KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

ÜÇ FAZLI ŞEBEKE BAĞLANTILI ÇOK SEVİYELİ EVİRİCİ KULLANARAK AKTİF FİLTRELEME YETENEĞİNE SAHİP FOTOVOLTAİK SİSTEMİN TASARIMI VE UYGULANMASI

SERKAN SEZEN

KOCAELİ 2015

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

ÜÇ FAZLI ŞEBEKE BAĞLANTILI ÇOK SEVİYELİ EVİRİCİ KULLANARAK AKTİF FİLTRELEME YETENEĞİNE SAHİP FOTOVOLTAİK SİSTEMİN TASARIMI VE UYGULANMASI

SERKAN SEZEN

Prof.Dr.Engin ÖZDEMİR
Danışman, Kocaeli Üniv. .....

Prof.Dr.Bekir ÇAKIR
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv. .....

Doç.Dr.Ercüment KARAKAŞ
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv. .....

Doç.Dr.Murat KALE
Jüri Üyesi, Düzce Üniv. .....

Yrd.Doç.Dr.Zeki BİLGİN
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv. .....

Tezin Savunulduğu Tarih: 20.05.2015

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Yenilenebilir enerji, gücünü güneşten alan ve hiç tükenmeyecek olarak düşünülen, çevreye emisyon yaymayan enerji çeşitleridir. Fosil yakıt fiyatlarındaki artış seyri, iklim değişikliği eksenli kaygılar ile birlikte enerji sektöründe gerek arz, gerekse talep tarafında bir dizi yeni yönelimi beraberinde getirmektedir. Bu çerçevede dünya genelinde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının yaygınlaştırılmasına yönelik gelişmeler küresel ölçekte ivme kazanmaya başlamıştır.

Alternatif enerji kaynağı olarak fotovoltaik (FV) güneş sistemlerinin kullanımı, doğrudan kolayca elektrik enerjisine dönüştürülebilmesi gibi avantajları sebebiyle popülerliğini arttırmaktadır. Bu sistemler şebekeden bağımsız ve şebeke bağlantılı olmak üzere genellikle iki şekilde kullanılmaktadır. Şebeke bağlantılı sistemler fiziksel depolamaya ihtiyaç duymadığından daha çok ilgi görmektedir. Şebeke bağlantılı sistemlerin sayısı arttıkça güç kalitesi, güvenlik ve adalama konusunda yeni ve zorlayıcı standartlar gündeme gelmiştir. Bunun sonucunda şebeke bağlantılı sistemlerin denetimi bu gereksinimleri karşılayacak şekilde sağlanmalıdır. Bununla birlikte güç elektroniği cihazlarının ve doğrusal olamayan yüklerin artan bir şekilde kullanımı enerji sistemlerinde ciddi sorunlara yol açmaktadır. Bu sebeple aktif güç filtreleme özelliğine sahip FV sistemler enerji dağıtım sistemleri için daha faydalı olabilir.

Tez çalışması kapsamında üç fazlı, üç seviyeli nötr noktası kenetlemeli evirici üzerinden şebekeye bağlı aktif güç filtreleme yeteneğine sahip FV sistemin uygulanabilirliğini değerlendirmek amaçlanmıştır. Bu amaçla deneysel uygulama düzeneği tasarlanmış ve oluşturulmuştur. Tezde laboratuvar ortamında gerçekleştirilen FV sistemin tasarım ve uygulama çalışmaları ile birlikte Matlab/Simulink ortamında gerçekleştirilen benzetim çalışmalarına yer verilmektedir.

Tez çalışmalarına ayırdığım zamanı anlayışla karşılayıp beni destekleyen, maddi ve manevi her türlü destekleriyle sürekli yanımda olan eşime ve oğluma, yine maddi ve manevi desteklerinden dolayı anne ve babama çok teşekkür ederim.

Tez çalışmalarım süresince, çalışmalarıma yön veren ve desteğini esirgemeyen tez danışmanım Prof. Dr. Engin ÖZDEMİR'e, deneysel çalışmalarda yaptıkları katkılardan dolayı Yrd. Doç. Dr. Mehmet UÇAR'a ve Ahmet AKTAŞ'a ve Semikron Türkiye Bölge Müdürü Halim ÖZMEN'e çok teşekkür ederim. Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine de ayrıca teşekkür ederim.

Tezimin konu ile ilgili araştırmacılara faydalı olması dileğiyle saygılarımı sunarım.

Mayıs – 2015 Serkan SEZEN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
TABLOLAR DİZİNİ vii
SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR viii
ÖZET x
ABSTRACT xi
GİRİŞ 1
1. FOTOVOLTAİK SİSTEM TEMELLERİ 15
1.1. Güneş Enerjisi 15
1.2. Türkiye'nin Güneş Enerjisi Potansiyeli 16
1.3. Güneş Hücreleri 18
1.3.1. Güneş hücrelerinin yapısı ve çalışması 20
1.3.2. Güneş hücresi elektriksel modeli 24
1.4. Maksimum Güç Noktası İzleyicisi 28
1.4.1. Maksimum güç noktası izleyicisi çalışma prensibi 29
1.4.2. Maksimum güç noktası izleme teknikleri 31
1.4.2.1. Saptır-gözle metodu 31
1.5. Fotovoltaik Sistemlerin Tarihsel Gelişimi 35
1.5.1. Dünyadaki durum 35
1.5.2. Ülkemizdeki durum 38
1.6. Fotovoltaik Sistemlerin Sınıflandırılması 40
1.6.1. Şebekeden bağımsız sistemler 41
1.6.2. Hibrit sistemler 42
1.6.3. Şebeke bağlantılı FV sistemler 43
1.7. Türkiye'de Güneş Enerjisi ile İlgili Yasal Düzenlemeler 43
2. ŞEBEKE BAĞLANTILI FOTOVOLTAİK SİSTEMLER 46
2.1. Giriş 46
2.2. Şebeke Bağlantılı FV Sistemlerin Sınıflandırılması 47
2.3. Şebeke Bağlantılı FV Sistemlerde Evirici Mimarileri 48
2.4. Şebeke Bağlantılı FV Sistemlerde Denetim Yapıları 54
2.4.1. Senkron referans çatı denetimi 55
2.4.2. Durağan referans çatı denetimi 56
2.4.3. Doğal çatı denetimi 57
2.4.4. Denetim yapılarının değerlendirilmesi 57
2.5. Şebeke Senkronizasyonu 58
2.5.1. Faz kenetlemeli döngü (PLL) 59
2.6. Adalama 61
2.7. Şebeke Bağlantılı Sistemler İçin Filtre Tasarımı 62
2.7.1. Filtre topolojilerinin incelenmesi 62
2.7.1.1. L filtre 63
2.7.1.2. LC filtre 63
2.7.1.3. LCL filtre 64

2.7.1.4. Ayarlanmış LC filtre 64
2.7.2. LCL filtre tasarımı 64
3. AKTİF FİLTRELEME YETENEĞİNE SAHİP FOTOVOLTAİK SİSTEMİN DENETİMİ 69
3.1. Aktif Güç Filtreleme 69
3.2. Denetim Tekniği 71
3.3. Anahtarlama Tekniği 73
4. FOTOVOLTAİK SİSTEMİN MODELLENMESİ VE BENZETİM SONUÇLARI 76
4.1. Çok Seviyeli Eviricinin Modellenmesi 76
4.2. Fotovoltaik Panelin Modellenmesi 78
4.3. Maksimum Güç Noktası İzleyicisinin Modellenmesi 80
4.4. Denetim Sisteminin Modellenmesi 81
4.5. Tüm Sistemin Modellenmesi 86
4.6. Benzetim Sonuçları 88
5. UYGULAMA DEVRESİNİN TASARIMI VE DENEYSEL SONUÇLAR 91
5.1. FV Panel Dizisi ve Yük Grubu 93
5.2. Akım-Gerilim Ölçüm Kartı 95
5.3. Sinyal Koşullandırma Ara Birim Kartı 96
5.4. DA Bara Gerilim Ölçüm Kartı 96
5.5. Aşırı Akım ve Gerilim Koruma Kartı 97
5.6. IGBT Sürücü Modülleri ve Geliştirme Bordları 97
5.7. Sürücüler için Tampon Devresi 100
5.8. Güç Devresi 101
5.9. Işınım Algılayıcısı (Piranometre) ve Işınım ölçer 101
5.10. DSPACE Tabanlı Gerçek Zamanlı Denetim Sistemi 103
5.11. Deneysel Sonuçlar 106
5.11.1. Doğrusal olmayan yük 108
5.11.2. “Sadece FV sistem” çalışma modu 108
5.11.3. “AGF fonksiyonlu FV sistem” çalışma modu 111
6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER 116
KAYNAKLAR 119
EKLER 129
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER 133
ÖZGEÇMİŞ 134

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Güneş, atmosfer ve yeryüzü arasındaki enerji akışı 16
Şekil 1.2. Türkiye'nin güneşlenme haritası 17
Şekil 1.3. FV hücre, modül, panel ve diziler 19
Şekil 1.4. Fotovoltaik hücrenin çalışması 21
Şekil 1.5. Fotovoltaik hücreyi oluşturan tabakalar 22
Şekil 1.6. İdeal bir güneş panelinin tipik I-V ve P-V karakteristikleri 22
Şekil 1.7 Voc, Isc ve Gücün sıcaklıkla değişimi 23
Şekil 1.8. Voc and Isc'nin ışıma ile değişimi 24
Şekil 1.9. Tek diyotlu güneş hücresi eşdeğer devresi 25
Şekil 1.10. Güneş pili dizisi eşdeğer devresi 27
Şekil 1.11. Güneş pilinin belirli bir güneşlenme durumu için elektriksel karakteristiği 29
Şekil 1.12. Güneş paneli akım-gerilim ve güç-gerilim eğrisi 30
Şekil 1.13. Saptır-gözle metodundaki MGN farklılıkları 32
Şekil 1.14. Saptır-gözle algoritmasının akış diyagramı şeması 34
Şekil 1.15. Tek aşamalı FV sistemlerde MGNİ'ye ilişkin blok gösterim 35
Şekil 1.16. Şebekeden bağımsız FV sistem 40
Şekil 1.17. FV-Dizel hibrit sistem 41
Şekil 1.18. Şebeke bağlantılı FV sistem 41
Şekil 1.19. Seri hibrit enerji sistemleri 42
Şekil 1.20. Anahtarlamalı hibrit enerji sistemleri 42
Şekil 1.21. Paralel hibrit enerji sistemleri 43
Şekil 2.1. Avrupa'da 2000-2013 yılları arasında şebekeye bağlı FV sistemlerdeki kurulu güç değişimi 47
Şekil 2.2. Tek aşamalı (single-stage) evirici mimarisi 49
Şekil 2.3. Çift aşamalı (dual-stage) evirici mimarileri 50
Şekil 2.4. Mikro eviricili FV sistem 51
Şekil 2.5. Dizi eviricili FV sistem 51
Şekil 2.6. Merkezi eviricili FV sistem 52
Şekil 2.7. İki seviyeli evirici ve çıkış gerilim dalga şekli 52
Şekil 2.8. Üç seviyeli evirici ve çıkış gerilim dalga şekli 53
Şekil 2.9. Senkron referans çatı denetimin genel yapısı 56
Şekil 2.10. Durağan referans çatı denetimin genel yapısı 56
Şekil 2.11. Doğal çatı denetimin genel yapısı 57
Şekil 2.12. Senkronizasyon parametrelerinin gösterilmesi 58
Şekil 2.13. Temel PLL Yapısı 60
Şekil 2.14. Temel PLL Blok gösterimi 60
Şekil 2.15. Üç elemanlı filtre genel gösterim 63
Şekil 2.16. LCL filtre devresi 65
Şekil 2.17. NNK evirici basitleştirilmiş devre 65
Şekil 2.18. h'ıncı sıradan harmonik bileşeninde LCL filtre şeması 67
Şekil 2.19. r ilişki faktörüne bağlı olarak dalgacık azalma oranının değişimi 68
Şekil 3.1. Akım beslemeli AGF eşdeğer devre şekli 69

Şekil 3.2. Gerilim kaynaklı eviricili Paralel aktif güç filtresi 70
Şekil 3.3. 3S-NNK eviricili paralel AGF güç devresi..... 71
Şekil 3.4. Aktif filtreleme yeteneğine sahip FV sistem denetimine ilişkin blok diyagram 71
Şekil 3.5. AGF referans akımların üretilmesi 72
Şekil 3.6. Üst ve alt histeresiz bandlar 74
Şekil 3.7. Diyot kenetlemeli AGF için histeresiz akım denetleyici blok diyagramı 74
Şekil 4.1. Üç seviyeli diyot kenetlemeli evirici benzetim modeli..... 76
Şekil 4.2. Evirici denetimi için referans ve taşıyıcı işaretler 77
Şekil 4.3. Evirici çıkışındaki fazlar arası gerilimler..... 77
Şekil 4.4. Evirici çıkışındaki yük akımları..... 78
Şekil 4.5. Fotovoltaik panel modeli 79
Şekil 4.6. Fotovoltaik dizi modeli 80
Şekil 4.7. Fotovoltaik diziye ait V-I ve V-P eğrileri 80
Şekil 4.8. Maksimum güç noktası izleyici modeli 81
Şekil 4.9. FV sistem denetim modeli 82
Şekil 4.10. PI Denetleyici modeli 83
Şekil 4.11. Histeresiz Band akım denetleyici modeli (3 faz)..... 83
Şekil 4.12. Histerezis bant akım denetleyici alt sistem modeli (1 faz) 84
Şekil 4.13. Histerezis bant akım denetleyici Gerilim Seviyesi Belirleme alt modeli..... 85
Şekil 4.14. 3S-NNK eviriciye sahip üç fazlı şebeke bağlantılı FV sistemin Matlab Modeli..... 86
Şekil 4.15. Üç faz şebeke gerilimi, şebeke akımı, evirici akımı ve yük akımı 88
Şekil 4.16. Şebeke akımı ve evirici akımına ilişkin yüzdesel toplam harmonik bozunumu..... 89
Şekil 4.17. DA bara referans gerilimi, DA bara gerilimi, FV panel dizi akımı, FV panel dizi gücü grafikleri 90
Şekil 5.1. Üç fazlı şebeke bağlantılı FV sistemin deneysel uygulama düzeneğine ait blok diyagram 91
Şekil 5.2. Üç fazlı şebeke bağlantılı FV sistemin test platformunun fotoğrafı 92
Şekil 5.3. 2000W kurulu güce sahip FV panel dizisi fotoğrafı..... 93
Şekil 5.4. Chroma FV Simülatör ve denetim arayüzü 94
Şekil 5.5. Üç fazlı köprü diyotlu doğrultucu ve omik yük grubu fotoğrafı 95
Şekil 5.6. Hall etkili gerilim sensörü devre bağlantı şeması 95
Şekil 5.7. Hall etkili akım sensörü devre bağlantı şeması..... 96
Şekil 5.8. Gerilim sinyal koşullandırma devresi blok diyagramı..... 96
Şekil 5.9. Akım sinyal koşullandırma devresi blok diyagramı 96
Şekil 5.10. AD210 izolasyon yükselteci devre bağlantı şeması..... 97
Şekil 5.11. 2BB0108T temel sürücü kartı ile 2SC0108T sürücü devresi 98
Şekil 5.12. IGBT sürücü ile üretilen ölü zamanlı kapı sinyalleri 99
Şekil 5.13. Deneysel olarak elde edilen IGBT sürücü ile üretilen ölü zamanlı kapı sinyalleri osiloskop görüntüsü..... 99
Şekil 5.14. Tampon devresi blok diyagramı 100
Şekil 5.15. Sinyal yükseltici ve koruma kartı fotoğrafı 100
Şekil 5.16. Semikron SK150MLI066T çok seviyeli evirici güç modülü 101
Şekil 5.17. TES 1333 ışınım ölçer ve Apogee SP-110 ışınım algılayıcısı..... 102

Şekil 5.18. Üç faz şebeke bağlantılı FV sisteminin gerçek zamanlı denetim blok diyagramı 105
Şekil 5.19. ControlDesk yazılımı kullanıcı ara yüzü 106
Şekil 5.20. Chroma yazılımı kullanıcı ara yüzü 106
Şekil 5.21. Doğrusal olmayan yüke ilişkin deneysel ölçüm sonuçları 107
Şekil 5.22. Doğrusal olamayan yük akımı THB grafiği 108
Şekil 5.23. a fazına ait şebeke gerilimi ve yük akımı grafiği 108
Şekil 5.24. Sadece FV sistem çalışma modu için deneysel sonuçlar 109
Şekil 5.25. Sadece FV sistem modunda evirici ve şebeke akımı THB grafikleri 110
Şekil 5.26. Sadece FV sistem modunda a fazına ait şebeke akımı ve gerilimi grafiği 110
Şekil 5.27. Sadece FV sistem modunda reaktif güç kompanzasyonu test sonuçları 110
Şekil 5.28. Sadece FV sistem modunda şebeke tarafı, evirici tarafı ve yük tarafında ölçülen elektriksel büyüklükler 111
Şekil 5.29. AGF fonksiyonlu FV sistem çalışma modu için deneysel sonuçlar 112
Şekil 5.30. AGF fonksiyonlu FV sistem çalışma modu için şebeke akımı THB grafiği 113
Şekil 5.31. AGF fonksiyonlu FV sistem modunda a fazına ait şebeke akımı ve gerilimi grafiği 113
Şekil 5.32. AGF fonksiyonlu FV sistem modunda reaktif güç kompanzasyonu test sonuçları 114
Şekil 5.33. AGF fonksiyonlu FV sistem modunda şebeke tarafı, evirici tarafı ve yük tarafında ölçülen elektriksel büyüklükler 115

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Türkiye'nin Aylık Ortalama Güneş Enerjisi Potansiyeli 17
Tablo 1.2. Türkiye'nin Yıllık Toplam Güneş Enerjisi Potansiyelinin Bölgelere Göre Dağılımı..... 18
Tablo 1.3. FV teknolojisine bağlı olarak ideal faktör (F) değerleri 27
Tablo 1.4. Saptır-gözle değişim verileri..... 32
Tablo 1.5. Dünya genelinde 2011-2013 (MW) FV kapasiteleri 36
Tablo 1.6. Avrupa ülkelerinde 2020-2030 (MW) FV kapasite tahminleri 37
Tablo 1.7. Yerli üretim durumunda verilen ilave destekler 44
Tablo 1.8. Bölgelerin Maksimum Kapasiteleri 45
Tablo 2.1. İki seviyeli ve çok seviyeli eviricilerin kıyaslanması 53
Tablo 2.2. AG seviyesinden bağlanan üretim tesisleri için koruma ayarı sınır değerleri 59
Tablo 2.3. Filtre tasarım parametreleri..... 64
Tablo 3.1. Çift band histeresiz akım denetleyici için anahtarlama durumları 75
Tablo 4.1. Mage Powertec Plus Mono (200Wp) panel katalog verileri..... 79
Tablo 4.2. Simülasyonda kullanılan sistem parametreleri 87
Tablo 5.1. Deneysel çalışmada kullanılan sistem parametreleri 92
Tablo 5.2. Sürücü devresi ile evirici modül bağlantıları..... 98
Tablo 5.3. Apogee SP-110 Işınım algılayıcısı teknik özellikleri 102

SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

C_{da} : DA bara kondansatörü, (μF)
$f_ş$: Şebeke frekansı, (Hz)
f_{an} : Anahtarlama frekansı, (Hz)
F : Hücrenin ideal faktörü
I_d : Birleşimdeki (jonksiyon bölgesindeki) diyot akımı, (A)
I_{fv} : FV dizi akımı, (A)
I_m : FV panel maksimum güçteki akımı, (A)
I_o : Ters sızıntı akımı, (A)
$I_o\ \alpha$: Hücrenin ters doygunluk akımı, (A)
I_p : Paralel kol direncinden geçen akım, (A)
I_{ph} : Işık fotonlarıyla üretilen akım veya kısa devre akımı, (A)
I_{sc} : 1 kW/m^2 ve 25 ^{o} C'deki hücrenin kısa devre akımı, (A)
i_{abc}* : 3 faz referans akımları, (A)
i_a*, i_b*, i_c* : a,b,c fazı anlık referans akımları, (A)
i_{Eabc} : 3 faz evirici akımı, (A)
i_{Ea} , i_{Eb} , i_{Ec} : a, b, c fazı evirici akımı, (A)
$i_{Şabc}$: 3 faz şebeke akımı, (A)
$i_{Şa}$, $i_{Şb}$, $i_{Şc}$: a, b, c fazı şebeke akımı, (A)
i_{Yabc} : 3 faz yük akımı, (A)
i_{Ya} , i_{Yb} , i_{Yc} : a, b, c fazı yük akımı, (A)
K : Boltzman sabiti, (1,38 10^{-23} j/ K^o)
K_p : Oransal kazanç
K_i : İntegral kazancı
L_E : Evirici tarafı filtre endüktansı
L_f : Anahtarlama harmonikleri filtre endüktansı, (mH)
L_{tr} : Transformatör endüktansı, (mH)
$L_Ş$: Şebeke tarafı filtre endüktansı, (mH)
L_Y : Doğrusal olmayan yük DA tarafı endüktans, (mH)
N_P : Paralel FV modül sayısı
N_S : Seri FV modül sayısı
P_E : Evirici çıkış gücü, (W)
P_{fv} : FV panel gücü, (W)
P_Y : Yük Gücü, (W)
P_m : FV panel maksimum gücü, (W)
q : Elektron yükü, (1,6 10^{-19} coulomb)
r : Dalgacık azalma oranı
R_p : Paralel kol direnci, (Ω)
R_s : Seri direnç, (Ω)
$R_Ş$: Şebeke iç direnci, (Ω)
R_Y : Doğrusal olmayan yük DA tarafı direnç, (Ω)
S : Cinsinden güneş radyasyon ışıması, (W/m^2)

t_s : Oturma zamanı, (saniye)
T_{FV} : Hücrenin mutlak sıcaklığı, (K^o)
T_r : Hücrenin referans sıcaklığı, (^oC)
ω_n : Doğal frekans, (rad/s)
ξ : Sönümleme katsayısı
$v_{Şabc}$: 3 faz şebeke gerilimi, (V)
$v_{Şa}$, $v_{Şb}$, $v_{Şc}$: a, b, c fazı anlık şebeke gerilimi, (V)
v_E : Evirici çıkış gerilimi, (V)
V_d : Diyot gerilimi, (V)
V_{da} : DA Bara Gerilimi, (V)
V_{da*} : DA bara gerilim referansı, (V)
V_{fv} : FV dizi gerilimi, (V)
V_g : Yarı iletken bant boşluk gerilimi, (V)
V_m : FV panel maksimum güçteki gerilimi, (V)
V_{oc} : Hücrenin açık devre gerilimi, (V)
μ_{sc} : Hücrenin kısa devre akımında sıcaklık katsayısı
Z_1,Z_2,Z_3 : Üç elemanlı filtre empedansları, (Ω)
$Z_Ş$: Şebeke empedansı, (Ω)

Kısaltmalar

3S-NNK : Üç Seviyeli Nötr Noktası Kenetlenmiş
AA : Alternatif Akım
ADC : Analog to Digital Converter (Analog Dijital Dönüştürücü)
AGF : Aktif Güç Filtresi
CPV : Concentrated Photovoltaic (Yoğunlaştırıcılı Fotovoltaik)
ÇSE : Çok Seviyeli Evirici
DA : Doğru Akım
DGM : Darbe Genişlik Modülasyonu
DMİ : Devlet Meteoroloji İşleri
DSP : Digital Signal Processor (Sayısal İşaret İşlemci)
EİE : Elektrik İşleri Etüd İdaresi
EPDK : Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu
FV : Fotovoltaik
HBD : Histerezis Bant Denetleyici
IGBT : Insulated Gate Bipolar Transistor (İzole Kapılı Transistör)
MGN : Maksimum Güç Noktası
MGNİ : Maksimum Güç Noktası İzleyicisi
NNK : Nötr Noktası Kenetlenmiş
P&O : Perturbation and Observation Method (Saptır-gözle)
PF : Power Factor (Güç Faktörü)
PI : Proportional Integral (Oransal İntegral)
PLL : Phase Locked Loop (Faz Kilitleme Döngüsü)
SDGM : Sinüsoidal Darbe Genişlik Modülasyonu
STK : Standart Test Koşulları
THB : Toplam Harmonik Bozukluğu
VCO : Gerilim Kontrollü Osilatör
YEK : Yenilenebilir Enerji Kaynakları

ÜÇ FAZLI ŞEBEKE BAĞLANTILI ÇOK SEVİYELİ EVİRİCİ KULLANARAK AKTİF FİLTRELEME YETENEĞİNE SAHİP FOTOVOLTAİK SİSTEMİN TASARIMI VE UYGULANMASI

ÖZET

Bu tez çalışmasında üç fazlı, tek aşamalı olarak üç seviyeli nötr noktası kenetlemeli (3S-NNK) evirici üzerinden şebekeye bağlı aktif güç filtreleme yeteneğine sahip FV sistem tasarımı ve uygulanması ele alınmaktadır. Önerilen sistem mümkün olan en büyük FV gücü şebekeye aktarmanın yanı sıra aynı zamanda doğrusal olmayan yüklerin neden olduğu harmonik akımlarının ve reaktif gücün kompanzasyonunu yapabilmektedir. Böylece FV sistem geleneksel FV sistemlere göre daha işlevsel olmaktadır ve elektrik enerji sistemleri için daha faydalı hale gelmektedir. Önerilen sistemin denetimi senkron referans çatı denetim algoritması ve histeresiz akım denetimi tekniği esaslı olarak gerçekleştirilmektedir. Önerilen sistemin etkinliği Matlab/Simulink ortamında yapılan benzetimlerle ve dSPACE DS1103 denetim tabanlı deneysel çalışmalarla gösterilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik Sistem, Çok Seviyeli Evirici, Maksimum Güç Noktası İzleyici, Aktif Güç Filtresi, Harmonik Bozunumu.

DESIGN AND APPLICATION OF PHOTOVOLTAIC SYSTEM CAPABLE OF ACTIVE POWER FILTERING USING THREE PHASE GRID CONNECTED MULTILEVEL INVERTER

ABSTRACT

In this thesis, it is presented that a three-phase three-level neutral point clamped (NPC) inverter based single-stage grid-connected photovoltaic (PV) system with active power filter (APF) functionality. The proposed system can perform both the maximum real power injection with the perturb and observe (P&O) maximum power point tracking (MPPT) algorithm from the PV panels into the grid and active power filtering to compensate the load current harmonics and reactive power. Thus, the PV system operates more functional compared to the conventional PV systems and can be useful for power system applications. Control of the proposed system is based on synchronous reference frame control algorithm and hysteresis-band current control technique. The effectiveness of the proposed system is demonstrated with Matlab/Simulink simulations and validated through dSPACE DS1103 real-time control platform based laboratory experimental results.

Keywords: Photovoltaic System, Multilevel Inverter, Maximum Power Point Tracker, Active Power Filter, Harmonic Distortion.

GİRİŞ

Günümüzde enerjiye olan talebin her geçen gün daha da artması, enerji maliyetlerindeki yükseliş, çevre duyarlılığı ve daralan fosil yakıt rezervleri gibi nedenler ile yenilenebilir, temiz enerji üretim ve kullanım ihtiyacı artmaktadır. Bu nedenle, alternatif ve yenilenebilir enerji üretim teknolojileri Türkiye'nin öncelikli teknoloji alanları arasında bulunmaktadır. Elektrik enerjisi; kısıtlı olarak depolanabilme, taşınabilme ve çevreye zarar vermeden tüketilebilme sebebi ile oldukça kararlı ve çevreci bir karakteristiğe sahiptir. Elektrik enerjisinin yenilenebilir kaynakları ile üretim tekniklerinin başında güneşten faydalanılan, fotovoltaik (FV) elektrik üretim sistemleri gelmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynağı olarak FV sistemlere gösterilen ilgi gün geçtikçe artmaktadır. FV sistemler kendi kendine yeten ve şebeke bağlantılı sistemler olmak üzere iki şekilde gruplanabilir [1-3]. Şebeke bağlantılı FV sistemler batarya gereksinimi duymadığından ve yatırım maliyeti düşük olduğundan daha çok ilgi görmektedir. Şebeke bağlantılı FV sistemlerde şebekeye maksimum gücü aktarabilmek için maksimum güç noktası izleme teknikleri kullanılmaktadır [4]. Saptır ve gözlemle metodu uygulamadaki basitliğinden dolayı FV sistemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır [5]. FV uygulamalarında çeşitli devre topolojileri kullanılmaktadır [6-7].

Yüksek güç uygulamaları yüksek gerilimler gerektirir ki bu gerilimler FV sistemin maksimum DA gerilim seviyesini sınırlandırır. Bu nedenle çok seviyeli evirici ailesi, FV modüllerin DA barının her bir seviyesine direk olarak bağlanmasından dolayı FV uygulamalar için bir çözüm olarak ortaya çıkmıştır. Nötr noktası kenetlenmeli (NNK) topoloji DA bara kondansatörlerinin üç faz için ortak olması, anahtarlama frekansının düşük olması ve reaktif akımın kontrol edilebilmesi avantajlarına sahip olmasından dolayı ilgi görmektedir [8-10]. Üç seviyeli NNK evirici kullanmanın bir

faydası da düşük akım harmoniği bozunumu (THB) sağlamasıdır ki bu da filtreleme gereksinimini ve filtre bobinlerindeki kayıpları azaltmaktadır [11].

Son yıllarda yapılan çalışmalar fotovoltaik elektrik üretim sistemine bağlı doğrusal ve doğrusal olmayan yüklerden kaynaklanan reaktif gücün kontrolünün de mümkün olduğunu göstermiştir. Bu durum, AA yükleri beslemek için enerji üretimi ve aktif filtre modunda harmonik ve reaktif güç kompanzasyonu olarak iki farklı işlevi sağlama açısından oldukça ilgi çekmektedir. [12]

Güç elektroniği cihazlarının ve doğrusal olmayan yüklerin kullanımındaki artış güç sistemlerinde ciddi problemlere neden olmaktadır. Bu sebeple aktif güç filtreleme (AGF) işlevine sahip şebeke bağlantılı FV sistemler hem şebeke kullanıcıları için hem de şebekeyi işletenler için çok faydalı olacaktır [13-23]. Aktif güç filtreleme işlevi sistemin güç katında herhangi bir değişiklik gerektirmemektedir. Bununla birlikte FV sistemlerin performansını arttırmak için bir veya üç fazlı çeşitli çok seviyeli eviriciler önerilmektedir [24-26].

Bu çalışmada üç fazlı, üç seviyeli nötr noktası kenetlemeli evirici üzerinden şebekeye bağlı aktif güç filtreleme yeteneğine sahip FV sistemin uygulanabilirliğini değerlendirmek amaçlanmıştır. Bu amaçla deneysel uygulama düzeneği tasarlanmış ve oluşturulmuştur. Geliştirilen sistem güneş panellerinden alınan DA enerjisini Saptır-Gözlemle maksimum güç noktası takibi algoritmasını kullanarak en üst düzeyde şebekeye aktarabilmekte ve denetleyici stratejisi değiştirilerek aynı zamanda aktif filtre olarak da kullanılabilmektedir. Böylece sistem başka yükler tarafından üretilen harmonik bileşenlerini ve reaktif gücün kompanzasyonunu yapabilmekte ve geleneksel FV sistemleri ile karşılaştırıldığında daha işlevsel olmaktadır. Sistemin etkinliği öncelikle Matlab/Simulink ortamında gerçekleştirilen benzetim çalışmalarıyla gösterilmiş sonrasında laboratuarda dSPACE DS1103 gerçek zamanlı denetleyici üzerinden gerçekleştirilen deneysel çalışmalarla doğrulanmıştır. Gerçekleştirilen sistem Kocaeli Üniversitesi Umuttepe yerleşkesinde kurulmuştur ve 2 kWp (tepe güç) değerine sahiptir.

Tezin 1. ve 2. bölümlerinde FV sistemler ve bileşenleri ile ilgili temel bilgiler verilmektedir. 3. Bölümde FV sistemin denetlenmesi konusu ele alınmaktadır. 4. ve 5. Bölümlerde ise sırasıyla Matlab/Simulink ortamında gerçekleştirilen benzetim çalışmalarına ve laboratuvar ortamında gerçekleştirilen FV sistemin tasarım ve uygulama çalışmalarına yer verilmektedir.

Literatür Özeti

Çalışma konusu, çok seviyeli evirici içeren aktif filtreleme yeteneğine sahip fotovoltaik sistem tasarımı olduğundan, literatür özetini de FV sistemler, çok seviyeli eviriciler, maksimum güç izleme ve FV sistemlerde aktif filtreleme olarak dört açıdan incelemek uygun olacaktır.

Çok seviyeli eviriciler sinüs formunda çıkış gerilimi üretebilmenin yanında istenilen harmoniklere sahip çıkış gerilimi de üretebilmektedir. Bu sayede çok seviyeli eviriciler gerilim aktif filtre uygulamalarında kullanılmaktadır. Ayrıca çok seviyeli eviriciler istenilen genlik, frekans ve faz açısında gerilim üretme yeteneğine sahip olması nedeniyle kompanzasyon uygulamalarında da yer almaktadır. Literatür incelemesi sırasında çok seviyeli eviricilerle yapılmış kompanzasyon ve aktif filtre uygulamalarına rastlanmıştır [27-29].

Literatürde yer alan çok seviyeli evirici topolojileri temel olarak üç grupta sınıflandırılabilir;

- Diyot kenetlemeli eviriciler
- Flying Kapasitörlü eviriciler
- Kaskat bağlı eviriciler

Aşağıda çok seviyeli eviriciler üzerine literatürde yapılan çalışmalara kronolojik olarak yer verilmiştir.

Lindgren'in doktora tezi FV sistemler için güç devreleri ve eviricilerle ile ilgilidir. Çalışmasında, MGN konusunda çalışmış ve 110 W panel tipi evirici tasarımı gerçekleştirmiştir. Literatürde AC panel olarak da bilinen bu eviricilerin bir kaçını paralel çalıştırarak, bir transformatör yardımı ile şebekeye bağlamıştır [30].

Tolbert ve Peng de çok seviyeli evirici kullanarak, statik reaktif güç kompanzasyonu yapmışlardır [31].

Kuo da MGNİ konusunda bir algoritma geliştirmiş ve IRFP 460 mosfetler ile oluşturduğu bir tam köprü eviricide, bu MGNİ algoritmasını denemiştir [32].

Literatürde, çok seviyeli yapı, farklı konulara da uyarlanmıştır. Buna örnek, olarak Boon'un D sınıfı güç yükseltecini, çok seviyeli yapı kullanarak gerçekleştirmeleri gösterilebilmektedir [33].

Martina Calais'in yaptığı çalışmada, 5 seviyeli kaskat H tipi bir evirici yapmıştır. DC filtre kapasiteleri üzerindeki dalgalanmaları (ripple) azaltmak için ise, farklı anahtarlama şekilleri denenmiştir [34].

Kim ve Enjeti ise, aktif filtrelemede eviricileri kullanmışlar, şebeke kompanzasyonu için yüksek gerilim düşük frekanslı IGBT'li bir evirici ile düşük gerilim yüksek frekanslı mosfetli bir eviriciyi birlikte kullanarak akım harmonik kompanzasyonu sağlamışlardır [35].

Rodriguez, Lai ve Peng literatürde sıkça yer alan nötr noktalı diyot kenetlemeli, flying kapasitörlü ve kaskat bağlı H köprü modüllü çok seviyeli evirici yapılarını incelemişlerdir. Ayrıca asimetrik hibrit hücreli ve yumuşak anahtarlamalı çok seviyeli eviricilere de değinmişlerdir. Çok seviyeli sinüsoidal darbe genişlik ayarlı, çok seviyeli harmonik eliminasyonlu ve uzay vektör ayarlı eviriciler için geliştirilen ayar ve kontrol yöntemlerinden bahsetmişlerdir. Yapılan çalışmada eviricilerin rejeneratif yükleri besleme durumları da ele alınmış ve devre topolojileri verilmiştir. Sonuç olarak gelecek çalışmalar için taban oluşturacak bir araştırma ve inceleme çalışması yapılmıştır [36].

Çok seviyeli evirici sistemlerinin matematiksel modellemeleri ile ilgili, Twinning ve Holmes çeşitli çalışmalar yapmışlardır [37].

Çok seviyeli eviricilerin modellenmesi konusunda çok yararlı kaynaklardan biri de, Dell'Aquila, Liserre, Monopoli ve Rotondo'nun yapmış olduğu çalışmalardır. Her ne kadar, çalışma çok seviyeli bir doğrultucu sisteminin matematiksel modellemesi olsa

da, çok seviyeli evirici sisteminde model oluşturulurken fikir vermesi açısından kullanılmıştır [38].

Kang, Park, Kim ve Cho yüksek kaliteli çıkış gerilim dalga formu elde etmek ve anahtarlama elemanı sayısını en aza indirmek amacıyla çok seviyeli bir evirici yapısı geliştirmiştir. Evirici yapısında yarım köprü ve tam köprü hücreler bulunmakta ve eviricide DGM yöntemi kullanılmaktadır. Geliştirilen sistem iki evirici modülünden oluşmaktadır. Modüllerden birincisi DGM ayarını yapabilmek amacıyla kullanılan evirici modülü, diğeri ise çıkış seviyelerini gerçekleştirmek amacıyla kullanılan seviye modülüdür. Bu çalışmada DGM evirici olarak kullanılan modülde tam köprü hücre yerine yarım köprü hücre kullanılmıştır. Bu alternatif yöntem önerilen yapıya bazı avantajlar sağlamıştır. Örnek olarak çıkış gerilim seviyesi bu yöntem sayesinde artmış ve evirici çıkışında neredeyse sinüsoidal gerilim üretimi sağlanmıştır. Ayrıca yarım köprü hücre sayesinde sistemde iki anahtarlama elemanından tasarruf edilmiştir. Etkili bir anahtarlama yöntemi ile de DGM eviriciye bağlanan transformatörün boyutları küçültülmüştür [39].

Kang, Rhee, Park, Moon ve Ise kaskat transformatör tabanlı çok seviyeli eviricilere yeni bir yaklaşım getirmişlerdir. Daha önce yapılan çalışmalarda 11 seviyeli DGM yöntemini kullanan tasarımın karakteristiği, bu çalışmada geliştirilmiş ve 19 seviyeli evirici yapısı elde edilmiştir. Tasarım fiziksel olarak, üç adet tam dalga köprü evirici modül ve üç adet kaskat bağlı transformatörden oluşmaktadır. Bununla birlikte görünüş itibariyle önerilen sistem yapısı bir önceki 11 seviyeli çalışma ile benzerdir. Sadece transformatörün dönüştürme oranı ve anahtarlama fonksiyonu farklıdır. Bu farklılıklar neticesinde önerilen sistemde iki avantaj dikkati çekmektedir. Bu avantajlardan birincisi, çıkış gerilim seviyesinin yaklaşık olarak iki kat artmasıdır. Bu sayede daha kaliteli çıkış gerilim seviyesi elde edilebilmektedir. İkinci olarak ise, uygun anahtarlama işlemi yapılmasına bağlı olarak DGM eviricinin bağlı olduğu transformatör üzerindeki güç dağılımı azalmıştır. Çıkış gerilim seviyesinin artmasıyla beraber yüksüz ve az yüklü durumlarda dahi filtre kullanmaksızın daha düşük toplam harmonik bozunumu (THB) değerleri elde edilmiş, ayrıca anahtarlama elemanları üzerindeki dv/dt gerilimi stresi de azalmıştır. DGM eviricinin bağlı olduğu transformatör üzerindeki güç dağılımı azaldığından transformatörün verimi de artmıştır [40].

Su, çok seviyeli eviricilerin yeni bir sınıfı olan çok seviyeli doğru akım (DA) bağlantılı ve köprü eviricili bir çalışma yapmıştır. Yapılan çalışmaya göre doğru akım bağlantı, diyot kenetlemeli modül, Flying kapasitörlü modül veya kaskat bağlı yarım H köprü hücrelerden oluşabilmektedir. Çok seviyeli evirici ise DA bağlantı ile bir H köprü eviricinin seri bağlanmasından meydana gelmektedir. Önerilen çalışmada seviye sayısının artmasıyla beraber kullanılan aktif anahtarlama eleman sayısında klasik benzerleri ile karşılaştırıldığında önemli ölçüde azalma olmaktadır. Verilen m sayıdaki gerilim seviyesi için önerilen yapıda (m+3) anahtarlama elemanına ihtiyaç duyulurken, klasik benzerlerinde 2(m-1) anahtarlama elemanına ihtiyaç vardır [41].

Ozpineci, Tolbert ve Chiasson kaskat bağlı H köprü çok seviyeli eviricinin genetik algoritma ile optimum anahtarlama açılarını belirleyerek çıkış gerilimindeki bazı yüksek dereceli harmonik bileşenleri yok etmeye yarayan bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu yöntem çok seviyeli eviricilerde her seviye sayısı için kullanılabilmektedir. Yapılan çalışmada 7 seviyeli evirici tercih edilmiştir. Optimum anahtarlama açıları 5. ve 7. harmoniği yok edecek şekilde önceden hesaplanarak deneysel çalışmalarda kullanılmıştır [42].

İleri düzeyde, eviricilerin performans analizlerini yapabilme için ise, Sanchis, Lopez, Ursua ve Marroyo tarafından 15 kW'lık bir FV emülatörü devresi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada devre, ilk önce gerçek bir FV modüllerine bağlanmakta, buradan içindeki elektronik yük yardımıyla V/I karakteristiğini çıkarılmakta ve veri olarak saklanmaktadır. Gerçekte devre, bir DA-DA dönüştürücü devresinden ibarettir. Devre, 500 V 30 A'e kadar FV modülleri, çeşitli hava koşullarının simülasyonunu yaparak farklı DA çıkışları verebilecek şekilde tasarlanmıştır. Böylece, farklı koşullarda evirici çalışmaları denenebilmektedir. Evirici testi yanında, eviricinin MGN algoritmasının karakteri tespit edilebilir ve evirici performans, verim ölçümleri yapılabilmektedir. Sistem dijital sinyal işlemcili (DSP) bir kontrol kartı ile akım ve gerilim çıkışlarının ayrı ayrı kontrol edilmesiyle çalışmaktadır. Gerekirse, en iyi modül bağlantı şeklini de hesaplayabilmektedir. Fakat sistem, 6 FV ile sınırlandırılmıştır. En iyi performans için, 6 FV' yi hangi şekilde bağlamak gerektiği otomatik olarak verilmektedir [43].

Teichmann ve Bernet, üç seviyeli eviriciler ile iki seviyeli evirici leri düşük gerilim sürücü ve şebeke uygulamaları için karşılaştırmıştır [44].

Kang, Park, Cho, Kim ve Ise güneş hücreleriyle birlikte kullanılmak üzere tasarlanmış, çok seviyeli Darbe Genişlik Ayarlı evirici yapısı üzerinde çalışmışlardır. Tasarlanan evirici üç temel kısımdan meydana gelmektedir. Bu kısımlar, darbe genişlik ayarının yapıldığı evirici kısmı, çıkışında gerilim basamakları elde etmek amacıyla kullanılan seviye eviricisi ve sekonderleri seri bağlı olan kaskat transformatör grubudur. Güneş hücreleri tarafından üretilen gerilimin genliği düşük olduğundan, klasik sistemlerde doğru gerilimden alternatif gerilime dönüşüm yapılırken yüksek çıkış gerilimi istendiği durumlarda Boost Konverter veya Step Up konverterlere ihtiyaç vardır. Yapılan çalışma günümüzdeki klasik benzerleriyle karşılaştırıldığında, yüksek sayıda çıkış gerilim seviyesine sahip olmasına rağmen anahtarlama eleman sayısı azaltılmıştır. Çıkış gerilimi seviyesi arttıkça çıkış geriliminin kalitesi artmıştır. Belirli bir gerilim seviyesi için az sayıda anahtarlama elemanı kullanılmaktadır. Sistemde kullanılan transformatörün kaçak endüktansı sayesinde tranformatör filtre etkisi göstermektedir. Anahtarlama elemanları üzerinde daha düşük dv/dt gerilim stresi oluşmaktadır. Evirici düşük harmonik bozunumu üretmektedir [45].

Alepuz, Busquets-Monge, Bordonau, Gago, Gonzalez ve Balcells yenilenebilir enerji kaynaklarının üç fazlı evirici kullanılarak şebekeye bağlanmasında yeni bir yaklaşım önermişlerdir. Çalışmalarında 1 kW gücünde prototip üç fazlı üç seviyeli nötr noktası bağlantılı evirici kullanmışlardır. Sistem denetleyicisi ise çok değişkenli lineer-kuadratik regülatör (LQR) denetim tekniğine dayanmaktadır. Yine çalışmada denetleyici hesaplamaları için hat anahtarlama fonksiyonları kullanılarak detaylı bir sistem modeli geliştirtmiştir. [46]

Jain ve Agarwal şebekeye başlı FV sistemler için akım kontrolüne dayalı yeni bir MGNİ algoritması önerdiler. Bu algoritmanın en büyük avantajı referans akım dalga şeklini yaklaşık olarak tahmin etmesiydi [47].

Hua, Wu ve Chuang kesintiye uğraması istenmeyen yüksek güçlü ve/veya yüksek gerilimli güç kaynağı uygulamalarında kullanılmak üzere 27 seviyeli kaskat bağlı eviricinin dijital uygulamasını anlatmışlardır. Bu uygulamanın, klasik 27 seviyeli

kaskat evirici ile yapılması halinde 13 adet H köprü evirici modülüne gerek duyulmasına karşın yapılan çalışmada DA gerilim kaynaklarının büyüklük oranı x:3x:9x olan 3 adet H köprü modülü kullanılmıştır. Klasik kaskat eviricilerde harmonik seviyelerini azaltmak için bulunan tetikleme açıları fourier serisi kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu yöntem karmaşık ve uygulanması oldukça zordur. Önerilen yöntem sayesinde anahtarlama açıları, anahtarlama referans gerilimlerine dönüştürülmekte ve farklı ayar değerleri için çıkış geriliminin kontrolü daha kolay yapılabilmektedir [48].

Sneineh ve Wang DA bara gerilimleri eşit olan ve faz bacakları birbirine seri bağlı olan 5 seviyeli Flying kapasitörlü yarım köprü ve bir H köprü eviriciden meydana gelen 9 seviyeli hibrit evirici üzerinde çalışmışlardır. Klasik benzerleri ile karşılaştırıldığında, kullanılan eleman sayısında ve DA kaynağı sayısında azalma olduğu görülmektedir [49].

Hamzah, Noor Muhammed ve Abdul Shukor bir fazlı matris konverter uygulaması gerçekleştirmişlerdir. Yapılan uygulamada darbe genişlik ayarı (DGM) kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan yapının AA-AA dönüştürücü ve 4 bölgeli DA kıyıcı olarak da çalıştırılabilen çok yönlü bir yapı olduğu görülmüştür. Yapılan çalışma için RL yük tercih edilmiştir. Anahtarlama sırası indüktif yüklerde gerilim yükselmelerini önleyecek şekilde düzenlenmiştir. Daha düzgün çıkış gerilimi elde etmek amacıyla sistemde bir RC filtre kullanılmıştır. Bu çalışmada yapılan evirici için simülasyon ve bazı deneysel sonuçlara yer verilmiştir. Elde edilen sonuçlar evirici yapısının uygulanabilir olduğunu göstermektedir [50].

Song, Guan, Zhao ve Liu genetik algoritma ile tetikleme açıları optimize edilmiş kaskat bağlı çok seviyeli eviricinin hibrit elektrikli araçlarda kullanılması üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada 11 seviyeli kaskat bağlı evirici yapısı kullanılmıştır. Eviricideki düşük seviyeli baskın harmonik bileşenleri en az indirmek amacıyla optimum anahtarlama açıları belirlenmektedir. Herhangi bir seviye sayısındaki eviricilere bu teknik uygulanabilmektedir. Bu çalışmada tetikleme açısı optimizasyonu için genel genetik algoritma yaklaşımı geliştirilmiştir. Bu yöntem ile belirli seviye sayısındaki aynı problem, yaygın olarak kullanılan analitik terimler kullanılmadan basit bir formül ile çözülebilmektedir. Matlab programı kullanılarak

optimum anahtarlama açılarıdaha önceden hesaplanmış ve 5, 7, 11 ve 13. dereceden harmonik bileşenler %0.5'in altında indirilmiştir. Daha sonra hesaplanan bu açılar simülasyon ve deneysel çalışmalarda kullanılmıştır [51].

Esram ve Chapman FV sistemler için literatürde adı geçen 19 ayrı MGNİ tekniğinin detaylı bir karşılaştırmasını yaparak sonuçlarını bir tablo halinde sundu [52].

Bulo, Sahan, Nöding ve Zacharias şebekeye bağlı FV sistemler için üç fazlı evirici yapılarını karşılaştırmıştır [53].

Hua, Wu ve Chuang değişken doğru gerilim kaynaklarına sahip kaskat bağlı H köprü modüllü evirici için anahtarlamayı kontrol eden bir algoritma geliştirmişlerdir. Önerilen denetleme yöntemi gerilime ait geri besleme ve ileri besleme sinyallerini birleştirerek tetikleme sinyallerini üretmektedir. Bu sayede eviricinin düşük harmonik bozunumlu çıkış gerilimi üretmesi ve dinamik olarak kontrol edilmesi sağlanmaktadır. Klasik yöntemde düşük harmonik bozunumlu çıkış gerilimi üretmek için tetikleme sinyalleri Fourier Serileri kullanılarak bulunmaktadır. Bu yüzden klasik yöntem karmaşıktır. Ayrıca giriş geriliminin sabit ve kararlı olmadığı durumlar için de uygulaması zordur. Önerilen yöntem için analizler ile simülasyon sonuçları ve deneysel sonuçlar birlikte verilmiştir [54].

Busquets-Monge, Rocabert, ve Rodriguez her bir FV panelinin çalışma gerilimini bağımsız olarak denetleyebilecek yeni bir denetim ve darbe genişlik modülasyonu (DGM) şeması önermişlerdir. Bu çalışmalarında çok seviyeli diyot tutmalı evirici kullanılmışlardır. Geleneksel iki seviyeli evirici sistemi ile karşılaştırıldığında, önerilen sistem yapısı maksimum güç kazanımı, anahtarlama elemanlarının gerilim seviyelerinin azalmasını (buna bağlı olarak cihaz performans karakteristiğindeki iyileşmeyi), çıkış gerilimindeki bozunumun azalmasını ve sistem veriminin artmasını sağlamıştır [55].

Zhang, Yang, Peng ve Qian zigzag kaskat bağlı evirici yapısı üzerine çalışmışlardır. Önerilen bu evirici yapısında sadece bir doğru akım kaynağı kullanılmakta ve gerilim dengesi problemi bulunmamaktadır. Bu çalışmada önerilen eviricinin analizlerine yer verilmiş, prototipi tanıtılmış ve analiz sonuçları deneysel sonuçlar ile doğrulanmıştır [56].

Chen, Zhang, Ma ve Deng kenetleme diyotlarını ve Flying kapasitörleri azaltmak amacıyla kenetleme diyotsuz ve flying kapasitörsüz yeni bir evirici yapısı geliştirmişlerdir. Bu yeni evirici yapısı düşük THB değerleri istenilen orta gerilim uygulamaları için elverişlidir [57].

Tehrani, Rasoanarivo, Andriatsioharana ve Sargos nötr noktalı ve kenetleme diyoları olmayan yeni bir evirici modeli geliştirmişlerdir. Geliştirilen bu model ile eviricide kullanılan yarıiletken elemanlarının güvenliği ve güvenilirliği arttırılmıştır. Bu çalışmada sonuç olarak simülasyon ve deneysel çalışmalar yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır [58].

Sivkov ve Pavelka çok seviyeli eviricilerdeki bara gerilimini bölen kapasitörleri analiz etmişlerdir. Bu çalışmada diyot kenetlemeli ve flying kapasitörlü çok seviyeli eviricilerin yapısal ve kontrol stratejisi bakımından karşılaştırması yapılmış ve kapasite gerilimlerinin dengelenmesi üzerine incelemeler yapılmıştır. Bu çalışmada 5 seviyeli diyot kenetlemeli eviricide kapasite gerilimini dengeleyebilmek amacıyla özel kontrol yöntemi geliştirilmiştir. Ayrıca aynı güç değerlerine sahip diyot kenetlemeli ve flying kapasitörlü eviricilerin karşılaştırmaları yapılmıştır [59].

Junling, Yaohua, Ping, Zhizhu ve Zuyi yüksek güçlü aktif filtreler için kaskat bağlı çok seviyeli eviricinin kapasite gerilim dengesini kontrol eden ve kapalı çevrim filtreleme işlemi yapabilen bir uygulama yapmışlardır [60].

Abdelhamid ve Madouh yeni yapıdaki çok seviyeli evirici yapısı ile gelişmiş statik VAR kompanzasyon uygulaması yapmışlardır. Bu yeni yapının farklılığı en az anahtarlama elemanına ve eşit olmayan doğru akım kaynaklarına sahip olmasıdır. Bu yapıda eviricinin anahtarlama açıları kontrol edilerek statik VAR kompanzasyon işlemi gerçekleştirilmektedir [61].

Özdemir, Özdemir ve Tolbert 6 seviyeli evirici kullanarak temel frekans anahtarlama yöntemi ile tek başına elektrik üretimi sistemi geliştirilmişlerdir. Düşük anahtarlama frekansında yüksek harmonik başarımı sağlanmaktadır [62].

Ahmadi ve Wang eşit alan prensibine dayalı bir teknik ile harmonik azaltma yöntemi geliştirmişlerdir. Bu yöntem ile seviye sayısına (n) bağlı olmaksızın sadece 4 basit

eşitlik yardımıyla harmonikler azaltılabilmektedir. Bu eşitlikler eşit alan prensibine dayanmaktadır. Bu yöntem sayesinde istenen ve elde edilen modülasyon indeksi arasında küçük bir fark olsa bile (n-1)'den daha fazla harmonik azaltılabilmektedir [63].

Liu, Hong ve Huang çıkış gerilimi üzerindeki toplam harmonik bozunum (THB) değerini minimize etmek amacıyla bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Bu yaklaşımda anahtarlama açıları gerçek zamanlı olarak hesaplanmaktadır ve optimizasyonun asıl amacı gerilim üzerindeki THB değerini en aza indirmektir [64].

Du, Tolbert, Ozpineci ve Chiasson tek bir doğru akım kaynağı ve kapasitörler kullanarak kaskat bağlı H köprülü çok seviyeli evirici uygulaması gerçekleştirmişlerdir. Standart kaskat bağlıçok seviyeli eviricilerde n adet doğru akım kaynağı kullanılarak 2n+1 adet seviye sayısı elde edilmektedir. Hibrit kaskat bağlı H köprülü çok seviyeli evirici olarak adlandırılan bu çalışmada transformatör kullanmaya gerek kalmadan önerilen yapı ile 2n+1 seviye sayısı, 1 adet doğru akım kaynağı ve n-1 adet kapasite ile elde edilmektedir. Böylece her fazda bir doğru akım kaynağı kullanılarak yüksek kaliteli çıkış gerilimi elde edilmektedir. Önerilen evirici yapısında kapasitelerin gerilim seviyeleri anlık olarak sağlanabilmiş ve istenilen frekansta sinüs formuna yakın çıkış gerilimi elde edilmiştir [65].

Selveraj ve Rahim bir fazlı 5 seviyeli evirici kullanarak yeni bir DGM anahtarlama yöntemi kullanarak şebeke bağlantılı FV sistem geliştirmişlerdir. MGNİ yeteneğine sahip sistem DSP üzerinden PI denetim esasına göre denetlenmekteydi ve yüksek harmonik başarımı sağlamaktaydı. Sonuçlar geleneksel 3 seviyeli evirici ile karşılaşmalı olarak sunulmuştur [24].

Martinez, Garcia ve Arnaltes 3 seviyeli gerilim kaynaklı NNK evirici kullanarak şebeke bağlantılı FV sistem geliştirmişlerdir. FV sistem Genişletilmiş Doğrudan Güç Denetimi (GDGD) esasına göre denetlenmekteydi. Çalışmada biri geleneksel diğeri ise GDGD esaslı olmak üzere iki farklı MGNİ yöntemi kullanılmaktaydı. DGDG esaslı yöntem doğrudan güç artış miktarını belirlediğinden DA bara gerilim denetleyiciye gerek olmadan çalışabilmekteydi [25].

Çolak, Kabalci ve Bayindir literatürde adı geçen çok seviyeli evirici topolojilerinin ve denetim şemalarının detaylı incelemesini yapmışlardır [26].

Marei, Abdelaziz ve Assad diyot ve kapasite kenetlemeli çok seviyeli eviricileri paralel aktif güç filtresi uygulamaları açısından ele almışlardır. Çalışmada 3 seviyeli akım denetimli kenetlemeli evirici içeren aktif güç filtreleri için basit ve adaptif bir denetim algoritması önerilmiştir. Önerilen denetim algoritması Adaptif ve Doğrusal olmak üzere birbirinden bağımsız iki farklı modülden oluşmaktaydı. Sistemin harmonik azaltma konusundaki başarısı yapılan benzetim çalışmaları ile doğrulanmıştır [66].

Çok seviyeli eviriciler için yapılan literatür incelemelerinde yer alan araştırmalara bakıldığında yapılan çalışmaların, yeni tasarımlar geliştirmeye, var olan sistemlerin niteliklerini arttırmaya ve denetim yöntemlerini geliştirmeye yönelik çalışmalar olduğu göze çarpmaktadır.

Literatürde aktif güç filtreleme işlevine sahip fotovoltaik sistemlere ilişkin bazı çalışmalara da rastlanmaktadır. Ancak çalışmaların önemli bir çoğunluğunun klasik iki seviyeli eviriciler ile yapıldığı görülmektedir. Bu konudaki öne çıkan bazı çalışmalar aşağıda sunulmaktadır.

Leslie tarafından da, aktif filtre fonksiyonu olan, FV sistemler için şebeke bağlantılı evirici tasarımı, yüksek lisans tezi olarak incelenmiştir [67].

Calleja ve Jimenez maksimum güç izleme ve aktif filtreleme özelliğine sahip 1 kW kapasiteli 1 fazlı FV sisteme ev tipi yükler (küçük motorlar, bilgisayarlar ve elektronik balastlar) bağlayarak sistemin performansını değerlendirmişlerdir. Bu sistem sadece aktif filtre olarak da çalışabilmekteydi [68].

Coalcanti, Azevedo, Amaral ve Neves'in yaptığı çalışmada birleşik güç kalite düzenleyici özelliğine sahip FV elektrik üretim sistemi ele alınmıştır. Sistemde yer alan bir güç dönüştürücüsü paralel aktif filtre olarak çalışmakta ve akım harmoniklerinin ve reaktif gücün kompanzasyonunu yapmaktaydı. Diğer güç dönüştürücüsü ise seri aktif filtre olarak kullanılmakta ve gerilim harmoniklerini veya gerilim çökmelerini kompanze etmekteydi [69].

Schonardie ve Martins üç fazlı DGM evirici modeli sunmuşlardır ve şebekeye bağlı fotovoltaik enerji üretim sisteminde dq0 dönüşümü kullanarak bir kontrol yaklaşımı uygulamışlardır. Önerilen yapı, sisteme bağlı diğer yükler tarafından oluşturulan harmonik bileşenlerinin ve reaktif gücün kompanzasyonunu yapabilen bir aktif filtre olarak çalışmaktaydı. Sistem aynı zamanda maksimum güç noktası izleme yeteneğine sahipti [70].

Shen, Jou ve Wu çalışmalarında aktif filtreleme fonksiyonuna sahip gerilim-modlu şebeke bağlantılı güç dönüştürücüsünü ele almışlardır. Bununla birlikte sistemde yeni bir adalama tespit metodu önermişlerdir. Önerilen metodun en önemli özellikleri basit denetimi, akım algılayıcısı gerektirmemesi ve geçici rejim cevabının hızlı olmasıydı [71].

Tseneges ve Adamis'in yaptığı çalışmada gerilim kaynaklı evirici üzerinden 3 fazlı şebekeye bağlı maksimum güç izleme yeteneğine sahip tek aşamalı (single-stage) FV sistem ele alınmıştır. Denetim yaklaşımı p-q teorisi esaslı olan bu sistemde güneş ışığı olduğu sürece şebekeye aktif güç verilebilmekte aynı zamanda yükün çektiği reaktif akımın kompanzasyonunu yapabilmekteydi. Ayrıca FV sistem güneşlenmenin olmadığı durumda sadece reaktif kompanzasyonu da yapabilmekteydi [19].

Singh, Khadkikar, Chandra ve Varma çalışmalarında aktif güç filtreleme işlevine sahip 3 faz 4 telli güç dönüştürücüsü içeren fotovoltaik sistemi ele almışlardır. Ayrıca güç kalitesini arttırmak için yeni bir denetim algoritması sunmuşlardır [72].

Marcos, Cadaval, Martinez ve Montero çalışmalarında klasik evirici üzerinden 3 fazlı şebekeye bağlı maksimum güç izleyebilen aktif filtreleme yeteneğine sahip tek aşamalı (single-stage) FV sistem ele alınmıştır. Denetim yaklaşımı Güç Dengeleme (Power Balance) tekniği esaslı olan bu sistemde modülasyon yöntemi olarak senkron histeresiz band tekniği kullanılmaktaydı [20].

Geury, Pinto ve Gyselinck çalışmalarında akım kaynaklı evirici üzerinden 3 fazlı şebekeye bağlı maksimum güç izleyebilen aktif filtreleme yeteneğine sahip tek aşamalı (single-stage) FV sistem ele alınmıştır. Denetim yaklaşımı Güç Dengeleme (Power Balance) tekniği esaslı olan bu sistem düşük gerilimli şebekeye bağlı iken neredeyse birim güç faktöründe (power factor) çalışabilmekteydi [21].

Noroozian ve Grarehpetian yaptıkları benzetim çalışmasında gerilim kaynaklı evirici üzerinden 3 fazlı şebekeye bağlı maksimum güç izleyebilen aktif filtreleme yeteneğine sahip çift aşamalı (dual-stage) FV sistemi ele almışlardır. Çalışmada, MGNİ amacıyla DA/DA dönüştürücü denetiminde yeni bir denetim yaklaşımı önermişlerdir. Ayrıca tüm FV sistemin denetimi için de Genelleştirilmiş Anlık Reaktif Güç Teorisine dayalı yeni bir denetim yaklaşımı sunmuşlardır [22].

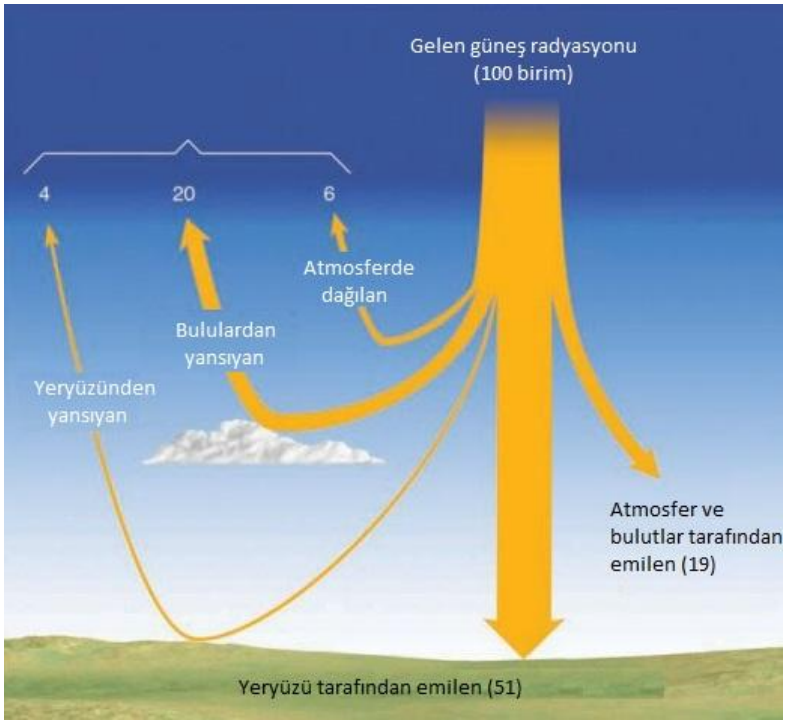
Acuna, Moran, Rivera, Dixon ve Rodriguez çalışmalarında aktif güç filtreleme işlevine sahip 3 faz 4 telli gerilim kaynaklı evirici içeren fotovoltaik sistemi ele almışlardır. Sistem aktif filtrelemenin yanı sıra doğrusal olmayan bir fazlı yüklerin ürettiği dengesiz akımların kompanzasyonunu da yapabilmekteydi. Ayrıca sistemin denetimi için basit bir matematiksel modellemeye dayalı kestirimci denetim algoritması sunmuşlardır [23].

1. FOTOVOLTAİK SİSTEM TEMELLERİ

1.1. Güneş Enerjisi

Güneş enerjisi; potansiyeli, kullanım kolaylığı, temizliği, yenilenebilirliği ve çevre dostu olması gibi nedenler ile diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına göre daha kolay bir şekilde yaygınlaşabilecek durumdadır. Diğer enerji kaynaklarına göre kurulum maliyetlerinin yüksekliği, düşük verim, şük kapasite faktörü ve benzeri bazı teknolojik ve ekonomik zorlukların aşılması, güneş enerjisini gelecekte daha da cazip hale getirecektir. Türkiye, güneş enerjisi konusunda son derece elverişli bir konumda olmasına rağmen sahip olduğu potansiyeli yeterince kullanamamaktadır [73].

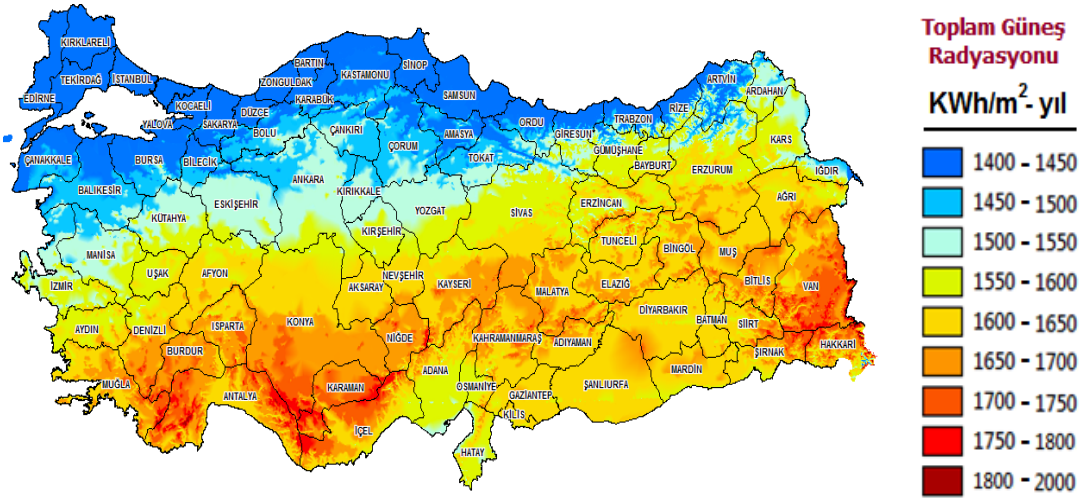
Güneş enerjisi, güneşin çekirdeğinde yer alan füzyon süreci ile (hidrojen gazının helyuma dönüşmesi) açığa çıkan ışıma enerjisidir. Dünya atmosferinin dışında güneş enerjisinin şiddeti, yaklaşık olarak 1370W/m^2 değerindedir, ancak yeryüzüne ulaşan miktarı atmosferden dolayı 0-1100W/m^2 değerleri arasında değişim gösterir. Bu enerjinin dünyaya gelen küçük bir bölümü dahi, insanlığın mevcut enerji tüketiminden kat kat fazladır. Güneş enerjisinden yararlanma konusundaki çalışmalar özellikle 1970'lerden sonra hız kazanmış, güneş enerji sistemleri teknolojik olarak ilerleme ve maliyet bakımından düşme göstermektedir. Çevresel etki açısından temiz bir enerji kaynağı olarak kendini kabul ettirmiştir. Güneş ışınımının tamamı yeryüzüne ulaşmaz, %30 kadarı dünya atmosferi tarafından geriye yansıtılır. Güneş ışınımının %51'i atmosferi geçerek dünya yüzeyine ulaşır. Bu enerji ile dünyanın sıcaklığı yükselir ve yeryüzünde yaşam mümkün olur. Rüzgar hareketlerine ve okyanus dalgalanmalarına neden olur. Güneşten gelen ışınımının %20'si atmosfer ve bulutlarda tutulur. Yeryüzüne gelen güneş ışınımının %1'den azı bitkiler tarafında fotosentez olayında kullanılır. Dünya'ya gelen bütün güneş ışınımı, sonunda ısıya dönüşür ve uzaya geri verilir. Güneş ışınımının atmosfer ve yeryüzü arasındaki enerji akışı ve dağılımı Şekil 1.1'de verilmiştir [74].



Şekil 1.1. Güneş, atmosfer ve yeryüzü arasındaki enerji akışı [75]

1.2. Türkiye'nin Güneş Enerjisi Potansiyeli

Türkiye, coğrafi konum itibariyle güneş enerjisi potansiyeli açısından birçok ülkeye göre şanslı durumda bulunmaktadır. EİE tarafından yapılan çalışmaya göre Türkiye'nin ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2640 saat (günlük toplam 7,2 saat), ortalama toplam ışınım şiddeti ise 1311 kWh/metre kare-yıl (günlük toplam 3,6 kWh/m²) düzeyindedir. Türkiye'nin en fazla güneş enerjisi alan bölgesi Güney Doğu Anadolu Bölgesidir, bu bölgeyi Akdeniz Bölgesi takip etmektedir [76]. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığına bağlı Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlü tarafından 2013 yılında Türkiye'nin güneşlenme haritası Şekil 1.2'de gösterilmektedir.



Şekil 1.2. Türkiye'nin güneşlenme haritası [77]

Aylara göre Türkiye güneş enerji potansiyeli ve güneşlenme süresi değerleri ise Tablo 1.1'de verilmektedir.

Tablo 1.1. Türkiye'nin Aylık Ortalama Güneş Enerjisi Potansiyeli

Aylar	**Aylık Toplam Güneş Enerjisi**		**Güneşlenme Süresi**
	(Kcal/cm^2-ay)	**(kWh/m^2-ay)**	**(Saat/ay)**
Ocak	4,45	51,75	103,0
Şubat	5,44	63,27	115,0
Mart	8,31	96,65	165,0
Nisan	10,51	122,23	197,0
Mayıs	13,23	153,86	273,0
Haziran	14,51	168,75	325,0
Temmuz	15,08	175,38	365,0
Ağustos	13,62	158,40	343,0
Eylül	10,60	123,28	280,0
Ekim	7,73	89,90	214,0
Kasım	5,23	60,82	157,0
Aralık	4,03	46,87	103,0
Toplam	112,74	1311	2640
Ortalama	308,0 cal/cm^2-gün	3,6 kWh/m^2-gün	7,2 saat/gün

Türkiye'nin en fazla güneş enerjisi alan bölgesi Güney Doğu Anadolu Bölgesi olup, bunu Akdeniz Bölgesi izlemektedir. Güneş enerjisi potansiyeli ve güneşlenme süresi değerlerinin bölgelere göre dağılımı da Tablo 1.2' de verilmektedir. Ancak, bu değerlerin, Türkiye'nin gerçek potansiyelinden daha az olduğu, daha sonra yapılan çalışmalar ile anlaşılmıştır. 1992 yılından bu yana EİE ve DMİ, güneş enerjisi değerlerinin daha sağlıklı olarak ölçülmesi amacıyla enerji amaçlı güneş enerjisi

ölçümleri almaktadırlar. Devam etmekte olan ölçüm çalışmalarının sonucunda, Türkiye güneş enerjisi potansiyelinin eski değerlerden %20-25 daha fazla çıkması beklenmektedir.

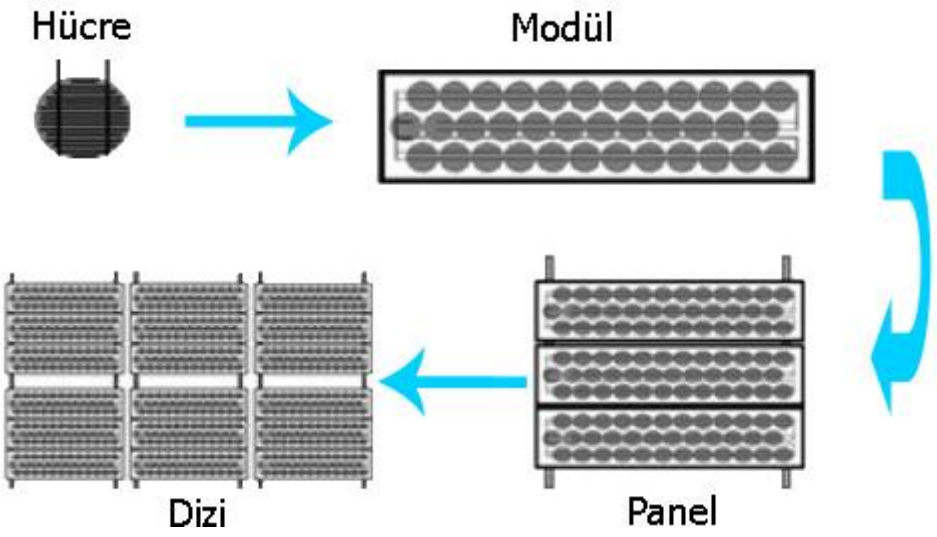
EİE'nin ölçü yaptığı 8 istasyondan alınan yeni ölçümler ve DMİ verileri yardımı ile 57 ile ait güneş enerjisi ve güneşlenme süreleri değerleri hesaplanarak bir kitapçık halinde basılmıştır.

Tablo 1.2. Türkiye'nin Yıllık Toplam Güneş Enerjisi Potansiyelinin Bölgelere Göre Dağılımı

BÖLGE	TOPLAM GÜNEŞ ENERJİSİ (kWh/m^2-yıl)	GÜNEŞLENME SÜRESİ (Saat/yıl)
G.Doğu Anadolu	1460	2993
Akdeniz	1390	2956
Doğu Anadolu	1365	2664
İç Anadolu	1314	2628
Ege	1304	2738
Marmara	1168	2409
Karadeniz	1120	1971

1.3. Güneş Hücreleri

Güneş pilleri, yüzeylerine gelen güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarı iletken maddelerdir. Yüzeyleri kare, dikdörtgen, daire şeklinde biçimlendirilen güneş hücreleri genellikle 100 cm^2 civarında, kalınlıkları ise 0,1-0,4 mm arasındadır. Güneş hücreleri fotovoltaik ilkeye dayalı olarak çalışırlar, yani üzerlerine ışık düştüğü zaman uçlarında elektrik gerilimi oluşur. Hücrenin verdiği elektrik enerjisinin kaynağı, yüzeyine gelen güneş enerjisidir. Güneş enerjisi, güneş hücresinin yapısına bağlı olarak yaklaşık %5 ile %40 arasında bir verimle elektrik enerjisine çevirebilir. Güç akışını arttırmak amacıyla çok sayıda güneş hücresi birbirine seri yada paralel bağlanarak bir yüzey üzerine monte edilir, bu yapıya güneş hücresi modülü yada fotovoltaik modül adı verilir. Böylece istenilen akım ve gerilim değerlerinde güneş panelleri üretilmiş olur. Güç talebine bağlı olarak modüllerin bağlantıları ile birkaç watt'tan megawatt'a kadar sistem oluşturulur. Şekil 1.3'de hücrelerin bir araya gelmesinden meydana gelen modül, panel ve diziler görülmektedir.



Şekil 1.3. FV hücre, modül, panel ve diziler

Güneş hücreleri pek çok farklı maddelerden yararlanılarak üretilebilmektedir. 1cm^{2}'lik hücre alanı için laboratuarlarda ulaşılan en yüksek hücre verimleri, kristalsi güneş hücresi için %24,5, polikristalsi için %19,8, amorfsi için %12,7, çok katlı güneş hücreleri için ise %40 civarındadır [74]. Güneş hücresi veriminde dünya rekoru %43,5 ile "Solar Junction" adlı firmanın CPV (yoğunlaştırıcılı fotovoltaik) teknolojisi ile üretmiş olduğu hücreye aittir [78]. CPV teknolojisinde ışığın odaklandığı hedef alana bir PV yarıiletken malzeme yerleştirilir, diğer düzlemsel güneş hücrelerine göre daha küçük alana merceklerle sağlanan daha yüksek yoğunluktaki ışık ışınlarının düşürülmesi ile daha yüksek verimde enerji üretimi sağlanmaktadır. Burada kullanılan PV malzeme Si dan 10 kat daha pahalı olmasına rağmen yüksek verim ve az malzeme kullanımından dolayı toplam maliyet daha düşük olmaktadır.

Ticari ortama girmiş olan geleneksel Si güneş hücrelerinin yerini alabilecek verimleri aynı ama üretim teknolojileri daha kolay ve daha ucuz olan güneş hücreleri üzerinde de son yıllarda çalışmalar yoğunlaştırılmıştır. Bunlar; fotoelektrokimyasal çok kristalli Titanyum Dioksit hücreler, polimer yapılı Plastik hücreler ve güneş spektrumunun çeşitli dalga boylarına uyum sağlayacak şekilde üretilebilen enerji bant aralığına sahip Kuantum güneş hücreleri gibi yeni teknolojilerdir.

1.3.1. Güneş hücrelerinin yapısı ve çalışması

Günümüz elektronik ürünlerinde kullanılan transistörler, doğrultucu diyotlar gibi güneş hücreleri de, yarı iletken maddelerden yapılırlar. Yarı iletken özellik gösteren birçok madde arasında güneş hücresi yapmak için en elverişli olanlar, silisyum, galyum arsenit, kadmiyum tellür gibi maddelerdir.

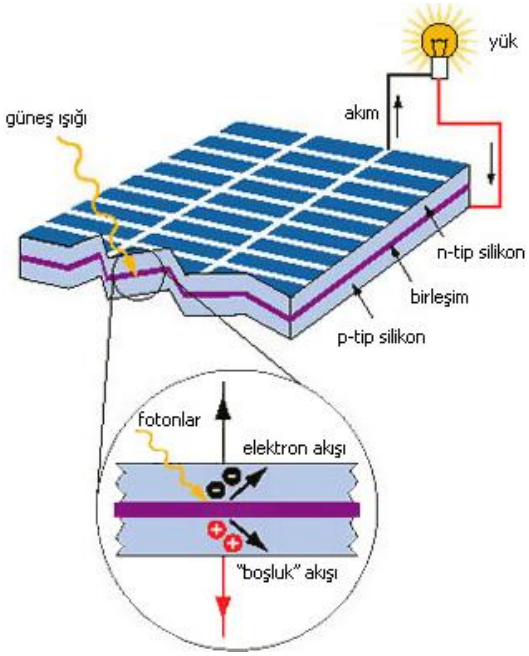
Yarı iletken maddelerin güneş hücresi olarak kullanılabilmeleri için N ya da P tipi katkılanmaları gereklidir. Katkılama, saf yarı iletken eriyik içerisine istenilen katkı maddelerinin kontrollü olarak eklenmesiyle yapılır. Elde edilen yarı iletkenin N ya da P tipi olması katkı maddesine bağlıdır. En yaygın güneş pili maddesi olarak kullanılan silisyumdan N tipi silisyum elde etmek için silisyum eriyiğine periyodik cetvelin 5. grubundan bir element, örneğin fosfor eklenir. Silisyum'un dış yörüngesinde 4, fosforun dış yörüngesinde 5 elektron olduğu için, fosforun fazla olan tek elektronu kristal yapıya bir elektron verir. Bu nedenle V. grup elementlerine "verici" ya da "N tipi" katkı maddesi denir.

P tipi silisyum elde etmek için ise, eriyiğe 3. gruptan bir element (alüminyum, indiyum, bor gibi) eklenir. Bu elementlerin son yörüngesinde 3 elektron olduğu için kristalde bir elektron eksikliği oluşur, bu elektron yokluğuna hol ya da boşluk denir ve pozitif yük taşıdığı varsayılır. Bu tür maddelere de "P tipi" ya da "alıcı" katkı maddeleri denir. P ya da N tipi ana malzemenin içerisine gerekli katkı maddelerinin katılması ile yarı iletken eklemler oluşturulur. N tipi yarı iletkende elektronlar, P tipi yarı iletkende holler çoğunluk taşıyıcısıdır. P ve N tipi yarı iletkenler bir araya gelmeden önce, her iki madde de elektriksel bakımdan nötrdür. Yani P tipinde negatif enerji seviyeleri ile hol sayıları eşit, N tipinde pozitif enerji seviyeleri ile elektron sayıları eşittir. PN eklem oluştuğunda, N tipindeki çoğunluk taşıyıcısı olan elektronlar, P tipine doğru akım oluştururlar. Bu olay her iki tarafta da yük dengesi oluşana kadar devam eder. PN tipi maddenin ara yüzeyinde, yani eklem bölgesinde, P bölgesi tarafında negatif, N bölgesi tarafında pozitif yük birikir.

Bu eklem bölgesine "geçiş bölgesi" ya da "yükten arındırılmış bölge" denir. Bu bölgede oluşan elektrik alan "yapısal elektrik alan" olarak adlandırılır. Yarı iletken eklemin güneş pili olarak çalışması için eklem bölgesinde fotovoltaik dönüşümün sağlanması gerekir. Bu dönüşüm iki aşamada olur, ilk olarak, eklem bölgesine ışık

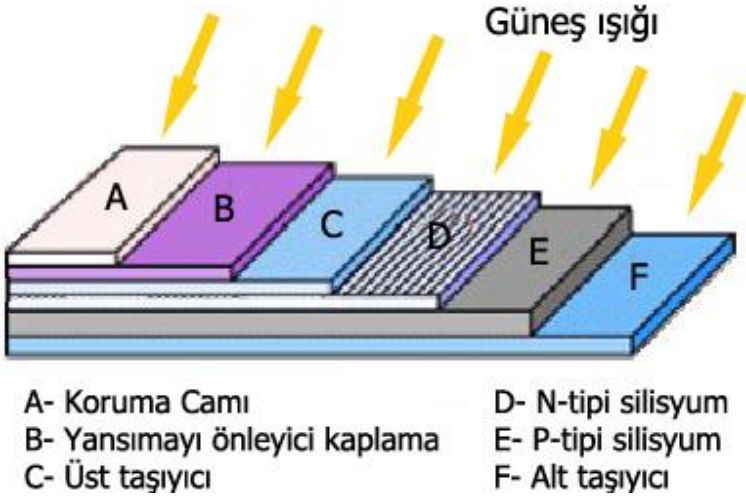
düşürülerek elektron-boşluk çiftleri oluşturulur, ikinci olarak ise, bunlar bölgedeki elektrik alan yardımıyla birbirlerinden ayrılır.

Enerji dönüşümü fotovoltaik olaya dayanmaktadır. Fotovoltaik olayda, ışık fotonları özellikle eklem bölgesine ulaştığında elektronlara çarparak serbest yük çiftleri oluşturur. Uyarılan negatif yüklü (-) her elektron, gerisinde pozitif yüklü (+) bir boşluk bırakır. Bu yük taşıyıcıları, eklemle kurulan doğal iç ters elektrik alanla (Ei) akım katkısı oluşturmak üzere çoğunlukta oldukları bölgelere sürülür. Doğal Ei alanı, fotonla enerji kazanan yük taşıyıcılarının hareketlerinde hangi tarafa eğilimli olduklarını ifade eden bir enerji engeli olarak düşünülebilir. Böylece fotonlarla üretilen (-) yüklü elektronlar N-bölgesinde, (+) yüklü pozitif taşıyıcılar P-bölgesinde toplanarak bir gerilim üretilmektedir [79]. Bu durum prensip olarak Şekil 1.4'de gösterilmektedir.

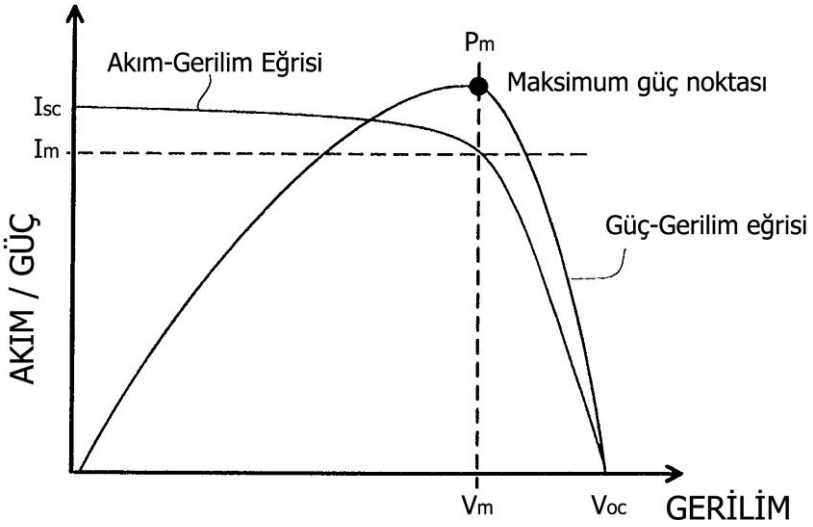


Şekil 1.4. Fotovoltaik hücrenin çalışması

Hücrelerin üst tabakaları yansımayı önleyici kaplama ve korumalardan oluşur. Güneş hücreleri son derece kırılgan olduğu için böyle bir koruma, çatlama ve kırılmaları önlemek açısından gereklidir. Yansıma önleyici kaplamanın koyulmasının sebebi de güneşten gelen ışığın yansıtılmadan soğurulmasını sağlamaktır. Böylece güneş ışınlarından elde edilen verim daha da artar. Şekil 1.5' de bir fotovoltaik hücreyi oluşturan tabakalar gösterilmektedir.



Şekil 1.5. Fotovoltaik hücreyi oluşturan tabakalar



Şekil 1.6. İdeal bir güneş panelinin tipik I-V ve P-V karakteristikleri

Şekil 1.6, ideal bir güneş panelinin tipik I-V ve P-V karakteristiğini göstermektedir. Birbirine seri veya paralel bağlanmış birden fazla güneş panelinden oluşan sistemlerin karakteristikleri de sırasıyla V_{oc} ve V_m ya da I_m ve I_{sc} değerlerinin katlanmış olması dışında benzerdir.

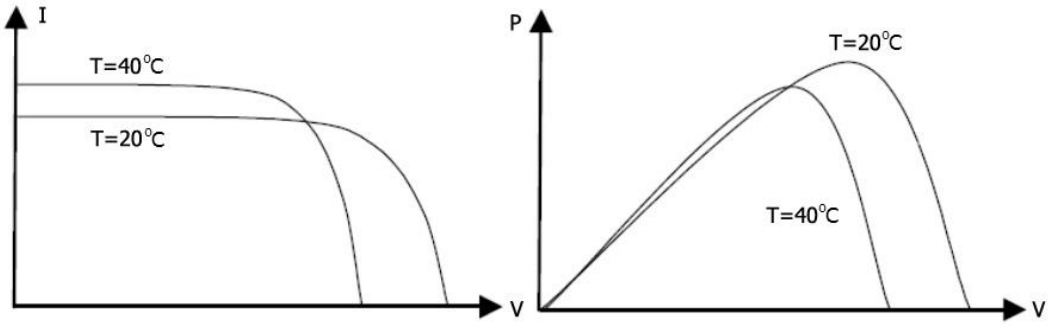
Şekil 1.6'dan da görülebildiği gibi ideal bir güneş panelinin çıkış gerilimi, çıkış akımı belli bir değere ulaşana kadar sabitken, bu değeri aştığında hızla azalmaya başlamaktadır. Gerçek bir güneş panelinde ise çıkış gerilimi panelden çekilen akım sıfırdan farklı olduğu anda düşmeye başlar. Ancak gerilimin düşme hızı akım belli bir değere ulaşana kadar yavaşken, bu değeri aştıktan sonra hızlanır.

Güneş panellerinin beş temel parametresi vardır. Bu parametreler ve sembolleri aşağıda liste halinde verilmiştir:

- V_{oc} : Açık devre gerilimi
- I_{sc} : Kısa devre akımı
- P_m : Maksimum güç değeri
- V_m : Maksimum güç noktası gerilimi
- I_m : Maksimum güç noktası akımı

Gerçek bir güneş panelinin I-V karakteristiği sıcaklığa ve ışımaya bağlı olarak değişir. Bu yüzden Şekil 1.6'daki gibi bir eğri ancak tek bir sıcaklık ve ışınım değeri için geçerlidir. Bu eğri, panel yüzeyinin tamamen ve homojen bir şekilde aydınlanmış olduğu, bölgeler ve kir nedeniyle gerçekte sağlanması oldukça zor olan bir koşul altında geçerlidir. Kısacası, bir güneş paneli için her koşulda doğru I-V eğrisinin elde edilebilmesi için ortam koşullarının hesaba katılması gerekmektedir.

Güneş panelleri çok sayıda küçük hücreden oluşur. Her hücre en basit haliyle yüzeyi büyütülmüş bir P-N eklemi olduğundan, parametreleri bir diyotunkiler gibi sıcaklık ile değişir. Sıcaklık arttıkça Voc azalır ve Isc artar. Voc'deki azalma miktarı Isc'deki artış miktarından çok daha fazla olduğu için sıcaklık arttıkça panelden elde edilebilecek olan maksimum güç azalır. Bu etkiler Şekil 1.7' de gösterilmiştir.

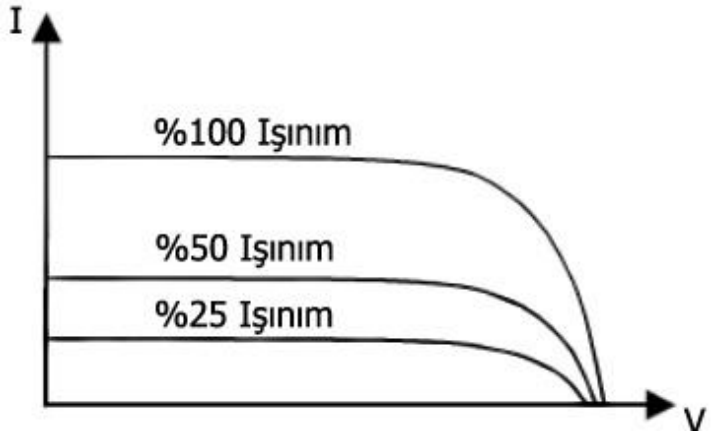


Şekil 1.7 Voc, Isc ve Gücün sıcaklıkla değişimi

Sıcaklıktaki 1°C 'lik değişime karşılık V_{oc} ve I_{sc}'deki değişim miktarı genellikle güneş panellerinin teknik dokümanlarında T = 25 °C 'deki değerleri referans alan sıcaklık katsayıları olarak verilir.

Bir güneş panelinin kısa devre akımı ışıma ile doğrudan orantılıyken, açık devre gerilimi artan ışıma ile sadece az bir miktar artar. V_{oc}'deki değişim Isc'deki değişime

kıyasla ihmal edilebilecek seviyede olduğundan bir güneş panelinin maksimum çıkış gücünün de ışıma ile doğrudan orantılı olduğu söylenebilir. Şekil 1.8'de aynı panelin üç farklı ışınım değeri için I-V eğrileri verilmiştir.



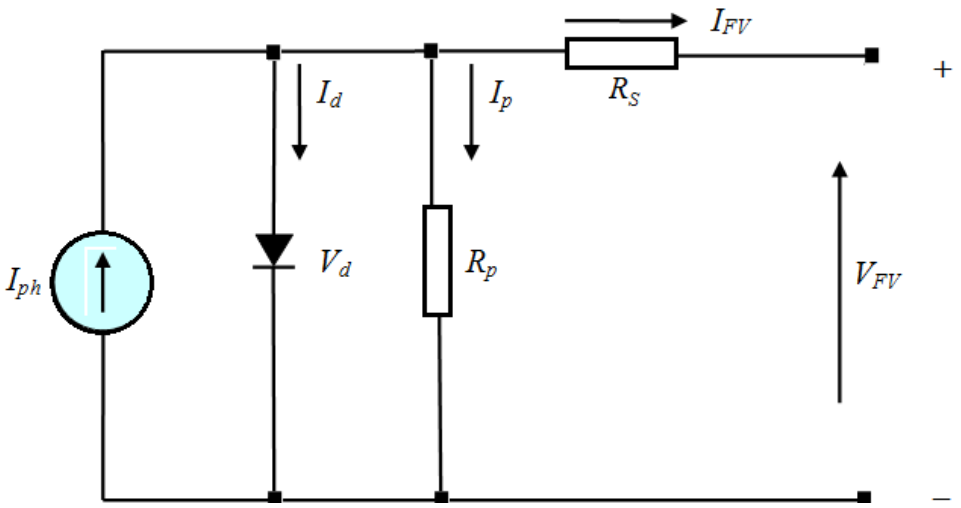
Şekil 1.8. Voc and Isc'nin ışıma ile değişimi

Isc ışınım ile doğrudan orantılı olduğundan, ışınımdaki 1 W/m^2 'lik değişimin Isc üzerindeki etkisini hesaplamak kolaydır. Ancak V_{oc}'deki değişim ancak yaklaşık olarak hesaplanabilmektedir çünkü ışınım ile V_{oc} arasında doğrudan bir orantı olmadığı gibi, panellerin teknik dokümanlarında bu iki değer arasındaki bağıntıyı veren bir katsayıya da rastlanmamaktadır.

1.3.2. Güneş hücresi elektriksel modeli

Güneş hücresi için birçok model geliştirilmesine karşın literatürde tek diyot modeli daha çok kullanılmaktadır. Bu modelin dayandığı eşdeğer devre prensip olarak Şekil 1.9'da verilmektedir. Tek diyot modeli; ışık tarafından üretilen akım I_{ph}, seri eşdeğer direnç R_S, paralel eşdeğer direnç R_P ve bir diyottan oluşmaktadır.

Eşdeğer devrede FV hücre, ışığa göre değişen bir akım kaynağı gibi davranmaktadır. I-V ilişkisi ise Denklem (1.1) ile verilmektedir. Karanlıkta FV hücre enerji üretmez, bir diyot gibi davranır. Eğer bu durumda dış bir kaynağa bağlanırsa, diyot üzerinden bir I_d akımı geçer. Bu akıma karanlık veya diyot akımı adı verilir.



Şekil 1.9. Tek diyotlu güneş hücresi eşdeğer devresi

$$I_{FV} = I_{ph} - I_d - I_p = I_{ph} - I_o\left[e^{\left(\frac{qV_d}{KFT_{FV}}\right)-1}\right] - \frac{V_d}{R_p} \qquad (1.1)$$

Burada;

I_{ph} = Işık fotonlarıyla üretilen akım veya kısa devre akımı (A)

I_o = Ters sızıntı akımı (A)

I_d = Karanlık (diyot) akımı (A)

I_p = Paralel kol direncinden geçen akım (A)

R_p = Paralel kol direnci (ohm)

R_s = Seri direnç (ohm)

q = Elektron yükü (1,6 10^{-19} c.)

K = Boltzman sabiti (1,38 10^{-23} j/ K^o)

T_{FV} = Hücrenin mutlak sıcaklığı (K^o)

F = Hücrenin ideal faktörü

I_{FV} = FV panel akımı (A)

V_d = Diyot gerilimi (V)

V_{FV} = FV panel çıkış gerilimi (V)

$I_{ph,}$ ışık fotonları ile üretilen akım esas olarak hücre üzerine düşen ışınıma ve hücre sıcaklığına bağlı olarak Denklem (1.2)'deki gibi değişmektedir.

$$I_{ph} = \left[\mu_{sc}\left(T_c - T_r\right) + I_{sc}\right]S \tag{1.2}$$

Buradaki μ_{sc} hücrenin kısa devre akımında sıcaklık katsayısı, T_r hücrenin referans sıcaklığı, I_{sc} 1 kW/m^2 ve 25^oC'deki hücrenin kısa devre akımı ve S ise W/m^2 cinsinden güneş radyasyonudur.

Tek diyot modeliyle I-V eğrisini belirlemek için ilgili güneş hücresine ait özel I_o ve F parametrelerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu parametreler genellikle üretici firma kataloglarında yoktur. I_o sızıntı akımı hassas bir ölçüm olanakları ile ölçülebilir. Ayrıca değişen sıcaklıklara göre, I_o teriminin yeni değerleri, analizde göz önünde tutulmalıdır. Çünkü I_o, sıcaklıkla üstel olarak değişmektedir. I_o doyma akımı Denklem (1.3)'te verilmektedir.

$$I_o = I_{o\alpha}\left[\frac{T_{FV}}{T_r}\right]^3 e\left[\frac{qV_g}{KF}\left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_c}\right)\right] \tag{1.3}$$

$$I_{o\alpha} = \frac{I_{sc}}{e^{\left(\frac{qV_{FV}}{KFT_c}\right)}} \tag{1.4}$$

Buradaki,

$I_{o\alpha}$ = Güneş ışınımı ve referans sıcaklığında hücrenin ters doygunluk akımıdır (A)

V_g = Hücre tarafından kullanılan yarı iletken bant boşluk gerilimi (V)

V_{oc} = Hücrenin açık devre gerilimi (V)

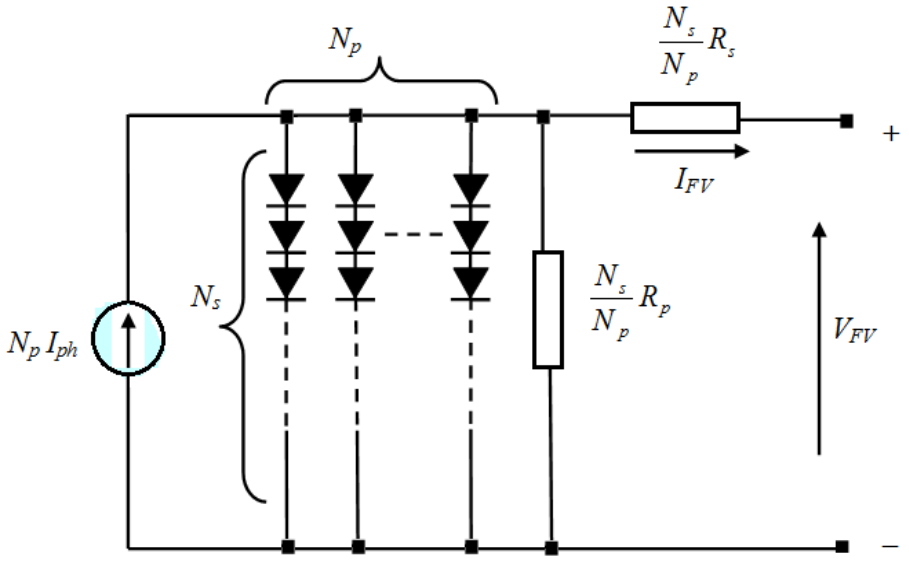
F = Hücrenin ideal faktörü kullanılan hücre teknolojisine bağlı olarak değişmektedir.

Tablo 1.3'de F faktörünün kullanılan hücre kimyasallarına göre değerleri verilmektedir.

Tablo 1.3. FV teknolojisine bağlı olarak ideal faktör (F) değerleri [80]

Hücre Teknolojisi	İdeal Faktör (F)
Si-poly	1,3
Si-mono	1,2
a-Si-triple	5
a-Si:tandem	3,3
a-Si:H	1,8

Bir güneş hücresi genellikle 0,5 V 2 W olarak üretilmektedir. Bu gücü arttırmak için hücreler seri veya paralel bağlanarak istenilen gerilim ve akım değerlerinde güneş panelleri üretilebilmektedir. N_s seri ve N_p paralel bir şekilde düzenlenen FV modül devresi Şekil 1.10'da gösterilmektedir.



Şekil 1.10. Güneş pili dizisi eşdeğer devresi

Parametreleri tek diyot modeline gören tanımlanmış, N_s kadar seri ve buna N_p kadar paralel bağlı paket FV'lerden oluşan sistemin akım-gerilim (I-V) ilişkisi Denklem (1.5)'de verilmektedir.

$$I_{pv} = N_p I_{ph} - I_o \left[e^{\left(\frac{q\left(\frac{V_d}{R_s} + \frac{IR_s}{R_p} \right)}{N_s K F T_{FV}} \right)} - 1 \right] - \frac{N_p V_d / N_s}{R_p} \quad (1.5)$$

Buradaki N_s seri hücre sayısı, N_p'de paralel bağlı hücre sayısıdır. Aslında FV modülünün verimini R_s çok az etkilerken R_p'nin etkisi daha büyüktür [81].

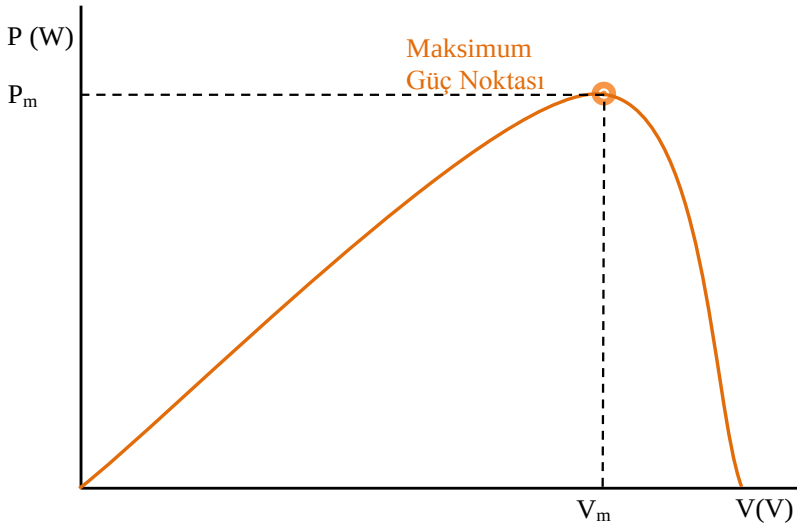
1.4. Maksimum Güç Noktası İzleyicisi

FV elektrik üretim sistemlerinin verim ve düşük ışınım şartları altında çalışması konusunda iki önemli sorunu vardır. Bu güç dönüşüm sistemlerinin verimleri oldukça düşüktür (%9-%17) ve özellikle düşük ışınım şartları altında güneş panelleri tarafından üretilen elektrik enerjisi miktarı hava koşullarına bağlı olarak sürekli değişmektedir. Üstelik güneş panellerinin elektriksel karakteristiği değişen sıcaklık ve ışınınım ile doğrusal olmayan bir eğri çizmektedir. Genellikle I-V veya V-P eğrisi üzerindeki sürekli olarak yer değiştiren bu tepe noktası Maksimum Güç Noktası (MGN) olarak adlandırılır. Maksimum Güç Noktası İzleyici (MGNİ) denetim tekniği FV panellerinin verimli kullanılmasını sağlayan bir yöntemdir. Bu yöntem güneş panelinin verdiği en yüksek olduğu noktayı yakalayan bir denetim yapısıdır. Bu tepe noktası ışıma, sıcaklık, FV panel eğimi, FV panel yaşlanması gibi değişkenlere bağlıdır. Tüm FV sistemi (dizi, dönüştürücü v.b.) bu tepe noktasında çalıştırıldığında maksimum verim ile çalışır ve FV panelden maksimum çıkış gücü alınır. MGN ancak hesaplama modelleri yoluyla veya arama algoritmaları tarafından tespit edilebilmektedir. Bu işlemi gerçekleştirebilmek için denetim mekanizması denetim tekniğine bağlı olarak FV panel değişkenlerini değerlendirip güç dönüştürücüsünün referansını gücün en yüksek olduğu noktaya ulaşmayı sağlayacak şekilde değiştirir [82-84]. Sistemde FV panel ile ilgili ne kadar çok girdi birimi olursa denetim sistemi MGN'na o kadar yakın ve kararlı çalışır. Ancak çok fazla girdi, çalışma algoritmasında işlem sayısını arttırmakta ve geç cevap tepki süresine neden olabilmektedir. Bunun sonucu olarak, hızla değişen hava koşullarında MGN'nı yakalamakta gecikebilir ve bu sistem için istenmeyen bir durumdur. Bu yüzden, minimum girdi birimi ile işlem algoritmasını fazla zorlamadan hızlı cevap tepki

süresine sahip aynı çalışma verimini sağlayan bir teknik kullanmamız maliyet ve basitlik açısından önem kazanmaktadır.

1.4.1. Maksimum güç noktası izleyicisi çalışma prensibi

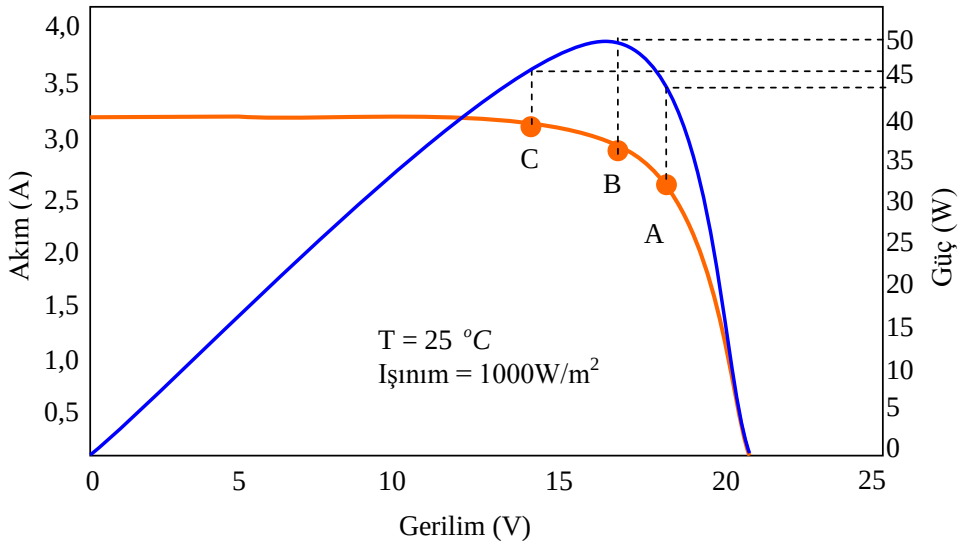
Belirli bir güneşlenme durumunda güneş pilinin elektriksel karakteristiği Şekil 1.11'de görülmektedir. Güneş pilinin iç direnci eğrinin sol tarafında yüksek iken sağ tarafında düşüktür. Maksimum güç noktası bu eğrinin tam tepe noktasındadır. Maksimum güç transferi teorisine göre, kaynak ve yük empedansları eşit olduğunda yüke maksimum güç aktarılır. Böylece anahtarlamalı dönüştürücünün empedansı anahtarlama darbe boşluk oranı ayarlanarak güneş paneli empedansı ile eşit yapıldığında maksimum güç noktasında çalışma şartı sağlanmaktadır.



Şekil 1.11. Güneş pilinin belirli bir güneşlenme durumu için elektriksel karakteristiği

Birçok geleneksel DA-DA çevirici devresi yapısı gereği gerilim düştükçe akım arttığından negatif empedans karakteristiğine sahiptir. Bu davranış sabit giriş gücü karakteri ve güç kaynağının ayarlanabilir çıkış gerilimi nedeniyledir. Eğer sistem güneş paneli karakteristik eğrisinin yüksek empedans tarafında (düşük gerilim tarafı) işletilirse, güneş panel gerilimi çökecektir. Bu nedenle, maksimum güç noktası izleme durumunda güneş paneli karakteristiğin sağ bölgesinde çalıştırılmalıdır. Aksi halde güneş paneli maksimum darbe boşluk durumunda çalışırken, güneş paneli gerilimi de güneşlenme durumuna göre değişecektir. Böylece sistem maksimum güç noktası izlemeye ulaşamayacak ve yanlış noktada çalışacaktır [85, 86].

Güneş paneli kaynak olarak kullanılan elektrik sistemlerde, panellerin yapısından dolayı çekilen akıma göre çıkış geriliminde doğrusal olmayan bir değişim oluşur. Bu değişim Şekil 1.12'de görülmektedir. Panellerin çıkış gerilimi, çekilen akıma bağlı olduğu gibi, panellerin üzerinde düşen güneş ışığı yoğunluğuna ve ortam sıcaklığına bağlı olarak da farklılık göstermektedir. Ticari güneş panellerinin anılan çıkış gücü, birim alana düşen güneş ışığı yoğunluğunun 1000W/m^2 olduğu ortamda, panelin üretebildiği elektrik enerjisi olarak tespit edilmiştir. Anılan çıkış gücünün güneş panelinin verebileceği maksimum güç olduğu varsayılır. Güneş ışığı yoğunluğu düştükçe güneş panelinden çekilebilecek akımında azaldığı Şekil 1.12'deki eğride görülmektedir.



Şekil 1.12. Güneş paneli akım-gerilim ve güç-gerilim eğrisi

Şekil 1.12'de 1000W/m^2 güneş ışığının olduğu bir ortamda çekilen akım 2,3 A iken gerilimin 19 V olduğu görülmektedir (A noktası). Bu durumda A noktasındaki üretilen güç 43,7 W'tır. Yine aynı güneş ışığı ortamında güneş panelinden çekilen akımın 3A noktasında çalıştırıldığında eğride çıkış geriliminin 17 V'a düştüğü görülmektedir (B noktası). Yeni akım gerilim değerlerine göre üretilen güç 51 W olmaktadır. Aynı durumda C noktasından 3,2 A çekilmesine karşılık çıkış geriliminin 14 V'a düştüğü görülmektedir. C noktasındaki üretilen güç 44,8 W olmaktadır.

Bu değerler sonucunda aynı güneşlenme ortamında, yükün giderek artmasına karşın güneş panelinden alınabilecek güç miktarı doğrusal olmayan bir şekilde farklılık göstermektedir. Bir noktaya kadar üretilen güç yüke bağlı olarak artmakta fakat bir

noktadan sonra yükün artmasına rağmen üretilen güçte azalma olmaktadır. Eğer bu durum kontrol altında tutulmazsa sistem düşük bir verimle çalışacaktır. MGNİ sistemleri değişim gösteren bu çıkış gücünü hep tepe noktasında tutmaya çalışmaktadır. MGNİ devreleri basit bir akım sınırlayıcıdan çok daha öte bir tasarım alt yapısını içermektedir [87-89].

1.4.2. Maksimum güç noktası izleme teknikleri

Değişen sıcaklık ve ışınım durumlarında, FV panelin MGN'si sürekli değişmekte dolayısıyla FV sistemin çalışma noktasını maksimum güç üretecek şekilde değiştirmemiz gerekmektedir. Bu nedenle de MGNİ teknikleri FV panellerin MGN'da çalışmasını sağlamak için kullanılır. FV panellerin maksimum güç noktasını yakalamak için birçok MGNİ teknikleri vardır. Yaygın olarak kullanılan bu teknikler;

• Sabit gerilim metodu
• Sabit akım metodu
• Kısa devre akım metodu
• Açık gerilim metodu
• Saptır-gözle metodu
• Artan iletkenlik metodu
• Sıcaklık metodudur [90].

1.4.2.1. Saptır-gözle metodu

Saptır-gözle metodu en sık kullanılan metotlardan biridir. Saptır-gözle yöntemi dalgalanan (artan veya azalan) FV panel terminal gerilim veya akımını aralıklarla değiştirir ve FV çıkış gücünü bir önceki güç değeri ile karşılaştırarak çalışır. FV panel çalışma gerilimi değişir ve eğer güç yükselirse kontrol sistemi FV çalışma noktası bu yönde değişir aksi takdirde çalışma noktası ters yönde hareket eder. Sonraki diğer çevrimde algoritma aynı şekilde devam eder. Saptır-gözle yönteminde FV çıkış gücü sürekli olarak izlenir ve kontrol değişkeninin hareketi ile gücün hareketi arasında bir bağıntı kurularak referansın azaltılmasına ya da artırılmasına karar verilir. Atmosferik koşulların hızla değişimine karşı tepkisinin yavaş olması ve ani değişimlerde maksimum güç noktasını yanlış yönde arama gibi zayıflıkları mevcuttur. Sistem sürekli olarak değiştir gözle işlemini yaptığından MGN'a

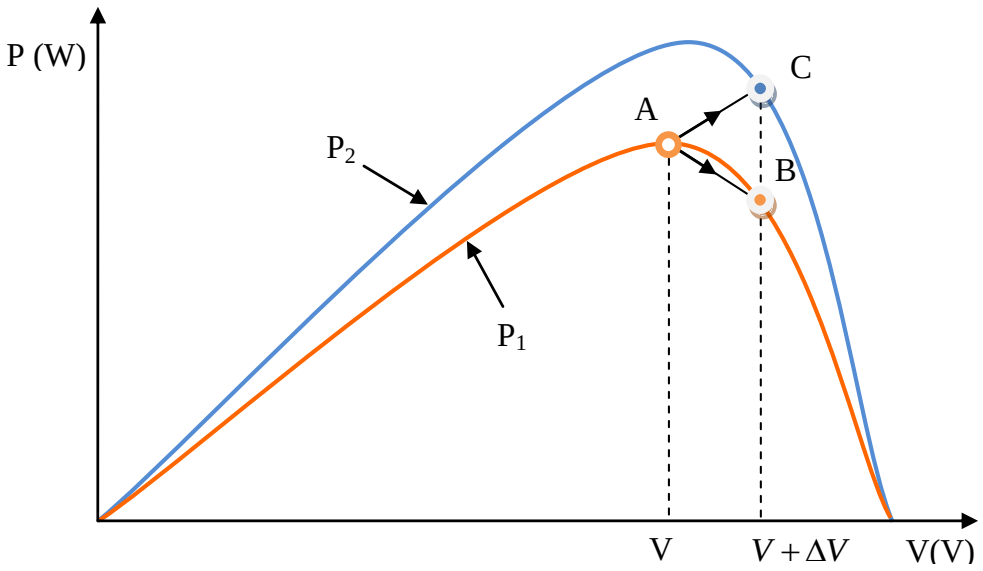
ulaştığında burada sabitlenmez. MGN civarında sürekli olarak osilasyon yapar ve sistemde bir miktar güç kaybı olur.

Şekil 2.6'da MGN noktasının sol tarafında iken gerilim arttığında güç de artarken, MGN noktasının sağ bölgesinde ise gerilim arttığında güç de azalmaktadır. Bu nedenle, eğer güçte bir artma varsa bir sonraki saptırma MGN noktasına ulaşmak için aynı tutulmalı ve eğer güçte bir azalma varsa saptırma terse çevrilmelidir. Bu durum Tablo 1.4'de detaylı olarak açıklanmaktadır.

Tablo 1.4. Saptır-gözle değişim verileri [85]

Saptırma	Güçteki Değişim	Sonraki Referans değişimi
Pozitif	Pozitif	Pozitif
Pozitif	Negatif	Negatif
Negatif	Pozitif	Negatif
Negatif	Negatif	Pozitif

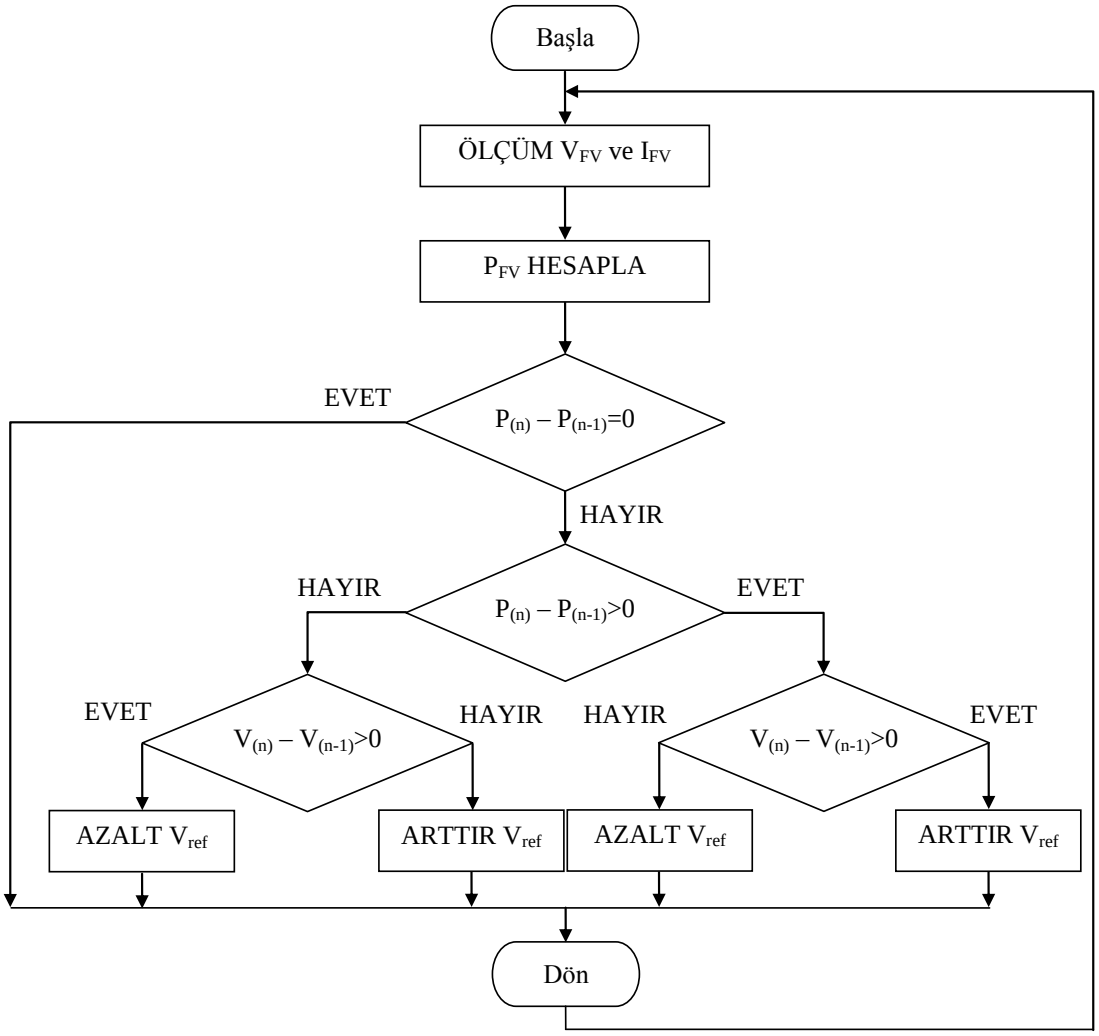
Tablo 1.4 verilen darbe oranına göre gücün değişimini esas alarak oluşturulmuştur. Saptır-gözle MGNİ algoritması güce göre gerilim ya da güce göre akım değişimi esas alınarak da uygulanabilir. Kıyaslama işlemi sonucunda maksimum güç noktasına ulaşılmayı sağlayacak bir sonraki darbe genişlik oranına karar verilir.



Şekil 1.13. Saptır-gözle metodundaki MGN farklılıkları

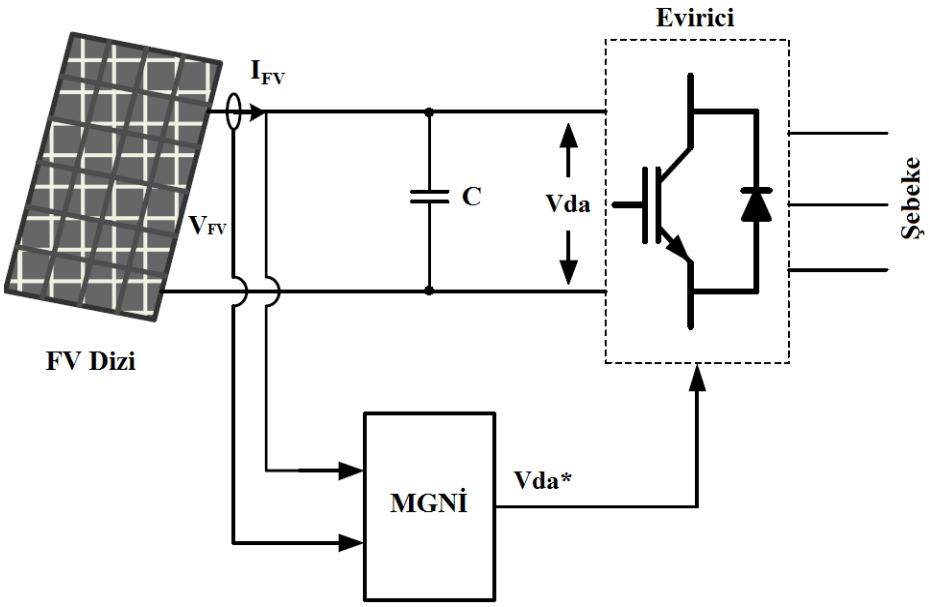
Saptır-gözle yöntemi, Şekil 1.13'de görüldüğü gibi hızlı değişen atmosferik koşullarda hatalı çalışabilmektedir. A noktasında çalışmaya başlandığında, atmosferik koşullar yaklaşık sabit kaldığında, FV gerilimindeki ΔV kadar bir saptırma, işletim noktasını B'ye taşıyacak ve güçteki azalma nedeniyle bir sonraki saptırma tersine dönecektir. Bununla birlikte, eğer güneşlenme artarsa, bir örnekleme zamanı içinde güç eğrisi P_1'den P_2'ye kayar, işletim noktası da A'dan C'ye doğru taşınır. Bu güçte bir artma anlamına gelir ve saptırma aynı tutulur. Bu yüzden, işletim noktası MGN'dan ayrılır ve eğer güneşlenme sürekli artarsa işletim noktası MGN'dan ayrı kalmaya devam eder. Anlık olarak değişen güneşlenme durumunda bile MGN'nın takip edilmesini sağlamak üzere saptırma işareti kararı vermeden önce gerçek güç noktası iki önceki nokta ile karşılaştırılarak üç nokta ağırlık karşılaştırması yapılır.

Şekil 1.14'de saptır-gözle algoritmasının akış diyagram şeması verilmiştir. Bu algoritmada öncelikle sensörlerden gelen akım ve gerilim değerleri okunarak FV panelin gücü hesaplanır. Bu güç değeri daha önceki değer ile karşılaştırılarak kıyaslama yapılır. Eğer güçte artma veya azalma var ise FV panelin güçteki olduğu gibi gerilimi bir önceki gerilim değeri ile karşılaştırılır. Eğer güçte azalma olup gerilim değerinde de artma meydana gelirse MGN'nın sağ bölgesinde saptır-gözle yapıldığı tespit edilir ve MGN'ı yakalayabilmek için referans gerilim değerimizi azaltmamız gerekir. Fakat, aynı şekilde güçte azalma olup gerilim değerinde de azalma meydana gelirse MGN'nın sol bölgesinde saptır-gözle yapıldığı tespit edilir ve MGN'ı yakalayabilmek için referans gerilim değerimizi arttırmamız gerekir. Bu işlem MGN'a ulaşılana kadar sürmekte ve ardından sistem MGN etrafında salınmaktadır. Bu örnekleme adımı büyük olursa sistem, MGN'a uzak noktalarda salınım yapacağından panellerden alınacak toplam enerji miktarını azaltır. Bununla birlikte, daha küçük boyutta bir saptırma MGNİ'yi yavaşlatır ve geç tepki süresine neden olur. Bunun çözümü olarak da MGN'a doğru daha değişken saptırma kullanarak küçültmek önerilmektedir [82,83,85,86].



Şekil 1.14. Saptır-gözle algoritmasının akış diyagramı şeması

Bu tez çalışmasında tasarlanan tek aşamalı FV sistemde MGNİ yöntemi olarak Saptır-Gözle algoritması kullanılmaktadır. FV sistemde DA/DA dönüştürücüsü olmadığından MGNİ, DA bara gerilim denetleyici ile tümleşik olarak çalışmaktadır ve çıkışında DA gerilim referansı (V_{da*}) üretmektedir. Tek aşamalı FV sistemlerde MGNİ'ye ilişkin blok gösterimi Şekil 1.15'de verilmektedir. Tek aşamalı sistemler ve diğer evirici mimarileri Bölüm 2 de ayrıntılı olarak ele alınmaktadır.



Şekil 1.15. Tek aşamalı FV sistemlerde MGNİ'ye ilişkin blok gösterim

1.5. Fotovoltaik Sistemlerin Tarihsel Gelişimi

1.5.1. Dünyadaki durum

Dünya'da fotovoltaik enerji sistemleri, ilk olarak uzay araştırmalarında elektrik enerjisi üretmek amaçlı kullanılmıştır. 1970 ve 80'li yıllarda, fotovoltaik (FV) pazarı hızla büyüdü. Özellikle Dünya'daki petrol krizi ile alternatif enerji kaynakları birden önem kazanmıştır.

Ülkeler kendi FV pazarlarını genişletmek ve bağımsız, temiz enerji üretimlerini arttırmak için çeşitli destekleme programları oluşturmuşlardır. İlk olarak Japonya "Ev FV sistemlerini yayma programı (Residential PV Systems Dissemination Programme)" ile 1999 yılının sonunda 120 MWp yaklaşık 30.000 evin çatısı FV sistemlerle donatıldı.

Hollanda, Avustralya, İsviçre ve Amerika gibi ülkeler farklı yöntemlerle şebekeye bağlı FV sistemleri kullanmayı teşvik ettiler. Bu da FV pazarında büyük hareketliliğe neden oldu maliyetler çok düştü. FV panel üretim hızı arttıkça buna paralel olarak maliyetlerin düşüş hızı da arttı. FV Paneller, FV sistemlerin maliyetlerinin yaklaşık %50-70'ini oluşturduğu için maliyetlerindeki düşüş direkt olarak FV sistemlerin maliyetlerine yansıdı. Gelişen teknolojide FV sistem fiyatlarını daha da azalttı.

Dünya genelinde 2009 yılında toplam FV güç kapasitesi 23 GW'ın üzerindeyken bu değer 2010 yılı sonunda 40,3 GW, 2011 yılı sonunda ise 70,5 GW değerine ulaşmıştır. 2012'de 100 GW olan toplam FV kapasitesi 2013 yılında 138,9 GW'a ulaşmıştır. Kurulan bu 138,9 GW'lık güç ile her yıl 160 TWh elektrik üretilebilir. Bu enerji miktarı 45 milyon hanenin yıllık elektrik enerji ihtiyaçlarını karşılamak için yeterlidir [91]. Tablo 1.5'de 2011, 2012 ve 2013 yıllarında yeni kurulan ve toplam FV kapasiteleri ülkelere göre verilmiştir.

Tablo 1.5. Dünya genelinde 2011-2013 (MW) FV kapasiteleri [92]

Ülkeler	**Toplam 2011 (MW)**	**Toplam 2012 (MW)**	**Toplam 2013 (MW)**
İtalya	12.923	16.361	17.928
Almanya	24.807	32.411	35.715
Çin	3.300	8.300	18.600
ABD	4.431	7.777	13.727
Fransa	2.924	4.003	4.673
Japonya	4.914	6.914	13.758
Avustralya	1.412	2.412	3.233
Büyük Britanya	904	1.829	3.375
İspanya	4.889	5.166	5.340
Yunanistan	624	1.536	2.579
Slovakya	508	523	524
Kanada	497	765	1.312
Hindistan	225	1.205	2.300
Türkiye	7	9	18

Çin 2013 yılında FV pazarında 11,8 GW'lık yeni bir sistem bağlayarak birinci, 6,9 GW'lık sistem ile Japonya ikinci olmuştur. Bu iki büyük FV pazarını 4,8 GW'lık FV sistem ile ABD takip etmektedir. 2020 sonlarına doğru toplam 27 Avrupa ülkesinde sadece 249,350 MW'tın üzerinde bir FV sistemden enerji üretilmesi planlanıyor. Böylece FV, küresel toplam kurulu güç kapasitesi açısından hidrolik ve rüzgar enerjisinden sonra gelen en önemli üçüncü yenilenebilir enerji kaynağıdır.

Tablo 1.6'da 2020 ve 2030 yılları için öngörülen toplam FV sistem kapasiteleri verilmiş ve 2020 yılındaki tahmin değeri ile Almanya 65,000 MW'lık FV kapasitesiyle birinci konumdadır [93-95].

Tablo 1.6. Avrupa ülkelerinde 2020-2030 (MW) FV kapasite tahminleri [93]

Ülkeler	**Hızlandırılmış 2020 Senaryoları**	**Hızlandırılmış 2030 Senaryoları**
Avusturya	4.000	10.000
Belçika	7.000	13.000
Bulgaristan	3.000	6.500
Kıbrıs	300	800
Çek Cumhuriyeti	4.000	9.000
Danimarka	1.000	2.500
Estonya	400	800
Finlandiya	1.000	2.000
Fransa	30.000	70.000
Almanya	65.000	100.000
Yunanistan	8.000	16.000
Macaristan	2.000	5.000
İrlanda	400	2.000
İtalya	42.000	65.000
Letonya	400	800
Litvanya	400	1.000
Lüksemburg	400	1.000
Malta	250	400
Hollanda	3.000	15.000
Polonya	5.000	20.000
Portekiz	3.000	8.000
Romanya	5.000	10.000
Slovakya	3.000	6.000
Slovenya	1.500	3.000
İspanya	18.000	45.000
İsviçre	1.000	6.000
Büyük Britanya	20.000	40.000
Toplam 27 AB	229.050	458.800

1.5.2. Ülkemizdeki durum

Türkiye' de toplam fotovoltaik (FV) kurulu güç 2014 yılı için yaklaşık 21 MWp değerine ulaşmıştır [96]. Türkiye'de güneş enerjisi sektörünün yakın zamandaki tarihsel gelişimi şu şekilde özetlenebilir [97];

• Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Enstitüsü şemsiyesi altında ve proje yürütücülüğünde çeşitli kamu kuruluşlarının, üniversitelerin ve sanayi kuruluşlarının katılımı ile TÜBİTAK-Bilimsel ve Teknolojik İşbirliği Ağları ve Platformları (İŞBAP) desteği çerçevesinde "Ulusal FV Teknoloji Platformunun Oluşturulması" başlıklı proje, 01/09/2008 tarihinde başlayarak 3 yıllık bir süre boyunca desteklenmesine karar verildi. Bu projenin temel hedefi; Türkiye'de ulusal FV teknoloji platformunun oluşturulması ve bu platformun ülkemizdeki FV alanındaki teknolojilerin gelişimi için etkin plan ve programları belirlenmesini sağlamaktı.

• 2010 Yılı sonlarında yenilenebilir enerji konusundaki özendirici kanun değişiklikleri sektörün çalışmalarını hızlandırdı.

• 2010 yılında İzmir Orman İdaresinin "Güneş Enerjisi ile Beslenen Gözetleme Kuleleri" projesi İzmir Kalkınma Ajansı (İZKA) tarafından desteklendi. Proje kapsamında 2040 Wp kapasiteli FV sistem kuruldu.

• 2010 yılında Manisa'nın Turgutlu ilçesinde inşaat halindeki 300 yataklı devlet hastanesinin, elektrik ihtiyacını güneş enerjisinden sağlaması için yüklenici firma tarafından proje hazırlandı.

• 2010 yılında Gazi Üniversitesi 5440 Wp kapasiteli FV sistem projelendirdi.

• 2010 yılında Kocaeli Üniversitesi ince film güneş panelleri içeren 360 Wp kapasiteli FV sistem projelendirerek, eviriciler, güç kalitesi ve şebeke bağlantısı konularında çalışmalarını sürdürdü. Kocaeli Büyükşehir Belediyesi ve Kocaeli Üniversitesi işbirliği ile 3 KWp kapasiteli güneş takip yeteneğine sahip FV sistem geliştirildi.

• 2010 yılında Antalya Büyükşehir Belediyesi Antalya'ya "Güneş Şehir" kimliği kazandırmak amacıyla yapılacak çalışmalara ilişkin yol haritası da içeren uzun soluklu bir program başlattı.

• 2011 yılında Teknologis Ankara'da "Solar Lab Turkey" isimli 300 KW kapasiteli araştırma tesisi kurdu. Tesiste çeşitli tipte güneş panelleri, eviriciler ve güneş izleyicisi teknolojileri gerçek iklim koşullarında test edilmektedir. Teknologis, Ankara Hacettepe Teknokent' de 420 kW kapasiteli FV sistem inşasına başladı.

• 2011 yılında Antalya Büyükşehir Belediyesi Türkiye'de ilk "Temiz Enerji Ofisi"ni açtı.

• 2011 yılında Enisolar Ltd. Bosch Bursa Fabrikasında 10 kW şebeke bağlantılı/çift eksen güneş izleyicili FV sistem kurdu.

• 2011 yılında Motif Proje Ltd. Samsun'da 6 kW şebeke bağlantılı FV sistem kurdu. Ayrıca Motif Proje Ltd. Odtü-Günam'da 3,5 kW ve Ankara'da sulama amaçlı 2,2 kW FV sistem kurdu.

• 2011 yılında Girasolar Ltd. Ak An Yapı için 15 kW şebeke bağlantılı FV sistem kurdu.

• 2012 yılında Halk Enerji Ltd. Ankara'da Hacettepe Teknokent için 420 kW şebeke bağlantılı FV sistem kurdu.

• 2012 yılında IBC Solar Ltd. Konya'da MEDAŞ için 200 kW şebeke bağlantılı FV sistem kurdu.

• 2012 yılında Anel Enerji Ltd. Muğla'da Muğla Belediyesi için 105 kW şebeke bağlantılı FV sistem kurdu.

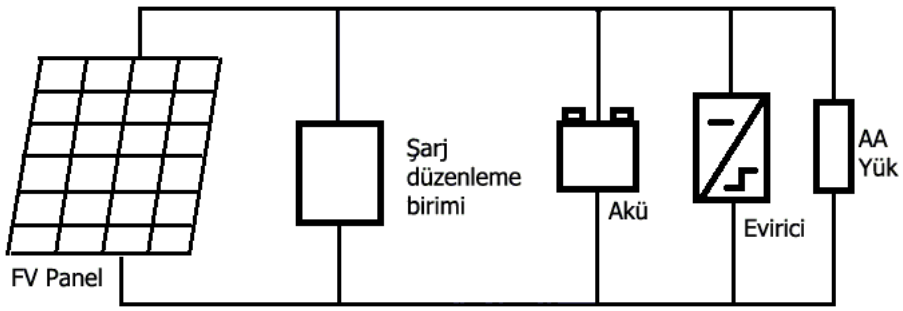
• 2013 yılında 1 MW altı projeler lisans alımını gerektirmediğinden küçük ölçekli güneş enerjisi sektöründe olumlu beklentiler ortaya çıkmıştır. Toplam kapasitesi 62 MW'ı bulan 199 FV projesi TEDAŞ'a sunulmuş ve 2013 yılı sonunda bunların 6 MW'lık kısmı ön kabul almıştır.

1.6. Fotovoltaik Sistemlerin Sınıflandırılması

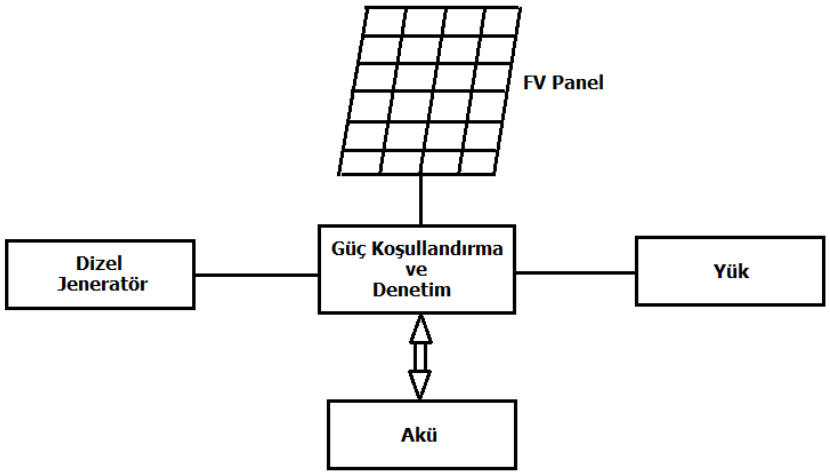
Fotovoltaik sistemler üç grupta sınıflandırılabilir [98];

- Şebekeden bağımsız FV sistemler
- Şebeke bağlantılı FV sistemler
- Hibrit FV sistemler

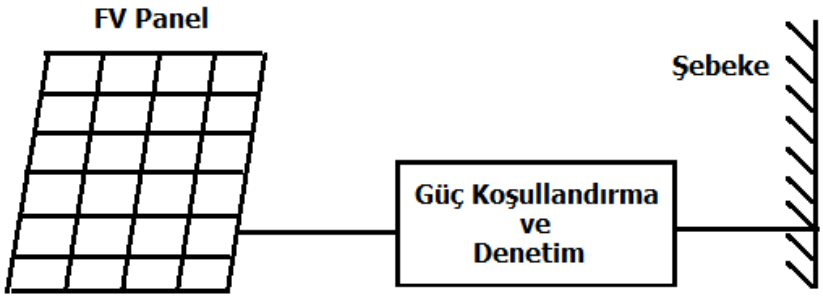
Şebekeden bağımsız FV sistemler Şekil 1.16'da gösterilmektedir. Şebekeye uzak bölgelerde kullanılırlar. Şebekeden uzak bölgelerde sıklıkla geleneksel enerji sistemleri olarak el ile kumanda edilen dizel jeneratörler kullanılmaktadır. Dizel jeneratörlerin uzun süreli kullanımı maliyeti arttırmakta ve sistemin kullanım ömrünü azaltmaktadır. Şebeken uzak bölgelerde, dizel veya başka bir fosil yakıt ile çalışan enerji sistemine güneş enerjisi gibi bir yenilenebilir enerji kaynağı 24 saat boyunca ekonomik ve güvenilir olarak enerji sağlamak için eklenebilir. Bu tür sistemler hibrit sistemler olarak adlandırılır. Şekil 1.17'de FV-Dizel hibrit sistem şeması gösterilmektedir. Şekil 1.18'de gösterilen şebeke bağlantılı FV sistemlerde FV paneller evirici aracılığıyla batarya depolaması olmaksızın şebekeye bağlanır. Bu sistemler çatı üzerine yerleştirilen küçük sistemler veya şebeke bağlantılı büyük sistemler olarak sınıflandırılabilir.



Şekil 1.16. Şebekeden bağımsız FV sistem



Şekil 1.17. FV-Dizel hibrit sistem



Şekil 1.18. Şebeke bağlantılı FV sistem

1.6.1. Şebekeden bağımsız sistemler

Şebekeden bağımsız FV sistemlerin iki ana uygulaması vardır. Bunlar batarya şarj etme ve su pompalama uygulamalarıdır. Şebekeden bağımsız FV enerji sistemleri güneş ışınımının yetersiz olduğu zamanlarda veya gece olduğunda enerji talebini karşılamak için depolama sistemlerine gereksinim duyar. Kurşun asit, nikel kadminyum, lityum gibi çeşitli akü türleri mevcuttur. FV güç sistemlerinin geliştirilmesi için depolama sistemlerinin maliyetli oluşu önemli bir engel teşkil etmektedir. Genel olarak kurşun asit aküler enerji depolamada kolay temin edilme ve uygun maliyet sebebiyle tercih edilir.

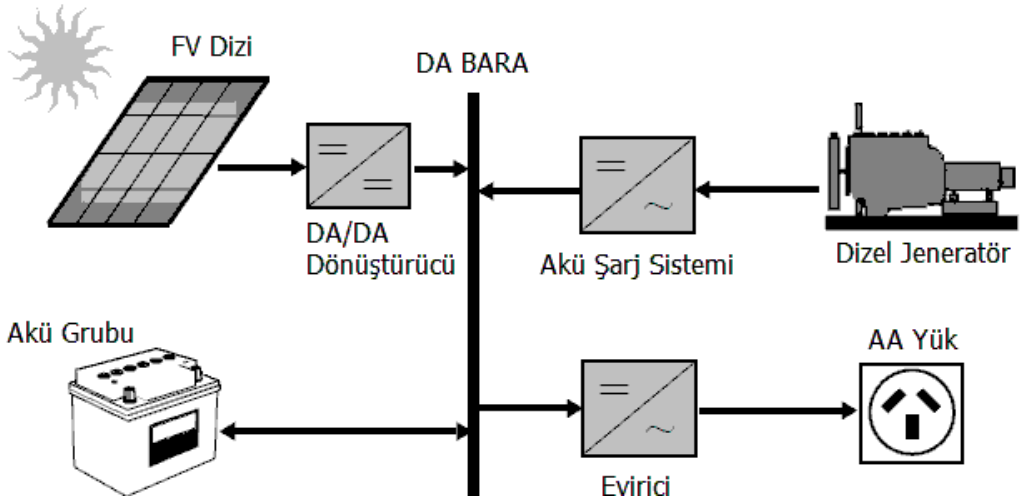
Birçok uzak ve kırsal alanlarda el pompaları veya dizel pompalar sulama amaçlı kullanılır. Dizel pompalar, fosil yakıt kullandıklarından dolayı çevreye zarar verirler, çok bakıma ihtiyaç duyarlar ve güvenilirlikleri düşüktür. FV enerji kaynaklı su pompaları güç elektroniği sistemleri ve FV hücre malzemelerindeki büyük gelişmeler sayesinde büyük ilgi görmektedir.

1.6.2. Hibrit sistemler

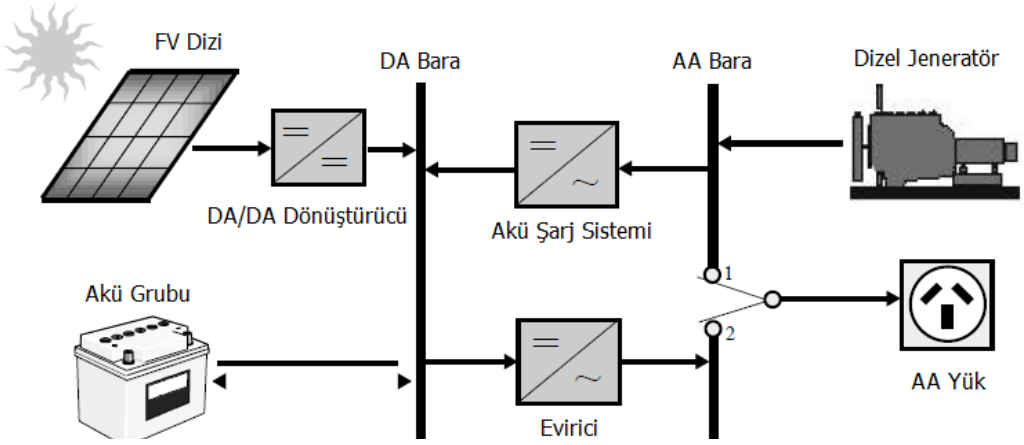
FV dizel hibrit enerji sistemleri, bir FV panel bağlantılı evirici ile makine tarafından tahrik edilen jeneratorü birleştirerek AA elektrik üretir. Bu sistemler yapılarına bağlı olarak aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir;

- Seri hibrit enerji sistemleri
- Anahtarlamalı hibrit enerji sistemleri
- Paralel hibrit enerji sistemleri

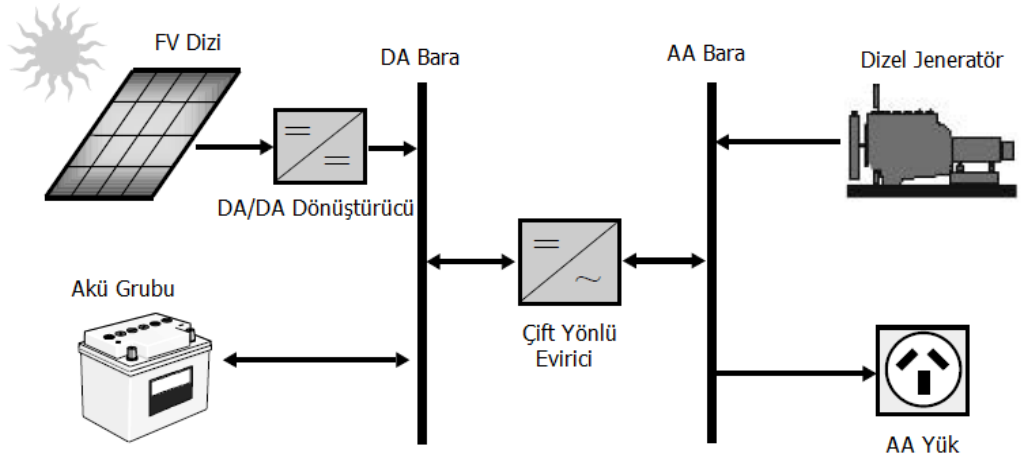
Bu sistemlere ait blok diyagramlar sırasıyla Şekil 1.19, 1.20 ve 1.21'de gösterilmektedir.



Şekil 1.19. Seri hibrit enerji sistemleri [98]



Şekil 1.20. Anahtarlamalı hibrit enerji sistemleri [98]



Şekil 1.21. Paralel hibrit enerji sistemleri [98]

1.6.3. Şebeke bağlantılı FV sistemler

Fotovoltaik elektrik üretim sistemleri temel olarak şebeke bağlantılı ve şebekeden bağımsız olmak üzere ikiye ayrılır. Şebeke bağlantısız sistemler mevcut yükleri beslemek için kullanılırken şebeke bağlantılı sistemler de mevcut yüklerin ihtiyacının haricinde üretilen fazla güç şebekeye aktarılmaktadır. Bu konu ile ilgili ayrıntılı bilgi Bölüm 2'de verilmektedir.

1.7. Türkiye'de Güneş Enerjisi ile İlgili Yasal Düzenlemeler

Ülkemiz için Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretimine İlişkin Yönetmeliğin Uygulanmasına Dair Tebliğ 10 Mart 2012 Tarih ve 28229 Sayılı Resmi gazetede yayınlanmıştır.

Bu şekilde Aralık 2011 tarihinde yayınlanan tebliğ taslağı, söz konusu yönetmelik düzeltmesi ve uygulama tebliği ile son haline getirildi. Sonuç olarak elektrik tüketicileri (tüzel ya da gerçek kişiler) ürettikleri ihtiyaç fazlası elektrik enerjisini dağıtım şirketlerine satma imkânına kavuştular. Söz konusu yasa çerçevesinde getirilen yeni uygulama, lisanssız yenilenebilir enerji yatırımlarının daha verimli çalışması sonucunu doğuracağı için genel anlamda lisanssız pazarın gelişmesini sağlayacaktır.

Her bir tüketim tesisi için bir adet kojenerasyon tesisi ya da mikro kojenerasyon tesisi ya da yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı üretim tesisi kurulması esas alındı. Ancak dağıtım sisteminde yeterli kapasite bulunması halinde bir tüketim tesisi

için birden fazla yenilenebilir enerji kaynağına dayalı üretim tesisi ya da tesisleri kurulmasına izin verilebilecektir. Bu tesislerin toplam kurulu gücü 1 MW dan büyük olamayacaktır.

Bu yönetmelik kapsamında, Mikro kojenerasyon veya kurulu gücü azami 1 MW olan yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı üretim tesislerinde üretim faaliyetinde bulunan gerçek veya tüzel kişiler lisans alma ve şirket kurma yükümlülüğünden muaf olmaktadır. Lisanssız üretimin kişinin kendi ihtiyacı için yapılması esas alınmaktadır. Ancak; Gerçek/tüzel kişilerce kurulan YEK'e dayalı tesislerde, Gerçek / tüzel kişilerce kurulan kojenerasyon tesislerinde, üretilen elektrik enerjisinin üretim tesisi ile aynı yerde kurulu tüketim tesisinde ya da tesislerinde tüketilemeyen miktarı aynı kişinin uhdesindeki, üretim tesisiyle aynı yerde olmayan bir tüketim tesisinde ya da tesislerinde tüketilebilir. Gerçek veya tüzel kişilerce kurulan bu yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı üretim tesislerinde üretilen elektrik enerjisinin tüketimi aşan kısmını dağıtım şirketine satabilecektir.

Yenilenebilir enerji kaynakları için 5346 sayılı kanunda belirtilen fiyatın uygulanacağı, üretim tesislerinde kullanılan makine ve/veya elektromekanik aksamın yüzde yetmiş beşinin yerli üretim girdilerinden oluştuğunun belgelendirilmesi halinde Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu (EPDK) onaylı perakende satış tarifesi uygulanacaktır.

Kanun teklifinde, güneş enerjisine dayalı üretim tesisleri için on yıl süreyle 13,3 ABD Doları cent/kWh alım garantisi verilmiştir. Yerli üretim durumunda ise üretim tesisinin işletmeye giriş tarihinden itibaren beş yıl süreyle ABD Doları cent/kWh olarak verilen ilave destekler Tablo 1.7'de gösterilmektedir.

Tablo 1.7. Yerli üretim durumunda verilen ilave destekler

	Yurt İçinde Gerçekleşen İmalat	Yerli Katkı İlavesi $ cent/kWh
Fotovoltaik Güneş Enerjisine Dayalı Üretim Tesisi	1- PV Panel entegrasyonu ve güneş yapısal mekaniği imalatı	0,8
	2- PV Modülleri	1,3
	3- PV Modülünü oluşturan hücreler	3,5
	4- İnvertör	0,6
	5- PV Modülü üzerine güneş ışınını odaklayan malzeme	0,5

Tablo 1.8. Bölgelerin Maksimum Kapasiteleri [99]

	BÖLGELER	KAPASİTE(MW)		BÖLGELER	KAPASİTE(MW)
1	Konya (1)	46	15	Isparta Afyon	18
2	Konya (2)	46	16	Denizli	18
3	Van-Ağri	77	17	Bitlis	16
4	Antalya (1)	29	18	Bingöl Tunceli	11
5	Antalya (2)	29	19	Şırnak	11
6	Karaman	38	20	Adana Osmaniye	9
7	Mersin	35	21	Muş	9
8	Kahramanmaraş Adıyaman	27	22	Siirt Batman Mardin	9
9	Burdur	26	23	Sivas	9
10	Niğde Nevşehir Aksaray	26	24	Elazığ	8
11	Kayseri	25	25	Şanlıurfa Diyarbakır	7
12	Malatya Adıyaman	22	26	Erzurum	5
13	Hakkari	21	27	Erzincan	3

Güneş enerjisi ile elektrik üretimi için Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından enerji bölgeleri belirlenmiştir. Toplamda 27 bölge 38 şehir belirlenerek elektrik üretimi için teşvik edilmiştir. En yüksek kapasite 92 MW ile Konya olurken Van 77 MW, Mersin 35 MW'la takip etmektedir. Güneş enerjisi, Türkiye genelinde kurulu güç 600 MW'ı geçmeyecek şekilde belirlenmiştir. Tablo 1.8'de belirlenen bu şehirlerin maksimum elektrik enerjisi üretim kapasiteleri verilmiştir [96, 79].

2. ŞEBEKE BAĞLANTILI FOTOVOLTAİK SİSTEMLER

2.1. Giriş

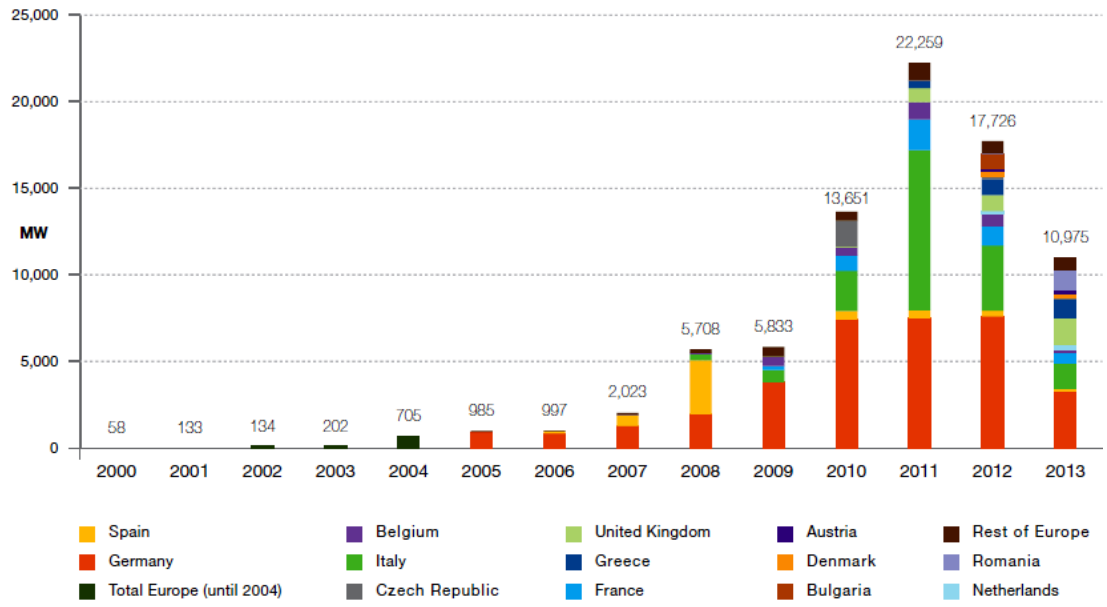
Fotovoltaik sistemler her geçen gün elektrik enerjisi üretimindeki payını artırmakta, birçok devlet çeşitli program ve teşvikler ile bunu desteklemekte ve birçok firma bu konuya yatırım yapmakta, araştırma geliştirme çalışmaları yürütmektedir. Ülkemiz güneşlenme açısından bakıldığında bu konuda yatırım ve kurulum yapan pek çok ülkeye göre daha avantajlı konumdadır.

Şebeke bağlantılı fotovoltaik elektrik üretim sistemlerinin gücü, birkaç kW' tan birkaç MW'lara kadar değişebilmektedir. Şebeke bağlantılı FV sistemleri yüksek güçte, santral boyutunda sistemler şeklinde olabileceği gibi daha çok görülen uygulamalar ise binalarda küçük güçlü uygulamalar şeklindedir. Bu tür sistemler, iki ana gruba ayrılır. İlk tür sistem, temelde bir yerleşim biriminin mesela, bir konutun elektrik ihtiyacını karşılamaktadır. Bu sitemlerde, üretilen fazla enerji elektrik şebekesine verilir. Yeterli enerjinin üretilmediği durumlarda şebekeden enerji satın alınır. Böyle bir sistemde enerji depolaması yapmaya gerek yoktur, yalnızca üretilen doğru akım elektrik enerjisinin, alternatif akım elektrik enerjisine çevrilmesi ve şebeke uyumlu olması yeterlidir. İkinci tür şebekeye bağlı fotovoltaik sistemleri kendi başına elektrik üretip, bunu şebekeye satan büyük güç üretim merkezleri şeklindedir. Bunların büyüklüğü 600–700 kW'tan onlarca MW'lara kadar değişmektedir.

Şekil 2.1'de 2000 den 2013 yılına kadar Avrupa'da şebekeye bağlı FV sistemler için kurulu güç artışı grafiksel olarak gösterilmektedir. Bu durum dünya çapında FV kapasite artış oranının ve bu konuya verilen önemin arttığının bir göstergesidir.

Fotovoltaik sistemlerde kullanılan panellerin yüksek kurulum maliyeti ve sınırlı bir ömre sahip olmaları, bu sistemden maksimum güç elde etmeyi zorunlu hale getirmektedir. FV panellerinin doğrusal olmayan I-V karakteristikleri ve yeryüzünün güneş etrafındaki dönüşü, fotovoltaik enerji üretim sistemi için maksimum güç

noktası takibi (MGNİ) uygulamasını daha da zor hale getirmektedir. Bu bağlamda, şebeke bağlantılı FV sistemleri, maksimum güç noktası takibini sağlamak için batarya takviyesi gerektirmediğinden çok popüler hale gelmiştir.



Şekil 2.1. Avrupa'da 2000-2013 yılları arasında şebekeye bağlı FV sistemlerdeki kurulu güç değişimi [92]

Şebeke bağlantılı fotovoltaik sistem uygulamalarının bazı avantajları olarak, FV panel maliyetlerindeki azalma, çevre kirliliği oluşturmaması, AA yükleri besleme yeteneği, fotovoltaik sistemden şebekeye aktif güç aktarabilme yeteneği ve depolama gereksiniminin olmayışı sayılabilir.

2.2. Şebeke Bağlantılı FV Sistemlerin Sınıflandırılması

Şebekeye bağlı eviriciler, FV panellerin çıkışındaki gücü kontrol etmekle birlikte FV sistem çıkışının şebekeyle tam olarak senkronize olmasını sağlarlar. Bu sistemler aküsüz ya da akü depolamalı olabilir. Akü depolamalı sistemler ilave bir güç kaynağına sahip olduğundan daha güvenilirdir. Şebeke bağlantılı sistemler çeşitli teşvik ve indirimler sebebiyle tercih edilir hale gelmiştir. Bu sistemler mevcut olan güneş enerjisiyle kendi yükünü besleme konusunda müşteriye imkân verir ve fazla enerji şebekeye aktarılabilir. FV sistem şebekeye bağlandığında iki yolla güç akışı sağlanır. FV gücün fazlası şebekeye aktarılır. FV gücün yetersiz veya gece olduğu durumda tamamen veya kısmen yükler şebeke tarafından beslenir. Dünyanın çeşitli yerlerinde elektrik dağıtım şirketleri bu uygulamayı desteklemektedirler.

Şebeke bağlantılı sistemler aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

- Çatı üzerine yerleşik (roof-top) şebeke bağlantılı FV sistemler
- Şebeke ölçekli (grid-scale) büyük FV sistemler.

Küçük ölçekli FV ev uygulamaları için çatıya veya bina çevresinde uygun bir yere yerleşik FV dizileri en iyi çözüm olabilir. Bu şekilde yerleştirilen FV panel dizisi ile elde edilen FV enerji konut yükünü besleyebilir. Bu sistemler evsel yükleri besleyerek, enerji dağıtım şirketlerine yüksek enerji talebini azaltma konusunda yardımcı olabilmektedir. Üretilen enerjinin depolanması ışınım seviyesinin düşük olduğu gece saatlerinde veya bulutlu günlerde sistemin güvenilirliğini daha da arttırabilir. Fakat depolama, bakım ve yüksek maliyet gibi bazı sorunları beraberinde getirir.

Çatıya yerleşik uygulamalarda FV panel dizileri çatıda taşıyıcı bir yapı üzerine yerleştirilebildiği gibi direk olarak çatıya da yerleştirilebilir. Çatıdaki yerleşimin paneller arasındaki hava akışını engelleyecek biçimde olması panel sıcaklığının yükselmesine dolayısıyla enerji kayıplarının oluşmasına yol açar.

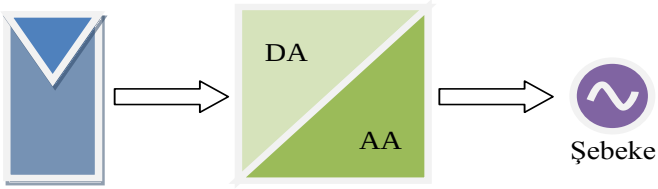
FV sistemlere olan ilgi büyük şebeke bağlantılı FV sistemler üzerinde odaklanmış durumdadır. Almanya'da, Amerika'da, İspanya'da ve dünyanın çeşitli ülkelerinde büyük FV sistemler kurulmaktadır.

2.3. Şebeke Bağlantılı FV Sistemlerde Evirici Mimarileri

Şebeke bağlantılı FV sistemlere dahil edilen aşama sayısı, bu sistemlerdeki genel verimlilik, güvenilirlik ve denetim karmaşıklığı gibi etkenler açısından önemlidir. FV sistemler aşama sayısına bağlı olarak tek aşamalı (single-stage) ve çift aşamalı (dual-stage) olmak üzere iki gurupta sınıflandırılabilir [81].

Fotovoltaik eviricilerin bir veya iki adet enerji çevrim katı bulunabilir [100]. Şekil 2.2'de bir adet enerji çevrim katına (DA/AA) sahip fotovoltaik evirici görülmektedir. Bu tek aşamalı (single-stage) yapıda sadece bir adet enerji çevrimi gerçekleştiği için yüksek enerji çevrim verimliliğine ulaşmak mümkündür. Yarı iletken anahtar ve kondansatör gibi pasif eleman sayısı çift katlı yapıya göre daha az sayıda olacağından, daha düşük maliyetli ve daha güvenilirdir. Ancak, tek katlı yapıda DA

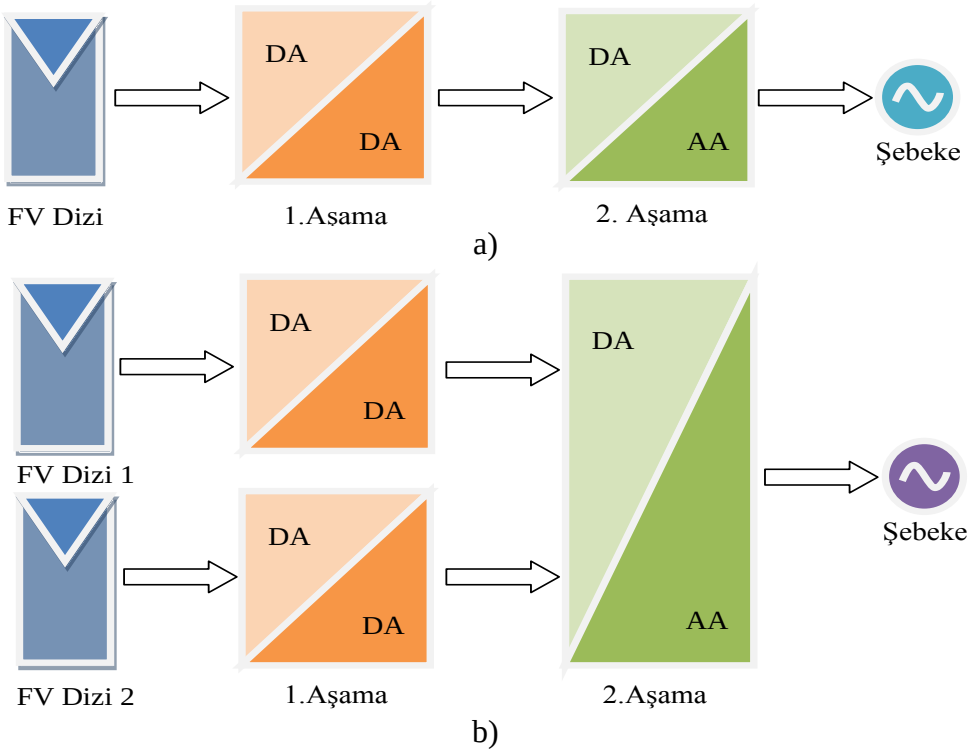
bara geriliminin şebeke geriliminin tepe değerinden daha yüksek olmalıdır. Bununla birlikte DA bara geriliminin yarı iletken anahtarların en yüksek dayanabileceği gerilimden daha düşük olması gerekmektedir. Dolayısıyla, DA bara gerilimi dar bir gerilim aralığında kalmaktadır. Bu nedenle tek katlı merkezi evirici yapısında seri bağlanabilecek güneş paneli sayısı dar bir aralıkta kalmaktadır. Çatı gibi dar alan uygulamalarında esnek olmayan panel sayısı ile tasarım yapmak bu açıdan sorun oluşturmaktadır.



Şekil 2.2. Tek aşamalı (single stage) evirici mimarisi

Bu yapıda MGN izleme, şebeke akımının denetimi ve gerilim yükseltilmesi gibi tüm görevler evirici tarafından gerçekleştirilmektedir. Tek aşamalı sistemlerde evirici, şebekeye sinüzodial güç aktarmanın yanında MGN'yi de takip etmelidir. Tek aşamalı şebeke bağlantılı FV sistemler, her iki döngüyü tek bir güç dönüşüm aşamasında eşzamanlı olarak gerçekleştirmekte ve böylece sistem topolojisi basitleştirilmektedir. [81].

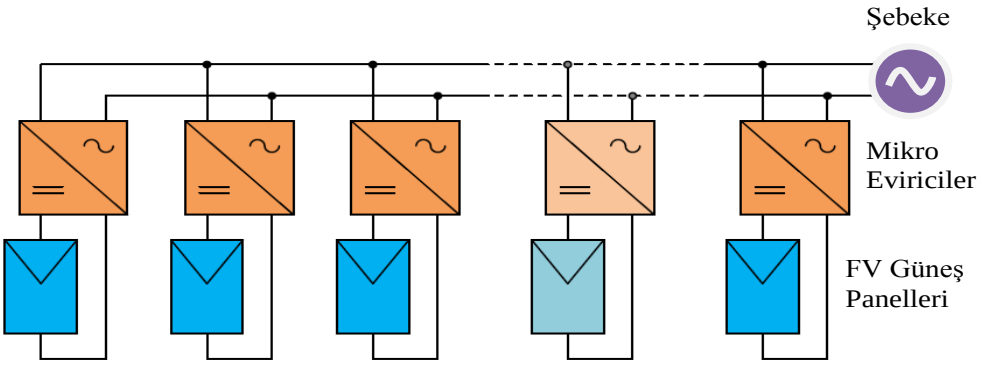
Diğer bir alternatif olan iki adet enerji çevrim katına sahip çift aşamalı (dual-stage) fotovoltaik dönüştürücü yapısı Şekil 2.3.a'da gösterilmektedir. Bu yapı, girişindeki DA/DA çevirici sayesinde geniş giriş gerilim aralığında çalışabilmektedir. Böylece seri bağlı güneş paneli sayısında esneklik mümkün olmaktadır. Ayrıca bazı yapılarda Şekil 2.3.b'de gösterildiği gibi DA/DA çeviriciden iki veya daha fazla bulunabilmektedir. MGN izleme DA/DA çeviriciler ile gerçekleştirildiğinden her panel dizisi kendi en yüksek güç noktasında çalışabilmektedir. Ancak iki kere enerji çevrimi gerçekleştiğinden dolayı bu yapının enerji çevrim verimliliği tek katlı yapıya göre daha düşüktür. SiC gibi yenilikçi anahtar teknolojileri kullanılarak, anahtarlama kayıpları düşürülebilir ve filtreleme elemanları küçültülebilir.



Şekil 2.3. Çift aşamalı (dual-stage) evirici mimarileri a) Tek DA/DA dönüştürücüsüne sahip çift aşamalı mimari b) Çoklu DA/DA dönüştürücüsüne sahip (multi-string) çift aşamalı mimari

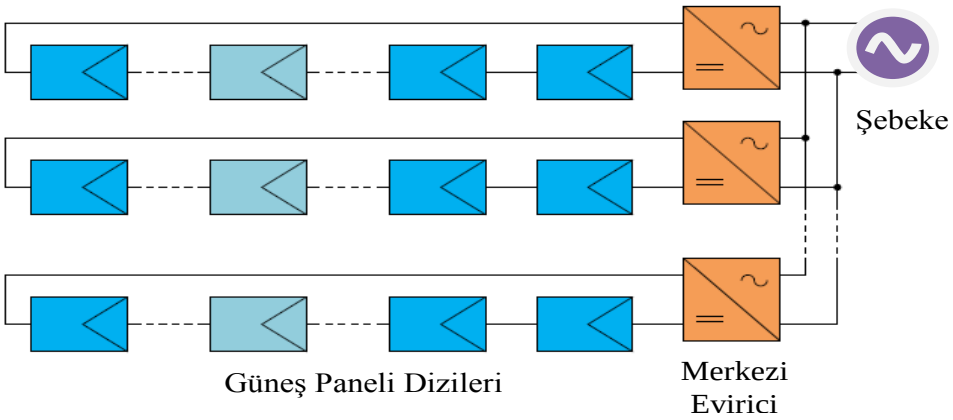
Şebeke bağlantılı fotovoltaik sistemlere güneş paneli ile evirici bağlantısı açısından bakıldığında değişik bağlantı mimarileri mevcuttur. Bunlar mikro eviriciler, dizi (string) eviriciler ve merkezi (central) eviriciler olmak üzere üç sınıfta incelenebilir.

Şekil 2.4'de gösterilen Mikro eviriciler, bağlandığı tek panelin enerjisini şebekeye aktarır. Bu sayede her mikro evirici bağlandığı paneli kendi maksimum güç noktasında çalıştırabilir [100]. Güneş panelleri üzerinde eşit güneşlenmenin sağlanamadığı veya çok sayıda panel yerleştirecek alanın bulunamadığı ev çatı uygulamalarında mikro eviricilerin kullanımı daha uygundur. Mikro eviricilerin güç seviyeleri güneş paneli gücüne yakın olup 200-300W arasındadır [101].



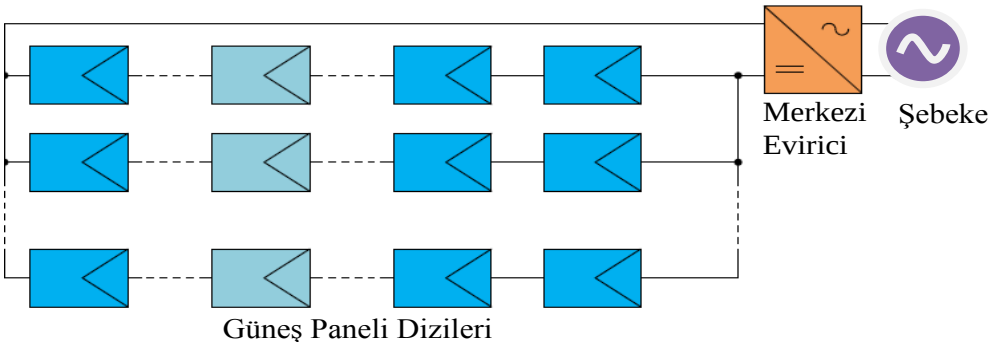
Şekil 2.4. Mikro eviricili FV sistem

Dizi eviriciler ise çalışabilmek için çok sayıda (10-25 adet) seri bağlı güneş paneline ihtiyaç duyar. Şekil 2.5'de de görüldüğü gibi her dizi evirici kendi panel dizisine sahiptir. Bir adet dizi eviriciye 12 adet panel dizisinin bağlanması da mümkündür. Birçok dizi evirici ürününde, birden fazla maksimum güç noktası takipçisi bulunur ve bu sayede farklı özellikteki panel dizilerini farklı güç noktası takipçilerine bağlanarak aynı evirici üzerinden, farklı özellikteki panellerin şebekeye güç aktarımı sağlanmış olur. Bu sayede, dizideki güneş panelleri arasında güneşlenme farkı olması durumunda enerji üretiminin olumsuz etkilenmesinin önüne geçilir. Güçleri 5-30kW arasında değişen dizi eviriciler dizilerdeki güneş panellerine yakın güneşlenme imkanı sunabilecek geniş çatı uygulamalarında, bahçe uygulamalarında ve 2-3 MW altı güneş tarlası uygulamalarında sıklıkla kullanılır. Birim güç maliyetleri mikro eviricilerden daha düşüktür.



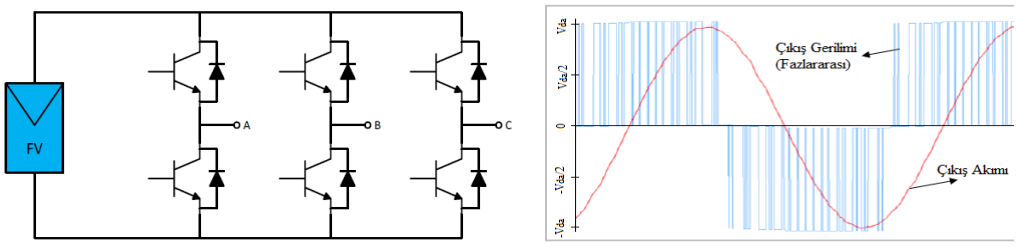
Şekil 2.5. Dizi eviricili FV sistem

Merkezi eviriciler ise Şekil 2.6' da gösterilmektedir. Bu tür bağlantıda çok sayıda güneş paneli dizisinin paralel bağlanması ile oluşan güneş tarlalarının ürettiği enerjiyi şebekeye aktarır. Merkezi evirici 50-100 adet gibi çok sayıda panel dizisinin paralel bağlanması sebebiyle, panel dizilerinden birinde meydana gelebilecek gölgelenme veya arıza gibi bir durum diğer dizilere de büyük oranda yansımaktadır. Merkezi eviricilerin güç seviyeleri 100-2500kW aralığındadır. Birim güç maliyetleri dizi eviricilerden daha düşük olan merkezi eviriciler 1MW ve daha üstü güneş enerjisi santrali uygulamalarında kullanılmaktadır [102].



Şekil 2.6. Merkezi eviricili FV sistem

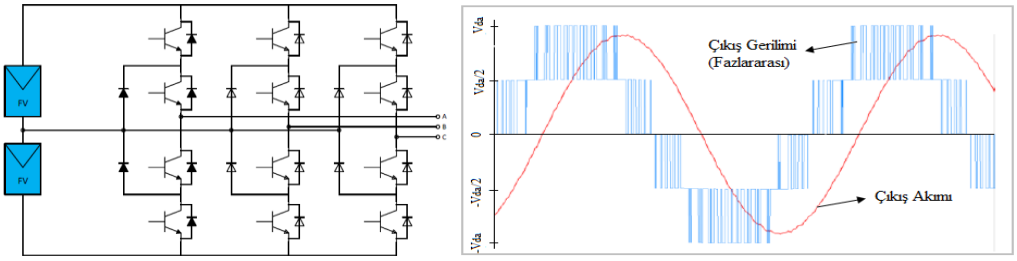
Gerilim seviyesi dikkate alınarak evirici topolojilerini sınıflandırıldığında eviricileri iki seviyeli ve çok seviyeli olmak üzere iki grupta inceleyebiliriz. Şekil 2.7'de iki seviyeli bir eviricinin devre şeması ve çıkış gerilim dalga şekli gösterilmektedir. Basit devre yapısı ve kolay kontrol yöntemleri sayesinde iki seviyeli eviriciler çok yaygın kullanılmaktadır.



a) b)

Şekil 2.7. a) İki seviyeli evirici b) Çıkış gerilim dalga şekli

Çok seviyeli eviriciler içerisinde fotovoltaik uygulamalar için üç-seviyeli eviriciler tercih edilmektedir. Şekil 2.8'de üç-seviyeli "Nötr Noktası Kenetlemeli" (Neutral Point Clamped) evirici ve çıkış gerilim dalga şekli gösterilmektedir. İki seviyeli eviriciler ile kıyaslandığında, çok seviyeli eviriciler ile aynı anahtarlama frekansında daha düşük harmonik içeren bir AA gerilim dalga şekli elde edilir.



a) b)

Şekil 2.8. a) Üç seviyeli evirici b) Çıkış gerilim ve akım dalga şekli

Tablo 2.1. İki seviyeli ve çok seviyeli eviricilerin kıyaslanması [11]

İki Seviyeli Evirici	Çok Seviyeli Evirici
Az sayıda güç anahtarı	Çok sayıda güç anahtarı
Basit denetim yöntemleri	Karmaşık denetim yöntemleri
Anahtarlama elemanlarının sahip olması gereken ters gerilim dayanım değeri (reverse blocking voltage) yüksek	Anahtarlama elemanlarının sahip olması gereken ters gerilim dayanım değeri (reverse blocking voltage) düşük
Çıkış filtre gereksinimi yüksek	Çıkış filtre gereksinimi düşük
Aynı anahtarlama frekansı ve filtre grubu için yüksek harmonikli çıkış akımı	Aynı anahtarlama frekansı ve filtre grubu için düşük harmonikli çıkış akımı
Aynı güç seviyesinde ve anahtarlama frekansında yüksek anahtarlama ve iletim kaybı	Aynı güç seviyesinde ve anahtarlama frekansında düşük anahtarlama ve iletim kaybı

İki seviyeli ve çok seviyeli eviricilerin özellikle fotovoltaik uygulamalardaki farklılıkları Tablo 2.1'de listelenmektedir. Mevcut güneş panellerinin izolasyon gerilim değeri 1000V seviyesindedir. Dolayısıyla fotovoltaik eviricilerde DA bara gerilimi 1000V üzerine çıkmamalıdır. Aynı gerilim seviyesinde anahtarın kullanıldığı iki seviyeli ve çok seviyeli eviricilerde, çok seviyeli eviricinin giriş ve çıkış gerilim değerleri daha yüksek seviyelere ulaşabilmektedir. Güneş panellerinin

izolasyon gerilim limiti sebebiyle bu yüksek gerilim seviyelerinde çalışma mümkün olmamaktadır. Bu yüzden, fotovoltaik uygulamalarda, iki seviyeli eviriciler ve çok seviyeli eviriciler giriş ve çıkış gerilim değerleri eşit veya yakın olduğu çalışma koşullarında kıyaslanmalıdır.

2.4. Şebeke Bağlantılı FV Sistemlerde Denetim Yapıları

Şebeke bağlantılı yenilenebilir enerji sistemlerinin sayısı arttıkça güç kalitesi, güvenlik ve adalama konusunda yeni ve zorlayıcı standartlar gündeme gelmiştir. Bunun sonucu olarak şebeke bağlantılı sistemlerin denetimi bu gereksinimleri sağlayacak şekilde yapılmalıdır. Giriş gücü güç dönüştürücü birimi aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülür. Üretilen elektrik enerjisi yerel yüklere veya şebekeye dağıtabilir.

Şebeke bağlantılı sistemlerin önemli bir kısmı ise kontrolleridir. Kontrol görevleri başlıca iki gruba ayrılır;

1) Giriş tarafındaki denetleyicinin görevi girişteki kaynaktan maksimum gücü elde etmektir.

2) Şebeke tarafındaki denetleyici aşağıdaki görevleri gerçekleştirir:

- Aktif güç kontrolü
- Reaktif güç kontrolü
- DC bara geriliminin kontrolü
- Şebekeye aktarılan gücün yüksek kalitede tutulması
- Şebeke senkronizasyonu

Şebeke bağlantılı sistemlerde çeşitli donanım topolojileri bulunmaktadır. Rüzgâr enerjisi ile ilgili farklı topolojiler bulunmasına karşın genelde güneş ve yakıt hücresi için topolojiler benzerdir. Bu sistemlerde çıkış akımını filtre etmek için genellikle LCL filtreler kullanılmaktadır. Bu sistemler için birçok ülkede gerekli bir şart olan yalıtım iki şekilde sağlanabilmektedir:

1) Yalıtım trafosu kullanmak
2) DA/DA dönüştürücü kullanmak

Şebeke tarafındaki dönüştürücüye uygulanan denetim stratejisi temel olarak ardışık iki sistemden oluşur. Birincisi şebeke akımını ayarlayan dâhili ve hızlı akım döngüsü; güç kalitesinden sorumludur. İkincisi ise DA Bara gerilimini ayarlayan harici gerilim döngüsüdür; sistemdeki güç akışını dengeler. Denetim stratejileri kontrol değişkenlerinin ifade edildiği referans çatıya göre farklılık gösterir [103]:

- Senkron Referans Çatı Denetimi (Synchronous Reference Frame Control)
- Durağan Referans Çatı Denetim (Stationary Reference Frame Control)
- Doğal Çatı Denetimi (Natural Frame Control)

2.4.1. Senkron referans çatı denetimi

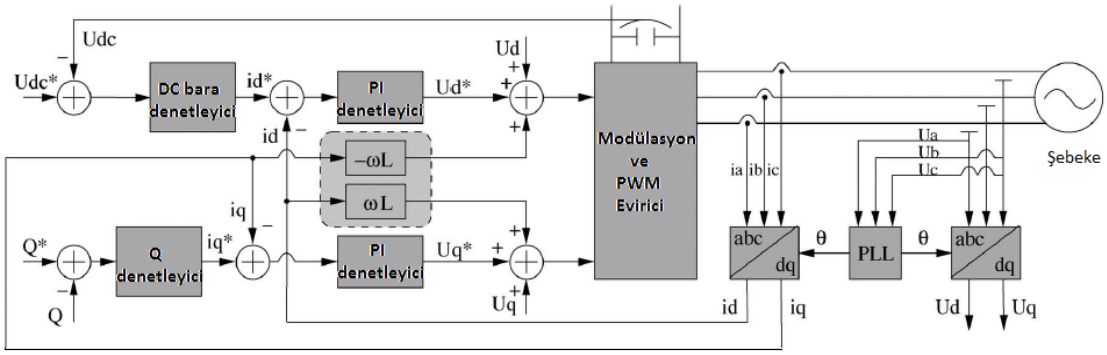
Bu denetim dq denetim olarak da adlandırılan bu denetim, abc→dq referans çatı dönüşüm modülü kullanır. Bu denetimde şebeke gerilim ve akım dalga şekilleri dq ekseninde ifade edilmektedir. Bu sayede denetim değişkenleri DA değerler haline gelmekte ve buna bağlı olarak denetim ve filtreleme kolaylaşmaktadır.

dq Denetim yapısında gerekli olan çıkış gücüne göre DC bara gerilimi denetlenir. DA bara denetleyici çıkışı aktif akım denetleyicisinin referans değeridir. Reaktif güç denetimine izin verilmemiş ise reaktif akım referansı sıfıra ayarlanır.

dq Denetim yapısında DA değişkenlerin ayarlanmasında başarılı sonuçlar veren PI denetleyiciler kullanılır. PI denetleyiciye ait transfer fonksiyonu Denklem (2.1)'de gösterilmektedir.

$$TF = K_p + \frac{K_i}{s} \tag{2.1}$$

Kontrol edilen akım şebeke gerilimi ile aynı fazda olmak zorunda olduğundan şebeke gerilimlerine bakarak faz açısı hesaplanır. Bu iş için en gelişkin yöntem faz kenetlemeli döngü (PLL) dür. Senkron referans çatı denetime ilişkin genel yapı Şekil 2.9'da gösterilmektedir.

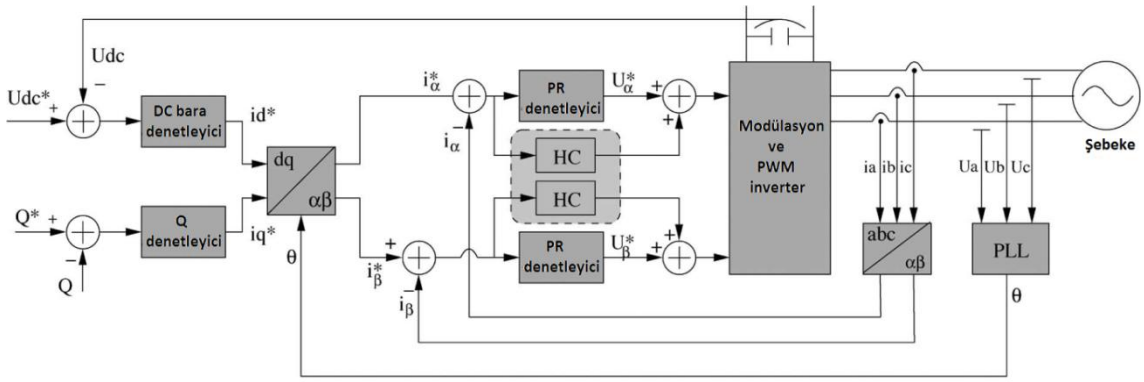


Şekil 2.9. Senkron referans çatı denetimin genel yapısı

PI denetleyici kullanılan şebeke bağlantılı sistemlerin en büyük dezavantajı düşük sıralı harmonikleri giderme konusunda zayıf olmasıdır.

2.4.2. Durağan referans çatı denetimi

Bu denetim yapısında şebeke akımları αβ dönüşümüne tabi tutulur ve denetim değişkenleri sinüsoidal olduğundan akım regülâsyonunu sağlamak için Oransal Rezonans (PR) denetleyici kullanılır. Çünkü PI denetleyiciler sinüsoidal dalga şekillerinde kalıcı durum hatasını yok etmede başarılı olamamaktadır. Durağan referans çatı denetime ilişkin genel yapı Şekil 2.10'da gösterilmektedir.



Şekil 2.10. Durağan referans çatı denetimin genel yapısı

PR denetleyiciye ait transfer fonksiyonu Denklem (2.2)'de gösterilmektedir.

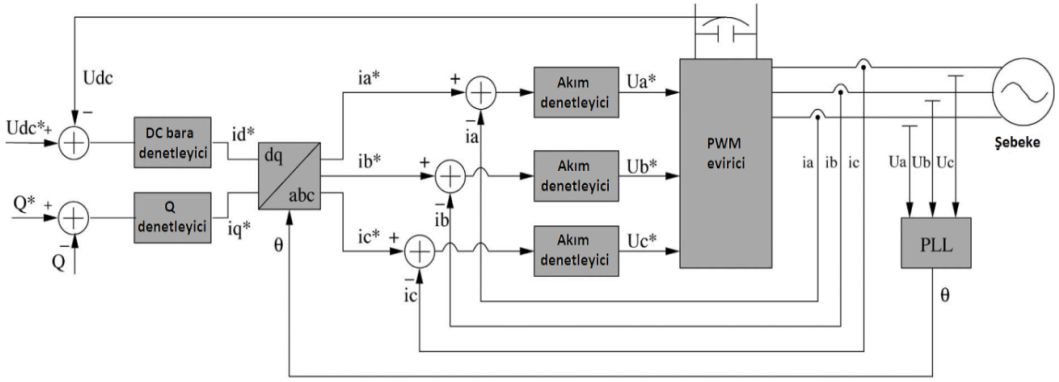
$$TF = K_p + \frac{K_i.s}{s^2 + \omega^2} \tag{2.2}$$

Burada ω denetleyici rezonans frekansıdır. PR denetleyici rezonans frekansında yüksek kazanç sağlar ve bu sayede denetlenen sinyal ve referans sinyal arasındaki kalıcı durum hatasını yok eder. Rezonans frekansını da Ki katsayısı belirlemektedir.

2.4.3. Doğal çatı denetimi

Her bir şebeke akımı için bireysel "abc" denetleyici düşüncesiyle gerçekleştirilen denetim yöntemidir. Bununla birlikte üç fazlı sistemleri sisteme bağlamak için yıldız-üçgen bağlantı ve izolasyon konusu denetleyici tasarımında dikkate alınmalıdır. İzoleli nötr sistemlerinde fazlar diğerleri ile etkileşim halindedir. Bu nedenle 3. akım denetleyicisine ihtiyaç yoktur çünkü bu akım Kirşof'un akımlar yasasından bulunabilir. abc denetim histeresiz gibi doğrusal olmayan denetleyicilerde yüksek dinamiklerinden dolayı tercih edilmektedir. Ancak denetleyici performansının anahtarlama frekansı ile doğru orantılı olduğu bilinmelidir.

Akım denetleyicisi olarak histeresiz kullanılmış ise modülasyona gerek yoktur. Akım denetleyicisi çıkışları, güç devresindeki anahtarların kapı sinyalleri olmaktadır. Akım denetleyicisi olarak PI denetleyici veya PR denetleyici kullanılmış ise modülasyon gereklidir. Doğal çatı denetime ilişkin genel yapı Şekil 2.11'de gösterilmektedir.



Şekil 2.11. Doğal çatı denetimin genel yapısı

2.4.4. Denetim yapılarının değerlendirilmesi

Denetim değişkenlerinin sabit olması avantajının yanı sıra, gerilim geri besleme gereksinimi ve çapraz bağlaşım (cross-coupling) değişkenleri senkron referans çatı (dq) denetimin temel zorluklarıdır.

Durağan referans çatı (αβ) denetimde PR denetleyici kullanılmış ise dq denetleyiciye göre denetim karmaşıklığı biraz daha azalmış olur. İlaveten şebeke faz açısının bilinmesi gerekli değildir. Filtre edilmiş şebeke gerilimleri referans akım dalga şekli için şablon olarak kullanılabilir. Ayrıca αβ denetimde şebeke gerilimleri yada üç tane

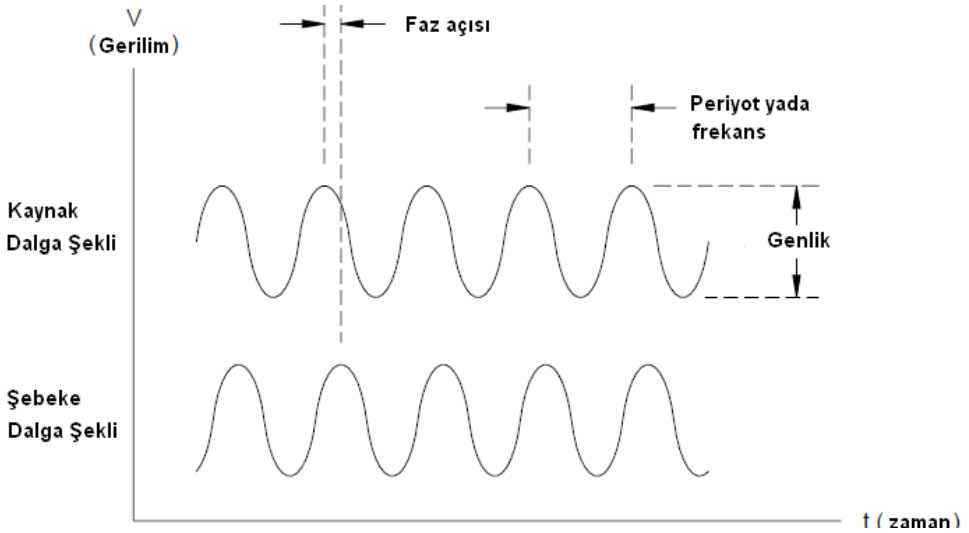
bir fazlı PLL kullanılarak akım referansı elde edilebilir ve böylece her fazın bağımsız denetimi sağlanabilir.

Doğal çatı (abc) denetimde akım regülasyonu için adaptif bant histeresiz kullanılırsa denetimin karmaşıklığı artabilir. Ölü bant (dead-band) denetleyici kullanılarak bu karmaşıklık biraz daha azaltılabilir.

2.5. Şebeke Senkronizasyonu

Şebeke bağlantılı FV uygulamalarda herhangi bir kaynağın şebekeye bağlanması için şebekenin sinüzoidal dalga şekli ile kaynağın çıkış gerilimi dalga şekli birbiri ile senkronize olmalıdır. Uygun bir senkronizasyon için kaynağın sinüzoidal dalga şeklinin frekansı, genliği ve faz açısı gerektiği gibi ayarlanmalıdır. Şekil 2.12' de senkronizasyon parametreleri gösterilmektedir.

Ülkemiz için Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretimine İlişkin Yönetmeliğin Uygulanmasına Dair Tebliğ 10 Mart 2012 Tarih ve 28229 Sayılı Resmi gazetede yayınlanmıştır. Bu tebliğde yer alan senkronizasyon koşulları Tablo 2.2'de özetlenmektedir.



Şekil 2.12. Senkronizasyon parametrelerinin gösterilmesi

Tablo 2.2. AG seviyesinden bağlanan üretim tesisleri için koruma ayarı sınır değerleri [104]

Parametre	**En Uzun Temizleme Süresi** [a]	**Açma Ayarı**
Aşırı Gerilim (ANSI 59)	0,2 s	230 V + %15
Düşük Gerilim – Kademe 1 (ANSI 27)	1,5 s	230 V – (%15…%20) [b]
Düşük Gerilim – Kademe 2 (ANSI 27)	0,2 s	230 V – (%50…%75) [b]
Aşırı Frekans (ANSI 81/O)	0,5 s	51 Hz
Düşük Frekans (ANSI 81/U)	0,5 s	47 Hz
Vektör Kayması [c]	0,2 s	(6^o…9^o) [b]
ROCOF (df/dt) (ANSI 81R) [c]	0,2 s	(1…2,5) [b] Hz/s
[a)] Arızayı tespit ve kesici açma süresi dâhildir. [b)] Verilen aralıkta uygun değer dağıtım şirketi tarafından istenebilir ve ayarlanabilir. [c)] Jeneratör, adalanma durumunda çalışmaya elverişli teknik özellikte ise ilave olarak bu koruma rölelerinden en az biri kullanılmalıdır.		
Not: Gerilim değerleri etkin (r.m.s) değerlerdir ve faz-nötr gerilimi olarak verilmiştir.		

Şebeke senkronizasyonu için Fourier Analizi Tekniği ve Faz Kenetlemeli Döngü (PLL) tekniği kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında şebeke senkronizasyonunu sağlamak için Faz Kenetlemeli Döngü tekniği kullanılmıştır.

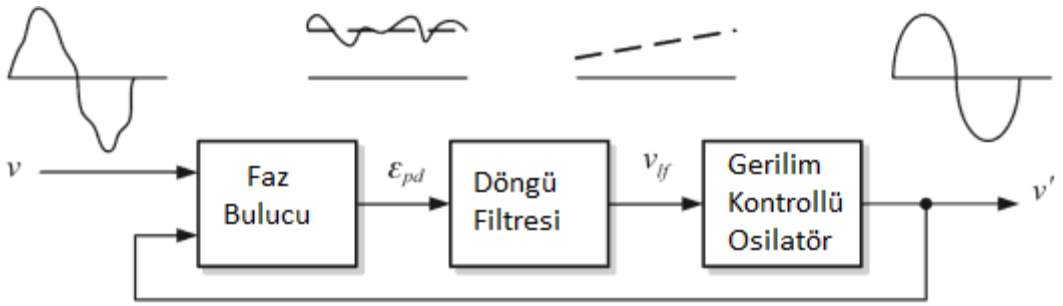
2.5.1. Faz kenetlemeli döngü (PLL)

Faz kenetlemeli döngü (PLL) kapalı bir döngüdür. Bu döngüde, bazı harici periyodik sinyallerin zamanını tutmak için geri besleme döngüsü kullanılarak dâhili osilatör kontrol edilir. PLL teknikleri iletişimde, bilgisayarlarda ve elektronikte yaygınca kullanılmaktadır. Bu teknikler harici periyodik olaylara senkronize olarak sabit frekanslar üretebilmektedir. Şebeke bağlantılı güç dönüştürücüsü, şebeke ile uyum içinde çalıştığından PLL felsefesi ile tam olarak örtüşmektedir. Faz kenetlemeli döngüye ait temel yapı Şekil 2.13'de gösterilmektedir.

Bir PLL üç temel blok içermektedir. Bunlar;

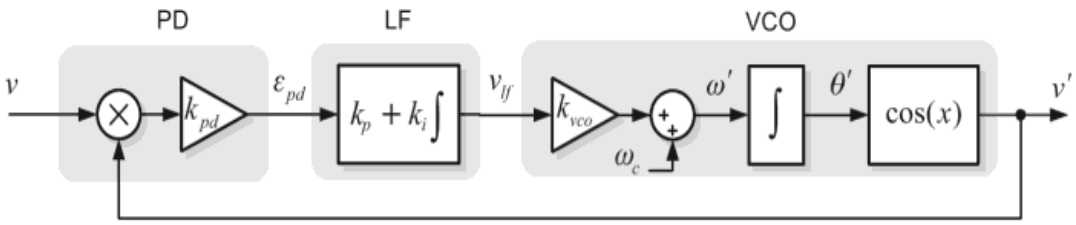
- Faz bulucu (PD): Bu blok giriş sinyali (v) ve dahili osilatör çıkışı (V') arasındaki faz farkı ile orantılı olarak çıkış sinyali üretir.

- Döngü filtresi (LF): Bu blok faz bulucu çıkışındaki yüksek frekanslı AC bileşenleri azaltmak için alçak geçiren filtre karakteristiği gösterir. Tipik olarak bu blok birinci dereceden alçak geçiren filtreden veya PI denetleyiciden oluşur.
- Gerilim kontrollü osilatör (VCO): Bu blok çıkışında, döngü filtresi tarafından üretilen giriş geriliminin fonksiyonu olarak, verilen merkez frekansa (ω_c) göre frekansı kaydırılmış AC sinyal üretir.



Şekil 2.13. Temel PLL Yapısı

Temel bir PLL in blok gösterimi Şekil 2.14'de verilmektedir. Burada, PD basit bir kazanç aracılığıyla, LF PI denetleyici ile ve VCO doğrusal integral alıcı tarafından beslenen sinüzoidal fonksiyondan oluşmaktadır.



Şekil 2.14. Temel PLL Blok gösterimi

Doğrusal hale getirilmiş küçük sinyal PLL modeli için transfer fonksiyonu Denklem (2.3)'de gösterilmektedir.

$$H(s) = \frac{2\xi\xi_n s + \omega^2_n}{s^2 + 2\xi\xi_n s + \omega^2_n} \qquad (2.3)$$

Burada $\omega_n = \sqrt{\frac{K_p}{T_i}}$ ve $\xi = \frac{\sqrt{K_p . T_i}}{2}$ dir.

Başka bir çalışmada konuya şöyle bir yaklaşım getirilmektedir. Denklem (2.4), oturma zamanına (t_s) bağlı olarak PI denetleyici parametrelerinin kabaca hesaplanmasında kullanılabilir. Bu durumda Kp ve Ti katsayıları Denklem (2.5)'deki gibi hesaplanabilir.

$$t_s = 4{,}6.\tau \text{ ve } \tau = \frac{1}{\xi.\omega_n} \tag{2.4}$$

$$K_p = 2.\xi.\omega_n = \frac{9{,}2}{t_s} \text{ ve } T_i = \frac{2.\xi.}{\omega_n} = \frac{t_s.\xi^2}{2{,}3} \tag{2.5}$$

Denklem (2.5)'deki eşitlikler, birim giriş sinyali (V=1) için elde edilmiştir. Aksi bir durumda PI denetleyici parametreleri giriş sinyalinin genliğine bölünmelidir.

Bu çalışmada, Denklem (2.5)'deki eşitlikler kullanılarak t_s=100ms oturma zamanı için K_p ve K_i katsayıları hesaplamaları Denklem (2.6), (2.7) ve (2.8)'de gösterilmektedir. Hesaplamalarda sönümleme katsayısı ξ=0,707 olarak alınmıştır.

$$K_p = \frac{9{,}2}{t_s} = \frac{9{,}2}{100.10^{-3}} \cong 92 \tag{2.6}$$

$$T_i = \frac{t_s.\xi^2}{2{,}3} = \frac{100.10^{-3}.(0{,}707)^2}{2{,}3} = 21{,}73\,\text{ms} \tag{2.7}$$

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} = \frac{92}{21{,}73.10^{-3}} \cong 4233 \tag{2.8}$$

2.6. Adalama

Şebekenin arıza, bakım gibi nedenlerden dolayı enerji iletmemesine rağmen, FV sistemlerde kullanılan eviricilerin şebekeye enerji vermesine adalama denilmektedir. Şebeke bağlantılı FV sistemler şebeke enerjisi kesildiğinde adalama durumunu gözlemleyerek şebekeden ayrılmalıdır. Sistem yapısı müsait ise bazı özel durumlarda adalama sırasında yerel yükler beslenebilmektedir.

Güvenlik açısından FV sistemlerde adalama istenmeyen bir durumdur. Eviricinin özelliği olarak enerji kesilse de bazı acil yükler beslenmeye devam edebilir, fakat bu durumda diğer yükler, bu kısımdan izole edilmeli ve acil yük üzerinde, kesinti durumunda, başka bir kaynaktan beslendiğine dair uyarı olmalıdır. Genelde şebeke bağlantılı eviriciler, şebeke enerjisi kesildiğinde devreden çıkar ve enerji üretimini durdururlar. Şebeke kesintisi ve tekrar enerjinin gelmesinde eviriciden otomatik olarak devreye girmesi beklenir. Bu da kontrol sistemleri yardımıyla şebeke gerilimi ya da frekansının ölçülüp doğru değerde olduğunun teyit edilmesi ile sağlanır. Bu yöntem hız açısından ve kararsızlığı nedeniyle ticari eviricilerde pek kullanılmaz. Kolay olan farklı bir frekansta enerji üretip senkronizasyonu kontrol etmektir. Eğer sistem şebekeden farklı bir frekansta çalışıyorsa şebeke bağlantısı olmadığı anlaşılır. Başka bir güvenilir yöntemde şebeke empedansının ölçülmesidir.

2.7. Şebeke Bağlantılı Sistemler İçin Filtre Tasarımı

Şebeke bağlantılı sistemlerde filtrelerin işlevi iki boyutludur. Bir tarafta filtre yeterince endüktif olmalıdır çünkü bu gerilim kaynağına bağlı dönüştürücünün doğru çalışması için önemlidir. Bu açıdan şebeke bağlantılı sistemler senkron jeneratörlere benzerler. Diğer taraftan şebeke bağlantılı sistemler gerilim harmonikleri üretirler. Bu gerilimler şebekeye harmonik akımları akmasına neden olurlar ve bu akımlar hassas yüklere zarar verebilir veya kayıpları arttırabilir. Sadece bir bobinden oluşan filtre bu iki gereksinimin karşılanması için en basit çözümdür.

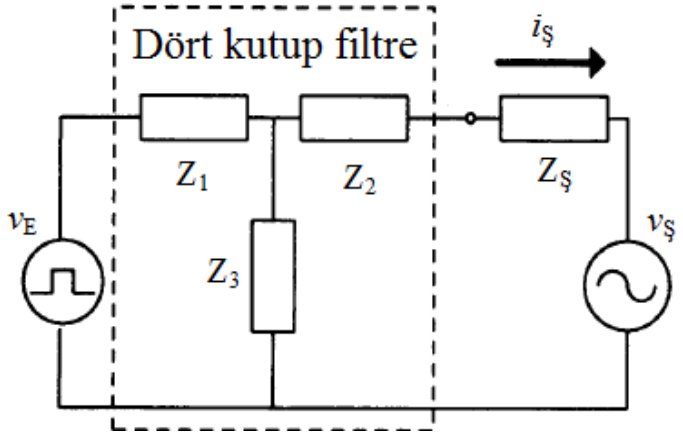
Birkaç kW a kadarki şebeke bağlantılı uygulamalarda anahtarlama frekansı yüksektir. Bu nedenle daha düşük değerlikli bir endüktans harmonik gereksinimleri için yeterli olabilir.

2.7.1. Filtre topolojilerinin incelenmesi

Bu çalışmada kullanılan çok seviyeli eviriciler için en uygun filtre topolojisini seçmek için verim, ağırlık, hacim gibi parametreler dikkate alınmalıdır. Verim konusu dikkate alındığında filtre topolojileri eviricilerdeki kayıplara kıyasla daha düşük kayıp oluşturmalıdır. Ağırlık ve hacim ise nakliye, kurulum ve depolama açısından filtre tasarımında önemli parametrelerdir.

Filtre maliyeti temel olarak kullanılan materyal sayısına ve kullanılan materyalin cinsine bağlıdır. Endüktans nüvesi olarak kullanılan manyetik malzeme buna örnek olarak verilebilir.

Bununla birlikte filtreler belli bir oranda şebeke parametrelerinden (rezonans hassasiyeti) bağımsız olarak görevini yapabilmelidir. Evirici çıkışına bağlanan filtreler temel olarak Şekil 2.15'de gösterilen dört kutuplu devre yapısında sahiptir [105].



Şekil 2.15. Üç elemanlı filtre genel gösterim

2.7.1.1. L filtre

Bu topoloji (Z_1: sonlu, Z_3: sonsuz ve Z_2=0) eviriciye seri bağlı sadece bir endüktans içerir. Düşük sayıda eleman içermesine rağmen sistem dinamikleri cevap süresini arttıran endüktör üzerindeki gerilim düşümü nedeniyle zayıftır.

2.7.1.2. LC filtre

Bu topoloji (Z_1: sonlu, Z_3: sonlu ve Z_2=0) kapasite ve endüktör birleşiminden oluşur. Daha yüksek kapasiteler için endüktör değeri azaltılabilir. Bu durumda kayıplar ve maliyet de azaltılabilir. Bununla birlikte yüksek kapasite değerleri önerilmemektedir. Çünkü ani boşalma (inrush) akımları, temel frekansta yüksek kapasite akımları, şebeke tarafı rezonans ve filtrenin şebeke empedansına bağlılığı ile ilgili problemler artabilir.

2.7.1.3. LCL filtre

Bir önceki topoloji ile karşılaştırıldığında LCL filtre, filtre ve şebeke endüktansı arasında daha iyi dekuplaj (şebeke parametrelerine bağımlılığı azaltır) ve şebeke tarafı endüktörden daha düşük dalgalanma (kapasitör tarafından azaltılır) sağlama avantajına sahiptir. LC filtredeki gibi kapasite değerinin arttırılması filtre maliyetini ve ağırlığı azaltır ancak bu durum yine aynı dezavantajları oluşturur.

2.7.1.4. Ayarlanmış LC filtre

LC filtreye alternatif bu filtrede anahtarlama frekansına ayarlanmış ikinci bir paralel kol bulunur. Bu filtrenin avantajı harmonik akımı bileşenlerine göre ayarlanmış olmasıdır.

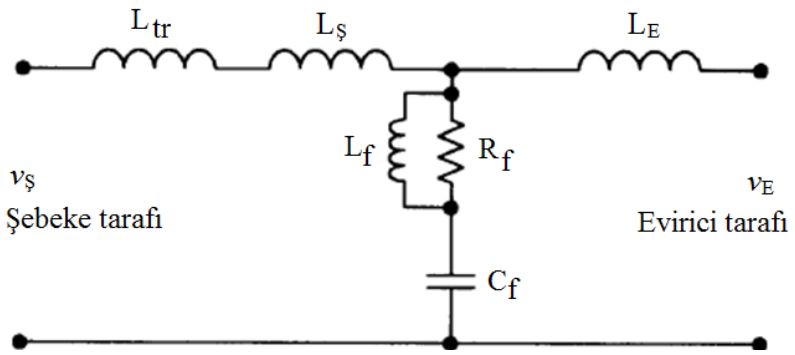
2.7.2. LCL filtre tasarımı

LCL filtreler bazen diğer basit topolojilere göre daha fazla maliyetli olmasına rağmen şebeke parametrelerine az bağımlı olması özellikle yüksek güçlü uygulamalarda önemli bir avantajdır. Dahası aynı boyuttaki diğer filtrelere göre daha fazla filtreleme yeteneğine sahiptir ve endüktif çıkışa sahip olması nedeniyle ani deşarj akımı problemleri ile baş etmede daha yeteneklidir. Bu avantajlarından dolayı bu çalışmada LCL filtre tasarımı konusu ele alınmaktadır. Tasarım parametreleri Tablo 2.3'de gösterilmektedir.

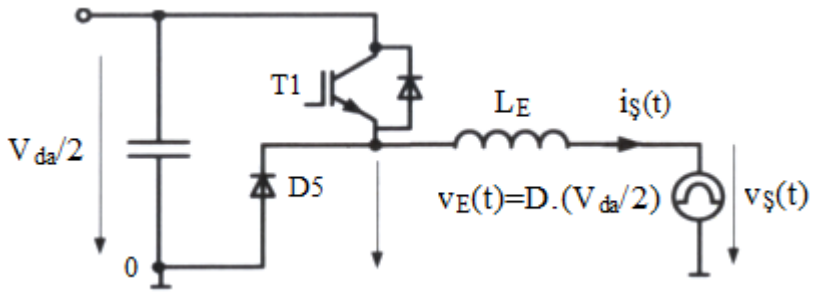
Tablo 2.3. Filtre tasarım parametreleri

Şebeke faz gerilimi	$v_Ş$ = 110 V
Evirici DC bara gerilimi	V_{da} = 370 V
Evirici çıkış gücü	P_E = 2000 W
Şebeke frekansı	$f_ş$ = 50 Hz
Evirici anahtarlama frekansı	f_{an} = 15 kHz

Şekil 2.16'da LCL filtre devresi ve elemanların adlandırılması gösterilmektedir. Birinci adım çıkış akım dalgalanmasını %10 değerinde sınırlandıracak endüktans değerinin hesaplanmasıdır. Filtre endüktans değerinin hesaplanması için NNK evirici anahtarlama frekansında yarım dalga düşürücü (buck) dönüştürücü olarak modellenebilir. Bu modellemede eviricinin nötr noktası şebekenin yıldız noktasına bağlanmıştır ve şebeke yarım sinüsoidal dalga şekline sahip olarak Şekil 2.17'de gösterildiği gibi modellenmiştir.



Şekil 2.16. LCL filtre devresi



Şekil 2.17. NNK evirici basitleştirilmiş devre

$$L_E = \frac{\frac{V_{da}}{2} - V_Ş}{2.\Delta i_Y} \cdot \frac{D}{f_{an}} \tag{2.9}$$

Denklem (2.9), evirici tarafı endüktansın hesaplanmasında kullanılabilir. Burada D görev çevrimidir ve akım dalgalanması görev çevrimi %50 olduğunda en büyük değerini alır. Bu durum dikkate alınarak Denklem (2.10) yazılabilir.

$$L_{inv} = \frac{\frac{V_{da}}{2} - \frac{V_{da}}{4}}{2.\Delta i_{Y_{max}}} \cdot \frac{1}{2.f_{an}} = \frac{V_{da}}{16.f_{an}.\Delta i_{Y_{max}}} \tag{2.10}$$

Tablo 2.3'de verilen tasarım parametreleri için nominal akımın %10 dalgalanma durumunda genliği Denklem (2.11)'den bulunabilir.

$$\Delta I_{L_{max}} = 0{,}10.\frac{P_E.\sqrt{2}}{3.V_Ş} \tag{2.11}$$

Filtre kapasite değeri Denklem (2.15)'de gösterildiği gibi temel kapasite değerinin %5 i alınarak hesaplanabilir. Temel değerlerin hesaplanmasına ilişkin eşitlikler Denklem (2.12), (2.13) ve (2.14)'de verilmektedir.

Temel empedans: $$Z_b = \frac{(E_n)^2}{P_E} \tag{2.12}$$

Temel kapasite: $$C_b = \frac{1}{\omega_n.Z_b} \tag{2.13}$$

Temel frekans: $$\omega_b = \omega_n \tag{2.14}$$

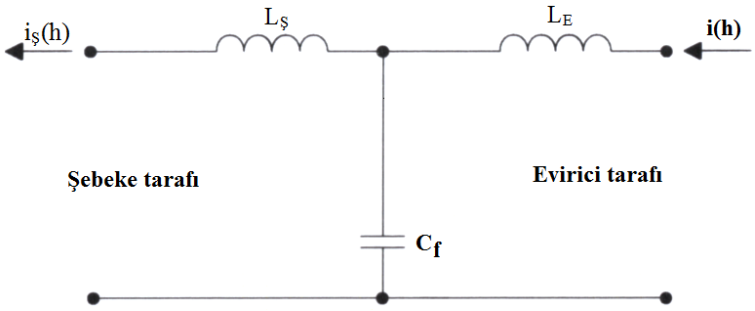
Burada $E_{n:}$ fazlar arası etkin gerilim, P_E: aktif güç ve $\omega_{n:}$ şebeke açısal frekansıdır.

$$C_f = 0{,}05.C_b \tag{2.15}$$

Filtre kapasitesi hesaplanırken temel kapasitenin %5 inden daha fazlası da alınabilir. Bu durumda bobinler üzerindeki endüktif reaktans daha fazla kompanze edilmiş olacaktır. Ayrıca daha büyük kapasite daha düşük değerlikli endüktansı mümkün kılar ancak çok büyük kapasite değerleri kullanıldığında endüktans üzerindeki dalgalanma artacaktır.

LCL filtre tasarımının temel amacı evirici çıkışındaki akım dalgalanmasını %2 değerine düşürmektir. Daha önce evirici tarafı endüktans ile %10 değerine sınırlanan akım dalgalanması şebeke tarafı endüktans ile bu değer üzerinden %20 daha sınırlandırılarak sonuçta %2 değerine düşürülür.

Dalgalanmadaki azalma miktarını hesaplamak için Şekil 2.18'de gösterilen LCL filtre eşdeğer devresi ilk olarak analiz edilmelidir. Burada evirici her bir harmonik frekansı için akım kaynağı olarak ele alınmaktadır.



Şekil 2.18. h'ıncı sıradan harmonik bileşeninde LCL filtre şeması

Evirici tarafından üretilen harmonik akımı i(h) ile şebekeye aktarılan akım iş(h) arasındaki ilişki Denklem (2.16)'da gösterilmektedir. Denklem (2.17)'de ise bu ifadenin dalgacık azalma oranını (r) içerecek şekilde sadeleştirilmiş hali gösterilmektedir.

$$\frac{i_ş(h)}{i(h_{an})} \approx \frac{z_{LC}^2}{|\omega_{res}^2 - \omega_{an}^2|} \tag{2.16}$$

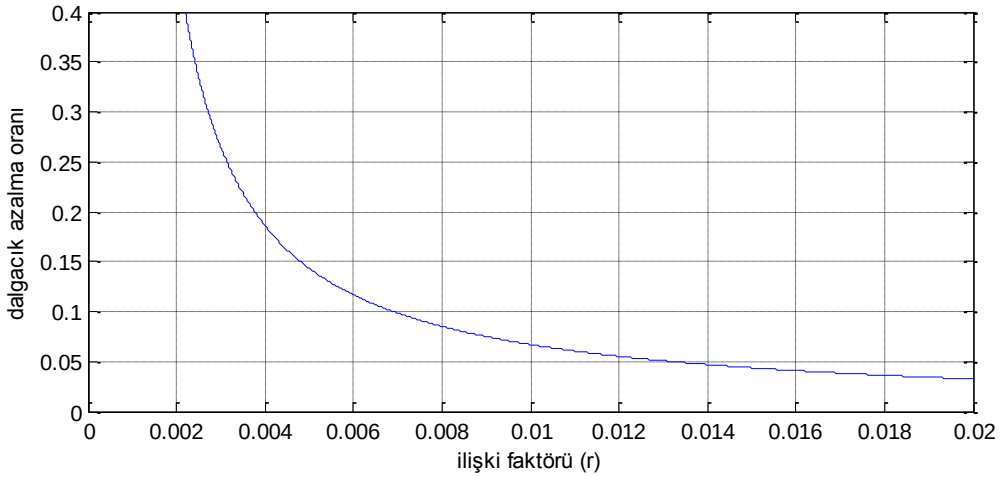
Burada r sabiti evirici tarafı endüktans ile şebeke tarafı endüktans arasındaki ilişkiyi tanımlamaktadır ve şebeke tarafındaki endüktansın değeri Denklem (2.18)'den bulunabilir.

$$\frac{i_g(h)}{i(h_{an})} = \frac{1}{|1+r.[1-(L.C_b.\omega_{an}^2).x]|} \tag{2.17}$$

$$L_Ş = r.L_E \tag{2.18}$$

Tablo 2.3'de belirtilen tasarım parametreleri için, r ilişki faktörüne bağlı olarak dalgacık azalma oranının değişimi Şekil 2.19'da gösterilmektedir. İstenilen dalgacık azalma oranı için r sabiti bu grafikten elde edilebilir. Grafikten dalgacık azalma oranı 0,2 için $r = 3{,}77.10^{-3}$ olarak seçilmektedir. Hesaplamaların yapılabilmesi ve grafiğin çizdirilmesi için gerekli Matlab kodu Ek C'de verilmektedir.

Buna göre evirici tarafı endüktans (L_E) 3,4 mH, kapasite 8,8 µF (10µF alınabilir) ve şebeke tarafı endüktans ise 12µH olarak hesaplanmaktadır.

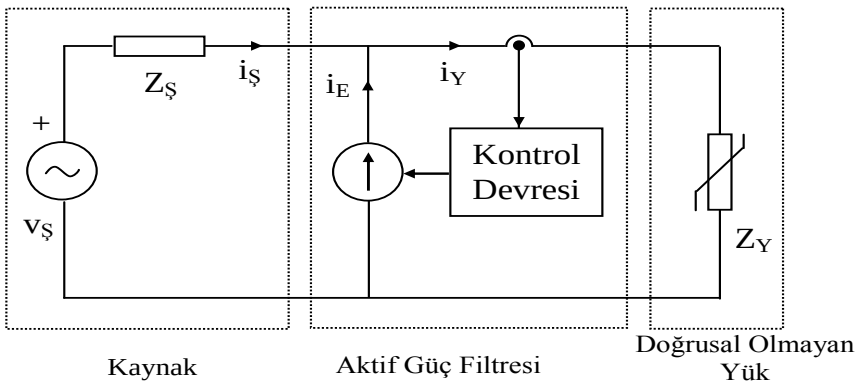


Şekil 2.19. r ilişki faktörüne bağlı olarak dalgacık azalma oranının değişimi

3. AKTİF GÜÇ FİLTRELEME YETENEĞİNE SAHİP FOTOVOLTAİK SİSTEMİN DENETİMİ

3.1. Aktif Güç Filtreleme

Aktif güç filtreleri (AGF) çoğunlukla akım ve gerilim harmoniklerini kompanze etmek için kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra reaktif güç kompanzasyonu, akım ve gerilim dengesizlikleri, nötr akımı kompanzasyonları ile şebeke gerilim regülasyonu için de kullanılmaktadır. Aktif güç filtreleri doğrusal olmayan yükün ürettiği akım harmoniklerini azaltmakta, reaktif güç çekebilmekte veya üretebilmektedir [106].

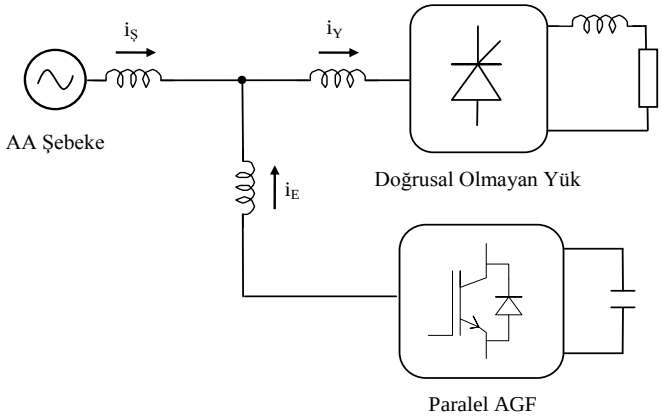


Şekil 3.1. Akım beslemeli AGF eşdeğer devre şekli

Aktif güç filtresinin çalışma ilkesi, yükün ürettiği harmonikle aynı genlikte fakat ters fazda bir akımın sisteme ilave edilmesi temeline dayanmaktadır. Şekil 3.1'de AGF ile harmonik kompanzasyon devre şeması görülmektedir. Denklem (3.1)'de görüldüğü gibi yük akımı (i_Y), kaynaktan çekilen akım ($i_Ş$) ve AGF akımı (i_E) toplamına eşit olduğundan kompanzasyon sonucunda kaynak akımı sinüzoidal olmaktadır.

$$i_Y = i_Ş + i_E \quad (3.1)$$

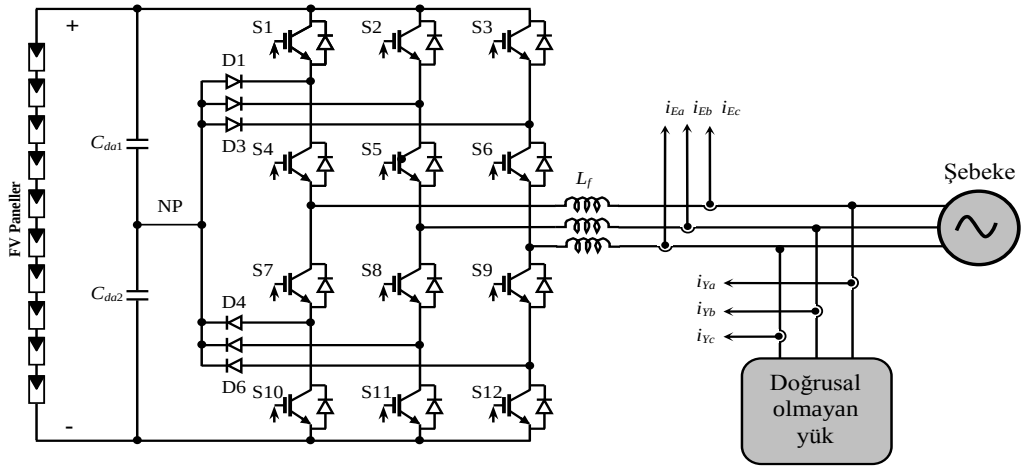
Paralel Aktif Güç Filtresi (PAGF) güç devresi, Şekil 3.2'de görüldüğü gibi bir Gerilim Kaynaklı Eviriciden (GKE) oluşmaktadır. Eviricinin DA tarafına bağlı bir güç kaynağı yoktur fakat yalnızca bir enerji depolama elemanı (kondansatör) bağlanmaktadır. Sonuç olarak, PAGF AA şebeke tarafından GKE'deki kayıpları sağlayabilmek için kontrol edilmektedir. GKE düşük kayıpları ve düşük başlangıç maliyeti aktif güç filtresi uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır.



Şekil 3.2. Gerilim kaynaklı eviricili Paralel aktif güç filtresi

Aktif güç filtreleri, sisteme bağlanış şekillerine göre dört farklı kategoride ele alınmaktadırlar. Bunlar, seri aktif güç filtresi, paralel aktif güç filtresi, hibrit aktif-pasif güç filtreleri ve birleşik güç kalite düzenleyicilerdir [106].

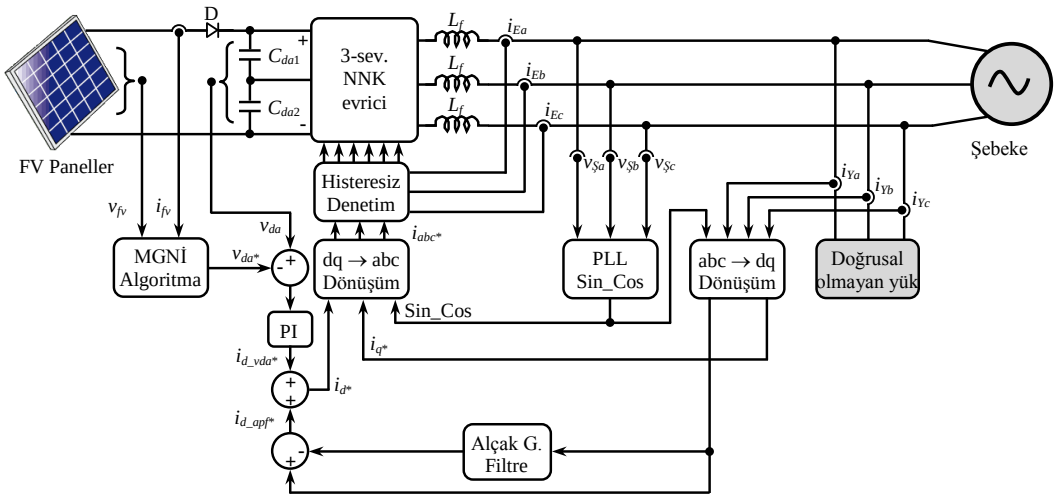
Bu çalışmada gerçekleştirilen fotovoltaik sistem aynı zamanda aktif filtreleme işlevine sahiptir. Sistem aktif filtreleme modunda iken gerilim kaynaklı evirici ile beslenen paralel aktif güç filtresi şeklinde çalışmaktadır. Şekil 3.3'de gerçekleştirilen sisteme ait güç devresi gösterilmektedir. Sistem, aktif filtreleme modunda çalışırken FV diziden elde edilen DA gücü doğrusal olmayan yükün çektiği sinüs biçiminde olmayan harmonikli akımı sinüs akıma tamamlayacak düzeltme akımı üreterek bu akım şebeke ile yükün bağlantı noktasına vermektedir.



Şekil 3.3. 3S-NNK eviricili paralel AGF güç devresi

3.2. Denetim Tekniği

Şebeke bağlantılı FV sistem ve PAGF benzer bir devre topolojisine ve denetim stratejisine sahiptir. Bu çalışmada MGNİ, DA bara gerilim denetleyici ile uyumlu çalıştığından DA/DA dönüştürücü kullanılmamaktadır ve bu durum sistemin cevap hızını arttırmaktadır. Şekil 3.4'de aktif filtreleme işlevine sahip tek-aşamalı şebeke bağlantılı FV sistem denetimine ilişkin blok diyagram gösterilmektedir.



Şekil 3.4. Aktif filtreleme yeteneğine sahip FV sistem denetimine ilişkin blok diyagram

Sistemin denetim yapısında yer alan aktif akım referansının (i_{d*}) iki bileşeni vardır. Bunlardan birincisi şebekeye aktarılacak aktif güç miktarını belirleyen i_{d_vda*} dir. Bu bileşen gerçek DA bara gerilimi ile MGNİ tarafından üretilen gerilim referansını karşılaştıran PI denetleyici tarafından belirlenmektedir. Bununla birlikte, aktif akım

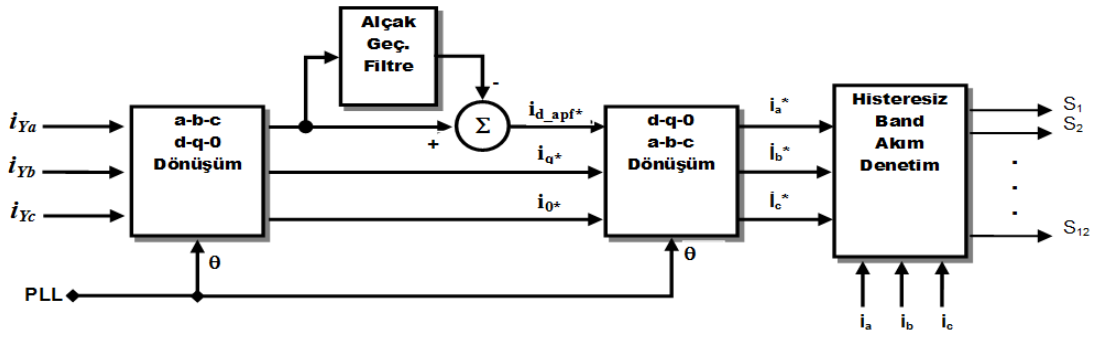
referansının diğer bileşeni, aktif filtreleme işlemi için gerekli referans akım sinyallerini üreten i_{d_apf*} dir. Bu bileşeni elde etmek için ilk olarak ölçülen yük akımları dq koordinat eksenine dönüştürülmektedir. Dönüşüme ilişkin matematiksel Denklem (3.2) de verilmektedir. Yük akımının d bileşeni alçak geçiren filtreden geçirilerek harmoniksiz (sinüs) temel bileşen genliği elde edilmektedir. Daha sonra harmonikli yük akımı genliğinden temel bileşen genliği çıkarılarak yük akımı harmoniklerini filtreleyecek olan i_{d_apf*} bileşeni elde edilmektedir. Son olarak aktif akım referansı Denklem (3.3)'de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır. AGF referans akım sinyallerinin üretilmesine ilişkin blok diyagram Şekil 3.5'de gösterilmektedir.

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} \sin(\omega t) & \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\omega t) & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \tag{3.2}$$

$$i_d^* = i_{d_vdc}^* + i_{d_apf}^* \tag{3.3}$$

Elde edilen aktif akım referansı (i_{d*}) yük akımlarının dq dönüşümünden elde edilen i_{q*} ve sıfır bileşenleri ile birlikte ters park dönüşümü yapılarak gerçek akımlara (i_{abc*}) dönüştürülmektedir. Dönüşüme ilişkin matematiksel Denklem (3.4)'de verilmektedir. Bu akımlar ise histeresiz band akım denetleyiciye referans akım olarak uygulanarak anahtarlama sinyalleri üretilmektedir.

$$\begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \\ \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_d^* \\ i_q^* \end{bmatrix} \tag{3.4}$$



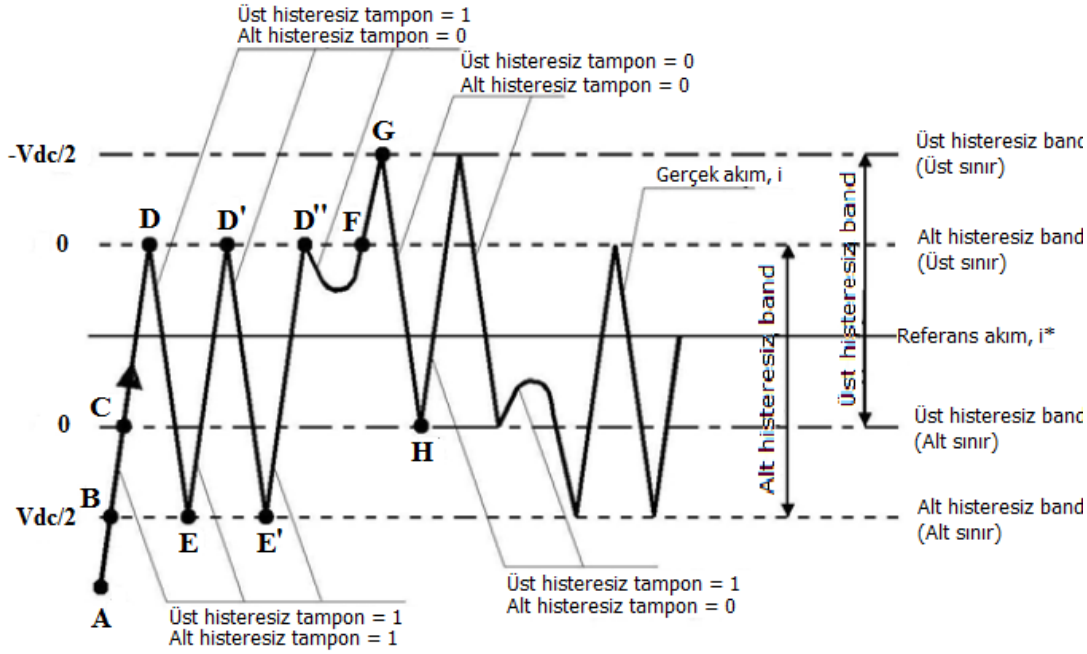
Şekil 3.5. AGF referans akımların üretilmesi

3.3. Anahtarlama Tekniği

FV sistemin akım denetimi histerezis bant akım denetleyici anahtarlama tekniği ile gerçekleştirilmektedir. Denetim algoritması tarafından üretilen referans akımlar ile ölçülen evirici çıkışı hat akımları karşılaştırılmakta ve histerezis bant akım denetleyici (HBD) ile anahtarlama sinyalleri elde edilmektedir. Histerezis bant akım denetimi, minimum donanım ve yazılım gereksinimi ile hızlı ve basit bir denetim metodudur fakat değişken anahtarlama frekansı önemli dezavantajıdır.

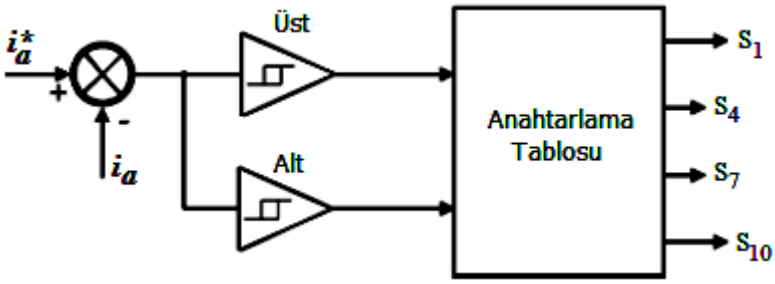
Üç seviyeli diyot kenetlemeli evirici için Vdc/2, 0 ve –Vdc/2 olmak üzere üç muhtemel faz çıkış gerilimi seviyesi vardır. Bu duruma göre, gerçek akımı azaltmak için, pozitif faz akımı polaritesi dikkate alındığında iki olası çıkıştan (0, -Vdc/2) biri seçilmelidir. Benzer şekilde gerçek akımı arttırmak için, iki olası çıkıştan (Vdc / 2, 0) biri seçilmelidir. Denetleyicinin bu seçimleri kendi kendine yapabilmesi için en basit çözüm Şekil 3.6'da gösterildiği gibi, iki ofset histerezis band tanımlamaktır.

Üst histeresiz band komşu iki gerilim seviyesi (0, -Vdc/2) arasındaki anahtarlamaları temsil etmektedir ve bu durumda sıfır çıkış geriliminin seçimi gerçek akımı arttırmaktadır. Buna karşılık alt histeresiz band komşu iki gerilim seviyesi (Vdc/2, 0) arasındaki anahtarlamaları temsil etmektedir ve bu durumda sıfır çıkış geriliminin seçimi gerçek akımı azaltmaktadır.



Şekil 3.6. Üst ve alt histeresiz bandlar

Şekil 3.7'de a fazı için önerilen akım denetim tekniğine ait blok diyagram gösterilmektedir. Burada referans akım ile gerçek akım arasındaki fark sırasıyla üst ve alt histeresiz bandı temsil eden iki histeresiz tampon tarafından işlenmektedir. Gerçek akım histeresiz tampon üst sınırını aştığında histeresiz tampon mantıksal 1 değerini üretmektedir. Gerçek akım histeresiz tamponun altına indiğinde histeresiz tampon mantıksal 0 değerini üretmektedir. Her iki histeresiz tampon bir önceki çıkış seviyesini akım hata sinyali histeresiz band içinde kaldığı müddetçe devam ettirmektedir. Histeresiz tamponlara ait iki mantıksal çıkış değerleri birleştirilerek Tablo 3.1'de verilen anahtarlama durumlarına göre her faz için kapı sinyallerinin belirlenmesi için mantıksal giriş sinyali olarak kullanılmıştır.



Şekil 3.7. Diyot kenetlemeli AGF için histeresiz akım denetleyici blok diyagramı

Tablo 3.1. Çift band histeresiz akım denetleyici için anahtarlama durumları

Giriş (Üst:Alt)	**Çıkış gerilimi**	**S_1**	**S_4**	**S_7**	**S_{10}**
00	-Vdc/2	0	0	1	1
01 veya 10	0	0	1	1	0
11	Vdc/2	1	1	0	0

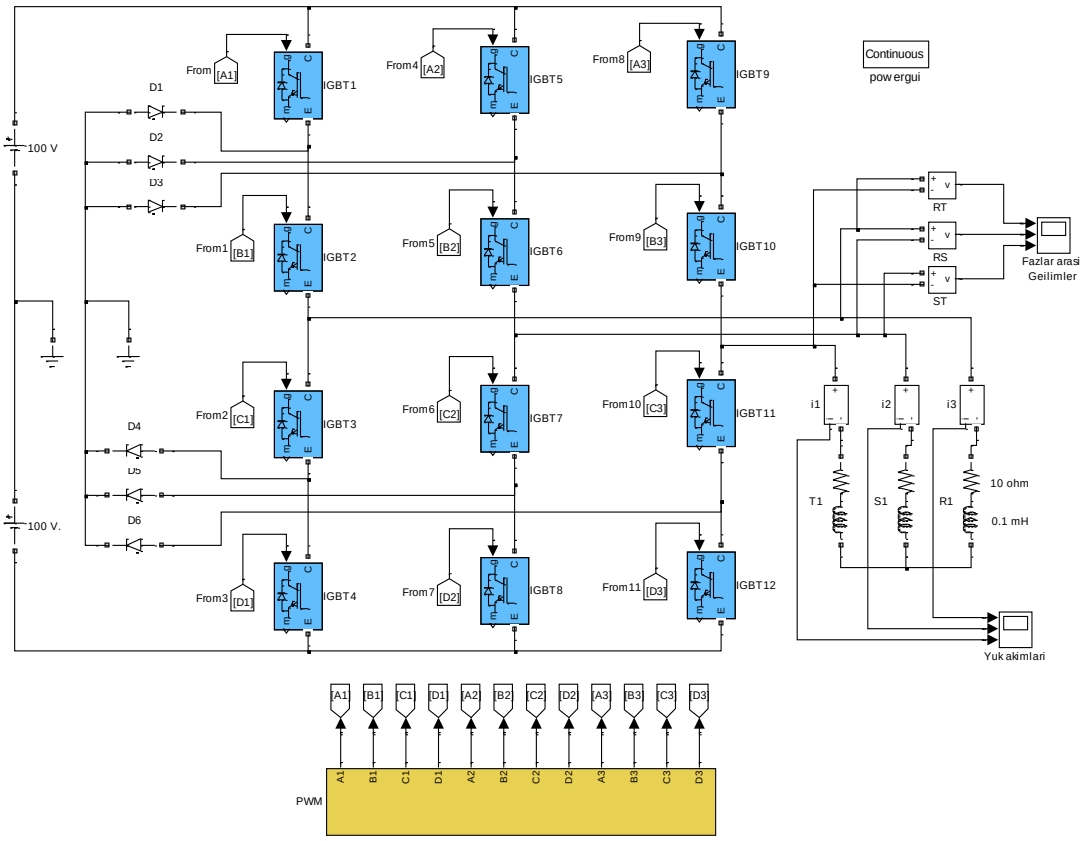
Önerilen HBD' nin çalışması ve çeşitli gerilim seviyeleri arasındaki geçişler Şekil 3.6 üzerinden açıklanabilir. A noktasında gerçek akım (i), referans akım (i*) den daha düşüktür yani akım hatası pozitiftir ve her iki histeresiz tampon üst limitlerinden daha büyüktür. Bu nedenle her iki histeresiz tampon çıkışı 1'e eşittir ve $V_{dc}/2$ gerilimi uygulanır. Böylece gerçek akım (i) B ve C noktaları arasına yükselir ki burada histeresiz tampon çıkışında herhangi bir değişim olmaz. D noktasında hata sinyali alt histeresiz tamponun alt limitinin aşağısına düşer. Bu nedenle alt histeresiz tamponun çıkışı değişerek 0 olur. Bu değişim çıkış gerilim seviyesini 0' a çeker. Uygulanan gerilim sıfır olunca iki durumdan biri gerçekleşir. Birincisi D ve D' noktalarında gösterilmektedir ki burada çıkış geriliminin sıfır olması gerçek akımı E ve E' noktalarına çekmek için yeterlidir. İkinci durum D'' noktasında gösterilmektedir ki burada gerilim seviyesinin sıfıra düşmesi gerçek akımı alt histeresiz band içinde tutmak için yeterli olmamaktadır ve gerçek akım artmaya devam ederek G noktasında bulunan üst histeresiz bandın üst kenarına ulaşmaktadır. G noktasında gerçek akım üst histeresiz bandın üst noktasını aşmaya başlar. Yani hata sinyali üst histeresiz tamponun alt sınırının altına iner. Böylece üst histeresiz tamponun çıkışı değişerek 0 olur ve bu durumda çıkış gerilim seviyesi $-V_{dc}/2$ olur [66].

4. FOTOVOLTAİK SİSTEMİN MODELLENMESİ VE BENZETİM SONUÇLARI

4.1. Çok Seviyeli Eviricinin Modellenmesi

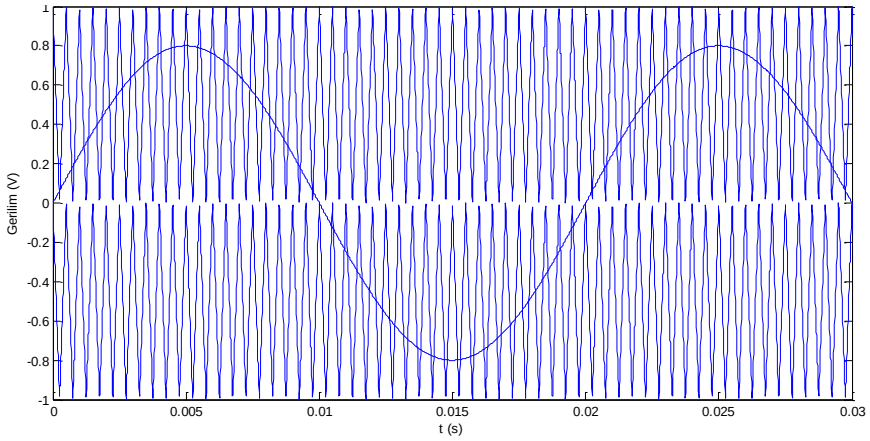
Üç fazlı üç seviyeli nötr noktası kenetlenmiş eviricinin Matlab benzetim modeli Şekil 4.1'de gösterilmektedir.

Bu bölümde modelin doğruluğu örnek çalışma koşulları altında tespit edilmektedir. Modelde anahtarlama işaretleri sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu (SDGM) yöntemi kullanılarak üretilmektedir. Sinüzoidal DGM metodu uygulamadaki basitliği ve düşük harmonik içermesinden dolayı çok seviyeli eviricilerin denetiminde de kullanılmaktadır. Bu yöntemde n seviyeli bir evirici için (n-1) tane taşıyıcı işaret kullanılır.

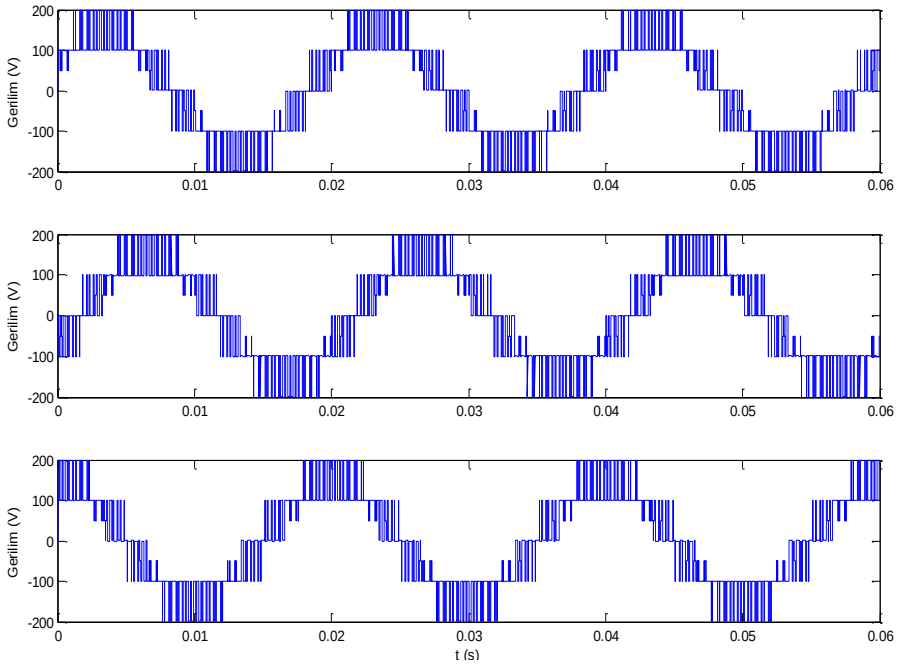


Şekil 4.1. Üç seviyeli diyot kenetlemeli evirici benzetim modeli

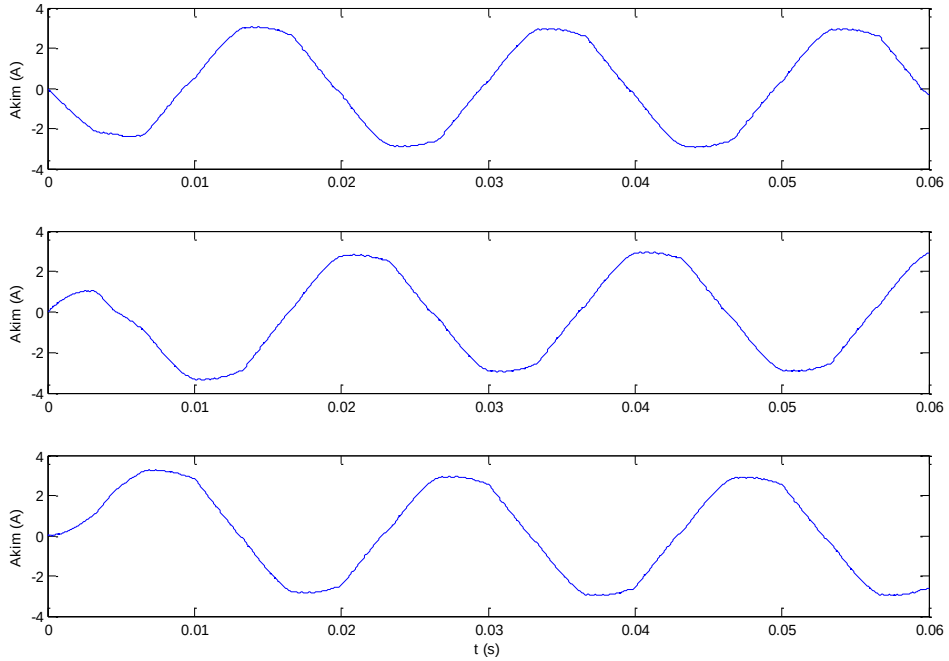
Şekil 4.2'de modellenen üç seviyeli evirici için aynı genlikte iki taşıyıcı işaret ve bir referans (sinüs) işaretin karşılaştırılması gösterilmektedir. Sinyal genlikleri modülasyon indeksi 0,8 olacak şekilde belirlenmiştir. Anahtarlama işaretleri, evirici çıkış gerilimlerinin frekansı 50 Hz ve anahtarlama frekansı 2 KHz olacak şekilde üretilmektedir. Modelde R=10 Ω ve L=0,1 mH değerlerine sahip olan üç fazlı R-L yükü kullanılmaktadır. Bu koşullar için elde edilen gerilim ve akım dalga şekilleri Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'de gösterilmektedir.



Şekil 4.2. Evirici denetimi için referans ve taşıyıcı işaretler (modülasyon indeksi = 0,8)



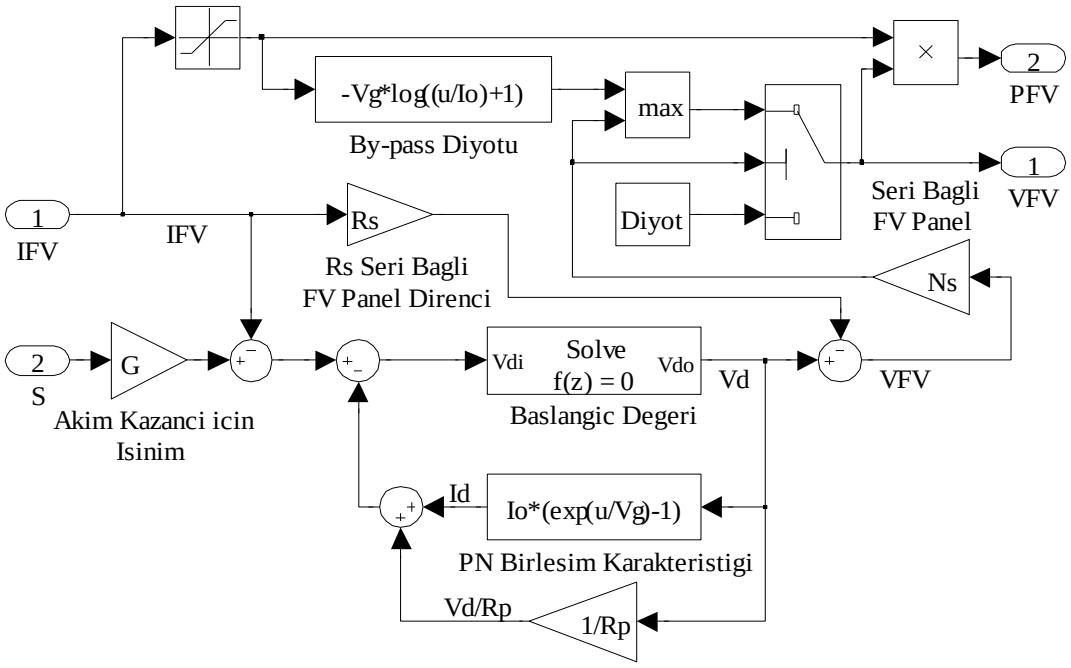
Şekil 4.3. Evirici çıkışındaki fazlar arası gerilimler



Şekil 4.4. Evirici çıkışındaki yük akımları

4.2. Fotovoltaik Panelin Modellenmesi

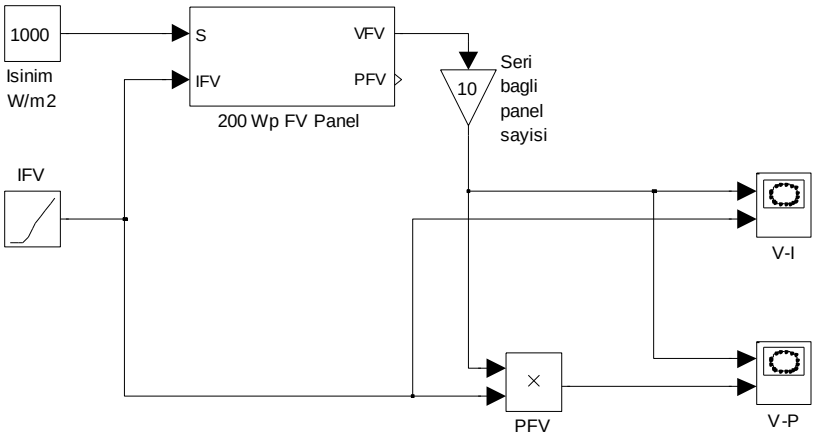
Şekil 4.5'de, deneysel olarak gerçekleştirilen FV sistemde kullanılan Mage Powertec Plus marka mono kristal güneş panelinin Matlab modeli gösterilmektedir. Modelleme bu panelin katalog verilerine dayalı olarak gerçekleştirilmiştir. Kullanılan güneş panelinin katalog değerleri Tablo 4.1'de gösterilmektedir. Modelde, panel akımı ve ışınım giriş değişkenleri, panel gerilimi ve gücü çıkış değişkenleridir. Bu modelleme yaklaşımı çıkış değişkeni gerilim olduğu için seri bağlı panellerden oluşan sistemler için daha uygundur. Modellemede sıcaklık değişkeni etkisi bulunmamaktadır. Fotovoltaik dizi, her biri 200Wp güce sahip 10 adet panelin seri bağlanmasından oluşmaktadır. Bu durumda FV dizinin akım karakteristiği değişmezken, gerilimi ve gücü 10 kat artarak 2000Wp güce ulaşılmaktadır. FV diziye ait I-V ve P-V eğrileri Şekil 4.7'de, bu grafiklerin çizdirilmesi için kullanılan matlab modeli ise Şekil 4.6'da gösterilmektedir.



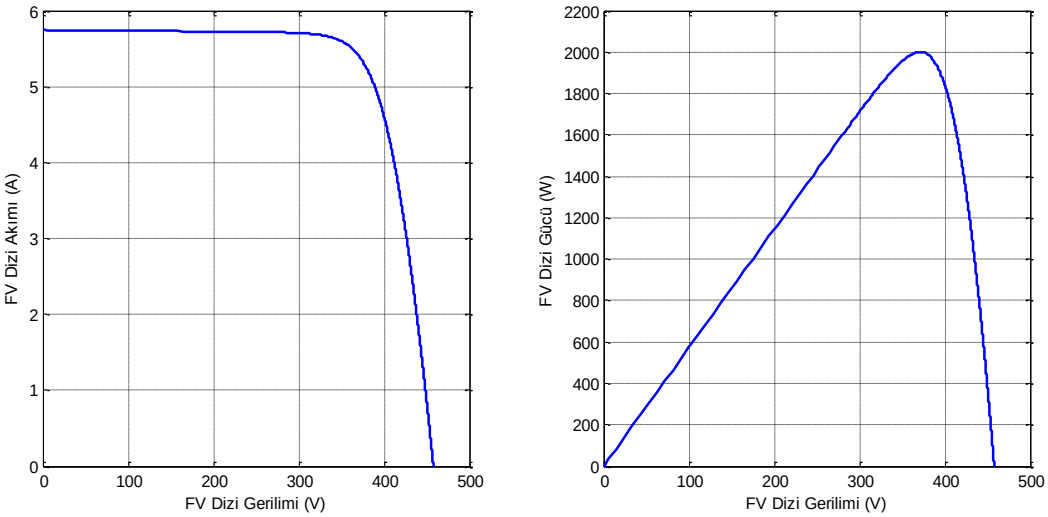
Şekil 4.5. Fotovoltaik panel modeli

Tablo 4.1. Mage Powertec Plus Mono (200Wp) panel katalog verileri [107]

Parametre	Değeri
Maksimum güç, P_m	200W
Kısadevre akımı, I_{sc}	5,75A
Açıkdevre gerilimi, V_{oc}	45,78V
Maksimum güçte akım, I_m	5,40A
Maksimum güçte gerilim, V_m	37,05V
Akımın sıcaklık katsayısı	+0,05 %/K
Gerilimin sıcaklık katsayısı	-3,32 %/K
Gücün sıcaklık katsayısı	-0,42 %/K



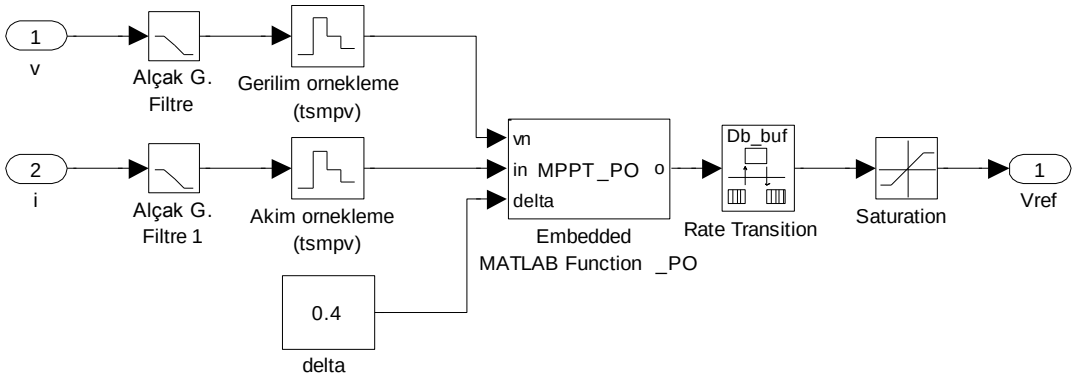
Şekil 4.6. Fotovoltaik dizi modeli



Şekil 4.7. Fotovoltaik diziye ait V-I ve V-P eğrileri

4.3. Maksimum Güç Noktası İzleyicisinin Modellenmesi

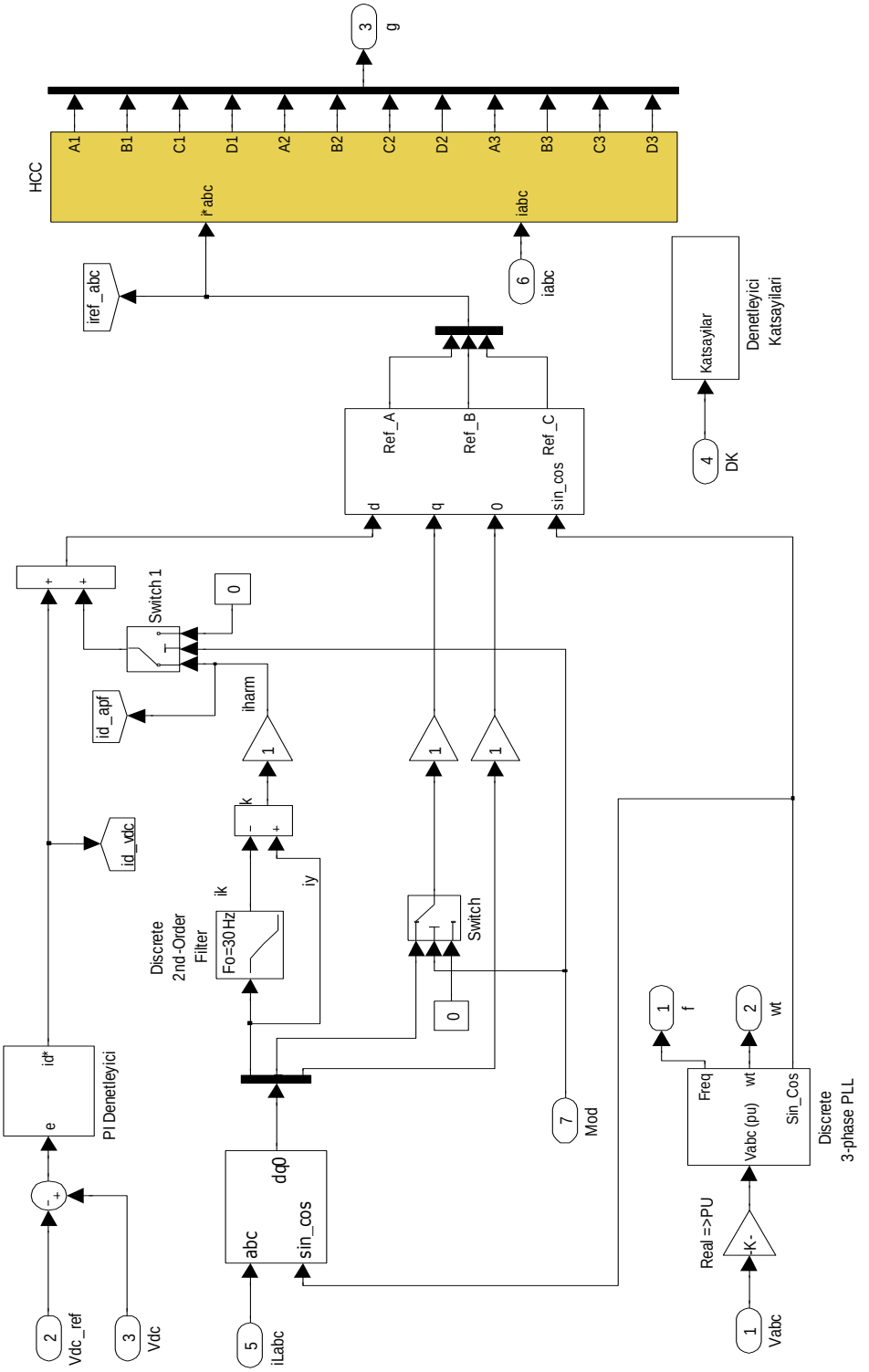
Şekil 4.8'de Maksimum güç noktası izleyicisinin Matlab/Simulink modeli gösterilmektedir. Modelde panel gerilimi ve panel akımı giriş değişkenleri, DA bara referans gerilimi ise çıkış değişkeni olmaktadır. Sistem için örnekleme zamanı 20 ms olarak tanımlanmıştır. Dolayısıyla MGNİ her 20ms de bir FV dizinin gerilimini ve akımını okuyarak Matlab Function bloğu içerisinde işlemekte ve Saptır ve Gözlemle algoritmasını kullanarak DA Bara denetleyicinin referans gerilim değerini hesaplamaktadır. Modelin çalışması için gerekli yazılım Ek A'da sunulmaktadır.



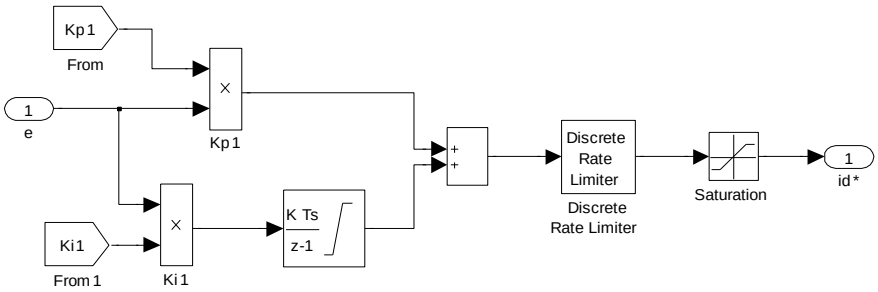
Şekil 4.8. Maksimum güç noktası izleyici modeli

4.4. Denetim Sisteminin Modellenmesi

Bu modelleme çalışmasında, denetim değişkenlerinin sabit olması ve PI denetleyici ile kolayca denetlenebilmesi nedeniyle senkron referans çatı (dq) denetim yöntemi seçilmiş ve Matlab ortamında modellenmiştir. Oluşturulan Matlab modeli Şekil 4.9'da gösterilmektedir. Modelleme ile ilgili bilgiler Bölüm 4' de verilmektedir. Şekil 4.9'da gösterilen denetim modelinde yer alan PI denetleyici modeli Şekil 4.10'da gösterilmektedir. PI denetleyici katsayıları benzetim başladıktan sonra rampa şeklinde artmakta ve K_p=0,2 ve K_i=1 değerlerine ulaşmaktadır.

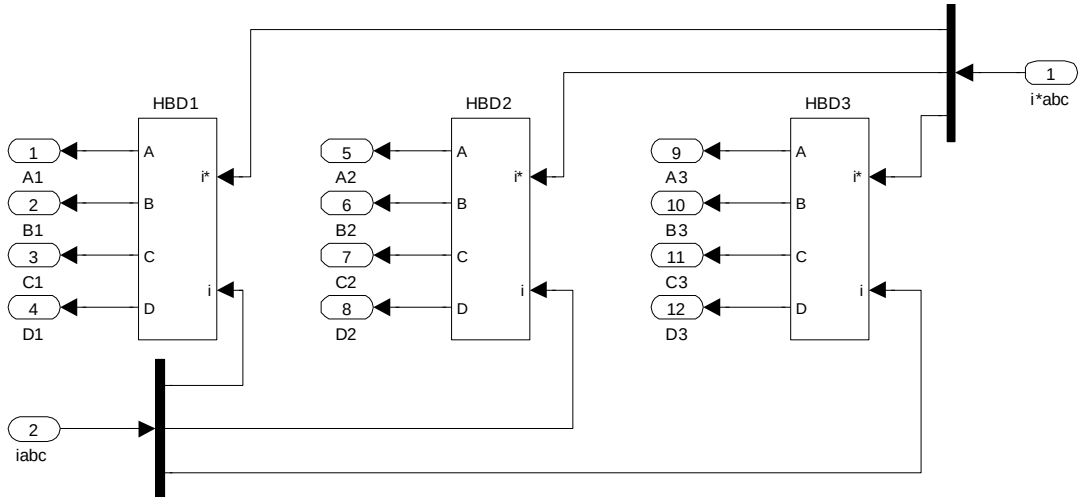


Şekil 4.9. FV sistem denetim modeli



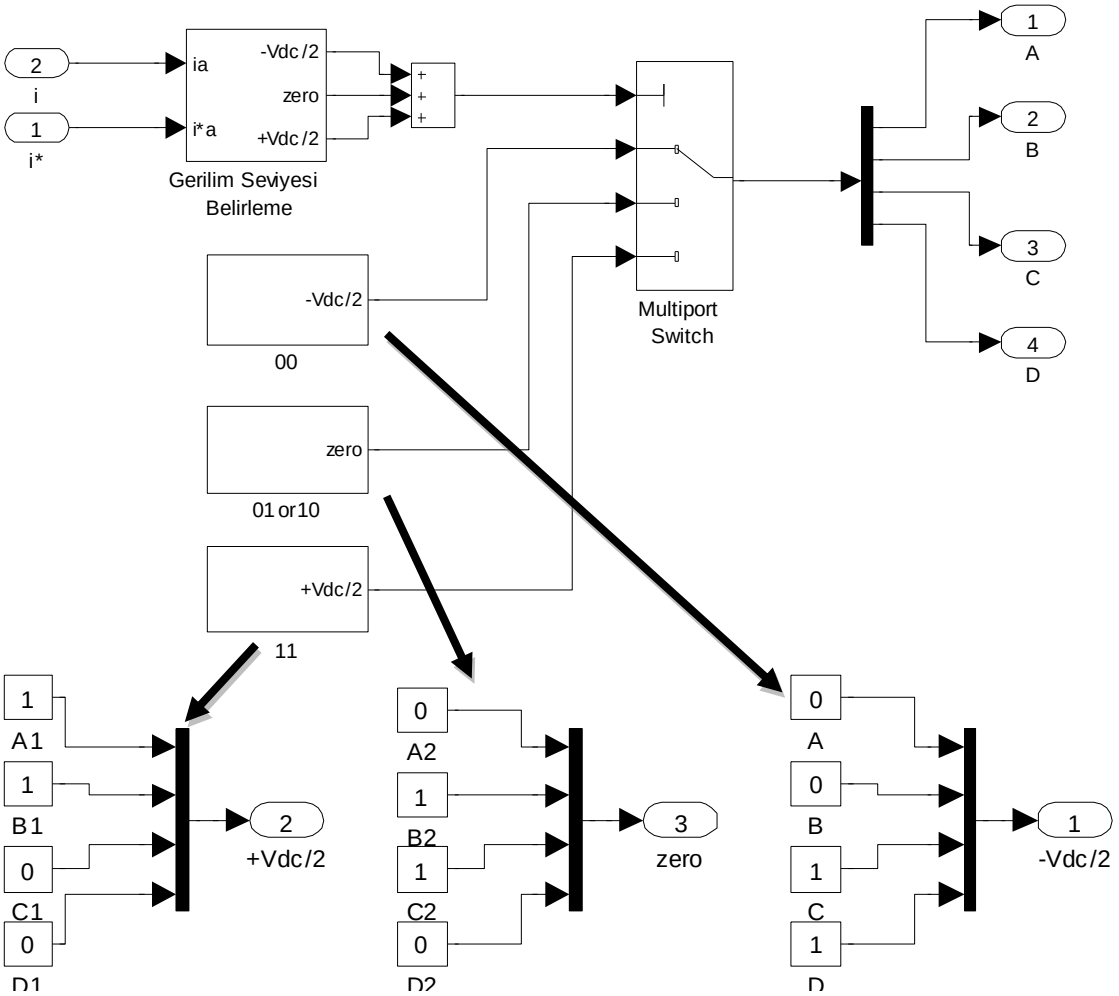
Şekil 4.10. PI Denetleyici modeli

Şekil 4.11'de ise üç fazlı histerezis band akım denetleyici modeli gösterilmektedir. Bu model üç faz akımlarının ayrı ayrı denetimini sağlayan HBD1, HBD2 ve HBD3 alt modellerinden oluşmaktadır. Bu üç alt model birbirinin aynısı olup içeriği Şekil 4.12'de gösterilmektedir.

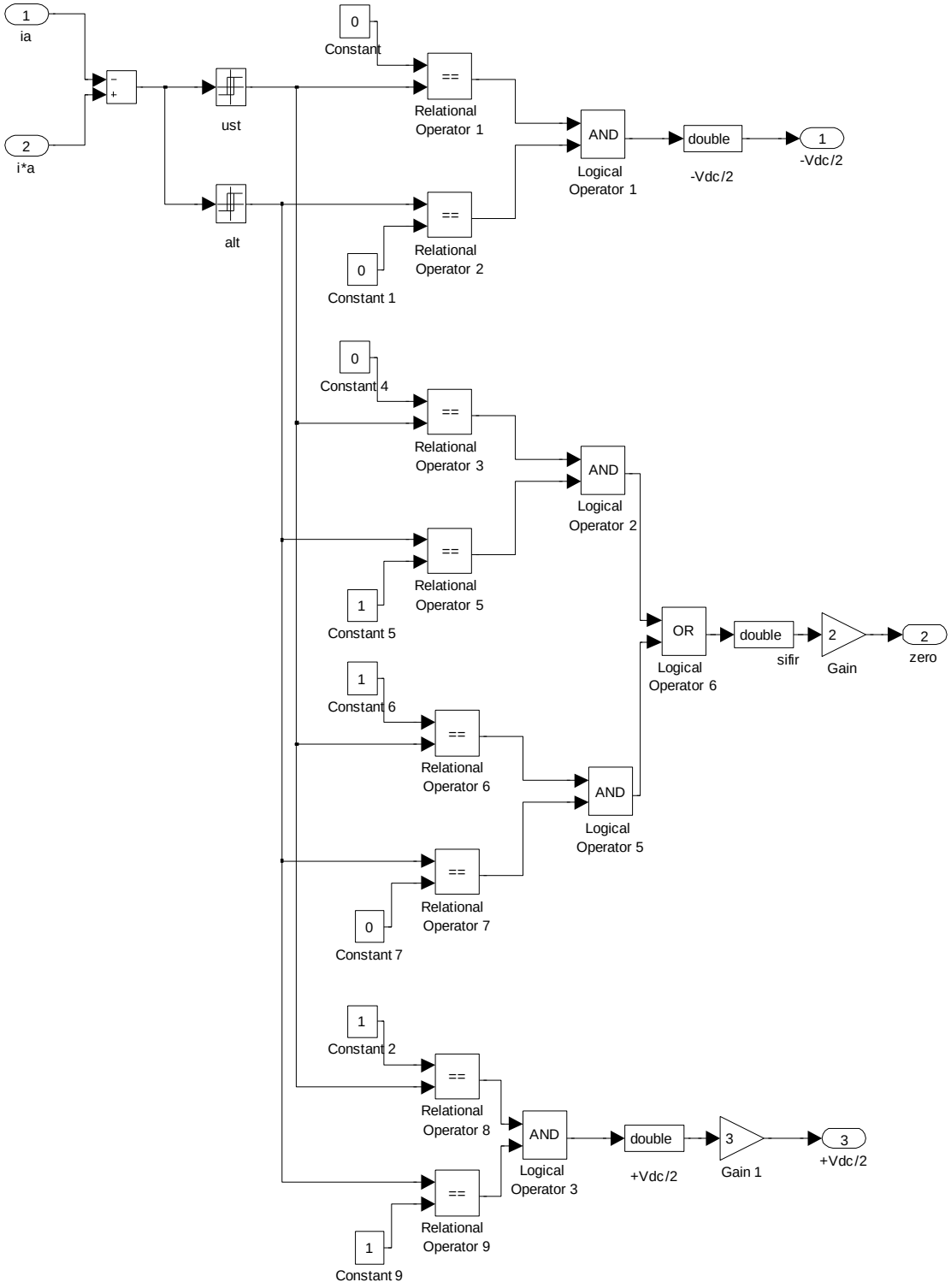


Şekil 4.11. Histeresiz Band akım denetleyici modeli (3 faz)

Şekil 4.12'de gösterilen histeresiz band alt sistem modeli girişine gelen referans akım ve gerçek akım değerlerine göre anahtarlama sinyallerini üretmektedir. Bu model gerçek akımın referans akımı takip etmesi için çok seviyeli eviricinin hangi gerilim seviyesinde çıkış üretmesi gerektiğini ($+V_{dc}/2$, sıfır, $-V_{dc}/2$) belirleyerek bu duruma uygun anahtarlama sinyallerini çıkışa aktarmaktadır. Evirici gerilim seviyesinin ve anahtarlamaların belirlenmesi işlemi Bölüm 3'de verilen Tablo 3.1'deki durumlara göre yapılmaktadır ve bu işleme ilişkin alt model Şekil 4.13'de gösterilmektedir.

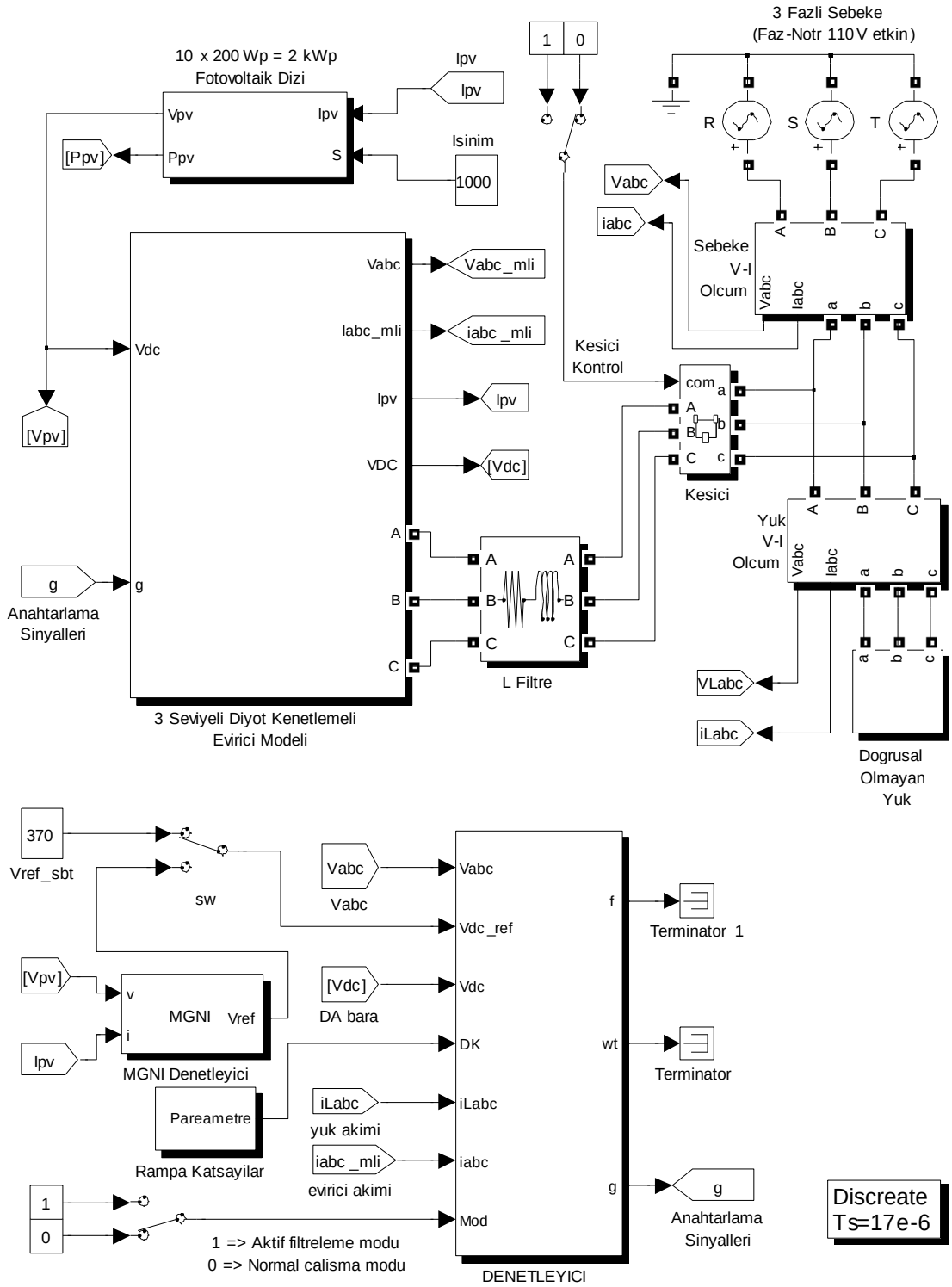


Şekil 4.12. Histerezis bant akım denetleyici alt sistem modeli (1 faz)



Şekil 4.13. Histerezis bant akım denetleyici Gerilim Seviyesi Belirleme alt modeli

4.5. Tüm Sistemin Modellenmesi



Şekil 4.14. 3S-NNK eviriciye sahip üç fazlı şebeke bağlantılı FV sistemin Matlab Modeli

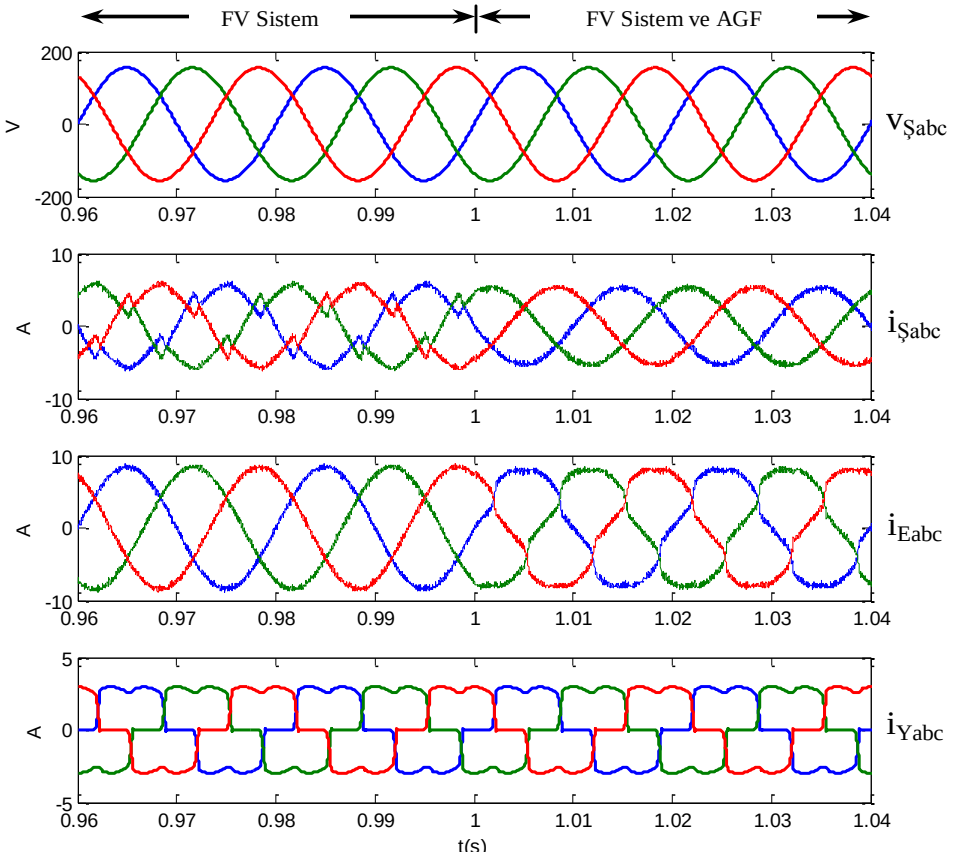
Üç fazlı şebeke bağlantılı aktif filtreleme yeteneğine sahip çok seviyeli evirici tabanlı FV sistemin performans analizi Matlab/Simulink ortamında gerçekleştirilen benzetimlerle yapılmaktadır. Harmonik akımları RL yüklü üç fazlı köprü diyot doğrultucunun doğrusal olmayan yük olarak kullanılmasıyla üretilmektedir. FV sistem iki çalışma modunda test edilmektedir. Bunlardan birincisi "Sadece FV Sistem" modudur. Bu modda sistem, FV dizeden gelen DA gücü evirerek şebekeye mümkün olduğunca az harmonik içeren sinüs formunda akım verir. Bir başka deyişle şebekeden çekilen akımı düzeltmeksizin klasik FV sistem şeklinde çalışır. İkincisi ise "AGF fonksiyonlu FV sistem" modudur. Bu modda ise sistem FV diziden gelen DA gücü evirici üzerinden şebekeye aktarmanın yanı sıra şebekeye verilen akım dalga şekli şebekeden çekilen akımı sinüse tamamlayacak biçimdedir. Oluşturulan FV sistem modeli Şekil 4.14'de gösterilmektedir. Benzetim modeli temel olarak FV panel dizisi modeli, 3S-NNK evirici modeli, MGNİ sistem modeli ve denetleyici sistem modeli bileşenlerinden meydana gelmektedir. Benzetim modelinde bulunan FV panel modeli için deneysel çalışmada kullanılan Mage Powertec Plus Mono (200Wp) güneş paneli katalog verileri esas alınmıştır. 10 adet güneş panelinin seri olarak bağlanması ile elde edilen akım, gerilim ve güç değerleri benzetim ortamında da elde edilmektedir. Simülasyonda kullanılan sistem parametreleri Tablo 4.2'de verilmektedir.

Tablo 4.2. Simülasyonda kullanılan sistem parametreleri

Şebeke	Gerilim, $v_{Şabc}$	110 V_{rms}/L-N
	Frekans, $f_ş$	50 Hz
FV Dizi	Maksimum güç, P_m Açık devre gerilimi, V_{oc} Kısa devre akımı, I_{sc} MGN'de gerilim, V_m MGN'de akım, I_m	2000 Wp 457,8 V 5,75 A 370,5 V 5,40 A
FV Sistem	DC bara gerilimi, V_{da} Filtre bobini endüktansı, L_f DC bara kapasiteleri, C_{da1}, C_{da2}	370 V 6,7 mH 2200 μF
Doğrusal Olmayan Yük (Köprü Diyot Doğrultucu)	Yük gücü, P_Y DA tarafı direnç, R_Y DA tarafı endüktans, L_Y	0,47 kW 90 Ω 5,6 mH

4.6. Benzetim Sonuçları

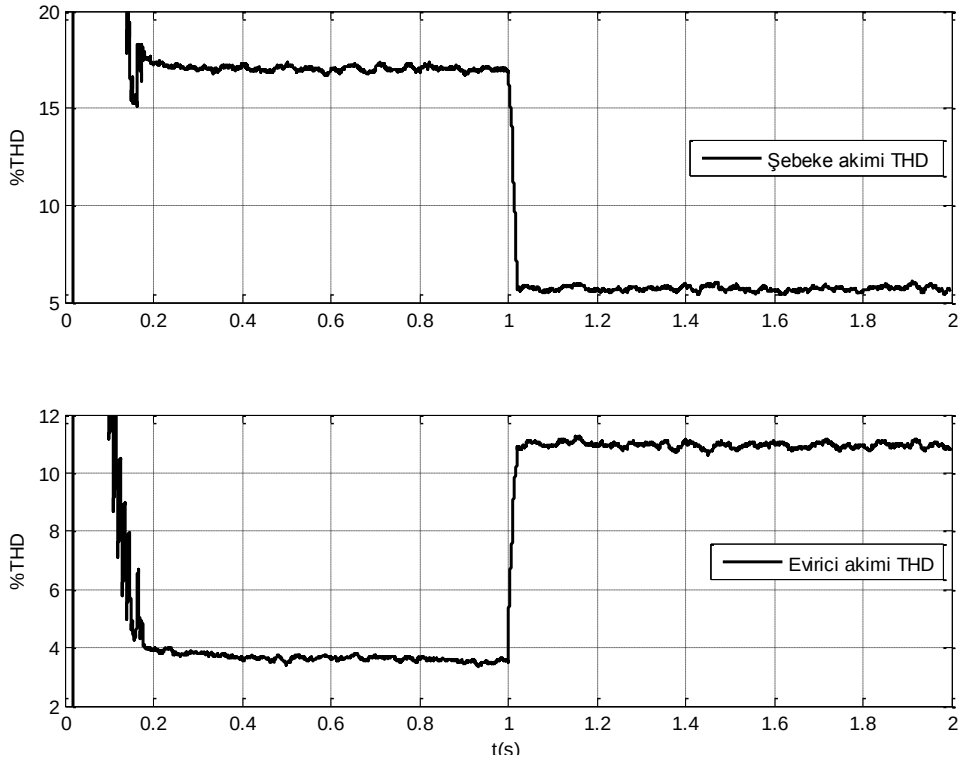
Matlab/Simulink ortamında oluşturulan FV sistem modeli benzetim sonuçlarını elde etmek için toplam 2 saniye boyunca çalıştırılmıştır. Benzetim süresince güneş ışınımı 1000W/m^2 değerinde sabit tutulmuştur. Yapılan benzetimin ilk 1 saniyesinde FV sistem "Sadece FV Sistem" modunda çalıştırılmış, kalan 1 saniyede ise "AGF fonksiyonlu FV sistem" modunda çalıştırılmıştır. Şekil 4.15'de sırasıyla üç fazlı şebeke gerilimi, şebeke akımı, evirici akımı ve yük akımı gösterilmektedir. Benzetim sonuçları, sistemin maksimum güç noktası izleme, şebekeye aktif güç iletme ve hormonik akımlarını filtreleme konusundaki etkinliğini göstermektedir.



Şekil 4.15. Üç faz şebeke gerilimi, şebeke akımı, evirici akımı ve yük akımı

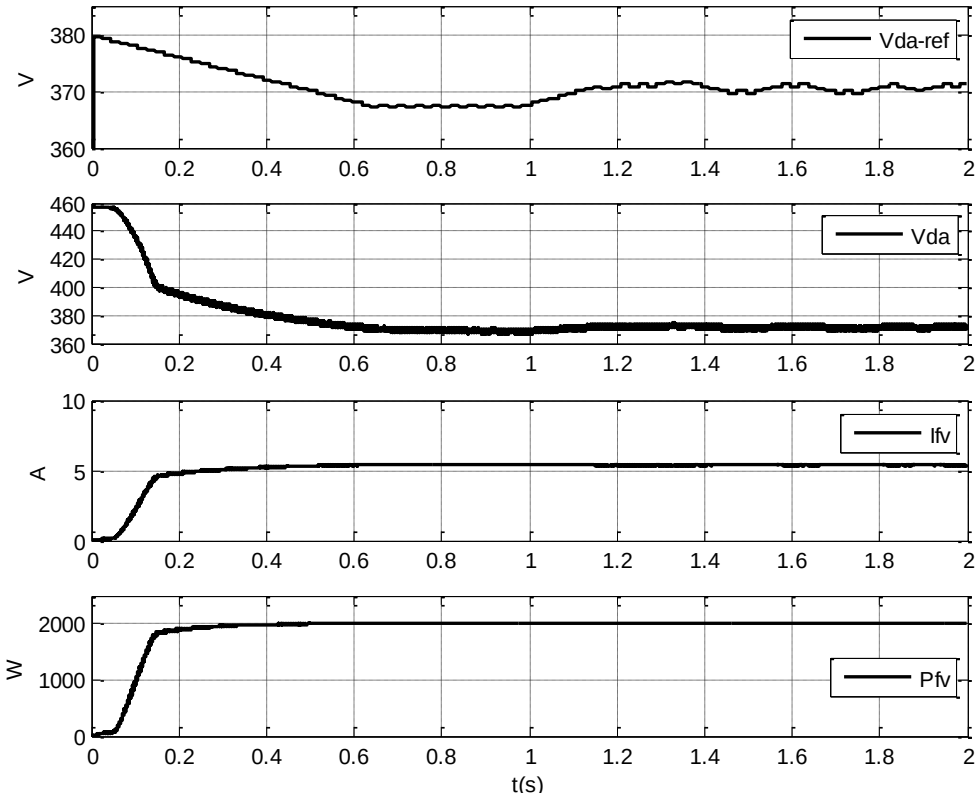
Şebekeden çekilen akıma bakıldığında ilk bir saniyelik kısımda harmonik oluşturan yükten dolayı bozulmaların olduğu görülmektedir. Ancak son bir saniyelik süreçte bu bozulmanın belirgin bir şekilde azaldığı görülmektedir. Bu durum Şekil 4.16'da gösterilen Toplam Harmonik Bozunumu (THB) grafiklerinden de anlaşılmaktadır. Aktif filtre moduna geçildiğinde şebeke akımındaki %THB değeri %17 den % 6

civarına gerilediği görülmektedir. Yine evirici kol akımlarına bakıldığında normal çalışma modunda akımlar sinüsoidale yakınken aktif filtreleme modunda akım dalga şekillerinin şebeke akımını düzeltecek şekilde oluştuğu görülmektedir. Ancak bu durumda evirici akımındaki %THB değeri %4 den % 11 değerine yükseldiği görülmektedir.



Şekil 4.16. Şebeke akımı ve evirici akımına ilişkin yüzdesel toplam harmonik bozunumu

Şekil 4.17'de ise MGNİ tarafından belirlenen DA bara referans gerilimi, DA bara gerilimi, FV panel dizi akımı, FV panel dizi gücü grafikleri gösterilmektedir. MGNİ'nin üretmiş olduğu DA bara gerilim referansı 380V olarak belirlenen başlangıç değerinden başlayarak azalmakta ve FV dizinin maksimum güç noktasında çalışmasını sağlayacak 370V değerine ulaşmaktadır. Yine aynı grafikte DA bara geriliminin de bu referans değeri takip ettiği ve buna bağlı olarak FV dizi akımının 5,4A, gücünün ise 2000W değerine ulaştığı görülmektedir.

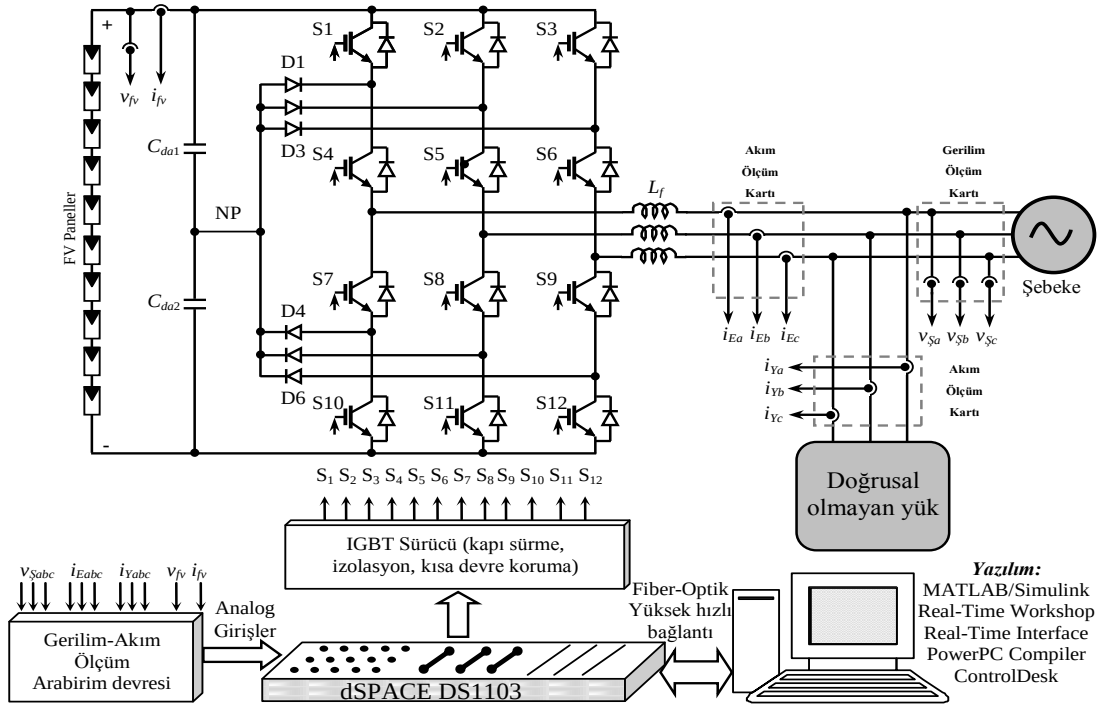


Şekil 4.17. DA bara referans gerilimi, DA bara gerilimi, FV panel dizi akımı, FV panel dizi gücü grafikleri

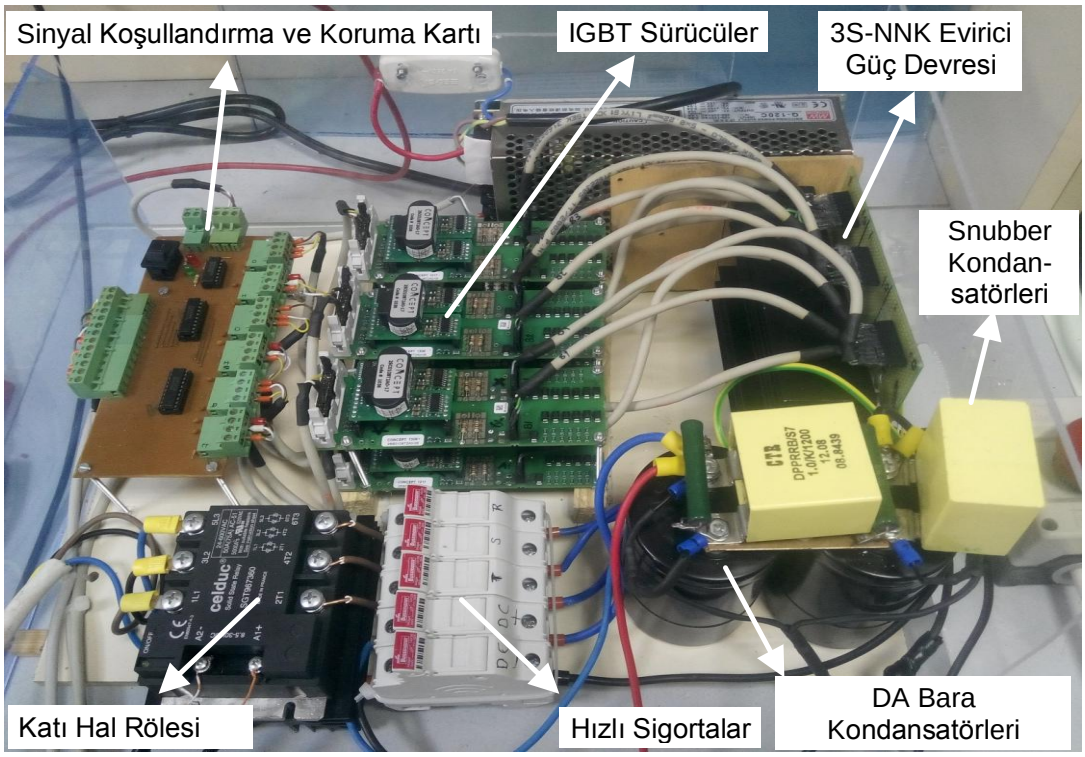
5. UYGULAMA DEVRESİNİN TASARIMI VE DENEYSEL SONUÇLAR

Üç fazlı şebeke bağlantılı aktif filtreleme yeteneğine sahip çok seviyeli evirici tabanlı FV sistemin uygulanabilirliğini değerlendirmek için bir deneysel uygulama düzeneği tasarlanmış ve oluşturulmuştur. Deneysel uygulama düzeneğinin genel blok diyagramı Şekil 5.1'de verilmektedir. Şekil 5.2'de ise sistemin test platformunun fotoğrafı gösterilmektedir.

Bu deneysel uygulama düzeneği dSPACE / DSP1103 ile kontrol edilmektedir. Bu donanım denetim işlemini gerçekleştirmek için gerçek zamanlı bir işlemciye ve giriş/çıkış (I/O) ara birimlerine sahiptir. Bununla birlikte Matlab/Simulink aracılığıyla programlamaya izin veren gerçek zamanlı arayüz (real-time interface, RTI) aracını desteklemektedir.



Şekil 5.1. Üç fazlı şebeke bağlantılı FV sistemin deneysel uygulama düzeneğine ait blok diyagram



Şekil 5.2. Üç fazlı şebeke bağlantılı FV sistemin test platformunun fotoğrafı

Tablo 5.1'de deneysel uygulama düzeneğine ilişkin parametreler verilmektedir. Sistemi şebekeden yalıtmak için kademeli 3 fazlı bir trafo kullanılmaktadır. Bu nedenle şebeke parametreleri olarak trafo parametreleri esas alınmaktadır.

Tablo 5.1. Deneysel çalışmada kullanılan sistem parametreleri

Şebeke (Trafo)	Gerilim, $v_{Şabc}$	110 V_{rms}/L-N
	Frekans, $f_ş$	50 Hz
	Empedansı ($R_Ş$, $L_Ş$)	10mΩ, 1mH
Chroma FV Simülatör	Maksimum güç, P_m Açık devre gerilimi, V_{oc} Kısa devre akımı, I_{sc} MGN'de gerilim, V_m MGN'de akım, I_m	2000 Wp 457,8 V 5,75 A 370,5 V 5,40 A
FV Sistem	DA bara gerilimi, V_{da} Filtre bobini endüktansı, L_f DA bara kapasiteleri, C_{da1}, C_{da2}	370 V 6,7 mH 2200 µF
Doğrusal Olmayan Yük (Köprü Diyot Doğrultucu)	Yük gücü, P_Y DA tarafı direnç, R_Y DA tarafı endüktans, L_Y	0,47 kW 90 Ω 5,6 mH

Deneysel çalışma kapsamında, 2008-2010 yılları arasında yürütmüş 108E083 nolu TÜBİTAK 1001 araştırma projesi ile elde edilen cihazlarla birlikte Kocaeli Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümünde kurulan Güç Elektroniği ve Güç Kalitesi Araştırma Laboratuvarının imkânlarından faydalanılmıştır. Bu bağlamda daha önceden laboratuarda hazır bulunan bazı ölçüm ve ara birim kartlarından yararlanılmıştır. Bunlar, akım-gerilim ölçüm kartı, sinyal koşullandırma ara birim kartı, DA bara gerilim ölçüm kartıdır. Deneysel düzeneğe ilişkin test platformunun kurulması için 3S-NNK evirici güç devresi, IGBT sürücü kartları, sinyal koşullandırma ve koruma kartı tasarlanarak imalatı gerçekleştirilmiştir.

5.1. FV Panel Dizisi ve Yük Grubu

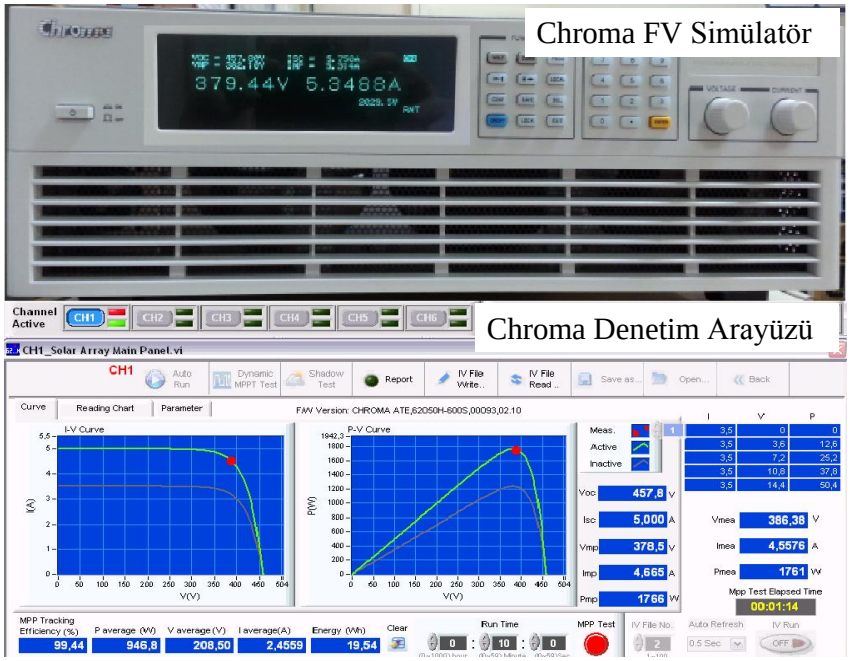
Deneysel çalışmada FV kaynak olarak Kocaeli Üniversitesi Teknoloji Fakültesi çatısında 2000W kurulu güce sahip FV panel dizisi kullanılmaktadır. Her biri 200W gücüne sahip 10 adet Mage Powertec Plus Mono kristal FV güneş panelleri bulunmaktadır. Güneş panelinin elektriksel özellikleri Tablo 4.1'de verilmektedir. Şekil 5.3'te FV panellere ait fotoğraf gösterilmektedir.



Şekil 5.3. 2000W kurulu güce sahip FV panel dizisi fotoğrafı

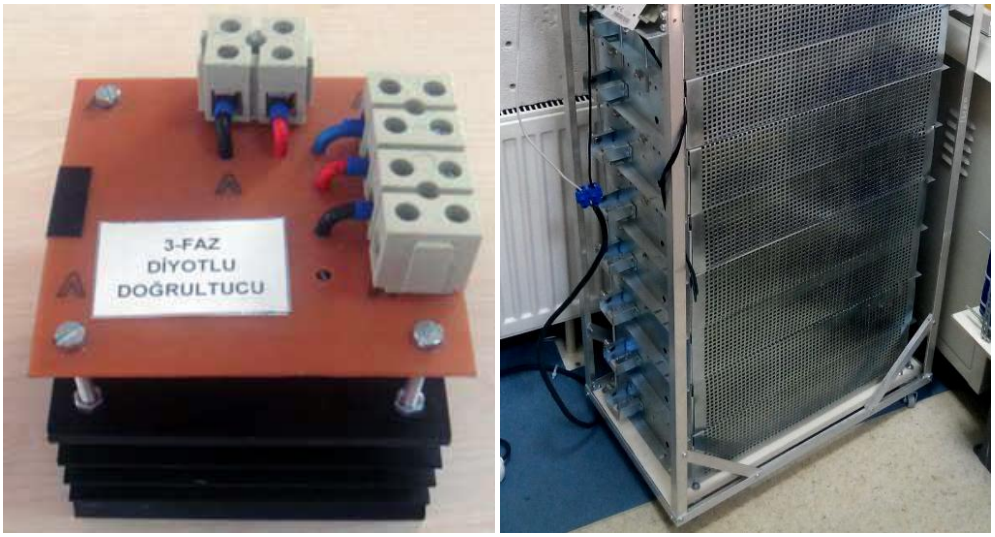
Bu deneysel çalışmada Chroma FV Simülatör 62050H-600S programlanabilir güç kaynağı aracılığıyla güneş panellerden alınan DA gücün benzetimi sağlanmıştır. Bu

cihaz açık devre gerilimi (V_{oc}) 600V'a ve kısa devre gerilimi (I_{sc}) 8,5A'e kadar olan maksimum 5kW gücündeki FV dizilerin benzetimini yapabilmektedir. FV dizi simülatörü yüksek kararlılık ve hızlı cevap verebilme özellikleri ile MGNİ ve evirici performanslarının değerlendirilmesi açısından avantajlara sahiptir. 16 bit sayısal denetimli olan cihaz yüksek doğrulukta akım (±%0,1) ve gerilim (±%0,05) ölçme devreleri ile donatılmıştır. Ayrıca cihaz sayesinde farklı güneşlenme koşulları altında FV modül karakteristiklerinin benzetimi, statik ve dinamik MGNİ testleri yapılabilmekte, gerektiğinde veriler kaydedilebilmektedir. Cihaza ait bilgisayar arayüzü programı sayesinde FV panel karakteristik eğrisi ve çalışma noktası grafiksel olarak ekranda görüntülenebilmektedir [108]. Şekil 5.4'de deneysel çalışmalarda kullanılan Chroma FV Simülatör ve denetim arayüzü gösterilmektedir. Simülatörün programlandığı elektriksel parametreler gerçek FV dizi parametreleri ile örtüşmekte olup Tablo 5.1'de verilmektedir.



Şekil 5.4. Chroma FV Simülatör ve denetim arayüzü

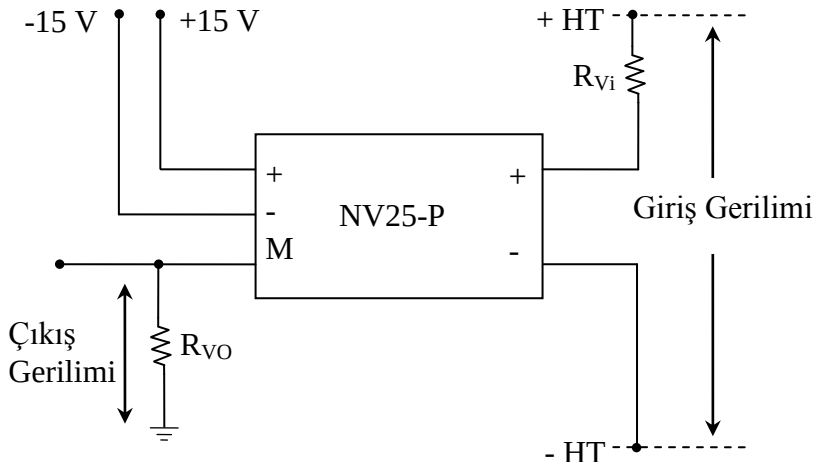
Deneysel çalışmada yük olarak RL yüklü üç fazlı köprü diyot doğrultucu kullanılmaktadır. Kullanılan doğrultucunun fotoğrafı Şekil 5.5'de gösterilmektedir.



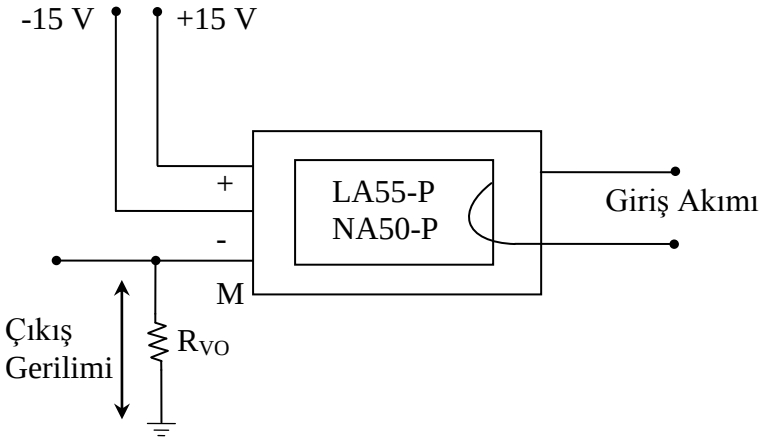
Şekil 5.5. Üç fazlı köprü diyotlu doğrultucu ve omik yük grubu fotoğrafı

5.2. Akım-Gerilim Ölçüm Kartı

Şebeke bağlantılı FV sisteminde akım ve gerilimlerin ölçülmesinde elektrik sisteminden galvanik olarak izolasyon sağlayan hall etkili akım (LEM LA55-P ve TEG NA50-P, 50A, 1:1000 dönüştürme oranı) ve hall etkili gerilim (TEG NV25P, 500V, 2500:1000 dönüştürme oranı) sensörleri kullanılmaktadır. Akım ve gerilim ölçümlerinde sensörlerin çıkış gerilimi R_{VO} direnci ile elde edilmektedir. Hall etkili gerilim ve akım sensörü devre bağlantı şeması sırasıyla Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'de verilmektedir [109].



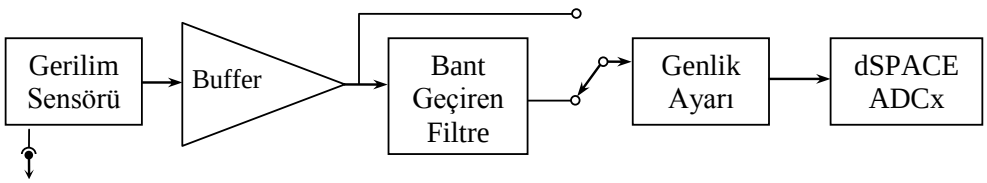
Şekil 5.6. Hall etkili gerilim sensörü devre bağlantı şeması



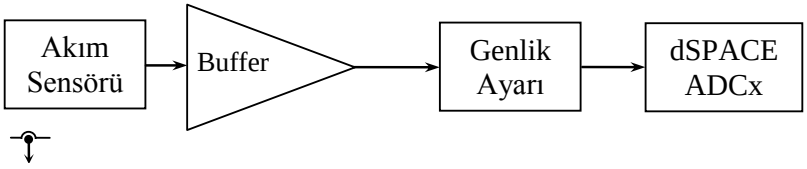
Şekil 5.7. Hall etkili akım sensörü devre bağlantı şeması

5.3. Sinyal Koşullandırma Ara Birim Kartı

Akım ve gerilim sensörlerinden elde edilen sinyaller, sinyal koşullandırma arabirim kartları ile uygun seviyelere getirilerek dSPACE CLP1103 bağlantı panelindeki, analog sayısal dönüştürücü (Analog to Digital Converter, ADC) girişlerine uygulanmaktadır. Şekil 5.8 ve Şekil 5.9'da sırasıyla gerilim ve akım sinyal koşullandırma devresi blok diyagramları gösterilmektedir [109].



Şekil 5.8. Gerilim sinyal koşullandırma devresi blok diyagramı

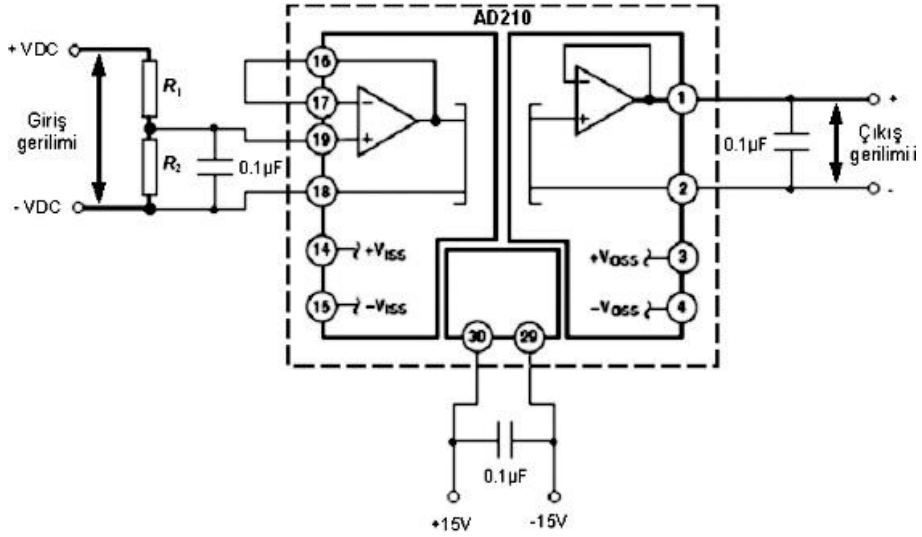


Şekil 5.9. Akım sinyal koşullandırma devresi blok diyagramı

5.4. DA Bara Gerilim Ölçüm Kartı

FV sistemin güç devresinde, DA bara gerilimi AD210 izolasyon yükselteci ile ölçülmektedir. (AD210, 2500 V_{rms} yüksek gerilim izolasyonu, giriş, çıkış ve güç izolasyonu, 20 kHz geniş bant genişliği ve 15 V izoleli güç) DA kondansatör gerilimi, gerilim bölücü dirençler ile 10 V gerilim değerinin altına düşürülerek

AD210 girişine uygulanmakta ve çıkışta bu gerilim izoleli olarak alınmaktadır. Şekil 5.10'da AD210 izolasyon yükselteci devre bağlantı şeması gösterilmektedir [109].



Şekil 5.10. AD210 izolasyon yükselteci devre bağlantı şeması

5.5. Aşırı Akım ve Gerilim Koruma Kartı

FV sisteminde oluşabilecek aşırı akım ve/veya gerilim gibi olumsuz durumlar, hızlı işlemsel yükselteçler kullanılarak gerçekleştirilen aşırı akım ve gerilim koruma katı ile tespit edilerek, Tampon devresinin reset girişine gönderilen sinyal ile IGBT'ler devreden çıkarılmaktadır. Böylece deneysel sistemin güvenli bir şeklide çalıştırılması sağlanmaktadır [109].

5.6. IGBT Sürücü Modülleri ve Geliştirme Bordları

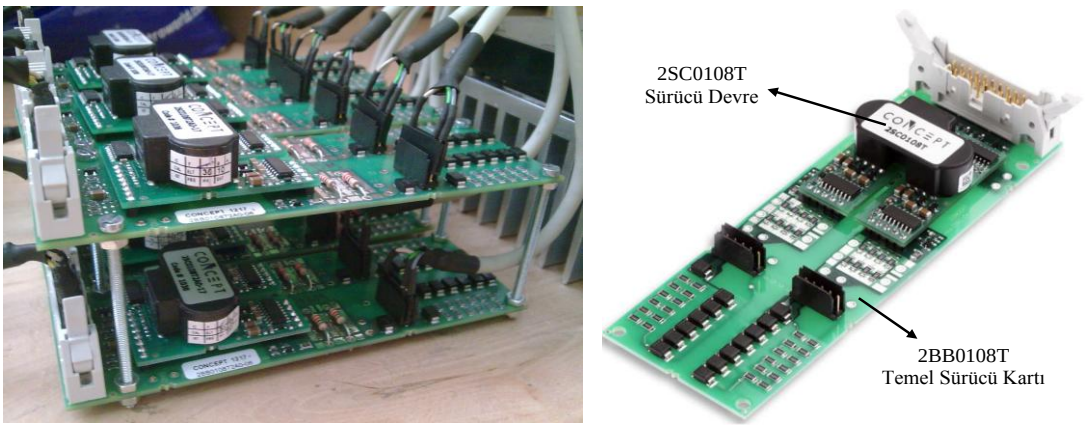
Kontrol sistemi tarafından üretilen anahtarlama sinyalleri ile IGBT'lerin sürülmesi için 6 adet 2 kanal sürücü modül (CONCEPT 2SC0108T, tüm anahtarlama sinyallerinin elektriksel izolasyonu, reset girişi) kullanılmaktadır. Bu çalışmada tüm IGBT sürücüler Yarım Köprü (Half Bridge) modunda çalıştırılarak aynı kolda bulunan IGBT'lerin anahtarlama sinyalleri arasındaki gerekli ölü zaman aralıkları otomatik olarak üretilmektedir. Böylece denetim devresinde 3 fazlı çok seviyeli eviricinin bir kolunda bulunan dört IGBT'den sadece üstteki iki IGBT için anahtarlama sinyali üretmek yeterli olmaktadır. Alttaki IGBT'lere uygulanan anahtarlama sinyalleri IGBT sürücü devre tarafından ölü zaman eklenerek oluşturulmaktadır. Çok seviyeli eviricinin bir kolunda 4 IGBT olduğundan bir kolu

denetlemek için 2 sürücü kullanılmaktadır. Evirici 3 fazlı olduğundan toplam 6 sürücü toplam 12 IGBT'yi sürmektedir. Tablo 5.2'de bir eviricinin bir kolu için sürücü ve evirici modül bağlantısı ifade edilmektedir.

Tablo 5.2. Sürücü devresi ile evirici modül bağlantıları

1.Sürücü (Yarım köprü modu)	Evirici Modülü (1 kol)	2.Sürücü (Yarım köprü modu)	Evirici Modülü (1 kol)
C1	-	C1	-
G1	55	G1	61
E1	56	E1	15b,20a-23a
C2	-	C2	-
G2	68	G2	62
E2	67	E2	11a-13a,14b

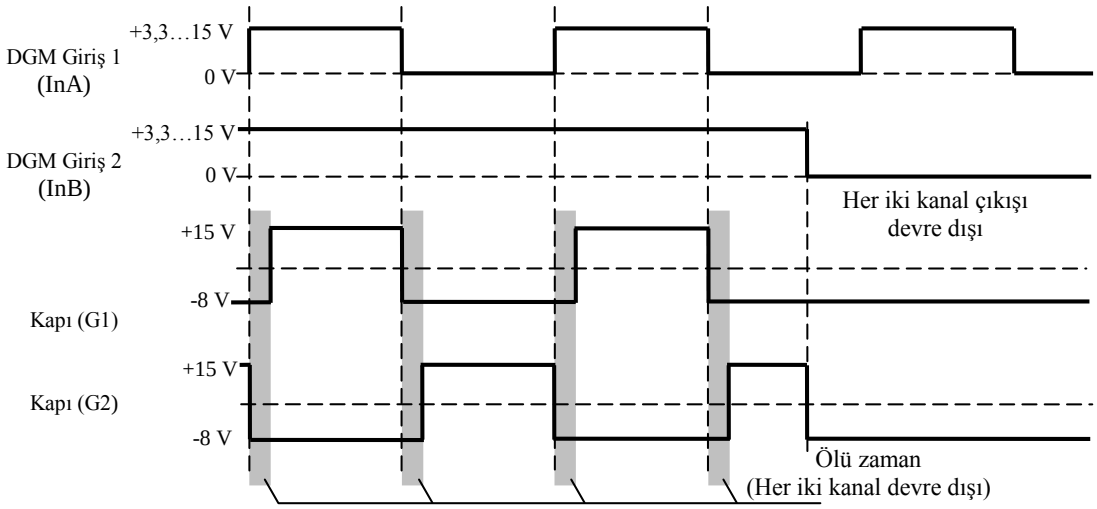
CONCEPT 2SC0108T sürücü modülleri, temel sürücü kartı (CONCEPT 2BB0108T, 1200V çok seviyeli 2 kanal çıkışlı bord) kullanılarak IGBT'lere sinyal çıkışları verilmektedir. Bu sürücü kartı IGBT'ler için gerekli olan güvenlik önlemlerini içermektedir. Her bir IGBT için kısa devre ve aşırı akım koruma, hata seviyesinde kapama, yarım köprü çalışma modunda gerekli ölü zaman aralıkları otomatik üretme ve tak-çalıştır özelliğine sahip bir karttır. Şekil 5.11'de sürücü modül ve sürücü kartı fotoğrafı birlikte verilmektedir.



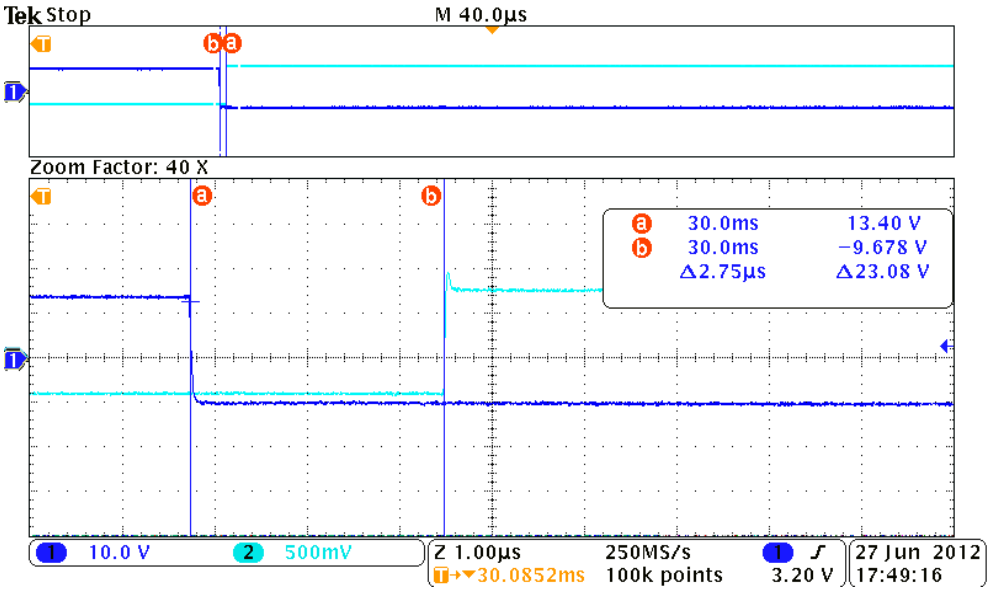
Şekil 5.11. 2BB0108T temel sürücü kartı ile 2SC0108T sürücü devresi

Ayrıca temel sürücü kartı ile sürücü modülü, IGBT'lerin iletime geçiş sırasında kolektör-emitör gerilim düşümünü ölçerek IGBT'lerin kısa devre ve aşırı akıma karşı

korunması sağlanmaktadır. Şekil 5.12'de IGBT sürücü ile üretilen ölü zamanlı kapı sinyalleri gösterilmektedir [110, 111].



Şekil 5.12. IGBT sürücü ile üretilen ölü zamanlı kapı sinyalleri [110]

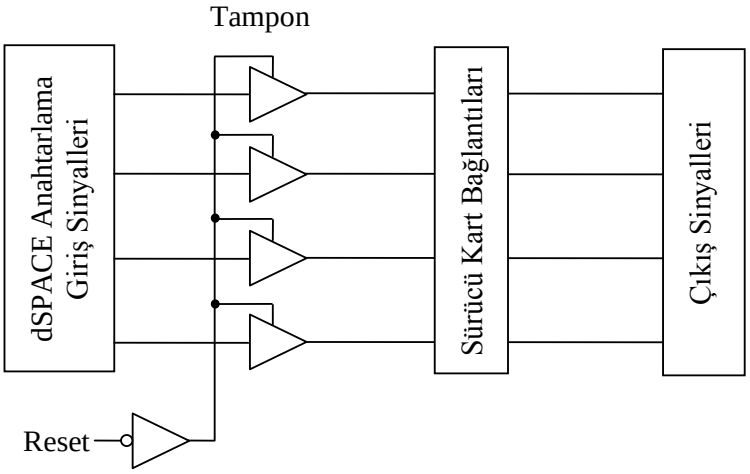


Şekil 5.13. Deneysel olarak elde edilen IGBT sürücü ile üretilen ölü zamanlı kapı sinyalleri osiloskop görüntüsü

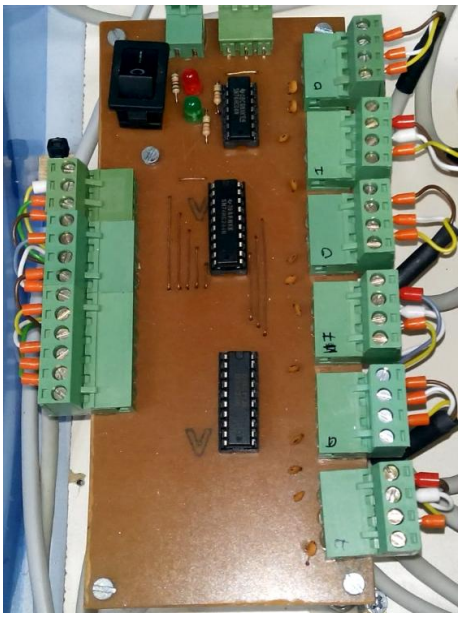
Şekil 5.13'de ise deneysel olarak elde edilen yarım köprü çalışma modunda anahtarlama sinyalleri arasındaki ölü zaman grafiği gösterilmektedir. Sürücü devre çıkışından alınan sinyaller arasında yaklaşık 2,75 µs ölü zaman olduğu görülmektedir.

5.7. Sürücüler için Tampon Devresi

dSPACE'den gelen IGBT anahtarlama sinyalleri güvenlik ve yalıtım amacıyla sürücü kartlara tampon devre üzerinden iletilmektedir. Ayrıca bu devre ile sinyaller sürücü kartları için uygun bir seviyeye getirilir. Devre üzerinde bulunan anahtar ile manüel olarak veya Bölüm 5.5'de anlatılan aşırı akım ve gerilim koruma devresinden gelen reset sinyali ile otomatik olarak dSPACE'den gelen bütün sinyaller kesilebilmektedir. Şekil 5.14'de tampon devresi blok diyagramı, Şekil 5.15'de ise fotoğrafı verilmektedir.



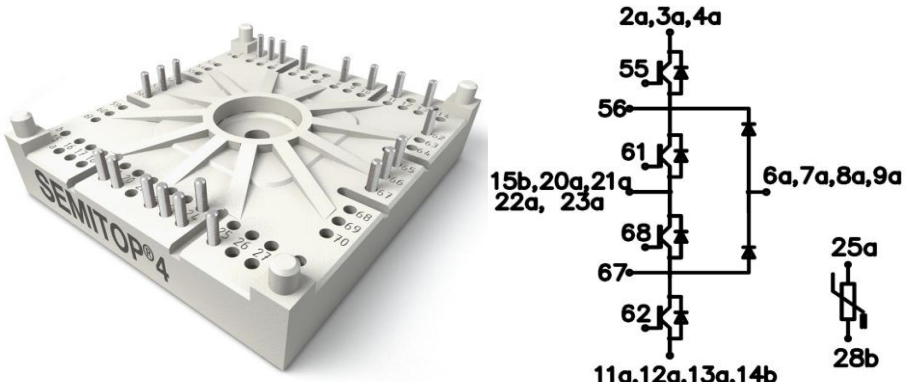
Şekil 5.14. Tampon devresi blok diyagramı



Şekil 5.15. Sinyal yükseltici ve koruma kartı fotoğrafı

5.8. Güç Devresi

Üç fazlı şebeke bağlantılı FV sisteminin güç katında 3 adet çok seviyeli evirici ayak (Semikron, SK150MLI066T, 150A, 600V) IGBT modülleri kullanılmaktadır. DA bara uçlarında iki adet seri bağlı 2200 μF, 450 V DA kondansatörleri bulunmaktadır. Evirici çıkışı ve AA hattı arasında 3 adet endüktansı 6,7 mH olan toroid nüve üzerine sarılı filtre bobinleri kullanılmaktadır. Şekil 5.16'de Semikron SK150MLI066T çok seviyeli evirici güç modülü devre şeması ve fiziksel görünümü gösterilmektedir.



Şekil 5.16. Semikron SK150MLI066T çok seviyeli evirici güç modülü [112]

5.9. Işınım Algılayıcısı (Piranometre) ve Işınım ölçer

Bilindiği gibi fotovoltaik güneş panellerinin I-V eğrileri dolayısıyla da üretebilecekleri maksimum güç değerleri güneş ışınımına bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle maksimum güç izleyici sistemlerde bir ışınım algılayıcısına ihtiyaç bulunmaktadır. Işınım ölçümü için ApoGee Instruments firmasının SP-110 modeli piranometre kullanılmıştır. Apogee SP-110 ışınım algılayıcısı silikon hücreli bir piranometredir ve toplam kısa dalga ışınımı ölçmek için kalibre edilmiştir. Algılayıcı ile ilgili bazı teknik özellikler Tablo 5.3' de verilmektedir [113].



TES 1333 APOGEE SP-110

Şekil 5.17. TES 1333 ışınım ölçer ve Apogee SP-110 ışınım algılayıcısı

Tablo 5.3. Apogee SP-110 Işınım algılayıcısı teknik özellikleri

Özellik	Değer
Duyarlılık	0,2 mV (W/m^2 başına)
Mutlak doğruluk	±%5
Kararlılık	±%3
Tekrarlanabilirlik	±%1
Çalışma sıcaklığı	(-40) – (55) ^oC
Çıkış gerilim aralığı	0-350 mV (0-1750 W/m^2)
Kalibrasyon faktörü	5 W/m^2 (mV başına)
Dış ortamda çalışmaya uygun mu?	Evet

Bu algılayıcı tam gün ışığında (1100 W/m^2) 220 mV gerilim üretmektedir. Denklem (6.1), çıkış gerilimine bağlı olarak W/m^2 cinsinden güneş ışınımının nasıl hesaplanacağını göstermektedir.

Güneş ışınımı (W/m^2) = Sensör çıkış gerlimi (mV) × Kalibrasyon Faktörü (6.1)

Dijital ışınım ölçeri (TES-1333), bölge içerisindeki mevcut güneş ışımasını hassas ve doğru bir şekilde ölçmek için kullanılan silikon fotovoltaik dedektörlü bir cihazdır. Güneş enerjisinin açısal değerine yönelik kosinüs düzeltmesine sahiptir. Güneş ışınımını W/m^2 cinsinden ölçmektedir ve saniyede dört örnek alma frekansına sahiptir.

Deneysel çalışmalarda ışınım algılayıcısından alınan gerilim dSPACE ADC girişine bağlanarak FV panel dizisinin MGN'nda çalıştığını göstermek için kullanılmaktadır. Dijital ışınım ölçeri (TES-1333), ışınım algılayıcısı ile ölçülen ışınım değerinin gerçek değerine kalibre edilmesi ve ölçülen verinin doğruluğunun tespit edilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Işınım algılayıcısına ve ışınım ölçere ait fotoğraflar Şekil 5.17'de birlikte gösterilmektedir.

5.10. DSPACE Tabanlı Gerçek Zamanlı Denetim Sistemi

FV Sistemin gerçek zamanlı denetimi için MathWorks'ün MATLAB/Simulink/Real-Time Workshop ve dSPACE'in Real-Time Interface (RTI) ve ControlDesk yazılımları kullanılmaktadır. Deneylerin yapılmasında ve verilerin gerçek zamanda toplanmasında kullanılan, dSPACE' in sunduğu Real-Time Interface (RTI) ve ControlDesk programlarından yararlanılmaktadır. Real-Time Interface (RTI) herhangi bir programlamaya gerek kalmadan Simulink modellerini gerçek zamanlı donanım üzerinde çalıştırmak için kullanılan bir gerçekleştirme yazılımıdır. Deneysel sonuçların bilgisayar ortamına alınıp incelenmesi, analizi ve kaydedilmesi için dSPACE'in ControlDesk yazılımı kullanılmaktadır.

DSPACE gerçek zamanlı denetim sistemi, Simulink bloklarıyla oluşturulan gerçek-zamanlı modelden otomatik olarak C kodları ürettiği için, programın hazırlanma sürecini kısaltırken, aynı zamanda hataların kolay bir şekilde belirlenmesiyle benzetim algoritmaları üzerinden doğrudan müdahalede bulunarak hızlı bir şekilde modifikasyonunun gerçekleştirilmesini de sağlamaktadır. Şebeke bağlantılı FV sisteminin tasarım ve uygulama aşamaları MATLAB/Simulink ortamında ve dSPACE DS1103 gerçek zamanlı işlemci donanımında gerçekleştirilmiştir.

DSPACE sistemi donanım bileşenleri şunlardır;
DS1103 denetleyici kartı: Bu kart üzerinde PowerPC 750GX/1 GHz ana işlemci ve Texas Instruments TMS320F240/20 MHz yardımcı işlemci bulunmaktadır. Ana işlemcide, 20 kanal 16 bit ADC, 8 kanal 16 bit sayısal analog dönüştürücü (Digital to Analog Converter, DAC), 32 kanal sayısal giriş/çıkış, yardımcı işlemcide ise 16 kanal 10 bit analog giriş, 18 bit sayısal giriş/çıkış, 1 adet 3-faz ve 4 adet tek-faz DGM ve 4 yakalama girişi bulunmaktadır [114]. DS1103 denetleyici kart, ISA veri yolu üzerinden bilgisayara bağlanmaktadır.

CLP1103 bağlantı ve led paneli: Analog sinyallere erişim BNC konektörleri ile sayısal sinyallere erişim ise Sub-D konnektörleri ile yapılmaktadır. LED panel, kartın sayısal sinyallerinin durumunu göstermektedir.

DSPACE sistemi yazılım bileşenleri ise şunlardır;
MATLAB: Denetlenecek sistemin teorik modelinden yararlanılarak çevrimdışı olarak bilgi işlemenin gerçekleştirildiği, analiz, tasarım ve sistem optimizasyon işlemlerinin yerine getirildiği ve ilk denetim tasarımının oluşturulduğu yazılımdır.

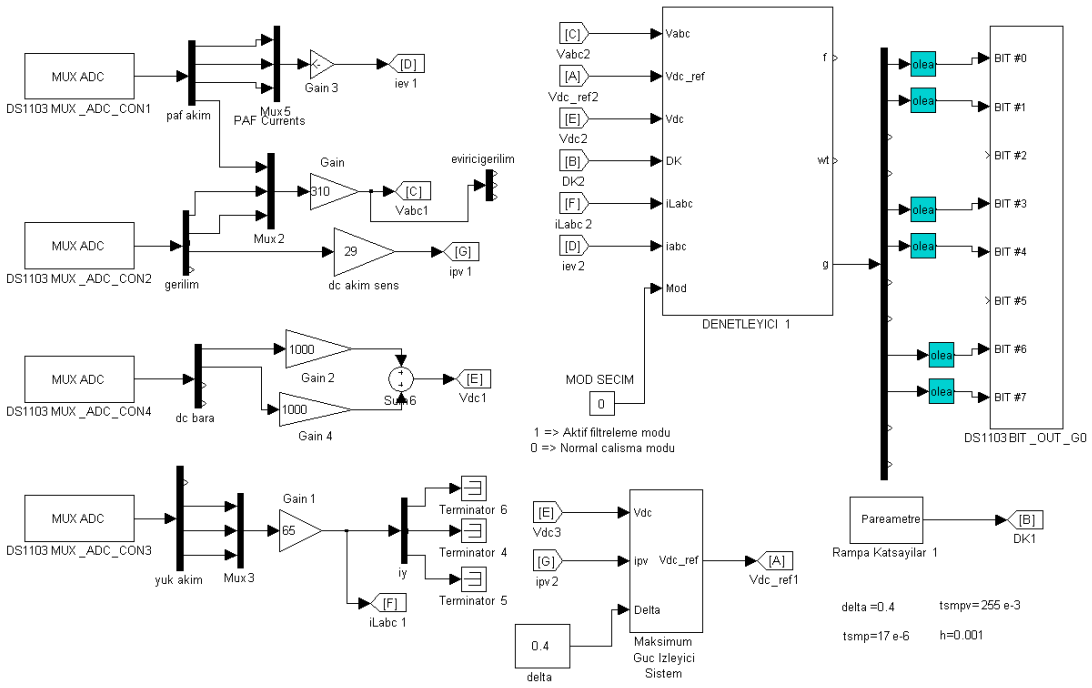
Simulink: Çevrimdışı benzetim algoritmalarının blok diyagramlar kullanılarak modellenmesinin yapıldığı yazılımdır.

Real-Time Workshop: Simulink ortamında oluşturulan bloklardan C kod üretiminin gerçekleştirildiği yazılımdır.

ControlDesk Developer: Denetimi gerçekleştirilen sistemin deneysel denetiminin ve test otomasyonunun yapıldığı yazılımdır. Ayrıca dSPACE ControlDesk Developer yazılımı ile, denetleyici kart tarafından hesaplanan ve ölçülen devre parametreleri grafiksel bir platform üzerinden gözlenebilmekte ve bu veriler sonradan istenmek üzere MAT dosyası olarak kaydedilebilmektedir.

Real-Time Interface: Simulink ve dSPACE donanımı arasında bir ara yüzdür. Gerçek zamanlı kodun oluşturulması, yüklenmesi ve dSPACE donanımı üzerinde yürütülmesini sağlamaktadır. Bu işlem, MATLAB/Simulink blok kütüphanesine eklenen dSPACE'in DS1103 gerçek zamanlı ara yüz I/O blokları ile yapılmaktadır [109].

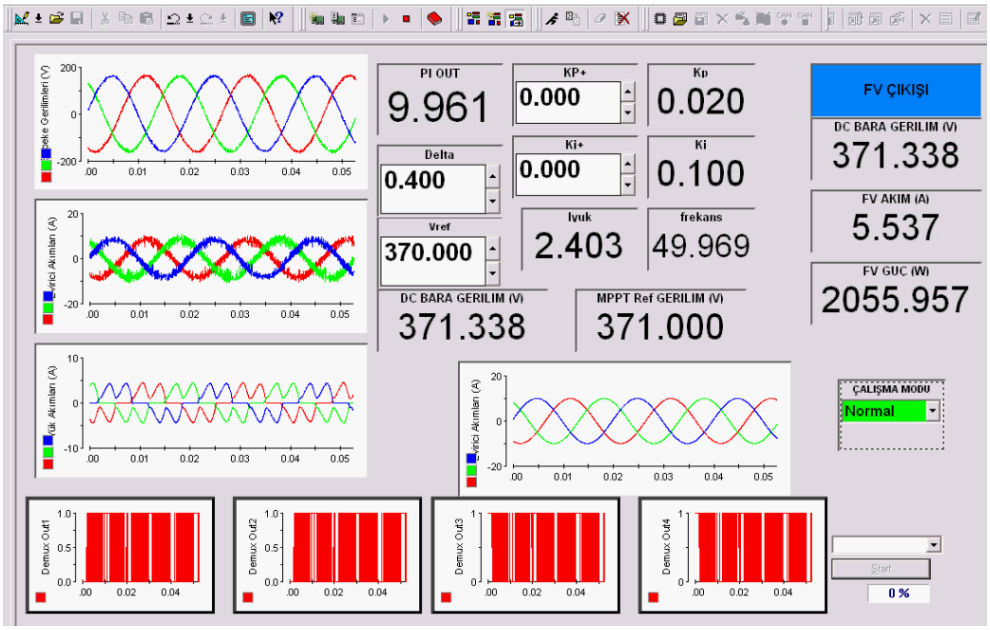
Gerçek zamanlı denetim uygulaması için Matlab benzetim modelindeki giriş ve çıkış blokları, dSPACE blokları (analog, sayısal giriş/çıkış) ile değiştirilerek deneysel modeller oluşturulmaktadır. Matlab/Simulink ortamında DS1103 ana işlemci RTI blokları kullanılarak oluşturulan üç fazlı şebeke bağlantılı FV sisteminin gerçek zamanlı denetim blok diyagramı Şekil 5.18'de gösterilmektedir. CLP1103 bağlantı paneli aracılığıyla DS1103 denetleyici kartının analog girişlerinden DS1103MUXADC_CON blokları kullanılarak Matlab/Simulink ortamına alınan denetim değişkenleri kazanç (gain) ile çarpılarak ölçeklendirilmekte ve denetim algoritmalarında kullanılmaktadır.



Şekil 5.18. Üç faz şebeke bağlantılı FV sisteminin gerçek zamanlı denetim blok diyagramı

Denetim algoritmalarınca üretilen anahtarlama sinyalleri DS1103BIT_OUT_G0 bloğu kullanılarak Matlab/Simulink ortamından DS1103 kartının sayısal çıkış kanallarıyla çok seviyeli eviriciye ait IGBT sürücülere gönderilmektedir.

Üç fazlı şebeke bağlantılı FV sisteminin geliştirilmesinde ControlDesk yazılımı aracılığıyla şebeke akımı, şebeke gerilimi, evirici akımı, yük akımı, FV dizi akımı, FV dizi gerilimi ve anahtarlama sinyalleri gerçek zamanlı olarak izlenirken, Chroma yazılımı aracılığıyla FV dizi akımı, FV dizi gerilimi ve FV dizinin karakteristik eğrisi üzerindeki çalışma noktası gerçek zamanlı olarak izlenmiştir. Şekil 5.19 ve Şekil 5.20'de ControlDesk ve Chroma yazılımlarına ait kullanıcı ara yüzleri gösterilmektedir.



Şekil 5.19. ControlDesk yazılımı kullanıcı ara yüzü



Şekil 5.20. Chroma yazılımı kullanıcı ara yüzü

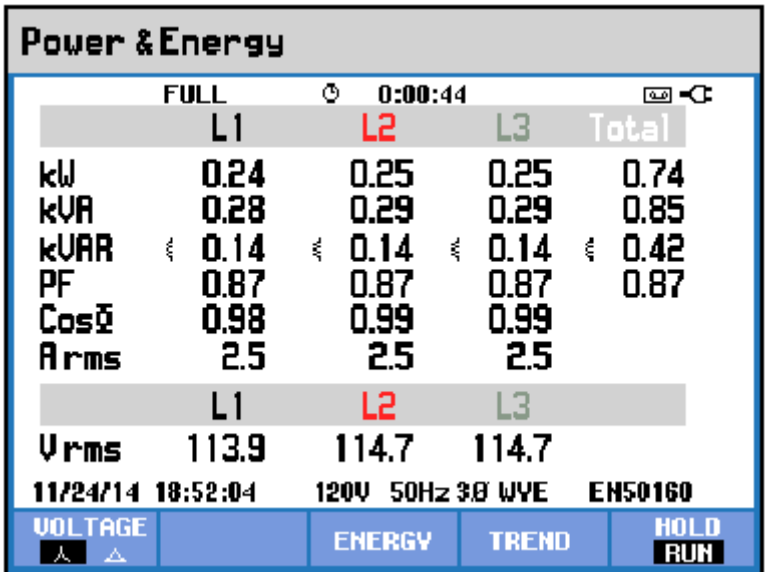
5.11. Deneysel Sonuçlar

Deneysel çalışmada üç fazlı şebeke bağlantılı FV sistem "Sadece FV Sistem" ve "AGF fonksiyonlu FV sistem" olmak üzere iki farklı çalışma modunda çalıştırılmaktadır. Her iki çalışma modu için FV sistemin harmonik filtreleme, şebeke ile senkronizasyonu sağlama ve güç faktörü denetim yeteneği test edilmektedir. Bu çalışma modlarında Chroma FV Simülatörün ışınım değeri

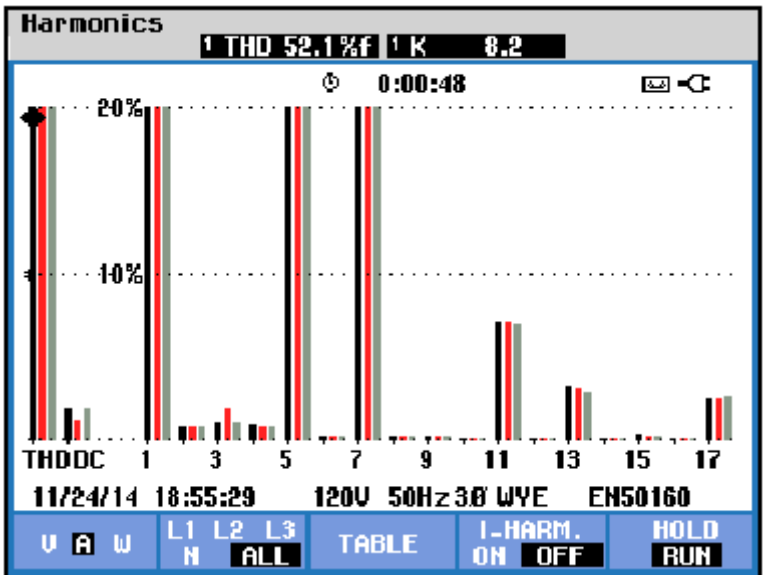
1000W/m^2 olarak sabit tutulmaktadır. DA bara gerilim referansının başlangıç değeri, FV dizinin açık devre gerilimine çok yakın bir değer olan 445V olarak belirlenmiştir. Çünkü bu durumda FV sistemin ilk devreye alınma anında FV diziden talep edilen enerji düşük olmakta, buna bağlı olarak evirici çıkışında da düşük akım üretilmektedir. Bu ise FV sistemin ilk devreye alınış anında oluşan geçici rejimlere karşı enerji stresini azaltarak güvenilirliği ve denetim kalitesini arttırmaktadır. MGNİ sistem DA bara gerilimi referansını bir süre sonra 1000W/m^2 ışınım değerine karşılık gelen 370-380 V aralığına düşürerek MGN' yi bulmaktadır. MGN'de Chroma FV Simülatör yaklaşık 2000W güç üretmektedir. Deneysel çalışmalarda elde edilen dalga şekilleri Tektronix DPO3054 osiloskop ile kaydedilmiştir. Güç ve harmonik analizi sonuçları ise Fluke 434 güç kalite analizörü ile alınmıştır.

5.11.1. Doğrusal olmayan yük

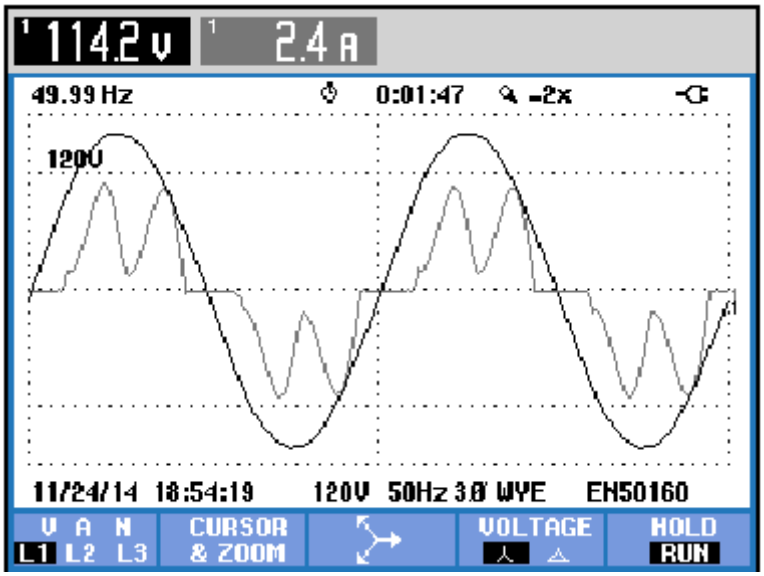
Doğrusal olmayan yükün doğrudan şebekeye bağlanması durumunda elde edilen deneysel grafikler Şekil 5.21, 5.22 ve 5.23'de gösterilmektedir. Grafiklerden toplam yük gücünün 0,74kW, yükün güç katsayısının 0,87 ve şebekeden çekilen akım harmoniğinin %52,1 olduğu görülmektedir.



Şekil 5.21. Doğrusal olmayan yüke ilişkin deneysel ölçüm sonuçları



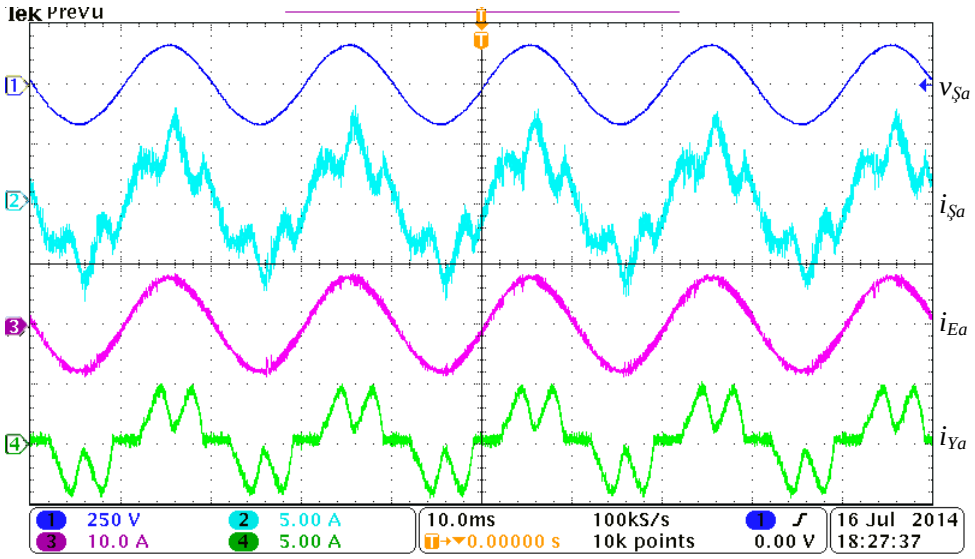
Şekil 5.22. Doğrusal olamayan yük akımı THB grafiği



Şekil 5.23. a fazına ait şebeke gerilimi ve yük akımı grafiği

5.11.2. "Sadece FV sistem" çalışma modu

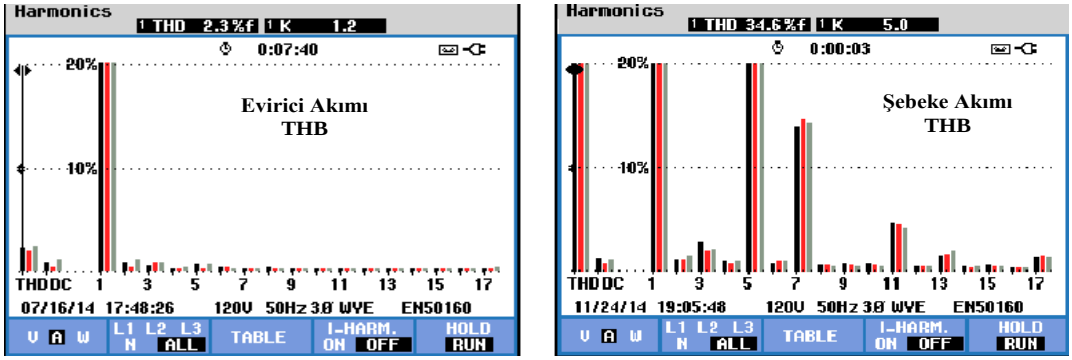
"Sadece FV Sistem" modunda FV sistem şebekeye aktif güç aktarmak sinüs formunda akım üretmektedir. Bu çalışma modu için a fazına ait şebeke gerilimi ($V_{Şa}$), şebeke akımı ($i_{Şa}$), evirici akımı (i_{Ea}) ve yük akımı (i_{Ya}) Şekil 5.24'de gösterilmektedir.



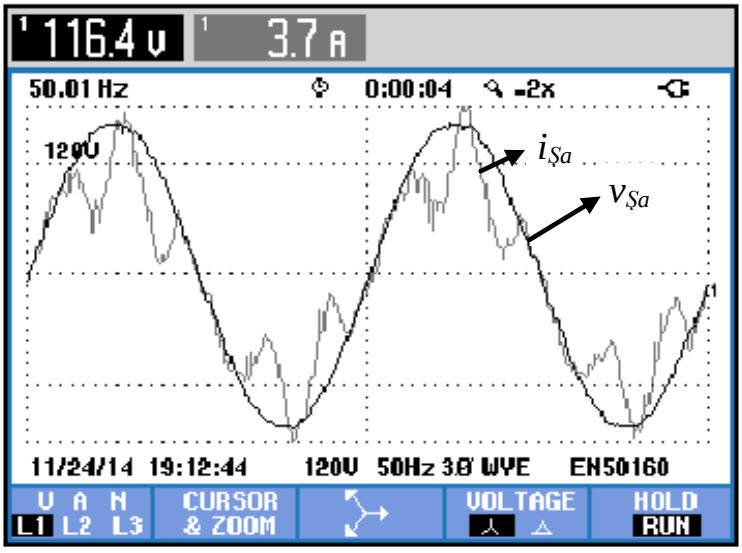
Şekil 5.24. Sadece FV sistem çalışma modu için deneysel sonuçlar

Bu çalışma modunda FV güç doğrusal olmayan yük gücünden daha büyüktür. Yükün talep ettiği gücün tamamı 3S-NNK evirici tarafından sağlanmaktadır ve FV gücün fazlası şebekeye verilmektedir. Şekil 5.24'e bakıldığında evirici çıkışındaki akımın sinüs biçiminde olmasına karşılık şebeke akımı dalga şeklinde harmoniklere bağlı bozulmalar olduğu açıkça görülmektedir.

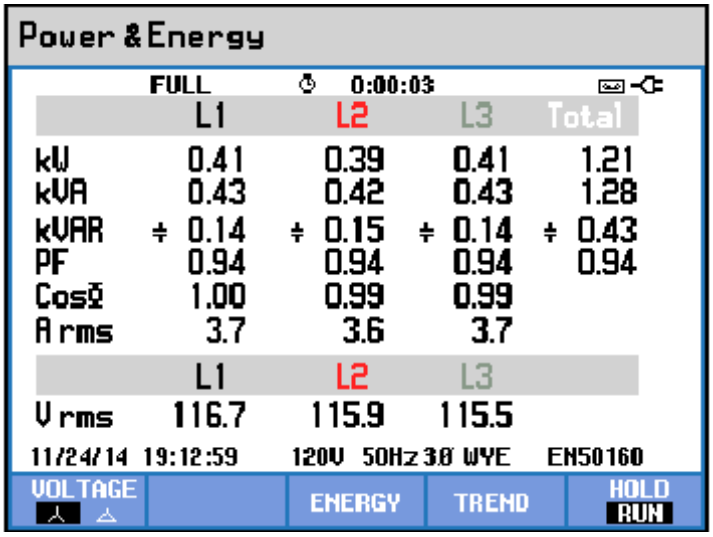
Sadece FV sistem modunda evirici ve şebeke akımları harmonik grafikleri Şekil 5.25'de gösterilmektedir. Evirici akımına ait THB grafiğine bakıldığında THB değerinin %2,3 ile IEEE 519/1992 standartlarında önerilen sınırlar içinde olduğu ve 3S-NNK evirici kullanılarak tatmin edici ölçüde düşük akım harmoniği elde edildiği görülmektedir. Diğer grafikten ise şebeke akımı THB değerinin ise %34,6 olduğu görülmektedir. Şekil 5.26'da şebeke akımı ve gerilimi grafikleri, Şekil 5.27'de ise reaktif güç kompanzasyonu test sonucu gösterilmektedir. Şekil 5.27'den yükün güç katsayısının (PF) 0,94 olduğu görülmektedir.



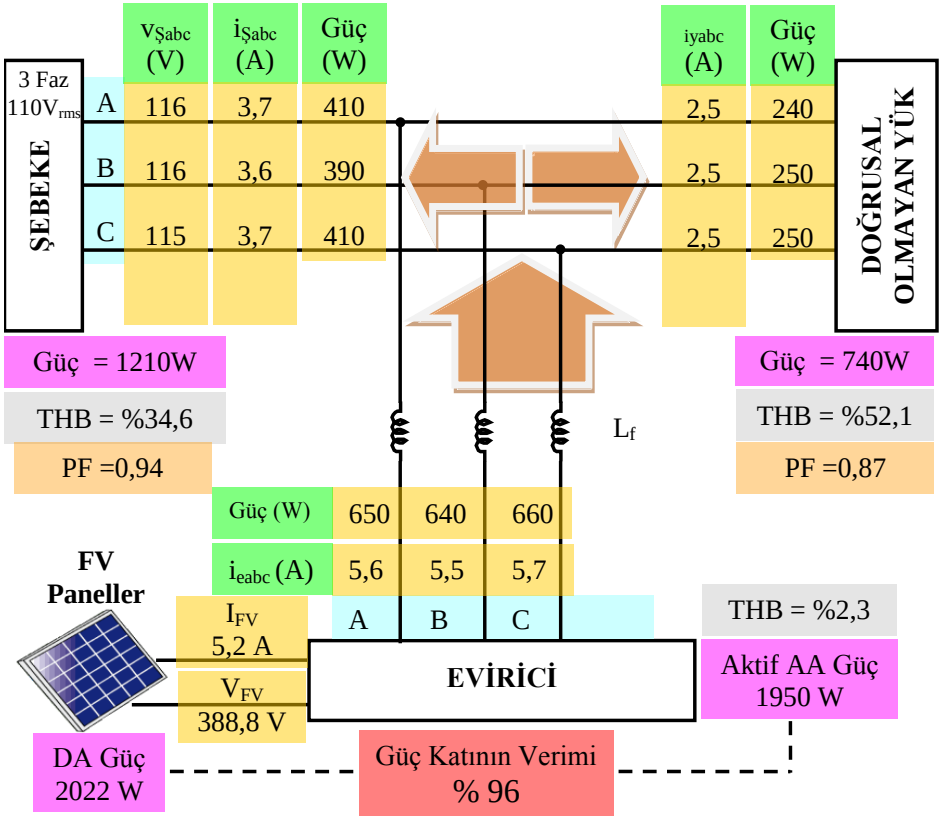
Şekil 5.25. Sadece FV sistem modunda evirici ve şebeke akımı THB grafikleri



Şekil 5.26. Sadece FV sistem modunda a fazına ait şebeke akımı ve gerilimi grafiği



Şekil 5.27. Sadece FV sistem modunda reaktif güç kompanzasyonu test sonuçları



Şekil 5.28. Sadece FV sistem modunda şebeke tarafı, evirici tarafı ve yük tarafında ölçülen elektriksel büyüklükler

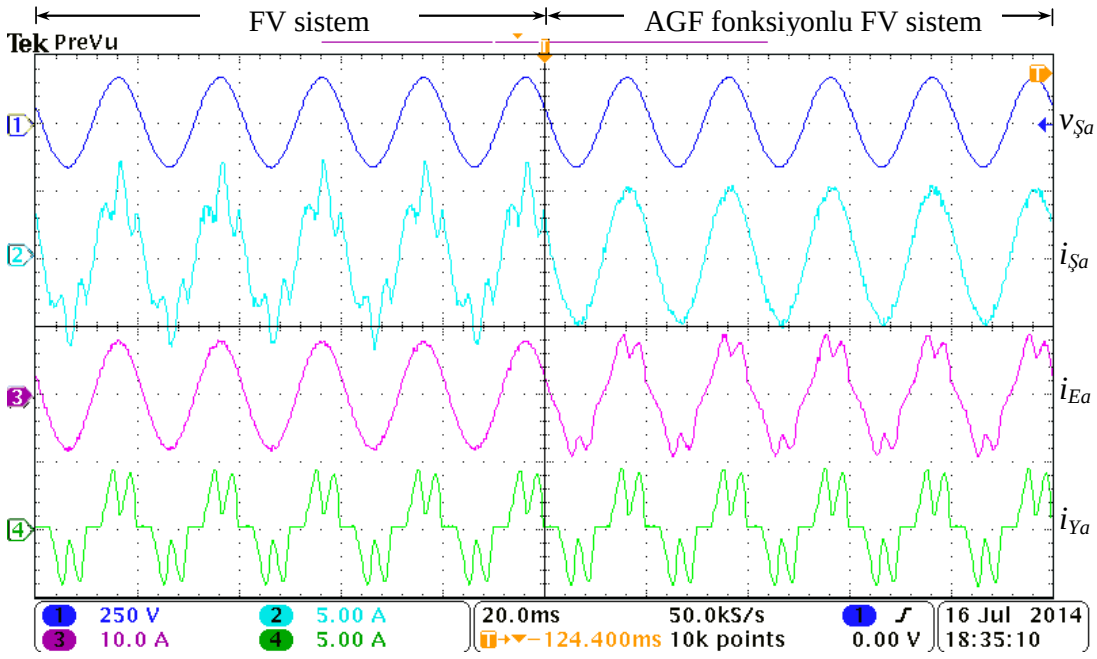
Şekil 5.28'de, 1000W/m^2 ışınım altında Sadece FV çalışma modunda iken şebeke tarafı, evirici tarafı ve yük tarafında ölçülen elektriksel büyüklükler gösterilmektedir. FV panellerde yaklaşık 2000W DA güç üretilmektedir. Evirici çıkışından alınan 1950W'lık gücün 740W'ı yük tarafından harcanmakta, kalan 1210W'ı ise şebekeye verilmektedir. Bu çalışma modu için, yük tarafı THB %52, şebeke tarafı THB %34,6 ve evirici çıkışı THB %2,3 olmaktadır.

5.11.3. "AGF fonksiyonlu FV sistem" çalışma modu

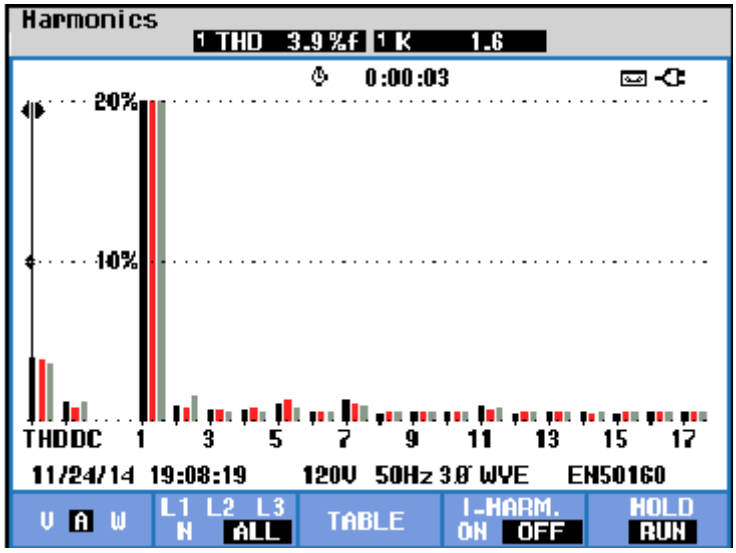
Sadece FV sistem modundan AGF fonksiyonlu FV sistem moduna geçiş sürecinde elde edilen deneysel sonuçlar Şekil 5.29'da gösterilmektedir. AGF fonksiyonuna sahip FV sistem modunda da FV güç doğrusal olmayan yük gücünden daha büyüktür. Yükün talep ettiği gücün tamamı 3S-NNK evirici tarafından sağlanmaktadır ve FV gücün fazlası şebekeye verilmektedir.

Şekil 5.29'a bakıldığında evirici çıkışındaki akımın şebekeden çekilen akımı sinüse tamamlayacak biçiminde olduğu, şebeke akımından harmoniklerin elendiği ve şebeke akımı dalga şeklinin sinüs biçimine geldiği görülmektedir.

AGF fonksiyonlu FV sistem modunda şebeke akımı harmonik grafiği Şekil 5.30'da gösterilmektedir. Şekil 5.29 ve Şekil 5.30 doğrusal olmayan yükün bağlı olduğu şebekeye bağlanan FV sistemin aktif güç filtreleme yeteneğini göstermektedir. Grafiklerden şebeke akımı THB'sinin %34,6'dan %3,9'a düştüğü görülmektedir ki bu değer IEEE 519 harmonik standardına göre üst sınır olan %5'den daha azdır.

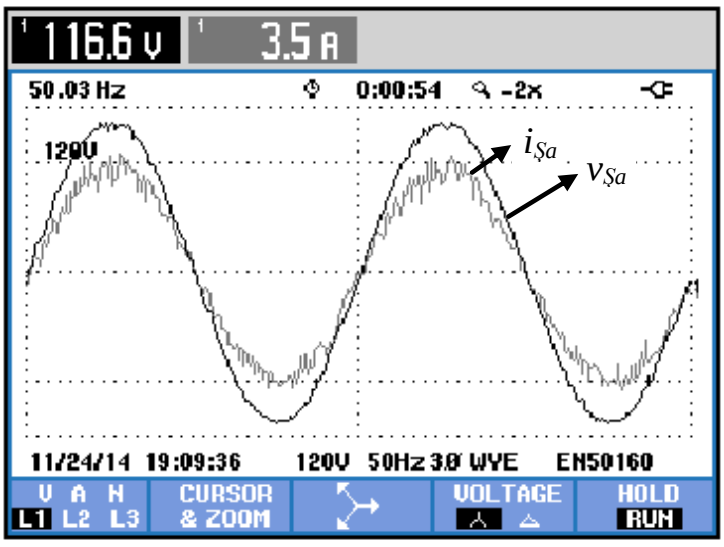


Şekil 5.29. AGF fonksiyonlu FV sistem çalışma modu için deneysel sonuçlar

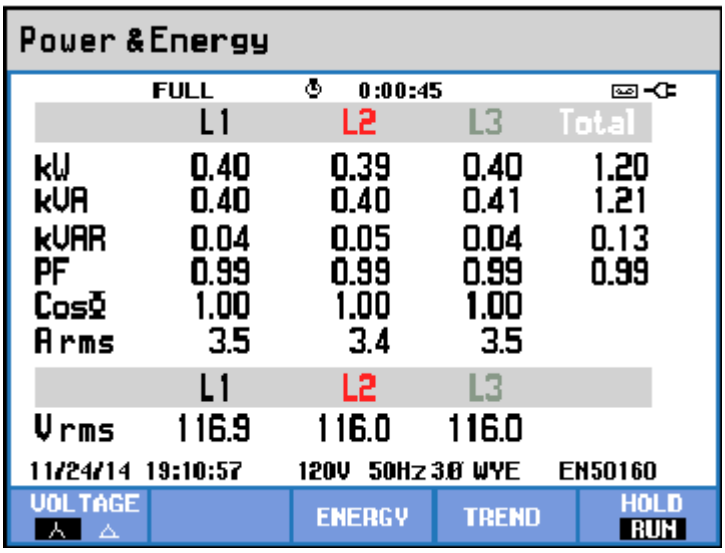


Şekil 5.30. AGF fonksiyonlu FV sistem çalışma modu için şebeke akımı THB grafiği

A fazı için şebeke gerilimi ve akımı dalga şekilleri Şekil 5.31'de gösterilmektedir. Şekilden şebeke gerilimi ve şebeke akımının aynı fazda olduğu görülmektedir. Şekil 5.32'de gösterilen reaktif güç kompanzasyonu test sonuçlarına bakıldığında güç faktörünün (PF) 0,94'den 0,99 değerine artarak birim değere (1) çok yaklaştığı, buna bağlı olarak çekilen reaktif gücün 0,43 kVAr'dan 0,13 kVAr değerine azaldığı görülmektedir.

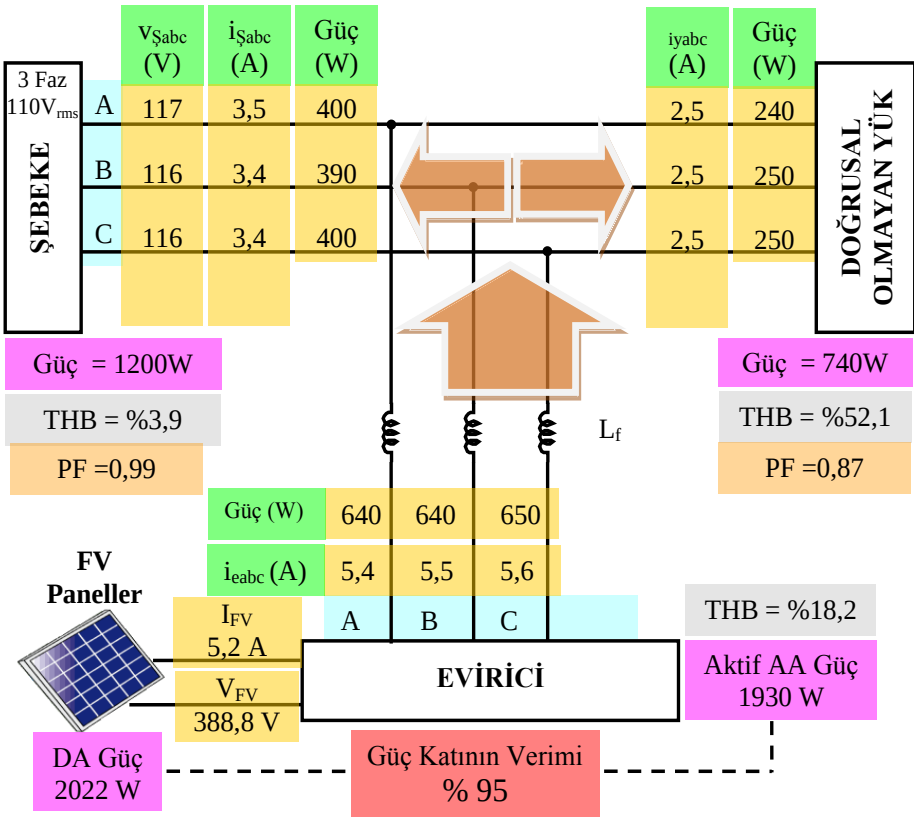


Şekil 5.31. AGF fonksiyonlu FV sistem modunda a fazına ait şebeke akımı ve gerilimi grafiği



Şekil 5.32. AGF fonksiyonlu FV sistem modunda reaktif güç kompanzasyonu test sonuçları

Şekil 5.33'de, 1000W/m^2 ışınım altında AGF fonksiyonlu FV çalışma modunda şebeke tarafı, evirici tarafı ve yük tarafında ölçülen elektriksel büyüklükler gösterilmektedir. Yük tarafı THB %52,1 Şebeke tarafı THB %3,9 ve Evirici çıkışı THB %18,2 olmaktadır. Yük tarafı güç faktörü 0,87 iken, Şebeke tarafı güç faktörü 0,99 olmaktadır.



Şekil 5.33. AGF fonksiyonlu FV sistem modunda şebeke tarafı, evirici tarafı ve yük tarafında ölçülen elektriksel büyüklükler

6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında üç fazlı, tek aşamalı olarak 3S-NNK evirici üzerinden şebekeye bağlı aktif güç filtreleme yeteneğine sahip FV sistem ele alınmakta ve performansı değerlendirilmektedir. Önerilen sistem mümkün olan en büyük FV gücü şebekeye aktarmanın yanı sıra aynı zamanda doğrusal olmayan yüklerin neden olduğu harmonik akımlarının ve reaktif gücün kompanzasyonunu yapabilmektedir. Böylece FV sistem güç kalitesinin arttırılmasına katkıda bulunmaktadır. Yeterli güneşlenmenin olduğu gündüz saatlerinde FV sistem aktif güç üretmekle beraber aktif güç filtreleme işlevini gerçekleştirmektedir. Gece saatlerinde veya güneşlenmenin yetersiz olduğu zamanlarda yükün ihtiyaç duyduğu aktif güç şebeke tarafından sağlanmaktadır. Önerilen sistemin etkinliği Matlab/Simulink ortamında yapılan benzetimlerle ve dSPACE DS1103 denetim tabanlı deneysel çalışmalarla gösterilmektedir.

MGNİ algoritmaları FV güç sistemleri için en önemli konulardan biri olmakla birlikte denetim sisteminin performansı açısından çok önemlidir. Literatürde çeşitli MGNİ teknikleri bulunmakta olup bunlardan en çok tercih edileni ve yüksek verime sahip olanı saptır gözle algoritmasıdır. Değişen atmosferik koşullara olan kısa cevap süresi ve uygulama basitliği nedeniyle bu çalışmada saptır-gözle yöntemi kullanılmıştır. Benzetim ve deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlar şebeke bağlantılı FV sistemin hızla değişen ışınım değerlerinde FV dizinin maksimum güç noktasını hızlı bir şekilde takip ettiğini göstermiştir.

Deneysel çalışmalarda Chroma FV Simülatörün ışınım değeri 1000W/m^2 olarak sabit tutulmuştur. MGNİ tarafından belirlenen DA bara gerilim referansının başlangıç değeri, FV dizinin açık devre gerilimine çok yakın bir değer olan 445V olarak belirlenmiştir. Bu durumda DA bara geriliminin referans değeri ile gerçek değeri yakın olduğundan denetleyici sistem içinde yer alan PI denetleyici düşük bir akım referansı üretmektedir. Ayrıca PI denetleyicinin katsayıları sıfırdan başlayarak

normal değerlerine rampa şeklinde arttırılmıştır. Bu ise FV sistemin ilk devreye alınış ve şebekeye bağlanma anında oluşan geçici rejimlere karşı enerji stresini azaltarak güvenilirliği ve denetim kalitesini arttırmıştır. MGNİ sistem DA bara gerilimi referansını bir süre sonra 1000W/m^2 ışınım değerine karşılık gelen 370V civarına düşürerek MGN' yi bulmuştur. MGN'de Chroma FV Simülatör yaklaşık 2000W güç üretmiştir.

Deneysel çalışmada üç fazlı şebeke bağlantılı FV sistem "Sadece FV Sistem" ve "AGF fonksiyonlu FV sistem" olmak üzere iki farklı çalışma modunda çalıştırılmıştır. Her iki çalışma modu için FV sistemin harmonik filtreleme, şebeke ile senkronizasyonu sağlama ve güç faktörü denetim yeteneği test edilmiştir.

Her iki çalışma modunda bir faz için şebeke gerilimi ve evirici akımı dalga şekillerine bakıldığında aynı fazda olduğu görülmüştür. Bu sonuç şebeke senkronizasyonunun doğru bir şekilde yapıldığını göstermektedir. İlgili grafikler Şekil 6.20 ve Şekil 6.24'de gösterilmektedir.

"Sadece FV Sistem" modunda yapılan deneysel çalışmalarda evirici akımına ait THB değeri %2,3 ile IEEE 519-1992 standartlarında önerilen sınırlar içinde olmuştur ve 3S-NNK evirici kullanılarak tatmin edici ölçüde düşük akım harmoniği elde edilmiştir. İlgili THB grafiği Şekil 6.19'da gösterilmektedir.

"AGF fonksiyonlu FV Sistem" modunda yapılan deneysel çalışmalarda şebeke akımı THB'si %34,6'dan %3,9'a düşmüştür. Bu değer IEEE 519-1992 harmonik standardına göre üst sınır olan %5'den daha azdır. Bu sonuç önerilen sistemin akım harmoniklerinin yok edilmesi konusunda başarılı olduğunu göstermiştir. İlgili THB grafiği Şekil 6.23'de gösterilmektedir.

"AGF fonksiyonlu FV Sistem" modunda yapılan deneysel çalışmalarda güç faktörünün (PF) 0,94'den 0,99 değerine artarak birim değere (1) çok yaklaştığı, buna bağlı olarak çekilen reaktif gücün 0,43 kVAr'dan 0,13 kVAr değerine azaldığı görülmüştür. Bu sonuç önerilen sistemin reaktif güç kompanzasyonunu sağlamada konusunda başarılı olduğunu göstermiştir. İlgili sonuçlar Şekil 6.25'de gösterilmektedir.

Bu tez çalışmasında üç fazlı üç seviyeli evirici kullanılmıştır. Geleneksel iki seviyeli evirici sistemi ile karşılaştırıldığında, önerilen çok seviyeli eviriciye sahip sistem yapısı maksimum güç kazanımı, anahtarlama elemanlarının gerilim seviyelerinin azalmasını (buna bağlı olarak cihaz performans karakteristiğindeki iyileşmesi), çıkış akımındaki harmonik bozunumun azalmasını ve sistem veriminin artmasını sağlamıştır.

Bilindiği gibi güç elektroniği cihazlarının ve doğrusal olamayan yüklerin artan bir şekilde kullanımı enerji sistemlerinde ciddi sorunlara yol açmaktadır. Bu sebeple bu tür yüklerin kullanımının yoğun olduğu yerlerde aktif güç filtreleme özelliğine sahip FV sistemler kullanılmalıdır.

İleriye dönük olarak aşağıda belirtilen konularda çalışmaların yapılması hedeflenmektedir;

- DA bara kondansatörleri yerine Süperkapasitörlerin bağlanması durumunda FV sistemin harmonik azaltma ve reaktif güç kompanzasyonu yeteneklerinin incelenmesi
- Önerilen FV sisteme ilişkin deneysel çalışmalar, "Sadece PV sistem" modunda ve "AGF fonksiyonuna sahip PV sistem" (herikisi aynı anda) modu olmak üzere iki farklı çalışma modu için yapılmıştır. Önerilen sistemin gece saatlerinde "Sadece Aktif Güç Filtreleme (AGF) modundaki çalışma performansının değerlendirilmesi
- Farklı MGNİ metotları uygulanarak performanslarının değerlendirilmesi
- Çalışmada kullanılan 3 Seviyeli NNK eviricinin seviye sayısının arttırılması durumunun FV sistem performansı ve harmonikler üzerideki etkilerinin incelenmesi
- Farklı tipte ÇSE yapıları kullanılması durumunda FV sistem performansı ve harmonikler üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi

KAYNAKLAR

[1] Masson G., Latour M., Rekinger M., Theologitis I. T., Papoutsi M., Global Market Outlook for Photovoltaics, *European Photovoltaic Industry Association (EPIA)*, 2013-2017, 4-5, 2013.

[2] German Solar Energy Society (DGS), *Planning and Installing Photovoltaic Systems–A Guide for Installers, Architects and Engineers*, 2nd ed., Earthscan, London, 1-8, 2008.

[3] Wang F., Duarte J. L., Hendrix M. A. M., Grid-interfacing converter systems with enhanced voltage quality for microgrid application-concept and implementation, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2011, **26**, 3501-3513.

[4] Jain S., Agarwal V., A single-stage grid connected inverter topology for solar PV systems with maximum power point tracking, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2007, **22**, 1928-1940.

[5] Esram T., Chapman P. L., Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques, *IEEE Transactions. Energy Conversion*, 2007, **22**, 439-449.

[6] Bo Y., Wuhua L., Yi Z., Xiangning H., Design and analysis of a grid connected photovoltaic power system, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2010, **25**, 992-1000.

[7] Wu T. F., Chang C. H., Lin L. C., Kuo C. L., Power loss comparison of single- and two-stage grid-connected photovoltaic systems, *IEEE Transactions on Energy Conversation*, 2011, **26**, 707-715.

[8] Sezen S., Ozdemir E., Modeling, simulation and control of three-phase three level multilevel inverter for grid connected photovoltaic system, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 2013, **15**, 335-341.

[9] Rodriguez J., Bernet S., Steimer P. K., Lizama I. E., A survey on neutral-point-clamped inverters, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, **57**, 2219-2230.

[10] Kouro S., Malinowski M., Gopakumar K., Pou J., Franquelo L. G., Bin W., Rodriguez J., Perez M. A., Leon J. I., Recent advances and industrial applications of multilevel converters, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, **57**, 2553-2580.

[11] Staudt I., 3L NPC & TNPC Topology, *Semikron*, AN-11001, 2-3, 2012.

[12] Schonardie M. F., Martins D. C., Solar grid-connected three-phase system with active and reactive power control and input voltage clamped, *14th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems*, Marrakech, 11-14 December 2007.

[13] Wu T.-F., Nien H.-S., Shen C.-L., Chen T.-M., A single phase inverter system for PV power injection and active power filtering with nonlinear inductor consideration, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2005, **41**, 1075-1083.

[14] Wu T.-F., Nien H.-S, Hsieh H. M., Shen C. L., PV power injection and active power filtering with amplitude-clamping and amplitude scaling algorithms, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2007, **43**, 731–741.

[15] Mastromauro R. A., Liserre M., Kerekes T., Dell'Aquila A., A single phase voltage-controlled grid-connected photovoltaic system with power quality conditioner functionality, *IEEE Transactions on Industrial Electronics.*, 2009, **56**, 4436–4444.

[16] Tumbelaka H. H., Miyatake M., Simple integration of three-phase shunt active power filter and photovoltaic generation system with Fibonacci-search-based MPPT, in *IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications*, Penang, Malaysia, 3-5 October 2010.

[17] Du C. S., Zhang C. H., Chen A., Amplitude limiting for the photovoltaic (PV) grid-connected inverter with the function of active power filter, *2nd IEEE Int. Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems*, Hefei, China, 16-18 June 2010.

[18] Albuquerque F. L., Moraes A. J., Guimaraes G. C., Sanhueza S. M. R., Vaz A.R., Photovoltaic solar system connected to the electric power grid operating as active power generator and reactive power compensator, *Solar Energy*, 2010, **84**, 1310–1317.

[19] Tsengenes G., Adamidis G., Investigation of the behavior of a three-phase grid-connected photovoltaic system to control active and reactive power, *Electric Power Systems Research*, 2011, **81**, 177–184.

[20] M.-Marcos V., R.-Cadaval E., G.-Martinez M. A., M.-Montero M. I., Three-phase single stage photovoltaic inverter with active filtering capabilities, *IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, Montreal, QC, 25-28 October 2012.

[21] Geury T., Pinto S., Gyselinck J., Three-phase power controlled PV current source inverter with incorporated active power filtering, *Industrial Electronics Society, IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE*, Vienna, Austria, 10-13 November 2013.

[22] Noroozian R., Gharehpetian G. B., An investigation on combined operation of active power filter with photovoltaic arrays, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2013, **46**, 392-399.

[23] Acuna P., Moran L., Rivera M., Dixon J., Rodriguez J., Improved active power filter performance for renewable power generation systems, *IEEE Transactions on Power Electronics.*, 2014, **29**, 687–694.

[24] Selvaraj J., Rahim N.A., Multilevel inverter for grid-connected PV system employing digital PI controller, *IEEE Transactions on Industrial Electronics.*, 2009, **56**, 149-158.

[25] Martinez J. A., Garcia J. E., Arnaltes S., Direct power control of grid connected PV systems with three level NPC inverter, *Solar Energy*, 2010, **84**, 1175-1186.

[26] Colak I., Kabalci E., Bayindir R., Review of multilevel voltage source inverter topologies and control schemes, *Energy Conversion and Management*, 2011, **52**, 1114-1128.

[27] Ortuzar M., Carmi R., Dixon J., Moran L., Voltage source active power filter, based on multi-stage converter and ultra capacitor dc-link, *The 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2003)*, 2003, **3**, 2300-2305.

[28] Junling C., Yaohua L., Ping W., Zhizhu Y., Zuyi D., A closed-loop selective harmonic compensation with capacitor voltage balancing control of cascaded multilevel inverter for high power active power filters, *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Rhodes, 15-19 June 2008.

[29] Abdelhamid T.H., Madouh J.Y., Advanced static var compensator using a new topology of multilevel inverters energized from non-equal dc sources, *Power and Energy Society*, Pittsburgh, 20-24 July 2008.

[30] Lindgren B., Power-generation, power-electronics and power systems issues of power converters for photovoltaic applications, Thesis for the degree of doctor of philosophy, Department of Electric Power Engineering Chalmers University of Technology, 1998.

[31] Tolbert L. M., Chiasson J. N., Peng F. Z., Modulation index regulation of a multilevel inverter for static var compensation, *Power Engineering Society General Meeting*, Toronto, Ontario, 13-17 July 2003.

[32] Kuo Y. C., Liang T. J., Chen J. F., Novel maximum-power- point-tracking controller for photovoltaic energy conversion system, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2001, **48**, 594-601.

[33] Boon C.T., Switch mode multilevel (classed) power amplifier, Degree of Bachelor of Electrical Engineering, Department of Information Technology and Electrical Engineering The University of Queensland, 2001.

[34] Calais M., Agelidis V. G., Dymond M. S., A cascaded inverter for transformerless single phase grid-connected photovoltaic systems, *Renewable Energy*, 2001, **22**, 255-262.

[35] Kim S., Enjeti P. N., A new hybrid active power filter (apf) topology, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2002, **17**, 48-54.

[36] Rodriguez J., Lai J. S., Peng F. Z., Multilevel inverters: a survey of topologies, controls and application, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2002, **49**, 724-738.

[37] Twinning E., Holmes D. G., Grid current regulation of a three-phase voltage source inverter with an LCL input filter, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2003, **18**, 888-895.

[38] Dell'Aquila A., Liserre M., Monopoli V. G., Rotondo P., Overview of PI-based solutions for the control of the dc-buses of a single-phase H-bridge multilevel active rectifier, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2008, **44**, 857 - 866.

[39] Kang F. S., Park S. J., Kim C. U., Cho S. E., Half bridge and full bridge cell based multilevel pwm inverter with cascaded transformers, *The 47th IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems*, Hiroshima, Japan, 25-28 July 2004.

[40] Kang F. S., Rhee K. Y., Park J. S., Moon C. J., Ise T., New approach for cascaded-transformers-based multilevel inverter with an efficient switching function, *The 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Busan, South Korea, 2-6 November 2004.

[41] Su, G. J., Multilevel DC link inverter, *IEEE Transactions on Industry Applications*, , 2005, **41**, 848 - 854.

[42] Ozpineci B., Tolbert L. M., Chiasson J. N., Harmonic optimization of multilevel converters using genetic algorithms, *35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Aachen, Germany, 20-25 June 2004.

[43] Sanchis P., Lopez J., Ursua A., Marroyo L., Electronic controlled device for the analysis and design of photovoltaic systems, *IEEE Power Electronics Letters*, 2005, **3**, 57-62.

[44] Teichmann R., Bernet S., A comparison of three-level converters versus two-level converters for low-voltage drives, traction, and utility applications, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2005, **41**, 855-865.

[45] Kang F. S., Park S. J. , Cho S. E., Kim C. U., Ise T., Multilevel pwm inverters suitable for the use of stand-alone photovoltaic power systems, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2005, **20,** 906-915.

[46] Alepuz S., Busquets-Monge S., Bordonau J., Gago J., Gonzalez D., Balcells J. Interfacing renewable energy sources to the utility grid using a three-level inverter, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2006, **53**, 1504-1511.

[47] S. Jain, V. Agarwal, New current control based mppt technique for single stage grid connected pv systems, *Energy Conversion and Management*, 2007, **48**, 625–644.

[48] Hua C. C., Wu C. H., Chuang C. W., Control of low-distortion 27-level cascade inverter with three h-bridge inverter modules, *IEEE International Conference on Industrial Technology*, Mumbai, Maharaştra, 15-17 December 2006.

[49] Sneineh A. A., Wang M. Y., Novel hybrid flying-capacitor-half-bridge 9-level inverter, *IEEE Tencon 2006*, Hong Kong, 14-17 November 2006.

[50] Hamzah M. K., Noor Mohammad S. Z., Abdul Shukor S. F., A new single-phase inverter using single-phase matrix converter topology, *1st International Power and Energy Conference,* Putrajaya, Malaysia, 28-29 November 2006.

[51] Song P. G., Guan E. Y., Zhao L., Liu S. P., Hybrid electric vehicles with multilevel cascaded converter using genetic algorithm, *IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications ICIEA 2006*, Singapore, 24-26 May 2006.

[52] Esram T., Chapman P. L., Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2007, **22**, 439-449.

[53] Bülo T., Sahan B., Nöding C., Zacharias P., Comparison of three-phase inverter topologies for grid-connected photovoltaic systems, *22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition,* Milan, Italy, 3-7 September 2007.

[54] Hua C. C., Wu C. W., Chuang C. W., Fully digital control of 27-level cascade inverter with variable dc voltage sources, *2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, Harbin, 23-25 May 2007.

[55] Busquets-Monge S., Rocabert J., Rodríguez P., Multilevel diode-clamped converter for photovoltaic generators with independent voltage control of each solar array, *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, 2008, **55**, 2713-2723.

[56] Zhang F., Yang S., Peng F. Z., Qian Z., A zigzag cascaded multilevel inverter topology with self voltage balancing, *The Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Austin, Texas, 24-28 February 2008.

[57] Chen A., Zhang C., Ma H., Deng Y., A novel multilevel inverter topology with no clamping diodes and flying capacitors, *The 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society*, Orlando, Florida, 10-13 November 2008.

[58] Tehrani K. A., Rasoanarivo I., Andriatsioharana H., Sargos F. M., A new multilevel inverter model NP without clamping diodes, *The 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society*, Orlando, Florida, 10-13 November 2008.

[59] Sivkov O., Pavelka J., Analysis of capacitor dividers for multilevel inverter, *13th International Power Electronics and Motion Control Conference*, Poznan, Poland, 1-3 September 2008.

[60] Junling C., Yaohua L., Ping W., Zhizhu Y., Zuyi D., A closed-loop selective harmonic compensation with capacitor voltage balancing control of cascaded multilevel inverter for high power active power filters, *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Rhodes, Greece, 15-19 June 2008.

[61] Abdelhamid T. H., Madouh J. Y., Advanced static var compensator using a new topology of multilevel inverters energized from non-equal dc sources, *Power and Energy Society*, Pittsburgh, Pennsylvania, 20-24 July 2008.

[62] Ozdemir E., Ozdemir S., Tolbert L. M., Fundamental-Frequency-Modulated six-level diode-clamped multilevel inverter for three-phase stand-alone photovoltaic system, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, **56**, 4407-4415.

[63] Ahmadi D., Wang J., Full study of a precise and practical harmonic elimination method for multilevel inverters, *The Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Washington, District of Columbia, 15-19 February 2009.

[64] Liu Y., Hong H., Huang A. Q., Real-time calculation of switching angles minimizing THD for multilevel inverters with step modulation, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, **56**, 285-293.

[65] Du Z., Tolbert L. M., Ozpineci B., Chiasson J. N., Fundamental frequency switching strategies of a seven-level hybrid cascaded h-bridge multilevel inverter, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2009, **24**, 25-33.

[66] Marei M. I., Abdelaziz M., Assad A. M., A simple adaptive control technique for shunt active power filter based on clamped-type multilevel inverters, *Consumer Electronics Times*, 2013, **2**, 85-95.

[67] Leslie L.G., Design and analysis of a grid connected photovoltaic generation system with active filtering function, Master Thesis, the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 2003.

[68] Calleja H., Jimenez H., Performance of a grid connected PV system used as active filter, *Energy Conversion and Management*, 2004, **45**, 2417-2428.

[69] Coalcanti M. C., Azevedo G. M. S., Amaral B. A., Neves F. A. S., Unified power quality conditioner in a grid connected photovoltaic system, *Electrical Power Quality and Utilization Journal*, 2006, **12**, 59-69.

[70] Schonardie M. F., Martins D. C., Solar Grid-Connected three-phase system with active and reactive power control and input voltage clamped, *14th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems*, Marrakech, Morocco, 11-14 December 2007.

[71] Shen J. -M., Jou H. -L., Wu J. -C., Voltage-Mode grid-connected power converter with the functions of photovoltaic generation and active power fitler, *7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, Singapore, 18-20 July 2012.

[72] Singh M., Khadkikar V., Chandra A., Varma R. K., Grid interconnection of renewable energy sources at the distribution level with power-quality improvement features, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2011, **26**, 307-315.

[73] Özden S. Y., Dünya'da ve Türkiye'de güneş enerjisi, *Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi*, DEK-TMK-0011/2009, 1-2, 2009.

[74] www.eie.gov.tr (Ziyaret tarihi: 03 Mart 2013).

[75] www.azimuthproject.org/azimuth/show/Blog++a+quantum+of+warmth (Ziyaret tarihi: 01 Şubat 2015).

[76] www.eie.gov.tr/eie-web/turkce/YEK/gunes/tgunes.html (Ziyaret tarihi: 27 Ocak 2015).

[77] www.eie.gov.tr/MyCalculator/Default.aspx (Ziyaret tarihi: 04 Ekim 2014).

[78] http://www.pvtech.org/news/nrel_confirms_world_record_43.5_efficiency_on_solar_junctions_cpv_cell (Ziyaret tarihi: 01 Şubat 2015).

[79] Rappaport P., The photovoltaic effect and its utilization, *Elsevier Solar Energy*, 1959, **3**, 8-18.

[80] Natsheh E. M., Albarbar A., Photovoltaic model with mpp tracker for standalone/grid connected applications, *Renewable Power Generation (RPG)*, UK, 6-8 September 2011.

[81] Aktaş A., 3 Fazlı 4 telli şebeke bağlantılı fotovoltaik sistemler için maksimum güç izleyen 4 kollu evirici tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2013, 342556.

[82] Özdemir Ş., Fotovoltaik sistemler için mikrodenetleyicili en yüksek güç noktasını izleyen bir konvertörün gerçekleştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2007, 212683.

[83] Roberto F., Sonia L., Energy comparison of MPPT techniques for PV systems, *WSEAS Transactions on power systems*, 2008, **3**, 446-455.

[84] Salas V., Olias E., Barrado A., Lazaro A., Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems, *Elsevier Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2006, **90**, 1555-1578.

[85] Esram T., Patrick L. C., Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2007, **22**, 439-449.

[86] Kwon J. M., Nam K. H., Kwon B. H., Photovoltaic power conditioning system with line connection, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2006, **53**, 1048-1054.

[87] Sera D., Real-time Modeling, diagnostics and optimized MPPT for residential photovoltaic systems, phD Thesis, Aalborg University, Institute of Energy Technology, Aalborg, 2009.

[88] Sunan M., Güneş enerjisi ile çalışan aracın elektrik ve elektronik sisteminin mikrodenetleyiciler ile tasarımı ve uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2006, 197920.

[89] Yusof Y., Sayuti S. H., Abdul Latif M., Wanik M. Z. C., Modeling and simulation of maximum power point tracker for photovoltaic system, *National Power and Energy Conference*, Kuala Lumpur, Malaysia, 29-30 November 2004.

[90] Roberto F., Sonia L., Energy comparison of MPPT tecniques for PV systems, *WSEAS Transactions on power systems*, 2008, **3**, 446-455.

[91] Masson G., Orlandi S., Rekinger M., Global market outlook for photovoltaics 2014-2018, *European Photovoltaic Industry Association (EPIA)*, 9789082228403, 17-23, 2013.

[92] Masson G., Latour M., Rekinger M., Theologitis I. T., Papoutsi M., Global Market Outlook for Photovoltaics, *European Photovoltaic Industry Association (EPIA)*, 2013-2017, 4-5, 2013.

[93] Rekinger M., Theologitis I. T., Latour M., Biancardi D., Roesch A., Concas G., Basso P., Connecting the sun solar photovoltaics on the road to large-scale grid integration full report, *European Photovoltaic Industry Association (EPIA)*, 09/12, 20-22, 2012.

[94] http://zdfcheck.zdf.de/wp-content/uploads/2013/08/EPIA-PV-Market-Report-2012.pdf (Ziyaret tarihi 11 Eylül 2014)

[95] Aktaş A., Özdemir E., Karakaya A., Uçar M., Operation and performance of grid-connected solar photovoltaic power system in Kocaeli University, *Solar TR-2 Solar Electricity Conference and Exhibition*, Antalya, Turkey, 7-9 November 2012.

[96] www.guneshaber.net/haber/2419-roportajlar-turkiye39nin-gunesi-enerji39miz-olsun.html (Ziyaret tarihi 13 Eylül 2014).

[97] Nowak S., Photovoltaic power system programme annual reports, *International Energy Agency*, 2007-2013, 103-105, 2013.

[98] Rashid Muhammad H., *Power electronics handbook*, Academic Press, Canada, 2001.

[99] www.enerji.gov.tr (Ziyaret tarihi: 03 Mart 2013).

[100] Kjaer S. B., Pedersen J. K., Blaabjerg F., A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules, *Industry Applications, IEEE Transactions on* , 2005, **41**, 1292-1306.

[101] Guvengir U., Deniz M., Al-Otaibi Z. S., Al-Zahrani S. S., Shafei H. Y., Almokaiteeb O. A., Alanazi F. S., Altuwaijry A. A., Efficiency and cost optimization of a micro-inverter transformer, *Fourth International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, Istanbul, Turkey, 13-17 May 2013.

[102] www.solarpowerworldonline.com/2014/01/choose-central-inverter/ (Ziyaret tarihi: 5 Ocak 2014).

[103] Blaabjerg F., Teodorescu R., Liserre M., Timbus A. V., Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2006, **53**, 1398-1409.

[104] Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretimine İlişkin Yönetmeliğin Uygulanmasına Dair Tebliğ, http://www.epdk.gov.tr/index.php/elektrik-piyasasi/mevzuat?id=116 (Ziyaret tarihi: 25 Mart 2013).

[105] Araujo, S. V., Engler, A., Sahan, B., Antunes, F., LCL filter design for grid-connected NPC inverters in offshore wind turbines, *7th International Conference on Power Electronics ICPE 07*, Daegu, South Korea, 22-26 October 2007.

[106] Uçar M., 3-Fazlı 4-telli paralel aktif güç filtresinin tasarımı ve uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2005, 168841.

[107] Mage Solar AG, Powertec Plus Mono Solar Module Technical Data Sheet, http://www.magesolar.de/en/products/mage_powertec_plus.html (Ziyaret tarihi: 02 Şubat 2015).

[108] Chroma ATE INC, 62150H-600S/1000S Model Programmable DC Power Supply Technical Data Sheet, http://www.chromaate.com/product/62150H-600S_1000S_Solar_Array_Simulator.htm (Ziyaret tarihi: 03 Şubat 2015).

[109] Uçar M., 3-fazlı 4-telli sistemlerde güç kalitesi düzeltimi için birleşik seri-paralel aktif filtre sisteminin tasarımı, denetimi ve gerçekleştirilmesi, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2010, 283044.

[110] Concept 2SC0108T Description and Application Manual Technical Data Sheet, http://www.farnell.com/datasheets/575530.pdf (Ziyaret tarihi: 03 Şubat 2015).

[111] Concept 2BB0108T Target Description and Application Manual Technical Data Sheet, http://www.pdfdoc.info/semiconductors/power-management-ics/general-purpose-drivers/igbt-driver-core-pcb-2sc0108t-1200v-2bb0108t2a0-12-758-9493/2bb0108t-description-amp-appication-manual (Ziyaret tarihi: 03 Şubat 2015).

[112] Semikron SK150MLI066T IGBT Module Technical Data Sheet, http://www.semikron.com/dl/service-support/downloads/download/semikron-datasheet-sk-150-mli-066-t-24913460 (Ziyaret tarihi: 03 Şubat 2015).

[113] ApoGee Instruments SP-110 Pyranometer Technical Data Sheet, http://www.apogeeinstruments.com/content/SP-110manual.pdf (Ziyaret tarihi: 03 Şubat 2015).

[114] DSPACE DS1103 PPC Controller Board Technical Data Sheet, https://www.dspace.com/en/inc/home/products/hw/singbord/ppcconbo.cfm (Ziyaret tarihi: 04 Şubat 2015).

EKLER

Ek-A

```
function o = MPPT_PO(vn,in,delta)
persistent io;
persistent po;
persistent vo;
persistent vro ;
persistent dsign;
if isempty(io)
io = 0;
po = 0.1;
vo = 0;
vro = 390;
dsign =1;
end

pn=vn*in;
if pn>=po
dsign=dsign;
else
dsign=0-dsign;
end
vrn=vro+dsign*delta;
vo=vn;
io=in;
po=pn;
vro=vrn;
o=vrn;
end
```

Ek-B

```
% FV modul parametrelerinin hesaplanmasi
Ns = round(Voc/0.61);
Vt = 26e-3;
G = Isc/1000;
Vmpc = Vr/Ns;
Vocc = Voc/Ns;
Rmpp = Vmpc/Ir;

Rp = 100*Vocc/Isc;
Vdm = Vocc;

for i=1:10

 Idm = Isc - Ir - Vdm/Rp;
 Io = (Isc-Vocc/Rp)/(exp(Vocc/Vt)-1);
 Vdm = Vt*log(Idm/Io+1);
 Rs = (Vdm-Vmpc)/Ir;
 Rd = (Rmpp - Rs)*Rp/(Rp-Rmpp+Rs);
 Idm = Vt/Rd;
 Rp = Vdm/(Isc-Ir-Idm);

end
```

Ek-C

```
%LCL Filtre Tasarımı için Matlab Kodu
clear all;
close all;
Vn=190;
Vph=110;
Vdc=370;
Pn=2000;
f=50;
fsw=8000;
deltaImaks=(0.1*Pn*sqrt(2))/(3*Vph)

Linverter=Vdc/(16*fsw*deltaImaks)

Zb=(Vn*Vn)/Pn;
Cb=1/(2*pi*f*Zb);
Cf=0.05*Cb

r=0:0.000001:0.2;
L=Linverter;
x=2*pi*f*L;
Wsw=2*pi*fsw;
z=abs(1.+r.*(1.-(L.*Cb.*Wsw.*Wsw).*x));

y=1./z;

plot(r,y);
axis([0 1 0 1]);

grid;
```

KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

[1] Aydemir S., **Sezen S.**, Ertunç H. M., Fuzzy logic speed control of a DC motor, *IEEE Power Electronics & Motion Control Conference (IPEMC 2004)*, Xi'an, China, 14-16 August 2004.

[2] **Sezen S.**, Yılmaz K., Karakaş E., Sonlu elemanlar yöntemi ile yüksek güçlü bir anahtarlamalı relüktans motorun performans analizi, *Elektrik-Elektronik – Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu ve Fuarı (ELECO2006)*, Bursa, Türkiye, 6-10 Aralık 2006.

[3] Karabacak M., **Sezen S.**, Ertunç H. M., Bulanık mantık hız denetimli doğru akım motor sürücü sistemi ve karşılaştırmalı performans analizi, *Ulusal Teknik Eğitim, Mühendislik ve Eğitim Bilimleri Genç Araştırmacılar Sempozyumu (UMES 2007)*, Kocaeli, Türkiye, 20-22 Haziran 2007.

[4] Yılmaz K., **Sezen S.**, Parametrik üç boyut tabanlı hesaplanmış faz dirençlerine sahip kısa kutup ve tam kutup adımlı AR motorlarının performans analizi, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 2008, **23**, 375-384.

[5] **Sezen S.**, Ozdemir E., Modeling, simulation and control of three phase three level multilevel inverter for grid connected PV system, *Solar Electricity Conference and Exhibition SOLAR TR2*, Antalya, Turkey, 7-9 November 2012.

[6] **Sezen S.**, Ozdemir E., Modeling, simulation and control of three-phase three level multilevel inverter for grid connected photovoltaic system, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 2013, **15**, 335-341.

[7] **Sezen S.**, Aktas A., Ucar M., Ozdemir E., A Three-Phase Three-Level NPC Inverter Based Grid-Connected Photovoltaic System With Active Power Filtering, *16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition PEMC2014*, Antalya, Turkey, 21-24 September 2014.

ÖZGEÇMİŞ

1981 yılında Kocaeli’ de doğdu. İlk ve orta öğrenimini Kocaeli' de tamamladı. 1999 yılında Kocaeli Sabancı Anadolu Teknik Lisesi Elektrik Bölümü'nden mezun oldu. 2003 yılında Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi Bölümünü bitirdi. Aynı yıl içinde Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Eğitimi A.B.D.'da Yüksek Lisans eğitimine başladı. 2006 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Eğitimi A.B.D.'de Doktora eğitimine başladı. 2007 Yılında Balıkesir Üniversitesi Edremit Meslek Yüksekokulu Mekatronik Programında göreve başladı ve halen görevine devam etmektedir. Serkan SEZEN evli ve 1 çocuk babasıdır.