KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

FOTOVOLTAİK SİSTEMLER İÇİN YENİ BİR MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI İZLEME YÖNTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE UYGULANMASI

MUSTAFA ENGİN BAŞOĞLU

KOCAELİ 2017

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

FOTOVOLTAİK SİSTEMLER İÇİN YENİ BİR MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI İZLEME YÖNTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE UYGULANMASI

MUSTAFA ENGİN BAŞOĞLU

Prof.Dr. Bekir ÇAKIR Danışman,	Kocaeli Üniv.	.....
Prof.Dr. Hacı BODUR Jüri Üyesi,	Yıldız Teknik Üniv.	.....
Prof.Dr. Engin ÖZDEMİR Jüri Üyesi,	Kocaeli Üniv.	.....
Yrd.Doç.Dr. Mehmet UÇAR Jüri Üyesi,	Düzce Üniv.	.....
Yrd.Doç.Dr. Mehmet Zeki BİLGİN Jüri Üyesi,	Kocaeli Üniv.	.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 14.07.2017

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Lisans eğitimimin ortalarında aklıma düşen bir hayalin yıllar sonra sonuçlanmasına ramak kala yaşadığım tatlı heyecanı sizlerle paylaşmaktan dolayı çok mutluyum. Üniversite hayatının tüm dinamikleriyle, insanı yeşerten ve üretken kılan önemli bir süreç olarak şahsıma çok önemli meziyetler kattığına olan inancımı ifade etmek istiyorum.

Dört buçuk yıl sonunda birçok bilimsel makale, ulusal/uluslararası bildiri ve projelerle desteklemiş olduğum doktora tezi çalışmamda, yenilenebilir enerji kaynakları içinde, son on yılda kayda değer gelişim gösteren fotovoltaik enerji ve maksimum güç noktası izleme fonksiyonun geliştirilmesi ve iyileştirilmesi konusunda özgün ve başarımı yüksek bir algoritma geliştirmenin ve bunu ulusal ve uluslararası literatüre kazandırmanın heyecanı ile bulunmuş olduğum aşamanın bir son olmayıp, yeni bir başlangıça yelken açış olarak değerlendirdiğimi belirtmek isterim.

Doktora tezi çalışmam, Türkiye Bilmsel ve Teknolojik Araştırmalar Kurumu (TUBİTAK)'ın belirlemiş olduğu öncelikli alanlar kapsamında olduğu için tez önerisi sonrasında yapmış olduğum burs başvurusuna olumlu cevap veren ve beni destekleyen TUBİTAK'a teşekkür ederim. Ayrıca tez çalışmam TUBİTAK'ın 1002 Hızlı Destek Proje kapsamında 116E283 Nolu projesi ile desteklenmiştir.

Yıllardır ırak olan mekanlarımız, yollarımız ve gözlerimiz olsa bile, namütenahi bir sevgi ve saygı ile bağlı olduğum kıymetli annem Hanım BAŞOĞLU'na, hayatını bizlere adamış, ben ve kardeşimin geleceği adına kendi hayatını ikinci plana atmış olan, ilmin önemini ve ilim öğrenmenin çok değerli olduğunu her fırsatta beynime kazıyan babam Turan BAŞOĞLU ve tüm aileme eşsiz ve pahasız destekleri için sonsuz teşekkür ederim. Zorlu doktora eğitimim sürecinde, sabrı, anlayışı ve merhameti sebebiyle kıymetli eşim Esra BAŞOĞLU'na ve kıymetli ailesine teşekkür ederim.

Yaklaşık on yıldır tanıdığım, birçok projede birlikte çalıştığım, lisansüstü eğitime ve araştırma görevlisi olmam yolunda tavsiye ve teşviklerini esirgemeyen, yüksek lisans ve doktora tezi çalışmalarımda, varlığı ve engin tecrübesiyle bana yol ve ilham kaynağı olan Sayın Prof. Dr. Bekir ÇAKIR'a teşekkürlerimi sunuyorum. Ayrıca Kocaeli Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde görev yapan tüm hocalarıma ve mesai arkadaşlarıma samimi yaklaşımları, ilgileri ve kıymetli katkılarından dolayı teşekkür ediyorum.

Haziran – 2017 Mustafa Engin BAŞOĞLU

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
TABLOLAR DİZİNİ viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ix
ÖZET xi
ABSTRACT xii
GİRİŞ 1
1. FOTOVOLTAİK PANEL KARAKTERİSTİKLERİ 8
1.1. Düzenli Işınım Durumu 8
1.2. Parçalı Gölgelenme Durumu 10
2. DA-DA DÖNÜŞTÜRÜCÜLERİN MGNİ BAŞARIMLARI 13
2.1. Düşürücü Dönüştürücülerde MGNİ Analizi 13
2.1.1. İleri yönlü dönüştürücüde MGNİ analizi 16
2.1.2. Tam köprü dönüştürücü MGNİ analizi 18
2.1.3. Düşürücü dönüştürücülerde MGNi başarım karşılaştırılması 19
2.2. Yükseltici Dönüştürücüde MGNİ Analizi 20
2.3. Düşürücü-Yükseltici Dönüştürücülerde MGNİ Analizi 22
2.3.1. Geri dönüşlü (flyback) dönüştürücüde MGNİ analizi 24
2.3.2. SEPIC ve Cúk dönüştürücülerde MGNİ analizi 25
2.3.3. Düşürücü-Yükseltici dönüştürücülerde MGNİ başarım karşılaştırılması 25
2.4. DA-DA Dönüştürücülerde MGNİ Başarımlarının Karşılaştırılması 27
2.4.1. Benzetim-1: Q_{FV}=1000W/m^2, T_H=25ºC, $R_{Yük}$=50Ω 28
2.4.2. Benzetim-2: Q_{FV}=200W/m^2, T_H=25ºC, $R_{Yük}$=50Ω 29
2.4.3. Benzetim-3: Q_{FV}=1000W/m^2, T_H=25ºC, $R_{Yük}$=1Ω 30
2.4.4. Benzetim-4: Q_{FV}=200W/m^2, T_H=25ºC, $R_{Yük}$=5Ω 31
2.5. Genel Değerlendirme 31
2.5.1. Eleman sayısı ve maliyet 31
2.5.2. FV panel akımı 31
2.5.3. Topolojik MGNİ başarımı 32
2.5.4. Güneş ışınımı ve yük direnci 32
3. ÖNERİLEN MGNİ ALGORİTMASI 33
3.1. FV Panelin Parçalı Gölgelenme Durumunun Tespit Edilmesi 34
3.2. Parçalı Gölgelenme Durumunda Kullanılan Algoritma 37
3.2.1. Güç-Gerilim karakteristik eğrilerinin incelenmesi 39
3.2.2. Güç-Gerilim eğrileri üzerindeki MGN bölgelerinin incelenmesi 39
3.2.3. 0,8V_{AD} modeline dayalı akıllı güç taraması 41
3.3. Düzenli Işınım Durumunda Kullanılan Algoritma 44
3.3.1. Yaklaşık kısa devre akımının ölçülmesine dayalı sabit akım yöntemi 44
4. SEPIC DÖNÜŞTÜRÜCÜ ÇALIŞMA PRENSİBİ VE TASARIM AŞAMALARI 48
5. YENİ MGNİ SİSTEMİNİN BENZETİM SONUÇLARI 52
5.1. Benzetim-1: 0,3-0,3-0,8kW/m^2 53
5.2. Benzetim-2: 0,2-0,4-0,6kW/m^2 55
5.3. Benzetim-3: 0,2-0,3-1kW/m^2 57
5.4. Benzetim-4: 0,1-0,5-1kW/m^2 59
5.5. Benzetim-5: 0,3-0,4-0,4kW/m^2 62

5.6. Benzetim-6: Düzenli Işınım Durumları (920W/m^2 ve 420W/m^2) 64
5.7. Benzetim-7: Işınım ve Yük Değişimi Senaryoları 65
6. YENİ MGNİ SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE DENEYSEL SONUÇLAR 69
6.1. SEPIC Dönüştürücü Güç Devresi 69
6.2. Algılama Devreleri, Mikrodenetleyici ve Güç Anahtarı Sürme Devresi 71
6.3. Deneysel Çalışmalar 73
6.3.1. Gölgelenme-1: 0,3-0,3-0,8kW/m^2 74
6.3.2. Gölgelenme-2: 0,2-0,4-0,6kW/m^2 76
6.3.3. Gölgelenme-3: 0,2-0,3-1kW/m^2 77
6.3.4. Gölgelenme-4: 0,1-0,5-1kW/m^2 79
6.3.5. Gölgelenme-5: 0,3-0,4-0,4kW/m^2 81
6.3.6. Düzenli ışınım uygulaması: 420W/m^2 82
6.3.7. Düzenli ışınım uygulaması: 920W/m^2 83
6.4. Önerilen Algoritmanın Gerçek FV Sistemdeki Başarımı 84
6.5. Önerilen Gölgelenme Tespiti Yaklaşımının Değerlendirilmesi 86
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 89
KAYNAKLAR 91
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER 94
ÖZGEÇMİŞ 96

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Tipik bir FV hücrenin tek diyotlu elektriksel eş değer devresi 8
Şekil 1.2. FV panel akım-gerilim karakteristik eğrileri a) Farklı güneş ışınımlarında b) Farklı sıcaklıklarda 10
Şekil 1.3. Tipik bir güç-gerilim karakteristik eğrisi, iki farklı yük direnci için FV panelin verimsiz çalışmasının gösterimi ve MGN gösterimi 11
Şekil 1.4. Seri bağlı üç modülden oluşmuş ve farklı şekillerde gölgelenmiş güneş panelleri ve bir modülün ayrı ayrı gösterimi 11
Şekil 1.5. Akım-gerilim karakteristik eğrileri a) Düzenli Işınım (1kW/m^2) b) FV-B (0,2kW/m^2) c) FV-A ve FV-C (0,2-1-1kW/m^2) 12
Şekil 2.1. MGNİ başarımlarının değerlendirileceği prensip DA-DA dönüştürücü devre şeması 13
Şekil 2.2. Güneş panelinin MGN'deki eşdeğer direnci ile güneş ışınımı değeri arasındaki değişim 14
Şekil 2.3. $R_1<R_2<R_3$ için düşürücü dönüştürücünün MGNİ başarımı 15
Şekil 2.4. $Q_{FV1}>Q_{FV2}>Q_{FV3}$ koşulunda düşürücü dönüştürücü MGNİ başarımı 16
Şekil 2.5. $R_1<R_2<R_3$ için ileri yönlü dönüştürücü MGNİ başarımı 17
Şekil 2.6. $Q_{FV1}>Q_{FV2}>Q_{FV3}$ koşulunda ileri yönlü dönüştürücü MGNİ başarımı 17
Şekil 2.7. $R_1<R_2<R_3$ için tam köprü dönüştürücünün MGNİ başarımı 18
Şekil 2.8. $Q_{FV1}>Q_{FV2}>Q_{FV3}$ koşulunda tam köprü dönüştürücünün MGNİ başarımı 18
Şekil 2.9. Düşürücü dönüştürücüler için sabit ışınım durumunda MGNİ başarım karşılaştırılması 19
Şekil 2.10. $R_1<R_2<R_3$ için yükseltici dönüştürücüde MGNİ başarımı 22
Şekil 2.11. $Q_{FV1}>Q_{FV2}>Q_{FV3}$ için yükseltici dönüştürücü MGNİ başarımı 22
Şekil 2.12. $R_1<R_2<R_3$ için düşürücü-yükseltici dönüştürücüde MGNİ başarımı 23
Şekil 2.13. $Q_{FV1}>Q_{FV2}>Q_{FV3}$ koşulunda düşürücü-yükseltici dönüştürücü MGNİ başarımı 24
Şekil 2.14. $R_1<R_2<R_3$ için geri dönüşlü dönüştürücüde MGNİ başarımı 25
Şekil 2.15. Düşürücü-yükseltici dönüştürücüler için eşit değerli ışınım ve yük direnci durumunda MGNİ başarımlarının grafiksel olarak gösterimi 26
Şekil 2.16. Q_{FV}=1000W/m^2, T_H=25ºC ve $R_{Yük}$=50Ω koşullarında FV panel güç değişimleri (Benzetim-1), Q_{FV}=200W/m^2, T_H=25ºC ve $R_{Yük}$=50Ω koşullarında FV panel güç değişimleri (Benzetim-2) 29
Şekil 2.17. Q_{FV}=1000W/m^2, T_H=25ºC ve $R_{Yük}$=1Ω koşullarında FV panel güç değişimleri (Benzetim-3), Q_{FV}=200W/m^2, T_H=25ºC ve $R_{Yük}$=5Ω koşullarında FV panel güç değişimleri (Benzetim-4) 30
Şekil 3.1. Önerilen MGNİ algoritmasının akış diyagramı 33
Şekil 3.2. Fotovoltaik sistem genel yapısı a) Bağlantı kutusu b) Akıllı Modül (Dönüştürücülü) c) DMGNİ sistemi 34
Şekil 3.3. Parçalı gölgelenme altında FV panel eş değer devresi 35
Şekil 3.4. Seri bağlı 3xFV panel sisteminin 100-500-1000W/m^2 gölgelenme profili için akım-gerilim karakteristik eğrileri 36
Şekil 3.5. FV panel yüzeyine gelen güneş ışınımlarının 0,1kW/m^2, 0,5kW/m^2 ve 1kW/m^2'den 0,2kW/m^2, 0,3kW/m^2 ve 1kW/m^2 gölgelenme koşuluna değişmesi durumunda önerilen gölgelenme metodu ile [28]'de önerilen yöntem ile karşılaştırılması 37
Şekil 3.6. Önerilen MGNİ test sistemi ve SEPIC (V_d: Gerilim bölücü devre) 38
Şekil 3.7. Parçalı gölgelenme tespitinde en büyük ve en küçük ışınım

değerlerinin kullanılması durumunun karşılaştırılması.....38
Şekil 3.8. Eşitlik (3.1)'e göre yüzyirmi farklı gölgelenme profili için güç-gerilim eğrileri.....40
Şekil 3.9. Parçalı gölgelenme algoritmasını açıklamak için örnek güç-gerilim eğrisi.....41
Şekil 3.10. Parçalı gölgelenme algoritmasının açıklanması a) Blok diyagram açıklaması b) Güç ve doluluk oranı değişimine göre açıklama.....43
Şekil 3.11. Parçalı gölgelenme algoritmasının bir güç-gerilim karakteristik eğrisi üzerinden açıklanması.....43
Şekil 3.12. Parçalı gölgelenme halinde kullanılan algoritmanın akış diyagramı.....44
Şekil 3.13. Seçilen FV panel/diziye ait akım-gerilim ve güç-gerilim karakteristik eğrileri.....45
Şekil 3.14. Düzenli ışınım durumunda kullanılan algoritmanın çalışma prensibinin grafik olarak açıklanması.....47
Şekil 3.15. Değiştir & Gözle algoritmasının akış diyagramı.....47
Şekil 4.1. Çift endüktanslı SEPIC dönüştürücü devresi.....48
Şekil 4.2. Q anahtarı iletimde iken, çift endüktanslı SEPIC devresi, oluşan tüm devreler ve akım dalga şekilleri.....49
Şekil 4.3. Anahtarın iletim ve kesim durumları için devredeki bazı elemanların akım ve gerilim değişimleri.....50
Şekil 4.4. Q anahtarı kesimde iken çift endüktanslı SEPIC devresi, oluşan tüm devreler ve akım dalga şekilleri.....51
Şekil 5.1. Gerçekleştirilen benzetim çalışmalarına ait MATLAB/Simulink dosyası ekran görüntüsü.....52
Şekil 5.2. 0,3-0,3-0,8kW/m^2 gölgelenme durumu için önerilen algoritmanın benzetim sonuçları.....54
Şekil 5.3. Benzetim-1 için FV panel güç değişiminin detaylı incelenmesi.....54
Şekil 5.4. 0,3-0,3-0,8kW/m^2 gölgelenme durumu için [20]'deki algoritmanın benzetim sonuçları.....55
Şekil 5.5. 0,3-0,3-0,8kW/m^2 gölgelenme durumu için [15]'deki algoritmanın benzetim sonuçları.....55
Şekil 5.6. 0,2-0,4-0,6kW/m^2 gölgelenme durumu için önerilen algoritmanın benzetim sonuçları.....56
Şekil 5.7. 0,2-0,4-0,6kW/m^2 gölgelenme durumu için [20]'deki algoritma İçin benzetim sonuçları.....57
Şekil 5.8. 0,2-0,4-0,6kW/m^2 gölgelenme durumu için [15]'deki algoritma için benzetim sonuçları.....57
Şekil 5.9. 0,2-0,3-1kW/m^2 gölgelenme durumu için önerilen algoritmanın benzetim sonuçları.....58
Şekil 5.10. Önerilen MGNİ algoritmasının 0,2-0,3-1kW/m^2 gölgelenme durumu için FV panel güç değişimi.....59
Şekil 5.11. 0,2-0,3-1kW/m^2 gölgelenme durumu için [20]'de önerilen MGNİ algoritmasının benzetim sonuçları.....59
Şekil 5.12. 0,2-0,3-1kW/m^2 gölgelenme durumu için [15]'deki algoritmanın benzetim sonuçları.....60
Şekil 5.13. 0,1-0,5-1kW/m^2 gölgelenme durumu için önerilen algoritmanın benzetim sonuçları.....60
Şekil 5.14. 0,1-0,5-1kW/m^2 gölgelenme durumu için [20]'de önerilen MGNİ algoritmasının benzetim sonuçları.....61
Şekil 5.15. 0,1-0,5-1kW/m^2 gölgelenme durumu için [15]'de önerilen MGNİ algoritmasının benzetim sonuçları.....61
Şekil 5.16. 0,3-0,3-0,4kW/m^2 gölgelenme durumu için önerilen algoritmanın MGNİ benzetim sonuçları.....62

Şekil 5.17. 0,3-0,3-0,4kW/m^2 gölgelenme durumu için [20]'de önerilen MGNİ algoritmasının benzetim sonuçları 63
Şekil 5.18. 0,3-0,3-0,4kW/m^2 gölgelenme durumu için [15]'de önerilen MGNİ algoritmasının benzetim sonuçları 63
Şekil 5.19. Benzetim-1, benzetim-2 ve benzetim-3 için önerilen algoritmanın, [15] ve [20]'deki algoritmalar ile panel güç değişimi açısından karşılaştırılması 64
Şekil 5.20. Benzetim-4 ve benzetim-5 için önerilen algoritmanın, [15] ve [20]'deki algoritmalar ile panel güç değişimi açısından karşılaştırılması 64
Şekil 5.21. FV panelin düzenli ışınıma maruz kalması durumunda kullanılan algoritmanın ve değiştir gözle algoritmasının başarımları (Q_{FV}=920W/m^2) 65
Şekil 5.22. FV panelin düzenli ışınıma maruz kalması durumunda kullanılan algoritmanın ve değiştir gözle algoritmasının başarımları (Q_{FV}=420W/m^2) 66
Şekil 5.23. Işınımın 1000W/m^2'den 500W/m^2'ye değişmesi durumunda önerilen algoritma, klasik kısa devre akımı ölçümüne dayalı algoritma ve değiştir gözle algoritmasının MGNİ başarımı 66
Şekil 5.24. Işınım değişimi benzetimi ayrıntılı gösterimi (Şekil 5.23) 67
Şekil 5.25. Yük direncinin 24Ω'dan 12Ω'a değişmesi durumunda, önerilen algoritma klasik kısa devre akımı ölçümüne dayalı algoritma ve değiştir gözle algoritmasının MGNİ başarımı 67
Şekil 5.26. Yük direnci değişimi benzetimi ayrıntılı gösterimi (Şekil 5.25) 68
Şekil 6.1. SEPIC dönüştürücü, algılayıcılar ve MGNİ işleminin temel olarak gösterimi 70
Şekil 6.2. FV modül gerilim ölçme devreleri ve MGNİ algoritması prensip şeması 72
Şekil 6.3. MOSFET kapı sürme devresi 73
Şekil 6.4. Gerçekleştirilen devrenin resmi (1: 5V DA ve 15V DA regülatör devreleri, 2:PIC18F452, 3: Kapı sürme devresi, 4:Giriş kondansatörleri, 5: Akım transdüseri, 6: Kuplajlı endüktans, 7: Çıkış ve kuplajlı kondansatör,8: MOSFET, 9: Diyot 74
Şekil 6.5. Test düzeneği (1: PIC18F452 ve FV simulatör ara yüz programı için kullanılan bilgisiyar, 2: FV simulatör, 3: PIC KIT2, 4: Osiloskop, 5: SEPIC, 6: Akım probu, 7: Direnç yük bankası 74
Şekil 6.6 Gölgelenme-1 için FV panelin akım, gerilim ve güç değişimi a) [20]'de önerilen algoritma b) [15]'de önerilen algoritma c) Önerilen algoritma 76
Şekil 6.7. Gölgelenme-2 için FV panelin akım, gerilim ve güç değişimi a) [20]'de önerilen algoritma b) [15]'de önerilen algoritma c) Önerilen algoritma 77
Şekil 6.8. Gölgelenme-3 için FV panelin akım, gerilim ve güç değişimi a) [20]'de önerilen algoritma b) [15]'de önerilen algoritma c) Önerilen algoritma 78
Şekil 6.9. Gölgelenme-4 için FV panelin akım, gerilim ve güç değişimi a) [20]'de önerilen algoritma b) [15]'de önerilen algoritma c) Önerilen algoritma 80
Şekil 6.10. Gölgelenme-5 için FV panelin akım, gerilim ve güç değişimi a) [20]'de önerilen algoritma b) [15]'de önerilen algoritma c) Önerilen algoritma 82
Şekil 6.11. Q_{FV}=420W/m^2 düzenli ışınım durumu için uygulama sonuçları a) Önerilen Algoritma b) Değiştir & Gözle Algoritması 83

Şekil 6.12. Q_{FV}=920W/m^2 düzenli ışınım durumu için uygulama sonuçları a) Önerilen Algoritma b) Değiştir & Gözle Algoritması 84
Şekil 6.13. Q_{FV}=920W/m^2 düzenli ışınım durumu uygulama a) Önerilen algoritma b) Klasik kısa devre akımı algoritmasının 84
Şekil 6.14. Gerçek FV sistemin resmi 85
Şekil 6.15. Önerilen algoritmanın gerçek FV sistemde kullanılması durumunda akım, gerilim ve güç değişimi a) [20]'de önerilen algoritma b) [15]'de önerilen algoritma c) Önerilen algoritma 86
Şekil 6.16. FV panel yüzeyine gelen güneş ışınım değerleri 0,2kW/m^2, 0,3kW/m^2 ve 1kW/m^2'den (P1) 0,1kW/m^2, 0,5kW/m^2 ve 1kW/m^2 (P2) gölgelenme koşuluna değişmesi durumunda yapılan uygulamanın deneysel sonuçları a) [28]'deki parçalı gölgelenme tespiti metodu b) Önerilen parçalı gölgelenme tespiti yaklaşımı 87
Şekil 6.17. 0,1kW/m^2, 0,5kW/m^2 ve 1kW/m^2 için güç-gerilim ve akım-gerilim eğrileri ve FV simülatör ekran görüntüsü 88
Şekil 6.18. 0,2kW/m^2, 0,3kW/m^2 ve 1kW/m^2 için güç-gerilim ve akım-gerilim eğrileri ve FV simülatör ekran görüntüsü 88

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 2.1. Düşürücü dönüştürücülerin MGNİ başarımı açısından Karşılaştırılması 20
Tablo 2.2. Düşürücü-yükseltici dönüştürücülerin MGNİ başarımı açısından karşılaştırılması 27
Tablo 2.3. DA-DA dönüştürücülerin MGNİ başarımlarının değerlendirilmesi için bazı benzetim senaryoları 27
Tablo 2.4. MGNİ başarımı karşılaştırması için kullanılan FV panelin katalog değerleri, dönüştürücü ve değiştir gözle algoritmasının parametreleri 27
Tablo 2.5. DA-DA dönüştürücülerin topolojik olarak MGNİ başarım (benzetim) sonuçları 29
Tablo 2.6. DA-DA dönüştürücülerin MGNİ başarım değerlendirilmesi 32
Tablo 2.7. Tablo 2.6 için açıklamalar tablosu 32
Tablo 3.1. Parçalı gölgelenme ışınım profilleri (kW/m^2) 40
Tablo 3.2. Farklı ışınım değerleri için benzetim ve uygulama çalışmalarında kullanılan FV panelin temel parametre değerleri 46
Tablo 5.1. Önerilen MGNİ algoritması, [20]'de ve [15]'de önerilen algoritmaların benzetim sonuçları 58
Tablo 6.1. Standart test koşulları altında kullanılan FV panele ait katalog verileri 69
Tablo 6.2. SEPIC devre parametreleri ve ölçüm cihazları 70
Tablo 6.3. Önerilen MGNİ algoritmasının, [15]'de ve [20]'de önerilen algoritmalarının deneysel sonuçları 81

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	:	FV panel eşdeğer devresinde bulunan diyotun ideallik katsayısı
A_1, A_2, A_3	:	MGNİ başarım indeksi (R_1, R_2 ve R_3 dirençleri için)
C_{IN}	:	Giriş kondansatörü, (F)
C_O	:	SEPIC dönüştürücü çıkış kondansatörü, (F)
C_S	:	SEPIC dönüştürücü kuplaj kondansatörü, (F)
D	:	Doluluk Oranı
D_{krt}	:	MGNİ uygulaması için tasarımda aşamasında kullanılan doluluk oranı
d_{sol}, d_{orta}, $d_{sağ}$	:	Gerilim-güç eğrisinde oluşan MGN bölgeleri için ortalama doluluk oranları
d_{a1}, d_{a2}, d_{a3}	:	Her bir MGN bölgesi için ilave güç taraması için doluluk oranları
d_{min}	:	Minimum doluluk oranı değeri
f_p	:	SEPIC dönüştürücü anahtarlam frekansı, (Hertz)
h	:	Gerilim dalgalanma yüzdesi, (%)
$I_Ç$	:	SEPIC dönüştürücü çıkış (yük) akımı, (A)
I_D	:	FV panel eşdeğer devresindeki ve SEPIC dönüştürücü diyot akımları, (A)
I_{FV}	:	FV panel akımı, (A)
I_G	:	SEPIC dönüştürücü giriş akımı, (A)
I_{KD}	:	FV panel kısa devre akımı, (A)
$I_{KD,ort}$	:	FV panelin farklı ışınmlardaki kısa devre akımları ortalaması, (A)
I_{MGN}	:	FV panelin MGN'deki akımı, (A)
$I_{MGN,ORT}$	:	FV panelin farklı ışınımlardaki MGN akımlarının ortalaması, (A)
I_{RS}	:	FV panel eşdeğer devresinde bulunan diyodun ters diyot akımı, (µA)
I_P	:	FV panel eşdeğer devresindeki paralel direnç üzerinden geçen akım, (mA)
$i_C(t)$	:	Çıkış kondansatörü akım değişimi, (A)
K_I	:	Kısa devre akımı-sıcaklık katsayısı (A/°C)
k	:	Boltzmann sabiti, (J/K)
k_{KD}	:	FV panel MGN akımının kısa devre akımına oranı
$k_{KD,ort}$	:	FV panelin farklı ışınımlarda elde edilen MGN akımlarının kısa devre akımlarına oranının ortalaması
k_q	:	Güneş ışınımı-FV panel kısa devre akım katsayısı, (m^2/V)
L_p	:	Primer endüktans, (H)
L_s	:	Sekonder endüktans, (H)
m	:	Gerilim-güç karakteristik eğrilerinin sayısı veya ışınım adedi
n	:	Bir FV panelde bulunan paralel diyot sayısı
n_S	:	FV panelde bulunan seri hücre sayısı
N_P	:	Birincil sargı sayısı
N_S	:	İkincil sargı sayısı
P_{sol}, P_{orta}, $P_{sağ}$	:	Sol, Orta ve Sağ MGN bölgelerinden elde edilen güç değerleri, (W)
$P_{Ç,min}$	:	Dönüşütürücü çıkış gücünün minimum değeri, (W)
Q_{maks}	:	Maksimum güneş ışınımı, (W/m^2)
Q_{FV1}, Q_{FV2}, Q_{FV3}	:	FV-A, FV-B ve FV-3 modüllerinin maruz kaldığı ışınımlar, (W/m^2)

Q_A	:	Anlık güneş ışınımı, (W/m^2)
Q_R	:	Standart test koşullarındaki ışınım değeri, (W/m^2)
R_{FV}	:	FV panel eşdeğer direnci, (Ω)
$R_{FV,ort}$	:	Ortalama FV panel eşdeğer direnci, (Ω)
$R_{FV,min}$	:	En büyük ışınım değerine sahip gölgelenme koşulunda hesaplanan eşdeğer FV panel direnci, (Ω)
$R_{FV,maks}$	:	En küçük ışınım değerine sahip gölgelenme koşulunda hesaplanan eşdeper FV panel direnci, (Ω)
$R_{FV,200W/m^2}$	:	200W/m^2 için FV panelin MGN'deki eş değer direnç değeri, (Ω)
R_P	:	FV panel eşdeğer devresindeki paralel direnç, (Ω)
R_S	:	FV panel eşdeğer devresindeki seri direnç, (Ω)
$R_{Yük}$	:	Yük direnci, (Ω)
q	:	Elektron yükü, (C)
T_H	:	FV panel hücre sıcaklığı, (°C)
T_R	:	Standart test koşullarındaki sıcaklık, (°C)
T	:	Gerilim-güç karakteristik eğrisi sayısı
V_{AD}	:	FV panel açık devre gerilimi, (V)
$V_{AD,m}$	:	FV modül açık devre gerilimi, (V)
V_{Cp}	:	Gerilim bölücü devrelerdeki kondansatör gerilimi, (V)
V_{Cs}	:	Kuplaj kondansatörü gerilimi, (V)
$V_Ç$	:	SEPIC dönüştürücü çıkış (yük) gerilimi, (V)
V_{d1}, V_{d2}, V_{d3}	:	Modüle paralel bağlı diyot gerilimleri, (V)
V_{FV}	:	FV panel gerilimi, (V)
V_{FV1}, $V_{FV2,}$ V_{FV3}	:	FV modül geriliminin gerilim bölücü devre ile küçültülmesi sonucu oluşan gerilimler, (V)
V_G	:	SEPIC dönüştürücü giriş gerilimi, (V)
$V_{G,min}$	:	Minimum giriş gerilimi, (V)
V_{Lp}	:	Primer endüktans gerilimi, (V)
V_{Ls}	:	Sekonder endüktans gerilimi, (V)
V_{MGN}	:	FV panelin MGN'deki gerilimi, (V)
α	:	Trafolu veya kuplajlı endüktanslarda primer sargının sekonder sargıya oranı
η	:	Dönüştürücü verimi
ΔD	:	Doluluk oranı adım miktarı
ΔQ_U	:	Düzenli ışınım algoritmasında ardışık iki ışınım değeri arasındaki fark, (W/m^2)
ΔVQ_{UCIN}	:	C_{IN} kondansatörü üzerinde oluşan dalgalanma gerilimi, (V)

Kısaltmalar

AA	:	Alternatif Akım
ÇN	:	Çalışma Noktası
DA-DA	:	Doğru Akım-Doğru Akım
DA-AA	:	Doğru Akım-Alternatif Akım
DGM	:	Darbe Genişlik Modülasyonu
DMGNİ	:	Dağıtılmış Maksimum Güç Noktası İzleme
ETKB	:	Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
FV	:	Fotovoltaik
MGN	:	Maksimum Güç Noktası
MGNİ	:	Maksimum Güç Noktası İzleme
PSO	:	Parçacık Sürü Optimizasyonu
SEPIC	:	Single Ended Primary Inductance Converter (Tek Sonlu Primer Endüktanslı Dönüştürücü)

FOTOVOLTAİK SİSTEMLER İÇİN YENİ BİR MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI İZLEME YÖNTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE UYGULANMASI

ÖZET

Bu doktora tezinde, düşük güç dönüştürme verimine sahip fotovoltaik panellerinin kapasite faktörlerinin arttırılması konusu ele alınmıştır. Bilindiği üzere, fotovoltaik paneller doğru akım formunda enerji üreten doğrusal olmayan kaynaklar olduğu için düzenli ışınıma maruz kaldıklarında, gerilim-güç karakteristik eğrilerinde tek bir maksimum güç noktası oluşur. Parçalı gölgelenme durumunda ise gerilim-güç karakteristik eğrisinde FV panel yapısında bulunan paralel diyot sayısına bağlı olarak birden fazla maksimum güç noktası oluşur. Böyle bir durumda klasik yöntemlerin maksimum güç noktası izleme başarımları düşük olmaktadır. Bu kapsamda düzenli ışınım ve parçalı gölgelenme durumlarında maksimum güç noktası izleme başarımına sahip iki alt algoritmadan oluşan yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Bu bağlamda parçalı gölgelenme ve düzenli ışınım durumları için algoritmalar önerilmiştir. Parçalı gölgelenme algoritmasında minimum ve maksimum güneş ışınımı değeri ile ışınım adım miktarı belirlenerek gerilim-güç eğrileri üretilir. Daha sonra tüm maksimum güç noktası bölgeleri $R_{FV}=V_{MGN}/I_{MGN}$ olarak tanımlanır ve her bölge için yük direncini dikkate alarak ortalama doluluk oranı hesabı yapılır. Yeni yöntem FV panel $0,8V_{AD}$ modelini kullanarak ve gerilim-güç eğrisi üzerinde akıllı güç tarama algoritması ile global maksimum güç noktası izler. Düzenli ışınım algoritmasının çalışma prensibi ise FV panelin yaklaşık kısa devre akımının ölçülmesine bağlıdır. Bu özelliği sebebiyle klasik kısa devre akımına dayalı algoritmasına göre daha yüksek izleme verimliliği elde edilir. Önerilen yöntemin maksimum güç noktası izleme başarımını göstermek için farklı düzenli ışınım ve gölgelenme profilleri oluşturularak MATLAB/Simulink'de benzetim çalışmaları yapılmıştır. Ayrıca, MGNİ başarım analizi sonucu seçilen SEPIC dönüştürücü kullanılarak önerilen algoritma deneysel olarak doğrulanmış ve benzer üç çalışmayla karşılaştırılmıştır. Benzetim ve uygulama sonuçlarına göre, önerilen algoritma diğer iki algoritmaya göre daha üstün bir maksimum güç noktası izleme başarımına sahiptir.

Anahtar Kelimeler: Düzenli Işınım, Fotovoltaik Panel, Maksimum Güç Noktası İzleme, Parçalı Gölgelenme, SEPIC Dönüştürücü.

DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF A NEW MAXIMUM POWER POINT TRACKING METHOD FOR PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

ABSTRACT

In this PhD thesis, the issue of increasing the capacity factor of photovoltaic panels with low power conversion efficiency has been discussed. As known, since photovoltaic panels are not a linear power source generating energy in direct current form, single maximum power point appears on their voltage-power characteristic curves under uniform irradiance conditions. In the case of partial shading, more than one maximum power points, which is based on number of bypass diodes in a panel, occurs on the voltage-power characteristic curves. In such a case, conventional methods have poor maximum power point tracking performances. In this context, a new method consisting of two sub-algorithms which have outstanding maximum power point tracking performance under uniform irradiance and partial shading conditions. In this regard, algorithms for partial shading and uniform irradiance conditions proposed. Voltage-power curves are produced by minimum, maximum and step size of the irradiances in the partial shading algorithm. After that, maximum power point regions are determined as an equivalent resistance which is ratio between voltage of MPP and current of MPP and average value of duty ratio for all MPP regions are calculated. The new method tracks the global MPP by using $0,8V_{OC}$ model and smart power scanning on the voltage-power curve. Operation of uniform irradiance algorithm is based on the measurement of approximate short circut current of PV panel. For this reason, big efficiencies are obtained compared with the classical one. In order to show the maximum power point tracking performance of the proposed method different uniform irradiances and shading profiles are produced and simulation studies are performed in MATLAB/Simulink. Furthermore, the proposed algorithm is verified experimentally by using SEPIC converter, which is selected at the end of the analyzes of MPPT performances, and compared with three similar studies. According to the results of simulations and experiments, proposed algorithm outperforms than the other two algorithms.

Keywords: Uniform Irradiance, Photovoltaic Panel, Maximum Power Point Tracking, Partial Shading, SEPIC Converter.

GİRİŞ

Yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik enerjisi üretimi, 21. yüzyılın önemli ve yaygın konularından biridir. Bu durum elektrik enerjisi istatistiklerine de yansımıştır. 2000'li yılların başında 15.400TWh olan global elektrik enerjisi ihtiyacı, geçen 15 yıl sonunda yaklaşık %60 oranında artarak 24.100TWh seviyelerine yükselmiştir [1]. Aynı dönemde 1,1TWh olan fotovoltaik (FV) enerjiden elektrik üretimi, 2016 yılı itibariyle 253TWh'e erişmiş olup, bu enerji miktarı toplam talebin yaklaşık %1'ne karşılık gelmektedir [1]. 2016 yılı sonu itibariyle 294GW olan global FV güç kapasitesi, resmi olmayan verilere göre 2017 yılı Nisan ayı itibariyle 85GW daha artarak 312GW'a erişmiştir [2]. FV enerji sektöründe malzeme verimliliğinin ve teşviklerin artmasıyla, önümüzdeki yıllarda FV güç kapasite artışının artarak devam etmesi öngörülmektedir.

Türkiye'de yenilenebilir enerji ile ilgili mevzuat çalışmaları, 2005 yılında çıkarılan 5346 sayılı yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimi amaçlı kullanımına ilişkin kanun ile başlamıştır. Bu kanun ile yenilenebilir enerji kaynak çeşitleri tanımlanmış ve teşvik miktarları belirlenmiştir. İlk belirlenen teşvik miktarının düşük olması ve 5346 sayılı kanunu destekleyici yasal düzenlemelerin eksikliği nedeniyle, yenilenebilir enerjinin yaygınlaşması sağlanamamıştır. 29 Aralık 2010 tarihinde kabul edilen 6094 sayılı kanun ile yenilenebilir enerji kaynakları destekleme mekanizması getirilmiş ve yenilenebilir enerji kaynağına dayalı üretim tesis tipleri için yeni teşvik miktarları ilgili kanun metninin I sayılı cetvelinde verilmiştir. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın (ETKB) 2010-2014 yılları arasını kapsayan Strateji Planı'na göre; enerji arz güvenliği, yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretimindeki payının ve enerji verimliliğinin arttırılması, yatırım koşullarının iyileştirilmesi gibi konuları kapsayan hedefler belirlenmiştir. Bu hedefler doğrultusunda 2023 yılı sonunda ulaşılması hedeflenen FV enerji santrali kurulu gücü miktarı 3GW'tır [3]. 2013 yılında Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu'nun, elektrik piyasasında lisanssız elektrik üretimine ilişkin yönetmelik ile 1MW'a kadar kurulu güce sahip yenilenebilir enerji kaynağından elektrik üreten tesisleri lisanstan muaf tutması [4], özellikle FV enerji üretim santralleri için önemli bir dönüm noktası olarak kabul edilmektedir. Türkiye'de 30 Haziran 2017 tarihi itibariyle 1.642 adet FV enerji santrali bulunmakta olup, bu santrallerin toplam kurulu gücü 1.362,6MW'a ulaşmıştır [5]. Türkiye bulunduğu coğrafya gereği, güneş

enerjisi potansiyeli yüksektir. ETKB'nın hazırlamış olduğu güneş enerjisi potansiyeli atlasına göre yıllık toplam güneşlenme süresi 2.737 saat olup, toplam güneş enerjisi miktarı m^2 başına yıllık 1.527kWh'tır [6].

FV paneller fotovoltaik enerji üretim sistemlerinin en önemli elemanları olup, birçok güneş hücresinin seri bağlanmasıyla oluşan, doğru akım (DA) formunda, güneş ışınımı şiddetine göre güç üreten p-n yapıdaki yarı iletken malzemelerdir. Üretilen DA güç, genellikle bir DA-DA dönüştürücü üzerinden batarya, omik, omik-endüktif karakterli bir yüke veya bir evirici üzerinden alternatif akım (AA) yüküne aktarılır. FV paneller düşük güç dönüştürme verimine sahip doğrusal olmayan DA güç kaynakları olduğundan, maksimum güç noktasi izleme (MGNİ) algoritmalı güç dönüştürücüleri ile çalıştırılırlar [7].

FV panel yüzeyine gelen güneş ışınımı düzenli veya eşit dağılımlı ise gerilim veya doluluk oranı temelli tepe tırmanma algoritmaları olan değiştir gözle [7] ve artan iletkenlik algoritmaları [8] ile MGNİ kolayca sağlanabilir. Diğer bir ifadeyle, bu algoritmalar, tek bir maksimum güç noktası (MGN) bulunan güç-gerilim karakteristik eğrileri için uygundur. Değiştir gözle ve artan iletkenlik algoritmaları için temel sorun MGN'ye erişim süresi ve kararlı hal çalışmasında güç salınımı arasındaki ikilemdir [9]. MGN'ye erişmek için gerilim veya doluluk oranı adım miktarının küçük olması MGNİ süresini arttırırken, kararlı halde güç salınımını azaltır. Adım miktarının büyük olması durumunda ise durum tam tersidir. Kararlı halde FV panel gerilimi ve akımı değişimi dalgalı olacağından, dalgalanma kaynaklı güç kaybı meydana gelir. Bu ikilemi ortadan kaldırmak için uyarlanabilir adım aralıklı, geliştirilmiş değiştir gözle ve artan iletkenlik algoritmaları önerilmiştir [10,11]. Bu algoritmalarda temel olarak gücün gerilime göre değişimine ($\Delta P/\Delta V$) bakılarak, $\Delta P/\Delta V$'nin büyük olduğu durumlarda büyük adım aralığı, $\Delta P/\Delta V$'nin sıfıra yaklaştığı durumlarda ise küçük adım aralığı seçilerek MGNİ süresi en uygun hale getirilir ve kararlı hal dalgalanması en küçük seviyede tutulmuş olur [10,11].

FV panel yüzeyine gelen güneş ışınımı, tüm yüzeyde eşit değilse parçalı (kısmi) gölgelenme meydana gelir. FV panel yapısında bulunan seri bağlı modüllere ters paralel bağlı diyotların sayısına bağlı olarak, FV panel güç-gerilim karakteristik eğrisinde MGN'ler oluşur. Bu durumda, tepe tırmanma kategorisindeki algoritmalar güç-gerilim karakteristik eğrisinde ilk MGN'yi global MGN olarak değerlendireceği için gerçek MGN'ye erişilememe ihtimali ortaya çıkar ve FV panelden çekilen güç miktarı optimum değerin altında kalabilir. Bundan dolayı parçalı gölgelenme koşulunda MGNİ

işlemi zorlaşmakta ve güç-gerilim karakteristik eğrisinin detaylı olarak incelenmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır [12].

Parçalı gölgelenme durumunda MGNİ yapabilen algoritmanın ilk kez Kobayashi ve arkadaşları tarafından önerildiği birçok çalışma tarafından doğrulanmıştır [13]. Bu çalışmada, iki aşamalı bir MGNİ algoritması önerilmiş olup, algoritmanın ilk aşamasında açık devre gerilimi ve kısa devre akımı ölçümü yapılır ve V_{AD}/I_{KD} oranı izlenir. MGN geriliminin açık devre gerilimine oranı 0,8 ve MGN akımının kısa devre akımına oranı 0,9 olduğu varsayılarak MGN'deki eş değer FV panel direnci hesaplanarak darbe genişlik modülasyonu (DGM) denetimi ile MGN civarında bir çalışma elde edilir. Algoritmanın ikinci aşamasında ise gerilim değişiminin akım değişimine oranına ($\Delta V/\Delta I$) dayalı bir algoritma kullanılarak FV panelin kararlı halde çalışması sağlanır. Fakat önerilen bu algoritmada parçalı gölgelenme durumunda MGNİ sağlayacak bir özellik olmadığından, ancak düşük verimli MGNİ sağlanabilir.

Patel ve Agarwal gerçekleştirdikleri çalışmada, FV panel akım-gerilim ve güç-gerilim karakteristik eğrilerini detaylı bir şekilde incelemiş ve parçalı gölgelenme durumunda maksimum güç noktalarının belirli gerilim değerlerinde oluştuğunu ve iki MGN gerilimi arasında en az $0,8V_{AD}$ kadar fark oluştuğunu öne sürmüşlerdir. Bu tespit sayesinde, güç-gerilim eğrisinin tamamen taranmasına gerek kalmaksızın, hızlı ve yüksek verimli MGNİ sağlanmıştır [14].

Tey ve Mekhikef, artan iletkenlik algoritmasını geliştirerek ve $0,8V_{AD}$ modelini baz alarak yeni bir MGNİ algoritması önermişlerdir [15]. FV panel gerilimi ilk MGN gerilimine kadar sabit adımlarla artan iletkenlik algoritması ile arttırılır ve güç değeri kaydedilir. Daha sonra $0,8V_{AD}$'lik adımlarla gerilim arttırılır ve FV akım değişimi kontrol edilir. Akım değişimi belirli bir değerin altındaysa, $0,8V_{AD}$'lik gerilim artışını sağlayacak doluluk oranı hesaplanarak dönüştürücüye uygulanır ve MGNİ sağlanır. Açık devre geriliminin ve seri bağlı panel sayısının bilinme ihtiyacı ve akım değişimi miktarının belirlenmesi algoritmanın olumsuz yönlerini oluşturmaktadır.

FV panel karakteristik eğrilerini parçalı gölgelenme koşulunda inceleyerek, bazı çıkarımlarda bulunmak ve bu bulguları MGNİ algoritması geliştirmek için kullanmak son yıllarda yayınlanan makalelerde çokça rastlanan bir durumdur. Chen ve arkadaşlarının elde ettikleri bulgulara göre; bir FV sistemde panel gerilim değerleri belirli bir kıstasa göre gruplandırılırsa FV panel yüzeyinin kaç farklı ışınıma maruz kaldığı ve dolayısıyla güç-gerilim eğrisi üzerinde kaç tane MGN bölgesinin oluşacağı

belirlenebilir [16]. Böylece denetimsiz güç taraması yapılmadan, hızlı ve yüksek verimli MGNİ'nin sağlanabileceği vurgulanmıştır. Geliştirilen algoritmanın olumsuz tarafı, açık devre gerilimi, seri bağlı panel sayısı gibi sistem bilgilerine ihtiyaç duymasıdır.

Bir diğer çalışmada on farklı FV panel üreticisinin verilerini kullanarak [14]'de olduğu gibi FV panel karakteristik özellikleri belirlenmiş ve iki aşamalı bir algoritma önerilmiştir [17]. Algoritmanın ilk aşamasında MGN geriliminin %10-90V_{AD} gerilim aralığında bulunduğu varsayılarak, bu gerilim aralığını eşit parçalara bölerek güç taraması yapılır. Bu aşama sayesinde global MGN'nin yer aldığı bölüm (segment) bulunur. İkinci aşamada, değişken adım aralıklı bir değiştir gözle algoritması ile MGNİ işlemi tamamlanır. Bölüm sayısı algoritmanın MGNİ süresi ve verimliliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

Ahmed ve Salam, bir FV sistemde seri bağlı panel sayısı arttıkça 0,8V_{AD} modeli referans alınarak yapılan MGNİ işleminin kısmi gölgelenme durumunda doğru sonuç vermeyeceğini ileri sürmüşlerdir [18]. Yaklaşık 400V civarındaki bir FV sistemde, MGN geriliminin 50V civarında farklılık gösterebileceğini ve global MGN'ye erişmek için gerilim ayarlama (kompanze) işlemine ihtiyaç duyulduğunu ifade etmişlerdir.

Yapay sinir ağları ve klasik bir MGNİ algoritmasından oluşan hibrit bir yaklaşım Jiang ve arkadaşları tarafından önerilmiştir [19]. FV sistem parametreleri kullanılarak akım-gerilim grafikleri benzetim çalışmaları yapılarak elde edilir ve veriler yapay sinir ağları aracılığıyla eğitilir. Daha sonra tüm FV panellerinin ışınım seviyeleri, panel akımları ölçülerek tahmin edilir. Aynı akım değerleri için gerilimlerde ölçülür ve güç değerleri belirlenmiş olur. Böylelikle global MGN'nin yeri bulunur. Bilindiği üzere yapay sinir ağları kullanılarak geliştirilen yöntemlerde, sistem parametrelerine bağlılık en üst düzeydedir. Bu nedenle, uygulanabilirlik açısından kısıtlar söz konusudur. Ayıca her bir panelin akım ölçümü donanımsal yükün artmasına neden olmaktadır.

Koutroulis ve Blaabjerg, geniş bir gerilim aralığında güç taraması yapan bir MGNİ algoritmasını kısmi gölgelenen FV paneller için önermişlerdir [20]. FV panel gerilimi açık devre geriliminden güç artışının sürekli negatif olduğu düşük bir gerilim değerine kadar sabit adım aralığı yaklaşımı ile değiştirilerek, güç taraması yapılır. Bu yaklaşım ile FV sistem parametrelerine gerek kalmaksızın global MGNİ sağlanırken, periyodik ve uzun tarama süresi gibi sebeplerden dolayı MGNİ süresi uzundur ve MGNİ verimi diğer çalışmalara göre düşüktür. Bu algoritma, önerdiğimiz MGNİ algoritması ile farklı

parçalı gölgelenme ve düzenli ışınım durumları için benzetim ve deneysel olarak karşılaştırılmıştır.

Bir diğer çalışmada, FV panel akımı ve gerilimi değişimleri izlenerek parçalı gölgelenme olup olmadığının belirlenebileceği ileri sürülmüştür. Gölgelenme belirlendikten sonra FV panel referans gerilimi, doğrusal bir denklem ile hesaplanır ve panel gerilimi referans gerilime ulaştırılır. Son aşamada klasik artan iletkenlik algoritması kullanılarak MGNİ işlemi tamamlanır [21].

Kotti ve Shireen önerdikleri MGNİ algoritmasında, FV panel gerilimini $0,4V_{AD}$-$0,8V_{AD}$ aralığında sabit bir adım büyüklüğü ile değiştirerek, global MGNİ gerçekleştirmişlerdir. Önerilen algoritmanın performansı değiştir gözle ve artan iletkenlik algoritması ile karşılaştırılmış ve klasik algoritmaların parçalı gölgelenme koşulunda başarımlarının yetersiz kaldığı vurgulanmıştır. Ayrıca önerilen algoritmanın basit ve uygulanabilir yapıda olduğu belirtilmiştir [22].

Doluluk oranının rampa fonksiyonu şeklinde değiştirilmesine dayalı, çift aşamalı, hibrit bir MGNİ algoritması önerilmiştir [23]. Algoritmanın ilk aşamasında gölgelenme olup olmadığı, tanımlanan bazı indeksler yardımıyla bulunur ve doluluk oranı rampa fonksiyonu şeklinde değiştirilerek güç değeri sürekli kaydedilir. Güç değerlerine göre global MGN belirlenir. Bu haliyle, geniş gerilim ve/veya akım aralığında tarama yapılan [20]'deki çalışmaya benzer bir algoritma, benzetim ve deneysel olarak doğrulanmış ve parçacık sürü optimizasyonu (PSO) yöntemiyle karşılaştırılarak, önerilen üstünlüğü vurgulanmıştır.

Wang, Li ve Ruan, FV panel akım-gerilim ve güç-gerilim karakteristik eğrilerine dayalı iki adet MGNİ algoritması önermişlerdir [24]. Araştır-atla-karar ver ilkesine göre çalışan algoritma ile FV panel gerilimi tarama aralığı daraltılarak yüksek MGNİ hızı ve takip verimliliği hedeflenmiştir. FV panel sayısının fazla olması durumunda, araştır-atla-karar ver prensibi ile yapılan MGNİ'nin başarımı kötüleşmektedir. Bunun için ikinci bir algoritma hızlı MGNİ başlığı altında önerilmiştir. Bu yaklaşımda FV panel yapısında bulunan paralel diyotlardan geçen akım bilgisine ihtiyaç vardır. Her bir FV panelde akım algılama elemanı gerekeceği için algoritmanın uygulanabilirliği azalır.

FV dizi eviricilerde kullanılmak üzere gerilim tarama aralığı daraltılmış yeni bir MGNİ algoritması önerilmiştir [25]. Algoritmanın başarımını arttırmak için FV panel açık devre gerilimine bağlı bir gerilim tarama adımı, güç-gerilim eğrisinde tanımlanan güç üçgeni ve gerilim sınır değerleri belirlenmiştir. Özellikle çok sayıda FV panelin

kullanıldığı sistemlerde algoritma başarımının diğer algoritmalara göre daha yüksek olacağı ifade edilmiştir.

FV panel açık devre gerilimi ve kısa devre akımı değerleri kullanılarak hesaplanan en küçük ve en büyük doluluk oranı sınır değerlerine göre global maksimum güç noktası taraması yapan bir MGNİ algoritması geliştirilmiştir [26]. Güç-gerilim değişimi Lipschitz fonksiyonu olarak tanımlanmış ve gerilim aralığı daraltılarak FV panel maksimum güç noktasında çalıştırılmıştır. Algoritmanın MGNİ başarımı, FV sistem parametrelerine bağlılığı fazla olduğu için uygulanabilirlik açısından zayıftır.

PSO tabanlı global maksimum güç noktası takibi yapabilen bir yöntem, her bir FV panelin kendi DA-DA dönüştürücüsüne sahip olduğu ve tek bir DA barayı beslediği bir uygulama için önerilmiştir [27]. Güç-gerilim eğrisinin tamamı periyodik olarak taranarak MGNİ gerçekleştirildiği için MGNİ süresi uzun ve takip verimi düşüktür.

Parçalı gölgelenme durumunda PSO yönteminin kullanıldığı, gölgelenme olmayan durumlarda ise değiştir gözle algoritmasının kullanıldığı hibrit bir MGNİ algoritması önerilmiştir [28]. Gölgelenmenin olup olmadığı FV panel gerilim, akım ve/veya güç değişimleri izlenerek belirlenmiştir. Parçalı gölgelenme durumunda en düşük ve en yüksek ışınım değerleri referans alınarak tarama aralığı daraltılmıştır. Algoritmanın başarımı benzetim ve deneysel çalışmalarla doğrulanmıştır. Algoritmanın mahzurlu tarafı gölgelenme tespit stratejisi olup, bu durum üçüncü kısımda teorik olarak anlatılmış ve yedinci kısımda ise önerdiğimiz algoritma ile deneysel olarak karşılaştırılarak algoritmanın mahzuru doğrulanmıştır.

Ishaque ve Salam gerçekleştirdikleri çalışmada klasik PSO yöntemini geliştirerek kısmi gölgelenme durumlarında hızlı ve yüksek verimli MGNİ sağlayan bir yaklaşım sunmuşlardır [29]. FV panel karakteristiğine bağlı olarak belirlenen doluluk oranı limit değerleri ve $0{,}8V_{AD}$ modeli baz alınarak belirlenen gerilim üst limit değeri sayesinde global MGN arama aralığı daraltılmış ve yüksek MGNİ başarımı elde edilmiştir.

Doktora tezi çalışmasında, parçalı gölgelenme tespiti yapan ve bu tespite göre algoritma seçiciliğine sahip, FV panel karakteristiklerine dayalı analizler sonucu sınırlandırılmış gerilim aralığında global MGNİ gerçekleştirebilen özgün bir algoritma önerilmiştir. FV panel yüzeyinin eşit ışınım alması durumunda ise sabit akım yöntemine dayalı iyileştirilmiş değiştir gözle algoritması kullanılmıştır. Önerilen algoritmanın başarımı, $0{,}8V_{AD}$ modeline dayalı artan iletken algoritması [15] ile geniş gerilim aralığında güç taraması yapan bir algoritma [20] ile karşılaştırılmıştır. MGNİ

başarım analizleri sonucunda karar verilen SEPIC tipi DA-DA güç dönüştürücüsü ile MATLAB/Simulink'de yapılan benzetim çalışmaları, FV simulatörü ve FV panel ile gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda önerilen algoritmanın diğer iki algoritmaya göre üstün olduğu belirlenmiştir.Birinci kısımda, FV panel elektriksel eş değer devresi ele alınarak matematiksel modeli çıkarılmıştır. FV panel akım-gerilim ve güç-gerilim karakteristikleri düzenli ışınım ve parçalı gölgelenme durumları için incelenmiş ve panel yapısındaki modüllere ters paralel bağlı diyotların faydası ifade edilmiştir.

İkinci bölümde, düşürücü, yükseltici ve düşürücü-yükseltici dönüştürücülerinin MGNİ başarımları FV panelin MGN'deki eş değer direnci ve yük direncine bağlı olarak değerlendirilmiştir. Farklı ışınım değerleri ve eş değer yük direnci değerleri için MATLAB/Simulink'de yapılan benzetimler ile düşürücü-yükseltici dönüştürücü tipinin MGNİ uygulamaları için üstünlüğü doğrulanmıştır. Ayrıca dönüştürücüler ile ilgili genel bir değerlendirme karşılaştırmalı olarak yapılmıştır.

Üçüncü bölümde, parçalı gölgelenme tespit yöntemi, kısmi gölgelenme durumunda MGNİ sağlayan algoritmanın teorik altyapısı ve aşama aşama açıklanması ve son olarak düzenli ışınım durumu için geliştirilen FV panel kısa devre akımına dayalı iyileştirilmiş değiştir gözle algoritması açıklanmıştır.

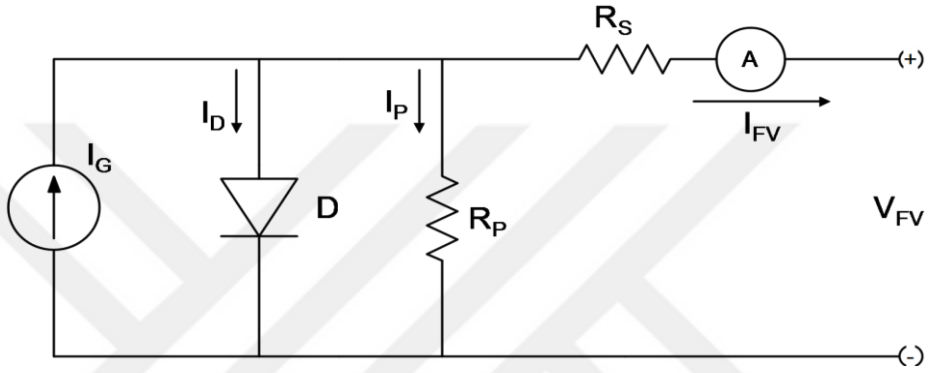
Dördüncü bölümde, MGNİ algoritmalarının başarımlarının test edileceği SEPIC dönüştürücünün çalışma prensibi, devredeki elemanların akım, gerilim değişimleri ve elemanların değerlerinin nasıl hesaplanacağı açıklanmıştır.

Beşinci bölümde, önerilen MGNİ algoritmasının başarımı MATLAB/Simulink'de yapılan benzetim çalışmalarıyla doğrulanmıştır. Statik MGNİ verimi ve MGN'ye ulaşma süreleri kıstas alınarak, önerilen algoritma [15]'de ve [20]'de önerilen algoritmalar beş farklı gölgelenme durumu, iki farklı düzenli ışınım durumu, ışınım değişimi ve yük direnci değişimi durumları için karşılaştırılmıştır.

Altıncı bölümde, MGNİ algoritmasının test edileceği SEPIC dönüştürücü güç devresi, kapı sürme, algılama ve mikrodenetleyici devreleri verilmiş olup, parçalı gölgelenme koşulları ve düzenli ışınım durumları FV simulatörü aracılığıyla sağlanarak deneysel çalışmalar yapılmış ve literatürdeki iki algoritma ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca önerilen parçalı gölgelenme değişimi tespit metodu [28]'deki yöntem ile karşılaştırılarak, önerilen metodun üstünlüğü deneysel olarak doğrulanmıştır.

1. FOTOVOLTAİK PANEL KARAKTERİSTİKLERİ

FV hücreler, yüzeylerine düşen güneş ışınımı değerine bağlı olarak DA formunda güç üreten doğrusal olmayan akım kaynaklarıdır. FV hücreler p-n yapısına sahip olup, diyotlara benzer bir karakteristiğe sahiptir. Şekil 1.1'de tipik bir FV hücresi için tek diyotlu elektriksel eş değer devre modeli verilmiştir.



Şekil 1.1 Tipik bir FV hücrenin tek diyotlu elektriksel eş değer devresi

1.1. Düzenli Işınım Durumu

FV panel yüzeyi eşit ışınıma maruz kalmışsa, güç-gerilim eğrisi üzerinde tek bir MGN oluşur. Düzenli ışınım durumunda Şekil 1.1'deki devreye göre I_{FV} hücre akımı;

$$I_{FV}=I_G-I_D-I_P \tag{1.1}$$

şeklinde ifade edilebilir. Eşitlik (1.1)'de I_G, güneş ışınımı değerine bağlı akım (güneş akımı), I_D, diyot akımı ve I_P, paralel direnç akımıdır. R_S ve R_P sırasıyla kontak direnci ve parazitik direnç olarak tanımlanabilir. I_G, I_D ve I_P sırasıyla;

$$I_G=I_{KD}\frac{Q_A}{Q_R}-K_I(T_H-T_R) \tag{1.2}$$

$$I_D=I_{RS}(e^{\frac{q}{AkT_H}}-1) \tag{1.3}$$

$$I_P=\frac{V_{FV}+I_{FV}R_S}{R_P} \tag{1.4}$$

şeklinde hesaplanabilir. Eşitlik (1.2), Eşitlik (1.3) ve Eşitlik (1.4)'te; Q_A, FV panel yüzeyine düşen güneş ışınımı değeri (kW/m^2), Q_R, standart test koşulları için ışınım değeri (kW/m^2), K_I, akım - sıcaklık düzeltme katsayısı, T_H, FV hücre çalışma sıcaklığı (ºC), T_R, standart test koşulları için sıcaklık değeri (ºC), I_{RS}, ters diyot akımı (A), q, elektron yükü (C), k, Boltzmann sabiti, I_{KD}, kısa devre akımı (A), R_S ve R_P ise seri ve paralel direnç değerleridir [29]. Buna göre; Eşitlik (1.2), Eşitlik (1.3) ve Eşitlik (1.4), Eşitlik (1.1)'de yerine yazılırsa;

$$I_{FV}=I_{KD}\frac{Q_A}{Q_R}-K_I(T_H-T_R)-I_{RS}(e^{\frac{q}{AkT_H}}-1)-\frac{V_{FV}+I_{FV}R_S}{R_P} \quad (1.5)$$

elde edilir. Tipik bir FV hücre yaklaşık olarak 0,6V civarında gerilim ve verimine bağlı olarak farklı değerlerde akım üretebilmektedir. Tek bir hücrenin gerilimi elektriksel bir uygulama için oldukça düşüktür. Bu nedenle hücreler seri bağlanarak gerilim değeri yükseltilir ve FV paneller meydana getirilir. n_S adet hücrenin seri bağlanmasıyla oluşan bir FV paneli için akım denklemi yeniden düzenlenirse;

$$I_{FV}=I_{KD}\frac{Q_A}{Q_R}-K_I(T_H-T_R)-I_{RS}(e^{\frac{q(V_{FV}+I_{FV}R_S n_S)}{n_S AkT_H}}-1)-\frac{V_{FV}+I_{FV}n_S R_S}{n_S R_P} \quad (1.6)$$

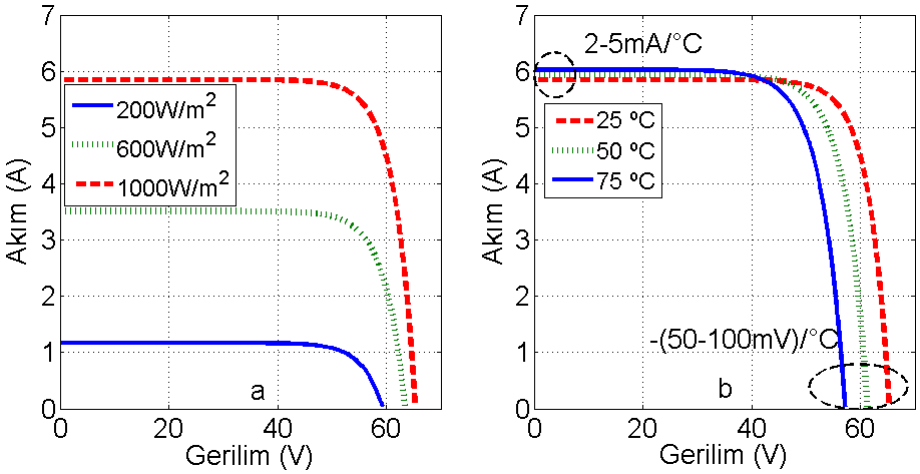
elde edilir [26]. Eşitlik (1.2)'ye göre güneş akımı ile güneş ışınımı arasında doğrusal bir bağıntı vardır. Diğer yandan akım - sıcaklık düzeltme katsayısı ticari FV panellerde 2-5mA/ºC seviyelerinde olduğu için, kısa devre akımı farklı sıcaklıklarda fazla değişmemektedir. Sıcaklık değişiminin açık devre gerilimine etkisi ise akım değişimine kıyasla daha fazla olup, -(50-100mV)/ºC civarındadır. Eşitlik (1.7)'de ve Eşitlik (1.8)'de FV panel açık devre gerilimi bağıntıları verilmiştir.

$$V_{AD}=\frac{nkT_H}{q}\ln(\frac{I_{KD}}{I_{RS}}+1) \quad (1.7)$$

$$V_{AD}(Q)=V_{AD}(Q_R)+K_V(T_H-T_R) \quad (1.8)$$

Tipik bir FV panelin güneş ışınımı ve sıcaklık değişimine bağlı olarak akım-gerilim karakteristik eğrileri düzenli ışınım durumu için Şekil 1.2'de verilmiştir. Şekil 1.2.a'da görüldüğü üzere ışınım değerinin artışı kısa devre akımının doğrusal olarak artmasına neden olmuştur. Şekil 1.2.b'den anlaşılacağı üzere sıcaklık artışı ise kısa devre

akımında bir miktar artışa neden olurken, açık devre gerilimi akıma göre yüzdesel olarak daha fazla azalmıştır.



Şekil 1.2. FV panel akım-gerilim karakteristik eğrileri a) Farklı güneş ışınımlarında b) Farklı sıcaklıklarda

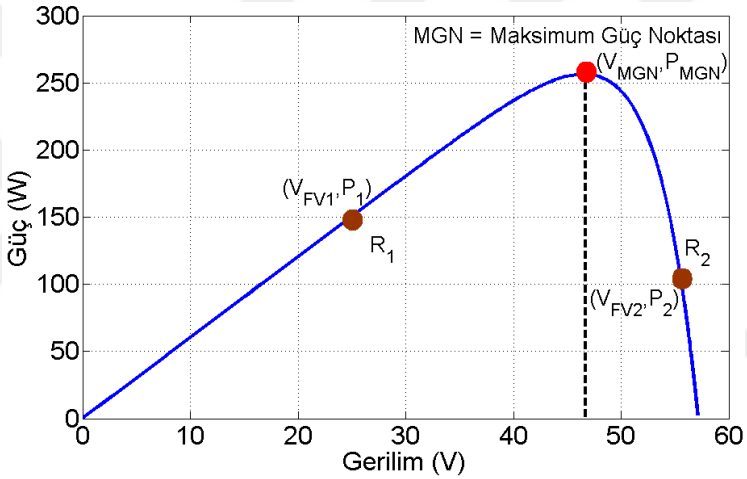
Bir FV panelin akımı ve gerilimi birbirine bağlı ve ters orantılı olarak değişir. Bu nedenle, FV panel akım-gerilim veya güç-gerilim karakteristik eğrisi üzerinde sadece bir noktada (V_{MGN}, I_{MGN}) en yüksek güç veya en yüksek verim elde edilir. Bu gücün veya verimin elde edildiği nokta maksimum güç noktası olarak tanımlanır. Şekil 1.3'te tüm yüzeyi eşit ışınıma maruz kalmış tipik bir FV panele ait güç-gerilim karakteristik eğrisi ve MGN gösterilmiştir. FV panelden maksimum güç elde edilebilmesi için MGN'de çalışma sağlanmalıdır.

FV panel doğrudan R_1 değerli bir yüke bağlanırsa Şekil 1.3'te görüleceği üzere MGN'den oldukça uzakta ve düşük verimli bir çalışma gerçekleşir. Aynı durum R_2 değerli yük içinde geçerlidir. FV panel yüke doğrudan bağlanırsa tek bir yük eş değer direnç değeri için MGN sağlanabilir. Bu nedenle FV paneller yüke (direnç, batarya grubu veya şebeke) bir güç dönüştürücüsü (DA-DA veya DA-AA dönüştürücü) aracılığıyla bağlanmalıdır.

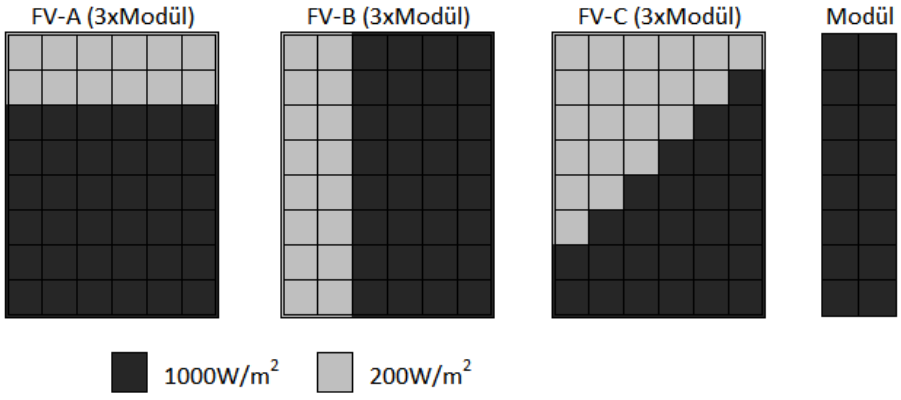
1.2. Parçalı Gölgelenme Durumu

Dünyanın doğal hareketi sebebiyle, FV paneller gün içerisinde farklı ışınım değerlerine maruz kalır ve değişken güç üretirler. Bu durumda tüm panel yüzeyi eşit ışınım aldığı için oluşan güç değişiminin, ışınım kaynaklı olduğu söylenebilir. Bir panelde parçalı gölgelenmenin meydana gelmesi için panel yüzeyi eşit ışınım almamış olması gerekir. Şekil 1.4'te farklı şekillerde parçalı gölgelenmeye maruz kalmış FV paneller ve panel yapısında bulunan seri bağlı modüller sembolik olarak

gösterilmiştir. Şekil 1.4'ten anlaşılacağı üzere modüller panellere dikey olarak yerleştirilmiştir. Şekil 1.4'te verilen örnek gösterimlere göre FV-A paneli yapısında bulunan modüller aynı oranda parçalı gölgelenmiş, FV-B'de sadece soldaki modül gölgelenmiş, FV-C'de ise tüm modüller farklı oranlarda gölgelenmiştir. Fakat gölgelenme ışınım değeri aynı olmak üzere, bir modülün tamamının gölgelenmesi ile çok küçük bir bölümünün gölgelenmesi, modül içindeki hücreler seri bağlandığı ve dolayısıyla aynı akımı paylaştıkları için aynı etkiye ve aynı akım-gerilim karakteristik eğrisinin oluşmasına neden olacaktır. Bu duruma örnek olarak FV-A ve FV-C panelleri gösterilebilir. Gölgelenme şekilleri farklı olsa bile bu paneller aynı akım-gerilim karakteristik eğrisine sahiptirler. Şekil 1.5'te FV-A, FV-B ve FV-C panellerine ait akım-gerilim karakteristik eğrileri verilmiştir.



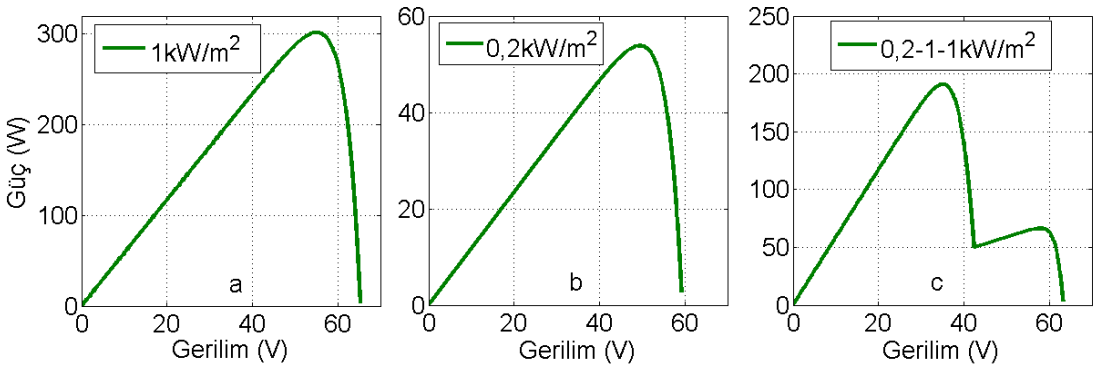
Şekil 1.3. Tipik bir güç-gerilim karakteristik eğrisi, iki farklı yük direnci için FV panelin verimsiz çalışmasının gösterimi ve MGN gösterimi



Şekil 1.4. Seri bağlı üç modülden oluşmuş ve farklı şekillerde gölgelenmiş güneş panelleri ve bir modülün ayrı ayrı gösterimi

Seri bağlı modüllerden oluşmuş gölgelenmiş bir FV panel, maruz kaldığı en düşük ışınım şiddetine göre akım üretir. Bu durum verimsiz çalışmaya neden olur. Bu sebeple FV paneller hücre sayılarına bağlı olarak belirli sayıda paralel diyot ile teçhiz edilerek gölgelenme durumunda daha yüksek verimde çalışma sağlanır. Diyotun bağlanmaması halinde oluşacak gerilim farklarından dolayı, yüksek ışınıma maruz kalmış modüller yük gibi davranıp güç harcamaya başlar ve ilgili modülün sıcaklığı artar. Sıcaklığın aşırı artması sonucunda literatürde "hotspot" olarak belirtilen problem oluşup, panel zarar görebilir.

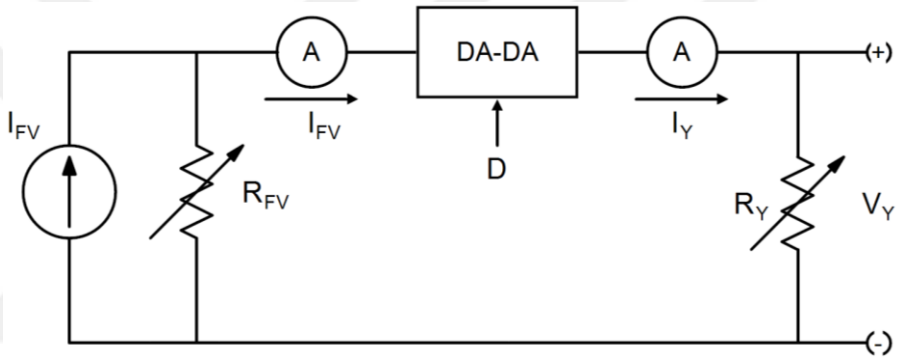
Şekil 1.5.a'da tam ışınım almış, Şekil 1.5.b'de FV-A ve FV-C panellerine ait (paralel diyotsuz durum için) akım-gerilim eğrisi ve Şekil 1.5.c'de paralel diyotlu FV-B paneli için akım-gerilim karakteristik eğrileri verilmiştir. Şayet FV-B panelinde diyot bulunmasaydı, Şekil 1.5.b'teki karakteristik eğrisi geçerli olacak ve en yüksek güç değeri 53W olacaktı. FV-B panelinde bulunan diyotlar sayesinde Şekil 1.5.c'deki karakteristik eğrisi oluşur ve en yüksek güç değeri 180W civarında olur. Özetle, diyotlu durumda güç değeri yükselir ve panelden daha büyük güç çekilebilir.



Şekil 1.5. Akım-gerilim karakteristik eğrileri a) Düzenli Işınım (1kW/m^2) b) FV-B (0,2kW/m^2) c) FV-A ve FV-C (0,2-1-1kW/m^2)

2. DA-DA DÖNÜŞTÜRÜCÜLERİN MGNİ BAŞARIMLARI

FV panellerin bir güç dönüştürücü devresi üzerinden yüke bağlanması gerekliliği daha önceki bölümde ifade edilmişti. Bu kısımda, temel DA-DA dönüştürücü devrelerinin MGNİ başarımları; fotovoltaik kaynağın en yüksek güç noktasındaki, varsayıma dayalı ve güneş ışınımın değerine bağlı eşdeğer devre direnci ile dönüştürücü çıkışındaki yük direncinin değeri baz alınarak belirlenecektir. Ayrıca ele alınan topolojiler arasında genel bir karşılaştırıma yapılacaktır. Buna göre, Şekil 1.1'de verilen devre prensip olarak Şekil 2.1'deki gibi revize edilebilir.



Şekil 2.1. MGNİ başarımlarının değerlendirileceği prensip DA-DA dönüştürücü devre şeması

Şekil 2.1'deki I_{FV}, güneş ışınımı ile doğru orantılıdır. $V_{FV}=I_{FV}R_{FV}$ bağıntısına göre I_{FV} ile R_{FV} ters orantılıdır. Dolayısıyla güneş ışınımı artarsa R_{FV} azalır. Bunun tam tersi de geçerlidir. R_{FV} ifadesi MGN durumu için tanımlanmaktadır. Şekil 2.2'de güneş ışınımı ve MGN'deki eş değer panel direnci değişimi tipik bir FV panel için verilmiştir.

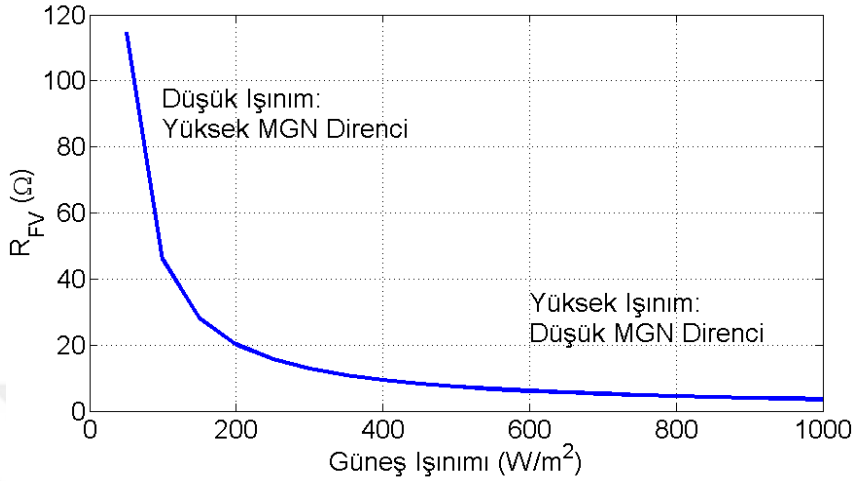
2.1. Düşürücü Dönüştürücülerde MGNİ Analizi

Düşürücü tip DA-DA dönüştürücü devresi prensip olarak giriş gerilimini azaltan en temel endüktanslı güç dönüştürücüsüdür. $V_Ç$ çıkış gerilimi, V_G giriş gerilimi, I_G giriş akımı, $I_Ç$ çıkış (yük) akımı olmak üzere;

$$V_Ç=V_G D=V_{FV}D \tag{2.1}$$

$$I_Ç=I_Y=\frac{I_G}{D}=\frac{I_{FV}}{D} \tag{2.2}$$

bağıntıları yazılabilir [30]. Eşitlik (2.1)'deki ve Eşitlik (2.2)'deki D değişkeni, düşürücü dönüştürücüde bulunan yarı iletken anahtara uygulanan DGM'nin doluluk oranıdır (görev oranı).



Şekil 2.2. Güneş panelinin MGN'deki eşdeğer direnci ile güneş ışınımı değeri arasındaki değişim

Şekil 2.1'de verildiği üzere giriş gerilimi yerine,

$$V_G = V_{FV} = I_{FV} R_{FV} \tag{2.3}$$

ve çıkış gerilimi yerine,

$$V_Ç = V_Y = R_{Yük} I_Ç \tag{2.4}$$

yazılırsa;

$$R_{Yük} I_Ç = I_{FV} R_{FV} D \tag{2.5}$$

elde edilir. Daha sonra $I_Ç$ yerine Eşitlik (2.2) yazılır ve R_{FV} eşitliğin solunda yanlız bırakılırsa;

$$R_{FV} = \frac{R_{Yük}}{D^2} \tag{2.6}$$

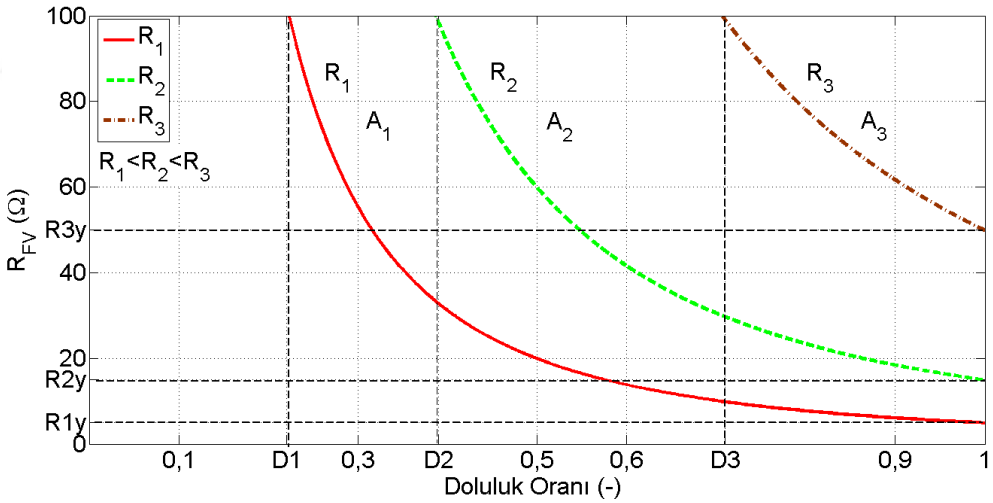
elde edilir. Düşürücü dönüştürücü MGNİ başarımı Şekil 2.3'de verilmiştir. Üç farklı yük direnci değeri için MGNİ başarımı $R_{FV}=f(D)R_{Yük}$ fonksiyonu aracılığıyla elde edilebilir [31]. R_1, R_2 ve R_3 dirençleri için alan ifadeleri aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$A_1=(R_{FV,m}-R_{1y})(1-D_1)-\int_{D_1}^{1} f(D)R_{Yük}dD \quad (2.7)$$

$$A_2=(R_{FV,m}-R_{2y})(1-D_2)-\int_{D_2}^{1} f(D)R_{Yük}dD \quad (2.8)$$

$$A_3=(R_{FV,m}-R_{3y})(1-D_3)-\int_{D_3}^{1} f(D)R_{Yük}dD \quad (2.9)$$

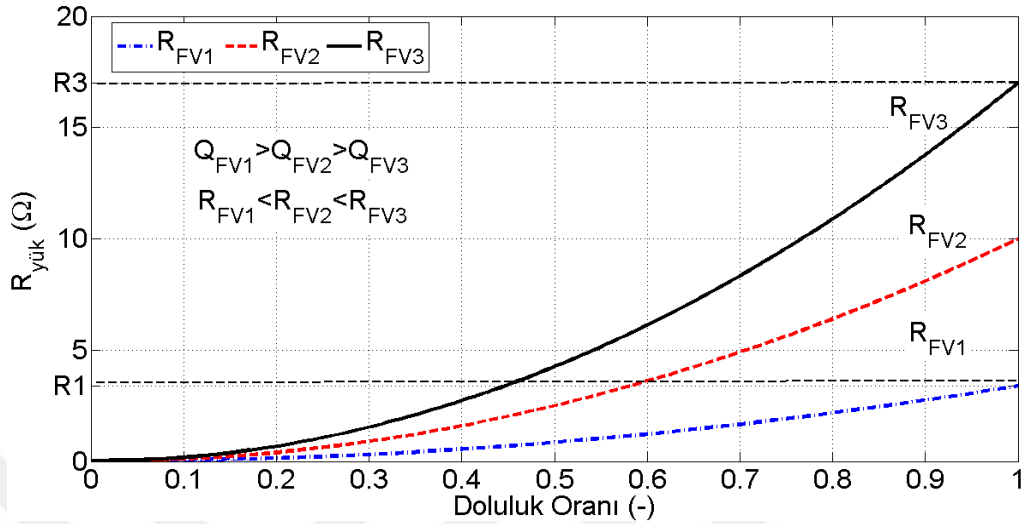
Düşük değerli dirençlerin yük olarak kullanılması halinde, $A_1>A_2>A_3$ olduğu için MGNİ başarımı daha iyidir. Diğer bir ifadeyle Şekil 2.3'de görülen R_1, R_2 ve R_3 değişimlerine bakıldığında, R_1 direnci R_2 ve R_3 dirençlerine göre daha büyük bir R_{FV} aralığında değiştiği için, MGNİ'nin başarı ile sağlanacağı ışınım değer aralığı daha büyüktür. Bu nedenle, R_1 direnci (en küçük değerli direnç) için MGNİ başarımı daha yüksektir. Direnç değeri arttıkça, ışınım değer aralığı (R_{FV}) azaldığı için MGNİ başarımı kötüleşecektir. Şekil 2.3'de verilen değişimler sabit güneş ışınımı ve farklı direnç durumları içindir.



Şekil 2.3. $R_1<R_2<R_3$ için düşürücü dönüştürücünün MGNİ başarımı

Üç farklı ışınım değeri ve sabit yük direnci için Şekil 2.4'de MGNİ başarımının yorumlanacağı değişimler verilmiştir. Görüldüğü üzere yüksek ışınım değerleri için yük direncinin alabileceği değer aralığı küçülmektedir. Güneş ışınımı azaldıkça, yük direncinin alabileceği değer aralığı büyümektedir. Özetle, düşürücü dönüştürücülerin düşük değerli direnç ve güneş ışınımı durumlarında MGNİ başarımı artmaktadır. Örneğin; Q_{FV1} ışınımı altında $R_{yük}>R_1$ ise MGNİ başarımı kötüdür. Bunun sebebi MGNİ

algoritması aracılığıyla doluluk oranı değeri %100'e (D=1) yakınsamaya başlar, fakat MGN'de çalışma sağlanamaz ve MGNİ verimi düşük kalır.



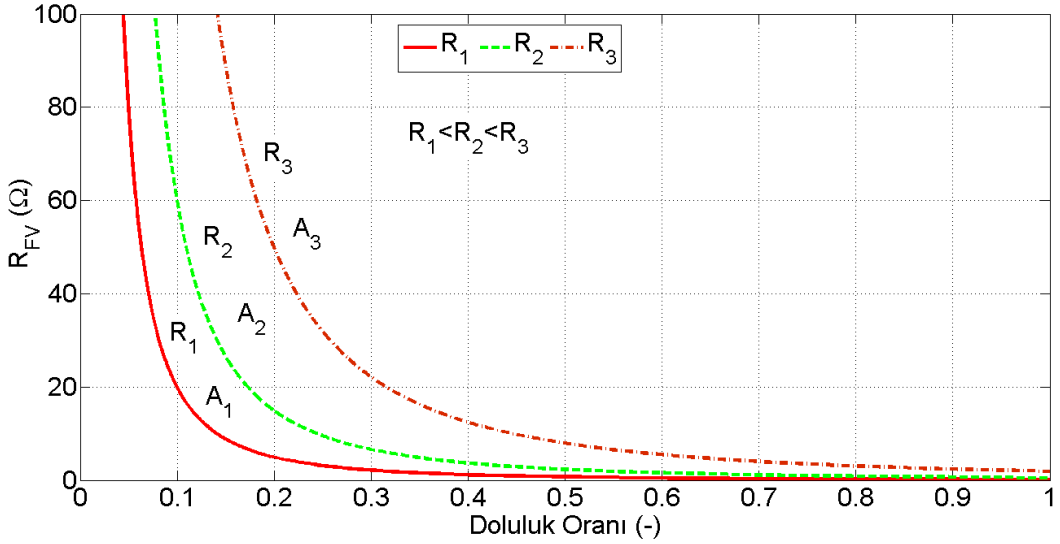
Şekil 2.4. $Q_{FV1}>Q_{FV2}>Q_{FV3}$ koşulunda düşürücü dönüştürücü MGNİ başarımı

2.1.1. İleri yönlü dönüştürücüde MGNİ analizi

İleri yönlü (forward) dönüştürücü düşürücü topolojisinden olup, yapısında bulunan transformatör sayesinde yüksek gerilim değerine sahip FV panel/dizileri daha düşük gerilim seviyelerine düşürmek için ideal bir dönüştürücüdür. Bu dönüştürücü için Eşitlik (2.5)'de verilen denkleme transformatörün birincil ve ikincil sargı oranının karesi eklenirse;

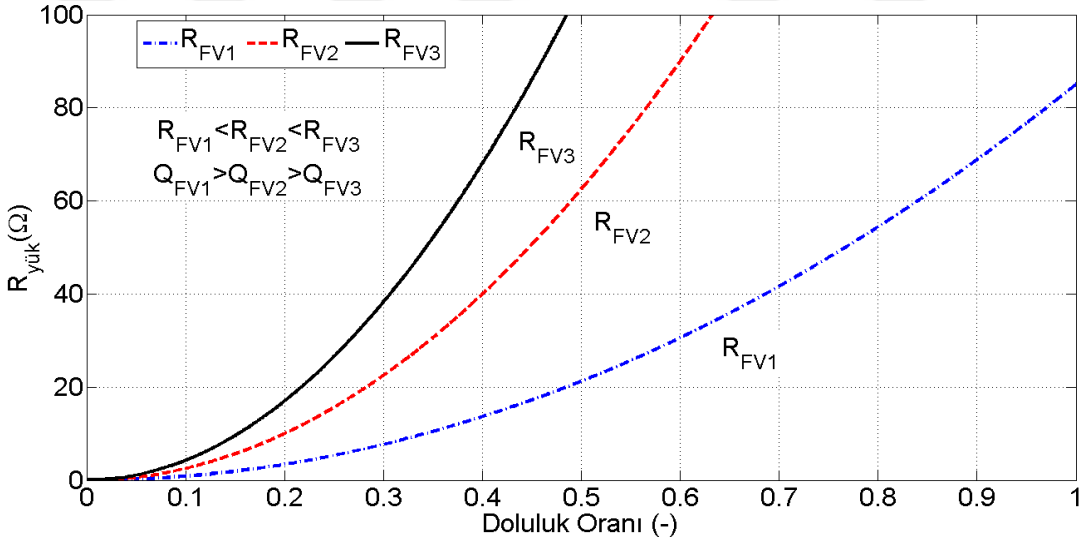
$$R_{FV}=\frac{R_{Yük}}{D^2}\left(\frac{N_P}{N_S}\right)^2 \tag{2.10}$$

denklemi elde edilir. Burada N_P ileri yönlü dönüştürücüde bulunan transformatörün birincil sargı sayısı, N_S ise ikincil sargı sayısıdır. Klasik düşürücü dönüştürücüden farkı, transformatör sargı oranı karesinin MGNİ başarımını etkilemesidir. Düşürücü dönüştürücüde olduğu gibi düşük değerli yük dirençleri kullanılması halinde MGNİ başarımı artmaktadır. Ayrıca $\alpha=N_P/N_S$ oranı ne kadar büyük olursa MGNİ başarımı daha yüksek olacaktır. Şekil 2.5'de $\alpha=2$ için MGNİ başarımı grafiksel olarak verilmiştir. Burada yine direnç eğrilerinin oluşturdukları alanlara bakılarak $R_1<R_2<R_3$ sonucuna ulaşılabilir. İleri yönlü dönüştürücüler yüksek güçlü düşürücü dönüştürücü ve yüksek gerilimli FV panel sistemleri için uygun olmakla beraber klasik düşürücü dönüştürücülere göre tasarımı daha zor olup, transformatör kullanımı maliyeti arttıran bir etkendir.



Şekil 2.5. $R_1<R_2<R_3$ için ileri yönlü dönüştürücü MGNİ başarımı

Sabit yük direnci için farklı ışınım koşulları altında ileri yönlü dönüştürücü MGNİ başarımı Şekil 2.6'da α=2 için verilmiştir. Görüleceği üzere büyük değerli ışınım için (Q_{FV1}) yük direncinin alabileceği değer 0-80Ω civarında iken, ışınım değeri azaldıkça yük direncinin alabileceği değer aralığı büyümektedir. Dolayısıyla düşük ışınım ve düşük değerli direnç değerleri için MGNİ başarım olasılığı artmaktadır.



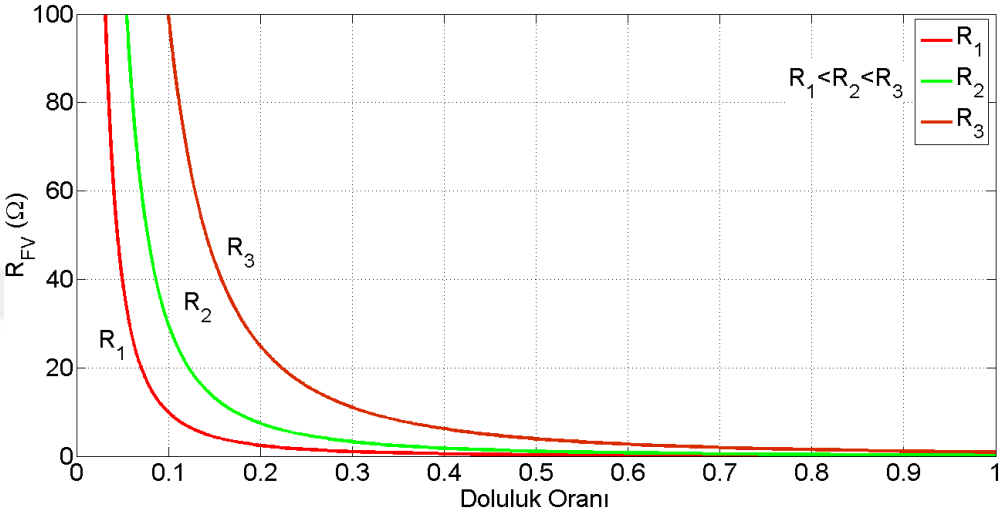
Şekil 2.6. $Q_{FV1}>Q_{FV2}>Q_{FV3}$ koşulunda ileri yönlü dönüştürücü MGNİ başarımı

2.1.2. Tam köprü dönüştürücüde MGNİ analizi

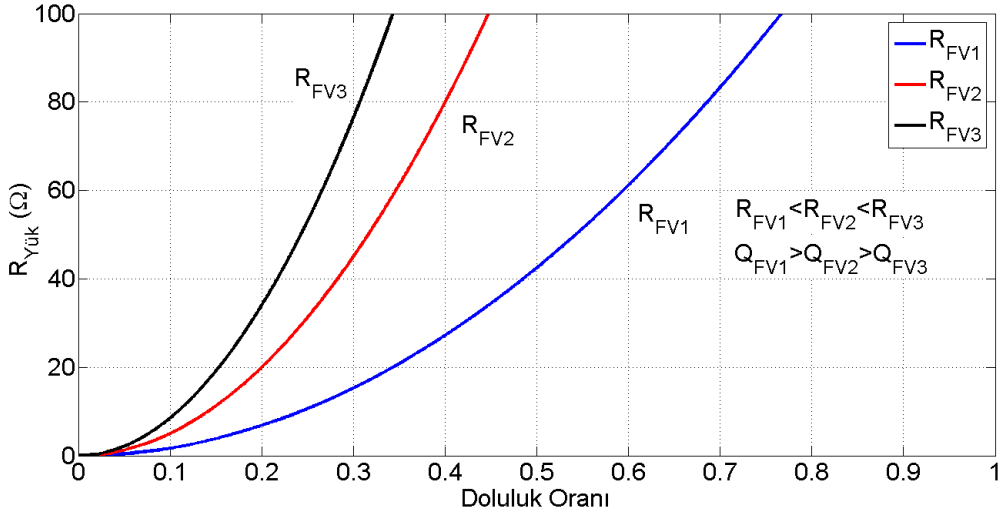
Tam köprü dönüştürücü dört güç anahtarı bulunan, evirici ara devreli yüksek güçlü uygulamalarda kullanılan düşürücü tip dönüştürücüdür. Bu dönüştürücü için $R_{FV}=f(D)$ fonksiyonu;

$$R_{FV}=\frac{R_{Yük}}{2D^2}\left(\frac{N_P}{N_S}\right)^2 \quad (2.11)$$

olarak yazılır [31]. Şekil 2.7'de ve Şekil 2.8'de α=2 için sırasıyla sabit ışınım ve sabit yük direnci durumları için benzer grafikler verilmiştir. Genel hatlarıyla klasik düşürücü dönüştürücü MGNİ başarım özellikleri bu dönüştürücü türü içinde geçerlidir.



Şekil 2.7. $R_1<R_2<R_3$ için tam köprü dönüştürücünün MGNİ başarımı

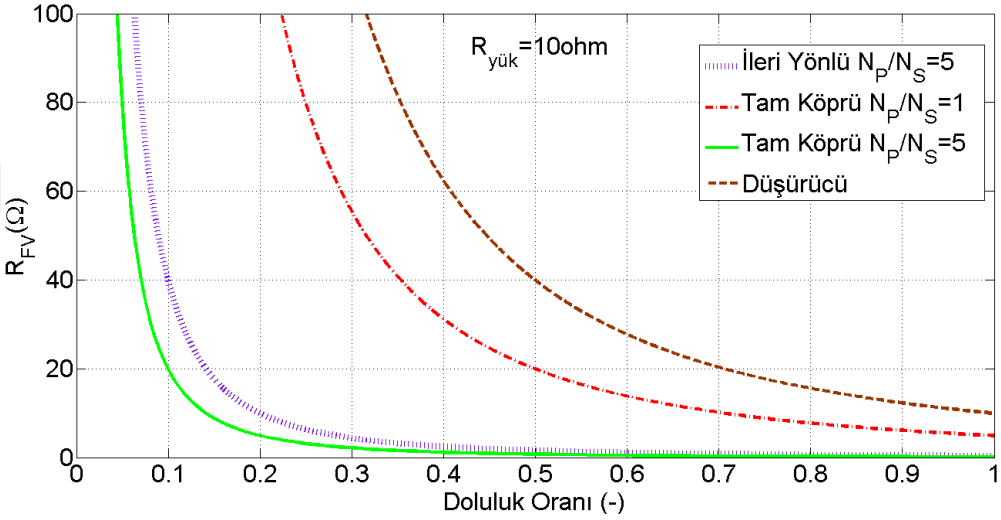


Şekil 2.8. $Q_{FV1}>Q_{FV2}>Q_{FV3}$ koşulunda tam köprü dönüştürücünün MGNİ başarımı

2.1.3. Düşürücü dönüştürücülerde MGNİ başarım karşılaştırılması

Bu kısımda, incelenen düşürücü dönüştürücü devrelerinin MGNİ başarımları ve donanımsal ihtiyaçları karşılaştırılmıştır. Şekil 2.9'da klasik düşürücü, ileri yönlü ve tam köprü dönüştürücü devreleri için $R_{yük}$=10Ω ve farklı α değerleri (izoleli ve evirici

ara devreleri dönüştürücüler için geçerli) için MGNİ başarımları grafiksel olarak gösterilmiştir. Daha öncede belirtildiği üzere düşürücü dönüştürücülerde α değeri büyüdükçe MGNİ başarımı artar. Şekil 2.9'daki eğrilerden de anlaşılacağı gibi, tam köprü dönüştürücü α=5 durumunda R_{FV}=f(D) fonksiyonu en büyük alanı kapladığı için MGNİ başarımı en yüksek dönüştürücüdür. α=5 olan ileri yönlü dönüştürücü MGNİ başarımı en büyük ikinci dönüştürücüdür. α=1 durumunda tam köprü dönüştürücü MGNİ başarımı α=5 durumuna nazaran daha kötüdür. Son olarak klasik düşürücü devre MGNİ başarımı en kötü düşürücü dönüştürücüdür.



Şekil 2.9. Düşürücü dönüştürücüler için sabit ışınım durumunda MGNİ başarım karşılaştırılması

Düşürücü dönüştürücülerin devre yapısı, kontrol kolaylığı, MGNİ başarımı ve doluluk oranı değişimi gibi ölçütler karşılaştırılarak Tablo 2.1'de özetlenmiştir. Düşürücü dönüştürücüleri ele aldığımızda en fazla eleman tam köprü dönüştürücüde olup, sıralama ileri yönlü ve klasik düşürücü olarak devam etmektedir. Kontrol devre kolaylığı, güç devresindeki anahtarın konumuna bağlı olarak izoleli bir sürme devresine ihtiyaç var mı sorusuna cevap olarak değerlendirilmiş olup, ileri yönlü dönüştürücü devresinde güç anahtarının kaynak (source) pini FV panel geriliminin negatif bağlantı noktasına bağlı olup, referans noktaları aynıdır. Dolayısıyla yalıtım yapılmaksızın FV panel gerilimi basit bir gerilim bölücü aracılığıyla kontrol kartının analog girişine bağlanabilir. İlave bir donanıma ihtiyaç yoktur. Klasik düşürücü ve tam köprü dönüştürücü devrelerinde ise izoleli sürme devresine ihtiyaç vardır ve kontrol devreleri daha karmaşık ve eleman sayısı daha fazladır.

Daha öncede ifade edildiği üzere, α sabit ve eşit olmak şartıyla tam köprü dönüştürücülerin MGNİ başarımları en iyidir. Sıralama ileri yönlü ve klasik düşürücü

olarak devam eder. Son karşılaştırma ölçütü ise doluluk oranı değişimidir. Aslında bu ölçüt MGNİ başarımının farklı bir açıdan açıklanmasını sağlar. Şekil 2.9'dan da anlaşılacağı üzere, tam köprü dönüştürücünün α=5 durumu için doluluk oranı değişimi yaklaşık olarak %8-100 iken klasik düşürücü için %32-100 aralığında olmaktadır. Bu tespite göre aynı ışınım şartlarında daha geniş doluluk oranı tarama fırsatı sağladığı için tam köprü dönüştürücülerde MGNİ başarımı daha iyidir.

Tablo 2.1. Düşürücü dönüştürücülerin MGNİ başarımı açısından karşılaştırılması [31]

Ölçütler	Sıralama (Az → Çok, İyi → Kötü veya Kolay → Zor)
Eleman Sayısı	Düşürücü, İleri Yönlü, Tam Köprü (Azdan çoğa sıralanmıştır.)
MGNİ Başarımı	Tam Köprü (α=5), İleri Yönlü (α=5), Tam Köprü (α=1), Düşürücü (İyiden kötüye sıralanmıştır.)
Kontrol Devre Kolaylığı	İleri Yönlü, Düşürücü, Tam Köprü (Kolaydan zora sıralanmıştır.)
Doluluk Oranı Değişimi	Tam Köprü (α=5), İleri Yönlü (α=5), Tam Köprü (α=1), Düşürücü (Azdan çoğa sıralanmıştır.)

2.2. Yükseltici Dönüştürücüde MGNİ Analizi

Yükseltici DA-DA dönüştürücüler prensip olarak FV panel geriliminden daha yüksek DA gerilime ihtiyaç duyulan batarya şarjı ve evirici uygulamalarında kullanılabilir. FV panel ve yükseltici dönüştürücü çıkışı için;

$$V_Ç = V_G \frac{1}{1-D} = V_{FV} \frac{1}{1-D} \tag{2.12}$$

$$I_Ç = I_G(1-D) = I_{FV}(1-D) \tag{2.13}$$

bağıntıları yazılabilir. Eşitlik (2.12)'de sırasıyla giriş gerilimi (FV panel gerilimi) ve dönüştürücü çıkış gerilimi yerine Eşitlik (2.3) ve Eşitlik (2.4)'deki gibi yazılırsa;

$$R_{Yük} I_Ç = R_{FV} I_{FV} \frac{1}{1-D} \tag{2.14}$$

elde edilir. Eşitlik (2.14)'de $I_Ç$ yerine Eşitlik (2.13) yazılır ve R_{FV} yalnız bırakılırsa;

$$R_{FV} = R_{Yük}(1-D)^2 \tag{2.15}$$

elde edilir. Eşitlik (2.15)'den doluluk oranı;

$$D=1-\sqrt{\frac{R_{FV}}{R_{Yük}}} \tag{2.16}$$

hesaplanabilir. Burada, düşürücü dönüştürücülerde kullanılan $R_{FV}=f(D)$ fonksiyonu yerine $D=f(R_{FV})$ fonksiyonunu kullanarak alan hesabı yapıp MGNİ başarımı belirlenir. R_1, R_2 ve R_3 dirençleri için MGNİ başarım bağıntıları Eşitlik (2.17)'de, Eşitlik (2.18)'de ve Eşitlik (2.19)'da yükseltici DA-DA dönüştürücüler için verilmiştir [31].

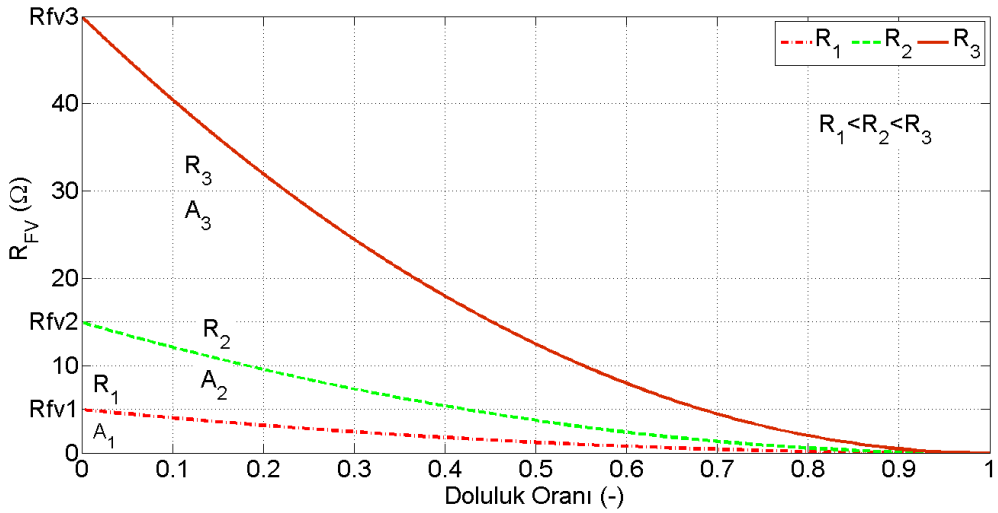
$$A_1=\int_0^{R_{fv1}} f(R_{FV})dR_{FV} \tag{2.17}$$

$$A_2=\int_0^{R_{fv2}} f(R_{FV})dR_{FV} \tag{2.18}$$

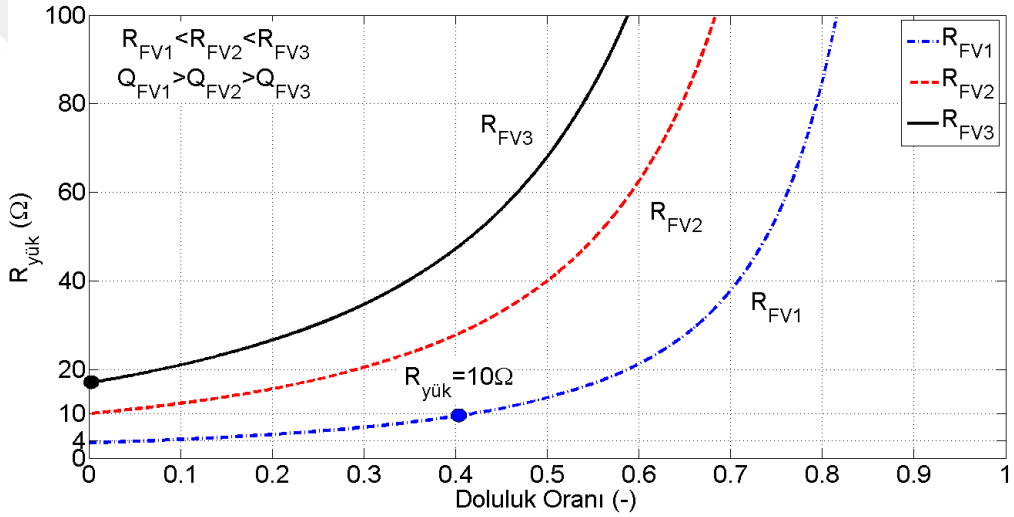
$$A_3=\int_0^{R_{fv3}} f(R_{FV})dR_{FV} \tag{2.19}$$

Sabit değerli güneş ışınımı durumunda dönüştürücü çıkışına bağlanan üç farklı direnç değeri için yükseltici dönüştürücü MGNİ başarımı Şekil 2.10'da verilmiştir. Yüksek değerli direnç değeri için daha büyük R_{FV} (daha büyük ışınım aralığı) aralığında MGNİ başarımı sağlanırken, yük direnci değeri azaldıkça, R_{FV}, yani ışınımın alabileceği değer aralığı küçülmektedir. Özetle, büyük değerli direnç, yükseltici dönüştürücülerde MGNİ başarım olasılığını artırmaktadır.

Yük direnci değerinin sabit ve ışınım değerinin değişken olduğu varsayıldığında, Eşitlik (2.17), Eşitlik (2.18) ve Eşitlik (2.19) kullanılarak belirlenen MGNİ başarımları Şekil 2.11'de verilen değişimler aracılığıyla değerlendirilebilir. Örneğin; Q_{FV1} en yüksek ışınım değerinde $R_{Yük}=10\Omega$ için MGNİ başarımı olumlu ve MGNİ D=%40 koşulunda sağlanırken, Q_{FV3} en düşük ışınım değerinde $R_{Yük}=10\Omega$ için MGNİ başarımı olumsuz, doluluk oranı değeri %0'a yakınsamakta ve MGNİ istenen düzeyde gerçekleşememektedir. Özetle yüksek değerli direnç ve ışınım koşulları, yükseltici dönüştürücülerin MGNİ başarımı için uygun koşullardır denilebilir.



Şekil 2.10. $R_1<R_2<R_3$ için yükseltici dönüştürücüde MGNİ başarımı



Şekil 2.11. $Q_{FV1}>Q_{FV2}>Q_{FV3}$ için yükseltici dönüştürücü MGNİ başarımı

2.3. Düşürücü-Yükseltici Dönüştürücülerde MGNİ Analizi

Düşürücü-yükseltici DA-DA dönüştürücü topolojisi D>%50 için yükseltici, D<%50 için düşürücü olarak çalışır. Bu özelliğinden dolayı hem düşürücü hem de yükseltici dönüştürücü olarak kullanılabilir. FV panel geriliminin ve MGN geriliminin yük direnci ve güneş ışınımı değerlerine bağlı olarak değişebilmesi sebebiyle, düşürücü-yükseltici dönüştürücüleri MGNİ başarımı en iyi dönüştürücülerdir. Bu dönüştürücü topolojisi için giriş ve çıkış büyükleri arasındaki bağıntılar;

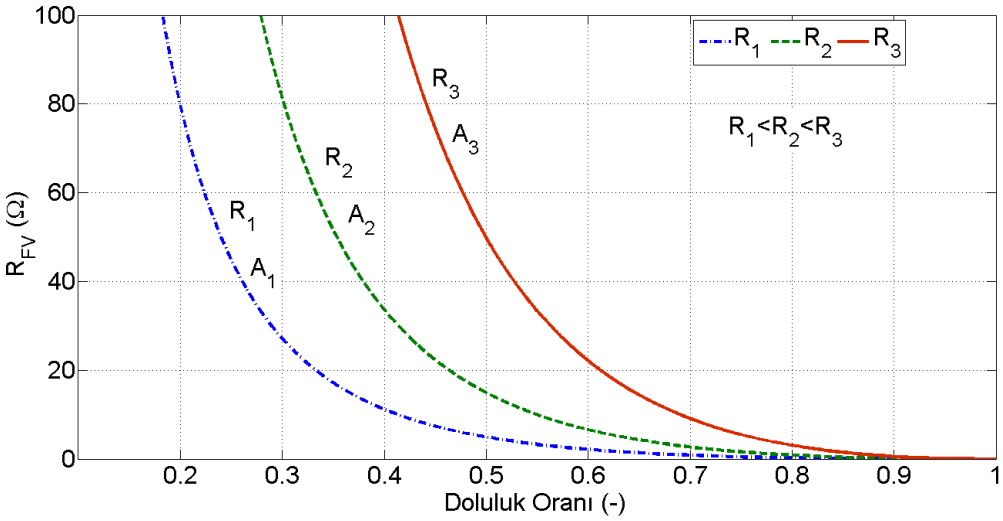
$$V_Ç=V_G\frac{D}{1-D}=V_{FV}\frac{D}{1-D} \tag{2.20}$$

$$I_{Ç}=I_G\frac{1-D}{D}=I_{FV}\frac{1-D}{D} \tag{2.21}$$

şeklinde yazılır. Eşitlik (2.20)'deki $V_Ç$ ve V_G yerine Eşitlik (2.3)'deki ve Eşitlik (2.4)'deki ve $I_Ç$ yerine Eşitlik (2.21)'deki ifade yazılırsa;

$$R_{FV}=R_{Yük}\frac{(1-D)^2}{D^2} \tag{2.22}$$

elde edilir. Şekil 2.12'de düşürücü-yükseltici dönüştürücünün MGNİ başarım eğrileri sabit ışınım ve üç farklı yük direnci değerleri için verilmiştir. Grafiğe bakıldığında R_{FV} güneş ışınımı değişkeni 0 - ∞ aralığında değişirken D doluluk oranı %0 - %100 aralığında değişim göstermektedir. Diğer bir ifadeyle, MGNİ başarımı güneş ışınımın ve yük direnci değerine bağlı değildir. Düşürücü ve yükseltici dönüştürücülerde olduğu gibi bir kısıtlama söz konusu değildir.

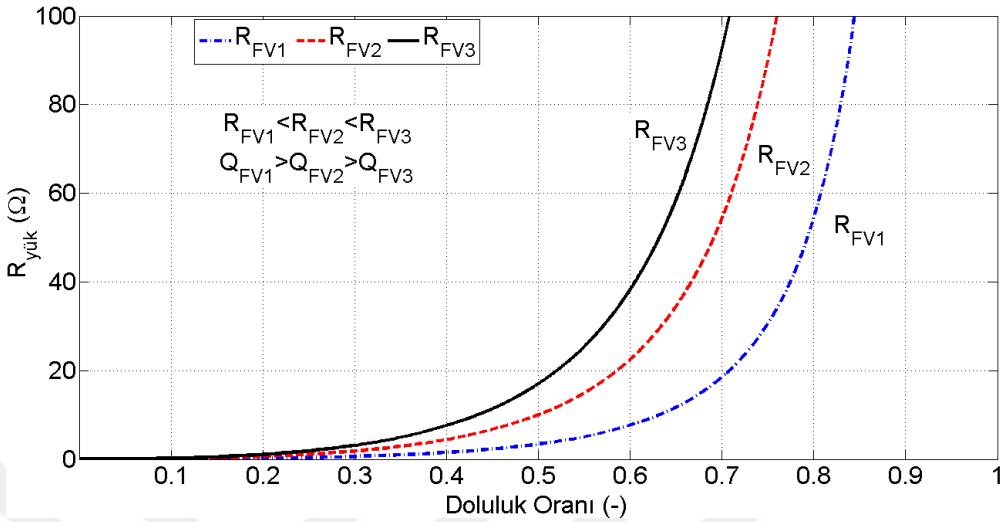


Şekil 2.12. $R_1<R_2<R_3$ için düşürücü-yükseltici dönüştürücüde MGNİ başarımı

Farklı yük direnci değerleri için MGNİ başarımı Şekil 2.13'de verilmiştir. Teorik olarak $R_{Yük}$ değerine bakılmaksızın MGNİ başarımının gerçekleşebileceği Şekil 2.13'de görülmektedir. $R_{Yük}$ değişim aralığı 0 - ∞ olarak gözükse de direnç değerinin çok büyümesi dönüştürücü çıkış gerilimini çok yükselteceğinden, dönüştürücü çıkışına bağlanan kondansatörün dayanma gerilimine de bakılarak, direnç değeri veya gerilim için yüksek sınır değeri belirlenmelidir.

Klasik düşürücü-yükseltici dönüştürücü devresinde bulunan güç transistörü FV panele seri bağlı olduğu için izoleli bir sürme devresi gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Ayrıca dönüştürücü çıkış gerilimi negatif polariteli (eviren) olduğu için MGNİ başarımı

açısından ve donanımsal olarak bazı problemler ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle diğer düşürücü-yükseltici dönüştürücüler MGNİ uygulamalarında öne çıkmaktadır.



Şekil 2.13. $Q_{FV1}>Q_{FV2}>Q_{FV3}$ koşulunda düşürücü-yükseltici dönüştürücü MGNİ başarımı

2.3.1. Geri dönüşlü (flyback) dönüştürücüde MGNİ analizi

Geri dönüşlü DA-DA dönüştürücüler izoleli düşürücü-yükseltici dönüştürücüler olup, kuplajlı endüktans tasarım kısıtları sebebiyle, düşük güçlü uygulamalarda kullanılmaktadır. Düşürücü-yükseltici dönüştürücüden farklı olarak, bu endüktansın birincil ve ikincil sargı sayıları MGNİ başarımını etkiler. Ayrıca dönüştürücü çıkış gerilimi FV panel gerilimi ile aynı polaritede olup, güç anahtarı kaynak (source) ucu, FV panel geriliminin negatif ucu ile aynı noktaya bağlı olduğundan anahtar sürme devresi ve FV panel gerilimi ölçme devresi, yükseltici dönüştürücüde olduğu gibi oldukça basittir. Dönüştürücü giriş ve çıkış büyüklükleri arasındaki bağıntılar;

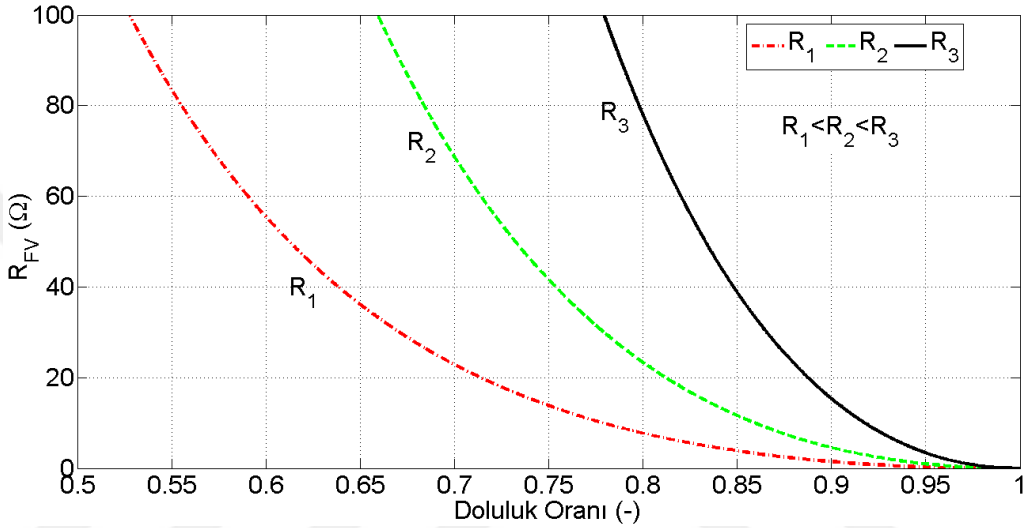
$$V_Ç = \frac{V_G}{\alpha}\frac{D}{1-D} = \frac{V_{FV}}{\alpha}\frac{D}{1-D} \tag{2.23}$$

$$I_Ç = \alpha I_G \frac{1-D}{D} = \alpha I_{FV}\frac{1-D}{D} \tag{2.24}$$

şeklinde elde edilir. Eşitlik (2.23)'de ve Eşitlik (2.24)'de $V_Ç$ ve V_G yerine Eşitlik (2.3)'deki ve Eşitlik (2.4)'deki ifadeler yazılır ve $I_Ç$ yerine Eşitlik (2.24) yazılırsa R_{FV} ve doluluk oranı arasındaki bağıntı;

$$R_{FV}=R_{Yük}\frac{(1-D)^2}{D^2}\left(\frac{N_P}{N_S}\right)^2 \quad (2.25)$$

şeklinde düzenlenebilir. α>1 için sabit güneş ışınımı altında farklı dirençler için MGNİ başarımı diğer dönüştürücülerde olduğu gibi grafiksel olarak Şekil 2.14'de verilmiştir. Tüm direnç değerleri için MGNİ başarımı mükemmeldir. Yük direnci değeri arttıkça doluluk oranı değişimi azalırken, MGNİ hızı artmaktadır.



Şekil 2.14. $R_1<R_2<R_3$ için geri dönüşlü dönüştürücüde MGNİ başarımı

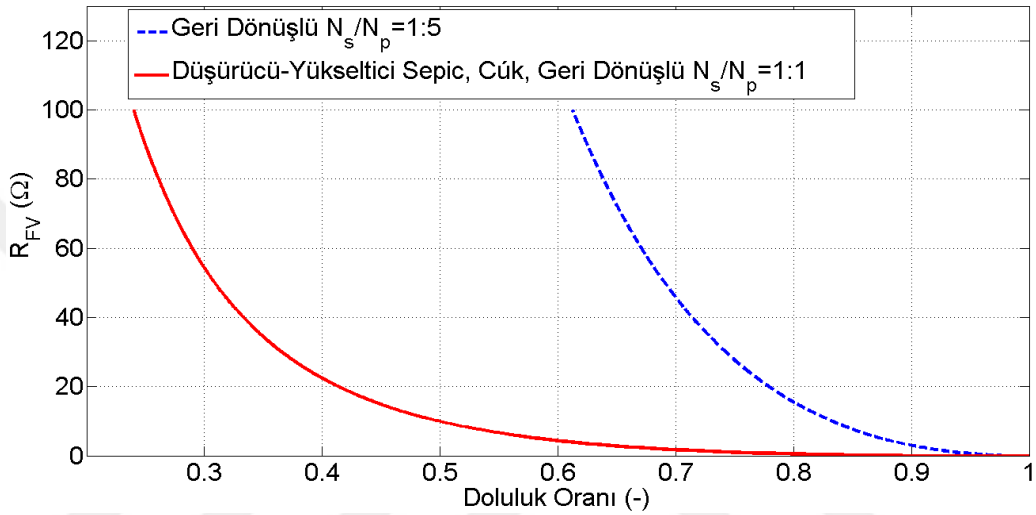
2.3.2. SEPIC ve Cúk dönüştürücülerde MGNİ analizi

SEPIC ve Cúk dönüştürücüler, izolesiz, pasif devre elemanı sayısı klasik düşürücü-yükseltici devreye göre fazla, denetimi kolay, geliştirilmiş birer düşürücü-yükseltici dönüştürücülerdir. Çıkış gerilimi ile giriş gerilimi arasındaki bağıntı klasik düşürücü-yükseltici ile aynı olduğu için burada denklemler tekrarlanmayacaktır. Cúk dönüştürücü çıkış gerilimi, giriş gerilimine göre ters polariteli olduğu için MGNİ uygulaması açısından dezavantajlıdır. SEPIC dönüştürücü ise yapısında bulunan endüktansların kuplajlanarak değerinin yarıya düşmesi, bakır kayıplarının azaltılması, güç anahtarı sürme kolaylığı, gerilim polaritesini değiştirmeme (evirmeyen çıkışlı) ve gerilimi hem yükseltme hem de düşürme gibi özelliklerinden dolayı MGNİ uygulamalarında öne çıkmaktadır [31].

2.3.3. Düşürücü-Yükseltici dönüştürücülerde MGNİ başarım karşılaştırılması

Düşürücü-yükseltici dönüştürücüler, gerilim dönüştürme özelliğinden dolayı MGNİ başarımı en yüksek dönüştürücülerdir. Klasik düşürücü-yükseltici, geri dönüşlü,

SEPIC ve cúk dönüştürücüler, eleman sayısı, MGNİ başarımı, denetim devresi ihtiyaçları ve denetim kolaylığı, gerilim polaritesi gibi ölçütler ele alınarak karşılaştırılmıştır. Geri dönüşlü dönüştürücü yapısında bulunan kuplajlı endüktansın α=1 (N_P=N_S) olması halinde belirtilen tüm dönüştürücülerin MGNİ başarımı aynıdır. α değeri büyüdükçe Şekil 2.15'de görüleceği üzere geri dönüşlü dönüştürücünün doluluk oranı değişimi azalmaktadır. α'nın artması bu dönüştürücü için MGNİ hızını arttırdığı için MGNİ başarımı olumlu yönde etkilenmektedir.



Şekil 2.15. Düşürücü-yükseltici dönüştürücüler için eşit değerli ışınım ve yük direnci durumunda MGNİ başarımlarının grafiksel olarak gösterimi [31]

İncelenen düşürücü-yükseltici dönüştürücülerin temel devre eleman sayılarına bakıldığında; klasik ters polariteli düşürücü-yükseltici dönüştürücü en az elemana sahiptir. Sıralama Tablo 2.2'de verildiği üzere geri dönüşlü ve SEPIC ve cúk dönüştürücü olarak devam eder. MGNİ başarımı ile ilgili Şekil 2.15 referans alınarak doluluk oranı değişimine bakılabilir. Geri dönüşlü dönüştürücü yapısında bulunan kuplajlı endüktans sargı oranı α>1 durumunda en yüksek MGNİ başarımına sahip olup, diğer dönüştürücüler arasında bir fark yoktur. Denetim devre ihtiyaçları ve denetim kolaylığı açısından bakıldığında, yükseltici dönüştürücüde olduğu gibi, SEPIC ve cúk dönüştürücülerde güç anahtarı kaynak (source) bağlantı noktası FV panel ile aynı referansa bağlı olduğu için izoleli bir sürme devresine ihtiyaç duyulmaz ve bu sayede denetim işlemi ve MGNİ algoritması işletilmesi klasik düşürücü-yükseltici devreye göre kolaylaşır. Son olarak dönüştürücü çıkış gerilim polaritelerine göre bir karşılaştırma yapılabilir. Klasik düşürücü-yükseltici ve cúk dönüştürücüler girişe göre ters polariteli (eviren) olduğu için donanımsal kısıta sahip olup, SEPIC ve geri dönüşlü dönüştürücüler aynı polariteye sahip olduğu için MGNİ başarımları daha iyidir.

Tablo 2.2. Düşürücü-yükseltici dönüştürücülerin MGNİ başarım karşılaştırılması [31]

Kriterler	Sıralama (Az → Çok, İyi → Kötü, Kolay → Zor)
Eleman Sayısı	Düşürücü - yükseltici, geri dönüşlü, (SEPIC, cúk) (Azdan çoğa sıralanmıştır.)
MGNİ Başarımı	Geri dönüşlü (α=5), (Düşürücü - yükseltici, geri dönüşlü (α=1), SEPIC, cúk) (İyiden kötüye sıralanmıştır.)
Kontrol Devre Kolaylığı	(SEPIC, cúk), geri dönüşlü, düşürücü – yükseltici (Kolaydan zora sıralanmıştır.)
Doluluk Oranı Değişimi	Geri dönüşlü (α=5), (Düşürücü - yükseltici, geri dönüşlü (α=1), SEPIC, cúk) (Azdan çoğa sıralanmıştır.)

2.4. DA-DA Dönüştürücülerde MGNİ Başarımlarının Karşılaştırılması

Bu kısımda düşürücü, yükseltici ve düşürücü-yükseltici dönüştürücülerin MGNİ başarımlarını belirlemek için dört farklı senaryo için benzetim çalışmaları MATLAB/Simulink programında gerçekleştirilmiş ve yapılan tespitler doğrulanmıştır. Üç dönüştürücü devresi değiştir gözle algoritması ile Tablo 2.3'te verilen senaryolar doğrultusunda çalıştırılmıştır. Benzetim çalışmaları esnasında kullanılan FV panel katalog değerleri, değiştir gözle algoritma çalışma parametreleri ve dönüştürücü devresi temel değerleri Tablo 2.4'te verilmiştir.

Tablo 2.3. DA-DA dönüştürücülerin MGNİ başarımlarının değerlendirilmesi için bazı benzetim senaryoları

Güneş Işınımı (W/m^2)	**Yük Direnci (Ω)**	**Düşürücü**	**Yükseltici**	**Düşürücü-Yükseltici**
1000	50	-	+	+
200	50	-	+	+
1000	1	+	-	+
200	5	+	-	+

Tablo 2.4. MGNİ başarımı karşılaştırması için kullanılan FV panelin katalog değerleri, dönüştürücü ve değiştir gözle algoritmasının parametreleri

Güneş Paneli Parametreleri (Standart Test Koşulları)	**Değer**	**Dönüştürücü Parametreleri**	**Değer**
Açık devre gerilimi (V_{AD})	44,2V	Endüktans	1mH
MGN gerilimi (V_{MGN})	35,2V	Giriş/Çıkış Kond.	470μF/100μF
Kısa devre akımı (I_{KD})	5,2A	Frekans	20kHz
MGN akımı (I_{MGN})	4,95A	D&G alg. (D_b)	%80 (adım:%1)

2.4.1. Benzetim-1: Q_{FV}=1000W/m^2, T_H=25ºC, $R_{Yük}$=50Ω

Tablo 2.4'te verilen panel özelliklerine göre standart test koşullarında (1000W/m^2, 25ºC ve AM:1,5) MGN eş değer panel direnci $R_{FV, MGN}$;

$$R_{FV,MGN} = \frac{V_{MGN}}{I_{MGN}} \tag{2.26}$$

ile hesaplandığında 7,1Ω sınır değeri elde edilir. Bunun anlamı; $R_{Yük}$<7,1Ω için düşürücü dönüştürücünün mükemmel MGNİ gerçekleştirebileceğidir. Şekil 2.16'da güç değişimi incelendiğinde (Benzetim-1: 1 nolu grafik), FV panelden çekilen gücün 25W civarında olduğu görülmektedir. Halbuki standart test koşullarında Tablo 2.4'te verilen FV panel 175W güç üretme kapasitesine sahiptir. Dönüştürücü çıkışına bağlanan $R_{Yük}$>7,1Ω için MGNİ başarımı olumsuzdur. MGNİ verimi;

$$\eta_{MGNİ} = \frac{\int_0^{\Delta t} Pdt}{\Delta t P_{MGN}} \tag{2.27}$$

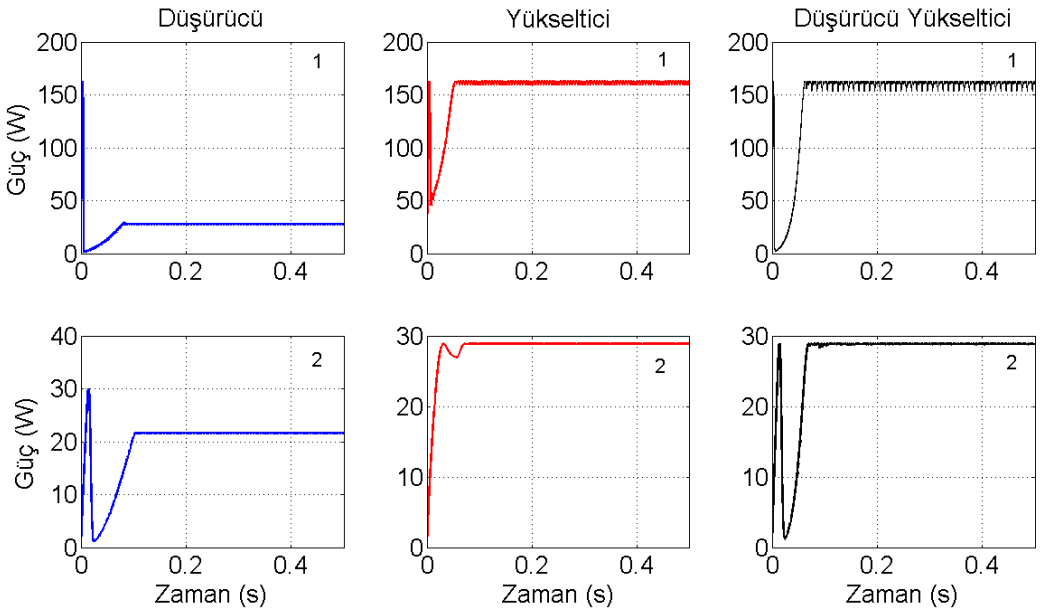
olmak üzere, düşürücü dönüştürücünün 0,5 saniyelik periyot için MGNİ verimi %15,72 olarak hesaplanmıştır. Daha öncede belirtildiği üzere yükseltici dönüştürücülerin yüksek değerli direnç yükü için MGNİ başarımları yüksektir. Aslında yüksek değerli direnç göreceli bir kavram olup, önemli olan ilgili test koşulunda MGN'de eş değer panel direncinin değeridir. Q_{FV}=1000W/m^2, T_H=25ºC için bu sanal direnç 7,1Ω olarak hesaplanmış olup, $R_{Yük}$>7,1Ω koşulu bu senaryoda sağlandığı için MGNİ mükemmel bir şekilde sağlanmış ve güneş panelinden yaklaşık 175W elde edilmiştir. MGNİ verimi 0,5 saniyelik periyot için %94,24 olarak hesaplanmıştır. Şekil 2.16'da bu benzetim çalışmasına ait gerilim, akım ve güç değişimleri (1 nolu grafik) verilmiştir. Düşürücü-yükseltici dönüştürücü için ışınım ve yük direnci değeri MGNİ başarımını etkilemediği için Şekil 2.16'da MGNİ başarımı olumlu, MGNİ veirmi %89,18 olarak hesaplanmıştır. Düşürücü-yükseltici dönüştürücünün MGNİ veriminin daha düşük olmasının sebebi, dönüştürücünin giriş ve çıkışındaki akım ve gerilim dalgalanmasının yükseltici dönüştürücüye göre daha fazla olmasıdır. Daha öncede ifade edildiği üzere, düşürücü-yükseltici dönüştürücülerde yük direnci değerinin çok büyük olması durumunda çıkış gerilimi de yükselmekte ve çıkış kondansatörünün yüksek dayanma gerilimine sahip olması gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

2.4.2. Benzetim-2: Q_{FV}=200W/m^2, T_H=25ºC, $R_{Yük}$=50Ω

Q_{FV}=200W/m^2 ve T_H=25ºC çalışma şartlarında R_{FV}<50Ω koşulu sağlandığı için MGNİ başarımı olumsuzdur. Bu çalışma şartlarında MGN gücü 30W olup, Şekil 2.16'da görüldüğü üzere FV panelden çekilen güç (2 nolu grafik) yaklaşık 20W civarındadır. MGNİ başarımı istenen düzeyde sağlanamamış olup, MGNİ verimi %67,28 olarak hesaplanmıştır. $R_{Yük}$=50Ω>R_{FV}=7,1Ω olduğu için yükseltici dönüştürücünün MGNİ başarımı ise olumludur. Şekil 2.16'da verildiği üzere (2 nolu grafik) FV panelden yaklaşık 30W'lık güç çekilmekte ve MGNİ mükemmel bir şekilde sağlanmaktadır. MGNİ verimi 0,5 saniyelik periyotta %97,61 olarak hesaplanmıştır. Diğer yandan, düşürücü-yükseltici dönüştürücünün MGNİ başarımı yük direnci ve ışınım değerlerine bağlı olmadığı için beklenen düzeyde olup, MGNİ verimi %92,20'dir. Tablo 2.5'de üç DA-DA dönüştürücü topolojisi için MGNİ başarım sonuçları verilmiştir.

Tablo 2.5. DA-DA dönüştürücülerin topolojik olarak MGNİ başarım (benzetim) sonuçları

Dönüştürücü	**1 (%)**	**2 (%)**	**3(%)**	**4 (%)**
Düşürücü	15,72	67,28	95,40	98,16
Yükseltici	94,24	97,61	18,97	18,38
Düşürücü-yükseltici	89,18	92,20	94,82	93,84



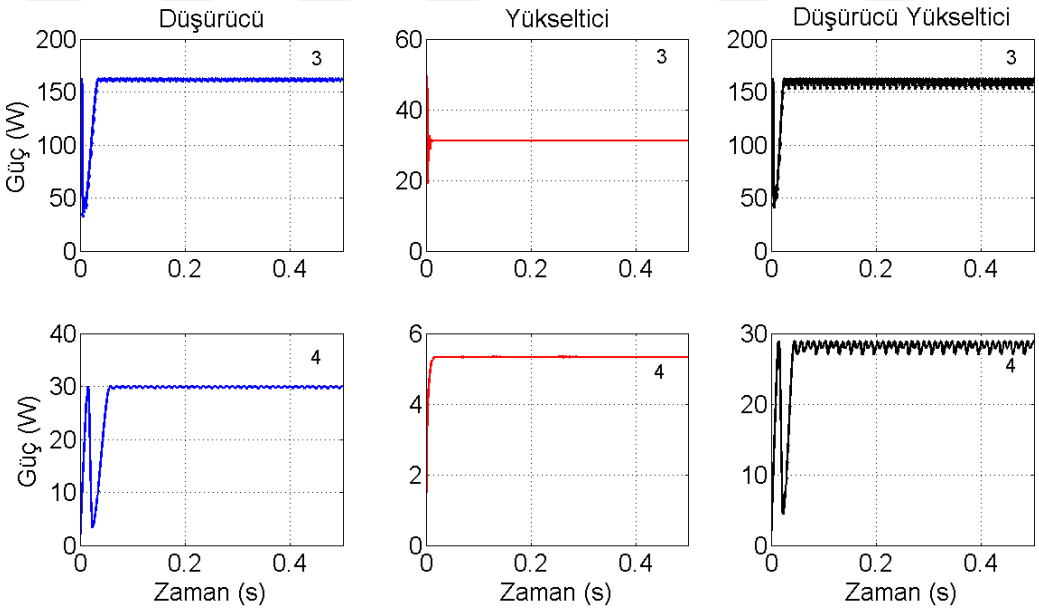
Şekil 2.16. Q_{FV}=1000W/m^2, T_H=25ºC ve $R_{Yük}$=50Ω koşullarında FV panel güç değişimleri (Benzetim-1), Q_{FV}=200W/m^2, T_H=25ºC ve $R_{Yük}$=50Ω koşullarında FV panel güç değişimleri (Benzetim-2)

2.4.3. Benzetim-3: Q_{FV}=1000W/m^2, T_H=25ºC, $R_{Yük}$ =1Ω

Bu senaryoda yük direnci değeri oldukça düşüktür. Işınım ve sıcaklık değerleri standart test koşullarının oluştuğunu göstermektedir. $R_{Yük}<R_{FV}$ koşulu sağlandığı için düşürücü dönüştürücü MGNİ başarımı olumludur. FV panelden yaklaşık 175W güç çekilmekte olup, MGNİ verimi %95,40'dır. Şekil 2.17'de düşürücü dönüştürücü girişine bağlı FV panelin güç değişimi (3 nolu grafik) gösterilmiştir.

Yükseltici dönüştürücülerin MGNi başarımlarının yüksek olması için gerek ve yeterli koşul; yüksek güneş ışınımı ve $R_{Yük}>R_{FV}$ koşulunun sağlanmasıdır. Bu senaryoda, yük direnci değeri FV panel eş değer direncinden küçük olduğu için MGNİ başarımı olumsuzdur. Şekil 2.17'deki güç değişimine bakıldığında 60W civarında güç elde edildiği ve bu değerin 175W'dan oldukça düşük kaldığı görülmektedir. MGNİ verimi %18,97'dir.

İlk iki senaryoda olduğu gibi düşürücü-yükseltici dönüştürücü MGNİ başarımı bu senaryoda da olumludur. FV panelden çekilen güç 175W civarında olup, FV panel güç değişimi (3 nolu grafik) Şekil 2.17'de verilmiştir. MGNİ verimi 0,5 saniyelik periyot için %94,82 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 2.17. Q_{FV}=1000W/m^2, T_H=25ºC ve $R_{Yük}$=1Ω koşullarında FV panel güç değişimleri (Benzetim-3), Q_{FV}=200W/m^2, T_H=25ºC ve $R_{Yük}$=5Ω koşullarında FV panel güç değişimleri (Benzetim-4)

2.4.4. Benzetim-4: Q_{FV}=200W/m^2, T_H=25ºC, $R_{Yük}$=5Ω

Düşürücü dönüştürücünün Q_{FV}=200W/m^2 $R_{Yük}$=50Ω koşullarında MGNİ başarımı Şekil 2.16'da verildiği üzere olumsuzdu. Aynı ışınım değeri için daha düşük değerli bir direncin dönüştürücü çıkışına bağlandığında, Şekil 2.17'de görüldüğü üzere $R_{Yük}<R_{FV,200W/m^2}$ olduğu için MGNİ başarımı olumlu hale gelir ve düşürücü dönüştürücünün MGNİ verimi %98,16 olur. Yükseltici dönüştürücünün MGNİ başarımı ise $R_{Yük}<R_{FV,200W/m^2}$ koşulu sağlandığı için olumsuzdur. Yükseltici dönüştürücünün MGNİ verimi %18,38'dir. Şekil 2.17'de bu dönüştürücü için güç değişimi (4 nolu grafik) verilmiştir.

Diğer üç benzetim çalışmasında olduğu gibi düşürücü-yükseltici dönüştürücünün MGNİ başarımı olumludur. Şekil 2.17'de verildiği üzere FV panelden 200W/m^2 ışınım altında 30W civarında bir güç çekilmektedir. FV panel güç değişimi (4 nolu grafik) Şekil 2.17'de gösterilmiştir. MGNİ verimi %93,84 olarak hesaplanmıştır.

2.5. Genel Değerlendirme

Bu bölümde, incelenen DA-DA dönüştürücülerin $R_{FV}=f(D,R_{Yük})$ veya $D=f(R_{FV},R_{Yük})$ fonksiyonları kullanılarak yapılan MGNİ başarım değerlendirmeleri ve bazı diğer topolojik ve donanımsal karşılaştırmaları içeren genel bir özet Tablo 2.6'da verilmiştir. Tablo 2.7'de ise Tablo 2.6 için gerekli bazı açıklamalara yer verilmiştir.

2.5.1. Eleman sayısı ve maliyet

İncelenen tüm dönüştürücülerin temel devreleri baz alınarak, eleman sayıları ve tipik maliyetleri dikkate alınarak, güç ve sürme devresi ve MGNİ için gerekli olan algılama elemanı ihtiyaçlarına göre bir karşılaştırma yapılmıştır.

2.5.2. FV panel akımı

DA-DA dönüştürücü girişinin FV panele seri bağlı olduğu durum düşünülerek, FV panel akımının sürekli olup olmadığı incelenmiştir. Girişinde endüktans içeren DA-DA dönüştürücülerde akım sürekli iken, girişinde güç anahtarı bulunan dönüştürücülerde panel akımı kesintilidir. FV panel akımının kesintili olması, akım ölçme işlemini zorlaştıracaktır.

2.5.3. Topolojik MGNİ başarımı

DA-DA dönüştürücülerin gerilim dönüştürme özelliğine bağlı olarak değişen topolojik MGNİ başarımları incelenmiştir. Düşürücü-yükseltici topolojisinin üstünlüğü vurgulanarak, transformatörlü dönüştürücülerde, sarım sayısı oranının MGNİ başarımını etkilediği belirlenmiştir.

2.5.4. Güneş ışınımı ve yük direnci

DA-DA dönüştürücülerin MGNİ başarımlarını etkileyen güneş ışınımı ve yük direnci parametreleri ele alınmıştır. Düşürücü-yükseltici dönüştürücüler için bu parametreler MGNİ başarımını etkilemezken, düşürücü dönüştürücüler için uygun koşullar düşük değerli ışınım ve dirençtir. Yükseltici dönüştürücü için ise yüksek ışınım ve yüksek değerli direnç olması durumunda MGNİ başarım olasılılığı artar.

Tablo 2.6. DA-DA dönüştürücülerin MGNİ başarım değerlendirilmesi

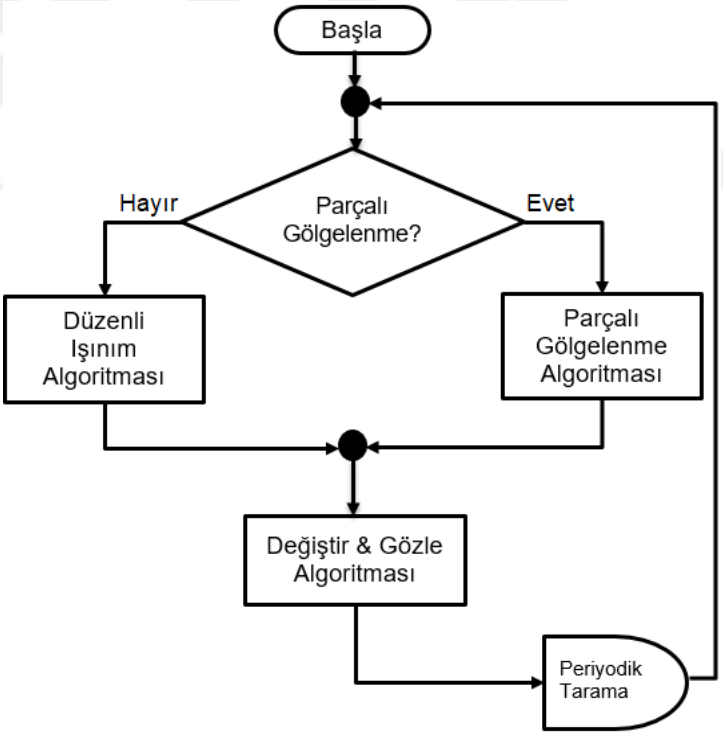
Devre	Eleman Sayısı ve Maliyet		FV Akım[5]	MGNİ Başarımı Topolojik[4]		Güneş Işınımı		Yük Direnci	
	Güç Devresi[3] Az→Çok	Sürme Algılama (MGNİ)[1] Kolay→Zor		$N_s/N_p=1$	$N_s/N_p<1$	Yüksek Limit	Düşük Limit	Yüksek Limit	Düşük Limit
Düşürücü	*	**	K	#		x	x	R_{FV}	^{2}~0
İleri Yönlü	****	***	K		##	xx	xx	R_{FV}	^{2}~0
Tam Köprü	*****	***	K		###	xxx	xxx	R_{FV}	^{2}~0
Yükseltici	*	*	S	#		xxxx		$^{2}\infty$	R_{FV}
Düşürücü-Yükseltici	*	**	K	####		xxxx	x	^{2}~∞	^{2}~0
Cúk	***	*	S	####		xxxx	x	$^{2}\infty$	^{2}~0
Sepic	***	*	S	####		xxxx	x	^{2}~∞	^{2}~0
Geri Dönüşlü	**	**	K	####	#####	xxxxx	xx	^{2}~∞	^{2}~0
Karş.	A-1	A-2	B	C	C	C	E	F	G

Tablo 2.7. Tablo 2.6 için açıklamalar tablosu

No	Açıklama
1	FV panel akım, gerilim ölçümü, kapı sürme devresi için yalıtım ve güç anahtarı sayısı dikkate alınmıştır.
2	Güç miktarı ve çalışma moduna bağlı (Sürekli mod veya Süreksiz mod)
3	Eleman sayısı ve fiyatları dikkate alınmıştır.
4	Topolojik olarak değerlendirilmiştir.
5	K: Kesintili, C:Sürekli

3. ÖNERİLEN MGNİ ALGORİTMASI

Bu bölümde, geliştirilen MGNİ algoritmasının teorik altyapısı oluşturularak, algoritma aşama aşama anlatılmış ve parçalı gölgelenmenin oluşup oluşmadığını belirlemek için önerilen farklı ve verimli bir yaklaşım izah edilmiştir. Geliştirilen MGNİ algoritması temel olarak Şekil 3.1'deki basit akış diyagramı ile gösterilebilir. Bu diyagrama göre global MGNİ periyodik olarak gerçekleştirilir. İlk olarak parçalı gölgelenme olup olmadığı denetlenir. Gölgelenme varsa parçalı gölgelenme algoritması, gölgelenme yoksa düzenli ışınım algoritması devreye girer. Bu iki alt algoritmada temel olarak, güç dönüştürücü devresinde yer alan yarı iletken anahtara uygulanan DGM'nin doluluk oranı değerinin ilk değerini ideale yakın belirlenmesi hedeflenir. Son aşamada ise değiştir gözle algoritması MGNİ'yi devam ettirir.



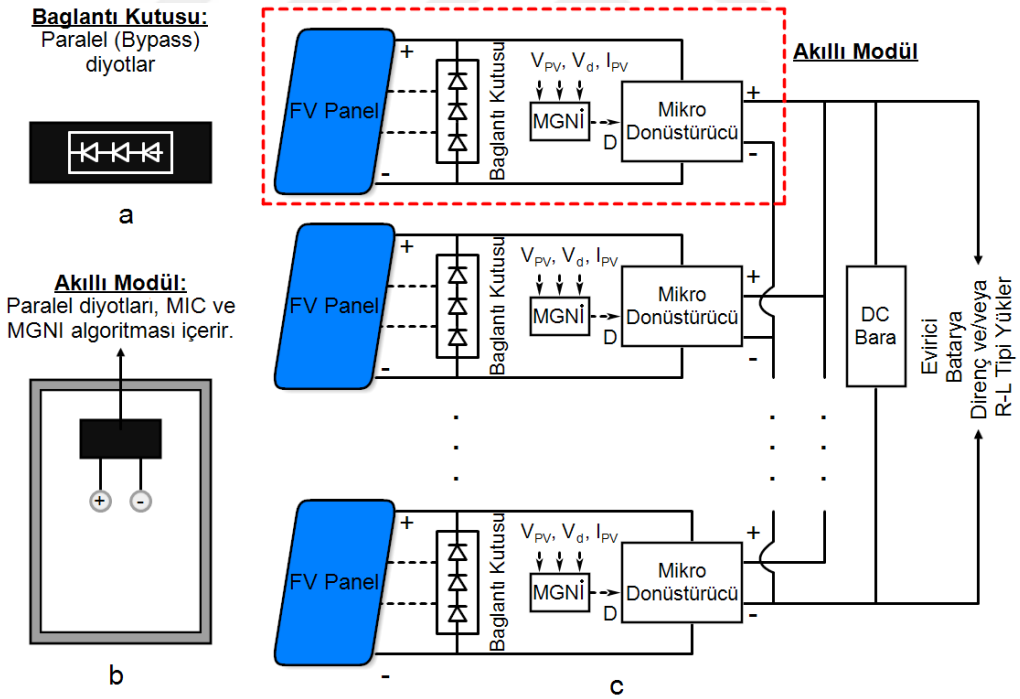
Şekil 3.1. Önerilen MGNİ algoritmasının akış diyagramı

Önerilen algoritma düşük güçlü ve genellikle tek bir FV panel içeren, modül bazlı dönüştürücü, akıllı modül, mikro dönüştürücü uygulamaları ve dağıtılmış maksimum güç noktası izleme (DMGNİ) uygulamaları referans alınarak geliştirilmiştir. Şekil 3.2'de önerilen algoritmanın uygulanacağı belirli sayıda FV panelin mikro dönüştürücüleri beslediği ve MGNİ işleminin her bir FV panelde bağımsız olarak

gerçekleştirildiği DMGNİ sistemi, paralel diyotların bulunduğu bağlantı kutusu ve akıllı FV panellerden oluşan test sistemi verilmiştir. Şekil 3.2'deki DMGNİ sisteminde belirli sayıdaki FV panel, mikro dönüştürücüler aracılığıyla paralel bağlanmıştır. Sistem çıkışı bir batarya grubuna, omik veya omik-endüktif yük grubuna veya bir eviriciye bağlanabilir. Tez çalışmasında algoritma başarımını test etmek için omik yük tipi tercih edilmiştir.

3.1. FV Panelin Parçalı Gölgelenme Durumunun Tespit Edilmesi

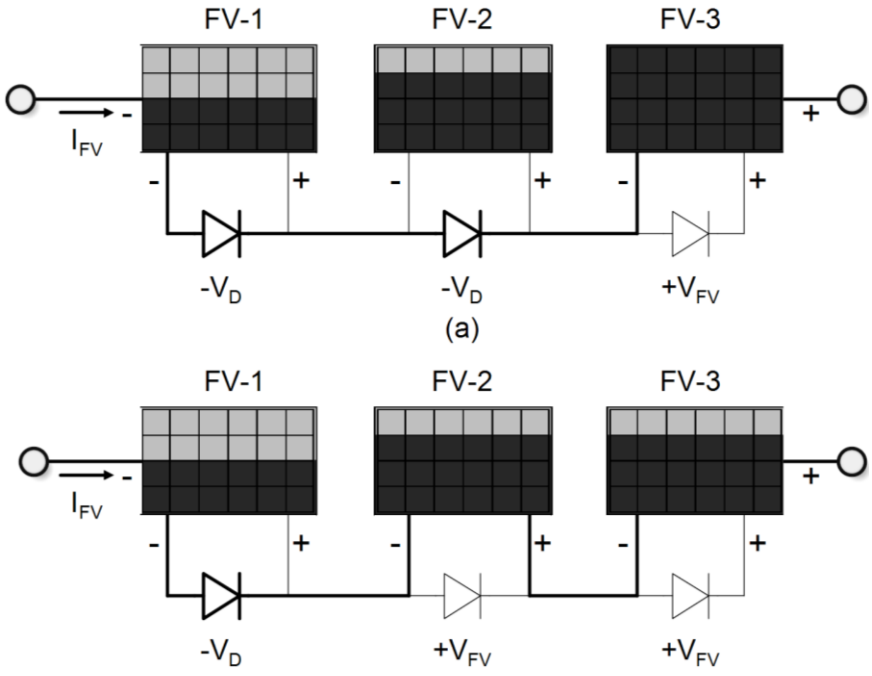
FV panel yüzeyine düşen güneş ışınımı her noktada eşit değilse, parçalı gölgelenme meydana gelmiş demektir. Parçalı gölgelenme; FV panel yüzeyinde bölgesel ısınmalara yol açar ve panelin gölgelenen kısmına ulaşan güneş ışınım değerine bağlı olarak bir akım üretileceği için verimsiz bir çalışma oluşur. Gölgelenme durumunda FV panelin güç üretme kapasitesini arttırmak için birkaç tane paralel diyot, seri bağlanmış FV modüllere ters paralel bağlanarak alternatif bir akım yolu sağlanır. Böylelikle gölgelenmemiş modüller tam kapasitede çalışmış olur.



Şekil 3.2. Fotovoltaik sistem genel yapısı a) Bağlantı Kutusu b) Akıllı Modül (Dönüştürücülü) c) DMGNİ sistemi

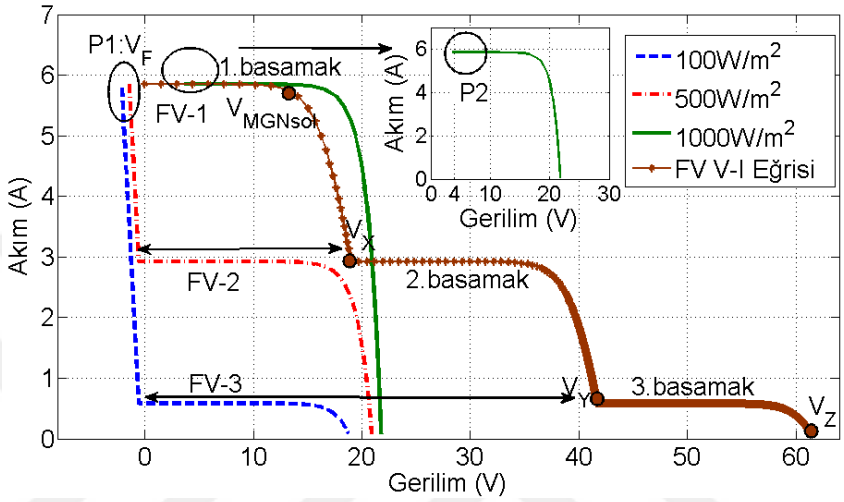
Şekil 3.3'de tek bir FV panele ait iki farklı gölgelenme durumu için elektriksel eş değer devre modeli verilmiştir. Şekil 3.3'den anlaşılacağı üzere FV panel üç adet modülden ve modüllere paralel bağlı üç tane paralel diyottan oluşmaktadır. Şekil 3.3.a'daki devrede seri iki modüle (FV-1 ve FV-2) paralel bağlı diyotlar iletim halinde olup,

modüller üzerinde diyot ileri gerilim düşümü oluşmaktadır. FV panel Şekil 3.4'deki güç-gerilim grafiğine göre 1. basamakta çalışmaktadır. P1 dairesi içine ayrıntılı bakıldığında, 100W/m^2 ve 500W/m^2 ışınıma maruz kalan modüllerde negatif gerilim (diyot ileri gerilim düşümü) oluştuğu görülmektedir. Bu basamakta FV panel gerilimi 0 ile V_X volt aralığında olup, FV-1 ve FV-2 modülleri negatif gerilim üretmekte ve bir direnç yükü gibi davranarak bölgesel ısınmalara sebep olurlar. Şekil 3.3.b'de ise FV-1 modülü, FV-2 ve FV-3 modüllerine göre daha düşük ışınıma maruz kalmış olup, sadece FV-1 modülüne bağlı paralel diyot iletim halindedir. Bu durumda FV panel gerilimi Şekil 3.4'de görüleceği üzere, tek bir modül üzerinde negatif gerilim oluştuğu için, FV panel gerilim değeri, V_X ile V_Y (akım-gerilim eğrisi 2. basamak) aralığındadır. FV panel Şekil 3.4'de verilen güç-gerilim eğrisinin üçüncü basamağında çalışırsa üç modülün de paralel diyotları kesim durumunda ve diyotlar üzerindeki gerilim pozitif değerli olacaktır. Böyle bir durumda FV panel gölgelenmiş bile olsa diyot gerilimleri kontrol edilerek parçalı gölgelenme denetimi yapmak mümkün olmayacaktır. Dolayısıyla, FV panel bir süre $V_{FV}<V_{MGN,sol}$ şartını sağlayacak şekilde (Sol MGN (1.basamak) bölgesi) çalıştırılarak diyot gerilimleri izlenmelidir. Bunun sebebi, gerilimin düşük olduğu birinci basamakta, parçalı gölgelenme meydana gelmişse en az bir diyot geriliminin negatif olma zorunluluğudur. İleriki kısımlarda $V_{MGN,sol}$ gerilimini sağlayan koşul ile ilgili detaylı bilgi verilecektir.



Şekil 3.3. Parçalı gölgelenme altında FV panel eş değer devresi

Parçalı gölgelenme olup olmadığının belirlenmesi, doğru MGN bölgesine karar vermek için önemlidir. Ayrıca FV panelin maruz kaldığı gölgelenme ışınım değerleri zamana, ağaca, bulut, hareketli ve hızlı bir cisim v.b. faktörlere bağlı olarak değişebilir. Böyle bir durumda farklı bir MGN oluşabilir ve mevcut gölgelenme değişimi, MGNİ algoritması ve parçalı gölgelenme tespiti prosedürü tarafından doğru ayırt edilemezse, düşük takip verimliliğine sahip bir çalışma gerçekleşebilir.

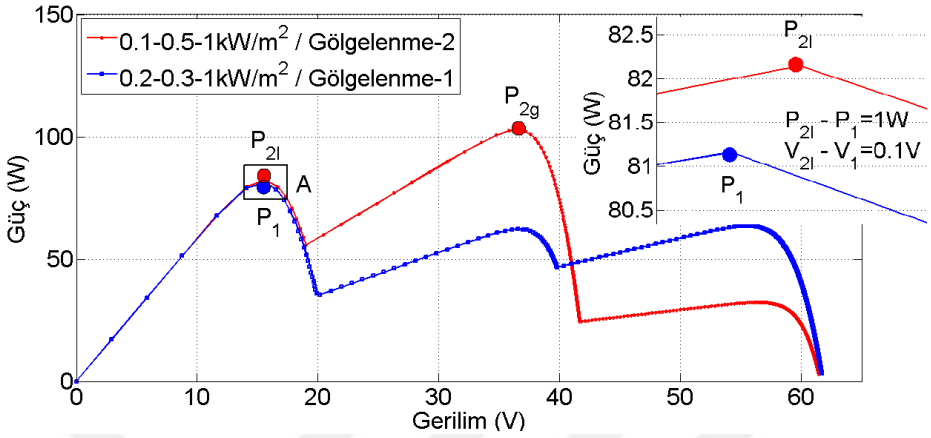


Şekil 3.4. Seri bağlı 3xFV panel sisteminin 100-500-1000W/m^2 gölgelenme profili için akım-gerilim karakteristik eğrileri [12]

FV panel akım, gerilim ve güç değişimleri izlenerek, FV panel üzerindeki gölgelenme profilinin değişimi tespit edilebilir [28]. Genel olarak bu yaklaşım olumlu sonuçlar verse de, FV panel gölgelenme ışınım değerleri değişirken, en az bir modül üzerine düşen güneş ışınımı değişmemişse [28]'deki yaklaşım doğru sonuç vermeyip, düşük MGNİ verimi oluşmasına neden olur. Şekil 3.5'deki gölgelenme koşullarına göre; FV panelin başlangıçta 0,2kW/m^2, 0,3kW/m^2 ve 1kW/m^2 gölgelenme ışınımlarına maruz kaldığını varsayalım. Bu durumda A noktası global MGN olup P_1 gücü üretilir. Gölgelenme ışınım değerleri 0,2kW/m^2, 0,3kW/m^2 ve 1kW/m^2'den 0,1kW/m^2, 0,5kW/m^2 ve 1kW/m^2 şeklinde değişirse, yeni durumda akım, gerilim ve güç çok az değişeceğinden [28]'deki yöntem gölgelenme değişimini doğru belirleyemeyip, A noktasını yine global MGN gibi kabul eder. Halbuki, bu gölgelenme durumu için B noktası global MGN olup, [28]'deki yaklaşımın başarısızlığı yüzünden FV panel yanlış MGN'de çalışmaya devam eder ve MGNİ verimi düşük olur.

Bu çalışmada, parçalı gölgelenmenin oluşup oluşmadığı ve gölgelenme değişiminin tespit edilmesi; FV panel bağlantı kutusuna yer alan her bir paralel diyota paralel bağlı iki direnç ve bir kondansatörden oluşan basit gerilim bölücü devreler ile yapılacaktır.

Modül gerilim değerlerinin negatif olup olmadığı belirli periyotlarda denetlenerek FV panel üzerinde gölgelenme olup olmadığı belirlenecektir. FV panel diyot sayısı sınırlı olduğu için (en çok üç) bu yaklaşımın donanım maliyetine etkisi makul düzeydedir.



Şekil 3.5. FV panel yüzeyine gelen güneş ışınımlarının 0,1kW/m^2, 0,5kW/m^2 ve 1kW/m^2'den 0,2kW/m^2, 0,3kW/m^2 ve 1kW/m^2 gölgelenme koşuluna değişmesi durumunda önerilen gölgelenme metodu ile [28]'de önerilen yöntemin karşılaştırılması

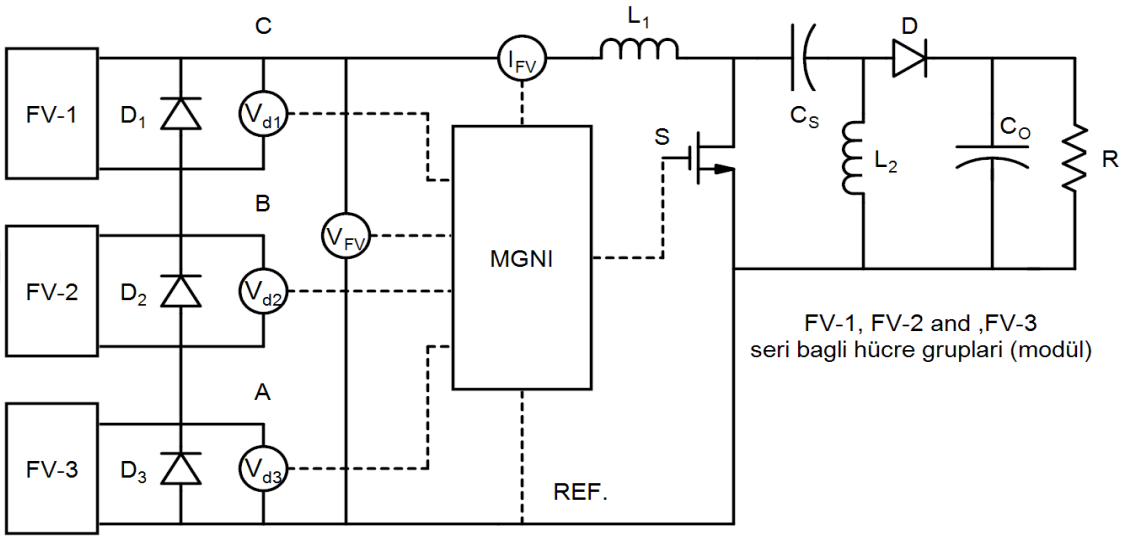
3.2. Parçalı Gölgelenme Durumunda Kullanılan Algoritma

FV panel bağlantı kutusuna yerleştirilen gerilim bölücü devrelerden okunan gerilim değerlerine göre paralel diyotların iletime girip girmediği anlaşılır. En az bir diyot iletime girmişse veya modül gerilimlerinden herhangi birisi negatifse parçalı gölgelenme meydana gelmiş demektir. Şekil 3.6'da diyotlara bağlı gerilim bölücü devreler V_{d1}, V_{d2} ve V_{d3} olarak gösterilmiştir. Gerilim ölçümü yapılırken $V_{FV}<V_{MGN,sol}$ şartının sağlanması gerektiği (gerilim 0 – $V_{MGN,sol}$ arasında olmalı) ifade edilmişti. Bunun için MGNİ işleminde kullanılan güç dönüştürücü devresi güç anahtarına uygulanacak olan DGM'nin doluluk oranının belirlenmesi gerekir.

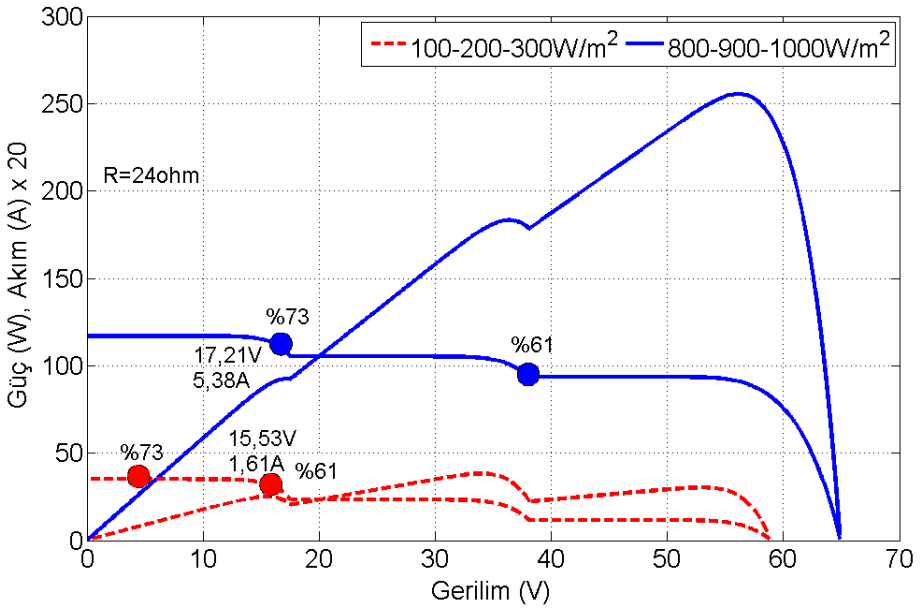
Parçalı gölgelenme tespiti yapılırken modül yapısında bulunan paralel diyot gerilimleri $V_{FV}<V_{MGN,sol}$ koşulu sağlanarak ölçülür. Bu sayede FV panelin tam kısa devre durumu önlenerek, periyodik ölçümler sırasında güç aktarımı devam eder. Bunun için gölgelenme ışınım değerinin en büyük olduğu 800W/m^2, 900W/m^2 ve 1000W/m^2 durumu ele alınır ve Bölge-1 MGN'si için $R_{FV,sol}$ ve $R_{Yük}$ değerine bağlı olarak; Eşitlik (3.1)'e göre doluluk oranı hesabı yapılır. Şayet en büyük ışınım değerleri yerine en küçük ışınım değerleri (100W/m^2, 200W/m^2 ve 300W/m^2) baz alınsaydı, $V_{FV}<V_{MGN,sol}$ sağlanamayıp Şekil 3.7'de görüleceği üzere parçalı gölgelenme olup olmadığına dair tespit doğru yapılamayacaktı. Bu değer $R_{Yük}$'e bağlı olarak değişir. $R_{FV,sol}$ değeri FV

panel parametrelerine bağlı olduğu için doluluk oranı değeri pratik olarak %75-80 civarında seçilebilir [12].

$$D=\frac{1}{1+\sqrt{\frac{R_{FV,sol,min}}{R_{Yük}}}} \tag{3.1}$$



Şekil 3.6. Önerilen MGNİ test sistemi ve SEPIC (V_d: Gerilim bölücü devre) [32]



Şekil 3.7. Parçalı gölgelenme tespitinde en büyük ve en küçük ışınım değerlerinin kullanılması durumunun karşılaştırılması

3.2.1. Güç-Gerilim karakteristik eğrilerinin incelenmesi

Doğru MGN bölgesinin belirlenebilmesi için bir FV panelin belirli sayıdaki güç-gerilim karakteristik eğrileri incelenerek her bir MGN bölgesi için doluluk oranı hesabı yapılmalıdır. Bu eğrilerin sayısını belirlemek için ticari güneş panellerinde kaç adet paralel diyot bulunduğuna dair bir araştırma yapılmıştır. 48 üretici ve 600 farklı güneş paneli katoloğu incelenmiştir. İnceleme sonucunda FV panellerin %90 oranında iki veya üç paralel diyoda sahip olduğu belirlenmiştir. Bu tespit ve güneş ışınımı sınır (en küçük ve en büyük) değerlerini belirleyerek güç-gerilim karakteristik eğrilerinin sayısını hesaplamak mümkündür. Buna göre; en düşük ve en yüksek güneş ışınımı değerleri sırasıyla [17]'de olduğu gibi 100W/m^2 ve 1000W/m^2 olarak belirlenebilir. Bir FV panelde en çok üç adet paralel diyot bulunacağı varsayımına bağlı olarak gölgelenme profilinde en çok üç farklı ışınım değeri olur ve buna bağlı olarak, güç-gerilim karakteristik eğrilerinde en fazla üç MGN oluşabilir. Bu durumda güç-gerilim eğrisi sayısı; n paralel diyot sayısı, m güneş ışınımı seviye sayısı olmak üzere;

$$t=C(m,n) \tag{3.2}$$

kombinasyon hesabı ile bulunabilir. Eşitlik (3.2)'ye göre karakteristik eğrisi sayısı C(10,3)=120 olarak hesaplanır. Yüz yirmi gölgelenme profili Tablo 3.1'de verilmiştir. Şekil 3.8'de verilen güç-gerilim karakteristik eğrileri incelendiğinde, MGN'lerin dar gerilim aralıklarında kümelendiği ve belirli bir eğilimde değiştiği belirlenmiştir. Belirli bir ışınım altında bir FV panel MGN geriliminin, açık devre gerilimine oranının yaklaşık olarak sabit olduğu varsayımına dayalı $0,8V_{AD}$ modeli [14] olarak bilinen yaklaşımda, gerilim yerine doluluk oranı kullanılarak yeni bir algoritmanın temeli oluşturulmuştur. Şekil 3.8'e göre üç paralel diyotlu bir FV panel için üç tane MGN bölgesi vardır. En yüksek güç noktasının belirlenebilmesi için tüm MGN bölgelerinin maksimum güç değerlerinin bilinmesi gerekir. Bu amaçla her MGN bölgesi için ortalama FV panel eş değer direnci, R_{FV}, MGN'de çalışma koşulu için hesaplanır.

3.2.2. Güç-Gerilim eğrileri üzerindeki MGN bölgelerinin incelenmesi

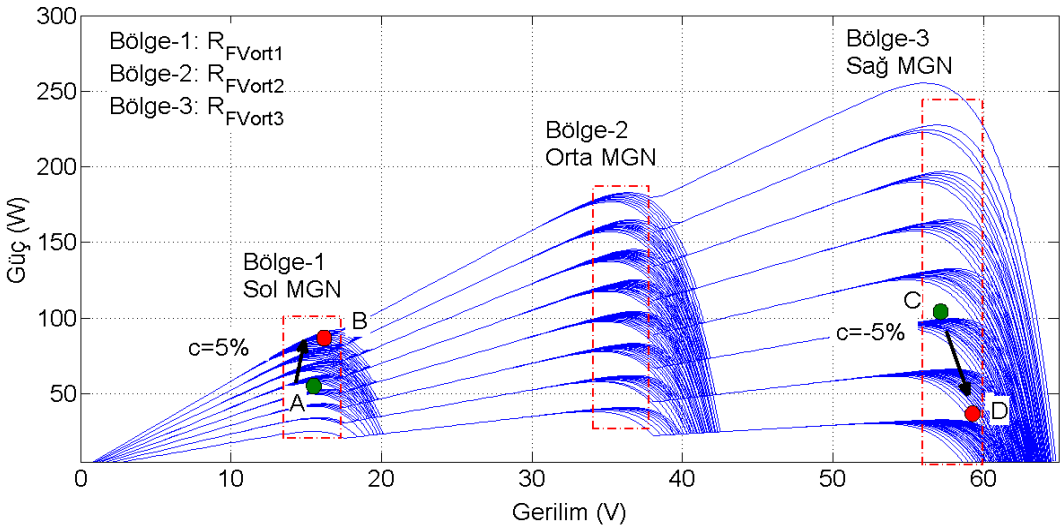
Şekil 3.8'de MGN bölgeleri Bölge-1 (Sol MGN), Bölge-2 (Orta MGN) ve Bölge-3 (Sağ MGN) olarak ayrılmıştır. Buna göre her bir eğrinin MGN'deki eşdeğer direnci hesaplanır ve her MGN bölgesi için ortalama direnç değerleri Eşitlik (3.3)'e göre belirlenir. Eşitlik (3.3) ile hesaplanan eş değer MGN direnç değerleri kullanılarak MGN bölgeleri için doluluk oranı değerleri, Eşitlik (3.1)'de $R_{FV,sol,min}$ yerine $R_{FV,ort}$ yazılarak

hesaplanır [32]. Bu doluluk oranı değerleri her bir MGN bölgesi için temel değer olarak kabul edilir.

$$R_{FV,ort} = \frac{\sum_{x=1}^{t} \frac{V_{MGN}}{I_{MGN}}}{t} = \frac{\sum_{x=1}^{t} \frac{P_{MGN}}{V_{MGN}^2}}{t} \quad (3.3)$$

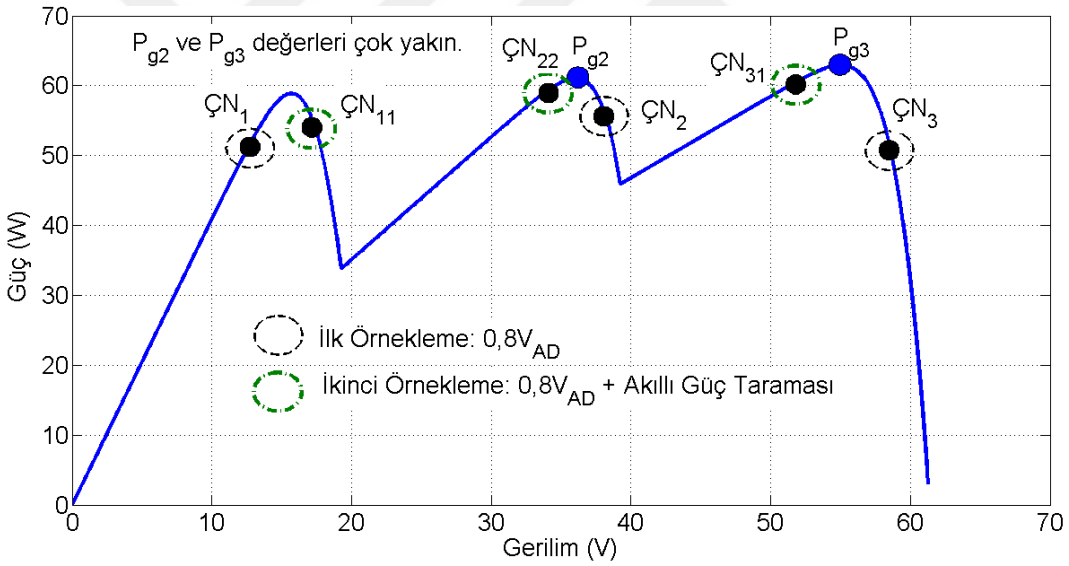
Tablo 3.1. Parçalı gölgelenme ışınım profilleri (kW/m^2)

N	Q_1	Q_2	Q_3	N	Q_1	Q_2	Q_3	N	Q_1	Q_2	Q_3	N	Q_1	Q_2	Q_3	N	Q_1	Q_2	Q_3
1	0,1	0,2	0,3	**25**	0,1	0,5	0,9	**49**	0,2	0,4	1	**73**	0,3	0,5	0,8	**97**	0,4	0,7	1
2	0,1	0,2	0,4	**26**	0,1	0,5	1	**50**	0,2	0,5	0,6	**74**	0,3	0,5	0,9	**98**	0,4	0,8	0,9
3	0,1	0,2	0,5	**27**	0,1	0,6	0,7	**51**	0,2	0,5	0,7	**75**	0,3	0,5	1	**99**	0,4	0,8	1
4	0,1	0,2	0,6	**28**	0,1	0,6	0,8	**52**	0,2	0,5	0,8	**76**	0,3	0,6	0,7	**100**	0,4	0,9	1
5	0,1	0,2	0,7	**29**	0,1	0,6	0,9	**53**	0,2	0,5	0,9	**77**	0,3	0,6	0,8	**101**	0,5	0,6	0,7
6	0,1	0,2	0,8	**30**	0,1	0,6	1	**54**	0,2	0,5	1	**78**	0,3	0,6	0,9	**102**	0,5	0,6	0,8
7	0,1	0,2	0,9	**31**	0,1	0,7	0,8	**55**	0,2	0,6	0,7	**79**	0,3	0,6	1	**103**	0,5	0,6	0,9
8	0,1	0,2	1	**32**	0,1	0,7	0,9	**56**	0,2	0,6	0,8	**80**	0,3	0,7	0,8	**104**	0,5	0,6	1
9	0,1	0,3	0,4	**33**	0,1	0,7	1	**57**	0,2	0,6	0,9	**81**	0,3	0,7	0,9	**105**	0,5	0,7	0,8
10	0,1	0,3	0,5	**34**	0,1	0,8	0,9	**58**	0,2	0,6	1	**82**	0,3	0,7	1	**106**	0,5	0,7	0,9
11	0,1	0,3	0,6	**35**	0,1	0,8	1	**59**	0,2	0,7	0,8	**83**	0,3	0,8	0,9	**107**	0,5	0,7	1
12	0,1	0,3	0,7	**36**	0,1	0,9	1	**60**	0,2	0,7	0,9	**84**	0,3	0,8	1	**108**	0,5	0,8	0,9
13	0,1	0,3	0,8	**37**	0,2	0,3	0,4	**61**	0,2	0,7	1	**85**	0,3	0,9	1	**109**	0,5	0,8	1
14	0,1	0,3	0,9	**38**	0,2	0,3	0,5	**62**	0,2	0,8	0,9	**86**	0,4	0,5	0,6	**110**	0,5	0,9	1
15	0,1	0,3	1	**39**	0,2	0,3	0,6	**63**	0,2	0,8	1	**87**	0,4	0,5	0,7	**111**	0,6	0,7	0,8
16	0,1	0,4	0,5	**40**	0,2	0,3	0,7	**64**	0,2	0,9	1	**88**	0,4	0,5	0,8	**112**	0,6	0,7	0,9
17	0,1	0,4	0,6	**41**	0,2	0,3	0,8	**65**	0,3	0,4	0,5	**89**	0,4	0,5	0,9	**113**	0,6	0,7	1
18	0,1	0,4	0,7	**42**	0,2	0,3	0,9	**66**	0,3	0,4	0,6	**90**	0,4	0,5	1	**114**	0,6	0,8	0,9
19	0,1	0,4	0,8	**43**	0,2	0,3	1	**67**	0,3	0,4	0,7	**91**	0,4	0,6	0,7	**115**	0,6	0,8	1
20	0,1	0,4	0,9	**44**	0,2	0,4	0,5	**68**	0,3	0,4	0,8	**92**	0,4	0,6	0,8	**116**	0,6	0,9	1
21	0,1	0,4	1	**45**	0,2	0,4	0,6	**69**	0,3	0,4	0,9	**93**	0,4	0,6	0,9	**117**	0,7	0,8	0,9
22	0,1	0,5	0,6	**46**	0,2	0,4	0,7	**70**	0,3	0,4	1	**94**	0,4	0,6	1	**118**	0,7	0,8	1
23	0,1	0,5	0,7	**47**	0,2	0,4	0,8	**71**	0,3	0,5	0,6	**95**	0,4	0,7	0,8	**119**	0,7	0,9	1
24	0,1	0,5	0,8	**48**	0,2	0,4	0,9	**72**	0,3	0,5	0,7	**96**	0,4	0,7	0,9	**120**	0,8	0,9	1



Şekil 3.8. Eşitlik (3.1)'e göre yüzyirmi gölgelenme profili için güç-gerilim eğrileri

Klasik $0,8V_{AD}$ modelinde, FV panel gerilimine $0,8V_{AD}$ eklenerek her MGN bölgesi için güç değerleri belirlenir [14, 15]. Daha sonra güç değerleri karşılaştırılarak global MGN bölgesi tespit edilir. Bu yaklaşım gölgelenme ışınım değerlerinin büyük olduğu bazı durumlarda başarılı sonuç verirken, gölgelenme ışınım değerleri küçük olduğunda FV panel gerilim değerleri küçüleceğinden, klasik $0,8V_{AD}$ yaklaşımı global MGN bölgesini doğru tespit edemeyip, başarısız MGNİ gerçekleştirebilir. Örneğin; Şekil 3.9'da verilen $0,1kW/m^2$, $0,2kW/m^2$ ve $0,7kW/m^2$ gölgelenme koşulu için klasik $0.8V_{AD}$ modeli kullanılarak FV panel güç-gerilim eğrisi üzerinde ilk örneklemeler alındığında $ÇN_1$ (Çalışma Noktası), $ÇN_2$ ve $ÇN_3$ noktalarında çalışma gerçekleştiği varsayılsın. Bu noktalardaki güç değerlerine göre $ÇN_2$'deki gücün değeri $ÇN_1$ ve $ÇN_3$'den büyüktür. Fakat bu gölgelenme profili için en büyük güç değeri $ÇN_3$'de olup, orta MGN bölgesinde bulunmaktadır. Özetle, $0,8V_{AD}$ adım aralıklı yapılan en büyük güç noktası taraması, özellikle gölgelenme ışınım değerlerinin küçük olması halinde yanlış sonuçların ortaya çıkmasına neden olabilmektedir.



Şekil 3.9. Parçalı gölgelenme algoritmasını açıklamak için örnek güç-gerilim eğrisi

3.2.3. $0,8V_{AD}$ modeline dayalı akıllı güç taraması

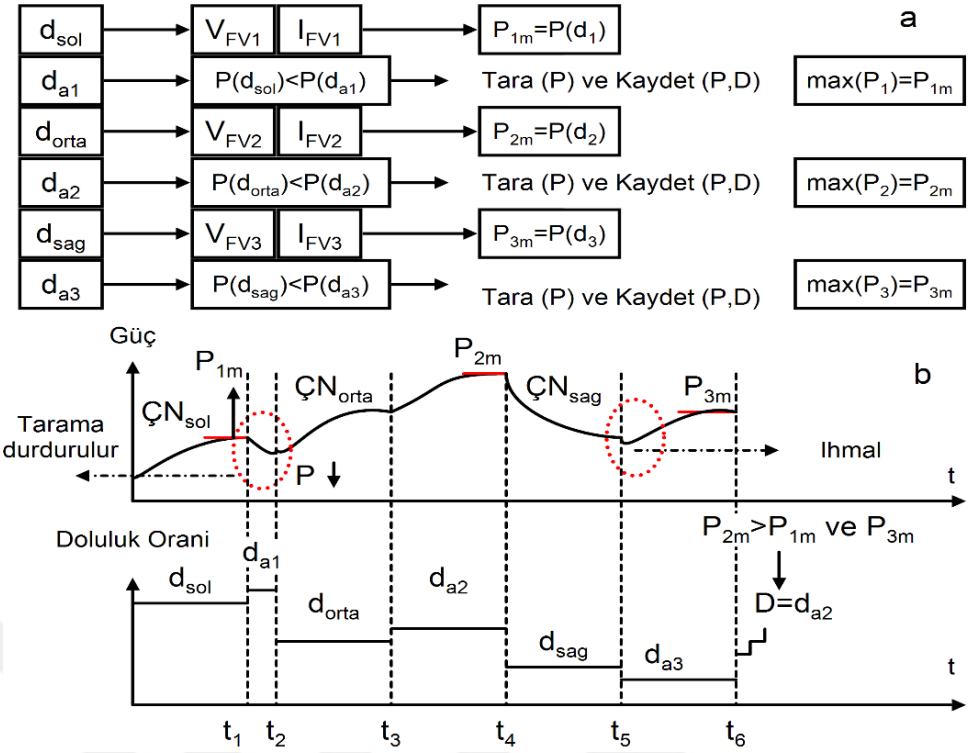
Klasik $0,8V_{AD}$ modeli kullanılarak yapılan MGNİ işleminin düşük MGNİ başarımı sağlama olasılığı bir önceki kısımda belirtilmişti. Şekil 3.8'deki eğrilere bakıldığında; Bölge-1'deki MGN'lerin yoğunluğu B noktası civarında olup, daha yüksek gölgelenme ışınımlarını dikkate alarak bu bölge için ilave bir güç taraması yapılması gerekebilir. Aynı şekilde Bölge-3 için D noktası civarında kümelenen MGN'ler için yeni bir güç taramasına ihtiyaç vardır. Şekil 3.10.a'da Eşitlik (3.1) ile hesaplanan doluluk oranı değerlerine ilave olarak d_{a1}, d_{a2} ve d_{a3} değerlerine sahip DGM doluluk oranları güç

dönüştürücüsüne uygulanır. Şekil 3.10.a'daki blok diyagrama göre d_{sol}, d_{orta} ve $d_{sağ}$ değerleri temel doluluk oranları, d_{a1}, d_{a2} ve d_{a3} değerleri ise ihtiyaç halinde uygulanacak doluluk oranlarıdır. d_{a1} ve d_{a3} hesaplamak için sırasıyla $R_{FV,min}$ ve $R_{FV,maks}$ baz alınarak Eşitlik (3.4) ve Eşitlik (3.5) kullanılır.

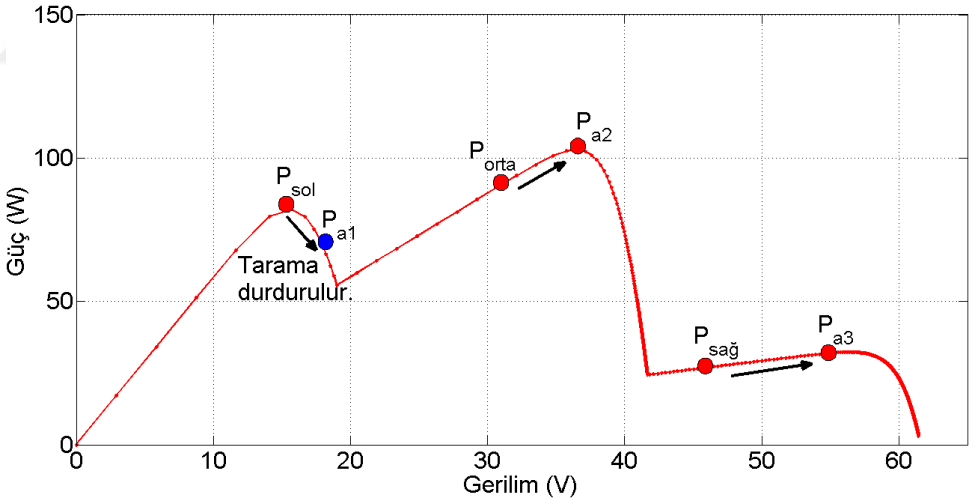
$$\Delta D=\frac{1}{1+\sqrt{\frac{R_{FV,min}}{R_{Yük}}}}-\frac{1}{1+\sqrt{\frac{R_{FV,ort}}{R_{Yük}}}}=d_{a1}-d_{sol}=\%5 \tag{3.4}$$

$$\Delta D=\frac{1}{1+\sqrt{\frac{R_{FV,maks}}{R_{Yük}}}}-\frac{1}{1+\sqrt{\frac{R_{FV,ort}}{R_{Yük}}}}=d_{a3}-d_{sağ}=-\%5 \tag{3.5}$$

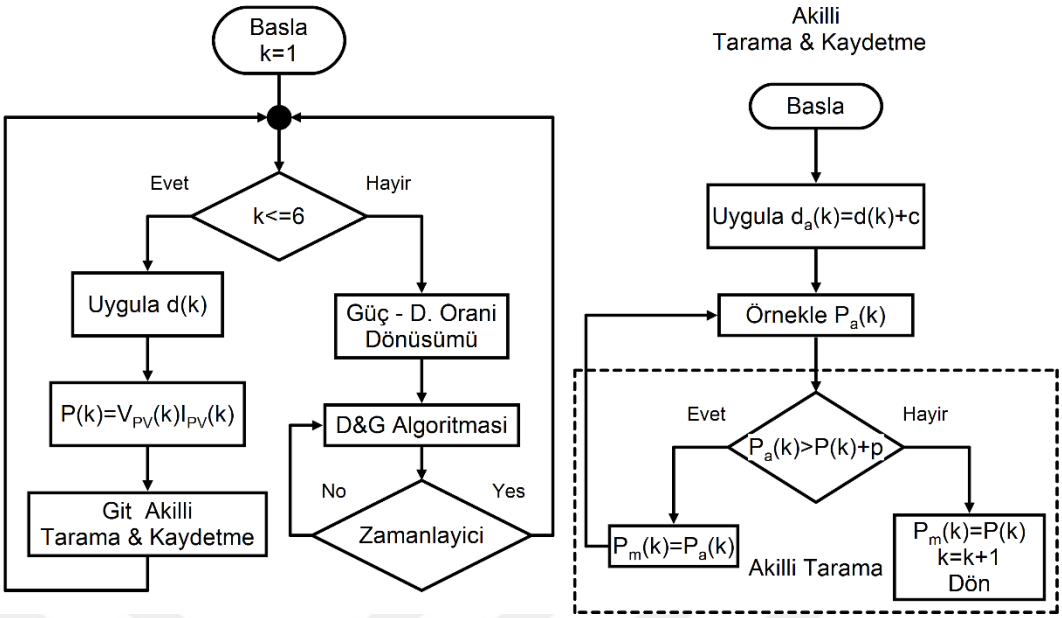
Eşitlik (3.4)'e göre Bölge-1 için yaklaşık %5'lik doluluk oranı artışı ile Şekil 3.8'deki A noktasından B noktasına kadar tüm eğriler taranabilir. Tarama işlemi gölgelenme ışınımının değerine bağlı olup, güç azalma eğilimindeyse tarama durdurulur. Sağ MGN bölgesi (Bölge-3) için durum tam tersidir. %-5'lik bir doluluk oranı artışı ile C noktasından D noktasına kadar tüm güç-gerilim eğrileri taranır. Aynı şekilde tarama işlemi gücün pozitif yönde değişim göstermesine bağlı olarak devam eder. Örneğin; Şekil 3.10.b'de verilen FV panel gücü ile doluluk oranı değişimini ele alalım. İlk olarak d_{sol} uygulanır ve P_{sol} çalışma noktasına erişilir. İlave güç örneklemesi almak için d_{a1} uygulanır. $P_{a1}>P_{sol}$ olduğu sürece d_{a1} uygulanmaya devam eder. Şekil 3.10.b'de görüldüğü üzere $P_{a1}<P_{sol}$ olduğu için belirli bir süre sonunda Bölge-1 güç taraması durdurulur. Şekil 3.11'de Şekil 3.10.b'de gösterimi yapılan duruma ait güç-gerilim eğrisi görülmektedir. Daha sonra Bölge-2 için güç taramasına geçilir ve d_{orta} güç dönüştürücüsüne uygulanır. İlave güç taraması amacıyla d_{a2} uygulanır ve P_{a2} belirlenir. Şekil 3.8'de Bölge-2 için MGN'ler homojen dağılmıştır. Dolayısıyla bu bölge için Eşitlik (3.4) kullanılabilir. Bu bölge için gücün yüksek olduğu (Bölge-1 gibi) üst kısımlardaki eğriler taranır. Aynı aşamalar Bölge-3 için tekrarlanır. $d_{sağ}$ uygulanır ve $P_{sağ}$ elde edilir. İlave güç taraması için d_{a3} uygulanır ve güç değişimine bakılarak her MGN bölgesi için en yüksek güç değerleri belirlenir. En yüksek güç hangi doluluk oranında elde edilmişse, doluluk oranı ilk değeri olarak atanır. Parçalı gölgelenme durumu için geliştirilen algoritmanın akış diyagramı Şekil 3.12'de tüm aşamalarıyla verilmiştir.



Şekil 3.10. Parçalı gölgelenme algoritmasının açıklanması a) Blok diyagram açıklaması b) Güç ve doluluk oranı değişimine göre açıklama



Şekil 3.11. Parçalı gölgelenme algoritmasının bir güç-gerilim karakteristik eğrisi üzerinden açıklanması [12]



Şekil 3.12. Parçalı gölgelenme halinde kullanılan algoritmanın akış diyagramı

3.3. Düzenli Işınım Durumunda Kullanılan Algoritma

FV panel yapısında bulunan modüllerin hepsi eşit miktarda ışınıma maruz kalırsa, FV panel düzenli ışınım durumu oluşur. Bir başka ifadeyle, gerilim bölücü devrelerden okunan gerilim değerleri pozitif veya paralel diyotlar kesim durumunda ise düzenli ışınım algoritması devreye girer.

3.3.1. Yaklaşık kısa devre akımının ölçülmesine dayalı sabit akım yöntemi

Eşitlik (3.1)'e göre hesaplanan DGM doluluk oranı değeri, FV paneli yaklaşık olarak kısa devre akımında, yüksek güç aktarımı sağlayacak şekilde sabit akım bölgesinde çalıştırır. Bu bölgede FV panel akımı yaklaşık sabit olduğu için ölçülen akım değerine göre güneş ışınımı değeri tahmin edilebilir. Sabit akım bölgesinde güneş ışınımı ile kısa devre akımı ve en yüksek güç noktası akımı arasında doğrusal bir bağıntı vardır [33]. Eşitlik (3.6)'da bu bağıntı verilmiştir.

$$I_{MGN}=k_{KD}I_{KD} \rightarrow k_qQ_{FV} \tag{3.6}$$

k_{KD} FV panel MGN akımının kısa devre akımına oranı, k_q ışınım-kısa devre akımı katsayısıdır. Literatürde k_{KD}'nin yaklaşık sabit olduğu kabul edilse de bu parametre güneş ışınımına bağlı olarak küçük değişimler gösterir [33]. Şekil 3.13'de benzetim ve deneysel çalışmalarda kullanılan FV panel/dizisine ait akım-gerilim ve güç-gerilim karakteristik eğrileri verilmiştir. Bu eğriler kullanılarak on farklı ışınım değeri için FV

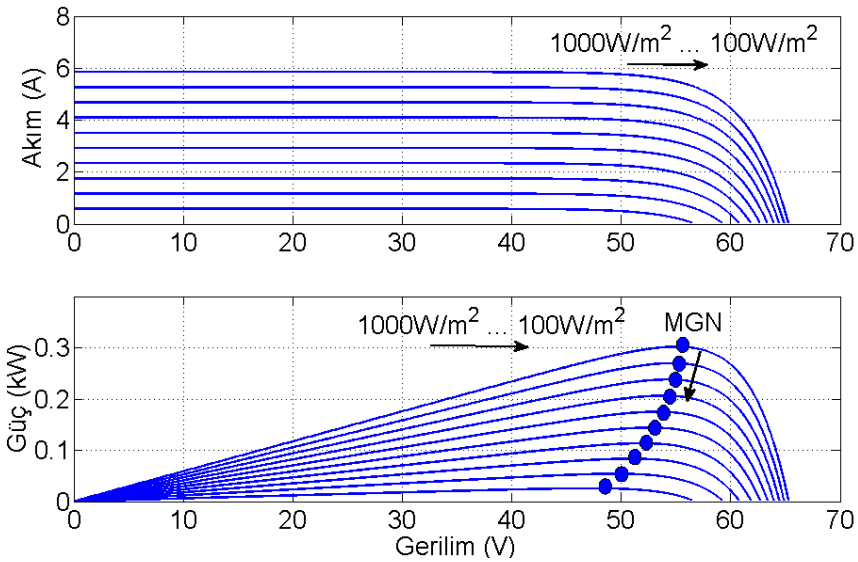
panel MGN akımı ve gerilimi, ilgili ışınıma ait maksimum güç değerleri ve k_{KD} değerleri Tablo 3.2'de listelenmiştir. k_{KD} ortalama değeri;

$$k_{KD,ort} = \frac{\sum_{a=1}^{10} k_{KD}(a)}{10} \tag{3.7}$$

şeklinde hesaplanır [12]. Eşitlik (3.7)'den 0-1000W/m^2 aralığında kaç adet güç-gerilim karakteristik eğrisi olması gerektiği bulunabilir. Karakteristik eğrilerinin sayısı ışınım veri sayısını belirler [12].

$$m = \frac{1}{1-k_{KD,ort}} = \frac{1}{1-\frac{I_{MGN,ort}}{I_{KD,ort}}} \tag{3.8}$$

$I_{MGN,ort}$ Şekil 3.13'deki akım-gerilim karakteristik eğrileri kullanılarak elde edilen FV panel ortalama akım değeridir. Eşitlik (3.8)'deki m, FV panel için akım ve R_{FV} veri çifti sayısı olarak da tanımlanabilir. Hesaplanan her R_{FV} için Eşitlik (3.3)'e göre doluluk oranı hesabı yapılır. Ölçülen akım değerine göre DGM doluluk oranı güç dönüştürücüsüne uygulanır ve MGN'ye yakın başlangıç çalışma koşulu elde edilir.



Şekil 3.13. Seçilen FV panel/diziye ait akım-gerilim ve güç-gerilim karakteristik eğrileri

Maksimum güneş ışınımı değerinin Eşitlik (3.8)'de hesaplanan m parametresini oranı, ardışık iki güç-gerilim karakteristiği için ışınım farkını verir. 0-1000W/m^2 ışınım aralığında ardışık iki güç-gerilim eğrisi için ışınım farkı miktarı;

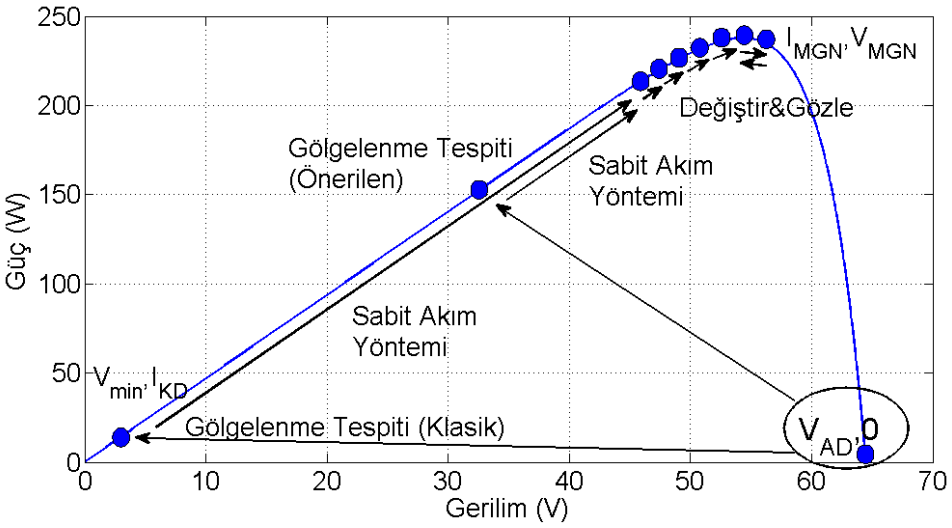
Tablo 3.2. Farklı ışınım değerleri için benzetim ve uygulama çalışmalarında kullanılan FV panelin temel parametre değerleri

Güneş Işınımı (W/m^2)	**I_{KD} (A)**	**I_{MGN} (A)**	**k_{KD}**	**V_{MGN} (V)**	**R_{FV}**
1000	5,85	5,493	0,939	54,93	10
900	5,265	4,951	0,9404	54,46	10,99
800	4,68	4,361	0,9318	54,3	12,45
700	4,095	3,838	0,9372	53,73	14
600	3,51	3,28	0,9345	53,3	16,25
500	2,925	2,734	0,9347	52,62	19,24
400	2,34	2,184	0,9333	51,87	23,75
300	1,755	1,635	0,9316	50,9	31,13
200	1,17	1,088	0,9299	49,5	45,49
100	0,585	0,5425	0,9274	47,02	86,67

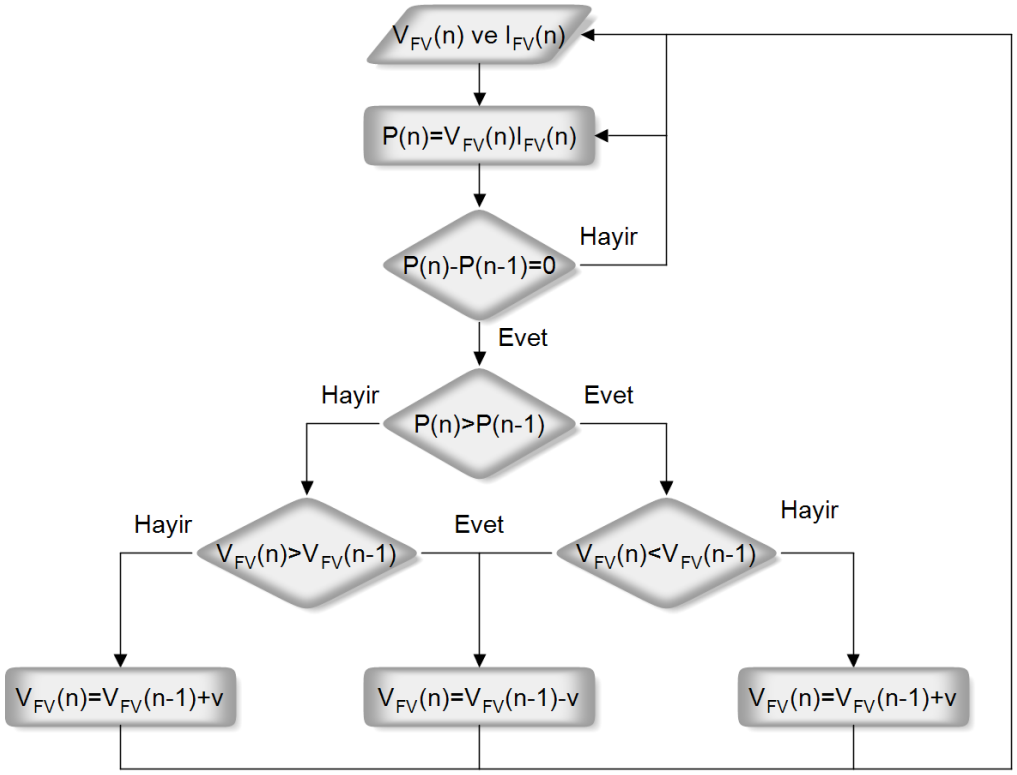
$$\Delta Q_U = \frac{Q_{maks}}{m} = Q_{a+1} - Q_a \tag{3.9}$$

ile hesaplanır. Eşitlik (3.9)'a göre hesaplanan ışınım farkına göre $I_{MGN}(Q_a) > I_{KD}(Q_{a+1})$ koşulu sağlanır [34]. Düzenli ışınım algoritmasının düşürücü-yükseltici dönüştürücü topolojisi için bir çalışma örneği Şekil 3.14'de verilmiştir. MGNİ başlamadan önce dönüştürücü devre, FV panel açık devre geriliminde çalışır. MGNİ algoritması devreye alındığında, ilk olarak paralel diyotlara bağlı gerilim bölücü devrelerden gerilim bilgisi alınır ve parçalı gölgelenmenin olup olmadığı kontrol edilir. Bunun için FV panel yaklaşık kısa devre akımı verecek şekilde çalıştırılır. Gölgelenme yok ise düzenli ışınım algoritması çalışmaya başlar. Ölçülen FV panel akım değerine göre geliştirilmiş sabit akım yöntemine başvurulur. Bu yöntem kısa devre akımı ölçümüne dayalı klasik yönteme benzemekle beraber, güç aktarımı açısından farklıdır. Geliştirilmiş sabit akım yöntemi sayesinde güç aktarımı ideale yakın sağlanabilmektedir. Algoritmanın son aşamasında Şekil 3.15'de akış diyagramı verilen değiştir gözle algoritması kullanılır. Bu çalışmada doluluk oranı adım büyüklüğü %0,5-%1 aralığında olup, örnekleme zamanı 10 milisaniye olarak belirlenmiştir.

Değiştir gözle en temel MGNİ algoritmalarından olup FV panel güç ve gerilim değişimine bakılarak, FV panel geriliminin veya doluluk oranı değerinin belirlenen adım miktarı kadar arttırılıp azaltılmasına dayalı olarak çalışır. Şekil 3.15'de verilen akış diyagramında FV panel gerilim ve güç değişimi takip edilmiş olup, gerilim değişimine karşılık gelen doluluk oranına göre işlem yapılmaktadır.



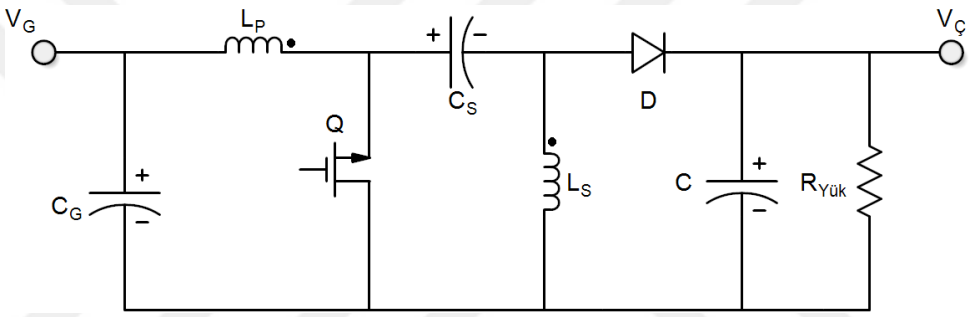
Şekil 3.14. Düzenli ışınım durumunda kullanılan algoritmanın çalışma prensibinin grafik olarak açıklanması



Şekil 3.15. Değiştir & Gözle algoritmasının akış diyagramı

4. SEPIC DÖNÜŞTÜRÜCÜ ÇALIŞMA PRENSİBİ VE TASARIM AŞAMALARI

İkinci bölümde yapılan kapsamlı analiz ve karşılaştırmaların sonucunda, SEPIC tipi düşürücü-yükseltici dönüştürücü devresinin MGNİ uygulamaları için oldukça uygun olduğu belirlenmişti. Bu kısımda, önceki bölümde ayrıntılı olarak düşürücü-yükseltici topolojisine uyarlanarak anlatılan MGNİ algoritması için kullanılacak olan SEPIC dönüştürücü devresi çalışma prensibi, güç devresi tasarım aşamaları temel matematiksel bağıntılar yardımıyla anlatılmıştır. Kuplajsız (çift endüktanslı) temel SEPIC dönüştürücü devresi Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Çift endüktanslı SEPIC dönüştürücü devresi

Çift endüktanslı SEPIC devrenin çalışma prensibini daha iyi izah etmek için devrenin kararlı halde sürekli akım modunda çalıştığını kabul edelim. DA analizinde L_P ve L_S endüktansları üzerindeki gerilim düşümleri ihmal edilirse, C_S kondansatörü üzerindeki gerilim V_G olur. Şekil 4.2'de Q anahtarı iletimde iken oluşan devreler verilmiştir. Q anahtarı iletimde iken, L_P endüktansı V_G gerilimi ile beslenerek enerji depolar. L_P endüktans akımı Şekil 4.2'de verildiği üzere doğrusal olarak artar. L_S endüktansı da C_S kondansatörü üzerinden enerjilenir ve endüktans akımı doğrusal olarak artar. Q anahtarı L_P üzerinden geçen akımı taşır. Q anahtarı iletimde iken, D diyotu kesimdedir ve üzerinde $-(V_G+V_Ç)$ büyüklüğünde bir gerilim tutar. C çıkış kondansatörü $R_{Yük}$ direncini $I_Ç$ akımı ile besler. İletim durumu için;

$$V_G=V_{Lp}+V_{Cs}+V_{Ls} \tag{4.1}$$

yazılır. Eşitlik (4.1)'de V_{Cs} kuplaj kondansatörü üzerindeki gerilimdir. $V_G=V_{Lp}$ ve $V_{Cs}=V_G$ olduğu için;

$$V_{Cs}=-V_{Ls}=V_G \tag{4.2}$$

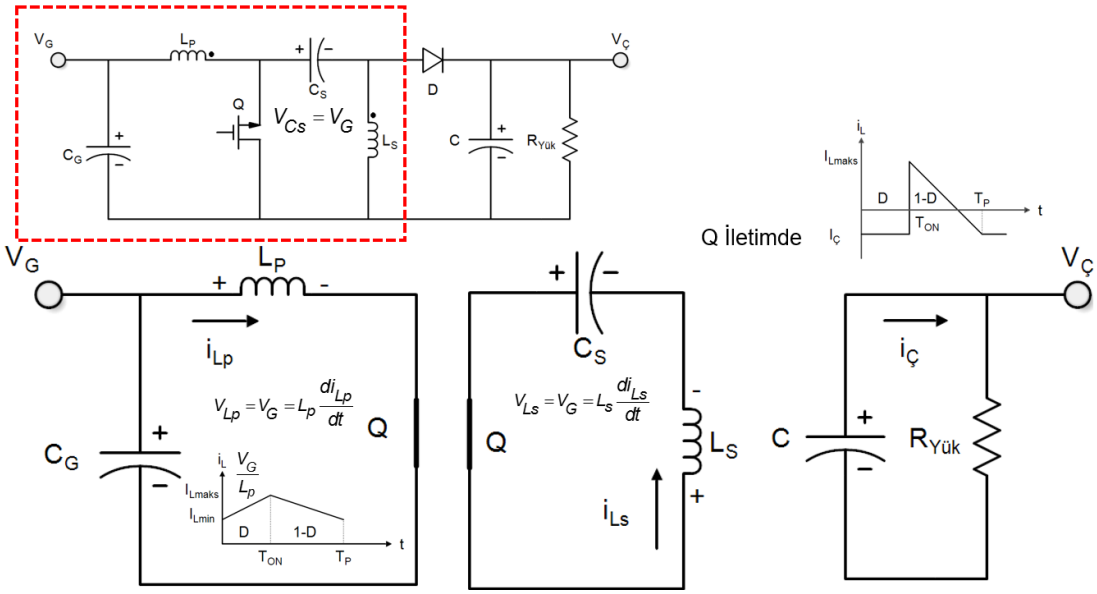
olur. L_S sekonder endüktansı üzerinde $-V_G$ gerilimi oluşur. Q anahtarı iletimde iken L_P endüktansı üzerinden geçen akım dalgalanma miktarı;

$$V_{Lp}=V_G=L_P\frac{di_{Lp}}{dt} \tag{4.3}$$

eşitliği kullanılarak;

$$\Delta I_{Lp}=\frac{V_G D}{f_P L_P} \tag{4.4}$$

şeklinde hesaplanır [35]. Eşitlik (4.4)'de f_P, anahtarlama frekansı, L_P birincil endüktans değeridir. Eşitlik (4.4) kullanılarak, frekans, akım dalgalanma miktarı, giriş gerilimi ve doluluk oranı değerine bağlı olarak endüktans değeri hesaplanabilir. Q anahtarı iletimde iken üzerinde çok düşük bir gerilim tutar. Anahtar iletim direnci ihmal edilirse bu gerilim 0V olarak kabul edilebilir. Şekil 4.3'te güç anahtarına ait kanal (drain) kaynak (source) üzerindeki gerilim ve akım değişimi verilmiştir.



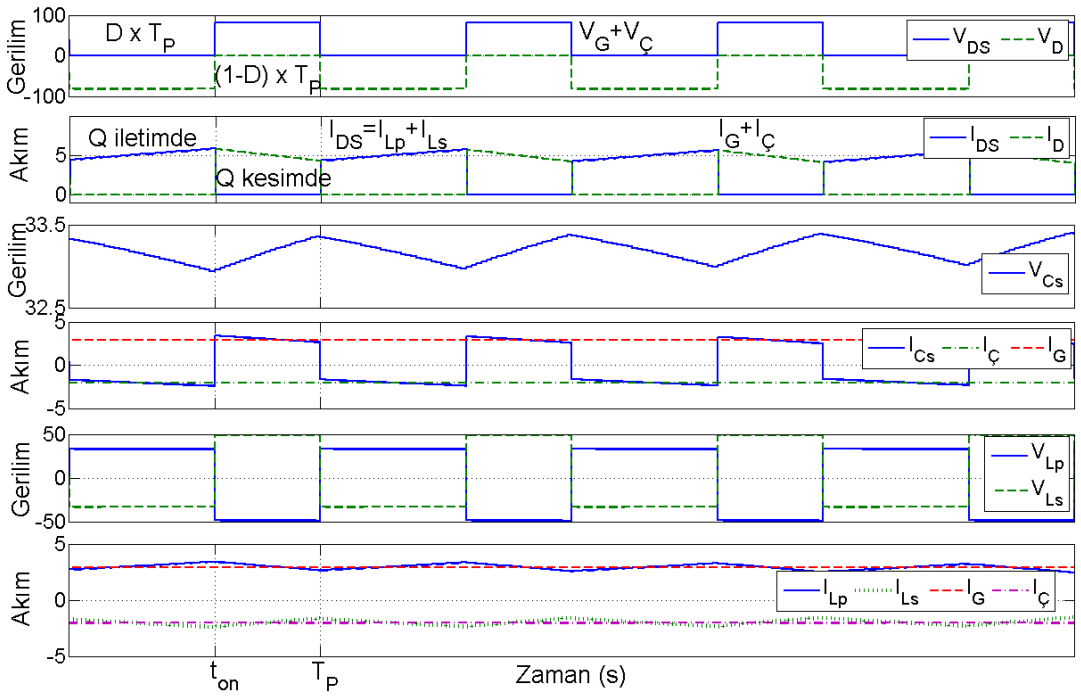
Şekil 4.2. Q anahtarı iletimde iken, çift endüktanslı SEPIC devresi, oluşan tüm devreler ve akım dalga şekilleri

Q anahtarı kesimde iken, D diyodu iletimdedir. L_P üzerinde biriken enerji C_S kondansatörünü şarj eder. Diyot iletim gerilim düşümü ihmal edilirse, L_S endüktansı doğrudan çıkış kondansatörüne bağlı olarak düşünülebilir ve üzerinde $V_Ç$ gerilimi oluşur. C_S kondansatörü üzerindeki gerilim V_G olduğu için Q anahtarı üzerinde giriş ve çıkış gerilimlerinin toplamı kadar (V_G+$V_Ç$) gerilim stresi meydana gelir. Güç anahtarı seçimi V_G+$V_Ç$ gerilimine göre yapılır. Çıkışa seri bağlı olan diyot iletime

girerek endüktans akımını üstlenerek çıkışa enerji aktarır. Çıkışa bağlı C kondansatörünün değeri, gerilim dalgalanma miktarı ve kondansatör akımına bağlı olarak;

$$i_C = \frac{1}{C}\int V_C dt \qquad (4.5)$$

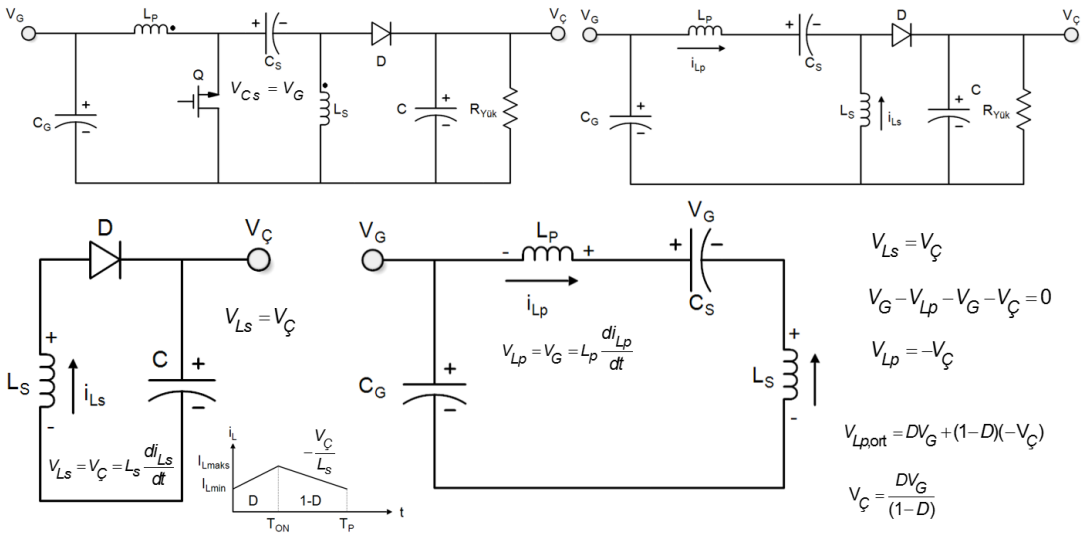
eşitliğinde C yanlız bırakılarak elde edilir.



Şekil 4.3. Anahtarın iletim ve kesim durumları için devredeki bazı elemanların akım ve gerilim değişimleri

$$C = \frac{D_{krt} I_Ç}{f_P V_Ç \%h} \qquad (4.6)$$

Burada h, yüzde gerilim dalgalanma miktarıdır. D_{krt} değeri, çıkış akımının en yüksek olduğu düşük değerli direnç ve D_{krt} x $I_Ç$ ifadesinin en büyük olduğu durum için, kullanılan FV panel parametrelerine göre Eşitlik (3.1)'e göre belirlenir.



Şekil 4.4. Q anahtarı kesimde iken çift endüktanslı SEPIC devresi, oluşan tüm devreler ve akım dalga şekilleri

C_S kuplaj kondansatörü, dönüştürücünün girişi (kaynak gerilimi) ile yük direnci arasında yalıtım sağlayarak yükün kısa devreden etkilenmemesini sağlar [37]. C_S kondansatörü üzerinde V_G giriş gerilimini tuttuğundan dolayı dayanma gerilimi FV panel geriliminin maksimum değerine göre yapılır. C_S kondansatörü, anahtar iletimde iken, ortalama giriş akımını ve anahar kesimde iken ortalama çıkış akımını ters yönde taşıdığı için üzerinden geçen akım çok dalgalıdır. C_S üzerinden geçen akımın etkin (RMS) değeri;

$$I_{Cs,RMS} = I_Ç \sqrt{\frac{V_Ç + V_D}{V_{G,min}}} \tag{4.7}$$

şeklinde ve C_S değeri giriş geriliminin en yüksek olduğu durumu baz alınarak;

$$C_S = \frac{D_{krt} I_Ç}{f_P V_{G,maks} \%h} \tag{4.8}$$

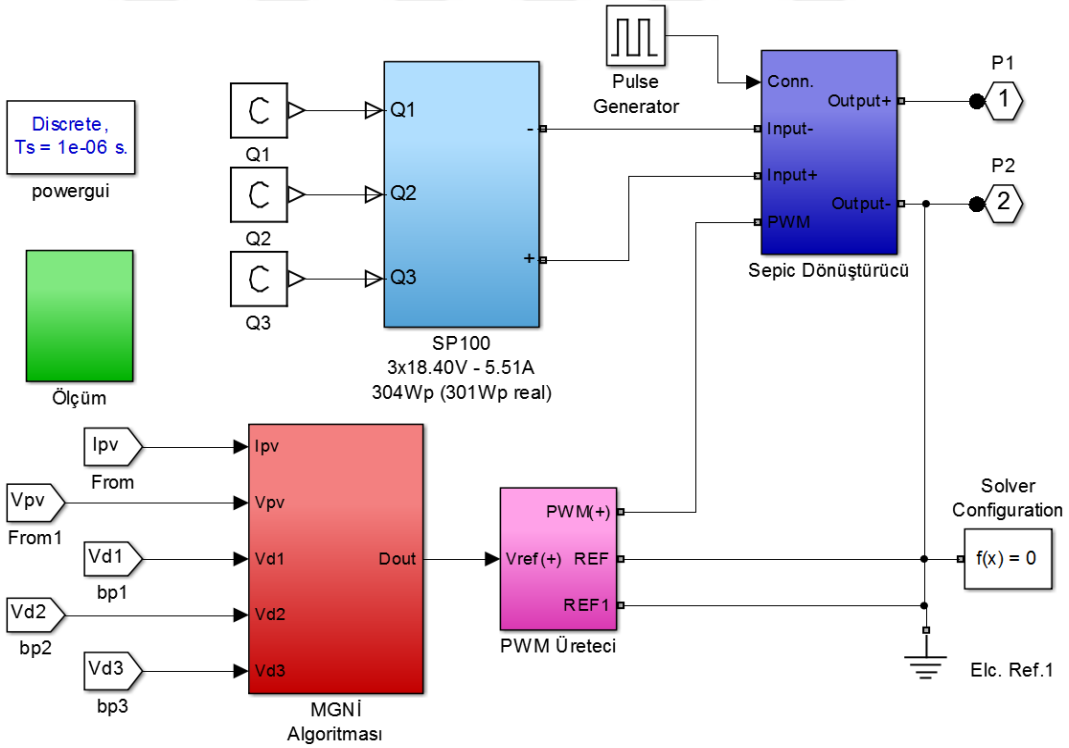
şeklinde hesaplanır [37]. $V_{G,maks}$ giriş geriliminin alabileceği en yüksek değerdir. FV panele paralel bağlı C_G kondansatörü değeri;

$$C_G = \frac{\Delta I_L}{4 f_P V_{G,maks} \%h} \tag{4.9}$$

şeklinde hesaplanır [37].

5. YENİ MGNİ SİSTEMİNİN BENZETİM SONUÇLARI

Önerilen MGNİ algoritmasının başarımını göstermek ve değerlendirmek için MATLAB/Simulink programında benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Simulink'de FV panel için "güneş hücresi (solar cell) bloğu kullanılmış olup, FV panel seri bağlı üç modülden oluşturulmuştur. Modül verileri Solbian firmasının üretmiş olduğu 101W'lık monokristal FV panelden alınmıştır [36]. Güneş hücresi açık devre gerilimi 0,68V, kısa devre akımı 5,85A olup, her modül 32 adet hücreden, FV panel ise 96 adet güneş hücresinden oluşmaktadır. Standart test koşullarında FV panel MGN akımı 5,51A, MGN gerilimi 55,2V olup, en yüksek güç değeri yaklaşık 300W civarındadır. MGNİ algoritması düzenli ışınım ve parçalı gölgelenme durumları için iki alt algoritma olarak modellenmiştir. SEPIC dönüştürücü, Simulink'de SimElectronics bloğunda yer alan MOSFET, diyot ve pasif elemanlar kullanılarak modellenmiş olup, tasarlanan simulink modeline ait ekran görüntüsü Şekil 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.1. Gerçekleştirilen benzetim çalışmalarına ait MATLAB/Simulink dosyasının ekran görüntüsü [12]

Beş farklı parçalı gölgelenme durumu için benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiş ve önerilen algoritmanın başarımı, güç-gerilim eğrisinin yaklaşık olarak tamamının

tarandığı [20]'deki algoritma ve $0,8V_{AD}$ büyüklüğünde gerilim adım büyüklüğü kullanan iyileştirilmiş artan iletkenlik algoritmalı karma yöntem [15] ile MATLAB/Simulink'de karşılaştırılmıştır. Ayrıca, önerilen düzenli ışınım algoritması farklı ışınım değerleri, ışınım ve yük direnci değişimleri durumlarında, değiştir gözle algoritması ve klasik kısa devre akımı ölçülmesine dayalı algoritma ile karşılaştırılmıştır.

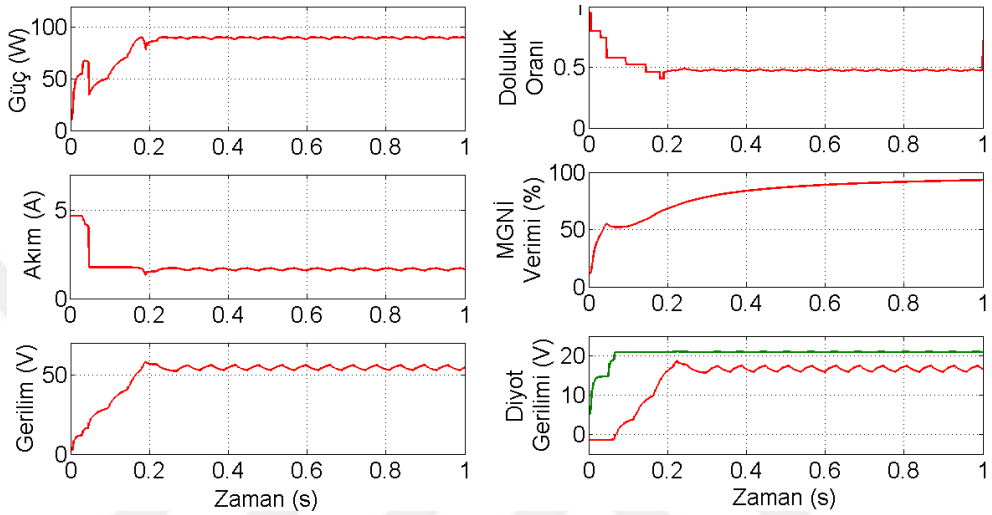
5.1. Benzetim-1: 0,3-0,3-0,8kW/m^2

İlk benzetimde, gölgelenme ışınımları 0,3kW/m^2, 0,3kW/m^2 ve 0,8kW/m^2 olup, FV panel iki farklı gölgelenme ışınımına maruz kalmıştır. Dolayısıyla güç-gerilim eğrisi üzerinde iki adet tepe oluşur. Fakat MGNİ algoritması en çok üç tepe varmış gibi çalışır ve bu durumda 0,3kW/m^2'lik ışınımın oluşturduğu MGN bölgesinden iki güç örneklemesi alır. Şekil 5.2'de benzetim-1 için FV panel güç, gerilim, akım, paralel diyotların gerilim değişimleri bir saniyelik periyot için verilmiştir. Ayrıca MGNİ işlemi esnasında, MGNİ takip verimliliği ve doluluk oranı değişimleri verilmiştir. Şekil 5.2'de görüleceği üzere, t=0s'de FV panel yaklaşık olarak kısa devre akımında çalıştırılarak, paralel diyot gerilimleri ölçülür. FV panel parçalı gölgelendiği için t=0s anında en az bir diyot üzerinde ileri gerilim düşümü $-V_F$ görülür. Daha sonra MGNİ işlemi önerilen algoritma tarafından gerçekleştirilir. Tarama işlemi sonunda, bu gölgelenme profili için Bölge-3'de (Sağ MGN bölgesi) FV panelden en yüksek gücün çekildiği tespit edilmiştir. Önerilen algoritma beş saniye sonunda %97,91'lik MGNİ verimliliğine ulaşmıştır. MGNİ verimi belirli bir zaman aralığı için FV panelden elde edilen enerjinin, maksimum enerjiye oranı MGNİ verimi olarak tanımlanabilir.

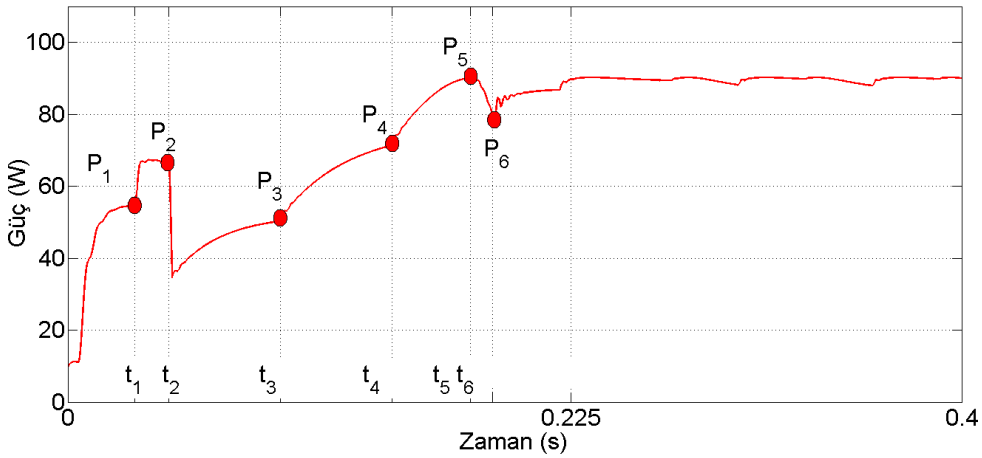
Şekil 5.3'de ilk benzetim sonucuna ait güç değişimi ayrıntılı olarak verilmiştir. Önerilen MGNİ algoritmasına göre t_1-t_2, t_3-t_4 ve t_5-t_6 zaman aralıklarında akıllı güç taraması yapılır. Ayrıca takip verimliliğini arttırmak amacıyla 0-t_1, t_2-t_3 ve t_4-t_5 aralıklarında da güç değişiminin yaklaşık sabit olana kadar veya negatif olması gözetilerek güç taraması yapılır. $t=t_6$ anında tüm güç değerleri (P_1,....,P_6) karşılaştırılır ve en yüksek güç değeri doluluk oranının hangi değerinde sağlanmışsa, o değer doluluk oranının başlangıç değeri olarak belirlenir.

Önerilen MGNİ algoritmasının başarımını doğrulamak ve karşılaştırmak için [15]'de ve [20]'de verilen yöntemler kullanılmıştır. Güç-gerilim eğrisinin yaklaşık tamamının tarandığı [20]'deki yöntem MATLAB/Simulink'de modellenmiş olup, 0,3-0,3-0,8kW/m^2 gölgelenme durumu için benzetim sonuçları Şekil 5.4'de verilmiştir. FV panel geriliminin yaklaşık 0V'dan açık devre gerilimine kadar doluluk oranının %1'lik

adımlarla değiştirilmesiyle, ilgili gölgelenme durumu için FV panelden elde edilen güç değişimi izlenmiştir. Bu sırada güç ve doluluk oranı veri çifti kaydedilmiştir. FV panelden çekilen gücün maksimum olduğu durumdaki doluluk oranı değeri ilk değer olarak atanır. Son olarak değiştir gözle algoritması devreye girer ve FV panel kararlı MGNİ işlemine devam eder. Bu gölgelenme durumunda, beş saniyelik periyot sınında MGNİ verimi %91,2 olarak hesaplanmış, takip süresi 975ms olarak gözlenmiştir.



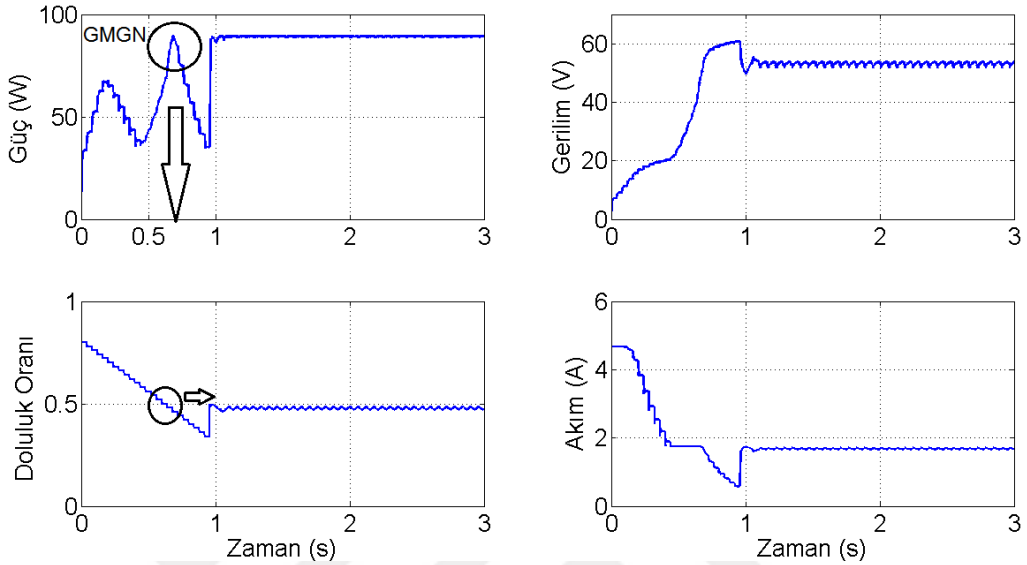
Şekil 5.2. 0,3-0,3-0,8kW/m^2 gölgelenme durumu için önerilen algoritmanın benzetim sonuçları



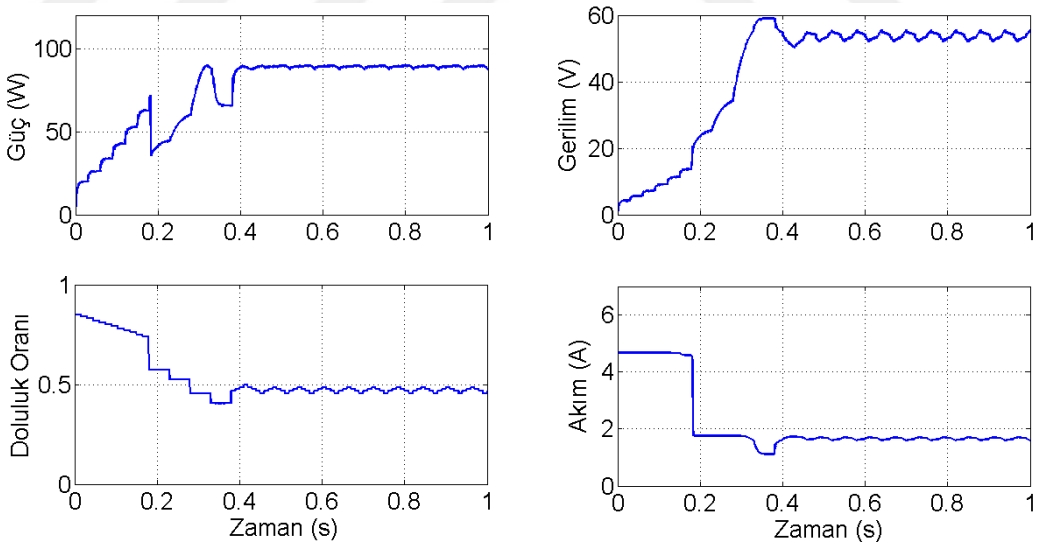
Şekil 5.3. Benzetim-1 için FV panel güç değişiminin detaylı incelenmesi

Geliştirilmiş 0,8V_{AD} temelli artan iletkenlik algoritmasının kullanıldığı [15]'de önerilen algoritma, 0,3-0,3-0,8kW/m^2 gölgelenme durumu için simule edilmiş ve sonuçlar Şekil 5.5'de verilmiştir. FV panel gerilimi, 0V'dan itibaren ilk MGN bölgesine ulaşıncaya kadar artan iletkenlik algoritması kullanılmıştır. Şekil 5.5'deki doluluk oranı değişimine bakıldığında, doluluk oranı %1'lik sabit adımla azaltılarak ilk MGN bölgesine ulaşılır. Daha sonra FV panel gerilimini 0,8V_{AD} kadar arttıracak olan doluluk oranı hesaplanıp

dönüştürücüye uygulanır. Akım değişimi belirlenmiş bir minimum değerden az oluncaya kadar bu yöntem uygulanır. Sonuçta, [20]'de verilen algoritmaya göre daha hızlı MGNİ gerçekleştirilmiş olur. Bu yöntemde takip verimi ve takip süresi sırasıyla %95,2 olarak hesaplanmış ve 400ms olarak gözlenmiştir.



Şekil 5.4. 0,3-0,3-0,8kW/m^2 gölgelenme durumu için [20]'deki algoritmanın benzetim sonuçları



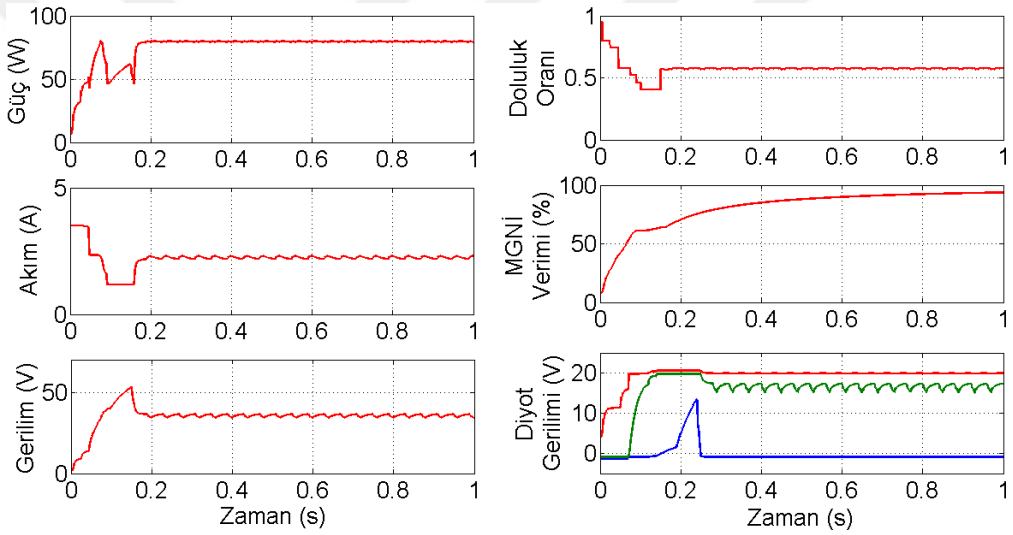
Şekil 5.5. 0,3-0,3-0,8kW/m^2 gölgelenme durumu için [15]'deki algoritmanın benzetim sonuçları

5.2. Benzetim-2: 0,2-0,4-0,6kW/m^2

İkinci benzetim çalışmasında gölgelenme ışınım değerleri 0,2kW/m^2, 0,4kW/m^2 ve 0,6kW/m^2 olup, bu durum için global MGN, Bölge-2'de yer almaktadır. Şekil 5.6'dan anlaşılacağı üzere, parçalı gölgelenme tespitinin yapılabilmesi için FV panel bir süre

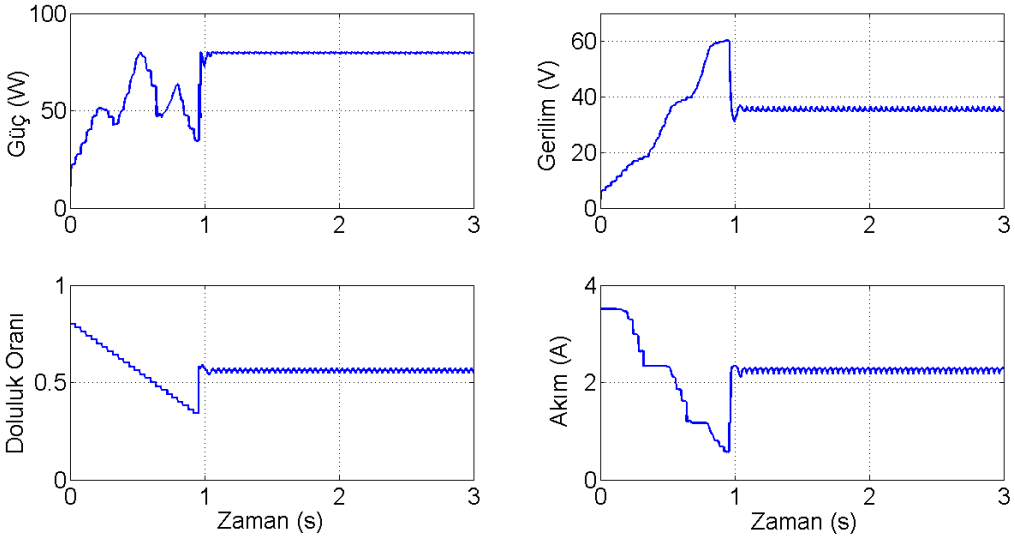
(birkaç ms) kısa devre akımına yakın bir akımda çalıştırılmış ve paralel diyot gerilimlerinin değerine göre gölgelenme olup olmadığı belirlenmiştir. Daha sonra Bölge-1, Bölge-2 ve Bölge-3 için güç değerleri belirlenmiştir. Beş saniyelik periyot sonunda %98,55'lik MGNİ verimliliği elde edilmiş olup, maksimum güç noktasına ulaşma süresi 230ms olarak gözlenmiştir.

Şekil 5.7'de Koutroulis ve Blaabjerg (2012) tarafından gerçekleştirilen çalışmada kullanılan algoritmanın 0,2-0,4-0,6kW/m^2 gölgelenme durumuna ait benzetim sonuçları verilmiştir. Görüleceği üzere, güç ve gerilim geniş bir aralıkta taranmış ve neredeyse tüm güç-gerilim karakteristiği ortaya çıkmıştır. 980ms'lik bir tarama sonucunda global MGN belirlenmiş ve MGNİ tamamlanmıştır. Bu benzetim çalışmasında %92,56'lik MGNİ verimi elde edilmiştir.

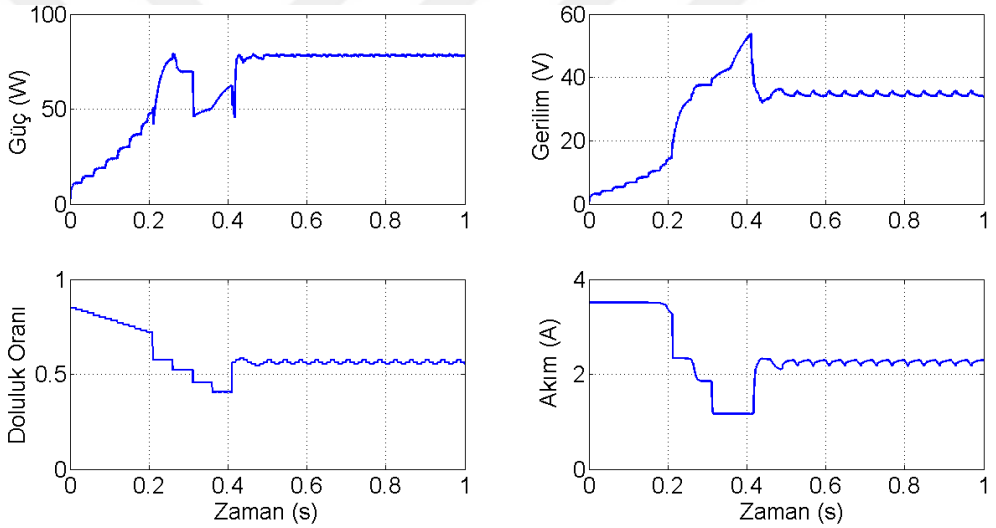


Şekil 5.6. 0,2-0,4-0,6kW/m^2 gölgelenme durumu için önerilen algoritmanın benzetim sonuçları

0,8V_{AD} modeline dayalı yöntemin 0,2-0,4-0,6kW/m^2 gölgelenme durumu için MGNİ başarım sonuçları Şekil 5.8'de gösterilmiştir. Bölge-2 (Orta MGN) bu gölgelenme durumu için global MGN bölgesidir. Beş saniyelik MGNİ verimi Tablo 5.1'de listelendiği üzere %94,03 olup, takip süresi 460ms'dir. MGNİ başarımı önerilen algoritmadan daha düşük olup, [20]'deki yaklaşıma göre takip verimliliği %1,5 daha fazladır.



Şekil 5.7. 0,2-0,4-0,6kW/m^2 gölgelenme durumu için [20]'deki algoritma için benzetim sonuçları



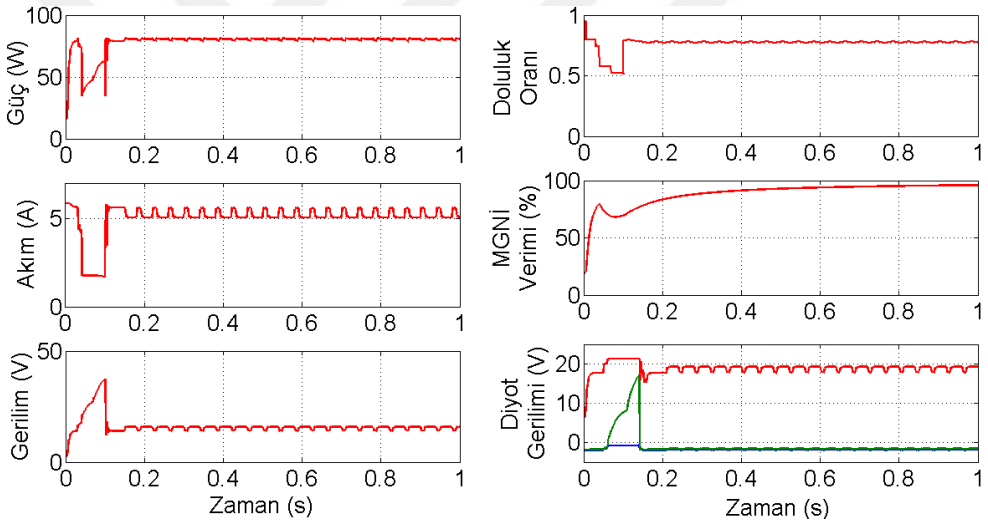
Şekil 5.8. 0,2-0,4-0,6kW/m^2 gölgelenme durumu için [15]'deki algoritma için benzetim sonuçları

5.3. Benzetim-3: 0,2-0,3-1kW/m^2

Gölgelenme ışınımlarının 0,2kW/m^2, 0,3kW/m^2 ve 1kW/m^2 olduğu durumda, global MGN Bölge-1'de (Sol MGN) bulunur. Şekil 5.9'a göre Bölge-1'de elde edilen güç değeri Bölge-2'ye göre daha büyüktür. Şekil 5.10'da ayrıntılı olarak verilen güç değişimine bakıldığında, birbirini takip eden iki MGN bölgesi için güç değişimi negatif olduğu görülür. Yani $P_{sol} > P_{orta}$ koşulu sağlandığı için Bölge-3'e bakılmaksızın, global MGN'nin Bölge-1'de olduğu söylenebilir. Beş saniyelik periyot sonunda MGNİ verimi %98,83 olarak hesaplanmış ve takip süresi 150ms olarak gözlenmiştir.

Tablo 5.1. Önerilen MGNİ algoritması, [20]'de ve [15]'de önerilen algoritmaların benzetim sonuçları

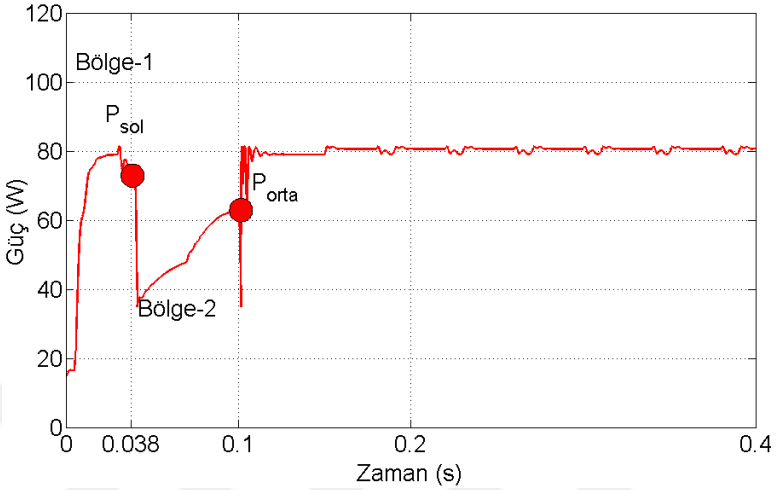
Gölgelenme Profili	MGNİ Yöntemi	Benzetim Sonuçları	
		η_{tr} (%) - 5s.	Zaman (ms)
Benzetim-1 0,3-0,3-0,8 kW/m²	[20]	91,20	975
	[15]	95,40	400
	Önerilen	97,91	220
Benzetim-2 0,2-0,4-0,6 kW/m²	[20]	92,56	980
	[15]	94,03	460
	Önerilen	98,55	230
Benzetim-3 0,2-0,3-1 kW/m²	[20]	93,42	970
	[15]	94,69	415
	Önerilen	98,83	150
Benzetim-4 0,1-0,5-1 kW/m²	[20]	91,41	975
	[15]	95,65	425
	Önerilen	98,20	120
Benzetim-5 0,3-0,4-0,4 kW/m²	[20]	89,20	975
	[15]	91,50	620
	Önerilen	98,40	200



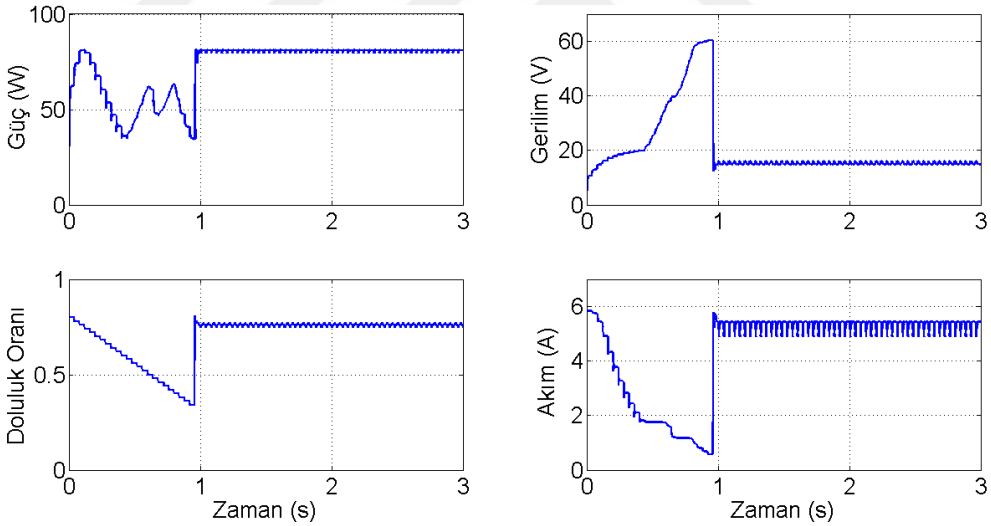
Şekil 5.9. 0,2-0,3-1kW/m² gölgelenme durumu için önerilen algoritmanın benzetim sonuçları

0,2kW/m², 0,3kW/m² ve 1kW/m² gölgelenme ışınımları altında FV panel [20]'deki algoritmaya göre çalıştırılmış ve benzetim sonuçları Şekil 5.11'de verilmiştir. Doluluk oranı değeri %1'lik adımlarla değiştirilerek, FV panel gerilimi 0V'dan yaklaşık olarak açık devre gerilimine kadar taranmış ve güç değerleri kaydedilmiştir. En yüksek güce karşılık gelen doluluk oranı başlangıç değeri olarak atanmıştır. Bu benzetim çalışmasında MGNİ 970ms içinde tamamlanmış ve %93,42'lik bir takip verimliliği elde edilmiştir.

$0,8V_{AD}$ modeline dayalı MGNİ algoritması ile aynı gölgelenme ışınımları altında yapılan benzetim sonuçları Şekil 5.12'de verilmiştir. MGNİ işlemi 415ms'de, %94,69 verimlilikle gerçekleşmiştir.



Şekil 5.10. Önerilen MGNİ algoritmasının 0,2-0,3-1kW/m^2 gölgelenme durumu için FV panel güç değişimi

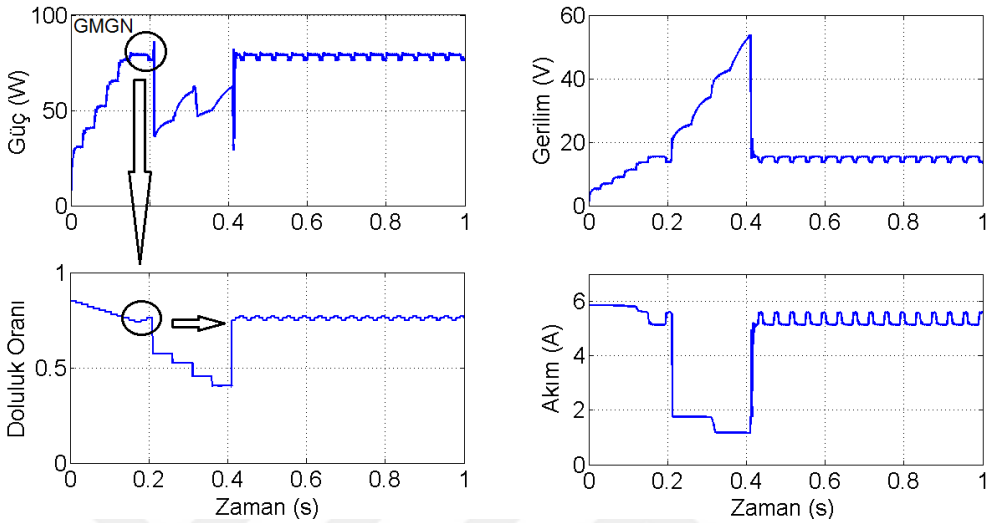


Şekil 5.11. 0,2-0,3-1kW/m^2 gölgelenme durumu için [20]'de önerilen MGNİ algoritmasının benzetim sonuçları

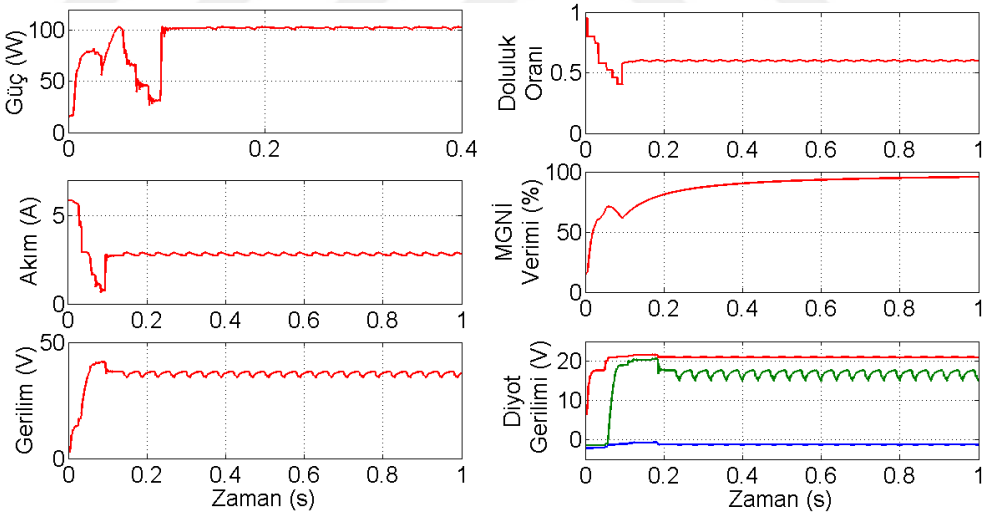
5.4. Benzetim-4: 0,1-0,5-1kW/m^2

Bu benzetimde, FV panel yüzeyi 0,1kW/m^2, 0,5kW/m^2 ve 1kW/m^2 şeklinde üç farklı ışınıma maruz kalmıştır. Bu nedenle, güç-gerilim eğrisi üzerinde üç adet MGN bölgesi oluşmuştur. Bu durum Şekil 5.13'deki FV panel güç değişiminden de görülmektedir. İlk üç benzetim çalışmasında olduğu gibi her MGN bölgesi için SEPIC dönüştürücüye, önerilen akıllı güç taraması uygulanmıştır. Tüm MGN bölgelerinde elde edilen en yüksek güç değerleri kaydedilmiştir. Daha sonra P_{sol}, P_{orta} ve $P_{sağ}$ karşılaştırılmıştır.

Sonuçta, $P_{orta}>P_{sol}$ ve $P_{orta}>P_{sağ}$ olduğu için doluluk oranı ilk değeri d_{orta} olarak belirlenmiş ve değiştir gözle algoritması devreye girerek MGNİ işlemini kararlı halde devam ettirmiştir. Bu senaryoda beş saniyelik zaman aralığı için MGNİ verimi %98,20 olarak hesaplanmış, takip süresi 150ms olarak gözlenmiştir.



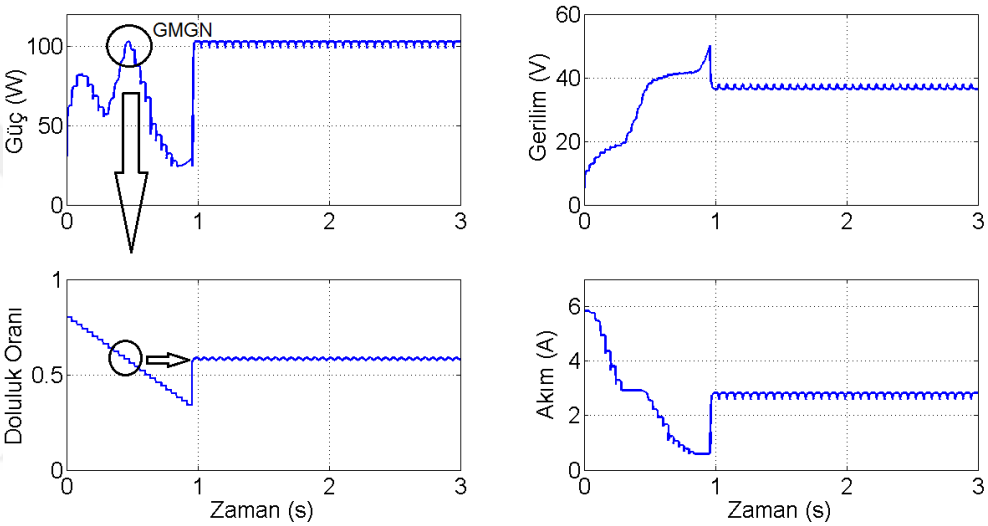
Şekil 5.12. 0,2-0,3-1kW/m^2 gölgelenme durumu için [15]'deki algoritmanın benzetim sonuçları



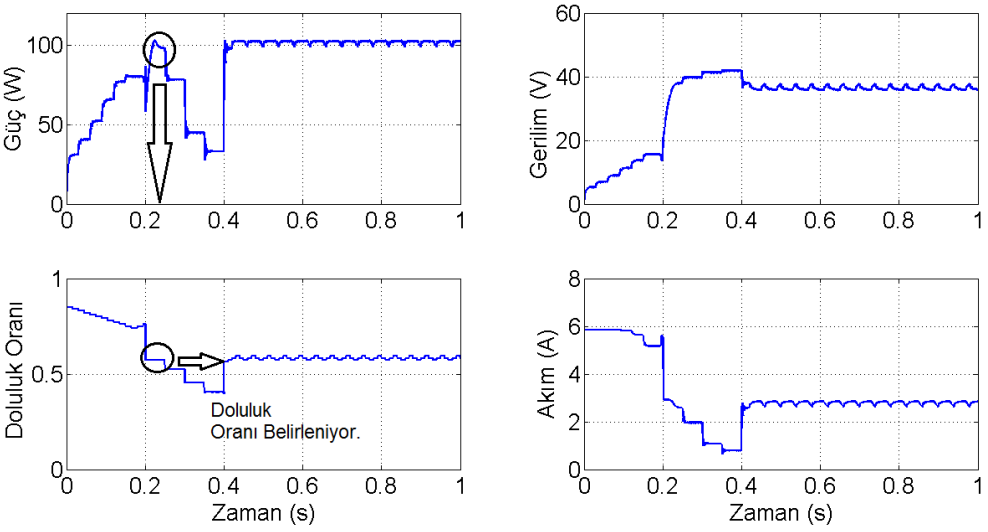
Şekil 5.13. 0,1-0,5-1kW/m^2 gölgelenme durumu için önerilen algoritmanın benzetim sonuçları

Koutroulis ve Blaabjerg'in (2012) önerdiği yönteme göre; FV panel gerilimi 0V'dan yaklaşık olarak açık devre gerilimine kadar taranır ve gücün maksimum olduğu andaki doluluk oranı değeri, tarama işlemi sonunda ilk değer olarak belirlenir. Daha sonra değiştir gözle algoritması sayesinde FV panel MGN'de çalışmaya devam eder. Bu benzetim sonucunda, Tablo 5.1'de verildiği üzere MGNİ verimi %91,41 olarak hesaplanmıştır. MGNİ süresi ise süresi 975ms'dir.

Tey ve Mekhilef'in (2014) önerdiği geliştirilmiş artan iletkenlik algoritmasının 0,1-0,5-1kW/m^2 gölgelenme durumundaki MGNİ başarımı Şekil 5.15'de verilmiştir. Sabit adım aralıklı artan iletkenlik algoritması kullanılarak ilk MGN'ye 230ms içinde ulaşılmıştır. Daha sonra 0,8V_{AD} büyüklüğündeki gerilim artışını sağlayacak doluluk oranı değeri hesaplanmış ve akım değişimi sıfıra yakınsayınca kadar adım aralığı düşürülerek MGNİ işlemine devam edilmiştir. FV panel gerilimi, 3V_{AD} (modül veya panel sayısı:3) oluncaya kadar bu işlem devam eder. Benzetim sonucunda beş saniyelik periyotta MGNİ takip verimi %95,65 olup, [20]'de önerilen algoritmanın veriminden %4,24 fazladır.



Şekil 5.14. 0,1-0,5-1kW/m^2 gölgelenme durumu için [20]'de önerilen MGNİ algoritmasının benzetim sonuçları

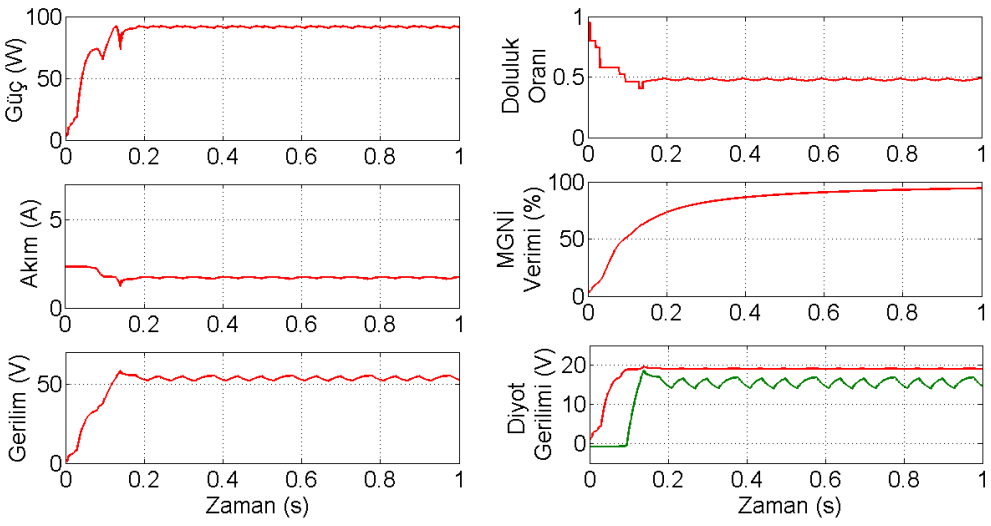


Şekil 5.15. 0,1-0,5-1kW/m^2 gölgelenme durumu için [15]'de önerilen MGNİ algoritmasının benzetim sonuçları

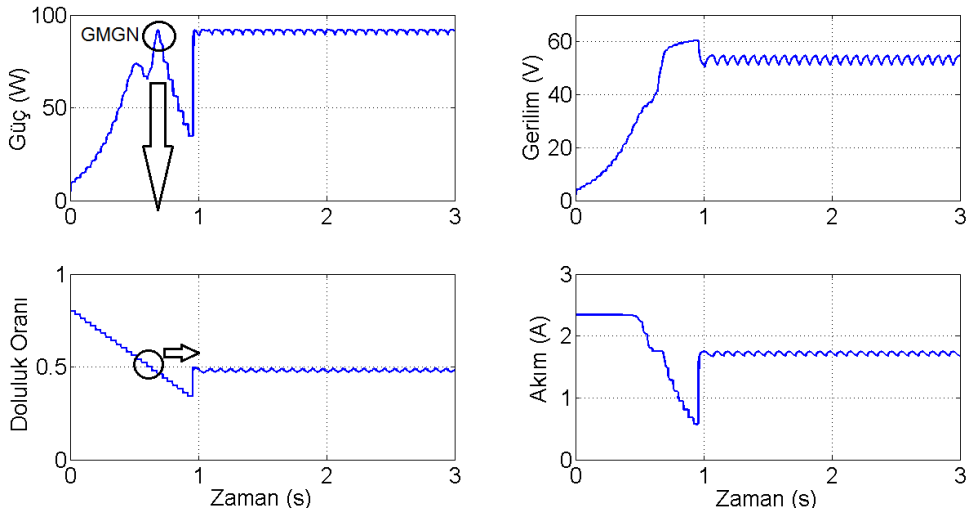
5.5. Benzetim-5: 0,3-0,4-0,4kW/m^2

0,3-0,3-0,4kW/m^2 ışınım durumu için önerilen MGNİ algoritmasının başarımına dair benzetim sonuçları Şekil 5.16'da verilmiştir. Gölgelenme ışınım değerlerinden ve Şekil 5.16'daki güç değişiminden anlaşılacağı üzere iki tane MGN bölgesi vardır. Global MGN, tüm diyotların kesimde olduğu Bölge-3'dedir. FV panel t=0s'de yaklaşık kısa devre durumunda çalıştırılmış ve parçalı gölgelenme tespiti yapılmıştır. Bu esnada diyot geriliminin negatif olduğu Şekil 5.16'da görülmektedir. Benzetim sonucuna göre MGNİ verimi %98,40 olarak hesaplanmış, takip süresi 200ms olarak gözlenmiştir.

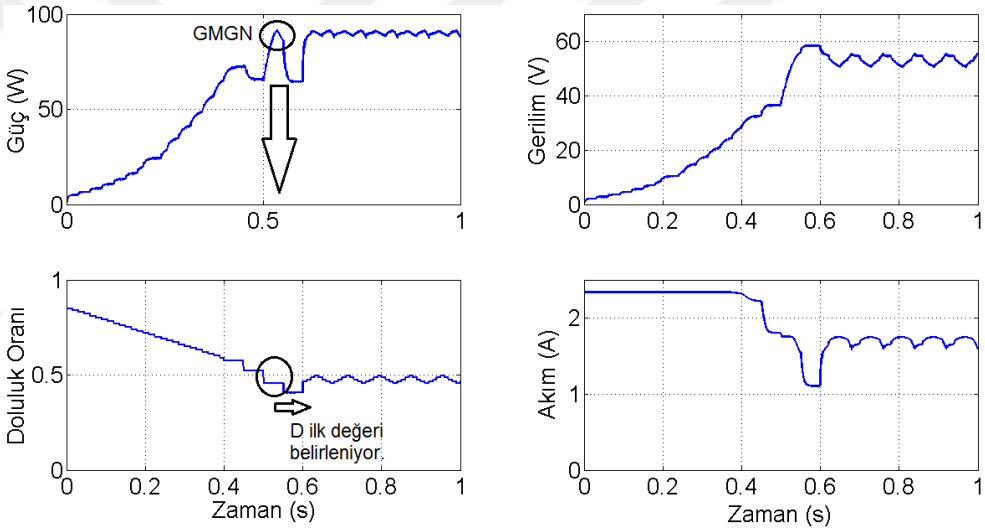
Şekil 5.17'de güç-gerilim eğrisinin tamamına yakınının tarandığı [20]'de önerilen algoritmaya ait benzetim sonuçları verilmiştir. Tarama işleminin süresi MGN'ye erişimi doğrudan belirlediği için, MGNİ süresi tarama süresidir. Bu benzetim çalışmasında MGNİ verimi %89,2 olarak hesaplanmıştır. MGNİ süresi güç değişimi grafiğinden 975ms olarak ölçülmüştür. 0,8V_{AD} modeline dayalı yöntemin [15] MGNİ başarımına dair sonuçlar Şekil 5.18'de verilmiştir. FV panel güç-gerilim eğrisinde ilk MGN, Bölge-2'de bulunduğu için, MGNİ 620ms'de tamamlanmıştır. Doluluk oranı değeri %1'lik adımlarla azaltılarak ilk MGN'ye ulaşılmıştır. Bu geçici hal içinde FV panelden oldukça düşük güç çekilmiştir. Bunun sonucunda, [20]'de verilen yöntem diğer benzetim çalışmalarına kıyasla oldukça düşük bir MGNİ verimine sahiptir (%91,2).



Şekil 5.16. 0,3-0,3-0,4kW/m^2 gölgelenme durumu için önerilen algoritmanın MGNİ benzetim sonuçları

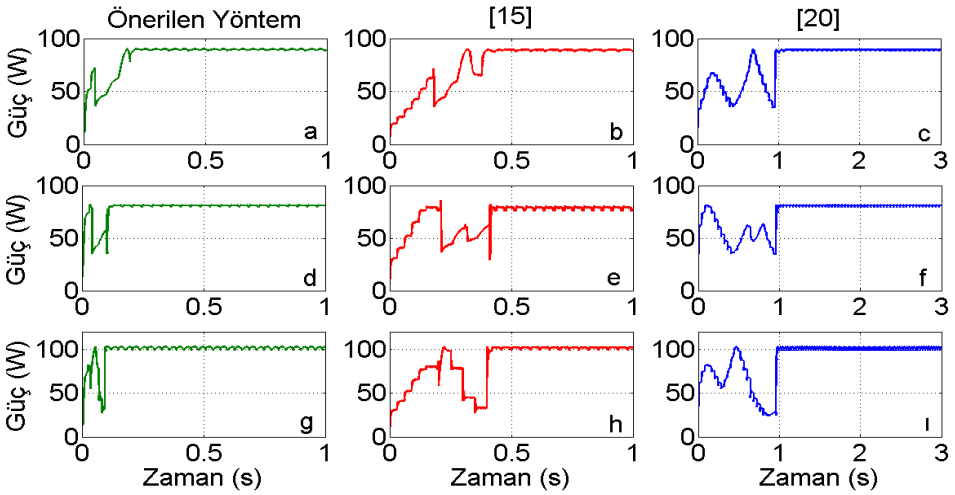


Şekil 5.17. 0,3-0,3-0,4kW/m^2 gölgelenme durumu için [20]'de önerilen MGNİ algoritmasının benzetim sonuçları

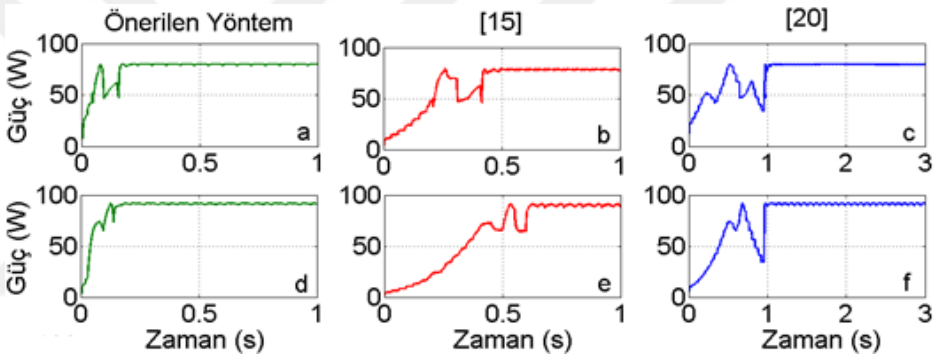


Şekil 5.18. 0,3-0,3-0,4kW/m^2 gölgelenme durumu için [15]'de önerilen MGNİ algoritmasının benzetim sonuçları

Parçalı gölgelenme durumu için önerilen algoritmanın MGNİ başarımını özetlemek amacıyla, benzetimi yapılan beş gölgelenme durumu için, önerilen algoritma ile [15]'de ve [20]'de önerilen algoritmalar kullanılarak yapılan benzetim çalışmalarının sonucunda oluşan FV panel güç değişimleri Şekil 5.19 ve Şekil 5.20'de verilmiştir. Şekil 5.19 ve Şekil 5.20'deki grafiklerden anlaşılacağı üzere, önerilen algoritma FV panelin daha kısa sürede MGN'de çalışmasını sağladığı için, diğer iki algoritmaya göre daha büyük MGNİ başarımına sahiptir. Koutroulis ve Blaabjerg'in önerdiği yaklaşım, [20]'deki önerilen algoritamdan ortalama %2,73 daha küçük MGNİ verimliliğine sahiptir. Geliştirilen algoritma sayesinde diğer iki algoritmaya göre sırasıyla %3,92 ve %6,65 daha fazla enerji FV panelden çekilmiştir.



Şekil 5.19. Benzetim-1, benzetim-2 ve benzetim-3 için önerilen algoritmanın, [15] ve [20]'deki algoritmalar ile panel güç değişimi açısından karşılaştırılması

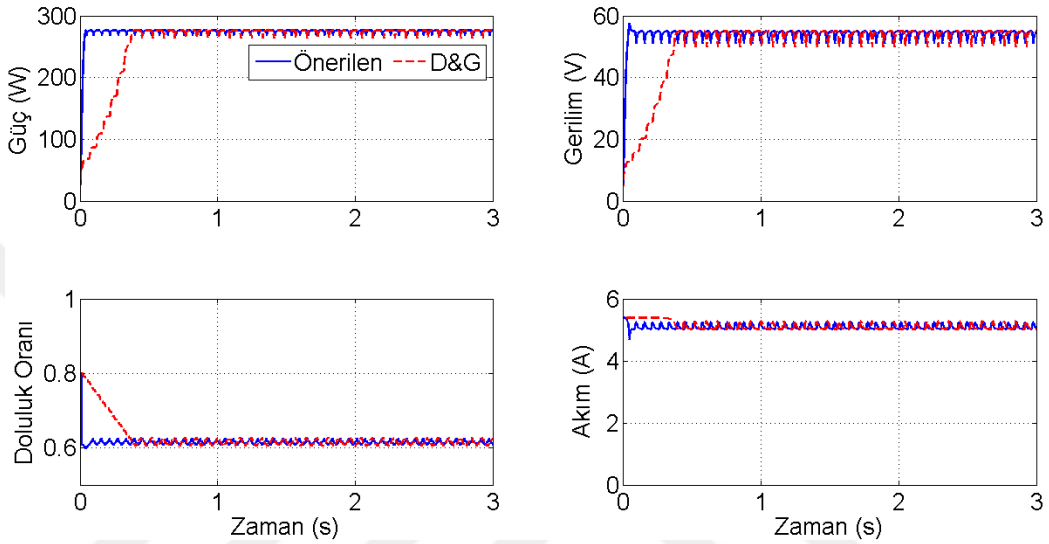


Şekil 5.20. Benzetim-4 ve benzetim-5 için önerilen algoritmanın, [15] ve [20]'deki algoritmalar ile panel güç değişimi açısından karşılaştırılması

5.6. Benzetim-6: Düzenli Işınım Durumları (920W/m^2 ve 420W/m^2)

FV panel yüzeyi eşit miktarda ışınıma maruz kalmışsa düzenli ışınım algoritması devreye girer. FV modül gerilim değerleri pozitifse, (tüm paralel diyotlar kesimdeyse) düzenli ışınım algoritması dönüştürücüye uygulanır. Bu algoritma, geliştirilmiş sabit akım yöntemi ile değiştir gözle algoritmasından oluşmaktadır. İlk olarak FV panel, güç aktarımını fazla etkilemeyecek şekilde, yaklaşık olarak kısa devre akımında çalıştırılır. Kısa devre akımının periyodik olarak ölçüldüğü klasik yaklaşımda var olan [33], paralel güç anahtarına (MOSFET, IGBT vs.) gerek yoktur. MGNİ devreye girmeden önce FV panele paralel bağlı kondansatörün yüksüz durumda (0V) olduğu kabul edilirse, FV panel kısa devre akımında çalışmaya başlayacaktır. Doluluk oranı değeri yaklaşık kısa devre durumunda $R_{FV}=V_{FV}/I_{FV}$ sıfıra yakınsayacağı için yaklaşık olarak %75-80 alınabilir. Şekil 5.21'de verilen benzetim sonuçlarına göre FV panel sırasıyla yaklaşık kısa devre akımında çalıştırılmış ve sabit akım yöntemi sayesinde MGN

civarında bir çalışma sağlanmıştır. Üç saniyelik MGNİ çalışma sonucunda verim %99,07 olup, MGN'ye ulaşma süresi yaklaşık 100ms'dir. Aynı ışınım ve yük direnci değeri için değiştir gözle algoritmasının MGNİ başarımı da Şekil 5.21'de verilmiştir. Değiştir gözle algoritmasında, doluluk oranı ilk değeri %80 ve adım büyüklüğü %0,5 olmak üzere üç saniyelik benzetim sonucunda MGNİ verimi %93,44 olarak hesaplanmıştır. MGN izleme süresi yaklaşık olarak 400ms olarak gözlenmiştir.



Şekil 5.21. FV panelin düzenli ışınıma maruz kalması durumunda kullanılan algoritmanın ve değiştir gözle algoritmasının başarımları (Q_{FV}=920W/m^2)

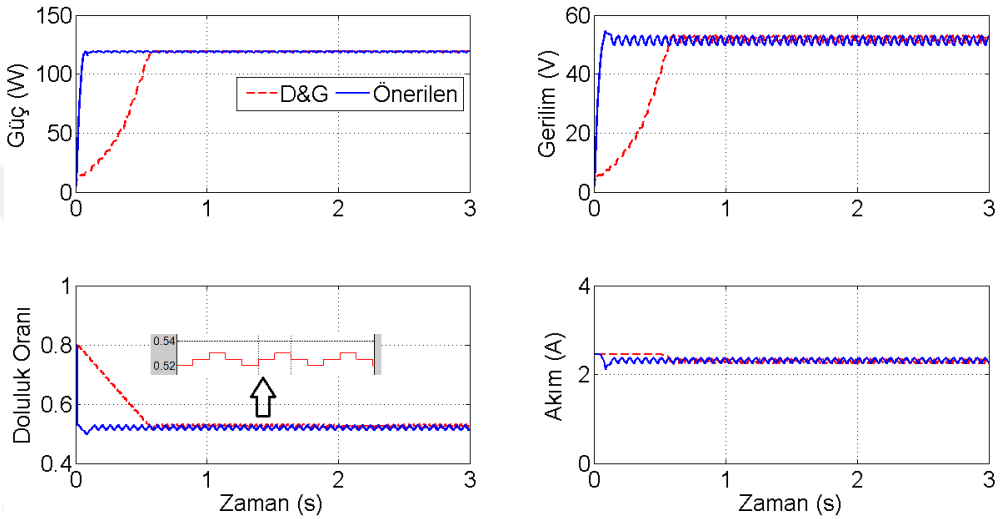
Güneş ışınımı değeri 420W/m^2 ve yük direncinin 24Ω olduğu durum için benzetim sonuçları Şekil 5.22'de verilmiştir. Değiştir gözle algoritması diğer benzetimdeki gibi MGNİ işlemini %80 başlangıç doluluk oranı değeriyle ve %0,5'lik adım büyüklüğü ile gerçekleştirmiştir. Şekil 5.22'den anlaşılacağı üzere, önerilen algoritmanın MGNİ süresi değiştir gözle algoritmasına göre daha kısadır. Üç saniyelik periyot sonunda, önerilen algoritmanın MGNİ verimi %98,66 iken, değiştir gözle algoritması %88,71'lik bir verime sahiptir.

5.7. Benzetim-7: Işınım ve Yük Değişimi Senaryoları

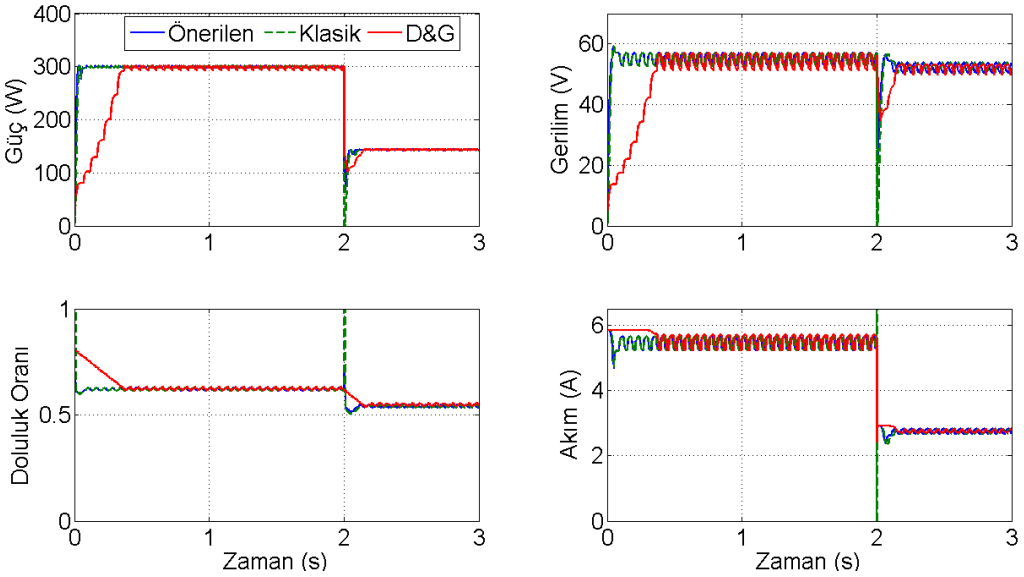
Düzenli ışınım algoritmasının MGNİ başarımı, ışınım değişimi ve yük değişimi durumları için değerlendirilerek klasik kısa devre akımı ölçümüne dayalı algoritma [33] ve değiştir gözle algoritması ile karşılaştırılmıştır.

Şekil 5.23'te ışınım değişimi durumuna ait benzetim sonuçları verilmiştir. t=2s'de, güneş ışınımı değeri 1000W/m^2'den 500W/m^2 olacak şekilde değiştirilmiştir. FV panel akımı ve gerilimi değerlerinde ani bir değişim yaşandığı için, FV panel yaklaşık kısa

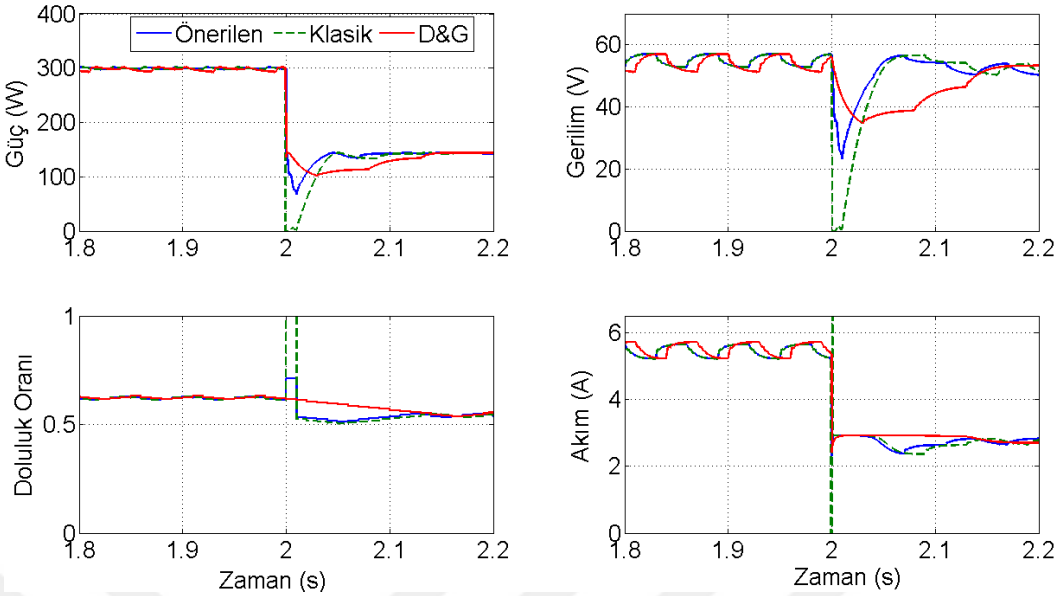
devre akımında çalıştırılmış ve yeni doluluk oranı değeri hesaplanarak dönüştürücüye uygulanmıştır. Klasik kısa devre akımı ölçümüne dayalı algoritmada ise FV panele paralel bağlı güç anahtarı birkaç ms kısa devre durumunda çalıştırılarak, kısa devre akımı ölçülmüş ve doluluk oranı değeri hesaplanarak dönüştürücüye uygulanmıştır. Şekil 5.24'de, t<2s, t=2s ve t>2s için ayrıntılı değişimler verilmiştir. Üç saniyelik periyot sonunda önerilen algoritmanın MGNİ verimi %98,58 olurken, kısa devre akımı ölçümüne dayalı algoritma ve değiştir gözle algoritmasının verimi sırasıyla %97,9 ve %91,8 olarak gözlenmiştir.



Şekil 5.22. FV panelin düzenli ışınıma maruz kalması durumunda kullanılan algoritmanın ve değiştir gözle algoritmasının başarımları (Q_{FV}=420W/m^2)

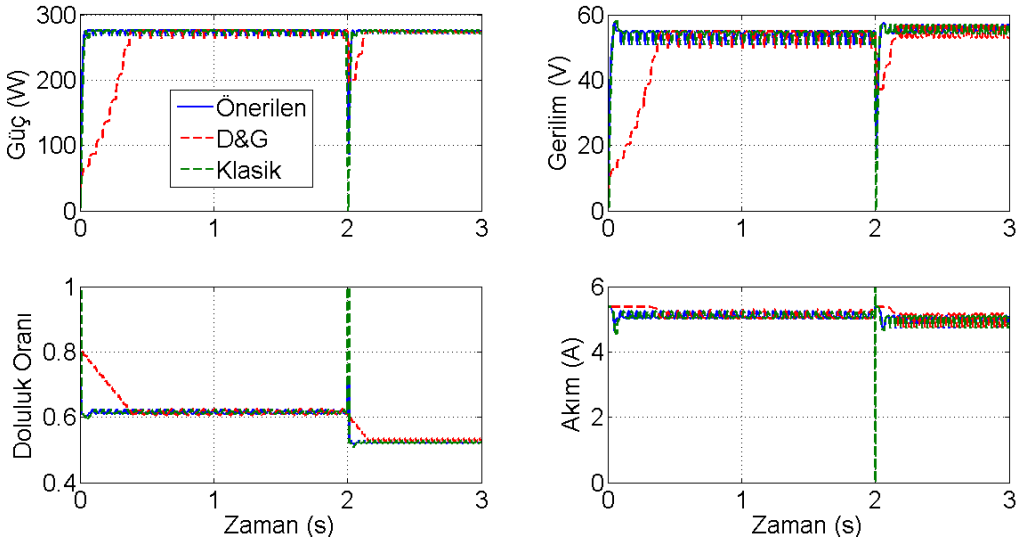


Şekil 5.23. Işınımın 1000W/m^2'den 500W/m^2'ye değişmesi durumunda önerilen algoritma, klasik kısa devre akımı ölçümüne dayalı algoritma ve değiştir gözle algoritmasının MGNİ başarımı

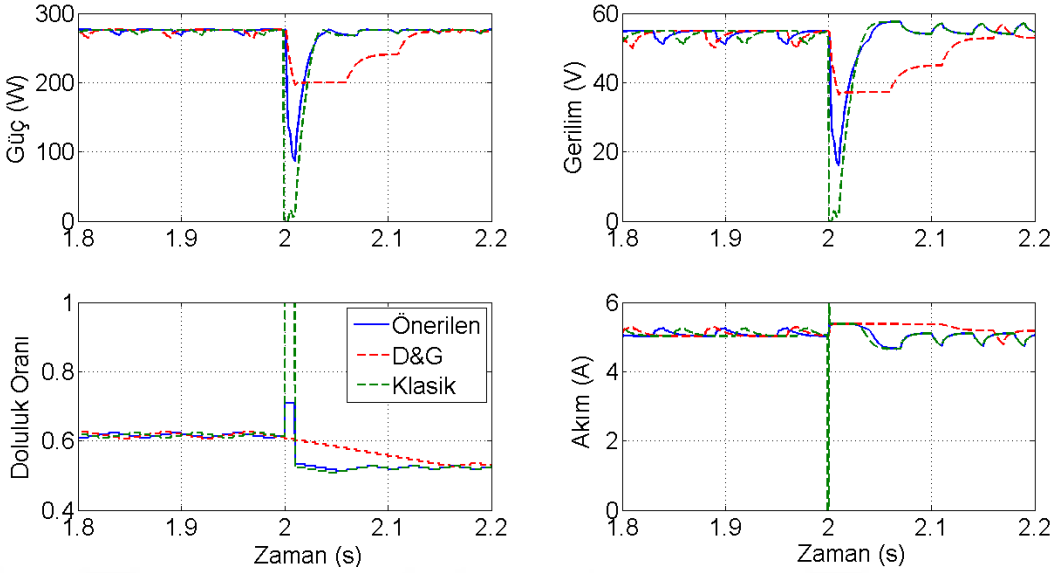


Şekil 5.24. Işınım değişimi benzetimi ayrıntılı gösterimi (Şekil 5.23)

Düzenli ışınım algoritmasının yük direnci değişimi durumundaki MGNİ başarımı, değiştir gözle algoritması ve klasik kısa devre akımı algoritması ile karşılaştırılarak değerlendirilebilir. t=2s anında yük direnci 24Ω'dan 12Ω'a düşürülmüş ve yaklaşık kısa devre akımının ölçülmesine dayalı önerilen algoritma, değiştir gözle ve klasik kısa devre akımına göre daha üstün bir MGNİ başarımı göstermiştir. Üç saniyelik benzetim sonucunda önerilen algoritmanın MGNİ verimi %98,83 olurken, klasik algoritmanın MGNİ verimi %98,22, değiştir gözle algoritmasının verimi ise %93,44 olarak hesaplanmıştır. Şekil 5.25'de ve Şekil 5.26'da yük değişimi benzetimine dair sonuçlar verilmiştir.



Şekil 5.25. Yük direncinin 24Ω'dan 12Ω'a değişmesi durumunda, önerilen algoritma klasik kısa devre akımı ölçümüne dayalı algoritma ve değiştir gözle algoritmasının MGNİ başarımı



Şekil 5.26. Yük direnci değişimi benzetimi ayrıntılı gösterimi (Şekil 5.25)

6. YENİ MGNİ SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE DENEYSEL SONUÇLARI

Önerilen MGNİ algoritmasının başarımını göstermek için düşük güçlü bir SEPIC dönüştürücü tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Önerilen algoritma FV simulatör ve gerçek FV paneller kullanılarak, $0,8V_{AD}$ modeline dayalı geliştirilmiş artan iletken algoritması [15] ve güç-gerilim eğrisinin yaklaşık olarak tamamının tarandığı bir algoritma [20] ile karşılaştırılmıştır. Bu kısımda güç devresi, algılama devresi tasarımı, güç anahtarı kapı sürme devresi ve birçok farklı senaryoyu kapsayan uygulama sonuçları verilmiştir.

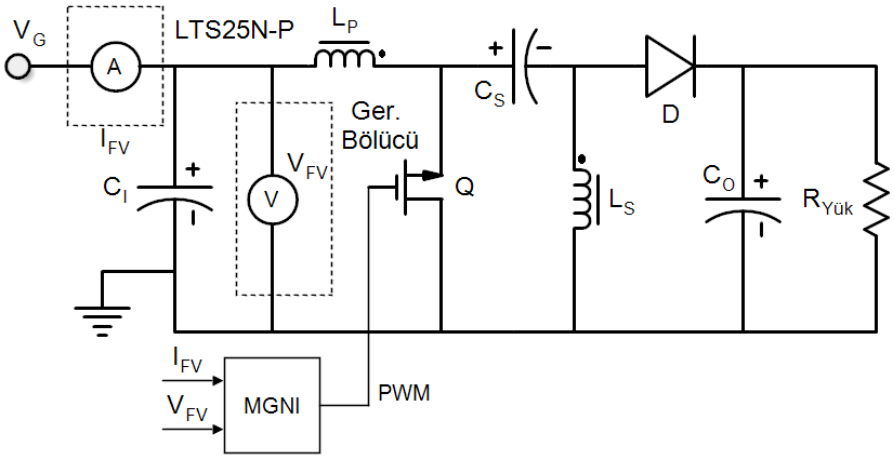
6.1. SEPIC Dönüştürücü Güç Devresi

Önerilen algoritmanın ve başarım karşılaştırması için kullanılan diğer algoritmaları test etmek için 300W nominal gücü referans alınarak kuplajlı endüktanslı bir SEPIC dönüştürücü tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmaların büyük bir bölümünde uygulama kolaylığı ve diğer algoritmalarla eş değer bir karşılaştırma yapmak için FV panel yerine CHROMA'nın 62050-600S model FV simulatörü kullanılmış olup, Tablo 6.1'de verilen katalog değerlerine göre güç-gerilim ve akım-gerilim karakteristik eğrileri FV simulatör sayesinde üretilmiştir.

Tablo 6.1. Standart test koşulları altında kullanılan FV panele ait katalog verileri [36]

FV Panel (Solbian – 101W) Standart Test Koşulları	**Değer**
Maksimum güç	101W
Açık devre gerilimi	21,76V
Maksimum güç noktası gerilimi	18,4V
Kısa devre akımı	5,85A
Maksimum güç noktası akımı	5,51A
Paralel diyot	1 adet
Panel verimi	%17,53

Şekil 6.1'de gerçekleştirilen MGNİ algoritmalı SEPIC dönüştürücü elektriksel eşdeğer devresi görülmektedir. Tablo 6.2'de ise dönüştürücü devreye ait, güç anahtarı, diyot modeli, pasif elemanların değerleri, algılama, mikrodenetleyici elemanlarının tipi ve kullanılan test cihazlarının modelleri ve tipleri verilmiştir.



Şekil 6.1. SEPIC dönüştürücü, algılayıcılar ve MGNİ işleminin temel olarak gösterimi

Tablo 6.2. SEPIC devre parametreleri ve ölçüm cihazları

Devre Elemanı / Ölçüm Elemanı	**Değer / Marka / Model**
Giriş kondansatörü	2//470µF, 100V
Çıkış kondansatörü	150µF, 200V
Kuplajlı endüktans (L_P / L_S)	569µH / 569µH
Kuplaj kondansatörü	220µF, 100V
MOSFET	IRFP450
Diyot	MUR860
Akım Algılayıcı	LTS25NP
Gerilim Bölücü	15k/2,7k - 22k/2,7k – 33k/2,7k
Mikrodenetleyici	PIC18F452
Anahtarlama Frekansı	20kHz
Akım Probu	Fluke 80i-110s
Osiloskop	GW Instek -GDS3254
FV Simülatör	CHROMA 62050-600S
Yük Direnci	24Ω – 300W

SEPIC dönüştürücüde bulunan L_P ve L_S endüktansları eşit değerli oldukları için tek bir ferrit nüveye sarılabilir. Bu sayede hem endüktans değeri yarıya düşürülmüş hem de devre hacmi küçültülebilir [38]. L_P ve L_S endüktans değerleri Eşitlik (4.4)'e göre hesaplanabilir. Eşitlik (4.4)'de D=0,8, f_P=20kHz, V_G=V_{FV}=55,2V ve endüktans akım dalgalanma yüzdesi %35 olarak kabul edilmiş ve akım dalgalanma miktarı 1,94A olarak hesaplanmıştır. L_P ve L_S endüktanslarının değeri Eşitlik (4.4)'e göre 569µH'dır.

Çıkış kondansatörü; Eşitlik (4.6)'da $I_Ç$xD_{krt} değerinin en büyük olduğu, $V_Ç$≥25V ve çıkış gerilimi dalgalanma miktarı h=2 için hesaplanmıştır. D_{krt}=%31, $I_Ç$=12,26A, f=20kHz, olmak üzere, çıkış kondansatörü 380µF olarak belirlenmiş ve 470µF,200V seçilmiştir.

Endüktanslar üzerinde meydana gelen gerilim düşümleri ihmal edilirse, kuplaj kondansatörü gerilimi FV panel gerilimine eşittir. Bu kondansatörün değeri, FV panel

için standart test koşullarında verilen V_{MGN}=55,2V, D_{krt}=%31, $I_Ç$=12,26A ve h=2 parametreleri kullanılarak Eşitlik (4.8)'e göre 172µF hesaplanır. C_S kuplaj kondasatörü 100V, 220µF değerlerinde ve elektrolitik tip olarak seçilmiştir.

FV panele paralel bağlı ve SEPIC dönüştürücü giriş kondansatörü, C_G, Eşitlik (4.9)'a göre endüktans akımı dalgalanma miktarı maksimum tutularak ve kondansatör gerilim dalgalanması ΔV_{CG}=100mV kabul edilerek, C_G=932µF olarak hesaplanmıştır. Uygulamada iki adet paralel bağlı 470µF (2//470µF), 100V değerinde elektrolitik kondansatör seçilmiştir.

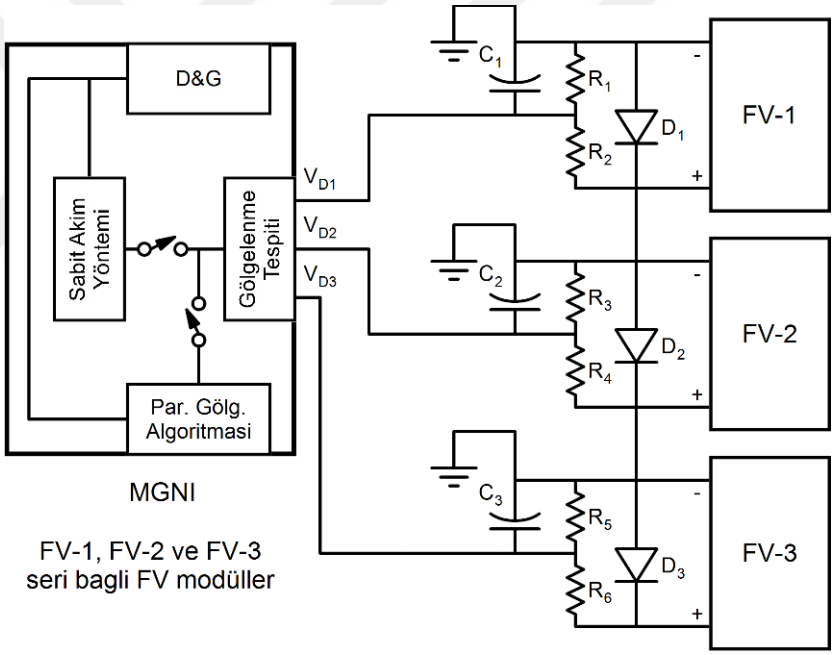
6.2. Algılama Devreleri, Mikrodenetleyici ve Güç Anahtarı Sürme Devresi

Şekil 6.1'de verilen devrede MGNİ işlemi için gerekli olan FV panel akımı, LEM firmasının 75mV/A hassasiyete ve %0,1'den düşük doğrusallık hatasına sahip LTS25N-P akım transdüseri kullanılarak ölçülmüştür. FV panel akım değeri kısa devre anında 5,85A olup, akım transdüseri 8A'lik bağlantı modeline göre kullanılmıştır. FV panel gerilimini ve modüllere paralel bağlı diyot gerilimlerini ölçmek için basit gerilim bölücü devreler kullanılmıştır. Şekil 6.1'de FV panel gerilimini ve Şekil 6.2'de paralel diyot gerilimlerini, gerilim bölücü devreler aracılığıyla en fazla 5V'a kadar düşüren devrelerin prensip şeması verilmiştir.

Üçüncü bölümde belirtildiği üzere, parçalı gölgelenmenin oluşup oluşmadığı, FV modüllere paralel bağlı diyotların gerilim değerleri izlenerek anlaşılır. Şekil 6.2'deki devrede her bir FV modülün ayrı referansı noktası vardır. Bu durum güç ve denetim devrelerinin ortak referansa sahip olduğu SEPIC dönüştürücü için donanımsal ihtiyaçları arttıracağından, FV modül gerilimleri toplanarak ölçülür. FV-1 modülü referans (-) noktasının SEPIC dönüştürücü referansı ile aynı olduğu varsayılarak, sırasıyla V_{FV1}, $V_{FV1}+V_{FV2}$ ve $V_{FV1}+V_{FV2}+V_{FV3}$ gerilim değerleri okunur. $V_{FV1}+V_{FV2}<V_{FV2}$ ve/veya $V_{FV1}+V_{FV2}+V_{FV3}<V_{FV1}+V_{FV2}$ ise FV panelin parçalı gölgelendiği söylenebilir. Gerilim bölücü devrelerde bulunan direnç değerlerini belirlerken, modül açık devre gerilimi referans alınır. $V_{AD,m}$=21,7V olmak üzere, gerilim bölücü devre çıkışındaki kapasiteler üzerinde en fazla V_{cp}=5V DA olacak şekilde tasarlanırsa, $V_{AD,m}/V_{cp}$ oranından yaklaşık R_2/R_1=4 elde edilir. Bu yöntemi kullanarak R_4/R_3 oranı $2V_{AD,m}/V_{cp}$ ve R_6/R_5 oranı $3V_{AD,m}/V_{cp}$ ile hesaplanırsa, sırasıyla 8 ve 12 elde edilir. Gerilim algılama devrelerinde, R_1=2,7k, R_2=15k, R_3=2,7k, R_4=22k, R_5=2,7k ve R_6=33k değerlerinde 0,25W'lık dirençler ve 2,7k'lık dirençlere paralel 10nf değerindeki kondansatörler kullanılmıştır.

Geliştirilen MGNİ algoritması ve diğer iki algoritma [15, 20] PIC C kullanılarak kodlanıp, PICKIT2 programlayıcı donanımı ile Microchip firmasının PIC18F452 mikrodenetleyicisine hex formatında yüklenmiştir. PIC18F452 mikrodenetleyicisi 5V DA gerilimi ile beslenmiştir. 5V DA gerilimi, şebeke geriliminin 220V/12V trafosu ile düşürülüp, köprü diyot ile doğrultulmasıyla elde edilen DA gerilimin filtrelenmesi ve 7805 regülatör entegresini beslemesiyle elde edilmiştir.

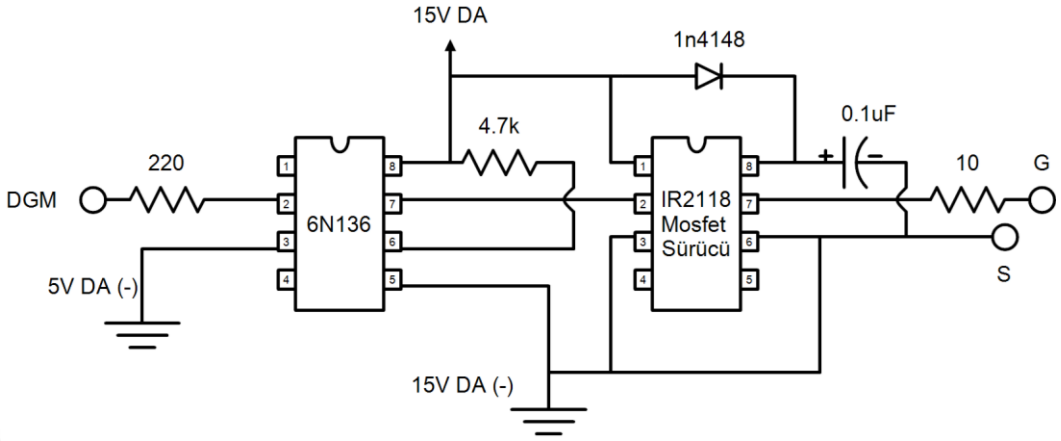
FV panel gerilimi, modüllere bağlı paralel diyot gerilimleri ve FV panel akımı denetleyicinin A portunda yer alan analog giriş çıkış pinlerine bağlanmıştır. Analog bilgi olarak ADC portunda sekiz bitlik dijital bilgiye dönüştürülen FV panel gerilim ve akım değerleri, gerilim bölücü devrelerin direnç oranları ve akım transdüseri mV/A parametresi aracılığıyla gerçek değerlerine dönüştürülerek MGNİ algoritması için hazır hale getirilir.



Şekil 6.2. FV modül gerilim ölçme devreleri ve MGNİ algoritması prensip şeması

SEPIC devredeki güç anahtarını sürmek için mikrodenetleyicinin CCP modülü DGM üretmek amacıyla kullanılmıştır. Anahtarlama frekansı, mikrodenetleyici yapısında bulunan Zamanlayıcı-2 (Timer2) aracılığıyla frekans sayıcı (prescaler) değeri ve kullanılan kristal osilatörü değerine bağlı olarak 20kHz olacak şekilde ayarlanmıştır. PIC18F452'in ürettiği sürme sinyali 6n136 optokuplörü ile güç devresinden izole edilmiş ve 5V DA tepe değerindeki güç anahtarı kapı sürme sinyalinin genliği 15V'a yükseltilmiştir. International Rectifier firmasının IR2118 kapı sürme (gate driver)

entegresi ile 10Ω'luk seri bir direnç üzerinden, IRFP450 güç MOSFETİ anahtarlanmıştır. Kapı sürme devre Şekil 6.3'de verilmiştir.



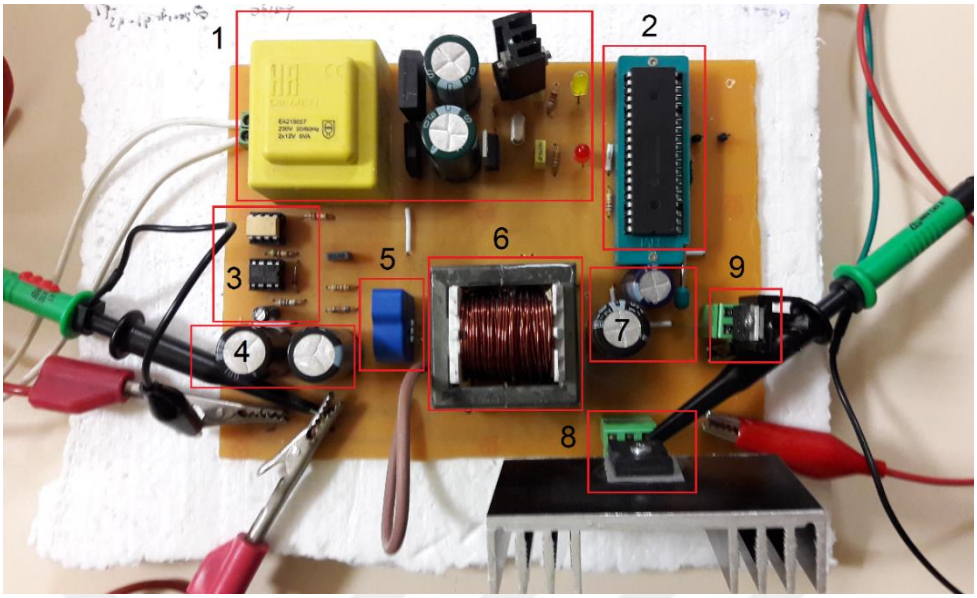
Şekil 6.3. MOSFET kapı sürme devresi

Gerçekleştirilen SEPIC dönüştürücü devresi Şekil 6.4'de verilmiş olup, devre üzerindeki tüm elemanlar numaralandırılarak gösterilmiştir. FV simulatör (programlanabilir DA kaynağı), simulatör arayüz programı için gereken bilgisayar, mikrodenetleyici programlamak için kullanılan programlama donanımı, dijital osiloskop, DA akım probu, direnç yük bankasından oluşan test düzeneği Şekil 6.5'de gösterilmiştir.

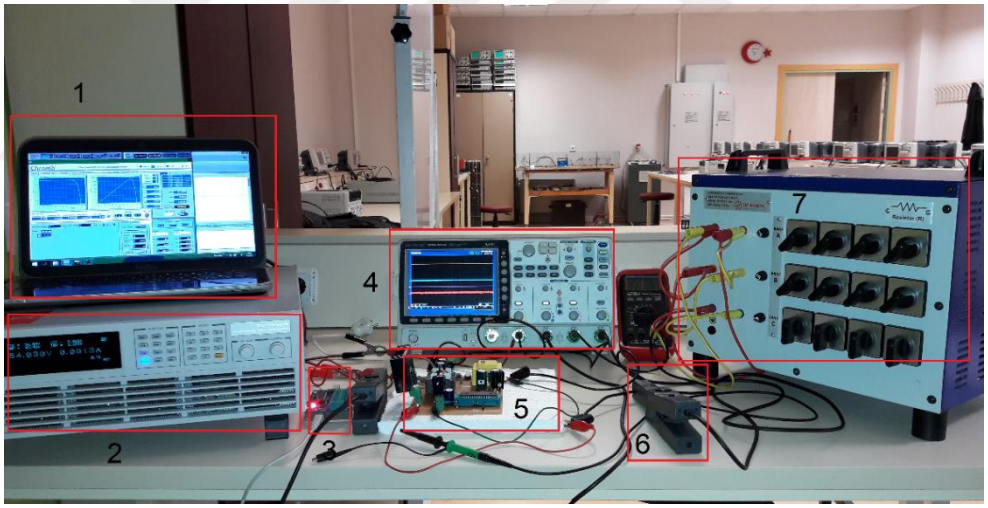
6.3. Deneysel Çalışmalar

Solbian firmasının SB-100 model FV panel verileri kullanılarak FV simulatör veri tabanına yeni bir panel bilgi girişi yapılmıştır. FV simulatör aracılığıyla üç adet FV panel seri bağlanarak yaklaşık 300W'lık bir FV kaynak oluşturulmuştur. Beşinci bölümde verilen gölgelenme ışınım profillerine göre beş farklı güç-gerilim karakteristik eğrisi üretilerek, tez çalışmasında önerilen MGNİ algoritması ve ele alınan diğer iki algoritmanın deneysel olarak MGNİ başarımları test edilmiş ve karşılaştırılmıştır.

Ayrıca düzenli ışınım algoritmasının başarımını doğrulamak için 920W/m^2'lik ve 420W/m^2'lik düzenli ışınım durumlarına ait akım-gerilim karakteristiği üretilmiştir. Düzenli ışınım algoritması, değiştir gözle ve klasik kısa devre akımı yöntemiyle karşılaştırılmıştır.



Şekil 6.4. Gerçekleştirilen devrenin resmi (1: 5V DA ve 15V DA regülatör devreleri, 2:PIC18F452, 3: Kapı sürme devresi, 4:Giriş kondansatörleri, 5: Akım transdüseri, 6: Kuplajlı endüktans, 7: Çıkış ve kuplajlı kondansatör,8: MOSFET, 9: Diyot



Şekil 6.5. Test düzeneği (1: PIC18F452 ve FV simulatör ara yüz programı için kullanılan bilgisayar, 2: FV simulatör, 3: PICKIT2, 4: Osiloskop, 5: SEPIC, 6: Akım probu, 7: Direnç yük bankası)

6.3.1. Gölgelenme-1: 0,3-0,3-0,8kW/m^2

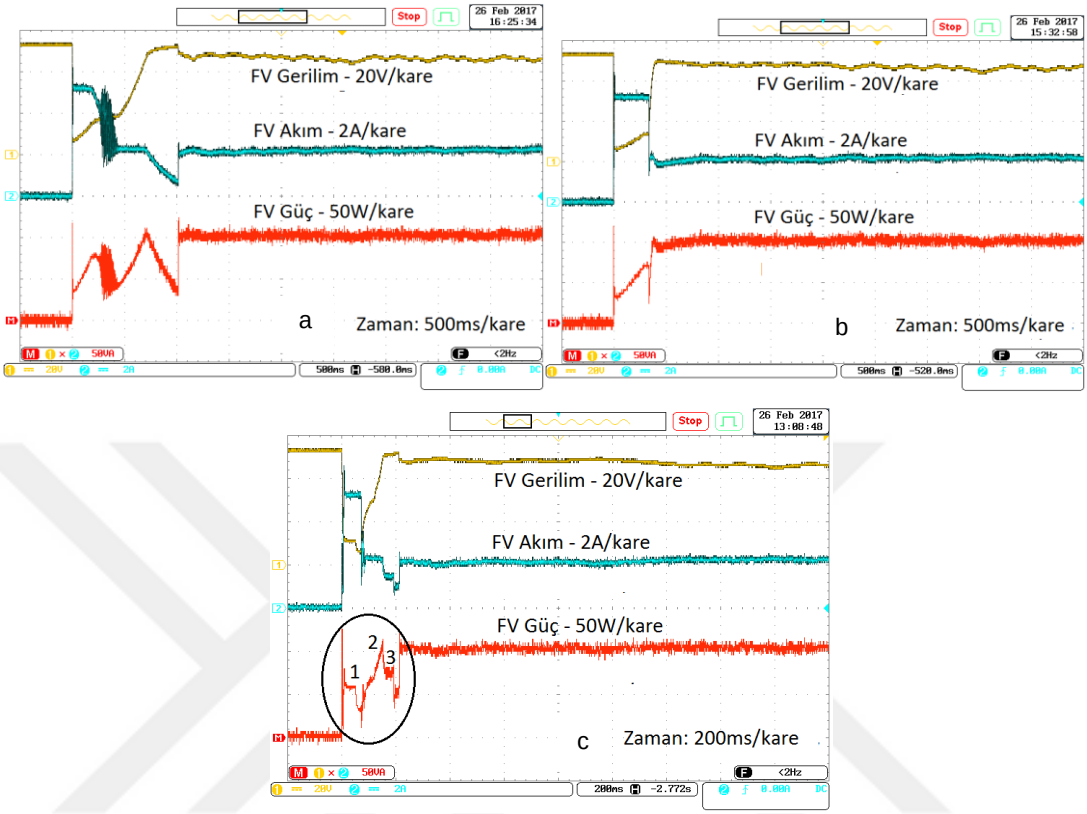
Koutroulis ve Blaabjerg'in önerdikleri algoritma, açık devre geriliminden başlayarak belirli bir gerilim değerine kadar güç taraması yapılmasına dayalıdır. Bu yaklaşım kullanılarak gerçekleştirilen MGNİ kesin sonuç vermekle beraber, MGNİ yavaş ve düşük verimli olmaktadır. Şekil 6.6.a'da [20]'de önerilen algoritma kullanılarak yapılan MGNİ başarım testi sonucunda elde edilen FV panel gerilimi, FV panel akımı ve güç değişimi görülmektedir. FV panel gerilimi geniş bir aralıkta ve %1'lik sabit doluluk

oranı büyüklüğünde değiştirilmiş ve tarama işlemi sırasında güç ve doluluk oranı değerleri kaydedilmiştir. Tarama işlemi tamamlandıktan sonra gücün en büyük olduğu durumdaki doluluk oranı değeri %49 olarak belirlenmiş ve ilk değer olarak atanmıştır. Bu aşamadan sonra değiştir gözle algoritması devreye girerek, MGNİ işlemi kararlı halde bir sonraki tarama başlangıcına kadar devam eder. Bu uygulamada, beşinci saniye sonunda %89,87'lik MGNİ verimine ulaşılmıştır. MGNİ süresi 1020ms'dir.

Tey ve Mekhilef'in önerdikleri yöntem, $0,8V_{AD}$ modeline dayalı güç-gerilim karakteristik eğrisinin taranması ve iyileştirilmiş artan iletkenlik algoritmasından oluşmaktadır. İlk olarak FV panel gerilimi yaklaşık 0V'dan ilk MGN'ye ulaşana kadar artan iletkenlik algoritması kullanılarak arttırılır. Şekil 6.6.b'de görüleceği üzere, FV panelin klasik tepe tırmanma algoritmalarında olduğu gibi, sabit adım aralığı yaklaşımı kullanılarak ilk MGN'ye ulaşması sağlanmıştır. FV panel MGN'ye erişene kadar $\Delta P/\Delta V>0$ sağlanır. MGN'de güç salınımı oluşacağından $\Delta P/\Delta V$ değeri sürekli işaret değiştirecektir ve ilk MGN'ye ulaşıldığı anlaşılır. Bu MGN'nin global MGN olmayacağı varsayımına dayalı olarak bundan sonraki aşamalarda $0,8V_{AD}$'lik gerilim adımı kullanılıp, diğer MGN bölgelerindeki güç değerleri kontrol edilir. Tarama işlemi tüm MGN bölgeleri tamamlandıktan sonra sona erer ve doluluk oranının ilk değeri belirlenir. Algoritmanın son aşamasında artan iletkenlik algoritması kullanılır. Bu uygulamada, statik MGNİ verimi %94,02 olup, MGNİ süresi 500ms civarındadır. Yük direncinin değeri 24Ω'dur.

Şekil 6.6.c'de önerilen algoritmanın MGNİ başarımına dair FV panel gerilim, akım ve güç değişimleri verilmiştir. Üçüncü bölümde anlatıldığı üzere, ticari FV panellerde birkaç istisna ürün dışında en fazla üç adet paralel diyot bulunduğu için FV panel güç-gerilim karakteristik eğrisi üzerinde en fazla üç adet MGN bölgesi oluşabileceği varsayımı yapılmıştır. Önerilen algoritma, ilk olarak FV panel üzerinde gölgelenme oluşup oluşmadığını paralel diyotların (veya FV modül) gerilim değerlerini mikrodenetleyici aracılığıyla değerlendirerek belirler ve kısmi gölgelenme olması halinde her MGN bölgesi için akıllı tarama işlemi gerçekleştirerek, FV panel gücünün en büyük olduğu gerçek MGN bölgesi saptanır. FV simulatör kullanarak yapılan uygulamalarda, tek bir güç çıkışı olduğu için, MGNİ algoritmasının ilk aşaması olan parçalı gölgelenme tespiti prosedürü göz ardı edilmiştir. Şekil 6.6.c'de FV panel güç değişimi üzerinde verilen 1, 2 ve 3 rakamları MGN bölgelerini temsil etmektedir. Akıllı güç taraması sonunda en büyük güç noktasının bulunduğu bölge (2:Orta MGN belirlenmiş ve daha sonra değiştir gözle algoritması ile MGN'de salınımlı çalışma devam etmiştir. Bu uygulama sonucunda, beş saniye içinde %97,39 değerinde MGNİ

verimi elde edilmiş olup, MGN'ye erişim süresi 230ms olarak osiloskop ekranından gözlenmiştir.



Şekil 6.6. Gölgelenme-1 için akım, gerilim ve güç değişimi a) [20]'de önerilen algoritma b) [15]'de önerilen algoritma c) Önerilen algoritma

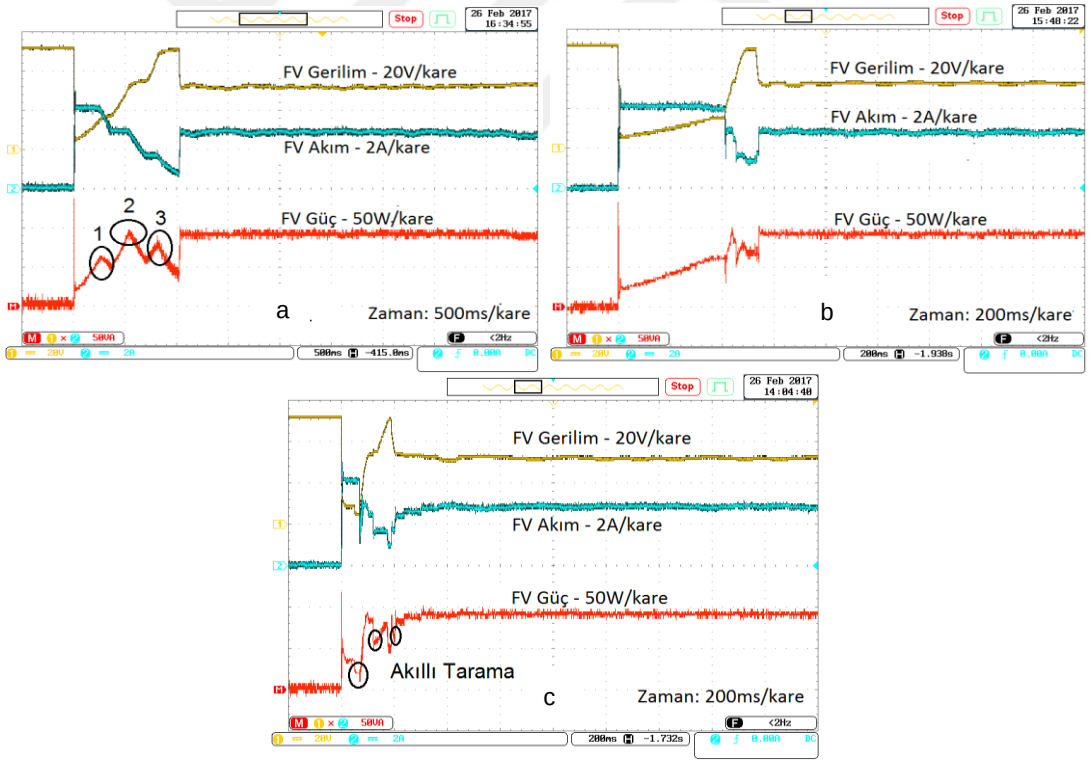
6.3.2. Gölgelenme-2: 0,2-0,4-0,6kW/m^2

Bu gölgelenme senaryosunda ışınım değerleri 0,2kW/m^2, 0,4kW/m^2 ve 0,6kW/m^2 olduğundan, üç farklı ışınım değeri içinn güç-gerilim eğrisinde üç adet MGN bölgesi oluşur. Bu üç MGN bölgesi Şekil 6.7.a'da görülmektedir. Şekil 6.7.a'dan anlaşılacağı üzere, Orta MGN (2) bölgesinde FV panel en büyük gücü üretmektedir. Geniş aralıkta gerilim taraması yapılan [20]'de önerilen yöntemin sonuçları Şekil 6.7.a'da verilmiştir. Tarama sonunda doluluk oranı değeri %60 olarak belirlenmiş ve bu değer değiştir gözle algoritması için başlangıç doluluk oranı değeri olarak değerlendirilir. Beş saniyelik ölçüm sonucunda, FV simulatörün hesapladığı MGNİ verimi %90,61'dir. MGNİ süresi 1020ms'dir.

Şekil 6.7.b'de Tey ve Mekhilef'in önerdiği algoritmanın MGNİ başarımına dair FV panel gerilim, akım ve güç değişimi verilmiştir. İlk MGN'ye kadar daha öncede belirtildiği gibi artan iletkenlik algoritması kullanılmıştır. Daha sonra güç değişimi üzerindeki "1" nolu bölgedeki MGN gerilimine, 0,8V_{AD} ekleyerek "2" nolu MGN

bölgesindeki gücü ve $0,8V_{AD}$ daha ekleyerek “3” nolu MGN bölgesindeki FV panel akım ve gerilimleri ölçülmüş ve FV panelden çekilen güç değerleri tüm MGN bölgeleri için belirlenir ve kaydedilir. Daha sonra üç MGN bölgesinden elde edilen güç değerleri karşılaştırılarak, doluluk oranı değeri belirlenir. MGNİ başarımı statik takip verimliliği ve MGNİ hızı açısından [20]’de önerilen algoritmadan daha üstün olup, %93,92 MGNİ verimi elde edilmiştir. MGNİ süresi 540ms’dir.

Önerilen algoritmanın gölgelenme-2 için MGNİ başarımı Şekil 6.7.c’de gerilim, akım ve güç değişimleri ile verilmiştir. En yüksek güç noktası “2” nolu MGN bölgesinde olduğu için tüm MGN bölgelerinde tarama yapılmıştır. Şekil 6.7.c’de daire içine alınan kısımlar akıllı tarama aşamalarını göstermekte olup, güç değişiminin negatif olması sebebiyle bu aşamalarda gereksiz tarama yapılması engellenmiş ve diğer iki algoritmaya göre %97,78 değerinde ve daha yüksek MGNİ verimi elde edilmiştir. MGN’ye yakınsama süresi 300ms olup, bu değer diğer iki yönteme göre daha küçüktür.

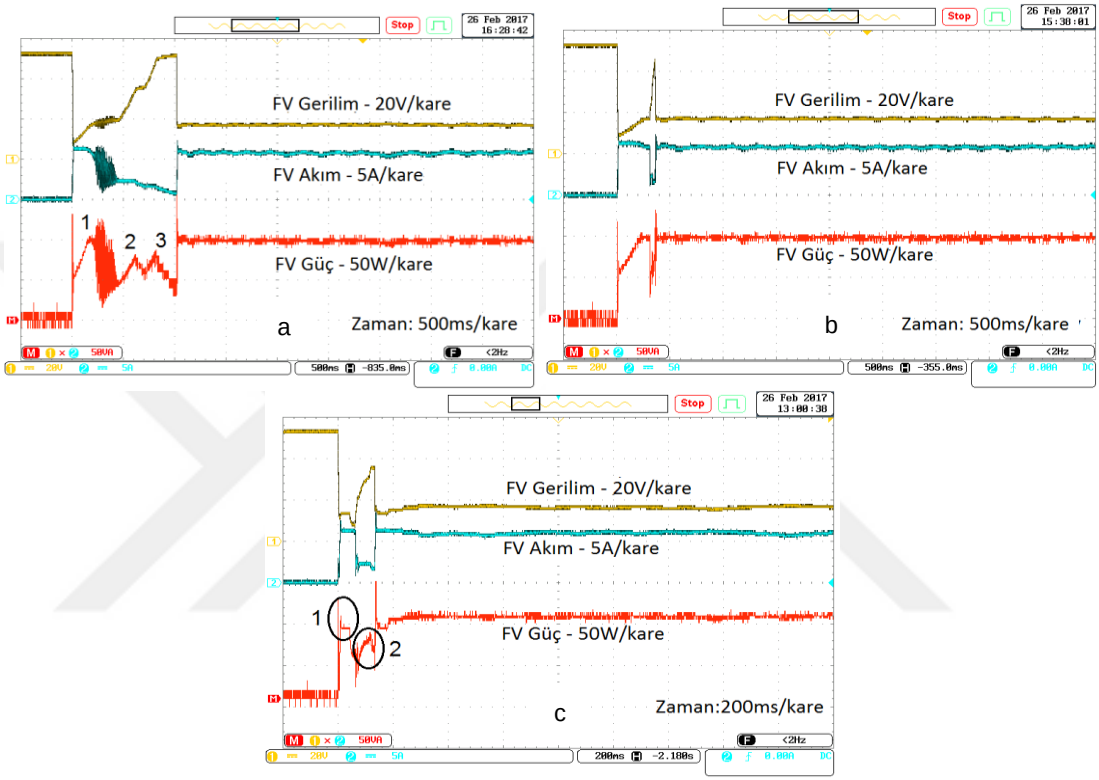


Şekil 6.7. Gölgelenme-2 için FV panelin akım, gerilim ve güç değişimi a) [20]’de önerilen algoritma b) [15]’de önerilen algoritma c) Önerilen algoritma

6.3.3. Gölgelenme-3: 0,2-0,3-1kW/m^2

Gölgelenme ışınım değerleri 0,2kW/m^2, 0,3kW/m^2 ve 1kW/m^2 olması halinde, Şekil 6.8.a’da görüleceği üzere “1” nolu MGN bölgesi en büyük güç değerinin elde edildiği

güç bölgesidir. FV panel güç-gerilim eğrisinin “1” nolu MGN bölgesinde; en büyük güç değeri 100W, MGN gerilimi 18,4V ve MGN akımı 5,5A’dir. Eşitlik (4.3)’e göre %73 olması gereken doluluk oranı değeri, tarama işlemi sonucunda %75 olarak belirlenmiştir. Beş saniyelik periyot sonunda, %88,97 değerinde MGNİ verimi elde edilmiş olup, MGNİ süresi 1020ms olarak gözlenmiştir. Şekil 6.8.a’da [20]’de önerilen algoritma ile yapılan uygulama sonuçları verilmiştir.



Şekil 6.8. Gölgelenme-3 için FV panelin akım, gerilim ve güç değişimi a) [20]’de önerilen algoritma b) [15]’de önerilen algoritma c) Önerilen algoritma

Şekil 6.8.b’de iyileştirilmiş $0,8V_{AD}$ modeline dayalı artan iletkenlik algoritmasına ait deneysel sonuçlar verilmiştir. FV panel gerilimi yaklaşık olarak 0V’dan “1” nolu bölgedeki MGN gerilimine eşit oluncaya kadar %1’lik sabit doluluk oranı adım büyüklüğü ile arttırılır. Daha sonra $0,8V_{AD}$ büyüklüğündeki adım genişliği kullanılarak diğer MGN bölgelerindeki maksimum güç değerleri kontrol edilir. Bir güç-gerilim eğrisinde, MGN güç değerleri azalma eğilimi göstermeye başladıysa, bir önceki MGN bölgesi global MGN bölgesidir [14] tespitine dayanılarak “1” nolu MGN bölgesindeki güç değeri “2” nolu bölgedeki güç değerinden büyük olduğu için diğer MGN bölgelerinin taranmasına gerek yoktur. Uygulama sonucunda MGNİ verimi %91,92 olarak hesaplanmış, MGN’ye ulaşma süresi 420ms olarak gözlenmiştir.

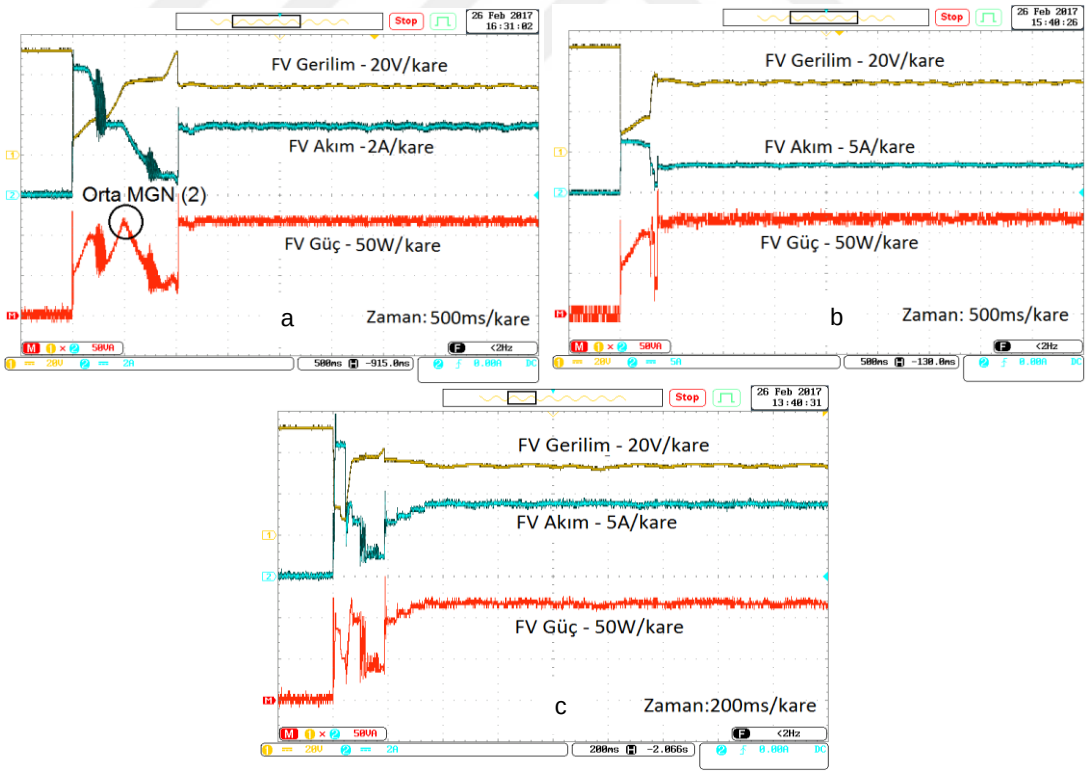
Şekil 6.8.c'de önerilen algoritmanın gölgelenme-3 ışınım değerleri için MGNİ sonucu verilmiştir. "1" nolu MGN bölgesinde FV panel gücü sabitleşmeye başlayınca, doluluk oranı %5 arttırılarak "1" nolu MGN bölgesi için ilave güç taraması yapılmıştır. FV panel güç değeri negatif değiştiği için bu aşama sonlandırılarak, "2" nolu MGN bölgesi için güç-gerilim karakteristiğine dayalı olarak hesaplanmış ortalama doluluk oranı değeri uygulanarak güç taraması gerçekleştirilmiştir. $P_1>P_2$ olduğu için "3" nolu MGN bölgesine bakılmaksızın [14], doluluk oranının ilk değeri belirlenerek, değiştir gözle algoritması ile MGNİ kararlı halde çalışmaya devam etmiştir. MGNİ verimi FV simulatör arayüz programından %94,87 olarak okunmuştur. MGNİ süresi 240ms'dir.

6.3.4. Gölgelenme-4: 0,1-0,5-1kW/m^2

Gölgelenme ışınım değerleri 0,1kW/m^2, 0,5kW/m^2 ve 1kW/m^2 olacak şekilde ayarlanarak, FV panelin üç farklı ışınıma maruz kalması sağlanmıştır. Koutroulis ve Blaabjerg'in önermiş olduğu yönteme göre, FV panel gerilimi 0V'dan yaklaşık açık devre gerilimine kadar taranır, güç değerleri ve güce karşılık gelen doluluk oranı değerleri kaydedilir. Şekil 6.9'da verilen güç değişimine göre, Orta MGN ("2"), FV panelden en büyük gücün çekildiği MGN bölgesidir. Diğer uygulamalarda olduğu üzere, tarama sonunda doluluk oranı değeri FV panelin "2" nolu MGN bölgesinde çalışmasını sağlayacak şekilde ayarlanır. Daha sonra değiştir gözle algoritması %1'lik adım büyüklüğü ile MGNİ işlemini devam ettirir. Bu uygulama sonucunda FV simulatör arayüz yazılımı ekranından okunan MGNİ verimi %90,44 olup, MGN'ye ulaşma süresi yaklaşık 1020ms'dir.

[15]'deki algoritma kullanılarak yapılan uygulamanın sonucu Şekil 6.9.b'de verilmiştir. Akım değişiminden anlaşılacağı üzere, FV panel akımı yaklaşık kısa devre akımı değerinden başlayarak %1'lik adımlarla sabit akım bölgesini geçerek ilk MGN'ye ulaşmıştır. Daha sonra, Orta MGN ve Sağ MGN bölgeleri $0,8V_{AD}$'lik adım büyüklüğü ile taranarak en büyük güç noktası belirlenir. Beş saniyelik periyot sonunda FV simulatörün hesapladığı MGNİ verimi %94,70'dir. Bu verim değerini doğrulamak için osiloskop ekranındaki dalga şekilleri xls formatında kaydedilmiş ve elde edilen verilerin beş saniyelik kısmı kullanılarak toplam enerji miktarı hesaplanmıştır. Algoritmanın sağladığı enerjinin, maksimum enerji miktarına oranlanmasıyla %94,85'lik bir MGNİ verimi elde edilmiştir. FV simulatörün MGNİ test butonunun el ile kontrol edilmesinden dolayı verim farkı ortaya çıkmıştır. Özetle, MGNİ devreye girme anı ile verim testini başlatma işlemi arasındaki küçük bir zaman farkı, %0,15'lik bir fark oluşmasına neden olmuştur.

Önerilen algoritma temel olarak üç aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada, FV panel yaklaşık kısa devre akımında (sabit akım bölgesinde) veya gerilimin yaklaşık 0V olduğu koşulda çalıştırılarak panel yapısında bulunan modüllere ters paralel bağlı diyot gerilimlerinin pozitif veya negatif olup olmadığı kontrol edilir. Bu sayede FV panel yüzeyine gelen ışınım formunun tipi (düzenli veya parçalı gölgelenme) anlaşılır. Şekil 6.9.c'de görüleceği üzere, MGNİ başladığı zaman FV panel akımı yaklaşık kısa devre akımı seviyesindedir. Parçalı gölgelenme, paralel bağlı diyot gerilim değerleri kontrol edilerek anlaşılır ve ilk MGN bölgesi için akıllı tarama işlemine geçilir. Tüm MGN bölgeleri için hesaplanan doluluk oranı değerleri uygulanır ve daha sonra akıllı güç taraması yapılarak, MGN bölgelerinin maksimum güç değerleri belirlenir. "1", "2" ve "3" bölgeleri için sırasıyla 78W, 117W ve 45W değerlerinde güç elde edilir. Tüm bölgelerin MGN taraması yapıldıktan sonra "2" nolu MGN bölgesinde uygulanan doluluk oranı değeri referans alınarak değiştir gözle algoritması ile MGNİ tamamlanır. Önerilen algoritmanın MGNİ başarımı, %96,41'lik MGNİ verimi ve 320ms'lik MGNİ süresi olarak açıklanabilir. Tüm gölgelenme senaryoları için Tablo 6.3'de uygulama sonuçları listelenmiştir.



Şekil 6.9. Gölgelenme-4 için FV panelin akım, gerilim ve güç değişimi a) [20]'de önerilen algoritma b) [15]'de önerilen algoritma c) Önerilen algoritma

6.3.5. Gölgelenme-5: 0,3-0,4-0,4kW/m^2

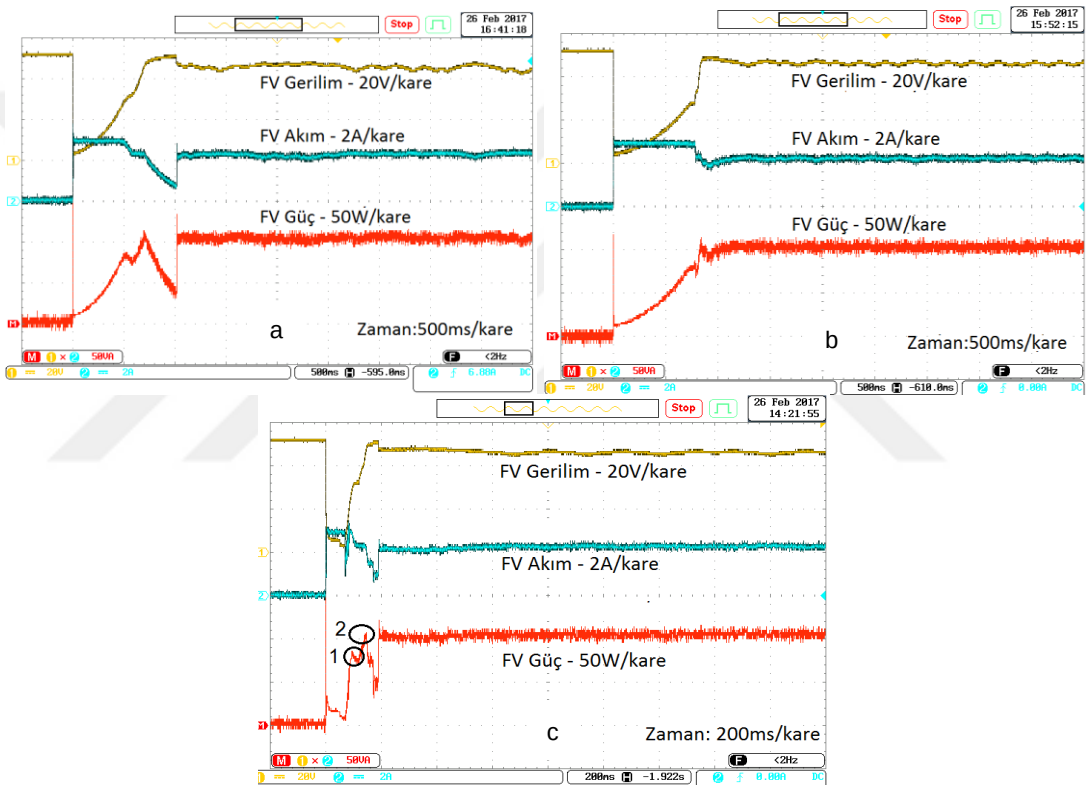
Bu uygulama çalışmasında, gölgelenme ışınım değerleri 0,3kW/m^2, 0,4kW/m^2 ve 0,4kW/m^2'dir. Bu durumda, güç-gerilim eğrisi üzerinde iki adet MGN oluşur. FV panel gerilimi 0V'dan yaklaşık açık devre gerilimine kadar değiştirilir, FV panel güç değeri ve güce karşılık gelen doluluk oranı değerleri kaydedilir. Tarama işlemi sona erdikten sonra MGN belirlenir ve kararlı halde değiştir gözle algoritması ile MGNİ işlemi tamamlanır. Uygulama sonucunda MGNİ verimi %88,93 olup, MGN'ye yakınsama süresi 1020ms'dir. Şekil 6.10.a'da FV gerilim, akım ve güç değişimleri görülmektedir.

Tablo 6.3. Önerilen MGNİ algoritmasının, [15]'de ve [20]'de önerilen algoritmalarının deneysel sonuçları

Gölgelenme Işınım Değerleri	MGNİ Yöntemi	Deney Sonuçları	
		η_{tr} (%) - 5s.	Zaman (ms)
Gölgelenme-1 0,3-0,3-0,8 kW/m^2	[20]	89,87	1020
	[15]	94,02	500
	Önerilen	97,39	230
Gölgelenme-2 0,2-0,4-0,6 kW/m^2	[20]	90,61	1020
	[15]	93,92	540
	Önerilen	97,78	300
Gölgelenme-3 0,2-0,3-1 kW/m^2	[20]	88,97	1020
	[15]	91,92	420
	Önerilen	94,87	240
Gölgelenme-4 0,1-0,5-1 kW/m^2	[20]	90,44	1020
	[15]	94,70	500
	Önerilen	96,41	320
Gölgelenme-5 0,3-0,4-0,4 kW/m^2	[20]	88,93	1020
	[15]	89,54	1000
	Önerilen	96,51	195

Gölgelenme-5 profili güç-gerilim eğrisinde "1" nolu MGN bölgesi oluşmadığı için [15]'de önerilen algoritmanın MGNİ başarımı diğer gölgelenme senaryolarına göre daha düşüktür. Bunun sebebi, ilk MGN'ye ("2") ulaşıncaya kadar geçen sürenin diğer uygulamalara göre daha fazla olmasıdır. Örneğin; gölgelenme-4 için bu süre 300ms iken, gölgelenme-5 durumunda yaklaşık 750ms'dir. İlk MGN'ye erişildikten sonra FV panel gerilimini 0,8V_{AD} kadar arttıracak doluluk oranı değeri hesaplanır ve SEPIC dönüştürücü güç anahtarına uygulanır. Elde edilen güç değeri "3" nolu MGN bölgesi için en yüksek güç değeri olup, güç değerleri karşılaştırılarak doluluk oranı değeri belirlenir. Beş saniyelik periyot sonunda MGNİ verimi %89,54 olarak okunmuştur. MGN'ye ulaşma süresi 1000ms'dir. Şekil 6.10.b'de FV panel güç, gerilim ve akım değişimleri verilmiştir.

Geliştirilen MGNİ algoritmasının gölgelenme-5 durumu için MGNİ başarımına ait FV panel akım, gerilim ve güç değişimleri Şekil 6.10.c'de verilmiştir. Diğer uygulamalarda olduğu gibi üç MGN bölgesi için yük direnci değerine bağlı olarak hesaplanan doluluk oranları SEPIC güç anahtarına uygulanmıştır. MGNİ başarımını arttırmak için akıllı tarama güç tarması her MGN bölgesi için gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.10.c'de daire içine alınan kısımlar incelendiğinde akıllı tarama sayesinde ilgili MGN bölgesinde daha büyük güç elde edilmiş ve doluluk oranı değeri daha doğru belirlenmiştir. Gölgelenme-5 durumu için yapılan deneysel çalışma sonucunda, MGNİ verimi %96,51 olup, MGNİ süresi 195ms'dir.

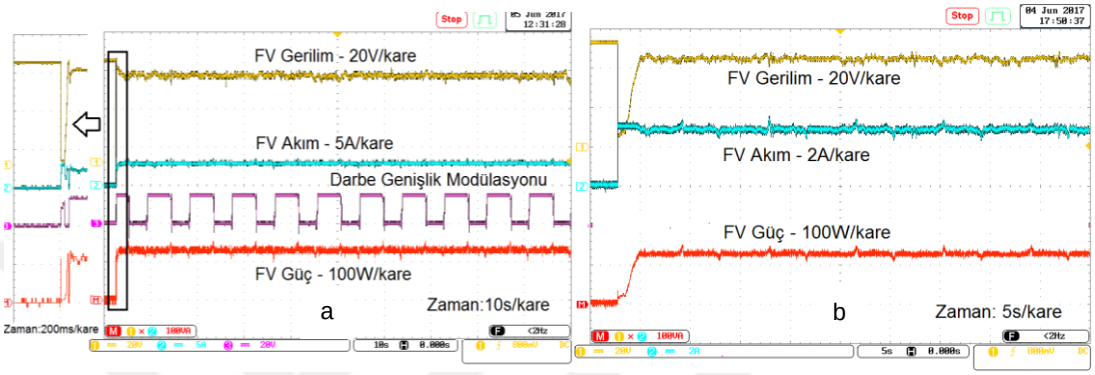


Şekil 6.10. Gölgelenme-5 için FV panelin akım, gerilim ve güç değişimi a) [20]'de önerilen algoritma b) [15]'de önerilen algoritma c) Önerilen algoritma

6.3.6. Düzenli ışınım uygulaması: 420W/m^2

Önerilen düzenli ışınım algoritması, kısa devre akımının ölçülmesine dayalı, MGNİ süresinin azalmasını sağlayan bir iyileştirmenin gerçekleştirildiği değiştir gözle algoritmasıdır. FV panel parametrelerine ve 420W/m^2 ışınım değerine göre makimum güç değeri 130W'dır. Şekil 6.11.a'da Q_{FV}=420W/m^2 için uygulama sonuçları detaylı ve büyük bir zaman aralığı için verilmiştir. Şekil 6.11.a'nın sol tarafında dikdörtgen içine alınan kısım detaylı olarak görülmektedir. Bu kısımda V_{FV} yaklaşık olarak 0V olup, akımın değeri ise yaklaşık olarak kısa devre akımına eşittir. Kısa devre akımı

ölçüldükten sonra sabit akım yöntemine göre doluluk oranının başlangıç değeri belirlenmiş ve değiştir gözle algoritması devreye girmiştir. Doluluk oranı adım büyüklüğü %0,5'dir. MGN'ye erişildikten sonra doluluk oranı değerinin sabit kaldığı Şekil 6.11.a'de görülmektedir. MGNİ başladıktan beş saniye sonra verim %97,89 iken, iki dakikalık test sonunda, MGNİ verimi %99,2 olarak okunmuştur. MGN'ye ulaşma süresi yaklaşık 100ms olarak osiloskop ekranından belirlenmiştir.



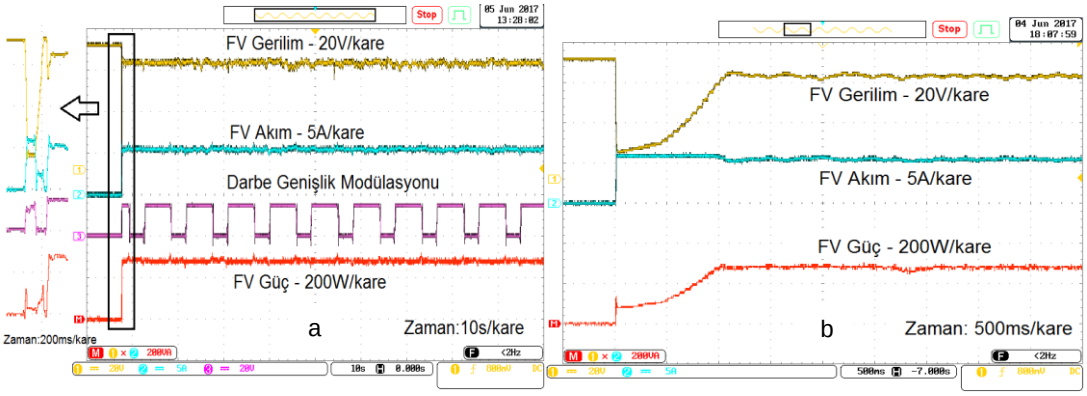
Şekil 6.11. Q_{FV}=420W/m^2 düzenli ışınım durumu için uygulama sonuçları a) Önerilen Algoritma b) Değiştir & Gözle Algoritması

Düzenli ışınım algoritmasının başarımı değiştir gözle algoritması ile karşılaştırılarak, önerilen algoritmanın üstünlüğü doğrulanmıştır. Aynı ışınım şartında ve doluluk oranı adım büyüklüğü %0,5 olmak üzere, değiştir gözle algoritmasının MGNİ başarımına dair uygulama sonuçları Şekil 6.11.b'de görülmektedir. İki dakikalık test sonunda MGNİ verimi, önerilen algoritmadan %1 küçük olup, %98,2'dir.

6.3.7. Düzenli ışınım uygulaması: 920W/m^2

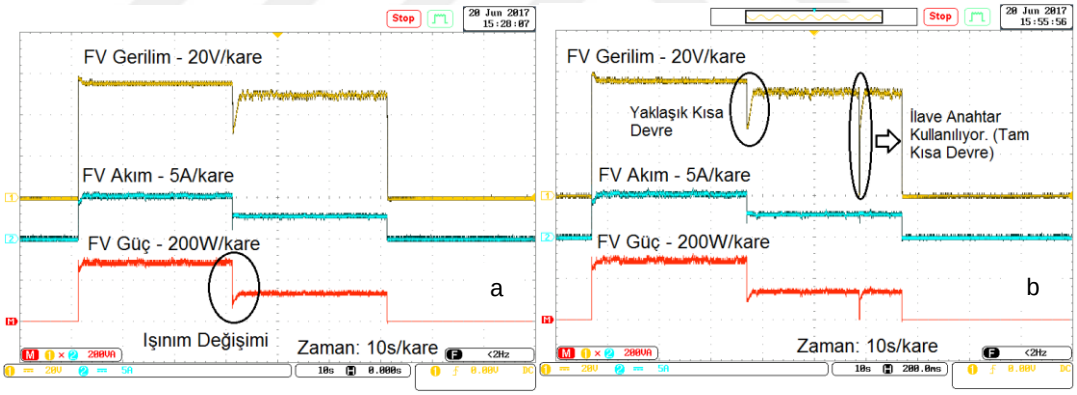
Güneş ışınımı değerinin 920W/m^2 olması durumunda, FV simulatörden elde edilecek güç miktarı en çok 285W olmaktadır. Şekil 6,12.a'da Q_{FV}=920W/m^2 ışınım değerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmaya ait FV panel gerilim, akım ve güç ve darbe genişlik modülasyonu değişimleri verilmiştir. MGNİ başladıktan beş saniye sonraki verim %98,25 iken, ikinci dakika sonunda verim %99,40'a ulaşmıştır. MGN'ye ulaşma süresi yaklaşık olarak 120ms'dir.

Değiştir gözle algoritmasının Q_{FV}=920W/m^2 ışınım durumundaki MGNİ başarımı Şekil 6.12.b'de verilmiştir. Şekil 6.12.b'ye göre MGN'ye ulaşma süresi yaklaşık 1000ms'dir. İki dakikalık test sonucunda %98,7'lik bir MGNİ verimi elde edilmiştir.



Şekil 6.12. Q_{FV}=920W/m^2 düzenli ışınım durumu için uygulama sonuçları a) Önerilen Algoritma b) Değiştir & Gözle Algoritması

Önerilen düzenli ışınım algoritmasında, yaklaşık kısa devre akımı ilave bir güç anahtarına gerek olmadan ölçülür. Şekil 6.13.a'dan ve Şekil 6.13.b'den anlaşılacağı üzere, ışınım değişimi meydana geldiğinde, algoritma değişimi belirleyip yaklaşık kısa devre akımının ölçülmesini sağlamıştır. Bu durumda FV panel gerilimin 0V olmadığı ve güç aktarımının sağlanmıştır. Tam kısa devre durumunda ise gerilim 0V olduğu için kısa bir süre güç aktarımı sağlanamamaktadır.



Şekil 6.13. Q_{FV}=920W/m^2 düzenli ışınım durumu uygulama a) Önerilen algoritma b) Klasik kısa devre akımı algoritmasının

6.4. Önerilen Algoritmanın Gerçek FV Sistemdeki Başarımı

Önerilen MGNİ algoritmasının başarımını gerçek bir FV sistemde değerlendirmek ve diğer iki algoritmadan [15,20] üstünlüğünü göstermek amacıyla Tablo 6.1'de özellikleri verilen FV panelden üç adet kullanarak standart test koşullarında 300W güç üreten bir FV sistem oluşturulmuştur. Bu sistemde her bir panel modül olarak kabul edilmiş ve üç adet seri bağlı modül 300W'lık bir FV paneli oluşturmuş şeklinde bir varsayım yapılmıştır. Bu sistemde her bir modülde birer tane olmak üzere toplam üç tane paralel diyot vardır. Şekil 6.14'de algoritma başarımlarını kıyaslamak için kullanılan FV

sistemin resmi verilmiştir. Bu şekilden anlaşılacağı üzere, üç modül farklı kalınlıklardaki naylonlar ile yapay bir şekilde kapatılarak, parçalı gölgelenme sağlanmıştır.



Şekil 6.14. Gerçek FV sistemin resmi

Uygulama 28.02.2017 tarihinde 14:04:47'de gerçekleştirilmiş olup, Şekil 6.15.a'daki güç değişiminden anlaşılacağı üzere üç adet MGN bölgesi oluşmuştur. Koutroulis ve Blaabjerg'in önerdikleri yöntemde [20], FV panel güç-gerilim eğrisinin yaklaşık olarak tamamı taranmıştır. Şekil 6.15.a'da verilen FV güç değişiminden görüleceği üzere "2" nolu MGN bölgesinde FV panelden maksimum güç çekilir. Tarama işlemi sonunda doluluk oranı değeri %59 olarak belirlenmiş ve kararlı halde değiştir gözle algoritması ile MGNİ devam etmiştir. MGN'ye erişim süresi yaklaşık 1000ms'dir.

Şekil 6.15.b'de Tey ve Mekhilef'in önermiş oldukları MGNİ algoritmasının başarımına dair uygulama sonuçları gerilim, akım ve güç değişimi şeklinde verilmiştir. İlk MGN'ye artan iletkenlik algoritması ile ulaşılmış olup daha sonra FV panel gerilimi $0,8V_{AD}$ kadar artırılarak tüm MGN bölgelerinde FV panelden çekilen güçler kaydedilmiştir. Güç değerleri karşılaştırılarak, en yüksek gücü FV panelden elde edecek şekilde doluluk oranı değeri ayarlanmıştır. Algoritma daha sonra artan iletkenlik algoritması ile MGNİ işlemini tamamlamıştır. Bu uygulamada MGN'ye ulaşma süresi yaklaşık 480ms olarak gözlenmiştir.

Önerilen MGNİ algoritması, diğer iki algoritma ile aynı gölgelenme şartlarında test edilmiş ve FV panel gerilim, akım ve güç değişimleri Şekil 6.15.c'de verilmiştir. Dördüncü kısımda detaylı bir şekilde anlatıldığı üzere, yük direnci değerine bağlı olarak hesaplanmış doluluk oranı değerleri kullanılarak tüm MGN bölgeleri için güç taraması yapılmıştır. Tarama sonucunda "2" nolu MGN bölgesinde FV panelden çekilen gücün değeri en büyüktür. FV panel güç değişiminin işaretine bağlı olarak

yapılan tarama işlemi sayesinde MGN'ye diğer iki algoritmaya kıyasla daha hızlı ulaşılmıştır. MGN'ye ulaşma süresi bu uygulama için yaklaşık 360ms'dir.



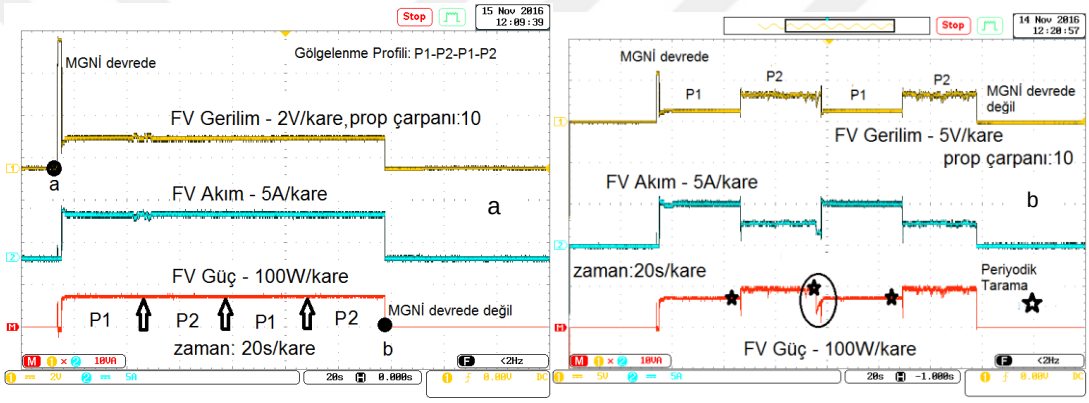
Şekil 6.15. Önerilen algoritmanın gerçek FV sistemde kullanılması durumunda akım, gerilim ve güç değişimi a) [20]'de önerilen algoritma b) [15]'de önerilen algoritma c) Önerilen algoritma

6.5. Önerilen Gölgelenme Tespiti Yaklaşımının Değerlendirilmesi

FV panel akım, gerilim ve/veya güç değişimlerinin bir veya birkaçının izlenerek, parçalı gölgelenme oluşup oluşmadığının tespit edilebileceği [28]'de önerilen yaklaşımla ileri sürülmüştür. Bu yaklaşımla bazı kısmi gölgelenme koşullarında MGNİ başarımı yeterli düzeyde elde edilse de bazı gölgelenme profili değişimlerinde global MGN doğru belirlenemeyebilir. Şekil 3.5'te akım, gerilim ve/veya güç değişimi izlenerek gölgelenme profili değişiminin yanlış belirlendiği bir örnek [28]'de sunulan yaklaşım doğrultusunda açıklanmıştı. Aynı güneş ışınım değerleri baz alınarak, FV simulatör ara yüz programı aracılığıyla Şekil 3.5'deki güç-gerilim karakteristik eğrileri elde edilmiştir. FV simulatör, parçalı gölgelenme test modunda çalıştırılarak, [28]'de öne sürülen yaklaşım ile tez çalışmasında önerilen parçalı gölgelenme oluşup oluşmadığına dair tespit deneysel olarak karşılaştırılmıştır.

Gerçekleştirilen uygulamalarda, güneş ışınımları 0,1kW/m^2, 0,5kW/m^2 ve 1kW/m^2'den (P2) 0,2kW/m^2, 0,3kW/m^2 ve 1kW/m^2 (P1) olacak şekilde iki kez otuz saniyelik

periyotlarda değiştirilmiş olup, yük direncinin değeri 24Ω'dur. Şekil 6.16.a'da FV panel akım, gerilim ve güç değişimleri verilmiştir. Şekil 6.16.a'da gösterilen a noktasında MGNİ devreye girmiştir. Gölgelenme ışınımları sırasıyla P1, P2, P1 ve P2 olacak şekilde FV simulatör ara yüz programı aracılığıyla programlanmış ve güç-gerilim karakteristik eğrileri değiştirilmiştir. [28]'de önerilen akım, gerilim ve güç değişimlerine göre gölgelenme değişimi belirlenmeye çalışılsa da güç değişiminden anlaşılacağı üzere algoritma değişimi ayırt edememiştir. [28]'de önerilen yaklaşım doğrultusunda FV panel yanlızca P1 gölgelenme durumu oluşmuşcasına çalışmıştır. Bu nedenle MGNİ verimi iki dakikalık MGNİ sonunda %86,35 olarak simulatör ara yüz programı üzerinden okunmuştur. FV simülatör ekran görüntüleri dikkate alınan iki gölgelenme durumu için Şekil 6.17'de ve Şekil 6.18'de verimiştir.



Şekil 6.16. FV panel yüzeyine gelen güneş ışınım değerleri 0,2kW/m^2, 0,3kW/m^2 ve 1kW/m^2'den (P1) 0,1kW/m^2, 0,5kW/m^2 ve 1kW/m^2 (P2) gölgelenme koşuluna değişmesi durumunda yapılan uygulamanın deneysel sonuçları a) [28]'deki parçalı gölgelenme tespiti metodu b) Önerilen parçalı gölgelenme tespiti yaklaşımı

Önerilen MGNİ algoritmasında, modüllere paralel bağlı diyotlar üzerindeki gerilim değerleri periyodik olarak ölçülmektedir. Bu sayede hem parçalı gölgelenme olup olmadığı hem de gölgelenme ışınım değerlerinin değişip değişmediği anlaşılmaktadır. Şekil 6.16.b'de FV panel yüzeyine düşen güneş ışınımlarının 0,2kW/m^2, 0,3kW/m^2 ve 1kW/m^2'den 0,1kW/m^2, 0,5kW/m^2 ve 1kW/m^2 şeklinde değişmesi durumuna dair önerilen yöntemin deneysel sonuçları görülmektedir. Belirtilen gölgelenme ışınım değişimi iki kez tekrarlanmıştır. Şekil 6.16.b'de verilen FV panel güç değişiminde yuvarlak içine alınan kısım incelendiğinde, MGNİ algoritması gölgelenme değişimini ilk durumda tespit edememiştir. Periyodik tarama gerçekleşip, tüm MGN bölgeleri tarandığında ise global MGN'nin 0,1kW/m^2, 0,5kW/m^2 ve 1kW/m^2 gölgelenme durumunda Şekil 6.17'deki güç-gerilim eğrisinden anlaşılacağı üzere "2" (Orta MGN) numaralı MGN bölgesinde bulunduğu belirlenmiştir. Parçalı gölgelenme değişimi [28]'de önerilen yaklaşıma göre daha hızlı tespit edilmiş ve bunun sonucunda

%97,64'lük bir MGNİ verimi elde edilmiştir. Şekil 6.18'de 0,2kW/m^2, 0,3kW/m^2 ve 1kW/m^2 gölgelenme durumu için güç-gerilim ve akım-gerilim eğrileri verilmiştir.



Şekil 6.17. 0,1kW/m^2, 0,5kW/m^2 ve 1kW/m^2 için güç-gerilim ve akım-gerilim eğrileri ve FV simülatör ekran görüntüsü



Şekil 6.18. 0,2kW/m^2, 0,3kW/m^2 ve 1kW/m^2 için güç-gerilim ve akım-gerilim eğrileri ve FV simülatör ekran görüntüsü

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Güneş enerjisinden elektrik üretimi, fotovoltaik etki çalışma prensibine sahip FV paneller tarafından gerçekleştirilir. FV paneller düşük verimli ve doğrusal olmayan DA enerji kaynakları olmaları sebebiyle, MGNİ özelliğine sahip bir güç dönüştürücüsü aracılığıyla yüke bağlanmalıdır. MGNİ işlemi bir algoritma tarafından dönüştürücüye uygulanarak FV panelden en yüksek fayda/güç elde edilir.

Bu çalışmada, FV panel parametrelerine en düşük seviyede bağımlı, güç-gerilim eğrisinin tamamına yakınının geliştirilen akıllı güç tarama yaklaşımı ile taranarak, parçalı gölgelenme ve düzenli güneş ışınımı koşullarında uygulanmak üzere yüksek hızlı ve yüksek verimli bir MGNİ algoritması önerilmiştir. Geliştirilen algoritma mevcut haliyle, özellikle, düşük güçlü, şebekeden bağımsız ve tek bir FV panel içeren (akıllı modül), güç optimizeri (power optimizer) gibi uygulamalar veya her bir FV panel için bağımsız MGNİ yapan yüksek güçlü modül bazlı dönüştürücü içeren uygulamalarda kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Bu ve benzeri uygulamalarda yüksek MGNİ başarımı beklenmektedir. Önerilen MGNİ algoritması küçük bazı iyileştirmeler ile yüksek güçlü geniş ölçekli uygulamalarda da kullanılabilir.

Çalışmanın bir diğer öne çıkan özelliği DA-DA dönüştürücü MGNİ başarımlarının, dönüştürücülerin sürekli akım modunda gerilim dönüştürme denklemlerini ve bu denklemler aracılığıyla oluşturulan grafiklerin incelenerek tespit edilmesidir. Gerçekleştirilen analizler sonucunda; düşürücü ve yükseltici dönüştürücüler genel olarak güneş ışınımı ve dönüştürücü çıkışına bağlanan yük değerine bağlı olarak değişken ve güvenilir olmayan MGNİ başarımına sahip iken, düşürücü-yükseltici dönüştürücü topolojisi ise yük direnci ve güneş ışınım değerine bağlı olmaksızın teorik olarak tam MGNİ kabiliyetine haizdir. FV panel akımının sürekli olması, evirmeyen çıkışa sahip olması ve yükseltici dönüştürücüde olduğu gibi yalıtım gerektirmeyen kapı sürme denetimine sahip olması gibi gerekçelerden ötürü SEPIC dönüştürücü seçilmiş ve önerilen MGNİ algoritması bu dönüştürücü üzerinde test edilmiştir.

Önerilen MGNİ algoritması, Tey ve Mekhilef'in önerdiği $0{,}8V_{AD}$ modeline dayalı geliştirilmiş artan iletken algoritması [15] ve Koutroulis ve Blaabjerg'in önerdiği geniş aralıkta güç-gerilim eğrisinin taranmasına dayalı bir MGNİ algoritması [20] ile MATLAB/Simulink'de beş farklı gölgelenme ışınım profili ve iki farklı düzenli ışınım

durumları için karşılaştırılmıştır. Benzetim sonuçlarına göre önerilen algoritma, MGNİ başladıktan sonra beş saniye içinde ortalama %98,48'lik bir statik takip verimine ulaşmıştır. [15]'de ve [20]'de önerilen algoritmalar ise sırasıyla %94,06 ve %91,22'lik MGNİ verimine sahiptir. Düzenli ışınım algoritması 420W/m^2 ve 920W/m^2 ışınım değerleri için test edilmiş ve %99'un üstünde MGNİ verimi elde edilerek, klasik değiştir gözle algoritmasına kıyasla üstün bir başarım göstermiştir.

Tasarlanan ve gerçeleştirilen SEPIC dönüştürücü ile önerilen parçalı gölgelenme algoritması deneysel olarak doğrulanmış ve [15]'de ve [20]'de önerilen algoritmalar ile karşılaştırılmıştır. Benzetimi yapılan beş gölgelenme senaryosu FV simülatör aracılığıyla gerçekleştirilmiş ve önerilen algoritma ortalama %96,33 değerinde MGNİ verimliliğine ulaşmış, diğer iki algoritmaya göre %3,5 ve %7,28 daha fazla MGNİ başarımı elde etmiştir. [15]'de ve [20]'de önerilen yöntemler kullanılarak sırasıyla ortalama %92,83 ve %89,05 değerlerinde MGNİ verimi elde edilmiştir. Ayrıca parçalı gölgelenme tespiti ve gölgelenme değişimi tespiti önerilen basit yaklaşımla iyileştirilmiş ve [28]'deki yönteme göre üstünlüğü doğrulanmıştır. Düzenli ışınım algoritmasının üstünlüğünü göstermek amacıyla klasik değiştir gözle algoritması ile karşılaştırma yapılmıştır. Önerilen algoritmanın MGNİ verimi %99,4 iken, değiştir gözle algoritmasının verimi %98,52 olarak elde edilmiştir.

Özetle, doktora tezi çalışması kapsamında, MGNİ başarım analizleri sonucu karar verilen SEPIC dönüştürücü tasarımı ve gerçeklemesi yapılarak, önerilen MGNİ algoritması birçok farklı senaryoda test edilmiş ve önerilen algoritmanın üstün başarım gösterdiği benzetim ve deneysel çalışmalar sonucunda ispatlanmıştır. İleriki çalışmalarda, önerilen algoritmanın mikro inverter uygulamalarında kullanılabilirliği araştırılacak olup, kararlı hal salınımını azaltacak, uyum sağlayabilen adım genişliği belirleme mekanizması geliştirilerek, algoritma iyileştirilmesi hedeflenmektedir.

KAYNAKLAR

[1] British Petroleum, *Statistical Review of World Energy 2016 – data workbook*, British Petroleum, Londra, 2016.

[2] Jäger-Waldau A., Snapshots of Photovoltaics - March 2017, *Sustainability*, 2017, **9**, 1-9.

[3] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, *2010-2014 Stratejik Planı*, T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Ankara, 2010.

[4] T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu, Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretimine İlişkin Yönetmelik, T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu*, Resmi Gazete Sayı: 28783*, 2013.

[5] https://teias.gov.tr/sites/default/files/2017-07/kuruluguc.xls (Ziyaret Tarihi: 11 Ağustos 2017).

[6] http://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Gunes (Ziyaret Tarihi: 21 Mayıs 2017).

[7] Fernia N., Petrone G., Spagnuolo G., Vitelli M., Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2005, **20**(4), 963-973.

[8] Safari A., Mekhilef S., Simulation and hardware implementation of incremental conductance MPPT with direct control method using cúk converter, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, **58**(4), 1154-1161.

[9] Esram T., Chapman P. L., Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2007, **22**(2), 439-449.

[10] Liu F., Duan S., Liu F., Liu B., Kang Y., A variable step size INC MPPT method for PV systems, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, **55**(7), 772-778.

[11] Mei Q., Shan M., Liu L., Guerrero M., A novel improved variable step size incremental resistance MPPT method for PV systems, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, **58**(6), 2427-2434.

[12] Başoğlu M. E., Çakır B., A novel voltage-current characteristic based global maximum power point tracking algorithm in photovoltaic systems, *Energy*, 2016, **112**, 153-163.

[13] Kobayashi K., Takano I., Sawada Y., A study of a two stage maximum power point tracking control of a photovoltaic system under partially shaded insolation conditions, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2006, **90**, 2975-2988.

[14] Patel H., 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.

[15] Tey K. S., Mekhilef S., Modified incremental conductance algorithm for photovoltaic system under partial shading conditions and load variation, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, **61**(10), 5384-5391.

[16] Chen K., Tian S., Cheng Y., Bai L., An improved MPPT controller for photovoltaic system under partial shading condition, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2014, **5**(3), 978-985.

[17] Liu Y., Chen J., Huang J., Global maximum power point tracking algorithm for PV systems operating under partially shaded conditions using the segmentation search method, *Solar Energy*, 2014, **103**, 350-363.

[18] Ahmed J., Salam Z., An improved method to predict the position of maximum power point during partial shading for PV arrays, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, **11**(6), 1378-1387.

[19] Jiang L. L., Nayanasiri D. R., Maskell D. L., Vilathgamuwa D. M., A hybrid maximum power point tracking for partially shaded photovoltaic systems in the tropics, *Renewable Energy*, 2015, **76**, 53-65.

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

[21] Ji Y., Jung D., Kim J., Kim J. H., Lee T., Won C., A real maximum power point tracking method for mismatching compensation in PV array under partially shaded conditions, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2011, **26**(1), 1001-1009.

[22] Kotti R. Shireen W., Efficient MPPT control for PV systems adaptive to fast changing irradition and partial shading conditions, *Solar Energy*, 2015, **114**, 397-407.

[23] Ghasemi M. A., Forushani H. M., Parniani M., Partial shading detection and smooth maximum power point tracking of PV arrays under PSC, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, **31**(9), 6281-6292.

[24] Wang Y., Li Y., Ruan X., High accuracy and fast speed MPPT methods for PV string under partially shaded conditions, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, **63**(1), 235-245.

[25] Boztepe M., Guinjoan G., Velasco-Quesada G., Silvestre S., Chouder A., Karatepe E., Global MPPT scheme for photovoltaic string inverters based on restricted voltage window search algorithm, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, **61**(7), 3302-3312.

[26] Nguyen T. L. Low K., A global maximum power point tracking scheme employing direct search algorithm for photovoltaic systems, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, **57**(10), 3456-3467.

[27] Renaudineau H., Donatantoni F., Fontchastagner J., Petrone G., Spagnuolo G., Martin J. P. Pierfederici S., A PSO based global MPPT technique for distributed PV power generation, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, **62**(2), 1047-1058.

[28] Manickam C., Raman G. R., Raman G. P., Ganesan S. I., Nagamani C., A hybrid algorithm for tracking of GMPP based on P&O and PSO with reduced power oscilllation in string inverters, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, **63**(10), 6097-6106.

[29] Villalva M. G. Gazoli J. R., Filho E. R., Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2009, **24**(5), 1198-1208.

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

[31] Başoğlu M. E., Çakır B., Comparisons of MPPT performances of isolated and non-isolated DC-DC converters by using a new approach, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, **60**, 1100-1113.

[32] Başoğlu M. E., Çakır B., A high speed global maximum power point tracking algorithm for PV systems, *32nd European PV Solar Energy Conference and Exhibition*, Münih, Almanya, 20-24 Haziran 2016.

[33] Noguchi T., Togashi S., Nakamoto R., Short-current pulse-based maximum-power-point tracking method for multiple photovoltaic and converter module system., *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2002, **49**(1), 217-223.

[34] Başoğlu M. E., Çakır B., An improved incremental conductance based MPPT approach for PV modules, *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 2015, **23**, 1687-1697.

[35] Falin J., Designing DC/DC converters based on SEPIC topology, *Texas Instruments*, 2009.

[36] http://www.solbian.eu/en/5-sp-series (Ziyaret Tarihi: 28 Mayıs 2017).

[37] Fagnani A., Using the TPS55340 as a SEPIC converter, *Texas Instruments Incorporated*, 4Q 2008, 18-23, 2012.

[38] Betten J., Benefits of a coupled-inductor SEPIC converter, *Texas Instruments Incorporated*, 2Q 2011,14-17, 2011.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

[1] **Başoğlu M. E**., Çakır B., A novel voltage-current characteristic based global maximum power point tracking algorithm in photovoltaic systems, *Energy*, 2016, **112**, 153-163.

[2] **Başoğlu M. E**., Çakır B., Comparisons of MPPT performances of isolated and non-isolated DC-DC converters by using a new approach, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, **60**, 1100-1113.

[3] **Başoğlu M. E**., Çakır B., An improved incremental conductance based MPPT approach for PV modules, *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 2015, **23**, 1687-1697.

[4] **Başoğlu M. E**., Kazdaloğlu A., Erfidan T., Bilgin M. Z., Çakır B., Performance analyzes of different photovoltaic module technologies under İzmit, Kocaeli climatic conditions, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, **50**, 357-365.

[5] **Başoğlu M. E**., Çakır B., Promising energy sources within the framework of 2023 energy targets in Turkey: Solar and Wind, *International Journal of Electronics and Electrical Engineering,* 2017, **5**(2), 153-158

[6] **Başoğlu M. E**., Çakır B., Wind energy status in Turkey, *International Journal of Environment, Ecological, Geological and Marine Engineering*, 2015, **9**(1), 19-24.

[7] **Başoğlu M. E**., Çakır B., Design and implementation of DC-DC converter with Inc-Cond algorithm, *International Journal of Electrical, Computer, Electronics and Communication Engineering,* 2015, **9**(1)**,** 45-48.

[8] **Başoğlu M. E**., Çakır B., Maksimum güç noktası izleme sistemlerinde performans değerlendirme kıstasları, *3e Electrotech*, 2015, **250**, 128-134.

[10] Keskin Y. E., **Başoğlu M. E**., Çakır B., Gerilim çökmesi yaratan kısa devre yerlerinin mesafe rölesi ile bulunması, *3e Electrotech*, 2013, **227**, 153-163.

[11] **Başoğlu M. E**., Çakır B., Fotovoltaik Sistemlerde Maksimum Güç Noktası İzleyicili Yükseltici Dönüştürücü Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi, *3e Elecrotech*, 2013, **228**, 216-219.

[12] **Başoğlu M. E**., Çakır B., Experimental evaluations of global maximum power point tracking approaches in partial shading conditions, *IEEE 17th International Conference on Environment and Electrical Engineering*, Milano, İtalya, 6-9 Haziran 2017.

[13] **Başoğlu M. E.**, Çakır B., Promising energy sources within the framework of 2023 energy targets in Turkey: *Solar and Wind, ICEEE*, İstanbul, Türkiye, 11-12 Nisan 2016.

[14] **Başoğlu M. E**., Çakır B., A high speed global maximum power point tracking algorithm for PV systems, *32nd European PV Solar Energy Conference and Exhibition*, Münih, Almanya, 20-24 Haziran 2016.

[15] **Başoğlu M. E**., Çakır B., A new maximum power point tracking approach for decreasing convergence time, *IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering*, Roma, İtalya, 7-10 Haziran 2015.

[16] **Başoğlu M. E**., Çakır B., Seasonal based energy performance analyzes of Cd-Te and c-Si photovoltaic modules, *IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering*, Roma, İtalya, 7-10 Haziran 2015.

[17] **Başoğlu M. E.**, Çakır B., Design and Implementation of DC-DC Converter with Inc-Cond Algorithm, *ICNREE*, Zürih, İsviçre, 11-12 Ocak 2015.

[18] **Başoğlu M. E.**, Çakır B., Wind Energy Status in Turkey, *ICNREE*, Zürih, İsviçre, 11-12 Ocak 2015.

[19] **Başoğlu M. E**., Çakır B., Hardware based comparison of buck-boost converter topologies in MPPT systems, *IEEE ELECO*, Bursa, Türkiye, 26-28 Kasım 2015.

[20] **Başoğlu M. E.**, Çakır B., Investigation of solar panel characteristics and MPPT performance under partial shading, *IEEE ELECO*, Bursa, Türkiye, 26-28 Kasım 2015.

[21] **Başoğlu M. E.**, Çakır B., DA-DA Dönüştürücülerin Maksimum Güç Noktası İzleme Sistemlerinde, *IEEE ELECO*, Bursa, Türkiye, 27-29 Kasım 2014.

[22] **Başoğlu M. E.**, Kazdaloğlu A., Bilgin Z., Erfidan T., Çakır B., Farklı Güneş Paneli Teknolojilerinin Kocaeli ili için Performans Değerlendirmesi, *IEEE ELECO*, Bursa, Türkiye, 27-29 Kasım 2014.

ÖZGEÇMİŞ

1988 yılında Trabzon'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Trabzon'da tamamladı. 2006 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'nden 2010 yılında mezun oldu. Aynı yıl Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Yüksek Lisans Programına başladı ve bu programı 2013 yılında "Güneş Enerjisi Sistemlerinde Kullanılan Maksimum Güç Noktası İzleyicili Yükseltici DA-DA Dönüştürücü Analizi ve Gerçekleştirilmesi" isimli tezi ile başarıyla tamamladı. 2012 yılından bu yana Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.