KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİRLEŞİK GÜÇ KALİTE DÜZENLEYİCİSİNİN SENKRON REFERANS YAPI TABANLI UYGULAMA TASARIMI VE ANALİZİ

DOKTORA TEZİ

Metin KESLER

Ana Bilim Dalı: Elektrik Eğitimi

Danışman: Doç.Dr. Engin ÖZDEMİR

KOCAELİ, 2010

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİRLEŞİK GÜÇ KALİTE DÜZENLEYİCİSİNİN SENKRON REFERANS YAPI TABANLI UYGULAMA TASARIMI VE ANALİZİ

DOKTORA TEZİ

Metin KESLER

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 29 Aralık 2009

Tezin Savunulduğu Tarih: 19 Ocak 2010

Tez Danışmanı
Doç. Dr. Engin ÖZDEMİR
(.....)

Üye
Prof. Dr. Nurettin ABUT
(.....)

Üye
Prof. Dr. Bekir ÇAKIR
(.....)

Üye
Prof. Dr. Etem KÖKLÜKAYA
(.....)

Üye
Doç. Dr. Ercüment KARAKAŞ
(.....)

KOCAELİ, 2010

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Modern güç elektroniği sistemlerinin her geçen gün gelişmesi, elektrik alıcılarının çok çeşitlilik göstermesi ve hızla artan uygulama alanları nedeniyle şebekelerde ve iletim hatlarında reaktif güçlerin çekilmesine, harmonik akımların üretilmesine ve enerji kalitesinin düşmesine sebep olmaktadır.

Günümüzde enerji verimliliğinin korunması ve güç kalitesinin artırılması önemli bir sorun haline gelmiştir. Bu nedenle güç kalitesi sorunlarını ve çözüm yollarını araştırmak amacıyla elektrik enerjisinin üretim noktasından tüketim noktasına kadar her safhasında üzerinde özenle durulması gerekmektedir. Son zamanlarda ülkemizde ve dünyada elektrik enerji kalitesini ve verimliliğini artırmak için bilim adamları tarafından çok sayıda çalışma yapılmaktadır.

Bu çalışmada 3-fazlı 4-telli güç sistemi alçak gerilim dağıtım seviyesinde güç kalitesi problemlerini düzeltmeye yönelik olarak geliştirilen birleşik güç kalite düzenleyici sisteminin tasarımı, denetimi ve uygulaması anlatılmaktadır.

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalar, 108E083 sayılı TÜBİTAK Araştırma Projesi ve Kocaeli Üniversitesi Araştırma Fonu projesi kapsamında desteklenmektedir.

Deneysel çalışmalara numune (sample) sağlayarak vermiş olduğu desteklerden dolayı; Semikron (Türkiye), CT-Concept Technologie AG, LEM Electronics Ltd. ve Texas Instrument (TI) firmalarına teşekkür ederim.

Çalışmalarım süresince öneri ve desteğini esirgemeyen danışman hocam Doç. Dr. Engin ÖZDEMİR'e, tez izleme komitesi üyeleri Prof. Dr. Bekir ÇAKIR'a ve Doç. Dr. Ercüment KARAKAŞ'a teşekkürlerimi sunarım.

Destek ve önerileri ile yardımcı olan Yrd. Doç. Dr. Murat KALE'ye, Öğretmen Metin SUNAN'a, Öğr. Gör. Murat KARABACAK'a, Arş. Gör. Mehmet UÇAR'a, Arş. Gör. Mevlüt KARAÇOR'a teşekkür ederim.

Çalışmalarım süresince hiçbir zaman maddi manevi desteğini esirgemeyen babama ve anneme, sabır ve anlayış gösteren eşime özellikle teşekkür ederim.

Biricik kızım Elif KESLER'e ithaf olunur.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ v
TABLOLAR DİZİNİ xiii
SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR xiv
ÖZET xx
İNGİLİZCE ÖZET xxi
1. GİRİŞ 1
1.1. Literatür Taraması 3
1.2. Motivasyon 7
1.3. Tezin Amacı ve Katkısı 7
2. ELEKTRİK SİTEMLERİNDE GÜÇ KALİTESİ 9
2.1. Güç Kalitesinin Sınıflandırılması 10
2.1.1. Geçici dalgalanama 13
2.1.2. Kısa süreli değişimler 14
2.1.3. Uzun süreli değişimler 14
2.1.4. Dalga şeklinde bozulmalar 15
2.1.5. Gerilim dengesizliği 16
2.2. Harmonikler 18
2.3. Harmonik Üreten Kaynaklar 22
2.3.1. Tek-fazlı doğrultucular 22
2.3.2. Üç-fazlı doğrultucular 23
2.3.3. Transformatörler 25
2.3.3. Ark fırınları 25
2.4. Harmoniklerin Etkileri 26
2.5. Harmonik Standartları ve Tanımları 26
3. BGKD SİSTEMİNİN PC TABANLI MODELLENMESİ VE SİMÜLASYONU 29
3.1. Giriş 29
3.2. Üç-Fazlı Sistemlerde Güç Kavramları 30
3.2.1. Geleneksel güç kavramları 30
3.2.2. Geleneksel anlık reaktif güç teorisi (ARGT) 31
3.2.3. Üç-fazlı 4-telli dengeli ve doğrusal yüklerde anlık güçlerin hesaplanması 34
3.2.4. Üç-fazlı 4-telli sinüzoidal kaynaktan beslenen doğrusal olmayan yüklerde anlık güç hesabı ve güç bileşenlerinin elde edilmesi 36
3.3. Faz Kilitlemeli Döngü (PLL) 39

3.4. Paralel Aktif Güç Filtresi (PAGF) 40
3.5. Seri Aktif Güç Filtreleri (SAGF) 46
3.6. Birleşik Güç Kalite Düzenleyicisi (BGKD) 48
3.7. BGKD'nin Geleneksel Anlık Reaktif Güç Teorisi Tabanlı Denetim Stratejisi .. 50
3.7.1. ARGT tabanlı YAY ile BGKD'nin denetimi ve simülasyonu 52
3.7.2. ARGT tabanlı KAY ile BGKD'nin denetimi ve simülasyonu 64
3.8. BGKD'nin Senkron Referans Yapı Tabanlı Denetim Stratejisi 73
3.8.1. Senkron referans yapı 73
3.8.2. Önerilen SRY tabanlı YAY ile BGKD'nin denetimi ve simülasyonu 76
3.8.2. Önerilen SRY tabanlı KAY ile BGKD'nin denetimi ve simülasyonu 86
3.9. Sonuç 97
4. BGKD'NİN DENETİM VE ALTYAPI KARTLARININ TASARIMI 100
4.1. Giriş 100
4.2. F28335 DSP Uygulama Geliştirme Kartının Tasarımı 101
4.3. F28335 DSP Ana Kartının Tasarımı 105
4.3.1. PAGF-Paralel aktif güç filtre denetim katının tasarımı 105
4.3.2. SAGF-Seri aktif güç filtre denetim katının tasarımı 106
4.3.3. FFT-Harmonik analiz ve sistem denetim katının tasarımı 107
4.4. Akım Ölçüm Ana Kartının Tasarımı 109
4.5. Gerilim Ölçüm Ana Kartının Tasarımı 110
4.6. Sinyal Düzenleyici Ana Kartının Tasarımı 112
4.6.1. Akım sinyal düzenleyici kartı 114
4.6.2. Gerilim sinyal düzenleyici kartı 115
4.6.3. V_{DA} gerilim sinyal düzenleyici kartı 116
4.6.4. Sinyal denetim ve hata koruma kartı 117
4.7. Grafik LCD Gösterge Kartının Tasarımı 120
4.8. Güç Besleme Kartının Tasarımı 122
4.9. IGBT Sürücü Kartlarının Tasarımı 122
4.10. DA Bara ve IGBT Güç Katının Tasarımı 127
4.10.1. DA bara kondansatör değerinin hesaplanması 128
4.11. SAGF ve PAGF Hat Filtre Bobinlerinin Tasarımı 129
4.12. SAGF ve PAGF Anahtarlama RC Filtre Elemanlarının Tasarımı 132
4.13. SAGF Seri Transformatörler 134
4.14. Genel Amaçlı Tristör Sürücü Kartının Tasarımı 134
4.15. 3-Fazlı Tam Denetimli Tristörlü Statik Anahtar ve AA Denetleyici 136
4.16. 3-Fazlı 6-Darbeli Tam Denetimli Tristörlü Doğrultucu 137
4.17. 3-Fazlı AA Hat Reaktörü 138
4.18. Şebeke Entegreli Harmonik Gerilim Kaynağının Tasarımı 139

4.19. Sonuç 152
5. BGKD'NİN DSP VE BİLGİSAYAR YAZILIMI İLE İZLENMESİ 155
5.1. Giriş 155
5.2. Fourier Dönüşümü 155
5.3. Hızlı Fourier Dönüşümü 156
5.4. Hartley Dönüşümü 157
5.5. Hızlı Hartley Dönüşümü 158
5.6. Bilgisayar Yazılımı İle DSP Kartları Arasında Veri İletişim Yönteminin Geliştirilmesi 159
5.7. BGKD'nin DSP Yazılımı ile İzlenmesi ve Harmonik Analiz Gösterge Kartı .. 162
5.8. BGKD'nin Bilgisayar Yazılımı ile İzlenmesi ve Harmonik Analizi 165
5.9. Sonuç 170
6. BGKD'NİN PERFORMANS ANALİZİ VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR 171
6.1. Giriş 171
6.2. ARGT Tabanlı YAY ile BGKD Denetim Algoritması Deneysel Sonuçları 182
6.3. ARGT Tabanlı KAY ile BGKD Denetim Algoritması Deneysel Sonuçları 183
6.4. Önerilen SRY Tabanlı YAY ile BGKD Denetim Algoritması Deneysel Sonuçları 185
6.5. Önerilen SRY Tabanlı KAY ile BGKD Denetim Algoritması Deneysel Sonuçları 186
6.6. Sonuç 202
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 204
KAYNAKLAR 210
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER 218
ÖZGEÇMİŞ 220

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1: (a) Seri aktif güç filtresi (b) paralel aktif güç filtresi genel blok şeması. 4
Şekil 2.1: Gerilim genlik ve süresine göre güç kalitesinin sınıflandırılması [48]..... 11
Şekil 2.2: Geçici dalgalanma örnek dalga şekilleri (a) yıldırım etkisi akım[47], (b) kondansatör anahtarlama sonucu oluşan salınım[48], (c) diyot doğrultucu fazlar arası gerilim [48]..... 13
Şekil 2.3: Kısa süreli değişim örnek dalga şekilleri (a) gerilim çökmesi [47], (b) gerilim yükselmesi [49]. 14
Şekil 2.4: (a) 3-fazlı gerilim kaynaklı diyot doğrultucu bağlantı şekli (b) fazlar arası gerilim dalga şekli (c) kaynaktan çekilen akım dalga şekli (d) kayaktan çekilen akımın harmonik dağılımı (e) harmonikli akımın aktif güç filtre ile düzeltilmesi durumunda oluşan gürültü. 16
Şekil 2.5: Fazlar arası gerilim genliğinde oluşan dengesizlikler..... 16
Şekil 2.6: (a) Doğrusal, (b) doğrusal olmayan [47] yükün örnek akım gerilim dalga şekilleri ve (c) bozulmuş dalga şeklinin sembolik harmonik bileşenleri. . 19
Şekil 2.7: (a) Tek-fazlı 2-darbeli bir doğrultucunun bağlantı şeması kaynaktan çektiği akımın dalga şekli ve harmonik dağılımı görülmektedir. 22
Şekil 2.8: (a) 3-fazlı 6-darbeli gerilim kaynaklı bir doğrultucunun bağlantı şeması kaynaktan çektiği akımın dalga şekli ve harmonik dağılımı. 23
Şekil 2.9: (a) 3-fazlı 6-darbeli akım kaynaklı bir doğrultucunun bağlantı şeması(b) $\alpha=0°$ için kaynaktan çektiği akımın dalga şekli ve harmonik dağılımı (c) $\alpha=45°$ için kaynaktan çektiği akımın dalga şekli ve harmonik dağılımı. . 24
Şekil 2.10: (a) Transformatörlerde kullanılan demir çekirdeğe ait örnek manyetik geçirgenlik ($\mu c=B/H$) grafiği (b) transformatörlerde uygulanan gerilim ve mıknatıslanma akımı. 25
Şekil 3.1: Güç dörtyüzlüsü (power tetrahedron). 31
Şekil 3.2: (a) a-b-c koordinatlarından (b) α-β-0 koordinatlarına dönüşüm. 32
Şekil 3.3: α-β-0 ekseninde anlık akım ve gerilim uzay vektörleri. 33
Şekil 3.4: Yüksek Geçiren Filtre (YGF) blok diyagramı (HPF:High Pass Filter). 39
Şekil 3.5: PLL devresi blok diyagramı 40
Şekil 3.6: Paralel aktif güç filtresi genel blok diyagramı. 41
Şekil 3.7: Paralel aktif güç filtresi temel denetim blok diyagramı. 42
Şekil 3.8: Histerezis bant PWM akım denetim [24]. 43
Şekil 3.9: PAGF ile harmonik ve reaktif güç kompanzasyonu [24]. 45
Şekil 3.10: Seri aktif güç filtresi genel blok şeması. 47
Şekil 3.11: Seri aktif güç filtresi temel denetim blok diyagramı. 48
Şekil 3.12: BGKD genel blok şeması. 50
Şekil 3.13: BGKD temel denetim blok şeması. 50
Şekil 3.14: Birleşik güç kalite düzenleyicisinin Matlab/Simulink modeli. 52
Şekil 3.15: ARGT tabanlı YAY ile BGKD'nin denetim algoritması blok şeması. ... 53
Şekil 3.16: ARGT tabanlı YAY ile BGKD'nin dengesiz-harmonikli kaynak gerilimi ve dengesiz-doğrusal olmayan yük koşullarında (1) yük gerilimleri, (2) trafo gerilimleri, (3) yük akımları, (4) kaynak akımları, (5) filtre akımları,

(6) kaynak nötr akımı, (7) aktif güç, (8) reaktif güç, (9) kaynak akımı ve yük gerilimi, (10) V_{DA} bara gerilimi simülasyon sonuçları. 58
Şekil 3.17: ARGT tabanlı YAY ile BGKD'nin dengesiz-harmonikli kaynak gerilimi ve dengeli-doğrusal olmayan yük koşullarında (1) yük gerilimleri, (2) trafo gerilimleri, (3) yük akımları, (4) kaynak akımları, (5) filtre akımları, (6) kaynak nötr akımı, (7) aktif güç, (8) reaktif güç, (9) kaynak akımı ve yük gerilimi, (10) V_{DA} bara gerilimi simülasyon sonuçları. 59
Şekil 3.18: ARGT tabanlı YAY ile BGKD'nin ideal kaynak gerilimi ve dengeli-doğrusal olmayan yük koşullarında (1) yük gerilimleri, (2) trafo gerilimleri, (3) yük akımları, (4) kaynak akımları, (5) filtre akımları, (6) kaynak nötr akımı, (7) aktif güç, (8) reaktif güç, (9) kaynak akımı ve yük gerilimi, (10) V_{DA} bara gerilimi simülasyon sonuçları. 60
Şekil 3.19: ARGT tabanlı YAY ile BGKD'nin ideal kaynak gerilimi ve dengesiz-doğrusal olmayan yük koşullarında (1) yük gerilimleri, (2) trafo gerilimleri, (3) yük akımları, (4) kaynak akımları, (5) filtre akımları, (6) kaynak nötr akımı, (7) aktif güç, (8) reaktif güç, (9) kaynak akımı ve yük gerilimi, (10) V_{DA} bara gerilimi simülasyon sonuçları. 61
Şekil 3.20: ARGT tabanlı YAY ile BGKD'nin ideal kaynak gerilimi ve dengeli-doğrusal olmayan tristörlü yük koşullarında (1) yük gerilimleri, (2) trafo gerilimleri, (3) yük akımları, (4) kaynak akımları, (5) filtre akımları, (6) kaynak nötr akımı, (7) aktif güç, (8) reaktif güç,(9) kaynak akımı ve yük gerilimi, (10) V_{DA} bara gerilimi simülasyon sonuçları. 62
Şekil 3.21: PAGF ile harmonik akım kompanzasyonu için referans filtre akımlarının hesaplanması. 63
Şekil 3.22: Harmonik akım kompanzasyonu hesaplanan "a" fazı için (a) yük akımı 63
Şekil 3.23: Reaktif güç kompanzasyonu için referans filtre akımlarının hesaplanması. 64
Şekil 3.24: Reaktif güç kompanzasyonu hesaplanan "a" fazı için (a) yük akımı 64
Şekil 3.25: ARGT tabanlı KAY ile BGKD'nin denetim algoritması blok şeması. ... 65
Şekil 3.26: ARGT tabanlı KAY ile BGKD'nin dengesiz-harmonikli kaynak gerilimi ve dengesiz-doğrusal olmayan yük koşullarında (1) yük gerilimleri, (2) trafo gerilimleri, (3) yük akımları, (4) kaynak akımları, (5) filtre akımları, (6) kaynak nötr akımı, (7) aktif güç, (8) reaktif güç,(9) kaynak akımı ve yük gerilimi, (10) V_{DA} bara gerilimi simülasyon sonuçları. 68
Şekil 3.27: ARGT tabanlı KAY ile BGKD'nin dengesiz-harmonikli kaynak gerilimi ve dengeli-doğrusal olmayan yük koşullarında (1) yük gerilimleri, (2) trafo gerilimleri, (3) yük akımları, (4) kaynak akımları, (5) filtre akımları, (6) kaynak nötr akımı, (7) aktif güç, (8) reaktif güç, (9) kaynak akımı ve yük gerilimi, (10) V_{DA} bara gerilimi simülasyon sonuçları. 69
Şekil 3.28: ARGT tabanlı KAY ile BGKD'nin ideal kaynak gerilimi ve dengeli-doğrusal olmayan yük koşullarında (1) yük gerilimleri, (2) trafo gerilimleri, (3) yük akımları, (4) kaynak akımları, (5) filtre akımları, (6) kaynak nötr akımı, (7) aktif güç, (8) reaktif güç, (9) kaynak akımı ve yük gerilimi, (10) V_{DA} bara gerilimi simülasyon sonuçları. 70
Şekil 3.29: ARGT tabanlı KAY ile BGKD'nin ideal kaynak gerilimi ve dengesiz-doğrusal olmayan yük koşullarında (1) yük gerilimleri, (2) trafo gerilimleri, (3) yük akımları, (4) kaynak akımları, (5) filtre akımları, (6) kaynak nötr akımı, (7) aktif güç, (8) reaktif güç, (9) kaynak akımı ve yük gerilimi, (10) V_{DA} bara gerilimi simülasyon sonuçları. 71

Şekil 3.30: ARGT tabanlı KAY ile BGKD'nin ideal kaynak gerilimi ve dengeli-doğrusal olmayan tristörlü yük koşullarında (1) yük gerilimleri, (2) trafo gerilimleri, (3) yük akımları, (4) kaynak akımları, (5) filtre akımları, (6) kaynak nötr akımı, (7) aktif güç, (8) reaktif güç, (9) kaynak akımı ve yük gerilimi, (10) V_{DA} bara gerilimi simülasyon sonuçları. 72
Şekil 3.31: (a) a-b-c koordinatlarından (b) α-β-0 durağan referans yapıdan ve d-q-0 senkron referans yapıya dönüşüm. 74
Şekil 3.32: Önerilen SRY tabanlı YAY ile BGKD'nin denetim algoritması blok şeması. 76
Şekil 3.33: SRY tabanlı YAY ile BGKD'nin dengesiz-harmonikli kaynak gerilimi ve dengesiz-doğrusal olmayan yük koşullarında (1) yük gerilimleri, (2) trafo gerilimleri, (3) yük akımları, (4) kaynak akımları, (5) filtre akımları, (6) kaynak nötr akımı, (7) aktif güç, (8) reaktif güç, (9) kaynak akımı ve yük gerilimi, (10) V_{DA} bara gerilimi simülasyon sonuçları. 80
Şekil 3.34: SRY tabanlı YAY ile BGKD'nin dengesiz-harmonikli kaynak gerilimi ve dengeli-doğrusal olmayan yük koşullarında (1) yük gerilimleri, (2) trafo gerilimleri, (3) yük akımları, (4) kaynak akımları, (5) filtre akımları, (6) kaynak nötr akımı, (7) aktif güç, (8) reaktif güç, (9) kaynak akımı ve yük gerilimi, (10) V_{DA} bara gerilimi simülasyon sonuçları. 81
Şekil 3.35: SRY tabanlı YAY ile BGKD'nin ideal kaynak gerilimi ve dengeli-doğrusal olmayan yük koşullarında (1) yük gerilimleri, (2) trafo gerilimleri, (3) yük akımları, (4) kaynak akımları, (5) filtre akımları, (6) kaynak nötr akımı, (7) aktif güç, (8) reaktif güç, (9) kaynak akımı ve yük gerilimi, (10) V_{DA} bara gerilimi simülasyon sonuçları. 82
Şekil 3.36: SRY tabanlı YAY ile BGKD'nin ideal kaynak gerilimi ve dengesiz-doğrusal olmayan yük koşullarında (1) yük gerilimleri, (2) trafo gerilimleri, (3) yük akımları, (4) kaynak akımları, (5) filtre akımları, (6) kaynak nötr akımı, (7) aktif güç, (8) reaktif güç,(9) kaynak akımı ve yük gerilimi, (10) V_{DA} bara gerilimi simülasyon sonuçları. 83
Şekil 3.37: SRY tabanlı YAY ile BGKD'nin ideal kaynak gerilimi ve dengeli-doğrusal olmayan tristörlü yük koşullarında (1) yük gerilimleri, (2) trafo gerilimleri, (3) yük akımları, (4) kaynak akımları, (5) filtre akımları, (6) kaynak nötr akımı, (7) aktif güç, (8) reaktif güç, (9) kaynak akımı ve yük erilimi, (10) V_{DA} bara gerilimi simülasyon sonuçları. 84
Şekil 3.38: SRY tabanlı YAY ile sadece harmonik akım kompanzasyonu için 85
Şekil 3.39: SRY tabanlı YAY ile reaktif güç kompanzasyonu için referans filtre akımlarının hesaplanması blok şeması. 85
Şekil 3.40: SRY tabanlı YAY ile 5. harmonik akım kompanzasyonu için 86
Şekil 3.41: Önerilen SRY tabanlı KAY ile BGKD'nin denetim algoritması blok şeması. 87
Şekil 3.42: (a) Dengesiz ve harmonikli kaynak gerilimleri, (b) SAGF denetim algoritmasının ürettiği filtre gerilimleri ve (c) yük gerilimleri simülasyon sonucu. 89
Şekil 3.43: (a) dengesiz ve harmonikli yük akımları, (b) PAGF denetim algoritmasının ürettiği filtre akımları ve (c) kaynak akımları simülasyon sonuçları. 90
Şekil 3.44: (a) yük nötr akımı, (b) filtre nötr akımı ve 90

Şekil 3.45: Harmonik ve reaktif güç kompanzasyonu için, (a) a-fazı kaynak gerilimi ve yük akımı, (b) a-fazı yük gerilimi ve kaynak akımı simülasyon sonuçları. 91
Şekil 3.46: Önerilen SRY tabanlı KAY ile BGKD'nin dengesiz-harmonikli kaynak gerilimi ve dengesiz-doğrusal olmayan yük koşullarında (1) Yük gerilimleri, (2) trafo gerilimleri, (3) yük akımları, (4) kaynak akımları, (5) filtre akımları, (6) kaynak nötr akımı, (7) aktif güç, (8) reaktif güç, (9) kaynak akımı ve yük gerilimi, (10) V_{DA} bara gerilimi simülasyon sonuçları. 92
Şekil 3.47: Önerilen SRY tabanlı KAY ile BGKD'nin dengesiz-harmonikli kaynak gerilimi ve dengeli-doğrusal olmayan yük koşullarında (1) Yük gerilimleri, (2) trafo gerilimleri, (3) yük akımları, (4) kaynak akımları, (5) filtre akımları, (6) kaynak nötr akımı, (7) aktif güç, (8) reaktif güç, (9) kaynak akımı ve yük gerilimi, (10) V_{DA} bara gerilimi simülasyon sonuçları. 93
Şekil 3.48: Önerilen SRY tabanlı KAY ile BGKD'nin ideal kaynak gerilimi ve dengeli-doğrusal olmayan yük koşullarında (1) Yük gerilimleri, (2) trafo gerilimleri, (3) yük akımları, (4) kaynak akımları, (5) filtre akımları, (6) kaynak nötr akımı, (7) aktif güç, (8) reaktif güç, (9) kaynak akımı ve yük gerilimi, (10) V_{DA} bara gerilimi simülasyon sonuçları. 94
Şekil 3.49: Önerilen SRY tabanlı KAY ile BGKD'nin ideal kaynak gerilimi ve dengesiz-doğrusal olmayan yük koşullarında (1) Yük gerilimleri, (2) trafo gerilimleri, (3) yük akımları, (4) kaynak akımları, (5) filtre akımları, (6) kaynak nötr akımı, (7) aktif güç, (8) reaktif güç, (9) kaynak akımı ve yük gerilimi, (10) V_{DA} bara gerilimi simülasyon sonuçları. 95
Şekil 3.50: Önerilen SRY tabanlı KAY ile BGKD'nin ideal kaynak gerilimi ve dengeli-doğrusal olmayan tristörlü yük koşullarında (1) Yük gerilimleri, (2) trafo gerilimleri, (3) yük akımları, (4) kaynak akımları, (5) filtre akımları, (6) kaynak nötr akımı, (7) aktif güç, (8) reaktif güç, (9) kaynak akımı ve yük gerilimi, (10) V_{DA} bara gerilimi simülasyon sonuçları. 96
Şekil 4.1:Tasarlanan F28335DSP uygulama geliştirme kartı genel blok şeması..... 102
Şekil 4.2: (devam) Tasarlanan F28335 DSP uygulama geliştirme kartının..... 104
Şekil 4.3: (a) eZdsp F28335 DSK (b) tasarlanan F28335 DSP kartı fotoğrafları. ... 105
Şekil 4.4: PAGF-DSP denetim katının genel blok şeması. 106
Şekil 4.5: SAGF-DSP denetim katının genel blok şeması. 107
Şekil 4.6: FFT-Sistem denetim ve harmonik analiz katı genel blok şeması. 108
Şekil 4.7: F28335 DSP ana kartı fotoğrafı. 108
Şekil 4.8: (a) LEM akım sensörünün bağlantı (b) çalışma prensibi devre şekli. 109
Şekil 4.9: Akım ölçüm ana kartı fotoğrafı. 110
Şekil 4.10: (a) LEM gerilim sensörünün bağlantı (b) çalışma prensibi devre şekli. 111
Şekil 4.11: Gerilim ölçüm ana kartı fotoğrafı. 111
Şekil 4.12: Sürekli zaman sinyalin örneklenmesi. 112
Şekil 4.13: Sinyal düzenleyici ana kartının modülsüz fotoğrafı. 113
Şekil 4.14: Akım sinyal düzenleyici kartı blok diyagramı. 114
Şekil 4.15: Ölçülen her sinyal için analog ve sayısal sinyallerin üretilmesi. 114
Şekil 4.16: Akım sinyal düzenleyici kartının fotoğrafı. 115
Şekil 4.17: Gerilim sinyal düzenleyici kartı blok diyagramı. 115
Şekil 4.18: Gerilim sinyal düzenleyici kartının fotoğrafı. 116
Şekil 4.19: V_{DA} gerim ölçüm katı genel blok diyagramı. 116

Şekil 4.20: Sinyal denetim ve hata denetim kartı blok diyagramı. 117
Şekil 4.21: Sinyal denetim ve hata denetim kartı fotoğrafı. 118
Şekil 4.22: Sinyal düzenleyici ana kartının fotoğrafı. 119
Şekil 4.23: Grafik LCD gösterge kartı. 120
Şekil 4.24: BGKD denetim sistemi fotoğrafı. 121
Şekil 4.25: BGKD deneysel düzeneğinde kullanılan devreler için besleme kaynağı. 122
Şekil 4.26: CONCEPT 6SD106EI-17 IGBT sürücü modülü kullanarak tasarlanan IGBT sürücü kartı blok diyagramı 123
Şekil 4.27: CONCEPT 6SD106EI-17 IGBT sürücü modülü kullanarak tasarlanan IGBT sürücü kartı fotoğrafları 124
Şekil 4.28: Semikron SKHI 61 IGBT sürücü modülü kullanarak tasarlanan IGBT sürücü kartı blok diyagramı 124
Şekil 4.29: Semikron SKHI 61 IGBT sürücü modülü kullanarak tasarlanan IGBT sürücü kartı fotoğrafları 125
Şekil 4.30: 1- kollu SEMiX 302GB128Ds IGBT, Semikton SKYPER 32PRO IGBT sürücü modül ve Evaluation Board 2s SKYPER 32PRO fotoğrafı. 125
Şekil 4.31: Evaluation Board 2s SKYPER 32PRO boardlarını birleştirme kartı fotoğrafı. 126
Şekil 4.32: 3-kollu SEMİKRON SKYPER 32PRO IGBT sürücü sistemi fotoğrafı. 126
Şekil 4.33: (a) sade (b) tasarlanan IGBT PCB kartı ile birlikte 3-kollu Semix 151 GD12T4s IGBT modülü fotoğrafı. 127
Şekil 4.34: DA bara ve IGBT güç katı fotoğrafı. 128
Şekil 4.35: DA manyetik gücü ve birim başına manyetik geçirgenlik eğrisi[84]. .. 130
Şekil 4.36: Kool Mμ E nüve seçme eğrisi[84]. 131
Şekil 4.37: Kool Mμ E nüve manyetik parametreleri [84]. 132
Şekil 4.38: tasarlanan hat filtre endüktanslarının fotoğrafı. 132
Şekil 4.39: SAGF ve PAGF güç katında kullanılan anahtarlama RC filtre elemanlarının (a) bağlantı şekli (b) fotoğrafı. 133
Şekil 4.40: 1-fazlı seri transformatörin fotoğrafı. 134
Şekil 4.41: Genel amaçlı tristör sürücü devresi blok diyagramı. 135
Şekil 4.42: Genel amaçlı tristör sürücü kartı (a) LCD siz (b) LCD'li fotoğrafı. 136
Şekil 4.43: Statik anahtar veya AA Denetleyici kartı fotoğrafı. 137
Şekil 4.44: AA denetleyici için (a) α=5°, (b) α=55° 3-fazlı kaynak gerilimleri deneysel sonuçları 137
Şekil 4.45: 3-Fazlı tam denetimli tristörlü doğrultucu fotoğrafı. 138
Şekil 4.46: 3-fazlı tam denetimli doğrultucu (a) α=15°, (b) α=60° için DA gerilimi, a-b faz gerilimi Vab ve senkron sinyali örnek deneysel sonuçları. 138
Şekil 4.47 : 3-Fazlı AA hat reaktörü fotoğrafı. 139
Şekil 4.48: Şebeke entegreli HGK genel blok şeması. 139
Şekil 4.49: Şebeke entegreli HGK açık blok şeması. 140
Şekil 4.50: Önerilen SRY tabanlı HGK denetim algoritması blok şeması. 141
Şekil 4.51: (a) Kaynak gerilimleri v_{Kabc} HGK öncesi ve sonrası dalga şekileri, (b) kaynak gerilimleri HGK öncesi harmonik dağılımı, (c) sadece 3. harmonik enjekte edilmiş kaynak gerilimleri HGK sonrası harmonik dağılımı deneysel sonuçları. 144
Şekil 4.52: (a) Kaynak gerilimleri v_{Kabc} HGK öncesi ve sonrası dalga şekileri, (b) kaynak gerilimleri HGK öncesi harmonik dağılımı, (c) sadece 5. harmonik

enjekte edilmiş kaynak gerilimleri HGK sonrası harmonik dağılımı deneysel sonuçları. 145
Şekil 4.53: (a) Kaynak gerilimleri v_{Kabc} HGK öncesi ve sonrası dalga şekileri, (b) kaynak gerilimleri HGK öncesi harmonik dağılımı, (c) 3. ve 5. harmonikleri enjekte edilmiş kaynak gerilimleri HGK sonrası harmonik dağılımı deneysel sonuçları. 146
Şekil 4.54: (a) Kaynak gerilimleri v_{Kabc} HGK öncesi ve sonrası dalga şekileri, (b) kaynak gerilimleri HGK öncesi harmonik dağılımı, (c) sadece 7. harmonik enjekte edilmiş kaynak gerilimleri HGK sonrası harmonik dağılımı deneysel sonuçları. 147
Şekil 4.55: (a) Kaynak gerilimleri v_{Kabc} HGK öncesi ve sonrası dalga şekileri, (b) kaynak gerilimleri HGK öncesi harmonik dağılımı, (c) 3. ve 5. harmonikleri enjekte edilmiş kaynak gerilimleri HGK sonrası harmonik dağılımı deneysel sonuçları. 148
Şekil 4.56: Kaynak gerilimleri v_{Kabc} 7. ve 9. harmonikler enjekte edilmiş HGK öncesi ve sonrası dalga şekleri deneysel sonuçları. 149
Şekil 4.57: Kaynak gerilimleri v_{Kabc} 11. harmonik enjekte edilmiş HGK öncesi ve sonrası dalga şekleri deneysel sonuçları. 149
Şekil 4.58: (a) ve (b) kaynak gerilimlerinde oluşturulan dengesizlikler HGK öncesi ve sonrası dalga şekilleri, (c) - (f) dengesizliklerle ilgili HGK öncesi ve sonrası harmonik analizörle alınmış değerlerin deneysel sonuçları. 151
Şekil 4.59: (a) kaynak gerilimlerinde oluşturulan gerilim çökmesi HGK öncesi ve sonrası dalga şekilleri, (b) ve (c) gerilim çökmesi ile ilgili HGK öncesi ve sonrası harmonik analizörle alınmış değerlerin deneysel sonuçları. 152
Şekil 5.1: N=8 için W matrisinin aldığı değerler 157
Şekil 5.2: DSP kartı ile bilgisayar yazılımı arasında iletişimi sağlayan komut dizimi. 160
Şekil 5.3: Grafik LCD gösterge kartı (b) BGKD denetim sisteminin bağlantı şekli, (c) harmonikli akım dalga şekli ve (d) harmonikli akımın harmonik dağılımı fotoğrafı. 163
Şekil 5.4: Grafik LCD gösterge kartı menülerine ait (a) ana menü, (b) sinyal menü, (c) FFT menü, (d) SAF veya PAF menü, (e) 3-fazlı harmonikli yük akım dalga şekilleri ve 165
Şekil 5.5: SDVAY ile BGKD sistem parametrelerin izlenmesi ve denetlenmesi fotoğrafı. 166
Şekil 5.6: SDVAY ile 3-fazlı kaynak gerilimlerin dalga şekli ve harmonik analizi fotoğrafı. 167
Şekil 5.7: SDVAY ile 3-fazlı 6-darbeli diyotlu doğrultucunun kaynaktan çektiği yük akımın dalga şekli ve harmonik analizi fotoğrafı. 167
Şekil 5.8: SDVAY ile 3-fazlı 6-darbeli diyotlu doğrultucunun kaynaktan çektiği a-fazı kaynak akımın ve kaynak gerilim dalga şekli ve harmonik analizi fotoğrafı. 168
Şekil 5.9: SDVAY ile a-fazı kaynak akımın ve kaynak gerilim zamana göre kayıt edilmiş dalga şekli ve harmonik analizi fotoğrafı 168
Şekil 5.10: SDVAY ile a-fazı kaynak akımın ve kaynak gerilim zamana göre kayıt edilmiş dalga şekli ve harmonik analizi fotoğrafı 169
Şekil 5.11: SDVAY ile a-fazı kaynak akımın ve kaynak gerilim zamana göre kayıt edilmiş dalga şekli ve harmonik analizi fotoğrafı 169
Şekil 6.1: GBKD deneysel uygulama düzeneğinin genel blok şeması…… 174

Şekil 6.2: FFT DSP denetim algoritması akış diyagramı. 175
Şekil 6.3: SAGF DSP denetim algoritması akış diyagramı. 176
Şekil 6.4: PAGF DSP denetim algoritması akış diyagramı. 177
Şekil 6.5: (a)-(c) BGKD deneysel uygulama düzeneğinin fotoğrafları. 179
Şekil 6.6: Deneysel uygulama düzeneğine ait harmonik analizör ile alınmış (a) kaynak gerilimleri dalga şekilleri, (b) kaynak gerilimleri harmonik dağılımı, (c) yük akımları dalga şekilleri, (d) yük akımları harmonik dağılımı, (e) yükün kaynaktan geçtiği güç oranları, (f) kaynak gerilimleri ve yük akımları maksimum ve etkin değerleri sonuçları. 181
Şekil 6.7: (a) ARGT tabanlı YAY ile PAGF öncesi ve sonrası i_{Kabc} kaynak akımları dalga şekli, (b) PAGF öncesi i_{Kabc} kaynak akımları harmonik dağılımı ve (c) PAGF sonrası i_{Kabc} kaynak akımları harmonik dağılımı. 182
Şekil 6.8: (a) ARGT tabanlı KAY ile PAGF öncesi ve sonrası i_{Kabc} kaynak akımları dalga şekli, (b) PAGF öncesi i_{Kabc} kaynak akımları harmonik dağılımı ve (c) PAGF sonrası i_{Kabc} kaynak akımları harmonik dağılımı. 183
Şekil 6.9: (a) v_{Labc} yük gerilimleri SAGF öncesi ve sonrası dalga şekli, (b) v_{Labc} yük gerilimleri SAGF öncesi harmonik dağılımı, (c) v_{Labc} yük gerilimleri SAGF sonrası harmonik dağılımı. 184
Şekil 6.10: (a) Önerilen SRY tabanlı YAY ile PAGF öncesi ve sonrası i_{Kabc} kaynak akımları dalga şekli, (b) PAGF öncesi i_{Kabc} kaynak akımları harmonik dağılımı ve (c) PAGF sonrası i_{Kabc} kaynak akımları harmonik dağılımı. 185
Şekil 6.11: (a) Önerilen SRY tabanlı KAY ile PAGF öncesi ve sonrası i_{Kabc} kaynak akımları dalga şekli, (b) PAGF öncesi i_{Kabc} kaynak akımları harmonik dağılımı ve (c) PAGF sonrası i_{Kabc} kaynak akımları harmonik dağılımı. 186
Şekil 6.12: (a) 3-fazlı (b) tek fazlı PAGF öncesi ve sonrası i_{Kabc} kaynak akımları ve DA bara gerilimi anlık değişim dalga şekilleri deneysel sonuçları. 187
Şekil 6.13: (devam) (a)-(c) PAGF devrede iken %100 yük değişimi öncesi ve sonrası DA bara gerilimi ve kaynak akımı değişimi deneysel sonuçları. 189
Şekil 6.14: (a) dengeli yük durumunda kaynak akımları PAGF öncesi ve sonrası, (b) dengesiz yük durumunda kaynak akımları PAGF öncesi ve sonrası ve (c) yük nötr akımı i_{Yn}, filtre nötr akımı i_{Cn} ve kaynak nötr akımı i_{Kn} PAGF öncesi ve sonra deneysel sonuçları. 190
Şekil 6.15: (a) tristörlerin tetikleme α açısı α=5° durumunda, (b) ve (c) α=45° durumunda, (d) ve (e) α=60° durumunda, (f) ve (g) α=90° olması durumunda PAGF ile alınan kaynak akımları ve tristörlü doğrultucunun DA yük gerilimi dalga şekilleri deneysel sonuçları. 191
Şekil 6.16: (a) RC filtre elemanları kullanılmadığında, (b)'de R= 4,7 Ω ve C=4,7 μF alınması durumunda ve (c)'de R= 2,35 Ω ve C=4,7 μF alınması durumunda 193
Şekil 6.17: (a) v_{Yabc} yük gerilimleri SAGF öncesi ve sonrası dalga şekli, (b) v_{Yabc} yük gerilimleri SAGF öncesi harmonik dağılımı, (c) v_{Yabc} yük gerilimleri SAGF sonrası harmonik dağılımı deneysel sonuçları verilmektedir. 194
Şekil 6.18: (a) v_{Ka} kaynak, v_{Ya} yük ve v_{Ha} harmonik gerilimleri HGK öncesi ve sonrası dalga şekilleri, (b) v_{Ka} kaynak, v_{Ya} yük ve v_{Ha} harmonik gerilimleri SAGF öncesi ve sonrası dalga şekilleri, (c) v_{Ka} kaynak ve v_{Ya} yük gerilimleri HGK sonrası harmonik dağılımı ve (d) v_{Ka} kaynak ve v_{Ya} yük gerilimleri SAGF sonrası harmonik dağılımı deneysel sonuçları. 195
Şekil 6.19: (a) v_{Ka} kaynak, v_{Ya} yük ve v_{Ha} harmonik gerilimleri SAGF öncesi ve sonrası dalga şekilleri, (b) v_{Ka} kaynak ve v_{Ya} yük gerilimleri HGK sonrası

harmonik dağılımı ve (c) v_{Ka} kaynak ve v_{Ya} yük gerilimleri SAGF sonrası harmonik dağılımı deneysel sonuçları. 196
Şekil 6.20: (a) v_{Ka} kaynak, v_{Ya} yük ve v_{Ha} harmonik gerilimleri HGK öncesi ve sonrası dalga şekilleri, (b) v_{Ka} kaynak, v_{Ya} yük ve v_{Ha} harmonik gerilimleri SAGF öncesi ve sonrası dalga şekilleri, (c) v_{Ka} kaynak ve v_{Ya} yük gerilimleri HGK sonrası harmonik dağılımı ve (d) v_{Ka} kaynak ve v_{Ya} yük gerilimleri SAGF sonrası harmonik dağılımı deneysel sonuçları. 197
Şekil 6.21: (a) v_{Ka} kaynak, v_{Ya} yük ve v_{Ha} harmonik gerilimleri HGK öncesi ve sonrası dalga şekilleri, (b) v_{Ka} kaynak, v_{Ya} yük ve v_{Ha} harmonik gerilimleri SAGF öncesi ve sonrası dalga şekilleri, (c) v_{Ka} kaynak ve v_{Ya} yük gerilimleri HGK sonrası harmonik dağılımı ve (d) v_{Ka} kaynak ve v_{Ya} yük gerilimleri SAGF sonrası harmonik dağılımı deneysel sonuçları. 198
Şekil 6.22: (a) v_{Ka} kaynak, v_{Ya} yük ve v_{Ha} harmonik gerilimleri HGK öncesi ve sonrası dalga şekilleri, (b) v_{Ka} kaynak, v_{Ya} yük ve v_{Ha} harmonik gerilimleri SAGF öncesi ve sonrası dalga şekilleri, (c) v_{Ka} kaynak ve v_{Ya} yük gerilimleri HGK sonrası harmonik dağılımı ve (d) v_{Ka} kaynak ve v_{Ya} yük gerilimleri SAGF sonrası harmonik dağılımı deneysel sonuçları. 199
Şekil 6.23: (a) v_{Ka} kaynak, v_{Ya} yük ve v_{Ha} harmonik gerilimleri HGK öncesi ve sonrası dalga şekilleri, (b) v_{Ka} kaynak, v_{Ya} yük ve v_{Ha} harmonik gerilimleri SAGF öncesi ve sonrası dalga şekilleri, (c) v_{Ka} kaynak ve v_{Ya} yük gerilimleri HGK sonrası harmonik dağılımı ve (d) v_{Ka} kaynak ve v_{Ya} yük gerilimleri SAGF sonrası harmonik dağılımı deneysel sonuçları. 199
Şekil 6.24: (a) kısa süreli (b) uzun süreli HGK ile üretilen gerilim çömesi ve SAGF ile düzeltilmesi ile ilgili kaynak ve yük gerilimi dalga şekli deneysel sonuçları. 200
Şekil 6.25: (a) ve (b)'de v_{Yabc} yük gerilimleri SAGF öncesi ve sonrası gerilim dalga şekilleri, (c) ve (d) v_{Yabc} yük gerilimleri SAGF öncesi ve sonrası harmonik analiz deneysel sonuçları. 201
Şekil 6.26: (a) ve (b)'de v_{Yabc} yük gerilimleri ve i_{Ya} yük akımı SAGF öncesi ve sonrası dalga şekilleri deneysel sonuçları. 201

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1.1: Aktif ve reaktif enerji tüketim oranları 2
Tablo 2.1: IEEE-1159 standardında tanımlanan elektrik güç kalitesi problemlerinin sınıflandırılması 12
Tablo 2.2: Elektrik güç kalitesi problemlerinin özeti 17
Tablo 2.3: Güç kalitesi problemlerinden dolayı bilgisayar sistemlerinde oluşan bazı sorunlar 18
Tablo 2.4: Harmonik frekansları ve faz sıraları 20
Tablo 2.5: Güç sistemlerde harmonik çeşitleri 21
Tablo 2.6: IEEE 519-1992 akım harmonik sınırları 26
Tablo 2.7: IEEE 519-1992 gerilim harmonik sınırları 27
Tablo 3.1: C_1 ve C_2 kondansatörlerindeki gerilim değişim durumları 44
Tablo 3.2: PAGF ile yapılacak kompanzasyon tipine göre gerekli güç bileşenleri ... 45
Tablo 3.3: BGKD Simülasyon sistem parametreleri 51
Tablo 3.4: SRY tabanlı PAGF ile yapılacak kompanzasyon tipine göre gerekli akım bileşenleri 76
Tablo 3.5: Ortak bağlantı noktasında, geleneksel ARGT tabanlı ve önerilen SRY tabanlı YAY ve KAY ile BGKD denetim algoritmalarıyla alınan simülasyon sonuçların karşılaştırılması. 97
Tablo 4.1: Uygulama geliştirme kartlarının karşılaştırılması 104
Tablo 4.2: 3-fazlı AA hat reaktör parametreleri 138
Tablo 4.3: HGK sistem parametreleri 140
Tablo 5.1: TYPE parametresinin aldığı örnek değerler ve açıklamaları 160
Tablo 5.2: CMD parametresinin aldığı bazı örnek değerler ve açıklamaları 161
Tablo 5.3: OP parametresinin aldığı bazı örnek değerler 162
Tablo 5.4: Örnek iletişim komutları ve açıklamaları 162
Tablo 6.1: BGKD deneysel sistem parametreleri 180
Tablo 6.2: Ortak bağlatın nontasında, geleneksel ARGT tabanlı ve önerilen SRY tabanlı YAY ve KAY ile BGKD denetim algoritmalarıyla alınan deneysel sonuçların karşılaştırılması 202

SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

$[C]$: ARGT tabanlı dönüşüm matrisi

$[C]^{-1}$: ARGT tabanlı ters dönüşüm matrisi

C_{DA} : DA-bara kondansatörü (F)

C_{da1} : Bir fazlı diyotlu doğrultucu DA taraf kondansatörü (F)

C_1 : Seri bağlı DA-bara kondansatörü (F)

C_2 : Seri bağlı DA-bara kondansatörü (F)

C_{Cabc} : Üç fazlı PAGF filtre kondansatörü (F)

C_{Tabc} : Üç fazlı SAGF filtre kondansatörü (F)

C_{Habc} : Üç fazlı HGK filtre kondansatörü (F)

f : Frekans (Hz)

I_n : Akım n. harmonik etkin değeri (A)

$i_{(t)}$: Akımın anlık değeri (A)

I_{rms} : Akımın etkin değeri (A)

I_{ort} : Akımın ortalama değeri (A)

I_a : Akım a-fazı etkin değeri (A)

I_{max} : Akımın maksimum değeri (A)

i_a : "a" fazı akımı (A)

i_b : "b" fazı akımı (A)

i_c : "c" fazı akımı (A)

i_0 : Nötr akımı (A)

I_h : Akımın h. harmonik bileşeni (A)

i_{Ha}, i_{Hb}, i_{Hc} : a, b, c fazı anlık SAGF filtre akımları (A)

$i_{H\alpha}, i_{H\beta}, i_{H0}$: α-β-0 koordinatlarında anlık SAGF filtre akımları (A)

$i'_{H\alpha}, i'_{H\beta}, i'_{H0}$: α-β-0 koordinatlarında SAGF filtre referans akımları (A)

i_{Kabc} : Üç faz anlık kaynak akımları (A)

i'_{Kabc} : Üç faz anlık kaynak referans akımları (A)

i_{Ka}, i_{Kb}, i_{Kc} : a, b, c fazı anlık kaynak akımları (A)

$i'_{Ka}, i'_{Kb}, i'_{Kc}$: a, b, c fazı anlık kaynak referans akımları (A)

$i'_{K\alpha}, i'_{K\beta}, i'_{K0}$: α-β-0 koordinatlarında anlık kaynak referans akımları (A)

i_{Kd}, i_{Kq}, i_{K0} : d-q-0 koordinatlarında anlık kaynak akımları (A)

$i'_{Kd}, i'_{Kq}, i'_{K0}$: d-q-0 koordinatlarında anlık kaynak referans akımları (A)

i_{Kn} : Nötr kaynak akımı (A)

i_d : "d" ekseni akımı (A)

$\bar{i}_d$: "d" ekseni akımı DA bileşeni (A)

$\bar{i}_{Kd}$: "d" ekseni kaynak akımı DA bileşeni (A)

$\bar{i}_{Yd5}$: "d" ekseni 5. harmonik yük akımı DA bileşeni (A)

$\bar{i}_{kayip}$: "d" ekseni ortalama kayıp akımı DA bileşeni (A)

$\tilde{i}_{d}$: "d" ekseni akımı AA bileşeni (A)

$\tilde{i}_{Yd}$: "d" ekseni yük akımı AA bileşeni (A)

i_{Cabc} : Üç faz anlık PAGF filtre akımları (A)

i'_{Cabc} : Üç faz anlık PAGF filtre referans akımları (A)

i_{Ca}, i_{Cb}, i_{Cc} : a, b, c fazı anlık PAGF filtre akımları (A)

$i'_{Ca}, i'_{Cb}, i'_{Cc}$: a, b, c fazı anlık PAGF filtre referans akımları (A)

$i_{C\alpha}, i_{C\beta}, i_{C0}$: α-β-0 koordinatlarında anlık PAGF akımları (A)

$i'_{C\alpha}, i'_{C\beta}, i'_{C0}$: α-β-0 koordinatlarında anlık PAGF referans akımları (A)

i_{Cn} : Nötr PAGF filtre akımı (A)

i_{q} : "q" ekseni akımı (A)

$\bar{i}_{q}$: "q" ekseni akımı DA bileşeni (A)

$\tilde{i}_{q}$: "q" ekseni akımı AA bileşeni (A)

$\bar{i}_{Yq}$: "q" ekseni yük akımı DA bileşeni (A)

$\bar{i}_{Yq5}$: "q" ekseni 5. harmonik yük akımı DA bileşeni (A)

$\tilde{i}_{Yq}$: "q" ekseni yük akımı AA bileşeni (A)

i_{y} : Yük akımı (A)

i_{Yn} : Nötr yük akımı (A)

i_{Yabc} : Üç faz anlık yük akımları (A)

i'_{Yabc} : Üç faz anlık yük referans akımları (A)

i_{Ya}, i_{Yb}, i_{Yc} : a, b, c fazı anlık yük akımları (A)

$i_{Y\alpha}, i_{Y\beta}, i_{Y0}$: α-β-0 koordinatlarında anlık yük akımları (A)

$i'_{Y\alpha}, i'_{Y\beta}, i'_{Y0}$: α-β-0 koordinatlarında anlık yük referans akımları (A)

i_{Yd}, i_{Yq}, i_{Y0} : d-q-0 koordinatlarında anlık yük akımları (A)

$i'_{Yd}, i'_{Yq}, i'_{Y0}$: d-q-0 koordinatlarında anlık yük referans akımları (A)

$i_{Yd5}, i_{Yq5}, i_{Y05}$: d-q-0 koordinatlarında anlık 5.harmonik yük akımları (A)

$i'_{Yd5}, i'_{Yq5}, i'_{Y05}$: d-q-0 koordinatlarında 5.harmonik yük referans akımları (A)

i_{Tabc} : Üç faz anlık trafo giriş akımları (A)

i_{Ta}, i_{Tb}, i_{Tc} : a, b, c fazı anlık trafo giriş akımları (A)

i_{yd} : Yük akımı "d" ekseni bileşeni (A)

$\bar{i}_{yd}$: Yük akımı "d" ekseni DA bileşeni (A)

$\tilde{i}_{yd}$: Yük akımı "d" ekseni AA bileşeni (A)

i_{yh} : Yük harmonik akımı (A)

i_{yq} : Yük akımı "q" ekseni bileşeni (A)

$\bar{i}_{yq}$: Yük akımı "q" ekseni DA bileşeni (A)

$\tilde{i}_{yq}$: Yük akımı "q" ekseni AA bileşeni (A)

i_{α} : Akımın α ekseni bileşeni (A)

i_{β} : Akımın β ekseni bileşeni (A)

i_{0} : Akımın 0 ekseni bileşeni (A)

L_{Kabc} : Üç faz kaynak endüktansları (H)
L_{Yabc} : Üç faz doğrultucu AA taraf yük endüktansları (H)
L_{Ya1} : Bir faz diyot doğrultucu AA taraf yük endüktansı (H)
L_{da3} : Üç faz diyot doğrultucu DA taraf yük endüktansı (H)
L_{Cabc} : Üç faz SAGF taraf filtre endüktansları (H)
L_{Tabc} : Üç faz SAGF taraf filtre endüktansları (H)
p_a : a fazı anlık gücü (W)
p_0 : Anlık sıfır sıralı güçü (W)
$\overline{p}_0$: Anlık sıfır sıra güçün DA bileşeni (W)
$\overline{p}$: Anlık gücün DA bileşeni (W)
$\tilde{p}$: Anlık gücün AA bileşeni (W)
$\overline{q}$: Sanal gücün DA bileşeni (VAr)
$\tilde{q}$: Sanal gücün AA bileşeni (IVA)
$\overline{p}_y$: Anlık yük gücü DA bileşeni (W)
$\tilde{p}_y$: Anlık yük gücü AA bileşeni (W)
$\overline{q}_y$: Yük Sanal gücünün DA bileşeni (VAr)
P : Aktif güç (W)
$P_{3\varphi}$: 3-fazlı aktif güç (W)
$\tilde{p}_C$: Referans filtre anlık gücü AA bileşeni (W)
$\tilde{p}_0$: Anlık sıfır sıra gücün dalgalı bileşeni(W)
$p_{2\omega}$: Gerçek gücün negatif sıra bileşeni(W)
p_h : Gerçek gücün harmonik bileşeni(W)
$p_{3\varphi}$: Üç faz anlık gerçek güç(W)
$\overline{p}_{3\varphi}$: ortalama 3-fazlı aktif gücü DA bileşeni (W)
$\overline{p}_{Kayıp}$: Ortalama kayıp gerçek güç (W)
p_Y : Anlık yük gücü (W)
$\overline{p}_y$: Anlık yük gücü DA bileşeni (W)
$\tilde{p}_Y$: Anlık yük gücü AA bileşeni (W)
Q : Üç faz sanal (reaktif) güç (IVA)
$Q_{3\varphi}$: Üç faz sanal (reaktif) güç (IVA)
$\overline{q}$: Sanal gücün DA bileşeni (VAr)
$\tilde{q}$: Sanal gücün AA bileşeni (IVA)
q_y : Yük sanal gücü (IVA)
$\overline{q}_y$: Yük sanal gücünün DA bileşeni (VAr)
$\tilde{q}_y$: Yük sanal gücünün AA bileşeni (IVA)
q_h : Sanal gücün harmonik bileşeni(IVA)
$q_{2\omega}$: Sanal gücün negatif sıra bileşeni(IVA)
R_{da3} : Üç fazlı doğrultucu DA taraf yük direnci (Ω)
R_{da1} : Bir fazlı doğrultucu DA taraf yük direnci (Ω)
R_{Kabc} : Üç faz kaynak direçleri (Ω)

R_{Tabc} : Üç faz SAGF filtre direçleri (Ω)
R_{Yabc} : Üç faz yük endüktans iç direçleri (Ω)
R_{Cabc} : Üç faz PAGF filtre direçleri (Ω)
R_{Habc} : Üç faz HKG filtre direçleri (Ω)
RS-232 : Seri haberleşme protokolü
[T] : SRY tabanlı dönüşüm matrisi
$[T]^{-1}$: SRY tabanlı ters dönüşüm matrisi
V : Gerilimin efektif değeri (V)
V_n : Gerilim n. harmonik etkin değeri (V)
V_a : Gerilim a-fazı etkin değeri (V)
V_0 : Gerilimin doğru bileşen değeri (V)
v_a : "a" fazı anlık gerilimi (V)
v_b : "b" fazı anlık gerilimi (V)
v_c : "c" fazı anlık gerilimi (V)
v_{Kabc} : Üç faz anlık kaynak gerilimleri (V)
v'_{Kabc} : Üç faz anlık kaynak referans gerilimleri (V)
v_{Ka}, v_{Kb}, v_{Kc} : a, b, c fazı anlık kayak gerilimleri (V)
$v'_{Ka}, v'_{Kb}, v'_{Kc}$: a-b-c koordinatlarında anlık kaynak referans gerilimleri (V)
$v_{K\alpha}, v_{K\beta}, v_{K0}$: α-β-0 koordinatlarında anlık kaynak gerilimleri (V)
$v'_{K\alpha}, v'_{K\beta}, v'_{K0}$: α-β-0 koordinatlarında anlık kaynak referans gerilimleri (V)
v_{Fabc} : Üç faz filtre gerilimleri (V)
v'_{Fabc} : Üç faz filtre referans gerilimleri (V)
$v_{Fa}, v_{Fb}, v_{Fc},$: a, b, c fazı anlık filtre gerilimleri (V)
$v'_{Fa}, v'_{Fb}, v'_{Fc},$: a, b, c fazı anlık referans filtre gerilimleri (V)
$v_{Ha}, v_{Hb}, v_{Hc},$: a, b, c fazı anlık SAGF filtre gerilimleri (V)
v_{Kd}, v_{Kq}, v_{K0} : d-q-0 koordinatlarında anlık kaynak gerilimleri (V)
$v'_{Kd}, v'_{Kq}, v'_{K0}$: d-q-0 koordinatlarında anlık kaynak referans gerilimleri (V)
v_{Tabc} : Üç faz trafo gerilimleri (V)
v_{Ta}, v_{Tb}, v_{Tc} : a, b, c fazı anlık yük gerilimleri (V)
v_{Yabc} : Üç faz yük gerilimleri (V)
v_{Ya}, v_{Yb}, v_{Yc} : a, b, c fazı anlık yük gerilimleri (V)
$v'_{Ya}, v'_{Yb}, v'_{Yc},$: a, b, c fazı anlık referans yük gerilimleri (V)
V_{DA} : DA-bara gerilimi (V)
$V_{f\text{-}f}$: Fazlar arası gerilim (V)
V_h : Gerilimin h. harmonik bileşeni (V)
v_{ref} : Referans gerilim (V)
v_α : Gerilimin α ekseni bileşeni (V)
v_β : Gerilimin β ekseni bileşeni (V)
v_0 : Gerilimin 0 ekseni bileşeni (V)
$Z_{yük}$: Yük empedansı (Ω)

α	: Tetikleme açısı (derece)
ω	: Açısal hız (rad/s)
ω_h	: Harmoniklerin açısal hızı (rad/s)
AA	: Alternatif Akım
AGF	: Alçak Geçiren Filtre
ARGT	: Anlık Reaktif Güç Teorisi
BGKD	: Birleşik Güç Kalite Düzenleyicisi
CPD	**:** Özel güç cihazları (Custom Power Devices)
DA	: Doğru Akım
DSP	: Sayısal işaret işlemci (Digital signal Processor)
DIN	: Bozulma indeksi (Distortion INdex)
EMI	**:** Elektro manyetik girişim (ElectroMagnetic Interference)
FACTS	**:** Esnek İletim Sistemleri **(**Flexible AC Transmission Systems)
GKE	: Gerilim Kaynaklı Evirici
GF	: Güç Faktörü
GLCD	: Grafik LCD
HB	: Histerisiz Bant
HF_h	: Harmonik faktör (Harmonic Factor)
HGK	: Harmonik Gerilim Kaynağı
FFT	: Hızlı Fourier dönüşümü (Fast Fourier Transform)
FHT	: Hızlı Hartley dönüşümü (Fast Hartley Transform)
KAY	: Kaynak Akımları ölçüm Yöntemi
I/O	: Çift yönlü dijital veri iletişim yolu (Input/Output)
IEC	: Uluslararası elektromekanik komisyon (International Electrotechnical Commission)
IEEE	: Elektrik ve elektronik mühendisleri enstitüsü (Institute of Electrical and Electronics Engineers)
IGBT	: Kapı izoleli çift kutuplu transistör (Insulated Gate Bipolar Transistor)
UPQC	: Birleşik güç kalite düzenleyicisi (Unified Power Quality Conditioner)
SAGF	: Seri Aktif Güç Filtresi
SD	: SD hafıza kartı
SPI	: Seri çevresel iletişim veri yolu (Serial Peripheral Interface)
SRY	: Senkron Referans Yapı
PCC	: Ortak bağlantı noktası (Point of Common Coupling)
PAGF	: Paralel Aktif Güç Filtresi
PLL	: Faz kilitlemeli çevrim (Phase Locked Loop)
PWM	: Darbe genişlik ayarı (Pulse Width Modulation)
THB	: Toplam harmonik bozulma (THD: Total Harmonic Distortion)

THD_I	: Akım toplam harmonik bozulum
THD_V	: Gerilim toplam harmonik bozulum
TIHD	: Toplam ara harmonik bozulma (Total Inter Harmonic Distortion)
TSHD	: Toplam alt harmonik bozulma (Total Sub Harmonic Distortion)
TDD	: Toplam talep bozulma (Total Demand Distortion)
YAY	: Yük akımları ölçüm yöntemi
YGF	: Yüksek Geçiren Filtre

BİRLEŞİK GÜÇ KALİTE DÜZENLEYİCİSİNİN SENKRON REFERANS YAPI TABANLI UYGULAMA TASARIMI VE ANALİZİ

Metin KESLER

Anahtar Kelimler: DSP, güç kalitesi, birleşik güç kalite düzenleyicisi, seri aktif güç filtresi, paralel aktif güç filtresi, harmonik akım ve reaktif güç kompanzasyon, aktif güç filtresi, reaktif güç kompanzasyon, harmonik kompanzasyon.

Özet: Günümüzde modern güç dağıtım sisteminin bileşenleri olan güç elektroniği temelli cihazlar hızlı bir şekilde artmaktadır. Bu cihazlar, güç işletmelerinde esnek denetim, düşük maliyet ve boyutlarının küçük olması gibi çok yönlü avantajlar sunmaktadır. Diğer yandan, bu cihazların işletilmesi, harmoniklerin oluşmasına ve reaktif güç bileşenleri gibi güç kalitesi problemlerinin üretilmesine sebep olmaktadır. Ayrıca, modern cihazlar kendilerine güç sağlayan gerilim kaynaklarına karşı oldukça duyarlı hale gelmektedirler. Bu yüzden, güç kalitesinin artırılması dağıtım sisteminin sağlıklı ve verimli çalışmasını sağlayarak güç kayıplarının azaltılmasına sebep olmakta ve böylece maliyetler açısından kazanç sağlamaktadır.

Aktif güç filtreleri ve geleneksel pasif filtreler, bazı güç kalitesi problemlerini gidermek için oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Birçok güç kalitesi problemlerini eşzamanlı olarak düzelten çok yönlü çözüm üreten cihazlar son zamanların ilgi odağı haline gelmektedir. Birleşik güç kalite düzenleyicisi (BGKD), güç kalitesi problemlerini çok yönlü olarak düzelten önemli bir aktif güç filtre sistemidir. BGKD, ortak DA-bara hattına arka arkaya bağlı iki adet gerilim kaynaklı evirici içermektedir. Bu eviricilerden birincisi, ayarlı bir gerilim kaynağı olarak seri aktif güç filtresi (SAGF) ve diğer evirici ise ayarlı bir akım kaynağı olarak paralel aktif güç filtresi (PAGF) işlevinde çalıştırılmaktadır.

Bu tez çalışmasında, farklı gerilim ve yük koşullarında BGKD sisteminin kompanzasyon kapasitesini artıran senkron referans yapı tabanlı yeni bir denetim yöntemi önerilmektedir. Geleneksel yöntemlere göre sistem parametrelerinin verimli kullanılması sonucunda, BGKD sistemi daha etkin ve performaslı işletilmekte ve kurulum maliyetlerini azaltmaktadır. Teorik analizler ve 10kW'lık deneysel test çalışmalar sonucunda önerilen BGKD denetim yönteminin uygulanabilirliği ve geçerliliği kanıtlanmaktadır. Önerilen BGKD denetim yöntemi doğrusal olmayan yük ve harmonikli kaynak gerilimi koşullarında performans değerlendirilmesi yapıldığında, kaynak gerilimi ve yük akımı harmonikleri etkili bir şekilde kompanze edilmektedir.

SYNCRONOUS REFERENCE FRAME BASED APPLICATION DESIGN AND ANALYSIS OF UNIFIED POWER QUALITY CONDITIONER

Metin KESLER

Keywords: DSP, power quality, UPQC, series APF, shunt APF, harmonic current and reactive power compensation, active power filter, harmonic compensation.

Abstract: Power electronics based equipments are rapidly increasing as key components in the present modern power distribution system. Power processing utilizing these devices offer vast advantages such as flexible control, cost reduction, overall size optimization, etc. On the other hand, operations of these devices give rise to some of the serious power quality problems, such as, the reactive power requirement and generation of harmonics. Moreover, modern equipments are becoming highly sensitive to the voltage supplied to them. Hence, improving the quality of power can not only make the power distribution systems healthier and more efficient, but also results in reduced power losses, and thus saving in terms of costs.

Active power filters and conventional passive filters are widely used to eliminate some of the important power quality problems. Recent trends are geared towards the realization of multitasking devices which can tackle several power quality problems simultaneously. The unified power quality conditioner (UPQC) is one of the most versatile active power filters that can compensate significant power quality issues. UPQC consists of two voltage source inverters connected back to back with each other sharing a common self-supporting DC link. One inverter is controlled as a variable voltage source in same manner as in the series active power filter (APF), and the other as a variable current source which is similar in operation as that of the shunt APF. The shunt APF is usually connected across the loads to compensate for all current-related problems such as the reactive power compensation, current harmonic compensation and load unbalance compensation. The series APF can compensate all voltage-related problems, such as voltage harmonics, voltage sag, voltage swell, flicker, voltage interruption, etc.

The present Ph.D. thesis proposes a novel control concept based on SRF method in which improves the UPQC compensation capabilities under different load and mains voltage conditions. This eventually results in a better utilization of the system parameters, and ultimately in the reduction of the overall cost of UPQC. Experimental test results obtained from a laboratory model of 10 kVA, along with a theoretical analysis are shown to verify the viability and effectiveness of the proposed UPQC control method. The performance evaluation of the propsoed approach under distorted source voltage and the non-linear load, the UPQC with the proposed control method, effectively compensates the harmonics in source voltage and load current.

1. GİRİŞ

Modern güç elektroniği sistemlerinin her geçen gün gelişmesi, elektrik alıcılarının çok çeşitlilik göstermesi ve hızla artan uygulama alanları nedeniyle bilgisayar, ofis ekipmanları, doğrultucular, eviriciler, ayarlı hız denetim cihazları, kesintisiz güç kaynakları, anahtarlamalı güç kaynakları ve ark fırınları, vb.. alıcıları şebekelerde ve iletim hatlarında reaktif güçlerin çekilmesine, harmonik akımların üretilmesine ve enerji kalitesinin düşmesine sebep olmaktadır.

Günümüzde enerji verimliliğinin korunması ve güç kalitesinin artırılması önemli bir sorun haline gelmiştir. Bu nedenle güç kalitesi sorunlarını ve çözüm yollarını araştırmak ve güç kalitesi sorunlarını çözmek için elektrik enerjisinin üretim noktasından tüketim noktasına kadar her safhasında üzerinde özenle durulması gerekmektedir. Son zamanlarda ülkemizde ve dünyada elektrik enerji kalitesini ve verimliliğini artırmak için bilim adamları tarafından çok sayıda çalışma yapılmaktadır.

Güç kalitesi problemlerini ve etkilerini azaltmak için uluslararası kuruluşlar tarafından IEC EN61000-3-2, IEC EN61000-3-4 "Electromagnetic compatibility (EMC)" ve IEEE 519-1992 [1] gibi çeşitli harmonik standartları tanımlanmıştır. Güç kalitesi problemlerine neden olan elektromanyetik olayların kategorileri ve tipik karakteristikleri IEEE 1159-1995 [2] standardında tanımlanmaktadır. Bu standartlarda güç kalitesi bozuklukları geçici olaylar (kısa süreli darbe ve salınım), kısa süreli gerilim değişimleri (kesinti, çökme ve yükselme), uzun süreli gerilim değişimleri (uzun süreli kesinti, gerilim çökmesi ve gerilim yükselmesi), gerilim dengesizliği, dalga şekli bozulması (DA bileşen, harmonik, ara harmonik, çentik ve gürültü), gerilim dalgalanmaları ve şebeke frekans değişimleri olarak ana başlıklar altında sınıflandırılmaktadır. Güç kalitesi, harmonikler ve etkileri bir sonraki bölümde daha ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

Ülkemizde güç kalitesi ve enerji verimi düşmesinden dolayı yeni yönetmelikler hazırlamakta veya var olan yönetmelikler tekrar düzenlemektedir. T.C. Enerji ve

Tabi Kaynaklar Bakanlığı (ETBK) ve T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) farklı zamanlarda çeşitli yönetmelikler yayınlamıştır [3-6].

EPDK, 25639 sayı ve 10.11.2004 tarihli "Elektrik İletimi Arz Güvenliği ve Kalitesi Yönetmeliği"nde güç faktörünü aşamalı olarak yükseltmiştir. Türkiye elektrik dağıtım sisteminde reaktif enerji akışları ile ilgili hususlar, 25.09.2002 tarihli ve 24887 sayılı Resmi Gazete'de yayınlanmıştır. "Elektrik Piyasası Müşteri Hizmetleri Yönetmeliği"nde yapılan 09.01.2007 tarihli ve 26398 sayılı ve 20.06.2007 tarihli ve 26558 sayılı resmi gazetede yayınlanan "Elektrik Piyasası Müşteri Hizmetleri Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik" ile yeniden düzenlenmiştir [6,7]. Tablo 1.1'de yukarıdaki yönetmeliğe göre reaktif enerji sınırlarının endüktif bölgede 0,98, kapasitif bölgede ise 0,988 değerlerine yükseltilmesi nedeniyle Türkiye Elektrik Dağıtım Sistemi'nden beslenen kurulu gücü 50 kVA ve üstünde olan tüm endüstriyel tesis veya yüklerin neredeyse 1,0 ortalama güç faktöründe çalıştırılmaları zorunluluk haline gelmektedir [7].

Tablo 1.1: Aktif ve reaktif enerji tüketim oranları [6,7].

Yönetmelikte Belirtilen Sınır Değerler		**Enerji Tüketimi /Ay**		
		Aktif (%)	**Reaktif (%)**	
			Endüktif	**Kapasitif**
Dağıtım sisteminde kurulu gücü 50 kVA'nın altında olanlar	1 Ocak 2007'den itibaren	100	≤ 33	≤ 20
	1 Ocak 2008'den itibaren	100	≤ 33	≤ 20
Dağıtım sisteminde kurulu gücü 50 kVA ve üstünde olanlar	1 Ocak 2007'den itibaren	100	≤ 33	≤ 20
	1 Ocak 2008'den itibaren	100	≤ 20	≤ 15

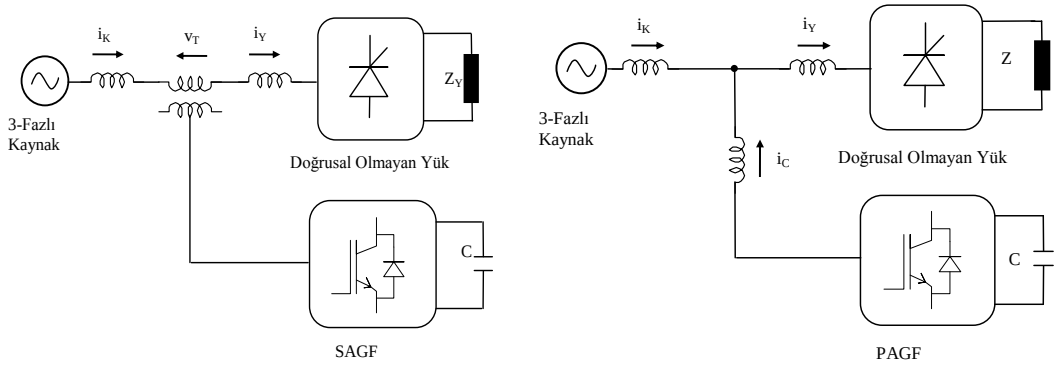
Bu yeni reaktif enerji sınırları, Türkiye dağıtım sisteminde giderek daha çok paralel kondansatör bankasının tesis edilmesi sorununu doğurmaktadır. Bu yüzden, tesislerde kompanzasyon gücünün artmasıyla beraber paralel rezonans olayı oluşması tehlikesine de yol açmaktadır. Ayrıca aşırı kompanzasyon nedeniyle tesiste ki harmonikler yükselmektedir. Yüksek harmonik oranlarının tesislerde meydana getireceği sorunlar da artmaya başlamaktadır [7].

Günümüzde endüstriyel uygulamalarda pasif LC filtreler ekonomik ve yapılarının basit olmasından dolayı harmonik akımların akışını ve gerilim harmoniklerini

engellemek için oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Fakat pasif filtreler, sabit kompanzasyon karakteristikleri, büyük fiziksel boyutları, ayar problemleri ve rezonans gibi bir çok dezavantajlara sahiptir. Bunun aksine Aktif Güç Filtreleri (AGF) ve literatürde "Unified Power Quality Conditioner - UPQC" olarak adlandırılan Birleşik Güç Kalite Düzenleyicileri (BGKD) daha iyi harmonik bastırma karakteristiklerine sahiptir. BGKD, Seri Aktif Güç Filtresi (SAGF) ve Paralel Aktif Güç Filtresinin (PAGF) birlikte kullanılması ile oluşturulmuş en gelişmiş filtre sistemidir. Paralel aktif güç filtresi, doğrusal olmayan yüklerin kaynaktan çektiği akım harmoniklerini yok etmekte, nötr akımı kompanzasyonu, reaktif güç kompanzasyonu ve DA-bara gerilim regülasyonu gerçekleştirmektedir. Seri aktif güç filtresi ile şebeke gerilim harmonik kompanzasyonu, gerilim düşme ve yükselmeleri, şebeke geriliminde frekans problemleri, gerilim kesilmeleri, geçici rejim gerilim bileşenleri, kaynak gerilimindeki dengesizlikler ve hızlı gerilim değişiklikleri gibi güç kalitesi parametrelerin düzeltilmesi işlevlerini gerçekleştirmektedir [13].

1.1. Literatür Taraması

Birleşik güç kalite düzenleyicisinin temel bileşenleri olan seri aktif güç filtresi ve paralel aktif güç filtresi 1976 yılında Gyugyi tarafından ileri sürülmüştür [14]. Bu çalışmada, aktif güç filtrelerini kullanılarak farklı devre uygulamaları ve denetim teknikleri ele alınmıştır. 1983 yılında Akagi, Kanazawa ve Nabae tarafından 3-fazlı sistemlerde anlık reaktif güç teorisi "p-q teorisi" olarak adlandırdığı yeni bir denetim teorisi ileri sürmüştür [15]. Bu denetim tekniğiyle çok sayıda aktif güç filtre sistemleri denetlenmiştir [30,31]. 1990 yılında Akagi ve arkadaşları seri ve paralel aktif güç filtre sistemlerini aynı anda birçok güç kalitesi problemlerini düzeltmek için iki filtre sistemini birlikte kullanmıştır [16]. Böylece iki filtre sistemi birlikte kullanılarak güç kalitesi düzeltme çalışmaları yapılmıştır. Birleşik güç kalite düzenleyicisi ilk olarak birleşik güç akış denetleyicisi (UPFC-Unified Power Flow Controller) adıyla Gyugyi tarafından 1992'de ortaya atılmıştır [17]. Seri ve paralel aktif güç filtrelerinin birleşimi olan birleşik güç kalite düzenleyicisi ise Akagi, Aredes ve Fujita tarafından önerilmiş ve farklı denetim ve konfigürasyon çalışmaları yapılmıştır [8-12,18-25]. Şekil 1.1'de seri ve paralel aktif güç filtresinin genel blok şeması görülmektedir.



(a) (b)

Şekil 1.1: (a) Seri aktif güç filtresi (b) paralel aktif güç filtresi genel blok şeması.

Aşağıda literatürde tez konusu ile ilgili yapılan çalışmalar özetle verilmektedir.

[24]'de Aredes 1996 yılında aktif güç hattı düzenleyicisi "Active Power Line Conditioners" ismiyle doktora tez çalışması yapmıştır. Çalışmasında 3 fazlı 4-telli sistemlerde birleşik güç kalite düzenleyicisiyle ilgili denetim, simülasyon ve deneysel çalışmalara yer vermiştir.

[25]'de birleşik güç kalite düzenleyicisi için yeni basit denetim algoritması tasarımından bahsedilmiştir. Yazar çalışmasında BGKD için geliştirdiği denetim algoritmasının basit ve uygulamasının kolaylığından bahsetmiştir. BGKD'nin paralel filtre kısmında gelişmiş p-q teorisi ve seri filtre kısmında ise anlık simetri bileşen teorisi kullanılmıştır. BGKD'nin seri aktif güç filtresi kısmıyla gerilim harmonikleri ve paralel aktif güç filtresi kısmıyla da akım harmonikleri ve reaktif güç kompanzasyonu gerçekleştirilmiştir.

[26]'da birleşik güç kalite düzenleyicisi için yeni bir konfigürasyon önerilmiştir. Çalışmada geleneksel birleşik güç kalite düzenleyicisi uygulamalarında seri aktif güç filtresi kısmında kullanılan enjeksiyon trafosu kullanılmayıp, onun yerine her bir faz için tam dalga köprü evirici devresi ile bağlanmış enjeksiyon kondansatörleri kullanılmıştır. Yazar çalışmasında önerdiği konfigürasyonu ve denetim algoritmasının bilgisayar tabanlı simülasyon sonuçlarına yer vermiştir. Ayrıca birleşik güç kalite düzenleyicisinin 22,9-kV dağıtım hattına bağlı olduğunu varsayarak simülasyon ve deneysel çalışmalara yer vermiştir. BGKD'nin paralel filtre kısmında gelişmiş p-q teorisi ve seri filtre kısmında ise oransal denetim ve geri beslemeli denetim sistemi kullanılmıştır. BGKD'nin seri aktif güç filtresi kısmıyla

gerilim harmonikleri ve paralel aktif güç filtresi kısmıyla da akım harmonikleri ve reaktif güç kompanzasyonu gerçekleştirilmiştir.

[27]'de birleşik güç kalite düzenleyicisinin DA-bara kısmına entegre edilen güç üreteçleri ile birlikte kullanılması, analiz ve simülasyon sonuçlarından bahsedilmiştir. Yazar çalışmasında güç sistemindeki harmoniklerin düzeltilmesi, gerilim yükselmesi ve düşmelerinin kontrol edilmesi, gerilim kesilmeleri ve reaktif güç kompanzasyonu gibi güç kalitesi sorunlarının düzeltilmesi konusunda çalışma yapmış simülasyon ve deneysel sonuçlara yer vermiştir. Yazar ayrıca çalışmasında dağıtık güç üreteçlerinin güç sistemlerine bağlandığı noktada ve diğer endüstriyel güç sistemlerinde güç kalitesinin artırılması konusuna değinmiştir.

[28]'de geleneksel birleşik güç kalite düzenleyicisine ilave olarak yük tarafına paralel aktif güç filtresinin eklenmesi ile oluşan BGKD sistemi incelenmiştir. Sistemin daha iyi harmonik kompanzasyonu yapması için eklenen bu paralel aktif güç filtresi hem kaynak tarafındaki gerilim dengesizliklerini hem de yük tarafındaki akım harmoniklerini düzeltmek ve reaktif güç kompanzasyonu yapmaktadır. Önerilen birleşik güç kalite düzenleyicisi, sistemden ortak DA-bara hattına veya DA-bara hattından sisteme aktif güç transferi yapan aktif doğrultucu, şebeke geriliminde ki gerilim çökmeleri ve yükselmeleri ve gerilim dengesizliklerini düzelten seri aktif güç filtresi ve yükün akım harmoniklerini ve yükün güç faktörünü düzelten paralel aktif güç filtresi birlikte kullanılması ile oluşmaktadır.

[29]'da geleneksel birleşik güç kalite düzenleyicilerde DA-bara kısmında kullanılan kondansatör kaldırılarak sistemin dinamik analiz çalışmaları yapılmıştır. Kondansatörsüz DA-bara akım ve sabit gerilimi paralel aktif güç filtresi tarafından sağlanmaktadır. DA-bara kısmında sadece yüksek gerilim dalgalarına ve yüksek harmonik gerilimlerine karşı AA filtre görevi yapacak küçük değerli kondansatör kullanılmaktadır. Gerilim harmoniklerini gidermek için seri aktif güç filtresi uzay vektör modülasyon tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yazar çalışmasında simülasyonlarda elde ettiği sonuçlara göre önerilen sistemin akım harmoniklerinin giderilmesinde ve gerilim dalgalanmalarının düzeltilmesinde başarılı olduğuna değinmiştir.

[32]'de aktif güç filtre istemlerinde ileri sürüldüğü tarihten itibaren çok yaygın kullanılan anlık reaktif güç teorisinin, doğrusal yük, doğrusal olmayan, dengeli ve dengesiz gibi tüm yük koşullarında uygulanmasına yönelik analiz simülasyon çalışmaları yapılmıştır.

[33]'de birleşik güç kalite düzenleyici denetim sistemi için modüler yapıda bir konfigürasyon önerilmektedir. Modüller temel frekansta kompanzasyon yapacak ve harmonik frekanslarda kompanzasyon yapacak hücrelerden oluşmaktadır. Seri aktif ve paralel aktif güç filtrelerinde kullanılan hücrelerin her biri tek fazlı evirici devrelerden oluşmaktadır. Yazar önerdiği yöntemde, temel frekans kompanzasyon modülünde daha yavaş ve harmonik kompanzasyon modülünde daha hızlı olmak üzere hücre sisteminde faklı güç elemanlarının kullanabileceğini, ayrıca bağımsız hücre sistemlerinin bağımsız algoritmalarda denetlenebileceği belirtmektedir.

[34]'de birleşik güç kalite düzenleyici sistemi ile rüzgar jeneratör sisteminin birlikte kullanıldığı bir konfigürasyon önerilmektedir. Rüzgar jeneratörü ile elde edilen enerjide, gerilim çökme, yükselme ve dalgalanma gibi güç kalite problemlerinin düzeltilmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır.

[35]'de birleşik güç kalite düzenleyici sistemi için yeni bir yapı önerilmiştir. Önerilen yapıda 3-fazlı şebekelerde 3-fazlı 4-telli yükleri çalıştırılabilecek bir konfigürasyon denenmiştir. Nötr hattı paralel aktif güç filtresi güç modülünde 4-kollu evirici topolojisi kullanarak elde edilmektedir. Önerilen yapının Matlab tabanlı simülasyon modelinde dengesiz yükler için de başarılı olduğu görülmektedir.

[36]'da birleşik güç kalite düzenleyici sistemi için DA-baraya bağlı farklı enerji seviyelerinden dönüşüm yapılan DA/DA dönüştürücüleri kullanılarak yeni bir yapı önerilmiştir. DA/DA dönüştürücüleri kullanarak, normal kondansatörlere göre daha uzun süre enerji depolama özeliğine sahip ultra kapasitör kullanılmakta ve kısa süreli enerji kesintilerin giderilmesine yönelik çalışmalar yapılmaktadır.

[37-39]'da birleşik güç kalite düzenleyicisinin kullanım alanları, yapısı ve geleneksel denetim stratejileri açıklanmıştır. Farklı denetim tekniklerine ve yapısal konfigürasyonlara yer verilmiştir.

1.2. Motivasyon

Güç kalitesini artırmak ve elektrik enerjisini verimli kullanmak her geçen gün önemi artan bir konu haline gelmiştir. Ülkemizde son zamanlarda elektrik enerjisinin kalitesini artırmak ve mevcut kaynakları daha etkin ve verimli kullanmak için mevcut yönetmelikler ihtiyaçlar doğrultusunda düzenlemeler yapılmatadır. Bu bağlamda 5627 sayılı Enerji Verimliliği Kanunu 2 Mayıs 2007 tarih ve 26510 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanmıştır. Ülkemiz için elektrik enerji sistemlerinde güç kalitesini artıracak, elektrik enerjisini daha etkin ve verimli kullanacak yöntem ve araçları geliştirmek ve uygulanabilir kılmak, bu çalışmanın motivasyonunu oluşturmaktadır.

1.3. Tezin Amacı ve Katkısı

Güç kalitesi, harmonikler ve etkileri, harmonik standartlarını özetlemek, 3-fazlı 4-telli sistemlerde doğrusal, dengesiz ve doğrusal olmayan yük koşullarında güç tanımları ve kavramları konusunda genel bir inceleme yapmak, paralel ve seri aktif güç filtre sistemlerinin genel kompanzasyon metotlarını kurmak ve uygulanabilir altyapısını oluşturmak, birleşik güç kalite düzenleyici sistemini kurmak, açıklamak, tasarım ve performans analizini yaparak deneysel çalışmalarla doğrulamak, birleşik güç kalite düzenleyici sisteminin laboratuar prototipini cihaza yönelik tasarlamak tez çalışmasının temel amaçlarıdır. Tez çalışması aşağıdaki belirtilen konularda literatüre katkı sağlamaktadır.

- ✓ Birleşik güç kalite düzenleyici sistemi, sinyal ölçüm sayısı azaltılarak önerilen senkron referans yapı tabanlı denetim algoritması ile denetlenmektedir. Önerilen denetim yöntemi sayısal işaret işlemci de etkin yazılım kodlaması yapılmakta, böylece BGKD sistem parametreleri daha verimli kullanılarak ekonomik ve performans açısından yarar sağlanmaktadır.

- ✓ Laboratuar ortamında, kaynak gerilim harmoniğinin düşük olması nedeniyle, kaynak geriliminde daha yüksek gerilim kaynaklı harmonik ve güç kalitesi problemleri oluşturmak amacıyla şebeke destekli harmonik gerilim kaynağı tasarlanmakta ve farklı seviyede güç kalitesi problemleri oluşturularak BGKD ile analiz çalışmaları yapılmaktadır.

- ✓ Birleşik güç kalite düzenleyicisinin ülkemiz koşullarında etkin kullanılmasına olanak sağlamak için hem geliştirilen bilgisayar tabanlı yazılım hem de laboratuar prototipi ve deneysel düzenek cihaza yönelik olarak tasarlamaktadır.

2. Bölümde: Elektrik enerji sisteminde güç kalitesi tanımı yapılmakta ve genel anlamda güç kalitesi problemleri açıklanmakta ve sınıflandırılması yapılmaktadır. Güç kalitesi problemlerinden olan ve işletmelerde çok karşılaşılan harmoniklerin tanımı yapılmakta, harmonik üreten kaynaklar incelenmekte, harmoniklerin işletmelerdeki etkileri özetlenmekte ve harmonik standartları açıklanmaktadır.

3. Bölümde: 3-fazlı sistemlerde geleneksel ve anlık reaktif güç tanımları incelenmektedir. Paralel aktif güç filtresi, seri aktif güç filtresi ve birleşik güç kalite düzenleyici sistemlerinin tanımı yapılmakta, görev ve işlevleri açıklanmaktadır. Birleşik güç kalite düzenleyici sisteminin modellenmesi ve simülasyonu yapılmaktadır. Geleneksel anlık reaktif güç teorisi tabanlı denetim stratejisi ve önerilen senkron referans yapı tabanlı denetim stratejisi açıklanmakta Matlab/Simülink tabanlı analizi yapılmakta ve simülasyonu sonuçları verilmektedir. Geleneksel anlık reaktif güç teorisi tabanlı denetim ve önerilen senkron referans yapı tabanlı denetim yöntemleri ile elde edilen analiz sonuçları karşılaştırılmaktadır.

4. Bölümde: Birleşik güç kalite düzenleyici deneysel düzeneğinin kurulumu ve açıklanması yapılmaktadır. BGKD deneysel düzeneğinde kullanılan tüm donanım ve alt yapı çalışmalarının tasarımı ve hazırlanması anlatılmaktadır.

5. Bölümde: Elektrik enerji sisteminde harmonik analiz yöntemleri hakkında genel açıklama yapılmaktadır. BGKD denetim sisteminin DSP tabanlı ve bilgisayar tabanlı izlenmesi, süreç denetimi ve harmonik analiz için geliştirilen yöntemlerin açıklanması yapılmakta ve analiz sonuçları verilmektedir.

6. Bölümde: Birleşik güç kalite düzenleyicisinin performans analizi ve deneysel çalışmalar açıklanmaktadır. Birleşik güç kalite düzenleyicisi sisteminin geleneksel anlık reaktif güç teorisi tabanlı denetim stratejisi ve önerilen senkron referans yapı tabanlı denetim stratejisi analizi ve deneysel sonuçları verilmektedir. Geleneksel anlık reaktif güç teorisi tabanlı denetim ve önerilen senkron referans yapı tabanlı denetim yöntemleri ile elde edilen analiz sonuçları karşılaştırılmaktadır.

2. ELEKTRİK SİTEMLERİNDE GÜÇ KALİTESİ

Elektrik enerjisi Güç Kalitesi “PQ (Power Quality)” problemleri ve çözüm arayışları elektrik enerjisinin yoğun olarak kullanılmaya başlandığı tarihten günümüze kadar güncelliğini korumaktadır. Elektrik enerjisini sağlayan kuruluşlar ve enerjiyi tüketen son kullanıcılar güç sistemlerinde güç kalitesi sorunları ile yakından ilgilenmektedir.

Güç kalitesi ifadesi, güç sistemlerinde oluşan problemlerin tamamını kapsayan genel bir ifade olarak kabul edilmektedir. Kelime anlamı olarak güç kalitesi, güç sistemlerinde çok geniş miktarda elektromagnetik olaylar olarak tanımlanmaktadır. Aslında farklı sorunları referans alarak çok sayıda çok farklı güç kalitesi tanımı yapılabilmektedir. Örneğin elektrik enerjisini sağlayan kuruluşlar güç kalitesini güvenirliği ve kararlılığı açısından değerlendirmekte, yük tarafındaki tüketiciler ise elektrik enerjinin devamlılığı ve elektrik enerjisinden beslenen cihazların sorunsuz çalışması şeklinde güç kalitesi tanımı yapmaktadır [47].

Elektrik enerjisinde güç kalitesini diğer hizmet ve ürünlerde olduğu gibi bir standart kriter kullanarak tanımlama yapmak oldukça zordur. Ancak son kullanıcı donanım ve cihazlarının sorunsuz ve güvenilir bir şeklinde çalışmasını sağlayabilmelidir. Eğer elektrik enerjisi bu ihtiyaçları karşılayamayacak kadar yetersiz ve sorunlu ise o zaman genel anlamda güç kalitesinden bahsedilemez [47].

Teknik olarak güç kalitesi, güç sistemlerinde gerilim ve akımın kalitesi olarak nitelendirilebilir. Çünkü gerilimdeki sorunlar birçok güç kalitesi problemlerinin ana sebeplerinden sayılmaktadır. Gerilimdeki anlık yükselmeler, gerilim çöküşleri, uzun ve kısa süreli kesintiler, gerilimdeki harmonikler ve frekans değişimleri gibi sorunları örnek olarak verilebilir. Aslında gerilim ile akım arasında çok yakın bir ilişki vardır. Doğrusal olmayan bir yükün çektiği doğrusal olmayan bir akım gerilim üzerinde olumsuz etki oluşturmaktadır. Bu nedenle güç kalitesi, güç sistemlerinde akım ve gerilimin kalitesi ile doğrudan ilişkilidir.

Bu bağlamada güç kalitesini, gerilim ve akım dalga formlarının herhangi bozulmaya uğramamış, istenilen frekans ve genlikte olması durumunda temiz enerji olarak tanımlamakta mümkündür [47, 48].

Günümüzde modern elektroniğin gelişmesiyle hassas yüklerin sayısı da artırmıştır. Güç kalitesi hassas yükler için önem arz etmektedir. Çünkü hassas yükler gerilim dalgalanmaları ve harmoniklerden olumsuz etkilenmekte, hatalı çalışmakta veya arızalanmaktadır. Güç elektroniğinde kullanılan yarı iletkenlerin birçoğu güç kalitesi problemlerine sebep olmakta ve harmonik kaynak olarak çalışmaktadır. Örneğin anahtarlamalı güç kaynakları, ayarlı sürücüler ve doğrultucular birer harmonik kaynak olarak çalışmaktadır.

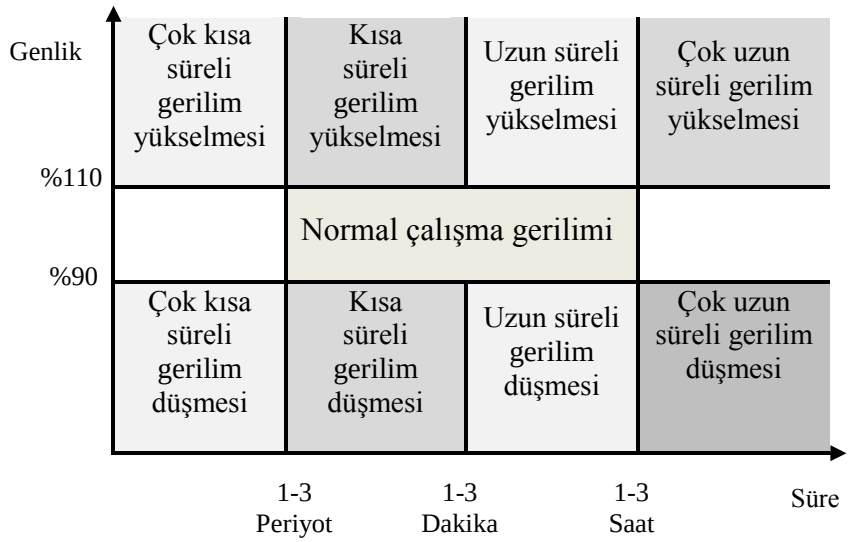
2.1. Güç Kalitesinin Sınıflandırılması

Güç kalitesi problemlerinin belirgin özellikleri kullanılarak çok farklı sınıflandırma yapılabilmektedir. Bazı sınıflandırmalar kalıcı durum ve kalıcı olmayan olayları dikkate alarak yapılmaktadır. Örneğin ANSI C84.1 standardında güç kalitesi problemleri olayların süresi temel alınarak sınıflandırmaktadır. Bir başka sınıflandırma olan IEEE-519 [1] ve IEEE1159 [2] standartlarında ise güç kalitesi gerilim dalga şekli genliği ve olayların süresi temel alınarak yapılmaktadır. IEC 61000-2-5 standardında güç kalitesi frekans aralığı referans alınarak sınıflandırma yapılmaktadır [48].

Güç kalitesi sorunlarını gidermek ve uygun çözümler üretmek için güç kalitesi problemlerini iyi anlamak ve sorunlar arasındaki karmaşık ilişkileri iyi çözümlemek gerekir. Şekil 2.1'de güç kalitesi problemleri gerilim genlik ve süresi temel alınarak yapılan sınıflandırma verilmektedir [48, 51]. Bu şekilden de görüldüğü gibi gerilim genlik ve süresine göre yapılan sınıflandırma 9 ana bölgeye ayrılmaktadır. Güç kalitesi olaylarının oluşum süresine göre sınıflandırılması çok kısa, kısa, uzun ve çok uzun şeklinde 4 bölgeye ayrılmaktadır. Gerilim genliği temel alınarak yapılan sınıflandırma ise 3 bölgeden oluşmaktadır.

- Kesintiler (Interruptions); Uzun veya kısa süreli olarak gerilim genliğinin (etkin değerinin) sıfıra düşmesi ile oluşan bu problem en sert güç kalitesi problemleri arasındadır.

- Çökmeler (Sags/Dips); Uzun veya kısa süreli olarak, kaynak tarafında oluşabilen hatalardan dolayı veya büyük yüklerin sisteme dahil edilmesi ile meydana gelen gerilim genliğinin normal değerinin %90'nın altına düşmesi ile oluşan bir güç kalitesi problemidir.
- Yükselmeler (Swells); Uzun veya kısa süreli olarak gerilim genliğinin normal değerinin %110'nun üstüne çıkması ile oluşan bir güç kalitesi problemidir.



Şekil 2.1: Gerilim genlik ve süresine göre güç kalitesinin sınıflandırılması [48].

Güç kalitesi problemleri ile ilgili önemli kısımlar aşağıda verilmektedir. Tablo 2.1' de IEEE-1159 standardında tanımlanan elektrik güç kalitesi problemlerinin kategorik sınıflandırılması verilmektedir [2, 47, 48].

1. Geçici dalgalanma (Transients Surges)

2. Kısa süreli değişimler (Short duration variations)

3. Uzun süreli değişimler (Long duration variations)

4. Dalga şekli bozulmaları (Waveform distortion)

5. Gerilim dengesizliği (Voltage unbalance)

6. Gerilim dalgalanması (Voltage fluctuations)

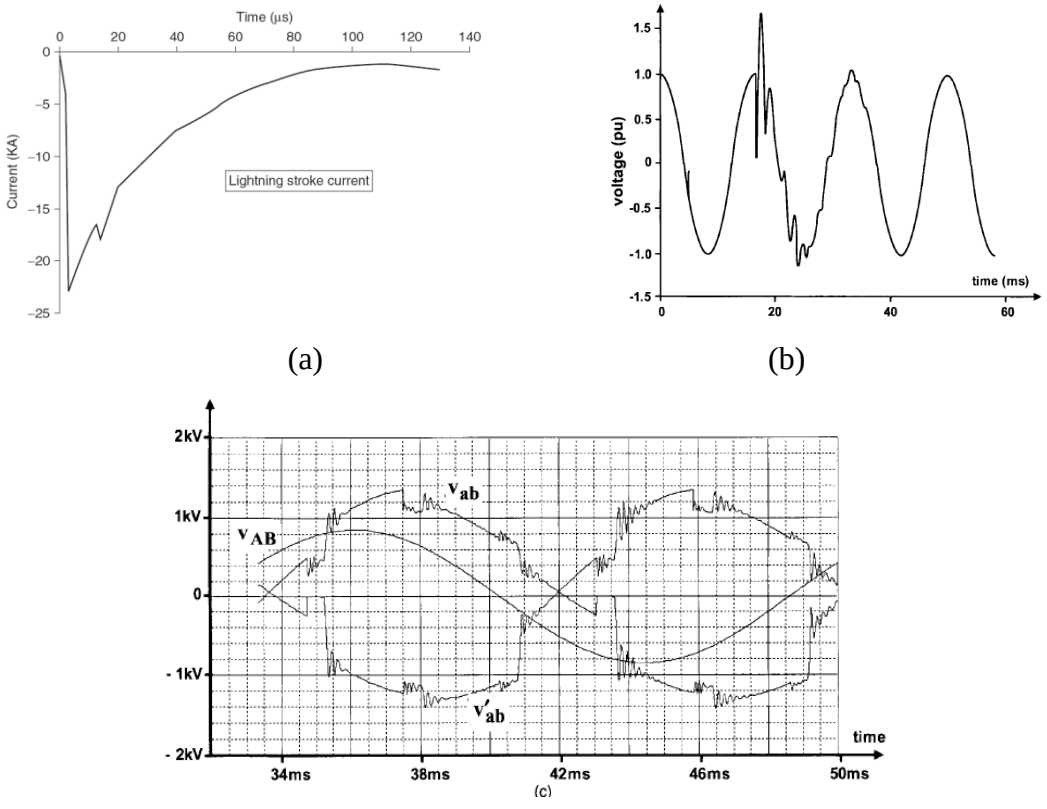
7. Frekans değişimleri (Power frequency variations)

Tablo 2.1: IEEE-1159 standardında tanımlanan elektrik güç kalitesi problemlerinin sınıflandırılması [2].

Güç kalitesi problemleri			Süresi	Gerilim genliği
1. Geçici dalgalanma (Transients Surges)	Dürtü (Impulsive transients)	Nano saniye	< 50 ns	–
		Mikro saniye	50 ns–1ms	–
		Mili saniye	> 1 ms	–
	Salınım (Oscillatory transients)	Düşük frekans	0,3–50 ms	0-4 pu
		Orta frekans	20 μs	0-8 pu
		Yüksek frekans	5 μs	0-4 pu
2. Kısa süreli değişimler (Short duration variations)	Anlık (Instantaneous)	Kesintiler (Interruptions)	0,5–30 çevrim	< 0,1 pu
		Çökmeler (Sags/Dips)	0,5–30 çevrim	0,1–0,9 pu
		Yükselmeler (Swells)	0,5–30 çevrim	1,1–1,8 pu
	Kısa süreli (Momentary)	Kesintiler (Interruptions)	30 çevrim–3s	< 0,1 pu
		Çökmeler (Sags/Dips)	30 çevrim –3s	0,1–0,9 pu
		Yükselmeler (Swells)	30 çevrim –3s	1,1–1,4 pu
	Geçici (Temporary)	Kesintiler (Interruptions)	3s–1dak.	< 0,1 pu
		Çökmeler (Sags/Dips)	3s–1dak.	0,1–0,9 pu
		Yükselmeler (Swells)	3s–1dak.	1,1–1,2 pu
3. Uzun süreli değişimler (Long duration variations)	Kesintiler (Interruptions)		>1 dak.	0,0 pu
	Gerilim düşmeleri (Undervoltages)		>1 dak.	0,8–0,9 pu
	Gerilim yükselmeleri (Overvoltages)		>1 dak.	1,1–1,2 pu
4. Dalga şeklide bozulmalar (Waveform distortion)	DA seviyesi (DC offset)		Kalıcı durum	0–0,1 %
	Harmonikler (Harmonics)		Kalıcı durum	0–20 %
	Ara Harmonikler (Interharmonics)		Kalıcı durum	0–2 %
	Çentik (Notching)		Kalıcı durum	–
	Gürültü (Noise)		Kalıcı durum	0–1 %
5. Gerilim dengesizliği (Voltage unbalance)			Kalıcı durum	0,5–2 %
6. Gerilim dalgalanması (Voltage fluctuations)			Aralıklı	0,1–7 % (< 25 Hz)
7. Frekans değişimleri (Power frequency variations)			–	< 10 s

2.1.1. Geçici dalgalanma

Geçici dalgalanma (transients surges); dürtü (impulsive transients) ve salınım (oscillatory transients) olarak iki şekilde oluşmaktadır. Dürtü etkisi, güç sistem hatlarında akım veya gerilim üzerinde çok kısa anlık bir değişim olarak tanımlanmaktadır. Yıldırım etkisi olarak da adlandırabileceğimiz dürtü olayı, kondansatör şarjı, elektromagnetik cihazların ilk kalkınma anları veya iletim hatlarına yıldırım etkisi ile oluşan anlık akım ve gerilim olaylarıdır. Salınım etkisi, güç faktörü düzeltme devrelerinde kullanılan kondansatörün anahtarlanması ile ve tristörlü doğrultucu devrelerinde $\alpha=0^{\circ}$ durumunda fazlar arasında gerilimde çentik ve salınımlar oluşmaktadır. Şekil 2.2'de geci dalgalanma örnek dalga şekilleri (a) yıldırım etkisi akım ile oluşan dalgalanma, (b) güç faktörü düzeltme ve benzeri devrelerde kondansatör anahtarlama sonucu oluşan salınımlar, (c) diyotlu veya tristörlü doğrultucu devrelerinde fazlar arası gerilim dalga şekilleri verilmektedir [47, 48].



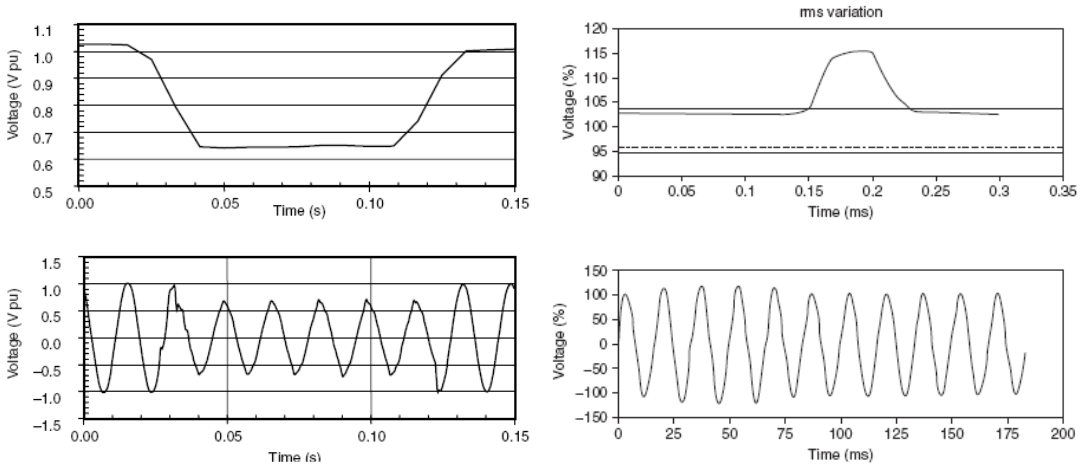
(a) (b)

(c)

Şekil 2.2: Geçici dalgalanma örnek dalga şekilleri (a) yıldırım etkisi akım[47], (b) kondansatör anahtarlama sonucu oluşan salınım[48], (c) diyot doğrultucu fazlar arası gerilim [48].

2.1.2. Kısa süreli değişimler

Kısa süreli değişimler (short duration variations), güç sistemlerinde gerilim genliğinde veya akımda 0,5 çevrim ile 1 dakika arasında meydana gelen değişim olayları olarak tanımlanan bir güç kalitesi sorunudur. Bu sorun IEC standardında gerilim çökmeleri "voltage dips" ve kısa süreli kesintiler "short interruptions" olarak iki başlıkla sınıflandırılmaktadır. IEEE -1159 [2] standardında, kesintinin 0,5 - 30 çevrim arasında olması durumunda anlık, 30 çevrim – 3 s arasında kısa süreli ve 3 s - 1 dak arasındaki kesintiler geçici kesinti (sag) ve yükselme (swell) olarak alt kategorilere ayrılarak sınırları belirtilmektedir. Tablo 2.1'de bu alt sınır değerleri görülmektedir. Şekil 2.3'de kısa süreli değişim (a) gerilim çökmesi, (b) gerilim yükselmesi örnek dalga şekilleri verilmektedir [47,48,49].



(a) (b)

Şekil 2.3: Kısa süreli değişim örnek dalga şekilleri (a) gerilim çökmesi [47], (b) gerilim yükselmesi [49].

2.1.3. Uzun süreli değişimler

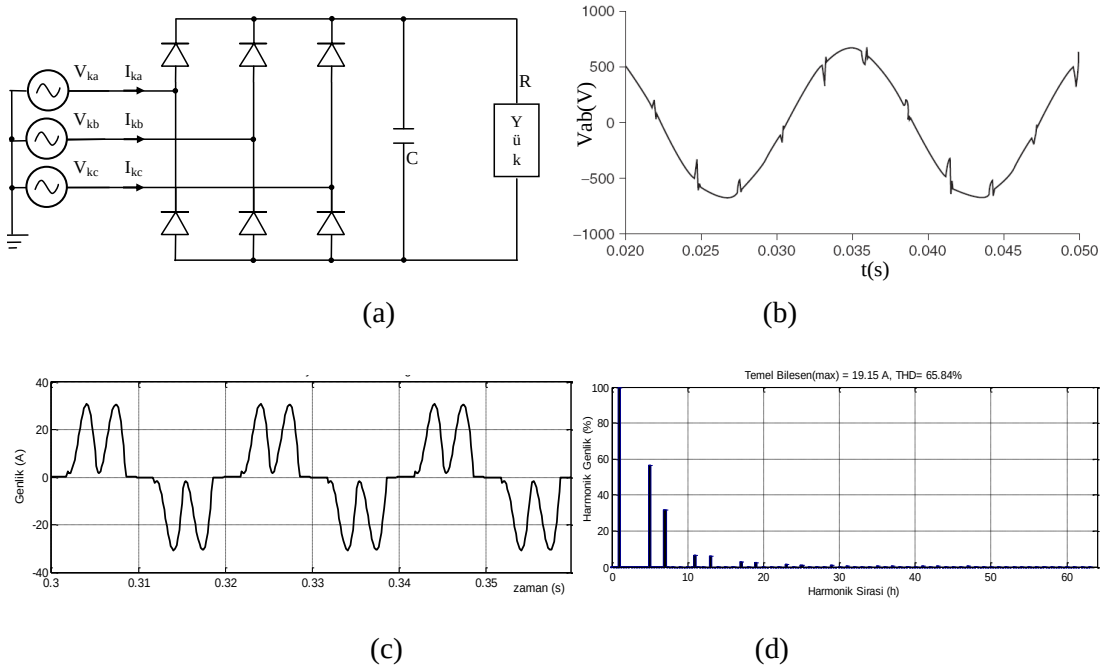
Uzun süreli değişimler (long duration variations) güç sistemlerinde gerilim genliğinde veya akımda 1 dakikadan uzun süreli meydana gelen değişim olayları olarak tanımlanan bir güç kalitesi sorunudur. Uzun süreli değişimler IEEE-1159 standardında, gerilim genliğinin 1 dakikadan uzun süre (0,0 pu) sıfıra düşmesi durumunda kesinti, gerilim genliğinin 1 dakikadan uzun süre 0,8 pu - 0,9 pu değerlerinde değişmesi durumunda gerilim düşmesi, gerilim genliğinin 1 dakikadan

uzun süre 1,1 pu - 1,2 pu değerlerinde değişmesi durumunda gerilim yükselmesi olarak sınıflandırılmaktadır.

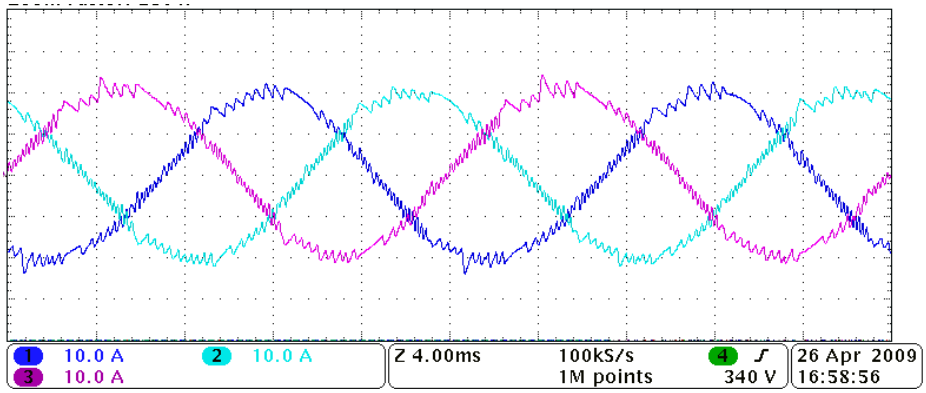
2.1.4. Dalga şeklinde bozulmalar

Dalga şeklinde bozulmalar (waveform distortions), güç sistem hatlarında şebeke gerilim frekansında sinüzoidal dalga formunda bozucu etki yapan olaylar, bir güç kalitesi problemi olarak ifade edilmektedir. Bu olaylar DA seviye (DC offset), harmonik (harmonics), ara harmonik (interharmonics), çentik (notching), ve gürültü (EMI/ noise) olarak sınıflandırılmaktadır.

Şekil 2.4 (a)'da 3-fazlı 6-darbeli diyot doğrultucu bağlantı şekli verilmektedir. (b)'de görüldüğü üzere bu doğrultucu diyotlarının iletim noktalarında fazlar arası gerilimlerde çentikler oluşmaktadır. Bu doğrultucunun kaynaktan çektiği akımın dalga şekli (c)'de ve harmonik dağılımı (d)'de görülmektedir. Kaynaktan çekilen akım THB %65,84 oranında bozulmaktadır. Bu harmonikli akımların AGF ile düzeltilmesi durumunda (e)'de verildiği gibi sinüs dalga şeklinde yüksek frekanslarda anahtarlamadan dolayı gürültüler oluşmaktadır.



Şekil 2.4: (a) 3-fazlı gerilim kaynaklı diyot doğrultucu bağlantı şekli (b) fazlar arası gerilim dalga şekli (c) kaynaktan çekilen akım dalga şekli (d) kaynaktan çekilen akımın harmonik dağılımı (e) harmonikli akımın aktif güç filtre ile düzeltilmesi durumunda oluşan gürültü.

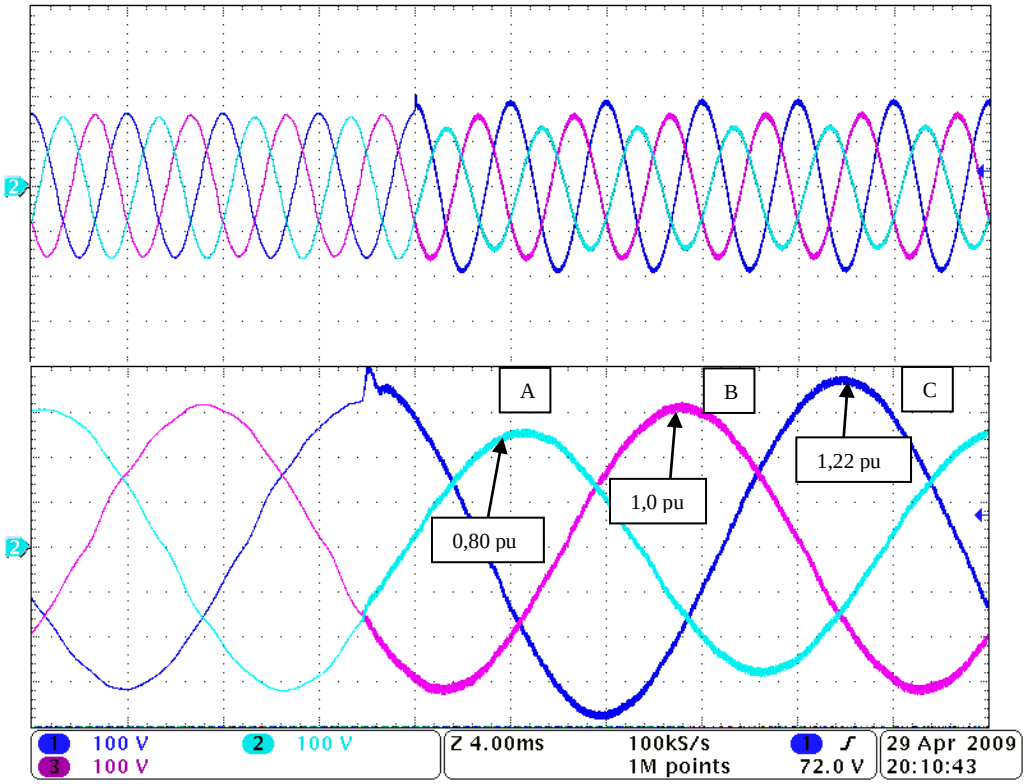


(e)

Şekil 2.4: (devam) (a) 3-fazlı gerilim kaynaklı diyot doğrultucu bağlantı şekli (b) fazlar arası gerilim dalga şekli (c) kaynaktan çekilen akım dalga şekli (d) kayaktan çekilen akımın harmonik dağılımı (e) harmonikli akımın aktif güç filtre ile düzeltilmesi durumunda oluşan gürültü.

2.1.5. Gerilim dengesizliği

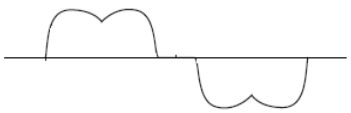
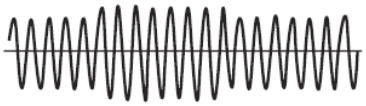
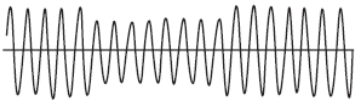
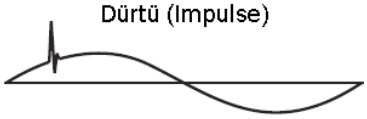
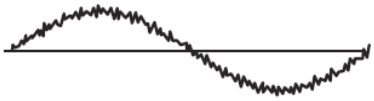
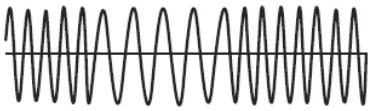
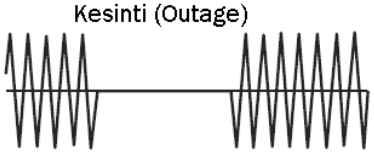
Gerilim dengesizliği (voltage unbalance), 3-fazlı sitemlerde fazlar arasında gerilim genliğinin ve şebeke frekansının farklılık göstermesi bir güç kalitesi problemi olarak tanımlanmaktadır. Şekil 2.5'de fazlar arası gerilim genliğinde oluşan dengesizlikle ilgili örnek dalga şekilleri verilmektedir.



Şekil 2.5: Fazlar arası gerilim genliğinde oluşan dengesizlikler.

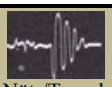
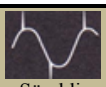
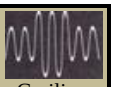
Yukarıda açıklanan ve elektrik sisteminde çok sık raslanan bazı güç kalitesi problemleri Tablo 2.2'de özetlenmektedir [2, 47, 48, 49, 51].

Tablo 2.2: Elektrik güç kalitesi problemlerinin özeti [2, 49, 51].

Bozulma Şekli	Açıklama
Harmonik (Harmonics) 	Gerilim veya akım dalga şeklinde harmonik - lerden dolayı bozulmalar oluşmaktadır. Bu bozulmalar, doğrultucular, hız denetim cihazları, frekans çeviriciler ve diğer doğrusal olmayan yükler tarafından üretilmektedir.
Yükselme (Swell) 	Gerilim genliği normal değerinin 1,1 pu (%110) üzerine çıkması ile tanımlanmaktadır. Bu durum büyük yüklerin devreden çıkması ve şebeke kesintileri ile oluşmaktadır
Çökme (Sag) 	Gerilim genliği normal değerinin 0,9 pu (%90) altına inmesi olayı ile tanımlanmaktadır. Bu durum büyük yüklerin devreden alınması, toprak hattı hatası ve şebeke kesintileri ile oluşmaktadır
Çentik (Notches) 	Hat geriliminde kısa süreli tekrarlanan çöküntüler. Genellikle kontrolsüz veya kontrollü α=0° durumunda 3-fazlı doğrultucularda meydana gelmektedir.
Dalgalanma(Fliker) 	Gerilim genliğinde kısa süreli dalgalanmalar. Büyük yüklerin kısa süreli devreye girip çıkması veya titreşimli yüklerden kaynaklanmaktadır
Dürtü (Impulse) 	0,5 μs – 2 ms süresi arasında 50 V – 6 kV gerilim genliğinde kısa süreli hızlı yükselen darbe veya salınımlar olarak tanımlanmaktadır. Şebeke veya yükün anahtarlanması, ark ve yıldırım etkisiyle oluşmaktadır.
Gürültü (Noise) 	10 kHz -1 GHz bant genişliğinde 100 μV-100V genliğinde düşük enerjili tekrarlanan bozulmalardır. Taşıyıcı frekanslı güç hattı haberleşmede, kablosuz yayılma, anahtarlamalı güç kaynakları ve motor hız denetim devrelerinde görülmektedir.
Frekans (Frequency) 	Güç frekansının normal değerinden sapması olarak tanımlanmaktadır. Düşük veya yetersiz regülasyon özelliğine sahip kaynaklarda ve enerji üreten güç generatörlerinde görülmektedir.
Kesinti (Outage) 	Tek fazlı veya çok fazlı sistemlerde gerilimin yarım periyottan fazla süreliğine sıfıra düşmesi ile tanımlanmaktadır. Yük donanım hataları, kaynak toprak hataları, kazalar, yıldırım ve nötr problemlerinden dolayı oluşmaktadır.

Tablo 2.3'de güç kalitesi problemlerinden dolayı bilgisayar sistemlerinde oluşan bazı sorunlar verilmektedir [58].

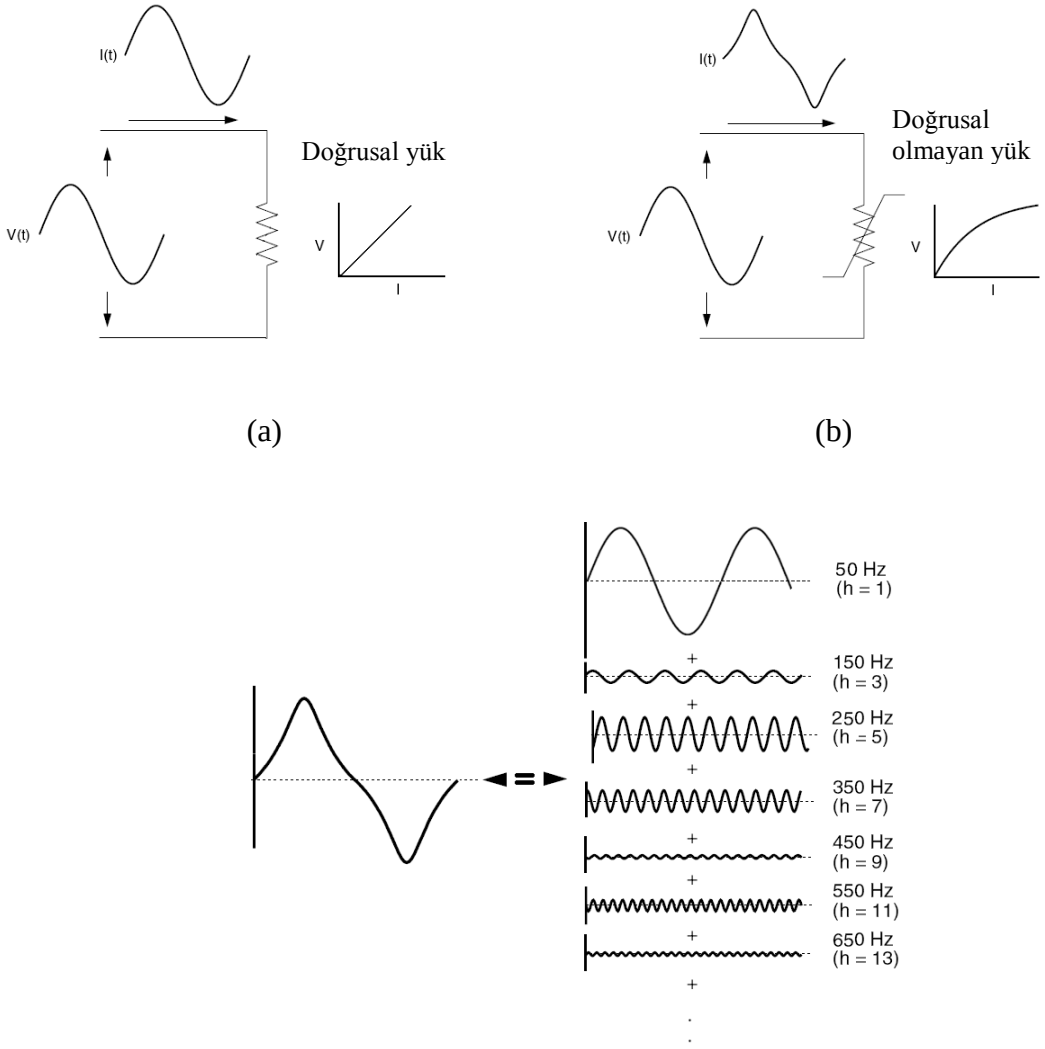
Tablo 2.3: Güç kalitesi problemlerinden dolayı bilgisayar sistemlerinde oluşan bazı sorunlar [58].

Hata Çeşitleri	 Gerilim çökme	 Dürtü 2x nominal	 Dürtü 4x nominal	 Kısa veya uzun süreli kesiti	 Nötr/Toprak gerilimi	 Sürekli bozulma	 Gerilim yükselme
PCB kart hataları	—	—	Evet	—	—	Evet	Evet
Çeşitli yazılım hataları	Evet	Evet	Evet	—	Evet	Evet	Evet
Hard disk çökmeleri /hataları	—	—	Evet	Evet	—	—	—
Kilitlenme bloke olma hataları	—	Evet	Evet	—	—	Evet	—
Parite hataları	—	Evet	Evet	—	Evet	Evet	—
Güç kaynağı hataları	—	—	Evet	Evet	—	Evet	Evet
Yeniden başlama hataları	Evet	—	—	Evet	Evet	—	—
AC sapma (AC detect)	Evet	—	—	Evet	—	—	Evet

2.2. Harmonikler

Harmonikler, doğrusal almayan yüklerden kaynaklanan gerilim veya akım dalga formlarında, genlik veya frekanslarında bozulmaya sebep olan sinüzoidal dalga şekilleri olarak tanımlanmaktadır [2, 47, 48, 49, 51, 52, 59, 60]. Doğrusal bir yükün akım-gerilim karakteristiği (R=V/I) doğrusal değişmektedir. Bu yük sinüzoidal bir gerilim kaynağına bağlandığında sinüzoidal akım çekmektedir. Doğrusal olmayan bir yükün akım-gerilim karakteristiği doğrusal değişmemektedir. Bu tip yükler sinüzoidal bir gerilim kaynağına bağlandığında, akım-gerilim karakteristiğine bağlı

olarak kaynaktan sinüzoidal olmayan akım çekmektedir. Sinüzoidal olmayan ve dalga şekli bozulmuş bu akımlar, temel sinüs bileşeninden (50Hz) farklı sinüs dalga şekilleri içermektedir. Şekil 2.6'da (a) doğrusal, (b) doğrusal olmayan yükün akım-gerilim karakteristiği ve örnek akım-gerilim dalga şekilleri, (c) bozulmuş dalga şeklinin sembolik harmonik bileşenleri görülmektedir.



Şekil 2.6: (a) Doğrusal, (b) doğrusal olmayan [47] yükün örnek akım gerilim dalga şekilleri ve (c) bozulmuş dalga şeklinin sembolik harmonik bileşenleri.

Sinüzoidal olmayan dalga şekillerinin içerdiği çift sıralı (2, 4, 6, 8,...) ve tek sıralı (3, 5, 7, 9,...) harmonikler Fourier serisinin birer bileşenidir. Sıfır sıralı (0) harmonik bileşen sinyalin DA seviyesini ve bir (1) sıralı bileşen ise sinyalin temel (50Hz) harmonik bileşenini temsil etmektedir. Harmonikli dalga şekillerinin her bir periyotta

pozitif ve negatif yarım dalgalar birbirinin aynısı olduğu durumlarda (yarım dalga simetri durumunda) Fourier serisinde çift sıralı (2, 4, 6, 8,...) harmonik bileşenler sıfır olmaktadır [59, 60].

Genellikle elektrik enerji sistemlerinde, sinüzoidal olmayan dalga şekilleri yarım dalga simetri oldukları için çift sıralı harmoniklere pek rastlanmamaktadır. Dengeli 3-fazlı güç sistemlerinde genellikle tek sıralı harmonikler bulunmakta, çift sıralı harmonikler ise ölçüm hatalarından veya anahtarlama elemanları içeren güç elektroniği cihazlarında yanlış anahtarlamalardan dolayı oluşmaktadır [48].

Temel bileşen (50Hz) referans alındığında harmoniklerin birbirlerine göre faz dönüş ilişkisi, harmonik faz sırası olarak bilinmektedir. Pozitif sıralı harmonikler (4., 7., 10., …) temel frekansla aynı yönde, negatif sıralı harmonikler (2., 5., 8., ...) temel frekansın tersi yönünde dönmekte ve sıfır sıralı harmonikler (3., 6., 9., ...) dönmemektedir [47, 48, 58, 60]. Tablo 2.4'de dengeli 3-fazlı güç sistemlerinde harmoniklerin frekansları ve faz sıraları verilmektedir. Tablo 2.5'de güç sistemlerinde harmonik kaynaklar ve çeşitleri özetlenmektedir.

Tablo 2.4: Harmonik frekansları ve faz sıraları.

	Temel (1.) Bileşen	2.	3.	4.	5.	6.	…
Harmonik frekansı	50 Hz	100 Hz	150 Hz	200 Hz	250 Hz	300 Hz	…
Harmonik faz dönüş yönü	(+) 	(-) 	(0) —	(+) 	(-) 	(0) —	…

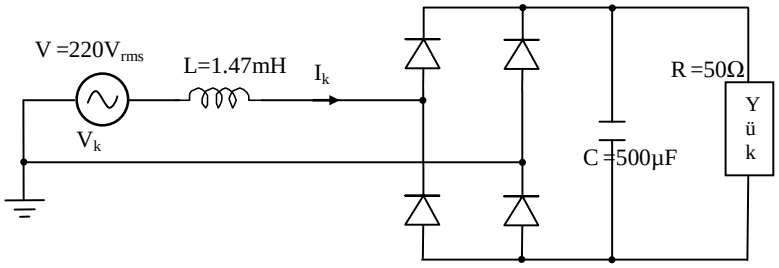
Tablo 2.5: Güç sistemlerinde harmonik çeşitleri [48].

Harmonik Çeşitleri	Frekansı (f=50Hz)	Açıklama (oluşma nedenleri)
DA	0	Anahtarlamalı elektronik cihazlar, yarım dalga doğrultucular, ark fırınları, manyetik alan içerikli akımlar
Tek sıralı (Odd harmonics)	h.f (h=3, 5, 7, 9, …)	Doğrusal olmayan yükler.
Çift sıralı (Even harmonics)	h.f (h=2, 4, 6, 8, …)	Yarım dalga doğrultucular
Üçün tek katları (Triplen harmonics)	3.h.f (h=1, 3, 5, 7, …)	Dengesiz 3-fazlı yükler ve anahtarlamalı elektronik cihazlar.
Pozitif sıralı (Positive-squence)	h.f (h=1, 4, 7, 10, …)	Dengesiz yüklerle yapılan işlemler.
Negatif sıralı (Negative-squence)	h.f (h=2, 5, 8, 11, …)	Dengesiz yüklerle yapılan işlemler.
Sıfır sıralı (Zero-squence)	h.f (h=3, 6, 9, 12, …)	Dengesiz yüklerle yapılan işlemler.
Ara (Interharmonics)	h.f (h=f'nin tamsayı katları olmayan değerler)	Anahtarlamalı frekans dönüştürücüler, doğrudan frekans dönüştürücüler, endüksiyon fırınları, ark fırınları ve bilgisayarlar.
Alt (Subharmonics)	h.f (h<1 ve f'nin tamsayı katları olmayan değerler)	Yüksek hız kontrollü güç kaynakları, alt rezonans durumları, yüksek kapasiteli kondansatör gurupları ve yüksek endüktif sistemler ve endüksiyon makineleri.
Zamansal (Time harmonics)	h.f (h=3, 5, 7, …)	Akım ve gerilim kaynaklı eviriciler, dalga genişlik modülasyonlu doğrultucu ve eviriciler, anahtarlamalı doğrultucular
Uzaysal (Spatial harmonics)	h.f (h=3, 5, 7, …)	Endüksiyon fırınları.
Tipik (Characteristic harmonics)	(12k+1).f (k=tamsayılar	Doğrultucular ve eviriciler.
Tipik olmayan (Uncharacteristic harmonics)	(12k-1).f (k=tamsayılar	Zayıf ve asimetrik AA sistemleri.

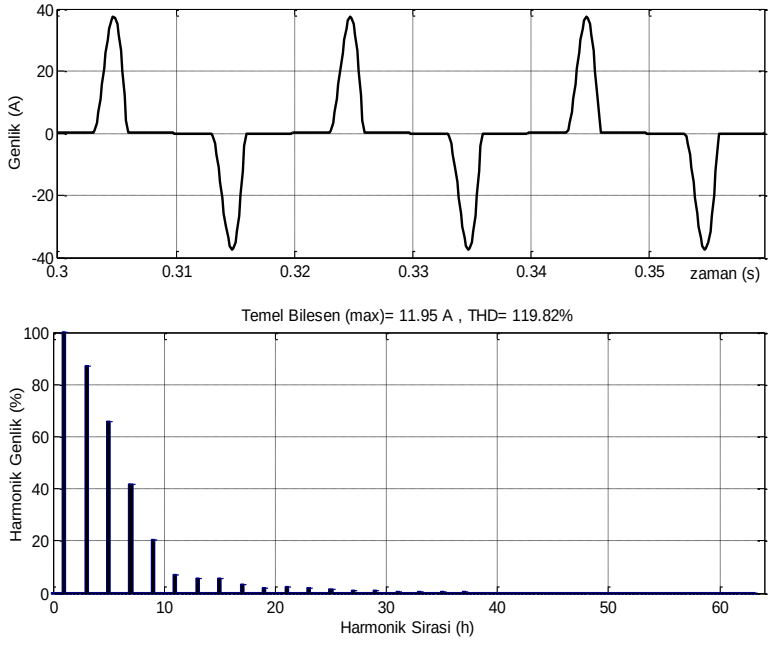
2.3. Harmonik Üreten Kaynaklar

2.3.1. Tek-fazlı doğrultucular

Tek fazlı doğrultucular güç elektroniği sistemlerinde çok sık kullanılan AA'dan DA'a dönüşüm yapan sistemlerdir. Anahtarlamalı güç kaynakları, bilgisayarlar, elektronik balastlı aydınlatma lambaları ve küçük güçlü motor sürücüleri tek-fazlı harmonik kaynaklarıdır. Şekil 2.7'de Matlab/Simulink ortamında simülasyonu yapılan tek-fazlı 2-darbeli bir doğrultucunun (a) bağlantı şeması (b) kaynaktan çektiği akımın dalga şekli ve harmonik dağılımı görülmektedir. 2-darbeli doğrultucunun %119,82 oranında harmonik bozulmaya sebep olmaktadır.



(a)

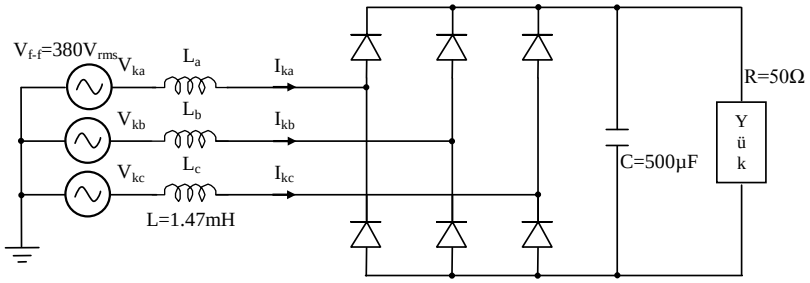


(b)

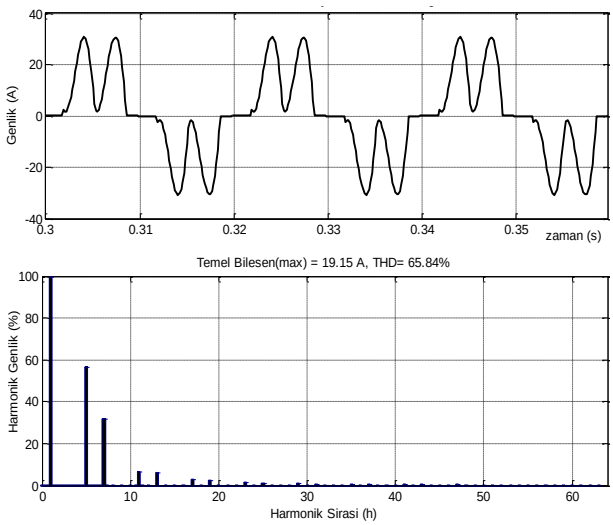
Şekil 2.7: (a) Tek-fazlı 2-darbeli bir doğrultucunun bağlantı şeması (b) kaynaktan çektiği akımın dalga şekli ve harmonik dağılımı.

2.3.2. 3-fazlı doğrultucular

3-fazlı 6-darbeli doğrultucular, güç elektroniği endüstriyel sistemlerde (kesintisiz güç kaynakları, tristör denetimli doğrultucular, ayarlı motor hız denetim sistemlerinde) oldukça yaygın kullanılan harmonik kaynaklardır. 6-darbeli doğrultucularda DA tarafına gerilim düzeltmek için kondansatör bağlandığında, çekilen akımın dalga şekli oldukça bozulmasına rağmen, harmonik akım genliği kaynak tarafındaki empedans ve gerilim dengesizliğine bağlıdır. Bu doğrultucular gerilim kaynaklı doğrultucular olarak adlandırılmaktadır [13]. Şekil 2.8'de Matlab/Simulink ortamında simülasyonu yapılan 3-fazlı 6-darbeli gerilim kaynaklı bir doğrultucunun (a) bağlantı şeması (b) kaynaktan çektiği akımın dalga şekli ve harmonik dağılımı görülmektedir. Doğrultucunun kaynaktan çektiği akımda (5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, …) harmonik bileşenler bulunmakta ve %65,84 oranında harmonik bozulmaya sebep olmaktadır.



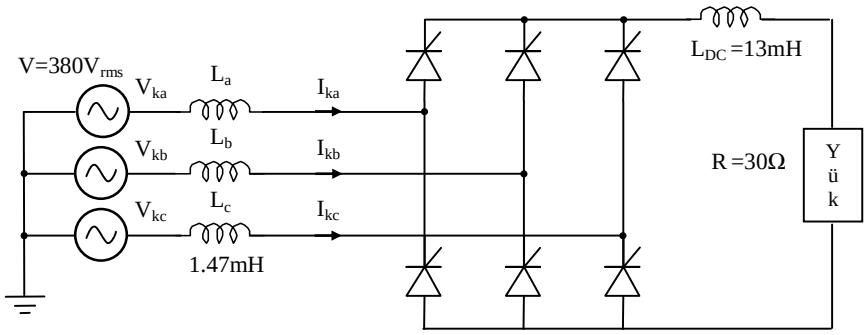
(a)



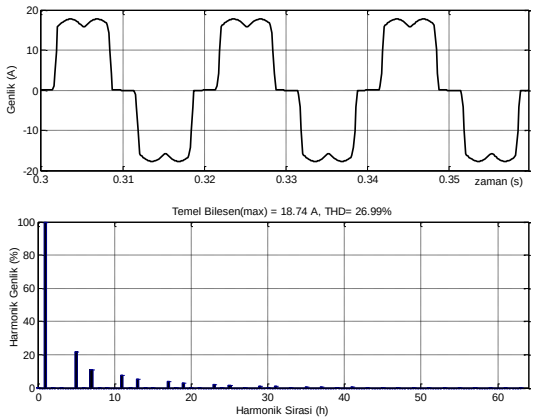
(b)

Şekil 2.8: (a) 3-fazlı 6-darbeli gerilim kaynaklı bir doğrultucunun bağlantı şeması (b) kaynaktan çektiği akımın dalga şekli ve harmonik dağılımı.

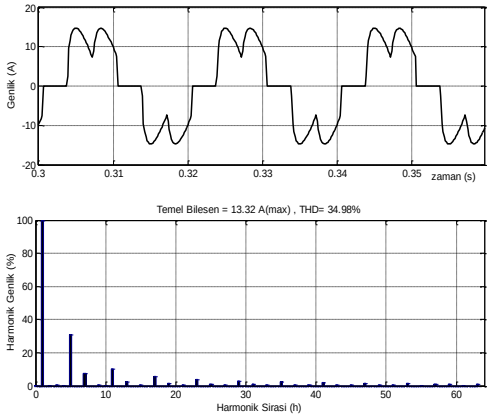
3-fazlı 6-darbeli tristör denetimli doğrultucular, endüstride ayarlı DA gerilim gerektiği (kesintisiz güç kaynakları, ayarlı motor hız sürücülerde, vb.) birçok alanda kullanılmaktadır. 3-fazlı 6-darbeli tristör denetimli doğrultucular, doğru akım tarafına yüksek değerli bir bobin bağlandığında kaynaktan çekilen harmonik akım bileşenleri, kaynak empedansına ve gerilim dengesizliğine daha az bağımlıdır. Bu nedenle tristör denetimli veya DA tarafına yeterli miktarda bobin bağlanmış diyotlu doğrultucular harmonik akım kaynağı gibi davranmaktadır [13]. Şekil 2.9'da Matlab/Simulink ortamında simülasyonu yapılan 3-fazlı 6-darbeli akım kaynaklı bir doğrultucunun (a) bağlantı şeması (b) α=0° için kaynaktan çektiği akımın dalga şekli ve harmonik dağılımı (c) α=45° için kaynaktan çektiği akımın dalga şekli ve harmonik dağılımı görülmektedir. Doğrultucunun kaynaktan çektiği akımda (5, 7, 9, 11, 15, 17, 19, 23, 25, …) harmonik bileşenler bulunmaktadır. Harmonik bozulma α=0° için %29,99 ve α=45° için %34,98 oranındadır.



(a)



(b)



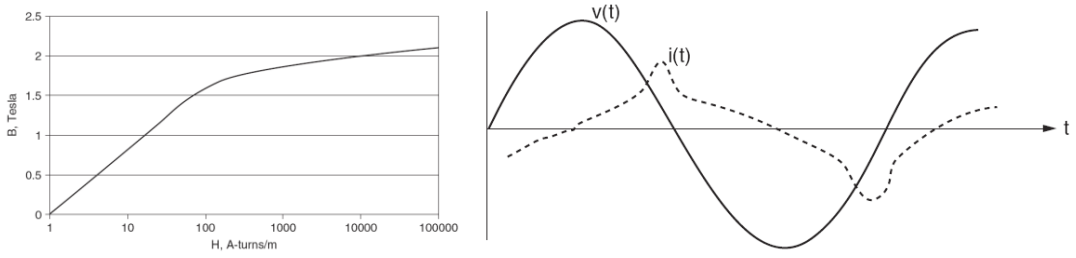
(c)

Şekil 2.9: (a) 3-fazlı 6-darbeli akım kaynaklı bir doğrultucunun bağlantı şeması (b) α=0° için kaynaktan çektiği akımın dalga şekli ve harmonik dağılımı (c) α=45° için kaynaktan çektiği akımın dalga şekli ve harmonik dağılımı.

2.3.3. Transformatörler

Transformatör, bir enerji seviyesinden diğer enerji seviyesine yüksek verimde dönüşüm yapan durağan bir elektrik makinesidir. Genel yapıda transformatörler demir nüve ve bu nüve üzerine sarılmış bobinlerden oluşmaktadır. Bu bobinlerden birisine gerilim uygulandığında demir çekirdek manyetize (mıknatıslanma) olmakta ve diğer bobinlere enerjinin aktarılması elektromanyetik indüksiyonla gerçekleşmektedir.

Güç sistemlerinde çok sık kullanılan transformatörlerin harmonik üretmesi, demir çekirdeğin mıknatıslanma karakteristiğinin (μc=B/H) doğrusal olmamasından kaynaklanmaktadır. Şekil 2.10 (a)'da transformatörlerde kullanılan demir çekirdeğe ait örnek manyetik geçirgenlik (mıknatıslanma) grafiği verilmektedir. Kaynaktan sinüzoidal bir gerilim uygulandığında mıknatıslanma karakteristiğine bağlı olarak Şekil 2.10 (b)'de görüldüğü gibi sinüzoidal olmayan harmonikli bir mıknatıslanma akımı çekilmektedir [49]. Transformatörlerin normal değerlerinin üstünde çalıştırılması durumunda, nüve daha çok doymakta ve harmonik akımların çekilmesine sebep olmaktadır.



(a) (b)

Şekil 2.10: (a) Transformatörlerde kullanılan demir çekirdeğe ait örnek manyetik geçirgenlik (μc=B/H) grafiği (b) transformatöre uygulanan gerilim ve mıknatıslanma akımı.

2.3.4. Ark fırınları

Ark fırınları demir çelik sektöründe metallerin eritilmesinde kullanılan yüksek güçlerde ve yoğun miktarda elektrik enerjisi tüketen harmonik kaynaklardır. Ark fırınının iç direnci doğrusal olmadığından şebekeden çektiği akım, direncin karakteristiğine bağlı olarak her an değişen farklı harmonikler içermektedir [62].

2.4. Harmoniklerin Etkileri

Akım harmoniklerinin görüldüğü işletmelerde sıkça rastlanan sorunlar [40];

- Aktif güçte azalma ve kayıpların artması, güç faktörünün düşmesi,
- Hassas elektronik kartların arızalanması,
- Üç faz sistemlerde nötr hattında aşırı akımların oluşumu ve nötr hattında ısınma,
- Trafo ve jeneratörlerde aşırı ısınma,
- Mekanik cihazlarda titreşim ve gürültülü çalışma,
- Elektronik ölçüm cihazlarının doğru çalışmaması.

Gerilim harmoniklerinin görüldüğü işletmelerde sıkça rastlanan sorunlar;

- Trafo, generatör ve motorlarda aşırı ısınma,
- Kondansatörlerde aşırı ısınma ve delinme,
- İzolasyon sistemlerinde yalıtkan problemleri,
- Rezonans ve yüksek gerilim delinmesi,
- Asenkron motorlarda problemler, mekanik salınımlar ve gürültülü çalışma.

2.5. Harmonik Standartları ve Tanımları

Güç sistemlerinde elektrik enerji verimliliği ve güç kalitesinin artırılması amacıyla akım ve gerilim harmoniklerinin belirli sınırlarda tutulması ile ilgili değişik ülkelerde farklı standartlar geliştirilmiştir. Örneğin güç kalitesinde temel kaynaklar arasında yer alan, IEC Std. 61000-1-1, IEC Std. 1000-3-4, CENELEC Std. EN 50006 ve EN 50160, IEEE Std. 100 ve IEEE-519-1992 gibi değişik standartlar bulunmaktadır. IEEE 519–1992 standardına Isc/I1 <20 için ortak bağlantı noktasında maksimum gerilim ve akım THB'sı %5'tir. Tablo 2.6 ve Tablo 2.7'de IEEE 519–1992 standardı tarafından belirlenen akım ve gerilim harmonik sınırları görülmektedir [40].

Tablo 2.6: IEEE 519-1992 akım harmonik sınırları.

Isc/I1	**h<11**	**11≤h<17**	**17≤h<23**	**23≤h<35**	**35≤h**	**THB (%)**
<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
100-1000	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

Tablo 2.7: IEEE 519-1992 gerilim harmonik sınırları.

Bara Gerilimi	**Maksimum bireysel harmonik bileşen (%)**	**Maksimum THB (%)**
2,3-69 kV	3,0	5, 0
69-138 kV	1,5	2,5
>138kV	1,0	1,5

Toplam Harmonik Bozulumu (THB) akım ve gerilim dalgalarındaki toplam bozulmayı ifade etmektedir. THB, harmoniklerin efektif değerlerinin toplamının temel bileşenin efektif değerine oranı şeklinde hesaplanmaktadır [1, 2].

Harmonikler nedeniyle bozulmuş periyodik ve sinüzoidal olmayan dalga şekilleri Fourier serisinin birer bileşeni olarak ifade edilmektedir. Fourier serisinde her bir terim, bozulmaya uğramış dalganın harmonik bileşeni olarak adlandırılmaktadır. Aşağıda harmoniklerle ilgi bazı tanımlar verilmektedir [48]. Sinüzoidal dalgaların ortalama değeri Denklem 2.1'de ve etkin değeri Denklem 2.2'de verilmektedir.

$$I_{ort} = \frac{1}{T}\int_0^T i(t)dt \tag{2.1}$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2(t)dt} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_0^T i_{max}^2 \cos^2(wt)dt} = \sqrt{\frac{1}{2} i_{max}^2} = \frac{i_{max}}{\sqrt{2}} \tag{2.2}$$

Sinüzoidal olmayan dalgaların ortalama değeri Denklem 2.3'de ve etkin değeri Denklem 2.4'de verilmekte ve gerekli sadeleştirmeler yapıldıktan sonra Denklem 2.5'de verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$I_{ort} = \frac{1}{T}\int_0^T [i^1(t) + i^2(t) + i^3(t) + i^4(t) + \cdots]dt \tag{2.3}$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2(t)dt} = \left\{\frac{1}{T}\int_0^T [i_{max}^{(1)} \cos(wt + \beta_1) + i_{max}^{(2)} \cos(2wt + \beta_2) + i_{max}^{(3)} \cos(3wt + \beta_3) + \cdots]^2 dt\right\}^{\frac{1}{2}} \tag{2.4}$$

$$I_{rms} = [I_{DA} + (I_{rms}^{(1)})^2 + (I_{rms}^{(2)})^2 + (I_{rms}^{(3)})^2 + \cdots (I_{rms}^{(H)})^2]^{1/2} \tag{2.5}$$

Harmonik faktör (HF-Harmonic Factor), h. harmoniğin bireysel bozulma faktörü olarak tanımlanmakta ve Denklem 2.6'da verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$HF_h = \frac{I_{rms}^{(h)}}{I_{rms}^{(1)}} \tag{2.6}$$

Toplam harmonik bozulma (THD-Total Harmonic Distortion), bozulmuş dalga şeklinin harmonik bileşen toplamalarının temel bileşene oranı olarak tanımlanmakta ve Denklem 2.7'de verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty}(I_{rms}^{(h)})^2}}{I_{rms}^{(1)}} \tag{2.7}$$

Toplam ara harmonik bozulma (TIHD-Total Interharmonic Distortion), bozulmuş dalga şeklinin ara harmonik bileşen toplamalarının temel bileşene oranı olarak tanımlanmakta ve Denklem 2.8'de verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$TIHD = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^{n}(I_{rms}^{(k)})^2}}{I_{rms}^{(1)}} \tag{2.8}$$

Toplam alt harmonik bozulma (TSHD-Total Subharmonic Distortion), bozulmuş dalga şeklinin alt harmonik bileşen toplamalarının temel bileşene oranı olarak tanımlanmakta ve Denklem 2.9'da verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$TSHD = \frac{\sqrt{\sum_{s=1}^{s}(I_{rms}^{(s)})^2}}{I_{rms}^{(1)}} \tag{2.9}$$

Toplam talep bozulma (TDD-Total Demand Distortion) ve bozulma indeksi (DIN-Distortion Index), Denklem 2.10'da verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50}(I_{rms}^{(h)})^2}}{I_{rated}} \;\; ; \;\; DIN = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty}(I_{rms}^{(i)})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{\infty}(I_{rms}^{(i)})^2}} = \frac{THD}{\sqrt{THD^2+1}} \tag{2.10}$$

3. BİRLEŞİK GÜÇ KALİTE DÜZENLEYİCİSİ SİSTEMİNİN BİLGİSAYAR TABANLI MODELLENMESİ VE SİMÜLASYONU

3.1. Giriş

Elektrik enerjisi üreten ve hizmet veren kuruluşların önemli sorumluluklarından birisi, Ortak Bağlantı Noktasında (OBN) enerji tüketen kullanıcılar için üretilen elektrik enerjisinin akım ve gerilimin dalga şekillerinin sinüzoidal formda, istenilen genlik ve frekansta olmasını sağlamaktır. Her ne kadar elektrik enerjisi senkron makineler ile sinüzoidal gerilime yakın üretilse de bazı istenmeyen ve beklenmeyen geçici gerilim olayları, yıldırımlar, kısa devre durumları ve doğrusal olmayan yüklerden dolayı akım bozulmaları gibi durumlar oluşmaktadır. Örneğin ark fırınları gerilim dalgalanmaları ve yüksek miktarda akım harmoniklerine sebep olmakta, güç elektroniği dönüştürücüleri bozuk akım çekmekte ve gerilim dalga şekli bozulmalarına sebep olmaktadır [48].

Güç kalite problemlerine çözüm üretmek, güç sitemlerinin performansını ve kararlılığını artırmak için çok sayıda teknik yöntem ve cihaz önerilmekte ve uygulanmaktadır. Geleneksel cihazlar, gerilim regülasyonu yapmak ve seri-paralel güç kondansatörleri kullanarak güç faktörünü düzeltmektedir. Gerilim regülasyon performansını artırmak, temel frekansta kalıcı durum ve anlık aktif ve reaktif güç kontrolü yapmak için geliştirilmiş FACTS (Flexible AC Transmission Sytems) sistemleri kullanılmaktadır. Ayrıca güç kalitesi problemlerini düzeltmek, reaktif güç kompanzasyonu ve gerilim regülasyonu yapmak için özel güç cihazları CPD (Custom Power Devices) kullanılmaktadır. Diğer modern çözüm yöntemi olan ve güç kalitesi problemlerine geniş çaplı çözüm üreten birleşik güç kalite düzenleyicisi (UPQC- Unified Power Quality Conditioner) sistemleri kullanılmaktadır [48].

Birleşik güç kalite düzenleyicisi, seri aktif güç filtresi ile paralel aktif güç filtresinin birlikte kullanılması ile oluşturulmuş en gelişmiş filtre sistemidir. Birleşik güç kalite düzenleyicisi'nin temel bileşenleri olan SAGF ve PAGF 1976 yılında Gyugyi tarafından ileri sürülmüştür [14]. PAGF, doğrusal olmayan yüklerin kaynaktan çektiği harmonikleri yok etmekte, nötr akımı kompanzasyonu, reaktif güç

kompanzasyonu ve DA-bara gerilim regülasyonu yapmaktadır. SAGF ise şebeke gerilim harmonik kompanzasyonu, gerilim düşme ve yükselmeleri, şebeke geriliminde frekans problemleri, gerilim kesilmeleri, kaynak gerilimindeki dengesizlikler gibi sorunların düzeltilmesi işlevini gerçekleştirmektedir [13, 14, 24].

3.2. Üç-Fazlı Sistemlerde Güç Kavramları

3.2.1. Geleneksel güç kavramları

Elektrik sistemlerinde güç kavramlarıyla ilgili, 1927 yılında Budeanu tarafından frekans domeninde ve 1932 yılında Fryze tarafından zaman domeninde olmak üzere iki farklı güç hesaplama tanımları yapılmıştır. Literatürde çok farklı güç tanımlarına rastlanmaktadır. Fakat günümüzde, bazı uygulama alanlarında (örneğin aktif güç filtre denetim algoritmalarının hesaplanması) zaman domeninde tanımlanan güç tanımları frekans domeninde tanımlanan güç tanımlarından daha kullanışlı olduğu görülmektedir [24].

Geleneksel güç tanımları aşağıda özetle verilmektedir [24]. Görünür güç Denklem 3.1'de verildiği gibi tanımlanmaktadır.

$$\mathbf{S = VI} \tag{3.1}$$

Denklem 3.1'de verilen gerilim "V" ve akım "I" etkin (rms) değerler olup Denklem 3.2'de verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$V = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T v^2(t)dt} = \sqrt{\sum_n V_n^2} \quad ; \qquad I = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2(t)dt} = \sqrt{\sum_n I_n^2} \tag{3.2}$$

Denklem 3.2'de V_n ve I_n n.harmoniğin etkin değerini vermektedir. Aktif güç Denklem 3.3'de, reaktif güç Denklem 3.4'de ve harmonik güç ise Denklem 3.5'de verilmektedir.

$$P = \sum_n P_n = \sum_n V_n I_n \cos\Phi_n \tag{3.3}$$

$$Q = \sum_n Q_n = \sum_n V_n I_n \sin\Phi_n \tag{3.4}$$

$$H^2 = S^2 - P^2 - Q^2 \tag{3.5}$$

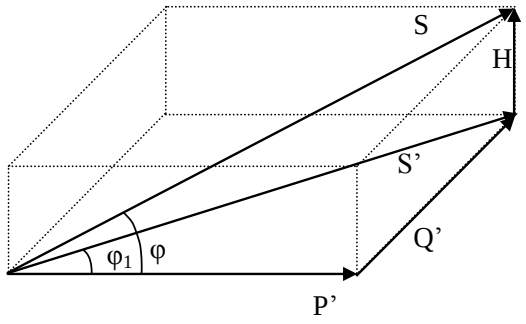
Denklem 3.5'de verilen harmonik bozulma gücü "H" doğrusal yük durumunda sıfır çıkmaktadır. Bu durumda görünür güç, Denklem 3.6'da ve güç faktörü (yer değiştirme faktörü) Denklem 3.7'de verilmektedir.

$$S^2 = P^2 + Q^2 \tag{3.6}$$

$$\cos\varphi_1 = \frac{P'}{S'} = \frac{P'}{\sqrt{P'^2 + Q'^2}} \tag{3.7}$$

Doğrusal olmayan yük durumlarında harmonik güç faktörü Denklem 3.8'de verilmektedir. Şekil 3.1'de dengesiz ve doğrusal olmayan yük durumlarında güç dörtyüzlüsü verilmektedir.

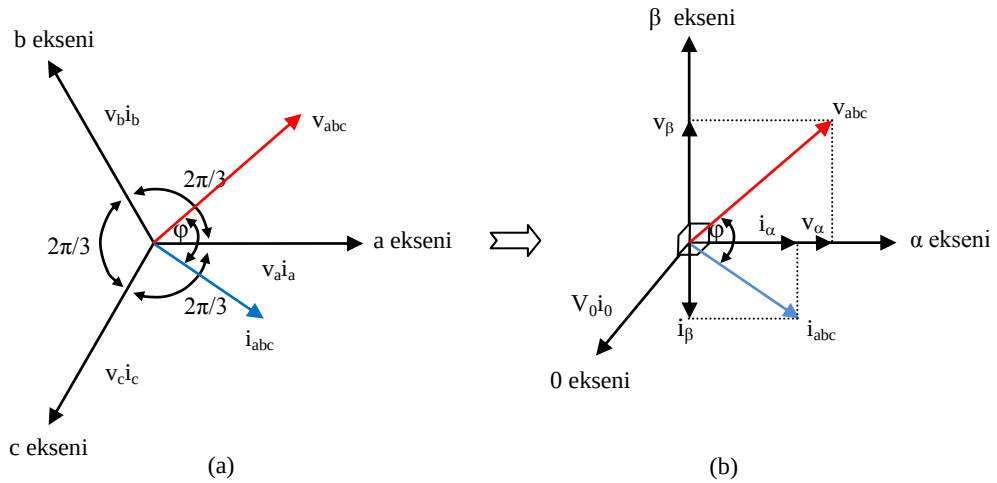
$$\cos\varphi = \frac{P'}{S} = \frac{P'}{\sqrt{P'^2 + Q'^2 + H^2}} \tag{3.8}$$



Şekil 3.1: Güç dörtyüzlüsü (power tetrahedron).

3.2.2. Geleneksel anlık reaktif güç teorisi

Literatürde "p-q teorisi" olarak da adlandırılan geleneksel Anlık Reaktif Güç Teorisi (ARGT), 1983 yılında Akagi, Kanazawa ve Nabae [15] tarafından ileri sürülmüştür. ARGT nötr hatlı veya nötr hatsız üç fazlı sistemlerde anlık akımların ve anlık gerilimlerin ölçülmesi ile anlık reaktif ve aktif güçlerin hesaplanması yöntemine dayanmaktadır [15]. Bu yöntem hem geçici rejim hem de kararlı hal durumda geçerli olmaktadır. Anlık güçlerin hesaplanabilmesi için Şekil 3.2 (a)'da verilen a-b-c koordinatlarından 3 fazlı akım ve gerilimlerin (Clark dönüşümü olarak da bilinen) α-β-0 koordinatlarına Şekil 3.2 (b)'de verildiği gibi durağan referans yapıya dönüşümü yapılmaktadır.



Şekil 3.2: (a) a-b-c koordinatlarından (b) α-β-0 koordinatlarına dönüşüm.

Şekil 3.2 (a)'da verilen a, b ve c eksenleri aynı düzlem üzerinde $2\pi/3$ faz açılarıyla yerleştirilmiştir. 3-fazlı 4-telli sinüzoidal gerilim kaynağından beslenen dengeli ve doğrusal yük durumlarında, $v_a i_a$ vektörleri a-ekseni, $v_b i_b$ vektörleri b-ekseni ve $v_c i_c$ vektörleri c-ekseni üzerindedir. Bu a, b ve c eksenleri 3-fazlı 4-telli sistemlerde α-β-0 koordinatlara Denklem 3.9'da verilen [C] çevrim matrisi kullanılarak, gerilimler Denklem 3.11 de ve akımlar ise Denklem 3.12'de verildiği gibi çevrilmektedir [30].

$$\left[C\right] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \tag{3.9}$$

$$\left[C\right]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1 & 0 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \tag{3.10}$$

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \left[C\right] \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \tag{3.11}$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \left[C\right] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \tag{3.12}$$

3-fazlı 4-telli sistemlerde dengesiz yük durumlarında nötr akımları oluşmakta ve oluşan i_N nötr akımı Denklem 3.13'de verilmektedir. 3-fazlı anlık akımların α-β-0 dönüşümü ile elde edilen sıfır sıralı i_0 akımı ise Denklem 3.14'de verilmektedir.

$$i_N = i_a + i_b + i_c \tag{3.13}$$

$$i_0 = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_a + i_b + i_c) = \frac{1}{\sqrt{3}}\, i_N \tag{3.14}$$

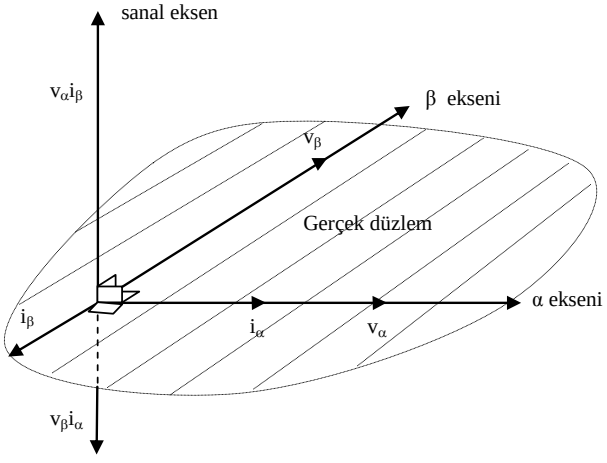
3-fazlı 4-telli sistemlerde, a-b-c koordinatlarında ve α-β-0 koordinatlarında anlık 3-fazlı aktif güç Denklem 3.15'de ve anlık sanal güç Denklem 3.16 ve 3.17'de verildiği gibi ifade edilmektedir.

Anlık sanal güç, sanal eksen üzerindeki vektörlerin toplamına eşittir [15, 23, 24, 30, 40, 41, 43]. Şekil 3.3'de α-β-0 ekseninde anlık akım ve gerilim uzay vektörleri görülmektedir.

$$\begin{aligned} p_{3\varphi} &= v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta + v_0 i_0 \\ &= p_a + p_b + p_c = p_\alpha + p_\beta + p_0 \\ &= p + p_0 \end{aligned} \tag{3.15}$$

$$\vec{q} = \vec{v}_\alpha \times \vec{i}_\beta + \vec{v}_\beta \times \vec{i}_\alpha \tag{3.16}$$

$$q = v_\alpha i_\beta - v_\beta i_\alpha = \frac{-1}{\sqrt{3}}\left[(v_a - v_b)i_c + (v_b - v_c)i_a) + (v_c - v_a)i_b)\right] \tag{3.17}$$



Şekil 3.3: α-β-0 ekseninde anlık akım ve gerilim uzay vektörleri.

3-fazlı 4-telli sistemde anlık aktif (gerçek) güç "p" ve anlık reaktif (sanal) güç "q", Denklem 3.18'deki [$V_{\alpha\beta}$] çevrim matrisi kullanarak Denklem 3.20'de verildiği gibi ifade edilmektedir.

$$\begin{bmatrix} V_{\alpha\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} v_0 & 0 & 0 \\ 0 & v_\alpha & v_\beta \\ 0 & -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \tag{3.18}$$

$$\begin{bmatrix} V_{\alpha\beta} \end{bmatrix}^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} v_0 & 0 & 0 \\ 0 & v_\alpha & -v_\beta \\ 0 & v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \tag{3.19}$$

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{\alpha\beta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \tag{3.20}$$

Denklem 3.20'de verilen, 3-fazlı 4-telli sistemde aynı eksenler üzerinde bulunan $v_\alpha.i_\alpha$ ve $v_\beta.i_\beta$ skaler çarpım ve toplamları ile hesaplanan anlık aktif gücün "p" birimi W (Watt) olarak adlandırılmaktadır. Farklı eksenler üzerinde bulanan $v_\alpha.i_\beta$ ve $v_\beta.i_\alpha$ vektörel çarpım ve toplamları ile elde edilen anlık sanal güç "q" gerçek elektriksel bir büyüklüğe karşılık gelmemekte ve birimi IVA (Imajiner Volt Amper) olarak adlandırılmaktadır [30, 32, 40, 41, 43].

3.2.3. 3-fazlı 4-telli dengeli ve doğrusal yüklerde anlık güçlerin hesaplanması

3-fazlı 4-telli sinüzoidal gerilim kaynaklı sistemlerde 3-fazlı doğrusal yük durumda anlık kaynak gerilimleri ve yükün çektiği anlık akımlar Denklem 3.21'de verilmektedir.

$$\begin{aligned} v_a &= \sqrt{2}V\sin\omega t & i_a &= \sqrt{2}I\sin(\omega t - \phi) \\ v_b &= \sqrt{2}V\sin(\omega t - 120°) & i_b &= \sqrt{2}I\sin(\omega t - 120° - \phi) \\ v_c &= \sqrt{2}V\sin(\omega t + 120°) & i_c &= \sqrt{2}I\sin(\omega t + 120° - \phi) \end{aligned} \tag{3.21}$$

Denklem 3.21'de verilen anlık gerilim ve anlık akım eşitlikleri kullanılarak a-fazına ait anlık güç Denklem 3.22'de verildiği gibi hesaplanmaktadır [32].

$$p_a = V_a I_a = \boxed{VI\cos\varphi(1-\cos 2\omega t)} - \boxed{VI\sin\varphi\sin 2\omega t} \tag{3.22}$$

Denklem 3.22'de görüldüğü gibi a-fazına ait anlık güç iki bileşenden oluşmaktadır. Birinci bileşen ($VI\cos\varphi(1-\cos 2\omega t)$), $VI\cos\varphi$'nin ortalama değerine ve hat frekansının iki katı salınım yapan ($VI\cos\varphi\cos 2\omega t$) dalgalı bileşenine sahiptir. Birinci bileşen negatif değerler almamakta ve ortalama DA gücüne karşılık gelmektedir. İkinci bileşen ($VI\sin\varphi\sin 2\omega t$), hat frekansının iki katı salınım yapmakta ve ortalama değeri sıfır olmakla birlikte $VI\sin\varphi$'nin tepe değerine sahiptir. a-fazına ait ortalama aktif güç Denklem 3.23'de verildiği gibidir. Denklem 3.24'de verilen geleneksel reaktif güç ise ikinci bileşenin tepe değeri olarak tanımlanmaktadır [32, 40, 41].

$$P = VI\cos\varphi \tag{3.23}$$

$$Q = VI\sin\varphi \tag{3.24}$$

Denklem 3.22'de a-fazına ait anlık güç Denklem 3.23 ve 3.24'de verilen ifadelerle tekrar yazıldığında Denklem 3.25 elde edilmektedir. Dengeli 3-fazlı sitemlerde anlık aktif güç sabittir ve ortalama aktif güç değerlerinin toplamına eşittir. 3-fazlı anlık aktif ve reaktif güçler Denklem 3.26'da verilmektedir [32].

$$p_a = P(1-\cos 2\omega t) - Q\sin 2\omega t \tag{3.25}$$

$$\begin{aligned} p_{3\varphi}(t) &= v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c = 3VI\cos\varphi \\ &= p_a + p_b + p_c = 3P = P_{3\varphi}, \\ Q_{3\varphi} &= 3VI\sin\varphi = 3Q \end{aligned} \tag{3.26}$$

Dengeli 3-fazlı sitemlerde, a-b-c koordinatlarında anlık gerilimlerin Denklem 3.11'de verilen α-β-0 koordinatlarına dönüşümü Denklem 3.27'de verildiği gibi yapılmaktadır. Denklem 3.12'de verilen anlık akımların α-β-0 koordinatlarına dönüşümü Denklem 3.28'de verildiği gibi yapılmaktadır. Dengeli sinüzoidal gerilim kaynaklı sistemde sıfır sıralı gerilim oluşmamaktadır bu nedenle gerilimin sıfır sıralı bileşeni (v_0) oluşmamaktadır. Aynı şekilde dengeli ve doğrusal yüklerde sıfır sıralı akım bileşeni (i_0) oluşmamaktadır [23, 24, 32, 40, 41].

$$
\begin{aligned}
v_\alpha &= \sqrt{\frac{2}{3}}\,(v_a - v_b\frac{1}{2} + v_c\frac{1}{2}) = \sqrt{3}V\sin\omega t \\
v_\beta &= \sqrt{\frac{2}{3}}\,(v_b\frac{\sqrt{3}}{2} - v_c\frac{\sqrt{3}}{2}) = \sqrt{3}V\cos\omega t \\
v_0 &= \sqrt{\frac{2}{3}}\,(v_a\frac{1}{\sqrt{2}} + v_b\frac{1}{\sqrt{2}} + v_c\frac{1}{\sqrt{2}}) = 0
\end{aligned}
\tag{3.27}
$$

$$
\begin{aligned}
i_\alpha &= \sqrt{\frac{2}{3}}\,(i_a - i_b\frac{1}{2} + i_c\frac{1}{2}) = \sqrt{3}I\sin(\omega t - \phi) \\
i_\beta &= \sqrt{\frac{2}{3}}\,(i_b\frac{\sqrt{3}}{2} - i_c\frac{\sqrt{3}}{2}) = \sqrt{3}I\cos(\omega t - \phi) \\
i_0 &= \sqrt{\frac{2}{3}}\,(i_a\frac{1}{\sqrt{2}} + i_b\frac{1}{\sqrt{2}} + i_c\frac{1}{\sqrt{2}}) = 0
\end{aligned}
\tag{3.28}
$$

3-fazlı 4-telli sistemlerde dengeli sinüzoidal gerilim kaynağından beslenen dengeli ve doğrusal yüklerde anlık gerçek ve sanal güçler Denklem 3.27 ve 3.28 kullanarak Denklem 3.29'da verildiği gibi hesaplanmaktadır. Anlık gerçek ve sanal güçler geleneksel aktif ve reaktif güçlere eşit olmaktadır [23, 24, 32, 40, 41, 43, 48].

$$
\begin{aligned}
p &= P_{3\varphi} = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta = 3VI\cos\phi \\
q &= Q_{3\varphi} = v_\alpha i_\beta - v_\beta i_\alpha = 3VI\sin\phi
\end{aligned}
\tag{3.29}
$$

3.2.4. 3-fazlı 4-telli sinüzoidal kaynaktan beslenen doğrusal olmayan yüklerde anlık güç hesabı ve güç bileşenlerinin elde edilmesi

3-fazlı 4-telli sinüzoidal kaynaktan beslenen doğrusal olmayan yüklerde, kaynak gerilimleri Denklem 3.21'de verilmektedir. Doğrusal olmayan yükün kaynaktan çektiği akımlar ise Denklem 3.30'da verilmektedir. Bu durumda yükün çektiği akımlar, temel frekansın tam katlarında harmonik bileşenler içermektedir [32, 40,41].

$$
\begin{aligned}
i_a &= \sum_{n=1}^{\infty}\sqrt{2}I_n\sin(n\omega t - \phi_n) \\
i_b &= \sum_{n=1}^{\infty}\sqrt{2}I_n\sin[n(\omega t + 120) - \phi_n] \\
i_c &= \sum_{n=1}^{\infty}\sqrt{2}I_n\sin[n(\omega t - 120) - \phi_n]
\end{aligned}
\tag{3.30}
$$

Denklem 3.21'de verilen kaynak gerilimleri ve Denklem 3.30'da verilen doğrusal olmayan yük akımları kullanarak a fazı için hesaplanan anlık güç ifadesi Denklem 3.31'de verilmektedir [32].

$$p_a = VI_1 \cos\phi_1(1-\cos 2\omega t) - VI_1 \sin\phi_1 \sin 2\omega t + \sum_{n=2}^{\infty} 2VI_n \sin\omega t \sin(n\omega t - \phi_n) \qquad (3.31)$$

Denklem 3.31'de verilen a fazı için anlık güç ifadesi ortalama aktif ve dalgalı bileşeninden oluşmaktadır. a-fazı için ortalama aktif güç Denklem 3.32'de, akımın etkin değeri Denklem 3.33'de verildiği gibi hesaplanmaktadır. a-fazı görünür gücü ise Denklem 3.34'de verilmektedir [32].

$$P = VI_1 \cos\varphi_1 \qquad (3.32)$$

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \ldots} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i_a^2 dt} \qquad (3.33)$$

$$S = 3VI \qquad (3.34)$$

Denklem 3.33 ve Denklem 3.34 kullanılarak Denklem 3.35 elde edilmektedir.

$$S^2 = 3^2 V^2 I^2 = 3^2 V^2 (I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \ldots) \qquad (3.35)$$

Doğrusal olmayan yük durumlarında harmonikli akımlardan dolayı reaktif güçler oluşmaktadır. Denklem 3.36'da geleneksel reaktif güç ve Denklem 3.37'de harmonik güç ifadeleri verilmektedir. Bu durumda görünür güç Denklem 3.38'de verilmektedir. Harmonik güce sahip olan görünür güç (S) Şekil 3.1'de verilen güç dörtyüzlüsü ile gösterilmektedir [32].

$$Q = 3VI_1 \sin\varphi_1 \qquad (3.36)$$

$$H = 3V\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_{4+\ldots}^2} \qquad (3.37)$$

$$S^2 = P^2 + Q^2 + H^2 \qquad (3.38)$$

3-fazlı 4-telli sinüzoidal kaynaktan beslenen doğrusal olmayan yük akımları α-β-0 koordinatlarına dönüşümü Denklem 3.39'da verildiği gibi yapılmaktadır [24, 32, 40, 41, 48].

$$
\begin{aligned}
i_\alpha &= \sqrt{\frac{2}{3}}\,(i_a - i_b\frac{1}{2} + i_c\frac{1}{2}) = \sum_{n=1}^{\infty}\frac{2}{\sqrt{3}} I_n \sin(n\omega t - \phi_n)[1-\cos(n120°)] \\
i_\beta &= \sqrt{\frac{2}{3}}\,(i_b\frac{\sqrt{3}}{2} - i_c\frac{\sqrt{3}}{2}) = \sum_{n=1}^{\infty} 2nI_n \cos(n\omega t - \phi_n)\sin(n120°) \\
i_0 &= \sqrt{\frac{2}{3}}\,(i_a\frac{1}{\sqrt{2}} + i_b\frac{1}{\sqrt{2}} + i_c\frac{1}{\sqrt{2}}) = \sum_{n=1}^{\infty}\sqrt{6} I_{3n} \sin(3n\omega t - \phi_{3n})
\end{aligned}
\tag{3.39}
$$

3-fazlı 4-telli sistemlerde dengeli sinüzoidal gerilim kaynağından beslenen, doğrusal olmayan yüklerde anlık gerçek güçler Denklem 3.27 ve 3.39 kullanarak Denklem 3.40'da ve anlık sanal güçler Denklem 3.41'de verildiği gibi hesaplanmaktadır [24,32,48].

$$
\begin{aligned}
p = {} & 3VI_1\cos\phi_1 - 3VI_2\cos(3\omega t - \phi_2) + 3VI_4\cos(3\omega t + \phi_4) - \\
& - 3VI_5\cos(6\omega t - \phi_5) + 3VI_7\cos(6\omega t + \phi_7) - \ldots \\
p = {} & \bar{p} + p_{2\omega} + p_h = \bar{p} + \tilde{p} = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta
\end{aligned}
\tag{3.40}
$$

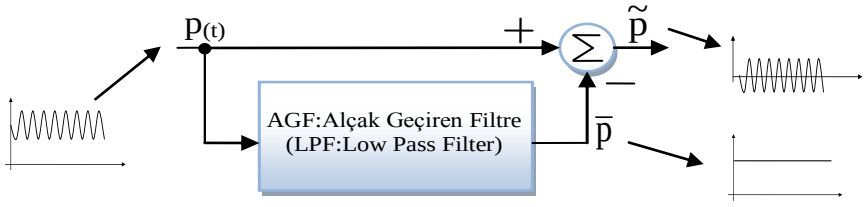
$$
\begin{aligned}
q = {} & 3VI_1\sin\phi_1 - 3VI_2\sin(3\omega t - \phi_2) + 3VI_4\sin(3\omega t + \phi_4) - \\
& - 3VI_5\sin(6\omega t - \phi_5) + 3VI_7\sin(6\omega t + \phi_7) - \ldots \\
q = {} & \bar{q} + q_{2\omega} + q_h = \bar{q} + \tilde{q} = v_\alpha i_\beta - v_\beta i_\alpha
\end{aligned}
\tag{3.41}
$$

$$
\begin{aligned}
p_0 &= v_0 i_0 \\
P_{3\varphi} &= \bar{p} \\
Q_{3\varphi} &= \bar{q}
\end{aligned}
\tag{3.42}
$$

$$
H = \sqrt{\tilde{P}^2 + \tilde{Q}^2} \tag{3.43}
$$

3-fazlı 4-telli sistemlerde dengeli sinüzoidal gerilim kaynağından beslenen doğrusal olmayan yük durumunda, geleneksel güç ifadesi ile anlık güç teorisi arasındaki ilişki Denklem 3.42 ve 3.43 de verilmektedir. Doğrusal olmayan yüklerde anlık gerçek ve sanal güçler Denklem 3.40 ve 3.41'de görüldüğü gibi p ve q'nun ortalama değeri

olan DA bileşenleri ($\bar{p}$ ve $\bar{q}$) yük akımının pozitif sıralı bileşeninden oluşmaktadır. Anlık gerçek gücün DA bileşeni ($\bar{p}$), geleneksel aktif ($P_{3\varphi}$) güce karşılık gelmektedir. Sanal gücün DA bileşeni ($\bar{q}$) geleneksel reaktif güce ($Q_{3\varphi}$) karşılık gelmektedir. Harmonikli akımların sebep olduğu anlık p ve q'nun AA bileşenleri ($\tilde{p}$ ve $\tilde{q}$), yükün harmonik güç (p_h ve q_h) ve negatif sıralı güç ($p_{2\omega}$ ve $q_{2\omega}$) bileşenlerinden oluşmaktadır. P'nin dalgalı bileşeni ($\tilde{P}$) doğrusal olmayan yük akım harmoniklerinden dolayı oluşmaktadır. $\tilde{P}$, birim zamanda kaynakla yük arasında alınıp verilen enerjiyi göstermektedir ve ortalama değeri sıfırdır. Sanal gücün dalgalı bileşeni ($\tilde{q}$) akım harmoniklerinden dolayı oluşmaktadır. $\tilde{Q}$, reaktif gücü göstermektedir ve ortalama değeri sıfırdır. Harmonik güç (H) gerçek ve sanal güçlerin dalgalı bileşenlerinden oluşmaktadır [23, 24, 32, 40, 41, 43, 48]. Denklem 3.40 ve 3.41'de verilen anlık gerçek ve sanal "p" ve "q" güçlerin DA bileşenleri ($\bar{p}$ ve $\bar{q}$), alçak geçiren filtreden geçirerek ve "p" ve "q" nun AA bileşenleri ($\tilde{p}$ ve $\tilde{q}$), yüksek geçiren filtreden geçirerek elde edilmektedir. Şekil 3.4'de anlık güç bileşenlerinin elde edilmesi işlemi blok diyagramı verilmektedir.



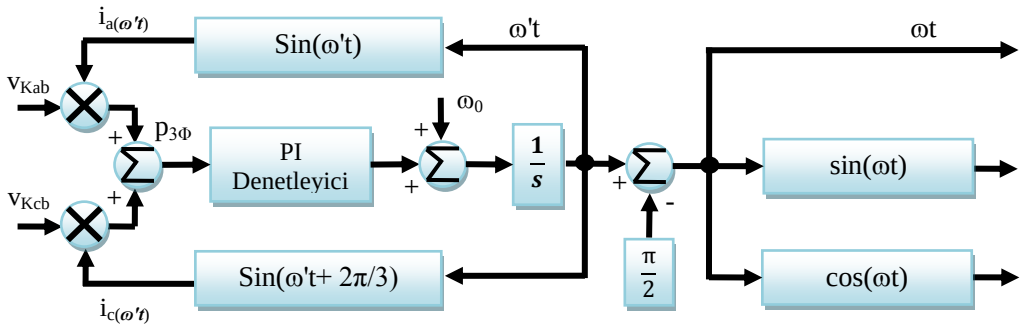
Şekil 3.4: Yüksek Geçiren Filtre (YGF) blok diyagramı (HPF:High Pass Filter).

3.3. Faz Kilitlemeli Döngü

Literatürde PLL (Phase Looked Loop) olarak bilen faz kilitlemeli döngü, frekans katlayıcı devrelerde, frekans modülasyonu (FM) devrelerinde, modemlerde, genlik modülasyon (AM), frekans kaydırmalı anahtarlama devrelerde ve güç elektroniği denetim sistemlerde oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

3-fazlı 4-telli güç sistemlerinde doğrusal ve dengeli kaynak gerilimleri genelde temel pozitif sıralı bileşenlerden oluşmaktadır. Fakat dengesiz ve doğrusal olmayan durumlarında temel pozitif sıralı bileşenle birlikte negatif ve sıfır sıralı bileşenlerde oluşmaktadır. Aktif güç filtre sistemlerinde harmonikleri kompanze etmek için

gerilimlerin temel pozitif sıralı bileşenlerinin ayırt edilmesi gerekmektedir. Kaynak gerilimlerinin temel pozitif sıralı bileşenlerini tespit etmek için bazı PLL devreleri [23, 24, 25] kullanılmaktadır. BGKD denetim algoritmalarında kullanılmak üzere modifiye edilmiş PLL devresinin blok şeması Şekil 3.5'de verilmektedir. PLL blok şemasında verildiği üzere giriş gerilimi olarak kullanılan fazlar arası gerilimler, $v_{Kab} = v_{Ka}-v_{Kb}$ ve $v_{Kcb} = v_{Kc}-v_{Kb}$ şeklinde hesaplanmaktadır. PLL algoritması 3-fazlı anlık gücün $p_{3\Phi} = v_{Kab}i_a + v_{Kcb}i_c$ hesaplanması yöntemine dayanmaktadır. Geri besleme akım sinyalleri $i_a=\sin(\omega t)$ ve $i_c=\sin(\omega t+2\pi/3)$ PI denetleyici çıkışının zamana bağlı toplayıcı (integral) kullanarak PLL tarafından üretilmektedir. PLL devresi, PI denetleyicinin 3-fazlı anlık ($p_{3\Phi} = \bar{p}_{3\Phi} + \tilde{p}_{3\Phi}$) güç girişinin ortalaması sıfır ($\bar{p}_{3\Phi} = 0$) ve düşük frekanslı ($\tilde{p}_{3\Phi}$) salınması durumunda sabit çalışma noktasına ulaşmaktadır. Ayrıca PLL devresi kararlı çalışmaya başlar ve $p_{3\Phi}$ nin ortalama değeri sıfır olmakta bununla birlikte gerilimin temel frekans pozitif sıralı bileşen açısına ulaşmaktadır. Üretilen i_a ve i_c akımları, ölçülen v_{Kab} ve v_{Kcb} gerilimlerin temel pozitif sıralı bileşenine dönüşmektedir. Bu nedenle PLL çıkışı $\sin(\omega t)$, ölçülen v_{Ka} gerilimin içerdiği temel pozitif sıralı bileşenle aynı açıdadır [25].

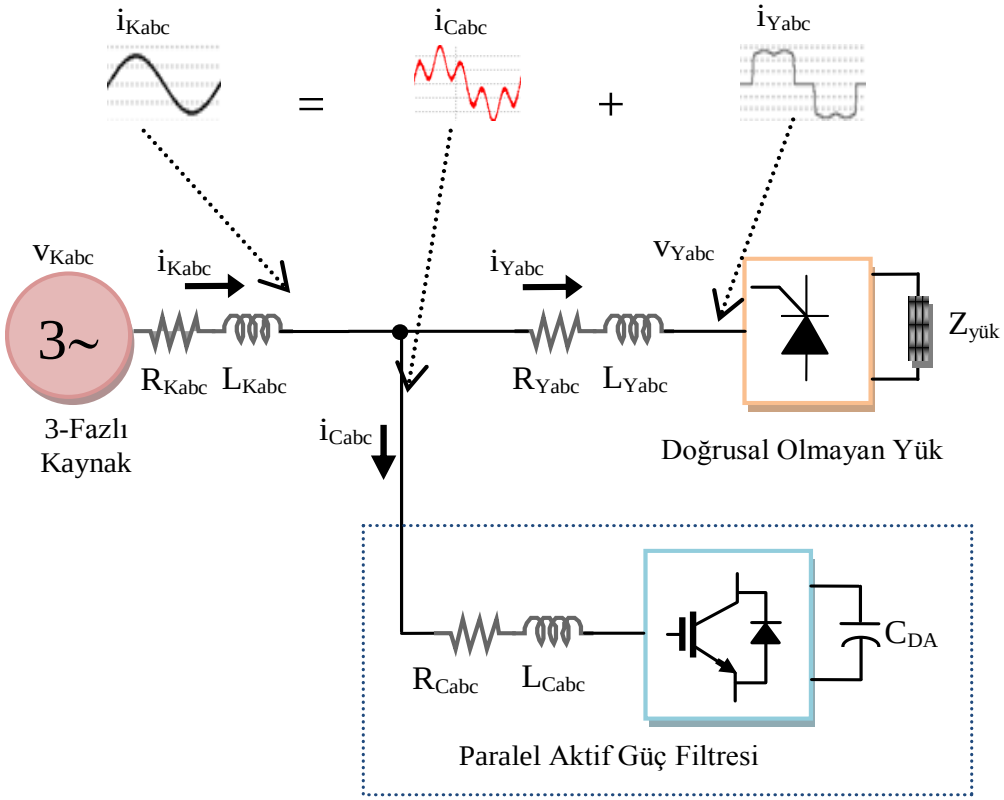


Şekil 3.5: PLL devresi blok şeması.

3.4. Paralel Aktif Güç Filtresi

1976 yılında Gyugyi [14] tarafından temel prensipleri tanıtılan paralel aktif güç filtresi, doğrusal olmayan yüklerin kaynaktan çektiği harmonikleri yok etmekte, reaktif güç kompanzasyonu, yük akımlarının dengelenmesi ve DA-bara hat gerilim regülâsyonu gerçekleştirmektedir. PAGF genellikle iki farklı birimden oluşmaktadır. Birincisi PWM evirici güç katı, diğer birimi ise yüksek anahtarlama frekans sinyalleri üreten denetim birimidir. PWM evirici güç katı, Şekil 3.6'da görüldüğü gibi DA tarafına bir kondansatör bağlanmış üç fazlı bir Gerilim Kaynaklı Evirici

(GKE) devresinden meydana gelmektedir. Gerilim kaynaklı PWM evirici sinüzoidal olmayan gerilim kaynağı gibi çalışmaktadır. Paralel aktif güç filtresi, kullanılan denetim algoritmasına göre sürekli olarak şebeke veya yük akımlarını okuyarak doğrusal olmayan yüklerle ilgili güç kalitesi problemlerine sebep olan olayları düzeltecek referans filtre akımlarını üreterek kapalı-döngü denetleyici olarak çalışmaktadır [24].

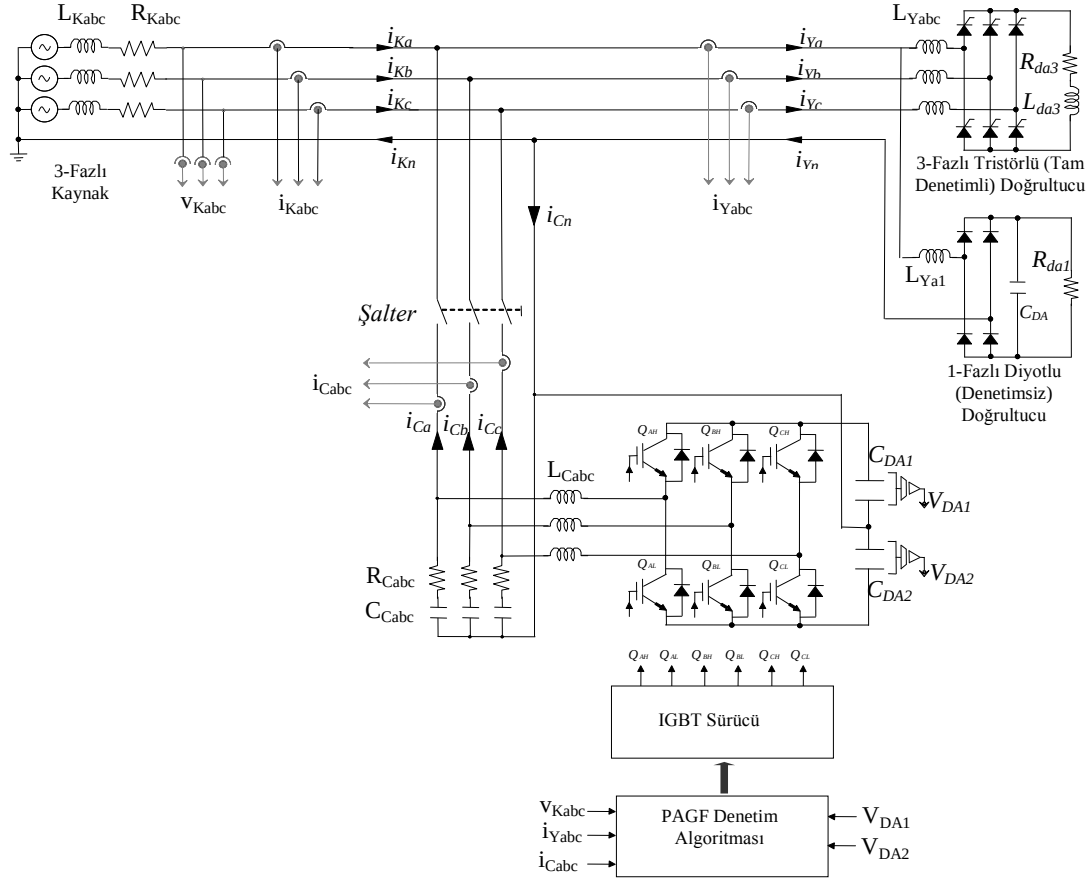


Şekil 3.6: Paralel aktif güç filtresi genel blok diyagramı.

PAGF'nin temel görevi, doğrusal olmayan yüklerin kaynaktan çektiği akım harmoniklerinin filtrelenmesi ve dengelenmesi, reaktif güç kompanzasyonu ve nötr akım yok edilmesi amacıyla yüke paralel bağlanarak sisteme aynı genlikte fakat ters fazda bir kompanzasyon akımı ilave etmektir. Böylece kaynak akımı sinüzoidal olmakta ve kaynak gerilimiyle aynı faza getirilmektedir.

Şekil 3.7'de 3-fazlı 4-telli sistemlerde PAGF'nin temel denetim blok diyagramı görülmektedir. Doğrusal olmayan yük olarak 3-fazlı tam denetimli tristörlü yük kullanılmaktadır. Ayrıca fazlar arasında dengesizlik oluşturmak için tek faza bağlanmış 1-fazlı denetimsiz diyotlu doğrultucu yük olarak kullanılmaktadır. 3-fazlı

4-telli sistemlerde fazlar arasında dengesizlikten dolayı oluşan nötr akımının kompanzasyonu için PAGF'nin PWM evirici güç katı, iki kondansatörün seri bağlanması ve orta noktasının nötr hattına bağlanması ile oluşmaktadır. Bu bağlantı sayesinde pozitif ve negatif harmonik bileşenleri ile birlikte aşırı nötr hat akımı da kompanze edilebilmektedir.

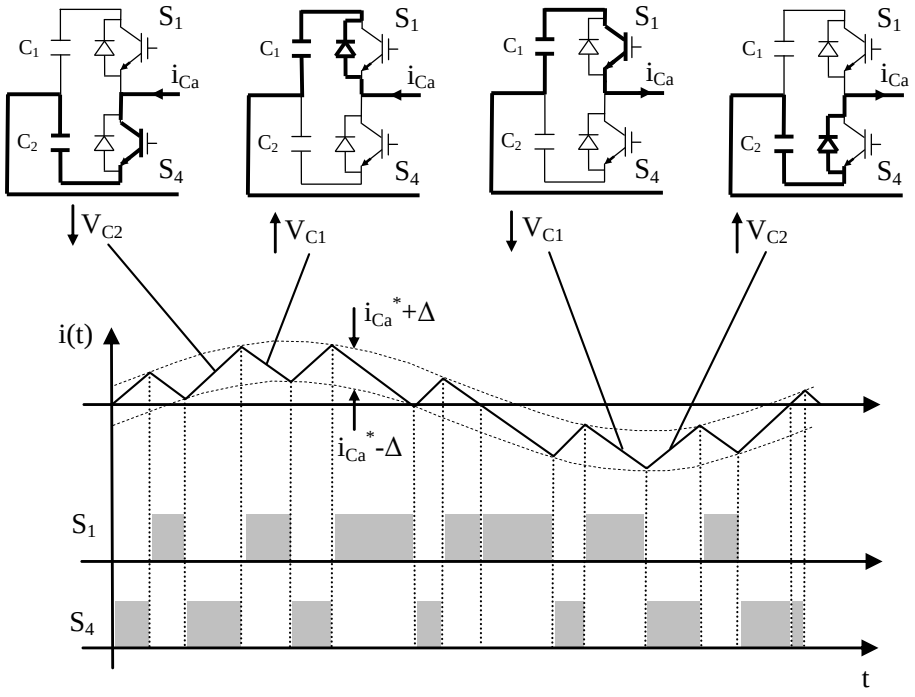


Şekil 3.7**:** Paralel aktif güç filtresi temel denetim blok diyagramı.

Şekil 3.7'de verilen PAGF'nin temel denetim sistemi doğrusal olmayan yüklerin sebep olduğu harmonikli akımları düzeltmek için, hesaplanan referans akımlar ile GKE tarafından üretilen akımlar karşılaştırılarak histerezis bant akım denetleyici ile GKE anahtarlama sinyalleri üretilmektedir.

Şekil 3.8'de histerezis bant PWM akım denetleyici ile denetlenen GKE akımının tipik davranışı görülmektedir. Referans akımlar (i'_{Ca}, i'_{Cb} ve i'_{Cc}) sıfır sıralı bileşenlerden oluşuyorsa, evirici hat akımları (i_{Ca}, i_{Cb} ve i_{Cc}), nötr hattından dönecektir. Bu durumda iki kondansatörlü evirici yapısında her bir faz akımı nötr hattından C_1 ve C_2 kondansatörleri üzerinden akacaktır. Akımlar, anahtarlama

elemanları ve kondansatörler üzerinden her iki yönde de akabilmektedir. Sıfır sıralı akımın yönü V_{C1} ve V_{C2} üzerine düşen gerilimin paylaşılmasını ve gerilimlerinin artış ve azalışını belirlemektedir [24].



Şekil 3.8: Histerezis bant PWM akım denetim [24].

$i_{Ca}>0$ olduğu durumlarda V_{C1} gerilimi artmakta ve V_{C2} gerilimi azalmaktadır. Fakat $d(i_{Ca})/dt$'nin pozitif ve negatif değerlerinin farklı olması ve anlık AA faz gerilim değerlerine bağlı olmasından dolayı V_{C1} ve V_{C2} gerilimleri eşit genliğe sahip değildir. $i_{Ca}<0$ olduğunda yukarıdaki durumun tersi oluşmakta V_{C1} gerilimi azalmakta ve V_{C2} gerilimi artmaktadır. Anahtarların konumu $d(i_{Ca})/dt$'nin polaritesine bağlıdır. DA bara gerilim değişimi, referans akım şekline ve histerezis bant akım denetleyicinin bant genişliğine bağlıdır. Bu yüzden toplam DA bara gerilimi ve aynı zamanda (V_{C2}-V_{C1}) gerilim farkı yalnızca anahtarlama frekansında değil GKE tarafından üretilen i_0 frekansında da dalgalanmaktadır [24].

Tablo 3.1'de 3-fazlı 4-telli sistemlerde iki kondansatörlü evirici devresindeki sıfır sıralı akımların neden olduğu C_1 ve C_2 kondansatörlerinde gerilim değişimi durumları verilmektedir.

Tablo 3.1: C_1 ve C_2 kondansatörlerindeki gerilim değişim durumları [24].

$i_{Ca} > 0$ ve $d(i_{Ca})/dt < 0$	V_{C1} gerilimi artar
$i_{Ca} < 0$ ve $d(i_{Ca})/dt < 0$	V_{C1} gerilimi azalır
$i_{Ca} < 0$ ve $d(i_{Ca})/dt > 0$	V_{C2} gerilimi artar
$i_{Ca} > 0$ ve $d(i_{Ca})/dt > 0$	V_{C2} gerilimi azalır

3-fazlı 4-telli sistemlerde α-β-0 koordinatlarında yüke ait kompanze edilebilecek güçler $\tilde{p}$, $q=\bar{q}+\tilde{q}$ ve $p_0 = \bar{p}_0 + \tilde{p}_0$'dır. Eğer kompanze edilmek üzere p_0 ve $\tilde{p}$ güç bileşenleri seçilirse paralel aktif güç filtre sisteminde depolama elemanı olarak kondansatör gerekmektedir. Eğer seçilen kompanzasyon (harmonik filtreleme ve reaktif güç kompanzasyonu) başarılı bir şekilde yapılırsa kaynaktan yüke sadece $\bar{p}$ güç bileşeni aktarılmaktadır. Paralel aktif güç filtre sisteminde depolama elemanı olarak kullanılan kondansatör, daha sonra yüke gönderilmek üzere $\tilde{p}$ ve $\tilde{q}$ bileşenlerini depolamaktadır. Sıfır sıralı güç "p_0", $\tilde{p}_0$ dalgalı bileşen gücü olmaksızın sadece $\bar{p}_0$ doğru bileşen gücünü ürettiğinden dolayı paralel aktif güç filtre sistemi sıfır sıralı gücü "p_0" kompanze etmek için kullanıldığında tüm $p_0 = \bar{p}_0 + \tilde{p}_0$ gücünü kompanze etmektedir [24].

Paralel aktif güç filtre sistemindeki kayıplar ihmal edildiğinde Denklem 3.44' de verildiği gibi ortalama aktif güç sıfır olmaktadır [24].

$$\bar{p}_{3\varphi} = \frac{1}{T}\int_0^T (v_a i_{Ca} + v_b i_{Cb} + v_c i_{Cc})dt = 0 \qquad (3.44)$$

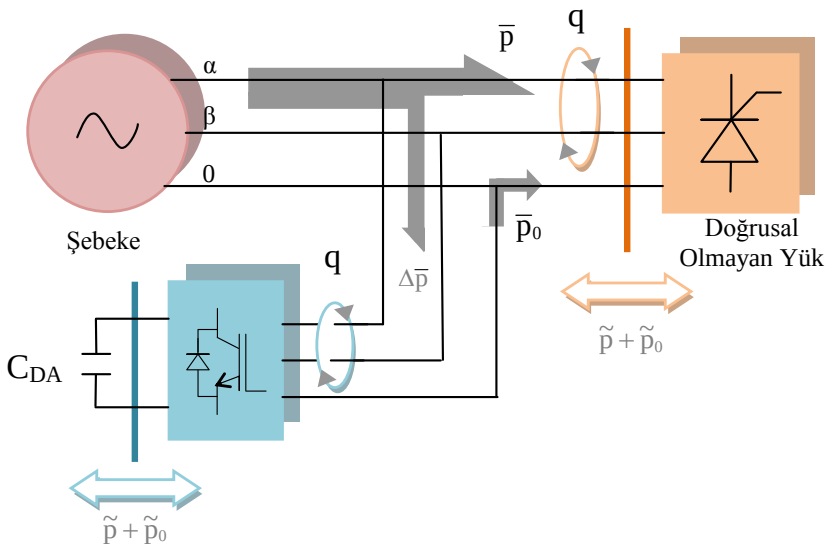
Denklem 3.45'de verildiği gibi gerçek bir uygulamada paralel aktif güç filtre sisteminde enerji dengesi, şebekeden ortalama gerçek güç çekilerek sağlanmaktadır. DA-bara gerilim denetleyici çıkışından gelen kayıp gücün DA bileşeni ($\bar{p}_{Kayıp}$), PAGF'deki anahtarlama kayıplarını kompanze etmek için kullanılmaktadır [24].

$$\Delta\bar{p} = \bar{p}_0 + \bar{p}_{Kayıp} \qquad (3.45)$$

Yukarıda anlatılanlar doğrultusunda paralel aktif güç filtre sisteminde güç akış diyagramı Şekil 3.9'da görülmektedir. 3-fazlı 4-telli sistemlerde a-b-c fazları α-β-0

eşdeğerleri kullanılarak oluşturulan güç akış diyagramında görüldüğü gibi paralel aktif güç filtresi, α-β hatlarından $\Delta\bar{p}$ gücünü almakta ve 0 hattından yüke $\bar{p}_0$ gücü sağlamaktadır.

PAGF yükün istenmeyen tüm güç bileşenlerini ($\tilde{p}$, $\bar{q}$, $\tilde{q}$, $\bar{p}_0$ ve $\tilde{p}_0$) kompanze etmekte ve DA bara kondansatör gerilimini referans değerlerinde tutarak enerji dengesini sağlamaktadır [24]. Tablo 3.2'de PAGF ile yapılacak kompanzasyon tipine göre gerekli güç bileşenleri verilmektedir.



Şekil 3.9: PAGF ile harmonik ve reaktif güç kompanzasyonu [24].

Tablo 3.2: PAGF ile yapılacak kompanzasyon tipine göre gerekli güç bileşenleri.

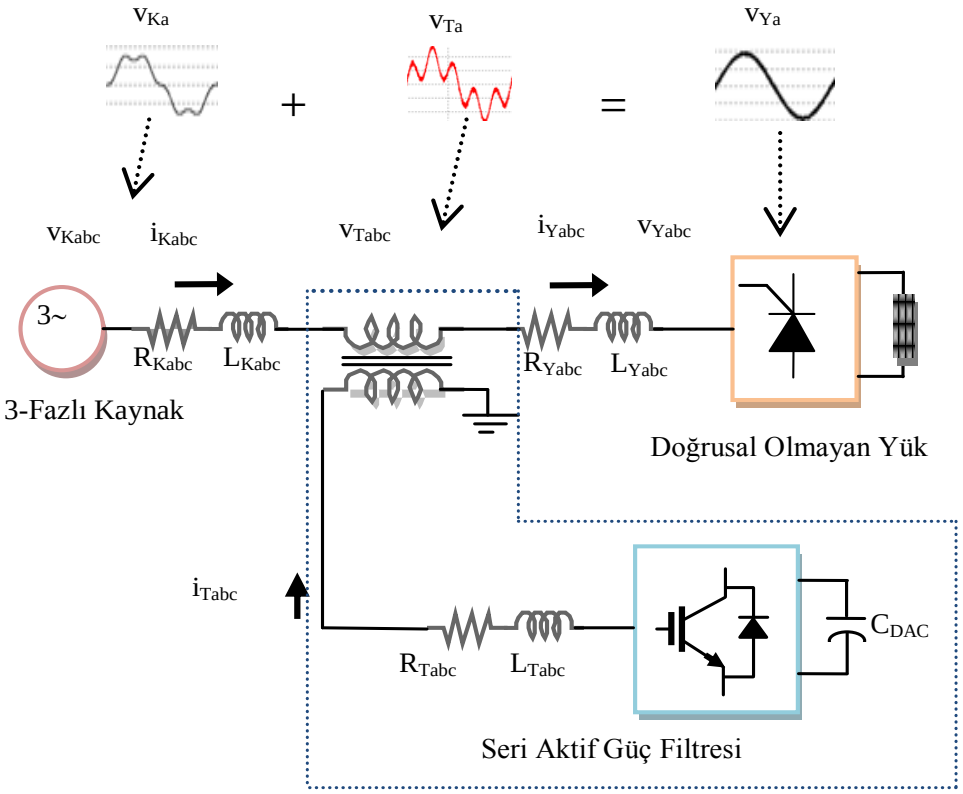
Kompanzasyon Tipi	Gerekli Güç Bileşenleri
Reaktif Güç	q
Negatif sıralı güç ve harmonik güç	$\tilde{p}$ ve $\tilde{q}$
Temel pozitif sıralı reaktif güç	$\bar{q}$
Reaktif güç ve harmonik güç	$\tilde{p}$ ve q
Negatif sıralı güç	$p_{2\omega}$ ve $q_{2\omega}$
Harmonik güç	p_h ve q_h
Nötr akım ve Sıfır sıralı güç	i_0 ve p_0

3.5. Seri Aktif Güç Filtresi

1976 yılında Gyugyi[14] tarafından temel prensipleri tanıtılan seri aktif güç filtresi ile şebeke gerilim harmonik kompanzasyonu, gerilim yükselme-çöküşleri düzeltilmekte ve gerilim dengesizlikleri giderilebilmektedir. SAGF temel prensibi Şekil 3.10'da görülmektedir. Seri aktif güç filtresi, yükten önce bir transformatör yardımıyla sisteme seri olarak bağlandığı için, kaynak ile yük arasında seri bir gerilim kaynağı olarak çalışmaktadır. SAGF, kaynak gerilim harmoniklerini azaltmak ve gerilim regülasyonu yapmak amacıyla sisteme eşit büyüklükte ve ters fazda harmonik gerilimler vermektedir. Böylece kaynak gerilimindeki yükselmeler çökmeler, gerilim kesilmeleri, kaynak gerilimindeki dengesizlikler ve gerilim harmonikleri düzeltilebilmektedir.

SAGF genellikle üç farklı birimden oluşmaktadır. Birincisi gerilim kaynaklı PWM evirici güç katı, ikinci birim şebeke güç hattına seri bağlı tek fazlı transformatörler ve üçüncü birimi ise yüksek anahtarlama frekans sinyalleri üreten denetim birimidir. PWM evirici katı, Şekil 3.10'da görüldüğü gibi DA tarafına bir kondansatör bağlanmış üç fazlı bir GKE devresinden meydana gelmektedir.

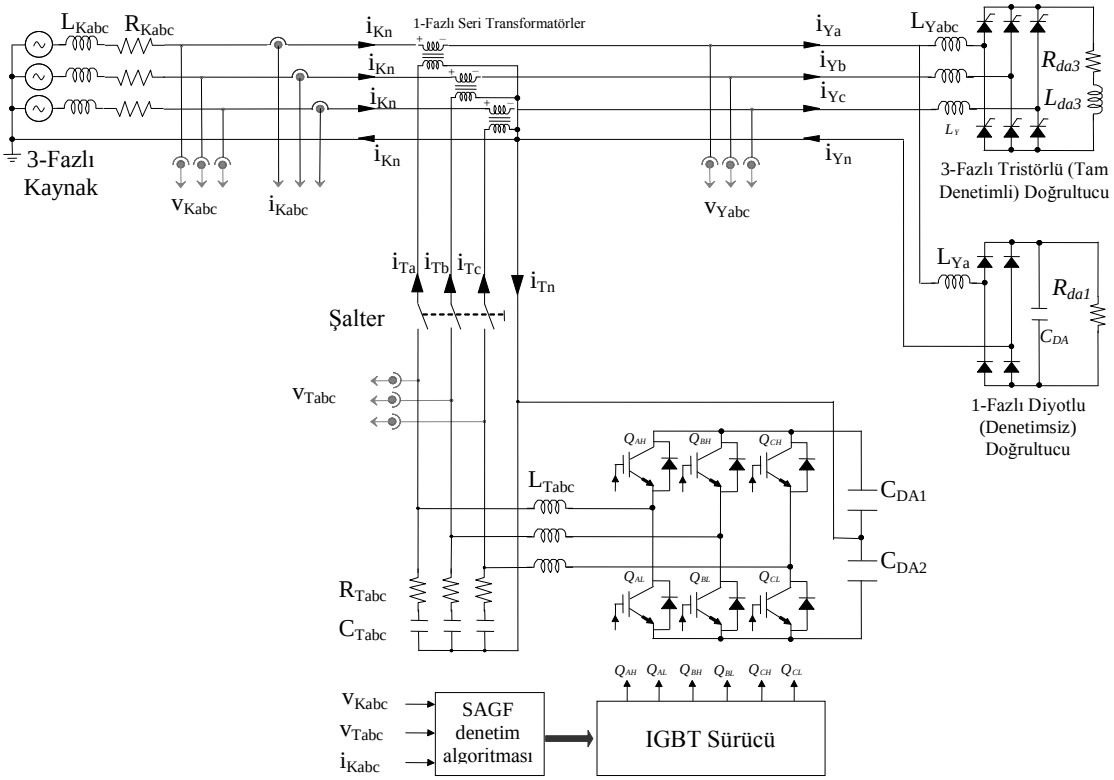
Gerilim kaynaklı PWM sinüzoidal olmayan gerilim kaynağı gibi çalışmaktadır. Seri aktif güç filtresi sürekli olarak şebeke gerilimlerini okuyarak şebeke tarafında gerilimden kaynaklanan güç kalitesi problemlerine sebep olan olayları düzeltecek referans filtre gerilimlerini üreterek kapalı-döngü denetleyici olarak çalışmaktadır. İdeal durumlarda, hesaplanan kompanzasyon gerilimleri v'_{Tabc}, evirici ile üretilen gerilimleri v_{Tabc} çok keskin bir şekilde takip ettiğinde GKE doğrusal bir güç yükselteci olarak davranmaktadır. Ayrıca kaynak gerilim kompanzasyonu yaparak, harmonikleri yok etmekte ve fazlar arasında dengeleme yapmaktadır [24].



Şekil 3.10: Seri aktif güç filtresi genel şeması.

Şekil 3.11'de 3-fazlı 4-telli sistemlerde SAGF'nin temel denetim blok diyagramı görülmektedir. Doğrusal olmayan yük olarak 3-fazlı tam denetimli tristörlü yük kullanılmaktadır. Kaynak geriliminden kaynaklanan güç kalitesi problemlerini düzeltmek için her faza seri olarak tek fazlı transformatör bağlanmaktadır.

SAGF denetim algoritmasında kaynak gerilimleri ve akımları ölçülerek gerilimden kaynaklanan güç kalitesi problemlerini düzeltecek referans filtre v'_{Tabc} gerilimleri hesaplanmaktadır. GKE tarafından üretilen ve seri transformatörlerin giriş (primer) tarafına uygulanan SAGF filtre hat gerilimleri v_{Tabc} ile hesaplanan referans filtre v'_{Tabc} gerilimleri sinüzoidal PWM yöntemi ile karşılaştırılarak anahtarlama sinyalleri üretilmektedir. Böylece kaynak tarafındaki gerilim kaynaklı problemler düzeltilmekte ve yük tarafındaki hassas yüklere olumsuz etkisi azaltılmaktadır.



Şekil 3.11: Seri aktif güç filtresi temel denetim blok diyagramı.

3.6. Birleşik Güç Kalite Düzenleyicisi

Birçok güç kalitesi problemlerini eşzamanlı olarak düzelten çok yönlü çözüm üreten cihazlar son zamanların ilgi odağı haline gelmektedir. Birleşik güç kalite düzenleyicisi, güç kalitesi problemlerini çok yönlü olarak düzelten önemli bir aktif güç filtre sistemidir. Aktif güç filtrelerinin en gelişmiş ve en yeni uygulaması olan birleşik güç kalite düzenleyicisi ilk olarak birleşik güç akış denetleyicisi (UPFC-Unified Power Flow Controller) adıyla Gyugyi [17] tarafından 1992'de ortaya atılmıştır. Seri ve paralel aktif güç filtrelerinin birleşimi olan birleşik güç kalite düzenleyicisi ise Akagi, Aredes ve Fujita tarafından önerilmiş ve farklı denetim ve konfigürasyon çalışmaları yapılmıştır [8-12, 16, 18-25]. Böylece iki filtre sistemi birlikte kullanılarak güç kalitesi problemlerine daha etkin ve verimli çözüm sağlayan yöntemler geliştirilmiştir.

Birleşik güç kalite düzenleyicisi, kaynak geriliminin sebep olduğu güç kalitesi problemlerini ve doğrusal olmayan yük tarafından üretilen harmonik akımın kompanzasyonunu yaparak harmonik akım izolasyonu sağlamaktadır. BGKD, hem seri hem de paralel kompanzasyon kabiliyetine sahip olduğu için güç akış denetimi

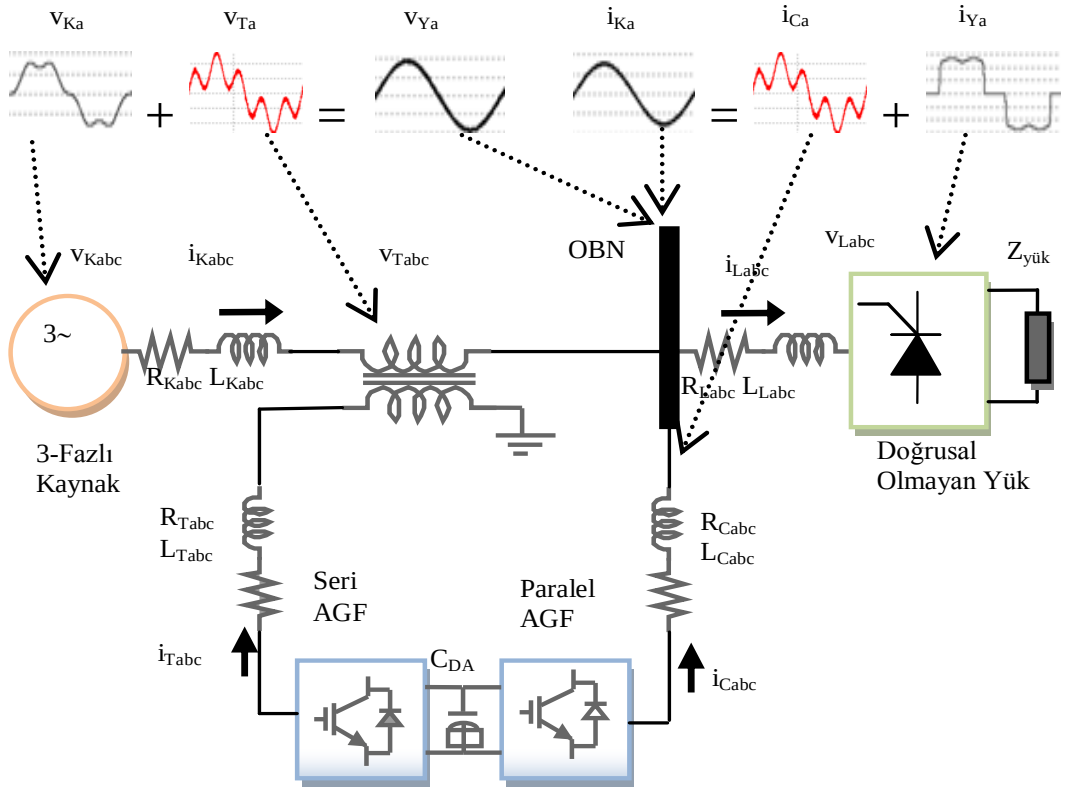
yapabilmekte ayrıca gerilim ve akım harmoniklerini, reaktif güç, gerilim bozulmaları (çökme, yükselme, dalgalanma, geçici durumlar vb.) gibi güç kalitesi sorunlara çözüm üretebilmektedir [48].

Şekil 3.12'de birleşik güç kalite düzenleyicisi genel blok şeması ve Şekil 3.13'de temel denetim blok şeması verilmektedir. Şekillerden anlaşılacağı üzere 3-fazlı 4-telli sistemler için konfigürasyonu yapılan BGKD, ortak bir DA-bara hattına bağlı iki adet GKE ve kaynak gerilimine seri bağlı transformatörlerden oluşmaktadır. DA-bara hattına arka arkaya bağlı bu eviricilerden birincisi, ayarlı bir gerilim kaynağı olarak seri aktif güç filtresi ve diğer evirici ise ayarlı akım kontrollu bir gerilim kaynağı olarak paralel aktif güç filtresi görevlerini yerine getirmektedir.

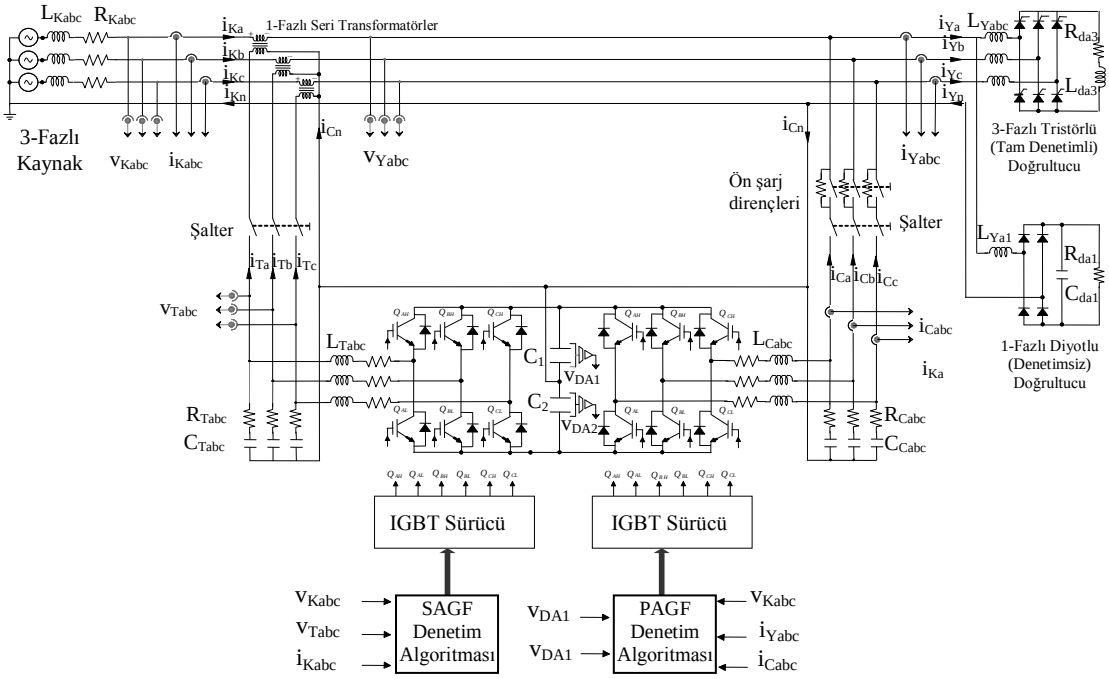
Ortak bağlantı noktasına paralel bağlı ve ayarlı bir akım kaynağı olarak çalışan GKE, doğrusal olmayan yük akımlarının ürettiği harmoniklerden diğer hassas yüklerin etkilenmesini önlemektedir. Kaynakl a yük arasına seri bağlı transformatörler ile ayarlı bir gerilim kaynağı olarak çalışan GKE, kaynak geriliminin sebep olduğu problemleri düzeltmekte ve ortak bağlantı noktasına bağlı diğer hassas yüklerin olumsuz etkilenmesini önlemektedir.

Birleşik güç kalite düzenleyici sisteminde, seri aktif güç filtresi denetim algoritmasında kaynak geriliminden kaynaklanan güç kalitesi problemlerini düzeltecek referans filtre v'_{Tabc} gerilimleri hesaplanmaktadır. Seri aktif güç filtre hat gerilimleri v_{Tabc} ile hesaplanan referans filtre v'_{Tabc} gerilimleri sinüzoidal PWM yöntemi ile karşılaştırılarak anahtarlama sinyalleri üretilmektedir. Böylece kaynak gerilimine bağlı problemler düzeltilmekte ve hassas yüklere etkisi azaltılmaktadır.

Birleşik güç kalite düzenleyici sisteminde, paralel aktif güç filtresi denetim algoritmasında doğrusal olmayan yükten kaynaklanan akım harmonik problemlerini düzeltecek referans filtre i'_{Cabc} akımları hesaplanmaktadır. Paralel aktif güç filtre hat akımları i_{Cabc} ile hesaplanan referans filtre i'_{Cabc} akımları histeresiz band (HB) PWM yöntemi ile karşılaştırılarak anahtarlama sinyalleri üretilmekte ve ortak bağlantı noktasında yük akımına bağlı problemler düzeltilmekte ve hassas yüklere olumsuz etkisi azaltılmaktadır.



Şekil 3.12: BGKD genel blok şeması.



Şekil 3.13: BGKD temel denetim blok şeması.

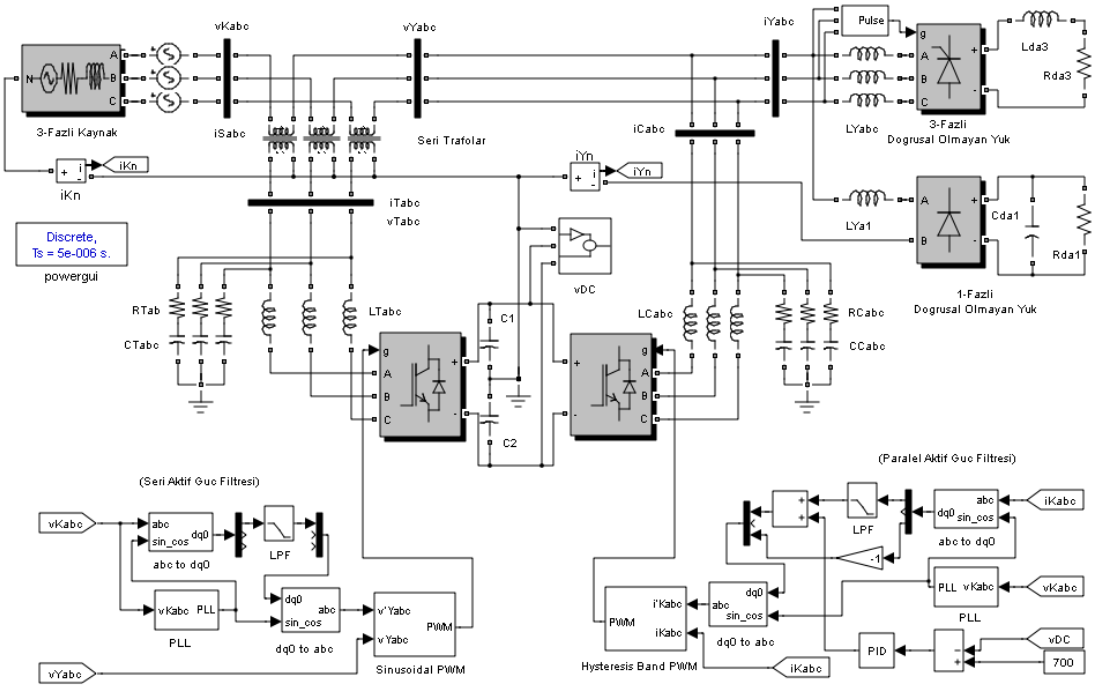
3.7. BGKD'nin Geleneksel Anlık Reaktif Güç Teorisi Tabanlı Denetim Stratejisi

Matlab/Simulink yazılımı ortamında Bölüm 3.7.1, Bölüm 3.7.2, Bölüm 3.8.2 ve Bölüm 3.8.3'de açıklamaları yapılan denetim algoritmaları ile yapılan simülasyon çalışmalarında kullanılan BGKD sistem parametreleri Tablo 3.3'de verilmektedir.

Tablo 3.3: BGKD Simülasyon çalışmalarında kullanılan sistem parametreleri.

	Parametreler		**Değeri**
Kaynak	Gerilimi	v_{Kabc}	380 V_{rms}/faz-faz
	Frekansı	f	50 Hz
	Direnci	R_{Kabc}	10 mΩ
	Empedansı	L_{Kabc}	0,1 mH
Yük	3-Fazlı AA Hat Reaktörü	L_{Yabc}	1,47 mH /0,25 Ω
	1-Fazlı AA Hat Reaktörü	L_{Ya1}	0,75 mH /0,15 Ω
	3-Fazlı DA Endüktansı	L_{da3}	11,53 mH
	3-Fazlı DA Direnci	R_{da3}	30 Ω
	1-Fazlı DA Direnci	R_{da1}	100 Ω
	1-Fazlı DA Kondansatörü	C_{da1}	75 μF
DA Bara	Gerilimi	V_{DA}	700 V
	Kondansatör1	C_1	2200 μF
	Kondansatör2	C_2	2200 μF
PAGF	AA Hat Endüktansı	L_{Cabc}	3,5 mH /0,6 Ω
	Filtre Direnci	R_{Cabc}	5 Ω
	Filtre Kondansatörü	C_{Cabc}	4,7 μF
	Anahtarlama Frekansı	f_{pwm}	~15 kHz
	Ön Şarj Dirençleri	$R_{şarj}$	10 Ω
	Histeresiz Bant	HB	1 A
SAGF	AA Hat Endüktansı	L_{Tabc}	1,5 mH /0,25 Ω
	Filtre Direnci	R_{Tabc}	5 Ω
	Filtre Kondansatörü	C_{Tabc}	26 μF
	Anahtarlama Frekansı	f_{pwm}	~18 kHz
	1-Fazlı Seri Transformatörler	S	5,4 kVA
		Oran	1/3

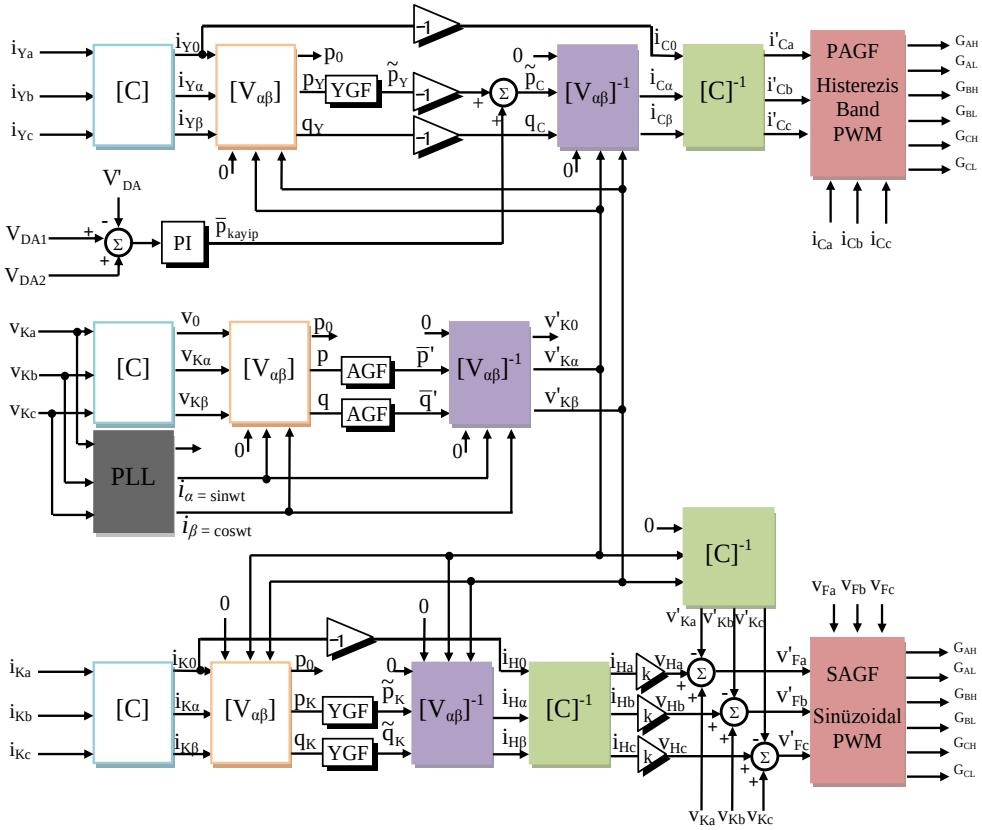
Şekil 3.14'de Matlab/Simulink yazılımı ortamında denetim algoritmaları ile yapılan simülasyon çalışmalarında kullanılan simülasyon modeli verilmektedir. Simülasyon modelinde, 3-fazlı 4-telli sistemlerde çok sık kullanılan kaynaktan harmonikli akım çeken (doğrusal olmayan) tam denetimli tristörlü yük kullanılmaktadır. Fazlar arasında dengesizlik oluşturmak için a-fazına 1-fazlı denetimsiz (diyotlu) doğrultucu bağlanmıştır. Böylece fazlar arasında dengesizlikten dolayı oluşan nötr akım kompanzasyon çalışmaları yapılmaktadır.



Şekil 3.14: Birleşik güç kalite düzenleyicisinin Matlab/Simulink modeli.

3.7.1. ARGT tabanlı YAY ile BGKD'nin denetimi ve simülasyonu

ARGT tabanlı Yük Akımları ölçüm Yöntemi (YAY) ile BGKD'nin denetim algoritması, kaynak gerilimleri (v_{Kabc}), kaynak akımları (i_{Kabc}), yük akımları (i_{Yabc}), seri aktif güç filtre hat gerilimleri (v_{Fabc}), paralel aktif güç filtre hat akımları (i_{Cabc}) ve DA bara gerilimi (V_{DA}) olmak üzere toplam altı ayrı noktadan ölçüm alınarak gerçekleştirilmektedir. Literatürde [8-41] ARGT tabanlı BGKD'nin denetimine ait bazı çalışmalar verilmektedir. Şekil 3.15'de YAY ile BGKD denetim blok şeması görülmektedir.



Şekil 3.15: ARGT tabanlı YAY ile BGKD'nin denetim algoritması blok şeması.

Denklem 3.9'da verilen [C] çevrim matrisi kullanarak kaynak gerilimlerinin Denklem 3.46'da, kaynak akımlarının Denklem 3.47'de ve yük akımlarının Denklem 3.48'de görüldüğü gibi a-b-c koordinatlarından α-β-0 koordinatlarına dönüşümü (Clarke dönüşümü) yapılmaktadır.

$$\begin{bmatrix} v_{K0} \\ v_{K\alpha} \\ v_{K\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{Ka} \\ v_{Kb} \\ v_{Kc} \end{bmatrix} \tag{3.46}$$

$$\begin{bmatrix} i_{K0} \\ i_{K\alpha} \\ i_{K\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Ka} \\ i_{Kb} \\ i_{Kc} \end{bmatrix} \tag{3.47}$$

$$\begin{bmatrix} i_{Y0} \\ i_{Y\alpha} \\ i_{Y\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Ya} \\ i_{Yb} \\ i_{Yc} \end{bmatrix} \tag{3.48}$$

Kaynak gerilimleri ve yük akımları harmonikli ve dengesiz olduğu durumlarda gerilimin ve akımın negatif ve sıfır sıralı bileşenleri oluşmaktadır. Aktif güç filtre sistemlerinde ARGT tabanlı kompanzasyon yapmak için sistem gerilimlerinin temel pozitif sıralı bileşenlerini tespit etmek için Şekil 3.5'de verilen PLL devresi kullanılmaktadır.

Kaynak geriliminin temel pozitif sıralı bileşeni ayırt etmek için, Denklem 3.18'de verilen $[V_{\alpha\beta}]$ çevrim matrisi, Denklem 3.46'da verilen 3-fazlı gerilimlerin α-β-0 koordinatlarındaki karşılıkları ($v_{K0,}$ $v_{K\alpha}$ ve $v_{K\beta}$) ve PLL tarafından üretilen i_α = sin(ωt) ve i_β =cos(ωt) kullanarak kaynak gerilimine ait anlık gerçek "p" ve sanal güçler "q" elde edilmektedir. p ve q'nun DA bileşenleri ($\overline{p}$ ve $\overline{q}$) AGF'den geçirilerek ayırt edilmekte ve bu bileşenler Denklem 3.19'da verilen $[V_{\alpha\beta}]^{-1}$ ters çevrim matrisi girişine uygulanarak, 3-fazlı kaynak gerilimlerinin α-β-0 koordinatlarında karşılıkları olan temel pozitif sıralı bileşenleri ($v'_{K0,}$ $v'_{K\alpha}$ ve $v'_{K\beta}$) elde edilmektedir.

Denklem 3.18'de verilen $[V_{\alpha\beta}]$ çevrim matrisi girişine kaynak gerilimlerinin temel pozitif sıralı bileşenleri ($v'_{K\alpha}$ ve $v'_{K\beta}$) ve yük akımlarının α-β-0 koordinatlarında karşılıkları olan ($i_{Y0,}$ $i_{Y\alpha}$ ve $i_{Y\beta}$) akımlar kullanarak yükün anlık gerçek, sanal ve sıfır sıralı güç bileşenleri Denklem 3.49'da verildiği gibi hesaplanmaktadır. Aynı şekilde $[V_{\alpha\beta}]$ çevrim matrisi girişine kaynak gerilimlerin temel pozitif sıralı bileşenleri ($v'_{K\alpha}$ ve $v'_{K\beta}$) ve kaynak akımlarının α-β-0 koordinatlarındaki karşılıkları ($i_{K0,}$ $i_{K\alpha}$ ve $i_{K\beta}$) kullanarak akımın anlık gerçek, sanal ve sıfır sıralı güç bileşenleri Denklem 3.50'de verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$\begin{bmatrix} p_{Y0} \\ p_Y \\ q_Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \\ V_{\alpha\beta} \\ \\ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Y0} \\ i_{Y\alpha} \\ i_{Y\beta} \end{bmatrix} \tag{3.49}$$

$$\begin{bmatrix} p_{K0} \\ p_K \\ q_K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \\ V_{\alpha\beta} \\ \\ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{K0} \\ i_{K\alpha} \\ i_{K\beta} \end{bmatrix} \tag{3.50}$$

3-fazlı 4-telli sistemlerde, kaynak ve yükün anlık gerçek ve sanal güçleri AA ve DA bileşenleri içermektedir ve Denklem 3.51'de verildiği gibi ifade edilmektedir. p ve q'nun DA bileşenleri ($\bar{p}$ ve $\bar{q}$), akımın pozitif sıralı bileşeninden oluşmaktadır. p ve q'nun AA bileşenleri ($\tilde{p}$ ve $\tilde{q}$), akımın harmonik güç (p_h ve q_h) ve negatif sıralı güç ($p_{2\omega}$ ve $q_{2\omega}$) bileşenlerinden oluşmaktadır [24, 32]. Sıfır sıralı güç ise sıfır sıralı akım ve gerilimlerin anlık çapımı ile oluşmaktadır.

$$\begin{aligned} p_k &= \bar{p}_k + \tilde{p}_k = \bar{p}_k + p_h + p_{2\omega} \quad ; \quad p_y = \bar{p}_y + \tilde{p}_y = \bar{p}_y + p_h + p_{2\omega} \\ q_k &= \bar{q}_k + \tilde{q}_k = \bar{q}_k + q_h + q_{2\omega} \quad ; \quad q_y = \bar{q}_y + \tilde{q}_y = \bar{q}_y + q_h + q_{2\omega} \\ p_0 &= v_0 * i_0 \end{aligned} \tag{3.51}$$

Şekil 3.12'de verilen anlık güç bileşenlerini ayırt etme yöntemi kullanılarak, kaynak veya yüke ait anlık gerçek ve sanal güçlerin AA bileşeni YGF ile ve DA bileşeni ise AGF uygulanarak elde edilmektedir. Şekil 3.15'de YAY ile BGKD'nin denetim algoritması blok şemasında verildiği gibi, paralel aktif güç filtre denetim algoritmasında aynı anda harmonik, reaktif güç ve nötr akım kompanzasyonu yapmak için yüke ait sanal gücün ve sıfır sıralı akımın tersi alınmakta ve gerçek güçün AA bileşeninin tersi kullanılmaktadır. Denklem 3.19'da verilen $[V_{\alpha\beta}]^{-1}$ ters çevrim matrisi girişine kaynak gerilimlerinin temel pozitif sıralı bileşenleri ($v'_{K\alpha}$ ve $v'_{K\beta}$) kullanarak PAGF denetim referans akımları Denklem 3.52'de verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$\begin{bmatrix} i_{C\alpha} \\ i_{C\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{(v'_{K\alpha})^2 + (v'_{K\beta})^2} \left[V_{\alpha\beta}\right]^{-1} \begin{bmatrix} -\tilde{p}_C + \bar{p}_{kayip} \\ -q_C \end{bmatrix} \tag{3.52}$$

Sıfır sıralı akımların kompanzasyonu yapılması durumunda, "0" koordinatlarında referans kompanzasyon akımı $i_{C0} = -i_{Y0}$ sıfır sıralı yük akımın tersi alınarak elde edilmektedir. $\bar{p}_{kayip}$gücü, DA-bara hat gerilimin PI denetleyici anlık çıkışı olup, PAGF kayıplarını gidermek ve DA-bara hat gerilim salınım ve değişimleri azaltmak amacıyla anlık aktif güce ilave edilmektedir [24, 30, 32]. i_{C0}, $i_{C\alpha}$ ve $i_{C\beta}$, α-β-0 koordinatlarında yükün harmonik ve reaktif akımlarına karşılık gelen ve PAGF denetim algoritmasının üretmesi gereken akımlardır. Bu akımlar üç fazlı sisteme

Denklem 3.10'da verilen $[C]^{-1}$ çevrim matrisi kullanarak Denklem 3.53'de verildiği gibi çevrilmektedir.

$$\begin{bmatrix} i'_{Ca} \\ i'_{Cb} \\ i'_{Cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} i_{C0} \\ i_{C\alpha} \\ i_{C\beta} \end{bmatrix} \tag{3.53}$$

3-fazlı 4-telli sistemlerde doğrusal olmayan yüklerin sebep olduğu nötr akımı, harmonikler ve reaktif güç kompanzasyonu yapacak i'_{Ca} i'_{Cb} ve i'_{Cc} referans akımları elde edilmektedir. Anahtarlama sinyallerinin üretilmesi aşamasında PAGF denetim algoritması tarafından üretilen referans akımlar ile PAGF filtre hat akımları karşılaştırılmakta ve Şekil 3.8'de verilen histerezis bant PWM tekniği kullanarak anahtarlama sinyalleri elde edilmektedir [23-32].

Seri aktif güç filtre denetim algoritması aynı anda kaynak gerilim harmonikleri, gerilim dengesizlikleri, gerilim çökme ve yükselme gibi kaynak gerilim problemlerini düzeltmektedir. Böylece hassas yükler gerilim kaynaklı problemlerden etkilenmemektedir. Denklem 3.46 ve 3.47'de verildiği gibi kaynak akım ve gerilimlerinin a-b-c koordinatlarından α-β-0 koordinatlarına dönüşümü yapılmaktadır. Denklem 3.18'de verilen $[V_{\alpha\beta}]$ çevrim matrisi girişine kaynak gerilimlerinin temel pozitif sıralı bileşenleri ($v'_{K\alpha}$ ve $v'_{K\beta}$) ve kaynak akımlarının α-β-0 koordinatlarındaki karşılıkları ($i_{K0,}$ $i_{K\alpha}$ ve $i_{K\beta}$) kullanarak akımın anlık gerçek, sanal ve sıfır sıralı güç bileşenleri Denklem 3.50'de verildiği gibi hesaplanmaktadır. ARGT tabanlı seri aktif güç filtre denetim algoritmasında referans akımlar için, anlık sıfır sıralı güç kullanılmayıp, kaynak akımının anlık gerçek ve sanal güçleri YGF den geçirilerek elde edilen AA bileşenleri kullanılmaktadır. Denklem 3.19'da verilen $[V_{\alpha\beta}]^{-1}$ ters çevrim matrisi girişine kaynak gerilimlerinin temel pozitif sıralı bileşenleri ($v'_{K\alpha}$ ve $v'_{K\beta}$) ve kaynak akımının anlık gerçek ve sanal güçlerin AA bileşenleri kullanarak SAGF denetim referans akımları Denklem 3.54'de verildiği gibi hesaplanmaktadır. Sıfır sıralı kaynak akımlarının "0" koordinatlarında referans kompanzasyon akımı $i_{H0} = -i_{K0}$ sıfır sıralı kaynak akımının tersi alınarak elde edilmektedir. i_{H0} $i_{H\alpha}$ ve $i_{H\beta}$, α-β-0 koordinatlarında kaynak harmoniklerine karşılık gelen akımlardır. Bu akımlar üç fazlı a-b-c koordinatlarına Denklem 3.10 de verilen $[C]^{-1}$ çevrim matrisi kullanarak Denklem 3.55'de verildiği gibi çevrilmektedir.

$$\begin{bmatrix} i_{H\alpha} \\ i_{H\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{(v'_{K\alpha})^2 + (v'_{K\beta})^2} \left[V_{\alpha\beta}\right]^{-1} \begin{bmatrix} \tilde{p}_K \\ \tilde{q}_K \end{bmatrix} \tag{3.54}$$

$$\begin{bmatrix} i_{Ha} \\ i_{Hb} \\ i_{Hc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} i_{H0} \\ i_{H\alpha} \\ i_{H\beta} \end{bmatrix} \tag{3.55}$$

Bu akımlar Denklem 3.56'da verildiği gibi bir oransal kazanç "K" katsayısı ile çarpılarak seri aktif güç filtre denetim algoritmasının üretmesi gereken harmonik gerilim referanslara çevrilmektedir.

$$\begin{bmatrix} v_{Ha} \\ v_{Hb} \\ v_{Hc} \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} i_{Ha} \\ i_{Hb} \\ i_{Hc} \end{bmatrix} \tag{3.56}$$

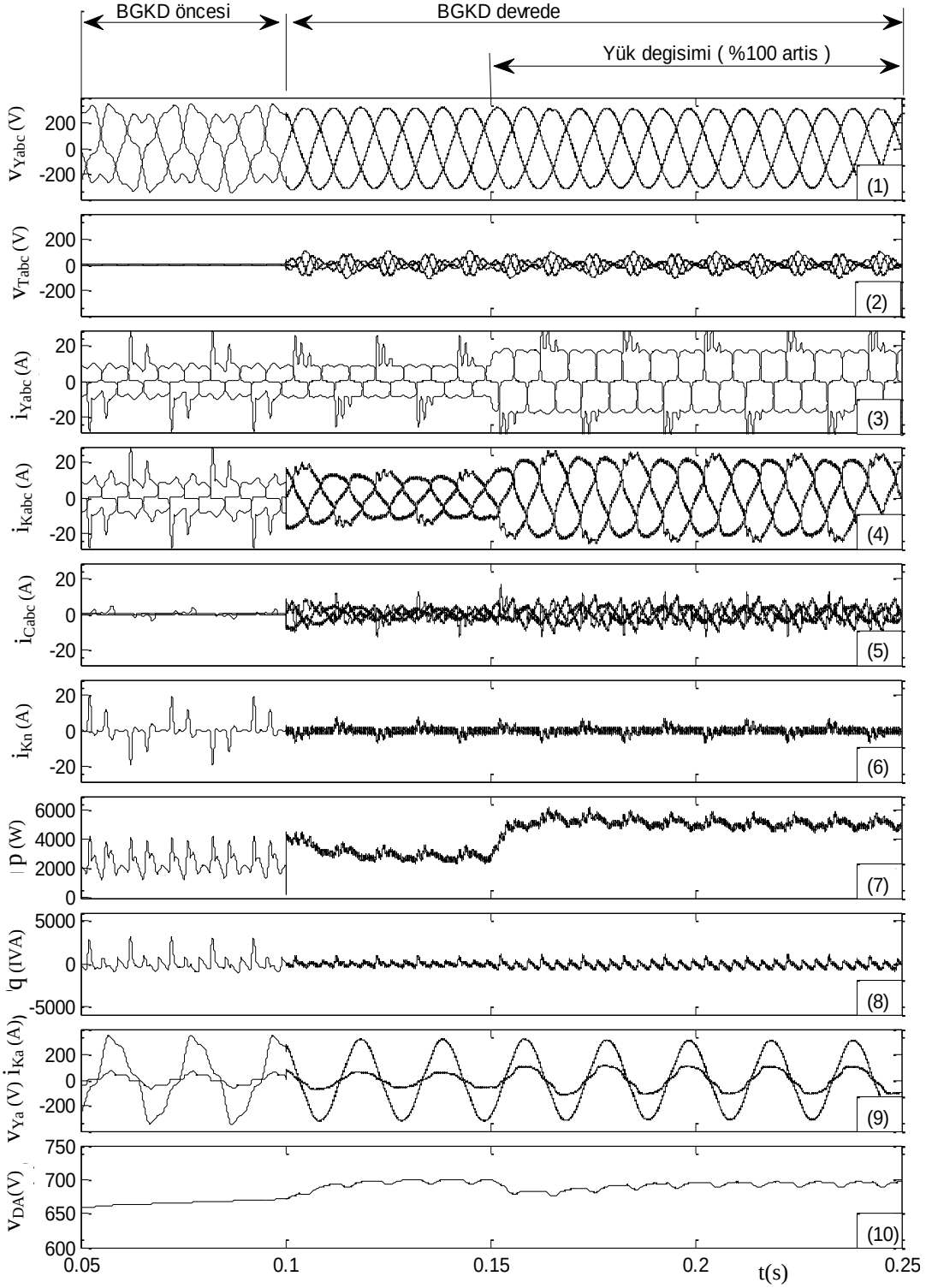
α-β-0 koordinatlarındaki kaynak gerilimlerinin temel pozitif sıralı bileşenleri ($v'_{K\alpha}$ ve $v'_{K\beta}$) a-b-c koordinatlarına ($v'_{Ka,}$ v'_{Kb} ve v'_{Kc}) Denklem 3.57'de verildiği çevrilmektedir. SAGF denetim algoritmasının Sinüzoidal PWM kullanarak üretmesi gereken referans filtre gerilimleri ($v'_{Fa,}$ v'_{Fb} ve v'_{Fc}) Denklem 3.58'de verilmektedir.

$$\begin{bmatrix} v'_{Ka} \\ v'_{Kb} \\ v'_{Kc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} v'_{K0} \\ v'_{K\alpha} \\ v'_{K\beta} \end{bmatrix} \tag{3.57}$$

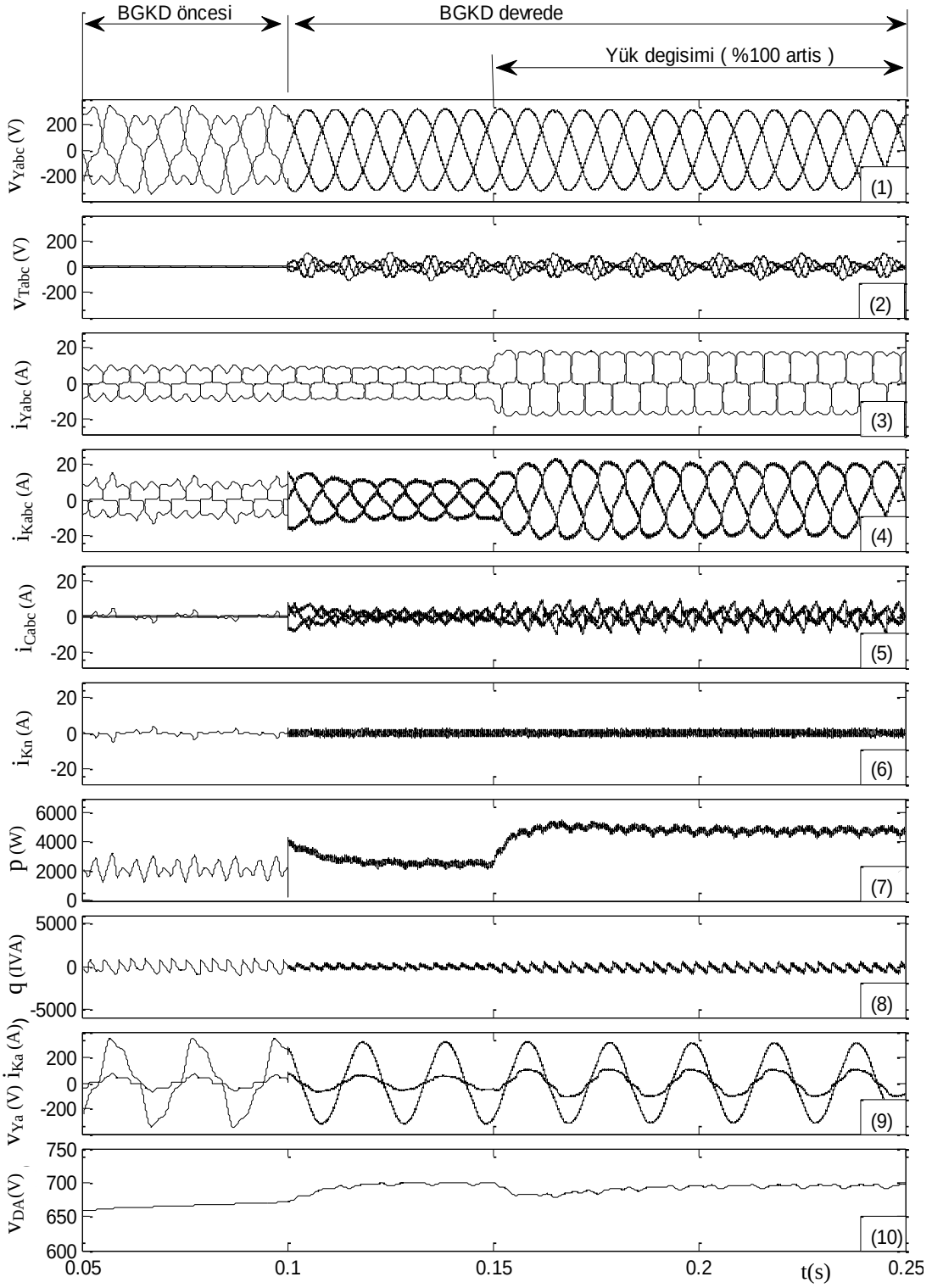
$$\begin{bmatrix} v'_{Fa} \\ v'_{Fb} \\ v'_{Fc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{Ha} \\ v_{Hb} \\ v_{Hc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{Ka} \\ v_{Kb} \\ v_{Kc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v'_{Ka} \\ v'_{Kb} \\ v'_{Kc} \end{bmatrix} \tag{3.58}$$

ARGT tabanlı YAY ile BGKD denetim algoritması; Şekil 3.16'da dengesiz-harmonikli kaynak gerilimi ve dengesiz-doğrusal olmayan yük, Şekil 3.17'de dengesiz-harmonikli kaynak gerilimi ve dengeli-doğrusal olmayan yük, Şekil 3.18'de ideal kaynak gerilimi ve dengeli-doğrusal olmayan yük, Şekil 3.19'da ideal kaynak gerilimi ve dengesiz-doğrusal olmayan yük ve Şekil 3.20'de ideal kaynak gerilimi ve dengeli-doğrusal olmayan tam denetimli tristörlü yük koşullarında filtre

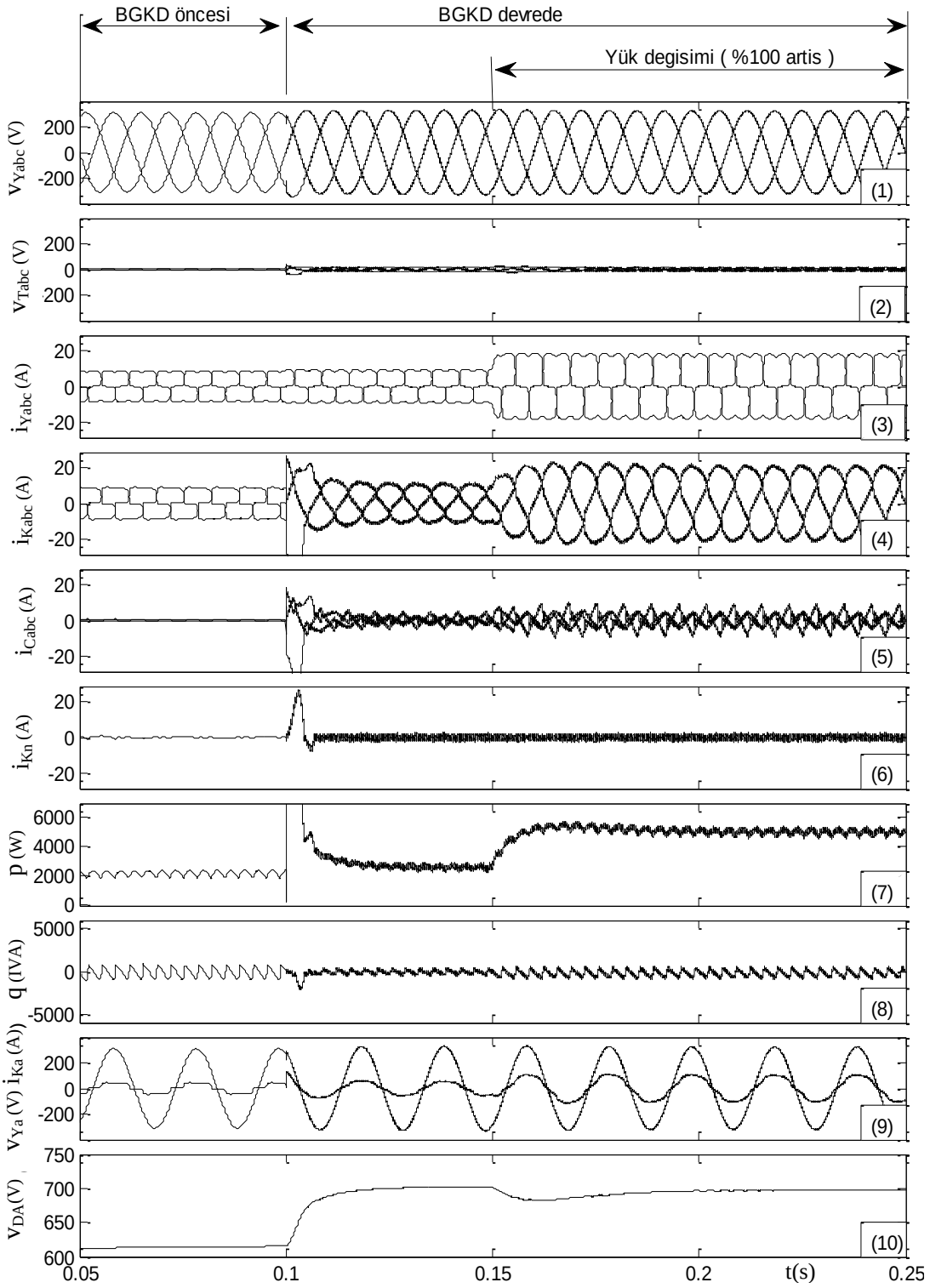
öncesi, sonrası ve sistem dinamik cevabının test edildiği Matlab/Simulink simülasyon sonuçları verilmektedir.



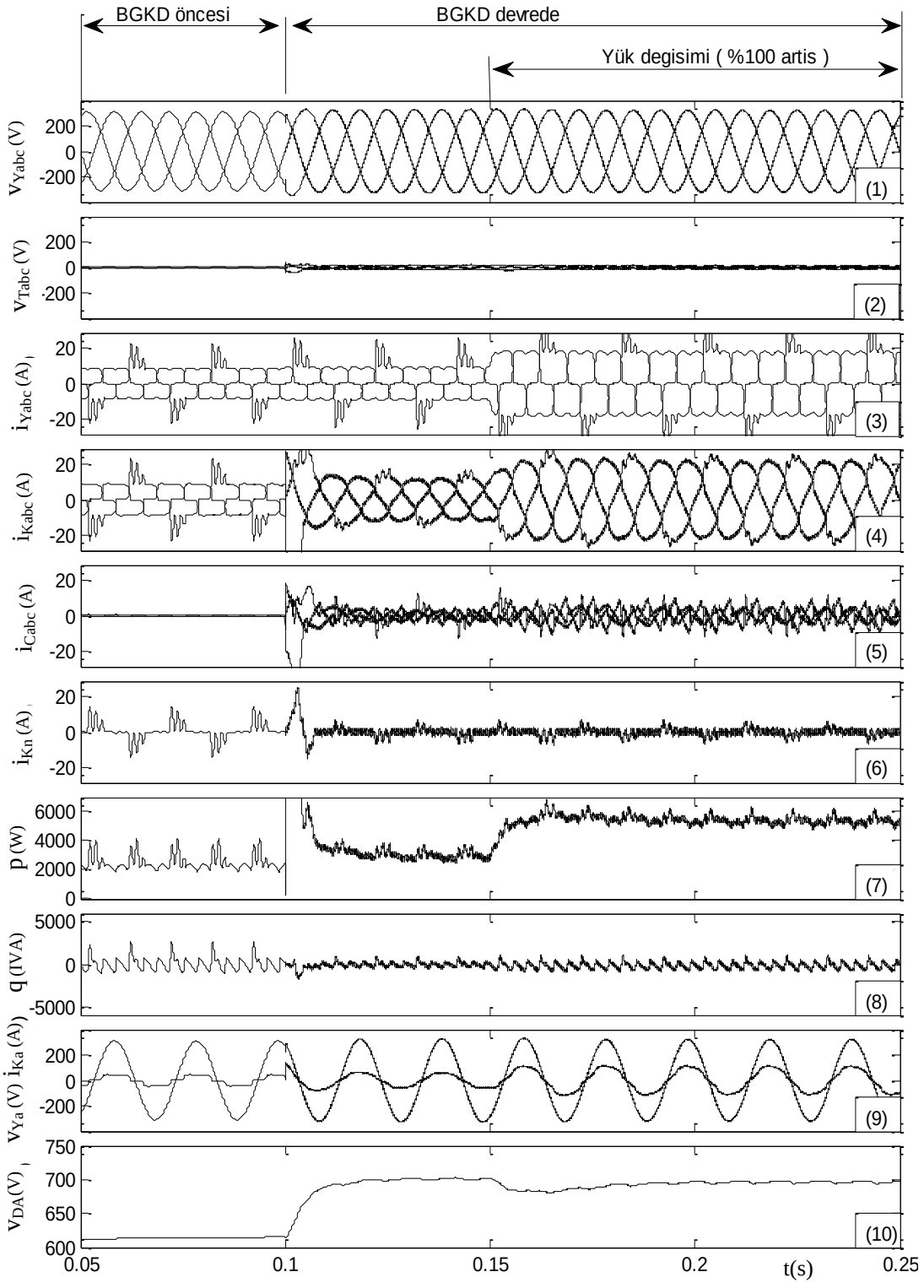
Şekil 3.16: ARGT tabanlı YAY ile BGKD'nin dengesiz-harmonikli kaynak gerilimi ve dengesiz-doğrusal olmayan yük koşullarında (1) yük gerilimleri, (2) trafo gerilimleri, (3) yük akımları, (4) kaynak akımları, (5) filtre akımları, (6) kaynak nötr akımı, (7) aktif güç, (8) reaktif güç, (9) kaynak akımı ve yük gerilimi, (10) V_{DA} bara gerilimi simülasyon sonuçları.



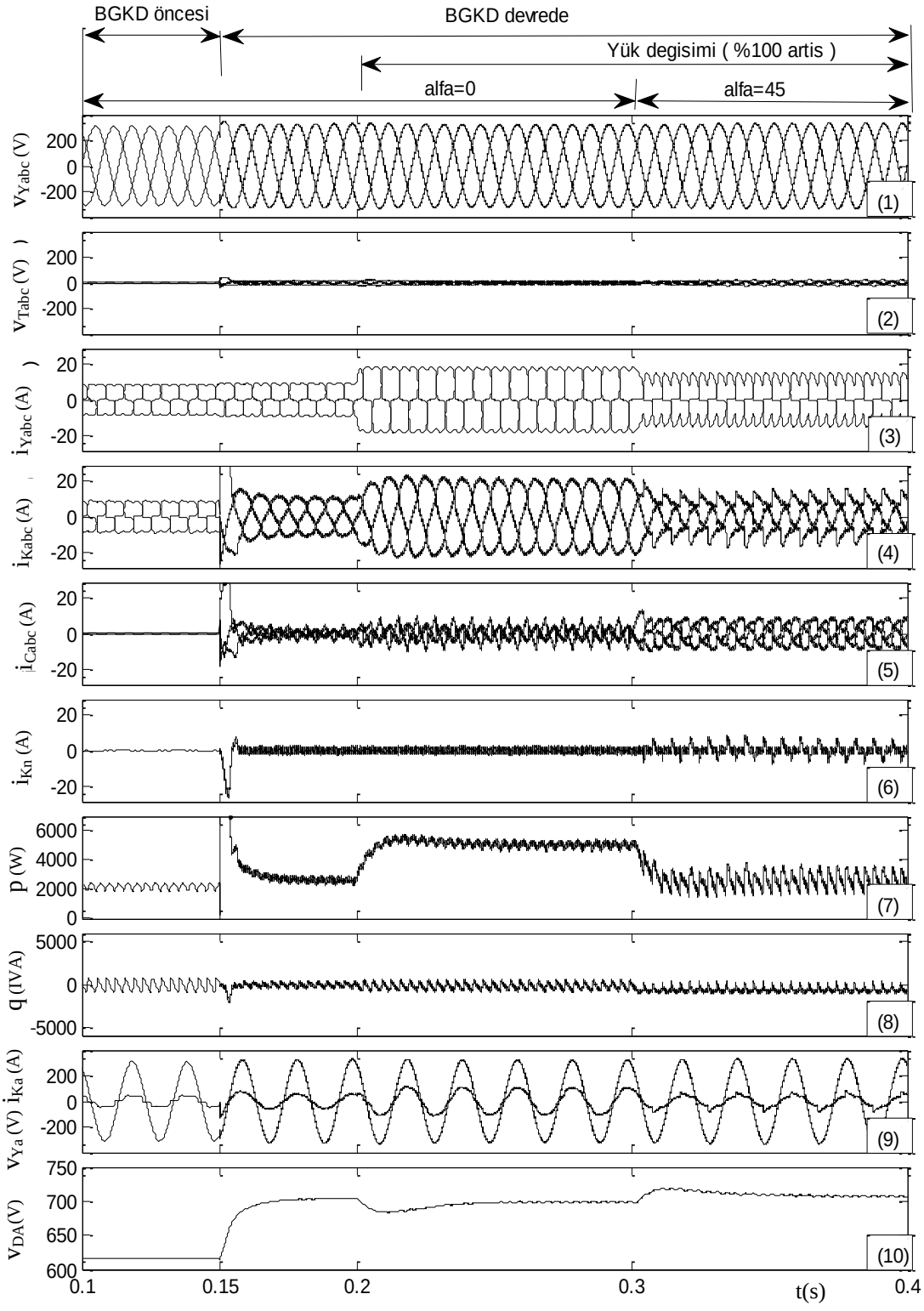
Şekil 3.17: ARGT tabanlı YAY ile BGKD'nin dengesiz-harmonikli kaynak gerilimi ve dengeli-doğrusal olmayan yük koşullarında (1) yük gerilimleri, (2) trafo gerilimleri, (3) yük akımları, (4) kaynak akımları, (5) filtre akımları, (6) kaynak nötr akımı, (7) aktif güç, (8) reaktif güç, (9) kaynak akımı ve yük gerilimi, (10) V_{DA} bara gerilimi simülasyon sonuçları.



Şekil 3.18: ARGT tabanlı YAY ile BGKD'nin ideal kaynak gerilimi ve dengeli-doğrusal olmayan yük koşullarında (1) yük gerilimleri, (2) trafo gerilimleri, (3) yük akımları, (4) kaynak akımları, (5) filtre akımları, (6) kaynak nötr akımı, (7) aktif güç, (8) reaktif güç, (9) kaynak akımı ve yük gerilimi, (10) V_{DA} bara gerilimi simülasyon sonuçları.

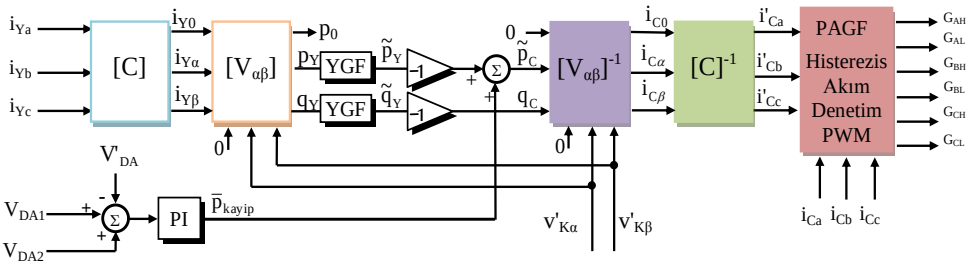


Şekil 3.19: ARGT tabanlı YAY ile BGKD'nin ideal kaynak gerilimi ve dengesiz-doğrusal olmayan yük koşullarında (1) yük gerilimleri, (2) trafo gerilimleri, (3) yük akımları, (4) kaynak akımları, (5) filtre akımları, (6) kaynak nötr akımı, (7) aktif güç, (8) reaktif güç, (9) kaynak akımı ve yük gerilimi, (10) V_{DA} bara gerilimi simülasyon sonuçları.

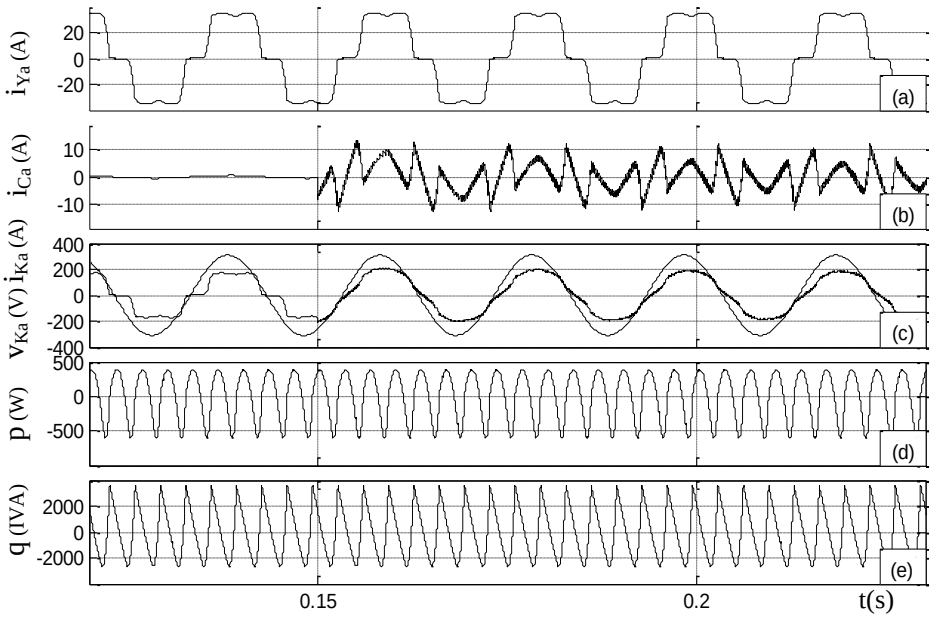


Şekil 3.20: ARGT tabanlı YAY ile BGKD'nin ideal kaynak gerilimi ve dengeli-doğrusal olmayan tristörlü yük koşullarında (1) yük gerilimleri, (2) trafo gerilimleri, (3) yük akımları, (4) kaynak akımları, (5) filtre akımları, (6) kaynak nötr akımı, (7) aktif güç, (8) reaktif güç,(9) kaynak akımı ve yük gerilimi, (10) V_{DA} bara gerilimi simülasyon sonuçları**.**

3-fazlı 4-telli sistemlerde anlık reaktif güç teorisi kullanılarak PAFG ile sadece harmonik akım kompanzasyonu yapmak için, gerçek ve sanal gücün dalgalı bileşenlerinin tersi kullanılmaktadır. Şekil 3.21'de referans akımların elde edilmesi yönteminin blok diyagramı verilmektedir. Doğrusal olmayan yük olarak 3-fazlı 6-darbeli denetimsiz diyot doğrultucu kullanılmaktadır. Şekil 3.22'de harmonik akım kompanzasyonu hesaplanan "a" fazı için (a) yük akımı (b) filtre akımı (c) kaynak akım ve kaynak gerilimi, (d) anlık aktif güç ve (e) anlık reaktif güç Matlab/Simulink simülasyon dalga şekilleri görülmektedir.

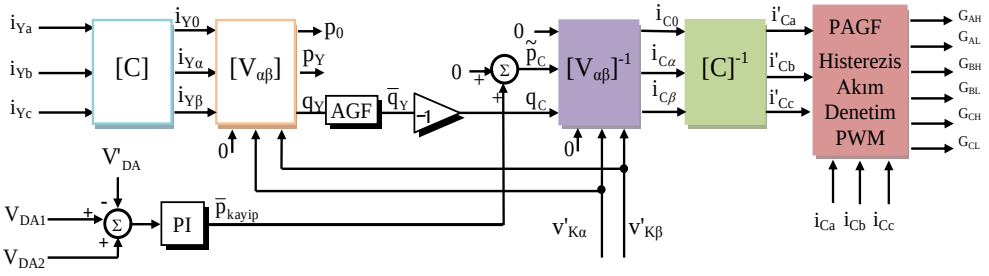


Şekil 3.21: PAGF ile harmonik akım kompanzasyonu için referans filtre akımlarının hesaplanması.

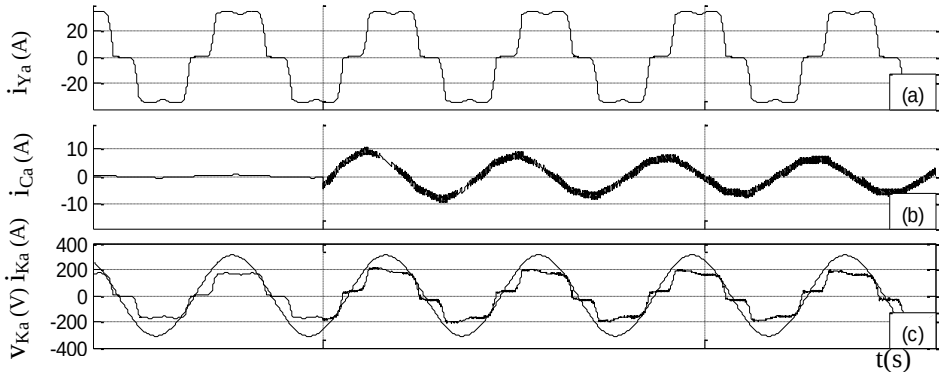


Şekil 3.22: Harmonik akım kompanzasyonu hesaplanan "a" fazı için (a) yük akımı (b) filtre akımı (c) kaynak akım ve kaynak gerilimi, (d) anlık aktif güç ve (e) anlık reaktif güç Matlab/Simulink simülasyon dalga şekilleri.

Şekil 3.23'de PAFG ile sadece reaktif güç kompanzasyonu yapmak için, sanal gücün doğru bileşeni kullanılarak referans akımların elde edilmesi yönteminin blok diyagramımı verilmektedir. Şekil 3.24'de reaktif güç kompanzasyonu hesaplanan "a" fazı için (a) yük akımı (b) filtre akımı (c) kaynak akım ve kaynak gerilimi Matlab/Simulink simülasyon dalga şekilleri görülmektedir.



Şekil 3.23: Reaktif güç kompanzasyonu için referans filtre akımlarının hesaplanması.

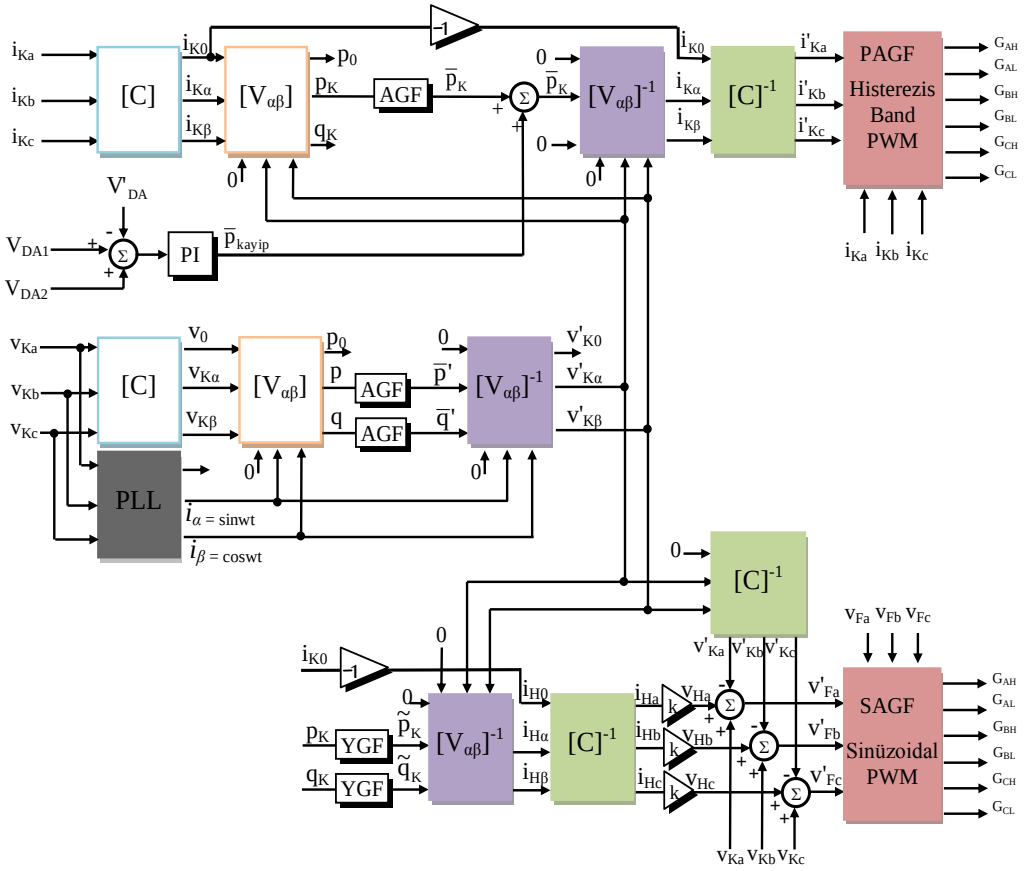


Şekil 3.24: Reaktif güç kompanzasyonu hesaplanan "a" fazı için (a) yük akımı (b) filtre akımı (c) kaynak akım ve kaynak gerilimi simülasyon dalga şekilleri.

3.7.2. ARGT tabanlı KAY ile BGKD'nin denetimi ve simülasyonu

ARGT tabanlı Kaynak Akımları ölçüm Yöntemi (KAY) ile BGKD'nin denetim algoritması, kaynak gerilimleri (v_{Kabc}), kaynak akımları (i_{Kabc}), seri aktif güç filtre hat gerilimleri (v_{Fabc}) ve DA bara gerilimi (V_{DA}) olmak üzere toplam dört ayrı noktadan ölçüm alınarak gerçekleştirilmektedir. KAY ile BGKD'nin denetim algoritması hem ölçüm sayısının az olması hem de denetim algoritmasının daha az işlem gerektirdiğinden YAY ile BGKD denetim algoritmasına göre avantajlı sayılmaktadır. Literatürde [75-79] ARGT tabanlı KAY ile BGKD'nin denetimine ait bazı çalışmalar verilmektedir.

Şekil 3.25'de ARGT tabanlı KAY ile BGKD'nin denetim algoritması blok şeması görülmektedir. Denetim algoritması blok şemasında görüldüğü gibi SAGF ve PAGF denetim bloklarında geleneksel ARGT kullanılmaktadır.



Şekil 3.25: ARGT tabanlı KAY ile BGKD'nin denetim algoritması blok şeması.

KAY ile BGKD'nin denetim algoritmasında kullanmak için, Bölüm 3.5.5'de bahsedilen Şekil 3.5'de verilen PLL devresi kullanılarak 3-fazlı kaynak gerilimlerinin (v_{Ka}, v_{Kb}, v_{Kc}) α-β-0 koordinatlarındaki karşılıkları olan temel pozitif sıralı bileşenleri (v'_{K0}, $v'_{K\alpha}$ ve $v'_{K\beta}$) elde edilmektedir. Denklem 3.10'da verilen [C] çevrim matrisi kullanarak kaynak gerilimlerinin Denklem 3.59'da ve kaynak akımlarının Denklem 3.60'da görüldüğü gibi a-b-c koordinatlarından α-β-0 koordinatlarına dönüşümü yapılmaktadır.

$$\begin{bmatrix} v_{K0} \\ v_{K\alpha} \\ v_{K\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{Ka} \\ v_{Kb} \\ v_{Kc} \end{bmatrix} \tag{3.59}$$

$$\begin{bmatrix} i_{K0} \\ i_{K\alpha} \\ i_{K\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Ka} \\ i_{Kb} \\ i_{Kc} \end{bmatrix} \tag{3.60}$$

Denklem 3.18'de verilen $[V_{\alpha\beta}]$ çevrim matrisi girişine kaynak gerilimlerin temel pozitif sıralı bileşenleri ($v'_{K\alpha}$ ve $v'_{K\beta}$) uygulanmakta ve kaynak akımlarının α-β-0 koordinatlarındaki karşılıkları ($i_{K0,}$ $i_{K\alpha}$ ve $i_{K\beta}$) kullanarak kaynak akımın anlık gerçek, sanal ve sıfır sıralı güç bileşenleri Denklem 3.61'de verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$\begin{bmatrix} p_{K0} \\ p_K \\ q_K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{\alpha\beta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{K0} \\ i_{K\alpha} \\ i_{K\beta} \end{bmatrix} \tag{3.61}$$

Kaynağın anlık gerçek ve sanal güçleri, AA ve DA bileşenleri içermekte ve Denklem 3.62'de verildiği gibi ifade edilmektedir. p ve q'nun DA bileşenleri ($\bar{p}$ ve $\bar{q}$), akımın pozitif sıralı bileşeninden oluşmaktadır. p ve q'nun AA bileşenleri ($\tilde{p}$ ve $\tilde{q}$), akımın harmonik güç (p_h ve q_h) ve negatif sıralı güç ($p_{2\omega}$ ve $q_{2\omega}$) bileşenlerinden oluşmaktadır [23, 24, 30, 32]. Sıfır sıralı güç ise sıfır sıralı akım ve gerilimlerin anlık çapımı ile oluşmaktadır.

$$\begin{aligned} p_k &= \bar{p}_k + \tilde{p}_k = \bar{p}_k + p_h + p_{2\omega} \\ q_k &= \bar{q}_k + \tilde{q}_k = \bar{q}_k + q_h + q_{2\omega} \\ p_0 &= v_0 * i_0 \end{aligned} \tag{3.62}$$

KAY ile PAGF denetim algoritmasında aynı anda harmonik, reaktif güç ve nötr akım kompanzasyonu yapmak için kaynağa ait gerçek gücün DA bileşeni ile sıfır sıralı akımın tersi alınarak hesaplanmaktadır. Denklem 3.19'de verilen $[V_{\alpha\beta}]^{-1}$ ters çevrim matrisi girişine kaynak gerilimlerinin temel pozitif sıralı bileşenleri ($v'_{K\alpha}$ ve $v'_{K\beta}$) uygulanmakta ve PAGF denetim referans akımları Denklem 3.63'de verildiği gibi hesaplanmaktadır.

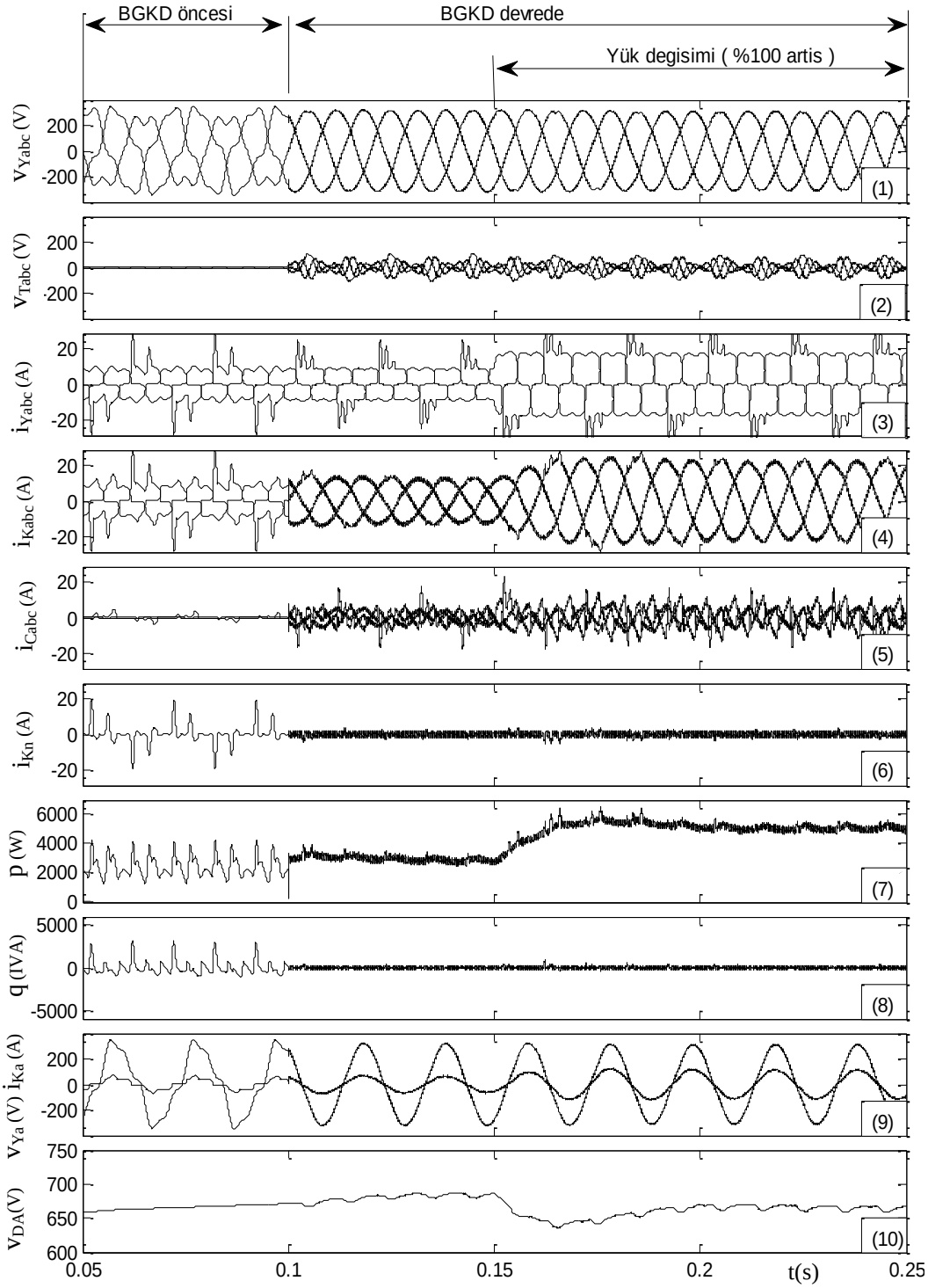
$$\begin{bmatrix} i_{K\alpha} \\ i_{K\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{(v'_{K\alpha})^2 + (v'_{K\beta})^2} \left[V_{\alpha\beta}\right]^{-1} \begin{bmatrix} \bar{p}_K + \bar{p}_{kayip} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{3.63}$$

Sıfır sıralı akımların kompanzasyonu yapılması gerektiğinden, "0" koordinatlarında referans kompanzasyon akımı $i_{K0} = -i_{K0}$ sıfır sıralı yük akımının tersi alınarak elde edilmektedir. $\bar{p}_{kayip}$gücü, DA bara gerilim PI denetleyici anlık çıkışı olup, PAGF kayıplarını gidermek ve DA-bara hat gerilim salınım ve değişimlerini azaltmak amacıyla anlık aktif güce ilave edilmektedir [23, 24, 30, 32]. i_{K0}, $i_{K\alpha}$ ve $i_{K\beta}$, α-β-0 koordinatlarında kaynak akımın harmonik ve reaktif akımlarına karşılık gelen ve PAGF denetim algoritmasının üretmesi gereken akımlardır. Bu akımlar üç fazlı sisteme Denklem 3.10'da verilen $[C]^{-1}$ ters çevrim matrisi kullanılarak Denklem 3.64'de verildiği gibi dönüştürülmektedir.

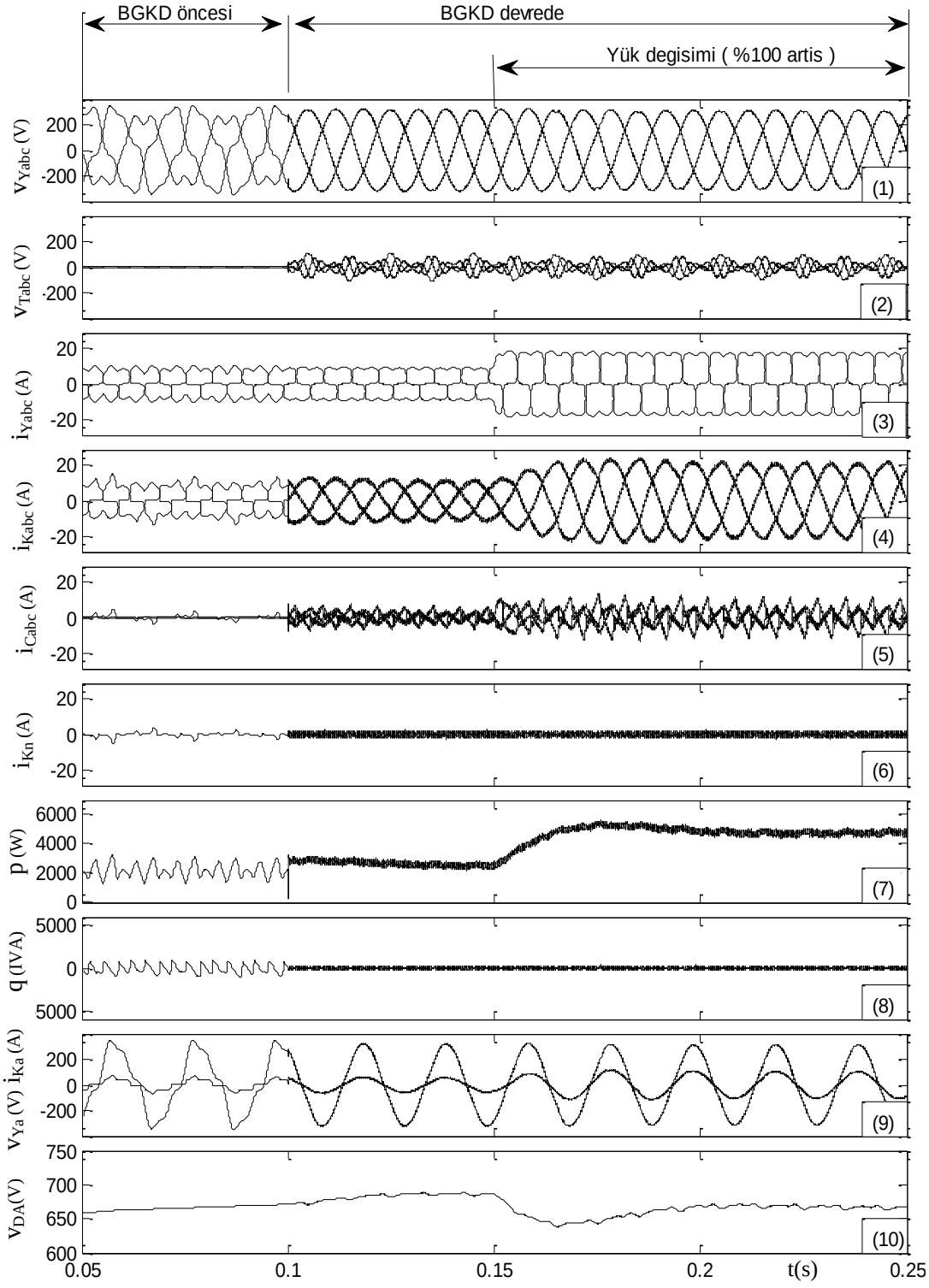
$$\begin{bmatrix} i_{Ka} \\ i_{Kb} \\ i_{Kc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} i_{K0} \\ i_{K\alpha} \\ i_{K\beta} \end{bmatrix} \tag{3.64}$$

Böylece 3-fazlı 4-telli sistemlerde doğrusal olmayan yükün ürettiği nötr akımı, harmonikler ve reaktif güç kompanzasyonu yapacak referans kaynak akımları elde edilmektedir. Paralel aktif güç filtre denetim algoritması tarafından üretilen referans kaynak akımları (i'_{Ka}, i'_{Kb} ve i'_{Kc}) ile kaynak hat akımları (i_{Ka}, i_{Kb} ve i_{Kc}) histerezis bant PWM tekniği kullanarak karşılaştırılmakta ve anahtarlama sinyalleri üretilmektedir. ARGT tabanlı KAY ile SAGF denetimini sağlayan ve harmonik kompanzasyon yapacak referans filtre gerilimleri Bölüm 3.7.1'de açıklanan Denklem 3.54 –3.58 ile hesaplanmaktadır.

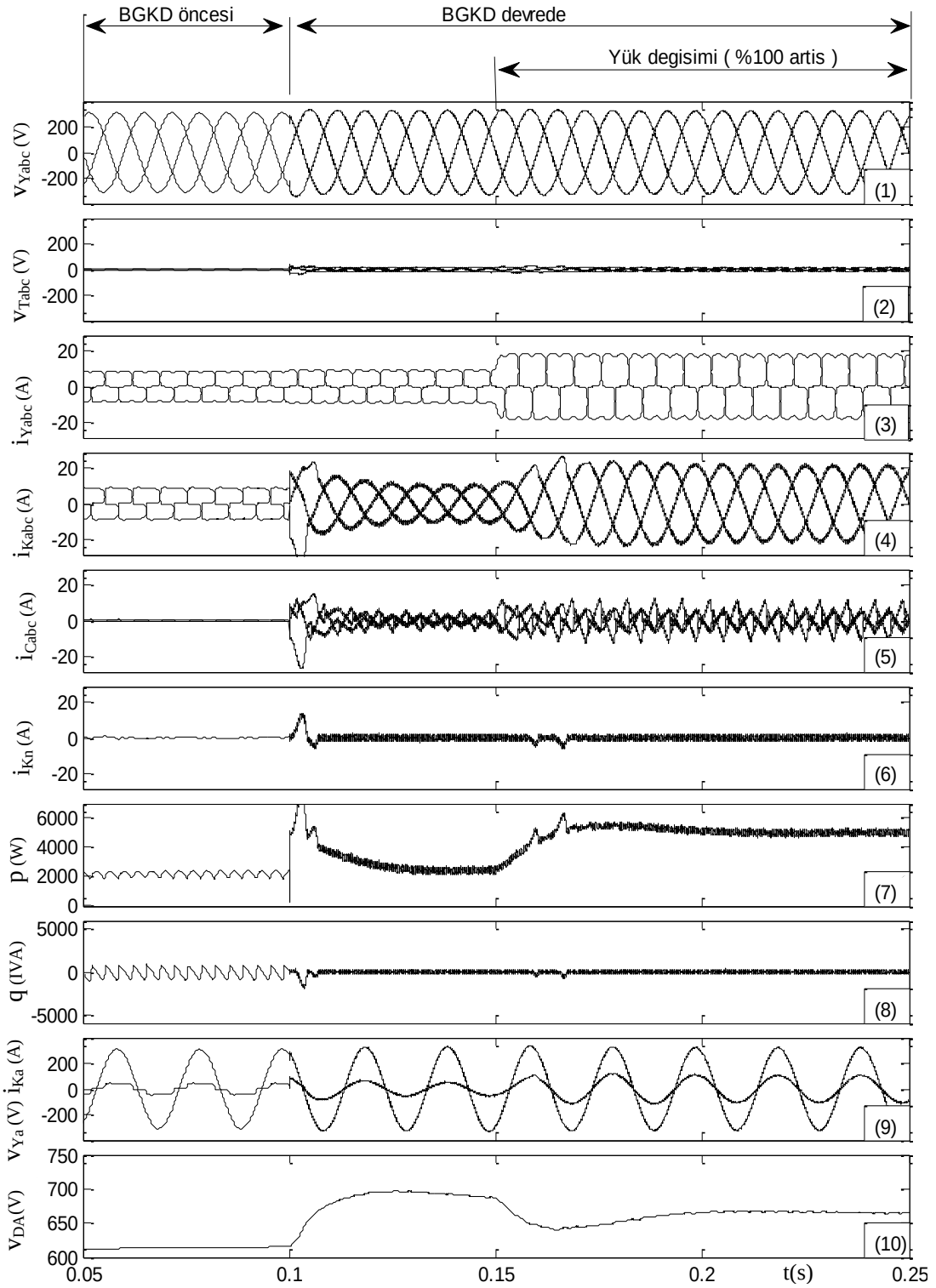
ARGT tabanlı KAY ile BGKD'nin denetim algoritması; Şekil 3.26'da dengesiz-harmonikli kaynak gerilimi ve dengesiz-doğrusal olmayan yük, Şekil 3.27'de dengesiz-harmonikli kaynak gerilimi ve dengeli-doğrusal olmayan yük, Şekil 3.28'de ideal kaynak gerilimi ve dengeli-doğrusal olmayan yük, Şekil 3.29'da ideal kaynak gerilimi ve dengesiz-doğrusal olmayan yük ve Şekil 3.30'da ideal kaynak gerilimi ve dengeli-doğrusal olmayan tam denetimli tristörlü yük koşullarında filtre öncesi, sonrası ve sistem dinamik cevabının test edildiği Matlab/Simulink simülasyon sonuçları verilmektedir.



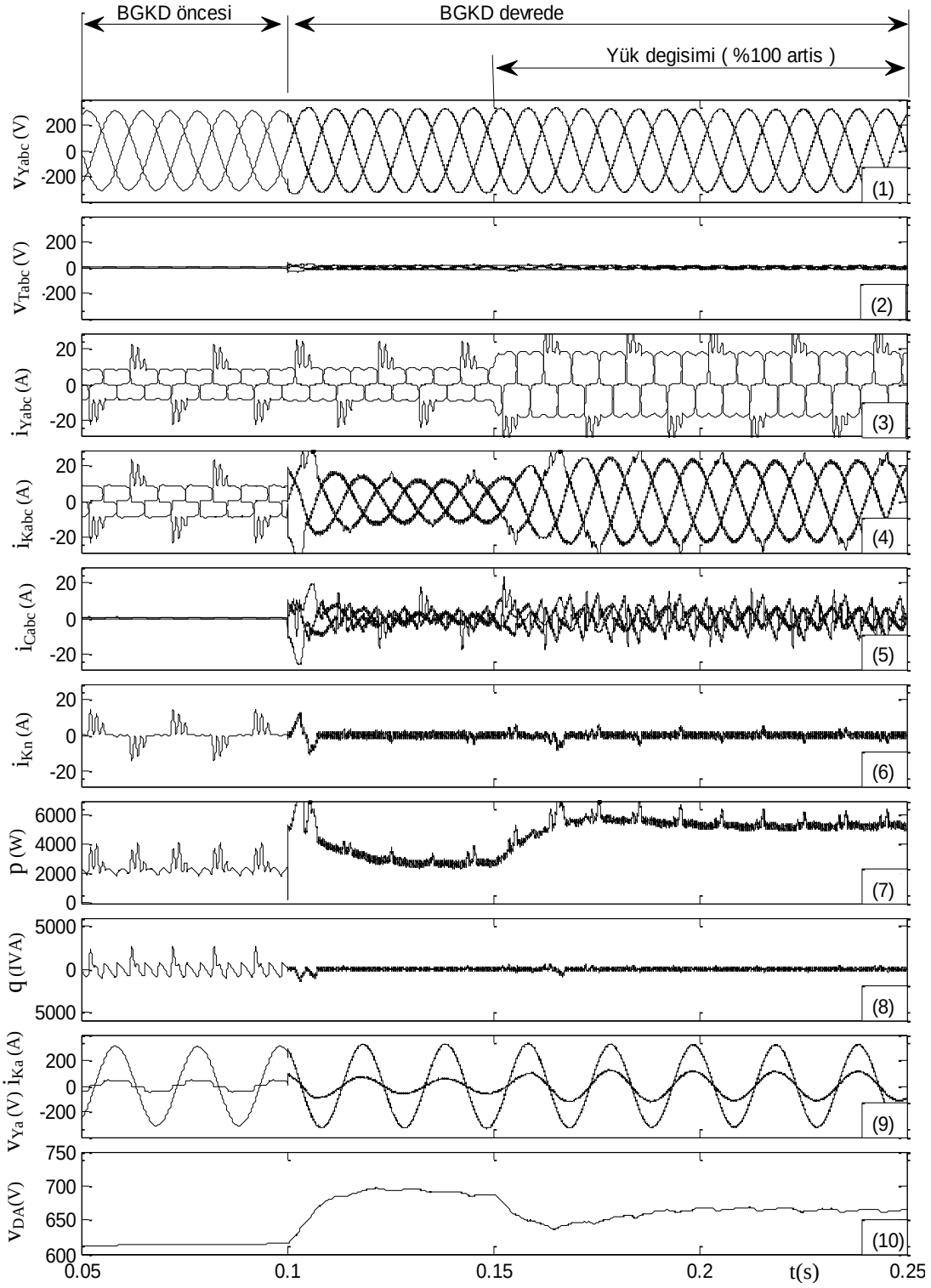
Şekil 3.26: ARGT tabanlı KAY ile BGKD'nin dengesiz-harmonikli kaynak gerilimi ve dengesiz-doğrusal olmayan yük koşullarında (1) yük gerilimleri, (2) trafo gerilimleri, (3) yük akımları, (4) kaynak akımları, (5) filtre akımları, (6) kaynak nötr akımı, (7) aktif güç, (8) reaktif güç,(9) kaynak akımı ve yük gerilimi, (10) V_{DA} bara gerilimi simülasyon sonuçları.



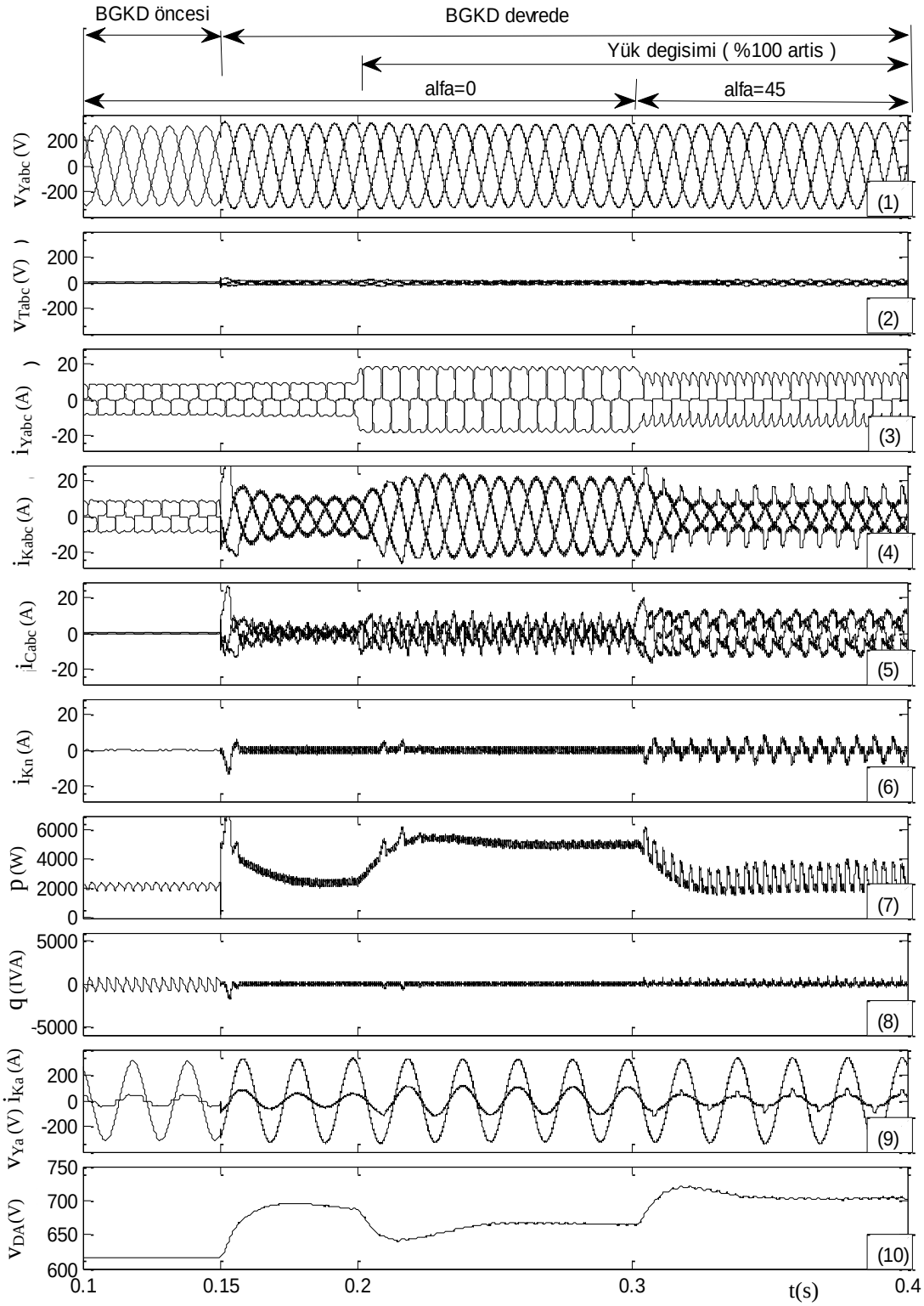
Şekil 3.27: ARGT tabanlı KAY ile BGKD'nin dengesiz-harmonikli kaynak gerilimi ve dengeli-doğrusal olmayan yük koşullarında (1) yük gerilimleri, (2) trafo gerilimleri, (3) yük akımları, (4) kaynak akımları, (5) filtre akımları, (6) kaynak nötr akımı, (7) aktif güç, (8) reaktif güç, (9) kaynak akımı ve yük gerilimi, (10) V_{DA} bara gerilimi simülasyon sonuçları.



Şekil 3.28: ARGT tabanlı KAY ile BGKD'nin ideal kaynak gerilimi ve dengeli-doğrusal olmayan yük koşullarında (1) yük gerilimleri, (2) trafo gerilimleri, (3) yük akımları, (4) kaynak akımları, (5) filtre akımları, (6) kaynak nötr akımı, (7) aktif güç, (8) reaktif güç, (9) kaynak akımı ve yük gerilimi, (10) V_{DA} bara gerilimi simülasyon sonuçları.



Şekil 3.29: ARGT tabanlı KAY ile BGKD'nin ideal kaynak gerilimi ve dengesiz-doğrusal olmayan yük koşullarında (1) yük gerilimleri, (2) trafo gerilimleri, (3) yük akımları, (4) kaynak akımları, (5) filtre akımları, (6) kaynak nötr akımı, (7) aktif güç, (8) reaktif güç, (9) kaynak akımı ve yük gerilimi, (10) V_{DA} bara gerilimi simülasyon sonuçları.



Şekil 3.30: ARGT tabanlı KAY ile BGKD'nin ideal kaynak gerilimi ve dengeli-doğrusal olmayan tristörlü yük koşullarında (1) yük gerilimleri, (2) trafo gerilimleri, (3) yük akımları, (4) kaynak akımları, (5) filtre akımları, (6) kaynak nötr akımı, (7) aktif güç, (8) reaktif güç, (9) kaynak akımı ve yük gerilimi, (10) V_{DA} bara gerilimi simülasyon sonuçları.

3.8. BGKD'nin Senkron Referans Yapı Tabanlı Denetim Stratejisi

3.8.1. Senkron referans yapı

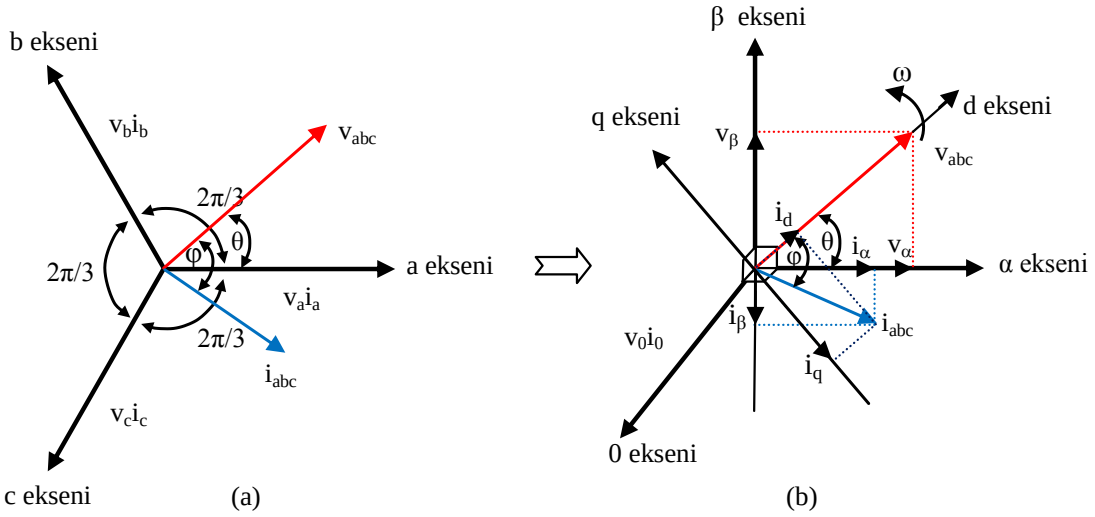
Senkron Referans Yapı (SRY) tabanlı denetim ve harmonik kompanzasyon 1991 yılında S. Bhattacharya [66-68] tarafından önerilmiştir. Literatürde [63-70, 73, 74] SRY tabanlı bazı aktif güç filtre çalışmaları yapılmıştır.

a-b-c koordinatlarından d-q-0 senkron referans koordinatlarına dönüşüm yapabilmek için sistem gerilim bilgisine ihtiyaç duyulmaktadır. Sistem gerilimiyle senkron olabilmek için Şekil 3.5'de verildiği gibi PLL yapıları kullanılmaktadır. PLL girişine kaynak gerilimleri uygulanarak üretilen açısal hız (ω), sistemin açısal hızı ile senkronize olduğunda d-q-0 senkron referans yapı, sistem gerilimiyle senkron dönmektedir. d-q-0 yapıda gerilim vektörünün açısal konumu aynı zamanda senkron referans yapının da açısal konumunu göstermektedir [73, 74].

SRY tabanlı aktif güç filtre uygulamalarında, 3-fazlı a-b-c koordinatlarında ki akımlar veya gerilimler, sistem gerilimiyle senkron dönen referans yapıya çevrilmektedir. Doğrusal olmayan yük durumunda yükün çektiği harmonik ve reaktif akımlar tespit edilmekte ve aktif güç filtre sistemi bu harmonikli akımları yok etmek için sisteme eşit büyüklükte ve ters fazda akımlar üreterek nötr akımı, harmonik ve reaktif güç kompanzasyonu yapmaktadır. Şekil 3.31 (a)'da verilen a-b-c koordinatlarından Şekil 3.31 (b)'de verildiği gibi durağan referans yapı α-β-0 koordinatlarına ve dönen referans yapı d-q-0 koordinatlarına dönüşümü birlikte verilmektedir. Durağan referans yapıda α-β-0 eksenleri dönmemektedir. Sistem gerilim ve akım vektörleri yer değiştirdikçe bu vektörlerin α-β-0 eksenlerindeki değerleri değişmektedir. Dönen referans yapı sistem gerilimiyle senkron dönmektedir. Bu nedenle sistem gerilim vektörünün açısal konumu aynı zamanda senkron referans yapının da açısal konumunu göstermektedir [73, 74].

3-fazlı 4-telli sistemlerde, Şekil 3.31 (b)'de görüldüğü gibi d-q-0 koordinatlarına dönüşümü yapılan akımın "d" ekseni üzerinde bulunan i_d bileşeni gerilimle aynı fazda olduğu için pozitif sıralı aktif akıma karşılık gelmektedir. "q" ekseni üzerinde bulunan i_q bileşeni, i_d bileşenine göre dik olduğu için negatif sıralı reaktif akımlara karşılık gelmektedir. i_d ve i_q bileşenlerine dik olan "0" ekseni üzerinde bulunan i_0 bileşeni ise akımın sıfır sıralı bileşenine karşılık gelmektedir. Akımın "q" ekseni

üzerinde bulunan i_q bileşeni negatif ise, yükün endüktif bileşen içerdiğini, pozitif ise, yükün kapasitif bileşen içerdiğini göstermektedir. 3-fazlı doğrusal olmayan yüklerde $i_d = \bar{i}_d + \tilde{i}_d$ ve $i_q = \bar{i}_q + \tilde{i}_q$ hem AA ($\tilde{i}_d$ ve $\tilde{i}_q$) hem de DA ($\bar{i}_d$ ve $\bar{i}_q$) bileşenlerine sahiptir. i_d ve i_q'nun AA ($\tilde{i}_d$ ve $\tilde{i}_q$) bileşenleri harmonik akımlara karşılık gelmektedir. DA bileşenleri ise ($\bar{i}_d$) aktif ve ($\bar{i}_q$) reaktif akımlara karşılık gelmektedir [66, 67, 74].



Şekil 3.31: (a) a-b-c koordinatlarından (b) α-β-0 durağan referans yapıdan ve d-q-0 senkron referans yapıya dönüşüm.

3-fazlı a-b-c koordinatlarında akım veya gerilimler Denklem 3.65'de verilen çevrim matrisi kullanılarak d-q-0 senkron referans yapıya Denklem 3.67'de verildiği gibi dönüşüm yapılmaktadır. d-q-0 senkron referans yapıdan tekrar a-b-c koordinatlarına Denklem 3.66'da verilen ters çevrim matrisi kullanılarak Denklem 3.68'de verildiği gibi dönüşüm yapılmaktadır.

$$\left[T\right] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ \sin(wt) & \sin(wt - 2\pi/3) & \sin(wt + 2\pi/3) \\ \cos(wt) & \cos(wt - 2\pi/3) & \cos(wt + 2\pi/3) \end{bmatrix} \tag{3.65}$$

$$\left[T\right]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & \sin(wt) & \cos(wt) \\ 1/\sqrt{2} & \sin(wt - 2\pi/3) & \cos(wt - 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & \sin(wt + 2\pi/3) & \cos(wt + 2\pi/3) \end{bmatrix} \tag{3.66}$$

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \\ T \\ \\ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad ; \quad \begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \\ T \\ \\ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \tag{3.67}$$

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \\ T \\ \\ \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} v_0 \\ v_d \\ v_q \end{bmatrix} \quad ; \quad \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \\ T \\ \\ \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} \tag{3.68}$$

3-fazlı a-b-c koordinatlarında akım veya gerilimler Denklem 3.9'da verilen [C] çevrim matrisi kullanarak α-β-0 koordinatlarına çevrilmektedir. Şekil 3.23 (b)'de verilen anlık akımlar ve anlık gerilimler α-β-0 koordinatlarından d-q-0 koordinatlarına Denklem 3.69'da verildiği gibi dönüşüm yapılmaktadır. Aynı şekilde d-q-0 koordinatlarında verilen anlık akımlar ve anlık gerilimler α-β-0 koordinatlarına Denklem 3.70'de verildiği gibi dönüşüm yapılmaktadır.

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) \\ 0 & \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} v_0 \\ v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) \\ 0 & \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \tag{3.69}$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ 0 & -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ 0 & -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_0 \\ v_d \\ v_q \end{bmatrix} \tag{3.70}$$

SRY tabanlı paralel aktif güç filtre denetimi ile sadece reaktif güç kompanzasyonu yapılmak isteniyorsa akımın i_q bileşeni, sadece harmonik güç kompanzasyonu yapılmak isteniyorsa akımın $\tilde{i}_d$ ve $\tilde{i}_q$ bileşenleri, reaktif güç ve harmonik güç kompanzasyonu birlikte yapılmak isteniyorsa akımın $\tilde{i}_d$ ve i_q bileşenleri referans alınarak hesaplamalar yapılmaktadır.

Dengesiz ve doğrusal olmayan yüklerden kaynaklanan nötr akım kompanzasyonu yapılmak istenirse, d-q-0 koordinatında akımın i_0 bileşeni kullanılmaktadır. Tablo 3.4'de SRY tabanlı PAGF ile yapılacak kompanzasyon tipine göre gerekli akım bileşenleri verilmektedir.

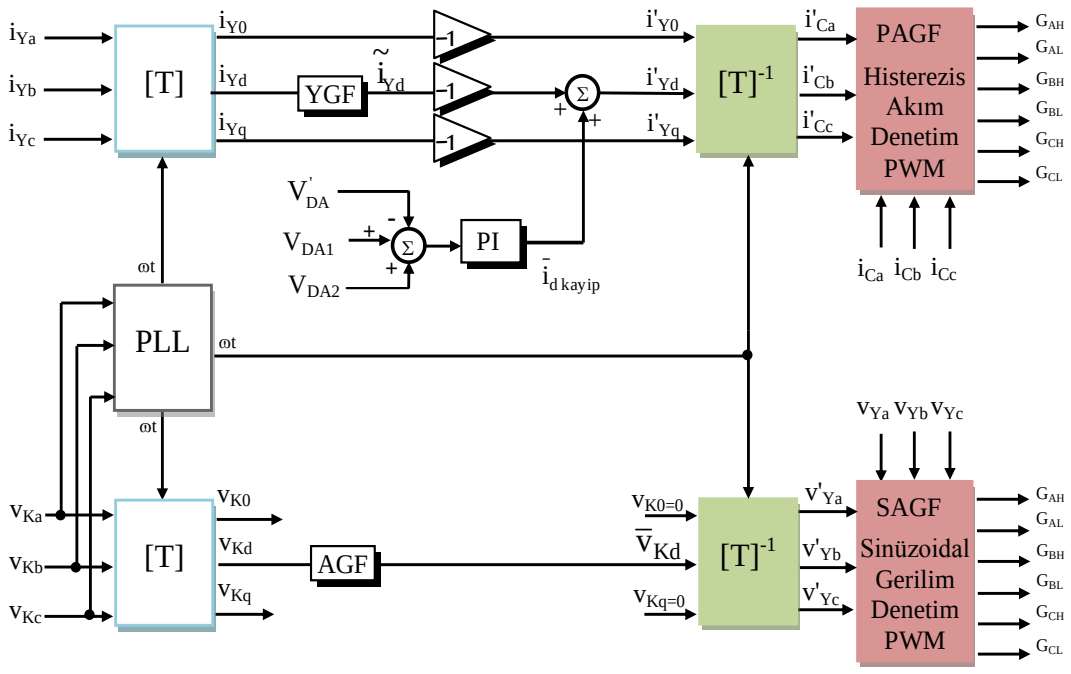
Tablo 3.4: SRY tabanlı PAGF ile yapılacak kompanzasyon tipine göre gerekli akım bileşenleri.

Kompanzasyon Tipi	Gerekli Akım Bileşenleri
Reaktif güç	i_q
Harmonik güç	$\tilde{i}_d$ ve $\tilde{i}_q$
Reaktif güç ve Harmonik güç	$\tilde{i}_d$ ve i_q
Nötr akımı	i_0

3.8.2. Önerilen SRY tabanlı YAY ile BGKD'nin denetimi ve simülasyonu

Bu bölümde, SRY tabanlı Yük Akımları ölçüm Yöntemi (YAY) ile BGKD denetim algoritmasının analizi ve simülasyon sonuçları verilmektedir. Literatürde [70, 71, 74, 90, 91] 3-fazlı 3-telli sistemler için bazı PAGF denetim algoritmaları bulunmaktadır. Bu çalışmada ise, 3-fazlı 4-telli sistemler için SRY tabanlı PAGF denetim algoritması kullanılmakta ve yeni bir SRY tabanlı SAGF denetim algoritması ise önerilmektedir.

Şekil 3.32'de önerilen SRY tabanlı YAY ile BGKD'nin denetim algoritması blok şeması görülmektedir. Denetim algoritması blok şemasında görüldüğü gibi SAGF ve PAGF kısımlarında SRY tabanlı denetim yöntemi kullanılmaktadır.



Şekil 3.32: Önerilen SRY tabanlı YAY ile BGKD'nin denetim algoritması blok şeması.

SRY tabanlı YAY ile BGKD'nin denetim algoritması, kaynak gerilimleri (v_{Kabc}), yük akımları (i_{Yabc}), PAGF hat filtre akımları (i_{Cabc}), yük gerilimleri (v_{Yabc}) ve DA bara gerilimi (V_{DA}) olmak üzere toplam beş ayrı noktadan ölçüm alınarak gerçekleştirilmektedir. Önerilen SRY tabanlı YAY ile BGKD'nin denetim algoritması hem ölçüm sayısının az olması hem de denetim algoritmasının daha basit ve az işlem gerektirmesi nedeniyle ARGT tabanlı YAY ile BGKD denetim algoritmasına göre avantajlı sayılmaktadır.

Önerilen SRY tabanlı YAY ile BGKD'nin denetim algoritmasında, kaynak gerilimleriyle senkron olabilmek için Şekil 3.5'de verilen PLL devresi kullanılarak a-b-c koordinatlarında akım ve gerilimler d-q-0 koordinatlarına çevrilmektedir. Denklem 3.65'de verilen [T] çevrim matrisi ve PLL devresi ile üretilen ωt kullanarak kaynak gerilimleri Denklem 3.71 de, yük akımları Denklem 3.72 de görüldüğü gibi a-b-c koordinatlarından d-q-0 senkron referans koordinatlarına dönüşüm (Park dönüşümü) yapılmaktadır.

$$\begin{bmatrix} v_{K0} \\ v_{Kd} \\ v_{Kq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \\ T \\ \\ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{Ka} \\ v_{Kb} \\ v_{Kc} \end{bmatrix} \tag{3.71}$$

$$\begin{bmatrix} i_{Y0} \\ i_{Yd} \\ i_{Yq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \\ T \\ \\ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Ya} \\ i_{Yb} \\ i_{Yc} \end{bmatrix} \tag{3.72}$$

3-fazlı doğrusal olmayan yük durumlarında, Denklem 3.72'de d-q-0 koordinatlarına dönüşümü yapılan "d" ve "q" eksenlerinde anlık yük akımları i_{Yd} ve i_{Yq} hem AA ($\tilde{i}_{Yd}$ ve $\tilde{i}_{Yq}$) hem de DA ($\bar{i}_{Yd}$ ve $\bar{i}_{Yq}$) bileşenleri içermektedir. i_{Yd} ve i_{Yq}'nun AA bileşenleri akımın harmonik ve negatif sıralı bileşeninden meydana gelmektedir. DA bileşenleri ise akımın pozitif sıralı bileşeninden oluşmakta aktif ve reaktif akımlara karşılık gelmektedir. Yük akımına ait sıfır sıralı akım i_{Y0} ise 3 ve 3'ün katları harmonik üreten yüklerde ve yükün dengesiz olması durumunda oluşmaktadır.

SRY tabanlı YAY ile BGKD'nin denetim yönteminde yük akım harmoniklerinin ve dengesizliklerinin yok edilmesi ve reaktif güç kompanzasyonu gerçekleştirmek için

yük akımına ait $\tilde{i}_{Yd}$, i_{Yq} ve i_{Y0} bileşenlerinin tersi alınmakta ve d-q-0 koordinatlarında referans filtre akımları (i'_{Y0}, $i'_{Y\alpha}$ ve $i'_{Y\beta}$) üretilmektedir. $\bar{i}_{d_{kayip}}$ akımı V_{DA} bara gerilimin PI denetleyici anlık akım çıkışı olup, filtre kayıplarını gidermek ve DA-bara hat gerilim salınım ve değişimleri azalmak amacıyla anlık $\tilde{i}_{Yd}$ akım bileşenine ilave edilmektedir. Denklem 3.66'da verilen $[T]^{-1}$ ters çevrim matrisi ve PLL ile üretilen ωt kullanarak Denklem 3.73'de verildiği gibi referans filtre akımları i'_{Ca}, i'_{Cb} ve i'_{Cc} üretilmektedir.

$$\begin{bmatrix} i'_{Ca} \\ i'_{Cb} \\ i'_{Cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \\ T \\ \\ \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} i_{C0} \\ i_{C\alpha} \\ i_{C\beta} \end{bmatrix} \tag{3.73}$$

Böylece 3-fazlı 4-telli sistemlerde doğrusal olmayan yükün ürettiği nötr akımını, harmonikler ve reaktif güç kompanzasyonu yapacak i'_{Ca}, i'_{Cb} ve i'_{Cc} referans akımları elde edilmektedir. Anahtarlama sinyalleri PAGF denetim algoritması tarafından üretilen referans filtre akımları i'_{Ca}, i'_{Cb} ve i'_{Cc} ile PAGF filtre hat akımları i_{Ca}, i_{Cb} ve i_{Cc} karşılaştırılmakta ve histerezis bant PWM tekniği kullanılarak elde edilmektedir.

Önerilen SRY tabanlı YAY ile BGKD'nin denetim yönteminde SAGF denetim algoritması aynı anda kaynak gerilim harmonikleri, gerilim dengesizlileri, gerilim de çökme ve yükselme gibi kaynak gerilim problemlerini düzelmektedir. a-b-c koordinatlarında kaynak gerilimleri d-q-0 koordinatlarına Denklem 3.65'de verilen [T] çevrim matrisi ve PLL devresi ile üretilen ωt kullanarak Denklem 3.71'de ki gibi çevrilmektedir.

3-fazlı harmonikli kaynak gerilimleri durumunda, d-q-0 koordinatlarına dönüşümü yapılan "d" ve "q" eksenlerinde bulunan anlık kaynak gerilimleri v_{Kd} ve v_{Kq} hem AA ($\tilde{v}_{Kd}$ ve $\tilde{v}_{Kq}$) hem de DA ($\bar{v}_{Kd}$ ve $\bar{v}_{Kq}$) bileşenleri içermektedir. v_{Kd} ve v_{Kq}'nun AA bileşenleri kaynak gerilimin harmonik ve negatif sıralı bileşeninden meydana gelmektedir. DA bileşenleri ise gerilimin pozitif sıralı bileşeninden oluşmaktadır. Kaynak gerilimine ait sıfır sıralı v_{K0} gerilimi ise kaynağın dengesiz olması durumunda oluşmaktadır.

Önerilen SAGF denetim algoritmasında, kaynak gerilim problemlerinin düzeltilmesi için geliştirilen algoritmada d-q-0 koordinatlarına dönüşümü yapılan kaynak geriliminin $\bar{v}_{Kd}$ bileşeni kullanılmaktadır."d" ekseninde v_{Kd} geriliminin Şekil 3.12'de verilen AGF yöntemi uygulanarak DA bileşeni $\bar{v}_{Kd}$ elde edilmektedir. Denklem 3.66'da verilen $[T]^{-1}$ ters çevrim matrisi girişine, kaynak geriliminin $\bar{v}_{Kd}$ bileşeni ve PLL ile üretilen ωt kullanarak Denklem 3.74'de verildiği gibi kaynak gerilimlerinin temel pozitif sıralı bileşeni olan yük gerilim filtreleme işlemlerinde kullanılmak üzere referans yük gerilimleri (v'_{Ya}, v'_{Yb} ve v'_{Yc}) üretilmektedir.

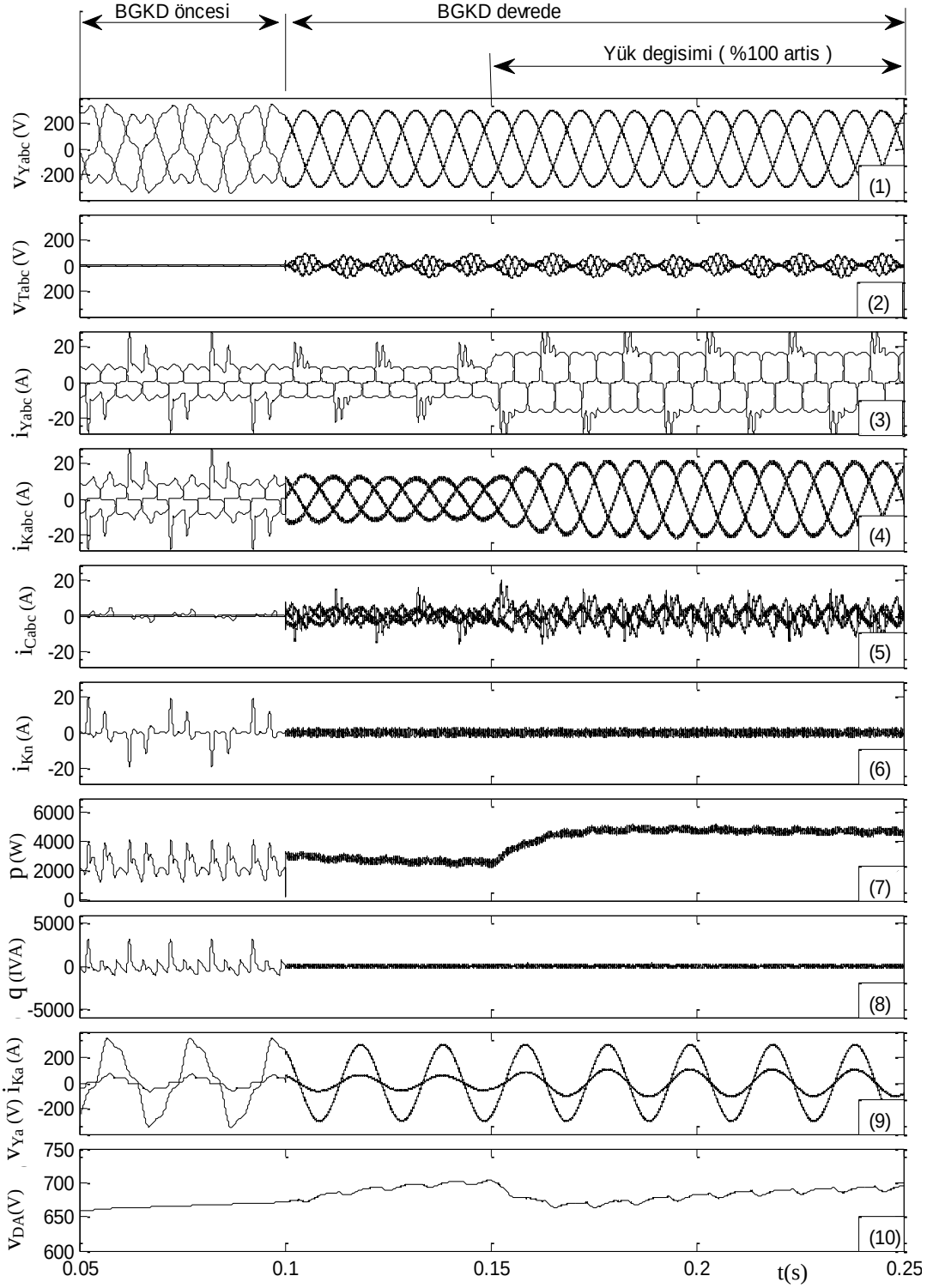
$$\begin{bmatrix} v'_{Ya} \\ v'_{Yb} \\ v'_{Yc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & \\ T & \\ & \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{v}_{Kd} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{3.74}$$

Böylece 3-fazlı 4-telli sistemlerde harmonikli kaynak gerilim kompanzasyonu yapacak referans gerilimleri (v'_{Ya}, v'_{Yb} ve v'_{Yc}) elde edilmektedir. SAGF denetim algoritması tarafından üretilen referans yük gerilimleri (v'_{Ya}, v'_{Yb} ve v'_{Yc}) ile yük hat gerilimleri (v_{Ya}, v_{Yb} ve v_{Yc}) kullanarak sinüzoidal PWM denetleyici tekniği ile anahtarlama sinyalleri üretilmektedir.

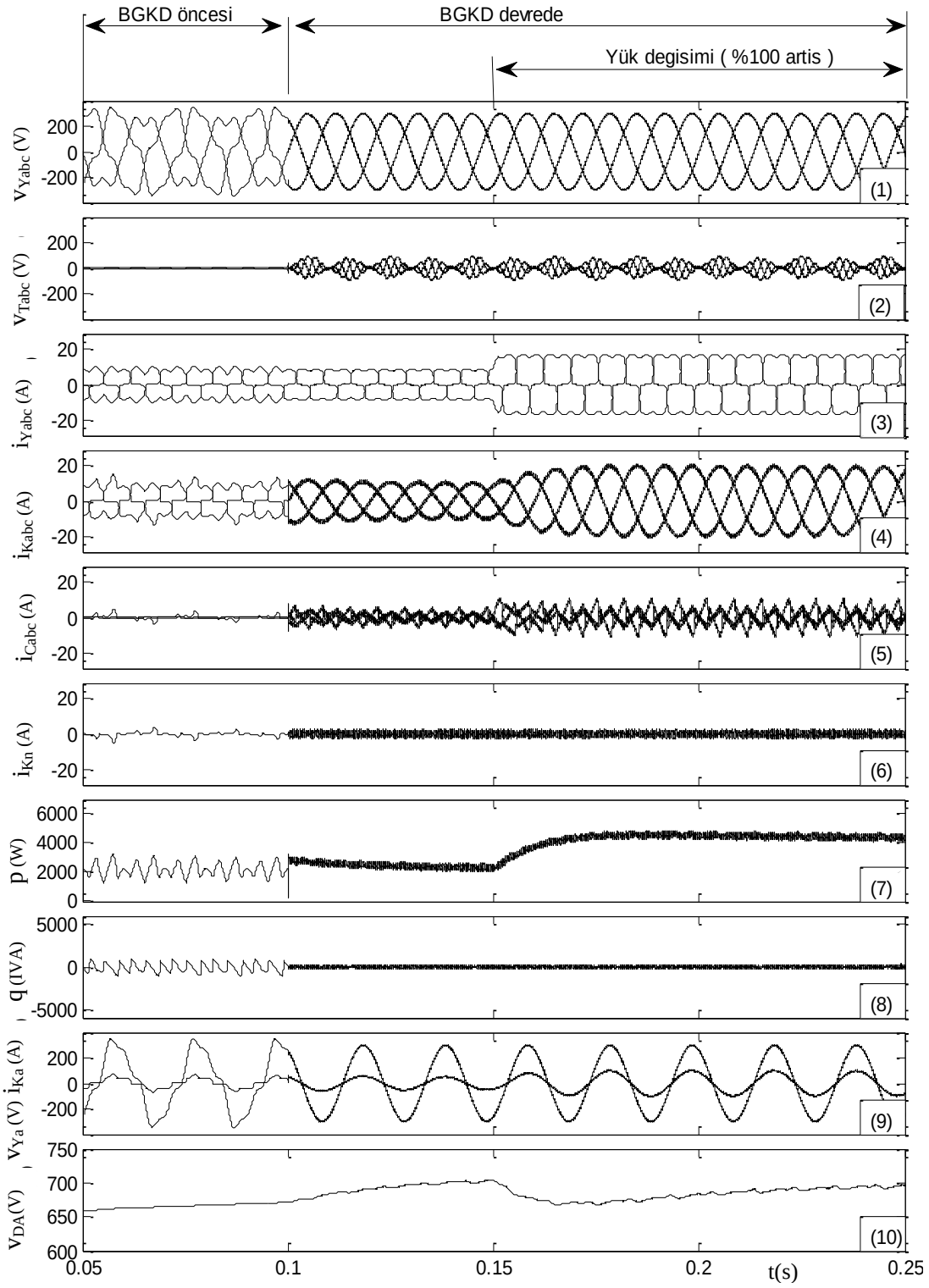
SRY tabanlı YAY ile BGKD'nin denetim algoritması; Şekil 3.33'de dengesiz-harmonikli kaynak gerilimi ve dengesiz-doğrusal olmayan yük, Şekil 3.34'de dengesiz-harmonikli kaynak gerilimi ve dengeli-doğrusal olmayan yük, Şekil 3.35'de ideal kaynak gerilimi ve dengeli-doğrusal olmayan yük, Şekil 3.36'da ideal kaynak gerilimi ve dengesiz-doğrusal olmayan yük ve Şekil 3.37'de ideal kaynak gerilimi ve dengeli-doğrusal olmayan tam denetimli tristörlü yük koşullarında filtre öncesi, sonrası ve sistem dinamik cevabının test edildiği Matlab/Simulink simülasyon sonuçları verilmektedir.

Simülasyon sonuçlarında da görüldüğü gibi SRY tabanlı YAY ile BGKD'nin denetimi ile harmonikli yük akımları kaynak tarafına sinüzoidal olarak iletilmekte, yük tarafında görülen gerilim harmonikleri ve nötr akımı yok edilmekte ve reaktif güç kompanzasyonu başarılı biçimde gerçekleştirilmektedir. Dengesiz yük akımı durumunda sistem oldukça iyi cevap vermektedir. BGKD devreye girmeden önceki,

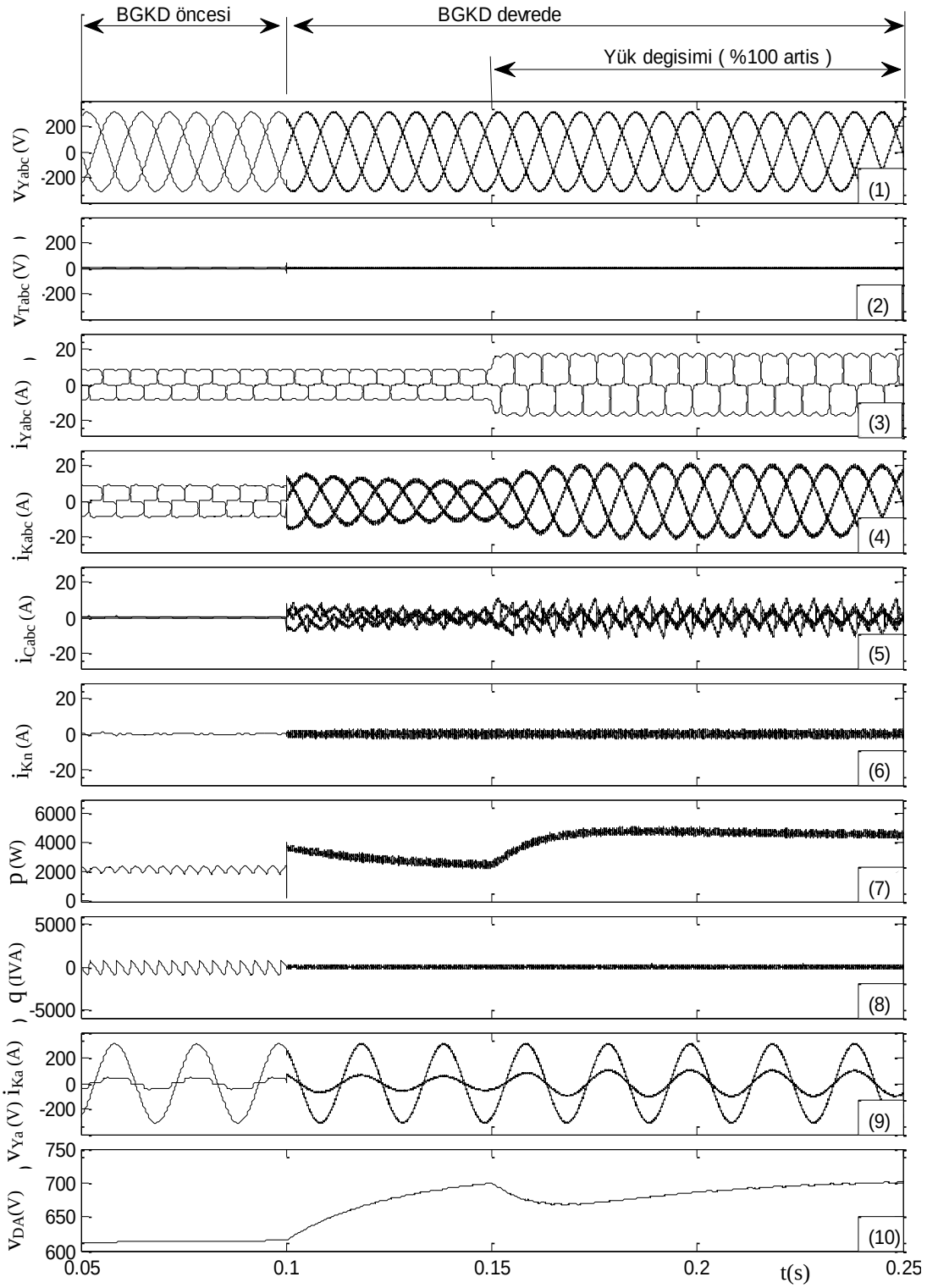
devreye girdikten sonraki durum ve %100 yük değişiminde görülen dinamik cevap oldukça iyi görülmektedir.



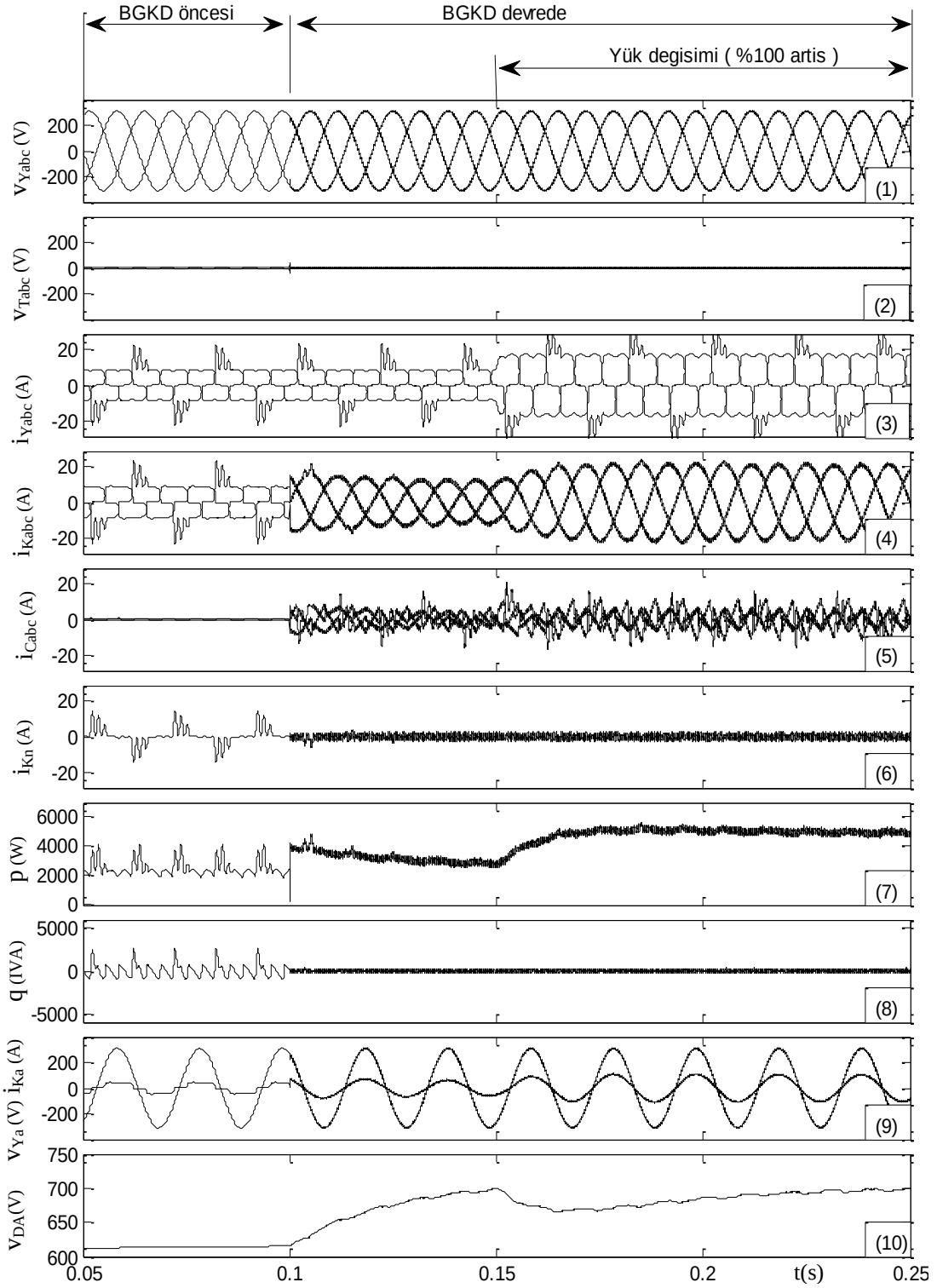
Şekil 3.33: SRY tabanlı YAY ile BGKD'nin dengesiz-harmonikli kaynak gerilimi ve dengesiz-doğrusal olmayan yük koşullarında (1) yük gerilimleri, (2) trafo gerilimleri, (3) yük akımları, (4) kaynak akımları, (5) filtre akımları, (6) kaynak nötr akımı, (7) aktif güç, (8) reaktif güç, (9) kaynak akımı ve yük gerilimi, (10) V_{DA} bara gerilimi simülasyon sonuçları.



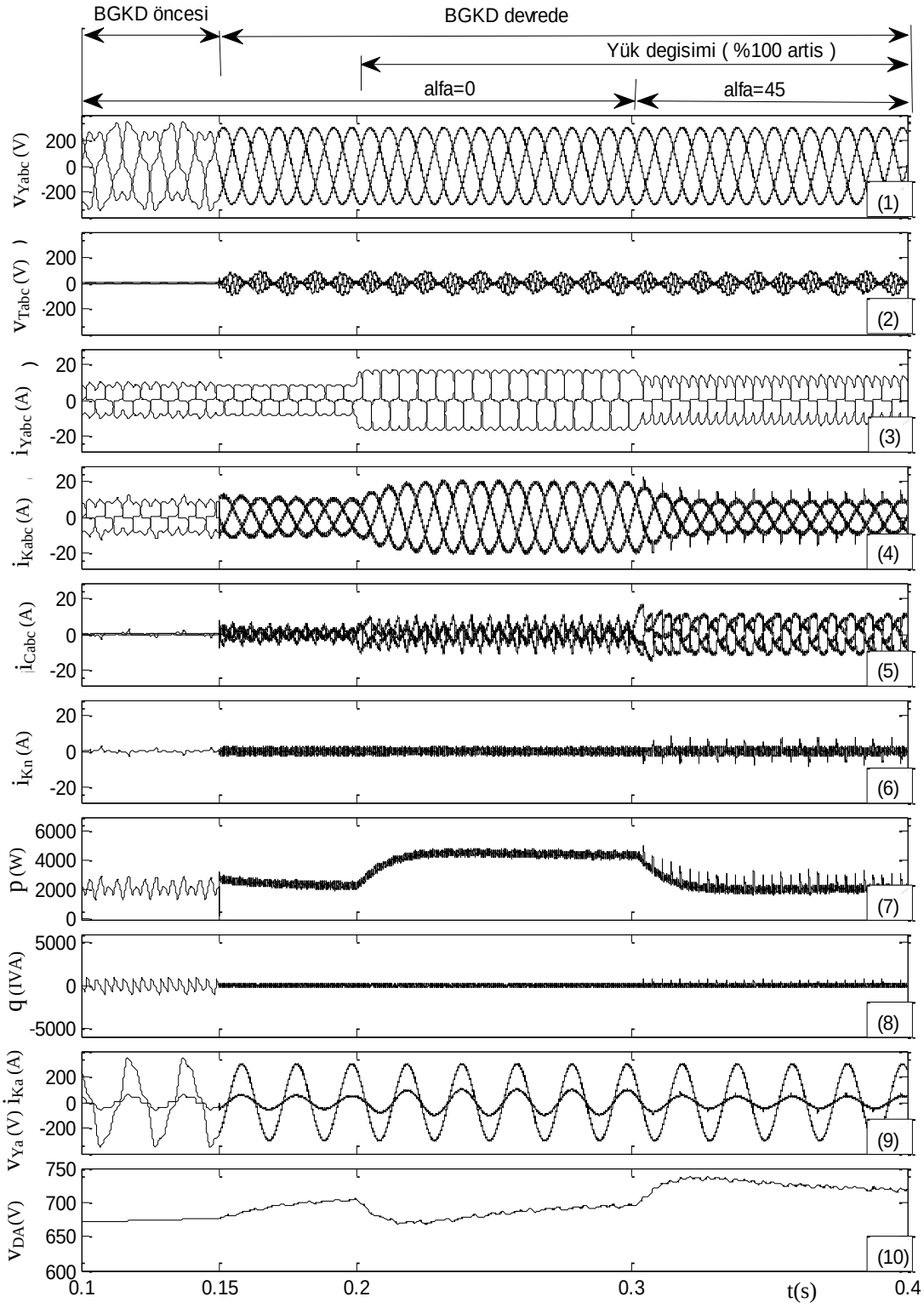
Şekil 3.34: SRY tabanlı YAY ile BGKD'nin dengesiz-harmonikli kaynak gerilimi ve dengeli-doğrusal olmayan yük koşullarında (1) yük gerilimleri, (2) trafo gerilimleri, (3) yük akımları, (4) kaynak akımları, (5) filtre akımları, (6) kaynak nötr akımı, (7) aktif güç, (8) reaktif güç, (9) kaynak akımı ve yük gerilimi, (10) V_{DA} bara gerilimi simülasyon sonuçları.



Şekil 3.35: SRY tabanlı YAY ile BGKD'nin ideal kaynak gerilimi ve dengeli-doğrusal olmayan yük koşullarında (1) yük gerilimleri, (2) trafo gerilimleri, (3) yük akımları, (4) kaynak akımları, (5) filtre akımları, (6) kaynak nötr akımı, (7) aktif güç, (8) reaktif güç, (9) kaynak akımı ve yük gerilimi, (10) V_{DA} bara gerilimi simülasyon sonuçları.

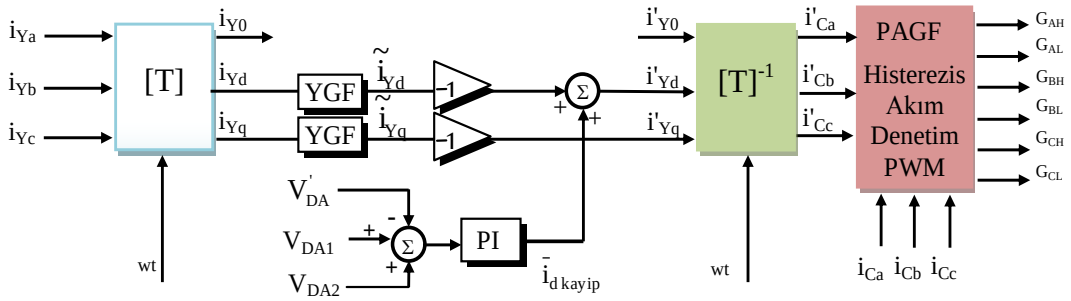


Şekil 3.36: SRY tabanlı YAY ile BGKD'nin ideal kaynak gerilimi ve dengesiz-doğrusal olmayan yük koşullarında (1) yük gerilimleri, (2) trafo gerilimleri, (3) yük akımları, (4) kaynak akımları, (5) filtre akımları, (6) kaynak nötr akımı, (7) aktif güç, (8) reaktif güç,(9) kaynak akımı ve yük gerilimi, (10) V_{DA} bara gerilimi simülasyon sonuçları.



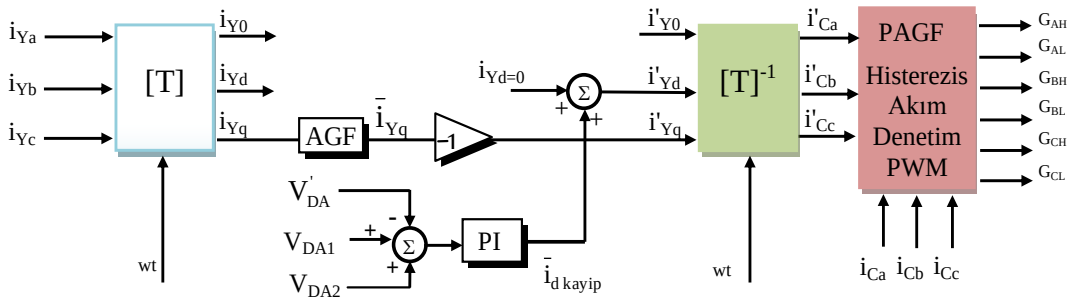
Şekil 3.37: SRY tabanlı YAY ile BGKD'nin ideal kaynak gerilimi ve dengeli-doğrusal olmayan tristörlü yük koşullarında (1) yük gerilimleri, (2) trafo gerilimleri, (3) yük akımları, (4) kaynak akımları, (5) filtre akımları, (6) kaynak nötr akımı, (7) aktif güç, (8) reaktif güç, (9) kaynak akımı ve yük erilimi, (10) V_{DA} bara gerilimi simülasyon sonuçları.

3-fazlı 4-telli sistemlerde SRY tabanlı PAFG ile sadece harmonik kompanzasyonu yapmak için, denetim algoritmasında gerçek ve sanal akımların dalgalı bileşenlerinin tersi kullanılmaktadır. Şekil 3.38'de referans akımların elde edilmesi yönteminin blok diyagramı verilmektedir.



Şekil 3.38: SRY tabanlı YAY ile sadece harmonik akım kompanzasyonu için referans filtre akımlarının hesaplanması.

SRY tabanlı PAFG ile sadece reaktif güç kompanzasyonu yapmak için, sanal akımın doğru bileşeninin tersi kullanılmaktdır. Şekil 3.39'da referans akımların elde edilmesi yönteminin blok diyagramı verilmektedir.

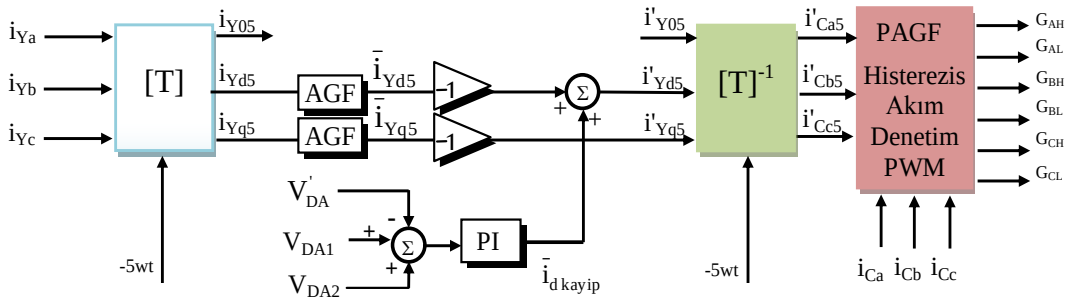


Şekil 3.39: SRY tabanlı YAY ile reaktif güç kompanzasyonu için referans filtre akımlarının hesaplanması blok şeması.

SRY tabanlı denetim algoritmasını kullanılarak sadece seçili harmonikler (örneğin sadece 3., 5. ve 7. harmonik gibi) yok edilebilir. Sadece 5. harmonik yok edilmek istenirse akım, 5. harmoniğe karşılık gelen frekans ile senkron referans yapıya çevrildikten sonra, alçak geçiren filtre kullanılarak i_{Yd5} ve i_{Yq5} akımlarından 5. harmoniğe karşılık gelen akımların doğru bileşenleri $\bar{i}_{Yd5}$ ve $\bar{i}_{Yq5}$ elde edilmektedir. Bu akımların tersi alınarak referans filtre akımları hesaplanmaktadır. PAGF bu referans akımların tersini üretip sisteme verdiğinde 5. harmonik yok edilmektedir.

Sadece 7. harmonik yok edilmek istenirse akım, 7. harmoniğe karşılık gelen frekans ile dönen senkron referans yapıya çevrildikten sonra, alçak geçiren filtre kullanılarak i_{Yd7} ve i_{Yq7} akımlarından 7. harmoniğe karşılık gelen akımların doğru bileşenleri $\bar{i}_{Yd7}$ ve $\bar{i}_{Yq7}$ elde edilmektedir. Bu akımların tersi alınarak referans filtre akımları hesaplanmaktadır. PAGF bu referans akımların tersini üretip sisteme verdiğinde 7. harmonik yok edilmektedir [74].

Şekil 3.40'da verilen blok diyagramından da görüldüğü gibi SRY tabanlı PAFG ile sadece 5.harmonik kompanzasyonu yapmak için Şekil 3.5'de verilen PLL devresi tarafından üretilen ve a-b-c koordinatlarından d-q-0 koordinatlarına dönüşümlerde kullanılan açısal hız "-5ωt" alınarak seçilen 5. harmonik frekansında döndürülmektedir. Hesaplamalarda 5.harmonik kompanzasyonu yapmak için gerçek ve sanal akımın DA bileşenin tersi kullanılarak referans akımları elde edilmektedir.



Şekil 3.40: SRY tabanlı YAY ile 5. harmonik akım kompanzasyonu için referans filtre akımlarının hesaplanması blok şeması.

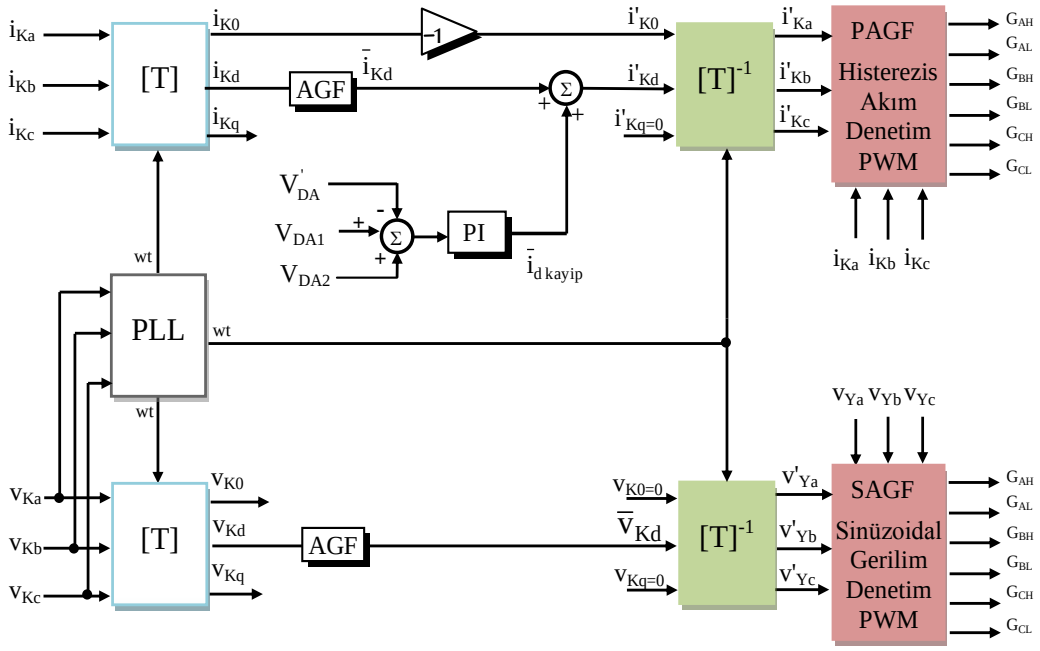
3.8.3. Önerilen SRY tabanlı KAY ile BGKD'nin denetimi ve simülasyonu

Bu bölümde, SRY tabanlı Kaynak Akımları ölçüm Yöntemi (KAY) ile BGKD denetim algoritmasının analizi ve simülasyon sonuçları verilmektedir. Literatürde [70, 71, 74, 90, 91] 3-fazlı 3-telli sistemler için bazı PAGF denetim algoritmaları bulunmaktadır. Bu çalışmada, 3-fazlı 4-telli sistemler için SRY tabanlı PAGF denetim algoritması kullanılmakta ve yeni bir SRY tabanlı SAGF denetim algoritması ise önerilmektedir.

Önerilen SRY tabanlı KAY ile BGKD'nin denetim algoritması, kaynak gerilimleri (v_{Kabc}), kaynak akımları (i_{Kabc}), yük gerilimleri (v_{Yabc}) ve DA bara gerilimi (V_{DA})

olmak üzere toplam dört ayrı noktadan ölçüm alınarak gerçekleştirilmektedir. SRY tabanlı KAY ile BGKD'nin denetim algoritması hem ölçüm sayısının az olması hem de denetim algoritmasının daha basit ve az işlem gerektirdiğinden ARGT tabanlı KAY ile BGKD denetim algoritmasına göre avantajlı sayılmaktadır. Ayrıca ölçüm sayısı daha az olduğu için SRY tabanlı KAY ile BGKD denetim algoritmasına göre de uygulanması oldukça kolaydır. Önerilen SRY tabanlı KAY ile BGKD'nin denetim algoritması, diğer denetim yöntemlerine göre daha kolay uygulanabilir yöntemdir.

Şekil 3.41'de önerilen SRY tabanlı KAY ile BGKD'nin denetim algoritması blok şeması görülmektedir. Denetim algoritması blok şemasında görüldüğü gibi SAGF ve PAGF denetim katlarında SRY tabanlı denetim yöntemi kullanılmaktadır.



Şekil 3.41: Önerilen SRY tabanlı KAY ile BGKD'nin denetim algoritması blok şeması.

Önerilen SRY tabanlı KAY ile BGKD'nin denetim algoritmasında, kaynak gerilimiyle senkron olabilmek için Şekil 3.5'de verilen PLL devresi kullanarak a-b-c koordinatlarında ki akım ve gerilimler d-q-0 koordinatlarına çevrilmektedir. Denklem 3.65'de verilen [T] çevrim matrisi ve PLL devresi ile üretilen ωt kullanarak kaynak gerilimlerinin Denklem 3.75'de, kaynak akımlarının Denklem 3.76'da görüldüğü gibi a-b-c koordinatlarından d-q-0 senkron referans koordinatlarına dönüşümü yapılmaktadır.

$$\begin{bmatrix} v_{K0} \\ v_{Kd} \\ v_{Kq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \\ T \\ \\ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{Ka} \\ v_{Kb} \\ v_{Kc} \end{bmatrix} \tag{3.75}$$

$$\begin{bmatrix} i_{K0} \\ i_{Kd} \\ i_{Kq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \\ T \\ \\ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Ka} \\ i_{Kb} \\ i_{Kc} \end{bmatrix} \tag{3.76}$$

3-fazlı doğrusal olmayan yük durumlarda, Denklem 3.72'de d-q-0 koordinatlarına dönüşümü yapılan "d" ve "q" eksenlerinde anlık kaynak akımları i_{Kd} ve i_{Kq} hem AA ($\tilde{i}_{Kd}$ ve $\tilde{i}_{Kq}$) hem de DA ($\bar{i}_{Kd}$ ve $\bar{i}_{Kq}$) bileşenleri içermektedir. i_{Kd} ve i_{Kq}'nun AA bileşenleri akımın harmonik ve negatif sıralı bileşeninden meydana gelmektedir. DA bileşenleri ise akımın pozitif sıralı bileşeninden oluşmakta ve aktif ve reaktif akımlara karşılık gelmektedir. Kaynak akımına ait sıfır sıralı akım i_{K0} ise yükün dengesiz olması durumunda oluşmaktadır.

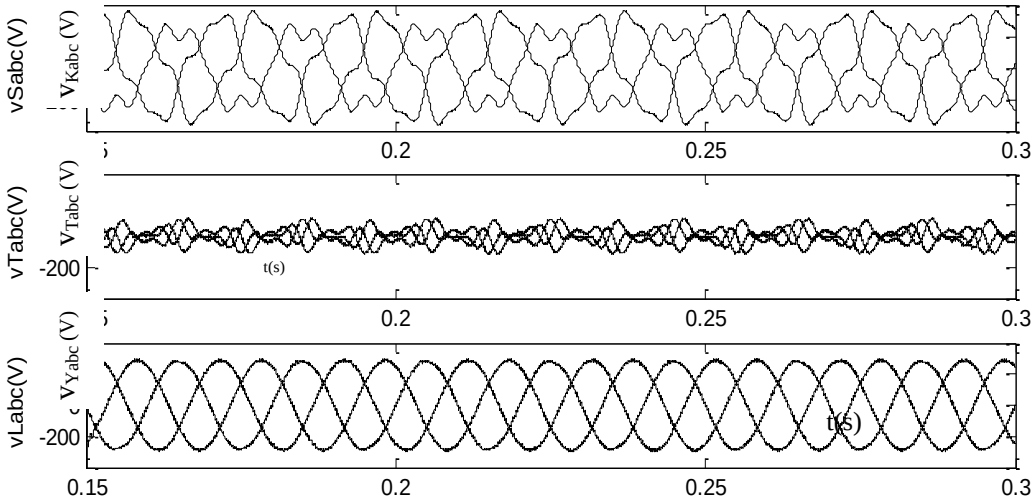
Önerilen SRY tabanlı KAY ile BGKD'nin denetim yönteminde yük akım harmoniklerinin ve dengesizliklerinin yok edilmesi ve reaktif güç kompanzasyonu gerçekleştirmek için kaynak akımına ait $\bar{i}_{Kd}$ ve i_{K0} bileşenleri kullanılmakta ve d-q-0 koordinatlarında yük akım harmoniklerini düzeltecek referans kaynak akımları (i'_{K0}, $i'_{K\alpha}$ ve $i'_{K\beta}$) üretilmektedir. $\bar{i}_{d\,kayip}$ akımı V_{DA} bara geriliminin PI denetleyici anlık akım çıkışı olup, filtre kayıplarını gidermek ve DA-bara hat gerilimi salınım ve değişimlerini azalmak amacıyla anlık $\bar{i}_{Kd}$ akım bileşenine ilave edilmektedir. Denklem 3.66'da verilen $[T]^{-1}$ ters çevrim matrisi ve PLL ile üretilen ωt kullanarak Denklem 3.77'de verildiği gibi referans filtre akımları i'_{Ka}, i'_{Kb} ve i'_{Kc} üretilmektedir.

$$\begin{bmatrix} i'_{Ka} \\ i'_{Kb} \\ i'_{Kc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \\ T \\ \\ \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} i_{K0} \\ i_{Kd} \\ i_{Kq} \end{bmatrix} \tag{3.77}$$

Böylece 3-fazlı 4-telli sistemlerde doğrusal olmayan yükün ürettiği nötr akımını, harmonikler ve reaktif güç kompanzasyonu yapacak referans kaynak akımları (i'_{K0}, $i'_{K\alpha}$ ve $i'_{K\beta}$) elde edilmektedir. PAGF denetim algoritması tarafından üretilen referans

kaynak akımları (i'_{Ka}, i'_{Kb} ve i'_{Kc}) ile kaynak hat akımları (i_{Ka}, i_{Kb} ve i_{Kc}) karşılaştırılmakta ve histerezis bant PWM tekniği kullanarak anahtarlama sinyalleri üretilmektedir. Önerilen SRY tabanlı KAY ile SAGF denetim kımı, Bölüm 3.8.2'de anlatıldığı gibi SRY tabanlı YAY ile SAGF denetim kısmı ile aynıdır.

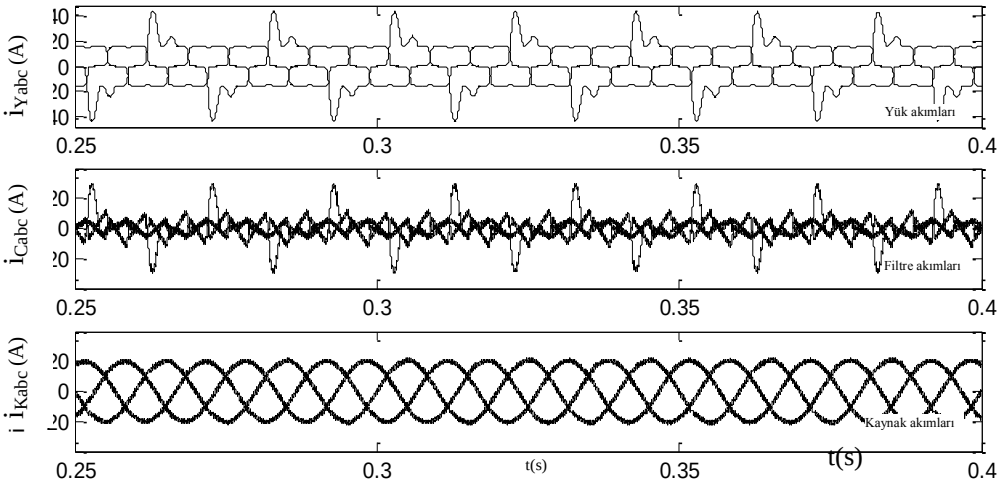
Aşağıda önerilen SRY tabanlı KAY ile BGKD'nin denetim algoritması ile Matlab/Simulink yazılımı ortamında yapılmış bazı simülasyon çalışmaları verilmektedir. Simülasyon çalışmalarında Tablo 3.3'de verilen parametreler kullanılmaktadır. Simülasyon, BGKD öncesi ve sonrası olmak üzere iki aşamalı gerçekleştirilmektedir. Ayrıca sistemin dinamik cevabını test etmek üzere %100 yük artışı da yapılmaktadır. BGKD devrede iken yük değişimi yapılarak sistemin dinamik cevabı test edilmektedir. Dengesiz ve harmonikli kaynak gerilimi ve dengesiz yük akımı durumu ayrı incelenmektedir. Şekil 3.42'de (a) dengesiz ve harmonikli kaynak gerilimleri (v_{Kabc}), (b) SAGF denetim algoritmasının ürettiği filtre gerilimleri (v_{Tabc}) ve (c) yük gerilimleri (v_{Yabc}), simülasyon sonuçları verilmektedir.



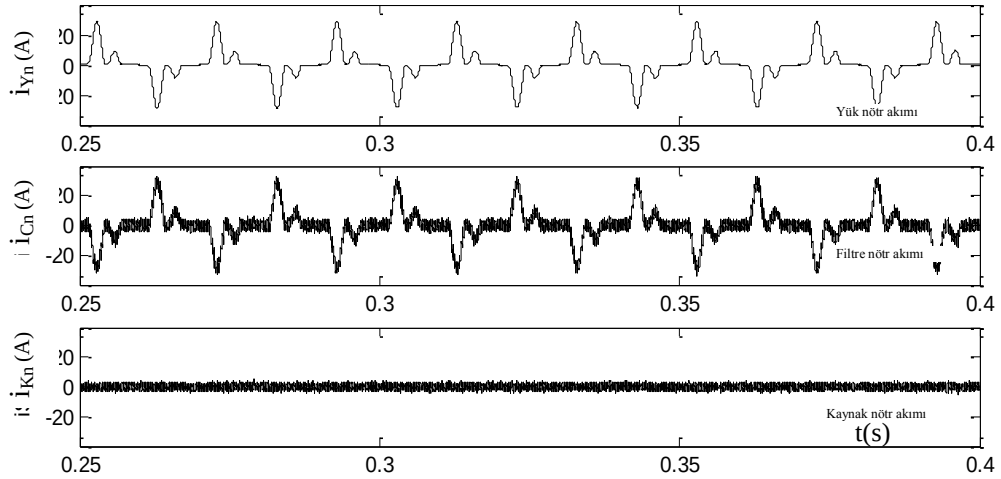
Şekil 3.42: (a) Dengesiz ve harmonikli kaynak gerilimleri, (b) SAGF denetim algoritmasının ürettiği filtre gerilimleri ve (c) yük gerilimleri simülasyon sonucu.

Simülasyonlarda, doğrusal olmayan yük olarak 3-fazlı 6-darbeli tam denetimli tristörlü yük kullanılmaktadır. Ayrıca fazlar arasında dengesizlik oluşturmak için fazlardan birine bağlanmış, 1-fazlı tam dalga diyotlu doğrultucu kullanılmaktadır. Böylece kaynaktan harmonikli ve dengesiz akım çekilmektedir.

Şekil 3.43'de önerilen SRY tabanlı KAY ile BGKD'nin denetim algoritması ile yapılan (a) dengesiz ve harmonikli yük akımları (i_{Yabc}), (b) PAGF denetim algoritmasının ürettiği filtre akımları (i_{Cabc}) ve (c) kaynak akımları (i_{Kabc}) simülasyon sonuçları verilmektedir. Şekil 3.44'de (a) yük nötr akımı (i_{Yn}), (b) filtre nötr akımı (i_{Cn}) ve (c) kaynak nötr akımı (i_{Kn}) kompanzasyonu simülasyon sonuçları verilmektedir.



Şekil 3.43: (a) dengesiz ve harmonikli yük akımları, (b) PAGF denetim algoritmasının ürettiği filtre akımları ve (c) kaynak akımları simülasyon sonuçları.

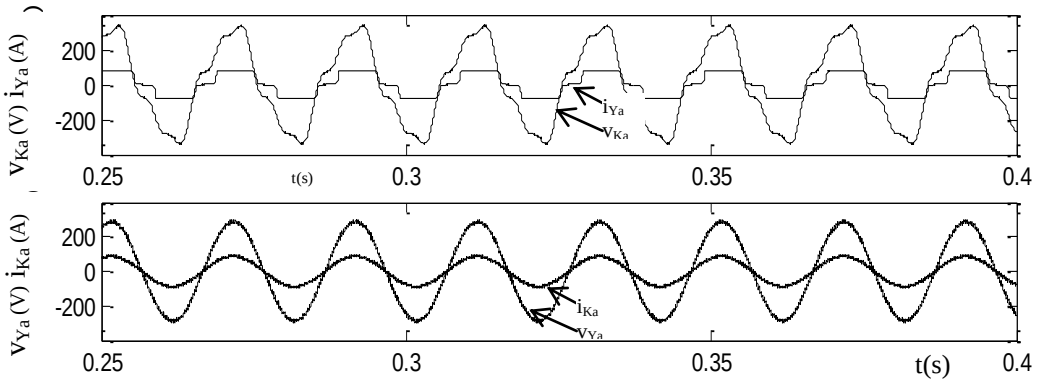


Şekil 3.44: (a) yük nötr akımı, (b) filtre nötr akımı ve (c) kaynak nötr akımı kompanzasyonu simülasyon sonuçları.

Elektrik sistemlerinde kullanılan yükün kapasitif veya endüktif bileşenler içermesinden dolayı, kaynaktan aktif akımlarla birlikte reaktif akımlarda çekilmektedir. İşletmelerde aktif işe ve enerjiye dönüşmeyen reaktif güçlerin, iletken

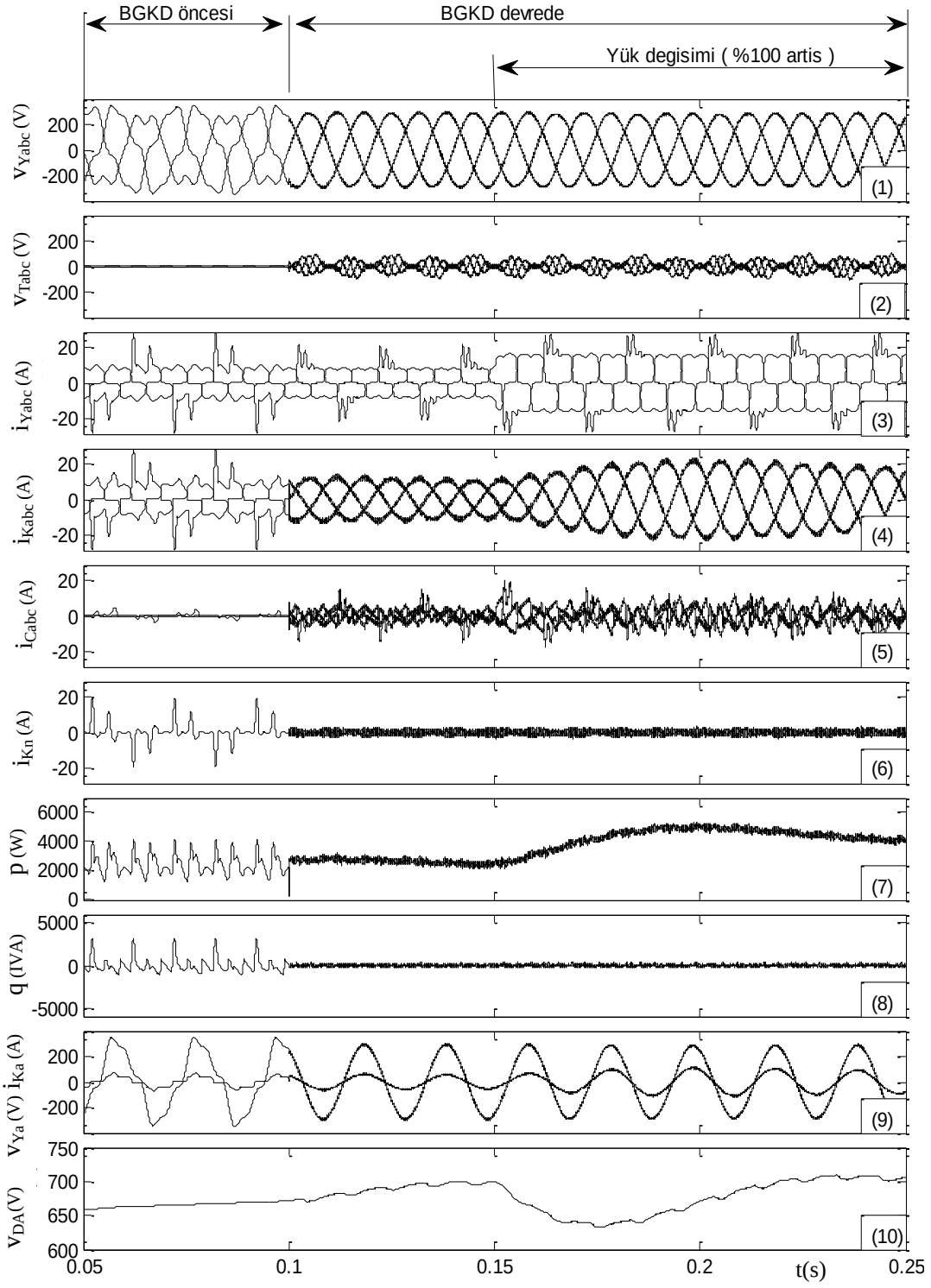
maliyetleri ve işletme masrafları olarak olumsuz etkileri görülmektedir. Bu nedenle elektrik güç sistemlerinde, reaktif güçlere sebep olan reaktif akımlar istenmeyen akımlardır. Yükün içerdiği kapasitif veya endüktif bileşenler gerilimle akım arasında faz farkının oluşmasına neden olmaktadır. Şekil 3.45'de harmonik ve reaktif akımların düzeltilmesine ait simülasyon sonuçları verilmektedir.

Şekil 3.45'de a-fazı için, (a) harmonikli kaynak gerilimi (v_{Ka}) ile birlikte harmonikli ve endüktif bileşen içerikli yük akımı (i_{Ya}), (b) harmoniği düzeltilmiş yük gerilimi (v_{Ya}) ile birilikte harmonik ve reaktif akımların düzeltilmiş kaynak akımı (i_{Ka}) simülasyon sonuçları verilmektedir. Şekil 3.45 (b)'de görüldüğü gibi kaynaktan çekilen akımın harmonik bileşenleri ve reaktif akım bileşeni yok edilerek gerilimle akım aynı faza getirilmektedir.

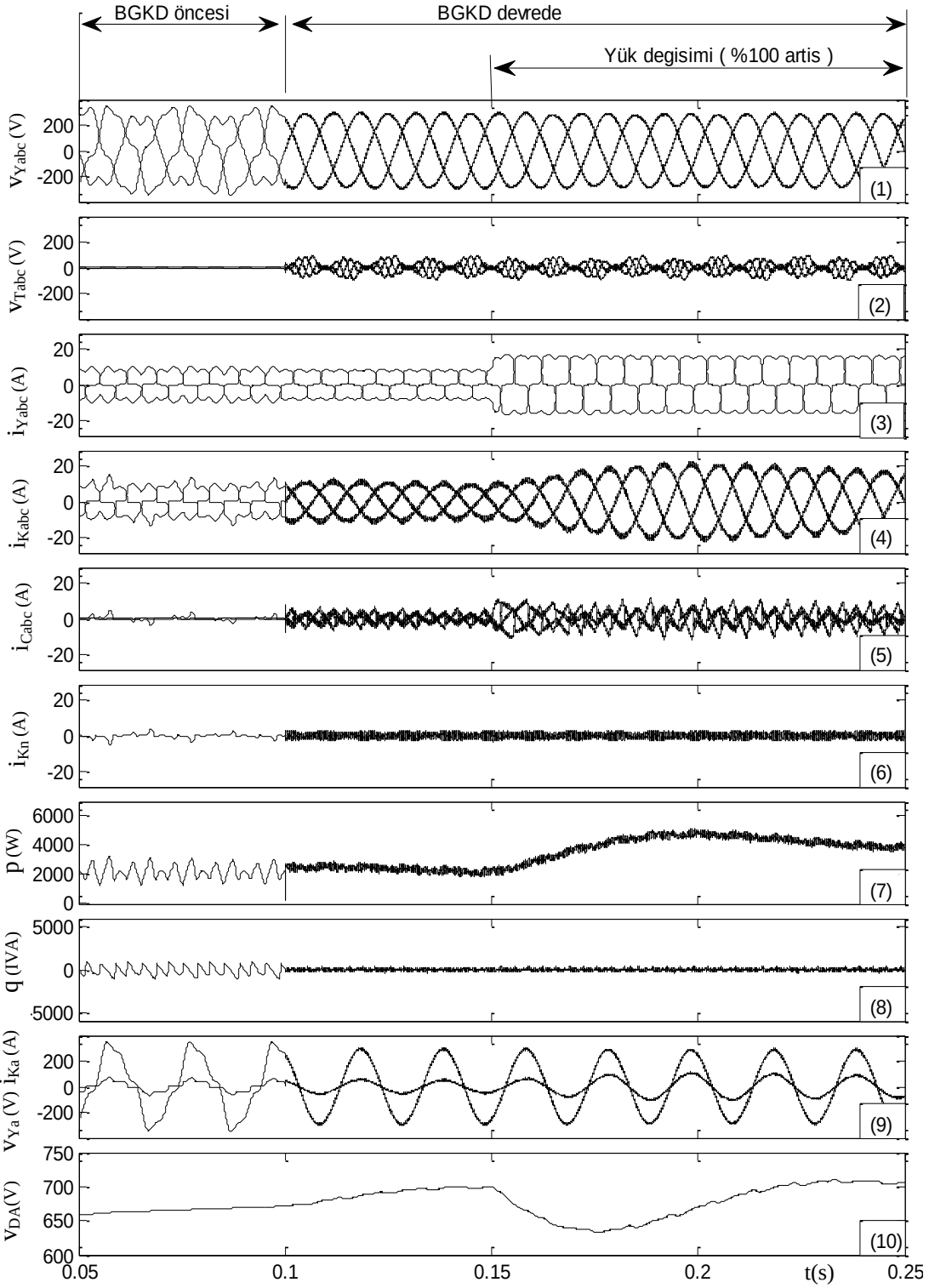


Şekil 3.45: Harmonik ve reaktif güç kompanzasyonu için, (a) a-fazı kaynak gerilimi ve yük akımı, (b) a-fazı yük gerilimi ve kaynak akımı simülasyon sonuçları.

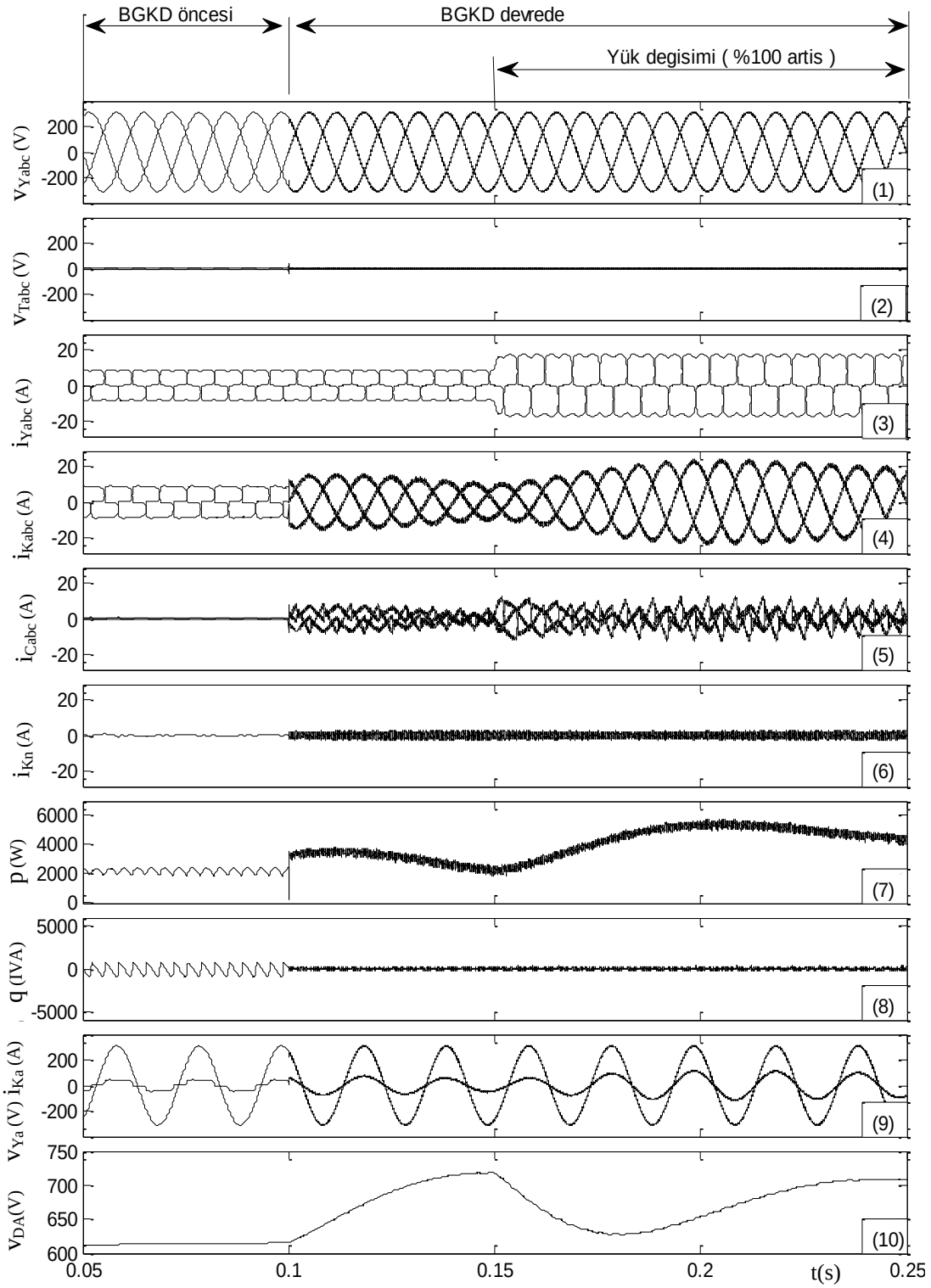
Önerilen SRY tabanlı KAY ile BGKD'nin denetim algoritması; Şekil 3.46'da dengesiz-harmonikli kaynak gerilimi ve dengesiz-doğrusal olmayan yük, Şekil 3.47'de dengesiz-harmonikli kaynak gerilimi ve dengeli-doğrusal olmayan yük, Şekil 3.48'de ideal kaynak gerilimi ve dengeli-doğrusal olmayan yük, Şekil 3.49'da ideal kaynak gerilimi ve dengesiz-doğrusal olmayan yük ve Şekil 3.50'de ideal kaynak gerilimi ve dengeli-doğrusal olmayan tam denetimli tristörlü yük koşullarında filtre öncesi, sonrası ve sistem dinamik cevabının test edildiği Matlab/Simulink simülasyon sonuçları verilmektedir. Tablo 3.5'de geleneksel ARGT tabanlı ve önerilen SRY tabanlı YAY ve KAY ile BGKD denetim algoritmalarının karşılaştırılması verilmektedir.



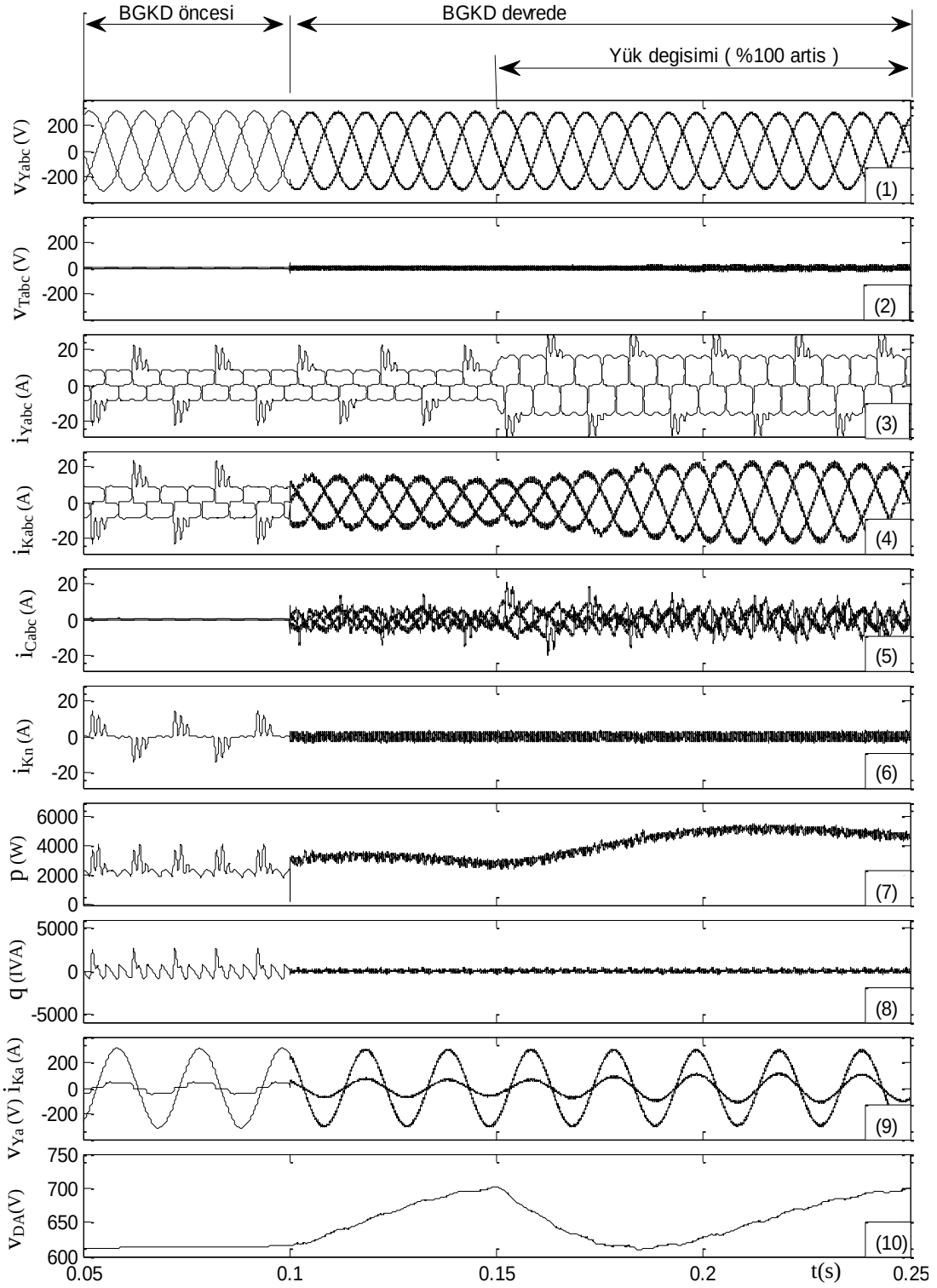
Şekil 3.46: Önerilen SRY tabanlı KAY ile BGKD'nin dengesiz-harmonikli kaynak gerilimi ve dengesiz-doğrusal olmayan yük koşullarında (1) Yük gerilimleri, (2) trafo gerilimleri, (3) yük akımları, (4) kaynak akımları, (5) filtre akımları, (6) kaynak nötr akımı, (7) aktif güç, (8) reaktif güç, (9) kaynak akımı ve yük gerilimi, (10) V_{DA} bara gerilimi simülasyon sonuçları.



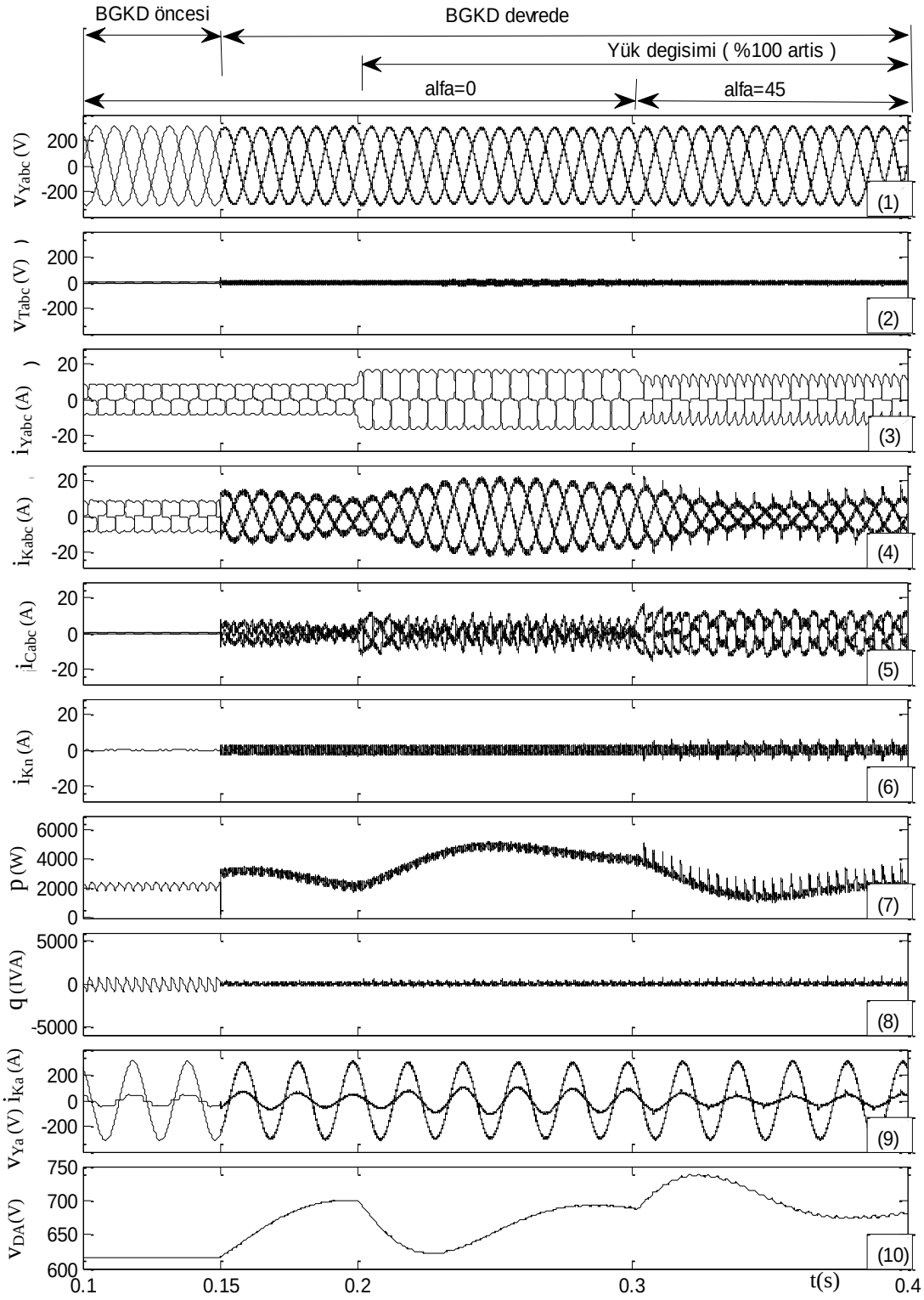
Şekil 3.47: Önerilen SRY tabanlı KAY ile BGKD'nin dengesiz-harmonikli kaynak gerilimi ve dengeli-doğrusal olmayan yük koşullarında (1) Yük gerilimleri, (2) trafo gerilimleri, (3) yük akımları, (4) kaynak akımları, (5) filtre akımları, (6) kaynak nötr akımı, (7) aktif güç, (8) reaktif güç, (9) kaynak akımı ve yük gerilimi, (10) V_{DA} bara gerilimi simülasyon sonuçları.



Şekil 3.48: Önerilen SRY tabanlı KAY ile BGKD'nin ideal kaynak gerilimi ve dengeli-doğrusal olmayan yük koşullarında (1) Yük gerilimleri, (2) trafo gerilimleri, (3) yük akımları, (4) kaynak akımları, (5) filtre akımları, (6) kaynak nötr akımı, (7) aktif güç, (8) reaktif güç, (9) kaynak akımı ve yük gerilimi, (10) V_{DA} bara gerilimi simülasyon sonuçları.



Şekil 3.49: Önerilen SRY tabanlı KAY ile BGKD'nin ideal kaynak gerilimi ve dengesiz-doğrusal olmayan yük koşullarında (1) Yük gerilimleri, (2) trafo gerilimleri, (3) yük akımları, (4) kaynak akımları, (5) filtre akımları, (6) kaynak nötr akımı, (7) aktif güç, (8) reaktif güç, (9) kaynak akımı ve yük gerilimi, (10) V_{DA} bara gerilimi simülasyon sonuçları.



Şekil 3.50: Önerilen SRY tabanlı KAY ile BGKD'nin ideal kaynak gerilimi ve dengeli-doğrusal olmayan tristörlü yük koşullarında (1) Yük gerilimleri, (2) trafo gerilimleri, (3) yük akımları, (4) kaynak akımları, (5) filtre akımları, (6) kaynak nötr akımı, (7) aktif güç, (8) reaktif güç, (9) kaynak akımı ve yük gerilimi, (10) V_{DA} bara gerilimi simülasyon sonuçları.

Tablo 3.5: Ortak bağlantı noktasında, geleneksel ARGT tabanlı ve önerilen SRY tabanlı YAY ve KAY ile BGKD denetim algoritmalarıyla alınan simülasyon sonuçların karşılaştırılması.

		BGKD Öncesi		**BGKD Devrede**								IEEE 519 Standardı	
				Geleneksel ARGT Tabanlı				**Önerilen SRY Tabanlı**					
				YAY ile Denetim		KAY ile Denetim		YAY ile Denetim		KAY ile Denetim			
	Fazlar	Akım (A)	Gerilim (V)	Akım (A)	Gerilim (V)	Akım (A)	Gerilim (V)	Akım (A)	Gerilim (V)	Akım (A)	Gerilim (V)	Akım (A)	Gerilim (V)
THB (%)	A	31,2	20.2	6,8	1,96	3,6	2,8	3,3	1,8	3,0	1,4	5.0	3.0
	B	31,7	17,7	7,0	2,7	3,7	2,5	3,2	1,44	3,1	1,4		
	C	29,9	19,7	7,5	3,16	3,7	2,9	3,4	1,0	3.3	1,3		
RMS	A	13,7	198	15,2	221	14,9	219	14,7	221	14,2	221	-	
	B	13,1	219	15,1	222	14,8	221	15,0	222	14,1	222		
	C	14,0	219	14,9	219	14,7	219	15,1	222	14,0	222		
	N	1,4	-	0,19	-	0,09	-	0,06	-	0,05	-		

3.9. Sonuç

Akagi ve arkadaşları tarafından önerilen ve aktif güç filtrelerinin en gelişmiş ve en yeni uygulaması olan BGKD, seri ve paralel aktif güç filtre sistemlerinin birlikte kullanılması ile oluşmaktadır. İki filtre sistemi birlikte kullanılarak güç kalitesi problemlerine daha etkin ve verimli çözüm sağlayan BGKD, kaynak geriliminin sebep olduğu güç kalitesi problemlerini ve doğrusal olmayan yük tarafından üretilen harmonik akımın kompanzasyonu yaparak harmonik akım izolasyonu sağlanmaktadır.

1983 yılında Akagi ve arkadaşları tarafından ileri sürülen ve hem geçici rejim hem de kararlı hal durumda geçerli olan ARGT, nötr hatlı veya nötr hatsız üç fazlı sistemlerde anlık akımların ve anlık gerilimlerin ölçülmesi ile anlık reaktif ve aktif güçlerin hesaplanması yöntemine dayanmaktadır. Bu yöntemde a-b-c koordinatlarındaki 3 fazlı akım ve gerilimlerin α-β-0 koordinatlarına skalar dönüşümü yapılmaktadır. Bu yöntem, güç hesaplama işlemlerinin daha basit olmasından dolayı aktif güç filtre uygulamalarında oldukça yaygın kullanılmaktadır.

1991 yılında S. Bhattacharya tarafından önerilen SRY, Şekil 3.5'de verilen bazı PLL yapıları kullanılarak a-b-c koordinatlarından d-q-0 senkron referans koordinatlarına dönüşüm yapmaktadır. Bu dönüşümlerde anlık hesaplama işlemlerinin daha basit olmasından dolayı aktif güç filtre uygulamalarında oldukça yaygın kullanılmaktadır. SRY tabanlı aktif güç filtre denetim algoritmasını kullanılarak sadece 3., 5. ve 7. harmonik gibi seçili harmonikler yok edilebildiğinden önemli avantaj sağlamaktadır.

Literatürde, aktif güç filtre uygulamalarında ve BGKD denetim algoritmalarında ARGT ve SRY tabanlı denetim algoritmaları sıklıkla kullanılmaktadır. Bu bölümde, SRY tabanlı yeni bir BGKD denetim algoritması önerilmekte ve geleneksel denetim algoritmaları ile karşılaştırılması yapılmaktadır. Yapılan simülasyon çalışmalarında alınan sonuçlar Tablo 3.5'de özetlenmektedir. ARGT tabanlı YAY, ARGT tabanlı KAY, SRY tabanlı YAY ve SRY tabanlı KAY ile BGKD denetim algoritmaları ile yapılan simülasyon çalışmaları açıklanmaktadır. Alınan simülasyon sonuçlarından ve Tablo 3.5'den anlaşıldığı üzere, hem ARGT tabanlı hem de SRY tabanlı KAY ile denetim, YAY ile denetime göre daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Tablo 3.5'de görüldüğü gibi a-fazı için geleneksel ARGT tabanlı YAY ile BGKD denetim algoritması uygulandığında %31,2 oranındaki kaynak akım harmoniği %6,8 oranına indirilmekte ve %20,2 oranındaki kaynak gerilim harmoniği %1,96 oranına düşürülmektedir. Geleneksel ARGT tabanlı KAY ile BGKD denetim algoritması uygulandığında %31,2 oranındaki kaynak akım harmoniği %3,6 oranına indirilmekte ve %20,2 oranındaki kaynak gerilim harmoniği %2,8 oranına düşürülmektedir. Önerilen SRY tabanlı YAY ile BGKD denetim algoritması uygulandığında %31,2 oranındaki kaynak akım harmoniği %3,3 oranına indirilmekte ve %20,2 oranındaki kaynak gerilim harmoniği %1,8 oranına düşürülmektedir. Önerilen SRY tabanlı KAY ile BGKD denetim algoritması uygulandığında %31,2 oranındaki kaynak akım harmoniği %3,0 oranına indirilmekte ve %20,2 oranındaki kaynak gerilim harmoniği %1,4 oranına düşürülmektedir.

Önerilen SRY tabanlı denetim yönteminde alınan simülasyon sonuçları geleneksel ARGT tabanlı denetim yönteminden alınan simülasyon sonuçlarına göre harmonikleri bastırması bakımında daha başarılı olduğu görülmektedir. Önerilen SRY tabanlı KAY ile BGKD denetim algoritması, önerilen SRY tabanlı YAY ile BGKD denetim algoritmasına göre, dengesiz ve harmonikli kaynak akımlarının

giderilmesi, dengesiz ve harmonikli kaynak gerilimlerinin bastırılması bakımından daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Ayrıca BGKD devreye girmeden önceki, devreye girdikten sonraki durum ve %100 yük değişiminde görülen dinamik cevabın oldukça iyi olduğu görülmektedir.

Sonuç olarak 3-fazlı 4-telli güç sistemlerinde farklı tipte güç kaitesi problemlerinde kullanılabilecek karmaşık hesaplamalar gerektirmeyen oldukça basit bir denetim yöntemi önerilmektedir. Önerilen SRY tabanlı denetim yöntemi ile geleneksel yöntemlerin karşılaştırılması ve elde edilen simülasyon sonuçları verilmektedir.

4. BİRLEŞİK GÜÇ KALİTE DÜZENLEYİCİSİNİN DENETİM VE ALTYAPI KARTLARININ TASARIMI

4.1. Giriş

Bu bölümde birleşik güç kalite düzenleyicisi'nin denetiminde kullanılan tüm donanım ve alt yapı çalışmalarının tasarımı ve hazırlanması anlatılmaktadır. BGKD denetim algoritmalarının yürütüldüğü merkezi karar verme birimi olan yeni bir sayısal işaret işlemci (DSP) denetim kartı tasarlanmaktadır. Deneysel çalışmalarda kaynak geriliminde daha yüksek gerilim kaynaklı harmonik ve güç kalitesi problemleri oluşturmak amacıyla şebekeye seri bağlı Harmonik Gerilim Kaynağı (HGK) tasarlanmaktadır. Tüm donanım ve denetim kartlarının tasarımı esnasında aşağıdaki ölçütlere dikkat edilmiştir.

- Optimum ve esnek tasarım; gerek ölçüm kartlarında gerek DSP destekli denetim kartlarında, gerektiğinde birden fazla işlevi yürütebilecek şekilde tasarım yapılmıştır.

- Seçenekli tasarım; uygulama ve denetim kartları birçok seçeneği barındıracak şekilde tasarlanmıştır. Örneğin, BGKD'nin deneysel çalışmalarında, farklı denetim algoritmalarının yürütülmesi ve çalıştırılması için seçenekli olarak gerekli tüm noktalardan akım ve gerilim sinyalleri alınmaktadır.

- Maksimum performans; kullanılan mikro denetleyiciler (PIC), sayısal işaret işlemciler, entegre devreler, IGBT sürücü kartları, IGBT, tristör vb.. kullanılan tüm devre elemanlarında üretici firmaların ilgili ürün katalogları dikkatli ve özenle incelenerek tasarım yapılmıştır.

- Sinyal bütünlüğü; tüm baskı devre (PCB-Printed Circuit Board) kartlarında, hat empedans oluşumlarından ve gerilim düşümlerinden kaçınmak için minimum hat uzunluğu, toprak hattı ve sinyal hatları üzerinde gürültülerin oluşmaması için devre elemanları mümkün olduğu kadar birbirine yakın tutularak ve düşük sinyal filtre devreleri kullanılarak tasarım yapılmıştır.

4.2. F28335 DSP Uygulama Geliştirme Kartının Tasarımı

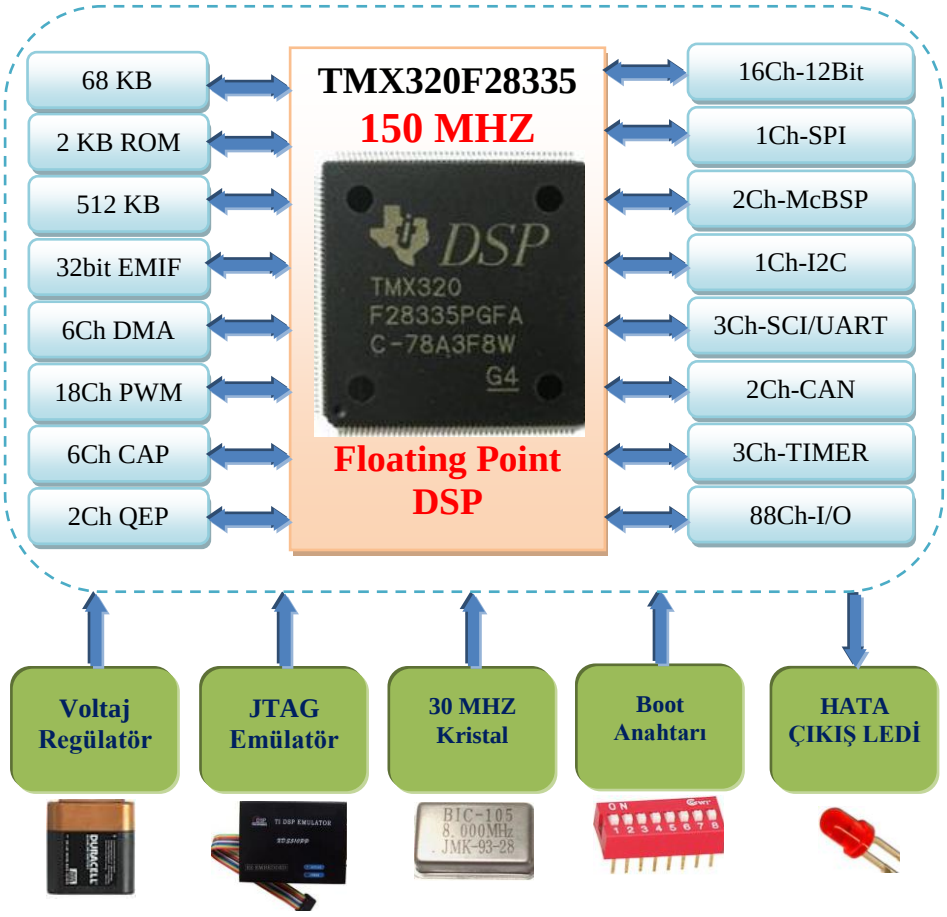
Sayısal işaret işlemciler, mühendislik tasarım ve analiz çalışmalarında, otomotiv sanayinde, sayısal haberleşme, görüntü işleme ve güç sistem uygulamalarında, deneysel çalışmalarda, laboratuar prototip geliştirme çalışmalarında ve endüstriyel tasarımlarda çok sık kullanılmaktadır. DSP tabanlı uygulama ve tasarım esnasında bu denetleyicinin iyi seçilmesi, uygulamaların verimli olması açısından önemlidir. DSP denetim kartları içinde merkezi denetim, karar verme ünitesi ve denetim algoritmalarının yürütüldüğü birim olduğundan, kullanılacak DSP'nin çevresel (peripheral) aygıtlarının, belleğinin (RAM-Random Access Memory) ve çalışma hızının yeterli olması gerekmektedir [42].

Yarı iletken teknolojisinde hızlı gelişmelere paralel olarak mikro işlemci ve sayısal işaret işlemcilerde büyük ilerlemeler kaydedilmektedir. DSP'lerin mikro işlemcilere göre en önemli üstünlükleri ADC, PWM, SPI, FLASH, SCI vs. gibi farklı çevresel birimleri içermesidir. Ayrıca DSP'ler paralel işlem yapabilme donanımlarına ve güçlü matematiksel işlem birimlerine sahiptir.

DSP tabanlı tasarımlarda kullanılacak çekirdeğin çalışma prensibinin iyi tespit edilmesi önemlidir. Çoğu DSP yongaları farklı çevresel birimler için farklı gerilim seviyelerine ihtiyaç duymaktadır. Ayrıca farklı gerilim yükselme zamanlarında çalışmaktadır. Örneğin TI C2000 ailesine ait F281x ve F24xx serilerinde çevresel birim ve merkezi çekirdeğin besleme gerilim yükselme zamanları farklıdır. Merkezi birim nominal çalışma gerilim seviyesine çıktıktan 200ms sonra çevresel birimler beslenmelidir. TI C2000 ailesinin yeni üyesi olan TMS320F28335 PGFA DSP yongasında yukarıda bahsedilen olumsuz durumlar ortadan kaldırılmıştır. TI C2000 ailesi DSP'ler çevresel giriş/çıkış birimi (I/O) 3,3 V gerilim seviyesinde ve analog sayısal dönüşüm (ADC) birimleri 1,9 V ve 3,3 V gerilim seviyesinde çalışabilmektedir. DSP merkezi işlem birimi maksimum 1,8 V - 1,9 V gerilim seviyesi aralığında çalışmaktadır [42].

BGKD denetim algoritmalarının yürütülmesi için tasarlanan DSP uygulama geliştirme kartında, TI firması tarafından geliştirilen işaret işleme ve sistem denetim alanında günümüzde en yeni ve güçlü bir işlemcisi olan TMS320F28335 PGFA DSP yongası kullanılmaktadır. Tasarlanan F28335 DSP uygulama geliştirme kartında

DSP çekirdeğini programlama, hata ayıklama ve gerçek zamanlı veri alış veriş işlemlerini yapabilmek için IEEE-1149.1 standardında tanımlanan JTAG portu kullanılmaktadır. Kart üzerinde DSP'nin çalışabilmesi için harici seçenekli olarak 30MHz kristal veya osilatör kullanılmaktadır. 30MHz kristal frekansı, DSP içerisindeki PLL modülü vasıtasıyla 5 katına kadar yükseltilerek DSP'nin 150 MHz veya ara frekanslarda çalışmasını sağlanmaktadır. Düşük frekanslı kristal kullanmaktaki amaç; DSP'nin gürültü ve elektromanyetik girişimlerinden (EMI) daha az etkilenmesini sağlanmaktır [42]. Şekil 4.1'de tasarlanan F28335 DSP uygulama geliştirme kartının genel blok diyagramı görülmektedir. Şekil 4.2'de BGKD denetim algoritmalarının yürütüldüğü kartın önden, arkadan ve yandan görünüm fotoğrafları verilmektedir.



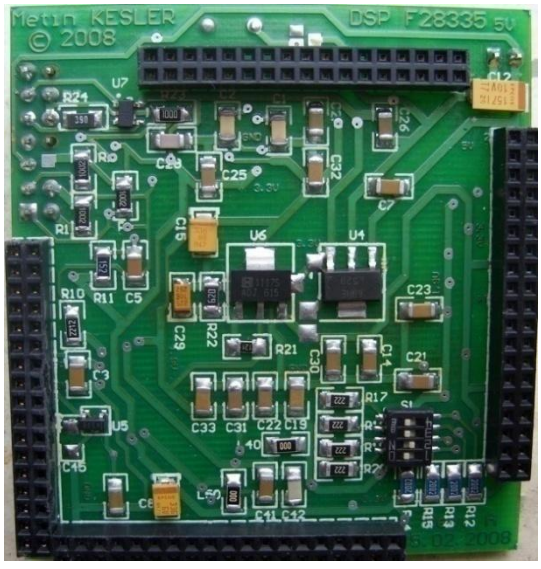
Şekil 4.1:Tasarlanan F28335 DSP uygulama geliştirme kartı genel blok şeması.

Tasarlanan F28335 DSP uygulama geliştirme kartında kullanılan, TI C2000 DSP çekirdek ailesine ait 32bit kayan noktalı (floating-point) ve saniyede 150 milyon

işlem yapabilen TMS320F28335 PGFA DSP yongasının temel özellikleri aşağıda listelenmektedir.

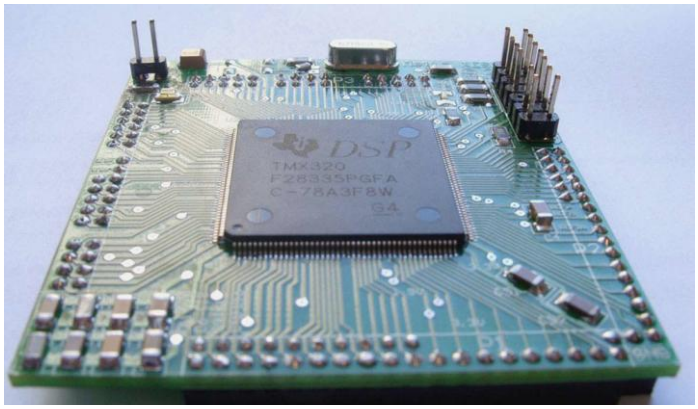
- 16 adet 12bit 25,5 MHz örnekleme hızında ADC,
- 18 adet motor denetim ve genel amaçlı PWM,
- 6 adet sinyal yakalama (CAP) ,
- 2 adet enkoder (QEP) ,
- 3 adet UART (SCI),
- 2 adet McBSP seri haberleşme protokolü,
- 2 adet CAN seri haberleşme protokolü,
- 1 adet SPI seri haberleşme protokolü,
- 3 adet 32bit zamanlayıcı (Timer),
- 88 adet genel amaçlı giriş-çıkış (I/O) birimi,
- 512KB FLASH bellek,
- 68 KB RAM bellek,
- 2KB ROM bellek,
- 14 adet CPU kesmesi (interrupt),
- 1 adet 6 kanallı DMA (Direct Memory Access) birimi,
- 1 adet 32 veya 16 bit EMIF (External Memory Interface) özelliklerinde çevresel birimler içermektedir.





(a) (b)

Şekil4.2: Tasarlanan F28335 DSP uygulama geliştirme kartının
(a) önden (b) arkadan (c) yandan görünüm fotoğrafları.



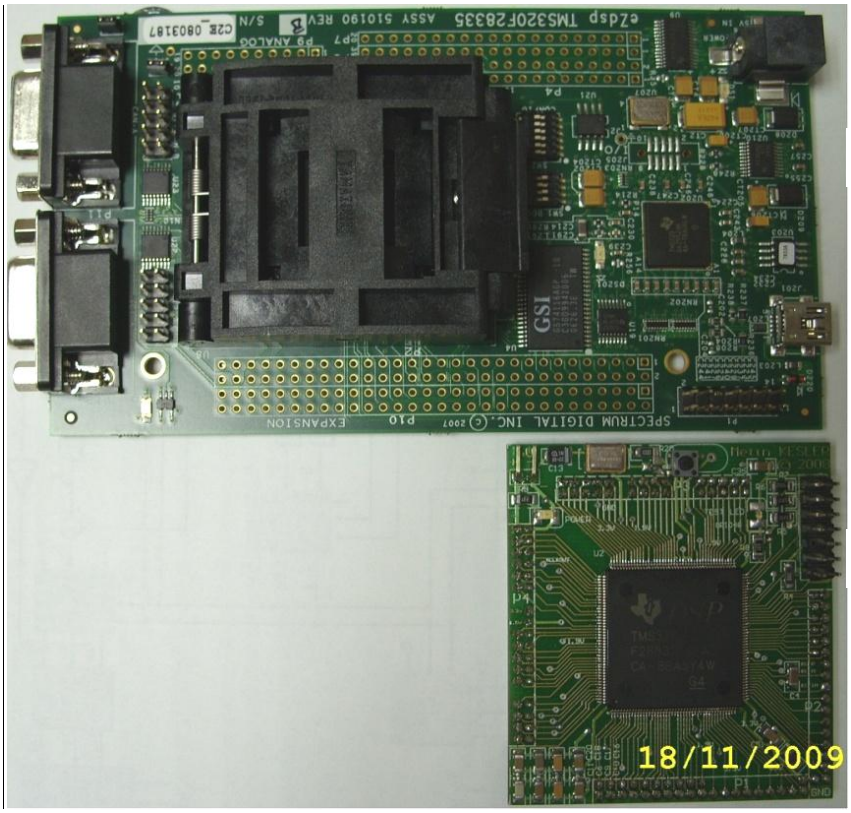
(c)

Şekil 4.2: (devam) Tasarlanan F28335 DSP uygulama geliştirme kartının (b) önden (b) arkadan (c) yandan görünüm fotoğrafları.

Tablo 4.1'de tasarlanan F28335 DSP uygulama geliştirme kartı ile Spectrum Digital firmasının aynı DSP yongasını kullanarak ürettiği eZdspF28335 DSK [80] ve piyasada en uyguna temin edilebilen Microchip firmasının yeni 32bit işlemcisi kullanarak ürettiği PIC32 Starter kit [81] kartlarının karşılaştırılması verilmektedir. Tablo 4.1'de uygulama kartlarında önemli olan ve avantaj sağlayan özelikler koyu renkle işaretlenmiştir. Tabloda DSP karşılaştırmaları fiyat ve performans kriterine göre değerlendirdiğimizde geliştirilen F28335 DSP uygulama geliştirme kartının avantajlı olduğu görülmektedir [42]. Şekil 4.3'de tasarlanan F28335 DSP kartı ve eZdspF28335 DSP kartının birlikte fotoğrafları verilmektedir.

Tablo 4.1: Uygulama geliştirme kartlarının karşılaştırılması.

	F28335 DSP	**eZdsp F28335**	**PIC32 MCU**
Fiyat	**45 $**	515 $	**50 $**
CPU	**32bit floating**	**32bit floating**	32bit fixed
Hız	**150 MHz**	**150 MHz**	80 MHz
RAM	**68 kB**	**68 kB**	32 kB
Flash	512 kB	512 kB	512 kB
Harici RAM	YOK	**2MB**	YOK
ADC	16 adet -**12bit 25 MHz**	16 adet -**12bit 25 MHz**	16 adet-10bit 500 kHz
GPIO	88 adet	88 adet	85 adet
PWM	**18 adet**	**18 adet**	5 adet
DMA	6 Adet	6 Adet	4 Adet
TIMER	3 Adet 32bit	3 Adet 32bit	5 Adet 16bit
JTAG	VAR-LPT	VAR-USB	VAR-USB
SPI	1 Adet	1 Adet	2 Adet
UART	3 Adet	3 Adet	2 Adet



Şekil 4.3: (a) eZdsp F28335 DSK (b) tasarlanan F28335 DSP kartı fotoğrafları.

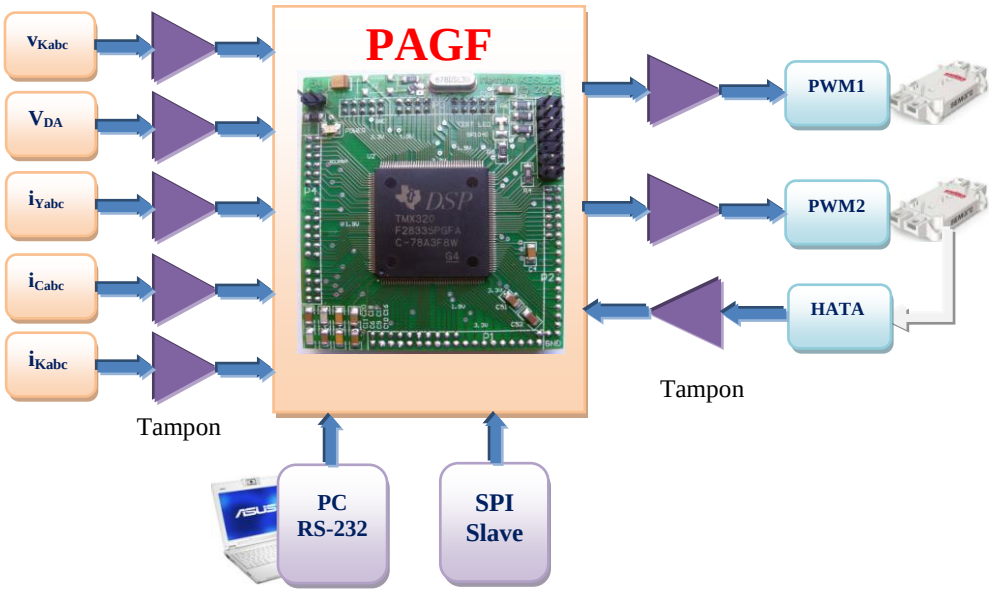
4.3. F28335 DSP Ana Kartının Tasarımı

BGKD deneysel çalışmalarda, PAGF, SAGF ve FFT denetim algoritmalarını yürütmek için 3 adet F28335 DSP uygulama geliştirme kartı kullanılmaktadır. BGKD deneysel çalışmalarda SAGF, PAGF ve FFT birimlerinin tasarlanan ana kartta DSP'lerin birlikte etkin çalışması ve veri iletişimi sağlaması amacı ile SPI (seri çevresel ara yüz) kullanılmaktadır. Bu katların görevleri aşağıda detaylı olarak açıklamaktadır.

4.3.1. Paralel aktif güç filtre denetim katının tasarımı

PAGF DSP denetim katı ile yük akımları (i_{Yabc}), kaynak akımları (i_{Kabc}), filtre akımları (i_{Cabc}), kaynak gerilimleri (v_{Kabc}) ve DA-bara (V_{DA}) hat gerilimi ölçülerek harmonik akım, reaktif güç kompanzasyonu, nötr akımı kompanzasyonu ve DA-bara hat gerilim regülasyonu yapacak denetim algoritmaları yürütülmektedir. Bilgisayar destekli denetim ve eşzamanlı veri alışverişi sağlamak amacıyla RS-232 seri veri iletişim kanalı kullanılmaktadır. Ayrıca diğer DSP denetim katları ile entegre çalışması ve veri iletişimi sağlaması amacıyla SPI kanalı kullanılmaktadır.

Paralel aktif güç filtre denetim çıkış katında iki adet 3-fazlı 6-darbeli IGBT sürücü katını denetlemek amacı ile PWM çıkış katı ve güç katında oluşabilecek herhangi bir arıza durumunda anahtarlama sinyallerini kesebilecek hata denetim (TRIP) katı kullanılmaktadır. Şekil 4.4'de PAGF-DSP denetim katı genel blok şeması görülmektedir.

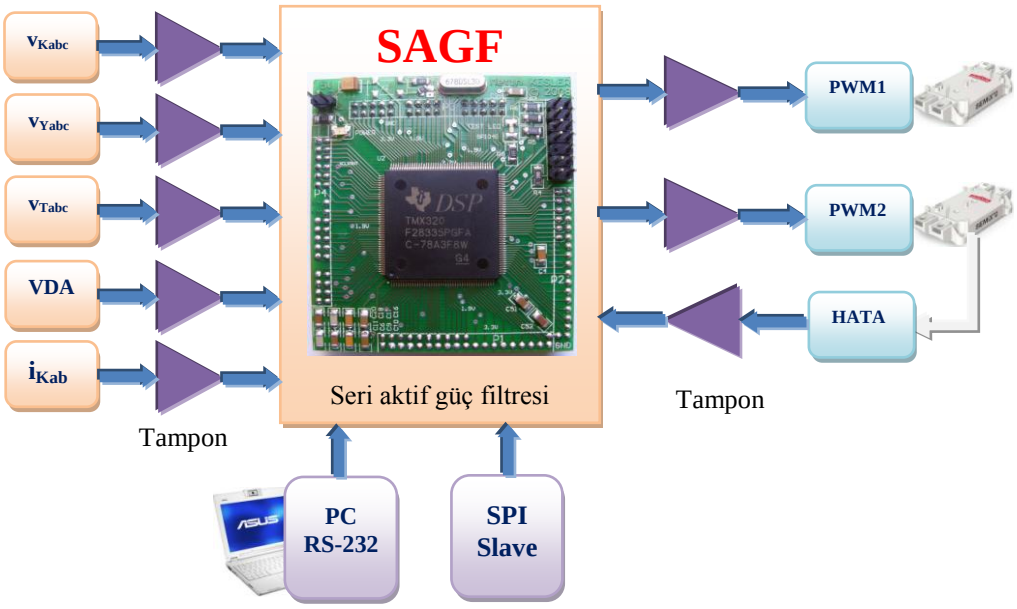


Şekil 4.4: PAGF-DSP denetim katının genel blok şeması.

4.3.2. Seri aktif güç filtre denetim katının tasarımı

SAGF DSP denetim katı ile şebeke gerilimleri (v_{Kabc}), yük gerilimleri (v_{Yabc}), filtre trafo gerilimleri (v_{Tabc}) ve kaynak akımları (i_{Kabc}) ölçülerek kaynak gerilimindeki çukur ve tepeler, gerilim kesilmeleri, geçici rejim gerilim bileşenleri, kaynak gerilimindeki dengesizlikler, gerilim harmonik kompanzasyonu için gerekli denetim algoritmaları yürütülmektedir.

Bilgisayar destekli denetim ve eşzaman veri alışverişi sağlamak için RS-232 seri veri iletişim kanalı kullanılmaktadır. Ayrıca diğer DSP denetim ara katları ile entegre çalışması ve veri iletişimi sağlaması amacı ile SPI kanalı kullanılmaktadır. Seri aktif güç filtre denetim çıkış katında iki adet 3-fazlı 6-darbeli IGBT sürücü katını denetlemek amacı ile PWM çıkış katı ve güç katında oluşabilecek herhangi bir arıza durumunda anahtarlama sinyallerini kesebilecek hata denetim (TRIP) katı kullanılmaktadır. Şekil 4.5'de SAGF-DSP denetim katı genel blok şeması görülmektedir.

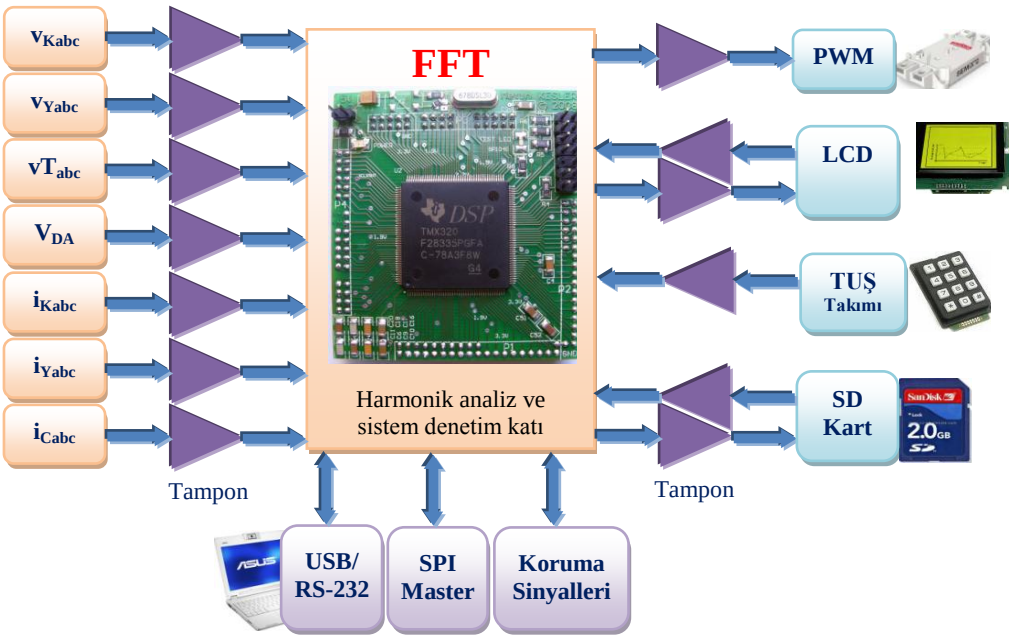


Şekil 4.5: SAGF-DSP denetim katının genel blok şeması.

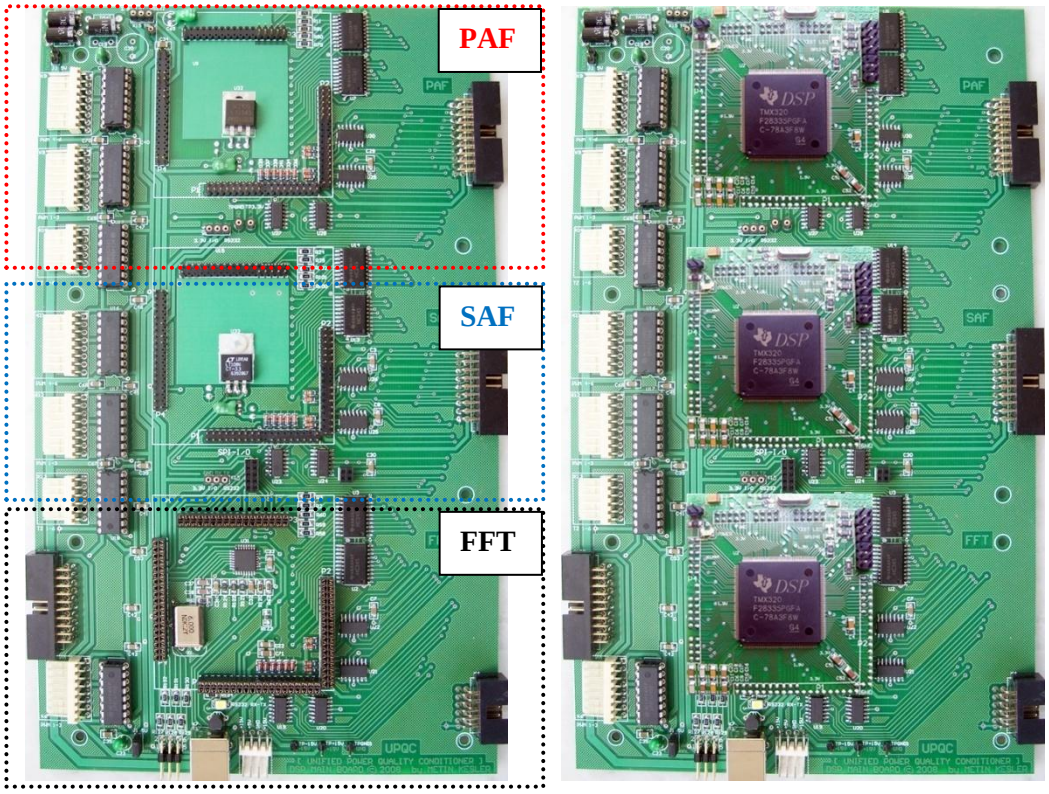
4.3.3. FFT-Harmonik analiz ve sistem denetim katının tasarımı

FFT harmonik analiz ve sistem denetim DSP katı ile, kaynak gerilimleri (v_{Kabc}), yük gerilimleri (v_{Yabc}), filtre trafo gerilimleri (v_{Tabc}), kaynak akımları (i_{Kabc}), yük akımları (i_{Yabc}), filtre akımları (i_{Cabc}) ve DA-bara (V_{DA}) hat gerilimi ölçülerek BGKD sisteminin tam analizi için FFT algoritmaları yürütülerek güç kalitesi analizi ve sistem denetimi yapılmaktadır.

FFT harmonik analiz ve sistem denetim DSP katı, sisteme ait tüm akım ve gerilim bilgilerini okuyarak aşırı akım, aşırı gerilim ve herhangi bir hata oluşması durumunda müdahale ederek sistemin güvenli çalışmasını sağlamaktadır. Bilgisayar ile veri alışverişi ve programsal denetim amacı ile RS-232 seri veri iletişim kanalı kullanılmaktadır. Ayrıca diğer DSP katları ile entegre çalışması ve veri iletişimi sağlaması amacı ile ana denetleyici olarak SPI kanalı kullanılmaktadır. FFT algoritmaları yürütülerek elde edilen sisteme ait harmonik bilgiler grafik LCD katına aktarılarak görsel hale dönüştürülmektedir. Ayrıca SD hafıza kart vasıtasıyla istenilen akım veya gerilim bilgileri kayıt tutularak saklamaktadır. Şekil 4.6'da FFT ve sistem denetim DSP katının genel blok şeması ve Şekil 4.7'de üç katın birlikte kullanılması için tasarlanan BGKD DSP ana kartın fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 4.6: FFT-Sistem denetim ve harmonik analiz katı genel blok şeması.

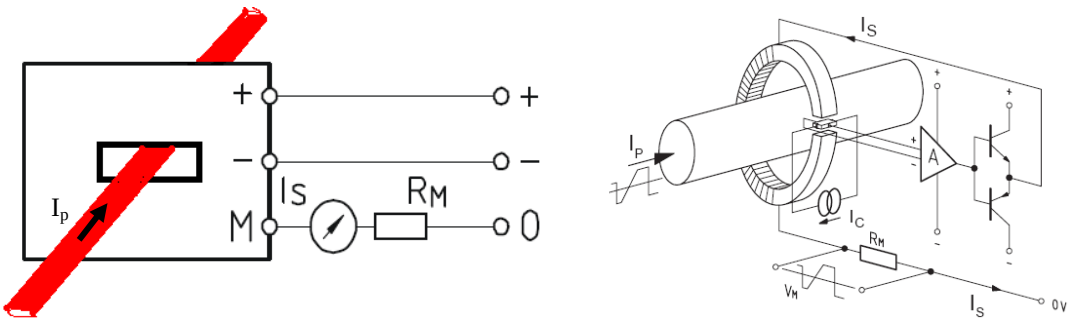


Şekil 4.7: F28335 DSP ana kartı fotoğrafı.

4.4. Akım Ölçüm Ana Kartının Tasarımı

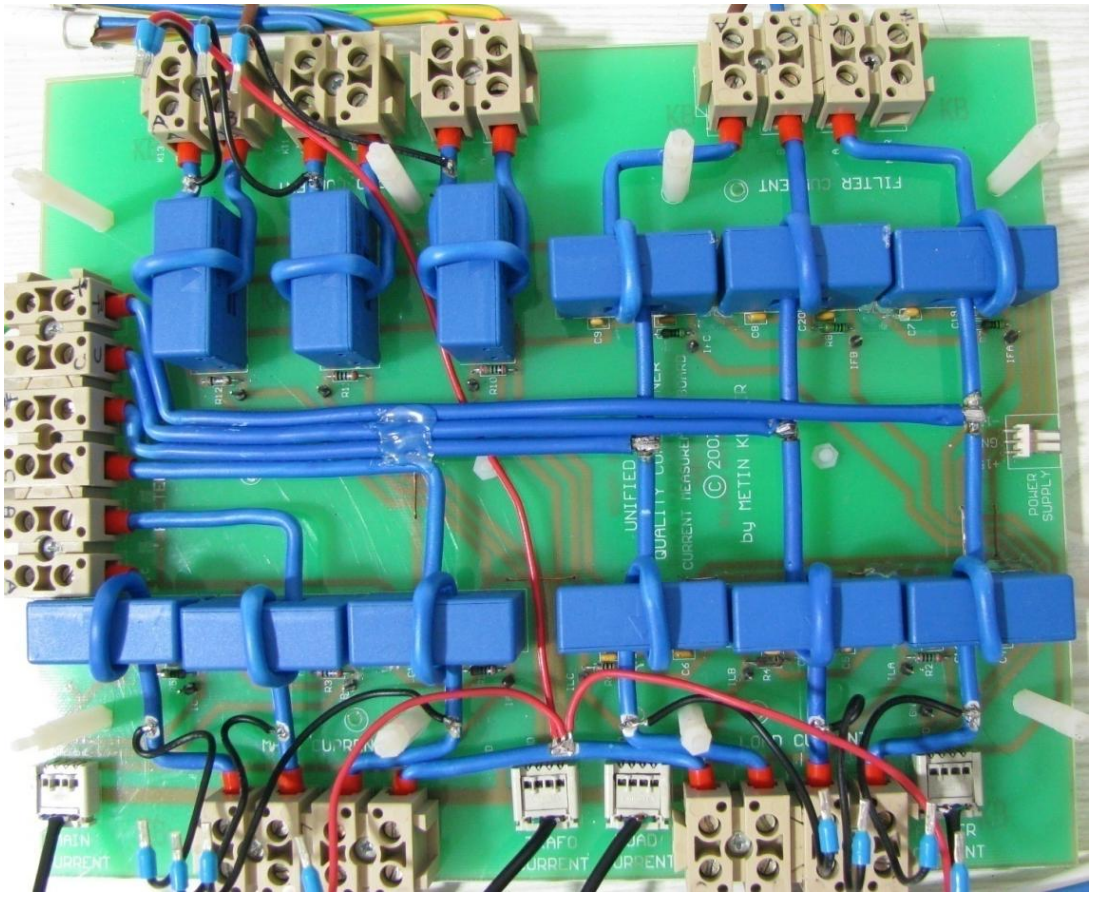
BGKD laboratuar düzeneğinde kaynak akımları (i_{Kabc}), yük akımları (i_{Yabc}), PAGF filtre akımların (i_{Cabc}) ve SAGF filtre akımların (i_{Tabc}) ölçülmesinde LEM LA55-P/SP1 (0-100A, 1:2000 dönüştürme oranı) akım sensörleri kullanılmaktadır. Bu tip hall etkili akım sensörleri elektrik güç sisteminden galvanik olarak yalıtım sağlamaktadır. LEM akım sensörü, hassas ölçüm, çok iyi doğrusallık, geniş frekans aralığı (DA–200 kHz), ideal cevap zamanı, düşük sıcaklık sapması, aşırı akım kapasitesi ve dış etkenlerden çok az etkilenmesi gibi teknik özelliklerinden dolayı güç elektroniği uygulamalarında çok tercih edilmektedir [40, 41].

LEM akım sensörü, içerdiği hall levhası sayesinde akımı algılar. Hall levhasının uçlarında, manyetik alanın yönüne ve şiddetine bağlı olarak bir gerilim meydana gelir. Manyetik alan dik ve algılayıcı düzlemden dışarı doğru uygulandığında, çıkış gerilimi algılayıcının manyetik yoğunluğunun genliği ile orantılı miktarda artar. Şekil 4.8'de (a) LEM akım sensörünün bağlantı ve (b) çalışma prensibi devre şekli görülmektedir. LEM akım sensörünün orta boşluğundan iletken geçirilip bu iletkenden akım akıtıldığında primer akımı (I_p) olarak adlandırılan ve bu akım tarafından üretilen magnetik akı, sekonder sargıdan geçen akım tarafından üretilen destekleyici akı ile dengelenir. Alan etkisi levhası ve kullanıldığı elektronik devrede +Vcc ve -Vcc besleme kaynağı tarafından sekonder I_s akımını üretilmektedir. Bu I_s akımı, örnekleme direnci (R_m) üzerinde I_p ile orantılı gerilim düşümü oluşturulmaktadır. Böylece sensörün orta boşluğundaki iletkenden akıtılan akımın orantılı ve izoleli ölçümü yapılmaktadır. Şekil 4.9'da LEM LA55-P/SP1 akım sensörleri kullanılarak tasarlanan akım ölçüm ana kartının fotoğrafı verilmektedir.



(a) (b)

Şekil 4.8: (a) LEM akım sensörünün bağlantı (b) çalışma prensibi devre şekli.



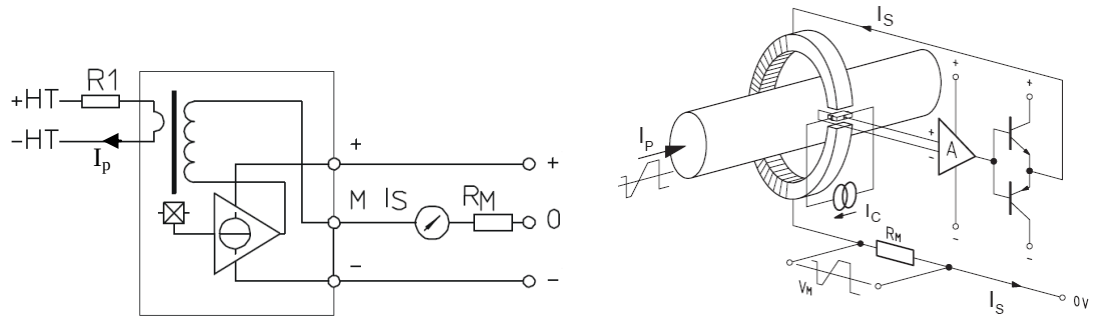
Şekil 4.9: Akım ölçüm ana kartı fotoğrafı.

4.5. Gerilim Ölçüm Ana Kartının Tasarımı

BGKD laboratuar düzeneğinde kaynak gerilimleri (v_{Kabc}), yük gerilimleri (v_{Yabc}), SAGF filtre hat gerilimleri (v_{Tabc}) ve DA-bara hat (V_{DA}) gerilimi ölçülmesinde LEM LV25-P (10-500V, 2500:1000 dönüştürme oranı) hall etkili gerilim sensörleri kullanılmaktadır. Bu gerilim sensörleri elektrik güç sisteminden galvanik olarak yalıtım sağlamaktadır. LEM gerilim sensörleri, hassas ölçüm, çok iyi doğrusallık, geniş frekans aralığı (DA–200 kHz), ideal cevap zamanı, düşük sıcaklık sapması ve dış etkenlerden çok az etkilenmesi gibi teknik özelliklerinden dolayı güç elektroniği uygulamalarında çok tercih edilmektedir.

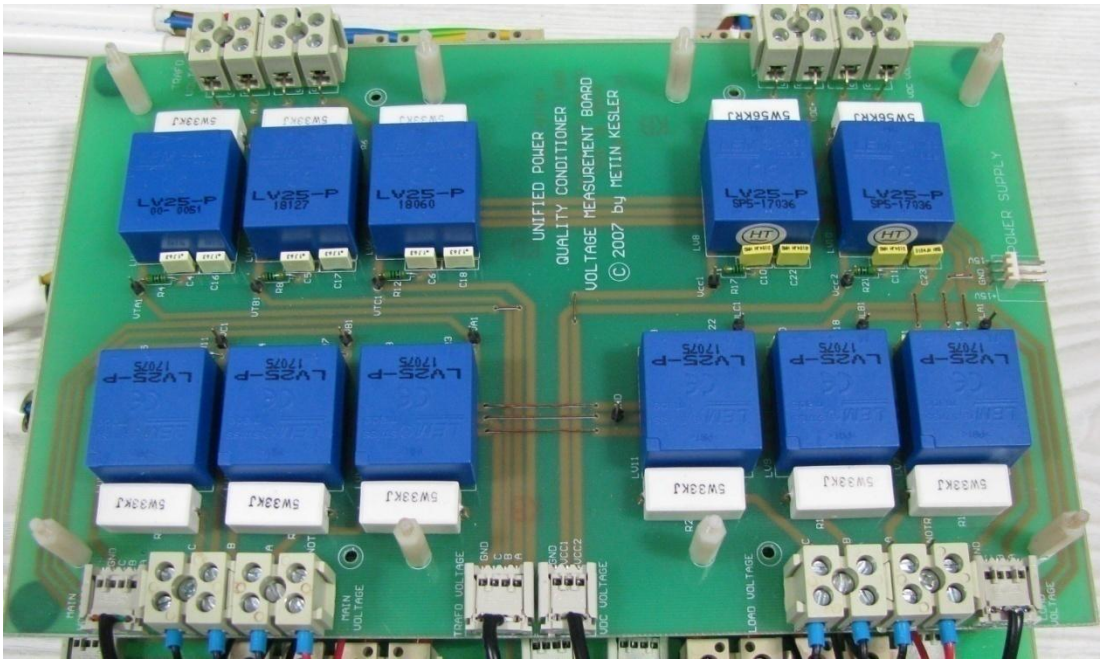
Şekil 4.10'da (a) LEM gerilim sensörün bağlantı ve (b) çalışma prensibi devre şekli görülmektedir. LEM gerilim sensörün +HT ve -HT uçları ölçülmesi istenen yüksek gerilime bağlanmaktadır. LEM LV25-P gerilim sensörünün katalog değerinde, ölçülecek gerilime göre +HT ucuna seri R1 direnç bağlanarak maksimum 10mA akım akıtılması sağlanmaktadır. Primer akımı (I_p) olarak adlandırılan R1 direnci

üzerinden akan bu akım tarafından üretilen magnetik akı, sekonder sargıdan geçen akım tarafından üretilen destekleyici akı ile dengelenir. Alan etkisi levhası ve kullanıldığı elektronik devrede +Vcc ve -Vcc besleme kaynağı tarafından sekonder I_s akımını üretilmektedir. Bu I_s akımı, örnekleme direnci (R_m) üzerinde I_p akımı ve dolayısıyla I_p akımına sebep olan +HT ve -HT uçlarına bağlı yüksek gerilim ile orantılı gerilim düşümü oluşturmaktadır. Böylece +HT ve -HT uçlarına bağlı yüksek gerilimin orantılı ve izoleli ölçümü yapılmaktadır. Şekil 4.10'da LEM LV25 gerilim sensörün (a) bağlantı (b) çalışma prensibi devre şekli verilmektedir. Şekil 4.11'de LEM LV25 gerilim sensörleri kullanılarak tasarlanan gerilim ölçüm ana kartının fotoğrafı verilmektedir.



(a) (b)

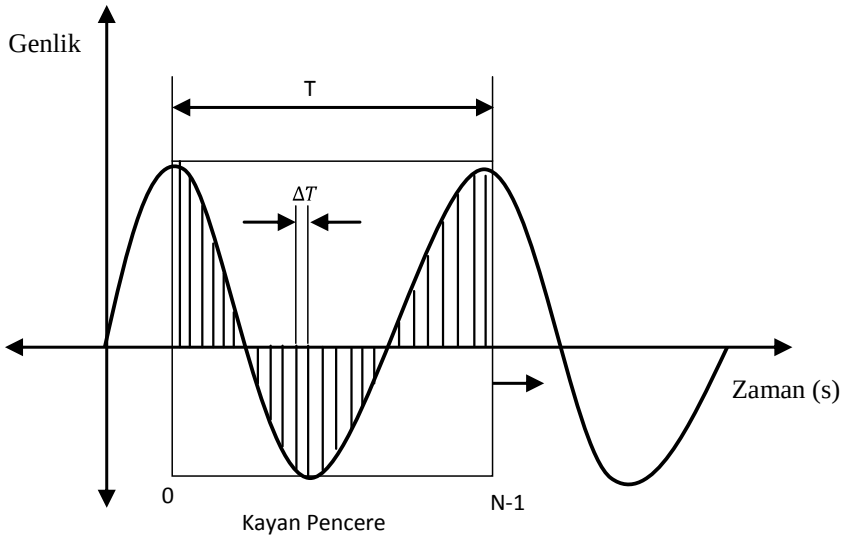
Şekil 4.10: (a) LEM gerilim sensörünün bağlantı (b) çalışma prensibi devre şekli.



Şekil 4.11: Gerilim ölçüm ana kartı fotoğrafı.

4.6. Sinyal Düzenleyici Ana Kartının Tasarımı

Sayısal işaret işlemciler sürekli zaman analog sinyallerini ayrık zaman sinyale çevirerek işlem yapmaktadır. Sürekli zaman analog sinyaller sabit zaman (ΔT) aralıklarıyla kayıt edilerek ayrık zaman sinyaline dönüştürülmektedir. Örneğin bir analog sinyali saniyede 15 bin defa sabit (ΔT) aralıkla kayıt yaparsak 15kHz ile örneklemiş oluruz. Şekil 4.12'de sürekli zaman sinyalin kayan pencere yöntemi ile örneklenerek ayrık sinyale çevirme tekniği verilmektedir [42].

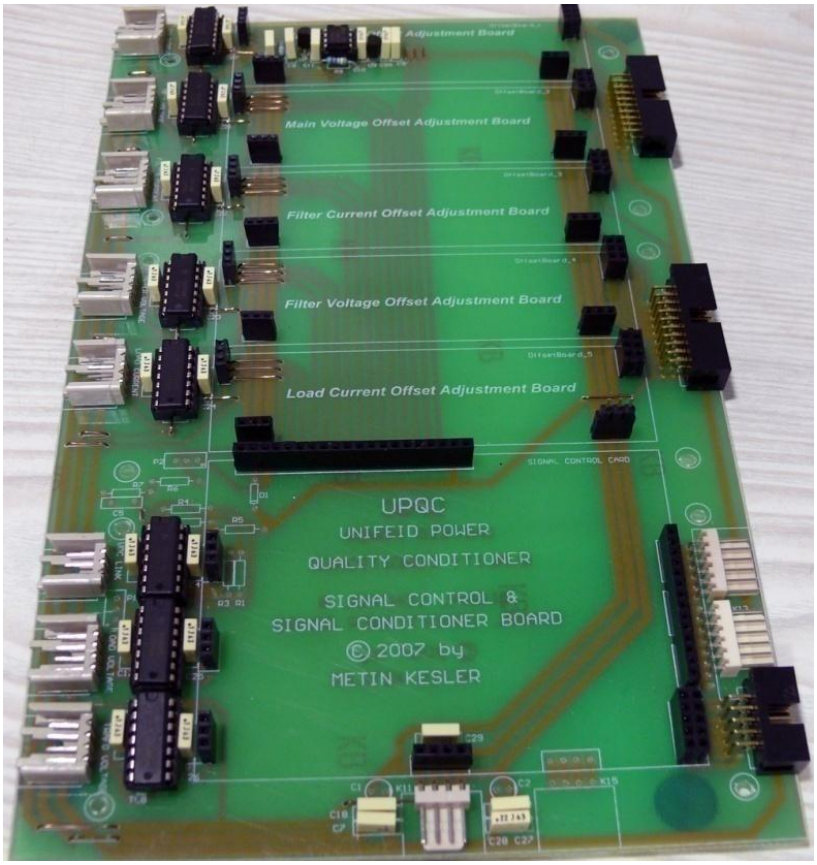


Şekil 4.12: Sürekli zaman sinyalin örneklenmesi.

DSP çekirdeğindeki dahili ADC (Analog Digital Converter - Analog Sayısal Dönüştürücü) yalnızca 0-3V arası analog sinyalleri sayısal değerlere çevirebilmektedir. Bu yüzden alternatif akım sinyalinin negatif alternansı işlenememektedir. Bu sorun iki şekilde giderilebilir, birincisi, AA sinyali analog devreler vasıtasıyla, sinyalin tamamı pozitif olacak şekilde sıfır eksenin üzerine kaydırılarak DSP tarafından ölçüm alınabilir. Bu yöntemin dezavantajı örneklenecek sinyalin çözünürlüğünün düşmesi ve DSP içerisinde yazılımla tekrar alternatif akıma çevrilmesi için sinyalin sıfır noktasının iyi tespit edilmesinin gerekliliğidir. Aksi halde sinyal yanlış örneklenebilir. İkinci yöntem ise AA sinyalini tam dalga doğrultucudan geçirerek DA sinyaline çevirmektedir. DA'a çevrilen bu sinyalin pozitif ve negatif alternanslarını ayırt etmek için ayrı bir işaret sinyali üretilmektedir. Tam dalga DA'a çevrilen sinyaller DSP'nin analog girişlerine ve üretilen işaret sinyali ise DSP'nin sayısal girişlerine uygulanmaktadır. DSP yazılımı içerisinde

ölçülen her sinyalin işaretine bakılarak sinyal tekrar AA sinyaline dönüştürülmektedir. Bu yöntemin avantajı sinyal örneklendiğinde çözünürlüğü korunmaktadır. Dezavantajı ise kullanılan her bir ADC için ilave sayısal girişe ihtiyaç duyulmaktadır [42].

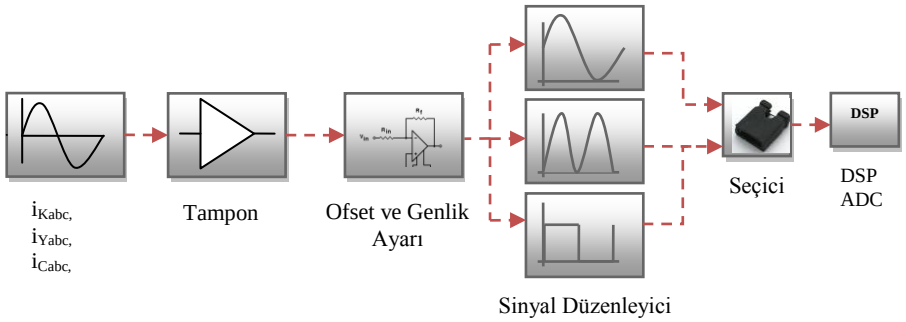
Sinyal düzenleyici ana kartında; gerilim ölçüm ana kartından ve akım ölçüm ana kartından gelen BGKD denetim sistemine ait tüm akım ve gerilim sinyalleri alınarak DSP ana kartına gönderilmeden önce gerekli koşullama ve düzenlemeler yapılmaktadır. Ayrıca sinyal düzenleyici ana kartı, sisteme ait tüm akım ve gerilim bilgilerini denetleyerek ve hata kontrolü yaparak sistemin güvenli çalışmasını sağlamaktadır. Sinyal düzenleyici ana kartı üzerinde; akım sinyal düzenleyici kartı, gerilim sinyal düzenleyici kartı, V_{DA} gerilim sinyal düzenleyici ve sistem denetim ve hata koruma kartı olmak üzere dört ayrı modül içermektedir. Aşağıda bu modüllerin kısa açıklamaları verilmektedir. Şekil 4.13'de sinyal düzenleyici ana kartının modülsüz fotoğrafı verilmektedir.



Şekil 4.13: Sinyal düzenleyici ana kartının modülsüz fotoğrafı.

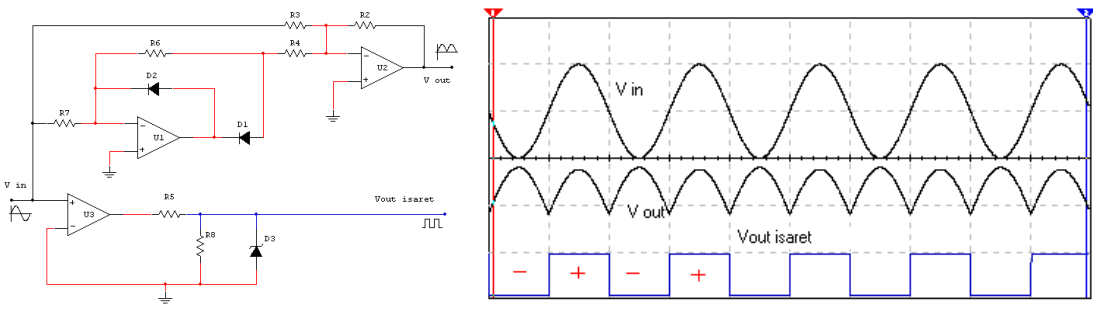
4.6.1. Akım sinyal düzenleyici kartı

Akım sinyal düzenleyici kartı, kaynak akımları (i_{Kabc}), yük akımları (i_{Yabc}) ve PAGF filtre akımlarının (i_{Cabc}) ölçülmesinde kullanılmaktadır. Şekil 4.14'de tasarlanan akım sinyal düzenleyici kartının genel blok diyagramı verilmektedir.



Şekil 4.14: Akım sinyal düzenleyici kartı blok diyagramı.

Ölçülen her bir akım sinyali, önce tampon devresinden geçirilerek anlık aşırı sinyal yükselmelerine karşı önlem alınmaktadır. Daha sonra sıfır seviye ve genlik ayarlarının yapıldığı sinyal düzenleme bölümünde DSP için uygun sinyal seviyeleri elde edilmektedir. Sıfır seviye ve genlik ayarlarından sonra sinyaller DA sinyaline çevrilmektedir. DA'a çevrilme işlemi seçenekli olarak iki şekilde yapılmaktadır. Birinci seçenekte, AA sinyali analog devreler vasıtasıyla, sinyalin tamamı pozitif olacak şekilde sıfır eksenin üzerine kaydırılarak DA'a çevrilmektedir. İkinci seçenekte ise, tam dalga doğrultucu kullanılmakta ve analog çıkışlarla birlikte, sinyalin pozitif ve negatif yarım dalgaları ayırt edici sayısal işaretlerde üretilmektedir. Şekil 4.15(a)'da ölçülen her sinyal için analog ve sayısal işaretlerin üretildiği devre şeması (b)'de sinyal çıkışları verilmektedir. V_{in} AA sinyal, V_{out} DA sinyal ve kare dalga sinyal ise V_{out} sinyalinin pozitif ve negatif yarım dalgalarını ayırt edici sayısal işaretlerdir [40].



Şekil 4.15: Ölçülen her sinyal için analog ve sayısal sinyallerin üretilmesi.

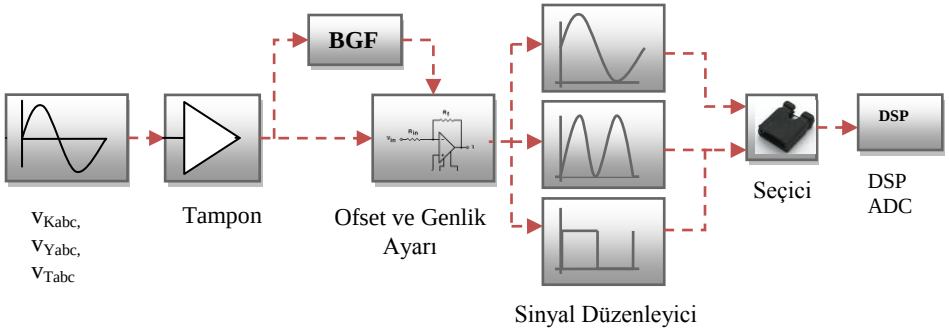
DA'a çevrilen analog sinyaller DSP katının analog girişine ve sayısal sinyaller ise DSP katının sayısal girişlerine uygulanmaktadır. DSP içerisinde yazılım ile DA sinyali, sayısal işaretine (yarım dalga ayırt edici sinyaline) bakılarak tekrar AA sinyaline dönüştürülmektedir. Şekil 4.16'da tasarlanan akım sinyal düzenleyici kartının fotoğrafı verilmektedir.



Şekil 4.16: Akım sinyal düzenleyici kartının fotoğrafı.

4.6.2. Gerilim sinyal düzenleyici kartı

Gerilim sinyal düzenleyici kartı, kaynak gerilimleri (v_{Kabc}), yük gerilimleri (v_{Yabc}) ve SAGF filtre gerilimleri (v_{Tabc}) ölçülmesinde kullanılmaktadır. Şekil 4.16'da tasarlanan gerilim sinyal düzenleyici kartının genel blok diyagramı verilmektedir.



Şekil 4.17: Gerilim sinyal düzenleyici kartı blok diyagramı.

Gerilim ölçüm ana kartından ölçülen her bir faz-nötr gerilim sinyalleri, önce tampon devresinden geçirilerek anlık aşırı sinyal yükselmelerine karşı önlem alınmaktadır. Daha sonra seçenekli özellik olan bant geçiren filtre (BGF) ile temel frekans dışındaki gerilim harmonikleri filtrelenmektedir. Doğrudan tampon çıkışı veya isteğe göre kullanılan BGF çıkışı tampon, sıfır seviye ve genlik ayarlarının yapıldığı sinyal düzenleme bölümünde DSP için uygun sinyal sevileri elde edilmektedir. Sıfır seviye ve genlik ayarlarından sonra sinyaller DA sinyaline çevrilmektedir. DA'a çevrilme

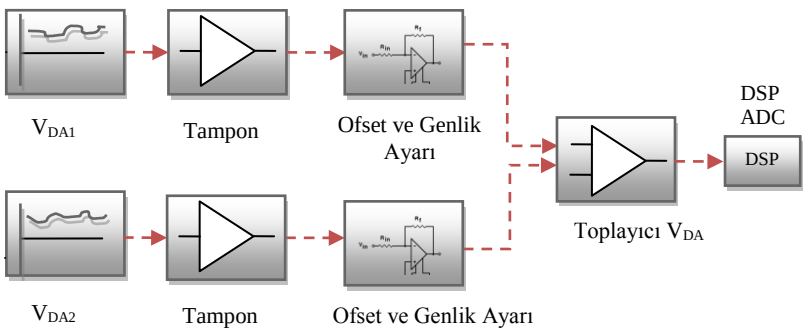
işlemi seçenekli olarak iki şekilde yapılmaktadır. Birinci seçenekte, AA sinyali analog devreler vasıtasıyla, sinyalin tamamı pozitif olacak şekilde sıfır eksenin üzerine kaydırılarak DA'a çevrilmektedir. İkinci seçenekte ise, Şekil 4.15'de verildiği gibi tam dalga doğrultucu kullanılmakta ve analog çıkışlarla birlikte, sinyalin pozitif ve negatif yarım dalgaları ayırt edici sayısal işaretler de üretilmektedir. DA'a çevrilen analog sinyaller DSP katının analog ve pozitif ve negatif yarım dalgaları ayırt edici sayısal sinyaller ise DSP katının sayısal girişlerine uygulanmaktadır. Şekil 4.18'de tasarlanan gerilim sinyal düzenleyici kartının fotoğrafı verilmektedir.



Şekil 4.18: Gerilim sinyal düzenleyici kartının fotoğrafı.

4.6.3. V_{DA} gerilim sinyal düzenleyici kartı

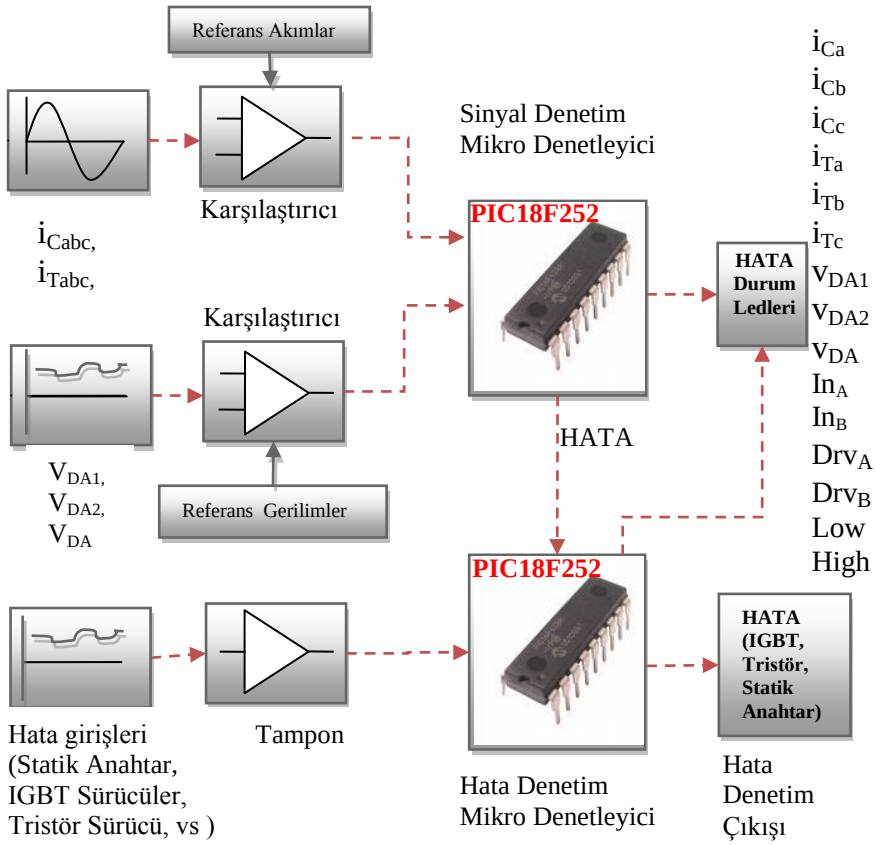
DA bara üzerinde seri ve orta noktaları nötr hattına bağlı C1 ve C2 kondansatörleri üzerindeki gerilimler ayrı LEM LV25-P gerilim ölçüm sensörü ile ölçülmektedir. Gerilim ölçüm ana kartından alınan C1 için V_{DA1} ve C2 için V_{DA2} sinyalleri önce tampon devresinden geçirilerek anlık aşırı sinyal yükselmelerine karşı önlem alınmaktadır. Sıfır seviye ve genlik ayarlarından sonra sinyaller toplama devresinde toplanarak DSP 'ye V_{DA} sinyali olarak iletilmektedir. Şekil 4.19'da V_{DA} gerilim ölçüm katı genel blok diyagramı verilmektedir.



Şekil 4.19: V_{DA} gerim ölçüm katı genel blok diyagramı.

4.6.4. Sinyal denetim ve hata koruma kartı

Sinyal denetim ve hata koruma kartı, BGKD sistem denetim kartlarında oluşabilecek aşırı akım, aşırı gerilime karşı koruma yapmakta, IGBT sürücü, tristör sürücü ve statik anahtarların denetimini yapmakta ve sistemin emniyetli çalışması sağlanmaktadır. Sinyal denetim ve hata koruma kartında, sistemin emniyetli çalışmasını sağlamak için sinyal denetim ve hata denetim işlevlerini yürüten iki adet PIC18F252 mikro denetleyici kullanılmaktadır. Şekil 4.20'de sinyal denetim ve hata denetim kartı blok diyagramı verilmektedir.



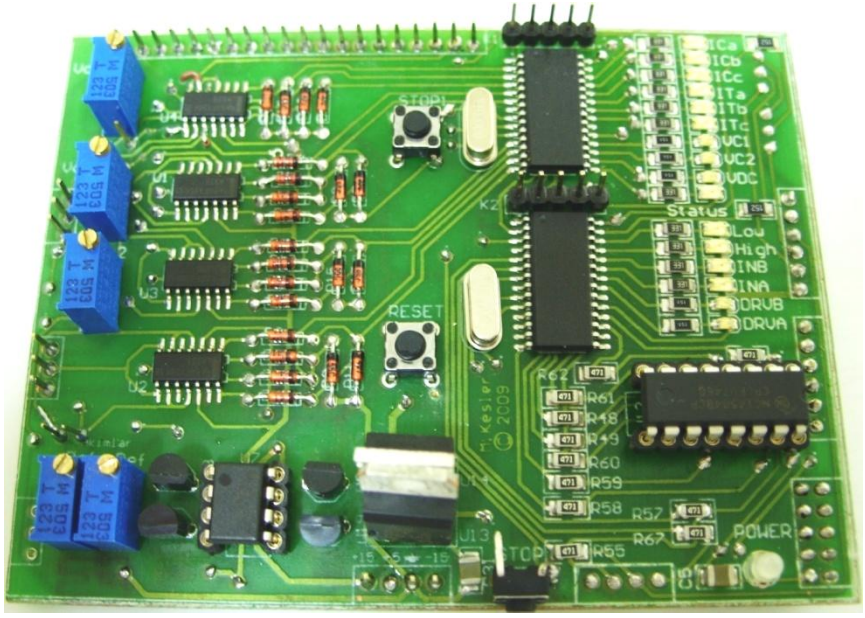
Şekil 4.20: Sinyal denetim ve hata denetim kartı blok diyagramı.

Sinyal denetim ve hata denetim kartında, entegre devreler kullanarak akım ölçüm ana kartından alınan PAGF filtre akım (i_{Cabc}) ve SAGF filtre akım (i_{Tabc}) sinyallerini belirlenen referans akımlarla karşılaştırılarak aşırı akımların oluşması durumunda hata sinyali üretilmekte ve sinyal denetleme işlevini yapan mikro denetleyiciye gönderilmektedir.

Aynı şekilde gerilim ölçüm ana kartından alınan DA-bara C1 ve C2 kondansatör (V_{DA1} ve V_{DA2}) gerilim sinyallerini belirlenen referans gerilimlerle karşılaştırarak aşırı gerilimler oluşması durumda hata sinyali üretilmekte ve sinyal denetleme işlevini yapan mikro denetleyiciye gönderilmektedir.

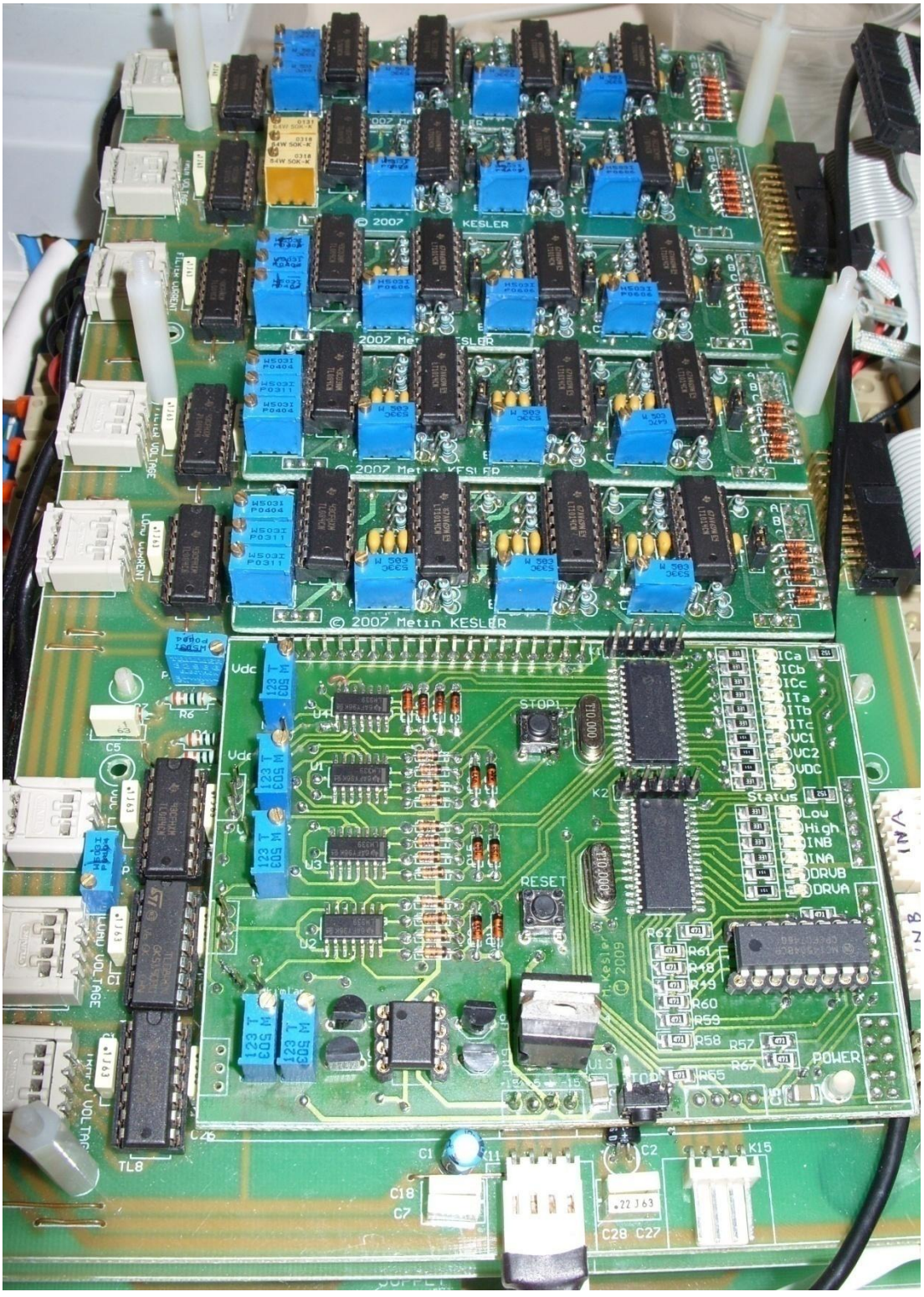
Sinyal denetleme işlevini yapan mikro denetleyici, sürekli olarak (i_{Cabc}), (i_{Tabc}) ve (v_{DA1} ve v_{DA2}) hata sinyal girişlerini denetim etmekte ve herhangi hata oluşması durumunda ilgili hataya göre hata durum LED'i yanmaktadır. Örneğin, PAGF filtre akımlarında (i_{Cabc}), a-fazına ait i_{Ca} akımında oluşan aşırı akım durumunda sinyal denetleme işlevini yapan mikro denetleyici i_{Ca} LED'ini yakmaktadır. Ayrıca hata denetim mikro denetleyiciye hata (TRIP) sinyali göndermektedir.

Hata denetim işlevini yapan mikro denetleyici, sürekli olarak IGBT sürücü, tristör sürücü ve statik anahtarlardan ve sinyal denetleme işlemini yapan mikro denetleyiciden gelen hata sinyal girişlerini denetim etmekte ve herhangi hata oluşması durumunda ilgili hataya göre sürücü devrelerine hata çıkış sinyali üretmektedir. Örneğin, PAGF filtre akımlarında (i_{Cabc}), a-fazına ait i_{Ca} akımında oluşan aşırı akım durumunda sinyal denetleme işlevini yapan mikro denetleyiciden hata sinyali geldiğinde PAGF filtre katına ait IGBT sürücü kartına kesinti hata sinyali göndermektedir. Böylece sistemin güvenli çalışması sağlanmaktadır. Şekil 4.21'de tasarlanan sinyal denetim ve hata denetim kartının fotoğrafı verilmektedir.



Şekil 4.21: Sinyal denetim ve hata denetim kartı fotoğrafı.

Şekil 4.22'de tasarlanan sinyal düzenleyici ana kartının modülleri olan; akım sinyal düzenleyici kartı, gerilim sinyal düzenleyici kartı, V_{DA} gerilim sinyal düzenleyici ve sistem denetim ve hata denetim kartları ile birlikte fotoğrafı verilmektedir.



Şekil 4.22: Sinyal düzenleyici ana kartının fotoğrafı.

4.7. Grafik LCD Gösterge Kartının Tasarımı

Grafik LCD gösterge kartı, gerilim ölçüm ana kartından ve akım ölçüm ana kartından gelen BGKD denetim sistemine ait tüm akım ve gerilim sinyalleri dalga şeklilerinin ve bu sinyallere ait harmonik analiz sonuçlarının görselleştirilmesi için kullanılmaktadır. Ayrıca grafik LCD gösterge kartı, sinyal denetim ve hata koruma kartı ile entegre çalışmakta ve sistemde herhangi bir hata oluşması durumunda ilgili hata ismiyle ekrana yansıtılmaktadır. Grafik LCD gösterge kartının veri yolları DSP ana kartına bağlanmakta ve FFT harmonik analiz ve sistem denetim DSP katı ile sürülmektedir.

Grafik LCD gösterge kartının üzerine eklenen tuş takımları ile BGKD denetim sitemine ait birçok parametre yönetilmektedir. Örneğin, PAGF, SAGF ve FFT DSP kartları (çalıştır, durdur, yeniden çalıştır, denetim algoritma değişkenlerine müdahale edilmesi, vs..), tristör ve statik anahtar sürücü kartı (çalıştır, durdur, α açısı ayarla, vs..) gibi birçok sistem parametreleri denetlenmektedir. Şekil 4.23'de 128x128 çözünürlükte grafik LCD kullanarak tasarlanan gösterge kartının fotoğrafı verilmektedir.

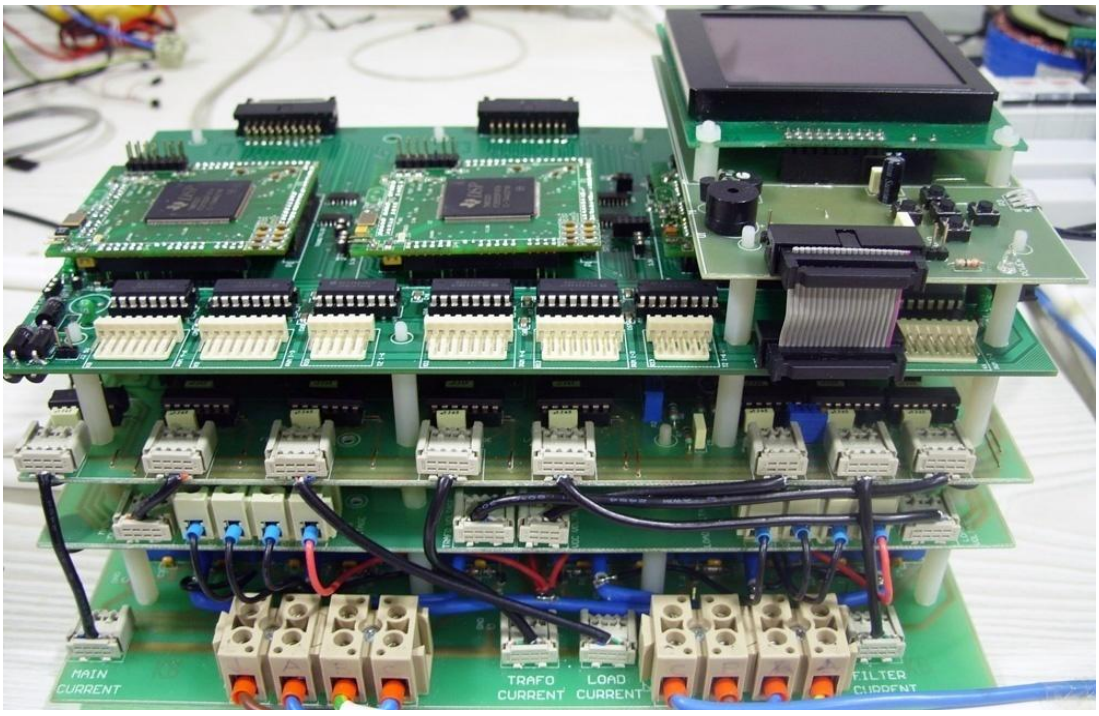


Şekil 4.23: Grafik LCD gösterge kartı.

Şekil 4.24'de yukarıda tasarımları anlatılan; F28335 DSP uygulama geliştirme kartları, F28335 DSP ana kartı, akım ölçüm ana kartı, gerilim ölçüm ana kartı, sinyal

düzenleyici ana kartı, akım sinyal düzenleyici kartı, gerilim sinyal düzenleyici kartı, sinyal denetim, hata koruma kartı ve grafik LCD gösterge kartlarının birlikte kullanıldığı BGKD denetim sisteminin fotoğrafı verilmektedir.

Bölüm 4.3 - 4.6 da ayrıntılı açıklamaları yapılan BGKD denetim sisteminde, en altta bulunan akım ölçüm ana kartından ölçülen akım sinyalleri soketlerle sinyal düzenleyici ana kartına aktarılmaktadır. İkinci katta bulunan gerilim ölçüm ana kartından ölçülen gerilim sinyalleri soketlerle sinyal düzenleyici ana kartına aktarılmaktadır. Üçüncü katta bulunan sinyal düzenleyici ana kartı, üzerinde bulunan akım sinyal düzenleyici ve gerilim sinyal düzenleyici kartları ile ölçülen tüm akım ve gerilim sinyalleri DSP ana kartına gönderilmeden önce gerekli koşullama ve düzenlemeler yapılmaktadır. Dördüncü katta bulunan DSP ana kartına iletilen sinyaller, BGKD denetim algoritmalarında kullanılacak ilgili sinyallere göre SAGF ve PAGF DSP uygulama geliştirme kartlarına aktarılmaktadır. Harmonik analizi ve sistem denetimi yapan FFT DSP uygulama kartına ise tüm akım ve gerilim sinyalleri aktarılmaktadır.



Şekil 4.24: BGKD denetim sistemi fotoğrafı.

4.8. Güç Besleme Kartının Tasarımı

BGKD denetim deneysel düzeneğinde kullanılan F28335 DSP uygulama geliştirme kartları ve F28335 DSP ana kartı +5V gerilim kaynağıyla beslenmektedir. Akım ölçüm ana kartı, gerilim ölçüm ana kartı, sinyal düzenleyici ana kartı, akım sinyal düzenleyici kartı ve gerilim sinyal düzenleyici kartı farklı ±15V'luk simetrik kaynak ile beslenmektedir. IGBT sürücü, tristör sürücü, statik anahtar sürücü kartlarının her biri farklı +15V'luk kaynak ile beslenmekte ve referans seviyeleri birbirinden izole edilmektedir. Şekil 4.25'de BGKD denetim deneysel düzeneğinde kullanılan devreler için besleme kaynağının fotoğrafı görülmektedir. Güç besleme kartı, seçenekli olarak 6 adet +15V ve 2 adet +5V izoleli çıkış veya 3 adet ±15V ve 1 adet ±5V izoleli çıkışlara sahip 250VA gücünde troidal trafo tarafından beslenmektedir.

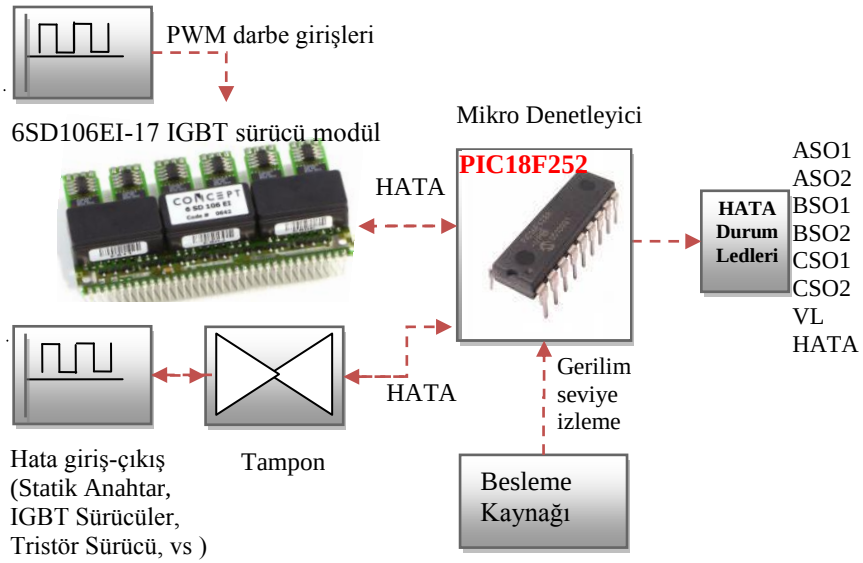


Şekil 4.25: BGKD deneysel düzeneğinde kullanılan devreler için besleme kaynağı.

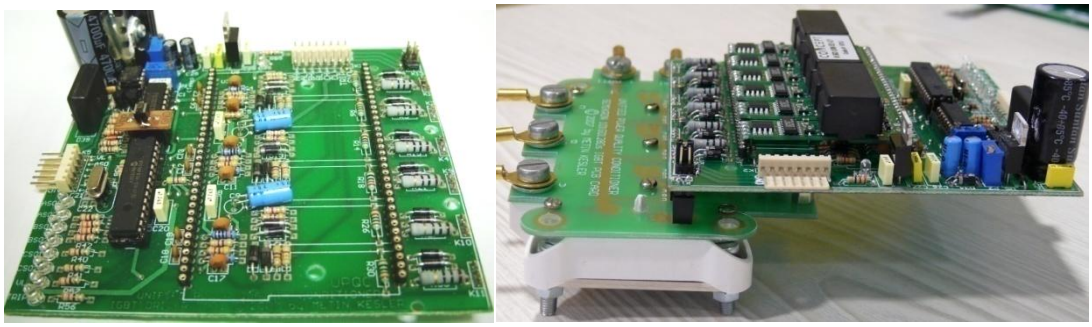
4.9. IGBT Sürücü Kartlarının Tasarımı

BGKD denetim algoritmaları tarafından üretilen anahtarlama sinyalleri ile IGBT'lerin sürülmesi için IGBT sürücü kartları tasarlanmıştır. IGBT sürücü kartlarında 3-kollu CONCEPT 6SD106EI-17, 1-kollu Semikron SKYPER 32PRO ve 3-kollu Semikron SKHI 61 IGBT sürücü modülleri kullanılmaktadır.

CONCEPT 6SD106EI-17 IGBT sürücü modülü; 1700V'a kadar DA bara gerilimi altında çalışabilme, 50 kHz'de tetikleme yapabilme, magnetik izolasyon, V_{CE} izleme özelliği ile kısa devre ve aşırı akım koruma ve yumuşak kesime girme, hata giriş ucu, hata çıkış ucu ve giriş-çıkış arasında elektriksel yalıtım gibi teknik özelliklere sahiptir. Sürücü girişlerine uygulanan 0-15 V arasındaki sinyali IGBT tetikleme (kapı) uçlarına (+15V/-7V) şeklinde vererek IGBT'lerin kesin olarak iletim ve kesime girmesini sağlamaktadır. 6SD106EI-17 IGBT sürücü modülü yarım köprü mod denetim ve direk mod denetim olmak üzere iki ayrı modda çalışabilmektedir. Yarım köprü modda çalıştırıldığında aynı kolda bulunan IGBT'lerin anahtarlama sinyalleri arasındaki gerekli ölü zaman (dead band) dahili devrelerle otomatik olarak üretilmektedir. Böylece 3-fazlı 6-darbeli GKE'nin sadece üst koldaki IGBT'ler için PWM çıkışları üretmek yeterli olmaktadır. Alt koldaki IGBT'lere uygulanan PWM sinyalleri 6SD106EI-17 IGBT sürücü modülü tarafından gerekli ölü zaman eklenerek otomatik olarak üretilmektedir. Şekil 4.26'da CONCEPT 6SD106EI-17 IGBT sürücü modülü kullanarak tasarlanan IGBT sürücü kartı blok diyagramı verilmektedir. IGBT sürücü kartında, tüm hata giriş çıkışlarını, besleme gerilim seviyesini denetlemek ve ilgili hataları görselleştirmek için PIC18F252 mikro denetleyici kullanılmaktadır. Şekil 4.27'de CONCEPT 6SD106EI-17 IGBT sürücü modülü kullanarak tasarlanan IGBT sürücü kartı fotoğrafı verilmektedir.

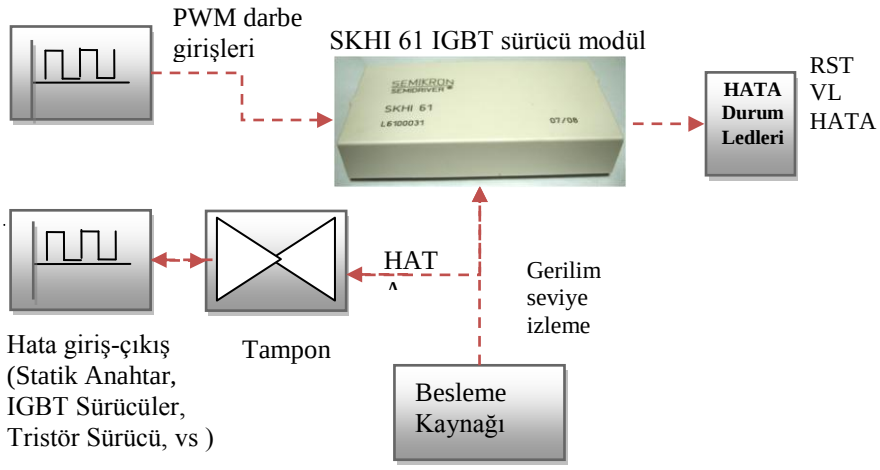


Şekil 4.26: CONCEPT 6SD106EI-17 IGBT sürücü modülü kullanarak tasarlanan IGBT sürücü kartı blok diyagramı.

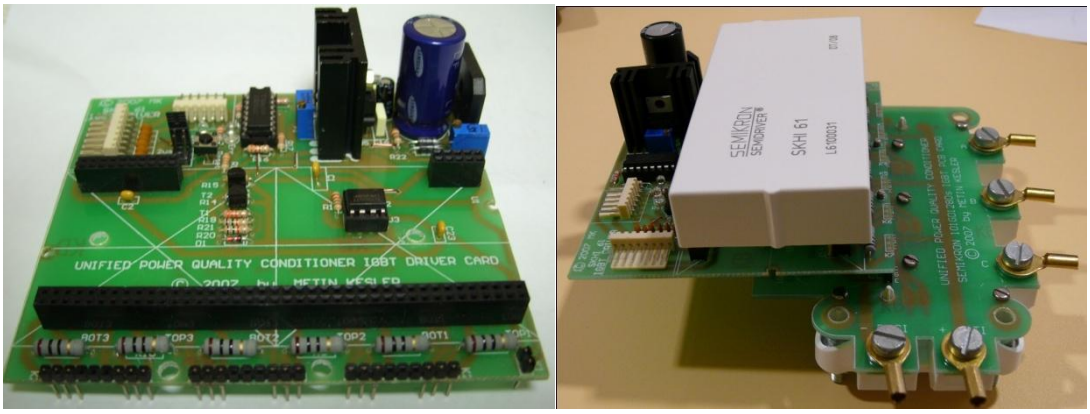


Şekil 4.27: CONCEPT 6SD106EI-17 IGBT sürücü modülü kullanarak tasarlanan IGBT sürücü kartı fotoğrafları.

Semikron SKHI 61 IGBT sürücü modül; 1200V'a kadar DA bara gerilimi altında çalışabilme, yüksek giriş empedansı (60kΩ), 20 kHz'de tetikleme yapabilme, magnetik izolasyon, V_{CE} izleme özelliği ile kısa devre ve aşırı akım koruma ve yumuşak kesime girme, hata giriş ucu, hata çıkış ucu ve giriş-çıkış arasında elektriksel yalıtım gibi teknik özelliklere sahiptir. Ayrıca sürücü, girişlerine uygulanan 0-5 V arasındaki sinyali IGBT tetikleme (gate) uçlarına (+15V/-5V) şeklinde vererek IGBT'lerin kesin olarak iletim ve kesime girmesini sağlamaktadır. Şekil 4.28'de Semikron SKHI 61 IGBT sürücü modülü kullanarak tasarlanan IGBT sürücü kartı blok diyagramı verilmektedir. IGBT sürücü kartında, tüm hata giriş çıkışlarını, besleme gerilim seviyesini denetlemek ve ilgili hataları görselleştirme için entegre devreler kullanılmaktadır. Şekil 4.29'da Semikron SKHI 61 IGBT sürücü modülü kullanarak tasarlanan IGBT sürücü kartı fotoğrafı verilmektedir.

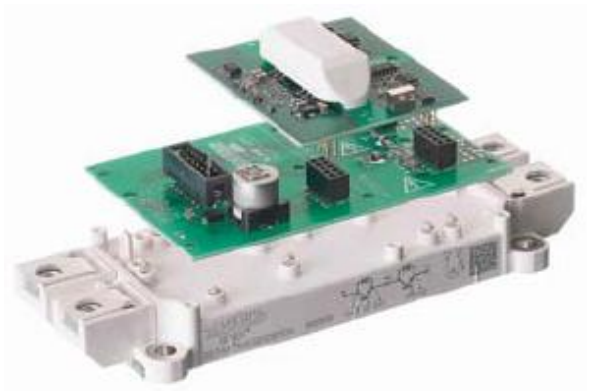


Şekil 4.28: Semikron SKHI 61 IGBT sürücü modülü kullanarak tasarlanan IGBT sürücü kartı blok diyagramı.



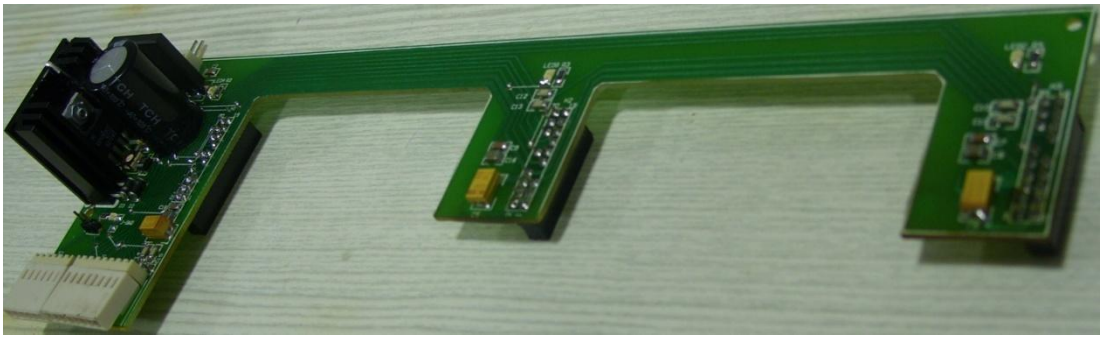
Şekil 4.29: Semikron SKHI 61 sürücü modülü kullanarak tasarlanan IGBT sürücü kartı fotoğrafları.

Semikron SKYPER 32PRO IGBT sürücü modülü; 1200V DA bara gerilimi altında çalışabilme, anlık kısa darbeleri bastırma, besleme gerilim seviye denetleyici, dahili ölü zaman üretici, yüksek giriş empedansı (60kΩ), 50 kHz'de tetikleme yapabilme, magnetik izolasyon, V_{CE} izleme özelliği ile kısa devre ve aşırı akım koruma ve yumuşak kesime girme, hata giriş ucu, hata çıkış ucu ve giriş-çıkış arasında elektriksel yalıtım gibi teknik özelliklere sahiptir. Ayrıca sürücü, girişlerine uygulanan 0-15V arasındaki sinyali IGBT tetikleme (gate) uçlarına (+15V/-7V) şeklinde vererek IGBT'lerin kesin olarak iletim ve kesime girmesini sağlamaktadır. 1-kollu Semikron SKYPER 32PRO IGBT sürücü modülü Semikron firmasının üretimi olan Evaluation Board 2s SKYPER 32PRO bordu ile birlikte kullanılmaktadır. Şekil 4.30'da 1-kollu Semix 302GB128Ds IGBT, Semikron SKYPER 32PRO IGBT sürücü modül ve Evaluation Board 2s SKYPER 32PRO ile birlikte fotoğrafı verilmektedir.

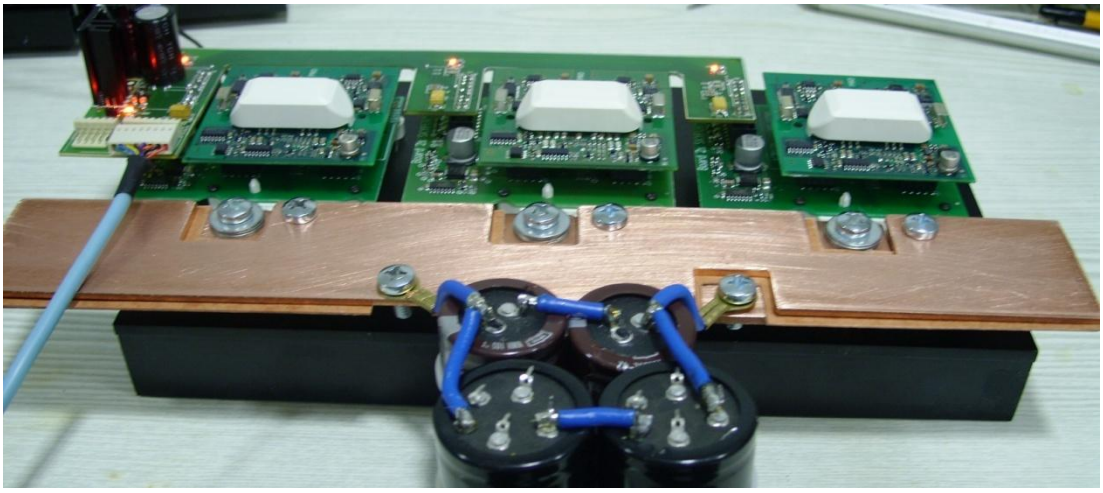


Şekil 4.30: 1- kollu SEMiX 302GB128Ds IGBT, Semikton SKYPER 32PRO IGBT sürücü modül ve Evaluation Board 2s SKYPER 32PRO fotoğrafı.

1- kollu Semix 302GB128Ds IGBT modüllerini 3-kollu olarak kullanmak ve denetlemek için Şekil 4.31'de verilen Semikron Evaluation Board 2s SKYPER 32PRO boardlarını birleştirme kartı tasarlanmıştır. Şekil 4.32'de 3-kollu Semikron SKYPER 32PRO IGBT sürücü sistemi verilmektedir.



Şekil 4.31: Evaluation Board 2s SKYPER 32PRO boardlarını birleştirme kartı fotoğrafı.

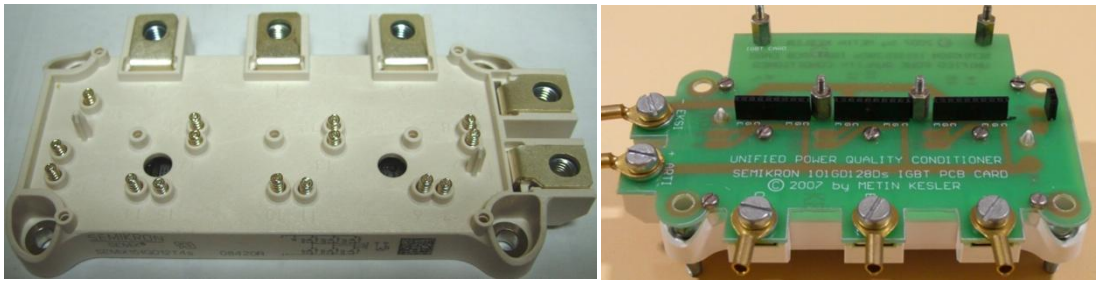


Şekil 4.32: 3-kollu SEMİKRON SKYPER 32PRO IGBT sürücü sistemi fotoğrafı.

BGKD denetim algoritmaları tarafından üretilen anahtarlama sinyalleri ile IGBT'lerin sürülmesi için, 3-kollu CONCEPT 6SD106EI-17, 3-kollu Semikron SKHI 61 ve 1-kollu Semikron SKYPER 32PRO sürücü modülleri kullanarak tasarlanan IGBT sürücü kartlarından maksimum verim alabilmek ve sinyal kayıplarını azalmak için bütünleşik yapıda tasarlanmıştır. Yukarıdaki şekillerde de görüldüğü gibi tasarlanan PCB kartlarında, IGBT sürücü kartlarının ürettiği anahtarlama sinyal çıkışları ile IGBT modülleri anahtarlama sinyal giriş (kapı) uçları arasında, dış etkenlerden ve girişimlerden kaçınmak için kablo kullanılmamakta ve birbirine soketlerle bağlanmaktadır.

4.10. DA-Bara ve IGBT Güç Katının Tasarımı

BGKD denetim ve deneysel çalışmalarda, Semikron firmasına ait 3-kollu Semix 151 GD12T4s (1200V, 150A), 3-kollu Semix 101 GD128Ds (1200V, 100A) ve 1-kollu Semix 302GB128Ds (1200V, 300A) IGBT modülleri kullanılmaktadır. Bu IGBT modüller yay kontak özelliğinde üretildiğinden, Semix 151 GD12T4s ve Semix 101 GD128Ds modüller için PCB kartı tasarlanmıştır. IGBT PCB kartı hem Semikron hemde Concept firmasının IGBT sürücü modüllerine uyumlu tasarlanmıştır. Semix 302GB128Ds modüller için Semikron firmasının ürettiği hazır "Evaluation Board 2s SKYPER 32PRO" boardları kullanılmaktadır. Şekil 4.33'de 3-kollu Semix 151 GD12T4s ve 3-kollu Semix 101 GD128Ds IGBT modülü fotoğrafı (a) sade (b) tasarlanan PCB kartı ile birlikte verilmektedir.

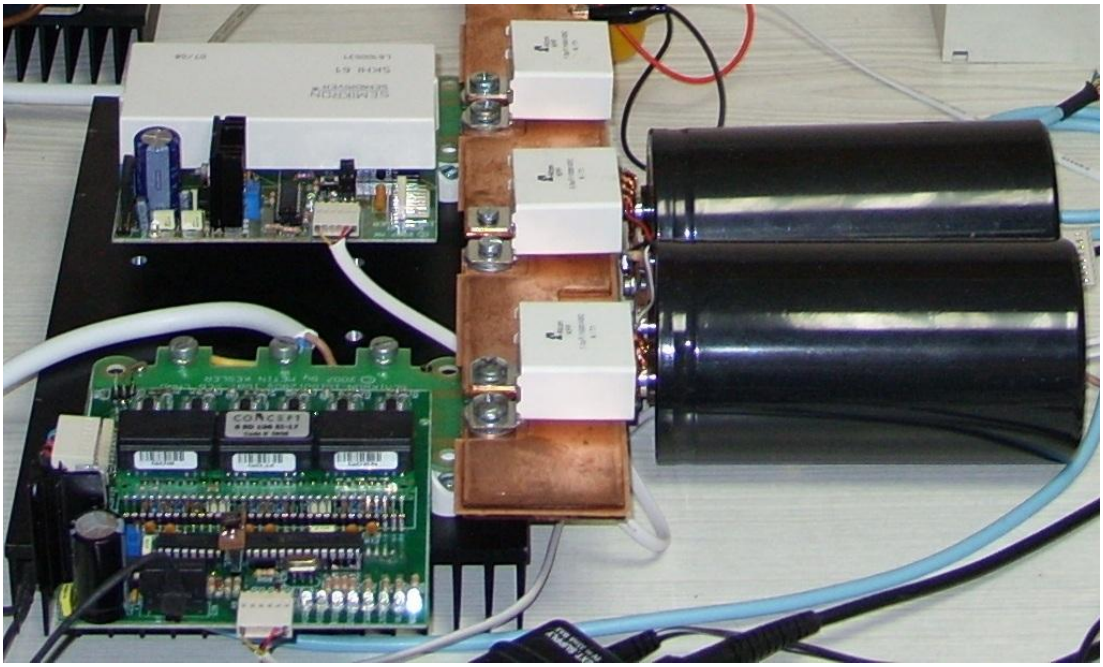


(a) (b)

Şekil 4.33: 3-kollu Semix 151 GD12T4s IGBT modülü (a) sade (b) tasarlanan IGBT PCB kartı ile birlikte fotoğrafı.

DA-bara, iki adet bakır levha arasına yalıtkan kağıt kullanarak lamine yapıda tasarlanmıştır. Böylece DA-bara kablolarından kaynaklanabilecek IGBT'ler için dezavantaj olan bara endüktans özelliğinden kaçınılmakta, avantaj sağlayan kapasitif özellik kazandırılmaktadır. DA-barada enerji depolama elemanı olarak iki adet seri bağlı 2200µF 450V kondansatör kullanılmaktadır. Bara üzerinde ani gerilim piklerini engellemek ve IGBT'lerin yumuşak iletime ve kesime girmelerini sağlamak için 3 adet 1µF 1000V bastırma (snubber) kondansatörleri kullanılmaktadır.

SAGF IGBT güç katı ve PAGF IGBT güç katı alüminyum soğutucu üzerinde monte edilmekte ve DA-barayı ortak olarak kullanmaktadır. Şekil 4.34'de DA-bara ve alüminyum soğutucu üzerinde monte edilmiş IGBT güç katı fotoğrafı verilmektedir.



Şekil 4.34: DA bara ve IGBT güç katı fotoğrafı.

4.10.1. DA bara kondansatör değerinin hesaplanması

BGKD'nin güç devresinde eviricinin DA tarafında bir gerilim kaynağı olmadığından onun yerine enerji depolama elemanı olarak gerilim kaynaklı eviricilerde kondansatör, akım kaynaklı eviricilerde ise bobin kullanılmaktadır. Dolayısıyla gerilim kaynağı evirici hem yükün ürettiği harmonik akımlara ters fazda ve eşit büyüklükte akımlar üretmek için hem de DA tarafındaki gerilimin ayarlanan değerde tutulması için kontrol edilmektedir. PAGF sürekli duruma geçtikten sonra DA kondansatör gerilimindeki dalgalanmalar anlık gerçek gücün dalgalanan bileşeninden kaynaklanmaktadır. Anlık gerçek gücün dalgalı bileşenini yok etmek için eviricinin DA tarafından AA tarafına anlık gerçek gücün dalgalanan bileşeni kadar enerji aktarılmaktadır. Dolayısıyla DA kondansatör geriliminde bu enerjinin miktarına bağlı olarak dalgalanmalar oluşmaktadır. DA kondansatör gerilimi dalgalı ve doğru bileşenleri ile Denklem 4.1'de verildiği gibi yazılabilir [18, 38, 74].

$$V_{da}(t) = \overline{V}_{da} + \tilde{v}_{da}(t) \tag{4.1}$$

$\overline{V}_{da}$ ortalama kondansatör gerilimi, $\tilde{v}_{da}$ kondansatör geriliminin dalgalanan bileşenidir. PAGF'nin sürekli durumda üretmesi gereken ve gerçek gücün dalgalanan bileşenine

karşılık gelen güç (anahtarlama kayıpları ihmal edildiğinde) Denklem 4.2'de verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$\tilde{p}_c = -\tilde{p}_y = \tilde{P}_m \sin 6\omega t \tag{4.2}$$

gücün $\tilde{P}_m$ dalgalanan bileşeninin maksimum değerdir. $\tilde{p}_c$ 'nin temel frekansı kaynak geriliminin 6 katına karşılık gelmektedir. Kondansatörün şebekeye vermesi gereken akım ise Denklem 4.3'de verildiği gibi hesaplanmaktadır. Kondansatör uçlarında gerilimdeki dalgalanma Denklem 4.4 ile hesaplanmaktadır.

$$i_c = \frac{\tilde{P}_m \sin 6\omega t}{V_{da}} \tag{4.3}$$

$$\tilde{v}_{da} = \frac{1}{C_{da}} \int_0^t i_f dt \tag{4.4}$$

PAGF'nin güç devresinde eviricinin DA tarafında kullanılacak kondansatör değeri Denklem 4.3 ve Denklem 4.4 kullanarak Denklem 4.5 ile elde edilmektedir. DA tarafta İstenen $\tilde{v}_{da}$ dalgalanmasına karşılık kondansatör değeri Denklem 4.5'de verildiği gibi hesaplanmaktadır [74]. Belirlenen gerilim dalgalanması için seçilen kondansatör değeri Denklem 4.5'deki hesaplanan değerden daha büyük seçilmelidir.

$$C_{da} \geq \frac{\tilde{P}_y}{6\tilde{v}_{da}\overline{V}_{da}\omega} \tag{4.5}$$

4.11. SAGF ve PAGF Hat Filtre Bobinlerinin Tasarımı

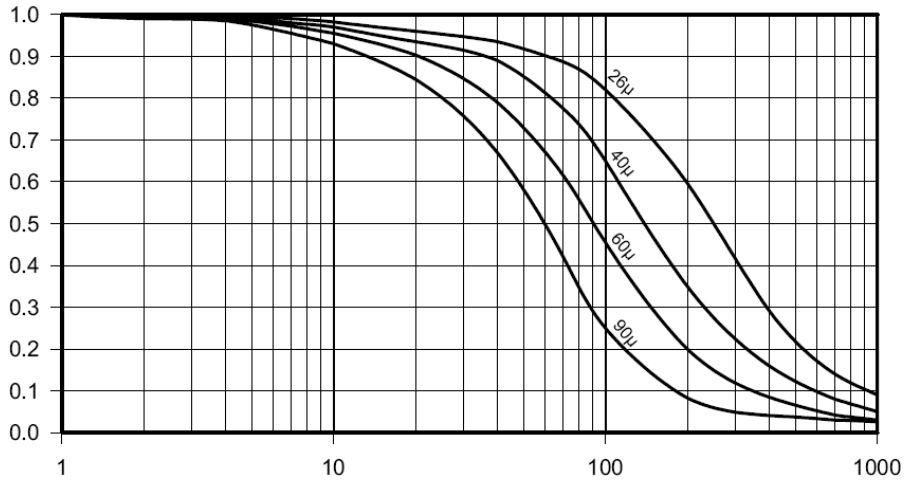
SAGF ve PAGF filtre L_{Tabc} ve L_{Cabc} bobinleri, filtre akımının yükselme hızını belirler. PAGF güç devresi, denetim algoritması tarafından hesaplanan referans filtre akımlarını üretebilmesi için filtre akımının yükselme hızı, yük akımının maksimum yükselme hızından büyük olmalıdır. Yük akımının maksimum yükselme hızı Denklem 4.6'da ve seçilecek bobin değeri ise Denklem 4.7'de verildiği gibi hesaplanmaktadır [74].

$$\frac{di_y}{dt} = \frac{\sqrt{2}V_{faz-faz}}{2L_{DA}} \tag{4.6}$$

$$L_{Cabc} \leq \frac{V_{da} - \sqrt{2}V_{faz-faz}}{2\frac{di_y}{dt}} \tag{4.7}$$

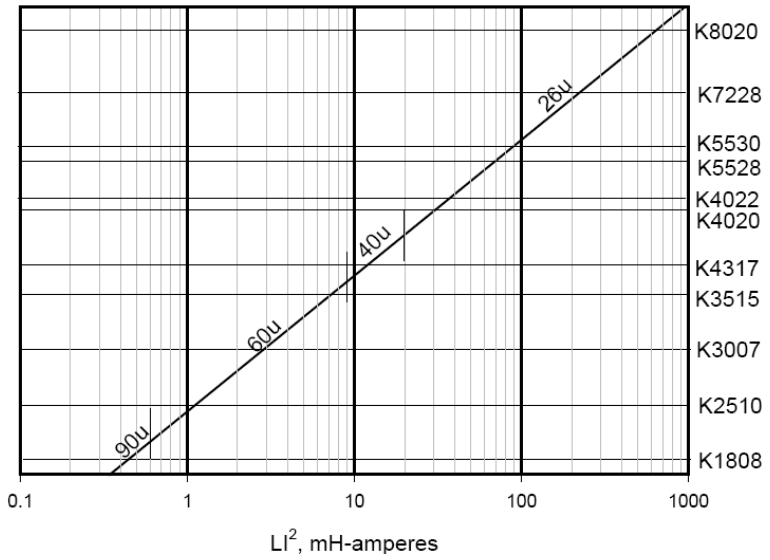
L_{Tabc} ve L_{Cabc} filtre bobinlerinin diğer bir görevi ise SAGF ve PAGF güç devrelerinin anahtarlamalardan dolayı ürettiği yüksek frekanslı harmonikleri filtrelemektir. PAGF güç devresinin hızlı dinamik cevap için L_{Cabc} Denklem 4.9'daki sınır değerden küçük seçilmelidir. L_{Cabc} hat filtre bobinlerinin değeri sınır değerden çok düşük olması durumunda, anahtarlamadan dolayı üretilen yüksek frekanslı harmonik akımlar kaynak akımında bozulmalara sebep olacağından L_{Cabc} bobini tasarlanırken her iki durumda dikkate alınmalıdır [74].

L_{Tabc} ve L_{Cabc} filtre bobinlerin tasarımında Magnetics firmasının Kool Mμ E nüveleri kullanılmaktadır. Kool Mμ E nüveleri, yüksek sıcaklıkta düşük kayıplara sahip demir alaşımlı tozdan üretilmektedir. Bu nüveler, yüzeye dağıtılmış hava aralıkları içerdiğinden ve 10500'lük gauss doyum seviyesinden dolayı yüksek frekanslı uygulamalarda (flyback transformatörlerinde, güç faktörü düzelme devrelerinde) geniş çalışma aralığı sunmaktadır. Kool Mμ E nüveleri 26μ, 40μ, 60μ ve 90μ olmak üzere dört farklı geçirgenlikte üretilmektedir. Şekil 4.35'de DA manyetik gücü ve birim başına geçirgenlik (permeabilite) eğrisi verilmektedir. Şekil 4.35 DA manyetik kuvvetin artışına karşılık birim başına manyetik geçirgenlik azalmayı göstermektedir. Kool Mμ'nun dağılmış hava aralıkları sayesinde DA manyetik kuvvet karşısında yumuşak bir endüktansa sebebiyet verdiğinden birçok uygulamada dengeli endüktans sağladığından geniş aralıkta çalışma imkanı sağlamaktadır [84].



Şekil 4.35: DA manyetik gücü ve birim başına manyetik geçirgenlik eğrisi[84].

Tasarımlarda uygun nüvenin seçilmesi için istenilen endüktans " L_{Tabc} ve L_{Cabc}" ile birlikte DA manyetik kuvvet ve DA akımın bilinmesi gerekmektedir. Manyetik geçirgenlik değerine göre uygun nüve seçmek için LI^2 (mH-amper) hesaplanmaktadır. Elde edilen değere karşılık gelen nüve Şekil 4.36'dan bulunmaktadır. Örneğin 3mH ve 10A değerlerinde bir endüktans tasarlamak için LI^2=300 alındığında 26µ manyetik geçirgenliğe sahip K7228 ile K5530 arasında bir nüve seçilebilmektedir.



Şekil 4.36: Kool Mµ E nüve seçme eğrisi[84].

Uygun manyetik geçirgenlik değerinde seçilen nüve üzerine sarılacak iletkenin tur sayısını bulmak için Denklem 4.8 veya Denklem 4.9 kullanılmaktadır.

$$N = \sqrt{\frac{10^8\, L(H)\, I_e}{0.4\, \pi\, \mu\, A_e}} \tag{4.8}$$

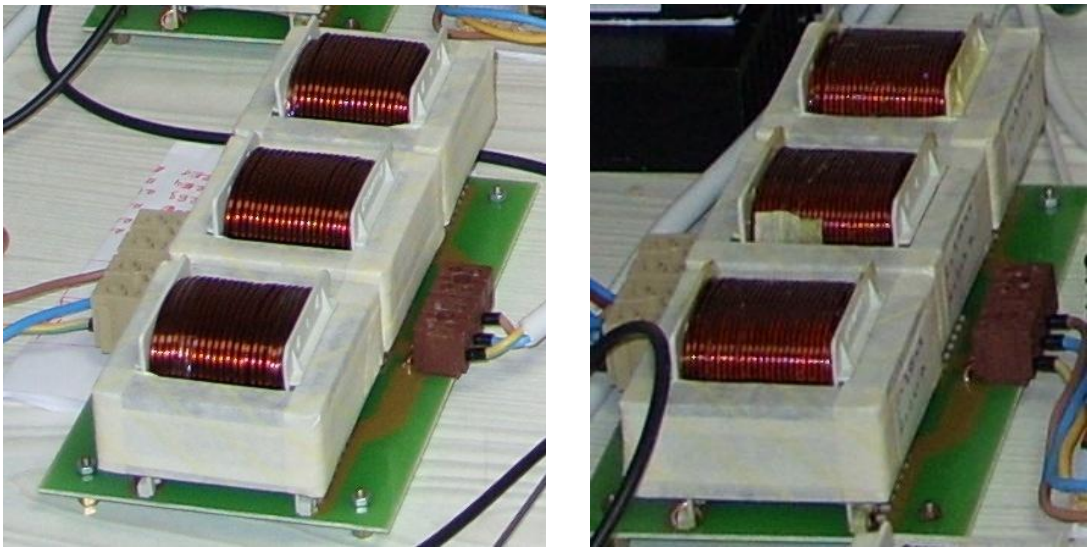
$$N = \sqrt{\frac{10^6\, L(mH)}{A_L}} \tag{4.9}$$

Seçilen nüve için Denklem 4.8 ve Denklem 4.9'da verilen bilinmeyen parametre değerleri Şekil 4.37'de verilmektedir [84]. Örneğin, 3mH ve 10A değerlerinde bir endüktans tasarlamak K5530E nüvesini seçtiğimizde, 26µ manyetik geçirgenliğe göre A_L 138 dir bu durumda Denklem 4.9'a göre hesaplama yaptığımızda N= 147 tur çıkmaktadır.

PART NO.	A_L mH/1000 turns ±8 %				Path Length l_e (cm)	Cross Section A_e (cm^2)	Volume V_e (cm^3)
	26µ	40µ	60µ	90µ			
00K1207E***	-	-	-	-	2.96	0.13	0.385
00K1808E***	26	35	48	69	4.01	0.228	0.914
00K2510E***	39	52	70	100	4.85	0.385	1.87
00K3007E***	33	46	71	92	6.56	0.601	3.94
00K3515E***	56	75	102	146	6.94	0.84	5.83
00K4017E***	56	76	105	151	9.84	1.28	12.6
00K4020E***	80	108	150	217	9.84	1.83	18
00K4022E***	104	140	194	281	9.84	2.37	23.3
00K4317E***	88	119	163	234	7.75	1.52	11.8
00K5528E***	116	157	219	NA	12.3	3.5	43.1
00K5530E***	138	187	261	NA	12.3	4.17	51.4
00K6527E***	-	-	-	NA	14.7	5.4	79.4
00K7228E***	-	-	-	NA	13.7	3.68	50.3
00K8020E***	103	145	190	NA	18.5	3.89	72.1

Şekil 4.37: Kool Mµ E nüve manyetik parametreleri [84].

BGKD deneysel uygulamada Kool Mµ K6527E026 26µ manyetik geçirgenlik değerinde E nüve kullanılmıştır. Şekil 4.38'de endüktans bobinleri SAGF için 1,5mH ve PAGF için 3,5mH değerlerinde tasarlanan filtre endüktanslarının fotoğrafı verilmektedir.

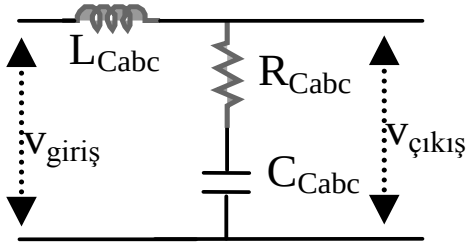


Şekil 4.38: Tasarlanan hat filtre endüktanslarının fotoğrafı.

4.12. SAGF ve PAGF Anahtarlama RC Filtre Elemanlarının Tasarımı

SAGF ve PAGF güç katında anahtarlama filtre elemanı olarak RC filtreler kullanılmaktadır. İkinci dereceden alçak geçiren pasif filtre olarak işlev yapan RC filtrenin genel bağlantı şeması Şekil 4.39 (a)'da görülmektedir. RC filtre, gerilim

kaynaklı inverterin çıkışında yüksek frekanslı anahtarlama gerilimleri filtrelemek için kullanılmaktadır. Düşük band genişliği, düşük rezonans frekansı ve yüksek performans alabilmek için, rezonans frekansı C_{Cabc} ve L_{Cabc} nin değerleri ile belirlemektedir. Anahtarlama gerilimleri yeterince filtrelenemediğinde rezonans frekansı oluşmaktadır. Gerekli filtreleme R_{Cabc} tarafından ayarlanmakta fakat R_{Cabc} nin değerinin iyi ayarlanmaması durmunda filtrenin performası düşmektedir. Filtrenin performansını düşürmeden yüksek oranda sönümleme yapabilmek için aktif sönümleme metodu kullanılmaktadır [61]. Şekil 4.39'da SAGF ve PAGF güç katında anahtarlama filtre elemanı olarak kullanılan RC filtrelerin (a) bağlantı şekli (b) fotoğrafı verilmektedir.



(a)



(b)

Şekil 4.39: SAGF ve PAGF güç katında kullanılan anahtarlama RC filtre elemanlarının (a) bağlantı şekli (b) fotoğrafı.

4.13. SAGF Seri Transformatörler

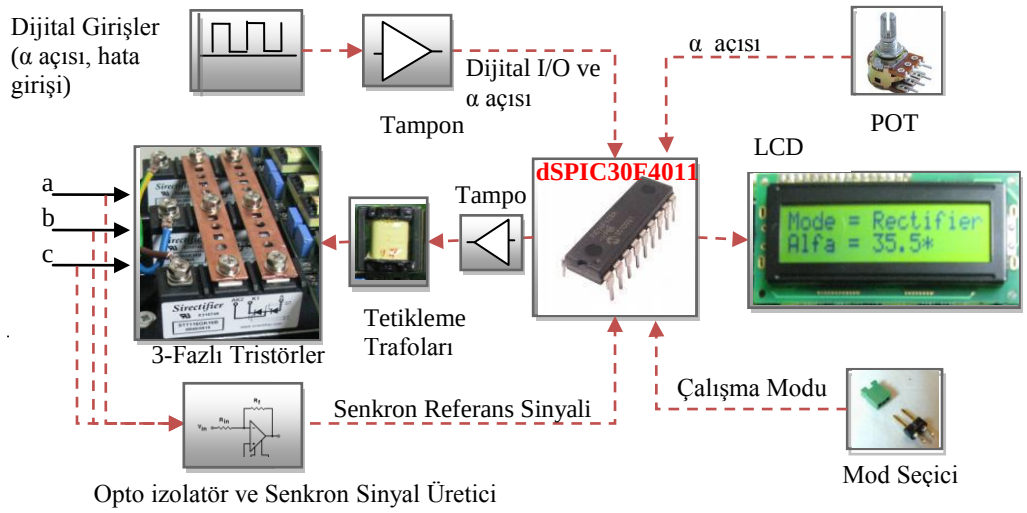
3-fazlı 4-telli BGKD denetim sisteminde seri transformatörler gerilim ile ilgili güç kalitesi problemlerinin düzeltilmesi için şebekeye gerilim enjekte etmek amacıyla hatta seri bağlanmaktadırlar. Şekil 4.40'da 5,4kVA gücünde, 270/90V ve 50Hz parametrelerine sahip 3-adet 1-fazlı seri transformatör fotoğrafı verilmektedir.



Şekil 4.40: 1-fazlı seri transformatörlerin fotoğrafı.

4.14. Genel Amaçlı Tristör Sürücü Kartının Tasarımı

Güç elektroniği uygulamalarında, yarım denetimli veya tam denetimli tristörlü uygulamalara çok rastlanmaktadır. Tristörlü doğrultucular motor sürücü devrelerinde, ayarlı hız denetim cihazlarında, AA dan DA'a dönüşüm devrelerinde ve kesintisiz güç kaynakları gibi uygulamalarda oldukça sık kullanılmaktadır. Şekil 4.41'de tasarlanan genel amaçlı tristör sürücü devresi blok diyagramı verilmektedir.



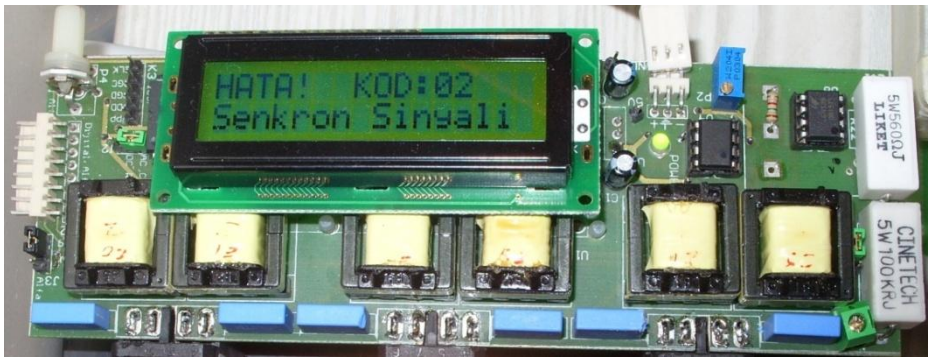
Şekil 4.41: Genel amaçlı tristör sürücü devresi blok diyagramı.

dsPIC30F4011 mikro denetleyici tabanlı tasarlanan genel amaçlı tristör sürücü kartı, 3-fazlı veya 1-fazlı tam denetimli tristörlü doğrultucu olarak, 3-fazlı veya 1-fazlı AA kıyıcı ve AA denetim olarak ve 3-fazlı veya 1-fazlı statik anahtar olmak üzere üç farklı durumda çalışabilmektedir. a-b-c fazlarından alınan referans sinyaller opto izolatörle yalıtım sağlanmakta ve kaynak gerilimi ile senkron sinyali elde edilmektedir. Senkron sinyali, tristör tetikleme sinyallerinin süre ve zamanını belirlemektedir. Mikro denetleyici tristör sürücü kartının hangi modda çalışacağını mod seçici (Jumper) ile belirlemektedir.

Tristör sürücü kartı, tam denetimli tristörlü doğrultucu, AA kıyıcı ve AA denetim modunda çalıştığında kıyma α açısı seçenekli olarak dijital port veya analog POT ile ayarlanabilmektedir. Sürücü kart üzerinde bulunan dijital port ile harici olarak denetlenebilmektedir. Örneğin sistemde arıza olması durumunda dijital porttan iletilen hata sinyali ile mikro denetleyici tetikleme sinyallerini kesmektedir. Sürücü kartının anlık kıyma α açısının, işlem durumunu ve çalışma modunu göstermek için LCD gösterge kullanılmaktadır. Şekil 4.42'de tasarlanan genel amaçlı tristör sürücü kartının fotoğrafı verilmektedir.



(a)



(b)

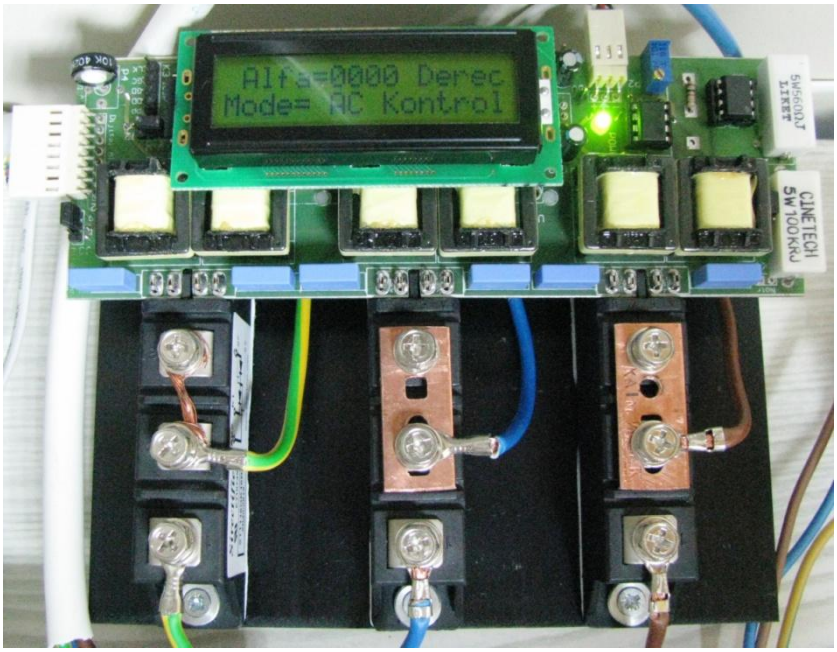
Şekil 4.42: Genel amaçlı tristör sürücü kartı (a) LCD siz (b) LCD'li fotoğrafı.

4.15. 3-Fazlı Tam Denetimli Tristörlü Statik Anahtar ve AA Denetleyici

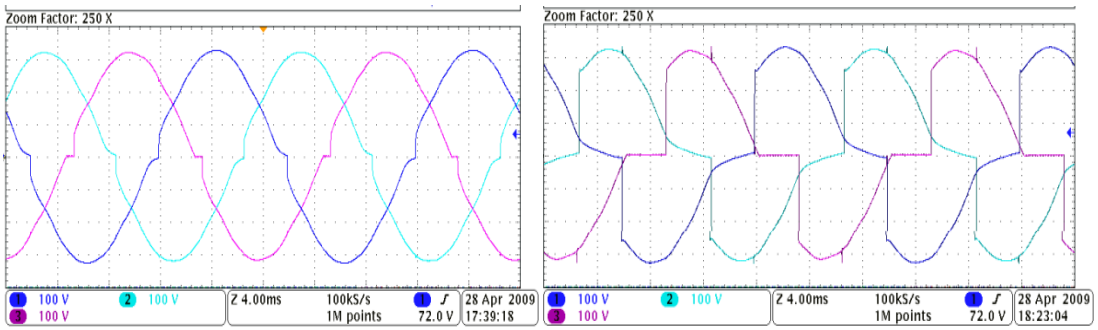
BGKD deneysel düzeneği çalışmalarında, genel amaçlı tristör sürücü kartı, tristörlerin Şekil 4.43'de verildiği gibi bağlanması ile statik anahtar veya AA denetleyici olarak kullanılmaktadır.

Statik anahtar modunda tristör sürücü kartı, harici olarak gönderilen açma-kapama denetimi kart üzerinde bulunan dijital port vasıtasıyla yapılmaktadır. AA denetleyici modunda çalıştığında kıyma açısı olan α, harici olarak dijital port veya kart üzerinde analog POT ile yapılmaktadır.

Şekil 4.43'de statik anahtar veya AA denetleyici kartı fotoğrafı verilmektedir. Şekil 4.44'de AA denetleyici için (a) α=5°, (b) α=55° 3-fazlı kaynak gerilimleri örnek deneysel sonuçları verilmektedir.



Şekil 4.43: Statik anahtar veya AA Denetleyici kartı fotoğrafı.

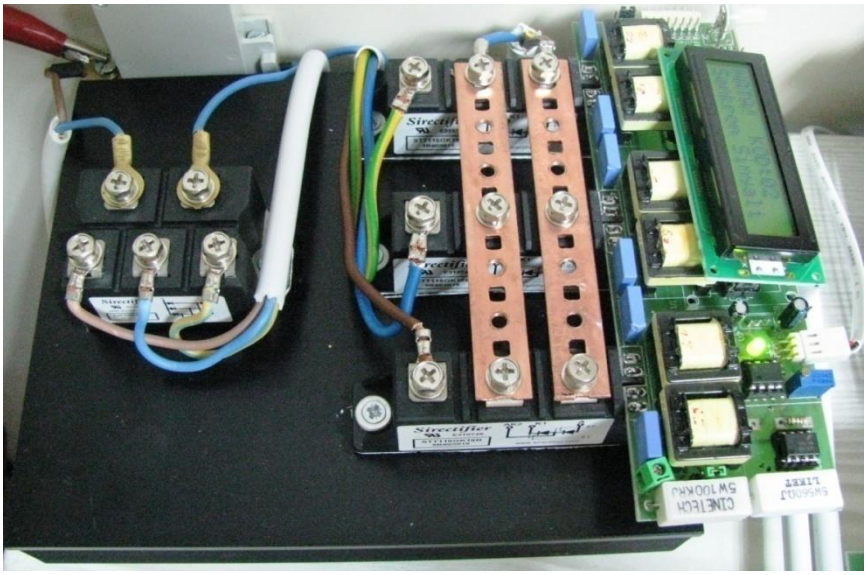


(a) (b)

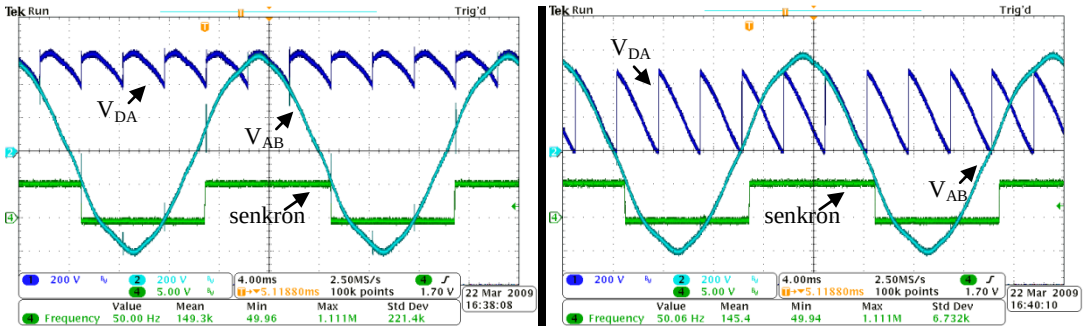
Şekil 4.44: AA denetleyici için (a) α=5°, (b) α=55° 3-fazlı kaynak gerilimleri deneysel sonuçları

4.16. 3-Fazlı 6-Darbeli Tam Denetimli Tristörlü Doğrultucu

BGKD deneysel düzeneği çalışmalarında, genel amaçlı tristör sürücü kartı, tristörlerin Şekil 4.44'de verildiği gibi bağlanması ile 3-fazlı tam denetimli doğrultucu olarak kullanılmaktadır. Tam denetimli doğrultucu modunda sürücü kartı harici olarak gönderilen açma-kapama denetimi kart üzerinde bulunan dijital port vasıtasıyla yapılmaktadır. Tristörlerin kıyma açısı olan α, harici olarak dijital port veya kart üzerinde analog POT ile ayarlanmaktadır. Şekil 4.45'de 3-fazlı tam denetimli kartı fotoğrafı verilmektedir. Şekil 4.46'da 3-fazlı tam denetimli doğrultucu (a) α=15°, (b) α=60° için doğrultucu çıkışı V_{DA} gerilimi, a-b faz gerilimi V_{AB} ve senkron sinyali örnek deneysel sonuçları verilmektedir.



Şekil 4.45: 3-Fazlı tam denetimli tristörlü doğrultucu fotoğrafı.



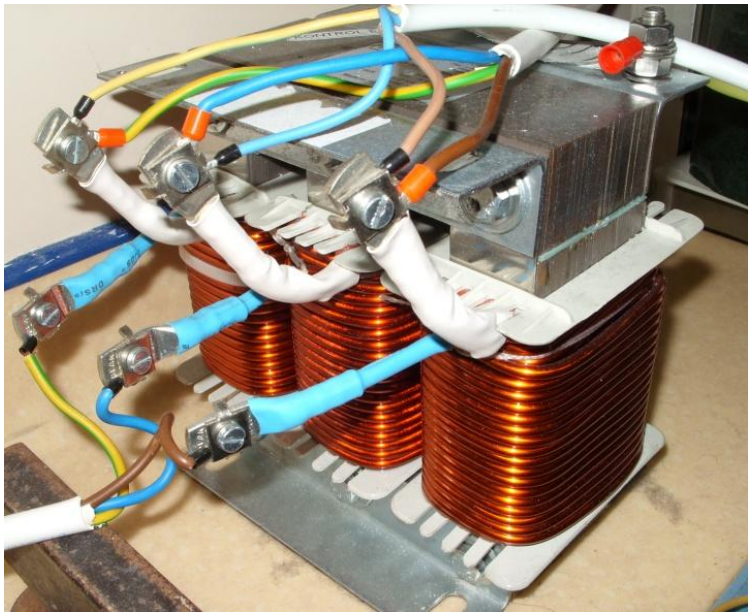
Şekil 4.46: 3-fazlı tam denetimli doğrultucu (a) α=15°, (b) α=60° için DA gerilimi, a-b faz gerilimi Vab ve senkron sinyali örnek deneysel sonuçları.

4.17. 3-Fazlı AA Hat Reaktörü

BGKD deneysel düzeneğinde doğrusal olmayan tristörlü doğrultucu yük öncesi harmonik filtreleme için hat rektörü kullanılmaktadır. Tablo 4.2'de 3-Fazlı AA hat reaktörün parametreleri ve Şekil 4.48'de ise fotoğrafı verilmektedir.

Tablo 4.2: 3-faz AA hat reaktörü parametreleri.

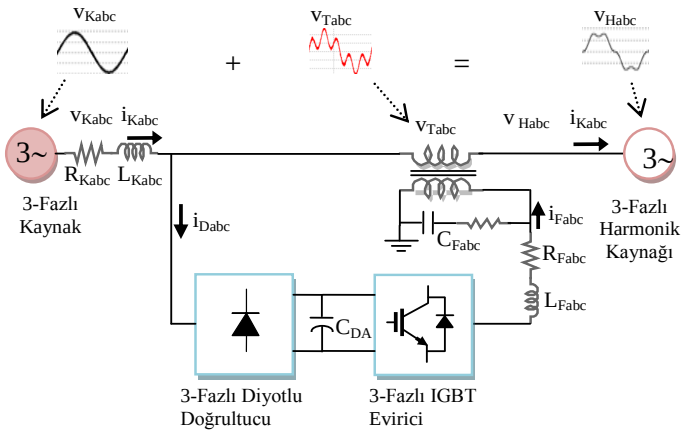
Parametreler		**Değeri**
Gerilimi	v	400 V_{rms}/faz-faz
Akım	I_n	20 A
Frekansı	f	50 Hz
Endüktası	L	1,47mH



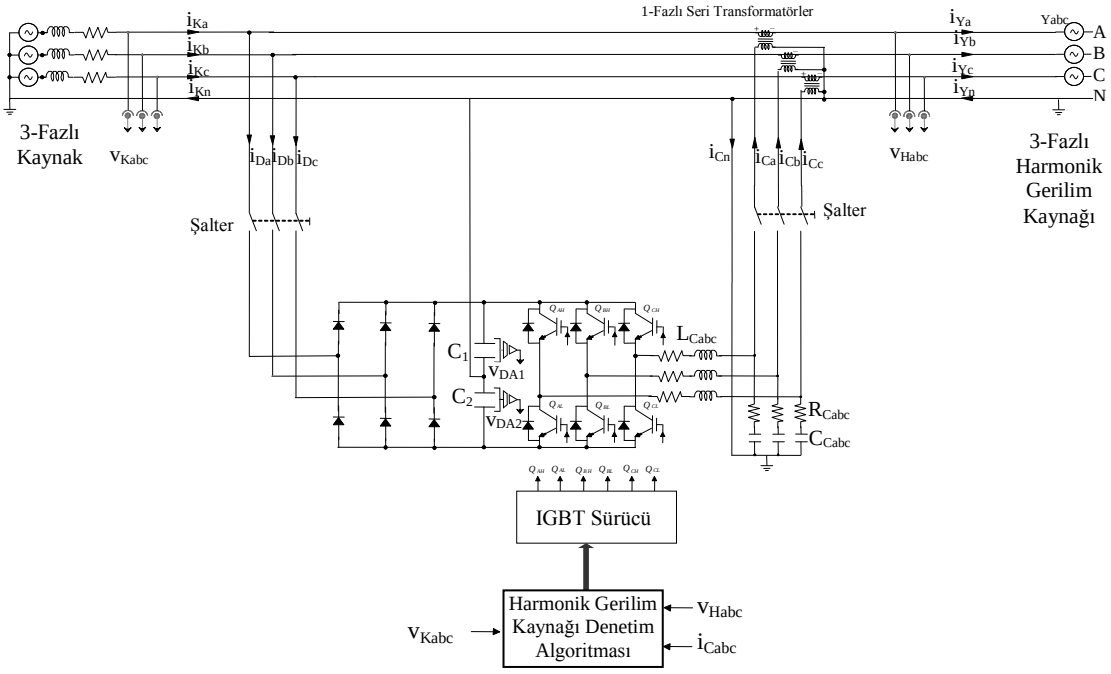
Şekil 4.47 : 3-Fazlı AA hat reaktörü fotoğrafı.

4.18. Şebeke Entegreli Harmonik Gerilim Kaynağının Tasarımı

Günümüzde harmonik üreten kaynaklar ve bazı güç kalitesi problemi üreticileri düşük güçte üretilmekle birlikte yüksek maliyetli ticari ürünlerdir. BGKD deneysel laboratuar ortamında, kaynak gerilim harmoniğinin düşük olması nedeniyle, kaynak geriliminde daha yüksek gerilim kaynaklı harmonik ve güç kalitesi problemleri oluşturmak amacıyla şebekeye seri bağlı Harmonik Gerilim Kaynağı (HGK) tasarlanmaktadır. Böylece kaynak gerilimi HGK ile değişik harmonik seviyelerinde bozulmakta ve gerilim kaynaklı harmonik ve güç kalitesi problemleri BGKD sistemi ile düzeltilme çalışmalarına imkân sağlanmaktadır. Şekil 4.48'de şebeke entegreli HGK genel bağlantı blok şeması ve Şekil 4.49'da HGK denetim blok şeması ve Tablo 4.2'de HGK sistem parametreleri verilmektedir.



Şekil 4.48: Şebeke entegreli HGK genel blok şeması.

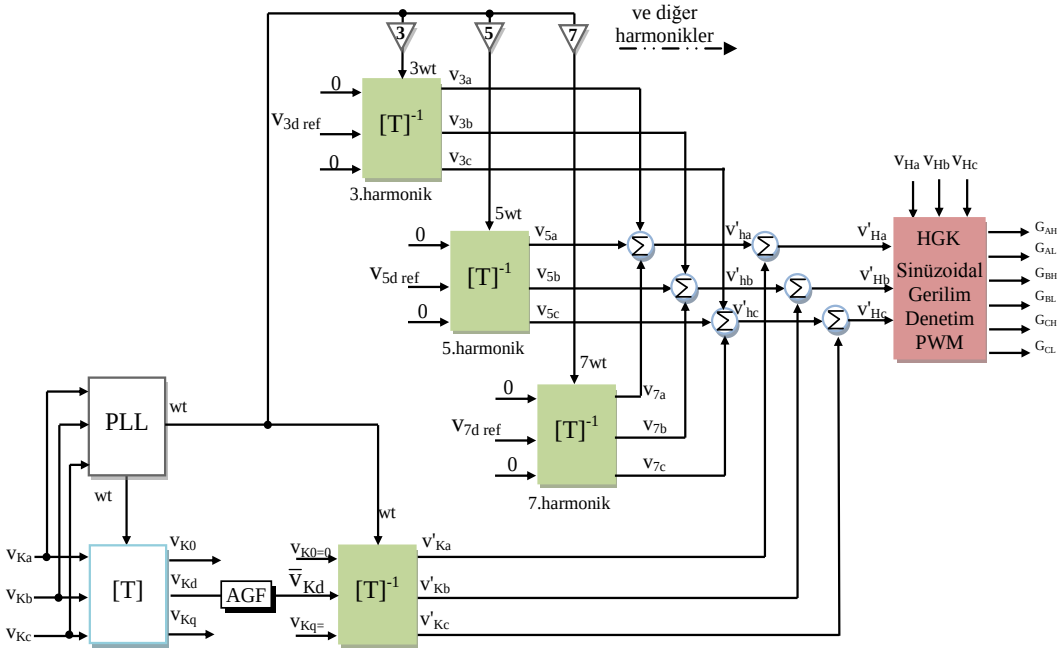


Şekil 4.49: Şebeke entegreli HGK açık blok şeması.

Tablo 4.3: HGK sistem parametreleri.

	Parametreler		**Değeri**
Kaynak	Gerilimi	v_{Kabc}	380 V_{rms}/faz-faz
	Frekansı	f	50 Hz
DA Bara	Gerilimi	V_{DA}	537 V
	3-Fazlı diyotlu doğrultucu	Ic	75 A
	Kondansatör1	C_1	2200 μF
	Kondansatör2	C_2	2200 μF
Harmonik Gerilim Kaynağı	AA Hat Endüktansı	L_{Habc}	1,5 mH /0,23 Ω
	Filtre Direnci	R_{Habc}	5 Ω
	Filtre Kondansatörü	C_{Habc}	26 μF
	Anahtarlama Frekansı	f_{pwm}	~18 kHz
	1-Fazlı Seri Transformatörler	S	5,4 kVA
		Oran	1/3

Şekil 4.50'de önerilen SRY tabanlı HGK denetim algoritması blok şeması görülmektedir. Denetim algoritması blok şemasında görüldüğü gibi üretilmek istenilen 3., 5. ve 7. harmonikler sisteme dâhil edilmektedir. Ayrıca isteğe bağlı olarak harmoniklerin tek veya birlikte üretilme imkânı sağlanmaktadır.



Şekil 4.50: Önerilen SRY tabanlı HGK denetim algoritması blok şeması.

Önerilen SRY tabanlı HGK denetim algoritması kaynak gerilimi ile eşzamanlı çalışmakta ve kaynak geriliminde harmonik, gerilim dengesizliği, gerilim çökmesi ve yükselmesi gibi güç kalitesi problemleri üretmektedir.

Önerilen SRY tabanlı HGK denetim algoritmasında, ilk önce kaynak geriliminde mevcut harmonikler düzeltilmekte ve sadece istenilen harmonikler üretilmektedir. a-b-c koordinatlarında kaynak gerilimleri d-q-0 koordinatlarına Denklem 3.65'de verilen [T] çevrim matrisi ve PLL devresi ile üretilen ωt kullanarak Denklem 3.71'de verildiği gibi çevrilmektedir. 3-fazlı harmonikli kaynak gerilimleri, d-q-0 koordinatlarına dönüşümü yapılan ve "d" ve "q" eksenlerinde bulunan anlık kaynak gerilimleri v_{Kd} ve v_{Kq} hem AA ($\tilde{v}_{Kd}$ ve $\tilde{v}_{Kq}$) hem de DA ($\overline{v}_{Kd}$ ve $\overline{v}_{Kq}$) bileşenleri içermektedir. v_{Kd} ve v_{Kq}'nun AA bileşenleri kaynak gerilimin harmonik ve negatif sıralı bileşeninden meydana gelmektedir. DA bileşenleri ise gerilimin pozitif sıralı bileşeninden oluşmaktadır. Kaynak gerilimine ait sıfır sıralı v_{K0} gerilimi ise kaynağın dengesiz olması durumunda oluşmaktadır.

Kaynak geriliminde mevcut olan harmoniklerin düzeltilmesi için algoritmada d-q-0 koordinatlarına dönüşümü yapılan kaynak geriliminin $\overline{v}_{Kd}$ bileşeni

kullanılmaktadır."d" ekseninde v_{Kd} gerilimi Şekil 3.12'de verilen AGF yöntemi uygulanarak DA bileşeni $\bar{v}_{Kd}$ elde edilmektedir. Denklem 3.66'da verilen $[T]^{-1}$ ters çevrim matrisi girişine, kaynak geriliminin $\bar{v}_{Kd}$ bileşeni ve PLL ile üretilen ωt kullanarak Denklem 4.10'da verildiği gibi kaynak gerilimlerinin temel pozitif sıralı bileşeni olan ve kaynak gerilim harmoniklerini filtreleme işlemlerinde kullanılmak üzere referans gerilimler v'_{Ka}, v'_{Kb} ve v'_{Kc} üretilmektedir.

$$\begin{bmatrix} v'_{Ka} \\ v'_{Kb} \\ v'_{Kc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \\ T \\ \\ \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{v}_{Kd} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{4.10}$$

Şekil 4.50'de verildiği gibi, örnek olarak kaynak gerilimine enjekte edilmek istenen 3. harmonik referans gerilimler, Denklem 3.66'da verilen $[T]^{-1}$ ters çevrim matrisi girişine, üretilmek istenen 3. harmoniğin genliği referans olan $v_{3d\,ref}$ bileşeni ve PLL ile üretilen ωt'nin 3 katı alınarak Denklem 4.11'de verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$\begin{bmatrix} v_{3a} \\ v_{3b} \\ v_{3c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \\ T \\ \\ \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ v_{3d\,ref} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{4.11}$$

Kaynak gerilimine enjekte edilmek istenen 5. ve 7. harmonik referans gerilimler, ters çevrim matrisi $[T]^{-1}$ girişine, üretilmek istenen 3. ve 5. harmonik genliklerin referansları olan $v_{5d\,ref}$ ve $v_{7d\,ref}$ bileşenleri ve PLL ile üretilen ωt'nin 5 ve 7 katı alınarak Denklem 4.12 ve Denklem 4.13'de verildiği gibi hesaplanmaktadır. Aynı şekilde kaynak gerilimine enjekte edilmek istenilen diğer harmonikler (9, 11, 13 vb.) yukarıda anlatılan yöntemle ilave edilebilmektedir. Harmonilerin toplamı Denklem 4.14'de verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$\begin{bmatrix} v_{5a} \\ v_{5b} \\ v_{5c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \\ T^{-1} \\ \\ \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ v_{5d\,ref} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{4.12}$$

$$\begin{bmatrix} v_{7a} \\ v_{7b} \\ v_{7c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ v_{7d\,ref} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{4.13}$$

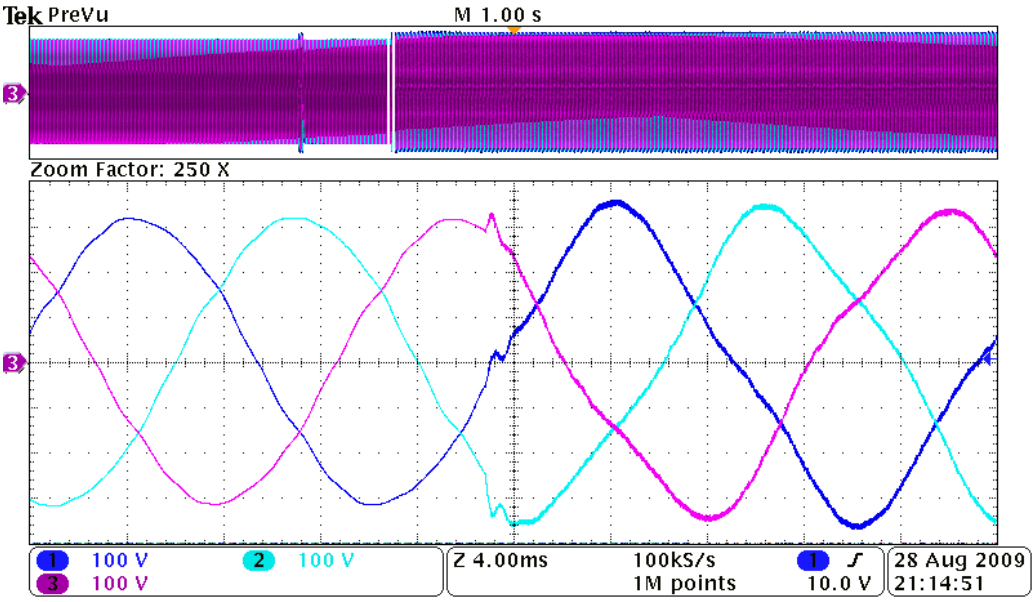
$$\begin{bmatrix} v'_{ha} \\ v'_{hb} \\ v'_{hc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{3a} \\ v_{3a} \\ v_{3a} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{5a} \\ v_{5a} \\ v_{5a} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{7a} \\ v_{7a} \\ v_{7a} \end{bmatrix} \tag{4.14}$$

Kaynak geriliminde mevcut olan harmonikleri düzeltip ve sadece istenilen harmonikleri üreten referans filtre gerilimleri Denklem 4.15'de verildiği gibi hesaplanmaktadır.

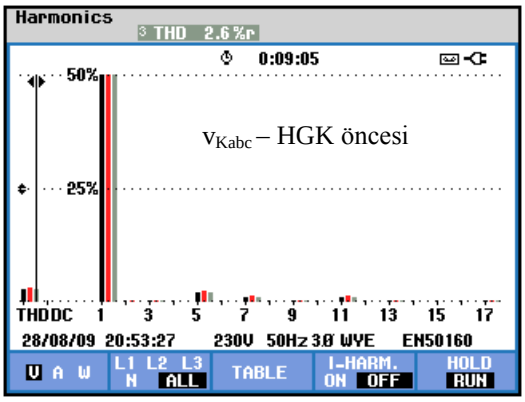
$$\begin{bmatrix} v'_{Ha} \\ v'_{Hb} \\ v'_{Hc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v'_{Ka} \\ v'_{Kb} \\ v'_{Kc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v'_{ha} \\ v'_{hb} \\ v'_{hc} \end{bmatrix} \tag{4.15}$$

Böylece kaynak gerilimine istenilen harmonikleri enjekte edecek v'_{Ha}, v'_{Hb} ve v'_{Hc} referans gerilimler elde edilmektedir. HGK denetim algoritması tarafından üretilen referans harmonik gerilimleri v'_{Ha}, v'_{Hb} ve v'_{Hc} ile HGK çıkış hat gerilimleri v_{Ha}, v_{Hb} ve v_{Hc} sinüzoidal PWM (SPWM) denetleyici tekniği kullanarak anahtarlama sinyalleri üretilmektedir.

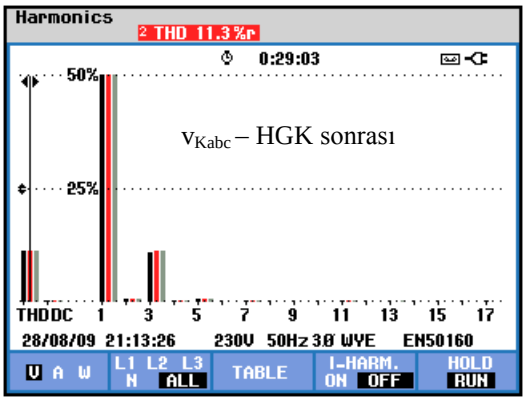
Şekil 4.51'de (a) kaynak gerilimleri v_{Kabc} HGK öncesi ve sonrası dalga şekilleri, (b) kaynak gerilimleri HGK öncesi harmonik dağılımı, (c) %11,3 oranında sadece 3. harmonik enjekte edilmiş kaynak gerilimleri HGK sonrası harmonik dağılımı deneysel sonuçları verilmektedir. Şekil 4.51 (c)'de görüldüğü gibi kaynak gerilimde mevcut olan %2,6 oranındaki harmonikler düzetilmekte ve sadece %11,3 oranında 3. harmonik kaynak gerilimine enjekte edilmektedir.



(a)



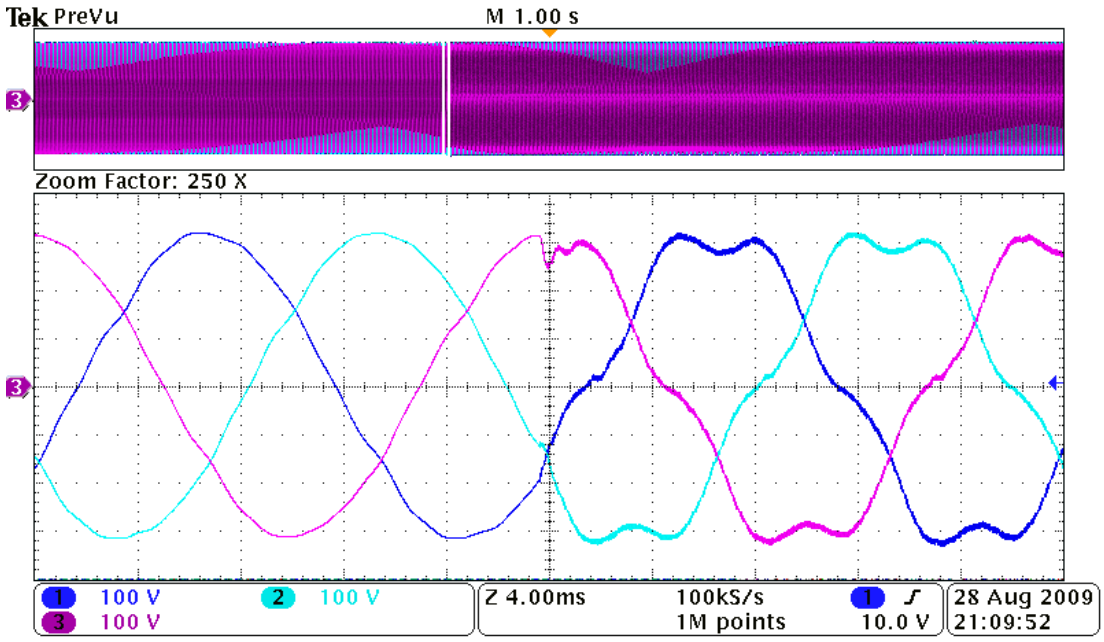
(b)



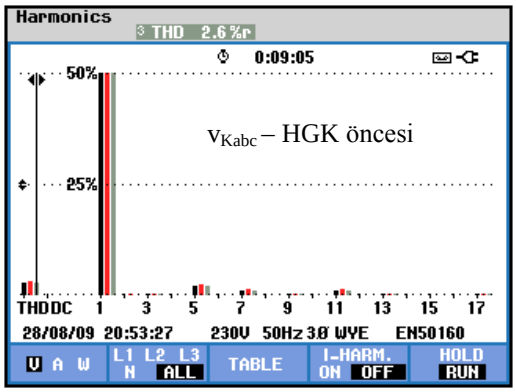
(c)

Şekil 4.51: (a) Kaynak gerilimleri v_{Kabc} HGK öncesi ve sonrası dalga şekileri, (b) kaynak gerilimleri HGK öncesi harmonik dağılımı, (c) sadece 3. harmonik enjekte edilmiş kaynak gerilimleri HGK sonrası harmonik dağılımı deneysel sonuçları.

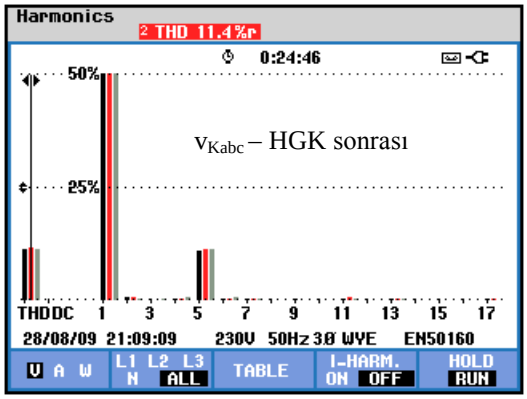
Şekil 4.52'de (a) kaynak gerilimleri v_{Kabc} HGK öncesi ve sonrası dalga şekilleri, (b) kaynak gerilimleri HGK öncesi harmonik dağılımı, (c) %11,4 oranında sadece 5. harmonik enjekte edilmiş kaynak gerilimleri HGK sonrası harmonik dağılımı deneysel sonuçları verilmektedir. Şekil 4.52 (c)'de görüldüğü gibi kaynak gerilimde mevcut olan %2,6 oranındaki harmonikler düzetilmekte ve sadece %11,4 oranında 5. harmonik kaynak gerilimine enjekte edilmektedir.



(a)



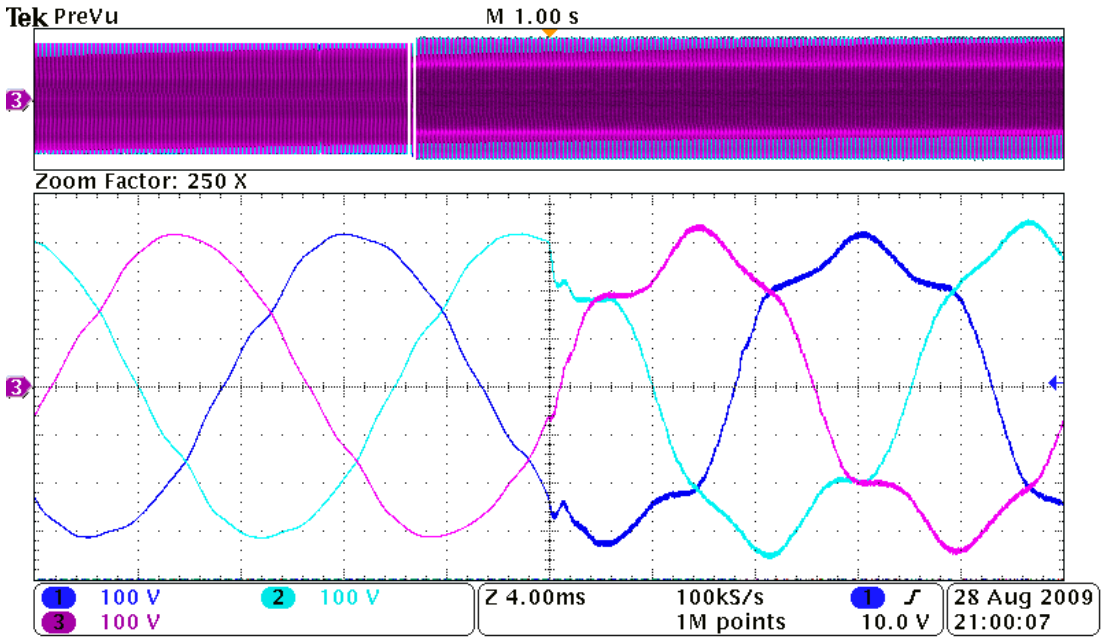
(b)



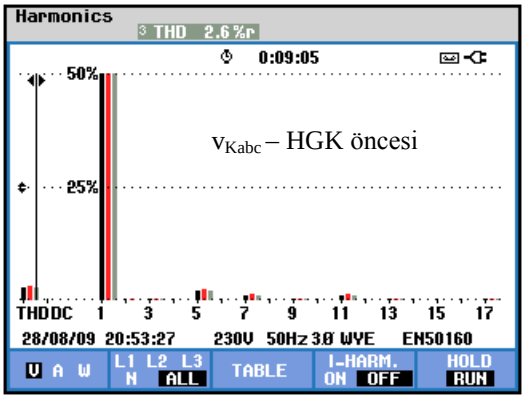
(c)

Şekil 4.52: (a) Kaynak gerilimleri v_{Kabc} HGK öncesi ve sonrası dalga şekileri, (b) kaynak gerilimleri HGK öncesi harmonik dağılımı, (c) sadece 5. harmonik enjekte edilmiş kaynak gerilimleri HGK sonrası harmonik dağılımı deneysel sonuçları.

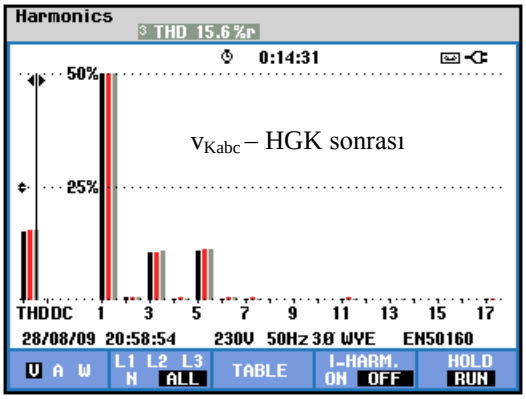
Şekil 4.53'de (a) kaynak gerilimleri v_{Kabc} HGK öncesi ve sonrası dalga şekilleri, (b) kaynak gerilimleri HGK öncesi harmonik dağılımı, (c) %15,6 oranında 3. ve 5. harmonikler enjekte edilmiş kaynak gerilimleri HGK sonrası harmonik dağılımı deneysel sonuçları verilmektedir.



(a)



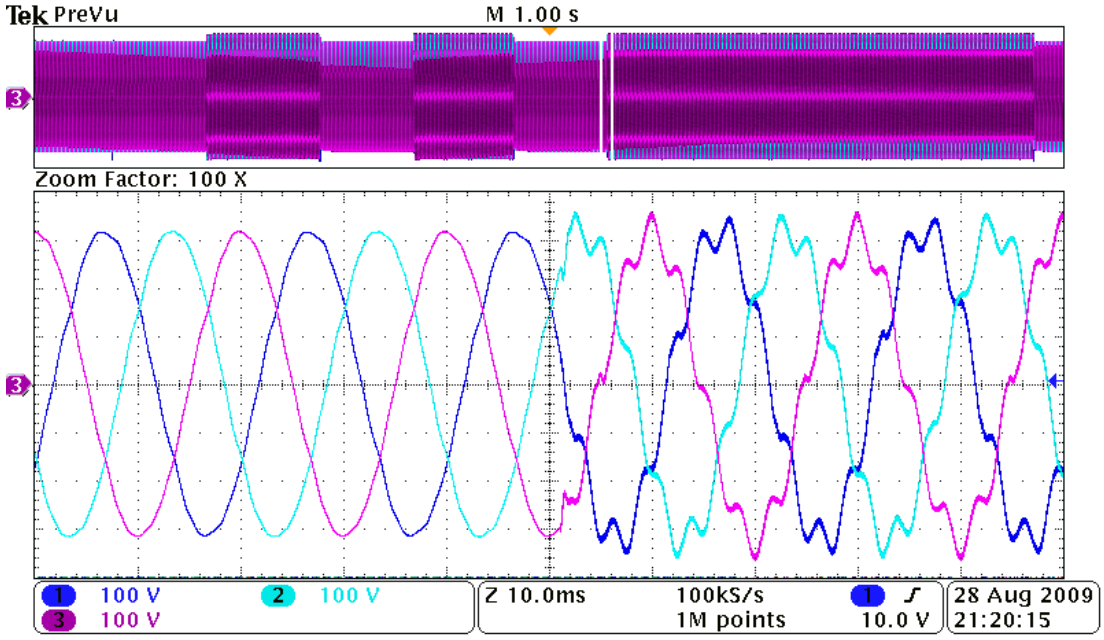
(b)



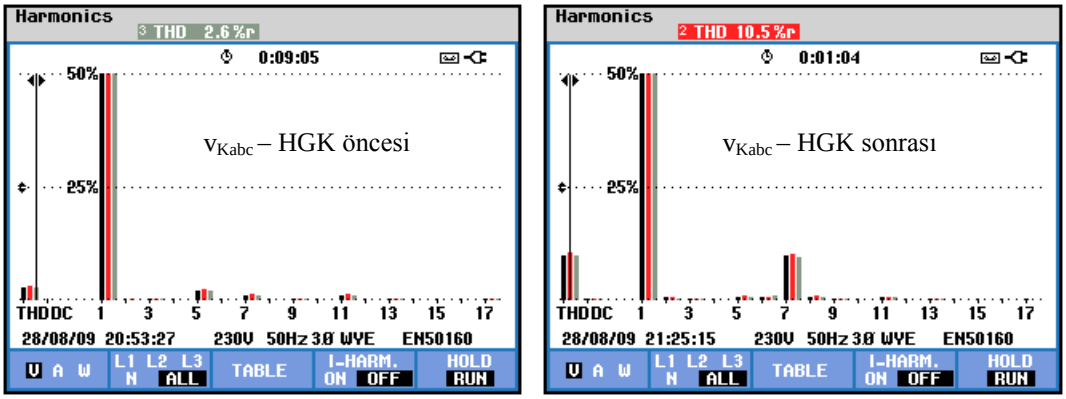
(c)

Şekil 4.53: (a) Kaynak gerilimleri v_{Kabc} HGK öncesi ve sonrası dalga şekileri, (b) kaynak gerilimleri HGK öncesi harmonik dağılımı, (c) 3. ve 5. harmonikleri enjekte edilmiş kaynak gerilimleri HGK sonrası harmonik dağılımı deneysel sonuçları.

Şekil 4.54'de (a) kaynak gerilimleri v_{Kabc} HGK öncesi ve sonrası dalga şekilleri, (b) kaynak gerilimleri HGK öncesi harmonik dağılımı, (c) %10,5 oranında sadece 7. harmonik enjekte edilmiş kaynak gerilimleri HGK sonrası harmonik dağılımı deneysel sonuçları verilmektedir. Şekil 4.54 (c)'de görüldüğü gibi kaynak gerilimde mevcut olan %2,6 oranındaki harmonikler düzetilmekte ve sadece %10,5 oranında 7. harmonik kaynak gerilimine enjekte edilmektedir.



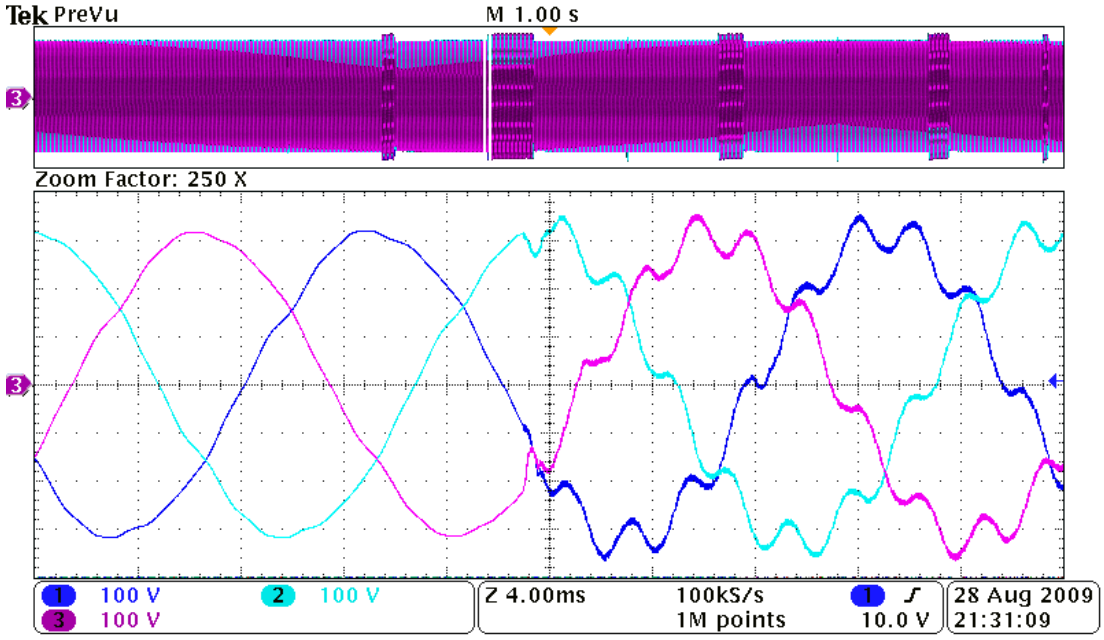
(a)



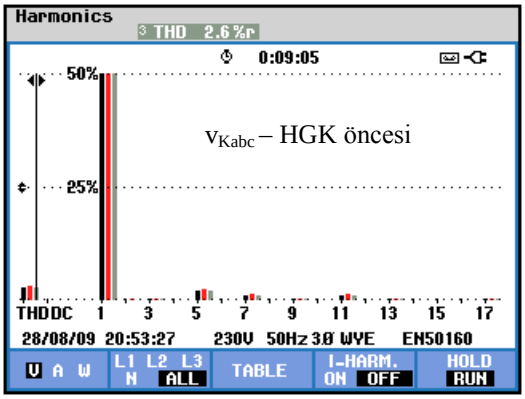
(b) (c)

Şekil 4.54: (a) Kaynak gerilimleri v_{Kabc} HGK öncesi ve sonrası dalga şekileri, (b) kaynak gerilimleri HGK öncesi harmonik dağılımı, (c) sadece 7. harmonik enjekte edilmiş kaynak gerilimleri HGK sonrası harmonik dağılımı deneysel sonuçları.

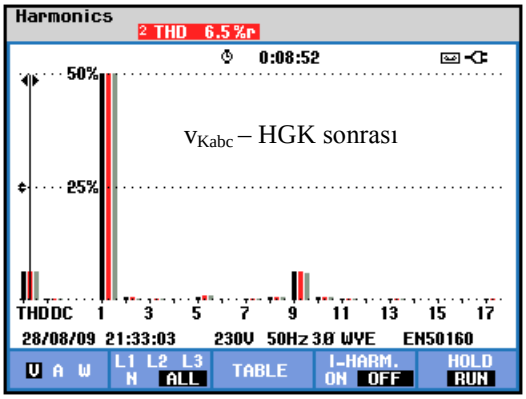
Şekil 4.55'de (a) kaynak gerilimleri v_{Kabc} HGK öncesi ve sonrası dalga şekilleri, (b) kaynak gerilimleri HGK öncesi harmonik dağılımı, (c) %6,5 oranında sadece 9. harmonik enjekte edilmiş kaynak gerilimleri HGK sonrası harmonik dağılımı deneysel sonuçları verilmektedir. Şekil 4.55 (c)'de görüldüğü gibi kaynak gerilimde mevcut olan %2,6 oranındaki harmonikler düzetilmekte ve sadece %6,5 oranında 9. harmonik kaynak gerilimine enjekte edilmektedir.



(a)



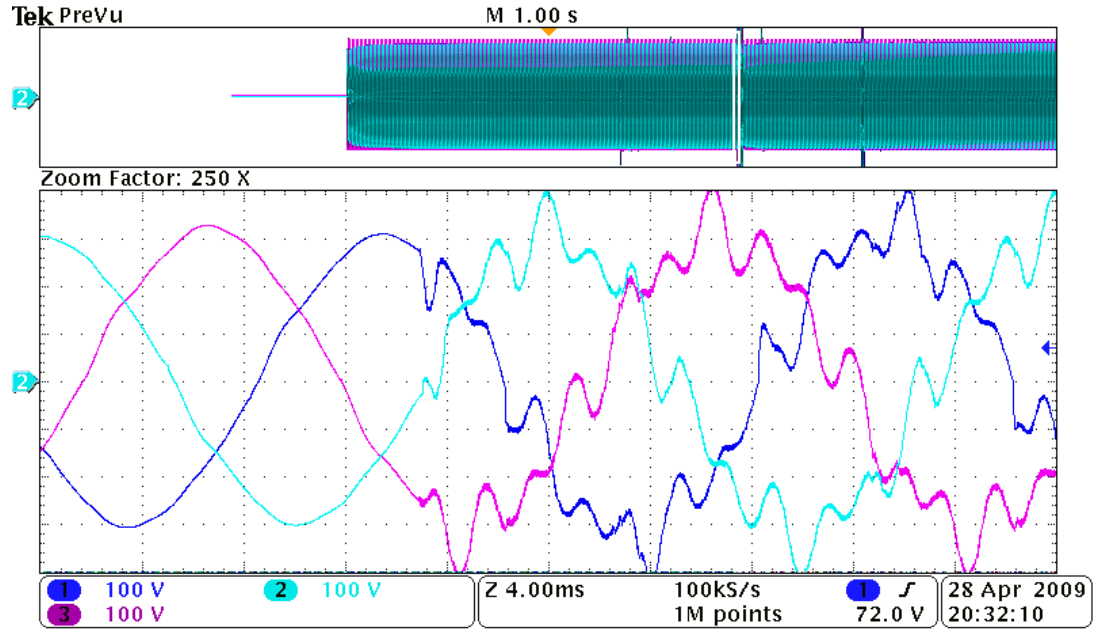
(b)



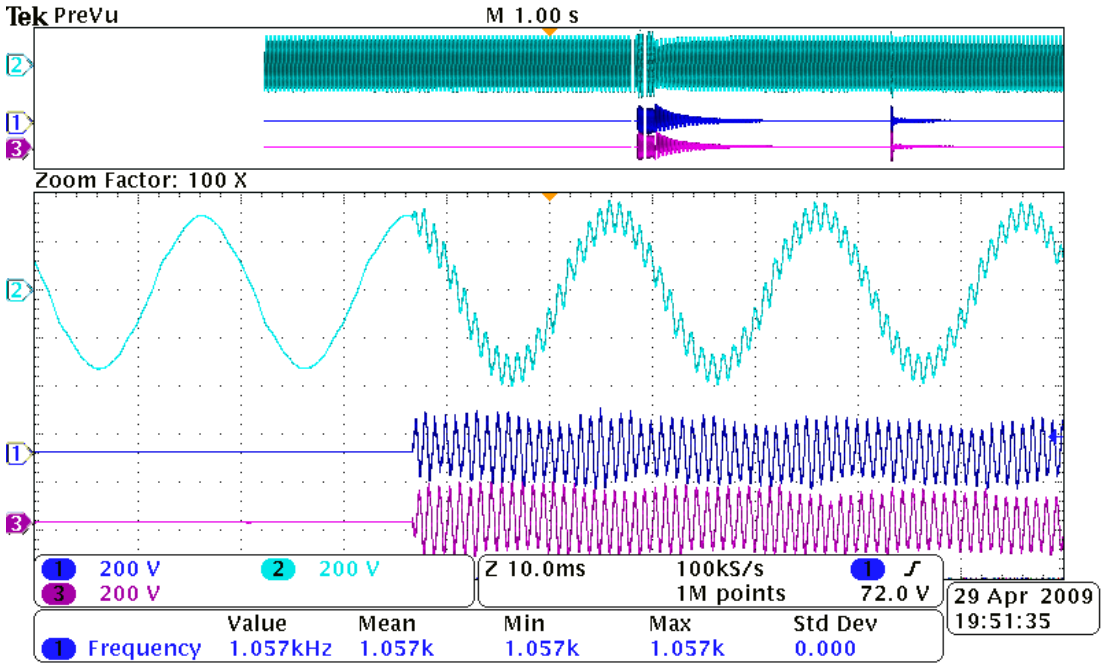
(c)

Şekil 4.55: (a) Kaynak gerilimleri v_{Kabc} HGK öncesi ve sonrası dalga şekileri, (b) kaynak gerilimleri HGK öncesi harmonik dağılımı, (c) 3. ve 5. harmonikleri enjekte edilmiş kaynak gerilimleri HGK sonrası harmonik dağılımı deneysel sonuçları.

Şekil 4.56'da kaynak gerilimleri v_{Kabc} 7. ve 9. harmonikler enjekte edilmiş HGK öncesi ve sonrası dalga şekleri ve Şekil 4.57'de kaynak gerilimleri v_{Kabc} 11. harmonik enjekte edilmiş HGK öncesi ve sonrası dalga şekleri deneysel sonuçları verilmektedir.



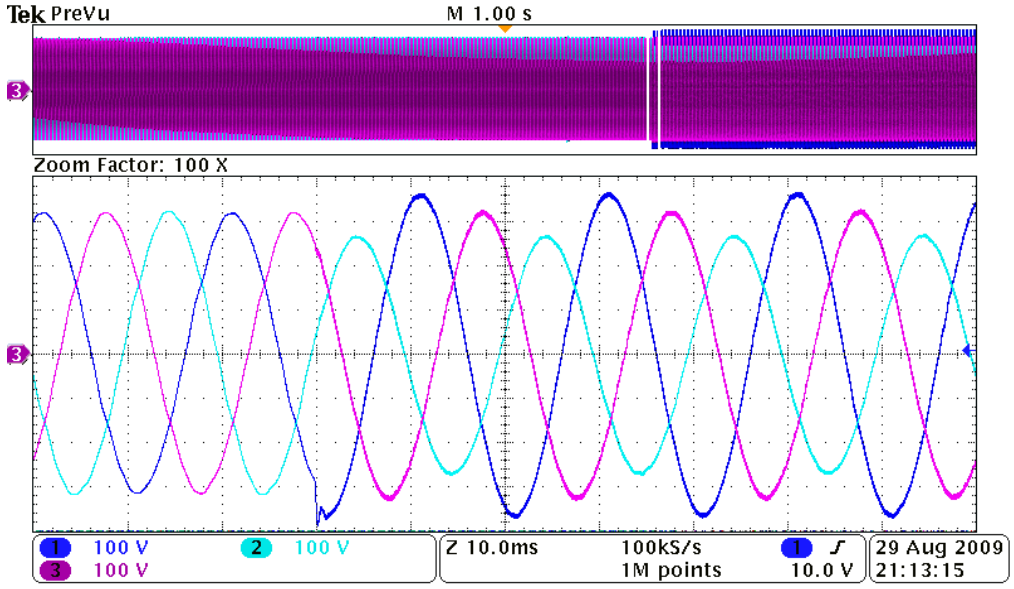
Şekil 4.56: Kaynak gerilimleri v_{Kabc} 7. ve 9. harmonikler enjekte edilmiş HGK öncesi ve sonrası dalga şekilleri deneysel sonuçları.



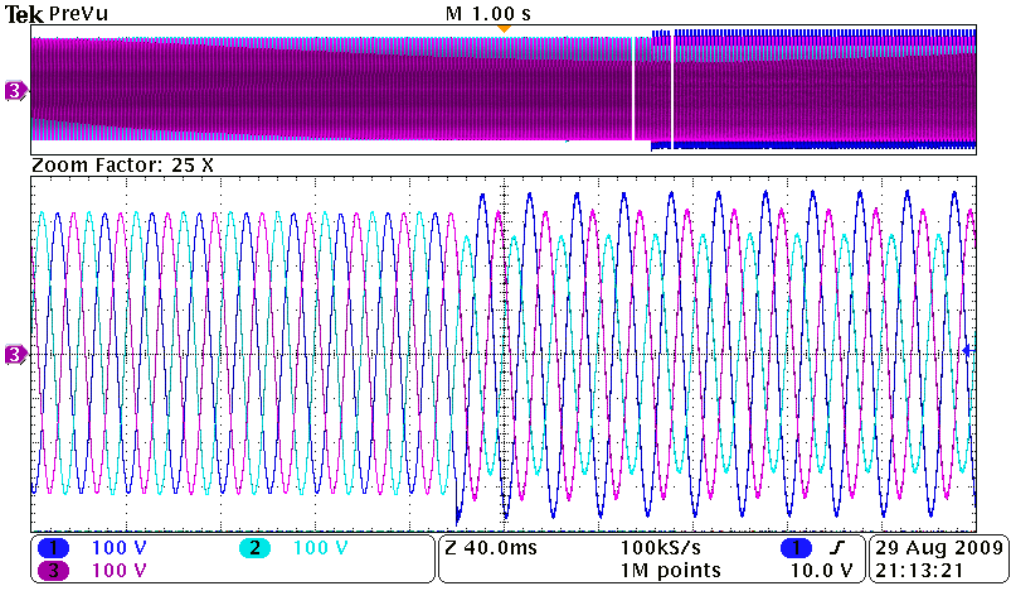
Şekil 4.57: Kaynak gerilimleri v_{Kabc} 11. harmonik enjekte edilmiş HGK öncesi ve sonrası dalga şekilleri deneysel sonuçları.

HGK denetim algoritması ile kaynak gerilimlerinde dengesizliklerde oluşturulabilmektedir. Şekil 4.58 (a) ve (b)'de kaynak gerilimlerinde oluşturulan dengesizlikler HGK öncesi ve sonrası dalga şekilleri deneysel sonuçları verilmektedir. Şekil 4.58 (c) ve (d)'de görüldüğü gibi a-fazı HGK öncesi 224,4 Vrms

etkin değeri HGK sonrasında 259,1 Vrms etkin değerine yükseltilmektedir. b-fazı HGK öncesi 224,3 Vrms etkin değeri HGK sonrasında 188,2 Vrms etkin değerine düşürülmektedir. c-fazı HGK öncesi 225,5 Vrms etkin değeri HGK sonrasında 230,2 Vrms etkin değerine tutularak fazlar arasında dengesizlik oluşturulmaktadır. Şekil 4.58 (e) ve (f)'de dengesizliklerle ilgili HGK öncesi ve sonrası harmonik analizörle alınmış bazı değerler verilmektedir.

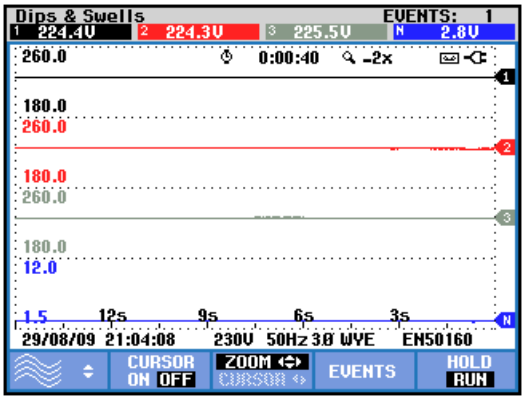


(a)

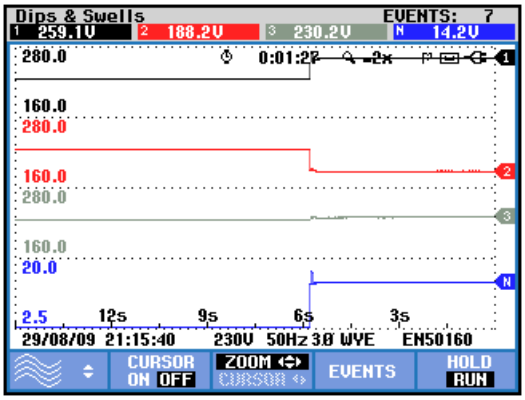


(b)

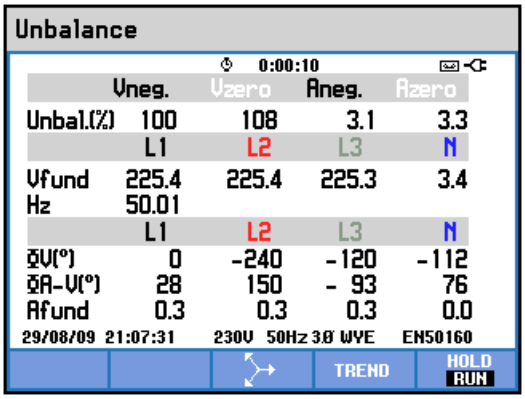
Şekil 4.59: (a) ve (b) kaynak gerilimlerinde oluşturulan dengesizlikler HGK öncesi ve sonrası dalga şekilleri, (c) - (f) dengesizliklerle ilgili HGK öncesi ve sonrası harmonik analizörle alınmış değerlerin deneysel sonuçları.



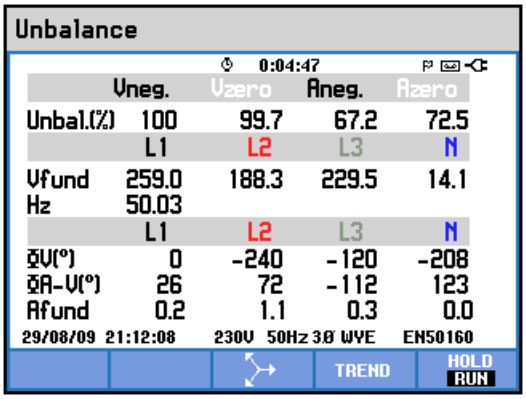
(c)



(d)



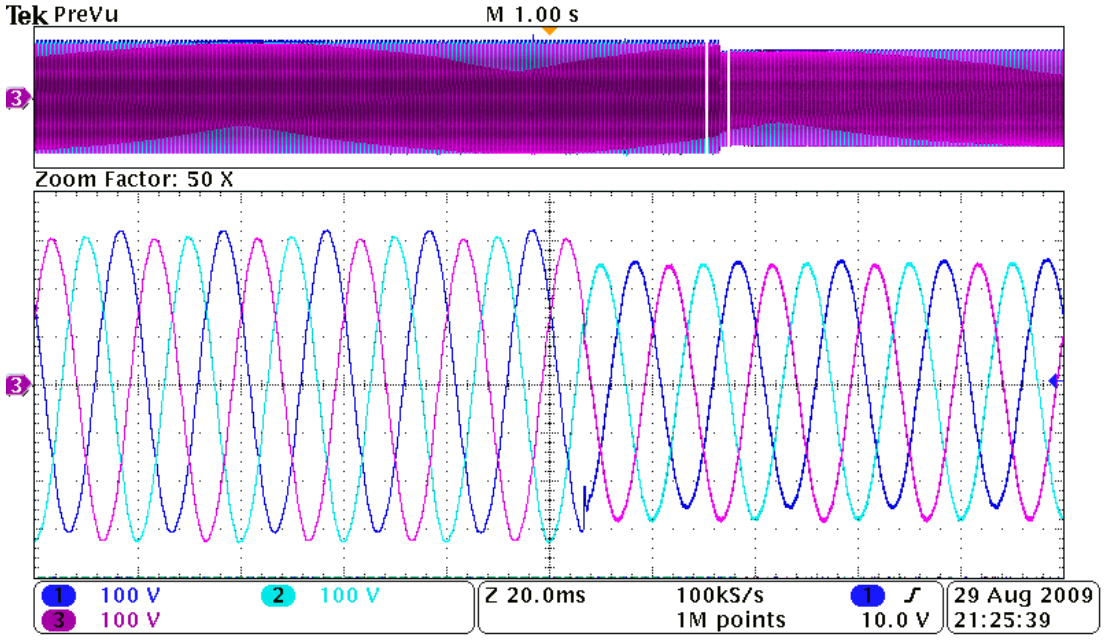
(e)



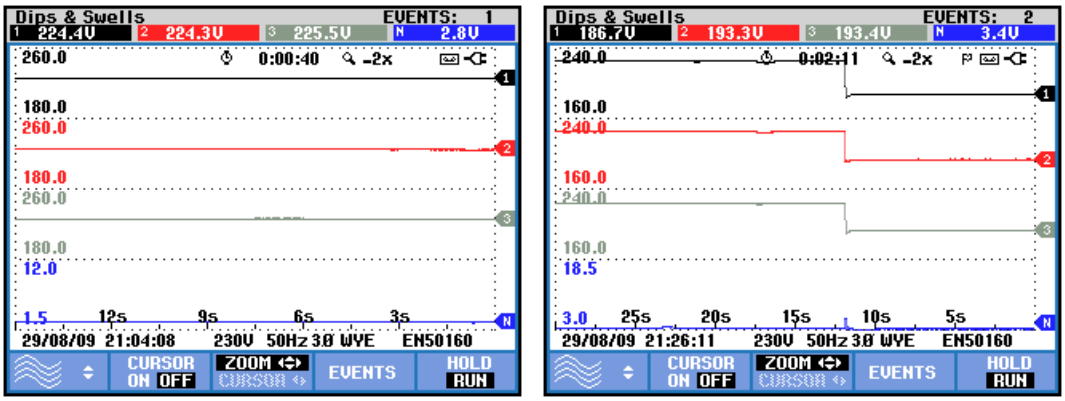
(f)

Şekil 4.58: (devam) (a) ve (b) kaynak gerilimlerinde oluşturulan dengesizlikler HGK öncesi ve sonrası dalga şekilleri, (c) - (f) dengesizliklerle ilgili HGK öncesi ve sonrası harmonik analizörle alınmış değerlerin deneysel sonuçları.

HGK denetim algoritması ile kaynak gerilimlerinde anlık gerilim çökmesi veya yükselmesi oluşturulabilmektedir. Şekil 4.59'da (a) kaynak gerilimlerinde oluşturulan gerilim çökmesi HGK öncesi ve sonrası dalga şekilleri deneysel sonuçları verilmektedir. Şekil 4.59 (b) ve (c)'de görüldüğü gibi a-fazı HGK öncesi 224,4 Vrms etkin değeri HGK sonrasında 186,7 Vrms etkin değerine düşürülmektedir. b-fazı HGK öncesi 224,3 Vrms etkin değeri HGK sonrasında 193,3 Vrms etkin değerine düşürülmektedir. c-fazı HGK öncesi 225,5 Vrms etkin değeri HGK sonrasında 193,4 Vrms etkin değerine düşürülmekte ve c-fazıda aynı anda gerilim çökmesi oluşturulmaktadır.



(a)



(b) (c)

Şekil 4.59: (a) kaynak gerilimlerinde oluşturulan gerilim çökmesi HGK öncesi ve sonrası dalga şekilleri, (b) ve (c) gerilim çökmesi ile ilgili HGK öncesi ve sonrası harmonik analizörle alınmış değerlerin deneysel sonuçları.

4.19. Sonuç

BGKD denetim sisteminde kullanılan tüm donanım ve alt yapı çalışmalarının tasarımı ve hazırlanmasında, hat empedans oluşumlarından ve gerilim düşümlerinden kaçınmak için minimum hat uzunluğu, toprak hattı ve sinyal hatları üzerinde gürültülerin oluşmaması için devre elemanları mümkün olduğu kadar birbirine yakın tutulmakta ve düşük sinyal filtre devreleri kullanılmaktadır. Gerektiğinde birden fazla işlevi yürütebilecek şekilde esnek ve farklı denetim algoritmalarının

yürütülmesi ve çalıştırtması için seçenekli olarak tasarlanmaktadır. Genel amaçlı kullanım ve BGKD denetim algoritmalarının yürütülmesi için tasarlanan F28335 DSP uygulama geliştirme kartı Tablo 4.1'de verilen farklı DSP'ler ile fiyat ve performans kriterine göre karşılaştırıldığında geliştirilen F28335 DSP uygulama geliştirme kartının avantajlı olduğu görülmektedir.

BGKD denetim sisteminde kullanılan kartlar Şekil 4.24'de görüldüğü gibi bütünleşik yapıda olup kablolara gerek kalmadan soketler ile bağlantı kurulmaktadır. Böylece laboratuar ortamında yerden tasarruf sağlanmakta ve EMI etkilerinden ve gürültülerden daha az etkilenmektedir. BGKD denetim sisteminde kullanılan kartlarında oluşabilecek aşırı akım, aşırı gerilime karşı koruma yapmak ve sistemin güvenli çalışmasını sağlamak için sinyal denetim ve hata koruma kartı kullanılarak tüm güç anahtarları (IGBT sürücüler, tristör sürücüler, statik anahtarlar vs.) korunmaktadır. BGKD denetim sistemine ait tüm akım ve gerilim sinyalleri dalga şeklilerinin ve bu sinyallere ait harmonik analiz sonuçlarının görselleştirilmesi için üzerindeki tuş takımları ile tüm DSP kartlarının parametreleri grafik LCD gösterge kartı ile basit bir şekilde denetlenmektedir.

BGKD denetim algoritmaları tarafından üretilen anahtarlama sinyalleri IGBT sürücü modülleri kullanarak tasarlanan kartlar ile sürülmektedir. IGBT sürücü kartlarından maksimum verim alabilmek, EMI etkileri ve sinyal kayıplarını azalmak için anahtarlama sinyal giriş uçlarında kablo kullanılmamakta ve birbirleri ile bağlantı soketlerle sağlanmaktadır.

BGKD deneysel düzeneğinde PAGF ve SAGF sistemlerinin ortak kullandığı enerji depolama ve transfer işlevlerini yapan DA-bara, iki adet bakır levha arasına yalıtkan kağıt kullanarak lamine yapıda tasarlanmaktadır. DA-bara kablolarından kaynaklanabilecek ve dezavantaj olan endüktans etkiden kaçınılmakta, avantaj sağlayan kapasitif özellik kazandırılmaktadır.

BGKD deneysel laboratuar düzeneğinde farklı yük akım harmonikleri oluşturmak için tasarlanan ve AA kıyıcı, motor sürücü devrelerinde, ayarlı hız denetim cihazlarında, AA dan DA'a dönüşüm devrelerinde ve kesintisiz güç kaynakları gibi uygulamalarda kullanılabilecek mikro denetleyici tabanlı genel amaçlı tristör sürücü kartı kullanılmaktadır. Tasarlanan tristör sürücü kartı, 3-fazlı veya 1-fazlı tam

denetimli tristörlü doğrultucu modu, 3-fazlı veya 1-fazlı AA kıyıcı ve AA denetim modu ve 3-fazlı veya 1-fazlı statik anahtar olmak üzere üç farklı modda çalışabilmektedir. Şekil 4.4, Şekil 4.46 ve deneysel çalışmalarda alınan sonuçlardan görüldüğü üzere tasarlanan tristör sürücü kartı piyasada yaygın kullanılan güçlerdeki tristörleri hem 3-fazlı veya 1-fazlı tam denetimli tristörlü doğrultucu olarak hem de AA kıyıcı olarak çok rahatlıkla denetleyebilmektedir.

Günümüzde harmonik üreten kaynaklar ve bazı güç kalitesi problemi üreticileri düşük güçte üretilemekle birlikte yüksek maliyetli ticari ürünlerdir. BGKD deneysel laboratuar ortamında, kaynak gerilim harmoniğinin düşük olması nedeniyle, kaynak geriliminde daha yüksek gerilim kaynaklı harmonik ve güç kalitesi problemleri oluşturmak amacıyla şebekeye seri bağlı Harmonik Gerilim Kaynağı (HGK) tasarlanmaktadır. Böylece kaynak gerilimi HGK ile değişik harmonik seviyelerinde bozulmakta ve gerilim kaynaklı harmonik ve güç kalitesi problemleri BGKD sistemi ile düzeltilme çalışmalarına imkân sağlamaktadır.

Sonuç olarak BGKD deneysel düzeneği, çok farklı düzeydeki güç kalitesi problemlerinin güvenli bir şekilde test edilmesi için modüler bir yapıda tasarlanmıştır. Grafik LCD gösterge ve üzerindeki tuş takımı ile sistemin denetimi yapılabildiği gibi ayrıca bilgisayar haberleşmesi yardımıyla tüm BGKD deneysel düzeneği bilgisayar üzerinden izlenebilmekte ve tüm veriler görüntülenebilmektedir.

5. BGKD'NİN DSP VE BİLGİSAYAR YAZILIMI İLE İZLENMESİ

5.1. Giriş

BGKD laboratuar düzeneğininde FFT, PAGF ve SAGF denetim kart bileşenlerinin deneysel altyapı düzeneğinin tasarımı Bölüm 4.3- 4.7'de detaylı bir şekilde açıklanmaktadır. Bu bölümde ise alt sistemlerin DSP ve bilgisayar yazılımları ile izlenmesi, güvenli çalışma, hata koruma denetimi ve analizi anlatılmaktadır.

Güç sistemlerinde elektrik enerjisinin verimliliğini ve yükün güç kalitesini artırmak için harmoniklerin yok edilmesi gerekmektedir. Harmoniklerin uygun biçimde yok edilmesi için analizlerin doğru yapılması çok önemlidir. BGKD sistemin harmonik analizinde FFT ve FHT algoritmaları kullanılmaktadır. Aşağıda harmonik analiz yöntemlerinde kullanılan Fourier ve Hartley dönüşüm yöntemleri hakkında genel açıklama yapılmaktadır.

5.2. Fourier Dönüşümü

Fourier dönüşümü, her frekansa ait sinüs dalgası için genlik ve evre hesaplayan bir fonksiyondur. Dönüşüm sürekli zaman fonksiyonlarına veya ayrık zaman fonksiyonlarına uygulanabilmektedir. Eğer dönüşüm ayrık zaman aralıklı değerlerden oluşmuş ise ayrık frekanslardaki sinüzoidal fonksiyonların serisi şeklinde gösterilebilir. Bu frekanslar asıl frekansın iki, üç ve daha büyük katlarıdır. Bu şekildeki sinüslerin toplamına Fourier serisi denmektedir. Zaman domenindeki bir sinyali frekans domenine aktarma işlemine Fourier dönüşümü denilmektedir. Bu dönüşümden sonra fonksiyon karmaşık ve eksponansiyel ifadeler şekline dönüşür ve mühendislik, analiz ve tasarım konusunda büyük kolaylıklar sağlar [84]. Bir elektrik sinyali hakkında bilgi alabilmek (frekans, genlik ve evresini öğrenmek) için bu sinyal Fourier serisi ile yazılmaktadır. Denklem 5.1'de Fourier serisinin açılımı verilmektedir.

$$f(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty}\left(a_n \cos\left(\frac{n2\pi t}{T}\right) + b_n \sin(\frac{n2\pi t}{T})\right) \tag{5.1}$$

Her bir harmonik frekansı için ayrı hesaplanan a_0, a_n, b_{n} katsayıları Denklem 5.2'de verilmektedir.

$$a_0 = \frac{2}{T}\int_0^T f(t)\mathrm{dt} \ , a_n = \frac{2}{T}\int_0^T f(t)\cos(\frac{n2\pi t}{T})\,\mathrm{dt} \ , b_n = \frac{2}{T}\int_0^T f(t)\sin(\frac{n2\pi t}{T})\,\mathrm{dt} \quad (5.2)$$

Denklem 5.1'de verilen Fourier serisi gerekli sadeleştirmeler yapıldığında Denklem 5.3'de verildiği gibi yazılabilmektedir. A_0 katsayısı sinyalin DA seviyesini, A_n katsayısı hesaplanan harmonik frekansa ait genliğini ve θ_n ise hesaplanan harmonik frekansın açısını vermektedir. Bu katsayılar Denklem 5.4'de verilmektedir.

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty}\left(A_n\cos(\frac{n2\pi t}{T}) + \theta_n\right) \quad (5.3)$$

$$A_0 = \frac{1}{2}a_0 \ ; \ A_n = \sqrt{{a_n}^2 + {b_n}^2} \ ; \ \theta_n = \arctan\left(-\frac{b_n}{a_n}\right) \quad (5.4)$$

$\omega t = 2\pi f t$ ve $e^{-i\omega t} = \cos\omega t - i\sin\omega t$ şeklinde tanımlama yaptığımızda Fourier düğüşüm Denklem 5.5'de verildiği gibi yazılabilmektedir.

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega\mathrm{t}}\mathrm{dt} \quad (5.5)$$

Denklem 5.5'de verilen dönüşüm fonksiyonu sabit ΔT aralıklarla N kadar örneklediğinde Denklem 5.6'da verilen ayrık Fourier dönüşümünü (DFT-Discreate Fourier Transform) elde edilmektedir [42,45,85].

$$F[k\omega] = \frac{1}{\mathrm{N}}\sum_{n=0}^{N-1} f[\mathrm{n}\Delta\mathrm{T}]\mathrm{e}^{-\mathrm{jk}\omega\mathrm{n}\Delta\mathrm{T}} \quad \mathrm{k} = 0,1,2\ldots,\mathrm{N}-1 \quad (5.6)$$

5.3. Hızlı Fourier Dönüşümü

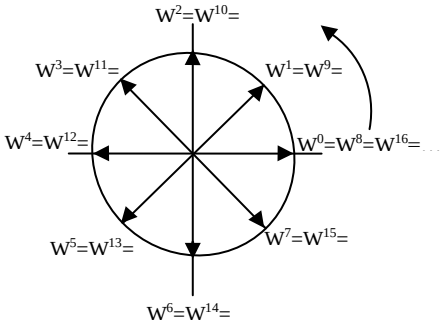
Faz faktörü olarak adlandırılan $\mathrm{W} = \mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi/\mathrm{N}}$ eşitliği ile ifade edilmektedir. Denklem 5.6 faz faktörüne göre tekrar yazıldığında Denklem 5.7 elde edilmektedir.

$$F[k] = \frac{1}{\mathrm{N}} \sum_{n=0}^{N-1} f[\mathrm{n}]\mathrm{W}^{\mathrm{kn}} \qquad \mathrm{k} = 0,1,2 \ldots, \mathrm{N}-1 \tag{5.7}$$

Denklem 5.7'de verilen ayrık Fourier dönüşümünde, N=8 olarak alındığında tekrar F=Wxf matris formunda aşağıdaki gibi yazılmaktadır.

$$\begin{bmatrix} F[0] \\ F[1] \\ F[2] \\ \vdots \\ F[N-1] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W^0 & W^0 & W^0 & & W^0 \\ W^0 & W^1 & W^2 & \cdots & W^{(N-1)} \\ W^0 & W^2 & W^4 & & W^{2(N-1)} \\ & \vdots & & \ddots & \vdots \\ W^0 & W^{(N-1)} & W^{2(N-1)} & \cdots & W^{(N-1)(N-1)} \end{bmatrix} X \begin{bmatrix} f[0] \\ f[1] \\ f[2] \\ \vdots \\ f[N-1] \end{bmatrix}$$

Buradaki W matrisi 7x7=49 değer almaktadır. Şekil 5.1'den de anlaşılacağı gibi W matrisinin 49 değerinden 46 değeri $1, \frac{1}{2} + j\frac{1}{2}$, $j\frac{1}{2}$ sayılarının eşleniğinden veya negatif değerlerinden oluşmaktadır. Ayrık Fourier dönüşümün bu yöntem kullanarak gereksiz hesaplamaların azaltılma işlemine FFT (Fast Fourier Transform) hızlı Fourier dönüşümü denilmektedir [85].



Şekil 5.1: N=8 için W matrisinin aldığı değerler

5.4. Hartley Dönüşümü

Güç sistemlerinde harmoniklerin analizinde kullanılan yöntemlerden biri olan Hartley dönüşümü, Fourier dönüşüm serileri kullanılarak üretilmektedir. $\mathrm{cas}(x) = \cos(x) + \sin(x)$ şeklinde tanımlama yapıldığında Denklem 5.1'de verilen Fourier serisi Denklem 5.8'de verildiği gibi yazılabilmektedir.

$$f(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{2}(a_n + b_n)\,\mathrm{cas}\left(\frac{n2\pi t}{T}\right) + \frac{1}{2}(a_n - b_n)\,\mathrm{cas}\left(\frac{-n2\pi t}{T}\right) \right) \tag{5.8}$$

a_n ve b_n katsayıları Denklem 5.2'de gibi hesaplanmaktadır. Bu katsayılar $a_{-n} = a_n$ ve $b_{-n} = -b_n$ değerlerini aldığından Denklem 5.8'de verilen ifadeler Denklem 5.9'da verildiği gibi yazılabilmektedir.

$$f(t) = \frac{1}{2}\sum_{n=1}^{\infty}\left((a_n + b_n)\,\mathrm{cas}(\frac{n2\pi t}{T})\right) \tag{5.9}$$

Denklem 5.9'da a_n ve b_n katsayıları $S_n = \frac{1}{2}(a_n + b_n)$ şeklinde tanımlanırsa, Fourier serileri kullanarak Denklem 5.10'da verilen Hartley serisi elde edilmektedir [85].

$$f(t) = \sum_{n=1}^{\infty} S_n\,\mathrm{cas}(\frac{n2\pi t}{T}) \tag{5.10}$$

Denklem 5.10'da verilen S_n katsayısı Denklem 5.11'de verildiği gibi hesaplanabilmektedir. Böylece $a_0 = 2S_0$, $a_n = S_{-n} + S_n$ ve $b_n = -S_{-n} + S_n$ şeklinde hesaplanabilmektedir[85].

$$S_n = \frac{1}{T}\int_0^T f(t)\,\mathrm{cas}(\frac{2\pi t}{T})\,\mathrm{dt} \tag{5.11}$$

5.5. Hızlı Hartley Dönüşümü

Hızlı Hartley dönüşümü (FHT), hızlı Fourier dönüşüm yöntemine çok benzemektedir. FHT dönüşümünün FFT dönüşümünden ayıran önemli farklarından biri $\frac{1}{2}N\log_2 N$ karmaşık işleme karşılık FHT de $\frac{1}{2}N\log_2 N$ adet reel işlem yapılmaktadır. Diğer önemli avantajı ise aynı N örnekleme sayısında $\frac{1}{2}$ daha az hafıza alanı kullanmaktadır [85, 86, 87]. Hartley dönüşümü fonksiyonu Denklem 5.12'de verilmektedir. Ayrık Fourier dönüşümünde olduğu gibi Denklem 5.12'de verilen Hartley dönüşüm fonksiyonu sabit ΔT aralıklarla N kadar örneklediğimizde Denklem 5.13'de verilen ayrık Hartley dönüşümünü (DHT-Discreate Hartley Transform) elde edilmektedir.

$$H(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\,\mathrm{cas}(\,\omega \mathrm{t})\ \mathrm{dt} \tag{5.12}$$

$$H[k] = \frac{1}{\mathrm{N}} \sum_{n=0}^{N-1} f[\mathrm{n}]\,\mathrm{cas}(\frac{nk2\pi}{N})\ \ \mathrm{k} = 0,1,2 \ldots, \mathrm{N}-1 \tag{5.13}$$

Denklem 5.13'de verilen ifadeyi $V = \mathrm{cas}(\frac{nk\,2\pi}{N})$ şeklinde bir matris formda tanımlayacak olursak Denklem 5.14 elde edilmektedir.

$$H[k] = \frac{1}{\mathrm{N}} \sum_{n=0}^{N-1} f[\mathrm{n}] V_{[k,n]}\ \ \mathrm{k} = 0,1,2 \ldots, \mathrm{N}-1 \tag{5.14}$$

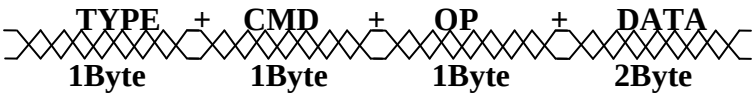
Denklem 5.13'de verilen $V_{[k,n]}$ matrisini oluşturan elemanlar benzer gerçek sayılar ve bu sayıların negatif değerlerinden meydana gelmektedir. Hızlı Fourier dönüşüm yönteminde olduğu gibi ayrık Hartley dönüşüm yöntemin de bu şekilde gereksiz hesaplamaların kısaltılması işlemine hızlı Hartley dönüşümü (FHT- Fast Hartley Transform) denilmektedir [85-88].

5.6. Bilgisayar Yazılımı İle DSP Kartları Arasında Veri İletişim Yönteminin Geliştirilmesi

İki sistem veya iki bilgisayar arasında haberleşme iletişim protokolleri ile sağlanmaktadır. İletişim protokollerinin görevi haberleşme kurallarını düzenlemek, mesajlaşmak ve verilerin gönderilmesini sağlamaktır. Herhangi bir firmaya bağlı olmayıp geniş organizasyonlar, komiteler ve topluluklar tarafından oluşturulan, yönetilen ve kullanılan TCP/IP, GSM, GPRS, USB, RS-232, SPI, CAN, SCI ..vs standart iletişim protokolleri vardır. Bu standart protokolleri destekleyen farklı firmaların cihazları birbiri ile sorunsuz anlaşabilmektedir. Bir firma tarafından kendi cihazları ve ürünleri için tasarlanmış protokoller standart olmayıp özeldir. Bu tarz protokoller sadece o firmanın ürünleri için geçerlidir [42, 45].

Bu çalışmada bilgisayar yazılımı ile DSP kartı arasında iletişimi sağlamak amacıyla standart RS-232 iletişim protokolü kullanarak iki sistem arasında verileri

düzenlemeye yarayan kurallar dizisi tanımlanmıştır. Bu bağlamda DSP kartın SCI (RS-232) ve bilgisayarın RS-232 portları kullanılmaktadır. Şekil 5.2'de DSP kartı ile bilgisayar yazılımı arasında veri iletişimi sağlayan komut dizimi verilmektedir.



Şekil 5.2: DSP kartı ile bilgisayar yazılımı arasında iletişimi sağlayan komut dizimi.

Şekil 5.2'de verilen iletişim diziminde kullanılan ilk TYPE parametresi DSP ile bilgisayar iletişimin hangi modda yapılacağını belirtmektedir. İletişim kurulmadan önce TYPE parametresi denetim edilmektedir. Örneğin, "TYPE=SCP" olduğunda DSP ile bilgisayar yazılımı BGKD denetim sistemine ait akım veya gerilim sinyal bilgileri izlenmek için haberleşme kurulmaktadır. Hangi sinyalin izleneceği Şekil 5.2'de verilen iletişim diziminde kullanılan ikinci CMD parametresi belirlenmektedir. RS-232 protokolü kullanarak sağlanan iletişimde TYPE parametre seçenekleri 1Byte uzunluğunda olup sayısal değerle eşleştirilmektedir. Böylece daha etkin ve hızlı haberleşme sağlamak için iletişim parametrelerin sayısal karşılıkları ile yapılmaktadır [42, 45]. Tablo 5.1'de TYPE parametre seçeneklerinin açıklamaları ve aldığı örnek sayısal değerleri verilmektedir.

Tablo 5.1: TYPE parametresinin aldığı örnek değerler ve açıklamaları.

TYPE	Sayısal Değeri	Açıklama
SCP	1	Osilaskop Modu
LOG	2	Zamana bağlı veri alma modu
CTL	3	BGKD süreç denetim modu
PAF	5	Paralel Aktif Filtre DSP katına komut gönderir
SAF	6	Seri Aktif Filtre DSP katına komut gönderir
SDC	7	SD kart yönetim modu
ALF	8	Tristörlü doğrultucunun α açısını ayarla
SW1	9	1. Statik anahtarı denetle
SW2	10	2. Statik anahtarı denetle

İletişim diziminde kullanılan CMD parametresi, seçilen denetim moduna göre hangi işlevi yerine getireceğini temsil etmektedir. Örneğin, "TYPE=SAF" olduğunda DSP ile bilgisayar yazılımı, SAGF denetim algoritmalarının yürütüldüğü DSP uygulama kartı ile iletişim kurmaktadır. Bu durumda iletişimin nasıl olacağını CMD

parametresi belirlemektedir. CMD parametre seçenekleri 1Byte uzunluğunda olup sayısal değerle eşleştirilmekte ve iletişim sayısal karşılıkları ile yapılmaktadır. Tablo 5.2'de CMD parametre seçeneklerinin açıklamaları ve aldığı bazı örnek sayısal değerleri verilmektedir.

Tablo 5.2: CMD parametresinin aldığı bazı örnek değerler ve açıklamaları.

CMD	Sayısal Değeri	Açıklama
START	1	İletişim kurulan DSP'yi çalıştırır
STOP	2	İletişim kurulan DSP'yi durdurur
RESET	3	İletişim kurulan DSP'yi yeniden başlatır
DUTY	5	İletişim kurulan DSP'de DUTY değişkeni ayarlar
HB	6	İletişim kurulan DSP'de HB değişkeni ayarlar
PERIOD	7	İletişim kurulan DSP'de PERIOD değişkeni ayarlar
V_{DA}	8	DA-bara gerilimini izle veya ayarla
v_{Sabc}	9	Kaynak gerilimlerini izle
i_{Sabc}	10	Kaynak akımlarını izle
i_{Sa}	11	Kaynak akımın a-fazını izle
v_{Sa} i_{Sa}	12	Kaynak akımın ve geriliminin a-fazını birlikte izle
i_{La}	13	Yük akımın a-fazını izle

İletişim diziminde kullanılan OP parametresi, DATA parametresi ile birlikte matematiksel operatör olarak kullanılmaktadır. OP parametre seçenekleri 1Byte ve DATA parametresi 2Byte uzunluğunda olup sayısal değerle eşleştirilmektedir. OP parametresi iletişim kurulan DSP denetim algoritmasında değiştirilecek değişkenin artırılıp veya azaltılması gibi matematiksel işlem için kullanılmaktadır.

Örneğin, "TYPE=SAF", "CMD=HB", "OP=+" ve "DATA=10" olduğunda, SAGF denetim algoritmasını yürüten DSP denetim algoritmasında HB değişkeninin değerini %10 artırmaktadır. Tablo 5.3'de OP parametre seçeneklerinin açıklamaları ve aldığı bazı örnek sayısal değerleri verilmektedir. Tablo 5.4'de örnek iletişim komutları ve açıklamaları verilmektedir.

Tablo 5.3: OP parametresinin aldığı bazı örnek değerler.

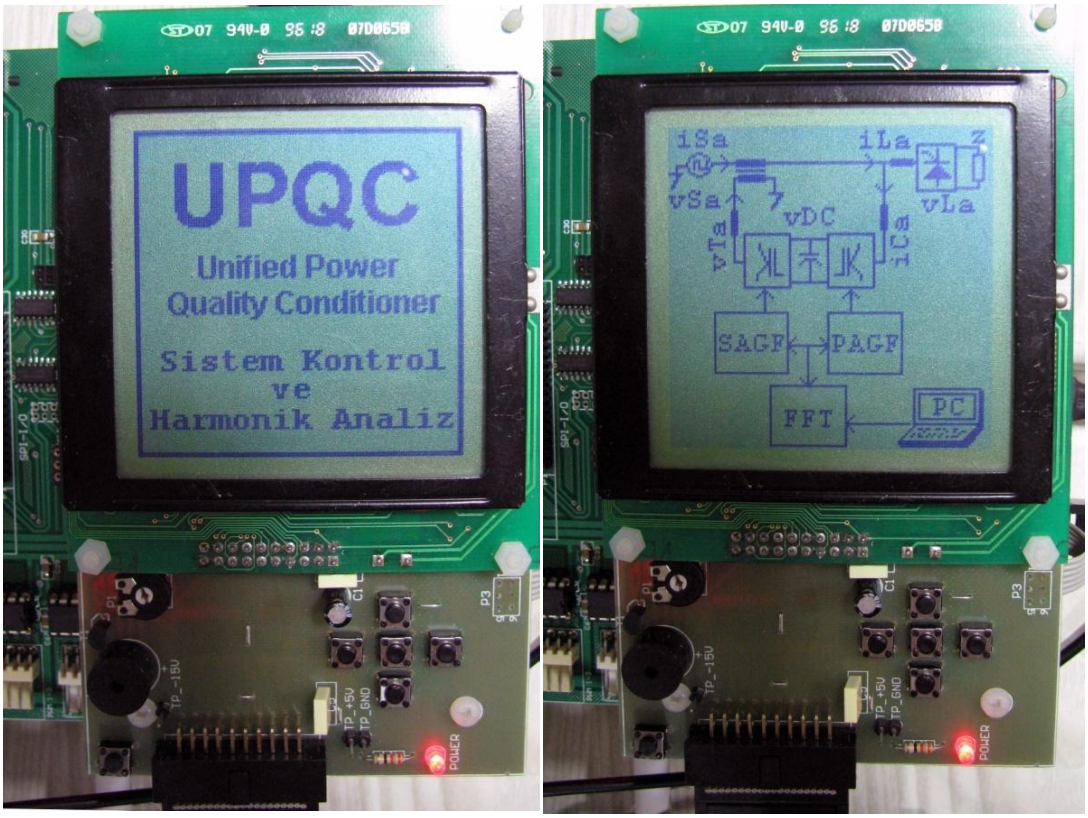
OP	Sayısal Değeri	Açıklama
+	40	Artırma Operatörü
-	43	Azaltma Operatörü
*	44	Çarpma Operatörü

Tablo 5.4: Örnek DSP iletişim komutları ve açıklamaları.

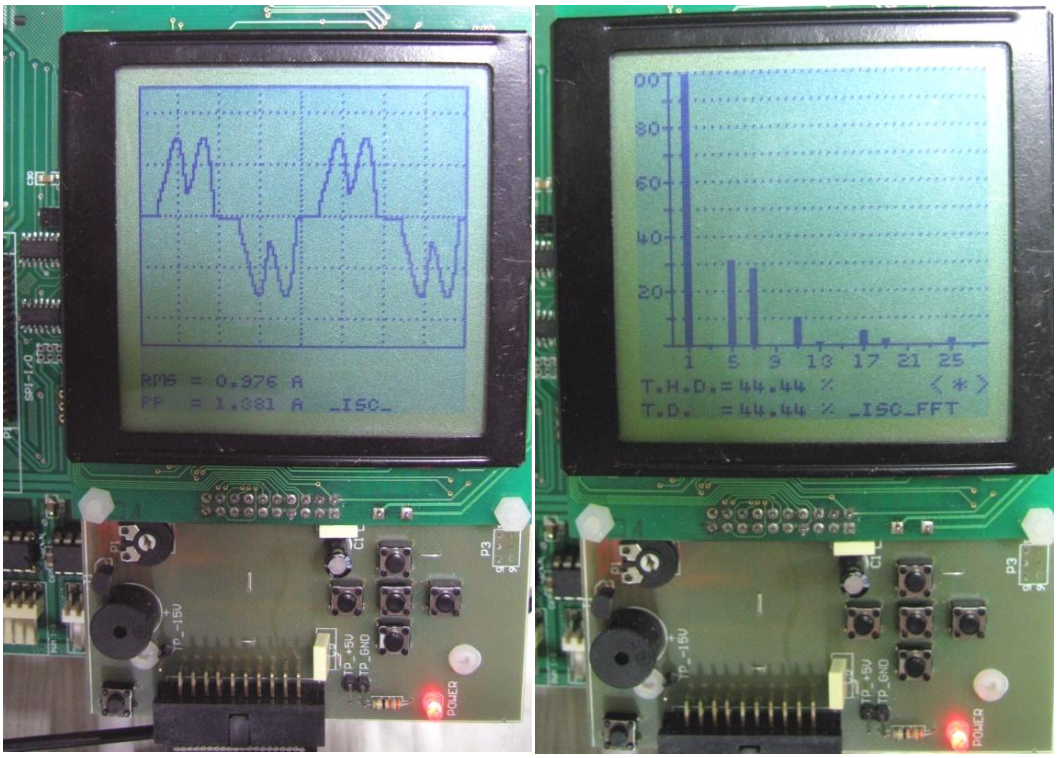
ÖRNEK	Sayısal Değeri	Açıklama
SCOPE vSabc * 2	1 9 * 128	Kaynak gerilimlerini 128 örnekleme ile izle
SCOPE vSaiSa * 4	1 9 * 256	Kaynak gerilim ve akımın a-fazını 256 örnekleme ile izle
LOG vLa * 4	2 16 * 256	Yük geriliminin a-fazını 256 örnekleme ile LOG tut
PAF START x x	5 1 x x	Paralel Aktif Filtre DSP yi çalıştır
SAF RESET x x	6 3 x x	Seri Aktif Filtre DSP yi resetle
SAF HB + 15	6 6 + 15	Seri Aktif Filtre DSP'nin HB değişkenini yüzde 15 artır
PAF PERIOD – 20	5 7 - 20	Paralel Aktif Filtre DSP'nin PERIOD değişkenini yüzde 20 azalt

5.7. BGKD'nin DSP Yazılımı ile İzlenmesi Ve Harmonik Analiz Gösterge Kartı

Grafik LCD gösterge kartı ile BGKD denetim sitemine ait birçok parametre yönetilebilmektedir. Örneğin, PAGF, SAGF ve FFT DSP kartları denetlenmekte (çalıştır, durdur, yeniden çalıştır, denetim algoritma değişkenlerine müdahale edilmesi, vb.), tristör ve statik anahtar sürücü kartı denetlenmektedir (çalıştır, durdur, α açısı ayarla, vb.). BGKD sistemine ait kaynak gerilimleri (v_{Kabc}), yük gerilimleri (v_{Yabc}), SAGF filtre trafo gerilimleri (v_{Tabc}), kaynak akımları (i_{Kabc}), yük akımları (i_{Yabc}), PAGF filtre akımları (i_{Cabc}) ve DA bara (v_{DA}) gerilimi okunarak, BGKD sisteminin tam analizi için Bölüm 5.3 ve Bölüm 5.5'de açıklanan FFT ve FHT algoritmaları yürütülerek güç kalitesi analizi yapılmaktadır. Ayrıca SAGF DSP denetim kartı, PAGF DSP denetim kartı ve FFT DSP denetim kartları aşırı akım, aşırı gerilim ve denetim sinyalleri eşzamanlı olarak izlenmekte sistemin güvenli çalışması sağlanmaktadır. Şekil 5.3'de grafik LCD gösterge kartına ait (b) BGKD denetim sisteminin bağlantı şekli, (c) harmonikli akım dalga şekli ve (d) harmonikli akımın harmonik dağılımı fotoğrafı verilmektedir.



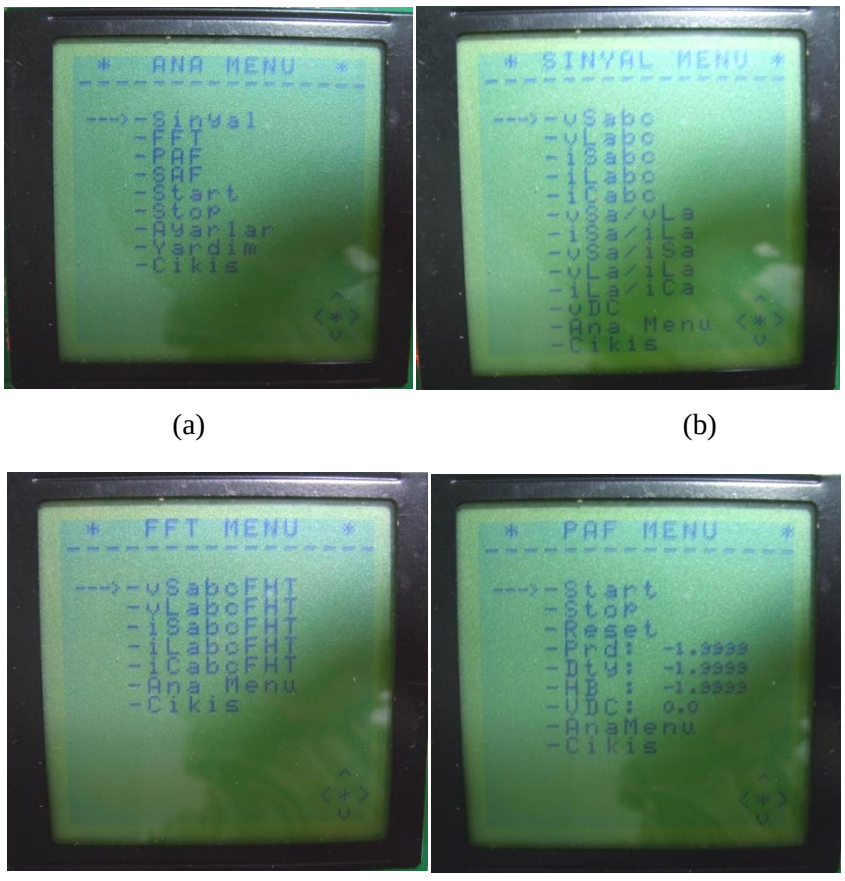
(a) (b)



(b) (d)

Şekil 5.3: Grafik LCD gösterge kartı (b) BGKD denetim sisteminin bağlantı şekli, (c) harmonikli akım dalga şekli ve (d) harmonikli akımın harmonik dağılımı fotoğrafı.

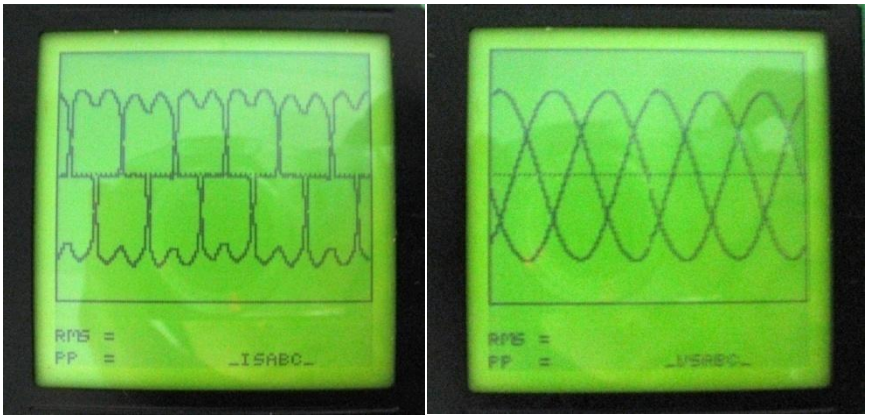
Grafik LCD gösterge kartı ile BGKD denetim sitemine ait birçok parametre menülerle yönetilmektedir. Kullanılan tüm menüler “Ana Menü” başlığı altında toplanmaktadır. Ana menü, “sinyal, FFT, PAF, SAF, Start, Stop, Ayarlar, Yardım ve Çıkış” seçeneklerinden oluşmaktadır. Ana menüden “sinyal” seçeneğine girildiğinde sinyal izleme menüsü olan “Sinyal Menü” açıklamaktadır. Sinyal menüde, BGKD sistemine ait tüm akım ve gerilim sinyalleri izlemek için seçenek olarak sunulmaktadır. Ana menüden FFT seçeneğine girildiğinde harmonik analiz menüsü olan “FFT Menü” açıklamaktadır. FFT menü, BGKD sistemine ait tüm akım ve gerilim sinyalleri harmonik analiz için seçenek olarak sunulmaktadır. Ana menüden SAF veya PAF seçeneğine girildiğinde SAGF ve PAGF denetim menüsü olan “PAF ve SAF Menü” açıklamaktadır. Bu menülerde ilgili DSP katına ait denetim işlemeleri seçenek olarak sunulmaktadır. Şekil 5.4’de grafik LCD gösterge kartı denetim menülerine ve sinyal dalga şekillerine ait bazı fotoğraflar verilmektedir.



(a) (b)

(c) (d)

Şekil 5.4: grafik LCD gösterge kartı menülerine ait (a) ana menü, (b) sinyal menü, (c) FFT menü, (d) SAF veya PAF menü, (e) 3-fazlı harmonikli yük akım dalga şekilleri ve (f) 3-fazlı kaynak gerilimleri dalga şekilleri fotoğrafları.



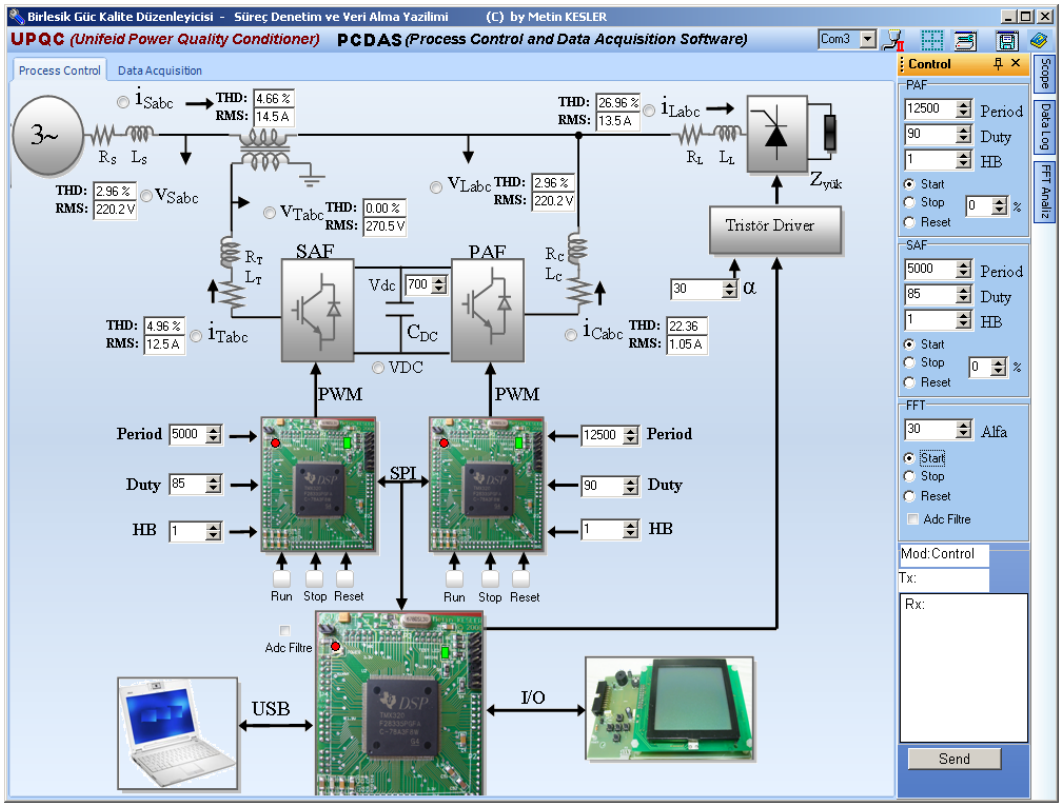
(e) (f)

Şekil 5.4: (devam) Grafik LCD gösterge kartı menülerine ait (a) ana menü, (b) sinyal menü, (c) FFT menü, (d) SAF veya PAF menü, (e) 3-fazlı harmonikli yük akım dalga şekilleri ve (f) 3-fazlı kaynak gerilimleri dalga şekilleri fotoğrafları.

5.8. BGKD'nin Bilgisayar Yazılımı ile İzlenmesi ve Harmonik Analizi

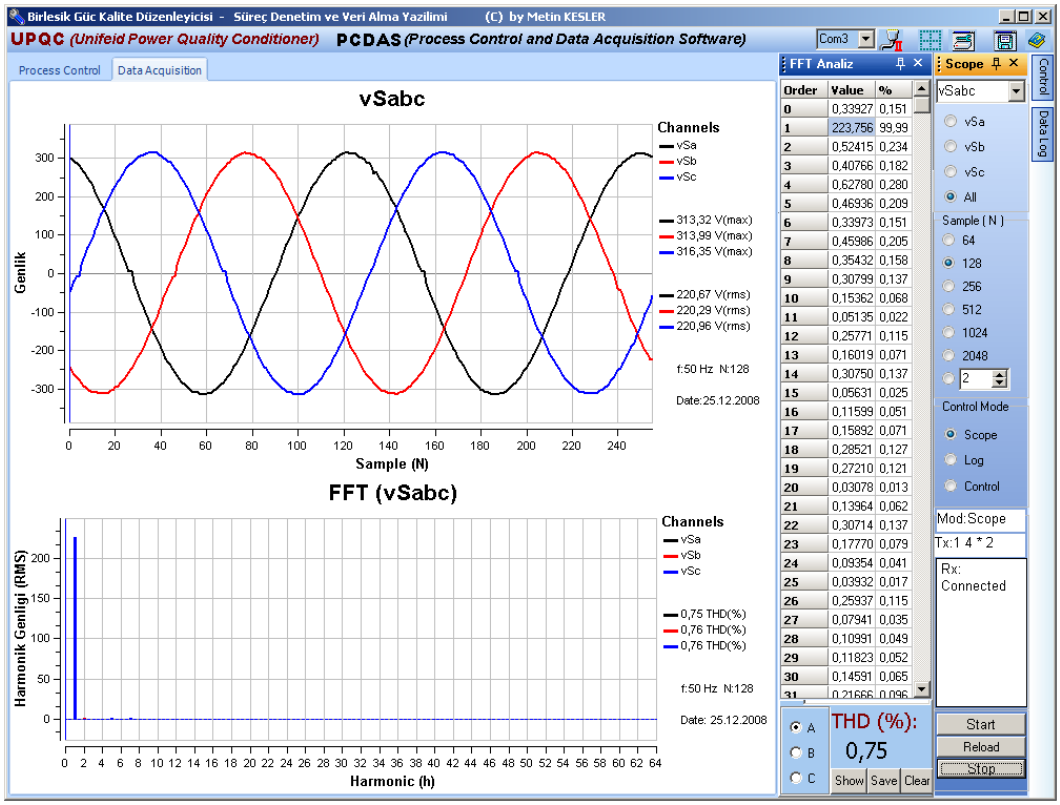
BGKD denetim sistemi bilgisayar ortamında geliştirilen yazılımla çok kapsamlı denetimi ve analiz yapılmaktadır. C++Builder yazılımı ortamında dijital sinyal işleme bileşenleri [89] kullanılarak geliştirilen Süreç Denetim ve Veri Alma Yazılımı (SDVAY), BGKD denetim sisteminde kullanılan tüm kartları yönetmek ve ilgili kartlardan veri alma işlevlerine sahiptir.

Bilgisayar destekli denetim yazılımı; eşzamanlı denetim yapan "Süreç Denetim" ve BGKD denetim sistemine ait tüm sinyalleri alıp analiz yapan "Veri Alma ve Analiz" olmak üzere iki aşamalı işlem yapmaktadır. SDVAY ile DSP kartları USB portu üzerinden RS-232 iletişim protokolü kullanarak 1.041 MBd (Mega baud rate) hızında haberleşmektedir. SDVAY ile süreç denetim aşamasında SAGF DSP denetim kartı, PAGF DSP denetim kartı ve FFT DSP denetim kartları eşzamanlı olarak denetlenmekte ve izlenmektedir. Örneğin, her bir DSP kartına başlat, durdur, yeniden başlat gibi komutlar gönderilebilmekte ve DSP kartlarında ilgili denetim algoritmaları yürütülürken; Period, duty, HB gibi çeşitli değişkenler eşzamanlı değiştirilmekte ve sistem performansına etkileri test edilmektedir. Ayrıca DA bara gerilimi için PAGF DSP denetim algoritmasına referans gerilim seviyesi verilebilmektedir. Kaynak, yük ve filtre akım ve gerilim THB ve RMS değerleri anlık olarak izlenebilmektedir. Şekil 5.5' SDVAY ile BGKD sistem parametrelerin izlenmesi ve denetlenmesi fotoğrafı verilmektedir.

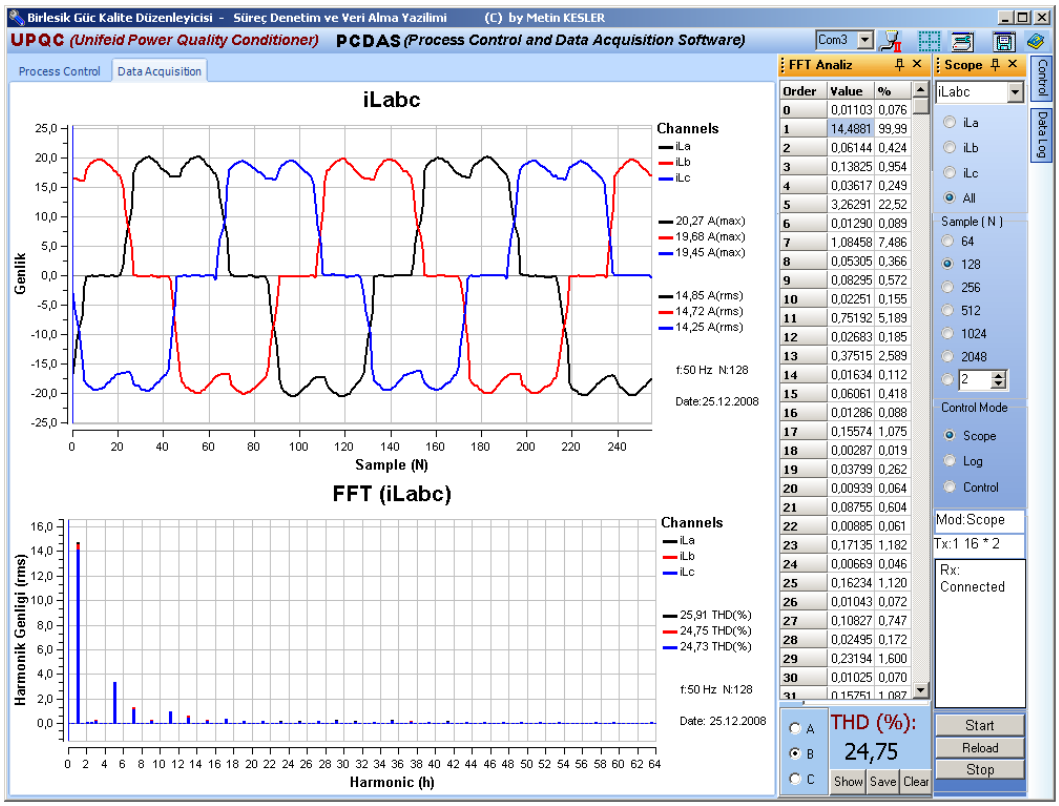


Şekil 5.5: SDVAY ile BGKD sistem parametrelerin izlenmesi ve denetlenmesi fotoğrafı.

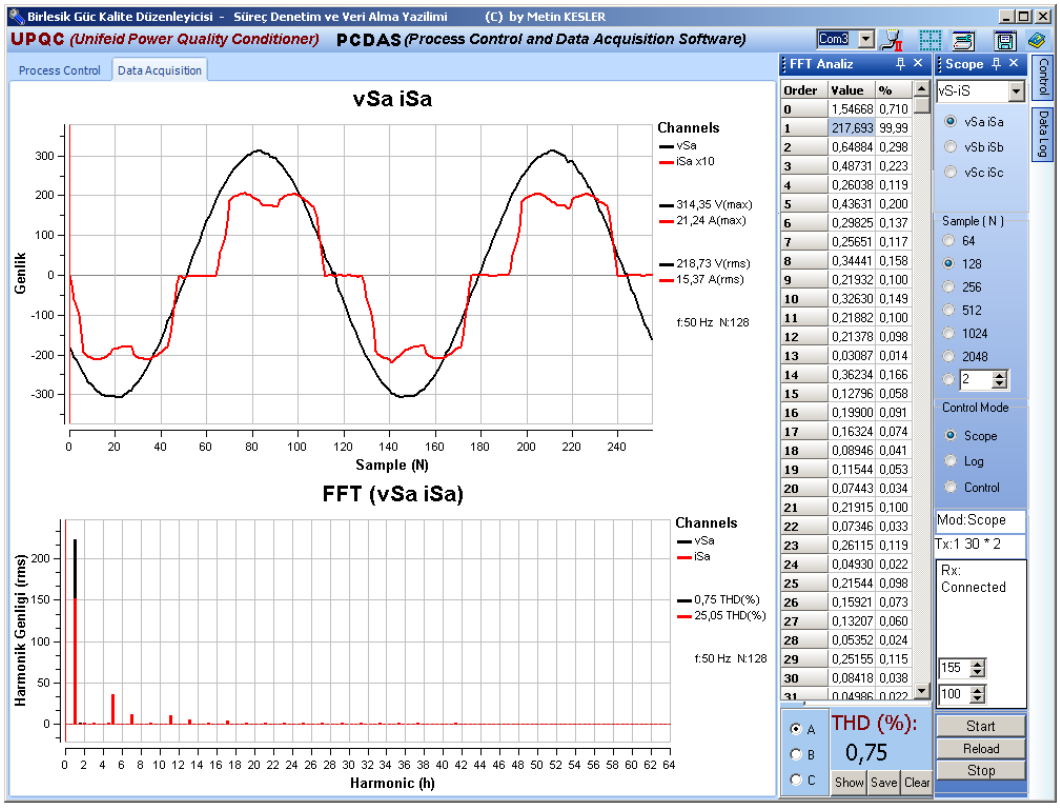
SDVAY ile BGKD sistemine ait kaynak gerilimleri, yük gerilimleri, SAGF filtre trafo gerilimleri, kaynak akımları, yük akımları, PAGF filtre akımları ve DA-bara hat gerilimi okunarak, BGKD sisteminin tam analizi için dijital sinyal işleme bileşenleri [89] ile FFT algoritmaları yürütülerek harmonik analizi yapılmaktadır. Anlık olarak analizi yapılan sinyalleri dalga şekillerinde RMS ve maksimum değerleri verilmekte ve sinyallerin harmonik dağılımında THB değerleri anlık olarak hesaplanmaktadır. SDVAY yardımıyla elde edilen veriler uzun süreli kayıt edilebilmekte ve daha sonra izlenerek zaman içerisinde sistemdeki değişimler kolaylıkla gözlenebilmektedir. Şekil 5.7'de SDVAY ile 3-fazlı 6-darbeli diyotlu doğrultucunun kaynaktan çektiği yük akımın dalga şekli ve harmonik analizi fotoğrafı verilmektedir. Şekil 5.8'de SDVAY ile 3-fazlı 6-darbeli diyotlu doğrultucunun kaynaktan çektiği a-fazı kaynak akımın ve kaynak gerilim dalga şekli ve harmonik analizi fotoğrafı verilmektedir. Şekil 5.9, 5.10 ve 5.11'de SDVAY ile a-fazı kaynak akımın ve kaynak gerilim zamana göre kayıt edilmiş dalga şekli ve harmonik analizi fotoğrafı verilmektedir. Uzun süreli kayıt işlemi sırasında sistem birkaç defa devreye girip çıkmaktadır. Böylece sistemin dinamik cevabı ve uzun süreli işletim sırasında meydana gelen geçici olaylar gözlenebilmektedir.



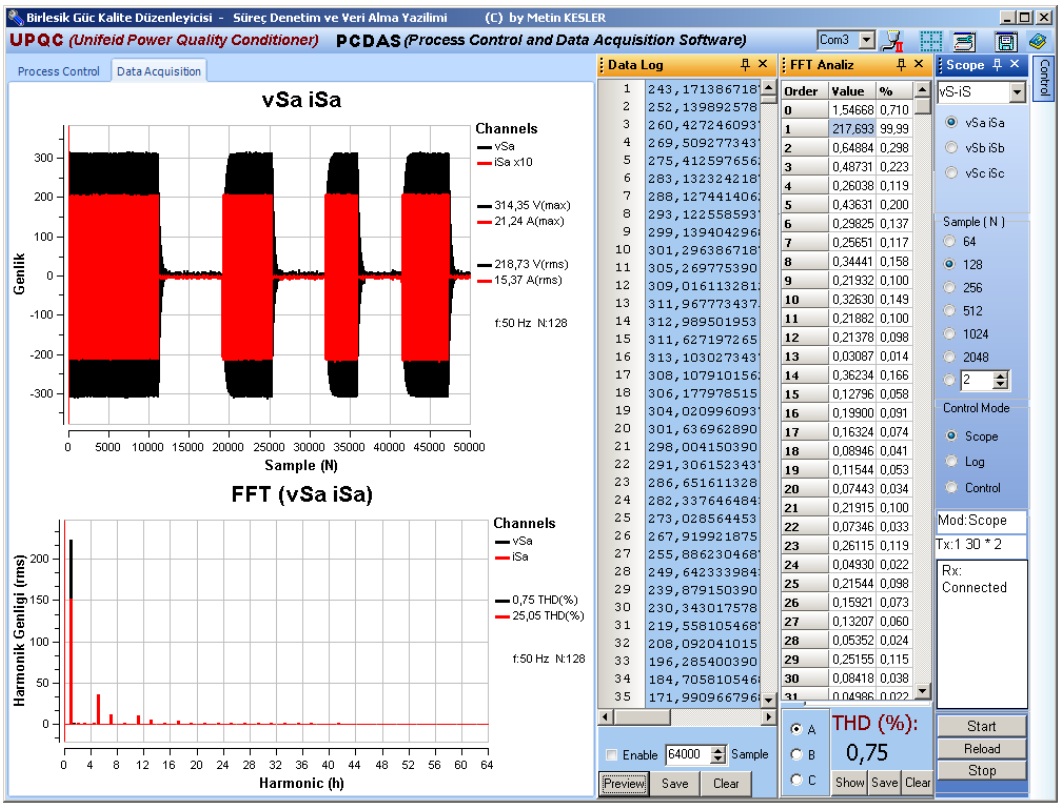
Şekil 5.6: SDVAY ile 3-fazlı kaynak gerilimlerinin dalga şekli ve harmonik analizi fotoğrafı.



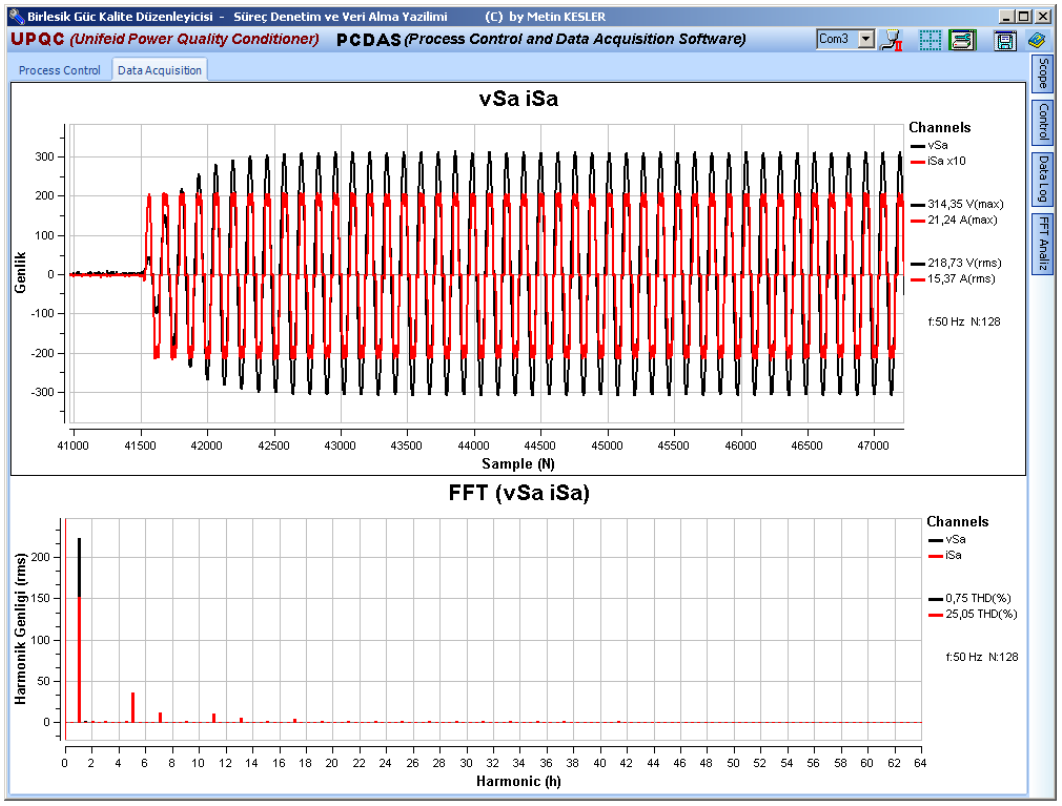
Şekil 5.7: SDVAY ile 3-fazlı 6-darbeli diyotlu doğrultucunun kaynaktan çektiği yük akımlarının dalga şekli ve harmonik analizi fotoğrafı.



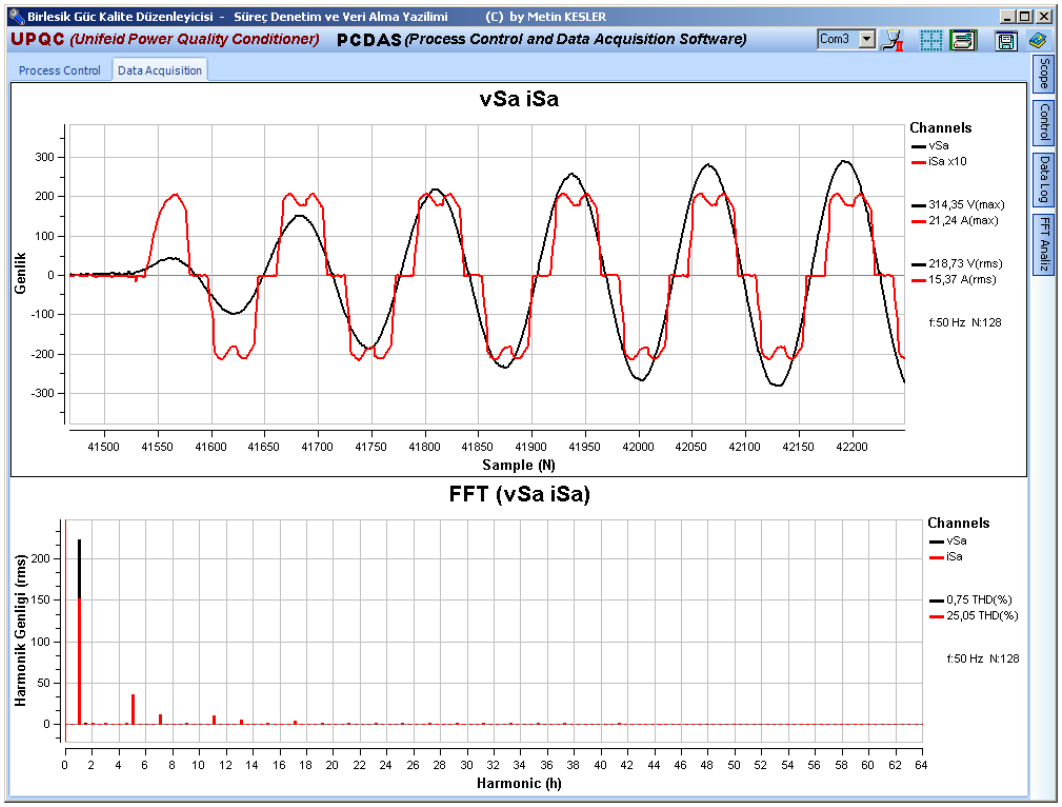
Şekil 5.8: SDVAY ile 3-fazlı 6-darbeli diyotlu doğrultucunun kaynaktan çektiği a-fazı kaynak akımının ve kaynak geriliminin dalga şekli ve harmonik analizi fotoğrafı.



Şekil 5.9: SDVAY ile a-fazı kaynak akımının ve kaynak geriliminin zamana göre kayıt edilmiş dalga şekli ve harmonik analizi fotoğrafı.



Şekil 5.10: SDVAY ile a-fazı kaynak akımının ve kaynak geriliminin zamana göre kayıt edilmiş dalga şekli ve harmonik analizi fotoğrafı.



Şekil 5.11: SDVAY ile a-fazı kaynak akımın ve kaynak gerilim zamana göre kayıt edilmiş dalga şekli ve harmonik analizi fotoğrafı

5.9. Sonuç

Güç sistemlerinde elektrik enerjisinin verimliliğini ve güç kalitesini artırmak, harmoniklerin düzeltilmesi ve yok edilmesi için harmonik analizlerin doğru yapılması önemlidir. Harmonik analiz yöntemlerinde genellikle FFT ve FHT dönüşümleri kullanılmaktadır. FHT dönüşümünün FFT dönüşümüne göre önemli farklardan biri $\frac{1}{2}N\log_2 N$ karmaşık işleme karşılık FHT de $\frac{1}{2}N\log_2 N$ adet reel işlem yapılmaktadır. Ayrıcı N örnekleme sayısında $\frac{1}{2}$ daha az hafıza alanı kullanmaktadır.

Harmonik analizler DSP yazılımı ve bilgisayar yazılımı olmak üzere iki farklı yöntemle başarılı bir şekilde yapılabilmektedir. Bilgisayar yazılımı ile DSP kartı arasında iletişimi sağlamak amacıyla standart RS-232 iletişim protokolü kullanarak iki sistem arasında veri iletişimini düzenleyen kurallar dizisi tanımlanmakta ve DSP ile bilgisayar yazılımı arasındaki iletişim sorunsuz bir şekilde sağlanmaktadır. DSP ortamında yapılan analiz sonuçları grafik LCD gösterge kartı yardımı ile görselleştirilerek sonuçlar ilave cihaza ihtiyaç duymadan izlenebilmektedir.

Bilgisayar ortamında C++Builder yazılımı ile geliştirilen programla çok kapsamlı denetimi ve analiz yapılabilmektedir. Geliştirilen SDVAY, BGKD denetim sisteminde kullanılan tüm kartları yönetebilmekte ve ilgili kartlarla veri iletişimi yapma özelliğine sahiptir. SDVAY ile DSP kartları USB portu üzerinden RS-232 iletişim protokolü kullanarak yüksek hızda (1.041 MBd) haberleşebilmektedir. SDVAY eşzamanlı denetim yapan "Süreç Denetim" ve BGKD denetim sistemine ait tüm sinyalleri alıp analiz yapan "Veri Alma ve Analiz" olmak üzere iki aşamalı işlem yapmaktadır. Analizi yapılan sinyallerin etkin ve maksimum değerleri ve sinyallerin harmonik dağılımında THB değerleri anlık olarak hesaplanmaktadır. SDVAY yardımıyla elde edilen veriler uzun süreli kayıt edilebilmekte ve daha sonra izlenerek zaman içerisinde sistemdeki uzun veya kısa süreli işletim sırasında meydana gelen geçici olaylar ve sistemin dinamik cevabı gözlenebilmektedir. Şekil 5.6, Şekil 5.7 ve Şekil 5.8 'de görüldüğü gibi sinyaller isteğe bağlı olarak 3-fazlı, tek fazlı veya gerilim ve akım dalga şekilleri birlikte izlenebilmekte ve analizleri yapılabilmektedir. SDVAY ile harmonik analizlerde elde edilen sonuçlar standart sayılan ölçü aletlerinin sonuçları ile karşılaştırıldığında gayet başarılı olduğu görülmektedir.

6. BGKD'NİN PERFORMANS ANALİZİ VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1. Giriş

Bu bölümde, önerilen BGKD denetim algoritmalarının deneysel çalışmaları yapılmakta ve performans analizi incelenmektedir. Bölüm 2'de tanımlamaları ve açıklamaları yapılan (harmonikler, kısa ve uzun süreli gerilim çökmeleri, gerilim ve akım dengesizlikleri gibi) bazı güç kalitesi problemlerinin giderilmesine yönelik deneysel çalışmalar yapılmakta ve sonuçları verilmektedir. Ayrıca farklı yüklerde ve anlık yük değişimlerinde BGKD sisteminin dinamik cevabı incelenmektedir. Deneysel çalışmalarda Bölüm 3'de simülasyonu ve analizleri yapılan ARGT tabanlı YAY, ARGT tabanlı KAY, SRY tabanlı YAY ve SRY tabanlı KAY ile BGKD denetim algoritmalarının karşılaştırılması ve deneysel sonuçları verilmektedir.

BGKD deneysel uygulama düzeneğinde, doğrusal olmayan yük olarak 10 kW gücünde, DA tarafında RL yük bağlı 3-fazlı 6-darbeli tam denetimli tristörlü doğrultucu kullanılmaktadır. Tristörlerin α açısı, Bölüm 4.16'da tasarımı anlatılan genel amaçlı tristör denetim kartı ile denetlenmekte ve farklı yük akım harmonik seviyeleri üretilerek analiz çalışmaları yapılmaktadır. Ayrıca fazlar arasında dengesizlik oluşturmak için tek faza (faz-nötr) bağlanmış 1-fazlı denetimsiz diyotlu doğrultucu yük olarak kullanılmaktadır. Böylece 3-fazlı 4-telli sistemlerde fazlar arasında dengesizlikten dolayı oluşan nötr akımının kompanzasyonu çalışmaları yapılmaktadır.

BGKD deneysel laboratuar ortamında, kaynak gerilim harmoniğinin düşük olması nedeniyle, daha yüksek gerilim kaynaklı harmonik ve güç kalitesi problemleri oluşturmak amacıyla Bölüm 4.18'de tasarımı anlatılan ve şebekeye seri bağlı HGK kullanılmaktadır. Böylece kaynak gerilimi HGK ile değişik harmonik seviyelerinde bozulmakta ve gerilim kaynaklı harmonik ve güç kalitesi problemleri BGKD sistemi ile düzeltime çalışmaları yapılmaktadır.

BGKD deneysel düzeneğinde PAGF, SAGF ve sistem parametrelerini denetlemek harmonik analiz (FFT) yapmak üzere üç adet F28335 DSP denetim kartı

kullanılmaktadır. Bölüm 4.2'de tasarımı anlatılan F28335 DSP denetim kartlarında, TI firması tarafından geliştirilen işaret işleme ve sistem denetim alanında yeni bir işlemcisi olan TMS320F28335 PGFA DSP yongası kullanılmaktadır.

PAGF DSP denetim kartı ile, yük akımları, kaynak akımları, filtre akımları, kaynak gerilimleri ve DA bara (V_{DA}) gerilimi ölçülerek harmonik akım, reaktif güç kompanzasyonu, nötr akımı kompanzasyonu ve DA hat gerilim regülasyonu yapacak denetim algoritmaları yürütülmektedir. Ayrıca diğer DSP denetim katları ile entegre çalışması ve veri iletişimi sağlaması amacı ile seri çevresel ara yüz (SPI) ile haberleşmektedir. Bölüm 4.3.1'de PAGF DSP denetim kartının işlevi ve blok şeması verilmektedir.

SAGF DSP denetim kartı ile şebeke gerilimleri, yük gerilimleri, filtre trafo gerilimleri ve kaynak akımları ölçülerek kaynak gerilimindeki çukur ve tepeler, gerilim kesilmeleri, geçici rejim gerilim bileşenleri, kaynak gerilimindeki dengesizlikler, gerilim harmonik kompanzasyonu için gerekli denetim algoritmaları yürütülmektedir. Ayrıca BGKD denetim sisteminde gerilim kaynaklı sorunların analizini yapmak için Bölüm 4.18'de tasarımı anlatılan, kaynak geriliminde harmonik oluşturan ve HGK denetim algoritmaları da yürütülmektedir. Diğer DSP denetim katları ile entegre çalışması ve veri iletişimi sağlaması amacı ile SPI ile haberleşmektedir. Bölüm 4.3.2'de SAGF DSP denetim kartının işlevi ve blok şeması verilmektedir.

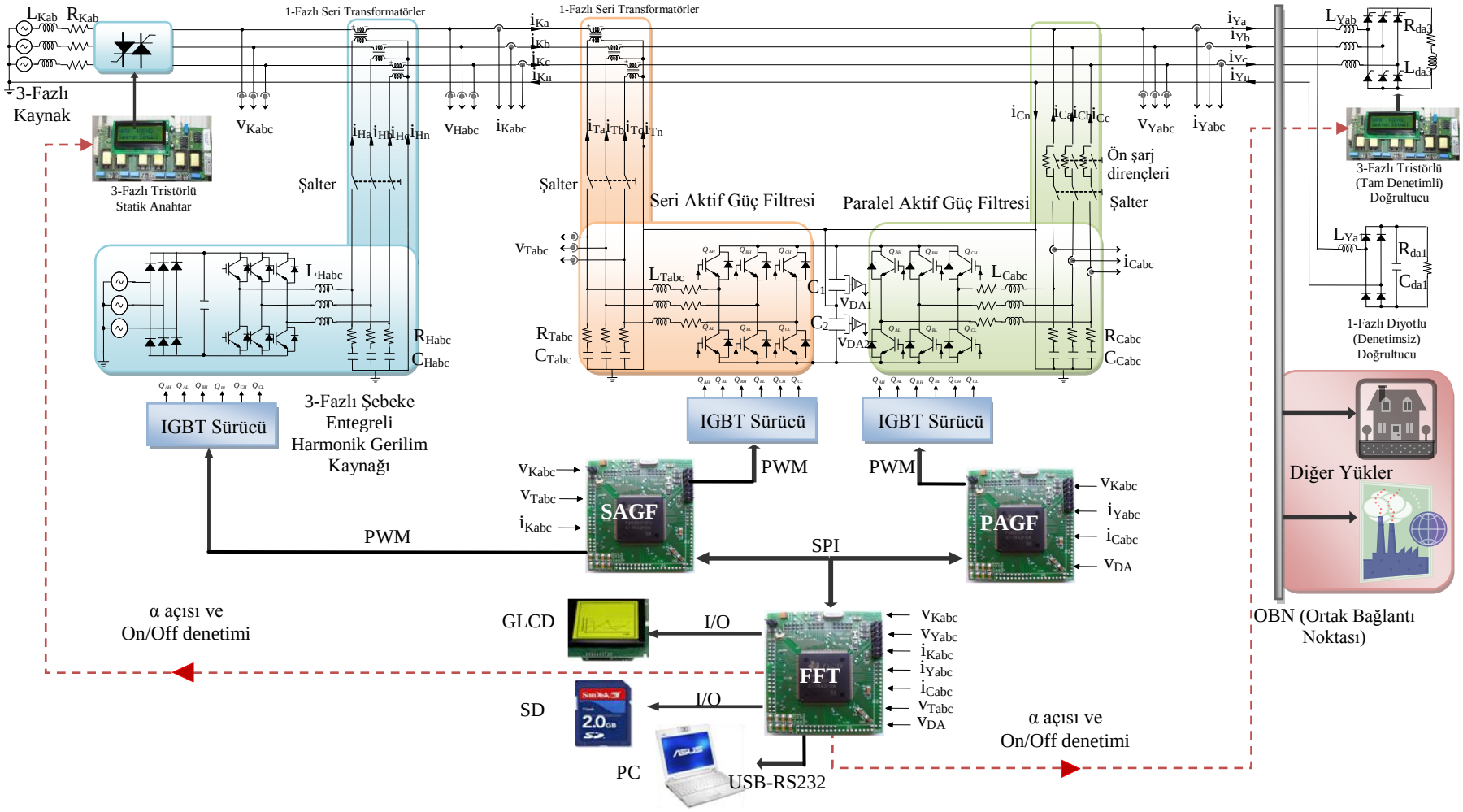
Sistem parametrelerini denetleyen ve harmonik analiz yapan DSP kartı ile, kaynak gerilimleri, yük gerilimleri, filtre trafo gerilimleri, kaynak akımları, yük akımları, filtre akımları ve DA-bara (V_{DA}) gerilimi ölçülerek, BGKD sisteminin tam analizi için FFT algoritmaları yürütülerek güç kalitesi analizi sistem denetimi yapılmaktadır. Bölüm 4.6.4'de anlatılan sinyal denetim ve hata koruma kartı ile entegre çalışan FFT DSP kartı, sisteme ait tüm akım ve gerilim bilgilerini okuyarak aşırı akım, aşırı gerilim ve herhangi bir hata oluşması durumunda müdahale etmekte ve BGKD sisteminin güvenli çalışmasını sağlamak için PAGF ve SAGF DSP kartlarına hata bilgisi göndermekte ve kaynak tarafında kullanılan Bölüm 4.15'de anlatılan 3-fazlı tristörlü statik anahtarı kumanda ederek sistemin enerjisini kesmektedir. Doğrusal olmayan yük olarak kullanılan ve Bölüm 4.16'da anlatılan 3-fazlı 6-darbeli tam

denetimli tristörlü doğrultucunun α açısı denetlenmektedir. Bölüm 5'de anlatılan BGKD sistemini bilgisayar yazılımı ile izlemek ve sistem parametrelerini yazılımsal olarak denetlemek amacı ile RS-232 seri veri iletişim kanalı kullanılmaktadır. Diğer DSP katları ile entegre çalışması ve veri iletişimi sağlaması amacı ile SPI kanalı kullanılmaktadır. FFT algoritmaları yürütülerek elde edilen sisteme ait harmonik analiz bilgileri grafik LCD katına aktarılarak görsel hale dönüştürülmektedir. Ayrıca SD hafıza kart vasıtasıyla istenilen akım veya gerilim bilgileri uzun süreli kayıt tutularak saklanmaktadır. Bölüm 4.3.3'de FFT DSP denetim kartının işlevi ve blok şeması verilmektedir.

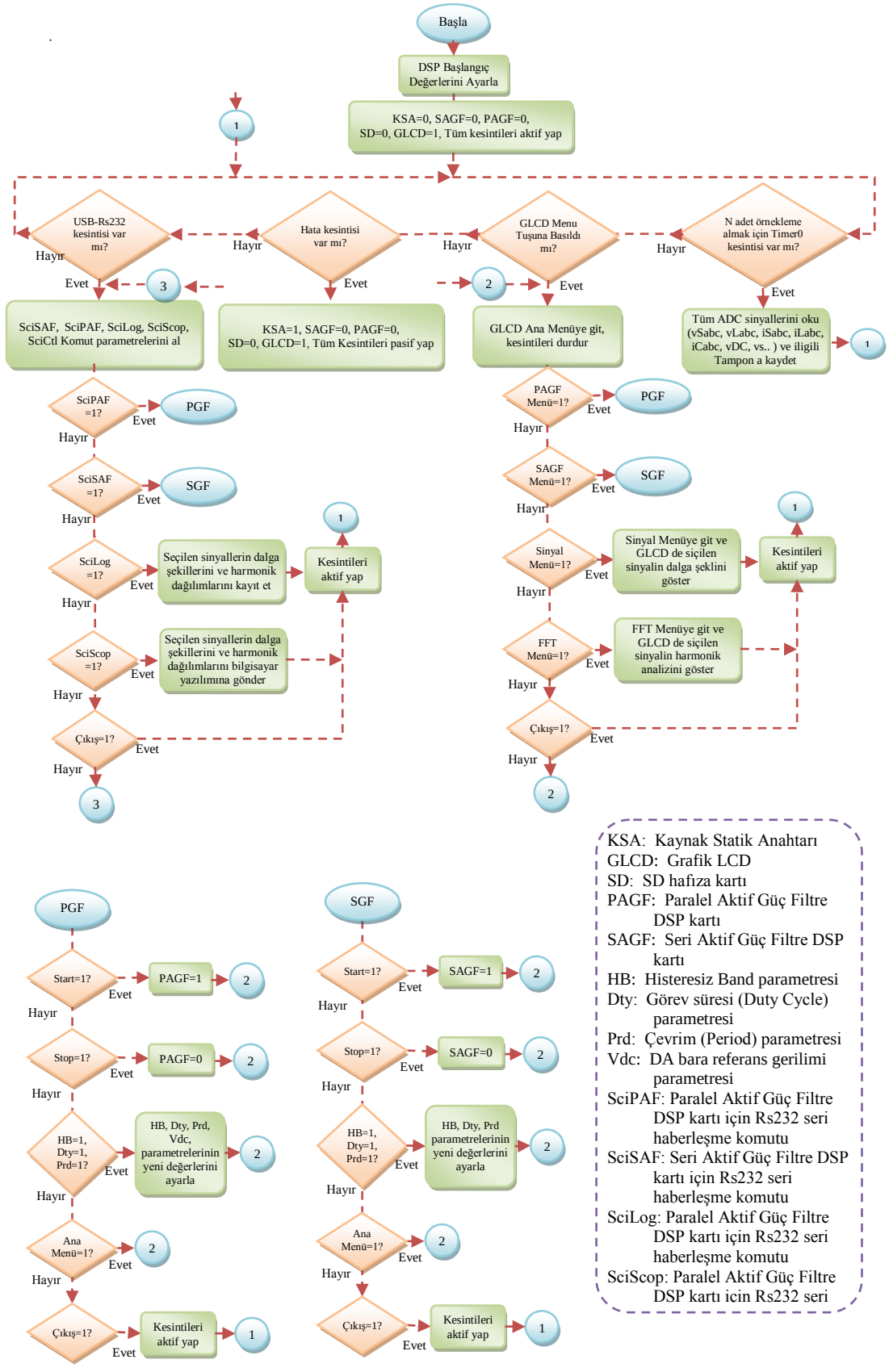
BGKD deneysel uygulama düzeneğinde, sisteme ait tüm akımlar ve gerilimler alan etkili algılayıcılarla ölçülmektedir. DA bara gerilimi 700V seviyesinde iki adet seri bağlı 2200 uF 450V kondansatör kullanılmaktadır. PAGF, SAGF ve HGK güç katında SEMIKRON SEMIX 101GD128Ds IGBT modülleri kullanılmaktadır. Bu IGBT modülleri, Bölüm 4.9'da tasarımı anlatılan CONCEPT 6SD106EI ve SEMIKRON SKHI 61 IGBT sürücü kartları ile anahtarlanmaktadır.

Yapılan deneysel çalışmalarda akım ve gerilim sinyallerinin izlenmesi ve kaydedilmesi için Tektronix DPO3054 500MHz ve LeCroy WaveSurfer 500MHz osilaskoplar kullanılmaktadır. Deneysel ölçümlerde gerilimler, Pintek DP-25 1300V (DA + peak AA) ölçüm oranlarında diferansiyel gerilim ölçüm probları kullanılmaktadır. Akımlar ise, Fluke 80i-110s 0,1A -100A ölçüm oranlarında diferansiyel akım ölçüm probları ile ölçülmektedir. Güç kalitesi analizi yapmak ve harmonik analiz sonuçlarını elde etmek için Fluke 434 güç kalite analizörü kullanılmaktadır.

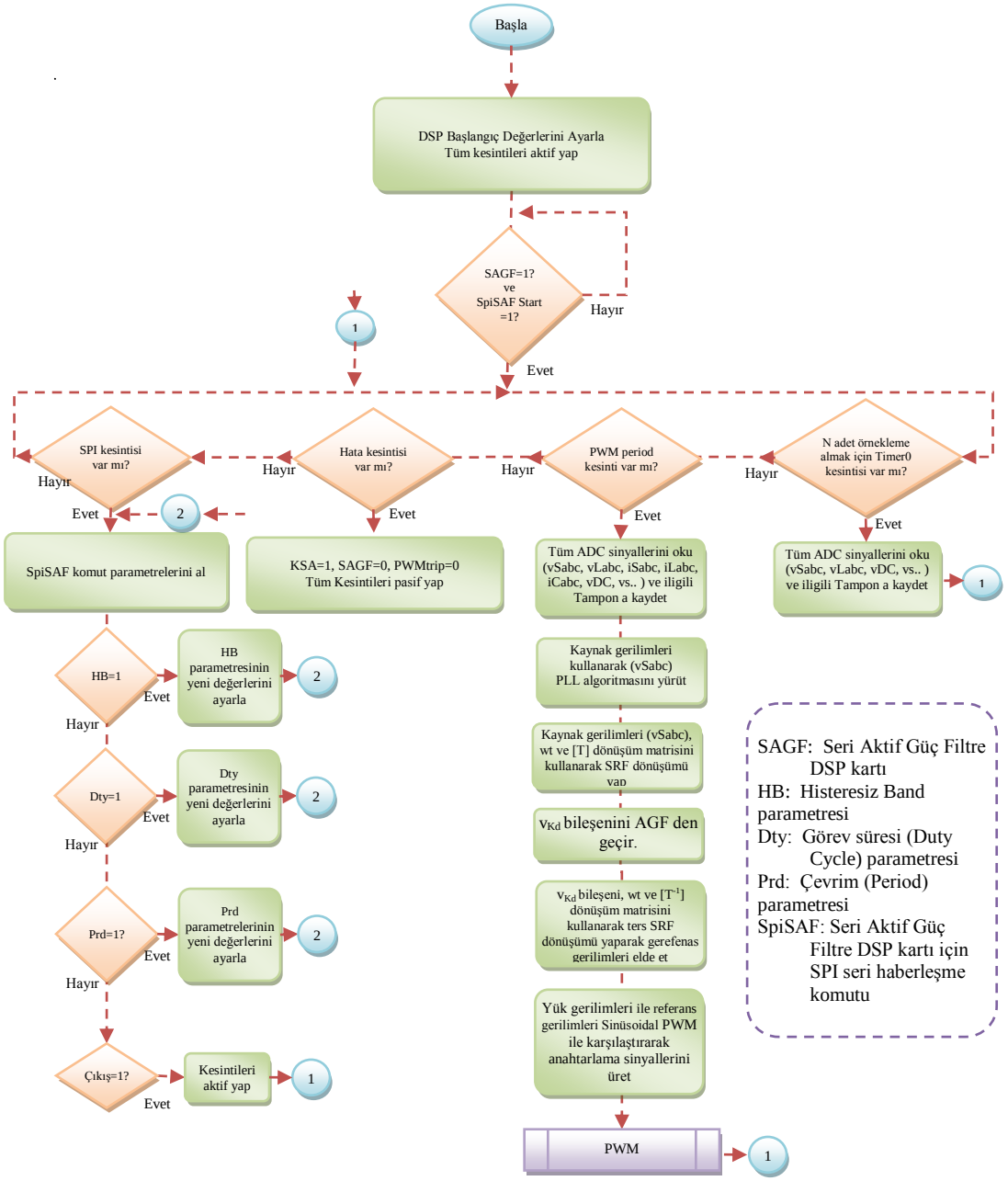
Şekil 6.1'de BGKD deneysel uygulama düzeneği genel blok şeması, Şekil 6.2'de FFT DSP kartının, Şekil 6.3'de SAGF DSP kartının ve Şekil 6.4'de PAGF DSP kartının denetim algoritma akış diyagramı verilmektedir. Şekil 6.5 (a)-(c)'de BGKD deneysel uygulama düzeneğinin fotoğrafları verilmektedir.



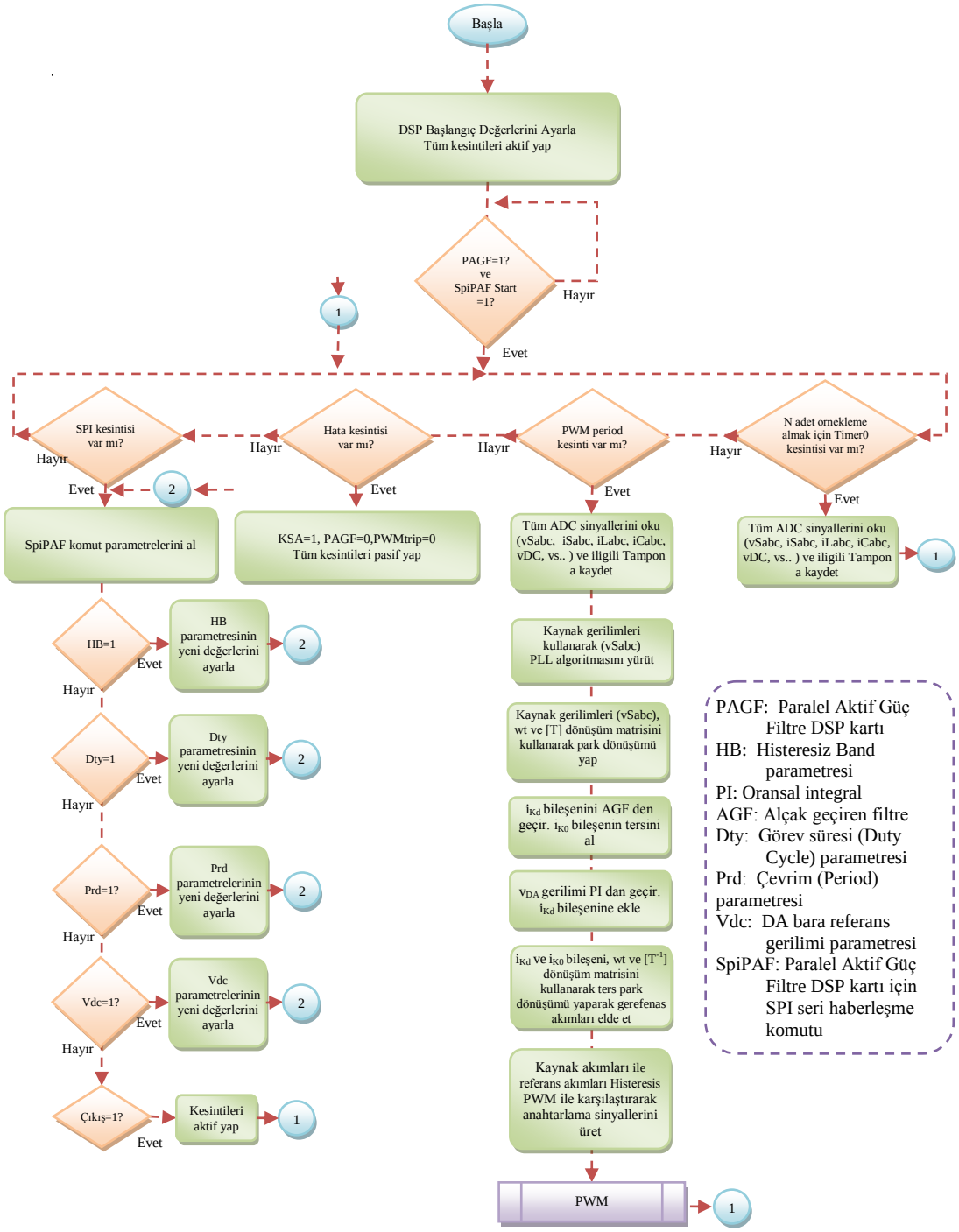
Şekil 6.1: BGKD deneysel uygulama düzeneği genel blok diyagramı.



Şekil 6.2: FFT DSP denetim algoritması akış diyagramı.



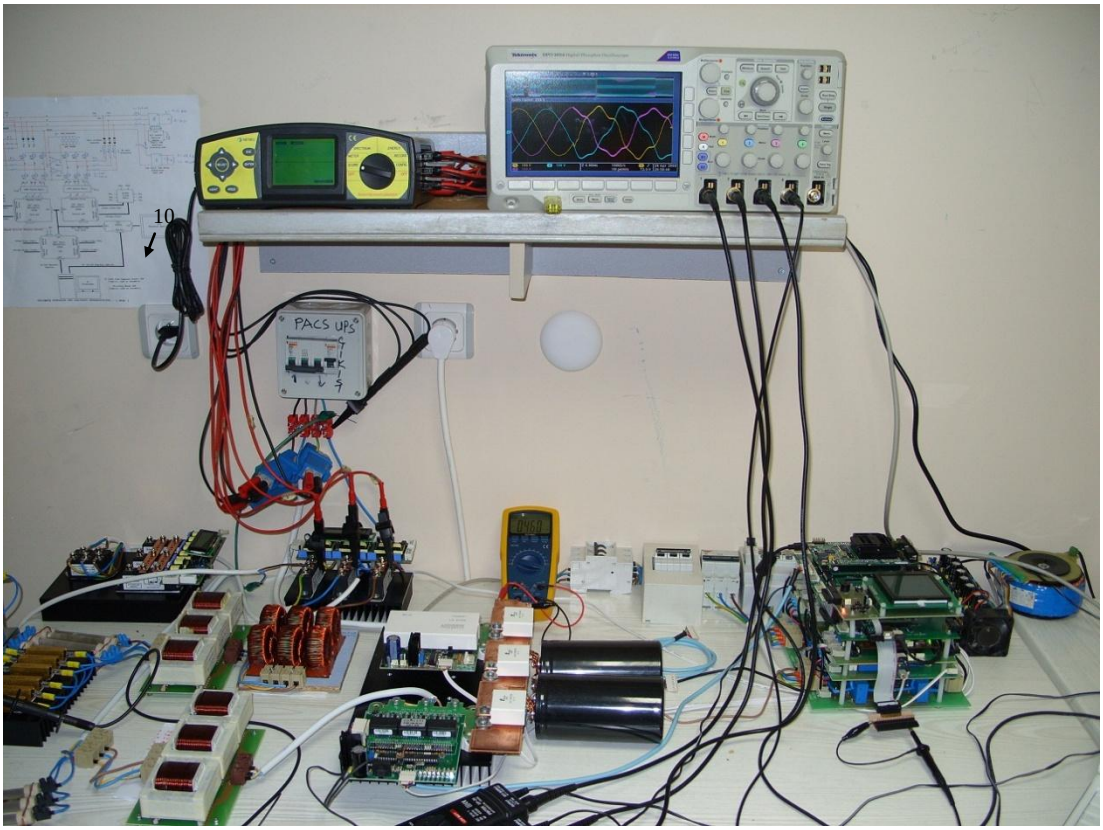
Şekil 6.3: SAGF DSP denetim algoritması akış diyagramı.



Şekil 6.4: PAGF DSP denetim algoritması akış diyagramı.

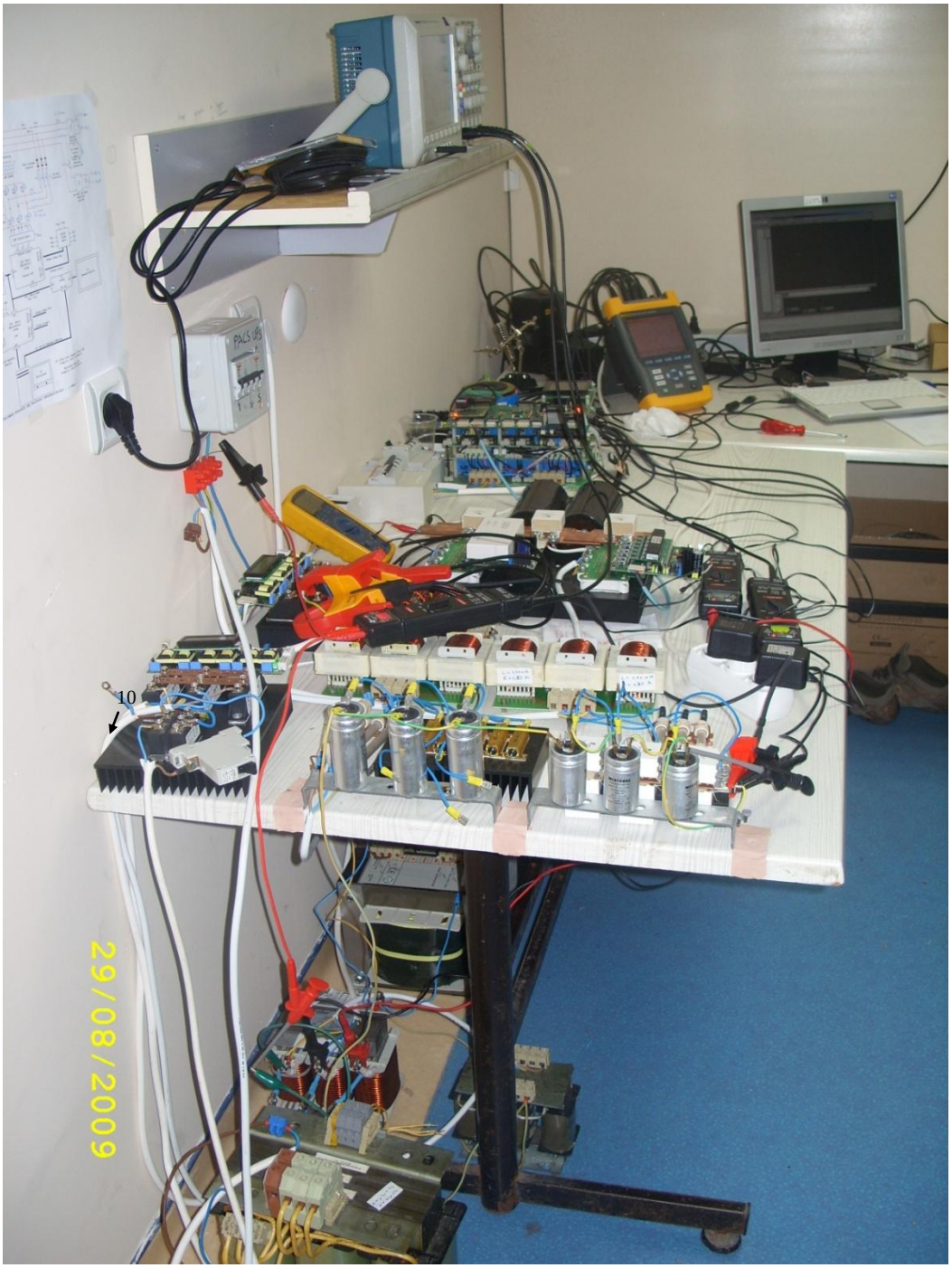


(a)



(b)

Şekil 6.5: (a)-(c) BGKD deneysel uygulama düzeneğinin fotoğrafları.



(c)

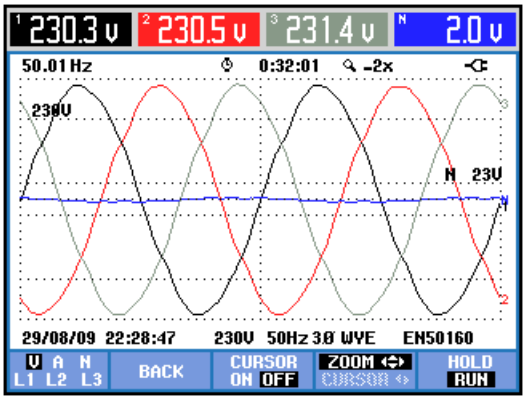
Şekil 6.5: (devam) (a)-(c) BGKD deneysel uygulama düzeneğinin fotoğrafları.

Tablo 6.1'de BGKD laboratuar deneysel düzeneğinde kullanılan sistem parametreleri verilmektedir. Şekil 6.6'da deneysel uygulama düzeneğine ait harmonik analizör ölçü aleti ile alınmış bazı değerler verilmektedir. (a)'da kaynak gerilimleri dalga şekilleri, (b)'de kaynak gerilimleri harmonik dağılımı, (c)'de 3-fazlı 6-darbeli tam denetimli

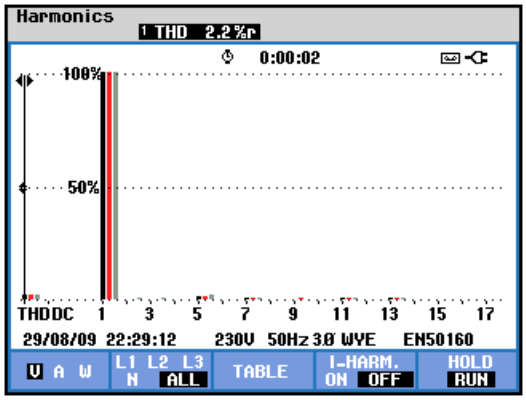
tristörlü doğrultucu (α=0° için) yük akımları dalga şekilleri, (d)'de yük akımları harmonik dağılımı, (e)'de yükün kaynaktan çektiği güç değerleri, (f)'de kaynak gerilimleri ve yük akımları maksimum ve etkin değerleri sonuçları verilmektedir.

Tablo 6.1: BGKD deneysel sistem parametreleri.

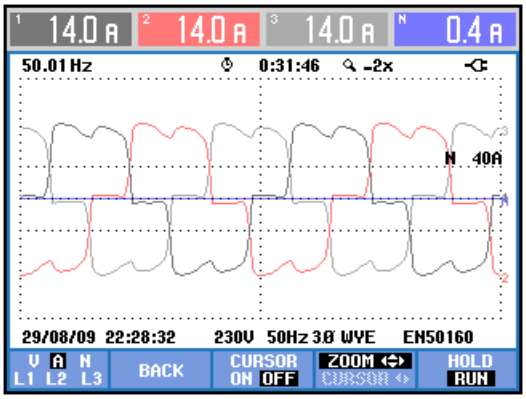
	Parametreler		**Değeri**
Kaynak	Gerilimi	v_{Kabc}	380 V_{rms}/faz-faz
	Frekansı	f	50 Hz
Yük	3-Fazlı AA Hat Reaktörü	L_{Yabc}	1,47 mH /0,25 Ω
	1-Fazlı AA Hat Reaktörü	L_{Ya1}	0,75 mH /0,15 Ω
	3-Fazlı DA Endüktansı	L_{da3}	11,53 mH
	3-Fazlı DA Direnci	R_{da3}	30 Ω
	1-Fazlı DA Direnci	R_{da1}	100 Ω
	3-Fazlı DA yük gerilimi	Y_{DA}	537 V
	1-Fazlı DA Kondansatörü	C_{da1}	75 μF
DA Bara	Gerilimi	V_{DA}	700 V
	Kondansatör1	C_1	2200 μF
	Kondansatör2	C_2	2200 μF
PAGF	AA Hat Endüktansı	L_{Cabc}	3,5 mH /0,6 Ω
	Filtre Direnci	R_{Cabc}	5 Ω
	Filtre Kondansatörü	C_{Cabc}	4,7 μF
	Anahtarlama Frekansı	f_{pwm}	~15 kHz
	Ön Şarj Dirençleri	$R_{şarj}$	10 Ω
	Histeresiz Band	HB	1 A
SAGF	AA Hat Endüktansı	L_{Tabc}	1,5 mH /0,25 Ω
	Filtre Direnci	R_{Tabc}	5 Ω
	Filtre Kondansatörü	C_{Tabc}	26 μF
	Anahtarlama Frekansı	f_{pwm}	~12 kHz
	1-Fazlı Seri Transformatörler	S	5,4 kVA
		Oran	1/3



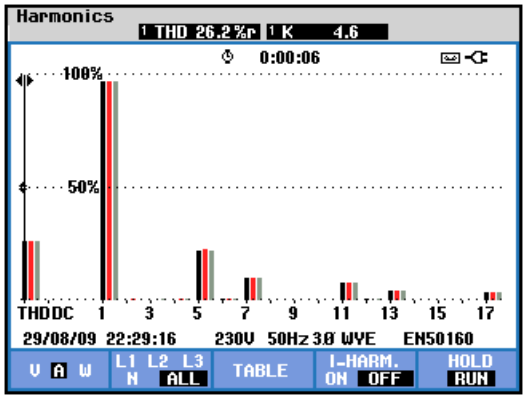
(a)



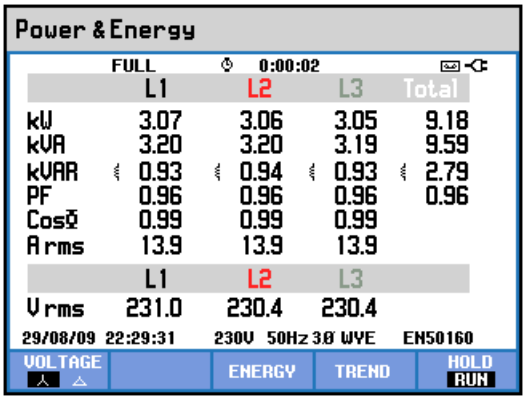
(b)



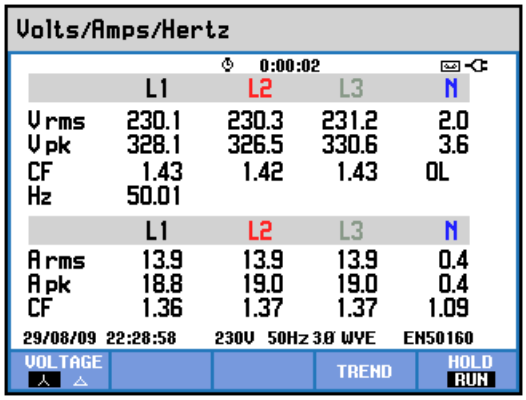
(c)



(d)



(e)

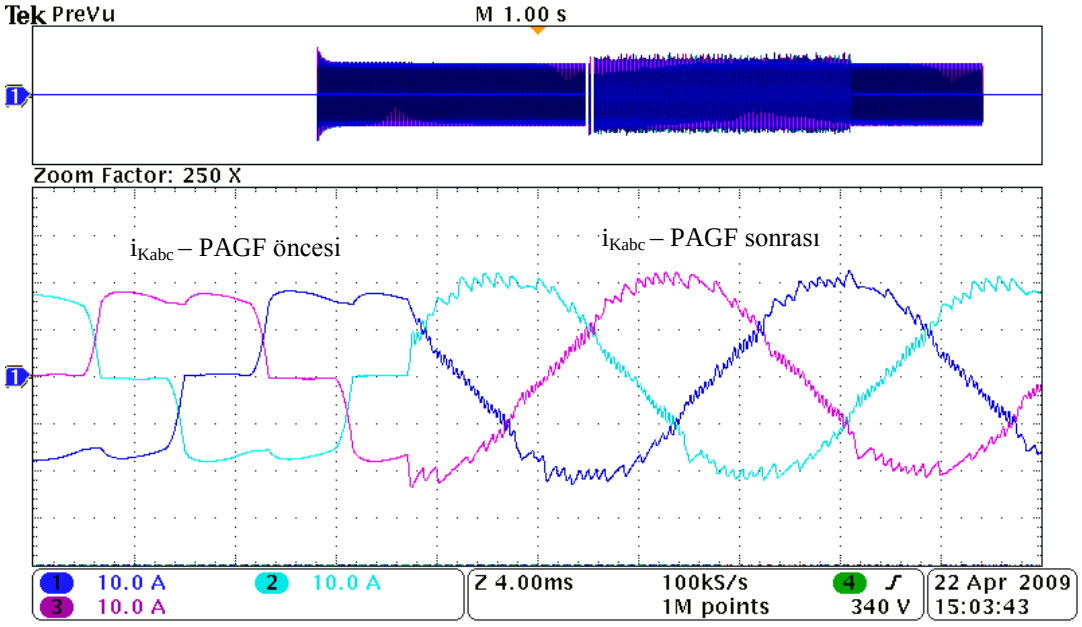


(f)

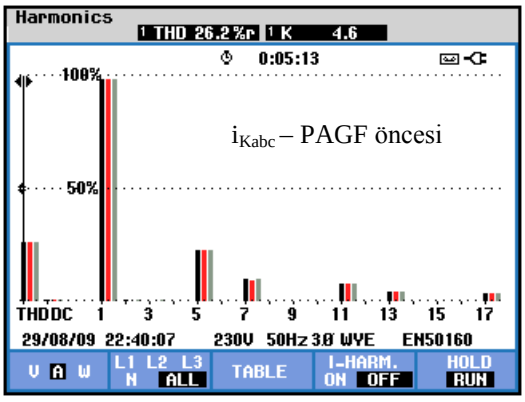
Şekil 6.6: Deneysel uygulama düzeneğine ait harmonik analizör ile alınmış (a) kaynak gerilimleri dalga şekilleri, (b) kaynak gerilimleri harmonik dağılımı, (c) yük akımları dalga şekilleri, (d) yük akımları harmonik dağılımı, (e) yükün kaynaktan çektiği güç değerleri, (f) kaynak gerilimleri ve yük akımları maksimum ve etkin değerleri sonuçları.

6.2. ARGT Tabanlı YAY ile BGKD Denetim Algoritması Deneysel Sonuçları

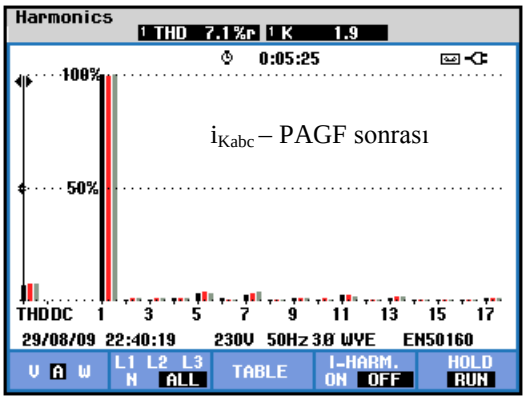
ARGT tabanlı YAY ile BGKD denetim algoritmasının simülasyon ve analiz çalışmaları Bölüm 3.7.1'de açıklanmaktadır. Şekil 6.7'de bu denetim algoritması kullanarak elde edilen deneysel sonuçlar verilmektedir. Şekil 6.7 (a)'da PAGF öncesi ve sonrası i_{Kabc} kaynak akımları dalga şekli, Şekil 6.7 (b)'de PAGF öncesi i_{Kabc} kaynak akımları harmonik dağılımı ve Şekil 6.7 (c)'de PAGF sonrası i_{Kabc} kaynak akımları harmonik dağılımı deneysel sonuçları verilmektedir.



(a)



(a)

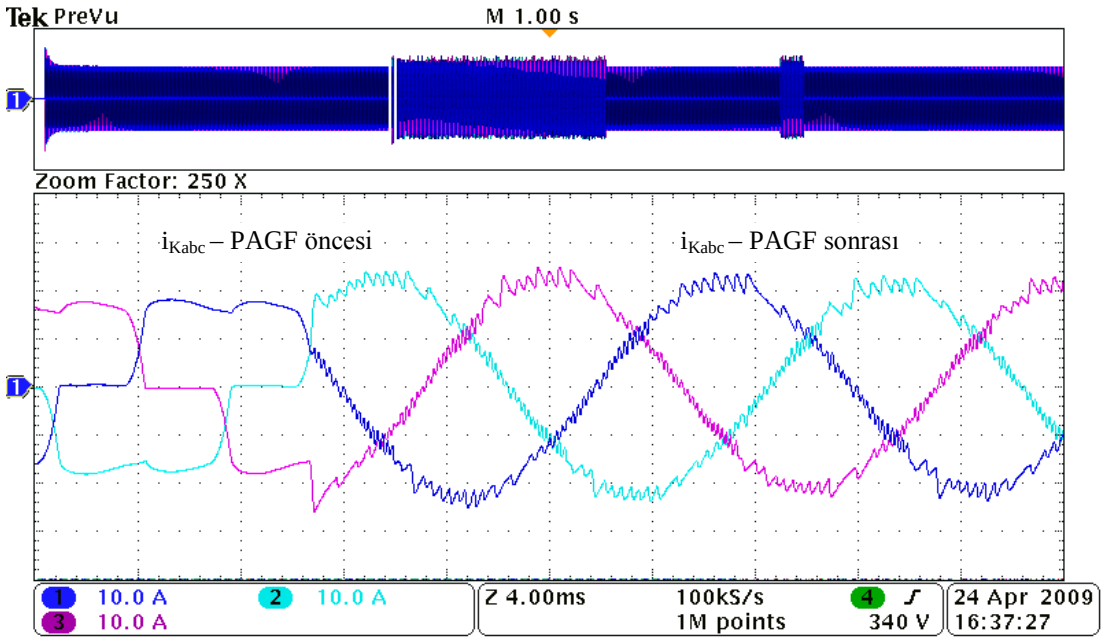


(c)

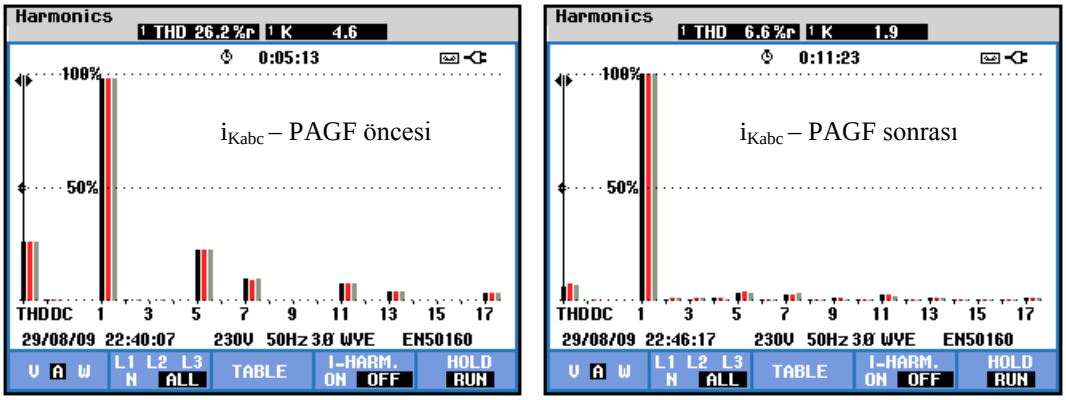
Şekil 6.7: (a) ARGT tabanlı YAY ile PAGF öncesi ve sonrası i_{Kabc} kaynak akımları dalga şekli, (b) PAGF öncesi i_{Kabc} kaynak akımları harmonik dağılımı ve (c) PAGF sonrası i_{Kabc} kaynak akımları harmonik dağılımı.

6.3. ARGT Tabanlı KAY ile BGKD Denetim Algoritması Deneysel Sonuçları

ARGT tabanlı KAY ile BGKD denetim algoritmasının simülasyon ve analiz çalışmaları Bölüm 3.7.2'de açıklanmaktadır. Şekil 6.8'de bu denetim algoritması kullanarak elde edilen deneysel sonuçlar verilmektedir. Şekil 6.8 (a)'da PAGF öncesi ve sonrası i_{Kabc} kaynak akımları dalga şekli, Şekil 6.8 (b)'de PAGF öncesi i_{Kabc} kaynak akımları harmonik dağılımı ve Şekil 6.8 (c)'de PAGF sonrası i_{Kabc} kaynak akımları harmonik dağılımı deneysel sonuçları verilmektedir.



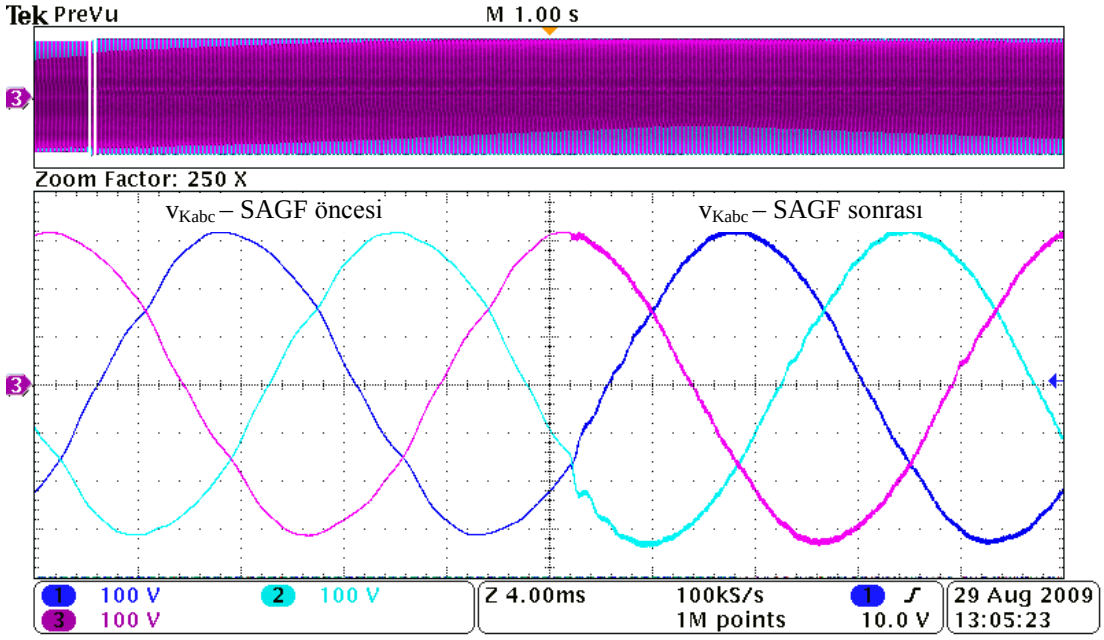
(a)



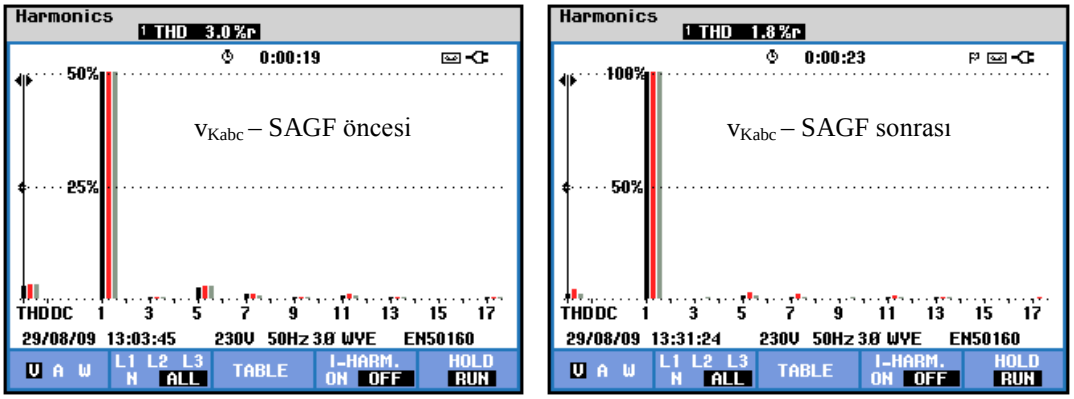
(a) (c)

Şekil 6.8: (a) ARGT tabanlı KAY ile PAGF öncesi ve sonrası i_{Kabc} kaynak akımları dalga şekli, (b) PAGF öncesi i_{Kabc} kaynak akımları harmonik dağılımı ve (c) PAGF sonrası i_{Kabc} kaynak akımları harmonik dağılımı.

Şekil 6.9'da (a) v_{Labc} yük gerilimleri SAGF öncesi ve sonrası dalga şekli, (b) v_{Labc} yük gerilimleri SAGF öncesi harmonik dağılımı, (c) v_{Labc} yük gerilimleri SAGF sonrası harmonik dağılımı deneysel sonuçları verilmektedir.



(a)



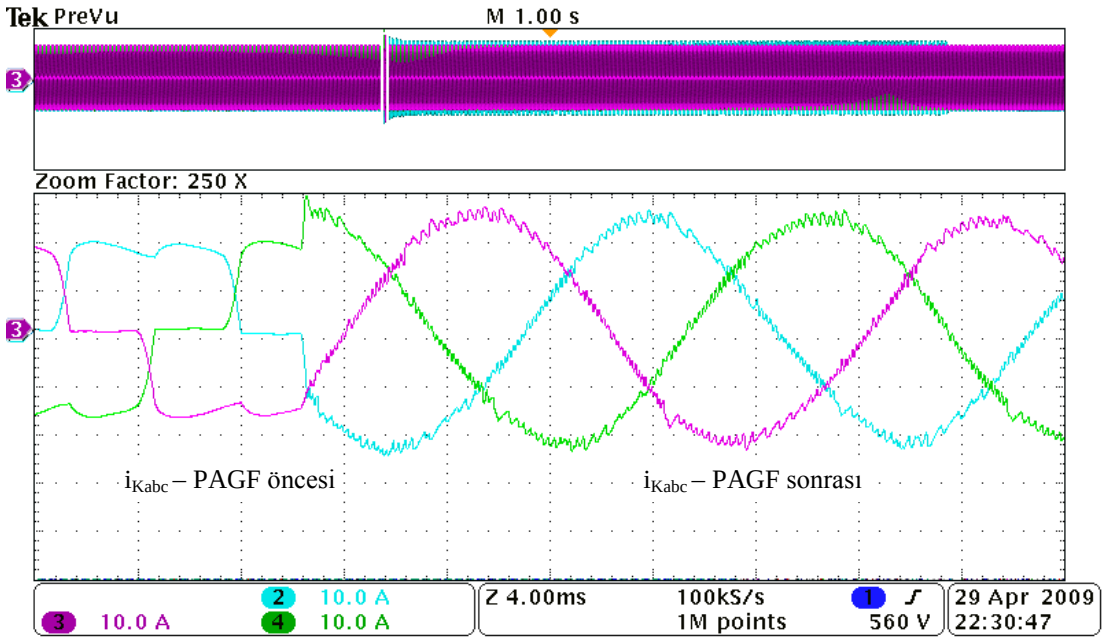
(a) (c)

Şekil 6.9: (a) v_{Labc} yük gerilimleri SAGF öncesi ve sonrası dalga şekli, (b) v_{Labc} yük gerilimleri SAGF öncesi harmonik dağılımı, (c) v_{Labc} yük gerilimleri SAGF sonrası harmonik dağılımı.

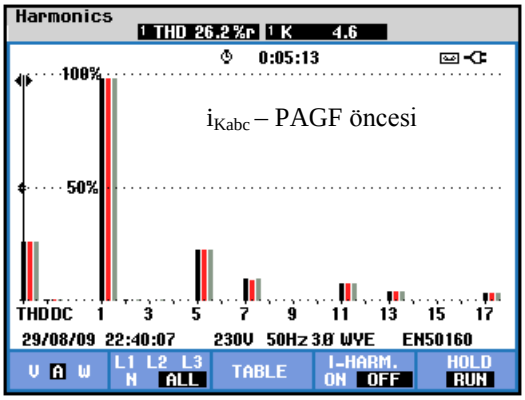
Şekil 6.7 – Şekil 6.9'da verilen deneysel uygulama sonuçları incelendiğinde ARGT tabanlı BGKD denetim algoritması ile kaynak akımında görülen harmoniklerin giderildiği, gerilimindeki harmoniklerin azaltıldığı açıkça görülmektedir.

6.4. Önerilen SRY Tabanlı YAY ile BGKD Denetim Algoritması Deneysel Sonuçları

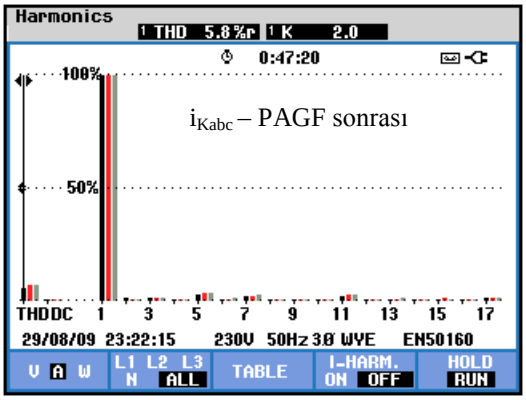
Önerilen SRY tabanlı YAY ile BGKD denetim algoritmasının simülasyon ve analiz çalışmaları Bölüm 3.7.3'de açıklanmaktadır. Şekil 6.10'da bu denetim algoritması kullanarak elde edilen deneysel sonuçlar verilmektedir. Şekil 6.10 (a)'da PAGF öncesi ve sonrası i_{Kabc} kaynak akımları dalga şekli, Şekil 6.10 (b)'de PAGF öncesi i_{Kabc} kaynak akımları harmonik dağılımı ve Şekil 6.10 (c)'de PAGF sonrası i_{Kabc} kaynak akımları harmonik dağılımı deneysel sonuçları verilmektedir.



(a)



(a)

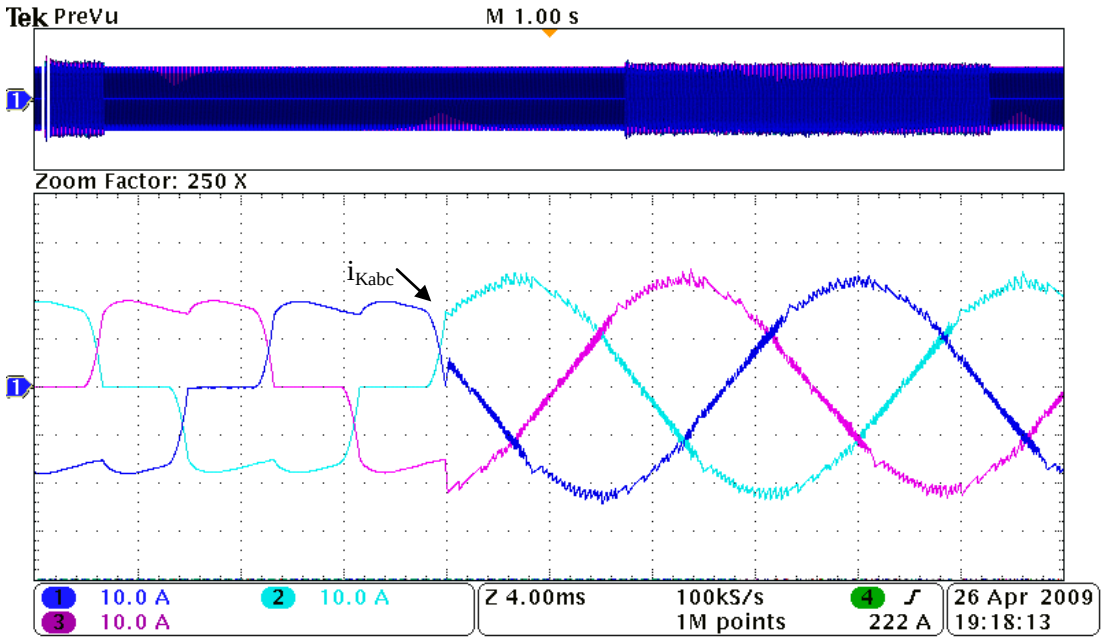


(c)

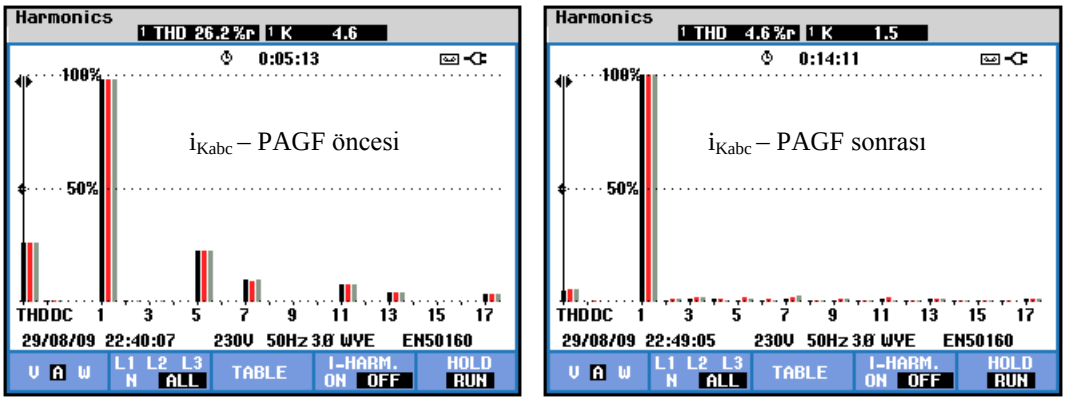
Şekil 6.10: (a) Önerilen SRY tabanlı YAY ile PAGF öncesi ve sonrası i_{Kabc} kaynak akımları dalga şekli, (b) PAGF öncesi i_{Kabc} kaynak akımları harmonik dağılımı ve (c) PAGF sonrası i_{Kabc} kaynak akımları harmonik dağılımı.

6.5. Önerilen SRY Tabanlı KAY ile BGKD Denetim Algoritması Deneysel Sonuçları

Önerilen SRY tabanlı KAY ile BGKD denetim algoritmasının simülasyon ve analiz çalışmaları Bölüm 3.7.4'de açıklanmaktadır. Şekil 6.11'de bu denetim algoritması kullanarak elde edilen deneysel sonuçlar verilmektedir. Şekil 6.11 (a)'da PAGF öncesi ve sonrası i_{Kabc} kaynak akımları dalga şekli, Şekil 6.11 (b)'de PAGF öncesi i_{Kabc} kaynak akımları harmonik dağılımı ve Şekil 6.11 (c)'de PAGF sonrası i_{Kabc} kaynak akımları harmonik dağılımı deneysel sonuçları verilmektedir.



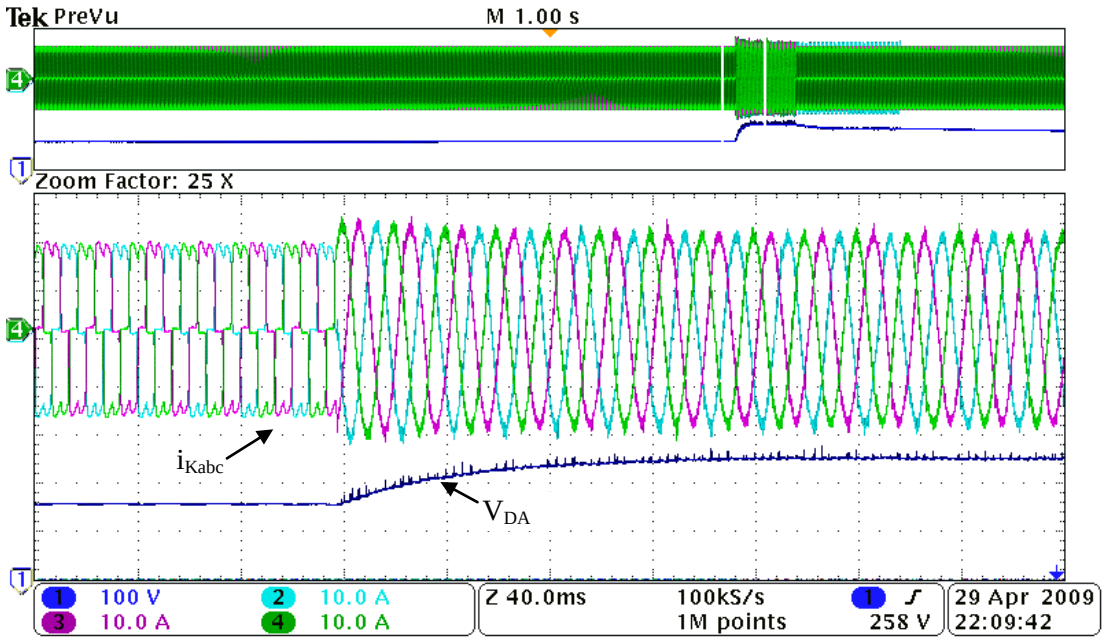
(a)



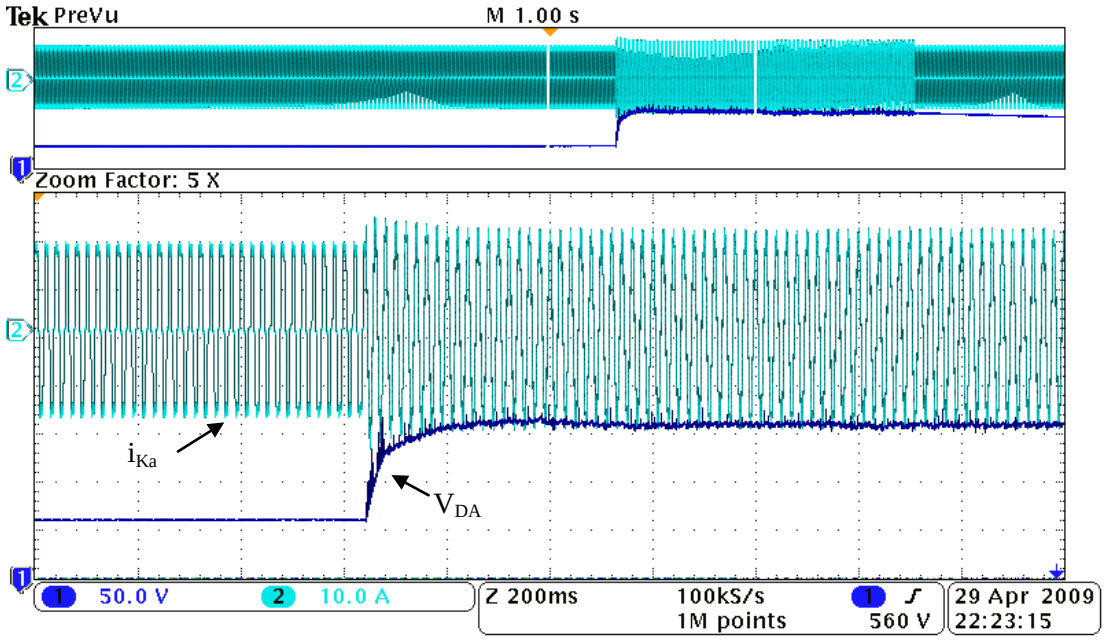
(a) (c)

Şekil 6.11: (a) Önerilen SRY tabanlı KAY ile PAGF öncesi ve sonrası i_{Kabc} kaynak akımları dalga şekli, (b) PAGF öncesi i_{Kabc} kaynak akımları harmonik dağılımı ve (c) PAGF sonrası i_{Kabc} kaynak akımları harmonik dağılımı.

Şekil 6.12 (a) ve (b)'de PAGF devreye girdiği anda kaynak akımları ve DA bara gerilimi anlık değişimi deneysel sonuçları verilmektedir.



(a)

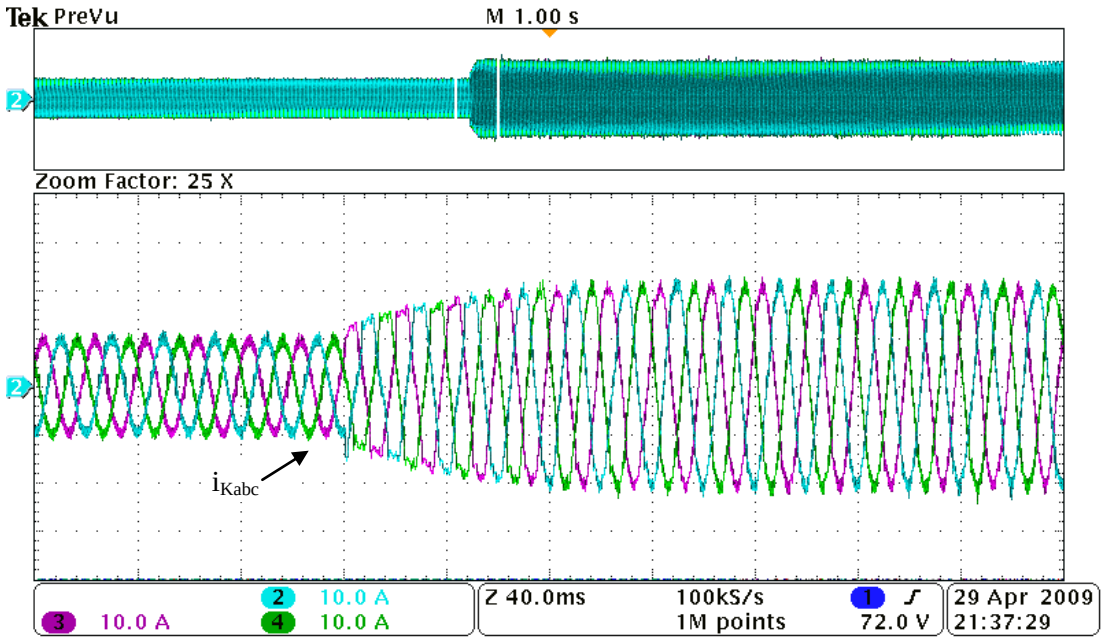


(b)

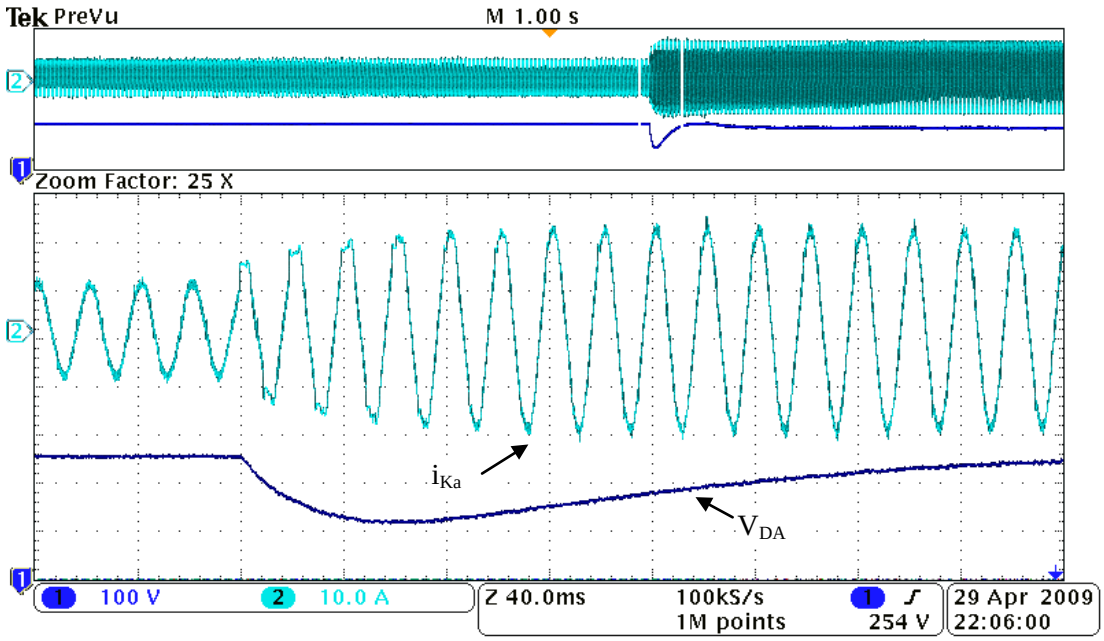
Şekil 6.12: (a) 3-fazlı (b) tek fazlı PAGF öncesi ve sonrası i_{Kabc} kaynak akımları ve DA bara gerilimi anlık değişim dalga şekilleri deneysel sonuçları.

Önerilen SRY tabanlı KAY ile BGKD denetim algoritması ile anlık yük değişimlerin test etmek ve dinamik cevabını analiz etmek için 5kW'lık yük anlık olarak 10kW'a

çıkarılmaktadır. Şekil 6.13 (a)- (c)'de PAGF devrede iken %100 yük değişimi öncesi ve sonrası DA bara gerilimi ve kaynak akımı değişimi deneysel sonuçları görülmektedir. Deneysel sonuçlardan da anlaşılacağı üzere yük değişiminde sistemin dinamik cevabı oldukça başarılı görülmektedir.

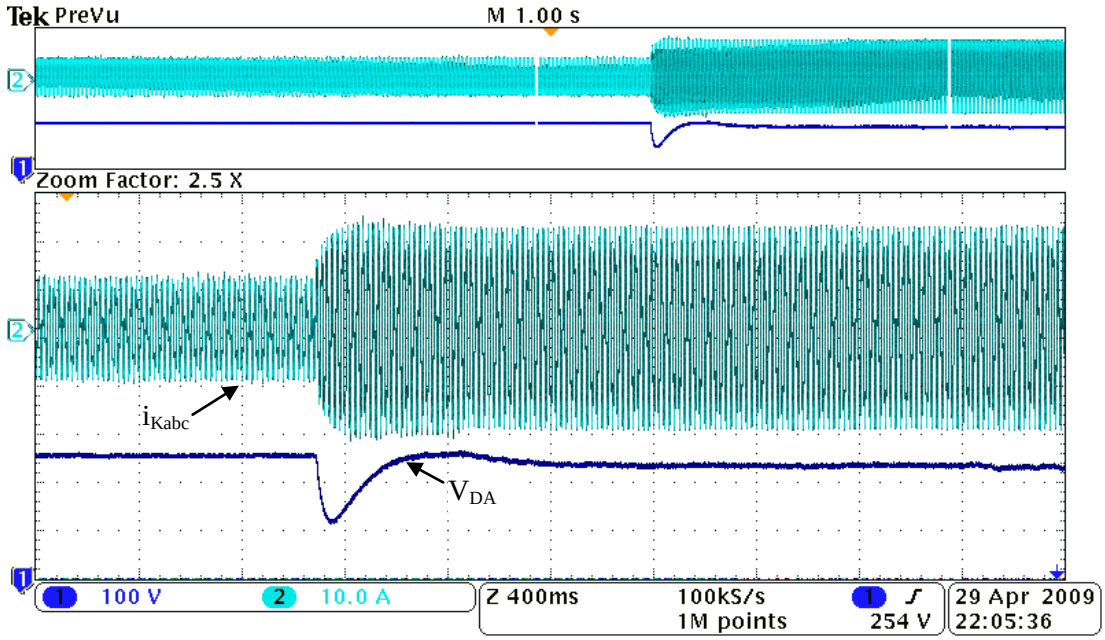


(a)



(b)

Şekil 6.13: (a)-(c) PAGF devrede iken %100 yük değişimi öncesi ve sonrası DA bara gerilimi ve kaynak akımı değişimi deneysel sonuçları.

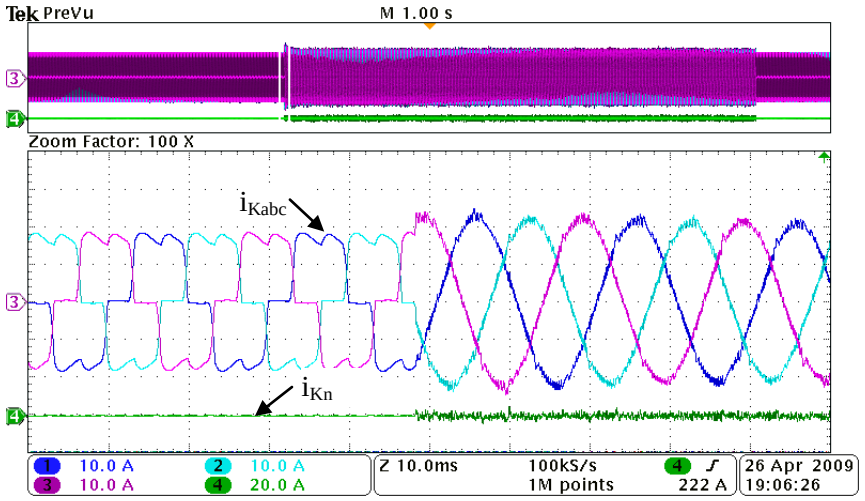


(c)

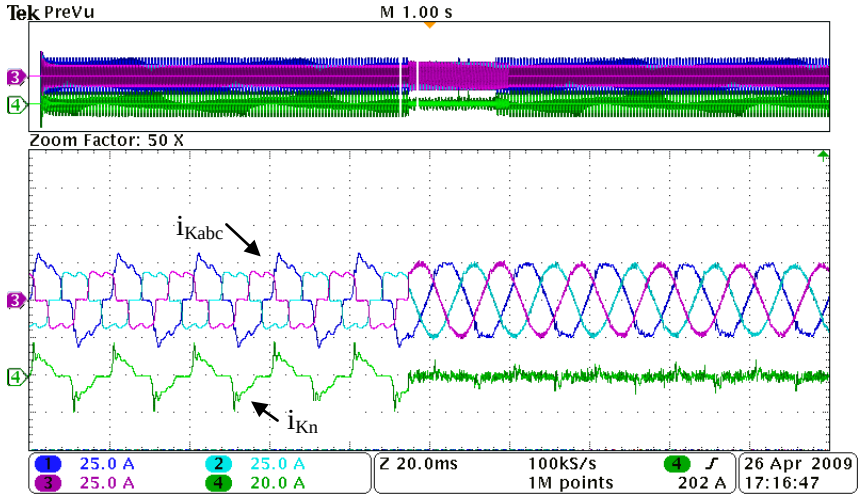
Şekil 6.13: (devam) (a)-(c) PAGF devrede iken %100 yük değişimi öncesi ve sonrası DA bara gerilimi ve kaynak akımı değişimi deneysel sonuçları.

3-fazlı 4-telli sistemlerde dengesiz yük durumlarında fazlar arası dengesizliklerden dolayı nötr hattından akım geçmektedir. Dengesizliklerin artması durumunda nötr hattında akımın artmasına nötr iletkenin ısınmasına ve iletim sorunlarına sebep olmaktadır. Şekil 6.14 (a)'da PAGF öncesi ve sonrasında görüldüğü gibi fazlar dengeli olduğu için kaynak nötr hattından akım geçmemektedir. Şekil 6.14 (b)'de ise fazlar dengesiz olduğundan PAGF öncesi dengesizlik kadar kaynak nötr hattında akım geçmektedir. PAGF devreye girdiğinde dengesiz yük akımları kaynak tarafında dengelenmekte ve kaynak nötr akımı kompanze edilmektedir. Şekil 6.14 (c)'de yük nötr akımı i_{Yn}, filtre nötr akımı i_{Cn} ve kaynak nötr akımı i_{Kn} PAGF filtre öncesi ve sonra deneysel sonuçları verilmektedir.

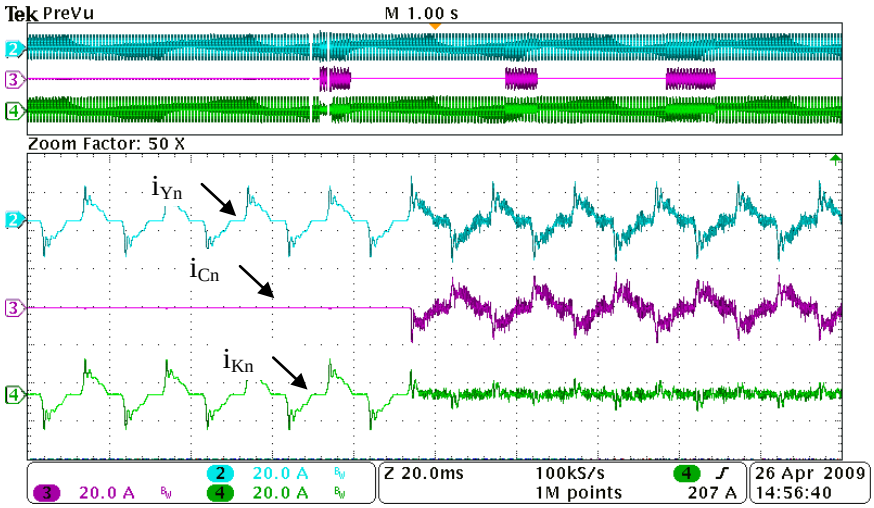
Önerilen SRY tabanlı KAY ile BGKD denetim algoritması kullanarak Bölüm 4.16'da anlatılan 3-fazlı 6-darbeli tam denetimli tristörlü yük ile yapılan farklı PAGF deneysel çalışma sonuçları verilmektedir. Şekil 6.15 (a)'da tristörlerin tetikleme α açısı α=5° durumunda, (b) ve (c)'de α=45° durumunda, (d) ve (e)'de α=60° durumunda, (f) ve (g)'de α=90° 'ye yakın olması durumunda PAGF ile alınan kaynak akımları ve tristörlü doğrultucunun DA yük gerilimi deneysel sonuçları verilmektedir. α=90° 'ye yakın olması durumunda PAGF çalışamamaktadır.



(a)

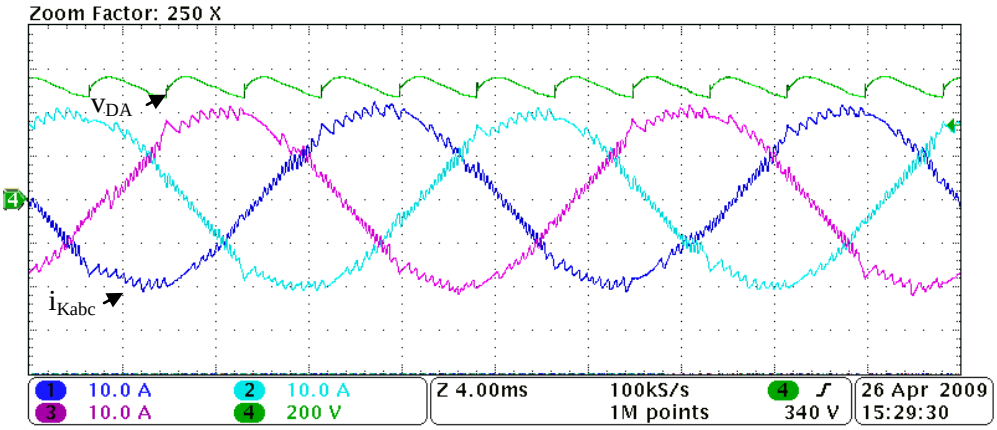


(b)

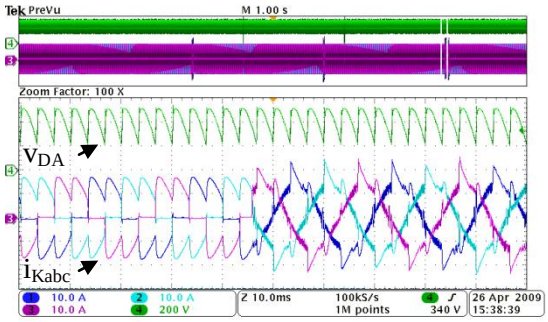


(c)

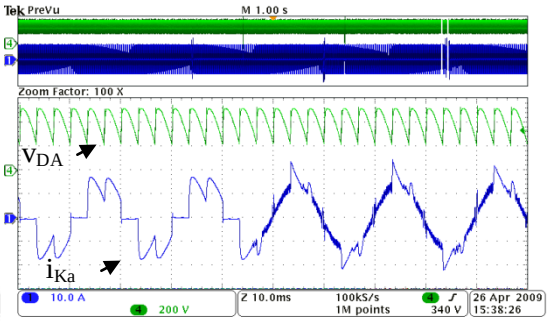
Şekil 6.14: (a) Dengeli yük durumunda kaynak akımları PAGF öncesi ve sonrası, (b) dengesiz yük durumunda kaynak akımları PAGF öncesi ve sonrası ve (c) yük nötr akımı i_{Yn}, filtre nötr akımı i_{Cn} ve kaynak nötr akımı i_{Kn} PAGF öncesi ve sonrası deneysel sonuçları.



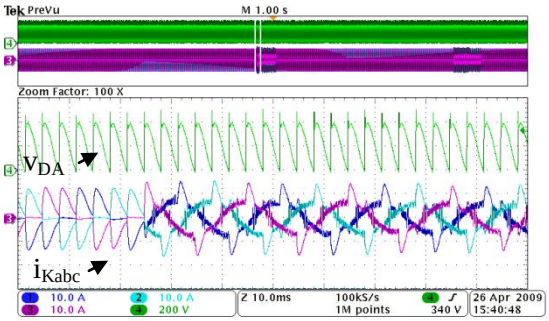
(a)



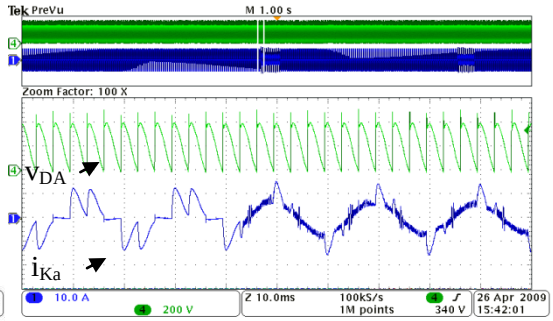
(b)



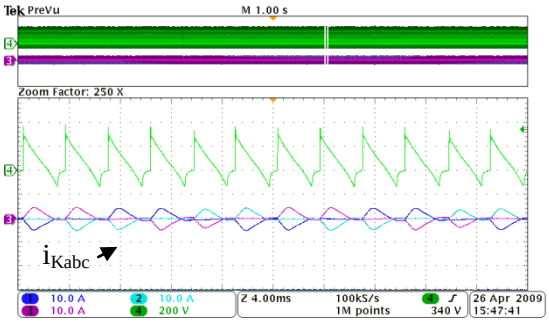
(c)



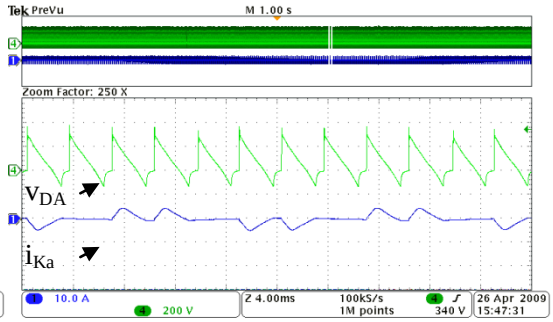
(d)



(e)



(f)

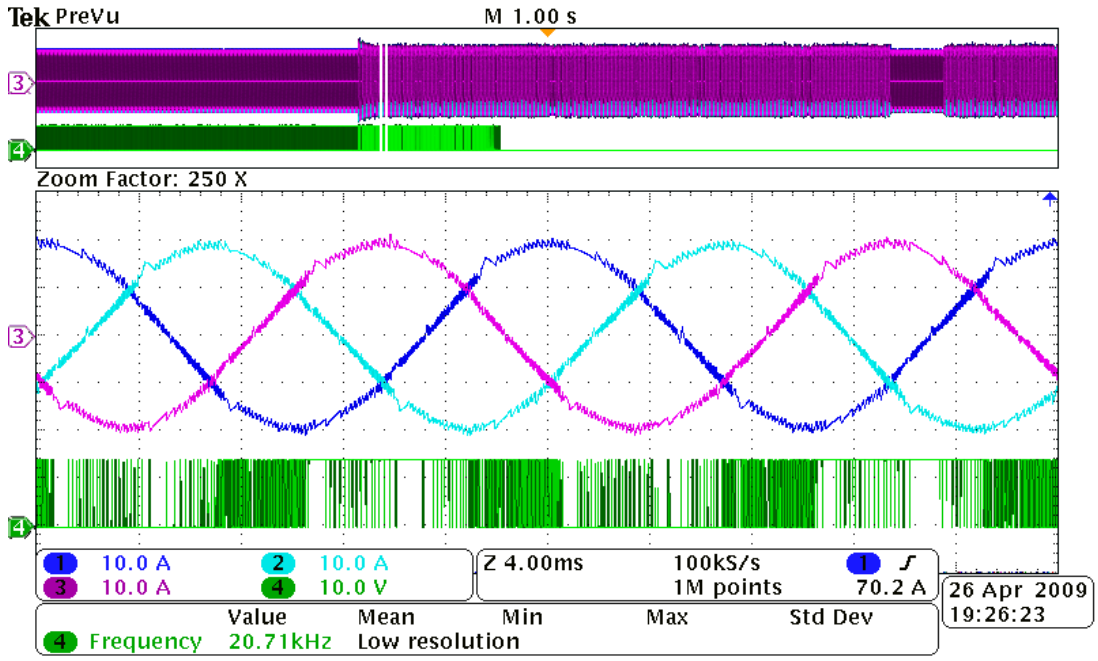


(g)

Şekil 6.15: (a) Tristörlerin tetikleme α açısı α=5° durumunda, (b) ve (c) α=45° durumunda, (d) ve (e) α=60° durumunda, (f) ve (g) α=90° olması durumunda PAGF ile alınan kaynak akımları ve tristörlü doğrultucunun DA yük gerilimi dalga şekilleri deneysel sonuçları.

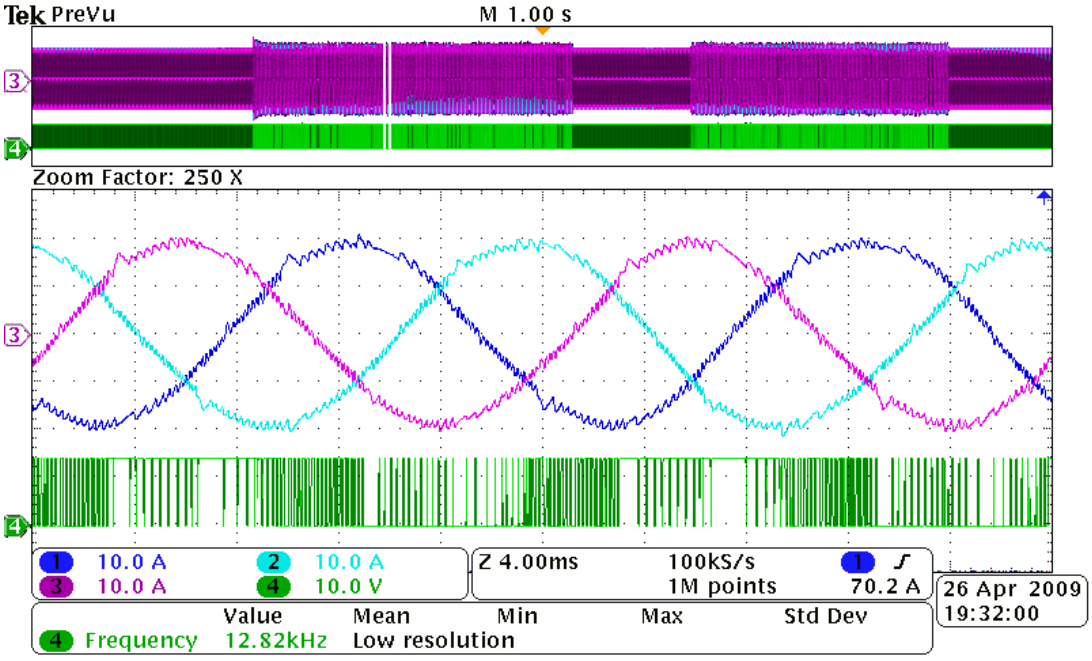
Şekil 6.16'da önerilen SRY tabanlı KAY ile BGKD denetim algoritması ile Bölüm 4.12'de açıklanan PAGF güç devresi hattına bağlı anahtarlama RC filtre (R_{Cabc} ve C_{Cabc}) elemanların etkisi incelenmekte ve deneysel sonuçları verilmektedir. (a)'da RC filtre elemanları kullanılmadığında PAGF devrede iken IGBT anahtarlama frekansı yaklaşık 20 kHz, (b)'de R=4,7 Ω ve C=4,7 µF alınması durumunda anahtarlama frekansı 12,8 kHz ve (c)'de R=2.35 Ω ve C=4,7 µF alınması durumunda anahtarlama frekansı yaklaşık 5,6 kHz olduğu görülmektedir.

Şekil 6.16'da verilen deneysel sonuçlarda görüldü gibi RC filtre elemanında R'nin değerinin azalması ile PAGF güç devresi IGBT anahtarlama frekansı azalmaktadır. Anahtarlama frekansının azalması ile anahtarlama kayıpları da azalmaktadır.

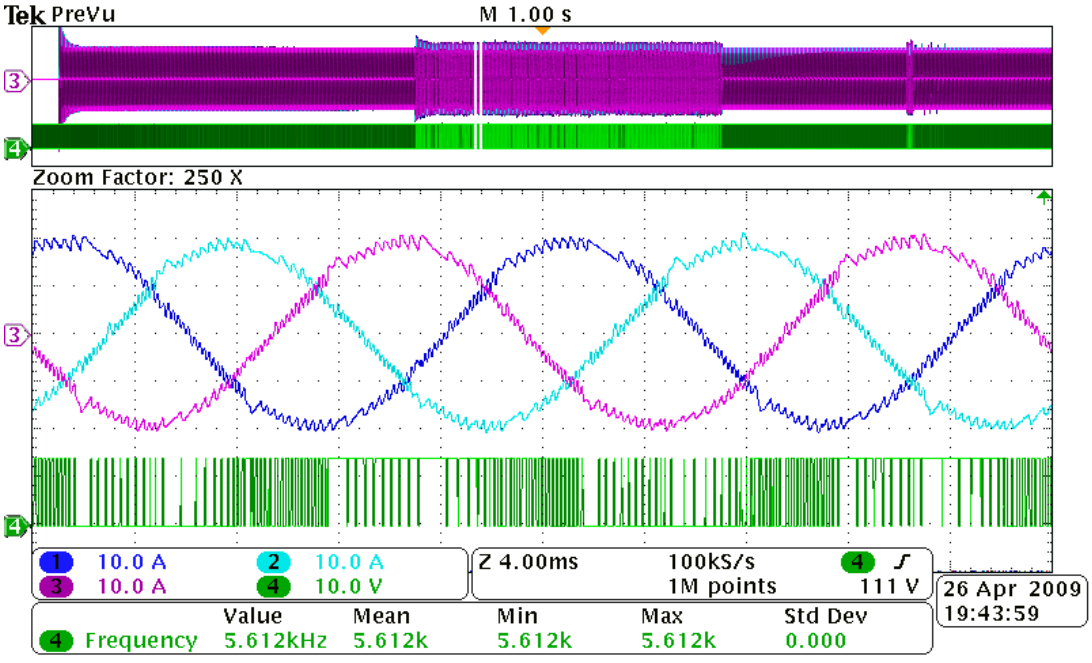


(a)

Şekil 6.16: (a) RC filtre elemanları kullanılmadığında, (b)'de R= 4,7 Ω ve C=4,7 µF alınması durumunda ve (c)'de R= 2,35 Ω ve C=4,7 µF alınması durumunda PAGF ile alınan deneysel sonuçlar.



(b)

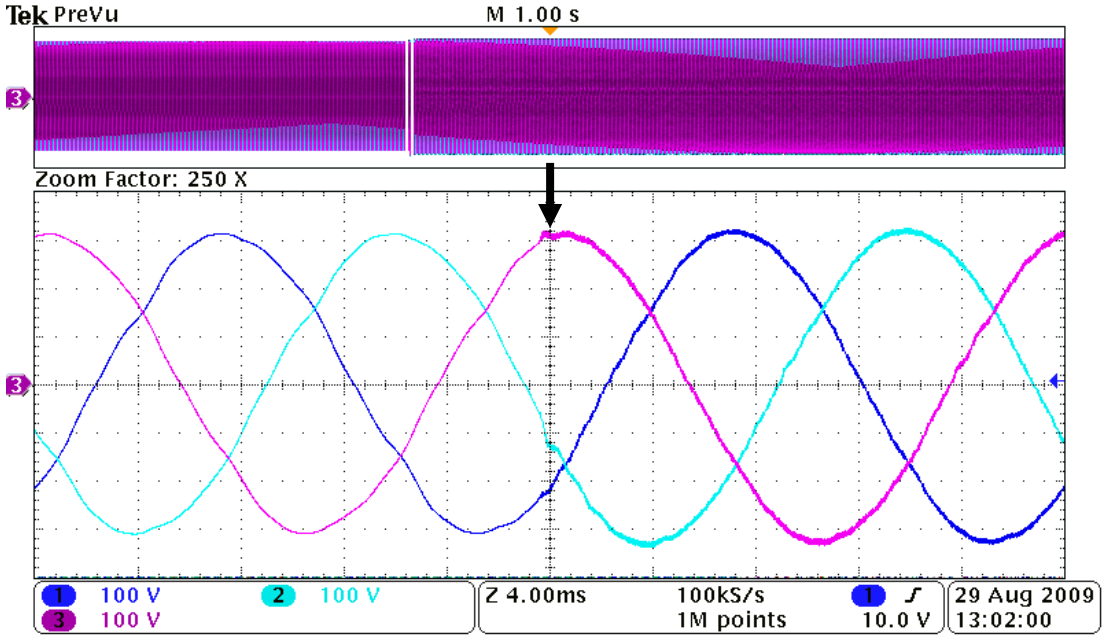


(c)

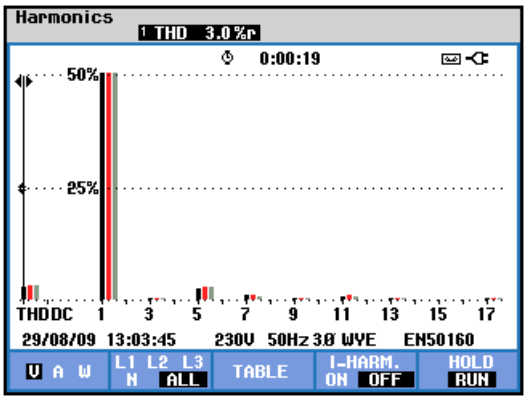
Şekil 6.16: (devam) (a) RC filtre elemanları kullanılmadığında, (b)'de R= 4,7 Ω ve C=4,7 µF alınması durumunda ve (c)'de R= 2,35 Ω ve C=4,7 µF alınması durumunda PAGF ile alınan deneysel sonuçlar.

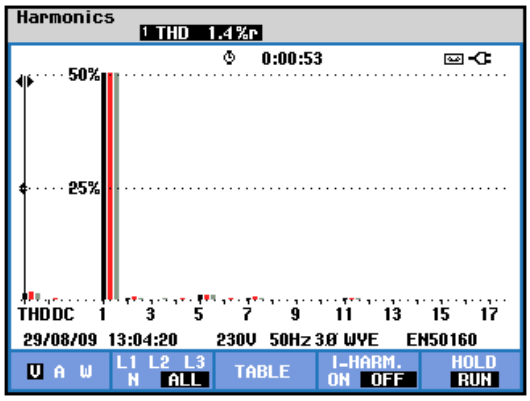
Aşağıda önerilen SRY tabanlı KAY ile BGKD denetim algoritması ile elde edilen bazı SAGF deneysel sonuçları verilmektedir. Şekil 6.17 (a)'da v_{Yabc} yük gerilimleri SAGF öncesi ve sonrası dalga şekli, (b)'de v_{Yabc} yük gerilimleri SAGF öncesi

harmonik dağılımı ve (c)'de v_{Yabc} yük gerilimleri SAGF sonrası harmonik dağılımı deneysel sonuçları verilmektedir. SAGF sonrası kaynak gerilim harmonikleri %3,0 seviyesinden %1,4 seviyesine inmektedir.



(a)



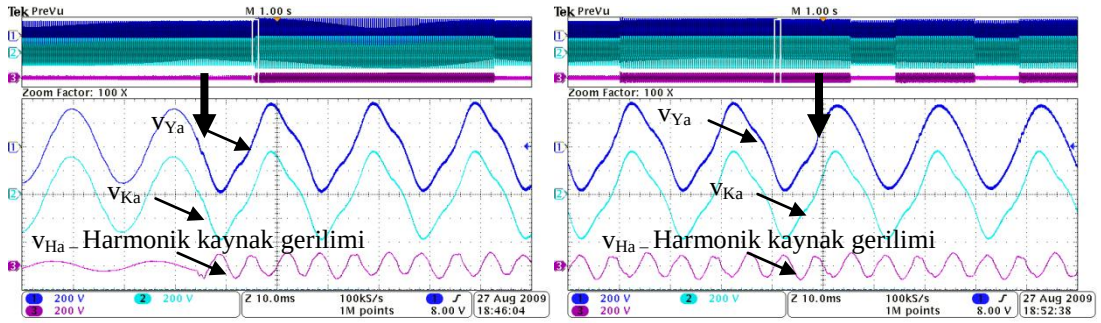


(b) (c)

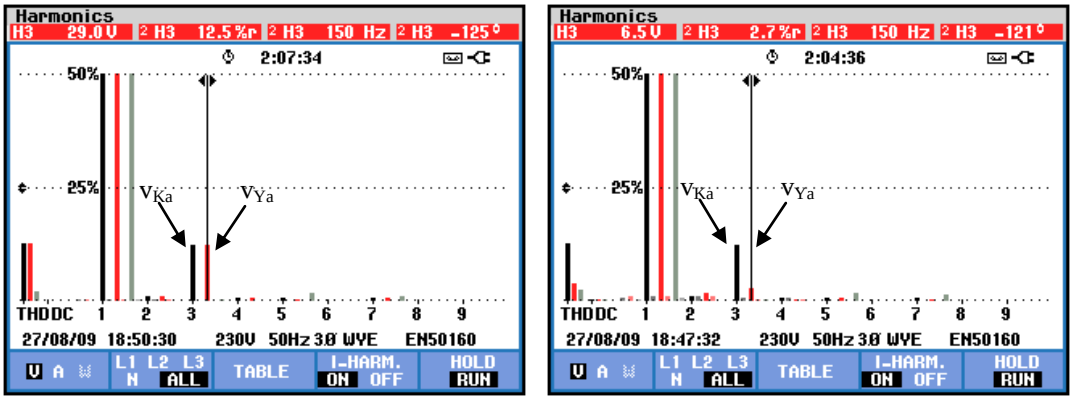
Şekil 6.17: (a) v_{Yabc} yük gerilimleri SAGF öncesi ve sonrası dalga şekli, (b) v_{Yabc} yük gerilimleri SAGF öncesi harmonik dağılımı, (c) v_{Yabc} yük gerilimleri SAGF sonrası harmonik dağılımı deneysel sonuçları verilmektedir.

BGKD deneysel laboratuar düzeneği ortamında, kaynak gerilim harmoniğinin düşük olması nedeniyle, kaynak geriliminde daha yüksek gerilim harmoniği ve güç kalitesi problemleri oluşturmak amacıyla Bölüm 4.18'de tasarımı anlatılan şebekeye seri bağlı HGK kullanılmaktadır. Aşağıda HGK kullanarak kaynak geriliminde

oluşturulan güç kalitesi problemleri ve bu problemlerin önerilen SRY tabanlı KAY ile BGKD denetim algoritması yöntemi kullanılarak yapılan bazı deneysel çalışmalar verilmektedir. Şekil 6.18 (a)'da SAGF devrede değil iken HGK ile kaynak gerilimine %12,5 oranında 3. harmonik enjekte edilmektedir. (b)'de görüldüğü gibi SAGF devreye girdiğinde kaynak gerilimine enjekte edilen 3. harmonik yük tarafında %2,7 oranına indirilmektedir. (c)'de SAGF öncesi kaynak ve yük gerilimlerin harmonik dağılımı, (d)'de SAGF devreye girdiğinde kaynak ve yük gerilimlerin harmonik dağılımı deneysel sonuçları verilmektedir.



(a) (b)

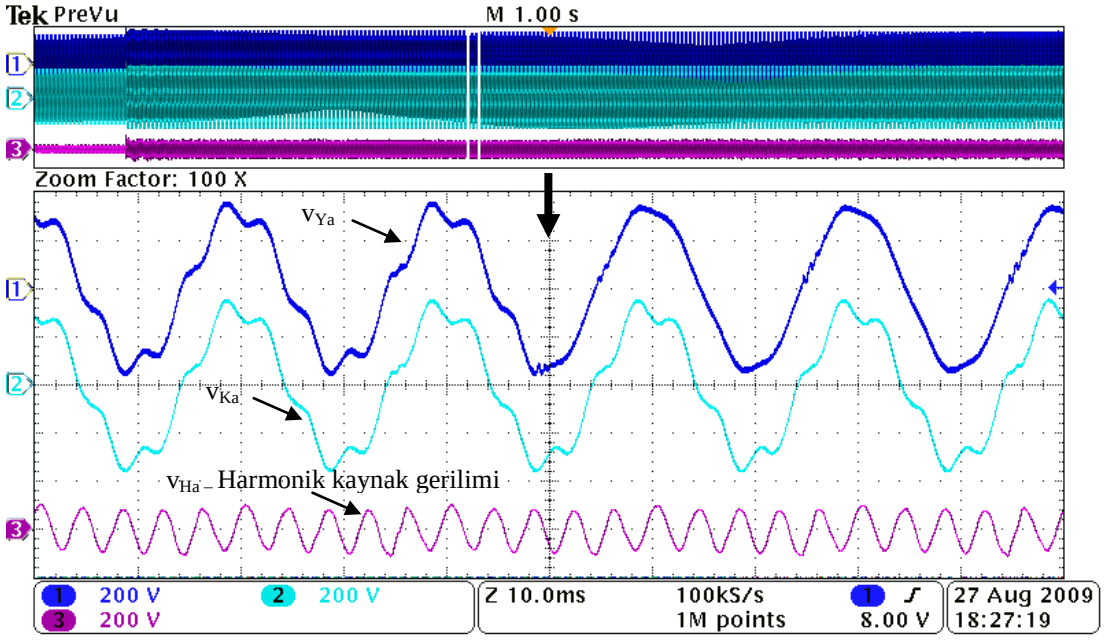


(c) (d)

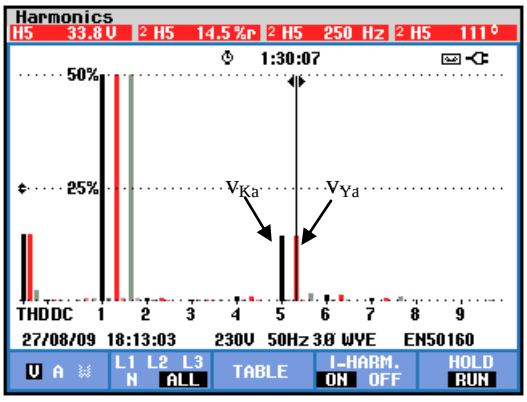
Şekil 6.18: (a) v_{Ka} kaynak, v_{Ya} yük ve v_{Ha} harmonik gerilimleri HGK öncesi ve sonrası dalga şekilleri, (b) v_{Ka} kaynak, v_{Ya} yük ve v_{Ha} harmonik gerilimleri SAGF öncesi ve sonrası dalga şekilleri, (c) v_{Ka} kaynak ve v_{Ya} yük gerilimleri HGK sonrası harmonik dağılımı ve (d) v_{Ka} kaynak ve v_{Ya} yük gerilimleri SAGF sonrası harmonik dağılımı deneysel sonuçları.

Şekil 6.19 (a)'da HGK ile kaynak gerilimine %14,5 oranında 5. harmonik enjekte edilmekte ve SAGF devreye girdiğinde kaynak gerilimine enjekte edilen 5. harmonik yük tarafında %4,1 oranına indirilmektedir. (b)'de SAGF öncesi kaynak ve yük gerilimlerin harmonik dağılımı, (c)'de SAGF devreye girdiğinde kaynak ve yük

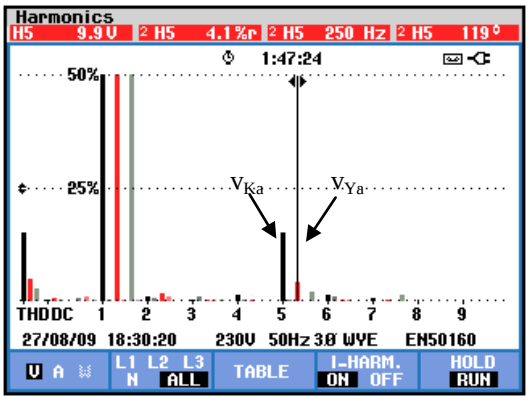
gerilimlerin harmonik dağılımı deneysel sonuçları verilmektedir. SAGF devreye girdiğinde kaynak gerilimindeki harmonikler kompanze edilerek yük tarafına (ortak bağlantı noktasına) etkisi azaltılmaktadır.



(a)



(b)

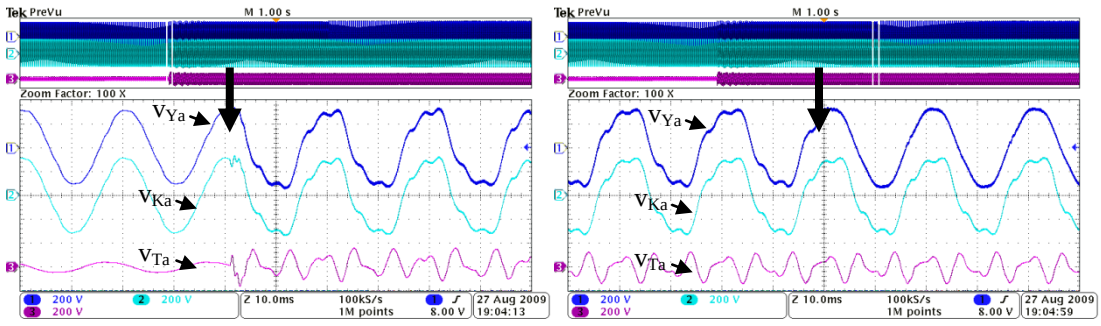


(c)

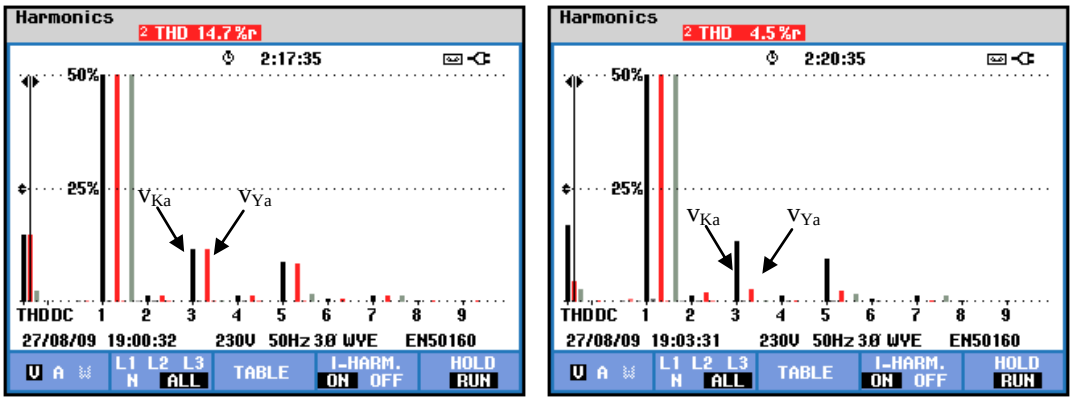
Şekil 6.19: (a) v_{Ka} kaynak, v_{Ya} yük ve v_{Ha} harmonik gerilimleri SAGF öncesi ve sonrası dalga şekilleri, (b) v_{Ka} kaynak ve v_{Ya} yük gerilimleri HGK sonrası harmonik dağılımı ve (c) v_{Ka} kaynak ve v_{Ya} yük gerilimleri SAGF sonrası harmonik dağılımı deneysel sonuçları.

Şekil 6.20 (a)'da HGK ile kaynak gerilimine %14,7 oranında 3. ve 5. harmonikler birlikte enjekte edilmektedir. (b)'de SAGF devreye girdiğinde kaynak gerilimine enjekte edilen harmonikler yük tarafında %4,5 oranına indirilmektedir. (c)'de SAGF öncesi kaynak ve yük gerilim harmoniklerin dağılımı, (d)'de SAGF devreye

girdiğinde kaynak ve yük gerilimlerin harmonik dağılımı deneysel sonuçları verilmektedir. SAGF devreye kaynak gerilimindeki harmonikler kompanze edilerek yük tarafına etkisi azaltılmaktadır.



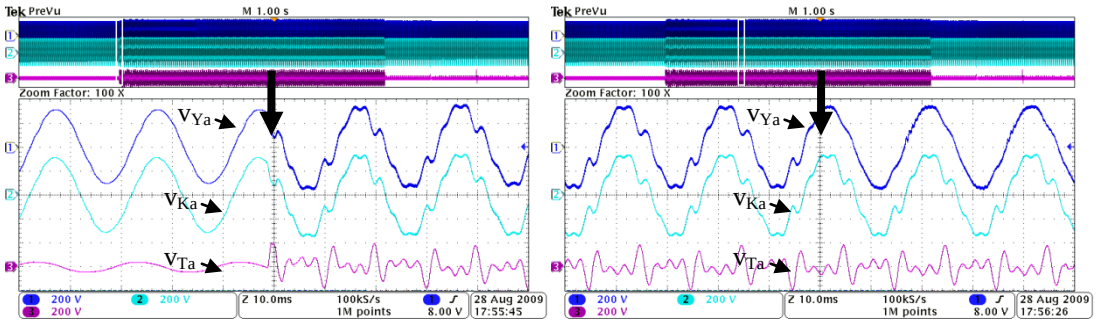
(a) (b)



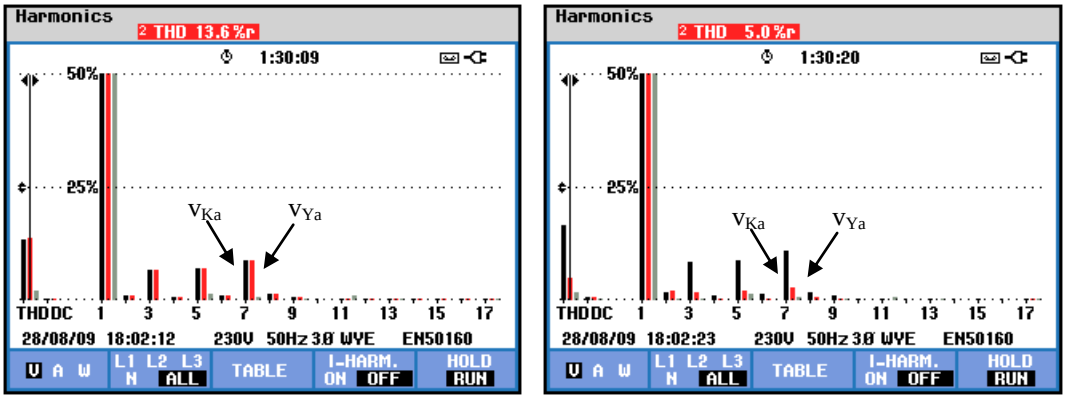
(c) (d)

Şekil 6.20: (a) v_{Ka} kaynak, v_{Ya} yük ve v_{Ha} harmonik gerilimleri HGK öncesi ve sonrası dalga şekilleri, (b) v_{Ka} kaynak, v_{Ya} yük ve v_{Ha} harmonik gerilimleri SAGF öncesi ve sonrası dalga şekilleri, (c) v_{Ka} kaynak ve v_{Ya} yük gerilimleri HGK sonrası harmonik dağılımı ve (d) v_{Ka} kaynak ve v_{Ya} yük gerilimleri SAGF sonrası harmonik dağılımı deneysel sonuçları.

Şekil 6.21 (a)'da SAGF öncesi HGK ile kaynak gerilimine %13,6 oranında 3., 5. ve 7. harmonikler birlikte enjekte edilmektedir. (b)'de SAGF devreye girdiğinde kaynak gerilimine enjekte edilen %13,6 oranındaki harmonikler yük tarafında %4,5 oranına indirilmektedir. (c)'de SAGF öncesi kaynak ve yük gerilimlerin harmonik dağılımı, (d)'de SAGF devreye girdiğinde kaynak ve yük gerilimlerin harmonik dağılımı deneysel sonuçları verilmektedir.



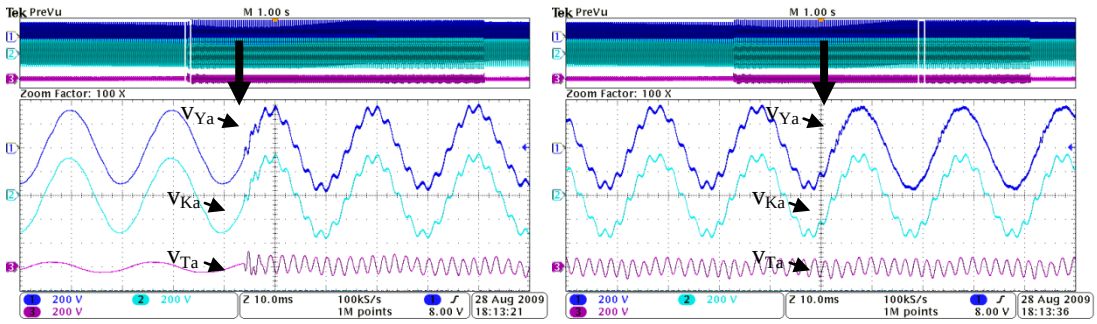
(a) (b)



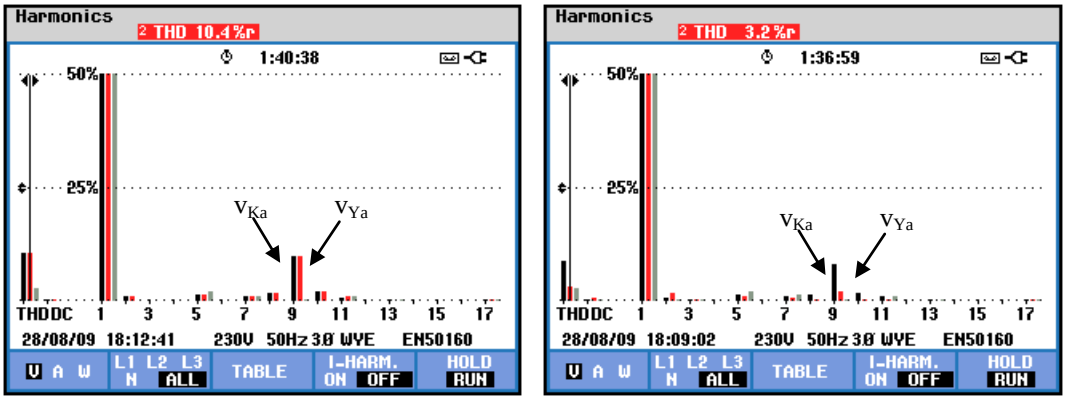
(c) (d)

Şekil 6.21: (a) v_{Ka} kaynak, v_{Ya} yük ve v_{Ha} harmonik gerilimleri HGK öncesi ve sonrası dalga şekilleri, (b) v_{Ka} kaynak, v_{Ya} yük ve v_{Ha} harmonik gerilimleri SAGF öncesi ve sonrası dalga şekilleri, (c) v_{Ka} kaynak ve v_{Ya} yük gerilimleri HGK sonrası harmonik dağılımı ve (d) v_{Ka} kaynak ve v_{Ya} yük gerilimleri SAGF sonrası harmonik dağılımı deneysel sonuçları.

Yüksek frekanslı 9. ve 11. harmonikler HGK ile kaynak gerilimine enjekte edilerek analiz çalışmaları yapılmaktadır. Şekil 6.23'de 9. harmonik %10,4 oranında ve Şekil 6.23'de 11. harmonik %10,9 oranında enjekte edilmektedir. Şekil 6.23'de verilen deneysel sonuçlardan da görüldüğü gibi bu yüksek frekanslı harmonikler de SAGF ile başarıyla düzeltilebilmektedir.

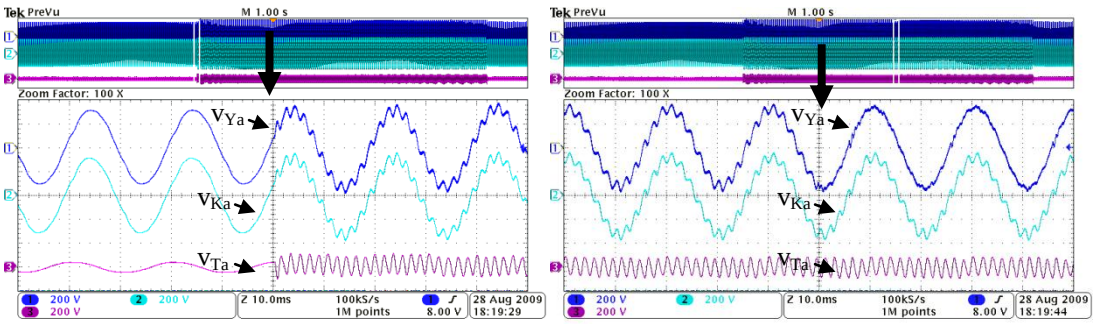


(a) (b)

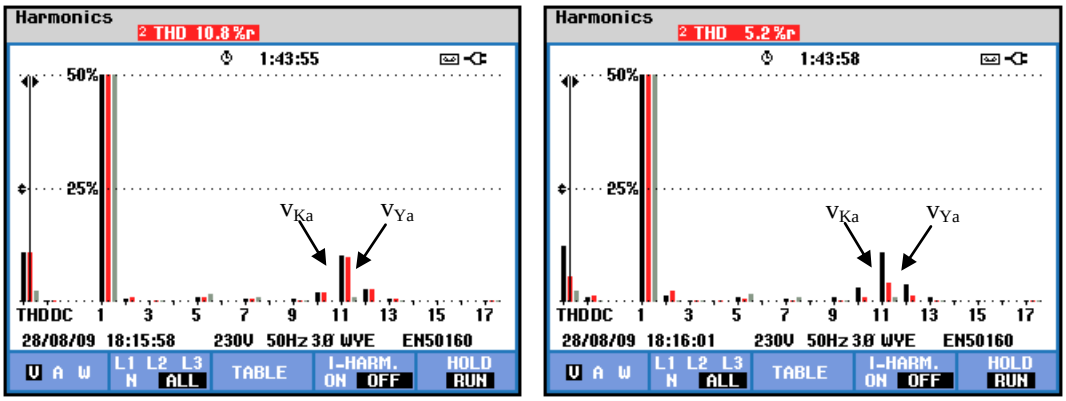


(c) (d)

Şekil 6.22: (a) v_{Ka} kaynak, v_{Ya} yük ve v_{Ha} harmonik gerilimleri HGK öncesi ve sonrası dalga şekilleri, (b) v_{Ka} kaynak, v_{Ya} yük ve v_{Ha} harmonik gerilimleri SAGF öncesi ve sonrası dalga şekilleri, (c) v_{Ka} kaynak ve v_{Ya} yük gerilimleri HGK sonrası harmonik dağılımı ve (d) v_{Ka} kaynak ve v_{Ya} yük gerilimleri SAGF sonrası harmonik dağılımı deneysel sonuçları.



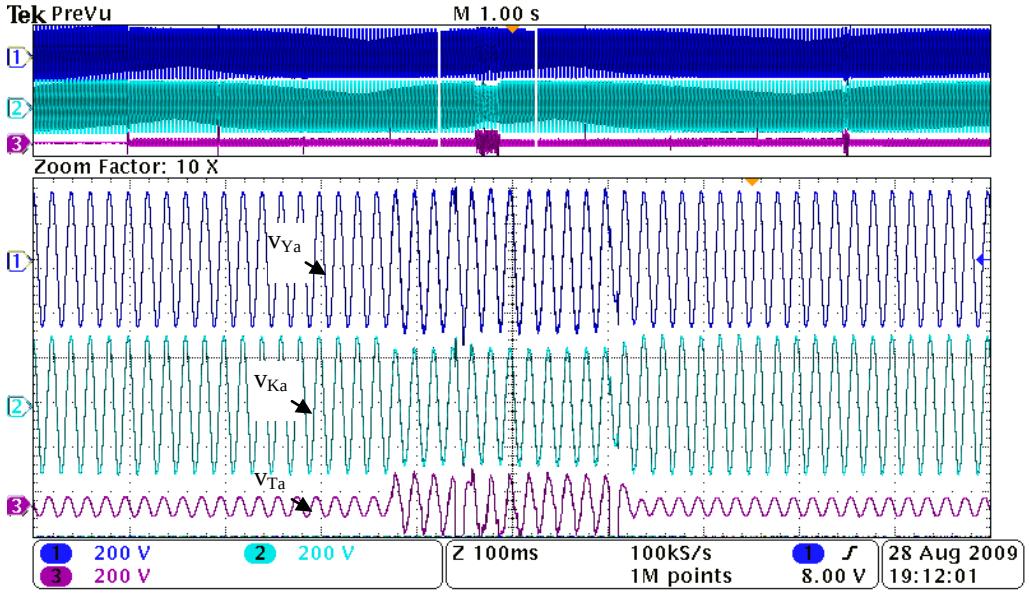
(a) (b)



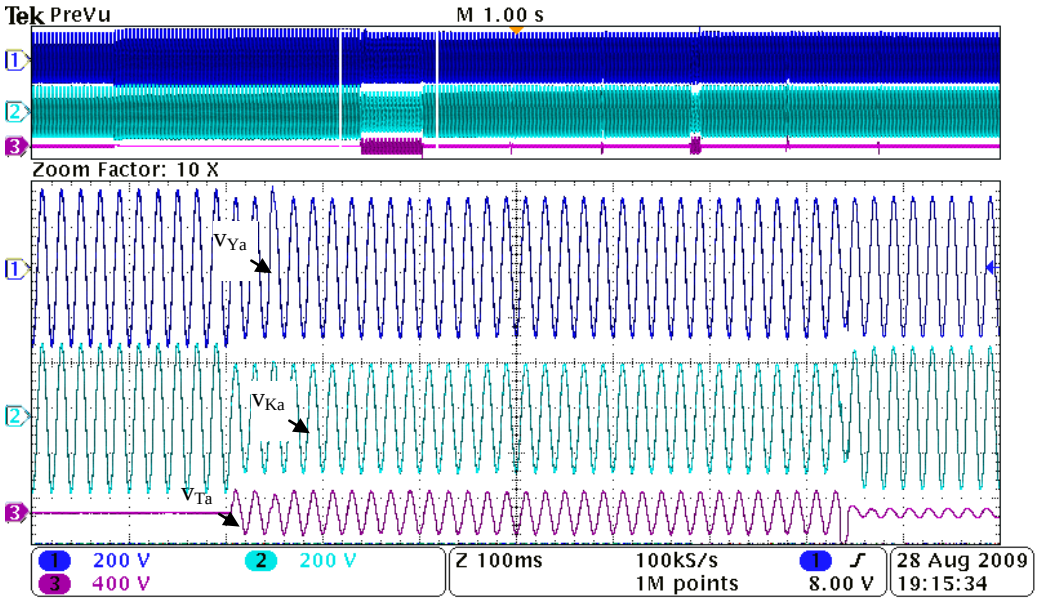
(c) (d)

Şekil 6.23: (a) v_{Ka} kaynak, v_{Ya} yük ve v_{Ha} harmonik gerilimleri HGK öncesi ve sonrası dalga şekilleri, (b) v_{Ka} kaynak, v_{Ya} yük ve v_{Ha} harmonik gerilimleri SAGF öncesi ve sonrası dalga şekilleri, (c) v_{Ka} kaynak ve v_{Ya} yük gerilimleri HGK sonrası harmonik dağılımı ve (d) v_{Ka} kaynak ve v_{Ya} yük gerilimleri SAGF sonrası harmonik dağılımı deneysel sonuçları.

Şekil 6.24 (a)'da HGK ile üretilen kısa süreli (b)'de ise uzun süreli gerilim çökmesi ve SAGF ile bu gerilim çökmesinin yüke yansıtılmadan düzeltilmesi ile ilgili kaynak ve yük gerilimi dalga şekli deneysel sonuçları verilmektedir.



(a)

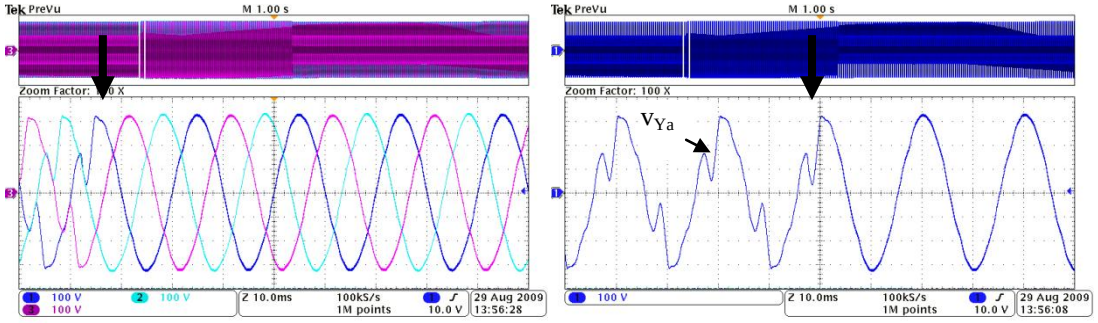


(b)

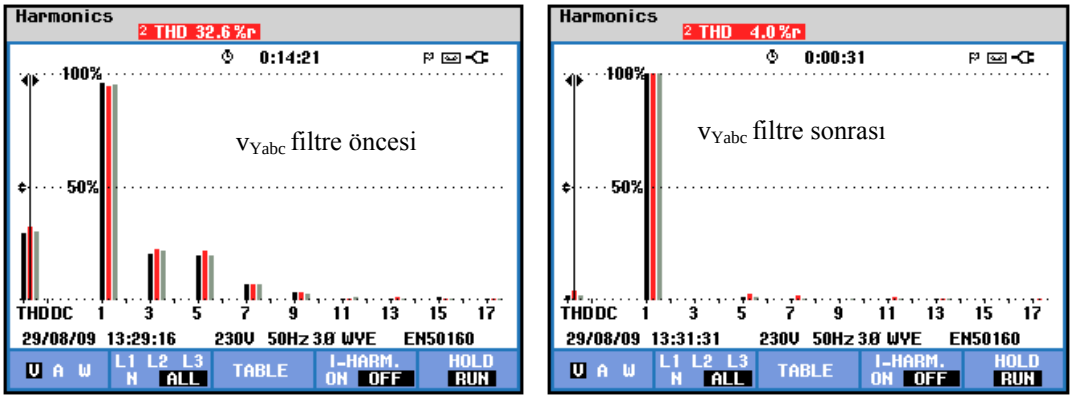
Şekil 6.24: (a) kısa süreli (b) uzun süreli HGK ile üretilen gerilim çökmesi ve SAGF ile düzeltilmesi ile ilgili kaynak ve yük gerilimi dalga şekli deneysel sonuçları.

Şekil 6.25 (a) ve (b)'de v_{Yabc} yük gerilimleri SAGF öncesi ve sonrası dalga şekilleri deneysel sonuçları verilmektedir. (c) v_{Yabc} yük gerilimleri SAGF öncesi ve (d)'de

sonrası harmonik analiz deneysel sonuçları verilmektedir. Harmonik analiz sonuçlarında görüldüğü gibi v_{Yabc} yük gerilimlerinde %32,6 oranında harmonik SAGF sonrası %4,0 oranına düşürülmektedir. Şekil 6.26 (a) ve (b)'de v_{Yabc} yük gerilimleri ve i_{Ya} yük akımı SAGF öncesi ve sonrası dalga şekilleri deneysel sonuçları verilmektedir.

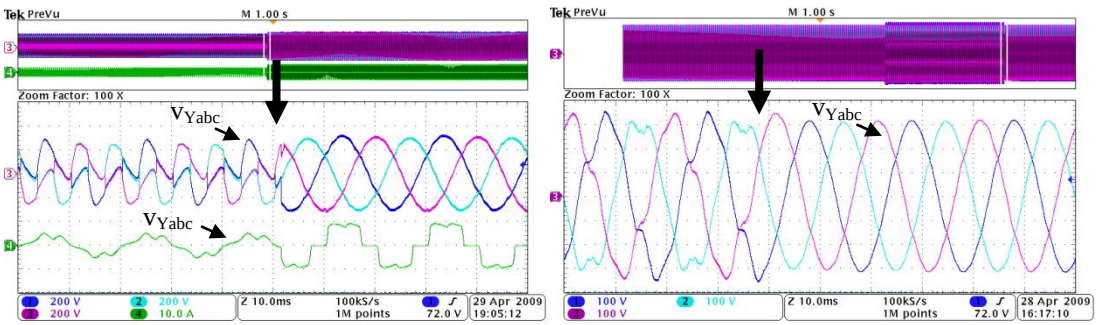


(a) (b)



(c) (d)

Şekil 6.25: (a) ve (b)'de v_{Yabc} yük gerilimleri SAGF öncesi ve sonrası gerilim dalga şekilleri, (c) ve (d) v_{Yabc} yük gerilimleri SAGF öncesi ve sonrası harmonik analiz deneysel sonuçları.



(a) (b)

Şekil 6.26: (a) ve (b)'de v_{Yabc} yük gerilimleri ve i_{Ya} yük akımı SAGF öncesi ve sonrası dalga şekilleri deneysel sonuçları.

Tablo 6.2: Ortak bağlantı noktasında, geleneksel ARGT tabanlı ve önerilen SRY tabanlı YAY ve KAY ile BGKD denetim algoritmalarıyla alınan deneysel sonuçların karşılaştırılması.

		BGKD Öncesi		BGKD Devrede								EEEI 519 Standardı	
				Geleneksel ARGT Tabanlı				Önerilen SRY Tabanlı					
				YAY ile Denetim		KAY ile Denetim		YAY ile Denetim		KAY ile Denetim			
	Fazlar	Akım (A)	Gerilim (V)	Akım (A)	Gerilim (V)	Akım (A)	Gerilim (V)	Akım (A)	Gerilim (V)	Akım (A)	Gerilim (V)	Akım (A)	Gerilim (V)
THB (%)	A	26.2	3.0	7.0	1.8	6.6	1.8	5.8	1.4	4.6	1.4	5.0	3.0
	B	26.2	3.0	7.1	2.2	6.8	2.2	5.9	1.6	4.7	1.6		
	C	26.1	2.9	7.0	1.9	6.7	1.9	5.9	1.5	4.7	1.5		

HGK ile Üretilen Kaynak Gerilim Harmoniklerinin SRY Tabanlı KAY ile Düzeltilmesi

HGK ile Üretilen Harmonik Bileşen		HGK Devrede Kaynak Gerilim Harmoniği% (V) (a-fazı için)	BGKD Devrede Kaynak Gerilim Harmoniği% (V) (a-fazı için)
THB (%)	3.h	12,5	2,7
	5.h	14,5	4,1
	3. ve 5.h	14,7	4,5
	3., 5. ve 7.h	13,6	5,0
	9.h	10,4	3,2
	11.h	10,8	5,2

6.6. Sonuç

Deneysel çalışmalarda alınan sonuçlar Tablo 6.2'de özetlenmektedir. ARGT tabanlı YAY, ARGT tabanlı KAY, SRY tabanlı YAY ve SRY tabanlı KAY ile BGKD denetim algoritmaları ile yapılan deneysel çalışmalar başarıyla yapılmaktadır. Alınan deneysel sonuçlardan ve Tablo 6.2'den anlaşılacağı üzere, hem ARGT tabanlı hem de SRY tabanlı KAY ile denetim, YAY ile denetime göre daha performanslı sonuç verdiği görülmektedir.

Tablo 6.2'de görüldüğü gibi a-fazı için geleneksel ARGT tabanlı YAY ile BGKD denetim algoritması uygulandığında %26,2 oranındaki kaynak akım harmoniği %7,0 oranına indirilmekte ve %3,0 oranındaki kaynak gerilim harmoniği %1,8 oranına

düşürülmektedir. Geleneksel ARGT tabanlı KAY ile BGKD denetim algoritması uygulandığında %26,2 oranındaki kaynak akım harmoniği %6,6 oranına indirilmekte ve %3,0 oranındaki kaynak gerilim harmoniği %1,8 oranına düşürülmektedir. Önerilen SRY tabanlı YAY ile BGKD denetim algoritması uygulandığında %26,2 oranındaki kaynak akım harmoniği %5,8 oranına indirilmekte ve %3,0 oranındaki kaynak gerilim harmoniği %1,4 oranına düşürülmektedir. Önerilen SRY tabanlı KAY ile BGKD denetim algoritması uygulandığında %26,2 oranındaki kaynak akım harmoniği %4,6 oranına indirilmekte ve %3,0 oranındaki kaynak gerilim harmoniği %1,4 oranına düşürülmektedir.

HGK ile kaynak gerilimine enjekte edilen harmonikler önerilen SRY tabanlı KAY ile düzeltilme sonuçları Tablo 6.2'de özetlenmektedir. a-fazı için verilen sonuçlarda kaynak gerilimine enjekte edilen %12,5 oranında 3. harmonik %2,7 oranına düşürülmekte, %12,5 oranında 3.harmonik %2,7 oranına düşürülmekte, %14,5 oranında 5.harmonik %4,71 oranına düşürülmekte, %14,7 oranında 3. ve 5. harmoniklerin toplamı %4,5 oranına düşürülmekte, %13,6 oranında 3., 5. ve 7. harmoniklerin toplamı %5,0 oranına düşürülmekte, %10,4 oranında 9.harmonik %3,2 oranına düşürülmekte ve %10,8 oranında 11.harmonik %5,2 oranına düşürülmektedir.

Önerilen SRY tabanlı denetim yönteminde alınan sonuçlar geleneksel ARGT tabanlı denetim yönteminden alınan sonuçlara göre harmonikleri bastırması bakımından daha başarılı olduğu görülmektedir. Önerilen SRY tabanlı KAY ile BGKD denetim algoritması, önerilen SRY tabanlı YAY ile BGKD denetim algoritmasına göre, dengesiz ve harmonikli kaynak akımlarının giderilmesi, dengesiz ve harmonikli kaynak gerilimlerinin bastırılması bakımından daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Ayrıca BGKD devreye girmeden önceki, devreye girdikten sonraki durum ve %100 yük değişiminde görülen dinamik cevap oldukça iyi görülmektedir.

Önerilen SRY tabanlı KAY ile BGKD denetim algoritması, yukarıda açıklanan diğer denetim yöntemlerine göre hem akım ve gerilim ölçüm noktasının az olması hem de basit ve kolay uygulanabilir olması bakımından avantaj sağlamaktadır.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Elektrik enerjisinin üretiminden tüketimine kadar bütün aşamalarında enerji kalitesi ve verimliliği sürekli olarak göz önünde tutulması gereken önemli bir konudur. Bu nedenle güç sistemlerinde, elektrik enerjisi kalitesizliğine ve kayıpların artmasına sebep olan harmonik akım ve reaktif güç akışının en düşük seviyeye indirilmesi gerekmektedir. Elektrik enerjisi üreten ve hizmet veren kuruluşların önemli sorumluluklarından birisi, ortak bağlantı noktasında enerji tüketen kullanıcılar için üretilen elektrik enerjisinin akım ve gerilim dalga şekillerinin sinüzoidal formda, istenilen genlik ve frekansta olmasını sağlamaktır.

Modern alıcı sistemlerinin giderek gelişmesi ve hızla artan uygulama alanları nedeniyle şebekelerde ve iletim hatlarında enerji kalitesinin düşmesine sebep olmaktadır. Bu sistemler tarafından oluşturulan reaktif güç ve harmonikler elektromanyetik cihazlarda ısınma, mekanik cihazlarda titreşim ve gürültülü çalışmaya, şebekede güç faktörünün azalmasına, aşırı nötr akımlarına ve nötr iletkeni problemlerine, ateşleme devrelerinin anormal çalışmasına, hassas elektronik kartların arızalanmasına, elektronik ölçüm cihazlarının doğru çalışmamasına, güç kondansatörlerinde aşırı ısınma ile ömrünün azalmasına ve kayıplara, iletim hatlarında ve kablolarda ısınma ve enerji kayıplarına yol açmaktadır.

Elektrik enerji sistemlerinde güç kalite problemlerine çözüm üretmek, güç sitemlerinin performansını ve kararlılığını artırmak için çok sayıda teknik ve cihaz önerilmekte ve uygulanmaktadır. Güç sistemlerinde elektrik enerjisinin verimliliğini ve yükün güç kalitesini artırmak, harmonik akımları yoketmek amacıyla pasif LC filtreler oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Pasif LC filtrelerin, kaynak empedansına bağımlı olması, rezonans problemleri, her bir harmonik frekans için ayrı bir filtre kolunun kurulması ve fiziksel boyutlarının büyük olması gibi uygulamalarda bazı dezavantajları vardır. Gerilim regülasyon performansını artırmak, temel frekansta kalıcı durum ve anlık aktif ve reaktif güç kontrolü yapmak için geliştirilmiş FACTS sistemleri kullanılmaktadır. Ayrıca güç kalitesi problemlerini düzeltmek, aktif ve reaktif güç kompanzasyonu ve gerilim regülasyonu

yapmak için özel güç cihazları kullanılmaktadır. Diğer modern çözüm yöntemi olan ve güç kalitesi problemlerine geniş çaplı çözüm üreten BGKD sistemleri de geliştirilmektedir.

BGKD, doğrusal olmayan yüklerin kaynaktan çektiği harmonikleri yok etmekte, nötr akımı kompanzasyonu, reaktif güç kompanzasyonu ve DA hat gerilim regülasyonu gerçekleştirmektedir. Ayrıca BGKD; kaynak gerilimindeki harmonikleri kompanze etmekte, gerilim çökme ve yükselmeleri, kaynak geriliminde frekans problemleri, kısa ve uzun süreli gerilim kesilmeleri, kaynak gerilimindeki dengesizlikleri ve hızlı gerilim değişiklikleri gibi güç kalitesi problemlerini düzeltmekte bu sayede hassas yüklerin etkilenmemesini sağlamaktadır [13, 14, 24].

Literatürde, aktif güç filtre uygulamalarında ve BGKD denetim algoritmalarında ARGT ve SRY tabanlı denetim algoritmaları yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. 1983 yılında Akagi ve arkadaşları tarafından ileri sürülen ve hem geçici rejim hem de kararlı hal durumda geçerli olan ARGT, üç fazlı sistemlerde anlık akım ve gerilimlerin ölçülmesi ile anlık reaktif ve aktif güçlerin hesaplanması yöntemine dayanmaktadır. Güç hesaplama işlemlerinin daha basit olmasından dolayı aktif güç filtre uygulamalarında AGRT oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Aktif güç filtre uygulamalarında ve BGKD denetim algoritmalarında kullanılan diğer bir denetim yöntemi olan SRY tabanlı denetim algoritması 1991 yılında S. Bhattacharya tarafından önerilmiştir. SRY tabanlı aktif güç filtre denetim algoritmasını kullanılarak sadece 3., 5. ve 7. gibi seçili harmoniklerin de yok edilebilmesi bu yöntemin önemli avantajlarındandır.

Bölüm 3'de, SRY tabanlı yeni bir BGKD denetim yöntemi önerilmekte ve geleneksel bazı denetim yöntemleri ile karşılaştırılması yapılmaktadır. Yapılan simülasyon çalışmalarında alınan sonuçlar Tablo 3.5'de özetlenmektedir. A-fazı için, BGKD devrede değil iken ortak bağlantı noktasında akım harmonikleri %31,2 ve gerilim harmonikleri %20,2 dir. Geleneksel ARGT tabanlı YAY ile BGKD denetim algoritması uygulandığında kaynak akım harmoniği %6,8 oranına indirilmekte ve kaynak gerilim harmoniği %1,96 oranına düşürülmektedir. Geleneksel ARGT tabanlı KAY ile BGKD denetim algoritması uygulandığında kaynak akım harmoniği %3,6 oranına indirilmekte ve kaynak gerilim harmoniği %2,8 oranına düşürülmektedir. Önerilen SRY tabanlı YAY ile BGKD denetim algoritması uygulandığında kaynak

akım harmoniği %3,3 oranına indirilmekte ve kaynak gerilim harmoniği %1,8 oranına düşürülmektedir. Önerilen SRY tabanlı KAY ile BGKD denetim algoritması uygulandığında kaynak akım harmoniği %3,0 oranına indirilmekte ve kaynak gerilim harmoniği %1,4 oranına düşürülmektedir.

Matlab/Simülink tabanlı simülasyon çalışmalarında, önerilen SRY tabanlı denetim yönteminde alınan sonuçların, geleneksel denetim yöntemlerinden alınan simülasyon sonuçlarına göre harmonikleri bastırma bakımında daha başarılı olduğu görülmektedir. Ayrıca BGKD devreye girmeden önceki, devreye girdikten sonraki durum ve %100 yük değişiminde dinamik cevabın iyi olduğu görülmektedir.

Bölüm 3'de verilen geleneksel ve önerilen BGKD denetim algoritmalarının deneysel ortamda uygulaması yapılmaktadır. BGKD deneysel düzeneğinde kullanılan tüm donanım ve alt yapı çalışmalarının tasarımında en iyi performans ve verim alabilmek için sinyal hat uzunluğu en kısa düzeyde tutulmakta, toprak hattı ve sinyal hatları üzerinde gürültülerin azaltılması gibi önlemler alınmaktadır. BGKD denetim sisteminde kullanılan kartlar bütünleşik yapıda olup kablolara gerek kalmadan soketler ile bağlantı kurulmaktadır. Böylece laboratuar ortamında yerden tasarruf sağlanmakta, çevresel gürültü ve EMI girişimlerinden daha az etkilenmektedir.

BGKD deneysel laboratuar düzeneğinde farklı yük akım harmonikleri oluşturmak ve farklı uygulamalarda kullanılmak üzere mikro denetleyici tabanlı genel amaçlı tristör sürücü kartı tasarlanmaktadır. Tasarlanan tristör sürücü kartı, 3-fazlı veya 1-fazlı tam denetimli tristörlü doğrultucu modu, 3-fazlı veya 1-fazlı AA kıyıcı ve AA denetim modu ve 3-fazlı veya 1-fazlı statik anahtar olmak üzere üç farklı durumda çalışabilmektedir. Ayrıca BGKD deneysel laboratuar ortamında, kaynak gerilim harmoniğinin düşük olması nedeniyle, kaynak geriliminde daha yüksek gerilim kaynaklı harmonik ve güç kalitesi problemleri oluşturmak amacıyla Şekil 4.48'de görüldüğü üzere şebekeye seri bağlı yeni bir HGK tasarlanmaktadır. Böylece kaynak gerilimi HGK ile değişik harmonik seviyelerinde bozulmakta ve gerilim kaynaklı harmonik ve güç kalitesi problemleri BGKD sistemi ile analiz çalışmalarına imkân sağlamaktadır.

BGKD laboratuar düzeneğinde alınan sonuçlar Tablo 6.2'de özetlenmektedir. A-fazı için deneysel çalışmalarda, BGKD devrede değil iken ortak bağlantı noktasında akım

harmonikleri %26,2 ve kaynak gerilim harmonikleri %3,0 dır. Önerilen SRY tabanlı KAY ile BGKD denetim algoritması uygulandığında kaynak akım harmonikleri %4,6 oranına indirilmekte ve kaynak gerilim harmonikleri %1,4 oranına düşürülmektedir. Önerilen SRY tabanlı YAY ile BGKD denetim algoritması uygulandığında kaynak akım harmonikleri %5,8 oranına indirilmekte ve kaynak gerilim harmonikleri %1,4 oranına düşürülmektedir. Geleneksel ARGT tabanlı KAY ile BGKD denetim algoritması uygulandığında kaynak akım harmonikleri %6,6 oranına indirilmekte ve kaynak gerilim harmonikleri %1,8 oranına düşürülmektedir. Geleneksel ARGT tabanlı YAY ile BGKD denetim algoritması uygulandığında kaynak akım harmonikleri %7,0 oranına indirilmekte ve kaynak gerilim harmonikleri %1,8 oranına düşürülmektedir.

Deneysel çalışmalarda önerilen SRY tabanlı denetim yönteminde alınan sonuçların, geleneksel ARGT tabanlı denetim yönteminden alınan sonuçlara göre harmonikleri bastırması bakımında daha başarılı olduğu görülmektedir. Önerilen SRY tabanlı KAY ile BGKD denetim algoritması, önerilen SRY tabanlı YAY ile BGKD denetim algoritmasına göre, dengesiz ve harmonikli kaynak akımlarının giderilmesi, dengesiz ve harmonikli kaynak gerilimlerinin bastırılması bakımından daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Ayrıca BGKD devreye girmeden önceki, devreye girdikten sonraki durum ve %100 yük değişiminde dinamik cevabın iyi olduğu görülmektedir.

Sonuç olarak bu tez çalışmasında önerilen denetim yöntemi ile denetim edilen BGKD sistemi oldukça etkin ve verimli bir şekilde çalışarak hem akım ve gerilim ölçüm noktasının az olması hem de basit ve kolay uygulanabilir olması bakımından tüm sistemin maliyetini azaltmaktadır. Bu çalışma, BGKD sisteminin kullanımı ile güç sisteminin iyileştirilmesi alanında gerçekleştirilen oldukça detaylı simülasyon analizleri ve deneysel çalışma sonuçları ile literatüre katkılar sağlamaktadır.

Bu çalışmada, analitik çalışmalarla desteklenmiş yeni bir denetim yöntemi önerilmekte ve bilgisayar ortamındaki simülasyonlar ve deneysel uygulamalarla geçerliliği ispat edilmektedir. Ayrıca geleneksel denetim yöntemiyle gerek simülasyon olarak gerek de deneysel olarak karşılaştırılması yapılarak önerilen yöntemin geçerliliği kanıtlanmaktadır. Geliştirilen denetim yönteminin dinamik cevabı kademeli olarak yük artışı ile 5kW dan 10kW a çıkarılarak test edilmekte ve

oldukça iyi sonuçlar elde edilmektedir. BGKD sisteminin bozuk ve dengesiz kaynak gerilimi, dengesiz ve harmonikli yük durumundaki, gerilim ve akım harmonikleri ile reaktif güç kompanzasyonu yetenekleri birlikte test edilmektedir.

BGKD sistemiyle farklı yük ve şebeke koşullarında dengeli ve dengesiz akım ve gerilim, doğrusal ve doğrusal olmayan yük durumlarında meydana gelen kaynak ve yük arasındaki, aktif ve reaktif güç akışıyla ilgili kavramsal analizler, simülasyonlar ve deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Ayrıca gerilim çökme ve yükselmesi durumunda BGKD sistemiyle çöken akım ve gerilim etkisi incelenmektedir.

Bu tez çalışması BGKD sisteminin denetimi ve gerçek zamanlı uygulanmasıyla ilerideki pratik endüstriyel uygulama çalışmalarına temel teşkil edebilecektir. Bu çalışmada öne çıkan bazı sonuçlar aşağıda verilmektedir.

- BGKD sisteminin dağıtım gerilimi seviyesindeki tasarımı ve pratik deneysel uygulama yapılmıştır. Ticari bir ürüne dönüştürülebilecek bir prototip BKGD düzeneği kurulmuştur.

- Farklı güç kalitesi problemlerinde kullanılabilecek (dengeli, dengesiz, vb.) karmaşık matematiksel hesaplamalar gerektirmeyen oldukça basit bir denetim yöntemi önerilmektedir.

- Önerilen denetim yönteminin geleneksel yöntemlerle karşılaştırılması ve elde edilen başarılı simülasyon ve uygulama sonuçları verilmektedir.

- Akım ve gerilim dengesizlikleri, harmonik ve gerilim çökme ve yükselmesi gibi durumlarda aktif veya reaktif güç bileşenleri değerlendirilmekte ve simülasyon ve deneysel çalışma sonuçları verilmektedir.

- 3-fazlı 4-telli sistemlerde kullanılabilecek yöntem ve devre şekli ile yükten kaynaklanan ve dengesizlikten dolayı ortaya çıkan nötr akım problemi çözülmektedir.

- Yapılan teorik analizler ve simülasyon çalışmalarıyla farklı çalışma koşullarında (dengesizlik, harmonikler, reaktif güç vb.) aktif ve reaktif güç akışı önceden

belirlenerek, deneysel uygulamalara yön verecek BGKD sisteminin parametreleri (akım, gerilim, güç vb.) belirlenmektedir.

- BGKD sisteminin alçak gerilim dağıtım seviyesinde 10kW'lık prototip ile testi yapılarak gerçek zamanlı uygulamasının fizibilitesi elde edilmiştir. Gelecekte yapılacak ticarileştirme çalışmalarıyla kolaylıkla endüstriyel bir cihazın üretilmesi mümkün görülmektedir.

- Genel amaçlı güç kalitesi deneysel çalışmalarında kullanmak üzere ve BGKD deneysel laboratuar ortamında, yüksek gerilim kaynaklı harmonik ve güç kalitesi problemleri oluşturmak amacıyla şebekeye seri bağlı HGK tasarlanmakta ve denetim yöntemi önerilmektedir.

İleriki çalışmalarda, daha yüksek veri işleme kapasitesi ile yapay zeka teknikleri denetim amaçlı uygulaması ve performans artışının incelenmesi yapılabilir. Ayrıca DA-bara hatına bağlanacak gelişmiş enerji depolama sistemleri (ultra kapasitör) ile performans artışı ve gelişmiş batarya düzenekleri eklenerek BGKD sisteminin kesintisiz güç kaynağı olarak kullanımı incelenebilir.

Güneş ve rüzgâr enerjisi elektrik üretim sistemleri, yenilenebilir alternatif elektrik üretim teknikleri olarak ön plan çıkmaktadır. Dolayısıyla gelişmekte olan yenilenebilir enerji kaynaklarının BGKD sistemine entegrasyon çalışmaları da yapılabilir. GBKD sisteminin farklı tipte yenilenebilir enerji üretim sistemleriyle birlikte kullanımı gelecekte ön plana çıkacak dağıtılmış enerji üretim sistemlerine oldukça uygundur. Böylece yenilenebilir enerji yöntemleri ile üretilen enerji BGKD sisteminin DA-bara hattına bağlanarak güç üretim amacıyla kullanılabilecektir. Ayrıca BGKD sistemiyle OBN'na enerji aktarımı sağlanabilecektir.

Günümüzde öne çıkan bir konu olan akıllı şebeke (smart grid) uygulamalarında BGKD sisteminin yenilenebilir enerji üreten sistemlerle birlikte kullanımı araştırılabilir.

KAYNAKLAR

[1] IEEE Recommended Practices and Rrequirements for Harmonic Control in Electric Power Systems." IEEE Std. 519 (1992).

[2] IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, IEEE Std. 1159, (1995).

[3] Elektronik Resmi Gazete 2004. Elektrik İletimi Arz Güvenirliği ve Kalitesi Yönetmeliği, Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu, Sayı 25639, www.rega.com.tr.

[4] Elektronik Resmi Gazete 2000. Elektrik Tarifeleri Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılması Hakkında Yönetmelik, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Sayı 23988, www.rega.com.tr.

[5] TEK, Haziran 1992. Bozucu Etki Yaratan Müşterilerin Uymak Zorunda Olduğu Koşullar.

[6] Elektrik Piyasası Müşteri Hizmetleri Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik, EPDK, 20.06.2007 tarihli ve 26558 sayılı Resmi Gazete. www.rega.com.tr.

[7] Kesler, M., Özdemir, E., "Birleşik Güç Kalite Düzenleyicisi (UPQC) Denetim Algoritmasının Geliştirilmesi ve PSIM Ortamında Simülasyonu", ***ELECO 2008, Elektrik, Elektronik, Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu,*** Bursa, 301-305, (2008)

[8] Akagi, H., Fujita, H., "A new power line conditional for harmonic compensation in power systems", ***IEEE Trans. Power Del***., ***vol:10, no:3,***1570–1575, Jul. (1995).

[9] Akagi, H., "New Trends in Active Filters," ***EPE'95– Eur. Conf. Power Electronics Appl., vol:0,*** Sevilla, Spain, 0.017-0.026,Sep, (1995).

[10] Aredes, M., Häfner, J. Heumann, K., "A Combined Series and Shunt Active Power Filter", ***IEEE/KTH Stockholm Power Tech Conf., SPT PE 07-05-0643,vol. Power Electr***., Sweden,237-242, June (1995)

[11] Aredes M., Heumann K., Watanabe E.H., 'An universal active power line conditioner', ***IEEE Trans. Power Deliv.,*** 545–551, (1998).

[12] Fujita, H., Akagi, H., "The unified power quality conditioner: The integration of series and shunt-active filters", ***IEEE Trans. Power Electron., vol: 13, no:2,*** 315–322, Mar. (1998).

[13] Peng, F. Z., OTT, G. W., Adams, D. J., "Harmonic and Reactive Power Compensation on the Generalized Instantaneous Reactive Power Theory for Three-Phase Four-Wire Systems", ***IEEE Trans. on Power Elec., vol:13, no:6,***1174-1181, (1998).

[14] Gyugyi, L. ve Strycula, E., "Active AC Power Filters", IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Chicago, USA, 529-535, October (1976).

[15] Akagi, H., Kanazawa, Y., Nabae, A., "Generalied Theory of Instatntenius Reactif Power and Ist Application", ***Transaction off the IEE Japan, Part B,vol:103, no:7***, 483-490, in Japanese, (1983).

[16] Peng, F. Z., Akagi, H., Nabae, A., "A New Approach to Harmonic Compensation in Power Systems--A Combined System of Shunt Passive and Series Active Filters", ***Industry Applications, IEEE Transactions on, vol:26, no:6,*** 983-990, (1990).

[17] Gyugyi, L., "Unified power flow control concept for flexible ac transmission systems", ***Proc. IEE 139(C),*** 323–331, (1992).

[18] Peng, F.Z., Akagi, H., Nabae, A., "A New Approach to Harmonic Compensation in Power Systems – A Combined System of Shunt Passive and Series Active Filters", ***IEEE Trans. Ind. Appl, vol:26, no:6,*** 983-990, (1990).

[19] Aredes, M., Häfner, J., Heumann, K., " A Combined Series and Shunt Active Power Filter", ***IEEE/KTH Stockholm Power Tech Conf., vol. Power Electronics***, 237-242, Stockholm, Sweden, June (1995).

[20] Aredes, M. and Watanabe, E. H., "New control algorithms for series and shunt three-phase for-wire active power filter", ***IEEE Trans. Power Delivery, vol:10, no:3***, (1995).

[21] Aredes, M., Hafner, J., Heumann, K., "A Combined Series and Shunt Active Power Filter", ***IEEWKTH Stockholm Power Tech Con, vol:PE., Sweden,*** 237-242, (1995).

[22] Fujita, H., Akagi, H. "The Unified Power Quality Conditioner: The Integration of Series and Shunt Active Filters", ***IEEE Trans. On Power Electronics, vol:13, no:2***, (1998).

[23] M. Aredes, K. Heumann, E. H. Watanabe, "An universal active power line conditioner", ***IEEE Trans. on Power Delivery, vol:13, no:2***, 545-551, (1998).

[24] Aredes, M., "Active Power Line Conditioners", Doktor Ing. Thesis, ***echnischen Universität Berlim***, Marh, (1996).

[25] Monteiro, L. F. C., Aredes, M., Neto, J. A. M., "A Control Strategy for Unified Power Quality Conditioner", ***Proc. (CDROM) of ISIE –International Symposium on Industrial Electronics***, Rio de Janeiro, Brazil, July, (2003).

[26] Han, B., Bae, B., Baek, S., Jang, G., "New Configuration of UPQC (Unified Power Quality Conditioner) for Medium-Voltage Application", ***IEEE Trans. on Power Delivery, vol:21, no:3,*** 1438-1444, (2006).

[27] Han, B., Bae, B., Kim, H., Baek, S., "Combined Operation of Unified Power-Quality Conditioner with Distributed Generation", ***IEEE Transaction on Power Delivery, vol:21, no:1***, January, (2006).

[28] Graovac, D., Katic, A., Rufer, A., "Power Quality Problems Compensation With Universal Power Quality Conditioning System", ***IEEE Transactions on Power Delivery, vol:22, num:2,*** 968-976, (2007).

[29] Geethalakshmi, B., Dananjayan, P., "Investigations of Performance of UPFC without DC link capacitor", ***Electric Power Systems Research, vol. 78, Issue 4***, 736-746, April, (2007).

[30] Akagi, H., Kanazawa, Y., Nabae, A., "Instantaneous Reactive Power Compensator Comprising Switching Devices without Energy Storage Components", ***IEEE Transaction on Industry Application, vol:IA-20, no:3,*** 625-630, (1984).

[31] Akagi, H., Ogasawara, S., Kim, H., "The Theory of Instantaneous Power in Three-Phase Four-Wire Systems and Its Applications", ***Electrical Engineering in Japan, vol:135, no:3***, 74-86, (2001).

[32] Watanabe, E. H, A., Stephan, M. Aredes, M., "New Concepts of Instantaneous Active and Reactive Powers in Electrical Systems with Generic Loads", ***IEEE Trans. on Power Delivery, vol:8, no:2***, 697-703, (1993).

[33] Javier A., Muñoz José R., Espinoza Iván A., Rubilar Luis A., Morán Pedro E. Melín, "A Modular Approach for Integrating Harmonic Cancellation in a Multi-cell based UPQC", ***Industrial Electronics, IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE,*** 3178-3183, (2008).

[34] Jayanti N. G., Malabika Basu, Kevin G., Michael F. Conlon, "A new configuration and control of doubly fed induction generator (UPQC-WG)", ***Industrial Electronics, IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE,*** 2094-209, (2008).

[35] Khadkikar, V., Chandra, A., "A. Novel Structure for Three-Phase Four-Wire Distribution System Utilizing Unified Power Quality Conditioner (UPQC)", ***Industry Applications, IEEE Transactions on vol:45, Issue:5***, 1897–1902, (2009).

[36] Han, Byung M., Bae B., "Unified power quality conditioner with super-capacitor for energy storage", ***1.European Transections on Eelectrical Power vol:18 Issue:4***, 327-343, (2008).

[37] da Silva, S.A.O., Donoso-Garcia, P.F., Cortizo, P.C., Seixas, P.F., "A Comparative Analysis of Control Algorithms for Three-phase Line-Interactive UPS Systems with Series-Parallel Active Power-Line Conditioning Using SRF Method", ***Power Electronics Specialists Conference, PESC 00. 2000 IEEE 31st Annual, vol.2,*** 1023-1028, (2000).

[38] Mohammadi, H.R., Varjani, A.Y., Mokhtari, H., "Multiconverter Unified Power-Quality Conditioning System: MC-UPQC", ***Power Delivery, IEEE Transactions on Power Delivery vol:24, Issue:3,*** 1679–1686, (2009).

[39] Munoz, J.A., Espinoza, J.R., Moran, L.A., Baier, C.R., "Design of a Modular UPQC Configuration Integrating a Components Economical Analysis", ***Power Delivery, IEEE Transactions on Volume 24, Issue 4,*** 1763– 772, (2009).

[40] Kesler, M., "Paralel Aktif Güç Filtresinin Tasarımı ve VisSim Yazılımı İle DSP Üzerinden Denetimi", Yüksek Lisans Tezi, ***Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Kocaeli, (2005).

[41] Uçar, M., "3-Fazlı 4-Telli Paralel Aktif Güç Filtresinin Tasarımı ve Uygulaması", Yüksek Lisans Tezi, ***Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Kocaeli, (2005).

[42] Kesler, M., Özdemir, E., "Düşük Maliyetli DSP Uygulama Geliştirme Kartının Tasarımı ve Güç Sistemlerinde Harmonik Analizin Gerçekleştirilmesi", ***ELECO 2008, Elektrik, Elektronik, Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu,*** Bursa, 311-315, (2008).

[43] Kale, M., "Paralel Aktif Güç Filtresi İle Harmonik Akım ve Reaktif Güç Kompanzasyonu", Yüksek Lisans Tezi, ***Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Kocaeli, (2005).

[44] Kesler, M., Özdemir, E., "Simplified Control Method for Unified Power Quality Conditioner (UPQC, ***"International Conference on Renewable Energies and Power Quality ICREPQ'09",***Valencia (Spain), April, (2009).

[45] Kesler, M., Özdemir, E., "Bilgisayar ve DSP Destekli Harmonik Analiz Sistemi Geliştirilmesi ve Birleşik Güç Kalite Düzenleyicisine Uygulanması", ***EVK 2009, III. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu***, Kocaeli, 313-317, (2009).

[46] Kesler, M., Özdemir, E., "Şebeke Gerilim ve Yük Akım Harmoniklerinin Birleşik Güç Kalite Düzenleyicisi İle Düzeltilmesi", ***EVK 2009, III. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu,*** Kocaeli, 291-296, (2009).

[47] Dugan, R.C., McGranaghan, M.F., Santoso, S., Beaty, H.W., "Electrical Power Systems Quality", Second Edition, ***McGraw-Hill Companies,*** 12-31, 43-180, (1996).

[48] Fuchs, E.F., Masoum M.A.S., "Power Quality in Electrical Machines and Power Systems", ***Academic Press,*** 1-54, 443-468, (2008)

[49] Alexander, K., Thompson, M.T., "Power Quality in Electrical Systems", ***McGraw-Hill Companies,*** 6-12, 25-98, (2007).

[50] Skvarenina, T. L., "The Power Electronics Handbook", ***CRC Press***, 471-534, (2007).

[51] Bollen, M.H.J., "Understanding Power Quality Problems", ***Wiley-IEEE Press Series on Power Engineering,*** (2000).

[52] Kennedy, B.W., "Power Quality Primer", ***McGraw-Hill Companies,*** 1-135, (2000).

[53] IEC 61000-2-1(1990-05), "Description of the Environment—Electromagnetic Environment for Low Frequency Conducted Disturbances and Signaling in Public Power Supply Systems", Electromagnetic Compatibility (EMC)—Part 2, Environment, Section 1, (1990).

[54] IEC 61000-3-2 (2001-10) Consolidated Edition. Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-2: Limits for harmonic current emissions (2001).

[55] IEC 61000-4-30 77A/356/CDV, Power Quality Measurement Methods, (2001).

[56] IEC 61000-4-15, Flicker Meter—Functional and Design Specifications, (1997).

[57] IEC 61000-4-7, Electromagnetic Compatibility (EMC)—Part 4-7, "Testing and Measurement Techniques—General Guide on Harmonics and Interharmonics Measurements and Instrumentation, for Power Supply Systems and Equipment Connected Thereto", SC77A, (2000).

[58] Dranetz-BMI, "The Dranetz-BMI Field Handbook for Power Quality Analysis", ***Dranetz-BMI,*** (1998).

[59] Acha. E, Madrigal. M, "Power System Harmonics Computer Modeling and Analysis", ***Crc Press,*** 10-34, (2002).

[60] Grady, W.M., Santoso, S., "Understanding power system harmonics", ***IEEE Power Engineering Review, vol:21 Issue:11***, 8-11, (2001).

[61] Şentürk, O.S., "Series Active Filter Design, Control, and Implementation with a Novel Load Voltage Harmonic Extraction Method", Msc Thesis., ***ODTÜ Elektrik ve Elektronik Mühendisliği***, Ankara, (2007).

[62] Bayram, M., "Hızlı Değişen Olaylarda Reaktif Güç Kompanzasyonu", ***Reaktif Güç Kompanzasyonu Seminer***, TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi Notları, 138-170, (1984).

[63] da Silva, S.A.O., Donoso-Garcia, P.F., Cortizo, P.C., Seixas, P.F., "A Comparative Analysis of Control Algorithms for Three-phase Line-Interactive UPS Systems with Series-Parallel Active Power-Line Conditioning Using SRF Method", ***Power Electronics Specialists Conference***, ***PESC 2000 IEEE 31st Annual, vol.2***, 1023-1028, (2000).

[64] da Silva, S.A.O., Modesto, R.A., "A Comparative Analysis of SRF-based Controllers Applied to Active Power Line Conditioners", ***Industrial Electronics, 2008. IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE***, 405-410, (2008).

[65] Soares, V., Verdelho, P., Marques, G. D., "Active Power Filter Control Circuit Based on the Instantaneous Active and reactive Current id-iq Method", ***Power Electronics Specialists Conference***, Pesc'97 St. Louis, Missouri, June 22-27, 1096-1101, (1997).

[66] Bhattacharya, S., Divan, D.M., Banerjee, B., "Synchronous Reference Frame Harmonic Isolator Using Series Active Filter", ***Proc. 4th EPE, Florence, vol. 3***, 030-035, (1991).

[67] Bhattacharya, S., Frank, T.M., Divan, D.M., Banerjee, B., "Active filter system implementation", ***IEEE Industrial Application Magazine,*** 47-63, (1998).

[68] Bhattacharya, S., Divan, D., "Synchronous frame based controller implementation for a hybridseries active filter system" ***Industry Applications Conference, Thirtieth IAS Annual Meeting, IAS '95,*** vol:3, 2531-2540, (1995).

[69] Marques, G.D., Pires, V.F., Malinowski, M., Kazmierkowski, M., "An Improved Synchronous Reference Frame Method for Active Filters", ***"EUROCON, The International Conference on Computer as a Tool"***, 2564-2569, (2007).

[70] S. Bhattacharya, T. M. Frank, D. M. Divan, B. Banerjee, "Parallel active filter system implementation and design issues for utility interface of adjustable speed drive systems", ***Industry Applications Conference, Thirty-First IAS Annual Meeting, IAS '96.***, 1032–1039, (1996).

[71] Marques, G.D., "A comparison of active power filter control methods in unbalancedand non-sinusoidal conditions", ***Industrial Electronics Society, IECON apos; 98. Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE vol:1, Issue :31,*** 444-449, (1998).

[72] Kaura, V., Blasko, V., "Operation of a phase locked loop system under distorted utility conditions", ***Industry Applications, IEEE Transactions on, vol:33, Issue:1***, 58–63, (1997).

[73] Limongi, L.R., Bojoi, R., Pica, C., Profumo, F., Tenconi, A., "Analysis and Comparison of Phase Locked Loop Techniques for Grid Utility Applications", ***Power Conversion Conference***, vol:07, 674–681, (2007).

[74] Kale, M., "Paralel aktif güç filtresi İçin Yeni Bir Denetim Yönteminin Geliştirilmesi Ve Gerçekleştirilmesi", Doktora Tezi, ***Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Kocaeli, (2009).

[75] Le Roux, A.D., Du Toit, J.A., Enslin, J.H.R., "Integrated active rectifier and power quality compensator with reduced current measurement", ***Industrial Electronics, IEEE Transactions on, vol:46, Issue:3***, 504–511, (1999).

[76] Takeshita, T., Matsui, N., "Control of active filters using source current detection", ***Industrial Electronics Society, IECON The 29th Annual Conference of the IEEE, vol:2***, 1515 -1520, (2003).

[77] Chatterjee, K., Fernandes, B.G., Dubey, G.K., "An instantaneous reactive volt-ampere compensator and harmonic suppressor system", ***Power Electronics, IEEE Transactions on, vol:, Issue:2***, 381–392, (1999).

[78] Ozdemir, E., Ucar, M., Kesler, M., Kale, M., "The Design and Implementation of a Shunt Active Power Filter based on Source Current Measurement", ***The IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC 2007***, Antalya, Turkey, 608-613, (2007).

[79] Ozdemir, E., Ucar, M., Kesler, M., Kale, M., "A Simplified Control Algorithm for Shunt Active Power Filter Without Load and Filter Current Measurement", ***The 32nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON'06,*** Paris, France, 2599-2604, (2006).

[80] eZdspF28335 DSK http://www.spectrumdigital.com/product_info.php?cPath=31&products_id=198&osCsid=ce26303190978b433371fc9b76ca4856 **(Ziyaret Tarihi: 5 Eylül 2008).**

[81] Microchip PIC32 Starter Kit http://www.microchip.com/stellent/idcplg?IdcService=SS_GET_PAGE&nodeId=2591&link=TodaysFeatures **(Ziyaret Tarihi: 5 Eylül 2008).**

[82] Magnetics Kool Mμ E-Cores Technical Bulletin "http://www.mag-inc.com/pdf/KMC-E1%20Rev-6.pdf " **(Ziyaret Tarihi: 19 Haziran 2009).**

[83] Kesler M., Uçar M., Özdemir E., "Paralel aktif güç filtresi İçin DSP Tabanlı Denetim Algoritmasının Otomatik Gömülü Kod Üretimi İle Hızlı Protiplendirilmesi", ***ELECO 2006, Elektrik, Elektronik, Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu***, Bursa, 181-185, (2006).

[84] Oppenheim, A.V., Willsky, A. S., "Signals and Systems", ***Prentice- Hall of India Private Limited, Second Edition,*** (1983).

[85] Acha. E, Madrigal. M, "Power System Harmonics Computer Modeling and Analysis", ***Crc Press,*** 10-34, (2002).

[86] Bracewell, R. N., "The Hartley transform", ***Oxford University Press***, (1986).

[87] Bracewell, R. N., "Discrete Hartley transform", ***J. Opt. Soc. Amer.,vol:73***, 1832-1835, (1983).

[88] Bracewell, R. N., "The fast Hartley transform", ***Proc. IEEE, vol:72,*** 1010-1018, (1984).

[89] Digital Signal Processing (DSP) C++ Builder Components http://www.mitov.com/ **(Ziyaret Tarihi: 20 Eylül 2008).**

[90] Asiminoaei, L., F. Blaabjerg and S. Hansen, "Evaluation of harmonic detection methods for active power filter applications", ***Proc., Applied Power Electronics Conference and Exposition, vol:1,*** APEC 2005, 635-641, (2005).

[91] Kale, M., Ozdemir, E., "An adaptive hysteresis band current controller for shunt active power filter", ***Electric Power Systems. Research, Issue:2, vol:73,*** 113-119, (2005).

[92] Texas Instrument Inc., TMS320C20x User Guide.

[93] Texas Instrument Inc., Code Composer Studio Getting Started Guide.

[94] Texas Instrument Inc., TMS320C1x/C2x/C2xx/C5x Assembly Language Tools User's Guide

KİŞİSEL YAYIN ve ESERLER

1. **Kesler, M.,** Özdemir, E., "Improved Synchronous Reference Frame (iSRF) Based Control Method for UPQC Under Unbalanced and Distorted Load Conditions", ***IEEE Transaction on Industrial Electronics,*** **(incelemede).**

2. **Kesler, M.,** Özdemir, E., "3-Falı 4-Telli Sistemlerde BGKD İle Güç Kalitesinin İyileştirilmesi", ***Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi,*** **(incelemede).**

3. **Kesler, M.,** Özdemir, E., "Şebeke Destekli Harmonik Gerilim Kaynağının Tasarımı ve Uygulaması", ***Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi,*** **(incelemede).**

4. **Kesler**, **M.,** Özdemir, E., "A Novel Control Method for Unified Power Quality Conditioner (UPQC) Under Non-Ideal Mains Voltage and Unbalanced Load Conditions", ***25th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference & Exposition,*** Palm Springs, California, February, (2010).

5. **Kesler**, **M.,** Özdemir, E., "Operation of Shunt Active Power Filter under Unbalanced and Distorted Load Conditions", ***ELECO 2009 6th International Conference on Electrical and Electronics Engineering***, 5-8 November Bursa, Turkey, 92-94, (2009).

6. **Kesler, M.,** Özdemir, E., "Simplified Control Method for Unified Power Quality Conditioner (UPQC)", ***ICREPQ'09, International Conference on Renewable Energies and Power Quality***, Valencia (Spain), April, (2009).

7. **Kesler, M.,** Özdemir, E., Karabacak, M., "Şebeke Gerilim ve Yük Akım Harmoniklerinin Birleşik Güç Kalite Düzenleyicisi İle Düzeltilmesi", ***EVK 2009, 3. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu,*** 21-22 Mayıs, Kocaeli, 291-296, (2009).

8. **Kesler, M.,** Özdemir, E., "Bilgisayar ve DSP Destekli Harmonik Analiz Sistemi Geliştirilmesi ve Birleşik Güç Kalite Düzenleyicisine Uygulanması", ***EVK 2009, 3. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu,*** 21-22 Mayıs, Kocaeli, 313-317, (2009).

9. Karabacak, M., Saraçoğlu, B., Eskikurt, H. İ., **Kesler, M.,** "Harmonik Optimal Uzay Vektör Darbe Genişlik Ayarı", ***EVK 2009, 3. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, 3. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu***, 21-22 Mayıs, Kocaeli, 143-148, (2009).

10. **Kesler, M.,** Sunan, M., "Düşük Maliyetli DSP Uygulama Geliştirme Kartının Tasarımı ve Güç Sistemlerinde Harmonik Analizin Gerçekleştirilmesi", ***ELECO 2008, Elektrik, Elektronik, Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu***, Bursa, 311-315, (2008).

11. **Kesler, M.,** Özdemir, E., "Birleşik Güç Kalite Düzenleyicisi (UPQC) Denetim Algoritmasının Geliştirilmesi ve PSIM Ortamında Simülasyonu", ***ELECO 2008, Elektrik, Elektronik, Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu***, Bursa, 301-305, (2008).

12. Saraçoğlu, B., Karabacak, M., **Kesler, M.,** "Asenkron Motorun Sinüzoidal Darbe Genişlik Ayar İle Açık Çevrim Slaler Hız Denetimi Uygulaması", ***TOK'08, Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi, Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı***, Kasım, (2008).

13. Ozdemir, E., Ucar, M., **Kesler, M.,** Kale, M., "The Design and Implementation of a Shunt Active Power Filter based on Source Current Measurement", ***IEMDC 2007, The IEEE International Electric Machines and Drives Conference***, Antalya, Turkey, 608-613, (2007).

14. Ozdemir, E., Ucar, M., **Kesler, M.,** Kale, M., "A Simplified Control Algorithm for Shunt Active Power Filter Without Load and Filter Current Measurement", ***IECON'06, The 32nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society***, Paris, France, 2599-2604, (2006).

15. **Kesler, M.,** Ucar, M., Ozdemir, E., "Rapid Prototyping of Real Time DSP Based Shunt Active Power Filter using Automatic Embedded Code Generation", ***PCIM 2006 Europe,*** Nürnberg, Germany, (2006).

16. **Kesler, M.,** Uçar, M., Özdemir, E., "Paralel aktif güç filtresi İçin DSP Tabanlı Denetim Algoritmasının Otomatik Gömülü Kod Üretimi İle Hızlı Prototiplendirilmesi", ***ELECO 2006, Elektrik, Elektronik, Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu***, Bursa, 181-185, (2006).

17. Uçar, M., **Kesler, M.,** Özdemir, E., "DSP Tabanlı Paralel Aktif Güç Filtresinin Tasarımı ve Uygulanması", ***ELECO 2006, Elektrik, Elektronik, Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu***, Bursa, 131-135, (2006).

18. Uçar, M., **Kesler, M.,** Özdemir, E., "3-Fazlı 4-Telli Paralel aktif güç filtresi ile Harmonik, Reaktif Güç ve Nötr Akımı Kompanzasyonu", ***EVK 2005, I. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu***, Kocaeli, 238-242, (2005).

19. **Kesler, M.,** Uçar, M., Özdemir, E., "DSP ile Paralel Aktif Güç Filtresinin Kontrolü", ***EVK 2005, I. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu***, Kocaeli, 243-247, (2005).

20. Uçar, M., **Kesler, M.,** Özdemir, E., "DSP Kontrollü Paralel aktif güç filtresi ile Harmonik ve Reaktif Güç Kompanzasyonu", ***ELECO 2004, Elektrik, Elektronik, Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu***, Bursa, 210-214, (2004).

ÖZGEÇMİŞ

1974 yılında Gümüşhane Kelkit ilçesinde doğdu. İlk ve orta öğrenimini Erzincan'da tamamladı. 1995 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi bölümünden 2000 yılında Elektrik Teknik Öğretmeni olarak mezun oldu. 2002 yılında askerlik görevini tamamladı ve Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Eğitimi Anabilim Dalında yüksek lisans öğrenimine başladı. 2005 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Eğitimi Anabilim Dalında doktora öğrenimine başladı.

2002 yılından beri Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi Bölümünde Araştırma Görevlisi kadrosuyla, Kocaeli Üniversitesi Tıp Fakültesi Bilgi İşlemde görev yapmaktadır. Evli ve bir çocuk babasıdır.