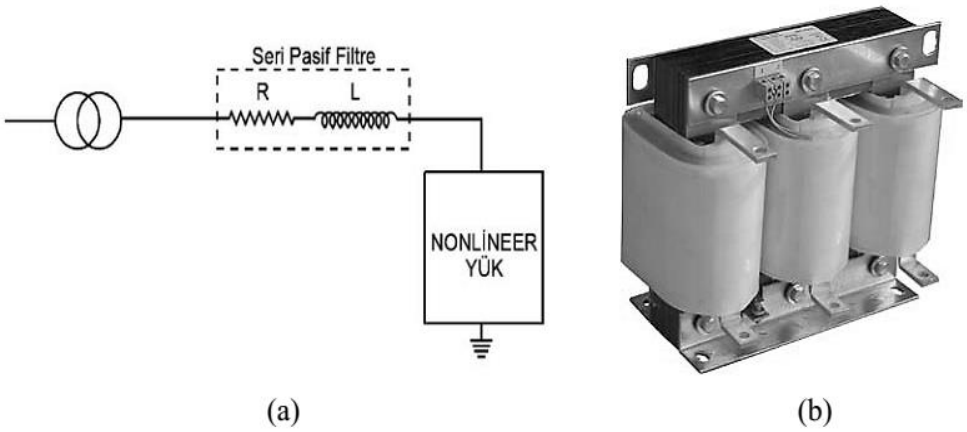
Şekil 1.45. Pasif filtrenin çalışma prensibi (Schneider Electric-Harmonic Detection and Filtering)

Pasif filtreler, kendi arasında seri pasif filtreler ve paralel (şönt) pasif filtreler olmak üzere iki çeşittir. Reaktif güç kompanzasyon sistemine seri endüktans (harmonik filtre reakörü) bağlayarak da kullanılmaktadır (Tunçalp ve Sucu, 2006).

1.11.1.1. Seri pasif filtreler

Seri filtreler harmonik üreten yük ile kaynak arasına seri olarak bağlanan endüktans (L)'den oluşur. Seri bağlanan empedans harmoniklere empedans göstererek geçişlerini engeller. Ana frekansta ise düşük empedans gösterirler. Örnek bir seri filtre uygulaması Şekil 1.46'da gösterilmiştir.

Seri filtreler uygulamada, AC motor sürücü devrelerinin ve yüksek güçlü AC/DC inverterlerin girişine bağlanırlar. Seri filtrelerin uygulanmasındaki zorluklara değinecek olursak; tüm yük akımının filtre üzerinden geçmesinin yanı sıra tam hat gerilimleri için yalıtım zorunluluğu ve hatta gerilim düşümüne neden olması şeklinde sıralanabilir (Tunçalp ve Sucu, 2006).



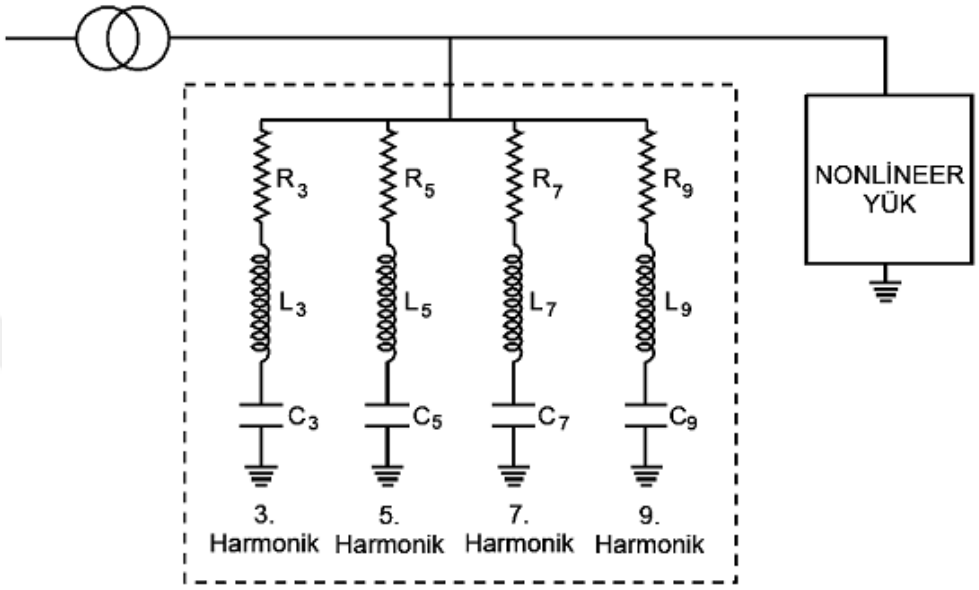
Şekil 1.46. (a) Seri pasif filtre prensip şeması, (b) Örnek seri pasif filtre (Uzan, 2013)

1.11.1.2. Paralel (şönt) pasif filtreler

Paralel (şönt) pasif filtreler, şebekeyle harmonikli yük arasına endüktans (L), kondansatör (C) ve bazen de direnç (R) elemanlarının paralel olarak bağlanmasından meydana gelen devrelerdir. Paralel pasif filtrelerin görevi, yok edilmek istenen harmonik frekansın rezonans şartını sağlayacak L ve C değerlerini hesaplayarak oluşturulan bu devreyi sisteme bağlamaktır. Tasarlanan filtrenin karakteristiği kalite faktörü (Q) adı verilen bir katsayı ile tanımlanır.

Her bir harmonik frekansı için ayrı ayrı rezonans kolları oluşturularak bu kollar sisteme bağlanmalıdır. Bu işlem harmonik mertebesinin genlik değeri yüksek olanlara yapılmalıdır. Her harmonik bileşeni için ayrı ayrı rezonans kolu oluşturmak sağlıklı bir çözüm olmayacağından, sadece harmonik mertebesinin genlik değeri yüksek olanlar için rezonans kolu oluşturulur. Harmonik mertebesinin Genlik değeri standartların altında olan için ise tek bir rezonans kolu oluşturmak yeterli olacaktır. Şönt pasif filtrelerin kullanılmasının, güç sistemiyle paralel rezonansa girmesi en büyük olumsuz yönlerindendir. Bu nedenle güç sistemine paralel pasif filtre yapılmadan önce sistemin ayrıntılı bir analizinin yapılmasında fayda vardır. Dört farklı paralel pasif filtre çeşidi vardır. Bunlar tek ayarlı (bant geçiren) filtreler, çift ayarlı filtreler, otomatik ayarlı filtreler ve yüksek geçiren sönümlü filtrelerdir. (Tunçalp ve Sucu, 2006).

Paralel pasif filtreye örnek olacak devre (tek ayarlı paralel pasif filtre) Şekil 1.47'de görülmektedir.



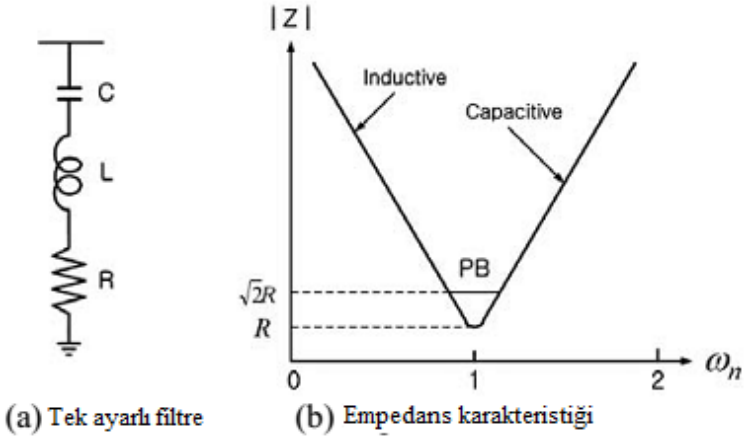
Şekil 1.47. Pasif filtre için bir örnek (tek ayarlı paralel pasif filtre) (Sucu, 2003)

1.11.1.2.1. Tek ayarlı (bant geçiren) filtreler

Tek ayarlı (bant geçiren) filtreler, tek bir frekanstaki harmonik akımı için kısa devre yol oluşturarak bu akımın hattan saptırılmasını sağlar. Tek ayarlı filtreler seri R-L-C devresinden meydana gelir. Tek ayarlı filtre örneği ve empedans karaktesitiği Şekil 1.48'de görülmektedir.

İdeal tek ayarlı filtre indüktif ve kapasitif reaktansı eşit yapan frekansa ayarlı olduğu söylenebilir. Filtrenin kalite faktörü (Q) ayar keskinliğini belirler ve bu konuda filtreler yüksek veya düşük Q tipi şeklinde olabilir. Düşük Q filtreleri düşük harmonik frekansın birine keskin olarak ayarlanmış ve 30 ve 60 arasında bir değerdedir. Ayrıca, yüksek dereceden harmonikleri ortadan kaldırmak için kullanılırken bir yüksek geçiş filtresi olarak adlandırılır. Ayarlanmış bir filtre olması durumunda, kalite faktörü Q rezonans

frekansında endüktansın dirence (ya da kapasitansa) oranı olarak tanımlanır Cho ve Cha, 2011).



Şekil 1.48. Tek ayarlı paralel pasif filtre ve frekansa bağlı olarak empedans karakteristiği (Cho ve Cha, 2011)

Tek ayarlı filtrenin, temel frekansta ve ayarlandğı harmonik frekans dışındaki harmonik frekanslarındaki filtre empedansı denklem (1.43)'de, kalite faktörü ise denklem (1.44)'deki gibidir.

$$Z = R + j(X_L - X_C) = R + j\left[2\pi f_n L - \frac{1}{2\pi f_n C}\right] \quad (1.43)$$

$$Q = n\frac{X_L}{R} \quad (1.44)$$

Burada;

Z: Temel frekansta ve ayarlandığı harmonik frekans dışındaki harmonik frekanslarında tek ayarlı filtrenin empedans değeri (Ω),

R: Tek ayarlı filtredeki endüktans ve kapasitansın iç direnç değeri (Ω),

Q: Kalite faktörü değeri,

X_L: Tek ayarlı filtrenin endüktif reaktans değeri (Ω),

X_C: Tek ayarlı filtrenin kapasitif reaktans değeri (Ω),

f_n: n. harmonikdeki frekans değeri (Hz),

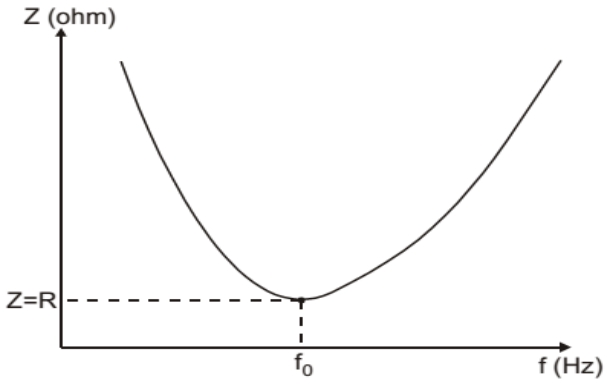
L: Tek ayarlı filtrenin endüktans değeri (H),

C: Tek ayarlı filtrenin kapasitans değeri (F),

Z_0: Tek ayarlı filtrenin istenen harmonikte rezonansa gelmesi sonucu oluşan empedans değeri (Ω),

f_0: Tek ayarlı filtrenin ayarlandığı harmonik frekans yani rezonans frekans değeri (Hz).

Filtrenin çalışma prensibi, istenen harmonik frekansında filtrenin rezonansa gelerek $X_L = X_C$ şartının sağlanmasıdır. Bu yüzden filtre empedansı $Z_0 = R$ olur. Yani filtre ayarlanan frekans için minimum empedans değerini gösterir ve ayarlanan frekanstaki harmonik toprağa akar. Tek ayarlı filtrenin empedans-frekans arasındaki ilişki Şekil 1.49'da görülmektedir.



Şekil 1.49. Tek ayarlı paralel pasif filtre için frekans-empedans ilişkisi (Sucu, 2003)

Tek ayarlı filtre seri rezonans ilkesine göre çalıştığından dolayı bu filtrelerde $X_L = X_C$ şartı aranmaktadır. X_L ve X_C değerleri sisteme uygun seçilmelidir.

Tek ayarlı filtrelerin pozitif yanları:

- İstenerek eklenmiş bir direnç mevcut değilse kayıplar oldukça azdır.
- Ayarlanan harmonik frekansında harmonik akımına karşı sıfıra yakın bir empedans gösterir.
- Filtre edilecek birden fazla harmonik akım varsa, birden fazla filtre paralel kullanılabilir (Sucu, 2003).

Tek ayarlı filtrelerin negatif yanları ise:

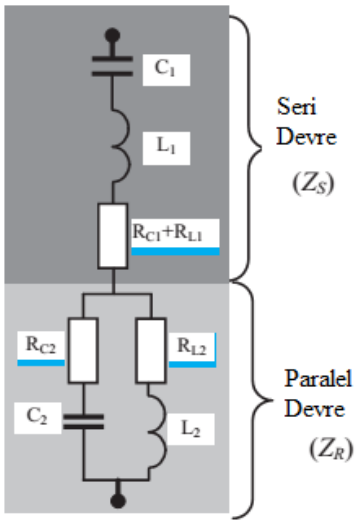
- Filtreyi meydana getiren eleman değerlerinde zamanla oluşan değişimlere karşı oldukça duyarlı olmasıdır. Bu durum direnç ve kondansatör değerlerinde yapılan değişiklik ile halledilebilir.
- Tek ayarlı filtreler yalnızca gücü sabit nonlineer yükün olduğu sistemlerde kullanılabilir. Bunun nedeni, üzerlerindeki kapasite değerleri sabit olduğundan sistemdeki endüktif yükler kalktığında kondansatörler devrede kalmaya devam edeceğinden dolayı aşırı kompanzasyona neden olabilmekte veya nonlineer yüklerin bir kısmı devreden çıktığında, örneğin sistemdeki 7. harmoniği oluşturan yük devreden çıktığında 7. harmoniği süzen tek ayarlı filtre kolu sistemde bulunacağından bu kol enerji kaybına yol açacaktır. Bu nedenle bu tür filtreler sabit nonlineer yüklerin olduğu sistemlerde kullanılmalıdır. Sabit yükler devreden çıktğında tek ayarlı filtrelerde devreden çıkarılmalıdır (Sucu, 2003).

1.11.1.2.2. Çift ayarlı filtreler

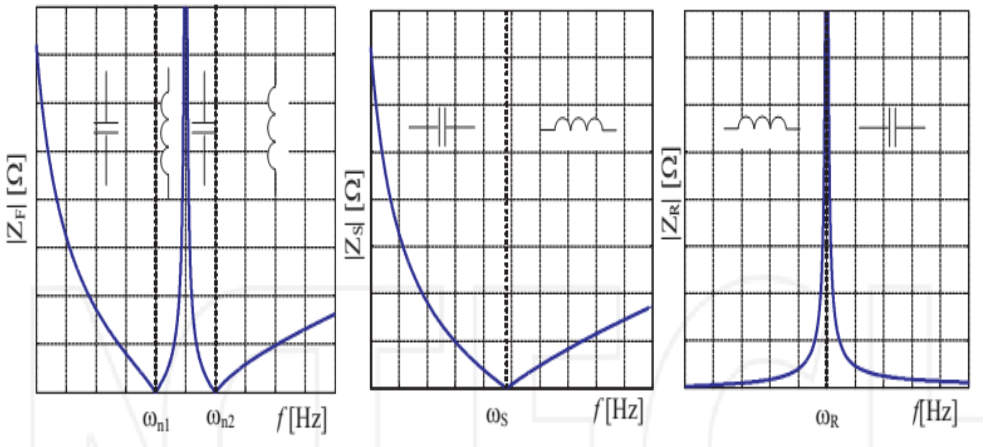
İki ayrı frekansa ayarlanmış olan ve ayarlandıkları bu frekanslarda küçük değerde empedans göstererek, bahsi geçen iki frekanstaki harmoniklerin süzülmesini sağlarlar. İki tane tek ayarlı filtreden oluştuğu için çift ayarlı filtrenin iki farklı rezonans frekansı vardır. Teorik olarak, üç yada dört ayarlı filtreler yapılabilir fakat bunların ayarında karşılaşılan zorluklardan (3 adet tek ayarlı filtrede 3 tene rezonans frekansı olur) dolayı kullanılamazlar. Çift ayarlı filtrelerin en öne çıkan özelliği temel frekansta güç kaybının

oldukça az olmasıdır. Ayrıca endüktans sayılarının ayarlanmasıyla darbe gerilimlerine karşıda kontrol sağlarlar (Uzan, 2013).

Çift ayarlı filtre ve onun temel frekans özellikleri; seri bölümü, paralel bir parçası ve tüm filtrenin temel yapılandırma ve frekans karakteristikleri Şekil 1.50 ve Şekil 1.51'de gösterilmiştir (Klempka ve ark., 2013)



Şekil 1.50. Çift ayarlı paralel pasif filtre şeması (Klempka ve ark., 2013)



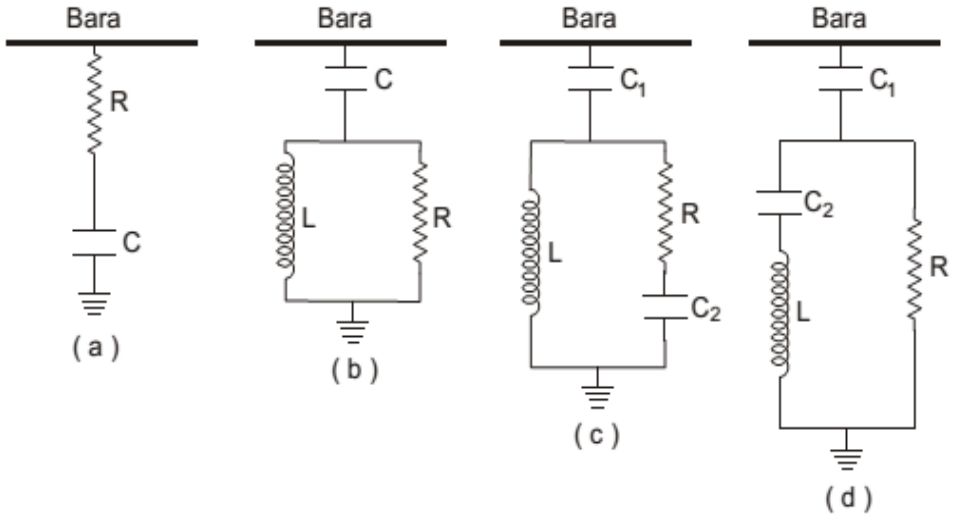
Şekil 1.51. Çift ayarlı filtre impendence -frekans karakteristik eğrisi (çift ayarlı filtrenin ω_{n1} ve ω_{n2} açısal frekansları - Seri kısmın ω_S açısal rezonans frekansı - Paralel kısmın ω_R açısal rezonans frekansı) (Klempka ve ark., 2013)

1.11.1.2.3. Otomatik ayarlı filtreler

Kullanılan filtre elemanlarının kapasitesi ve endüktansı otomatik ayarlanabilen filtrelerdir. Bu filtreler, sistemdeki ölçülen reaktif güce göre hem sistemdeki güç faktörü düzeltmesini hem de ayarlandığı harmonik bileşene göre filtreleme sağlayarak L ve C değerlerini hesaplayan ve devreye alabilen bir kontrol sisteminden meydana gelmektedir.

1.11.1.2.4. Yüksek geçiren sönümlü filtreler

Belirli bir frekansın üzerinde küçük empedans değeri gösteren filtrelere yüksek geçiren filtre olarak adlandırılır. Yüksek geçiren filtreler tek ayarlı filtrelerle birlikte kullanılabilirler. Tek ayarlı filtreler büyük harmonik genliklerine sahip düşük harmonik frekanslarını süzer. Yüksek geçiren filtreler ise küçük harmonik genliklerine sahip yüksek harmonik frekanslarını tek bir paralel kol ile süzerler. Tasarım açısından dört farklı yüksek geçiren filtre tipi mevcuttur. Şekil 1.52'de yüksek geçiren filtre tipleri verilmiştir (Sucu, 2003) .



Şekil 1.52. Yüksek Geçiren Sönümlü Filtreler (a) Birinci Derece, (b) İkinci Derece, (c) Üçüncü Derece, (d) C Tipi

Birinci dereceden yüksek geçiren sönümlü filtreler: Bu tip filtreler yüksek kondansatör gücü gereksiniminden ve güç sisteminde çok fazla kayba neden olduğu için tercih edilmezler.

İkinci dereceden yüksek geçiren sönümlü filtre: Filtreleme performansı güzel olan bir filtre tipidir. Ancak üçüncü dereceden filtreye göre çok daha fazla temel frekans kayıplarına rastlarız.

İkinci dereceden sönümlü filtrenin empedansı denlem (1.45)'de verilmiştir.

$$Z = \frac{1}{j\omega C} + (\frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L})^{-1} \tag{1.45}$$

Filtrenin kalite faktörü (Q) 0.5 ile 5 arasında bir değer alır ve denklem (1.46)'da verilen formül ile hesaplanabilir.

$$Q = \frac{R}{\sqrt{(L/C)}} = \frac{R}{X_L} = \frac{R}{X_C} = \frac{R}{X_r} \tag{1.46}$$

Kalite faktörünün seçiminde Arrillaga tarafından verilen Ainsworth'un kullandığı eşitliklerde ikinci dereceden sönümlü filtrenin m katsayısı ve ayar frekans değeri denklem (1.47) ve denklem (1.48)'de tanımlanmıştır.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi CR} \tag{1.47}$$

$$m = \frac{L}{R^2 C} \tag{1.48}$$

Üçüncü dereceden yüksek geçiren sönümlü filtre: Bir öncekine nazaranen avantajlı yanı, C_2 kondansatörü nedeniyle temel frekansta empedansında meydana gelen artmaya rağmen kayıplarının oldukça az olmasıdır.

C tipi yüksek geçiren sönümlü filtre: Üçüncü ile ikinci dereceden filtrelerin arasında filtreleme performansı sağlamaktadır. C_a kondansatörü ile L_m endüktandı seri bağlanırsa temel frekan için kayıplarının az olması en önemli avantajıdır (Şekil 1.55). Bu tarz filtrelerde, temel frekansta meydana gelen sapmalar nedeniyle elemanların değerlerinin zamanla değişmelerine karşı oldukça hassastır. Yüksek geçiren sönümlü filtrelerin elemanları tek ayarlı filtrelerdeki gibi seçilir. Fakat, yüksek geçiren sönümlü filtrelerde bulunan direnci hesaplamak için kalite faktörünün bilinmesi gerekmektedir. Denklem (1.49)'da bu eşitlik verilmiştir.

$$Q = \frac{R}{X_L} = \frac{R}{X_C} = \frac{R}{X_n} \tag{1.49}$$

Burada;

Q: Kalite faktörüdür ve değeri 0.5 ila 5 arasındadır,

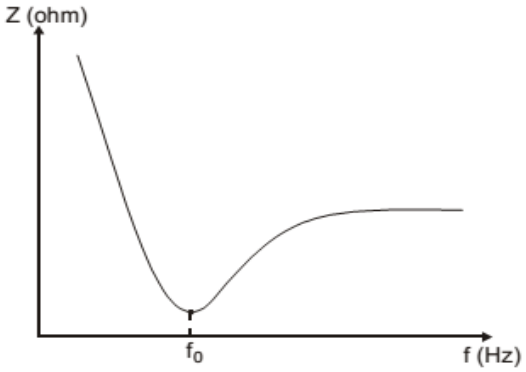
R: Yüksek geçiren sönümlü filtre içindeki direnç (Ω),

X_L: Yüksek geçiren sönümlü filtrenin ayarlandığı frekanstaki endüktif reaktans değeri (Ω),

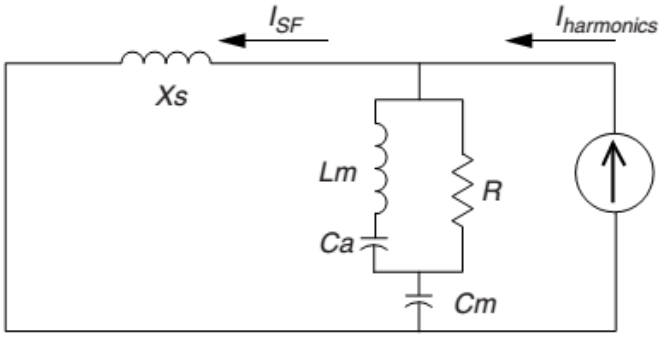
X_C: Yüksek geçiren sönümlü filtrenin ayarlandığı frekanstaki kapasitif reaktans değeri (Ω),

X_n: Yüksek geçiren sönümlü filtrenin ayarlandığı frekanstaki reaktans değeri (Ω).

Şekil 1.53'de yüksek geçiren bir filtrenin frekans-empedans ilişkisi verilmiştir. Bu filtre belirli bir frekansı aşınca düşük empedans gösterdiği için yüksek dereceki harmonikleri elimine etmektedir. Şekil 1.54'de ise c tipi yüksek geçiren sönümlü filtre verilmiştir. Devre elemanı hesaplamaları denklem (1.50), (1.51) ve (1.52)'de verilmiştir.



Şekil 1.53. Yüksek geçiren sönümlü, paralel pasif filtre için frekans empedans ilişkisi (Sucu, 2003)



Şekil 1.54. C tipi yüksek geçiren sönümlü filtre şeması (Dugan ve ark., 2004)

$$R_F = \frac{h_T X_S}{\sqrt{\frac{1}{I_{SF}(h_T)^2 - 1}}}\ \Omega \tag{1.50}$$

$$R = \frac{R_F (h_T)^2 + (\frac{X_{cm}}{h_T})^2}{R_F h_T}\ \Omega \tag{1.51}$$

$$X_{Lm} = X_{ca} = \frac{R_F (h_T)^2 + (\frac{X_{cm}}{h_T})^2}{(\frac{X_{cm}}{h_T})(\frac{h_T - 1)}{h_T}}\ \Omega \tag{1.52}$$

Burada;

X_S: Temel frekanstaki kısa devre reaktansı,

X_{Lm}: Temel frekanstaki L_m reaktansı,

X_{Ca}: Temel frekanstaki C_a reaktansı,

C_a: Yardımcı kondansatör,

R: Filtre resistansı,

h_T: Filtrenin tasarlandığı harmonik bileşen frekansı,

I_S: Sistemde izin verilen en fazla harmonik akım (h_T değerinde),

C_m: Kompanzasyon için kullanılan kondansatör,

L_m: Filtre bobinidir.

Filtrenin rezonans problemlerine yol açmaması için sisteme tesis edilen filtre ile şebeke ya da trafo empedansı dikkate alınarak, tesis edilen filtrelerin rezonans frekansları, denklem (1.53) kullanılarak hesaplanabilir.

$$h_0 = \sqrt{\frac{X_C}{X_T + X_L}} \tag{1.53}$$

Burada;

h_0: Filtre tesis edilmiş iken güç sisteminin rezonans frekansı,

X_T: Transformatörün empedansı(Ω),

X_C: Filtrenin kapasitif reaktansı(Ω),

X_L: Filtrenin endüktif reaktansıdır (Ω).

1.11.2. Aktif Filtreler

Aktif filtreler, harmonikleri ortadan kaldırmak için nispeten yeni cihazlardır. Aktif filtreler güç elektroniği temelli ve pasif filtrelerden çok daha pahalıdırlar. Bununla

birlikte, sistemle çakışmamaları ayrı bir avantaja sahiptir. Aktif filtreler, sistem empedansı özelliklerinden bağımsız olarak çalışabilir. Bu nedenle, paralel rezonans problemleri nedeniyle pasif filtrelerin başarıyla çalışamayacağı çok zor koşullarda kullanılabilirler. Aynı anda birden fazla harmonik adresi belirleyebilir ve titreşim gibi diğer güç kalitesi sorunlarıyla mücadele edebilirler. Güç sistemindeki nispeten zayıf noktalardan beslenen büyük, çarpık yükler için özellikle yararlıdır.

Aktif filrenin çalışma prensibi doğrusal olmayan bir yükte akımda eksik olan sinüs dalgasının yerini değiştirmektir. Bir elektronik kontrol, hat voltajını veya akımını izler; güç elektroniğini, yük akımını veya voltajını izlemek ve sinüsoidal olmasını sağlamak için çok hassas bir şekilde değiştirir. Sisteme uygun anında enjekte edilecek akımı depolamak için bir indüktör kullanır ve biri de bir kondansatör kullanır. Bu nedenle, yük akımı, doğrusal olmayan yükün talep ettiği düzeye kadar bozulurken, sistem tarafından görülen akım çok daha sinüsoidal olur. Aktif filtreler, güç faktörünün yanı sıra harmonikleri düzeltmek üzere tipik olarak programlanabilir.

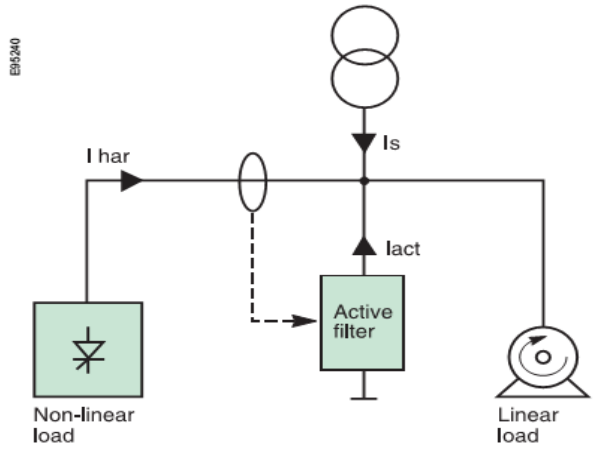
Aktif filtreye ait kontrol sistemi kapalı akım çevrimi ve açık akım çevrimi şeklinde gerçekleştirilebilir:

Kontrol sistemi açık çevrim ise, meydana gelmiş olan harmonik akımlara karşı zıt harmonik akımlar şebekeye verilir.

Kontrol sistemi kapalı çevrim ise, şebekedeki akım ölçülüp, aktif filtre ölçülen akımın en az harmonikleri barındırmasını sağlayacak bir şekilde harmonik üretir.

Aktif filtreler lineer olmayan yükler tarafından gerekli harmonik akımları sağlamak ve böylece güç sistemi üzerinde bozulmasını önlemek için seri veya non-lineer yük ile paralel kurulu güç elektroniği, istihdam sistemleridir.

Şekil 1.55'de, harmonik akımı kompanze eden aktif filtrenin bir örneği görülmektedir (I_{har}=-I_{act}).



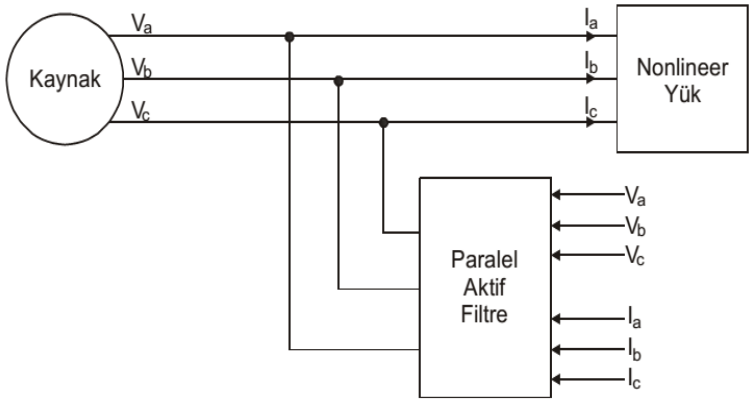
Şekil 1.55. Aktif filtre çalışma prensibi (Schneider Electric-Harmonic Detection and Filtering)

Yük tarafından çekilen harmoniklere ters fazda aktif filtre enjekte eder. Örneğin hat akımı I_S sinüsoidal olarak kalır.

Aktif güç filtreleri belirtilen olumlu özelliklerinin yanında, pasif filtrelere nazaran yüksek maliyetli olmaları, güç sistemindeki doğrusal olmayan yüklerin artması durumunda harmonikleri gidermede yetersiz kalmaları gibi olumsuz yönleri de bulunmaktadır. Güç elektroniği uygulamaları geliştikçe ve bilgisayar desteğiyle bu konu da ilerleme göstermiştir. Aktif filtreler şebekeye bağlantı şekline göre iki türdedir. Bu nedenle aktif filtreler paralel ve seri olmak üzere ikiye ayrılırlar.

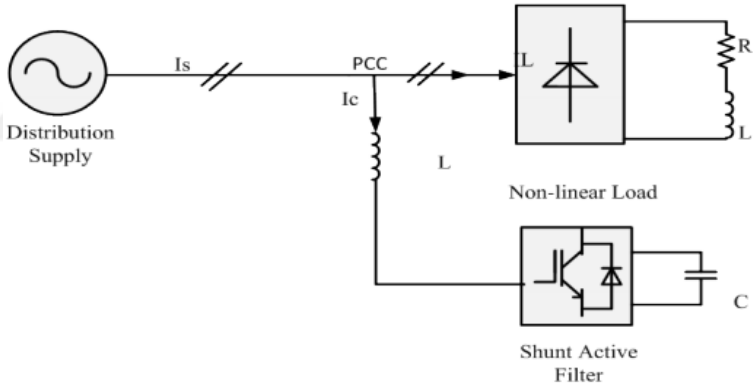
1.11.2.1. Paralel aktif filtre

Güç sisteme paralel bağlanan aktif filtreye paralel aktif filtre denir. Şönt aktif filtrenin pasif filtreleme üzerinde kesin avantajları olmasına rağmen, gerçek endüstriyel uygulamalarda kullanımı bugüne kadar sınırlı olmuştur. Bunun nedeni inverterin maliyetinin hala pasif filtreden daha yüksek olmasıdır. Paralel aktif filtrenin güç sistemine bağlantı prensip şeması Şekil 1.56'de gösterilmektedir (Sucu, 2003).

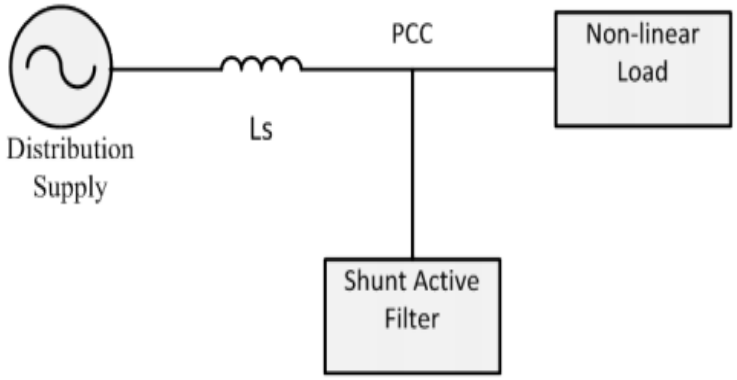


Şekil 1.56. Paralel aktif filtrenin prensip şeması (Sucu, 2003)

Şekil 1.57 ve Şekil 1.58 paralel aktif filtre tasarımı ve sistem yapılandırmasını göstermektedir.



Şekil 1.57. Tek başına paralel aktif filtre (Shahbaz, 2012)



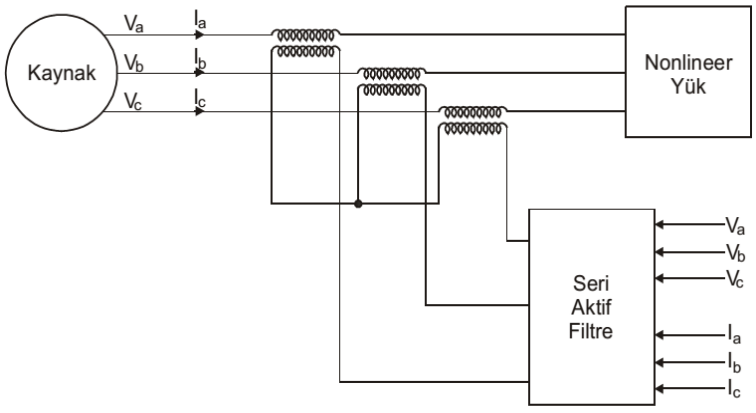
Şekil 1.58. Paralel aktif filtre ağ yapılandırması (Shahbaz, 2012)

1.11.2.2. Seri aktif filtre

Harmonik içeriğin üretilmesi doğrusal olmayan bileşenlerin çalışmasının özünde yer aldığı için, akışının sağlanması için bir yol sağlanmalıdır. Dolayısıyla, seri bağlı filtrelerin izolasyonda kullanımı normalde uygulanabilir değildir ve bir takım pasif filtreleme ile kombine edilmelidir. İkincisi, doğrusal olmayan harmonik kaynak tarafından üretilen akım harmoniklerini absorbe ederken, aktif filtreler harmoniklerin her iki yönde de aktarımını engeller.

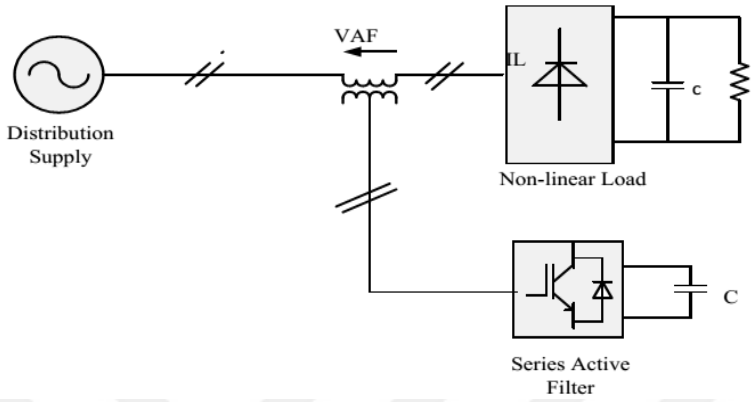
Bu kombinasyon pasif filtreleri ac sistem empedansından ayırarak yanıtlarını geliştirir ve olası aşırı yükleri azaltır. Kontrollü voltaj kaynağı, temel bileşenin akışına empedans sağlamaz, ancak harmonik frekanslar için ağ ve doğrusal olmayan tesis arasında çok büyük bir direnç ortaya çıkarır. Uygulamada, aktif filtre bant genişliğinin sınırlandırılması nedeniyle, bu direnç için maksimum bir seviye vardır.

Seri aktif filtreler güç sistemine bir transformatör ile bağlanır. Seri aktif filtre vasıtasıyla gerilim harmonikleri azaltılır yada süzülür. Seri aktif filtre vasıtasıyla gerilimden kaynaklı kompanzasyonlar, gerilim dengesizlikleri ve dalgalanmalarının düzeltmesi de gerçekleştirilir. Seri aktif filtrelerin güç sistemine bağlantı prensip şeması Şekil 1.59'da verilmiştir (Sucu, 2003).

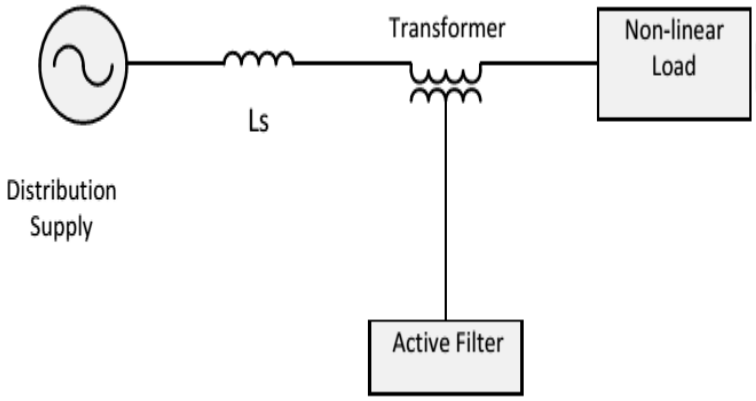


Şekil 1.59. Seri aktif filtrenin prensip şeması (Sucu, 2003)

Şekil 1.60 ve Şekil 1.61 seri aktif filtre tasarı4mı ve sistem yapılandırmasını göstermektedir.



Şekil 1.60. Tek başına seri aktif filtre (Shahbaz, 2012)

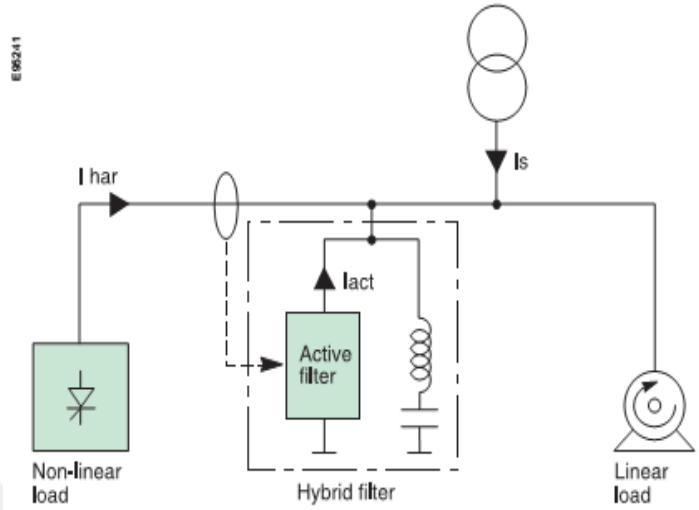


Şekil 1.61. Seri aktif filtre ağ yapılandırması (Shahbaz, 2012)

1.11.3. Hibrid (hybrid) filtreler

Hem pasif hem de aktif elemanlar içeren harmonik filtrelerin uygulanmasıdır ve melez filtre olarakda adlandırılmaktadır. Bu yöntemde, bir pasif filtre ile bir aktif filtre arasında harmonik azaltma ve reaktif güç kompanzasyonu paylaşılır.

Yukarıda belirtilen iki tür filtre, tek bir cihaz içinde birleştirilebilir böylece melez bir filtre oluşturulabilir (Şekil 1.62). Bu yeni filtreleme geniş bir güç aralığını kapsayan mevcut sistemlerden avantajlı ve yüksek performanslı bir çözüm sağlar.

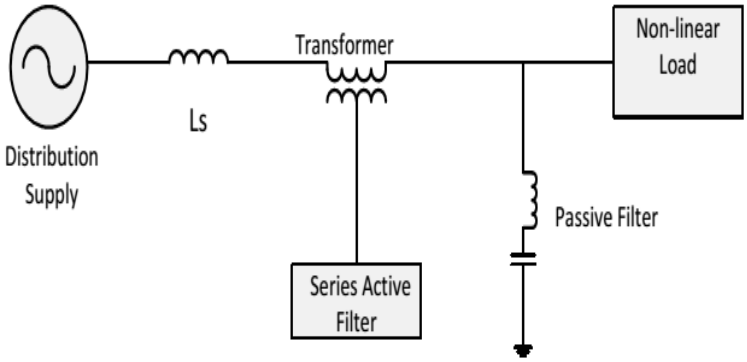


Şekil 1.62. Hibrid filtre çalışma prensibi (Schneider Electric-Harmonic Detection and Filtering)

Hibrid aktif-pasif filtre daha iyi performans için aktif ve pasif filtrenin kombinasyonundan oluşur. Kombinasyon paralel aktif filtre ve paralel pasif filtre, ya da seri aktif filtre ve paralel pasif filtre veya paralel pasif filtre ve daha birçok seri bağlı aktif filtre kombinasyonunun birleşimi olarak farklı şekillerde olabilir. Bu kombinasyonların her biri farklı bir performansa sahiptir. Ancak, paralel aktif ve paralel pasif filtre kombinasyonu daha ticari ve daha yaygın olarak kullanılır. Paralel pasif filtre ve seri aktif filtre genellikle test alanında kullanılmaktadır.

Seri ve paralel aktif filtrelerin kombinasyonunun kontrolü çok karmaşıktır ve yüksek maliyet oluşturur. Bu sorunun üstesinden gelmek için paralel pasif filtre ile paralel aktif filtreyi değiştirmektir ve pasif filtreleri uygulamak çok basit ve herhangi bir kontrol devresi gerektirmez.

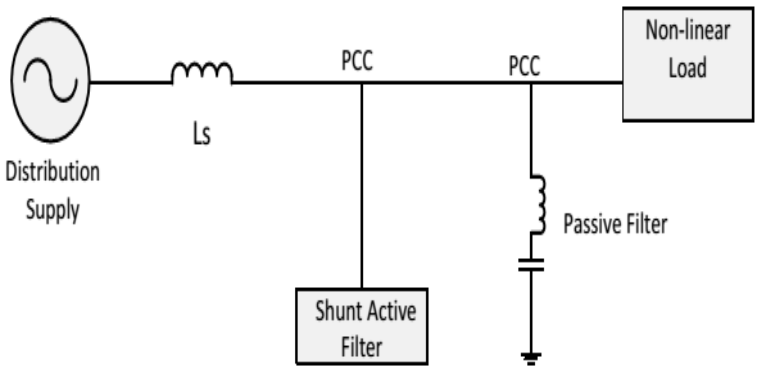
Bu yüzden, çözüm çok ekonomik olur. Seri aktif filtre yüksek frekanslı harmonikler için yüksek empedans teşkil eder. Şekil 1.63'de seri aktif filtre ve pasif filtre kombinasyonu görülmektedir.



Şekil 1.63. Seri aktif filtre ve pasif filtre kombinasyonu (Shahbaz, 2012)

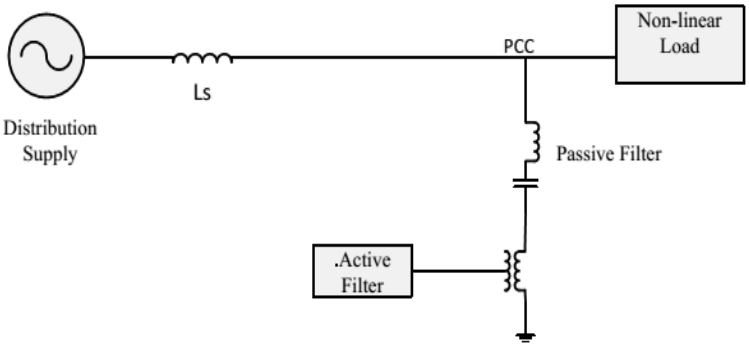
Paralel aktif ile pasif filtre düşük derece harmonikleri kompanza etmek için en uygundur ve paralel aktif ile pasif filtre düşük güç uygulamalarında çok ekonomiktir. Paralel aktif ve pasif filtre yapılandırması yanı sıra yüksek mertebeden harmonik kompanze etmek için paralel pasif filtre kullanır.

Şekil 1.64'de paralel aktif ve pasif filtrelerin kombinasyonu görülmektedir.



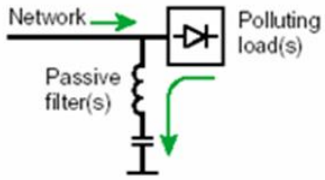
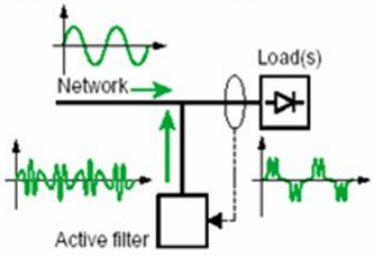
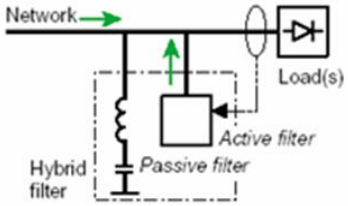
Şekil 1.64. Paralel aktif filtre ve pasif filtre kombinasyonu (Shahbaz, 2012)

Paralel pasif filtre ile seri bir aktif filtre kombinasyonu Şekil 1.65'de gösterilmiştir. Orta ve yüksek gerilim uygulaması için önemli bir yapılandırma olarak kabul edilir. Bu yapılandırmada pasif filtre aktif filtre anahtara uygulanan gerilimler stresi azaltmak için tasarlanmıştır.



Şekil 1.65. Paralel pasif filtre ile seri aktif filtre (Shahbaz, 2012)

Pasif, aktif ve hibrid filtrelerin karşılaştırma tablosu Şekil 1.66'da verilmiştir.

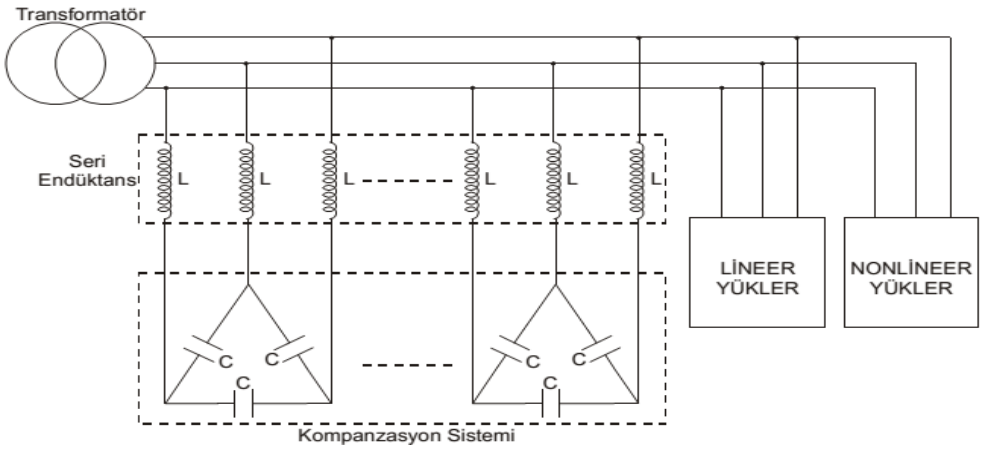
Filtre	Prensip	Özellikler
Pasif	Ortadan kaldırılacak her bir harmonik frekansı için ayarlanan by-pass seri AG devresi 	Harmonik akımında limit yok. Reaktif gücün dengelenmesi Bir veya daha fazla harmonik sırasının ortadan kaldırılması (genellikle 5, 7, 11). Dengelenecek bir veya iki sıra için bir filtre. Tesisat değişiminde harmoniklerin artma riski. Dış kirlenmeden kaynaklanan aşırı yük riski. "Tesisat" filtresi (global) Mühendislik durum çalışması.
Aktif	Yükün oluşturduğu tüm harmonikleri iptal eden akımın üretilmesi. 	Özellikle "makineli" filtrelemeye uygun (lokal) çözüm. Geniş bir frekans bandı üzerinde filtreleme (harmonik sırası 2 ila 25'in ortadan kaldırılması) Kendi kendine ayarlama: Tesisat değişikliğinin hiçbir etkisi yoktur. Yük ve harmonik spektrumunda tüm ayarlamalara uyum sağlar. Her tür yük için sınırsız, esnek çözüm. Basit mühendislik çalışması.
Karma		Pasif ve aktif filtreleme çözümlerinin avantajlarını sunmaktadır ve geniş bir güç ve performans yelpazesini içermektedir: Geniş bir frekans bandı üzerinde filtreleme (2 ila 25 numaralı harmoniklerin ortadan kaldırılması), Reaktif gücün dengelenmesi, Akım filtreleme için yüksek kapasite,"tesisat" filtreleme için iyi teknik-ekonomik çözüm

Şekil 1.66. Pasif, aktif ve hibrid filtrelerin karşılaştırma tablosu (Schneider Electric-Cahier Technique Power Quality)

1.11.4. Reaktif güç kompanzasyon sistemine seri endüktans (harmonik filtre reaktörü) bağlamak

Alternatif akımla çalışan enerji sitemlerinde reaktif güç kompanzasyonunun önemi bilinmektedir. Ek 3'de reaktif güç ve reaktif güç kompanzasyonu, ek 4'de reaktif güç kompanzasyonunda kondansatör gücünün hesabı, ek 5'de reaktif güç kompanzasyonunda kondansatör değerinin hesabı, ek 6'da EPDK tarafından yayınlanan reaktif güç yönetmelikleri ve reaktif enerji tarifesi verilmiştir.

Oluşan harmonikler en büyük etkiyi ve zararı reaktif güç kompanzasyon tesislerine ve bu tesislerde kullanılan kondansatörlere vermektedir. Harmonikler nedeniyle kondansatörlerde ısınma oluşmakta ve bu yüzden kapasitelerinde farklılıklara neden olmakta dolayısıyla ömürlerinde de kısalma meydana gelmektedir. Seri endüktans bağlayarak harmonikli akımlara karşı yüksek empedans gösterilerek reaktif güç kompanzasyon sistemine geçmesi engellenmekte ve bu seri endüktans ile reaktif güç kompanzasyon sisteminin kapasitansı filtre gibi harmonikleri süzmekte ve azaltmaktadır (Sucu, 2003). Bahsi geçen metod harmonikleri azaltmada çok etkili değildir. Fakat maliyeti en az ve çok kullanışlı bir metottur. Şekil 1.67'de bu yöntem bağlantısı görülmektedir.



Şekil 1.67. Kompanzasyon sistemine seri endüktans bağlamak (Sucu, 2003)

Sistemin reaktif güç ihtiyacı daha önce verilmiş olan denklem ek 4'deki $Q_C = P(\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2)$ formülünden hesaplanır. Hesaplanan kompanzasyon gücünden sonra, sisteme bağlanması gereken kondansatörün kapasitif reaktansı denklem (1.54)'deki formül ile bulunur.

$$X_{CT} = \frac{U^2}{Q_C} \tag{1.54}$$

Burada;

X_{CT}: Kapasitif reaktans değeri (Ω),
U: Çalışma gerilimi (V),
Q_C: Sistemin reaktif güç ihtiyacı (VAr).

Denklem (1.17)'de kapasitif reaktans $X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$ formülünden 50 Hz şebeke frekansında kondansatör C ifadesi hesaplanabilir. Rezonans frekansında $X_L = X_C$ olduğuna göre, buradan rezonans fraknsı denlem (1.21)'de verildiği üzere $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$'dir. Buradan L değeri hesaplanabilir.

Kondansatör önüne konulacak olan seri endüktansın (harmonik filtre reaktörü) hesaplamaları ayrıca ek 7'de verilmiştir.

Harmonik filtre reaktörü tesislere bağlanırken, bu reaktörlerin endüktans değerleri firmaların hazırladığı değerlere göre kararlaştırılmalıdır. Bunun için p (bağıl empedans) faktörünün bilinmesi gerekmektedir. Bu faktör denklem (1.55)'deki formül ile hesaplanır ve Çizelge 1.7'de verilen değerlerdedir.

$$p = \frac{X_L}{X_C} = \frac{1}{n^2} \tag{1.55}$$

Burada;

p: Bağıl empedans,

X_L: Reaktif güç kompanzasyon sistemine bağlanacak endüktansın temel frekanstaki endüktif reaktans değeri (Ω),

X_C: Reaktif güç kompanzasyon sisteminin temel frekanstaki kapasitif reaktans değeri (Ω).

Çizelge 1.7. Harmonikli şebekelerde reaktör bağıl empedans hesabı

TEMEL HARMONİK **f1 = 50Hz.**	**REZONANS FREKANSI**	**REAKTÖR AYAR FREK.**	**HARMONİK SIRALAMASI**	**BAĞIL EMPEDANS**	%	**0,…**
HARMONİK	**f**o ……Hz.	**f**r ….. Hz	**n = f**r **/ f**1	$p=(1/n^2)=X_L/X_C$		
3	150	134	2.7	0.139	13.9	0.14
5	250	189	3.78	0.069	7	0.07
7	350	210	4.2	0.0567	5.67	0.0567

p faktörü sistemde etkin olan harmonik derecesine göre seçilmelidir. Örneğin; sistemde 3. harmonik baskın ise bu sistemi 134 Hz de rezonansa getirecek (endüktans ve kompanzasyon sistemi arasındaki seri rezonans) p değeri %13.9 olan endüktanslar seçilmelidir.

Sistemde 5. harmonik baskın ise bu sistemi 189 Hz de rezonansa getirecek p değeri %7 olan endüktanslar seçilmelidir. Bundan maksat, örneğin 5. harmoniği baskın olan sistemde sistemi 5. harmoniğin frekansı olan 250 Hz de rezonansa getirecek olursak kompanzasyon sistemine 5. harmoniğin bütün genliği akacaktır, bu durumda kompanzasyon sistemide zarar görecektir.

Bu nedenle, sistem rezonansa mevcut olan baskın harmoniğin frekansına yakın frekanslarda getirilmekte ve önemli ölçüde baskın olan harmoniğin genliği azaltılmaktadır. Bu durum aynı zamanda baskın olmayan harmonik mertebelerinide etkiliyeceğinden sistemdeki THD seviyesi önemli ölçüde azalacaktır.

3. harmonik için 134 Hz, 5. harmonik için 189 Hz, 7. harmonik için 210 Hz değerleri rezonansı önlemek için en uygun değerlerdir. Kompanzasyon sistemine seri endüktans bağlamak için sistemin ya da tesisin gerekli olan kondansatör gücü denklem (1.56)'da verilen formül ile hesaplanır.

$$Q_C = 0.95 N_{Tr} (\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2) \tag{1.56}$$

Reaktif güç kompanzasyon sistemine bağlanan endüktanslar, kompanzasyon kondansatörleri uçlarındaki gerilimin artmasına neden olurlar. Bunun sebebi, reaktif güç kompanzasyon sisteminden akan akım azaldığı için kompanzasyon kondansatörleri uçlarındaki gerilim yükselecektir (güç değişmeyeceği için). Bu nedenle kapasitans değerleri denklem (1.57)'deki gibi şebeke geriliminden daha yüksek gerilimlere dayanabilmelidir.

$$U_C = U_r = U_n + U_n p = \frac{U_n}{(1-p)} \tag{1.57}$$

Burada;

U_C (U_r): Kondansatör (kapasitans) gerilimi (V),
U_n: Şebeke gerilimi (V),
p: Bağıl empedans.

400 V şebeke gerilimi olan bir sistemde p değeri %5.67 olan endüktanslar seçilmişse, bu durumda kapasitansların gerilimi 440 V veya 480 V seçilmelidir. Fakat,

480 V'da çalışabilecek şekilde seçilmiş olan kapasitanslar üzerlerinde yazılı olan reaktif gücü belirtilen gerilimin altında verebilirler. Kondansatörler daha küçük gerilim ile çalışırlar ise yeni güçleri denklem (1.58)'deki gibi hesaplanır. Reaktör yoksa (1-p) formülde kullanılmaz.

$$\left.\begin{aligned} &\frac{G_h}{S_{Tr}} < \%60 \\ &K = (\frac{U_n}{U_r})^2 \frac{1}{(1-p)} \\ &Q_n = Q_0 = KQ_r \\ &Q_r = (\frac{U_r}{U_n})^2 (1-p) Q_n \end{aligned}\right\} \quad (1.58)$$

Burada;

Q_n: Reaktif güç kompanzasyon sisteminin, nominal çalışma gerilimi altında üreteceği reaktif güç (VAr),

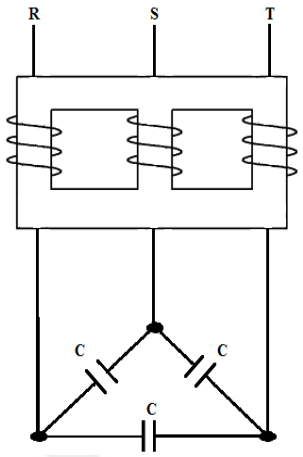
Q_r: Gerilimin değişmesiyle reaktif güç kompanzasyon sisteminin üreteceği reaktif güç (VAr),

U_n: Reaktif güç kompanzasyon sisteminin, nominal çalışma gerilimi (V),

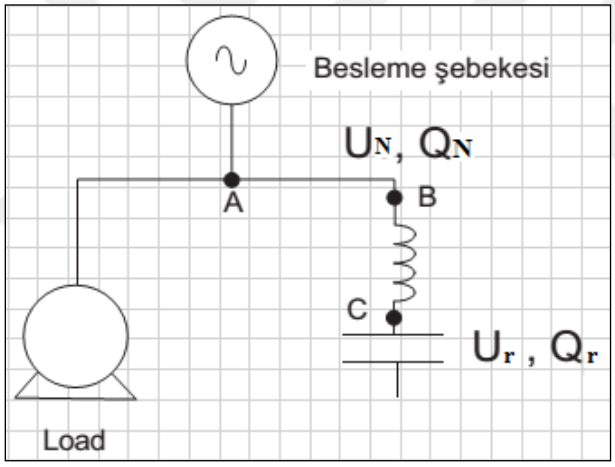
U_r: Değişmiş olan gerilimin değeri (V),

p: Bağıl empedans.

Harmonik filtre reaktörünün kondansatöre bağlantısı Şekil 1.68'de görülmektedir. Şekil 1.69'da kondansatör nominal gerilimi ve kondansatör reaktif gücü görülmektedir.



Şekil 1.68. Harmonik filtre reaktörünün kondansatörlere bağlantısı



Şekil 1.69. Kondansatör nominal gerilimi ve kondansatör reaktif gücü (Schneider Electric-AG kompanzasyon panosu tasarım ve üretim klavuzu)

Ayrıca, kompanzasyon sistemine seri bağlı reaktörlerin, tükettiği reaktif güç, denklem (1.59)'daki kadar daha az reaktif güç sisteme verecektir.

$$Q_L = 3I^2 X_L \tag{1.59}$$

Burada;

Q_L: Reaktif güç değeri, seri endüktanslar tarafından tüketilen (VAr),

I: Seri endüktanstan geçen alık değeri (A),

X_L: Temel frekans için seri endüktansın endüktif reaktans değeridir (Ω).

Q_n=5 kVAr, Un=400 V ise, p=%14 iken, p=%7 iken ve p=%5.67 iken Q_r'yi hesaplayacak olursak;

p=%14 iken;

$$U_C = U_r = \frac{400}{(1-0.14)} = 465.11V$$ 480 V veya 525 V seçilir.

$$Q_r = (\frac{U_r}{U_n})^2 (1-p) Q_n = (\frac{525}{400})^2 (1-0.14)(5) = 7.407 kVAr$$

Kondansatör, 400V 50Hz sisteminde %14 reaktör ile 5 kVAr güç sağlamak için 525V'da 7.407 kVAr değerine uygun olarak seçilmelidir.

p=%7 iken;

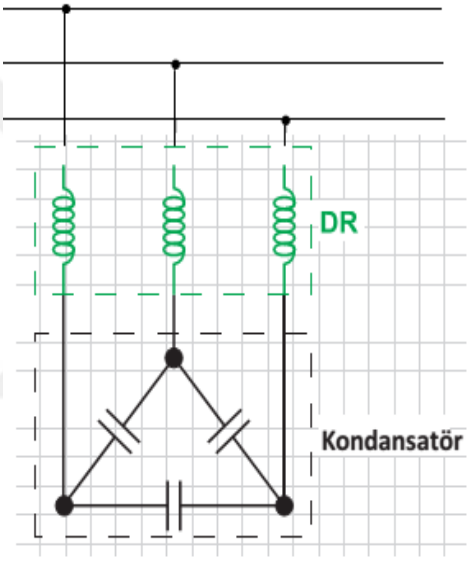
$$U_C = U_r = \frac{400}{(1-0.07)} = 430.1V$$ 440 V veya 480 V seçilir.

$$Q_r = (\frac{U_r}{U_n})^2 (1-p) Q_n = (\frac{480}{400})^2 (1-0.07)5 = 6.696 kVAr$$

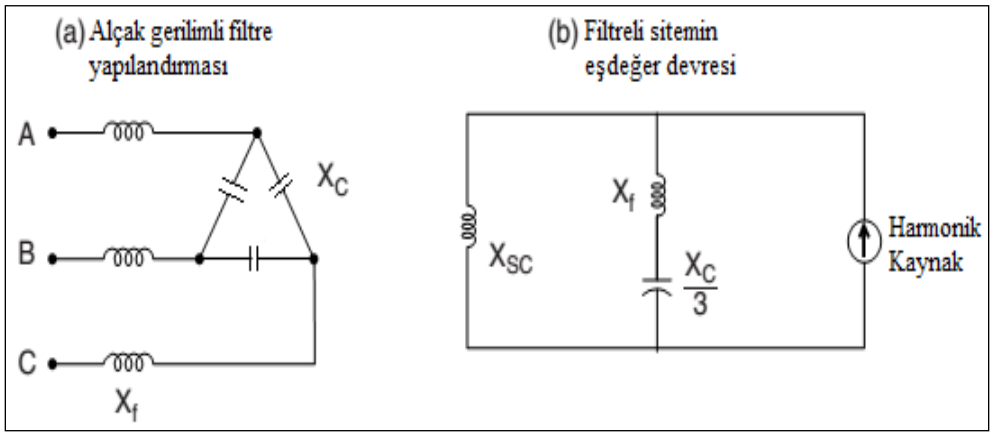
Kondansatör, 400V 50Hz sisteminde %5.67 reaktör ile 5 kVAr güç sağlamak için 480V'da 6.791 kVAr değerine uygun olarak seçilmelidir. Sonuç olarak; harmonik filtre reaktörleri, şebekedeki harmoniklerin artmasını önleyerek kondansatörleri korumak için tasarlanmışlardır. Kondansatörlerle seri bağlantılı olmalıdır. Harmonik filtre reaktörleri, kondansatör terminallerinde aşırı bir gerilim oluşturur. Kondansatörlerin nominal gerilimi buna bağlı olarak arttırılmalıdır.

Şekil 1.70'de harmonik filtre rektörünün kondansatöre bağlantısı görülmektedir. Şekil 1.71'de ise harmonik filtre rektörünün kondansatör bağlantısı ve eşdeğer deveresi

verilmiştir. Ayrıca oluşan harmonikleri bastırmak için harmonik filtre reaktörünün yanısıra kullanılacak olan filtre için L ve C'in hesabı rezonans frekansına göre hesaplanır. Rezonans frekansı $f_0 = 1/2\pi\sqrt{LC}$, 3. harmonikte 150 Hz, 5. harmonikte 250 Hz ve 7. harmonikte 350 Hz'dir. Bobinde kullanılacak toroid nüve, kondansatör önüne bağalanacak seri endüktans (harmonik filtre reaktörü) ve hesaplamaları ek 7'de verilmiştir.



Şekil 1.70. Harmonik filtre rektörünün kondansatör bağlantısı



Şekil 1.71. Harmonik filtre rektörünün kondansatör bağlantısı ve eşdeğer devresi (Dugan ve ark., 2004)

1.12. Harmonik filtre reaktörü seçim kriterleri

Harmonik filtre reaktörleri, harmonikli reaktif güç kompanzasyon sistemlerinde kompanzasyon kondansatörlerine seri olarak bağlanmaktadır. Kompanzasyon sistemlerinde harmonik filtre reaktörleri bağlanmasıyla harmoniklerin olduğu tesislerde karşılaşılan sorunların bir kısmı çözülmüş olur. Bunlar;

- Kondansatörlerin devreye alınması anında aşırı akım çekilmesinin önüne geçilmiş olur,
- Rezonans durumu nedeniyle kondansatörlerin aşırı yüklenmesi önlenmiş olur,
- Kondansatörlerin ömrü uzatılmış olur,
- Hatların aşırı akımlar nedeni ile yüklenmesinin önüne geçilmiş olur,
- Kablolarda ısınmalar azaltılmış olur,
- Koruma elemanlarının zamansız olarak açması engellenmiş olur,
- Harmonikler nedeni ile şebeke geriliminde aşırı bozulmalar ve bu nedenle hassas cihazlarda yaşanan sorunların önüne geçilmiş olur,
- Elektronik kart ve bilgisayarlarda meydana gelen sorun ve arızaların önüne geçilmiş olur.

Harmonikli reaktif güç kompanzasyon sistemlerinde harmonik filtre reaktörleri ve güç kondansatörlerinin seçimi çok büyük önem arzetmektedir. Kompanzasyon kondansatörü ve harmonik filtre reaktör seçimi esnasında dikkat edilmesi gereken hususlar aşağıda belirtilmiştir.

- Harmonikli reaktif güç kompanzasyon sisteminin rezonans frekansının harmoniklere göre seçilmiş olması,
- Harmonik filtre reaktörlerinin kullanılması ile birlikte kondansatörlerin uç gerilimleri şebeke geriliminin üzerinde olamsından dolayı kullanılacak kondansatörlerin nominal geriliminin bu duruma göre belirlenmesi,

- Harmonikli reaktif güç kompanzasyon sistemlerinde kompanzasyon gücü kullanılan yüksek gerilimli kondansatörler ve harmonik filtre reaktörleri nedeniyle filtreli sistemin reaktif güç kompanzasyonu bu durum göz önünde bulundurularak hesaplanmalıdır. Aksi durumda eksik kompanzasyon yapılmış olacaktır,
- Harmonikli reaktif güç kompanzasyon panolarında harmonik filtre reaktörleri nedeniyle sıcaklık artışları olacağından panoda gerekli tedbirlerin alınması.

Harmonik filtre reaktörü temin eder iken, rezonans frekansı, şebeke gerilimi ve kullanılacak olan kondansatörlere ait bilgiler olmalıdır. Harmonikli reaktif güç kompanzasyonunda sık yapılan hatalardan biri birbirlerine uygun olmayan harmonik filtre reaktörleri ve kondansatörlerin kullanılmalarıdır. Farklı bir kondansatör grrubu kullanılacaksa kondansatörün değerleri mutlak surette kontrol edilmelidir. Aksi durumda sistemin rezonans frekansı bu nedenle kayabilir ve uygulamadan tam anlamıyla yararlanamıyabilinir.

1.13. Harmonikli Devrelerde Kompanzasyon

Harmoniklerin olduğu sistemlerde, meydana gelebilecek bozucu etkileri gidermek ve hattın aşırı yüklenmesini önlemek için kullanılan klasik kompanzasyonun yerine harmonik bileşenlerini elimine edecek filtreli kompanzasyon sistemlerinin kullanılması daha etkin bir çözümdür. Bu şekilde güç faktörünün istenilen değerlere çekilmesi mümkün olacaktır. Bir sistemin harmonikli olup olmamasına göre güç faktörü farklılık gösterir. Harmonikli bir devrede herhangi bir harmonik bileşeni için görünür güç denklem (1.60)'daki gibi bulunur.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \tag{1.60}$$

Denklemden de anlaşılacağı üzere harmoniklerden dolayı meydana gelen distorsiyon gücünden dolayı, harmoniksiz sistemlerdeki güç faktörü değeri harmonikli

sitemlerinkinden daha yüksektir. Cosφ'yi hesaplarken, temel bileşenler kullanıldığından; harmonikli ya da harmoniksiz durum için Cosφ değeri değişmeyecektir. Güç faktörü için yapılacak hesaplama ve ölçümlerde farklı değerler karşımıza çıkmakta; bu nedenle de, cosφ ve güç faktörü kavramlarının ayırt edilmesi ve elektrik devrelerinin buna göre değerlendirilmesi gerekmektedir.

Cosφ (dpf-displacement power factor), yani temel bileşene göre güç faktörü, daha açık bir ifade ile harmoniksiz sinüsoidal dalga formuna göre ölçülen güç faktörüne denir. Harmonikleri ve diğer bozulmalarıda hesaba katarak ortaya çıkana ise güç faktörü (pf-power factor) denir. Kısacası güç faktörü Cosφ değerinden farklı olarak, harmonikler dahil olan akım ile harmonikler dahil olan gerilim arasındaki faz farkıdır. Gerçek güç faktörü (pf) harmonik içeriği içerir. Dpf (cos φ) yalnızca temel frekansı dikkate alır.

Belirli bir empedansı olan transformatör ile beslenen şebekeler, şebekenin reaktansı ile kondansatör reaktansı birbirlerine eşit olduğu anda rezonans olayının meydana geldiğini ve gerilim ile akımın yükseldiğini ve bunun da; hem işletme açısından ve hem kondansatör bakımından ve hem de transformatörün ömrü aşısında büyük kayıplar meydana getirdiğini biliyoruz.

Rezonans olaylarının önlenmesi için devredeki kondansatörlerimizi ön reaktör ile korumamız gerektiği önem kazanmaktadır. Bunun için de reaktör ayar frekansının hesap edilmesi ve kondansatörümüzün önüne seri bağlanarak aşırı akımlardan korumamız gerekmektedir.

1.000 kVA'lık bir transformatörün olduğu bir tesiste enerji analizörü ile yapılan ölçümde 5. harmoniğin olduğu tespit edilmiş ve Ntr=1 000 kVA, $\cos\varphi_1=0.75$ ise $\varphi_1=41.41°$ ve $\tan\varphi_1=0.88$, EPDK tarafından istenen $\cos\varphi_2=0.984$ ise $\varphi_2=10.26°$ ve $\tan\varphi_2=0.181$'dir. Buna göre;

$$Q_C = (0.95) N_{Tr} (\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2)$$

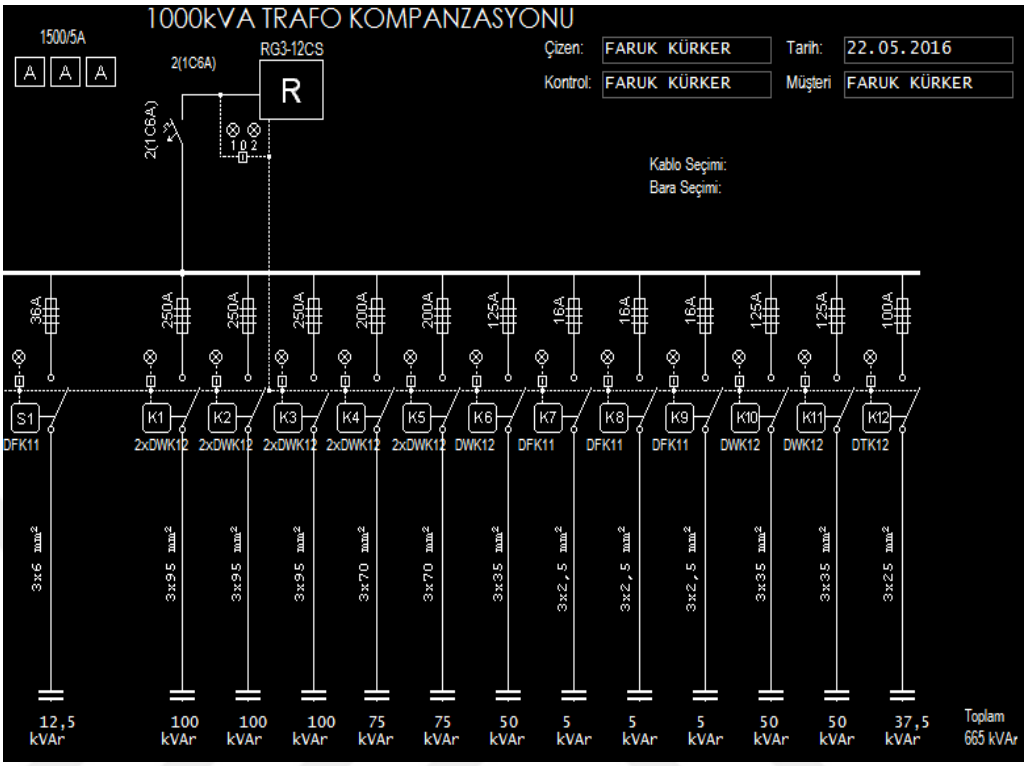
$$Q_C = (0.95)(1000)(0.88 - 0.181) = 664.05kVAr \cong 665kVAr.$$

$$U_C = U_r = \frac{400}{(1-0.07)} = 430.1V \;\; 440\sim480 \text{ V seçilir.}$$

$$Q_r = (\frac{U_r}{U_n})^2 (1-p) Q_n = (\frac{480}{400})^2 (1-0.07)(100) = 133.92kVAr$$

Kondansatör, 400 V, 50 Hz sisteminde %7 reaktör ile 100 kVAr güç sağlamak için 5. harmonikte 480 V'da 133.92 kVAr değerine uygun olarak seçilmelidir. Kompanzasyonun tek hat şeması Şekil 1.72'de görülmektedir.

Kademe	400V	480V
1	100 kVAr	133.92 kVAr
2	100 kVAr	133.92 kVAr
3	100 kVAr	133.92 kVAr
4	75 kVAr	100.44 kVAr
5	75 kVAr	100.44 kVAr
6	50 kVAr	66.96 kVAr
7	5 kVAr	6.696 kVAr
8	5 kVAr	6.696 kVAr
9	5 kVAr	6.696 kVAr
10	50 kVAr	66.96 kVAr
11	50 kVAr	66.96 kVAr
12	37.5 kVAr	50.22 kVAr
Sabit	12.5 kVAr	16.74 kVAr



Şekil 1.72. 1 000 kVA'lık bir transformatörün olduğu bir tesiste hesaplanmış olan reaktif gücün tek hat gösterimi

Kullandığımız rölenin özelliğinden dolayı büyükten küçüğe doğru kondansatörler dizilmiştir. Şebekemizde enerji analizörümüzle ölçtüğümüzde 5'inci harmonik tespit edilmiştir. 5'inci harmonikte bağıl empedans p=%7'lik bir reaktörü seri olarak bağlamamız gerekir.

Kondansatörler ile harmoniklerden dolayı kondansatörlerle transformatör arasında rezonans olayı yaşanmaması için de seri endüktans (harmonik filtre reaktörü) ile kondansatörler korunur ve aynı zamanda da rezonans olayı önlenmiş olur. Reaktörlerin L empedansları ile kondansatör C kapasiteleri seri bağlandıkları noktalarda gerilim seri L ve C devrede bağlantı noktasında gerilim artacağından kondansatör ucuna gelen gerilim artar. Standart gerilim olan 440~480 V'luk seçilmesi gerekir.

Ayrıca EPDK tarafından, $\tan\varphi_L \leq 0.20$ ve $\tan\varphi_C \leq 0.15$ istendiğinden reaktif rölenin bu değerlerde tutması için kondansatörlerin hızlı bir şekilde devreye alınması ve çıkarılması gerektiğinden dolayı kondansatörün yıpranmaması için, devreden çıktığında deşarj dirençleri yerine deşarj bobinleri kullanılmalıdır.

Ne kadar kısa zamanda devreye alınırsa alınsınlar kondansatörler üzerinde bir şarj gerilimi kalmadığından, bazı durumlarda kondansatörün aşırı bir gerilimle karşı karşıya gelip aşırı ”Inrush” akımı çekmesi önlenmiş olur. Piyasadaki röleler işletmede üretim makinaları alınmadan otomatik olarak kondansatörleri devreye alıp çıkarmak suretiyle bütün kondansatörleri tanırlar (hafızalarına alırlar). Bu olay bittikten ve rölenin ayarları yapıldıktan sonra, artık kondansatör panomuz devreye alınabilir.

Şebeke yükleri sık sık değişim içinde ise harmonikler de değişim gösterirler. Bu gibi şebekelerde reaktif kontrolün daha hızlı bir şekilde kontrol edilmesi gerekir. Kontrolünün hızlı yapılması için de hem reaktif rölenin ve hem de kontaktör yerine tristör şalterlerin kullanılması gerekir. Bu şalterler; “Zero Switch” olarak da anılırlar. Bu şalterler gerilimin sıfır olduğu anda devreyi keserler. Dolayısıyla kondansatör üzerinde herhangi bir şarj gerilimi oluşmaz. Bu gerilim oluşmazsa da artık bir şarj yükü kalmaz ve deşarj bobininede gerek kalmaz.

1.14. Güç Kalitesinin Bozulması ile İlgili Standartlar

Elektrik güç kalitesinin bozulması ile ilgili belli başlı standartlar aşağıda belirtilmiştir.

1. IEC (International Electrotechnical Commission) Norm 555-2 (Harmonics), 5553 (Voltage fluctuations and flicker - Voltaj dalgalanmaları ve kırpışma), (http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=168 030)

2. IEC 1000-3-2, 1995 (EN 6 100-3-3) 1995 Alçak gerilimdeki gerilim dalganması flicker sınırlarını belirler.

3. VDE (West German Standarts) 0838 Beyaz eşya, VDE 0160 Çeviriciler VDE 0712 Flüoresan ampuller.

4. IEEE 519-1992 Static Power Converter ANSI (American National Standards Institute) / IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) Std 519.

5. TSE 9882 Ev tipi cihazlar ve benzeri elektrik donanımı. Elektrik sistemlerindeki bozulmalar. Bölüm: 2 Harmonikler.

6. EN 6100-3-2: elektrik manyetik uyumluluk (EMC-Electromagnetic Compatibility) Kısım 3. Sınırlar. Bölüm: 2 Harmonik akım emisyonu sınırları, (Faz başına 16 A. den küçük cihazlar.)

7. IEC 1000-3-4: Elektro Manyetik Uyumluluk (EMC-Electromagnetic Compatibility) Kısım 3. Sınırlar. Bölüm: 4 Harmonik emisyonu sınırları, Faz başına 16 A. den büyük cihazlar).

8. IEC 1000-2-2: Elektro Manyetik Uyumluluk (EMC-Electromagnetic Compatibility) Kısım 2. Düşük frekans, dağıtımlar ve düşük gerilimde uyumluluk seviyeleri.

9. EN 50 006 ‘’The Limitations of Disturbances in Electricity Supply Networks caused by Domestic and Similar Appliances Equipped with Electronic Devices’’ European Committee for Electrotechnical Standardization, CENELEC.

Uluslararası IEC 519-1992 standarlarına göre harmonik bozulma değerleri denklem (1.61)’de gerilim için ve denklem (1.62)’de akım için verilmiştir. Elektrik tesislerinde akım için toplam harmonik bozulma değeri I_{THD} < % 15 - 20 ve gerilim için toplam

harmonik bozulma değeri U_{THD} < % 3 - 5 olmalıdır. Belirtilen değerlerin üzerinde ölçülen toplam harmonik bozulmalar, tesis için tehlikeli ve büyük zararlar oluşturur (http://www.epdk.org.tr/TR/DokumanDetay/Elektrik/Mevzuat/Yonetmelikler/ ElektrikDagitimiPerakendeSatisinaHizmetKalitesi).

$$U_{THD} < \% 3 \quad (V) \tag{1.61}$$

$$I_{THD} < \% 5 \quad (A) \tag{1.62}$$

Harmonik değerler belirli bir seviyenin altında tutularak şebekenin ve sistemdeki diğer yüklerin harmoniklerin olumsuz etkilerinden mümkün olduğu kadar az zarar görmesini sağlanır ve tüketiciye daha kaliteli enerji verilir. Bu amaçla bazı ülkeler, nonlinear yüklerin meydana getirdiği harmonik bileşenleri bir yaptırım olarak sınırlandırmışlardır ve harmonik standartlarını oluşturmuşlardır.

Oluşturulan harmonik standartları, harmonikler için sınırlama getirmektedir. IEEE tarafından 1992 yılında getirilen IEEE 519-1992 nolu standart ve IEC tarafından 1995 yılında IEC 1000-3-2 gibi standartlar, elektrik şirketleri için şebeke bara gerilim distorsiyonunu ve müşteriler için nonlineer yükler tarafından üretilen harmonik akımları ile ilgili sınırlamaları vurgulamaktadırlar.

Ek 8'de elektrik piyasasında dağıtım sisteminde sunulan elektrik enerjisinin tedarik sürekliliği, ticari ve teknik kalitesi hakkında yönetmelikler verilmiştir.

Endüstriyel kullanıcılarla birlikte elektrik üretim ve dağıtımıyla ilgili harmonik standartlar IEEE-519 ve VDE-0839'da belirtilmiştir. Bu standartlarda, şebeke gücünün bir fonksiyonu olarak akım ve gerilim harmonik bileşenlerinin, temel bileşene oranları verilmiştir. Çeşitli ülkeler tarafından farklı gerilimler için harmoniklerin sınırlanmış değerleri toplam harmonik distorsiyonu olarak Çizelge 1.8'de verilmiştir (Kocatepe, 2003).

Çizelge 1.8. Çeşitli ülkelerin harmonik standartları

Ülke	Gerilim (kV)	THD_V (%)
A.B.D.	Genel 2.4-69 115≤ Özel 2.4-69 115≤	 5 1,5 8 1,5
Almanya	Tüm Gerilimler (15. harmoniğe kadar)	10
Avustralya	Dağıtım 33≥ İletim 22,33,66 110 ≤	 5 3 1,5
Finlandiya	1 3-20 30-45 110	5 4 3 1,5
Fransa	Tüm Gerilimler	1,6
İngiltere	0.415 6,6-11 33-66 132	5 4 3 1,5
İsveç	0,43/0,25 3,3-24 84≥	4 3 1

1.15. Transformatörlerin Harmonik Yüklenmesi

Transformatörlerde kaçak reaktans hesabı ve transformatörlerde kritik kondansatör gücü hesabı ek 9'da verilmiştir.

Transformatörlerden çekilen harmonik akımlardan dolayı transformatör demir çekirdeğindeki demir kayıplarını arttırır. Buna ilâve olarak gerilim harmonikleri hysteresizden dolayı demir kayıplarına (boş çalışma kayıplarına) sebep olurlar. Akımın toplam harmonik distorsiyonu $(U_n)^2$ karesi olarak sargılardaki kayıplar artar.

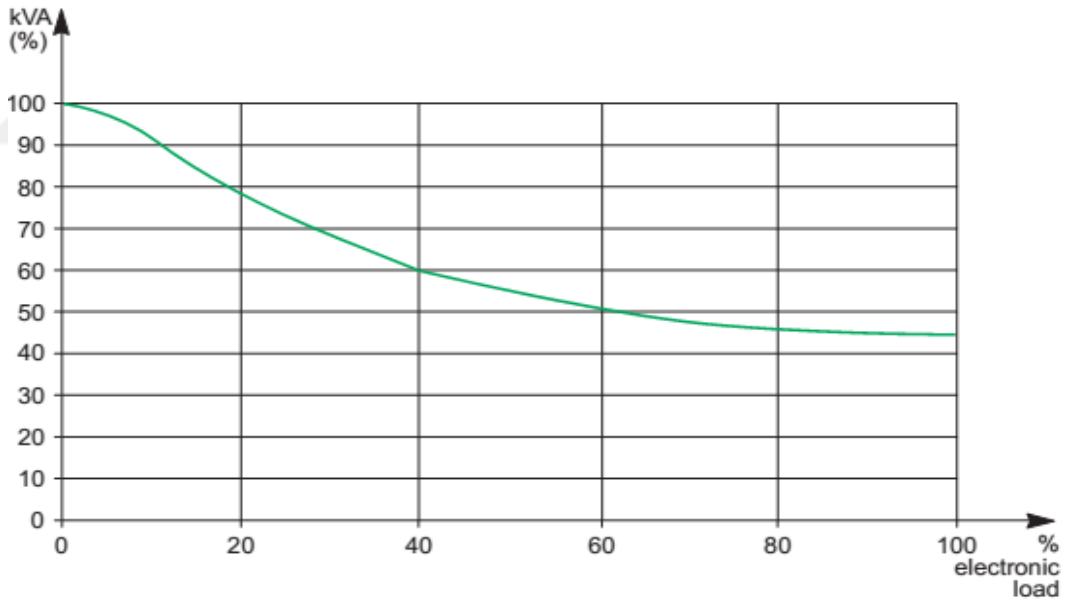
Transformatörlere bağlı lineer yükler için harmonik bastırıcı filtre elemanları kullanılmıyorsa transformatörler sistemde ortaya çıkan harmonikler tarafından ilâve

olarak yüklenirler ve harmonik yüklenmeler transformatör hesabında göz önüne alınmalıdır. Transformatörün ilâve yüklerini belirlemek için:

1. Şehir dağıtım şebekelerinde harmonik distorsiyon seviyesi nispeten düşük olduğundan % 10–15 demir kayıplarında artış göz önüne alınır.

2. Aşağıda verilen transformatör için azalma faktörü belirlemek için Şekil 1.73'deki ilgili eğrilerden faydalanılır.

IEEE–519 Application Guide 1996 standartlarına göre, harmonikli yüklere göre transformatörlerde yüklenme artış grafiği Şekil 1.73'de verilmiştir.



Şekil 1.73. Transformatora bağlanan lineer yükün toplam yüke oranına göre transformator azalma faktörü (Schneider Electric Harmonic Detection and Filtering)

Mevcut trafo gücü ve harmonikli yüklerin toplamı verilen bir tesiste, trafonun yüklenmede azalma faktörünü bulmak için denklem (1.63)'deki formülden elde edilen sonuç kullanılır.

$$N_{hy} = \frac{N_h}{S_{tr}} \tag{1.63}$$

Burada;

N_{hy}: Harmonikli yükler toplamının mevcut trafo gücüne oranı,

N_h: Harmonikli yükler toplamı,

S_{TR}: Mevcut trafo gücü.

Trafonun yüklenmede azalma faktörü ($\%N_{af}$) için denklem (1.63)'de elde edilen sonuç (x ekseninde) Şekil 1.73'deki grafikte yaklaşık olarak (y ekseni) $\%N_{af}$ bulunur. Azalma faktörü ise denlem (1.64)'deki formül ile bulunur.

$$\%N_{az} = \frac{100 - N_{af}}{100} \tag{1.64}$$

Burada;

$\%N_{az}$: Yüzde olarak azalma faktörü,

N_{af}: Trafonun yüklenmede azalma faktörü.

Trafonun toplam harmonikle yükü ise denklem (1.65)'de verilmiştir.

$$N_{trh} = \frac{N_h}{1 - N_{az}} \tag{1.65}$$

Burada;

N_{trh}: Trafonun toplam harmonikle yükü,

N_h: Harmonikli yükler toplamı

N_{az}: Yüzde olarak azalma faktörü.

Harmonikli yüklerin toplamı verilen sistem için uygun tarfo gücünü hesaplayacak olursak;

Harmonikli Yükler Toplamı	
8 Adet CNC	383.75 KVA
5 Adet Gazaltı Kaynak	69.99 kVA
17 Adet "1x400W" "Ayd."	8.50 kVA
2 Adet Klima	6.25 kVA
Toplam	468.49 kVA

Mevcut trafo S_{tr}=630 kVA çekilen harmonikli güç toplamı 468.49 kW, harmonikli yükler toplamının mevcut trafo gücüne oranı (N_{hy}),

$$N_{hy} = \frac{N_h}{S_{tr}} = \frac{468.49}{630} = 0.74$$

Trafonun yüklenmede azalma faktörü N_{hy}'nin (x ekseninde) değerinin Şekil 1.73'deki grafikte karşılığı yaklaşık olarak $\%N_{af}$=48 bulunur (y ekseninde).

Azalma faktörü, $\%N_{az} = \frac{100 - N_{af}}{100} = \frac{100 - 48}{100} = 52$

Trafonun toplam harmonikli yükü, $N_{trh} = \frac{N_h}{1 - N_{az}} = \frac{468{,}49}{1 - 0.52} = 976kVA$ bulunur.

Trafonun toplam harmonikle yük değerine göre standart trafo gücü S_{tr}=1000 kVA olmalıdır. (25 – 40 – 50 – 63 – 80 – 100 - 125 – 160 – 200 – 250 – 315 – 400 – 500 – 630 – 800 – **1 000** – 1 250 – 1 600 – 2 000 – 2 500 kVA).

Eğer N_h=468.49 kVA harmonikli yükler için S_{tr}=630 kVA'lık trafo seçilseydi; Mevcut durum trafo üzerindeki güç artışı,

$$\frac{N_{trh}}{S_{tr}} = \frac{1000}{630} = \%1.58$$

Sonuç olarak S_{tr}=630 kVA'lık trafo %58 kadar aşırı yüklenir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Elektrik Enerjisi Kalitesi, Harmonikler ve Harmonik Azaltma Analizi konusu ile ilgili yapılan önceki çalışmalar ve elde edilen temel yaklaşımlar aşağıda özetlenmiştir.

Attar (1994), tarafından yapılan ”Non-Lineer Yükleri İçeren Elektrik Enerji Sistemlerinin İşlemesinde Harmoniklerin Etkinlikleri ve Kayıp Analizi” konulu doktora tezinde, harmonik oluşturan non-lineer yüklerin enerji sistemleri üzerindeki etkinliklerini incelemiş ve sayısal uygulama bölümünde birbirinden farklı konbinasyonlar oluşturarak her duruma ilişkin değerleri hesaplamış, ortaya konulan bağıntılar ve elde edilen sayısal bulgular ışığında sonuçları irdelemiş ve gerekli öneriler ifade etmiştir.

Yörükeren (1994), tarafından yapılan ”Güç Sistem Harmonikleri ve Bu Harmoniklerin Elektrikli Ulaşım Sistemlerinde Belirlenmesi ve Değerlenmesi” konulu doktora tezinde, güç sistem harmoniklerini teorik olarak ele almış ve modern elektrikli ulaşım sistemlerinde örneklerle değerlendirmiştir, İncelenen örneklerde, simülasyon sonuçları ile test sonuçlarını karşılaştırmıştır.

Ellis (1996)’da, Endüstriyel Güç Sistemlerinin Harmonik Analizi adlı çalışmasında, IEEE 519-1992 standardın 1981 sürümleri arasındaki farkları, harmonik sınırları ve endüstriyel güç kullanıcıları üzerindeki etkilerinden bahsetmiştir. Değişken frekans sürücüleri tarafından üretilen harmonikleri incelemiştir. 1981 ve 1992 sürümlerinde verilen harmonik sınır değerlerini, bir güç sistem modeli üzerinde analiz etmiş ve harmonik sorununu hafifletmek için alınabilecek azaltıcı bazı önlemleri ayrıntılı olarak açıklamıştır.

Erkan (1996), tarafından yapılan “Nonlineer Yüklerde Güç Faktörünün İyileştirilmesi” konulu yüksek lisans tezinde, harmoniklerin genel tanımını yaparak oluşumu ve etkileri üzerinde durmuş, akım, gerilim ve güç değerleri hakkında bağıntılar

vermiştir. Nonlineer devrelerde yalnızca kapasitansla yapılacak olan kompanzasyonu ele almıştır.

Demir (1998), tarafından yapılan ”Enerji Dağıtım Tesislerinde Harmoniklerin Bilgisayarlı Simülasyonu ve Ölçümü” konulu doktora tezinde, harmonik güç akış analizini vermiş ve önerilen bir algoritma ortaya koymuştur. Bara sayısına bağlı olarak enerji sisteminde bulunan transformatörlerin mıknatıslanma akımlarınının etkisini dikkate almıştır. Sayısal uygulama kısmında nonlineer yükleri bulunan 8 baralı bir enerji sistemini örnek almıştır.

Owen (1998), tarafından yapılan çalışmada, güç sistemlerinde harmoniklerin ilk kez fark edilmesinden günümüze kadar oluşan süreçler hakkında bir değerlendirme yapmıştır.

Dwyer (1999)’da yaptığı çalışmada, veri toplama kartları kullanılarak oluşturulan güç kalitesi ölçüm düzeneklerinin, harmonikler, gerilim düşmesi vb. gibi geçici bozulmaların görüntülenmesi açısından güç kalitesi analizörlerine göre daha iyi bir çözüm olduğu üzerinde durmuştur.

Turan (2002), tarafından yapılan ”Sinüsoidal Olmayan Gerilimlerde Yönlendirilmemiş Saclarda Oluşan Harmonik Kayıpların Belirlenmesi” konulu doktora tezinde, yönlendirilmemiş makina saclarında sinüsoidal olmayan besleme gerilimlerinde oluşan harmonik demir kayıpları ve bunların sinüsoidal olmayan besleme geriliminin toplam harmonik distorsiyonu ile değişimini incelemiştir. Sinüsoidal olmayan besleme gerilimlerinde demir kayıplarının hesaplanması için elde edilen bağıntıların doğruluğu, oluşturulan deney düzeneğinden alınan sonuçlar ile karşılaştırmıştır. Yapılan karşılaştırmalı hata analizleri sonucunda, sinüsoidal olmayan besleme gerilimlerinde klasik bağıntılar ile yapılan hesaplamalarda hata %34’e kadar çıkarken, bu çalışmada önerilen bağıntılar ile yapılan hesaplamalarda hatanın %3’ten küçük kaldığını tespit etmiştir.

Adak (2003), tarafından yapılan "Enerji Sistemlerinde Harmonik Distorsiyonunun Azaltılması" konulu Doktora tezinde; harmonik bozulmanın azaltılmasını hedeflemiştir. Enerji sistemlerinde çokça kullanılan 3 fazlı tam dalga doğrultucunun harmoniklerinin giderilmesini sağlamıştır. Konu ile ilgili sayısal uygulama gerçekleştirilerek çeşitli tetikleme açıları için toplam harmonik bozulma değerini hem analitik hem de MATLAB programı ile elde etmiştir.

Amaç (2003), tarafından yapılan "Yeni Aktif Filtre Topolojileri Kullanılarak Akım ve Gerilim Harmoniklerinin Azaltılması ve Kesintisiz Güç Kaynağı Sistemlerine Uygulanması" konulu doktora tezinde, güç kalitesini artıran ve doğrusal olmayan yüklerin neden olduğu bozulmaları elimine eden aktif filtre sistemlerini incelemiştir. Seri, paralel, hibrid ve seri-paralel aktif filtre topolojileri inceleyerek simülasyon sonuçları sunmuştur.

Dursun (2003), yaptığı çalışmada, hem şebeke kaynaklı harmoniklerin etkisini azaltan, hem de reaktif güç kompanzasyonu sağlayan bir seri aktif güç filtresi ele alarak tasarımını ve simülasyonunu gerçekleştirmiştir. Tasarladığı seri aktif güç filtresini, geleneksel paralel aktif güç filtrelerine bir alternatif olarak sunmuştur.

Ekiz ve Tümay (2003), yaptıkları çalışmada, gerçekte çalışan bir işletmenin Matlab/Simulink programı kullanarak harmonik analizini yapmıştır. Simülasyonlarda tamaman gerçek veriler kullanmış ve buna göre sonuçlar elde etmişlerdir. Tesisler harmonik yönünden incelenmek istendiğinde Matlab/Simulink programı yardımıyla modelleme ve analizler yapmışlardır. Elde edilen sonuçlardan sistem harmoniklerini azaltacak bir filtre tasarımı yaparak işletmenin ihtiyaç duyduğu sabit bir gerilim ve düzgün bir dalga şeklini elde etmenin mümkün olacağı sonucuna ulaşmışlardır.

Gencer ve ark. (2003), tarafından yapılan "Harmoniklerin Güç Faktörü Üzerine Etkileri" konulu çalışmalarında, tek fazli bir sistemde gücü 20W olan bir elektronik balastli flüoresan lamba tesisati kurarak, filtreli ve filtresiz durumda güç faktörünü incelemişlerdir. Filtre takılmadan önce gerçek güç faktörünü 0.6143 temel güç faktörünü 0.9743 ve akım için toplam harmonik bozulma değerini THD_I %123,1 tespit etmişler.

Filtre takıldıktan sonra gerçek güç faktörünün değerinin 0.98'e temel güç faktörünün değerinin 0.99'a çıktığını ve akım için toplam harmonik bozulma değerinin ise THD_I %16.28'e indiğini tespit etmişlerdir.

Kuru (2003), tarafından yapılan "Adaptif Bulanık Mantık Yöntemi Kullanılarak Harmoniklerin Sınıflandırılması ve Adaptif Filtre Yaklaşımı ile Temel Bileşenin Belirlenmesi" konulu doktora tezinde, modern güç sistemlerindeki gerilim toplam harmonik distorsiyonu'nun (THDv) bulanık mantık yöntemi ile belirlenmesine yönelik yeni bir yaklaşım üzerinde durmuştur. Güç sistemlerindeki harmoniklerin belirlenmesi için öncelikle tespit edilmesi gerekli olan 50 Hz temel bileşen işaretinin adaptif filtre teorisi yaklaşımı ile elde edilmesine çalışmıştır. Örnek bir güç sisteminden alınan harmonik ölçüm sonuçlarını kullanarak önerilen adaptif filtrenin bir uygulamasını göstermiştir. Yapılan simülasyonlar ile toplam işaret içerisindeki 50 Hz temel bileşen işaretinin elde edilebilmesinde adaptif filtre teorisi yaklaşımının tatmin edici sonuçlar verdiğini göstermiştir.

Özdemir (2003), tarafından yapılan "Reaktif Güç Kompanzasyonu ve Harmonik Azaltımında Kullanılan Kompanzatörün Bulanık Mantık Denetimiyle Analizi ve Simülasyonu" konulu doktora tezinde, harmonik ve reaktif güç kompanzasyonu için Gelişmiş Statik VAr Kompanzatörü denetimini amaçlamıştır. Doğrusal olmayan yükün reaktif güç ve akım harmonik kompanzasyonu için bulanık mantık denetimli Gelişmiş Statik Var Kompanzatörü simülasyonunu gerçekleştirmiştir. Önerilen bulanık mantık denetimli Gelişmiş Statik Var Kompanzatörü'nün dinamik cevabı, hem kararlı hal hem de dinamik olarak değişen yük durumları için elde etmiş ve PI (Proportional Integral-Oransal İntegral) denetim ile karşılaştırmıştır. Önerilen bulanık denetleyicinin geleneksel PI denetleyiciye göre daha iyi sonuç verdiği sonucuna varmıştır.

Sucu (2003), tarafından yapılan "Elektrik Enerji Sistemlerinde Oluşan Harmoniklerin Filtrelenmesinin Bilgisayar Destekli Modellenmesi ve Simülasyonu" konulu yüksek lisans tezinde, elektrik enerjisi kullanan tüm kesimler için çok önemli olan

ve giderek artan harmoniklerin, tanımı, etkileri ve matematiksel analizi konularını incelemiş ve harmoniklerin giderilmesi yöntemlerinden biri olan filtreler üzerinde durmuştur. Örnek olarak ele almış olduğu harmonik içeren bir elektrik enerji sisteminin modelini MATLAB programı ile oluşturmuş ve 3 farklı harmonik filtre türünü ayrı ayrı uygulayarak sistemin bunlara cevabını incelemiştir. Uygulamış olduğu filtre türleri sırası ile; tek ayarlı filtre, kompanzasyon tesisine seri endüktans bağlamak ve paralel aktif filtredir. Bu sistemde akımdaki THD değerini %40 mertebelerinde, gerilimdeki THD değerlerini ise %6.5 mertebelerinde ölçmüştür. Tek ayarlı filtreyi uyguladıktan sonra akımdaki THD değerinin %4 mertebelerine ve gerilimin THD değerinin ise %3 mertebelerine düştüğünü gözlemlemiştir. Kompanzasyon sistemine seri endüktans bağladıktan sonra sistem akımı THD değerinin %8 mertebelerine, gerilimin THD değerinin % 6 mertebelerine düştüğünü gözlemlemiştir. Sisteme aktif filtre uyguladıktan sonra sistem akımı THD değerinin %3 mertebelerine, gerilim THD değerinin %0,5 mertebelerine düştüğünü gözlemlemiştir. Simülasyonu yapılan filtre çeşitleri içerisinde en iyi sonucu aktif filtre, ikincisini tek ayarlı filtre, en kötü performansı ise kompanzasyon sistemine seri endüktans bağlama işlemi verdiğini gözlemlemiştir.

Kale (2004), tarafından yapılan ”Paralel Aktif Güç Filtresi ile Harmonik Akım ve Reaktif Güç Kompanzasyonu” konulu Yüksek Lisans tezinde, paralel aktif güç filtrelerinin, doğrusal olmayan yüklerin ürettiği harmonik akımlarını ve reaktif gücü azaltarak, şebekenin ve diğer yüklerin zarar görmesini engellediğini görmüştür. Paralel aktif güç filtresi kontrolünde kullanılan metotları açıklayarak anlık reaktif güç teorisi tabanlı kontrol ve senkron referans yapı tabanlı kontrolün MATLAB'ta simülasyonunu yapmıştır. Farklı devre parametreleriyle yapılan simülasyon sonuçlarını sunmuştur.

Kocatepe ve ark. (2005)’de yaptıkları çalışmada, farklı yapıda ve ağırlıklı olarak harmonikli devreler için güç faktörüne bağlı olarak güçlerin nasıl bir değişim gösterdiğini incelemişlerdir. Ayrıca düzgün doğrusal olmayan (nonsinüsoidal) kaynaktan beslenen devrede sadece omik, indüktif veya kapasitif elemanların olması durumunda güçlerin değişimini ortaya koymuşlardır.

Sermon (2005), güç kalitesi ölçümleri ile ilgili standartlar ve temel noktaları sunmuş ve güç kalitesi sınır değerlerinin hangi seviyelerde olabileceği konusunda bilgiler vermiştir.

Vatansever (2005), tarafından yapılan ” Dalgacık Tabanlı Harmonik ve Güç Analizleri” konulu doktora tezinde, dalgacık tabanlı analitik ifadelerin, Fourier tabanlı ifadelere göre frekanstaki değişimlere duyarlıklıkları, işlem sayıları gibi yönlerden karşılaştırmış ve diğer alanlarda olduğu gibi harmonik ve güç analizi alanında da dalgacık dönüşümlerinin etkili, hızlı, yaygın ve verimli bir şekilde kullanılabileceğini elde ettiği sonuçlarla göstermiştir.

Yağcı (2005), tarafından yapılan ”Güç Transformatör Kayıplarına Harmoniklerin Etkisi” konulu doktora tezinde, bir fazlı ve üç fazlı transformatörlerin analizine yönelik temel bilgiler vermiş transformatörün lineer ve lineer olmayan eşdeğer devre modelleri üzerinde durmuştur. Transformatörün eşdeğer devresinden faydalanarak devre analizi tekniği ile harmonikli durumdaki parametrelerin hesabına yönelik yeni bir yaklaşım ortaya koymuştur. Ölçüm ve hesaplamaları besleme gerilim kaynakları ve dört farklı yük durumu için ayrı ayrı yaparak sonuçları karşılaştırmıştır. Ayrıca üç fazlı transformatörlerin her biri için K faktörleri ve yine her bir durum için gerilim ve akım THD'leri elde etmiştir. Özellikle deneysel ölçümlerden elde edilen veriler lineer olmayan yük şartlarında, transformatörlerin K faktörleri ile THD değerlerinin bilhassa sistemde üretilen küçük dereceli harmoniklerden ciddi olarak etkilendiklerini kanıtlamıştır.

Chang ve ark. (2006), makalelerinde, ark fırınlarının farklı durumlardaki çalışma özelliklerine değinmişler, Matlab/Simulink ile değerler elde etmişler ve çelik işleme bölgesindeki güç sisteminden alınan gerçek değerler arasında karşılaştırma yapmışlardır. Gerçekleştirmiş oldukları devreden elde edilen değerler ile benzetim sonucunda çıkan değerlerin birbirine yakın olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Efe (2006), tarafından yapılan “Güç Sistemlerinde Harmonikler ve Harmoniklerin Analizi” konulu yüksek lisans tezinde, harmoniklerle ilgili temel bilgileri vererek nasıl ve

neden oluştukları, elektrik enerji sistemi üzerindeki etkileri ve filtreleme yöntemlerini incelemiştir. Örnek bir elektrik enerji tesisinin modelini MATLAB programında oluşturmuş, pasif filtrelerin etkisini incelemiştir.

Filiz (2006), tarafından yapılan "Güç Sistemlerinde Harmonikler ve Filtrelemelerin İncelenmesi" konulu yüksek lisans tezinde, Fourier analizi kullanarak harmoniklerin matematiksel analizini, harmonik üreten kaynakları, harmoniklerin sistem üzerine etkilerini ve harmonik standartlarını incelemiştir. Harmoniklerin giderilmesi konusuna ise ana hatları ile değinerek filtrelerden bahsetmiştir.

İlaslaner (2006), tarafından yapılan "Güç Kalitesinde Harmonikler ve Filtrelenmesi" konulu Yüksek Lisans çalışmasında, TEİAŞ (Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi) tarafından kullanılan bir enerji nakil hattının (Akdağmadeni–Tokat Enerji Nakil Hattının) simülasyonunu yapmış, enerji kalitesi için gerekli uygulamaları hat üzerinde denemiş ve özellikle elektriksel bileşenler için kararlılık çalışmalarını sağlamıştır. Tezde enerji kalitesi için karma bir filtre kullanmıştır. Bu filtre aktif ve pasif filtrelerden oluşmuştur. Üretimden tüketim noktasına kadar enerji sistemindeki kararlılık için gerekli seri ve paralel kompanzasyonları yapmış, sonuç olarak harmonik bileşenlerde azalma sağlamış ve enerji kalitesindeki artışı gözlemleyerek örnek hat için raporlamıştır.

Kara ve ark. (2006), tarafından yapılan çalışmada, Niğde bölgesinde yer alan bir tekstil fabrikasının harmonik ölçümünü yapmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda harmonik kirlenmesinin çok önemli bir sorun olduğunu ortaya koymuştur. Fabrikadaki bu harmonik kirliliğinin en önemli kaynağının, kullanılan evirici sayısının fazlalığından olduğunu tespit etmiştir. Toplam harmonik bozulmayı azaltmak için, fabrikadaki standart kompanzasyon panosu yerine harmonik filtreli panolarının yerleştirilmesini önermiştir.

Karaağaç (2006), tarafından yapılan "Güç Sistemlerindeki Harmoniklerin Ölçülmesi Analizi ve Bunların Etkileri" konulu Yüksek Lisans tezinde, orta gerilim dağıtım sistemlerindeki güç kalitesini etkileyen harmonikleri incelemiştir. Bu incelemeyi

gerçekleştirmek için İzmir ilindeki sisteme bağlı bir fiderden ölçümler almıştır. Buradaki problemlere çözüm getirmeye çalışmıştır. Dağıtım sisteminden alınan ölçüm değerlerini MATLAB/Simulink programında analiz etmiştir. Güçlü motorlara sahip bir sistemdeki gerilim harmoniklerine karşı bir pasif filtre tasarlayarak sonuçları MATLAB/Simulink programında incelemiştir.

Tunçalp ve Sucu (2006), yaptıkları çalışmada, elektrik enerji sistemlerinde oluşan harmoniklerin filtrelenmesinde kullanılan pasif filtrelerin ve filtreli kompanzasyon sistemlerinin (seri endüktans bağlanmışkompanzasyon sistemi) yapıları ve uygulama şekilleri hakkında bilgi vermiştir. Daha sonra örnek olarak ele alınmış harmonik içeren bir elektrik enerji sisteminin modelini MATLAB programı ile oluşturmuştur. Bu sisteme, pasif filtre ve filtreli kompanzasyon sistemi uygulanarak bu filtrenin sistem üzerinde oluşturduğu etkileri incelemiş, sonuçlar üzerinde yorumlar yapmıştır. Sisteme tek ayarlı filtre uygulanmadan önce akımdaki THD değeri %40 mertebelerinde iken, tek ayarlı filtre uygulandıktan sonra bu değerin %4 mertebelerine düştüğünü tespit etmiştir. Gerilimin THD değerinin ise %6.5 değerinden %3 mertebelerine düştüğünü tespit etmiştir. Kompanzasyon sistemine seri endüktans bağlandıktan sonra sistem akımının THD değeri % 8 mertebelerine, gerilimin THD değeri %6 mertebelerine düştüğünü tespit etmiştir.

Yılmaz (2006), tarafından yapılan “Elektrik Sistem Tasarımında Harmoniklerin Giderilmesi için Bir Analiz” adında yüksek lisans tezinde, elektrik sistem tasarımında harmonikleri yok edebilmek için basit bir analiz vermiş ve elde edilen sonuçları sıralamış, proje tasarım aşamasında alınabilecek tedbirleri sunmuştur.

Açar (2007), tarafından yapılan “Mikrodenetleyicili Harmonik Analizör” konulu yüksek lisans tezinde, şehir şebekesi üzerinde ya da her hangi bir gerilim işareti üzerinde bulunan harmonikleri ölçen mikrodenetleyicili ve bilgisayar ara yüzü bulunan bir sistem tasarlamıştır. Mikrodenetleyicili harmonik analizör sisteminin donanımsal ve yazılımsal gerçeklenmesini vermiştir. Mikrodenetleyicili harmonik analizör sisteminin farklı girişler altında performansı sayısal sonuçlar vererek ortaya koymuş ve performans değerlendirmesini yapmıştır.

Aydın (2007), tarafından yapılan ”Kampüs Tipi Yerleşim Birimlerinde Kompanzasyon ve Harmonik Açısından Güç Analizleri” konulu Yüksek Lisans tezinde, örnek bölge olarak Sakarya Üniversitesi yerleşkesini seçmiş olup beş ayrı transformatör merkezinde ölçüm yapmış, sistemin gereksinimleri, yeni yönetmelikle birlikte karşı karşıya kalınacak problemleri göz önüne sermiş, bu transformatör merkezlerinden birine kompanzasyon ve enerji analizörü görevi yapan reaktif güç kontrol rölesi yerleştirmiş, uzaktan izleme ve anında veri alabilmek amacıyla cihaz yerel alan ağı üzerinden görüntülenebilir hale getirmiştir. Sakarya Üniversitesi ve bağlı birimlerine ait 2006 yılının tüm elektrik faturalarını incelemiş, 2008 yılı ve sonrasına yönelik, Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu’nca (EPDK) yürürlüğe alınması planlanan yönetmelik gereği cezai uygulamaya maruz kalması muhtemel trafo merkezlerini belirlemiştir. Sakarya Üniversitesi’nin yakın gelecekteki enerji politikasını değerlendirmiştir.

Salor ve ark. (2007), yaptıkları çalışmada, Türkiye’de elektrik ark fırınlarının oldukça yoğun olduğu bölgelerdeki güç kalitesi değerlerini göstermiştir. Mobil olarak kurulan güç kalitesi ölçüm sistemi aracılığı ile elektrik enerjisi dağıtım hatlarının belirli noktalarındaki değerleri incelemiştir. Değerlerin International Electrotechnical Commission-Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC) 61000-4-30 standartları ile uygunluğunu karşılaştırmıştır.

Aykut (2008), tarafından yapılan ”Eskişehir Kent Merkezinde Güç Kalitesi Olaylarının Gerçek Zamanda İzlenmesi ve Analizi” konulu yüksek lisans tezinde, Eskişehir İli kent merkezinde bulunan yeraltı besleme hatlarından toplanan verilerle güç kalitesi bozucu olaylarını izlemiş ve analiz etmiştir. Tespit ettiği güç kalitesi bozucularıyla ilgili verileri, güç kalitesi konusundaki ulusal olarak da kabul edilmiş olan standartlar çerçevesinde analiz ederek değerlendirmiş ve bu bozucuların etkilerinin en aza indirilmeleri, ayrıca besleme sistemine olan kötü etkilerinin giderilmesi için öneriler sunmuştur.

Bath ve Kumra (2008), tarafından yapılan çalışmada, LabVIEW grafik programı ile öncelikle sinüs dalgaları üretmiş, bunlar üzerine harmonik ve gürültü jeneratörleri ile üretilen sinyaller bindirmiş, daha sonra oluşturulan harmonik analizörü simülatörü ile bu sinyaller içerisindeki farklı harmonik değerler, gürültü ve anahtarlamalı sinyaller, harmonik değer seviyeleri, toplam harmonik bozulmalarını ölçerek göstermiştir.

Bilge (2008), tarafından yapılan "Güç Sistemlerinde Harmoniklerin Pasif Filtrelerle Eliminasyonu" konulu Yüksek Lisans tezinde, elektrik enerjisinin kalitesini belirleyen, frekans ve sinüzoidal dalga biçiminin bozulma nedenlerini ortaya koymuş ve 'Harmonik Analizörü' ile harmonik ölçümü yapmıştır. Daha sonra pasif filtreyi devreye alarak tekrar harmonik ölçümü yapmıştır. Elde edilen akım ve gerilimin Total Harmonic Voltage Distortion-Toplam Harmonik Gerilim Bozunumu (THD_V) ve Total Harmonic Current Distortion-Toplam Harmonik Akım Bozunumu (THD_I) değerleri ile mevcut durumun MATLAB ortamındaki simülasyonunu yapmıştır.

Çelik (2008), tarafından yapılan "Dağıtım Sistemlerinde Enerji Kalitesi" konulu yüksek lisans tezinde, güç kalitesi problemlerini, harmonikleri ve filtreleme metotlarını incelemiştir. Ayrıca sabit yüklü bir radyo verici istasyonunun güç trafosunun sekonder sargısı üzerinden yapılan ölçümlere yer vermiştir. Ölçüm sonuçlarına göre sistem için tasarlanan sabit ayarlı filtre ve kompanzasyon sistemine seri endüktans bağlaması metotlarının simülasyonunu Matlab ta gerçekleştirmiştir.

Engin (2008), tarafından yapılan "Elektrik Dağıtım Sistemlerinde Kompanzasyon ve Enerji Kalitesi Sorunları" konulu Yüksek Lisans tezinde, orta gerilim elektrik dağıtım sistemlerinde reaktif güce bağlı olarak ortaya çıkan enerji kalitesi problemlerini ve bunların çözüm yöntemlerini incelemiştir. Bir demir-çelik fabrikası elektrik dağıtım sistemi esas alarak bir model şebeke oluşturmuş ve bu modelin bilgisayar benzetimini yapmıştır.

Issouribehere ve ark. (2008), elektrik ark fırınları ile ilgili yapılan çalışmada, Arjantin Buenos Aires'te çok sayıda elektrik ark fırınının olduğu bir bölgedeki elektrik

enerjisi dağıtım istasyonundaki güç kalitesi ölçüm sonuçlarını göstermiştir. Çalışmada ark fırınlarının karakteristiklerinden bahsetmiş ve ark fırınlarının çeşitli çalışma periyotlarından alınan değerleri karşılaştırmıştır.

Kakilli ve ark. (2008), elektrik enerji sistemlerinde oluşan harmoniklerin reaktif güç kompanzasyon sistemlerine olan etkilerini incelemişlerdir. Örnek olarak, harmonik barındıran bir elektrik enerji sisteminin modeli MATLAB/SIMULINK programı ile oluşturmuşlardır. Oluşturulan bu sisteme, öncelikle klasik kompanzasyon sistemi uygulamıştır. Daha sonra filtreli kompanzasyon sistemi uygulayarak bunun sistem üzerinde oluşturduğu etkileri incelemişlerdir.

Venkatesh ve Kumar (2008), tarafından yapılan "Modelling of Nonlinear Loads and Estimation of Harmonics in Industrial Distribution System - Sanayi Dağıtım Sistemde Harmoniklerin Doğrusal Olmayan Yükler ve Tahmini Modellenmesi" konulu çalışmasında, küçük ölçekli endüstriyel dağıtım sistemlerinde kullanılan doğrusal olmayan elektrik yüklerinin modellemesinden bahsetmiştir. Dağıtım sisteminin harmonik analizi, tasarımı ve filtrelerin en uygun konum için sinüsoidal olmayan sistem ortamında bağlı aygıtların davranışını incelemiş, simülasyon modelleri laboratuvarda elde edilen gerilim ve akım dalga şekilleri, uygulamaya dayanan çeşitli doğrusal olmayan yükler için geliştirmiştir. Voltaj ve akım harmonikleri analizini tek tek bu yükler için gerçekleştirmiştir. Bu modelleri, tipik ev tipi ve endüstriyel yüklerin harmonik analizi için kullanmıştır. Elde edilen THD değerleri, PSCAD/EMTDC simülasyon kullanarak ve simülasyonda elde edilen THD'leri karşılaştırırak yapmıştır. Örnek bazı yük tiplerinin harmonik bozulma oranları çizelge 2.1'de, toplam gerilim için harmonik bozulma (THB_V) ve toplam akım için harmonik bozulma simülasyon (THB_I) ölçümleri, THD_V (%) ve THDI (%) olarak verilmiştir. Tüm yüklerde kaynak olarak 230 V, 50 Hz AC kullanmıştır. İlk olarak, her faz için gerilim ve akımların toplam harmonik bozulmasını ve PF'yi ölçmüş ve bu ölçüm sonucuna benzer sonuçlar elde edeceği simülasyon oluşturmuştur. Daha sonra simülasyona kondansatör bağladıktan sonra PF değerini ölçerek karşılaştırma yapmıştır.

Çizelge 2.1. Bazı yüklerin toplam harmonik bozulma ve yük akımlarının simülasyon sonuçları (Venkatesh, 2008)

Ekipman Adı	Güç	Irms (A)	THD_V (%)	THD_I(%)
Televizyon	50W	0.374	3.331	91.244
CPU & Monitor	100W	0.597	3.001	99.724
Şarj Cihazı	12V, 3A	3.068	3.286	45.581
Fan	80W	0.401	0.343	13.178
CFL Lamba	2x55W	0.471	3.224	29.621
Klima	Soğutma/Isıtma 5/5 A; IP = 1100/1100 W	5.028	3.285	44.719
Buzdolabı	220V, 4,4A	4.475	3.286	44.673
Çamaşır Makinesi	500W	2.774	3.285	42.013
Hidrofor	1HP(746W), 4A	4.01	0.328	0.318
Sıcak Su Sistemi	1000W	5.186	3.272	24.384

Eroğlu (2009), tarafından yapılan "Bir Dağıtım Şebekesinin Güç Kalitesi ve Harmonikler Yönünden İncelenmesi" konulu yüksek lisans tezinde, harmoniklerle ilgili temel bilgiler verilerek nasıl ve neden oluştukları, analiz yöntemleri, elektrik enerji sistemleri üzerindeki etkileri, standartları ve filtreleme yöntemlerini incelemiştir. Daha sonra bir elektrik dağıtım şebekesinde yapılan ölçümleri incelemiş ve harmoniklerin bu dağıtım şebekesi üzerindeki etkilerini yorumlamıştır.

Faisal ve Mohamed (2009), yaptıkları çalışmada, çoklu çözünürlük analizi ve yapay sinir ağı teknikleri kullanmışlardır. Malezya'daki endüstriyel bir bölgede kurulu bulunan enerji sistemine; güç kalitesi kaydetme düzeneklerini bağlayarak üç ay boyunca verileri izlemiş, daha sonra bu verileri işleyerek sınıflandırmış, bozulmanın kaynağını tanımlamış ve değerlendirmişlerdir.

Gencer ve ark. (2009), yaptıkları çalışmada, bir endüstri tesisinde harmonikler nedeniyle oluşan bozucu etkileri gidermek için aktif filtre uygulaması yapmışlardır. Aktif filtrenin boyutlandırılması, aktif filtre devrede iken ve devre dışı iken sistemden almış oldukları sonuçların karşılaştırılmasını yapmışlardır.

Huaying ve ark. (2009), yaptıkları çalışmada, güç kalitesi bozulmalarındaki bozucu ve geçici sinyallerin temelinin özelliklerini açıklamışlardır. Bu yeni yaklaşımı yapay zekâ ile birleştirerek güç sistemlerindeki kısa süreli bozulmaları ve bozulmanın yerini tespit etmişlerdir.

Yüksel ve ark. (2009), tarafından yapılan çalışmada, enerji kalitesi ve enerji kalitesinin verimliliğe etkisini incelemişlerdir. Bu doğrultuda endüstride ve binalarda yaygın olarak kullanılan ve verimlilikte önemli bir pay sahibi olan sürücülerin enerji kalitesine etkisi ile bu etkinin giderilmesinde kullanılan yöntemlerden bazılarını incelemiş ve karşılaştırma yapmışlardır.

Con (2010), tarafından yapılan "Medya Sektöründe Elektrik Enerji Kalitesinin Harmonik Yönünden İncelenmesi ve Çözüm Önerileri" konulu yüksek lisans tezinde, elektrik enerji kalitesini etkileyen faktörlerin neler olduğu, etkileri ve nasıl giderileceği konusunda araştırılmalar yapmıştır. İki medya kuruluşunun televizyon binaları ve yine o tesislere ait olan matbaa tesisleri ile birlikte toplam dört tesis üzerinde incelemeler yapmıştır. Tesislerde mevcut durumu, harmoniksel anlamda yapılan veya yapılmayan düzenlemeler yönünden incelemiştir.

Koçyiğit (2010), tarafından yapılan "Elektrik Enerji Kalitesinin Tekstil Sanayine Maliyeti ve Öneriler" konulu Doktora tezinde, hem emek hem de makine yoğun olan testil sektöründe elektrik enerjisi kalitesinin oluşturduğu üretim kayıpları, verimlilik kayıpları, makine arızalarına bağlı kayıplar, iki farklı ilimizdeki farklı işletmelerde 6 ayı aşkın sürelerde yapılan ölçümlerle incelemiştir. Elektrik enerjisi kalite olayları sırasındaki parasal kayıpları hesaplamıştır. Tezde elektrik enerjisi kalite olaylarının tekstil üretimindeki etkileri anlatılmıştır. Son bölümde oluşan maliyetler ve bu maliyetlerin önüne geçilmesi için önerileri bulunmaktadır.

Okuducu (2010), tarafından yapılan "Elektrik Güç Sistemlerinde Elektrik Kalitesinin Analizi ve Simülasyonu" konulu yüksek lisans tezinde, elektrik güç kalitesine etki eden unsurları incelemiş, güç kalitesizliklerini sınıflandırmış, güç kalitesini

tanımlamak ve boyutlandırmak için kullanılan formulasyonları tanıtmış ve güç kalitesizliğinin sistem üzerindeki olumsuz etkilerine değinmiştir. Van ilinde iki ayrı tesiste (iki fabrika) farklı tarihlerde zera MT310 adlı güç analizörü ile çeşitli ölçümler (anlık elektriksel değerler, harmonikler, akım ve gerilim dalga şekilleri vb.) yapılarak bazı güç kalitesizlikleri tespit etmiştir. MATLAB Simülasyon programı kullanılarak tek ayarlı bir pasif filtre tasarlamış ve filtrenin etkilerini gözlemlemiştir.

Akyel (2011), tarafından yapılan "Elektrik Enerji Sistemlerinde Güç Kalitesinin İncelenmesi" konulu yüksek lisans tezinde, enerji kalitesi parametreleri olan gerilim seviyesi, frekans, gerilim düşümü gibi değerlerin istenilen mertebelere getirmek amacı ile tesislerdeki harmoniklerin giderilmesi ve tesislerden çekilen reaktif gücün minimuma indirilmesi incelemelerinde bulunmuştur. Harmonik bileşenleri yok etmek için matlab simulink programı kullanmıştır. Benzetim ortamında harmonik filtrasyon, pasif harmonik filtreler, aktif harmonik filtreler ve kompanzasyon bataryaları kullanarak elektrik enerjisini kaliteli hale getirmiştir.

Erişti ve Demir (2011), yaptıkları çalışmada, elektrik dağıtım sistemlerindeki güç kalitesinin belirlenmesi için gerçek zamanlı güç kalitesi izleme sistemi gerçekleştirmişlerdir. Gerçekleştirilen güç kalitesi izleme sistemini, Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi yanında bulunan dağıtım trafo merkezinde yapmışlardır. İzleme sisteminde ilk olarak, güç sistemine bir güç kalitesi analizörü bağlamışlardır. Bu güç kalitesi analizörü ile sisteme ait akım, gerilim, güç ve frekans gibi parametrelerin yanı sıra sistemde meydana gelen güç kalitesi olaylarını kayıt altına almışlardır. Yapılan analizlerde, akım ve gerilim harmoniklerini incelemişlerdir.

Ertay ve ark. (2011), yaptıkları çalışmada, MATLAB ortamında endüstriyel bir sistemde nonlineer yükler sebebiyle meydana gelen harmonik bozulmalara karşın pasif filtre tasarımı ve uygulanmasını gerçekleştirmişlerdir.

Fidan (2011), tarafından yapılan ”Harmoniklerden Kaynaklanan Gerilim Bozulmalarının Elektriksel Kısmi Boşalmalar Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi” konulu doktora tezinde, harmoniklerden kaynaklanan gerilim bozulmalarının kısmi boşalmalar üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Doktora çalışması kapsamında geliştirmiş olduğu faz çözünümlü kısmi boşalma ölçüm sistemini kullanarak deneysel ölçümler gerçekleştirmiştir.

Gökozan (2011), tarafından yapılan “Endüstriyel Tesislerde Güç Kalitesinin İzlenmesi, Analizi ve Uygun Harmonik Filtre Seçimi” konulu doktora tezinde, yük karakteristiği değişken olan çeşitli endüstriyel tesislerden, yüksek örnekleme frekanslarında toplanan akım ve gerilim verilerini kullanarak güç kalitesi parametrelerinden olan harmonik analizi yapmıştır. Güç kalitesi izleme ve veri kaydı için LABVIEW tabanlı görsel bir kullanıcı ara yüzü tasarlamıştır. Farklı endüstriyel tesislerin değişik çalışma koşullarına ait yük durumlarındaki harmonik analizi için toplanan verileri MATLAB ortamında analiz etmiştir.

Parthasarathy ve ark. (2012), “Harmonic Mitigation in a Rectifier System Using Hybrid Power Filter” adlı yaptıkları çalışmada, doğrusal olmayan doğrultucu sistemde harmoniklerin azaltılması ve güç faktörünün iyileştirilmesi için Hybrid Power Filter (HPF) tasarlamışlardır. Tek ayarlı pasif filtreyi baskın üçüncü dereceden harmoniği azaltmak için tasarlamışlardır. Pasif filtre ile birlikte, Aktif Güç Filtresi (APF) harmonik filtreleme performansını artırmak için uygulamışlardır. Önerilen sistemi MATLAB SIMULINK kullanılarak simüle etmişlerdir. Tüm aşamaları tabloda verilmiş olan Toplam Akım Harmonik Bozulma (THD_I) simüle sonuçlarına göre, hybrid filtrenin saf aktif filtreye göre daha iyi harmonik azalttığı ve bunun yanı sıra güç faktörünü düzelttiği sonucunu ulaşmışlardır.

Tin ve ark. (2012), “Power System Harmonic Mitigation using Hybrid Filters” adlı yaptıkları çalışmada, dengeli ve saf sinüs dalga şekilleri elde etmek için, paralel aktif filtrenin en iyi aday olduğunu göstermiş, simülasyon sonuçlarına göre optimal tasarım hibrit filtreler için çeşitli tasarımları tanıtmış ve önermişlerdir. Simülasyon sonuçları, aynı

zamanda, bir hibrid filtrede seri bileşen yük tarafına bağlandığı zaman, arzu edilmeyen bozulmuş sinyale neden olduğunu göstermişlerdir.

Uçar (2012), tarafından yapılan "Paralel Aktif Güç Filtresi Kullanarak Harmonik ve Reaktif Güç Kompanzasyonu Yapılması" konulu yüksek lisans tezinde, harmonik ve reaktif güç kompanzasyonu işlemlerini aynı anda yapabilen iki seviyeli evirici tabanlı bir paralel aktif güç filtresinin (PAGF) benzetim modelini Matlab/Simulink paket programı kullanılarak oluşturmuştur.

Demirdelen (2013), tarafından yapılan "Çok Seviyeli Paralel Melez Aktif Filtrenin Modellenmesi ve Analizi" konulu yüksek lisans tezinde, melez aktif güç filtresi PSCAD/EMTDC programını kullanarak modellemiştir. PSCAD/EMTDC simulasyon programında elde ettiği sonuçlara göre, çok seviyeli paralel melez aktif filtrenin hem harmonik kompanzasyon hem de reaktif güç kompanzasyonunu başarılı biçimde gerçekleştirdiğini gözlemiştir.

Göçmen ve Özdemir (2013), yaptıkları çalışmada, farklı tipteki aydınlatma aygıtlarıyla oluşturulan deney düzeneğini kullanarak, aygıtlarının tek tek ve birlikte kullanılmaları durumunda şebekeden çektikleri akımlar ve şebekeye olan harmonik etkilerini incelemişlerdir.

Rüstemli ve ark. (2013), yaptıkları çalışmada, Van ilindeki bir tesiste (fabrikada) ZERA MT 310 güç analizörü ile çeşitli ölçümler (anlık elektriksel değerler, harmonikler, akım ve gerilim dalga şekilleri vb.) yaparak bazı güç kalitesizliklerini tespit etmiş ve bu bulgulardan hareketle güç kalitesizliğine neden olan harmonikleri incelemiş ve harmoniklerin mevcut tesisler üzerindeki etkilerini yorumlayarak aktif filtre çözümlerini simülasyon çalışmalarıyla karşılaştırmışlardır.

Şekkeli ve ark. (2013), yaptıkları çalışmada, toplam kurulu gücü 36 MW olan ve üretim yapmakta olan bir rüzgâr santrali çıkışındaki güç kalitesi parametrelerini

ölçmüşlerdir. Ölçüm sonuçlarını EN 50160 standartlarına göre değerlendirmişlerdir. Ölçümlerde gerilim, akım, aktif, reaktif, görünür güçler, frekans, kırpışma, harmonik, güç faktörü gibi büyüklükleri incelemişlerdir. Ölçüm sonuçlarına göre gerilime ilişkin toplam harmonik bozunumu (THB-V) değerinin standart limiti aştığı, akım harmonik bozunum (THB-I) değerinin ise standart sınırlar içerisinde kaldığını tespit etmişlerdir. Aynı şekilde frekans, kırpışma ve güç faktörü değerlerinin de sınır değerler içerisinde olduğunu belirlemiştir. Ölçüm sonuçlarında, diğer güç değerlerine ilişkin herhangi bir olumsuz etkiye rastlamamışlardır.

Uzan (2013), tarafından yapılan "Alçak Gerilim Dağıtım Sistemlerinde Güç Kalitesi" konulu Yüksek Lisans tezinde, alçak gerilim dağıtım sistemlerinde, güç kalitesi problemleri ve çözüm yöntemlerini, çözüm yöntemlerinin maliyetini, güç kalitesi ile ilgili standart ve yönetmelikleri, güç sisteminde oluşan harmonikler ve çözüm yöntemlerini ayrıntılı olarak açıklamıştır. Ayrıca örnek uygulama olarak, bir alçak gerilim dağıtım sisteminde akımdaki THD_I değerini % 85 olarak ölçmüştür. Dağıtım sisteminde tespit edilen 3.,5.,7. harmonik bileşenlerin azaltılması amacıyla tek ayarlı paralel pasif filtre ile 11. harmonik bileşenin süzülmesi için ise yüksek mertebedeki harmoniklerin de kısmen süzülebilmesine imkan veren C tipi yüksek geçiren filtre uygulanması yönteminin simülasyonunu, MATLAB R2010b, simulink programı kullanarak yapmıştır. Filtreleme sonrasında sistemde akımdaki THD_I değerini % 15 seviyelerine indirmiştir.

Chiradeja ve ark. (2015), tarafından "Energy savings analysis and harmonics reduction for the electronic ballast of T5 fluorescent lamp in a building's lighting system" başlıklı çalışmada, bir bina floresan T5 tipi elektronik balastlı lamba kullanıldığında enerji tasarrufunu ve harmoniklerini incemişlerdir. Aydınlatma açısından, enerji tasarrufu ve harmonik verimlilik endekslerini de değerlendirilmişlerdir. Aynı zamanda yaygın olarak kullanılan T8 tipi düşük watt kayıplı elektromanyetik balast ile çalışan floresan lamba ile karşılaştırmışlardır. Her bir tip ve marka için floresan lambaları 4'lü ve 10'lu gruplar halinde çalıştırmıştır. T5 tipi elektronik balastlı floresan lambanın filtresiz 4'lü floresan grup için THD_I %23.7 ölçmüşler, 10'lu grup için THD_I %27.2 ölçmüşlerdir. Pasif filre

takıldıktan sonra 4'lü floresan grup için THD_I %11 ölçülmüş, 10'lu grup için THD_I %11.1 ölçmüşlerdir.

Germeç (2015), tarafından yapılan "Elektrik Güç Sistemlerinde Harmonik Analizi Algoritmaları Geliştirme" konulu doktora tezinde, elektrik güç sistemlerinde zamanla değişen sinyaller için, ADALINE (Adaptive Linear Neuron-Uyarlamalı Doğrusal Eleman) tabanlı algoritmalar kullanarak, temel frekans tespiti ile harmonik ve ara harmonik bileşenlerin genlik ve faz açılarının kestirimini kapsayan çok işlevli bir sistem yapısı geliştirmiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Ölçümde kullanılan ekipmanlar

Bir güç sisteminde doğrusal olmayan bir yük, bir anahtarlama eylemi ve buna bağlı olarak akım kesintileri ile karakterize edilir. Bu davranış, sistemin temel frekansının katları olan farklı bileşenlere akım sağlar. Bu bileşenlere harmonik denir.

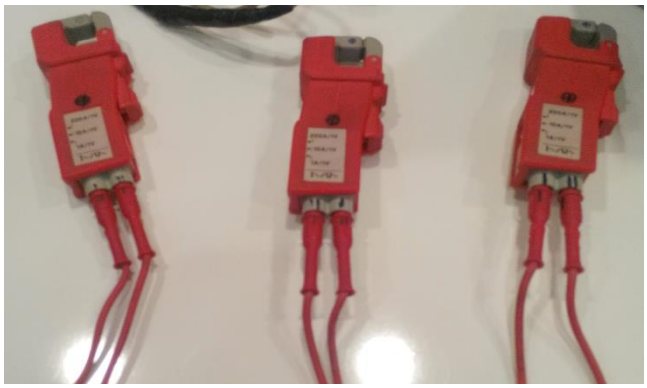
Harmonik akımlar üretebilen doğrusal olmayan yüklere örnek olarak bilgisayarlar, faks makineleri, yazıcılar, PLC'ler, buzdolapları, televizyonlar ve elektronik aydınlatma balastları verilebilir. Akım harmonikleri, sistemin güç faktörünü kötüleştirir. Harmonikler içeren akımlar, elektrik üretim sistemleri ve iletim hatları boyunca akarken, elektrik şebekesinin empedansı nedeniyle ek bozulmalar meydana gelir. Temel frekansta çalışacak şekilde tasarlanan güç sistemleri, giderek daha fazla doğrusal olmayan yükler ağa bağlandığı için hatalı çalışabilmektedir. Harmonikler deri etkisi nedeniyle iletkenlerin direncini arttırır ve anormal nötr-toprak voltaj farkına neden olur. Bağlanan daha doğrusal olmayan yükler toplam harmonik bozulmayı yükseltir, ancak toplam miktar bireysel büyüklüklerin toplamından daha düşüktür. Harmonikler, sigortalar ve devre kesiciler gibi bileşenlere zarar verebilir ve yardımcı cihaz sayaçlarının hatalı ölçümleri kaydetmesine neden olabilir.

Bu çalışmada güç kalitesizliğine neden olan olaylar tanıtılmış, elektrik enerji kalitesizlikleri tespit edilerek uygun filtre ile gerilim bozulmasına neden olan harmonikler bastırılmış ve sinüsoidal bir dalga biçimi elde edilmeye çalışılmıştır. Esas olarak sistem ve şebeke karakteristiklerinin elde edilmesi, güç analizörü cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Güç analizörü ile elde edilen karakteristikler, cihazın sürücüsü yardımıyla bilgisayar ortamına aktarılarak bu şekilde daha ayrıntılı bir inceleme imkânı elde edilmiştir.

Güç tesislerinde kullanılan ölçüm sistemlerinde gelinen noktada, en etkili ölçüm cihazları olarak; güç analizörleri (power analiyzer) görülmektedir. Çalışmamızda kullanılan güç analizörü ile tesislerde, gerilim, akım, reaktif güç, aktif güç, frekans, görünür güç, güç katsayısı ve harmonik distorsiyon değerlerini anlık olarak ölçüp kaydetme, bu değerlerin analizini yapılabilme imkânını elde edebiliyoruz. Bu şekilde, güç sistemlerinin performansını ayrıntılı bir biçimde analiz edebilmekteyiz. Çalışmamızda kullanılan güç analizörü Şekil 3.1'deki Amprobe Energy Test 2020'dir. Amprobe energy test 2020 ölçüm aparatları Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'te görülmektedir. Şekil 3.4'te ise Amprobe energy test 2020 bilgisayar bağlantı kablosu verilmiştir. Amprobe energy test 2020 harmonik analizör bağlantı şeması (tek faz ve üç faz) Şekil 3.5'de görülmektedir.



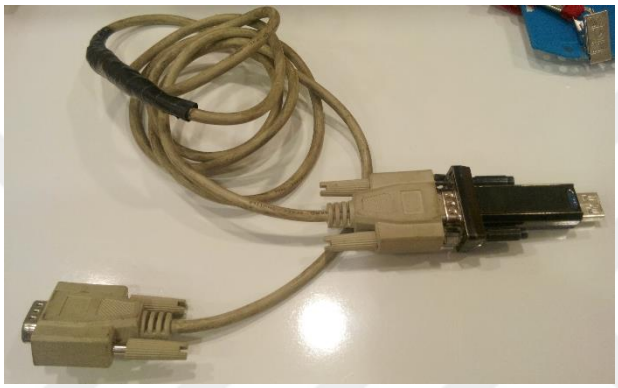
Şekil 3.1. Amprobe energy test 2020 harmonik analizör



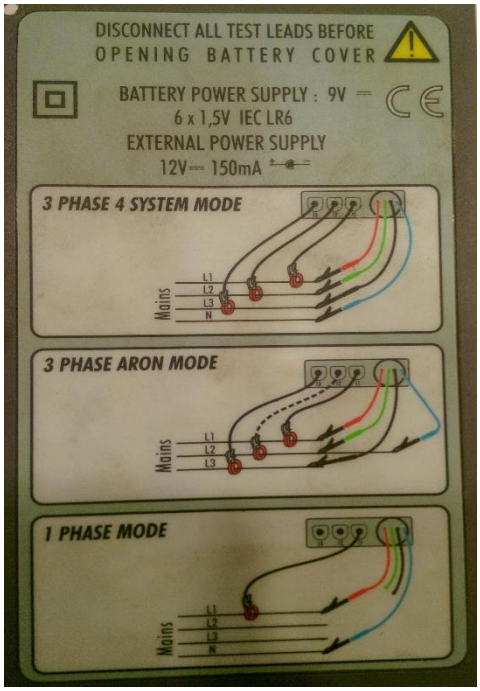
Şekil 3.2. Amprobe energy test 2020 ölçüm aparatları



Şekil 3.3. Amprobe energy test 2020 ölçüm aparatları



Şekil 3.4. Amprobe energy test 2020 bilgisayar bağlantı kablosu



Şekil 3.5. Amprobe energy test 2020 harmonik analizör bağlantı şeması

Amprobe Energy Test 2020 güç analizörü üç fazlı olarak, akım ve gerilim harmonikleri, aktif, reaktif ve görünür güçlerin analizini yapabilen ölçüm cihazıdır. Yüksek depolama kapasitesi ve uzun güç kaydı (bir aydan fazla) ile güç tüketiminin doğru bir analizini gerçekleştirmesine izin verir. Amprobe Energy Test 2020 güç analizörünün gerilim, güç, enerji, kayıt ve temel fonksiyonları aşağıda belirtilmiştir. Gerilim ile ilgili olarak, gerçek zamanlı görüntü yanı sıra gerilim değerleri ve ilgili harmonik kayıt. Güncel olarak, gerçek zamanlı görüntü yanı sıra güncel değerler ve ilgili harmonik kayıt. Güç ile ilgili olarak, gerçek zamanlı görüntü yanı sıra voltaj, akım değerleri ve güç faktörü ve Cosφ, aktif, reaktif ve görünür güçler ile ilgili harmonik kayıt. Enerji ile ilgili olarak, gerçek zamanlı görüntünün yanı sıra aktif ve reaktif güçlerin kaydı. Kayıt ile ilgili olarak, kayıtlar cihazın hafızası (max. 35) içinde saklanır. Cihazın temel ayarları ile ilgili olarak, tek fazlı, üç fazlı ve tam ölçekli akım. Çizelge 3.1'de ise Amprobe energy test 2020 harmonik analizör ölçüm parametreleri verilmiştir.

Çizelge 3.1. Amprobe energy test 2020 harmonik analizör ölçüm parametreleri

Voltage and current measurement

Function	Range (V)	Resolution (V)	Input impedance	Overload protection
Voltage measurement	300, 600 (Autorange)	0.2	300 kOhm	900 V (1 min.)
Current measurement	1	0.001	100 kOhm	5 V

PF measurement

Function	PF	Resolution
PF measurement	0.2	0.01 digits
	0.5	0.01 digits
	0.8	0.01 digits

Harmonic measurement

Function	Range	max. resolution
Harmonic measurement	DC - 25. harmonic	0.1 V/0.1 A
	26 - 33. harmonic	0.1 V/0.1 A
	34 - 50. harmonic	0.1 V/0.1 A

Power measurement

Function	Range	Resolution
Active power	0 - 999.9 W 1 kW - 999.9 kW 1 MW - 999.9 MW	0.1 W 0.1 kW 0.1 MW
Reactive power	0 - 999.9 VAR 1 kVAR - 999.9 kVAR 1 MVAR - 999.9 MVAR	0.1 VAR 0.1 kVAR 0.1 MVAR
Apparent power	0 - 999.9 VA 1 - 999.9 kVA 1 - 999.9 MVA	0.1 VA 0.1 kVA 0.1 MVA
Active energy (Class 2 IEC 1036)	0 - 999.9 WH 1 - 999.9 kWH 1 - 999.9 MWH	0.1 WH 0.1 kWH 0.1 MWH
Reactive energy (Class 3 IEC 1268)	0 - 999.9 VARH 1 - 999.9 kVARH 1 - 999.9 MVARH	0.1 VARH 0.1 kVARH 0.1 MVARH

3.2. Yöntem

Elektrik enerjisini üreten ve dağıtan kuruluşların görevi, kaliteli ve ucuz elektrik enerjisini tüketicilere temin etmektir. Bu kuruluşlar gerek kompanzasyon ve gerekse harmonikler bakımından uyulması gereken yönetmelikleri belirlemişlerdir.

Dağıtım şirketleri harmoniklerden kaynaklanan ısı kayıplarını, kWh olarak kullanıcılardan karşılamaktadırlar. Tesisler, harmonik üreten makinalardan kaynaklı olarak kayıp bedeli ödemektedirler. Bu harmonik ısı kaybının değeri; 1 kW = 860 kCal/h'dir. Harmoniklerden kayanaklanan bu kayıp elektrik kullanıcılarından karşılanmaktadır.

Güç elektroniğinin büyümesi ve genişlemesi ve elektrik güç sistemi uygulamalarında doğrusal olmayan yüklerin çoğalmasıyla harmonikler meydana gelmekte ve böylece tesislerde kullanılan elektrik enerjisinin kalitesi azalmaktadır. Tesislerde kaliteli bir elektrik enerjisi için reaktif güç kompanzasyonunu harmonik etkiler göz önüne alınarak yapılmalıdır. Harmoniklerin varlığı göz ardı edilecek olursa yapılan reaktif güç kompanzasyonu hatalı olacağından dolayı elektrik kayıplarımız daha fazla olacaktır. Güç kalitesinin ölçülebilen en önemli parametrelerinden biri harmoniklerdir.

Kondansatörler doğrusal yük olduklarından şebekeye harmonik üretmezler. Ancak şebekede var olan harmoniklerin genliklerini arttırırlar. Ayrıca endüktif reaktif enerjiyi yok etmek, yani; Güç katsayısı cosφ'yi düzeltmek için şebekeye paralel bağlandıklarından rezonansa sebep olurlar. Bundan dolayı rezonans frekansında empedans artışına sebep olurlar. Bu durumda da sistemde var olan harmoniklerin gerilimini arttırırlar. Dolasıyla da şebeke tarafına genliği yüksek harmonik akımlarının iletilmesi başlar. İçinde harmonik üreten yüklerin bulunduğu sistemlerde kompanzasyon yalnız 400 Volt'luk standart kondansatörlerle yapılması durumunda kondansatörlerde harmoniklerden dolayı önüne reaktör bağlandığı için kondansatör ucuna gelen gerilim yükseldiğinden tahribat ve aynı zamanda var olan harmoniklerin genliklerinde de artış meydana getirir. Kompanzasyon sistemleri tasarlanırken,

harmoniklerin kondansatörler üzerinde etkisi mutlaka göz önünde bulundurmalıdır. Kondansatör önüne konacak reaktörün hesaplanabilmesi reaktör ayar frekansı hesaplanabilmesi gerekir. Bu ayar frekansı da devredeki L ve C değerlerinin meydana getireceği rezonans frekansına bağlıdır.

Yapılan çalışmada, birçok tesiste ölçümler yapılmıştır. Güç analizörü kullanılarak tesislerde gerilim, akım ve güç değerleri ölçülmüştür. Ölçülen veriler bilgisayar bağlantı aparatları vasıtasıyla bilgisayara aktarılmış ve güç analizleri ve hesapları yapılmıştır.

Kürker ve Taşaltın'ın yapmış olduğu çalışmada lazer torna tezgahının olduğu tesisde harmonik akım ve gerilim ölçümlerinin sonuçları kullanılarak kompanzasyon hesabı gerçekleştirilmiş, bu tesisin ve diğer tesislerin gerekli kondansatör gücü kullanılarak seri endüktans (harmonik filtre reaktörü) ile uygun filtre hesapları yapılmıştır. Kürker ve Taşaltın'ın yapmış olduğu çalışma olan lazer torna tezgahı Şekil 3.6'da görülmektedir.

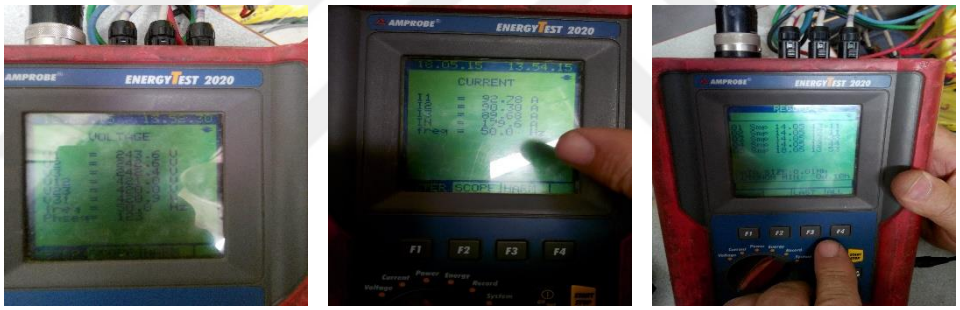


Şekil 3.6. İlk ölçümün yapıldığı tesiste kullanılan lazer torna tezgahı

Şekil 3.7'de harmonik analizör ile panoya olan bağlantı, ölçme1-besleme1 noktasında yapılan ölçüm görülmektedir. Şekil 3.8'da harmonik analizör ile ölçme1-besleme1 noktasında yapılan gerilim ve akım ölçümü ile kayıtları görülmektedir.



Şekil 3.7. Harmonik analizör ile panoda yapılan bağlantı, ölçme1-besleme1 noktası



Şekil 3.8. Ölçme1-Besleme1 noktasında yapılan ölçümler

İkinci ölçüm yapılan 2500 kVA ve 1600 kVA ile beslenen tekstil tesisinde belirlenen iki noktada her faz için yapılan ölçümler sonucunda gerilim ve akım harmoniklerinin varlığı tespit edilmiştir.

Üçüncü ölçüm olarak 40 W ve 150 W'lık LED projektörün ölçümleri yapılmış, yapılan ölçümler sonucunda gerilim ve akım harmoniklerinin varlığı tespit edilmiştir.

Dördüncü olarak ölçüm yapılan tesiste yedi noktada ölçümler yapılmış, yapılan ölçümler sonucunda gerilim ve akım harmoniklerinin varlığı tespit edilmiştir.

En son ölçüm yapılan tesis 1250 kVA ve 1600 kVA'lik trafolardan beslenmektedir. Tesiste yaklaşık olarak 152 kW'lık ve 185 kW'lık 6'şar adet open-end makinası mevcuttur. Filtresiz olarak open-end 1 makinasında ölçümler yapılmış ve tespit edilen harmoniği azaltmak için 152 kW'lık open-end 1 makinasının ayarlanabilen frekans sürücüsünün hem önüne hem arkasına tasarladığımız pasif filtre bağlanmıştır. Filtre bağlandıktan sonra 152 kW'lık open-end 1 makinasında harmonik ölçümleri yapılmıştır. Daha sonra kompanzasyon kondansatörleri önüne harmonik filtre reaktörü bağlayıp harmonik ölçümleri yapılmıştır. Filtre bağlanmadan önce, kompanzasyon kondansatörleri önüne harmonik filtre reaktörü bağlandıktan sonra ve pasif harmonik filtre takıldıktan sonra yapılan ölçüm sonuçları ve harmonik güç oranları karşılaştırılmıştır. En son ölçümün yapıldığı tesiste kullanılan open-end makinalarının görünümü Şekil 3.9'da verilmiştir.

Çalışmada hedef, doğru ölçüm yaparak ölçüm neticesinde harmoniği azaltacak filtre ve parametrelerin ne olacağını belirlemektir.



Şekil 3.9. En son ölçümün yapıldığı tesiste kullanılan open-end makinalarından görünüm

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Araştırma Bulguları

Elektronik sayaçlar sayesinde elektrik tedarikçileri harmoniklerden kaynaklanan ısı şeklinde meydana gelen ve atmosfere dağılan ve işletmenin ısı kaybını (hiç bir iş yapmayan enerjiyi) tüketicilerden tahsil etmektedirler.

Daha önceleri gerilim kırpıcı yokken harmonikler de yoktu. Gerilim kırpıcılar (diyot, tristör triyak ve IGBT transistörler çıktı) meselâ hız kontrol cihazları %10 - %20 arasında işletmeye tasarruf sağlatırken %35 ve daha yukarı harmoniklere sebep olduklarından dolayı elektrik enerjisi bakımından zarara uğratır.

Eğer önlem alınamazsa harmonik frekansından doğan rezonansa gelindiği anda, besleyici transformatör ile alıcı durumundaki işletme makinaları ve kompanzasyon kondansatörlerinden dolayı rezonans olayı meydana gelmesine sebep olur ve transformatör devre dışı kalır ve bütün işletmenin enerjisi kesilir. Bu ise iş kaybı, kalite kaybı gibi neticesinde işletmeye zarar verir. Bu sadece işletmeye mahsus olmayıp komşu işletmelere de zarar verebilmektedir.

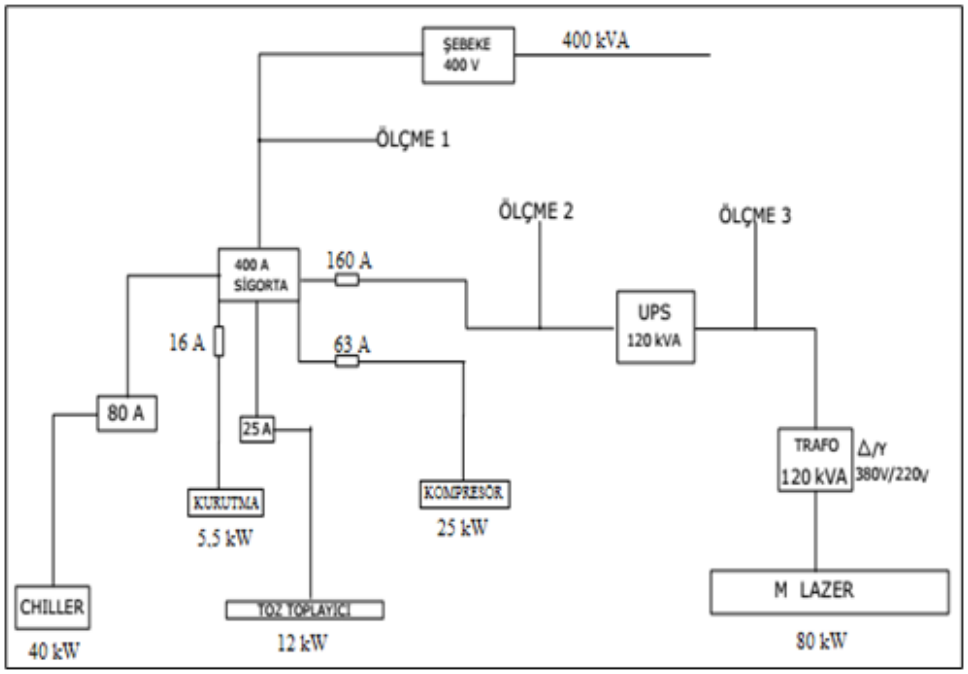
Literatürde, partik uygulama simülasyon uygulamalarına nazaran çok azdır. Çalışmamızdaki beklenti pratikte meydana gelecek problemleri çözmek. Bunu ise doğru ölçüm yaparak, ölçüm neticesinde harmoniği azaltacak filtre ve parametrelerinin ne olacağını belirlemektir. Ayrıca uygulamasını yapmış olduğumuz harmonik azaltma yönteminin otomatik olarak devreye alınması yani otomatik bir sistem kurmak. İleriki hedefimiz aktif filtre uygulaması gerçekleştirmektir.

4.2. Lazer Torna Tezgahına Sahip Tesiste Filtre Takılmadan Önce Harmonik İncelemesi

Kürker ve Taşaltın 2016'da lazer torna tezgahına sahip tesiste üç noktada filtresiz olarak her faz için yaptıkları ölçümler sonucunda gerilim ve akım

harmoniklerinin varlığını tespit etmişlerdir, daha sonra bu harmoniklerden kaynaklı kayıbı % olarak hesaplamışlardır. Ölçüm yapılan tesiste ML3015ex ve nihai gücü 4500 Watt olan lazer torna makinası kullanılmaktadır.

Tesiste belirlenen üç ölçüm noktası Şekil 4.1'de görülmektedir. İlk ölçüm noktası tesiste şebeke girişi, ikinci ölçüm noktası 120 kVA'lik UPS'in önü, üçüncü ölçüm noktası ise 120 kVA'lik UPS ile 120 kVA'lik trafo'nun arasıdır.



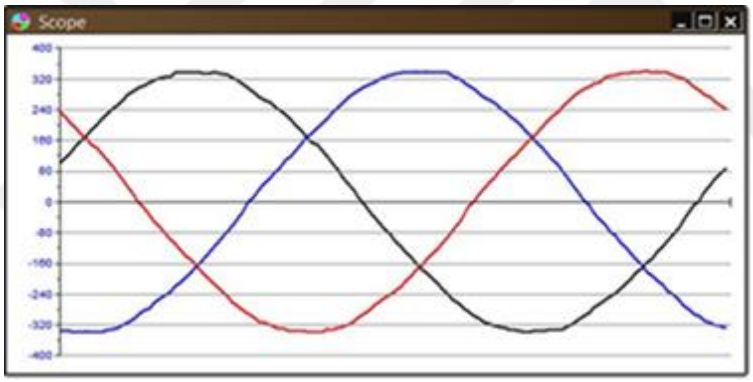
Şekil 4.1. Lazer torna tezgahına sahip tesiste ölçme noktaları (Kürker ve Taşaltın, 2016)

Çizelge 4.1'de birinci ölçüm noktasındaki, Çizelge 4.3'de ikinci ölçüm noktasındaki, Çizelge 4.5'de ise üçüncü ölçüm noktasındaki herbir fazın fazlar arası gerilimi, U_{rms}, I_{rms}, her bir fazın gerilim [Thd(U)] için ve akım [Thd(I)] için toplam harmonik bozulmaları, görünür güç [S(kVA)], aktif güç [P(kW)], reaktif güç [Q(kVAr)], Pfc (capacitive power factor), dPf (displacement power factor-cosφ) ile görünür gücün toplamı [Stot(kVA)], aktif gücün toplamı [Ptot(kW)], reaktif gücün toplamı Qtot(kVAr) değerleri verilmiştir. Yine Çizelge 4.2'de birinci ölçüm noktasına, Çizelge 4.4'de ikinci ölçüm noktasına, Çizelge 4.6'da ise üçüncü ölçüm noktasına ait görünür gücün toplamı, aktif gücün toplamı, reaktif gücün toplamı, güç katsayısı (Pf), akım ve gerilimin rms değerleri ile hesaplamaları verilmiştir.

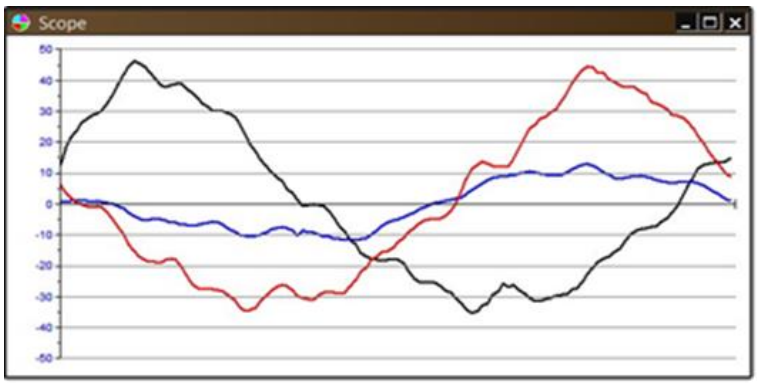
Çizelge 4.1. Birinci ölçüm noktasındaki tüm fazların değerleri (Kürker ve Taşaltın, 2016)

1st phase		2nd phase		3rd phase	
Urms	Ul_12	Urms	Ul_23	Urms	Ul_13
239.956	416.238	240.754	417.251	240.459	415.601
thd(U)	S(kVA)	thd(U)	S(kVA)	thd(U)	S(kVA)
0	5.964	0	1.830	0	5.914
Irms	P(kW)	Irms	P(kW)	Irms	P(kW)
24.856	5.462	7.601	-0.227	24.593	5.414
thd(I)	Q(kVAR) c	thd(I)	Q(kVAR) c	thd(I)	Q(kVAR) c
16.984	-2.395	24.870	1.816	16.402	-2.380
Pf c	dPf	Pf c	dPf	Pf c	dPf
0.916	0.929	0.124	0.127	0.915	0.928

Total info				
Stot(kW)	Qtot(kVAR)	Ptot(kW)	Pftot c	I null
11.05	-2.96	10.65	0.96	29.21

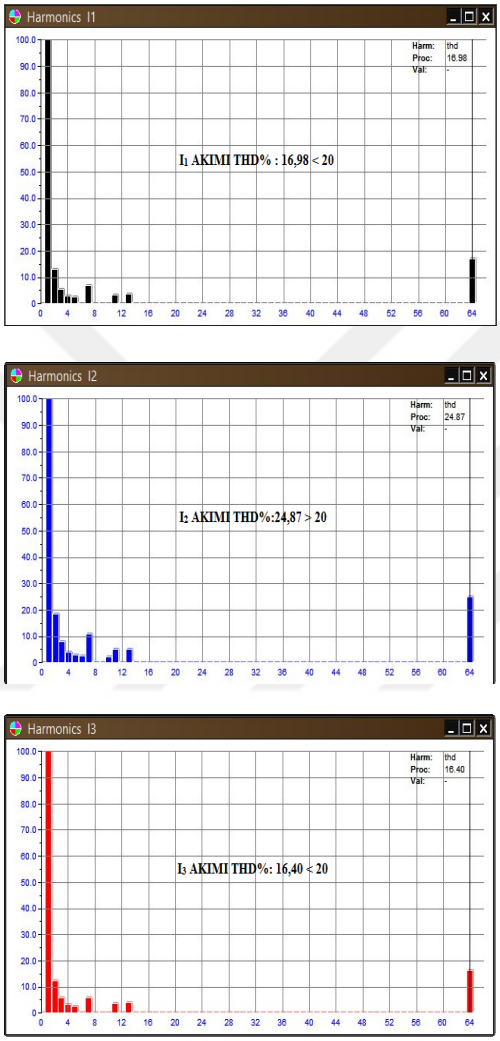


Şekil 4.2. Birinci ölçüm noktasında işletmedeki gerilimler grafiği (Kürker ve Taşaltın, 2016)



Şekil 4.3. Birinci ölçüm noktasında işletmedeki akımlar grafiği (Kürker ve Taşaltın, 2016)

Çizelge 4.1'deki ölçüm sonuçlarına ve Şekil 4.2'deki gerilim grafiği incelendiğinde birinci ölçüm noktasında gerilim harmoniğine rastlanmamıştır. Şekil 4.3'deki akım grafiği imcelendiğinde ise akım harmoniği olduğundan dolayı akım grafiği sinüsoidal görünümden uzaktadır (Kürker ve Taşaltın, 2016).



Şekil 4.4. Birinci ölçüm noktasında I_1, I_2 ve I_3 akımlarının harmonik değerleri (Kürker ve Taşaltın, 2016)

Şekil 4.4 incelendiğinde 3. ve 5. harmoniklerden kaynaklı olarak toplam harmonik bozulma miktarı birinci fazda akım (THD_I) için %16.98, ikinci fazda 3.,7., 11. ve 13. harmoniklerden dolayı toplam harmonik bozulma değeri akım (THD_I) için %24.87, üçüncü fazda 3. ve 7. harmoniklerden kaynaklı toplam harmonik bozulma değeri akım(THD_I) için %16.40'dır (Kürker ve Taşaltın, 2016).

Çizelge 4.2. Birinci ölçüm noktasındaki harmonik hesapları

	ÖLÇÜLEN YER :	SERVO LAZER BESLEME. 1								
	GÜÇ	ADI	FORMÜL						ÖLÇÜLEN	BİRİM
1	Stot	TOPLAM GÖRÜNÜR GÜÇ	Stot = S1 + S2 + S3						13,708	kVA.
	Qtot	TOPLAM REAKTİF GÜÇ	Qtot = Q1 + Q2 + Q3						6,591	kVAr
	Ptot	TOPLAM AKTİF GÜÇ	Ptot = P1 + P2 + P3						11,103	kW.
	Pfi	GÜÇ KATSAYISI	Pfi = (Pfi1+Pfi2+Pfi3)/3						0,651	-
	Inull	NÖTR AKIMI (DENGESİZ YÜK)							29,210	A.

	FAZ	GÜÇ	ÖLÇME DEĞERLERİ								DEĞER
2	L1	S1	Urms1 x Irms1	5,96	S2	Urms2xIrms2	1,83	S3	Urms3xIrms3	5,914	kVA.
	L2	P1	S1 x Pfi1	5,46	P2	S2xPfi2	0,23	P3	S3xPfi3	5,414	kW.
	L3	Q1	S1 x sinØ1	2,40	Q2	S2xsinØ2	1,82	Q3	S3xsinØ3	2,380	kVAr.
		thd	0, U1	0,00	thd	0, U2	0,00	thd	0, U3	0,000	

	HARMONİKLİ GÜÇ					
	FAZ	Irms	0, ITHD.	Urms	(cosø) dPf	PHarm. (Kw.)
3	L1	24,865	0,16984	239,956	0,929	0,941
	L2	7,601	0,24870	240,754	0,127	0,058
	L3	24,593	0,16402	240,459	0,928	0,900
					TOPLAM	1,899

	HARMONİK GÜÇ ORANI			
4	PHar. (kW)	1,899	(PHar./ PTot.) x 100	17,11
	PTot. (kW)	11,103		

	HARMONİK GERİLİMİ TESPİTİ						KOND.(V)
5	FAZ	UI_12	UI_23	UI_13	UI+(UI...xÖlçülen.Uthd)	UÇ GERL.	∑U/3
	L1	416,238			UI_12+(UI_12xU1thd)	416,24	
	L2		417,251		UI_23+(UI_23xU2thd)	417,25	416,36
	L3			415,601	UI_13+(UI_13xU3thd)	415,60	

	AKIM FİLTRESİ HESABI								
6	FAZ	ÖLÇÜLEN Irms	Çarpan X / 5 A.	Irms (A)	Ithd	Ha.Ithd (A)	∑I = thd / 3	∑Ithd (A)	FİLTRE (A)
	L1	24,865		24,9	0,16984	4,22			GÜÇ GEREĞİ
	L2	7,601	1	7,6	0,24870	1,89	3,38	4,00	?
	L3	24,593		24,6	0,16402	4,03			

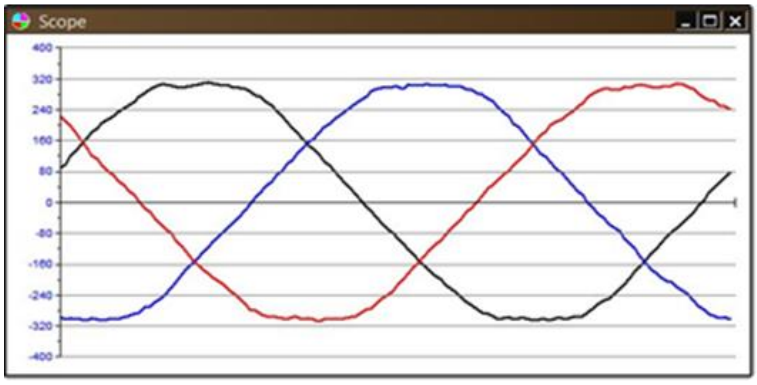
Çizelge 4.2'deki hesaplama tablosunun birinci kısmında görünür gücün toplamı (Stot) 13.708 kVA, reaktif gücün toplamı (Qtot) 6.591 kVAr, aktif gücün toplamı (Ptot) 11.103 kW ve nötr akımı I(null) 29.210 A'dir. (Kürker ve Taşaltın, 2016).

Harmonikli sinüsoidal dalga formuna göre ölçülen güç faktörü (Pf) 0,651 ve harmoniksiz sinüsoidal dalga formuna göre ölçülen güç faktörü (dpf) ise 0.661'dir.

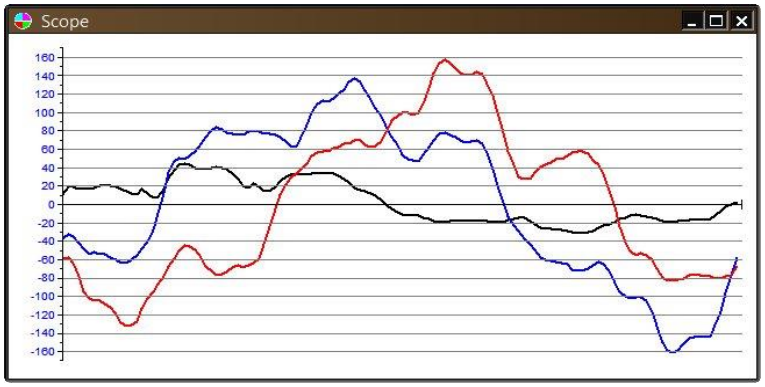
İkinci kısımda her bir faz için ölçülen akım ve gerilimin rms değerleri ve güç katsayısını kullanarak görünür, reaktif ve aktif gücün hesabı yapılmıştır. Üçüncü kısımda tüm fazlar için ölçülen akım ve gerilim rms değerleri, akımın toplam harmonik bozulma değeri ve cosφ değeri kullanılarak harmonikli güç hesabı yapılmıştır. Dördüncü kısımda ise harmonik güç oranı %17.11 olarak hesaplanmıştır (Kürker ve Taşaltın, 2016). Beşinci bölümde kondansatör gerilimi harmoniklerden dolayı 416.36 V olarak hesaplanmıştır. Altıncı bölümde ise kullanılacak olan filtre için toplam harmonik bozulmaya bağlı olarak akımda meydana gelen kayıp ortalaması 4 A hesaplanmıştır.

Çizelge 4.3. İkinci ölçüm noktasındaki tüm fazların değerleri (Kürker ve Taşaltın, 2016)



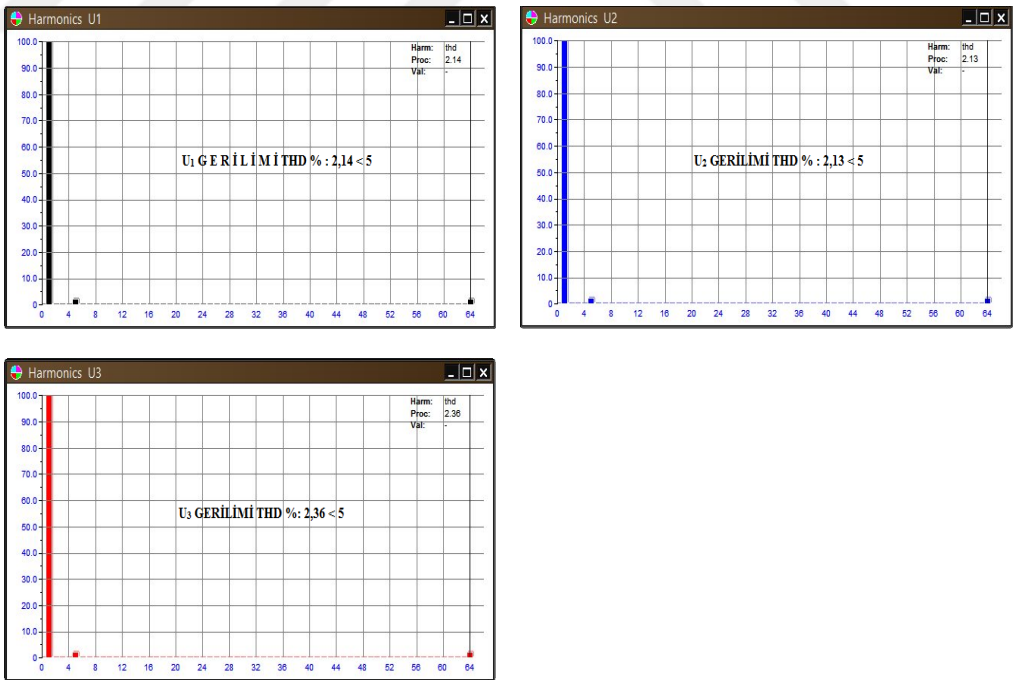


Şekil 4.5. İkinci ölçüm noktasında işletmedeki gerilimlerin grafiği (Kürker ve Taşaltın, 2016)

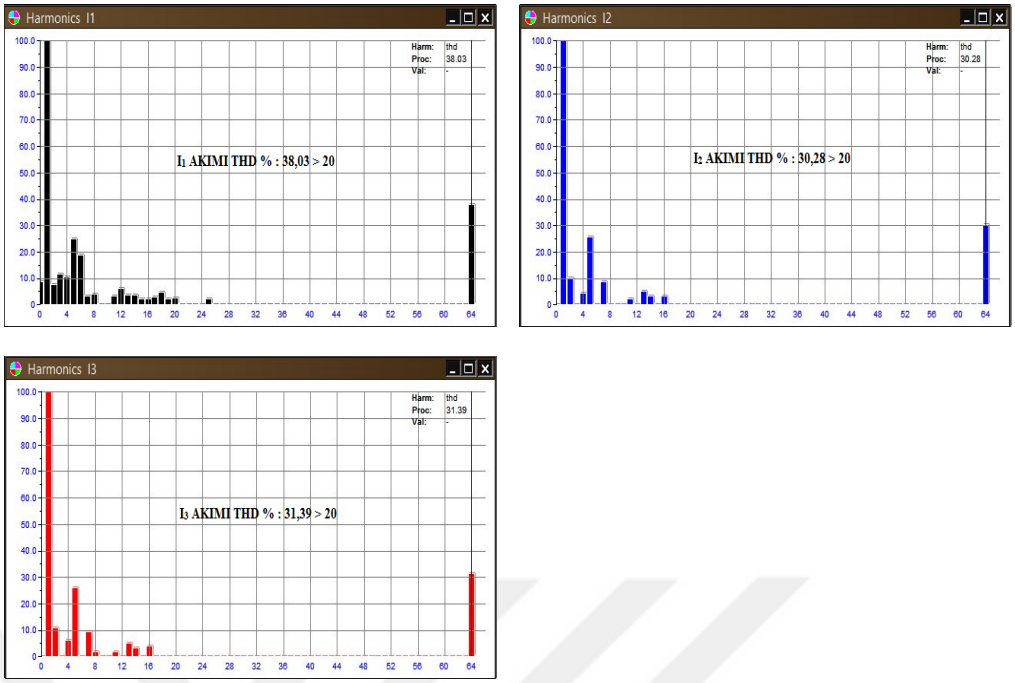


Şekil 4.6. İkinci ölçüm noktasında işletmedeki akımların grafiği (Kürker ve Taşaltın, 2016)

Çizelge 4.3'deki ölçüm sonuçlarına ve Şekil 4.5'deki gerilim grafiği incelendiğinde birinci ölçüm noktasında gerilim harmoniğine rastlanmamıştır. Şekil 4.6'deki akım grafiği imcelendiğinde ise akım harmoniği olduğundan dolayı akım grafiği sinüsoidal görünümden uzaktadır. Şekil 4.7 incelendiğinde toplam harmonik bozulma miktarı birinci fazda gerilim (THD_V) için %2.14, toplam harmonik bozulma miktarı ikinci fazda gerilim (THD_V) için %2.13, toplam harmonik bozulma miktarı üçüncü fazda gerilim (THD_V) için %2.36'dır (Kürker ve Taşaltın, 2016).



Şekil 4.7. İkinci ölçüm noktasında U_1, U_2 ve U_3 gerilimlerinin harmonik değerleri (Kürker ve Taşaltın, 2016)



Şekil 4.8. İkinci ölçüm noktasında I_1, I_2 ve I_3 akımlarının harmonik değerleri (Kürker ve Taşaltın, 2016)

Şekil 4.8 incelendiğinde 3. ve 5. harmoniklerden kaynaklı olarak toplam harmonik bozulma miktarı birinci fazda akım (THD_I) için %38.03, ikinci fazda 5., 7. ve 13. harmoniklerden dolayı toplam harmonik bozulma değeri akım (THD_I) için %30.28, üçüncü fazda yine 5., 7. ve 13. harmoniklerden kaynaklı toplam harmonik bozulma değeri akım(THD_I) için %31.39'dur (Kürker ve Taşaltın, 2016).

Çizelge 4.4'deki hesaplama tablosunun birinci kısmında görünür gücün toplamı (Stot) 41.651 kVA, reaktif gücün toplamı (Qtot) 33.810 kVAr, aktif gücün toplamı (Ptot) 22.034 kW ve nötr akımı I(null) 148.240 A'dir. (Kürker ve Taşaltın, 2016).

Harmonikli sinüsoidal dalga formuna göre ölçülen güç faktörü (Pf) 0.615 ve harmoniksiz sinüsoidal dalga formuna göre ölçülen güç faktörü (dpf) ise 0.656'dır.

İkinci kısımda her bir faz için ölçülen akım ve gerilimin rms değerleri ve güç katsayısını kullanarak görünür, reaktif ve aktif gücün hesabı yapılmıştır. Üçüncü kısımda tüm fazlar için ölçülen akım ve geriliminin rms değerleri, akımın toplam harmonik bozulma değeri ve cosφ değeri kullanılarak harmonikli güç hesabı

yapılmıştır. Dördüncü kısımda ise harmonik güç oranı %34.03 olarak hesaplanmıştır (Kürker ve Taşaltın, 2016). Beşinci bölümde kondansatör gerilimi harmoniklerden dolayı 391.18 V olarak hesaplanmıştır. Altıncı bölümde ise kullanılacak olan filtre için toplam harmonik bozulmaya bağlı olarak akımda meydana gelen kayıp ortalaması 20 A hesaplanmıştır.

Çizelge 4.4. İkinci ölçüm noktasındaki harmonik hesapları

	ÖLÇÜLEN YER :	SERVO-LAZER BESLEME.2		
	GÜÇ	ADI	FORMÜL	ÖLÇÜLEN	BİRİM
1	Stot	TOPLAM GÖRÜNÜR GÜÇ	Stot = S1 + S2 + S3	41,651	kVA.
	Qtot	TOPLAM REAKTİF GÜÇ	Qtot = Q1 + Q2 + Q3	33,810	kVAr.
	Ptot	TOPLAM AKTİF GÜÇ	Ptot = P1 + P2 + P3	22,034	kW.
	Pfi	GÜÇ KATSAYISI	Pfi = (Pf1+Pf2+Pf3) / 3	0,615	-
	Inull	NÖTR AKIMI (DENGESİZ YÜK)		148,240	A.

	FAZ	GÜÇ	ÖLÇME DEĞERLERİ								DEĞER
2	L1	S1	Urms1 x Irms1	5,04	S2	Urms2xIrms2	18,61	S3	Urms3xIrms3	18,00	kVA.
	L2	P1	S1 x Pfi1	4,51	P2	S2xPfi2	11,62	P3	S3xPfi3	5,91	kW.
	L3	Q1	S1 x sinØ1	2,27	Q2	S2xsinØ2	14,54	Q3	S3xsinØ3	17,01	kVar.
		thd	0, U1	0,021	thd	0, U2	0,021	thd	0, U3	0,024	

	HARMONİKLİ GÜÇ					
	FAZ	Irms	0, ITHD.	Urms	(cosø) dPfi	PHarm. (Kw.)
3	L1	22,773	0,38025	221,440	0,968	1,856
	L2	84,162	0,30283	221,130	0,649	3,658
	L3	81,697	0,31388	220,369	0,351	1,983
					TOPLAM	7,497

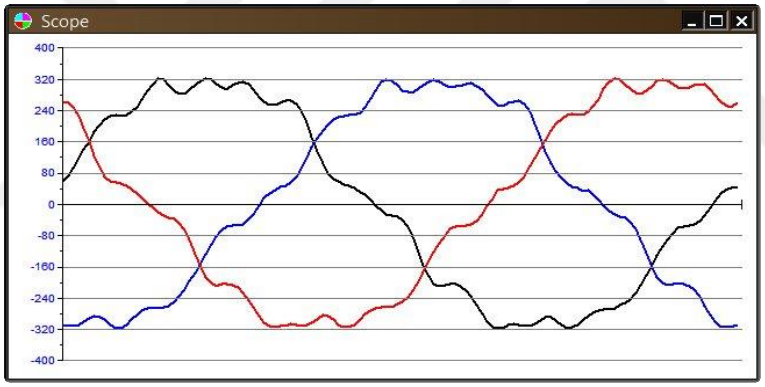
4	HARMONİK GÜÇ ORANI			
	PHar. (kW)	7,497	(PHar./ PTot.) x 100	34,03
	PTot. (kW)	22,034		

	HARMONİK GERİLİMİ TESPİTİ					KOND.(V)
5	FAZ	UI_12	UI_23	UI_13	UI+(UI...xÖlçülen.Uthd)	UÇ GERL.	∑U/3
	L1	383,811			UI_12+(UI_12xU1thd)	392,04	
	L2		382,730		UI_23+(UI_23xU2thd)	390,89	391,18
	L3			381,585	UI_13+(UI_13xU3thd)	390,61	

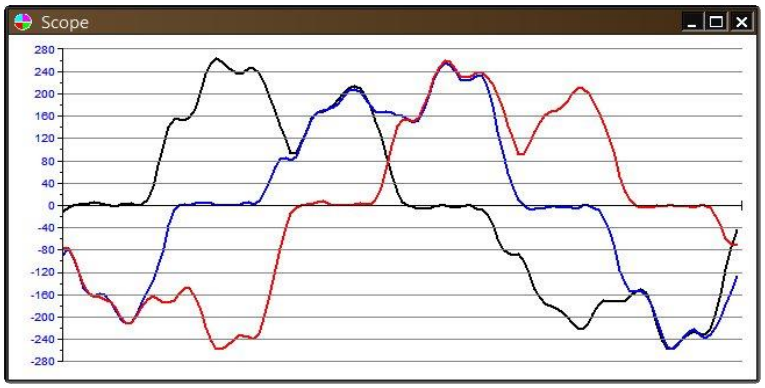
	AKIM FİLTRESİ HESABI								
6	FAZ	ÖLÇÜLEN Irms	Çarpan X/5A.	Irms (A)	Ithd	Ha.Ithd (A)	∑I = thd / 3	∑Ithd (A)	FİLTRE (A)
	L1	22,773		22,77	0,38025	8,66			GÜÇ GEREĞİ
	L2	84,162	1	84,16	0,30283	25,49	19,93	20,00	
	L3	81,697		81,70	0,31388	25,64			

Çizelge 4.5. Üçüncü ölçüm noktasındaki tüm fazların değerleri (Kürker ve Taşaltın, 2016)



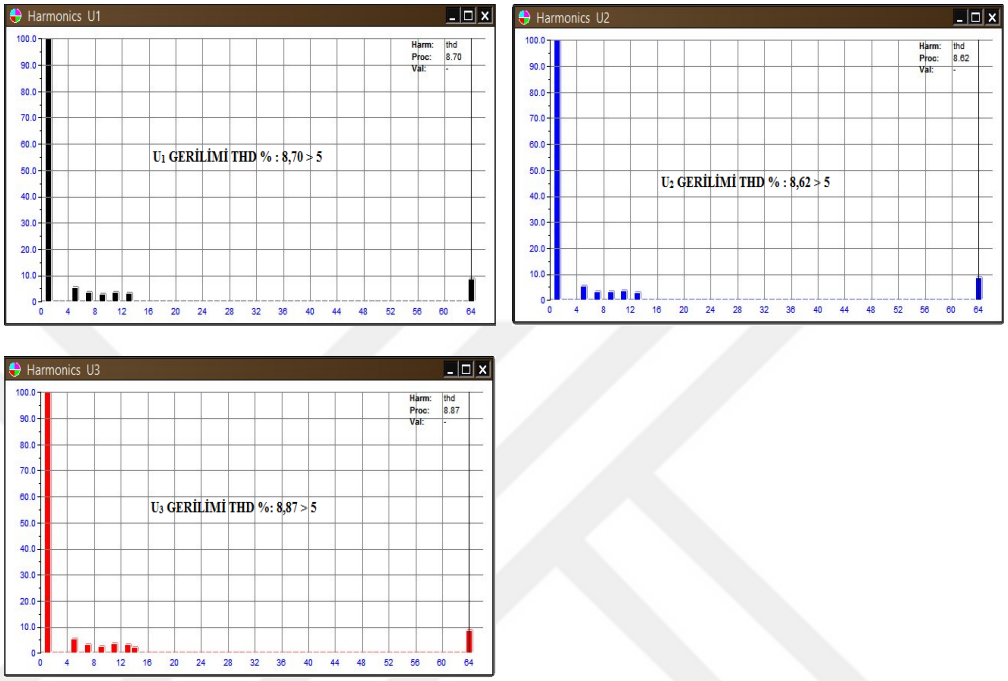


Şekil 4.9. Üçüncü ölçüm noktasında işletmedeki gerilimler grafiği (Kürker ve Taşaltın, 2016)



Şekil 4.10. Üçüncü ölçüm noktasında işletmedeki akımlar grafiği (Kürker ve Taşaltın, 2016)

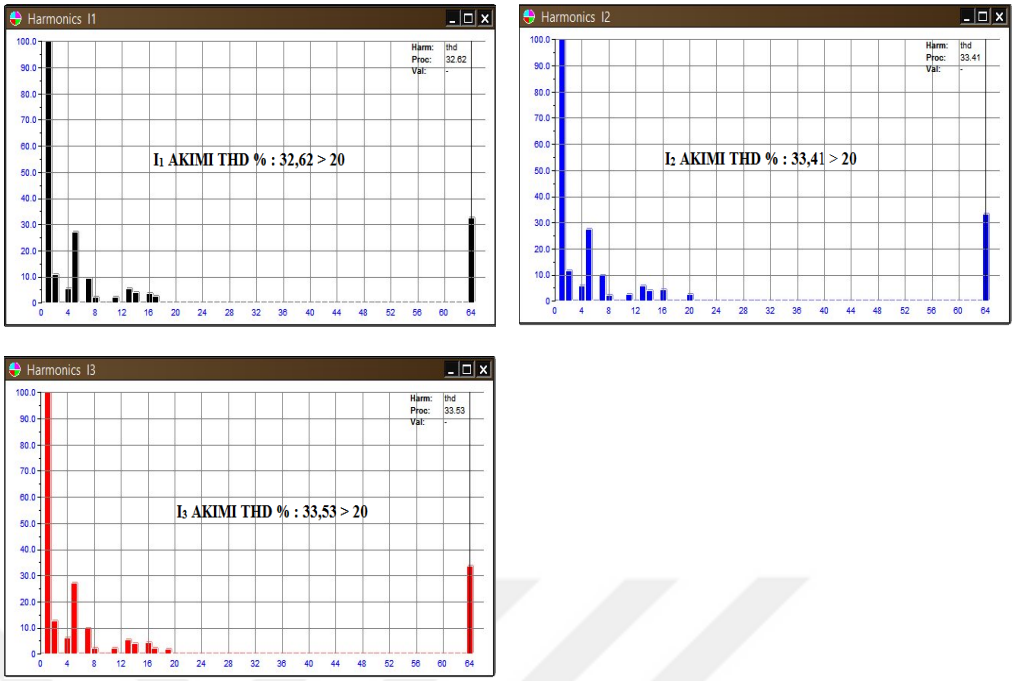
Çizelge 4.5'deki ölçüm sonuçlarına ve Şekil 4.9'daki gerilim grafiği incelendiğinde birinci ölçüm noktasında gerilim harmoniğine rastlanmıştır. Şekil 4.10'daki akım grafiği imcelendiğinde ise akım harmoniği olduğundan dolayı akım grafiği sinüsoidal görünümden uzaktadır.



Şekil 4.11. Üçüncü ölçüm noktasında U_1, U_2 ve U_3 gerilimlerinin harmonik değerleri (Kürker ve Taşaltın, 2016)

Şekil 4.11 incelendiğinde tüm fazlarda 5., 7., 9., 11. ve 13. Harmonikler nedeniyle toplam harmonik bozulma miktarı birinci fazda gerilim (THD_V) için %8.70, toplam harmonik bozulma miktarı ikinci fazda gerilim (THD_V) için %8.62, toplam harmonik bozulma miktarı üçüncü fazda gerilim (THD_V) için %8.87'dir (Kürker ve Taşaltın, 2016).

Şekil 4.12 incelendiğinde 5., 7. ve 13. harmoniklerden kaynaklı olarak toplam harmonik bozulma miktarı birinci fazda akım (THD_I) için %32.62, ikinci fazda 5., 7. ve 13. harmoniklerden dolayı toplam harmonik bozulma değeri akım (THD_I) için %33.41, üçüncü fazda yine 5., 7. ve 13. harmoniklerden kaynaklı toplam harmonik bozulma değeri akım (THD_I) için %33.53'dür (Kürker ve Taşaltın, 2016).



Şekil 4.12. Üçüncü ölçüm noktasında I_1, I_2 ve I_3 akımlarının harmonik değerleri (Kürker ve Taşaltın, 2016)

Çizelge 4.6'daki hesaplama tablosunun birinci kısmında görünür gücün toplamı (Stot) 102.346 kVA, reaktif gücün toplamı (Qtot) 73.475 kVAr, aktif gücün toplamı (Ptot) 60.628 kW ve ve nötr akımı I(null) 299.56 A'dir (Kürker ve Taşaltın, 2016).

Harmonikli sinüsoidal dalga formuna göre ölçülen güç faktörü (Pf) 0.593 ve harmoniksiz sinüsoidal dalga formuna göre ölçülen güç faktörü (dpf) ise 0.629'dur.

İkinci kısımda her bir faz için ölçülen akım ve gerilimin rms değerleri ve güç katsayısını kullanarak görünür, reaktif ve aktif gücün hesabı yapılmıştır. Üçüncü kısımda tüm fazlar için ölçülen akım ve gerilimin rms değerleri, akımın toplam harmonik bozulma değeri ve cosφ değeri kullanılarak harmonikli güç hesabı yapılmıştır. Dördüncü kısımda ise harmonik güç oranı %35.10 olarak hesaplanmıştır (Kürker ve Taşaltın, 2016). Beşinci bölümde kondansatör gerilimi harmoniklerden dolayı 422.69V olarak hesaplanmıştır. Altıncı bölümde ise kullanılacak olan filtre için toplam harmonik bozulmaya bağlı olarak akımda meydana gelen kayıp ortalaması 51 A hesaplanmıştır.

Çizelge 4.6. Üçüncü ölçüm noktasındaki harmonik hesapları

	ÖLÇÜLEN YER :	SERVO-LAZER BESLEME.3								
	GÜÇ	ADI	FORMÜL						ÖLÇÜLEN	BİRİM
1	Stot	TOPLAM GÖRÜNÜR GÜÇ	Stot = S1 + S2 + S3						102,346	kVA.
	Qtot	TOPLAM REAKTİF GÜÇ	Qtot = Q1 + Q2 + Q3						73,475	kVAr.
	Ptot	TOPLAM AKTİF GÜÇ	Ptot = P1 + P2 + P3						60,628	kW.
	Pfi	GÜÇ KATSAYISI	Pfi = (Pf1+Pf2+Pf3) / 3						0,593	-
	Inull	NÖTR AKIMI (DENGESİZ YÜK)							299.56	A.

	FAZ	GÜÇ	ÖLÇME DEĞERLERİ								DEĞER
2	L1	S1	Urms1 x Irms1	20,09	S2	Urms2xIrms2	19,35	S3	Urms3xIrms3	19,65	kVA.
	L2	P1	S1 x Pfi1	26,86	P2	S2xPfi2	31,47	P3	S3xPfi3	5,99	kW.
	L3	Q1	S1 x sinØ1	24,28	Q2	S2xsinØ2	15,72	Q3	S3xsinØ3	33,48	kVar.
		thd	0, U1	0,087	thd	0, U2	0,086	thd	0, U3	0,089	

	HARMONİKLİ GÜÇ					
	FAZ	Irms	0, ITHD.	Urms	(cosø) dPfi	PHarm. (Kw.)
3	L1	154,473	0,32624	225,271	0,772	8,764
	L2	149,391	0,33411	224,388	0,938	10,506
	L3	151,840	0,33531	224,089	0,176	2,008
					TOPLAM	21,278

4	HARMONİK GÜÇ ORANI			
	PHar. (kW)	21,278	(PHar./ PTot.) x 100	35,10
	PTot. (kW)	60,628		

	HARMONİK GERİLİMİ TESPİTİ						KOND.(V)
5	FAZ	UI_12	UI_23	UI_13	UI+(UI...xÖlçülen.Uthd)	UÇ GERL.	∑U/3
	L1	390,123			UI_12+(UI_12xU1thd)	424,06	
	L2		389,021		UI_23+(UI_23xU2thd)	422,55	422,69
	L3			387,115	UI_13+(UI_13xU3thd)	421,45	

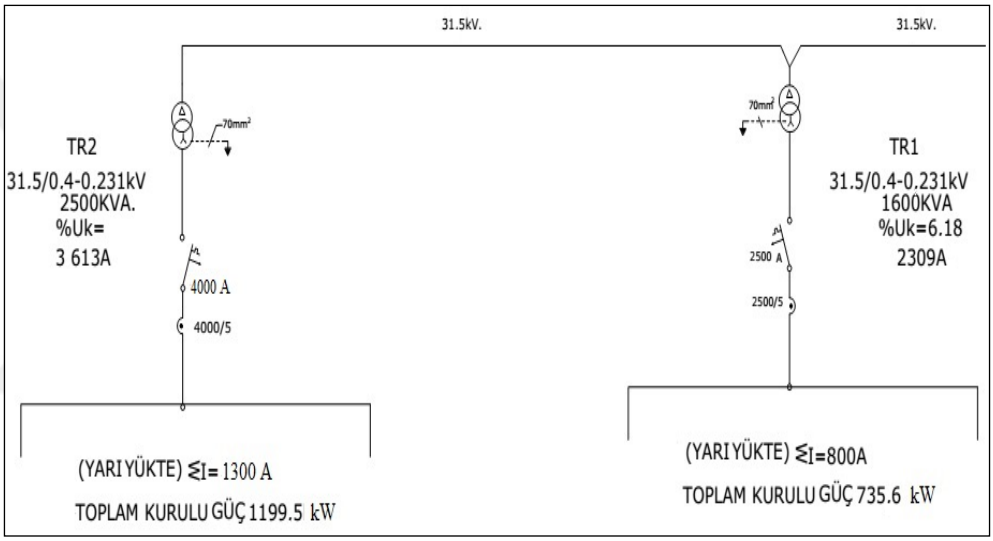
	AKIM FİLTRESİ HESABI								
6	FAZ	ÖLÇÜLEN Irms	Çarpan X / 5 A.	Irms (A)	Ithd	Ha.Ithd (A)	∑I = thd / 3	∑Ithd (A)	FİLTRE (A)
	L1	154,473	1	154,47	0,32624	50,40	50,41	51,00	GÜÇ GEREĞİ
	L2	149,391		149,39	0,33411	49,91			
	L3	151,840		151,84	0,33531	50,91			

120 kVA.'lık, %u_k=6, U=400 V bir transformatörün olduğu lazer torna tezgahıba sahip tesisde enerji analizörü ile yapılan ölçümde 3., 5., ve 7. harmoniğin olduğu tespit edilmiştir. Belirlenen harmoniklerden özellikle 5. harmoniğin değeri diğerlerinden daha yüksek olduğu görülmüştür.

Lazer torna tezgâhına sahip tesisin kompanzasyon, harmonik filtre reaktörü ve pasif harmonik filtre hesaplamaları ek 10'da verilmiştir.

4.3. 2500 kVA ve 1600 kVA ile Beslenen Tesiste Filtre Takılmadan Önce Harmonik İncelemesi

Ölçüm yapılan tesis 2500 kVA ve 1600 kVA ile beslenmektedir. Tesiste iki noktada filtresiz olarak her faz için yapılan ölçümler sonucunda gerilim ve akım harmoniklerinin varlığı tespit edilmiş, daha sonra harmonik güç oranı hesaplanmıştır. Tesisin Trafo 1'e bağlı olan kurulu gücü 735.6 kW iken, Trafo 2'ye bağlı olan kurulu gücü 1199.5 kW'tır. Şekil 4.13'de 2500 kVA ve 1600 kVA ile beslenen tesisisin tek hat şeması görülmektedir.



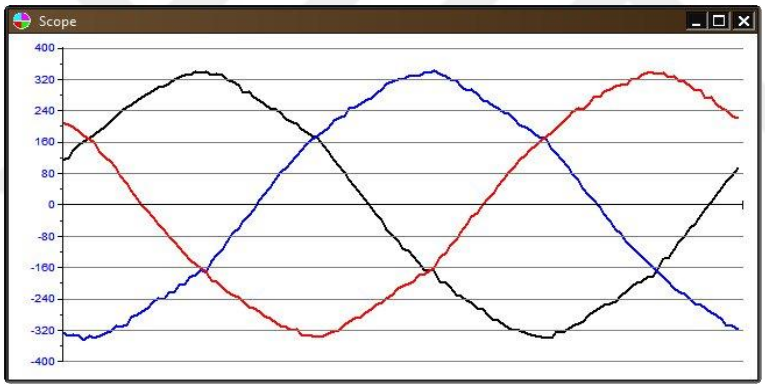
Şekil 4.13. 2500 kVA ve 1600 kVA ile beslenen tesisisin tek hat şeması

Çizelge 4.7'de şebeke girişinde ve Çizelge 4.9'da invertör girişinde yapılan ölçümlerde U_{rms}, I_{rms}, her bir fazın gerilim [Thd(U)] için ve akım [Thd(I)] için toplam harmonik bozulmaları, görünür güç [S(kVA)], aktif güç [P(kW)], reaktif güç [Q(kVAr)], Pfc (capacitive power factor), dPf (displacement power factor-cosφ) ile görünür gücün toplamı [Stot(kVA)], aktif gücün toplamı [Ptot(kW)], reaktif gücün toplamı Qtot(kVAr) değerleri verilmiştir.

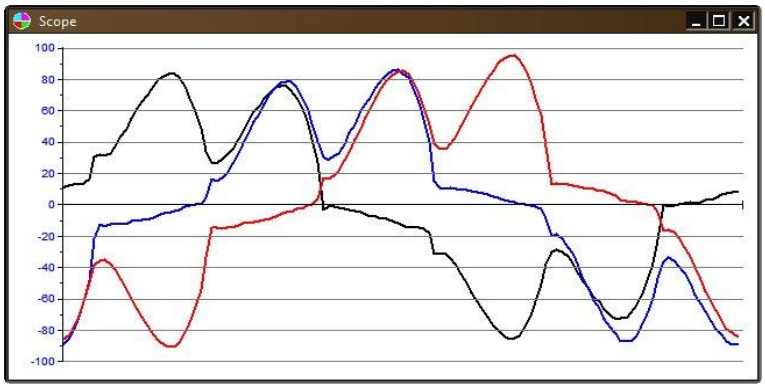
Çizelge 4.8'de şebeke girişine, Çizelge 4.10'da invertör girişine ait görünür gücün toplamı, aktif gücün toplamı, reaktif gücün toplamı, güç katsayısı (Pf), akım ve gerilimin rms değerleri ile hesaplamaları verilmiştir.

Çizelge 4.7. Water şebeke girişinde yapılan ölçüm sonucunda tüm fazların değerleri



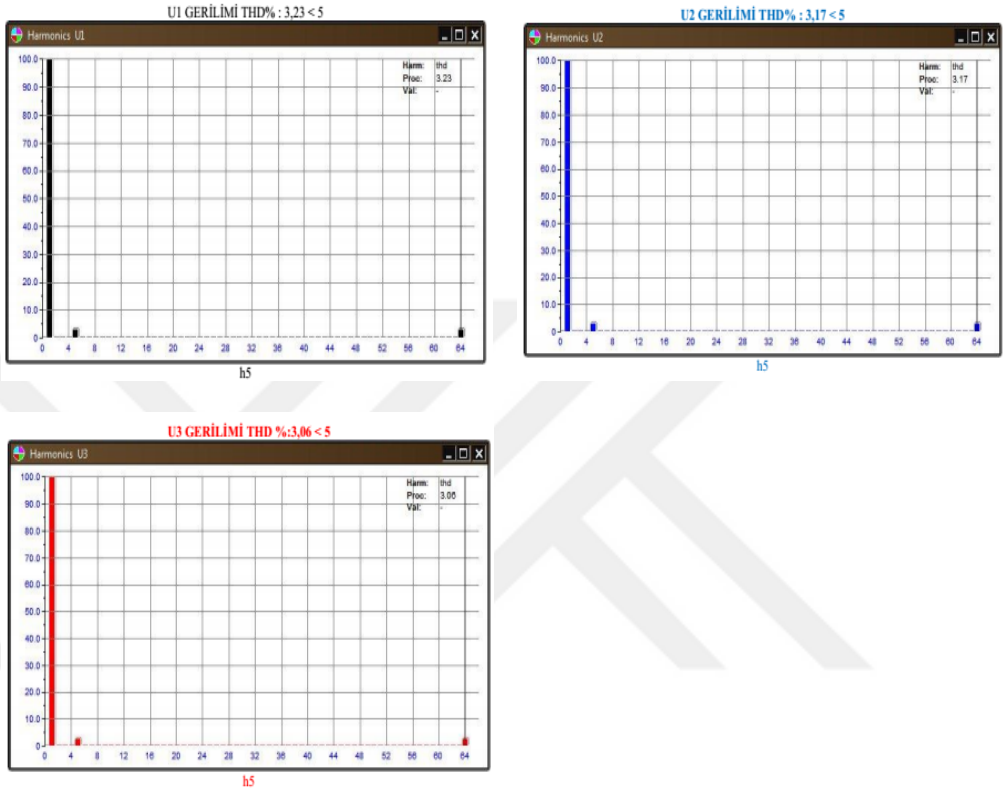


Şekil 4.14. Water şebeke girişinde işletmedeki gerilimlerin grafiği



Şekil 4.15. Water şebeke girişinde işletmedeki akımların grafiği

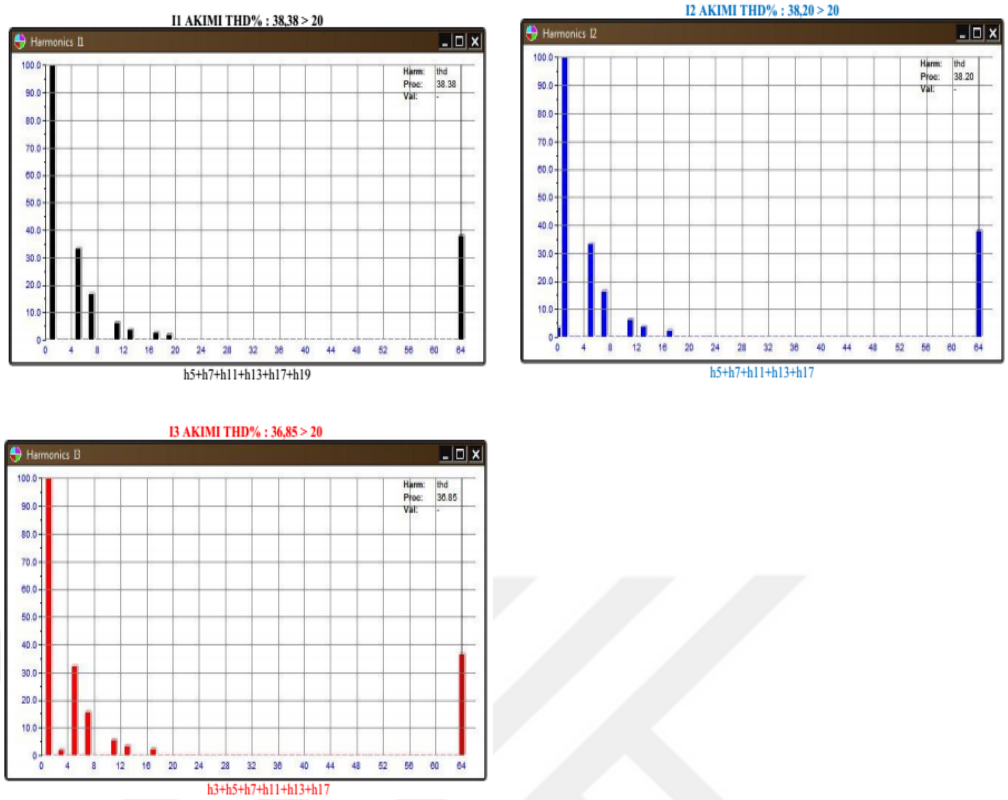
Çizelge 4.7 ve Şekil 4.14'de şebeke girişinde yapılan ölçümler sonucunda gerilim harmoniğine çok az rastlanmış, fakat bu durum gerilimin sinüs formunu fazla etkilememiştir. Akım harmoniğine ileri derecede rastlandığı için Şekil 4.15'de akım sinüsoidal görünümden oldukça uzaktır.



Şekil 4.16. Water şebeke girişinde gerilim grafiği U_1, U_2 ve U_3 geriliminin harmonik değerleri

Şebeke girişinde ölçüm noktasında Şekil 4.16'da birinci, ikinci ve üçüncü fazda düşük de olsa 5. harmoniğin olduğu ve ölçülen toplam harmonik bozulma miktarı sırasıyla THD_V değeri %3.23, THD_V değeri %3.17 ve THD_V değeri %3.06'dır.

Şekil 4.17 incelendiğinde 5. ve 7. harmoniklerden kaynaklı olarak toplam harmonik bozulma miktarı birinci fazda akım (THD_I) için %38.38, ikinci fazda 5. ve 7. harmoniklerden dolayı toplam harmonik bozulma değeri akım (THD_I) için %38.20, üçüncü fazda yine 5., 7. ve 9. harmoniklerden kaynaklı toplam harmonik bozulma değeri akım (THD_I) için %36.85'tir.



Şekil 4.17. Water şebeke girişinde, akım grafiği I_1, I_2 ve I_3 akımının harmonik değerleri

Çizelge 4.8'deki hesaplama tablosunun birinci kısmında görünür gücün toplamı (Stot) 23.828 kVA, reaktif gücün toplamı (Qtot) 24.898 kVAr, aktif gücün toplamı (Ptot) 20.708 kW ve nötr akımı I(null) 91.62 A'dir. Harmonikli sinüsoidal dalga formuna göre ölçülen güç faktörü (Pf) 0.602 ve harmoniksiz sinüsoidal dalga formuna göre ölçülen güç faktörü (dpf) ise 0.650'dir. İkinci kısımda her bir faz için ölçülen akım ve gerilimin rms değerleri ve güç katsayısını kullanarak görünür, reaktif ve aktif gücün hesabı yapılmıştır.

Üçüncü kısımda tüm fazlar için ölçülen akım ve gerilimin rms değerleri, akımın toplam harmonik bozulma değeri ve cosφ değeri kullanılarak harmonikli güç hesabı yapılmıştır. Dördüncü kısımda ise harmonik güç oranı %41.12 olarak hesaplanmıştır. Beşinci bölümde kondansatör gerilimi harmoniklerden dolayı 410.08 V olarak hesaplanmıştır. Altıncı bölümde ise kullanılacak olan filtre için toplam harmonik bozulmaya bağlı olarak akımda meydana gelen kayıp ortalaması 20 Amper hesaplanmıştır.

Çizelge 4.8. Water Şebeke girişinde yapılan ölçümün harmonik hesapları

	ÖLÇÜLEN YER :	WATER ŞEBEKE GİRİŞİ			
	GÜÇ	ADI	FORMÜL	ÖLÇÜLEN	BİRİM
1	Stot	TOPLAM GÖRÜNÜR GÜÇ	Stot = S1 + S2 + S3	23,828	kVA.
	Qtot	TOPLAM AKTİF GÜÇ	Qtot = Q1 + Q2 + Q3	24,898	kVAr
	Ptot	TOPLAM AKTİF GÜÇ	Ptot = P1 + P2 + P3	20,708	kW.
	Pfi	GÜÇ KATSAYISI	Pfi = (Pfi1+Pfi2+Pfi3)/3	0,602	-
	Inull	NÖTR AKIMI	(DENGESİZ YÜK)	91,620	A.

	FAZ	GÜÇ	ÖLÇME DEĞERLERİ								DEĞER
2	L1	S1	Urms1 x Irms1	11,121	S2	Urms2xIrms2	11,712	S3	Urms3xIrms3	121,116	kVA.
	L2	P1	S1 x Pfi1	10,301	P2	S2xPfi2	7,582	P3	S3xPfi3	2,825	kW.
	L3	Q1	S1 x sinØ1	4,190	Q2	S2xsinØ2	8,927	Q3	S3xsinØ3	11,781	kVAr.
		thd	0, U1	0,032	thd	0, U2	0,032	thd	0, U3	0,031	

	HARMONİKLİ GÜÇ					
	FAZ	Irms	0, ITHD.	Urms	(cosØ) dPf	PHarm. (Kw.)
3	L1	48,290	0,38376	230,297	1,000	4,268
	L2	50,808	0,38197	230,521	0,691	3,091
	L3	53,197	0,36845	227,749	0,259	1,156
					TOPLAM	8,515

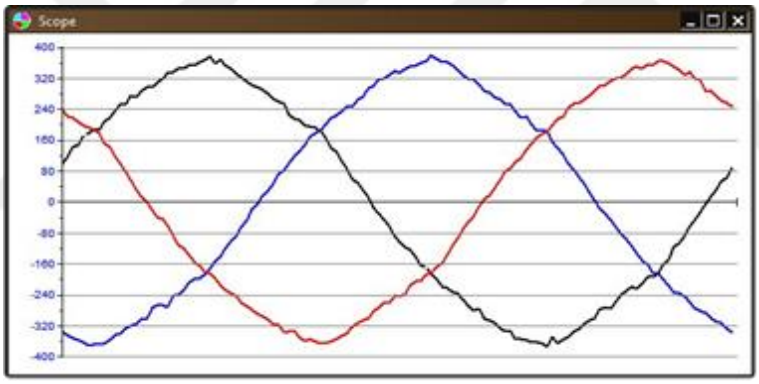
4	HARMONİK GÜÇ ORANI (%)			
	PHar. (kW)	8,515	(PHar./ PTot.) x 100	41,12
	PTot. (kW)	20,708		

	HARMONİK GERİLİMİ TESPİTİ						KOND.(V)
5	FAZ	Ul_12	Ul_23	Ul_13	Ul+(Ul…xÖlçülen.Uthd)	UÇ GERL.	∑U/3
	L1	399,401			Ul_12+(Ul_12xU1thd)	412,32	
	L2		397,013		Ul_23+(Ul_23xU2thd)	409,61	410,08
	L3			396,172	Ul_13+(Ul_13xU3thd)	408,30	

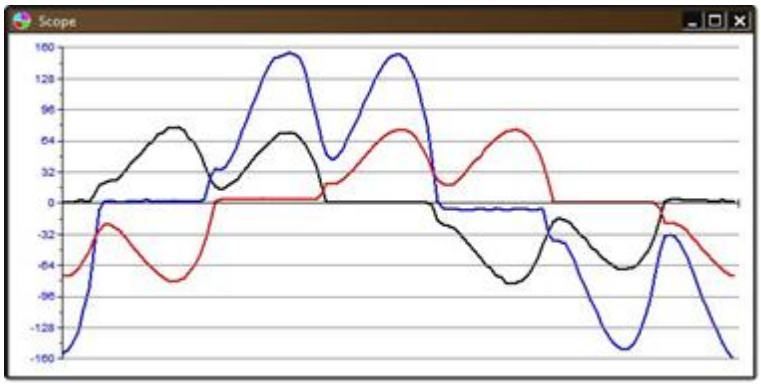
6	I(THD)'NİN AKIMDA MEYDANA GETİRDİĞİ KAYIP HESABI							
	FAZ	ÖLÇÜLEN Irms	Çarpan X / 5 A.	Irms (A)	Ithd	Ha.Ithd (A)	∑I = thd / 3	∑Ithd (A)
	L1	48,290	1	48,3	0,38376	18,53	19,18	20,00
	L2	50,808		50,8	0,38197	19,41		
	L3	53,197		53,2	0,36845	19,60		

Çizelge 4.9. Water invertör girişi tüm fazların değerleri





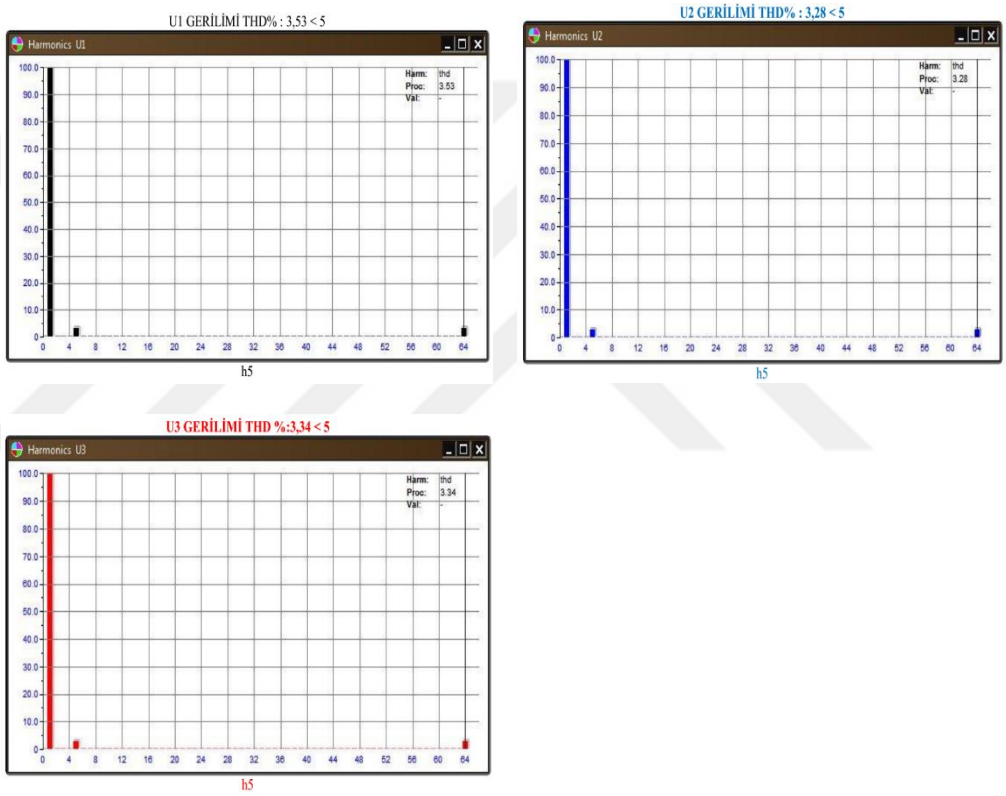
Şekil 4.18. Water invertör girişi işletmedeki gerilimler grafiği



Şekil 4.19. Water invertör girişi işletmedeki akımlar grafiği

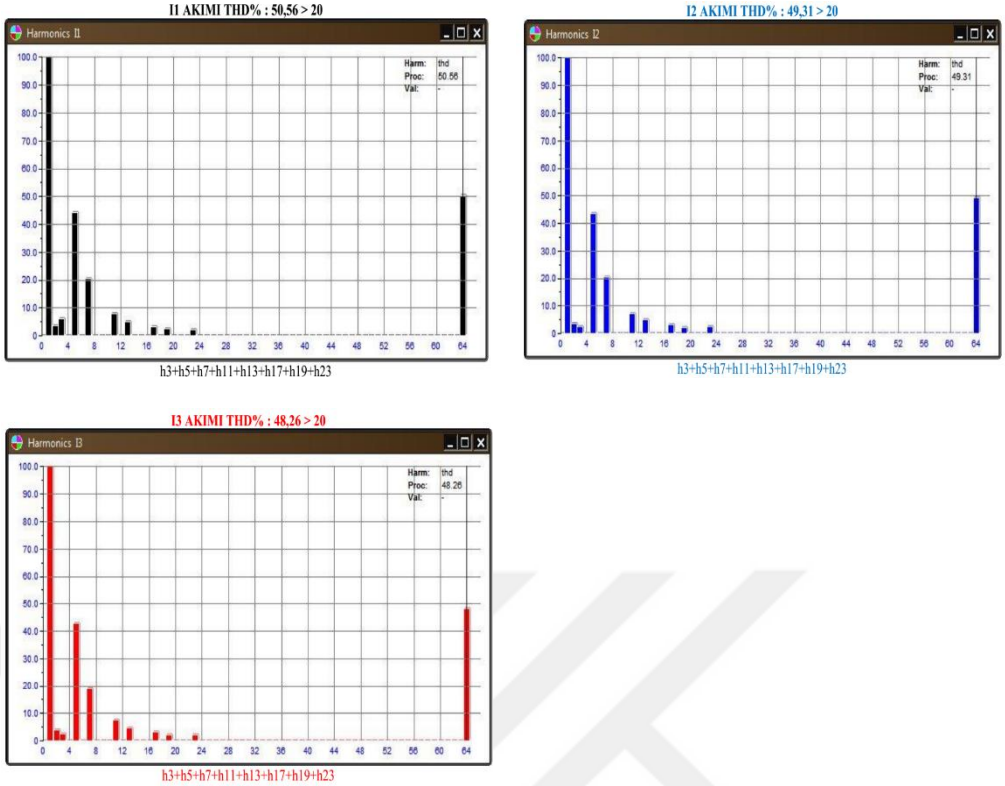
Çizelge 4.9 ve Şekil 4.18'de invertör girişinde yapılan ölçümler sonucunda gerilim harmoniğine çok az rastlanmış, fakat bu durum gerilimin sinüs formunu fazla etkilememiştir. Akım harmoniğine ileri derecede rastlandığı için Şekil 4.19'da akım sinüsoidal görünümden oldukça uzaktır.

Şebeke girişindeki ölçüm noktasında Şekil 4.20'de birinci, ikinci ve toplam harmonik bozulma miktarı üçüncü fazda sırasıyla THD_V değeri %3.53, THD_V değeri %3.28 ve THD_V değeri %3.34'dür.



Şekil 4.20. Water invertör girişi gerilim grafiği U_1, U_2 ve U_3 geriliminin harmonik değerleri

Şekil 4.21 incelendiğinde 5. ve 7. harmoniklerden kaynaklı olarak toplam harmonik bozulma miktarı birinci fazda akım (THD_I) için %50.56, ikinci fazda 5., 7. ve 11. harmoniklerden dolayı toplam harmonik bozulma değeri akım (THD_I) için %49.31, üçüncü fazda yine 5., 7. ve 11. harmoniklerden kaynaklı toplam harmonik bozulma değeri akım (THD_I) için %48.26'dır.



Şekil 4.21. Water invertör girişi akım grafiği I_1, I_2 ve I_3 akımının harmonik değerleri

Çizelge 4.10'daki hesaplama tablosunun birinci kısmında görünür gücün toplamı (Stot) 43.786 kVA, reaktif gücün toplamı (Qtot) 34.151 kVAr, aktif gücün toplamı (Ptot) 24.876 kW ve nötr akımı I(null) 130.96 A'dir. Harmonikli sinüsoidal dalga formuna göre ölçülen güç faktörü (Pf) 0.583 ve harmoniksiz sinüsoidal dalga formuna göre ölçülen güç faktörü (dpf) ise 0.659'dir. İkinci kısımda her bir faz için ölçülen akım ve gerilimin rms değerleri ve güç katsayısını kullanarak görünür, reaktif ve aktif gücün hesabı yapılmıştır. Üçüncü kısımda tüm fazlar için ölçülen akım ve gerilimin rms değerleri, akımın toplam harmonik bozulma değeri ve cosφ değeri kullanılarak harmonikli güç hesabı yapılmıştır. Dördüncü kısımda ise harmonik güç oranı %55.88 olarak hesaplanmıştır. Beşinci bölümde kondansatör gerilimi harmoniklerden dolayı 443.46 V olarak hesaplanmıştır. Altıncı bölümde ise kullanılacak olan filtre için toplam harmonik bozulmaya bağlı olarak akımda meydana gelen kayıp ortalaması 30 A hesaplanmıştır.

Çizelge 4.10. Water invertör girişi harmonik hesapları

	ÖLÇÜLEN YER :		WATER İNVERTER GİRİŞİ								
	GÜÇ	ADI	FORMÜL							ÖLÇÜLEN	BİRİM
1	Stot	TOPLAM GÖRÜNÜR GÜÇ	Stot = S1 + S2 + S3							43,786	kVA.
	Qtot	TOPLAM AKTİF GÜÇ	Qtot = Q1 + Q2 + Q3							34,151	kVAr
	Ptot	TOPLAM AKTİF GÜÇ	Ptot = P1 + P2 + P3							24,876	kW.
	Pfi	GÜÇ KATSAYISI	Pfi = (Pfi1+Pfi2+Pfi3)/3							0,583	-
	Inull	NÖTR AKIMI	(DENGESİZ YÜK)							130,960	A.
	FAZ	GÜÇ	ÖLÇME DEĞERLERİ								DEĞER
2	L1	S1	Urms1 x Irms1	10,755	S2	Urms2xIrms2	22,070	S3	Urms3xIrms3	10,958	kVA.
	L2	P1	S1 x Pfi1	9,450	P2	S2xPfi2	11,719	P3	S3xPfi3	3,707	kW.
	L3	Q1	S1 x sinØ1	5,135	Q2	S2xsinØ2	18,701	Q3	S3xsinØ3	10,313	kVAr.
		thd	0, U1	0,035	thd	0, U2	0,033	thd	0, U3	0,033	
	HARMONİKLİ GÜÇ										
	FAZ	Irms	0, ITHD.	Urms	(cosØ) dPf	PHarm. (Kw.)					
3	L1	43,248	0,50560	248,690	0,997	5,422					
	L2	88,655	0,49315	248,936	0,589	6,410					
	L3	44,660	0,48263	245,379	0,391	2,068					
					TOPLAM	13,900					
4	HARMONİK GÜÇ ORANI (%)										
	PHar. (kW)	13,900	(PHar./ PTot.) x 100		55,88						
	PTot. (kW)	24,876									
	HARMONİK GERİLİMİ TESPİTİ										KOND.(V)
5	FAZ	UI_12	UI_23	UI_13	UI+(UI…xÖlçülen.Uthd)	UÇ GERL.	∑U/3				
	L1	432,000			UI_12+(UI_12xU1thd)	447,25					
	L2		428,424		UI_23+(UI_23xU2thd)	442,46	443,46				
	L3			426,431	UI_13+(UI_13xU3thd)	440,66					
	I(THD)'NİN AKIMDA MEYDANA GETİRDİĞİ KAYIP HESABI										
6	FAZ	ÖLÇÜLEN Irms	Çarpan X / 5 A.	Irms (A)	Ithd	Ha.Ithd (A)	∑I = thd / 3	∑Ithd (A)			
	L1	43,248	1	43,2	0,50560	21,87	29,05	30,00			
	L2	88,655		88,7	0,49315	43,72					
	L3	44,660		44,7	0,48263	21,55					

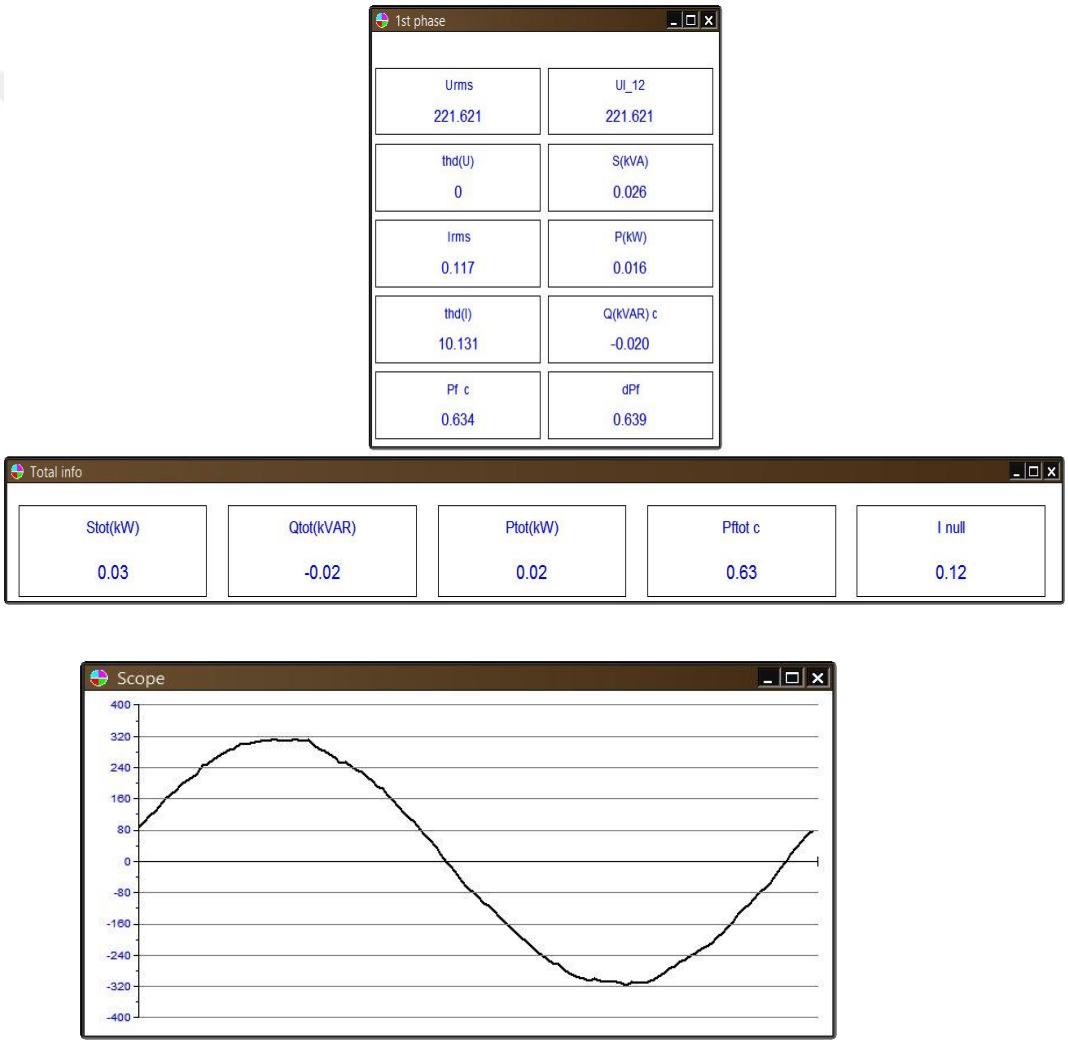
4.4. 40 W ve 150 W'lık LED Projektör Filtresiz Harmonik İncelemesi

Çizelge 4.11'de 40 Watt'lık LED armatüründe ve Çizelge 4.13'de 150 Watt'lık LED armatüründe yapılan ölçümlerde U_{rms}, I_{rms}, her bir fazın gerilim [Thd(U)] için ve akım [Thd(I)] için toplam harmonik bozulmaları, görünür güç [S(kVA)], aktif güç [P(kW)], reaktif güç [Q(kVAr)], Pfc (capacitive power factor), dPf (displacement

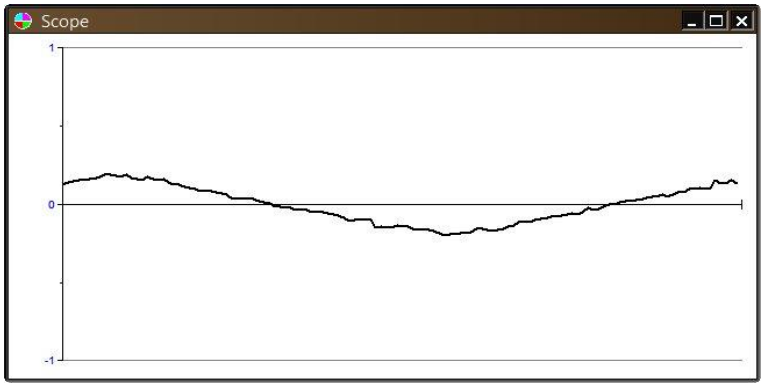
power factor-cosφ) ile görünür gücün toplamı [Stot(kVA)], aktif gücün toplamı [Ptot(kW)], reaktif gücün toplamı Qtot(kVAr) değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.12'de 40 Watt'lık LED armatürüne, Çizelge 4.14'de 150 Watt'lık LED armatürüne ait görünür gücün toplamı, aktif gücün toplamı, reaktif gücün toplamı, güç katsayısı (Pf), akım ve gerilimin rms değerleri ile hesaplamaları verilmiştir.

Çizelge 4.11. 40 W'lık LED armatürde yapılan ölçüm sonucunda faz değerleri



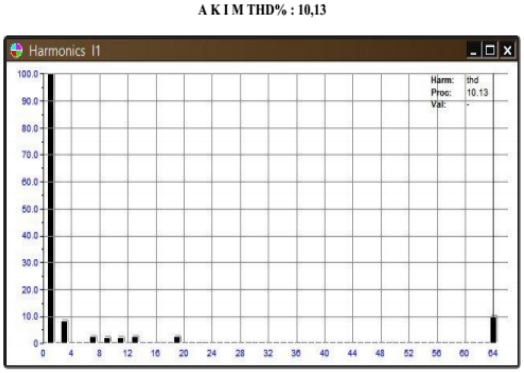
Şekil 4.22. 40 W'lık LED armatürde yapılan ölçüm sonucunda gerilim grafiği



Şekil 4.23. 40 W'lık LED armatürde yapılan ölçüm sonucunda akım grafiği

Çizelge 4.11 ve Şekil 4.22'de 40 Watt'lık LED armatüründe yapılan ölçümler sonucunda gerilim harmoniğine rastlanmadığı için gerilimin sinüs formunu etkilememiştir. Azda olsa akım harmoniği olduğundan dolayı Şekil 4.23'de akımın sinüsoidal görünümde olmadığı görülmektedir. 40 Watt'lık LED armatüründe ölçüm noktasında

Şekil 4.24'de küçük de olsa 3. harmoniğin olduğu ve ölçülen toplam harmonik bozulma miktarı THD_I %10.13'dür.



Şekil 4.24. 40 W'lık LED armatürde yapılan ölçüm sonucunda I akımının harmonik değerleri

Çizelge 4.12. 40 W'lık LED armatürde yapılan ölçümün harmonik hesapları

	ÖLÇÜLEN YER :		40W LED ARMATÜR		
	GÜÇ	ADI	FORMÜL	ÖLÇÜLEN	BİRİM
1	Stot	TOPLAM GÖRÜNÜR GÜÇ	Stot = S1 + S2 + S3	0,026	kVA.
	Qtot	TOPLAM AKTİF GÜÇ	Qtot = Q1 + Q2 + Q3	0,020	kVAr
	Ptot	TOPLAM AKTİF GÜÇ	Ptot = P1 + P2 + P3	0,016	kW.
	Pfi	GÜÇ KATSAYISI	Pfi = (Pfi1+Pfi2+Pfi3)/3	0,634	-
	Inull	NÖTR AKIMI	(DENGESİZ YÜK)	0,120	A.

	FAZ	GÜÇ	ÖLÇME DEĞERLERİ								DEĞER
2	L1	S1	Urms1 x Irms1	0,03	S2	Urms2xIrms2		S3	Urms3xIrms3		kVA.
	L2	P1	S1 x Pfi1	0,02	P2	S2xPfi2		P3	S3xPfi3		kW.
	L3	Q1	S1 x sinØ1	0,02	Q2	S2xsinØ2		Q3	S3xsinØ3		kVAr.
		thd	0, U1	0,00	thd	0, U2		thd	0, U3		

	HARMONİKLİ GÜÇ					
	FAZ	Irms	0, ITHD.	Urms	(cosØ) dPf	PHarm. (Kw.)
3	L1	0,117	0,10131	221,621	0,639	0,002
	L2					0,000
	L3					0,000
					TOPLAM	0,002

	HARMONİK GÜÇ ORANI (%)			
4	PHar. (kW)	0,002	(PHar./ PTot.) x 100	10,49
	PTot. (kW)	0,016		

	HARMONİK GERİLİMİ TESPİTİ						KOND.(V)
5	FAZ	Ul_12	Ul_23	Ul_13	Ul+(Ul…xÖlçülen.Uthd)	UÇ GERL.	∑U
	L1	221,621			Ul_12+(Ul_12xU1thd)	221,62	
	L2				Ul_23+(Ul_23xU2thd)	0,00	221,62
	L3				Ul_13+(Ul_13xU3thd)	0,00	

	I(THD)'NİN AKIMDA MEYDANA GETİRDİĞİ KAYIP HESABI						
6	FAZ	ÖLÇÜLEN Irms	Çarpan X / 5 A.	Irms (A)	Ithd	Ha.Ithd (A)	∑I = thd	∑Ithd (A)
	L1	0,117	1	0,1	0,10131	0,01	0,01	1,00
	L2	0,000		0,0	0,00000	0,00		
	L3	0,000		0,0	0,00000	0,00		

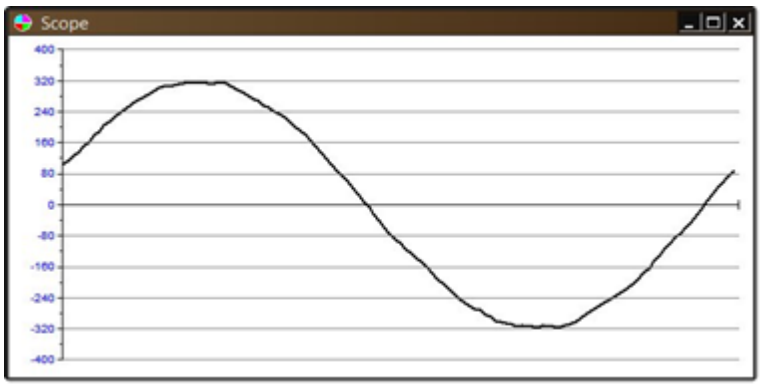
Çizelge 4.12'deki hesaplama tablosunun birinci kısmında görünür gücün toplamı (Stot) 26 VA, reaktif gücün toplamı (Qtot) 20 VAr, aktif gücün toplamı (Ptot) 16 W'tır. Harmonikli sinüsoidal dalga formuna göre ölçülen güç faktörü (Pf) 0.583 ve harmoniksiz sinüsoidal dalga formuna göre ölçülen güç faktörü (dpf) ise 0.659'dir. Üçüncü kısımda faz için ölçülen akım, gerilimin rms değeri, akımın toplam harmonik bozulma değeri ve cosφ değeri kullanılarak harmonikli güç hesabı yapılmıştır. Dördüncü kısımda ise harmonik güç oranı %10.49 olarak hesaplanmıştır. Beşinci

bölümde kondansatör gerilimi harmoniklerden dolayı 221.62 V olarak hesaplanmıştır. Altıncı bölümde ise kullanılacak olan filtre için toplam harmonik bozulmaya bağlı olarak akımda meydana gelen kayıp ortalaması 1 A hesaplanmıştır.

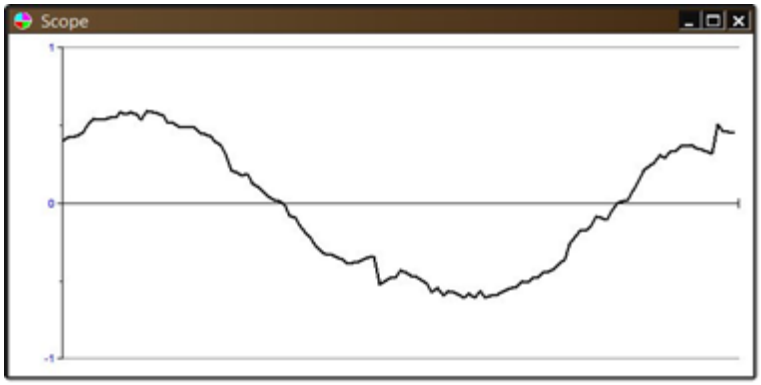
Çizelge 4.13. 150 W'lık LED armatürde yapılan ölçüm sonucunda faz değerleri



Çizelge 4.13 ve Şekil 4.25'de şebeke girişinde yapılan ölçümler sonucunda gerilim harmoniğine rastlanmadığı için gerilimin sinüs formunu etkilememiştir. Azda olsa akım harmoniği olduğundan dolayı Şekil 4.26'da akımın sinüsoidal görünümde olmadığı görülmektedir.

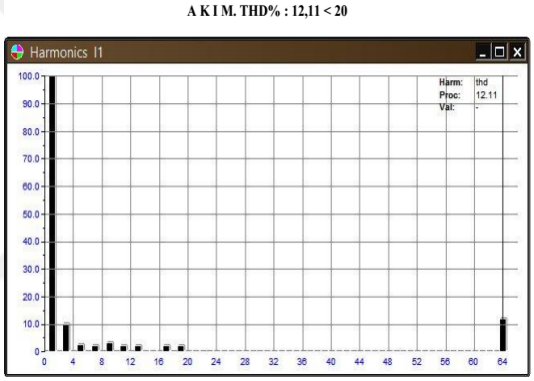


Şekil 4.25. 150 W'lık LED armatürde yapılan ölçüm sonucunda gerilim grafiği



Şekil 4.26. 150 W'lık LED armatürde yapılan ölçüm sonucunda akım grafiği

150 Watt'lık LED armatüründe ölçüm noktasında Şekil 4.27'de küçük de olsa 3. harmoniğin olduğu ve ölçülen toplam harmonik bozulma THD_I %12.11'dir.



Şekil 4.27. 150 W'lık LED armatürde yapılan ölçüm sonucunda I akımının harmonik değerleri

Çizelge 4.14'deki hesaplama tablosunun birinci kısmında görünür gücün toplamı (Stot) 94 VA, reaktif gücün toplamı (Qtot) 67 VAr, aktif gücün toplamı (Ptot) 66 W'tır. Harmonikli sinüsoidal dalga formuna göre ölçülen güç faktörü (Pf) 0.699 ve harmoniksiz sinüsoidal dalga formuna göre ölçülen güç faktörü (dpf) ise 0.706'dir. Üçüncü kısımda faz için ölçülen akım, gerilimin rms değeri, akımın toplam harmonik bozulma değeri ve cosφ değeri kullanılarak harmonikli güç hesabı yapılmıştır. Dördüncü kısımda ise harmonik güç oranı %12.14 olarak hesaplanmıştır. Beşinci bölümde kondansatör gerilimi harmoniklerden dolayı 224.75 V olarak hesaplanmıştır. Altıncı bölümde ise kullanılacak olan filtre için toplam harmonik bozulmaya bağlı olarak akımda meydana gelen kayıp ortalaması 1 A hesaplanmıştır.

Çizelge 4.14. 150 W'lık LED armatürde yapılan ölçümün harmonik hesapları

	ÖLÇÜLEN YER :		150W LED ARMATÜR		
	GÜÇ	ADI	FORMÜL	ÖLÇÜLEN	BİRİM
1	Stot	TOPLAM GÖRÜNÜR GÜÇ	Stot = S1 + S2 + S3	0,094	kVA.
	Qtot	TOPLAM AKTİF GÜÇ	Qtot = Q1 + Q2 + Q3	0,067	kVAr
	Ptot	TOPLAM AKTİF GÜÇ	Ptot = P1 + P2+ P3	0,066	kW.
	Pfi	GÜÇ KATSAYISI	Pfi = (Pfi1+Pfi2+Pfi3)/3	0,699	-
	Inull	NÖTR AKIMI	(DENGESİZ YÜK)	0,420	A.

	FAZ	GÜÇ	ÖLÇME DEĞERLERİ								DEĞER
2	L1	S1	Urms1 x Irms1	0,09	S2	Urms2xIrms2		S3	Urms3xIrms3		kVA.
	L2	P1	S1 x Pfi1	0,07	P2	S2xPfi2		P3	S3xPfi3		kW.
	L3	Q1	S1 x sinØ1	0,07	Q2	S2xsinØ2		Q3	S3xsinØ3		kVAr.
		thd	0, U1	0,00	thd	0, U2		thd	0, U3		

	HARMONİKLİ GÜÇ					
	FAZ	Irms	0, ITHD.	Urms	(cosØ) dPf	PHarm. (Kw.)
3	L1	0,417	0,12111	224,752	0,706	0,008
	L2					0,000
	L3					0,000
					TOPLAM	0,008

	HARMONİK GÜÇ ORANI (%)			
4	PHar. (kW)	0,008	(PHar./ PTot.) x 100	12,14
	PTot. (kW)	0,066		

	HARMONİK GERİLİMİ TESPİTİ						KOND.(V)
5	FAZ	Ul_12	Ul_23	Ul_13	Ul+(Ul…xÖlçülen.Uthd)	UÇ GERL.	∑U
	L1	224,752			Ul_12+(Ul_12xU1thd)	224,75	
	L2				Ul_23+(Ul_23xU2thd)	0,00	224,75
	L3				Ul_13+(Ul_13xU3thd)	0,00	

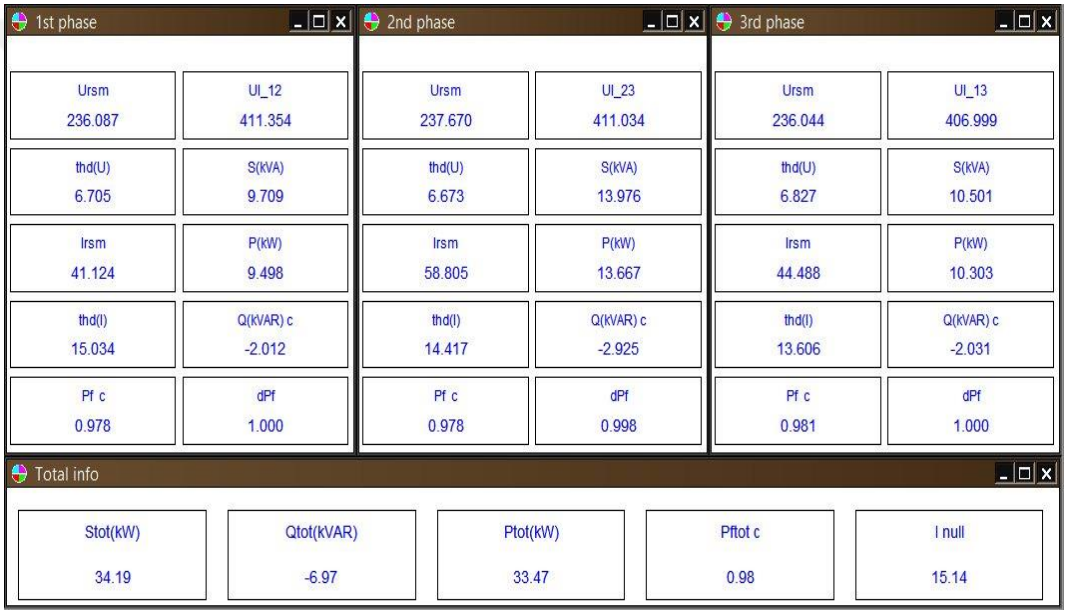
	I(THD)'NİN AKIMDA MEYDANA GETİRDİĞİ KAYIP HESABI						
6	FAZ	ÖLÇÜLEN Irms	Çarpan X / 5 A.	Irms (A)	Ithd	Ha.Ithd (A)	∑I = thd	∑Ithd (A)
	L1	0,417	1	0,4	0,12111	0,05	0,05	1,00
	L2	0,000		0,0	0,00000	0,00		
	L3	0,000		0,0	0,00000	0,00		

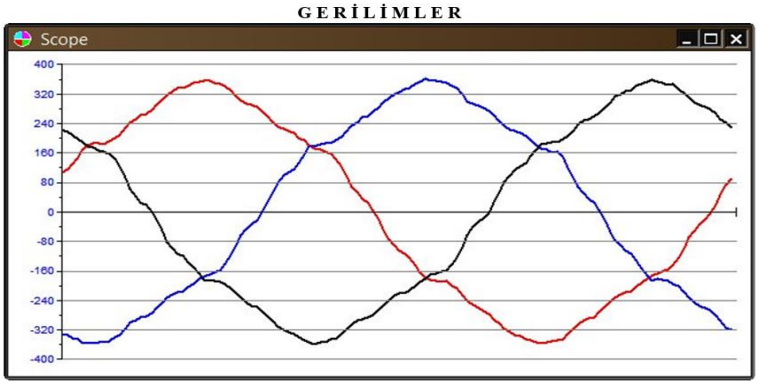
4.5. Dört Farklı İplik Üretimi Yapan Tesiste Filtre Takılmadan Önce Harmonik İncelemesi

Ölçüm yapılan tesis dört çeşit ürün üzerine üretim yapmaktadır. İplik üreten tesiste 7 ölçüm yapılmış, tüm fazlar için gerilim ve akım harmonikleri ölçülmüş daha sonra harmonik güç oranı hesaplanmıştır. Çizelge 4.15, Çizelge 4.17, Çizelge 4.19, Çizelge 4.21, Çizelge 4.23, Çizelge 4.25 ve Çizelge 4.27'de yapılan ölçümlerde Urms,

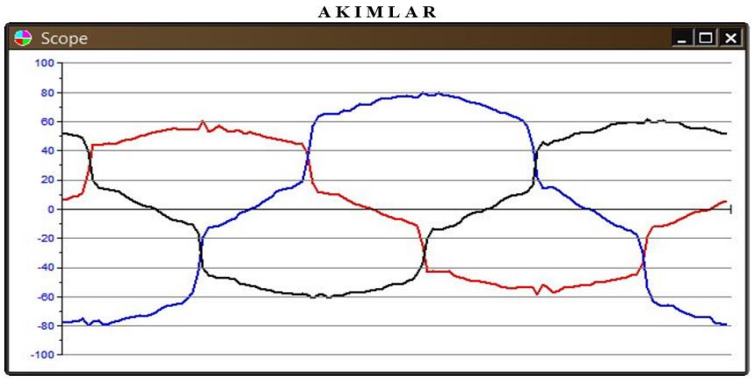
Irms, her bir fazın gerilim [Thd(U)] için ve akım [Thd(I)] için toplam harmonik bozulmaları, görünür güç [S(kVA)], aktif güç [P(kW)], reaktif güç [Q(kVAr)], Pfc (capacitive power factor), dPf (displacement power factor-cosφ) ile görünür gücün toplamı [Stot(kVA)], aktif gücün toplamı [Ptot(kW)], reaktif gücün toplamı Qtot(kVAr) değerleri verilmiştir. Çizelge 4.16, Çizelge 4.18, Çizelge 4.20, Çizelge 4.22, Çizelge 4.24, Çizelge 4.26 ve Çizelge 4.28'de görünür gücün toplamı, aktif gücün toplamı, reaktif gücün toplamı, güç katsayısı (Pf), akım ve gerilimin rms değerleri ile hesaplamaları verilmiştir.

Çizelge 4.15. Hazırlama (ısıtıcı) kısmındaki ölçüm sonucunda tüm fazların değerleri



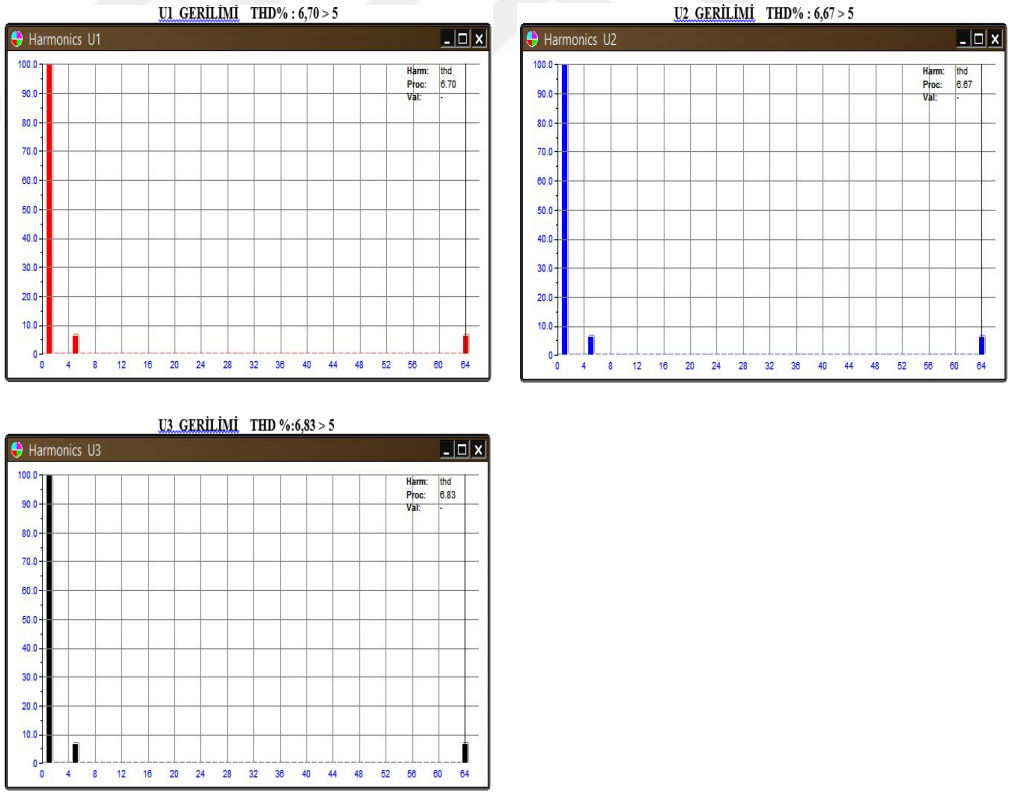


Şekil 4.28. İplik üretim tesisinde hazırlama (ısıtıcı) kısmında yapılan ölçümde gerilimler grafiği



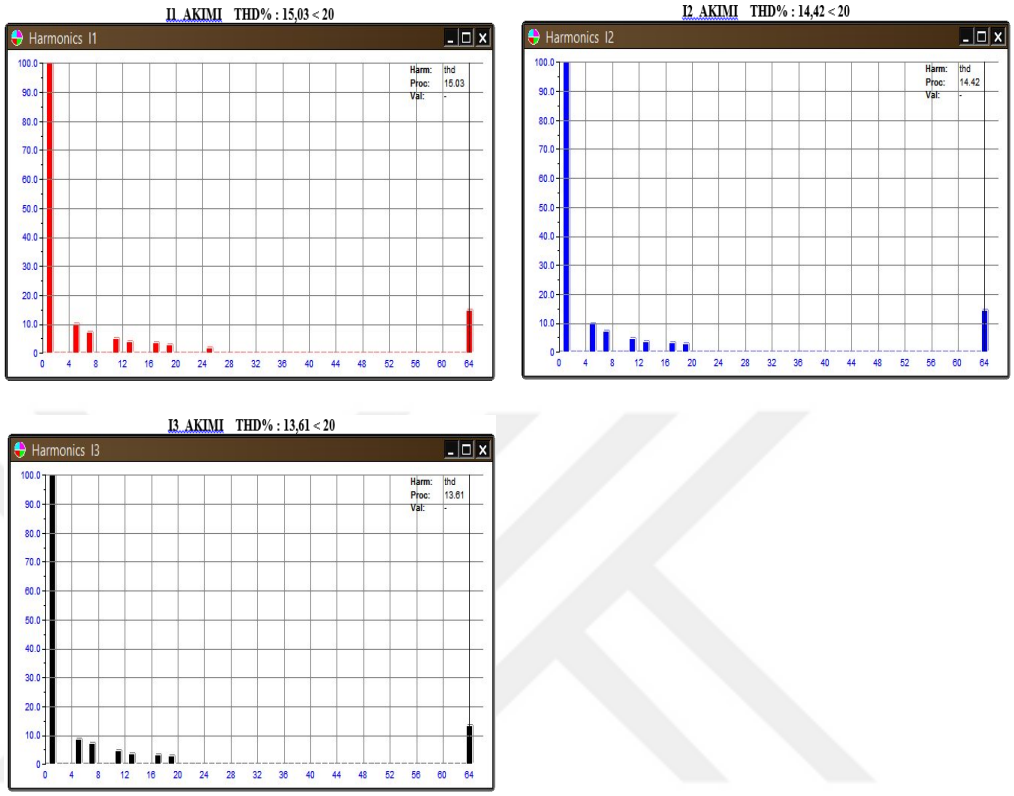
Şekil 4.29. İplik üretim tesisinde hazırlama (ısıtıcı) kısmında yapılan ölçümde akımlar grafiği

Çizelge 4.15 ve Şekil 4.28'de hazırlama (ısıtıcı) olan kısımda gerilim ile ilgili harmoniğe rastlanmıştır. Hazırlama (ısıtıcı) ölçüm noktasında şekil 4.30'da her faz için 5. harmoniğe rastlanmıştır. Ölçülen toplam harmonik bozulma miktarı birinci fazda THD_V %6.70, toplam harmonik bozulma miktarı ikinci fazda THD_V %6.67, toplam harmonik bozulma miktarı üçüncü fazda THD_V %6.83'dür.



Şekil 4.30. Hazırlama (ısıtıcı) kısmında U_1, U_2 ve U_3 geriliminin harmonik değerleri

Çizelge 4.15 ve Şekil 4.29'da hazırlama (ısıtıcı) olan kısımda yapılan ölçümlerde azda olsa akım harmoniğine rastlanmıştır.



Şekil 4.31. Hazırlama (ısıtıcı) kısmında I_1, I_2 ve I_3 akımının harmonik değerleri

Şekil 4.31 incelendiğinde tüm fazlarda 5., 7. ve 11. harmoniklerden kaynaklı olarak toplam harmonik bozulma miktarı birinci fazda akım (THD_I) için %15.03, toplam harmonik bozulma miktarı ikinci fazda akım (THD_I) için %14.42, toplam harmonik bozulma miktarı üçüncü fazda akım (THD_I) için %13.61'dir.

Çizelge 4.16'daki hesaplama tablosunun birinci kısmında görünür gücün toplamı (Stot) 34.186 kVA, reaktif gücün toplamı (Qtot) 7.076 kVAr, aktif gücün toplamı (Ptot) 33.468 kW ve nötr akımı I(null) 15.140 A'dir. Harmonikli sinüsoidal dalga formuna göre ölçülen güç faktörü (Pf) 0.979 ve harmoniksiz sinüsoidal dalga formuna göre ölçülen güç faktörü (dpf) ise 0.999'dur. İkinci kısımda her bir faz için ölçülen akım ve gerilimin rms değerleri ve güç katsayısını kullanarak görünür, reaktif ve aktif gücün hesabı yapılmıştır. Üçüncü kısımda tüm fazlar için ölçülen akım ve gerilimin rms değerleri, akımın toplam harmonik bozulma değeri ve cosφ değeri

kullanılarak harmonikli güç hesabı yapılmıştır. Dördüncü kısımda ise harmonik güç oranı %14.64 olarak hesaplanmıştır. Beşinci bölümde kondansatör gerilimi harmoniklerden dolayı 437.39 V olarak hesaplanmıştır. Altıncı bölümde ise kullanılacak olan filtre için toplam harmonik bozulmaya bağlı olarak akımda meydana gelen kayıp ortalaması 7 amper hesaplanmıştır.

Çizelge 4.16. Hazırlama (ısıtıcı) kısmında yapılan ölçümün harmonik hesapları

	ÖLÇÜLEN YER :		HAZIRLAMA (ISITICI)		
	GÜÇ	ADI	FORMÜL	ÖLÇÜLEN	BİRİM
1	Stot	TOPLAM GÖRÜNÜR GÜÇ	Stot = S1 + S2 + S3	34,186	kVA.
	Qtot	TOPLAM AKTİF GÜÇ	Qtot = Q1 + Q2 + Q3	7,076	kVAr
	Ptot	TOPLAM AKTİF GÜÇ	Ptot = P1+P2+P3	33,468	kW.
	Pfi	GÜÇ KATSAYISI	Pfi = (Pfi1+Pfi2+Pfi3)/3	0,979	-
	Inull	NÖTR AKIMI	(DENGESİZ YÜK)	15,140	A.

	FAZ	GÜÇ	ÖLÇME DEĞERLERİ								DEĞER
2	L1	S1	Urms1 x Irms1	9,71	S2	Urms2xIrms2	13,98	S3	Urms3xIrms3	10,501	kVA.
	L2	P1	S1 x Pfi1	9,50	P2	S2xPfi2	13,67	P3	S3xPfi3	10,303	kW.
	L3	Q1	S1 x sinØ1	2,01	Q2	S2xsinØ2	2,93	Q3	S3xsinØ3	2,031	kVAr.
		thd	0, U1	0,067	thd	0, U2	0,067	thd	0, U3	0,068	

	HARMONİKLİ GÜÇ					
	FAZ	Irms	0, ITHD.	Urms	(cosØ) dPf	PHarm. (Kw.)
3	L1	41,124	0,15034	236,087	1,000	1,460
	L2	58,805	0,14417	237,670	0,998	2,011
	L3	44,488	0,13606	236,044	1,000	1,429
					TOPLAM	4,899

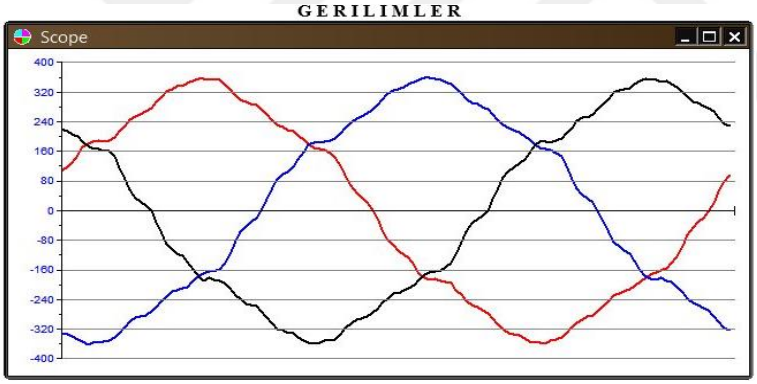
	HARMONİK GÜÇ ORANI (%)			
4	PHar. (kW)	4,899	(PHar./ PTot.) x 100	14,64
	PTot. (kW)	33,468		

	HARMONİK GERİLİMİ TESPİTİ					KOND.(V)
5	FAZ	UI_12	UI_23	UI_13	UI+(UI…xÖlçülen.Uthd)	UÇ GERL.	∑U/3
	L1	411,354			UI_12+(UI_12xU1thd)	438,94	
	L2		411,034		UI_23+(UI_23xU2thd)	438,46	437,39
	L3			406,999	UI_13+(UI_13xU3thd)	434,78	

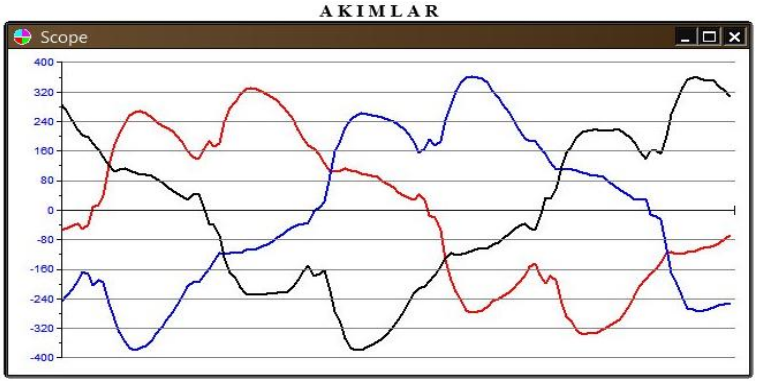
	I(THD)'NİN AKIMDA MEYDANA GETİRDİĞİ KAYIP HESABI						
6	FAZ	ÖLÇÜLEN Irms	Çarpan X / 5 A.	Irms (A)	Ithd	Ha.Ithd (A)	∑I = thd / 3	∑Ithd (A)
	L1	41,124		41,1	0,15034	6,18		
	L2	58,805	1	58,8	0,14417	8,48	6,90	7,00
	L3	44,488		44,5	0,13606	6,05		

Çizelge 4.17. İplik üretim tesisinde hazırlama (sürücü) kısmında yapılan ölçüm sonucunda tüm fazların değerleri





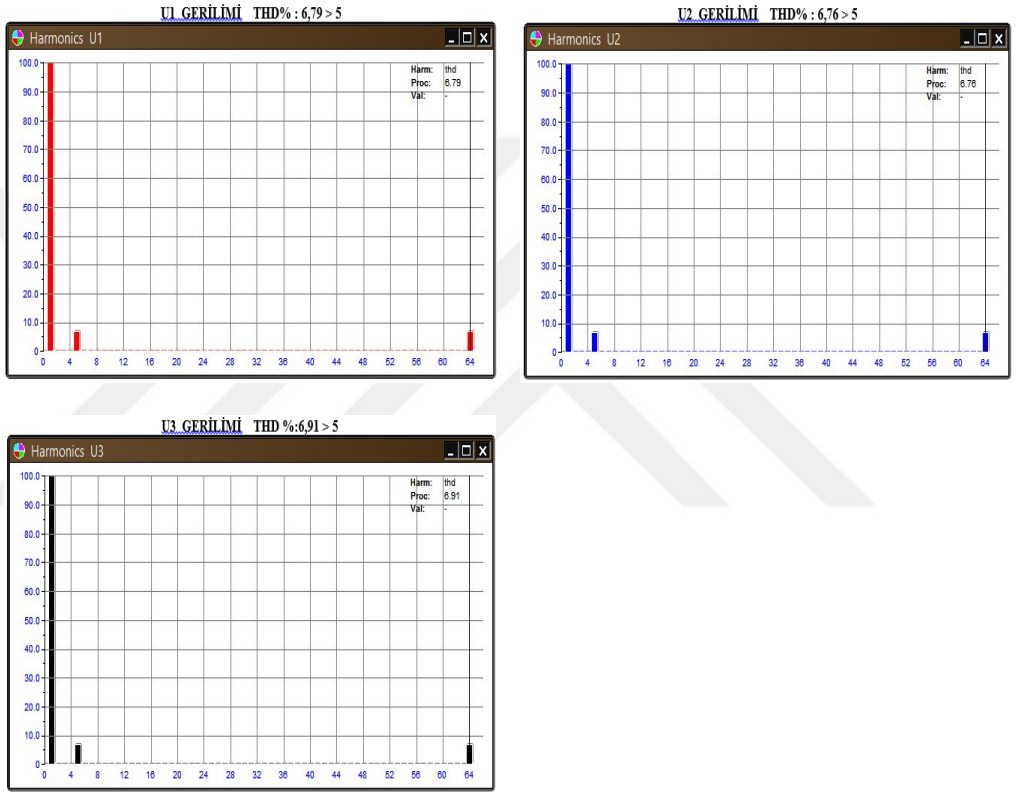
Şekil 4.32. İplik üretim tesisinde hazırlama (sürücü) kısmında yapılan ölçümde gerilimler grafiği



Şekil 4.33. İplik üretim tesisinde hazırlama (sürücü) kısmında yapılan ölçümde akımlar grafiği

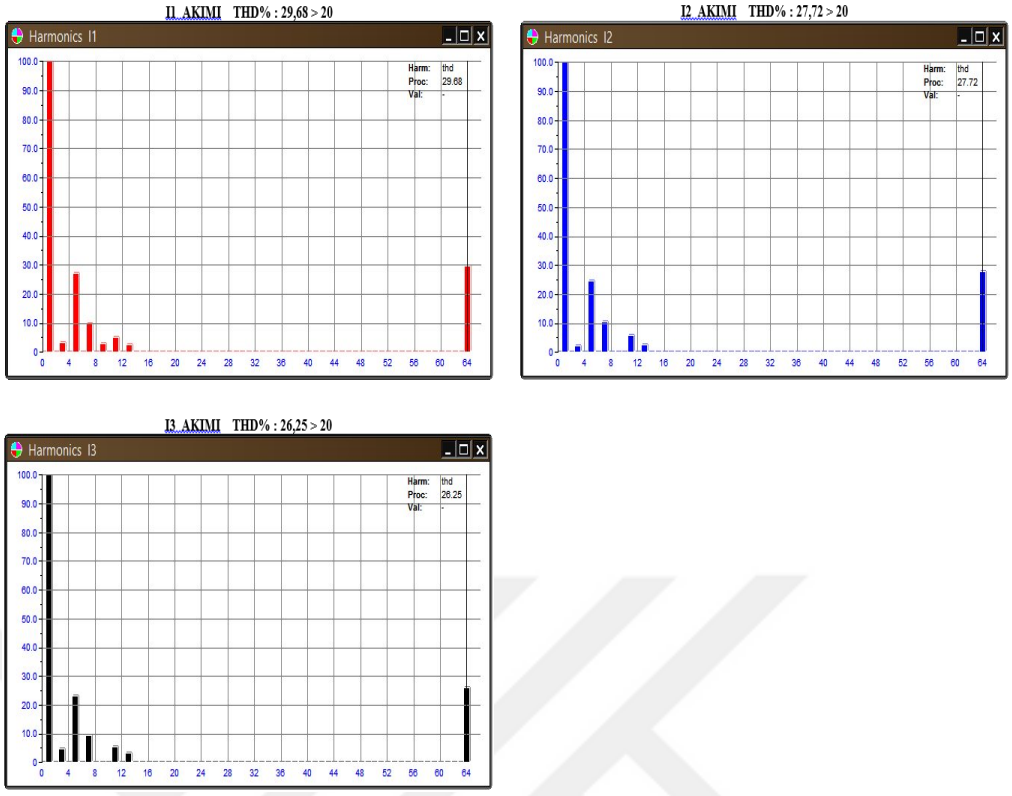
Çizelge 4.17 ve Şekil 4.32'de hazırlama (sürücü) olan kısımda gerilim ile ilgili harmoniğe rastlanmıştır. Hazırlama (sürücü) ölçüm noktasında Şekil 4.34'de her faz için 5. harmoniğe rastlanmıştır.

Ölçülen toplam harmonik bozulma miktarı birinci fazda THD_V %6.79, toplam harmonik bozulma miktarı ikinci fazda THD_V %6.76, toplam harmonik bozulma miktarı üçüncü fazda THD_V %6.91'dir.



Şekil 4.34. Hazırlama (sürücü) kısmında U_1, U_2 ve U_3 geriliminin harmonik değerleri

Şekil 4.35 incelendiğinde tüm fazlarda 3., 5., 7., ve 11. harmoniklerden kaynaklı olarak toplam harmonik bozulma miktarı birinci fazda akım (THD_I) için %29.68, toplam harmonik bozulma miktarı ikinci fazda akım (THD_I) için %27.72, toplam harmonik bozulma miktarı üçüncü fazda akım (THD_I) için %26.25'dir.



Şekil 4.35. Hazırlama (sürücü) kısmında I_1, I_2 ve I_3 akımının harmonik değerleri

Çizelge 4.18'deki hesaplama tablosunun birinci kısmında görünür gücün toplamı (Stot) 147.863 kVA, reaktif gücün toplamı (Qtot) 66.743 kVAr, aktif gücün toplamı (Ptot) 131.912 kW ve nötr akımı I(null) 16.09 A'dir. Harmonikli sinüsoidal dalga formuna göre ölçülen güç faktörü (Pf) 0.892 ve harmoniksiz sinüsoidal dalga formuna göre ölçülen güç faktörü (dpf) ise 0.947'dir.

İkinci kısımda her bir faz için ölçülen akım ve gerilimin rms değerleri ve güç katsayısını kullanarak görünür, reaktif ve aktif gücün hesabı yapılmıştır.

Üçüncü kısımda tüm fazlar için ölçülen akım ve gerilimin rms değerleri, akımın toplam harmonik bozulma değeri ve cosφ değeri kullanılarak harmonikli güç hesabı yapılmıştır.

Dördüncü kısımda ise harmonik güç oranı %29.59 olarak hesaplanmıştır.

Beşinci bölümde kondansatör gerilimi harmoniklerden dolayı 438.63 V olarak hesaplanmıştır.

Altıncı bölümde ise kullanılacak olan filtre için toplam harmonik bozulmaya bağlı olarak akımda meydana gelen kayıp ortalaması 58 amper hesaplanmıştır.

Çizelge 4.18. Hazırlama (sürücü) kısmında yapılan ölçümün harmonik hesapları

	ÖLÇÜLEN YER :		HAZIRLAMA (SÜRÜCÜ)		
	GÜÇ	ADI	FORMÜL	ÖLÇÜLEN	BİRİM
1	Stot	TOPLAM GÖRÜNÜR GÜÇ	Stot = S1 + S2 + S3	147,863	kVA.
	Qtot	TOPLAM REAKTİF GÜÇ	Qtot = Q1 + Q2 + Q3	66,743	kVAr
	Ptot	TOPLAM AKTİF GÜÇ	Ptot = P1+P2+P3	131,912	kW.
	Pfi	GÜÇ KATSAYISI	Pfi = (Pfi1+Pfi2+Pfi3)/3	0,892	-
	Inull	NÖTR AKIMI	(DENGESİZ YÜK)	16,090	A.

	FAZ	GÜÇ	ÖLÇME DEĞERLERİ								DEĞER
2	L1	S1	Urms1 x Irms1	47,81	S2	Urms2xIrms2	50,82	S3	Urms3xIrms3	49,237	kVA.
	L2	P1	S1 x Pfi1	42,54	P2	S2xPfi2	45,91	P3	S3xPfi3	43,467	kW.
	L3	Q1	S1 x sinØ1	21,82	Q2	S2xsinØ2	21,80	Q3	S3xsinØ3	23,128	kVAr.
		thd	0, U1	0,068	thd	0, U2	0,068	thd	0, U3	0,069	

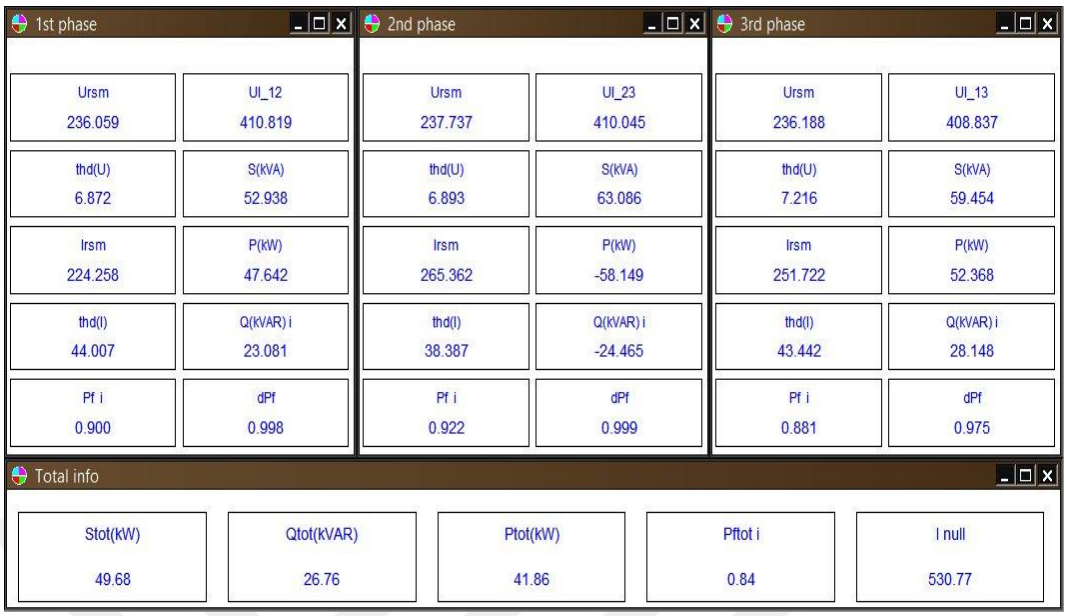
	HARMONİKLİ GÜÇ					
	FAZ	Irms	0, ITHD.	Urms	(cosØ) dPf	PHarm. (Kw.)
3	L1	202,062	0,29680	236,585	0,950	13,479
	L2	213,437	0,27722	238,110	0,958	13,497
	L3	208,156	0,26254	236,539	0,933	12,061
					TOPLAM	39,037

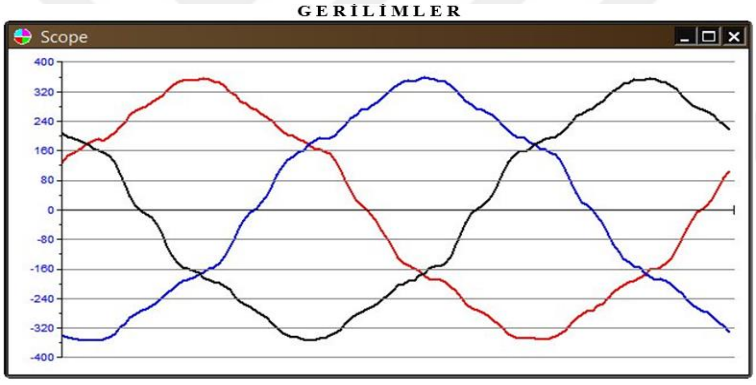
	HARMONİK GÜÇ ORANI (%)			
4	PHar. (kW)	39,037	(PHar./ PTot.) x 100	29,59
	PTot. (kW)	131,912		

	HARMONİK GERİLİMİ TESPİTİ						KOND.(V)
5	FAZ	UI_12	UI_23	UI_13	UI+(UI…xÖlçülen.Uthd)	UÇ GERL.	∑U/3
	L1	411,647			UI_12+(UI_12xU1thd)	439,62	
	L2		411,645		UI_23+(UI_23xU2thd)	439,46	438,63
	L3			408,586	UI_13+(UI_13xU3thd)	436,80	

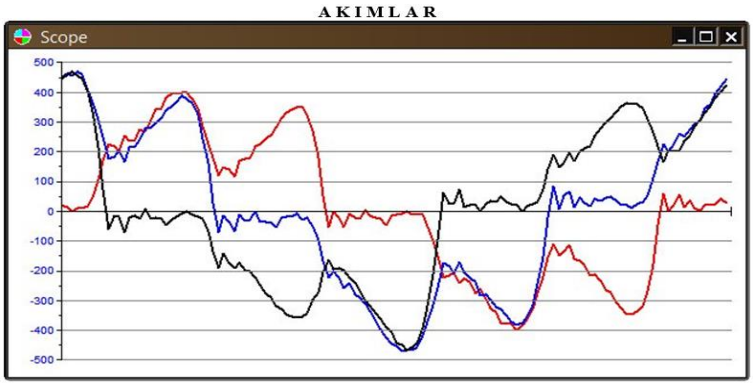
	I(THD)'NİN AKIMDA MEYDANA GETİRDİĞİ KAYIP HESABI						
6	FAZ	ÖLÇÜLEN Irms	Çarpan X / 5 A.	Irms (A)	Ithd	Ha.Ithd (A)	∑I = thd / 3	∑Ithd (A)
	L1	202,062		202,1	0,29680	59,97		
	L2	213,437	1	213,4	0,27722	59,17	57,93	58,00
	L3	208,156		208,2	0,26254	54,65		

Çizelge 4.19. Büküm kısmında yapılan ölçüm sonucunda tüm fazların değerleri



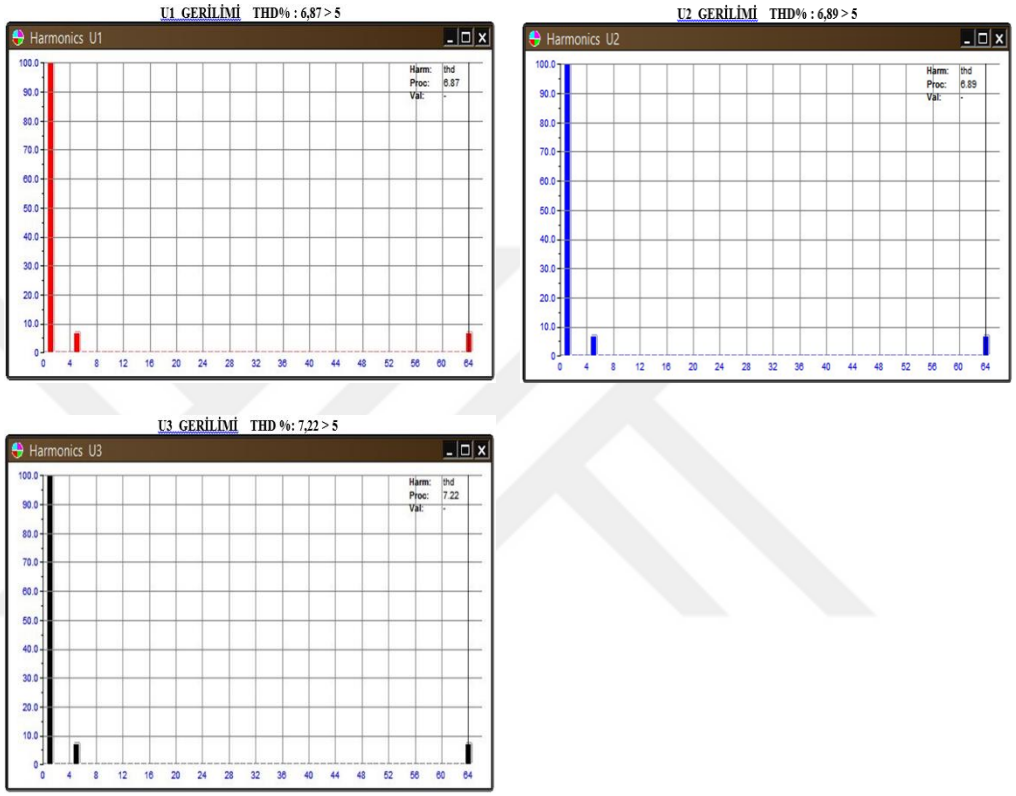


Şekil 4.36. Büküm kısmında yapılan ölçüm sonucunda gerilimler grafiği



Şekil 4.37. Büküm kısmında yapılan ölçüm sonucunda akımlar grafiği

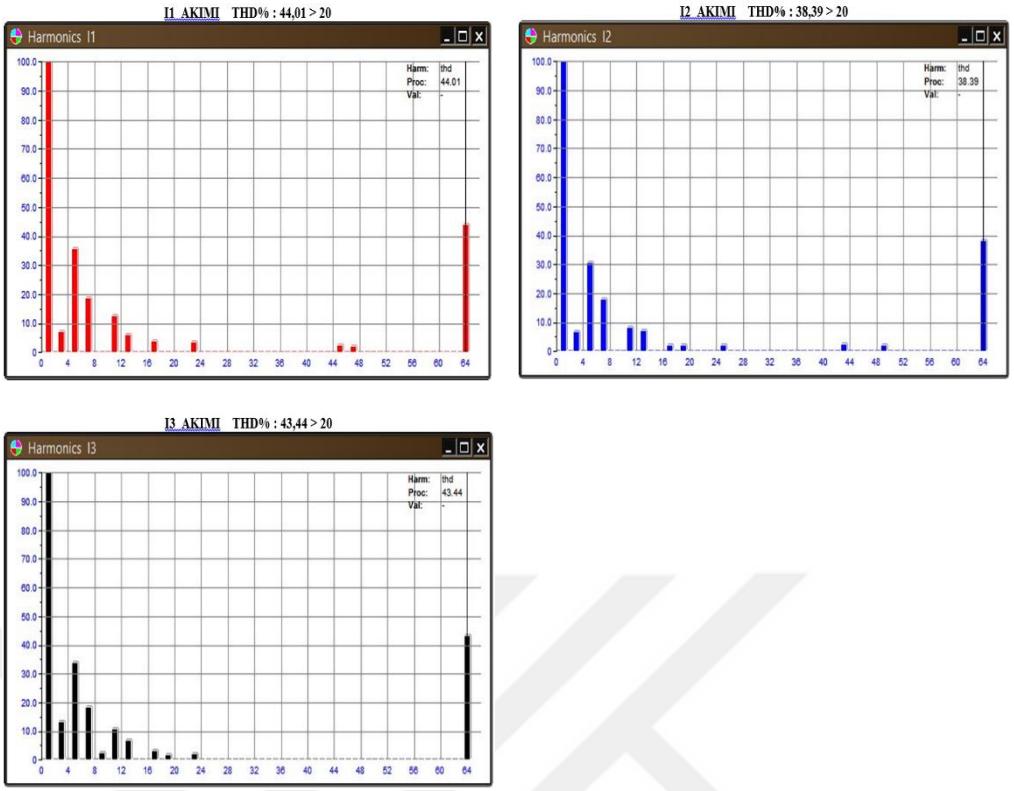
Çizelge 4.19 ve Şekil 4.36'da büküm kısmında gerilim ile ilgili harmoniğe rastlanmıştır. Büküm kısmındaki ölçüm noktasında Şekil 4.38'de her faz için 5. harmoniğe rastlanmıştır. Ölçülen toplam harmonik bozulma miktarı birinci fazda THD_V %6.87, toplam harmonik bozulma miktarı ikinci fazda THD_V %6.89, toplam harmonik bozulma miktarı üçüncü fazda THD_V %7.22'dir.



Şekil 4.38. Büküm kısmında U_1, U_2 ve U_3 geriliminin harmonik değerleri

Çizelge 4.19 ve Şekil 4.37'de büküm kısmında yapılan ölçümlerde akım harmoniğine rastlanmıştır. Şekil 4.39'da birinci, ikinci ve üçüncü fazlarda 3., 5., 7., ve 11. harmonik tespit edilmiştir.

Birinci fazda toplam harmonik bozulma akım için THD_I değeri %44.01, ikinci fazda toplam harmonik bozulma akım için THD_I değeri %38.39, üçüncü fazda toplam harmonik bozulma akım için THD_I değeri %43.44'dir.



Şekil 4.39. Büküm kısmında I_1, I_2 ve I_3 akımının harmonik değerleri

Çizelge 4.20'deki hesaplama tablosunun birinci kısmında görünür gücün toplamı (Stot) 175.484 kVA, reaktif gücün toplamı (Qtot) 75.694 kVAr, aktif gücün toplamı (Ptot) 158.159 kW ve nötr akımı I(null) 530.77 A'dir. Harmonikli sinüsoidal dalga formuna göre ölçülen güç faktörü (Pf) 0.901 ve harmoniksiz sinüsoidal dalga formuna göre ölçülen güç faktörü (dpf) ise 0.990'dir.

İkinci kısımda her bir faz için ölçülen akım ve gerilimin rms değerleri ve güç katsayısını kullanarak görünür, reaktif ve aktif gücün hesabı yapılmıştır.

Üçüncü kısımda tüm fazlar için ölçülen akım ve gerilimin rms değerleri, akımın toplam harmonik bozulma değeri ve cosφ değeri kullanılarak harmonikli güç hesabı yapılmıştır.

Dördüncü kısımda ise harmonik güç oranı %45.92 olarak hesaplanmıştır.

Beşinci bölümde kondansatör gerilimi harmoniklerden dolayı 438.57 V olarak hesaplanmıştır.

Altıncı bölümde ise kullanılacak olan filtre için toplam harmonik bozulmaya bağlı olarak akımda meydana gelen kayıp ortalaması 122 amper hesaplanmıştır.

Çizelge 4.20. Büküm kısmında yapılan ölçümün harmonik hesapları

	ÖLÇÜLEN YER :		BÜKÜM KISMI		
	GÜÇ	ADI	FORMÜL	ÖLÇÜLEN	BİRİM
1	Stot	TOPLAM GÖRÜNÜR GÜÇ	Stot = S1 + S2 + S3	175,484	kVA.
	Qtot	TOPLAM REAKTİF GÜÇ	Qtot = Q1 + Q2 + Q3	75,694	kVAr
	Ptot	TOPLAM AKTİF GÜÇ	Ptot = P1+P2+P3	158,159	kW.
	Pfi	GÜÇ KATSAYISI	Pfi = (Pf1+Pf2+Pf3)/3	0,901	-
	Inull	NÖTR AKIMI	(DENGESİZ YÜK)	530,770	A.

	FAZ	GÜÇ	ÖLÇME DEĞERLERİ								DEĞER
2	L1	S1	Urms1 x Irms1	52,94	S2	Urms2xIrms2	63,09	S3	Urms3xIrms3	59,454	kVA.
	L2	P1	S1 x Pfi1	47,64	P2	S2xPfi2	58,15	P3	S3xPfi3	52,368	kW.
	L3	Q1	S1 x sinØ1	23,08	Q2	S2xsinØ2	24,47	Q3	S3xsinØ3	28,148	kVAr.
		thd	0, U1	0,069	thd	0, U2	0,069	thd	0, U3	0,072	

	HARMONİKLİ GÜÇ					
	FAZ	Irms	0, ITHD.	Urms	(cosØ) dPfi	PHarm. (Kw.)
3	L1	224,268	0,44007	236,059	0,998	23,251
	L2	265,362	0,38387	237,737	0,999	24,193
	L3	251,722	0,43442	236,188	0,975	25,182
					TOPLAM	72,626

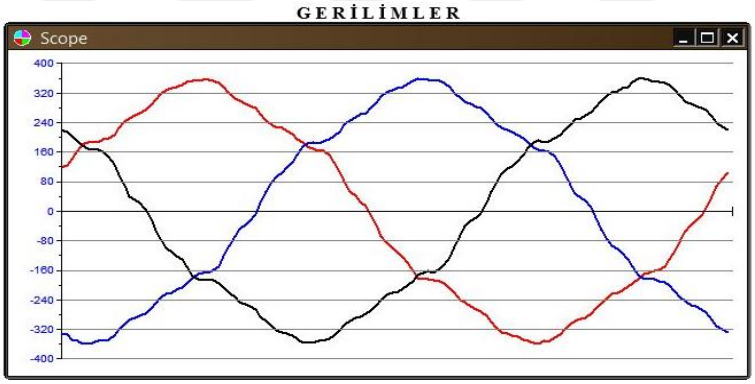
	HARMONİK GÜÇ ORANI (%)			
4	PHar. (kW)	72,626	(PHar./ PTot.) x 100	45,92
	PTot. (kW)	158,159		

	HARMONİK GERİLİMİ TESPİTİ						KOND.(V)
5	FAZ	UI_12	UI_23	UI_13	UI+(UI…xÖlçülen.Uthd)	UÇ GERL.	∑U/3
	L1	410,819			UI_12+(UI_12xU1thd)	439,05	
	L2		410,045		UI_23+(UI_23xU2thd)	438,31	438,57
	L3			408,837	UI_13+(UI_13xU3thd)	438,34	

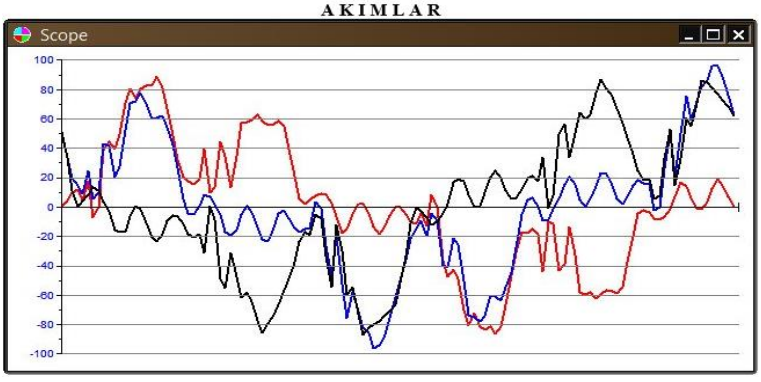
	I(THD)'NİN AKIMDA MEYDANA GETİRDİĞİ KAYIP HESABI						
6	FAZ	ÖLÇÜLEN Irms	Çarpan X / 5 A.	Irms (A)	Ithd	Ha.Ithd (A)	∑I = thd / 3	∑Ithd (A)
	L1	224,268		224,3	0,44007	98,69		
	L2	265,362	1	265,4	0,38387	101,86	103,30	104,00
	L3	251,722		251,7	0,43442	109,35		

Çizelge 4.21. Fikse (buhar) kısmında yapılan ölçümde tüm fazların değerleri



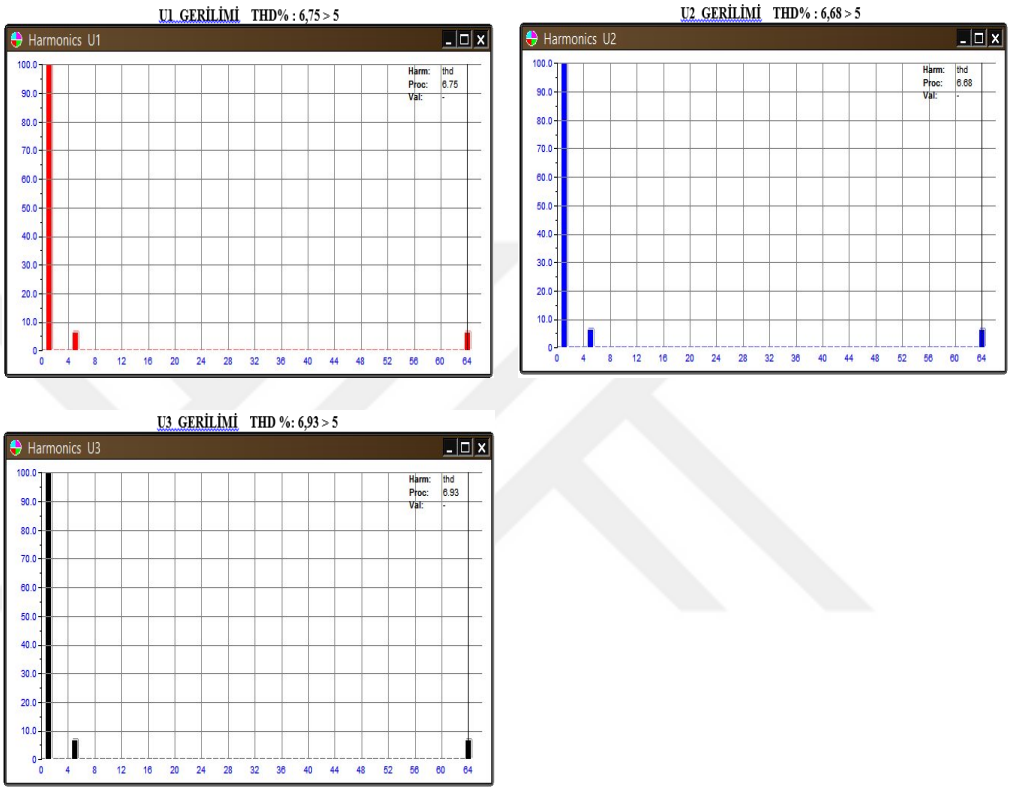


Şekil 4.40. Fikse (buhar) kısmında yapılan ölçümde gerilimler grafiği



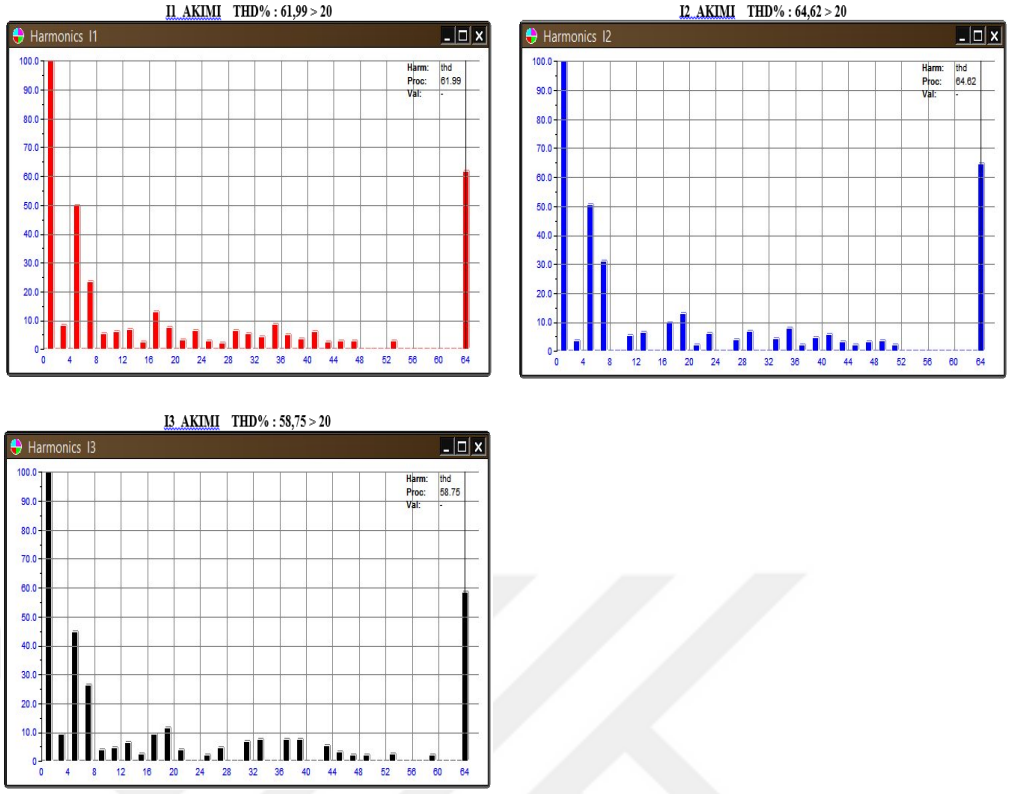
Şekil 4.41. Fikse (buhar) kısmında yapılan ölçümde akımlar grafiği

Çizelge 4.21 ve Şekil 4.40'da büküm kısmında gerilim ile ilgili harmoniğe rastlanmıştır. Büküm kısmındaki ölçüm noktasında Şekil 4.42'de her faz için 5. harmoniğe rastlanmıştır. Ölçülen toplam harmonik bozulma miktarı birinci fazda THD_V %6.75, toplam harmonik bozulma miktarı ikinci fazda THD_V %6.68, toplam harmonik bozulma miktarı üçüncü fazda THD_V %6.93'dir.



Şekil 4.42. Fikse (buhar) kısmında U_1, U_2 ve U_3 geriliminin harmonik değerleri

Çizelge 4.21 ve Şekil 4.41'de büküm kısmında yapılan ölçümlerde akım harmoniğine rastlanmıştır. Şekil 4.43'de birinci, ikinci ve üçüncü fazlarda 3., 5., 7., 9., 11., 13., 17., 19., 23., 29., 31., 35., 39. ve 41. harmonikler tespit edilmiştir. Özellikle 5., 7. ve 17. harmoniklerin değerleri diğerlerinden daha büyüktür. Birinci fazda toplam harmonik bozulma akım için THD_I değeri %61.99, ikinci fazda toplam harmonik bozulma akım için THD_I değeri %64.62, üçüncü fazda toplam harmonik bozulma akım için THD_I değeri %58.75'dir.



Şekil 4.43. Fikse (buhar) kısmında I_1, I_2 ve I_3 akımının harmonik değerleri

Çizelge 4.22'deki hesaplama tablosunun birinci kısmında görünür gücün toplamı (Stot) 30.786 kVA, reaktif gücün toplamı (Qtot) 17.906 kVAr, aktif gücün toplamı (Ptot) 25.035 kW ve nötr akımı I(null) 89.020 A'dir. Harmonikli sinüsoidal dalga formuna göre ölçülen güç faktörü (Pf) 0.813 ve harmoniksiz sinüsoidal dalga formuna göre ölçülen güç faktörü (dpf) ise 0.988'dir.

İkinci kısımda her bir faz için ölçülen akım ve gerilimin rms değerleri ve güç katsayısını kullanarak görünür, reaktif ve aktif gücün hesabı yapılmıştır.

Üçüncü kısımda tüm fazlar için ölçülen akım ve gerilimin rms değerleri, akımın toplam harmonik bozulma değeri ve cosφ değeri kullanılarak harmonikli güç hesabı yapılmıştır.

Dördüncü kısımda ise harmonik güç oranı %75.05 olarak hesaplanmıştır.

Beşinci bölümde kondansatör gerilimi harmoniklerden dolayı 438.5 V olarak hesaplanmıştır.

Altıncı bölümde ise kullanılacak olan filtre için toplam harmonik bozulmaya bağlı olarak akımda meydana gelen kayıp ortalaması 27 amper hesaplanmıştır.

Çizelge 4.22. Fikse (buhar) kısmında yapılan ölçümdeki harmonik hesapları

	ÖLÇÜLEN YER :		FİKSE (BUHAR)		
	GÜÇ	ADI	FORMÜL	ÖLÇÜLEN	BİRİM
1	Stot	TOPLAM GÖRÜNÜR GÜÇ	Stot = S1 + S2 + S3	30,786	kVA.
	Qtot	TOPLAM AKTİF GÜÇ	Qtot = Q1 + Q2 + Q3	17,906	kVAr
	Ptot	TOPLAM AKTİF GÜÇ	Ptot = P1 + P2 + P3	25,035	kW.
	Pfi	GÜÇ KATSAYISI	Pfi = (Pfi1+Pfi2+Pfi3)/3	0,813	-
	Inull	NÖTR AKIMI	(DENGESİZ YÜK)	89,020	A.

	FAZ	GÜÇ	ÖLÇME DEĞERLERİ								DEĞER
2	L1	S1	Urms1 x Irms1	9,76	S2	Urms2xIrms2	10,53	S3	Urms3xIrms3	10,494	kVA.
	L2	P1	S1 x Pfi1	7,95	P2	S2xPfi2	8,38	P3	S3xPfi3	8,709	kW.
	L3	Q1	S1 x sinØ1	5,67	Q2	S2xsinØ2	6,39	Q3	S3xsinØ3	5,855	kVAr.
		thd	0, U1	0,068	thd	0, U2	0,067	thd	0, U3	0,069	

	HARMONİKLİ GÜÇ					
	FAZ	Irms	0, ITHD.	Urms	(cosØ) dPf	PHarm. (Kw.)
3	L1	41,247	0,61990	236,652	0,990	5,990
	L2	44,228	0,64618	238,164	0,980	6,670
	L3	44,387	0,58749	236,428	0,994	6,128
					TOPLAM	18,789

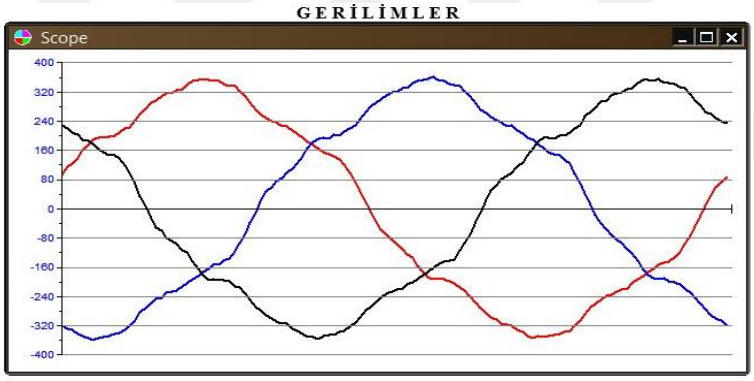
	HARMONİK GÜÇ ORANI (%)			
4	PHar. (kW)	18,789	(PHar./ PTot.) x 100	75,05
	PTot. (kW)	25,035		

	HARMONİK GERİLİMİ TESPİTİ						KOND.(V)
5	FAZ	UI_12	UI_23	UI_13	UI+(UI…xÖlçülen.Uthd)	UÇ GERL.	∑U/3
	L1	411,440			UI_12+(UI_12xU1thd)	439,22	
	L2		411,399		UI_23+(UI_23xU2thd)	438,87	438,50
	L3			409,051	UI_13+(UI_13xU3thd)	437,39	

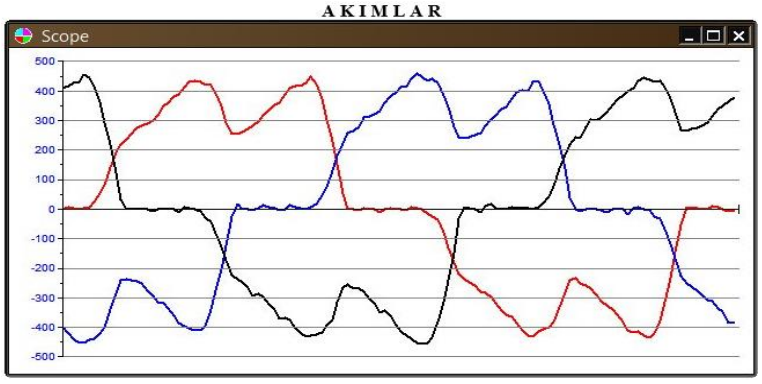
	I(THD)'NİN AKIMDA MEYDANA GETİRDİĞİ KAYIP HESABI						
6	FAZ	ÖLÇÜLEN Irms	Çarpan X / 5 A.	Irms (A)	Ithd	Ha.Ithd (A)	∑I = thd / 3	∑Ithd (A)
	L1	41,247		41,2	0,61990	25,57		
	L2	44,228	1	44,2	0,64618	28,58	26,74	27,00
	L3	44,387		44,4	0,58749	26,08		

Çizelge 4.23. Kompresör (hava) kısmında yapılan ölçüm sonucunda tüm fazların değerleri



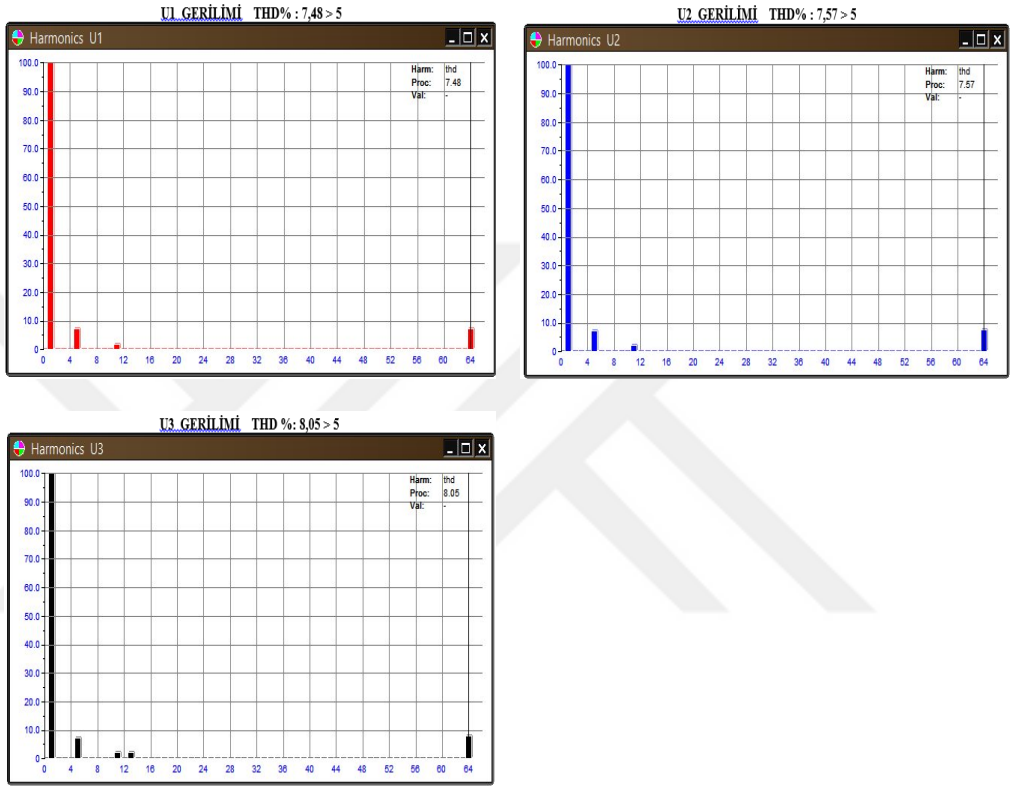


Şekil 4.44. Kompresör (hava) kısmında yapılan ölçümde gerilimler grafiği



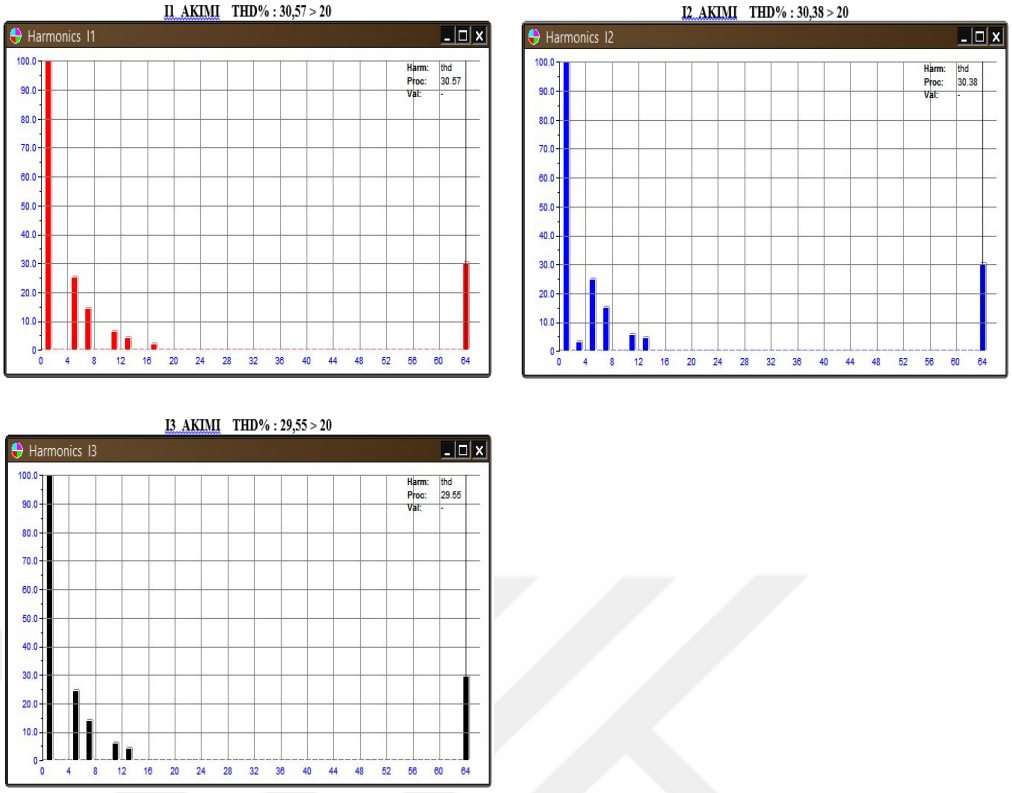
Şekil 4.45. Kompresör (hava) kısmında yapılan ölçümde akımlar grafiği

Çizelge 4.23 ve Şekil 4.44'de sarıcı kısmında nominal yükte gerilim ile ilgili harmoniğe rastlanmıştır. Kompresör (hava) kısmındaki ölçüm noktasında Şekil 4.46'da her faz için 5. harmoniğe rastlanmıştır. Ölçülen toplam harmonik bozulma miktarı birinci fazda THD_V %7.48, toplam harmonik bozulma miktarı ikinci fazda THD_V %7.57, toplam harmonik bozulma miktarı üçüncü fazda THD_V %8.05'dir.



Şekil 4.46. Kompresör (hava) kısmında U_1, U_2 ve U_3 geriliminin harmonik değerleri

Çizelge 4.23 ve Şekil 4.45'de kompresör (hava) kısmında yapılan ölçümlerde akım harmoniğine rastlanmıştır. Şekil 4.47'de birinci, ikinci ve üçüncü fazlarda 5. ve 7. harmonikler tespit edilmiştir. Birinci fazda toplam harmonik bozulma akım için THD_I değeri %30.57, ikinci fazda toplam harmonik bozulma akım için THD_I değeri %30.38, üçüncü fazda toplam harmonik bozulma akım için THD_I değeri %29.55'dir.



Şekil 4.47. Kompresör (hava) kısmında I_1, I_2 ve I_3 akımının harmonik değerleri

Çizelge 4.24'deki hesaplama tablosunun birinci kısmında görünür gücün toplamı (Stot) 201.920 kVA, reaktif gücün toplamı (Qtot) 74.104 kVAr, aktif gücün toplamı (Ptot) 187.818 kW ve nötr akımı I(null) 18.860 A'dir. Harmonikli sinüsoidal dalga formuna göre ölçülen güç faktörü (Pf) 0.930 ve harmoniksiz sinüsoidal dalga formuna göre ölçülen güç faktörü (dpf) ise 0.982'dir.

İkinci kısımda her bir faz için ölçülen akım ve gerilimin rms değerleri ve güç katsayısını kullanarak görünür, reaktif ve aktif gücün hesabı yapılmıştır.

Üçüncü kısımda tüm fazlar için ölçülen akım ve gerilimin rms değerleri, akımın toplam harmonik bozulma değeri ve cosφ değeri kullanılarak harmonikli güç hesabı yapılmıştır.

Dördüncü kısımda ise harmonik güç oranı %31.86 olarak hesaplanmıştır.

Beşinci bölümde kondansatör gerilimi harmoniklerden dolayı 440.63 V olarak hesaplanmıştır.

Altıncı bölümde ise kullanılacak olan filtre için toplam harmonik bozulmaya bağlı olarak akımda meydana gelen kayıp ortalaması 86 amper hesaplanmıştır.

Çizelge 4.24. Kompresör (hava) kısmında yapılan ölçümdeki harmonik hesapları

	ÖLÇÜLEN YER :		KOMPRESÖR (HAVA)		
	GÜÇ	ADI	FORMÜL	ÖLÇÜLEN	BİRİM
1	Stot	TOPLAM GÖRÜNÜR GÜÇ	Stot = S1 + S2 + S3	201,920	kVA.
	Qtot	TOPLAM REAKTİF GÜÇ	Qtot = Q1 + Q2 + Q3	74,104	kVAr
	Ptot	TOPLAM AKTİF GÜÇ	Ptot = P1 + P2 + P3	187,818	kW.
	Pfi	GÜÇ KATSAYISI	Pfi = (Pfi1+Pfi2+Pfi3)/3	0,930	-
	Inull	NÖTR AKIMI	(DENGESİZ YÜK)	18,860	A.

	FAZ	GÜÇ	ÖLÇME DEĞERLERİ								DEĞER
2	L1	S1	Urms1 x Irms1	65,89	S2	Urms2xIrms2	67,49	S3	Urms3xIrms3	68,540	kVA.
	L2	P1	S1 x Pfi1	61,02	P2	S2xPfi2	63,13	P3	S3xPfi3	63,669	kW.
	L3	Q1	S1 x sinØ1	24,86	Q2	S2xsinØ2	23,87	Q3	S3xsinØ3	25,377	kVAr.
		thd	0, U1	0,075	thd	0, U2	0,076	thd	0, U3	0,081	

	HARMONİKLİ GÜÇ					
	FAZ	Irms	0, ITHD.	Urms	(cosØ) dPf	PHarm. (Kw.)
3	L1	279,711	0,30575	235,557	0,979	19,722
	L2	284,338	0,30383	237,366	0,988	20,260
	L3	290,760	0,29554	235,729	0,980	19,851
					TOPLAM	59,834

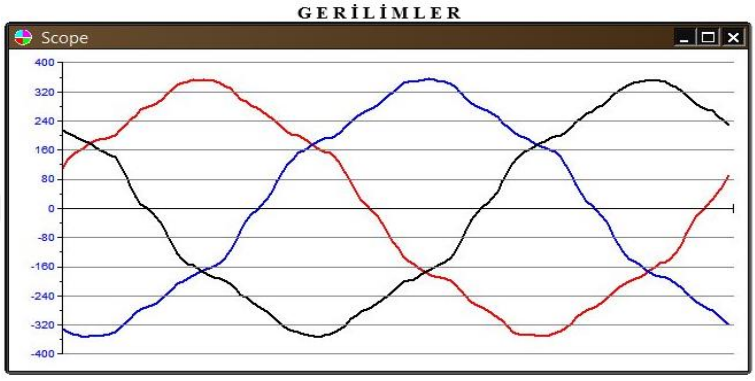
	HARMONİK GÜÇ ORANI (%)			
4	PHar. (kW)	59,834	(PHar./ PTot.) x 100	31,86
	PTot. (kW)	187,818		

	HARMONİK GERİLİMİ TESPİTİ						KOND.(V)
5	FAZ	UI_12	UI_23	UI_13	UI+(UI…xÖlçülen.Uthd)	UÇ GERL.	∑U/3
	L1	410,632			UI_12+(UI_12xU1thd)	441,35	
	L2		410,456		UI_23+(UI_23xU2thd)	441,54	440,63
	L3			406,274	UI_13+(UI_13xU3thd)	438,99	

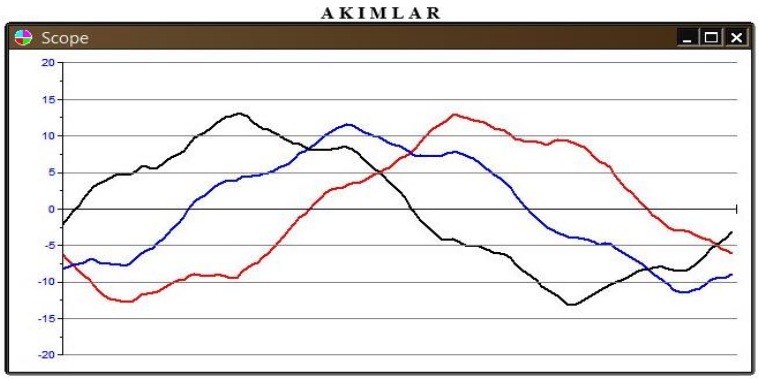
	I(THD)'NİN AKIMDA MEYDANA GETİRDİĞİ KAYIP HESABI						
6	FAZ	ÖLÇÜLEN Irms	Çarpan X / 5 A.	Irms (A)	Ithd	Ha.Ithd (A)	∑I = thd / 3	∑Ithd (A)
	L1	279,711		279,7	0,30575	85,52		
	L2	284,338	1	284,3	0,30383	86,39	85,95	86,00
	L3	290,760		290,8	0,29554	85,93		

Çizelge 4.25. Kompresör (kurutucu) kısmında yapılan ölçüm sonucunda tüm fazların değerleri



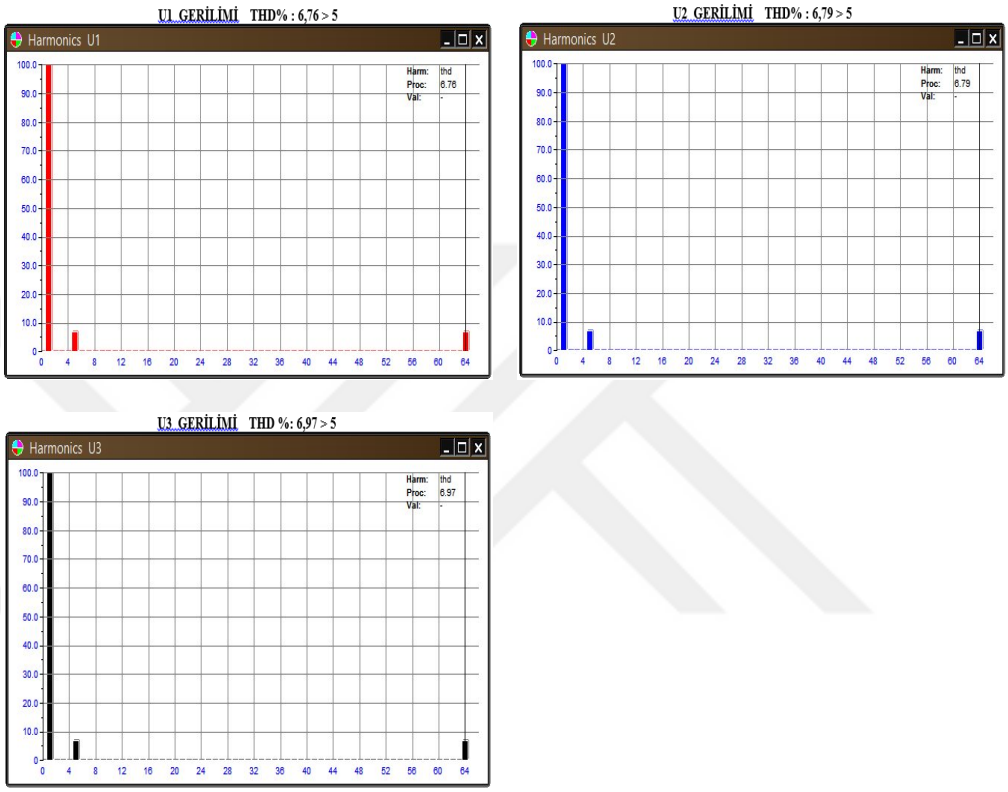


Şekil 4.48. Kompresör (kurutucu) kısmında yapılan ölçümde gerilimler grafiği



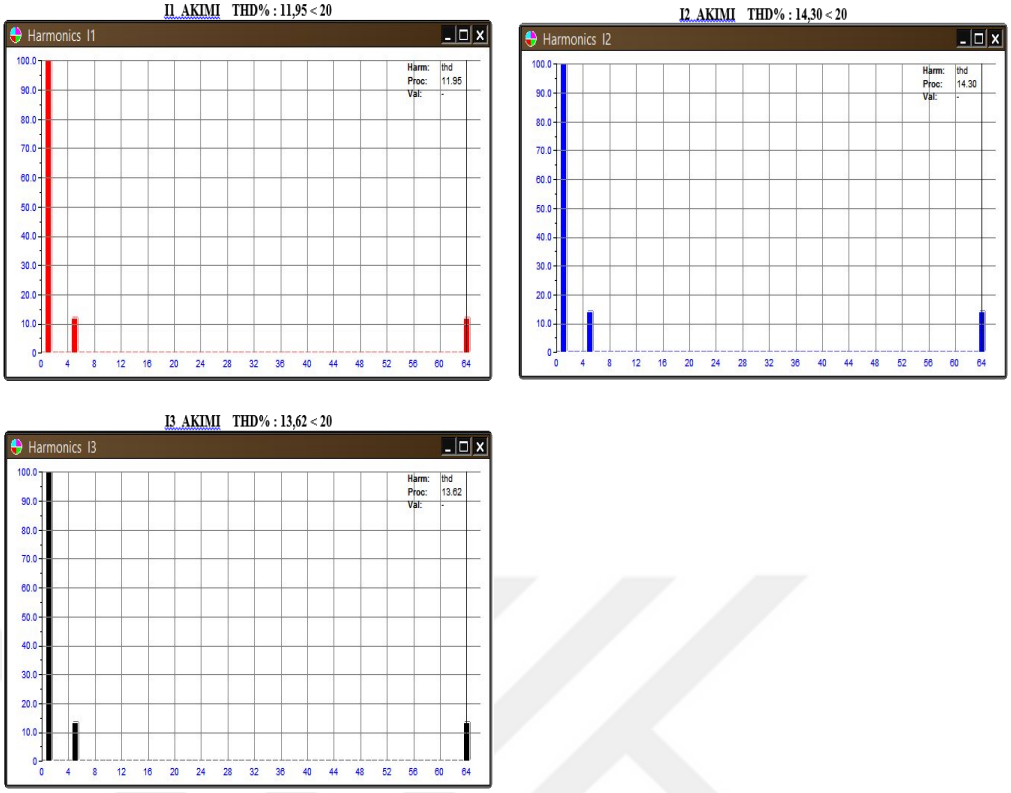
Şekil 4.49. Kompresör (kurutucu) kısmında yapılan ölçümde akımlar grafiği

Çizelge 4.25 ve Şekil 4.48'de sarıcı kısmında nominal yükte gerilim ile ilgili harmoniğe rastlanmıştır. Kompresör (kurutucu) kısmındaki ölçüm noktasında Şekil 4.50'de her faz için 5. harmoniğe rastlanmıştır. Ölçülen toplam harmonik bozulma miktarı birinci fazda THD_V %6.76, toplam harmonik bozulma miktarı ikinci fazda THD_V %6.79, toplam harmonik bozulma miktarı üçüncü fazda THD_V %6.97'dir.



Şekil 4.50. Kompresör (kurutucu) kısmında U_1, U_2 ve U_3 geriliminin harmonik değerleri

Çizelge 4.25 ve Şekil 4.49'da Kompresör (kurutucu) kısmında yapılan ölçümlerde az da olsa akım harmoniğine rastlanmıştır. Şekil 4.51'de birinci, ikinci ve üçüncü fazlarda 5. Harmonik tespit edilmiştir. Birinci fazda toplam harmonik bozulma akım için THD_I değeri %11.95, ikinci fazda toplam harmonik bozulma akım için THD_I değeri %14.30, üçüncü fazda toplam harmonik bozulma akım için THD_I değeri %13.62'dir.



Şekil 4.51. Kompresör (kurutucu) kısmında I_1, I_2 ve I_3 akımının harmonik değerleri

Çizelge 4.26'daki hesaplama tablosunun birinci kısmında görünür gücün toplamı (Stot) 5.494 kVA, reaktif gücün toplamı (Qtot) 3.047 kVAr, aktif gücün toplamı (Ptot) 4.563 kW ve nötr akımı I(null) 14.400 A'dir. Harmonikli sinüsoidal dalga formuna göre ölçülen güç faktörü (Pf) 0.830 ve harmoniksiz sinüsoidal dalga formuna göre ölçülen güç faktörü (dpf) ise 0.846'dır.

İkinci kısımda her bir faz için ölçülen akım ve gerilimin rms değerleri ve güç katsayısını kullanarak görünür, reaktif ve aktif gücün hesabı yapılmıştır.

Üçüncü kısımda tüm fazlar için ölçülen akım ve gerilimin rms değerleri, akımın toplam harmonik bozulma değeri ve cosφ değeri kullanılarak harmonikli güç hesabı yapılmıştır.

Dördüncü kısımda ise harmonik güç oranı %13.5 olarak hesaplanmıştır.

Beşinci bölümde kondansatör gerilimi harmoniklerden dolayı 435.98 V olarak hesaplanmıştır.

Altıncı bölümde ise kullanılacak olan filtre için toplam harmonik bozulmaya bağlı olarak akımda meydana gelen kayıp ortalaması 2 amper hesaplanmıştır.

Çizelge 4.26. Kompresör (kurutucu) kısmında yapılan ölçümdeki harmonik hesapları

	ÖLÇÜLEN YER :	KOMPRESÖR (KURUTUCU)			
	GÜÇ	ADI	FORMÜL	ÖLÇÜLEN	BİRİM
1	Stot	TOPLAM GÖRÜNÜR GÜÇ	Stot = S1 + S2 + S3	5,494	kVA.
	Qtot	TOPLAM REAKTİF GÜÇ	Qtot = Q1 + Q2 + Q3	3,047	kVAr
	Ptot	TOPLAM AKTİF GÜÇ	Ptot = P1 + P2 + P3	4,563	kW.
	Pfi	GÜÇ KATSAYISI	Pfi = (Pfi1+Pfi2+Pfi3)/3	0,830	-
	Inull	NÖTR AKIMI	(DENGESİZ YÜK)	14,400	A.

	FAZ	GÜÇ	ÖLÇME DEĞERLERİ								DEĞER
2	L1	S1	Urms1 x Irms1	1,92	S2	Urms2xIrms2	1,68	S3	Urms3xIrms3	1,892	kVA.
	L2	P1	S1 x Pfi1	1,67	P2	S2xPfi2	1,38	P3	S3xPfi3	1,512	kW.
	L3	Q1	S1 x sinØ1	0,95	Q2	S2xsinØ2	0,96	Q3	S3xsinØ3	1,138	kVAr.
		thd	0, U1	0,068	thd	0, U2	0,068	thd	0, U3	0,070	

	HARMONİKLİ GÜÇ					
	FAZ	Irms	0, ITHD.	Urms	(cosØ) dPf	PHarm. (Kw.)
3	L1	8,166	0,11946	235,037	0,883	0,202
	L2	7,108	0,14299	236,764	0,841	0,202
	L3	8,051	0,13666	235,018	0,816	0,211
					TOPLAM	0,616

	HARMONİK GÜÇ ORANI (%)			
4	PHar. (kW)	0,616	(PHar./ PTot.) x 100	13,50
	PTot. (kW)	4,563		

	HARMONİK GERİLİMİ TESPİTİ					KOND.(V)
5	FAZ	UI_12	UI_23	UI_13	UI+(UI…xÖlçülen.Uthd)	UÇ GERL.	∑U/3
	L1	409,368			UI_12+(UI_12xU1thd)	437,04	
	L2		409,279		UI_23+(UI_23xU2thd)	437,08	435,98
	L3			405,559	UI_13+(UI_13xU3thd)	433,83	

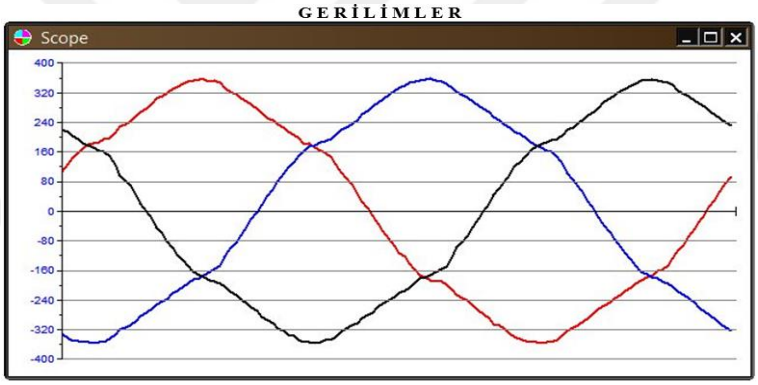
	I(THD)'NİN AKIMDA MEYDANA GETİRDİĞİ KAYIP HESABI						
6	FAZ	ÖLÇÜLEN Irms	Çarpan X / 5 A.	Irms (A)	Ithd	Ha.Ithd (A)	∑I = thd / 3	∑Ithd (A)
	L1	8,166		8,2	0,11946	0,98		
	L2	7,108	1	7,1	0,14299	1,02	1,03	2,00
	L3	8,051		8,1	0,13666	1,10		

Çizelge 4.27. Kompanzasyon off konumunda yapılan ölçüm sonucunda tüm fazların değerleri

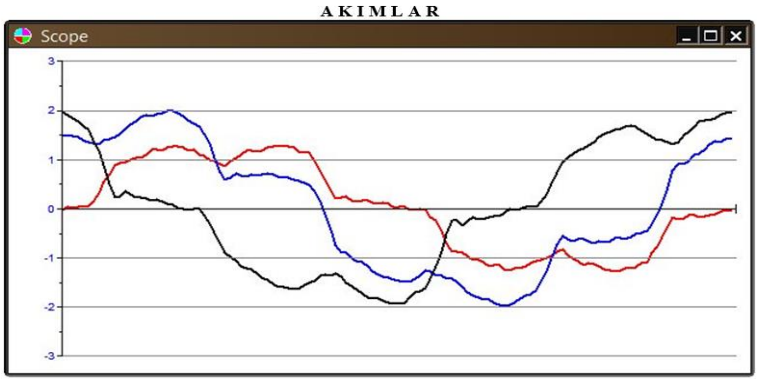
2500 kVA. TRASFORMATÖR (Komp.: **OFF**) **AP-K0**
TÜM FAZLARIN DEĞERLERİ (Çarpan Katsayısı:4000 / 5 = **800**)

1st phase		2nd phase		3rd phase	
Ursm	Ul_12	Ursm	Ul_23	Ursm	Ul_13
237.309	412.610	238.264	412.617	236.892	408.773
thd(U)	S(KVA)	thd(U)	S(KVA)	thd(U)	S(KVA)
6.249	0.210	6.276	0.303	6.512	0.299
Irsm	P(kW)	Irsm	P(kW)	Irsm	P(kW)
0.886	0.199	1.270	-0.262	1.263	0.280
thd(I)	Q(kVAR) i	thd(I)	Q(kVAR) i	thd(I)	Q(kVAR) i
22.672	0.068	21.968	-0.152	22.189	0.106
Pf i	dPf	Pf i	dPf	Pf i	dPf
0.946	0.983	0.866	0.901	0.935	0.970

Total info				
Stot(kW)	Qtot(kVAR)	Ptot(kW)	Pftot i	I null
0.22	0.02	0.22	0.99	2.37

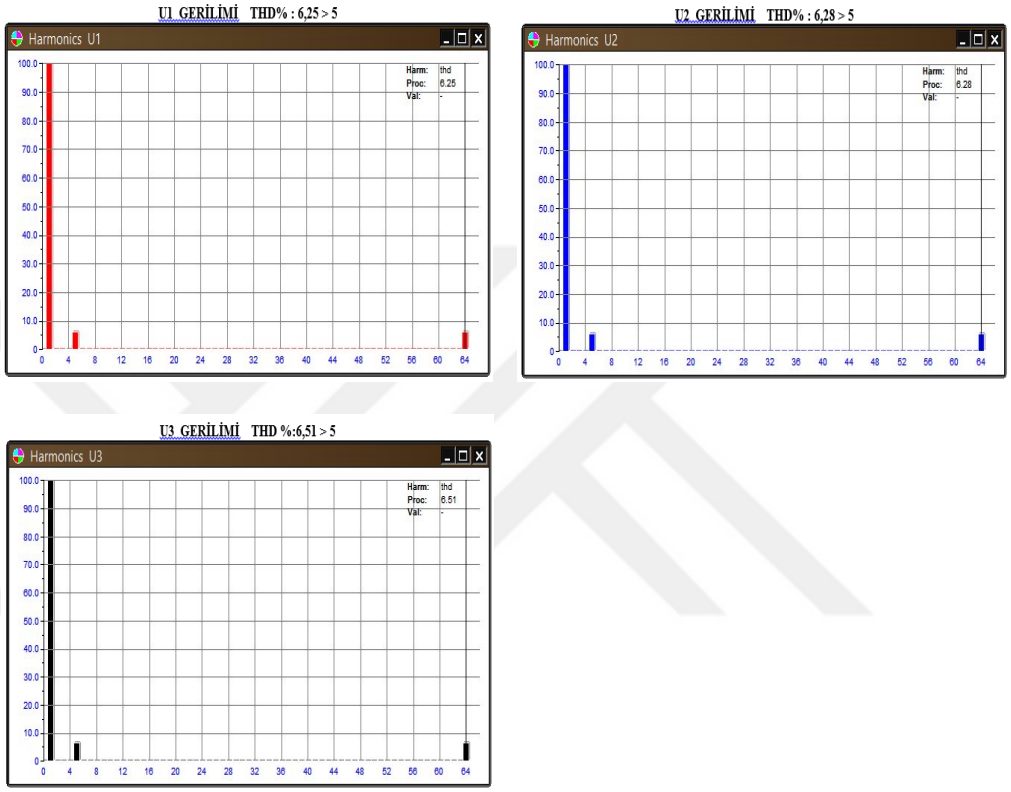


Şekil 4.52. Kompanzasyon off konumunda yapılan ölçümde gerilimler grafiği



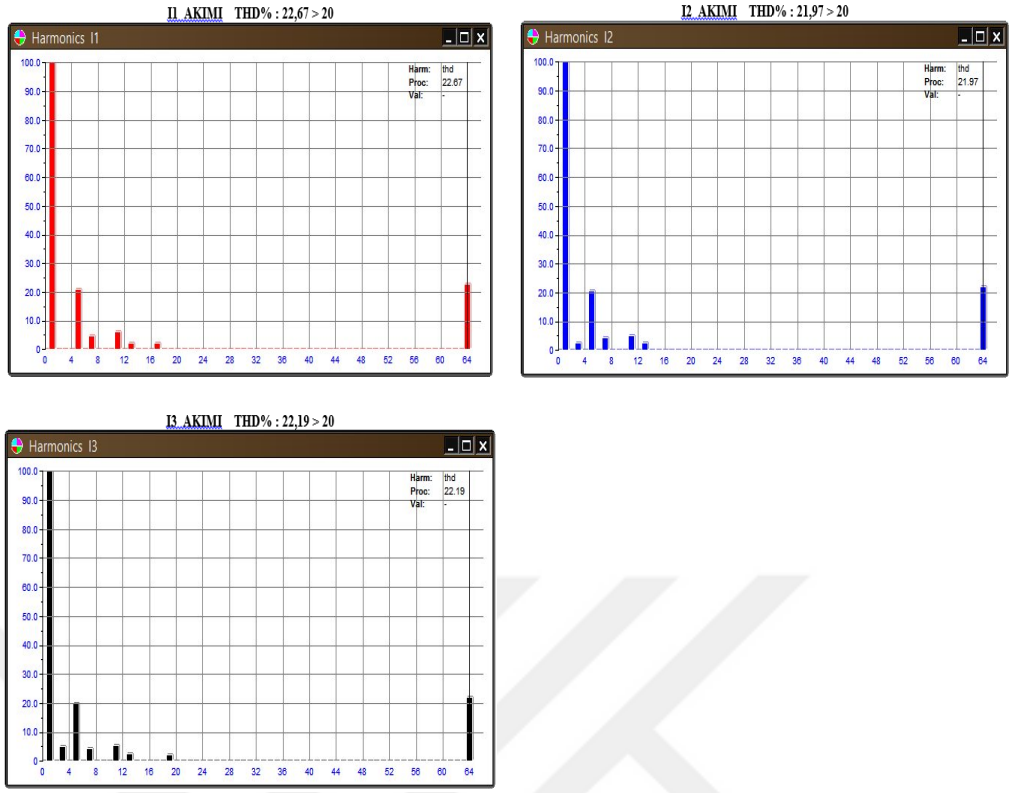
Şekil 4.53. Kompanzasyon off konumunda yapılan ölçümde akımlar grafiği

Çizelge 4.27 ve Şekil 4.52'de kompanzasyon off konumunda iken gerilim ile ilgili harmoniğe rastlanmıştır. Kompanzasyon off iken Şekil 4.54'de her faz için 5. harmoniğe rastlanmıştır. Ölçülen toplam harmonik bozulma miktarı birinci fazda THD_V %6.25, toplam harmonik bozulma miktarı ikinci fazda THD_V %6.28, toplam harmonik bozulma miktarı üçüncü fazda THD_V %6.51'dir.



Şekil 4.54. Kompanzasyon off konumunda U_1, U_2 ve U_3 geriliminin harmonik değerleri

Çizelge 4.27 ve Şekil 4.53'de kompanzasyon off konumunda yapılan ölçümlerde akım harmoniğine rastlanmıştır. Şekil 4.55'de birinci, ikinci ve üçüncü fazlarda 5. harmonik tespit edilmiştir. Birinci fazda toplam harmonik bozulma akım için THD_I değeri %22.67, ikinci fazda toplam harmonik bozulma akım için THD_I değeri %21.97, üçüncü fazda toplam harmonik bozulma akım için THD_I değeri %22.19'dir.



Şekil 4.55. Kompanzasyon off konumunda I_1, I_2 ve I_3 akımının harmonik değerleri

Çizelge 4.28'deki hesaplama tablosunun birinci kısmında görünür gücün toplamı (Stot) 649.600 kVA, reaktif gücün toplamı (Qtot) 260.800 kVAr, aktif gücün toplamı (Ptot) 592.800 kW ve nötr akımı I(null) 1 896 A'dir. Harmonikli sinüsoidal dalga formuna göre ölçülen güç faktörü (Pf) 0.915 ve harmoniksiz sinüsoidal dalga formuna göre ölçülen güç faktörü (dpf) ise 0.951'dir. İkinci kısımda her bir faz için ölçülen akım ve gerilimin rms değerleri ve güç katsayısını kullanarak görünür, reaktif ve aktif gücün hesabı yapılmıştır. Üçüncü kısımda tüm fazlar için ölçülen akım ve gerilimin rms değerleri, akımın toplam harmonik bozulma değeri ve cosφ değeri kullanılarak harmonikli güç hesabı yapılmıştır. Dördüncü kısımda ise harmonik güç oranı %23.03 olarak hesaplanmıştır. Beşinci bölümde kondansatör gerilimi harmoniklerden dolayı 437.43 V olarak hesaplanmıştır. Altıncı bölümde ise kullanılacak olan filtre için toplam harmonik bozulmaya bağlı olarak akımda meydana gelen kayıp ortalaması 203 amper hesaplanmıştır.

Çizelge 4.28. Kompanzasyon off konumunda yapılan ölçümdeki harmonik hesapları

	ÖLÇÜLEN YER :		2500kVA (KOMPANZASYON OFF)		
	GÜÇ	ADI	F O R M Ü L	ÖLÇÜLEN	BİRİM
1	Stot	TOPLAM GÖRÜNÜR GÜÇ	Stot = S1 + S2 + S3	649,600	kVA.
	Qtot	TOPLAM REAKTİF GÜÇ	Qtot = Q1 + Q2 + Q3	260,800	kVAr
	Ptot	TOPLAM AKTİF GÜÇ	Ptot = P1+P2+P3	592,800	kW.
	Pfi	GÜÇ KATSAYISI	Pfi = (Pf1+Pf2+Pf3)/3	0,915	-
	Inull	NÖTR AKIMI	(DENGESİZ YÜK)	1.896,000	A.

	FAZ	GÜÇ	ÖLÇME DEĞERLERİ								DEĞER
2	L1	S1	Urms1 x Irms1	168,00	S2	Urms2xIrms2	242,40	S3	Urms3xIrms3	239,200	kVA.
	L2	P1	S1 x Pfi1	159,20	P2	S2xPfi2	209,60	P3	S3xPfi3	224,000	kW.
	L3	Q1	S1 x sinØ1	54,40	Q2	S2xsinØ2	121,60	Q3	S3xsinØ3	84,800	kVAr.
		thd	0, U1	0,062	thd	0, U2	0,063	thd	0, U3	0,065	

	HARMONİKLİ GÜÇ					
	FAZ	Irms	0, ITHD.	Urms	(cosØ) dPfi	PHarm. (Kw.)
3	L1	708,800	0,22672	237,309	0,983	37,487
	L2	1.016,000	0,21968	236,264	0,901	47,512
	L3	1.010,400	0,22189	236,892	0,970	51,517
					TOPLAM	136,517

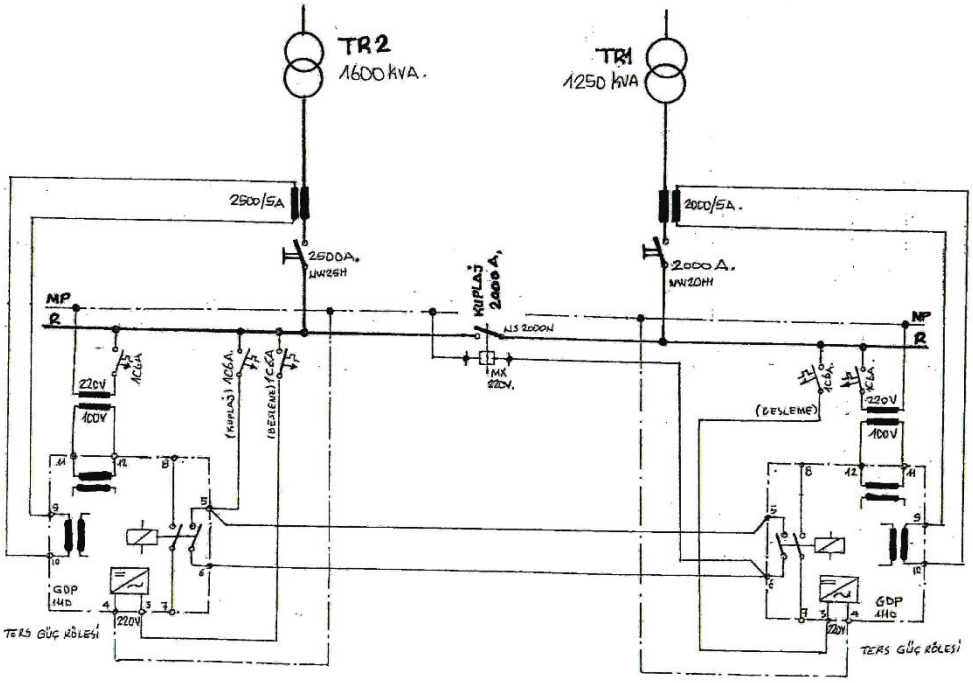
	HARMONİK GÜÇ ORANI (%)			
4	PHar. (kW)	136,517	(PHar./ PTot.) x 100	23,03
	PTot. (kW)	592,800		

	HARMONİK GERİLİMİ TESPİTİ						KOND.(V)
5	FAZ	Ul_12	Ul_23	Ul_13	Ul+(Ul…xÖlçülen.Uthd)	UÇ GERL.	∑U/3
	L1	412,610			Ul_12+(Ul_12xU1thd)	438,39	
	L2		412,617		Ul_23+(Ul_23xU2thd)	438,51	437,43
	L3			408,773	Ul_13+(Ul_13xU3thd)	435,39	

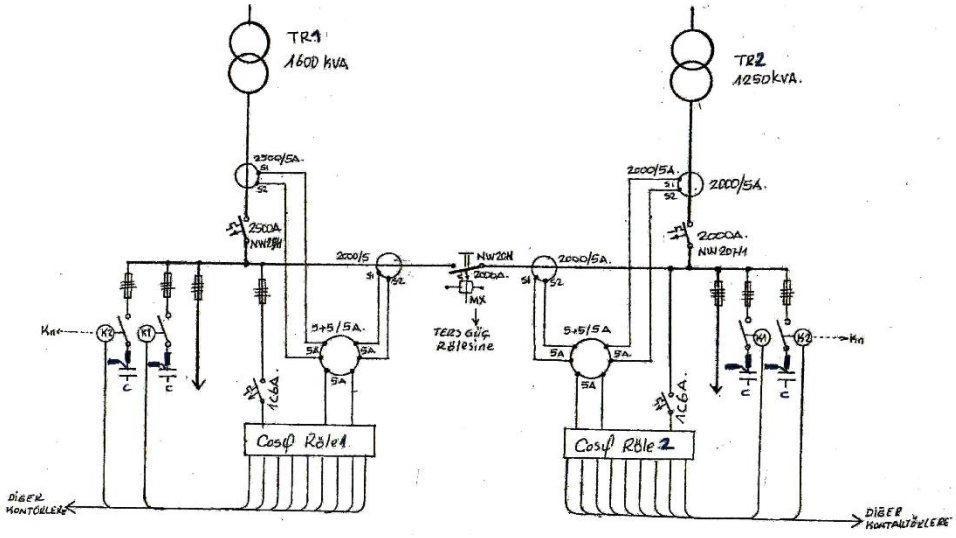
	I(THD)'NİN AKIMDA MEYDANA GETİRDİĞİ KAYIP HESABI							
6	FAZ	ÖLÇÜLEN Irms	Çarpan X / 5 A.	Irms (A)	Ithd	Ha.Ithd (A)	∑I = thd / 3	∑Ithd (A)
	L1	708,800	1	708,8	0,22672	160,70	202,70	203,00
	L2	1.016,000		1.016,0	0,21968	223,19		
	L3	1.010,400		1.010,4	0,22189	224,20		

4.6. 1600 kVA ve 1250 kVA ile Beslenen Tesiste Filtresiz, Seri Endüktanslı ve Pasif Harmonik Filtreli Harmonik İncelemesi

Ölçüm yapılan tesis 1 600 kVA ve 1 250 kVA'lik Şekil 4.56 ve Şekil 4.57'de iki trafodan beslemektedir.

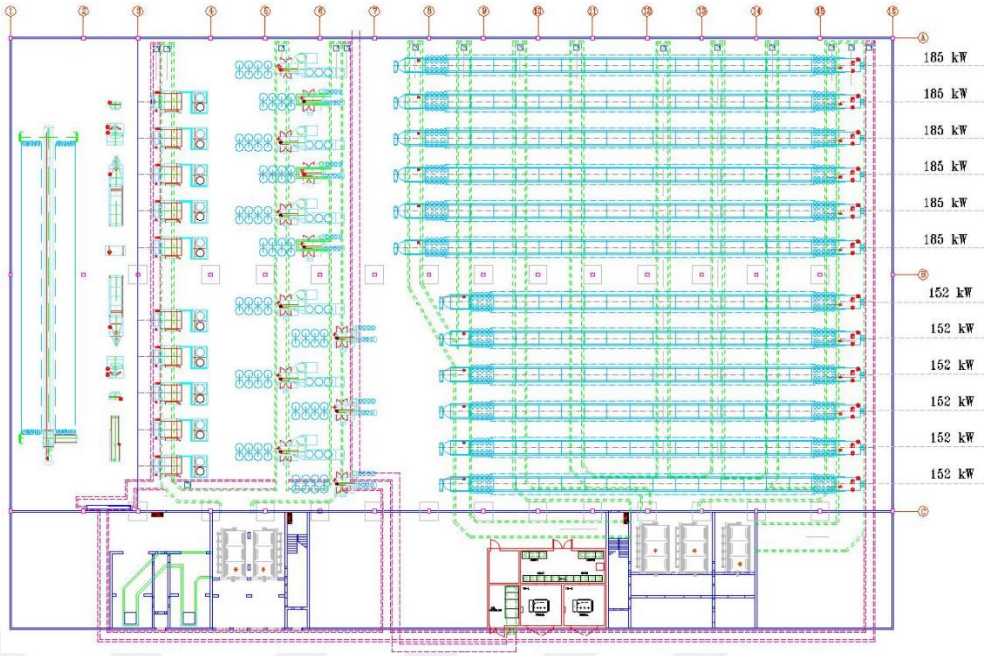


Şekil 4.56. Ölçüm yapılan tesiste Trafo 1 ve Trafo 2 bağlantıları



Şekil 4.57. Ölçüm yapılan tesiste 1600 kVA ve 1250 kVA bağlantıları

İplik üreten tesiste 152 kW'lık ve 185 kW'lık 6'şar adet iplik eğirme makinası Şekil 4.58'de mevcuttur.



Şekil 4.58. 152 kW ve 185 kW'lık iplik eğirme makinaları

152 kW'lık iplik eğirme makinalarında filtresiz olarak ölçüm yapılmış, akım ve gerilim harmonikleri tespit edilmiş ve 152 kW'lık iplik eğirme makinasına uygun pasif filtre tasarlanarak, filtre yapılmış ve 152 kW'lık herbir makinanın hız kontrol ünitesi (invertör yada sürücü) önüne ve arkasına bağlanmıştır. Daha sonra filtreli olarak ölçümler yapılmış ve filtreli ve filtresiz ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.29'da seri endüktans ve filtre olmadan fazlara ait U_{rms}, I_{rms}, her bir fazın gerilim [Thd(U)] için ve akım [Thd(I)] için toplam harmonik bozulmaları, görünür güç [S(kVA)], aktif güç [P(kW)], reaktif güç [Q(kVAr)], Pfc (capacitive power factor), dPf (displacement power factor-cosφ) ile görünür gücün toplamı [Stot(kVA)], aktif gücün toplamı [Ptot(kW)], reaktif gücün toplamı Qtot(kVAr) değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.30'da görünür gücün toplamı, aktif gücün toplamı, reaktif gücün toplamı, güç katsayısı (Pf), akım ve gerilimin rms değerleri ile hesaplamaları verilmiştir.

Çizelge 4.29. Filtresiz olarak iplik eğirme 1 makinasında yapılan ölçüm değerleri



Filtresiz olarak iplik eğirme 1 makinasında yapılan ölçüm sonuçları Çizelge 4.29'da görülmektedir. Ölçüm sonucunda gerilim olarak 5. harmoniğe ratlanmış ve en yüksek toplam harmonik bozulma değeri THD_V %6.70 tespit edilmiştir.

Yine ölçüm sonucunda akım olarak 5. harmoniğe düşük değerde de olsa 7., 11. ve 13.. harmoniğe ratlanmış ve en yüksek toplam harmonik bozulma değeri THD_I %29.10 tespit edilmiştir.

Çizelge 4.30'daki hesaplama tablosunun birinci kısmında görünür gücün toplamı (Stot) 87.726 kVA, reaktif gücün toplamı (Qtot) 41.680 kVAr, aktif gücün toplamı (Ptot) 77.200 kW'dır. Harmonikli sinüsoidal dalga formuna göre ölçülen güç faktörü (Pf) 0.88 ve harmoniksiz sinüsoidal dalga formuna göre ölçülen güç faktörü (dpf) ise 0.990'dır. İkinci kısımda her bir faz için ölçülen akım ve gerilimin rms değerleri ve güç katsayısını kullanarak görünür, reaktif ve aktif gücün hesabı yapılmıştır. Üçüncü kısımda tüm fazlar için ölçülen akım ve gerilimin rms değerleri, akımın toplam harmonik bozulma değeri ve cosφ değeri kullanılarak harmonikli güç hesabı yapılmıştır. Dördüncü kısımda ise harmonik güç oranı %31.92 olarak hesaplanmıştır. Beşinci bölümde kondansatör gerilimi harmoniklerden dolayı 435.70 V olarak hesaplanmıştır. Altıncı bölümde ise kullanılacak olan filtre için toplam

harmonik bozulmaya bağlı olarak akımda meydana gelen kayıp ortalaması 36 amper hesaplanmıştır.

Çizelge 4.30. Filtresiz olarak iplik eğirme 1 makinasında yapılan ölçümün harmonik hesapları

	ÖLÇÜLEN YER :		OPEN-END1 FİLTRESİZ		
	GÜÇ	ADI	F O R M Ü L	ÖLÇÜLEN	BİRİM
1	Stot	TOPLAM GÖRÜNÜR GÜÇ	Stot = S1 + S2 + S3	87,726	kVA.
	Qtot	TOPLAM REAKTİF GÜÇ	Qtot = Q1 + Q2 + Q3	41,680	kVAr
	Ptot	TOPLAM AKTİF GÜÇ	Ptot = P1+P2+P3	77,200	kW.
	Pfi	GÜÇ KATSAYISI	Pfi = (Pf1+Pf2+Pf3)/3	0,880	-
	Inull	NÖTR AKIMI	(DENGESİZ YÜK)		A.

	FAZ	GÜÇ	ÖLÇME DEĞERLERİ								DEĞER
2	L1	S1	Urms1 x Irms1	29,43	S2	Urms2xIrms2	28,84	S3	Urms3xIrms3	29,46	kVA.
	L2	P1	S1 x Pfi1	25,90	P2	S2xPfi2	25,38	P3	S3xPfi3	25,92	kW.
	L3	Q1	S1 x sinØ1	13,98	Q2	S2xsinØ2	13,70	Q3	S3xsinØ3	14,00	kVAr.
		thd	0, U1	0,064	thd	0, U2	0,063	thd	0, U3	0,067	

	HARMONİKLİ GÜÇ					
	FAZ	Irms	0, ITHD.	Urms	(cosØ) dPfi	PHarm. (Kw.)
3	L1	124,600	0,29100	236,200	0,985	8,436
	L2	122,200	0,27900	236,000	0,996	8,014
	L3	124,500	0,28100	236,600	0,990	8,195
					TOPLAM	24,644

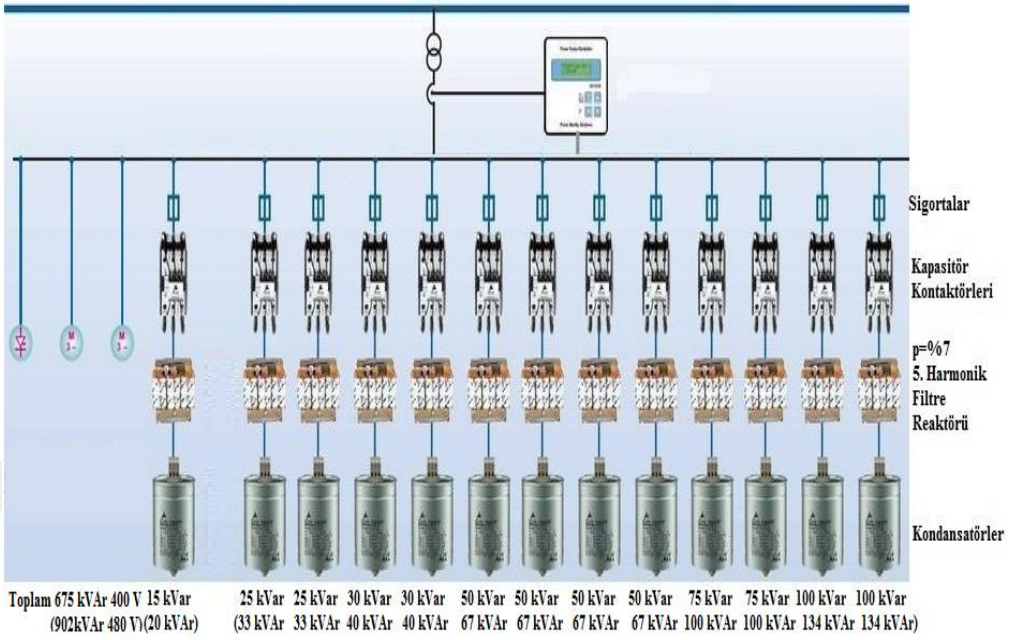
4	HARMONİK GÜÇ ORANI (%)			
	PHar. (kW)	24,644	(PHar./ PTot.) x 100	31,92
	PTot. (kW)	77,200		

	HARMONİK GERİLİMİ TESPİTİ						KOND.(V)
5	FAZ	Ul_12	Ul_23	Ul_13	Ul+(Ul…xÖlçülen.Uthd)	UÇ GERL.	∑U/3
	L1	409,100			Ul_12+(Ul_12xU1thd)	435,28	
	L2		408,800		Ul_23+(Ul_23xU2thd)	434,55	435,70
	L3			409,800	Ul_13+(Ul_13xU3thd)	437,26	

6	I(THD)'NİN AKIMDA MEYDANA GETİRDİĞİ KAYIP HESABI						
	FAZ	ÖLÇÜLEN Irms	Çarpan X / 5 A.	Irms (A)	Ithd	Ha.Ithd (A)	∑I = thd / 3	∑Ithd (A)
	L1	124,600	1	124,6	0,29100	36,26	35,11	36,00
	L2	122,200		122,2	0,27900	34,09		
	L3	124,500		124,5	0,28100	34,98		

Tesisin beslendiği 1250 kVA'lık trafonun kurulu güce göre uygun olup olmadığı, kompanzasyon, harmonik filtre reaktörü hesabı ve harmonikler nedeniyle trafonun gücünün uygun olup olmadığı ek 11'de verilmiştir. Kondansatörlere %7'lik

bağıl empedansa sahip 5. harmonikte bağlanan harmonik filtre reaktörü Şekil 4.59'da görülmektedir.



Şekil 4.59. 5. Harmonik filtre reaktörlerinin kondansatörlere bağlantısı

Çizelge 4.31'de kondansatöre seri endüktans bağlandıktan sonra fazlara ait U_{rms}, I_{rms}, her bir fazın gerilim [Thd(U)] için ve akım [Thd(I)] için toplam harmonik bozulmaları, görünür güç [S(kVA)], aktif güç [P(kW)], reaktif güç [Q(kVAr)], Pfc (capacitive power factor), dPf (displacement power factor-cosφ) ile görünür gücün toplamı [Stot(kVA)], aktif gücün toplamı [Ptot(kW)], reaktif gücün toplamı Qtot(kVAr) değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.32'de kondansatöre seri endüktans bağlandıktan sonra görünür gücün toplamı, aktif gücün toplamı, reaktif gücün toplamı, güç katsayısı (Pf), harmonikli güç hesabı yapılmıştır. Dördüncü kısımda ise harmonik güç oranı

Çizelge 4.31. Kondansatörlere seri endüktans bağlantıktan sonra yapılan ölçüm değerleri



Çizelge 4.32'deki hesaplama tablosunun birinci kısmında görünür gücün toplamı (Stot) 90,481 kVA, reaktif gücün toplamı (Qtot) 22.772 kVAr, aktif gücün toplamı (Ptot) 86.856 kW'dır. Harmonikli sinüsoidal dalga formuna göre ölçülen güç faktörü (Pf) 0.96 ve harmoniksiz sinüsoidal dalga formuna göre ölçülen güç faktörü (dpf) ise 0.98'dir.

İkinci kısımda her bir faz için ölçülen akım ve gerilimin rms değerleri ve güç katsayısını kullanarak görünür, reaktif ve aktif gücün hesabı yapılmıştır. Üçüncü kısımda tüm fazlar için ölçülen akım ve gerilimin rms değerleri, akımın toplam harmonik bozulma değeri ve cosφ değeri kullanılarak harmonikli güç hesabı yapılmıştır. Dördüncü kısımda ise harmonik güç oranı %13.82 olarak hesaplanmıştır.

Beşinci bölümde kondansatör gerilimi harmoniklerden dolayı 435.01 V olarak hesaplanmıştır. Altıncı bölümde ise kullanılacak olan filtre için toplam harmonik bozulmaya bağlı olarak akımda meydana gelen kayıp ortalaması 18 amper hesaplanmıştır.

Çizelge 4.32. Kondansatöre seri endüktans bağlanarak yapılan ölçümün harmonik hesapları

	KOMPANZASYON KONDANSATÖRLERİ ÖNÜNE SERİ ENDÜKTANS BAĞLI										
	GÜÇ	ADI	FORMÜL							ÖLÇÜLEN	BİRİM
1	Stot	TOPLAM GÖRÜNÜR GÜÇ	Stot = S1 + S2 + S3							90,481	kVA.
	Qtot	TOPLAM REAKTİF GÜÇ	Qtot = Q1 + Q2 + Q3							22,772	kVAr
	Ptot	TOPLAM AKTİF GÜÇ	Ptot = P1+P2+P3							86,856	kW.
	Pfi	GÜÇ KATSAYISI	Pfi = (Pf1+Pf2+Pf3)/3							0,960	-
	Inull	NÖTR AKIMI	(DENGESİZ YÜK)								A.
	FAZ	GÜÇ	ÖLÇME DEĞERLERİ								DEĞER
2	L1	S1	Urms1 x Irms1	30,422	S2	Urms2xIrms2	30,192	S3	Urms3xIrms3	29,867	kVA.
	L2	P1	S1 x Pfi1	28,901	P2	S2xPfi2	28,984	P3	S3xPfi3	28,971	kW.
	L3	Q1	S1 x sinØ1	9,492	Q2	S2xsinØ2	7,340	Q3	S3xsinØ3	5,940	kVAr.
		thd	0, U1	0,060	thd	0, U2	0,062	thd	0, U3	0,067	

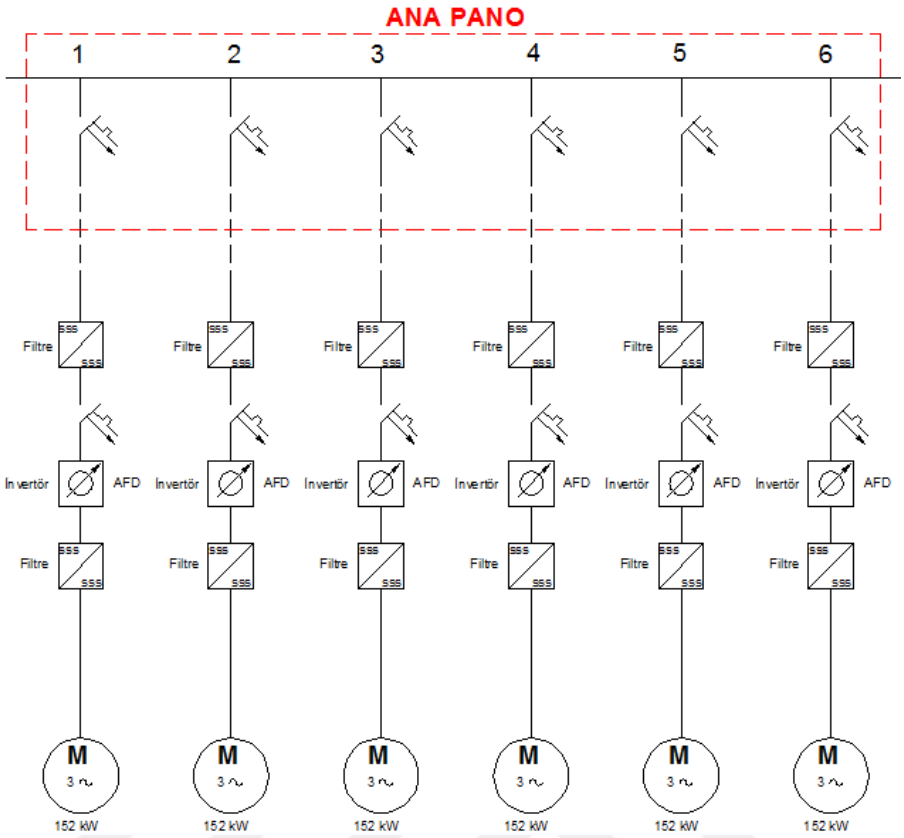
	HARMONİKLİ GÜÇ					
	FAZ	Irms	0, ITHD.	Urms	(cosØ) dPfi	PHarm. (Kw.)
3	L1	128,200	0,13800	237,300	0,980	4,114
	L2	127,500	0,13500	236,800	0,985	4,015
	L3	126,500	0,13300	236,100	0,975	3,873
					TOPLAM	12,002

	HARMONİK GÜÇ ORANI (%)			
4	PHar. (kW)	12,002	(PHar./ PTot.) x 100	13,82
	PTot. (kW)	86,856		

	HARMONİK GERİLİMİ TESPİTİ						KOND.(V)
5	FAZ	UI_12	UI_23	UI_13	UI+(UI…xÖlçülen.Uthd)	UÇ GERL.	∑U/3
	L1	410,500			UI_12+(UI_12xU1thd)	435,13	436,01
	L2		410,200		UI_23+(UI_23xU2thd)	435,63	
	L3			409,800	UI_13+(UI_13xU3thd)	437,26	

	I(THD)'NİN AKIMDA MEYDANA GETİRDİĞİ KAYIP HESABI							
6	FAZ	ÖLÇÜLEN Irms	Çarpan X / 5 A.	Irms (A)	Ithd	Ha.Ithd (A)	∑I = thd / 3	∑Ithd (A)
	L1	128,200	1	128,2	0,13800	17,69	17,24	18,00
	L2	127,500		127,5	0,13500	17,21		
	L3	126,500		126,5	0,13300	16,82		

Seri endüktans bağlamak yerine sisteme pasif harmonik filtre bağlayarak harmonikler azaltılabilir. Tasarlanan pasif harmonik filtrenin hesabı ve bağlantısı ek 12'de verilmiştir. İplik eğirme 1 makinasının sürücüsüne bağlanan pasif filtre Şekil 4.60'da görülmektedir.



Şekil 4.60. 152 kW iplik eğirme makinalarının sürücülerine bağlanan pasif harmonik filtreleri

İplik eğirme 1 makinasına filtre bağlandıktan sonra harmonik ölçümü yapılmıştır.

Çizelge 4.33'de pasif harmonik filtre bağlandıktan sonra fazlara ait U_{rms}, I_{rms}, her bir fazın gerilim [Thd(U)] için ve akım [Thd(I)] için toplam harmonik bozulmaları, görünür güç [S(kVA)], aktif güç [P(kW)], reaktif güç [Q(kVAr)], Pfc (capacitive power factor), dPf (displacement power factor-cosφ) ile görünür gücün toplamı [Stot(kVA)], aktif gücün toplamı [Ptot(kW)], reaktif gücün toplamı Qtot(kVAr) değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.34'de pasif harmonik filtre bağlandıktan sonra görünür gücün toplamı, aktif gücün toplamı, reaktif gücün toplamı, güç katsayısı (Pf), akım ve gerilimin rms değerleri ile hesaplamaları verilmiştir.

Çizelge 4.33. Filtre takılmış olarak iplik eğirme 1 makinasında yapılan ölçüm değerleri



Çizelge 4.34'deki hesaplama tablosunun birinci kısmında görünür gücün toplamı (Stot) 88.944 kVA, reaktif gücün toplamı (Qtot) 25.128 kVAr, aktif gücün toplamı (Ptot) 85.412 kW'dır. Harmonikli sinüsoidal dalga formuna göre ölçülen güç faktörü (Pf) 0.96 ve harmoniksiz sinüsoidal dalga formuna göre ölçülen güç faktörü (dpf) ise 0.99'dur.

İkinci kısımda her bir faz için ölçülen akım ve gerilimin rms değerleri ve güç katsayısını kullanarak görünür, reaktif ve aktif gücün hesabı yapılmıştır. Üçüncü kısımda tüm fazlar için ölçülen akım ve gerilimin rms değerleri, akımın toplam harmonik bozulma değeri ve cosφ değeri kullanılarak harmonikli güç hesabı yapılmıştır. Dördüncü kısımda ise harmonik güç oranı %8.81 olarak hesaplanmıştır.

Beşinci bölümde kondansatör gerilimi harmoniklerden dolayı 435.17 V olarak hesaplanmıştır. Altıncı bölümde ise kullanılacak olan filtre için toplam harmonik bozulmaya bağlı olarak akımda meydana gelen kayıp ortalaması 11 amper hesaplanmıştır.

Çizelge 4.34. Filtre takılarak iplik eğirme 1 makinasında yapılan ölçüm harmonik hesapları

	OPEN-END1 PASİF HARMONİK FİLTRELİ				
	GÜÇ	ADI	F O R M Ü L	ÖLÇÜLEN	BİRİM
1	Stot	TOPLAM GÖRÜNÜR GÜÇ	Stot = S1 + S2 + S3	88,944	kVA.
	Qtot	TOPLAM REAKTİF GÜÇ	Qtot = Q1 + Q2 + Q3	25,128	kVAr
	Ptot	TOPLAM AKTİF GÜÇ	Ptot = P1+P2+P3	85,412	kW.
	Pfi	GÜÇ KATSAYISI	Pfi = (Pf1+Pf2+Pf3)/3	0,960	-
	Inull	NÖTR AKIMI (DENGESİZ Y			A.

	FAZ	GÜÇ	ÖLÇME DEĞERLERİ								DEĞER
2	L1	S1	Urms1 x Irms1	30,410	S2	Urms2xIrms2	29,580	S3	Urms3xIrms3	28,954	kVA.
	L2	P1	S1 x Pfi1	29,190	P2	S2xPfi2	28,397	P3	S3xPfi3	27,825	kW.
	L3	Q1	S1 x sinØ1	8,514	Q2	S2xsinØ2	8,282	Q3	S3xsinØ3	8,332	kVAr.
		thd	0, U1	0,066	thd	0, U2	0,063	thd	0, U3	0,065	

	HARMONİKLİ GÜÇ					
	FAZ	Irms	0, ITHD.	Urms	(cosØ) dPfi	PHarm. (Kw.)
3	L1	128,900	0,08500	235,900	0,990	2,559
	L2	125,500	0,08500	235,700	0,995	2,502
	L3	127,500	0,08300	236,300	0,985	2,463
					TOPLAM	7,524

	HARMONİK GÜÇ ORANI (%)			
4	PHar. (kW)	7,524	(PHar./ PTot.) x 100	8,81
	PTot. (kW)	85,412		

	HARMONİK GERİLİMİ TESPİTİ						KOND.(V)
5	FAZ	Ul_12	Ul_23	Ul_13	Ul+(Ul…xÖlçülen.Uthd)	UÇ GERL.	∑U/3
	L1	408,600			Ul_12+(Ul_12xU1thd)	435,57	
	L2		408,300		Ul_23+(Ul_23xU2thd)	434,02	435,17
	L3			409,300	Ul_13+(Ul_13xU3thd)	435,90	

	I(THD)'NİN AKIMDA MEYDANA GETİRDİĞİ KAYIP HESABI						
6	FAZ	ÖLÇÜLEN Irms	Çarpan X / 5 A.	Irms (A)	Ithd	Ha.Ithd (A)	∑I = thd / 3	∑Ithd (A)
	L1	128,900	1	128,9	0,08500	10,96	10,74	11,00
	L2	125,500		125,5	0,08500	10,67		
	L3	127,500		127,5	0,08300	10,58		

Genel olarak ölçüm sonuçlarını özetliyecek olursak;

Kürker ve Taşaltın 2016'da yaptıkları çalışmada, lazer torna tezgâhına sahip tesiste filtresiz olarak ana girişte birinci ölçüm noktasında yani şebeke girişinde toplam güç 11 103 W ve harmonikli akımların etkilediği güç kaybı 1 899 W ve sonuç olarak % 17.11'lik bir harmonik güç oranı söz konusudur. 3. ve 7. harmonik değerinden kaynaklı olarak en yüksek akım harmoniği % 24.87'dir. 120 kVA'lik UPS'den önce

ikinci ölçüm noktasında toplam güç 22 034 W ve harmonikli akımların etkilediği güç kaybı 7 497 W ve sonuç olarak % 34.03'lük bir harmonik güç oranı söz konusudur. En yüksek gerilim harmoniği % 2.36 ve 3., 5. ve 7. harmonik değerinden kaynaklı olarak akım harmoniği % 38.03'dür. 120 kVA'lik UPS'den sonra üçüncü ölçüm noktasında güç toplamda 60 628 W ve harmoniklerin neden olduğu kayıp 21 378 W ve sonuç olarak %35.10'lık bir kayıp söz konusudur. 5. ve 7. harmonikten kaynaklı olarak en yüksek gerilim harmoniği % 8.87 ve yine 5. ve 7. harmonikten kaynaklı olarak akım harmoniği % 33.53'dür. UPS'in önünde ve sonrasında yapılan ölçümler neticesinde UPS'in etkisinden kaynaklı olarak kayıp 2 katına çıkmıştır. Burada UPS'den kaynaklı olarak harmonik miktarı yüksek çıkmıştır.

2 500 kVA ve 1 600 kVA ile beslenen tesiste filtresiz olarak birinci ölçüm noktası olan şebeke girişinde güç toplamda 20 708 W ve harmonikli akımların etkilediği güç kaybı 8 515 W ve sonuç olarak % 41.12'lik bir harmonik güç oranı söz konusudur. En yüksek gerilim harmoniği % 3.23 ve 5., 7. ve 11. harmoniklerden kaynaklı olarak en yüksek akım harmoniği % 38.38'dir. İkinci ölçüm noktası olan invertör girişinde güç toplamda 24 876 W ve harmonikli akımların etkilediği güç kaybı 13 900 W ve sonuç olarak % 55.88'lik bir harmonik güç oranı söz konusudur. En yüksek gerilim harmoniği % 3.53 ve 5., 7. ve 11. harmoniklerden kaynaklı olarak en yüksek akım harmoniği % 50.56'dır. Burada yine invertör'ün etkisi nedeniyle sonuç olarak kayıp ve akım harmoniği artmıştır.

40 W'lık LED armatüründe filtresiz olarak yapılan ölçümde güç toplamda 16 W ve harmonikli akımların etkilediği güç kaybı 1.648 W ve sonuç olarak %10.49'luk bir harmonik güç oranı söz konusudur. 3. harmonikten kaynaklı olarak akım harmoniği %10.13'dür. 150 W'lık LED armatüründe ölçülen güç toplamda 66 W ve harmonikli akımların etkilediği güç kaybı 8.01 W ve sonuç olarak %12.14'lük bir harmonik güç oranı söz konusudur. 3. harmonikten kaynaklı olarak akım harmoniği %12.11'dir. LED'ler adındanda anlaşılacağı üzere light emitting diode "ışık yayan diyot" yani yarıiletken olduğu için harmoniğe sebep olmaktadır. Led'ler tek başına sisteme fazla etkisi olmasada, yüzlercesinin kullanıldığı ortamlarda mesala sokak aydınlatmalarında kullnılacak olursa sistemde önemli ölçüde harmonik oluşmasına neden olurlar.

Dört çeşit iplik üreten tesiste filtresiz olarak yapılan birinci ölçüm noktasında hazırlama (ısıtıcı) kısmında güç toplamda 33 468 W ve harmonikli akımların etkilediği güç kaybı 4899 W ve sonuç olarak harmonik güç oranı % 14.64'tür. 5. harmonikten kaynaklı olarak en yüksek gerilim harmoniği % 6.83, 5., 7. ve 11. harmoniklerden kaynaklı olarak en yüksek akım harmoniği % 15.03'dür. İkinci ölçüm noktasında hazırlama (sürücü) kısmında güç toplamda 131 912 W ve harmonikli akımların etkilediği güç kaybı 39 037 W ve sonuç olarak harmonik güç oranı % 29,59'dur. 5. harmonikten kaynaklı olarak en yüksek gerilim harmoniği % 6.91, 5., 7. ve 11. harmoniklerden kaynaklı olarak en yüksek akım harmoniği % 29.68'dir. Üçüncü ölçüm noktasında büküm kısmında güç toplamda 158 159 W ve harmonikli akımların etkilediği güç kaybı 85 683 W ve sonuç olarak harmonik güç oranı %54.18'dir. 5. harmonikten kaynaklı olarak en yüksek gerilim harmoniği % 7.22, 5., 7., 11. ve 13. harmoniklerden kaynaklı olarak en yüksek akım harmoniği % 44.01'dir. Dördüncü ölçüm noktasında fikse (buhar) kısmında güç toplamda 25 035 W ve harmonikli akımların etkilediği güç kaybı 18 789 W ve sonuç olarak harmonik güç oranı % 75.05'dir. 5. harmonikten kaynaklı olarak en yüksek gerilim harmoniği % 6.93, 3., 5., 7., 17. ve 35. harmoniklerden kaynaklı olarak en yüksek akım harmoniği % 64.62'dir. Beşinci ölçüm noktasında kompresör (hava) kısmında güç toplamda 187 818 W ve harmonikli akımların etkilediği güç kaybı 59 834 W ve sonuç olarak harmonik güç oranı % 31.86'dır. 5. harmonikten kaynaklı olarak en yüksek gerilim harmoniği % 8.05, 5. ve 7. harmoniklerden kaynaklı olarak en yüksek akım harmoniği % 30.57'dir. Altıncı ölçüm noktasında kompresör (kurutucu) kısmında ise güç toplamda 4 563 W ve harmonikli akımların etkilediği güç kaybı 616 W ve sonuç olarak harmonik güç oranı %13.5'dir. 5. harmonikten kaynaklı olarak en yüksek gerilim harmoniği % 6.97, yine 5. harmonikten kaynaklı olarak en yüksek akım harmoniği % 14.30'dur. Yedinci ölçüm noktasında ana panoda kompanzasyon off konumunda iken ise güç toplamda 592 800 W ve harmonikli akımların etkilediği güç kaybı 136 517 W ve sonuç olarak harmonik güç oranı %23.03'tür. 5. harmonikten kaynaklı olarak en yüksek gerilim harmoniği % 6.51, 5. ve 11. harmoniklerden kaynaklı olarak en yüksek akım harmoniği % 22.67'dir.

Burada harmonik üreten cihazlardan kaynaklı olarak harmonik güç oranı %75 seviyelerine kadar çıkmıştır. Kompanzasyon devre dışı iken ise harmonik güç oranı %23 seviyelerine kadar düşmüştür. Yapılan ölçüm sonucuna göre kompanzasyon sistemi olan sistemde eğer harmonik mevcutsa, bu durumun harmonik seviyelerini daha fazla arttırdığı görülmüştür. Bunun nedenleri ise, sistemde meydana gelen rezonans olayları ve yüksek frekanslardaki harmonikli akımlara kompanzasyon sisteminin oldukça düşük empedans göstererek harmonikli akımların genliklerinin artmasına neden olmasıdır. Harmonikli akım ve gerilimlerin artması kompanzasyon sisteminde ısınma ve dielektrik zorlanmaya neden olacağından kondansatörlerin ömürlerini azaltmakta ve hatta patlamalarına neden olmaktadır. Bu yüzden harmonikli bir sistemde harmonikler en fazla kompanzasyon sistemlerinde hissedilmektedir.

2005 yılında Celal Kocatepe ve Mehmet Uzunoğlu tarafından yapılan "Nonlineer Yükleri İçeren Enerji Sistemleri İçin Filtreli Reaktif Güç Kompanzasyonu ve Sistemin MATLAB & Simulink Modeli ile Simülasyonu" başlıklı çalışmada harmonik barındıran bir elektrik enerji sisteminin modeli simule edilmiş ve kompanzasyonlu ve kompanzasyonsuz olarak THD ölçülmüş ve sonuçta kompanzasyonlu sistemdeki THD değerleri kompanzasyonsuza göre daha yüksek çıkmıştır. Bu sonuç ile ölçüm sonucumuz aynı paralelliktedir.

1 600 kVA ve 1 250 kVA ile beslenen tesiste 6 adet 152 kW'lık ve 6 adet 185 kW'lık iplik eğirme makinası bulunmaktadır. 152 kW'lık iplik eğirme 1 makinasında filtre takılmadan önce yapılan ölçümde güç toplamda 87 726 W ve harmonikli akımların etkilediği güç kaybı 24 644 W ve sonuç olarak harmonik güç oranı % 31.92'dir. 5. harmonikten kaynaklı olarak en yüksek gerilim harmoniği % 6.7'dir. 5. ve 7. harmoniklerden kaynaklı olarak en yüksek akım harmoniği % 29.1'dir.

Pasif harmonik filtre takılmadan kompanzasyon sistemine herbir kondansatör önüne seri endüktans (harmonik filtre reaktörü) bağlandıktan sonra yapılan ölçümde güç toplamda 86 856 W ve harmonikli akımların etkilediği güç kaybı 12 002 W'a ve sonuç olarak harmonik güç oranı % 13.82'e düşmüştür. Yine 5. Harmonikten kaynaklı olarak en yüksek gerilim harmoniği % 6.7 olarak ve en yüksek akım harmoniği %

13.8'dir. 2008 yılında Adnan Kakilli, Koray Tunçalp ve Mehmet Sucu tarafından yapılan "Harmoniklerin Reaktif Güç Kompanzasyon Sistemlerine Etkilerinin İncelenmesi ve Simülasyonu" başlıklı çalışmada harmonik barındıran bir elektrik enerji sisteminin modeli simule edilmiş ve kompanzasyon içeren sisteme seri endüktans bağladıktan sonra sistemdeki THD değerleri düşmüştür. Bu sonuç ile ölçüm sonucumuz aynı paralelliktedir.

Seri endüktans yerine pasif harmonik filtre uygulaması yapırsa; 152 kW'lık iplik eğirme 1 makinasında sürücünün (invertör) önüne ve arkasına pasif harmonik filtre takıldıktan sonra yapılan ölçümde 5. ve 7. akım harmoniğini oldukça azaltmıştır. Güç toplamda 88 944 W ve harmonikli akımların etkilediği güç kaybı 7 524 W'a ve sonuç olarak harmonik güç oranı % 8.81'e düşmüştür. Yine 5. Harmonikten kaynaklı olarak en yüksek gerilim harmoniği % 6.6'ya ve en yüksek akım harmoniği % 8.5'e düşmüştür. 2015 yılında P. Chiradeja, A. Ngaopitakkul ve C. Jettanasen tarafından yapılan "Energy savings analysis and harmonics reduction for the electronic ballast of T5 fluorescent lamp in a building's lighting system" başlıklı çalışmada elektromanyetik ve electronik balastlı flouresan lambaların olduğu sisteme pasif harmonik filtre uygulamış ve sistemdeki THD bozulma değerini akım için %27.2'den %11.1 değerine düşürmüştür. 2015 yılında yapılan uygulama çalışması ile benzer sonuçlar elde edilmiştir.

İplik eğirme 1 makinasındaki kayıp seri endüktans bağlandığında harmonik güç oranı %31.92'den %13.82'ye, pasif harmonik filtre takıldıktan sonra harmonik güç oranı %8.81'e düşmüştür. Kompanzasyon kondansatörleri önüne seri endüktans bağlanarak harmonik güç oranı olarak %18.1'lik bir kazanç sağlanmıştır. Tasarlanan pasif filtre iplik eğirme 1 makinasında uygulandığında ise yaklaşık olarak harmonik güç oranı nda %23.11'lik bir kazanç sağlanmıştır. Pasif harmonik filtre harmonik kaynağını oluşturan cihaza bağlanarak yapılan uygulama seri endüktans bağlanarak yapılan uygulamaya göre harmonik güç oranı olarak %5.01'lik daha iyi bir sonuç elde edilmiştir.

Genel olarak literatürde harmonik azaltılması ile ilgili simülasyon çalışmaları mevcut olup uygulama çalışmaları oldukça azdır. Bu çalışma işletmelerde harmonik azaltılması ile ilgili uygulama çalışmasıdır. Yukarıda da belirtildiği üzere yapılan bu tezdeki uygulama çalışması literatürde geçen simülasyon çalışmalarının sonuçlarıyla paralellik göstermektedir. Yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçların tamamı Çizelge 4.35'de verilmiştir.

Çizelge 4.35. Çalışmalardan elde edilen sonuçların tamamı

Lazer Torna Tesisi	Ölçüm 1 (Şebeke Girişi)			Ölçüm 2 (120 kVA UPS Girişi)			Ölçüm 3 (UPS Çıkışı Trafo Girişi)		
	Ithd	Vthd	Harmonik Güç Oranı (%)	Ithd	Vthd	Harmonik Güç Oranı (%)	Ithd	Vthd	Harmonik Güç Oranı (%)
L1 (Filtresiz)	16,984	0	17,11	38,025	2,145	34,03	32,624	8,699	35,1
L2 (Filtresiz)	24,87	0		30,283	2,133		33,412	8,619	
L3 (Filtresiz)	16,402	0		31,388	2,364		33,531	8,87	

2500 kVA-1600 kVA Tesis	Ölçüm 1 (Water Şebeke Giriş)			Ölçüm 2 (Water İnvertör Girişi)					
	Ithd	Vthd	Harmonik Güç Oranı (%)	Ithd	Vthd	Harmonik Güç Oranı (%)			
L1 (Filtresiz)	38,376	3,234	41,12	50,56	3,53	55,88			
L2 (Filtresiz)	38,197	3,174		49,315	3,277				
L3 (Filtresiz)	36,845	3,061		48,263	3,336				

40 W-150 W LED	Ölçüm								
	Ithd	Vthd	Harmonik Güç Oranı (%)						
L1 (40W) (Filtresiz)	10,131	0	10,49						
L1 (150 W) (Filtresiz)	12,111	3,174	12,14						

Dört Farklı İplik Üretim Tesisi	Ölçüm 1 (Hazırlama Isıtıcı)			Ölçüm 2 (Hazırlama Sürücü)			Ölçüm 3 (Büküm)		
	Ithd	Vthd	Harmonik Güç Oranı (%)	Ithd	Vthd	Harmonik Güç Oranı (%)	Ithd	Vthd	Harmonik Güç Oranı (%)
L1 (Filtresiz)	15,034	6,705	14,64	29,68	6,795	29,59	44,007	6,872	54,18
L2 (Filtresiz)	14,417	6,673		27,722	6,758		38,387	6,893	
L3 (Filtresiz)	13,606	6,827		26,254	6,906		43,442	7,216	

Dört Farklı İplik Üretim Tesisi	Ölçüm 5 (Kompresör Hava)			Ölçüm 6 (Kompresör Kurutucu)			Ölçüm 7 (2500 kVA Komp. Off)		
	Ithd	Vthd	Harmonik Güç Oranı (%)	Ithd	Vthd	Harmonik Güç Oranı (%)	Ithd	Vthd	Harmonik Güç Oranı (%)
L1 (Filtresiz)	30,575	7,481	31,86	11,946	6,759	13,5	22,672	6,249	23,03
L2 (Filtresiz)	30,383	7,574		14,299	6,792		21,968	6,276	
L3 (Filtresiz)	29,554	8,052		13,616	6,972		22,189	6,512	

Dört Farklı İplik Üretim Tesisi	Ölçüm 4 (Fikse Buhar)								
	Ithd	Vthd	Harmonik Güç Oranı (%)						
L1 (Filtresiz)	61,99	6,753	75,05						
L2 (Filtresiz)	64,618	6,678							
L3 (Filtresiz)	58,749	6,929							

1600 kVA-1250 kVA Tesis	Ölçüm 1 (Filtresiz)			Ölçüm 2 (Harmonik Filtre Reaktörlü)			Ölçüm 3 (Pasif Harmonik Filtreli)		
	Ithd	Vthd	Harmonik Güç Oranı (%)	Ithd	Vthd	Harmonik Güç Oranı (%)	Ithd	Vthd	Harmonik Güç Oranı (%)
L1	29,1	6,4	31,92	13,8	6	13,82	8,5	6,6	8,81
L2	27,9	6,3		13,5	6,2		8,5	6,3	
L3	28,1	6,7		13,3	6,7		8,3	6,5	

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

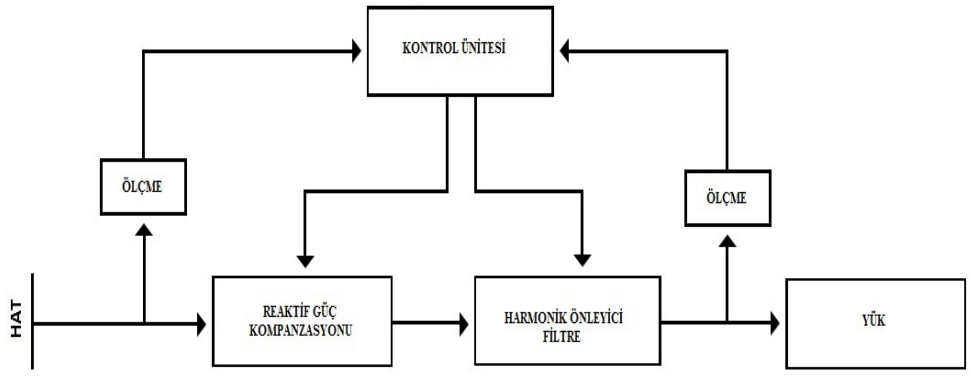
5.1. Sonuçlar

Elektrik kullanan tesislerde üretimin sağlıklı bir şekilde yapılabilmesi için tesise kaliteli enerji sağlanması oldukça önem arz etmektedir. Elektrik enerjisinin kalitesini belirleyen ana faktörlerden biri olan, akım ve gerilimin sinüs eğrisine çok benzer bir biçimde ve 50 Hz frekansında olmasıdır. Fakat doğrusal olmayan yük kullanımının yaygınlaşması sonucunda bu yüklerin ürettiği harmoniklerden dolayı, akım ve gerilimin dalga şekli sinüs halden uzaklaşır ve sonuç olarak, işletmede istenmeyen elektrik sorunları meydana gelir. Yarı iletken elemanların kullanıldığı cihazlar, kesintisiz güç kaynakları, redresörler, motor hız kontrol sistemleri gibi elemanlar şebekede harmoniklerin meydana gelmesine sebep olmaktadır.

Güç faktörünün şebekede 1'e yakın olmasının ekonomiye olan katkısından dolayı kanunlarla yapılması zorunlu hale getirilen reaktif güç kompanzasyonu, harmonikler nedeniyle reaktif güç kompanzasyonunda kullanılan kondansatörler rezonans halinde tahribata uğramakta, güç kayıpları yaşanmakta, delinmeler ve patlamalar olabilmekte ve kompanzasyon sigortalarında atmalar gerçekleşmektedir. Ayrıca yalıtkan kablolarda delinme oluşmasına neden olabilmekte ve bu durum çok ciddi problemlere neden olmaktadır. Elektrik enerji sisteminde harmoniklerden kaynaklı olarak işletmelere kaliteli bir elektrik enerjisi sunulamadığı takdirde, sistem ya da tesis olumsuz etkilemekte ve bunun sonucu olarak ek kayıplar artmakta dolayısıyla gerek endüstriyel işletmeye ve gerekse milli ekonomiye önemli ölçüde zarar vermektedir. Harmoniklerin şebekelerde azaltılması, EPDK tarafından belirtilen değerlerin altında tutulması tesislerde hem teknik hem de ekonomik açıdan fayda sağlar. Harmoniklerin azaltılması için farklı yöntemler kullanılabilir. Bunlardan ilki harmoniklerin giderilmesi için işletmelerde harmoniklere sebebiyet veren cihazlar tasarlanırken harmonikleri düşük seviyede ya da hiç oluşturmayacak şekilde harmonikleri azaltacak filtre ile birlikte tasarlanması, diğeri ise filtreler vasıtasıyla sistemde bulunan harmoniklerin süzülerek azaltılmasıdır.

Elektrik tesislerinde reaktif güç kompanzasyonu yapılırken harmoniklerinde göz önünde bulundurulması ve bu yüzden harmonikli kompanzasyonun yapılması gerektiğinden dolayı, tesislerde ve dağıtım sistemlerindeki harmoniklerin incelenmesi, harmonik sınırlara uyumluluğu sağlamak üzere atılacak adımlara rehberlik etmesi açısından oldukça önemlidir.

Bu çalışmada harmonikli reaktif güç kompanzasyonu, harmoniklerden kaynaklanan etkiye bağlı olarak trafonun durumu, pasif harmonik filtre uygulaması, uygulama öncesi ve sonrası toplam harmonik bozulma ile yaklaşık olarak harmonik güç oranı hakkında sonuçlara yer verilmiştir. Literatür çalışmalarına bakıldığında bu konuda birçok teorik çalışma mevcut olmasına karşın bu doktora tezi hem teorik hemde pratik olarak ilk yapılan çalışmalar arasındadır. Bu kayıpların azaltılması doğrusal olmayan yük devreden çıktığında ya da yeni yükler devreye girdiğinde oluşan harmonik etkiye göre şekil 5.1'de görüldüğü üzere bilgisayar kontrolünde otomatik veya online olarak devreye alınması yada devreden çıkarılması ve hatta harmonik filtre parametrelerinin oluşan harmoniğe göre değiştirilmesi çalışması planlanmaktadır. Ayrıca yapılan ve yapılacak olan bu çalışmalar diğer filtre uygulamalarına da temel teşkil edecektir.



Şekil 5.1. Önerilen sistemin blok şeması

Bu tez çalışmasının asıl amacı harmoniklerin güç sistemindeki etkilerini ve harmoniklerin azaltılmasının sanayinin istifadesine nasıl sunulacağını göstermektir. Yapılan bu çalışmada, harmonik bozulmanın, güç kalitesiyle ilgili en önemli sorunlardan biri olduğu ve güç sistemine çeşitli bozulmalar oluşturduğu

açıklanmaktadır. Bu doktora tezinde birçok tesisin akım, gerilim ve güç gibi parametreleri ölçülmüştür. Ölçümler sonucunda veriler bilgisayara aktarılarak harmonik analizi yapılmıştır. Yapmış olduğumuz analizlerde, akım ve gerilim harmonik güç oranları hesaplanmıştır. En son ölçüm yapılan tesis 1250 kVA ve 1600 kVA'lik trafolardan beslenmekte olup, bu tesiste önce filtresiz olarak, daha sonra reaktif güç kompanzasyon kondansatörleri önüne harmonik filtre reaktörü bağlayarak ve en son pasif harmonik filtre bağlayarak ölçümler gerçekleştirilmiştir. Ölçümler sonucunda harmonik güç oranı filtresizde %31.92, harmonik filtre reaktörlü bağlantıda %13.82 ve pasif harmonik filtreli bağlantıda %8.81 olarak ölçülmüştür.

Bu çalışmada yapılan uygulamalardan elde edilen tespitler aşağıdaki şekildedir.

Kürker ve Taşaltın 2016'da lazer torna tezgâhına sahip tesiste filtresiz olarak üç noktada ölçümler yapmış 3., 5. ve 7. harmoniğe rastlamışlardır. Elektrik tesisinin girişinde yapılan ölçümlerin 120 kVA'lik UPS'in girişinde ve çıkışında yapılan ölçümlere göre daha düşük çıkmasının sebebi, harmonik üreten cihazdan ne kadar uzaklaşılırsa harmonik ölçüm sonucu o derece küçük çıkacağı görülmektedir. İkinci ölçüm yapılan 2500 kVA ve 1600 kVA ile beslenen tesiste filtresiz olarak iki noktada ölçümler yapılmış 5. ve 7. harmoniğe rastlanmış olup elektrik tesisinin girişinde yapılan ölçümlerin en yüksek akım harmonik değeri %38.38 iken, invertör girişinde yapılan ölçümde en büyük akım harmonik değeri %50.56 değerinde ölçülmüştür. Birinci ölçüm yapılan tesiste olduğu gibi harmonik üreten cihaz yakınında yapılan ölçümde harmonik bozulma değeri daha yüksek çıkmıştır. Burada invertör'ün ciddi bir harmonik kaynağı olması nedeniyle daha yüksek bir değer ölçülmüştür. Üçüncü olarak 40 W'lık ve 150 W'lık LED armatürlerinde filtresiz olarak ölçümler yapılmış her iki LED için 3. harmoniğe rastlanmış olup sırasıyla akım harmonik değeri %10.13 ve %12.11 olarak ölçülmüştür. Bu ölçüm sonucuna göre LED'lerinde harmonik kaynağı olduğu görülmektedir. Dördüncü ölçüm yapılan tesiste filtresiz olarak yedi farklı noktada ölçümler yapılmış genel olarak 5. ve 7. harmoniğe rastlanmış olup elektrik tesisinde en yüksek akım harmonik değeri %64.618 iken, reaktif güç kompanzasyon off durumunda iken 2500 kVA'lik trafoda ise en yüksek akım harmonik değeri %22.67 olarak ölçülmüştür. Bu sonuca göre reaktif güç

kompanzasyon sistemi devrede iken daha yüksek harmonik bozulmalar görülmektedir. Beşinci ölçüm yapılan 1600 kVA ve 1250 kVA ile beslenen tesiste filtresiz, harmonik filtre reaktörü bağlı iken ve pasif harmonik filtre bağlı iken yapılan ölçümlerde genel olarak 5. ve 7. harmoniğe rastlanmıştır. Filtresiz olarak en yüksek akım harmonik değeri %29.1 iken harmonik filtre reaktörü bağlandıktan sonra en yüksek akım harmonik değeri %13.8 ve pasif harmonik filtre bağlandıktan sonra en yüksek akım harmonik değeri %8.5 olarak ölçülmüştür. Buradan elde edeceğimiz tespit uygulamasını yapmış olduğumuz çalışmalar neticesinde harmoniklerin seviyesinde azalma sağlanmıştır. Pasif harmonik filtre, harmonik filtre reaktörüne göre daha etkilidir.

Elektrik tesislerinde gerçekleştirilen bu çalışmanın sonucu olarak aşağıdaki tespitler verilebilir.

Akımdaki toplam harmonik bozulma değeri, harmonik oluşturan cihazların yakınında daha yüksektir. Harmonik bozulma değerinin doğru bir şekilde ölçülebilmesi için ölçüm yapılan yerin harmonik üreten cihaza yakın olması gerekmektedir. Doğrusal olmayan yüklerin olduğu bir sisteme reaktif güç kompanzasyon sistemi eklendiğinde sistemdeki mevcut harmoniklerin genlik değerleri artmıştır. Bunun nedenleri, sistemde meydana gelen rezonans olayları ile reaktif güç kompanzasyon sisteminin yüksek frekanslardaki harmonikli akımlara çok düşük empedans göstererek bu akımların genliklerinin artmasına neden olmasıdır. Bu nedenlerden dolayı harmoniklerin olduğu bir sistemde reaktif güç kompanzasyon tesisi kurulması gerektiğinde, en iyi çözüm yöntemlerinden birisi reaktif güç kompanzasyonunda kullanılan kondansatörlere harmonik filtre reaktörü bağlamaktır. Harmoniklerin varlığı çoğu zaman harmoniklerin olduğu bir sistemde reaktif güç kompanzasyon kondansatörlerine verdiği zararlarla anlaşılır. Dolayısıyla bu yöntem, reaktif güç kompanzasyon sistemindeki harmoniklerin etkilerini oldukça azaltmasından dolayı yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Bahsedilen harmonik filtre reaktörü işletmede reaktif güç kompanzasyon değerlerine bakılarak elektrik firmalarının oluşturduğu endüktans seçim tablolarından uygun endüktans değerleri

seçilerek bağlanmalıdır. Aslında burada seri endüktasın (harmonik filtre reaktörü) asıl işlevi harmoniklerin etkisine karşı kondansatörleri korumaktır.

Reaktif güç kompanzasyon sistemine harmonik filtre reaktörü bağlamanın negatif yanı sonuçlardan da görüldüğü üzere filtreleme performansının pasif harmonik filtreye göre daha düşük olmasıdır. Başka bir negatif yanı harmonikleri standartlarda belirtilen düzeylere tam olarak çekememesidir. Diğer bir negatif yanı ise reaktif güç kompanzasyonu kondansatörlerine bağlanan seri endüktanslar kondansatör uçlarındaki gerilimin artmasına neden olmaktadır, bu yüzden reaktif güç kompanzasyon sistemi için seçilen kondansatörler şebeke geriliminden daha büyük gerilim değerlerine dayanıklı olarak seçilmelidir. Harmonik filtre reaktörü bağlamanın pozitif yanları ise; mevcut sistemlere kolayca monte edilebilir olması, maliyetinin düşük olması, sistemdeki rezonans riskini azaltması şeklinde sıralanabilir. Uygulamada en çok kullanılan yöntem harmonik filtre reaktörü bağlama yöntemidir.

Bahsedilen yöntem dışında pasif filtre, aktif filtre veya hibrid filtre kullanarak da harmoniklerin etkisi azaltılabilir. Tasarlanan pasif harmonik filtrenin olumlu yanlarından birisi birden fazla harmonik akımı filtre etmek için her bir harmonik akımı için tasarlanan pasif harmonik filtrenin paralel bağlanabilmesidir. Diğer bir olumlu yanı ise her bir harmonik frekansı için harmonik akımına çok düşük empedans göstermesi ve çok az kayıplarının olmasıdır. Olumsuz yanı ise; tasarımı yapılan pasif harmonik filtrenin elemanlarının yükteki değişmelere karşı oldukça duyarlı olmasıdır. Pasif harmonik filtre gücü sabit olan doğrusal olmayan yüke sahip sistemlerde veya tesislerde kullanılmalıdır. Nedeni pasif harmonik filtredeki kapasite değerleri sabit olduğundan, tesisteki harmonik üreten yük kalkınca bu kondansatörler devrede kalmaya devam edecek ve sonuçta aşırı reaktif güç kompanzasyonu olacaktır. Bu çalışmada harmonik üreten cihazın (hız kontrol sürücüsü) hem girişine hem çıkışına yerleştirilen pasif harmonik filtre ile harmonik etki azaltılmıştır.

5.2. Öneriler

Elde edilen tespitler ve sonuçlara göre aşağıdaki önerilerden söz edilebilir.

Tesislerde yapılan ölçümlerde EPDK tarafından belirtilen harmonik standartlarının üzerinde sonuçlar çıkmıştır. Harmoniklerin EPDK tarafından belirlenen standartlara çekilmesi hususunda resmi gazetedeki haliyle bir an evvel aktif hale getirilmesi ve aksi durumda davrananlara belirtilen cezaların uygulanması gerekmektedir. Tesise reaktif güç kompanzasyonu yapılmadan önce, tesis harmonik yönünden incelenmeli ve standart değerler göz önünde bulundurularak harmonik filtre reaktörü ile harmonikli kompanzasyon yapılmalıdır. Kısa vadede harmonik filtre reaktörü ve filtreleme masraf olarak görünse de uzun vadede tesisin üretim kalitesi artacağından tesis ve ülke ekonomisi için faydasının olduğu bir gerçektir.

Tesiste bulunan harmonikli yüklerin toplam gücüne göre (ek 11'de yapılan hesaplama) besleme trafosunun seçilmesi gerekmektedir. Tesiste bulunan harmonik üreten cihazların tespit edilerek; mesela hız kontrol cihazları (invertörler) için pasif harmonik filtre eklenmesi, kesintisiz güç kaynaklarında (konvertörlerin) darbe sayılarının arttırılması (6 pals yerine 12 palslı konver törler tercih edilmelidir) gibi uygulamalarla harmonik etki azaltılabilir.

Ayrıca harmonik etkiyi azaltmak için; harmonik akımlarının sınırlandırılması, güçlendirme faktörünün küçültülmesi, şebekenin kısa devre gücünün arttırılması, zig-zag veya dyn5 bağlantı grubu tranformatörlerin kullanılması, harmonik kirliliğine sebep olan yüklerin sınırlandırılması, kaynağın harmonik empedansının küçültülmesi ve şebeke enerji dağıtımının iyi belirlenmesi çözüm yöntemlerinin bazıları olarak söylenebilir. Tek ayarlı pasif filtre ile birden fazla harmonik mertebedeki akımı filtre etmek için her bir harmonik mertebe için tasarlanan pasif harmonik filtre paralel bağlanabilmektedir.

Sonuç olarak bu çalışma ile maliyete duyarlı uygulamalarda sıklıkla önemli faktör olan asgari başlangıç maliyetleriyle uygun harmonik azaltma gerçekleştirilmiştir. Aktif ve hibrid filtreler güç elektroniği temelli ve pasif filtrelerden çok daha pahalıdırlar. Ek olarak, harmonik filtre rektörü ve pasif harmonik filtre tekniği ile aktif ve hibrid filtre uygulamarına öncülük etmesi anlamında önem arz etmektedir.

KAYNAKLAR

ABB, 2013. Harmonik Filtre Sistemleri, 24s.
http://www.san-el.com/wp-content/uploads/2013/04/A-G-Harmonik-Filtre.pdf
Erişim Tarihi:09.06.2016

ABB, 2008. Technical Application Papers, 62s.
http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/18aa8879b8cc0186c125761f005035b7/$file/Vol.8.pdf
Erişim Tarihi:02.11.2016

AÇAR, T., 2007. Mikrodenetleyicili Harmonik Analizör. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 115s.

ACARKAN, B., KILIÇ, O., AY, S., GÜNDÜZ, N., 2011. Bilgisayar Yüklerinin Harmonik Aktivite Kestirimi ve Harmonik Analizi. IV. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu Bildirileri, s.21-25.

ADAK, S., 2003. Enerji Sistemlerinde Harmonik Distorsiyonunun Azaltılması. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul, 130s.

AKTİF MÜHENDİSLİK, 2011. Enerji Kalitesi Mühendisliği Kapasitör & Filtre Bankları Kondansatörler & Reaktörler. Katalog 2011, 76s.
https://aktif.net/files/documents/AMDT-PQ-1411-Enerji-Kalitesi-Kat.pdf
Erişim Tarihi:02.06.2017

AKYEL, A., 2011. Elektrik Enerji Sistemlerinde Güç Kalitesinin İncelenmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 101s.

AMAÇ, A., E., 2003. Yeni Aktif Filtre Topolojileri Kullanılarak Akım ve Gerilim Harmoniklerinin Azaltılması ve Kesintisiz Güç Kaynağı Sistemlerine Uygulanması. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Kocaeli, 210s.

ARİFOĞLU, U., 2002. Güç sistemlerinin Bilgisayar Destekli Analizi. Alfa Basım Yayım Dağıtım Ltd. Şti., İstanbul, 464s.

ATTAR, S., 1994. Non-Lineer Yükleri İçeren Elektrik Enerji Sistemlerinin İşlemesinde Harmoniklerin Etkinlikleri ve Kayıp Analizi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul, 166s.

AYDIN, U., 2007. Kampüs Tipi Yerleşim Birimlerinde Kompanzasyon ve Harmonik Açısından Güç Analizleri. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya, 81s.

AYKUT, H. K., 2008. Eskişehir Kent Merkezinde Güç Kalitesi Olaylarının Gerçek Zamanda İzlenmesi ve Analizi. Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir, 68s.

BAKAN, A. F., ZENGİNCE, H., ve GİRGİN, Ö., 2011. Çok Darbeli Doğrultuculardа Çok Seviyeli Akım Enjeksiyonu ile Harmonik Eliminasyonu. 4. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, 12-23 Mayıs, Kocaeli, s.69-73.

BATH, S. K., ve KUMRA, S., 2008. Simulation and Measurement of Power Waveform Distortions using LabVIEW, IEEE International Power Modulators and High Voltage Conference, 27-31 Mayıs, Las Vegas, s.427-434.

BİLGE, M., 2008. Güç Sistemlerinde Harmoniklerin Pasif Filtrelerle Eliminasyonu. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş, 42s.

CHANG, G. W., LIU, Y. J., HUANG, H. M., and CHU, S. Y., 2006. Harmonic Analysis of the Industrial Power System with an AC Electric Arc Furnace. IEEE Power Engineering Society General Meeting, 4s.

CHATTOPADHYAY, S., MİTRA, M., SENGUPTA, S., 2011. Electric Power Quality. Springer, 182s.

CHIRADEJA, P., NGAOPITAKKUL, A., JETTANASEN, C., 2015. Energy Savings Analysis and Harmonics Reduction For The Electronic ballast of T5 fluorescent lamp in a building's lighting system. ELSEVIER Energy and Buildings, 97: 107–117.

CHO, Y., S. ve CHA, H., 2011. Single-tuned Passive Harmonic Filter Design Considering Variances of Tuning and Quality Factor, Journal of International Council on Electrical Engineering. 1(1): 7-13.

CLAYTON, R., P., 1989. Analysis of Linear Circuit. Mc Graw Hill, 792s.

CON, İ., 2010. Medya Sektöründe Elektrik Enerji Kalitesinin Harmonik Yönünden İncelenmesi ve Çözüm Önerileri. İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 97s.

ÇELİK, Ç., 2008. Dağıtım Sistemlerinde Enerji Kalitesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 138s.

DATAKOM, 2016. Elektronik Mühendislik San. ve Tic. A.Ş.
http://www.datakom.com.tr/
Erişim Tarihi:10 Ocak 2016.

DEMİR, Z., 1998. Enerji Dağıtım Tesislerinde Harmoniklerin Bilgisayarlı Simülasyonu ve Ölçümü. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Kocaeli, 137s.

DEMİRDELEN, T., 2013. Çok Seviyeli Paralel Melez Aktif Filtrenin Modellenmesi ve Analizi. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Adana, 95s.

DUGAN, R.C., MCGRANAGHAN, M.F., BEATY H.W., SANTOSO S., 2004. Electrical Power Systems Quality. 2nd Edition. McGraw-Hill, 521s.

DURSUN, M., 2003. Doğrusal Olmayan Sistemler için Bir Seri Aktif Güç Filtresi Tasarımı ve Analizi. Gazi Üniversitesi Politeknik Dergisi, 6(3): 523-530.

DWYER, R., 1999. Power Quality Measurements Using General Purpose Data Acquisition Systems vs. Dedicated PQ Analyzers. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 1: 379-381.

EFE, S. B., 2006. Güç Sistemlerinde Harmonikler ve Harmoniklerin Analizi. İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Malatya, 61s.

EKİZ, A., ve TÜMAY, M., 2003. Fabrikalarda Meydana Gelen Harmoniklerin MATLAB/SIMULINK Kullanılarak Modellenmesi. Elektrik Elektronik Bilgisayar Mühendisliği 10. Ulusal Kongresi, 18-21 Eylül, İstanbul, s.99-102.

EPDK, 2017. Elektrik Dağıtımı ve Perakende Satışına İlişkin Hizmet Kalitesi Yönetmeliği.
http://www.epdk.org.tr/TR/DokumanDetay/Elektrik/Mevzuat/Yonetmelikler/ElektrikDagitimiPerakendeSatisinaHizmetKalitesi
Erişim Tarihi: 10 Ocak 2017

ELKON Elk.Ltd.Şti., 2016.

https://yadi.sk/d/pUtpIdNmSfU27
Erişim Tarihi:08.02.2016
ELLIS, R., G., 1996. Harmonic Analysis of Industrial Power Systems, IEEE Transactions on Industry Applications, 32(2): 417-420.
ENGİN, B., 2008. Elektrik Dağıtım Sistemlerinde Kompanzasyon ve Enerji Kalitesi Sorunları. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 104s.
ERİŞTİ, H., 2010. Güç Kalitesi için Dalgacık Dönüşümü ve Destek Vektör Makine Tabanlı Bir Olay Tanıma Tekniğinin Geliştirilmesi. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Elazığ, 112s.
ERKAN, E., 1996. Nonlineer Yüklerde Güç Faktörünün İyileştirilmesi. Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 103s.
EROĞLU, H., 2009. Bir Dağıtım Şebekesinin Güç Kalitesi ve Harmonikler Yönünden İncelenmesi. Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Konya, 207s.
FAISAL, M. F., and MOHAMED, A., 2009. A New Technique for Power Quality Based Condition Monitoring. 20th International Conference on Electricity Distribution CIRED 2009 Session 2, 0062: 1-4.
FİDAN, M., 2011. Harmoniklerden Kaynaklanan Gerilim Bozulmalarının Elektriksel Kısmi Boşalmalar Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Kocaeli, 147s.
FİLİZ, C., 2006. Güç Sistemlerine Harmonikler ve Filtrelerin İncelenmesi. Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale, 146s.
GENCER, Ö., ÖZTÜRK S., ve ERFİDAN, T., 2003. Harmoniklerin Güç Faktörü Üzerine Etkileri. Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 10. Ulusal Kongresi, 18-21 Eylül, İstanbul, s.38-41.
GENCER, Ö., Ö., ALBOYACI, B., ÖZTÜRK S., ve ÇETİNKAYA, H., B., 2003. Endüstriyel Bir Tesiste Aktif Filtre Uygulaması. 3. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, 21-22 Mayıs, Kocaeli, s.9-12.
GERMEÇ, K., E., 2015. Elektrik Güç Sistemlerinde Harmonik Analizi Algoritmaları Geliştirme. Başkent Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Ankara, 126s.
GOUDA, O., E., AMER, G., M., SALEM, W., A., A., 2011. A Study of K-Factor Power Transformer Characteristics by Modeling Simulation. ETASR-Engineering, Technology & Applied Science Research, 1(5): 114-120.
GÖÇMEN, E., ve ÖZDEMİR, Ş., 2013. Farklı Tip Aydınlatma Aygıtlarının Harmonik Etkilerinin Karşılaştırılması. 5. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, 23-24 Mayıs, Kocaeli, s.261-265.
GÖKOZAN, H., 2011. Endüstriyel Tesislerde Güç Kalitesinin İzlenmesi, Analizi Ve Uygun Harmonik Filtre Seçimi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya, 110s.
GÜNTÜRKÜN, R., 2003. İleri Beslemeli ve Elman Geri Beslemeli Yapay Sinir Ağlarını Kullanarak Harmoniklerin Kompanzasyonu. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Sakarya, 156s.
HUAYING, W., JINGBO, L., and XIUFA, S., 2009. A Novel Intelligent System for Analysis and Recognition of Power Quality Disturbance Signal. CCDC'09 Control and Decision Conference, s.3915-3918.
http://www. hilkar.com/ harmonik filtre reaktorleri.html.

Erişim: 07 Haziran 2016.
IEC (International Electrotechnical Commission) Norm, 2002. http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=168030 Erişim Tarihi:10 Aralık 2015.
IEEE519 Standardı, 2014. IEEE Recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems. http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6826459 Erişim Tarihi:17 Aralık 2015.
ISSOURIBEHERE, P. E., BARBERO, J. C., ISSOURIBEHERE, F., and BARBERA, G. A., 2008. Power Quality Measurements in A Steel Industry With Electric Arc Furnaces. 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, s.1-8.
İLASLANER, İ., 2006. Güç Kalitesinde Harmonikler ve Filtrelenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 88s.
JANIK, P., ve SIKORSKI, T., 2011. Power Quality Assessment. Wrocław University of Technology. Wrocław, Poland, 167s.
MANSON, J. And TARGOSZ, R., 2008. European Power Quality Survey Report. Leonardo Energy, 29s.
KAKİLLİ, A., TUNÇALP, K., ve SUCU, M., 2008. Harmoniklerin Reaktif Güç Kompanzasyon Sistemine Etkilerinin İncelenmesi. Fırat Üniversitesi, Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 20(1): 109-115.
KALE, M., 2004. Paralel Aktif Güç Filtresi ile Harmonik Akım ve Reaktif Güç Kompanzasyonu. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli, 116s.
KARA A., CEYLAN Y., AYASUN S., ve YALÇINÖZ T., 2006. Bir Tekstil Fabrikasının Harmonik Analizi. 3e Electrotech, 142: 118-122.
KARAAĞAÇ, A., 2006. Güç Sistemlerindeki Harmoniklerin Ölçülmesi Analizi ve Bunların Etkileri. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir, 86s.
KLEMPKA, R., HANZELKA Z. and VARETSKY, Y., 2013., Bank Harmonic Filters Operation in Power Supply System, Power Quality Issues, s.201-230.
KOCATEPE, C., KÖROĞLU, S., ve ARIKAN, O., 2005. Nonsinüsoidal Şartlar Altında Güç Faktörünün ve Güç Tanımlarının İncelenmesi. Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 2: 117-126.
KOCATEPE, C., UZUNOĞLU, M., YUMURTACI, R., KARAKAŞ, A., ARIKAN, O., 2003. Elektrik Tesislerinde Harmonikler. Birsen Yayınevi, 330s.
KOÇYİĞİT, F., 2010. Elektrik Enerji Kalitesinin Tekstil Sanayine Maliyeti ve Öneriler. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Sakarya, 125s.
KURU, E., 2003. Adaptif Bulanık Mantık Yöntemi Kullanılarak Harmoniklerin Sınıflandırılması ve Adaptif Filtre Yaklaşımı ile Temel Bileşenin Belirlenmesi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Sakarya, 139s.
KÜÇÜK, D., SALOR, Ö., GÜDER, M., DEMİRCİ, T., AKKAYA, Y., ÇADIRCI, I., ERMİŞ, M., 2009. Türkiye Elektrik İletim Sisteminde Harmonik Bozulma ve Kırpışma Parametrelerinin Oluşturulan Güç Kalitesi Veritabanı Yapısıyla Değerlendirilmesi. III. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, 21-22 Mayıs, Kocaeli, s.211-216.

KÜRKER, F. ve TAŞALTIN, R., 2016. Elektrik Tesislerinde Harmoniklerin Meydana Getirdiği Kayıpların Analizi. Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 5: 21-38.

NILSSON, J.,W., RIEDEL, S., A., 1998. Electric Circuits. Prentice Hall, 794s.

OKUDUCU, E., 2010. Elektrik Güç Sistemlerinde Elektrik Kalitesinin Analizi ve Simülasyonu. Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Van, 102s.

OWEN, E. L., 1998. A History of Harmonics in Power Systems. IEEE Industry Applications Magazine, s.6-12.

ÖZDEMİR, Ş., 2003. Reaktif Güç Kompanzasyonu ve Harmonik Azaltımında Kullanılan Kompanzatörün Bulanık Mantık Denetimiyle Analizi ve Simülasyonu. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Kocaeli, 157s.

PARTHASARATHY, S., SINDHUJAH, L. J., and RAJASEKARAN, V., 2012. Harmonic Mitigation in a Rectifier System Using Hybrid Power Filter. 2012 International Conference on Computing, Electronics and Electrical Technologies, 21-22 March, Tamil Nadu, India, s.483-488.

RÜSTEMLİ, S.,CENGİZ, M.D., ve DİNÇER, F., 2013. Elektrik Tesislerinde Harmoniklerin Aktif Filtre Kullanılarak Yok Edilmesi ve Simülasyonu. Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 2(1): 30-38.

SALOR, Ö., GÜLTEKİN, B., BUHAN, S., BOYRAZOĞLU, B., İNAN, T., ATALIK, T., AÇIK, A., TERCİYANLI, A., ÜNSAR, Ö., ALTINTAŞ, E., AKKAYA, Y., ÖZDEMİRCİ, E., ÇADIRCI, I., ve ERMİŞ, M., 2007. Electrical Power Quality of Iron and Steel Industry in Turkey. 42nd IAS Industry Applications Conference Annual Meeting Conference Record of the 2007 IEEE, 23-27 Eylül, New Orleans, s.404-423.

SCHNEIDER ELECTRIC, 2001. Cahier Technique Power Quality, 36s.
http://www.schneider-electric.com
Erişim Tarihi:03 Aralık 2015.

SCHNEIDER ELECTRIC, 2008. Harmonic Detection and Filtering, 56s.
http://www.schneider-electric.com
Erişim Tarihi:13 Kasım 2015.

SCHNEIDER ELECTRIC, 2015. AG Kompanzasyon Panosu Tasarım ve Üretim Klavuzu, 72s.
http://www.schneider-electric.com
Erişim Tarihi:10.05.2016.

SERMON, R. C., 2005. An Owerview of Power Quality Standards and Guidelines from the End-User's Point-of-View. REPCON 2005 Rural Electric Power Conference, 8-10 Mayıs, San Antonio, s.1-5.

SHAHBAZ, M., 2012. Active Harmonics Filtering of Distributed AC System. Norwegian University of Science and Technology, Master of Science in Electric Power Engineering, Trondheim, Norway, 101s.

SİEMENS, 2017. Back-to-Back HVDC.
https://www.energy.siemens.com/br/en/power-transmission/hvdc/applications-benefits/configurations/back-to-back-hvdc.htm.
Erişim Tarihi:10.05.2017.

SUCU, M., 2003. Elektrik Enerji Sistemlerinde Oluşan Harmoniklerin Filtrelenmesinin Bilgisayar Destekli Modellenmesi ve Simülasyonu. Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 156s.

ŞAHİN, M., YÜKSEL, O., TUĞCU, H., Z., 2014. Güç Sistemlerinde Enerji Kalitesini Etkileyen Harmoniklerin İncelenmesi. Erzincan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 7(2): 199-218.

ŞEKKELİ, M., KEÇECİOĞLU, Ö. F., ve YILDIZ, C., 2013. Rüzgar Enerji Santrali Güç Kalite Parametrelerinin Gerçek Zamanlı Ölçümü ve Değerlendirilmesi. 5. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, 23-24 Mayıs, Kocaeli, s.194-198.

TARGOSZ, R. And MANSON, J., 2007. PAN European LPQI Power Quality Survey. Proceedings of 19th International Conference on Electricity Distribution, 263s.

TIN, H., ABU-SIADA, A. and MASOUM M. S., 2012. Power System Harmonic Mitigation Using Hybrid Filters. Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 2012 22nd Australasian, 26-29 September, Bali, s1-7.

TUNÇALP, K., ve SUCU, M., 2006. Elektrik Enerji Sistemlerinde Oluşan Harmoniklerin Filtrelenmesinde Pasif Filtre ve Filtreli Kompanzasyonun Kullanımı ve Simülasyon Örnekleri. Gazi Üniversitesi Politeknik Dergisi, 9(4): 263-269.

TURAN, M., 2002. Sinüsoidal Olmayan Gerilimlerde Yönlendirilmemiş Saclarda Oluşan Harmonik Kayıpların Belirlenmesi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Sakarya, 105s.

UÇAR, F., 2012. Paralel Aktif Güç Filtresi Kullanarak Harmonik ve Reaktif Güç Kompanzasyonu Yapılması. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ, 83s.

UZAN, O., 2013. Alçak Gerilim Dağıtım Sistemlerinde Güç Kalitesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 175s.

VATANSEVER, F., 2005. Dalgacık Tabanlı Harmonik ve Güç Analizleri. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Sakarya, 240s.

VENKATESH, C. and KUMAR, D.S., 2008. Modelling of Nonlinear Loads and Estimation of Harmonics in Industrial Distribution System. Fifteenth National Power Systems Conference (NPSC), IIT Bombay, s.593-595.

YAĞCI, M., 2005. Güç Transformatör Kayıplarına Harmoniklerin Etkisi. Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Konya, 130s.

YILMAZ, M., 2006. Elektrik Sistem Tasarımında Harmoniklerin Giderilmesi için Bir Analiz. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 98s.

YÖRÜKEREN, N., 1994. Güç Sistem Harmonikleri ve Bu Harmoniklerin Elektrikli Ulaşım Sistemlerinde Belirlenmesi ve Değerlenmesi. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Kocaeli, 226s.

YÜKSEL, A. C., AKIN, D., ve TÜRKAY, B., 2009. Sürücülü Sistemlerde Enerji Kalitesi Problemlerinin İncelenmesi. 3. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, 21-22 Mayıs, Kocaeli, s.109-113.

YÜKSEL, E., 2011. Elektrik Enerjisinin Kalitesi. 3e Electrotech Aylık Enerji, Elektrik, Elektronik Teknolojileri Dergisi.
http://www.3eelectrotech.com.tr/arsiv/yazi/elektrik-enerjisinin-kalitesi.
Erişim Tarihi:14 Ocak 2015.

EKLER

Ek 1: Fourier Analizi

Harmoniklerin analizi, periyodik dalga formlarının temel ve yüksek mertebeden harmoniklerinin büyüklüklerini ve fazlarını hesaplama işlemidir. Elde edilen seri Fourier serisi olarak bilinir. Zaman alanındaki bir işlev ile frekans alanında bir işlev arasında bir ilişki kurar. Fourier serisi ilk olarak 1804 yılında Fransız Matematikçisi Joseph Fourier tarafından ısı akışıyla ilgili çalışmasında kullanılmıştır.

Fourier analizi, genel fonksiyonların belirli frekanslarla trigonometrik veya üstel fonksiyonlara nasıl ayrıştırabileceğinin incelenmesidir. İki çeşit Fourier açılımı vardır: Fourier serisi, bir fonksiyon periyodik ise, belirli frekanslarla trigonometrik veya üstel fonksiyonların ayrık bir toplamı olarak yazılabilir. Fourier dönüşümü, mutlak periyodik olmayan genel bir fonksiyon, trigonometrik veya üstel fonksiyonların kesintisiz integrali olarak olası frekansların bir sürekliliği ile yazılabilir.

Fourier, periyodik bir fonksiyonu, harmonik ilişkiye sahip sinüs ve kosinüslerin sonsuz toplamı ile göstermiştir. Trigonometrik bir değerin sonsuz serideki periyodu, ana periyodun harmoniği ve tam katlarıdır. Fourier 1,2,3,…,n tamsayı dizisi iken denklem (Ek.1)'deki gibi formulize edilebileceğini göstermiştir.

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n Cos(n\omega_0 t) + B_n \sin(n\omega_0 t) \qquad \text{(Ek.1)}$$

Burada A_0, A_n, B_n değerleri Fourier katsayısı olarak ifade edilir ve f(t)'den formülünden hesaplanabilir. f(t)'nin temel frekansı ω_0 ($\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$) periyodik bir fonksiyondur. f(t)'nin harmonik frekansları $2\omega_0$, $3\omega_0$, $4\omega_0$, ……, $n\omega_0$'dır. f(t) sinyalinin

ikinci harmoniği $2\omega_0$, üçüncü harmoniği $3\omega_0$, dördüncü harmoniği $4\omega_0$ ve n'inci harmoniği $n\omega_0$ olarak ifade edilir (Nilsson ve Riedel, 1998).

Matematiksel açıdan, f(t) periyodik sinyalinin Fourier serisi olarak ifade edilebilmesi için Dirichlet koşullarını sağlamalıdır.

1. f(t) tek değerli olmalıdır.
2. $\int_{t_1}^{t_1+T} |f(t)|dt$ t_1'in tüm değerleri için integrali olmalıdır.
3. f(t) herhangi bir periyotta sonlu sayıda süreksizliğe sahip olmalıdır.
4. f(t) herhangi bir periyotta sonlu sayıda maksimum (tepe) ve minumum (çukur) değerlerine sahip olmalıdır. (Clayton, 1989)

Elektrik enerji sistemlerindeki ve fiziksel olarak bir kaynak tarafından üretilebilen herhangi bir periyodik fonksiyonun dalga şekilleri Dirichlet koşullarını her zaman sağlamasından dolayı Fourier bileşenleri elde edilebilir. Bu elde edilme işlemi harmonik analizi veya dalga analizi olarak tanımlanır (Kocatepe ve ark., 2003).

Sinüsoidal dalgadan farklı şekilde değişen f(t) dalgası T periyot boyunca Fourier'e göre denklem (Ek.2) ve (Ek.3)'deki şekliyle yazılır.

$$f(t) = A_0 + A_1 Cost + ... + A_n Cosnt + B_1 S\,\text{int} + ... + B_n Sinnt \qquad \text{(Ek.2)}$$

$$f(t) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_n Cosnt + B_n \sin nt \qquad \text{(Ek.3)}$$

Sinüsoidal dalgadan farklı şekilde değişen f(t) dalgası T periyot boyunca Fourier'e göre denklem (Ek.4) ve denklem (Ek.5)'de olduğu gibi ifade edilebilir. Burada denklem (Ek.6), (Ek.7), (Ek.8) ve (Ek.9)'daki eşitliklerde yazılabilir.

$$f(t) = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(n\omega t \mp \varphi_n) \quad \text{(Ek.4)}$$

$$f(t) = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \sin(n\omega t \mp \varphi_n) \quad \text{(Ek.5)}$$

$$C_0 = \sqrt{A_0^{\,2} + B_0^{\,2}} \quad \text{(Ek.6)}$$

$$C_n = \sqrt{A_n^{\,2} + B_n^{\,2}} \quad \text{(Ek.7)}$$

$$\varphi_1 = \tan^{-1} \frac{B_1}{A_1} \quad \text{(Ek.8)}$$

$$\varphi_n = \tan^{-1} \frac{B_n}{A_n} \quad \text{(Ek.9)}$$

Bu eşitliklerde,

C_0: Sabit terim,

C_1, C_2, …., C_n: Harmonik genliği,

φ_1, φ_2,…, φ_n: Faz açısını,

ω: Temel frekansta açısal hızı, göstermekte olup $C_n.\cos(n\omega t \mp \varphi_n)$ veya $C_n.\sin(n\omega t \mp \varphi_n)$, n. harmonik bileşen olarak adlandırılır.

Ek 2: Tepe, rms, ortalama ve ani değer

Maximum değer (Tepe değer); alternatif gerilim veya akımın anlık olarak maksimum değeridir. I_{max} akımın maksimum değerini ve V_{max} gerilimin makimum değerini ifade eder. Sinüsoidal bir dalganın şayet rms değeri 1 birim ise bu dalganın maksimum (tepe=peak) değeri rms değerinin $\sqrt{2}$ katıdır yani 1.44 birime eşittir.

Root mean square (rms) değer; bir AC dalgasının rms değeri genellikle efektif (etkin) değer veya DC eşdeğer değeri olarak adlandırılır. Sinüs dalgası için, rms değeri maksimum değerinin 0.707 katıdır. Evdeki şebeke gerilimleri rms terimlerle ifade edilir. Bir sinüsoidal veya karmaşık dalga formunun rms gerilimi grafik ve analitik metod yöntemiyle belirlenebilir. Rms değerini grafik metoduyla belirlemek için AC dalga formunu temsil eden fonksiyon üzerinde üç matematiksel işlem gerçekleştirilir:

(1) Dalga formu fonksiyonunun karesi (genellikle bir sinüs dalgası) alınır,

(2) Adım (1) 'den çıkan fonksiyon ortalaması alınır,

(3) Adım (2) 'den çıkan fonksiyonun karekökü ile bulunur. Denklem (Ek.10)'da grafik metoduyla formülü görülmektedir.

$$S_{RMS} = \sqrt{\frac{S_1^2 + S_2^2 + ... + S_n^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{n} S_n^2}{n}} \qquad \text{(Ek.10)}$$

Rms değeri analitik bir yol ile bulunabilir. Periyodik bir sinüzoidal voltaj sabittir ve T periyodu ile V(t) = Vmcos (ωt) olarak tanımlanabilir. Sinüsoidal voltajın V(t) rms değerini denklem (Ek.11)'deki gibi ve sinüsoidal bir işaretin rms akım değerini ise denklem (Ek.12)'den hesaplayabiliriz:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T V^2(t)dt} = \frac{V_{\max}}{\sqrt{2}} = 0.707V_{\max} \qquad \text{(Ek.11)}$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2(t)dt} = \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}} = 0.707 I_{\max} \qquad \text{(Ek.12)}$$

Ortalama değer (mean value); bir işaretin ortalama değeri o işaretin zaman ekseni ile arasında kalan alanı ifade etmektedir. Başka bir ifadeyle alternatif voltajın anlık değerlerinin ortalaması ve tam bir çevrim boyunca akımların ortalaması, ortalama değer olarak adlandırılır. Sürekli bir DC voltajının ortalama değeri, DC voltajının sabit olması nedeniyle her zaman maksimum tepe değerine eşit olacaktır. Bu ortalama değer yalnızca DC voltajının çalışma çevrimi değişirse değişir. Saf sinüs dalgasında, ortalama değer tam çevrim üzerinden hesaplanırsa, pozitif ve negatif yarımlar birbirini iptal edecekleri için ortalama değer sıfıra eşit olur. Dolayısıyla bir AC dalga formunun ortalama veya ortalama değeri sadece yarım çevrim boyunca hesaplanır veya ölçülür ve denklem (Ek.13)'deki formül kullanılarak hesaplanır.

$$I_{ort} = \frac{1}{T}\int_0^T i(t)dt \Rightarrow I_{ort} = I_{DC} \qquad \text{(Ek.13)}$$

Bir işaretin ortalama değeri hesaplanırken şu adımlar izlenir: sinyalin belirli örnekleme zamanıyla bir periyot boyunca genlik değerleri alınır, alınan bu genlik değerleri toplanır ve sonuç örnek sayısına bölünür. Bu durum denklem (Ek.14)'te verilmiştir. Alternatif akım ya da gerilimin ortalama değeri bulunurken bütün alternanslar pozitif olarak kabul edilir. Gerilimin ortalama değeri $V_{ort} = 0.636 V_{\max}$ ve akımın ortalama değeri'dir.

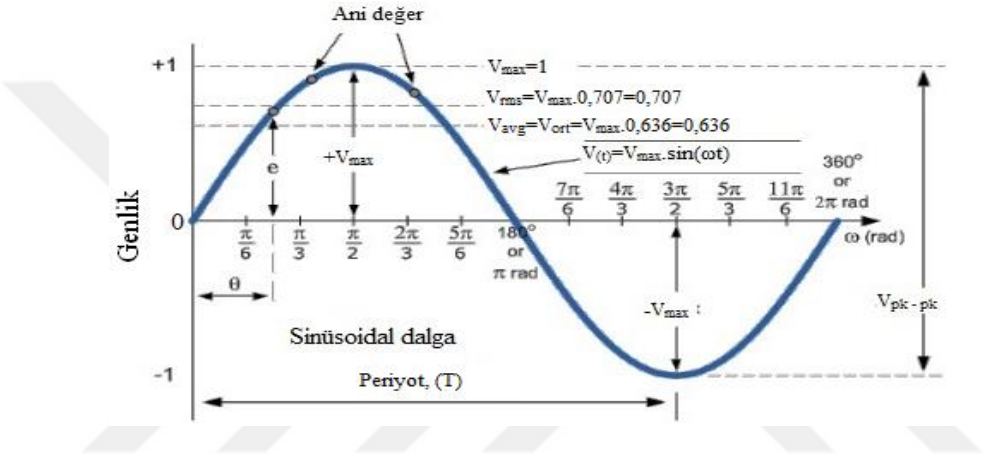
$$OrtalamaDeğer = \frac{S_1 + S_2 + ... + S_n}{n} = \frac{\sum_{n=1}^{n} S_n}{n} = S_{ort} \qquad \text{(Ek.14)}$$

Elektriksel güç, bir DC miktarı veya bir AC miktarı olarak zamanla değişebilir. Bir devredeki herhangi bir an içindeki güç, akım veya gerilim miktarı, anlık güç olarak

adlandırılır. Ani akım "i" ile ani gerilim ise "v" ile gösterilir. Akımın ani değeri denklem (Ek.15)'de gerilimin ani değeri denklem (Ek.16)'da verilmiştir.

$$i = I_{\max} \sin(\omega t) \qquad \text{(Ek.15)}$$

$$v = V_{\max} \sin(\omega t) \qquad \text{(Ek.16)}$$



Şekil Ek.1. Tepe (maximum), ortalama (average) ve rms değerinin sinüs dalga üzerinde gösterimi

Şekil Ek.1.'de tepe (maximum), ortalama (average) ve rms (etkin) değerleri sinüs dalga üzerinde görülmektedir. Çizelge Ek.1'de ise tepe (maximum), ortalama (average) ve rms (etkin) birbirlerine dönüşüm değerleri verilmiştir.

Çizelge Ek.1 Tepe (maximum), ortalama (average) ve rms (etkin) dönüşüm değerleri

<table>
<tr><th>Değer</th><th colspan="2">I_{max}</th><th colspan="2">I_{ort}</th><th colspan="2">$I_{rms}=I_{etkin}$</th></tr>
<tr><td rowspan="2">I_{max}</td><td colspan="2" rowspan="2">1</td><td>$\frac{I_{ort}}{0.636}$</td><td>$\frac{\pi}{2}.I_{ort}$</td><td>$1.41.I_{rms}$</td><td>$\sqrt{2}.I_{rms}$</td></tr>
<tr><td colspan="2">$1.57.I_{ort}$</td><td colspan="2">$\frac{I_{rms}}{0.707}$</td></tr>
<tr><td rowspan="2">I_{ort}</td><td>$0.636.I_{\max}$</td><td>$\frac{2}{\pi}.I_{\max}$</td><td rowspan="2">1</td><td rowspan="2" colspan="2">$\frac{Irms}{1.11}$</td></tr>
<tr><td colspan="2">$\frac{I_{\max}}{1.57}$</td></tr>
<tr><td rowspan="2">$I_{rms}=I_{etkin}$</td><td>$\frac{I_{\max}}{\sqrt{2}}$</td><td>$\frac{I_{\max}}{1.41}$</td><td rowspan="2">$1.11.I_{ort}$</td><td rowspan="2" colspan="2">1</td></tr>
<tr><td colspan="2">$0.707.I_{\max}$</td></tr>
</table>

Ek 3: Reaktif Güç ve Reaktif Güç Kompanzasyonu

Elektrik enerjisinin 3 bileşeni vardır. Bunlar; Görünür Güç (S), Aktif Güç (P), Reaktif Güç (Q)'tür.

Görünür güç (S) bileşeni, (VA), (kVA), jeneratör ve transformatörler (MVA) birimleriyle ifade edilen gerilim üreten bütün üreticilerdir. Görünür güç, devreye verilen güçtür. Görünür Güç, volt amper (VA) cinsinden ölçülür ve bir AC sistemindeki voltajın içinde akan tüm akım ile çarpımıdır. Görünür güç S(kVA) aktif ve reaktif gücün vektörel kombinasyonudur. Görünür güç denklem (Ek.17)'de monofaz (tek faz) ve trifaz (üç faz) olarak verilmiştir.

Görünür güç $S = UI$ (VA) ve $S = \sqrt{3}UI$ (VA) (Ek.17)

Aktif güç (P) bileşeni, (W), (kW), yük üzerinde çalışmak için kullanılan güçtür. Aktif güç watt (W) cinsinden ölçülür ve faydalı bir iş yapan bir sistemin elektrik direnci tarafından çekilen güçtür. Motorlar, lambalar, ısıtıcılar, bilgisayarlar vb. yüklere aktarılan gerçek güç aktif güçtür. Elektriksel aktif güç mekanik güce, ısıya veya ışığa dönüştürülür. Birimi wattır ve denklem (Ek.18)'de görüldüğü gibidir.

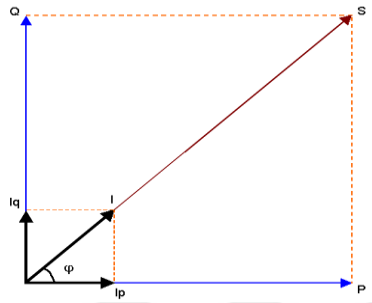
Aktif güç $P = UICos\varphi = SCos\varphi$ (W) (Ek.18)

Reaktif güç (Q) bileşeni, (Var), (kVAr), sadece motorlar ve transformatörler gibi makinelerin manyetik devrelerini beslemek için kullanılır. Reaktif güç, enerjinin önce depolandığı ve daha sonra indüktör ve kapasitör durumunda manyetik alan veya elektrostatik alan şeklinde salındığını gösterir. Jeneratör, motor, bobin ve trafo gibi cihazların çalışabilmeleri için gereken manyetik alanı sağlayan mıknatıslanma akımına reaktif akım ve dolayısıyla çekilen güce reaktif güç denir.

Denklem (Ek.19)'da reaktif gücün formülü görülmektedir. Denklem (Ek.20)'de ise Şekil Ek.2'deki güç üçgenine göre güç faktörü ve açısı hesaplanabilir.

Reaktif güç $Q = UISin\varphi = SSin\varphi$ (VAr) (Ek.19)

Güç Faktörü $PF = Cos\varphi = \frac{P}{S}$ (Ek.20)



Şekil Ek.2. Görünür güç (S), aktif güç (P), reaktif güç (Q), hat akımı (I), reaktif akım (I_q)

Şekil Ek.2'ye göre hat akımı ve görünür güç denklem (Ek.21) ve denklem (Ek.22)'deki gibi bulunur.

Hat akımı $I_h = \sqrt{I_p^2 + I_q^2}$ (A) (Ek.21)

Görünür güç $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ (VA) (Ek.22)

Yüksek akım nedeniyle reaktif enerjinin dağıtım ağlarında sirkülasyonu aşağıdaki durumlara neden olur:

- Transformatörlerde aşırı yük,
- Besleme kablolarında daha fazla sıcaklık artışı,
- Ek kayıplar,
- Büyük gerilim düşüşleri,

• Daha yüksek enerji tüketimi ve maliyet,
• Daha az dağıtılan aktif güç.

Bu nedenlerle şebekede gereksiz akım sirkülasyonunu önlemek için yük düzeyinde reaktif enerji üretmek çok avantajlıdır. Bu, "Güç Faktörü Düzeltme" olarak da bilinir. Bu, motorlar gibi yükler tarafından alınan enerjiye ters olarak reaktif enerji üreten kondansatörlerin bağlanmasıyla sağlanır. Güç üretim ve iletim şebekeleri kısmen rahatlar ve böylelikle güç kayıpları önlenir ve ek iletim becerisi sağlanır. Kapasitif reaktif güç kondansatörler tarafından sağlanır. Reaktif güç enerji sağlayıcı tarafından faturalandırılmaz.

Reaktif akım elektrik santrallerinde üretilerek, enerji nakil hatlarında tüketiciye ulaştırıldığı zaman enerji nakil hatları gereksiz yere işgal edilmiş olur. Bu sebeple reaktif enerjiyi tüketim merkezlerinde üretmek en uygun yoldur. Kondansatörler ve endüktif reaktörler yapıları gereği reaktif güç sağlarlar. Böylece güç şebeke yerine yük yakınında bulunan reaktör ve kondansatörlerden sağlanır. Bu işleme reaktif güç kompanzasyonu denir.

Elektrik tesislerinde kullanılan statik veya magnetik alan ile çalışan bütün tesis cihazları aktif güç ile beraber reaktif güç de harcarlar. Bunların en önemlileri şunlardır;

- Düşük ikazlı senkron makineleri,
- Asenkron motorları,
- Senkron motorları,
- Bobinleri,
- Transformatörleri,
- Redresörleri,
- Endüksiyon fırınlarını ve ark fırınlarını,
- Kaynak makinelerini,
- Hava hatlarını,

- Flüoresan lambaların balastları,
- Sodyum ve civa buharlı lambaların balastları,
- Neon lambaların balastlarını verebiliriz.

Yukarıdaki tüketicilerde söz konusu olan reaktif güç endüktif karakterde olup, akım fazörü gerilim fazörüne göre geri fazdadır (Arifoğlu, 2002).

Reaktif enerji, daha önce de bahsedildiği üzere manyetik etkisine ihtiyaç duyulan tüm elektrik cihazlarının çalışabilmeleri için gerekli bir enerjidir. Manyetik etkiyle çalışan başta transformatörler olmak üzere, tüm elektiktrik makinaları; klimalar buzdolapları çamaşır ve bulaşık makinaları, elektrik süpürgeleri, sanayideki bütün motorlar el aletler, endüksiyon ocakları, motor ve elektro mıknatıs bulunduran ev ve sanayi alet ve cihazları, aydınlatmadaki ateşlemeli (deşarj) lâmbaların normal işlevlerini yapabilmeleri için reaktif enerjiye ihtiyaç duyarlar. Dolayısıyla reaktif enerji kullanımı bu türdeki cihazlar için kaçınılmaz bir ihtiyaçtır.

Meskenlerin toplam tüketim içerisindeki oranı ülke genelinin yüzde 23'leri seviyesindedir. Bu oran küçük güçlü müşteriler ile birlikte yaklaşık olarak yüzde 30 seviyelerine yaklaşmaktadır. Tarife gereği reaktif bedel ödemeyen ve kullandığı cihazlar bazında harmonik denetimine dahil olmayan mesken abonesinin sayısı yaklaşık 23-25 milyon civarına kadar olması reaktif gücünün kompanzasyonunda ve şebeke harmonikleri bazında dağıtım şirketlerine ciddi yükler getirir. Ancak dağıtım şirketleri elektronik (gerçek true Rms değerini kaydeden) sayaçlar bağlamak suretiyle bu reaktif bedeli tüketicilerden karşılamaktadırlar.

Mesken ve küçük abonelerin ve beyaz eşya üretmekte olan firmaların imal etmekte oldukları cihazların harmoniklerinin önlenmesi için yaptırımlar getirilmesi önemle gözden kaçmamalıdır. Bütün dünyada sanayi kalkınma hamlesi yapılmaktadır. Sanayi kalkınmasının en önemli maddesi enerjidir. Özelikle de elektrik enerjisi'dir. Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerde plân %12-%16 kadardır.

Enerji üretimimizle tüketimimiz arasında da enerji ihtiyacını karşılamak için yılda 500 MVA gücünde bir enerji santrali kurulması gerekmektedir. Fakat teknik ve ekonomik sebeplerden dolayı bunu gerçekleştirmek çok zordur. Mevcut tesislerle ihtiyacı karşılamak maksadı ile bazı idari ve teknik tedbirlere başvurulması gerekmektedir. Bu tedbirler ise şöyle sıralanabilir:

1. Yaz saati uygulaması, (zararlı görülerek organize sanayiler tarafından kaldırılmaktadır).
2. Enerji ihtiyacının büyük puant zamanlarında, enerji fiyatlarını sınırlamak ve kısıtlamak için yüksek ücretli tarife uygulamaktır.
3. En önemlisi ise teknik tedbirler'dir.

Kurulu gücü 9 kw'tan büyük olan tesisler için kapasitif ve reaktif enerjiyi ölçmek için gerekli sistem kurulmalıdır. Bu yüzden tesiste kompanzasyon sistemi kurulması gerekir.

Reaktif güç kompanzasyonunun şebeke açısından ve tüketici açısından faydaları vardır. Reaktif güç kompanzasyonunun şebeke açısından faydaları maddeler halinde aşağıda verilmiştir;

- Kablo kesitleri küçülür,
- Şebekenin güç kapasitesi artar,
- Şebekedeki ısı kaynaklı kayıplar düşer,
- Gerilim düşümünde azalma meydana gelir,
- Geçici durum kararlılığı iletim hatlarında daha iyi olur,
- Elektrik iletim kayıpları düşer,
- Faz gerilim dengesizlikleri azaltılmış olur,
- Gerilim dalgalanmaları (fliker olanları) azalır,
- Harmonikler azalır,

- Fatura edilen reaktif bedel düşer.

Reaktif güç kompanzasyonunun tesis açısından faydaları ise;

- Kompanzasyon tesisine sahip bir işletmenin işletme maliyetleri azalır,
- Güç katsayısı düzeltildiği için müşteri şebekeden çok daha az reaktif güç çeker ve daha az para öder,
- Elektrik enerjisinin kalitesizliğinden doğabilecek arıza riski en aza indirilmiş olur,
- Enerji kalitesi ile üretim kalitesi direkt bağlantılı olacağı için işletmenin ürün kalitesi de artar. (Arifoğlu, 2002).

Çizelge E.2'de güç faktörünün 0.7'den 1'e çıkarılmasıyla transformatör çıkışında artan kullanılabilir güç gösterilmiştir.

Çizelge E.2. Güç faktörünün 0.7'den 1'e çıkarılmasıyla transformatör çıkışında artan kullanılabilir güç (Schneider Electric-AG kompanzasyon panosu tasarım ve üretim klavuzu)

Güç faktörü	Artan kullanılabilir güç
0.7	%0
0.8	+%14
0.85	+%21
0.90	+%28
0.95	+%36
1	+%43
Güç faktörü	Kablo kesiti katsayısı
1	1
0.80	1.25
0.60	1.67
0.40	2.50

Güç faktörünün 0.7'den 1'e çıkarılmasıyla tesisteki toplam kayıpları azaltır. Bu da enerji üretim ve dağıtım güçlerin yapılmasına imkân sağlar veya diğer anlamda mevcut büyük güç çekme imkânı doğar. Enerji sıkıntısı çeken yerler için bu ikinci imkân daha

önemlidir. Hiç olmazsa belirli bir süre için, mevcut kapasitelerinden daha iyi yararlanarak daha büyük tüketici kitleler beslenebilirler.

Reaktif güç gereksiminin belirlenebilmesi için işletmenin şebekeden çektiği görünür gücün S_1, buna ait $Cos\varphi_1$ güç katsayısının ve hedeflenen $Cos\varphi_2$ değerinin bilinmesi gereklidir. Aynı zamanda bir işletmede kurulacak olan kompanzasyon sistemi, reaktif güç dağılımına, ihtiyaç duyulan reaktif güçteki değişime, işletmedeki harmonik bozulma miktarına ve işletmenin yerleşim durumuna bağlıdır.

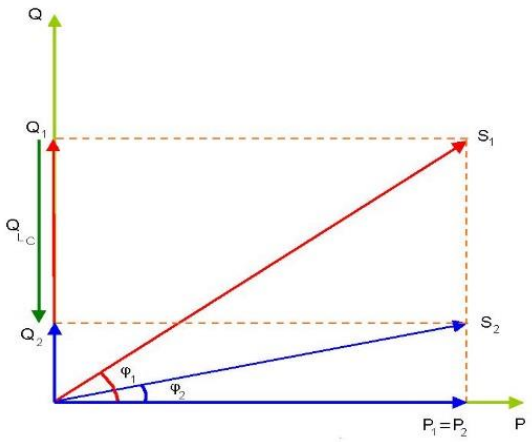
Ek 4: Reaktif güç kompanzasyonunda kondansatör gücünün hesabı

Kurulacak olan kompanzasyon sisteminin, tesisin ihtiyacı olan reaktif gücü hızlı bir şekilde standart seviyede tutması gereklidir.

Reaktif güç kompanzasyonu için gerekli kondansatör gücünü hesaplarken tüketici, kompanzasyon işleminin şebekeden (kompanzasyon öncesi şebekeden) çekilen aktif güç değerini değiştirmemesini (P = sabit) isteyebilir veya müşteri kompanzasyon öncesi ile sonrasındaki görünür güç değerinin sabit tutulmasını isteyebilir.

Kompamzasyon öncesi (P_1) ve kompanzasyon sonrası (P_2) aktif gücün sabit tutulması; kompanzasyondan önceki durumda yükün güç faktörü $Cos\varphi_1$ görünür gücü S_1 ve güç faktörünün $Cos\varphi_2$'ye çıkarılması durumunda görünür güç S_2 değerine (Şekil Ek.3) düşmektedir.

Gerekli kondansatör gücü hesabı formülü denklem (Ek.23)'deki şekliyle hesaplanabilir.



Şekil Ek.3. Kompanzasyon öncesi ve sonrası aktif güçler eşit

$$
\begin{aligned}
&Q_1 = S_1 Sin\varphi_1 \,(\text{kVAr}) \\
&Q_2 = S_2 Sin\varphi_2 \,(\text{kVAr}) \\
&Q_C = Q_1 - Q_2 \\
&Q_C = S_1 . Sin\varphi_1 - S_2 Sin\varphi_2 \,(\text{kVAr}) \\
&P_1 = S_1 Cos\varphi_1 (Watt) \Rightarrow S_1 = \frac{P_1}{Cos\varphi_1} (\text{VA}) \\
&P_2 = S_2 Cos\varphi_2 (Watt) \Rightarrow S_2 = \frac{P_2}{Cos\varphi_2} \quad (\text{VA}) \\
&P_1 = P_1 = P \\
&Q_C = P_1 \frac{Sin\varphi_1}{Cos\varphi_1} - P_2 \frac{Sin\varphi_2}{Cos\varphi_2} (\text{kVar}) \\
&Q_C = P_1 \tan\varphi_1 - P_2 \tan\varphi_2 (\text{kVar})
\end{aligned}
\qquad \text{(Ek.23)}
$$

Denklem (Ek.23)'de elde edilen gerekli kondansatör gücü en sade denklem (Ek.24)'deki gibi yazılabilir.

$$Q = Q_C = P(\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2)\,\text{kVar} \qquad \text{(Ek.24)}$$

Burada;

Q_C: İstenen güç katsayısına yükseltmek için gerekli kondansatör gücü (kVAr),

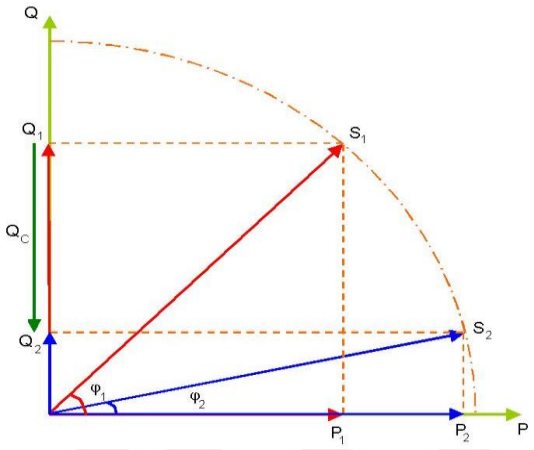
P: İşletmenin aktif gücü (kW),

$\tan\varphi_1$: Kompanzasyondan önceki faz farkı değerini,

$\tan\varphi_2$: Kompanzasyondan sonraki faz farkı değerini ifade eder.

Kompamzasyon öncesi (S_1) ve kompanzasyon sonrası (S_2) görünür gücün sabit tutulması; güç faktörü değerinin kompanzasyon sonrası $Cos\varphi_2$'ye çıkarılması nedeni ile

şebekeden çektiği aktif güç değeri P_1'den P_2'ye (Şekil Ek.4) çıkacaktır. Kompanzasyon öncesi ve sonrası reaktif güç değeri denklem (Ek.25)'de çıkarılmıştır.



Şekil E.4. Kompanzasyon öncesi ve sonrası görünür güçler eşit

$$
\left.
\begin{aligned}
&Q_1 = S_1 Sin\varphi_1 \,(\text{kVar}) \\
&Q_2 = S_2 Sin\varphi_2 \,(\text{kVar}) \\
&S_1 = S_2 \\
&Q_C = Q_1 - Q_2 \\
&Q_C = S(Sin\varphi_1 - Sin\varphi_2)\,(\text{kVar}) \\
&\text{veya} \\
&Q_C = P_1 \tan\varphi_1 - P_2 \tan\varphi_2 \,(\text{kVar})
\end{aligned}
\right\} \qquad \text{(Ek.25)}
$$

Burada;

Q_C: İstenen güç katsayısına yükseltmek için gerekli kondansatör gücü (kVAr),

S: Görünür gücü (kVA),

$\tan\varphi_1$: Kompanzasyondan önceki faz farkı değerini,

$\tan\varphi_2$: Kompanzasyondan sonraki faz farkı değerini ifade eder.

Ek 5: Reaktif güç kompanzasyonunda kondansatör değerinin hesabı

Faz ve hat gerilimleri arasındaki farkın izolâsyon bakımından çok önemi olmadığı alçak gerilim tesislerinde üçgen (Δ) bağlama yıldız (Y) bağlamaya göre, 1/3 oranında daha ucuzdur. Buna bağlı ekonomik sebeplerden dolayı kondansatör bataryalarının üçgen (Δ) bağlanmaları tercih edilir. Gerekli kondansatör gücü denklem (Ek.26)'daki gibidir.

$$Q_C = U^2 \omega C_{\mu F} 10^{-9} \qquad \text{kVAr} \qquad \text{(Ek.26)}$$

Burada;

Q_C: İstenen güç katsayısına yükseltmek için gerekli kondansatör gücü (kVAr),
U: Gerilim (V),
ω: Açısal frekans (2πf),
$C_{\mu F}$: Kompanzasyonda kullanılacak kondansatör kapasitesi (μF).

Y ve Δ kondansatör bağlantılarında kapasite hesaplamalarından da anlaşılıyor ki; yıldız (Y) bağlamada her bir faza bağlanan kondansatörün kapasitesi, delta-üçgen (Δ) bağlamadaki kondansatör kapasitesinin denklem (Ek.29)'da görüldüğü gibi üç katına eşittir. Y (yıldız) bağlamada C_Y kondansatörünün uçlarına faz-nötr gerilimi uygulandığı halde; Δ bağlamada C_Δ kondansatörünün uçlarına $\sqrt{3}$ kadar daha büyük gerilim uygulanır.

Faz ve hat gerilimleri arasındaki farkın izolâsyon bakımından çok önemi olmadığı Kondansatörler yıldız olarak bağlandığında her bir faz ile nötr arasına konulan kapasite değeri denklem (Ek.27)'de verilmiştir.

$$\left.\begin{aligned} C_Y &= \frac{Q_C 10^{-3}}{\omega U^2} Farad \\ Q_{CY} &= U^2 \omega C_Y 10^{-3} kVAr \\ Q_{CY} &= 3\frac{I^2}{\omega C_Y} 10^{-3} kVAr \end{aligned}\right\} \quad \text{(Ek.27)}$$

Üçgen bağlamada her bir faz ile nötr arasına konulan kapasite denklem (Ek.28)'de verilmiştir.

$$\left.\begin{aligned} C_\Delta &= \frac{Q_C 10^{-3}}{3\omega U^2} Farad \\ Q_{C\Delta} &= U^2 \omega C_\Delta 10^{-3} kVAr \\ Q_{C\Delta} &= \frac{I^2}{\omega C_\Delta} 10^{-3} kVAr \end{aligned}\right\} \quad \text{(Ek.28)}$$

Üçgen ve yıldız sistemlerde deklem (Ek.27) ve denklem (Ek.28)'e göre $Q_{CY} = 3.Q_{C\Delta}$ olduğu kabul edilirse, denklem (Ek.29)'daki sonuç elde edilir.

$$C_Y = 3.C_\Delta \quad \text{(Ek.29)}$$

Kompanzasyon uygulamalarında aşağıda belirtilen durumlar göz önüne alınmalıdır.

- Kondansatörler üretici firmaların ürettikleri gerilim ve kVAr'a göre seçilerek, kademelendirilmelidir.
- Bu kademelendirme otomatik reaktif güç kontrol röleleriyle ve rölenin kendi programlama kriterlerlerine bağlı yapılmalıdır.
- Yükün fazlara göre dengeli olduğu durumlarda bir fazdan akım ölçerek işlem yapan reaktif güç kontrol yapan röleler kullanılabileceği gibi, günümüz şartlarında genellikle yük dağılımları dengesiz olabileceğinden ve özelikle endüktif ve

kapasitif oranların EPDK'nın bu hususstaki yönetmeliği göz önüne alındığında üç fazdan akım ölçerek işlem yapan reaktif güç kontrol röleleri tercih edilmelidir.

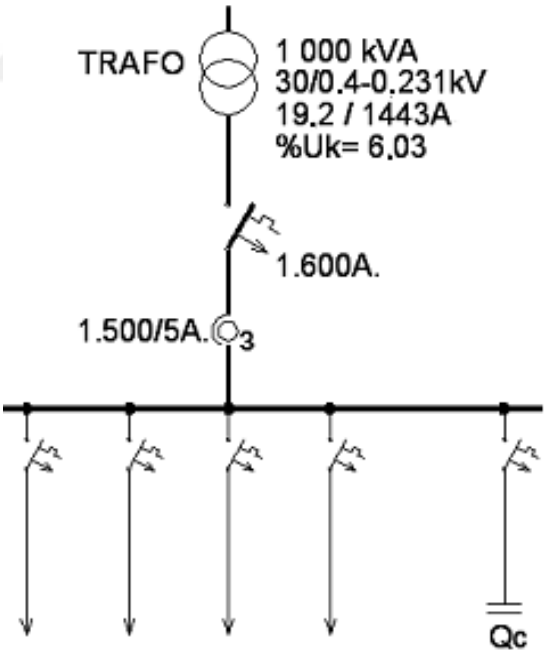
Trafoya bağlı olan bir yükün durumu bir örnekte incelenecek olursa;

Şekil Ek.5'de trafoya bağlı olan yükün toplam kurulu gücü P=900 kW ve $Cos\varphi_1$=0.7 olduğuna göre;

a)Yükün trafodan çekeceği akım ve trafoyu % yükleme oranını,

b)Cosφ=0.984'e yükseltilmesi için gerekli kondansatör gücünü,

c)Güç katsayısı düzeltildikten sonra trafodan çekilen toplam akımı ve trafonun % yükleme oranını hesaplayacak olursak; (Talep faktörü=0.7)



Şekil Ek.5. Trafoya bağlı yükün tek hat gösterimi

a) P=900. (telep faktörü)=(900)(0.7)=630 kW

$$I_{yük1} = \frac{P}{\sqrt{3}U\cos\varphi_1} = \frac{(630)10^3}{\sqrt{3}(400)(0.7)} = 1299A$$

Yükün trafodan çekeceği akım $I_{yük1}$=1299 A olur.

I_n=1443 A ve $\frac{I_{yük1}}{I_n}100 = \frac{1299}{1443}100 = \%90$. Trafo üzerinde %90 oranında yük akımı olur.

b) Cosφ_1=0.7 ise tanφ_1=1.02 ve Cosφ_2=0.984 ise tanφ_2=0.18 gerekli kondansatör gücü;

$Q_C = P(\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2) = 630(1{,}02 - 0{,}18) = 529.2kVAr$ bulunur.

c) Güç katsayısı düzeltildikten sonra yükün trafodan çekeceği toplam akım,

$$I_{yük2} = \frac{P}{\sqrt{3}U\cos\varphi_2} = \frac{(630)10^3}{\sqrt{3}(400)(0.984)} = 924.11A$$

$$\frac{I_{yük2}}{I_n}100 = \frac{924.11}{1443}100 = \%64$$

Dolayısıyla şebekemizi besleyen transformatörümüz %64 oranında akım ile yüklenmiştir. Sonuç olarak aynı aktif yük için transformatör %90 yerine güç katsayısı düzeltildikten sonra %64 oranında yüklenmiştir. Transformatör aynı aktif yük için %26 daha az yük akımı ile yüklenmiştir.

Kompanzasyon öncesi ve sonrasında çekilen akım ve güç ile ilgili, denlem (Ek.30) ve denklem (Ek.31)'deki gibi bir bağıntı oluşturulabilir.

$$I_{yük1} = \frac{P}{\sqrt{3}U\cos\varphi_1} \text{ ve } I_{yük2} = \frac{P}{\sqrt{3}U\cos\varphi_2}$$

$$\frac{I_{yük1}}{I_{yük2}} = \frac{\frac{P}{\sqrt{3}U\cos\varphi_1}}{\frac{P}{\sqrt{3}U\cos\varphi_2}} = \frac{\cos\varphi_2}{\cos\varphi_1}$$

$$I_{yük2} = (I_{yük1})\frac{\cos\varphi_1}{\cos\varphi_2} \quad \text{(Ek.30)}$$

Buna göre; $I_{yük2} = (I_{yük1})\frac{\cos\varphi_1}{\cos\varphi_2} = (I_{yük1})\frac{0.7}{0.984} = 0.711(I_{yük1})$ bulunur.

Dolayısıyla hat akımı (1-0.711=0.2886) %28.86 azalmış olur.

$P_1 = 3(I_{yük1})^2 R$ ve $P_2 = 3(I_{yük2})^2 R$

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{3(I_{yük1})^2 R}{3(I_{yük2})^2 R} = (\frac{I_{yük1}}{I_{yük2}})^2 = (\frac{\cos\varphi_2}{\cos\varphi_1})^2$$

$$P_2 = (\frac{\cos\varphi_1}{\cos\varphi_2})^2 (P_1) \quad \text{(Ek.31)}$$

Buna göre; $P_2 = (\frac{\cos\varphi_1}{\cos\varphi_2})^2 P_1 = (\frac{0.7}{0.984})^2 P_1 = 0.506(P_1)$ bulunur.

Güç katsayısını 0.7'den 0.984'e yükselterek hat üzerinde meydana gelecek olan enerji kaybı (1-0.506=0.493) %49.3 oranında azalmış olur.

Kompanzasyon yapılmış bir tesiste gerilim de (bara gerilimi) bir miktar yükselir. Kapasitif yükten dolayı transformatör üzerindeki % gerilim artışı da deklem (Ek.32)'deki gibi hesaplabilir.

$$\%\varepsilon = \%u_k \frac{Q_C}{S_{tr}} \text{ Volt} \qquad \text{(Ek.32)}$$

Burada;

%ε: Kompanzasyondan dolayı % gerilim artışı,
%uk: Devreyi besleyen transformatörün % empedansı,
Qc: Devreye bağlı bulunan kondansatör gücü,
Str: Devreyi besleyen transformatörün gücü.

$$\%\varepsilon = \%u_k \frac{Q_C}{S_{tr}} = (6.03)\frac{529.2kVAr}{1000kVA} = 3.19 = \%0.0319\,\text{V olur.}$$

Kompanzasyon sonrası kondansatör uçlarındaki gerilim değeri hesabı formülü denklem (Ek.33)'de verilmiştir.

$$\sum U_C = U_n + (Un\%\varepsilon) \qquad \text{(Ek.33)}$$

Burada;

Uc: Kompanzasyon sonrası kondansatör uçlarındaki gerilim değeri,
%ε: Kompanzasyondan dolayı % gerilim artışı,
U_n: Gerilim değeri.

Transformatör'ün AG barasındaki gerilim kompanzasyon öncesinde 400 V iken devresine bağladığımız 529.2 kVAr'lık kondansatörden sonra kondansatör uçlarındaki (baradaki) gerilim:

$\sum U_C = U_n + (Un\%\varepsilon) = 400 + (400)(0.0319) = 412.76 Volt$ değerine yükselir.

Aşırı kompanzasyon'a giderek bara gerilimini belirli sınırların üzerine çıkarılırsa, özellikle kondansatörler için artan gerilimler tehlike oluşturabilir. Şekil Ek.5'de verilmiş olan tesisin hesaplanmış olan reaktif gücün tek hat şeması Şekil Ek.6'da gösterilmiştir.

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığının, elektrik projelerinin hazırlanması ve elektirik tesislerinin gerçekleştirilmesi sürecinde güç faktörünün iyileştirilmesiyle ilgili tebliğ'de degişiklik yapılmasına dair tebliğe göre; "Sabit kondansatör grubu öncelikle güç transformatörünün boştaki sabit reaktif kayıplarını kompanze edecek şekilde bulunacak bu hesabın yapılamadığı durumlarda, kompanzasyon sisteminde yanlızca sabit grup devredeyken elektrik tesisinin güç faktörü istenilen değerde kalmak şartıyla, güç transformatörü anma gücünün yaklaşık %3 ile %5 arasında seçilen birinci kondansatör grubu sabit ve sürekli olarak işletmede kalacak, öbür gruplar otomatik olarak devreye girip çıkacak şekilde tesis edilecektir. Sabit grup ana otomatik şalterden önce veya sonra bağlanabilir. Sabit grubun ana otomatik şalterden önce bağlanması durumunda gerekli teknik emniyet tedbirleri (uyarı levhası, vb.) alınmalıdır. Sabit kondansatör gücü, sistemde istenmeyen harmoniklerde rezonansa sebep olmayacak şekilde hesaplanmalıdır." denmektedir. Tebliğe göre, sabit kondansatör değeri güç transformatörü anma gücünün yaklaşık %3 ile %5 arasında olmalı, yani 1 000 kVA'lik bir trafo için 30 kVAr ile 50 kVAr arasında seçilmesi gerekir. Fakat sabit kondansatörün 30 kVAr ile 50 kVAr arasında seçilmesinden dolayı tesislerde yapılan ölçümlerde kapasitif değerin istenilen değer üzerinde olduğu tespit edildiğinden dolayı, sabit kondansatör kapasitesi denklem (Ek.34)'deki şekliyle alınması daha uygun olacaktır.

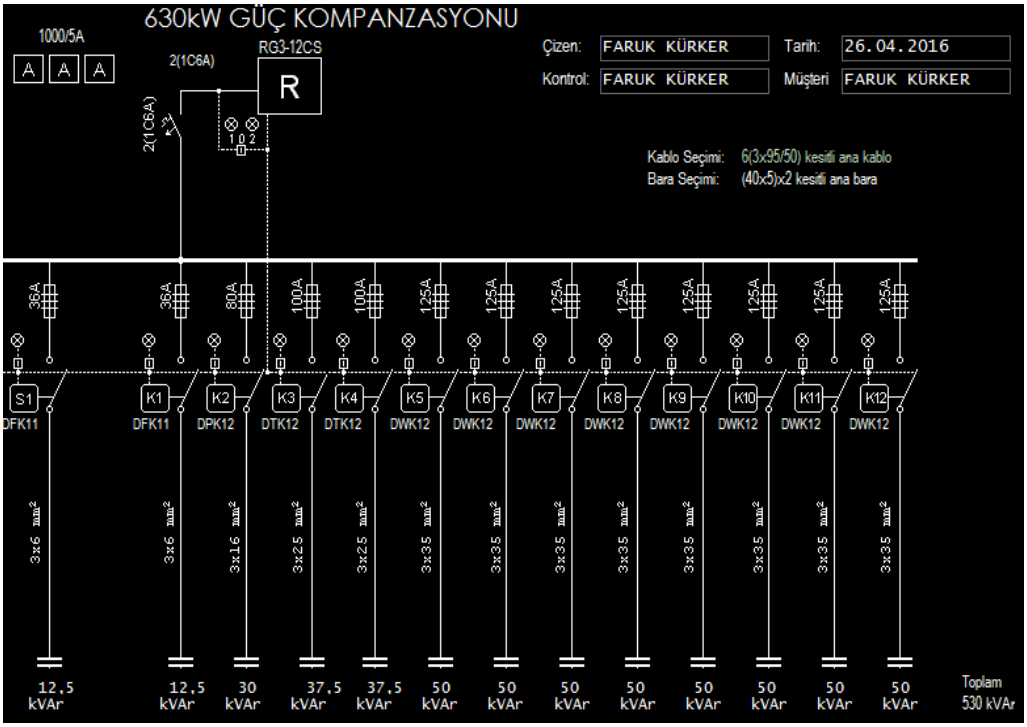
$$Q_{Co} = N_{kVA}(0.0125)kVAr \quad \text{(Ek.34)}$$

Burada;

Q_{C0}: Kompanzasyon sisteminde kullanılacak sabit kondansatör kapasitesi (kVAr),
N_{kVA}: Trafo gücü (kVA).

$Q_{Co} = 1000(0.0125) = 12.5kVAr$ bulunur.

Aşağıdaki tek hat şemasında tesis enerjisini direk trafodan aldığı için sabit 12.5 kVAr'lık konsansatör kullanılmıştır. Sabit kondansatör dışında kondansatör yerleşimi 12.5 kVAr - 30 kVAr – 37.5 kVAr – 37.5 kVAr - 50 kVAr - 50 kVAr - 50 kVAr - 50 kVAr - 50 kVAr - 50 kVAr - 50 kVAr - 50 kVAr şeklinde olabilir. Toplamda 530 kVAr'lık kondansatör grubu kullanılabilir.



Şekil Ek.6. Şekil Ek.5'de hesaplanmış olan reaktif gücün tek hat gösterimi

Bir başka tesis üzerinde sabit kondansatör kullanmaksızın örnek hesaplama yapacak olursak; Toplam kurulu gücü P=140 kW ve Cosφ=0.7 olduğuna göre, Cosφ=0.984'e yükseltilmesi için gerekli kondansatör gücünü hesaplayacak olursak; (Talep faktörü=0.7).

P=140(talep faktörü)=900(0.7)=98 kW aynı anda çalışabilecek güç değeri,

$\cos\varphi_1=0.7$ ise $\tan\varphi_1=1.02$

$\cos\varphi_2=0.984$ ise $\tan\varphi_2=0.18$

Güç katsayısı düzeltillmeden önce çekilen akım,

$$I_1=\frac{P}{\sqrt{3}U\cos\varphi_1}=\frac{(98)10^3}{\sqrt{3}(400)(0.7)}=202.07A$$

Güç katsayısı düzeltildikten sonra çekilen akım,

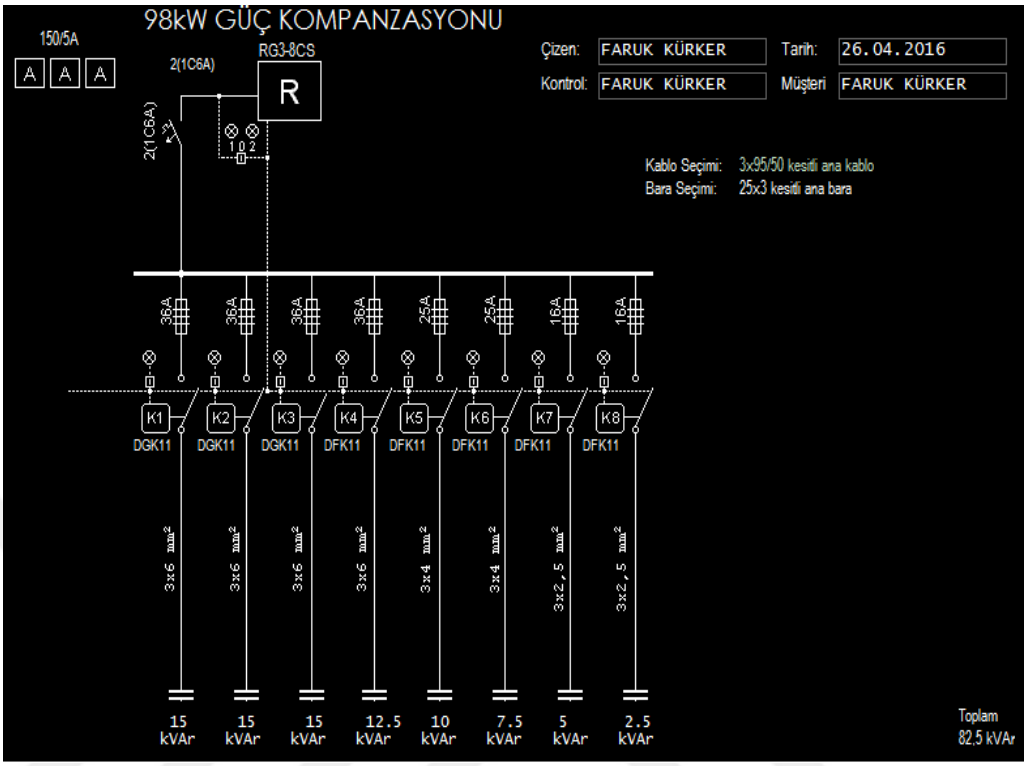
$$I_2=\frac{P}{\sqrt{3}U\cos\varphi_2}=\frac{(98)10^3}{\sqrt{3}(400)(0.984)}=143.75A$$

Gerekli kondansatör gücü,

$Q_C=P(\tan\varphi_1-\tan\varphi_2)=98(1.02-0.18)=82.32kVAr$ bulunur.

Toplam kurulu gücü P=140 kW olan tesisin hesaplanmış olan reaktif gücün tek hat şeması Şekil Ek.7'de gösterilmiştir.

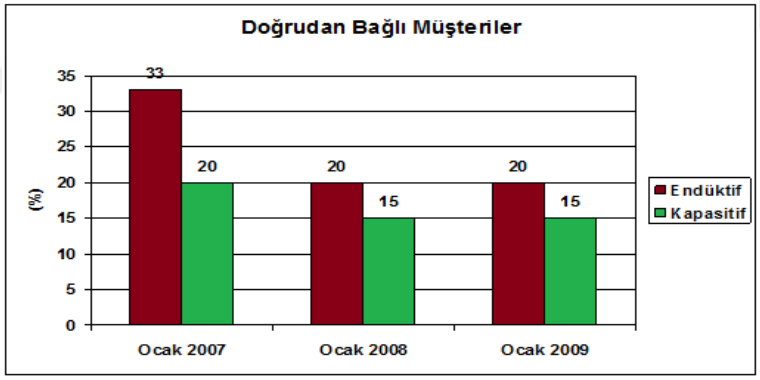
Reaktif gücü hesaplanmış olan tesiste kondansatör yerleşimi 15 kVAr - 15 kVAr - 15 kVAr – 12.5 kVAr - 10 kVAr – 7.5 kVAr - 5 kVAr – 2.5 kVAr şeklinde olabilir. Toplamda 82.5 kVAr'lık kondansatör grubu kullanılabilir.



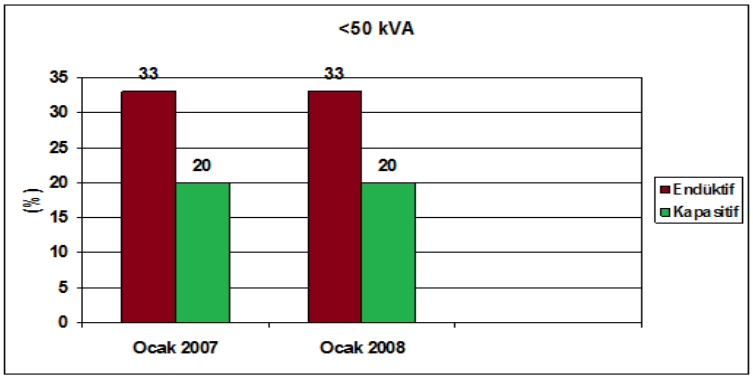
Şekil Ek.7. Kurulu gücü P=140 kW olan tesisin hesaplanmış olan reaktif gücün tek hat gösterimi

Ek 6: EPDK Tarafından Yayınlanan Reaktif Güç Yönetmelikleri ve Reaktif Enerji Tarifesi

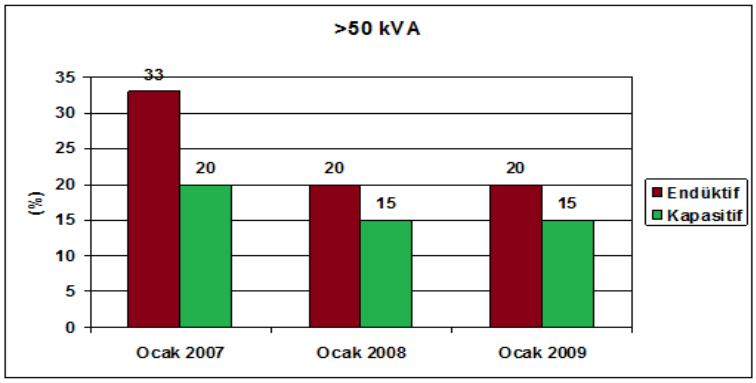
EPDK tarafından 10.11.2004 tarihinde yayınlanan ve 09.01.2007 tarihinde bazı maddeleri değiştirilen elektrik iletim sistemi arz güvenliği ve kalite yönetmeliği de 12.09.2006 tarihinde yayınlanan elektrik piyasasında dağıtım sisteminde sunulan elektrik enerjisinin tedarik sürekliliği, ticari ve teknik kalitesi hakkında yönetmelik vasıtasıyla elektrik dağıtım şirketlerinin ve müşterilerin Türkiye genelinde uymakla yükümlü oldukları güç kalitesi ve güç faktörü kriterleri yeniden belirlenmiştir. Yönetmeliklerle dağıtım şirketleri ve tüketici, gereken güç faktörü değerleri bazında bir dizi yükümlülükler altına girmişlerdir. Şekil Ek.8, Şekil Ek.9 ve Şekil Ek.10'da 2007, 2008 ve 2009 yıllarında yapılmış olan reaktif tarife değişimleri görülmektedir.



Şekil Ek.8. Yıllara göre reaktif tarife değişimi tg φ



Şekil Ek.9. 50 kVA'den küçük olan reaktif tarife değişimi tg φ



Şekil Ek.10. 50 kVA'den büyük olan reaktif tarife değişimi tg φ

30 Aralık 2012 ve 28513 sayı ile resmi gazetede yayınlanan enerji piyasası düzenleme kurumundan, elektrik piyasası müşteri hizmetleri yönetmeliğinde değişiklik yapılmasına dair yönetmelik gereğince;

Madde 1: 25.09.2002 tarihli ve 24887 sayılı Resmî Gazete'de yayımlanan Elektrik Piyasası Müşteri Hizmetleri Yönetmeliğinin 16. Maddesinin dördüncü fıkrası 30 Aralık 2012 ve 28513 sayı ile Resmî Gazete'de yayımlanan Elektrik Piyasası Müşteri Hizmetleri Yönetmeliğinin 5. bölümünün 16. maddesinin beşinci fıkrasında aşağıdaki şekilde değiştirilmiştir. "Reaktif enerji miktarını ölçmek üzere gerekli ölçme düzeneği, ilgili mevzuata göre reaktif enerji tarifesi uygulanmayacak aboneler dışında kalan müşteriler tarafından tesis edilir. Bu müşterilerden, kurulu gücü 50 kVA'nın altında olanlar, çektikleri aktif enerji miktarının yüzde otuzüçünü aşan şekilde endüktif reaktif enerji tüketmeleri veya aktif enerji miktarının yüzde yirmisini aşan şekilde kapasitif reaktif enerji tüketmeleri halinde; kurulu gücü 50 kVA ve üstünde olanlar ise, çektikleri aktif enerji miktarının yüzde yirmisini aşan şekilde endüktif reaktif enerji tüketmeleri veya aktif enerji miktarının yüzde onbeşini aşan şekilde sisteme kapasitif reaktif enerji vermeleri halinde, reaktif enerji tüketim bedeli ödemekle yükümlüdür. Endüktif ve kapasitif enerji tüketimleri itibarıyla söz konusu sınırların ikisini birden aşan veya reaktif enerji ölçme düzeneğini kurma yükümlülüğü bulunmasına rağmen kurmayan ya da mevzuat hükümlerine uygun olarak kurmayan müşterilerin ödemeleri gereken reaktif enerji

bedeline ilişkin usul ve esaslar elektrik piyasası tarifeler yönetmeliği ve ilgili tebliğleri çerçevesinde kuruma sunulan tarife önerilerinde yer alır."

Madde 2: Aynı yönetmeliğe aşağıdaki geçici madde eklenmiştir. "1/1/2007 tarihinden itibaren kurulu gücü 50 kVA ve üstünde olan müşteriler çektikleri aktif enerji miktarının yüzde otuzüçünü aşan şekilde endüktif reaktif enerji tüketmeleri veya tükettikleri aktif enerji miktarının yüzde yirmisini aşan şekilde sisteme kapasitif reaktif enerji vermeleri halinde, reaktif enerji tüketim bedeli ödemekle yükümlüdür. Bu müşteriler için 1/1/2008'den itibaren Yönetmeliğin 16 ncı maddesi hükümlerinde yer alan oranlar uygulanır.".

Madde 3: Bu Yönetmelik hükümleri, 1/1/2013 tarihinde yürürlüğe girer.

Madde 4: Bu Yönetmelik hükümlerini Başkan yürütür.

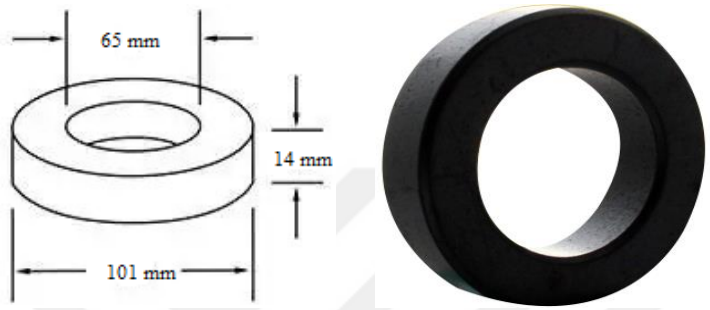
Enerji piyasası düzenleme kurumu tarafından resmi gazetede ilan edilen reaktif enerji tarifesi kısaca Çizelge Ek.3'de özetlenmiştir.

Çizelge Ek.3. EPDK tarafından düzenlenen reaktif enerji tarifesi

	Kurulu Gücü <50kVA	**Kurulu Gücü >50kVA**
Endüktif	$tg\varphi_1 \leq 0.33$	$tg\varphi_1 \leq 0.20$
Kapasitif	$tg\varphi_2 \leq 0.20$	$tg\varphi_2 \leq 0.15$

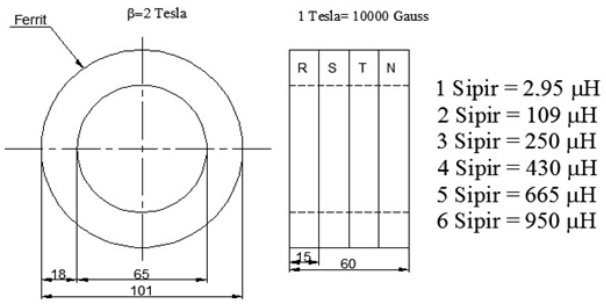
Ek 7: Bobinde kullanılacak toroid nüve, kondansatör önüne bağalanacak seri endüktans ve örnek hesaplamaları

Bobinde kullanılacak toroid nüve örnek Şekil Ek.11'de görülmektedir.



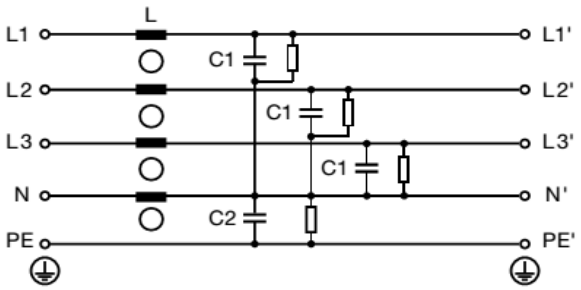
Şekil Ek.11. Bobinde kullanılacak toroid nüve

Kullanacağımız bobin kaç sipirlik ise değerini daha önce tespit edilmiş olan Şekil Ek.12'deki değerlere göre alabiliriz. Rezonans frekansı formülünden kapasitans değeri de hesaplanabilir.



Şekil Ek.12. Bağlanacak olan bobinin sipir sayısına göre değerleri

Oluşan harmoniği bastıracak olan örnek bir filtrenin şeması Şekil Ek.13'de verildiği gibi alınabilir.



Şekil Ek.13. Oluşan harmoniği bastıracak olan örnek bir filtre

Bir örnek hesaplama yapılacak olursa;

1000 kVA'lık, $\%u_k$=6, U=400 V bir transformatörün olduğu tesiste enerji analizörü ile yapılan ölçümde 3. harmoniğin etkin olduğu tespit edilmiştir. Ntr=400 kVA, $\cos\varphi_1$=0.80 ise φ_1=36.86° ve $\tan\varphi_1$=0.75 ve EPDK tarafından istenen $\cos\varphi_2$=0.984 ise φ_2=10.26° ve $\tan\varphi_2$=0.181'dir. Buna göre gerekli kondansatör gücü, reaktör ve filtre hesaplanacak olursa;

$$Q_C = (0.95)N_{Tr}(\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2) = (0.95)(1000)(0.75 - 0.181) = 540.55kVAr \cong 540kVAr$$

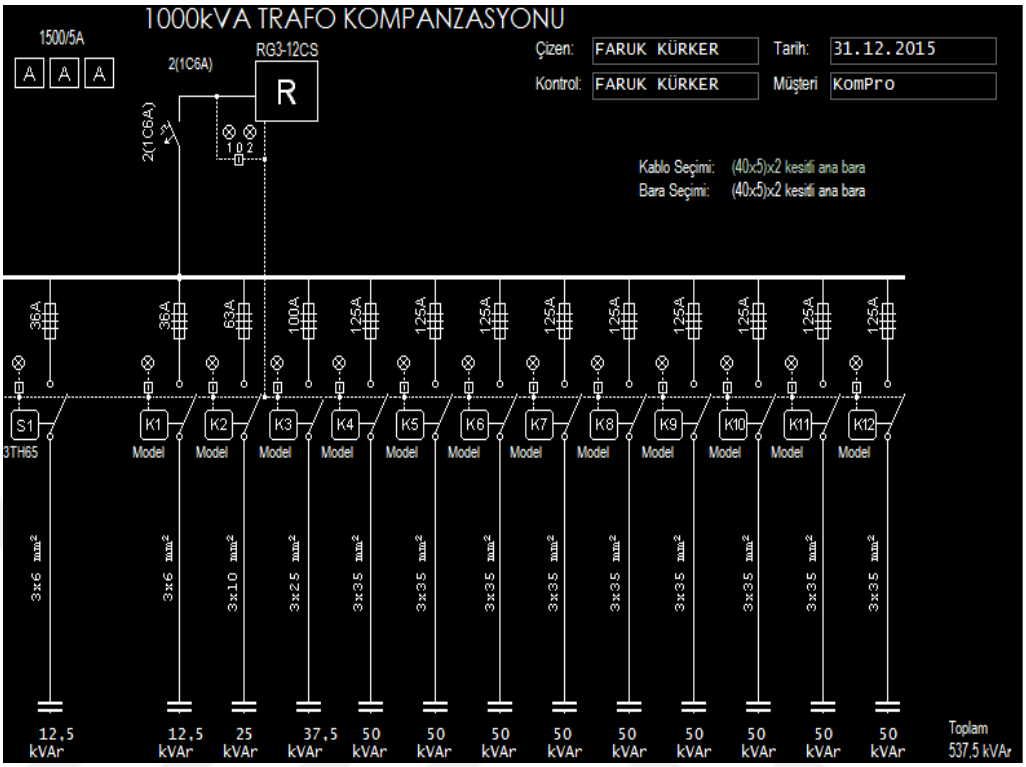
Kompanzasyon sisteminde kullanılacak sabit kondansatör kapasitesi (kVAr) olarak hesaplanır. Kompanzasyonun tek hat şeması şekil Ek.14'de görülmektedir.

$$Q_{Co} = N_{kVA}(0.0125) = (1000)(0.0125) = 12.5kVAr$$

3. Harmonik için;

$$U_C = U_r = \frac{U_n}{(1-p)} = \frac{400}{(1-014)} = 465V$$

400V – 440V – ***480V*** – ***525V*** – 600V – 660V



Şekil Ek.14. Tesisinin tahmini reaktif güç tek hat şeması

$$Q_r = (\frac{U_r}{U_n})^2 (1-p) Q_n = (\frac{525}{400})^2 (1-0.14)(50) = 74 kVAr$$

Kondansatör önüne seri endüktans bağlanacak olursa, kondansatör 400V 50 Hz sisteminde %14 reaktör ile 50 kVAr güç sağlamak için 3. Harmonikte 525V'da 74 kVAr değerine uygun olarak seçilmelidir. Kondansatör grupların önüne konulacak reaktörlerin değerlerinin hesaplanması;

19 kVAr kondansatör önüne konulacak reaktör hesabı;

$$X_{C19} = \frac{V_C^2}{Q_{19}} = \frac{525^2}{19000} = 14.50658\Omega$$

$$X_{C19} = \frac{1}{2\pi f C_{19}} \Rightarrow C_{19} = \frac{1}{2\pi f X_{C19}} = \frac{1}{(2)(3.14)(50)(14.5065)} = 0.219 mF$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \Rightarrow L = \frac{1}{(2\pi f_r)^2 C} = \frac{1}{((2)(3.14)(134))^2 (0{,}219)10^{-3}} = 6.42mH$$

Bu reaktörün akım taşıma kapasitesi hesabı;

$$I_{C19} = \frac{Q_{19}}{V_C\sqrt{3}} = \frac{19000}{(525)\sqrt{3}} = 20.894A$$

19 kVAr kondansatör grupları için kullanılacak reaktör değeri 6,429 mH ve 20,894 A akım taşıma gücünde olacaktır. Kondansatör için 3. harmonikte hesap yapıldığında Çizelge E.4'deki sonuç elde edilir.

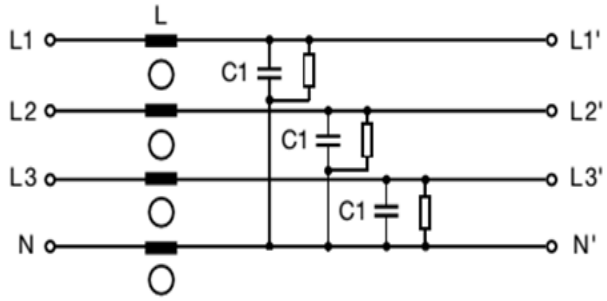
Çizelge Ek.4. 3. harmonikte hesaplanan değerler

Harmonik Bileşen	**Q_C**	**U_C**	**L**	**I**	**Q_r**
3.	50 kVAr	525 V	1.65 mH	81.378 A	74 kVAr
3.	37.5 kVAr	525 V	2.18 mH	61.584 A	56 kVAr
3.	25 kVAr	525 V	3.30 mH	40.689 A	37 kVAr
3.	12.5 kVAr	525 V	6.429 mH	20.894 A	19 kVAr

Ayrıca oluşan harmonikleri bastırmak için harmonik reaktör yanısıra kullanılacak olan pasif filtre için L ve C'in hesabı rezonans frekansına göre hesaplanır. Rezonans frekansı $f_0 = 1/2\pi\sqrt{LC}$, 3. harmonikte 150 Hz, 5. harmonikte 250 Hz ve 7. harmonikte 350 Hz'dir. Oluşan harmoniği bastıracak olan filtrenin bağlantısı Şekil E.14'de verilmiştir. Kullanacağımız bobin 5 sipirlik olduğu için Şekil Ek.12'ye göre L=0,665mH alınır. Rezonans frekansı formülünden kapasitans değeri de hesaplanabilir. 3. harmonikte;

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \Rightarrow 150 = \frac{1}{2\pi\sqrt{(665)10^{-6}C_1}} \Rightarrow C_1 = 1.692mF$$ elde edilir.

Oluşan harmoniği bastıracak olan örnek bir filtrenin şeması Şekil Ek.15'de verildiği gibi alınabilir.



Şekil Ek.15. Oluşan harmoniği bastıracak olan pasif filtre bağlantısı

Örnek hesaplama yapılacak olursa;

100 kW gücündeki asenkron motorun güç katsayısını 0.75'den 0.984'e çıkarmak için gerekli kondansatör kapasitesini, 5. ve 7. harmonik frekansları yok etmek için kullanılacak olan reaktörün değerini hesaplayacak olursak; (Cosφ_1=0.80 ise φ_1=36.86° ve tanφ_1=0.75 ve EPDK tarafından istenen Cosφ_2=0.984 ise φ_2=10.26° ve tanφ_2=0.181'dir). Buna göre;

$$Q_C = P(\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2) = (100)(0.75 - 0.181) = 56.9kVAr \cong 57kVAr$$

Bu kapasite değeri, 5. ve 7. harmonik frekansları yok etmek için kullanılırsa her bir kademe için gerekli güç;

57/2 = 28.5 kVAr bulunur.

$$X_C = \frac{U^2}{Q_C} = \frac{(400)^2}{(28.5).10^3} = 5.614\,\Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{1}{(2\pi)(50)(5.614)} = 566.985\mu F$$

3. harmonik rezonans frekansı, şayet bobin manyetik nüveli olacaksa, uygulamalarda 134 Hz, 5. harmonikte 189 Hz ve 7. harmonikte 210 Hz civarında seçilir. Hava nüveli bobinlerde rezonans frekansı harmoniğin kendi frekansında seçilir. Bundan maksat, 5. harmoniği baskın olan sistemde, sistemi 5. harmoniğin frekansı olan 250 Hz de rezonansa getirirsek bu durumda 5. harmoniğin bütün genliği kompanzasyon sistemine akacak, bu da kompanzasyon sistemine zarar verebilecektir. Bu nedenle filtre sistemi, sistemde mevcut olan baskın harmoniğin frekansına yakın frekanslarda rezonansa getirilmekte ve böylece sistemde baskın olan harmoniğin genliği önemli ölçüde azaltılmaktadır. Bu, baskın olmayan diğer harmonik mertebeleri üzerinde de etki göstereceğinden sistemdeki THB seviyesi önemli ölçüde düşecektir. Bahsedilen, 5. harmonik için 189 Hz değeri zamanla uygulamadan kazanılan tecrübelerden elde edilmiş verilerdir. Bu durumda kondansatörün reaktansı,

$$X_{C5} = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{(2\pi)(189)(566{,}985).10^{-6}} = 1.4852\,\Omega$$

$$X_{C7} = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{(2\pi)(210)(566.985).10^{-6}} = 1.3366\,\Omega$$

Rezonansta $X_L=X_C$ olacağından,

$$L_5 = \frac{X_{L5}}{2\pi f} = \frac{1.4852}{(2\pi)(189)} = 125mH$$

$$L_7 = \frac{X_{L7}}{2\pi f} = \frac{1.3366}{(2\pi)(210)} = 1.013mH$$

Çizelge Ek.5. Kompanzasyon sistemi için endüktans seçim tablosu (http://www. hilkar.com)

Type		Q_{cn} (kVAr) 50 Hz			C_y (µF)	L_n(mH)		I_n (A)	Loss (W)	Weight (kg)	(mm)				
		400 V	440 V	525 V		p=%5,67 (fr=210 Hz)	p=%7 (fr=189 Hz)				L	I	B	H	b
HFR5/4/5	K6	4.7	5.7	8.1	3x32	6.12	-	7.65	50	10,5	180	120	95	160	85
HFR5/4/7	K6	4.7	5.6	8	3x31	-	7.66			11	180	120	95	160	85
HFR10/4/5	K6	9.4	11.4	16.2	3x63	3.06	-	15.3	65	12	180	120	95	160	85
HFR10/4/7	K6	9.3	11.2	16	3x62	-	3.84			12	180	120	95	160	85
HFR15/4/5	P8	14.1	17.1	24.3	3x93	2.04	-	23	76	23	240	160	160	210	112
HFR15/4/7	P8	13.9	16.8	23.9	3x93	-	2.56			24	240	160	160	210	112
HFR20/4/5	P8	18.8	22.8	32.4	3x125	1.53	-	30.6	100	25	240	160	160	210	112
HFR20/4/7	P8	18.5	22.4	31.8	3x125	-	1.92			25	240	160	160	210	112
HFR25/4/5	P8	23.6	28.5	40.6	3x156	1.22	-	38	130	25	240	160	160	210	112
HFR25/4/7	P8	23.2	28.1	40	3x154	-	1.53			26	240	160	160	210	112
HFR30/4/5	P8	28.2	34.1	46.6	3x188	1.02	-	46	140	25	240	160	160	210	112
HFR30/4/7	P8	27.8	33.6	47.8	3x185	-	1.28			26	240	160	160	210	112
HFR40/4/5	P10	37.9	45.8	65.2	3x252	0.76	-	61	150	33	300	200	170	260	120
HFR40/4/7	P10	37	44.8	63.8	3x247	-	0.96			36	300	200	170	260	120
HFR50/4/5	P10	47.2	57.1	81.3	3x314	0.61	-	76.5	160	36	300	200	170	260	120
HFR50/4/7	P10	46.2	55.8	79.5	3x308	-	0.77			36	300	200	170	260	120

Çizelge Ek.5'den, 5. harmonik için 189 Hz frekans ve L=1,25 mH bu ihtiyacı karşılayacak reaktör kayıp gücü 140 W ve nominal akım (I_n) 46 A seçilirse, reaktörün omik direnci;

$$P_{Loss} = I_n{}^2 R \Rightarrow R = \frac{P_{Loss}}{I_n{}^2} = \frac{140}{(46)^2} = 0.066\,\Omega \text{ elde edilir.}$$

Çizelge Ek.5'den, 7. harmonik için 210 Hz frekans ve ve L=1.013 mH bu ihtiyacı karşılayacak reaktör kayıp gücü 140 W ve nominal akım (I_n) 46 A seçilirse, reaktörün omik direnci;

$$P_{Loss} = I_n{}^2 R \Rightarrow R = \frac{P_{Loss}}{I_n{}^2} = \frac{140}{(46)^2} = 0.066\,\Omega \text{ elde edilir.}$$

Ek 8: Elektrik piyasasında dağıtım sisteminde sunulan elektrik enerjisinin tedarik sürekliliği, ticari ve teknik kalitesi hakkında yönetmelik

Elektrik dağıtımı ve perakende satışına ilişkin hizmet kalitesi yönetmeliğinin 23. maddesinde belirtildiğine göre, sistem frekansı, 22.01.2003 tarihli ve 25001 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanan Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliğinde belirtilen sınırlar içerisinde TEİAŞ tarafından kontrol edilir. Dağıtım şirketi; sunduğu elektrik enerjisinin kalitesine ilişkin aşağıdaki işletme şartlarını sağlamakla yükümlüdür. Dağıtım şirketi, TS EN 50160:2011 standardında tanımlanan ve Çizelge Ek.7'de gösterilen gerilim harmonik sınır değerlerine uymakla yükümlüdür. Ek.7'deki değerler her bir gerilim harmoniğinin ana bileşene göre oransal değerlerini ifade eder. Ölçüm periyodu boyunca ölçülen her bir gerilim harmoniği etkin değerinin 10'ar dakikalık ortalamalarının en az % 95'i, Çizelge Ek.13'de verilen değerlerden küçük veya bu değerlere eşit olmalıdır.

Bununla birlikte, THB değeri (40. harmoniğe kadar değerler dâhil) en fazla % 8 olarak uygulanır. Dağıtım şirketinin gerilim harmoniklerine ilişkin performansı, AG ve OG seviyesi için esas olarak bağlantı noktasından ölçülür. Ancak, dağıtım şirketinin uygun görmesi halinde ölçme, faturalandırmaya esas ölçüm noktasından da yapılabilir. Harmonik bozulmaya ilişkin bu şartın ihlal edilmesi durumunda, dağıtım şirketi hakkında Kanunun 16'ncı maddesi hükümleri çerçevesinde işlem yapılır. (http://www.epdk.org.tr/TR/DokumanDetay/Elektrik/Mevzuat/Yonetmelikler/ElektrikDagitimiPerakendeSatisinaHizmetKalitesi).

Reaktif enerji bedeli uygulanan dağıtım sistemi kullanıcıları IEEE Std.519-1992 standardında ya da bunun revizyonlarında belirtilen aşağıdaki harmonik sınır değerlerine uymakla yükümlüdür. Ölçüm periyodu boyunca ölçülen her bir akım harmoniğinin etkin değerinin ve TTB'nin 3'er saniyelik ortalamalarının I_L'e göre oransal değerleri Çizelge Ek.8'de verilen değerlerden küçük veya bu değerlere eşit olmalıdır. Kullanıcının akım harmoniklerine ilişkin performansı, AG ve OG seviyesi için esas olarak bağlantı noktasından ölçülür. Ancak, dağıtım şirketinin ihtiyaç duyması halinde ölçme,

faturalandırmaya esas ölçüm noktasından da yapılabilir. Ancak, bu durumda OG kullanıcıları için transformatör sargıları arasındaki akım harmonikleri geçişi dikkate alınmalıdır. Harmonik bozulmaya neden olan kullanıcıya, dağıtım şirketi tarafından durumun düzeltilmesi için AG kullanıcısı olması durumunda en fazla 60 iş günü, OG kullanıcısı olması durumunda ise en fazla 120 iş günü süre tanınır. Kullanıcıya yapılan bildirimde, verilen sürenin sonunda durumun düzeltilmemiş olmasının tespiti halinde bağlantısının kesileceği bildirilir. Verilen sürenin sonunda, kullanıcı tarafından kusurlu durumun giderilmemesi halinde, kullanıcının bağlantısı kesilir. (http://www.epdk.org.tr/TR/DokumanDetay/Elektrik/Mevzuat/Yonetmelikler/ElektrikDagitimiPerakendeSatisinaHizmetKalitesi).

Çizelge Ek.6'da gerilim için harmonik distorsiyon sınırları, Çizelge Ek.7'de gerilim harmonikleri için sınır değerler, Çizelge Ek.8'de harmonikler için maksimum yük akımına (I_L) göre sınır değerler, Çizelge Ek.9'da flicker şiddeti için sınır değerler, Çizelge Ek.10'da kullanıcı başına yıllık maksimum kesinti süresi hedefleri, Çizelge Ek.11'de kullanıcı başına yıllık maksimum kesinti sayısı hedefleri, Çizelge Ek.12'de eşik kesinti süresi ve sayıları görülmektedir.

Çizelge Ek.6. Gerilim için harmonik distorsiyon sınırları
(http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6826459)

Bara Gerilimi (V_n)	Tekil Harmonik Büyüklüğü %	(Toplam Harmonik Distirsiyonu) THD (%)
$V_n \leq 1kV$	5.0	8.0
$1 < V_n \leq 69kV$	3.0	5.0
$69 \leq V_n \leq 161kV$	1.5	2.5
$V_n > 69kV$	1.0	1.5

Çizelge Ek.7. Gerilim harmonikleri için sınır değerler (http://www.epdk.org.tr/TR/DokumanDetay /Elektrik/Mevzuat/Yonetmelikler/ElektrikDagitimiPerakendeSatisinaHizmetKalitesi)

Tek Harmonikler				Çift Harnomikler	
3'ün Katları Olmayanlar		3'ün Katları Olanlar			
Harmonik Sırası h	Sınır Değer (%)	Harmonik Sırası h	Sınır Değer (%)	Harmonik Sırası h	Sınır Değer (%)
5	% 6	**3**	**% 5**	2	% 2
7	% 5	9	% 1,5	4	% 1
11	% 3.5	15	% 0.5	6…..24	% 0.5
13	% 3	21	% 0.5		
17	% 2				
19	% 1.5				
23	% 1.5				
25	% 1.5				

Çizelge Ek.8. Harmonikler için maksimum yük akımına (I_L) göre sınır değerler (http://www.epdk.org.tr/ TR/DokumanDetay/ Elektrik/Mevzuat/Yonetmelikler/ElektrikDagitimiPerakendeSatisina HizmetKalitesi)

Tek Harmonikler (Vn≤69 kV)						
I_{SC}/I_L	<11	11≤h<17	17≤ h<23	23≤ h<35	35≤h	THD
<20*	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	**15.0**
1000>	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	**20.0**
Çift harmonikler, kendinden sonraki tek harmonik için tanımlanan değerin %25'i ile sınırlandırılmıştır.						

Bu tabloda belirtilen I_{SC}/I_L oranı, şebeke ortak bağlantı noktasındaki (PCC) kısa devre akımının tesis yük akımına oranını ifade eder.

Çizelge Ek.9. Flicker şiddeti için sınır değerler (http://www.epdk.org.tr/TR/DokumanDetay/Elektrik/ Mevzuat/Yonetmelikler/ElektrikDagitimiPerakendeSatisinaHizmetKalitesi)

Flicker Şiddeti Endeksi	Sınır Değerler
P_{st}	≤1.0
P_{lt}	≤0.8

P_{st}: Short Term Flicker Effect-Kısa Vadeli Kırpışma Etkisi

(10 dakikalık periyotlarla ölçülen flicker şiddet endeksi)

P_{lt}: Long Term Flicker Effect-Uzun Vadeli Kırpışma Etkisi

Çizelge Ek.10. Kullanıcı başına yıllık maksimum kesinti süresi hedefleri

	2007	2008	2009	2010
İmar Alanı İçi-OG	8 saat	7 saat	6 saat	5 saat
İmar Alanı İçi-AG	14 saat	13 saat	12 saat	11 saat
İmar Alanı Dışı	20 saat	18 saat	16 saat	15 saat

Çizelge Ek.11. Kullanıcı başına yıllık maksimum kesinti sayısı hedefleri

	2007	2008	2009	2010
İmar Alanı İçi	6 saati aşan 4 kesinti	6 saati aşan 4 kesinti	5 saati aşan 3 kesinti	5 saati aşan 3 kesinti
İmar Alanı Dışı	9 saati aşan 6 kesinti	9 saati aşan 6 kesinti	8 saati aşan 5 kesinti	8 saati aşan 5 kesinti

Çizelge Ek.12. Eşik kesinti süresi ve sayıları (http://www.epdk.org.tr/TR/DokumanDetay/Elektrik /Mevzuat/Yonetmelikler/ElektrikDagitimiPerakendeSatisinaHizmetKalitesi)

Eşik Değer Adı	Kesinti Sınıfı	İmar Alanı İçindeki Kullanıcılar İçin		İmar Alanı Dışındaki Kullanıcılar İçin	
		AG	OG	AG	OG
Esüre (saat)	Bildirimsiz	48	24	72	36
Esayı (kez)		56	56	72	72
Esüre (saat)	Bildirimli	24	16	32	24
Esayı (kez)		6	4	8	6

I_{SC}: Şebekeye bağlantı noktasındaki kısa devre akımı (Amp).

I_L: Şebekeye bağlantı noktasındaki yükün max. Demand (herhangi bir anda 15 dk. boyunca çekilen azâmi güç akımı (Amp).

I_{SC}=50 000 A ve I_L=500 A olduğunda I_{TDH} hesaplanacak olursa;

$$\frac{I_{SC}}{I_L} = \frac{5000}{500} = 100$$ 100<1000 olduğundan harmonik TTB=I_{TDH}=%15 bulunur.

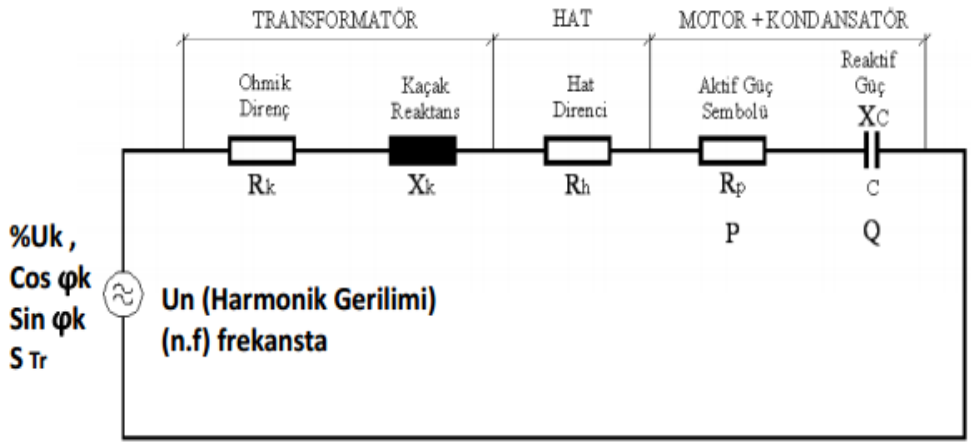
T_R=1 600 kVA, I_n=2 309 A, Uk=%6 ve I_L=1 800 A olduğunda I_{TDH} hesaplanacak olursa;

$$I_{SC} = \frac{2309}{0.06} = 38483.33A$$

$$\frac{I_{SC}}{I_L} = \frac{38483.33}{1800} = 21.379$$ 20<50 olduğundan TTB=I_{TDH}==%8 bulunur.

Ek 9: Transformatörlerde kaçak reaktans hesabı ve transformatörlerde kritik kondansatör gücü hesabı

Transformatörlerde kaçak reaktans hesabı; transformatör devresinin tek hat elektroteknik şeması şekil Ek.16'da görülmektedir. Transformatör kaçak reaktansı denklem (Ek.35)'deki formül ile bulunur. Formülde kısa devre faz açısı 0.7 alınır.



Şekil Ek.16. Transformatör devresinin tek hat elektroteknik şeması

$$X_k = nU_k \frac{U_n^2}{S_{TR}} Sin\varphi_k \quad \text{Ohm}(\Omega) \qquad \text{(Ek.35)}$$

Burada;

X_k : Transformatör kaçak reaktansı,

U_k : Trafonun nisbi kısa devre gerilimi,

U_n : U_n gerilimi n.f frekansında üretilen harmonik gerilimi,

S_{TR} : Nominal transformatör gücü,

$Sin\varphi_k$: Kısa devre faz açısı,

n : Harmonik mertebesidir.

Eğer motor devrede değilse, $P=Q_L=0$ olduğundan yalnız kondansatör ve tansformatörlerden meydana gelen özel seri devrede, kritik kondansatör gücü denklem (Ek.36)'da verilmiştir.

$$Q_{Cr} = \frac{S_{Tr}}{n^2 u_k Sin\varphi_k} \text{ kVar} \qquad \text{(Ek.36)}$$

Burada;

Q_{Cr} : Kritik kondansatör gücü,

u_k : Transformatörün bağıl kısa devre gerilimi,

S_{TR} : Nominal transformatör gücü,

$Sin\varphi_k$: Kısa devre faz açısı,

n : Harmonik mertebesi.

Bu formül motor devrede kalma halinde de kullanılabilir. Ayrıca bu formül ile o şebekede hangi harmoniklerde rezonans olayı meydana gelebileceği tespit edilebilir. Bir tesis kurulurken reaktif güç kompanzasyon gücünün paralel rezonans değerinden küçük olması dikkat edilmesi gereken hususların başında gelir. Rezonansın oluşmaması için rezonans gücünün kompanzasyon gücünden büyük olması gerekmektedir. Yani $Q_{Cr} > Q_C$ olmalıdır.

Transformatörlerde kritik kondansatör gücü hesabı; 100 kVA ile 400 kVA arasında güce sahip transformatörlerde,

$u_k = \%4 = 0.04$ ve $Sin\varphi_k = 0.7$

$u_k Sin\varphi_k = (0.04)(0.7) = 0.028$ alınabilir.

400 kVA'den büyük güçteki transformatörlerde, $u_k Sin\varphi_k = 0.1$ alınabilir.

100 kVA ile 400 kVA arasında güce sahip transformatörlerde kritik kondansatör gücü (Q_{Cr}), denklem (Ek.36)'de verilenler daha yalın haliyle denklem (Ek.37)'deki haliyle yazılabilir.

$$Q_{Cr} = \frac{S_{Tr}}{n^2(0.028)} \text{ kVar} \qquad \text{(Ek.37)}$$

400 kVA'den büyük güçteki transformatörlerde kritik kondansatör gücü (Q_{Cr}), denklem (Ek.36)'de verilen formül daha yalın haliyle denklem (Ek.38)'daki haliyle yazılabilir.

$$Q_{Cr} = \frac{S_{Tr}}{n^2(0.1)} \text{ kVar} \qquad \text{(Ek.38)}$$

Çizelge Ek.13. 400 kVA ve 400 kVA'dan büyük transformatörlerde rezonans oranları

Oran	Harmonik	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**
$\frac{Q_{Cr}}{S_{Tr}}$	$u_k Sin\varphi_k = 0.028$ 400 kVA	3.96	2.23	1.42	0.99	0.73	0.56	0.44	0.35	0.29
$\frac{Q_{Cr}}{S_{Tr}}$	$u_k Sin\varphi_k = 0.1$ 400kVA>	1.11	0.625	0.40	0.278	0.20	0.156	0.12	0.10	0.08

Çizelge Ek.13'de 400 kVA ve 400 kVA'dan büyük transformatörlerde rezonans oranları verilmiştir. Gerekli kondansatör gücü formülü denklem (Ek.24)'deki $Q_C = P(\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2)$ kVar formülü ile hesaplanır.

Rezonans olmaması için, $Q_{Cr} = \frac{S_{Tr}}{n^2 u_k Sin\varphi_k}$ kVar, $Q_{Cr} > Q_C$ olması gerekir.

Hesaplanan kondansatör sebebiyle kaçıncı harmonikte rezonans meydana geleceğine bakılacak olursa;

1. Motor ile kondansatör beraber devreye alınıp çıkarılırken rezonans tehlikesi oluşmaz.
2. Motorun birdenbire devreden çıkarılarak kondansatörlerin devrede kalması durumunda rezonans olayları meydana gelmektedir. Bu yüzden işletmede merkezi kompanzasyon yapılmışsa motorların ve diğer endüktif yüklerin devreden çıkarılmasında reaktif rölelelerin yeteri derecede hızlı olması gerekir. Çünkü kondansatörlerin devrede kesilmesi ile rezonans olayı meydana gelme ihtimali artar. Rölesiz, manuel olarak devrede kaldıklarında aynı olay meydana gelebilir. Enerji kesilmesinden sonra tekrar enerji gelirse kondansatörler direkt olarak devreye girer ve rezonans olayına sebep olabilirler. Bu sebeple manuel pozisyonunda kondansatörler start-stop butonu ile devreye alınmalıdırlar.
3. Orta büyüklükteki transformatörlerdeki 5'inci harmonik rezonansı sıksık görülmez.
4. 7. Harmoniğin tesiri ise büyük değildir. $\%u_k$'sı büyük trafolarda rezonans olayı daha büyüktür. Kompanzasyon tesisi projelendirilmesine dikkat edilmesi ve rezonans oluşmasına sebep olacak etkenlerin ortadan kaldırılması gerekir.
5. Hattın R_h direncinin büyük tutulmasnını rezonansın önlenmesinde katkısı çoktur. Kondansatörlerin transformatörlere yakın baralara bağlanmasından ziyade bir ilâve kablo ile uzak konmasında yarar vardır (tek kablo yerine paralel kablolar kullanılmalıdır).
6. Rezonans olayının meydana gelmemesi için $Q_{Cr} = S_{Tr} / n^2 . u_k . Sin\varphi_k$ kVar formülünden hesaplanan değerlerden daha düşük bir kondansatör kullanılmalıdır.
7. Merkezi kompanzasyon yapılmasında günümüz şartları (invertörler, redresörler, UPS'ler, CNC makinaları ve kaynak makinaları, vb.) düşünülerek projelendirilmelidir.
8. Genellikle DC tesislerinde akım düzeltilmiş olacağından, pals sayısına göre harmonik mertebesi pratikte hesaplanabilir.

$I_{5h}=0.25xI_n$ 5’inci harmonik akımını,

$I_{7h}=0.13xI_n$ 7’inci harmonik akımını,

$I_{11h}=0.09xI_n$ 11’inci harmonik akımını,

$I_{13h}=0.07xI_n$ 13’inci harmonik akımını,

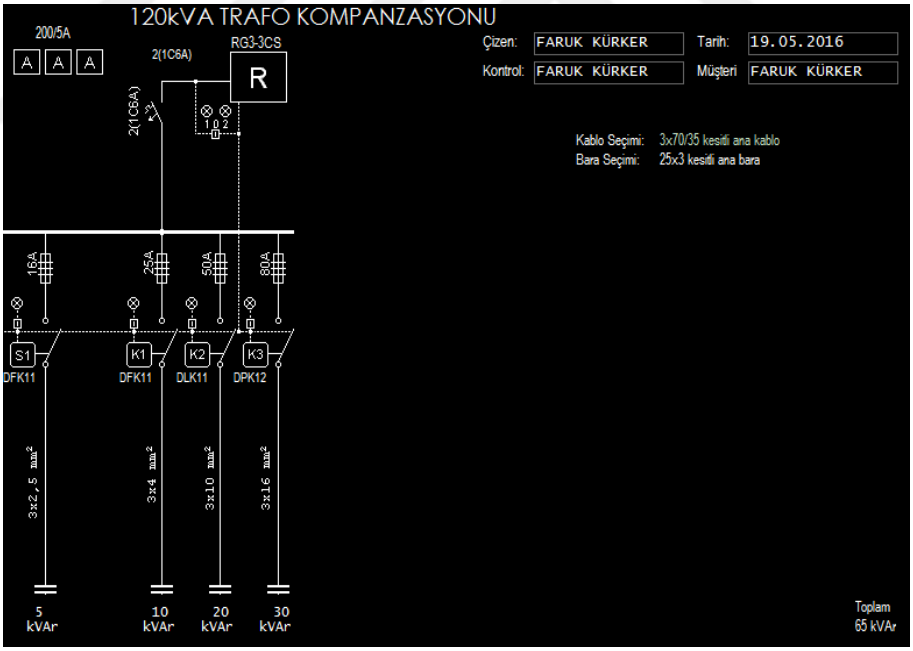
I_n: Nominal akımı ifade etmektedir.

Ek 10: Lazer torna tezgahına sahip tesisin kompanzasyon, harmonik filtre reaktörü ve pasif harmonik filtre hesaplamaları

Ölçüm yaptığımız tesiste Ntr=120 kVA, Cosφ_1=0.8 ise φ_1=36.86° ve tanφ_1=0.75 ve EPDK tarafından istenen Cosφ_2=0.984 ise φ_2=10.26° ve tanφ_2=0.181'dir.

$$Q_C = (0.95)N_{Tr}(\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2) = (0.95)(120)(0.75-0.181) = 64.866kVAr \cong 65kVAr$$

$Q_{Co} = (N_{kVA})(0.0125) = (120)(0.0125) = 1.5kVAr$. Kompanzasyon sisteminde kullanılacak sabit kondansatör kapasitesi 5 kVAr olarak seçildi. Kompanzasyonun tek hat şeması Şekil Ek.17'de görülmektedir.



Şekil Ek.17. Lazer tesisinin tahmini reaktif güç tek hat şeması

3. Harmonik için;

$$U_C = U_r = \frac{U_n}{(1-p)} = \frac{400V}{(1-0.14)} = 465V \qquad 480\text{V} - \underline{\boldsymbol{525V}} - 600\text{V}$$

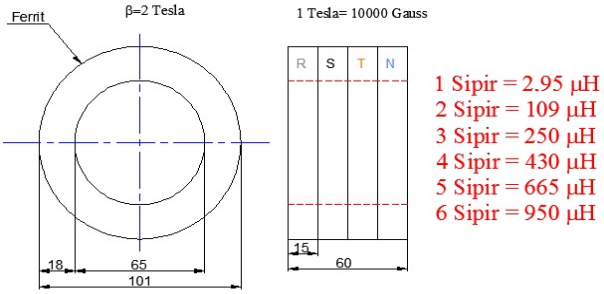
$$Q_r = (\frac{U_r}{U_n})^2 (1-p) Q_n = (\frac{525}{400})^2 (1-0.14)(20) = 29.62$$

Harmonik filtre reaktörü bağlanması durumunda 400 V'luk kondansatör, 50 Hz sisteminde %14 reaktör ile 20 kVAr güç sağlamak için 3. harmonikte 525V'da 29,62 kVAr değerine uygun olarak seçilmelidir. Her bir kondansatör için 3., 5. ve 7. harmonikte hesap yapıldığında Çizelge Ek.14'deki sonuçlar elde edilmiştir. Tesiste 5. harmonik diğerlerinden daha baskın olduğu için dolayısıyla kondansatör önüne seri bağlanacak reaktörün 6.69 kVAr kondansatör grupları için kullanılacak reaktör değeri 7.672 mH ve 16.105 A akım taşıma gücünde olacaktır. Çizelge Ek.14'deki 5. harmoniğe göre seçilmesi gerekmektedir. Bu değerler ışığında firmaların (hilkar.com.tr, elektra.com.tr, enteselectronics.com, omsantrafo.com.tr, …) belirtilen değerlere göre harmonik filtre reaktörü seçilerek temin edilebilir.

Çizelge Ek.14. 3., 5. ve 7. harmonikte hesaplanan değerler

Harmonik Bileşen	**Q_C**	**U_C**	**L**	**I**	**Q_r**
3.	30 kVAr	525 V	2.748 mH	18.87 A	44.44 kVAr
3.	20 kVAr	525 V	4.123 mH	32.57 A	29.62 kVAr
3.	10 kVAr	525 V	8.24 mH	16.286 A	14.81 kVAr
3.	5 kVAr	525 V	16.5 mH	8.137 A	7.4 kVAr
5.	30 kVAr	480 V	1.277 mH	48.317 A	40.17 kVAr
5.	20 kVAr	480 V	1.916 mH	32.211 A	26.78 kVAr
5.	10 kVAr	480 V	3.833 mH	16.105 A	13.39 kVAr
5.	5 kVAr	480 V	7.672 mH	8.0468 A	6.69 kVAr
7.	30 kVAr	480 V	1.02 mH	49.014 A	40.75 kVAr
7.	20 kVAr	480 V	1.53 mH	32.66 A	27.16 kVAr
7.	10 kVAr	480 V	3.06 mH	16.33 A	13.58 kVAr
7.	5 kVAr	480 V	6.30 mH	7.92 A	6.59 kVAr

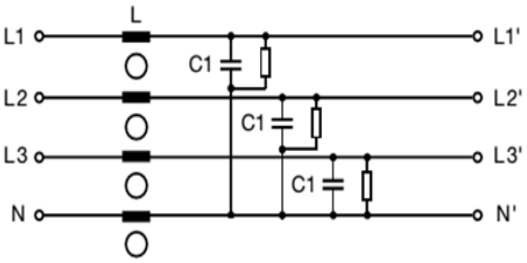
Ayrıca oluşan harmonikleri bastırmak için harmonik filtre reaktörü haricinde kullanılacak olan pasif harmonik filtre için L ve C'in hesabı rezonans frekansına göre hesaplanır. Rezonans frekansı $f_0 = 1/2\pi\sqrt{LC}$ ve Çizelge 1.7'de verilen değerlerde, 3. harmonikte 150 Hz, 5. harmonikte 250 Hz ve 7. harmonikte 350 Hz alınır.



Şekil Ek.18. Bobinin sipir sayısına göre değerleri

Kullanacağımız bobin 3 sipirlik olduğu için Şekil Ek.18'e göre L=0.25mH alınacak olursa, rezonans frekansı formülünden kapasitans değeri de hesaplanabilir. 3. harmonikte rezonans frekansı;

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \Rightarrow 150 = \frac{1}{2\pi\sqrt{(0.25)10^{-3}.C}} \Rightarrow C = 4.5mF$$ elde edilir. Oluşan harmoniği bastıracak olan filtrein bağlantısı Şekil Ek.19'da verilmiştir. Buna göre 5. ve 7. harmonik içinde hesap yapılırsa Çizelge Ek.15'deki değerler elde edilir.



Şekil Ek.19. Oluşan harmoniği bastıracak olan filtrenin bağlantısı

Çizelge Ek.15. 3., 5. ve 7. harmonikte hesaplanan C değerleri

	3. Harmonik	5. Harmonik	7. Harmonik
L(µH)	250	250	250
C(mF)	C_1=4,5	C_2=1,62	C_3=0,827

Ek 11: 1250 kVA ve 1600 kVA'lik trafodan beslenen tesisin 1250 kVA'lik trafo, kompanzasyon ve harmonik filtre reaktörü hesaplamaları

1250 kVA trafo ve kondansatör gücü hesabı çizelge E.16'da verilmiştir. Tesisin toplam kurulu gücü 1531.65 kW'tır. Talep faktörü 0.8 kabul edilmiş, düzeltilecek $\cos\varphi_1$=0.8 ve hedeflenen $\cos\varphi_2$=0.984 değerindendir. Trafo gücü yaklaşık olarak 1245 kVA hesaplanmış olup mevcut trafo 1250 kVA olduğundan dolayı seçilen trafo uygundur.

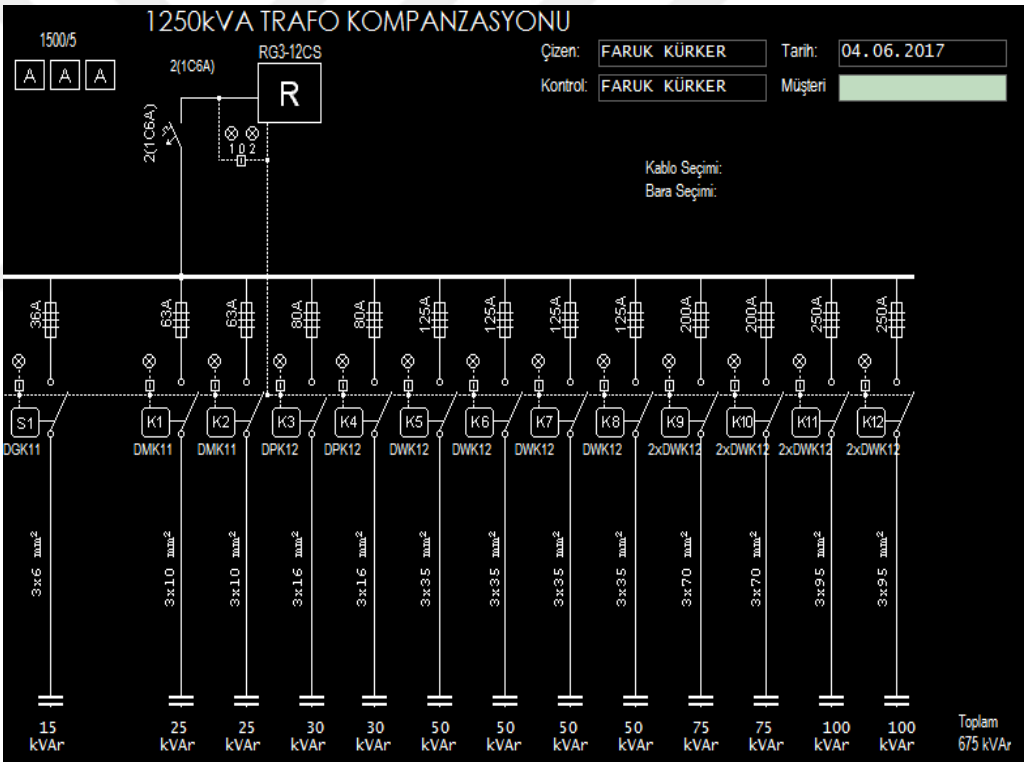
Çizelge Ek.16. 1250 kVA trafo ve kondansatör gücü hesabı

TRAFO ve KONDANSATÖR GÜCÜ HESABI							
A D I	KURULU GÜÇ kW	MEVCUT Ad.	TOPLAM Ad.	MEVCUT kW.			
	11.3	1	1	11.3			
	2.6	1	1	2.6			
	12	1	1	12			
	4.25	1	1	4.25			
	16	1	1	16			
	3.75	1	1	3.75			
	2.2	3	3	6.6			
	4	3	3	12			
	7.5	1	1	7.5			
	23.33	5	5	116.65			
	7.85	5	5	39.25			
	5.01	5	5	25.05			
	9.51	3	3	28.53			
	11.11	3	3	33.33			
OE-Rotor Spin Mach.	152.39	6	6	914.34			
	100	1	1	100			
	80	1	1	80			
	16.5	0.5	0.5	8.25			
	16.5	0.5	0.5	8.25			
	10	0.5	0	5			
	67	1	1	67			
	30	1	1	30			
		1	1	0			
	TOPLAM KURULU GÜÇ:			1531.65			
TRAFO HESABI :							
TALEP FAKTÖRÜ (Tf) :	0.8						
İYİLEŞTİRME $Cos\Ø_2$:	0.984						
TRAFO GÜCÜ N_{TR} :	1 245.24	kVA.	[N_{TR}=TalepFaktörü*N(kW)/$Cos\Ø_2$]				
SEÇİLEN TRAFO GÜCÜ :	**1 250**	**kVA.**	***SEÇİLEN TRAFO UYGUNDUR***				
TOPLAM FİİLİ GÜÇ :	1 225.32	kW.	[Toplam Fiili Güç=TalepFaktörü*Toplam Kurulu Güç]				
MEVCUT $Cos\Ø_1$:	0.8	$Tan\Ø_1$:	0.75	[Düzeltilecek olan "CosØ"]			
İSTENEN $Cos\Ø_2$	0.984	$Tan\Ø_2$:	0.18	[Hedeflenen "CosØ"]			
Sabit Kondansatör Qco=	15.625	kVAr.	[Q_{C0}=0.0125*N(kVA)]				
TOPLAM Qc=	**675.61**	kVAr.	***YAKLAŞIK :***	***675***	***kVAr.***		
[Q_C=0.95*N(kVA)*($Tan\Ø_1 - Tan\Ø_2$]							

Ölçüm yaptığımız tesiste Ntr=1250 kVA, Cosφ_1=0.8 ise φ_1=36.86° ve tanφ_1=0.75 ve EPDK tarafından istenen Cosφ_2=0.984 ise φ_2=10.26° ve tanφ_2=0.181'dir.

$$Q_C = (0.95)(N_{Tr})(\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2) = (0.95)(1250)(0.75 - 0.181) = 675.68kVAr \cong 675kVAr$$

$Q_{Co} = (N_{kVA})(0.0125) = (1250)(0.0125) = 15.6kVAr$. Kompanzasyon sisteminde kullanılacak sabit kondansatör kapasitesi 15 kVAr olarak seçildi. Kompanzasyonun tek hat şeması Şekil Ek.20'de görülmektedir.



Şekil Ek.20. Tesisin tahmini reaktif güç tek hat şeması

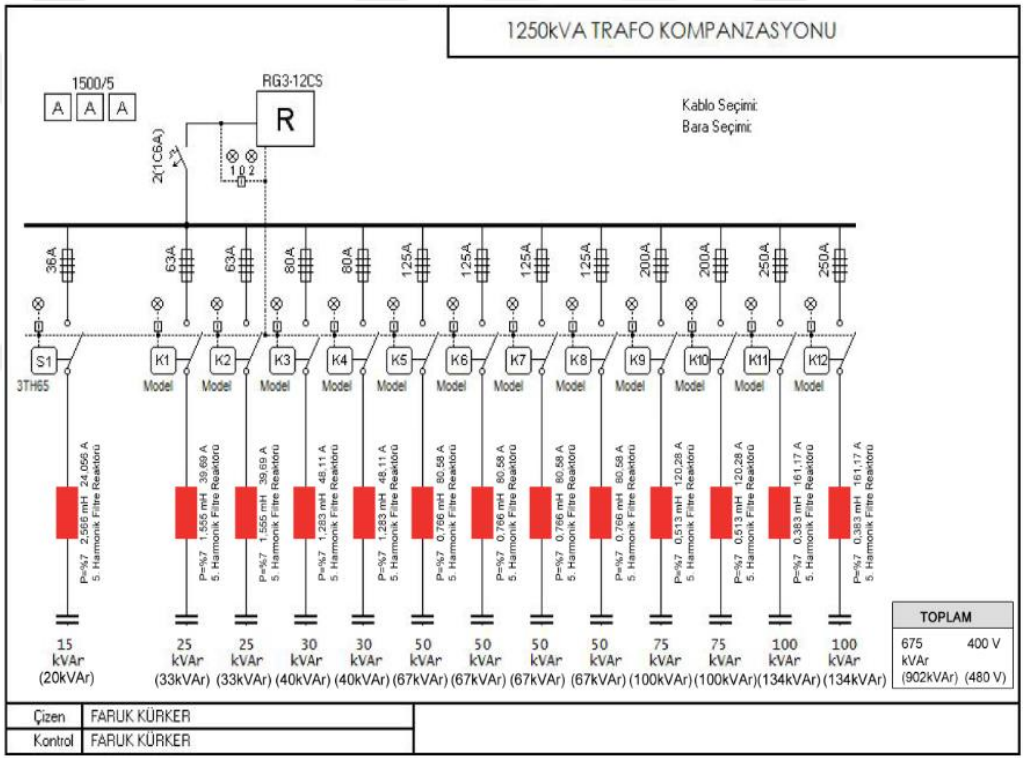
5. Harmonik için;

$$U_C = U_r = \frac{U_n}{(1-p)} = \frac{400V}{(1-0.07)} = 430.10V$$

400V – ***440V*** – ***480V*** – 525V – 600V – 660V

$$Q_r = (\frac{U_r}{U_n})^2 (1-p) Q_n = (\frac{480}{400})^2 (1-0.07)(30) = 40.176 \cong 40 kVAr$$

Kompanzasyon kondansatörlerinin yeni değerleri ve seri endüktans bağlantısı Şekil Ek.21'de görülmektedir.



Şekil Ek.21. Kompanzasyon kondansatörlerinin yeni değerleri ve seri endüktans bağlantısı

Kondansatörleri koruma amaçlı kondansatörlere seri olarak harmonik filtre reaktörü bağlanacak olursa; 400 V'luk kondansatör, 50 Hz sisteminde %7 reaktör ile 30 kVAr güç sağlamak için 5. harmonikte 480V'da 40 kVAr değerine uygun olarak seçilmelidir. 20 kVAr kondansatör grupları için kullanılacak reaktör değeri 2.566 mH ve 24.056 A akım taşıma gücünde olacaktır. Her bir kondansatör için 5. harmonikte hesap yapıldığında Çizelge Ek.17'deki sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge Ek.17. 5. harmonikte hesaplanan değerler

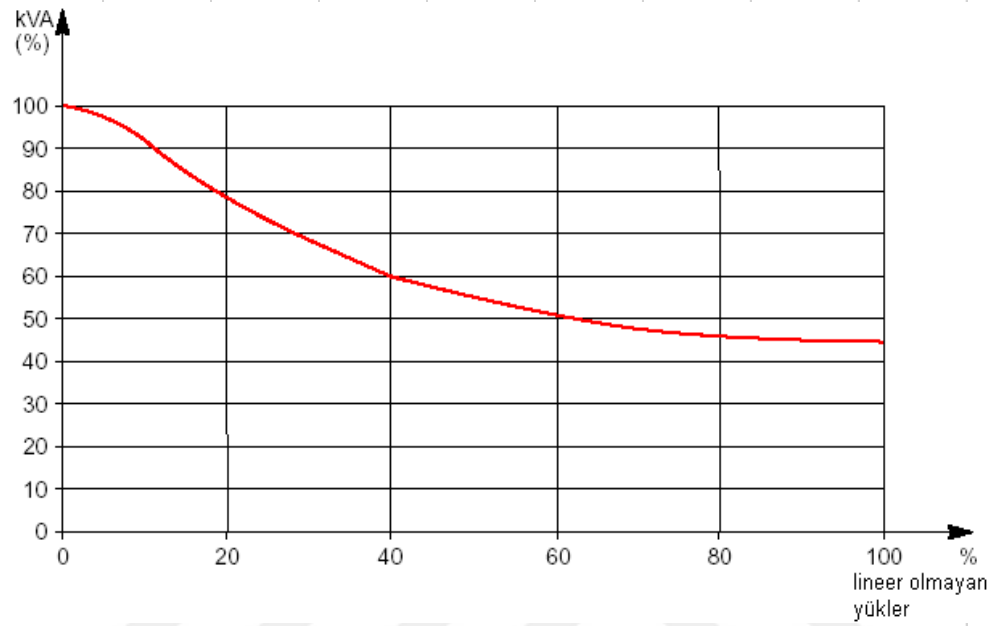
Harmonik Bileşen	Q_C	U_C	L	I	Q_r
5.	100 kVAr	480 V	0.383 mH	161.17 A	134 kVAr
5.	75 kVAr	480 V	0.513 mH	120.28 A	100 kVAr
5.	50 kVAr	480 V	0.766 mH	80.58 A	67 kVAr
5.	30 kVAr	480 V	1.283 mH	48.11 A	40 kVAr
5.	25 kVAr	480 V	1.555 mH	39.69 A	33 kVAr
5.	15 kVAr	480 V	2.566 mH	24.056 A	20 kVAr

400 V'luk kondansatör, 50 Hz sisteminde %7 reaktör ile 100 kVAr güç sağlamak için 5. harmonikte 480V'da 134 kVAr değerine uygun olarak seçilmelidir. 400 V'luk kondansatör, 50 Hz sisteminde %7 reaktör ile 75 kVAr güç sağlamak için 5. harmonikte 480V'da 100 kVAr değerine uygun olarak seçilmelidir. 400 V'luk kondansatör, 50 Hz sisteminde %7 reaktör ile 50 kVAr güç sağlamak için 5. harmonikte 480V'da 67 kVAr değerine uygun olarak seçilmelidir. Harmonik filtre reaktörleri reaktif güç kontrol sistemlerinde kompanzasyon sistemini korur.

Harmoniklerden kaynaklanan etkiye bağlı olarak trafonun uygun olup olmadığı Çizelge Ek.18'de hesaplanmıştır. 1250 kVA üzerindeki tesisin kurulu gücü yaklaşık olarak 1 531 kW'tır. Tahmini harmonikli yük 600 kW ve harmonikli gücün trafo gücüne oranı 0.48 hesaplanmıştır.

Trafonun yüklenmede azalma faktörü Nhy'nin (x ekseninde) değerinin grafikte karşılığı yaklaşık olarak %Naf=55 bulunur (y ekseninde). Trafonun toplam harmoniklerle azalma faktörü 0,45 yani %45 bulunur. Trafonun toplam harmoniklerle yükü yaklaşık olarak 1 090 kVA hesaplanmıştır. Standart trafo 1 250 kVA olsuğu için seçilen trafo uygundur.

Çizelge Ek.18. Harmoniğe göre trafo seçimi



LİNEER YÜKLER :	**h5+h7 HARMONİKLİ YÜKLER :**
KURULU GÜÇ : 1531.65 kW.	Bütün alıcılarda İNVERTÖR Olduğuna göre :
FİİLİ GÜÇ : 1225.32 kW.	Tahmini harmonikli yük 600 kW

Fiili Güç = Kurulu Güçx0.8

1. MEVCUT TRAFO : **1250 kVA.'dır.**
2. HARMONİKLİ GÜCÜN **TRAFO** GÜCÜNE ORANI **: Gh / Str = 600 / 1.250 = 0.48 = % 48**
3.TRAFONUN **YÜKLEMEDE AZALMA FAKTÖRÜ** (GRAFİKTEN)**: %55 = 0.55** OLARAK BULUNUR.
4.TRAFONUN **TOPLAM HARMONİKLERLE AZALMA** FAKTÖRÜ = **(100 - 55) / 100 = 0.45 = % 45** BULUNUR.
5.TRAFONUN **TOPLAM HARMONİKLERLE YÜKÜ = 600 / (1-0.45)= 1090 kVA**.
6.STANDARD TRAFO : **1250 kVA**'DIR. **SEÇİM DOĞRUDUR.**

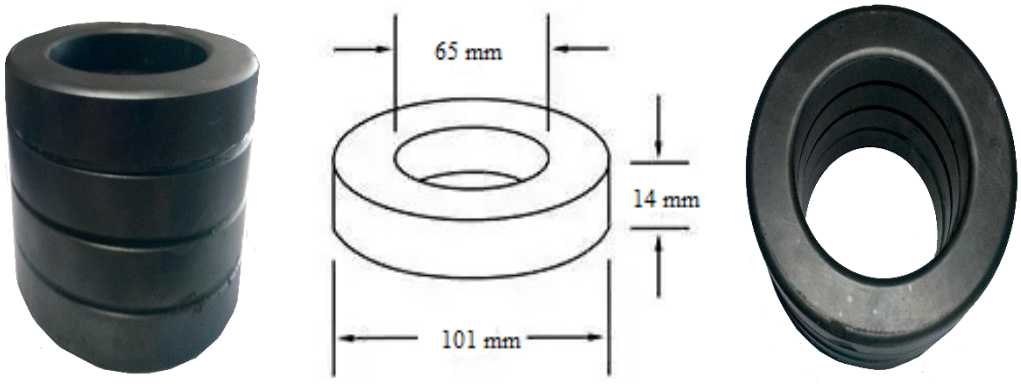
İşletmede İnvertörler çoğunlukta olduğundan **5. ve 7. Harmonikler** mutlak surette mevcuttur. İşletmenizde Rezonans olaylarının meydana gelmemesi için Bağıl empedansı %7 olan kondansatör önlerine seri endüktans (reaktör) için "Kondansatörlerinde üzerine gelecek olan gerilim hesaplandığında : Uc = Un / (1-p) = 400 V/ 0.07) = 430 V "Standart" 440V veya 480 V'luk kondansatör kullanılmalıdır.

Ek 12: 1250 kVA ve 1600 kVA'lik trafodan beslenen tesisin pasif harmonik filtre hesapları

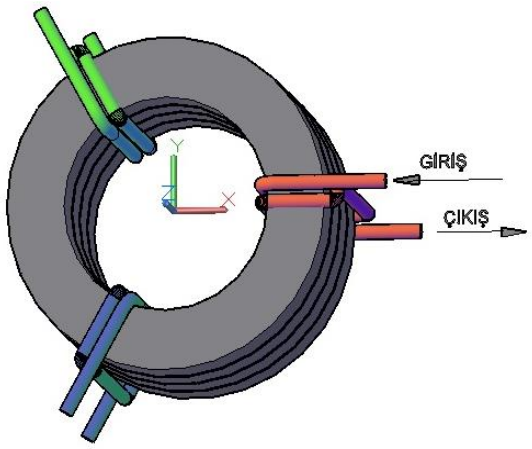
Pasif filtre kullanılacak olursa; tasarlanacak olan filtre için kullanılacak malzemeler antimanyetik ferit nüve, 70 mm^2 çapında kablo ve kondansatör'dür. 4 adet antimanyetik ferit nüve üst üste yapıştırılmış ve üzerine 2 sipir olarak 70 mm^2 kablo sarılmıştır. Bobinin değerine göre 5. harmoniği rezonansa getiren frekans 250 Hz olduğundan, filtrede kullanılacak kondasatör değeri;

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \Rightarrow 250Hz = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \Rightarrow C = 11\mu F$$ olarak bulunur.

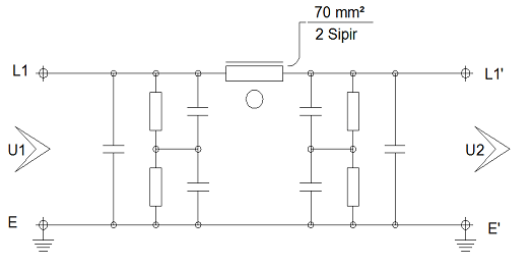
Antimanyetik ferit nüve Şekil Ek.22'de, ve bu ferit nüveye her bir faz için 2 spir Şekil Ek.23'te verilmektedir. Tasarlanan filtrenin monofaz devresi Şekil Ek.24'te, bu devrenin 220 V giriş gerilimi için 50 Hz, 150 Hz, 250 Hz ve 350 Hz için frekans spektrumu Şekil Ek.25 ve Şekil Ek.26'da görülmektedir. Tasarlanan filtrenin her bir faz için giriş sipirine ve çıkış sipirine kondansatör, bobin ve direnç bağlanarak elde edilen değerlere göre üç faz devresi Şekil Ek.27, Şekil Ek.28, Şekil Ek.29 ve Şekil Ek.30'da verilmiştir.



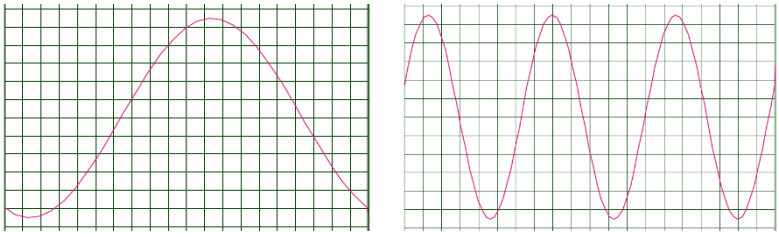
Şekil Ek.22. Antimanyetik toroid ferit nüve



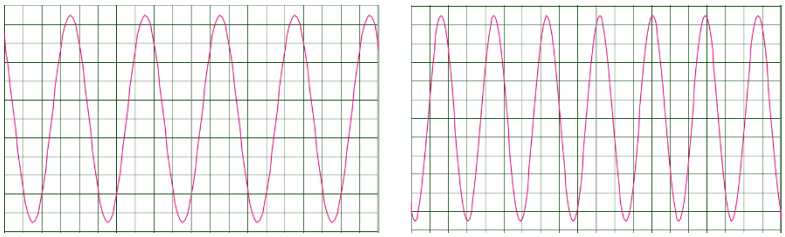
Şekil Ek.23. Antimanyetik toroid ferit nüve üzerine 70 mm^2 ve 2 sipir sarılı bobin



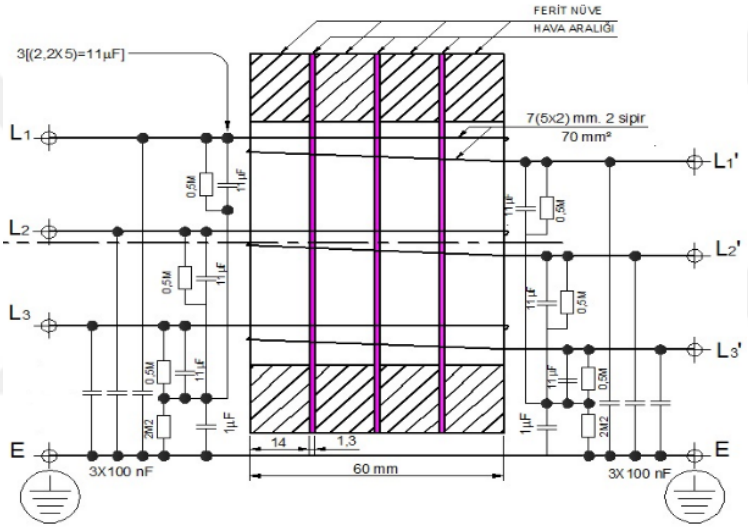
Şekil Ek.24. 152 kW iplik eğirme makinası harmonik filtresi monofaz bağlantısı



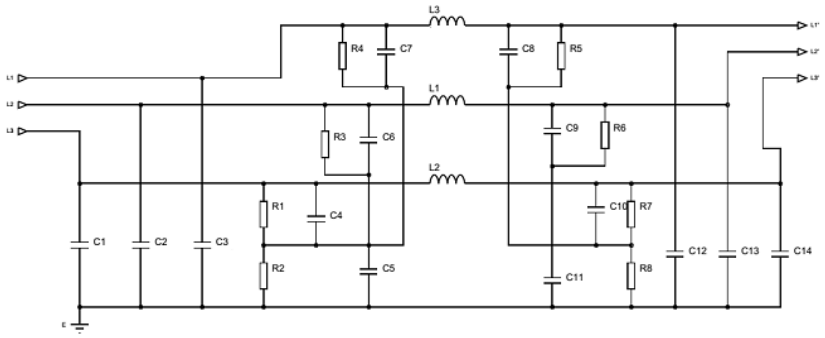
Şekil Ek.25. Tasarlanan harmonik filtrenin monofaz 50 Hz ve 150 Hz frekans spektrumu



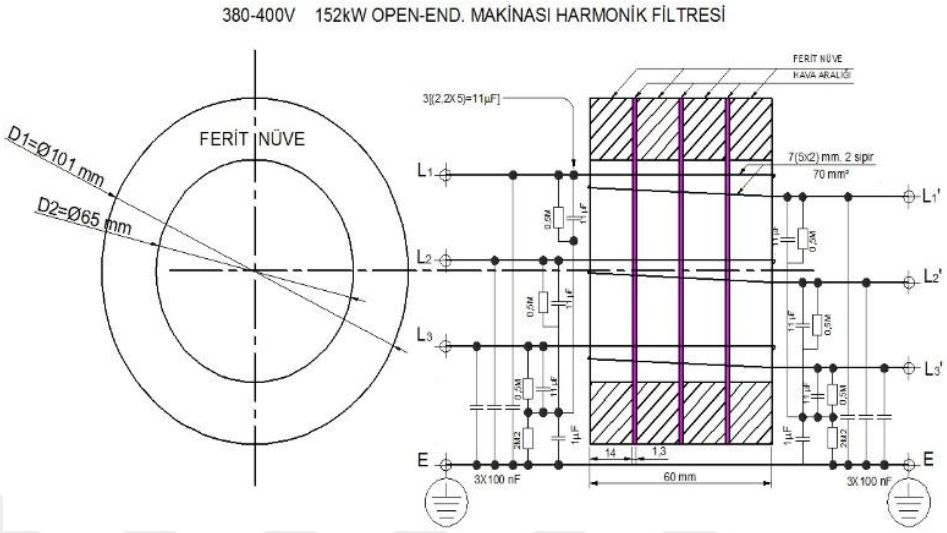
Şekil Ek.26. Tasarlanan harmonik filtrenin monofaz 250 Hz ve 350 Hz frekans spektrumu



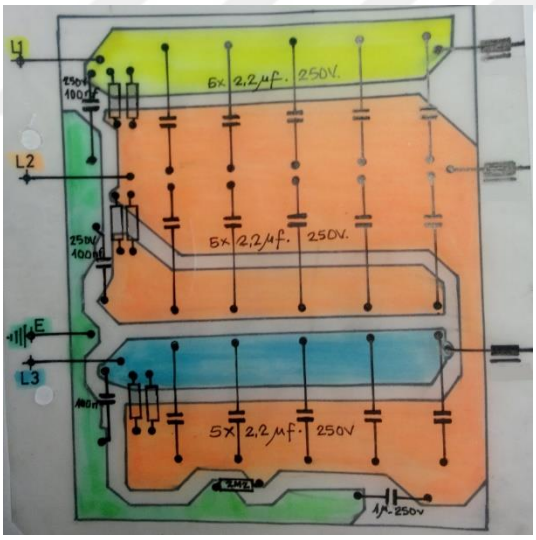
Şekil E.27. Filtre, 4 adet ferit nüve üzerine 2 sipir 70 mm^2 kablo ile kondansatör bağlantısı



Şekil Ek.28. 152 kW iplik eğirme makinası harmonik filtresi üçfaz bağlantısı



Şekil Ek.29. 152 kW iplik eğirme makinası harmonik filtresi



Şekil Ek.29. 152 kW iplik eğirme makinasına bağlanan harmonik filtresi