KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FOTOVOLTAİK SİSTEMLERDE DÜŞÜRÜCÜ TİP DA-DA DÖNÜŞTÜRÜCÜLÜ MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI İZLEYİCİSİNİN ANALİZİ, TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

MOHAMED ABOUBACAR YASKO

KOCAELİ 2018

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FOTOVOLTAİK SİSTEMLERDE DÜŞÜRÜCÜ TİP DA-DA DÖNÜŞTÜRÜCÜLÜ MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI İZLEYİCİSİNİN ANALİZİ, TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

MOHAMED ABOUBACAR YASKO

Prof. Dr. Bekir ÇAKIR
Danışman, Kocaeli Üniversitesi .....

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Zeki BİLGİN
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi .....

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Engin BAŞOĞLU
Jüri Üyesi, Gümüşhane Üniversitesi .....

Tezin Savunulduğu Tarih: 11.07.2018

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Dünya çapında yenilenebir enerji alanında bilimsel araştırmalar gün geçtikçe artmaktadır. Türkiye'nin kamu kuruluşlarında, üniversitelerinde ve ar-ge firmalarında güneş enerjisinden elektrik üretimi konusunda ciddi çalışmalar yapılmaktadır.

Güneş enerjisinden elektrik üretimi için kullanılan fotovoltaik modüllerin veriminin düşük ve atmosferik koşullara bağlı olduğu için maksimum güç noktası izleyicisinin kullanılması söz konusu olacaktır.

Bu tez çalışmasında, fotovoltaik sistemde kullanılan maksimum güç noktası izleyicisi tasarlanmış ve bir uygulama devresi gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada desteğini esirgemeden çalışmalarıma yön veren, danışman hocam Prof. Dr. Bekir ÇAKIR'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Yüksek lisans öğrenimim boyunca fikirleri ile çalışmalarıma katkıda bulunan hocalarım Dr. Öğr. Üyesi Tarık ERFİDAN'a, Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Zeki BİLGİN'e ve Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Engin BAŞOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım. Akademik çalışmalarım sırasında, birçok aşamada bana yardımcı olan Ögr. Gör. Abdulvehhap KAZDALOĞLU'na teşekkürü borç bilirim.

Hayatım boyunca sıkıntılarımı ve mutluluklarımı paylaşan annem Kouboura'ya ve kardeşlerim Halima'ya, Saleh'e, Zahra'ya, Ali'ye ve Fatime'ye teşekkür ederim.

Haziran - 2018 Mohamed Aboubacar YASKO

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
TABLOLAR DİZİNİ vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ vii
ÖZET x
ABSTRACT xi
GİRİŞ 1
1. FOTOVOLTAİK SİSTEMLER 5
1.1. Fotovoltaik Sistemin Kısa Tarihçesi 5
1.2. Fotovoltaik Enerjinin Dünyadaki Durumu 5
1.3. Türkiye'deki Fotovoltaik Durumu 7
1.4. Fotovoltaik Hücreler 8
1.4.1. Fotovoltaik hücrenin çalışma prensibi 8
1.4.2. Fotovoltaik hücrenin elektriksel eşdeğer devresi 9
1.4.3. Fotovoltaik hücrenin elektriksel parametreler 10
1.4.4. Çevresel değişimin fotovoltaik hücre üzerine etkisi 11
1.4.5. Fotovoltaik hücre çeşitleri 11
1.5. Fotovoltaik Modüller ve Diziler 14
1.6. Fotovoltaik Sistem Tipleri 15
1.6.1. Bağımsız FV sistemler 15
1.6.2. Şebekeye bağlı FV sistemler 15
1.6.3. Hibrit FV sistemler 16
1.7. Fotovoltaik Sistemlerin Avantajları ve Dezavantajları 17
2. MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI İZLEME ALGORİTMALARI 18
2.1. Sabit Gerilim Algoritması 18
2.2. Kısa Devre Akım Algoritması 19
2.3. Açık Devre Gerilimi Algoritması 20
2.4. Değiştir Gözle Algoritması 21
2.5. Tepe Tırmanma Algoritması 22
2.6. Artan İletkenlik Algoritması 22
2.7. Bulanık Mantık Algoritması 23
2.8. Yapay Sinir Ağı Algoritması 24
2.9. Genetik Algoritması 25
2.10. Parçacık Sürüsü Optimizasyon Algoritması 26
3. DA-DA DÖNÜŞTÜRÜCÜLER 27
3.1. Darbe Genişlik Modülasyonu Kontrolü 27
3.2. DA-DA Dönüştürcülerin Gereği 29
3.3. DA-DA Dönüştürcülerin Tipleri 29
3.4. Düşürücü Dönüştürücü 29
4. MGN İZLEYİCİSİNİN TASARIMI, MODELLENMESİ VE BENZETİMİ 33
4.1. FV Modülün Modellenmesi 33

4.1.1. FV modülün elektriksel ve matematiksel modeli 33
4.1.2. Seri ve şönt dirençlerin belirlenmesi 35
4.1.3. FV modülün simülasyon sonuçları 36
4.2. Düşürücü Dönüştürücünün Tasarımı, Modellenmesi ve Simülasyonu 40
4.2.1. Düşürücü dönüştürücünün tasarımı 40
4.2.2. Düşürücü dönüştürücünün modellenmesi 41
4.2.3. Simülasyon sonuçları 41
4.3. MGN İzleme Algoritmasının Modellenmesi 42
4.4. FV Sistemin Simülasyon Sonuçları 43
5. MGN İZLEYİCİSİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ 47
5.1. MGN İzleyicisi 47
5.1.1. Düşürücü dönüştürücü devresi 48
5.1.2. MOSFET sürücü devresi 48
5.1.3. Arduino UNO 48
5.1.4. ACS712 akım algılayıcısı 49
5.2. Güneş Dizi Simülatörü 49
5.3. FV Sistemin Deney Sonuçları 50
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 54
KAYNAKLAR 55
EKLER 59
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER 63
ÖZGEÇMİŞ 64

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Doğrudan normal güneş ışınım haritası 6
Şekil 1.2. Dünya FV hücresi/modül üretimi 6
Şekil 1.3. Yıllık FV sistemin kurulumları 6
Şekil 1.4. Şebekeye bağlı FV sistemler 7
Şekil 1.5. Türkiye'nin doğrudan normal güneş ışınım haritası 8
Şekil 1.6. P-N bağlantısı 9
Şekil 1.7. FV hücrenin elektriksel eşdeğer devresi 9
Şekil 1.8. FV hücre verimliliğinin zaman çizelgesi 14
Şekil 1.9. FV hücre-modül-dizi sistemi 14
Şekil 1.10. Bypass ve blokaj diyotlarının gösterimi 15
Şekil 1.11. Bağımsız FV sistem 16
Şekil 1.12. Şebekeye bağlı FV sistem 16
Şekil 1.13. Hybrit FV sistem 17
Şekil 2.1. Sabit gerilim algoritması akış diyagramı 18
Şekil 2.2. Kısa devre akım algoritması 19
Şekil 2.3. Açık devre gerilimi algoritması 20
Şekil 2.4. Değiştir-gözle algoritması 21
Şekil 2.5. Tepe tırmanma algoritması akış diyagramı 22
Şekil 2.6. Artan iletkenlik algoritması akış diyagramı 23
Şekil 3.1. Darbe genişlik modülasyonu kontrolü 28
Şekil 3.2. Düşürücü dönüştürücü 30
Şekil 3.3. Düşürücü dönüştürücü çalışma modeli 30
Şekil 3.4. Bobin gerilimi ve akım dalga şekli 31
Şekil 3.5. Kondansatör akım dalga formu 32
Şekil 4.1. FV sistem 33
Şekil 4.2. FV hücrenin elektriksel eşdeğer devresi 34
Şekil 4.3. MATLAB'da kurulan FV modül modeli 35
Şekil 4.4. MATLAB'da kurulan FV modülün alt sistemi 35
Şekil 4.5. FV modülün I-V karakteristiği 37
Şekil 4.6. FV modülün P-V karakteristiği 38
Şekil 4.7. Farklı ışınım değerleri için I-V karakteristiği 38
Şekil 4.8. Farklı çalışma sıcaklıklarında I-V karakteristiği 39
Şekil 4.9. Farklı ışınım değerleri için P-V karakteristiği 39
Şekil 4.10. Farklı çalışma sıcaklıklarında P-V karakteristiği 39
Şekil 4.11. MATLAB'da kurulan düşürücü dönüştürücünün devresi 41
Şekil 4.12. $L = L_{min} = 20.6\ \mu H$ ile düşürücü dönüştürücü simülasyon sonuçları 42
Şekil 4.13. $L = 25\ \mu H > L_{min}$ ile düşürücü dönüştürücü simülasyon sonuçları 42
Şekil 4.14. Düşürücü dönüştürücünün çıkış gerilimi 42
Şekil 4.15. FV modülün çıkış gerilimi 42
Şekil 4.16. MATLAB'da kurulan değiştir-gözle algoritması 43
Şekil 4.17. MATLAB'da kurulan FV sistem 43

Şekil 4.18. 1000 W/m^2-25 °C için simülasyon sonuçları. 44
Şekil 4.19. 500 W/m^2-25 °C için simülasyon sonuçları. 44
Şekil 4.20. 250 W/m^2-25 °C için simülasyon sonuçları. 45
Şekil 4.21. 1000 W/m^2-50 °C için simülasyon sonuçları. 45
Şekil 4.22. 1000 W/m^2-0 °C için simülasyon sonuçları. 46
Şekil 5.1. MGN izleyicisinin şeması 47
Şekil 5.2. Düşürücü dönüştürücü devresi 48
Şekil 5.3. Güneş dizi simülatörü 49
Şekil 5.4. Güneş dizi simulatörün arayüzeyi 50
Şekil 5.5. Gerçekleştiren devrenin resmi 51
Şekil 5.6. 1000 W/m^2-25 °C için deneysel sonuçları 51
Şekil 5.7. 8000 W/m^2-25 °C için deneysel sonuçları 51
Şekil 5.8. 600 W/m^2-25 °C için deneysel sonuçları 52
Şekil 5.9. 1000 W/m^2-50 °C için deneysel sonuçları 52
Şekil 5.10. 1000 W/m^2-0 °C için deneysel sonuçları 53

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Fotovoltaik enerjinin önemli tarihleri ve olayları 5
Tablo 1.2. FV sistemlerin bazı avantajlarını ve dezavantajlarını 17
Tablo 4.1. Farklı R_S değerleri ile simülasyon sonuçlarını 37
Tablo 4.2. Farklı R_S ve R_{SH} değerleri ile simülasyon sonuçları 37
Tablo 4.3. FV modülün parametreleri 37
Tablo 4.4. Düşürücü dönüştürücünün parametreleri 40
Tablo 4.5. Farklı test koşulları için simülasyon sonuçları 44
Tablo 5.1. MGN izleyicisinin elektronik bileşenleri 47
Tablo 5.2. Arduino UNO'nın bazı özellikleri 49
Tablo 5.3. ACS712 algılayıcının bazı özellikleri 49
Tablo 5.4. MGN izleyicisinin deney sonuçları 50

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	:	Güneş ışınımının kapsadığı hücrenin yüzey alanı, (m^2)
C	:	Kondansatör, (μF)
C_g	:	Düşürücü dönüştürücünün giriş kondansatörü, (μF)
D	:	Doluluk oranı
ΔE	:	Bulanık mantık sistemde hata
ΔI	:	Anlık akımın değişmesi, (A)
ΔV	:	Anlık gerilimin değişmesi, (A)
ΔV_O	:	DA-DA Dönüştürücü çıkış dalgalanma gerilimi, (V)
ΔQ	:	Biriktirilmiş iki şarj miktarın farkı, (C)
Δ_T	:	FV Hücrenin çalışma sıcaklığı ile hücrenin nominal sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkı, (°C)
η	:	FV hücrenin verimliliği
E	:	Bulanık mantık sistemde hatanın değişmesi
f	:	Anahtarlama frekansı, (Hz)
FF	:	Dolgu faktörü
G	:	Güneş ışınımı, (W/m^2)
G_{STC}	:	Standart Test Koşullarındaki güneş ışınım, (W/m^2)
I	:	FV hücrenin çıkış akımı, (A)
I_{ort}	:	Düşürücü dönüştürücünün çıkış ortalama akımı, (A)
I_C	:	Kondansatör akımı, (A)
I_{Cpk}	:	Kondansatör tepe akımı, (A)
I_D	:	Diyot akımı, (A)
I_L	:	Bobin akımı, (A)
I_{Lmaks}	:	Bobin maksimum akımı, (A)
I_{Lmin}	:	Bobin minimum akımı, (A)
I_{Lavg}	:	Bobin ortalama akımı, (A)
I_{MP}	:	FV hücrenin maksimum akımı, (A)
I_O	:	DA-DA dönüştürücünün çıkış akımı, (A)
I_{PH}	:	Işınım akımı, (A)
$I_{PH,STC}$	:	Standart Test Koşullarındaki ışınım akımı, (A)
I_{REF}	:	Referans akımı, (A)
I_S	:	Doyma akımı, (A)
I_{SC}	:	Kısa devre akımı, (A)
$I_{SC,STC}$	:	Standart Test Koşullarındaki kısa devre akımı, (A)
I_{SH}	:	Şönt direnç akımı, (A)
$I_{MP,STC}$	:	Standart Test Koşullarındaki maksimum akımı, (A)
k	:	Boltzmann sabiti
K_I	:	Kısa devre akımın sıcaklık katsayısı, (mV/°C)
K_V	:	Açık devre geriliminin sıcaklık katsayısı, (mA/°C)
L	:	Endüktans, (μH)
L_1	:	Cuk dönüştürücünün giriş endüktansı, (μH)
L_2	:	Cuk dönüştürücünün çıkış endüktansı, (μH)
L_{min}	:	Endüktans minimum değeri, (μH)

n	:	Diyot kalite faktörü
N_1	:	Bobin sarım sayısı 1. hesap
N_2	:	Bobin sarım sayısı 2. hesap
P_{ort}	:	FV hücrenin ortalama gücü, (W)
$P_{MP,ort}$	:	FV hücrenin ortalama maksimum gücü, (W)
P_{MP}	:	FV hücrenin maksimum gücü, (W)
$P_{MP,STC}$	:	Standart Test Koşullarındaki FV hücrenin maksimum gücü, (W)
R_{CH}	:	FV hücrenin karakteristik direnci, (Ω)
R_S	:	FV hücrenin seri direnci, (Ω)
R_{SH}	:	FV hücrenin şönt direnci, (Ω)
$R_{S,maks}$	:	FV hücrenin maksimum seri direnci, (Ω)
$R_{SH,min}$	:	FV hücrenin minimum şönt direnci, (Ω)
q	:	Elektron yükü, (C)
t_{ON}	:	Yarı iletken yüklelme süresi, (ns)
t_{OFF}	:	Yarı iletken düşme süresi, (ns)
T	:	FV hücrenin çalışma sıcaklığı, (°C)
T_S	:	Yarıiletken nahtarma periyodu, (μs)
T_{STC}	:	Standart Test Koşullarındaki FV hücrenin sıcaklığı, (°C)
V	:	FV hücrenin çıkış gerilimi, (V)
V_{ort}	:	FV hücrenin ortalama çıkış gerilimi, (V)
V_C	:	Kondansatör gerilimi, (V)
V_{Cmaks}	:	Kondansatör maksimum gerilimi, (V)
V_{Cmin}	:	Kondansatör minimum gerilimi, (V)
V_D	:	Diyot gerilimi, (V)
V_L	:	Bobin gerilimi, (V)
V_{MP}	:	FV hücrenin maksimum gerilimi, (V)
$V_{MP,STC}$	:	Standart Test Koşullarındaki FV hücrenin maksimum gerilimi, (V)
V_O	:	DA-DA dönüştürücünün çıkış gerilimi, (V)
V_{OC}	:	FV hücrenin açık devre gerlimi, (V)
$V_{OC,STC}$	:	Standart Test Koşullarındaki FV hücrenin açık devre gerlimi, (V)
V_{REF}	:	Referans gerilim, (V)
V_S	:	DA-DA dönüştürücünün kaynak gerilimi, (V)
V_T	:	FV hücrenin sıcaklığı termal gerilimi, (V)

Kısaltmalar

a-Si	:	Amorf Silikon
ABD	:	Amerika Birleşik Devletleri
CAGR	:	Compound Annual Growth Rate (Yıllık Bileşik Büyüme Oranı)
CIS	:	Copper Indium Selenide (Bakır İndiyum Selenid)
CdTe	:	Cadmium Telluride (Kadmiyum Telurid)
DA	:	Doğru Akım
DSC	:	Dye Sensitized Cells (Boya Duyarlı Hücreler)
FV	:	Fotovoltaik
NREL	:	National Renewable Energy Laboratory (Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuarı)
MGNI	:	Maksimum Güç Noktası İzleme
PSC	:	Perovskit hücreleri
PWM	:	Pulse Width Modulation (Darbe Genişlik Modülasyonu)

STC	:	Standart Test Koşulları
YEGM	:	Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü

FOTOVOLTAİK SİSTEMLERDE DÜŞÜRÜCÜ TİP DA-DA DÖNÜŞTÜRÜCÜLÜ MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI İZLEYİCİSİNİN ANALİZİ, TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

ÖZET

Fotovoltaik (FV) sistem, doğrudan güneş ışınımını elektriğe dönüştürmek için FV hücrelerini kullanan yenilenebilir enerjilerden biridir. FV hücreleri düşük güç verimliliğine sahip olduğundan, mevcut maksimum gücü üretebilmek, FV dönüşüm sistemlerin en önemli konusudur. FV sisteminden maksimum güç elde etmek için, DA-DA (Doğru Akım) dönüştürücülü ve mikrodenetleyiciden oluşan bir elektronik devre olan maksimum güç noktası izleyicisi kullanılmalıdır. Bu tez çalışmasında değiştir-gözle algoritması ile kontrol edilen ve düşürücü dönüştürücü kullanan maksimum güç noktası (MGN) izleyicisi sunulmuştur. MGN izleyicisi MATLAB/Simulink'de geliştirilmiş ve bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştiren uygulama devresi, bir mikrodenetleyici (Arduino) ve 20 kHz'lık anahtarlama frekansında çalışan düşürücü dönüştürücüden oluşmuştur. 54W'lık dönüştürücü, FV modül çıkış gerilimini (17.4V), 12V'luk bir yük (çıkış) gerilimine düşürmüştür. Önerilen MGN izleyicisi, farklı ışınım seviyeleri ve sıcaklık değerleri için MATLAB/Simulink'de analiz edilmiş ve sonuçları elde edilen deneysel sonuçlar ile doğrulanmıştır. MGN izleyicisinin sadece sabit durum atmosfer koşullarında değil, aynı zamanda ışınım veya sıcaklık değişimleri varlığında da doğru tepki verdiği gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Değiştir-gözle algoritması, Düşürücü DA-DA dönüştürücü, Fotovoltaik sistem, MGN izleyicisi.

ANALYSIS, DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A MAXIMUM POWER POINT TRACKER USING DC-DC BUCK CONVERTER FOR PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

ABSTRACT

The Photovoltaic (PV) technology is one of the renewable energy which uses PV cells to convert directly sunlight into electricity. Because of the low power efficiency the PV cells, generating the maximum available power is the most crucial part of the PV conversion systems. In order to extract the maximum power from PV system, a maximum power tracker using DC-DC converter and microcontroller must be used. A maximum power point (MPP) tracker using DC-DC buck converter controlled by perturb-observe algorithm is presented in this thesis. The MPP tracker is developed in MATLAB/Simulink and its practical circuit is carried out. The practical circuit of MPP tracker consists of a microcontroller (Arduino) and a buck converter which operates at the switching frequency of 20kHz. The buck converter steps down the PV module output voltage (17.4V) of 54W to a load voltage of 12V. The proposed PV system is analyzed in MATLAB/Simulink and validated with an experimental work by using various solar irradiation levels and temperature values. A comparative study between the MATLAB simulation results and the experimental test results has been done. It was observed that the MPP tracker responds accurately not only in steady-state atmospheric conditions but also in presence of irradiation or temperature variations.

Keywords: Perturb-observe algorithm, DC-DC buck converter, Photovoltaic system, MPP tracker.

GİRİŞ

Enerji, bir toplumun insani gelişimi ve ekonomik büyümesi için temel bir unsurdur. Bu nedenle, şüphesiz dünyanın ana gündemidir. Geleneksel enerji üretimi faaliyetleri, iklim değişikliği ve hava kirliliği gibi bazı sorunlara yol açmaktadır. Geleneksel enerji üretiminin sorunlarıyla ve nüfus artışına bağlı olarak enerji tüketiminin katlanarak artmasıyla, çevre açısından güvenli enerji kaçınılmaz bir gereklilik haline gelmektedir.

Güvenli, özgür, yeşil ve doğal olarak bol olan yenilenebilir enerji, fosil yakıt kullanan enerji üretiminden kaynaklanan bazı küresel problemlerin bir çözümüdür. Biyokütle, hidroelektrik, jeotermal, rüzgar ve güneş olmak üzere yaygın olarak kullanılan beş yenilenebilir enerji kaynağıdır. Fotovoltaik (FV) enerji, tüm yenilenebilir teknolojileri arasında en bol olanıdır. FV sistemdeki enerji, güneş enerjisinin bolluğu nedeniyle temiz ve sürdürülebilirdir. Ancak, FV sistemin temel dezavantajları, kesintili olması ve düşük güç verimliliğidir. FV hücrelerin laboratuvar verimi, kristalli silikon için %25, ince film teknolojisi için %22 ve gelişmekte olan FV hücreler için %22'dir [1].

Dünyadaki fotovoltaik modül üretimi, önceki yıllara oranla yaklaşık %20 oranında artarak, 2016 yılında yaklaşık 60GW üretim kapasitesine ulaşmıştır. Son 15 yıldaki bileşik yıllık büyüme oranı (CAGR) %40'ın üzerindeydi ve bu da FV enerjiyi şu anda en hızlı büyüyen endüstrilerden biri yapmaktadır [2]. Güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesinde sağlanan iyileştirmeler ve maliyet düşürme, bu büyümenin olmasına yardımcı olmuştur.

Güneş enerjisini elektriğe dönüştürmek için FV hücreler kullanılmaktadır. FV hücrelerin enerji üretim kapasitesi atmosferik koşullarla bağlantılı olarak her an değişmektedir. Değişen koşullarda bile sürekli maksimum güç üretmek FV sistemlerde en önemli konulardan biridir.

Maksimum güç noktası (MGN) güneş ışınımı ve sıcaklığa bağlı olarak P-V eğrilerinde

benzersiz ve tek noktadır. Bu noktada FV sistemi maksimum çıkış gücünü üretir. Enerji dönüşüm verimliliğini etkileyen birçok faktör olsa da, maksimum güç noktası izleme (MGNİ), bir FV sistemde kontrol tasarımının en önemli unsurudur [3].

MGN izleyicisi, maksimum güç elde etmek için FV sistem gücünü yüke bağlamak için MGNİ algoritmalarını kullanan bir kontrol ünitesi ile bağlantılı bir DA-DA dönüştürücüsüdür. FV sistemde kullanılan DA-DA dönüştürücüler arasında, FV sistemin çıkış gerilimini düşürmek için düşürücü tip dönüştürücüler kullanılır.

Geçtiğimiz yıllarda, düşürücü dönüştürücü kullanan MGN izleyicisi ve farklı MGNİ metotları ile ilgili birçok bilimsel makale yayınlanmıştır.

E. Koutroulis., K. Kalaitzakis ve Nicholas C.V. 2001 yılında yaptıkları çalışmada mikrodenetleyici tabanlı bir FV MGNİ kontrol sistemi geliştirmişlerdir. Geliştirilen kontrol ünitesi, batarya şarj uygulamalarında kullanılabilen düşürücü tipi DA-DA dönüştürücü ve Intel 80C196KC mikrodenetleyiciden oluşmaktadır. Önerilen sistem aynı zamanda birden fazla yenilenebilir enerji kaynağının kontrolünü yapabilme özelliğine sahiptir [4].

Dylan D.C.L., R.H. Chuo., S. Sathiakumar ve V.G. Agelidis 2006 yılında yaptıkları çalışmada, öğrencilerin ders esnasında öğrenilmiş teorileri pratik uygulamalarına yardımcı olan bir öğrenme aracı önermişlerdir. Önerilen sistem, FV sistemde güç elektroniği eğitimi için basit MGNİ'ye sahip olan bir düşürücü dönüştürücüden oluşmaktadır [5].

D. Choudhary ve A. R. Saxena, 2014 yılında yapmış oldukları çalışmada, artan iletkenlik algoritması kullanarak bağımsız bir FV sisteme bağlanmış bir düşürücü dönüştürücü önermişlerdir. 20kW'lık FV modül ve 25kHz'de çalışan dönüştürücü MATLAB programında geliştirilmiş ve sonuçlar laboratuvar prototipi kullanılarak elde edilen deney sonuçları ile doğrulanmıştır [6].

A.M. Attalah., A.Y. Abdelaziz ve R.S. Jumah 2014 yılında yayınladıkları çalışmalarında değiştir-gözle algoritmalı MGN izleyicisini düşürücü ve düşürücü-yükseltici dönüştürücülerini kullanarak gerçekleştirmişlertir. Benzetim sonuçlarına

göre, değiştir-gözle algoritmasının kullanılmasından dolayı oluşan salınımların önlenmesinde düşürücü dönüştürücünün çok daha etkili olduğu gözlenmiştir.

P. Kofinas., A. I. Dounis., G. Papadakis ve M.N. Assimakopoulos 2015 yılında sunulan çalışmada, kısmen gölgeli sistem için doğrudan sinir ağı algoritmasına dayalı akıllı bir MGNİ sistemi geliştirmişler. Önerilen sistem, FV kaynağı ile paralel olarak bağlanmış bir düşürücü dönüştürücü ve bir yükten oluşmuştur. Önerilen algoritmanın performansının, geleneksel değiştir-gözle algoritmasından daha iyi olduğu gözlenmiştir [3].

Fathi A. O. A., 2015 yılında yapılan doktora çalışmasında, bir düşürücü dönüştürücü kullanarak FV su pompalama sistemi için MGN izleyicisi geliştirmiştir. Su pompasını besleyen 240W'lık FV sistem MATLAB/SIMULINK programında tasarlanmıştır. Önerilen MGNİ algoritmaları arasında karşılaştırma yapılmış olup, karşılaştırmanın sonuçlarına göre, geliştirilmiş değiştir-gözle algoritmasının bulanık mantık ve sinir ağı algoritmalarından daha verimli olduğunu gösterilmiştir [8].

Mihir Pathare, bir düşürücü dönüştürücü ve Arduino kullanarak güneş şarj kontrolörü tasarlamış ve uygulamıştır. 2017 yılında yayınlanan bildiriye göre, diğer DA-DA dönüştürücülerle kıyaslandığında, düşürücü dönüştürücünün daha avantajlı olduğu gösterilmiştir [9].

Jasim A. ve Y. Shepetov 2017 yılında yayınlanan makelede, uydu güneş enerjisi sistemi için geliştirilmiş tepe tırmanma algoritmasına dayalı bir MGNİ modeli önermişlerdir. Önerilen sistem, FV modülün farklı ışınım koşulları altında çalışan uydu güç sisteminin yük ile eşleşmesi sağlamıştır [10].

Bu tezin amacı, 54W'lık bir FV modül için tasarlanan bir MGN izleyicisinin analiz edilmesi ve uygulama devresi gerçekleştirilerek benzetim çalışmalarının doğrulanması şeklinde özetlenebilir. 20kHz'lık anahtarlama frekansında ve değiştir-gözle algoritması ile çalışan bir düşürücü dönüştürücü tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Önerilen FV sistem, MATLAB/SIMULINK'de modellenmiş ve farklı ışınım seviyeleri ve sıcaklık değerleri için analiz edilmiştir. Benzetim sonuçları, elde edilen deneysel çalışmanın sonuçları ile doğrulanmıştır.

Bu tez çalışması beş bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, dünya çapında ve Türkiye'de FV sistemin genel durumu, FV hücrenin çalışma prensibi, elektriksel eşdeğer devresi ve farklı teknolojiler hakkında bilgi verilmiştir.

İkinci bölümde, FV sistemin maksimum güç noktasında çalışmasının önemi belirtilerek, bu konuda kullanılan farklı konvansiyonel ve akıllı MGNİ algoritmalarının ayrıntılı bir literatürü özeti sunulmuştur.

Üçüncü bölümde, FV sistemde kullanılan DA-DA dönüştürücülerin matematiksel denklemleri ve devrelere ait temel dalga şekilleri verilmiştir. Düşürücü DA-DA dönüştürücünün analizi ve tasarım gereksinimleri ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Dördüncü bölümde, FV modülün, düşürücü dönüştürücünün ve değiştir-gözle algoritmasının MATLAB/SIMULINK modelleri sunulmuştur. Beş farklı ışınım ve sıcaklık değerleri için analiz edilmiş ve simülasyon sonuçları olarak beklenen maksimum güç, ortalama güç ve MGN izleyicisinin verimliliği tablo ve grafiklerle gösterilmiştir.

Beşinci ve son bölümde, önerilen MGN izleyicisinin uygulanması ve deneysel çalışmanın sonuçları verilmiştir. Bu uygulama devresi, düşürücü dönüştürücü, MOSFET sürücü ve kontrol devrelerinden oluşmuştur. Bu deneysel çalışmada, FV modülün yerine DA güç kaynağı olan programlanabilir güneş dizi simülatörü kullanılmıştır.

1. FOTOVOLTAİK SİSTEMLER

1.1. Fotovoltaik Sistemin Kısa Tarihçesi

“Fotovoltaik” terimi, İtalyan fizikçi Volta'nın isminden, elektrik anlamına gelen “voltaik” ve “ışık” anlamına gelen Yunan φώς (phos) kelimesinden gelir. Fotovoltaik, ışığın fotovoltaik etkisi ile yarı iletken malzemeler kullanılarak elektriğe dönüştürülmesidir.

1839'da Edmund Becquerel, ışığa maruz kaldığında elektrik iletkenliği artan bir solüsyon içine yerleştirilen iki metal elektrottan oluşan bir elektrolitik hücre ile deney yaparken fotovoltaik etkisini keşfetti. Katılaşmış selenyumdaki fotovoltaik etkisinin ilk çalışması ise, 1877'de Adams ve Day tarafından "selenyumda ışığın hareketi" başlıklı selenyum hücresindeki kâğıtlarında yapıldı ve yayınlandı. Bell laboratuarları tarafından, uzay aktiviteleri için ilk pratik FV hücreleri üretilmiştir.

Fotovoltaik enerji tarihçesi, keşif yıllarından günümüze kadar altı zaman dilimine bölünebilir. Tablo 1.1, fotovoltaik gelişimine ait en önemli olayları ve tarihlerini özetlemektedir [11].

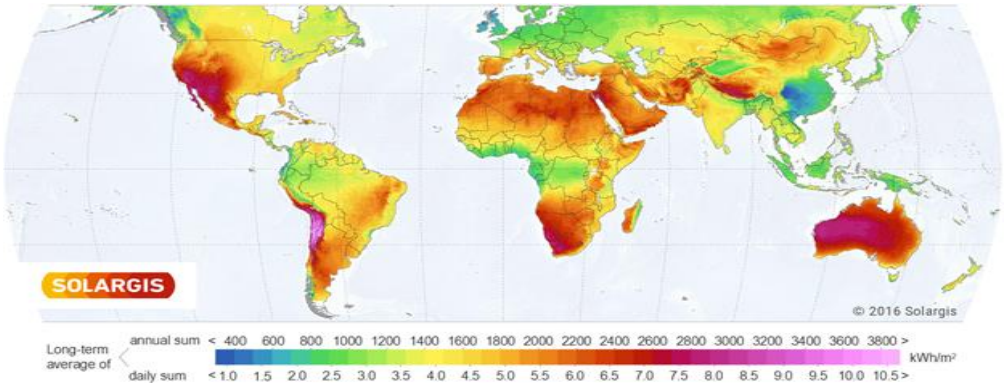
Tablo 1.1. Fotovoltaik enerjinin önemli tarihleri ve olayları

Tarihler	Olaylar
1800-1904	Keşif yıllar
1905-1950	Bilimsel temel
1950-1959	İlk pratik güneş pilleri
1960-1980	ABD'nin desteği ve yeni güneş pilleri
1980-2000	Yavaş geliştirme aşaması
2000-Bugün	Uluslararası destek ve yeni fırsatlar

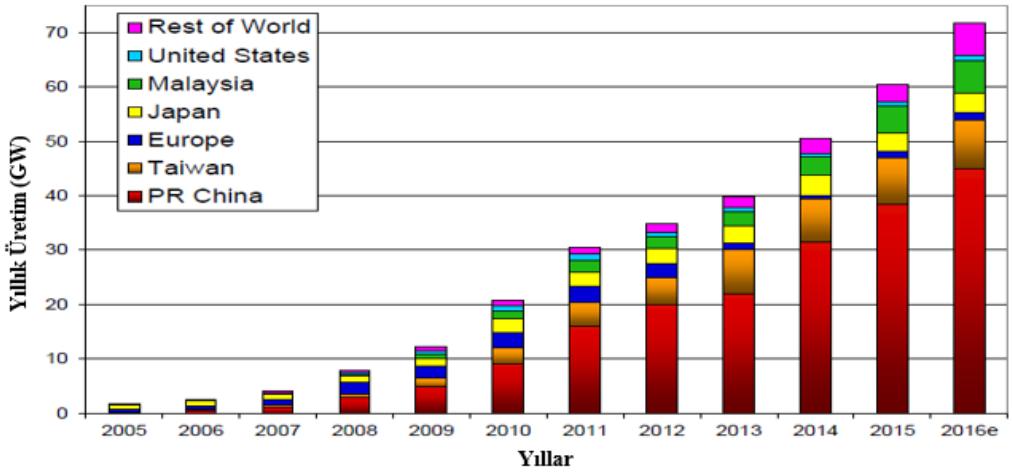
1.2. Fotovoltaik Enerjinin Dünyadaki Durumu

Güneş'in Dünya’ya sağladığı enerji miktarının yaklaşık 10^{17} W (10000 TW) olduğu tahmin edilmektedir. Bu tahmin, bir yıl boyunca tüm insan nüfusunun bir saatlik elektrik enerjisi ihtiyacına eşdeğerdir [12]. Şekil 1.1, doğrudan normal güneş ışınım

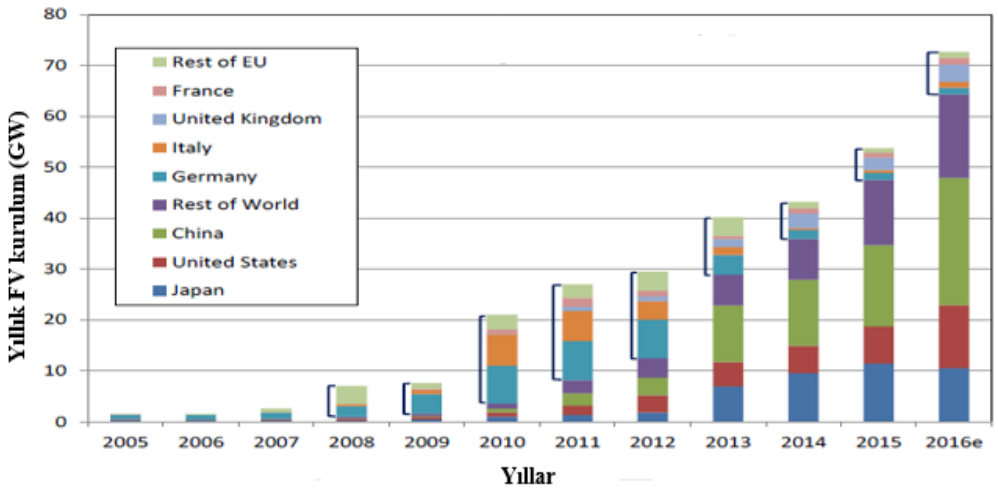
haritasını göstermektedir. Şekil 1.2 ve Şekil 1.3, 2005'ten 2016'ya kadar dünya FV hücre/modül üretimi ve yıllık FV sistemin kurulum miktarını göstermektedir.



Şekil 1.1. Doğrudan normal güneş ışınım haritası [2]

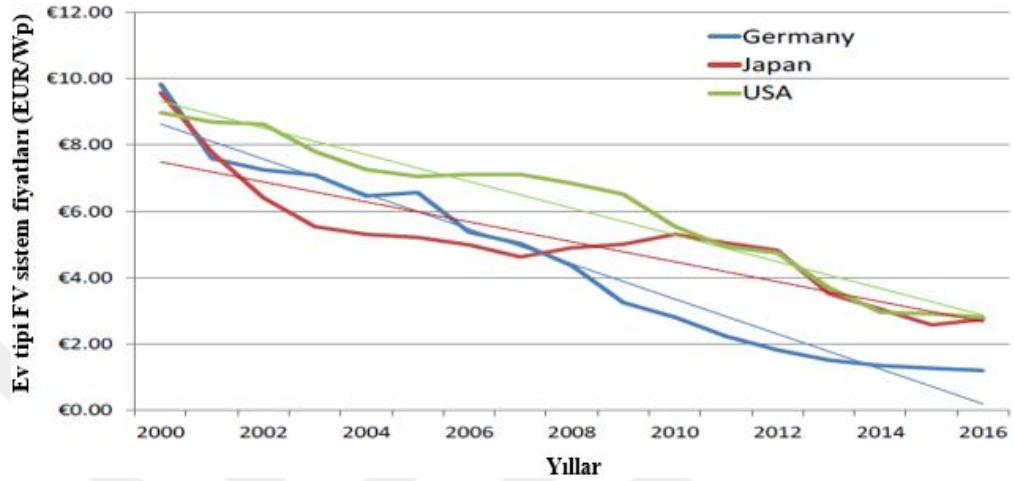


Şekil 1.2. Dünya FV hücresi/modül üretimi [2]



Şekil 1.3. Yıllık FV sistemin kurulum kapasitesi [2]

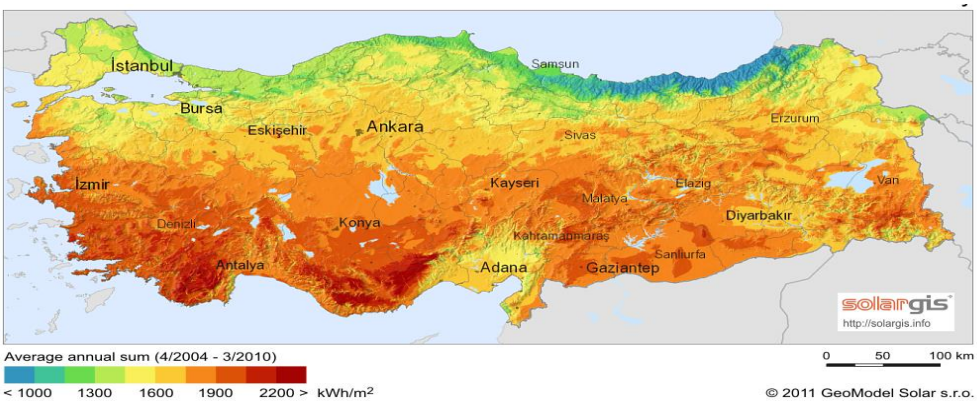
FV modüllerin maliyeti, devlet desteği ve diğer uluslararası finansal teşvikler sayesinde son on yıl içinde büyük bir düşüş yaşadı. Şebekeye bağlı FV sistemler için maliyetler; 2000 yılında neredeyse 10€/W iken 2016'da 1,5€ ile 3€/W'a kadar düşmüştür.



Şekil 1.4. Şebekeye bağlı FV sistemler [2]

1.3. Türkiye'deki Fotovoltaik Durumu

Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü (YEGM) tarafından hazırlanan Türkiye güneş enerjisi haritasına göre, yıllık toplam güneşlenme süresinin 2741 saat (günde toplam 7,5 saat) olduğu ve yılda üretilen toplam güneş enerjisinin 1527 kWh/m^2 (günde 4,2 kWh/m^2) olduğu görülmektedir. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından yayınlanan verilere göre, 2017 yılı sonu itibariyle işletmede bulunan 3,421 MW'lık kurulu güce sahip 3616 adet güneş enerji santrali Türkiye toplam kurulu gücün yaklaşık %4'üne karşılık gelmektedir [13]. Türkiye'nin doğrudan normal güneş ışınım haritası, Şekil 1.5'te gösterilmektedir.



Şekil 1.5. Türkiye'nin doğrudan normal güneş ışınım haritası [14]

1.4. Fotovoltaik Hücreler

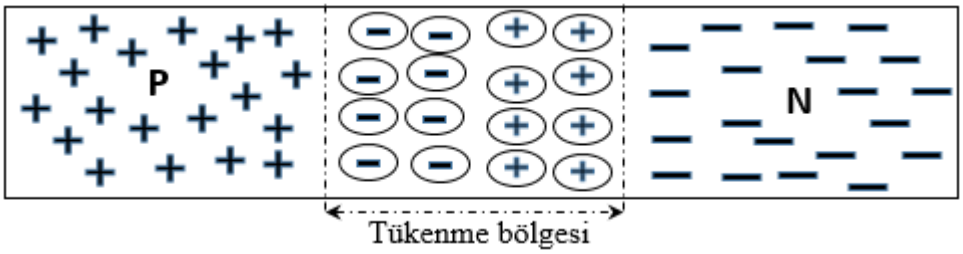
1.4.1. Fotovoltaik hücrenin çalışma prensibi

FV sistem teknolojisi güneş ışığını elektriğe dönüştürmek için FV hücreleri veya güneş hücrelerini kullanır. Güneş ışığı, güneş hücresi üzerine geldiğinde, fotonlar yansıyabilir, emilebilir veya içinden geçebilir. Sadece emilen fotonlar elektrik üretimine katkıda bulunur. Bir fotonun absorbe edilmesi için, enerjisinin, güneş hücresinin bant boşluğundan daha büyük olması gerekir. Bu hücre içindeki valans bandının iletim bandı ile arasındaki enerji seviyelerinin farkıdır [15].

Hücre, iki farklı silikon katmanından (n-tabaka ve p-tabaka) oluşur. Bu tabakalar çok küçük miktarlarda atomları, çoğunlukla fosfor ve bor ile bir p-n bileşkesine katılmıştır. Bu tür katkı maddelerinin eklenmesi, hücrenin çalışması için çok önemlidir ve güneş ışığının oluşturduğu elektronları ve delikleri bir harici devrede yararlı işler yapmaya zorlayan mekanizmayı sağlar. n-tabakası, vericiler olarak bilinen bir tane daha valans elektronu bulunan atomlardan oluşur, ve p-tabakası, alıcılar olarak bilinen daha az valans olan atomlara sahiptir.

İki yarı iletkenin birleşme noktasında, n-tabakasının serbest elektronları, p-tarafına yayılmis olup, donörler tarafından pozitif olarak yüklenmiş bir alan bırakılır. Aynı şekilde, p-tabasındaki serbest delikler n-tarafına yayılmis olup alıcılar tarafından negatif olarak yüklenmiş bir bölgeyi geride bırakır.

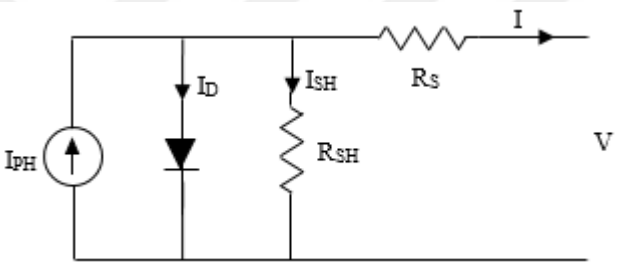
Bağlantı bölgesinde bulunan pozitif ve negatif yüklü iyonlar (katyon iyonları), daha fazla elektron akışı ve deliği kısıtlayan potansiyel bir bariyer ile sonuçlanır. Bu potansiyel bariyer, Şekil 1.6'da gösterildiği gibi tükenme bölgesi olarak bilinir [15].



Şekil 1.6. P-N bağlantısı

1.4.2. Fotovoltaik hücrenin elektriksel eşdeğer devresi

Literatürde bulunan FV hücre için tek-diyot elektrik eşdeğer devresi, Şekil 1.7'de verilmiştir. Elektrik eşdeğer devresi, bir ışınım akımı kaynağı, bir diyot, bir paralel direnç (kaçak akım modellenmesi için) ve iç direncin tanımı için seri dirençten oluşur.



Şekil 1.7. FV hücrenin elektriksel eşdeğer devresi

Kirchhoff'un akım yasasını ve gerilim yasasını eşdeğer devreye uygulayarak ve Shockley diyot denklemini kullanarak, bir FV hücre tarafından üretilen akımın matematiksel modeli, denklem (1.1) 'den (1.6)' ya kadar açıklandığı gibi elde edilebilir.

$$I_{PH}-I_D-(I-I_{SH})=0 \tag{1.1}$$

$$I_{SH}=\frac{V+R_SI}{R_{SH}} \tag{1.2}$$

$$I_D=I_S\left[e^{\frac{V_D}{nV_T}}-1\right] \tag{1.3}$$

$$V_T=\frac{kT}{q} \tag{1.4}$$

$$V_D=V+R_SI \tag{1.5}$$

$$I=I_{PH}-I_S\left[e^{\frac{q(V+R_SI)}{nkT}}-1\right]-\frac{V+R_SI}{R_{SH}} \tag{1.6}$$

I ve V, FV hücrenin çıkış akımı ve gerilimidir. I_{PH} foto akımdır. V_D, I_D ve I_S sırasıyla diyot gerilim, diyot akımı ve doyma akımıdır. T ve V_T, hücrenin sıcaklığı ve termal gerilimidir. k, q ve n, sırasıyla Boltzmann sabitini, elektron yükünü ve diyot kalite faktörünü temsil eder. R_S ve R_{SH}, seri ve paralel dirençleridir. I_{SH}, R_{SH}'den geçen akımdır.

1.4.3. Fotovoltaik hücrenin elektriksel parametreleri

FV hücrenin özelliklerini belirleyen parametreleri, kısa devre akımı, açık devre gerilimi, maksimum güç, dolgu faktörü ve verimliliktir.

Kısa devre akımı (I_{SC}): Gerilim sıfır olduğunda bir FV hücre üzerinden akan en büyük akımdır. İdeal olarak direnç kaybı yoksa, FV hücre akımı kısa devre akımına eşittir.

$$I_{SC}=I_{PH} \tag{1.7}$$

Açık devre gerilimi (V_{OC}): FV hücre tarafından üretilen maksimum gerilimdir ve net akım sıfır olduğu durumda FV çıkışından elde edilir. Denklem (1.8), ışınım akımının açık devre geriliminde logaritmik bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

$$V_{OC}=\frac{nkT}{q}\ln\left(\frac{I_{PH}}{I_S}+1\right) \tag{1.8}$$

Maksimum güç (P_{MP}): FV hücre tarafından sağlanan maksimum güçtür. Maksimum gücün akımı ve gerilimi, maksimum akım (I_{MP}) ve maksimum gerilim (V_{MP}) olarak bilinir.

$$P_{MP}=V_{MP}I_{MP} \tag{1.9}$$

Dolgu Faktörü (FF): FV hücre kalitesinin bir ölçüsüdür. FV hücreden alınan maksimum güçün açık devre gerilimi ve kısa devre akımı çarpımına oranı olarak tanımlanır.

$$FF=\frac{V_{MP}I_{MP}}{V_{OC}I_{SC}} \tag{1.10}$$

Verimlilik (η): Hücrenin çıkış enerjisinin güneşten gelen giriş enerjisine (P_g) oranı olarak tanımlanır. G ve A sırasıyla güneş ışınımı ve güneş ışığının kapsadığı hücrenin yüzey alanıdır. Verimlilik, standart test koşulları (1000 W/m^2, 25 °C, AM 1.5) altında ölçülür.

$$\eta = \frac{V_{OC} I_{SC} FF}{P_g} = \frac{P_{MP}}{GA} \quad (1.11)$$

FV hücrenin karakteristik direnci (R_{CH}), maksimum güce karşılık gelen hayali bir direnç olarak tanımlanır. Yükün direnci R_{CH}'ye eşit olduğunda, FV hücre maksimum güç noktasında çalışır ve yüke maksimum güç sağlar.

$$R_{CH} = \frac{V_{MP}}{I_{MP}} \quad (1.12)$$

1.4.4. Çevresel değişimin fotovoltaik hücre üzerine etkisi

FV hücrenin çıkış gücü, sıcaklık, ışınım ve gölgelenme yansıması gibi bazı çevresel değişikliklerden etkilenir. Sıcaklık artması ile hücre çıkış gerilimi azalırken akım bir miktar artar. Işınım akımı doğrudan ışınım ile orantılıdır. Bu nedenle, kısa devre akımı ışınım ile doğru orantılıdır. Gerilim değişimi logaritmik olarak ışınım ile bağlı olduğu için çok daha küçüktür ve genellikle pratik uygulamalarda ihmal edilir [15].

Gölgelenme etkisiyle FV hücrenin özellikleri değişir. Gölgelenme koşulu altında güç eğrilerinde birden çok maksimum güç noktası oluşur. Gölgelenme bulutlar, ağaçlar ve binalar gibi çevresel engeller, paralel sıralardaki paneller arasında kendiliğinden gölgelenme, kir ve toz, kuşların pislemesi vb. Nedenlerden dolayı oluşabilir. Bu gölgelenme etkileri gün içinde statik, güneş ışığı açısına bağlı olarak yavaş veya çok dinamik olabilir.

1.4.5. Fotovoltaik hücre çeşitleri

1.4.5.1. Kristal silikon hücreler

Kristalin silikon hücre teknolojisi için iki farklı hücre bulunmaktadır.

Monokristal silikon hücre: Monokristal silikon, çok ince bir dilimden veya saf erimiş silikondan elde edilen büyük tek bir kristal yapısından yapılan en verimli tiptir. Gerekli elektriksel özellikleri üretmek için dikkatli ve pahalı üretim ve katkılama işlemleri gerektirir. Hücre laboratuar verimliliği yaklaşık %25,3'tür [1].

Polikristal silikon hücre: Polikristal silikon da saf erimiş silikondan üretilir, ancak bir döküm işlemi kullanılır. Silikon soğudukça, rastgele boyutları, şekilleri ve oryantasyonu olan büyük düzensiz çok kristalli olarak ayarlanır. Rastgele olan kristal

yapı, monokristalden daha az idealdir ve dolayısıyla daha düşük hücre verimi verir. Ancak bu dezavantaj düşük üretim maliyetleri ile dengelenmiştir. Polikristal silikon laboratuar verimliliği yaklaşık %21,5'dir [1].

1.4.5.2. İnce film hücre teknolojisi

İnce film FV teknolojisi, bir veya daha fazla ince tabaka veya FV malzemenin ince filmini bir alt tabaka (cam, plastik veya metal) üzerine biriktirerek yapılan ikinci nesil FV hücre teknolojisidir. Amorf silikon (a-Si), bakır indiyum diseleneid (CIS) ve kadmiyum tellur (CdTe) üç temel ince film hücre teknolojileridir.

Amorf silikon hücre: FV sistemlerde özellikle saatler ve hesap makineleri gibi tüketici ürünlerinde kullanılan ilk ince film teknolojisidir. Üretim kolaylığı ve düşük maliyet, kristal silikonla karşılaştırıldığında amorf silikonun avantajlarıdır. Fakat, verimin %14 civarında olması amorf silikonun dezavantajlı yanıdır [1].

Bakır indiyum diseleneid hücre: Cam veya plastik üzerine ince bir bakır, indiyum, galyum ve selenit tabakası biriktirerek, akımları toplamak için ön ve arkadaki elektrotlarla birlikte üretilir. Yüksek emilim katsayısına sahiptir ve diğer yarı iletken malzemelere göre çok daha ince film gerektirir [17]. 1970'lerde, CIS'nin oldukça düşük bir bant boşluğunun, indiyum yerine bir miktar galyum kullanılarak arttırılabileceği keşfedilmiştir. Galyum içeriğini değiştirerek, FV hücreye ilişkin bir dizi bant, yaklaşık 1,1eV'den 1,7eV'ye kadar elde edilebilir. Ayrıca, CIS'in düşük açık devre gerilimi 0,5V'a yükseltilmiştir [12]. Hücrenin verimliliği %22,6 civarındadır.

Kadmiyum tellurid hücre: 1,45eV'lik doğrudan bant aralığı sahip olan ince film FV hücreler için önemli bir yarı iletken malzemedir. Bu bant aralığı, tek bir birleştirme cihazı kullanarak güneşin spektrumunu yakalamak için optimumdan yakındır. Basit üretim süreçleri olan CdTe modüllerinin piyasada, watt başına fiyat bakımından en ucuz panel teknolojisi olduğu bilinmektedir. Dönüşüm verimliliği % 22,1'dir [1]. İnce film ürünleri, hafif ve dağınık ışıkta kristal ürünlerden daha performanslıdır ve yüksek sıcaklıklardan daha az olumsuz etkilenir [12].

1.4.5.3. Gelişmekte olan fotovoltaik hücreler

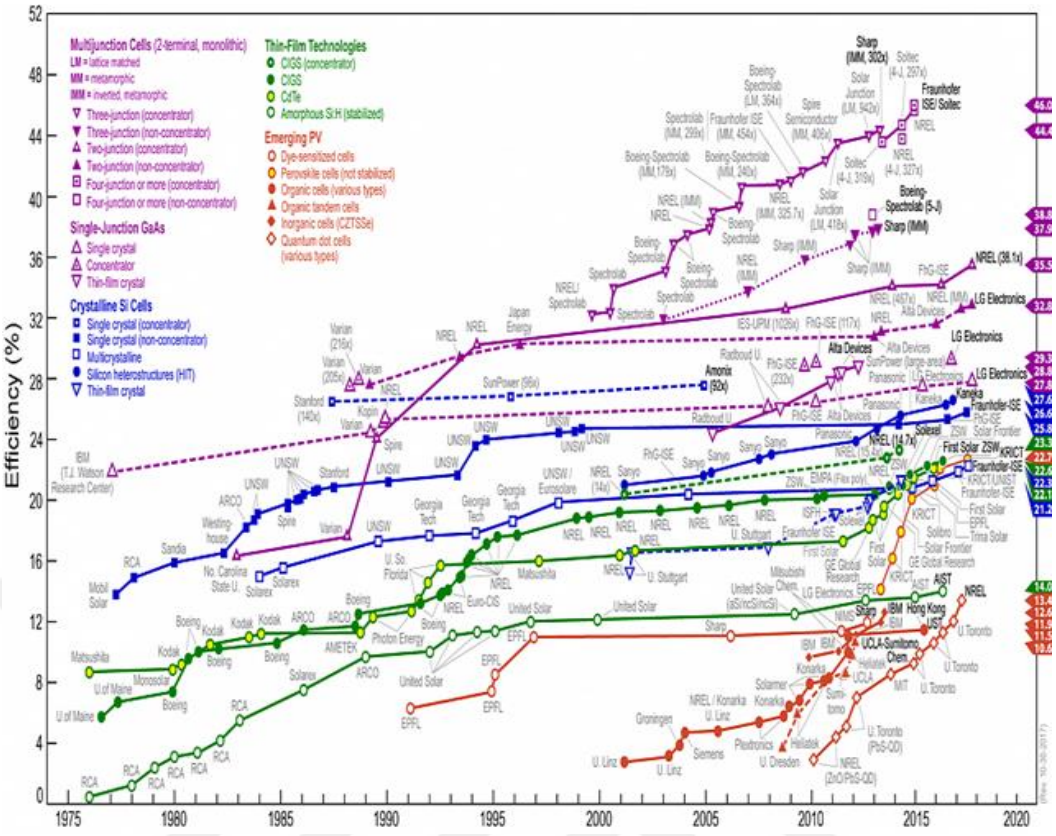
Gelişmekte olan FV teknolojiler, halen devam eden araştırmaların erken aşamasında ve ticari kullanılabilirlik açısından sınırlı olan üçüncü nesil FV hücrelerdir. Bu hücreler arasında, boya duyarlı hücreler (DSC) ve perovskit hücreleri (PSC) önemli bir yer almaktadır.

Boya duyarlı hücreler veya Gratzel hücresi: Işığa duyarlı anot ve elektrolit arasında oluşan bir yarı iletkene dayanan düşük maliyetli bir FV hücredir [18]. 1991 yılında Gratzel'in ekibi, yarı iletken titanyum dioksitin (TiO2) 10 mikro ince filminin, bir organik boya ile kaplanmış, bir elektrolit içine daldırılmış ve elektrik kontakları ile donatılmış bir FV hücre olarak çalışabileceğini bildirmiştir. Standart dikdörtgenlere sınırlamak yerine, DSC belirli boyutlara, şekillere ve estetik tasarım kriterlerine göre üretebilir. DSC'nin verimliliği yaklaşık %11,9'dur.

Perovskit hücreleri: Bir perovskit yapılı bileşik, en yaygın olarak bir hibrit organik inorganik kurşun veya kalay halit bazlı bir materyal içeren bir FV hücre türüdür. PSC'nin avantajları düşük üretim maliyeti ve yüksek dönüşüm verimliliğidir. Verimlilik oranları, 2009'da %3,8 iken, 2016 başında %22,1'e yükseldi ve bu da bugüne kadar en hızlı gelişen FV hücre teknolojisidir [19].

1.4.5.4. Fotovoltaik hücrelerin verimliliği

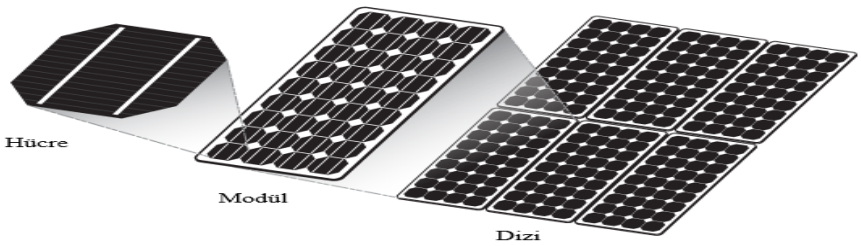
Şekil 1.8, Amerika Birleşik Devletleri'nin (ABD) ulusal yenilenebilir enerji laboratuarı (NREL) tarafından tasarlanan FV hücre teknolojilerinin verimlilik performans araştırmalarının 1975-2017 yıllarını kapsayan zaman çizelgesini göstermektedir. Şekil aynı zamanda FV hücre teknolojisi araştırması alanında çalışan farklı laboratuvarları da göstermektedir.



Şekil 1.8. FV hücre verimliliğinin zaman çizelgesi [1]

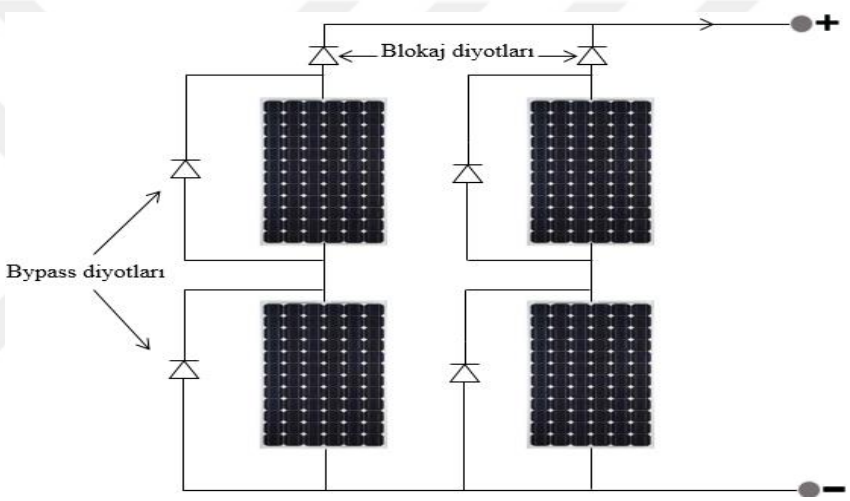
1.5. Fotovoltaik Modüller ve Diziler

FV hücre, FV sisteminin en küçük parçasıdır. FV hücrelerin tipik çıkış gücü, çoğu elektriksel yükün çalışma geriliminden çok daha düşük olan, 0,5 V'luk tipik bir açık devre geriliminde 2W'den daha azdır. FV modüller, istenen gerilim seviyesini elde etmek için seri olarak bağlanmış FV hücrelerden oluşur. Akım değerini arttırmak için paralel olarak bağlanabilirler. Ayrıca, birkaç modülden oluşan bir grup ya da sistem için gerekli gerilim ve akım değerini üretmek üzere seri, paralel veya ikisinin bir karışımı olarak FV dizi şeklinde bağlanabilir. Şekil 1.9 FV hücre-modül-dizi sistemini göstermektedir.



Şekil 1.9. FV hücre-modül-dizi sistemi

Seri ve paralel bağlantıların kombinasyonu, FV dizide uyumsuzluk etkileri, hot-spot gibi çeşitli sorunlara yol açabilir. Bu sorunlar farklı pozisyonlarda bypass ve blokaj diyotları kullanılarak minimize edilebilir veya önlenebilir. Bypass diyotları herhangi gölgeli hücrenin etrafında paralel akım yolu sağlar. İdeal olarak, her bir FV hücre ile paralel olarak bir bypass diyot olacaktır. Akımın sadece modülden dışarı akmasını sağlamak için blokaj diyotları her bir diziyle seri halde bulunmaktadır. Bu blokaj diyotları, genellikle FV panel geriliminin sıfır olduğu durumlarda bataryanın FV modüllere geri akmasını önlemek için batarya şarj sistemlerinde kullanılır [12]. Şekil 1.10, FV sistemlerinde kullanılan bypass ve blokaj diyotların pozisyonlarını göstermektedir.

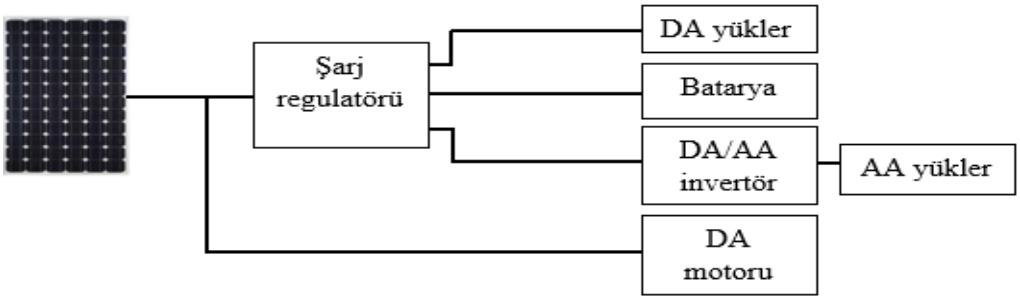


Şekil 1.10. Bypass ve blokaj diyotlarının gösterimi

1.6. Fotovoltaik Sistem Tipleri

1.6.1. Bağımsız FV sistemler

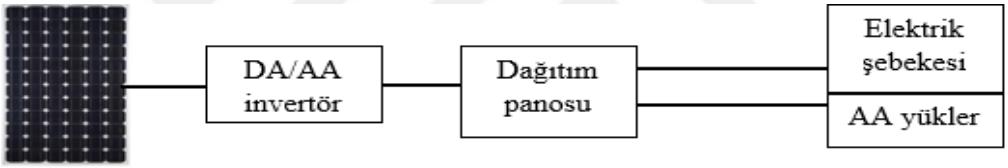
Bağımsız sistemler, FV modüller ve sadece bir yükten oluşur veya enerji depolama için batarya içerir. Bataryalar tamamen şarj olduğunda FV modüllerini kapatmak için veya bataryanın belirli bir sınırın altında boşalmasını önlemek için şarj regülatörleri gereklidir. Şekil 1.11'de, bağımsız FV sistem gösterilmektedir.



Şekil 1.11. Bağımsız FV sistem

1.6.2. Şebekeye bağlı FV sistemler

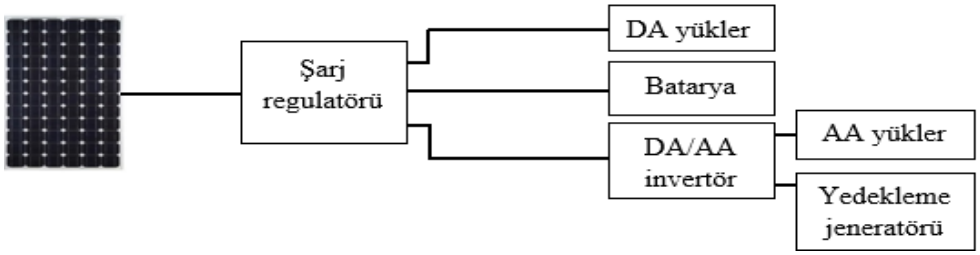
Şebekeye bağlı FV sistem, eviricilerle dağıtım panosuna aktarılıp elektrik şebekesine bağlanır. Küçük konut ve ticari çatı sistemlerinden büyük ölçekli güneş enerjisi santrallerine kadar çeşitlilik gösterir. Şebekeye bağlı FV sistemlerde, ihtiyaç fazlası enerji, elektrik şebekesine verilir. Şekil 1.12'de, şebekeye bağlı FV sistem gösterilmektedir.



Şekil 1.12. Şebekeye bağlı FV sistem

1.6.3. Hibrit FV sistemler

Dizel, gaz veya rüzgar jeneratörleri gibi tamamlayıcı elektrik üretim sistemleri FV modüller ile birleştirilip hibrit sistemler oluşturulur. FV sistem ve dizel jeneratörün birleşiminden oluşan ve yaygın olarak kullanılan fotovoltaik dizel hibrid sistemidir. Bu tür uygulama genellikle madencilik sektöründe ve adalarda bulunabilir. Diğer iki tip FV sisteminden daha karmaşık kontrol gerektirirler. Bunun nedeni, akünün belirli bir deşarj seviyesine ulaşması ve akünün istenen bir şarj durumuna ulaşması durumunda dizel motorun çalıştırılması gerekliliğidir [20]. Şekil 1.13'de, hibrit FV sistem gösterilmektedir.



Şekil 1.13. Hybrit FV sistem

1.7. Fotovoltaik Sistem Avantajları ve Dezavantajları

Tablo 1.2'de diğer yenilenebilir enerji sistemleri ve geleneksel elektrik üretim sistemleri ile karşılaştırıldığında FV sistemlerin bazı avantajları ve dezavantajları listelenmiştir.

Tablo 1.2 FV sistemlerin bazı avantajlarını ve dezavantajlarını

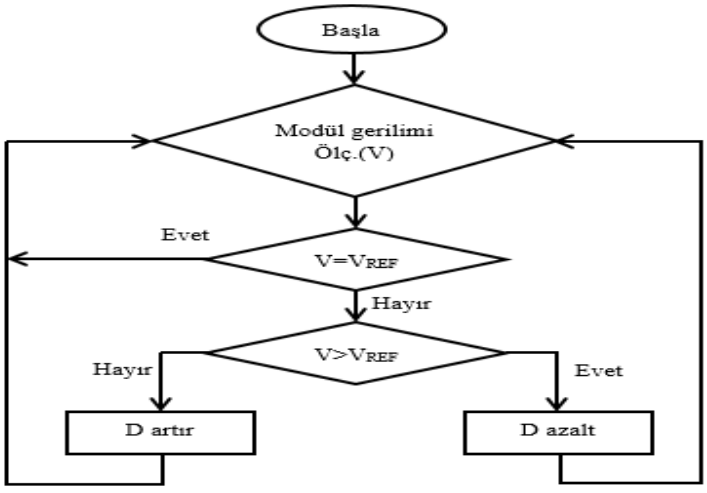
Avantajları	Dezavantajları
Temiz-yeşil enerji üretimi Özgür ve bol doğal enerji Doğrudan elektrik üretimi yolu Düşük işletme ve bakım maliyetleri Sessiz güç üretimi Çatılarda veya zeminde kolay kurulum Dünyayı çevreleyen neredeyse her uyduya güç vermek Ekonomik canlılık ve çevresel sürdürülebilirlik için gelecek vaad eden	Kesintili enerji özelliği Güneş enerjisinin tahmin edilemezliği Ek ekipman gerekli Düşük verimlilik Pahalı üretim maliyetleri Toksik kimyasallar (üretim sürecinde). Büyük ölçekli FV sistemi için gerekli geniş alan

2. MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI İZLEME ALGORİTMALARI

FV sistemlerin çıkış gücü çevresel değişimlerden etkilenir ve atmosfer rastgele değiştiği için, herhangi bir atmosferik durumda maksimum güç sağlayabilmek için sistemin takip edilmesi gerekmektedir. FV sistemler, herhangi bir çevre koşulunda maksimum güç noktasını izleyebilmek için farklı algoritmalar kullanır. Bu maksimum güç noktası izleme (MGNİ) algoritmaları tezin bu bölümünde anlatılmıştır. Referans [35], [38] ve [40]'daki yazarlar hemen hemen tüm eski ve yeni MGNI tekniklerine genel bir bakış sunmaktadır.

2.1. Sabit Gerilim Algoritması

Sabit gerilim algoritması MGNİ'nın en basit kontrol yöntemidir. FV geriliminin geri beslemesi, sabit bir referans gerilim (V_{REF}) ile karşılaştırılır ve sonuçta meydana gelen sinyal, FV modül çalışma noktasını MGN'nin yakınında tutmak için DA-DA dönüştürücünün doluluk oranını ayarlar. Referans gerilim değeri, FV modülün maksimum gerilimine veya başka bir hesaplanmış en iyi sabit gerilime eşit olacak şekilde ayarlanır. Bu yöntemde, maksimum güç noktası, standart atmosferik durum için açık devre gerilimin % 72'si ile % 78'i arasında gerçekleşir [21]. Sabit gerilim algoritması akış diyagramı, Şekil 2.1'de gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Sabit gerilim algoritması akış diyagramı

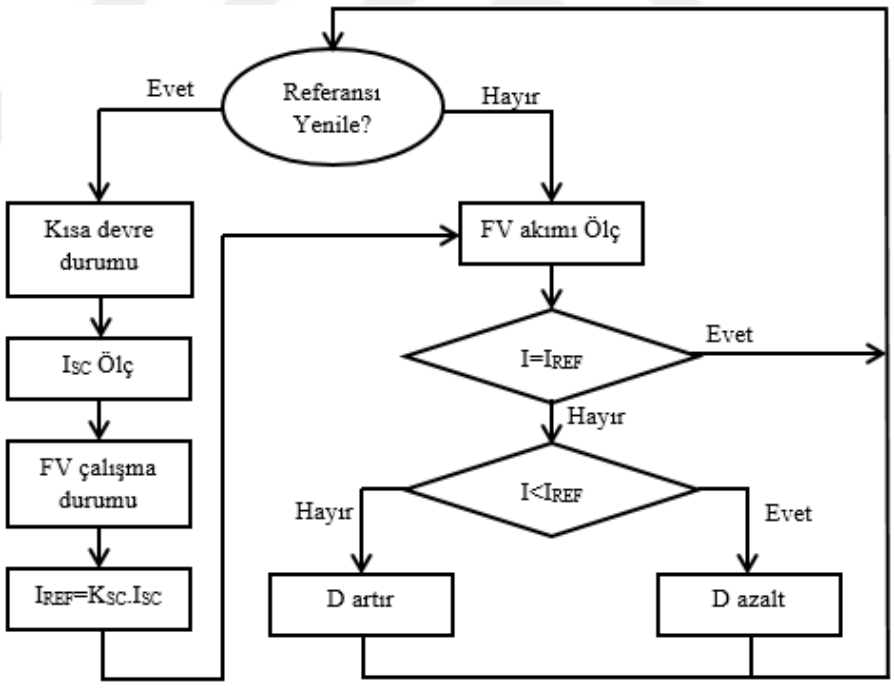
$$V_{REF}=K_C V_{OC} \quad (2.1)$$

K_C = 0.72-0.78 ve V_{REF}, $V=V_{REF}$ oranını ayarlamak için bir örnekleme periyodu sırasında hesaplanır ve sabit tutulur. Bir sonraki örnekleme için tekrar V_{OC} ölçülür ve her ölçüm için aynı prosedür tekrarlanır.

Bu yöntem basit ve ekonomiktir. Sadece bir geri besleme kontrolü gerektirir. Ancak bu teknik FV modüldeki ışınım ve sıcaklık değişimlerinin önemsiz olduğunu ve sabit referans gerilimin gerçek MGN'nin uygun bir yaklaşımı olduğunu varsaymaktadır [22].

2.2. Kısa Devre Akım Algoritması

Bu yöntemin temel prensibi, maksimum çalışma akımının (I_{MP}), herhangi bir atmosferik koşul altında kısa devre akımı (I_{SC}) ile yaklaşık olarak doğrusal bir ilişkiye sahip olmasına dayanır. Şekil 2.2'de bu algoritmanın akış diyagramı verilmiştir.



Şekil 2.2. Kısa devre akım algoritması

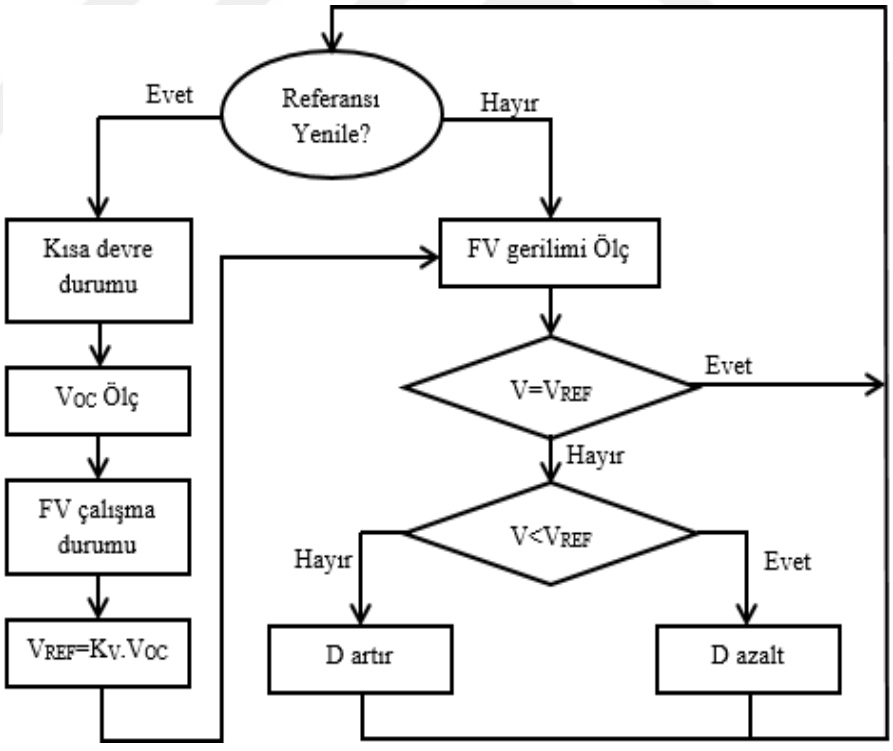
$$I_{MP}=K_{SC} I_{SC} \quad (2.2)$$

KSC esas olarak meteorolojik koşullara ve dolgu faktörüne bağlıdır. KSC genellikle %72-92 arasında bulunur. K_{SC} bir yaklaşım olduğu için gerçek MGN'yi izlemez [26].

Kısa devre akım algoritması, kısa devre akım ölçümü gerektirir. Kısa devre koşulunu oluşturmak için FV modüle paralel bir statik anahtar bağlanmalıdır. Kısa devre sırasında, FV sistem tarafından herhangi bir yük beslenmez. Enerji kesintisi olur. Bu yöntemin avantajları, sadeliği ve düşük uygulama maliyetidir. Öte yandan, I_{SC}'nin ölçülmesi için gerekli olan anlık kesinti, üretilen gücün bir miktar kaybına yol açmakta ve K_{SC}'nin değeri biraz değişmektedir.

2.3. Açık Devre Gerilimi Algoritması

Açık devre gerilimi tekniğinde, FV modül gerilimi FV sistem geriliminin en uygun değerine (V_{MP}) karşılık gelen bir referans gerilimi ile karşılaştırılır. Daha sonra gerilim hatası, kullanılan dönüştürücünün doluluk oranını kontrol etmek için kullanılır. V_{MP}, Eşitlik (2.3)'de gösterildiği gibi farklı ışınım ve sıcaklık seviyeleri altında FV modülün açık devre gerilimi (V_{OC}) ile yakın bir ilişkiye sahiptir. Açık devre gerilimi algoritması akış diyagramı, Şekil 2.3'de gösterilmektedir.



Şekil 2.3. Açık devre gerilimi algoritması

$$V_{MP}=K_V V_{OC} \tag{2.3}$$

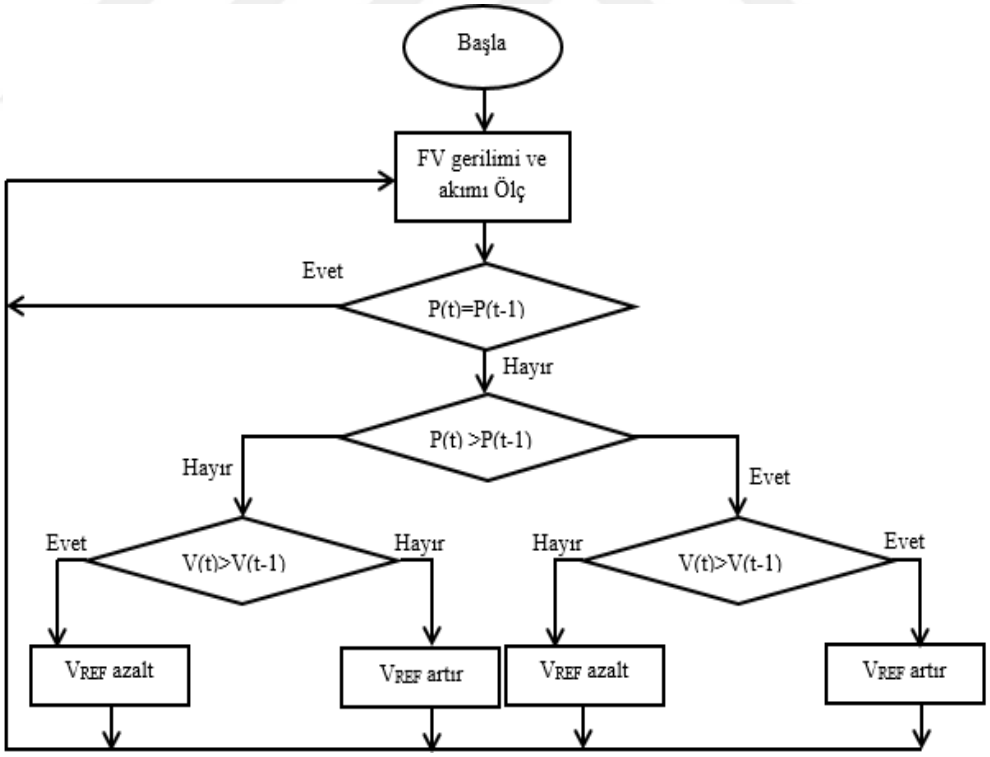
K_V, 0.71 ile 0.78 arasındadır. Açık devre gerilimi, sistemin normal çalışmasını anlık olarak keserek ölçülür. Açık devre gerilimi yöntemi, hızlı izleme özelliğine sahiptir,

ancak farklı hava koşullarındaki performansı, esnek olmayan sabit K_V'ye bağlı olarak zayıftır. Başka bir deyişle, referans gerilimi tüm hava koşulları için sabit kalır.

2.4. Değiştir Gözle Algoritması

Bu yöntemde, güç dönüştürücüsünün çalışma döngüsünde, FV modül çalışma gerilimi ve akımı ölçülerek ilk modül gücü hesaplanır ve daha sonra işletim gücündeki değişiklik gözlenir. Gerilim değişiminin bir sonucu olarak, gücün değişimi pozitif ise, o zaman gerilimin değişimini aynı yönde olur. Güç değişimi negatif ise, çalışma gerilimi ters yönde değiştirilmelidir.

MGN'ye ulaşıldığında algoritma durmayacak ve bazı gereksiz güç kaybıyla sonuçlanacak şekilde salınım oluşacaktır. Güç değişimini küçük tutmak için, değiştirme boyutunu çok küçük tutmak gerekir [7]. Ancak, çok küçük bir değiştirme boyutu MGNİ'yi yavaşlatır. Değiştir gözle algoritması literatürde en çok karşılaşılan ve en temel algoritmadır. Algoritmanın akış diyagramı, Şekil 2.4'de gösterilmektedir.

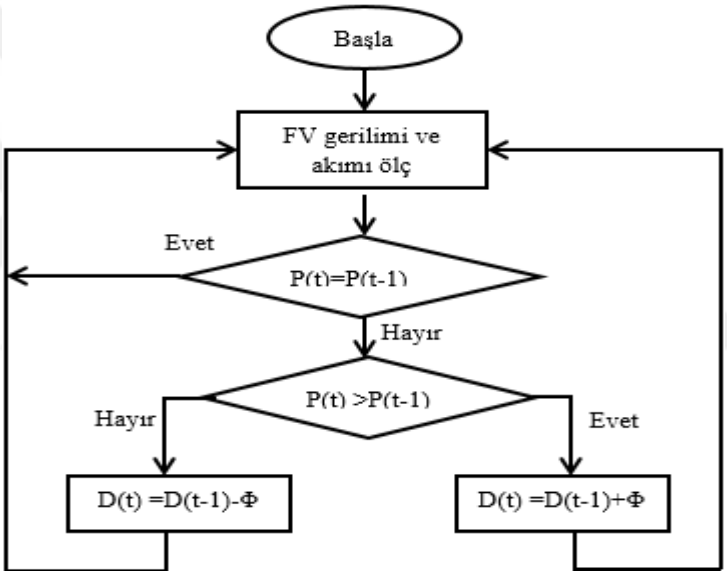


Şekil 2.4. Değiştir-gözle algoritması

2.5. Tepe Tırmanma Algoritması

Tepe tırmanma algoritması, değiştir gözle algoritmasına gibi yaygın kullanılan MGNİ tekniğidir. Bu yöntemde, gerilim maksimum çıkış gücünü takip edecek şekilde ayarlanır. Değiştir gözle tekniğinden farkı çalışma gerilimi değiştirmek yerine doluluk oranı ile MGNİ yapılmaktadır [24].

Periyodik olarak doluluk oranı D(t), artan güç yönüyle sabit bir adım boyutu (Φ) ile güncellenir. P(t)<P(t-1) ise, pertürbasyon yönünün, MGN'ye doğru hareket etmediğinin bir göstergesidir [25]. Tepe Tırmanma algoritmasının akış diyagramı, Şekil 2.5'de gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Tepe tırmanma algoritması akış diyagramı

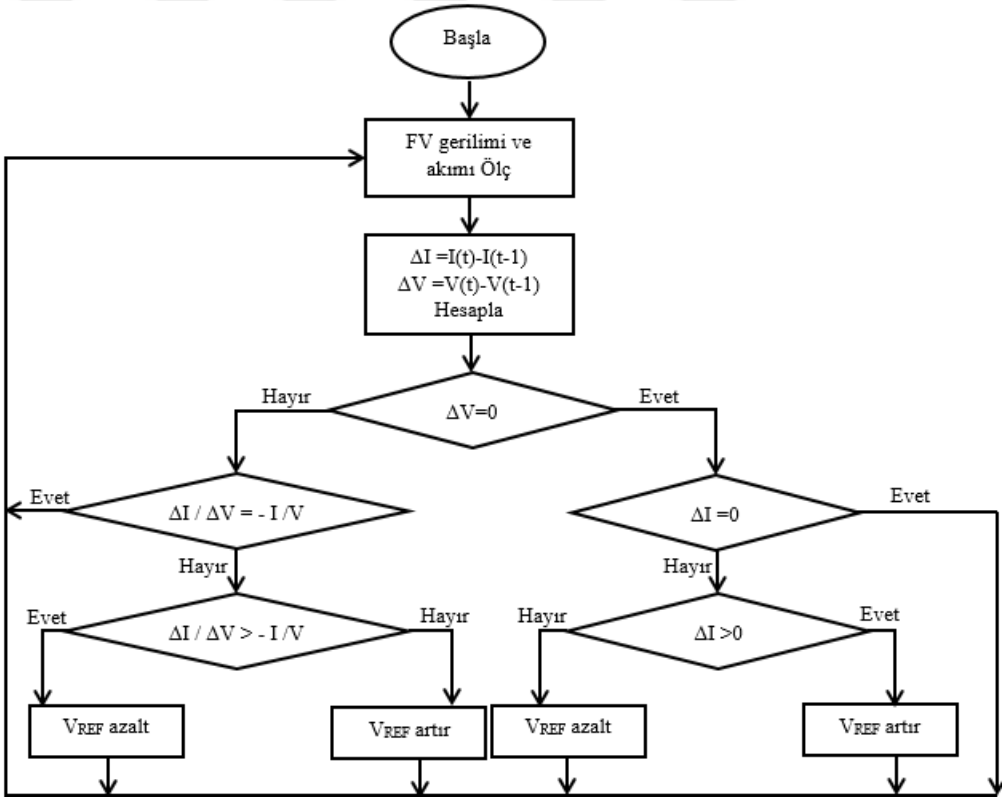
2.6. Artan İletkenlik Algoritması

Artan iletkenlik algoritması, FV modülün çıkış gücünün çıkış gerilimine göre türevinin MGN'da sıfır gerçeğine dayanmaktadır. Türevin sonucu MGN'nin sağında negatif ve MGN'nin solunda pozitiftir.

Anlık iletkenlik (I/V), artan iletkenliğe (ΔI/ΔV) eşit olduğunda MGN'ye ulaşmış demektir. MGN'ye ulaşıldığında, FV modülün ΔI değerinde değişiklik ölçülene kadar bu noktada çalışmaya devam edilir. ΔI'deki değişim, atmosferik durum ve MGN'deki değişim ile korelasyon gösterir. Bu nedenle, algoritma MGN'yi izlemek için FV modül çalışma gerilimini arttırır veya azaltır.

ΔI/ΔV<-I/V olduğunda, algoritma MGN'nin sağında çalışır, bu nedenle çalışma noktasının MGN'ye doğru hareket ettirilmesi için modül çalışma gerilim azaltılır. ΔI/ΔV>- I/V olduğunda, MGN'nin sol tarafında algoritma çalıştığı için modül çalışma gerilimi artırılır. Ancak, MGN'ye ulaşıldığında modül çalışma gerilimi herhangi bir değişikliğe ihtiyaç duymaz.

Hızla değişen atmosferik koşullar altında maksimum güce ulaşmak için değiştir gözle yönteminin tepe noktası etrafında salınımı bu yöntemle ortadan kaldırılmıştır [7]. Artan iletkenlik metodu, hızla artan ve azalan ışınlama koşullarını değiştir gözle tekniğinden daha yüksek hassasiyetle izleyebilir. Bu algoritmanın dezavantajı, kontrol devresinin diğerlerine göre karmaşık olmasıdır [24]. Algoritmanın akış diyagramı, Şekil 2.6'de gösterilmektedir.



Şekil 2.6. Artan iletkenlik algoritması akış diyagramı

2.7. Bulanık Mantık Algoritması

Bulanık mantık, belirsizlik ve kesin olmayan, belirsiz, gürültülü veya eksik giriş bilgileriyle ilgilenen bir matematik modeline dayanır. Bir analog giriş sinyalini,

önceden belirlenmiş bir mantıksal değişken üyelik işlevine veya 0 ve 1 aralığında değerlere karşılık gelen bulanık kümelerle karşılaştırır [8].

Bulanık mantık kavramı ilk olarak 40 yıl önce ortaya atılmıştır, çünkü temel teori 1965 yılında Zadeh tarafından tanıtılmıştır [27]. Bulanık mantık denetleyicisi dört bileşenden oluşur. Bunlar bağlantı arabirimi, bilgi tabanı, arabirim motoru ve yansıtma arabirimi şeklinde sıralanabilir. Bulanık mantık denetleyicisi, gerilim çıkış gücünü maksimize eden değerde tutmak için DA-DA dönüştürücüyü kullanarak maksimum güç noktasını kontrol edebilir. Bulanık denetleyicinin girdileri genellikle bir hata (E) ve hatanın değişimidir (ΔE). Hata tasarımcı tarafından seçilebilir, ama genellikle MGN'de sıfır olduğu için ΔP/ΔV olarak seçilir. E ve ΔE aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$E=\frac{P(t)-P(t-1)}{V(t)-V(t-1)} \tag{2.4}$$

$$\Delta E=E(t)-E(t-1) \tag{2.5}$$

Referans [28]'de, Bulanık mantık denetleyicisinin giriş değişkenleri FV modül gücündeki değişiklik ve FV akımındeki değişimlerdir. Sistemin çıkışı ise yüseltici dönüştürücü akım referansının değişiminin büyüklüğüdür.

FV sistem için bulanık mantık denetleyicisinin kullanılması, sistem dalgalanmasından kaçınmak için maksimum voltajda yüzde sapma ile uğraşmak gibi bazı avantajlar sağlar. Öte yandan, hava koşullarındaki büyük ve hızlı değişimler nedeniyle ortaya çıkan kararsızlık, DA-DA dönüştürücü çıkış geriliminde yüksek değişikliklere neden olan yükün değiştirilmesi gibi iki temel sorunla karşı karşıya kalınabilir. Referans [29]'da yapay sinir ağ tekniği ile birleşik bir bulanık mantık sistemi, FV sistem için geleneksel bulanık mantık denetleyicisini dezavantajlarının üstesinden gelmiştir.

2.8. Yapay Sinir Ağı Algoritması

Yapay sinir ağı analizi kavramı, beyin ve onunla ilişkili sinir sistemlerine dayanmaktadır. Sistemleri temsili olarak oluşturmak için değişken ağırlıklar ile bağlanan işlem öğelerini kullanırlar [30]. Önceden kaydedilmiş verilerdeki eğilimleri kullanarak girdi ve çıktı değişkenleri arasındaki ilişkiyi etkili bir şekilde öğrenir.

Bir sinir ağının en basit örneği, giriş katmanı, gizli katman ve çıktı katmanı olarak adlandırılan üç katmana sahiptir. Katmanların sayısı, her katmandaki düğüm sayısı ve

her katmanda kullanılan işlev kullanıcı bilgisine bağlı olarak değişir. Giriş değişkenleri, V_{OC} ve I_{SC}, atmosferik veriler (ışınım ve sıcaklık) veya bunların bir kombinasyonu gibi PV dizisinin parametreleri olabilir. Çıkış, genellikle doluluk oranı veya DA-link referans gerilimi gibi bir veya daha fazla referans sinyalidir.

Sinir ağı tekniğinin temel dezavantajı, FV modülün özelliklerine modele ve atmosfer koşullarına bağlı olarak değişmesi nedeniyle, her FV modül ve konum için eğitim süreci için gereken verilerin özel olarak elde edilmesi gerekliliğidir. Bu özellikler zamanla da değişir, bu nedenle sinir ağının periyodik olarak eğitilmesi gerekir. Bir güneş (hibrit) aracının akü grubunu şarj etmek için bir yapay sinir ağı MGNİ örneği [31] 'de önerilmiştir.

2.9. Genetik Algoritması

Genetik algoritması, doğal genetik seçime dayalı bir optimizasyon algoritmasıdır. Bir kromozom popülasyonundan yeni bir popülasyona, bir çeşit doğal seleksiyon ile birlikte, genetik, geçiş, mutasyon ve inversiyon ile ilgili işleyenlerle birlikte hareket etmek için bir yöntemdir [32].

MGN'nin genetik algoritması ile izlenmesine örnek [33]'de sunulmuştur. Giriş olarak V_{OC} ve I_{SC}'ye ihtiyaç duyar. Işınımı ve hücre sıcaklığını bilmeden hücre modelini kullanarak maksimum güç akımını hesaplar. Genetik operasyonlara dayanan genetik algoritması uygulamasının farklı adımları (seçim, çaprazlama, mutasyon) [34]'de sunulmuştur.

Algoritmanın, lokal maksimumda aramayı durdurmayacağı, ancak algoritmanın gerçek global zirveyi izleyene kadar devam edeceği garanti edilmelidir. [35] 'te, genetik algoritması, değişen atmosfer koşullarında maksimum güç noktası izlemek için bulanık mantık denetleyicisini optimize etmek için kullanılır. Genetik algoritması uygulayarak, kural tabanı ve üyelik işlevi gibi bulanık mantık denetleyicisi parametreleri, en son üretkenlikteki en yüksek uygunluğun, üyelik işlevinin yanı sıra kural tabanı tablosunu belirleyeceği en uygun değere ayarlanabilmektedir. Böylece bu optimizasyon işleminde bulanık mantık denetleyicisinin performansı artar.

2.10. Parçacık Sürüsü Optimizasyon Algoritması

Parçacık sürü metodolojisi kullanılarak lineer olmayan fonksiyonların optimizasyonu konsepti, Kennedy ve Elberhat tarafından tarafından tanıtılmıştır [36]. Parçacık sürü optimizasyonu tekniği, global optimizasyon problemlerini çözmek için kullanılabilecek güçlü yöntemlerden biridir. Algoritmanın temeli, kuşların sürüsü, balıklar vb. gibi organizma topluluklarının akıllı sosyal davranışlarına dayanır. En iyi çözümü bulmak için bir dizi parçacık bir arama alanında hareket eder. Yeni çözümler denerken, hareket en iyi çözümü takip ederek ayarlanır. En uygun çözümü karşılamak için, parçacığın pozisyonu parçacığın en iyi konumunu veya komşunun en iyi pozisyonunu takip etmelidir. Konum güncellemesi ve hız güncellemesi, algoritmayı yöneten operatörlerdir. Algoritma ilgili arama işleminde elde edilen bilgi alışverişi yapan çoklu ajanların işbirliğine dayanmaktadır. MGNİ algoritmalarının, lokal minimum ve maksimumda sıkışıp kalması nedeniyle algoritma problemin üstesinden gelmenin yanı sıra, kararlı durum hatasını azaltmak ve verimliliği arttırmak için yardımcı olabilir.

FV sistemlerde MGNİ için parçacık sürü optimizasyon yöntemi ayrıntılı olarak [37]'de açıklanmıştır. Değiştir gözle algoritması ile birleştirilen yöntem, sayısal simülasyon ile doğrulanmıştır ve farklı çevresel koşullar altında iki farklı FV konfigürasyonu ile denenmiştir.

3. DA-DA DÖNÜŞTÜRÜCÜLER

Güç elektroniğinin görevi, kullanıcı için en uygun şekilde gerilim ve akımların sağlanmasıyla elektrik enerjisinin akışını işlemek ve kontrol etmektir. Güç elektroniği bazlı DA-DA dönüştürücüler, yenilenebilir enerji sistemlerinde özellikle rüzgar enerjisi ve güneş FV sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. DA-DA dönüştürücüler, regüle edilmemiş olan DA girişini, istenen gerilim seviyesinde kontrollü bir DA çıkışa dönüştürür.

Giriş bir DA gerilim kaynağıdır ve çıkış bir yüktür. Girişten çıkışa aktarılan enerji, elektronik anahtarlar (kontrollü bir anahtar ve diyot) ile enerji depolama bileşenlerine (endüktans ve kapasitör) aktarılır ve daha sonra depodan yüke aktarılır. Enerji aktarma işlemi, anahtarlara uygulanan sinyallere bağlıdır. Bunun sonucunda giriş gerilimine bağlı bir çıkış gerilimi elde edilir.

DA-DA dönüştürücüler, endüktans akımına göre iki farklı modda çalışabilir. Endüktans akımının her zaman sıfırdan büyük olan kesintisiz iletim modu ve anahtarlama periyodunun bir kısmı sırasında endüktans akımının sıfır olduğu kesintili iletim modu. Kesintisiz iletim modu, yüksek verim, ve yarı iletken anahtarların ve pasif bileşenlerin iyi kullanımı için tercih edilir. Kesintili iletim modu, özel kontrol gereksinimleri olan uygulamalarda kullanılabilir [40].

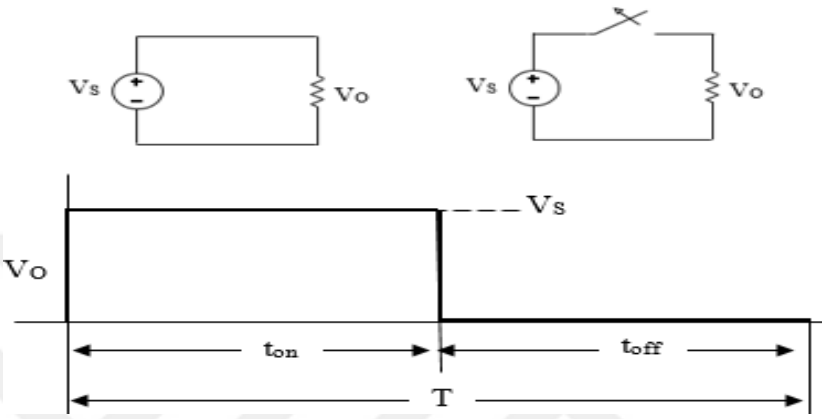
DA-DA dönüştürücülerinin çıkış gerilimi, bir anahtarın açık olduğu sürenin ayarlanmasıyla kontrol edilir ve bu da çıkıştaki bir gerilim seviyesinin genliğini ayarlar. Bu yönteme darbe genişlik modülasyonu kontrolü denir.

3.1. Darbe Genişlik Modülasyonu Kontrolü

Darbe genişlik modülasyonu kontrolü, transistörün açık kalma süresi (t_{ON}) olarak bilinen bir süre boyunca iletimde olduğu ve kapalı zaman (t_{OFF}) olarak adlandırılan bir zaman için kesimde olmasına dayalı bir yöntemdir. Anahtar kapalı olduğunda, tam giriş gerilimi veya kaynak gerlimi (V_S) yük üzerinde görünür ve anahtar açıldığında,

yük gerilimi veya çıkış gerilimi (V_O) sıfır olur. Şekil 3.1'de darbe genişlik modülasyonu kontrolünün durumları gösterilmektedir.

Anahtarlama frekansı (f), ortalama çıkış gerilimi (V_O), doluluk oranı (D) ve ortalama güç (P) ifadeleri sırasıyla (3.1), (3.2), (3.3) ve (3.5) 'de gösterilmiştir. Ortalama çıkış gerilimi, (3.4) 'te gösterildiği gibi D kullanılarak ifade edilir.



Şekil 3.1. Darbe genişlik modülasyonu kontrolü

$$f=\frac{1}{T} \tag{3.1}$$

$$V_O=\frac{1}{T}\int_0^{t_{ON}} V_S\,dt=\frac{t_{ON}}{T}\,V_S \tag{3.2}$$

$$D=\frac{t_{ON}}{T} \tag{3.3}$$

$$V_O=\frac{t_{ON}}{T}\,V_S=DV_S \tag{3.4}$$

$$P=\frac{D}{R}Vs^2 \tag{3.5}$$

Darbe genişlik modülasyonu tarafından kontrol edilen DA-DA dönüştürücülerin avantajları arasında düşük eleman sayısı, yüksek verim, sabit frekans çalışması, tümleşik devre denetleyicilerinin nispeten basit kontrolü, ticari kullanılabilirliği ve yüksek dönüştürme oranlarını elde etme yeteneği sayılabilir. Dezavantajları, dikdörtgen gerilim ve akım dalga formlarının, yarı iletkenlerde pratik çalışma frekanslarını bir megahertz aralığına sınırlayan açma ve kapama kayıplarına neden olmasıdır [41].

3.2. DA-DA Dönüştürücülerin Gereği

Önceki bölümde bahsedildiği gibi, FV hücrenin çıkış gücü, güneş ışınımı, sıcaklık ve gölgeleme yansımaları gibi bazı çevresel değişikliklere bağlıdır. Bu parametreler ve elektrik yükü gün boyunca değişebilir. Bu nedenlerle, herhangi bir atmosfer koşulunda FV sistemden maksimum gücü aktarma ihtiyacı vardır.

Maksimum güç aktarım teorisine göre, kaynak empedansı yük empedansına eşit olduğunda (yük eşleşmesi) maksimum güç, kaynaktan yüke aktarılır. Yük eşleşmesi, yük direncinin FV hücrenin karakteristik direncine eşit olmasını gerektirir.

Bu eşleşme, DA-DA dönüştürücünün doluluk oranı ayarlanarak yapılır. Değişen atmosferik koşullarda, dönüştürücünün MGN'yi izleyebilmesi için doluluk oranı aynı doğru yapılmalıdır. Bu amaçla kullanılan çeşitli DA-DA dönüştürücü devreleri bulunmaktadır.

3.3. DA-DA Dönüştürücülerin Tipleri

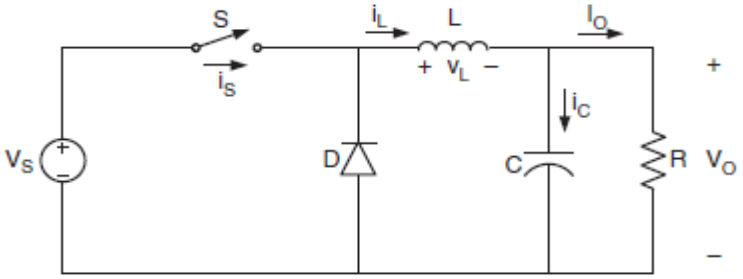
DA-DA dönüştürücülerin elektriksel izolasyon transformatörü (izoleli dönüştürücüler) ile kullanılması önerilmektedir ama neredeyse çoğu uygulamada izolasyon transformatörü (izolesiz dönüştürücü) olmadan kullanılır. Temel dönüştürücü topolojileri, düşürücü veya yükseltici dönüştürücülerdir. Düşürücü-yükseltici, Cuk ve diğer izoleli dönüştürücüler, iki temel topolojinin birleşimidir.

3.4. Düşürücü Dönüştürücü

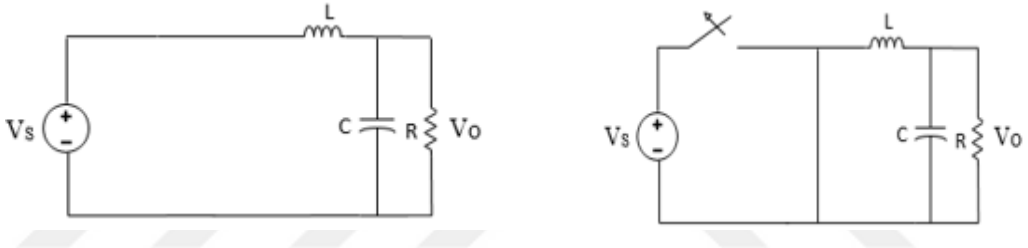
Düşürücü dönüştürücü devresinin amacı, DA giriş geriliminden daha düşük bir DA çıkış gerilimi üretmektir. Eşdeğer devre şeması ve anahtar durumları, sırasıyla Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'te gösterilmiştir.

Devrenin kapanma durumu sırasında enerji akışını sağlamak için belirli bir miktarda endüktans (L) ve kapasitans (C) gereklidir. Bu endüktans ve kapasitör değerleri, düşürücü devresinin ayrıntılı bir analiz sonucu belirlenir. DA-DA dönüştürücüler için çeşitli analiz yöntemleri bulunmaktadır. Genel olarak kullanılan yöntem, anahtarlama periyodunun koşullarına uygun olarak endüktans akımı ve kapasitör gerilimi tanımlayan denklemleri çözmektir [42].

Endüktans gerilimi (V_L) ve akımı (I_L) arasındaki Eşitlik (3.6)'da verilmiştir. Endüktans gerilimi, açıkta ve kapalı zaman durumlarında, Eşitlik (3.7) ve (3.8) 'de gösterildiği gibi Kirchhoff'un gerilim yasasının devreye uygulanmasıyla belirlenir. Daha sonra (3.6)'nın yerine (3.7) ve (3.8) kullanarak anlık endüktans akımı (i_L) (3.9) ve (3.10) 'da elde edilir.



Şekil 3.2. Düşürücü dönüştürücü



Şekil 3.3. Düşürücü dönüştürücü çalışma modeli

$$V_L = \frac{diL}{dt} \tag{3.6}$$

$$V_L, t_{ON} = V_S - V_O \tag{3.7}$$

$$V_L, t_{OFF} = -V_O \tag{3.8}$$

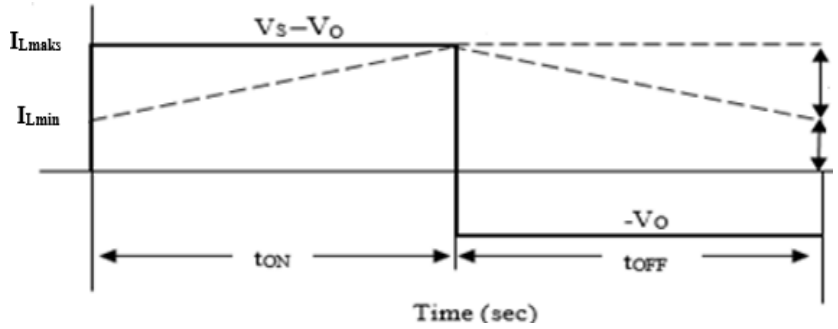
$$\frac{di_L, t_{ON}}{dt} = \frac{V_S - V_O}{L} \tag{3.9}$$

$$\frac{di_L, t_{OFF}}{dt} = \frac{-V_O}{L} \tag{3.10}$$

Şekil 3.4'de gösterildiği gibi, endüktans akımı, anahtar iletimde iken minimum akım değerinden (I_{Lmin}) maksimum akım değerine (I_{Lmaks}) doğrusal olarak artar. Anahtar keimde iken I_{Lmaks}'dan I_{Lmin}'e doğrusal olarak azalır. Doğrusal artış ve düşüş sırasıyla (3.11) ve (3.12) 'de verilmiştir.

$$I_{Lmaks} - I_{Lmin} = \frac{V_S - V_O}{L} t_{ON} \tag{3.11}$$

$$I_{Lmin} - I_{Lmaks} = \frac{-V_O}{L} t_{OFF} \tag{3.12}$$



Şekil 3.4. Bobin gerilimi ve akım dalga şekli

Anahtarlama süreleri, doluluk oranı (D) ve anahtarlama periyodu (T_S) ile tanımlanır. Anahtarın iletim ve kesim süreleri (3.13) ve (3.14) 'de verilmiştir.

$$t_{ON}=DT_S \tag{3.13}$$

$$t_{OFF}=(1-D)T_S \tag{3.14}$$

Yüke akan endüktans akımının (I_{Lort}) ortalama değeri, endüktans akımı dalga formu ve anahtarlama periyodu ekseni arasındaki üçgen alanlardan elde edilir. Dalga formu altındaki toplam alan (A), (3.15) 'de verilmiştir. Eşitlik (3.15), anahtarlama periyodu tarafından bölündüğünde, aynı zamanda çıkış akımı olan I_{Lavg} verir, çünkü yük direncine (R) akan sadece I_{Lort} 'dır. I_{Lort} daha sonra (3.16) ve (3.17) 'de ifade edilir.

$$A=T_S I_{Lmin}+\frac{1}{2}T_S(I_{Lmaks}-I_{Lmin}) \tag{3.15}$$

$$I_{Lort}=I_{Lmin}+\frac{1}{2}(I_{Lmaks}-I_{Lmin}) \tag{3.16}$$

$$I_{Lort}=\frac{V_O}{R} \tag{3.17}$$

Anahtarlama frekansı (f) (3.18) 'de ifade edilmiştir. Endüktans akımının minimum değeri (I_{Lmin}), (3.13), (3.16), (3.17) ve (3.18) denklemleri kullanılarak Eşitlik (3.19)'da olduğu gibi hesaplanabilir.

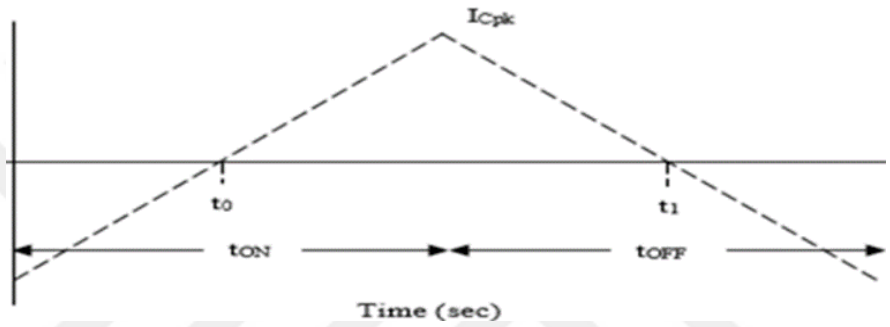
$$f=\frac{1}{T_S} \tag{3.18}$$

$$I_{Lmin}=\frac{Vo}{R}-\frac{D(V_S-V_O)}{2Lf} \tag{3.19}$$

$I_{Lmin}=0$ olduğunda, kesintisiz iletim modu işlemi için gereken minimum endüktansın (L_{min}) değeri belirlenir. Minimum endüktansın değeri Eşitlik (3.20)'de verilmiştir.

$$L_{min}=\frac{D(V_S-V_O)R}{2fV_O} \quad (3.20)$$

Şekil 3.5, kondansatör akımı dalga formunu göstermektedir ve kondansatörün şarj edildiği hat aralığı t_0 ve t_1 arasındadır. Kondansatör dalgalanma gerilimi (ΔV_O), maksimum (V_{Cmaks}) ve minimum (V_{Cmin}) kapasitör gerilimi arasındaki fark olarak tanımlanır. Bu gerilim farkı, iki gerilim seviyesi arasındaki birikmiş (ΔQ) şarj miktarına da karşılık gelir. ΔV_O ifadeleri (3.21) ve (3.22) 'da gösterilmiştir. Denklem (3.23), ΔQ'nun aynı zamanda en yüksek kapasitör akımı ile (I_{Cpk}) şarj süresinin (t_1-t_0) integrali olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.5. Kondansatör akım dalga formu

$$\Delta V_o=V_{Cmaks}-V_{Cmin} \quad (3.21)$$

$$\Delta V_O=\frac{\Delta Q}{C} \quad (3.22)$$

$$\Delta Q=\frac{1}{2}(t_1-t_0)I_{Cpk} \quad (3.23)$$

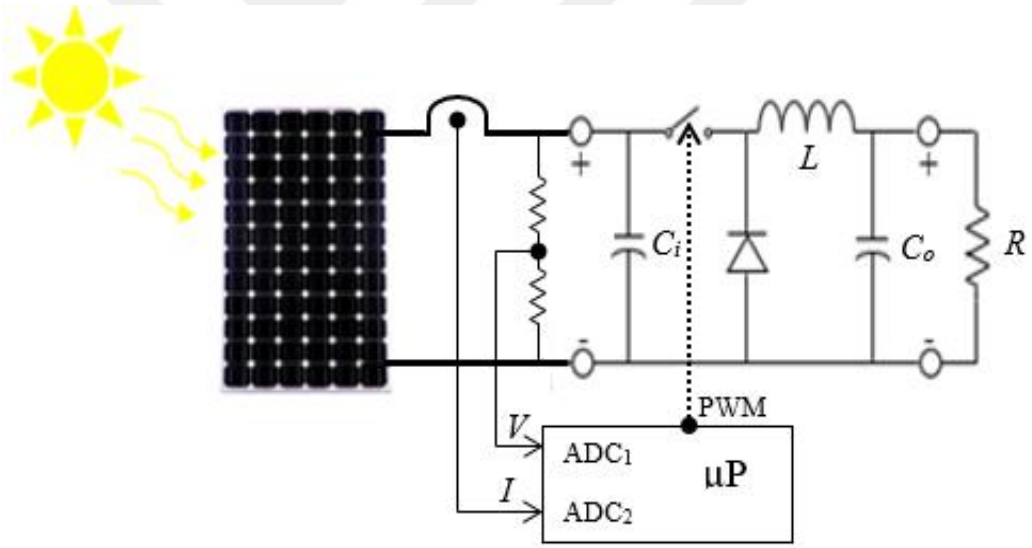
Kondansatör değeri Eşitlik (3.24) ile bulunur. Burada kapasitans, istenilen gerilim, dalgalanma gerilimi, endüktans değeri, doluluk oranı ve anahtarlama frekansından belirlenebilir.

$$C=\frac{D(Vs-Vo)}{8\Delta VoLf^2} \quad (3.24)$$

Düşürücü dönüştürücü devresinin analizi, dönüştürücü devresinin farklı parametrelerine dayanan endüktans ve kapasitans değerlerini belirleyen iki ana denklem ile sonuçlanır. Bu denklemler, bu dönüştürücü devresini tasarlamak için kullanılır.

4. MGN İZLEYİCİSİNİN TASARIMI, MODELLENMESİ VE BENZETİMİ

Tezin bu bölümünde, FV hücrenin modellenmesi, düşürücü tip dönüştürücünün tasarımı ve MGNİ algoritmasının modellenmesi sunulmuştur. Model, güneş ışınımını ve sıcaklığı giriş olarak kullanarak, çıkışında regüle edilmiş bir gerilim üretmektedir. Güneş pilleri, güneş ışınımını regüle edilmemiş bir DA gerilimine dönüştürür. Şekil 4.1'de gösterilen MGN izleyicisi iki amaç için kullanılır. Öncelikle, regüle edilmemiş gerilimi, bir DA-DA dönüştürücü ile istenen bir gerilim seviyesine dönüştürür. İkinci olarak, uygun algoritmalar ile maksimum güç elde edilmesini sağlar.

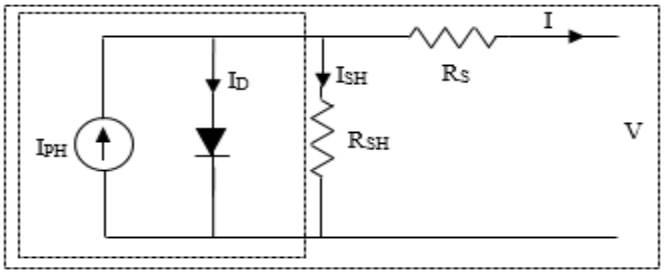


Şekil 4.1. FV sistem

4.1. FV Modülün Modellenmesi

4.1.1. FV modülün elektriksel ve matematiksel modeli

Bir FV hücrenin modellenebilmesi için Şekil 4.2 ile verilen elektriksel eşdeğer devresi dikkate alınmalıdır. FV hücrenin çıkış akımı Eşitlik (4.1), hücre sıcaklığına bağlı olan doyma akımı Eşitlik (4.2) ile verilmiştir. Üretilen akım, hücrenin çalışma sıcaklığı ve güneş ışınımı ile değişir. Bu durum Eşitlik (4.3)'de verilmiştir [43-44].



Şekil 4.2. FV hücrenin elektriksel eşdeğer devresi

$$I=I_{PH}-I_S\left[e^{\frac{q(V+R_SI)}{N_snkT}}-1\right]-\frac{V+R_SI}{R_{SH}} \quad (4.1)$$

$$I_S=\frac{I_{SC,STC}+K_I\Delta_T}{e^{\frac{q(V_{OC,STC}+K_V\Delta_T)}{N_snkT}}-1} \quad (4.2)$$

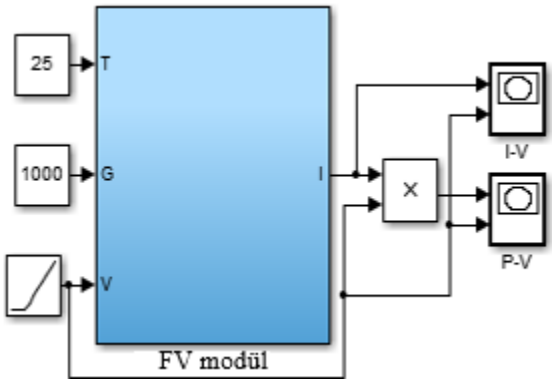
$$I_{PH}=\left[I_{PH,STC}+K_I\Delta_T\right]\left[\frac{G}{G_{STC}}\right] \quad (4.3)$$

Bu denklemlerde,

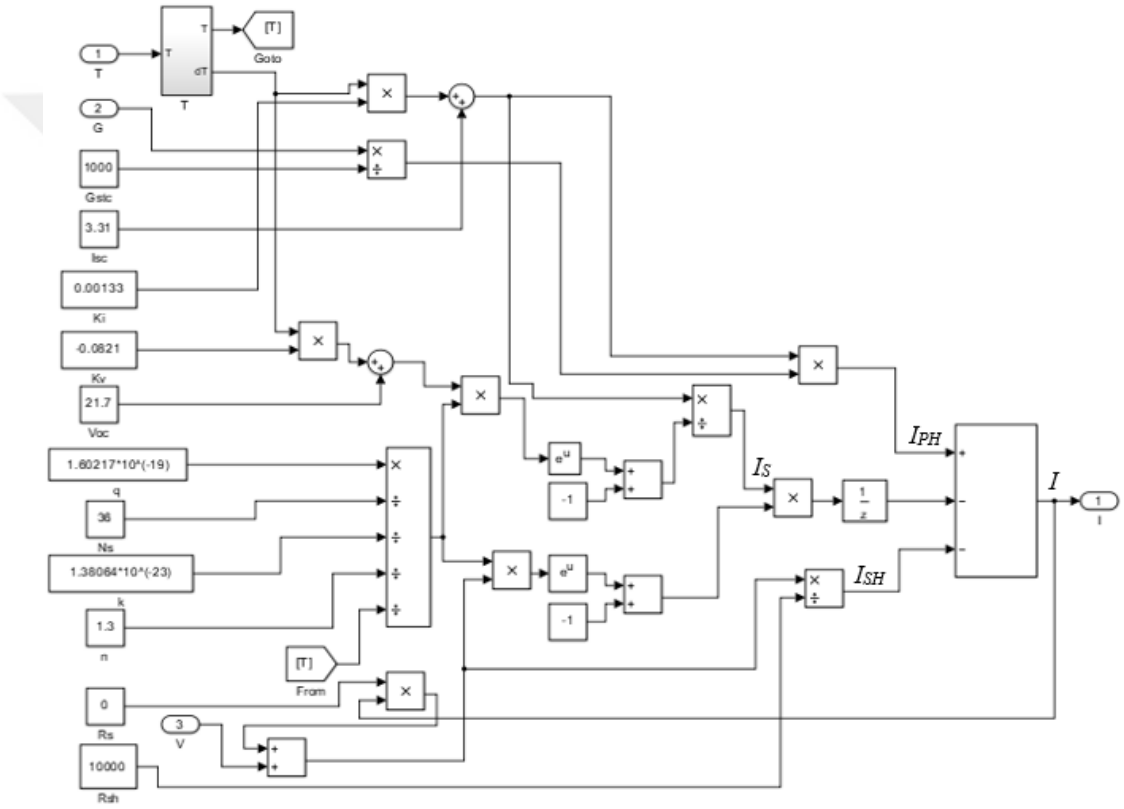
$I_{SC,STC}$ ve $V_{OC,STC}$, STC'de kısa devre akımı ve açık devre gerilimini, $I_{PH,STC}$, üretilen ışınım akımını, K_I ve K_V, kısa devre akımı ve açık devre geriliminin sıcaklık katsayılarını, Δ_T ($\Delta_T = T-T_{STC}$), hücrenin çalışma sıcaklığı ile STC'deki hücre sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkını, G ve G_{STC}, gerçek ışınım ve STC'deki ışınımını göstermektedir.

Eşitlik (4.3), hücre standart test koşullarda ($T=T_{STC}$ ve $G=G_{STC}$) çalışırken ışınım akımının kısa devre akımına eşit olduğunu göstermektedir. FV hücre modeli Eşitlik (4.1), (4.2) ve (4.3) kullanılarak MATLAB/SIMULINK programında Şekil 4.4'deki gibi elde edilmiştir. Gerilimi elde edebilmek için bir rampa bloğu kullanılır.

İdeal bir güneş pili modelinde seri direnç çok küçük ve şönt direnç ise çok büyük olduğu için ihmal edilir. Bu nedenle, seri direnç için bir minimum değer (örneğin 0 Ω) ve şönt direnç için maksimum bir değer (örneğin 10000 Ω) alınabilir.



Şekil 4.3. Matlab'da kurulan FV modül modeli



Şekil 4.4. Matlab'da kurulan FV modül modelinin alt sistemi

4.1.2. Seri ve şönt dirençlerin belirlenmesi

Gerçek bir FV modülünü modellemek için Eşitlik (4.1), (4.2) ve (4.3) parametrelerin belirlenmesi gereklidir. Bu parametrelerin çoğu ($I_{SC,STC}$, $V_{OC,STC}$, K_I, K_V, N_S, n, T_{STC}, G_{STC}), FV modülün katalogları tarafından verilir. Ancak, FV modülün çıkış gücünü etkileyen seri ve şönt direnç değerleri bilinmemektedir. Bunlar belirlendiğinde FV hücre daha iyi modellenmiş olur.

Seri direnç, hücre lehim bağları, yayıcı ve taban bölgeleri, hücre metalizasyonu ve hücreye bağlı baralar gibi çeşitli iç dirençleri temsil eden toplanmış bir parametre değeridir [46]. Şönt direnç değeri ise, FV hücre boyunca herhangi bir paralel yüksek iletkenlik yolunu temsil eder.

Bu dirençlerin belirlenmesi matematiksel ya da deneysel verilere dayanarak yapılır. [46] tarafından önerilen yöntem, seri ve şönt dirençlerin ayarlanmasıyla elde edilen maksimum gücün, kataloglar tarafından verilen maksimum güce eşit olması gerçeğine dayanmaktadır. Bu yöntem, bu direnç değerlerini bulmak için bir çözüm olabilir. Referans [45] ve [46]'ya göre, seri direncin başlangıç değeri 0, maksimum değeri ($R_{S,max}$), (4.4)' de olduğu gibi ve minimum şönt direnç değeri ($R_{SH,min}$) ise Eşitlik (4.5) tarafından verilmiştir.

$$R_{S,maks}=\frac{V_{OC.STC}-V_{MP,STC}}{I_{MP,STC}} \tag{4.4}$$

$$R_{SH,min}=\frac{V_{MP,STC}}{I_{SC,STC}-I_{MP,STC}}-\frac{V_{OC,STC}-V_{MP,STC}}{I_{MP,STC}} \tag{4.5}$$

Bu eşitliklerde, $I_{MP,STC}$ and $V_{MP,STC}$, STC'deki FV modülün maksimum gücündeki akım ve gerilim değerleridir. Bu çalışmada, R_S ve R_{SH}'nin belirlenmesi için, FV modülün çıkış gücü, Eşitlik (4.6)'da verilen maksimum güçle ($P_{MP,STC}$) eşit oluncaya kadar, iç direnç değerlerini ayarlayarak yapılır.

$$P_{MP,STC}=V_{MP,STC}\ I_{MP,STC} \tag{4.6}$$

4.1.3. FV modülün simülasyon sonuçları

Öncelikle FV modülün ideal modeliyle (R_S= 0Ω ve R_{SH} = 10000Ω) simülasyon yapılmıştır. Bu durumda dirençlerden kaynaklanan kayıplar hesaba katılmaz. İkinci olarak, $R_{S,min}$ ve denklem (4.5)'den hesaplanan $R_{SH,min}$ değeri (85.62 Ω) ile simulasyon yapılmıştır. R_S sadece maksimum güçe ulaşıncaya kadar ayarlanmıştır. R_S, $R_{S,min}$ (0 Ω) ve $R_{S,maks}$ (1.38 Ω) arasında olmalıdır. Tablo 4.1, farklı R_S değerleri ile simülasyon sonuçlarını göstermektedir.

Tablo 4.1'den görüldüğü gibi, R_S ve R_{SH}'nin maksimum güçle eşleşebilecek değerleri sırasıyla 0,1Ω ve 100Ω civarında olabilir. Bu nedenle simülasyon, Tablo 4.2'de gösterildiği gibi, bu değerler dikkate alınarak devam etmiştir.

Tablo 4.1. Farklı RS değerleri ile simülasyon sonuçları

R_S (Ω)	0	0	0.276	0.552	0.828	1.104	1.38
R_{SH} (Ω)	10000	85.62	85.62	85.62	85.62	85.62	85.62
P_{MP} (W)	58.46	54.41	52.05	49.59	47.35	45.01	42.75

Tablo 4.2. Farklı R_S ve R_{SH} değerleri ile simülasyon sonuçları

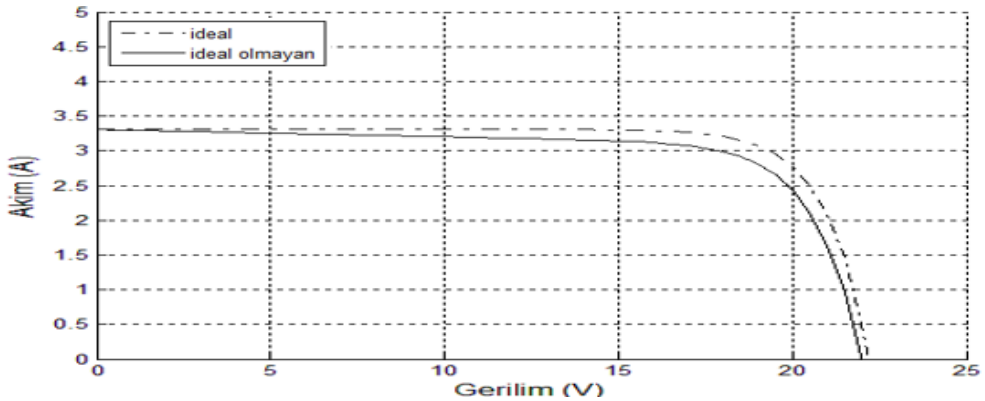
R_S (Ω)	R_{SH} (Ω)	P_{MP} (W)
0.1	100	54.14
0.1	95	53.96
0.15	95	53.46
0.15	100	53.64
0.15	97.5	53.55
0.125	97.5	53.81
0.1	97.5	54.05
0.1	98	54.07
0.1	97.25	54.04
0.1	97	54.03
0.11	97	53.94
0.1	96.75	54.02
0.1	96	53.99

Tablo 4.3. FV modülün parametreleri

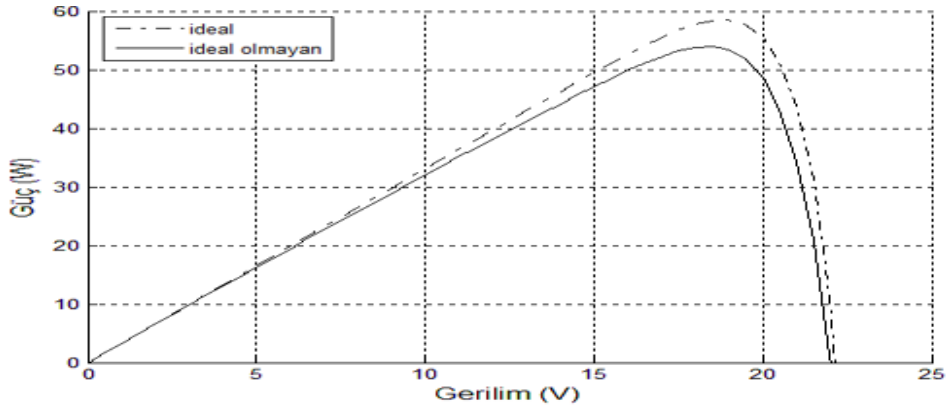
$P_{MP,STC}$ (W)	$V_{MP,STC}$ (V)	$I_{MP,STC}$ (A)	$V_{OC,STC}$ (V)	$I_{SC,STC}$ (A)	K_V (V/°C)	K_I (A/°C)	N_S	*n*	P_{MP} matlab	R_S (Ω)	R_{SH} (Ω)
54	17.4	3.11	21.7	3.31	-0.0821	0.0013	36	1.3	53.99	0.1	96

Bu yöntemle, yaklaşık olarak R_S= 0,1Ω ve R_{SH}=96Ω olarak bulunmuştur. Bu direnç değerleri ile seçilen FV modülün en iyi modeli elde edilmiş olur. Kullanılan FV modülün özellikleri ve hesaplanan direnç değerleri Tablo 4.3'te gösterilmiştir.

FV hücre modelinin ideal ve ideal olmayan model kullanılması durumlarındaki simülasyon sonuçları, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'de I-V ve P-V grafikleriyle gösterilmektedir.



Şekil 4.5. FV modülün I-V karakteristiği

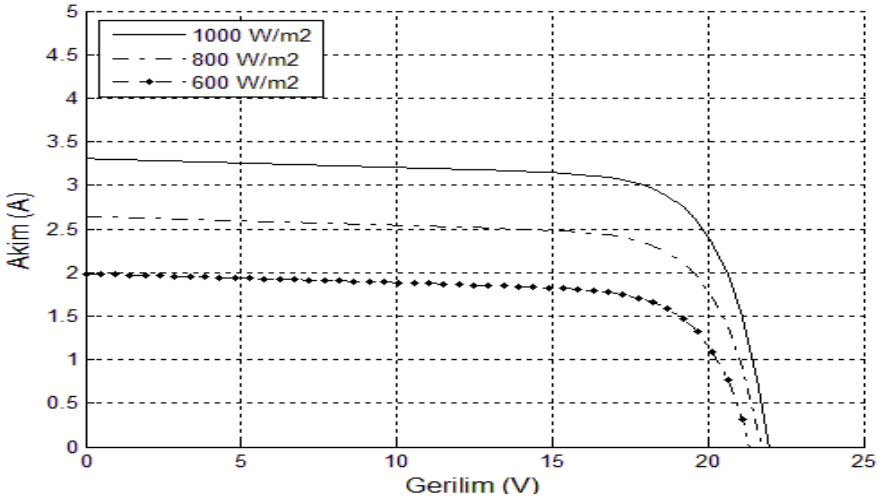


Şekil 4.6. FV modülün P-V karakteristiği

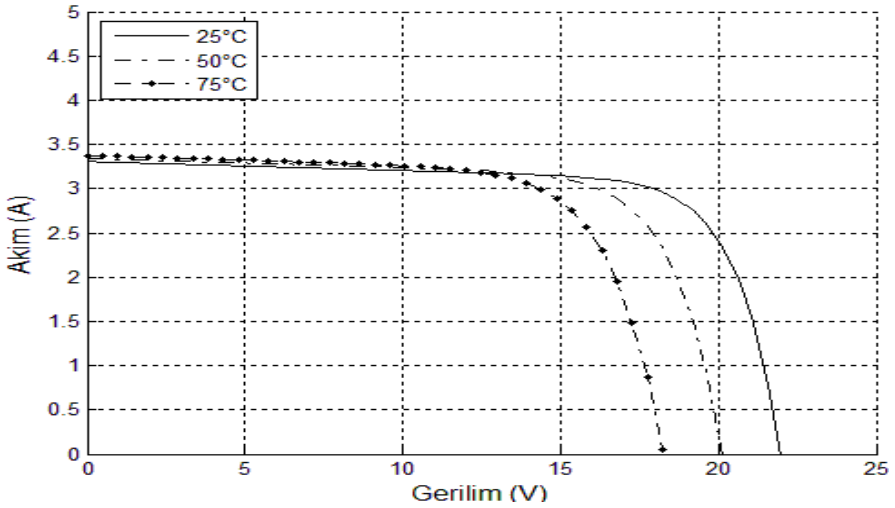
Şekil 4.7'de FV modülün I-V karakteristikleri güneş ışınımının farklı değerleri ve sıcaklık 25 °C için gösterilmiştir. Üretilen ışınım akımı, daha önce de belirtildiği gibi güneş ışınımı ile doğru orantılıdır. Gerilim değişimi logaritmik ışınım bağımlılığı nedeniyle çok daha küçüktür.

Şekil 4.8, FV modülün I-V karakteristiklerini, farklı sıcaklık değerleriyle ve güneş ışınımı 1000W/m^2 seviyesinde sabitken göstermektedir. Sıcaklığın çıkış gerilimi üzerindeki etkisi, yaklaşık olarak katalog tarafından verilen sıcaklık katsayısına (K_V=-0.0821 V/°C) eşittir.

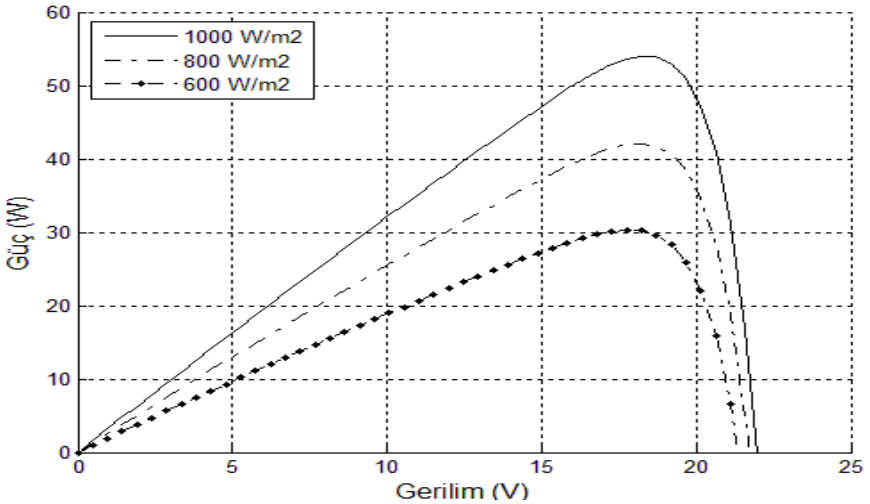
Şekil 4.9 ve Şekil 4.10 farklı çalışma sıcaklıklarında ve ışınım seviyeleri için P-V karakteristiklerini göstermektedir.



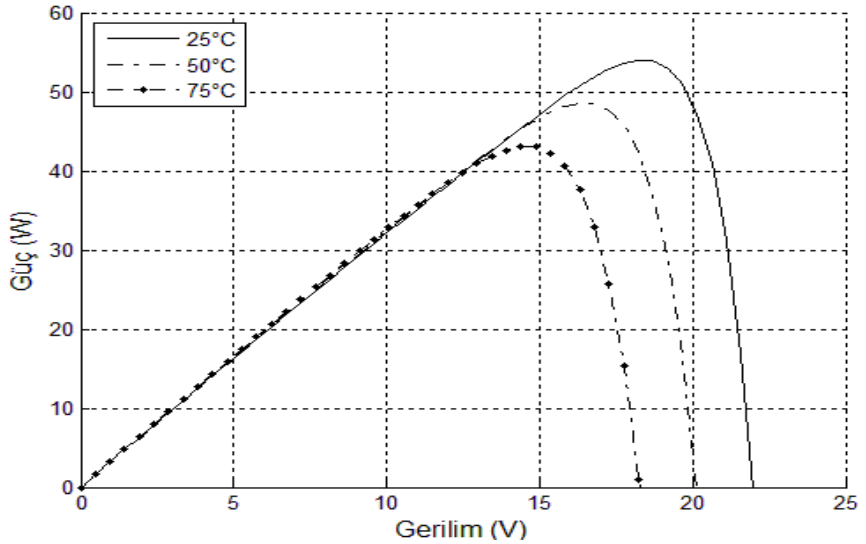
Şekil 4.7. Farklı ışınım değerleri için I-V karakteristiği



Şekil 4.8. Farklı çalışma sıcaklıklarında I-V karakteristiği



Şekil 4.9. Farklı ışınım değerleri için P-V karakteristiği



Şekil 4.10. Farklı çalışma sıcaklıklarında P-V karakteristiği

4.2. Düşürücü tip DA-DA Dönüştürücünün Tasarımı, Modellenmesi ve Simülasyonu

4.2.1. Düşürücü tip dönüştürücünün tasarımı

Düşürücü tip DA-DA dönüştürücü devresinin çalışma prensibini açıklayan denklemler tezin üçüncü bölümünde verilmiştir. Bu denklemler dönüştürücünün tasarlanması için kullanılır. Bir DA-DA dönüştürücünün tasarlanmasında, devrenin elektronik bileşenlerinin belirlenmesi için istenen çıkış gerilim değeri ve anahtarlama frekansı gibi bazı parametreler öncceden belirlenir. Dönüştürücü, bu istenen değerlere ve FV modül parametrelerine göre tasarlanır.

Bu çalışmada, düşürücü tip DA-DA dönüştürücü sürekli akım modunda tasarlanmıştır. Düşürücü tip DA-DA dönüştürücü devresinin seçilen çıkış gerilimi 12V'dur. Bu genellikle batarya şarj sistemleri için gerekli gerilim seviyesidir. Dönüştürücünün giriş gerilimi FV modülün gerilimidir. Düşürücü tip dönüştürücü devresinin parametreleri Tablo 4.4'te listelenmiştir.

Tablo 4.4. Düşürücü dönüştürücünün parametreleri

Parametreler		Değerler
FV modülü çıkış değerleri	P_{MP}	54 W
	V_S	17.4 V
İstenen parametreler	V_O	12 V
	f	20 kHz
Hesaplanan parametreler	I_O	4.5 A
	D	0.689
	L_{min}	20.6 µH
	C_o	235.17 µF
	C_i	138.53 µF
	R	2.66 Ω

Düşürücü tip dönüştürücü devresinde, dalgalanma gerilimini azaltmak için ek bir giriş kondansatörü (C_i) kullanılır. Giriş kondansatörü, Denklem (4.7)'de verilen giriş dalgalanma gerilimi (ΔV_S) ifadesinden belirlenebilir.

Kapasitörler değeri %2 'lik dalgalanma gerilimi dikkate alınarak hesaplanmıştır [4]. Anahtarlama elemanların seçimi (MOSFET ve diyot), güç kayıpları ve sıcaklık artışına bağlıdır [53]. Dönüştürücünün çıkış akımı (Io) Denklem (4.9) 'dan hesaplanır. V_O istenen çıkış gerilimi ve P_{MP}, FV modülü tarafından sağlanan maksimum güçtür.

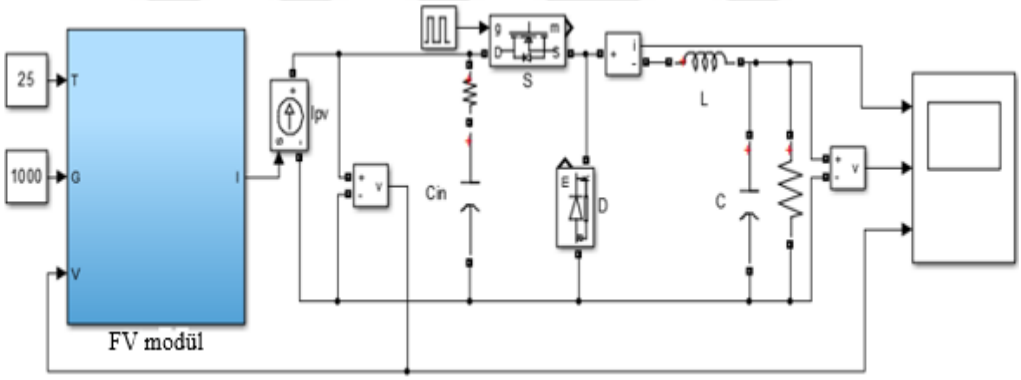
$$\Delta V_S = \frac{(1-D) I_S T_S}{C_i} \tag{4.7}$$

$$C_i = \frac{(1-D) D I_O}{\Delta V_S f} \tag{4.8}$$

$$I_O = \frac{P_{MP}}{V_O} \tag{4.9}$$

4.2.2. Düşürücü dönüştürücünün modellenmesi

Düşürücü tip dönüştürücü devresinin modeli Şekil 4.11'de verildiği üzere MATLAB/Simulink'de kurulmuştur. Dönüştürücünün simülasyonu, hesaplanan elektronik bileşenlerin değerleri ile gerçekleştirilir.

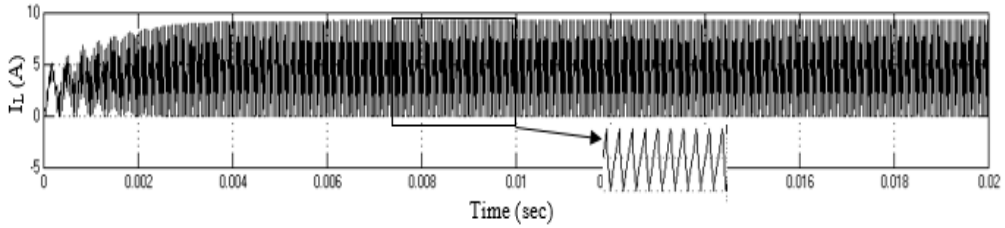


Şekil 4.11. Matlab'da kurulan düşürücü dönüştürücünün devresi

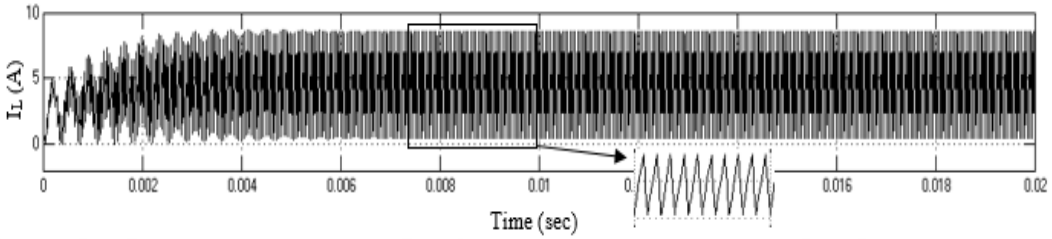
4.2.3. Simülasyon sonuçları

Şekil 4.12'de gösterildiği gibi, bobinin (20.6µH) minimum değeri kullanıldığında, dönüştürücünün süreksiz akım modunda çalıştığını görulmektedir. Bu endüktans akımının bir periyot içinde sıfıra eşit olduğu anlamına gelir. Dönüştürücünün sürekli akım modunda çalıştırılabilmesı için, Şekil 4.13'te gösterildiği gibi, minimum endüktans değerinden daha yüksek bir değere (örneğin 25 µH) çıkarılmalıdır.

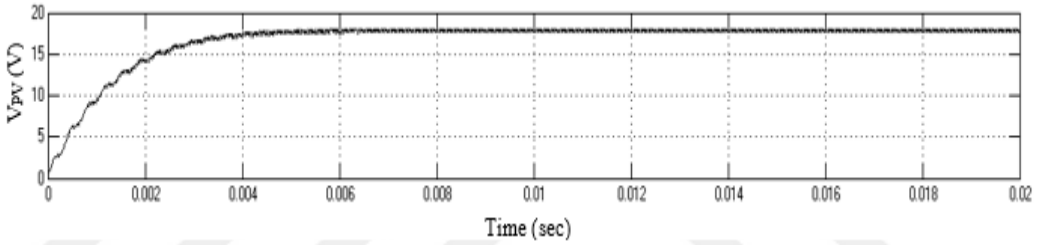
FV modülün ve düşürücü tip dönüştürücünün çıkış gerimleri Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'de gösterilmiştir.



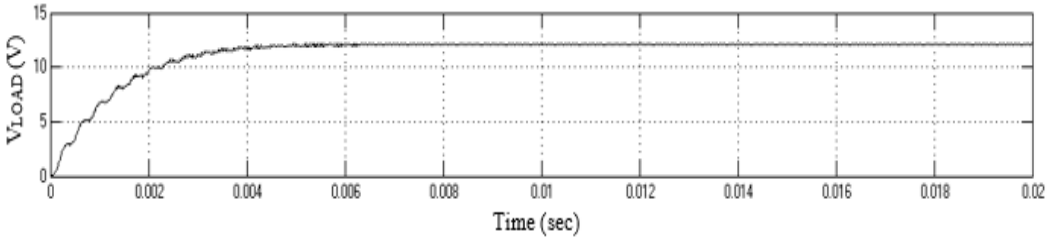
Şeki 4.12. L = L_{min} = 20.6µH ile düşürücü dönüştürücü simülasyon sonuçları



Şekil 4.13. L = 25µH > L_{min} ile düşürücü dönüştürücü simülasyon sonuçları



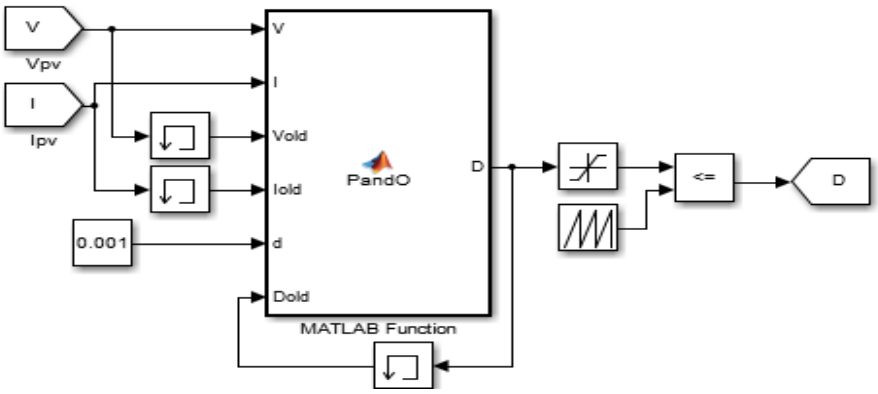
Şekil 4.14. Düşürücü dönüştürücünün çıkış gerilimi



Şekil 4.15. FV modülün çıkış gerilimi

4.3. MGN İzleme Algoritmasının Modellenmesi

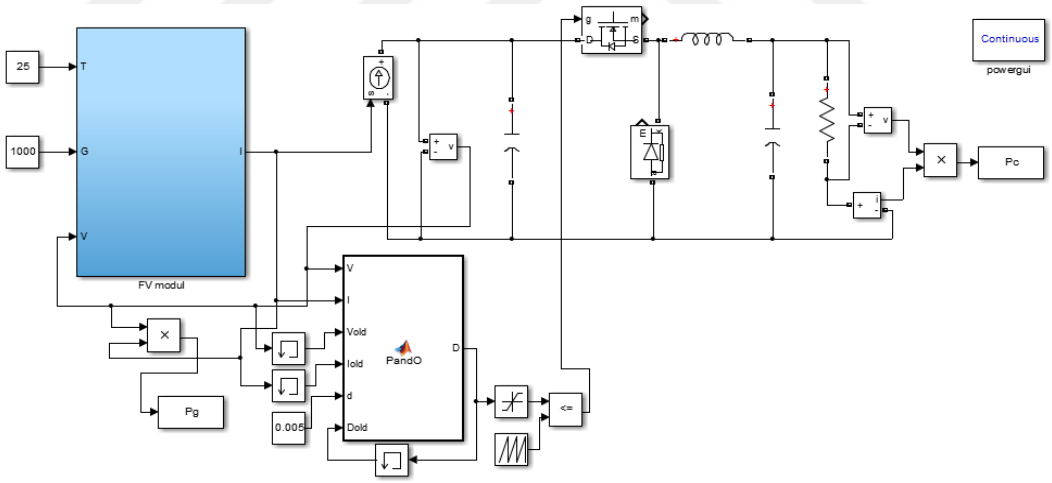
Bu çalışmada değiştir gözle algoritması kullanılmıştır. MATLAB/Simulink programında oluşturulan değiştir gözle algoritması Şekil 4.16'de gösterilmiştir. Değiştir gözle algoritmasının kodu, tezin Ek-A kısmında verilmiştir.



Şekil 4.16. Matlab'da kurulan değiştir-gözle algoritması

4.4. FV Sistemin Simülasyon Sonuçları

MGN izleyicisi içeren FV sistemin MATLAB modeli, Şekil 4.17'de gösterilmektedir. Şekil 4.17 ile farklı atmosfer koşulları (sıcaklık ve güneş ışınımı) altında, FV modül ve düşürücü tip DA-DA dönüştürücünün davranışları elde edilebilir. Beş farklı simülasyon durumları için MGN izleyicisinin giriş (P_g) ve çıkış (P_c) güç elde edilmiştir.



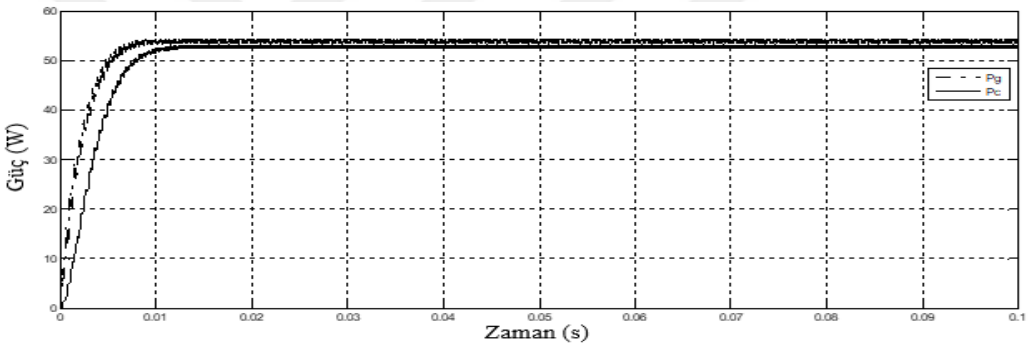
Şekil 4.17. MATLAB'da kurulan FV sistem

Beş farklı ışınım ve sıcaklık değeleri için simülasyon sonuçları olarak beklenen maksimum güç, ortalama maksimum güç ve MGN izleyicisinin verimliliği, Tablo 4.5'te gösterilmektedir.

Tablo 4.5. Farklı test koşulları için simülasyon sonuçları

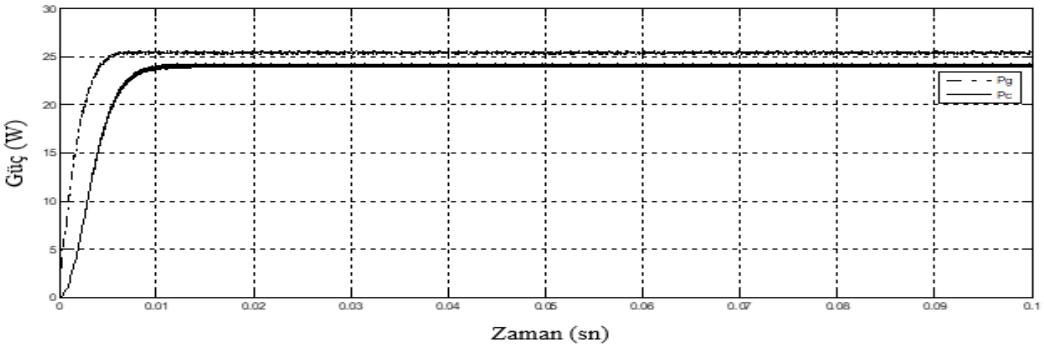
G (W/m^2)	T (°C)	P_{MP} (W)	$P_{MP,avg}$ (W)	MGN izleyicisinin verimliliği (%)
1000	25	54.00	53.31	98.72
500	25	26.04	25.5	97.92
250	25	12.02	11.78	97.75
1000	50	48.59	47.6	97.96
1000	0	59.3	57.25	96.54

1. 1000W/m^2-25 °C: FV modül standart test koşulları ile çalışmaktadır. Sistem, yaklaşık 0.012 sn'de kararlı duruma ulaşmış ve 0.1 sn 'ye kadar nominal değerleri sağlayacak şekilde çalışmıştır. Bu simülasyona ait sonuçlar Şekil 4.18'de gösterilmektedir.



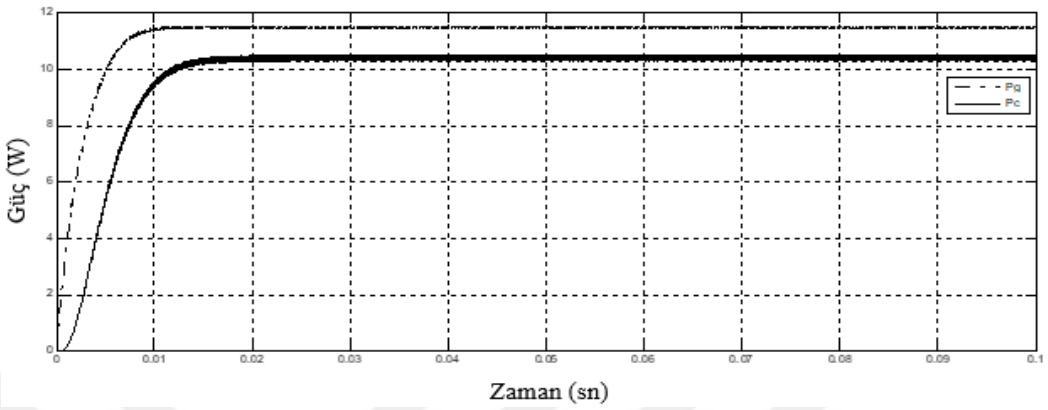
Şekil 4.18. 1000 W/m^2-25 °C durumu için simülasyon sonuçları

2. 500W/m^2-25 °C : Güneş ışınımının değeri 1000W/m^2'den 500W/m^2 değerine düşmüştür. Şekil 4.19'da gösterildiği gibi güç değeri bu durumdan direk etkilenmiştir.



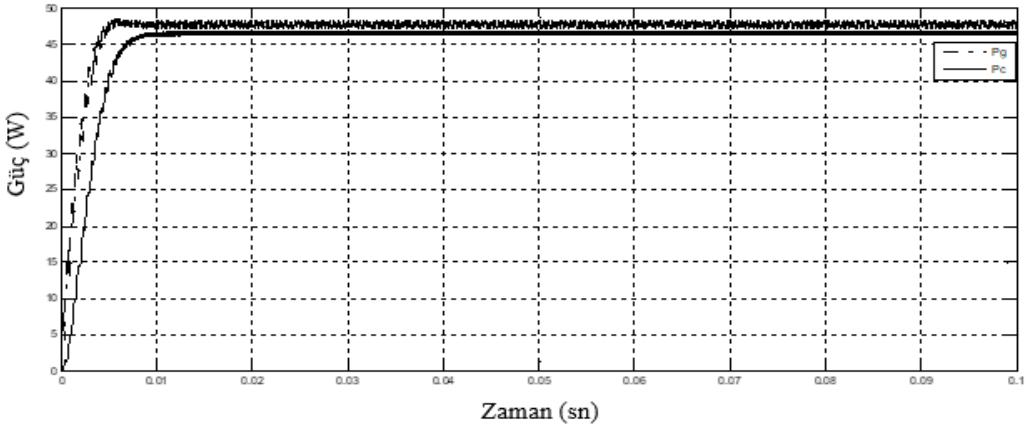
Şekil 4.19. 500W/m^2-25 °C durumu için simülasyon sonuçları

3. 250W/m^2-25 °C: Güneş ışınımının değeri 500W/m^2'den 250W/m^2 değerine düşmüştür. Şekil 4.20'de gösterildiği gibi ışınımın güç değerine bu durumdan da direk etkilenmiştir.



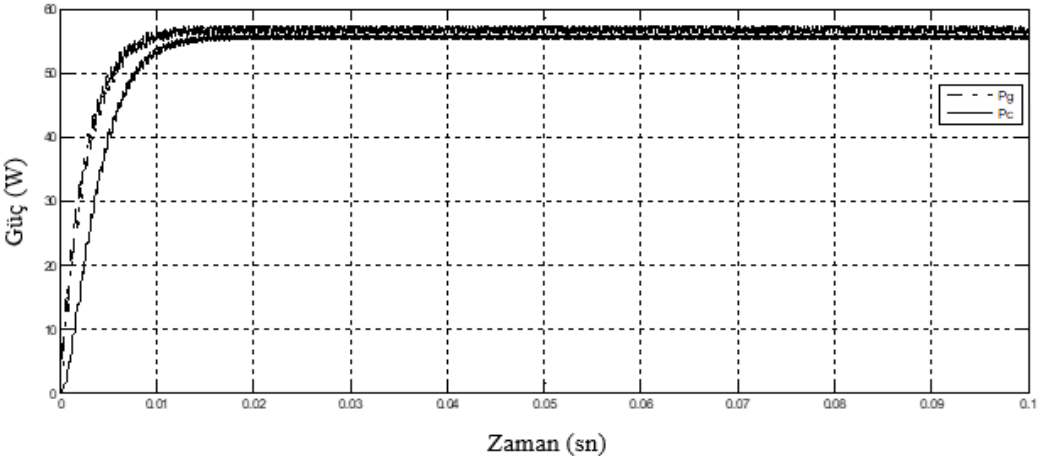
Şekil 4.20. 250W/m^2-25 °C durumu için simülasyon sonuçları

4. 1000W/m^2-50 °C: Işınımın nominal değerinde tutup ve sıcaklığın artması, sistemin nominal gücünün azalmasına neden olmuştur. Sıcaklığın güce etkisi Şekil 4.21'de gösterilmektedir.



Şekil 4.21. 1000W/m^2-50 °C durumu için simülasyon sonuçları

5. 1000W/m^2-0 °C: : Işınımın nominal değerinde tutup ve sıcaklığın azalması, sistemin nominal gücünün artmasına neden olmuştur. Sıcaklığın güce etkisi Şekil 4.22'de gösterilmektedir.

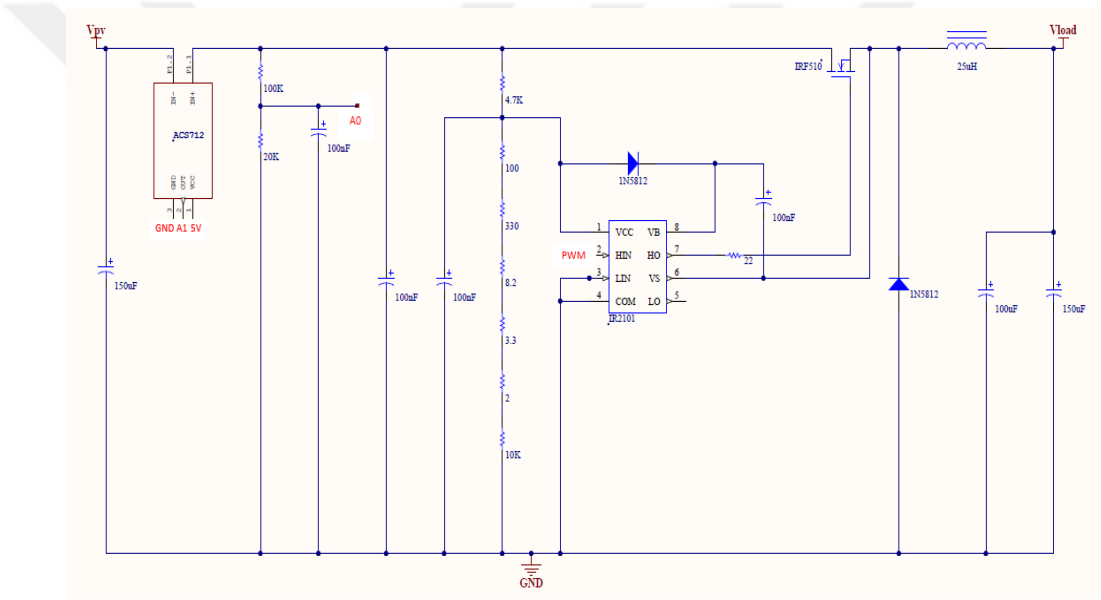


Şekil 4.22. 1000W/m^2-0 °C durumu için simülasyon sonuçları

5. MGN İZLEYİCİSİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

5.1. MGN İzleyicisi

MGN izleyicisinin şeması, Şekil 5.1'de gösterildiği gibi baskı devre kartları (PCB) elektronik tasarım yazılım paketi olan Altium Designer kullanılarak tasarlanmıştır. Tablo 5.1 MGN izleyicisi devresi için kullanılan farklı elektronik bileşenlerini göstermektedir.



Şekil 5.1. MGN izleyicisinin şeması

Tablo 5.1. MGN izleyicisinin elektronik bileşenleri

Devre tipi	Bileşenler	Sayı
Düşürü dönüştürücü devresi	Bobin	1×25µH
	Kondansatör	1×100µF, 2×150µF
	Diyot	1× 1N5812
	MOSFET	1× IRF510
MOSFET sürücü devresi	Entegre devre	1× IR2101
	Diyot	1×1N5812
	Kondansatör	3×0.1µF
	Direnç	1×4.7k, 1×100, 1×330, 1×8.2, 1×3.3, 1×2, 1×10k
Kontrol devresi	Akım algılayıcı	1×ACS712
	Gerilim algılayıcı	1×100k, 1×20k, 1×0.1µF
	Arduino analog giriş	A0, A1
	Arduino digital çıkış	PWM 9
	Besleme	5V

5.1.1. Düşürücü dönüştürücü devresi

Düşürücü dönüştürücü devresi Tablo 4.4 ve Tablo 5.1'de belirtilen bileşenlerin parametrelerine göre gerçekleştirilmiştir. MOSFET'in anahtarlama frekansı 20kHz, endüktans değeri 25µH, giriş kondansatörü 150µF ve çıkış kondansatörleri paralel olarak 150µF ve 100µF'dir. Şekil 5.2 düşürücü tip dönüştürücü devresinin pratik halini göstermektedir.



Şekil 5.2. Düşürücü dönüştürücü devresi

5.1.2. MOSFET sürücü devresi

Bir mikrodenetleyici tarafından üretilen PWM sinyalinin lojik “1” seviyesi 3,3V veya 5V değerlerinde olup, bu değerler bir MOSFET‘i iletime sokmak için yeterli değildir. MOSFET'i iletime sokmak için genellikle 8-12V gerekir. Bu amaçla, MOSFET sürücü entegre devresi kullanmak gereklidir. Bu çalışmada, IR2101 sürücü entegre devresi kullanılmıştır.

5.1.3. Arduino UNO

Arduino UNO, ATmega328 tabanlı bir mikrodenetleyici geliştirme kartıdır. Bu çalışma için gerekli PWM ve analog giriş donanımlarını içerir ve USB portu üzerinden programlanabilir. MGN izleyiciyisini gerçekleştirmek için kullanılan değiştir gözle algoritmasının Arduino kodu, tezin Ek-A kısmında verilmiştir. Arduino UNO'nun bazı özelliklerini Tablo 5.2’de verilmiştir.

Tablo 5.2. Arduino UNO’nun bazı özellikleri

Mikrodenetleyici	ATmega328
Çalışma gerilimi	5 V
Digital cıkış pinler	14 (6 PWM’lı çıkış)
Analog giriş pinler	6
Flaş bellek	32 KB
Saat hızı	16 MHz

5.1.4. ACS712 akım algılayıcısı

Bu çalışmada FV modül akımını ölçmek için ACS712 akım algılayıcısı kullanılmıştır. Mevcut akım sinyali Arduino'nun analog giriş portu üzerinden okunabilir. Algılayıcının üç temel özelliği, Tablo 5.2’de verilmiştir.

Tablo 5.3. ACS712 algılayıcının bazı özellikleri

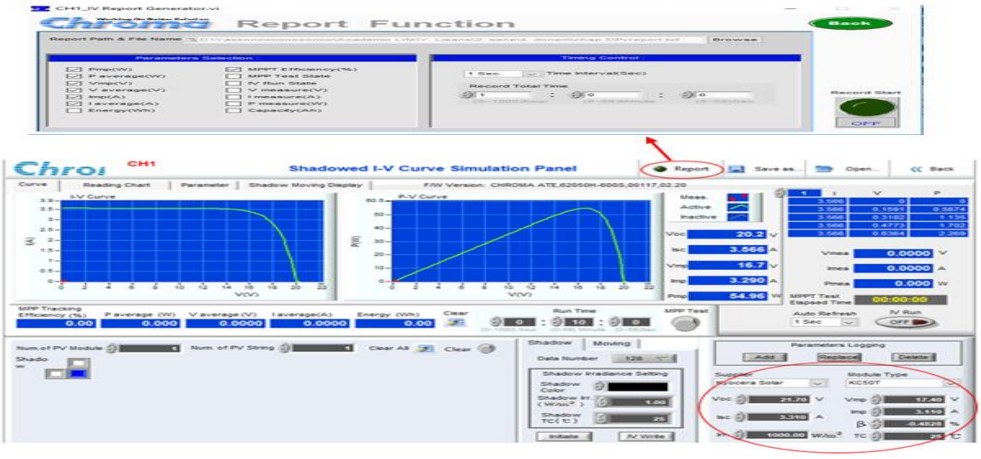
Besleme gerilimi	5 V
Çalışma akımı	5 A
Hassasiyet	185 mV/A

5.2. Güneş Dizi Simülatörü

Bu çalışmada, farklı senaryolar oluşturabilmek için, güneş simülatörü olarak, Şekil 5.3’te gösterilen Chroma 62050H programlanabilir DA güç kaynağı kullanılmıştır. Güneş simülatör programının ekran görüntüsü Şekil 5.4’te gösterilmektedir. Şekil 5.4’te gösterildiği gibi, program raporlama yapabilmektedir. Bu çalışmada, program içerisinde kayıtlı olan KYOCERA KC50T kodlu FV modül kullanılmıştır.



Şekil 5.3. Güneş dizi simülatörü



Şekil 5.4. Güneş dizi simulatörün arayüzeyi

5.3. FV Sistemin Deney Sonuçları

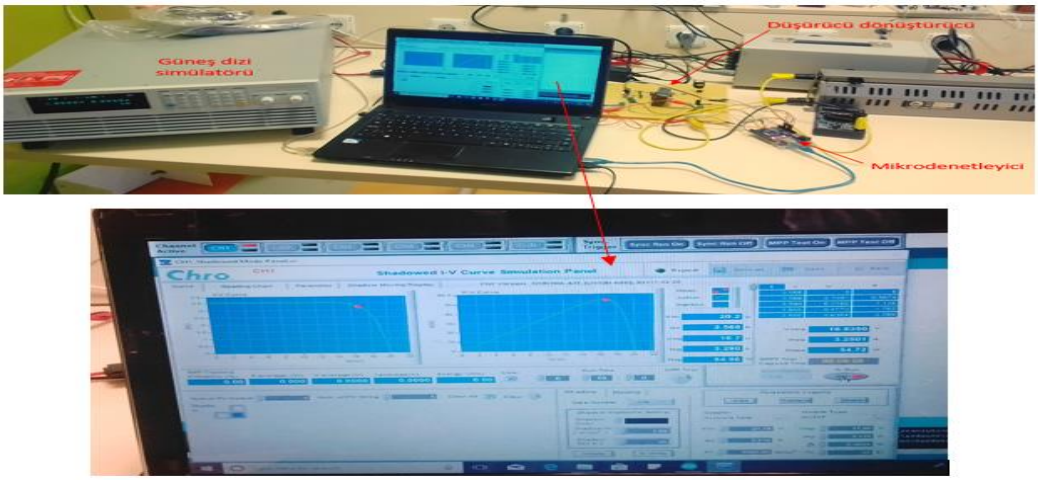
Test sistemin görüntüsü Şekil 5.5'te verilmiştir. Pratik çalışmada, güneş dizi simülatörü ile, beş farklı ışınım ve sıcaklık değerleri programlanarak MGN izleyicisinin çıkış parametreleri gözlenmiştir. Bilgisayarda yüklü olan güneş simülatör programının raporlama kısmını kullanarak her test koşulu için ortalama güç (P_{avg}) ve ortalama maksimum güç ($P_{MP,avg}$) çizilmiştir.

Ortalama maksimum güç, ortalama güç, ve MGN izleyicisinin verimliliği, Tablo 5.4'te verilmiştir. Bu ortalama değerler, 30 sn içinde alınan deneysel sonuçların ortalamasıdır.

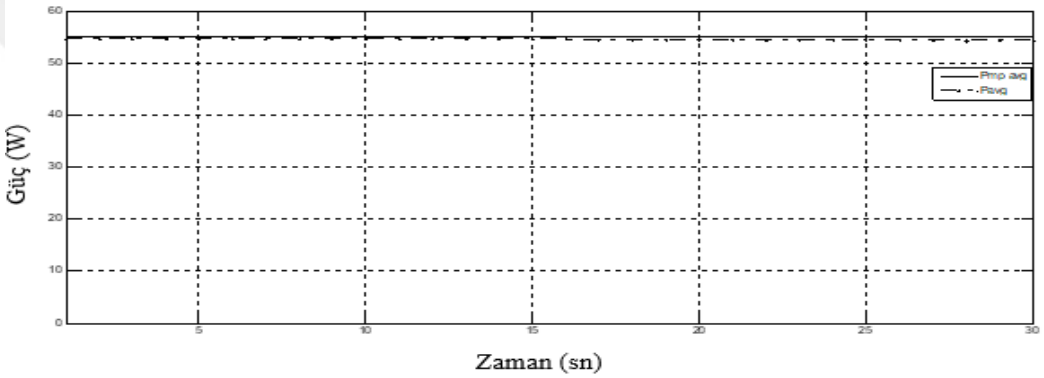
1. 1000W/m^2-25 °C: Sistem standart test koşulları ile çalışmaktadır. Sistemin ulaştığı maksimum ortalama güç yaklaşık 54,96 W ve ortalama güç 54,77 W olduğnu Şekil 5.6'da gösterilmektedir.

Tablo 5.4. MGN izleyicisinin deney sonuçları

G (W/m^2)	T (°C)	P_{avg} (W)	$P_{MP,avg}$ (W)	MGN izleyicisinin verimliliği (%)
1000	25	54.77	54.96	99.65
800	25	49.8	51	97.64
600	25	35.05	35.14	99.74
1000	50	48.92	50.63	96.62
1000	0	58.48	61.59	94.95

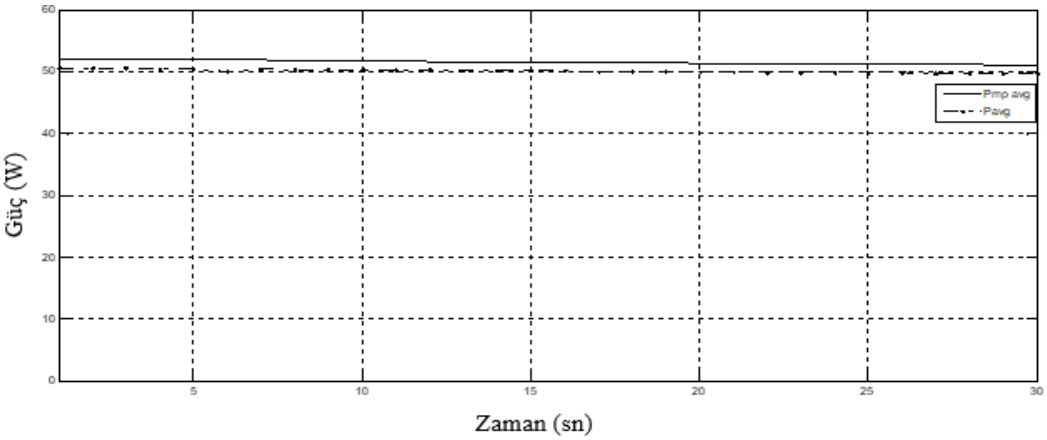


Şekil 5.5. Gerçekleştiren devrenin resmi



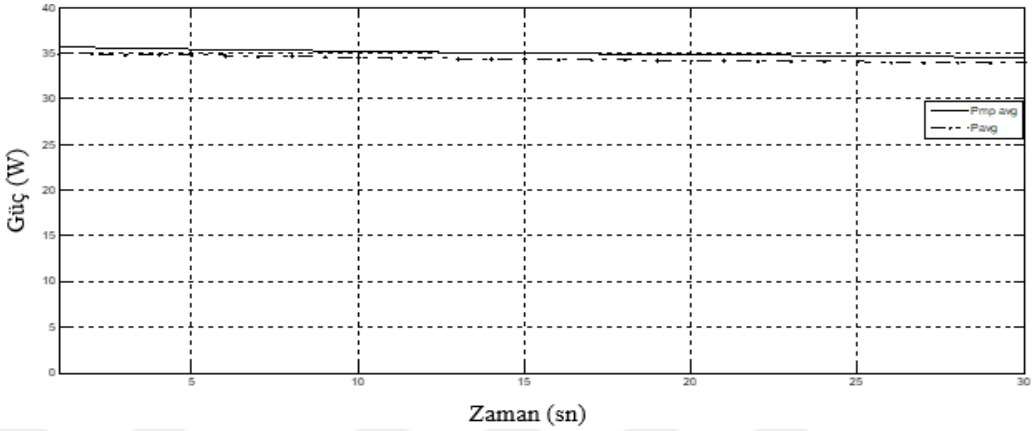
Şekil 5.6. 1000W/m^2-25 °C durumu için deneysel sonuçları

2. 800W/m^2-25 °C: Sistem standart nominal ışınım değerinden daha düşük değer ile çalışmaktadır. Sistemin ulaştığı maksimum ortalama güç yaklaşık 51W ve ortalama güç 49,8W olduğnu Şekil 5.7'de gösterilmektedir.



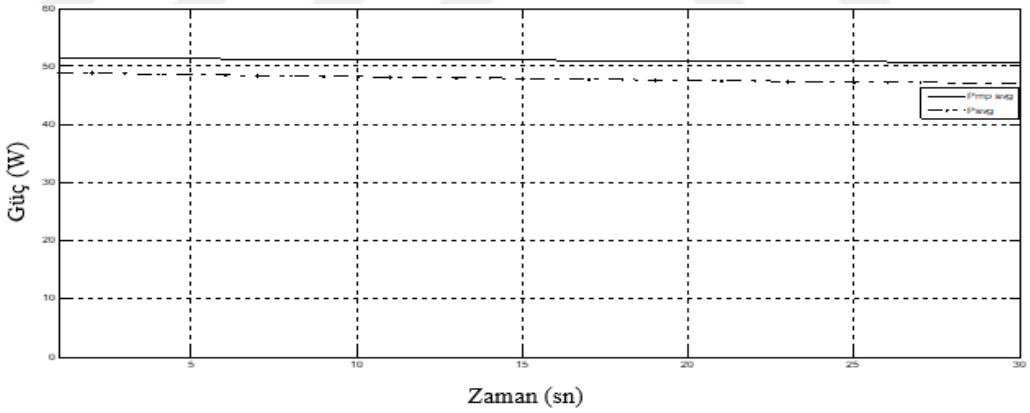
Şekil 5.7. 800W/m^2-25 °C durumu için deneysel sonuçları

3. 600W/m^2-25 °C: Sistem düşük ışınım değeri ile çalışmaktadır. Sistemin ulaştığı maksimum ortalama güç yaklaşık 35,74W ve ortalama güç 35,05W olduğunu Şekil 5.8'de gösterilmektedir.



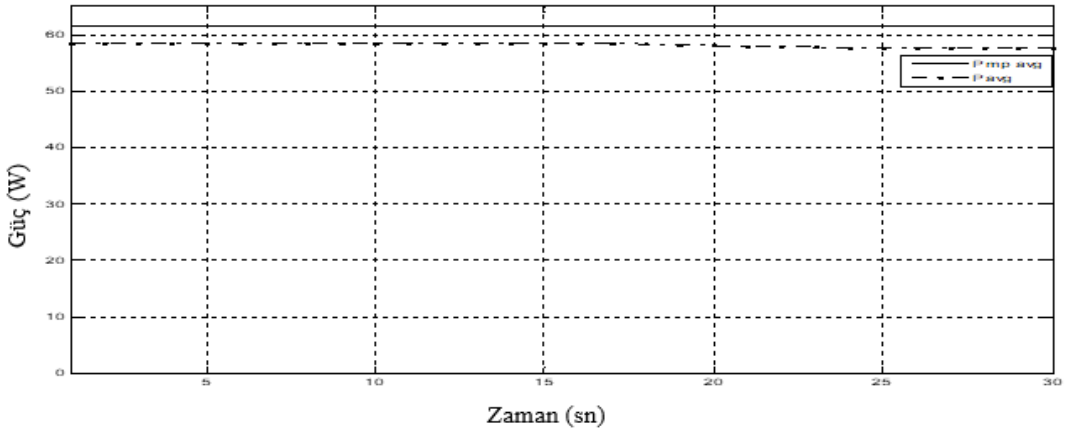
Şekil 5.8. 600W/m^2-25 °C durumu için deneysel sonuçları

4. 1000W/m^2-50 °C: Sistem yüksek sıcaklık değeri ile çalışmaktadır. Sistemin ulaştığı maksimum ortalama güç yaklaşık 50,63W ve ortalama güç 48,92W olduğnu Şekil 5.9'da gösterilmektedir.



Şekil 5.9. 1000W/m^2-50 °C durumu için deneysel sonuçları

5. 1000W/m^2-0 °C: Sistem düşük sıcaklık değeri ile çalışmaktadır. Sistemin ulaştığı maksimum ortalama güç yaklaşık 61,59 W ve ortalama güç 58,48 W olduğnu Şekil 5.10'da gösterilmektedir.



Şekil 5.10. 1000W/m^2-0 °C durumu için deneysel sonuçları

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, FV sistemin maksimum güç noktasında çalışmasını sağlayan bir MGN izleyicisi gerçekleştirilmiştir. Değiştir-gözle algoritması kullanan düşürücü dönüştürücüden oluşan MGN izleyicisinin farklı atmosferik koşulları için performansları belirlenmiştir.

Tezin dördüncü bölümünde önerilen FV sistemin MATLAB/SIMULINK modeli geliştirilmiş ve beş farklı ışınım ve sıcaklık seviyeleri için sistemin simülasyon sonuçları verilmiştir. Daha sonra tezin beşinci bölümünde önerilen FV sistemin uygulama devresi hakkinda bilgi verilmiştir. Gerçekleştiren devre, güneş dizi simülatörü kullanılarak beş değişik ışınım ve sıcaklık değerleri için test edilmiştir.

FV modül standart test koşulları ile çalıştığı durumunda, sistemin hem MATLAB'da hem deneysel çalışmada daha iyi verimli olduğunu gözlenmiştir. Işınımın sistemin gücü üzerindeki etkisini gözleyebilmek için nominal değerden daha düşük ışınım değerleriyle sistemin performansı izlenmiştir. Sıcaklığın etkisi ise nominal değerden daha yüksek ve daha düşük sıcaklık değerleriyle sistemin davranışları gözlenmiştir.

MATLAB simülasyonu ve pratik çalışma sonuçların beklenen değerler ile yakın olması çalışmanın başarısını göstermektedir.

Çalışmanın devamında gerçekleştiren düşürücü tip DA-DA dönüştürücü, literatürdeki diğer MGNİ algoritmaları kullanılarak test edilebilir. Ayrıca gerçekleştiren MGN izleyicisinin, parçalı gölgelenme durumları için performansları da izlenebilir.

KAYNAKLAR

[1] http:www.nrel.gov./pv/asstes/images/efficiency-chart.png (Ziyaret tarihi: 21-10-2017).

[2] Arnulf J., Waldau W., PV Status Report 2016, *JRC Science for Policy Report*, EUR 28159 EN, 11-50, 2016.

[3] Kofinas P., Dounis I., Papadakis G., Assimakopoulos N., An Intelligent MPPT Controller Based on Direct Neural Control for Partially Shaded PV System, *Energy and Buildings*, 2015, **90** (15), 51-64.

[4] Koutroulis E., Kalaitzakis K., Nicholas V., Development of a Microcontroller Based Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Control System, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2001, **16**(1), 46-54.

[5] Dylan L., Chuo H., Sathiakumar S., Agelidis G., A Buck Converter with Simple Maximum Power Point Tracking for Power Electronics Education on Solar Energy Systems, *Australasian Universities Power Engineering Conference*, Perth, Australia, 9-12 Decembre 2007.

[6] Choudhary D., Saxena R., DC-DC Buck-Converter for MPPT of PV System, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2014, **4**(7), 813-821.

[7] Attalah M., Abdelaziz Y., Jumah S., Implementation of Perturb and Observe MPPT of PV System with Direct Control Method using Buck and Buck-Boost Converters, *Emerging Trends in Electrical, Electronics & Instrumentation Engineering*, 2014, **1**(1), 31-44.

[8] Fathi A., Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Water Pumping System, Doctoral Dissertation, University of Bath, Bath, 2015.

[9] Pathare M., et al., Designing and Implementation of Maximum Power Point Tracking (MPPT) Solar Charge Controller, *International Conference on Nascent Technologies in the Engineering Field*, Navi Munbai, India, 27-28 Janvier 2017.

[10] Jasim A., Shepetov Y., Maximum Power Point Tracking for Satellite Solar Power Load Matching under Different Light Panels, *Current Journal of Applied Science and Technology*, 2017, **23**(1), 1-14.

[11] Lewis M.F., *Low-Cost Solar Electric Power*, Springer, Switzerland, 2014.

[12] Paul L., *Electricity from Sunlight: an Introduction to Photovoltaics*, 1st edition, Wiley, Chichester, 2010.

[13] http:www.enerji.gov.tr (Ziyaret tarihi: 16-07-2018).

[14] http:www.solargis.org (Ziyaret tarihi: 16-10-2017).

[15] Santoshi B., Topology Reconfiguration to Improve the Photovoltaic Array Performance, Master's Thesis, Arizona State University, Arizona, 2011.

[16] http:www.pveducation.com (Ziyaret tarihi: 15-10-2017).

[17] htttp:www.wikipedia.com/copper indium gallium selenide (Ziyaret tarihi: 18-10-2017).

[18] http:www.wikipedia.com/Dye sensitized cells (Ziyaret tarihi: 20-10-2017).

[19] Shengsheng H., Chuangwei P., He T., A Short Progress Report on High-Efficiency Perovskite Solar Cells, *Nanoscale Research Letters*, 2017, **12**(410), 2-8.

[20] Smetz A. et al., *Solar Energy: Fundamentals, Technology and Systems*, Delft University of Technology, Delft, 2014.

[21] Verma D., Nema S., Shandilya A. M., Dash S.K., Maximum Power Point Tracking (MPPT) Techniques: Recapitulation in Solar Photovoltaic Systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, **54**(16), 1018-1034.

[22] Faranda R., Leva S., Energy Comparison of MPPT Techniques for PV Systems, *WSEAS Transactions on Power Systems*, 2008, **3**(6), 446-455.

[24] Seyedmahmoudian M., Mohamadi A., Kumary S., Maung O., Stojcevski A., A Comparative Study on Procedure and State of the Art of Conventional Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic System, *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, 2014, **6**(5), 402-414.

[25] Ishaque K., Salam Z., Amjad M., Mekhilef S., An Improved Particle Swarm Optimization (PSO)–Based MPPT for PV with Reduced Steady-State Oscillation, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2012, **27**(8), 3627-3638.

[26] Sher et al., A New Sensorless Hybrid MPPT Algorithm Based on Fractional Short Circuit Current Measurement and P&O MPPT, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2015, **6**(4), 1426-1434.

[27] Zadeh A., Fuzzy Sets, *Information and Control*, 1965, **8**(3), 338-353.

[28] Takun P., Kaitwanidvilai S., Jettanasen C., Maximum Power Point Tracking using Fuzzy Logic Control for Photovoltaic Systems, *International Multiconference of Engineers and Computer Scientists*, Hong Kong, China, 16-18 March 2011.

[29] Mohamed H., Nassar A., Intelligent Algorithm for Maximum Power Tracking of Photovoltaic Energy System, *International Journal of Computer Applications*, 2015, **115**(20), 36-41.

[30] Mellit A., Kalogirou S., Hontoria L., Shaari S., Artificial Intelligence Techniques for Sizing Photovoltaic Systems: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, **13**(2), 406-419.

[31] Ocran T., Junyi C., Binggang C., Xinghua S., Artificial Neural Network Maximum Power Point Tracker for Solar Electric Vehicle, *Tsinghua Science and Technology*, 2005, **10**(2), 204-208.

[32] Mallika S., Saravanakumar R., Genetics Algorithm based MPPT Controller for Photovoltaic System, *International Electrical Engineering Journal*, 2013, **4**(4), 1159-1164.

[33] Hadji S., Gobert J., Krim F., Experimental Analysis of Genetic Algorithms based MPPT for PV systems, *International Renewable and Sustainable Energy Conference*, Ouarzazate, Morroco, 17-19 October 2014.

[34] Kumar A., Kumar A., Arora R., Overview of Genetic Algorithm Technique for Maximum Power Point Tracking (MPPT) of Solar PV System, *International Journal of Computer Applications*, 2015, **3**(3), 21-24.

[35] Messai A., Mellit A., Guessoum A., Kalogirou S., Maximum Power Point Tracking using a GA Optimized Fuzzy Logic Controller and its FPGA Implementation, *Solar Energy*, 2011, **85**(11) 265-277.

[36] Kennedy J., Eberhart R., Particle Swarm Optimization, *International Conference on Neural Network*, Perth, Australia, 27 Novembre-1 December 1995.

[37] Selvapriyanka P., Vijayakumar G., Particle Swarm Optimization Based MPPT for PV System under Partial Shading Conditions, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 2014, **3**(1), 856-861.

[38] Saravanan S., Babu R., Maximum Power Point Tracking Algorithms for Photovoltaic System – A review , *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, **57**(16), 192-204.

[39] Karamia N., Moubayed N., Outbib R., General Review and Classification of Different MPPT Techniques, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, **68**(17), 1-18.

[40] Muhammad R., *Power Electronics Handbook: Devices, Circuits, and Applications*, Third Edition, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2011.

[41] Mohan N., Undeland M., William P., *Power Electronics: Converters, Applications and Design*, Second Edition, John Wiley and Sons, New Jersey, 1995.

[42] Randall S., *Fundamentals of Power Electronics with Matlab*, Charles River Media, Massachusetts, 2007.

[43] Mendalek N., Al-Haddad K., Photovoltaic System Modeling and Simulation, *IEEE International Conference on Industrial Technology*, Toronto, Canada, 22-25 March 2017.

[44] Villalva M., Gazoli J., Filho E., Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2009, **24**(5), 1198-1208.

[45] Siddique H., Xu P., De Doncker R., Parameter Extraction Algorithm for One-Diode Model of PV Panels based on Datasheet Values, *IEEE International Conference on Clean Electrical Power*, Alghero, Italy, 11-13 June 2013.

[46] Ghani F., Duke M., Carson J., Numerical calculation of series and shunt resistances and diode quality factor of a photovoltaic cell using the Lambert W-function, *Solar Energy*, 2013, **91**, 422-431.

[47] Mouhadjer S., Chermitti A., Neçaibia A., Comprehensive and Field Study to Design a Buck Converter for Photovoltaic Systems, *Revue des Energies Renouvelables*, 2012, **15**(2), 321-330.

EKLER

Ek-A

Aşağıda kullanılan değiştir-gözle algoritmasının MATLAB kodu verilmiştir;

```
function D = POALGORITHM(V,I,Vold,Iold,Dold)
Dref=0.689; deltaD=0.001;
P= V*I;
Pold=Vold*Iold;
dV= V - Vold;
dP= P - Pold;
if dP/dV<0
   D =Dref+deltaD;
else
   D=Dref-deltaD;
end
if dP/dV>0
   D =Dref-deltaD;
else
   D =Dref+deltaD;
end
if dP/dV==0
   D=Dold;
end
end
```

Ek-B

Aşağıda MGN izleyicisinin ARDUINO kodu verilmiştir;

```
#include <TimerOne.h>
 int tempa=0;
 int tempv=0;
 double Vpv, Ipv, Ppv;
 double Vpv_old=0, Ppv_old=0;
 double dV, dP;
 int D, D_old=0;
 int D_ref=735.8, del_D=1;
 float suma =0;
 float sumv =0;
 float AMPS_SCALE =0;
 float VOLTS_SCALE =0;
void setup()
{
  pinMode(9, OUTPUT);
  Timer1.initialize(50);
  Timer1.pwm(9, D);
  Serial.begin(9600);
 for(int i = 0; i < 100; i++)   {
    tempa=analogRead(A1);
    tempv=analogRead(A0);
    suma += tempa;
    sumv += tempv;
    delayMicroseconds(50);
  }
   suma=suma/100;
   sumv=sumv/100;
  }
void readData() {
   AMPS_SCALE= 0.00488/ 0.185;
   Ipv = AMPS_SCALE* suma - 13.51;
   VOLTS_SCALE = 0.00498 * (120/20);
   Vpv = VOLTS_SCALE * sumv ;
   Ppv=Vpv*Ipv;
   }
void PO() {
  dV = Vpv - Vpv_old;
  dP = Ppv - Ppv_old;
  if (dP > 0.0) {
    if (dV > 0.0) {
      D = D_ref + del_D;
    }
    else {
      D = D_ref - del_D;
```

```
    }
   }
   else {
    if (dV > 0.0) {
     D = D_ref - del_D;
    }
    else {
     D = D_ref + del_D;
    }
   }
}
void pwmDuty() {
  if (D > 900 || D < 100) {
    D = D_old;
  }
  Timer1.pwm(9, D);
}
void saveData() {
  D_old = D;
  Vpv_old = Vpv;
  Ppv_old = Ppv;
  }
void loop()
{
  readData();
  PO();
  pwmDuty();
  saveData();
}
```

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Mohamed A. Y., Bekir Ç., Mehmet Z. B., Tarık E., Abdulvehhap K., Design and Simulation of a Maximum Power Point Tracker Using Buck Converter for Photovoltaic System, *International Renewable Energy and Energy Efficiency Congress*, Şanlıurfa, 10-12 May 2018.

Mohamed A. Y., Bekir Ç., Accurate Modeling for Photovoltaic Modules, *International Congress on Engineering and Life Science*, Kastamonu, 26-29 April 2018.

ÖZGEÇMİŞ

1990 yılında N'guigmi'de (Nijer) doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimi Agadez'de tamamladı. 2011 yılında girdiği Maradi Üniversitesi Teknoloji Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Bölümü'nden 2013 yılında mezun oldu. 2014 yılında SONİCHAR kömürlü termik santralinde çalıştı. 2015 yılında Türkçe hazırlık eğitiminden sonra 2016 yılında Kocaeli Ünivertesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı.