T.C.

AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ

PV SİSTEMLERDE ANLIK BOBİN AKIMININ ANALİZİ İLE YENİ BİR MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI İZLEME YÖNTEMİ VE UYGULAMASI

Nihal ÇETİN ACAR

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDSİLİĞİ

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

MAYIS 2024

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ

PV SİSTEMLERDE ANLIK BOBİN AKIMININ ANALİZİ İLE YENİ BİR MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI İZLEME YÖNTEMİ VE UYGULAMASI

Nihal ÇETİN ACAR

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDSİLİĞİ

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

MAYIS 2024

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PV SİSTEMLERDE ANLIK BOBİN AKIMININ ANALİZİ İLE YENİ BİR MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI İZLEME YÖNTEMİ VE UYGULAMASI

Nihal ÇETİN ACAR

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDSİLİĞİ

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

MAYIS 2024

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PV SİSTEMLERDE ANLIK BOBİN AKIMININ ANALİZİ İLE YENİ BİR MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI İZLEME YÖNTEMİ VE UYGULAMASI

Nihal ÇETİN ACAR

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDSİLİĞİ

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

Bu tez 31/05/2024 tarihinde jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Selim BÖREKCİ
Prof. Dr. Ali KIRÇAY
Prof. Dr. S. Cumhur BAŞARAN
Prof. Dr. Şükrü ÖZEN
Dr. Öğr.Üyesi Yusuf ÖZTÜRK

ÖZET

PV SİSTEMLERDE ANLIK BOBİN AKIMININ ANALİZİ İLE YENİ BİR MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI İZLEME YÖNTEMİ VE UYGULAMASI

Nihal ÇETİN ACAR

Doktora Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Selim BÖREKCİ

Mayıs 2024; 71 sayfa

Son yıllarda dünyada giderek artan teknolojik gelişmeler ve sanayi üretimine bağlı olarak enerji tüketimi de artmaktadır. Artan enerji talebi karşısında alternatif ve sürdürülebilir enerji kaynaklarının kullanımı da önem kazanmaktadır. Özellikle fosil yakıtların kullanım kapasitelerinin kısıtlı olması ve kullanımı sonucu olumsuz çevresel etkilerin oluşması, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan talebi arttırmıştır. Güneş enerjisi, kaynağının sınırsız olması ve olumsuz çevresel etkilerinin oldukça az olması gibi avantajları sayesinde, günümüzde yaygın olarak kullanılan yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının potansiyelleri atmosferik koşullara bağlı olarak değiştiğinden kontrol edilmesi ve verimli kullanımı oldukça önemlidir. Özellikle güneş paneli sistemlerinde sıcaklık, ışınım, nem gibi ortam koşulları çalışma verimini doğrudan etkilemektedir. Dünya üzerinde belli alanlarda güneşlenme süresi her ne kadar istatiksel olarak belli olsa da anlık değişimler güneş paneli sitemlerinin çıkış gücünü oldukça fazla etkilemektedir. Güneş paneli sistemlerinde, ortam koşullarında mümkün olan en yüksek gücü elde etmek için Maksimum Güç Noktası İzleme (MGNİ) sistemleri geliştirilmiştir.

Bu tez çalışmasında da değişen çalışma ortamı koşulları altında güneş paneli sisteminden mümkün olan en yüksek gücün elde edilmesi için bir MGNİ yöntemi geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntem de maksimum güç noktası (MGN) tespiti panelin çalışma akım ve geriliminin anlık ölçüm verileri ile yapılmaktadır. Tasarlanan MGNİ sistemini literatürdeki mevcut ölçüme dayalı yöntemlerden ayıran özelliği fotovoltaik (PV) panel I-V değerleri ölçümünün bobin akımının anlık değişiminin analizi ile yapılmasıdır. Bu çalışma kapsamında geliştirilen sistem 40 W'lık bir güneş paneli, STMF32F407 kontrolcü, güç dönüştürücü devre ve yük bileşenlerinden oluşmaktadır. Sistemin güç dönüştürücü kısmında; panel gücüne uygun olarak basit yapılı ve bobin ile ölçüm yönteminin uygulanmasına elverişli bir interleaved boost dönüştürcü tercih edilmiştir.

Geliştirilen MGNİ yöntemi ölçüme dayalı olduğundan PV panel akım ve gerilimi anlık olarak ölçülerek, PV panel gücü takip edilmektedir. PV panel gücünde %5'lik bir değişim olması durumunda PV panel I-V değerleri ölçülerek yeni MGN tespit edilir. Bu MGN'na uygun olarak devrenin anahtarlama frekansı belirlenir. Anahtarlama frekansı tespit edilen MGN'na uygun olarak değişirken, anahtar görev oranları sabit 0.5 olarak kalmaktadır.

Geliştirilen yöntemin MGN tespitindeki doğruluk oranı deneysel çalışma ile kontrol edilmiştir. Deneysel çalışmada ışınım miktarı kademeli olarak değiştirilerek sistemin tespit ettiği MGN ile olması gereken MGN karşılaştırılmıştır. Sistemin bulduğu ve olması gereken güç değerleri birbirine oldukça yakın olup ve yöntemin doğruluğu %96.4 olarak hesap edilmiştir. Geliştirilen yöntemde, MGN hesaplama veya varsayım sonucu yaklaşık olarak değil, ölçüm sonucu direkt olarak elde edildiğinden yüksek doğruluk ile MGNİ sağlanmaktadır. Ayrıca, geliştirilen yöntemin devre tasarımı ve kontrol algoritması oldukça sade ve kolay uygulanabilir yapıdadır.

ANAHTAR KELİMELER: DC-DC Dönüştürücü, I-V Karakteristiği, MGNİ, PV Panel.

JÜRİ: Prof. Dr. Selim BÖREKCİ

Prof. Dr. Ali KIRÇAY

Prof. Dr. S. Cumhur BAŞARAN

Prof. Dr. Şükrü ÖZEN

Dr. Öğr.Üyesi Yusuf ÖZTÜRK

ABSTRACT

A NEW MAXIMUM POWER POINT TRACKİNG METHOD AND ITS APPLICATION IN PV SYSTEMS BASED ON INDUCTOR CURRENT TRANSIENT ANALYSIS

Nihal ÇETİN ACAR

PhD Thesis in Electrical-Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Selim BOREKCİ

May 2024; 71 pages

In recent years, energy consumption has been increasing due to increasing technological developments and industrial production in the world. In the face of increasing energy demand, the use of alternative and sustainable energy sources is also gaining importance. In particular, the limited utilization capacity of fossil fuels and the negative environmental impacts resulting from their use have increased the demand for renewable energy sources. Solar energy is one of the widely used renewable energy sources today, thanks to its advantages such as its unlimited resource and its very low negative environmental impacts.

Since the potential of renewable energy sources varies depending on atmospheric conditions, it is very important to control and use them efficiently. Especially in solar panel systems, ambient conditions such as temperature, radiation and humidity directly affect the operating efficiency. Although the sunshine duration in certain areas of the world is statistically certain, instantaneous changes affect the output power of solar panel systems considerably. In solar panel systems, Maximum Power Point Tracking (MPPT) systems have been developed to obtain the highest possible power under ambient conditions.

In this thesis, a MPPT method is developed to obtain the highest possible power from the solar panel system under varying operating environment conditions. In the developed method, MPP detection is performed with the instantaneous measurement data of the operating current and voltage of the panel. The feature that distinguishes the designed MPPT system from the existing measurement-based methods in the literature is that the panel I-V values are measured by analyzing the instantaneous change of the inductor current. The system developed in this study consists of a 40 W solar panel, STMF32F407 controller, power converter circuit and load. In the power converter part of the system, an interleaved boost converter, which has a simple structure and the inductor measurement method is easily applicable, is preferred in accordance with the panel power.

Since the developed MPPT method is measurement-based, panel current and voltage are measured instantaneously and panel power is monitored. In case of a 5% change in panel power, panel I-V values are measured and a new MPP is determined. In accordance with this new MPP, the switching frequency of the circuit is determined.

While the switching frequency changes according to the detected MPP, the switch duty ratio remains constant 0.5.

The accuracy of the developed method in MPP detection is checked with an experimental study. In the experimental study, the irradiance is changed gradually and the MPP detected by the system is compared with the MPP that should be detected. The power values found by the system and the required power values are very close to each other and the accuracy of the method is calculated as 96.4%. In the developed method, since the MPP is obtained directly as a result of measurement, MGNI is provided with high accuracy. In addition, the circuit design and control algorithm of the developed method are very simple and easy to implement.

KEYWORDS: DC-DC Converter, I-V Characteristics, MPPT, PV Panel.

COMMITTEE: Prof. Dr. Selim BÖREKCİ

Prof. Dr. Ali KIRÇAY

Prof. Dr. S. Cumhur BAŞARAN

Prof. Dr. Şükrü ÖZEN

Dr. Öğr. Üyesi Yusuf ÖZTÜRK

ÖNSÖZ

Lisansüstü eğitimim boyunca yardımlarını ve destekleri ile her zaman yanımda olan, bilgi ve tecrübesi ile yolumu aydınlatan ve beni cesaretlendiren sayın hocam Prof. Dr. Selim BÖREKCİ'ye teşekkürlerimi sunarım. Tez izleme süreci boyunca yapıcı yorumları ve önerileri ile çalışmama olumlu katkılarından dolayı Prof.Dr Ali KIRÇAY ve Pof. Dr. S. Cumhur BAŞARAN hocalarıma teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Deneysel çalışmalar sırasında her türlü yardımı benden esirgemeyen ve destek olan doktora öğrencisi arkadaşlarım Alper ÇANDIR ve H. İbrahim AYTEKİN'e teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim ve çalışma hayatım da maddi ve manevi desteğini her zaman hissettiğim eşim Hasan Ali ACAR'a, zorlandığım süreçlerde yüzümü güldüren canım oğlum Mert ACAR'a ve desteğini her zaman hissettiğim aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET i
ABSTRACT iii
AKADEMİK BEYAN viii
SİMGELER VE KISALTMALAR ix
ŞEKİLLER DİZİNİ xii
ÇİZELGELER DİZİNİ xv
1. GİRİŞ 1
2. KAYNAK TARAMASI 4
2.1 Fotovoltaik Sistemler 4
2.1.1 Fotovoltaik Hücre Yapısı 4
2.1.2 Fotovoltaik Hücrenin Elektriksel Karakteristiği 5
2.1.3 Fotovoltaik Hücrede Işınım ve Sıcaklık Etkisi 6
2.1.4 Fotovoltaik Paneller 8
2.2 PV Panel I-V Eğrisi Ölçüm Yöntemleri 9
2.2.1 Ayarlı Direnç ile I-V Eğrisi Ölçüm Yöntemi 10
2.2.2 Kondansatör ile I-V Eğrisi Ölçüm Yöntemi 10
2.2.3 Elektronik Yük İle I-V Eğrisi Ölçüm Yöntemi 11
2.3 Fotovoltaik Güç Sistemleri 12
2.2.1 Klasik MGNİ Yöntemleri 14
2.2.2 Yapay Zeka Tabanlı MGNİ Yöntemleri 20
2.2.3 Hibrit MGNİ Yöntemleri 21
2.2.4 MGNİ Yöntemlerinin Karşılaştırılması 22
2.4 MGNİ Sistemlerinde Kullanılan DC-DC Dönüştürücü Devreler 22
2.4.1 Buck Dönüştürücü 24
2.4.2 Buck-Boost Dönüştürücü 25
2.4.3 SEPIC Dönüştürücü 27
2.4.4 Cuk Dönüştürücü 27
2.4.5 Boost Dönüştürücü 28
3. MATERYAL VE METOT 31
3.1 Bobin ile Güneş Paneli I-V Eğrisi Ölçümü 32
3.2 Interleaved Boost Dönüştürücü Matematiksel Analizi 34

3.3 Interleaved Boost Dönüştürücünün Benzetim Çalışması 37
3.4 Prototip Devre Tasarımı 39
3.4.1 Bobin Tasarımı 40
3.4.2 Yarıiletkenler ve Anahtar Sürücü Seçimi 41
3.4.2 Akım ve Gerilim Ölçümleri 42
3.5 Geliştirilen MGNİ Algoritması 44
4. BULGULAR VE TARTIŞMA 48
5. SONUÇLAR 54
6. KAYNAKLAR 56
7. EKLER 61
ÖZGEÇMİŞ

AKADEMİK BEYAN

Doktora Tezi olarak sunduğum "Bobin Yüklü I-V Eğrisi Ölçüm Yöntemi ile Maksimum Güç Noktası Tespiti" adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

31/05/2024

Nihal ÇETİN ACAR

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

I_{PV} : PV panel akımı (A)

V_{PV} : PV panel gerilimi (V)

I_{MGN} : Maksimum güç noktasındaki akım

V_{MGN} : Maksimum güç noktasındaki gerilim

I_D : Diyot akımı (A)

I_{ph} : Foton akımı (A)

I_0 : Diyot sızıntı akımı (A)

V_D : Diyot gerilimi (V)

V_T : Termal gerilim (V)

q : Elektron yükü

k : Boltzman sabiti

n : Diyot ideallik faktörü

R_{sh} : Diyot şönt direnci (Ω)

R_s : Diyot seri direnci (Ω)

I_{sc} : PV panel kısa devre akımı (A)

V_{oc} : PV panel açık devre gerilimi (V)

G : Işınım miktarı (W/m^2)

T : Sıcaklık (°C)

$R_{s,panel}$: PV panel seri direnci (Ω)

$R_{sh,panel}$: PV panel şönt direnci (Ω)

N_p : PV paralel bağlı hücre sayısı

N_s : Seri bağlı hücre sayısı

C : Kapasite değeri

L : Bobin değeri

T_{sweep} : Test süresi

I_{ref} : Referans akım değeri (A)

K : Sabit

V_{ref} : Referans gerilim değeri (V)

α : Tek diyot modeli katsayısı

γ : Tek diyot modeli katsayısı

β : Tek diyot modeli katsayısı

V_{in} : Giriş gerilimi (V)

V_o : Çıkış gerilimi (V)

I_{in} : Giriş akımı (A)

I_o : Çıkış akımı (A)

R_{in} : Giriş direnci (Ω)

R_o : Çıkış Direnci (Ω)

$R_{yük}$: Yük direnci (Ω)

R_{mgn} : Maksimum güç noktası direnci (Ω)

D : Anahtar görev süresi

A : İdeallik faktörü

t_{test} : Test süresi (s)

c : İntegral katsayısı

L_{1ort} : Dönüştürücü devre bobini ortalama değeri (H)

I_{max} : Maksimum akım (A)

ΔI_L : Bobin akımındaki değişim miktarı (A)

L_{1min} : Dönüştürücü devre bobini minimum değeri (H)

$I_{L1ort\text{-}krtk}$: Kritik mod ortalama bobin akımı (A)

f_s : Anahtarlama frekansı (Hz)

f_{MGN} : Maksimum güç noktasındaki anahtarlama frekansı (Hz)

ΔI_{max} : Akımdaki maksimum değişim miktarı (A)

L_{krtk} : Kritik mod çalışma için bobin değeri (H)

C_o : Çıkış kondansatörü (F)

ΔV_o : Çıkış gerilimindeki dalgalanma miktarı (V)

ΔP : Güçteki değişim miktarı (W)

μ_i : Göreceli geçirgenlik

A_L : Nüve endüktans faktörü (H)

l_e : Nüve etkin uzunluğu (mm)

A_{min} : Nüve kesit alanı (mm^2)

V_e : Nüvenin etkin hacmi (mm^3)

B_{sat} : Maksimum akı yoğunluğu (T)

N : Nüve sarım sayısı

Kısaltmalar

AC : Alternatif Akım

CRCM: Critical Conduction Mode

DC : Doğru Akım

DCM : Discontinuous Conduction Mode

ESR : Equivalent Series Resistor

PV : Fotovoltaik

MGN : Maksimum Güç Noktası

MGNİ : Maksimum Güç Noktası İzleme

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1: Fotovoltaik hücre yapısı 4
Şekil 2.2: Fotovoltaik hücre tek diyot modeli 5
Şekil 2.3. a) Fotovoltaik hücre I-V karakteristiği **b)** Fotovoltaik hücre P-V grafiği 6
Şekil 2.4: Işınım miktarındaki değişimin hücre akım ve gerilimine etkisi 7
Şekil 2.5 : Sıcaklık değişiminin hücre akım ve gerilimine etkisi. 7
Şekil 2.6. a) Seri bağlı PV hücre dizisi **b)** Paralel bağlı PV hücre dizisi 8
Şekil 2.7. a) Ayarlı direnç ile PV panel I-V eğrisi ölçüm devresi **b)** Ayarlı direnç ile elde edilen PV panel I-V eğrisi 10
Şekil 2.8: Kondansatör ile PV panel I-V eğrisi ölçüm devresi 11
Şekil 2.9. a) Elektronik yük ile PV panel I-V eğrisi ölçüm devresi **b)** Elektronik yük ile ölçülen PV panel I-V eğrisi 12
Şekil 2.10: PV sistem temel yapısı 12
Şekil 2.11. a) Değişken dirençyüklü PV panel **b)** PV panel I-V eğrisinin çıkış yüküne göre değişim grafiği 13
Şekil 2.12: Kısmi gölgelenme durumunda PV panel MGN değişim grafiği 14
Şekil 2.13: Oransal kısa devre akımı ile MGNİ yöntemi algoritması 15
Şekil 2.14: Oransal devre gerilimi ile MGNİ yöntemi algoritması 16
Şekil 2.15: Eğri uydurma yöntemi ile MGNİ yöntemi grafiksel gösterimi 16
Şekil 2.16: Değiştir ve gözlemle yöntemi algoritması 18
Şekil 2.17: Artımsal iletlenlik yönteminde kullanılan PV panel P-V ve türevlerinin değişim grafiği 19
Şekil 2.18: Yapay sinir ağları temsili gösterimi 20
Şekil 2.19: Bulanık mantık sistemi blok diyagramı 21
Şekil 2.20: PV panel empedansının çalışma akım ve gerilime bağlı olarak değişimi grafiği 23
Şekil 2.21: PV sistemlerin farklı yükler ile kullanımı 23
Şekil 2.22: DC-dc dönüştürücü devresi temel yapısı 24
Şekil 2.23: Buck dönüştürücü devresi 24
Şekil 2.24: PV panel I-V eğrisi üzerindeki Buck dönüştürücü çalışma bölgesi grafiği . 25
Şekil 2.25: Buck-Boost dönüştürücü devresi 26
Şekil 2.26: PV panel I-V eğrisi üzerindeki Buck-Boost dönüştürücü çalışma bölgesi grafiği 26
Şekil 2.27: SEPIC dönüştürücü devresi 27
Şekil 2.28: Cuk dönüştürücü devresi 27
Şekil 2.29: Boost dönüştürücü devresi 28
Şekil 2.30: PV panel I-V eğrisi üzerindeki Boost dönüştürücü çalışma bölgesi grafiği 29
Şekil 2.31: Interleaved Boost Dönüştürücü Devre Yapısı 29

Şekil 2.32: a) Klasik boost dönüştürücü ile PV akımı dalgalanmasına bağlı olarak gerçekleşen güç değişimi b) Interleaved boost dönüştürücü ile PV akımı dalgalanmasına bağlı olarak gerçekleşen güç değişimi (Çandır ve Börekci, 2024). 30
Şekil 3.1: Tasarlanan MGNİ Sistemin Temel Yapısı 31
Şekil 3.2: Bobin Yüklü I-V Eğrisi Ölçüm Devresi 32
Şekil 3.3: Interleaved Boost Dönüştürücü Devre Yapısı 34
Şekil 3.4. Çalışma moduna göre interleaved boost dönüştürücünün bobin akımı dalga şekilleri. 35
Şekil 3.5: PV panel ve interleaved boost devrenin simülasyon modeli 38
Şekil 3.6: L_1 ve L_2 bobinlerinin akım dalga şekli 38
Şekil 3.7: Giriş ve çıkış gerilimleri dalga şekli 39
Şekil 3.8: Giriş ve çıkış akımları dalga şekli 39
Şekil 3.9: E4215 nüve ölçüleri(mm) 40
Şekil 3.10: a) Tasarlanan hava aralıklı manyetik bobinbobin **b)** Orta kısmı hava aralıklı manyetik nüve çifti 41
Şekil 3.11: IR2184 MOSFET sürücü uygulama devresi 42
Şekil 3.12: Gerilim ölçümü için uygulanan gerilim bölücü devre 43
Şekil 3.13. a) INA169 Akım sensör modülü **b)** INA169 akım sensörü uygulama devresi 43
Şekil 3.14: Kritik mod çalışmada interleaved boost dönüştürücü L_1 bobininin akım dalga şekli 44
Şekil 3.15: Anahtar iletim süresi arttırıldığında elde edilen bobin akımı dalga şekli 45
Şekil 3.16: Dönüştürücü devre bobin akımının örneklenmesi ve MGN tespitinin temsili grafiği 46
Şekil 3.17: Geliştirilen MGNİ Yönteminin Algoritması 47
Şekil 4.1: Geliştirilen yöntemin uygulanması için oluşturulan deney düzeneği 48
Şekil 4.2: 1000 W/m^2 ışımada ölçülen akım ve gerilim dalga şekilleri. 49
Şekil 4.3: a) 1000 W/m^2 ışınımdaki panel I-V eğrisi **b)** 1000 W/m^2 ışınımdaki panel P-V eğrisi 49
Şekil 4.4: 700 W/m^2 ışımada ölçülen akım ve gerilim dalga şekilleri. 50
Şekil 4.5: a) 700 W/m^2 ışınımdaki PV panel I-V eğrisi **b)** 700 W/m^2 ışınımdaki PV panel P-V eğrisi 50
Şekil 4.6: 500 W/m^2 ışımada ölçülen akım ve gerilim dalga şekilleri. 51
Şekil 4.7: a) 500 W/m^2 ışınımdaki PV panel I-V eğrisi **b)** 500 W/m^2 ışınımdaki PV panel P-V eğrisi 51
Şekil 4.8: 300 W/m^2 ışımada ölçülen akım ve gerilim dalga şekilleri. 52
Şekil 4.9: a) 300 W/m^2 ışınımdaki PV panel I-V eğrisi **b)** 300 W/m^2 ışınımdaki PV panel P-V eğrisi 52

Şekil 4.10: 3 kHz anahtarlama frekansında bobin akımı ve kontrol sinyal dalga şekilleri 53

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. MGNİ yöntemlerinin karşılaştırılması 22
Çizelge 3.1. Kullanılan PV Panel Özellikleri 37
Çizelge 3.2. Tasarlanan devre parametreleri 37
Çizelge 3.3. E4215 Manyetik Nüve Katalog Verileri..... 40
Çizelge 5.1. Deneysel çalışma ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması..... 55

1. GİRİŞ

Dünya genelinde, fosil yakıt rezervlerinin azalması ve bu yakıtların olumsuz çevresel etkilerinden dolayı güneş enerjisi, rüzgar, bio-yakıt gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına olan talep günden güne artmaktadır. Yenilenebilir enerji üretiminde, düşük bakım ve işletim maliyetleri, kaynağının sınırsız olması gibi avantajlarından dolayı en fazla tercih edilen enerji kaynağı güneş enerjisidir. Üretim teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak ilk yatırım maliyetlerinin de azalması ile dünya genelinde güneşten elde edilen elektrik enerjisi miktarı her geçen yıl daha fazla artış göstermektedir. Ülkemizin de iklimsel özellikleri ve mevsimler içindeki güneşlenme süreleri göz önüne alındığında, güneş enerjisi üretme potansiyelinin oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Bütün bu etkenler göz önüne alındığında gelecek yıllarda ülkemiz ve dünya genelinde güneşten elektrik enerjisi üretim miktarı daha da artacaktır.

Güneş enerjisi, güneş hücreleri ile elektrik enerjisine dönüştürülür. Güneş pili veya güneş hücresi, foton enerjisini doğrudan elektrik akımına dönüştüren (fotovoltaik) bir araçtır. Bu sebeple hücrenin elektrik üretebilmesi için gün ışığına ihtiyaç vardır. Çok sayıda güneş pilinin seri veya paralel bağlanmasıyla yüksek güçlü güneş panelleri oluşturulmaktadır. Güneş paneli üretimi alanındaki teknolojik gelişmeler günümüzde oldukça ilerleme kaydetmiş olup bir çok farklı malzeme ile farklı özelliklere sahip PV paneller üretilerek güneşten daha yüksek verim elde edilmesi amaçlanmıştır. Ancak panellerden alınan verim hala oldukça düşüktür. PV panellerden elde edilen elektrik enerjisi büyük oranda güneş ışınımına bağlıdır. Bununla birlikte sıcaklık, nem, gölgelenme gibi çevresel etkiler, elektriksel yük durumu, PV panel kalitesi gibi yan etkiler de PV panelden elde edilen enerji miktarını etkilemektedir. Bu etkiler arasında ışınım miktarı, sıcaklık ve yük durumu PV panelin elektriksel özellikleri üzerinde en etkili olan faktörlerdir. Güneş ışınımının gün içinde dünyanın hareketi ile güneşe göre koordinatları ve hava koşullarının değişmesi panelin çalışma koşullarını etkilemektedir. Farklı çevresel koşullar ve elektriksel yük durumu karşısında güneş panelinin çalışma noktasındaki değişim çıkışta alınan güç miktarını etkilemektedir. Bu nedenle özellikle farklı çalışma koşulları altında, PV panelden mümkün olan maksimum gücün alınabilmesi için bir çok yöntem geliştirilmektedir. Bu çalışmalar genel olarak maksimum güç noktası izleme(MGNİ) teknikleri olarak adlandırılmaktadır. Maksimum güç noktası izleme amacıyla çok fazla sayıda çalışma yapılmış olup farklı türde teknikler geliştirilmiştir. Genel olarak geliştirilen bu teknikler klasik yöntemler, yapay zeka tabanlı yöntemler ve hibrit yöntemler olmak üzere üç farklı sınıfa ayrılmaktadır.

Klasik yöntemlerde MGN tespit edilirken PV panelin elektrik özellikleri doğrudan ve dolaylı olarak tespit edilir ve buna göre çalışma noktası belirlenir. Dolaylı yöntemlerde panellerin veri sayfalarındaki test eğrileri dikkate alınarak yaklaşık maksimum çalışma noktası hesaplanır. Hesap edilen değerlere göre panel çıkışındaki dönüştürücü devrenin kontrolü yapılır. Ancak bu veri sayfalarında PV panellerin sadece belirli koşullar altındaki elektriksel özellikleri ve test sonuçları verilmektedir. Güneş panelleri açık alanda kullanılan malzemeler olduğundan kirlilik, gölgelenme, yaşlanma, yağış gibi birçok çevresel faktör çalışma koşullarını ve elektriksel özelliklerini etkilemektedir. Bu sebeple belli bir koşuldaki çalışma anında, akım-gerilim ilişkisinden yola çıkılarak MGNİ yapılması doğru sonuca ulaşmak açısından önemlidir.

Doğrudan yöntemlerde ise PV panelin çalışma akım ve gerilimleri belli aralıklar ile ölçülerek gerçek değerlere göre dönüştürücü devre kontrolü yapılır. Bu sebeple bu yöntemler doğrudan denetimli yöntemler olarak adlandırılır. Doğrudan denetimli yöntemlerde PV panel çalışma akım ve gerilimlerinin ölçümü panel çıkışına bağlanan bir kondansatör, ayarlı direnç veya elektronik yük vasıtası ile yapılmaktadır. Bu yöntemler arasından kondansatör ile ölçüm yöntemi diğer yöntemlere göre daha basit, ucuz, güvenilir ve hızlı olduğu için yaygın olarak tercih edilmektedir. Ancak kondansatörün ESR etkisi, şarj-deşarj durumundan kaynaklı kullanım ömrünün azalması, kondansatörü deşarj edebilmek için yardımcı bileşene ihtiyaç duyulması ve ölçüm sırasında panelden yüke güç aktarımın kesilmesi gibi dezavantajları da bulunmaktadır. PV panelin çalışma akım ve geriliminin ölçülmesinde kondansatör yerine bobin kullanılmasının bu dezavantajları büyük ölçüde azaltmaktadır. Çalışma akım ve gerilimi daha hızlı bir şekilde ölçülebilmektedir.

MGNİ sistemlerinin en önemli bileşenlerinden biri de güç dönüştürücü devredir. Uygulanan yöntemlerin neredeyse tamamında güneş panelinden elde edilen gücün, yüke veya depolama birimine aktarımı genellikle bir dc-dc dönüştürücü vasıtasıyla yapılmaktadır. Maksimum güç noktası izleyici tekniklerde, PV panelden alınan gücün mümkün olan en yüksek verim ile yüke veya şebekeye aktarılması amaçlanmaktadır. Güç dönüşümünün yüksek verim ile gerçekleştirilmesi için genellikle alçaltıcı (buck), alçaltıcı-yükseltici (buck-boost) ve yükseltici (boost) türü dönüştürücü devreler tercih edilmektedir.

Bu çalışmada, güç dönüşüm devresi olarak, interleaved boost dönüştürücünün kullanılması amaçlanmıştır. Çalışma temelde, güneş panelinin çalışma noktasının anlık ölçüm ile belirlenerek maksimum güç noktasının yüksek doğruluk ve kesintisiz güç aktarımı ile tespit edilmesini amaçlamaktadır. Ölçüme dayalı yöntemlerde, mevcut çalışmalarda kullanılan kondansatör veya direnç ile ölçüm yöntemlerindeki dezavantajları ortadan kaldıran yeni bir ölçüm yöntemi kullanılması amaçlanmıştır. PV panel çalışma akım ve gerilimi, kondansatör ile ölçüm yöntemine benzer şekilde çıkışına bağlanan bobin üzerindeki anlık akım ve gerilim değişiminin analiz edilmesi ile daha hızlı bir şekilde elde edilebilmektedir. Interleaved boost dönüştürücünün girişinde bobin bulunması ve anahtarının her açma kapama anında kaynağın bobinlerden biri üzerinden kısa devre olması, bobin ile I-V eğrisi ölçüm yönteminin uygulanmasını kolaylaştırmaktadır. PV panel I-V eğrisinin, değişen çalışma koşullarına göre bobin akımındaki anlık değişim analiz edilerek ölçülmesi ve buna bağlı olarak MGN'nın tespit edilmesine imkan sağlamaktadır. Böylece PV panelin çalışma akım ve geriliminin ölçülmesi işlemi için ekstra bir devre elemanına ihtiyaç duyulmamaktadır.

Geliştirilen yöntemde kullanılan interleaved boost dönüştürücü kritik modda çalışırken, anahtar görev süresi oranları sabit olup %50'dir. Bu sayede anahtarlama sıfır akım altında yapıldığından anahatarlama kayıpları azalırken, PV panel akımındaki dalgalanma miktarı klasik boost dönüştürücüye göre oldukça azalmaktadır. PV panel uygulamalarında akımındaki değişim oranı, anlık çıkış gücündeki değişim oranını da etkilemektedir. PV akımındaki dalgalanmanın fazla olması sistemin MGN'nda salınım yapmasına ve güç kaybına sebep olmaktadır. Giriş akımındaki dalgalanmanın mümkün olduğunca azaltılması çıkış gücü değerindeki değişim miktarını da azaltarak sistem verimini arttırmaktadır. Geliştirilen yöntemde PV akım dalgalanması düşük olduğundan devre girişinde büyük kondansatör kullanımına gerek yoktur. PV panelin çalışma akım

ve geriliminin ölçümü sırasında, PV panel ve yük bağlantısı kesilmediğinden bobindeki enerji yüke aktarılmaya devam etmektedir. Güneş panelinin çalışma noktasının tespit edilmesinde gerçek ölçüm değerleri kullanıldığından MGNİ doğruluğu oldukça yüksektir.

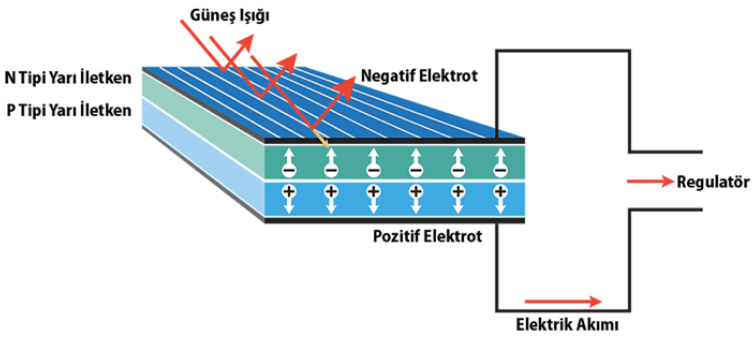
2. KAYNAK TARAMASI

2.1 Fotovoltaik Sistemler

Dünyada elektrik enerjisine olan talebin sürekli artması ile yenilenebilir enerji kaynakları alanındaki uygulamalarda yaygınlaşmaktadır. Güneş enerjisi kaynağının sınırsız olması, gürültüsüz ve çevre kirliliği oluşturmaması gibi avantajlarından dolayı en çok tercih edilen kaynaklardan biridir. Ancak sürekli olarak gün ışığına ihtiyaç duyulması, sıcaklık, nem gibi dış etkenlerden verim durumunun etkilenmesi, depolama ihtiyacı ve zorluğu gibi dezavantajları da vardır. Güneş enerjisi santrallerinin günümüzde giderek çoğalmasına ve hücre üretimindeki teknolojik gelişmelere rağmen mevcut sistemlerde verim hala %14-16 düzeylerinde olduğu belirtilmektedir(Bollipo vd., 2020). Hem mevcut dezavantajları ortadan kaldırmak hem de sistem verimini arttırmak için çok sayıda MGNİ yöntemi üzerinde çalışmalar yapılmaktadır.

2.1.1 Fotovoltaik Hücre Yapısı

Fotovoltaik hücre üzerine düşen ışığı fotovoltaik etki ile elektriğe çeviren yarı iletken maddelerdir. Yapıları basit olarak bir p-n ekleminden oluşur. Şekil 2.1'de görüldüğü gibi katmanlı bir yapıdan oluşmaktadır. En üst tabakada yansımayı mümkün olduğu kadar azaltacak ve en yüksek miktarda ışığı absorbe edecek yansıma engelleyici bir tabaka bulunmaktadır. Mekanik koruma için –dış yüzey cam kaplıdır ve bu cam yüzeye yapıştırılmıştır. Yansımayı önleyen tabaka altında da P ve N tipi malzemeler bulunur (Benda & Černá, 2020).

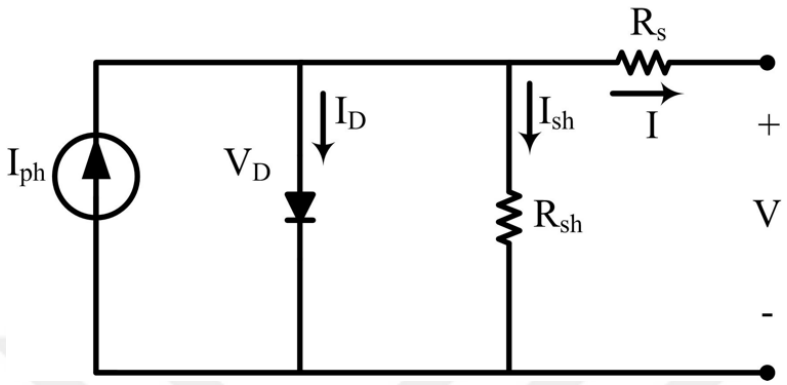


Şekil 2.1: Fotovoltaik hücre yapısı

Güneş pilleri yapımında bir çok farklı yarıiletken element kullanılmakla birlikte en fazla silisyum elementi kullanılmaktadır ve standart bir silisyum güneş pili 0.5 V gerilim üretebilmektedir. Fotovoltaik hücrelerden elde edilen güç miktarı ışınım, nem ve sıcaklık gibi ortam koşullarına bağlı olarak değişebilmektedir (Rahman vd., 2015). Bu dış etkenlere bağlı olarak da yine hücrelerin üretebileceği akım, gerilim ve güç değerleri ve dolasıyla elektriksel karakteristikleri de değişmektedir.

2.1.2 Fotovoltaik Hücrenin Elektriksel Karakteristiği

Fotovoltaik hücre aldığı ışınım ile doğru orantılı olarak akımı artan bir kaynak gibi davranır. Bir ışık kaynağı tarafından uyarılmadığı durumlarda ise standart bir diyot gibi davranır. Bu sebeple elektriksel özellerinin anlaşılabilmesi ve analiz edilebilmesi için genellikle Şekil 2.2'deki tek diyotlu eşdeğer devre ile temsil edilmektedir.



Şekil 2.2: Fotovoltaik hücre tek diyot modeli

Bir güneş pili ideal koşullarda, akım kaynağına paralel bağlı bir diyot ile sembolize edilebilir ancak hücre bağlantıları, p-n eklem derinliği ve materyallerin katkılanma durumları gibi etkenler bir R_s seri direnci ile temsil edilmektedir. Şekil 2.2'de görülen R_p direnci de p-n ekleminin sızıntı akımından kaynaklanan bir dirençtir ve değeri malzeme kalitesine bağlıdır. I_{ph} foton akımını temsil eder ve ışınım ile doğru orantılıdır. Eşdeğer devreye göre çıkış akımı matematiksel olarak eşitlik 2.1'de olduğu gibi ifade edilmektedir(İŞen & Koçhan, t.y.; Senthilkumar vd., 2022).

$$I = I_{ph} - I_D - \frac{V_D}{R_{sh}} \tag{2.1}$$

Burada I_{ph} foton akımını, I_D diyot akımını ve V_D diyot gerilimini ifade etmektedir. I_D ise diyot akımını ifade etmekte olup eşitliği 2.2'de verilmiştir.

$$I_D = I_0\left(e^{qV_D/nkV_T} - 1\right) \tag{2.2}$$

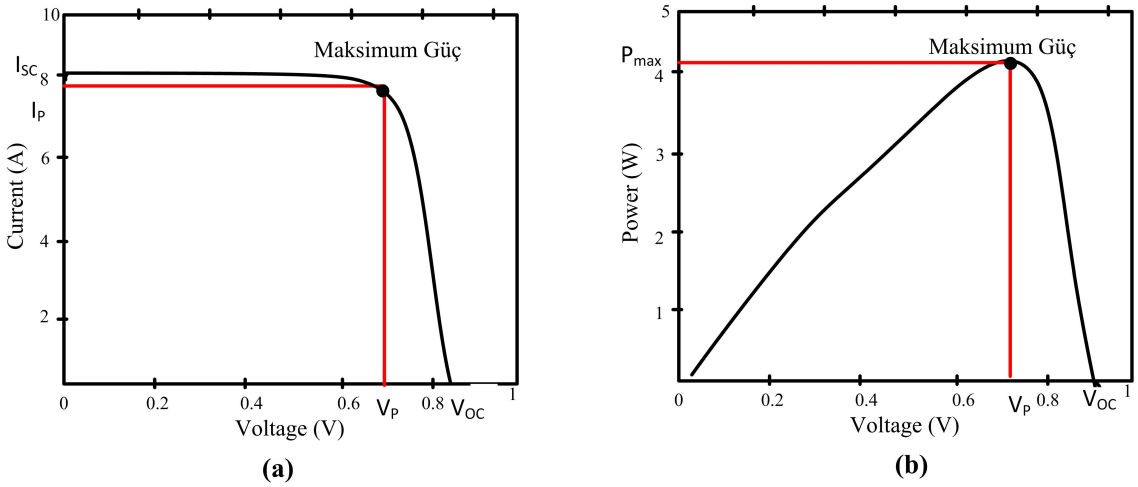
Eşitlikte I_0 sızıntı akımını, V_D diyot gerilimini, q elektron yükünü, k boltzman sabitini, n diyot ideallik faktörünü ve V_T termal gerilimi temsil etmektedir.

Devre çıkışındaki gerilim eşitliğinden diyot gerilim eşitliği de aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$V_D = V + IR_s \tag{2.3}$$

Eşitlik (2.1) ve (2.3)'e göre şönt direnç ve seri direnç güneş hücresinin akım ve gerilim değerlerini doğrudan etkilemektedir. Eşitlik 2.2 ve 2.3'de verilen diyot akımı ve gerilimi ifadeleri eşitlik 2.1'de yerine koyulduğunda, güneş pilinin çıkış akımı ifadesinin dirençlere bağlı değeri eşitlik 2.4'deki gibi elde edilmektedir.

$$I = I_{ph} - I_0\left(e^{qV_D/nkT} - 1\right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \tag{2.4}$$



Şekil 2.3. a) Fotovoltaik hücre I-V karakteristiği **b)** Fotovoltaik hücre P-V grafiği

Bir fotovoltaik hücrenin elektriksel özelliklerini belirleyen, çalışma akımı ve geriliminin sınır değerleri mevcuttur. Şekil 2.3.a üzerinde I_{sc} ve V_{oc} olarak görülen değerler, sırası ile kısa devre akımı ve açık devre gerilimini ifade etmektedir. Kısa devre akımının elde edilebilmesi için hücre uçları gerilim sıfır olacak şekilde kısa devre edilir, bu durumda hücreden akan akım I_{sc} kısa devre akımıdır.

Açık devre gerilimin elde edilebilmesi için de hücre uçlarından akım akmayacak şekilde açık bırakılarak gerilim ölçümü yapılır, ölçülen gerilim V_{oc} açık devre gerilimidir. PV panel çıkış gücü, çalışma akım ve geriliminin çarpımından eldildiğinden bu değerin en yüksek olduğu noktada Şekil 2.3.b'deki gibi maksimum güç noktası olarak elde edilmektedir.

2.1.3 Fotovoltaik Hücrede Işınım ve Sıcaklık Etkisi

Fotovoltaik hücrenin elektriksel parametreleri malzeme yapısına ve üretim koşullarına bağlı olarak değişmekle birlikte farklı çalışma koşullarında farklı karakteristikler göstermektedir. Hücrelerin çalışma performansının anlaşılabilmesi için akım-gerilim karakteristiği oldukça önemlidir. PV paneller için çalışma ortamı koşulları çok değişken olabileceğinden, PV panellerin elektriksel davranışları, üreticiler tarafından çalışma koşulları standart kabul edilerek test edilmektedir. Standart test koşulları altında ışınım genellikle 1000 W/m^2 olarak kabul edilmektedir(Olotu vd., t.y.). I_{sc} ölçümü sırasında hücre gerilimi sıfır olduğundan akım eşitlik 2.5'teki gibi ifade edilmektedir.

$$I_{sc}=I_{ph} \tag{2.5}$$

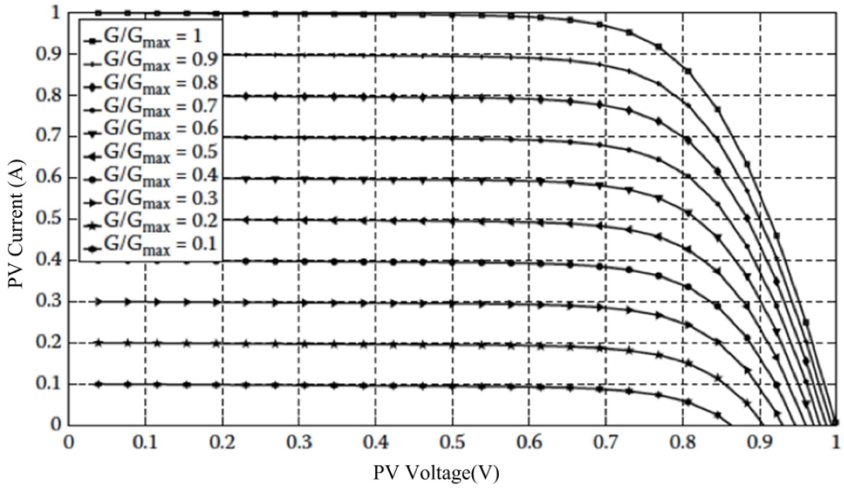
Kısa devre durumunda diyot akımı ve sızıntı akımı ihmal edilerek ölçülen akım doğrudan foton akımı olarak ifade edilir ve ışınım ile doğru orantılıdır. Bu sayede, bir fotovoltaik hücrenin standart koşullardaki akım değerinden yola çıkarak herhangi bir ışınım değerindeki yaklaşık akımı eşitlik 2.6'daki gibi elde edilebilmektedir (Messenger & Ventre, 2004). Eşitlikte G ışınım değerini ifade etmektedir.

$$I_{ph}(G) = \left(\frac{G}{G_0}\right) I_{ph}(G_o) \tag{2.6}$$

Açık devre durumunda ise PV panel akımın sıfır olduğu kabul edilir ve eşitlik 2.1 kullanılarak, açık devre gerilimi eşitlik 2.7'deki gibi yazılabilir.

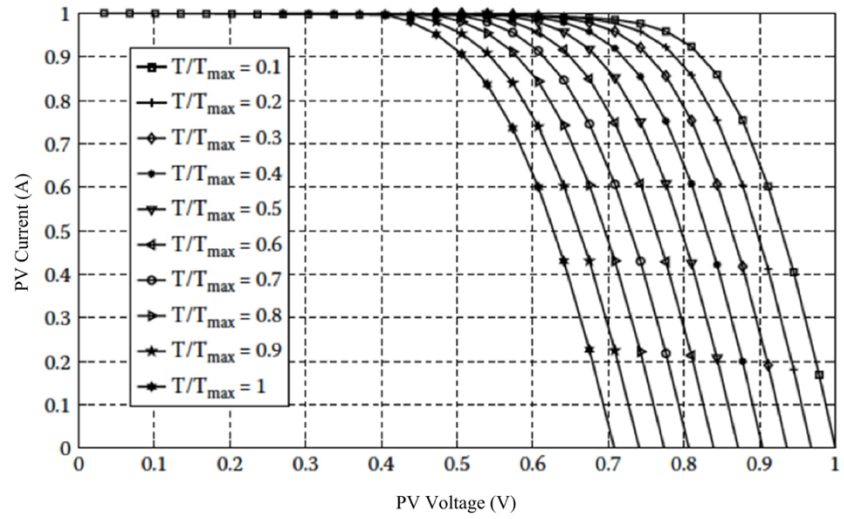
$$V_{oc} = \frac{kT}{q} ln \frac{I_{ph} + I_o}{I_o} \cong \frac{kT}{q} ln \frac{I_{ph}}{I_o} \quad (2.7)$$

Normal koşullarda $I_{ph} >> I_0$ olduğundan, foton akımının doyum akımına oranının 10^{10} olduğu kabul edilirse, standart 26 mV'luk termal gerilimde (kT/q) açık devre gerilimi 0.6 volt olarak elde edilir. Eşitlik 2.6 ve 2.7'den yola çıkarak, hücre akımı ışınım ile doğrudan ilişkili iken hücre geriliminin ışınım ile logaritmik ilişkili olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır. Değişen ışınım değerlerine göre fotovoltaik hücrenin akım ve gerilim değişimi grafiksel olarak Şekil 2.4'de gösterilmektedir.



Şekil 2.4: Işınım miktarındaki değişimin hücre akım ve gerilimine etkisi.

Şekil 2.5'de ise hücre sıcaklığı ile I-V karakteristiğindeki değişim gösterilmektedir. Sıcaklık artışının özellikle fotovoltaik hücrenin gerilimi üzerine olumsuz etki ettiği görülürken akım üzerindeki etkisi ihmal edilebilir düzeydedir.



Şekil 2.5 : Sıcaklık değişiminin hücre akım ve gerilimine etkisi.

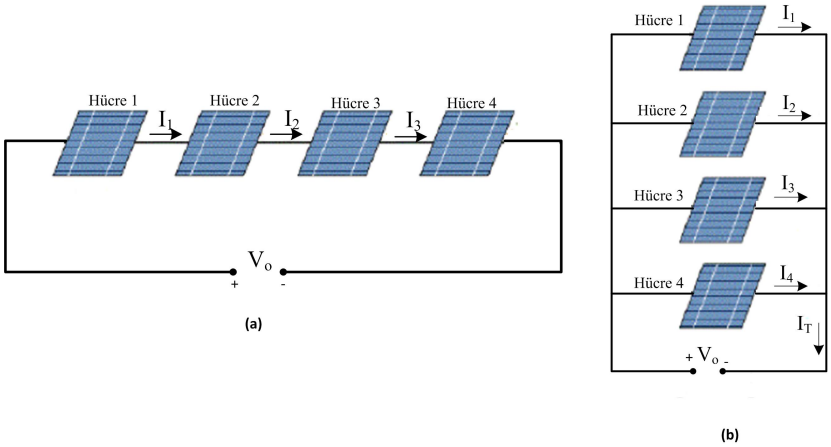
Fotovoltaik hücre sıcaklığı T, normal ortam koşulları hesaba katılarak (NOCT), eşitlik 2.8'deki gibi ifade edilmektedir.

$$T = T_a + \frac{NOCT - 20}{800} \times G \tag{2.8}$$

Sıcaklık değeri gün içinde genellikle daha yavaş değiştiğinden ışıma seviyesinin gün içinde maruz kalabileceği değişime göre genellikle sabit kabul edilmekte ve etkisi ihmal edilmektedir. Işınım miktarı gün için daha hızlı değiştiğinden ve hücre akımıyla doğrusal ilişkili olduğundan fotovoltaik hücrelerin elektriksel davranışı üzerinde daha etkili olmaktadır (Femia vd., 2017; Suman vd., 2021).

2.1.4 Fotovoltaik Paneller

Fotovoltaik paneller yüksek miktarda güç elde etmek için güneş pillerinin seri veya paralel bağlanması ile oluşturulan modüllerdir. İstenilen miktarda gerilim elde edilmesi için hücreler Şekil 2.6.a'da olduğu gibi seri bağlanırken ve akım miktarının arttırılması için de Şekil 2.6.b'de olduğu gibi hücreler paralel bağlanarak farklı bağlantı türlerinde PV panel yapıları oluşturulmaktadır.



Şekil 2.6. a) Seri bağlı PV hücre dizisi **b)** Paralel bağlı PV hücre dizisi

Yapısındaki seri ve paralel bağlı hücrelerin sayısına bağlı olarak PV panelin seri ve şönt direnç değerleri değişmektedir. Yapısında N_p adet paralel bağlı ve N_s adet seri bağlı hücre bulunan bir fotovoltaik panelin seri direnci ($R_{s,panel}$) ve şönt direnci ($R_{sh,panel}$) sırasıyla, eşitlik 2.9 ve 2.10'daki gibi ifade edilmektedir.

$$R_{s,panel} = \frac{N_p}{N_s} \times R_s \tag{2.9}$$

$$R_{sh,panel} = \frac{N_s}{N_p} \times R_s \tag{2.10}$$

Kısa devre akımı $I_{sc,panel}$ ve açık devre gerilimi $V_{oc,panel}$ de yine hücre sayısı ve bağlantı şekline bağlı olarak değişmektedir. Kısa devre akımı eşitlik 2.11'deki gibi paralel bağlı hücre sayısı ve hücre kısa devre akımının çarpımı şeklinde ifade edilmektedir. Seri bağlı hücrelerden oluşan panellerde panel kısa devre akımı hücre akımına eşit olup açık

devre gerilimi hücre sayısı ile hücre açık devre geriliminin çarpımı şeklinde eşitlik 2.12'deki gibi ifade edilmektedir. (B.Eteiba vd., 2013).

$$I_{sc,panel} = N_p \times I_{sc} \tag{2.11}$$

$$V_{oc,panel} = N_s \times V_{oc} \tag{2.12}$$

Piyasada mevcut fotovoltaik panellerin yapısında genellikle, daha yüksek gerilim ve düşük akım elde edilebilmesi için hücreler seri bağlı halde bulunmaktadır. Fotovoltaik panelin yapısında çok sayıda seri bağlı hücre bulunduğundan, Eşitlik 2.13'de verilen çalışma akım eşitliği, eşitlik 2.4'dekinden farklılık göstermektedir.

$$I = I_{ph} - I_o \left[exp\left(\frac{V + R_s I}{V_T a}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p} \tag{2.13}$$

Eşitlikte V_t termal gerilimi ve a ideallik faktörünü ifade etmektedir. Termal gerilim seri bağlı hücre sayısına bağlı olarak eşitlik 2.14'deki gibi değişmektedir.

$$V_T = \frac{N_s k T}{q} \tag{2.14}$$

Üreticiler tarafından PV panel kataloglarında genellikle açık devre gerilimi (V_{oc}), kısa devre akımı(I_{sc}), maksimum güçteki açık devre gerilimi (V_{ocmpp}), maksimum güçteki kısa devre akımı(I_{scmpp}), toplam güç, gerilim sıcaklı katsayısı (K_v), akım sıcaklık katsayısı (K_I), güç sıcaklı katsayısı (K_p) gibi değerler verilmektedir. R_s ve R_{sh} direnç değerleri ise gerekli olduğunda literatürde mevcut bazı matematiksel yaklaşımlar ile hesaplanmaktadır (Hussein, t.y.; Ndegwa vd., 2020).

PV panel veri sayfalarında bulunan değerler, standart koşullar altında yapılan testler sonucu elde edilen değerlerdir. Çevre koşullarına bağlı olarak PV panelin çalışma karakteristikleri oldukça değişkendir. Herhangi bir ışınım veya sıcaklık altında panelin çalışma akım ve geriliminin nasıl değiştiğini tespit etmek için ölçüm yapmak gerekmektedir. Fotovoltaik sistemler dış ortamlarda kullanıldığından, çalışması esnasında ışınım ve sıcaklık gibi değerler sıklıkla değişmekte ve bu yeni durum için bir çalışma noktası belirlenmesi gerekmektedir.

2.2 PV Panel I-V Eğrisi Ölçüm Yöntemleri

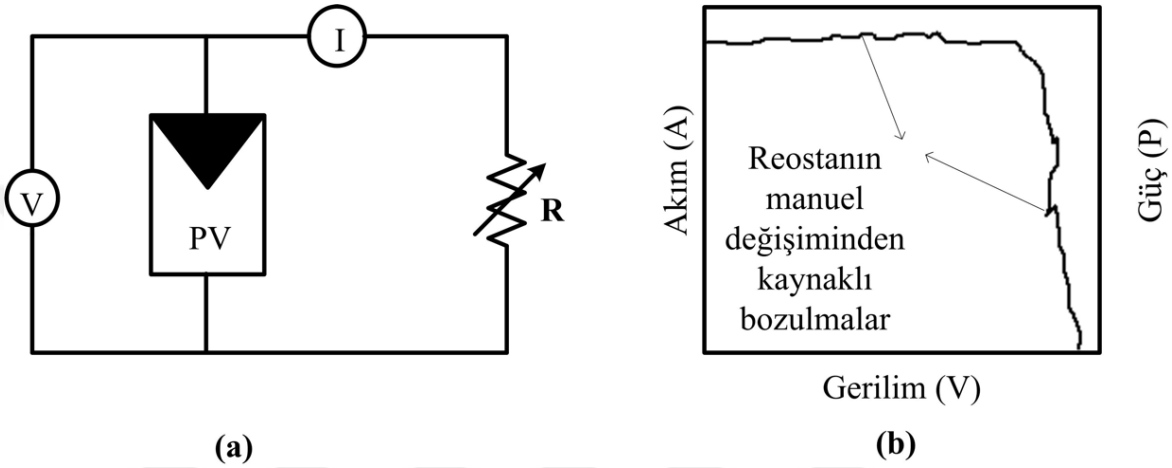
PV panellerin lineer olmayan çalışma karakteristiklerinden dolayı anlık çalışma akımı, gerilimi ve diğer panel parametreleri (R_s, R_{sh}) gibi değerlerin hesaplanması oldukça zor ve karmaşıktır. Önceki bölümlerde de ifade edildiği gibi fotovoltaik paneller farklı ışınım, sıcaklık, nem gibi ortam koşullarında farklı çalışma karakteristiklerine sahiptirler. Üretici kataloglarında ise standart koşullar altında yapılan test sonuçları ile elde edilen çalışma karakteristikleri yer almaktadır. PV paneller çok farklı sıcaklık ve ışınım değerleri altında çalışıyor olabilir ve bütün bu olasılıklara göre bir teknik veri kataloğu oluşturmak imkansızdır. Bu değerler ancak hesaplama veya ölçüm sonucu elde edilebilmektedir.

Hesaplamaya dayalı yöntemlerde, büyük veri tabanlarının oluşturduğu karmaşıklık ve elde edilen sonuçların yaklaşık sonuçlar olması sistem doğruluğunu ve çalışma hızını olumsuz etkilemektedir. Yapılan çalışmaların büyük çoğunluğunda, ölçüme dayalı MGN hesaplamalarının doğruluk oranının, hesaplamaya dayalı yöntemlere göre daha yüksek olduğu ifade edilmiştir. Sistem doğruluğunu ve hızını için arttırmak

MGNİ yöntemlerine çeşitli PV panel I-V eğrisi ölçüm yöntemleri adapte edilmiştir. Kondansatör ile ölçüm, ayarlı direnç veya elektronik yük ile ölçüm yöntemleri I-V eğrisi ölçümü için en yaygın kullanılan yöntemlerdir. (Khatib vd., 2018; Kuai & Yuvarajan, 2006; S. Kumar vd., 2019; Navabi vd., 2015).

2.2.1 Ayarlı Direnç ile I-V Eğrisi Ölçüm Yöntemi

Ayarlı direnç ile ölçüm yönteminde, Şekil 2.7.a'daki gibi PV panel çıkışına yük olarak bir ayarlı direnç bağlanmakta, değişen direnç değerine göre maksimum panel çıkış gücü tespit edilmektedir.

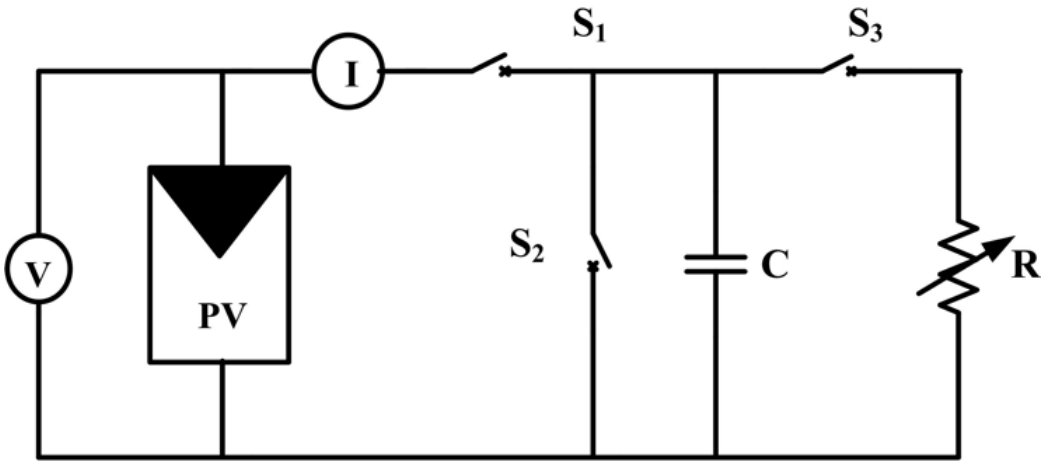


Şekil 2.7. a) Ayarlı direnç ile PV panel I-V eğrisi ölçüm devresi **b)** Ayarlı direnç ile elde edilen PV panel I-V eğrisi

Maksimum güç değerinin elde edildiği direnç değerine göre panelin çalışma akım ve gerilimi belirlenerek belli koşullar altında I-V eğrisi elde edilmektedir. Bu yöntem kolay ve düşük maliyetlidir, ancak ayarlı direnç manuel değiştirildiğinden ölçüm hızı oldukça yavaştır ve ölçüm sonuçları net değildir (Şekil 2.7.b). Ayrıca, ölçüm işlemi sırasında, sistemde yük ile kaynak arasındaki güç aktarımının kesintiye uğraması ve PV panelin yük vasıtası ile kısa devre yapılması sırasındaki reostalardaki gereksiz güç tüketimi sistem verimini düşürmektedir. Yöntem uygulanabilirlik açısından da daha küçük güçlü sistemler için uygundur. Büyük güçlü sistemler için piyasada bulunması zor olan, çok büyük reostalara ihtiyaç duyulmaktadır (Duran vd., 2008; Morales-Aragonés vd., 2021; Sayyad & Nasikkar, 2021).

2.2.2 Kondansatör ile I-V Eğrisi Ölçüm Yöntemi

Dirençli I-V eğrisi ölçüm yönteminin sahip olduğu dezavantajları ortadan kaldırmak için mevcut çalışmalarda kullanılan bir diğer alternatif yöntem de kondansatör şarj-deşarj yöntemidir(R. Ahmad vd., 2017; Spertino vd., 2015). Bu yöntemde Şekil 2.8'de olduğu gibi PV panel çıkışına uygun büyüklükte bir kondansatör bağlanarak, panel kısa devre edilmektedir. S_1 anahtarı kapanınca, kondansatör PV panelin açık devre gerilimine ulaşıncaya kadar şarj olmaktadır. Bu sırada PV panel kısa devre durumundan açık devre durumuna geçmektedir. Bu geçiş anındaki akım ve gerilim değerleri ölçülerek PV panelin I-V karakteristik eğrisi şekildeki gibi elde edilmektedir. (Mahmoud, 2006).



Şekil 2.8: Kondansatör ile PV panel I-V eğrisi ölçüm devresi

Kondansatör değeri PV panelin V_{OC} ve I_{sc} değerlerine göre hesaplanmakta olup uygun kondansatör değeri eşitlik 2.15'den elde edilir.

$$C = \frac{t_s}{2} \times \frac{I_{sc}}{V_{oc}} \tag{2.15}$$

PV panelin etiket değerlerine bağlı olarak test süresi eşitlik 2.16'daki gibi elde edilmektedir.

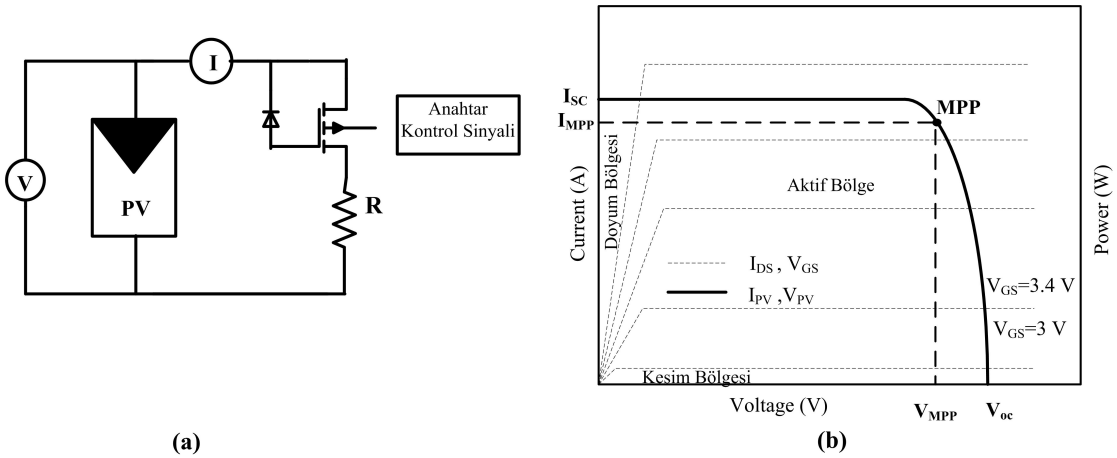
$$T_{sweep} = 1.261 \left(\frac{V_{oc} \times C}{I_{sc}} \right) \tag{2.16}$$

Kondansatörün şarj edilme ve I-V eğrisinin elde edilmesinden sonra, S_1 anahtarı açık, S_3 anahtarı kapalı durumu getirilerek kondansatörün yük üzerinden deşarj olması sağlanmaktadır. Şekildeki devre kondansatör ile I-V eğrisi ölçüm yönteminin en temel uygulamasını temsil etmektedir. Kondansatörün şarj-deşarj olması sırasında, PV panel-yük arasından enerji kesintisi ile deşarj yükü üzerinde bir miktar enerji kaybı meydana gelmektedir (Chen vd., 2020; Spertino vd., 2015).

Bu yöntem dirençli ölçüm yöntemine göre daha hızlıdır. (R. Ahmad vd., 2017) Çalışmasında kondansatördeki enerjiyi yüke aktararak deşarj kaynaklı enerji kaybını azaltmıştır. Ancak kondansatörün ESR etkisi, şarj-deşarj durumundan kaynaklı kullanım ömrünün azalması(Morales-Aragonés vd., 2021), büyük sistemler için çok büyük kondansatörlere ihtiyaç duyulması(Santra vd., 2021), ölçüm sırasında PV panel-yük arası güç aktarımın kesilmesi gibi dezavantajları da bulunmaktadır(Chen vd., 2018; Pal vd., 2020)

2.2.3 Elektronik Yük İle I-V Eğrisi Ölçüm Yöntemi

Elektronik yük ile I-V eğrisi ölçüm metodunda IGBT veya MOSFET gibi yarı iletkenler kontrollü bir yük gibi kullanılırlar. Şekil 2.9.a'da temel bir elektronik yüklü test devresi bağlantısı görülmektedir.

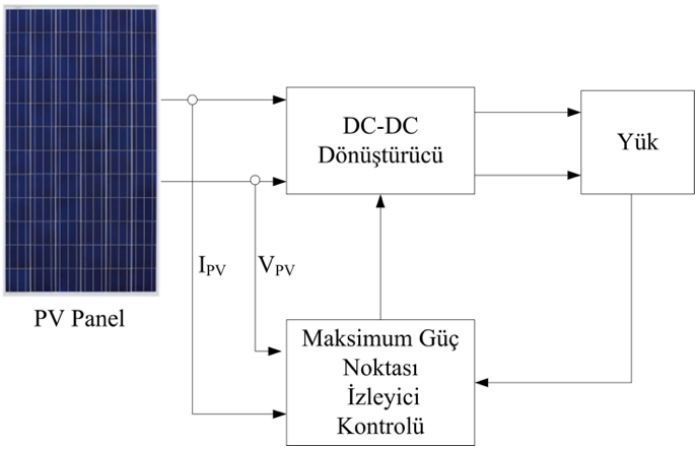


Şekil 2.9. a) Elektronik yük ile PV panel I-V eğrisi ölçüm devresi **b)** Elektronik yük ile ölçülen PV panel I-V eğrisi

Yöntemde yarı iletken anahataın kapı gerilimin değiştirilmesi ile drain-source terminali iletim direncinin ve sonuç olarak direnç üzerindeki akımın değişmesi özelliğinden faydalanılır (Kuai & Yuvarajan, 2006; Leite & Chenlo, 2010). Test sırasında yarı iletken anahtar Şekil 2.9.b'de gösterildiği gibi kesim, doyum ve aktif bölgelerde çalışır. Terminaller arasındaki dinamik direncin hızlı değişmesi test işleminin hızlı gerçekleştirilmesi sağlamaktadır. Ancak tüm PV panel enerjisi, terminal direnci üzerinden akacağından ve bu tür yarı iletkenler orta güç seviyelerinde kullanıma uygun olduğundan, yöntem orta ve düşük güçteki uygulamalarda kullanılabilmektedir. İletim direncinin sınırlı olması, kısa devre akımının hatalı ölçümüne sebep olabilmektedir. Bunun yanında, ölçümler anahtar kontrol devresi kaynaklı gürültü içerebilmektedir(Duran vd., 2008; Morales-Aragonés vd., 2021).

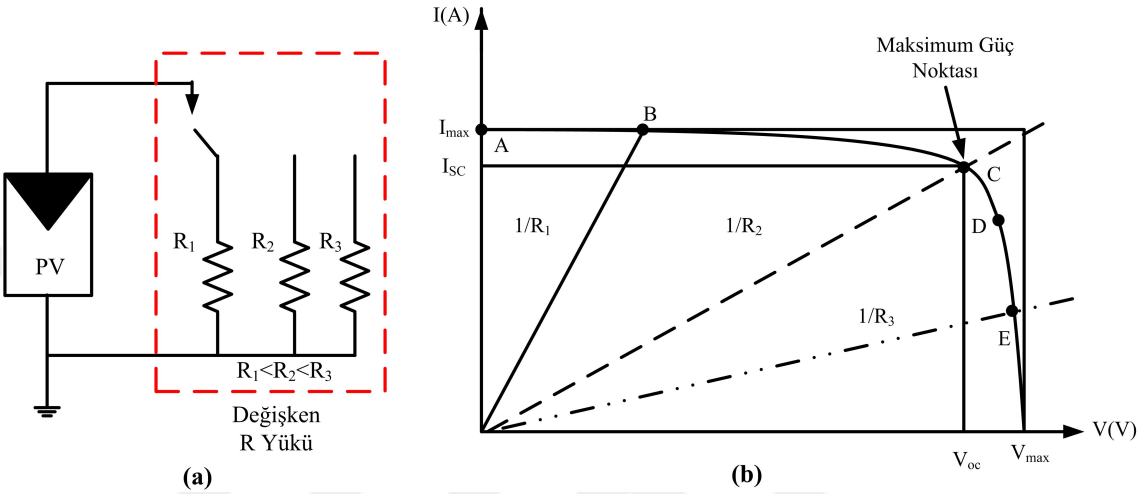
2.3 Fotovoltaik Güç Sistemleri

Fotovoltaik güç sistemlerinin yapısı panel, dönüştürücü devre, MGNİ kontrol birimi ve yükten oluşmaktadır. Şekil 2.10'da görüldüğü gibi panel tarafından üretilen enerji, dönüştürücü devre vasıtası ile yüke aktarılmaktadır.



Şekil 2.10: PV sistem temel yapısı

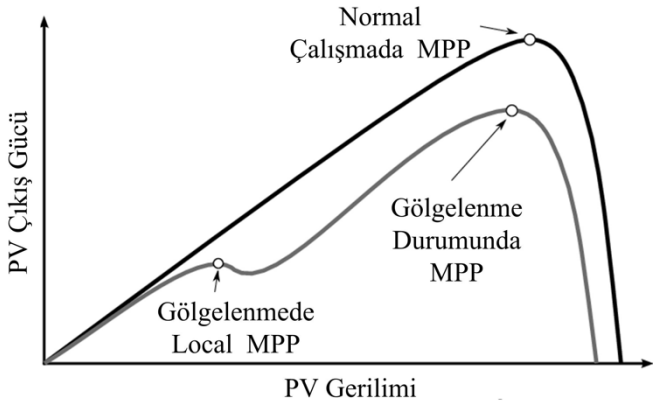
Fotovoltaik panellerde çalışma akımı ve gerilimi Şekil 2.11.a'daki gibi PV panel çıkışına bağlanan yüke göre değişmektedir. Belirli bir yük değeri için en verimli çalışma noktası maksimum güç noktası(MGN) olarak ifade edilir. Aynı PV panel çıkışına farklı yükler bağlanması durumunda Şekil 2.11.b'deki gibi farklı çalışma eğrileri oluşmaktadır. Şekil 2.11'de R_2 yükü ile çalıştırıldığında, A noktasında PV panelden mümkün olan en yüksek güç elde edilmektedir.



Şekil 2.11. a) Değişken direnç yüklü PV panel **b)** PV panel I-V eğrisinin çıkış yüküne göre değişim grafiği

Sistem verimi için MGN tespiti oldukça önemlidir. MGN doğru tespit edilemezse PV panelin güç üretme potansiyeli doğru kullanılamamakta ve sistem verimi büyük ölçüde düşmektedir. Ortam koşullarındaki ışınım, sıcaklık gibi çalışma koşullarında meydana gelen değişimler de PV panelin çalışma akımı ve geriliminin önemli oranda değişmesine neden olmaktadır. Sonuç olarak panelin maksimum güç noktası da değişmektedir. Bu sebeple, değişen ortam koşulları ve yük durumlarında PV panelin MGN'nın yeniden tespit edilmesi gerekmektedir. PV sistemlerde MNG'nın tespiti için kullanılan devrelere maksimum güç noktası izleyici (MGNİ) adı verilmektedir.

PV panelin akım gerilim karakteristiği ortam koşullarından oldukça fazla etkilendiğinden MGNİ'nin maksimum güç noktasını hızlı ve doğru bir şekilde tespit etmesi oldukça önemlidir. Özellikle sıcaklık, ışıma gibi ortam koşullarının değişmesine sebep olan gölgelenme veya kısmi gölgelenme durumlarında gerilim-güç karakteristiğinde Şekil 2.12'deki gibi farklı tepe noktaları oluşmaktadır. Burada en yüksek gücü ifade eden tepe noktası global maksimum noktası olarak adlandırılmakta, diğer tepe noktaları ise lokal maksimum olarak ifade edilmektedir. MGNİ yönteminin global maksimum noktasını yakalayabilmesi gerekmektedir, aksi halde sistem lokal tepe noktaları arasında salınım gösterebilir veya lokal maksimum noktalardan herhangi birinde çalışabilir. Bu durum da sistem veriminde azalmaya sebep olmaktadır. Bunun yanında MGNİ yönteminin, sisteme dahil edildiğinde sistem yapısını karmaşık hale getirmemesi ve sistem maliyetini de çok arttırmaması gerekmektedir



Şekil 2.12: Kısmi gölgelenme durumunda PV panel MGN değişim grafiği

Sonuç olarak, bir MGNİ sisteminin yüksek doğrulukla çalışması, yapısının sade ve düşük maliyetli olması, algoritmasının dinamik ortam şartlarına adapte olabilmesi ve MGN'nın hızlı bir şekilde hesaplayabilmesi gerekmektedir (Dhimish, 2019). Yapılan çalışmaların bir çoğunda MGNİ yöntemleri temel olarak klasik yöntemler, yapay zeka tabanlı yöntemler ve hibrit yöntemler olmak üzere üç kategoriye ayrılmaktadır (Dadkhah ve Niroomand, 2021; M. Kumar vd., 2023).

2.2.1 Klasik MGNİ Yöntemleri

Klasik MGNİ yöntemler basit yapılı, uygun maliyetli olmaları sebebiyle uygulamada daha fazla tercih edilmektedir. Ayrıca bu yöntemlerin bazılarında gerçek ölçüm değerleri kullanıldığından sonuçların daha güvenilir olduğu belirtilmektedir (K. Ali vd., 2019; M. Kumar vd., 2023). Oransal kısa devre akımı yöntemi, oransal açık devre gelimi yöntemi, değiştir ve gözlemle ve artımsal iletkenlik gibi yöntemler klasik yöntemler olarak sınıflandırılmıştır (Bollipo vd., 2020). Klasik MGNİ yöntemleri doğrudan denetimli ve dolaylı denetimli olmak üzere iki farklı hesaplama yöntemi bulunmaktadır (Hanzaei vd., 2020).

2.2.1.1 Dolaylı MGNİ Yöntemleri

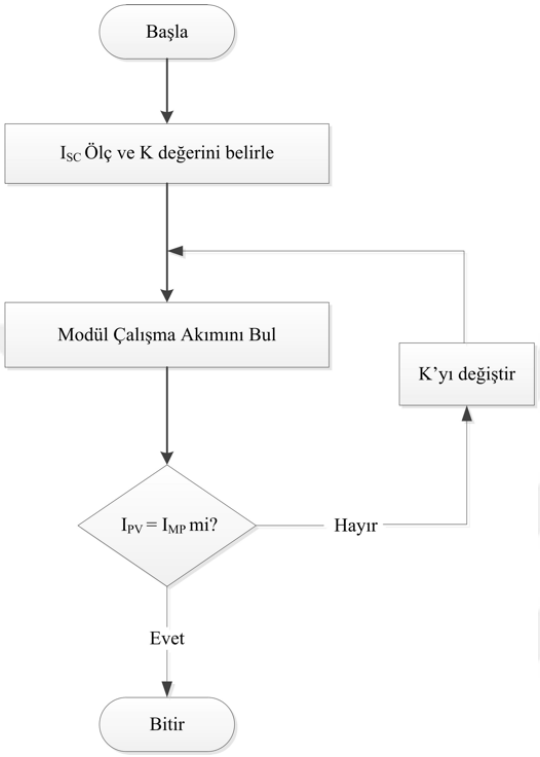
Dolaylı denetimli yöntemlerde değişik çalışma koşulları altında PV panel sisteme bağlı iken anlık akım ve gerilimi ölçümü yapılmaz. Fotovoltaik panellerin veri sayfalarındaki değerlerinden yola çıkılarak veya geçici süreliğine PV panel sistemden ayrılarak ölçülen değerler ile MGN hesaplanır. Literatürde yaygın olarak kullanılan yöntemlerden bazıları;

Oransal Kısa Devre Akımı Yöntemi: Bu yöntemde PV panelin MGN'ndaki çalışma akımı ile kataloğunda yer alan kısa devre akımı arasında Eşitlik 2.17'deki gibi bir bağıntı olduğu kabul edilir.

$$I_{ref} = K \times I_{sc} \tag{2.17}$$

Eşitlikte, I_{ref} referans akımı ve I_{sc} PV panelin kısa devre akımını temsil etmektedir. K değerinin ise 0,78 ile 0.92 arasında bir sabit olduğu kabul edilir(LESIA Laboratory, ENSAI, University of LESIA Laboratory, ENSAI, University of Ngaoundere. Cameroon. Cameroon vd., 2021). PV panel belirli aralıklarla sistemden ayrılarak kısa devre akımı

ölçülür ve eşitlikteki orana göre olması gereken MGN akımı hesaplanarak dönüştürücü devrenin kontrolü yapılır. Yöntemin uygulama adımları Şekil 2.13'de verilmiştir.(Sandali vd., 2014).



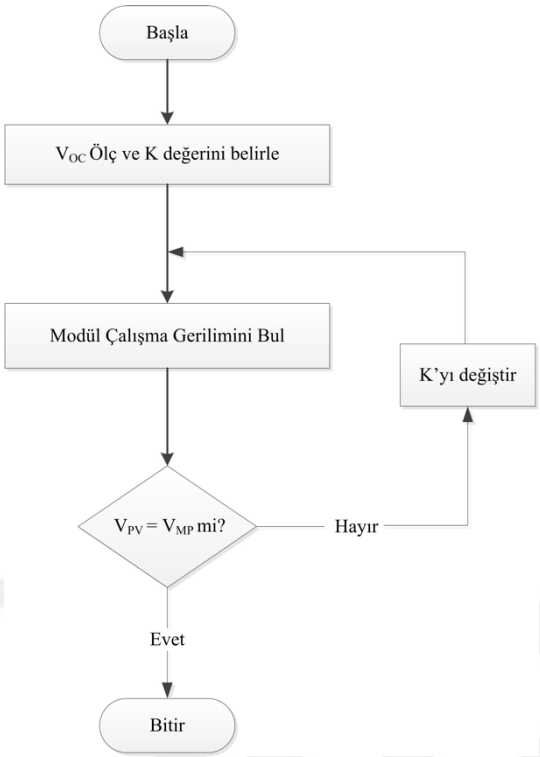
Şekil 2.13: Oransal kısa devre akımı ile MGNİ yöntemi algoritması

Yöntemin uygulanması oldukça basit ve düşük maliyetlidir. Ancak sık aralılarla panelin sistemden ayrılması enerji aktarımında kesintiye sebep olmaktadır, ayrıca referans akım hesaplamada sabit katsayılar kullanıldığından yöntemin doğruluğu yüksek değildir. Özellikle ışınım ve sıcaklık değişimlerinde MGN akımı ile kısa devre akımı arasındaki ilişki farklılık gösterebilmektedir(Bollipo vd., 2020; M. Kumar vd., 2023).

Oransal Açık Devre Gerilimi Yöntemi: Bu yöntemde de PV panelin MGN'ndaki çalışma gerilimi ile açık devre gerilimi arasında Eşitlik 2.18'deki gibi bir oransal ilişki olduğu kabul edilir.

$$V_{ref} = K \times V_{oc} \tag{2.18}$$

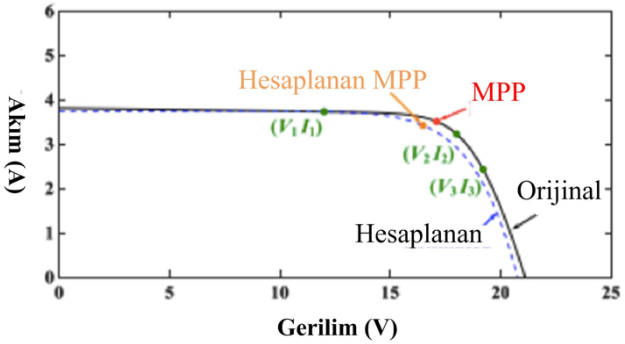
Eşitlikteki K sabit olup, değerinin standart atmosferik koşullar altında 0,72 ile 0,78 arasında değiştiği kabul edilmektedir(Kumar vd. 2023). Açık devre gerilimi V_{oc} ise belli aralıklarla PV panel sistemden ayrılarak ölçülmektedir. Hesaplanan V_{ref} değerine göre PV panelin bağlı olduğu dönüştürücü devredeki anahtar iletim süresi kontrol edilmektedir. Şekil 2.14'de temel bir oransal açık devre gerilim yöntemi algoritması gösterilmektedir(Yu-Pei Huang, 2014).



Şekil 2.14: Oransal devre gerilimi ile MGNİ yöntemi algoritması

Bu yöntem de uygulama yönünden kolay ve düşük maliyetli olmasına karşın, oransal kısa devre akımı yönteminin taşıdığı dezavantajları taşımaktadır. Kesintisiz enerji aktarımı ve sistem doğruluğu yönüyle dezavantajları mevcuttur (Dadkhah ve Niroomand, 2021; M. Kumar vd., 2023).

Eğri Uydurma Yöntemi: Fotovoltaik panel katalog verilerinden yola çıkılarak MNG hesabı yapılan yöntemlerden biridir. R_s ve R_{sh} gibi PV panel parametrelerinin hesabı için test koşullarında elde edilen PV panel karakteristik eğrileri kullanılır. Şekil 2.15'de görüldüğü gibi I-V karakteristik eğrisinden bazı referans noktalar (I_1-V_1, I_2-V_2, I_3-V_3) seçilir.



Şekil 2.15: Eğri uydurma yöntemi ile MGNİ yöntemi grafiksel gösterimi

$$I = \alpha + \beta V^{\gamma} \quad (2.19)$$

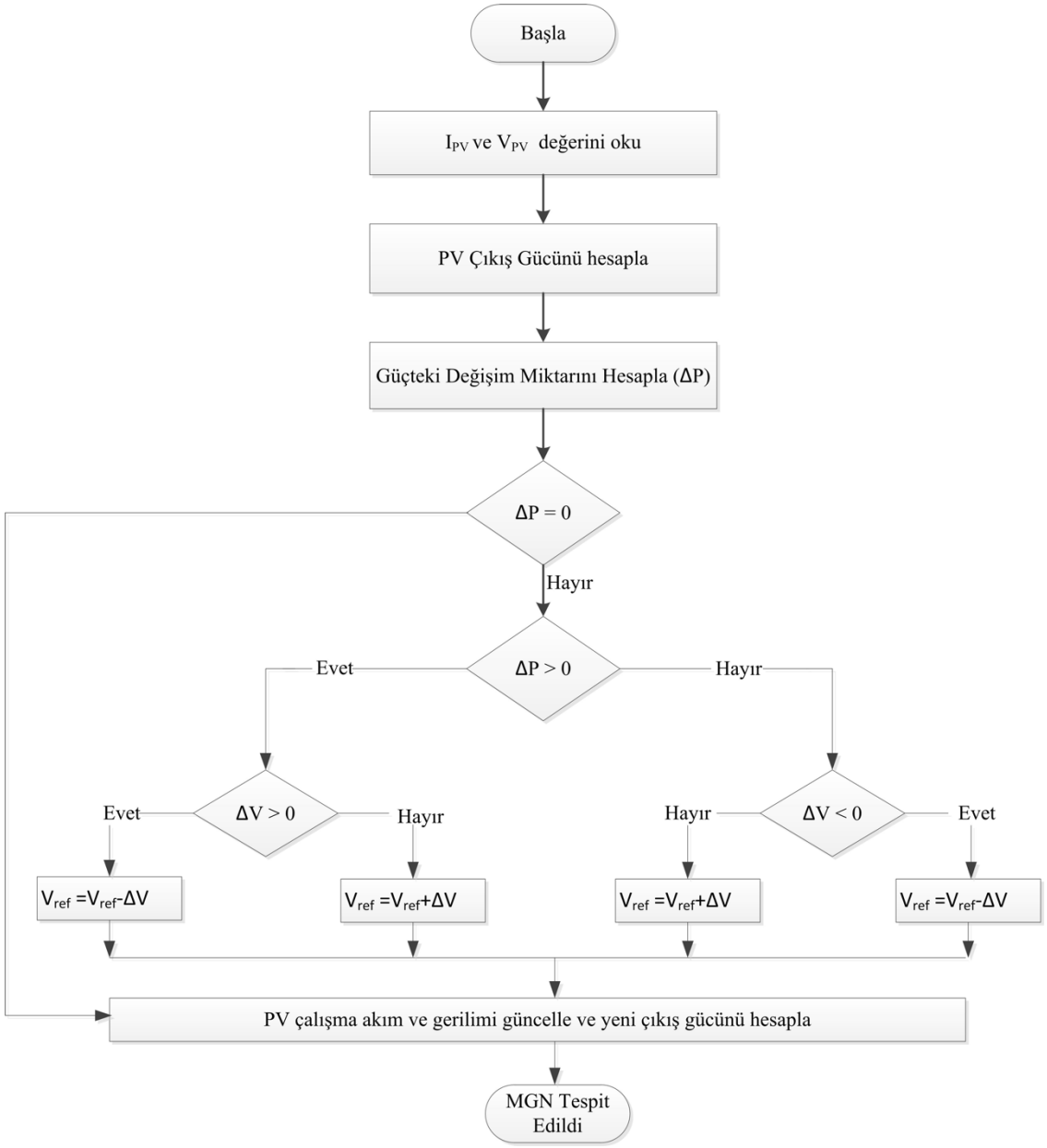
Seçilen referans noktalar kullanılarak Eşitlik 2.19'daki tek diyot modelin denklemindeki α, β, γ katsayıları elde edilir ve yaklaşık MGN hesaplanır. Bu yöntem ile elde edilen MGN gerçek MGN olmayıp tahmini ve gerçek değere en yakın olduğu varsayılmaktadır.(Li vd., 2021). Bu yöntemde MGN'nı en doğru şekilde elde edebilmek için oldukça fazla sayıda referans noktasının bulunduğu bir veri tabanı gereklidir. Ancak fazla sayıdaki veri ile hesaplama yapılması işlem sürenin uzamasına da neden olmaktadır (Karami vd., 2017).

Veri sayfalarında bulunan değerler genellikle belirli sıcaklık ve ışıma koşulları altında yapılan testlerin sonucuna dayanmaktadır. Bunun yanında, günlük hayatta çalışma ortam koşulları çok daha farklı durumlarda olabilmektedir. Bu da PV panel elektriksel özelliklerinin tam olarak hesaplanamamasına sebep olmaktadır. Bu yöntemde, mevcut veriler temelinde hesaplanan yaklaşık değerler kullanılmaktadır. Özellikle gölgelenme gibi durumların oluşmasında PV panelin elektriksel özellikleri sürekli değişmekte ve sistemin bu değişime cevap vermesi zorlaşmaktadır (A. Ali vd., 2020).

2.2.1.2 Doğrudan MGNİ Yöntemleri

Doğrudan denetimli yöntemlerde ise PV panelin çalışma akım ve gerilimleri belli aralıklar ile anlık olarak ölçülmektedir. Elde edilen verilere göre MGN tespit edilip dönüştürücü devre kontrolü buna göre yapılmaktadır(A. Kumar vd., 2022; Zurbriggen ve Ordonez, 2019). Bu sistemlerde sürekli olarak değişen ortam koşullarına göre I-V karakteristiği oluşturulup buna göre çalışma noktası belirlendiğinden, sistemin MGN tespitindeki doğruluk oranı oldukça yüksektir. Literatürde yaygın olarak çalışılmış bazı yöntemler şu şekildedir;

Değiştir ve Gözlemle Yöntemi (Perturb and Observe): En yaygın kullanılan MGNİ yöntemlerinden biridir. Temel bir değiştir gözleme yöntemine ait blok diyagram Şekil 2.16'daki gibidir.(Karami vd., 2017; Sera vd., 2013).Yöntemin temeli panelin çıkış gücündeki değişikliğin gözlemlenmesine dayanır. Güç değişim takibi genellikle panelin güç-gerilim (P-V) eğrisi üzerinde yapılır. Belirli aralıklarla PV panel akımı ve gerilimi ölçülerek güç hesaplanır. Gerilim ve güç değişimi dikkate alınarak PV panelin çalışma noktası değiştirilir. PV panel gücü arttıkça gerilim değişimi aynı doğrultuda devam eder, gücün azalması durumunda gerilim değişimi ters yönde oluşur (De Brito vd., 2013). MGN'na ulaşana kadar izleme işlemine davam edilir. Eğimin sıfır olduğu (dP/dV=0) durumda MGN'na ulaşıldığı kabul edilir. Gerilimdeki değişimin yönüne göre PV panelin bağlı olduğu dönüştürücü devrenin anahtar çalışma zamanı (D) ayarlanır.

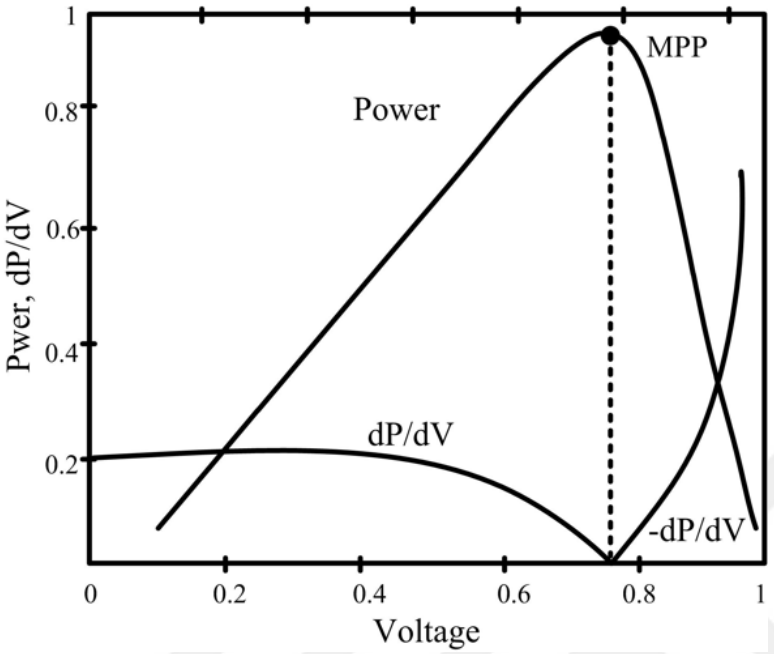


Şekil 2.16: Değiştir ve gözlemle yöntemi algoritması

Yöntem ölçüme dayalı olduğundan diğer klasik yöntemlere göre doğruluk oranı daha yüksektir. Panel katalog değerlerine bağımlı olmadığından çeşitli türdeki PV panellere kolayca adapte edilebilmektedir. Ancak algoritmanın işleyişi, I-V değerlerini değişim hızı ve MGN'na ulaşana kadar gerçekleşen adım sayısı olmak üzere iki ana değişkene bağlıdır. Bu değerlere bağlı olarak sistem bir miktar salınım ile çalışmaktadır. Özellikle ortam koşullarının sık değiştiği durumlarda salınım miktarı artmaktadır(Karami vd., 2017; Zamora vd., 2017).

Artımsal İletkenlik Yöntemi (Incremental Conductance): Değiştir ve gözlemle yöntemine benzer şekilde PV panel gücünün gerilime göre türevi alınır ve türevin sıfır olduğu nokta Şekil 2.17'de görüldüğü gibi MGN kabul edilir (Fangrui Liu

vd., 2008).



Şekil 2.17: Artımsal iletlenlik yönteminde kullanılan PV panel P-V ve türevlerinin değişim grafiği

Eşitlikteki PV panel gücünün gerilime göre türevi alınarak Eşitlik 2.21 elde edilir (Karami vd., 2017). Burada P_{PV} panel gücünü, V_{PV} panel gerilimini ve I_{PV} panel akımını temsil etmektedir.

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = \frac{d(V_{PV}I_{PV})}{dV_{PV}} = I_{PV} + V_{PV}\frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} = 0 \tag{2.20}$$

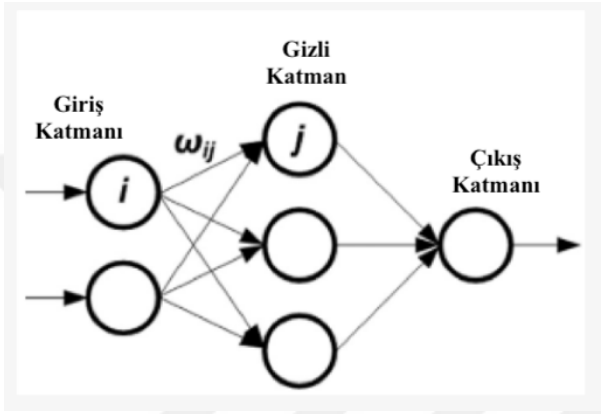
$$\frac{V_{PV}}{I_{PV}} = -\frac{dV_{PV}}{dI_{PV}} \tag{2.21}$$

MGN sağında türev sıfırdan küçük, solunda ise sıfırdan büyüktür. dV ve dI değerleri aynı zamanda akım ve gerilimdeki ortalama değişime (ΔV ve ΔI) karşılık geldiğinden, ölçülen PV panel akım ve gerilim değerlerindeki artış değerlendirilerek MGN tespiti yapılmaktadır.

Yöntem ile sürekli olarak PV panelin çalışma akım ve gerilimi ölçüldüğünden değişken ortam koşullarında kullanıma uygundur. Ancak periyodik ölçüm aralıklarından kaynaklı salınım problemi bu yöntemde de yaşanmaktadır. Salınım miktarı, değiştir ve gözlemle yöntemine göre az olmasına karşılık kontrol yapısı bir miktar daha karmaşıktır (Bollipo vd., 2020; Sera vd., 2013).

2.2.2 Yapay Zeka Tabanlı MGNİ Yöntemleri

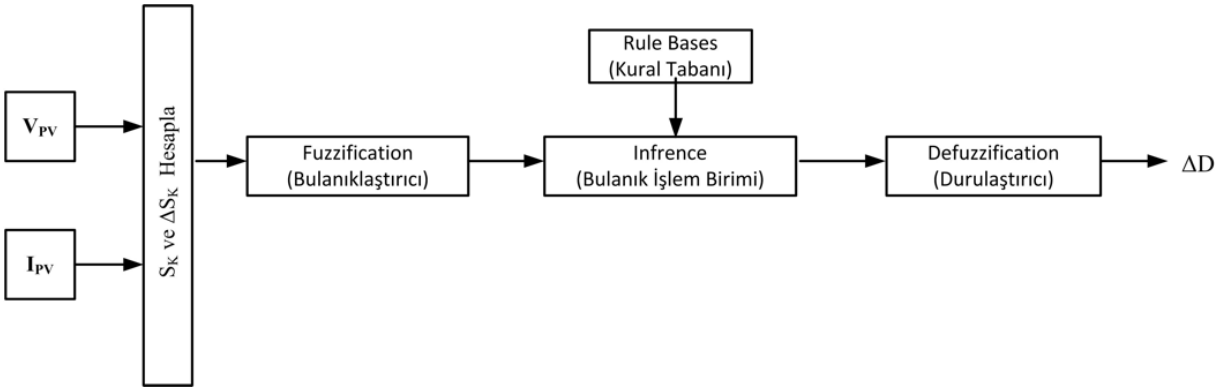
Bulanık mantık ve yapay sinir ağları tabanlı teknikler de yapay zeka tabanlı yöntemlere örnek verilebilir. Yapay zeka tabanlı yöntemler, insan merkezi sinir sisteminden esinlenen hesaplama yaklaşımlarıdır. Makine öğrenimi yeteneğine sahip bilgisayar modeli ile biyolojik sinir ağına benzer, yapay düğümler içeren bir yapı oluşturulur. Yapının en iyi uyum ile çalışabilmesi için uzun bir süre eğitilmesi gerekmektedir. Şekil 2.18'de görüldüğü gibi, Yapay sinir ağı yapılarında genellikle giriş katmanı, çıkış katmanı ve gizli katman olmak üzere üç farklı katman bulunur. PV panel özellikleri ve çevre koşulları giriş parametreleri olarak değerlendirilir (Touil vd., 2019).



Şekil 2.18: Yapay sinir ağları temsili gösterimi

Gizli katmana göre oluşturulmuş ve MGN takip etmeyi sağlayan görev sinyali ise çıkış parametresi olarak değerlendirilebilir. Sistemin MGN'a karşılık gelen referans voltajı hesaplayabilmesi için oldukça fazla sayıda veri ile uzun süre eğitilmesi gerekmektedir. Veri boyutunun artması sistem karmaşıklığı ve depolama alanı gereksinimini arttırmaktadır. PV panel parametrelerinin de zaman içinde yaşlanmaya bağlı olarak veya çalışma sıcaklığı, ışınım gibi parametrelere bağlı olarak sıklıkla değişmektedir. Bu açıdan ele alındığında algoritma eğitimi sürecinde kararsız durum oluşma olasılığı yüksektir, bu sebeple algoritmanın sık aralıklarla ve uzun süre boyunca eğitilmesi gerekmektedir (Karami vd., 2017). Ayrıca belli bir PV panel sistemi için eğitilmiş bir algoritmanın başka bir PV panel sistemin kullanılması da düşük bir ihtimaldir. Bu sebeplerden dolayı yapay sinir ağı tabanlı sistemlerde uygulama sıkıntıları görülebilmektedir (Katche vd., 2023).

MGNİ için yaygın kullanılan yöntemlerden bir diğeri de bulanık mantık kontrolcülerdir. Bulanık mantık sistemleri Şekil 2.19'da görüldüğü gibi bulanıklaştırıcı, bulanık işlem birimi ve durulaştırıcı olmak üzere üç ana bileşenden oluşmaktadır (Alrubaie vd., 2022).



Şekil 2.19: Bulanık mantık sistemi blok diyagramı

Bulanıklaştırıcı birim gerçek verileri bulanık veriye dönüştürerek bulanık işlem birimine aktarır. İşlem birimindeki temel kurallara göre hesaplama yapılır, son olarak durulaştırıcı bulanık verileri aritmetik çıktılara dönüştürür. Şekilde de görüldüğü gibi sistem çıktısı genellikle dönüştürücü devrenin anahtarlama yapısını kontrol eder. Yöntemin çözüm için lineer verilere ihtiyaç duymaması da ayrıca bir avantaj sayılabilir Ancak optimum çözümün sağlanması için bulanık işlem biriminin tasarımında uzmanlık gerektirmektedir. Sistem çıkışının doğruluğunun tasarımcının bilgi birikimine bağlı olması bir dezavantajdır. Bu yöntem ile MGN oldukça hızlı bir şekilde tespit edilebilmektedir ancak sistem çalışması salınımlıdır. (Katche vd., 2023; M. Kumar vd., 2023; Li vd., 2019).

Yapay zeka tabanlı MGNİ algoritmaları temelde tahmine dayalı hesaplama yöntemleridir. Hesaplamaların yüksek doğruluk ile yapılabilmesi için büyük boyutlu veri tabanı ve sistem hafızasının yanında tasarımcı açısında yüksek uzmanlık gerektirmektedir. Tasarımlar belli bir sisteme özel olduğundan farklı sistemler için farklı tasarımlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bütün bu etkenler de sistem karmaşıklığını ve maliyetini arttırmaktadır (Alrubaie vd., 2022; Yung Yap vd., 2020).

2.2.3 Hibrit MGNİ Yöntemleri

Kısmi gölgelenme, yağış veya ısı değişimi gibi çalışma koşullarının değiştiği durumlarda klasik MGNİ yöntemleri yetersiz kalabilmektedir. Değiştir ve gözlemle, artımsal iletkenlik ve bulanık mantık yöntemlerinde özellikle gölgelenme durumlarında MGN tespiti zorlaşmakta sistem zaman zaman yerel maksimum noktasında veya osilasyonlu bir şekilde çalışmaktadır.(A. Ali vd., 2020) Bu problemi önlemek için klasik MGNİ yöntemlerine ek olarak, yapay zeka tabanlı yöntemler gibi, yeni nesil MGNİ yöntemlerinin bir arada kullanıldığı hibrit yöntemler geliştirilmiştir (Elbarbary ve Alranini, 2021; M. Kumar vd., 2023).

Hibrit MGNİ yöntemleri bilinen iki veya daha fazla tekniğin bir araya getirilmesi yada klasik MGNİ yöntemine farklı bir optimizasyon tekniği eklenerek parametrelerin optimize edilmesi gibi iki farklı şekilde oluşturulmaktadır. Hibrit yöntemler klasik yöntemlere göre özellikle değişken çevre koşullarına hızlı anıt vermeleri yönünden daha avantajlıdır (Moo ve Wu 2014). Ancak yapay zeka tabanlı sistemlerin mevcut

dezavantajlarının bir kısmına sahiptirler. Bunun yanında hibrit sistemlerde birden fazla metot bir araya getirildiğinden sistem maliyeti ve karmaşıklığı artmaktadır.

2.2.4 MGNİ Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Bir MGNİ yönteminin performansını belirleyen ana faktörler MGN tespitinin hızı, doğruluğu, kısmi gölgelenmede(Partial Shading(Ps)) kullanıma uygunluğu, güç dönüşüm verimi, devre yapısı ve maliyeti olarak sıralanabilir. Bu kriterler göz önüne alınarak literatürde yaygın kullanılan MGNİ yöntemlerinin farklı özelliklerine göre karşılaştırması Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1: MGNİ yöntemlerinin karşılaştırılması

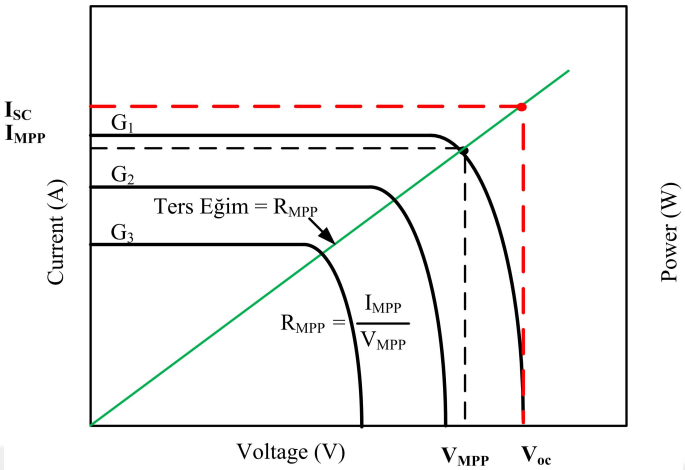
MGNİ Yöntemleri		Hız	Doğruluk	PS Uygunluk	Verim	Maliyet	Devre Yapısı
Klasik MPPT	Doğrudan	Hızlı	İyi	Değil	Yüksek	Düşük	Basit
	Dolaylı	Hızlı	Az	Uygun	Düşük	Düşük	Basit
Fuzzy		Orta	Az	Uygun	Yüksek	Yüksek	Kompleks
Optimizasyon		Yavaş	Az	Uygun	Düşük	Yüksek	Kompleks
Hibrit		Yavaş	İyi	Uygun	Yüksek	Yüksek	Kompleks

Buna göre klasik yöntemler basit ve uygun maliyetli devre yapıları ile ön plana çıkmaktadırlar. Ancak bu yöntemlerde doğrudan ölçüm yapılmadığı takdirde MGN tespitinin doğruluğu azalmaktadır. Yapay zeka ve optimizasyon temelleri sistemlerde ise devre yapısı karmaşık ve yüksek maliyetli olması gibi dezavantajlar mevcuttur. Bunun yanında sistemlerde büyük veri tabanları kullanıldığından, MGN tespiti göreceli olarak da uzun zaman almaktadır. Kısmi gölgelenme koşullarında kullanıma olanak sağlamaları ve veri tabanı iyileştirmeleri ile sistem doğruluğunun arttırılması gibi avantajları da mevcuttur. Sonuç olarak, Çizelge 2.1'e göre direk ölçüm yapabilen ve kısmi gölgelenmeye uygun yapıda bir klasik MGNİ yönteminin diğerler yöntemlere göre oldukça avantajlı olduğu anlaşılmaktadır.

2.4 MGNİ Sistemlerinde Kullanılan DC-DC Dönüştürücü Devreler

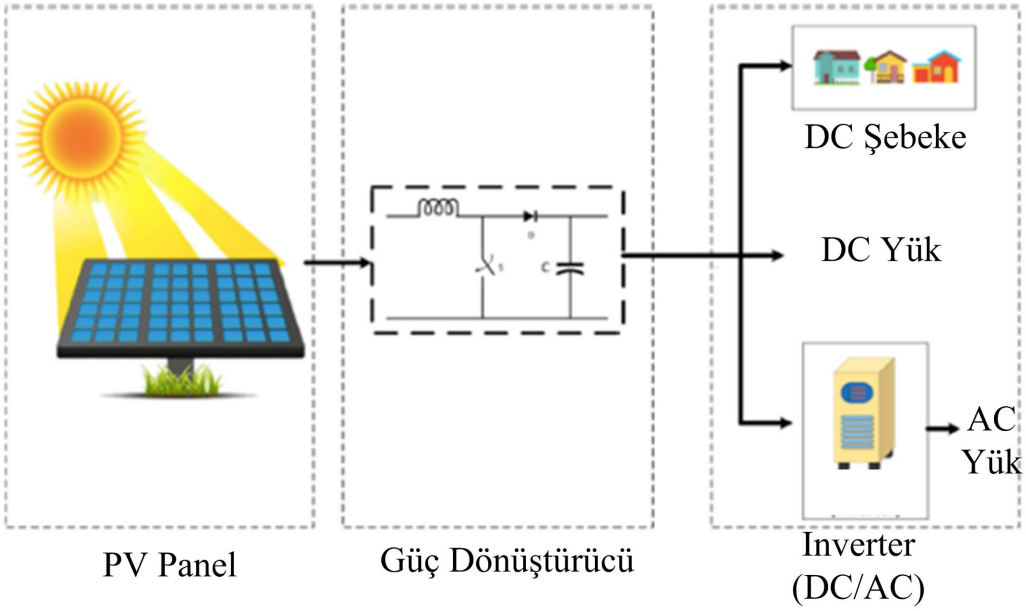
PV sistemlerden elde edilen güç miktarı büyük oranda hava koşulları, ışınım değeri, hücre sıcaklığı gibi dış etkenlere bağlıdır. Güneşlenme süresi ve güneş ışınlarının açısı gün içinde değişken olduğundan PV sistemlerin gücü de güneşlenme durumuna bağlı olarak değişmektedir. Verimli bir sistemde herhangi bir çalışma ortamında PV panelden mümkün olan en yüksek gücün elde edilmesi gerekmektedir. Maksimum güç teoremine göre bir kaynaktan çekilen gücün maksimum olabilmesi için kaynak ve yük

dirençlerinin birbirine eşit olması gerekmektedir. PV panellerde güneş ışınlarına bağlı olarak MGN'ndaki panel empedansı Şekil 2.20'de görüldüğü gibi değişmektedir.



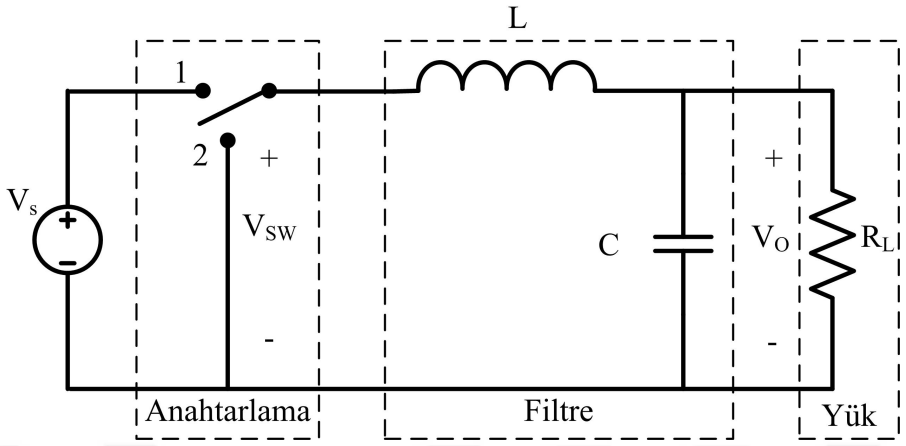
Şekil 2.20: PV panel empedansının çalışma akım ve gerilime bağlı olarak değişimi grafiği

Dc-dc dönüştürücüler, PV panelin terminal voltajlarını yük empedansına uyacak şekilde ayarlayarak PV panelin iç empedansını artırabilir veya azaltabilir (Ramki, t.y.). Bu sebeple PV sistemlerde empedans uygunluğunun sağlanması ve PV panelden alınan gücün maksimum seviyede olması için genellikle dc-dc dönüştürücü devreler tercih edilmektedir. Şekil 2.21'deki gibi Bir PV sistemde panelden elde edilen gücün yüke, aküye veya şebekeye aktarımı sırasında dc-dc dönüştürücü devreler kullanılmaktadır (Raghavendra vd., 2019; Sutikno vd., 2022).



Şekil 2.21: PV sistemlerin farklı yükler ile kullanımı

Şekil 2.22'de temel bir dc-dc dönüştürücü devre yapısı verilmiştir. Burada anahtar ve devreden ters akımın akmasını engelleyen diyot konumu değiştirilerek diğer pasif elemanların da eklenmesiyle farklı dc-dc dönüştürücü devre türleri de uygulanmaktadır.

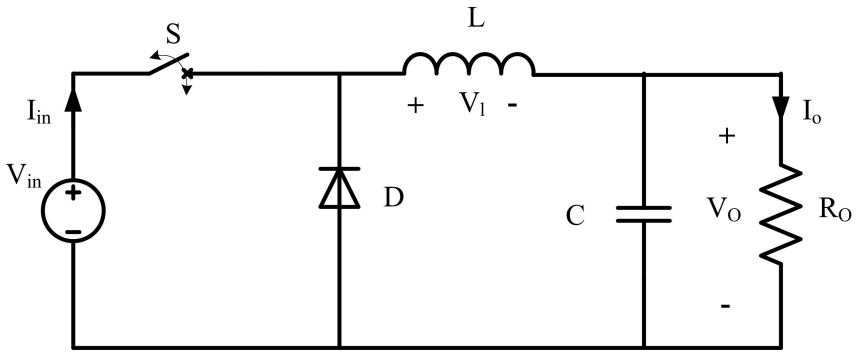


Şekil 2.22: DC-dc dönüştürücü devresi temel yapısı

PV sistemin verimini belirleyen en önemli faktör dc-dc dönüştürücü devre yapısıdır. Maksimum güç noktası izleme yöntemleri dc-dc dönüşüm sırasında uygulanmaktadır. Dc-dc dönüştürücü devrelerin anahtarlama kontrolü, kullanılan maksimum güç noktası izleme yönteminin türüne ve yapısına göre yapılmaktadır. Bu sebeple kullanılan MGNİ yöntemine uygun dönüştürücü devre seçimi oldukça önemlidir. MGNİ devrelerin yapısında kullanılan dc-dc dönüştürücü seçimi yapılırken sistem maliyeti, boyutları, güç aktarım verimi ve sistem girişindeki değişimlerden çıkışın etkilenme oranı gibi etkenler dikkate alınmaktadır(Radhika ve Margaret, 2021). Basit yapılı ve düşük maliyetli olmaları sebebiyle buck, boost, buck-boost, SEPIC, flyback gibi dc-dc dönüştürücüler PV sistemlerde yaygın olarak tercih edilmektedir. (Reshma Gopi ve Sreejith, 2018; Taghvaee vd., 2013).

2.4.1 Buck Dönüştürücü

Buck dönüştürücüde çıkış gerilimi, giriş geriliminden daima düşüktür ve temel devre yapısı Şekil 2.23'de görüldüğü gibidir. Düşürücü tip dönüştürücü olarak da adlandırılır. PV panel geriliminin, yük geriliminden daha yüksek olduğu uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 2.23: Buck dönüştürücü devresi

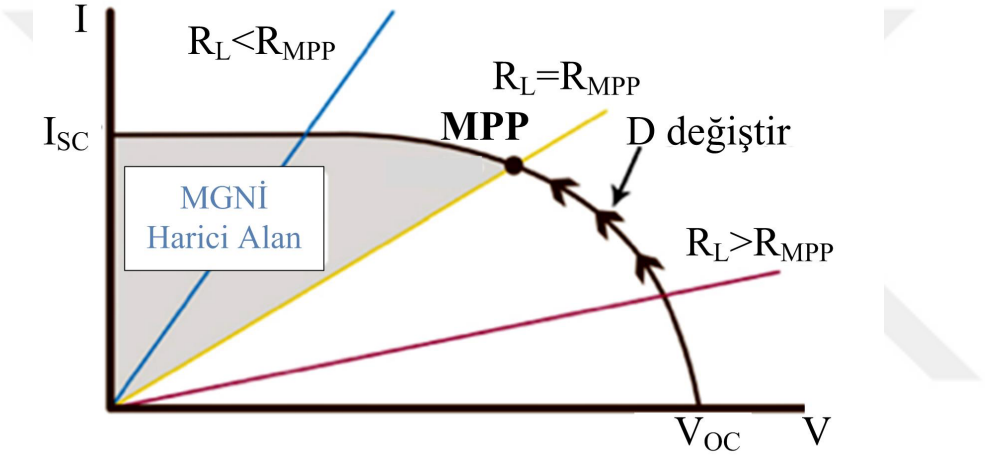
Giriş-çıkış gerilimleri oranı ve buna bağlı olarak direnç oranları Eşitlik 2.22 ve 2.24'deki gibidir (Ramki, t.y.).

$$\frac{V_o}{V_{in}} = D \tag{2.22}$$

$$\frac{I_o}{I_{in}} = \frac{1}{D} \tag{2.23}$$

$$R_{in} = \frac{R_o}{D^2} \tag{2.24}$$

D anahtar çalışma süresi olup 0 ile 1 arasında değiştiğinden, giriş direnci de R_o ile sonsuz aralıkta değişmektedir (G ve Singh, 2017).

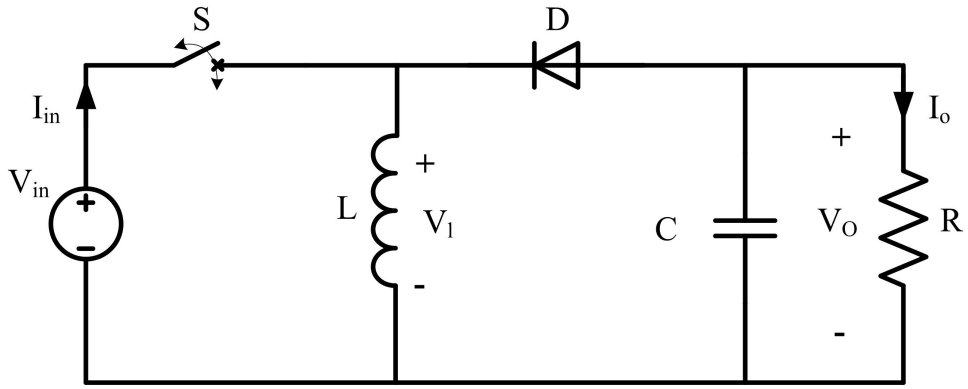


Şekil 2.24: PV panel I-V eğrisi üzerindeki Buck dönüştürücü çalışma bölgesi grafiği

Şekil 2.24'de görüldüğü gibi $R_{yük} >= R_{mgn}$ çalışma aralığında MGNİ olarak kullanılmaktadır. MGN akımının kısa devre akımına yakın olduğu durumlarda MGN takibinde yetersiz kalabilmektedir. Kolay ve basit yapılı olması gibi avantajlarının yanında giriş akımındaki dalgalanmanın fazla olması ve anahtar kontrol devresinin karmaşıklığı gibi dezavantajları bulunmaktadır (Raghavendra vd., 2019; Taghvaee vd., 2013).

2.4.2 Buck-Boost Dönüştürücü

Buck-Boost dönüştürücü çıkış gerilimi giriş geriliminden yüksek veya düşük olabilen hem yükseltici hem de düşürücü modda çalışabilen bir dc-dc dönüştürücü devre türüdür. Temel devre yapısı Şekil 2.25'de görüldüğü gibidir.



Şekil 2.25: Buck-Boost dönüştürücü devresi

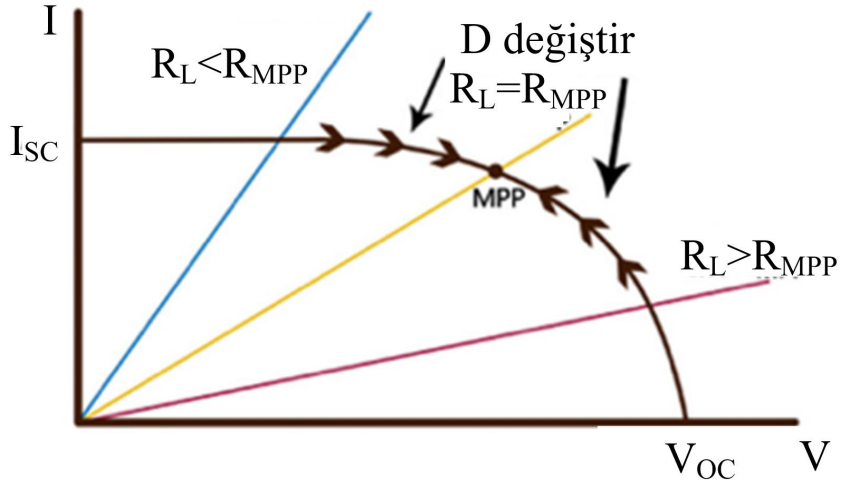
Anahtar çalışma zamanına bağlı olarak giriş ve çıkış gerilim arasındaki ilişki eşitlik 2.25'deki gibi ifade edilmektedir. Buna bağlı olarak giriş ve çıkış empedanslarının oranı ise Eşitlik 2.27'daki gibi değişmektedir (Ramki ve Tripathy, 2015).

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{D}{1-D} \tag{2.25}$$

$$\frac{I_o}{I_{in}} = \frac{1-D}{D} \tag{2.26}$$

$$R_{in} = R_o\left(\frac{(1-D)^2}{D^2}\right) \tag{2.27}$$

Eşitlik 2.27'ye göre dönüştürücü giriş empedansı sıfır ile sonsuz aralıkta değişmektedir.



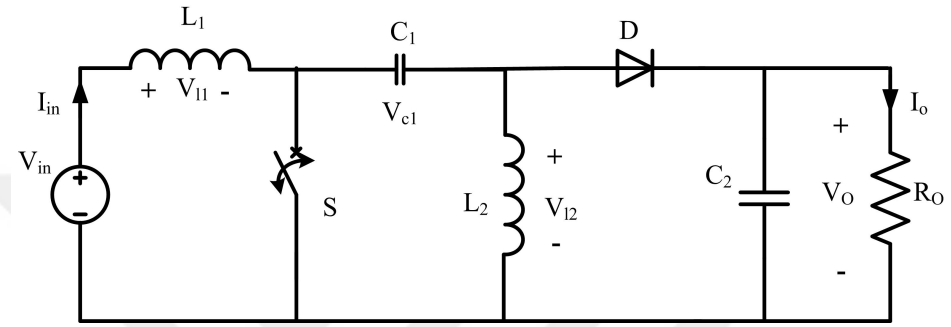
Şekil 2.26: PV panel I-V eğrisi üzerindeki Buck-Boost dönüştürücü çalışma bölgesi grafiği

Şekil 2.26'de görüldüğü gibi çalışma aralığı Buck dönüştürücüye göre daha geniştir. Bu sayede değişen çalışma koşullarına rahatlıkla adapte olabilmektedir. Sıcaklık, ışınım gibi parametrelerin daha geniş aralıkta değişmesi durumunda da MGN takibi yapabilmektedir. Yapılan bazı çalışmalarda Buck-Boost dönüştürücüde verimin özellikle Boost dönüştürücüye göre bir miktar düşük olduğu ifade edilmektedir. Bir diğer

dezavantajı da anahtar çalışma süresine bağlı olarak çıkış geriliminin polaritesinin giriş gerilimine göre ters olmasıdır (Poshtkouhi vd., 2012; Taghvaee vd., 2013).

2.4.3 SEPIC Dönüştürücü

SEPIC dönüştürücü çalışma prensibi Buck-Boost dönüştürücüyle oldukça benzer olup çıkış gerilimi giriş geriliminden daha düşük veya yüksek seviyede elde edilebilmektedir. Temel bir SEPIC dönüştürücü devresi Şekil 2.27'de gösterilmektedir. Buck- boost dönüştürücüden farkı güç dönüşümü sırasında enerji transferinin kondansatör ile bobin arasında olmasıdır (Ramki ve Tripathy, 2015).

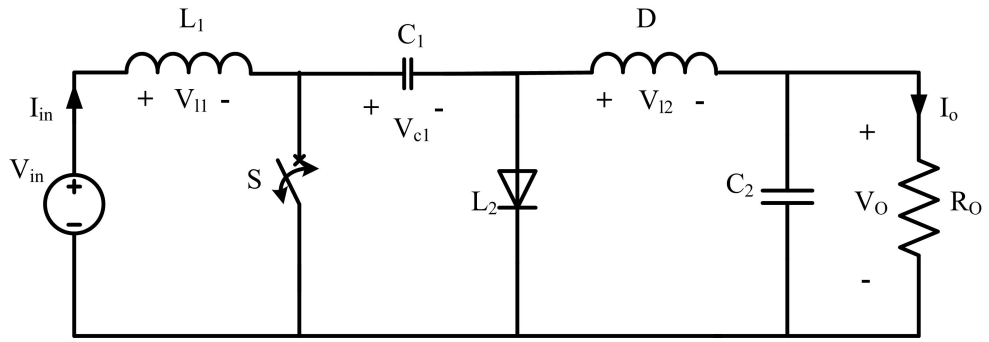


Şekil 2.27: SEPIC dönüştürücü devresi

Anahtar çalışma süresine bağlı olarak giriş gerilimi çıkış geriliminden daha yüksek veya düşük olabilmektedir. Buck boost dönüştürücüdeki gibi giriş çıkış gerilimlerinin ters polariteli olma problemi SEPIC dönüştürücüde yoktur. Ancak devredeki komponent sayısı daha fazla olduğundan verimi bir miktar daha düşüktür (Majstorovic vd., 2020). Giriş akımındaki dalgalanma daha ve anahtarlama kontrolü de daha basittir (G & Singh, 2017; Taghvaee vd., 2013).

2.4.4 Cuk Dönüştürücü

Cuk dönüştürücü de buck-boost dönüştürücü ye benzer yapıda olup Şekil 2.28'de de görüldüğü gibi enerjinin depolanması ve transferinde bobin yerine kondansatör kullanılmaktadır (Seguel vd., 2022).



Şekil 2.28: Cuk dönüştürücü devresi

Cuk dönüştürücüde çıkış geriliminin polaritesi giriş gerilimine göre terstir. Giriş geriliminin çıkış gerilimine oranı anahtar çalışma zamanına bağlı olarak Eşitlik 2.28'deki gibi değişmektedir (Safari ve Mekhilef, 2011).

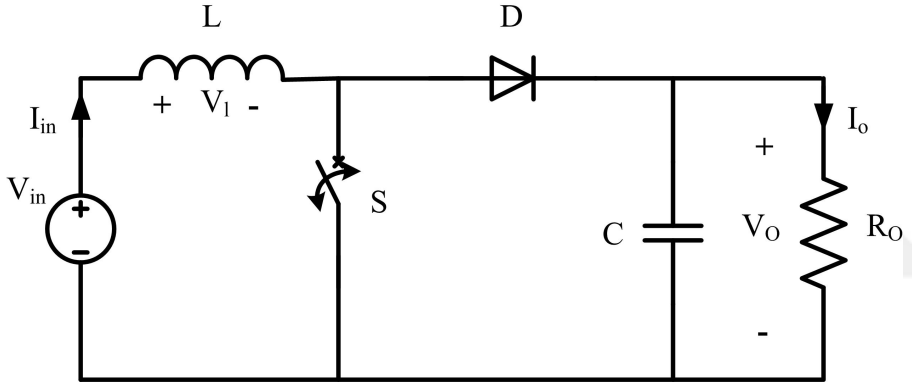
$$\frac{V_o}{V_{in}} = -\left(\frac{D}{1-D}\right) \tag{2.28}$$

$$\frac{I_{in}}{I_o} = -\left(\frac{D}{1-D}\right) \tag{2.29}$$

Giriş gelimindeki dalgalanma oldukça az ve anahtarlama kontrolü basit olması gibi avantajları sayesinde MGNİ devrelerinde tercih edilmektedir (Chafle vd., 2013).

2.4.5 Boost Dönüştürücü

Çıkış gerilimi, giriş geriliminden daha yüksek olan dc-dc dönüştürücü türüdür. Yükseltici tip dönüştürücü olarak adlandırılır. PV panel geriliminin yükseltilerek kullanılması gereken uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Temel bir boost dönüştürücü devresi Şekil 2.29'da görüldüğü gibidir.



Şekil 2.29: Boost dönüştürücü devresi

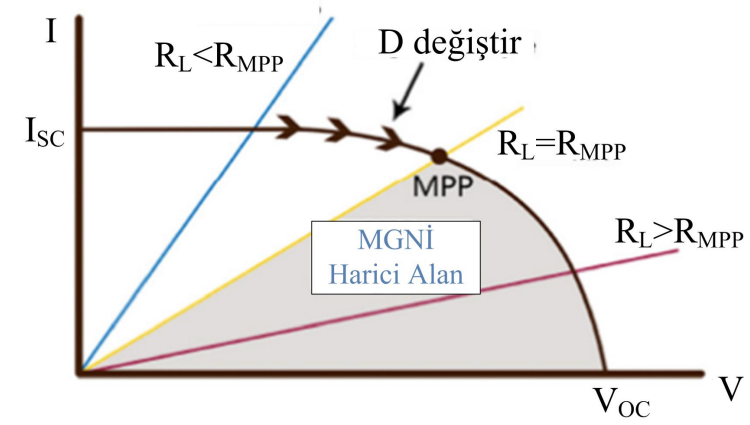
Giriş geriliminin çıkış gerilimine oranı eşitlikte 2.30'da verildiği gibi anahtar çalışma zamanına bağlı olarak değişmektedir. Giriş akımının çıkış akımına oranı da Eşitlik 2.31'de olduğu gibidir.

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{1-D} \tag{2.30}$$

$$\frac{I_o}{I_{in}} = 1 - D \tag{2.31}$$

$$R_{in} = R_o(1-D)^2 \tag{2.32}$$

Eşitlik 2.30 ve 2.31 kullanılarak elde edilen giriş empedansı ile çıkış empedansı arasındaki ilişki eşitlik 2.32'de verilmiştir. Buna göre MGN izleme amacıyla kullanılan boost devrenin çalışma alanı Şekil 2.30'da görüldüğü gibi $R_{yük} <= R_{MGN}$ olduğu aralığı kapsamaktadır.

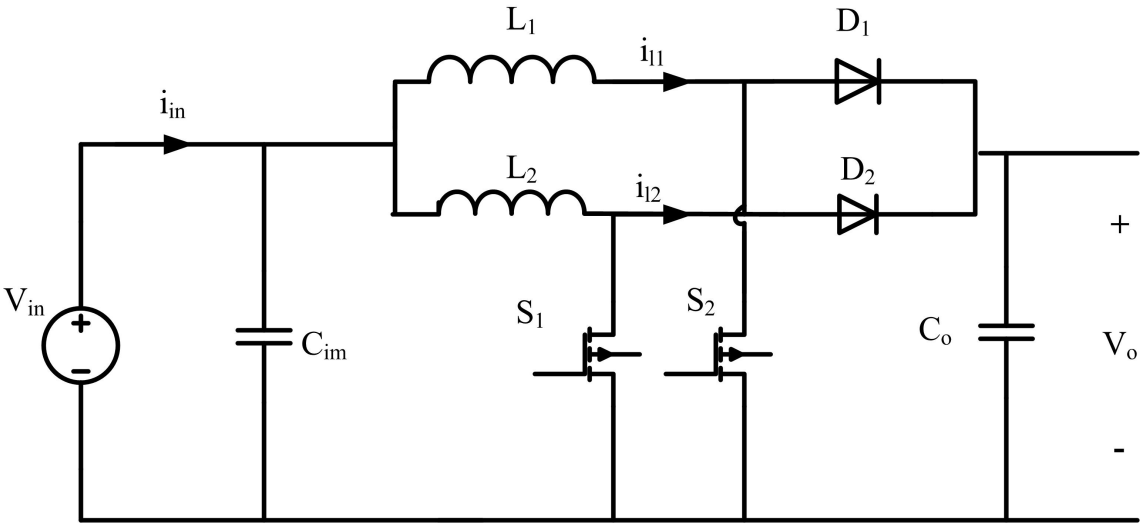


Şekil 2.30: PV panel I-V eğrisi üzerindeki Boost dönüştürücü çalışma bölgesi grafiği

Boost dönüştürücü MGN'nın kısa devre akımına yakın olduğu bölgede oldukça iyi performans göstermektedirler. Buck dönüştürücüye göre giriş akımındaki dalgalanma daha azdır. Ayrıca anahtarının source terminali toprak potansiyelinde olduğundan anahtarlama devresinin kontrolü daha kolaydır.

Dc-dc Boost dönüştürücü, basit yapısı, düşük maliyeti ve kontrol kolaylığı gibi avantajlarından dolayı MGNİ yöntemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak giriş akımındaki dalgalanma, her ne kadar buck dönüştürücüye göre daha az olsa da PV uygulamalarında çıkış gücündeki toplam güç değişimine olumsuz etki etmektedir.

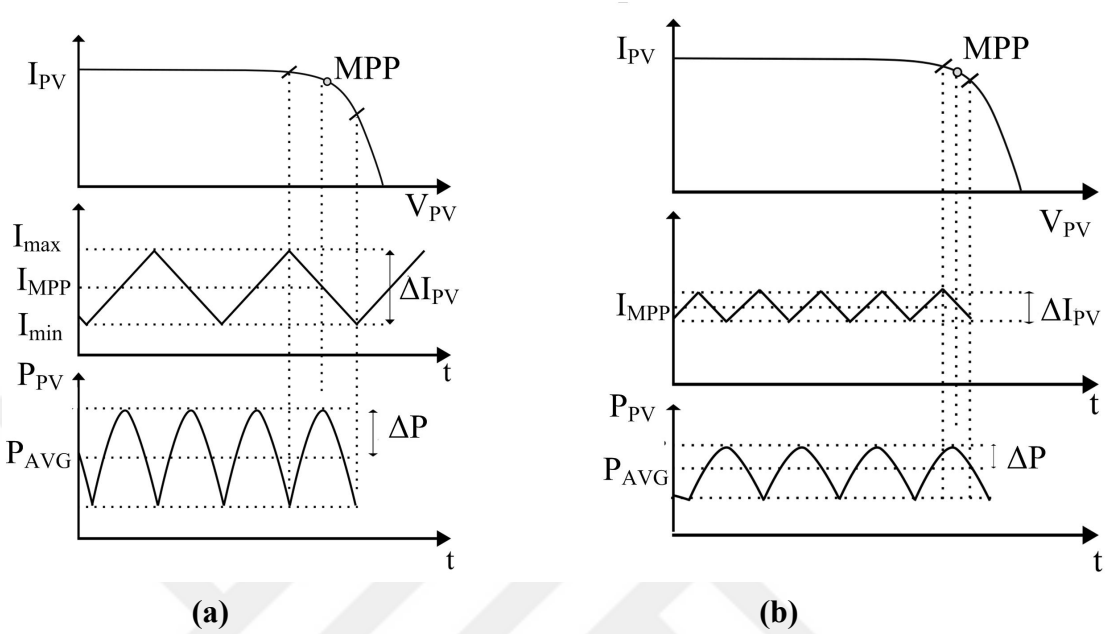
Boost dönüştürücüdeki giriş akımı dalgalanması problemini ortadan kaldırmak için Şekil 3.32'de verilen çift katlı (interleaved boost) dönüştürücüler kullanılmaktadır.



Şekil 2.31: Interleaved Boost Dönüştürücü Devre Yapısı

Interleaved boost dönüştürücüde giriş akımı ve çıkış gerilimindeki dalgalanma klasik boost dönüştürücüye göre daha düşüktür. Akım dalgalanmasındaki bu azalma ile toplam güç değişimi de azalmakta ve sistem verimi artmaktadır (Çandır ve Börekci, 2024; Elkhateb vd., 2013). Şekil 2.32.a ve 2.32.b'de sırasıyla klasik boost dönüştürücü ve

interleaved boost dönüştürücüde PV akımındaki dalgalanma miktarına bağlı olarak toplam güç miktarındaki değişim gösterilmektedir.



Şekil 2.32: a) Klasik boost dönüştürücü ile PV akımı dalgalanmasına bağlı olarak gerçekleşen güç değişimi **b)** Interleaved boost dönüştürücü ile PV akımı dalgalanmasına bağlı olarak gerçekleşen güç değişimi (Çandır ve Börekci, 2024).

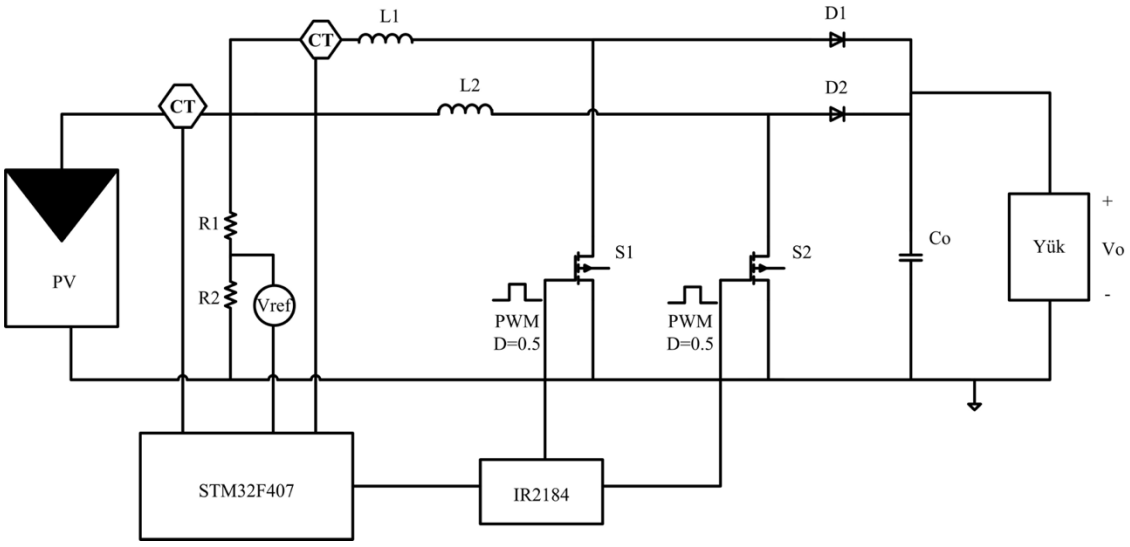
PV akımında meydana gelen dalgalanma ΔI_{PV} değerinin fazla olması durumunda, PV panel çıkış gücündeki değişim miktarı ΔP_{PV} de artacağından panelden alınan ortalama güç miktarı azalmaktadır. İnterlaved dönüştürücü yapısının kullanımıyla devrede kullanılan eleman sayısı artmaktadır ancak devrenin giriş ve çıkışındaki düşük dalgalanmaya bağlı olarak kondansatör boyutları küçüldüğünden devrenin maliyeti daha ucuz ve kullanım ömrü daha uzun olmaktadır (Faraj ve Hussain, 2020; Mirbagheri vd., 2013).

3. MATERYAL VE METOT

Bu tez çalışmasının amacı, ölçüme dayalı ve yüksek doğruluk ile çalışan yeni bir MGNİ yönteminin geliştirilmesidir. Çalışmada sunulan MGNİ tekniği doğrudan denetimli bir yöntem olup sürekli olarak güneş panelinin I-V değişimi ölçülmektedir. MGN tespiti sırasında çalışma ortamı koşullarına göre I-V eğrisindeki değişim dikkate alındığından, geliştirilen MGNİ yöntemi değişken ortam koşulları altında kullanıma uygun yapıdadır.

Bu çalışmada, literatürde çalışılan yöntemlerden farklı olarak, PV panel I-V eğrisi dönüştürücü devrede bulunan bobinin anlık akımının analizi ile elde edilmektedir. Dönüştürücü devre olarak interlaved boost yapısı tercih edilmiştir. Interleaved boost dönüştürücülerde giriş akımındaki dalgalanma miktarı klasik boost dönüştürücüye göre oldukça azdır. Devre girişinde bulunan kaynak anahtarların iletim durumunda bobin üzerinden kısa devre olmaktadır. Kısaca, anahtarın iletim süresince PV akımı bobin akımına eşit olmaktadır. Bu yönüyle bobin ile I-V eğrisi ölçümü yönteminin uygulanmasına elverişli yapıda bir dönüştürücüdür.

Interleaved dönüştürücü devrede bulunan iki adet anahatar kritik modda, %50 sabit çalışma oranı ile kontrol edilerek PV akımındaki dalgalanma ve buna bağlı çıkış gücündeki değişim miktarının minimum olması amaçlanmaktadır. Ayrıca kritik modda çalışmada sıfır akım altında anahtarlama ile anahatarlama kayıplarının devre verime olan olumsuz etkisinin en aza indirilmesi hedeflenmektedir. MGNİ için tasarlanan sistem yapısı Şekil 3.1'de verilmiştir.



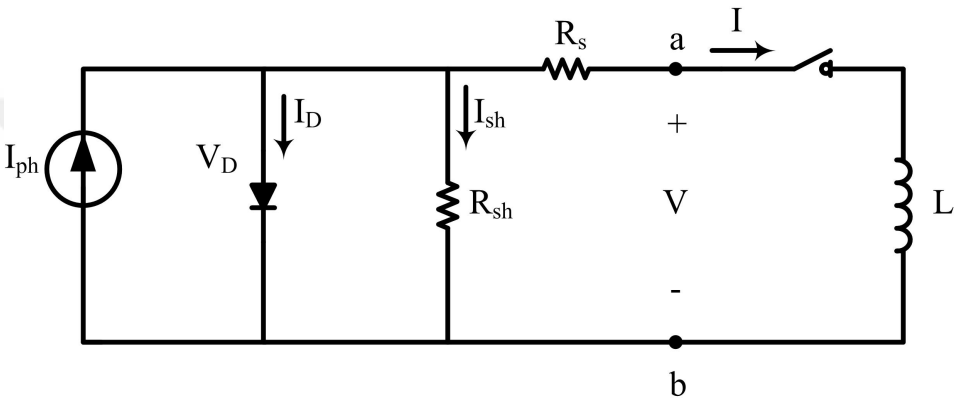
Şekil 3.1: Tasarlanan MGNİ Sistemin Temel Yapısı

Devrede uygulanan kontrol yöntemi anahtarlama frekansının değiştirilmesi prensibine dayanmaktadır. Ortalama PV panel gücü her 100 ms'de bir kontrol edilerek %5'den fazla değişimin gerçekleşmesi durumunda, anahtarlama frekansı azaltılarak anahtar iletim süresi arttırılmaktadır. Anahtarın iletimde olduğu sürece bobin akımı PV panel akımına eşit olana kadar artmaktadır. Anahataın iletim süresi arttırılsa da bu

aralıkta bobin akımı en fazla panelin kısa devre akımına kadar şarj olarak sabit kalmaktadır. Geliştirilen yöntemde, anahatarın iletim anındaki bobin akımının anlık değişimi analiz edilerek MGN tespiti noktasal olarak yapılmaktadır. Ölçülen PV panel akımı ve gerilimine bağlı olarak çıkış gücündeki değişimin takibi, bobin akımının örneklenmesi ve MGN hesabı, anahtarlama frekansının kontrolü STM32F407 geliştirme kartı ile oluşturulan algoritmaya bağlı olarak gerçekleştirilmektedir.

3.1 Bobin ile Güneş Paneli I-V Eğrisi Ölçümü

Güneş paneli I-V eğrisi ölçümünde Bölüm 2.2'de bahsedilen kondansatörlü ve dirençli ölçüm yöntemlerine benzer şekilde Şekil 3.2'de sunulan devre yapısı kullanılarak bobin üzerindeki akım ve gerilim değişimi analiz edilmiştir. (Borekci ve Acar, 2024).



Şekil 3.2: Bobin Yüklü I-V Eğrisi Ölçüm Devresi

Güneş pili, hesaplama kolaylığı ve sadeliği dikkate alınarak Şekil 3.2'deki gibi tek diyot modeli ile temsil edilmiştir. R_s ihmal edilerek devrenin çıkış akımı I ve çıkış gerilimi V ifadeleri Eşitlik 3.1 ve Eşitlik 3.2'de verilmiştir. Eşitliklerde I_D diyot akımını, I_{ph} foton akımını ve V_D diyot gerilimini temsil etmektedir.

$$I_D + I = I_{Ph} \tag{3.1}$$

$$R_s I + V = V_D \tag{3.2}$$

Tek diyot modeline göre diyot akımı ve diyot gerilimi eşitlikleri sırasıyla Eşitlik (3.3) ve (3.4)'teki gibi ifade edilmektedir. Burada V_T termal gerilimi, I_0 saturasyon akımını ve A ideallik faktörünü temsil etmektedir.

$$I_D = I_0 \left[exp\left(\frac{V_D}{AV_T}\right) - 1 \right] \tag{3.3}$$

$$V_D = V_T \, ln\left(\frac{I_D + I_0}{I_0}\right) \tag{3.4}$$

Devrede matematiksel eşitliklerin sadeleştirilmesi için, bobinin başlangıç akımı sıfır kabul edilmiş ve R_s direnci ihmal edilmiştir. Sabit ışınım koşullarında, Şekil 3.1'deki akımın zaman göre değişimi eşitlikteki gibi ifade edilmektedir.

$$\frac{dI_D}{dt} + \frac{dI}{dt} = 0 \tag{3.5}$$

Devrede bobin akımı ile gerilimi arasındaki ilişki ise Eşitlik (3.6)'da olduğu gibidir.

$$\frac{V}{L} = \frac{dI}{dt} \tag{3.6}$$

Eşitlik (3.3)'te V_D yerine eşitlik (3.2)'deki ifadenin yazılmasıyla ve R_s direncinin ihmali dikkate alınarak diyot akımı Eşitlik (3.7)'de olduğu gibi elde edilmektedir.

$$I_D = I_o.\left(e^{\frac{V}{A.V_T}} - 1\right) \tag{3.7}$$

Bu durumda diyot akımındaki değişim Eşitlik (3.8) ve (3.9)'daki gibi olmaktadır.

$$\frac{dI_D}{dV} = \frac{I_o}{A.V_T}.\left(e^{\frac{V}{A.V_T}}\right) \tag{3.8}$$

$$\frac{dI_D}{dt}.\frac{dt}{dV} = \frac{I_o}{A.V_T}\left(e^{\frac{V}{A.V_T}}\right) \tag{3.9}$$

Şekil 3.2'deki devrede panel çıkışında yük olarak bobin bağlı olduğundan bobin akım ve gerilimi PV panel çıkış gerilimi ve akımına eşit olmaktadır. (3.6) ve (3.9)'un (3.5)'te yerine yazılmasıyla devrenin akım eşitliği (3.10)'daki gibi olmaktadır.

$$\frac{I_o}{A.V_T}.\left(e^{\frac{V}{A.V_T}}\right).\frac{dV}{dt} + \frac{V}{L} = 0 \tag{3.10}$$

$$\frac{I_o}{A.V_T}.\left(e^{\frac{V}{A.V_T}}\right)dV + \frac{V}{L}.dt = 0 \tag{3.11}$$

Burada Eşitlik (3.11)'in integrali alınarak (3.12) elde edilir.

$$\int \frac{I_o}{AV_T}.e^{\frac{V}{AV_T}}dV + \int \frac{V}{L}dt = C \tag{3.12}$$

Çıkış geriliminin başlangıç değeri PV panel açık devre gerilimine eşit kabul edilerek($V_{(t=0)} = V_{oc}$), integral katsayısı C, Eşitlik (3.13)'de olduğu gibi ifade edilir. Bu eşitliğe göre, (3.12) tekrar düzenlenirse Eşitlik (3.14) elde edilir.

$$C = I_o.e^{\frac{V_{oc}}{A.V_T}} \tag{3.13}$$

$$I_o.e^{\frac{V}{A.V_T}} + \frac{V}{L}.t = I_o.e^{\frac{V_{oc}}{A.V_T}} \tag{3.14}$$

Eşitlik (3.14)'e 2. derece taylor serisi açılımı uygulanması ile (3.15) elde edilmektedir.

$$0 = I_o.\left[1 + \frac{V}{A.V_T} + \sum_{n=2}^{N}\left[\left(\frac{V}{A.V_T}\right)^n.\frac{1}{n!}\right]\right] + \frac{V}{L}.t - I_o.e^{\frac{V_{oc}}{A.V_T}} \tag{3.15}$$

Sonuç olarak, devrenin gerilim eşitliğinin basitleştirilmiş hali Eşitlik (3.16)'da verilmiştir.

$$V(t) = \frac{AV_T\sqrt{A^2.V_T^2.t^2 - I_o^2.L^2 + 2.I_o^2.L^2.e^{\frac{V_{oc}}{A.V_T}} + 2.A.I_o.L.V_T.t}}{I_oL} - A.V_T - \frac{A^2.V_T^2.t}{I_o.L} \quad (3.16)$$

Yöntemde hesaplanması gereken başlıca önemli parametreler bobin boyutu ve test süresidir. Eşitlik 3.17 yardımı ile PV panel özelliklerine göre test süresi ve bobin boyutu sırasıyla Eşitlik 3.18 ve 3.19'da olduğu gibi hesaplanmaktadır.

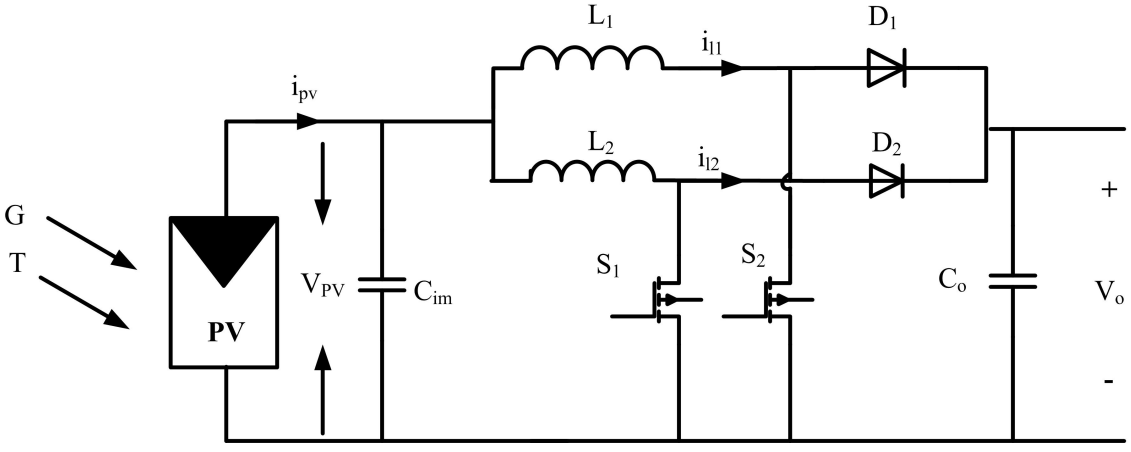
$$V(t_{test}) = \frac{V_{oc}}{20} \quad (3.17)$$

$$\frac{t_test}{L} = \frac{I_o.e^{\frac{V_{oc}}{A.V_T}}}{\frac{V_{oc}}{20}} \quad (3.18)$$

Eşitlik 3.18 PV panel eğrisinin elde edilmesi gerekli minimum test süresinin sağlanabilmesi için gerekli bobin sınır değerlerini ifade etmektedir. Bu çalışmada I-V eğrisi dönüştürücü bobini üzerinden analiz edildiğinden bobin tasarım aşamasında minimum test süresi dikkate alınmamıştır.

3.2 Interleaved Boost Dönüştürücü Matematiksel Analizi

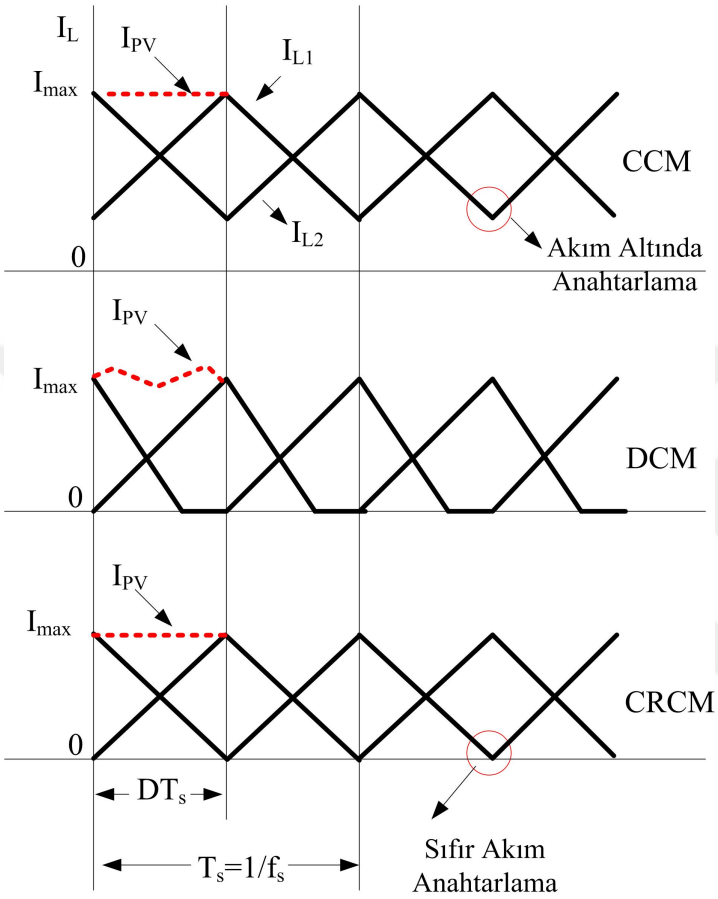
Dc-dc Boost dönüştürücü, basit yapısı, düşük maliyeti ve kontrol kolaylığı gibi avantajlarından dolayı MGNİ yöntemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak standart boost dönüştürücüde giriş akımındaki dalgalanma ve anahtar üzerindeki gerilim stresi PV sistem verimini olumsuz etkilemektedir. Bu olumsuzluğu ortadan kaldırmak için Şekil 3.3'de verilen iki katlı (interleaved boost) dönüştürücüler tercih edilmektedir.



Şekil 3.3: Interleaved Boost Dönüştürücü Devre Yapısı

Interleaved boost dönüştürücülerde, her bir anahtarlama periyodunda çıkışa aktarılan gücün miktarına göre çalışma modları, sürekli, süreksiz ve kritik mod olmak üzere üçe ayrılır. Şekil 3.3'deki devrede S_1 anahtarı kapandığı anda, L_1 bobini üzerindeki akım Şekil 3.4'deki gibi artar ve L_1 bobininde enerji depolanır. Bu sırada çıkış gerilimi,

giriş gerilimine göre daha yüksek olduğundan D_1 diyotu iletime geçmez. S_1 anahtarı açıldığında, D_1 diyotu bobinde depolanan enerjiyi çıkışa aktarır ve L_1 akımı giriş ve çıkış gerilimi oranına bağlı olarak azalır. Devrede bobinler birebir aynıdır ve iki güç kanalı da benzer çalıştığından, diğer yarı periyotta S_2 anahtarının iletime geçmesi ile aynı döngü ikinci kanal üzerinde tekrarlanır. Interleaved boost devrenin çalışma moduna göre bobin akımı dalga şekilleri Şekil 3.4'deki gibi elde edilir.



Şekil 3.4. Çalışma moduna göre interleaved boost dönüştürücünün bobin akımı dalga şekilleri.

Bobinde depolanan enerjinin tümünün çıkışa aktarıldığı çalışma şekli süreksiz mod(DCM) olarak adlandırılır. Süreksiz modda bobin akımı belli bir süre sıfır olabilir. Bobinde depolanan enerjinin belli bir kısmının çıkışa aktarıldığı çalışma şekli ise sürekli mod(CCM) olarak adlandırılır. Bu çalışma modunda bobin akımı tam olarak sıfır olmaz belli bir miktar azaldıktan sonra tekrar artmaya başlar. Sürekli ve süreksiz moddan farklı olarak bobin akımının tepe değer ile sıfır arasında değiştiği ve kritik mod(CRCM) olarak isimlendirilen bir çalışma modu daha vardır. Bu çalışma modunda, anahtarın iletim durumunda bobin enerjisi kaynak akımına eşit oluncaya kadar yükselir ve kesim durumunda sıfıra iner. Akım sıfıra ulaştıktan hemen sonra tekrar bobin enerji depolamaya başlar. Anahtarın iletim durumunda PV panel bobin üzerinden kısa devre olduğundan devrenin bu aşamadaki davranışı Şekil 3.2'deki bobin ile I-V eğrisi ölçüm devresi gibidir. Bu sebeple bu çalışmada, bobin ile I-V eğrisi ölçüm yöntemi, kritik modda çalışan interleaved boost devresi ile kullanılmıştır.

Devre yapısının I-V eğrisi ölçüm yöntemine uygun olmasının yanında, anahtarlamanın sıfır akımın altında yapılması ve ters diyot akımının olmaması anahtarlama kayıplarının diğer çalışma şekillerine göre daha az olmasını sağlamaktadır. Ayrıca anahtarların %50 çalışma süresi ile çalıştırılması durumunda giriş akımındaki dalgalanma neredeyse sıfırdır.

Interleaved boost dönüştürücüde bobin ve diyotlar her iki güç katı için aynı olmalıdır. Bu elemanların seçimini etkileyen en önemli kriterler anahtar çalışma süresi ve tepe akım değerleridir. Anahtar çalışma süresi D, giriş gerilimi V_i ve çıkış gerilimi V_o oranlarına göre Eşitlik 3.20'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$D = \frac{V_o - V_i}{V_o} \tag{3.20}$$

Şekilde 3.2'deki devrede iki güç katı bulunduğundan, tek bir güç katındaki akım toplam giriş akımının yarısı kadardır. Bu husus dikkate alınarak ve çıkış hesaba katılarak L_1 bobininin ortalama akım değeri I_{ort} Eşitlik 3.21'den hesap edilmektedir.

$$I_{L1_{ort}} = \frac{0.5 \times I_o}{1 - D} \tag{3.21}$$

L_1 bobinin akımının tepe değeri ise akımdaki dalgalanma miktarı ΔI_{L1} da hesaba katılarak Eşitlik 3.22'den elde edilmektedir.

$$I_{max} = I_{L1_{ort}} + \frac{\Delta I_L}{2} \tag{3.22}$$

Bulunan akım, gerilim değerleri ve seçilen anahtarlama frekansı f_s için L_1 bobininin minimum değeri ise Eşitlik 3.22'deki gibi ifade edilmektedir.

$$L_{1_{min}} = \frac{V_i \times D}{f_s \times \Delta I_L} \tag{3.23}$$

Kritik çalışma modunda, bobin akımındaki dalgalanma Şekil 3.3'deki gibi sıfır ile tepe değer arasında değişmektedir. Bundan dolayı kritik modda çalışmada bobin akımının ortalama değeri eşitlik 3.24'de olduğu gibidir.

$$I_{L1_{ort-krtk}} = \frac{\Delta I_{max}}{2} \tag{3.24}$$

Eşitlik 3.21 ve 3.24'den kritik modda bobin akımının tepe değeri Eşitlik 3.25'deki gibi ifade edilmektedir.

$$I_{L1_{max-krtk}} = \frac{I_o}{1 - D} \tag{3.25}$$

Eşitlik 3.25 ve 3.23 dikkate alınarak kritik modda çalışma için gerekli bobin değeri Eşitlik 3.26'dan hesaplanmaktadır.

$$L_{krtk} = \frac{(V_{in} \times D \times (1 - D))}{f_s \times I_o} \tag{3.26}$$

Son olarak çıkış kondansatörünün değeri ise çıkış gerilimindeki dalgalanma miktarı, ΔV_o hesaba katılarak Eşitlik 3.27'deki gibi elde edilmektedir.

$$\Delta V_o = \frac{I_o \times (1 - D_{min})}{f_s x C_o} \tag{3.27}$$

Bu çalışmada kullanılacak 40 Watt çıkış gücüne sahip PV panelin katalog bilgileri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1: Kullanılan PV Panel Özellikleri

Maksimum Güç(W)	40
Açık Devre Gerilimi (Volt)	22
Kısa Devre Akımı (Amper)	2.58
Maks. Güçteki Gerilim V_{MGN} (Volt)	18
Maks Güçteki Akım I_{MNG} (Amper)	2.2
Hücre Sayısı	6x12

PV panel çalışma gücü ile çalışma akım ve gerilimi dikkate alınarak tasarlanan interleaved boost dönüştürücünün devre elemanları Çizelge 3.2'de verilmektedir.

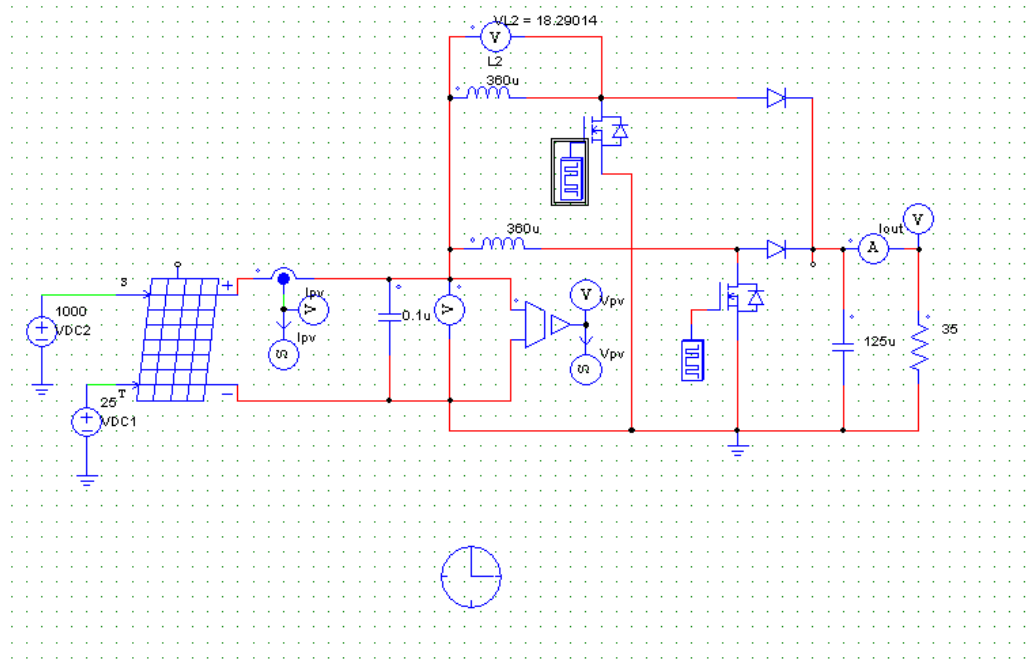
Çizelge 3.2: Tasarlanan devre parametreleri

Giriş gerilimi	18 V
Çıkış gerilimi	36 V
Duty (S_1=S_2)	0.5
Anahtarlama Frakansı f_s	12 kHz
L_1 ve L_2 Bobinleri	360 µH
Çıkış Kondansatörü C_o	100 µF
Yük R_L	35 Ω

3.3 Interleaved Boost Dönüştürücünün Benzetim Çalışması

Matematiksel tasarımı yapılan devrenin benzetimi PowerSim uygulaması ile yapılmıştır. Çalışmada kullanılan 40 W'lık PV panel, etiket değerlerine göre benzetim programında modellenmiştir. PV panel ışınım değeri 1000 W/m^2 ve sıcaklık 25 °C olacak şekilde normal ortam koşullarına göre ayarlanmıştır. Çizelge 3.2'de verilen değerlere

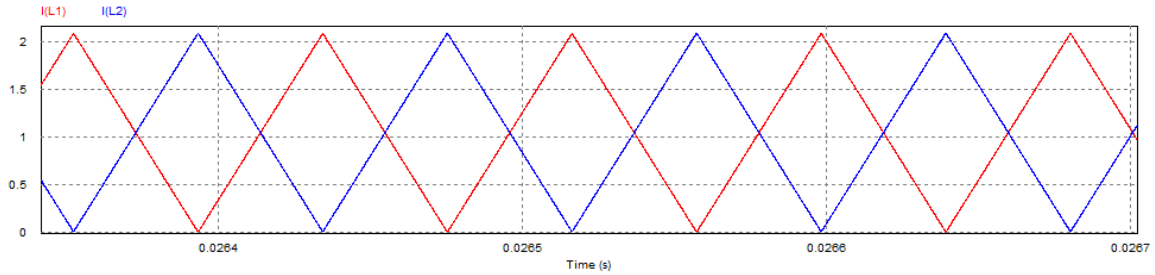
göre tasarlanan interleaved boost dönüştürücü devre PV panel çıkışına bağlanarak oluşturulan devre yapısı Şekil 3.5'de verilmiştir.



Şekil 3.5: PV panel ve interleaved boost devrenin simülasyon modeli

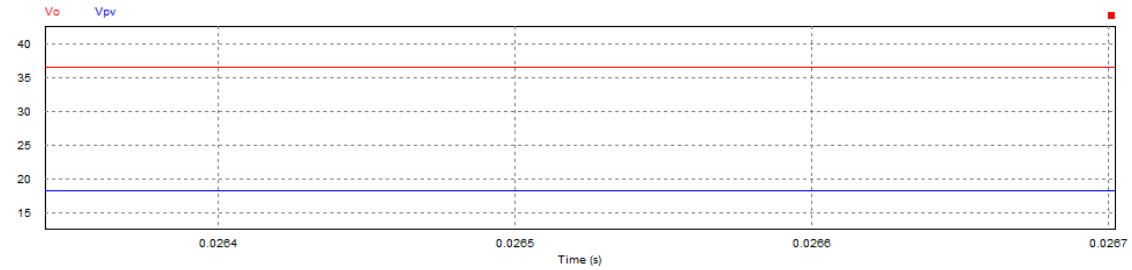
Devre çıkışındaki yük 40 W'lık PV panel gücünü karşılayabilecek bir direnç ile temsil edilmiştir. Devre tasarımı dönüştürücünün kritik modda çalışma prensibine göre yapılmış olup anahatarlama kontrol sinyalleri anahatarların çalışma oranları eşit ve %50 olacak şekilde ayarlanmıştır.

Standart koşularda PV panelin MGN'nda çalışması için tasarlanan devrede L_1 ve L_2 bobinlerinin akım dalga şekilleri Şekil 3.6'da verilmiştir. Devrenin çalışması, tasarımına uygun şekilde kritik moddadır.Her bir anahtarlama periyodunda bobin anahtarın iletim süresi boyunca, PV akımının maksimum değerine kadar şarj olmakta ve anahtarın kesim anında sıfıra inmektedir.



Şekil 3.6: L_1 ve L_2 bobinlerinin akım dalga şekli

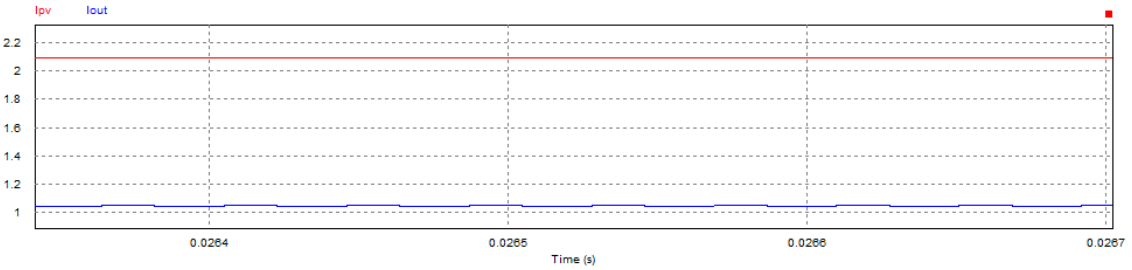
Devre yükseltici tip bir dönüştürücü olduğundan belirlenen tasarım kriterlerine göre çıkış geriliminin giriş geriliminin tam iki katı olması beklenmektedir. 100W/m^2'lik ışınım değeri için benzetim çalışmasından elde edilen PV panel gerilimi V_{PV} ve çıkış gerilimi V_o Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.7: Giriş ve çıkış gerilimleri dalga şekli

Kullanılan PV panelin MGN'nda çalışması durumunda gerilimi Çizelge 3.1'de 18 V olarak verilmiş olup benzetim çalışmasında elde edilen dönüştürücü devre çıkış gerilimi de devrenin tasarım kriterlerine uygun bir şekilde 36 V olarak elde edilmiştir.

Interleaved boost dönüştürücü devrenin giriş akımı PV panel akımına eşittir. Devrenin kritik modda çalışması ve anahatarların %50 eşit görev süresi ile kontrol edilmeleri sayesinde PV panel akımındaki dalgalanmanın oldukça düşük olması beklenmektedir. Bundan dolayı PV panel ile dönüştürücü devre arasında filtre amaçlı bir kondansatör kullanılmamıştır. Benzetim çalışması ile elde edilen giriş akımı I_{PV} ve çıkış akımı I_o ait dalga şekli Şekil 3.8'de verilmiştir.



Şekil 3.8: Giriş ve çıkış akımları dalga şekli

Benzetim çalışması sonucu ölçülen PV panel akımı 2.17 A olup PV panel etiket değerine oldukça yakındır. Devrede kritik çalışma modu ve anahatarlama kontrol yapısı sonucu PV panel akımındaki dalgalanma miktarı ise %0.42 olarak elde edilmiştir. Çıkış akımı da devre tasarımına uygun olarak PV panel akımının yarısı şeklinde elde edilmiştir.

Benzetim çalışması, hesaplanan devre parametrelerinin uygunluğunun kontrolü ve uygulanan MGNİ yöntemi için frekans değişimine devrenin ne şekilde cevap verdiğini gözlemlemek amacı ile yapılmıştır. Devrede farklı güç durumu için ışınım ve yük değişimi manuel olarak yapılmış olup ayrı bir kontrol bloğu tasarlanmamıştır. Uygulanacak yöntemde bobin akımı analizi yapılacağından, benzetim çalışmasında düşük frekanstaki bobin akımının beklenen formda olup olmadığı gözlemlenmiştir.

3.4 Prototip Devre Tasarımı

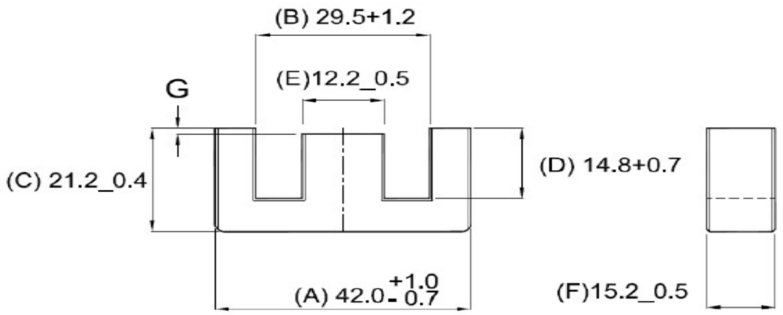
Bölüm 3.1'de matematiksel analizi yapılan devrenin çalışma akım, gerilim değerleri ve anahtarlama frekansına göre bobin, kondansatör ve yük değerleri belirlenmiştir. Belirlenen bu değerlere göre devrenin benzetimi gerçekleştirilmiş ve devre çıktıları matematiksel hesaplamalar ile uylumlu olarak elde edilmiştir. Bu bölüm ise

deneysel çalışmalar için protip devre tasarımını içermekte olup interleaved boost devresinin gerçekleştirilmesi, matematiksel analiz ile belirlenen değerlere göre bobin tasarımı, anahtar, diyot, anahtar sürücü devresi seçimi, akım ve gerilim ölçüm elemanlarının seçimi aşamalarından oluşmaktadır.

3.4.1 Bobin Tasarımı

Matematiksel analiz aşamasında interleaved boost devrenin anahtarlama frekansı 12 kHz olarak seçilmiştir. Bu çalışma frekansı ve PV panel gücüne göre devre üzerindeki bobinlerin her birinin değeri 360 μH olarak hesaplanmıştır.

Tasarlanan bobinler hava aralıklı olduğundan, her bir bobin tasarımında CF139 materyalinden imal edilmiş iki adet E4215 tipi nüve kullanılmıştır. E4215 Nüvenin boyutları Şekil 3.9.a'daki teknik çizimde verilmiştir.



Şekil 3.9: E4215 nüve ölçüleri(mm)

Kullanılan E4215 nüvenin teknik özellikleri ise Çizelge 3.3'de verilmiştir.

Çizelge 3.3: E4215 Manyetik Nüve Katalog Verileri

Göreceli Geçirgenlik (μ_i)	2100 ± %20
Endüktans Faktörü (A_L)	4100 +%30 / -%20 nH
Etkin Uzunluk (l_e)	97 mm
Kesit Alanı (A_{min})	175 mm^2
Etkin Hacim (V_e)	17600 mm^3
Saturasyon Akı Yoğunluğu (B_{sat})	0.4 T

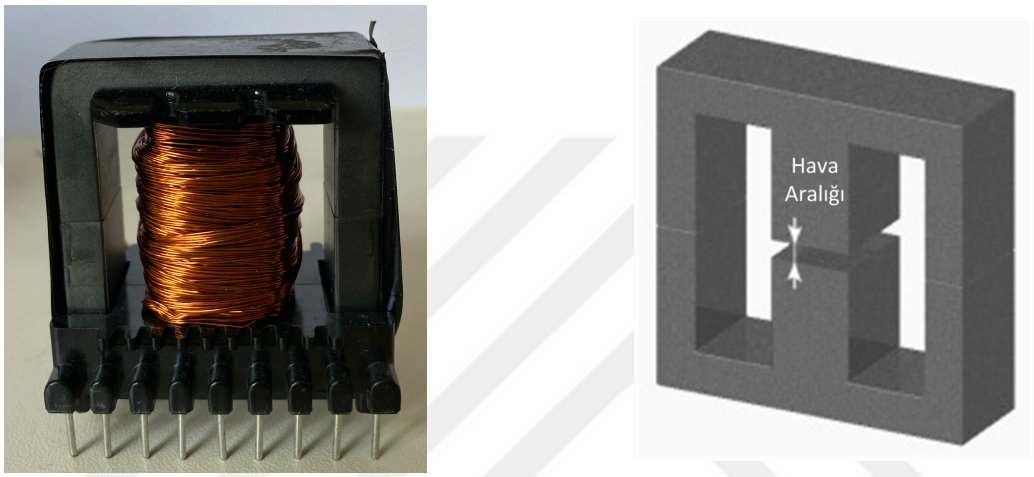
N sarım sayısı manyetik iletkenlik A_L ve hesaplanan bobin değeri L kullanılarak Eşitlik 3.28'deki gibi hesaplanır.

$$N = \sqrt{\frac{L}{A_L}} \tag{3.28}$$

Sarım sayısı ve maksimum akı yoğunluğuna bağlı olarak bobinden geçebilecek maksimum akım Eşitlik 3.29'daki gibi ifade edilmektedir.

$$N \times I_{max} = \frac{B_{sat} \times A_c}{A_L} \quad (3.29)$$

Eşitlikte B_{sat} maksimum akı yoğunluğunu, A_c nüve kesit alanını ve A_L nüve direncini temsil etmektedir. Maksimum akı yoğunluğu B_{sat} = 0.4 T olacak şekilde ve PV panelin maksimum kısa devre akımı 2.8 A'e göre sarım sayısı 13 olarak elde edilmiştir. Bobin tasarımında iletken olarak litz teli kullanılmıştır. Kullanılan litz teli'nin kesit alanı 0.05 mm^2 olduğundan maksimum akım taşıma kapasitesi 0.5 amperdir. Tasarlanan bobinin maksimum akım taşıma kapasitesi 5 amper olacak şekilde 5 damarlı tel ile karkas üzerine sarılmıştır. Karkas Şekil 3.10.a'daki gibi nüve ortasına yerleştirilerek manyetik hava aralıklı bobin tasarımı tamamlanmıştır.



(a) **(b)**

Şekil 3.10: a) Tasarlanan hava aralıklı manyetik bobinbobin **b)** Orta kısmı hava aralıklı manyetik nüve çifti

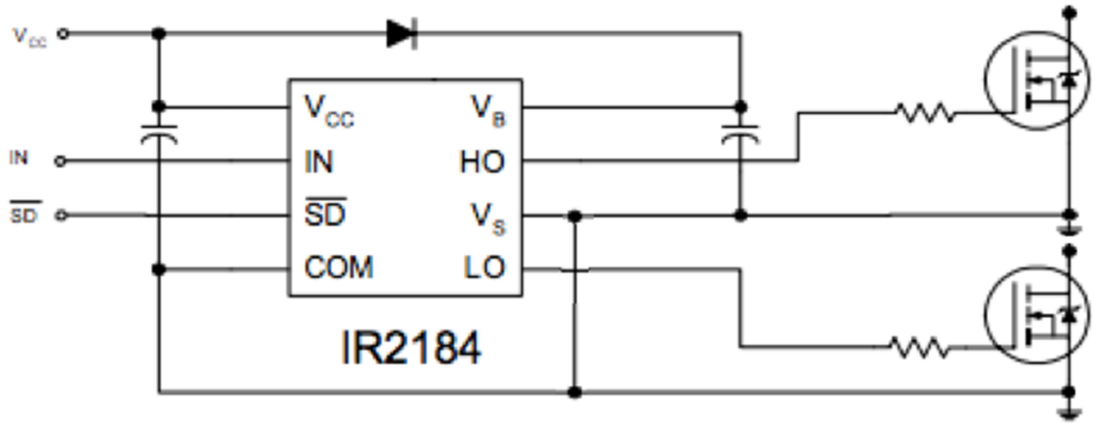
Nüvenin hava aralığı ile ilişkili olan A_L değeri eşitlik 3.29'a göre nüvenin saturasyon akı yoğunluğu değeri dikkate alınarak tasarlanmıştır.

3.4.2 Yarıiletkenler ve Anahtar Sürücü Seçimi

Devrede güç elemanları, çalışma gerilimi, akımı ve anahtarlama frekansı dikkate alınarak seçilmiştir. Interleaved boost devre yapısında bulunan iki adet anahtar üzerinden geçecek maksimum akım miktarı maksimum PV panel akımı kadardır. Deneysel çalışmada kullanılan PV panelin maksimum akımı 2.58 A olup Çizelge 3.1'de verilmiştir. Anahtarlar sabit %50 görev süresi ile kontrol edildiğinden, anahtarlar üzerinde oluşacak maksimum gerilim PV panel geriliminin iki katı kadardır. PV panel maksimum gerilimi ise açık devre durumunda 22 V olduğundan maksimum anahtar gerilimi yaklaşık 44 V olarak belirlenmiştir.

Devrede anahtarlama frekansı kontrol yöntemi uygulandığından anahtarlama frekansı sabit değildir. Anahtarlama frekansının en küçük olduğu değer benzetim çalışması sonucu 3 kHz, en yüksek frekans değeri ise 50 Khz olarak belirlenmiştir. PV Panel çalışma gücü ve anahtarlama frekansı değerleri dikkate alınarak devre üzerinde IRF630 N kanal mosfet ve MUR1560 ultra fast diyot kullanılmıştır.

Dönüştürücü devredeki iki anahtar dönüşümlü ve sabit %50 görev süresi ile çalışmaktadır. Yani bir periyot boyunca anahtarlardan biri iletimde iken diğeri kesimdedir. Bu sebeple düşük maliyetli ve basit yapılı bir sürücü entegre olan IR2184 kullanılmıştır. Sürücü devrenin bağlantı şeması Şekil 3.11'de verilmiştir.



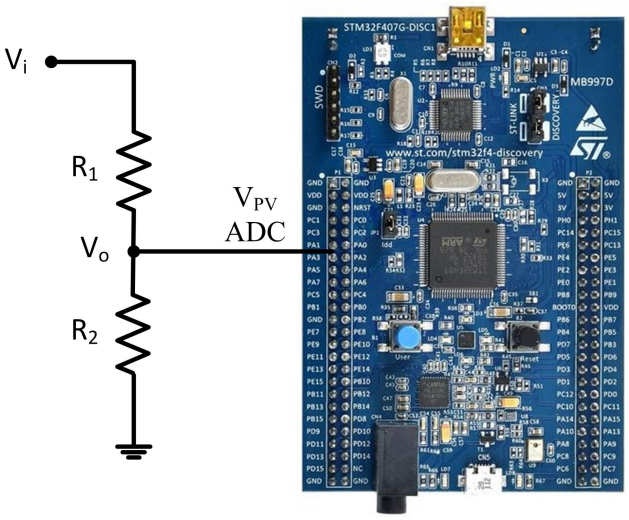
Şekil 3.11: IR2184 MOSFET sürücü uygulama devresi

Çıkışlardan her biri bir anahtarı kontrol etmektedir. Sürücü devrenin kontrol sinyali ise STM32F407 geliştirme kartı ile sağlanmaktadır. Kontrol sinyalinin frekansı MGNİ algoritması ile belirlenmektedir.

3.4.2 Akım ve Gerilim Ölçümleri

Güneş panellerinin çalışma akım ve gerilim değerleri çalışma ortamı koşullarına bağlı olduğundan, PV panelden alınabilecek maksimum güç de sürekli olarak değişebilmektedir. PV panelden alınan gücün en yüksek seviyede olması için bu değişimin anlık takip edilip yeni oluşan çalışma koşullarına göre dönüştürücü devrenin kontrolünün sağlanması gerekmektedir. Bu çalışmada önerilen MGNİ yöntemi doğrudan bir yöntem olduğundan MGN hesaplamaları anlık ölçüm verilerine göre yapılmaktadır. PV panel çalışma gücünün takibi için panel akım ve geriliminin sürekli olarak ölçülmesi gerekmektedir. Bunun yanında MGN tespiti için kısım 3.1'de anlatılan bobin temelli I-V karakteristiğinin de kullanılması için bobin akımının da ölçülmesi gerekmektedir.

PV panel gerilimi Şekil 3.12'deki gibi devre girişine paralel bağlanan bir gerilim bölücü direnç çifti vasıtası ile ölçülerek işlemciye aktarılmaktadır.

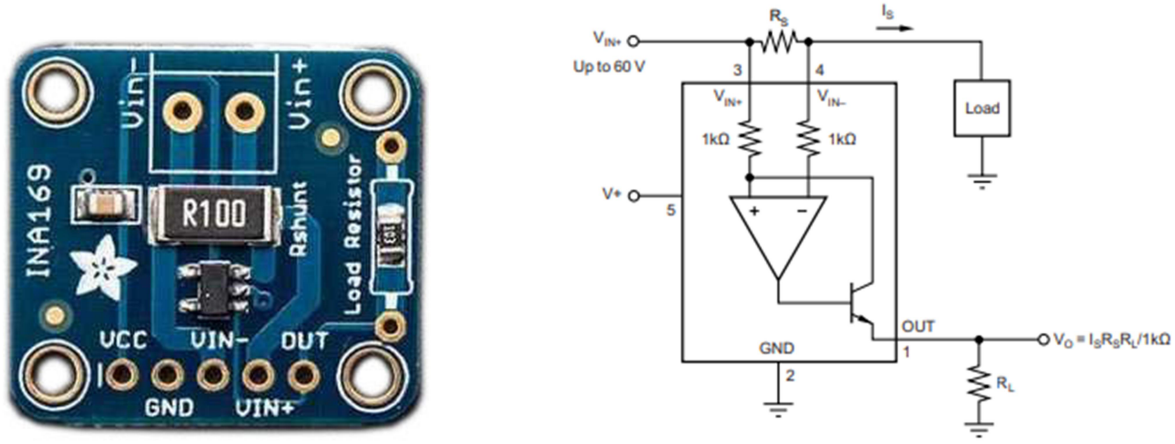


Şekil 3.12: Gerilim ölçümü için uygulanan gerilim bölücü devre

$$V_o = V_{in}\frac{R_2}{R_1 + R_2} \tag{3.30}$$

PV panel gerilimi, gerilim bölücü dirençlerin oranına göre R_2 direnci üzerinden okunmaktadır. Okunan gerilim değeri daha sonra işlemci kart girişine uygulanacağından ve işlemci girişimi maksimum 3.3 V ile sınırlı olduğundan direnç seçimi yapılırken bu durum dikkate alınmıştır. Panel çıkış gerilimi maksimum 22 V olduğundan, R_2 direnci üzerinde 3 V'dan yüksek bir gerilim oluşmayacak şekilde Eşitlik 3.30 'a göre R_1 = 560 kΩ ve R_2 = 560 Ω olarak seçilmiştir.

Panel ve bobin akımlarının ölçümü için ise 2 adet, 0-5 A aralığında akım ölçebilen, Texas Instruments fimrasına ait INA169 akım sensör modülü kullanılmıştır. Kullanılan sensör modülü ve temel çalışma prensip şemesı, sırasıyla Şekil 3.13. a ve Şekil 3.13.b verilmiştir.



(a) **(b)**

Şekil 3.13. a) INA169 Akım sensör modülü **b)** INA169 akım sensörü uygulama devresi

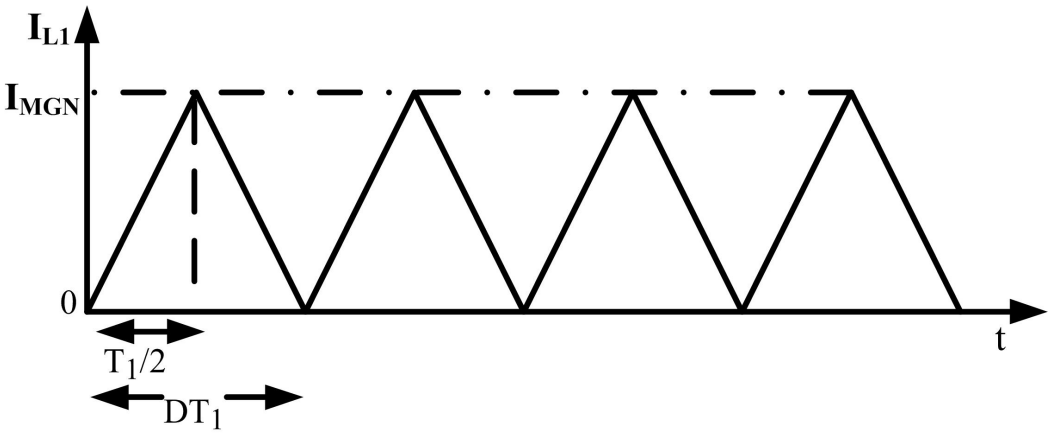
Şekil 3.13.b'deki uygulama devresinde görüldüğü gibi sensör V_{IN+} ve $V_{IN_}$ girişleri arasında bir seri direnç bulunmaktadır. Kaynak akımı I_s direnç üzerinde bir potansiyel fark oluşturur. Direnç üzerinde meydana gelen potansiyel fark R_{G1} ve Q_1 kollektöründen akım akıtmaya zorlar. Bu akım çıkışta R_L direnci ile tekrar gerilime dönüştürülür. Böylece, yükselteç transfer fonksiyonu Eşitlik 3.31'daki gibi ifade edilmektedir.

$$V_o = I_s R_s (1000 \mu A/V) R_L \tag{3.31}$$

V_o gerilimi Eşitlik 3.30'daki yer transfer fonksiyonuna bağlı olarak işlemci tarafından akım bilgisine çevrilir. Bu çalışmada kullanılan sensör modülü üzerinde 0.1 Ω'luk seri direnç bulunmaktadır. Kazancın 1 olması için, yani 1 A akıma karşılık V_o pininden 1 V gerilim okunabilmesi için R_L direnci 5 kΩ seçilmiştir. PV panelden çekilebilecek maksimum akım 2.2 amper olduğundan V_o pininden en fazla 2.2 V gerilim oluşmaktadır. Bu değer de işlemcinin güvenli çalışma sınırlarında olduğundan seçilen kazanç aralığı uygundur.

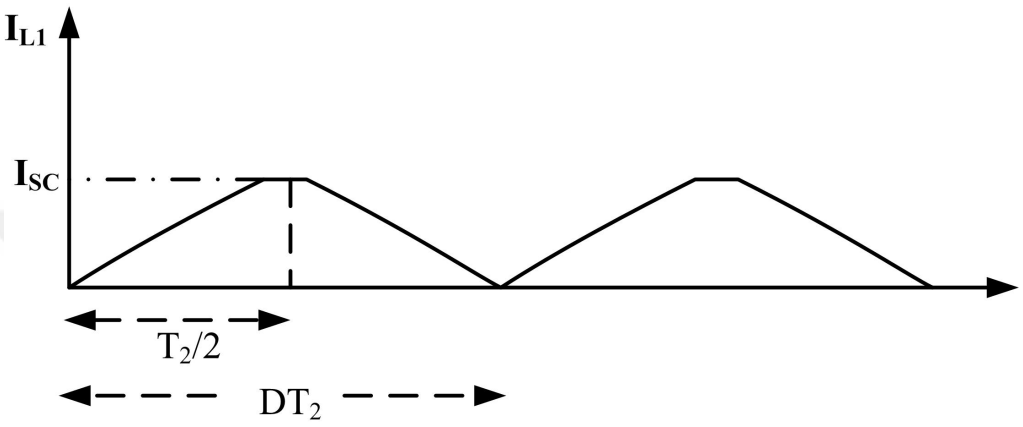
3.5 Geliştirilen MGNİ Algoritması

Güneş panellerinden elde edilen güç değişen çalışma ortamı koşullarına ve çıkıştaki elektriksel yük durumuna göre değiştiğinden MGN da değişmektedir. Bu çalışmada MGN'nın etkin bir şekilde izlenebilmesi için uygulanan MGNİ yönteminde, dönüştürücü devrenin bobin akımını anlık değişiminden faydalanarak PV panel I-V eğrisi elde edilmektedir. PV panel katalog değerleri dikkate alınarak tasarlanmış bir interleaved boost dönüştürücü devre, kritik modda çalışırken bobin akımının dalga şekli Şekil 3.14'deki gibi elde edilmektedir. Şekilde bobin akımı I_{L1} sıfırken anahtar iletime girdiği anda bobinin PV panel üzerinden kısa devre olmasıyla I_{MGN} değerine kadar şarj olmaktadır. Anahtar kesime girdiğinde bobin I_{L1} tekrar sıfıra inmektedir.



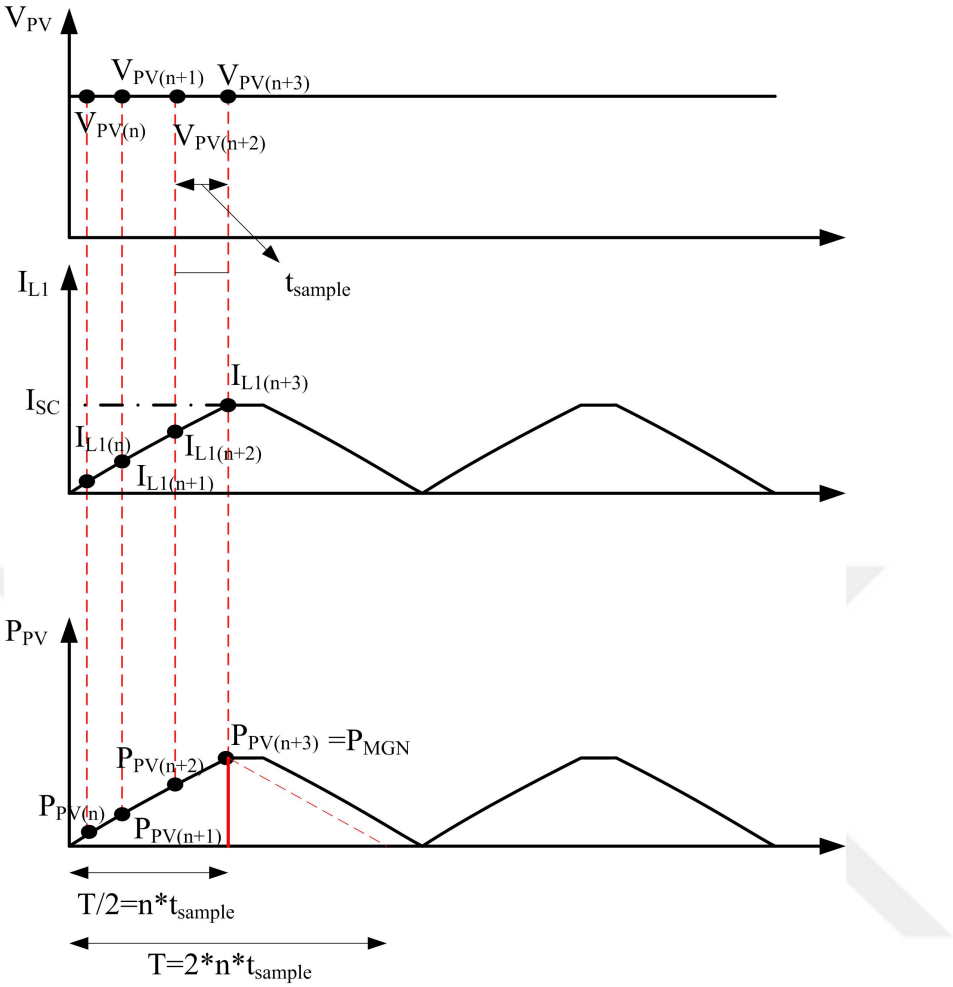
Şekil 3.14: Kritik mod çalışmada interleaved boost dönüştürücü L_1 bobininin akım dalga şekli

Ortam çalışma koşuluna bağlı olarak PV panel gücünün değişmesi durumunda PV panelin ortaya çıkan çalışma karakteristiğini bobin üzerinden elde etmek mümkündür. Bobin her anahtarlama periyodunda PV panel üzerinden kısa devre olduğundan, Şekil 3.15'deki gibi anahtarlama frekansı azaltılarak anahtar iletim süresi yeterince arttırıldığında, bobin akımı PV panelin kısa devre akımına kadar şarj olur ve sabit kalır. Anahtar kesime girdiği anda ise tekrar sıfıra iner. Şekil 3.15'de anahtarın iletim süresince bobin üzerinde oluşan akım dalga şekli aynı zamanda PV panelin kısa devre akımıdır.



Şekil 3.15: Anahtar iletim süresi arttırıldığında elde edilen bobin akımı dalga şekli

Geliştirilen yöntemde PV panel çıkışında bulunan akım sensörü ve gerilim bölücü ile PV panelin çalışma akımı ve geriliminin ölçümü yapılmaktadır. Akım ve gerilim değerleri STM32F407 geliştirme kartı ile örneklenerek PV panel çıkış gücü hesaplanmaktadır. PV panelin ortalama çıkış gücü her 100 ms 'de bir, bir önceki değer ile karşılaştırılarak güçteki değişim miktarı kontrol edilmektedir. Güçteki değişim miktarının %5'den fazla olması durumunda anahtarlama frekansı azaltılarak Şekil 3.16'da olduğu gibi anahtar iletim süresi arttırılıp, bobinin PV panelin kısa devre akımına kadar şarj olması sağlanmaktadır.



Şekil 3.16: Dönüştürücü devre bobin akımının örneklenmesi ve MGN tespitinin temsili grafiği

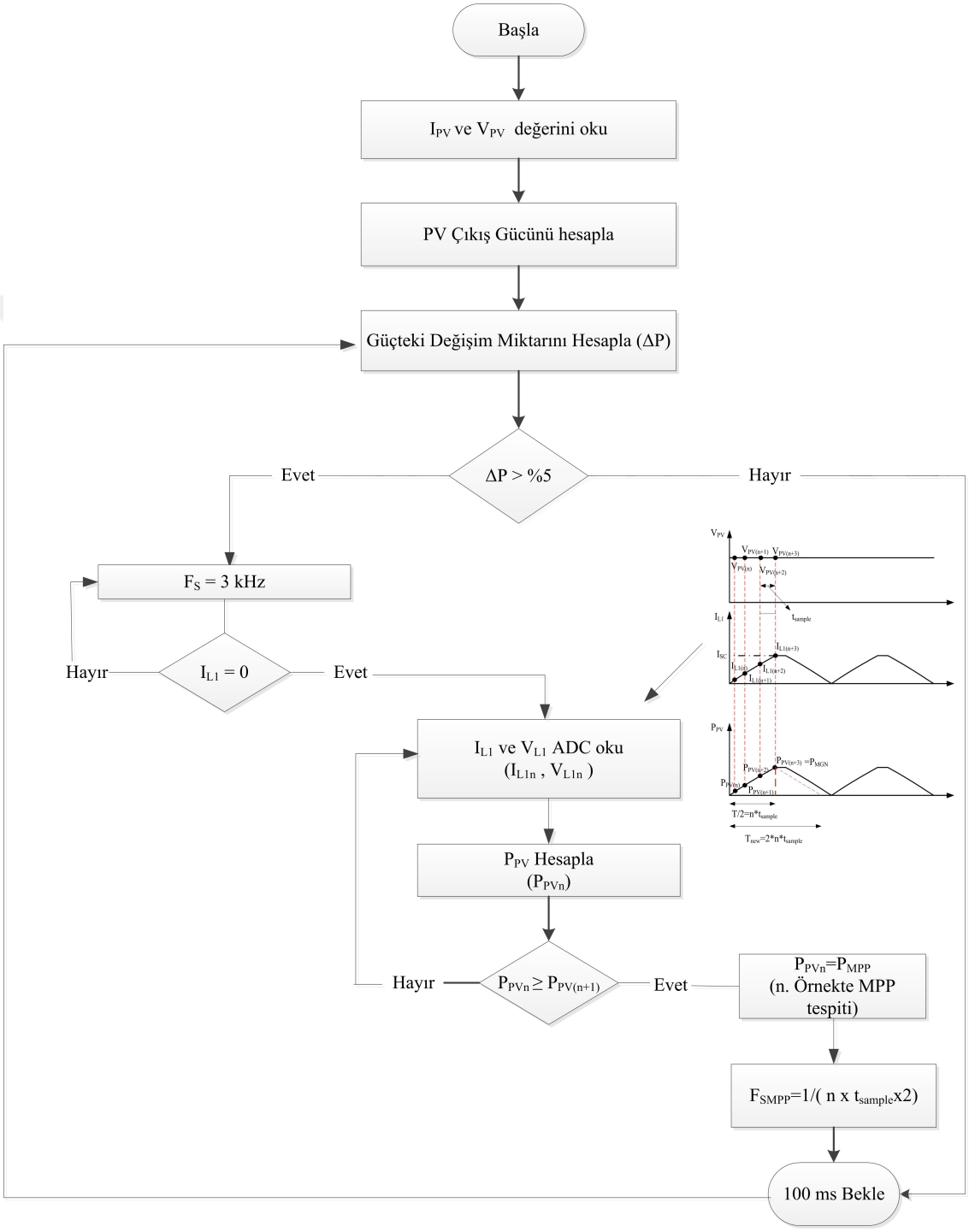
Bobin üzerinde oluşan kısa devre akımı sıfır noktasından başlayarak işlemci tarafından örneklenmektedir. Bu sırada PV panel gerilimi bilgisi de işlemci tarafından okunmakta olduğundan her bir alınan örnekleme noktasına karşılık gelen PV panel gücü Şekil 3.16'daki gibi hesap edilmektedir. Hesaplanan her bir örnekleme noktasındaki güç değeri bir önceki ile karşılaştırılarak maksimum güce karşılık gelen örnek numarası belirlenir.

Böylelikle MGN'nın, bobin akımın yükselen kenarında, kaçıncı örnekleme noktasına denk geldiği şekil gibi belirlenebilmektedir. Maksimum güç noktasının n. örnekte tespit edildiği varsayılırsa, her bir örnek için işlemcinin örnekleme süresi dikkate alınarak, MGN'nda çalışma için olması gereken yeni anahtarlama periyodu T_{MGN} ve frekansı f_{MGN} sırasıyla Eşitlik 3.31 ve 3.32'de olduğu gibi elde edilebilir.

$$T_{MGN} = \left(n \times t_{sample}\right) x2 \tag{3.31}$$

$$f_{MGN} = \frac{1}{T_{MGN}} \tag{3.32}$$

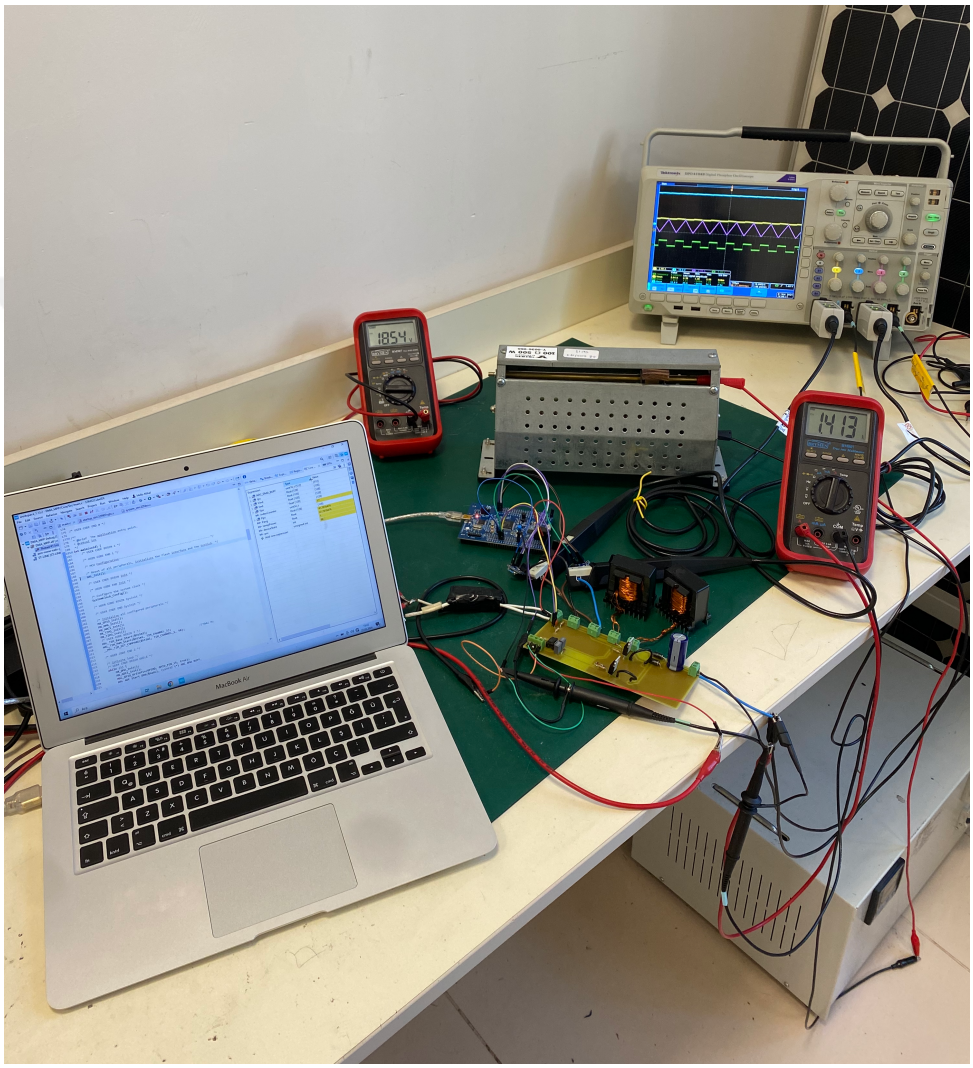
Şekil 3.16'da gösterildiği gibi MGN'nda bobin akımı I_{MNG}'ya eşit olacağından örnekleme süresinin örnek sayısı ile çarpımının iki katı tespit edilen MGN için gerekli olan anahtarlama periyoduna eşit olmaktadır. Hesaplanan anahtarlama periyodu T_{MGN}, Eşitlik 3.32'deki gibi işlemci tarafından frekansa bilgisine dönüştürülerek MOSFET sürücüye gönderilmektedir. Geliştirilen yöntemde MGN tespiti sırasında gerçekleşen işlem basamakları Şekil 3.17'daki akış diyagramında verilmiştir.



Şekil 3.17: Geliştirilen MGNİ Yönteminin Algoritması

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

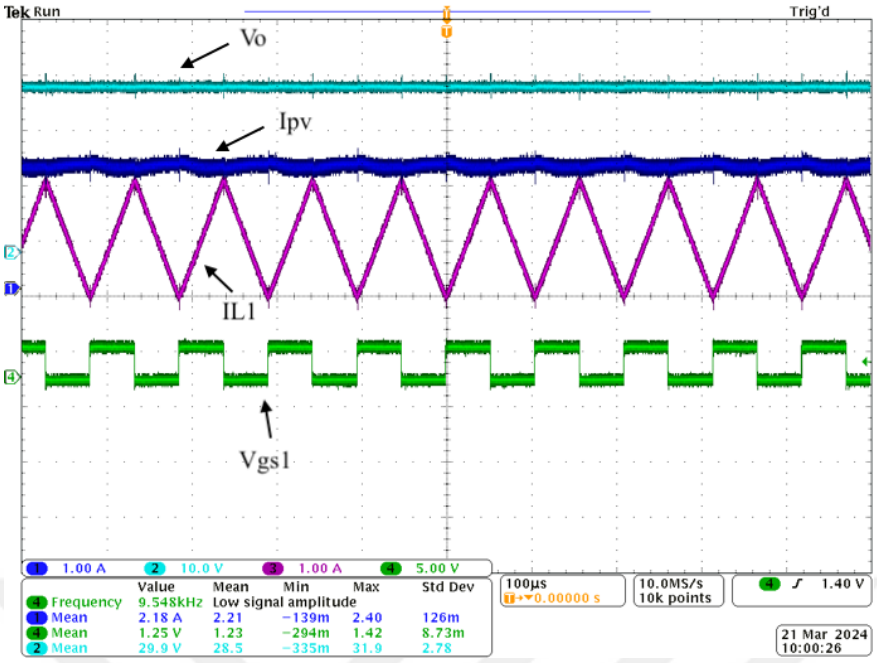
Geliştirilen MGN yönteminin MGNİ'deki doğruluk oranın kontrolü deneysel uygulama ile sağlanmıştır. Deneysel çalışma için Bölüm 3'de tasarlanan interleaved boost dönüştürücü devre 40 W'lık PV panel çıkışına bağlanmıştır. MGNİ için oluşturulan kontrol algoritması da STM32F407 işlemci ile dönüştürücü devreye uygulanmaktadır. Geliştirilen yöntemin uygulanması için oluşturulan deney düzeneği Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1: Geliştirilen yöntemin uygulanması için oluşturulan deney düzeneği

Uygulama sırasında PV panel akımı ve dönüştürücü devrenin bobin akımı, anahtar kontrol sinyali ve çıkış gerilimi değerleri osiloskop ile ölçülerek dalga şekillerindeki değişiler gözlemlenmiştir. Işınım değerine bağlı olarak PV panelin toplam çıkış gücünde meydana gelen değişim ve işlemcinin hesapladığı değerler PC üzerinden izlenmiştir.

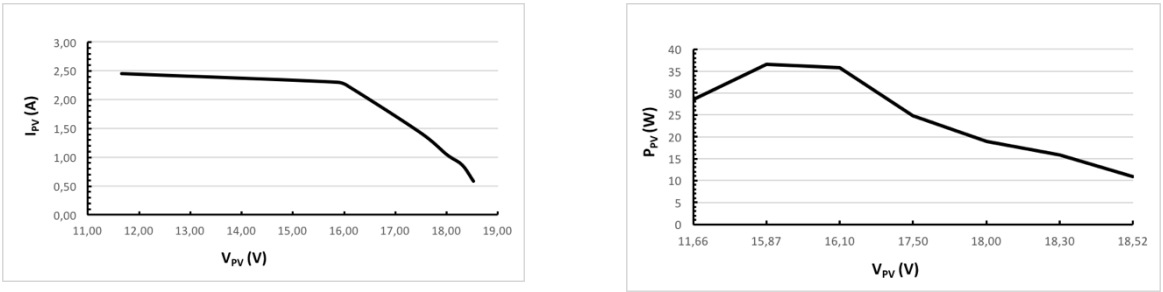
Deneysel çalışmada ilk olarak PV panel 1000 W/m^2'lik ışınım altında iken panel akımı, dönüştürücü devredeki bobinlerden birinin akımı, anahtar kontrol sinyali ve çıkış gerilimi ölçülüp Şekil 4.2'deki gösterilmiştir.



Şekil 4.2: 1000 W/m^2 ışımada ölçülen akım ve gerilim dalga şekilleri.

Devrenin kritik modda çalışmasından dolayı bobin akımı 0-2.18 A aralığında değişmektedir. PV panel etiketinde MGN akımı 2.20 A verilmiş olup tasarlanan devrenin MGN'nda çalıştığı görülmüştür. Dönüştürücü devrenin iki katlı olması ve anahtar görev süresinin 0.5 seçilmesi sonucu olarak PV panel akımındaki dalgalanma miktarı oldukça azdır. Böylelikle devre girişinde filtre kondansatörü kullanımına ihtiyaç duyulmamıştır. Anahtarlama kontrol sinyali 0.5 sabit görev süresine sahip olacak şekilde ayarlanmıştır. Buna bağlı olarak da çıkış gerilimi giriş geriliminin iki katı olarak elde edilmiştir.

1000 W/m^2'lik tam ışıma altında yapılan ölçümde, tasarlanan devre MGN'nı 36,8 W olarak bulmuştur. Sistemin bulduğu MGN'nın doğruluğunu teyit etmek için PV panel sistemden ayrılarak, değişken direnç yükü testine tabi tutulmuştur. Test sonucunda elde edilen akım-gerilim (I-V) ve güç-gerilim (P-V) karakteristikleri Şekil 4.3'de verilmiştir.



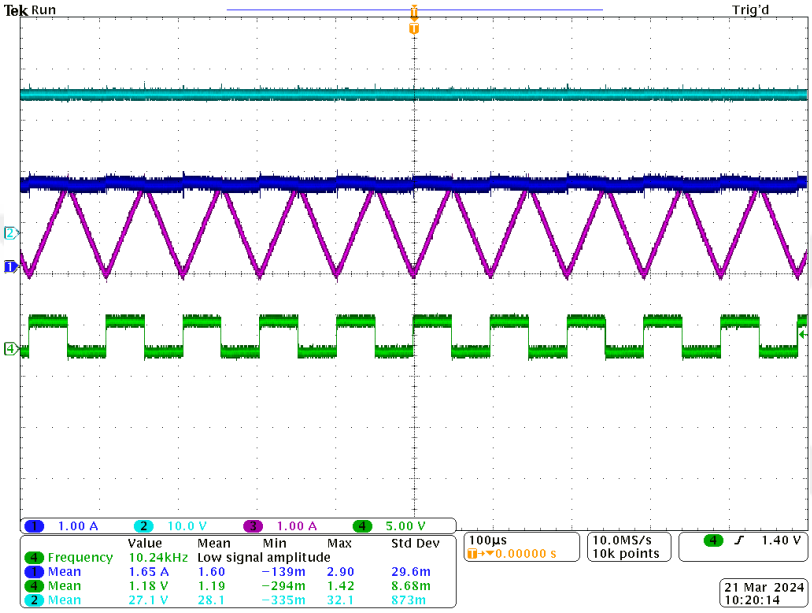
(a) **(b)**

Şekil 4.3: a) 1000 W/m^2 ışınımdaki panel I-V eğrisi **b)** 1000 W/m^2 ışınımdaki panel P-V eğrisi

Direnç testi sonucunda elde edilen güç- gerilim karakteristiğindeki MGN 36.5 W olarak ölçülmüştür. Oluşturulan algoritmada ortam koşuluna bağlı güç değişimi her 100 ms'de bir kontrol edilmektedir. Panel çıkış gücünde %5'den fazla bir artış veya azalma olması durumunda yeni MGN'nın tespit edilebilmesi için çok kısa süreliğine anahtarlama

frekansı 3 kHz yapılarak, bobindeki anlık akım değişimi analiz edilerek PV panelin I-V değerleri elde edilmekte ve yeni MGN tespit edilmektedir.

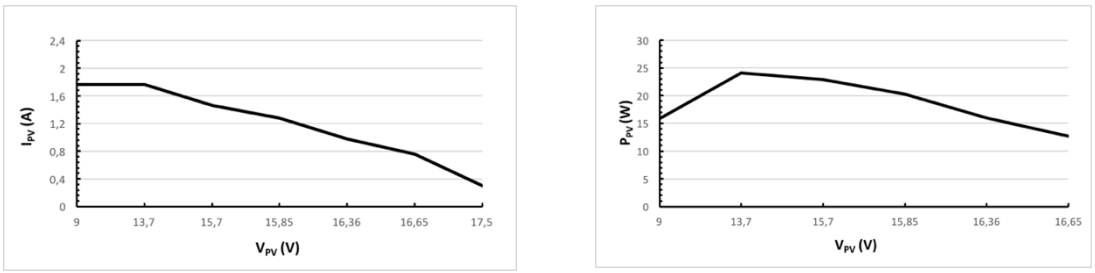
Bir sonraki ölçümde, ışınım değeri 700 W/m^{2}'ye indirilerek PV panel gücünün bir miktar azalması sağlamıştır. Güçteki azalma işlemci tarafından algılanmış ve yeni MGN 24 W olarak tespit edilmiştir. Bu durumda ölçülen PV panel akımı dalga şekli, dönüştürücü devre çıkış gerilimi dalga şekli ve dönüştürücü devredeki L_1 bobini üzerindeki akımın dalga şekli ile anahtarlama sinyalindeki değişim Şekil 4.4'de verilmiştir.



Şekil 4.4: 700 W/m^{2} ışımada ölçülen akım ve gerilim dalga şekilleri.

PV panel akımı ışınımdaki azalmaya bağlı olarak 1.65 A'e inmiştir. Bu çalışma koşulunda 24 W olarak tespit edilen yeni MGN'na göre anahtarlama frekansı işlemci tarafından 10,24 kHz olarak belirlenmiş ve güncellenmiştir.

PV panelin 700 w/m^{2}'lik ışıma altındaki çalışma durumunda, geliştirilen yöntem ile bulunan MGN'nın doğruluğu ayarlı direnç yükü ile kontrol edilmiştir. PV panel aynı ışımada ayarlı direnç yüküne bağlı iken elde edilen I-V ve P-V karakteristikleri Şekil 4.5'de verilmiştir.

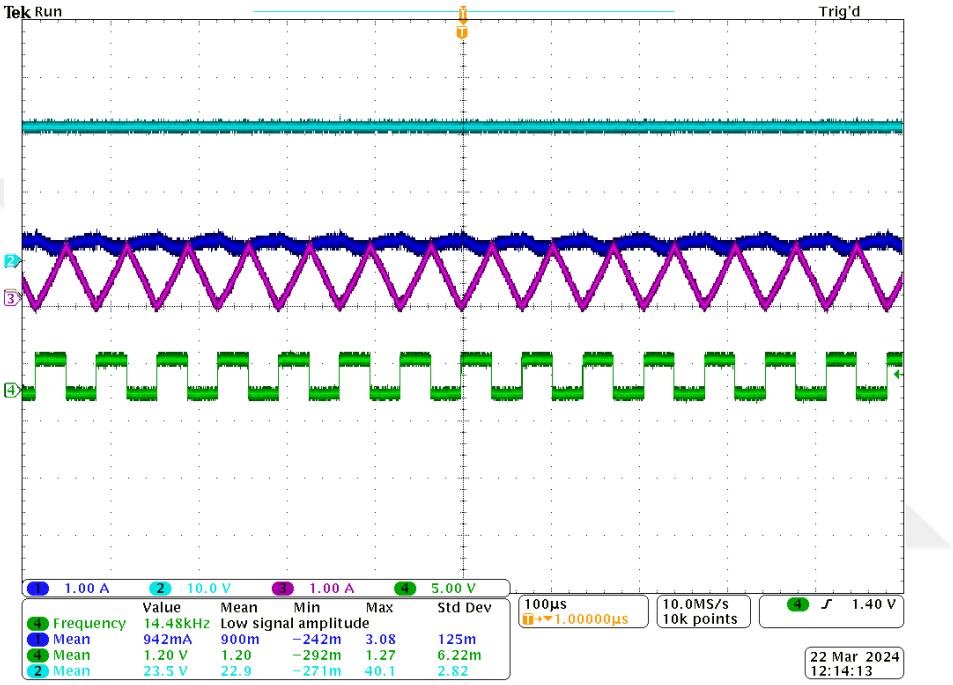


(a) **(b)**

Şekil 4.5: a) 700 W/m^{2} ışınımdaki PV panel I-V eğrisi **b)** 700 W/m^{2} ışınımdaki PV panel P-V eğrisi

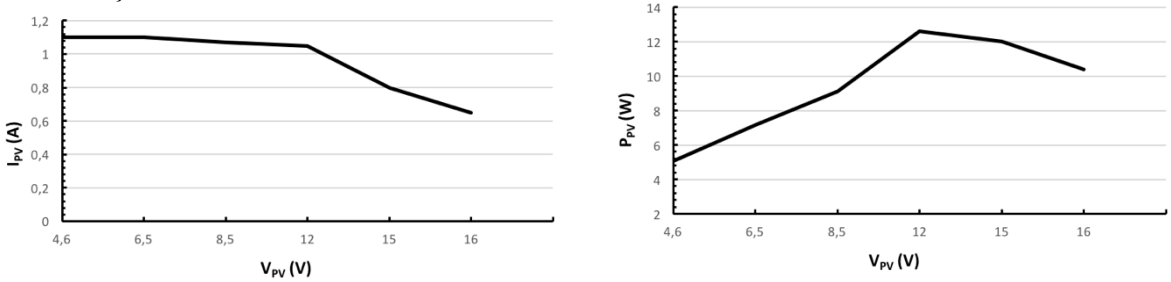
Direnç yükü ile elde edilen MGN 24.11 W olup, geliştirilen yöntemin bulduğu MGN'a oldukça yakındır.

Uygulanan yöntemin doğruluğun daha fazla farklı çalışma noktasında test edilebilmesi için ışınım değeri kademeli bir şekilde 500 W/m^2 ve 300 W/m^2 olarak değiştirilerek devrenin bu ışıma değerlerindeki çalışması da gözlemlenmiş ve bulunan MGN değerlerinin kontrolü ayarlı direnç ile yapılmıştır. Işınımın 500 W/m^2 indirilmesi durumunda elde edilen ölçüm sonuçları Şekil 4.6'da verilmiştir. Bu durumda tespit edilen MGN 11.94 W bu güç değeri ve bobin akımı analizi sonucu anahtarlama frekansı 14.4 kHz'e güncellenmiştir.



Şekil 4.6: 500 W/m^2 ışımada ölçülen akım ve gerilim dalga şekilleri.

Işınım değerinin 500 W/m^2'ye düşürülmesi durumunda PV panelin yeni MGN ayarlı direnç ile de test edilmiş ve 12.5 W olarak ölçülmüştür. PV Panel çıkışına ayarlı direnç bağlı iken elde edilen I-V ve P-V grafikleri sırasıyla Şekil 4.7.a ve 4.7.b'de verilmiştir.

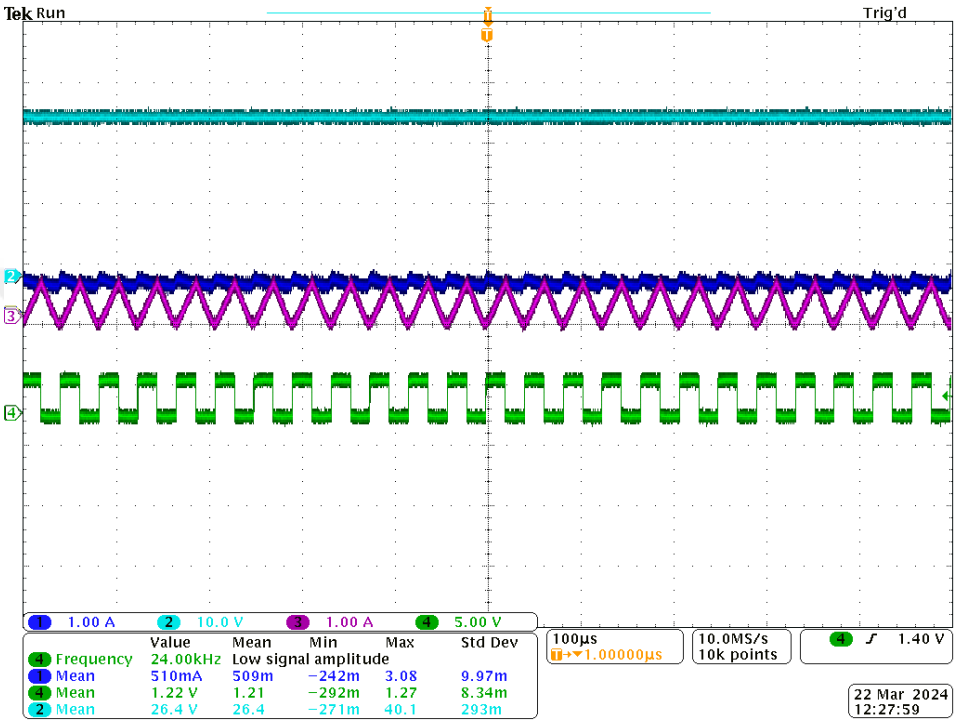


(a) **(b)**

Şekil 4.7: a) 500 W/m^2 ışınımdaki PV panel I-V eğrisi **b)** 500 W/m^2 ışınımdaki PV panel P-V eğrisi.

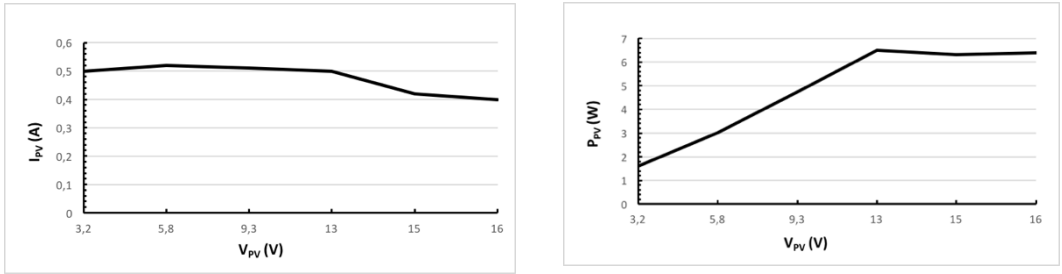
Geliştirilen yöntemin bulduğu 11.94 W'lık değer ile karşılaştırıldığında MGN tespitinin %95.5 oranında doğru olduğu gözlemlenmiştir.

Işınım miktarı 300 W/m^2 iken devreden alınan ölçüm sonuçları da 4.8'de gösterilmektedir. Işınımın azalmasına bağlı olarak, geliştirilen yöntem tarafından tespit edilen MGN 7.32 W olup bu çalışma durumuna göre belirlenen anahtarlama frekansı 24 kHz'dir.



Şekil 4.8: 300 W/m^2 ışımada ölçülen akım ve gerilim dalga şekilleri.

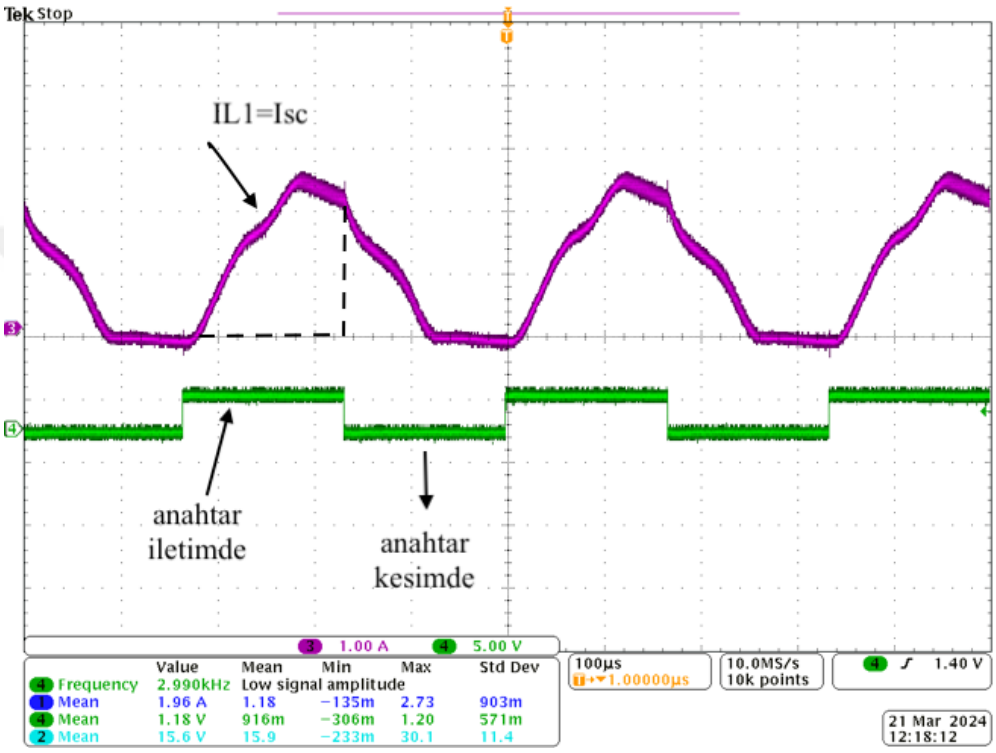
300 W/m^2'lik ışınım değeri için PV panelin ayarlı direnç ile elde edilen I-V ve P-V eğrileri Şekil 4.9'de verilmiştir. PV panelin MGN bu çalışma koşu için 7.5 W olarak tespit edilmiştir.



(a) **(b)**

Şekil 4.9: a) 300 W/m^2 ışınımdaki PV panel I-V eğrisi **b)** 300 W/m^2 ışınımdaki PV panel P-V eğrisi

Deneysel çalışmada ışınım miktarına bağlı olarak belirlenen sınırların üzerinde bir güç değişimi olması durumunda Şekil 3.16'da gösterilen yeni MGN'nın tespiti aşamasında bobin akımı ve anahtar kontrol sinyalinin değişimi Şekil 4.10'daki gibi olmaktadır. Anahtar iletimde olduğu sırada, bobin akımı Şekil 4.10'daki gibi PV panel kısa devre akımına kadar yükselmiş, daha sonra çok kısa bir süre sabit kalmış ve anahtarın kesime girmesiyle azalmıştır. Şekil 4.10'da işaretli aralıktaki bobin akımı, PV panelin kısa devre akımına eşit olup bobin gerilimi de PV panel gerilimine eşittir. PV panel I-V eğrisinin elde edilmesi sırasında anahtarlama frekansı 3 kHz'e indirilmiştir.



Şekil 4.10: 3 kHz anahtarlama frekansında bobin akımı ve kontrol sinyal dalga şekilleri

Ölçülen akım ve gerilim değerleri STM32F407 işlemci ile örneklenmektedir. Kullanılan işlemci için örnekleme süresi ortalama 3.7 µs olarak belirlenmiştir. Kısa devre (anahtar iletim süresince) anında bobin akım ve gerilim değerlerinin çarpımı ile panel gücü noktasal olarak hesaplanmaktadır. MGN tespiti ve yeni frekansın hesaplanması işlemi, Şekil 3.17'deki algoritma ile işlemci tarafından oldukça kısa sürede yapılmaktadır. Bu süre devrenin kararlı hale gelmesi durumu göz önüne alınarak yaklaşık üç anahtarlama periyodu olarak belirlenmiş olup 1.2 ms sürmektedir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada PV panelden sürekli olarak maksimum güç elde edilebilmesi için bir MGNİ yöntemi geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntem MGN'nı dönüştürücü bobinin anlık akımı ve PV panel geriliminin ölçümüne bağlı olarak tespit etmektedir. Yöntemin literatürdeki mevcut ölçüme dayalı klasik MGNİ yöntemlerine göre özgünlüğü, I-V eğrisi ölçümünde bobin kullanılmasıdır. Geliştirilen yöntemde ölçüm verilerinin işlenmesi sonucu MGN noktasal olarak elde edilebilmektedir. Ölçüm sonuçlarını değerlendiren ek bir MGNİ algoritmasına ihtiyaç duyulmamaktadır.

Yapılan kapsamlı literatür araştırması sonucunda ölçüme dayalı MGNİ yöntemlerinin yüksek doğruluk ile MGN tespiti yaptığı görülmüş ve mevcut I-V eğrisi ölçüm yöntemlerine alternatif olarak bobin ile I-V eğrisi ölçüm yöntemi geliştirilmiştir. PV panel ile yük arasındaki güç aktarımı için dönüştürücü devre seçiminde bobin ile I-V eğrisi ölçüm yönteminin en uygun şekilde entegre edilebilme ve PV sistemlerde yaygın kullanım dikkate alınarak interleaved boost dönüştürücü devre tercih edilmiştir. Kullanılan PV panelin etiket değerlerine göre dönüştürücü devrenin matematiksel hesaplamaları yapılmış ve benzetimi PSIM programı ile yapılmıştır. Benzetim sonuçları hesaplanan değerlere uygun bir şekilde elde edilmiştir. Sonraki aşamada uygulama devresi tasarımı yapılarak, STMF32407 geliştirme kartı ile oluşturulan algoritma devreye uygulanarak MGNİ sistemi oluşturulmuştur.

Geliştirilen MGNİ yönteminin yapısında, kullanılan iki katlı interleaved boost girişinde bulunan bobinlerden bir tanesi PV panel kısa devre akımını ölçmek için kullanılmıştır. PV Panel akım-gerilim eğrisinin oluşturulması sırasında kullanılan bobin, dönüştürücü devre üzerinde hazır bulunduğundan ölçüm işlemi için ek bir devre elemanına ihtiyaç duyulmamıştır. Ayrıca PV panel akım ve gerilimi devrenin normal çalışması sırasında ölçüldüğünden devre çıkışına güç aktarımı kesintisizdir. Böylelikle PV panel I-V eğrisi ölçüm işlemi için gereksiz güç tüketimi ve kayıplar oluşmamaktadır. Dönüştürücü devrenin kritik modda, sabit %50 anahtar görev oranı ile çalışması PV panel akımındaki dalgalanmanın azalmasını sağlamıştır. PV panel akımındaki dalgalanmanın azalması ile çıkış gücüdeki değişim miktarı ΔP daha az olmaktadır.

Geliştirilen yöntemde, PV panel çıkış gücü 100 ms aralıklar ile kontrol edilmekte ve ortalama çıkış gücünün %5'den daha fazla değişmesi durumunda yeni MGN tespiti yapılmaktadır. Sunulan yöntemde güç değişiminin gerçekleşmesi durumunda, MGN tespiti için PV panel I-V eğrisi ölçümü yapıldığından, geliştirilen MGNİ tekniği gölgelenme, sıcaklık değişimi gibi değişken ortam koşullarında kullanıma uygundur. Bu uygunluğun teyit edilebilmesi için deneysel ölçümler, farklı ışınım değerlerinde yapılmıştır.

Sistemin MGN'nı doğru tespit edip etmediğini kontrol etmek amacıyla, ölçümlerin yapıldığı ışınım değerleri için PV panelin MGN ayarlı direnç ile tespit edilmiş olup PV panelin I-V ve P-V karakteristikleri oluşturulmuştur. Işınımın 1000, 700, 500, 300 ve 180 W/m^2 olduğu durumlar için deneysel ölçümler yapılmıştır. Bu ışınım değerlerinde, ayarlı direnç ile elde edilen sonuçlar ile geliştirilen yöntemin bulduğu sonuçlar Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1 : Deneysel çalışma ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması.

Işınım değeri(W/m^2)	Reosta ile ölçülen MGN(W)	Geliştirilen yöntem ile bulunan MGN(W)	Anahtarlama frekansı (kHz)
1000	37	36,8	9.54
700	24.1	24	10.25
500	12.50	11.94	14.40
300	7.5	7.32	24.00
180	2.5	2.24	49.4

Ölçüm sonuçlarına göre geliştirilen yöntemin %30 ve üzerindeki çıkış gücündeki MGNİ doğruluk oranı %98.2 olup, ortalama %96.4 doğruluk oranı ile çalışmaktadır.

Geliştirilen yöntemde MGN'nın tespiti sırasında PV panelin çalışma noktası anlık ölçülmektedir. Bu sayede sıcaklık, gölgelenme, nemlilik oranı gibi değişen çalışma koşulları altında da PV panelden maksimum güç elde edilmesi mümkündür. Değişen ortam koşullarında kullanılmak üzere geliştirilen MGNİ yöntemelerinin yapısında yaygın olarak kondansatör ile ölçüm yöntemi kullanılmakta olup bu çalışma kapsamında geliştirilen bobin ile I-V eğrisi ölçüm yöntemi PV uygulamaları için yeni bir alternatif oluşturmaktadır. Sunulan yöntemde MGN değişken ortam koşulları altında, yüksek doğrulukla tespit edilebildiğinden endüstriyel PV panel sistemlerinin güç dönüşüm birimlerinde kullanıma uygundur.

PV panel I-V eğrisi ölçümü literatürde MGNİ çalışmalarının yanı sıra PV panelin kimyasal ve fiziksel özelliklerinin incelenmesi ve geliştirilmesi, performansının test edilmesi gibi farklı çalışmalarda da gerekli olmaktadır. Bu çalışmada sunulan bobin ile I-V eğrisi ölçüm yönteminin PV panel çalışma noktasını hızlı ve doğruluğu yüksek bir şekilde tespit edebildiği deneysel yöntemlerle kanıtlanmıştır. Elde edilen bu sonuçlara göre bundan sonra yapılacak akademik ve endüstriyel çalışmalara katkı sağlanaması beklenmektedir. Ayrıca bu tez çalışmasında sunulan interleaved boost dönüştürcü ile kullanılan bobin ile I-V eğrisi ölçüm yönteminin farklı yapıdaki dönüştürücü devreler ile de kullanılması mümkündür. Bu yönüyle sunulan çalışma ile yeni MGNİ yöntemlerinin ve literatürdeki mevcut çalışmaların geliştirilmesine katkı sağlanabilir.

6. KAYNAKLAR

Ahmad, J. (2010). A fractional open circuit voltage based maximum power point tracker for photovoltaic arrays. *2010 2nd International Conference on Software Technology and Engineering*, 5608868.

Ahmad, R., Murtaza, A. F., Shami, U. T., Zulqarnain, Spertino, F. (2017). An MPPT technique for unshaded/shaded photovoltaic array based on transient evolution of series capacitor. *Solar Energy*, *157*, 377-389.

Ali, A., Almutairi, K., Padmanaban, S., Tirth, V., Algarni, S., Irshad, K., Islam, S., Zahir, Md. H., Shafiullah, Md., Malik, M. Z. (2020). Investigation of MPPT Techniques Under Uniform and Non-Uniform Solar Irradiation Condition–A Retrospection. *IEEE Access*, *8*, 127368-127392.

Ali, K., Khan, L., Khan, Q., Ullah, S., Ahmad, S., Mumtaz, S., Karam, F., Naghmash. (2019). Robust Integral Backstepping Based Nonlinear MPPT Control for a PV System. *Energies*, *12*(16), 3180.

Alrubaie, A. J., Al-Khaykan, A., Malik, R. Q., Talib, S. H., Mousa, M. I., Kadhim, A. M. (2022). Review on MPPT Techniques in Solar System. *2022 8th International Engineering Conference on Sustainable Technology and Development (IEC)*, 123-128.

Benda, V., & Černá, L. (2020). PV cells and modules – State of the art, limits and trends. *Heliyon*, *6*(12), e05666.

B.Eteiba, M., T. El Shenawy, E., J. H. Shazly, Z. Hafez, A. (2013). A Photovoltaic (Cell, Module, Array) Simulation and Monitoring Model using MATLAB®/GUI Interface. *International Journal of Computer Applications*, *69*(6), 14-28.

Bollipo, Mikkili, Bonthagorla. (2020). Hybrid, optimization, intelligent and classical PV MPPT techniques: Review. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*.

Borekci, S., Acar, N. C. (2024). Inductor based I-V curve measurement method for photovoltaic panels. *Engineering Research Express*, *6*(1), 015066.

Chafle, S. R., Vaidya, U. B., Khan, Z. J. (t.y.). *DESIGN OF CUK CONVERTER WITH MPPT TECHNIQUE*. *1*(3).

Chen, Z., Lin, W., Wu, L., Long, C., Lin, P., Cheng, S. (2018). A capacitor based fast I-V characteristics tester for photovoltaic arrays. *Energy Procedia*, *145*, 381-387.

Chen, Z., Lin, Y., Wu, L., Cheng, S., Lin, P. (2020). Development of a capacitor charging based quick I-V curve tracer with automatic parameter extraction for photovoltaic arrays. *Energy Conversion and Management*, *226*, 113521.

Çandır, A., Börekci, S. (2024). Providing Low Current Ripple and MPPT Requirements in PV Panels with IBC Operating in Critical Current Mode. *Electric Power Components and Systems*, *52*(10), 1832-1841.

Dadkhah, J., Niroomand, M. (2021). Optimization Methods of MPPT Parameters for PV Systems: Review, Classification, and Comparison. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, *9*(2), 225-236.

De Brito, M. A. G., Galotto, L., Sampaio, L. P., E Melo, G. D. A., Canesin, C. A. (2013). Evaluation of the Main MPPT Techniques for Photovoltaic Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *60*(3), 1156-1167.

Dhimish, M. (2019). Assessing MPPT Techniques on Hot-Spotted and Partially Shaded Photovoltaic Modules: Comprehensive Review Based on Experimental Data. *IEEE Transactions on Electron Devices*, *66*(3), 1132-1144.

Duran, E., Piliougine, M., Sidrach-de-Cardona, M., Galan, J., Andujar, J. M. (2008). Different methods to obtain the I–V curve of PV modules: A review. *2008 33rd IEEE Photovolatic Specialists Conference*, 1-6.

Elbarbary, Z. M. S., Alranini, M. A. (2021). Review of maximum power point tracking algorithms of PV system. *Frontiers in Engineering and Built Environment*, *1*(1), 68-80.

Elkhateb, A., Rahim, N. A., Selvaraj, J., Williams, B. W. (2013). The effect of input current ripple on the photovoltaic panel efficiency. *2013 IEEE Conference on Clean Energy and Technology (CEAT)*, 478-481.

Fangrui Liu, Shanxu Duan, Fei Liu, Bangyin Liu, Yong Kang. (2008). A Variable Step Size INC MPPT Method for PV Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *55*(7), 2622-2628.

Faraj, K., Hussain, J. (2020). Analysis and Comparison of DC-DC Boost Converter and Interleaved DC-DC Boost Converter. *Engineering and Technology Journal*, *38*(5), 622-635.

Femia, N., Petrone, G., Spagnuolo, G., Vitelli, M. (2017). *Power Electronics and Control Techniques for Maximum Energy Harvesting in Photovoltaic Systems* (1. bs). CRC Press.

G, Dileep., Singh, S. N. (2017). Selection of non-isolated DC-DC converters for solar photovoltaic system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *76*, 1230-1247.

Hanzaei, S. H., Gorji, S. A., & Ektesabi, M. (2020). A Scheme-Based Review of MPPT Techniques With Respect to Input Variables Including Solar Irradiance and PV Arrays' Temperature. *IEEE Access*, *8*, 182229-182239.

Hussein, A. (t.y.). *A simple approach to extract the unknown parameters of PV modules*. 14.

İ. Şen, E., Koçhan, Ö. (t.y.). *Fotovoltaik Panelin Tek Diyotlu Modellenmesi Single Diode Modeling of Photovoltaic Panel*.

Karami, N., Moubayed, N., Outbib, R. (2017). General review and classification of different MPPT Techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *68*, 1-18.

Katche, M. L., Makokha, A. B., Zachary, S. O., Adaramola, M. S. (2023). A Comprehensive Review of Maximum Power Point Tracking (MPPT) Techniques Used in Solar PV Systems. *Energies*, *16*(5), 2206.

Khatib, T., Ghareeb, A., Tamimi, M., Jaber, M., Jaradat, S. (2018). A new offline method for extracting I-V characteristic curve for photovoltaic modules using artificial neural networks. *Solar Energy*, *173*, 462-469.

Kuai, Y., Yuvarajan, S. (2006). An electronic load for testing photovoltaic panels. *Journal of Power Sources*, *154*(1), 308-313.

Kumar, A., Karn, M., Gupta, B. K., Sekhar, K. R. (2022). A Direct Current MPPT Control with Eliminated Outer Loop For Grid Interfaced Solar Inverter. *2022 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, 1-5.

Kumar, M., Panda, K. P., Rosas-Caro, J. C., Valderrabano-Gonzalez, A., Panda, G. (2023). Comprehensive Review of Conventional and Emerging Maximum Power Point Tracking Algorithms for Uniformly and Partially Shaded Solar Photovoltaic Systems. *IEEE Access*, *11*, 31778-31812.

Kumar, S., Sahu, H. S., Nayak, S. K. (2019). Estimation of MPP of a Double Diode Model PV Module From Explicit *I–V* Characteristic. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *66*(9), 7032-7042.

Leite, V., Chenlo, F. (2010). An Improved Electronic Circuit for Tracing the I-V Characteristics of Photovoltaic Modules and Strings. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, *1*(08), 1224-1228.

LESIA Laboratory, ENSAI, University of LESIA Laboratory, ENSAI, University of Ngaoundere. Cameroon. Cameroon, Nzoundja Fapi, C. B., Wira, P., Kamta, M., & IRIMAS Laboratory, University of Haute Alsace. France. (2021). Real-Time Experimental Assessment of a New MPPT Algorithm Based on the Direct Detection of the Short-Circuit Current for a PV System. *Renewable Energy and Power Quality Journal*, *19*, 598-603.

Li, X., Wen, H., Hu, Y., Du, Y., Yang, Y. (2021). A Comparative Study on Photovoltaic MPPT Algorithms Under EN50530 Dynamic Test Procedure. *IEEE Transactions on Power Electronics*, *36*(4), 4153-4168.

Li, X., Wen, H., Hu, Y., Jiang, L. (2019). A novel beta parameter based fuzzy-logic controller for photovoltaic MPPT application. *Renewable Energy*, *130*, 416-427.

Mahmoud, M. M. (2006). Transient analysis of a PV power generator charging a capacitor for measurement of the I–V characteristics. *Renewable Energy*, *31*(13), 2198-2206.

Majstorovic, M., Mrsevic, D., Duric, B., Milesevic, M., Stevic, Z., Despotovic, Z. V. (2020). Implementation of MPPT Methods with SEPIC Converter. *2020 19th International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH)*, 1-6.

Messenger, R. A., Ventre, J. (2004). *Photovoltaic systems engineering* (2nd ed). CRC Press.

Mirbagheri, S. Z., Mekhilef, S., Mirhassani, S. M. (2013). MPPT with Inc.Cond Method using Conventional Interleaved Boost Converter. *Energy Procedia*, *42*, 24-32.

Moo, C.-S., Wu, G.-B. (2014). Maximum Power Point Tracking With Ripple Current Orientation for Photovoltaic Applications. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, *2*(4), 842-848.

Morales-Aragonés, J. I., Dávila-Sacoto, M., González, L. G., Alonso-Gómez, V., Gallardo-Saavedra, S., Hernández-Callejo, L. (2021). A Review of I–V Tracers for Photovoltaic Modules: Topologies and Challenges. *Electronics*, *10*(11), 1283.

Navabi, R., Abedi, S., Hosseinian, S. H., Pal, R. (2015). On the fast convergence modeling and accurate calculation of PV output energy for operation and planning studies. *Energy Conversion and Management*, *89*, 497-506.

Ndegwa, R., Simiyu, J., Ayieta, E., Odero, N. (2020). A Fast and Accurate Analytical Method for Parameter Determination of a Photovoltaic System Based on Manufacturer's Data. *Journal of Renewable Energy*, *2020*, 1-18.

Olotu, Y., Omoakhalen, A. I., Ishiekwene, R., Abolaji, S. K., Imanogor, P. A. (t.y.). *Evaluation of the Effect of Solar Radiation on Photovoltaic Cell Performance*.

Pal, S. B., Das Bhattacharya, K., Mukherjee, D., Paul, D. (2020). A simple and low cost measurement technology for solar PV modules. *Sādhanā*, *45*(1), 279.

Poshtkouhi, S., Palaniappan, V., Fard, M., Trescases, O. (2012). A General Approach for Quantifying the Benefit of Distributed Power Electronics for Fine Grained MPPT in Photovoltaic Applications Using 3-D Modeling. *IEEE Transactions on Power Electronics*, *27*(11), 4656-4666.

Radhika, S., Margaret, V. (2021). A Review on DC-DC Converters with Photovoltaic System in DC Micro Grid. *Journal of Physics: Conference Series*, *1804*(1), 012155.

Raghavendra, K. V. G., Zeb, K., Muthusamy, A., Krishna, T. N. V., Kumar, S. V. S. V. P., Kim, D.-H., Kim, M.-S., Cho, H.-G., Kim, H.-J. (2019). A Comprehensive Review of DC–DC Converter Topologies and Modulation Strategies with Recent Advances in Solar Photovoltaic Systems. *Electronics*, *9*(1), 31.

Rahman, M. M., Hasanuzzaman, M., Rahim, N. A. (2015). Effects of various parameters on PV-module power and efficiency. *Energy Conversion and Management*, *103*, 348-358.

Ramki, T., Trioathi L.N (2015). Comparison of Different DC-DC Converter for MPPT Application of Photovoltaic System. International Conference on Electrical, Electronics, Signals, Commumications and Optimization.

Reshma Gopi, R., Sreejith, S. (2018). Converter topologies in photovoltaic applications – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *94*, 1-14.

Safari, A., Mekhilef, S. (2011). Simulation and Hardware Implementation of Incremental Conductance MPPT With Direct Control Method Using Cuk Converter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *58*(4), 1154-1161.

Sandali, A., Oukhoya, T., Cheriti, A. (2014). Modeling and design of PV grid connected system using a modified fractional short-circuit current MPPT. *2014 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, 224-229.

Santra, S. B., Chatterjee, D., Kumar, K., Bertoluzzo, M., Sangwongwanich, A., Blaabjerg, F. (2021). Capacitor Selection Method in PV Interfaced Converter Suitable for Maximum Power Point Tracking. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, *9*(2), 2136-2146.

Sayyad, J., Nasikkar, P. (2021). Design and Development of Low Cost, Portable, On-Field I-V Curve Tracer Based on Capacitor Loading for High Power Rated Solar Photovoltaic Modules. *IEEE Access*, *9*, 70715-70731.

Seguel, J. L., Seleme, S. I., Morais, L. M. F. (2022). Comparative Study of Buck-Boost, SEPIC, Cuk and Zeta DC-DC Converters Using Different MPPT Methods for Photovoltaic Applications. *Energies*, *15*(21), 7936.

Senthilkumar, S., Mohan, V., Mangaiyarkarasi, S. P., Karthikeyan, M. (2022). Analysis of Single-Diode PV Model and Optimized MPPT Model for Different Environmental Conditions. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, *2022*, 1-17.

Sera, D., Mathe, L., Kerekes, T., Spataru, S. V., Teodorescu, R. (2013). On the Perturb-and-Observe and Incremental Conductance MPPT Methods for PV Systems. *IEEE Journal of Photovoltaics*, *3*(3), 1070-1078.

Spertino, F., Ahmad, J., Ciocia, A., Di Leo, P., Murtaza, A. F., Chiaberge, M. (2015). Capacitor charging method for I–V curve tracer and MPPT in photovoltaic systems. *Solar Energy*, *119*, 461-473.

Suman, Sharma, P., Goyal, P. (2021). Analysing the effects of solar insolation and temperature on PV cell characteristics. *Materials Today: Proceedings*, *45*, 5539-5543.

Sutikno, T., Purnama, H. S., Widodo, N. S., Padmanaban, S., Sahid, M. R. (2022). A review on non-isolated low-power DC–DC converter topologies with high output gain for solar photovoltaic system applications. *Clean Energy*, *6*(4), 557-572.

Taghvaee, M. H., Radzi, M. A. M., Moosavain, S. M., Hizam, H., Hamiruce Marhaban, M. (2013). A current and future study on non-isolated DC–DC converters for photovoltaic applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *17*, 216-227.

Touil, S., Boudjerda, N., Boubakir, A., El Khamlichi Drissi, K. (2019). A sliding mode control and artificial neural network based MPPT for a direct grid-connected photovoltaic source. *Asian Journal of Control*, *21*(4), 1892-1905.

Yung Yap, K., R. Sarimuthu, C., Mun-Yee Lim, J. (2020). Artificial Intelligence Based MPPT Techniques for Solar Power System: A review. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, *8*(6), 1043-1059.

Yu-Pei Huang. (2014). A Rapid Maximum Power Measurement System for High-Concentration Photovoltaic Modules Using the Fractional Open-Circuit Voltage Technique and Controllable Electronic Load. *IEEE Journal of Photovoltaics*, *4*(6), 1610-1617.

Zamora, A. C., Vazquez, G., Sosa, J. M., Martinez-Rodriguez, P. R., Juarez, M. A. (2017). Efficiency based comparative analysis of selected classical MPPT methods. *2017 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, 1-6.

Zurbriggen, I. G., Ordonez, M. (2019). PV Energy Harvesting Under Extremely Fast Changing Irradiance: State-Plane Direct MPPT. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *66*(3), 1852-1861.

7. EKLER

Ek-1: STM32F407 Discovery İçin Yazılan MGNİ Algoritması

```
/* USER CODE BEGIN Header */
/**
 ******************************************************************************
 * @file           : main.c
 * @brief          : Main program body
 ******************************************************************************
 * @attention
 *
 * Copyright (c) 2023 STMicroelectronics.
 * All rights reserved.
 *
 * This software is licensed under terms that can be found in the LICENSE file
 * in the root directory of this software component.
 * If no LICENSE file comes with this software, it is provided AS-IS.
 *
 ******************************************************************************
 */
/* USER CODE END Header */
/* Includes ------------------------------------------------------------------*/
#include "main.h"

/* Private includes ----------------------------------------------------------*/
/* USER CODE BEGIN Includes */
#include "stdio.h"
#include <stdbool.h>
#define NUMBER_ADC_CHANNEL 4
#define NUMBER_ADC_CHANNEL_AVERAGE_PER_CHANNEL 128

float Vpv[128];
float Ipv[128];
float Vind[128];
float Iind[128];
float PindAvg[128];
float IindAvg[128];
float VindAvg[128];
int counter = 0;

float Ppv[128];
float Pind[128];
float pPvMax = 0;
float pIndMax = 0;
float pIndTemp = 0;
float sayi1 = 0;
float sayi2 = 0;
float sum = 0;
float Pavg = 0.01;
float tempPower = 0.01;

int deviceState = 0;
unsigned int psc;
unsigned int freq;
float newper = 0;

uint16_t ADC_DMA_BUFF[NUMBER_ADC_CHANNEL
```

```
                * NUMBER_ADC_CHANNEL_AVERAGE_PER_CHANNEL] = { 0 };
float sum1, sum2, sum3, sum4;

bool isHalfCompleted = false, isFullCompleted = false;

uint32_t previousMillis = 0;
uint32_t periodCounter = 0;
uint32_t adcPeriod = 0;
uint32_t time = 0;
uint32_t firstRun = 0;
uint32_t indexCounter = 0;

/* USER CODE END Includes */

/* Private typedef -----------------------------------------------------------*/
/* USER CODE BEGIN PTD */

/* USER CODE END PTD */

/* Private define ------------------------------------------------------------*/
/* USER CODE BEGIN PD */

/* USER CODE END PD */

/* Private macro -------------------------------------------------------------*/
/* USER CODE BEGIN PM */
void getAdcValues() {

        while (!isFullCompleted) {

        }
        HAL_GPIO_WritePin(GPIOD, GPIO_PIN_15, false);

        isFullCompleted = false;

        int vPvCounter = 0, iPvCounter = 0, vIndCounter = 0, iIndCounter = 0;

        for (int i = 0; i < 512; ++i) {

                switch (i % 4) {

                case 0:
                        Vpv[vPvCounter++] = (ADC_DMA_BUFF[i] * 3.3 / 4095) * 11;
                        break;
                case 1:
                        Ipv[iPvCounter++] = ((ADC_DMA_BUFF[i] * 3.01 / 4095));
                        break; //((ADC_DMA_BUFF[i] * 3.3) / 4096) ; break;
                case 2:
                        Vind[vIndCounter++] = (ADC_DMA_BUFF[i] * 3.03 / 4095) * 11;
                        break;
                case 3:
                        Iind[iIndCounter++] = ((ADC_DMA_BUFF[i] * 3.3 / 4095));
                        break;
                default:
                        break;
                }
        }
        sum = 0;
```

```
		for (int i = 0; i < 128; i++) {

			Ppv[i] = Vpv[i] * Ipv[i];

			sum += Ppv[i];

			Pind[i] = Vpv[i] * Iind[i];

			if (i < 124) {

				IindAvg[i] = (Iind[i] + Iind[i + 1] + Iind[i + 2] + Iind[i + 3]
						+ Iind[i + 4]) / 5;
				VindAvg[i] = (Vind[i] + Vind[i + 1] + Vind[i + 2] + Vind[i + 3]
						+ Vind[i + 4]) / 5;
			}

		}

		for (int i = 0; i < 128; i++) {

			PindAvg[i] = (IindAvg[i] * VindAvg[i] + IindAvg[i + 1] * VindAvg[i + 1]
					+ IindAvg[i + 2] * VindAvg[i + 2]
					+ IindAvg[i + 3] * VindAvg[i + 3]
					+ IindAvg[i + 4] * VindAvg[i + 4]) / 5;
		}


		Pavg = sum / 128;

}

/* USER CODE END PM */

/* Private variables ---------------------------------------------------------*/
ADC_HandleTypeDef hadc1;
DMA_HandleTypeDef hdma_adc1;

TIM_HandleTypeDef htim1;
TIM_HandleTypeDef htim3;

/* USER CODE BEGIN PV */

/* USER CODE END PV */

/* Private function prototypes -----------------------------------------------*/
void SystemClock_Config(void);
static void MX_GPIO_Init(void);
static void MX_DMA_Init(void);
static void MX_ADC1_Init(void);
static void MX_TIM1_Init(void);
static void MX_TIM3_Init(void);
/* USER CODE BEGIN PFP */

/* USER CODE END PFP */

/* Private user code ---------------------------------------------------------*/
/* USER CODE BEGIN 0 */
```

```
/* USER CODE END 0 */

/**
 * @brief  The application entry point.
 * @retval int
 */
int main(void) {
	/* USER CODE BEGIN 1 */

	/* USER CODE END 1 */

	/* MCU Configuration--------------------------------------------------------*/

	/* Reset of all peripherals, Initializes the Flash interface and the Systick. */
	HAL_Init();

	/* USER CODE BEGIN Init */

	/* USER CODE END Init */

	/* Configure the system clock */
	SystemClock_Config();

	/* USER CODE BEGIN SysInit */

	/* USER CODE END SysInit */

	/* Initialize all configured peripherals */
	MX_GPIO_Init();
	MX_DMA_Init();
	MX_ADC1_Init();
	MX_TIM1_Init();
	MX_TIM3_Init();
	/* USER CODE BEGIN 2 */
	HAL_TIM_Base_Start(&htim3);
	HAL_TIM_PWM_Start(&htim1, TIM_CHANNEL_1);
	__HAL_TIM_SET_COMPARE(&htim1, TIM_CHANNEL_1, 50);

	/* USER CODE END 2 */

	/* Infinite loop */
	/* USER CODE BEGIN WHILE */
	while (1) {
		MX_DMA_Init();
		MX_ADC1_Init();
		HAL_GPIO_WritePin(GPIOD, GPIO_PIN_15, true);
		HAL_ADC_Start_DMA(&hadc1, (uint32_t*) ADC_DMA_BUFF,
				NUMBER_ADC_CHANNEL *
NUMBER_ADC_CHANNEL_AVERAGE_PER_CHANNEL);

		/* USER CODE END WHILE */

		/* USER CODE BEGIN 3 */

		getAdcValues();

		deviceState = 1;
```

```
if (((tempPower / Pavg <= 0.90) || (tempPower / Pavg >= 1.1)) && (Pavg > 0)) {

		__HAL_TIM_SET_PRESCALER(&htim1, 280);//3kHz

		HAL_Delay(1000);


		while (HAL_GPIO_ReadPin(GPIOE, GPIO_PIN_7) == 0) {
		}
		while (HAL_GPIO_ReadPin(GPIOE, GPIO_PIN_7) == 1) {
		}
		while (HAL_GPIO_ReadPin(GPIOE, GPIO_PIN_7) == 0) {
		}

		/*  for (int i = 0; i < 512; i++) {
		 ADC_DMA_BUFF[i] = 0;
		 }
		 for (int i = 0; i < 128; i++) {
		 Pind[i] = 0;
		 }
		 */
		MX_DMA_Init();
		MX_ADC1_Init();
		HAL_ADC_Start_DMA(&hadc1, (uint32_t*) ADC_DMA_BUFF,
		NUMBER_ADC_CHANNEL *
NUMBER_ADC_CHANNEL_AVERAGE_PER_CHANNEL);

		getAdcValues();

		indexCounter = 0;
		while (Pind[indexCounter] < Pind[indexCounter + 1]) {
			indexCounter++;
		}

		indexCounter = indexCounter;

		newper = (2*indexCounter)*(3.6/1000000);
		freq = 1 / newper;
		psc = (84000000 / (freq * 100)) - 1;

		if (psc < 5 || psc > 400) {

			psc = 83;
		}

		__HAL_TIM_SET_PRESCALER(&htim1, psc);


	HAL_Delay (2000);

		deviceState = 3;
		MX_DMA_Init();
		MX_ADC1_Init();
		HAL_ADC_Start_DMA(&hadc1, (uint32_t*) ADC_DMA_BUFF,
		NUMBER_ADC_CHANNEL *
NUMBER_ADC_CHANNEL_AVERAGE_PER_CHANNEL);
		HAL_Delay(500);
```

```
                        getAdcValues();
                        tempPower = Pavg;

                }
                else {
                        tempPower = Pavg;
                }

                HAL_Delay(100);
        }
        /* USER CODE END 3 */
}

/**
 * @brief System Clock Configuration
 * @retval None
 */
void SystemClock_Config(void) {
        RCC_OscInitTypeDef RCC_OscInitStruct = { 0 };
        RCC_ClkInitTypeDef RCC_ClkInitStruct = { 0 };

        /** Configure the main internal regulator output voltage
         */
        __HAL_RCC_PWR_CLK_ENABLE();
        __HAL_PWR_VOLTAGESCALING_CONFIG(PWR_REGULATOR_VOLTAGE_SCALE1);

        /** Initializes the RCC Oscillators according to the specified parameters
         * in the RCC_OscInitTypeDef structure.
         */
        RCC_OscInitStruct.OscillatorType = RCC_OSCILLATORTYPE_HSE;
        RCC_OscInitStruct.HSEState = RCC_HSE_ON;
        RCC_OscInitStruct.PLL.PLLState = RCC_PLL_ON;
        RCC_OscInitStruct.PLL.PLLSource = RCC_PLLSOURCE_HSE;
        RCC_OscInitStruct.PLL.PLLM = 4;
        RCC_OscInitStruct.PLL.PLLN = 168;
        RCC_OscInitStruct.PLL.PLLP = RCC_PLLP_DIV2;
        RCC_OscInitStruct.PLL.PLLQ = 4;
        if (HAL_RCC_OscConfig(&RCC_OscInitStruct) != HAL_OK) {
                Error_Handler();
        }

        /** Initializes the CPU, AHB and APB buses clocks
         */
        RCC_ClkInitStruct.ClockType = RCC_CLOCKTYPE_HCLK | RCC_CLOCKTYPE_SYSCLK
                        | RCC_CLOCKTYPE_PCLK1 | RCC_CLOCKTYPE_PCLK2;
        RCC_ClkInitStruct.SYSCLKSource = RCC_SYSCLKSOURCE_PLLCLK;
        RCC_ClkInitStruct.AHBCLKDivider = RCC_SYSCLK_DIV1;
        RCC_ClkInitStruct.APB1CLKDivider = RCC_HCLK_DIV4;
        RCC_ClkInitStruct.APB2CLKDivider = RCC_HCLK_DIV4;

        if (HAL_RCC_ClockConfig(&RCC_ClkInitStruct, FLASH_LATENCY_5) != HAL_OK) {
                Error_Handler();
        }
}

/**
 * @brief ADC1 Initialization Function
 * @param None
```

```
 * @retval None
 */
static void MX_ADC1_Init(void) {

	/* USER CODE BEGIN ADC1_Init 0 */

	/* USER CODE END ADC1_Init 0 */

	ADC_ChannelConfTypeDef sConfig = { 0 };

	/* USER CODE BEGIN ADC1_Init 1 */

	/* USER CODE END ADC1_Init 1 */

	/** Configure the global features of the ADC (Clock, Resolution, Data Alignment and number of conversion)
	 */
	hadc1.Instance = ADC1;
	hadc1.Init.ClockPrescaler = ADC_CLOCK_SYNC_PCLK_DIV4;
	hadc1.Init.Resolution = ADC_RESOLUTION_12B;
	hadc1.Init.ScanConvMode = ENABLE;
	hadc1.Init.ContinuousConvMode = ENABLE;
	hadc1.Init.DiscontinuousConvMode = DISABLE;
	hadc1.Init.ExternalTrigConvEdge = ADC_EXTERNALTRIGCONVEDGE_NONE;
	hadc1.Init.ExternalTrigConv = ADC_SOFTWARE_START;
	hadc1.Init.DataAlign = ADC_DATAALIGN_RIGHT;
	hadc1.Init.NbrOfConversion = 4;
	hadc1.Init.DMAContinuousRequests = DISABLE;
	hadc1.Init.EOCSelection = ADC_EOC_SINGLE_CONV;
	if (HAL_ADC_Init(&hadc1) != HAL_OK) {
		Error_Handler();
	}

	/** Configure for the selected ADC regular channel its corresponding rank in the sequencer and its sample time.
	 */
	sConfig.Channel = ADC_CHANNEL_0;
	sConfig.Rank = 1;
	sConfig.SamplingTime = ADC_SAMPLETIME_3CYCLES;
	if (HAL_ADC_ConfigChannel(&hadc1, &sConfig) != HAL_OK) {
		Error_Handler();
	}

	/** Configure for the selected ADC regular channel its corresponding rank in the sequencer and its sample time.
	 */
	sConfig.Channel = ADC_CHANNEL_1;
	sConfig.Rank = 2;
	if (HAL_ADC_ConfigChannel(&hadc1, &sConfig) != HAL_OK) {
		Error_Handler();
	}

	/** Configure for the selected ADC regular channel its corresponding rank in the sequencer and its sample time.
	 */
	sConfig.Channel = ADC_CHANNEL_2;
	sConfig.Rank = 3;
	if (HAL_ADC_ConfigChannel(&hadc1, &sConfig) != HAL_OK) {
```

```
		Error_Handler();
	}

	/** Configure for the selected ADC regular channel its corresponding rank in the sequencer and
its sample time.
	 */
	sConfig.Channel = ADC_CHANNEL_3;
	sConfig.Rank = 4;
	if (HAL_ADC_ConfigChannel(&hadc1, &sConfig) != HAL_OK) {
		Error_Handler();
	}
	/* USER CODE BEGIN ADC1_Init 2 */

	/* USER CODE END ADC1_Init 2 */

}

/**
 * @brief TIM1 Initialization Function
 * @param None
 * @retval None
 */
static void MX_TIM1_Init(void) {

	/* USER CODE BEGIN TIM1_Init 0 */

	/* USER CODE END TIM1_Init 0 */

	TIM_MasterConfigTypeDef sMasterConfig = { 0 };
	TIM_OC_InitTypeDef sConfigOC = { 0 };
	TIM_BreakDeadTimeConfigTypeDef sBreakDeadTimeConfig = { 0 };

	/* USER CODE BEGIN TIM1_Init 1 */

	/* USER CODE END TIM1_Init 1 */
	htim1.Instance = TIM1;
	htim1.Init.Prescaler = 84;
	htim1.Init.CounterMode = TIM_COUNTERMODE_UP;
	htim1.Init.Period = 99;
	htim1.Init.ClockDivision = TIM_CLOCKDIVISION_DIV1;
	htim1.Init.RepetitionCounter = 0;
	htim1.Init.AutoReloadPreload = TIM_AUTORELOAD_PRELOAD_DISABLE;
	if (HAL_TIM_PWM_Init(&htim1) != HAL_OK) {
		Error_Handler();
	}
	sMasterConfig.MasterOutputTrigger = TIM_TRGO_RESET;
	sMasterConfig.MasterSlaveMode = TIM_MASTERSLAVEMODE_DISABLE;
	if (HAL_TIMEx_MasterConfigSynchronization(&htim1, &sMasterConfig)
			!= HAL_OK) {
		Error_Handler();
	}
	sConfigOC.OCMode = TIM_OCMODE_PWM1;
	sConfigOC.Pulse = 0;
	sConfigOC.OCPolarity = TIM_OCPOLARITY_HIGH;
	sConfigOC.OCNPolarity = TIM_OCNPOLARITY_HIGH;
	sConfigOC.OCFastMode = TIM_OCFAST_DISABLE;
	sConfigOC.OCIdleState = TIM_OCIDLESTATE_RESET;
	sConfigOC.OCNIdleState = TIM_OCNIDLESTATE_RESET;
```

```
	if (HAL_TIM_PWM_ConfigChannel(&htim1, &sConfigOC, TIM_CHANNEL_1)
			!= HAL_OK) {
		Error_Handler();
	}
	sBreakDeadTimeConfig.OffStateRunMode = TIM_OSSR_DISABLE;
	sBreakDeadTimeConfig.OffStateIDLEMode = TIM_OSSI_DISABLE;
	sBreakDeadTimeConfig.LockLevel = TIM_LOCKLEVEL_OFF;
	sBreakDeadTimeConfig.DeadTime = 0;
	sBreakDeadTimeConfig.BreakState = TIM_BREAK_DISABLE;
	sBreakDeadTimeConfig.BreakPolarity = TIM_BREAKPOLARITY_HIGH;
	sBreakDeadTimeConfig.AutomaticOutput = TIM_AUTOMATICOUTPUT_DISABLE;
	if (HAL_TIMEx_ConfigBreakDeadTime(&htim1, &sBreakDeadTimeConfig)
			!= HAL_OK) {
		Error_Handler();
	}
	/* USER CODE BEGIN TIM1_Init 2 */

	/* USER CODE END TIM1_Init 2 */
	HAL_TIM_MspPostInit(&htim1);

}

/**
 * @brief TIM3 Initialization Function
 * @param None
 * @retval None
 */
static void MX_TIM3_Init(void) {

	/* USER CODE BEGIN TIM3_Init 0 */

	/* USER CODE END TIM3_Init 0 */

	TIM_ClockConfigTypeDef sClockSourceConfig = { 0 };
	TIM_MasterConfigTypeDef sMasterConfig = { 0 };
	TIM_OC_InitTypeDef sConfigOC = { 0 };

	/* USER CODE BEGIN TIM3_Init 1 */

	/* USER CODE END TIM3_Init 1 */
	htim3.Instance = TIM3;
	htim3.Init.Prescaler = 140;
	htim3.Init.CounterMode = TIM_COUNTERMODE_UP;
	htim3.Init.Period = 100;
	htim3.Init.ClockDivision = TIM_CLOCKDIVISION_DIV1;
	htim3.Init.AutoReloadPreload = TIM_AUTORELOAD_PRELOAD_DISABLE;
	if (HAL_TIM_Base_Init(&htim3) != HAL_OK) {
		Error_Handler();
	}
	sClockSourceConfig.ClockSource = TIM_CLOCKSOURCE_INTERNAL;
	if (HAL_TIM_ConfigClockSource(&htim3, &sClockSourceConfig) != HAL_OK) {
		Error_Handler();
	}
	if (HAL_TIM_PWM_Init(&htim3) != HAL_OK) {
		Error_Handler();
	}
	sMasterConfig.MasterOutputTrigger = TIM_TRGO_RESET;
	sMasterConfig.MasterSlaveMode = TIM_MASTERSLAVEMODE_DISABLE;
```

```
	if (HAL_TIMEx_MasterConfigSynchronization(&htim3, &sMasterConfig)
			!= HAL_OK) {
		Error_Handler();
	}
	sConfigOC.OCMode = TIM_OCMODE_PWM1;
	sConfigOC.Pulse = 0;
	sConfigOC.OCPolarity = TIM_OCPOLARITY_HIGH;
	sConfigOC.OCFastMode = TIM_OCFAST_DISABLE;
	if (HAL_TIM_PWM_ConfigChannel(&htim3, &sConfigOC, TIM_CHANNEL_1)
			!= HAL_OK) {
		Error_Handler();
	}
	/* USER CODE BEGIN TIM3_Init 2 */

	/* USER CODE END TIM3_Init 2 */
	HAL_TIM_MspPostInit(&htim3);

}

/**
 * Enable DMA controller clock
 */
static void MX_DMA_Init(void) {

	/* DMA controller clock enable */
	__HAL_RCC_DMA2_CLK_ENABLE();

	/* DMA interrupt init */
	/* DMA2_Stream0_IRQn interrupt configuration */
	HAL_NVIC_SetPriority(DMA2_Stream0_IRQn, 0, 0);
	HAL_NVIC_EnableIRQ(DMA2_Stream0_IRQn);

}

/**
 * @brief GPIO Initialization Function
 * @param None
 * @retval None
 */
static void MX_GPIO_Init(void) {
	GPIO_InitTypeDef GPIO_InitStruct = { 0 };
	/* USER CODE BEGIN MX_GPIO_Init_1 */
	/* USER CODE END MX_GPIO_Init_1 */

	/* GPIO Ports Clock Enable */
	__HAL_RCC_GPIOH_CLK_ENABLE();
	__HAL_RCC_GPIOA_CLK_ENABLE();
	__HAL_RCC_GPIOE_CLK_ENABLE();
	__HAL_RCC_GPIOD_CLK_ENABLE();

	/*Configure GPIO pin Output Level */
	HAL_GPIO_WritePin(GPIOD, GPIO_PIN_15, GPIO_PIN_RESET);

	/*Configure GPIO pin : PE7 */
	GPIO_InitStruct.Pin = GPIO_PIN_7;
	GPIO_InitStruct.Mode = GPIO_MODE_INPUT;
	GPIO_InitStruct.Pull = GPIO_NOPULL;
	HAL_GPIO_Init(GPIOE, &GPIO_InitStruct);
```

```
	/*Configure GPIO pin : PD15 */
	GPIO_InitStruct.Pin = GPIO_PIN_15;
	GPIO_InitStruct.Mode = GPIO_MODE_OUTPUT_PP;
	GPIO_InitStruct.Pull = GPIO_NOPULL;
	GPIO_InitStruct.Speed = GPIO_SPEED_FREQ_LOW;
	HAL_GPIO_Init(GPIOD, &GPIO_InitStruct);

	/* USER CODE BEGIN MX_GPIO_Init_2 */
	/* USER CODE END MX_GPIO_Init_2 */
}

/* USER CODE BEGIN 4 */
void HAL_ADC_ConvCpltCallback(ADC_HandleTypeDef *ADCx) {

	isFullCompleted = true;
	time = __HAL_TIM_GET_COUNTER(&htim3);
	__HAL_TIM_SET_COUNTER(&htim3, 0);
	HAL_GPIO_TogglePin(GPIOD, GPIO_PIN_15);
}

/* USER CODE END 4 */

/**
 * @brief  This function is executed in case of error occurrence.
 * @retval None
 */
void Error_Handler(void) {
	/* USER CODE BEGIN Error_Handler_Debug */
	/* User can add his own implementation to report the HAL error return state */
	__disable_irq();
	while (1) {
	}
	/* USER CODE END Error_Handler_Debug */
}

#ifdef  USE_FULL_ASSERT
/**
  * @brief  Reports the name of the source file and the source line number
  *         where the assert_param error has occurred.
  * @param  file: pointer to the source file name
  * @param  line: assert_param error line source number
  * @retval None
  */
void assert_failed(uint8_t *file, uint32_t line)
{
  /* USER CODE BEGIN 6 */
  /* User can add his own implementation to report the file name and line number,
     ex: printf("Wrong parameters value: file %s on line %d\r\n", file, line) */
  /* USER CODE END 6 */
}
#endif /* USE_FULL_ASSERT */
```

ÖZGEÇMİŞ

Nihal ÇETİN ACAR

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Doktora 2019-2024	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya
Yüksek Lisans 2012-2014	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya
Lisans 2005-2009	Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Kütahya

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Öğretim Görevlisi 2018-Devam ediyor	Akdeniz Üniversitesi Korkuteli MYO, Elektronik-Haberleşme Programı, Antalya
Elektrik-Elektronik Mühendisi 2014-2018	ANTEPE İnşaat ve Ticaret A.Ş Antalya
Araştırma Görevlisi 2010-2014	Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Antalya

ESERLER

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler

1- S. Börekci And N. Çetin Acar, "Inductor based I-V curve measurement method for photovoltaic panels," Engineering Research Express , vol.6, no.1, pp.1-8, 2024.

2- S. Börekci, N. Çetin Acar, A. Kircay, Ş. Ozdem, "Design and Implementation of A LED Driver Circuit with Dimming Function without Burst Mode at Constant Switching Frequency," LIGHT AND ENGINEERING , vol.31, no.6, pp.58-63, 2023.

3- S. Börekci, N. Çetin Acar, A. Kircay , "Led Dimming Technique Without Frequency And Pulse Width Modulations," Internatıonal Journal Of Cırcuıt Theory And Applications , Vol.46, No.11, Pp.2028-2037, 2018.

4- S. Börekci And N. C. Acar, "High-Brightness And Low-Cost Led Driver - Dc Or Ac?," Electronics World , Vol.121, No.1950, Pp.34-36, 2015.

Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler

1- S. Börekci N. Çetin Acar, "Magnetically Dimmable Half Bridge Current Fed Led Driver," Advances İn Robotıcs, Mechatronics And Circuits , Santorini, Greece, Pp.150-154, 2014.

2- S. Börekci And N. Çetin Acar, "An Accurate Way of Determining BJT's Switching Loss in Medium and High Voltage Applications," 2012 IEEE International Conference on Electronics Design, Systems and Applications , Kuala Lump,Ur, Malaysia, pp.210-213, 2012.