KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

FOTOVOLTAİK SİSTEMLER İÇİN PARÇALI GÖLGELENME DURUMLARINDA MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI İZLEYEBİLEN ŞEBEKE BAĞLANTILI YENİ BİR EVİRİCİ TASARIMI VE UYGULAMASI

MURAT ÜNLÜ

KOCAELİ 2015

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

FOTOVOLTAİK SİSTEMLER İÇİN PARÇALI GÖLGELENME DURUMLARINDA MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI İZLEYEBİLEN ŞEBEKE BAĞLANTILI YENİ BİR EVİRİCİ TASARIMI VE UYGULAMASI

MURAT ÜNLÜ

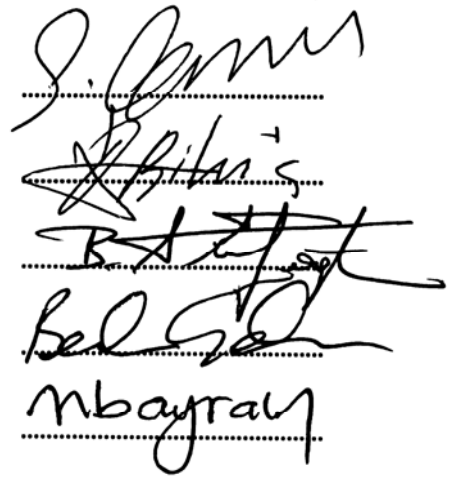
Yrd.Doç.Dr. Sabri ÇAMUR
Danışman, Kocaeli Üniv.

Prof.Dr. Oruç BİLGİÇ
Jüri Üyesi, İstanbul Kültür Üniv.

Yrd.Doç.Dr. Birol ARİFOĞLU
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

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

Doç.Dr. Mehmet BAYRAK
Jüri Üyesi, Sakarya Üniv.



Tezin Savunulduğu Tarih: 16.06.2015

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Güneş ışınımını elektrik enerjisine dönüştürmede düşük verime sahip olan FV enerjinin verimleri artırılmaya çalışılmaktadır. Halen düşük olan panel verimleri göz önüne alındığında; var olan panellerden en iyi şekilde faydalanmak gerekmektedir. Bu yüzden FV enerji dönüşüm çalışmalarında en göze çarpan çalışma alanı FV panellerden en iyi düzeyde faydalanabilmek için kullanılan maksimum güç noktası izleme yöntemleridir. Literatürde bu konuda çok sayıda çalışma mevcuttur. Fakat bu yöntemlerin çoğu özellikle parçalı gölgelenme durumlarında gerçek maksimum güç noktasına ulaşamazlar. Bu sebeple son yıllarda bu durumun üstesinden gelebilecek birçok yöntem önerilmiştir. Ayrıca günümüzde FV sistemlerin çok büyük bir kısmı şebekeye bağlı olarak çalışmaktadır. FV sistemlerin şebekeye bağlanması için farklı yapıda birçok evirici mevcuttur.

Yapılan literatür incelemeleri ile elde edilen kazanımlar sonucunda, homojen ışınım değişimlerinde ve parçalı gölgelenme durumlarında maksimum güç noktası izleyecek yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Ayrıca FV sistemden elde edilen gücü şebekeye aktarmak için literatürde daha önce kullanılan şebeke komütasyonlu evirici tipinin dezavantajları ortadan kaldıran yeni bir evirici tasarlanmıştır. Tasarlanan şebeke komütasyonlu evirici, şebekeye uluslararası standartlarda belirtilen sınırların altında toplam harmonik bozunuma sahip sinüs formunda, istenilen güç faktöründe akım aktarabilmesi ve akımın kontrol edilerek maksimum güç noktası izleme yapabilmesi gibi şebeke bağlantılı eviricilerden istenilen özelliklere sahiptir. Önerilen maksimum güç noktası izleyici yöntemi tasarlanan evirici üzerinde uygulanmıştır. Doktora tez aşamasında geliştirilen maksimum güç noktası izleme yöntemi ve şebeke komütasyonlu evirici devresinin daha sonraki çalışmalarda altyapı oluşturması amaçlanmıştır.

Akademik çalışma hayatında, kararlı ve kendi ayakları üzerinde durabilen bir akademisyen olarak yetişmemi sağlayan değerli danışmanım Yrd. Doç. Dr. Sabri ÇAMUR'a, tez çalışmam boyunca bana her zaman katkı sağlayan ve destek olan değerli hocalarım Yrd. Doç. Dr. Birol ARİFOĞLU ve Yrd. Doç. Dr. Ersoy BEŞER'e tez çalışmamda sırasında verdiği tavsiyeler ve yönlendirmeler için değerli hocam Prof. Dr. Oruç BİLGİÇ'e teşekkür ederim. Akademik çalışma hayatım boyunca bana hep destek olan değerli hocam Prof. Dr. Bekir ÇAKIR'a teşekkür ederim. Ayrıca tez çalışmalarım esnasında ve dışında hep yanımda olan değerli arkadaşlarım Yrd. Doç. Dr. Esra KANDEMİR BEŞER, Arş. Gör. Korhan KARARSLAN, Uzman Abdülvehhab KAZDALOĞLU ve tezimi her satırına kadar titizlikle okuyup, katkı sağlayan Yrd. Doç. Dr. Nasır ÇORUH'a destekleri için teşekkür ederim.

Ayrıca bu günlere gelmemde büyük pay sahibi olan annem, babam ve kardeşlerime sabır ve desteklerinden dolayı sonsuz şükranlarımı sunarım. Ve teşekkürlerimin en özelini, varlıklarıyla yaşamıma anlam veren, sadece tez aşamasında değil, hayatımın

geri kalan kısımlarında da sevgisini, ilgisini hiçbir zaman esirgemeyen, her türlü özveride bulunan sevgili eşim Gülten ÜNLÜ, kızlarım Esma ÜNLÜ ve Feyza ÜNLÜ'ye sunuyorum.

Haziran - 2015 Murat ÜNLÜ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER iii
ŞEKİLLER DİZİNİ v
TABLOLAR DİZİNİ viii
SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR ix
ÖZET xi
ABSTRACT xii
GİRİŞ 1
1. FOTOVOLTAİK ENERJİ 6
1.1. Fotovoltaik Hücrenin Akım-Gerilim ve Güç-Gerilim Karakteristikleri 8
1.2. Fotovoltaik Hücre Modeli 10
1.3. Fotovoltaik Hücre Modeli Numerik Analizi 12
1.4. Fotovoltaik Devre Temelli Parçalı Doğrusal Diyot Modeli 15
2. PARÇALI GÖLGELENME DURUMU (PGD) 21
2.1. By-pass (Köprüleme) ve Blokaj Diyodu 23
2.2. Parçalı Gölgelenme Durumunun (PGD) Analizi 24
2.2.1. PGD'nin FV çıkış I-V ve P-V karakteristiğine etkisi 24
3. PARÇALI GÖLGELENME DURUMU İÇİN MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI İZLEYİCİ 29
3.1. Maksimum Güç Noktası İzleyici Yöntemleri 30
3.1.1. Doğrudan denetim MGNİ yöntemleri 30
3.1.1.1. Değiştir-Gözle (P&O) ve Tepe Tırmanma (Hill-Climbing) MGNİ yöntemleri 31
3.1.1.2. Artan iletkenlik MGNİ yöntemi 33
3.2. Literatürdeki Parçalı Gölgelenme Durumları için MGNİ Yöntemleri 36
3.3. Önerilen MGNİ Yöntemi 41
3.3.1. Parçalı gölgelenme durumunun tespit edilmesi 41
3.3.2. Önerilen MNGİ yönteminin düşürücü tip DA-DA dönüştürücüye uygulanması 44
4. FV ENERJİ DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİ İÇİN TASARLANAN ŞEBEKE BAĞLANTILI EVİRİCİ YAPISI VE ÖNERİLEN MGNİ 52
4.1. Giriş 52
4.2. Literatürde Yer Alan Bir Fazlı Şebeke Komütasyonlu Evirici (ŞKE) Yapısı 61
4.2.1. Geleneksel bir fazlı ŞKE harmonik analizi 63
4.3. Tasarlanan Bir Fazlı Akım Zorlamalı ŞKE Devresi ve Çalışma Prensibi 64
4.3.1. Denetleyici kısmı 69
4.3.2. Sinüzoidal akım aktarma kısmı 71
4.3.3. ŞKE kısmı 71
4.3.4. FV sistem kısmı 72
4.4. FV sistemin çıkış gücü ile şebekeye aktarılan güç arasındaki ilişki 72

4.5. Tasarlanan ŞKE'nin Önerilen MGNİ ile Birlikte Çalışması 75
5. TASARLANAN ŞKE VE ÖNERİLEN MGNİ YÖNTEMİNİN SİMÜLASYON SONUÇLARI 78
5.1. Giriş 78
5.2. Tasarlanan ŞKE Matlab/Simulink Modeli 78
5.3. Simülasyon Çalışmaları 79
5.3.1. DA Gerilim Kaynağından Şebekeye Güç Aktarmada Tasarlanan ŞKE'nin kullanılması 79
5.3.2. PGD için önerilen MGNİ yöntemiyle FV sistemi genel MGN'de çalıştırma ve elde edilen gücün tasarlanan ŞKE ile şebekeye aktarılması 81
6. TASARLANAN ŞKE VE ÖNERİLEN MGNİ YÖNTEMİNİN DENEYSEL SONUÇLARI 85
6.1. Giriş 85
6.2. Tasarlanan Bir Fazlı Şebeke Bağlantılı FV Evirici için Test Düzeneği 86
6.3. Deneysel Çalışmalar 87
6.3.1. DA gerilim kaynağından şebekeye güç aktarmada tasarlanan ŞKE'nin kullanılması durumundaki deneysel sonuçlar 87
6.3.2. FV sistemden sabit gerilim MGNİ yöntemiyle elde edilen gücün önerilen ŞKE ile şebekeye aktarılması 90
6.3.3. PGD için önerilen MGNİ yöntemiyle FV sistemi genel MGN'de çalıştırma ve elde edilen gücün tasarlanan ŞKE ile şebekeye aktarılması 96
7. BULGULAR ve TARTIŞMA 102
8. SONUÇLAR ve ÖNERİLER 104
KAYNAKLAR 107
KİŞİSEL YAYIN ve ESERLER 113
ÖZGEÇMİŞ 114

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Fotovoltaik (FV) Hücrenin basit yapısı 6
Şekil 1.2. FV hücre, panel, dizin 7
Şekil 1.3. FV panelin I-V (Akım-gerilim) karakteristiği 7
Şekil 1.4. (a) FV hücre Akım-gerim (I-V) ve güç-gerilim (P-V) karakteristiği (b) FV hücre dolum faktörü 9
Şekil 1.5. Sıcaklık değişiminin açık devre gerilimine ve kısa devre akımına etkisi 9
Şekil 1.6. Tek diyot iki dirençli FV hücre eşdeğer devresi 10
Şekil 1.7. R_s ve R_p için Newton-Raphson yöntemi ile hesaplanması 14
Şekil 1.8. Newton-Raphson yöntemi ile elde edilen FV hücre I-V eğrisi 15
Şekil 1.9. FV hücre Diyot I-V eğrisi elde edilmesi 16
Şekil 1.10. FV hücre Diyot I-V eğrisi 16
Şekil 1.11. FV Hücre Parçalı doğrusal diyot modeli ile oluşturulan eşdeğer devre modeli 17
Şekil 1.12. Diyot I-V Eğrisi üzerinde üç nokta 17
Şekil 1.13. FV Hücre Parçalı doğrusal Matlab/Simulink modeli 18
Şekil 1.14. FV hücre farklı ışınım ve sıcaklıklardaki I-V eğrileri 18
Şekil 1.15. FV hücre farklı ışınım ve sıcaklıklardaki P-V eğrileri 18
Şekil 1.16. SCHUCO S125-SP FV panel üretici katalog P-V ve I-V eğrileri 19
Şekil 1.17. SCHUCO S125-SP FV panel model P-V ve I-V eğrileri 19
Şekil 2.1. Parçalı gölgelenme durumları için örnekler 21
Şekil 2.2. (a) Homojen ışınım altındaki ve (b) tek hücresi gölgeli olan panel eşdeğer devresi 22
Şekil 2.3. (a) Seri bağlı paneller ve by-pass diyotları b)Paralel bağlı paneller ve Blokaj diyotları 23
Şekil 2.4. Altı adet seri bağlı panelden oluşan FV sistemi 25
Şekil 2.5. FV sistemin homojen ışınım altında farklı ışınım seviyelerinde I-V ve P-V değişimi 26
Şekil 2.6. Gölgeye maruz kalan panel sayısının I-V ve P-V değişimine olan etkisi 26
Şekil 2.7. Bypass diyotu yok iken, gölgeye maruz kalan panel sayısının FV dizin I-V ve P-V değişimine olan etkisi 26
Şekil 2.8. Panellerden biri gölgeye maruz kaldığında, bu panel üzerindeki gölge oranının değişiminin I-V ve P-V değişimine olan etkisi 27
Şekil 2.9. By-pass diyotu olmadığı durumda, panellerden biri gölgeye maruz kaldığında, bu panel üzerindeki gölge oranının değişiminin, FV dizin I-V ve P-V değişimine olan etkisi 27
Şekil 2.10. FV dizinde üç panel farklı gölgelenme oranı ile gölgelendiğinde, FV dizin I-V ve P-V değişimi. 28
Şekil 3.1. Genel MGNİ sistemi blok diyagramı 31

Şekil 3.2. Değiştir-gözle ve tepe-tırmanma MGNİ yöntemi blok diyagramları 32
Şekil 3.3. Artan iletkenlik MGNİ yöntemi temel prensibi 33
Şekil 3.4. Artan İletkenlik MGNİ yöntemi akış şeması 35
Şekil 3.5. Seri bağlı dört panelden oluşan FV dizin 42
Şekil 3.6. Önerilen MGNİ Yöntemi akış şeması 46
Şekil 3.7. Önerilen MGNİ yöntemi ve düşürücü DA-DA dönüştürücü Matlab/Simulink modeli 47
Şekil 3.8. Homojen ışınım değişiminde FV dizinin I-V ve P-V eğrisi 48
Şekil 3.9. PGD altında FV dizinin I-V ve P-V eğrisi 48
Şekil 3.10. Artan iletkenlik yöntemi ile iki farklı durum için FV dizinin çıkış gücünün zamana bağlı değişimi 49
Şekil 3.11. Artan iletkenlik yöntemi ile iki farklı durum için FV dizinin çıkış akımının zamana bağlı değişimi 49
Şekil 3.12. Önerilen MGNİ ile PGD için FV dizinin çıkış güç değişimi, P(t) 51
Şekil 4.1. Avrupa'da FV enerji kurulu gücü 53
Şekil 4.2. Farklı şebeke bağlantılı evirici tipleri (a) Merkezi evirici (b) Dizi evirici (c) Modül evirici 54
Şekil 4.3. Güç işleme aşama sayısına göre şebeke bağlantılı evirici tipleri (a) bir aşamalı güç işleme (b) iki aşamalı güç işleme 55
Şekil 4.4. Dekuplaj kondansatörünün bağlandığı yere göre bir ve iki aşamalı şebeke bağlantılı evirici 56
Şekil 4.5. Trafo kullanılan şebeke bağlantılı evirici tipleri (a) Şebeke frekanslı trafo kullanan yapı ve (b) yüksek frekanslı trafo kullanan yapı 56
Şekil 4.6. Trafosuz şebeke bağlantılı evirici [48] 58
Şekil 4.7. Giriş kaynağına türüne göre evirici tipleri (a) Akım Kaynaklı Evirici (AKE) (b) Gerilim Kaynaklı Evirici (GKE) 59
Şekil 4.8. Şebeke bağlantılı eviricilerin genel olarak sınıflandırması 59
Şekil 4.9. AKE ve GKE'lerin şebekeye güç aktarmak için kullandıkları farklı modülasyonlar 60
Şekil 4.10. Geleneksel bir fazlı ŞKE yapısı. 62
Şekil 4.11. Bir fazlı şebeke bağlantılı FV sistem için tasarlanan ŞKE devresi 65
Şekil 4.12. Tasarlanan ŞKE'nin çalışma prensibi ve anahtarlama aralıkları 66
Şekil 4.13. Tasarlanan ŞKE'nin çalışma aralıkları (a) Şebekenin negatif alternansında, T1-T3 iletimde ve Aralık II (S1-S2 kesimde), (b) Şebekenin pozitif alternansında, T1-T3 iletimde ve Aralık I (S1-S2 iletimde), (c) Şebekenin pozitif alternansında, T2-T4 iletimde ve Aralık II (S1-S2 kesimde), (d) Şebekenin negatif alternansında, T2-T4 iletimde ve Aralık I (S1-S2 iletimde) 68
Şekil 4.14. Tasarlanan ŞKE blok diyagramı 69
Şekil 4.15. Tasarlanan ŞKE denetleyici kısmı blok şeması. 70
Şekil 4.16. Sıfır Geçiş Algılama (SGA) devresi. 71
Şekil 4.17. Tristör tetikleme devresi 72
Şekil 4.18. v_{grid}, i_{grid}, V_{pv}, P_{pv} ve p_{grid} arasındaki ilişki 73
Şekil 4.19. Tasarlanan ŞKE devresinin önerilen MGNİ ile birlikte çalışmasını blok şeması 75
Şekil 4.20. Tasarlanan ŞKE için gerçekleştirilen MGNİ Yönteminin akış şeması 77

Şekil 5.1. Tasarlanan ŞKE'nin önerilen MGNİ ile birlikte Matlab/Simulink modeli. 79
Şekil 5.2. Tasarlanan ŞKE'nin girişinde DA gerilim kaynağı ile oluşturulmuş Matlab/Simulink modeli 80
Şekil 5.3. $\alpha = 145^{\circ}$, I_{ref} =4 A için; (a) $v_{grid}(t)$ - $i_{grid}(t)$, (b) $v_d(t)$ - $i_L(t)$, (c) $v_a(t)$ - $i_L(t)$ 80
Şekil 5.4. Farklı α ve I_{ref} için $v_{grid}(t)$ve $i_{grid}(t)$; (a) α=145° ve I_{ref} =2,4A (b) α=120° ve I_{ref} =4A (c) α=120° ve I_{ref} =2,4A 81
Şekil 5.5. Homojen ışınım değişiminde FV dizinin I-V ve P-V eğrileri 82
Şekil 5.6. PGD altında FV dizinin I-V ve P-V eğrileri 82
Şekil 5.7. Artan iletkenlik yöntemi ile iki farklı durum için FV dizinin çıkış güç değişimi, P(t) 83
Şekil 5.8. Artan iletkenlik yöntemi ile iki farklı durum için FV dizinin çıkış akımı değişimi, I(t) ve çıkış gerilimi değişimi, V(t) 83
Şekil 5.9. Önerilen MGNİ ile PGD için FV dizinin çıkış güç değişimi, P(t) 84
Şekil 6.1. Tasarlanan ŞKE'nin prototipi 86
Şekil 6.2. $\alpha=145^{\circ}$, I_{ref}=4A için deneysel sonuçlar; (a) $v_{grid}(t)$ ve $i_{grid}(t)$, (b) $v_d(t)$ ve $i_L(t)$, (c) $v_a(t)$ ve $i_L(t)$ 88
Şekil 6.3. Farklı tetikleme açısı ve referans akımları için $v_{grid}(t)$ ve $i_{grid}(t)$ dalga şekilleri; (a) α=145° ve I_{ref} =2.4 A, (b) α=120° ve I_{ref} =4A, (c) α=120° ve I_{ref} =2.4 A 89
Şekil 6.4. $\alpha=145^{\circ}$ ve I_{ref} =4A için THB_i 89
Şekil 6.5. Deneysel çalışmada kullanılan seri bağlı iki FV panelin iki farklı ışınım değeri için (a) I-V ve (b) P-V karakteristiklerinin deneysel olarak elde edilmesi 91
Şekil 6.6. Sabit gerilim MGNİ yöntemi ile FV dizinin çıkış akım ve geriliminin değişimi 92
Şekil 6.7. Sabit gerilim MGNİ yöntemi ile FV dizinin çıkış gerilimi ve DA-link üzerindeki akımın değişimi 93
Şekil 6.8. Sabit gerilim MGNİ yöntemi ile FV dizinin çıkış gerilimi ve şebekeye aktarılan akımın değişimi 93
Şekil 6.9. α=140° tetikleme açısında; 388W/m^2 ve 776W/m^2 ışınımlarında şebekeye aktarılan akımın ve şebeke geriliminin değişimi 94
Şekil 6.10. α=174° tetikleme açısında; 388W/m^2 ve 776W/m^2 ışınımlarında şebekeye aktarılan akımın ve şebeke geriliminin değişimi 94
Şekil 6.11. α=174° ve 776W/m^2 ışınımdaki THB_i 96
Şekil 6.12. Önerilen MGNİ yöntemi ile 1.durum için FV dizinin çıkış akım ve gerilim değişimi 97
Şekil 6.13. Artan iletkenlik MGNİ yöntemi ile 2.durum için FV dizinin çıkış akım ve gerilim değişimi (geçici hal) 98
Şekil 6.14. Artan iletkenlik MGNİ yöntemi ile 2.durum için FV dizinin çıkış akım ve gerilim değişimi (kalıcı hal) 98
Şekil 6.15. Önerilen MGNİ yöntemi ile 2.durum için, genel MGN'i bulunurken FV dizinin çıkış akım ve gerilim değişimi 99
Şekil 6.16. Önerilen MGNİ yöntemi ile 2.durum için sistemin genel MGN'de çalışırken FV dizinin çıkış akım ve gerilim değişimi 99

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1.1. SCHUCO S125-SP Güneş Hücresi Parametreleri (25 ◦C, 1000W/m2 AM 1,5 STK'daki değerleri için) 12
Tablo 3.1. FV Panel Parametreleri 45
Tablo 3.2. FV dizindeki panellerin ışınım değerleri 47
Tablo 3.3. FV dizin homojen ve PGD altında elde edilen sonuçlar 50
Tablo 5.1. FV dizindeki panellerin ışınım değerleri 82
Tablo 6.1. Farklı tetikleme açısı ve referans akımları için simülasyon ve deneysel çalışma sonuçlarının karşılaştırılması 90
Tablo 6.2. Kullanılan FV panelin STK altında verilen üretici katalog değerleri 90
Tablo 6.3. Işınım değişimi 91
Tablo 6.4. Sabit gerilim MGNİ yöntemi ile elde edilen deneysel sonuçlar 95
Tablo 6.5. FV dizinde (3 adet seri bağlı SCHUCO S 125-SP) kullanılan FV panelin STK altında verilen üretici katalog değerleri 97
Tablo 6.6. Önerilen ve Artan iletkenlik MGNİ yöntemlerinin simülasyon ve deneysel sonuçları 100

SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

α : Tetikleme açısı
ΔT : FV hücrenin sıcaklık değişimi
ΔV_{pv} : Geriliminin dalgalanma genliği
C_{dc} : Dekuplaj kondansatörü
Eg : Yarı iletken hücrenin band enerjisi (eV)
G_n : Referans ışınım şiddeti (1000 W/m^2)
I_d : Diyot akımını
I_{grid} : Şebekeye aktarılan akım
I_L : DA-hat bobini üzerinden geçen akım
I_{Lref} : Referans akımı
I_{mgrid} : Şebeke akımın tepe değeri
I_{mp} : Maksimum güç noktasındaki akım
I_o : Diyot ters doyum akımı
I_{on} : Referans diyot ters doyum akımı
I_{ph} : FV hücrenin ürettiği akım
I_{pv} : FV çıkış akımı
I_{sc} : FV kısa devre akımı
I_{scn} : Referans kısa devre akımı
k : Boltzmann sabiti (1,38x10-23J/K)
K_i : Kısa devre akımının sıcaklık katsayısı (A/^{o}C)
K_v : Açık devre geriliminin sıcaklık katsayısı (V/^{o}C)
n : Diyotun ideal faktörü
P_{mp} : Maksimum çıkış gücü
P_{grid} : Şebeke aktarılan güç
P_{pv} : FV çıkış gücü
R_p : Eşdeğer devre paralel direnci
R_s : Eşdeğer devre seri direnci
q : Bir elektron yükü (1.6022 x 10^{-19} C)
T_n : Referans sıcaklık (25 ^{o}C)
V_{grid} : Şebeke gerilimi
V_{mgrid} : Şebeke gerilimi tepe değeri
V_{mp} : Maksimum güç noktasındaki gerilim
V_{oc} : Açık devre gerilimi
V_{ocn} : Referans açık devre gerilimi
V_{pv} : FV çıkış gerilimi
V_{ref} : Referans gerilimi

Kısaltmalar

ADC : Analog Digital Converter (Analog Dijital Dönüştürücü)
AKE : Akım Kaynaklı Evirici
DGA : Darbe Genişlik Ayarı

FV	: Fotovoltaik
GKE	: Gerilim Kaynaklı Evirici
MGN	: Maksimum Güç Noktası
MGNİ	: Maksimum Güç Noktası İzleyici
PGD	: Parçalı Gölgelenme Durumu
P&O	: Perturb and Observe (Değiştir-Gözle)
SGA	: Sıfır Geçiş Algılama
STK	: Standart Test Koşulları
ŞKE	: Şebeke Komütasyonlu Evirici
THB	: Toplam Harmonik Bozunumu

FOTOVOLTAİK SİSTEMLER İÇİN PARÇALI GÖLGELENME DURUMLARINDA MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI İZLEYEBİLEN ŞEBEKE BAĞLANTILI YENİ BİR EVİRİCİ TASARIMI VE UYGULAMASI

ÖZET

Fotovoltaik paneller güneş ışınımını elektrik enerjisine dönüştürmede düşük verimli olduğundan, fotovoltaik sistemin her bileşeni ayrı bir öneme sahiptir. Panellerden elde edilen enerji miktarını en yüksek seviyede tutmak için kullanılan maksimum güç noktası izleyicileri, fotovoltaik sistem içinde önemli bir rol oynamaktadır. Maksimum güç noktası izleyicileri fotovoltaik paneller doğrusal olamayan bir karakteristiğe sahip olduğu için gereklidir. Doğrusal olmayan bu karakteristik, paneller parçalı gölgelenme durumuna maruz kaldıklarında daha karmaşık hale gelmektedir. Bu yüzden gerçekleştirilen fotovoltaik sistemde ilk aşama, fotovoltaik panelleri homojen ışınım ve parçalı gölgelenme durumlarında, maksimum güç noktasında çalıştıracak bir izleyici tasarlamaktır. İkinci aşama ise, elde edilen maksimum gücün anlık olarak şebekeye aktarabilen ve uluslararası standartları karşılayan yüksek verimli şebeke bağlantılı eviricilerdir.

Yapılan literatür incelemeleri ile elde edilen kazanımlar sonucunda, homojen ışınım değişimlerinde ve parçalı gölgelenme durumlarında maksimum güç noktası izleyecek yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Önerilen izleyicinin simülasyon çalışmasında kullanmak üzere FV panelin devre temelli parçalı doğrusal modeli oluşturulmuştur. Numerik analiz ile üretici bilgilerinde verilmeyen parametrelerin bulunmasından sonra elde edilen panel modeli ile gerçek panelin çıkış karakteristikleri karşılaştırılarak doğrulanmıştır.

Önerilen izleyicinin kullanılacağı şebeke bağlantılı eviriciler için literatür incelemesi yapılmış ve yeni bir Şebeke Komütasyonlu Evirici devresi tasarlanmıştır. Yapılan deneysel ve simülasyonlar sonuçları ile tasarlanan eviricinin, DA kaynaktan veya FV panellerden şebekeye birim güç faktöründe veya farklı güç faktörlerinde, toplam harmonik bozunumun (THB) uluslararası standartların altında (THB_i < %5) olan sinüzoidal akım aktarabildiği gösterilmiştir.

Tasarlanan eviricinin, sabit gerilim, artan iletkenlik ve önerilen maksimum güç noktası izleyici yöntemleri kullanılarak, homojen ışınım değişimleri ve parçalı gölgelenme durumları için simülasyon ve deneysel çalışmaları yapılmıştır. Sonuç olarak, FV sistemin önerilen MGNİ yöntemi ile tüm ışınım durumlarında geleneksel izleme yöntemlerinden farklı olarak gerçek maksimum güç noktasında çalıştığı ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik Sistem, Maksimum Güç Noktası İzleyici, Parçalı Gölgelenme Durumu, Şebeke Bağlantılı Evirici.

A NEW INVERTER DESIGN AND IMPLEMENTATION FOR GRID CONNECTED PHOTOVOLTAIC SYSTEMS WITH MAXIMUM POWER POINT TRACKING UNDER PARTIALLY SHADED CONDITIONS

ABSTRACT

The efficiency of photovoltaic (PV) panel in conversion of solar radiation into electrical energy is low. Every photovoltaic system component has significant role because of the poor conversion efficiency. Maximum Power Point Trackers (MPPTs) play an important role in photovoltaic power systems in order to maximize the power output from photovoltaic panels. MPPTs are necessary because panels show a non-linear voltage-current characteristic with a unique point. Moreover, the voltage-current characteristic becomes more complicated under partially shaded conditions. As a result, the first stage of system is to design a tracker that enable the PV panels to operate effectively at maximum power under uniform radiation and partial shaded conditions. The second stage is inverter that a power electronic interface is required to connect the PV systems to the utility grid, and it inject the obtained maximum power from PV (dc) into the grid (ac) by ensuring international standards.

In consideration of literature investigations and experiences, a new MPPT method is developed for uniform radiation variations and partial shaded conditions. The circuit-based piecewise linear model of PV was built in MATLAB/Simulink in order to test simulation studies of the proposed method. Numerical method is used to define unknown parameters of the PV panel using information from the datasheet. The output characteristics of this PV model were compared to real PV panel and verified.

The grid connected inverters for PV systems are discussed, and then a new Line Commutated Inverter (LCI), which overcomes the drawbacks of the conventional the line commutated inverter, is designed. Experimental and simulation results confirmed the developed inverter's ability to inject sinusoidal current from PV panels or the dc supply to the grid at unity or different power factors. The total harmonic distortion (THD) of the injected currents for the different power factors is achieved less than 5%, which meet the international grid-connected standards.

The designed LCI circuit is performed with respectively, constant voltage (fractional open-circuit voltage), incremental conductance and the proposed MPPT methods under uniform irradiations and partially shaded conditions. Finally, the results confirmed that the designed grid connected inverter with the proposed MPPT method can track the real maximum power point under all irradiation conditions on the contrary the conventional MPPT methods.

Keywords: Photovoltaic System, Maximum Power Point Tracker, Partially Shaded Condition, Grid Connected Inverter.

GİRİŞ

Elektrik enerjisi üretimi için geleneksel enerji kaynakları hidroelektrik, fosil yakıtlar ve nükleer enerjidir. Dünya çapında sera gazları emisyonunun artması ve fosil yakıtların hızla tükenmesi yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi artırmıştır. Ayrıca, çevrenin korunması, gelecekte insan yaşamı ve çevre dengeleri üzerinde oluşabilecek tehditlerin önlenmesi, ulusal kaynaklardan en üst düzeyde yararlanılarak ülkelerin enerji kaynakları arz güvenliğinin sağlanması, alternatif enerji kaynaklarının geliştirilmesini ve kullanılmasını gerekli hale getirmektedir. Bu kaynaklar arasında, fotovoltaik elektrik üretim sistemleri en önemli yenilenebilir enerji kaynakları arasındadır.

FV sistemlerinin yenilenebilir kaynaklar arasında hızla önem kazanmasının bir başka nedeni ise temiz, düşük bakım maliyeti, gürültüsüz ve modüler yapısı ile birkaç Watt'tan Megawatt değerlerine kadar kolaylıkla tasarlanıp uygulanabilir olmasıdır.

Düşük bakım maliyeti ve temiz enerji özelliklerinden dolayı avantajlı olan bu sistemler bunun yanında uygulamasının (geniş yer gereksinimi) zor olması, enerji ihtiyacının yoğun olduğu aylarda ışıma miktarının az olması ve maliyetinin yüksek olması gibi sakıncalar içermektedir. FV panellerin düşük verimli olmaları en büyük sakıncalardan biridir.

FV sistemler ister şebekeye doğrudan bağlı olsun ister şebekeden bağımsız olsun maliyetleri göz önüne alındığında maksimum verimde kullanılması gereken sistemlerdir. PV sistemlerinin çıkış güç eğrisinde parçalı gölgelenme durumları hariç tek bir maksimum nokta oluşmaktadır. Doğrudan şebekeye, yüke veya akü grubuna bağlı sistemlerde sistemin maksimum güç noktasında çalışmadığı görülmüştür. Bu nedenle; FV'den maksimum gücü elde edebilmek ve dolayısıyla FV sistemlerin verimliliğini artırmak için Maksimum Güç Noktası İzleyicisi (MGNİ, MPPT-Maximum Power Point Tracker) kullanmak gereklidir. MGNİ kullanımıyla sistemden çekilecek güç artacağı için daha düşük sayıda FV panel kullanmak yeterli

olacak mümkün olacak ve böylece FV sistemin maliyeti düşecektir. Literatürde yer alan çoğu MGNİ yöntemleri, FV panellere homojen ışınım geldiği durumlarda verimli çalışmakta fakat parçalı gölgelenme durumları (PGD) meydana geldiğinde yerel maksimum güç noktasına takılmaktadırlar. Bu yüzden FV panellerden maksimum verimde faydalanamamaktadır.

Günümüzde şebeke bağlantılı FV sistemlerin kurulu gücü şebeke bağlantısız FV sistemlere göre oldukça fazladır. Bu yüzden FV panellerden elde edilen gücün anlık olarak şebekeye aktarılması için şebeke bağlantılı eviriciler kullanmak gerekmektedir.

Yapılan literatür incelemesi sonucunda elde edilen kazanımlardan yola çıkarak literatüre farklı bir bakış açısı getirebilmek amacıyla gerçekleştirilen doktora tez çalışmasının amacını maddeler halinde sıralanırsa;

(i) Homojen ışınım değişimlerinde FV sistemi maksimum güç noktasında çalışması sağlayabilen MGNİ metodu gerçekleştirmek
(ii) Parçalı gölgelenme durumu oluştuğunda önerilen MGNİ yönteminin bu durumu tespit edip FV sistemin çalışma noktasını gerçek MGN'ye götürecek bir algoritma oluşturmak
(iii) Literatürde kullanılmış olan şebeke komütasyonlu eviricinin, yüksek THB değerine sahip akım aktarması, sürekli değişken güç faktöründe çalışması ve akımın kontrol edilememesi gibi sakıncalarını ortadan kaldıracak yeni bir şebeke komütasyonlu evirici tasarlamak
(iv) Literatürdeki şebeke bağlantılı evirici yapılarına alternatif olacak düşük THB değerli, şebekeye sabit güç faktöründe kontrol edilebilen sinüzoidal akım aktarabilen, güç faktörü ayarlanabilen evirici gerçekleştirmek
(v) Önerilen MGNİ yönteminin tasarlanan şebeke komütasyonlu evirici üzerine uygulamasını gerçekleştirmek. Böylelikle şebeke aktarılan akımın genliği kontrol edilerek FV sistemden homojen ve parçalı gölgelenme durumlarında maksimum güç çekilmesini sağlamak

Bu amaçla doktora tezinin birinci bölümde; FV enerjisinin tanımı, FV hücre denklemleri, akım-gerilim (I-V) güç-gerilim (P-V) karakteristikleri anlatılmıştır.

Daha sonra MGNİ ve şebeke bağlantılı evirici devrelerinin deneysel çalışmalarında kullanılacak olan FV panelin, bilgisayar ortamında ön analizlerini yapabilmek amacıyla FV panelin modeli çıkarılmıştır. Bunun için öncelikli olarak panelin karakteristiğinin çıkarılması gerekmektedir. Doğrusal olmayan bu karakteristiğinin elde edilmesi için gerekli olan ve üretici kataloglarında verilmeyen bazı parametreler numerik yöntemle elde edilmiştir. Gerçekleştirilen modelin simülasyon ortamında daha hızlı ve sorunsuz çalışabilmesi için FV panelin doğrusal olmayan karakteristiği doğrusal bir çok denklemle ifade etme imkanı sağlayan parçalı doğrusal model oluşturulmuştur. FV sistemin Matlab/simulink simülasyon ortamında powersystem/toolbox'da yer alan güç elektroniği elemanlarının kullanımına imkan verecek şekilde devre temelli bir model tasarlanmıştır. Gerçekleştirilen devre temelli model bir önceki aşamada oluşturulan parçalı doğrusal modele uyarlanmıştır. Elde edilen bu FV hücre/panel modeli ile FV hücrelerin/panellerin farklı ışınımlarda ve sıcaklıklarda P-V ve I-V karakteristikleri elde edilebilmektedir. Ayrıca bu model kullanılarak FV panellerin farklı bağlantı tiplerinde ve asıl amaç olan parçalı gölgelenme durumlarında FV sistemin çıkış parametrelerinin nasıl değiştiğinin analizi yapılmıştır. Yine bu model ile parçalı gölgelenme durumlarında önerilen MGNİ'nin çalışmasını simülasyon ortamında denemek için kullanılmıştır. Elde edilen model devre temelli olduğundan tezde kullanılan güç elektroniği dönüştürücü devrelerinde daha etkin ve hızlı cevaplar alabilmek için uygun olmuştur.

İkinci bölümde; parçalı gölgelenme durumunun tanımı, hangi durumlarda meydana geldiği ve sakıncalarından bahsedilmiştir. FV hücre eşdeğer devresi kullanılarak PGD'nin FV panel/dizilerin çıkış karakteristiğine olan etkisi anlatılmıştır. Daha sonra, birinci bölümde oluşturulan FV panelin devre temelli modelinden faydalanılarak örnek olarak oluşturulan bir FV dizinin, birçok değişik parçalı gölgelenme durumlarının meydana gelmesine göre senaryolar üretilmiş ve bu senaryoların farklı sıcaklık, ışınım ve by-pass diyotlarının bağlı olup-olmaması durumları için analizler yapılmıştır. Bu analizler sonucunda FV dizinde paneller üzerindeki gölgenin ışınım olarak oranı, gölgeli panel sayısı, panellerin farklı ışınıma maruz kaldığı, ışınımın homojen olarak değiştiği, bypass paralel diyotların bağlı olduğu ve olmadığı durumlarında FV dizi çıkışındaki güç, gerilim ve akımın değişimi P-V ve I-V eğrileri çıkarılmıştır. Elde edilen bu eğrilerle, MGNİ devresinin

kullanılacağı bu sistemde parçalı gölgelenme etkisinin her farklı durumu için maksimum güç noktasının nasıl değiştiği gözlemlenmiştir.

Üçüncü bölümde; maksimum güç noktası izleyicinin tanımı yapılmış ve en çok kullanılan geleneksel MGNİ yöntemleri olan değiştir-gözle ve artan iletkenlik yöntemleri çalışma prensipleri anlatılmıştır. Daha sonra literatürde parçalı gölgelenme durumları için önerilen yöntemlerden bahsedilmiş ve irdelenmiştir. Literatür araştırmasından sonra bu tez çalışmasında parçalı gölgelenme durumu için önerilen yöntem anlatılmıştır. Önerilen MGNİ yöntemi örnek bir PGD senaryosu oluşturularak düşürücü tip DA-DA dönüştürücü üzerinde simülasyonu gerçekleştirilmiştir.

Dördüncü bölümde; şebeke bağlantılı eviriciler hakkında bilgi verilmiş, bu eviricilerde bulunması gereken özellikler ve çeşitli parametrelere göre sınıflandırılması yapılmıştır. Sonrasında, literatürde yer alan bir fazlı şebeke komütasyonlu evirici yapılarının sakıncalarından bahsedilmiştir. Bunun ardından bu tez çalışmasında tasarlanan bir fazlı akım zorlamalı şebeke komütasyonlu evirici devresinin çalışma prensibi, çalışma aralıkları ve devre topolojileri ile birlikte anlatılmıştır. Sonrasında tasarlanan eviriciye ait blok diyagramı verilerek, bu blok diyagramı üzerinden denetleyici kısmının çalışması ve eviricinin diğer kısımları hakkında ayrı ayrı bilgi verilmiştir.

Beşinci bölümde, doktora tez çalışması için tasarlanan eviricinin ve önerilen MGNİ yönteminin Matlab/Simulink ortamında oluşturulan modeli tanıtılmıştır. Bu model kullanılarak önerilen sistemin farklı parametreler ve durumlar için simülasyonları yapılmıştır. Yapılan simülasyon çalışmalarında elde edilen FV çıkış akımı, gerilimi ve gücü ile şebekeye aktarılan akımın ve gerilimin zamana bağlı değişimleri verilmiştir.

Altıncı bölümde, doktora tez çalışması için tasarlanan evirici prototipi için hazırlanmış olan test düzeneği tanıtılmış ve yapılan deneysel çalışmalarda elde edilen şebekeye aktarılan akımın zamana bağlı değişimi ve THB değeri grafiksel olarak verilmiştir. Daha sonra tasarlanan ŞKE'ye sabit gerilim MGNİ yöntemi gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda elde edilen şebekeye aktarılan

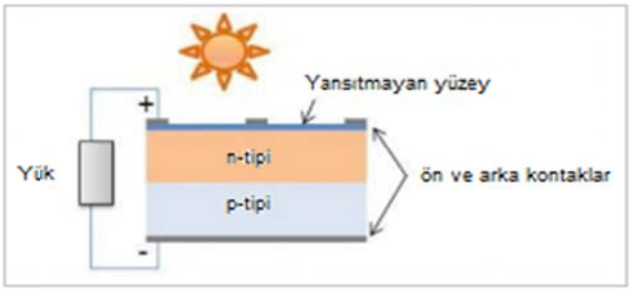
akımın zamana bağlı değişimi ve THB değeri grafiksel olarak verilmiştir. Son olarak tasarlanan ŞKE artan iletkenlik ve önerilen MGNİ yöntemleri ile birlikte çalıştırılarak elde edilen FV çıkış akım ve gerilimin zamana bağlı değişimleri verilmiştir.

Yedinci bölümde, doktora tez çalışmasında elde edilen bulgulara yer verilmiştir. Sekizinci bölümde, doktora tez çalışmasında elde edilen sonuçlara yer verilmiştir. Bu kısmında tasarlanan şebeke komütasyonlu evirici yapısı ve önerilen MGNİ yönteminin simülasyon ve deneysel çalışmaları neticesinde elde edilen kazanımlardan, literatürde yer alan yapılar arasındaki avantaj ve dezavantajlardan bahsedilmiştir.

1. FOTOVOLTAİK ENERJİ

İlk olarak 1954 yılında Bell telefon araştırmacıları tarafından geliştirilen pratik FV hücreleri ve 1960'ların başlarında ABD uzay araştırmalarında ve daha sonra hesap makineleri, saatler ve uzaktaki şebeke bağlantısı olmayan yerlerde elektrik enerjisi üretmek için kullanılmışlardır. 1990'lardan itibaren teknolojik gelişmeler ve devletlerin teşvikleri sayesinde FV enerjinin kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır. Bu gibi gelişmelerin sonucu olarak 2000'lerden sonra özellikle şebeke bağlantılı FV enerji üretim santralleri ve FV sistem kullanan bina sayısı gün geçtikçe hızla artmaktadır. FV sistemler güneş ışınlarını arada barajlarda veya rüzgâr türbinlerinde olduğu gibi bir jeneratör vasıtası ile elektrik üreten sistemler olmayıp doğrudan elektrik üreten sistemlerdir.

Fotovoltaik hücreler yapısal olarak p ve n tip yarı iletkenlerin ince bir katman haline getirilerek birleştirilmesinden oluşur. Birleşim bölgesine düşen güneş fotonları kabuk yapının son yörüngesine zayıf bir şekilde bağlı olan elektronları yörüngesinden kopartıp elektrik akımı meydana getirir ve malzemeler arasında elektriksel potansiyel fark oluşur. Basit yapısı Şekil 1.1'de gösterilen FV hücrede oluşan akımları toplamak için n-tip ve p-tipi malzemenin birleşim noktasının her iki tarafına metal kontaklar yerleştirilmiştir.

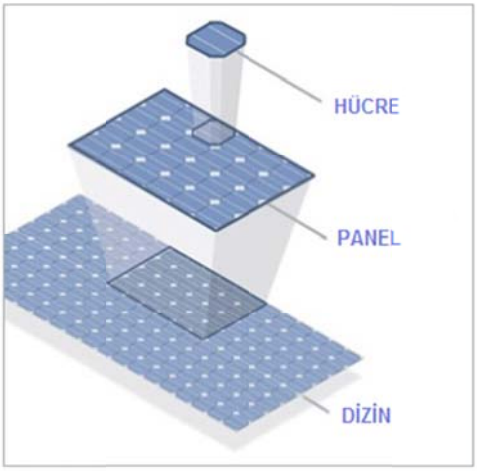


Şekil 1.1. Fotovoltaik (FV) Hücrenin basit yapısı

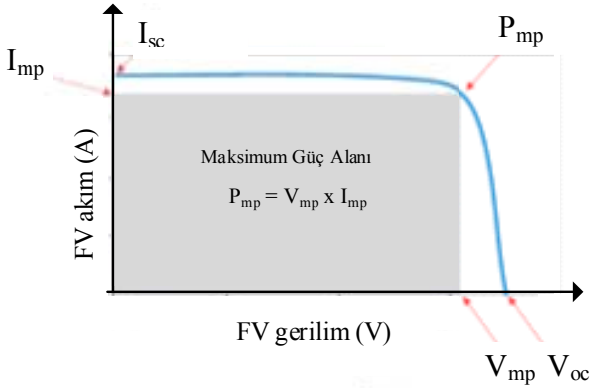
Şekil 1.1'de görülen hücrenin güneş ışığına maruz kalan yüzü, en az yansıtma ile mümkün mertebe çok miktarda ışığı yutacak anti yansıtıcı bir kaplama ile kaplıdır. Hücrenin bu yüzeyi ayrıca mekanik koruma için koruyucu bir cam ile kapalı olup, bu

cam saydam bir yapıştırıcı ile sisteme tutturulmuştur. Tek bileşimli p-n yapısıyla FV hücre diyot elemanı ile benzerdir. Özellikle güneş ışığı olmadığı durumda hücre, diyot çalışma karakteristiğine çok benzer bir çıkış I-V karakteristiği gösterir. Işığa maruz kaldığında ise fotonlar sayesinde harici bir yük üzerinden veya FV hücre kısa devre edildiğinde akım akması sağlanır.

FV hücreler 1,25 cm'den 10 cm'ye kadar değişen boyutlarda ve 1-3 W güç aralığında üretilebilmekte olup, bu güç çoğu uygulama için yetersizdir. Bu yüzden hücreler hava geçirmez bir yapıda seri bağlı olacak şekilde birleştirilerek FV paneli oluşturmaktadırlar. Şekil 1.2'de gösterildiği gibi FV paneller yine istenilen gerilime ve güce göre seri ve paralel olarak bağlanarak FV dizisini ve FV sistemi oluşturmaktadırlar.



Şekil 1.2. FV hücre, panel, dizin



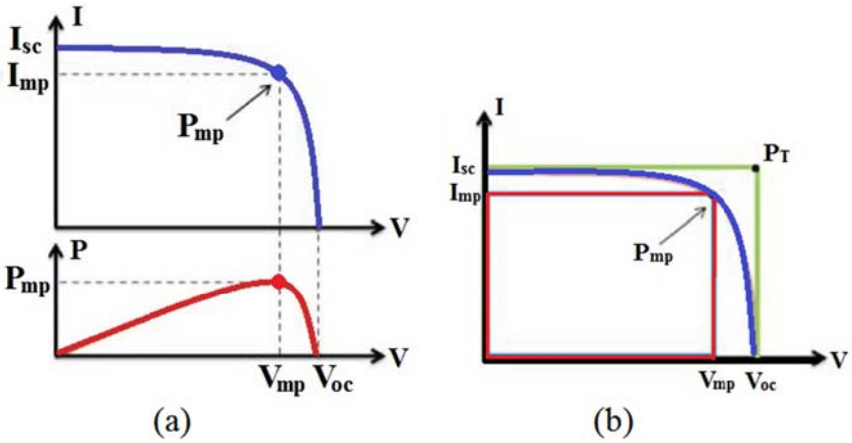
Şekil 1.3. FV panelin I-V (Akım-gerilim) karakteristiği

Bir fotovoltaik hücrenin akım-gerilim (I-V) karakteristiği Şekil 1.3'deki gibidir. Karakteristikte belirtilen noktalar FV hücrenin elektriksel performansını belirlemektedir. Bu noktalar deneysel olarak ya da üretici katalog verilerinden elde edilebilir. Üretici kataloglarında belirtilen değerler Standart Test Koşullarında (STK) (AM 1,5 güneş spektrumuna sahip, 1000W/m^2 ışınım ve 25°C ortam sıcaklığı) için ölçülmüş değerlerdir. Normalde ışınım değeri bulutsuz bir günde 1200W/m^2'ye çıkabilmekte iken, bulutlu bir günde yaklaşık 200-800W/m^2 arasında değişmektedir. Karakteristikte, V_{oc} FV hücrenin açık devre gerilimini, I_{sc} kısa devre akımı göstermektedir. Kısa devre akımı, çıkış uçları kısa devre edilerek uç akımı ölçülerek belirlenir ve yaklaşık olarak hücrenin ürettiği akıma (I_{ph}) eşit olduğu varsayılır. Kısa devre akımı daha çok ışınım seviyesiyle doğru orantılı iken sıcaklıkla değişimi çok azdır. Açık devre geriliminin ise ışınım ile değişimi az olmakta ve daha çok sıcaklıkla değişim göstermektedir.

FV hücre karakteristiğinin en önemli noktası olan maksimum güç noktası (MGN) Şekil 1.3'den de görüldüğü üzere çıkış eğrisinin doğrusal olarak en büyük alanını göstermektedir. FV hücrenin bu noktada çalışırken çıkış akımı MGN'deki akım (I_{mp}) çıkış gerilimi MGN' deki gerilim (V_{mp}) olarak adlandırılmaktadır.

1.1. Fotovoltaik Hücrenin Akım-Gerilim ve Güç-Gerilim Karakteristikleri

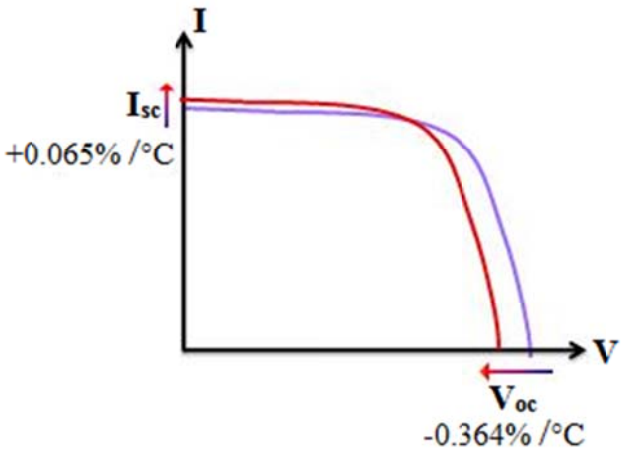
Bir fotovoltaik hücre, Sekil 1.4.a'da görüldüğü gibi karakteristik akım-gerilim eğrisine sahip olup, yüke bağlı olarak bu eğri üzerinde herhangi bir noktada çalışmaktadır. FV akım-gerilim (I-V) karakteristiğindeki dört önemli nokta olan, V_{oc}, I_{sc}, V_{mp} ve I_{mp} hücrenin elektriksel performansını belirlemektedir. Düşük seviyedeki diyot akımı ile toprağa doğru olan sızıntı akımı, sıfır uç gerilimi altında ihmal edildiğinde ölçülen kısa devre akımı, I_{ph} fotovoltaik hücre akımını verir. Kısa devre akımı (I_{sc}) ışınım seviyesi ile orantılı iken, açık devre gerilimi (V_{oc}), ışınım seviyesinin logaritması ile doğru orantılıdır. Maksimum hücre gerilimi, açık devre gerilimi (V_{oc}) durumunda elde edilir. Kısa devre ve açık devre durumlarında FV hücre çıkış gücü sıfırdır. FV hücrenin kullanıldığı sistemlerde, FV enerjiden en iyi şekilde faydalanabilmek için maksimum güç noktası izleme yöntemlerinde referans olarak kullanılan akım veya gerilimin V_{mp} ve I_{mp} değerlerinde olması istenmektedir.



Şekil 1.4. (a) FV hücre Akım-gerim (I-V) ve güç-gerilim (P-V) karakteristiği (b) FV hücre dolum faktörü

Bir FV hücrenin kalitesini tanımlamak için genel olarak üretici bilgilerinde Dolum Faktöründen (Fill Factor-FF) bahsedilir. Dolum faktörü, Şekil 1.4.b'de betimlendiği gibi FV hücrenin I-V eğrisinde hesaplanan kareye en yakın dikdörtgen alan olan FV hücrenin maksimum gücünün ($P_{mp}=V_{mp}.I_{mp}$), kısa devre akımı ile açık devre gerilimlerinin çarpımı olan teorik güce ($P_T=V_{oc}.I_{sc}$) olan oranı olarak tanımlanabilir. FV hücre için dolum faktörünün büyük olması istenir ve genel olarak 0,5 – 0,82 arasında değere sahiptir.

Teorik gücün hesaplanmasında da kullanılan kısa devre akımı ve açık devre geriliminin sıcaklığa göre değişimi yüzde olarak Şekil 1.5'de gösterildiği gibi olmaktadır.

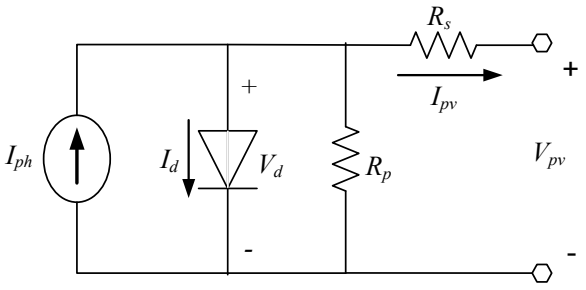


Şekil 1.5. Sıcaklık değişiminin açık devre gerilimine ve kısa devre akımına etkisi

1.2. Fotovoltaik Hücre Modeli

Literatürde FV hücre modeli için çeşitli yaklaşımlarda bulunulmuştur: Tek diyot ve tek direnç, tek diyot ve iki direnç, iki diyot ve iki direnç eşdeğer devre temelli modeller mevcuttur [1-5]. Tek diyotlu olan model üstel, iki diyotlu olan model çift üstel model olarak da geçmektedir. Tek diyotlu olan model, tek üstel ifade içerdiğinden, iki diyotlu modele göre daha basit yapıya sahiptir. Bundan dolayı FV model ve simülasyon çalışmaları için daha geniş bir kullanıma sahiptir. Fakat iki diyotlu olan model daha doğru sonuç vermekle birlikte çift üstel ifade içerdiğinden dolayı sıcaklık ve ışınımla değişen parametrelerin hesaplanması daha zor olmaktadır [6]. Tek diyot ve tek dirençli olan model paralel direnç akım kaynağına paralel olan direnci içermediğinden parçalı gölgelenme durumu analizi için uygun olmamaktadır.

Bu çalışmada kullanılan tek diyot ve iki dirençli model için kullanılan eşdeğer devre Şekil 1.6'da gösterildiği gibidir.



Şekil 1.6. Tek diyot iki dirençli FV hücre eşdeğer devresi

Bu eşdeğer devre bir akım kaynağı (I_{ph}), bu akım kaynağına paralel bağlı direnç (R_p) ile diyot ve oluşan yapıya seri bağlı bir direnç (R_s) ile ifade edilirler. Şekil 1.6'daki bu eşdeğer devreye Kirchoff akımlar kanunu uygulandığında Denklem (1.1) elde edilir;

$$I_{ph} - I_d - \frac{V_d}{R_p} - I_{pv} = 0 \tag{1.1}$$

$$V_d = V_{pv} + I_{pv} R_s \tag{1.2}$$

Burada; I_{ph} fotovoltaik hücreye düşen ışının oluşturduğu akımı, I_d diyot akımını, V_d diyot gerilimini, I_{pv} fotovoltaik hücre çıkış akımını, V_{pv} hücre çıkış gerilimini, R_s direnci hücredeki iç direnci ve bağlantı dirençlerini temsil ederken, R_p direnci ise paralel kaçak akım direncini temsil etmektedir. Denklem (1.1)'den anlaşılacağı üzere FV hücre çıkış akımı (I_{pv}) yaklaşık olarak, hücre tarafından üretilen akım (I_{ph}) ile diyot akımının (I_d) farkına eşittir.

$$I_d = I_o(e^{\frac{q.V_d}{n.k.T}} - 1) = I_o(e^{\frac{q(V_{pv}+I_{pv}.R_S)}{n.k.T}} - 1) \tag{1.3}$$

Denklem (1.3)'de verilen diyot akımı Shockley diyot denklemi ile ifade edilmektedir. Burada; I_o diyot ters doyum akımını, q bir elektron yükünü (1,6022 x 10^{-19} C), k Boltzmann sabitini 1,38x10-23J/K, T Kelvin cinsinden hücre sıcaklığını ifade etmektedir. Bu denklemdeki n ise diyotun ideal faktörü olup, 1-2 arasında değerler almaktadır. Denklem (1.2) ve Denklem (1.3), Denklem (1.1)'de yerine konduğunda aşağıdaki Denklem (1.4) ile ifade edilen FV hücre çıkış akımı elde edilir.

$$I_{pv} = I_{ph} - I_o\left(e^{\frac{q(V_{pv}+I_{pv}.R_S)}{n.k.T}} - 1\right) - \frac{V_{pv} + I_{pv}.R_s}{R_p} \tag{1.4}$$

$$I_{on} = \frac{I_{scn}}{e^{\frac{qV_{ocn}}{n.k.T_n}} - 1} \tag{1.5}$$

STK'da diyot ters doyum akımı I_{on} Denklem (1.5) ile hesaplanır. Burada, I_{scn} ve V_{ocn} sırasıyla STK'da FV hücrenin kısa devre akımı ve açık devre gerilimini temsil etmektedir. Denklem (1.6)'da ise STK'daki ters doyum akımının sıcaklığa bağlı değişimi verilmektedir. Burada, E_g(eV) yarı iletken hücrenin band enerjisidir.

$$I_o = I_{on}.\left(\frac{T}{T_n}\right)^3.e^{\frac{q.Eg}{n.k.}\left(\frac{T-T_n}{T.T_n}\right)} \tag{1.6}$$

Sıcaklığın ters doyum akımına etkisi Denklem (1.7)'deki gibi de hesaplanabilmektedir [8]. Burada K_i ve K_v katsayıları üretici kataloglarında verilmektedir. Bu katsayılardan K_i, FV hücre kısa devre akımının sıcaklık katsayısı

(A/^{o}C) olup sıcaklığın kısa devre akımına olan etkisini, K_v FV hücre açık devre geriliminin sıcaklık katsayısı (V/^{o}C) olup sıcaklığın açık devre gerilimine olan etkisini, ΔT ise FV hücrenin çalışma sıcaklığı ile referans sıcaklık arasındaki sıcaklık değişimi ifade etmektedir.

$$I_o = \frac{I_{scn} + K_i \Delta T}{e^{\frac{q(V_{ocn} + K_v \Delta T)}{n.k.T_n}} - 1} \tag{1.7}$$

FV hücre kısa devre akımı farklı ışınım ve sıcaklık için hesaplanması Denklem (1.8)'de FV hücre açık devre geriliminin sıcaklığa bağlı değişimi ise Denklem (1.9)'da gösterilmektedir.

$$I_{sc} = (I_{scn} + K_i \Delta T) \frac{G}{G_n} \tag{1.8}$$

$$V_{oc} = V_{ocn} + K_v \Delta T \tag{1.9}$$

1.3. Fotovoltaik Hücre Modeli Numerik Analizi

Bu bölümde FV hücrenin Şekil 1.6'da verilen FV hücrenin eşdeğer devresindeki R_s ve R_p direnç değerleri iterasyon yöntemiyle hesaplanmaktadır. Bu direnç değerleri hücrenin katalog bilgilerinde yer almamaktadır. Bu yöntemde FV hücrenin Tablo 1.1'de verilen STK için hazırlanmış olan üretici katalog bilgileri kullanılmaktadır.

Tablo 1.1. SCHUCO S125-SP Güneş Hücresi Parametreleri (25 ◦C, 1000W/m2 AM 1,5 STK'daki değerleri için)

I_{sc}	V_{oc}	I_{mp}	V_{mp}	$P_{m_datasheet}$	Kv	Ki	n
7,27 A	0,6 V	6,65 A	0,47 V	3,47 W	-0,364 %/°C	+0,065 %/°C	1,2

Numerik analiz için Newton-Raphson numerik analiz yöntemi tercih edilmiştir. Bu yöntem ile özetle katalog bilgilerinde yer alan FV hücrenin maksimum güç noktasındaki güç değeri olan $P_{m_datasheet}$ değeri ile yine Tablo 1.1'deki değerler kullanılarak Denklem (1.14)'de hesaplanan maksimum güç (P_{m_hesap}) değerinin eşitliğini sağlayan ($P_{m_hesap} = P_{m_datasheet}$) R_s ve R_p çifti yaklaşık olarak bulunmaktadır.

$$I_{n+1} = I_n - \frac{f(I_n)}{f'(I_n)} \tag{1.10}$$

$$I_{sc} - I_o\left(e^{\frac{q(V+I_{pv}.R_S)}{nkT}} - 1\right) - \frac{V + I_{pv}.R_s}{R_p} - I_{pv} = 0 \tag{1.11}$$

$$I_o = \frac{I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_p}}{e^{\frac{qV_{oc}}{nkT}} - 1} \tag{1.12}$$

$$f(I) = I_{sc} - I_o\left(e^{\frac{q(V_{mp}+I_{mp}.R_S)}{nkT}} - 1\right) - \frac{V_{mp} + I_{mp}.R_s}{R_p} - I_{mp} \tag{1.13}$$

Denklem (1.10) de ifade edilen Newton-Raphson metodu için gerekli olan akımın fonksiyonu olan eşitlik Denklem (1.13); FV hücre çıkış akımını ifade eden (1.11) numaralı denklemin Tablo 1.1'de verilen FV panelin maksimum güç noktasındaki değerler için yeniden düzenlenmesiyle elde edilir [8]. Denklem (1.12)'de ifade edilen ters doyum akımı I_o, Denklem (1.11)'deki denklemin açık devre durumundaki (I_{pv} = 0) FV panelin Tablo 1.1 değerlerinin yerine konulmasıyla elde edilmektedir.

İterasyon metodunun R_s ve R_p başlangıç değerleri

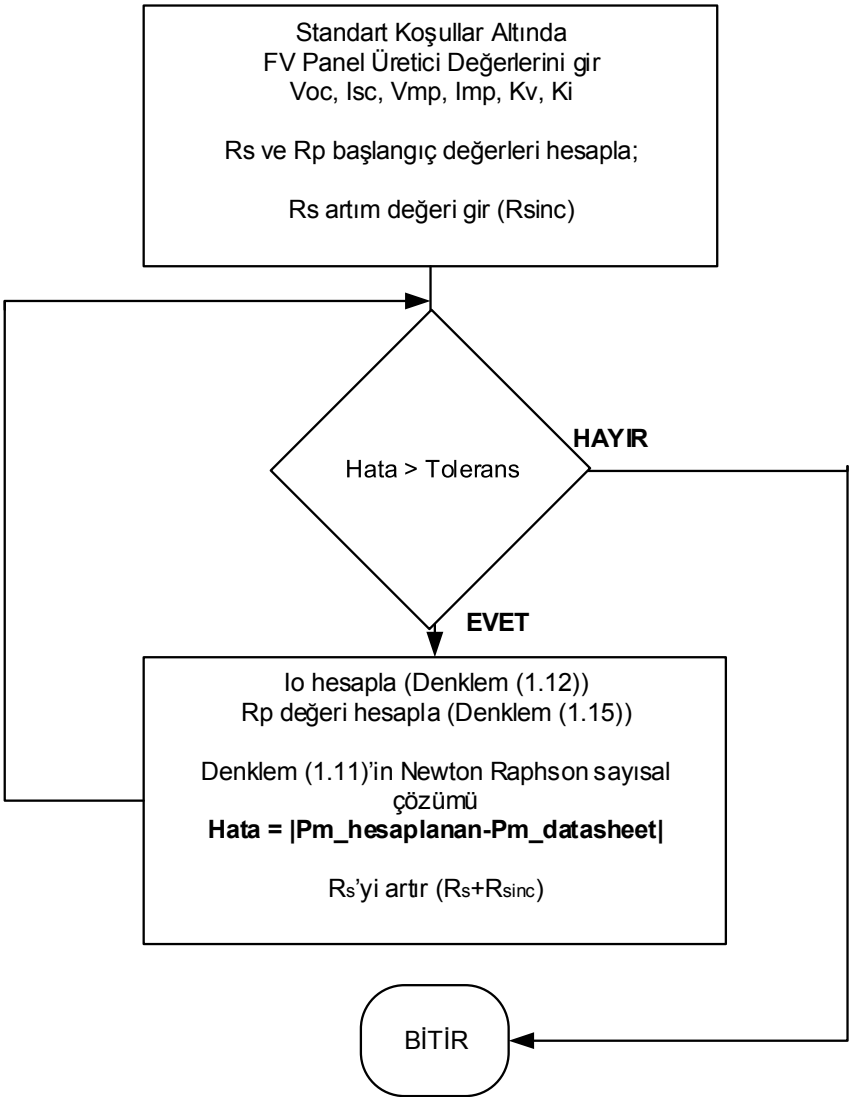
$$R_s = 0; R_{s_\max} = \frac{V_{oc} - V_{mp}}{I_{mp}}$$

$$R_p = R_{p_\min} = \frac{V_{mp}}{I_{sc} - I_{mp}} - R_{s_\max}$$

için Şekil 1.7'e göre Newton-Raphson denkleminde yerine konan her R_s değeri için, $P_{m_hesap,}$Denklem (1.14), R_p değeri Denklem (1.15)'deki gibi hesaplanır,

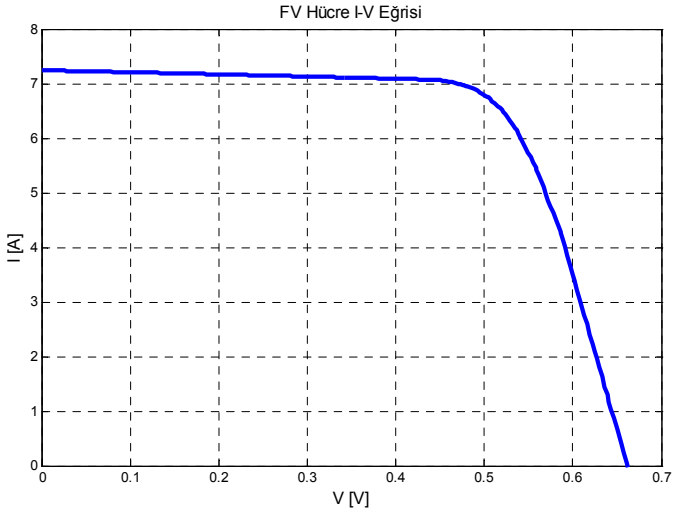
$$P_{m_hesap} = V_{mp}(I_{sc} - I_o\left(e^{\frac{q(V_{mp}+I_{mp}.R_S)}{nkT}} - 1\right) - \frac{V_{mp} + I_{mp}.R_s}{R_p}) \tag{1.14}$$

$$R_p = \frac{V_{mp} + I_{mp} R_s}{\left(I_{sc} - I_o \left(e^{\frac{q(V_{mp} + I_{mp} \cdot R_S)}{nkT}} - 1 \right) - \frac{P_{m_{datasheet}}}{V_{mp}} \right)} \tag{1.15}$$



Şekil 1.7. R_s ve R_p için Newton-Raphson yöntemi ile hesaplanması

Tablo 1.1'de verilen değerlere göre FV panelin numerik yöntem ile elde edilen R_s ve R_p direnç değerleri sırasıyla 0,24Ω ve 80Ω'dur. Parametreleri hesaplanan FV hücrenin I-V eğrisi Şekil 1.8'deki gibi elde edilmiştir.



Şekil 1.8. Newton-Raphson yöntemi ile elde edilen FV hücre I-V eğrisi

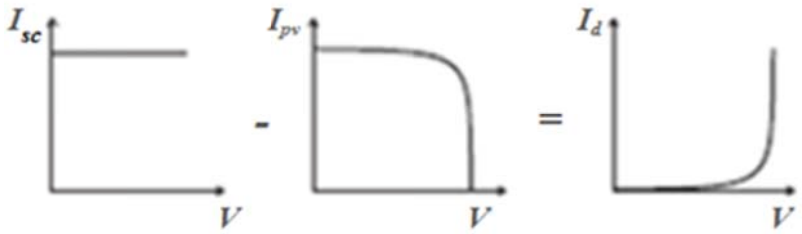
1.4. Fotovoltaik Devre Temelli Parçalı Doğrusal Diyot Modeli

Bu çalışmada, FV hücre modeli için devre temelli model amaçlanmaktadır. Matlab/Simulink'te oluşturulacak modelde Şekil 1.16'da gösterilen FV hücre modelindeki diyotun modellenmesi için karakteristiğinin doğrusallaştırılması gerekmektedir. Doğrusal karakteristik, hücre modelindeki akım kaynağına birden fazla paralel ideal diyot bağlanarak gerçekleştirilir [7]. Parçalı diyot modeli olarak adlandırılan bu model, güç elektroniği elemanları kullanıldığı için devre temelli bir modeldir.

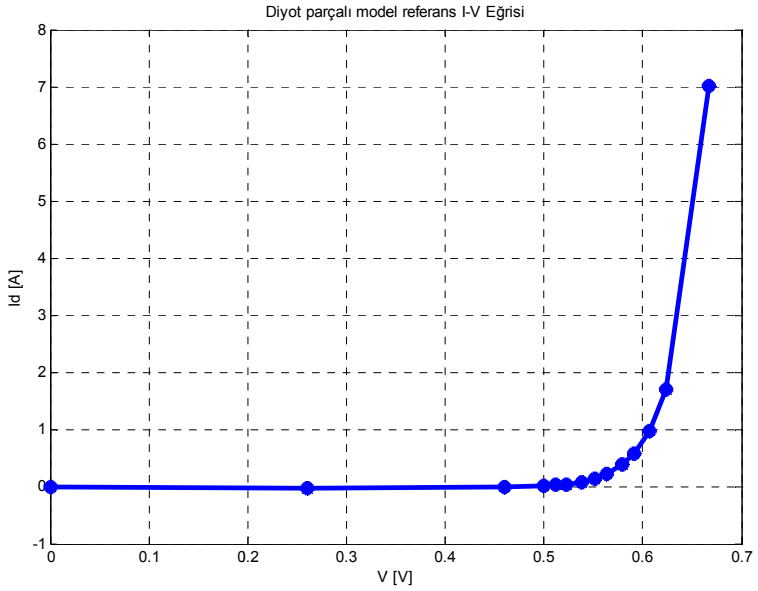
Parçalı doğrusal modeli oluşturmak için Şekil 1.6'daki tek diyotlu eşdeğer devredeki diyotun I-V eğrisinden faydalanılmaktadır. Şekil 1.9'dan görüldüğü üzere diyot modelinin I-V karakteristiği, akım kaynağından, hücrenin I-V eğrisinin çıkarılmasıyla elde edilmektedir. Denklem (1.16) ile diyot akımı, Denklem (1.17) ile diyot gerilimi elde edilmekte olup Denklem (1.16)'da paralel direnç üzerinden geçen akım ihmal edilmiştir. Bu denklemlere göre elde edilen FV hücrenin diyot karakteristik eğrisi Şekil 1.10'da verilmiştir.

$$I_d = I_{sc} - \frac{V + R_s.I_{pv}}{R_p} - I_{pv} \tag{1.16}$$

$$V_d = V + R_s.I_{pv} \tag{1.17}$$

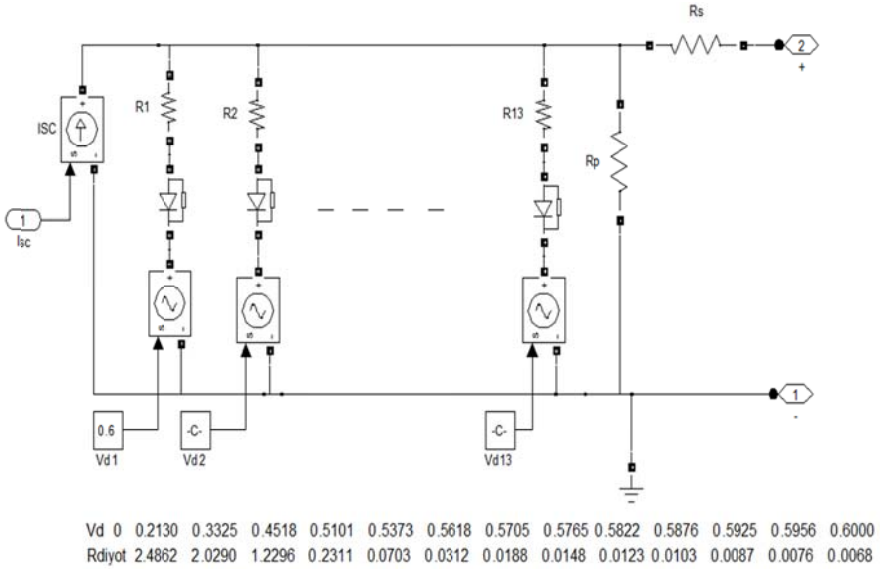


Şekil 1.9. FV hücre Diyot I-V eğrisi elde edilmesi



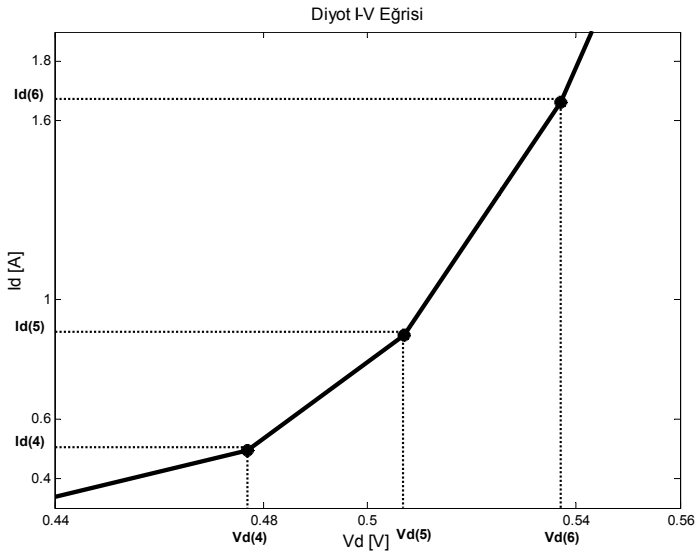
Şekil 1.10. FV hücre Diyot I-V eğrisi

Şekil 1.6'de verilen eşdeğer devrenin parçalı doğrusal diyot modeli ile oluşturulan Matlab/Simulink modeli Şekil 1.11'de gösterilmiştir. Devrede kullanılan ideal diyot sayısı artırıldıkça karakteristik gerçek diyot karakteristiğine daha çok yaklaşmaktadır. Şekil 1.10'dan da görüldüğü üzere, özellikle eğrinin dirsek bölgesi olan maksimum güç noktasına yakın bölgede daha sık diyot kullanılmıştır.



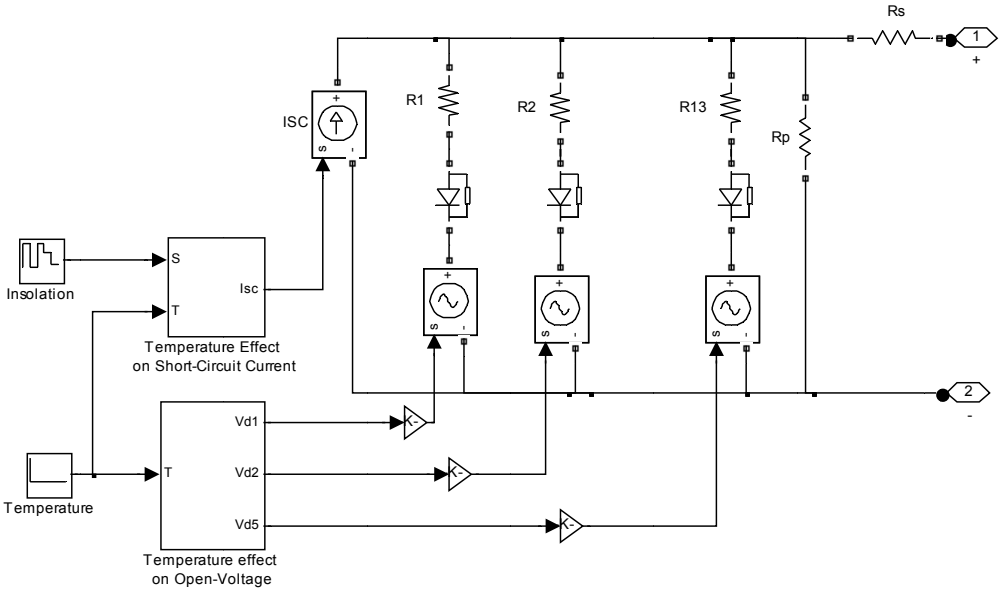
Şekil 1.11. FV Hücre Parçalı doğrusal diyot modeli ile oluşturulan eşdeğer devre modeli

Diyot I-V eğrisi parçalı doğrusal denklemler ile ifade edilmek istendiğinde öncelikle karakteristik üzerinde aralarında doğrusal denklem yazılacak noktalar belirlenmektedir. Şekil 1.12'de Şekil 1.10'da seçilen üç nokta belirlenerek parçalı doğrusal modele geçiş gösterilmiştir.



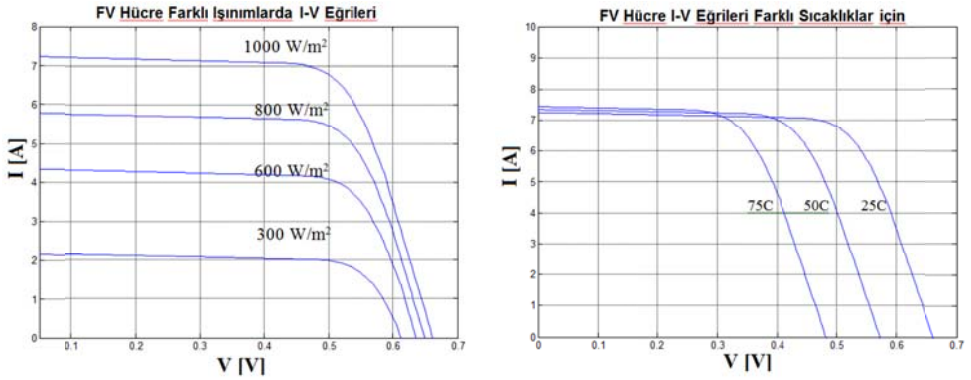
Şekil 1.12. Diyot I-V Eğrisi üzerinde üç nokta

Şekil 1.11'deki modele, Denklem (1.8) ve (1.9) da ifade edilen sıcaklık değişiminin etkisi dâhil edilerek Şekil 1.13'deki gibi Matlab/Simulink modeli oluşturulmuştur.

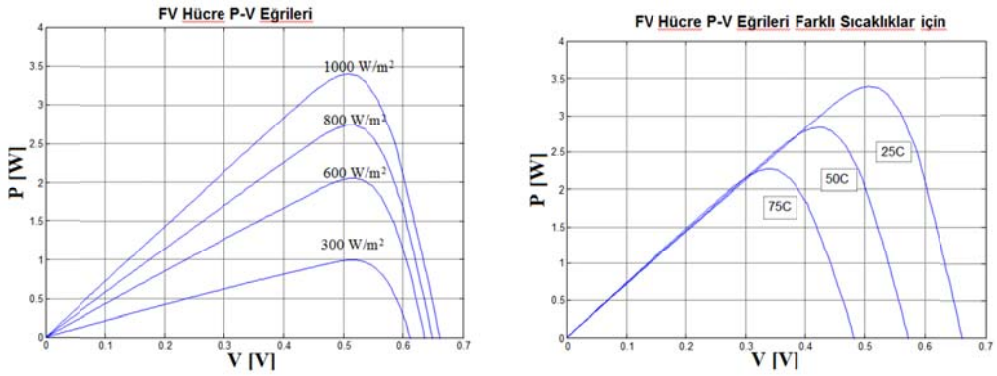


Şekil 1.13. FV Hücre Parçalı doğrusal Matlab/Simulink modeli

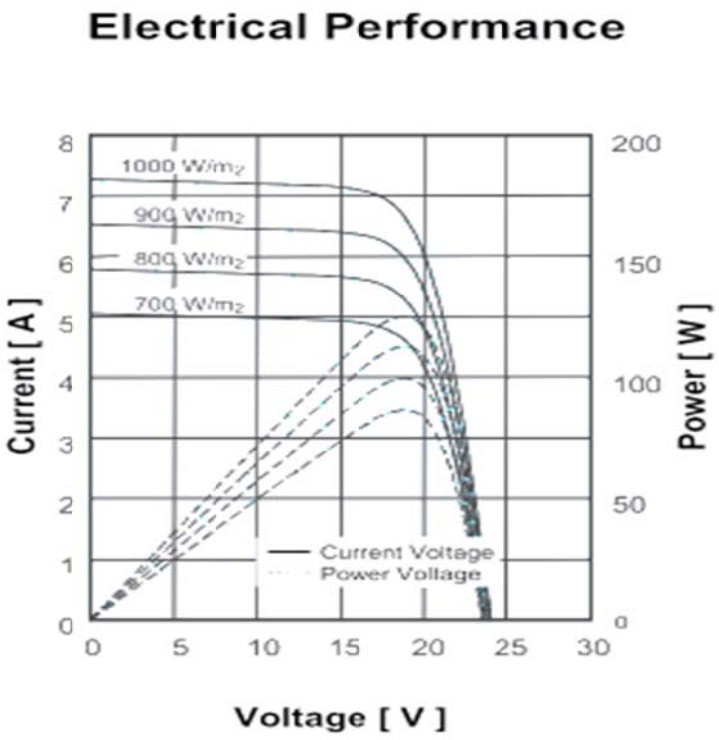
Elde edilen FV hücre modelinin farklı ışınım ve sıcaklıklardaki I-V ve P-V karakteristikleri Şekil 1.14 ve 1.15'de gösterildiği gibi elde edilmiştir.



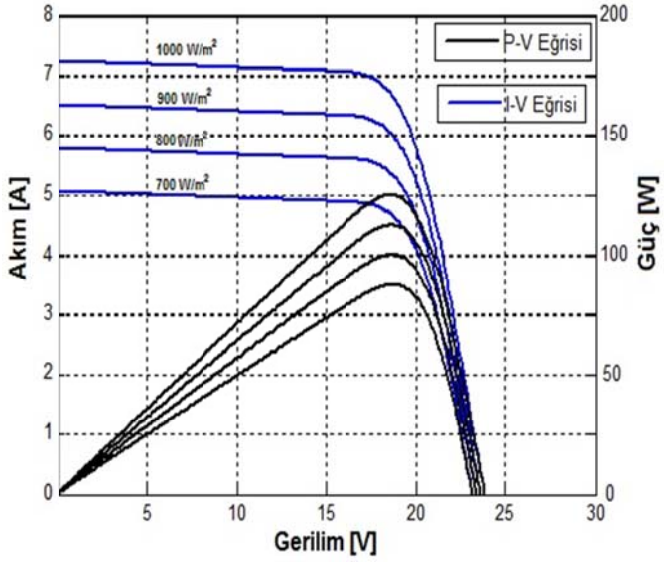
Şekil 1.14. FV hücre farklı ışınım ve sıcaklıklardaki I-V eğrileri



Şekil 1.15. FV hücre farklı ışınım ve sıcaklıklardaki P-V eğrileri



Şekil 1.16. SCHUCO S125-SP FV panel üretici katalog P-V ve I-V eğrileri



Şekil 1.17. SCHUCO S125-SP FV panel model P-V ve I-V eğrileri

Elde edilen farklı ışınım ve sıcaklıklardaki FV hücrenin Akım-Gerilim ve Güç-Gerilim karakteristikleri, oluşturulan parçalı doğrusal modelin doğrusal olmayan FV hücre modeline çok yakın sonuçlar verdiğini göstermektedir.

Şekil 1.16'da SCHUCO S125-SP FV panelin üretici katalog verilerinden alınmış olan farklı ışınımlar için, Şekil 1.17'de ise yine bu panel için parçalı doğrusal model ile elde edilmiş P-V ve I-V karakteristikleri verilmiştir. Bu iki şekilden görüleceği üzere, tez çalışmasında oluşturulan ve diğer analizler kullanılacak olan model ile elde edilen eğriler ile gerçek eğriler birbirine çok yakındır.

Doktora çalışmasının bu bölümünde oluşturulan FV Hücre modeli, devre temelli, kolay anlaşılır ve basit yapıda olduğundan dolayı özellikle model üzerinde güç elektroniği uygulamaları yapacaklar için uygun olmaktadır. Oluşturulan model parçalı doğrusal denklemlerden oluştuğu için simülasyon cevap süreleri kısadır. Bu sayede elde edilen model, FV sistemlerde panel yerine kullanılarak maksimum güç noktası izleme yöntemi veya algoritması, gölgelenme ve farklı ışınımlara maruz kalma gibi birçok analiz için kullanılabilecektir.

2. PARÇALI GÖLGELENME DURUMU (PGD)

Fotovoltaik paneller seri bağlı FV hücrelerden oluşmaktadır. Bu panellerin imalatında kullanılan seri bağlı hücre sayısı panellerin çıkış gerilimini belirlemektedir. FV sistemlerde ise istenilen gerilim seviyesine ulaşmak için panellerin seri bağlanmaları gerekmektedir. FV sistemler veya paneller her zaman homojen ışınıma maruz kalmazlar, bu durum parçalı gölgelenme olarak adlandırılır. Parçalı Gölgelenme Durumu (PGD); herhangi bir panelin ya da hücrenin bulut, ağaç, baca, bina, sistemdeki diğer bir panel vs. tarafından gölgelenmesi sebebiyle oluşabilmektedir [11]. Bu durum daha çok seri bağlı hücreler veya paneller için önemli bir sorun olmaktadır.



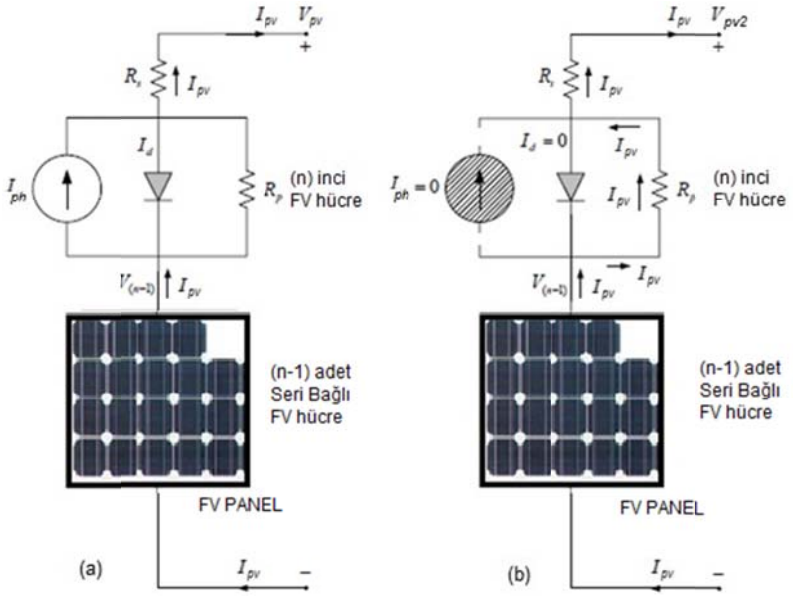
Şekil 2.1. Parçalı gölgelenme durumları için örnekler

PGD meydana geldiğinde FV sistemde oluşan bazı istenmeyen durumlar;

- Gölge miktarı küçük bile olsa FV sistemin çıkış gücü büyük oranda azalır.
- Gölgede kalan FV hücreler negatif gerilim bölgesinde çalışacağından, direnç yükü gibi davranır ve üzerinde büyük miktarda güç harcanır. Bu yüzden FV panellere

fiziksel olarak zarar veren sıcak noktalar (hot-spot) oluşmaktadır. Çoğu durumda bazı FV hücre gruplarına/FV panellere by-pass (paralel) diyot konmakta ve bu hücreler/paneller devre dışı bırakılmaktadır.

Şekil 2.2'de tüm hücrelerin homojen ışınıma maruz kaldığı durumdaki FV panel ile bir hücresi gölgelenmiş olan panel üzerinden geçen akımlar gösterilmiştir.



Şekil 2.2. (a) Homojen ışınım altındaki ve (b) tek hücresi gölgeli olan panel eşdeğer devresi

Şekil 2.2.a' da homojen ışınım altındaki panel için çıkış gerilim V_{pv} ise, tek hücresi tamamen gölgelenmiş panelin çıkış gerilimi olan V_{pv2}, Denklem (2.1)'deki gibi hesaplanmaktadır.

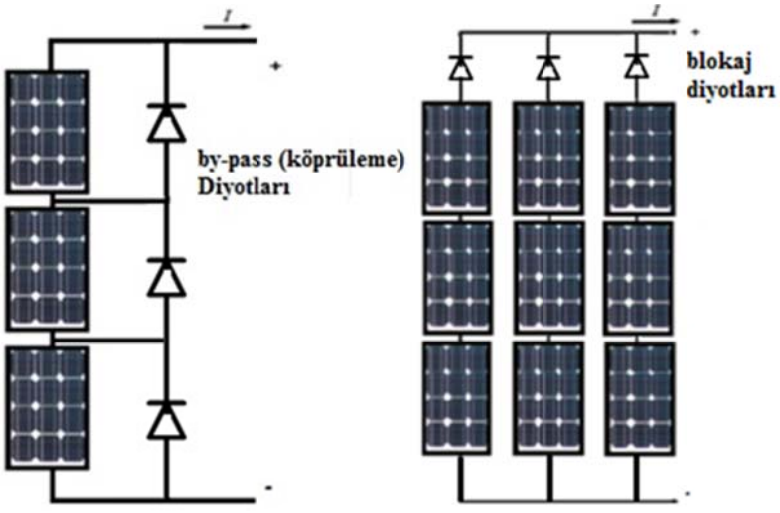
$$V_{pv2} = V_{pv} - (R_p + R_s).I_{pv} - \frac{V_{pv}}{n} \tag{2.1}$$

Şekil 2.2.b'de, gölgelenmiş olan hücreye ait eşdeğer devrede akım kaynağı sıfır olacağından açık devre gibi davranacaktır. Bu yüzden ana devreden geçen panel akımı paralel direnç R_p üzerinden akmak zorundadır. Bu direnç, seri dirence nispeten çok büyük değere sahip olduğundan gölgelenmiş panelin çıkış gerilim aşırı derecede düşmektedir. Yani panelin tek bir hücresinde ya da FV sistemin tek bir panelin meydana gelen gölgelenme durumu çıkış karakteristiğini önemli ölçüde olumsuz yönde etkilemektedir. PGD sadece FV sistemin çıkış gerilim ve gücünü azalmasına

neden olmaz, aynı zamanda sıcak nokta (hot-spot) oluşumundan dolayı fiziksel olarak zarar vermektedir. Böyle bir durumda hücreler aşırı ısıdan kaynaklı kalıcı olarak zarar görebilmektedir. Bu olumsuz durumun etkisi azaltmak amacıyla by-pass (köprüleme) diyotları kullanılmaktadır. Bu diyotlar homojen ışınım altında aktif değil iken, gölge etkisi durumunda aktif hale gelir.

2.1. By-pass (Köprüleme) ve Blokaj Diyodu

Fotovoltaik sistemde herhangi bir panelde arıza olması veya çoğunlukla gölge meydana gelmesi durumlarında sistemdeki diğer panellerin olumsuz yönde etkilenmemeleri için by-pass diyotları her bir panele Şekil 2.3.a'da gösterildiği gibi paralel olarak bağlanmaktadırlar. Böylece FV ana akımı gölgeli panelin etrafından dolaşarak akmaktadır. Bu diyotlar panellerin seri bağlanmaları durumunda gerekmektedir. Böylece by-pass diyotları FV sistemin sadece performansını artırmakla kalmayıp, aynı zamanda hücrelerin fiziksel eşdeğerindeki paralel dirençten akım geçmesinden dolayı oluşacak sıcak noktaların oluşmasını engeller.



(a) (b)

Şekil 2.3. (a) Seri bağlı paneller ve by-pass diyotları b)Paralel bağlı paneller ve Blokaj diyotları

Birden fazla FV dizinin paralel bağlanması durumunda arızalı veya gölgeli çalışan modül geri kalan diğer modüllerden akım çeker. Bu akımın FV dizin üzerinde oluşturacağı olumsuz etkiyi ortadan kaldırmak için Şekil 2.3.b'de gösterildiği gibi her bir dizine blokaj diyotları konmaktadır. Bununla birlikte blokaj diyotları, FV

sistemlerin çıkışına akü bağlı olduğu durumlarda aküden gelebilecek ters akımı engelleme görevi yapar.

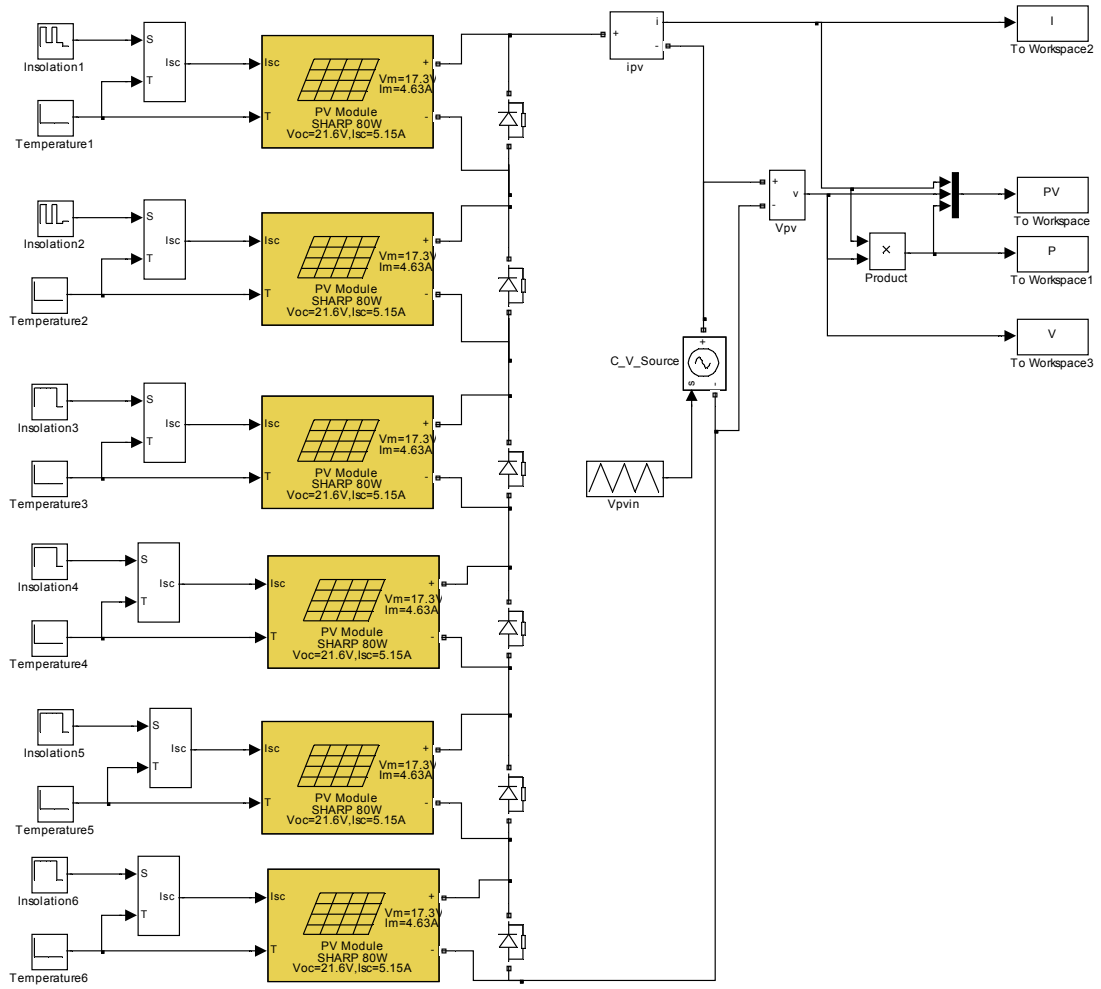
2.2. Parçalı Gölgelenme Durumunun (PGD) Analizi

Verimleri halen çok düşük olan FV panellerinden en iyi şekilde faydalanmak için FV sistemler maksimum güç noktasında çalıştırılması gerekmektedir. Bunun için kullanılacak olan MGNİ devresinin FV sistemde meydana gelen parçalı gölgelenme durumlarında da MGN'de çalışması arzu edilen durumdur. Bunu sağlamak için öncelikle parçalı gölgelenme durumlarının iyi analiz edilmesi gerekmektedir. FV sistemlerinin çıkış güç eğrisinde parçalı gölgelenme durumları hariç tek bir maksimum nokta oluşmaktadır. Parçalı gölgelenme meydana geldiğinde; 1 tane genel (global) ve 1 yada daha fazla yerel (local) MGN oluşmaktadır. Burada amaç kullanılacak olan MGNİ'nin yerel noktalara takılmadan genel MGN'ye ulaşabilmesi olmaktadır. Bu sebeple öncelikli olarak, parçalı gölgelenme durumlarının iyi analiz edilmesi ve MGN'nin farklı durumlar için nasıl değişiklik gösterdiğinin bilinmesi gerekmektedir. Konu ile ilgili yapılan literatür çalışmaları incelendiğinde, bunların genel anlamda simülasyon modeli kullanılarak ve bazılarında deneysel olarak, FV hücre/panellerin üzerine meydana gelen gölgenin yüzey ve ışınım olarak oranının, gölgeli hücre sayısının, by-pass paralel diyotların bağlı olduğu ve olmadığı durumların, bypass diyotlarının farklı bağlantı kombinasyonlarının ve farklı hücrelerde gölge olması durumlarının FV panel/dizi çıkış I-V ve P-V karakteristiklerine nasıl yansıdığı incelenmiştir [12-17]. Bu bölümde 80 W maksimum çıkış gücüne sahip FV panelin, 6 adet seri bağlanmasıyla oluşturulan FV dizinde, birçok değişik parçalı gölgelenme durumlarının meydana gelmesine göre farklı sıcaklık, ışınım ve by-pass diyotlarının bağlı olup-olmaması durumları için analizler yapılmış ve FV dizinin I-V ve P-V eğrileri elde edilmiştir.

2.2.1. PGD'nin FV çıkış I-V ve P-V karakteristiğine etkisi

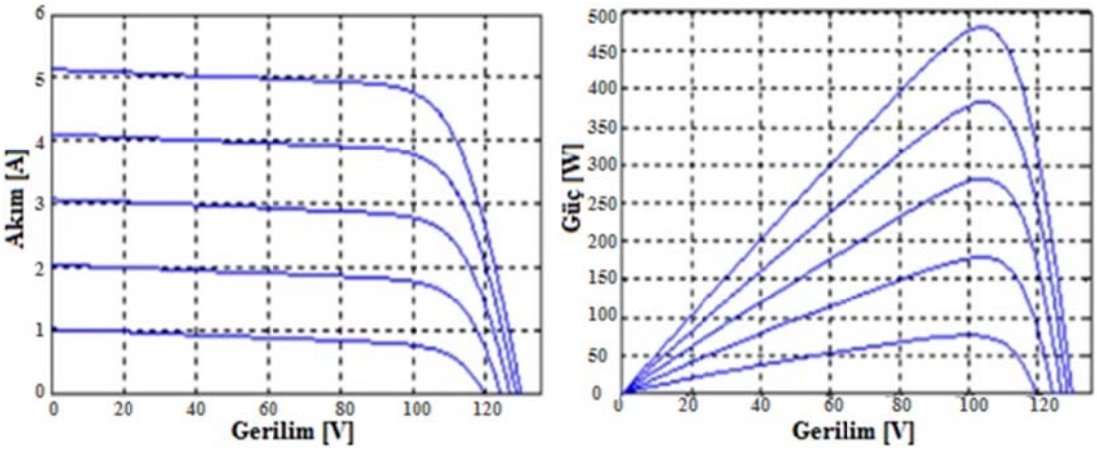
Bu bölümde parçalı gölgelenmenin birçok farklı durumları için analizler yapılmış güneş panellerinin gerilime bağlı olarak akım (I-V) ve güç (P-V) eğrileri elde edilmiştir. Elde edilen bu eğrilerle, MGNİ devresinin kullanılacağı bu sistemde parçalı gölgelenme etkisinin her farklı durumu için maksimum güç noktasının nasıl

değiştiği gözlemlenmiştir. Bu analizleri gerçekleştirmek için açık devre gerilimi (V_{oc}) 21,6 V, Kısa Devre Akımı (I_{sc}) 5,15 A, Maksimum Güçte Çalışma Gerilimi (V_{mp}) 17,3 V, Maksimum Güçte Çalışma Akımı (I_{mp}) 4,63 A olan 80 Watt'lık bir FV panelinin katalog bilgileri referans alınarak Matlab/Simulink ortamında oluşturulan FV panelin devre temelli modelinden faydalanılmıştır.

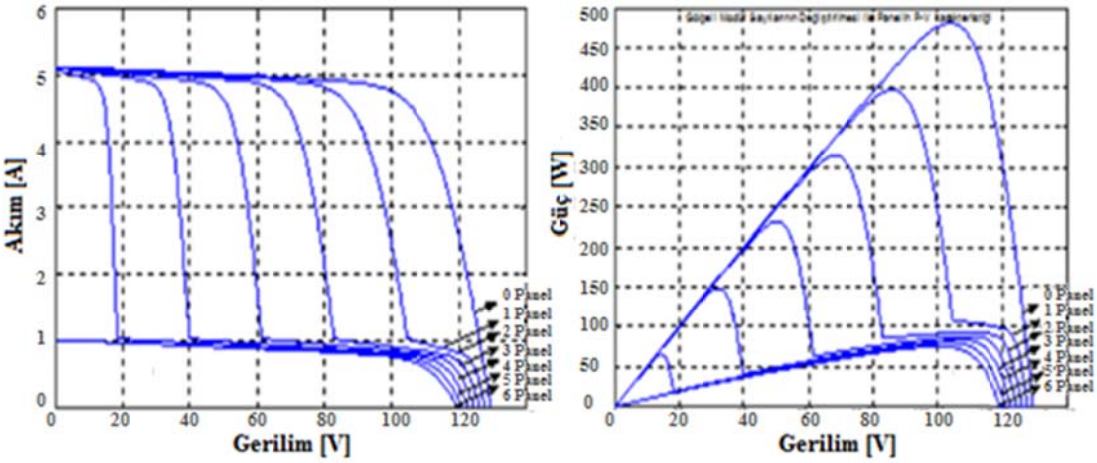


Şekil 2.4. Altı adet seri bağlı panelden oluşan FV sistemi

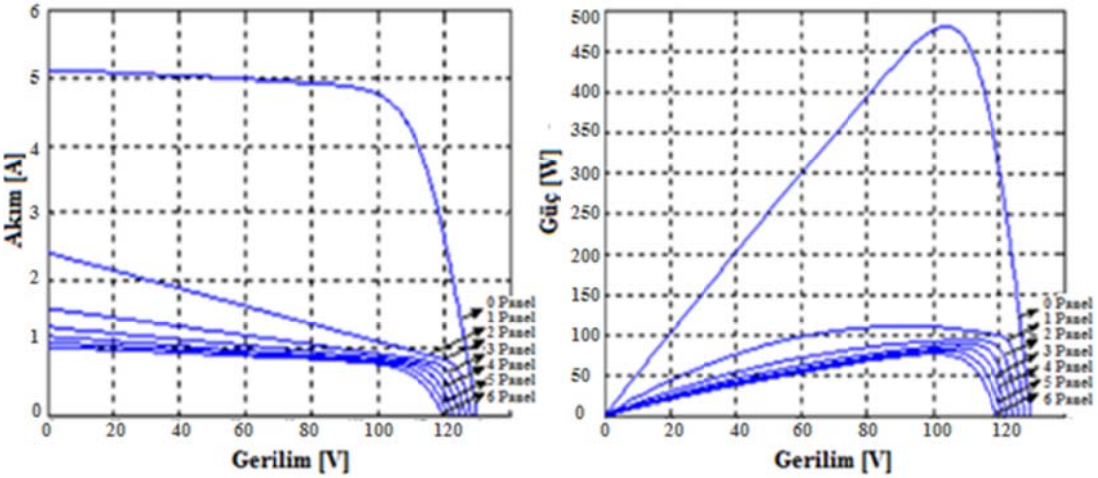
Şekil 2.5'de FV dizinin homojen ışınım altında I-V ve P-V değişimleri verilmiştir. Burada görüldüğü üzere her farklı ışınımda sadece bir tane MGN oluşmaktadır. Şekil 2.6'da gölgelenmiş olan panel sayıları artırılarak I-V ve P-V değişimleri elde edilmiş ve MGN'lerin değişimi görülmektedir. Şekil 2.6'daki sonuçların FV dizinde bağlı olan bypass diyotlarının kaldırıldığı durum için yapılmış analiz sonuçları Şekil 2.7'de gösterilmektedir.



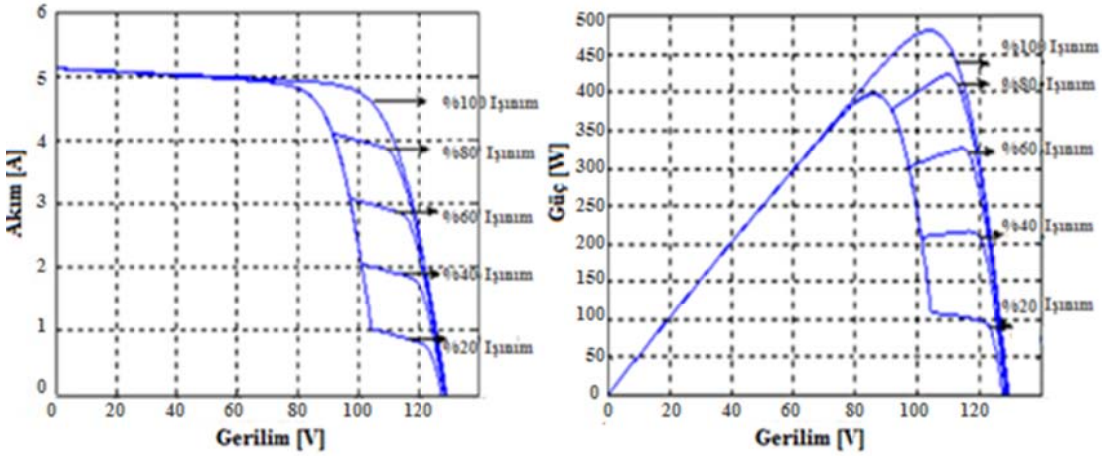
Şekil 2.5. FV sistemin homojen ışınım altında farklı ışınım seviyelerinde I-V ve P-V değişimi



Şekil 2.6. Gölgeye maruz kalan panel sayısının I-V ve P-V değişimine olan etkisi



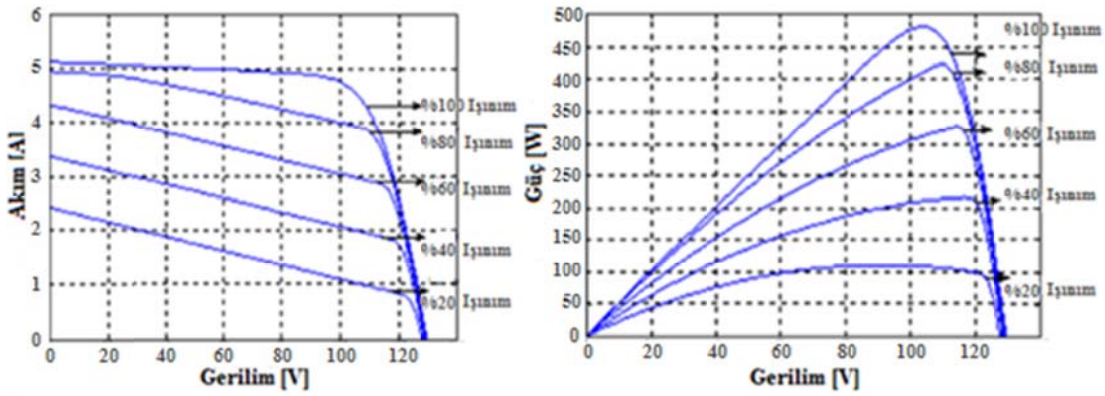
Şekil 2.7. Bypass diyotu yok iken, gölgeye maruz kalan panel sayısının FV dizin I-V ve P-V değişimine olan etkisi



Şekil 2.8. Panellerden biri gölgeye maruz kaldığında, bu panel üzerindeki gölge oranının değişiminin I-V ve P-V değişimine olan etkisi

Şekil 2.8'de FV dizininde sadece bir panelin farklı gölgelenme oranları ile gölgelendiği veya farklı ışınıma maruz kaldığı durum için I-V ve P-V değişimleri elde edilmiştir. Burada diğer paneller maksimum ve sabit ışınım altındayken, gölgeli panelin ışınım oranı değiştirilerek FV dizinin maksimum güç noktası değişimi gözlemlenmiştir.

Şekil 2.9'da, Şekil 2.8'de sonuçları verilen durumun, FV dizindeki panellere paralel by-pass diyotlarının olmadığı haliyle yapılmış analizlerden elde edilen sonuçlar verilmiştir.

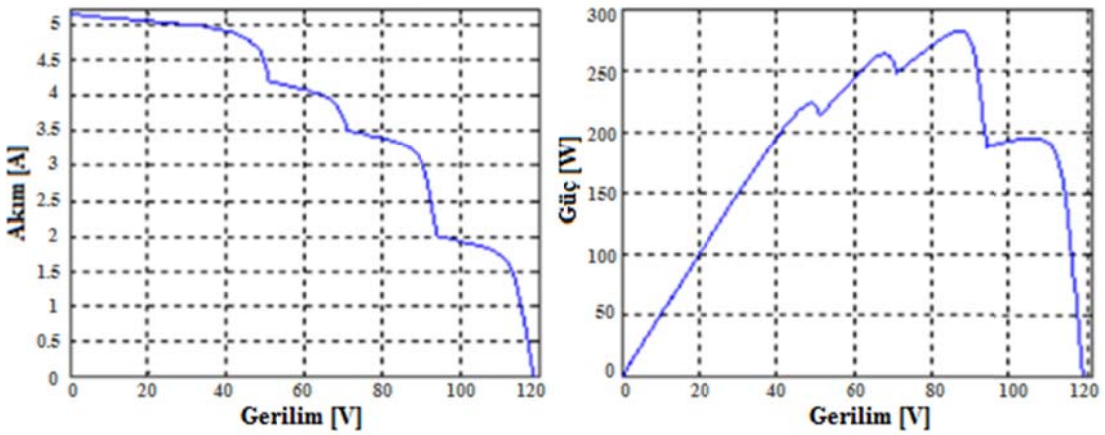


Şekil 2.9. By-pass diyotu olmadığı durumda, panellerden biri gölgeye maruz kaldığında, bu panel üzerindeki gölge oranının değişiminin, FV dizin I-V ve P-V değişimine olan etkisi

Şekil 2.10'da FV dizinde herhangi 3 panel maksimum ışınım altında iken, diğer üç panel farklı gölgelenme oranlarına maruz kaldığı durumdaki FV dizinin I-V ve P-V

değişimlerini göstermektedir. Buradan görüleceği üzere, FV dizindeki panellerin gölgelenme oranlarının farklı olması yerel MGN'lerin sayısını artırmaktadır.

Örnek olarak Şekil 2.5'deki FV dizinin P-V değişimi incelendiğinde; panellerin MGN'de çalışması için, ışınımın en üst seviyesinde (1000 W/m^2), FV sistem geriliminin ($V_{pv} = V_{mp}$) 103,8 V ve akımının ($I_{pv} = I_{mp}$) 4,63 A olması gerekmektedir. Bu durumda FV dizinden çekilecek güç maksimum olmakta ve şekilden anlaşılacağı üzere sistemden çekilecek gücün (P_{pv}) 480 W olması gerekmektedir. Sistem parçalı gölgelenmeye maruz kaldığında ise Şekil 2.10'daki gibi bir I-V ve P-V değişimi elde edilebilmektedir. Bu örnek durum analiz edilirse, FV dizinin MGN'de çalışması için FV dizinin çıkış geriliminin ve akımının sırasıyla V_{pv} = 87,9 ve I_{pv} = 3,22 A olması gerekmektedir. Bu sayede sistemden elde edilecek güç 283 W olacaktır, aksi halde sistem yerel maksimum noktalardan birinde çalıştırılırsa sistemden daha az miktarda güç (225W, 260W veya 195W) elde edilecektir ve dolayısıyla FV panellerden etkin bir şekilde faydalanılamaz.



Şekil 2.10. FV dizinde üç panel farklı gölgelenme oranı ile gölgelendiğinde, FV dizin I-V ve P-V değişimi.

FV sistemde parçalı gölgelenme ne kadar farklı oranlarda ve farklı panel sayılarında meydana gelirse Şekil 2.10'da görüldüğü gibi MGN sayısı artmaktadır. Bu güç noktalarından sadece bir tanesi genel MGN diğerleri yerel MGN olmaktadır. Bu analizlerden elde edilen sonuçlara göre, PGD meydana geldiğinde sistemi genel MGN'de çalıştırması için tasarlanacak olan MGNİ devresi ve algoritması için göz önünde bulundurulmalıdır.

3. PARÇALI GÖLGELENME DURUMU İÇİN MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI İZLEYİCİ

Fotovoltaik sistemler ister şebekeye doğrudan bağlı olsun ister şebekeden bağımsız olsun yüksek maliyetlere sahiptir. Bununla birlikte güneş hücrelerinin elektrik enerjisine dönüştürmede düşük verime sahip olması göz önüne alındığında, FV enerji dönüşüm sistemleri maksimum verimde kullanılması gereken sistemlerdir. FV panellerin çıkış güç karakteristiğinin güneş ışınımına ve panel sıcaklığına bağlı değişimi doğrusal değildir. Doğrudan yüke veya akü grubuna bağlı sistemlerde, FV sistemin sıcaklık, ışınım veya yük değişimine bağlı olarak maksimum güç noktası sürekli olarak değişebilmektedir. Bu sistemlerin doğrudan yüke bağlı olduğu durumlarda MGN'de çalışmadığı görülmüştür. Bu nedenle, FV sistemin verimliliğini artırmak, FV'den maksimum gücü elde edebilmek için MGNİ-Maksimum Güç Noktası İzleyicisi (Maximum Power Point Tracker, MPPT) kullanmak gereklidir [30].

Bir önceki bölümde, FV dizinin I-V ve P-V değişimleri, homojen ışınım ve PGD altında farklı ışınım durumları için incelenmiştir. Bu sonuçlara göre, FV panelin çok küçük bir parçası gölgeye maruz kalsa bile panelin maksimum güç değeri önemli ölçüde azalmaktadır. Bu olumsuz etki gölgeli panele seri bağlı diğer panelleri de olumsuz yönde etkilediğinde dolayı FV sistem çıkışından elde edilecek güç tahmin edilenden çok daha aşağılara düşmektedir. PGD özellikle panellerin seri bağlandığı durumlar için sakınca oluşturur, paralel bağlı olduğu durumda FV sistem etkilenmez. Seri bağlı FV dizinde, parçalı gölgelenme durumunda çok sayıda MGN'nin oluşmasının nedeni panellere paralel bağlı olan by-pass diyotlarıdır.

Çalışma kapsamında yapılan analizlerde her bir panele by-pass diyotunun bağlı olduğu göz önünde bulundurulmuştur. Aksi halde FV sistem çıkışında gölgeli panelin belirlediği tek bir MGN oluşur ve çıkış uçlarından alınacak güç miktarı aşırı düşük olur. PGD meydana geldiği durumlarda FV sistemin karakteristiği daha

karmaşık Olacağından geleneksel MGNİ'ler maksimum güç izlemede verimli olarak çalışamazlar. Bu durumu ortadan kaldırmak için farklı MGNİ'ler önerilmiştir.

3.1. Maksimum Güç Noktası İzleyici Yöntemleri

FV sistemler için birçok MGNİ yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemler ile panelde üretilen gücün yüke sürekli ve olabilecek en yüksek seviyede aktarılması sağlanmaya çalışılmaktadır. MGNİ yöntemi DA/DA dönüştürücülerde veya doğrudan DA/AA dönüştürücülerde uygulanmaktadır. MGNİ denetimi DGA veya doluluk boşluk ayarı ile yapılmaktadır [21].

Uygulanacak MGNİ'nin temel olarak aşağıdaki ihtiyaçları karşılaması gerekmektedir [22];

- Ortam koşulları değiştiğinde, FV sistem maksimum güç noktasına yakın çalışmalıdır.
- Ortam koşulları değiştiğinde, MGNİ cevap süresi kısa olmalıdır.
- Verimi yüksek olmalıdır.

MGNİ yöntemleri başlıca 2 ana kısma ayırılabilir [23];

i. Dolaylı denetim
ii. Doğrudan denetim

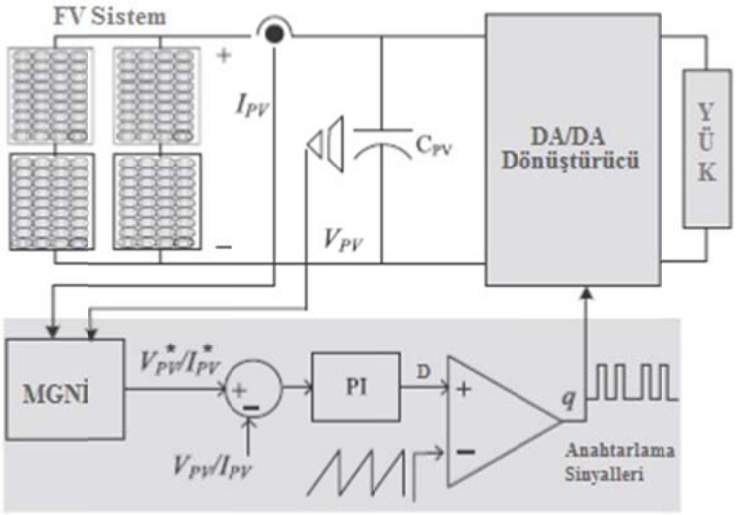
Dolaylı denetim tekniklerinin içerisinde "Sabit Gerilim Yöntemi" "Sabit Akım Yöntemi" ve "Pilot Hücre Yöntemi" yöntemleri yer almaktadır. Doğrudan denetim yöntemleri MGNİ için FV gerilim ve/veya akım değerlerini kullanır. Bu yöntemin dolaylı denetim yöntemlerine göre en önemli avantajı maksimum güç noktasını izlerken, FV karakteristiği, panel sıcaklığı, ışınım seviyesi gibi değişkenlerden etkilenmemesidir. Başka bir deyişle FV panelin fiziksel özelliklerinden bağımsızdır.

3.1.1. Doğrudan denetim MGNİ yöntemleri

Doğrudan denetim MGNİ algoritmaları üç ana grupta toplanabilir; model-tabanlı yöntemler, öğretme-tabanlı (yapay sinir ağları) algoritmalar ve arama algoritmalarıdır.

- Model tabanlı yöntemler, maksimum gerilim noktasını veya maksimum akım noktasını hesaplayabilmek için bir matematiksel model veya tablodan bakma yöntemi kullanırlar.
- Öğretme-tabanlı algoritmalar yapay sinir ağları gibi yapay zekâ sistemlerini içerirler.
- Arama algoritmaları ise Değiştir ve Gözle (P&O) algoritmalarını ve Artan İletkenlik (Inc.Cond.) algoritmalarını içerir, bu yöntemler panel akım ve gerilimini ölçerek farklı atmosferik durumlarda FV sistemin maksimum güç noktasını bulmaya çalışırlar.

Doğrudan denetim MNGİ yöntemi olarak uygulama kolaylığı ve düşük maliyetli olması sebebiyle literatürde en çok kullanılan değiştir-gözle (Perturb – Observe, P&O) veya tepe tırmanma (Hill-climbing) [24, 25] ve artan iletkenlik yöntemleridir [26, 27].



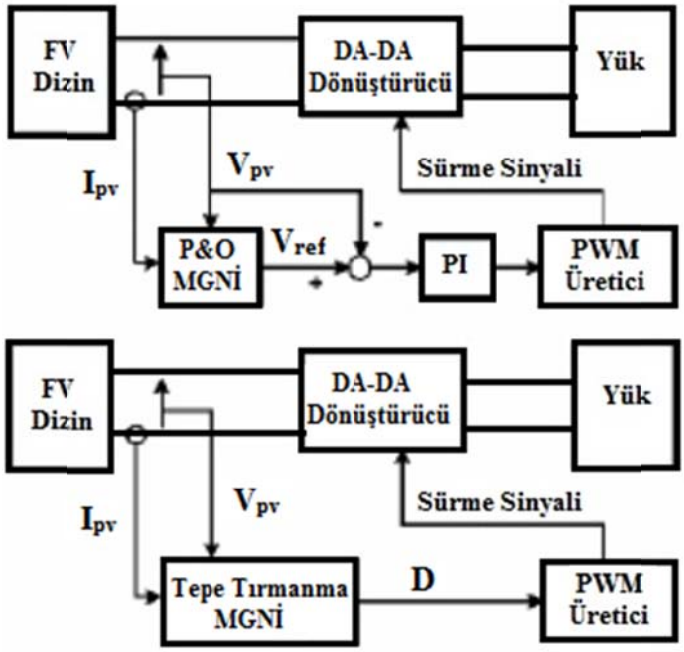
Şekil 3.1. Genel MGNİ sistemi blok diyagramı [28]

3.1.1.1. Değiştir-Gözle (P&O) ve Tepe Tırmanma (Hill-Climbing) MGNİ yöntemleri

Değiştir-gözle (P&O- Perturb and Observe) algoritması gerçekleştirilmesinin kolay olması nedeni ile literatürde en çok kullanılan MGNİ yöntemidir [22]. Her iki yönteme ait blok şemaları Şekil 3.2'de verilmiştir. Şekil 3.2'de görüldüğü üzere P&O yöntemi DA-DA dönüştürücü referans gerilimini belirleyen bir algoritmadır.

FV panelin çıkış gerilimi ve akımı ölçülerek güç hesaplanır. Daha sonra referans gerilimi değiştirilerek çıkış gücünün artıp azalmadığı izlenir ve buna göre referans gerilimim bir sonraki adımı belirlenir. Eğer referans gerilim arttığında panel çıkış gücü artıyor ise referans gerilim artırılmaya devam edilir. Referans geriliminin artırılma işlemi gücün bir önceki panel gücünden daha az olduğu duruma kadar devam eder. Bu noktaya gelindiğinde de bu yöntemin en büyük dezavantajı olan referans gerilimi sürekli olarak değiştirilerek çıkış gücü izlenmeye devam edilir.

Tepe tırmanma yönteminde, değiştir-gözle yönteminden farklı olarak referans olarak DA-DA dönüştürücünün bağıl-iletim (duty cycle) süresi kullanılmaktadır [21]. Bu yöntemde değiştir-gözle yöntemine benzer şekilde dönüştürücünün bağıl iletim süresini değiştirerek panel çıkış gücü izlenir. FV panel dönüştürücüye bağlıyken bağıl iletim süresi değiştirildiğinde, panelin çıkış akımı değişir, dolayısıyla aynı zamanda panelin gerilimi değiştirilmiş olacağından, her iki algoritma da temelde aynı olup farklı yollar izleyen algoritmalardır [21].

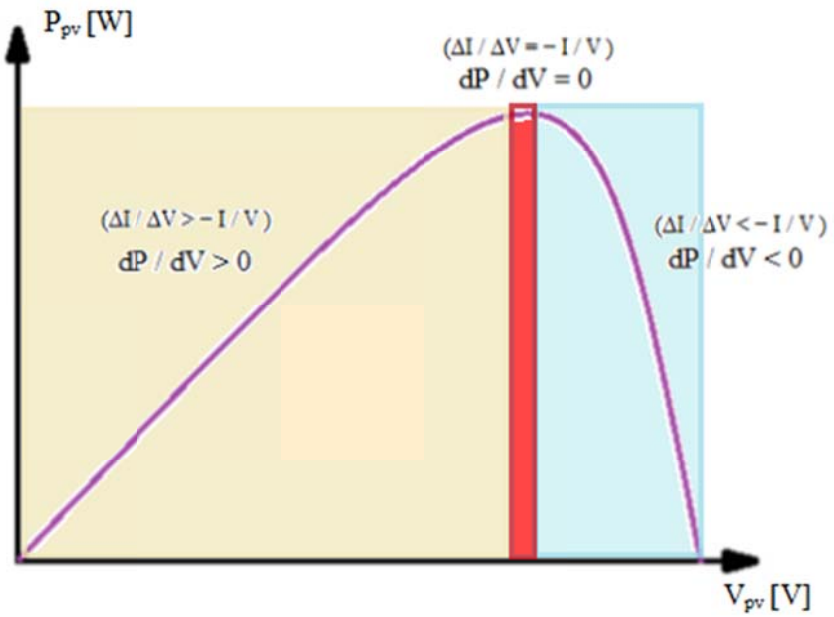


Şekil 3.2. Değiştir-gözle ve tepe-tırmanma MGNİ yöntemi blok diyagramları [29]

Bununla birlikte, Tepe Tırmanma yönteminde Şekil 3.2'den görüleceği üzere referans değişkeni olarak bağıl iletim süresi kullanıldığından P&O yönteminde bulunan P veya PI kontrolör bloğu elimine edilmektedir.

3.1.1.2. Artan iletkenlik MGNİ yöntemi

Artan iletkenlik (Incremental Conductance - Inc.Cond) yönteminin çalışma prensibinin temeli FV panel çıkış gücünün panel gerilimine göre değişiminin sıfır olduğu yerin maksimum güç noktası (MGN) olduğuna dayanmaktadır. Şekil 3.3'de verilen eğri artan iletkenlik algoritmasının temelini oluşturmaktadır. Şekilden anlaşılacağı üzere, bu yöntem ile FV panelin çalışma noktasının, panel çıkış gücünün eğiminin sıfır olduğu yerin maksimum güç noktası, pozitif olduğu yerin MGN'nin sol tarafı, negatif olduğu yerin MGN'nin sağ tarafı olduğu bilinmektedir [28]. Bu yöntemde de değiştir-gözle yönteminde olduğu gibi çıkış akımı ve gerilim gözlemlenir, MGNİ algoritması iletkenliği ve artımsal iletkenliği hesaplar ve buna göre MGN'ye ulaşana kadar referans gerilimi, akımını veya bağıl iletim süresini (D) artırır veya azaltır. Artan iletkenlik yönteminin matematiksel yapısı aşağıdaki denklemlerde verildiği gibidir.



Şekil 3.3. Artan iletkenlik MGNİ yöntemi temel prensibi

Panel çıkış gücünün panel gerilimine göre türevi incelendiğinde; panel çalışma noktasını,

$$\begin{aligned} &\frac{dP}{dV} = 0; \text{ MGN'de} \\ &\frac{dP}{dV} > 0; \text{ MGN'nin solunda} \\ &\frac{dP}{dV} < 0; \text{ MGN'nin sağında} \end{aligned} \tag{3.1}$$

Panel çıkış gücünün gerilime göre türevi açık şekilde yazılıp yeniden düzenlendiğinde Denklem (3.2)'deki eşitlik elde edilir.

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(V \cdot I)}{dV} = I\frac{dV}{dV} + V\frac{dI}{dV} = I + V\frac{dI}{dV} \tag{3.2}$$

Şekil 3.3'deki panel gücünün gerilime göre değişiminin sıfır ($\frac{dP}{dV} = 0$) olduğu maksimum güç noktasında; Denklem (3.3)'deki eşitlik elde edilir.

$$-\frac{I}{V} = \frac{dI}{dV} \tag{3.3}$$

Bu eşitliğe göre; Denklem (3.1)'deki ifadeleri Denklem (3.4)'de verildiği gibi de yazmak mümkündür [22]. Buna göre FV panel çalışma noktasının,

$$\begin{aligned} &\frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V}; \text{ MGN'de} \\ &\frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V}; \text{ MGN'nin solunda} \\ &\frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V}; \text{ MGN'nin sağında} \end{aligned} \tag{3.4}$$

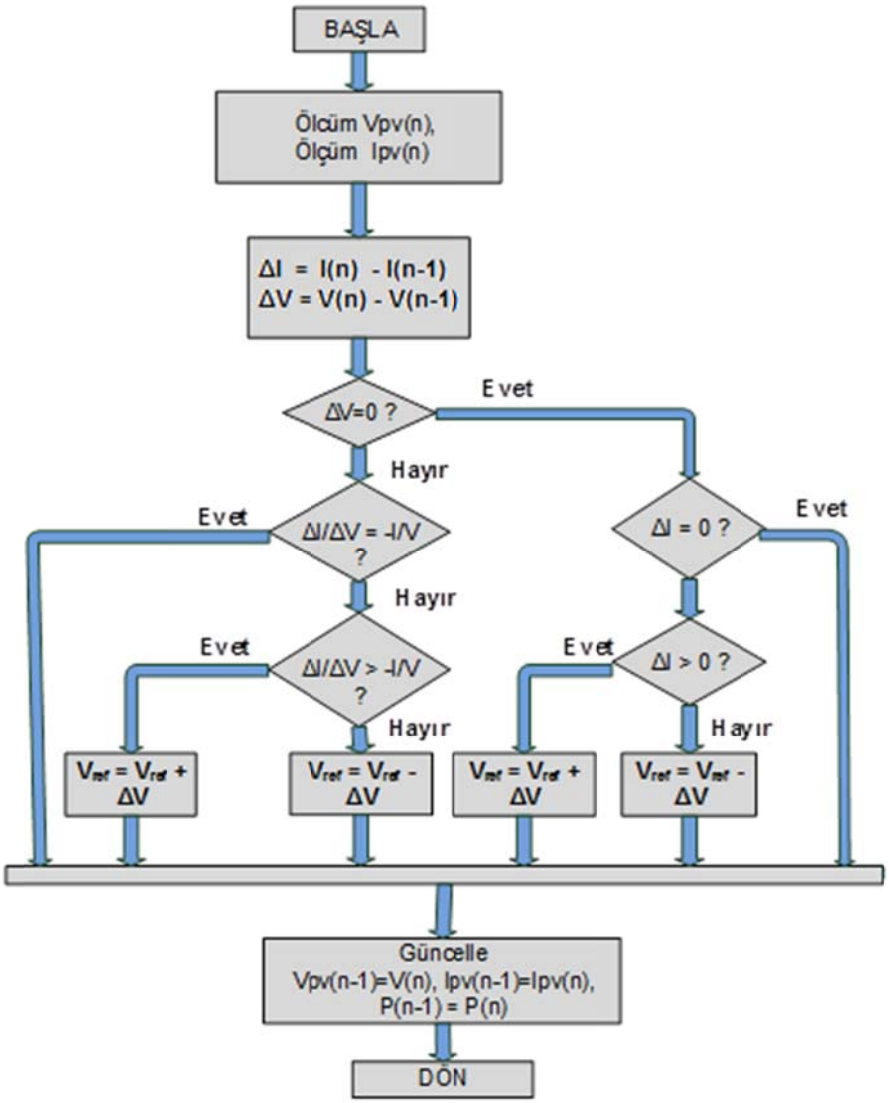
şeklinde ifade edilebilir.

Şekil 3.4'de artan iletkenlik MGNİ yönteminin Denklem (3.4) dikkate alınarak oluşturulmuş akış şeması verilmiştir. Akış şemasından anlaşılacağı üzere; FV panelin çıkış akım geriliminde herhangi bir değişiklik yok ise sistem önceki referans geriliminde çalışmaya devam eder. Bu durum artan iletkenlik yöntemini değiştir-gözle yönteminden ayıran en önemli özelliktir. Eğer FV panelin çıkış gerilimde değişiklik var ise FV panelin çıkış gücünün değişimine bakılır. Çıkış gücünün

değişimi ile çıkış geriliminin değişiminin durumuna göre çıkış referans gerilim artırılır ya da azaltılır.

Bu yöntemin dezavantajları;

- Değiştir-gözle metoduna oranla maksimum güç noktasını tespit etmede daha başarılıdır fakat parçalı gölgelenme durumlarında gerçek MGN değerine ulaşamaz.
- İşlem karmaşıklığı değiştir-gözle algoritmasına göre daha fazladır. Hesap işlemleri fazla zaman aldığından ortam değişimlerine karşı tepki süreleri değiştir-gözle yöntemine göre uzundur.



Şekil 3.4. Artan İletkenlik MGNİ yöntemi akış şeması

Bu yöntemin değiştir-gözle yöntemine göre üstünlükleri aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Maksimum güç noktasını bir kere yakaladığında o noktada sabit kalır ve yeni bir ortam değişikliği olmadığı sürece değişmez [21].
- Referans değişkeninin artma yönünün kesin olarak belirlenebilmesi değişen ortam koşullarına daha hızlı cevap verebilmesini sağlar [27].
- MGN'de meydana gelen dalgalanma çok daha azdır [30].
- Verim değiştir-gözle yöntemi ile yaklaşık olarak aynı olup sabit gerilim ve sabit akım yöntemlerinden daha yüksektir [22].

Burada bahsedilen MGNİ yöntemleri genellikle ışınımın homojen olarak değiştiği durumlarda iyi performans sergilemektedirler. Işınımın homojen olmadığı veya parçalı gölgelenme durumu meydana geldiğinde FV sistemi genel MGN'de çalıştıracak MGNİ yöntemine gereksinim vardır. Bunun için literatürde en çok kullanılan iki yöntem olan değiştir-gözle ve artan iletkenlik yöntemleri üzerinde çeşitli modifikasyonlar yapılmıştır. Bu sebeple bu bölümde özellikle bu iki yöntemden bahsedilmiştir. Bu çalışmada değiştir-gözle yöntemine göre üstünlüğü sebebiyle artan iletkenlik yöntemi tercih edilmiş ve PGD meydana geldiğinde genel MGN'ye ulaşmak için bu yöntem üzerinde modifikasyon yapılarak yeni bir MGNİ önerilmiştir.

3.2. Literatürdeki Parçalı Gölgelenme Durumları için MGNİ Yöntemleri

Parçalı gölgelenme durumları, bazı panellere bulut, ağaç, baca, FV sisteme yakın yerdeki bina gölgesi veya bir panelin diğer panele gölge oluşturması vb. durumlarda oluşabilmektedir. Bu durumlarda FV sistem homojen ışınıma maruz kalmaz ve FV sistemin karakteristiği daha karmaşık hale gelmektedir. FV sistemlerinin çıkış güç eğrisinde parçalı gölgelenme durumları hariç tek bir maksimum güç noktası oluşmaktadır. Parçalı gölgelenme meydana geldiğinde ise; FV sistem homojen ışınıma maruz kalmaz ve FV sistemdeki paneller farklı ışınıma maruz kalmaktadır. Bu durumda FV sistemin P-V eğrisinde birçok MGN oluşmaktadır. Bu güç noktalarından bir tanesi genel maksimum güç noktası diğerleri yerel maksimum güç noktaları olarak adlandırılmaktadır. Yerel MGN'ler ışınım çeşitliliğine göre bir veya daha fazla olabilmektedir. Parçalı gölgelenme durumlarında maksimum güç noktası

izleyecek olan yöntemin amacı yerel noktalara takılmadan genel MGN'ye ulaşabilmesi olmaktadır.

Literatürde homojen ışınım altındaki FV sistemler için birçok MGNİ yöntemi mevcuttur [21-23]. Bunların içinde en popüler olanları bir önceki bölümde bahsedilen değiştir-gözle, artan iletkenlik, sabit gerilim ve sabit akım yöntemleridir [24-27]. Bu yöntemlerin en önemli avantajı basit algoritmaya sahip olmalarıdır fakat sadece homojen ışınımlar altında etkindirler. Bu geleneksel yöntemler, P-V eğrisinde bir MGN bulunması prensibine göre çalıştıkları için parçalı gölgelenme durumlarında yerel MGN'ye takılabilirler ve bu yüzden düşük verimle çalışmaktadırlar.

PGD meydana geldiğinde genel MGN'yi yakalamak için son yıllarda literatürde birçok yöntem önerilmiştir [31-39]. Bu yöntemlerde çoğunlukla değiştir-gözle ve artan iletkenlik yöntemleri üzerine çeşitli uyarlamalar yapılarak, yerel maksimum noktalara takılmadan genel maksimum güç noktasına ulaşabilen MGNİ yöntemleri önerilmiştir. Bu yöntemlerden bazıları karmaşık yapıda olma, ek bir devreye ihtiyaç duyma, FV panellerin bağlanma biçimleri ve karakteristikleri hakkında önceden bilgiye sahip olma ve periyodik olarak sistemin kendini eğitme ihtiyacı vb. gibi sakıncalara sahiptirler.

2006 yılında Kobayashi ve ark. [31], PGD durumlarında FV sistemi genel MGN'de çalıştıracak artan iletkenlik yöntemi temelli MGNİ yöntemi önermiş ve simülasyon çalışmalarıyla desteklemiştir. Fakat önerilen yöntem, FV sistemin periyodik olarak açık devre gerilimi (V_{oc}) ve kısa devre akımı (I_{sc}) ölçülmesi prensibine dayanmaktadır. Ölçümler FV sistem enerji aktardığı esnada alınmakta, bu yüzden FV sistem DA-DA dönüştürücüden ayrılmak zorunda kalmaktadır. Ayrıca bu yöntem V_{oc} ve I_{sc} parametrelerini elde etmek için ek bir ölçüm devresine ihtiyaç duymaktadır.

2008 yılında Patel ve Agarval [32], Genel MGN'yi bulabilecek artan iletkenlik temelli bir algoritma önermiş ve önerilen algoritma simülasyon ve deneysel çalışmalarla desteklenmiştir. Önerilen yöntem için FV sistemde kullanılan panelin açık devre geriliminin bilinmesi gerekmektedir. Bu yöntemin çalışma prensibine

göre, eğer FV çıkış gücünde çok büyük bir değişiklik olursa genel tarama yapmaya geçilir. Genel taramada ise sabit gerilim yönteminde kullanılan MGN'deki gerilim $V_{mp} = 0{,}8xV_{oc}$ prensibine göre denetleyici referans gerilim değeri V_{ref}, $0{,}8xV_{oc}$'den başlar ve FV sistem panel sayısı kadar (n) $nx0{,}8xV_{oc}$'ye kadar tarama yapılarak genel MGN'ye ulaşılır. Fakat bu yöntemde referans alınan açık-devre geriliminin periyodik olarak farklı hava durularında veya mevsimlerde ölçülüp güncellenmesi gerekmektedir.

2008 yılında Miyatake ve Ahmed, değiştir-gözle temelli değişken adımlı bir MGNİ yöntemi geliştirmiştir [33]. Önerilen yöntemde Fibonacci arama algoritması kullanılmıştır. Bu algoritma FV dizini PGD meydana geldiğinde ve homojen ışınım altında genel MGN' ye ulaştıracak şekilde sisteme uyarlanmıştır. Bu çalışmada önerilen PGD tespiti için doğrusal bir fonksiyon tanımlanmıştır. Denklem (3.5)' de verilen bu fonksiyon eşitliği sağlandığında, sistemde geniş bir tarama yapılarak gerçek maksimum güç noktasının bulunması sağlanmıştır. Bu fonksiyon denklemi pratik çalışmalarla kullanıcı tarafından belirlenmektedir. Önerilen bu yöntem simülasyon ve deneysel çalışmalar ile desteklenmiştir. Bu yöntem kullanılan FV panel hakkında önbilgi gerektirmemektedir. Önerilen fonksiyon PGD için sağlandığı gibi homojen olarak değişip küçük ışınımda çalışan sistemde de sağlandığından her zaman PGD meydana geldiğini göstermemektedir.

$$\frac{\left|P(s_{i+1}) - P(s_i)\right|}{P(s_i)} > \Delta P \tag{3.5}$$

2010 yılında Chen ve ark. [34], biyolojik sürü kovalama (Biological Swarm Chasing) optimizasyon tekniğini MGNİ yöntemine uyarlamıştır. Önerdikleri sistemde her bir FV panel DA/DA dönüştürücüye bağlanmıştır. Her bir dönüştürücü için ayrı ayrı uydu mikro denetleyici ve bir ana mikro denetleyici kullanmışlardır. Ana mikro denetleyici uydu denetleyicilerden her bir panelin akım ve gerilim bilgisini toplamakta ve her biri için ayrı ayrı referans girişler üreterek tüm uydu denetleyicilere göndermektedir. Yaptıkları çalışmada önerilen MGNİ oldukça esnek olup her durumda genel MGN' ye ulaşıldığı deneysel sonuçlarla gösterilmiştir. Fakat önerilen sistem önerilen sistem çok sayıda dönüştürücü ve denetleyici

gerektirmektedir. Ayrıca her panelin için ayrı ayrı ölçüm alındığından dolayı çok sayıda algılayıcıya ihtiyaç duyulmaktadır.

2010 yılında Nguyen ve Low [35], FV hücre güç/gerilim arasındaki ilişkiyi tanımlayan bir Lipschitz fonksiyonu kullanılmıştır. Böylece dikdörtgenlere bölme (DIRECT) optimizasyon tekniği önerilen MGNİ yöntemine uyarlanmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlar, 2008 yılında Patel ve Agarwal' ın önerdiği yöntemin sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve bu çalışmada önerdikleri yöntemin daha verimi daha yüksek ve daha hızlı MGN' ye ulaşan bir yöntem olduğu doğrulanmıştır. Fakat yöntemin matematik altyapısı karmaşıktır.

2011 yılında Ji ve ark. [36], değişken adımlı artan iletkenlik temelli bir MGNİ yöntemi önermiştir. Önerilen yöntemde, Denklem (3.6) ve (3.7)' de verilen iki adet fonksiyon PGD'yi tespit etmek için kullanılmaktadır. Bu fonksiyonlardaki eşitlikler sağlandığında FV sistemin çalışma noktasını gerçek maksimum güç noktasının sol tarafına götürecek referans gerilimi için ayrıca bir doğrusal fonksiyon tanımlanmıştır. Burada PGD tespiti için önerilen fonksiyonlardaki gerilim değişimi ve akım değişimi için kullanılan kritik değerler (ΔV_{set} ve ΔI_{set}) kullanıcı tarafından önceden belirlenmesi gerekmektedir.

$$V_{pv}[n] - V_{pv}[n-1] < \Delta V_{SET} \tag{3.6}$$

$$\left| \frac{I_{pv}[n] - I_{pv}[n-1]}{I_{pv}[n-1]} \right| > \Delta I_{SET} \tag{3.7}$$

2011 yılında Miyateke ve ark. [37] MGNİ yöntemi için parçacık sürü optimizasyon (PSO, Particle Swarm Optimization) tekniğini kullanmışlardır. Önerdikleri yöntem için kullandıkları FV sistemde, 2010 yılında Chen ve arkadaşlarının önerdiği sistemdeki gibi, her bir panel için ayrı ayrı DA/DA dönüştürücü kullanılmakta ve yine bu dönüştürücüler için ayrı ayrı referans girişler üretilmektedir. Fakat bu çalışmada kullanılan sistemde, her bir panelin çıkış gerilim ve akımını ölçmek yerine sadece tüm FV sistemin çıkış gerilimi ve akımı ölçülmektedir. Önerilen sistem çok boyutlu bir arama özelliğine sahip olup genel maksimum güç noktasına ulaşabilmektedir. Önerilen MGNİ'nin deneysel çalışmaları yapılmış ve diğer

yöntemlerle kıyaslanmıştır. Daha önce 2008 yılında önerdikleri Fibonaccci arama tekniği yöntemine göre kıyaslama yapılmış ve daha verimli olduğu deneysel sonuçlarla gösterilmiştir.

2011 yılında Renaudineau ve ark. [38], parçalı gölgelenme durumlarında genel maksimum güç noktasına ulaşmak için önermiş olduğu MGNİ yönteminde dönüştürücü kayıpları da hesaba katılmıştır. Bu çalışmada PGD tespiti için Miyatake ve Ahmed ile Ji ve ark.'larının önerdiği denklemler birleştirilmiştir. PGD tespit edildikten sonra MGNİ algoritması referans gerilimini minimum değerden maksimum değere kadar olacak şekilde rampa fonksiyonu olarak ayarlayarak tüm çalışma noktalarının taraması yapılmakta ve genel maksimum güç noktasını aramaktadır. Genel MGN' ye denk gelen zaman hafızada tutularak bu zamana denk gelen referans gerilimi uygulanarak sistemin genel MGN' de çalışması sağlanmaktadır. Önerilen yöntem farklı bağlantı tipleri için simülasyon ve deneysel çalışmalarla doğrulanmıştır.

2012 yılında Koutroulis ve Blaabjerg [39], parçalı gölgelenme durumları için değiştir-gözle MGNİ yöntemi temel alınarak yeni bir yöntem önermişlerdir. Önerilen yöntemde yeni bir genel tarama yaklaşımı sunulmuştur. Bu yaklaşımda DA/DA dönüştürücü ayarlanabilir sabit bir güç tüketici gibi düşünülmüştür. Diğer MGNİ yöntemlerinde referans girişi olarak gerilim kullanılırken, burada referans girişi olarak DA/DA dönüştürücünün giriş gücü alınmıştır. Önerilen yöntemde belirli aralıklarla, referans giriş gücü maksimum değerden minimum değere doğru değiştirilerek genel tarama yapılmakta ve genel MGN' ye ulaşılması sağlanmıştır. Önerilen yöntem, FV panellerin bağlantı durumları veya karakteristikleri hakkında herhangi bir önbilgiye ihtiyaç duymamaktadır.

Yapılan bu literatür incelemeleri ile elde edilen kazanımlar sonucunda, Homojen ışınımlar altında ve özellikle PGD meydana geldiğinde, FV sistemin çalışma noktasını genel MGN'ye götürecek bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntem, literatürdeki diğer yöntemlere göre daha basit yapıdadır, ayrıca ışınım değişiminin homojen olup olmadığı bilgisine sahip olmamızı sağlar.

3.3. Önerilen MGNİ Yöntemi

Bu bölümde, FV enerji üretim sistemlerinde meydana gelen PGD'lerde maksimum güç noktası izleyebilen yeni bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntemde temel olarak daha önce bahsedilen, geleneksel yöntemlerden olan artan iletkenlik MGNİ yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntem, FV sistemin çıkış güç eğrisinde (P-V) bir MGN olduğunu varsaydığı için homojen ışınım altında etkindir. Fakat PGD meydana geldiğinde yerel MGN'ye takılabilmektedir. Bu yüzden artan iletkenlik algoritmasına PGD meydana gelip gelmediğini tespit edecek bir denklem eklenmiştir. Önerilen MGNİ yöntemi sayesinde, FV sistem genel maksimum güç noktasında çalışmakta ve böylece yerel MGN ile genel MGN arasındaki güç kaybı önlenmiştir.

3.3.1. Parçalı gölgelenme durumunun tespit edilmesi

FV sistemler PGD altında, gücün gerilime göre değişiminin sıfır olduğu maksimum gücün çekildiği tepe noktalarından (dP/dV=0) birden fazla oluştuğu önceki bölümlerde bahsedilmişti. Geleneksel yöntemler, bu maksimum güç noktalarının karakteristikleri aynı olduğu için hangisinin genel MGN olduğunu ayırt edemezler ve yerel MGN'ye takılabilirler. Bu yüzden öncelikle ışınımın değiştiği durumlarda; değişimin homojen mi, parçalı gölgelenme durumu mu bilinmesi gerekmektedir. Işınım durumunu tespit ettikten sonra çalışma noktasını MGN'ye götürecek arama algoritmasına ihtiyaç duyulur.

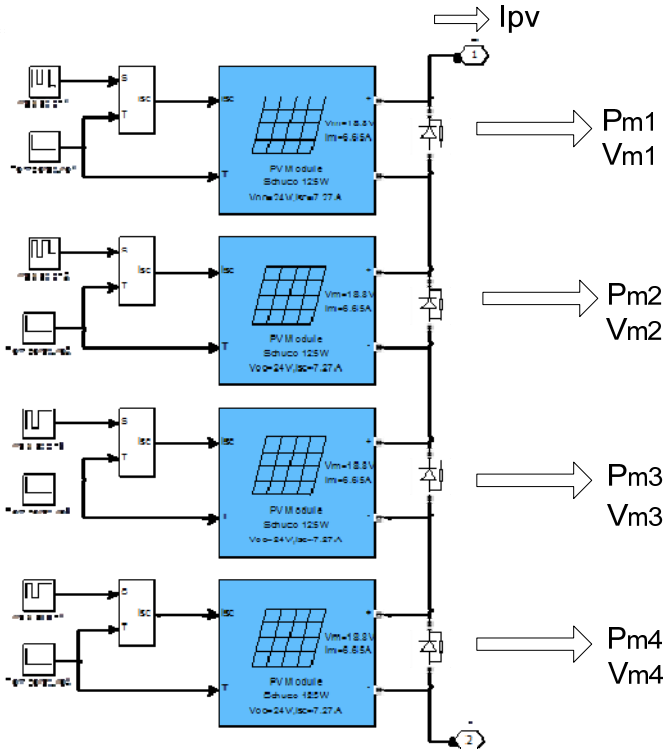
Matlab/Simulink ortamında oluşturulan model kullanılarak yapılan benzetim sonuçlarından Denklem (3.8) elde edilir;

$$\left(\frac{P_n}{P_{n-1}}\right)-\left(\frac{I_{pvn}}{I_{pvn-1}}\right)>\Delta_{hata_kritik} \tag{3.8}$$

Burada; FV dizinin çıkış gücünün (P_n), bir önceki hesaplanan çıkış gücüne (P_{n-1}) oranı ile çıkış akımının (I_{pvn}) bir önceki ölçülen çıkış akımına (I_{pvn-1}) oranının arasındaki değişimin belirli bir değerin altında kaldığı, hemen hemen değişmediği durumlarda, güneş ışınımının homojen olarak değiştiği, aksi halde PGD'nin meydana geldiğini kabul edilmektedir

Işınımın homojen olduğu durumda; FV panellerden seri bağlantıdan dolayı aynı akım geçmekte (I_{pv}) ve by-pass diyotlarından akım akmaz. Bu durumda tüm paneller devrede olduğu için her bir panel aynı gerilimi (V_{pv}) ve dolayısıyla aynı gücü üretmektedir.

Bu bölümde PGD'nin tespit edilmesi için örnek olarak Şekil 3.5'deki FV dizin kullanılmıştır. Bu dizinde dört adet seri bağlı FV panel kullanılmış, her bir panele paralel olarak by-pass diyotu bağlanmıştır.



Şekil 3.5. Seri bağlı dört panelden oluşan FV dizin

FV dizin MGN'de çalıştığında, panel akımı I_{mp} ve panel gerilimi V_{mp} olmaktadır. FV dizinin çıkış gücü Denklem (3.11)'deki hesaplandığında, Denklem (3.12) elde edilmektedir.

$$V_{m1} = V_{m2} = V_{m3} = V_{m4} = V_{mp} \tag{3.9}$$

$$I_{pv} = k.I_{sc} = I_{mp} \tag{3.10}$$

$$P_{Array} = P_{m1} + P_{m2} + P_{m3} + P_{m4} \tag{3.11}$$

$$P_{Array} = V_{m1}I_{pv} + V_{m2}I_{pv} + V_{m3}I_{pv} + V_{m4}I_{pv} = 4.V_{mp}I_{mp} = 4.P_{mp}(W) \quad (3.12)$$

FV dizinde ışınımın homojen olarak değiştiği durumda çıkış ifadeleri Denklem (3.13-3.15) ile verilmiştir. Denklemlerde, S gölgelenme oranını ifade etmektedir ve tüm panellerin aynı oranda gölgelendiği göz önünde bulundurulmaktadır. Homojen değişim durumunda, FV panel gerilimleri aynı olmakta ve yaklaşık olarak aynı kalmaktadır.

$$V_{m1} = V_{m2} = V_{m3} = V_{m4} \cong V_{mp} \quad (3.13)$$

FV dizinin kısa devre akımı (I_{sc}), gölgelenme oranı (S) ile doğru orantılı olarak değiştiğinden, MGN'de FV dizin akımı yaklaşık olarak (I_{pv2}), Denklem (3.14) verildiği gibi; bir önceki durumdaki maksimum güç noktasındaki akımın (I_{mp}) gölgelenme oranı ile çarpılmasıyla elde edilen değere eşit olmaktadır.

$$I_{pv2} = S \times kI_{sc} = S \times I_{mp} \quad (3.14)$$

Panel gerilimleri yaklaşık olarak aynı kaldığından FV dizin çıkış gücü de aynı şekilde Denklem (3.15)'deki gibi, bir önceki güç değerinin gölgelenme oranı ile çarpımına eşit olmaktadır. Bu durumda FV panel çıkış gücü ve akımı bir önceki değerlerine göre yaklaşık olarak aynı oranda değiştiğinden Denklem (3.8)'i sağlamaz. Bu yüzden MGNİ homojen ışınım değişimine göre MGN'yi bulur.

$$P_{Array2} = S \times P_{Array} = S \times 4P_{mp} \quad (3.15)$$

$$I_{sc} = (I_{scn} + K_i \Delta T).S \quad (3.16)$$

$$P_{mp} = (P_{mpn} - K_p \Delta T).S \quad (3.17)$$

Denklem (3.16) ve (3.17)'de verilen kısa devre akımının ve maksimum gücün, sıcaklık ve gölgelenme oranı ile değişimi verilmektedir. FV panel çıkış karakteristiğinin sıcaklığa bağlı değişim eğrisi ışınıma bağlı değişim eğrisine oranla oldukça düşüktür [40]. Başka bir ifade ile FV panelin çıkış karakteristiğinin sıcaklık

değişimlerine olan cevap süresi uzundur. Bundan dolayı Denklem (3.16) ve (3.17)'de verilen sıcaklık değişimleri ihmal edilmiştir.

Şekildeki 4 numaralı panelde gölgelenme olması durumunda, bu panele bağlı olan diyot aktif olmakta ve FV dizin çıkış gerilimine bu diyotun gerilim düşümü yansımaktadır (-0,7 V). Bu durumda FV dizinin çıkış gerilimi yaklaşık olarak geri kalan üç panelin gerilimlerinin toplamı olmakta, ancak Denklem (3.18)'de ifade edilen, FV dizinden geçen akım miktarı yaklaşık olarak aynı kalmaktadır. Gölgelenme öncesi durumda çıkış gücü, Denklem (3.12) ile, PGD meydana geldiğinde ise Denklem (3.18)'deki gibi olmaktadır. Denklem (3.10) ve (3.18) ile Denklem (3.12) ve (3.19) birlikte değerlendirildiğinde; FV çıkış gücü değişim oranı ile akım değişim oranının farklı olduğu anlaşılmaktadır. Bu durumda Denklem (3.8)'de verilen koşul sağlanır ve böylelikle PGD'nin meydana geldiğini tespit edilmiş olur.

$$I_{pv3} \cong I_{mp} \tag{3.18}$$

$$P_{Array3} = V_{m1} I_{pv} + V_{m2} I_{pv} + V_{m3} I_{pv} - 0,7 \cong 3.V_{mp}.I_{mp} = 3.P_{mp}(W) \tag{3.19}$$

PGD'nin olup olmadığı tespit edildiğinde artık klasik artan iletkenlik yöntemiyle herhangi bir MGN'ye gidecek olan MGNİ'nin genel MGN'ye gitmesi için tüm MGN'leri tarayacak bir genel arama algoritmasına ihtiyacı olmaktadır.

3.3.2. Önerilen MNGİ yönteminin düşürücü tip DA-DA dönüştürücüye uygulanması

Önerilen MGNİ yönteminde daha önceki bölümde bahsedilen avantajlarından ötürü artan iletkenlik yöntemi seçilmiştir. Bu yöntem parçalı PGD meydana geldiğinde bunu tespit edecek ve sistemin çalışma noktasını genel ya da gerçek MGN'ye götürecek şekilde eklemeler yapılmıştır. Şekil 3.6'da önerilen MGNİ yönteminin akış şeması verilmektedir. Önerilen bu yöntemde ışınımın homojen değiştiği durumda FV sistem artan iletkenlik yöntemiyle MGN'de çalıştırılmaktadır.

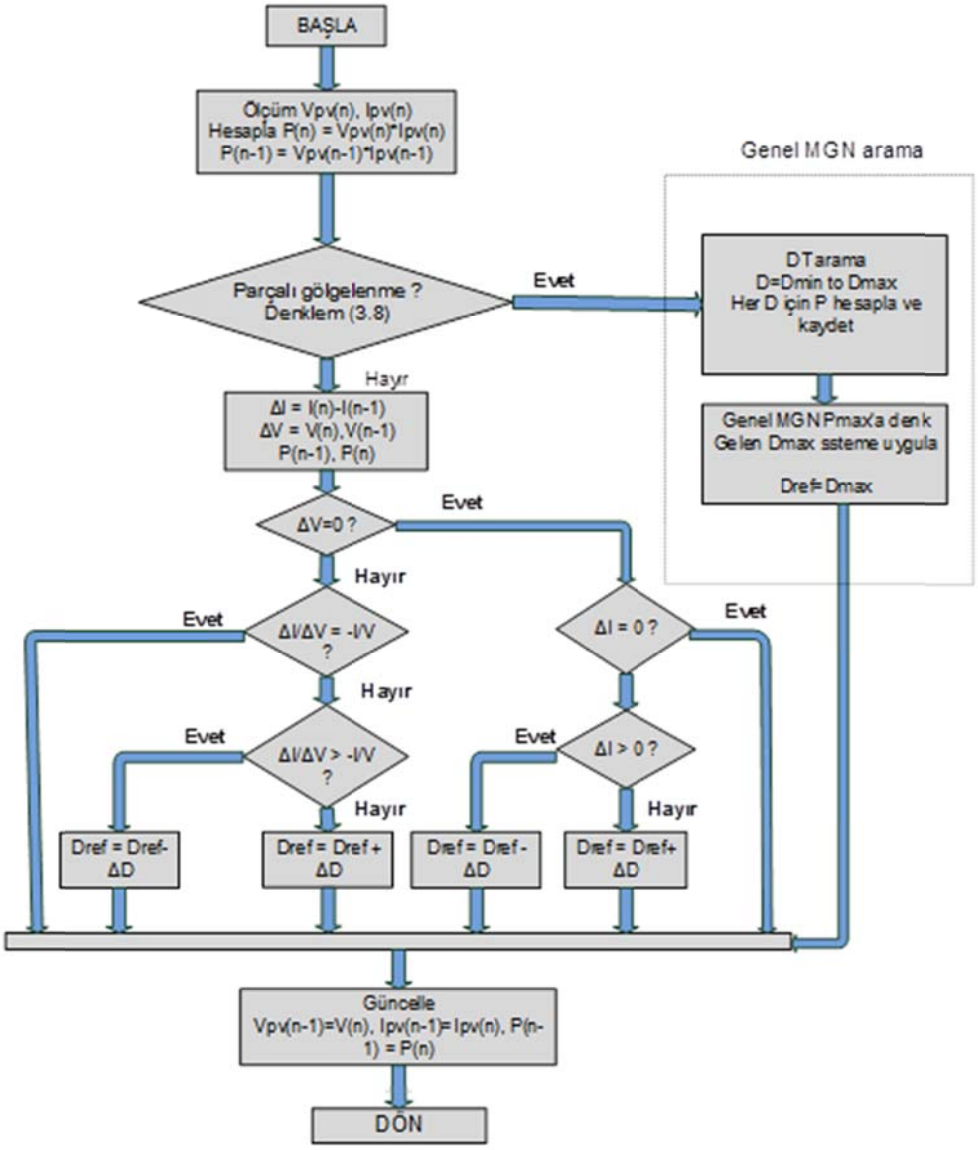
PGD meydana geldiğinde ise artan iletkenlik yöntemi ile FV sistem yerel MGN'de çalışabileceği için sistemin çalışma noktası genel MGN'ye götürecek bir arama

algoritması devreye girmektedir. Arama algoritmasında, Şekil 3.6'da gösterildiği gibi referans değişkeni minimum değerden maksimum değere kadar değiştirilerek FV sistemin tüm çalışma noktaları taranarak hangi referans girişinde maksimum güç çekildiği kaydedilir. Sonrasında burada bulunan maksimum güç noktasına denk gelen referans girişi sisteme uygulanır. FV sistem bu şekilde genel MGN'ye götürüldükten sonra artan iletkenlik yöntemiyle tepe noktası aranmaya devam edilmektedir.

Önerilen MGNİ'nin performansını incelemek amacıyla Matlab/Simulink ortamında bir DA/DA dönüştürücü üzerinde uygulaması yapılmıştır. Referans girişi uygulamaya göre doluluk-boşluk oranı (D), akım veya gerilim olabilmektedir. Bu uygulama için referans doluluk-boşluk oranı alınmış, Bölüm 5 ve 6 da tasarlanan ŞKE için gerçekleştirilen MGNİ yönteminde ise referans olarak gerilim kullanılmıştır. Şekil 3.7' de FV dizin, DA/DA dönüştürücü ve MGNİ algoritmasının blok şeması gösterilmiştir. FV dizin için bir önceki bölümde kullanılan dört adet seri bağlı FV paneller kullanılmıştır. Bu paneller Tablo 3.1'deki parametrelere sahip olup MATLAB/Simulink ortamında modellenmiştir.

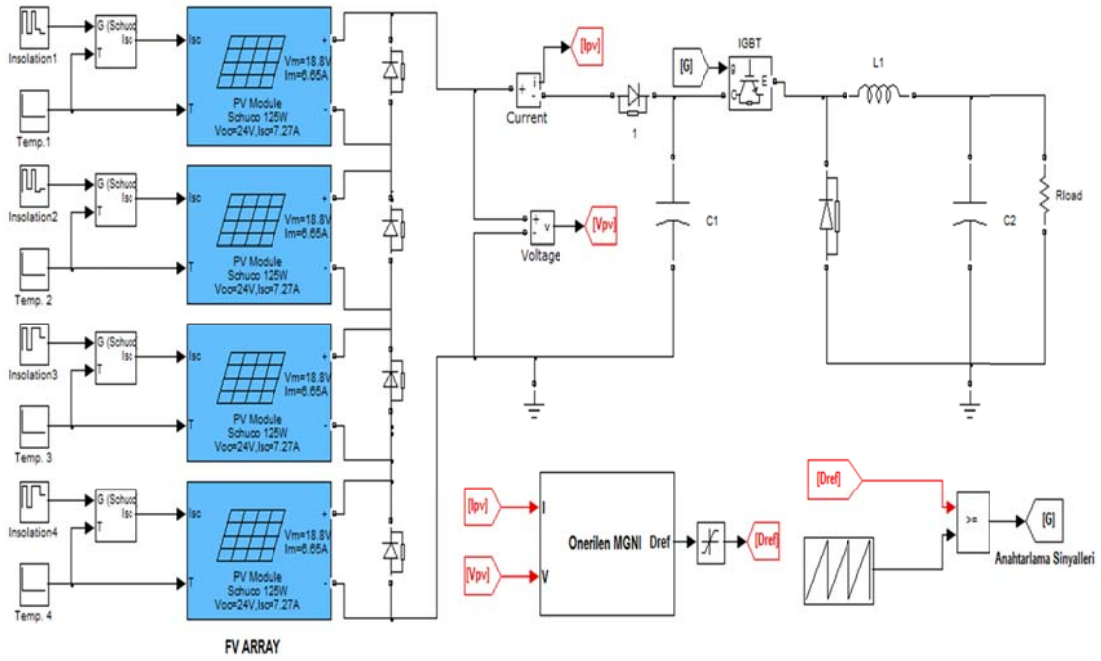
Tablo 3.1. FV Panel Parametreleri

P_{mpp} (W) (MGN'de Güç)	**V_{mpp} (V)** (MGN'de Gerilim)	**I_{mpp} (A)** (MGN'de Akım)	**V_{oc} (V)** (Açık devre Ger.)	**I_{sc} (A)** (Kısa devre akımı)
125	18.3	6.7	24	7.27



Şekil 3.6. Önerilen MGNİ Yöntemi akış şeması

Bu sistem için Tablo 3.2'de özetlendiği şekilde hem homojen ışınım değişimi hem de PGD'nin benzetimini yapabilmek amacıyla 2 farklı durum uygulanmıştır. Birinci durum, tüm sistem homojen ışınım altındayken ışınımın yine homojen olarak değişmesidir. İkinci durum ise yine tüm FV dizin homojen ışınım altındayken PGD'nin meydana gelmesidir.

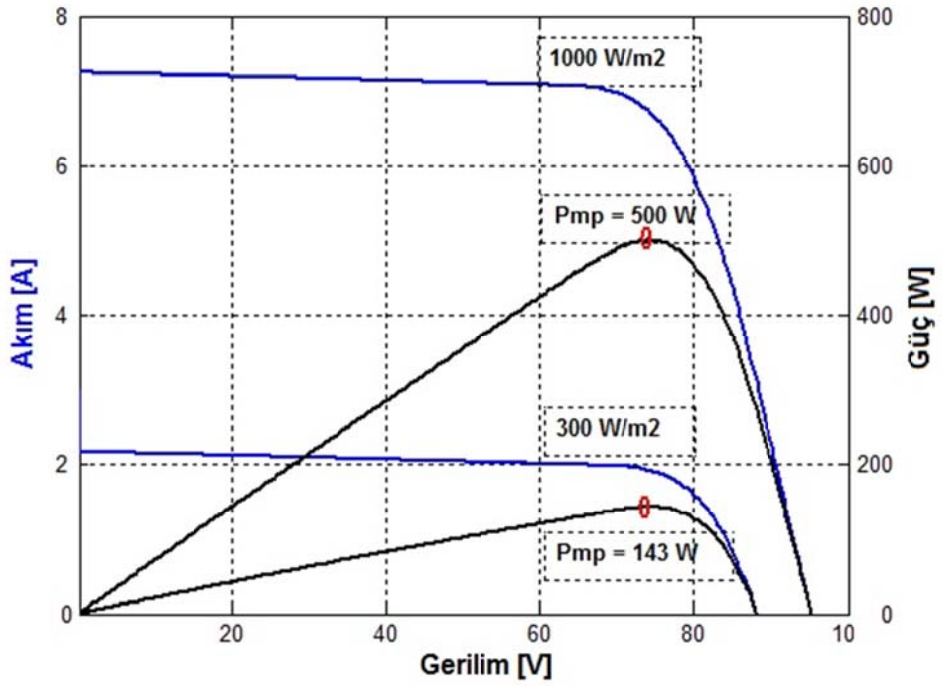


Şekil 3.7. Önerilen MGNİ yöntemi ve düşürücü DA-DA dönüştürücü Matlab/Simulink modeli

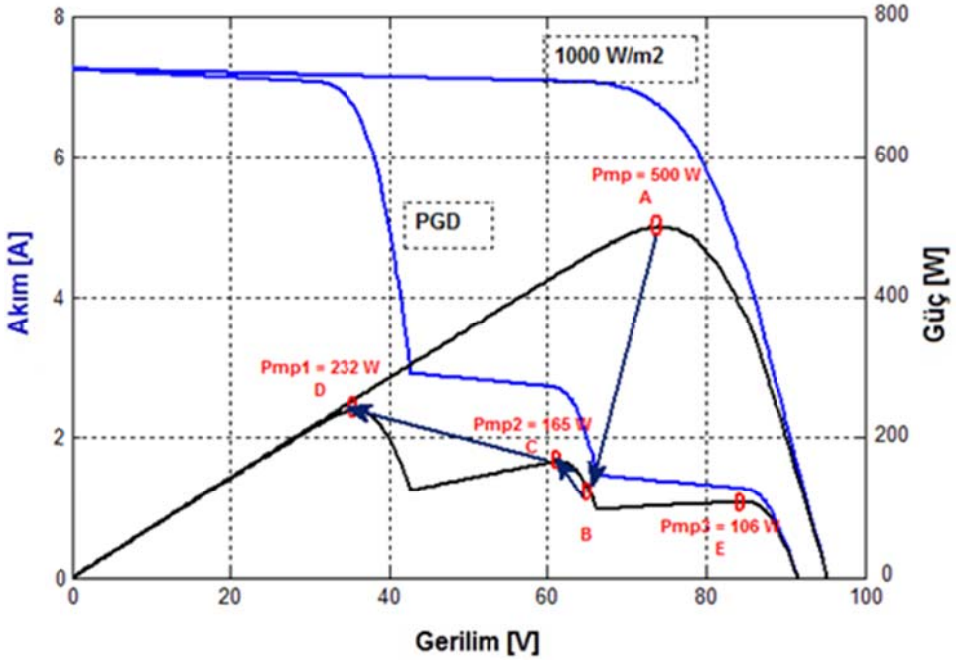
Tablo 3.2. FV dizindeki panellerin ışınım değerleri

Panel Numarası	1. Durum		2. Durum	
	Işınım (W/m^2)	Işınım (W/m^2)	Işınım (W/m^2)	Işınım (W/m^2)
Panel 1	1000	300	1000	1000
Panel 2	1000	300	1000	1000
Panel 3	1000	300	1000	400
Panel 4	1000	300	1000	200

FV dizin 1000 W/m^2 homojen ışınım altında çalışırken Tablo 3.2'deki gösterilen iki farklı durum için sistemin güç-gerilim (P-V) ve akım- gerilim (I-V) eğrileri Şekil 3.8 ve Şekil 3.9'da sırasıyla verilmiştir.



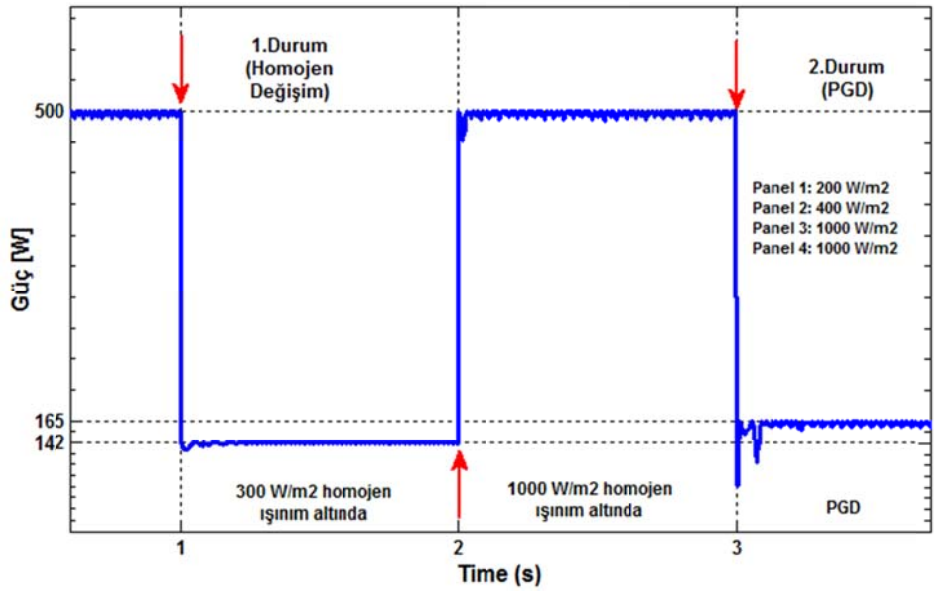
Şekil 3.8. Homojen ışınım değişiminde FV dizinin I-V ve P-V eğrisi



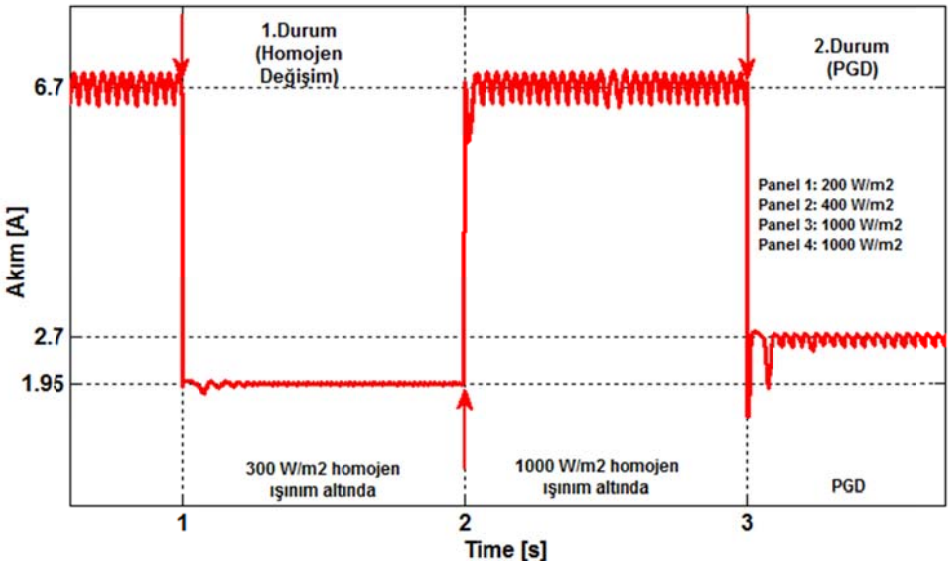
Şekil 3.9. PGD altında FV dizinin I-V ve P-V eğrisi

Birinci durumda; FV dizin üzerine gelen ışınım homojen olarak 300 W/m^2' ye düşmektedir. Bu durumda sistemin maksimum gücü 500 W'tan 143 W'a düşer.

İkinci durumda ise; FV dizin üzerinde PGD meydana gelmekte ve dizin üzerine 3 farklı ışıma olduğundan dolayı 3 adet MGN oluşmaktadır (C, D ve E). Bu noktalardan, D(165 W) ve E(106 W) yerel MGN'lerdir. C(232 W) noktası ise genel MGN 'dir.



Şekil 3.10. Artan iletkenlik yöntemi ile iki farklı durum için FV dizinin çıkış gücünün zamana bağlı değişimi



Şekil 3.11.Artan iletkenlik yöntemi ile iki farklı durum için FV dizinin çıkış akımının zamana bağlı değişimi

Simülasyon çalışmaları sonucundan elde edilen FV dizinin çıkış gücünün zamana bağlı değişimi (P(t)) ile çıkış akımının zamana bağlı değişimi (I(t)) sırasıyla Şekil 3.10 ve 3.11' de verildiği gibi elde edilmektedir.

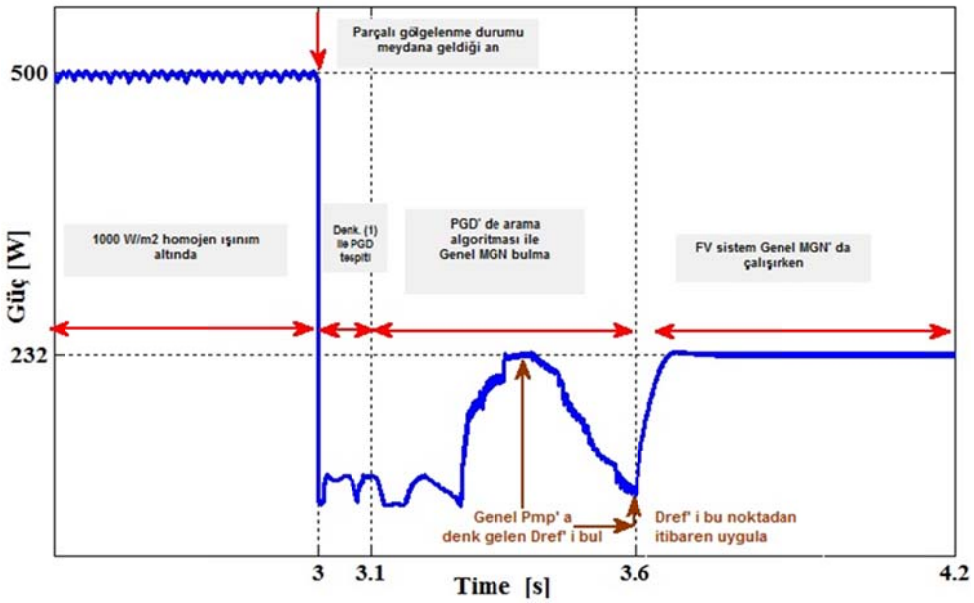
Şekil 3.10'daki güç değişimi incelendiğinde; birinci durum için, FV dizinin ışınımı 1.sn.'de homojen olarak 300 W/m^2'ye düşürülmüştür. Şekil 3.8'deki FV dizinin P-V eğrisinden görüleceği üzere, eğri üzerinde tek MGN olan 142 W'da çalışmaktadır. FV sisteme 2.sn de tekrar 1000 W/m^2 homojen ışınım uygulanmıştır. 3.sn.'de sisteme Tablo 3.2'de verildiği gibi PGD uygulanmıştır.

Tablo 3.3. FV dizin homojen ve PGD altında elde edilen sonuçlar

Homojen ışınım değişimi meydana geldiğinde						
t = 0 'da 1000 W/m^2	t = 1 sn. 'de 300 W/m^2	t = 0 'da 1000 W/m^2	t = 1 sn. 'de 300 W/m^2	Güç ve Akım Oranları		Hata
Ppv (W)		**Ipv (A)**		**P_1/ P_2**	**I_1/I_2**	**Δ_{tol}**
500	142 (Genel MGN)	6.7	1.95	3.52	3.44	0.08
PGD meydana geldiğinde						
t = 2. sn 'de 1000 W/m^2	t = 3 sn. 'de PGD	t = 2. sn 'de 1000 W/m^2	t = 3 sn. 'de PGD	Güç ve Akım Oranları		Hata
Ppv (W)		**Ipv (A)**		**P_1/ P_2**	**I_1/I_2**	**Δ_{tol}**
500	165 (Yerel MGN)	6.7	2.7	3.03	2.48	0.55
500	106 (Yerel MGN)	6.7	1.25	4.72	5.36	0.64

Fakat ikinci durumda, FV dizin Şekil 3.9'da gösterildiği gibi yerel MGN olan C (165W) noktasında çalışmakta ve MGNİ yerel MGN'ye takılmıştır. Eğer klasik artan iletkenlik yöntemi ile maksimum güç noktası izlenirse, sistem genel MGN olan D (232W) noktasına ulaşamaz. Bunun sonucunda bu sistem için 67W güç kaybı söz konusu olmaktadır. Bu sakıncanın üstesinden gelmek için bu durum algılanıp, sistemi genel MGN olan D noktasına götürecek MGNİ yöntemi gerekmektedir. Önerilen MGNİ yöntemi sisteme uygulandığında elde edilen FV dizinin çıkış güç değişimi eğrisi Şekil 3.12'de verildiği olmaktadır. Burada PGD meydana geldiği Denklem (3.8) ile tespit edilmektedir.

Tablo 3.3'de ışınımın homojen olarak değiştiği ve PGD'nin meydana gelmesi durumunda oluşan genel ve yerel maksimum noktalarının Denklem (3.8)'de yerine konmasıyla elde edilen sonuçları verilmektedir. Bu sonuçlara bakıldığında, Denklem (3.8) için hesaplanan hata (tolerans) değerinin ışınımın homojen olarak değiştiği durumda çok küçük olduğu, fakat yerel MGN'lerde bu değerin büyüdüğü görülmektedir. Bu durum, belirlenen bir kritik hata değerinin üzerine çıkıldığında FV sistemde PGD meydana geldiği bilgisini vermektedir. PGD'nin tespit edilmesinin ardından referans değişkeni olan doluluk boşluk oranı D'nin minimum değerden başlanarak artırılarak FV dizinin tüm güç eğrisinin taramakta ve genel MGN'yi bulmaktadır. Daha sonra genel MGN'ye denk gelen D_{ref} referansı sisteme uygulanmaktadır. Bu durum Şekil 3.12' de P(t) eğrisi üzerinde betimlenmiştir.



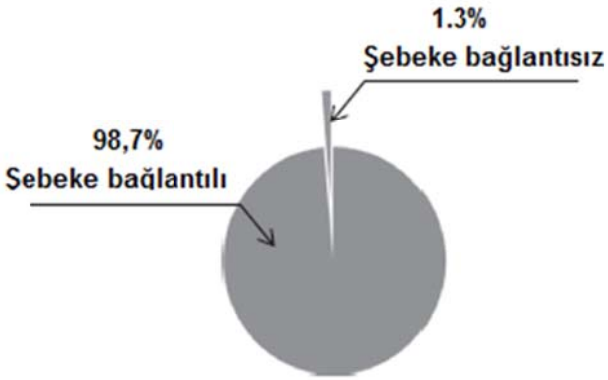
Şekil 3.12. Önerilen MGNİ ile PGD için FV dizinin çıkış güç değişimi, P(t)

Simülasyon sonuçları incelendiğinde, artımsal iletkenlik metodunun homojen ışınım altında etkin olduğu MGN'de çalıştığı görülmektedir. Fakat parçalı gölgelenme durumu meydana geldiğinde yerel MGN'de çalıştığından dolayı sistemin verimi düşmektedir. Burada önerilen MGNİ yöntemi sayesinde, ışınımın homojen olarak değiştiği durumlarda artımsal iletkenlik metodu ile FV sistemden maksimum güç çekilirken, PGD meydana geldiğinde bu durum tespit edebilmiş ve sistemin gerçek maksimum güç noktasında çalışması sağlanmıştır.

4. FV ENERJİ DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİ İÇİN TASARLANAN ŞEBEKE BAĞLANTILI EVİRİCİ YAPISI VE ÖNERİLEN MGNİ

4.1. Giriş

2010 yılının sonunda tüm dünyada fotovoltaik enerji kurulu güç kapasitesi 41 GW'a ulaşmıştır. 2011 yılında ise bu kapasite 71 GW düzeyine sıçramış ve 2012 yılında 100 GW üzerine çıkmıştır. Bu rakamlar incelendiğinde FV enerji yenilenebilir enerji kaynakları arasında hidroenerji ve rüzgâr enerjisinden sonra üçüncü en önemli yenilenebilir enerji kaynağı olarak göze çarpmaktadır. FV kurulu gücü devlet teşvikleri sayesinde üstel olarak artış göstermiş ve esas olarak şebeke bağlantılı FV sistemler desteklenmiştir. Bu yüzden şebeke bağlantılı FV sistemlerin kurulu gücü şebeke bağlantısız FV sistemlere göre oldukça fazladır. Şekil 4.1'de gösterildiği üzere, günümüzde Avrupa'da şebeke bağlantısız fotovoltaik sistemlerin tüm fotovoltaik sistemlere göre güç kapasitesi %1.3'tür. Buna karşın şebeke bağlantılı fotovoltaik sistemlerin kurulu güç kapasitesi ise %98,7 ile neredeyse tamamına yakınını oluşturmaktadır [41]. FV sistemlerin maliyetinin büyük bölümünü yaklaşık %50 ile güneş panelleri oluşturmaktadır. Bunları %10-20 ile eviriciler takip etmektedir [42]. FV sistemlerin kullanımının artmasıyla panel üretici sayısı ve üretim miktarı arttığından maliyetleri de düşmektedir. Bu sebepten FV sistemlerde şebeke bağlantılı evirici maliyetinin, toplam sistem maliyeti üzerindeki ağırlığı artmıştır. FV sistemlerden üretilen enerjinin daha cazip olabilmesi için evirici maliyetinin düşürülmesi önem kazanmıştır. Sonuç olarak yeni, ucuz ve yaratıcı evirici çözümleri üzerine çalışmalar yoğunlaşmıştır [43].



Şekil 4.1. Avrupa'da FV enerji kurulu gücü [41]

Şebeke bağlantılı FV enerji dönüşüm sistemlerinde kullanılan eviriciler FV panellerden elde edilen gücü şebekeye aktarmak için ara yüz olarak kullanılmaktadır. Şebeke bağlantılı bu eviricilerin iki temel görevi vardır; birincisi, FV panellerden elde edilen doğru akımı alternatif sinüzoidal akıma çevirmektir. İkincisi, FV panelleri maksimum güç noktasında çalışmasına imkân sağlamaktır [44]. Bu eviriciler şebekeye eşzamanlı olarak, Akım Toplam Harmonik Bozunum (THD_i) değeri düşük, yüksek kalitede sinüzoidal akım aktarmanın yanında belirli teknik standartları karşılamak zorundadırlar [45].

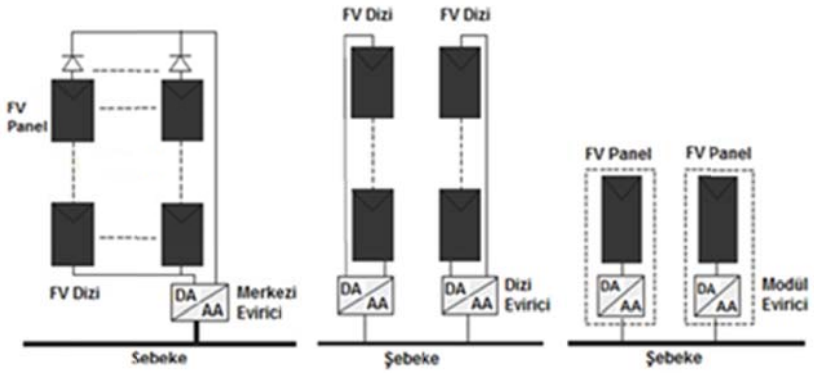
Şebeke bağlantılı bir eviricinin aşağıda belirtilen özellikleri taşıması beklenmektedir. Bu özellikler;

a) Şebekeye aktarılan akım sinüzoidal olmalı ve bu akımın harmonikleri uluslararası standartlar veya ilgili yönetmeliklerde belirtilen sınırlar içinde olmalıdır (THD_i < %5) [44].
b) Şebeke bağlantılı eviricinin Güç faktörü (Power factor) 1'e yakın olmalıdır. (Nominal gücün yarısında; Güç faktörü > 0,90) [44].
c) FV sistemlerde en etkin şekilde faydalanabilmek için FV'lerden her an maksimum güç çekilmesini sağlamalıdır [44].
d) Normal çalışma durumunda, frekans aralığı belirli aralıklarda olmalıdır (50±1 Hz).
e) Normal çalışma durumunda, gerilim aralığı şebeke geriliminin %85 ila %110 aralığında olmalıdır [44].

f) Şebekeye aktarılan akımın doğru akım bileşeni, nominal çalışma akımının %1'inden daha az olmalıdır [6]. IEEE1547 için bu değer %0,5'tir [44].
g) Eviricideki güç elemanlarının yüksek frekanslı anahtarlaması nedeniyle oluşan elektro manyetik girişimi (EMI) düşük olmalıdır [44].
h) Şebeke kesildiğinde, evirici şebekeden ayrılmalıdır [43].

Şebeke bağlantılı eviriciler sadece bir FV panele bağlanabildiği gibi FV dizi veya birçok dizinden meydana gelen FV sisteme de bağlanabilir. Bağlanan panel sayısına göre şebeke bağlantılı eviriciler; AA modül eviriciler, dizi eviriciler ve merkezi eviriciler olarak sınıflandırılabilir [43]. Sadece tek panele bağlı olan evirici tipi AA modül evirici olarak adlandırılmaktadır. Bu tip eviriciler bir fazlı olarak şebekeye bağlanmaktadırlar. Tek başına küçük güç ihtiyacı olan yerlerde kullanılabilir ve ortalama güçleri 0,1 – 0,5 kW civarındadır [44].

Daha yüksek gerilim istenen yerlerde gerilimin yükseltilmesi ihtiyacını ortadan kaldırmak için FV paneller seri olarak bağlanmakta ve FV dizini oluşturmaktadır. Bu şekilde elde edilen FV dizine bağlanan eviriciler, dizi evirici olarak adlandırılmaktadır. Dizi eviriciler genellikle bir fazlı olarak şebekeye bağlanmakta [41] ve 0.5-1 kW civarındaki güçlerde kullanılmaktadır [44].



(a) (b) (c)

Şekil 4.2. Farklı şebeke bağlantılı evirici tipleri (a) Merkezi evirici (b) Dizi evirici (c) Modül evirici

Daha yüksek güç istenen yerlerde birçok FV dizinin birleştirilmesiyle FV sistemler oluşturulmaktadır. Bu FV sistemlerde kullanılan eviriciler merkezi eviriciler olarak adlandırılmaktadır [46]. Merkezi eviriciler üç fazlı olarak şebekeye bağlanırlar ve

ortalama güç aralığı 1-5 kW'tır [44]. Şebekeye bağlantıda, kullanılan panel veya dizi sayısına göre sınıflandırılmış olan bu üç evirici tipi Şekil 4.2'de gösterilmiştir [41].

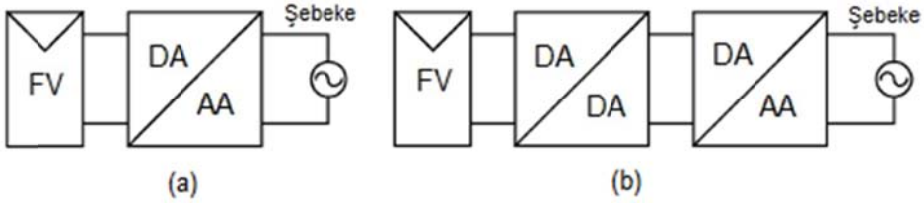
Şebeke bağlantılı eviriciler basit anlamda bir fazlı ve üç fazlı olmak üzere ikiye ayrılırlar [47]. Ayrıca Şebeke bağlantılı eviriciler;

- ✓ Güç işleme aşamalarına,
- ✓ Dekuplaj kondansatörünün yerine,
- ✓ Trafo kullanılıp kullanılmamasına,
- ✓ Şebeke arayüzüne ve
- ✓ Komütasyon şekline göre de sınıflandırılabilmektedir [46].

Şebeke bağlantılı eviriciler güç işleme aşamalarına (power conversion stage) göre; bir güç işleme aşamasına sahip olan ve iki güç işleme aşamasına sahip olan eviriciler olarak ikiye ayrılabilir [43]. Şekil 4.3'de bir ve iki aşamalı şebeke bağlantılı evirici görülmektedir.

Şekil 4.3.a'daki bir güç işleme aşamasına sahip eviricide; MGNİ işlemi şebeke akımı denetlenerek gerçekleştirilmektedir. Bir güç işleme aşamalı eviricide gerilim yükseltme işlemi çıkışındaki trafo ile yapılmaktadır. Eğer evirici çıkışında trafo bağlantısı yok ise ve giriş gerilimi de yeteri kadar yüksek değilse, gerilimi yükseltmek için DA-DA dönüştürücü kullanması gerekmektedir.

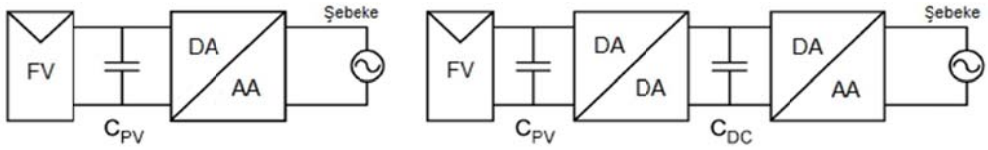
Şekil 4.3.b'de verilen iki güç işleme aşamasına sahip eviricide; birinci aşamada DA-DA dönüştürücü kullanılmaktadır. Bu dönüştürücü aynı zamanda MGNİ'den sorumludur. İkinci aşamada kullanılan evirici ise şebeke akımının denetiminden sorumludur. Eğer gerekli ise gerilim yükseltme işlemi her iki aşamada da gerçekleştirilebilir [46].



Şekil 4.3. Güç işleme aşama sayısına göre şebeke bağlantılı evirici tipleri (a) bir aşamalı güç işleme (b) iki aşamalı güç işleme

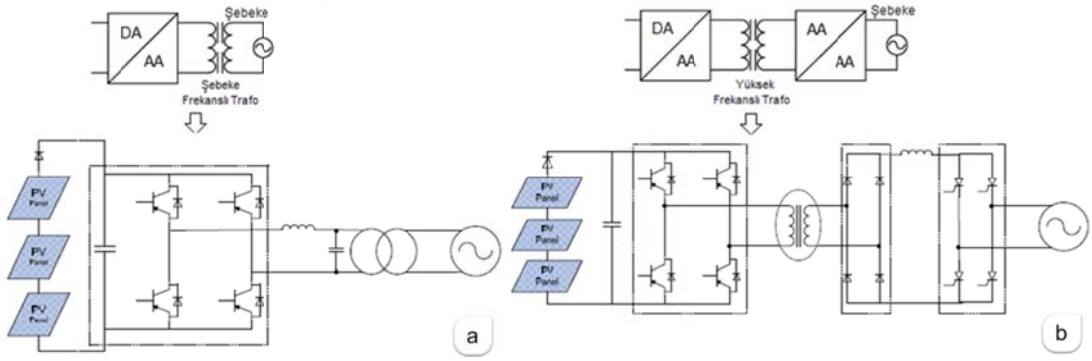
Şebeke bağlantılı eviricilerde dekuplaj kondansatörü Şekil 4.4.a'da gösterildiği üzere; bir güç aşamalı eviricide panele paralel bağlanır. Bu tip eviricide giriş gerilimim yükseltmek için çok sayıda panel seri olarak bağlandığından, evirici çıkışında ayrıca trafo bağlantısına gerek olmaz. Bu eviricinin girişinde DA-DA dönüştürücü kullanılmadığından giriş gerilim dalgalanmasının düşük olması için dekuplaj kondansatörünün yüksek değerde seçilmesi gerekmektedir [48].

İki güç aşamalı eviricide ise dekuplaj kondansatörü, Şekil 4.4.b'de görüldüğü üzere panele veya evirici girişindeki DA baraya bağlanır [46]. Bu eviricinin girişinde DA-DA dönüştürücü olduğundan giriş gerilim dalgalanması düşük olmaktadır. Bu sayede dekuplaj kondansatörünün değeri bir aşamalıya göre daha düşük olmaktadır [48].



(a) (b)

Şekil 4.4. Dekuplaj kondansatörünün bağlandığı yere göre bir ve iki aşamalı şebeke bağlantılı evirici

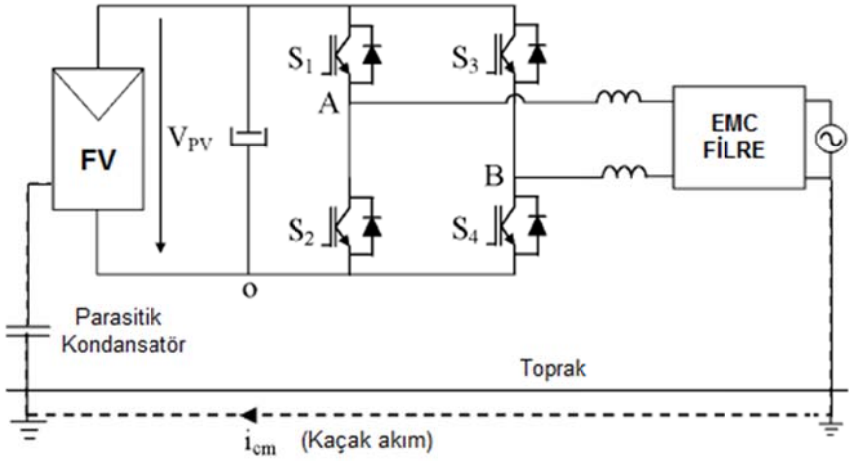


Şekil 4.5. Trafo kullanılan şebeke bağlantılı evirici tipleri (a) Şebeke frekanslı trafo kullanan yapı ve (b) yüksek frekanslı trafo kullanan yapı

FV panellerin toplam geriliminin şebeke geriliminin tepe değerinden düşük olduğu durumlarda evirici çıkış gerilimi de şebeke geriliminden düşük olacağından şebekeye enerji transfer edilemez. Bu durumda eviricinin çıkış gerilimi uygun bir trafoyla yükseltilebilir [43]. Şekil 4.5'de görüldüğü gibi bazı eviriciler şebeke frekanslı trafolar kullanırken bazıları yüksek frekanslı trafolar kullanmaktadır.

Şebeke frekanslı trafoların kullanımı IEEE ve IEC gibi standartların sınırlandırdığı ve dağıtım trafolarında doymaların oluşmasına neden olan doğru akım transferini engeller. Bunun yanı sıra şebeke ile FV kaynak arasında elektriksel yalıtım sağladığından FV panellerin topraklanmasındaki sakınca ortadan kalkmış olmaktadır [46]. Bu yüzden Trafo kullanan sistemler elektriksel yalıtım sağladığı için trafosuz sistemlere göre daha güvenlidirler. Şekil 4.5.b'deki yüksek frekanslı trafolar şebekeye doğru akım aktarılması problemini çözemez fakat elektriksel yalıtım sağlandığından topraklama işlemini kolaylaştırır [43].

Trafo kullanmayan şebeke bağlantılı eviricinin genel prensip yapısı Şekil 4.6'da verilmiştir [48]. Trafo kullanılmayan bu eviricilerde giriş gerilimi şebeke geriliminin tepe değerinden yüksek olması gerekmektedir. Bu dönüştürücülere literatürde düşürücü tip (buck inverter) evirici de denilmektedir. Bu tip eviricilerde şebeke ile FV sistem arasında elektriksel yalıtım bulunmamaktadır. FV sistemlerde, paneller insanların erişebileceği yerlerde bulunabildiğinden panellerin gövdeleri topraklanmak zorundadır. Topraklama yapıldıktan sonra, FV panellerin geniş yüzeyinden kaynaklanan panel ile toprak arasındaki eşdeğer parasitik kondansatör oluşmaktadır. Yüksek hızdaki anahtarlamalardan dolayı bu kondansatör üzerinde oluşan gerilim değişimleri Şekil 4.6'da görülen kaçak akımlara neden olmaktadır [49]. Güvenlik açısından, bu kaçak akım değerini insan sağlığını tehlikeye düşürecek seviyenin altına indirmek gerekmektedir. Bunu sağlamak için trafosuz eviriciler için kaçak akımın panel tarafına geçişine izin vermeyecek şekilde yeni topolojiler geliştirmeye ihtiyaç duyulmuştur. Bu yüzden trafosuz eviriciler, devre topolojisi anlamında trafo kullanan eviricilere nazaran daha fazla zorluk içermektedir. Fakat bu evirici yapılarında trafo kullanılmadığından manyetik eleman sayısı azaltılmış, bunula birlikte maliyet ve boyut da düşürülmüştür. Son yıllarda, literatürde kaçak akımların seviyesini standartlarda belirtilen değerin altına (<30mA) düşürmek için çok sayıda trafosuz devre topolojisi üzerine çalışmalar mevcuttur [50,51]



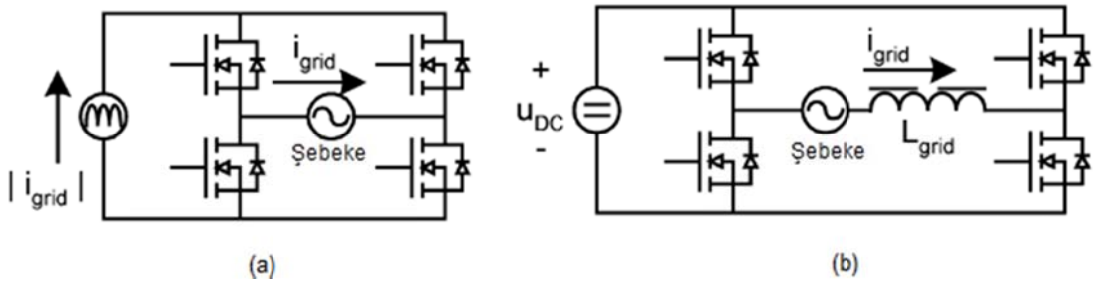
Şekil 4.6. Trafosuz şebeke bağlantılı evirici [48]

Şebeke bağlantılı eviriciler FV paneller ile şebeke ara yüzüne veya evirici girişindeki kaynağın türüne göre, Gerilim Kaynaklı Evirici (GKE) ve Akım Kaynaklı Evirici (AKE) olmak üzere iki ana sınıfa ayrılmaktadır [45]. Şekil 4.7'de prensip şemaları verilen her iki eviricinin de amacı şebekeye sinüzoidal akım aktarmaktır. GKE girişi sabit bir gerilim kaynağından sağlanır ve şebekeye sinüzoidal akım aktarmak için şebekeye anlık değerleri pozitif, negatif veya sıfır olan gerilim darbeleri uygulamaktadır. GKE'lerde evirici katında genellikle darbe genişlik ayarı (DGA) veya histerezis denetletici ile yüksek frekanslı anahtarlama yapılmaktadır [52].

Akım kaynaklı eviriciler, genellikle girişinde doğrultulmuş sinüs akımı elde edilerek şebeke tarafına aktarırken tekrar sinüs formuna dönüştüren (unfold) eviricilerdir [46]. Girişinde doğru akım bulunan AKE'ler genellikle yüksek frekansta anahtarlama (IGBT, MOSFET) ile çıkışında sinüzoidal akım elde etmektedir. Girişinde doğrultulmuş sinüzoidal akım bulunan akım kaynaklı eviriciler şebeke komütasyonlu olup, şebeke frekansının iki katı frekansta (Tristör) anahtarlanmaktadır. Girişinde doğru akım bulunan akım kaynaklı eviricilerde, şebeke frekansının iki katında anahtarlama (Tristör) yapıldığında ise, şebeke tarafında yüksek toplam harmonik bozunum değerine sahip, kare dalga formuna yakın bir akım aktarılmış olur.

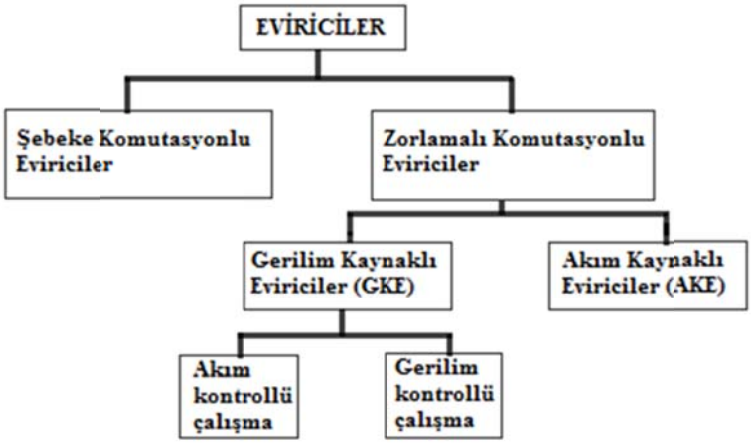
AKE'lerde GKE'lerden farklı olarak evirici katında anahtarlama kayıpları yerine sadece iletin kayıpları olmaktadır. Fakat evirici katının girişinde doğrultulmuş sinüs akımı elde etmek için anahtarlama kayıpları bir önceki aşamada meydana gelmektedir [52]. Çoğu uygulamada GKE'ler kullanılmış olsa da kısa devrelere karşı

yüksek direnç göstermeleri ve ters gerilimi bloke etmeleri gibi özellikleri nedeniyle AKE üzerine çalışmalar yapılmıştır [43].



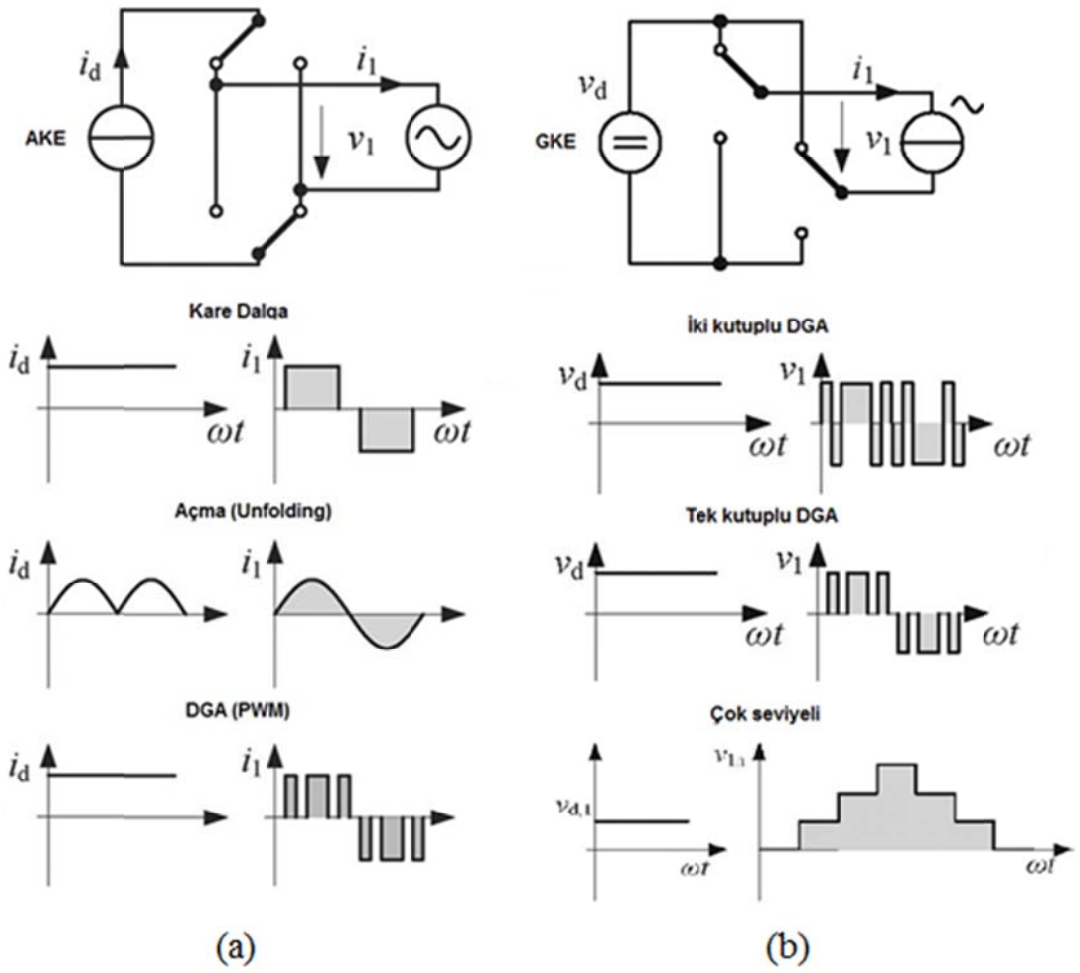
Şekil 4.7. Giriş kaynağına türüne göre evirici tipleri (a) Akım Kaynaklı Evirici (AKE) (b) Gerilim Kaynaklı Evirici (GKE) [46]

Şebeke bağlantılı eviriciler ayrıca; Şebeke Komütasyonlu veya Doğal Komütasyonlu Evirici (Line commutated inverter) ve Zorlamalı Komütasyonlu Evirici (Self commutated inverter) olmak üzere de sınıflandırılabilir.



Şekil 4.8. Şebeke bağlantılı eviricilerin genel olarak sınıflandırması

Gerilim kaynaklı eviriciler, yapısında MOSFET ve IGBT gibi yüksek frekansta anahtarlama yapabilen elemanlara sahip olup, darbe genişlik modülasyonu (DGM) ile yüksek frekansta çalışırlar [55]. Bir fazlı şebeke bağlantılı birçok FV uygulamalarında kullanılmakta olan bu eviriciler genel olarak zorlamalı komütasyonlu evirici sınıfına girmektedir [54]. Benzer olarak, yapısında anahtarlama elemanı olarak IGBT kullanılan ve girişinde sabit doğru akım bulunan akım kaynaklı eviriciler de Zorlamalı komütasyonlu eviriciler sınıfına girmektedir [53].



Şekil 4.9. AKE ve GKE'lerin şebekeye güç aktarmak için kullandıkları farklı modülasyonlar [53]

AKE ise zorlamalı veya şebeke komütasyonlu olabilmektedir [53]. Şekil 4.9.a'da AKE için şebeke komütasyonlu çalışan kare dalga evirici, yine şebeke komütasyonlu olan girişindeki doğrultulmuş sinüzoidal akımı unfolding devresi ile şebekeye aktaran evirici ve zorlamalı komütasyonlu DGM tekniği ile çalışan evirici devrelerinin prensip şemaları verilmiştir. Şekil 4.9.b'de ise GKE için farklı modülasyon tekniği ve çok seviyeli evirici prensip şemaları verilmiştir. Zorlamalı komütasyonlu eviricilerde MOSFET ve IGBT gibi yüksek hızda çalışabilen yarı iletken elemanlar kullanılmaktadır. Bu eviricilerde yarı iletken elemanların iletime ve kesime girme zamanları evirici tarafından belirlenir [53].

Şebeke komütasyonlu eviricilerde, zorlamalı komütasyonlu eviricilerin aksine yarı iletken elemanların kesime girmesi için ayrıca tetikleme yapılmaz, doğal yapısından

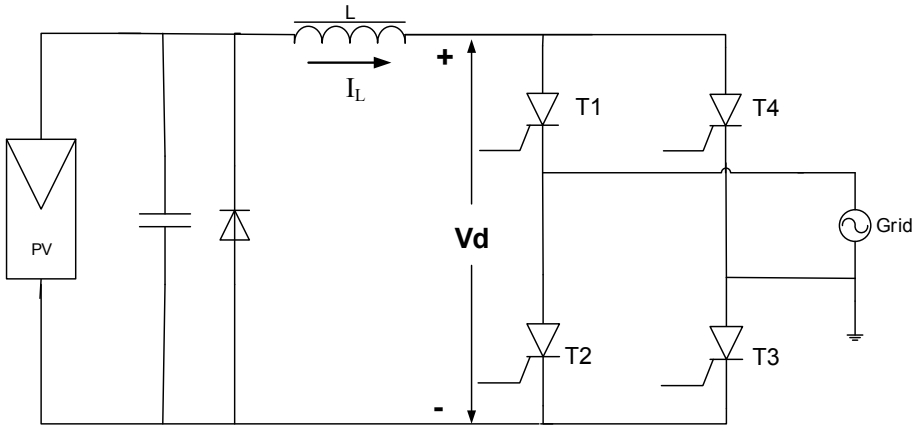
kaynaklı olarak içinden geçen akımın sıfır olmasıyla kesime kendiliğinden girmektedir [56]. Bu eviricilerde yarı iletken eleman olarak tristör (SCR) kullanılmaktadır. Tristörler çalışma prensipleri bakımından şebeke komütasyonlu olduklarından, şebeke ile senkronizasyon için zorlamalı komütasyonlu eviricilerde olduğu gibi çok fazla çaba sarf etmeye gerek yoktur [57]. Tristör tetiklemelerini ayarlamak amacıyla Sıfır Geçiş Algılama (SGA, ZCD-Zero Crossing Detection) devresi kullanmak yeterli olmaktadır. Burada bir tristör, iletimde iken, diğer tristör tetiklense dahi, üzerinden geçen akım sıfıra düşünceye kadar iletimde kalmaktadır. Bu sebepten bu tür eviricilerde tristörler sadece iletime girmesi için tetiklenmektedir [58].

Şebeke komütasyonlu eviricilerin gelişimi 1980 başlarından itibaren kullanılan elektrik motor sürücü teknolojisine dayanmaktadır ve genellikle elektik motor uygulamalarında kullanılmaktadır [45]. Bir fazlı ŞKE Şekil 4.10'da gösterildiği gibi dört adet tristörden meydana gelmektedir. Bu eviriciler ve Avrupa'da 1.5 kVA nominal gücünde şebekeye bağlı FV enerji üretim sistemlerinden şebekeye güç transferi için kullanılmaktadır [59]. Geçmişte popüler olmalarına rağmen ek olarak filtre gereksinimleri dolayısıyla günümüzde pek tercih edilmemektedirler [46]. ŞKE'lerin en büyük avantajı şebeke ile kolaylıkla senkronize olarak çalışmalarıdır [60], ayrıca basit ve sağlam bir yapıda olmaları, yüksek verime sahip olmaları ve ucuz olmaları diğer avantajlarıdır [57, 60]. Fakat bunların yanında dezavantaj olarak; kare dalga formuna yakın akım aktarmaları sebebiyle fazla miktarda harmonik içermeleri ve güç faktörlerinin düşük olmaları sayılabilir [60]. Bu harmonikleri bastırmak için büyük filtre elemanları kullanmak gerekmektedir.

4.2. Literatürde Yer Alan Bir Fazlı Şebeke Komütasyonlu Evirici (ŞKE) Yapısı

Literatürde FV enerji dönüşüm sistemlerinden ŞKE kullanılarak şebekeye güç aktarma üzerine yapılan çalışmalar bu eviricinin çıkış akımının yüksek miktarda harmonik içermesinden dolayı oldukça azdır. Bir fazlı ŞKE için literatürde kullanılan devre yapısı Şekil 4.10'da verilmektedir. Buradan görüldüğü üzere devre oldukça basit bir yapıya sahip olup dört adet tristör elemanından oluşmaktadır. Bu çalışmalarda Şekil 4.10'daki ŞKE devre yapısı kullanılarak FV panellerden şebeke

güç aktarılması başarılmıştır [60]. Fakat bu çalışmaların tümünde şebekeye aktarılan akım yaklaşık olarak kare dalga formunda olduğundan dolayı fazla miktarda harmonik akım içermekte ve bu yüzden THB seviyesi uluslararası standartların çok üzerinde olmaktadır [55, 61]. Bundan dolayı benzer çalışmaların hepsinde maliyetin artmasına ve verimin düşmesine neden olan harmonik filtre ekipmanları kullanılmaktadır [57, 58, 62-65]. Ayrıca bu çalışmaların bazılarında maksimum güç izleme için tetikleme açısı sürekli olarak ayarlandığından güç faktörü değişkendir [57, 62, 64, 65]. Tetikleme açısının sabit olduğu uygulamalarda ise maksimum güç izleme için fazladan bir DA-DA dönüştürücü devresi kullanılmakta ve şebekeye güç aktarmada bir kademe daha eklenmiş olmaktadır [58, 63]. Bu durum karmaşıklığı arttırmakta ve verimin düşmesine sebep olmaktadır.



Şekil 4.10. Geleneksel bir fazlı ŞKE yapısı

Şekil 4.10'daki devre genel olarak tam kontrollü doğrultucu olarak kullanılmaktadır. Bu doğrultucuda, sabit kabul edilen çıkış veya yük akımı I_L'nin yönü değiştirilemez. Ancak, kontrollü doğrultucularda her iki yönde de gerilim elde edilebilir. Bu durumda, doğrultucu modunda çıkış gücü pozitiftir, yani AA gerilim DA'ye çevrilir ve AA şebekeden DA yüke enerji aktarılır. İnverter modunda ise, çıkış gücü negatiftir, yani DA gerilim AA'ye çevrilir ve DA çıkıştaki enerji AA şebekeye aktarılır [56].

Bu devrede, tristör köprüsünün ortalama giriş gerilimi, V_d, Denklem (4.1) ile ifade edilir. Burada; V_m şebeke geriliminin tepe değerini, α ise tetikleme açısını temsil etmektedir. Devrede tristör tetikleme açısı, $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ arasında olduğunda devre

evirici modunda çalıştırılmış olur; Bu durumda V_d gerilimi pozitif olmakta ve I_L akımı bu gerilime göre ters yönde akmaktadır [64]. Bu yüzden tristör köprüsünün çıkış gücü P_{dc} negatif değer almaktadır. Bu durumda; güç akışı DA kaynaktan şebekeye doğru olur. Başka bir deyişle, ŞKE evirici modunda çalıştığında P_{dc} negatif değer alacağından FV panelden şebeke tarafına enerji akışı olduğu anlamına gelir.

$$V_d = -\frac{2}{\pi} V_m \cos\alpha \tag{4.1}$$

Geleneksel ŞKE'nin en büyük dezavantajı, şebekeye aktarılan akımın sinüs formundan uzak olmasıdır. Burada, aktarılan akım kontrol edilememekte ve yaklaşık olarak kare-dalga formunda olmakta ve şebekeye aktarılan akımın THB'si %48.4'e kadar çıkabilmektedir.

FV sistem için maksimum güç izleme en önemli parametre olduğundan, geleneksel ŞKE kullanan çalışmalar, maksimum güç izleme yapabilmek için, kontrol değişkeni olarak tetikleme açısını kullanmışlardır. Bundan dolayı bu çalışmalarda güç faktörü değişkendir. Sabit güç açısında maksimum güç izleme yapılan çalışmalarda ise maksimum güç izleme işlemi genel olarak yükseltici DA-DA dönüştürücüde yapılmıştır.

4.2.1. Geleneksel bir fazlı ŞKE harmonik analizi

Eviriciden şebekeye aktarılan kare dalga formundaki akım yüksek miktarda harmonik bileşen içerir. Bir fazlı ŞKE için şebekeye aktarılan bu akımın THB'si aşağıda verilen denklemler ile hesaplanmaktadır.

$$I_{grid1} = (a_1 \cos \pi\omega t + b_1 \sin \pi\omega t) \tag{4.2}$$

$$I_{grid1} = \frac{\mathrm{I}_{\mathrm{m}\,grid1}}{\sqrt{2}} = \frac{2}{\pi}\sqrt{2} I_L = 0,9 I_L \tag{4.3}$$

Şebekeye aktarılan akımın RMS değeri I_{grid}, akımın tepe değeri I_{mgrid} ve evirici girişindeki doğru akımın değeri I_L birbirine eşittir ($I_{mgrid} = I_{grid} = I_L$). Fourier analiz

ile şebekeye aktarılan akımın temel bileşeni Denklem (4.2) ile ve bu akımın RMS değeri (I_{grid1}) Denklem (4.3)'deki gibi hesaplanmaktadır.

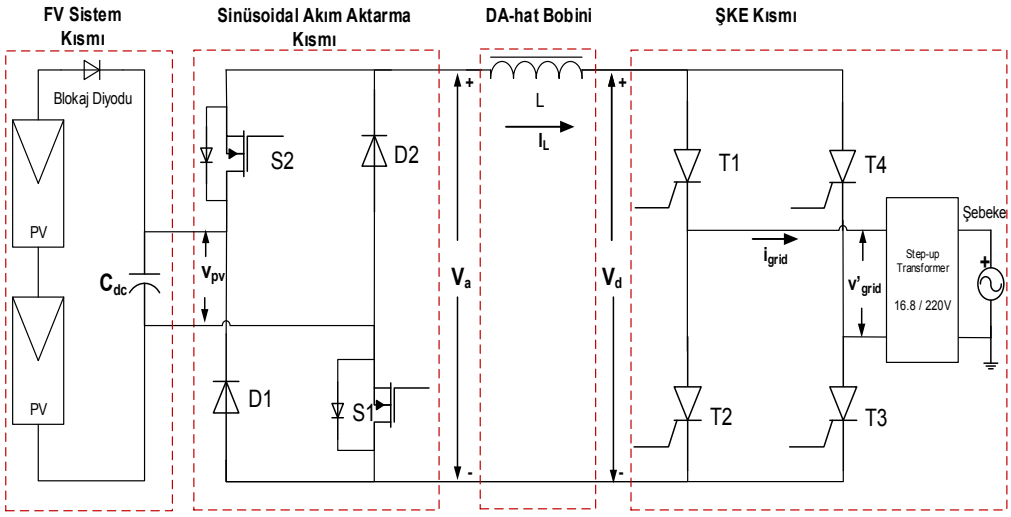
Akımdaki toplam harmonik bozunum (THB_i) Denklem (4.4)'de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$THB_i\% = 100 \times \sqrt{\frac{I_{grid}^2 - I_{grid1}^2}{I_{grid1}^2}} \tag{4.4}$$

Denklem (4.4)'de I_{grid} ve I_{grid1} yerine yerleştirildiğinde görüleceği üzere geleneksel ŞKE ile şebekeye aktarılan akım THB'si %48,4 gibi çok yüksek değerlere çıkabilmektedir.

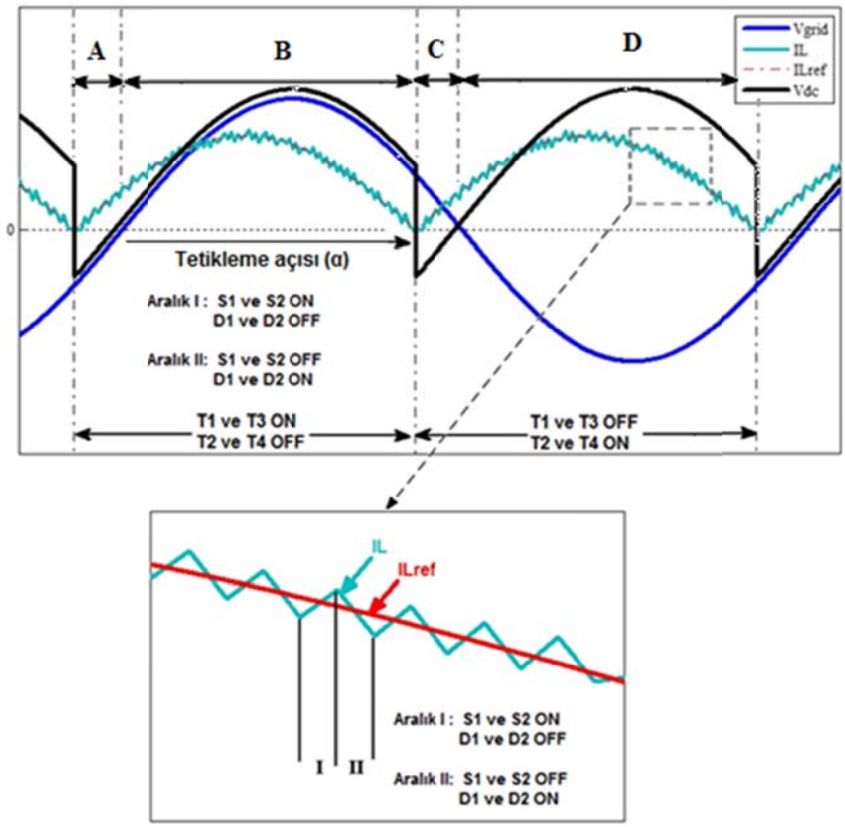
4.3. Tasarlanan Bir Fazlı Akım Zorlamalı ŞKE Devresi ve Çalışma Prensibi

Bu çalışmada, geleneksel ŞKE'nin dezavantajlarını ortadan kaldırıp, şebekeye sinüzoidal akım aktarabilen, sabit güç faktöründe çalışabilen ve istenildiğinde güç faktörü ayarlanabilen akım zorlamalı şebeke komütasyonlu yeni bir evirici yapısı tasarlanmıştır. Tasarlanan ŞKE devresi Şekil 4.11'de verilmiştir. Buradan görüldüğü üzere devredeki ŞKE ve DA-hat bobin kısmı, geleneksel olan ŞKE ile aynı yapıya sahiptir. Tasarlanan yapı, şebeke uçlarında sinüs formunda akım elde edebilmek için sinüzoidal akım aktarma (akım dalga şekli düzenleyici) kısmını içerecek şekilde geliştirilmiştir. Bu kısım, iki adet MOSFET ve iki adet diyottan meydana gelmektedir. Yapıdaki iki adet MOSFET, pozitif ve negatif gerilim darbeleri üretilmesini sağlayarak istenilen sinüzoidal akım şeklinin elde edilmesini kolaylaştırmaktadır. Bu sayede şebekeye aktarılan akımın THB'sinin küçük olması başarılmıştır. Ayrıca eklenen sinüzoidal akım aktarma kısmında anahtarların denetimi ile DA-hat bobini üzerinden geçen akımın kontrolü mümkün olmaktadır. Bu sayede DA-DA dönüştürücü devresi kullanılmadan maksimum güç izleme gerçekleştirme imkânı sağlanmıştır. Bu devredeki DA-hat bobini, enerji aktarma ara elemanı olarak kullanılmaktadır.



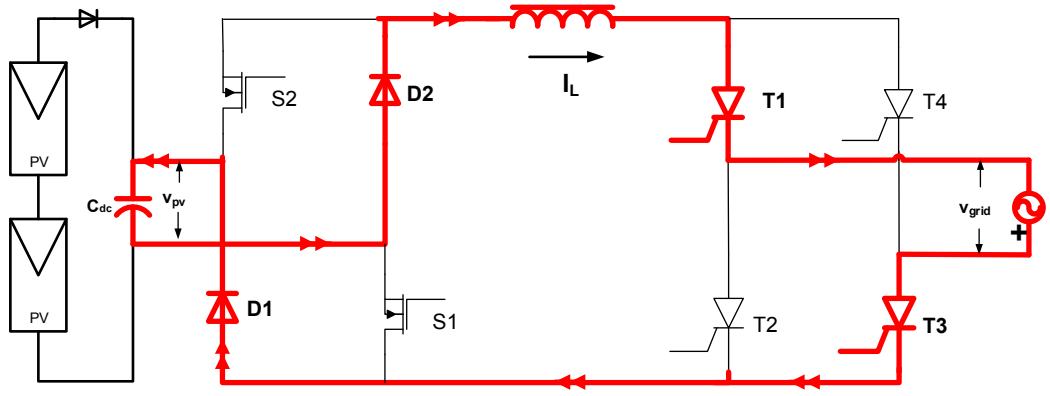
Şekil 4.11. Bir fazlı şebeke bağlantılı FV sistem için tasarlanan ŞKE devresi

Şekil 4.12'de görüldüğü üzere tristörler (T1-T3, T2-T4) 90°'nin üzerinde, 180°'ye yakın bir anda tetiklenmektedir. Tetikleme açısı ile sistemin güç faktörü belirlenmektedir ve bu açıya göre Şekil 4.12'de kesikli kırmızıçizgi ile gösterildiği gibi doğrultulmuş sinüs olan referans sinyal oluşturulmaktadır.

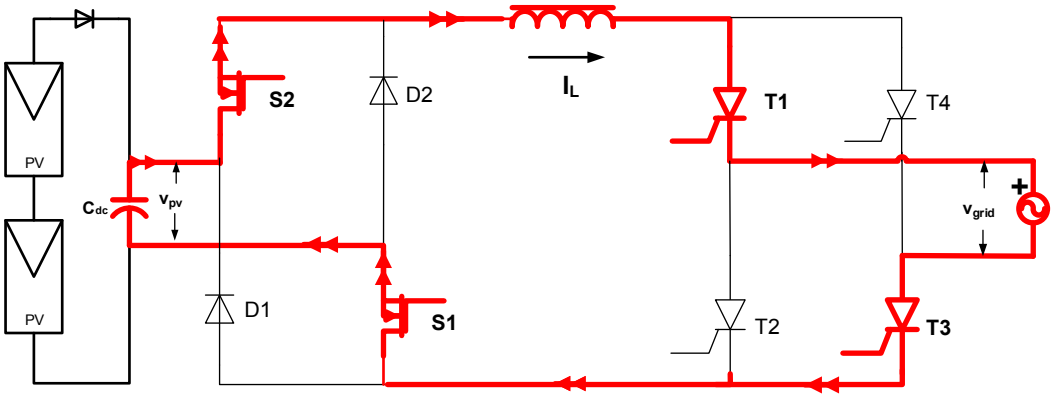


Şekil 4.12. Tasarlanan ŞKE'nin çalışma prensibi ve anahtarlama aralıkları

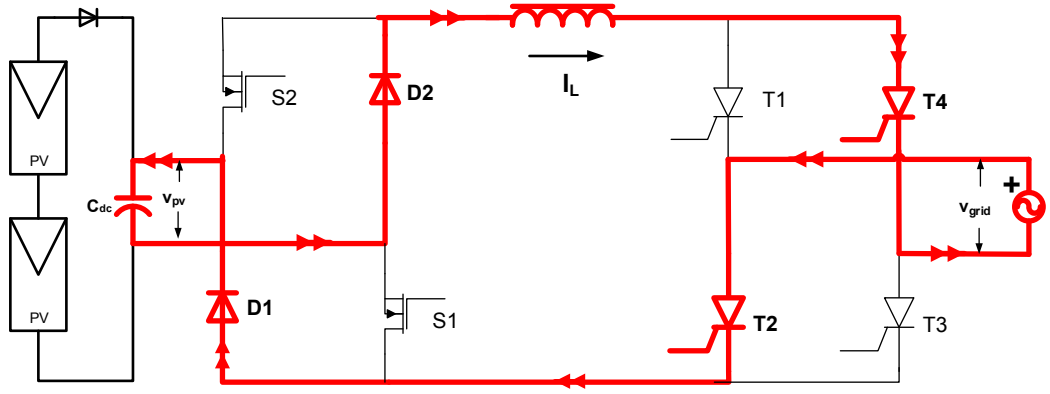
Tristörler Şekil 4.12'den de görüldüğü gibi şebeke frekansının iki katında tetiklenmektedir. MOSFETlerin (S1 ve S2) anahtarlama frekansları histerezis kontrolörün tolerans bandının fonksiyonu şeklinde değişmektedir. Histerezis kontrolör, kesikli kırmızıçizgi ile verilen referans sinyale (I_{Lref}) göre Şekil 4.12'deki yeşil çizgi ile gösterilen DA-hat bobini üzerinden geçen akımın (I_L) geçmesi için tetikleme sinyalleri üretmektedir. Şekil 4.12'de, Tristörler ve MOSFETler için verilen tüm anahtarlama aralıkları için devrenin çalışma durumları Şekil 4.13' de verilmiştir.



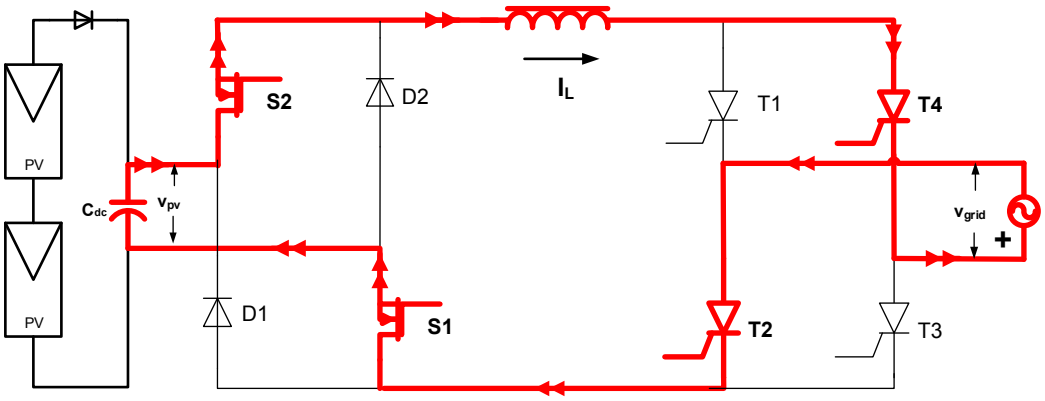
(a) Aralık-A



(b) Aralık-B



(c) Aralık-C

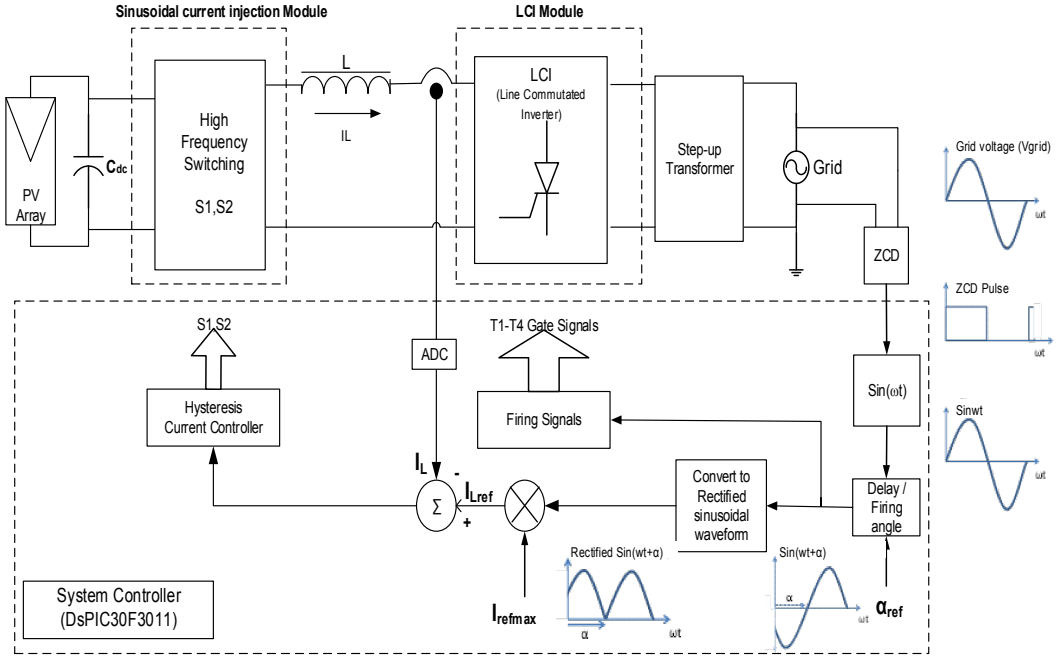


(d) Aralık-D

Şekil 4.13. Tasarlanan ŞKE'nin çalışma aralıkları (a) Şebekenin negatif alternansında, T1-T3 iletimde ve Aralık II (S1-S2 kesimde), (b) Şebekenin pozitif alternansında, T1-T3 iletimde ve Aralık I (S1-S2 iletimde), (c) Şebekenin pozitif alternansında, T2-T4 iletimde ve Aralık II (S1-S2 kesimde), (d) Şebekenin negatif alternansında, T2-T4 iletimde ve Aralık I (S1-S2 iletimde)

Tasarlanan eviricinin blok diyagramı Şekil 4.14'de verilmiştir. Blok diyagramdan görüleceği üzere sistem, ŞKE kısmı, DA-hat bobini, sinüzoidal akım aktarma kısmı, transformatör (16.8/220V), denetleyici kısımdan kullanılan mikrodenetleyici devreden meydana gelmektedir.

Devredeki trafo şebeke gerilimi uyumu gerektiren durumlarda kullanılır. Eğer girişteki DA gerilim kaynağı yeteri kadar büyük ise devre doğrudan şebekeye bağlanabilir. Denetleyici kısım özetle, tristörlerin ne zaman iletime gireceğini ve MOSFETlerin de iletim ve kesim zamanlarını belirlemekte ve buna göre kontrol işaretleri üretmektedir. Tasarlanan devrede sistemin kontrolü için DsPIC30F3011 mikro denetleyicisi kullanılmıştır.

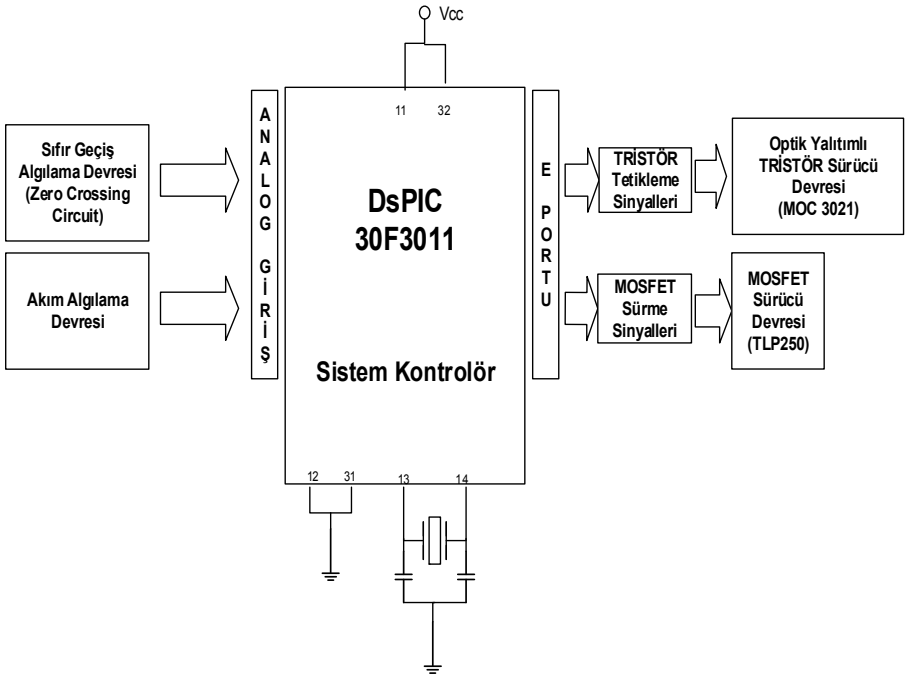


Şekil 4.14. Tasarlanan ŞKE blok diyagramı

4.3.1. Denetleyici kısmı

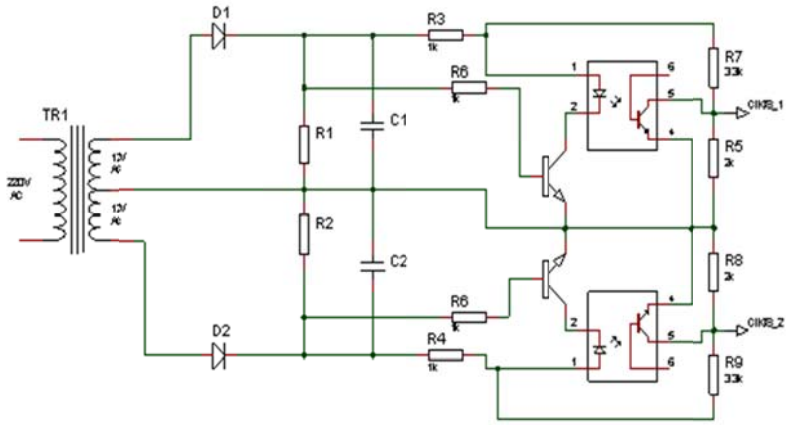
FV sistemden şebekeye olan güç akışı iki adet MOSFET aracılığıyla mikrodenetleyici tarafından üretilen referans akıma göre kontrol edilmektedir. İlk aşamada mikrodenetleyici içinde şebeke ile senkronize bir referans akımı üretmek için Sıfır Geçiş Algılama devresi kullanılmıştır. Üretilen birim sinüs sinyali istenilen güç faktörüne göre belirlenen α tetikleme açısı değeri kadar bir faz farkı ile ötelenerek mikrodenetleyici içerisinde doğrultulmuş sinüs şekli oluşturulur. Bu aşamada elde edilen sinyal, DA-hat bobini üzerinden geçmesini istediğimiz akım ile aynı fazda birim sinyaldir. Elde edilen birim sinyal ile maksimum güç noktası izleyici tarafından belirlenecek olan $I_{Lrefmax}$ katsayısı ile çarpılarak şebekeye aktarılmak istenen akım (I_{Lref}) üretilir. DA-hat bobini üzerinden LA 25-NP akım algılayıcısı devresi vasıtasıyla ölçülen I_L bobin akımı mikrodenetleyicinin analog dijital dönüştürücü (ADC) portundan girerek sayısal sinyale dönüştürülür ve I_{Lref} referans akımı ile karşılaştırılarak fark akımı elde edilir. Fark akımı histerezis akım kontrolör bloğuna girilir ve önceden belirlenmiş olan hata bandına (ΔI) göre MOSFET'ler için sürme sinyalleri üretilir. Ayrıca tristörlere tetikleme sinyalleri de denetleyici kısım tarafından üretilmektedir. Denetleyici kısımda sistem kontrolörü

olarak, Şekil 4.15'de blok şeması verilen Microchip firmasına ait DsPIC30F3011 mikrodenetleyicisi kullanılmıştır.



Şekil 4.15. Tasarlanan ŞKE denetleyici kısmı blok şeması.

Şebeke bağlantılı sistemlerde; şebeke geriliminin sıfır geçişlerini tespit etmek için Faz kilitleme döngüsü (Phase locked loop) ve Sıfır geçiş algılama (Zero-crossing detection) teknikleri kullanılmaktadır. SGA tekniği faz kilitleme döngüsü tekniğine göre daha basittir [66]. Bu yüzden bu çalışmada SGA tekniği tercih edilmiş ve sıfır geçiş algılama devresi olarak Şekil 4.17'de gösterilen devre kullanılmıştır. Bu devrede şebeke geriliminin sıfır geçişlerinde elde edilen sinyal, referans sinyal oluşturmak ve tristörlerin tetikleme sinyallerini elde etmek amacıyla kullanılmıştır. Referans sinüs sinyalini istenilen faz açısında doğru şekilde oluşturmak ve tetikleme sinyallerinin mikrodenetleyici program akışından bağımsız olması için, SGA devresinin çıkış sinyali DsPIC30F3011 mikrodenetleyicisine donanımsal harici dış-kesme sinyali olarak girilmiştir.



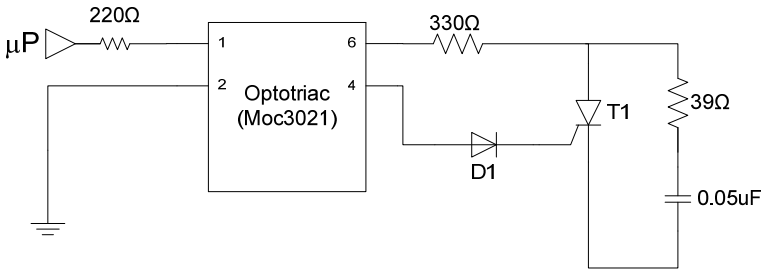
Şekil 4.16. Sıfır Geçiş Algılama (SGA) devresi.

4.3.2. Sinüzoidal akım aktarma kısmı

Bu tez çalışmasında sinüzoidal akım aktarma kısmı, DA-hat bobini üzerinden geçen akımın dolayısıyla şebekeye aktarılan akımın dalga şeklini ayarlamak amacıyla geleneksel ŞKE yapısına eklenmiştir. Bu kısım iki adet yüksek hızlarda anahtarlama yapabilen kontrollü eleman olan MOSFET(S1 ve S2) ve iki adet kontrolsüz eleman olan diyotlardan(D1 ve D2) oluşmaktadır. Sinüzoidal akım aktarma kısmında kullanılan MOSFET'ler için denetleyici kısmındaki histerezis kontrol algoritması ile üretilen sürme sinyalleri kullanılarak şebekeye sinüs formunda akım aktarma işlevi yerine getirilmektedir.

4.3.3. ŞKE kısmı

Dört adet tam kontrollü tristör köprüsünden oluşmakta olan ŞKE kısmında, tristörler 90°'nin üzerinde istenilen tetikleme açısında iletime sokularak evirici modunda çalışması sağlanır. Burada tristör olarak IXYS-CS35 serisi kullanılmıştır. Tristörün tetiklemesi için Şekil 4.17'de gösterilen tetikleme devresi tasarlanmıştır. Tetikleme devresinde kullanılan MOC3021 optotriyak ile mikrodenetleyici ve tristör arasında yalıtım sağlanmıştır. Tristörlerin tetiklenme için belirlenen tetikleme açısının zamanı SGA devresine göre belirlenmektedir. SGA devresinden gelen sinyaller denetleyiciye donanımsal harici kesme (hardware interrupt) olarak girse bile yine tetikleme zamanlarının bozulma ihtimaline karşı bu sinyaller denetleyici içerisinde yazılımsal (software interrupt) kesme olarak üretilmiştir.



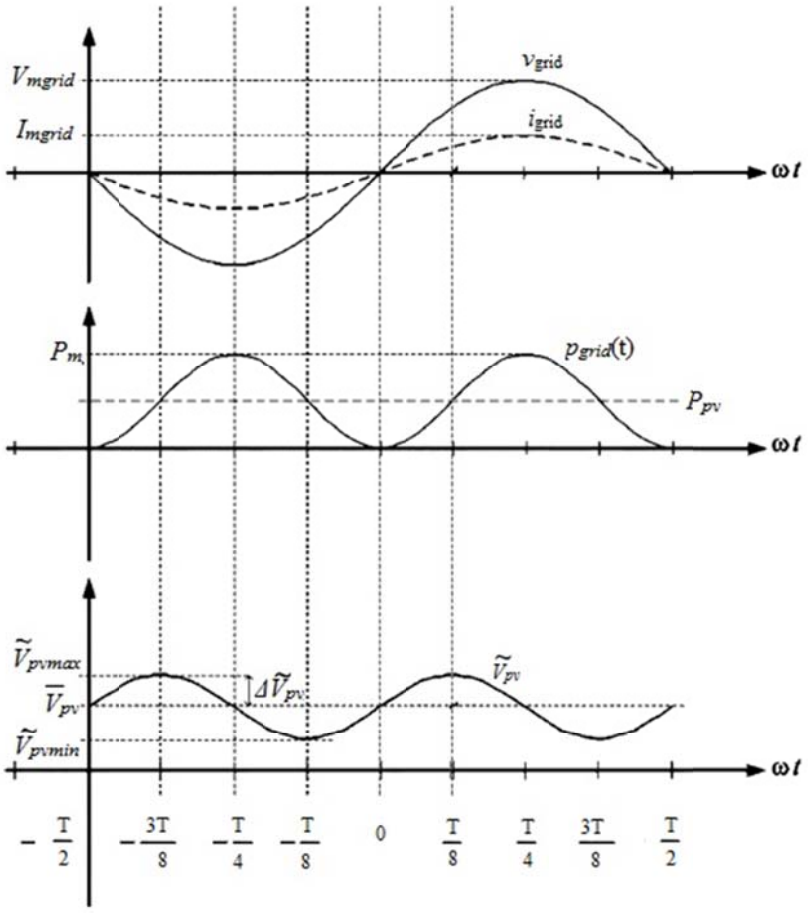
Şekil 4.17. Tristör tetikleme devresi

4.3.4. FV sistem kısmı

FV sistem kısmı seri bağlı paneller, by-pass diyotları, blokaj diyodu ve dekuplaj kondansatöründen (C_{dc}) oluşmaktadır. Bu kısımda 80 W ve 125 W maksimum çıkış gücüne sahip, iki farklı Sharp NE-80EJEA ve SCHUCO S 125-SP panelleri için deneysel ve simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Seri bağlı panellerin sayısı FV dizinin çıkış gerilimi şebekeye tarafındaki gerilimin üzerinde olacak şekilde belirlenmektedir. Eğer yeteri kadar FV panel seri bağlanırsa, şebekeye trafo kullanmadan güç aktarmak mümkün olmaktadır. By-pass diyotları her bir panele paralel olarak bağlanmıştır. Bu diyotlar seri bağlı FV paneller parçalı gölgelenme veya farklı ışınıma maruz kalma durumlarında aktif olmaktadır. Blokaj diyotu seri bağlı panelleri ters akımdan korumak için FV panellerden şebeke yönüne akım geçişine izin verecek şekilde seri bağlanmıştır. C_{dc}, dekuplaj veya DA-hat kondansatörü ise, FV panellerin çıkış gerilim dalgalanmasını azaltmak için kullanılmıştır.

4.4. FV sistemin çıkış gücü ile şebekeye aktarılan güç arasındaki ilişki

Tasarlanan ŞKE devresinde, FV sistemin çıkışında bulunan C_{dc} kondansatörü (Şekil 4.11), şebekeye aktarılan anlık olarak değişen gücü karşılamak amacıyla enerji depolama ara elemanı olarak kullanılmaktadır. Böylece FV sistemden yaklaşık sabit güç çekilmesi sağlanmakta ve anlık olarak değişen güç, FV sistemin çıkışına yansıtılmamaktadır [67]. FV sistemin çıkış gerilimi V_{pv}, şebeke frekansının iki katında dalgalanmakta (100 Hz) ve V_{pvmin} ile V_{pvmax} arasında değişmektedir.



Şekil 4.18. v_{grid}, i_{grid}, V_{pv}, P_{pv} ve p_{grid} arasındaki ilişki

FV çıkış geriliminin dalgalanma genliği ΔV_{pv}, şebekeye aktarılan ortalama güç P_{grid} ve dekuplaj kondansatörünün kapasite (C_{dc}) değerine bağlıdır. FV sistem tarafından üretilen gücün ortalama değeri P_{pv} Denklem (4.5)'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$P_{pv} = V_{pv}.I_{pv} \tag{4.5}$$

Şebekeye aktarılan akım $i_{grid}(t)$, şebeke gerilimiyle $v_{grid}(t)$, α açısı kadar faz farkı dikkate alındığında; şebekeye aktarılan gücün anlık değişimi Denklem (4.6)'deki gibi olmaktadır.

$$\begin{cases} p_{grid}(t) = V_{mgrid}.I_{mgrid}\sin^2\omega t\cos(\alpha) \\ \qquad\quad = V_{grid}.I_{grid}(1-\cos 2\omega t)\cos(\alpha) \end{cases} \tag{4.6}$$

Burada faz farkını temsil eden α, tetikleme açısıyla belirlenmektedir. Denklem (4.6)'da geçen V_{grid} şebeke geriliminin RMS değeri, I_{grid} ise şebekeye aktarılan

akımın RMS değerini ifade etmektedir. V_{mgrid} ve I_{mgrid} sırasıyla şebeke geriliminin ve şebekeye aktarılan akımın tepe değerini göstermektedir.

$$P_{pv} = P_{grid} + P_{losses} \tag{4.7}$$

$$P_{pv} \cong P_{grid} \tag{4.8}$$

Denklem (4.7)'deki ifadeden kayıp güç P_{losses} ihmal edilirse, FV sistemin çıkış gücü Denklem (4.8) ifade edildiği gibi yaklaşık olarak şebekeye aktarılan aktif güce eşit olmaktadır.

Bu sistemde güç dalgalanması, kondansatörün şarj ve deşarjından dolayıdır. Şekil 4.18'den görüleceği üzere C_{dc}, FV çıkış gücü P_{pv}'nin, $p_{grid}(t)$'den büyük olduğu [(–T/8) – (+T/8)] aralığında V_{pvmin} değerinden V_{pvmax} değerine şarj olmaktadır. Bu durumda C_{dc} kondansatörünün gücünün anlık değişimi ($p_c(t)$) Denklem (4.9)'da verildiği gibi olmaktadır [68].

$$p_c(t) = P_{pv} - p_{grid}(t) = P_{grid} - p_{grid}(t) \tag{4.9}$$

Bu denklemde, $P_{grid} = V_{grid} I_{grid} \cos(\alpha)$ ve Denklem (4.6)'da belirtilen $p_{grid}(t)$ yerine yazılırsa C_{dc} kondansatörünün gücünün anlık değişimi Denklem (4.11) ile ifade edilebilmektedir;

$$p_c(t) = V_{grid} I_{grid} \cos 2\omega t \cos(\alpha) = P_{grid} \cos 2\omega t \tag{4.11}$$

C_{dc} kondansatöründe depolanan enerji Denklem (4.12) veya (4.13)'da verildiği gibi hesaplanabilir.

$$\Delta E_c = \int_{-T/8}^{T/8} p_c dt = \int_{-\pi/4}^{\pi/4} P_{grid} \cos 2\omega t dt = \frac{P_{grid}}{\omega} \tag{4.12}$$

$$\Delta E_c = \frac{1}{2} C_{dc} (V_{pv\max}^2 - V_{pv\min}^2) = 2 C_{dc} V_{pv} \Delta V_{pv} \tag{4.13}$$

Denklem (4.12) ve Denklem (4.13) birbirine eşitlendiğinde,

$$\frac{P_{grid}}{\omega} = 2C_{dc}V_{pv}\Delta V_{pv} \tag{4.14}$$

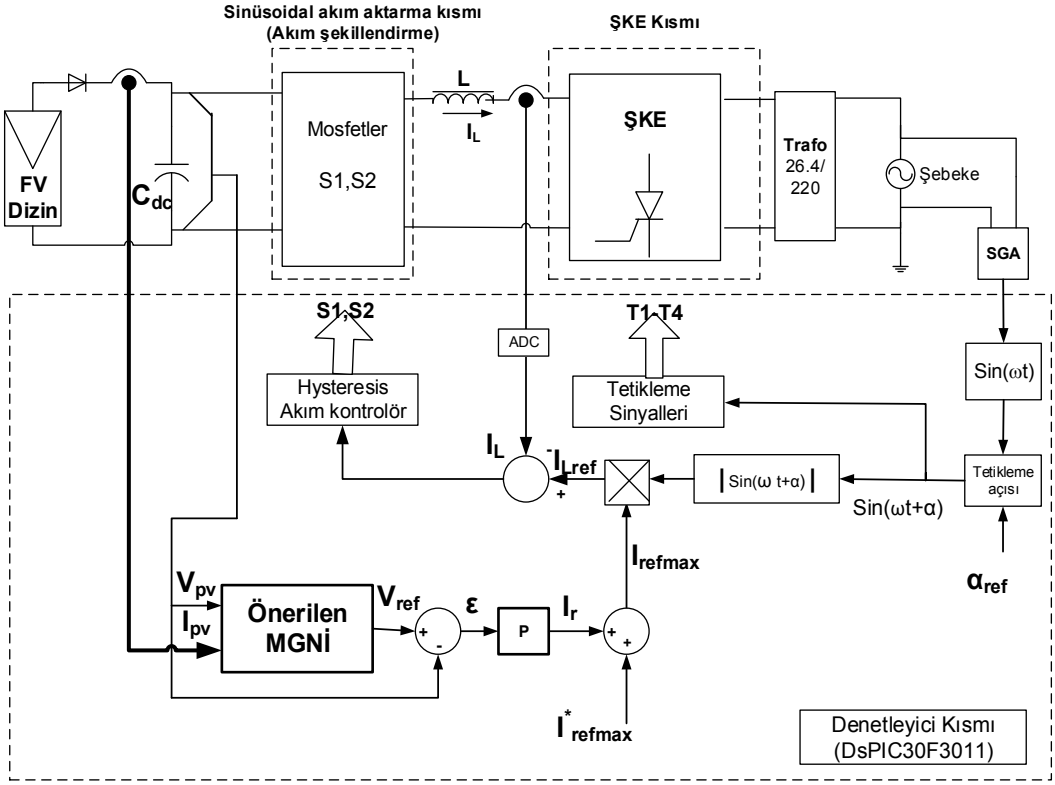
elde edilir. Denklem (4.14)'den C_{dc} yalnız bırakıldığında, kapasite değeri Denklem (4.15) ile hesaplanacaktır.

$$C_{dc} = \frac{P_{grid}}{2V_{pv}\Delta V_{pv}\omega} \tag{4.15}$$

Bu şekilde FV çıkış geriliminin dalgalanmasının genliği değeri ΔV_{pv}, değeri önceden tayin edilmiş uygun bir kondansatör ile sınırlandırılmaktadır. Böylece FV sistemden şebekeye sinüs formunda güç aktarırken, FV sistemin çıkış gerilimim küçük dalgalanmalara izin verilerek, yaklaşık olarak sabit tutulması gerçekleştirilmiş olur.

4.5. Tasarlanan ŞKE'nin Önerilen MGNİ ile Birlikte Çalışması

Tasarlanan ŞKE'nin önerilen MGNİ yöntemi ile birlikte çalışmasını gösteren blok şeması Şekil 4.19'de gösterildiği gibidir.

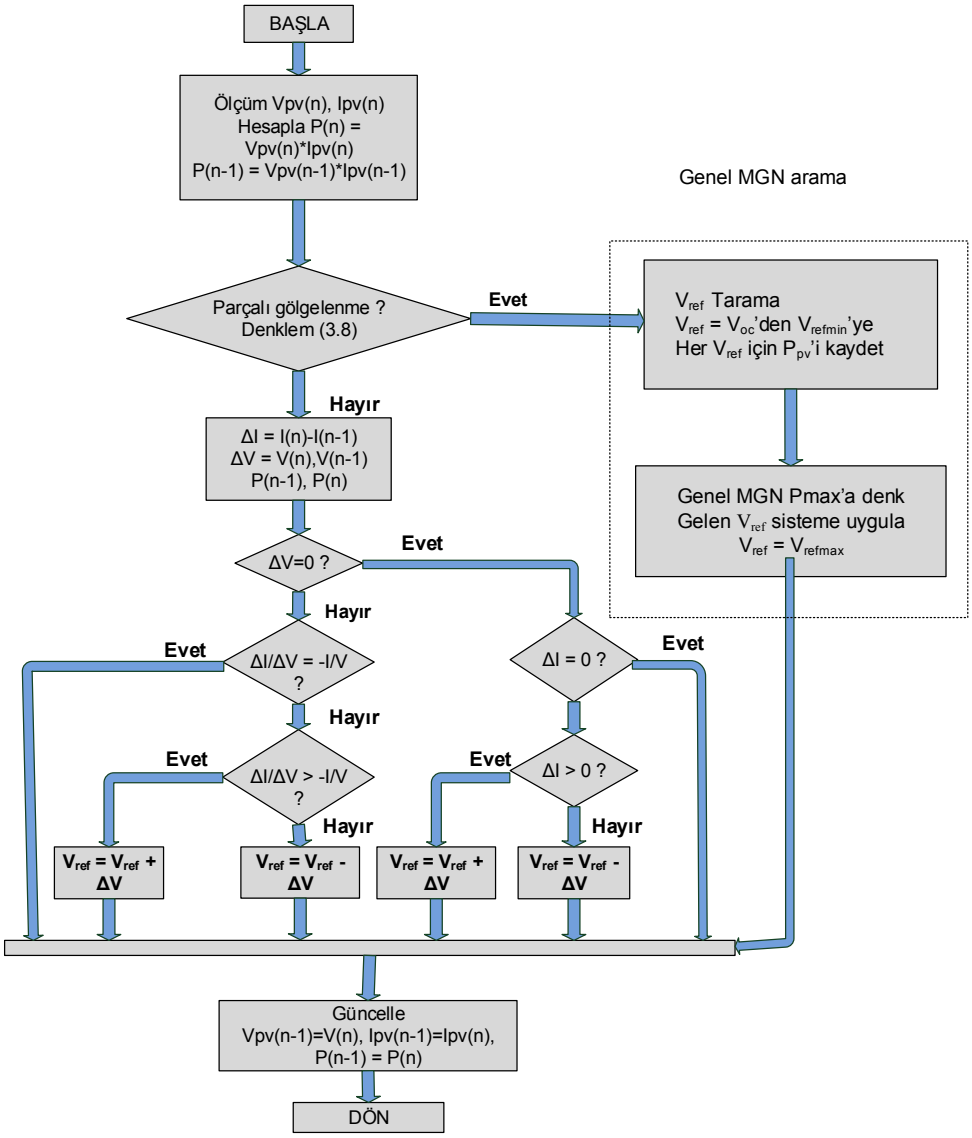


Şekil 4.19. Tasarlanan ŞKE devresinin önerilen MGNİ ile birlikte çalışmasını blok şeması

Burada I_{Lref} referans akımı MGNİ yöntemi tarafından belirlenir. Şekil 4.19'dan anlaşılacağı üzere öncelikle FV dizinin çıkış gerilim ve akımı ölçülmektedir. Bunun için sırasıyla LV 25-P gerilim algılayıcısı ve LA 55-P akım algılayıcısı kullanılmıştır. Ölçülen FV gerilim ve akıma göre önerilen MGNİ referans gerilim (V_{ref}) üretmektedir. Üretilen referans gerilimi, Şekil 4.20'de verilen akış şemasından ayrıntılı olarak betimlenmiştir. V_{ref} referans gerilim sinyali ile ölçülen FV gerilimi karşılaştırılıp hata sinyali elde edilir. Elde edilen hata sinyali P kontrolöründen geçirilerek akım referans sinyaline (I_r) dönüştürülür. Burada üretilen I_r referans akım sinyali, MGNİ yöntemi için oluşturulan programda başlangıç referans sinyali (I^*_{refmax}) ile toplanarak şebekeye aktarılmak istenilen akımın tepe değerini ($I_{Lrefmax}$) belirlemektedir. Burada elde edilen $I_{Lrefmax}$ ile look-up table yöntemiyle program içinde daha önce oluşturulmuş doğrultulmuş birim sinüs sinyali ile çarpılarak DA-hat bobini üzerinden geçmesi istenilen referans akım sinyali (I_{Lref}) elde edilir. Daha önceki bölümde anlatıldığı gibi I_{Lref} referans sinyali ile LA 25-NP akım algılayıcı ile ölçülen bobin üzerinden geçen akım karşılaştırılarak histerezis kontrolör için giriş hata değeri elde edilir.

Şekil 4.20'de tasarlanan ŞKE'de parçalı gölgelenme durumları meydana geldiğinde de maksimum güç noktası izlemesi yapabilmesi için önerilen yöntemin akış şeması verilmektedir. Akış şemasından anlaşılacağı üzere Bölüm 3'de anlatıldığı gibi homojen ışınım değişimlerinde artan iletkenlik MGNİ yöntemiyle maksimum güç takibi yapılmaktadır.

PGD meydana geldiğinde V_{ref} referans sinyali FV dizinini alabileceği maksimum gerilim değerinden minimum gerilim değerine kadar her bir adımda FV çıkış gücü hesaplanır. Akış şemasında belirtildiği üzere maksimum güce denk gelen referans sinyali sisteme uygulanarak PGD meydana geldiğinde FV sistemin gerçek maksimum güç noktasında çalışması sağlanır. Bu noktadan sonra eğer FV sistemin ışınımında bir değişiklik yok ise sistem bu noktada çalışmaya devam eder.



Şekil 4.20. Tasarlanan ŞKE için gerçekleştirilen MGNİ Yönteminin akış şeması

5. TASARLANAN ŞKE VE ÖNERİLEN MGNİ YÖNTEMİNİN SİMÜLASYON SONUÇLARI

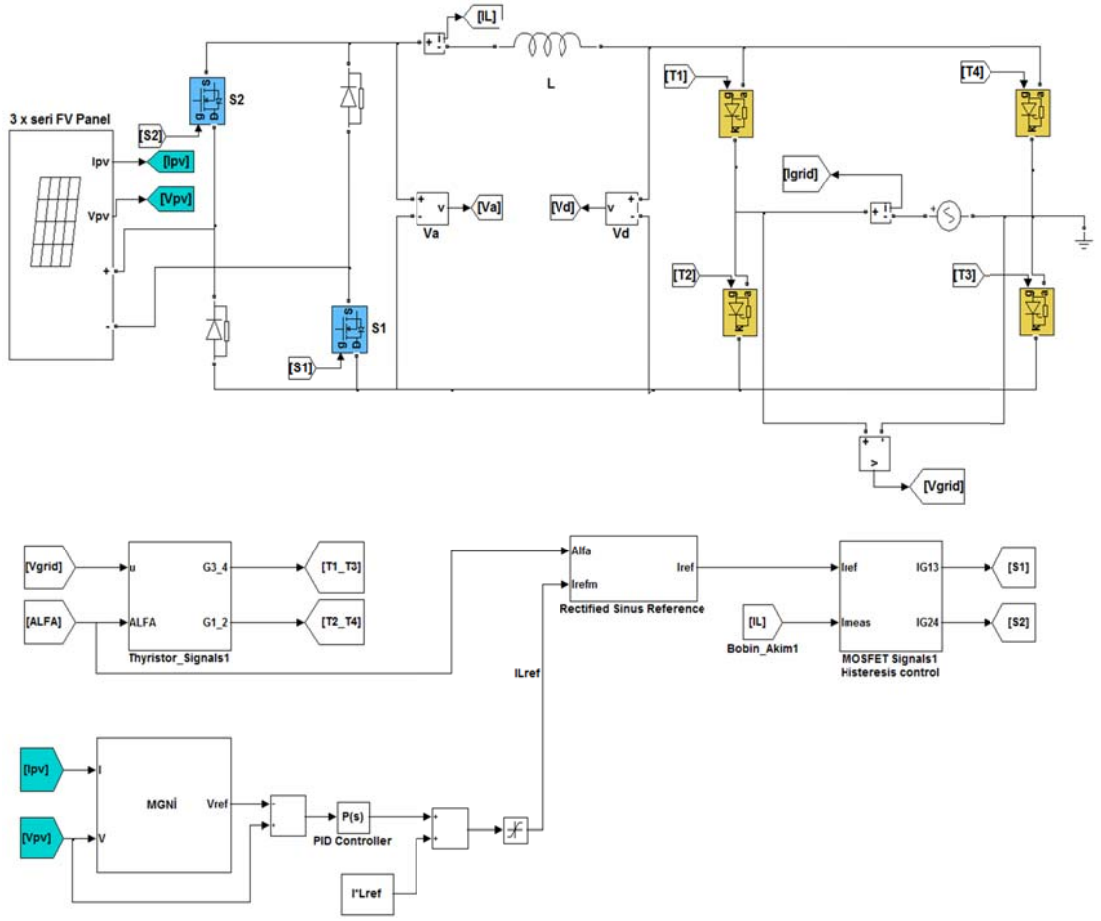
5.1. Giriş

Bu bölümde ilk olarak; şebekeye düşük THB değerine sahip, sinusoidal akım aktarabilecek şekilde tasarlanan şebeke komütasyonlu eviricinin girişinde DA gerilim kaynağı bağlı iken Matlab/Simulink modeli oluşturulmuş, tasarlanan eviricinin farklı referans akımları ve tetikleme açıları/güç faktörleri için simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Simülasyon çalışmaları sonucunda, şebekeye aktarılan akımın ve şebeke geriliminin zamana bağlı değişimleri verilmiş ve THB değerleri ölçülmüştür.

İkinci olarak; tasarlanan ŞKE'nin girişine, üç adet seri bağlı 125W gücünde SCHUCO marka FV panellerden oluşan FV dizin bağlanıp, artan iletkenlik ve önerilen MGNİ yönteminin kontrol bloklarını içeren tüm sistemin Şekil 5.1'de gösterilen Matlab/Simulink modeli oluşturulmuş, elde edilen model ile FV dizinin homojen ışınım değişimleri ve parçalı gölgelenme durumları için simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Simülasyon çalışmaları sonucunda; MGNİ olarak sadece artan iletkenlik yönteminin olduğu ve önerilen MGNİ yöntemi ile elde edilen FV dizinin çıkış akım, gerilim ve gücün zamana bağlı değişimleri verilmiştir. Burada deneysel çalışmalardaki durum temel alınarak şebeke tarafında 26,8/220V dönüştürme oranına sahip transformatör kullanılmıştır.

5.2. Tasarlanan ŞKE Matlab/Simulink Modeli

Şekil 5.1'de tasarlanan ŞKE ve MGNİ birlikte olduğu Matlab/Simulink ortamında oluşturulmuş model gösterilmektedir. Elde edilen model Bölüm 4.4'de anlatılan çalışma prensibine göre hazırlanmıştır.

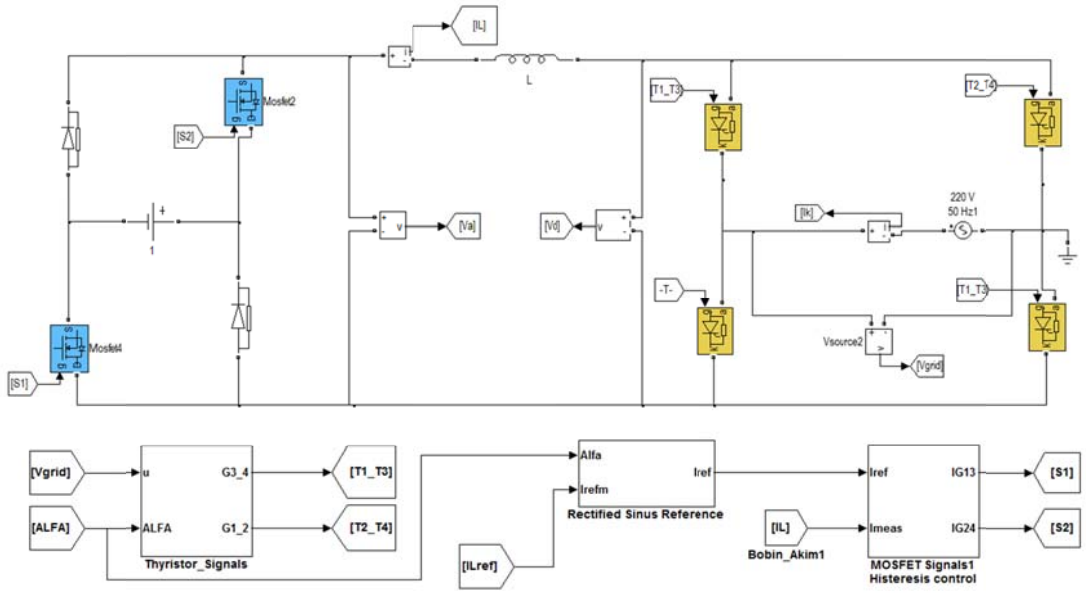


Şekil 5.1. Tasarlanan ŞKE'nin önerilen MGNİ ile birlikte Matlab/Simulink modeli.

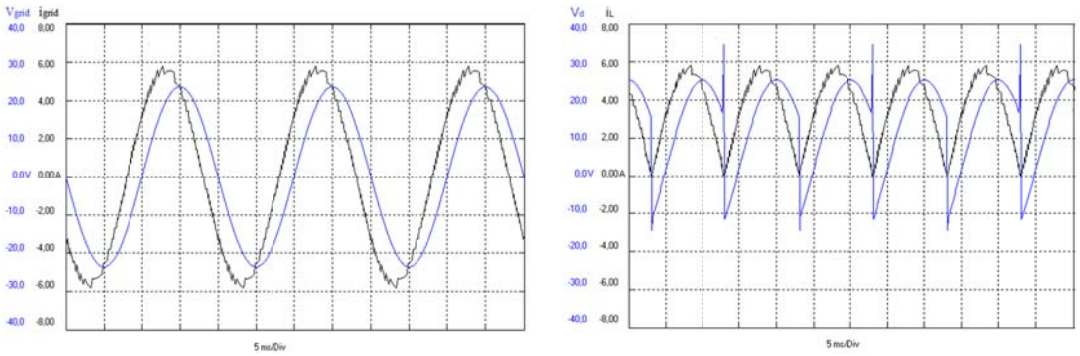
5.3. Simülasyon Çalışmaları

5.3.1. DA Gerilim Kaynağından Şebekeye Güç Aktarmada Tasarlanan ŞKE'nin kullanılması

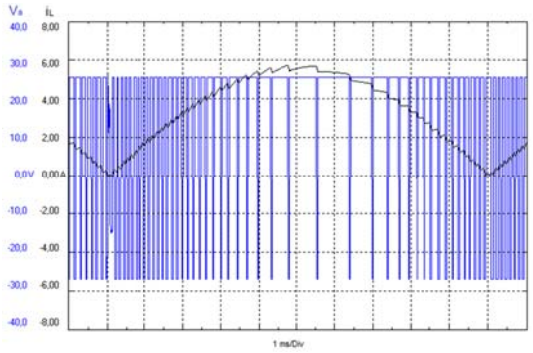
Bu bölümde girişinde DA kaynak kullanılarak şebekeye sinüzoidal akım aktarmak için önerilen ŞKE için MATLAB/Simulink ortamında analizler yapılmıştır. Bu analizlerde iki farklı α tetikleme açısı ve iki farklı I_{ref} akımı için tasarlanan ŞKE devresi kullanılarak simülasyonlar yapılmış ve elde edilen simülasyon sonuçlarına yer verilmiştir. Bu farklı durumlar için şebekeye aktarılan akımın (i_{grid}), şebeke geriliminin (v_{grid}), bobin üzerinden geçen akımın (i_L), şebeke tarafındaki gerilimin (v_d), DA tarafındaki gerilimin (v_a) zamana bağlı değişimleri Şekil 5.3 ve 5.4'de verilmektedir. Analizde kullanılan diğer devre parametreleri; L=5mH, V_{dc} =25,6V, V_{grid} =16,8V ve tolerans bant ΔI=0,2A olarak seçilmiştir.



Şekil 5.2. Tasarlanan ŞKE'nin girişinde DA gerilim kaynağı ile oluşturulmuş Matlab/Simulink modeli

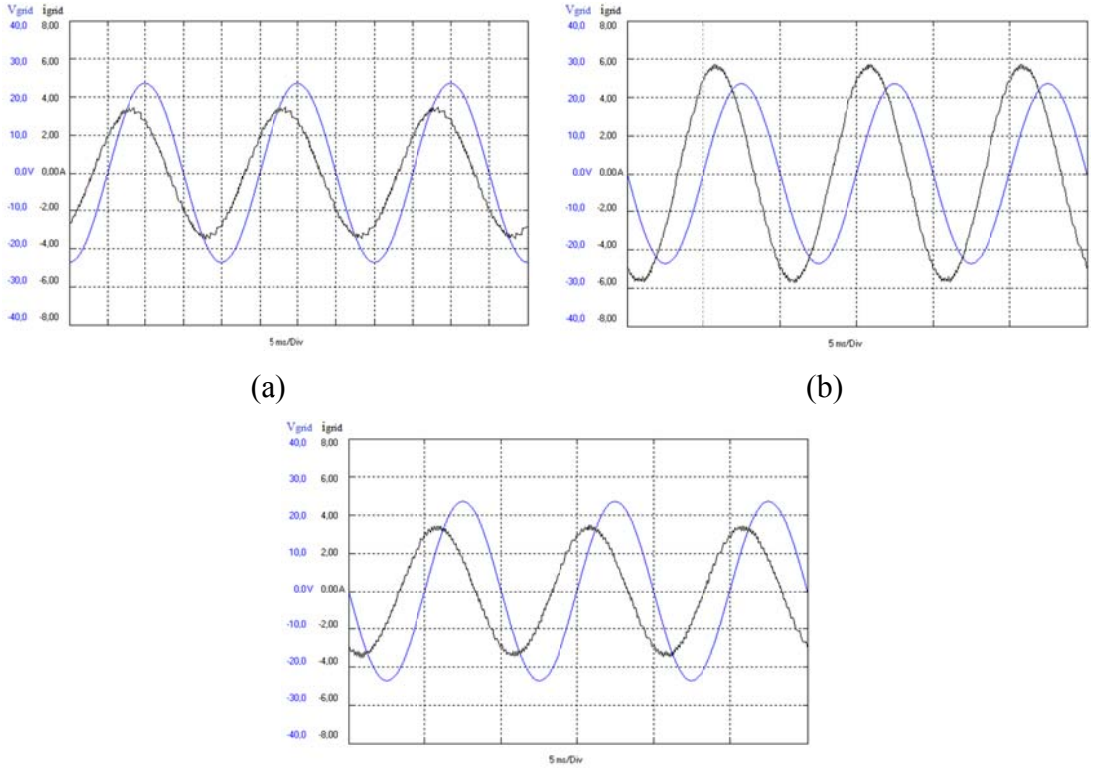


(a) (b)



(c)

Şekil 5.3. $\alpha = 145^{\circ}$, I_{ref} =4 A için; (a) $v_{grid}(t)$ - $i_{grid}(t)$, (b) $v_d(t)$ - $i_L(t)$, (c) $v_a(t)$ - $i_L(t)$



Şekil 5.4. Farklı α ve I_{ref} için $v_{grid}(t)$ve $i_{grid}(t)$; (a) α=145° ve I_{ref} =2,4A (b) α=120° ve I_{ref} =4A (c) α=120° ve I_{ref} =2,4A

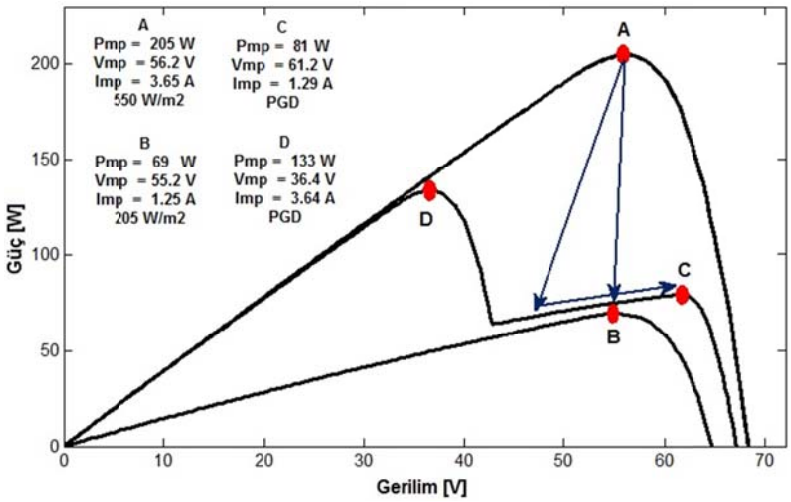
5.3.2. PGD için önerilen MGNİ yöntemiyle FV sistemi genel MGN'de çalıştırma ve elde edilen gücün tasarlanan ŞKE ile şebekeye aktarılması

Tasarlanan ŞKE'de önerilen MNGİ yönteminin performansını analiz etmek için Tablo 5.1'deki gibi FV dizinde panellerin homojen ışınıma ve parçalı gölgelenmeye maruz kaldığı iki farklı durum tasarlanmıştır. Birinci durum, tüm sistem homojen ışınım altındayken ışınımın yine homojen olarak değişmesidir. İkinci durum ise yine tüm FV dizin homojen ışınım altındayken PGD'nin meydana gelmesidir. FV panel olarak Bölüm 3'de kullanılan Tablo 3.1'deki parametrelere sahip SCHUCO marka panelin Matlab/Simulink ortamında hazırlanmış olan FV panel modeli kullanılmıştır. FV dizin için deneysel çalışmalarda olduğu gibi üç adet seri bağlı FV paneller kullanılmıştır.

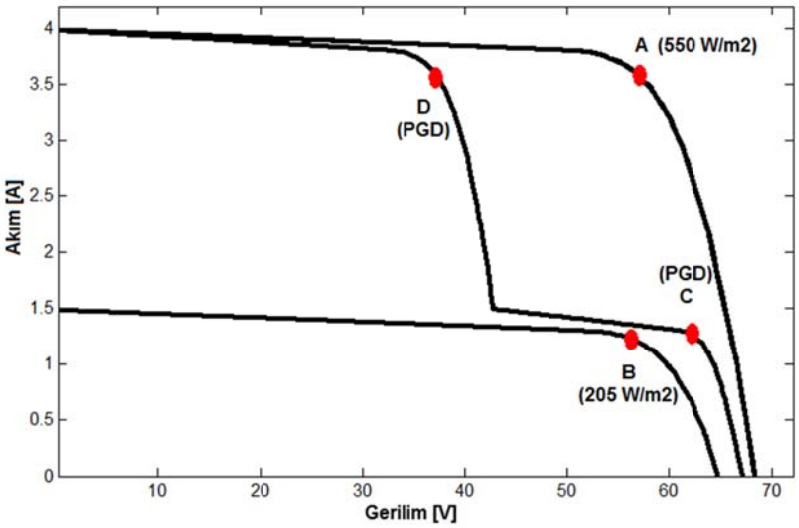
Tablo 5.1. FV dizindeki panellerin ışınım değerleri

Panel Numarası	1. Durum		2. Durum	
	Işınım(W/m^2)	Işınım(W/m^2)	Işınım(W/m^2)	Işınım(W/m^2)
Panel 1	550	205	550	205
Panel 2	550	205	550	550
Panel 3	550	205	550	550

FV dizin 550 W/m^2 homojen ışınım altında çalışırken Tablo 5.1'deki gösterilen iki farklı durum için sistemin güç-gerilim (P-V) ve akım- gerilim (I-V) eğrileri Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da sırasıyla verilmiştir.



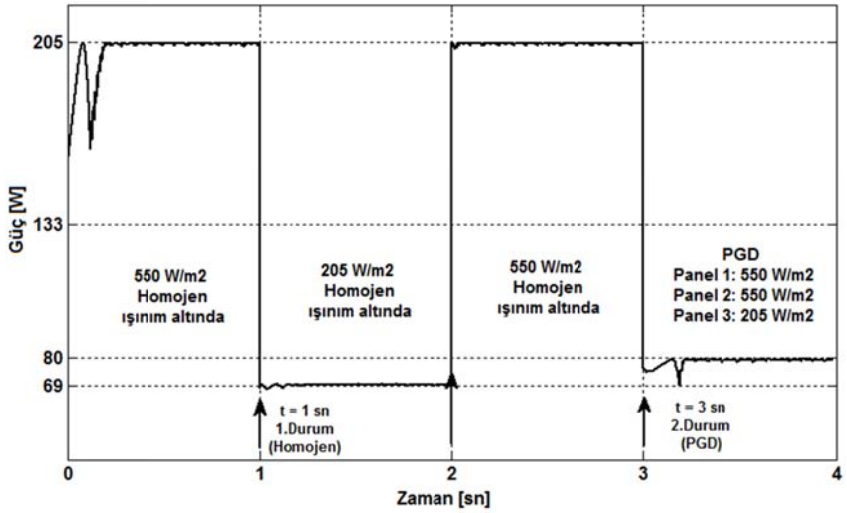
Şekil 5.5. Homojen ışınım değişiminde FV dizinin I-V ve P-V eğrileri



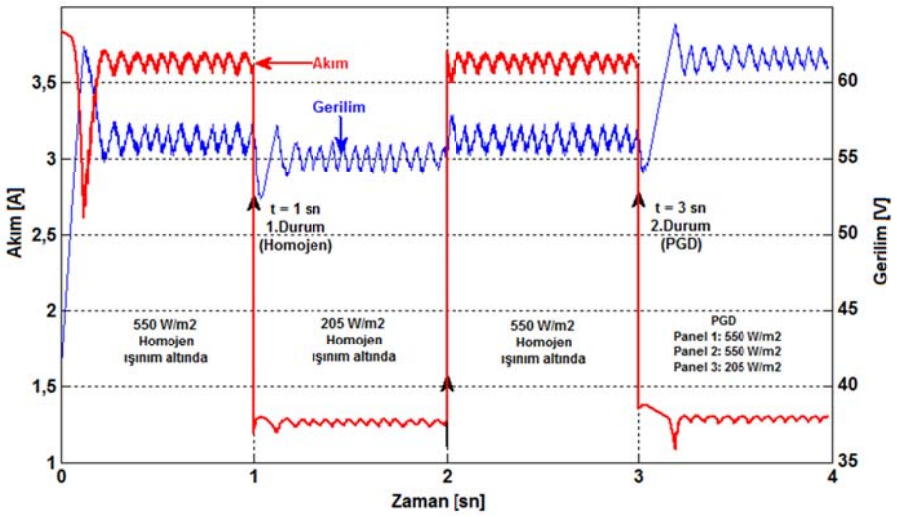
Şekil 5.6. PGD altında FV dizinin I-V ve P-V eğrileri

Tasarlanan sistemde MGNİ yöntemi olarak sadece artan iletkenlik yöntemi kullanıldığında Tablo 5.1'deki iki farklı durum FV dizinin çıkış gücünün zamana bağlı değişimi P(t) Şekil 5.7'de verilmiştir.

Şekil 5.7'deki güç değişimi incelendiğinde; 1.durum için, FV dizinin ışınımı 1.sn.'de homojen olarak 550 W/m^2'den 205 W/m^2'ye düşürülmüştür. Şekil 5.5'deki FV dizinin P-V eğrisinden görüleceği üzere, eğri üzerinde tek MGN olan B noktasında (69 W)'da çalışmaktadır. FV sisteme 2.sn de tekrar 550 W/m2 homojen ışınım uygulanmıştır. 3.sn.'de sisteme Tablo 5.1'de verildiği gibi PGD uygulanmıştır.

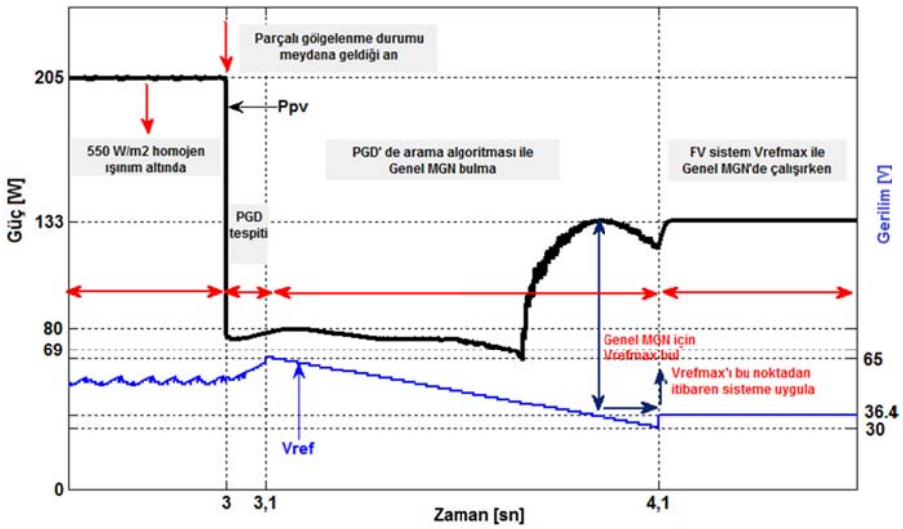


Şekil 5.7. Artan iletkenlik yöntemi ile iki farklı durum için FV dizinin çıkış güç değişimi, P(t)



Şekil 5.8. Artan iletkenlik yöntemi ile iki farklı durum için FV dizinin çıkış akımı değişimi, I(t) ve çıkış gerilimi değişimi, V(t)

Aynı şekilde çıkış akımının I(t) ve geriliminin V(t) zamana bağlı değişimi Şekil 5.8'de verildiği gibi elde edilmiştir. Bu durumda, FV dizin Şekil 5.5'de gösterildiği gibi yerel MGN olan C (81 W) noktasında çalışmaktadır. Başka bir ifade ile MGNİ yerel MGN'ye takılmaktadır. Eğer klasik artan iletkenlik yöntemi ile maksimum güç noktası izlenirse, sistem genel MGN olan D (133W) noktasına ulaşamaz. Bunun sonucunda bu sistem için 52 W güç kaybı söz konusu olmaktadır.



Şekil 5.9. Önerilen MGNİ ile PGD için FV dizinin çıkış güç değişimi, P(t)

Önerilen MGNİ yöntemi ile oluşan PGD tespit edildikten sonra, referans gerilim açık devre gerilime yakın bir değerden minimum gerilim arasında değiştirilerek genel MGN bulunmakta ve bu noktadaki güce denk gelen referans gerilim V_{refmax} bulunmaktadır. Böylelikle FV dizinin çalışma noktası genel MGN olan D (133 W) noktasına götürülmektedir. Önerilen MGNİ yöntemi sisteme uygulandığında elde edilen FV dizinin çıkış güç değişimi eğrisi Şekil 5.9'da verildiği olmaktadır. Burada PGD meydana geldiği Bölüm 3'de verilen Denklem (3.8) ile tespit edilmektedir.

6. TASARLANAN ŞKE VE ÖNERİLEN MGNİ YÖNTEMİNİN DENEYSEL SONUÇLARI

6.1. Giriş

Bu bölümde ilk olarak; şebekeye THB değerine sahip, sinusoidal akım aktarabilecek şekilde tasarlanan şebeke komütasyonlu eviricinin girişinde DA gerilim kaynağı bağlı iken farklı referans akımları ve tetikleme açıları/güç faktörleri için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda elde edilen şebekeye aktarılan akımın şebeke gerilimleri ile birlikte zamana bağlı değişimleri verilmiş ve THB değerleri ölçülmüştür. Burada algılayıcı olarak sadece DA-hat bobini üzerindeki akımı ölçmek için LA 25-NP akım algılayıcısı kullanılmıştır. Şebeke tarafında kullanılan trafo olarak 16,8/220 V ve 150 VA değerlerine sahiptir.

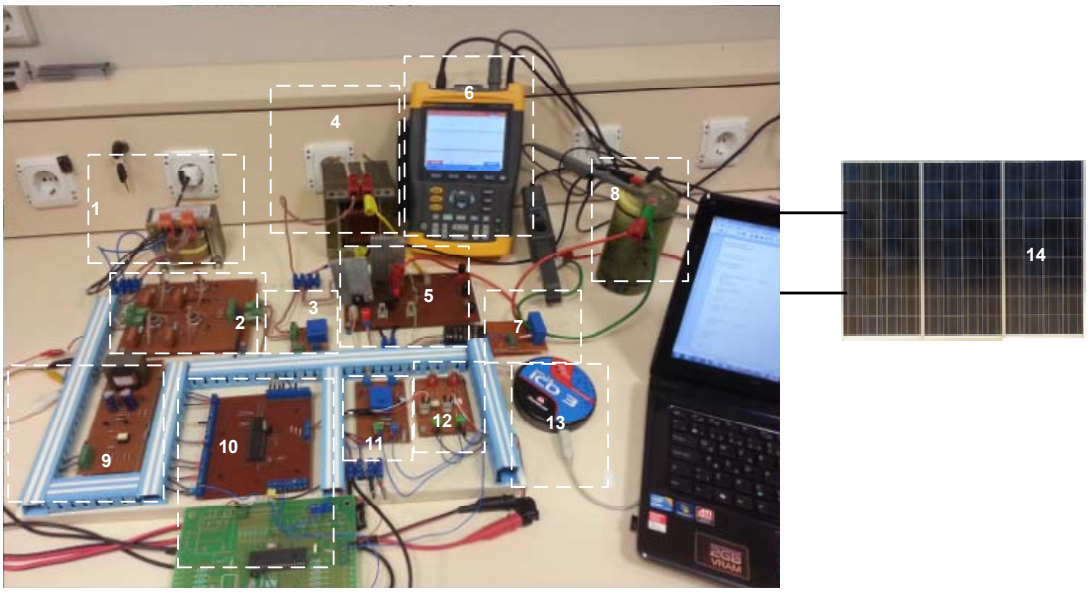
İkinci olarak; tasarlanan ŞKE'nin girişine iki adet 80W gücünde SHARP marka FV panel bağlanıp sabit gerilim MNGİ yöntemi gerçekleştirilerek farklı ışınımlar için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen FV dizinin çıkış akım ve gerilimin zamana bağlı değişimleri ile şebekeye aktarılan akımın ve gerilimin zamana bağlı değişimleri verilmiş ve THB ölçülmüştür. Ayrıca farklı ışınımlar için FV dizinin I-V ve P-V karakteristikleri tasarlanan eviricinin vasıtasıyla elde edilmiş ve maksimum güç noktasındaki akım, gerilim ve gücü ile şebekeye aktarılan güç tablo olarak verilmiştir. Sabit gerilim MGNİ yöntemini gerçekleştirmek için FV dizin çıkış gerilimini ölçmek gerekmektedir. Bu yüzden burada fazladan LV 25-P gerilim algılayıcısı kullanılmıştır.

Üçüncü olarak; tasarlanan ŞKE'nin girişine üç adet 125W gücünde SCHUCO marka FV panel bağlanıp artan iletkenlik MGNİ yöntemi ile homojen ışınım değişimleri ve parçalı gölgelenme durumları için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Sonrasında önerilen PGD için önerilen MGNİ yöntemi ile artan iletkenlik yöntemindeki aynı ışınım değişimleri ve PGD için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Burada artan iletkenlik ve önerilen MGNİ yöntemlerini gerçekleştirmek için FV dizin çıkış gerilim

ve akımını ölçmek gerekmektedir. Bu yüzden burada sabit gerilim yöntemindeki donanıma ek olarak LA 55-P akım algılayıcısı kullanılmıştır. Buradaki deneysel çalışmada şebeke tarafında 26,8/220 V dönüştürme oranına sahip trafo kullanılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen FV dizinin çıkış akım ve geriliminin zamana bağlı değişimleri verilmiştir.

6.2. Tasarlanan Bir Fazlı Şebeke Bağlantılı FV Evirici için Test Düzeneği

Şekil 6.1'de tasarlanan parçalı gölgelenme durumlarında maksimum güç noktası izleyebilen şebeke komütasyonlu eviricinin prototipinin fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 6.1. Tasarlanan ŞKE'nin prototipi

Tasarlanan evirici temel olarak sinüzoidal akım aktarma, şebeke komütasyonlu evirici ve denetleyici kısmından oluşmaktadır. Şekil 6.1'de tasarlanan ŞKE prototipi birimleri; (1) Transformatör, (2) ŞKE kısmı ve Tristör tetikleme devresi (MOC3021), (3) LA-25NP ve Akım Algılayıcı devresi, (4) DA-hat bobini, (5) Sinüzoidal akım aktarma kısmı, (6) Ossiloskop (Fluke 225 CS), (7) LA-55-P ve FV akım ölçüm devresi, (8) DA-hat kondansatörü, (9) SGA devresi, (10) Denetleyici kısmı, (11) LV-25P ve FV gerilim ölçüm devresi,

(12) MOSFET sürücü devresi, (13) MPLAB ICD3 Debugger Circuit, (14) Seri bağlı FV paneller.

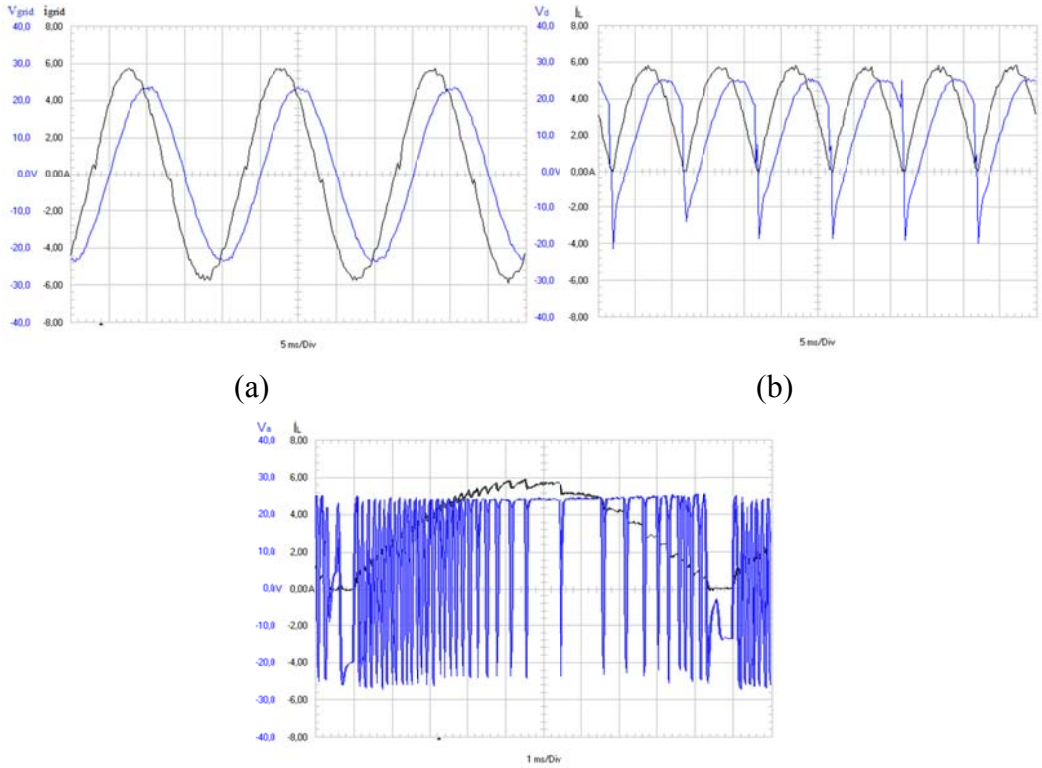
Sinüzoidal akım aktarma kısmı ise ŞKE'nin aktardığı akımı düşük THB değerine sahip sinüs formuna dönüştürerek akım şekillendirici olarak çalışmaktadır. Tasarlanan sistemde DA-link bobini üzerinden geçen akım, FV dizinin çıkış akımı ve gerilimini ölçmek amacıyla iki adet akım algılayıcısı ve bir adet gerilim algılayıcısı kullanılmaktadır. Denetleyici kısım ise SGA devresinden gelen sıfır geçiş sinyalleri ve istenilen güç faktörüne göre birim referans sinüs sinyali üretir. Denetleyici kısımda MGNİ yöntemini gerçekleştirilmesi için gerekli olan FV dizin çıkış akım ve gerilim bilgisi sırasıyla LA 55-P akım algılayıcısı ve LV 25-P gerilim algılayıcı vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir. Denetleyici kısımda ayrıca MGNİ'den gelen referans gerilime göre elde edilen referans akım ile LA 25-NP akım algılayıcısı ile ölçülen bobin üzerindeki akım karşılaştırılarak histerezis kontrolör işlevi yerine getirilmektedir. Burada üretilen referans sinyaline göre tristörlerin tetikleme ve MOSFETlerin sürme sinyalleri üretilmekte ve sürücü devreleri giriş olarak gönderilmektedir. Gerçekleştirilen test düzeneğinde DsPIC30F3011 mikrodenetleyicisine program yüklemek amacıyla MPLAB program derleyicisi kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda tüm ölçümler Fluke 225-CS ossiloskopu vasıtasıyla alınmıştır.

6.3. Deneysel Çalışmalar

6.3.1. DA gerilim kaynağından şebekeye güç aktarmada tasarlanan ŞKE'nin kullanılması durumundaki deneysel sonuçlar

Bölüm 5.2.1'de simülasyonu yapılmış olan, Şekil 4.11'deki tasarlanan eviricinin girişinde 25,6V'luk DA gerilim kaynağı bağlı iken tasarlanan ŞKE'nin farklı parametreler için deneysel analizleri yapılmıştır. Deneysel analizler sonucunda elde edilen, şebeke tarafına aktarılan aktif güç değişimleri, güç faktörleri ile toplam harmonik bozunumlarının (THB) deneysel sonuçları ile simülasyon sonuçları Tablo 6.1'de özetlenmektedir. Şekil 6.2'de $\alpha = 145^{\circ}$ ve $I_{ref} = 4A$ için; şebekeye aktarılan akım, şebeke gerilimi, Sinüzoidal akım

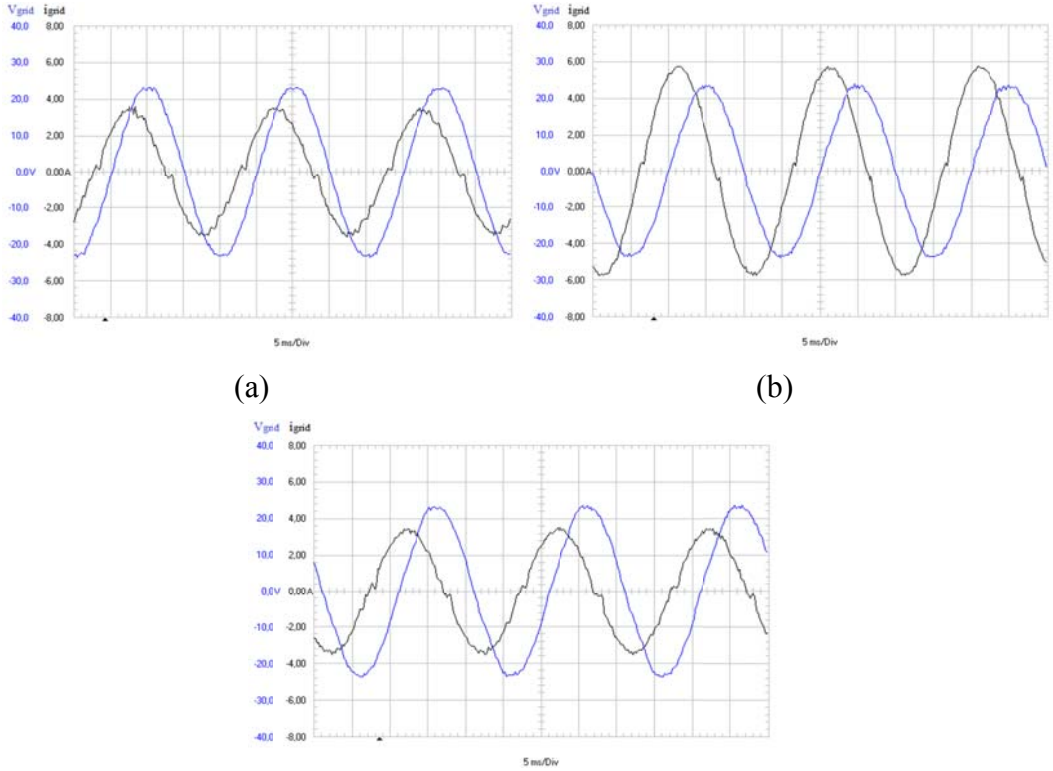
aktarma çıkış gerilimi (V_a), Tristör köprü çıkış gerilimi (V_d) ile DA-hat bobin üzerindeki akımın (I_L) zamana bağlı değişimleri verilmiştir.



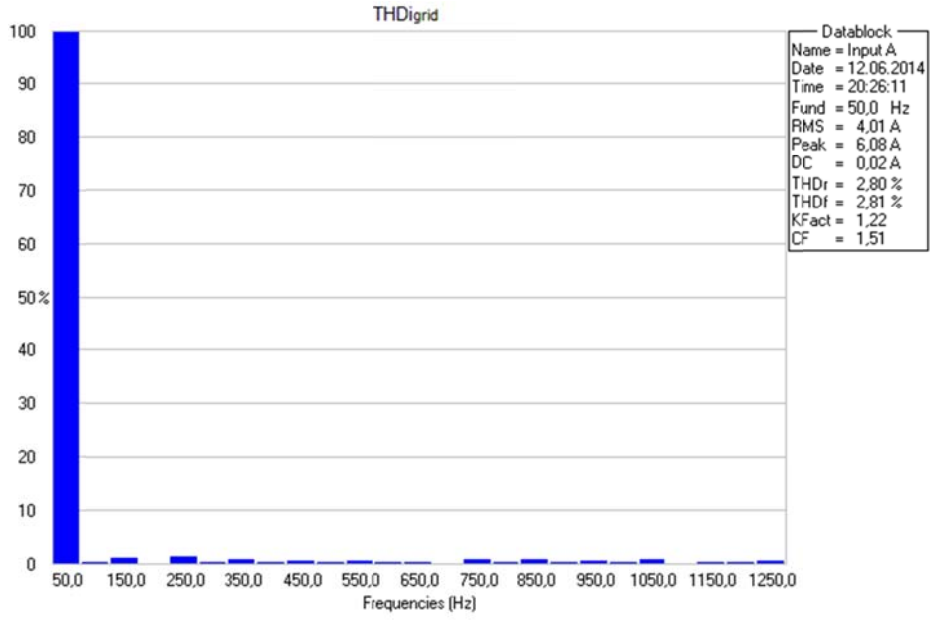
Şekil 6.2. α=145°, I_{ref}=4A için deneysel sonuçlar; (a) $v_{grid}(t)$ ve $i_{grid}(t)$, (b) $v_d(t)$ ve $i_L(t)$, (c) $v_a(t)$ ve $i_L(t)$

Şekil 6.3.a'da α=145° ve I_{ref} =2,4A için; şebekeye aktarılan akım ve şebeke geriliminin zaman bağlı değişimleri verilmiştir. Şekil 6.3.b ve 6.3.c'de α=120° tetikleme açısında sırasıyla I_{ref} =4A ve 2,4A için akım ve şebeke geriliminin zaman bağlı değişimleri verilmiştir.

Şekil 6.4'de α=145° ve I_{ref} = 4A için şebekeye aktarılan akımın THB'si grafiksel olarak verilmiştir.



Şekil 6.3. Farklı tetikleme açısı ve referans akımları için $v_{grid}(t)$ ve $i_{grid}(t)$ dalga şekilleri; (a) α=145° ve I_{ref} =2,4 A, (b) α=120° ve I_{ref} =4A, (c) α=120° ve I_{ref} =2,4 A



Şekil 6.4. α=145° ve I_{ref} =4A için THB_i

Tablo 6.1. Farklı tetikleme açısı ve referans akımları için simülasyon ve deneysel çalışma sonuçlarının karşılaştırılması

	α=120°			
	I_{ref}=2,4A		**I_{ref}=4A**	
	Simülasyon sonuçları	Deneysel sonuçlar	Simülasyon sonuçları	Deneysel sonuçlar
Şebekeye aktarılan akım (**I_{grid}**)	2,4A	2,4A	4A	4A
Şebekeye aktarılan Aktif güç (**P_{grid}**)	19,58W	17,4W	32,97W	30,1W
DA kaynak gücü (**P_{dc}**)	25,8W	27,6	45,68W	47,36
Güç faktörü (**cos φ**)	0,5	0,45	0,5	0,46
Akım Toplam Harmonik Bozunumu (**%THB_i**)	% 4,4	% 4,8	% 2,6	% 2,73
	α=145°			
	I_{ref}=2,4A		**I_{ref}= 4A**	
	Simülasyon sonuçları	Deneysel sonuçlar	Simülasyon sonuçları	Deneysel sonuçlar
Şebekeye aktarılan akım (**I_{grid}**)	2,4A	2,4A	4A	4A
Şebekeye aktarılan Aktif güç (**P_{grid}**)	32,25W	31,7W	54,18W	53,2W
DA kaynak gücü (**P_{dc}**)	38,16W	40,44W	66,9W	68,1W
Güç faktörü (**cos φ**)	0,819	0,78	0,819	0,79
Akım Toplam Harmonik Bozunumu (**%THB_i**)	%4,15W	% 4,9	% 2,5	% 2,80

6.3.2. FV sistemden sabit gerilim MGNİ yöntemiyle elde edilen gücün önerilen ŞKE ile şebekeye aktarılması

Tablo 6.2'de tasarlanan evirici girişinde kullanılan Sharp marka FV panelin üretici katalog bilgileri verilmiştir. Bu bölümde FV dizin için iki adet FV panel seri bağlanmış ve her bir panelde paralel by-pass diyotu vardır. Ayrıca FV dizine seri olarak blokaj diyotu bağlanmıştır.

Tablo 6.2. Kullanılan FV panelin STK altında verilen üretici katalog değerleri

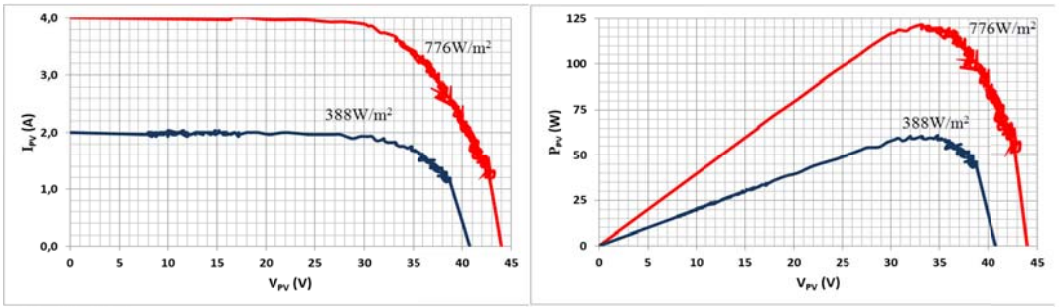
Parametre	**Değer**
Maksimum çıkış gücü (P_{mp})	80W
Kısa devre akımı (I_{sc})	5,15A
Açık devre gerilimi (V_{oc})	21,6V
MGN'deki akım(I_{mp})	17,3V
MGN'deki gerilim (V_{mp})	4,63A
Kv (Açık devre gerilimi sıcaklık değişim katsayısı)	-0,36%/°C
Ki (Kısa devre akımı sıcaklık değişim katsayısı)	0,053%/°C

Tablo 6.2'deki panele ait değerler dikkate alındığında evirici girişinde kullanılan FV dizinin STK altında MGN'deki gerilimi, açık devre gerilim ve maksimum gücü sırsıyla, V_{mpp} =17,3×2=34,6V, V_{oc}=21,6×2=43,2V ve P_{mpp}=2×80=160W olmaktadır.

Tablo 6.3. Işınım değişimi

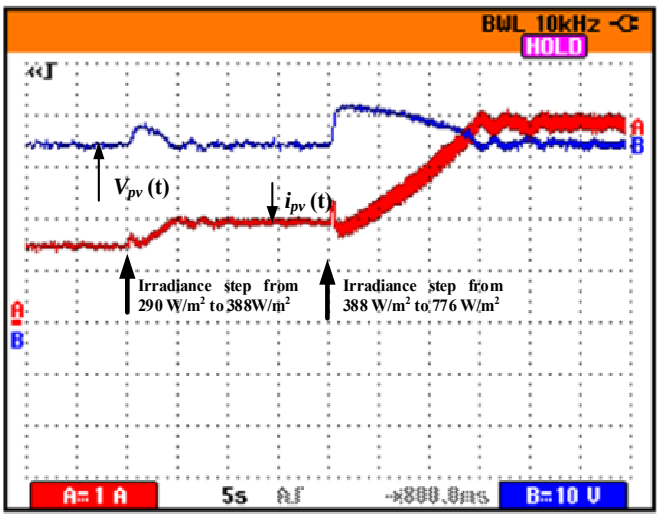
Seviye	**0**	**1**	**2**
Işınım seviyeleri	290W/m^2	388W/m^2	776W/m^2

Tablo 6.3'de verilen ikinci ve üçüncü adımdaki ışınım seviyeleri 388W/m^2 ve 776W/m^2 için I-V ve P-V eğrileri, V_{ref} referans gerilim değeri açık devre geriliminden sıfıra kadar değiştirilerek Şekil 6.5'deki gibi deneysel olarak elde dilmiştir. 388W/m^2



(a) (b)

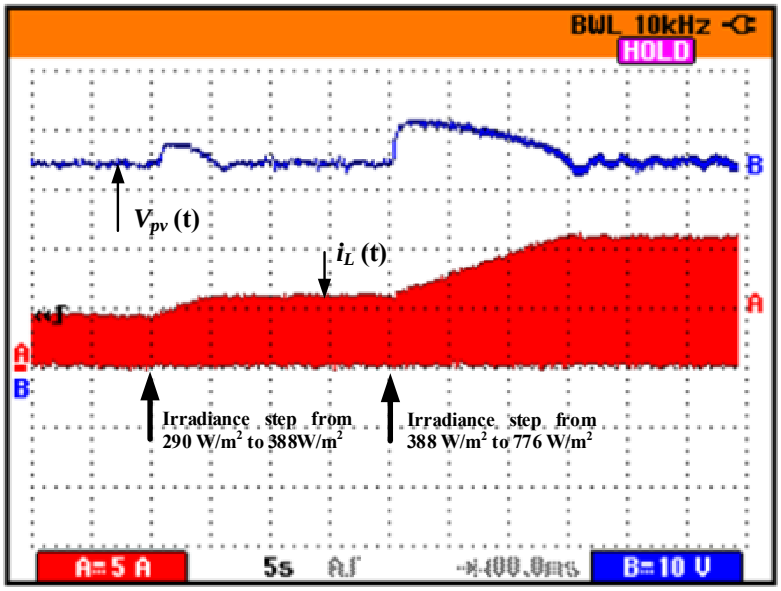
Şekil 6.5. Deneysel çalışmada kullanılan seri bağlı iki FV panelin iki farklı ışınım değeri için (a) I-V ve (b) P-V karakteristiklerinin deneysel olarak elde edilmesi



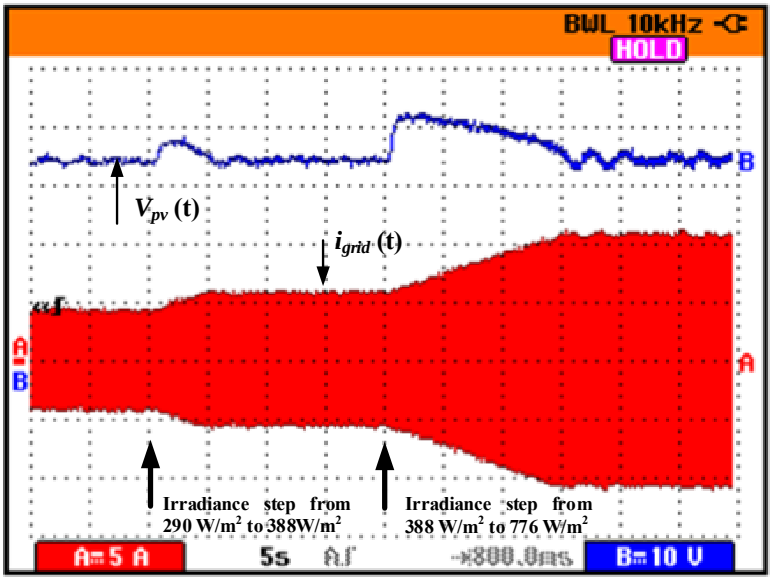
Şekil 6.6. Sabit gerilim MGNİ yöntemi ile FV dizinin çıkış akım ve geriliminin değişimi

Şekil 6.6'da FV dizinin maruz kaldığı ışınım seviyelerinin Tablo 6.3'de verildiği gibi değiştiği durumlar için elde edilen FV çıkış gerilimi ve akımının zamana bağlı değişimleri; $I_{pv}(t)$ ve $V_{pv}(t)$ verilmiştir.

Yukarıdaki aynı durum için elde edilen, FV çıkış gerilimi ve DA-hat bobini üzerinden geçen akımın zamana bağlı değişimleri; $V_{pv}(t)$ ve $i_L(t)$ Şekil 6.7'de verilmiştir. FV çıkış gerilimi ve şebekeye aktarılan akımın zamana bağlı değişimleri ise; $V_{pv}(t)$ ve $i_{grid}(t)$ Şekil 6.8'de verilmiştir.

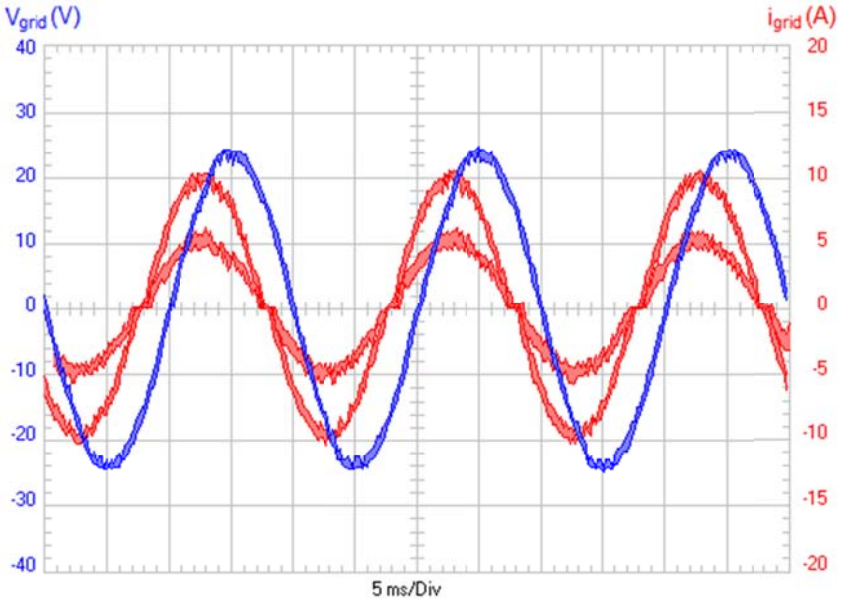


Şekil 6.7. Sabit gerilim MGNİ yöntemi ile FV dizinin çıkış gerilimi ve DA-link üzerindeki akımın değişimi



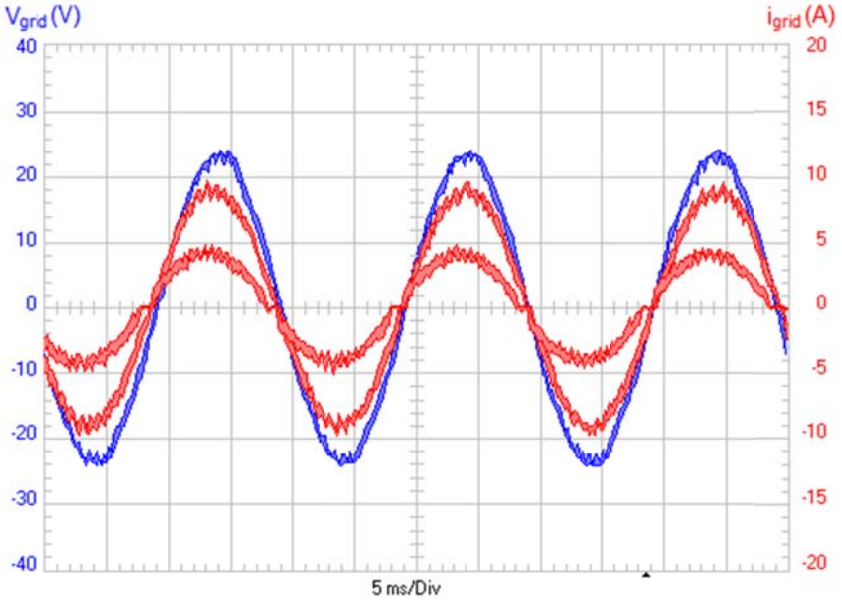
Şekil 6.8. Sabit gerilim MGNİ yöntemi ile FV dizinin çıkış gerilimi ve şebekeye aktarılan akımın değişimi

Şekil 6.9'da α=140° tetikleme açısında, Tablo 6.3'deki iki farklı ışınım seviyesi 388W/m^2 ve 776W/m^2 için, şebekeye aktarılan akım ve şebeke geriliminin zamana bağlı değişimleri; $i_{grid}(t)$ ve $v_{grid}(t)$ verilmiştir.



Şekil 6.9. α=140° tetikleme açısında; 388W/m^2 ve 776W/m^2 ışınımlarında şebekeye aktarılan akımın ve şebeke geriliminin değişimi

Şekil 6.10'da α=174° tetikleme açısında, Tablo 6.3'deki iki farklı ışınım seviyesi 388W/m^2 ve 776W/m^2 için, şebekeye aktarılan akım ve şebeke geriliminin zamana bağlı değişimleri; $i_{grid}(t)$ ve $v_{grid}(t)$ verilmiştir.



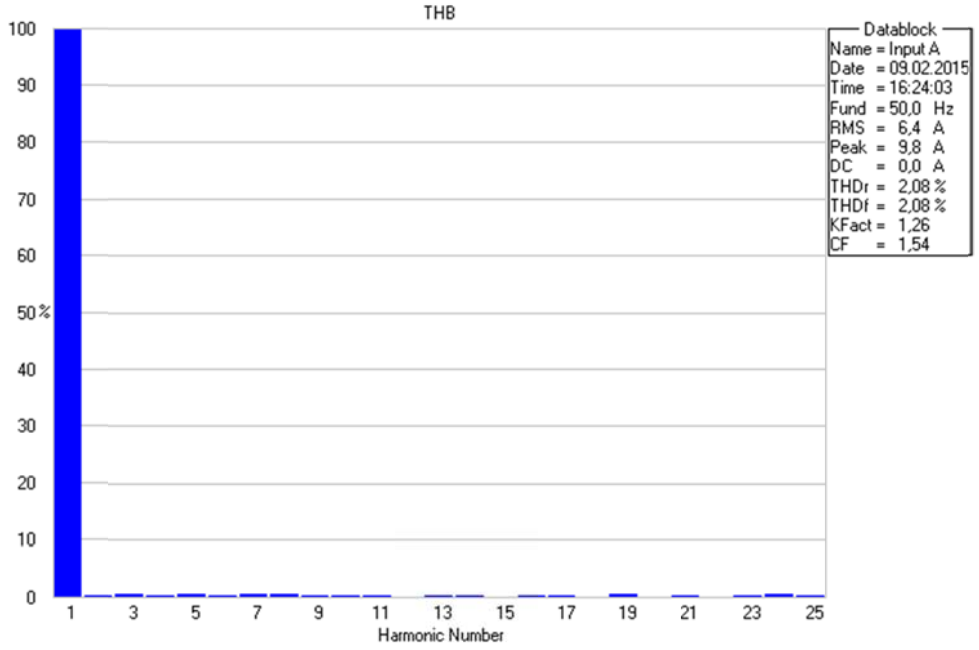
Şekil 6.10. α=174° tetikleme açısında; 388W/m^2 ve 776W/m^2 ışınımlarında şebekeye aktarılan akımın ve şebeke geriliminin değişimi

Tablo 6.4. Sabit gerilim MGNİ yöntemi ile elde edilen deneysel sonuçlar

Parameter	α=140°		α=174°	
Işınım seviyesi (G)	388 W/m^2	776 W/m^2	388W/m^2	776W/m^2
MGN'deki akım (I_{mp})	1,87 A	3,66 A	2,37 A	3,66 A
MGN'deki gerilim(V_{mp})	32,4 V	33,2 V	32,4 V	33,2 V
MGN'deki güç (P_{mp})	60,6 W	121,5 W	60,6 W	121,5 W
FV çıkış akımı (I_{pv})	1,78 A	3,59 A	1,77 A	3,65 A
FV çıkış gerilimi (V_{pv})	33,0 V	33,6 V	32,5 V	33,6 V
FV çıkış gücü	58,7 W	120,6 W	57,5 W	118,0 W
Şebekeye aktarılan güç	46,4 W	91,1 W	48,6 W	104,5 W
Şebekeye aktarılan akım	3,64 A	7,09 A	3,1 A	6,4 A
Güç faktörü	0,75	0,76	0,98	0,99
Şebeke aktarılan akımın THB'si	%6,16	%3,44	%5,14	%2,08

Tablo 6.4'de yukarıda alınan tüm deneysel sonuçlar özetlenmektedir. Bu sonuçlarda anlaşılacağı üzere; tasarlanan ŞKE ile şebekeye aktarılan akımın THB seviyesi, aktarılan akım yükseldikçe uluslararası standart olan %5'in çok altında elde edilmiştir. Ayrıca elde edilen sonuçlardan, tasarlanan ŞKE'nin istenilen güç faktöründe çalışabildiği ve istenildiğinde güç faktörünün yaklaşık 1 olduğu durumda da şebeke aktif güç aktarabildiği görülmektedir.

Şekil 6.11'de α =174° tetikleme açısı ve 776W/m^2 ışınımdaki şebekeye aktarılan akımın THB'si grafiksel olarak verilmiştir.



Şekil 6.11. α=174° ve 776W/m^2 ışınımdaki THB_i

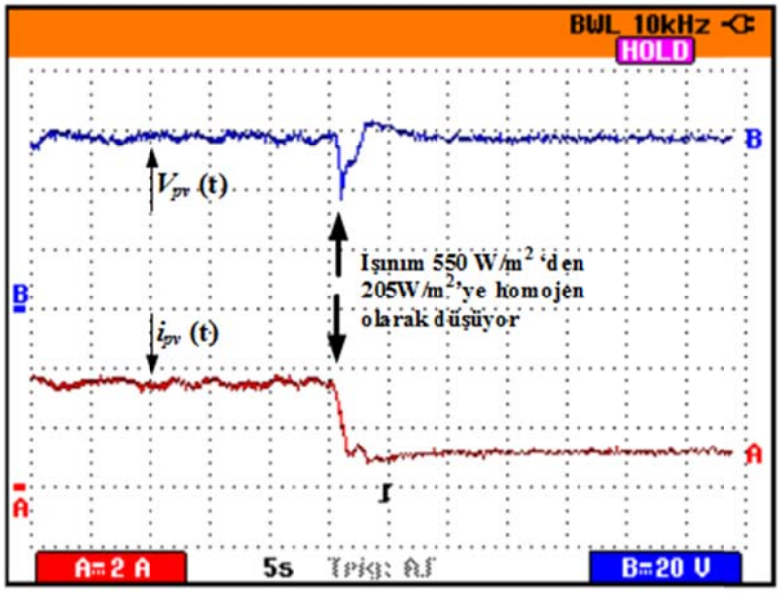
6.3.3. PGD için önerilen MGNİ yöntemiyle FV sistemi genel MGN'de çalıştırma ve elde edilen gücün tasarlanan ŞKE ile şebekeye aktarılması

Bu bölümde önerilen MGNİ yönteminin tasarlanan ŞKE'ye uygulanmasının deneysel çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan sistemin çalışması Şekil 4.19'da verilmiş olan blok şemasında özetlenmiştir. Buradaki FV sistem kısmı için kullanılan SCHUCO marka FV panelin üretici katalog bilgileri Tablo 6.5'de verilmiştir. Gerçekleştirilen deneysel çalışmada FV dizin için üç adet SCHUCO marka FV panel seri olarak bağlanmıştır. Yine sabit gerilim yönteminde olduğu gibi FV dizine seri blokaj diyotu ve her bir panele paralel by-pass diyotları bağlanmıştır. Sistemde, önceki bölümlerden farklı olarak şebeke tarafında bulunan 16,8/220V değerindeki trafo yerine 26,4/220V değerinde trafo kullanılmıştır.

Tablo 6.5. FV dizinde (3 adet seri bağlı SCHUCO S 125-SP) kullanılan FV panelin STK altında verilen üretici katalog değerleri

Parametre	**Değer**
Maksimum çıkış gücü (P_{mp})	125 W
Kısa devre akımı (I_{sc})	7,27 A
Açık devre gerilimi (V_{oc})	24,0 V
MGN'deki akım(I_{mp})	18,8 V
MGN'deki gerilim (V_{mp})	6,65 A
Kv (Açık devre gerilimi sıcaklık değişim katsayısı)	-0,36%/°C
Ki (Kısa devre akımı sıcaklık değişim katsayısı)	0,065%/°C

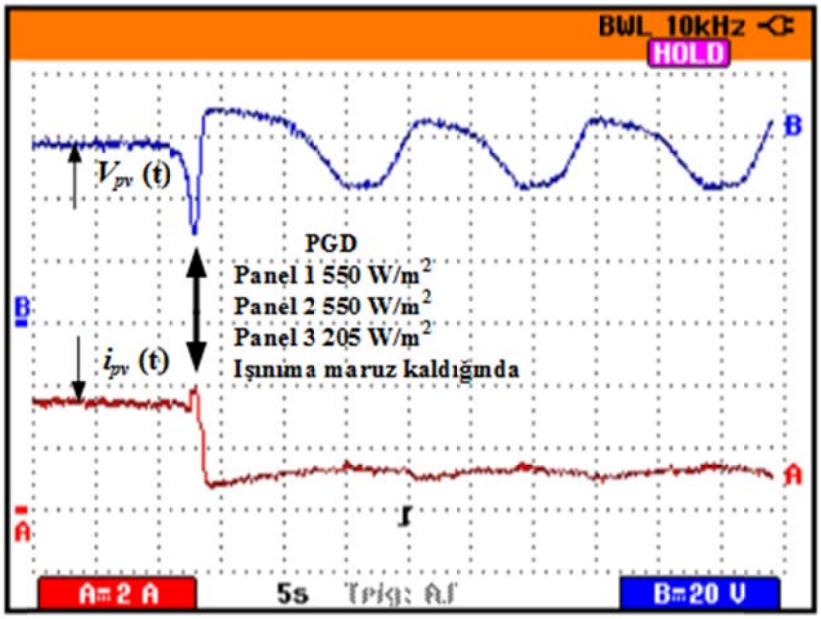
Önerilen MGNİ yönteminin tasarlanan ŞKE ile birlikte çalıştırılması durumunda elde edilen deneysel sonuçlar Şekil 6.12-6.16'da verilmiştir. Şekil 6.12'de Tablo 5.1'de 1. durum olarak verilen, ışınımın 550 W/m^2'den 205 W/m^2'ye homojen olarak düştüğü duruma ait FV dizinin çıkış akım ve gerilimin zamana bağlı değişimleri; $I_{pv}(t)$ ve $V_{pv}(t)$ verilmiştir. Şekil 6.12'de önerilen MGNİ yöntemi ile elde edilen bu değişimler ışınımın homojen olarak değişmesinden dolayı artan iletkenlik MGNİ yöntemi ile aynıdır.



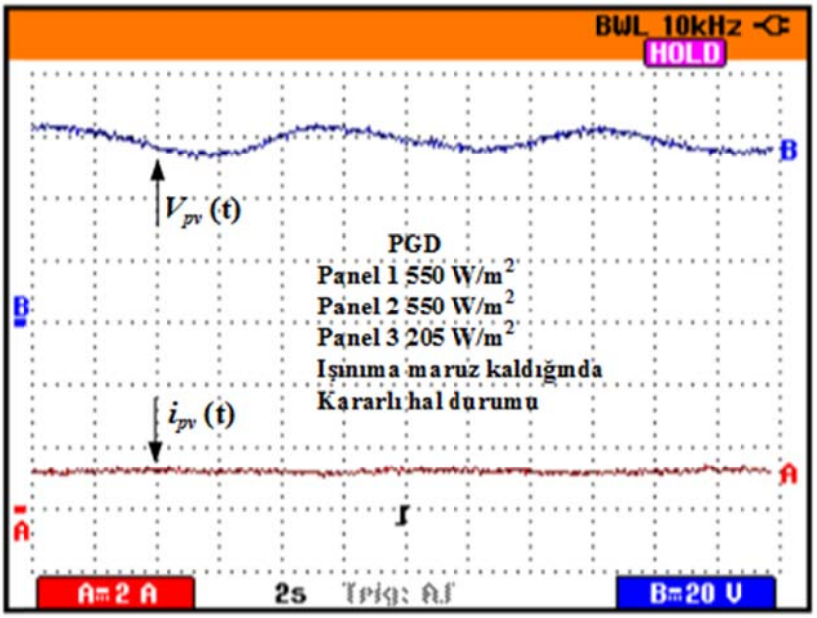
Şekil 6.12. Önerilen MGNİ yöntemi ile 1.durum için FV dizinin çıkış akım ve gerilim değişimi

Şekil 6.13 ve 6.14'de MGNİ olarak sadece artan iletkenlik MGNİ yöntemi kullanıldığında, Tablo 5.1'de 2. durum olarak verilen PGD meydana gelmesi

durumuna ait FV dizinin çıkış akım ve gerilimin zamana bağlı değişimleri; $I_{pv}(t)$ ve $V_{pv}(t)$ verilmiştir. Şekil 6.13'de PGD meydana geldiğinde FV çıkış akım ve geriliminin geçici hali verilmiş olup, Şekil 6.14'de ise kalıcı hali verilmiştir.

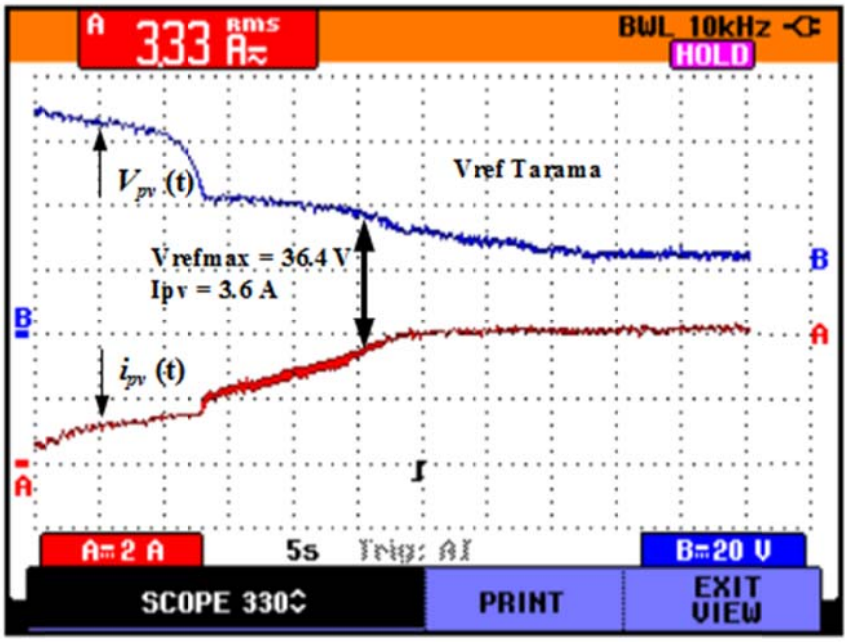


Şekil 6.13. Artan iletkenlik MGNİ yöntemi ile 2.durum için FV dizinin çıkış akım ve gerilim değişimi (geçici hal)

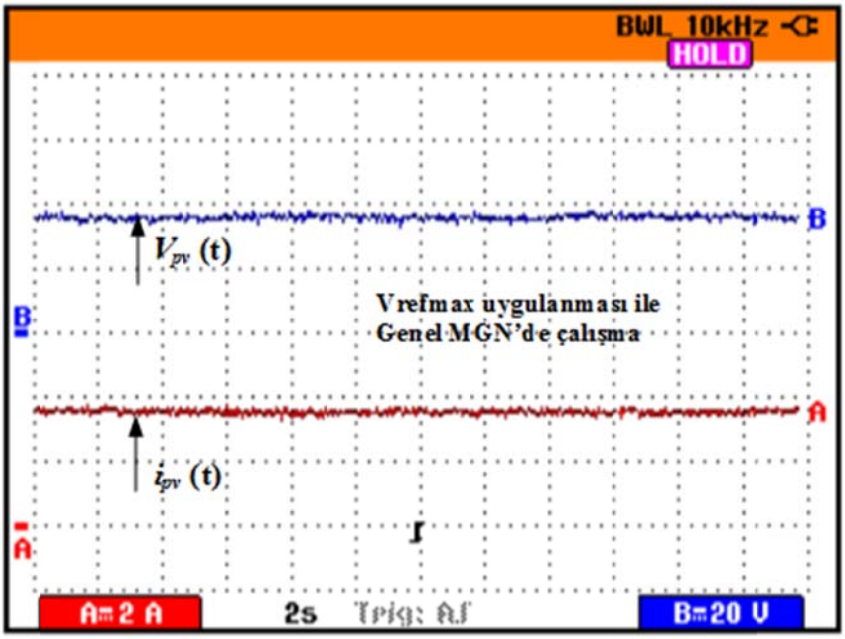


Şekil 6.14. Artan iletkenlik MGNİ yöntemi ile 2.durum için FV dizinin çıkış akım ve gerilim değişimi (kalıcı hal)

Şekil 6.15 ve 6.16'da önerilen MGNİ yöntemi kullanıldığında, PGD meydana gelmesi durumunda sistemin genel MGN'yi bulması için referans gerilimin tarandığı ve sistemin genel MGN'de çalıştığı duruma ait FV dizinin çıkış akım ve gerilimin zamana bağlı değişimleri; $I_{pv}(t)$ ve $V_{pv}(t)$ verilmiştir.



Şekil 6.15. Önerilen MGNİ yöntemi ile 2.durum için, genel MGN'i bulunurken FV dizinin çıkış akım ve gerilim değişimi



Şekil 6.16. Önerilen MGNİ yöntemi ile 2.durum için sistemin genel MGN'de çalışırken FV dizinin çıkış akım ve gerilim değişimi

Tablo 6.6. Önerilen ve Artan iletkenlik MGNİ yöntemlerinin simülasyon ve deneysel sonuçları

Önerilen MGNİ yöntemi ve Artan iletkenlik yöntemi deneysel sonuçları				
	Simülasyon Sonuçları			
	Homojen Işınım		**PGD**	
	550 W/m^2	205 W/m^2	**Artan ilet. MGNİ yöntemi**	**Önerilen MGNİ yöntemi**
FV dizin MGN'deki akım (**I_{mp}**)	3,65 A	1,25 A	1,29 A	3,66 A
FV dizin MGN'deki gerilim (V_{mp})	56,2 V	55,2 V	61,2 V	36,4 V
FV dizin MGN'deki güç (**P_{mp}**)	205 W	69 W	81 W	133 W
FV dizin çıkış akımı (**I_{pv}**)	3,65 A	1,25 A	**1,28 A**	**3,66 A**
FV dizin çıkış gerilimi (V_{pv})	56,2 V	55 V	**62,5 V**	**36,4 V**
FV dizin çıkış gücü (**P_{pv}**)	205 W	69 W	**80 W**	**133 W**
	Deneysel Sonuçlar			
	Homojen Işınım		**PGD**	
	550 W/m^2	205 W/m^2	**Artan ilet. MGNİ yöntemi**	**Önerilen MGNİ yöntemi**
FV dizin çıkış akımı (**I_{pv}**)	3,6 A	1,2 A	**1,23 A**	**3,6 A**
FV dizin çıkış gerilimi (V_{pv})	56,.5 V	56 V	**60 V**	**36 V**
FV dizin çıkış gücü (**P_{pv}**)	203 W	67 W	**74 W**	**130 W**

Tablo 6.6'da önerilen MGNİ yöntemi ile sadece artan iletkenlik yönteminin kullanıldığı durumlara ait simülasyon ve deneysel sonuçlar verilmiştir. Deneysel sonuçlar irdelenirse; PGD meydana geldiğinde FV dizin Şekil 5.5'de gösterilen yerel MGN olan C (74 W) noktasında çalışmakta, MGNİ yerel MGN'ye takılmaktadır. Önerilen MGNİ kullanıldığında ise PGD tespit edildikten sonra, referans gerilim açık devre gerilime yakın bir değerden minimum gerilim arasında değiştirilerek Şekil 5.5'de D (130 W) noktası olarak gösterilen genel MGN bulunmakta ve bu noktadaki güce denk gelen referans gerilim V_{refmax} sisteme uygulanmaktadır. Bu sayede FV dizin genel MGN olan 130W noktasında çalıştırılmış ve böylelikle bu sistem için 56W güç kaybının

önüne geçilmiştir. Burada önerilen MGNİ için gerçekleştirilen deneysel ve simülasyon çalışmaları üç adet seri bağlı FV panel için yapılmıştır. FV dizindeki seri bağlı FV panel sayısı arttığında genel MGN ve yerel MGN arasındaki güç farkı daha fazla olacaktır. Bu durumlarda önerilen MGNİ yöntemi ile artan iletkenlik veya geleneksel MGNİ yöntemleri ile FV dizinin yerel MGN'de çalışmasından kaynaklanan güç kaybı çok daha büyük olacaktır.

Deneysel ve simülasyon çalışmalarından elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir; artan iletkenlik yöntemi ışınımın homojen olarak değiştiği durumlarda etkin olmakta ve FV dizinin MGN'de çalışmasını sağlamaktadır. Fakat parçalı gölgelenme durumu meydana geldiğinde bu yöntem ile FV dizin yerel MGN'de çalışmakta ve bundan dolayı sistemin verimi düşmektedir. Bu doktora çalışmasında önerilen MGNİ yöntemi sayesinde ise, FV dizin ışınımın homojen olarak değiştiği durumlarda artan iletkenlik metodu ile MGN'de çalıştırılırken, PGD meydana geldiğinde bu durum tespit edilerek, FV dizinin gerçek maksimum güç noktasında çalışması sağlanmaktadır. Bu sayede FV panellerden daha etkin bir şekilde faydalanılmaktadır.

7. BULGULAR ve TARTIŞMA

Doktora tez çalışması sırasında tasarlanıp, prototipi imal edilen, parçalı gölgelenme durumlarında MGNİ yapabilen ve şebekeye sinüzoidal akım aktarabilen şebeke komütasyonlu eviricinin simülasyon ve deneysel çalışmaları esnasında elde edilen bulgular maddeler halinde sıralanabilir;

(i) Birinci bölümde oluşturulan devre temelli model R_s ve R_p parametrelerini içerdiğinden PGD için analiz yapmaya imkan sağlamaktadır. İdeal hücre modeli, R_s ve R_p dirençlerini içermediğinden PGD analizi mümkün olmamaktadır.

(ii) İkinci bölümde devre temelli model ile PGD'nin farklı durumları için FV dizinin çıkış karakteristikleri incelenmiştir. Bu model ile ayrıca FV panellerin farklı bağlanma durumlarında çıkış karakteristiklerinin analizini yapmak mümkündür.

(iii) Tezin tümünde kullanılan FV sistem, seri bağlı FV panellerin oluşturduğu FV dizinden meydana gelmektedir. Bunun nedeni, seri bağlı paneller üzerinde PGD oluştuğunda birden fazla MGN oluşmasından kaynaklanmaktadır. FV paneller paralel bağlandıklarında aynı durum oluşmamaktadır.

(iv) PGD için önerilen MGNİ için yapılan simülasyon ve deneysel çalışmalarda, FV dizinde bulunan seri bağlı panellerin her birine paralel by-pass diyotları bağlanmıştır. Aksi halde FV dizin tek bir MGN'ye sahip olmaktadır. Bu durumda FV dizinin çıkış güç karakteristiğini belirleyici olan en düşük ışınıma maruz kalan FV panel olmakta ve buradan by-pass diyotlarının bağlanmasının gerekliliği anlaşılmaktadır.

(v) Tasarlanan ve prototipi yapılan evirici ile girişindeki DA gerilim kaynağından üretilen DA gücü şebekeye AA güç olarak aktarabilmektedir. Bu özelliği sayesinde önerilen evirici FV enerji dışında diğer yenilenebilir enerji kaynaklarından şebekeye güç aktarmada iyi bir alternatif olmaktadır.

(vi) Yapılan simülasyon ve deneysel çalışmalar neticesinde önerilen eviricinin şebekeye aktardığı akımlar için hesaplanan ve ölçülen THB değeri uluslararası standartların altındadır.

(vii) Tasarlanan eviricide şebekeye aktarılan akım kontrol edilebildiği için sadece akım ile MGNİ gerçekleştirme imkânı bulunmaktadır. Böylece ileriki çalışmalarda fazladan akım ve gerilim algılayıcısı kullanmadan MGNİ gerçekleştirilebilir.

(viii) Tasarlanan eviricideki tristörlerin tetikleme açıları ile aynı zamanda güç faktörü ayarlanmış olduğundan, evirici istenilen güç faktöründe çalışma imkânı sağlamaktadır. Ayrıca MGNİ gerçekleştirme için referans kontrol değişkeni olarak tetikleme açısının kullanılması imkânı bulunmaktadır. Fakat bu durumda güç faktörü sürekli değişken olmakta ve dinamik cevap süresi uzun olmaktadır.

(ix) Tasarlanan ŞKE'de şebeke tarafında tristörler kullanıldığından, tristörler için sadece iletime girmesi için tetikleme sinyalleri gönderilmektedir. Tristörler üzerinden geçen akım sıfır olduğunda kendiliğinden kesime girecekleri için ayrıca kesim sinyalleri göndermeye gerek yoktur.

(x) Doktora tez çalışmasında önerilen MGNİ yöntemi Bölüm 3'de tip DA-DA dönüştürücü üzerinde simülasyonu yapılmış ve ayrıca tasarlanan eviricide simülasyonu ve deneysel çalışması gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte önerilen MGNİ yöntemi diğer güç elektroniği dönüştürücü tipleri için uygulanabilir.

8. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Doktora tez çalışmasında analizlerde kullanmak amacıyla oluşturulan FV hücre modeli, devre temelli, kolay anlaşılır ve basit yapıda olduğundan dolayı, matematiksel FV hücre modellerine göre karmaşıklığı azaltılmıştır. FV model, parçalı doğrusal denklemlerden oluştuğu için simülasyonun cevap süresi uzun olmamaktadır. Bu sayede oluşturulan model, FV sistemlerin farklı ışınım, sıcaklık, bağlantı tipi, MGNİ ve PGD vb. durumlarda, FV sistemin çıkış karakteristiklerinin analizlerinde, daha kısa sürede cevap almak için kullanılabilir

Kullanılan FV model, FV hücre eşdeğer devresindeki Rs ve Rp dirençlerini içerdiği için PGD için kullanılabilmektedir. Aksi halde, ideal hücre modeli kullanan modeller ile PGD etkisinin analizi mümkün olmamaktadır.

Elde edilen model devre temelli olduğundan, gerçek güç elekroniği elemanları ile kolaylıkla birleştirilebilir ve üzerinde farklı MGNİ yöntemleri gerçekleştirilerek analiz yapma imkânı sunmaktadır. FV panel modelinin farklı ışınım ve sıcaklıklardaki Akım-Gerilim ve Güç-Gerilim karakteristiği sonuçları ile gerçek panel katalog verileri karşılaştırılmış ve birbirine çok yakın olduğu gösterilmiştir.

Bu doktora çalışmasında değiştir-gözle yöntemine göre üstünlüğü sebebiyle artan iletkenlik yöntemi tercih edilmiş ve bu yöntem üzerinde PGD meydana geldiğinde genel MGN'ye ulaşmak için modifikasyon yapılarak yeni bir MGNİ önerilmiştir.

Önerilen MGNİ yönteminin DA-DA dönüştürücü ile yapılan simülasyon sonuçları incelendiğinde, artan iletkenlik metodunun homojen ışınım altında etkin olduğu MGN'de çalıştığı görülmektedir. Fakat parçalı gölgelenme durumu meydana geldiğinde yerel MGN'de çalıştığından dolayı sistemin verimi düşmektedir. Önerilen MGNİ yöntemi sayesinde, ışınımın homojen olarak değiştiği durumlarda artan iletkenlik metodu ile FV sistemden maksimum güç çekilirken, PGD meydana geldiğinde bu durum tespit edilerek, FV sistemin gerçek maksimum güç noktasında çalışması sağlanmıştır.

Tasarlanan ŞKE'de şebekeye aktarılan akımın THB'sinin küçük olması başarılmasının yanında akım kontrolü de yapılabildiğinden DA-DA dönüştürücü devresi kullanılmadan maksimum güç izleme gerçekleştirme imkânı sağlamıştır. Bu sayede, daha önceki yıllarda, şebekeye aktarılan akımın kontrolsüz ve THB'sinin yüksek olması ile güç faktörünün değişken olması sebebiyle tercih edilmeyen geleneksel ŞKE'nin dezavantajları giderilmiştir.

Geliştirilen ŞKE devresi basit, sağlam ve düşük maliyetli olması nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen gücü şebekeye doğrudan aktarmak için de iyi bir alternatif olacaktır.

Tasarlanan ŞKE'nin analizlerini yapabilmek için oluşturulan prototipte, giriş DA gerilimi düşük seviyededir bu yüzden tasarlanan ŞKE'nin verimi %80 civarındadır. Önerilen sistem, giriş gerilimi şebeke geriliminin üstünde olduğu dizi eviriciler için kullanıldığında trafo kullanmaya gerek kalmayacak aynı zamanda sistemin verimi çok daha yüksek seviyelere çıkacaktır.

İlk olarak tasarlanan şebeke komütasyonlu eviricinin girişinde DA kaynak bağlı iken farklı parametreler için simülasyon ve deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar ile şebekeye aktarılan akımın sinüzoidal olduğu ve akımın THB'sinin uluslararası standartlara uygun olduğu ve ayrıca tasarlanan eviricinin istenilen güç faktöründe çalışabildiği gösterilmiştir.

Tasarlanan ŞKE ile sabit gerilim MGNİ yönteminin birlikte çalıştığı durumdaki deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu kısımda elde edilen deneysel sonuçlar ile tasarlanan eviricinin, şebekeye aktarılan akımın genliği kontrol edilerek maksimum güç noktası izleyebildiği, şebekeye aktarılan akımın THB'sinin düşük olduğu ve istenilen güç faktöründe çalışabildiği ortaya konmuştur. Ayrıca tasarlanan ŞKE istenilen güç faktöründe çalışabilmesinin yanı sıra, güç faktörü yaklaşık 1 olacak şekilde şebekeye güç aktarabildiği deneysel sonuçlarla gösterilmiştir.

Tasarlanan ŞKE'nin artan iletkenlik ve önerilen MGNİ yöntemleriyle birlikte çalıştığı durumdaki simülasyon ve deneysel çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçları ile simülasyon sonuçları karşılaştırılarak tablo olarak verilmiştir. Buradan

tasarlanan ŞKE'nin artan iletkenlik MGNİ yöntemi ile birlikte çalıştığı durumlarda; FV dizinin, homojen ışınım değişimlerinde maksimum güç noktasında çalıştığı fakat PGD meydana geldiğinde yerel MGN'ye (74 W) takıldığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, tasarlanan ŞKE'nin önerilen MGNİ yöntemi ile birlikte çalıştığı durumlarda, FV dizinin homojen ışınım ve PGD durumlarında FV dizinin genel MGN'de (130W) çalıştığı gözlemlenmiştir. Bu sayede, artan iletkenlik MGNİ yöntemi ile FV sistem parçalı gölgelenme durumuna maruz kaldığında, sistemin yerel MGN'de çalışması durumundaki 56 W'lık güç kaybının önüne geçilmiştir. Bu güç kaybı FV dizindeki panel sayısının fazla olduğu durumlarda çok daha büyük olacağından dolayı önerilen yöntemin sisteme kazandırdığı güç çok daha fazla olacaktır.

Tasarlanan eviricide, tristörlerin tetikleme açısı değiştirilerek, güç faktörü ayarlanabildiği için reaktif güç kompanzasyon uygulamaları için kullanılabilir.

Bu tez çalışmasında önerilen MGNİ yöntemi ayrıca diğer güç elektroniği dönüştürücü tipleri için uygulanabilir.

Burada PGD için önerilen MGNİ yönteminde temel arama algoritması olarak diğer geleneksel MGNİ algoritmalarına üstünlüğünden dolayı artan iletkenlik yöntemi seçilmiştir. Fakat bunula birlikte, önerilen yöntem diğer MGNİ algoritmalarına uyarlanabilir

KAYNAKLAR

[1] Issam H. I., Locment F., Sechilariu M., Maximum power tracking for photovoltaic power system Development and experimental comparison of two algorithms, *Renewable Energy,* 2010, **35**(10), 2381-2387.

[2] Walker G. Evaluating MPPT converter topologies using a Matlab PV model, *Journal of Electrical, Electronics & Engineering*, 2001, **21**(4), 49-55.

[3] Benghanem M., Low cost management for photovoltaic system in isolated site with new IV characterization model proposed, *Energy Conversion and Management*, 2009, **50**, 748-755.

[4] Tafticht T., Agbossou K., Doumbia M. L., Chériti A., An improved maximum power point tracking method for photovoltaic systems, *Renewable Energy* 2008, **33**(7), 1508-1516.

[5] Ouaschning V, Hanitsch R., Numerical simulation of photovoltaic generators with shaded cells, *30th Universities Power Engineering Conference*, Greenwich, UK, 583-586, 5-7 September 1995.

[6] Dzimano G., Modeling of Photovoltaic Systems, *MSc., Ohio State University, Ohio,* 2008.

[7] Wang Y.-J. and Hsu P.-C., Analysis of Partially Shaded PV Modules Using Piecewise Linear Parallel Branches Model, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2009, **60**, 783-789.

[8] Villalva M. G., Gazoli J. R. and Filho E. R., Comprehensive Approach to Modeling andSimulation of Photovoltaic Arrays, *IEEE Trans. on Power Elect*., 2009, **24**(5), 1198-1208.

[9] Renaudineau H., Houari A., Martin J.-P., Pierfederici S., Meibody-Tabar F., Gerardin B., A new approach in tracking maximum power under partially shaded conditions with consideration of converter lossesi, *Solar Energy*, 2011, **85**(11), 2580–2588.

[10] Qi C. and Ming Z., Photovoltaic Module Simulink Model for a Stand-alone PV System, *Physics Procedia*, 2012, **24**, 94–100.

[11] Ünlü M., Çamur S., Arifoğlu B., A new maksimum power point tracking method for PV systems under partially shaded conditions, *4th International Conference on Power Engineering*, *Energy and Electrical Drives*, İstanbul, Turkey, 13-17 May 2013

[12] Kawamura H., Naka K., Yonekura N., Yamanaka S., Kawamura H., Ohno H. and Naito K., Simulation of I-V characteristics of a PV module with shaded PV cells, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2003, **75**, 613–621.

[13] Alonso-Garcia M. C., Ruiz J. M. and Chenlo F., Experimental study of mismatch and shading effects in the I-V characteristic of a photovoltaic module, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2006, **90**, 329–340.

[14] Alonso-Garcia M. C., Ruiz J. M. and Herrmann W., Computer simulation of shading effects in photovoltaic arrays, *Renewable Energy*, 2006, **31**(12), 1986-1993.

[15] Wang Y.-J. and Hsu P.-C., Analysis of Partially Shaded PV Modules Using Piecewise Linear Parallel Branches Model, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2009, **60**, 783-789.

[16] Ramaprabha R., Mathur B. L., Impact of Partial Shading on Solar PV Module Containing Series Connected Cells, *International Journal of Recent Trends in Engineering*, 2009, **2**(7), 56-60.

[17] Patel H. and Agarwal V., MATLAB-Based Modeling to Study the Effects of Partial Shading on PV Array Characteristics, *IEEE Trans. Energy Convers*., 2008, **23**(1), 184–190.

[18] Ünlü M., Çamur S., Arifoğlu B., Fotovoltaik Enerji Dönüşüm Sistemlerinde Parçalı Gölgelenme Durum Analizi, *4.Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu (EVK2011)*, Kocaeli, Türkiye, 12-13 Mayıs 2011.

[19] Ünlü M., Çamur S., Arifoğlu B., Fotovoltaik Hücrenin Tek Diyot Eşdeğer Devre Parametrelerinin Çıkarılması ve MATLAB/Simulink Modeli, *5.Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu (EVK2013)*, Kocaeli, Türkiye, 23-24 Mayıs 2013.

[20] Ünlü M., Çamur S., Arifoğlu B., Parçalı Gölgelenme Durumları için Yeni Bir Maksimum Güç Noktası İzleyici Yöntemi, *YEKSEM2013*, Girne, KKTC, 03-04 Ekim 2013.

[21] Esram T. and Chapman P. L., Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques, *IEEE Trans. Energy Convers.*, 2007, **22**(2), 439–449.

[22] Hohm D. P. and Ropp M. E., Comparative study of maximum power point tracking algorithms, *Prog. Photovolt: Res. Appl*., 2003, **11**, 47–62.

[23] Salas V., Olias E., Barrado A., Lazaro A., Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems, *Solar Energy Materials and Solar Cells,* 2006, **90**(11), 1555e78.

[24] Sera D., Teodorescu R., Hantschel J., and Knoll M., Optimized maximum power point tracker for fast changing environmental conditions, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2008, **55**(7), 2629–2637.

[25] Femia N., Petrone G., Spagnuolo G., and Vitelli M., Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method, *IEEE Trans. Power Electron.*, 2005, **20**(4), 963–973.

[26] Hussein K. H., Muta I., Muta T. and Osakada M., Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions, *Proc. Inst. Elect. Eng.*, 1995, **142**(1), 59–64.

[27] Liu F., Duan S., Liu F., Liu B. and Kang Y., A variable step size INC MPPT method for PV systems, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2008, **55**(7), 2622–2628.

[28] Ishaque K., Salam Z., A review of maximum power point tracking techniques of PV system for uniform insolation and partial shading condition, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2012, **19**, 475-488.

[29] Liu F., Kang Y., Zhang Y. and Duan S., Comparison of P&O and Hill Climbing MPPT Methods for Grid-Connected PV Converter, *3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA2008)*, Singapore, 3-5 June 2008.

[30] Safari A. and Mekhilef S., Simulation and Hardware Implementation of Incremental Conductance MPPT With Direct Control Method Using Cuk Converter, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2011, **58**(4), 1154–1161.

[31] Kobayashi K., Takano I. And Sawada Y., A study of a two stagemaximum power point tracking control of a photovoltaic system under partially shaded insolation conditions, *Solar Energy Mater. Solar Cells*, 2006, **90**, 2975–2988.

[32] Patel H. and Agarwal V., Maximum power point tracking scheme for PV systems operating under partially shaded conditions, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, **55**(4), 1689–1698.

[33] Ahmed N. A. and Miyatake M., A novel maximum power point tracking for photovoltaic applications under partially shaded insolation conditions, *Electr. Power Syst. Res.*, 2008, **78**(5), 777–784.

[34] Chen L. R. et al., A Biological Swarm Chasing Algorithm for Tracking the PV Maximum Power Point, *IEEE Trans. Energy Convers.*, 2010, **25**(2), 484-493.

[35] Nguyen T. L. and Low K. S., A global maximum power point tracking scheme employing DIRECT search algorithm for photovoltaic systems, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2010, **57**(10), 3456–3467.

[36] Young-Hyok J., Doo-Yong J., Jun-Gu K., Jae-Hyung K., Tae-Won L., and Chung-Yuen W., A real maximum power point tracking method for

mismatching compensation in PV array under partially shaded conditions, *IEEE Trans. Power Electron.*, 2011, **26**(4), 1001–1009.

[37] Miyatake M. et al., Maximum Power Point Tracking of Multiple Photovoltaic Arrays: A PSO Approach*, IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, 2011, **47**(1), 367-380.

[38] Renaudineau H., Houari A., Martin J.-P., Pierfederici S., Meibody-Tabar F., Gerardin B., A new approach in tracking maximum power under partially shaded conditions with consideration of converter losses, *Solar Energy*, 2011, **85**(11), 2580–2588.

[39] Koutroulis E. and Blaabjerg F., A new technique for tracking the global maximum power point of PV arrays operating under partial-shading conditions, *IEEE J. Photovolt.*, 2012, **2**(2), 184–190.

[40] Houssamo I., Locment F., Sechilariu M., Maximum power tracking for photovoltaic power system: Development and experimental comparison of two algorithms, *Renewable Energy,* 2010, **35**, 2381–87.

[41] Hassaine L., OLias E., Quintero J. and Salas V., Overview of power inverter topologies and control structures for grid connected photovoltaic systems, Renew. Sustain. Energy Rev., 2014, **30**, 796-807.

[42] Margolis R., A Review of PV Inverter Technology Cost and Performance Projections, *National Renewable Energy Laboratory*, Subcontract Report NREL/SR-620-38771, 2006.

[43] Sefa İ., Altun N., Güneş Pili ile Beslenen Şebeke Etkileşimli Eviriciler-Genel Bir Bakış, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 2009, **24**(3), 409-424.

[44] Blaabjerg F., Chen Z. and Kjaer S. B., Power Electronics as Efficient Interface in Dispersed Power Generation Systems, *IEEE Trans. Power Electron.*, 2004, **19**(5), 1184-1194.

[45] Rashid M. H., *Power electronics handbook*, Academic Press, 2nd Ed., London, 2001.

[46] Kjaer S. B., Pederson J. K. and Blaabjerg F., A Review of Single-Phase Grid-Connected Inverters for Photovoltaik Modules, *IEEE Trans. Ind. Appl*., 2005, **41**(5), 1292-1306.

[47] Kramer W., Chakraborty S., Kroposki B., Advanced Power Electronic Interface for Distributed Energy Systems: Part 1: Systems and Topologies, *National Renewable Energy Laboratory*, Technical Report, NREL /TP-581-42672, 2008.

[48] González R., López J., Sanchis P. and Marroyo L., Transformerless Inverter for Single-Phase Photovoltaic Systems, *IEEE Trans. Power Electron*., 2007, **22**(2), 693-698.

[49] Yang B., Li W., Gu Y., Cui W. and He X., Improved Transformerless Inverter With Common-Mode Leakage Current Elimination for a Photovoltaic Grid-Connected Power System, *IEEE Trans. Power Electron*., 2012, **22**(2), 752-762.

[50] Libo W., Zhengming Z. and Jianzheng L., A Single-Stage Three-Phase Grid-Connected Photovoltaic System With Modified MPPT Method and Reactive Power Compensation, *IEEE Trans. Energy Convers.*, 2007, **22**(4), 881-886.

[51] Čorba Z. J. et al., In-grıd Solar to Electrıcal Energy Conversıon System Modeling and Testıng, *Thermal Scıence*, 2012, **16**(1), 159-171.

[52] Kjaer S. B., Pedersen J. K. and Blaabjerg F., Power Inverter Topologies for Photovoltaic Modules – A Review, *Industry Applications Conference, 2002. 37th IAS Annual Meeting*., Pittsburgh, USA, 13-18 Oct. 2002.

[53] Sahan B., Araújo S., Nöding C., Zacharias P., Comparative Evaluation of Three-Phase Current Source Inverters for Grid Interfacing of Distributed and Renewable Energy Systems, *IEEE Trans. Power Electron*., 2011, **26**(8), 2304-2318.

[54] Enslin J. H. R., Heskes P. J. M., Harmonic interaction between a large number of distributed power inverters and the distribution network, *IEEE Trans. Power Electron*., 2004, **19**(6), 1586-1593

[55] IEEE standard for interconnecting distributed resources with electric powersystems, IEEE Std. 1547, 1-207, 2009.

[56] Bodur H., *Güç Elektroniği Temel Analiz ve Sayısal Uygulamalar*, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2010.

[57] Lavanya V., Gounden N. A., Rao P. M., A simple controller using line commutated inverter with maximum power tracking for wind-driven grid-connected permanent magnet synchronous generators, *Power Electronics, Drives and Energy Systems*, New Delhi, India, 12-15 December 2006.

[58] Pilli V. P. B., Bhamu M., Power Electronic Interface for Grid-Connected PV array using SEPIC Converter and Line-Commutated Inverter with MPPT, *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2013, **2**(2), 1-6.

[59] Sick F., Erge T., Photovoltaics in Buildings, IEA Task 16, 1995.

[60] Calais M., Myrzik J., Spooner T., Agelidis V. G., Inverters for single-phase grid connected PV systems an overview, *33rd Annual Power Electronics Specialists Conference*, Cairns, Australia, 23-27 June 2002.

[61] IEC Standard 61727, Photovoltaic (PV) systems characteristic of the utility interface, *International Electrotechnical Commission*, Switzerland, 14 December 2004.

[62] Shanthi T., and Gounden N. A., Power Electronic Interface for Grid-Connected PV array using Boost Converter and Line-Commutated Inverter with MPPT, *Intelligent and Advanced Systems*, Kuala Lumpur, Malaysia, 25-28 November 2007.

[63] Arjun A., Vinod B., Kumaresan N., Jose D. R. B. B., A Power Electronic Controller for PV-tied Grid-connected System with Single Parameter Sensing for Mppt Using Boost Converter and Line-commutated Inverter, *3rd International Conference on Sustainable Energy Technologies*, Kathmandu, Nepal, 24-27 September 2012.

[64] Gounden N. A., Peter S. A., Nallandula H., Krithiga S., Fuzzy logic controller with MPPT using line-commutated inverter for three-phase grid-connected photovoltaic systems, *Renew. Energy*, 2009, **34**, 909–915.

[65] Krithiga S., Gounden N. A., Power electronic configuration for the operation of PV system in combined grid-connected and stand-alone modes, *IET Power Electron*., 2014, **7**(3), 640 -647.

[66] Zhou L., Yang M., Liu Q. and Guo K., New Control Strategy for Three-Phase Grid-Connected LCL Inverters without a Phase-Locked Loop, *Journal of Power Electronics*, 2013, **13**(3), 487-496.

[67] Ho B. M. T., Chung H. S. H., An Integrated with Maximum Power Tracking for Grid-Connected PV Systems, *IEEE Trans. Power Electron*., 2005, **20**(4), 953-962.

[68] Cadaval E. R., Romera E. G., Power injection system for grid-connected photovoltaic generation systems based on two collabrative voltage source inverters, *IEEE Trans. Ind. Electron*., 2009, **56**(11), 4389-4398.

KİŞİSEL YAYIN ve ESERLER

[1] **Ünlü M.**, Çamur S., Beşer E., Arifoğlu B., A Current-Forced Line-Commutated Inverter for Single-Phase Grid-Connected Photovoltaic Generation Systems, *Advances in Electrical and Computer Engineering*, DOI:10.4316/AECE.2015.02011.

[2] **Ünlü M.**, Çamur S., Arifoğlu B., A New Maksimum Power Point Tracking Method for PV Systems under Partially Shaded Conditions, *4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, İstanbul, Turkey, 13-17 May 2013.

[3] **Ünlü M.**, Çamur S., Arifoğlu B., Fotovoltaik Enerji Dönüşüm Sistemlerinde Parçalı Gölgelenme Durum Analizi, *4.Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu (EVK2011),* Kocaeli, Türkiye, 12-13 Mayıs 2011.

[4] **Ünlü M.**, Çamur S., Arifoğlu B., Fotovoltaik Hücrenin Tek Diyot Eşdeğer Devre Parametrelerinin Çıkarılması ve MATLAB/Simulink Modeli, *5.Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu(EVK2013),* Kocaeli, Türkiye, 23-24 Mayıs 2013.

[5] **Ünlü M.**, Çamur S., Arifoğlu B., Parçalı Gölgelenme Durumları için Yeni Bir Maksimum Güç Noktası İzleyici Yöntemi, *YEKSEM2013*, Girne, KKTC, 03-04 Ekim 2013.

[6] **Ünlü M.**, Çamur S., Beşer E., Arifoğlu B., Bir Fazlı Akım Zorlamalı Şebeke Komütasyonlu Evirici, *Eleco 2014 Elektrik – Elektronik – Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu*, Bursa, Türkiye, 27-29 Kasım 2014, 268-272.

ÖZGEÇMİŞ

Murat ÜNLÜ, 1981 yılında Ordu'da doğdu. 1998 yılında Ordu Atatürk Lisesi'nden mezun oldu. Aynı yıl Kocaeli Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümünü kazandı. 2002 yılında lisans öğretimini tamamladı. 2003 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Elektrik Mühendisliği ana bilim dalında yüksek lisans programına başladı. Aynı zamanda Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Araştırma görevlisi olarak çalışmaya başladı. 2006 yılında yüksek lisans öğretimini tamamladı. Aynı yıl Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Elektrik Mühendisliği ana bilim dalında doktora programına başladı. 2013 yılında Kocaeli Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü'ne araştırma görevlisi olarak görevlendirildi. Halen Kocaeli, Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma görevlisi olarak çalışmaya devam etmektedir.