



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



METEOROLOJİK VERİLERİ KULLANAN
MPPT KONTROLLÜ RÜZGAR-GÜNEŞ
HİBRİT ENERJİ SİSTEMİ TASARIMI VE
UYGULAMASI

Göksel GÖKKUŞ

DOKTORA TEZİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Kasım-2020
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Göksel GÖKKUŞ tarafından hazırlanan “Meteorolojik Verileri Kullanan MPPT Kontrollü Rüzgâr-Güneş Hibrit Enerji Sistemi Tasarımı ve Uygulaması” adlı tez çalışması 17/11/2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Ramazan AKKAYA

.....

Danışman

Prof. Dr. Ahmet Afşin KULAKSIZ

.....

Üye

Doç. Dr. Bahadır AKBAL

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Hulusi KARACA

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Mümtaz MUTLUER

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.


Göksel GÖKKÜŞ

ÖZET

DOKTORA TEZİ

METEOROLOJİK VERİLERİ KULLANAN MPPT KONTROLLÜ RÜZGAR- GÜNEŞ HİBRİT ENERJİ SİSTEMİ TASARIMI VE UYGULAMASI

Göksel GÖKKUŞ

**Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Ahmet Afşin KULAKSIZ

2020, 122 Sayfa

Jüri

**Prof. Dr. Ramazan AKKAYA
Prof. Dr. Ahmet Afşin KULAKSIZ
Doç. Dr. Bahadır AKBAL
Dr. Öğr. Üyesi Hulusi KARACA
Dr. Öğr. Üyesi Mümtaz MUTLUER**

Bu tezde özellikle akademik çalışmalara destek olabilecek, eğitim ve araştırma maksadıyla kullanılabilecek küçük ölçekte rüzgâr-güneş enerji kaynaklarını temel alan hibrit bir enerji sistemi üzerinde tasarım ve pratik çalışma yapılmıştır. Çalışma kapsamında; rüzgâr hızı, güneş ışıması ve ortam sıcaklığı gibi meteorolojik veriler üzerinden rüzgâr türbini ve güneş paneli gibi davranan iki bileşenden meydana gelen bir enerji sistemi önerilmiştir. Ayrıca tasarlanan hibrit enerji sistemi, rüzgâr ve güneş enerji sistemlerinin verimlerine etki eden, günümüzde üzerinde akademik pek çok çalışmanın yapıldığı ve popüler olarak kullanılan maksimum güç noktası takibi algoritmaları ile de desteklenmektedir. Bu çalışmanın önemli yönlerinden biri üç farklı maksimum güç noktası takibi algoritmasının aynı mikrodenetleyici üzerine yüklenmesi ve kullanıcı tarafından seçilen algoritmanın çalıştırılmasıdır.

Tezde ilk olarak, rüzgâr enerji kaynağı gibi davranacak olan rüzgâr türbini emülatörü üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda bir asenkron motor ve bir doğru akım makinesi akupile edilerek motor-generatör çifti oluşturulmuştur. İkinci olarak, güneş simülatörü üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Hem güneş dizi simülatörü hem de rüzgâr emülatörü çıkışına ayrı ayrı birer güç dönüştürme katı tasarlanmış ve iki güç dönüştürme katı da merkezi bir DA barası üzerinde birleştirilmiştir. Tasarlanan bu güç katları ile üretilen DA türündeki enerjinin bir gerilim seviyesinden başka bir seviyeye dönüştürülmesine ve maksimum güç noktası takibi algoritmalarının işletilmesine imkân sağlanmıştır. Tezde ayrıca hem rüzgâr türbini emülatörü hem de güneş simülatörünün ayrı ayrı veya birlikte kullanılabileceği bir omik yük simülatörü ve mikro yapı bir evirici tasarlanmıştır. Rüzgâr ve güneş enerji kaynakları ile alternatif akım yüklerinin beslenmesine imkân sağlayacak şekilde,

çıkışlar evirici girişine bağlanmıştır. Sistemin hibrit çalıştırılması durumunda farklı yük değerleri için elde edilen sonuçlardan maksimum güç noktası takibi algoritmalarının verimlerinin ortalama %88 değerinde olduğu gözlenmiştir.

Tasarım ve uygulaması gerçekleştirilen hibrit enerji sistemi, rüzgâr ve güneş ışığı erişimine ihtiyaç duymadan sadece ortam verilerini kullanarak laboratuvar ortamında rüzgâr ve güneş enerjisi üreteçleri gibi davranabilmektedir. Sistem sayesinde her istenildiğinde ulaşılması mümkün olmayan rüzgâr türbinleri ve güneş panellerinin akademik ve eğitim ortamında çalışmalarının gözlenebilmesi amacıyla kullanılabilmesi mümkün hale gelmiştir. Hibrit enerji sistemi, yapısı bakımından geliştirilmeye açık, yeni algoritma ve kontrol yöntemlerinin uygulamasına imkân sağlar niteliktedir.

Anahtar Kelimeler: Güneş Simülatörü, MPPT Algoritması, Rüzgâr Türbini Emülatörü, Hibrit Güç Sistemi



ABSTRACT

PhD THESIS

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF MPPT CONTROLLED WIND-SOLAR HYBRID ENERGY SYSTEM USING METEOROLOGICAL DATA

Göksel GÖKKUŞ

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Electrical and Electronics Engineering**

Advisor: Prof. Dr. Ahmet Afşin KULAKSIZ

2020, 122 Pages

Jury

**Prof. Dr. Ramazan AKKAYA
Prof. Dr. Ahmet Afşin KULAKSIZ
Assoc. Prof. Dr. Bahadır AKBAL
Asst. Prof. Dr. Üyesi Hulusi KARACA
Asst. Prof. Dr. Mümtaz MUTLUER**

In this thesis, design and practical implementation have been made on a small scale hybrid energy system based on wind-solar energy resources that can support academic studies and can be used for education and research purposes. In the scope of the study; based on meteorological data such as wind speed, solar radiation, and ambient temperature, a two-component energy system behaving as a wind turbine and photovoltaic panel has been proposed. In addition, the designed hybrid energy system is also supported by the maximum power point tracking algorithms that affect the efficiency of wind and solar energy systems, on which many academic studies have been carried out and are popularly used today. One of the important aspects of this study is that three different maximum power point tracking algorithms are loaded on the same microcontroller and the algorithm chosen by the user is run.

In the thesis, firstly, studies were carried out on the wind turbine emulator that will behave as a wind energy source. In this context, an asynchronous motor and a direct current machine were coupled to create a motor-generator pair. Secondly, studies have been carried out on the solar simulator. A power conversion stage has been designed separately for both the solar array simulator and the wind emulator output, and the two power conversion stages are combined on a central DC bus. With these designed power stages, it is possible to convert the DC type energy from one voltage level to another and to operate the maximum power point tracking algorithms. In the thesis, a resistive load simulator and a micro inverter that can be used separately or together by both wind turbine emulator and solar simulator are designed. The outputs are connected to an inverter input to allow the feeding of wind and solar energy sources and alternating current loads. When the system is operated in hybrid, from the results

obtained for different load values, it has been observed that the efficiency of maximum power point tracking algorithms is 88% on average.

The designed and implemented hybrid energy system can behave as wind and solar energy generators in laboratory environment by using only meteorological data without needing access to wind and sunlight. The system makes it possible to use wind turbines and photovoltaic panels, which are not accessible at all times, and their operation in academic and educational environments can be observed. It is open to development in terms of system structure and allows the application of new algorithms and control methods.

Keywords: Solar Simulator, MPPT Algorithm, Wind Turbine Emulator, Hybrid Power System



ÖNSÖZ

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesi süresince zamanını ve bilgileri, çalışmaların yürütülmesi esnasında sabır, hoşgörü ve emeğini benden esirgemeyen saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. Ahmet Afşin KULAKSIZ'a sonsuz teşekkür eder saygılarımı sunarım.

Tez İzleme Komitesi üyeleri Prof. Dr. Ramazan AKKAYA ve Dr. Öğr. Üyesi Hulusi KARACA hocalarıma görüş, öneri ve desteklerinden dolayı teşekkür ederim. Çalışmalarımın yürütülmesi esnasında vermiş olduğu proje desteği için Selçuk Üniversitesi BAP koordinatörlüğüne ve sağladığı fiziksel imkânlar için Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi MYO'na teşekkür ederim. Çalışma arkadaşım Dr. Öğr. Üyesi Ebubekir Kaya ve ailesine, son olarak da bu süreçte yanımda oldukları için kıymetli aileme teşekkür ederim.

Göksel GÖKKUŞ
KONYA-2020

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	vi
ÖNSÖZ	viii
İÇİNDEKİLER	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Güneş Enerji Sistemleri.....	1
1.1.1. Fotovoltaik sistemler ile elektrik enerjisi üretimi	3
1.2. Rüzgâr Enerji Sistemleri	6
1.3. Rüzgâr ve Güneşi Temel Alan Hibrit Enerji Sistemleri	8
1.4. MPPT Tekniği ve Algoritmaları	10
1.5. Tezin Amaç ve Hedefleri	13
1.6. Tez Organizasyonu	15
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	16
2.1. Güneş Simülatörü	16
2.2. Rüzgâr Emülatörü	17
2.3. Rüzgâr ve Güneş Enerji Sistemlerinde MPPT Algoritmaları	19
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	25
3.1. Meteoroloji İstasyonunun Montajı ve Devreye Alınması.....	25
3.2. Rüzgâr Emülatörü Tasarımı ve Bileşenleri.....	28
3.2.1. Rüzgâr emülatörü benzetim çalışmaları	29
3.2.2. ASM sürücü ve kontrol birimi	33
3.2.3. Rüzgâr emülatörü kontrol kartı ve bileşenleri	34
3.2.4. Kullanıcı arayüzü birimi	40
3.2.5. Rüzgâr emülatörü üzerinde MPPT tekniklerinin geliştirilmesi	43
3.3. Güneş Simülatörü Tasarımı ve Bileşenleri	51
3.3.1. Güneş simülatörünün genel yapısı ve kullanıcı arayüzü	51
3.3.2. DA/DA dönüştürücü birimi	53
3.3.3. Güneş simülatörü üzerinde MPPT tekniklerinin geliştirilmesi.....	58
3.4. Omik Yük Simülatörü Tasarımı ve Bileşenleri	66
3.4.1. Yük simülatörü sürücü birimi	67
3.4.2. Omik yük grubu ve özellikleri	69
3.5. Evirici Birimi Tasarımı ve Bileşenleri.....	70
3.6. Diğer Bileşenler	74
3.6.1. Güç kaynağı katı	74
3.6.2. Manuel yük seçim ünitesi	75
3.7. Uygulaması Yapılan Sistemin Tüm Bileşenleri.....	76

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	79
4.1. Güneş Simülatörü Üzerinden Elde Edilen Sonuçlar ve Tartışma.....	79
4.2. Rüzgâr Emülatörü Üzerinde Sonuçlar ve Tartışma	94
4.3. Sistemin Hibrit Çalıştırılması Üzerine Sonuçlar ve Tartışma	95
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	98
5.1 Sonuçlar	98
5.2 Öneriler	99
KAYNAKLAR	101
EKLER	113
ÖZGEÇMİŞ	121



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

I	: PV hücresi akımı
I_d	: PV eşdeğer devresi diyot akımı
k	: Boltzmann sabiti
I_{sc}	: PV hücresinin kısa devre akımı
I_Q	: Saturasyon akımı
q	: Elektron değişimi
V	: Hücre gerilimi
T	: PV hücre sıcaklığı
P_t	: Mekaniksel çıkış gücü
ρ	: Hava yoğunluğu
A	: Kanatların süpürme alanı
V_w	: Rüzgâr hızı
C_p	: Güç katsayısı
η	: Dişli kutusu dönüştürme oranı
N_s	: Yüksek devir mili dönüş sayısı
$TSR(\lambda)$	: Uç hız oranı
D	: Rüzgâr türbini kanat çapı
f	: Frekans
$2P$	: Çift kutup sayısı
V_g	: Dönüştürücü giriş gerilimi
V_c	: Dönüştürücü çıkış gerilimi
d	: Dönüştürücü PWM doluluk oranı
L	: Dönüştürücü bobin indüktansı
F_s	: Dönüştürücü anahtarlama frekansı
ΔI_L	: Dönüştürücü bobin akımı değişim oranı
ΔV_ζ	: Dönüştürücü çıkış gerilimi değişim oranı
C	: Dönüştürücü kondansatör sığası
Δv	: MPPT gerilim değişimi
Δp	: MPPT güç değişimi
c	: MPPT adım sabiti

Kısaltmalar

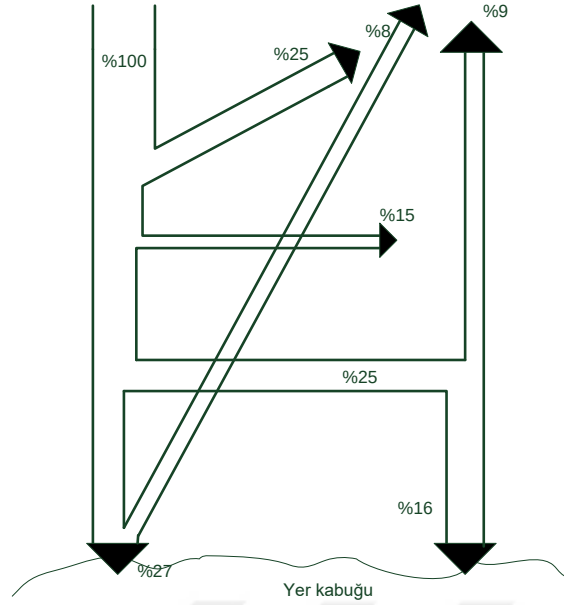
AA	: Alternatif Akım
AC	: Alternatif Akım (<i>Alternating Current</i>)
AD-P&O	: Adaptif Değiştir ve Gözle (<i>Adaptive Perturb and Observe</i>)
ANN	: Yapay Sinir Ağları (<i>Artificial Neural Networks</i>)
CSP	: Konsantre/Yoğunlaştırılmalı Güneş Enerji Sistemi (<i>Concentrating Solar Power</i>)
CVT	: Sürekli Değişken Transmisyon (<i>Continuously Variable Transmission</i>)
DA	: Doğru Akım
DC	: Doğru Akım (<i>Direct Current</i>)
DD	: Doğrudan Sürüş (<i>Direct Drive</i>)
DFIG	: Çift Beslemeli İndüksiyon Generatörü (<i>Doubly Fed Induction Generator</i>)
DPC	: Doğrudan Güç Kontrol (<i>Direct Power Control</i>)
FC	: Yakıt Hücresi (<i>Fuel Cell</i>)
FLC	: Bulanık Mantık Denetleyicisi (<i>Fuzzy Logic Control</i>)
FOIC	: Kesirli Sıralı Artımlı İletkenlik (<i>Fractional Order Incremental Conductance</i>)
FSWT	: Sabit Hızlı Rüzgâr Türbini (<i>Fixed Speed Wind Turbine</i>)
GSM	: <i>Global System for Mobile Communications</i>
HAWT	: Yatay Eksenli Rüzgâr Türbini (<i>Horizontal Access Wind Turbine</i>)
HB-P&O	: Hibrit Değiştir ve Gözle (<i>Hybrid Perturb and Observe</i>)
HC	: Tepe Tırmanma (<i>Hill Climbing</i>)
IC	: Artımlı İletkenlik (<i>Incremental Conductance</i>)
IG	: İndüksiyon Generatörü/Asenkron Generatör (<i>Induction Generator</i>)
IPC	: Doğrudan Olmayan Güç Kontrol (<i>Indirect Power Control</i>)
LED	: Işık Yayan Diyot (<i>Light Emitting Diode</i>)
LPF	: Alçak Geçiren Filtre (<i>Low-Pass Filter</i>)
MG	: Manyetik Dişli Kutusu (<i>Magnetic Gearbox</i>)
OCV	: Açık Devre Gerilimi (<i>Open-Circuit Voltage</i>)
OTC	: Optimal Tork Kontrol (<i>Optimal Torque control</i>)
PCB	: Baskı Devre Kartı (<i>Printed Circuit Board</i>)
PG	: Planet Dişli Kutusu (<i>Planetary Gearbox</i>)
PID	: Orantılı-İntegral-Türev (<i>Proportional Integral Derivative</i>)
P&O	: Değiştir ve Gözle (<i>Perturb and Observe</i>)
PS	: Parçalı Gölgeleme (<i>Partially Shaded</i>)
PSF	: Güç Sinyali Geri Besleme Kontrol (<i>Power Signal Feedback Control</i>)
PSO	: Parçacık Sürü Optimizasyonu (<i>Particle Swarm Optimization</i>)
PV	: Foto Voltaik (<i>Photo Voltaic</i>)
PWM	: Dalga Genişlik Modülasyonu (<i>Pulse Width Modulations</i>)
SCC	: Kısa Devre Akımı (<i>Short-Circuit Current</i>)
SEIG	: Kendinden Uyarımlı İndüksiyon Motor (<i>Self Excited Induction Motor</i>)
STC	: Standart Test Koşulu (<i>Standart Test Condition</i>)
TG	: Sıcaklık Eğimi (<i>Temperature Gradient</i>)
TSR	: Uç Hızı Oranı Kontrolü (<i>Tip Speed Ratio Control</i>)
TP	: Parametrik Sıcaklık (<i>Temperature Parametric</i>)
VSWT	: Değişken Hızlı Rüzgâr Türbini (<i>Variable Speed Wind Turbine</i>)

1. GİRİŞ

Günümüzde enerji ihtiyacı giderek artmakta ve enerji kaynaklarının çeşitlendirilmesi ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Mevcut durumda enerji ihtiyacı büyük ölçüde fosil kaynaklardan karşılanmaktadır. Fosil kaynakların kullanımından dolayı çevre üzerinde olumsuz etkiler meydana gelmekte, ayrıca gün geçtikçe bu kaynakların ömürleri de azalmaktadır. Enerji ihtiyacı ekonomik, teknik, sosyal ve çevresel pek çok etkiye sahiptir. Ülkelerin enerji alanında yaşadıkları sorunlar da küresel ve bölgesel pek çok gerginliğe sebep olmakta, enerji bağımlılığı gittikçe önem kazanmaktadır. Günümüzde ülkeler pek çok olumsuz yöne sahip olan fosil yakıtlar yerine, sahip oldukları potansiyelleri bakımından alternatif enerji kaynaklarını daha fazla tercih etmeye başlamıştır.

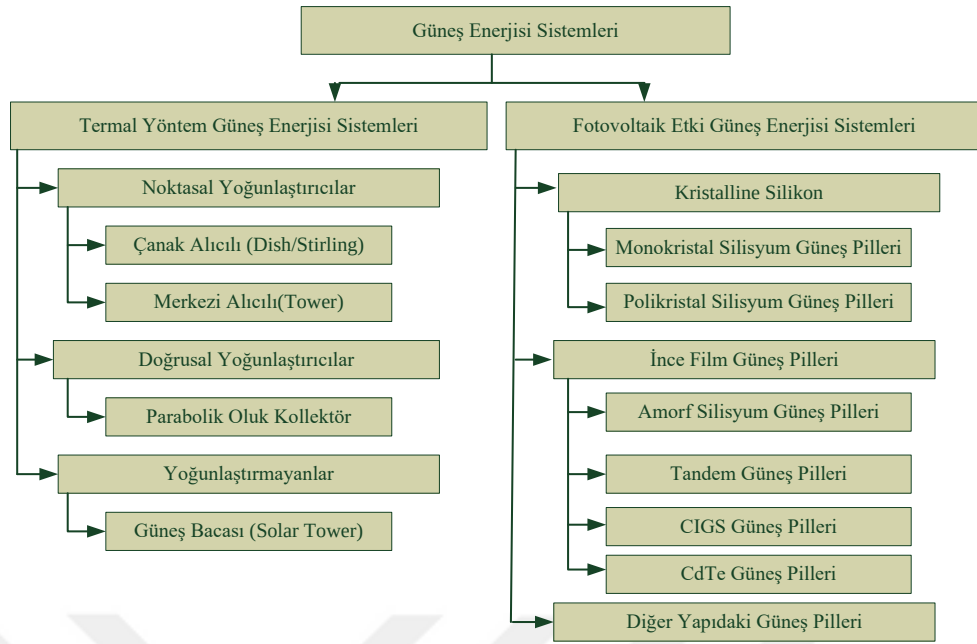
1.1. Güneş Enerji Sistemleri

Güneş enerjisi canlıların hayat kaynağı olduğu gibi diğer pek çok enerji kaynağı da güneş enerjisinin diğer enerji türlerine dönüşmesi sonucunda meydana gelir. Enerji yoktan var olmayan, bir türden diğer türe dönüşen bir olgudur. Güneşten yayılan ışık, ısı ve manyetik enerji dünya yüzeyine ulaştığında; rüzgâr, mekanik, elektrik, kimyasal vb. pek çok enerji türüne dönüşür. Güneş enerjisi; tıbbi alanda, endüstride, kimyasal süreçlerde, bitki ve besin yetiştirmede, ev-ofis gibi alanlarda iklimlendirme işlemlerinde kullanılmaktadır. Günümüzde güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüşümü üzerine akademik ve ticari alanda pek çok çalışma yapılmaktadır. Bu çalışmaların genel kapsamı güneş enerjisinden en yüksek oranda verim elde etmek ve enerjinin sürdürülebilirliğini sağlamaktır. Güneş, dünyamıza 150 milyon km uzaklıkta olan ve sıcak gazlardan meydana gelen bir yıldızdır. Güneşin yaymış olduğu enerjinin yer kabuğuna ulaşmasına kadarki geçen süreçte meydana gelen kayıplar Şekil 1.1'de verilmiştir.



Şekil 1.1. Güneş enerjisinin yer kabuğuna ulaşmaya kadar meydana gelen kayıplarını gösteren şema

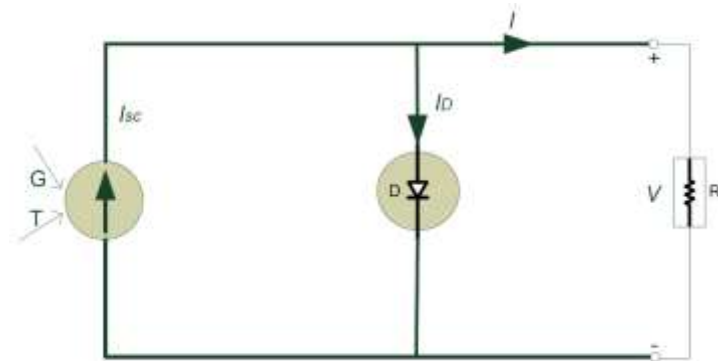
Güneşten ısıma ile yayılan enerjinin; % 25'i atmosfer ve bulutlara çarparak geri yansır, kalan % 75'lik kısmın % 25'i atmosferde dağılmaya (difüzyon) uğrar, bu % 25'lik dağılmanın % 9'u geri yansır, % 16'sı yer küreyi ısıtır. Kalan % 50'lik enerjinin % 15'i atmosfer ve bulutlar tarafından emilir. Yer küreye ulaşan % 35'lik enerjinin % 8'i yer küre tarafından uzaya geri yansıtılır. Tüm enerjinin % 27'si doğrudan, % 16'sı dağılma yoluyla yer kabuğuna ulaşır. Bu kadar kayıptan sonra bile dünya yüzeyinde 1 m^2 'ye 1360 W enerji düşmektedir ancak bu değer coğrafi şartlara bağlı olarak değişir. Araştırmalar ve uygulamalarda bu değer Standart Test Koşullarında (Standard Test Condition, STC) 1 m^2 'ye 1000 W olarak işleme alınır. Güneş enerjisinden faydalanma adına yapılan uygulamalarda göz önüne alınması gereken iki önemli etken vardır. Bunlar; gün uzunluğu ve güneşlenme süresidir. Günümüzde güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretimi yöntemleri olarak fotovoltaik etki tekniği ve termal teknikler olmak üzere iki teknikten faydalanılır (Bosnjakovic ve Tadijanovic, 2019). Güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretimine dair kullanılan teknikler Şekil 1.2'de bir şema halinde verilmiştir.



Şekil 1.2. Güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretiminde kullanılan yöntemler

1.1.1. Fotovoltaik sistemler ile elektrik enerjisi üretimi

Güneş paneli hücreleri (PhotoVoltaic, PV), yarı iletken malzemelerden meydana gelirler ve güneş enerjisini doğru akım elektrik enerjisine dönüştürürler. Günümüzde ticari niteliğe sahip PV hücreler güneşin yaymış olduğu enerjiyi % 18 ile % 21 oranında verimle elektrik enerjisine dönüştürebilmektedirler (Kavya ve Jayalalitha, 2020). P ve N yarı iletken malzemelerin birleşim noktasının foton radyasyonu ile aydınlatılması sonucu bu maddeler arasında bir potansiyel fark ortaya çıkar. Bu olaya fotovoltatik etki denir. Yeterli enerjiye sahip olan fotonlar yarı iletken malzemeler üzerinde delik-elektron çifti oluşturur. Delikler + yüklü iken, elektronlar – yüklüdür. En küçük PV bileşeni hücre olarak anılır. Bir PV hücresinin elektriksel eşdeğeri Şekil 1.3’te verilmiştir.



Şekil 1.3. PV hücresinin elektriksel eşdeğer devresi

PV hücrede dış devreye bir yük bağlanması sonucunda hücre içerisindeki elektron potansiyeli dış devre üzerinden akarak bir akım kaynağı gibi davranır. Hücrenin üretmiş olduğu akımın güneş radyasyonu ve sıcaklığa bağlı değeri Denklem (1.1) ve Denklem (1.2) ile hesaplanır.

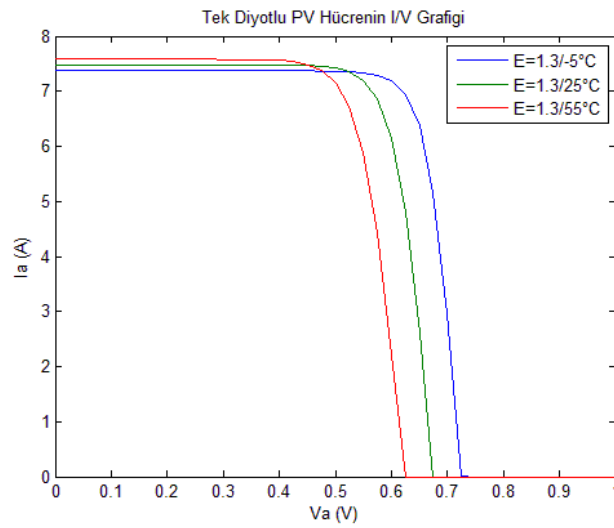
$$I = I_{sc} - I_d \quad (1.1)$$

$$I = I_{sc} - I_Q \left(e^{\frac{qV_d}{kT}} - 1 \right) \quad (1.2)$$

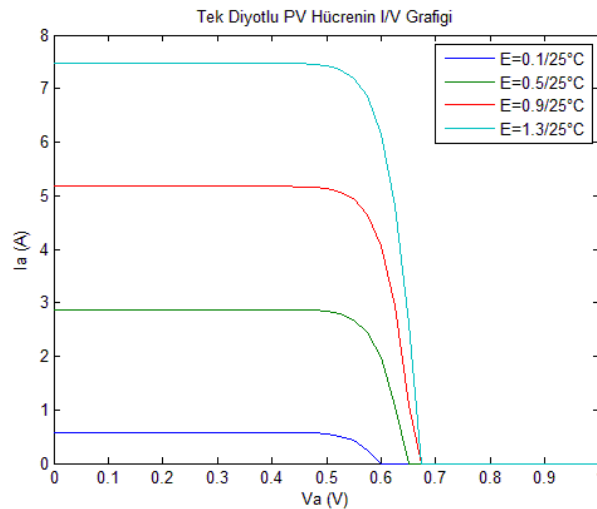
Burada; I PV hücresi çıkış akımı, I_{sc} PV hücresinin kısa devre akımı, I_d PV eşdeğer devresi diyot akımı, I_Q saturasyon akımı, q elektron yükü, k Boltzmann sabiti, T Kelvin cinsinden PV hücre sıcaklığı, V hücre gerilimidir. PV hücreler akım kaynağı gibi davranır ancak bu sistemin sağladığı akım değerinin yüksek olması beraberinde güç kayıplarının da artmasına sebep olur çünkü her sistem küçük de olsa bir iç direnç sahiptir. Düşük akım uygulamalarında güç kayıplarının da düşük olması mümkündür (Jee ve ark., 2020). PV hücreleri avantajları sayesinde pek çok uygulamada kullanılmaktadır. Bunlara ek olarak alternatif akım (AA) şebekelerinin karmaşık yapısı, sahip olduğu kalite faktörleri ve diğer sebeplerden dolayı doğru akım (DA) uygulamaları gün geçtikçe artmaktadır (Pragathi ve ark., 2020). PV hücreleri yarı iletken bileşen yapısı sebebiyle DA türünden enerji üretir. PV hücrede çıkış gücü meteorolojik değişimlere yani güneş radyasyonu ve sıcaklığa bağlı olarak değişim gösterir (Vink ve ark., 2020). Şekil 1.4 (a)'da $1,3 \text{ kW/m}^2$ güneş ışıması altında -5°C ile 55°C arasındaki sıcaklık değişimine karşılık bir PV hücresinin akım ve gerilim grafiği verilmiştir. Şekil 1.4 (b)'de ise aynı hücre için bu defa 25°C sabit sıcaklık altında $0,1 \text{ kW/m}^2$ ile $1,3 \text{ kW/m}^2$ arasında değişim gösteren güneş ışımasına karşılık akım ve gerilim grafiği verilmiştir.

PV hücrelerin seri ve/veya paralel bağlanması ile istenilen seviyede güç değerlerine ulaşmak mümkündür. PV enerji sistemleri elektrik şebekesine uzak TV ve Radyo vericileri, yangın gözlem noktaları, GSM (Global System for Mobile Communications, GSM) antenleri, telsiz vericileri vb. yerlerin ihtiyaç duyduğu enerjiyi karşılama anlamında ideal uygulamalardır. PV hücreler amorf silikon ve diğer materyallerden meydana gelir ve mono-kristal silikon, multi-kristal silikon ve ince film gibi isimler ile gruplandırılır (Dubey ve Tay, 2013). Günümüzde ileri teknoloji içeren organik güneş hücresi çalışmaları da yapılmaktadır (Yue ve ark., 2020). Güneş panelleri

birden fazla PV hücrenin kendi içerisinde seri ve paralel bağlanması sonucunda elde edilir. Güneş panellerinin çıkış gerilimi, akımı ve gücü panelin kaç PV hücreden meydana geldiğine bağlı olarak değişim gösterir. Örneğin Trinasolar firmasına ait TMS250-PC/PA05 modeli 250 W güce sahipken, tam yük altında panel uç gerilimi 30,3 V, tam yük altında sağlayabileceği akım 8,27 A, panel verimi % 15,3'tir. Bu güneş panelini oluşturabilmek için 10 adet PV hücre kendi arasında seri, bu 10 adet seri hücreden de 6 adet paralel olacak şekilde toplamda 60 adet PV hücre kullanılmıştır. PV hücrelerin seri bağlanması panelin çıkış gerilimini etkilerken, PV hücrelerinin paralel bağlanması ise panelin çıkış akımını etkiler.



(a)



(b)

Şekil 1.4.(a) 1,3 kW/m² güneş ışması altında -5 °C ile 55 °C arasındaki sıcaklık değişimine karşılık PV hücrenin akım-gerilim grafiği. **(b)** PV hücre için 25 °C sabit sıcaklık altında 0,1 kW/m² ile 1,3 kW/m² arasında değişim gösteren güneş ışmasına karşılık akım-gerilim grafiği.

Günümüzde güneş enerjisi uygulamalarında yoğun olarak kullanılan PV panellerin yapısında kullanılan hücre tipleri ve sınıflandırılmasına dair bilgiler Çizelge 1.1’de verilmiştir.

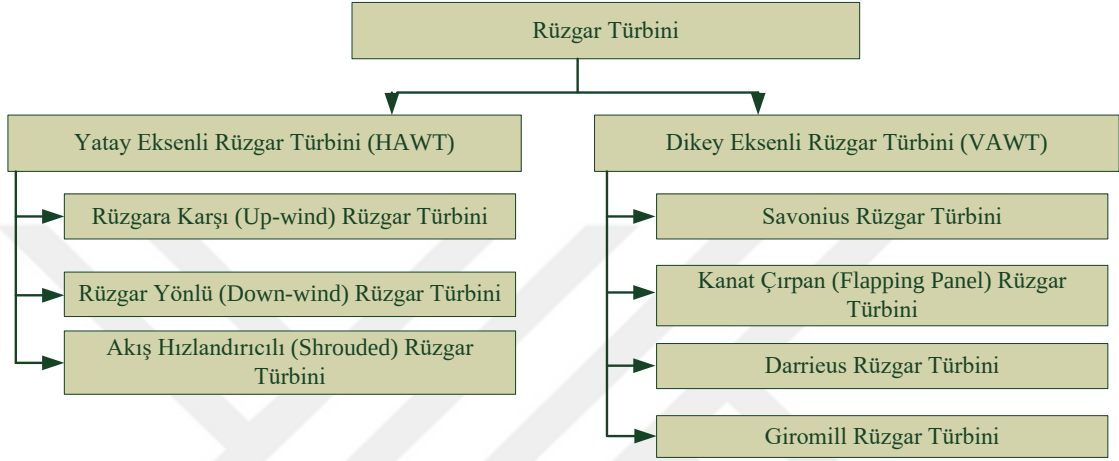
Çizelge 1.1. PV hücre tiplerinin karşılaştırılma tablosu

PV Hücre Teknolojisi	PV Hücre Tipi	Hücre Verimi (%)
Kristal silikon PV	Mono-kristal silikon	12,5-15
	Poli-kristal silikon	11-14
İnce film PV	Copper Indium Gallium Selenide, (CIGS)	10-13
	Cadmium Telluride, (CdTe)	9-12
	Amorphous Silicon, (a-Si)	5-7
Diğer tipler	Yoğunlaştırılmış PV hücre (CVP ve HCVP)	41

1.2. Rüzgâr Enerji Sistemleri

Rüzgâr enerjisi geçmişten günümüze kadar pek çok maksatla kullanılan bir enerji türüdür. Günümüze kadar insanoğlu rüzgâr enerjisini su pompalarında, tahıl öğütmede ve küçük ölçekte de olsa elektrik üretmede kullanmıştır. Günümüzde rüzgâr enerjisi, enerji ihtiyacına cevap verebilecek en önemli yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir. Bir bölgedeki ısıнын etkisiyle havanın yükselmesi sonucunda o bölgede bir alçak hava basıncı oluşur. Oluşan bu alçak basınç alanına havanın dolması neticesinde hava akışı meydana gelir, böylece rüzgâr oluşur. Rüzgâr enerjisinden elektrik üretimi yapabilen sistemler rüzgâr türbinleridir (Wind Turbine, WT). Rüzgâr türbinleri şebekeye yüksek enerji girişi sağlamaktadırlar. Bu sebeple kullanım alanı giderek genişlemekte ve bu sistemlerin şebekeye entegrasyonu gün geçtikçe önem kazanmaktadır. Rüzgâr türbinleri küçük veya büyük ölçekte pek çok alanda uygulamalara sahiptir. Küçük ölçekte yapılan uygulamalar ucuz, temiz ve şebeke bağlantısı istemeyen özellikleri sebebiyle geçmiş tarihlerden günümüze kadar gelmektedir. Rüzgâr türbinleri, kurulumu yapılan bölgenin rüzgâr karakteristiğine uygun olarak seçilirler. Rüzgâr hızının değişken olduğu bölgelerde çoğunlukla dişli kutusu mekanizmasına sahip rüzgâr türbinleri kullanılır. Mevcut dişli kutularının kullanımına ek olarak gelecekte kullanılabilecek Planet Dişli (Planetary Gearbox, PG), sürekli değişken transmisyon (Continuously Variable Transmission, CVT), ve manyetik dişli kutusu (Magnetic Gearbox, MG) gibi dişli kutusu tipleri üzerinde de çalışılmaktadır (Bharani ve Sivaprakasam, 2020). Günümüzde çok sık rastlanan rüzgâr türbinlerinin özellikle büyük ölçekli ve deniz üstü (off-shore) uygulamalarında dişli

kutusu ve ağır kule bileşenleri kayıplara sebep olmaktadır. Bu kayıpları azaltmada hidrolik teknolojisine sahip yapıdaki (Chen ve ark., 2020) rüzgâr türbinlerinden faydalanılabilir. Bu teknoloji daha esnek olduğu gibi daha az yer kaplar ve daha hafif yapıdadır. Rüzgâr türbinleri yapısal olarak yatay (HAWT) ve dikey (VAWT) eksenli olmak üzere iki başlıkta incelenebilir. Günümüzde elektrik enerjisi üretiminde kullanılan rüzgâr türbini tipleri Şekil 1.5'te verilmiştir



Şekil 1.5. Günümüzde elektrik enerjisi üretiminde kullanılan rüzgâr türbini tipleri şeması

Rüzgâr türbinleri rüzgâr enerjisini dairesel harekete çeviren yapılardır. Rüzgâr, türbin kanatlarına çarptığında kanadın aerodinamik yapısı kanadı yukarı doğru kaldırır. Kanatlar rotor ismi verilen bir bileşene bağlıdır. Kanatların bu hareketi rotoru döndürmeye başlar. Rotor mili dişli kutusu üzerinden veya doğrudan generatör miline bağlıdır. Rüzgârın kanatlara çarpması rotor milini, rotor ise generatör milini döndürür böylece rüzgâr enerjisi önce mekanik enerjiye sonra da elektrik enerjisine dönüştürülmüş olur. Günümüzde rotorun iki veya üç kanatlı olması tercih edilir. Rüzgâr türbinleri kullanılan generatör türleri bakımından sıralandığında; sabit hızlı rüzgâr türbinlerinde (Fixed Speed Wind Turbine, FSWT) asenkron generatör (Induction Generator, IG) kullanılırken bu türbinler bir transformatör üzerinden şebekeye bağlanırlar. İkinci olarak değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde çift beslemeli indüksiyon generatörü ve kanat açısı kontrolü kullanılır. Üçüncü tür ise yine değişken hızlı rüzgâr türbinleridir. Bu tür uygulamalarda ise sabit mıknatıslı senkron generatör (Permanent Magnet Synchronous Generator, PMSG) kullanılır ve üretilen enerji frekans konverterleri üzerinden şebekeye bağlanır. Bunlar aynı zamanda doğrudan sürme (Direct Drive, DD) rüzgâr türbinleri olarak da anılırlar (Zhang ve Ula, 2008).

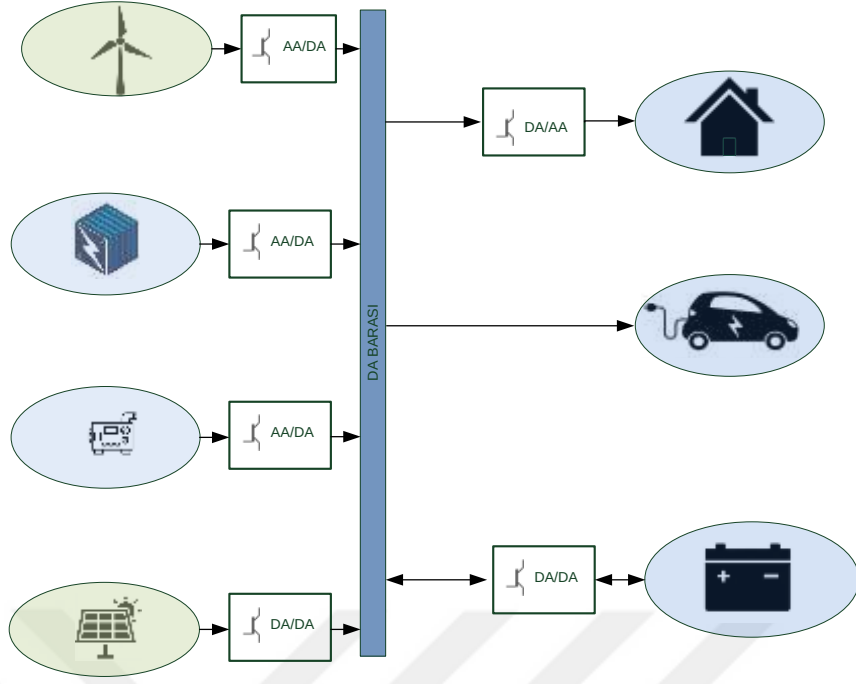
Rüzgâr türbinlerinde çıkış gücü Denklem (1.3) ile hesaplanır. Bu denklemde P_t mekaniksel çıkış gücü, ρ kg/m³ cinsinden hava yoğunluğu, A kanatların süpürme alanı, V m/s cinsinden rüzgâr hızı ve C_p güç katsayısı olarak ifade edilir.

$$P_t = \frac{\rho A V^3 C_p}{2} \quad (1.3)$$

1.3. Rüzgâr ve Güneş Temel Alan Hibrit Enerji Sistemleri

Elektrik şebekesine uzak veya ada türündeki yerleşim yerlerinde bir türden alternatif enerji kaynağının yeterli olmadığı durumlarda veya alternatif enerji kaynaklarından en yüksek oranda faydalanmak için bir araya getirilmiş enerji kaynaklarının meydana getirdiği sisteme hibrit yenilenebilir enerji kaynakları (Hybrid Renewable Energy Sources, HRES) ismi verilir. Alternatif enerji kaynakları içerisinde rüzgâr, güneş ve jeotermal enerji kaynakları büyük enerji potansiyeline sahiptir (Geleta ve ark., 2020). Hibrit enerji sistemleri bu kaynakların iki veya daha fazlasının bir araya getirilmesi ile oluşturulabilir, ayrıca yıl boyunca kesintisiz olarak enerji üretimine katkıda bulunması sağlanabilir. Hibrit enerji sistemlerinin başında belirli sayıda rüzgâr türbini ve güneş panellerinden oluşan sistemler gelir.

Güneş ve rüzgâr enerjisi tükenmez, bol, çevre dostu ve ücretsiz olarak bulunabilen yenilenebilir enerji kaynaklarıdır (Singh ve ark., 2016). Ancak sadece rüzgâr ve güneş temel alan hibrit enerji sistemlerinin en büyük riski hibrit sistemi meydana getiren bu kaynakların enerji üretimlerinin hava şartlarına bağlı olmasıdır (Bakir ve Kulaksiz, 2020). Bu türden hibrit yapılar orta ölçekte yapılabildiği gibi son yıllarda küçük ölçekli uygulamaların daha da arttığı görülmektedir. Bu ölçekteki uygulamalar elektrik üretimi dışında bölgesel atık su arıtma işlerinde (Li ve ark., 2020), adada yaşayan sakinlerinin birincil öncelikli ihtiyacı olan temiz su temininde (Mehrerdi, 2020), konut sektörüyle ilgili olarak bina ısıtma, soğutma ve havalandırma (Figaj ve ark., 2020) gibi işlemler için de kullanılmaktadır. Şekil 1.6'da rüzgâr, güneş, yakıt pili, biyo-yakıt ve aküden oluşan hibrit enerji sistemi örneği verilmiştir.



Şekil 1.6. Rüzgâr, güneş, yakıt pili, biyo-yakıt ve aküden oluşan hibrit enerji sistemi örneği

Hibrit enerji sistemleri mevcutta kısıtlı olan kaynaklardan en yüksek oranda faydalanmayı amaçlar. Bu sebeple hibrit enerji sistemlerinin verimlerini arttıracak optimizasyon (AbuElrub ve ark., 2020), yönetim ve tekno-ekonomik optimizasyon algoritmaları kullanılır (Yang ve Li, 2020). Aynı zamanda yatırım maliyeti gerektiren bu sistemlerin verilerinin takip edilmesi, durumlarının gözlemlenmesi ve teknik bileşenlerinin takip altında tutulması maksadıyla izleme sistemlerine başvurulur. Ayrıca hibrit enerji sistemlerinin şebekeye bağlanması ve şebekenin kesilmesi durumunda ada-mod kontrolü ve ada-mod tespiti için de metotlar geliştirilmektedir (Bayrak ve Kabalci, 2016). Hibrit enerji sistemleri için çok seviyeli girişe sahip güç dönüştürücü (evirici) yapıları ve sistemin maksimum düzeyde enerji üretebilmesi için algoritmalara da yer verilmiştir (Jiang ve ark., 2017).

Yapılan akademik çalışmalar, hibrit enerji sistemlerinin sadece enerji boyutuyla ilgilenmeyip ekonomik fizibilite, kullanım stratejisi, gelecekteki beklentileri ve düzenlemelerini geliştirmek için çeşitli parametrelerine ışık tutmaktadır. Hibrit enerji sistemlerinin ürettiği enerji anlık olarak kullanımı dışında fazla enerjinin depo edilerek daha sonra kullanımı da sistemin verimli kullanılmasına katkıda bulunacaktır. Hibrit enerji sistemi oluşturmada ve elde edilen fazla enerjinin depo edilmesinde kullanılan ana kaynaklar ve günümüzde çok kullanılan enerji depolama yöntemleri Çizelge 1.2’de başlıklar halinde verilmiştir.

Çizelge 1.2. Hibrit enerji sistemi oluşturmada ve elde edilen fazla enerjinin depo edilmesinde kullanılan ana kaynaklar

Alternatif/yenilenebilir enerji kaynağı	Enerji depo etme yöntemi
Biyo-kütle/Biyo-gaz enerji	Akü grupları ile enerji depolama
Jeotermal enerji	Sıkıştırılmış hava ile enerji depolama
Hidrojen/yakıt pili	Termal yöntem ile enerji depolama
Mikrotürbin/ Rüzgâr enerjisi	Süper kapasitör ile enerji depolama
Güneş enerjisi (PV/termal)	Su depolama ile enerji depolama
Okyanus enerjisi (gelgit/dalga)	Hidrojen üretimi ile enerji depolama
Hidro/mikrohidro elektrik enerjisi	Volan (Flywheel) ile enerji depolama

(Ceran ve ark., 2017) yaptıkları çalışma ile rüzgâr enerjisi kaynağı, güneş enerjisi kaynağı ve hidrojen enerjisinden doğrudan elektrik enerjisi üretebilen yakıt pilinin kullanıldığı üç farklı hibrit enerji sistemi konfigürasyonu oluşturarak bu sistemleri yıllık enerji üretimleri ve verimleri bazında karşılaştırmış ve elde ettikleri değerler üzerinden bir çizelge oluşturmuşlardır. Üzerinde araştırma yaptıkları hibrit enerji sistemlerine ait veriler Çizelge 1.3'te verilmiştir.

Çizelge 1.3. Rüzgâr, güneş ve yakıt pilinin kullanıldığı üç farklı hibrit enerji sistemi konfigürasyonunun karşılaştırılması tablosu

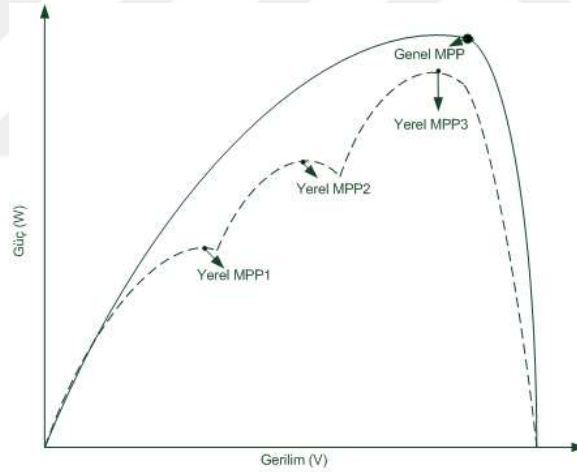
Enerji Kaynağı	1.Konfigürasyon		2.Konfigürasyon		3.Konfigürasyon	
	Kwh/yıl	Verim (%)	Kwh/yıl	Verim (%)	Kwh/yıl	Verim (%)
Rüzgâr-(WT)	12362	81	yok	yok	24724	94
Güneş-(PV)	827	5	1756	49	yok	yok
Hidrojen-(FC)	2156	14	1812	51	1676	6
Toplam	15345	100	3567	100	26399	100

1.4. MPPT Tekniği ve Algoritmaları

Maksimum güç noktası takibi (Maksimum Power Point Tracking, MPPT) olarak adlandırılan teknikler veya algoritmalar, alternatif enerji kaynaklarının verimlerini arttırmada önemli role sahiptir (Alhajomar ve ark., 2019), (Podder ve ark., 2019). Alternatif enerji kaynakları potansiyelleri bakımından sonsuz, temiz ve bedava olarak

düşünürlürler ancak sistem bileşenleri bakımından belirli bir kurulum maliyetine sahiptirler. Bu sistemlerin kurulum maliyetlerini en kısa sürede amorti etmek, sistemi verimli olarak kullanmak ve sistemin beslediği yüklerin kaliteli bir enerjiye sahip olması MPPT algoritmaları ile sağlanabilir. Bu algoritmalar sistem verimliliğine olumlu etki ettiği gibi sistemin sürdürülebilir olmasına da katkı sağlar. Ayrıca alternatif enerji kaynaklarından rüzgâr ve güneş enerji sistemlerinin çıkış güçleri doğrusal olmayıp çevre şartlarına bağlı olarak değişim gösterir. MPPT algoritmaları ile uygulandığı enerji sisteminden o anda elde edilebilecek en yüksek güç değerini alabilmeyi hedefler.

Enerji sisteminden çekilen gücün, sisteme ait nominal güç değerine çok yakın bir noktaya kadar zorlanması ile maksimum güç noktasına (Maksimum Power Point, MPP) ulaşılmış olur. Nominal güç değerinden daha aşağıdaki maksimum güç noktaları ise yerel maksimum güç noktası (Local MPP, LMPP) olarak isimlendirilir. PV panellerde meydana gelen yerel maksimum güç noktaları ile genel (global) maksimum güç noktasını gösteren PV panel güç-gerilim grafiği Şekil 1.7’de verilmiştir.



Şekil 1.7. PV panellerde meydana gelen yerel maksimum güç noktaları ile genel (global) maksimum güç noktasını gösteren PV panel güç-gerilim grafiği

Yerel maksimum güç noktaları rüzgâr türbinlerinde daha düşük rüzgâr değerlerinde elde edilirken, PV panellerde kısmi gölgelenme ve panellerin kirli olması sonucunda meydana gelebilir. MPPT algoritmaları rüzgâr, güneş, yakıt hücresi gibi alternatif enerji kaynaklarına uygulanabilir. Bu amaçla günümüzde üreticiler, ürünleri olan bir veya üç fazlı eviricilere ve şarj sistemlerine MPPT algoritmalarını eklemektedir. MPPT algoritmaları uygulandıkları enerji türüne göre mekaniksel ve/veya yazılımsal bileşenlere sahip olabilir. Örneğin rüzgâr türbinlerinde MPPT

algoritmalarının bir kısmı mekaniksel olup, türbinin rotor kanat açılarını ayarlayarak veya kulenin yönünü değiştirerek türbinin maksimum güç noktasına ulaşmayı hedefler. Güneş panellerinde ise bu algoritmaların bir kısmı güneş ışınması ve panel sıcaklığını kullanırken (Youssef ve ark., 2018) bir kısmı da elektriksel verileri kullanır. Sensörler vasıtasıyla elde ettiği elektriksel verileri bir takım matematiksel işlemde geçirerek kontrol sinyalleri üretir. Bu sinyaller ile güç katını kontrol eder ve PV panellerden oluşan enerji sisteminden en yüksek ölçüde enerji almayı hedeflerler. Benzer durum hidrojen enerjisinden elektrik enerjisi üretimi yapan yakıt pillerinde de kullanılabilir. Bu enerji kaynağı için elektriksel verilere sıcaklık da eklenerek yakıt pillerinden maksimum güç elde etme imkânı oluşur.

Günümüzde enerji sistemlerinden elde edilen elektrik enerjisinin üretim maliyetlerini düşürme, daha verimli kullanma adına araştırma ve geliştirmeler yapılmaktadır. Bu araştırmaların büyük bir kısmı MPPT teknikleri üzerine yapılmaktadır. Başlangıçtaki MPPT algoritmaları daha basit yapıda ve sabit adımlı iken günümüzde birden fazla MPPT algoritmasını aynı anda kullanan ve kendi kendini konfigure edebilen yapılar haline gelmiştir (Belarbi ve ark., 2018). MPPT tekniğinin seçiminde;

- Kapasite Kullanım Faktörü
- Maliyet
- Enerji Tasarrufu
- Geri ödeme Süresi
- Gelir Kazancı
- İstikrar gibi kriterlerin değerlendirilmesi faydalı olacaktır.

PV panellerinde ve rüzgâr türbinlerinde kullanılan MPPT teknikleri üzerine literatürde pek çok çalışma mevcuttur (Motahhir ve ark., 2020). Literatürdeki MPPT algoritmaları belirli başlıklar altında şu şekilde sınıflandırılabilir;

Geleneksel teknikler

- Değiştir ve Gözle
- Tepe Tırmanma
- Artımlı İletkenlik
- Açık Devre Gerilimi Metodu
- Sabit Gerilim Metodu
- Kısa Devre Akımı Metodu

Yapay zekâ teknikleri

- Bulanık Mantık Denetleyicisi
- Yapay Sinir Ağları

Evrım algoritmaları

- Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO)
- Geliştirilmiş PSO
- Deterministik PSO
- Değiştirilmiş PSO

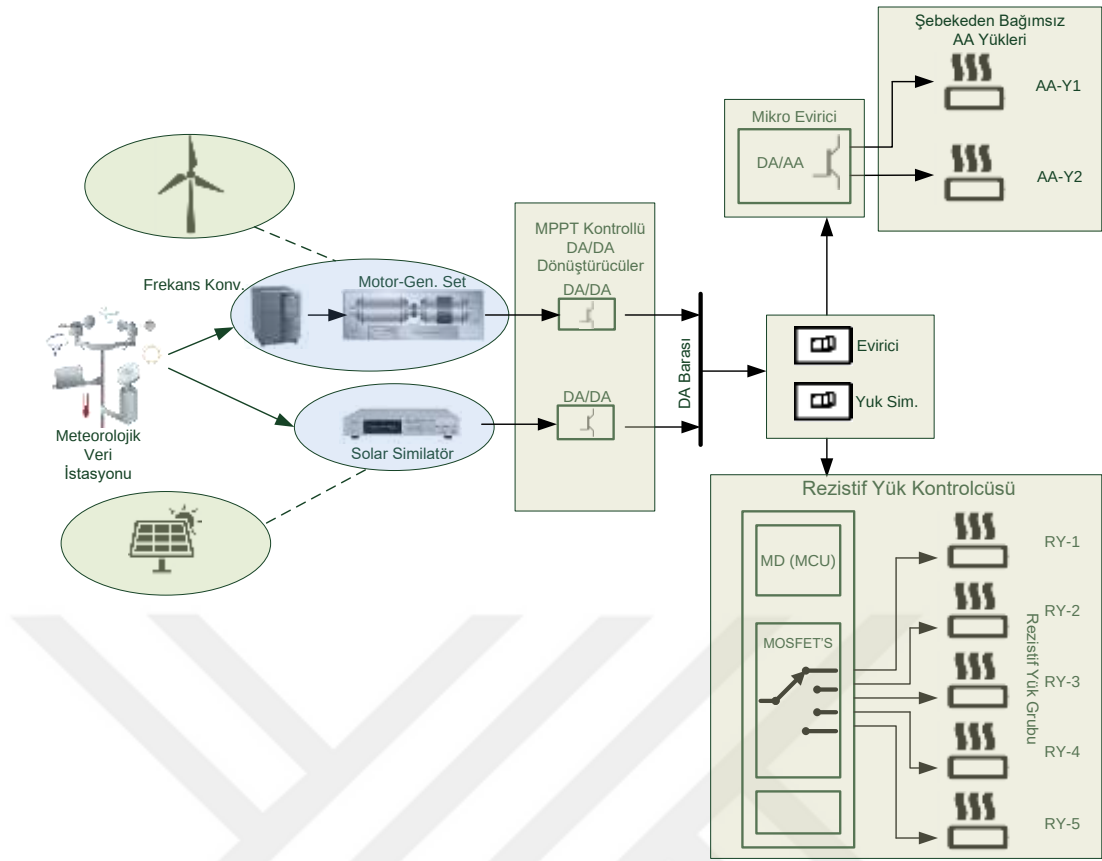
Doğadan esinlenmiş teknikler

- Guguk Kuşu Araması
- Ateşböceği Algoritması
- Rastlantısal Arama Metodu
- Kaotik Kontrol Metodu
- Lineer Olmayan Kontrol Metotları

gibi teknikler elektrik enerjisi üretim platformlarında kullanılmaktadır.

1.5. Tezin Amaç ve Hedefleri

Bu tez çalışmasında, meteorolojik verileri kullanarak rüzgâr ve güneş enerji kaynağı gibi davranan hibrit yapılı bir enerji sisteminin tasarlanması hedeflenmiştir. Ayrıca tasarlanan enerji sistemi üzerinde enerji verimliliğini artıracak MPPT algoritmalarının da denenebilmesine imkân sağlanmıştır. Tez kapsamında Şelçuk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) 17401144 numaralı araştırma projesi kapsamında temin edilen meteoroloji istasyonu, güneş dizi simülatörü, asenkron motor-doğru akım makinesi çifti ve asenkron motor sürücüsü hazır olarak kullanılmıştır. Önerilen hibrit enerji sisteminin diğer bileşenleri uygulamaya özel olarak tasarlanmıştır. Tezde önerilen sistemin blok şeması Şekil 1.8’de verilmiştir.



Şekil 1.8. Tez kapsamında önerilen sisteme ait blok şema

Önerilen sistem ile meteoroloji istasyonundan alınan güneş ve rüzgâr verileri sisteme girdi olarak kullanılmakta, sistem almış olduğu bu verileri çeşitli matematiksel ve mantıksal işleminden geçirerek kontrol sinyalleri oluşturmaktadır. Oluşturulan kontrol sinyalleri güç elektroniği katlarını kontrol ederek, rüzgâr verilerini kullanarak asenkron motor-DA makinesi çifti üzerinden rüzgâr enerji kaynağı gibi davranan bir rüzgâr türbini emülatörü oluşturulmuştur. Benzer şekilde güneş verileri üzerinden de güneş enerjisi kaynağı gibi davranan bir kaynak oluşturulmuştur. Şekil 1.8’de blok şeması verilen önerilen tez çalışması temel olarak Çizelge 1.4’te görülen bileşenlerden oluşmuştur.

Çizelge 1.4. Tez kapsamında tasarım ve uygulaması yapılan sistem bileşenleri tablosu

Meteoroloji istasyonu	DA-DA Dönüştürücüler
Rüzgâr emülatörü	DA-AA Mikro yapıli evirici
Güneş simülatörü	Omik yük simülatörü
Manuel yük seçim modülü	Kullanıcı arayüzü

Tez çalışması ile;

- Laboratuvar ortamında çalışabilen ve sağladığı güç aralığı bakımında küçük ölçekli bir hibrit enerji sisteminin tasarımı ve uygulamasının yapılması hedeflenmiştir.
- Tasarımı ve uygulaması yapılan enerji sistemi geliştirmelere açık ve özellikle eğitim maksatlı kullanılabilecek bir yapıdadır.
- Önerilen sistem ile araştırmacılar ulaşılması her an mümkün olmayan değişken formdaki rüzgâr ve güneş enerjisine günün her saati ulaşabileceklerdir.
- Araştırmacılar isterlerse sistemin sunduğu veriler üzerinden, isterlerse de kendi verileri ile çalışma yapabileceklerdir.
- Sistemin üretmiş olduğu DA türünde enerji ile ister DA yükleri isterlerse de AA yükleri üzerinden araştırma ve gözlem yapabileceklerdir.
- Günümüzde popüler olan değiştir ve gözle (Perturb and Observe, P&O), artımlı iletkenlik (Incremental Conductance, IC) ve bulanık mantık denetleyicisi (Fuzzy Logic Control, FLC) tekniğini içeren MPPT algoritmaları ile sistem verimini analiz edebilecekler, kendi geliştirdikleri algoritmaları test edebileceklerdir.

1.6. Tez Organizasyonu

Tez çalışması kapsamında önerilen sistemi tanıtmak adına genel terimler ve bu terimlere ait kapsamlı bilgiler birinci bölümde verilmiştir. Tasarımı ve uygulaması yapılan hibrit enerji sistemini oluşturan bileşenler hakkında kaynak araştırması ikinci bölümde sunulmuştur. Önerilen sisteme ait bileşenlerin tasarım ve uygulama aşamaları üçüncü bölümde detaylı olarak açıklanmıştır. Tasarım ve uygulaması yapılan enerji sistemi çeşitli konfigrasyonlar oluşturularak bu yapılar üzerinden araştırma sonuçları ve çıktılar elde edilmiş ve değerlendirmeleri dördüncü bölümde yapılmıştır. Son olarak elde edilen sonuçlar ve öneriler beşinci bölümde değerlendirilmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu bölümde, tez kapsamında önerilen sistemin tasarım ve uygulamasına kaynak olabilecek, sistem yapısı hakkında bileşenleri hakkında ön bilgi sağlayabilecek literatür araştırmas yapılmıştır. İncelenen çalışmalar son 5 yılı kapsayacak şekilde seçilmiştir.

2.1. Güneş Simülatörü

Güneş enerjisi sonsuz, temiz, güvenilir bir enerji kaynağıdır ancak her an ulaşılabilir bir kaynak değildir. Özellikle güneş enerjisine bağlı olarak yapılan araştırmalarda güneş ışığını istenildiği zamanda ve istenildiği enerji düzeyinde bulmak mümkün değildir. Ayrıca çevresel koşulların örneğin kısmi bulutlanma gibi bir durumun istenildiği zaman oluşması da mümkün olmayacaktır. Güneş simülatörlerinin kullanımı ile güneş enerjisi üzerine araştırma yapan araştırmacılara istedikleri zaman ve istedikleri bir senaryo üzerinde çalışma imkânı sağlanır. Güneş simülatörleri kapalı ortamlarda yüksek ışıma sağlayan cihazlardır (Zhu ve ark., 2020) ve PV hücrelerin karakteristiklerinin tespitinde kullanılan temel enstrümanlardır (Lopez-Fraguas ve ark., 2019).

Güneş simülatörlerinin tasarımı ışık kaynaklarının kullanımı, güç elektroniği uygulamaları ve kimyasal prosesler ile de yapılabilmektedir. (Lougou ve ark., 2020) yaptıkları çalışma ile Karbondioksit destekli $\text{NiFe}_2\text{O}_4/\text{Alumina}$ kullanımı sonucunda meydana getirdikleri bir termo-kimyasal süreç ile reaktör ısıtmalı ve yüksek ışımalı bir güneş simülatörü üzerinde çalışmışlardır.

(Bardizza ve ark., 2020) çalışmalarında güneş ışıması ve hava sıcaklığını temel olarak IEC 60891 ve IEC 61853-1 standartları çerçevesinde güneş simülatörü gibi çalışan bir mini modül tasarımı üzerinde çalışmışlardır. Işık kaynağına dayalı tasarımlarda bir ışık kaynağının kontrol edilerek istenilen alana istenilen miktarda ışık enerjisi aktarmayı hedefler. Yüksek ışımalı (High Flux) güneş simülatörleri ayarlanabilir ışık yoğunluğu sayesinde solar termal araştırmalarında geniş ölçekli olarak kullanılırlar (Song ve ark., 2019).

(Meyer ve Nwodo, 2020) yaptıkları çalışma ile Xenon Arc lambası kullanarak kapalı ortamlarda PV paneller üzerine çalışma yapmaya imkân sağlayan bir güneş simülatörü üzerinde çalışmışlardır. Diğer bir çalışmada (Abuseada ve Ozalp, 2020), yüksek ışımalı Xenon Arc lambası ile 10 kW güç değerinde ışık kaynaklı bir güneş

simülatörü üzerinde çalışmışlardır. (Jin ve ark., 2019) yaptıkları çalışmada ise 70 kW güce sahip hem yoğunlaştırmalı sistemler için hem de yoğunlaştırmalı olmayan sistemler için kullanılabilecek ışık kaynağına dayanan bir güneş simülatörü üzerinde çalışmışlardır. Önerdikleri sistem lamba dizileri, optik entegratörler ve yönlendirme merceklerinden meydana gelmektedir. Tungsten halojen lamba içeren bir güneş simülatörü üzerinde araştırma yapan (Salam ve ark., 2019) tarafından geliştirilen yapı küçük ölçekli bir güneş simülatörü olup, lamba, faz kısıyıcı dimmer ve 8 bitlik bir mikrodenetleyiciden meydana gelmektedir. Xenon ışık kaynağını temel alan tasarımlara göre daha fazla avantaja sahip olan ışık yayan diyot (Light-Emitting Diode, LED) içeren (Turek ve ark., 2019) pek çok güneş simülatörü tasarımı günümüzde mevcuttur.

LED ışık kaynağını temel alan bir çalışmada (Bodnar ve ark., 2020) farklı renklere sahip LED blokları ve halojen reflektörleri kullanarak küçük ölçekli (150x150mm) PV hücreleri için güneş simülatörü tasarlamışlardır. LED içeren bir diğer tasarımda ise (Esen ve ark., 2020) düşük maliyetli, A sınıfı güneş simülatörü üzerinde araştırmalar yapmışlardır. LED veya lamba gibi ışık kaynakları dışında, (Farahani ve ark., 2020) güç elektroniği uygulamasını temel alan bir güneş dizi simülatörü üzerinde çalışmışlardır. Tasarımları azaltan dönüştürücülü güç katı, filtre, sayısal işaret işlemci (DSP) ve kontrol yazılımını içermektedir.

Bunların dışında yapılan bir diğer çalışmada (Li ve ark., 2019) ise üç boyutlu kompozit parabolik yoğunlaştırmalı yüksek ışımalı güneş simülatörü üzerinde çalışmışlardır. Güneş simülatörleri sadece elektrik enerjisi üreten sistemler dışında da kullanılmaktadır. (Abuseada ve ark., 2019) çalışmalarında 10 kW gücünde, yüksek ışımalı Xenon Arc lambası içeren bir güneş simülatörü üzerinde çalışmışlardır. Tasarımlarını doğrudan olmayan ışıma tekniği içeren termo-kimyasal süreçler için yapmışlardır. Aynı amaç ve altyapıya sahip benzer bir çalışma da (Martinez-Manuel ve ark., 2019) tarafından yapılmıştır.

2.2. Rüzgâr Emülatörü

Rüzgâr türbinleri yüksek karmaşıklık ve doğrusal olmayan yapıda sistemlerdir (Moness ve Moustafa, 2020). Giderek karmaşık hale gelen bu yapılar daha dikkatli analiz edilmeli, test ve sertifika süreçlerinden geçirilmelidir (Moness ve ark., 2018). Rüzgâr enerjisinden elektrik enerjisine dönüşüm yapan bu sistemlerin karakteristikleri çevresel değişimlere göre farklılık gösterir. Küçük ölçekli rüzgâr türbini emülatörleri

özellikle laboratuvarlar seviyesinde, çeşitli rüzgâr profilleri oluşturabilmek için kullanılırlar (Bajonero-Sandoval ve ark., 2020). Ayrıca rüzgâr türbini emülatörleri ile farklı rüzgâr profilleri oluşturabilirken çeşitli kontrol algoritmalarının da geliştirilebilmesine yardımcı olur (Kumar ve ark., 2020). Tüm bu özellikleri bakımından kapalı alanlar ve laboratuvarlarda rüzgâr enerjisi üzerine çalışmalar yapmak rüzgâr türbini emülatörleri (WTE) ile mümkün olabilmektedir (Gokkus ve ark., 2020).

Rüzgâr türbini emülatörlerini rüzgâr tüneli şeklinde tasarlamak mümkündür ancak bu tünel yapıları daha maliyetlidir. Tüneller yerine güç elektroniği ve kontrol yazılımı kullanan sistemler daha uygun maliyetlere sahiptir (Martinez-Marquez ve ark., 2019). Günümüzde kullanılan rüzgâr türbini emülatörleri basitleştirilmiş rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemleri olup detaylandırılmış elektriksel alt sistemleri (Mohammadi ve ark., 2018) ve önemli donanımsal parçalar içeren sonuç olarak rüzgâr türbini gibi davranan sistemlerdir (Moussa ve Khedher, 2020).

Günümüzde laboratuvar ölçeğindeki rüzgâr türbini emülatörleri; hareket veren ve hızı kontrol edilebilen bir motor ve bu hareketten elektrik enerjisi üreten bir generatörden meydana gelmektedir (Sajadi ve ark., 2016). Rüzgâr türbini emülatörlerini kontrol eden yazılımlar geri beslemeli-kapalı döngülü olabileceği gibi açık döngülü olup, rüzgâr profiline bağlı olarak rüzgâr türbini gibi davranabilirler (Moussa ve ark., 2019). Yapıları benzer olmasına rağmen, bu yapıları bazı çalışmalar doğrudan rüzgâr türbini emülatörü olarak isimlendirirken kimileri de elektronik rüzgâr türbini emülatörü (EWTE) olarak adlandırmaktadır (Wollz ve ark., 2020).

Bu maksatla yapılan bir literatür çalışmasında (Gan ve ark., 2017) rüzgâr türbini emülatörü kullanarak yaptıkları çalışma ile yatay eksenli rüzgâr türbinleri üzerinde meydana gelen kule gölgesi etkisinin laboratuvar ortamında analiz edilmesini sağlamışlardır. (Ajewole ve ark., 2017) yaptıkları çalışma ile gerçek zamanlı olarak kontrol edilebilen bir rüzgâr türbini emülatörü üzerinde çalışmışlardır. Yaptıkları tasarım bilgisayar yazılımı, donanım, sürücü ve rotoru sargılı asenkron motordan meydana gelmektedir. Diğer bir çalışmada ise (Yan ve ark., 2016) sabit mıknatıslı senkron motor kullanarak, motorun tork dinamikleri üzerinde kontroller gerçekleştirmişler ve rüzgâr türbini gibi davranan bir sistem üzerinde çalışmışlardır.

Rüzgâr türbini emülatörleri üzerine yapılan çalışmalar, kullanılan motor-generatör türlerine göre çeşitlilik gösterebilir. (Himani ve Dahiya, 2016) yaptıkları çalışma ile 2,5 kW güce sahip DA makinesi ile 1 kW güce sahip sincap kafesli asenkron makineyi bir araya getirerek küçük ölçekli bir rüzgâr türbini emülatörü

oluşturmuşlardır. (Castello ve ark., 2016) çalışmalarında iki adet 1,5 kW güce sahip sincap kafesli asenkron motoru bir araya getirerek birini hareket verici diğerini ise generatör olarak kullanmışlardır. Sistemi kontrol etmek maksadıyla bir bilgisayar ve ona USB (Universal Serial Bus) üzerinden bağlı bir DSP'den (Digital Signal Processor) faydalanmışlardır. Literatür araştırması esnasında incelenen rüzgâr türbini emülatörleri sahip oldukları nitelikler bakımında pek çok yönü ile birbirlerine üstünlük sağlayacak özelliklere sahiptir. Ancak incelenen bu emülatör yapıları kullanıcı arayüzü, veri toplama kartı vb. bileşenleri hazır kullanmaktadırlar. Bahsedilen bu bileşenlerin temininin belirli bir maliyete sahip olması ve kullanıcılara sundukları kısıtlı geliştirme imkânları sebebiyle çeşitli dezavantaja sahiptir. Tez kapsamında tasarım ve uygulaması yapılan enerji sistemi; hibrit yapısı ile farklı kaynakların kullanımına imkân sağlar ve geliştirilebilir bir yapıdadır. Kaynak taraması yapılırken karşılaşılan rüzgâr türbini emülatörü çalışmaları belirli başlıklar altında gruplandırılarak Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Literatür araştırması esnasında incelenen rüzgâr türbini emülatörü motor-generatör çifti tablosu

Motor Tipi/Güç (kW)	Generatör Tipi/Güç (kW)	Motor Sürücüsü	Güç Elektr. Uyg.	Kullanıcı Arayüzü
DA Motor (1 kW)	SMSG (1 kW)	Var	Var	Var
IM (1,5 kW)	SEIG (1,5 kW)	Var	Var	Var
IM (10 Hp)	SMSG (5 kW)	Var	Var	Var
IM (11 kW)	IG (22 kW)	Var	Var	Var (dSPACE)
SEDC (15 kW)	SG (10 kW)	Var	Var	Var
DC Motor (2,5 kW)	IG (1 kW)	Var	Yok	Var
IM (1,3 kW)	IG (0,7 kW)	Var	Var	Var
DC Motor (2,5 kW)	SEIG (1,5 kW)	Var	Yok	Var (LabView)
DC Motor (1,5 kW)	DFIG (1,5 kW)	Var	Yok	Var (dSPACE)
DC Motor (0,8 kW)	PMSG (-)	Var	Var	Var (dSPACE)
DC Motor (<1 kW)	IG (<1 kW)	Var	Var	Var
IM (3 kW)	DC Makine (1,8 kW)	Var	Var	-
IM (1 kW)	PMSG (1 kW)	Var	Var	-
DC Motor (3,5 kW)	IG (1,5 kW)	Var	Var	-
DC Motor (-)	IG (-)	Var	Yok	-
IM (5,5 kW)	IG (5,5 kW)	Var	Var	Var (LabView)
Servo Motor (-)	IM (1,5 kW)	Var	Yok	Var
PMSM (-)	PMSG (-)	Var	Yok	Var
IM (1,5 kW)	IM (1,5 kW)	Var	Var	Var (LabView)

2.3. Rüzgâr ve Güneş Enerji Sistemlerinde MPPT Algoritmaları

MPPT tekniklerinin en yoğun kullanıldığı alternatif enerji kaynağı güneş enerjisidir. PV panellerin kullanıldığı güneş enerjisinden elektrik enerjisi üreten

sistemler gerek şebeke bağlantılı gerekse şebekeden uzak (Seyedmahmoudian ve ark., 2016) yerde bulunabilen ve çevre dostu sistemler olup diğer alternatif enerji kaynaklarına göre daha yoğun olarak başvurulur. (Pathak ve ark., 2020) 27 farklı PV için geliştirilmiş MPPT algoritması üzerinde incelemeler yapmışlardır. Literatürdeki çalışmalar göstermiştir ki MPPT tekniklerinin uygulanmasına en müsait sistemler PV sistemleridir. MPPT algoritmalarının geliştirilmesi sürecinde pek çok aşamadan geçilmiş ve beraberinde pek çok türden algoritma geliştirilmiştir. (Motahhir ve ark., 2020) yaptıkları çalışma ile düşük maliyetli olup PV enerji sistemlerinde en çok kullanılan MPPT tekniklerini nitelikleri bakımından 3 grupta incelemişlerdir. Bu gruplandırma Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2. PV yöntem ile elektrik enerjisi üretimi yapan sistemler için düşük maliyetli ve çok kullanılan MPPT algoritmalarının belirli nitelikleri bakımından gruplandırılması tablosu (Motahhir ve ark., 2020)

Grup 1	Grup 2	Grup 3
Geleneksel ve popüler teknikler	PV panel ve güç dönüştürücü karakteristiği	Yumuşak hesaplama yaklaşımı
Değiştir ve Gözle	Kısmi Kısa-devre Akımı	Kalman Filtresi (KF) Temelli MPPT
Tepe Tırmanma	Kısmi Açık-Devre Gerilimi	Bulanık Mantık Denetleyicisi
Artımlı İletkenlik (IC)	Pilot Hücre	Yapay Sinir Ağları
IC Direkt Doluluk Oranı	-	Evrimsel Hesaplama
-	-	Hibrit PSO-FLC

(El Mentaly ve ark., 2019) yaptıkları çalışma ile PV panellerden elde edilen elektrik enerjisini düşüren (buck) dönüştürücü üzerinden yüklere aktararak yine günümüzde popüler olarak kullanılan yedi farklı MPPT algoritmasını verimleri bakımından kıyaslamıştır. Kullandıkları MPPT algoritmaları sırası ile Tepe Tırmanma (Hill Climbing, HC), IC, FLC, Açık-devre Gerilim Metodu (Open-Circuit Voltage method, OCV), Kısa-devre Akım Metodu (Short-Circuit Current Method, SCC), Sıcaklık Gradyanı (Temperature Gradient, TG) ve Sıcaklık Parametrik (Temperature Parametric, TP)’dir. Yaptıkları denemeler sonucunda OCV ve OCC’nin % 96, diğerlerinin ise % 99 verimle çalıştıkları sonucuna ulaşmışlardır.

Diğer bir çalışmada ise P&O, IC, OCV, SCC, HC gibi geleneksel MPPT algoritmaları ile günümüzde üzerinde pek çok çalışma yapılan doğadan esinlenmiş (Nature-inspired ve Bio-inspired) MPPT algoritmalarını karşılaştırmışlardır (Pathy ve ark., 2019). Diğer bir çalışmada ise (Karami ve ark., 2017) yaptıkları çalışma ile

geçmişten günümüze gelmiş en eski kırk adet MPPT algoritması ile günümüzde çok popüler olan diğer MPPT algoritmasını karşılaştırmış ve sınıflandırmıştır.

Günümüzde MPPT algoritmaları yüksek oranda verime sahiptir, ayrıca maksimum güç noktasına ulaşmada sabit adım yerine değişken adım kullanılması (Messalti ve ark., 2017) sayesinde de çok hızlıdır. MPPT algoritmaları sahip oldukları bu nitelik ile güneş enerjisi sistemlerinden daha fazla verim elde etmeye imkân sağlarken, çevresel değişimlere de çok hızlı tepki vermektedir. MPPT algoritmaları her ne kadar pek çok açıdan gelişmiş olsalar da PV hücrelerin enerji üretimleri sıcaklık ve güneş ışınmasına göre değişir, bu iki değişken günün her saati ve yılın her günü, sezona bağlı olarak anlık değişim gösterir (Aldair ve ark., 2018), (Sameeullah ve Swarup, 2016). Bu sebeple güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretimi yapan sistemlerde çevresel etkenler önemli rol oynar (Bollipo ve ark., 2020). Bu etkenlerin başında bulut, sistemi çevreleyen yüksek cisimler ve özellikle panel ve aynaların üzerini kaplayan toz ve kir gelir.

Güneş ışınlarının enerji sistemine tam olarak erişememesi neticesinde sistem üzerinde parçalı gölgelenme (PS) meydana gelir. Parçalı gölgelenme ve doğrudan ışıma altında olmayan PV paneller için MPPT algoritması gereksinimi yok sayılamaz (Verma ve ark., 2016). (Mohapatra ve ark., 2017) yaptıkları çalışmada günümüzde popüler olarak kullanılan MPPT algoritmalarını PV panellerin parçalı gölgelenme durumları altında maksimum gücüne hangi oranda ulaştırabildiklerine dair karşılaştırmalarını yapmışlardır.

PV hücrelerine etki eden diğer bir olumsuz durum ise sıcak nokta (hot-spotting) ismi verilen bir durumdur. Sıcak nokta olayı neticesinde PV hücresi veya hücreleri aşırı ısınarak çıkış güçlerini dolayısıyla da verimlerini kaybederler (Dhimish, 2019). Parçalı gölgelenme ve sıcak nokta olayları neticesinde PV panellerin oluşturduğu sistemde pek çoğu yerel (lokal), bir tanesi de genel (global) olmak üzere maksimum güç noktaları oluşur (Rezk ve ark., 2017). PV panellerin oluşturduğu güneş enerji sistemlerine dair yapılan MPPT algoritmalarından P&O, IC ve FLC tekniklerini içeren üç MPPT algoritması üzerinde çalışma ve geliştirmeler yapılmıştır.

Enerji potansiyelleri ve günümüzde yapılan uygulamaları bakımından popüler bir diğer kaynak olarak rüzgâr enerjisinden bahsedilebilir. Rüzgâr enerjisi kaynakları, rüzgâr enerjisinden elektrik enerjisi üreten enerji dönüşüm sistemleri olup geçmişten günümüze gelen güvenilir ve sürekli gelişen bir enerji kaynağıdır (Kumar ve Chatterjee, 2016). Rüzgâr türbinlerinde, türbin kanadına çarpan rüzgâr gücü türbin tarafından

elektrik enerjisine dönüştürülünceye kadar pek çok güç katından geçer (Manoj ve ark., 2019). Diğer alternatif enerji kaynaklarında olduğu gibi rüzgâr enerjisinin verimli kullanımı çok önemlidir. Rüzgâr türbinlerinden maksimum oranda güç elde edebilmek için generatörün optimum hızda döndürülmesi gerekir. Rüzgâr türbinlerinde geniş aralıktaki rüzgâr hızlarında üretim yapabilmesi için sabit hızlı rüzgâr türbinleri yerine daha çok değişken hız rüzgâr türbinleri tercih edilir (Dursun ve Kulaksız, 2020).

Rüzgâr türbinlerinde maksimum güç noktası algoritmaları elektriksel veriler, meteorolojik veriler ve mekanik veriler üzerinden geliştirilebilirler. Bir kısım MPPT algoritmalar sensörlü yapıda olabilirken bir kısmı ise mekaniksel ve sensörsüzdür (Lopez-Flores ve ark., 2020). Rüzgâr türbinlerinde MPPT algoritmalarında doğrudan güç kontrol tekniği (Direct Power Control, DPC) olarak aşağıda verilen yöntemler kullanılabilir.

- Tepe Tırmanma
- Artımlı İletkenlik
- Bulanık Mantık Denetleyicisi
- Yapay Sinir Ağları
- Parçacık Sürü Optimizasyonu

Bu yöntemler, maksimum güç noktasına ulaşmak için türbin generatörüne ait özelliklerin önceden yüklenmesi veya rüzgâr hızı sensörü gerektirmezler. Diğer bir kontrol tekniği ise dolaylı güç kontrol tekniği (Indirect Power Control, IPC)'dir.

- Uç Hız Oranı Denetimi
- Optimal Tork Denetimi
- Güç Sinyali Geri Beslemesi Denetimi (Power Signal Feedback, PSF)

Bu yöntemler rüzgâr türbini hızını regüle eder. Ayrıca, optimum hızı bulmak için rüzgâr hızı, jeneratör torku ve güç sinyali geri besleme değerleri gibi bilgileri kullanırlar. Bu yöntemler rüzgâr türbinlerine etki eden rüzgâr hızını regüle ederek maksimum güç noktasında çalışmasını sağlarken aynı zamanda kanat açısı kontrolü yaparak aşırı rüzgârların olumsuz etkisine karşı sistemi de korur (Maroufi ve ark., 2020). Ayrıca rüzgâr türbinlerinin iç dinamiklerinden olan uç hızı oranı (Tip Speed Ratio, TSR) ve güç katsayısı (power coefficient) rüzgâr enerjisi için uygulanan MPPT algoritmalarında verime etki eder (Agarwal ve ark., 2019). Rüzgâr türbinlerinden enerji üretiminde yüksek verim sağlamak sadece rüzgâr türbinlerinin iç dinamikleri ile mümkün olmayıp güç katında kullanılan dönüştürücü ve eviricinin verimleri de önemlidir (Parvin ve ark., 2019).

Literatürde rüzgâr türbinlerinin enerji üretimi ve verim analizleri üzerine çok miktarda çalışma yapılmıştır (Madan ve Kumar, 2020). (Youssef ve ark., 2020) yaptıkları çalışma ile dinamik yapıya ve geliştirmelere uygun P&O tekniği üzerinde çalışmalar yaparak hızlı hibrit P&O (Fast Hiybrid, FH-P&O) ve kendinden-akıllı ayarlama yapabilen (SA-P&O) algoritmalarını geliştirmişler ve Matlab/Simulink ortamında denemeler yapmışlardır. Bir diğer çalışma ile (Salem ve ark., 2019) sabit mıknatıslı senkron generatör kullanan rüzgâr türbini üzerinde FLC tekniğini içeren bir MPPT algoritması geliştirmişler ve denemeler yapmışlardır.

Rüzgâr türbinlerinde kullanılan generatör tipleri rüzgârın karakteristiğine ve enerji türünün ihtiyacına göre (AA veya DA) olmak üzere çeşitli tiplerde olabilmektedir. Rüzgâr türbinlerinde DA dinamoları veya AA generatörleri kullanılır. (Sitharthan ve ark., 2020) yaptıkları çalışmada çift beslemeli asenkron generatörünü (Double Feed Induction Generator, DFIG) temel alan bir türbin üzerinde hibrit akıllı-adaptif yapılı bir MPPT algoritması üzerinde çalışmışlardır. (Karabacak, 2019) yaptığı çalışma ile P&O tekniği üzerinden geliştirmeler yaparak uyguladığı rüzgâr türbini üzerinde klasik sistemlere oranla % 9,55 civarında bir verim artışı gözlemlemiştir. PV paneller ve rüzgâr türbinlerinde kullanılan MPPT algoritmaları için yapılan literatür taramasında karşılaşılan en popüler tekniklerin karşılaştırılması Çizelge 2.3'te verilmiştir.

Çizelge 2.3. Hem güneş panellerinde hem de rüzgâr türbinlerinde kullanılan popüler teknikleri içeren MPPT algoritmaları karşılaştırma tablosu

Algoritma Türü	Enerji Kaynağı	Algoritma Karmaşıklığı	Dönüştürücü Kurulumu	Güç Nok. Ulaşma Hızı	Hafıza Gereksinimi	İklim Değ. Altında Performansı
P&O	Rüzgâr	Kolay	Orta	Orta	Düşük	Orta
	Güneş	Kolay	Kolay	Yavaş	Düşük	Düşük
Adaptif P&O	Rüzgâr	Orta	Karmaşık	İyi	Orta	İyi
	Güneş	Kolay	Kolay	Orta	Düşük	Orta
IC	Rüzgâr	Kolay	Karmaşık	Orta	Düşük	Orta
	Güneş	Kolay	Kolay	Düşük	Düşük	Düşük
Adaptif IC	Rüzgâr	Orta	Karmaşık	Yüksek	Orta	İyi
	Güneş	Kolay	Kolay	Orta	Düşük	Orta
HC	Rüzgâr	Kolay	Karmaşık	Orta	Düşük	Orta
	Güneş	Kolay	Kolay	Yavaş	Düşük	Düşük
Adaptif HC	Rüzgâr	Orta	Karmaşık	Orta	Orta	İyi
	Güneş	Kolay	Kolay	Orta	Düşük	Orta
FLC	Rüzgâr	Zor	Karmaşık	Yüksek	Yüksek	Yüksek
	Güneş	Zor	Kolay	Yüksek	Yüksek	Yüksek
NN	Rüzgâr	Zor	Karmaşık	Yüksek	Yüksek	Yüksek
	Güneş	Zor	Kolay	Yüksek	Yüksek	İyi
Hibrit	Rüzgâr	Zor	Karmaşık	Yüksek	Yüksek	Yüksek
	Güneş	Zor	Kolay	Yüksek	Yüksek	Yüksek

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde tez kapsamında önerilen çalışmanın tüm bileşenleri detaylıca açıklanmaktadır.

3.1. Meteoroloji İstasyonunun Montajı ve Devreye Alınması

Tez kapsamında önerilen hibirt enerji sistemi meteorolojik verileri kullanarak rüzgâr ve güneş enerjisi kaynakları gibi davranacağından, önerilen sistemin geliştirilmesi esnasında ihtiyaç duyulacak çevresel verileri sağlayabilen bir meteorolojik veri istasyonuna ihtiyaç duyulmuştur. Bu bileşen parametrelerin hassasiyeti ve çeşitliliği bakımından tasarlanmak yerine hazır olarak temin edilmiştir. Bu kapsamda Davis firmasının Vantage Pro2 modelinden temin edilerek montajı yapılmış ve devreye alınmıştır. Temini yapılan meteoroloji istasyonu:

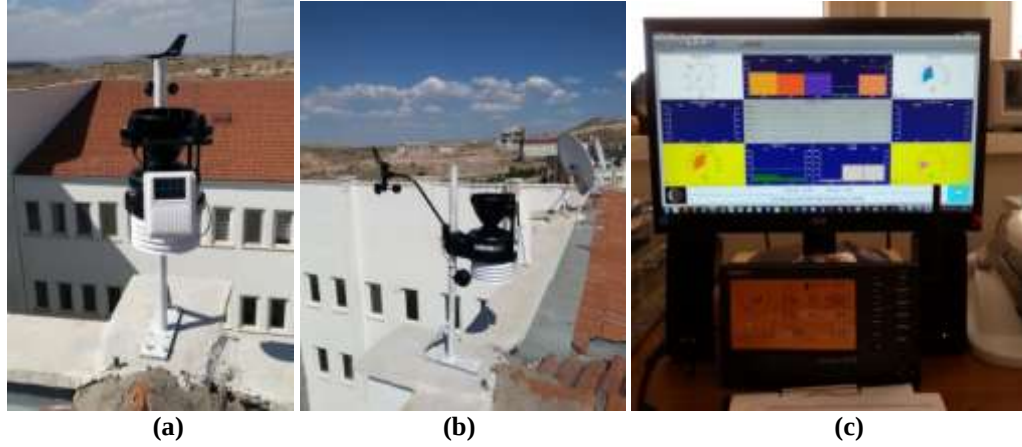
- Dış ortam/çevresel veri toplama ünitesi
- Kablosuz veri saklayıcı
- Kullanıcı arayüzü

olmak üzere üç bileşenden oluşmaktadır. Meteoroloji istasyonunun montajı yapıldıktan sonra kuşkonmazlarının takılmasına dair görseller Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Meteoroloji istasyonu montaj aşamaları

Meteoroloji istasyonuna ait dış ortam veri toplama ünitesi Şekil 3.2(a), (b)’de verilmiştir. Kullanıcı arayüzünün kurulu olduğu masaüstü bilgisayar ve kablosuz veri saklayıcı ünite Şekil 3.2(c)’de verilmiştir.



Şekil 3.2.(a), (b) Montajı yapılan meteoroloji istasyonunun dış ortam veri toplama ünitesi, **(c)** kullanıcı arayüzü ve kablosuz veri saklama ünitesi

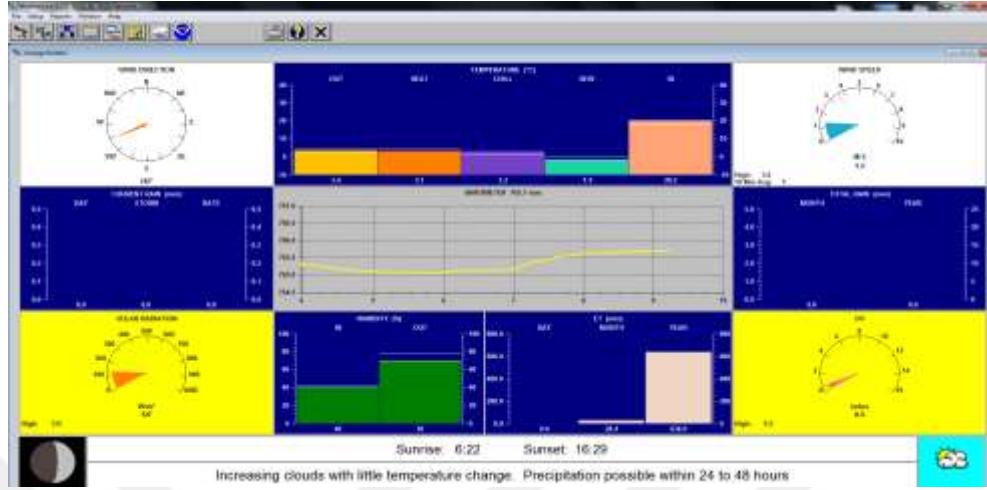
Meteoroloji istasyonu tezde önerilen sistemin ihtiyacı olan çevresel parametreleri içerecek şekilde temin edilmiştir. Temini yapılan meteoroloji istasyonu aşağıda listelenen çevresel parametreleri ölçebilmekte ve kaydedebilmektedir. Meteoroloji istasyonunun ölçümünü yapabildiği parametreler Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Meteoroloji istasyonu tarafından ölçülen parametreler

Sıcaklık (dış ve iç ortam)	Güneş radyasyonu ve UV ışıması
Nem (dış ve iç ortam)	Yağmur ve yağış oranı
Rüzgâr hızı ve yönü	Basınç

Dış ortam ünitesi üzerinde bulunan güneş pili hem üniteyi anlık olarak besler hem de içerisinde bulunan bataryayı şarj eder. Batarya sayesinde, dış ünite güneşin olmadığı zamanlarda da ölçümler yapmaya devam eder. Dış ünite ile kablosuz veri saklayıcı radyo frekansı (Radio Frequency, RF) üzerinden haberleşir. Kablosuz veri saklayıcı ünite ile dış ünitenin haberleşmesinin kesilmesi halinde dış ünite belirli bir süre için verileri kendi içerisinde saklamaya devam eder. Dış ünite ile kablosuz veri saklama ünitesi sağlıklı olarak iletişim kurabiliyorsa çevresel veriler veri saklama ünitesine aktarılır. Kablosuz veri saklama ünitesi de dış ünite olduğu gibi belirli bir veri depolama alanına sahiptir. Belirli aralıklarla bilgisayara bağlayıp depoladığı verilerin arayüz vasıtasıyla bilgisayara alınması gerekir. Bilgisayara alınan veriler geçmişe yönelik analiz yapmak ve diğer işlemler için veri tabanına saklanır. Şekil 3.3(a)’da ölçümü yapılan parametreleri görselleştirmek için kullanılan arayüz

verilmiştir. Şekil 3.3(b)'de ise ölçüm sonuçlarının analiz edilmesine imkân sağlayan grafik arayüzü verilmiştir.



(a)



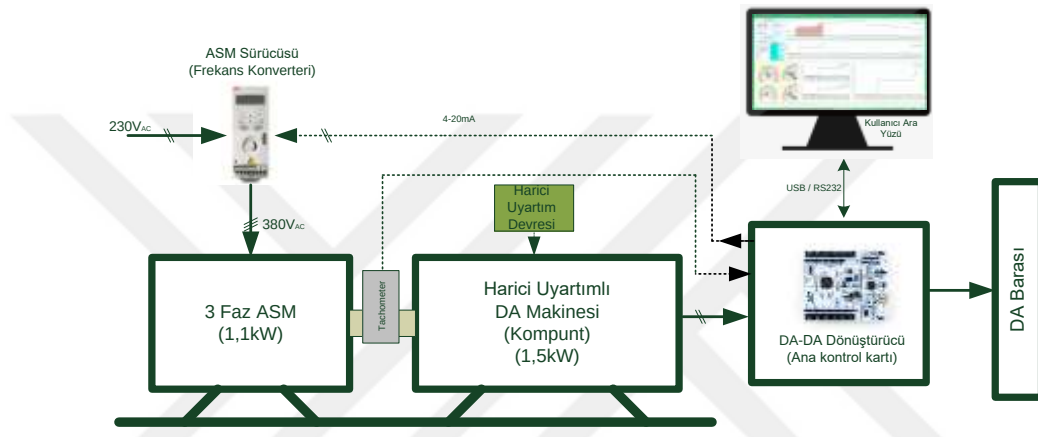
(b)

Şekil 3.3.(a) Meteoroloji istasyonundan elde edilen verilerin görselleştirildiği kullanıcı arayüzü, **(b)** ölçüm sonuçlarının analiz edilmesine imkân sağlayan grafik arayüzü

Meteoroloji istasyonu aracılığıyla ölçümü yapılan çevresel parametreler kullanıcının belirleyeceği aralık ve birim ile veri tabanına yazılmaktadır. Bunlar 1, 5, 10, 30, 60 ve 120 dakikadır. Ayrıca basınç, sıcaklık, rüzgâr hızı gibi parametreleri farklı birimler ile de kaydetmek mümkündür. Örneğin rüzgâr hızını istenildiğinde m/s istenildiğinde km/h şeklinde almak mümkündür.

3.2. Rüzgâr Emülatörü Tasarımı ve Bileşenleri

Rüzgâr emülatörü; rüzgârın rotor bıçaklarına çarpması sonucu oluşturduğu ve yüksek devir milinde meydana getirdiği döndürme hareketini taklit edecek sistemdir. Ayrıca rüzgâr emülatörü, laboratuvar ortamındaki çalışmalara kaynak sağlayabilmek amacıyla tasarlanmıştır. Genel yapısı ile küçük ölçekli, rüzgâr türbini gibi davranan bir sistemdir. Rüzgâr türbini emülatörü için oluşturulan sistemin blok şeması Şekil 3.4’te verilmiştir.



Şekil 3.4. Rüzgâr emülatörü olarak tasarlanan sistemin blok şeması

Tez kapsamında tasarlanan ve uygulaması yapılan rüzgâr emülatörü;

- 1,1 kW 3 fazlı asenkron motor
- 1,5 kW kompunt doğru akım makinesi
- Kullanıcı arayüzü
- 1 faz ile beslenen ASM sürücüsü
- İzolesiz DA/DA artıran dönüştürücü birimlerinden oluşur.

Kullanıcılar rüzgâr emülatörü ile seçmiş oldukları tarihe ait rüzgâr verisi ve rüzgâr türbini tipine göre laboratuvar ortamında rüzgâr enerjisi üzerine uygulamalar yapabilmektedir. Arayüz, kullanıcının seçtiği rüzgâr profili ve rüzgâr türbini tipine göre hesaplamalar yapar, yaptığı hesaplamalar sonucunda motor sürücüsünü kontrol etmek için sinyal üretir. Üretilen kontrol sinyali motoru sürececek olan frekans konvertörüne uygulanır. Böylece seçilen rüzgâr profili ve rüzgâr türbini tipine göre, asenkron motorun mili, rüzgâr türbinlerindeki yüksek devir mili gibi döner ve böylece rüzgâr türbinini taklit etmiş olur. Asenkron motor sürücüsü endüstriyel kontrol sistemlerinde kullanılan 4-20 mA ile uzaktan kontrol edilebilmektedir. Kullanılan sürücü asenkron motorun hız

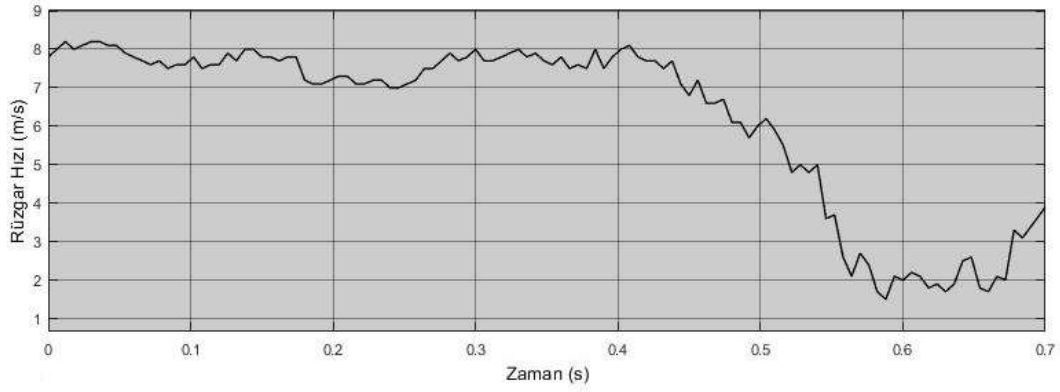
kontrolünü V/F değişken frekans sürme (Variable Frequency Drive, VFD) tekniği ile yapar. Asenkron motorun devir bilgisi artımlı enkoder ile ölçülerek kontrol kartına geri bildirim yapılır. Tüm sistemin kontrol yazılımı Matlab/Simulink platformunda geliştirilmiştir. Rüzgâr emülatörünün diğer bileşenleri ile kullanıcı arayüzü RS232/USB dönüştürücü ile haberleşir.

3.2.1. Rüzgâr emülatörü benzetim çalışmaları

Rüzgâr emülatörünün uygulamasına geçilmeden önce sisteme ait deneyim kazanmak, sistemin davranışları hakkında bilgi edinmek maksadıyla Matlab/Simulink ortamında bir benzetim çalışması yapılmıştır. Benzetim çalışmasında; harici uyarımlı DA makinesi elektrik enerjisi üretecek olan generatörü temsil etmektedir. Rüzgârın döndürdüğü, dişli kutusu çıkışı olan yüksek devir milini ise asenkron motorun mili temsil etmektedir. Benzetimde asenkron motorun mili ile harici uyarımlı DA makinesinin mili akuple edilerek rüzgâr türbinine benzetmek istenmiştir. Asenkron motorun devir sayısını değiştirerek rüzgâr hızının değişimi sağlanmıştır. Asenkron motorunu kontrol etmek için bir frekans konvertörü tasarlanmıştır. Benzetim çalışması Vestas firmasının rüzgâr türbini olan V44-600 modeline ait parametreler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Rüzgâr türbinine ait parametreler Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Benzetim çalışmasında kullanılan rüzgâr türbinine ait elektriksel ve diğer parametreler tablosu

Türbin Parametresi	Parametre Değeri
Nominal güç değeri	600 kW
Generatör türü	Asenkron generatör
Maksimum devir (generatör)	1650 U/min
Nominal çıkış gerilimi (generatör)	690 V
Devreye girme hızı (türbin) minimum	4 m/s
Nominal çalışma hızı (türbin)	16 m/s
Devreden çıkma hızı (türbin) maksimum	20 m/s
Rotor çapı	44 m
Uç hızı	65 m/s
Kanatların süpürme alanı	1521 m ²
Kanat sayısı	3
Dişli kutusu dönüştürme oranı	1:51



Şekil 3.6. Benzetim çalışmasına uygulanan rüzgâr profilinin zamana bağlı rüzgâr hızı grafiği

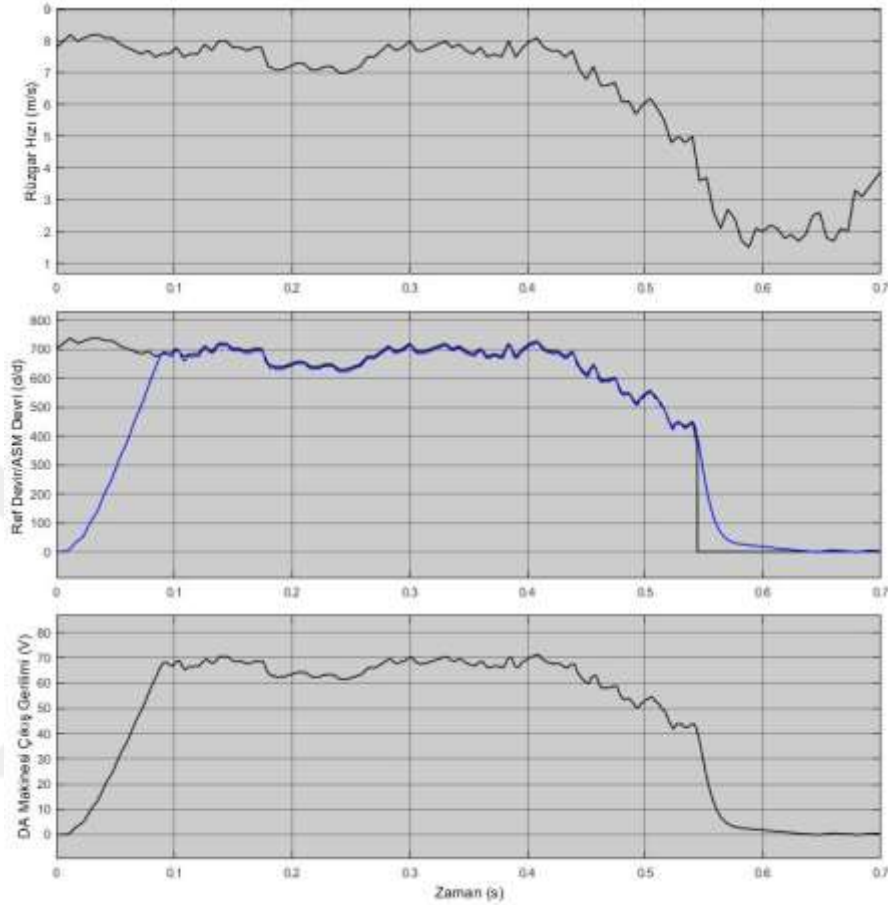
Benzetim için tasarlanan V44-600 modeli, rüzgâr profilinin o anki rüzgâr hızına göre bir referans devir bilgisi üretir. Örneğin V44-600 modelinin parametrelerini kullanarak, rüzgâr hızının 6 m/s olduğunu varsayarak bir hesaplama yapılırsa;

$$TSR(\lambda) = \frac{65}{16} = 4,07$$

$$Ns = \frac{60 * V_w * TSR}{\pi * D} = \frac{60 * 6 * 4,07}{3,14 * 44} * 51 = 540,8 d / d$$

Elde ettiğimiz bu değeri Şekil 3.6 üzerinde analiz edecek olursak; zaman ekseninin 0.5 saniye olduğu nokta ile rüzgâr hızının 6 m/s olduğu noktanın kesişiminde referans devir sayısının 500 d/d'nın üzerinde bir devir sayısına denk geldiğini görmek mümkündür. V44-600 modeli rüzgâr hızının 4 m/s'nin altına düştüğü zamanlarda devreden çıkarak beklemektedir. Bu değerın altında elektrik enerjisi üretmesi tercih edilmediğinden sistemin devrede olması mümkün olmaz. Benzetim için oluşturulan Simulink modeli, referans rüzgâr verisi üzerinden çalıştırılmış ve çalışması gözlemlenmiştir. Çalışma sonucunda Şekil 3.7'de verilen çıkış grafikleri elde edilmiştir. Birinci grafik rüzgâr emülatörüne uygulanan rüzgâr profili grafiğidir. Bu grafik meteoroloji istasyonundan alınmıştır. V44-600 modeli rüzgâr profili grafiğinden yukarıda örneklenen şekilde anlık değerler üretmiştir. Bu anlık değerlerin zamana bağlı değişim grafiği ikinci şekilde siyah renkte gösterilmektedir. Bu grafik aynı zamanda PI kontrol için referans devir bilgisidir. PI kontrol referans devir bilgisi ve asenkron motor milinden aldığı gerçek devir bilgisini değerlendirerek V/F kontrol için gerekli sinyali üretir. V/F kontrol üretmiş olduğu sinyal ile uzay vektör darbe genişlik modülasyonunu (SV-PWM) kullanarak motorun kontrolü için gerekli anahtarlama sinyallerini üretir.

Üretilen sinyaller üç faz tam köprü eviriciye uygulanır. Bu sinyaller ile doğru akım türündeki elektrik enerjisi motorun ihtiyaç duyduğu değişken frekanslı alternatif akıma dönüştürülerek motorun istenilen devirde dönmesi sağlanmış olur.



Şekil 3.7. Rüzgâr emülatörü için oluşturulan benzetim modeli giriş ve çıkış grafikleri

İkinci grafikte görüleceği üzere rüzgâr profiline ait grafik değerinde rüzgâr hızının 4 m/s'nin altına düşmesi durumunda V44-600 modeli kesime giderek devreden çıkmaktadır. Bunun sonucunda enerji üretimi durmaktadır. Üçüncü grafik ise asenkron motorun miline bağlanmış olan harici uyarımlı DA makinesinin çıkış gerilimine ait grafiklerdir. Harici uyarımlı DA makinesine ait bilgiler Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Benzetim ve gerçek ortamda kullanılan harici uyarımlı DA makinesine ait bilgiler

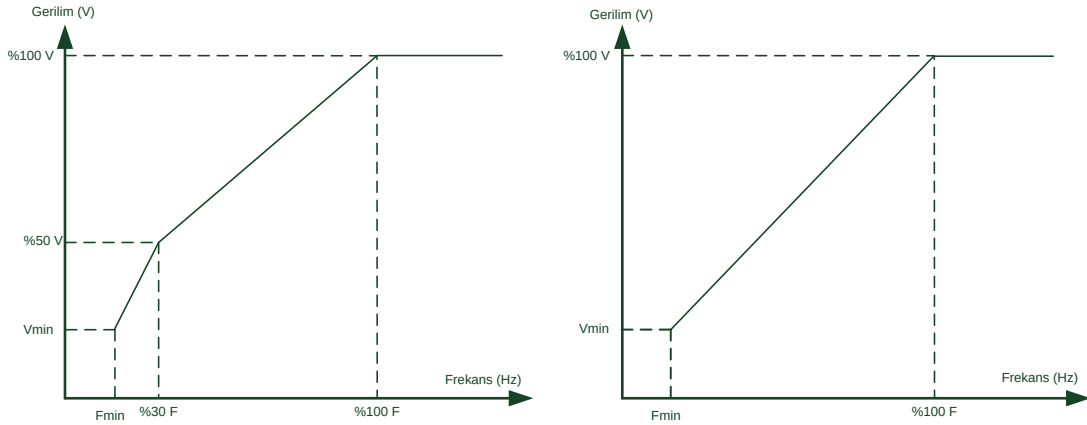
Endüvi Devresi		Uyarım Devresi	
V. Arm.	200 V	V. Exc.	200 V
A. Arm.	8.5 A	A. Exc.	0.4 A
Nominal Hız		1500 d/d	
Nominal Güç		1500 W	

3.2.2. ASM sürücü ve kontrol birimi

Bu birim asenkron motorun istenilen devirde dönebilmesini sağlayacak olan bileşendir. Asenkron motor sürücüsü olarak Schneider Electric firmasının ACS150 modeli kullanılmıştır. Bu ürün 1,5 kW gücünde bir asenkron motor sürücüsü olup 1 fazlı şebekeden beslenmektedir. Asenkron motorlarda devir sayısı, kutup sayısı ve besleme gerilimin frekansına bağlıdır. Asenkron motorlarda senkron devir sayısı (N_s) Denklem (3.3) ile hesaplanır.

$$N_s = \frac{120 * f}{2P} \quad (3.3)$$

Burada N_s senkron devir sayısıdır ve birimi d/d'dir. f motorun bağlı olduğu şebekeye ait frekanstır ve birimi Hz'dir. $2P$ motorun tasarımında belirlenen çift kutup sayısıdır. Bu denklemde motor milinin dönme sayısına etki eden tek değişken şebeke frekansıdır. Temin edilen motor sürücüsü, asenkron motorun devir sayısını değiştirmek için değişken frekans sürücüsü tekniği kullanır. Bu teknik, senkron motorların kontrolünde statora uygulanan gerilimi ve gerilimin frekansını ayarlayarak kontrol sağlar (Wang ve ark., 2019). VFD tekniği, asenkron motorların kullanıldığı ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme sistemlerinde asenkron motoru sürmek için kullanılır. Teknik sayesinde enerji verimliliği sağlanırken güç katsayısını da geliştirmek mümkündür (Wang ve Song, 2018). (Zagirnyak ve ark., 2019) çalışmalarında VFD tekniğinin kullanılması ile asenkron motorların sargılarında meydana gelen termal aşırı yüklemelerinin azaltılabileceği ve asenkron motorların kullanım ömrünün uzatılabileceğini tespit etmişlerdir. Ayrıca çok geniş frekans aralığında, elektrik motorlarına akım ve gerilim yüklemelerinde VFD tekniği katkı sağlar (Nisha ve ark., 2019). Literatür çalışmalarında VFD tekniği ile eskiden beri kullanılan diğer tekniklerin avantaj ve dezavantajlarının karşılaştırması adına pek çok çalışma vardır (Agamloh, 2017). Bu yönüyle VFD tekniği günümüzde halen üzerinde çalışılan bir konudur. VFD tekniği için kullanılan farklı V/F oranlarına sahip grafikler Şekil 3.8'de verilmiştir.



Şekil 3.8. VFD tekniği için oluşturulmuş iki farklı V/F grafiği

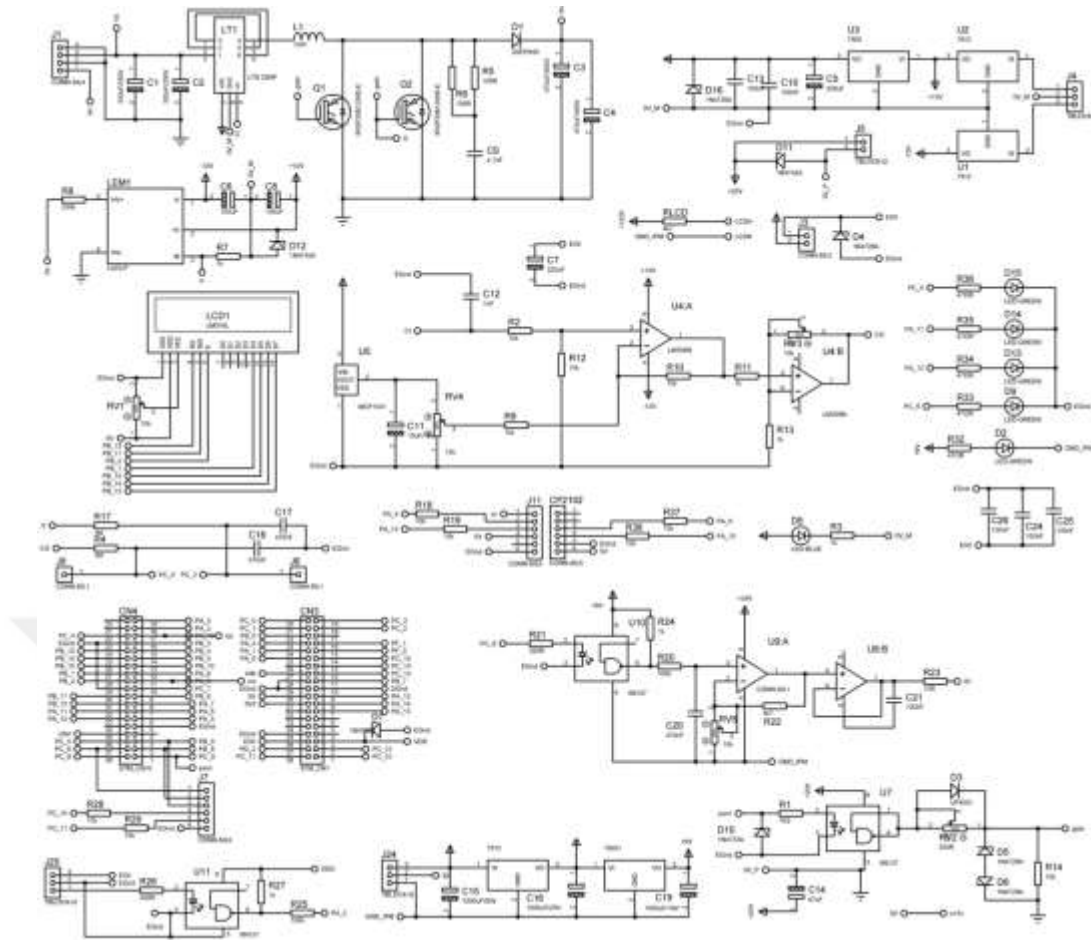
V/F oranında değişiklikler yaparak asenkron motorların sürülmesini sağlayan VFD tekniği için farklı V/F oranı grafiği kullanılabilir. Bu grafiğin nasıl olacağı, kontrolü yapılacak asenkron motorun yapısına, kullanılacağı yere ve asenkron motorun miline bağlı olan yüklerin karakteristiğine göre değişiklik gösterebilir.

3.2.3. Rüzgâr emülatörü kontrol kartı ve bileşenleri

Tasarımı yapılan birim; kullanıcı arayüzü ile emülatör sisteminin uyumlu bir biçimde çalışmasını sağlar. Bu birim;

- 4-20 mA sinyal üretmek için işlemsel yükselteçli bir devre yapısı içerir.
- Alan etkisi prensibine göre çalışan izoleli akım-gerilim okuma sensörleri ile dönüştürücü girişindeki akım ve gerilim değerlerinin ölçümünü yapar.
- Artımlı optik enkoderden asenkron motorun devir bilgisini ölçer.
- DA-DA dönüştürücünün ihtiyaç duyduğu sürme sinyalini üretir.

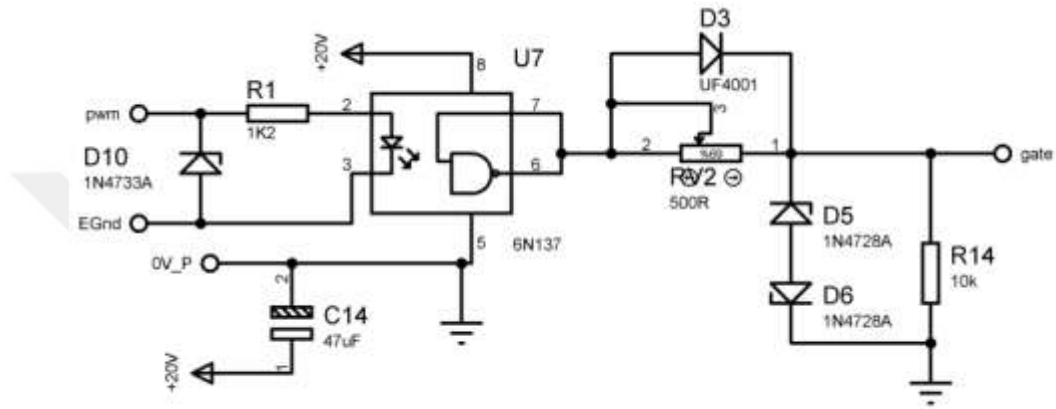
Kontrol kartı tüm bu işlemleri 32-bit mikrodenetleyici bulunduran bir geliştirme kartı ile yapar. Tasarımı yapılan rüzgâr emülatörü kontrol kartına ait devre şeması ve bileşenleri Şekil 3.9'da verilmiştir



Şekil 3.9. Tasarımı yapılan rüzgâr emülatörü kontrol kartına ait devre şeması

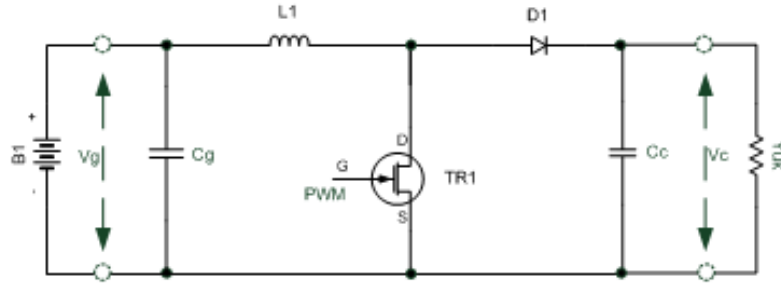
Rüzgâr emülatörü kontrol kartı üzerinde; elektriksel parametrelerin elde edildiği akım ve gerilim sensörlerini içeren akım-gerilim okuma katı, analog sinyallerin filtre edildiği filtre katı, motor sürücüsünü kontrol eden 4-20 mA analog sinyalinin üretildiği sinyal katı, MOSFET yarı iletken anahtarlama elemanının sürülmesini sağlayan optik izoleli sürücü katı, çeşitli seviyeden gerilimlerin regüle edildiği gerilim regüle katları ve diğer pasif devre elemanlarını içerir. Şekil 3.10'da akım gerilim okuma katı ve güç katını içeren devre şeması verilmiştir. Güç katı iki adet birbirine paralel bağlanmış IXYS markasına ait XHFH60N50P3 modeli olan MOSFET yarı iletken anahtarlama elemanından meydana gelir. MOSFET'lerin paralel bağlanmasıdaki sebeplerden biri, güç katından çekilecek akımın yarı yarıya bölünmesi ve anahtarlar üzerinde oluşan stresi azaltmaktır. İkinci sebep ise daha yüksek değerdeki akımı kontrol edebilecek pahalı bir anahtarlama elemanı yerine iki adet daha uygun fiyatlı anahtarlama elemanını paralel bağlayarak ihtiyaç duyulan akımı sağlayabilmektir.

kHz frekansa ve 3,3 V genliğe sahiptir. Anahtarlama frekansının doluluk oranı d ise maksimum güç noktasına bağlı olarak % 10 ile % 85 arasında değişir. Üretilen PWM sinyalinin genliği olan 3,3V MOSFET'leri sürrebilmek için yeterli değildir. Kullanılan MOSFET'lerin katalog bilgisinde, MOSFET'lerin sürülebilmesi için ideal sinyal genliğinin 20 V civarında olması gerektiği belirtilmiştir. Mikrodenetleyicinin ürettiği olduğu 3,3 V'luk sürme sinyali Şekil 3.12'de verilen yapı sayesinde ideal sürme sinyaline dönüştürülür.



Şekil 3.12. MOSFET yarı iletken anahtarları sürrebilmek için oluşturulan sürücü katı

Tasarlanan sürme katı hem 3,3 V'luk sürme sinyalini yükseltir hem de mikrodenetleyiciyi güç katından optik olarak izole eder. Bu sayede güç katında meydana gelen gürültüler mikrodenetleyici katına ulaşamaz. Tez kapsamında tasarlanan MPPT algoritmalarının işletilebilmesi için rüzgâr emülatörüne yükleme yapılması gerekmektedir. Rüzgâr emülatörüne yükleme yapmak, emülatörün enerji üreten bileşeni olan DA generatörünün çıkışındaki gerilimin daha yüksek bir seviyeye çıkartılması ile sağlanabilir. Bu maksatla oluşturulan DA-DA dönüştürücü izolesiz artıran (boost) dönüştürücü yapısındadır. Literatürde yapılan araştırmada artıran dönüştürücü üzerine on dört farklı tasarıma rastlanmıştır (Harasimczuk ve Dawidziuk, 2020). Artıran dönüştürücü yapısı endüstride ihtiyaç duyulan yüksek gerilim seviyesine ulaşabilmek için kullanılır (Bhaskar ve ark., 2020), (Premkumar ve ark., 2020). Ek olarak günümüzde elektrikli otomobillerde de artıran dönüştürücü yapıları yer alır (Marimuthu ve ark., 2020). Bu nitelikleri bakımından artıran dönüştürücü yapıları çok geniş kapsamda kullanım alanlarına sahiptir (Mohammadi ve ark., 2019a). Tez kapsamında tasarımı yapılan izolesiz artıran dönüştürücü yapısına ait blok şema Şekil 3.13'te verilmiştir.



Şekil 3.13. Tez kapsamında tasarımı yapılan izolesiz artıran dönüştürücü yapısının blok şeması

Bu dönüştürücü yapısında dönüştürücü çıkış gerilimi her zaman dönüştürücü giriş geriliminden daha yukarı bir seviyededir. Artıran dönüştürücünün anahtarlama frekansı doluluk oranı d 'ye bağlı çıkış gerilimi Denklem (3.4) ile hesaplanır.

$$V_c = \frac{1}{1-d} V_g \quad (3.4)$$

Burada; V_g dönüştürücü giriş gerilimi, V_c dönüştürücü çıkış gerilim ve d anahtarlama frekansının % cinsinden doluluk oranıdır. Artıran DA-DA dönüştürücünün sürekli iletim modunda çalışabilmesi için gerekli minimum bobin ve kondansatör değerleri sırasıyla Denklem (3.5) ve (3.6)'da verilmiştir.

$$L > \frac{V_{g_{\min}} * d}{F_s * \Delta I_L} \quad (3.5)$$

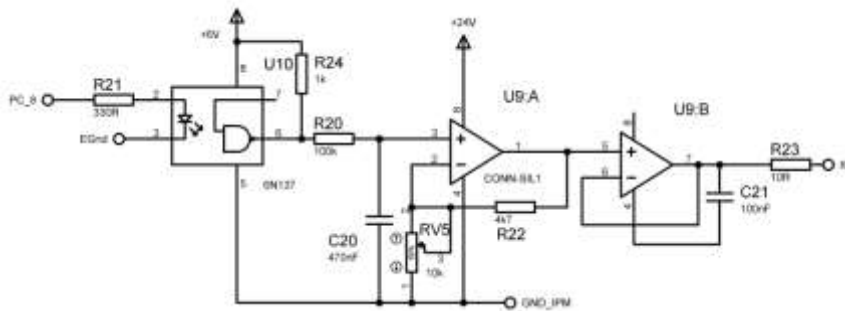
$$C > \frac{I_{\zeta_{\max}} * d}{F_s * \Delta V_{\zeta}} \quad (3.6)$$

Burada; ΔV_{ζ} % cinsinden dönüştürücü çıkış gerilimi üzerindeki müsaade edilen dalgalanma miktarı, ΔI_L % cinsinden çıkış akımı üzerindeki müsaade edilen dalgalanma miktarı, $I_{\zeta_{\max}}$ maksimum dönüştürücü çıkış akımı, F_s dönüştürücü anahtarlama frekansı, C dönüştürücü çıkış kondansatörü sığası, L dönüştürücüde kullanılan bobinin indüktansıdır. Tasarımı ve uygulaması yapılan artıran izolesiz DA-DA dönüştürücüye ait tasarım ve uygulama parametreleri Çizelge 3.4'te verilmiştir

Çizelge3.4. Tez kapsamında tasarım ve uygulaması yapılan izolesiz DA-DA dönüştürücüsünün tasarım parametreleri

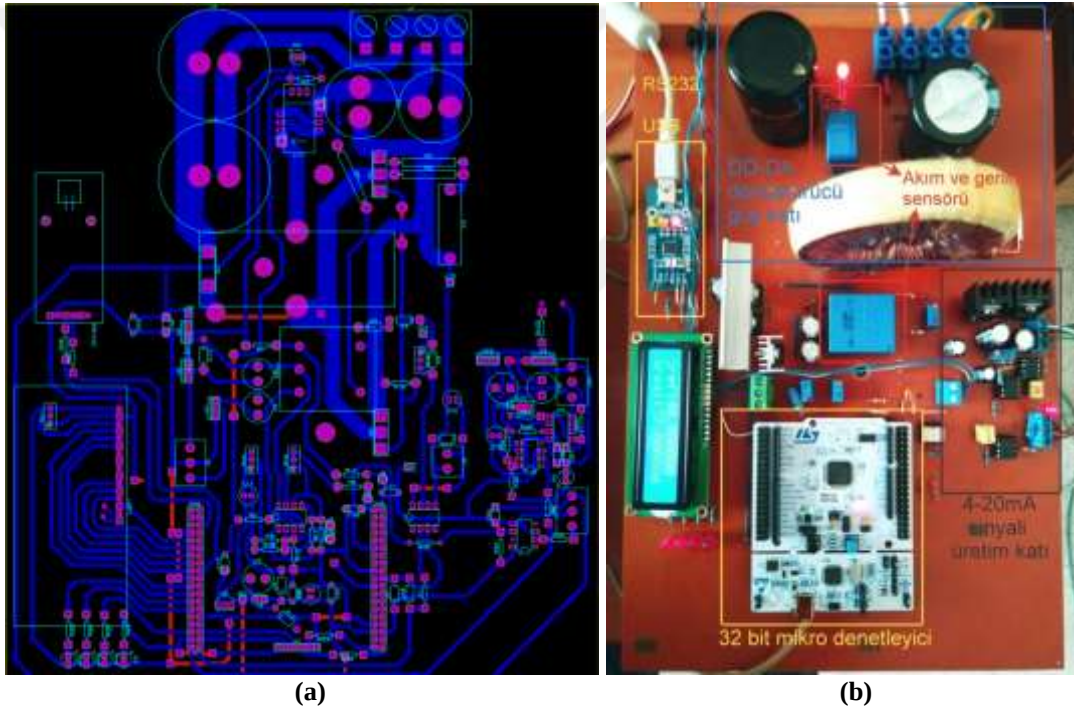
Dönüştürücü parametresi	Parametre değeri
Maksimum dönüştürücü gücü	2000 W
Maksimum giriş gerilimi	250 V
Minimum dönüştürücü giriş gerilimi	60 V
Maksimum dönüştürücü çıkış gerilimi	400 V
Maksimum dönüştürücü giriş akımı	8 A
Dönüştürücü anahtarlama frekansı	40 kHz
Bobin değeri	1 mH
Giriş kondansatörü değeri	1260 μ F
Çıkış kondansatörü değeri	470 μ F

Kontrol kartında bulunan bir diğer kat ise asenkron motor sürücüsünün kablolu uzaktan kontrolünü sağlayacak olan 4-20 mA üretim katıdır. 4-20 mA sürme sinyali endüstride çok kullanılan bir tekniktir. Belirli bir mesafe uzakta bulunan basınç ölçer, sıcaklık ölçer, debi ölçer vb. sensörlerden bilgi okumada, motor sürücüleri, elektrikli vanalar, ayarlanabilir aydınlatmalar ve selenoid valfler gibi çıkış elemanlarını kontrol etmede 4-20 mA analog sinyali kullanılır. ACS150 modeli de uzaktan kontrol için 0-10 V veya 4-20 mA gibi analog sinyaller ile kontrol edilebilmektedir. Asenkron motor sürücüsünü kontrol etmek için oluşturulan 4-20 mA analog sinyali üreten devre şeması Şekil 3.14’te verilmiştir.



Şekil 3.14. 4-20mA analog sinyali üretmek için oluşturulan devre şeması

4-20 mA analog sinyali 5 kHz'lik PWM sinyalinin R20 ve C20 elemanları üzerinden alçak geçiren filtre (Low-Pass Filter, LPF) ile doğru akıma dönüştürülmüştür. Anahtarlama sinyalinin doluluk oranı % 0'da iken filtre çıkışı 0 V, % 100'e ulaştığında ise 5 V olmaktadır. 0 V ile 5 V arasında genliğe sahip DA işlemsel yükselteç (op-amp) devresi ile akım kaynağına dönüştürülür. Böylece 0 V'a karşılık 4 mA, 5 V'a karşılık 20 mA üretilebilir. Şekil 3.9'da verilen devre şeması üzerinden baskı devre (Printed Circuit Board, PCB) tasarımı yapılmıştır. Tasarımı yapılan baskı devre şeması Şekil 3.15(a)'da verilmiştir. Baskı devre tasarımı daha sonrasında kazıma tekniğine göre bakır plakete aktarılmıştır. Bakır plaket üzerine devre elemanları lehimlenmiş ve Şekil 3.15(b)'de verilen rüzgâr emülatörü kontrol devresi fiziksel olarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.15. Rüzgâr emülatörü kontrol kartına ait baskı devre şeması tasarımı

3.2.4. Kullanıcı arayüzü birimi

Bu bileşen, kullanıcının rüzgâr verilerini seçebileceği, sistemin otomatik veya manuel kontrolünü sağlayabileceği, sistemin davranışını grafiksel veya diğer görseller ile izleyebileceği, MPPT algoritmalarını seçebileceği ve inceleyebileceği kısımdır. Kullanıcı arayüz, Microsoft Visual Studio platformunda hazırlanmıştır. Kullanıcı arayüzü sade ve kullanıcı dostu bir yapıdadır. Rüzgâr türbini emülatörü için tasarlanan

kullanıcı arayüzü Şekil 3.16(a)'da verilmiştir. Tasarlanan kullanıcı arayüzüne ait detaylar ise ok ve kutucuklar kullanılarak Şekil 3.16(b)'de verilmiştir.

Kullanıcı arayüzü:

- Manuel ve otomatik kontrol menüleri,
- Rüzgâr hızına karşılık generatör devir sayısı grafiği,
- Generatör devri, akımı, gerilimi ve gücü göstergeleri,
- Generatör akım, gerilim ve güç grafikleri,
- MPPT kontrol araçları,
- Yük simülatörü kontrol araçlarını içerir.



(a)



(b)

Şekil 3.16. Rüzgâr türbini emülatörü için tasarlanmış kullanıcı arayüzü ve bileşenleri

Kullanıcı rüzgâr emülatörünü otomatik olarak çalıştırmak isterse öncelikli olarak hangi tarihi emule edecekse o tarihi seçer. Seçilen tarihteki rüzgâr verilerinin hangi hızda emule edilmesi isteniyorsa emule hızını ve emüle etmek istediği rüzgâr türbinini seçer ve emülasyonu başlatır. Rüzgâr emülatörünün manuel ve otomatik kontrol edilebilmesine imkân sağlayan ve kullanıcı arayüzünde rüzgâr türbini seçimi için

kullanılan araca ait detaylar ve kullanıcı arayüzünün seçime göre üretmiş olduğu referans devir bilgileri Şekil 3.17’de verilmiştir.



Şekil 3.17. Rüzgâr türbini seçimine imkân sağlayan araç ve bileşenleri

Sistemde 12 farklı firmanın, benzer özelliklere sahip rüzgâr türbini ve bu türbinlere ait parametreler yer almaktadır. Sisteme kaydedilen türbin modelleri ve markaları Çizelge 3.5’te verilmiştir.

Çizelge 3.5. Rüzgâr türbini emülatörü kullanıcı arayüzüne kayıtlı rüzgâr türbini marka ve modelleri

AN Bonus 600	Gemesa G42-600	Jacobs 48/600-600
BWU 43-600	Goldwind S43_600	Elecon T600-48-600
DeWind D4 48_600	Vestas V44-600	IWT V42-600
Ecotecnia ECO 44_600	Made Endesa AE-45-600	Micon M 1500-600

Bu türbin modelleri kanat çapları, güçleri, dişli kutusu dönüştürme oranları ve kullanılan asenkron generatörleri bakımından birbirlerine benzetilmektedir. Bunların dışında seçilen türbinlerden ortak olarak kullanılan parametreler ise;

- Nominal rüzgâr hızı
- Devreye girme alt hız sınırı
- Devreden çıkma üst hız sınırı
- Kanat çapı
- Kanat uç hızı
- Kanat uç hız oranı
- Dişli kutusu dönüştürme oranı
- Generatör tipi gibi parametreler göz önüne alınmıştır.

Kullanılan generatörlerin güçleri aynı olup hepsinde de bir dişli kutusu bulunmaktadır fakat dönüştürme oranları kendi aralarında farklılık göstermektedir.

Bunlara ek olarak seçilen rüzgâr türbinlerinde kullanılan generatör tipleri çoğunlukla asenkron generatör türündedir ve birbirlerine benzemektedir.

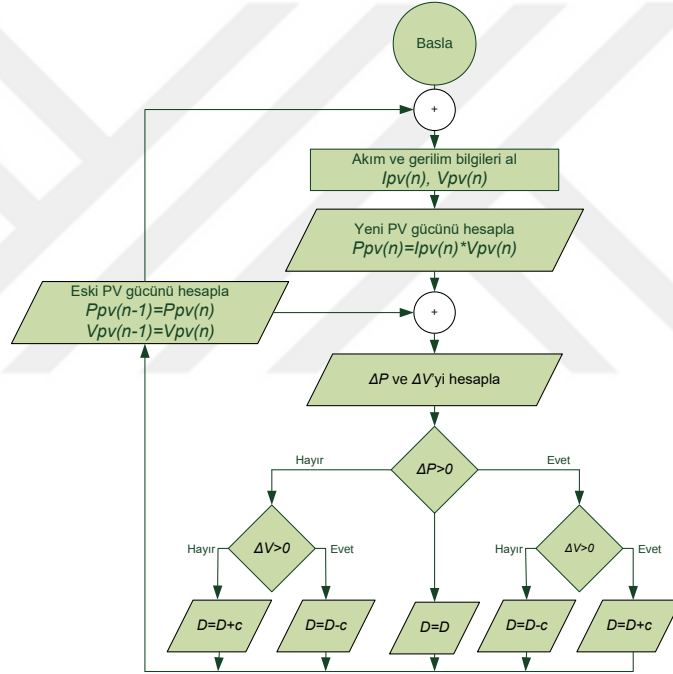
3.2.5. Rüzgâr emülatörü üzerinde MPPT tekniklerinin geliştirilmesi

Rüzgâr türbinlerinde kullanılan MPPT teknikleri ve algoritmaları detaylı olarak ikinci bölümde incelenmiştir. Altyapılarının ve işletim gereksinimlerinin benzer olması sebebiyle P&O, IC ve FLC tekniklerini içeren algoritmalar üzerinde incelemeler ve geliştirmeler yapılmıştır.

Değiştir ve gözle (P & O) tekniği:

P&O tekniğini temel alan MPPT algoritmaları geliştirilebilir dinamik karakteristiklere sahip bir tekniktir (Youssef ve ark., 2020). P&O tekniği, rüzgâr türbinlerinde enerji üretimini arttırmak için kullanılır. Bu yönüyle P&O tekniğini içeren MPPT algoritmaları değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde özellikle de düşük hızlarda verim elde etmek için kullanılabilmektedir (Mousa ve ark., 2019a). Ancak geleneksel P&O teknikleri sabit adımlı olması sebebiyle rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemlerinde kısıtlamalara sebep olabilmektedir (Youssef ve ark., 2019), (Mousa ve ark., 2019b). Geleneksel P&O tekniğini içeren algoritmalar geliştirilerek daha verimli hale getirilmesi üzerine çalışmalar yapılmaktadır. (Mousa ve ark., 2019c) yaptıkları çalışmada geleneksel P&O tekniklerini içeren algoritmalar üzerinde çeşitli yöntemler ile geliştirmeler yapmışlardır. Benzer olarak (Ramadan ve ark., 2019) geleneksel P&O tekniğini, değişken adımlı P&O'ya dönüştürerek rüzgâr türbinlerinin maksimum güç noktasına daha hızlı ulaşmasına ve maksimum güç noktasında meydana gelen salınımları en aza indirmeyi hedeflemişlerdir. Benzer olarak (Mousa ve ark., 2020) çalışmalarında hibrit ve adaptif özelliklere sahip P&O tekniğini temel alan araştırmalar yapmışlardır. (Meghni ve ark., 2020) yaptıkları çalışma ile değişken yapıli rüzgâr türbinlerinde geleneksel P&O tekniğini kullanarak otomatik sistem yaklaşımı üzerine araştırma yapmışlardır. (Kumar ve ark., 2017) yaptıkları çalışmada rüzgâr ve güneşi temel alan, şebekeden bağımsız ve küçük ölçekli bir hibrit enerji sistemi üzerinde modifiye P&O algoritması üzerine inceleme yapmışlardır. Hibrit bir diğer sistem yapısı üzerinde araştırmalar yapan (Rezkallah ve ark., 2018) daha az sensör içeren ve daha fazla verim sağlayan P&O tekniğini temel alan MPPT algoritması üzerinde

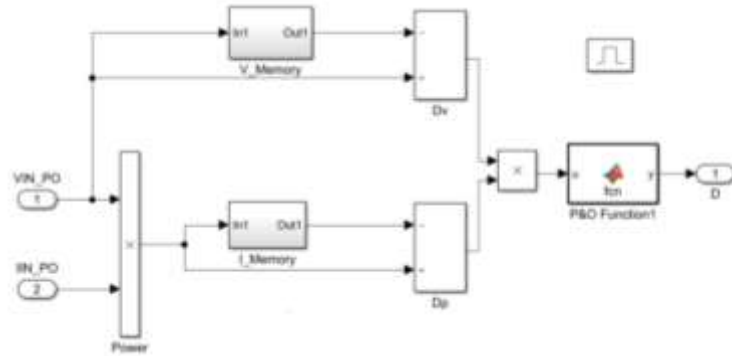
çalışmışlardır. Rüzgâr türbinlerinde üretilen elektrik enerjisi sistemde yer alan rotor veya generatörün devir sayısı ile ifade edilebilirken kimi teknikler devir sayısı yerine elektriksel parametreler üzerinden de yapılabilir (Putri ve ark., 2018). P&O tekniği ile elektriksel parametreleri kullanarak maksimum güç noktasına erişmek mümkündür. P&O'ya göre akım ve gerilim okuma kartından elde edilen akım ve gerilim değerleri üzerinden bir güç değeri hesaplanır. Sonraki aşamada anahtarlama sinyalinin çalışma süresi değiştirilir. Bu işlem sonunda tekrardan akım ve gerilim ölçülerek bu değerler üzerinden yeni güç değeri hesaplanır. Son durumda bir önceki güç değeri ile yeni güç değeri, bir önceki gerilim değeri ile yeni gerilim değeri karşılaştırılarak Şekil 3.18'de verilen akış şemasına göre algoritma işletilir.



Şekil 3.18. P&O tekniğinin işletim akış şeması verilmiştir

Verilen akış şeması geleneksel P&O tekniğine göre oluşturulmuştur. Akış şemasında belirtilen c sabit bir değere karşılık gelir. c değeri algoritmanın uygulanacağı sistemin karakteristiğine ve güç katında meydana getirilen değişimlere verdiği tepki süresine göre tasarımcı tarafından belirlenir. Şekil 3.18'de verilen akış şemasının işletilebilmesi için Simulink ortamında bir model oluşturulmuştur. Oluşturulan model derlenerek gömülü sisteme aktarılmıştır. P&O tekniğini içeren MPPT algoritması için oluşturulan Simulink modeli Şekil 3.19'da verilmiştir. Türbin çıkışına ait akım ve gerilim bilgileri Simulink modeline uygulanır. Oluşturulan Simulink modeli;

gerilimdeki değişim olarak Δv , güçteki değişim olarak Δp 'yi hesaplayıp daha sonra fonksiyon çıkışı olan d 'yi hesaplar.



Şekil 3.19. P&O algoritması için oluşturulan Simulink modeli

Simulink modeli, akım ve gerilim bilgilerini akım-gerilim okuma kartından elde edilen analog değerlerin Nucleo board'a ADC kanalları üzerinden uygulanmasıyla elde eder ve MPPT işletimi için sayısal verilere dönüştürür. Verilerin daha sağlıklı işletilebilmesi için sayısal filtreleme işlemlerine tabi tutulur. P&O kontrol tekniğinin işletilmesi sonucunda kullanıcı arayüzü üzerinden gözlemlenen elektriksel ve mekaniksel grafikler Şekil 3.20'de verilmiştir.

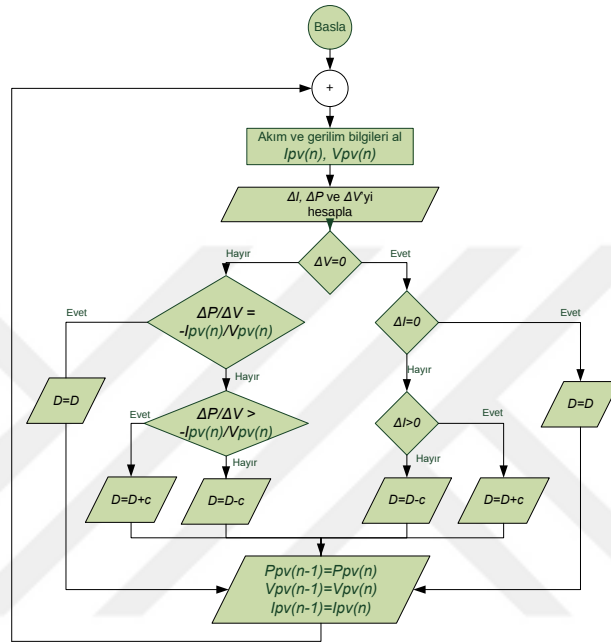


Şekil 3.20. P&O algoritmasının işletilmesi sonucunda elde edilen elektriksel ve mekaniksel grafikler

Artımlı iletkenlik (IC) tekniği:

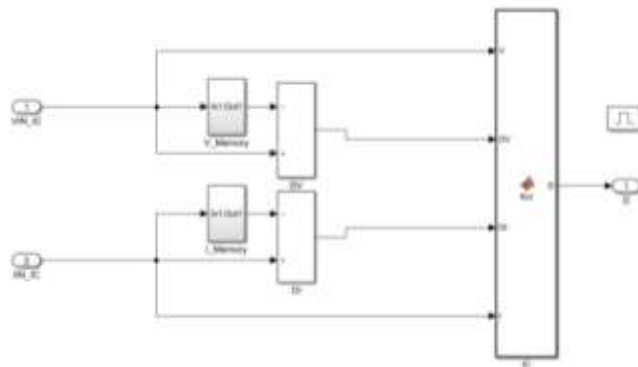
Rüzgâr ve güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretimi yapan sistemler üzerinde pek çok tekniği içeren MPPT algoritmaları uygulanmaktadır (Paul ve Thomas, 2014).

Atmosferde ve yükte meydana gelen değişimlere karşı maksimum güç noktasına ulaşma konusunda kanıtlanmış yöntemlerden bir diğeri ise artımlı iletkenlik yöntemini içeren MPPT algoritmalarıdır (Ahmadzadeh ve Markadeh, 2017). IC tekniğinde de panel akım ve gerilim değerleri üzerinden işlem yapılır. P&O'dan farklı olarak IC'de, güç değerleri yerine gerilim ve akım değerlerindeki değişimler üzerinden işlem yapılır. Şekil 3.21'de IC tekniğinin işletim akış şeması verilmiştir.



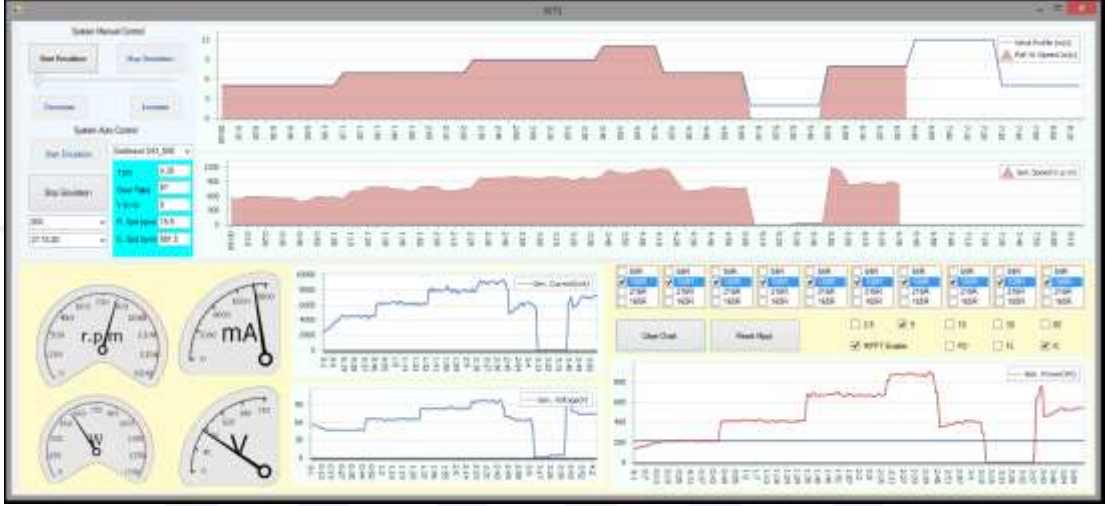
Şekil 3.21. Çalışma kapsamında oluşturulan IC algoritmasına ait akış şeması

Akış şemasının işletilebilmesi için Simulink ortamından faydalanılarak bir model oluşturulmuştur. Gömülü sisteme yüklenecek olan IC tekniğini içeren algoritmaya ait Simulink modeli Şekil 3.22'de verilmiştir.



Şekil 3.22. Çalışma kapsamında oluşturulan IC algoritmasına ait Simulink modeli

Oluşturulan model ile akım gerilim okuma kartından elde edilen analog değerler Nucleo board'a ADC kanalları üzerinden uygulanmakta ve MPPT işletimi için sayısal verilere dönüştürülmektedir. Verilerin daha sağlıklı işletilebilmesi için sayısal filtreleme ve çeşitli matematiksel işlemlerden geçirilir. IC tekniğinin işletilmesi sonucunda kullanıcı arayüzü üzerinden gözlemlenen elektriksel ve mekaniksel grafikler Şekil 3.23'te verilmiştir.

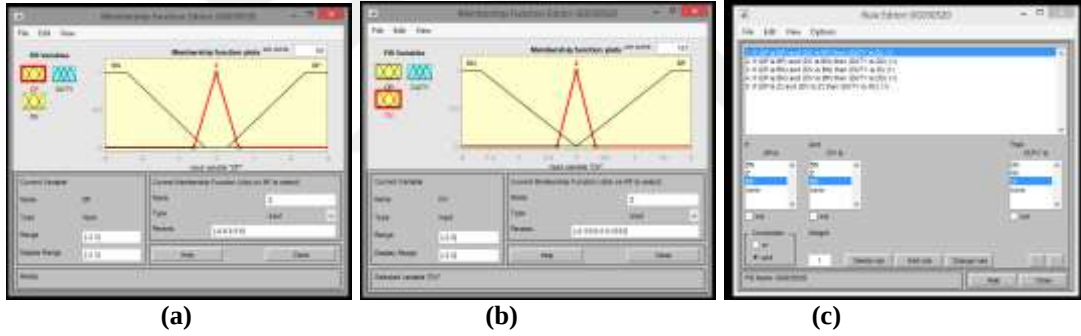


Şekil 3.23. IC kontrol tekniğinin işletilmesi sonucunda elde edilen elektriksel ve mekaniksel grafikler

Bulanık mantık denetleyicisi (FLC) içeren MPPT tekniği:

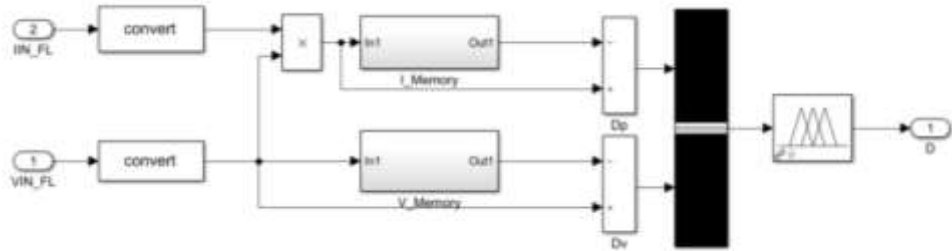
Literatür araştırmasında FLC tekniğini içeren MPPT algoritmaları ve bu algoritmaların kullanıldığı sistemler ve çalışmalar örneklenecek olursa; (Salem ve ark., 2019) yaptıkları çalışmada FLC tekniğini içeren MPPT algoritmasını sabit mıknatıslı senkron generatör üzerinde uygulamıştır. Çalışma sonucunda maksimum güç noktasında daha az salınım, bu noktaya daha hızlı ulaşım ve verimde artış sağlandığını gözlemlemişlerdir. Diğer bir çalışmada ise (Mekki ve ark., 2020) sabit mıknatıslı senkron generatöre ait manyetik akı ve tork bilgileri üzerinden FLC tekniğini içeren MPPT algoritması geliştirmişler ve değişken hızlı rüzgâr profili üzerinden çalışmalar yapmışlardır. Benzer olarak (Belmokhtar ve ark., 2014) çalışmalarında FLC tekniği için giriş değerleri olarak elektromanyetik torku ve generatör devir bilgisini kullanarak maksimum güç noktasına ulaşmayı amaçlamışlardır. (Priyadarshi ve ark., 2017), (Bihari ve ark., 2019) çalışmalarında rüzgâr ve güneşi temel alan hibrit enerji sistemi üzerinde FLC tekniğini içeren MPPT algoritması üzerinde çalışmışlardır. (Benaouinate ve ark.,

2020) çalışmalarında asenkron motor ve sabit mıknatıslı senkron generatör içeren bir rüzgâr emülatörü üzerinde FLC tekniğini içeren MPPT algoritmasını geliştirmişler ve DA barasının gerilimini PI kontrol ile sabit tutmayı amaçlamışlardır. Rüzgâr türbini üzerinde yapılan bir diğer çalışmada (Parvin ve ark., 2019) şebeke etkileşimli bir enerji sistemi üzerinde FLC tekniğini içeren MPPT algoritmasını incelemişlerdir. Çalışmada, eviricinin çıkış akımı ve gerilimi üzerinden maksimum güç noktasına erişebilmek için araştırmalar yapmışlardır. IC ve P&O'ya benzer şekilde panel akımı ve gerilimi üzerinden MPPT algoritması işletiminde kullanılan yöntemlerden bir diğeri de bulanık mantık kontrolüdür. Bulanık mantık denetleyicisi giriş değişkenlerini kural tablosu üzerinden karşılaştırarak çıkış değişkenini oluşturur. Generatör gerilim değişimi Dv ve generatör güç değişimi Dp giriş değişkenleri olarak kullanılmıştır. Bu değişkenlere ait üye fonksiyonu Şekil 3.24(a) ve (b)'de verilmiştir. Bu iki değişkenin karşılaştırılarak anahtarlama frekansının doluluk oranı d 'nin belirlenmesi için kullanılan kural tablosu da Şekil 3.24(c)'de verilmiştir.



Şekil 3.24. FL kontrolünü oluşturan fonksiyon üyeleri, (a) Güçteki değişim miktarı (DP), (b) Gerilimdeki değişim miktarı (DV), (c) anahtarlama sinyali çalışma oranı (Duty)'nin belirleneceği DP ve DV'ye bağlı kural tablosu

Oluşturulan kural tablosunun işletilebilmesi için Simulink ortamında bir model tasarlanmıştır. Bulanık mantık denetleyicisi için tasarlanan Simulink modeli Şekil 3.25'de verilmiştir.



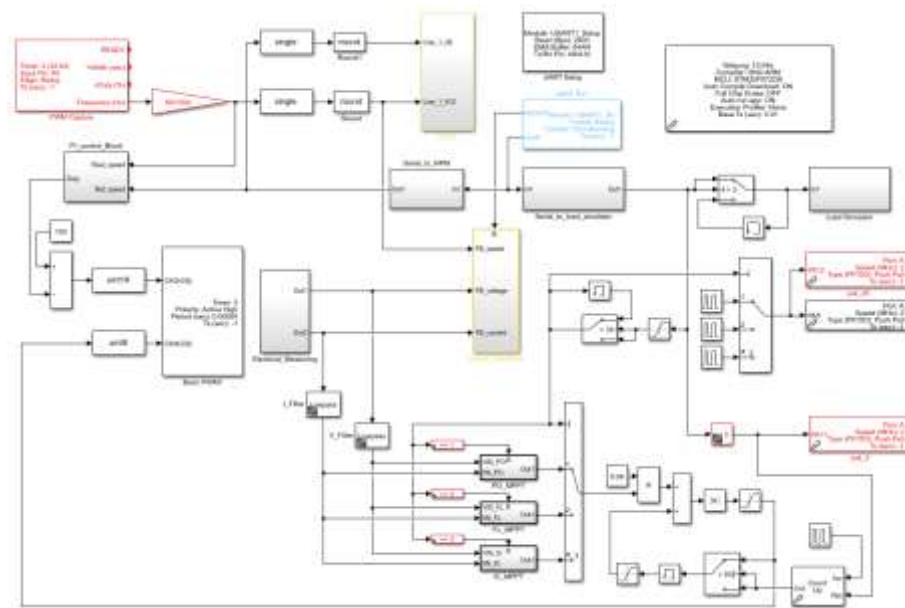
Şekil 3.25. Çalışma kapsamında oluşturulan FLC tekniğini içeren MPPT algoritmasına ait Simulink modeli

P&O, IC tekniklerinde olduğu gibi oluşturulan model MPPT algoritmasını işletebilmek için akım ve gerilim bilgilerine ihtiyaç duyar. Bu analog bilgiler, akım gerilim okuma kartından elde edilerek ADC kanalları üzerinden Nucleo geliştirme kartına uygulanarak sayısal verilere dönüştürülürler. MPPT algoritmasının daha sağlıklı işletilebilmesi için sayısal filtreleme ve bir dizi işlemlerden geçirilirler. FLC kontrol tekniğinin işletilmesi sonucunda kullanıcı arayüzü üzerinden gözlemlenen elektriksel ve mekaniksel grafikler Şekil 3.26’da verilmiştir.



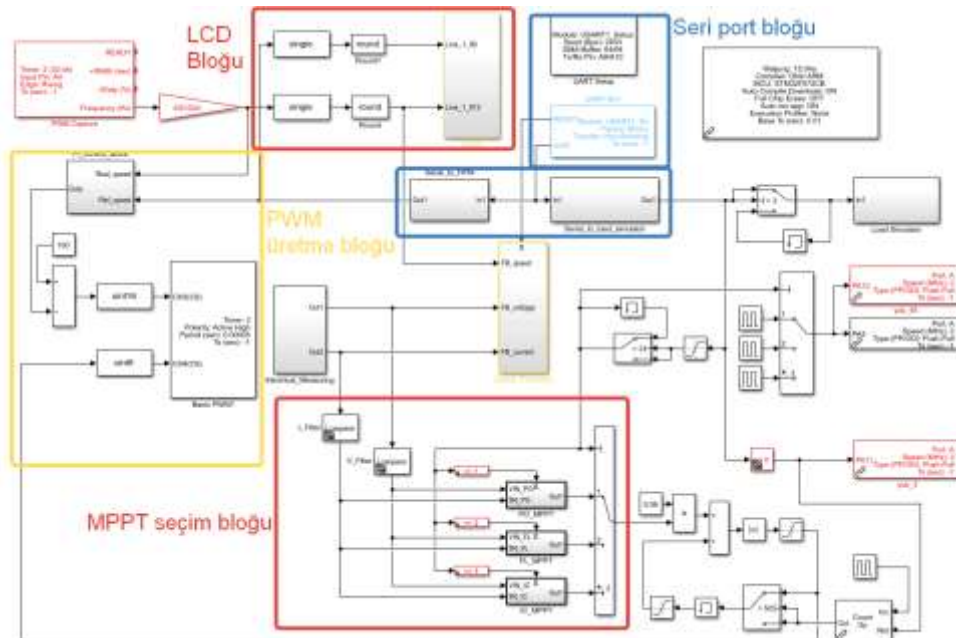
Şekil 3.26. FLC kontrol tekniğinin işletilmesi sonucunda elde edilen elektriksel ve mekaniksel grafikler

Tasarımı, analizi ve geliştirmeleri yapılan rüzgâr türbini emülatörü ve üç tekniğe dayanan MPPT algoritmalarını içeren tasarım Simulink ortamında modellenmiştir. Modellemesi yapılan rüzgâr türbini emülatörü tüm bileşenleri ile Şekil 3.27’de verilmiştir.



Şekil 3.27. Çalışma kapsamında oluşturulan rüzgâr türbini emülatörünün Simulink modeli

Rüzgâr türbini emülatörü modeli çeşitli blokların bir araya getirilmesi ile oluşturulmuştur. Modeli meydana getiren bileşenleri seri port haberleşme bloğu, artımlı enkoder sayıcı bloğu, karakter LCD ekran bloğu, MPPT seçme bloğu, dönüştürücüler için PWM üretici bloğu ve diğer bloklar şeklinde sıralanabilir. Rüzgâr türbini emülatörünü meydana getiren bloklar Şekil 3.28’de verilmiştir.



Şekil 3.28. Rüzgâr türbini emülatörünün Simulink modeli bileşenleri

Ayrıca tasarlanan Simulink modeli Nucleo geliştirme borduna ait dijital giriş-çıkış blokları, analog giriş bloğu ve PWM çıkış bloğu da yer alır. Oluşturulan Simulink modeli gömülü sistem kodlayıcı (Embedded Coder) sayesinde derlenerek Nucleo geliştirme kartına yüklenmiş ve çalışması üzerinde analizler ve geliştirmeler yapılmıştır.

3.3. Güneş Simülatörü Tasarımı ve Bileşenleri

Tez kapsamında önerilen hibrit enerji sisteminde güneş enerjisi kaynağı gibi davranacak olan bileşen güneş dizi simülatörü (SAS)'dır. Güneş dizi simülatörleri kendine has akım-gerilim (I-V) karakteristiği olan özel DA güç kaynaklarıdır (Gowrishankara ve ark., 2011). Ayrıca güneş dizi simülatörleri değişken hava şartları ve değişken yükler altında gerçek PV paneller gibi davranabilirler (Jassim ve Jasim, 2018). Güneş dizi simülatörleri sayesinde PV panellerin test maliyetlerini aza indirmek mümkündür (Chang ve ark., 2013). Güneş dizi simülatörleri uzay uygulamalarında da kullanılabilir. (Jin ve ark., 2018) yaptıkları çalışma ile mevcut güneş dizi simülatörlerinin uzay araçlarının güç denemelerinde yeterli olmayacağını savunmuşlar ve daha verimli bir güneş dizi simülatörü üzerinde çalışmışlardır. (Gadelovits ve ark., 2014) çalışmalarında düşük maliyetli ve hızlı prototip güneş simülatörü üzerinde geliştirmeler yapmışlardır. Diğer çalışmalarında ise yüksek verimli ve hızlı tepki sürelerine sahip bir sistem üzerinde çalışmışlardır. Yaptıkları çalışma ile PV panellerin kaynak olarak kullanıldığı evirici yapıları üzerinde MPPT algoritmalarına dair araştırmalar yapmak için güneş dizi simülatörlerinden faydalanmışlardır (Farahani ve ark., 2020).

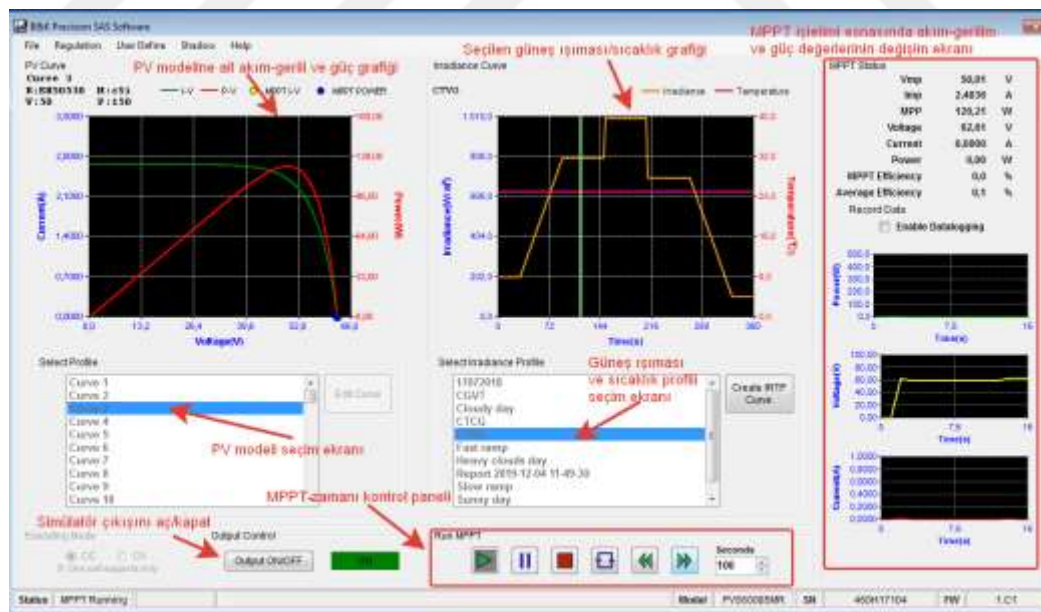
3.3.1. Güneş simülatörünün genel yapısı ve kullanıcı arayüzü

Tez kapsamında, BK Precision firmasının ürünü olan PVS60085MR modeli temin edilmiştir. Temini yapılan güneş dizi simülatörü Şekil 3.29'da verilmiştir.



Şekil 3.29. Tez kapsamında temini yapılan güneş dizi simülatörü

Bu ürün hem programlanabilir DA güç kaynağı gibi çalışırken hem de arayüz sayesinde güneş dizi simülatörü gibi çalışabilmektedir. Güneş dizi simülatörü arayüz kurulmadan veya kullanmadan, üzerinde bulunan buton ve diğer araçlar ile normal bir güç kaynağı gibi kullanılabilir. Güneş dizi simülatörü 600 V/8,5 A değerlerinde 2400 W sınırlandırılmış güce sahiptir. Yani bu kaynak ile 600 V çıkışa karşılık 4 A veya 280 V çıkışa karşılık 8,5 A'lık akım sağlayabilir. Güneş simülatörünün güneş dizi simülatörü olarak kullanılmasına imkân sağlayan arayüz ve bileşenleri Şekil 3.30'da verilmiştir.



Şekil 3.30. Tezde kullanılan güneş simülátörünün güneş dizi simülátörü olarak çalışmasına imkân sağlayan kullanıcı arayüzü ve bileşenleri

Temin edilen güneş simülatörü ile tümleşik olduğundan kullanıcı arayüzü yeniden tasarlanmamıştır. Arayüz sayesinde çeşitli firmaların PV panelleri ile çalışmak

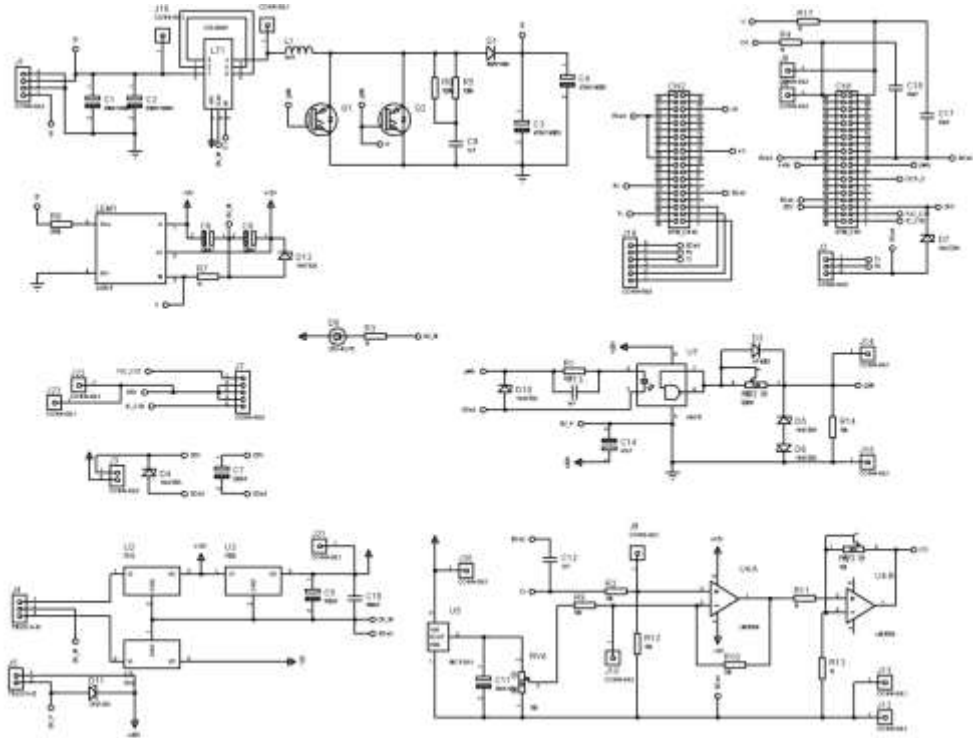
mümkündür. Arayüzde kayıtlı olan PV paneller dışında kullanıcı isterse kendine özgü paneli de oluşturabilmektedir. Arayüzün sunduğu güneş/sıcaklık grafiği dışında kullanıcının kendisi de grafikler oluşturabilmektedir. Arayüz aynı zamanda verim ve diğer nitelikleri bakımından MPPT algoritmalarının analiz edilmesine imkân sağlayan bir araca da sahiptir.

3.3.2. DA/DA dönüştürücü birimi

Güneş simülatöründen elde edilen DA türündeki elektrik enerjisi üzerinde MPPT algoritmalarını işletebilmek için, rüzgâr türbini emülatöründe kullanılan dönüştürücü yapısına benzer bir DA-DA dönüştürücü tasarlanmıştır. Bu dönüştürücü de diğer tasarımı olduğu gibi izolesiz artıran DA-DA dönüştürücü yapısındadır. Tasarımı yapılan birim;

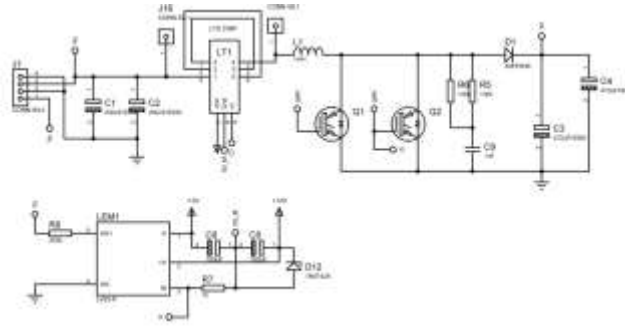
- Alan etkisi prensibine göre çalışan izoleli akım-gerilim okuma sensörleri ile dönüştürücü girişindeki akım ve gerilim değerlerinin ölçümünü yapar.
- Kullanıcı tarafından manuel olarak seçilen MPPT algoritmasına göre girdileri değerlendirir.
- DA-DA dönüştürücünün ihtiyaç duyduğu sürme sinyali üretir.

Tasarlanan DA-DA dönüştürücü bütün bu işlemleri 32-bit mikrodnetleyici sayesinde yapar. Güneş simülatörü için yapılan dönüştürücü tasarımına ait şeması ve bileşenleri Şekil 3.31’de verilmiştir.



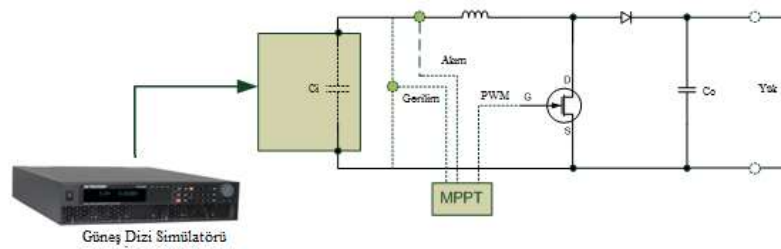
Şekil 3.31. Tasarımı yapılan güneş simülátörü kontrol kartına ait devre şeması

Tasarlanan dönüştürücü üzerinde; elektriksel parametrelerin elde edildiği akım ve gerilim sensörlerini içeren akım-gerilim okuma katı, analog sinyallerin filtre edildiği filtre katı, MOSFET yarı iletken anahtarlama elemanının sürülmesini sağlayan optik izoleli sürücü katı, çeşitli seviyeden gerilimlerin regüle edildiği gerilim regüle katları ve diğer pasif devre elemanlarını içerir. Şekil 3.32’de akım gerilim okuma katı ve güç katını içeren devre şeması verilmiştir. Güç katı iki adet birbirine paralel bağlanmış IXYS firmasının ürünü olan IXFH60N50P3 modeli MOSFET’ten oluşmuştur. Bu MOSFET’lerin paralel bağlanması ile güç katından çekilecek akımın anahtarlar arasında yarı yarıya bölünmesi ve anahtarlar üzerinde oluşan stresin azalması sağlanırken aynı zamanda daha yüksek değerdeki akımı kontrol edebilecek pahalı bir anahtarlama elemanı yerine iki adet daha uygun fiyatlı anahtarlama elemanı ile ihtiyaç duyulan akım değeri sağlanabilir.



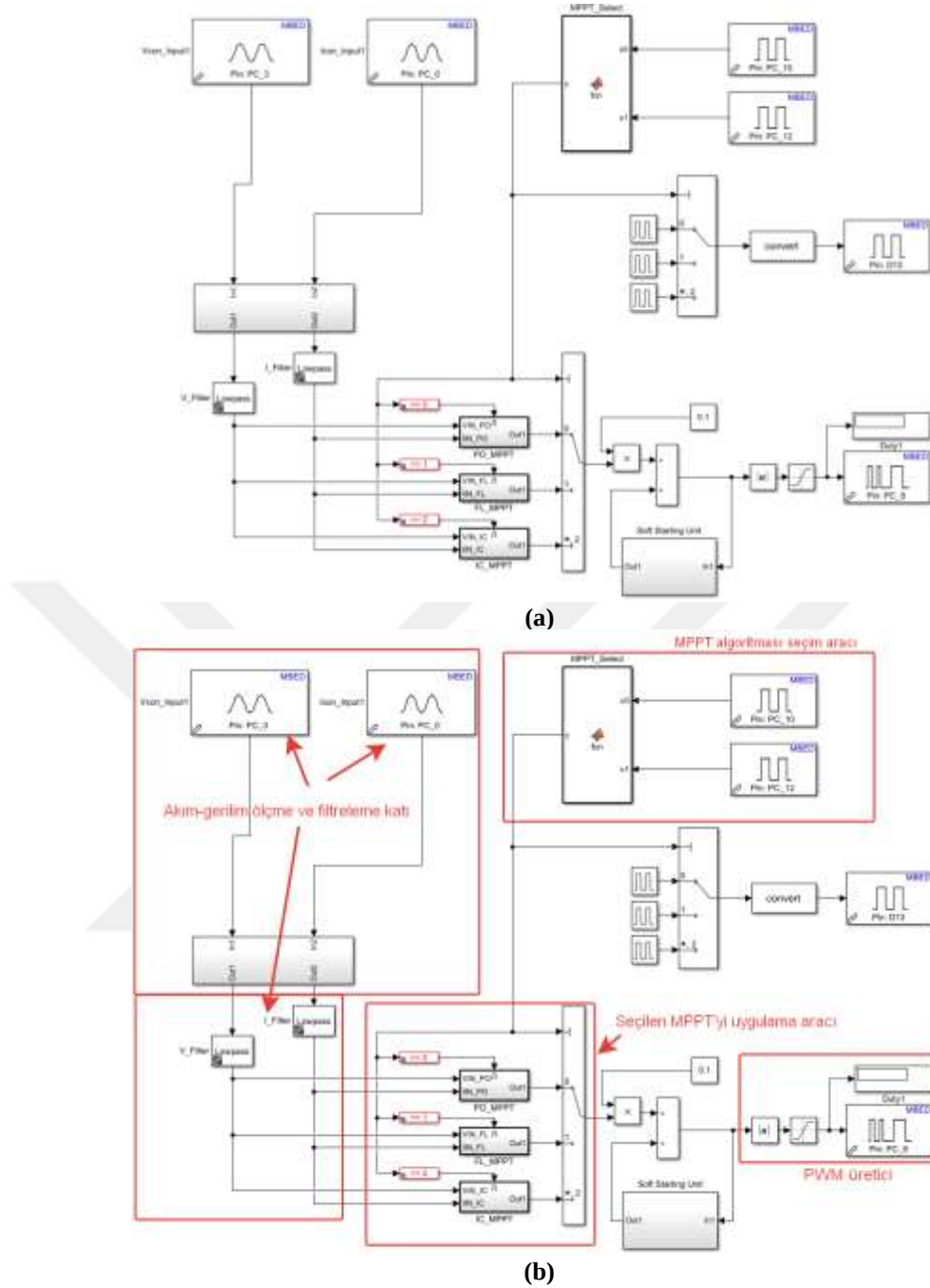
Şekil 3.32. Tasarlanan DA-DA dönüştürücü biriminin güç katı ve akım-gerilim okuma katı

MPPT algoritmalarının işletilebilmesi için gerekli akım ve gerilim bilgisi, yine bu katta bulunan alan etkisi prensibine göre çalışan ve izoleli ölçüm yapabilen LEM firmasına ait akım ve gerilim sensörlerinden elde edilmiştir. Bu sensörler güneş dizi simülátörünün çıkışındaki elektriksel değerleri ölçerler. Bulundukları konum aynı zamanda DA-DA dönüştürücünün girişidir. DA-DA dönüştürücüsü üzerindeki akım-gerilim okuma sensörlerinin konumu ve MPPT algoritması için gerekli konfigürasyon Şekil 3.33'te görülen blok şema ile verilmiştir.



Şekil 3.33. Güneş simülátörü üzerinde MPPTişletimi için gerekli konfigürasyona ait blok şema

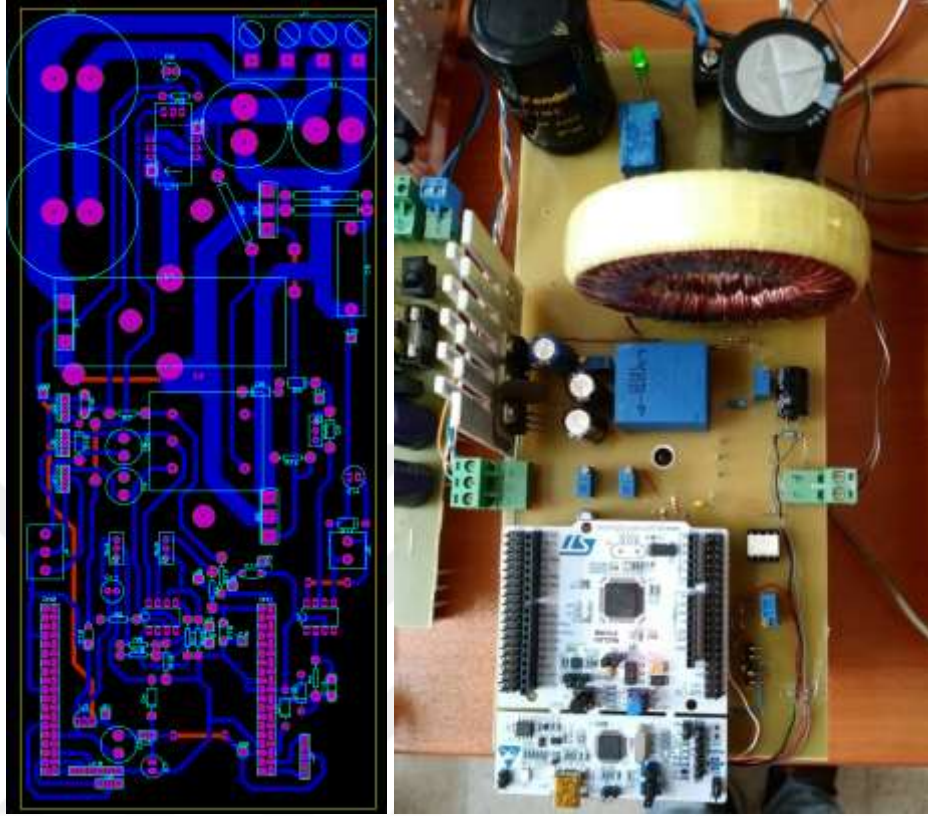
Kullanılan sensörlerden akım sensörü 25 A'e kadar ölçüm yapabilirken gerilim sensörü 500 V'a kadar ölçüm yapabilmektedir. Ayrıca sensörler hem AA'da hem de DA'da kullanılabilir. MPPT algoritması girişine uygulanan akım ve gerilim bilgisini kullanarak, yarı iletken anahtarlama elemanlarını sürmek için PWM sinyalini üretir. Üretilen bu sinyal 20 kHz frekansa ve 3,3 V genliğe sahiptir. Anahtarlama frekansının doluluk oranı maksimum güç noktasına bağlı olarak % 10 ile % 85 arasında değişir. Üretilen PWM sinyalinin genliği olan 3,3 V MOSFET'leri sürmek için yeterli değildir. Kullanılan MOSFET'lerin katalog bilgisinde, MOSFET'lerin sürülebilmesi için ideal sinyal genliğinin 20 V civarında olması gerektiği belirtilmiştir. Mikrodenetleyicinin üretmiş olduğu 3,3 V'luk sürme sinyali Şekil 3.34'te verilen yapı sayesinde ideal sürme sinyaline dönüştürülür.



Şekil 3.36. Güneş simülâtörü için tasarlanan sistemin Simulink modeli

Güneş simülâtörü için tasarlanan DA-DA dönüştürücü yapısı rüzgâr türbini emülâtörü için tasarlanan dönüştürücü ile güç ve topoloji bakımından aynıdır. Bu maksatla artıran dönüştürücü yapısına ait denklemler için (3.4), (3.5) ve (3.6) incelenebilir. Ayrıca dönüştürücü parametreleri için Çizelge 3.4 incelenebilir. Şekil 3.31’de verilen devre şeması üzerinden baskı devre (PCB) tasarımı yapılmıştır. Tasarımı yapılan baskı devre şeması Şekil 3.37(a)’da verilmiştir. Baskı devre tasarımı daha sonrasında kazıma tekniğine göre bakır plakete aktarılmıştır. Bakır plaket üzerine

devre elemanları lehimlenmiş ve Şekil 3.37(b)'de verilen rüzgâr emülatörü kontrol devresi fiziksel olarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.37. Güneş simülatörü çıkışına başlanan DA-DA dönüştürücü yapısına ait baskı devre şeması tasarımı

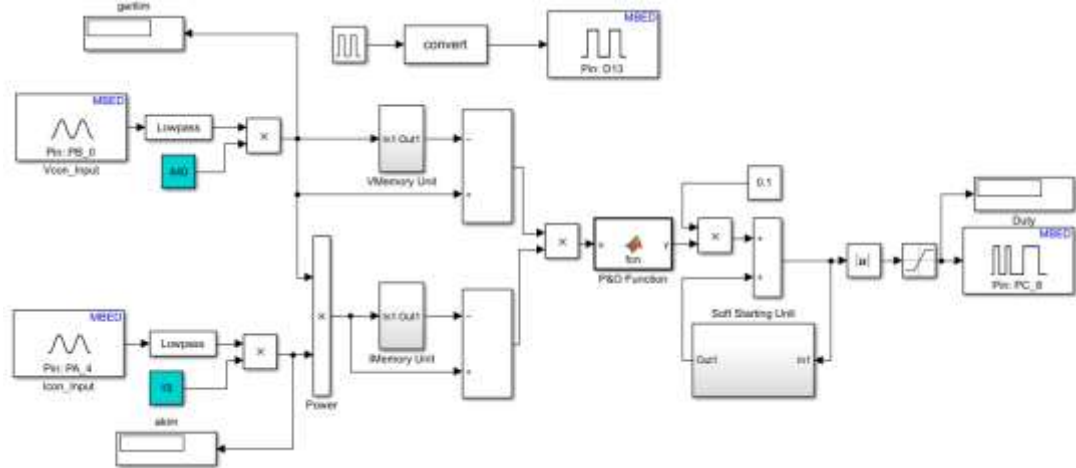
3.3.3. Güneş simülatörü üzerinde MPPT tekniklerinin geliştirilmesi

Bu bölümde güneş simülatörü için tasarlanan DA-DA dönüştürücü üzerinde MPPT tekniklerinin geliştirilmesi aşamalarından bahsedilecektir. Her bir algoritma ayrı ayrı Simulink modelleri üzerinden geliştirilmiş, en sonunda tek bir Simulink modeline dönüştürülerek detayları Şekil 3.36'da verilen en son haline getirilmiştir.

Değiştir ve Gözle (P&O) MPPT Algoritmasının Uygulaması:

Geleneksel MPPT algoritmalarından olan P&O tekniği, analog veya dijital cihazlar üzerinden kolaylıkla uygulanabilen (Kota ve Bhukya, 2017) bir yapıdadır. P&O tekniğini kullanan MPPT algoritması, ucuz, kolay uygulanabilen, verimi iyi, geliştirmelere uygun ve hızlı değişen çevresel şartlara kolayca uyum sağlayabilen bir

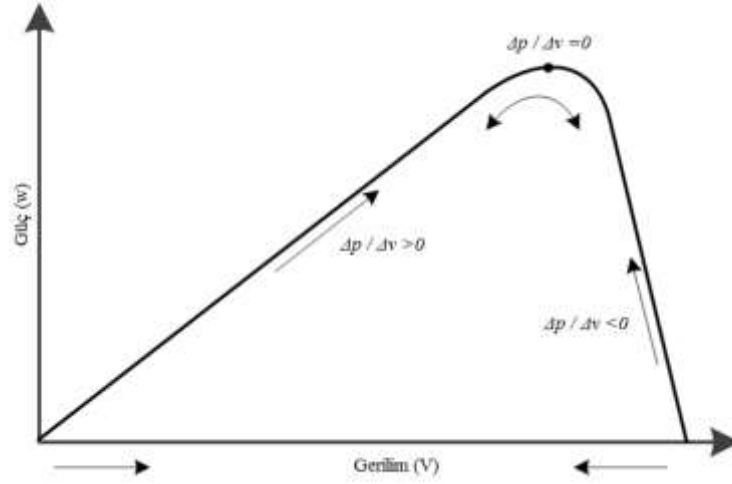
tekniktir (Harrag ve Messalti, 2019). Bu nitelikleri bakımından literatürde P&O tekniğini içeren çok sayıda algoritma yer almakta ve bu algoritmaların PV enerji sistemleri üzerindeki performans analizleri yapılmaktadır (Sirisha ve ark., 2019). P&O tekniği o kadar popülerdir ki akademik çalışmalarda araştırmacılar bu tekniği yeniden formülize ederek (Abdel-Salam ve ark., 2020) analizlerini yapmakta, diğer teknikler ile bir araya getirerek çeşitli hibrit yapıları MPPT algoritmalarına dönüştürmektedir. (Farzaneh, 2020) akademik çalışmasında modifiye ateş böceği algoritması, ANFIS ve P&O tekniğinin olumlu yönlerini bir araya getirerek PV panellerden oluşan enerji sistemi üzerinde araştırmalar yapmışlardır. Matlab ortamında yaptıkları benzetim ile çevresel değişimlere 0,2 saniyede tepki verdiği sonucuna ulaşmışlardır. P&O tekniği sadece şebekeye veya AA yüklerine enerji sağlayan sistemlerde değil aynı zamanda akü/batarya gruplarının şarj işlemlerinde de kullanılmaktadır. (Lakshmi ve ark., 2020) yaptıkları çalışma ile P&O ve oransal-integral (PI) kontrol ile şarj kontrol ünitesi üzerinde MPPT çalışması yapmışlardır. Tez çalışması kapsamında P&O tekniğini içeren Simulink modeli oluşturulmuş ve üzerinde geliştirmeler yapılmıştır. P&O tekniğini içeren MPPT algoritmasına ait Simulink modeli Şekil 3.38’de verilmiştir.



Şekil 3.38. Tez kapsamında geliştirilen P&O kontrol tekniğini içeren Simulink modeli

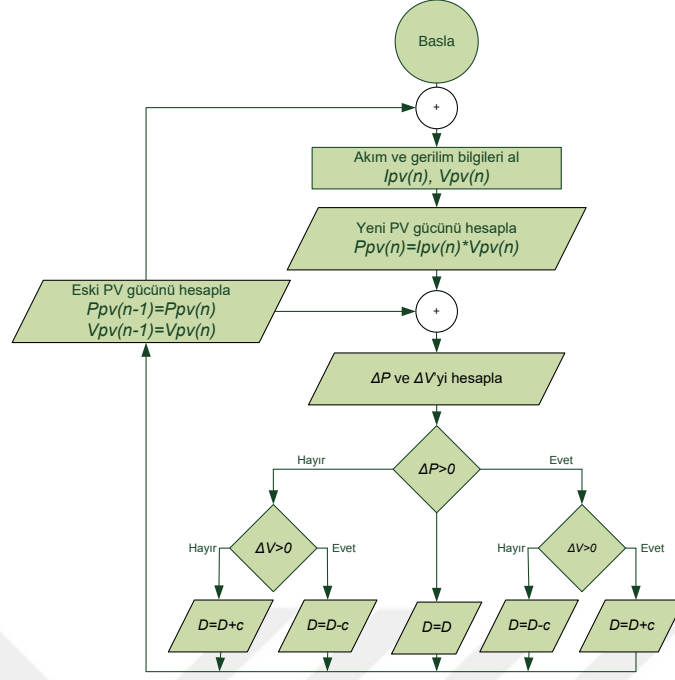
P&O tekniğini içeren MPPT algoritması şu şekilde çalışır; PV panele ait elektriksel bilgilerden olan akım ve gerilim değeri analog sayısal dönüştürücü (ADC) üzerinden sayısal verilere dönüştürülür. Okunan bu iki değer üzerinden panel gücü P_{pv} ve panel gerilimi V_{pv} elde edilir. Bu değerler hafızaya kaydedilerek çıkış frekansının çalışma oranı d , P&O adım değişkeni olan c kadar değiştirilir (artırılır veya azaltılır) bu işlemten sonra yeniden akım ve gerilim ölçümü yapılarak yeniden güç hesaplaması

yapılır. Önceki güç değeri ile yeni güç değeri karşılaştırılarak Δp ve Δv değerleri hesaplanır. Δp ve Δv 'ye göre maksimum güç noktasının konumu için Şekil 3.39'da verilen grafik incelenebilir.



Şekil 3.39. ΔP ve ΔV 'ye bağlı maksimum güç noktasının konumunu tespit edilmesini sağlayan PV paneli ait güç-gerilim eğrisi

Bu hesaplama sonunda Δp ve Δv oranlanarak anahtarlama frekansının çalışma oranı d 'nin değişimi sağlanır. Δp ve Δv 'ye bağlı D 'nin değişimi Şekil 3.40'da verilen akış şeması üzerinden gerçekleştirilir. Geliştirilen Simulink modeli Embedded Coder yardımı ile STM32F411RE Nucleo Board içerisine gömülmüş ve geliştirmeler bu platform üzerinden yapılmıştır. Geliştirilen Simulink modelinden de anlaşılabacağı üzere, panele ait akım ve gerilim değerleri analog kanallar üzerinden geliştirme kartına bağlanmıştır ve ADC ile okunarak alçak geçiren filtre ile gürültülerden arındırılmıştır. Filtre çıkışındaki değer gerçek değere uydurulmak maksadıyla belirli bir sabit ile çarpılmıştır. Elde edilen akım ve gerilim değeri P&O tekniğini içeren Matlab fonksiyonuna uygulanmıştır.



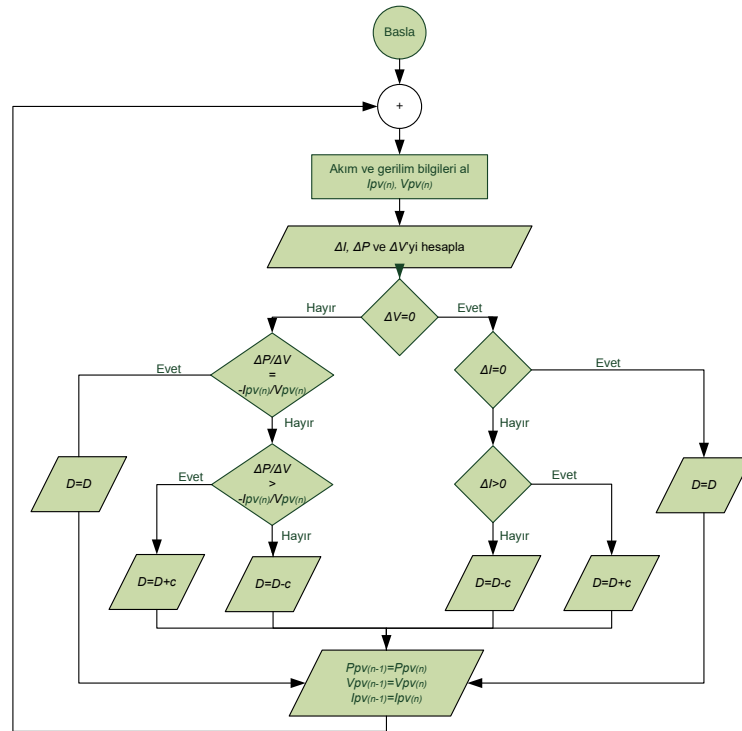
Şekil 3.40. Tez kapsamında uygulaması yapılan P&O tekniğine ait akış şeması

Fonksiyon çıkışı y , Δp ve Δv 'ye bağlı olarak -1, 0, 1 değerlerinden birini alır. Fonksiyon çıkış değeri y , P&O adım sabiti olan c ile yani 0,1 ile çarpılarak bir önceki d ile toplanır. d değeri 20 kHz'lik anahtarlama frekansının doluluk/çalışma oranıdır. Elde edilen anahtarlama frekansı güç katına uygulanarak panelden elde edilen enerjinin yüke aktarılması sağlanır.

Artımlı İletkenlik (IC) MPPT Algoritmasının Uygulaması:

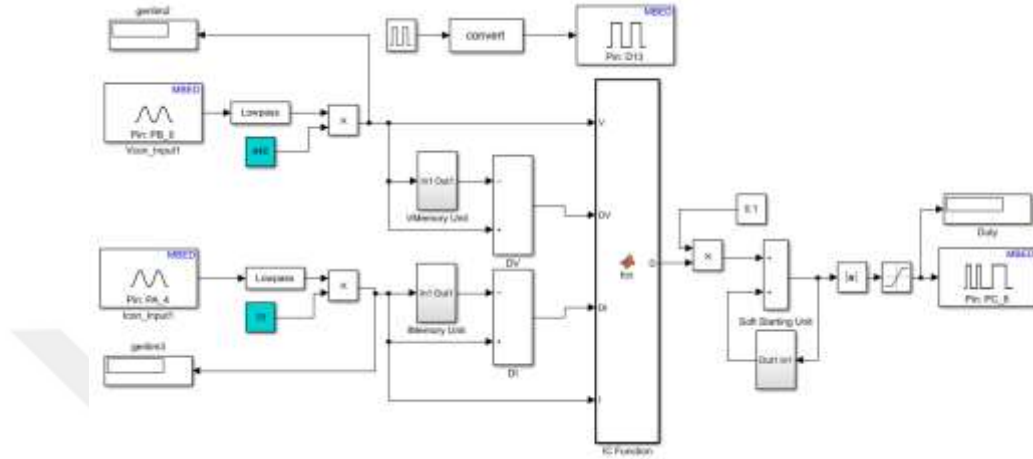
Artımlı iletkenlik tekniği ile oluşturulan MPPT algoritması, yapı olarak basittir ve dış ortam değiştiğinde anlık akım, gerilim ve güç artışını ayırt edebilir ve böylece izleme verimliliğini artırabilir (Shang ve ark., 2020). Ancak pek çok diğer algoritmalarda olduğu gibi IC tekniğini temel alan MPPT algoritmasında da maksimum güç noktasında salınımlar meydana gelir. Bu salınımları azaltmak amacıyla (Khan ve ark., 2020) değişken adımlı IC algoritması üzerinde çalışmışlar ve algoritmanın geliştirilmesi için PID ve parçacık sürü optimizasyonu (PSO) gibi diğer tekniklerden de faydalanmışlardır. (Monteiro ve ark., 2019) yaptıkları çalışma ile kırsal alanlarda PV panellerin enerji kaynağı olarak kullanıldığı bir fazlı enerji sistemleri üzerinde çalışmışlardır. Bir fazlı eviricilerin AA yüklerini beslemesi esnasında meydana gelen salınımları en aza indirmek ve bu sistemlerden maksimum oranda faydalanmak için

değişken adımli IC algoritması üzerine çalışmışlardır. Diğer bir çalışma ile (Alsumiri, 2019), IC tekniğinin geliştirilmesi maksadıyla matematiksel kalıntı teoremini kullanarak parametrik olmayan bir MPPT tekniği geliştirmeyi amaçlamışlardır. Artımlı iletkenlik algoritması uygulaması kolay bir yapıda olduğu için araştırmacılar bu tekniği temel alan MPPT algoritmalarını pek çok alternatif enerji kaynağına uygulamışlardır. (Necaibia ve ark., 2019) çalışmalarında PV panelleri kullanarak oluşturulmuş bir enerji sistemi üzerinde düşük maliyetli bir uygulama ile otomatik skalalı IC algoritmasının analizini yapmışlardır. Önerdikleri yaklaşım sonucunda, güneş ışımasının hızlı değişimine karşılık geleneksel IC yönteminden daha yüksek bir MPPT verimi ve daha kısa yakınsama süreleri elde etmişlerdir. Artımlı iletkenlik PV paneller ile enerji üretimi yapan sistemlerin dışında hidrojen kaynaklı yakıt pillerine uygulanan MPPT algoritmalarında kullanılırken (Harrag ve Messalti, 2017) küçük ölçekli elektromanyetik titreşiminden enerji üretiminde de kullanılmıştır (Leicht ve Manoli, 2017). P&O'da olduğu gibi IC de hibrit enerji sistemlerinde MPPT algoritması olarak kullanılmaktadır. (Harrag ve Bahri, 2017) yaptıkları çalışmada değişken adımli IC tekniğinin yakıt pilleri üzerindeki verim analizini yapmıştır. Tez kapsamında, IC tekniği ile oluşturulan MPPT algoritması panelin elektriksel parametrelerini kullanır. Şekil 3.41'de IC tekniğine ait akış şeması verilmiştir.



Şekil 3.41. Tez kapsamında uygulaması yapılan IC tekniğine ait akış şeması

Simulink ortamında geliştirilen IC modeli Embedded Coder yardımı ile STM32F411RE Nucleo Board içerisine aktarılmıştır. IC üzerine yapılan geliştirmeler bu platform üzerinden yapılmıştır. Simulink ortamında geliştirilen IC kontrol tekniğini içeren Simulink modeli Şekil 3.42’de verilmiştir.



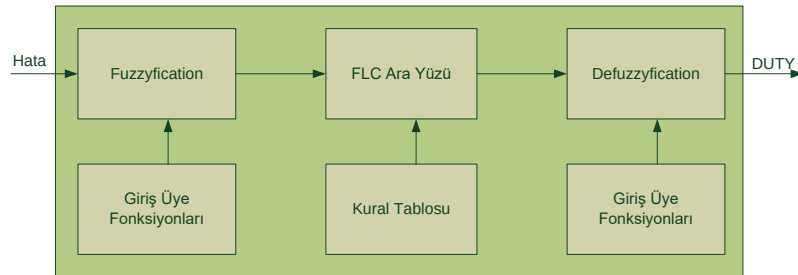
Şekil 3.42. Tez kapsamında geliştirilen IC kontrol tekniğini içeren Simulink modeli

Verilen modelden de anlaşılacağı üzere, panele ait akım ve gerilim değerleri analog kanallar üzerinden ADC ile okunarak alçak geçiren filtre ile gürültülerden arındırılmıştır. Okunan değerler, gerçek akım ve gerilim değerine uydurulmak amacıyla belirli bir sabit ile çarpılmıştır. Elde edilen akım ve gerilim değeri IC tekniğini içeren Matlab fonksiyonuna uygulanmıştır. Fonksiyon çıkışı (y), Δp , ΔI ve Δv 'ye bağlı olarak -1, 0, 1 değerlerinden birini alır. Fonksiyon çıkış değeri (y), IC adım sabiti olan c ile yani 0,1 ile çarpılarak bir önceki d ile toplanır. d değeri 20 kHz'lık anahtarlama frekansının doluluk/çalışma oranıdır. Elde edilen anahtarlama frekansı güç katına uygulanarak panelden elde edilen enerjinin yüke aktarılması sağlanır.

Bulanık Mantık Denetleyicisi (FLC) MPPT Algoritmasının Uygulaması:

Bulanık mantık, sistemin matematiksel modeline ihtiyaç duyulmayan, pek çok değişken girdisine ve bu değişkenlere göre çok hızlı dinamiklere sahip olabilen bir tekniktir (Boukezata ve ark., 2016). FLC tekniğini içeren MPPT algoritmaları IC ve P&O'dan farklı olarak PV panellerin elektriksel parametreleri dışında güneş ışınması (G) ve panel sıcaklığı (T) gibi dış ortama ait bilgiler ile de maksimum güç noktası takibi yapabilirler. (Yılmaz ve ark., 2018) yaptıkları çalışma ile güneş ışınmasının 700-1000

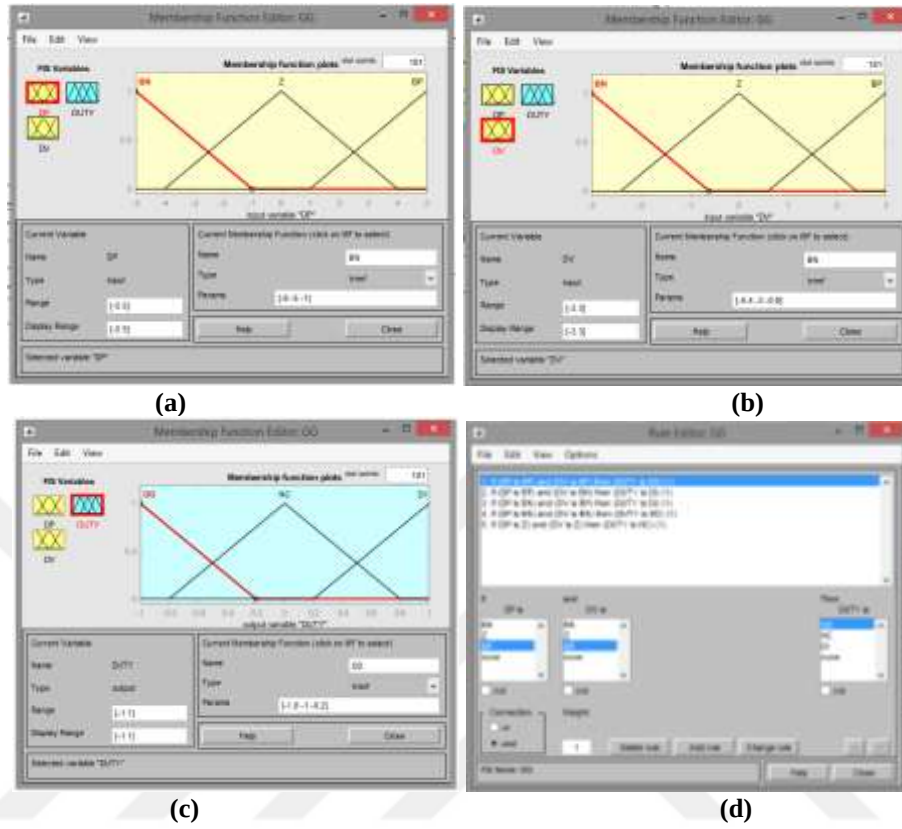
W/m^2 arasında değişimine karşılık panel sıcaklığının 25-60 °C değişimini esas alan bir senaryo ile Matlab-Simulink ortamında FLC tekniğini temel alan MPPT denemeleri yapmışlardır ve denemeler sonunda MPPT veriminin % 94,8 ile % 99,4 arasında değiştiğini gözlemlemişlerdir. Yapılan bir diğer çalışma ile (Garraoui ve ark., 2017) FLC ve Kayan Kipli Denetleyici (Sliding Mode Controller, SMC) kullanarak, PV enerji sistemlerinde hava şartlarının ve yükün değişimine göre panelin maksimum güç noktasına ulaşmasını hedeflemişlerdir. (Noor ve ark., 2016) yaptıkları çalışmada PV paneller tarafından beslenen eviriciler üzerinde FLC temelli MPPT algoritması geliştirmişlerdir. Çalışmalarında eviricin çıkış gerilimi üzerinde kontroller yaparak, eviricinin modülasyon indeksi ve faz açısını değiştirmeyi hedeflemişlerdir. AA yüklerinin kullanıldığı diğer bir çalışmada (Kandemir ve ark., 2018) yaptıkları çalışma ile IC ve bulanık mantık denetleyicisini içeren MPPT algoritmaları ile 150W güce sahip bir PV panel üzerinde MPPT geliştirmeleri yapmışlardır. FLC tekniğinin diğer teknikler ile hibrit bir yapı oluşturacak şekilde bir araya getirilmesiyle, PV enerji sistemlerinin maksimum güç noktasına ulaşması hem daha kısa süre alırken hem de daha fazla verim sağlamaktadır. Bu maksatla (Tang ve ark., 2017) yaptıkları çalışmada Fractional Order FLC (FO-FLC) tekniği ile MPPT algoritması üzerinde çalışmışlardır. Çalışma sonucunda çevre koşullarının değişimine daha hızlı dinamik tepki verdiği ve daha kesin bir takip sağlayarak PV sistemin maksimum güç noktasına ulaştığını gözlemlemişlerdir. Tez kapsamında geliştirilen P&O tekniğinde olduğu gibi panelin gerilim ve güç bilgilerini kullanan FLC tekniği üzerinden MPPT algoritması geliştirilmiştir. FLC tekniği için oluşturulan sistemin blok şeması Şekil 3.43'te verilmiştir.



Şekil 3.43. FLC tekniği için oluşturulan sistemin blok şeması

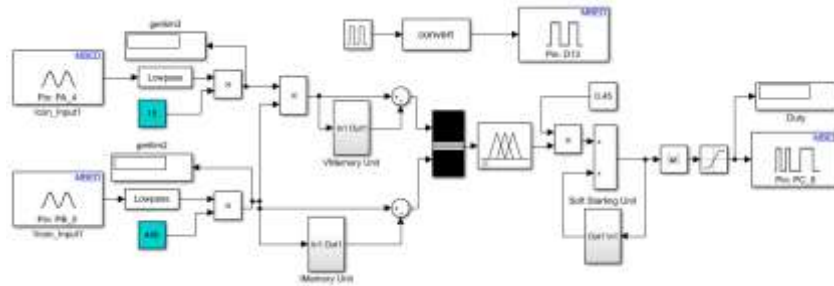
Şemaya göre panele ait akım ve gerilim bilgileri alınarak gerilim üzerindeki değişimin hata değeri D_v ve gücün üzerindeki hata değişimi alınarak anahtarlama sinyalinin çalışma oranı ($DUTY$) oluşturulmuştur. Bu maksatla D_p , D_v ve $DUTY$

isminde üç adet üye fonksiyonu oluşturulmuştur. Oluşturulan üye fonksiyonları ve kural tablosu Şekil 3.44’te verilmiştir.



Şekil 3.44. Tez kapsamında geliştirilen FLC tekniği için geliştirilen üye fonksiyonları, (a) güç değişimi (Dp) üye fonksiyonu, (b) gerilim değişimi (Dv) üye fonksiyonu, (c) çıkış üye fonksiyonu (DUTY) ve (d) çıkış fonksiyonu kural tablosu

Tez kapsamında FLC için geliştirilen Simulink modeli Embedded Coder yardımı ile STM32F411RE Nucleo Board içerisine gömülmüş ve geliştirmeler bu platform üzerinden yapılmıştır. Simulink ortamında geliştirilen FLC kontrol tekniğini içeren Simulink modeli Şekil 3.45’te verilmiştir.

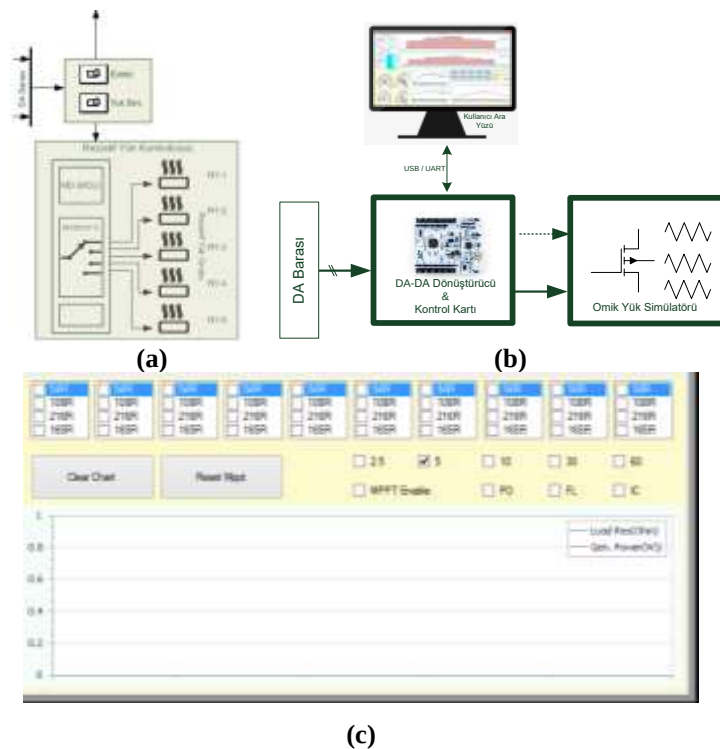


Şekil 3.45. FLC tekniğini içeren MPPT algoritması için tez kapsamında geliştirilen Simulink modeli

FLC Simulink modelinde, P&O ve IC'de olduğu gibi panele ait akım ve gerilim değerleri analog kanallar üzerinden geliştirme kartına bağlanmıştır ve ADC ile okunarak alçak geçiren filtre ile gürültülerden arındırılmıştır. Filtre çıkışındaki değer, gerçek değere uydurulmak maksadıyla bir sabit ile çarpılmıştır. Elde edilen akım ve gerilim değeri FLC tekniğini içeren Matlab fonksiyonuna uygulanmıştır. Fonksiyon çıkışı değeri *DUTY*, FLC adım sabiti olan *c* ile yani 0,45 ile çarpılarak bir önceki *d* ile toplanır. *d* değeri 20kHz'lik anahtarlama frekansının doluluk/çalışma oranıdır. Elde edilen anahtarlama frekansı güç katına uygulanarak panelden elde edilen enerjinin yüke aktarılması sağlanır.

3.4. Omik Yük Simülatörü Tasarımı ve Bileşenleri

Omik yük simülatörü, DA-DA dönüştürücü çıkışına omik (rezistif) yüklerin bağlanmasına imkân sağlayan, tezin diğer bir bileşenidir. Yük simülatörü ile enerji dönüşüm sistemi çıkışına sabit bir yük yerine kullanıcının isteğine göre değişken güç aralıklarında yüklerin kontrolü ile enerji sisteminin test edilmesine imkân sağlar. Yük simülatörü, kullanıcının belirlediği aralıklarla değişen omik yük gruplarından meydana gelir.

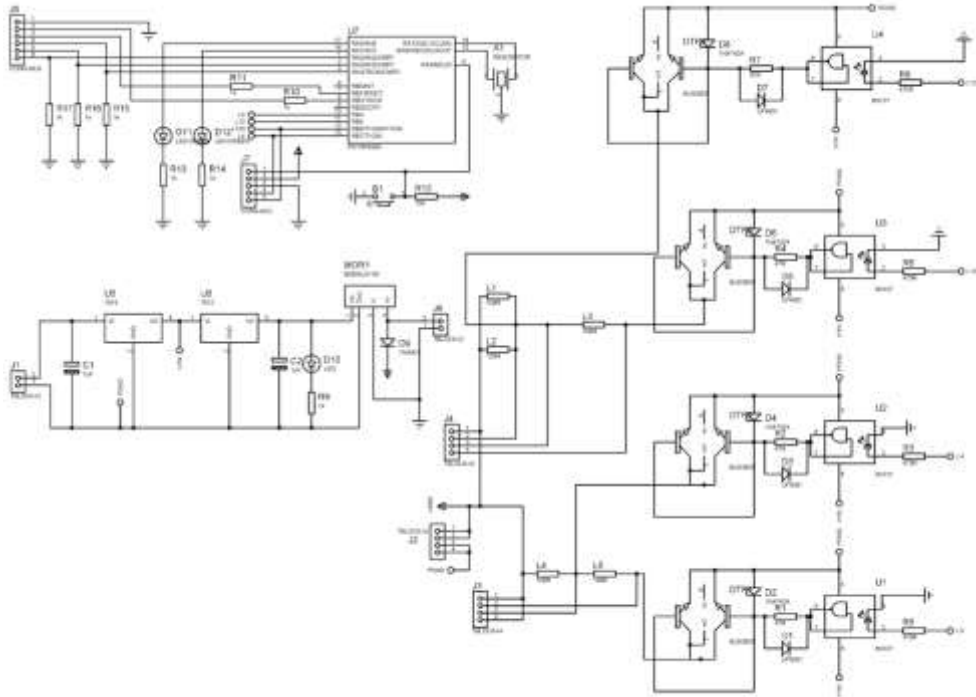


Şekil 3.46. Tez kapsamında tasarlanan omik yük simülatörünün blok şeması

Bir başka açıdan yük simülatörü, kullanıcının arayüzden seçtiği bir döngüye göre omik yükleri devreye alıp devreden çıkaran bir güç elektroniği uygulamasıdır. Tasarımı yapılan omik yük simülatörüne ait blok şemaları Şekil 3.46(a) ve (b)'de görülmektedir. Kullanıcının arayüz üzerinden belirlemiş olduğu yük sırası döngüsüne göre arayüzün oluşturduğu yük sırası grafiği Şekil 3.46(c)'de verilmiştir. Bu grafiğe göre 5 saniye aralıklarla yüklerin kullanıcının belirlediği sıraya göre değiştiği görülmektedir. Yük simülatörü DA barasına manuel anahtar üzerinden bağlanır. Yük simülatörünün kullanımı kullanıcı tarafından belirlenir. Yük simülatörü rüzgâr emülatörü ve güneş simülatörü ile ayrı ayrı olarak kullanılabileceği gibi her ikisi ile de kullanılabilir.

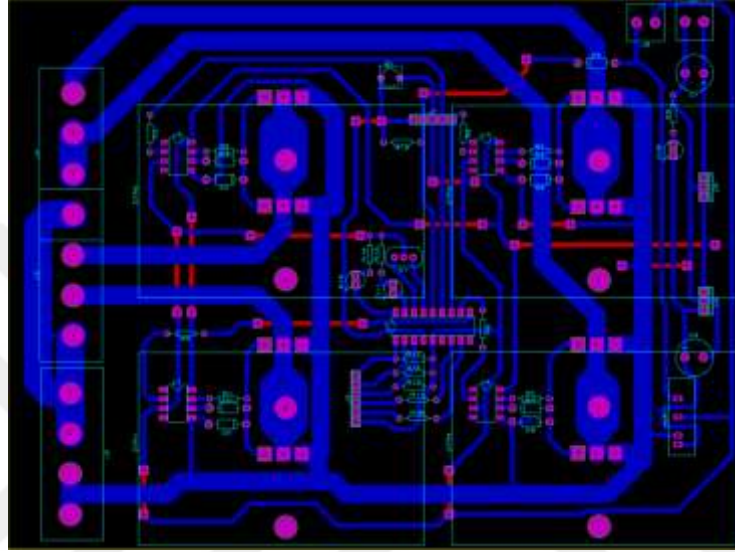
3.4.1. Yük simülatörü sürücü birimi

Yük simülatörü daha önceki bölümlerde detaylıca açıklanan rüzgâr emülatörü kontrol kartı tarafından kontrol edilir. Rüzgâr emülatörü kontrol kartı, arayüzden aldığı yük ihtiyacı bilgisine göre anahtarlama elemanını sürerek istenilen yük veya yük grubunu devreye alır. Bu kapsamda tasarlanan yük simülatörü devre şeması Şekil 3.47'de verilmiştir.



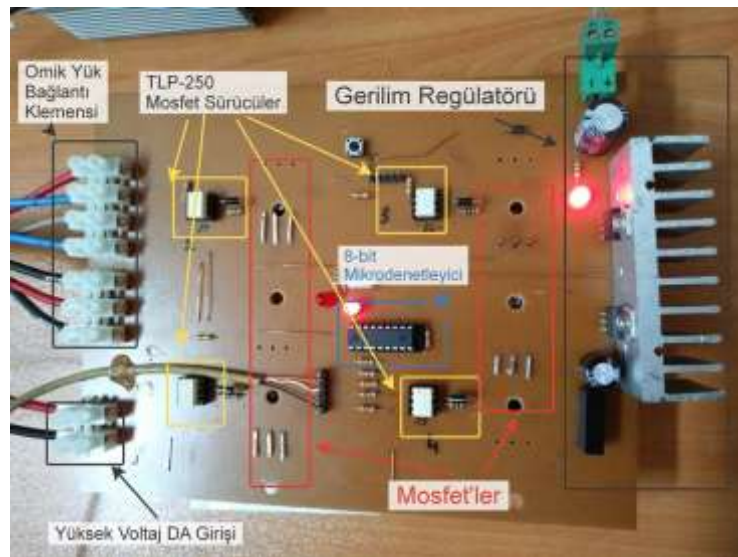
Şekil 3.47. Tasarımı yapılan yük simülatörünün elektronik devre şeması

Yük simülatörü 4 adet MOSFET grubundan oluşmaktadır. İstenilen güç değerinin sağlanması maksadıyla iki MOSFET'in paralel bağlanması ile yarı iletken anahtar sayısı 8 adete çıkartılabilir. MOSFET'ler her bir yük grubunu kontrol edebilecek güçtedir. MOSFET'ler omik yük simülatörünü kontrol eden 8-bitlik mikrodnetleyiciden optik izoleli TL250 MOSFET kapı sürücüsü ile izole edilmekte ve sürülmektedir. Şekil 3.47 üzerinden yapılan PCB tasarımı Şekil 3.48'de verilmiştir.



Şekil 3.48. Omik yük simülatörü için oluşturulan bileşenin PCB tasarımı

Tasarlanan yük simülatörünü kontrol eden devre kartı kazıma tekniği ile fiziksel hale getirilmiştir ve Şekil 3.49'da görülmektedir.

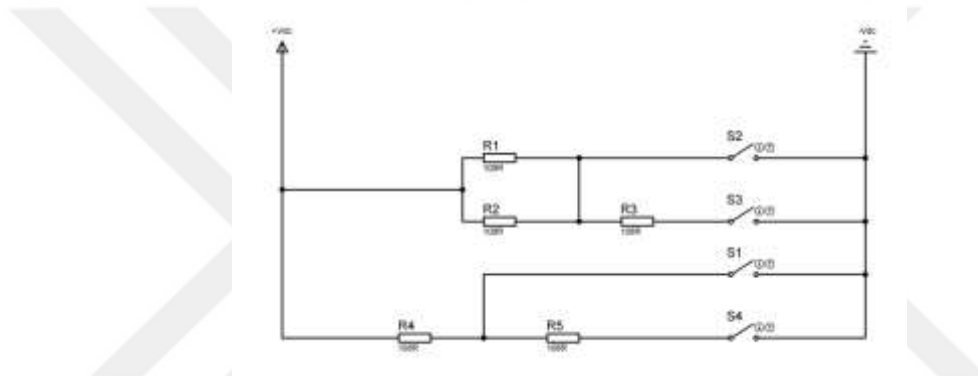


Şekil 3.49. Tasarımı yapılan yük simülatörü kontrol kartı

Yük simülatörü, üzerindeki bağlantı klemensleri ile dönüştürücülere ve yük gruplarına bağlanabilir. Ayrıca rüzgâr türbini emülatörü ile iletişim kurması için de bir iletişim bağlantı kablosu vardır.

3.4.2. Omik yük grubu ve özellikleri

Omik yük grubu için 5 adet 500 W güce sahip 108 Ω 'luk piyasada serpantinli rezistans olarak bilinen rezistansların temini yapılarak omik yük grubu tasarımı yapılmıştır. Tasarımdaki omik yüklerin ve anahtarlama elemanlarının konumunu gösterir devre şeması Şekil 3.50'de verilmiştir



Şekil 3.50. Omik yüklerin bağlanma konfigrasyonu

Bu kapsamda 4 adet anahtarın farklı zamanlarda açılıp kapanması sonucunda oluşacak toplam devre direnci ($R_{eş}$) ve anahtarların konumlarını gösterir tablo Çizelge 3.6’da verilmiştir.

Çizelge 3.6 Anahtar konumlarına bağlı olarak oluşan devrenin eşdeğer direnci ve toplam güç değerini gösterir tablo

S1	S2	S3	S4	Reş (Ω)
1	0	0	0	108 Ω
0	1	0	0	54 Ω
0	0	1	0	162 Ω
0	0	0	1	216 Ω

Bu bileşen 5 adet 500 W'lık serpantinli rezistans kullanılarak oluşturulmuştur. Yük simülatörünün tamamlayıcı bileşeni olan yük grubu ve bileşenleri Şekil 3.51'de verilmiştir. Tasarlanan yük grubu MPPT algoritmalarının verim analizlerinde kullanılabilecektir. Ayrıca sabit güçlü bir omik yük üzerinden değil de zamana bağlı farklı güç değerlerine sahip omik yüklerin kullanılması istenildiğinde omik yük simülatörü faydalı olacaktır.



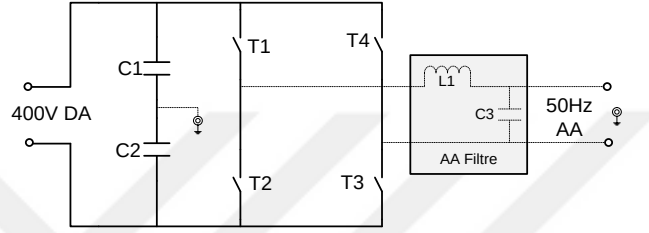
Şekil 3.51. Tasarımı yapılan yük simülatörüne ait yük grubu

Enerji sisteminin çalışması esnasında omik yük grubu kimi zaman kullanıcılara zarar verebilecek sıcaklıklara ulaşabilmektedir. Hem sıcaklık etkisi hem de sistemin fiziksel bütünlüğünü korumak amacıyla omik yük grubu metal bir sac kafes içerisine alınmıştır.

3.5. Evirici Birimi Tasarımı ve Bileşenleri

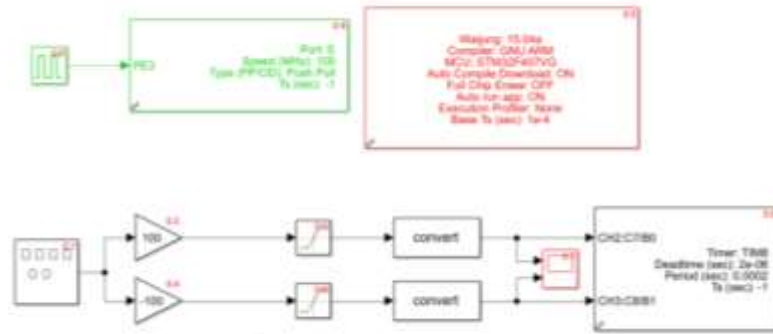
Günümüzde yerel uygulamalarda AA yüklerinin PV enerji sistemleri ile beslenmesi istenilmektedir (Bentouati ve ark., 2020). Bu ihtiyacın karşılanmasında eviriciler önemli role sahiptir. Tasarlanan evirici birimi hem rüzgâr emülatörü hem de güneş simülatöründen elde edilen DA türündeki elektrik enerjisinden AA türünde elektrik enerjisi elde etmek için kullanılan birimdir. Eviriciler MPPT algoritmalarının geliştirilmesinde ve verimlerinin artırılmasında kullanılabilmektedir (Liao ve ark., 2017). Bu birim sayesinde tasarımı yapılan sisteme AA yükleri de bağlanabilecek, AA yükleri üzerinde de MPPT denemeleri ve geliştirmeleri yapılabilecektir. Bu birim 1 fazlı trafosuz tam köprü evirici yapısındadır. Trafolu yapılar güç katında izolasyon sağlarken

(Vidales ve ark., 2019) tasarımıda kullanılan trafosuz yapılarda yük ile kaynak birbirine elektriksel olarak bağlıdır. Evirici güç sınırları bakımından mikro evirici türündedir. Mikro eviriciler düşük maliyetli, ucuz, düşük güçlü yüksek verimli ve yerel uygulamalara imkân sağlayan yapılar olup çoğu uygulamada PV panellere monte edilebilecek kadar da ince yapıdadır (Choi ve ark., 2019). Tek fazlı veya üç fazlı olabilirler. Avantajları sayesinde yüksek frekanslı ve yüksek DA girişli olarak tasarlanırlar (Geetha ve Ravi, 2018). Kullanılan evirici topolojisi Şekil 3.52’de görülmektedir.



Şekil 3.52. 1 fazlı tam köprü evirici yapısı

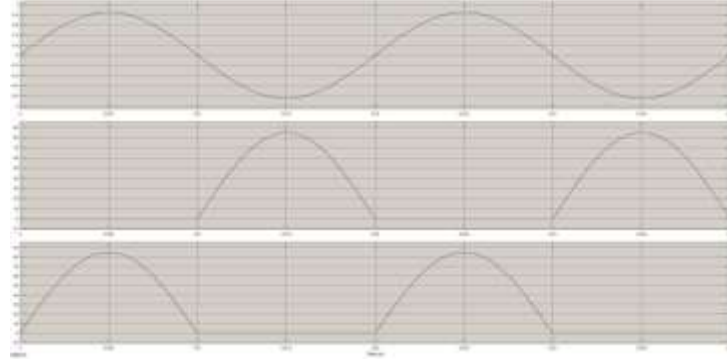
Trafosuz tam köprü evirici yapısı ile çeşitli sürme sinyalleri ile istenilen genlik ve frekansta AA üretmek mümkündür. Tez kapsamında şebeke ile uyumlu olması maksadıyla 50 Hz’lik AA üretilmesi amaçlanmıştır. Evirici sürme sinyali türü olarak sinüsoidal darbe genişlik modülasyonu (SPWM) kullanılmıştır. Sürme sinyali Simulink ortamında geliştirilen bir blok ile üretilmektedir. Şekil 3.53’te SPWM sinyallerini üretmekte kullanılan Simulink bloğu görülmektedir.



Şekil 3.53. Sinüs PWM üretebilmek için oluşturulan Simulink bloğu

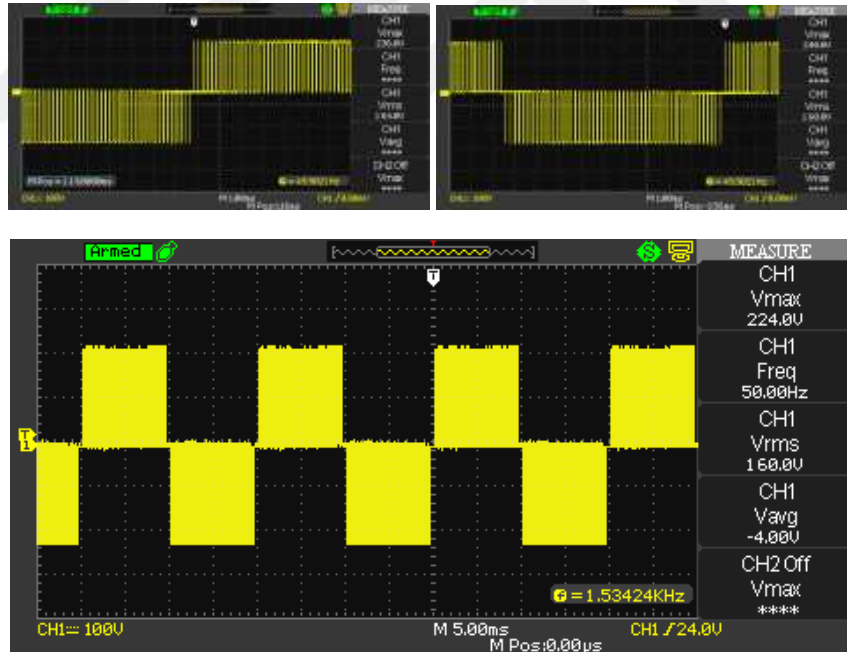
Şekil 3.54’te ise PWM üreticinin girişine uygulanan sinüzoidal sinyali verilmiştir. Uygulanan bu sinyal, evirici çıkışında oluşturulmak istenen sinüs sinyalini meydana getirir ve referans sinyali olarak bilinir. Bu sebeple 50 Hz frekansta bir sinüs

sinyali uygulanmıştır. Ek olarak uygulanan bu sinyalin modülasyon indisi 0,85 civarındadır. PWM yöntemi sonucu elde edilen anahtarlama sinyalinin yani taşıyıcı sinyalin frekansı ise 5 kHz'dir.



Şekil 3.54. Sinüs PWM oluşturabilmek için kullanılan sinüzoidal sinyal

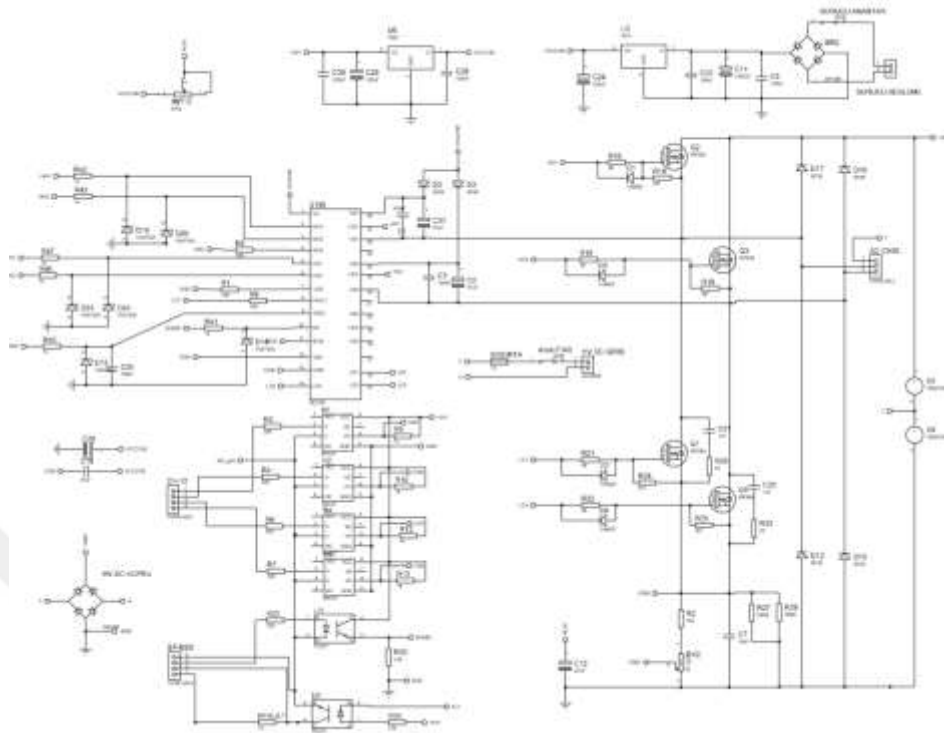
Üretilen bu sinyaller, 1 fazlı trafosuz tam köprü eviriciye uygulanmıştır. Evirici giriş gerilimi yaklaşık olarak 240 V değerindedir. Şekil 3.55'de 1 fazlı evirici çıkışında meydana gelen filtre edilmemiş AA sinyalleri görülmektedir.



Şekil 3.55. 1 fazlı evirici çıkışında oluşan filtre edilmemiş AA sinyali

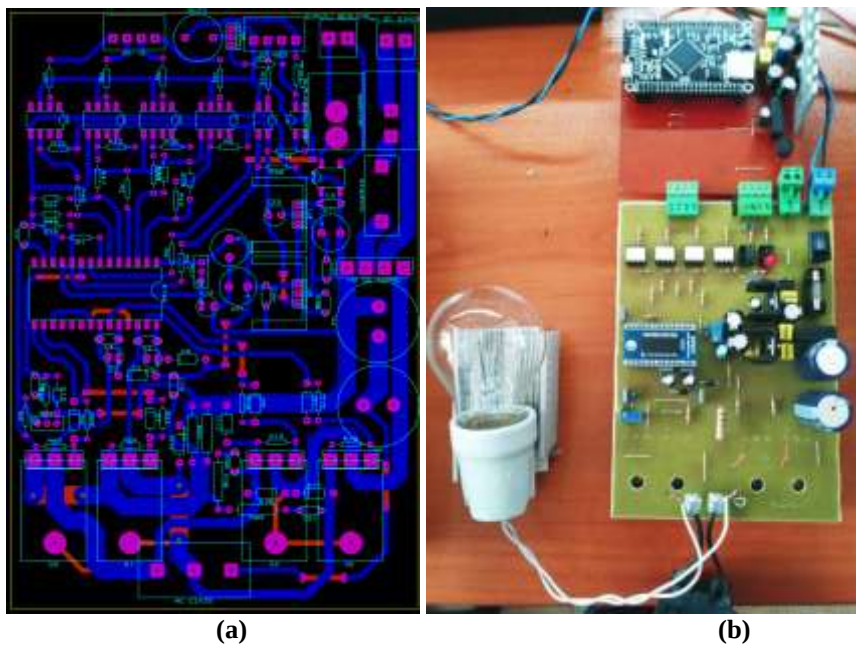
Evirici katı, güç katı ve sinyal katı olarak iki bölümde incelenebilir. Dört adet güç MOSFET'i kullanılarak yüksek değerli DA türündeki elektrik enerjisi AA'a dönüştürülür. IR2136 entegresi çıkışına MOSFET'ler eklenerek güç katı

oluşturulmuştur. Bu maksatla oluşturulan evirici katının devre şeması Şekil 3.56'da verilmiştir.



Şekil 3.56. 1 fazlı evirici için oluşturulan devre şeması ve bileşenleri

Şekil 3.56'daki devre şeması üzerinden PCB tasarımı yapılmıştır. Tasarımı yapılan 1 fazlı eviriciye ait görseller Şekil 3.57'de verilmiştir.



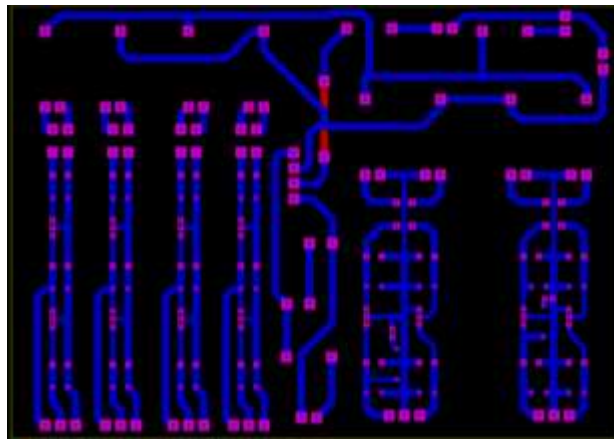
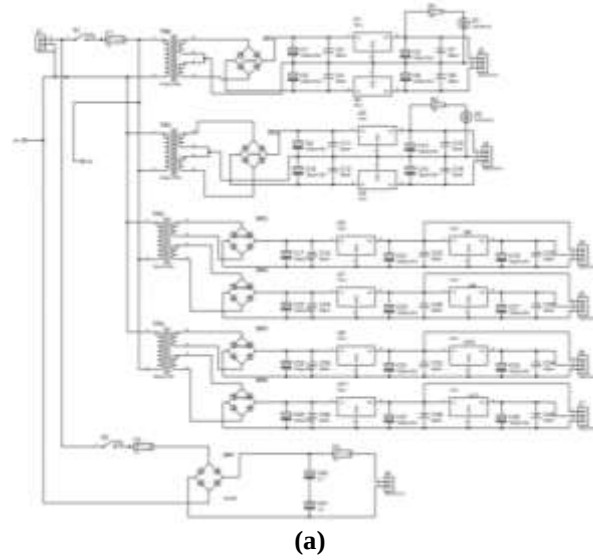
Şekil 3.57 (a) 1 fazlı eviriciye ait PCB tasarımı, **(b)** 1 fazlı eviricinin fiziksel olarak uygulaması

3.6. Diğer Bileşenler

Diğer bileşenler başlığında tezin ana bileşenleri dışında kalan ek yapılara yer verilmiştir. Bu yapılar tez kapsamında önerilen sistemin bir arada sağlıklı bir şekilde çalışmasına imkân sağlarlar.

3.6.1. Güç kaynağı katı

Bu bileşen tüm sistemin gereksinimi olan çeşitli seviyeden DA enerjisi sağlar. Güç kaynağı katında; 5 V, simetrik ($\pm$)12 V, 15 V, 204 V gibi seviyelerde DA türünden enerji sağlar. Bu bileşene ait elektronik devre şeması Şekil 3.58(a)'da, devre şeması üzerinden tasarlanan PCB şeması ise Şekil 3.58(b)'de verilmiştir.



Şekil 3.58. (a) Tasarımı yapılan güç kaynağı katına ait elektronik devre şeması, **(b)** bu şema üzerinden tasarlanan PCB şeması

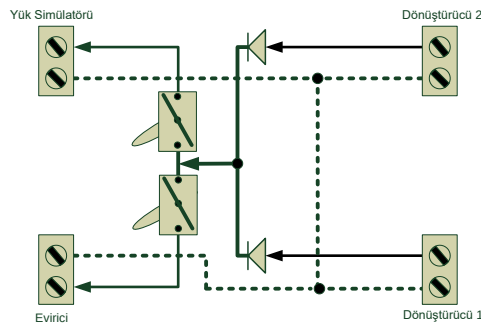
Güç kaynağı katı, hat transformatörlerini içeren bir yapıya sahiptir. Tasarım ile her bir enerji seviyesi birbirinden manyetik olarak izolelidir. Bunun sebebi güç elektroniği katları arasında ortak şasenın oluşmasını engellemektir. Elektronik ortamda yapılan tasarımların fiziksel olarak gerçekleştirilmesi sonucunda oluşan güç kaynağı katına ait görsel Şekil 3.59’da verilmiştir. Güç katı, olası kısa devre veya akım yüklemelerinden etkilenmemek için cam sigorta ile koruma altına alınmıştır.



Şekil 3.59. Tasarımı yapılan güç kaynağı katı ve bileşenleri

3.6.2. Manuel yük seçim ünitesi

Manuel yük seçim ünitesi rüzgâr türbini emülatörü ve güneş simülatörünün ürettiği enerjinin paralel bağlandığı DA barasını içerir. Bu ünite aynı zamanda bu iki kaynağın ürettiği enerjiyi yönlendirmek için kullanılır. Tasarlanan sistemin elektriksel blok şeması Şekil 3.60’da verilmiştir.



Şekil 3.60. Manuel yük seçim ünitesine ait elektriksel blok şema
Dönüştürücü yapıları vidalı klemensler üzerinden yük seçim ünitesine bağlanır. Dönüştürücüler yüksek akım ve gerilim taşıyabilen iki güç diyotu üzerinden DA

barasına bağlanır. Bara üzerinde oluşan enerji, mekanik bir anahtar üzerinden eviriciye ya da omik yük simülatörüne yönlendirilebilir. Tez kapsamında tasarlanan manuel yük seçim ünitesi aynı zamanda DA barası olarak görev yapan ünedir ve Şekil 3.61’de verilmiştir.



Şekil 3.61. Tez kapsamında tasarlanan manuel yük seçim ünitesi ve doğru akım barasının iç yapısı ve genel görünümü

Evirici veya omik yük simülatörünün devrede olmadığı bir durum olursa DA barasının geriliminin aşırı yükselmemesi için alüminyum gövdeli bir direnç bağlanmıştır. Hem direncin gövdesinde oluşacak ısıyı hem de diyotların gövde ısılarını uzaklaştırmak için alüminyum soğutucu kullanılmış, diyotlar ve direnç bu alüminyum soğutucu üzerine monte edilmiştir.

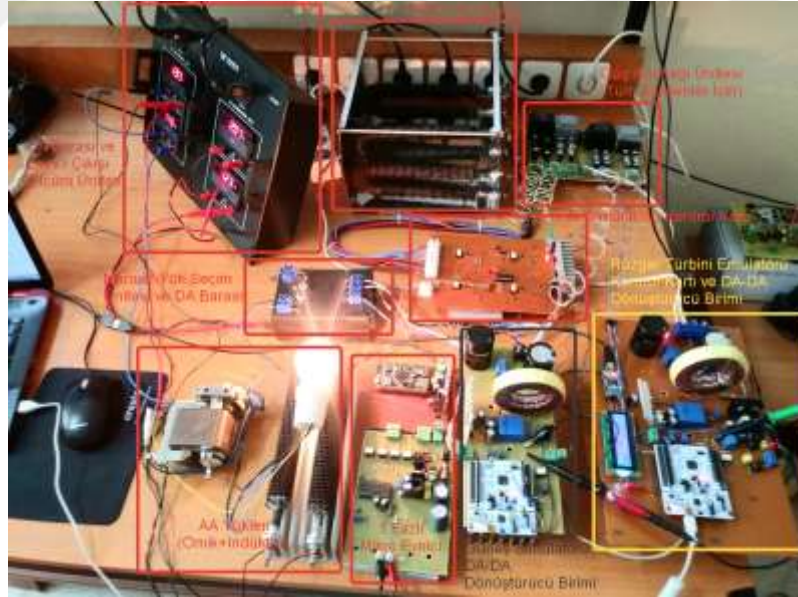
3.7. Uygulaması Yapılan Sistemin Tüm Bileşenleri

Bölüm 3 içerisinde detayları verilen tüm bileşenlerden asenkron motor ve harici uyarımlı DA makinesi, asenkron motor sürücü ünitesi ve ölçüm araçları Şekil 3.62’de verilmiştir.



Şekil 3.62. Rüzgâr türbini emülatörüne ait bileşenlerin bir kısmı

Sistemin diğer bileşenleri ise Şekil 3.63'te verilmiştir. Verilen görselde rüzgâr türbini emülatörü sürücü kartı ve DA-DA dönüştürücü birimi, güneş simülatörüne ait DA-DA dönüştürücüsü, omik yük kontrol kartı ve omik yük grubu, DA barası ve manuel yük seçim ünitesi ve 1 fazlı sinüzoidal PWM mikro evirici görülmektedir.



Şekil 3.63. Rüzgâr türbini emülatörü ve güneş simülatörüne ait diğer bileşenler

Şekil 3.64'te ise tez kapsamında önerisi, tasarımı ve uygulaması yapılan tüm bileşenler bir görsel içerisinde verilmiştir.

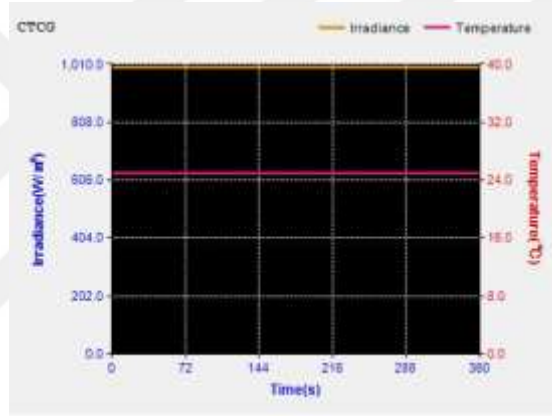


Şekil 3.64. Tez kapsamında önerisi, tasarımı ve uygulaması yapılan sistemin tüm bileşenleri

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

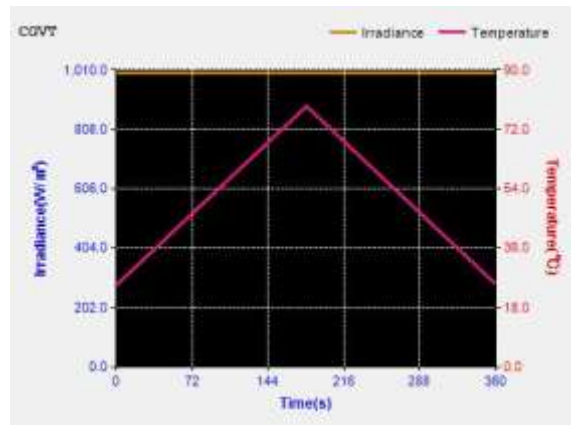
4.1. Güneş Simülatörü Üzerinden Elde Edilen Sonuçlar ve Tartışma

Tez kapsamında, altyapı ve gereksinimlerinin benzer olması ve aynı elektriksel parametrelere ihtiyaç duyuyor olması sebebiyle P&O, IC ve FLC algoritmaları uygulanmış ve analiz edilmiştir. Bu tekniklerin kendi aralarındaki verim analizlerini yapabilmek için 3 farklı güneş ışıması (G) ve ortam sıcaklığı (T) profili oluşturulmuş ve bu profiller üzerinden karşılaştırılmaları sağlanmıştır. İlk profil sabit güneş ışıması ve sabit sıcaklık (CTCG) profilidir. Bu profilede hava sıcaklığı 25 °C ve güneş ışıması ise 1000 W/m²'dir. İlk profile ait grafik Şekil 4.1'de verilmiştir.



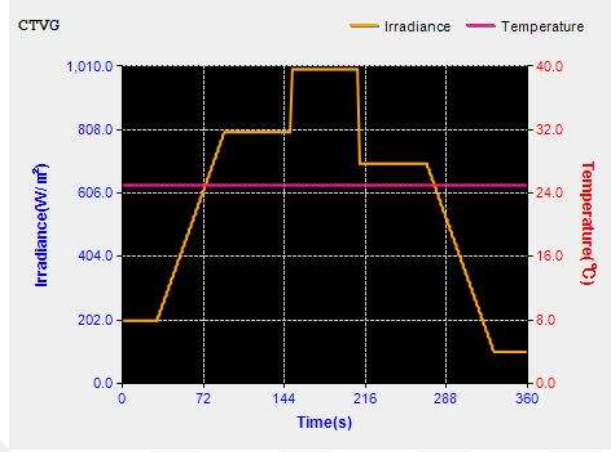
Şekil 4.1. Sabit güneş ışıması ve sabit sıcaklık grafiği

İkinci profilede (CGVT) panel sıcaklığı 18 °C ile 75 °C arasında değişirken, güneş ışıması 1000 W/m² sabittir. İkinci profile ait grafik Şekil 4.2'de verilmiştir.



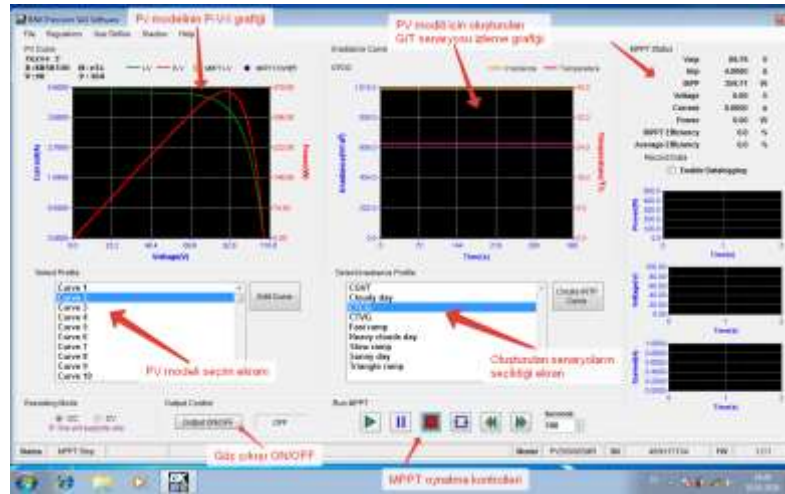
Şekil 4.2. Sabit güneş ışıması, değişken sıcaklık grafiği

Son profilde ise (CTVG) panel sıcaklığı 25 °C sabitken, güneş ışınması 1000 W/m² ile 100 W/m² arasında değişmektedir. Son profile ait grafik Şekil 4.3’de verilmiştir.



Şekil 4.3. Sabit sıcaklık ve değişken güneş ışınmasına ait profil grafiği

Oluşturulan profiller 360 saniyelik bir süreye sahiptir. Bu profiller güneş dizi simülatörü (SAS) arayüzü üzerinden kullanıcı tarafından oluşturulmuştur. Şekil 4.4’te güneş simülatörünün arayüzü ve kullanımına dair detaylar şekil üzerinde belirtilmiştir.



Şekil 4.4. Güneş dizi simülatörüne ait kullanıcı arayüzü ve arayüz araçları

Kullanıcı bu ekran üzerinden çeşitli kontrolleri yönetebilmektedir. Firmanın sunmuş olduğu PV modelini, G/T profilini ve MPPT kontrollerini yönetebilmekte, MPPT işletimi esnasında elde edilen çıktılar gözlemlenebilmektedir. Şekil 4.5’te kullanıcı tarafından G/T profilinin oluşturulduğu arayüz verilmiştir. Arayüz ile kullanıcı

kendi belirlediği güneş ışıması (G) ve panel sıcaklığını (T) belirten grafiği aşama aşama oluşturulabilmektedir.

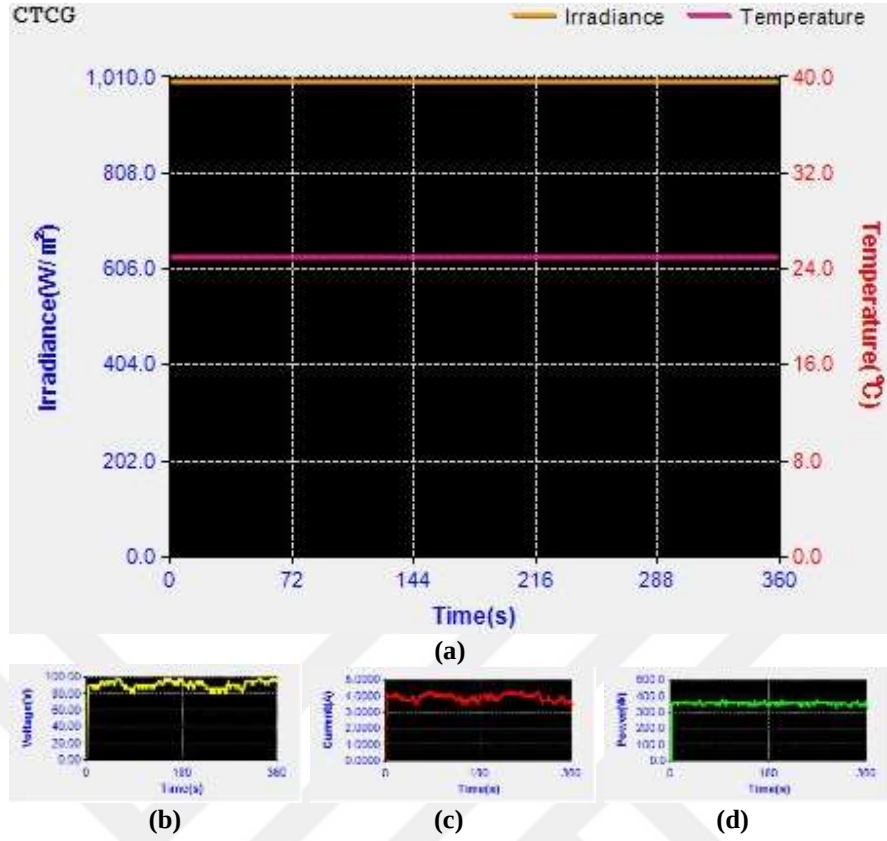


Şekil 4.5. Kullanıcının kendi güneş ışıması/sıcaklık profilini oluşturabileceği arayüz

Bu kapsamda oluşturulmuş üç farklı profil üzerinden üç farklı MPPT tekniği denenmiş ve aşağıda detayları verilecek olan sonuçlara ulaşılmıştır.

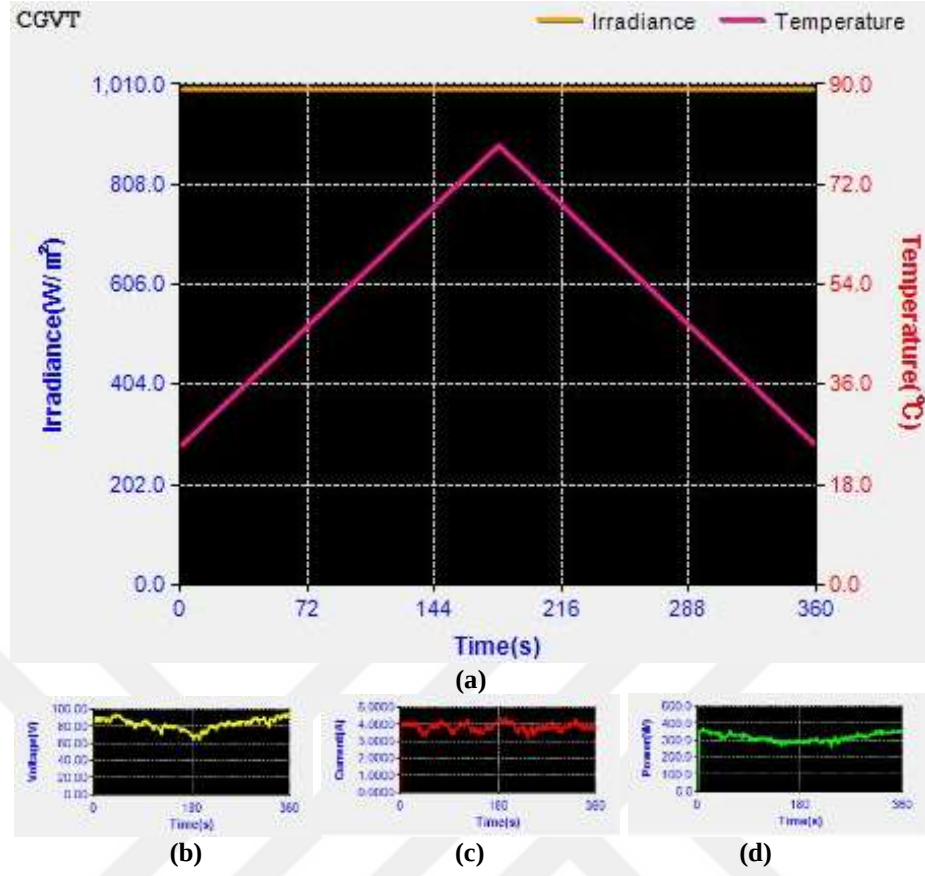
P&O tekniğini içeren MPPT algoritması çıktıları ve analizi

Değiştir ve gözle tekniğini içeren MPPT algoritmasının detayları Bölüm 3.3.3 içerisinde açıklanmıştı. Tasarlanan Simulink modeli 32-bitlik mikrodnetleyiciye yüklenmiş ve P&O algoritmasının yukarıda bahsedilen üç profil altında davranışları gözlemlenmiştir. İlk olarak sabit sıcaklık, sabit güneş ışıması altında elde edilen grafikler Şekil 4.6'da verilmiştir.



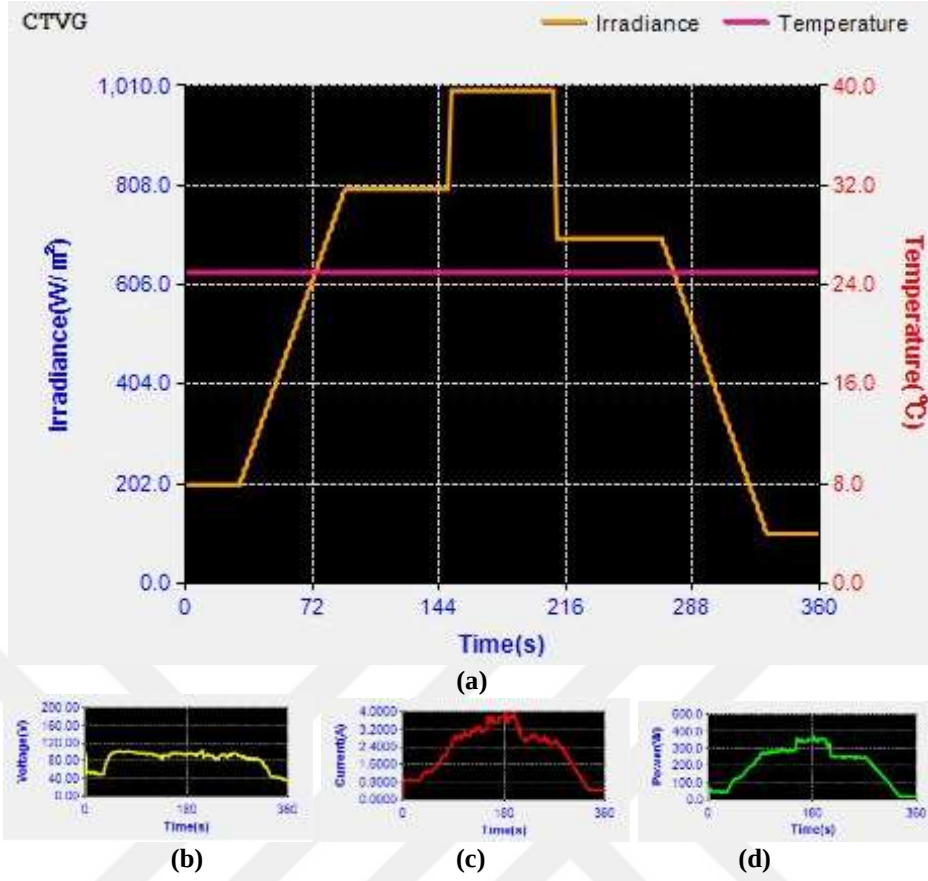
Şekil 4.6. (a) Sabit sıcaklık, sabit güneş ışımaya ait profil grafiği, **(b)** seçilen profil altında panel çıkış gerilimi grafiği, **(c)** panelden çekilen akım, **(d)** panelin sağladığı güç grafiği

Şekil 4.6’da verilen akım ve gerilim grafiklerinden P&O tekniğini içeren MPPT algoritmasının sürekli maksimum güç noktasına ulaşma konusunda çaba gösterdiğini ve bu noktada akım ve gerilim değerleri üzerinde salınımlara sebep olduğunu görmek mümkündür. İkinci profilde ise güneş ışması sabit tutulurken ortam sıcaklığının zamana göre değişmesi sağlanmıştır. Sıcaklık değerinin değişmesi PV paneller üzerinde fark edilir güç değişimine sebep olur. İkinci profil altında P&O tekniğini içeren MPPT algoritmasına ait grafikler Şekil 4.7’de verilmiştir.



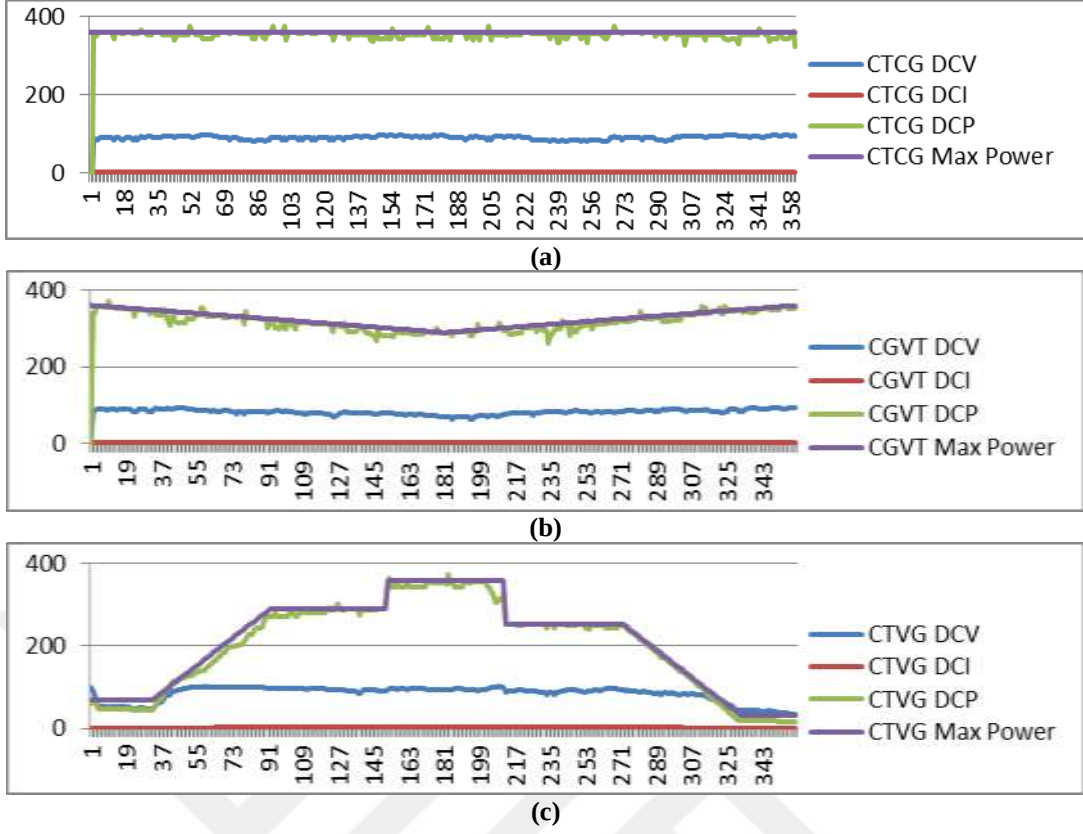
Şekil 4.7. (a) Sabit güneş ışıması, değişken ortam sıcaklığı profiline ait grafik, **(b)** seçilen profil altında panel çıkış gerilimi grafiği, **(c)** panelden çekilen akım, **(d)** panelin sağladığı güç grafiği

P&O tekniği ilk profilde olduğu gibi maksimum güç noktasına ulaşmak için çaba göstermiştir ve sıcaklığın değişimi ile panel çıkışındaki değişime salınımlar yaparak ayak uydurabilmiştir. Üçüncü ve son profilde ise ortam sıcaklığı sabitken güneş ışımasının zamana bağlı olarak değişmesi sağlanmıştır. Bu durumda P&O tekniğini içeren MPPT algoritması Şekil 4.8’de verilen grafikleri oluşturmuştur.



Şekil 4.8. (a) Değişken güneş ışıması, sabit ortam sıcaklığı profiline ait grafik, **(b)** seçilen profil altında panel çıkış gerilimi grafiği, **(c)** panelden çekilen akım, **(d)** panelin sağladığı güç grafiği

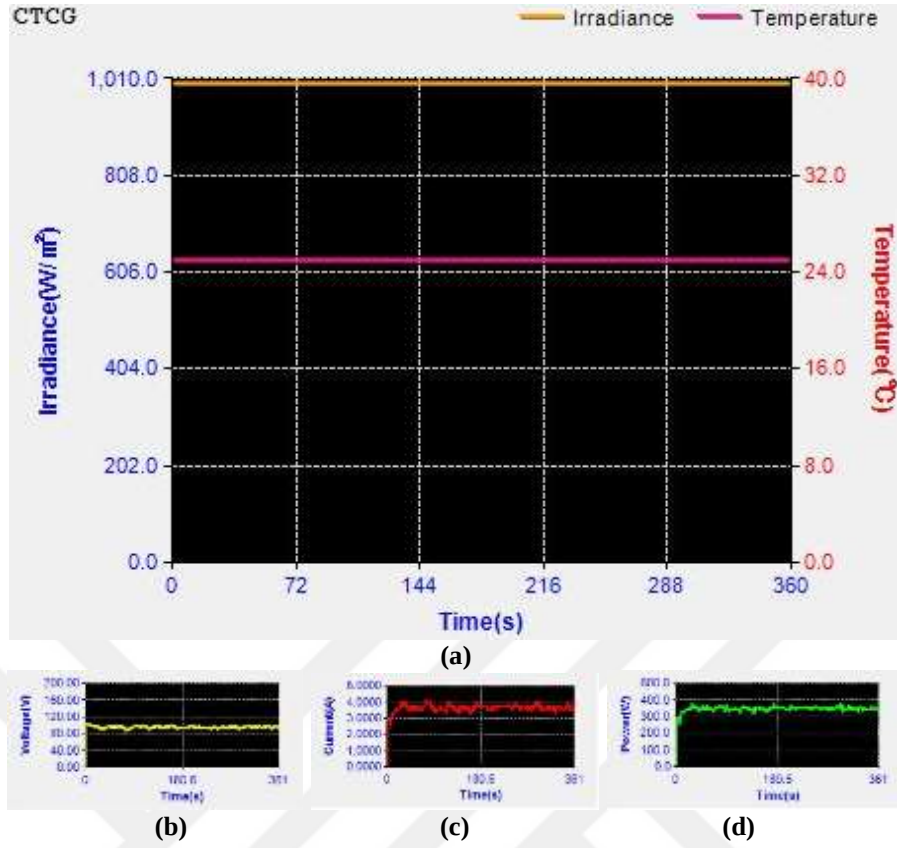
Grafiğe göre güneş ışımasındaki değişimin PV paneller üzerinde çok büyük bir etkiye sahip olduğu görülebilmektedir. P&O MPPT algoritmasının son profil üzerinde de maksimum güce ulaşma konusunda çalışmış ve diğerlerinde olduğu gibi maksimum güç noktasında salınımlar yapmıştır. Kullanılan güneş dizi simülatörü MPPT algoritmalarının işletimi esnasında pek çok elektriksel veriyi kayıt edebilmektedir. Bu verilerin alınarak Excel ortamında grafiklere dönüştürmek mümkündür. Güneş dizi simülatörünün kayıt ettiği verilerin Excel ortamında çizilmesi sonucunda elde edilen elektriksel grafikler Şekil 4.9’da verilmiştir.



Şekil 4.9. P&O tekniğinin üç ortam profili altındaki elektriksel veri grafikleri. **(a)** sabit sıcaklık (T), sabit güneş ışıması (G) altında dönüştürücünün giriş gerilim (DCV), akımı (DCI) ve çıkış gücü (DCP), **(b)** değişken sıcaklık (T), sabit güneş ışıması (G) altında dönüştürücünün giriş gerilim (DCV), akımı (DCI) ve çıkış gücü (DCP), **(c)** sabit sıcaklık (T), değişken güneş ışıması (G) altında dönüştürücünün giriş gerilim (DCV), akımı (DCI) ve çıkış gücü (DCP)

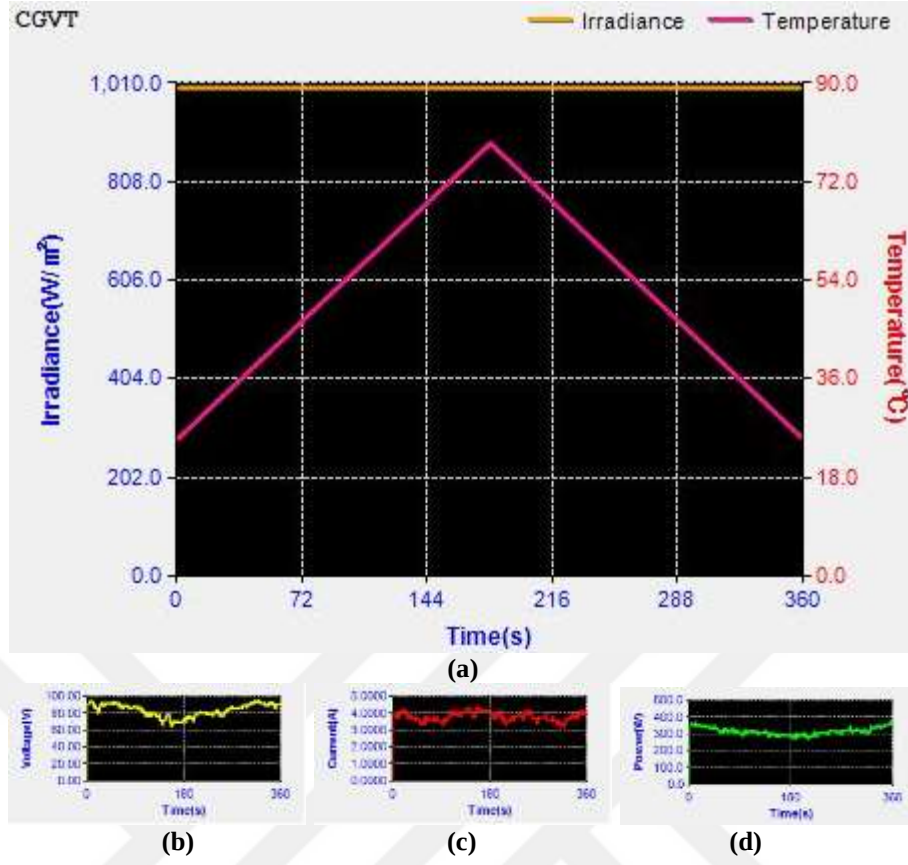
IC tekniğini içeren MPPT algoritması çıktıları ve analizi:

Artımlı iletkenlik tekniğinin çalışmasına dair bilgi Bölüm 3.3.3 içerisinde verilmiştir. P&O'da olduğu gibi artımlı iletkenlikte, panel akım ve gerilim değerleri üzerinden panelin maksimum güç noktasına ulaşmayı amaçlar. Artımlı iletkenlik içeren MPPT algoritması için tasarlanan Simulink modeli 32-bitlik mikrodenetleyiciye yüklenmiş ve detayları yukarıda verilen üç profil altında davranışları gözlemlenmiştir. İlk olarak sabit sıcaklık, sabit güneş ışıması altında elde edilen grafikler Şekil 4.10'da verilmiştir.



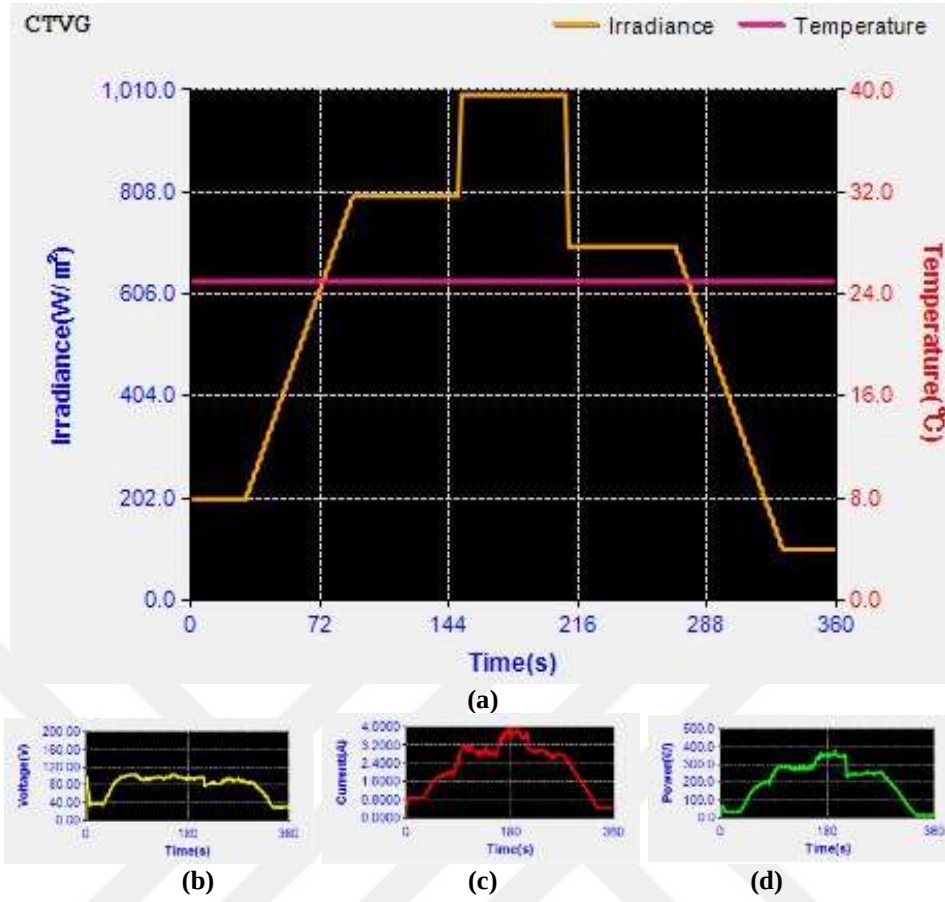
Şekil 4.10. (a) Sabit sıcaklık, sabit güneş ışımasına ait profil grafiği, **(b)** seçilen profil altında panel çıkış gerilimi grafiği, **(c)** panelden çekilen akım, **(d)** panelin sağladığı güç grafiği

Şekil 4.10’da verilen akım ve gerilim grafiklerinden IC tekniğini içeren MPPT algoritmasının sürekli maksimum güç noktasına ulaşma konusunda denemeler yaptığı görülmektedir. IC algoritmasının özellikle akım değeri üzerinde salınımlara sebep olduğunu görmek mümkündür. Güneş ışımasının sabit tutulduğu ancak ortam sıcaklığının zamana göre değişmesini sağlandığı ikinci profil ile IC tekniğini içeren MPPT algoritmasının incelenmesi Şekil 4.11’de verilmiştir.



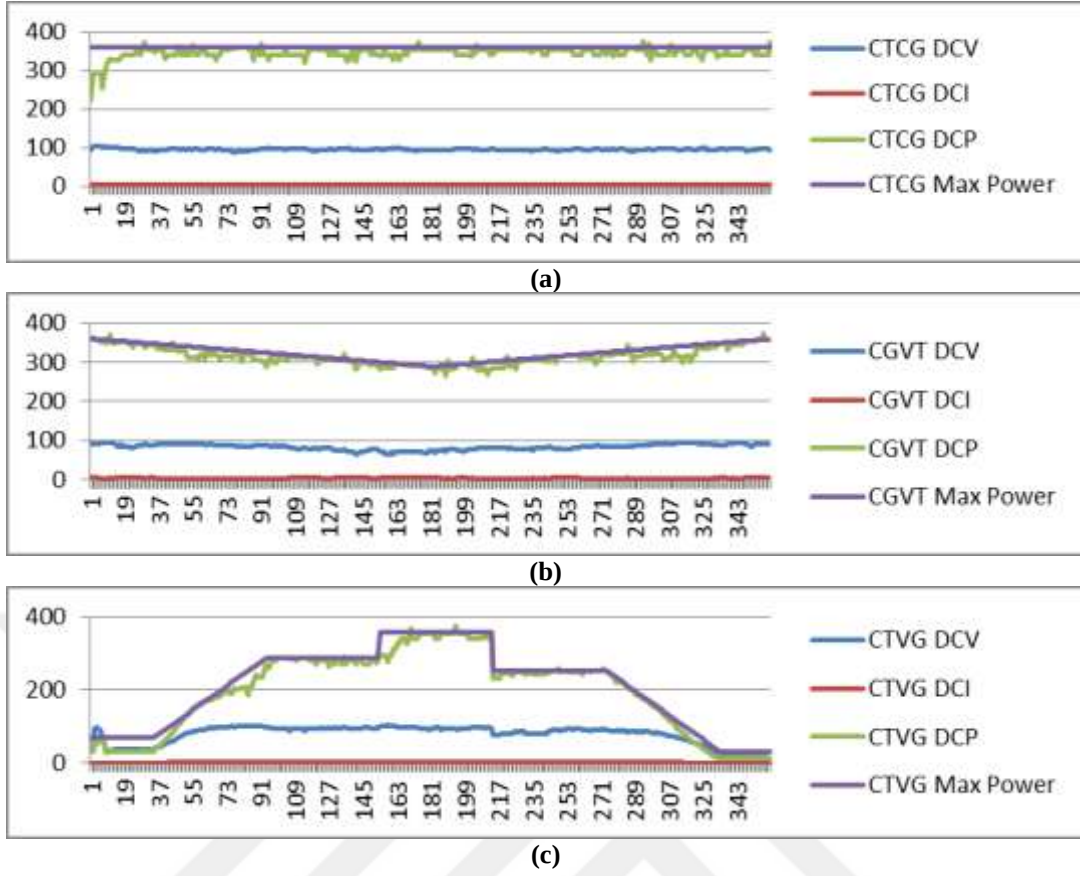
Şekil 4.11. (a) Sabit güneş ışıması, değişken ortam sıcaklığı profiline ait grafik, **(b)** seçilen profil altında panel çıkış gerilimi grafiği, **(c)** panelden çekilen akım, **(d)** panelin sağladığı güç grafiği

Sıcaklık değerinin değişimi PV panel üzerinde güç değişimine sebep olmuştur. İlk profilden farklı olarak IC tekniğini içeren MPPT algoritması hem akım hem gerilim değerleri üzerinde salınımlara sebep olmasına rağmen maksimum güç noktasına çok yakın seyretmiştir. Son profilde ise sabit sıcaklık değişken güneş ışıması altında IC tekniğinin davranışları incelenerek Şekil 4.12’de grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.12. (a) Değişken güneş ışıması, sabit ortam sıcaklığı profiline ait grafik, (b) seçilen profil altında panel çıkış gerilimi grafiği, (c) panelden çekilen akım, (d) panelin sağladığı güç grafiği

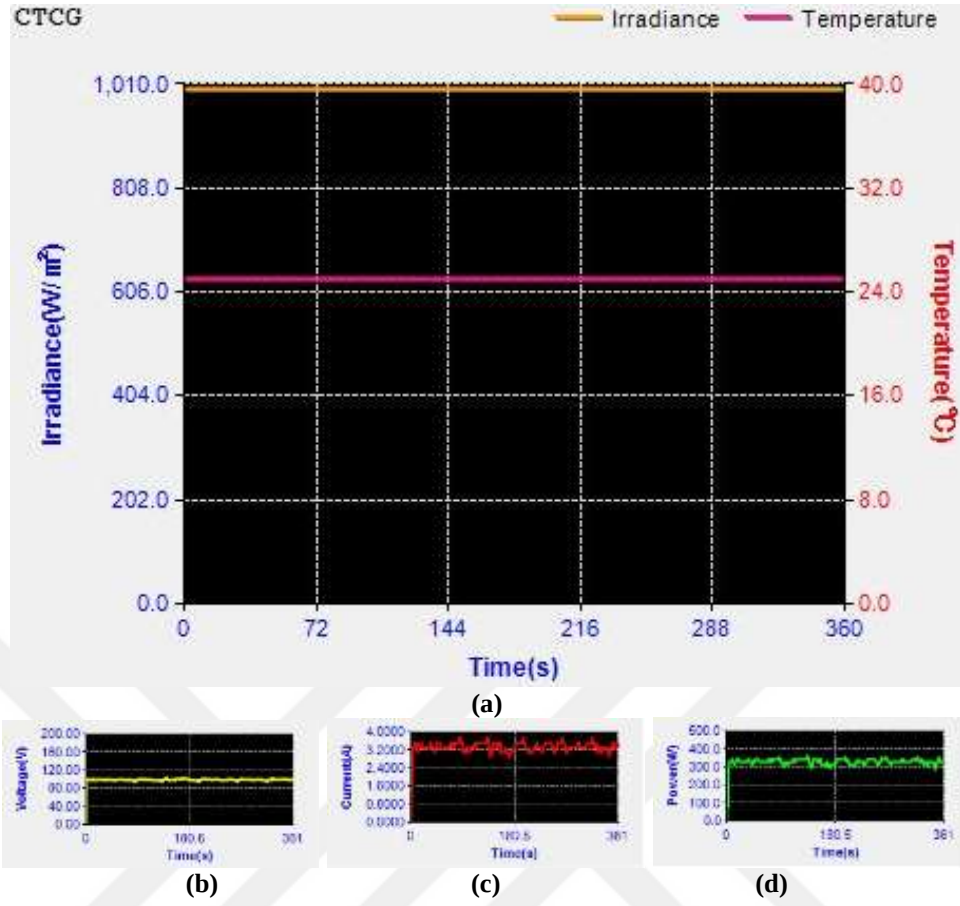
Son profil ile ortam sıcaklığı sabitken güneş ışımasının zamana bağlı olarak değişmesi sağlanmıştır. Bu durumda oluşan grafiğe göre güneş ışımasındaki değişimin PV paneller üzerinde çok büyük bir etkiye sahip olduğu görülebilmektedir. IC MPPT algoritmasının son profil üzerinde de maksimum güce ulaşma konusunda çalışmış ve diğerlerinde olduğu gibi maksimum güç noktasında salınımlar yapmıştır. IC tekniği ile tasarlanan MPPT algoritmasının üç farklı ortam profili altındaki elektriksel değerlerin değişiminin grafikleri Şekil 4.13'te verilmiştir.



Şekil 4.13. IC tekniğinin üç ortam profili altındaki elektriksel veri grafikleri. **(a)** sabit sıcaklık (T), sabit güneş ışıması (G) altında dönüştürücünün giriş gerilim (DCV), akımı (DCI) ve çıkış gücü (DCP), **(b)** değişken sıcaklık (T), sabit güneş ışıması (G) altında dönüştürücünün giriş gerilim (DCV), akımı (DCI) ve çıkış gücü (DCP), **(c)** sabit sıcaklık (T), değişken güneş ışıması (G) altında dönüştürücünün giriş gerilim (DCV), akımı (DCI) ve çıkış gücü (DCP)

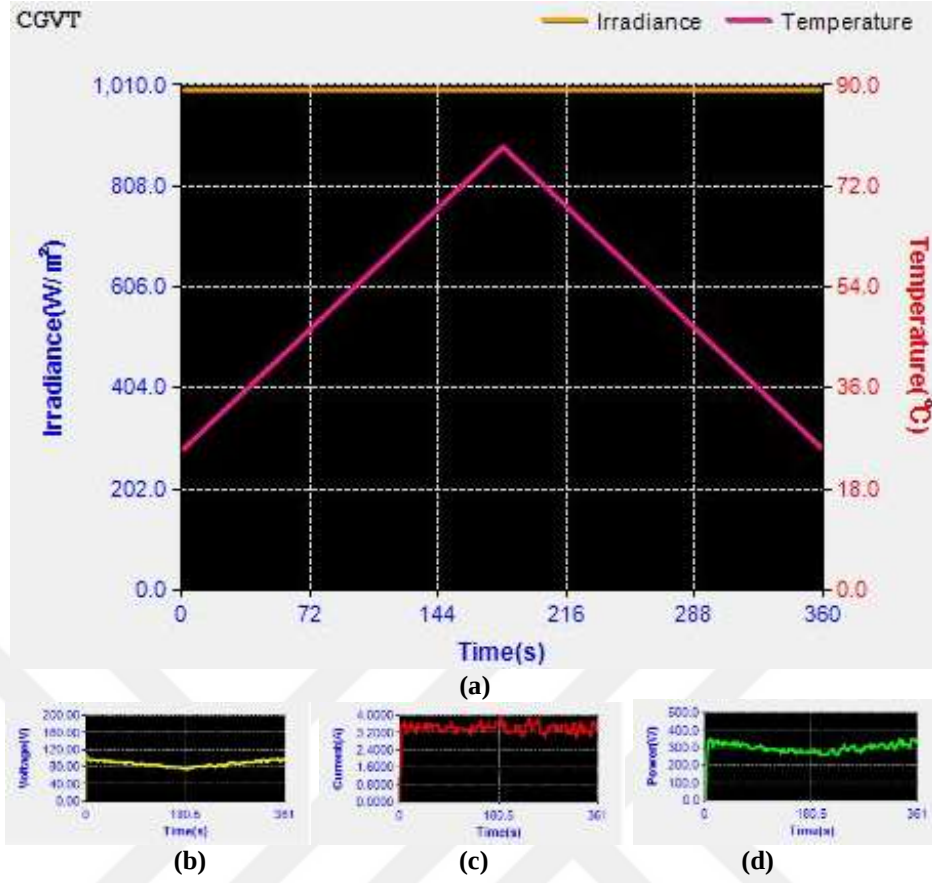
FLC tekniğini içeren MPPT algoritması çıktıları ve analizi:

Bulanık mantık denetleyicisi tekniği ile oluşturulan MPPT algoritması için bir Simulink modeli tasarlanmış ve 32-bitlik mikrodenetleyiciye yüklenmiştir. Diğer iki teknik için de kullanılan profiller altında FLC tekniği analiz edilmiştir. Birinci durumda sabit sıcaklık ve sabit güneş ışıması altında denemeler yapılmış ve Şekil 4.14'te verilen grafikler elde edilmiştir.



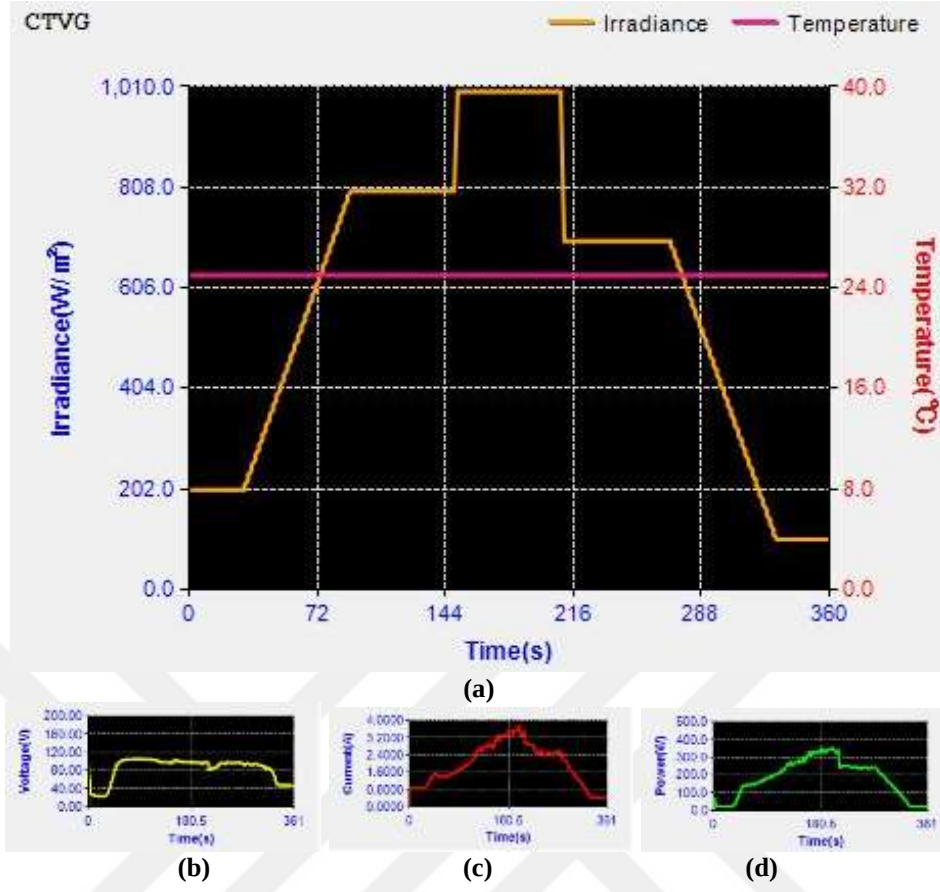
Şekil 4.14. (a) Sabit sıcaklık, sabit güneş ışımasına ait profil grafiği, (b) seçilen profil altında panel çıkış gerilimi grafiği, (c) panelden çekilen akım, (d) panelin sağladığı güç grafiği

FLC tekniği ile sabit sıcaklık ve ışıma altında diğer tekniklere göre daha fazla salınım yaptığı gözlemlenebilmektedir. FLC algoritmasının özellikle akım değeri üzerinde salınımlara sebep olduğunu görmek mümkündür. Salınımların bu derece fazla olmasındaki en temel neden Bölüm 3.3.3'te verilen FLC tasarım detaylarından da anlaşılacağı üzere fonksiyon üye sayısının az olmasıdır. Fonksiyon üyelerinin sayısı belirli ölçüde artırılarak salınımların azaltılması mümkün olabilir. İkinci aşamada güneş ışımasının sabit tutularak, ortam sıcaklığının zamana göre değişmesi sağlanmıştır. Bu profil altında FLC tekniğini içeren MPPT algoritmasının incelenmesi Şekil 4.15'te verilmiştir.



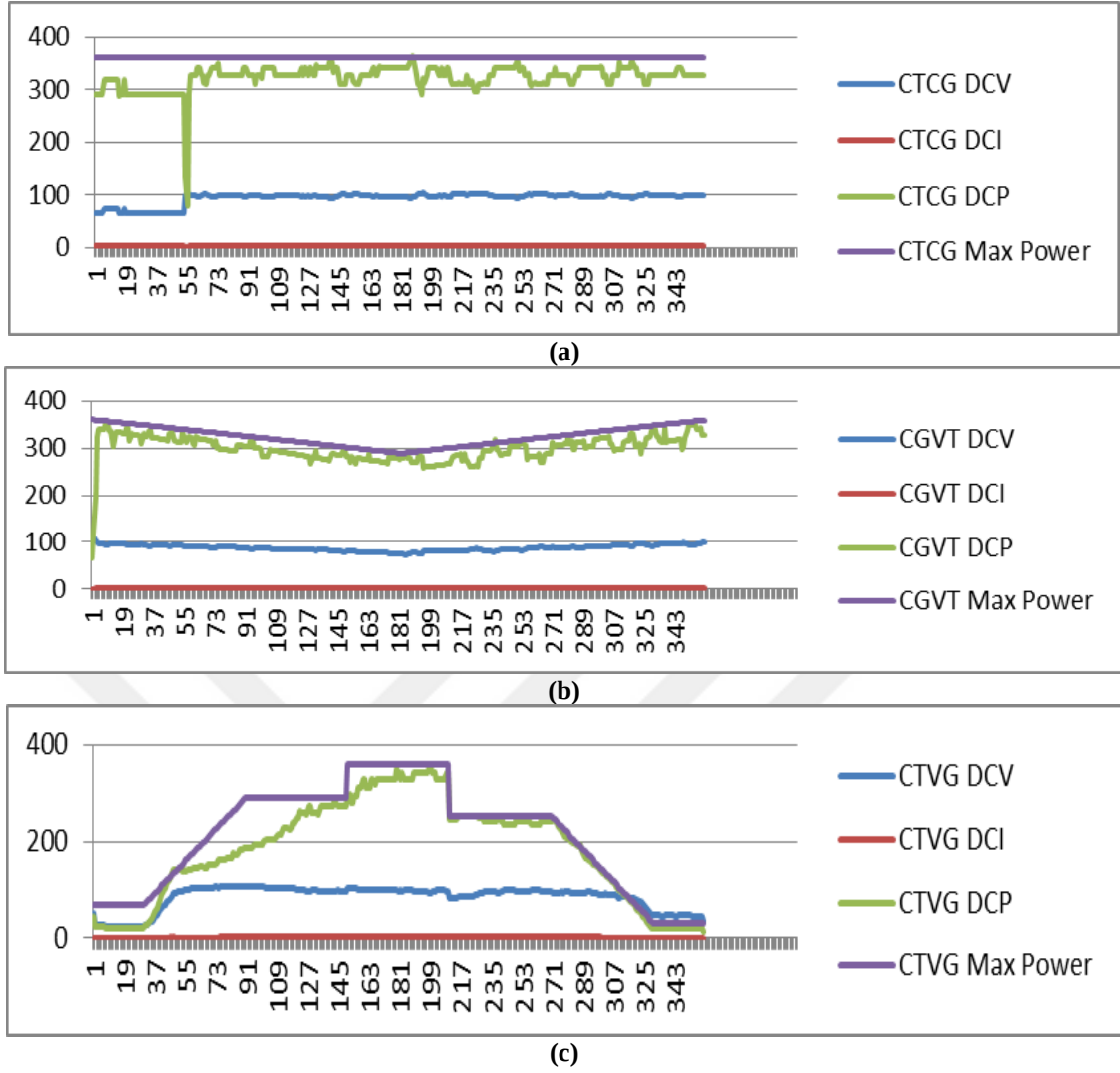
Şekil 4.15. (a) Sabit güneş ışıması, değişken ortam sıcaklığı profiline ait grafik, (b) seçilen profil altında panel çıkış gerilimi grafiği, (c) panelden çekilen akım, (d) panelin sağladığı güç grafiği

Son ortam profilinde ise sabit sıcaklık, değişken güneş ışıması altında FLC tekniğinin davranışları incelenerek Şekil 4.16’da grafikleri verilmiştir.



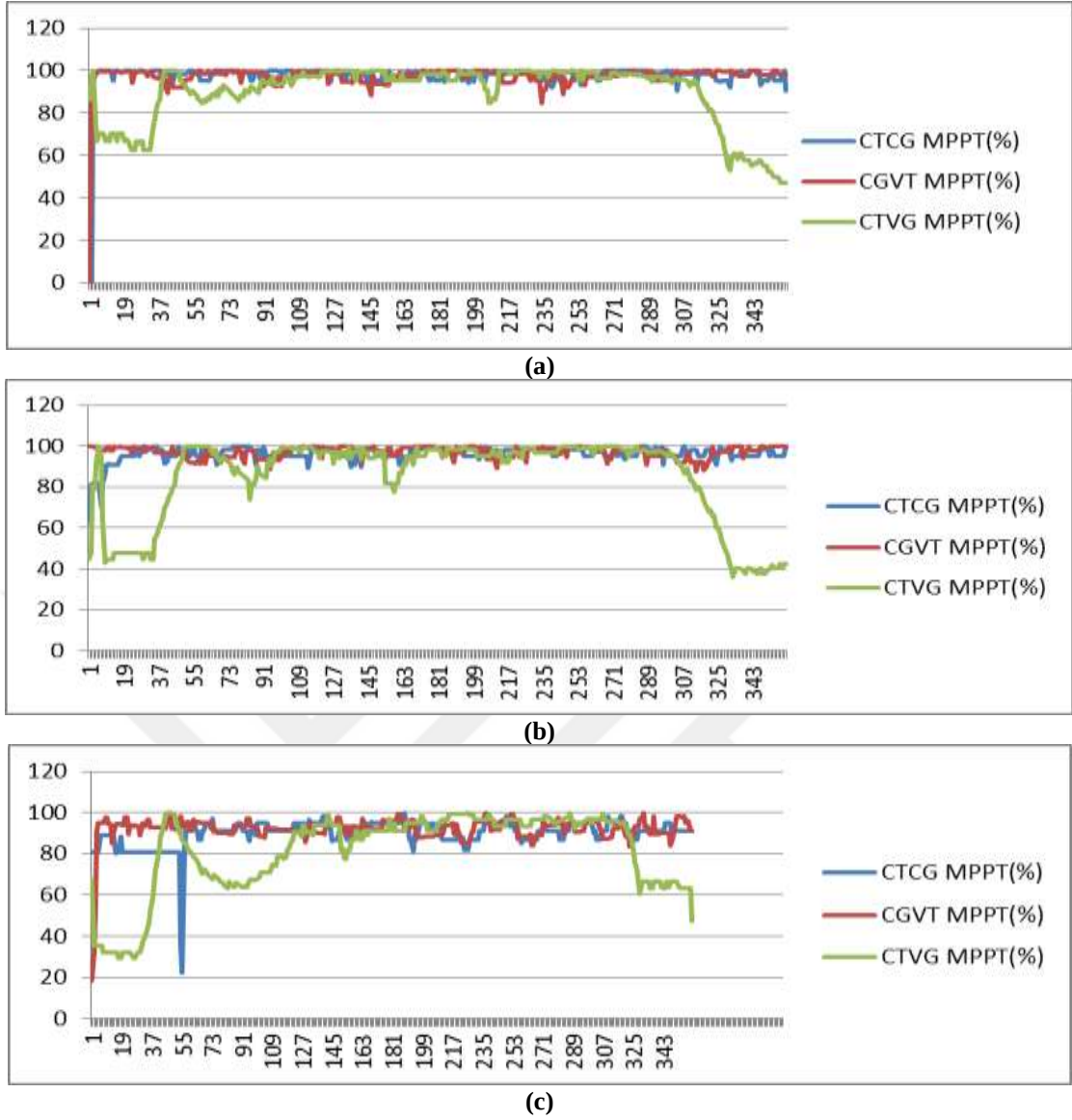
Şekil 4.16. (a) Değişken güneş ışıması, sabit ortam sıcaklığı profiline ait grafik, (b) seçilen profil altında panel çıkış gerilimi grafiği, (c) panelden çekilen akım, (d) panelin sağladığı güç grafiği

FLC tekniğini içeren MPPT algoritmasının işletimi esnasında elektriksel veriler üzerinde meydana gelen değişimlerin grafikleri Şekil 4.17’de verilmiştir.



Şekil 4.17. FLC tekniğinin üç ortam profili altındaki elektriksel veri grafikleri. **(a)** sabit sıcaklık (T), sabit güneş ışıması (G) altında dönüştürücünün giriş gerilimi (DCV), akımı (DCI) ve çıkış gücü (DCP), **(b)** değişken sıcaklık (T), sabit güneş ışıması (G) altında dönüştürücünün giriş gerilimi (DCV), akımı (DCI) ve çıkış gücü (DCP), **(c)** sabit sıcaklık (T), değişken güneş ışıması (G) altında dönüştürücünün giriş gerilimi (DCV), akımı (DCI) ve çıkış gücü (DCP)

Şekil 4.18'deki grafiklerden anlaşılmaktadır ki özellikle güneş ışımasının değişimi her üç MPPT tekniğini de olumsuz etkilemektedir. Genel maksimum güç noktasından yerel maksimum güç noktasına geçmesi veya tersi durumda algoritmalar yeni maksimum güç noktasını ararken güç grafiklerinin bozulduğu gözlemlenmiştir. Her yönden aynı donanımsal ve yazılımsal ortamda olmalarına rağmen verimleri bakımından en iyi P&O, ikinci sırada IC ve son sırada FLC'nin geldiği gözlemlenebilir. Güneş simülatörü, MPPT'leri işletmesi sırasında panel akımını, gerilimini ve gücünü ölçerek MPPT verimini kendi veri tabanına kaydeder. Algoritmalar arasındaki bu sıralamaya güneş simülatörünün veri tabanından alınan verim değerlerinin çizdirilmesi ile ulaşılmıştır.

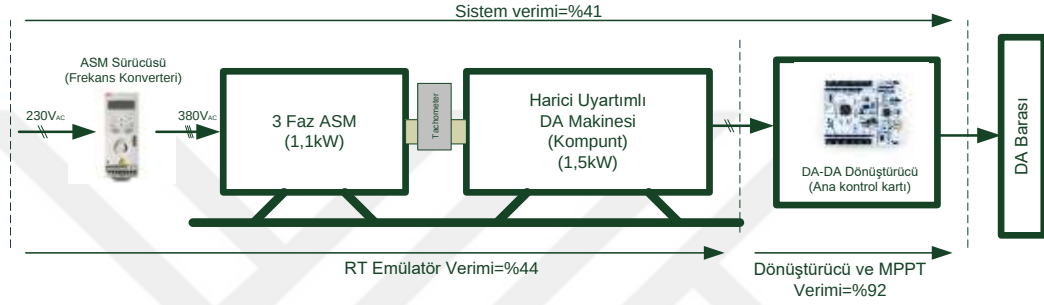


Şekil 4.18. (a) P&O tekniğinin üç ortam profili altındaki verim grafikleri, (b) IC tekniğinin üç ortam profili altındaki verim grafikleri, (c) FLC tekniğinin üç ortam profili altındaki verim grafikleri

4.2. Rüzgâr Emülatörü Üzerinde Sonuçlar ve Tartışma

Rüzgâr türbini emülatörü başarılı bir şekilde tasarlanmış ve uygulaması gerçekleştirilmiştir. Ancak rüzgâr türbini emülatörü üzerinde MPPT verimlerinin analiz edilmesi güçlü bir veri toplama ünitesi (data acquisition, DAQ) gerektirmektedir. Rüzgâr türbini emülatörünün tasarımındaki temel amaç rüzgâr türbini gibi davranan bir sistemin ortaya koyulmasıdır. Kullanıcılar rüzgâr türbini emülatörü ile enerji dönüşüm sistemi dışında dilerse su pompası, hava kompresörü vb. mekaniksel uygulamaları da gerçekleştirebilirler. Rüzgâr türbini emülatörüne MPPT algoritmasının eklenmesindeki amaç bu sistemin daha etkin kullanılmasını sağlamaktır. Ek olarak

sistemin sınırlarını belirlemek adına enerji dönüşüm sistemi uygulamalarına da yardımcı olmaktadır. Rüzgâr türbini emülatörü birden fazla güç dönüştürücüsüne sahiptir. Bu dönüştürücülerden asenkron motor sürücüsü ticari bir ürün olup diğer bileşenler tez kapsamında tasarlanmıştır. Tez kapsamında tasarlanan rüzgâr türbini emülatörü ile; elektrik şebekesinden alınan enerjinin çeşitli teknikler kullanılarak, meteorolojik rüzgâr verisinin de etkisi eklenerek tekrardan elektrik enerjisine dönüştürülmesi sağlanmıştır. Tüm bu süreçlerin çeşitli elektriksel ölçüm cihazları ile ölçülmesi sonucunda rüzgâr türbini emülatörünün verimi hesaplanmış ve Şekil 4.19 üzerinde gösterilmiştir.



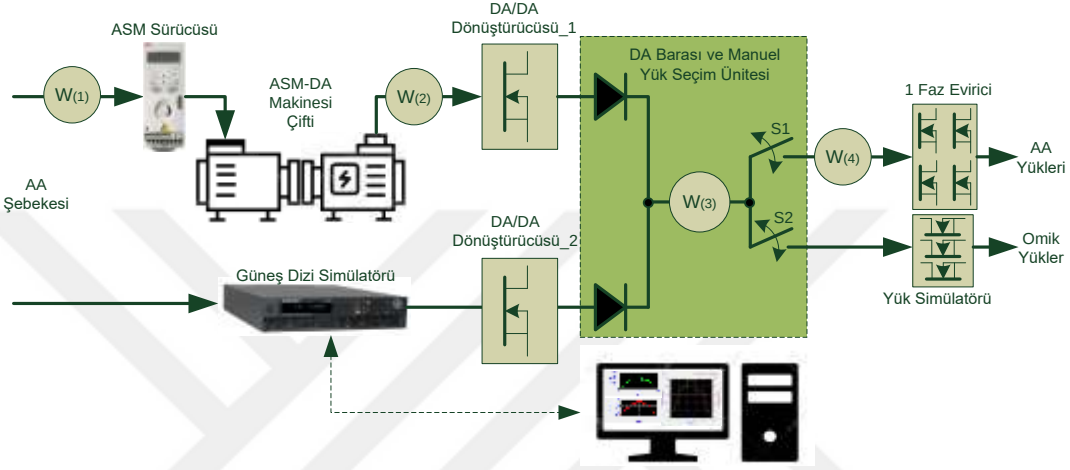
Şekil 4.19. Tez kapsamında tasarım ve uygulaması yapılan rüzgâr türbini emülatörünün bileşenleri üzerinden verim analizi görseli

Şekil 4.19’da verilen verim değerlerinin elde edilebilmesi için çeşitli ölçü aletlerinden faydalanılmıştır. Sistemin sabit koşullarda çalıştırılması ile şebekeden çekilen enerjinin her bir bileşen öncesine bağlanmış güç ölçerler ile ölçülmesi sonucunda verim değerleri elde edilmiştir. Buna göre şebekeden çekilen enerji, DA makinesi çıkışına ulaşana kadar % 56 kayba uğramaktadır. Bu kayıplar mekaniksel ve elektriksel olarak ortaya çıkarlar. Kayıplar; asenkron motor sürücüsü üzerinde güç elektroniği kayıpları, asenkron motor ve DA makinesi üzerinde elektriksel ve mekaniksel kayıplar olarak meydana gelir. DA makinesinin çıkışına bağlı olan DA-DA dönüştürücü ise bu enerjiyi % 8 kayıpla çıkışına aktarır. En genel haliyle şebekeden çekilen elektriksel enerji DA barasına bağlı olan yüklere aktarılincaya kadar % 59’unu kaybeder.

4.3. Sistemin Hibrit Çalıştırılması Üzerine Sonuçlar ve Tartışma

Bu bölümde tez kapsamında tasarım ve uygulaması yapılan enerji sistemi hibrit olarak çalıştırılmış ve davranışları gözlemlenmiştir. Bu kapsamda rüzgâr türbini

emülatörü ve güneş simülatörü aynı zamanda çalıştırılmış, AA yükleri bir fazlı evirici üzerinden beslenirken omik yükler ise yük simülatörü üzerinden enerji sistemine bağlanmıştır. Bu durumda oluşacak güç akışının ve yüklerin hangi oranda hangi kaynaktan beslendiği üzerine ölçümler yapılarak sonuçları değerlendirilmiştir. Hibrit olarak çalıştırılan sistemin analizini yapabilmek için oluşturulan ölçüm düzeneğine ait blok şeması Şekil 4.20’de verilmiştir.



Şekil 4.20. Tez kapsamında tasarım ve uygulaması yapılan tüm sistemin enerji verim analizini yapabilmek için oluşturulan ölçüm düzeneği bileşenleri

Ölçüm düzeneğinde bir adet AA güç analizörü asenkron motor sürücüsü girişine bağlanmıştır bu sayede rüzgâr türbini emülatörünün şebekeden çektiği enerji ölçülebilecektir. DA makinesi çıkışına bir adet DA ampermetre-voltmetre çifti bağlanmıştır. Bu ölçü aletleri ile DA makinesi çıkışında üretilen enerji hesaplanabilecektir, aynı zamanda rüzgâr türbini emülatörü üzerinde meydana gelen toplam enerji kaybı da ölçülebilecektir. Bir diğer DA ampermetre-voltmetre çifti DA barası çıkışına bağlanmıştır. Bu ölçü aleti çifti ise DA barası üzerindeki enerji akışı hakkında bilgi verecektir. Bu ölçü aleti çifti aynı zamanda DA-DA dönüştürücüler ve DA barası üzerinde meydana gelen kayıpları hesaplama imkânı sağlamaktadır. Son ampermetre-voltmetre çifti ise AA türünde ölçümler yapabilmektedir ve konum olarak bir fazlı evirici çıkışına bağlanmıştır. Bu sayede AA yüklerinin harcadığı enerji hesaplanabilecektir. Güneş simülatörü üzerinden harcanan enerji ise güneş dizi simülatörü kullanıcı arayüzünden okunacaktır. Tez kapsamında kullanılan iki dönüştürücü de aynı güç ve tasarım değerlerine sahip olduğundan ikinci dönüştürücü çıkışına ölçü aleti bağlanmasına gerek duyulmamıştır. Sistemin Şekil 4.20’deki ölçüm

düzenine göre hibrit olarak çalıştırılması sonucunda ölçülen değerler ve sistemin verim analizi Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1.Sistemin hibrit çalıştırılması sonucunda elde edilen elektriksel değerler tablosu

W(1) (W)	W(2) (W)	Rüz. Tür. Emülatör Verimi	Güneş Sim. Çıkış Gücü (W)	DA Barası Giriş Gücü (W)	W(3) (W)	Toplam MPPT Verimi (%)	Tüm Sis. Verimi (%)
256	84,9	33	67,4	152,4	136,5	89	53
504	217,6	43,1	94,65	312,61	270,2	86	53
720	328	45	90,9	416,18	374,7	89	52
1004	482,4	48	43	525,4	456,8	88	46
Ort. Ver. (%)	-	42	-	-	-	88	51

Çizelge 4.1’den de anlaşılabileceği üzere tasarım ve uygulaması yapılan hibrit enerji sistemi dört farklı güç değerinde çalıştırılmıştır. Bu değerler üzerinden, tasarımı yapılan rüzgâr türbini emülatörünün mekaniksel ve elektriksel kayıpları sonucunda ortalama % 42 verim ile çalıştığı, hem rüzgâr türbini emülatörü hem de güneş simülatörü çıkışında bulunan DA-DA dönüştürücülerin MPPT verimlerinin ortalama % 88 ve tüm sistem veriminin ise ortalama % 51 olduğu sonucuna varılmıştır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Bu tez çalışmasında meteorolojik verileri kullanarak rüzgâr enerjisi ve güneş enerjisi kaynağı gibi davranan bir sistemin oluşturulması hedeflenmiştir. Gerçekleştirilen hibrit enerji sisteminde merkezi bir DA bara mimarisi kullanılmış, solar simülatör ve rüzgâr türbini emülatörünün yanında sistem temel olarak ayrı ayrı gerçekleştirilen DA-DA dönüştürücüler, 1 fazlı sinüzoidal darbe genişlik modüleli gerilim kaynaklı evirici içermiştir. Ek olarak tasarlanan sistemler üzerinde günümüzde popüler sayılan P&O, IC ve FLC tekniğini temel alan maksimum güç noktası takibi algoritmalarının denenebilmesine ve analiz edilebilmesine imkân sağlanmıştır. Tasarlanan sistem, laboratuvar ortamında ve küçük ölçekli bir yapıdadır. Tasarlanan yapı, rüzgâr enerji sistemini temsilen 1,5 kW'lık güce sahip rüzgâr türbini gibi davranan bir emülatörden ve güneş enerji kaynağını temsilen 2,4 kW güce sahip güneş dizi simülatöründen meydana gelir. Bu iki kaynak dışarıdan kullanıcı arayüzleri aracılığıyla girilen rüzgâr hızı, güneş ışıması ve ortam sıcaklığı verileri üzerinden rüzgâr enerji kaynağı ve güneş enerji kaynağı gibi davranır. Ayrıca kullanıcılar çeşitli verim artırıcı algoritmalar veya MPPT algoritmalarını denemek amacıyla her bir enerji kaynağının çıkışına bağlanmış olan izolesiz DA-DA dönüştürücüler üzerinde çalışmalar yapabilmektedir. Bunlara ek olarak iki kaynağın üretmiş olduğu DA türündeki elektrik enerjisi DA barasında toplanmıştır. DA türündeki elektrik enerjisi istenildiğinde DA yüklerini, istenildiğinde ise mikro evirici yapısı üzerinden AA yüklerini besleyebilmektedir. DA yüklerini temsilen omik yük simülatörü tasarlanmıştır. Omik yük simülatörü sayesinde bir döngüye bağlı olarak 0,5 kW, 1 kW, 1,5 kW'lık omik yük gruplarının devreye alınması ve devreden çıkartılması ile kararsız davranan bir yük karakteristiği oluşturulabilmektedir. Rüzgâr emülatörü için tasarlanan arayüz sade ve kullanıcı dostu bir niteliğe sahiptir. Kullanıcılar kendi belirledikleri veya gerçek ölçümlerden temin ettikleri m/s cinsinden rüzgâr hızlarını sisteme yükleyip onlar üzerinden MPPT veya diğer algoritmaları analiz edebilmektedir. Bu algoritmaların analizleri arayüz üzerinden kullanıcının tercihiye göre yapılabilmektedir. Güneş dizi simülatörü ticari bir ürün olduğu için arayüzüne müdahale etmek mümkün değildir. Bu sebeple P&O, IC ve FLC tekniklerini içeren MPPT algoritmaları güneş simülatörü için tasarlanan DA-DA dönüştürücü üzerinden manuel olarak seçilebilmekte ve analizleri

güneş dizi simülatörü arayüzü üzerinden yapılabilmektedir. Tez kapsamında tasarlanan rüzgâr türbini emülatörü tüm kayıpların tespiti ile % 59 verimle çalışırken, her iki sistem bünyesinde bulunan izolesiz DA-DA dönüştürücüler ortalama % 89 verimle enerji dönüşümü yapabilmektedirler. Tasarım ve uygulaması yapılan sistem istenildiğinde tek yapı; rüzgâr türbini emülatörü veya güneş simülatörü olarak, istenildiğinde ise hibrit olarak çalıştırılabilmektedir. Ek olarak omik yük grubunun veya AA yüklerinin de kullanımı isteğe bağlı olarak kullanıcı tarafından belirlenebilmektedir.

5.2 Öneriler

- Bulanık mantık denetleyicisinin verimini artırabilmek için dönüştürücü giriş akım ve gerilimi parametreleri dışında; rüzgâr türbini emülatörü için rüzgâr hızı ve kanat açışı gibi bilgiler kullanılabilirken güneş simülatörü için panel/ortam sıcaklığı ve güneş ışıması bilgileri kullanılabilir.
- P&O, IC ve FLC tekniklerini içeren MPPT algoritmaları maksimum güç noktasına ulaştıklarında bu noktada kalabilmek için yaptıkları denemeler sonucunda salınımlar meydana gelmektedir. Bu salınımlar, kimi tekniklerin tasarımı sırasında sabit adım yerine değişken adım kullanılması, FLC tekniği için üyelik fonksiyonlarının sayısını arttırmak faydalı olabilir.
- MPPT verimlerin artırılması ve maksimum güç noktasındaki salınımlar, tasarım esnasında kullanılan akım-gerilim sensörleri ve okuma devrelerinin üzerinde yapılacak geliştirmeler ile azaltılabilir.
- Tekniklerin tasarımlarında kullanılan değişken adım yöntemi aynı zamanda algoritmaya, sistemlerin maksimum güç noktasına daha hızlı ulaşmasında da yardımcı olur.
- Bütün bileşenler için daha hızlı ve daha fazla işlem kapasitesine sahip mikrodenetleyiciler kullanılabilir.
- Artıran dönüştürücü yapısındaki bobinin anahtarlama elemanı üzerinden devreye alınması ve devreden çıkartılması esnasında vurutular oluşur. Bu vurutular akım ve gerilim değerleri üzerinde zıplamalara sebep olur. Tasarlanan DA-DA dönüştürücülerin izolesiz olması bu dönüştürücülerin kontrol edilmesi esnasında ciddi problemler çıkarabilmektedir. İzolesiz yapılarda ortak şase oluşur, bu durum okunan akım ve gerilim değerinde hatalara dolayısıyla MPPT algoritmalarının yanlış işlemesine sebep olur. Ek olarak sistemi kontrol eden mikrodenetleyicinin çalışma esnasında

tıkanmasına, reset atmasına ve aşırı gerilim yüzünden bozulmasına sebep olabilir. Geliştirmeler esnasında dönüştürücü çıkışında 400 V, 4 A, dönüştürücü girişinde ise 200 V, 8 A gibi değerlere ulaşılmıştır. Bu değerlerin izolesiz yapılarda kullanılması zordur. Ancak tasarım esnasında güç katının diğer bileşenlerden optik ve elektriksel yöntemler ile izole edilmesi ile bu durumlardan sakınılmıştır. Alternatif olarak izolesiz DA-DA dönüştürücü yerine yüksek frekanslı transformatör kullanılan Fly-Back Boost veya Forward Boost dönüştürücü yapılarına yer verilmesi ile izolasyon ve kontrol kolaylığı sağlanabilir.

- Hibrit enerji sisteminin yapısında bulunan DA barası sayesinde sisteme daha farklı yapıda enerji kaynaklarının eklenmesi ile sistemin kapsamı ve niteliği geliştirilebilir.
- Akü/batarya grupları ve yakıt pilleri gibi diğer kaynak ve enerji depolama sistemleri eklenerek sistem daha kapsamlı hale getirilebilir.
- Deneysel olarak geliştirilen hibrit yapı ile enerji yönetimi yapmak da mümkün olacaktır. Yüklerin hangi oranda hangi kaynak tarafından besleneceği üzerine mevcut yöntemlerin analizi yapılabilir veya çeşitli yöntemler sistem üzerinde kolaylıkla geliştirilebilir. Hibrit sistem ayrıca akıllı şebeke uygulamalarının gerçekleştirilebilmesi, maksimum güç noktası izleme yönteminin yerine akıllı şebekeler için uygun olabilecek esnek güç noktası izleme algoritmalarının geliştirilmesine de uygun yapıdadır. Şebeke entegrasyonu sağlanarak, şebeke frekansındaki değişimlere göre aktif güç kontrolü gerçekleştirilebilir.
- Tez kapsamında tasarım ve uygulaması yapılan hibrit enerji sisteminin küçük ölçekte olması, kullanımının kolay olması ve gelişime açık olması gibi avantajları ile eğitim maksatlı kullanımı pek çok açıdan fayda sağlayacaktır.
- Sistemin bir diğer bileşeni olan yük simülatörü yapısında bulunan omik yük grubu yerine çeşitli türden akü/batarya gruplarının bağlanması ile sistemin çeşitli yapıdaki akü/batarya grupları üzerindeki davranışlarının araştırılmasına imkân sağlayabilir.
- Benzer şekilde omik yük grupları yerine endüktif yapıdaki DA yükleri de (DA motorları) bağlanabilir ve incelemeler yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Abdel-Salam, M., El-Mohandes, M. T. ve El-Ghazaly, M., 2020, An Efficient Tracking of MPP in PV Systems Using a Newly-Formulated P&O-MPPT Method Under Varying Irradiation Levels, *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 15 (1), 501-513.
- AbuElrub, A., Al-Masri, H. M. K. ve Singh, C., 2020, Hybrid wind-solar grid-connected system planning using scenario aggregation method, *International Transactions on Electrical Energy Systems*.
- Abuseada, M., Ophoff, C. ve Ozalp, N., 2019, Characterization of a New 10 kW(e) High Flux Solar Simulator Via Indirect Radiation Mapping Technique, *Journal of Solar Energy Engineering-Transactions of the Asme*, 141 (2).
- Abuseada, M. ve Ozalp, N., 2020, Numerical Characterization of a High Flux Solar Simulator Using Forward and Inverse Methods, *Journal of Heat Transfer-Transactions of the Asme*, 142 (2).
- Agamloh, E. B., 2017, Power and Efficiency Measurement of Motor-Variable-Frequency Drive Systems, *Ieee Transactions on Industry Applications*, 53 (1), 766-773.
- Agarwal, N. K., Sadhu, P. K. ve Chakraborty, S., 2019, MPPT Based PMSG Wind Turbine System Using Sliding Model Control (SMC) and Artificial Neural Network (ANN) Based Regression Analysis, *Iete Journal of Research*.
- Ahmadzadeh, S. ve Markadeh, G. A., 2017, Incremental Conductance Based MPPT Using A High Step-Up V-Source DC-DC Converter, 2017 8th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference (Pedstc), 543-548.
- Ajewole, T. O., Alawode, K. O., Omoigui, M. O. ve Oyekanmi, W. A., 2017, Design validation of a laboratory-scale wind turbine emulator, *Cogent Engineering*, 4 (1).
- Aldair, A. A., Obed, A. A. ve Halihal, A. F., 2018, Design and implementation of ANFIS-reference model controller based MPPT using FPGA for photovoltaic system, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 82, 2202-2217.
- Alhajomar, F., Gokkus, G. ve Kulaksiz, A. A., 2019, Rapid Control Prototyping Based on 32-bit ARM Cortex-M3 Microcontroller for Photovoltaic MPPT Algorithms, *International Journal of Renewable Energy Research*, 9 (4), 1938-1947.
- Alsumiri, M., 2019, Residual Incremental Conductance Based Nonparametric MPPT Control for Solar Photovoltaic Energy Conversion System, *Ieee Access*, 7, 87901-87906.
- Bajonero-Sandoval, D. F., Sanabria-Vargas, J. ve Trujillo-Rodriguez, C. L., 2020, Design and Implementation of a Low Power Wind Turbine Emulator Through the Induction Motor-Permanent Magnet Generator Arrangement, *Revista Facultad De Ingenieria, Universidad Pedagogica Y Tecnologica De Colombia*, 29 (54).

- Bakir, H. ve Kulaksiz, A. A., 2020, Modelling and voltage control of the solar-wind hybrid micro-grid with optimized STATCOM using GA and BFA, *Engineering Science and Technology-an International Journal-Jestech*, 23 (3), 576-584.
- Bardizza, G., Salis, E. ve Dunlop, E. D., 2020, Power matrix of OPV mini-module under steady conditions of temperature and irradiance at large-area solar simulator, *Solar Energy*, 204, 542-551.
- Bayrak, G. ve Kabalci, E., 2016, Implementation of a new remote islanding detection method for wind-solar hybrid power plants, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 58, 1-15.
- Belarbi, M., Haddouche, K., Sahli, B., Belarbi, E., Boudghene-Stambouli, A. ve Khiali, B., 2018, Self-reconfiguring MPPT to avoid buck-converter limits in solar photovoltaic systems, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 82, 187-193.
- Belmokhtar, K., Doumbia, M. L. ve Agbossou, K., 2014, Novel fuzzy logic based sensorless maximum power point tracking strategy for wind turbine systems driven DFIG (doubly-fed induction generator), *Energy*, 76, 679-693.
- Benaouinate, L., Khafallah, M., Voyer, D., Mesbahi, A. ve Bouragba, T., 2020, Nonlinear Control Based on Fuzzy Logic for a Wind Energy Conversion System Connected to the Grid, *International Journal of Renewable Energy Research*, 10 (1), 193-204.
- Bentouati, L., Cheknane, A., Benyoucef, B. ve Barambones, O., 2020, An improved DC-DC converter with high voltage gain based on fully tapped quadratic boost converter for grid connected solar PV micro-inverter, *Transactions of the Institute of Measurement and Control*.
- Bharani, R. ve Sivaprakasam, A., 2020, A Review Analysis on Performance and Classification of Wind Turbine Gearbox Technologies, *Iete Journal of Research*.
- Bhaskar, M. S., Almakhlles, D. J., Padmanaban, S., Blaabjerg, F., Subramaniam, U. ve Ionel, D. M., 2020, Analysis and Investigation of Hybrid DC & x2013;DC Non-Isolated and Non-Inverting Nx Interleaved Multilevel Boost Converter (Nx-IMBC) for High Voltage Step-Up Applications: Hardware Implementation, *Ieee Access*, 8, 87309-87328.
- Bihari, S. P., Sadhu, P. K., Das, S., Arvind, P. ve Gupta, A., 2019, Design and Implementation of a Photovoltaic Wind Hybrid System with the Assessment of Fuzzy Logic Maximum Power Point Technique, *Revue Roumaine Des Sciences Techniques-Serie Electrotechnique Et Energetique*, 64 (3), 235-240.
- Bodnar, I., Koos, D., Iski, P. ve Skribanek, A., 2020, Design and Construction of a Sun Simulator for Laboratory Testing of Solar Cells, *Acta Polytechnica Hungarica*, 17 (3), 165-184.

- Bollipo, R. B., Mikkili, S. ve Bonthagorla, P. K., 2020, Critical Review on PV MPPT Techniques: Classical, Intelligent and Optimisation, *Iet Renewable Power Generation*, 14 (9), 1433-1452.
- Bosnjakovic, M. ve Tadijanovic, V., 2019, Environment Impact of a Concentrated Solar Power Plant, *Tehnicki Glasnik-Technical Journal*, 13 (1), 68-74.
- Boukezata, B., Chaoui, A., Gaubert, J. P. ve Hachemi, M., 2016, An improved fuzzy logic control MPPT based P&O method to solve fast irradiation change problem, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 8 (4).
- Castello, J., Espi, J. M. ve Garcia-Gil, R., 2016, Development details and performance assessment of a Wind Turbine Emulator, *Renewable Energy*, 86, 848-857.
- Ceran, B., Hassan, Q., Jaszczur, M. ve Sroka, K., 2017, An analysis of hybrid power generation systems for a residential load, *Energy and Fuels* 2016, 14.
- Chang, C. H., Chang, E. C. ve Cheng, H. L., 2013, A High-Efficiency Solar Array Simulator Implemented by an LLC Resonant DC-DC Converter, *Ieee Transactions on Power Electronics*, 28 (6), 3039-3046.
- Chen, W. T., Wang, X. Y., Zhang, F. S., Liu, H. W. ve Lin, Y. G., 2020, Review of the application of hydraulic technology in wind turbine, *Wind Energy*, 23 (7), 1495-1522.
- Choi, Y. G., Lee, H. S., Kang, B., Lee, S. C. ve Yoon, S. J., 2019, Compact Single-Stage Micro-Inverter with Advanced Control Schemes for Photovoltaic Systems, *Energies*, 12 (7).
- 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.
- Dubey, S. ve Tay, A. A. O., 2013, Testing of two different types of photovoltaic-thermal (PVT) modules with heat flow pattern under tropical climatic conditions, *Energy for Sustainable Development*, 17 (1), 1-12.
- Dursun, E. H. ve Kulaksiz, A. A., 2020, MPPT Control of PMSG Based Small-Scale Wind Energy Conversion System Connected to DC-Bus, *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, 21 (2).
- El Mentaly, L., Amghar, A. ve Sahsah, H., 2019, Comparison between Seven MPPT Techniques Implemented in a Buck Converter, *Recent Advances in Electrical & Electronic Engineering*, 12 (6), 476-486.
- Esen, V., Saglam, S., Oral, B. ve Esen, O. C., 2020, Spectrum Measurement of Variable Irradiance Controlled LED-Based Solar Simulator, *International Journal of Renewable Energy Research*, 10 (1), 109-116.

- Farahani, M., Shamsi-nejad, M. A. ve Najafi, H. R., 2020, Design and construction of a digital solar array simulator with fast dynamics and high performance, *Solar Energy*, 196, 319-326.
- Farzaneh, J., 2020, A hybrid modified FA-ANFIS-P&O approach for MPPT in photovoltaic systems under PSCs, *International Journal of Electronics*, 107 (5), 703-718.
- Figaj, R., Zoladek, M. ve Goryl, W., 2020, Dynamic Simulation and Energy Economic Analysis of a Household Hybrid Ground-Solar-Wind System Using TRNSYS Software, *Energies*, 13 (14).
- Gadelovits, S., Sitbon, M. ve Kuperman, A., 2014, Rapid Prototyping of a Low-Cost Solar Array Simulator Using an Off-the-Shelf DC Power Supply, *Ieee Transactions on Power Electronics*, 29 (10), 5278-5284.
- Gan, L. K., Shek, J. K. H. ve Mueller, M. A., 2017, Modeling and Characterization of Downwind Tower Shadow Effects Using a Wind Turbine Emulator, *Ieee Transactions on Industrial Electronics*, 64 (9), 7087-7097.
- Garraoui, R., Ben Hamed, M. ve Sbita, L., 2017, MPPT Controllers Based on Sliding-Mode Control Theory and Fuzzy Logic in Photovoltaic Power Systems: A Comparative Study, *Applications of Sliding Mode Control*, 79, 215-231.
- Geetha, P. ve Ravi, S., 2018, PV Module Integrated Dual Boost Isolated dc-dc Converter Fed Three-Phase Micro-Inverter, *Journal of Testing and Evaluation*, 46 (3), 1145-1157.
- Gokkus, G., ve Kulaksiz, A. A. (2020). Design and Implementation of a Wind Turbine Emulator Using an Induction Motor and Direct Current Machine. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, 10(3), 1426-1438.
- Geleta, D. K., Manshahia, M. S., Vasant, P. ve Banik, A., 2020, Grey wolf optimizer for optimal sizing of hybrid wind and solar renewable energy system, *Computational Intelligence*.
- Gowrishankara, C. K., Abhishek, K. P. ve Krishnan, V., 2011, Advanced Solar Array Simulator, *Journal of Spacecraft Technology*, 21 (2), 13-23.
- Harasimczuk, M. ve Dawidziuk, J., 2020, Overview of non-isolated boost converters with coupled inductors, *Przegląd Elektrotechniczny*, 96 (7), 19-23.
- Harrag, A. ve Bahri, H., 2017, Novel neural network IC-based variable step size fuel cell MPPT controller Performance, efficiency and lifetime improvement, *International Journal of Hydrogen Energy*, 42 (5), 3549-3563.
- Harrag, A. ve Messalti, S., 2017, Variable Step Size IC MPPT Controller for PEMFC Power System Improving Static and Dynamic Performances, *Fuel Cells*, 17 (6), 816-824.

- Harrag, A. ve Messalti, S., 2019, PSO-based SMC variable step size P&O MPPT controller for PV systems under fast changing atmospheric conditions, *International Journal of Numerical Modelling-Electronic Networks Devices and Fields*, 32 (5).
- Himani ve Dahiya, R., 2016, Condition monitoring of a wind turbine generator using a standalone wind turbine emulator, *Frontiers in Energy*, 10 (3), 286-297.
- Jain, S. ve Saha, U. K., 2020, The State-of-the-Art Technology of H-Type Darrieus Wind Turbine Rotors, *Journal of Energy Resources Technology-Transactions of the Asme*, 142 (3).
- Jassim, B. M. H. ve Jasim, H. M., 2018, Modelling of a Solar Array Simulator based on Multiple DC-DC Converters, *International Journal of Renewable Energy Research*, 8 (2), 1038-1044.
- Jee, H., Song, J., Moon, D., Lee, J. ve Jeong, C., 2020, Improvement in Power of Shingled Solar Cells for Photo-Voltaic Module, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 20 (11), 7096-7099.
- Jiang, J. A., Su, Y. L., Kuo, K. C., Wang, C. H., Liao, M. S., Wang, J. C., Huang, C. K., Chou, C. Y., Lee, C. H. ve Shieh, J. C., 2017, On a hybrid MPPT control scheme to improve energy harvesting performance of traditional two-stage inverters used in photovoltaic systems, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 69, 1113-1128.
- Jin, J., Hao, Y. ve Jin, H. G., 2019, A universal solar simulator for focused and quasi-collimated beams, *Applied Energy*, 235, 1266-1276.
- Jin, S. S., Zhang, D. L. ve Wang, C., 2018, UI-RI Hybrid Lookup Table Method With High Linearity and High-Speed Convergence Performance for FPGA-Based Space Solar Array Simulator, *Ieee Transactions on Power Electronics*, 33 (8), 7178-7192.
- Kandemir, E., Borekci, S. ve Cetin, N. S., 2018, Comparative Analysis of Reduced-Rule Compressed Fuzzy Logic Control and Incremental Conductance MPPT Methods, *Journal of Electronic Materials*, 47 (8), 4463-4474.
- Karabacak, M., 2019, A new perturb and observe based higher order sliding mode MPPT control of wind turbines eliminating the rotor inertial effect, *Renewable Energy*, 133, 807-827.
- Karami, N., Moubayed, N. ve Outbib, R., 2017, General review and classification of different MPPT Techniques, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 68, 1-18.
- Kavya, M. ve Jayalalitha, S., 2020, Developments in Perturb and Observe Algorithm for Maximum Power Point Tracking in Photo Voltaic Panel: A Review, *Archives of Computational Methods in Engineering*.

- Khan, F. U., Gulzar, M. M., Sibtain, D., Usman, H. M. ve Hayat, A., 2020, Variable step size fractional incremental conductance for MPPT under changing atmospheric conditions, *International Journal of Numerical Modelling-Electronic Networks Devices and Fields*.
- Kota, V. R. ve Bhukya, M. N., 2017, A novel linear tangents based P & O scheme for MPPT of a PV system, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 71, 257-267.
- Kumar, D. ve Chatterjee, K., 2016, A review of conventional and advanced MPPT algorithms for wind energy systems, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 55, 957-970.
- Kumar, K., Babu, N. R. ve Prabhu, K. R., 2017, Design and Analysis of Modified Single P&O MPPT Control Algorithm for a Standalone Hybrid Solar and Wind Energy Conversion System, *Gazi University Journal of Science*, 30 (4), 296-312.
- Kumar, P. S., Chandrasena, R. P. S. ve Babu, K. V. S. M., 2020, Design and implementation of wind turbine emulator using FPGA for stand-alone applications, *International Journal of Ambient Energy*.
- Lakshmi, B., Sujatha, M. S., Kumar, N. M. G. ve Girish, N., 2020, MPPT Using P&O and IC Based PI Controller for Solar PV System with Charge Controller, *Helix*, 10 (2), 184-194.
- Leicht, J. ve Manoli, Y., 2017, A 2.6 μ W-1.2 mW Autonomous Electromagnetic Vibration Energy Harvester Interface IC with Conduction-Angle-Controlled MPPT and up to 95% Efficiency, *Ieee Journal of Solid-State Circuits*, 52 (9), 2448-2462.
- Li, L. F., Wang, B., Pottas, J. ve Lipinski, W., 2019, Design of a compound parabolic concentrator for a multi-source high-flux solar simulator, *Solar Energy*, 183, 805-811.
- Li, P. Y., Zheng, T. L., Li, L., Ma, Y. Q., Sun, X. ve Liu, J. X., 2020, An appropriate technique for treating rural wastewater by a flow step feed system driven by wind-solar hybrid power, *Environmental Research*, 187.
- Liao, C. Y., Lin, W. S., Chen, Y. M. ve Chou, C. Y., 2017, A PV Micro-inverter With PV Current Decoupling Strategy, *Ieee Transactions on Power Electronics*, 32 (8), 6544-6557.
- Lopez-Flores, D. R., Duran-Gomez, J. L. ve Chacon-Murguia, M. I., 2020, A Mechanical Sensorless MPPT Algorithm for a Wind Energy Conversion System based on a Modular Multilayer Perceptron and a Processor-in-the-Loop Approach, *Electric Power Systems Research*, 186.
- Lopez-Fraguas, E., Sanchez-Pena, J. M. ve Vergaz, R., 2019, A Low-Cost LED-Based Solar Simulator, *Ieee Transactions on Instrumentation and Measurement*, 68 (12), 4913-4923.

- Lougou, B. G., Shuai, Y., Zhang, H., Ahouannou, C., Zhao, J. P., Kounouhewa, B. B. ve Tan, H. P., 2020, Thermochemical CO₂ reduction over NiFe₂O₄@alumina filled reactor heated by high-flux solar simulator, *Energy*, 197.
- Madan, C. ve Kumar, N., 2020, Enhancement of low voltage ride-through ability of the photovoltaic array aided by the MPPT algorithm connected with wind turbine, *Data Technologies and Applications*.
- Manoj, P. S., Vijayakumari, A. ve Kottayil, S. K., 2019, Development of a comprehensive MPPT for grid-connected wind turbine driven PMSG, *Wind Energy*, 22 (6), 732-744.
- Marimuthu, M., Vijayalakshmi, S. ve Shenbagalakshmi, R., 2020, A Novel Non-isolated Single Switch Multilevel Cascaded DC-DC Boost Converter for Multilevel Inverter Application, *Journal of Electrical Engineering & Technology*.
- Maroufi, O., Choucha, A. ve Chaib, L., 2020, Hybrid fractional fuzzy PID design for MPPT-pitch control of wind turbine-based bat algorithm, *Electrical Engineering*.
- Martinez-Manuel, L., Pena-Cruz, M. I., Pineda-Arellano, C. A., Carrillo-Baeza, J. G. ve May-Arrioja, D. A., 2019, Optical improvement for modulating a high flux solar simulator designed for solar thermal and thermochemical research, *Applied Optics*, 58 (10), 2605-2615.
- Martinez-Marquez, C. I., Twizere-Bakunda, J. D., Lundback-Mompo, D., Orts-Grau, S., Gimeno-Sales, F. J. ve Segui-Chilet, S., 2019, Small Wind Turbine Emulator Based on Lambda-Cp Curves Obtained under Real Operating Conditions, *Energies*, 12 (13).
- Meghni, B., Ouada, M. ve Saad, S., 2020, A novel improved variable-step-size P&O MPPT method and effective supervisory controller to extend optimal energy management in hybrid wind turbine, *Electrical Engineering*, 102 (2), 763-778.
- Mehrjerdi, H., 2020, Modeling and optimization of an island water-energy nexus powered by a hybrid solar-wind renewable system, *Energy*, 197.
- Mekki, M., Allaoui, T., Belabbas, B. ve Denai, M., 2020, Decoupling Vector Control and Optimisation of PMSG-Based Wind Energy System Using Adaptive Type-1 and Type-2 Fuzzy Logic Control, *Przeglad Elektrotechniczny*, 96 (8), 112-117.
- Messalti, S., Harrag, A. ve Loukriz, A., 2017, A new variable step size neural networks MPPT controller: Review, simulation and hardware implementation, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 68, 221-233.
- Meyer, E. L. ve Nwodo, J. C., 2020, Autonomous Dynamic Adaptability System to Maintain Irradiance Levels in a Steady-State Solar Simulator, *Applied Sciences-Basel*, 10 (13).

- Mohammadi, E., Fadaeinedjad, R. ve Naji, H. R., 2018, Using a new wind turbine emulator to analyze tower shadow and yaw error effects, *Energy Conversion and Management*, 174, 378-387.
- Mohammadi, F., Farhadi-Kangarlu, M., Rastegar, H., Khorsandi, A. ve Pichan, M., 2019a, P-type non-isolated boost DC-DC converter with high voltage gain and extensibility for DC microgrid applications, *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 47 (11), 1812-1836.
- Mohapatra, A., Nayak, B., Das, P. ve Mohanty, K. B., 2017, A review on MPPT techniques of PV system under partial shading condition, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 80, 854-867.
- Moness, M., Mahmoud, M. O. ve Moustafa, A. M., 2018, A Real-Time Heterogeneous Emulator of a High-Fidelity Utility-Scale Variable-Speed Variable-Pitch Wind Turbine, *Ieee Transactions on Industrial Informatics*, 14 (2), 437-447.
- Moness, M. ve Moustafa, A. M., 2020, Real-Time Switched Model Predictive Control for a Cyber-Physical Wind Turbine Emulator, *Ieee Transactions on Industrial Informatics*, 16 (6), 3807-3817.
- Monteiro, L. F. C., Freitas, C. M. ve Bellar, M. D., 2019, Improvements on the Incremental Conductance MPPT Method Applied to a PV String with Single-Phase to Three-Phase Converter for Rural Grid Applications, *Advances in Electrical and Computer Engineering*, 19 (1), 63-70.
- Motahhir, S., El Hammoumi, A. ve El Ghzizal, A., 2020, The most used MPPT algorithms: Review and the suitable low-cost embedded board for each algorithm, *Journal of Cleaner Production*, 246.
- Mousa, H. H. H., Youssef, A. R. ve Mohamed, E. E. M., 2019a, Modified P&O MPPT algorithm for optimal power extraction of five-phase PMSG based wind generation system, *Sn Applied Sciences*, 1 (8).
- Mousa, H. H. H., Youssef, A. R. ve Mohamed, E. E. M., 2019b, Variable step size P&O MPPT algorithm for optimal power extraction of multi-phase PMSG based wind generation system, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 108, 218-231.
- Mousa, H. H. H., Youssef, A. R. ve Mohamed, E. E. M., 2019c, Adaptive P&O MPPT algorithm based wind generation system using realistic wind fluctuations, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 112, 294-308.
- Mousa, H. H. H., Youssef, A. R. ve Mohamed, E. E. M., 2020, Hybrid and adaptive sectors P&O MPPT algorithm based wind generation system, *Renewable Energy*, 145, 1412-1429.
- Moussa, I., Bouallegue, A. ve Khedher, A., 2019, New wind turbine emulator based on DC machine: hardware implementation using FPGA board for an open-loop operation, *Iet Circuits Devices & Systems*, 13 (6), 896-902.

- Moussa, I. ve Khedher, A., 2020, A Theoretical and Experimental Study of a Laboratory Wind Turbine Emulator using DC-Motor Controlled by an FPGA-Based Approach, *Electric Power Components and Systems*, 48 (4-5), 399-409.
- Necaibia, S., Kelaiaia, M. S., Labar, H., Necaibia, A. ve Castronuovo, E. D., 2019, Enhanced auto-scaling incremental conductance MPPT method, implemented on low-cost microcontroller and SEPIC converter, *Solar Energy*, 180, 152-168.
- Nisha, P. V., Sindhu, T. K. ve Cheriyan, E. P., 2019, Analysis of EMI in a Variable Frequency Drive through Modelling and Experimental Validation, *Journal of Electrical Systems*, 15 (2), 222-236.
- Noor, S. Z. M., Omar, A. M., Radzi, M. A. M. ve Mahzan, N. N., 2016, Single Stage String Inverter for Grid-connected Photovoltaic System with Modified Perturb and Observe (P&O) Fuzzy Logic Control (FLC)-based MPPT Technique, *Journal of Electrical Systems*, 12 (2), 344-356.
- Parvin, K., Kit, Y. K., Jern, K. P., Hoque, M. M. ve Hannan, M. A., 2019, Particle Swarm Optimization Based Fuzzy Logic MPPT Inverter Controller for Grid Connected Wind Turbine, *International Journal of Renewable Energy Research*, 9 (1), 164-174.
- Pathak, P. K., Yadav, A. K. ve Alvi, P. A., 2020, Advanced Solar MPPT Techniques Under Uniform and Non-Uniform Irradiance: A Comprehensive Review, *Journal of Solar Energy Engineering-Transactions of the Asme*, 142 (4).
- Pathy, S., Subramani, C., Sridhar, R., Thentral, T. M. T. ve Padmanaban, S., 2019, Nature-Inspired MPPT Algorithms for Partially Shaded PV Systems: A Comparative Study, *Energies*, 12 (8).
- Paul, S. ve Thomas, J., 2014, Comparison of MPPT using GA Optimized ANN Employing PI Controller for Solar PV System with MPPT using Incremental Conductance, 2014 International Conference on Power Signals Control and Computations (Epscicon).
- Podder, A. K., Roy, N. K. ve Pota, H. R., 2019, MPPT methods for solar PV systems: a critical review based on tracking nature, *Iet Renewable Power Generation*, 13 (10), 1615-1632.
- Pragathi, B., Nayak, D. K. ve Poonia, R. C., 2020, Mitigation of power quality issues for grid connected photo voltaic system using soft computing techniques, *Journal of Interdisciplinary Mathematics*, 23 (2), 631-637.
- Premkumar, M., Kumar, C., Anbarasan, A. ve Sowmya, R., 2020, A novel non-isolated high step-up DC-DC boost converter using single switch for renewable energy systems, *Electrical Engineering*, 102 (2), 811-829.
- Priyadarshi, N., Sharma, A. K. ve Azam, F., 2017, A Hybrid Firefly-Asymmetrical Fuzzy Logic Controller based MPPT for PV-Wind-Fuel Grid Integration, *International Journal of Renewable Energy Research*, 7 (4), 1546-1560.

- Putri, R. I., Pujiantara, M., Priyadi, A., Ise, T. ve Purnomo, M. H., 2018, Maximum power extraction improvement using sensorless controller based on adaptive perturb and observe algorithm for PMSG wind turbine application, *Iet Electric Power Applications*, 12 (4), 455-462.
- Ramadan, H., Youssef, A. R., Mousa, H. H. H. ve Mohamed, E. E. M., 2019, An efficient variable-step P&O maximum power point tracking technique for grid-connected wind energy conversion system, *Sn Applied Sciences*, 1 (12).
- Rezk, H., Fathy, A. ve Abdelaziz, A. Y., 2017, A comparison of different global MPPT techniques based on meta-heuristic algorithms for photovoltaic system subjected to partial shading conditions, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 74, 377-386.
- Rezkallah, M., Hamadi, A., Chandra, A. ve Singh, B., 2018, Design and Implementation of Active Power Control With Improved P&O Method for Wind-PV-Battery-Based Standalone Generation System, *Ieee Transactions on Industrial Electronics*, 65 (7), 5590-5600.
- Sajadi, A., Roslaniec, L., Klos, M., Biczal, P. ve Loparo, K. A., 2016, An emulator for fixed pitch wind turbine studies, *Renewable Energy*, 87, 391-402.
- Salam, R. A., Munir, M. M., Warsahemas, T., Saputra, C., Latief, H. ve Khairurrijal, K., 2019, A simple solar simulator with highly stable controlled irradiance for solar panel characterization, *Measurement & Control*, 52 (3-4), 159-168.
- Salem, A. A., Aldin, N. A. N., Azmy, A. M. ve Abdellatif, W. S. E., 2019, A Fuzzy Logic-Based MPPT Technique for PMSG Wind Generation System, *International Journal of Renewable Energy Research*, 9 (4), 1751-1760.
- Sameeullah, M. ve Swarup, A., 2016, MPPT Schemes for PV System under Normal and Partial Shading Condition: A Review, *International Journal of Renewable Energy Development-Ijred*, 5 (2), 79-94.
- Syedmahmoudian, M., Horan, B., Soon, T. K., Rahmani, R., Oo, A. M. T., Mekhilef, S. ve Stojcevski, A., 2016, State of the art artificial intelligence-based MPPT techniques for mitigating partial shading effects on PV systems - A review, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 64, 435-455.
- Shang, L. Q., Guo, H. C. ve Zhu, W. W., 2020, An improved MPPT control strategy based on incremental conductance algorithm, *Protection and Control of Modern Power Systems*, 5 (1).
- Singh, S., Singh, M. ve Kaushik, S. C., 2016, A review on optimization techniques for sizing of solar-wind hybrid energy systems, *International Journal of Green Energy*, 13 (15), 1564-1578.
- Sirisha, G., Vijaybabu, A. R., Rao, C. U. ve Janardhan, K. S., 2019, Performance Analysis of a Standalone Photovoltaic System Using P&O Mppt Algorithm, *Journal of Mechanics of Continua and Mathematical Sciences*, 14 (6), 817-826.

- Sitharthan, R., Karthikeyan, M., Sundar, D. S. ve Rajasekaran, S., 2020, Adaptive hybrid intelligent MPPT controller to approximate effectual wind speed and optimal rotor speed of variable speed wind turbine, *Isa Transactions*, 96, 479-489.
- Song, J. F., Wang, J. T., Niu, Y. S., Wang, W. M., Tong, K., Yu, H. ve Yang, Y. P., 2019, Flexible high flux solar simulator based on optical fiber bundles, *Solar Energy*, 193, 576-583.
- Tang, S. Q., Sun, Y. Z., Chen, Y. J., Zhao, Y. M., Yang, Y. H. ve Szeto, W., 2017, An Enhanced MPPT Method Combining Fractional-Order and Fuzzy Logic Control, *Ieee Journal of Photovoltaics*, 7 (2), 640-650.
- Turek, M., Sporleder, K. ve Luka, T., 2019, Spectral characterization of solar cells and modules using LED-based solar simulators, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 194, 142-147.
- Verma, D., Nema, S., Shandilya, A. M. ve Dash, S. K., 2016, Maximum power point tracking (MPPT) techniques: Recapitulation in solar photovoltaic systems, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 54, 1018-1034.
- Vidales, B., Monroy-Morales, J. L., Rodriguez-Rodriguez, J. R., Madrigal, M. ve Torres-Lucio, D., 2019, A transformerless topology for a micro inverter with elevation factor of 1:10 for photovoltaic applications, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 109, 504-512.
- Vink, K., Ankyu, E. ve Kikuchi, Y., 2020, Long-Term Forecasting Potential of Photovoltaic Electricity Generation and Demand Using R, *Applied Sciences-Basel*, 10 (13).
- Wang, G. ve Song, L., 2018, Performance assessment of variable frequency drives in heating, ventilation, and air-conditioning systems, *Science and Technology for the Built Environment*, 24 (10), 1075-1083.
- Wang, G., Wang, Z. F., Han, Z. T. ve Rodriguez, R. D., 2019, Investigation of efficiency models in EnergyPlus and AMCA standard 207 for induction motors powered by variable frequency drives, *Energy and Buildings*, 196, 94-102.
- Wollz, D. H., da Silva, S. A. O. ve Sampaio, L. P., 2020, Real-time monitoring of an electronic wind turbine emulator based on the dynamic PMSG model using a graphical interface, *Renewable Energy*, 155, 296-308.
- Yan, J. H., Feng, Y. ve Dong, J. N., 2016, Study on dynamic characteristic of wind turbine emulator based on PMSM, *Renewable Energy*, 97, 731-736.
- Yang, Y. ve Li, R., 2020, Techno-Economic Optimization of an Off-Grid Solar/Wind/Battery Hybrid System with a Novel Multi-Objective Differential Evolution Algorithm, *Energies*, 13 (7).

- Yilmaz, U., Kircay, A. ve Borekci, S., 2018, PV system fuzzy logic MPPT method and PI control as a charge controller, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 81, 994-1001.
- Youssef, A., El Telbany, M. ve Zekry, A., 2018, Reconfigurable generic FPGA implementation of fuzzy logic controller for MPPT of PV systems, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 82, 1313-1319.
- Youssef, A. R., Ali, A. I. M., Saeed, M. S. R. ve Mohamed, E. E. M., 2019, Advanced multi-sector P&O maximum power point tracking technique for wind energy conversion system, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 107, 89-97.
- Youssef, A. R., Mousa, H. H. H. ve Mohamed, E. E. M., 2020, Development of self-adaptive P&O MPPT algorithm for wind generation systems with concentrated search area, *Renewable Energy*, 154, 875-893.
- Yue, Q. H., Liu, W. Y. ve Zhu, X. Z., 2020, n-Type Molecular Photovoltaic Materials: Design Strategies and Device Applications, *Journal of the American Chemical Society*, 142 (27), 11613-11628.
- Zagirnyak, M., Kalinov, A. ve Melnykov, V., 2019, Decrease of the thermal overloads of a variable-frequency electric drive at damages in the electric circuit of an induction motor stator, *Przeglad Elektrotechniczny*, 95 (5), 43-46.
- Zhang, Y. ve Ula, S., 2008, Comparison and evaluation of three main types of wind turbines, 2008 *Ieee/Pes Transmission & Distribution Conference & Exposition*, Vols 1-3, 312-317.
- Zhu, Q. B., Xuan, Y. M., Liu, X. L., Yang, L. L., Lian, W. L. ve Zhang, J., 2020, A 130 kWe solar simulator with tunable ultra-high flux and characterization using direct multiple lamps mapping, *Applied Energy*, 270.

EKLER

EK-1 Güneş dizi simülatörü ürün katalog bilgisi

Data Sheet

High Power Programmable DC Power Supplies PVS Series



The PVS1000S, PVS6008S, and PVS6008SMR programmable DC power supplies offer clean output power up to 5.1 kW, excellent regulation, and fast transient response time characteristics in an industry leading 2U package.

These power supplies provide many useful features such as high programming resolution, multiple remote interfaces for test systems, and a built-in SAS (solar array simulation) function to generate PV (photovoltaic) I-V curves. The optional SAS software allows users to consistently reproduce various I-V curves to test a PV inverter's MPPT efficiency.

For benchtop applications, this series provides an intuitive user interface with full keypad and rotary knob. System integrators benefit from the standard USB (virtual COM), RS232, GPIB, and LAN interfaces supporting SCPI commands. Free application software and a complete set of LabVIEW drivers are available to reduce

programming time and increase productivity. The application software allows users to control the power supply, execute test sequences, or log measurements. It also integrates with Data Dashboard for LabVIEW apps, enabling users to remotely monitor select measurement indicators with iOS, Android, or Windows 8 compatible tablets or smart phones.

These power supplies are well suited for both bench use and ATE systems integration, R&D, design verification, production test, and high voltage testing.

Special Applications

In particular, the low-noise characteristic of the PVS Series makes these instruments ideal for motor inverter testing. When operated with the optional SAS software, these power supplies can be used for solar array testing applications such as validating a solar inverter's MPPT algorithm and testing to ENS0530 and Sandia Labs standards.

Features & Benefits

- Compact, high power density, 2U package
- Output up to 1000 V / 5 A (PVS1000S) and 600 V / 8.5 A (PVS6008S & PVS6008SMR)
- Convenient single-phase AC input configuration
- Bright VFD display
- High voltage and current resolution of 0.1 V, 0.1 mA (PVS1000S) or 10 mV, 0.2 mA (PVS6008S & PVS6008SMR)
- Fast transient response time of ≤ 0.5 ms
- Adjustable voltage and current slope (rise and fall times)
- List mode: 9 user-defined programs with up to 100 programmable steps each
- Built-in SAS function for storage of up to 16 I-V curves with Voc, Isc, Vmp, and Imp parameters and 1024-point table
- Store up to 100 different instrument settings to internal memory
- Control up to 30 power supplies from one PC via the RS485 interface
- Timer-controlled output (1 s to 1000 hrs)
- Standard USB (virtual COM), RS232, RS485, GPIB and LAN interfaces
- External analog programming and monitoring interface
- Extensive protection features: OVP, OCP, OPP, OTP, foldback protection mode, and key-lock function
- Front to rear airflow allows for efficient cooling in high rack density environments
- Master/slave mode for parallel operation
- LabVIEW™ driver and softpanel for remote control, test sequence generation, and datalogging available

Model	PVS1000S	PVS6008S	PVS6008SMR**
Max Output Voltage	1000 V	600 V	600 V
Max Output Current	5 A	8.5 A	8.5 A
Max Output Power	5000 W	5100 W	3000 W

**Model PVS6008SMR is a multi-ranging supply allowing any combination of the rated voltage and current up to the maximum output power of 3000 W.

Technical data subject to change
© B&K Precision Corp. 2016

www.bkprecision.com



High Power Programmable DC Power Supplies PVS Series

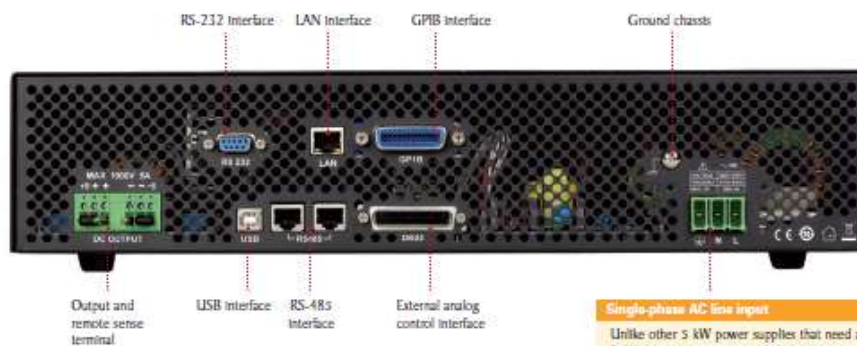
Front panel



Intuitive user interface

The numeric keys and rotary knob provide a convenient interface for setting output levels quickly and precisely. Both measured output values and setting values are concurrently displayed on the screen. Additionally, the power supplies provide internal memory for storage of up to 10 different instrument settings that can be set and recalled via both the front panel and remote interfaces.

Rear panel



Single-phase AC line input

Unlike other 5 kW power supplies that need a 3-phase mains connection, this series only requires a single-phase connection, which is easier to wire and much more commonly available than 3-phase AC outlets.

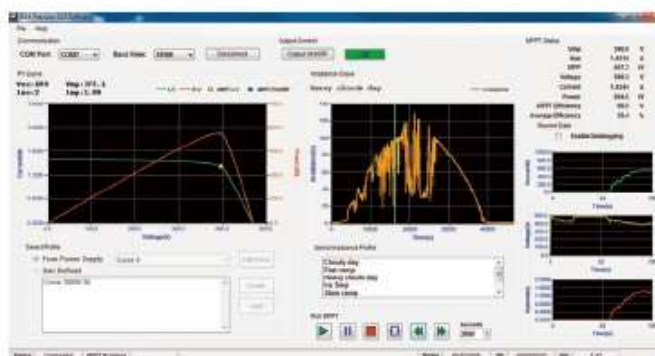
High Power Programmable DC Power Supplies PVS Series

Solar Array Simulation (SAS) Software Option

Solar Inverter designers need to verify their inverter is capable of delivering the maximum power available from solar modules. The I-V curve of solar cells can be influenced by various weather conditions such as a cloudy day. Combined with the SAS application software, PVS users can easily simulate the I-V curve of different arrays under various irradiance conditions while measuring and validating the effectiveness of the inverter's MPPT algorithm.

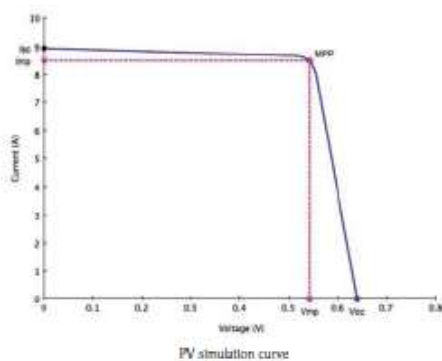
Features

- Variety of input parameters (Voc/Isc/Vmp/Amp/FF/FFI/FFI)
- Monitors and logs real-time voltage, current, power, MPPT efficiency, and average MPPT efficiency
- Simulate I-V curve under different weather conditions during a day
- User-definable irradiance profile
- Generate a custom I-V curve with up to 1,024 data points
- Test to EN50530 and Sandia Labs standards



PV Simulation

Solar arrays consist of multiple solar cells characterized by a complex voltage and current profile that is represented in an I-V curve.



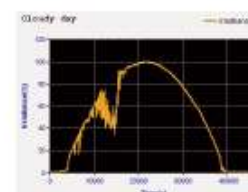
Automatically generate the I-V curve of a solar array in the software by specifying open circuit voltage (Voc), short circuit current (Isc), maximum power voltage (Vmp), and maximum power current (Imp) along with fill factor parameters.

A1		
	A	B
1	1.000	0
2	999.872	0.0049
3	999.746	0.0098
4	999.619	0.0147
5	999.492	0.0196
6	999.365	0.0244
7	999.238	0.0293
8	999.11	0.0342
9	998.983	0.0391
10	998.856	0.044
11	998.729	0.0489
12	998.602	0.0538
13	998.475	0.0587

Generate an I-V curve manually via a 1,024-point voltage and current table with Notepad or MS Excel and load it in the software.

The PVS power supply outputs points on the I-V curve in 1 ms intervals to test the inverter's MPPT efficiency.

Use any of the software's built-in irradiance profiles or generate your own point-by-point irradiance profile.



High Power Programmable DC Power Supplies
PVS Series

Specifications

Model	PVS60085	PVS60085MR	PVS10005
Output Rating			
Output Voltage ⁽¹⁾	0 - 600 V		0 - 1000 V
Output Current ⁽²⁾	0 - 8.5 A		0 - 5 A
Max. Output Power	≤100 W	3000 W	5000 W
Line Regulation			
Voltage	60 mV		100 mV
Current	4.25 mA		2.5 mA
Load Regulation			
Voltage	60 mV		100 mV
Current	8.5 mA		5 mA
Ripple and Noise (20 Hz - 20 MHz)			
Voltage	≤100 mVrms / ≤500 mVpp		≤100 mVrms / ≤600 mVpp
Current	15 mA		10 mA
Resolution			
Programming	10 mV/0.2 mA		0.1 V/0.1 mA
Readback	10 mV/0.2 mA		0.1 V/0.1 mA
Programming Accuracy			
Voltage	400 mV		700 mV
Current ⁽³⁾ ± (%output + offset)	0.03% + 3.5 mA		0.03% + 2 mA
Readback Accuracy ± (%output + offset)			
Voltage	0.05% + 300 mV		0.05% + 500 mV
Current ⁽⁴⁾	0.1% + 8.5 mA		0.1% + 5 mA
General			
Transient Response Time ⁽⁵⁾	≤0.5 ms		≤0.5 ms
OVP adjustment Range	5 - 660 V		5 - 1100 V
OVP Accuracy	6 V		10 V
OCV Accuracy	85 mA		50 mA
Command Response Time	20 ms		20 ms
Efficiency ⁽⁶⁾	90%		90%
Power Factor	0.99		0.99
Remote Sense Compensation	6 V		10 V
Rising Time at Full Load	≤100 ms		≤250 ms
Rising Time at No Load	≤100 ms		≤250 ms
Falling Time at Full Load	≤100 ms	≤150 ms	≤250 ms
Falling Time at No Load	≤3000 ms		≤5000 ms
Standard Interfaces	Analog Programming, USB, RS485, RS232, GPIB, and Ethernet		
AC Input ⁽⁶⁾	170 - 265 VAC single phase		
Rated Frequency	47 - 63 Hz		
Maximum Rated Input Power	≤800 VA	≤500 VA	≤800 VA
Temperature Ratings	Operation (0 °C—40 °C) Storage (-40 °C—85 °C)		
Dimensions (W x H x D)	16.53" x 3.46" x 20.94" (420 x 88 x 532 mm)		
Weight	32.18 lbs (14.6 kg)		
Three-Year Warranty			
Standard Accessories	User manual, power cord, test report & certificate of calibration		
Optional Accessories	SASIVS (SAS software), RKPVS (rackmount kit)		

⁽¹⁾ Minimum voltage is guaranteed to 5V.

⁽²⁾ Minimum current is guaranteed to maximum 0.4% of rated output current.

⁽³⁾ Current accuracy is applied when output power > 0.1% of full power.

⁽⁴⁾ Time for output voltage to recover within 0.5% of its rated output for a load change 50 - 100% of rated output current.

⁽⁵⁾ 90% typical at nominal line and max load.

⁽⁶⁾ 10% of output de-rated when operating below 190 VAC.

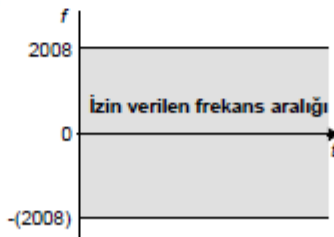
EK-2 ACS150-01E ASM sürücüsü ürün katalog bilgisi

Sürücü I/O arayüzü ile nasıl kontrol edilir

Aşağıdaki tablo belirtilen durumlarda sürücünün dijital ve analog girişlerle nasıl çalıştırılacağını anlatır:

- motorun devreye alması gerçekleştirildiğinde ve
- hazır değer (standart) parametre ayarları geçerli olduğunda.

ÖN AYARLAMALAR									
Dönüş yönünü değiştirmeniz gerekirse 1003 DÖNÜŞ YÖNÜ parametresinin 3 (İKİ YÖNLÜ) olarak ayarlanmış olduğundan emin olun. Kontrol bağlantılarının ABB standart makrosu için verilmiş bağlantı şemasındaki gibi yapıldığına emin olun. Sürücünün uzaktan kontrolde olduğundan emin olun. Tuşa basın  uzaktan ve lokal kontrol arasında geçiş için.	Blk. <i>Varsayılan I/O bağlantı şeması</i>, sayfa 46. Uzaktan kontrolde, panel ekranında REM yazısı görüntülenir.								
MOTORUN HIZINI KONTROL ETMEK VE START ETME									
DI1 dijital girişini açarak start edin. FWD yazısı hızlı şekilde yanıp sönmeye başlar ve set değerine ulaşıldıktan sonra durur. AI(1) analog girişinin gerilimini veya akımını ayarlayarak sürücü çıkış frekansını (motor hızı) ayarlayın.	<table> <tr> <td>REM</td><td>0.0 Hz</td></tr> <tr> <td>OUTPUT</td><td>FWD</td></tr> </table> <table> <tr> <td>REM</td><td>50.0 Hz</td></tr> <tr> <td>OUTPUT</td><td>FWD</td></tr> </table>	REM	0.0 Hz	OUTPUT	FWD	REM	50.0 Hz	OUTPUT	FWD
REM	0.0 Hz								
OUTPUT	FWD								
REM	50.0 Hz								
OUTPUT	FWD								
MOTOR DÖNME YÖNÜNÜ DEĞİŞTİRME									
Geri yön: DI2 dijital girişini açın. İleri yön: DI2 dijital girişini kapatın.	<table> <tr> <td>REM</td><td>50.0 Hz</td></tr> <tr> <td>OUTPUT</td><td>REV</td></tr> </table> <table> <tr> <td>REM</td><td>50.0 Hz</td></tr> <tr> <td>OUTPUT</td><td>FWD</td></tr> </table>	REM	50.0 Hz	OUTPUT	REV	REM	50.0 Hz	OUTPUT	FWD
REM	50.0 Hz								
OUTPUT	REV								
REM	50.0 Hz								
OUTPUT	FWD								
MOTORU STOP ETME									
DI1 dijital girişi kapalı. Motor durur ve FWD metni yavaşça yanıp sönmeye başlar.	<table> <tr> <td>REM</td><td>0.0 Hz</td></tr> <tr> <td>OUTPUT</td><td>FWD</td></tr> </table>	REM	0.0 Hz	OUTPUT	FWD				
REM	0.0 Hz								
OUTPUT	FWD								

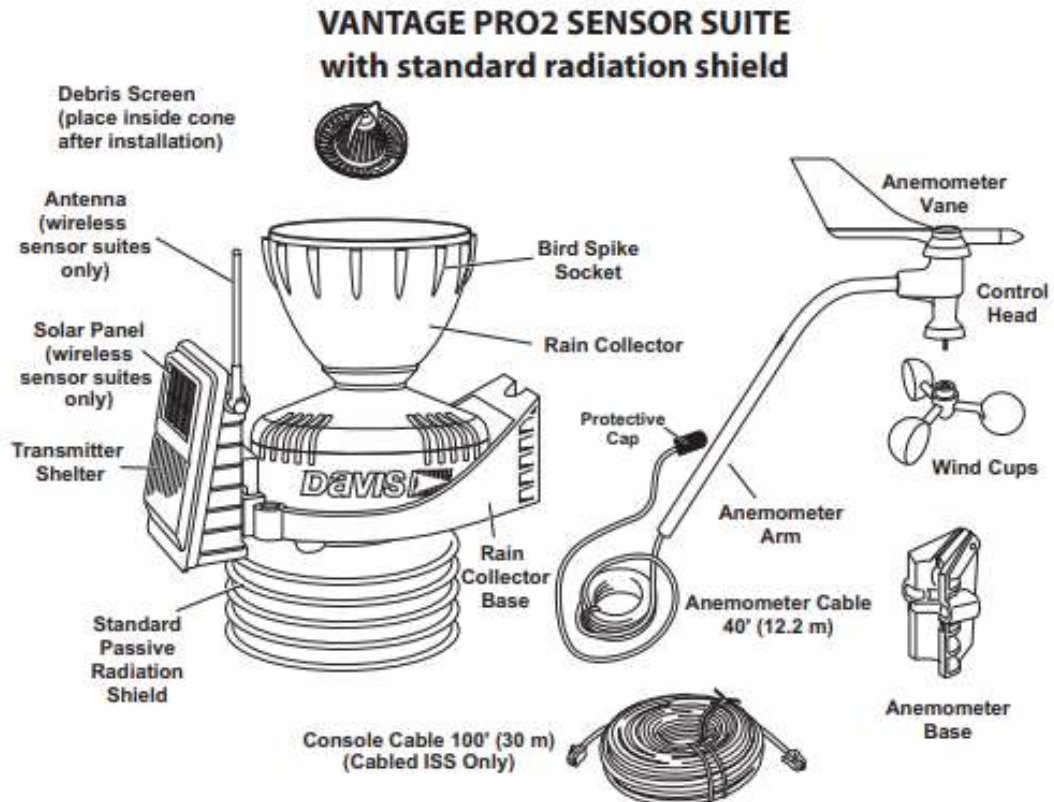
Kısa parametre modundaki parametreler																		
No.	Ad/Değer	Açıklama	Vars.															
	0,0...500,0 Hz	Maksimum değer																
12 SABİT HIZLAR		Sabit hızlar. Sabit hız aktifleştirme, harici hız referansına göre önceliklidir. Sürücü lokal kontrol modundaydı sabit hız seçimleri yok sayılır. Varsayılan olarak sabit hız seçimi DI3 ve DI4 dijital girişleri kullanılarak yapıldığı için. 1 = DI aktif, 0 = DI devredışı. <table><tr><th>DI3</th><th>DI4</th><th>Çalışma</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>Sabit hız yok</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1202 SABİT HIZ 1 parametresiyle tanımlanan hız</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>1203 SABİT HIZ 2 parametresiyle tanımlanan hız</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1204 SABİT HIZ 3 parametresiyle tanımlanan hız</td></tr></table>	DI3	DI4	Çalışma	0	0	Sabit hız yok	1	0	1202 SABİT HIZ 1 parametresiyle tanımlanan hız	0	1	1203 SABİT HIZ 2 parametresiyle tanımlanan hız	1	1	1204 SABİT HIZ 3 parametresiyle tanımlanan hız	
DI3	DI4	Çalışma																
0	0	Sabit hız yok																
1	0	1202 SABİT HIZ 1 parametresiyle tanımlanan hız																
0	1	1203 SABİT HIZ 2 parametresiyle tanımlanan hız																
1	1	1204 SABİT HIZ 3 parametresiyle tanımlanan hız																
1202	SABİT HIZ 1	Sabit hız 1'i (yani sürücü çıkış frekansını) tanımlar.	E: 5,0 Hz / U: 6,0 Hz															
	0,0...500,0 Hz	Çıkış frekansı																
1203	SABİT HIZ 2	Sabit hız 2'yi (yani sürücü çıkış frekansını) tanımlar.	E: 10,0 Hz / U: 12,0 Hz															
	0,0...500,0 Hz	Çıkış frekansı																
1204	SABİT HIZ 3	Sabit hız 3'ü (yani sürücü çıkış frekansını) tanımlar.	E: 15,0 Hz / U: 18,0 Hz															
	0,0...500,0 Hz	Çıkış frekansı																
13 ANALOG GİRİŞLER		Analog giriş sinyali minimum																
1301	MINIMUM AI1	AI1 analog girişi için minimum mA/(V) sinyaline karşılık gelen minimum % değerini tanımlar. 0...20 mA $\neq$ %0...%100 4...20 mA $\neq$ %20...%100 Analog giriş AI1, harici referans REF1 için kaynak olarak seçildiğinde, değer minimum referans değerine, yani 0 Hz'ye karşılık gelir. 1105 REF1 MAX parametresi için bkz. şekil.	%0															
	%0...%100,0	Tam sinyal aralığının yüzdesi cinsinden değer. Örnek: Analog giriş minimum değeri 4 mA ise 0...20 mA aralığının yüzde değeri: (4 mA / 20 mA) · %100 = %20																
20 LİMİTLER		Maksimum frekans																
2008	MAX FREKANS	Sürücünün çıkış frekansının maksimum limitini tanımlar. 	E: 50,0 Hz / U: 60,0 Hz															
	0,0...500,0 Hz	Maksimum frekans																
21 START/STOP		Motorun stop modu																
2102	STOP FONKSİYON	Motor stop yöntemini seçer.	1 = SERBEST															
	1 = SERBEST	Motor güç beslemesinin kesilmesiyle stop etme. Motor serbest duruş yapar.																

EK-3 Davis Vantage Pro2 Meteoroloji istasyonu ürün katalog bilgisi

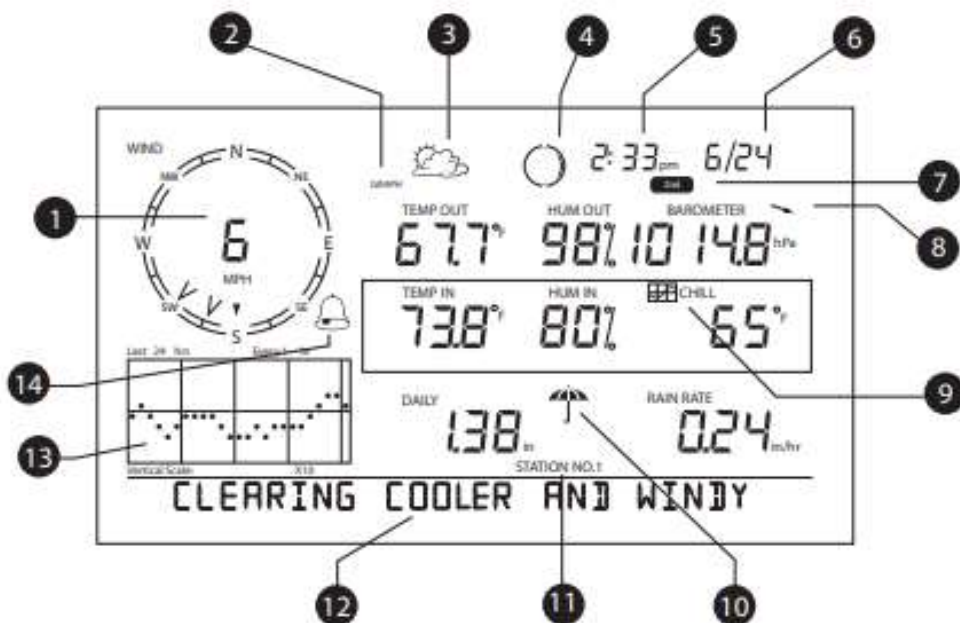
Included Components and Hardware

The sensor suite comes with all the components and hardware shown in the following illustrations. If you purchased your sensor suite as part of a weather station package containing the Vantage Pro2 console, additional components may be included in the package that are not shown here.

Components



Vantage Pro2 Console Display Features



Display Features

- | | |
|---------------------------------|------------------------------|
| 1. Compass Rose | 8. Barometric Trend Arrow |
| 2. Graph & Hi/Low Mode Settings | 9. Graph Icon |
| 3. Forecast Icons | 10. Current Rain Icon |
| 4. Moon Phase Indicator | 11. Station Number Indicator |
| 5. Time/Sunrise Time | 12. Weather Ticker |
| 6. Date/Sunset Date | 13. Graph Field |
| 7. 2ND Button Indicator | 14. Alarm Icon |

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Göksel GÖKKUŞ
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : Tarsus, 23.02.1985
Telefon : 537 427 90 78
Faks :
E-Posta : gokselgokkus@nevsehir.edu.tr, gokkusgoksel@gmail.com

EĞİTİM

Derece	Adı	İlçe	İl	Bitirme Yılı
Lise	: Gülnar Çok Programlı Lisesi,	Gülnar,	Mersin	2002
Üniversite	: Gazi Üniversitesi, Beşevler,	Ankara		2009
Yüksek Lisans	: Gazi Üniversitesi, Beşevler,	Ankara		2014
Doktora	: Konya Teknik Üniversitesi, Selçuklu,	Konya		Devam ediyor

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2010-2012	M.E.B	Ücretli Öğretmen
2013-	Nevşehir HBVÜ MYO	Öğretim Görevlisi

UZMANLIK ALANI

YABANCI DİLLER

İngilizce – 63,75 (YDS-Eylül-2014)

BELİRTMEK İSTEĞİNİZ DİĞER ÖZELLİKLER

YAYINLAR

A. Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler

1. **Gokkus, G.**, ve Kulaksiz, A. A. (2020). Design and Implementation of a Wind Turbine Emulator Using an Induction Motor and Direct Current Machine. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, 10(3), 1426-1438. **(Doktora tezinden yapılmıştır)**
2. Alhajomar, F., **Gokkus, G.**, & Kulaksiz, A. A., (2019). Rapid Control Prototyping based on 32-Bit ARM Cortex-M3 Microcontroller for Photovoltaic MPPT Algorithms. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, 9(4), 1938-1947. **(Doktora tezinden yapılmıştır)**

3. Omar, F. A., **Gökkuş, G.**, & Kulaksız, A. A. Şebekeden Bağımsız Fv Sistemde Maksimum Güç Noktası Takip Algoritmalarının Değişken Hava Şartları Altında Karşılaştırmalı Analizi. *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(3), 585-593.

B. Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında (proceedings) basılan bildiriler

1. AlhajOmar, F., **Gökkuş, G.**, & Kulaksız, A. A. (2018, October). Performance Evaluation of P&O, IC and FL Algorithms used in Maximum Power Point Tracking Systems. In International Conference on Engineering Technologies (ICENTE'18), Konya, TÜRKİYE (pp. 286-289).

C. Projeler

1. Bölgesel Ortam Verisi Kullanan MPPT Kontrollü Hibrit PV-Rüzgâr Enerji Sisteminin Simülasyonu ve Donanımsal Gerçekleştirilmesi, Yükseköğretim Kurumları tarafından destekli bilimsel araştırma projesi, Yürütücü: A.A. KULAKSIZ, Araştırmacı: G. GÖKKUŞ, 30/11/2017 - 26/03/2020 (ULUSAL)