



T.C.  
KIRSEHİR AHİ EVRAN ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İLERİ TEKNOLOJİLER ANABİLİM DALI



**KÜÇÜK ÖLÇEKLİ UYGULAMALAR İÇİN  
MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI İZLEME (MPPT)  
ALGORİTMASI İLE GÜNEŞ-RÜZGAR HİBRİT  
SİSTEM MODELİNİN SİMÜLASYONU**

**KARAM SABRI HADITH AL-JANABI**

**YÜKSEK LİSANS**

**KIRSEHİR / 2023**



T.C.  
KIRŞEHİR AHI EVRAN ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İLERİ TEKNOLOJİLER ANABİLİM DALI



**KÜÇÜK ÖLÇEKLİ UYGULAMALAR İÇİN  
MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI İZLEME (MPPT)  
ALGORİTMASI İLE GÜNEŞ-RÜZGAR HİBRİT  
SİSTEM MODELİNİN SİMÜLASYONU**

**KARAM SABRI HADITH AL-JANABI**

**YÜKSEK LİSANS**

**DANIŞMAN**

**Doç. Dr. ŞEKİP ESAT HAYBER**

**II. DANIŞMAN**

**Dr. Öğr. Üyesi MEHMET GÜÇYETMEZ**

**KIRŞEHİR / 2023**

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Karam Sabri Hadith AL-JANABI



20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi’nin aboneli olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.



## ÖNSÖZ

Yüksek lisansa başlamamda ve yüksek lisans ders sürecinde kendisini tanıdığım günden bu yana gösterdiği sakin ve sabırlı hali ile her zaman bana örnek olmasının yanı sıra bir bilim insanının nasıl çalışması gerektiğini kendisinden öğrendiğim değerli danışmanım Doç. Dr. Şekip Esat HAYBER'e ve Dr. Öğr. Üyesi MEHMET GÜÇYETMEZ'e büyük bir içtenlikle teşekkür ederim.

Tezimi, benim her zorluğumda yanımda olan canım aileme ithaf ederim.

Mayıs, 2023

Karam Sabri Hadith AL-JANABI



# İÇİNDEKİLER

<b>TEZ BİLDİRİMİ</b> .....	<b>ii</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>iv</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>vii</b>
<b>Kısaltmalar Listesi</b> .....	<b>ix</b>
<b>Semboller Listesi</b> .....	<b>ix</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xi</b>
<b>1. Giriş</b> .....	<b>1</b>
1.1. Hedefler.....	<b>2</b>
1.2. Literatür taraması .....	<b>3</b>
<b>2. Sistem tasarımı için malzemeler</b> .....	<b>5</b>
2.1. Fotovoltaik alt sistem.....	<b>5</b>
2.1.1. Blok şeması.....	<b>5</b>
2.1.2. Güneş pili ilkeleri .....	<b>6</b>
2.1.3. PV hücresinin modellenmesi .....	<b>8</b>
2.1.4. MPPT teknikleri.....	<b>11</b>
2.1.5. DC-DC dönüştürücüler .....	<b>15</b>
2.2. Rüzgar enerjisi alt sistemi .....	<b>17</b>
2.2.1. Yapılandırma .....	<b>17</b>
2.2.2. Rüzgar türbini .....	<b>18</b>
2.2.3. Rüzgar generatörü.....	<b>21</b>
2.2.4. Güç dönüştürücü .....	<b>24</b>
2.3. Rüzgar türbini kontrolü .....	<b>25</b>
2.3.1. Hatve kontrolü .....	<b>26</b>
2.3.2. Sabit ve değişken hızlı işlemler .....	<b>28</b>
<b>3. Metodoloji</b> .....	<b>32</b>
3.1. Sistem modelleme.....	<b>32</b>
3.2. Kontrol hedefi .....	<b>32</b>
3.3. Rüzgar türbini durum uzayı modeli .....	<b>35</b>
3.4. Denetleyici tasarımı .....	<b>38</b>
3.4.1. PID denetleyici .....	<b>38</b>
3.4.2. PID kontrolü .....	<b>38</b>

3.4.3. H-sonsuz .....	39
3.4.4. LQR kontrolü .....	41
<b>4. Simülasyon ve sonuçlar .....</b>	<b>42</b>
4.1. PV alt sistemi.....	42
4.1.1. PV dizisi bloğu .....	42
4.1.2. MPPT modellemesi .....	46
4.2. Rüzgar alt sistemi .....	48
4.3. Sistem entegrasyonu .....	51
4.4. Pitch açısı kontrolü .....	54
4.5. Sistem çıkışı.....	57
4.6. Sistem alanı temsilini kullanarak hatve kontrolü.....	63
<b>5. SONUÇLAR.....</b>	<b>64</b>
<b>REFERANSLAR .....</b>	<b>66</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>71</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil (1) Önerilen fotovoltaik alt sistem .....	6
Şekil (2) Silisyum FV hücresi .....	7
Şekil (3) PV hücresinin şematik diyagramı.....	7
Şekil (4) I-V silikon PV'nin karakteristik eğrisi .....	8
Şekil (5) Fotovoltaik hücre eşdeğer devresi .....	9
Şekil (6) (a) PV hücresi için V-I, (b) P-V .....	10
Şekil (7) MPPT'nin blok diyagramı.....	12
Şekil (8) MPP' nin değişiklik.....	13
Şekil (9) PO MPPT algoritmasının akış şeması .....	14
Şekil (10) IC MPPT algoritmasının akış şeması .....	15
Şekil (11) DC-DC dönüştürücü devresi .....	16
Şekil (12) Rüzgar enerjisi dönüştürme sistemi (REDS).....	18
Şekil (13) Farklı $\beta$ değeri için $C_p$ .....	20
Şekil (14) Rüzgar hızı ve eğim açısının fonksiyonu olarak kanatlardaki tork .....	21
Şekil (15) Bir güç dönüştürücü ile seri bağlı bir senkron generatör .....	22
Şekil (16) d-q referans çerçevesinde PMSG'nin eşdeğer devresi .....	23
Şekil (17) İdeal bir rüzgar türbini güç eğrisi. ....	25
Şekil (18) Rüzgar hızı ile güç değişimi .....	26
Şekil (19) Hatve kontrol ilkesi .....	27
Şekil (20) Uç hızı oranı .....	28
Şekil (21) Sabit hızlı rüzgar türbini .....	29
Şekil (22) Senkron generatörlü değişken hızlı rüzgar türbini .....	30
Şekil (23) Çift beslemeli endüksiyon generatörlü değişken hızlı rüzgar türbini.....	30
Şekil (24) İki farklı rüzgar hızında rotor hızına karşı güç .....	31
Şekil (25) Hibrit sistem modeline ait şema .....	32
Şekil (26) Temel sabit hızlı hatve kontrol stratejileri, (a) Çıkış gücü ve, (b) Rüzgar hızına karşı güç verimliliği .....	34
Şekil (27) Aktarma organı modeli.....	36
Şekil (28) Doğrusallaştırılmış model kullanan PID kontrolü.....	38
Şekil (29) H-Sonsuz kontrol problem diyagramı .....	40
Şekil (30) MATLAB'de oluşturulan PV modeli.....	42



Şekil (31) PV bloğu detayları.....	43
Şekil (32) (a) PV modülünün I-V eğrisi, (b) PV modülünün P-V eğrisi.....	44
Şekil (33) Işınlama varyasyonunun (a) I-V ,(b) P-V üzerindeki etkisi .....	45
Şekil (34) Sıcaklık değişiminin (a) I-V , (b) P-V üzerindeki etkisi .....	46
Şekil (35) MPPT bloğu .....	47
Şekil (36) MPPT'nin (IC) simulink modeli .....	48
Şekil (37) MATLAB'da oluşturulan rüzgar enerjisi modeli.....	48
Şekil (38) Rüzgar türbini bloğunun Simulink modeli.....	49
Şekil (39) Türbin gücü özellikleri .....	51
Şekil (40) Tüm hibrit sistem.....	52
Şekil (41) H köprüsü inverter bloğu.....	53
Şekil (42) Son üç fazlı gerilim sinyali (220V- 60Hz) .....	53
Şekil (43) Pil şarj durumu .....	54
Şekil (44) Pitch açısının PID kontrolü. ....	55
Şekil (45) Pitch kontrolü olmadan rüzgar enerjisi çıkışı.....	56
Şekil (46) PID pitch kontrollü rüzgar enerjisi çıkışı. ....	56
Şekil (47) Pitch açısı ve rüzgar hızı, şebeke bağlı , şebeke kapalı .....	57
Şekil (48) Izgara bağlıyken PV eğrileri (solda), şebekeye bağlı değilken(sağda). ....	58
Şekil (49) VSC çıkışı, şebekeye bağlı (solda), şebekeye bağlı değilken (sağda).....	59
Şekil (50) H-sonsuz uygulandığında şebeke sinyalleri. ....	60
Şekil (51) LQR uygulanırken şebeke sinyalleri. ....	61
Şekil (52) PID uygulanırken şebeke sinyalleri.....	62
Şekil (53) Farklı denetleyiciler kullanılarak eğim açısı kontrolü.....	63

## Kısaltmalar Listesi

PV	:Fotovoltaik
MPPT	:Maksimum Güç Noktası Takibi
DC	:Doğru Akım
P&O	:Panel akım güç değişiminin izlenmesi
IC	:Artımlı İletkenlik
PMSG	:Kalıcı Mıknatıslı Senkron generatör
MPP	:Maksimum Güç Noktası
PID	:Orantılı İntegral Türev
LQR	:Doğrusal İkinci dereceden Düzenleyici
REDS	:Rüzgar Enerjisi Dönüşüm Sistemi
RTG	:Rüzgar Türbini generatörü

## Semboller Listesi

<i>IPV</i>	:Fotoakım
<i>IO</i>	:Diyotun ters doyma akımı
<i>V</i>	:Diyot boyunca voltaj
<i>VT</i>	:Termal voltaj
<i>Rs</i>	:Seri direnç
<i>Rp</i>	:Hücrenin şönt direnci
<i>Eg</i>	:Yarı iletkenin enerji bandı boşluğu
<i>NS</i>	:Seri hücre sayısı
<i>NP</i>	:Paralel hücre sayısı
$\rho$	:Hava yoğunluğu
$\beta$	:Eğim açısı (derece olarak)
<i>R</i>	:Bıçak yarıçapı (metre cinsinden)
<i>V</i>	:Rüzgar hızı( m/s cinsinden)
<i>P</i>	:Rüzgar gücü
$\Omega$	:Rotor hızı
$\lambda$	:Uç hızı oranı

# ÖZET

## YÜKSEK LİSANS TEZİ

### KÜÇÜK ÖLÇEKLİ UYGULAMALAR İÇİN MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI İZLEME (MPPT) ALGORİTMASI İLE GÜNEŞ-RÜZGAR HİBRİT SİSTEM MODELİNİN SİMÜLASYONU

**KARAM SABRİ HADİTH AL-JANABİ**

**Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**İleri Teknolojiler Anabilim Dalı**

**Danışman: Doç. Dr. ŞEKİP ESAT HAYBER**

**II. Danışman: Dr. Öğr. Üyesi MEHMET GÜÇYETMEZ**

Enerji üreticilerinin yanı sıra tüketicilerin de paydaşları olduğu mikro şebekeler, şebeke içi ve şebeke dışı olarak gelişmektedir. Çevre kirliliği ve artan maliyetler nedeniyle mikro şebekelerde yenilenemeyen enerji kaynaklarının tek enerji kaynağı olarak görülmesi sürdürülebilir değildir. Konvansiyonel enerji kaynaklarına ek olarak, öncelikle rüzgar ve güneş enerjisinden oluşan hibrit enerji sistemleri, mikro şebekeler için kritik ikincil enerji kaynakları olacaktır. Böylece elektrik hattı arızaları, dış aksaklıklar gibi durumlarda şebekenin kendi içinde çalışması ve ana şebekeye yeniden bağlanana kadar çalışması mümkün olacaktır. Bu çalışmada ilk olarak hibrit rüzgar-fotovoltaik sistem tasarlanmıştır. Daha sonra geliştirilen sistemde değişken hızlı rüzgar türbini için farklı kontrolörler tasarlanarak şebeke içi ve şebeke dışı durumlar için analiz edilmiştir. Geliştirilen hibrit enerji sistemi, mikro şebekedeki durum uzay modeli kullanılarak PID, LQR ve H-sonsuz kontrol yöntemleri ile kontrol edilmiştir.

Sonuçlar, H-sonsuzun diğer tekniklerle karşılaştırıldığında hız ve maksimum güç açısından en iyi performansı verdiğini göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Yenilenebilir Enerji Kaynakları, Fotovoltaik, Değişken Hızlı Rüzgar Türbini, PID, LQR, H-sonsuz Kontrol.

(Mayıs 2023, 70 Sayfa)

## **ABSTRACT**

### **M.Sc. THESIS**

# **SIMULATION OF SOLAR-WIND HYBRID SYSTEM MODEL WITH MAXIMUM POWER POINT TRACKING (MPPT) ALGORITHM FOR SMALL SCALE APPLICATIONS**

**KARAM SABRI HADITH AL-JANABI**

**Kirsehir Ahi Evran University**

**Graduate School of Sciences and Engineering**

**Advanced Technologies Department**

**Supervisor: Assoc. Prof. Dr. ŞEKİP ESAT HAYBER**

**II. Supervisor: Assist. Prof. Dr. MEHMET GÜÇYETMEZ**

Microgrids, in which consumers are stakeholders as well as energy producers, are developing as on-grid and off-grid. It is not sustainable to consider non-renewable energy sources in microgrids as the only energy source due to environmental pollution and increasing costs. In addition to conventional energy sources, hybrid energy systems consisting primarily of wind and solar energy will be critical secondary energy sources for microgrids. Thus, in cases such as power line faults, external disturbances, it will be possible for the network to work within itself and to work until it is reconnected to the main grid. In this study, a hybrid wind-photovoltaic system was first designed. Then, the developed system by designing different controllers for the variable speed wind turbine was analyzed for on-grid and off-grid situations. The developed hybrid energy system is controlled by PID, LQR and H-infinity controlling methods using the state space model in the microgrid.

The results indicate that H-infinity gives the best performance in terms of speed and maximum power, comparing with other techniques.

**Keywords:** Renewable Energy Sources, Photovoltaic, Variable Speed Wind Turbine, PID, LQR, H-infinity Control.

(May 2023, 70 Pages.)

## 1. Giriş

Geleneksel enerji kaynaklarının aksine yenilenebilir enerjiye dayalı sistemlerde kullanılan enerji kaynakları bol, öngörülebilir ve doğası gereği temizdir. Bu yenilenebilir enerji kaynakları daha az kirlilik, çevresel bozulma veya küresel ısınmaya neden oldukları için yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Artan temiz enerji ihtiyacını karşılamada çok önemlidirler. Yüksek başlangıç sermaye maliyeti, enerji sistemlerinin kullanılmasının önünde önemli bir engeldir. PV ve rüzgar sistemi tüm hibrit sistemi oluşturur. Ortam sıcaklığı ve güneş ışınımı, bir güneş-PV hücresinin ilişki gücü üzerinde önemli bir etkiye sahiptir [1]. Ek olarak, bir PV hücresi yalnızca belirli çevresel koşullar altında en yüksek güç çıkışında çalışabilir [2]. PV üniteleri güneş enerjisine dayandığından, geleneksel generatörlerin yapabildiği gibi sürücü tarafından ayarlanamaz veya genişletilemezler. Tersine, senkron generatör, regülatör ve uyarma sistemlerini kullanarak iş güçlerini bir şekilde düzenleyebilirler. Bu kısıtlama, PV üniteleri için düşük penetrasyon seviyelerine sahip bir tesiste önemsizdir ve PV ünitelerinin sistemin dinamikleri üzerinde çok az etkisi vardır veya hiç etkisi yoktur. Öte yandan, yüksek PV modül penetrasyonuna sahip sistemlerde, bu çok önemli sorunlara neden olabilir. PV enerji santralleri, geleneksel senkron generatörlerle aynı çevresel sorunlara sahip olmadıkları için yük merkezlerine yakın yerleştirilebilir. Bu, sistemin kayıplarını ve kurulum ve bakım maliyetlerini düşürür [3].

Rüzgar enerjisi sistemi bir AC-DC dönüştürücü, generatör, dişli kutusu ve rüzgar türbininden oluşur. Rüzgar enerjisi, rüzgar türbini tarafından türbin şaftında dönme mekanik enerjisine aktarılır ve daha sonra bir generatör tarafından elektrik enerjisine dönüştürülür. Rüzgar sisteminden mümkün olan en fazla gücü elde etmek için bir maksimum güç noktası izleme MPPT sistemi kullanılır [4].

Birkaç güç kaynağı kullanan hibrit üretim sistemleri, yük ihtiyaçlarının sabitliğini önemli ölçüde artırabilir [5]. Aslında, hibrit sistemler gelişmiş üretim kapasitesi elde edebilir. Rüzgar enerjisinin kullanımı son birkaç on yılda önemli ölçüde arttı ve bugün en rekabetçi yenilenebilir enerji türleri arasında yer almaktadır.

Sert ve değişen iklim koşullarında çalışan büyük, karmaşık ve son derece esnek yapılar olan rüzgar türbinlerinin etkinliği ve güvenilirliği, büyük ölçüde dikkatlice düşünülmüş bir kontrol yaklaşımına bağlıdır. Nominal hızın altında çalışan bir dikey değişken hızlı rüzgar türbini, rotorun farklı hızlarda döndüğü en yaygın rüzgar türbini biçimidir [6].

Kontrol açısından bakıldığında, önemli olan sadece rüzgar türbinlerinin en iyi şekilde çalışmasını sağlamak değil, aynı zamanda yükü azaltmak ve şebeke entegrasyonunu iyileştirmek için çalışmaktır. Bunu yapmak için, rüzgar enerjisi dönüşüm cihazları, temelde öngörülemez bir ana kaynak olan rüzgardan yüksek kaliteli enerji üretebilmelidir. Rüzgar enerjisi kullanımının farklı unsurları, rüzgar enerjisi kaynağının özelliklerine bağlıdır. Rüzgardaki enerji miktarı, rüzgar hızı hücrelerine bağlı olarak dalgalanmaktadır [7]. Ayrıca rüzgar hızı değeri türbinin ne kadar iyi yönetildiğini ve hangi bölgede çalışacağını etkiler.

İki ana işleyen rejim vardır; birincisi, kontrol amacının enerji üretimini maksimize etmek olduğu düşük rüzgar hızında çalışmayı ifade eder. Türbin, “anma hızına” ulaştığında alternatif bölgeye geçer. Rüzgarın anma hızı tipik olarak 14 ila 18 m/s arasında değişir [8].

Yapısal yükü azaltmak ve ilişki gücünü tasarımcı tarafından belirlenen nominal değer civarında tutmak için kullanılan kontrol parametreleri; hatve açısı ve elektromanyetik torktur.

### **1.1. Hedefler**

Bu çalışmalar sırasında aşağıdaki hedeflere ulaşılmıştır.

- MATLAB Simulink kullanarak küçük ölçekli bir hibrit PV-rüzgar enerjisi sistemi oluşturmak.
- Güç dönüştürme ile ilgili teknik ve yöntemlerin uygulanması.
- PV alt sistemine MPPT uygulayarak ve rüzgar türbini hatve açısı kontrolünde maksimum gücün korunması.
- Rüzgar türbini kontrol hedefi, üçüncü bölgede (anma rüzgar hızının üzerinde) türbin hızını düzenlemek ve türbinin çeşitli düşük sönümlü esnek modlarında sönümlemeyi arttırmaktır. Bunu gerçekleştirmek için öncelikle mevcut MATLAB Simulink blokları alınmış ve üzerinde çalışılmıştır. İkinci olarak, hibrit sistem tasarlanmış ve incelenmiştir.

Üçüncüsü, rüzgar türbini kontrol kısmı, bir durum uzayı modeli kullanılarak ayrı olarak uygulanmıştır.

Katkımız, generatör dönüş hızında daha iyi bir performans elde etmek için bir durum uzayı modeli kullanarak rüzgar türbini hatve açısı için üç farklı kontrol yönteminin (PID, LQR, H-sonsuz) uygulanmasını içerir.

## 1.2. Literatür taraması

Güneş ve rüzgar enerjisi ile çalışan PMSG'ye dayalı hibrit dağıtılmış bir generatör topolojisi 2015 yılında açıklanmıştır [9].

Kaynaklar, yalnızca bir yükseltici dönüştürücü ve bir invertör kullanılarak şebekeye bağlanır. d-q eksenleri referans çerçevesinde, önerilen taktığın bir modeli üretilir. Yeni hibrit sistemin invertörü ve DC-DC dönüştürücüyü bağımsız olarak açması için iki ucuz kontrolör önerilir. Generatörün voltaj ve akım THD'si, güç kalitesi için IEEE'nin tavsiye ettiği aralıklar içindedir.

Rüzgar, güneş ve pillere dayanan mikro şebekeler için hibrit bir güç izleme ve yönetim sistemi 2016'da önerilmiştir [10]. Sistemin amacı, PV güneş panellerin nasıl çalıştığını kontrol etmek için MPPT kullanmaktır. Geri besleme kontrolleri kullanılarak, rüzgar enerjisi dönüştürme sistemi (REDS) kontrol edilir.

Hibrit bir yenilenebilir enerji sistemi 2017'de tanıtılmıştır [11]. Süper kapasitör, pil deposu, rüzgar türbini ve güneş paneli, güç dönüştürücüler aracılığıyla bir DC bağlantısına bağlanır. Rüzgâr ve güneş kaynakları, MPPT'den ziyade operasyonel güç noktası elde etmek için eşdeğer dönüştürücülere bir destekle bağlanır.

2019'da iki mikro şebeke bağlantılı PMSG rüzgar türbini sistemi incelenmiştir [12]. İlk şebeke yapısında PV solar, WT ve pil bankaları, bir filtre-yükseltme dönüştürücü ve paylaşılan bir DC bara ile bir doğrultucu devresine bağlanır. PV dizisi ve depolama pilleri, ikinci şekilde bir invertör devresi aracılığıyla bağlanır. Bir arka arkaya dönüştürücü ve bir düşürücü transformatör aracılığıyla, WT doğrudan üç fazlı AC'ye bağlanır. Simülasyon sonuçlarına göre, birinci tip daha iyi güç kalitesi ve daha az gerilim harmoniği sunmaktadır. Karmaşık trafo ve invertörün etkinliği nedeniyle, ikinci model ev için daha fazla elektrik enerjisi sağlayabilir.

2020 yılında bir güneş-rüzgar hibrit sistemi oluşturulmuş ve çalışılmıştır [13]. Rüzgar generatörünün alternatif enerjisi, pilleri şarj etmek için kullanılabilir sabit bir DC değerine dönüştürülür veya daha sonra bir AC/DC invertörü ile AC yüklerine güç sağlamak için bir AC voltajına dönüştürülür. Bir MPPT sistemine dayalı bir yükseltici dönüştürücünün amacı, mümkün olan maksimum güç miktarını elde etmektir. [14]. Bu teknik ile harmonik indirgeme artırılır. Rüzgar türbininin kontrol hedefiyle ilgili bir araştırma, Kanada'nın Vancouver Adası'ndaki şebekeye bağlı bir rüzgar çiftliği, voltajı düzenlemek için lineer bir

ikinci dereceden düzenleyici (LQR) ile MIMO (Çoklu Giriş Çoklu Çıkış) teknolojilerini kullanmıştır. Doğrusal olmayan bir denetleyicinin faydaları, bir PID, LQR ve doğrusal olmayan model öngörücü denetleyicinin geliştirilmesi ve karşılaştırılması yoluyla gösterilmiştir [15]. Deneyle, model tabanlı doğrusal olmayan kontrol yöntemlerinin potansiyel avantajlarını göstermektedir [16]. Bir kontrol stratejisi oluşturmak amacıyla bir 2D kanat kesiti için bir PID ve bir LQR kontrolünü uygulamak ve incelemek için bir aerodinamik modelle birlikte sert bir yay/sönümleyici modeli kullanır. PID kontrolü, hesaplama basitliği ve verimliliği nedeniyle LQR yerine seçilir.

Standart H regülatörü, belirli bir durum tahmincisi ve durum geri beslemesini birleştirerek elde edilebilir [17] .

Otonom bir güneş - rüzgar hidroelektrik sistemi için modelleme prosedürünü belirtilmiş ve Simulink/MATLAB’da servis simülasyonu yapılmıştır [18].

Belirli bir güç kaybı olasılığı için PV modüllerin, rüzgar türbinlerinin ve pil banka ayarlarının en iyi düzenlemelerini belirlemek için hibrit rüzgar/güneş modelleri yaratılmıştır [19].

Tipik bir binanın yük ihtiyaçlarını karşılarken aynı zamanda elektrik sağlamanın pratikliğini değerlendirmek için rüzgar enerjisi sistemleri, güneş pili depolama panelleri ve dizel güç depolama ağlarının çeşitli kombinasyonlarını araştırılmıştır [20].

Yunanistan’ın İskeçe kentinde şebekeye bağlı hibrit rüzgar/güneş ağı kullanan tipik bir eve elektrik ve termal enerji sağlamanın teknik ve mali uygulanabilirliği üzerine araştırma yapılmıştır [21].

Şebekeye bağlı uygulamalar için güç kaynağı olarak hibrit PV/ rüzgar enerji sistemi üç Irak şehri için çalışılmıştır [22]. Bir model simülasyonu için girdi parametreleri, rüzgar türbinleri ve PV dizilerinin yanı sıra üç bölgeden meteorolojik veriler tarafından oluşturulmuştur. Bu MATLAB’da yapılmış ve bulguları; hibrit sistemin yerleşim yerlerine ihtiyaç duyulandan fazla elektrik sağlayabileceğini göstermiştir.

Akülü tezgah sistemlerini kullanılarak Hibrit rüzgar/güneş sistemi konfigürasyonları için en uygun boyut yaklaşımını üretmek amacıyla bir genetik algoritma kullanıldı. Daha sonra en iyi sistem konfigürasyonları, güç kaybı olasılığını azaltmak için optimum boyut yaklaşımı kullanılarak tahmin edildi [23].



Güneş ve rüzgar elektriği üretmek için bir hücre kullanan bir sistem tasarlandı. Güneş ve rüzgar sistemlerinde yedekleme için birincil güç kaynakları, yakıt pelet sistemiydi. Bulgular, cihazın rüzgar ve güneş ışığı olmadığında bile etkili olduğunu ve yüke yüksek kaliteli elektrik sağlayabildiğini göstermiştir [24].

Ayrıca güneş ve rüzgar enerjisi kullanarak şebekeden bağımsız olarak çalışabilen yakıt hücresi cihazları da oluşturulmuştur [25].

Hibrit pil depolamalı rüzgar/güneş enerjisi sistemlerini boyutlandırmak için hem cihazın maliyetini hem de sistemin yükü tamamlaması için gereken süre yüzdesini tasarım kriteri olarak dikkate alacak yeni bir yaklaşım önerilmiştir [26].

## **2. Sistem tasarımı için malzemeler**

### **2.1. Fotovoltaik alt sistem**

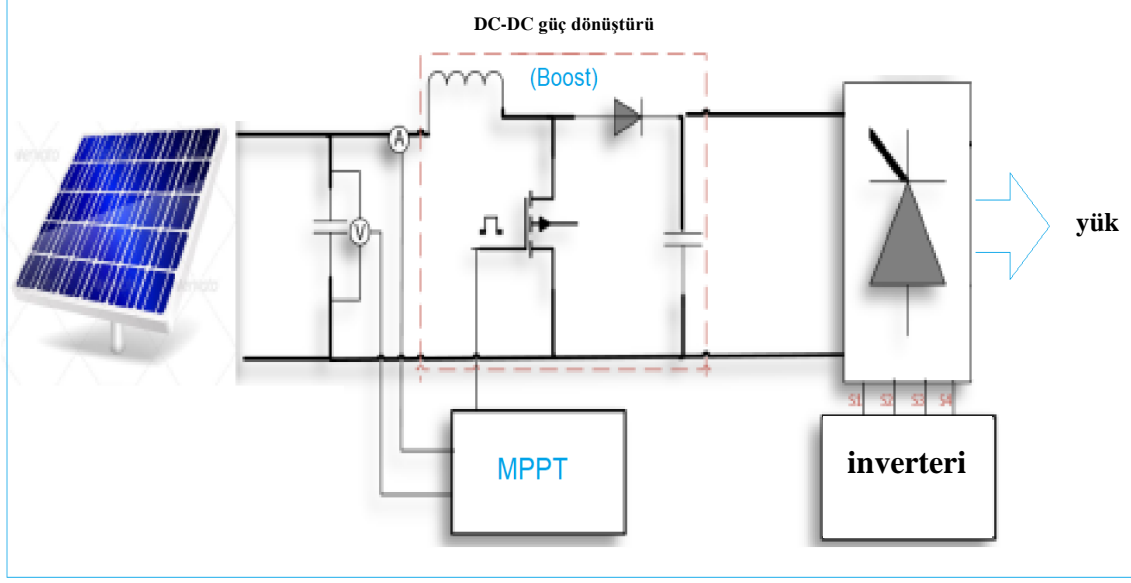
Güneşten gelen fotonlar bir fotovoltaik hücreye çarptığında soğurular, bu da hücrenin atomlarındaki elektronların hücrenin deliklerine gitmesine neden olur. Elektronların ve deliklerin gerçek konumlarının ayarlanması elektriğin üretilmesini sağlar [27].

Başka bir deyişle, fotovoltaik etki, bir PV hücresinin güneş ışığını enerjiye dönüştürdüğü mekanizmanın teknik terimidir. Tek bir PV hücresi yalnızca 0,5 ila 0,8 volta veya 2 Watt'a kadar elektrik sağlayabilir ve en az 1 ila 2 V'a ihtiyaç duyduklarından bir saati veya cep hesap makinesini çalıştıramaz. Bununla birlikte, bir modül yapmak için çok sayıda PV hücresini bir araya getirerek, güç çıkışı artırılabilir. Bu daha büyük güneş panelleri ile üretilebilir. Diziler, bağlantılı panellerin toplamlarıdır. Güneş pilleri, fotovoltaik hücrelerin başka bir adıdır [28].

#### **2.1.1. Blok şeması**

Önerilen fotovoltaik alt sistemin temel blok diyagramı Şekil 1'de gösterilmektedir. Aşağıdaki bileşenlerden oluşur:

- Solar PV paneli
- MPPT denetleyicili DC-DC güç dönüştürücü
- Güç inverteri: Tek fazlı dönüştürücü (Sinüzoidal PWM)

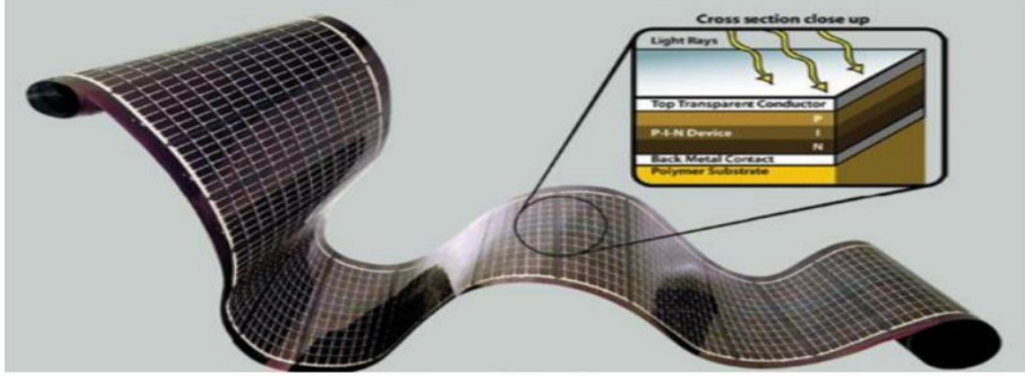


**Şekil (1)** Önerilen fotovoltaik alt sistem

Güneş panellerinin MPPT'si, PV akım ve gerilim sinyalleri kullanılarak elde edilir. MPPT seviyesinde bir çıkış voltajı üreten yükseltme devresi, PV modülüne bağlıdır. Tek fazlı invertörün girişi, Şekil 1'de gösterildiği gibi, yükseltici dönüştürücünün terminallerinin bağlandığı yerdir. Maksimum voltaj ve akımı elde etmek için, yükseltici dönüştürücü, MPPT algoritmasına göre düzenlenir ve etkinleştirilir. AC gerilim ve frekansın ihtiyaç duyulan değerde olması için inverter güç devresi devreye alınmıştır.

### 2.1.2. Güneş pili ilkeleri

PV hücreleri çok basit bir şekilde kurulur. Şekil 2'de görüldüğü gibi altı farklı malzeme katmanı vardır. İkincisi, siyah kapağın cam yüzeyi desteklemesi sayesinde foton soğurma kapasitesi artar ve cam, hücreyi atmosfer bileşenlerinden korur. Fotonlardaki yansımaya kaybı, yansımaya önleyici kaplama kullanılarak %5'in altına düşürülür.



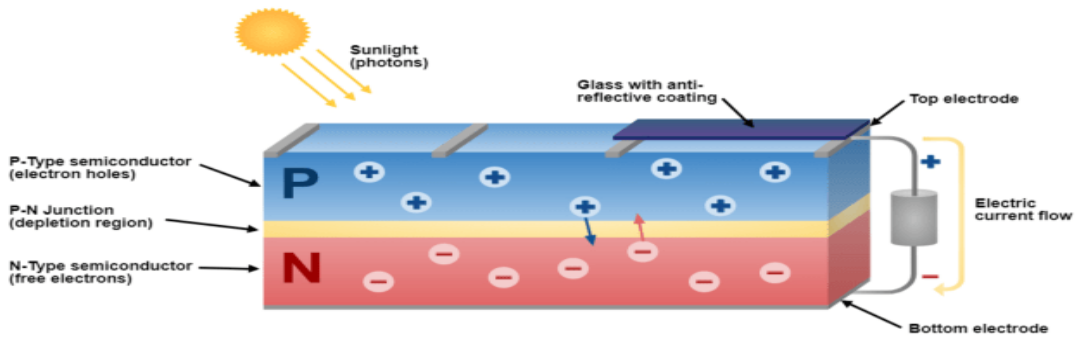
Şekil (2) Silisyum FV hücresi

Dokunmatik ızgara, Foton ile yarım daire arasındaki boşluğu azaltmıştır. İki ince yarı iletken tabakası, p ve n, fotovoltaik sistemin çekirdeğini oluşturur.

Arka dokunuş sonunda sürüşü iyileştirme eğilimindedir [29]. Güneş enerjisinin fotovoltaik hücrelere dönüştürülmesinde iki temel aşama vardır [30]. Bir PV hücresinin şematik diyagramı Şekil 3'te gösterilmektedir. İlk olarak, ışık bir çift elektron deliği tarafından emilir. Elektron ve delik daha sonra yarı iletken çipin yapısı tarafından ayrılır.

Delikler pozitif terminallere ayrılırken, elektronlar negatif terminallere ayrılır. Nesnelere sabit kalırken delik döner. Sonuç olarak, bir elektron deliğini terk ederek farklı bir deliğin boş alanına girer ve olası elektronlar da aynısını yapar. Güneş pili artık bir iletken görevi görerek silikon yapısından elektriği emer [31].

Bununla birlikte, katkı maddeleri - saf olmayan atomlar - güneş pilinin çalışması için gereklidir. PV hücrelerinde en sık bor ve fosfor katkı maddelerini kullanır. Fosfor katkılı olduğunda silikon güneş pili negatif tip (n-tipi) olur, ancak bor katkılı olduğunda hücre negatif tip (p-tipi) kalır [32].

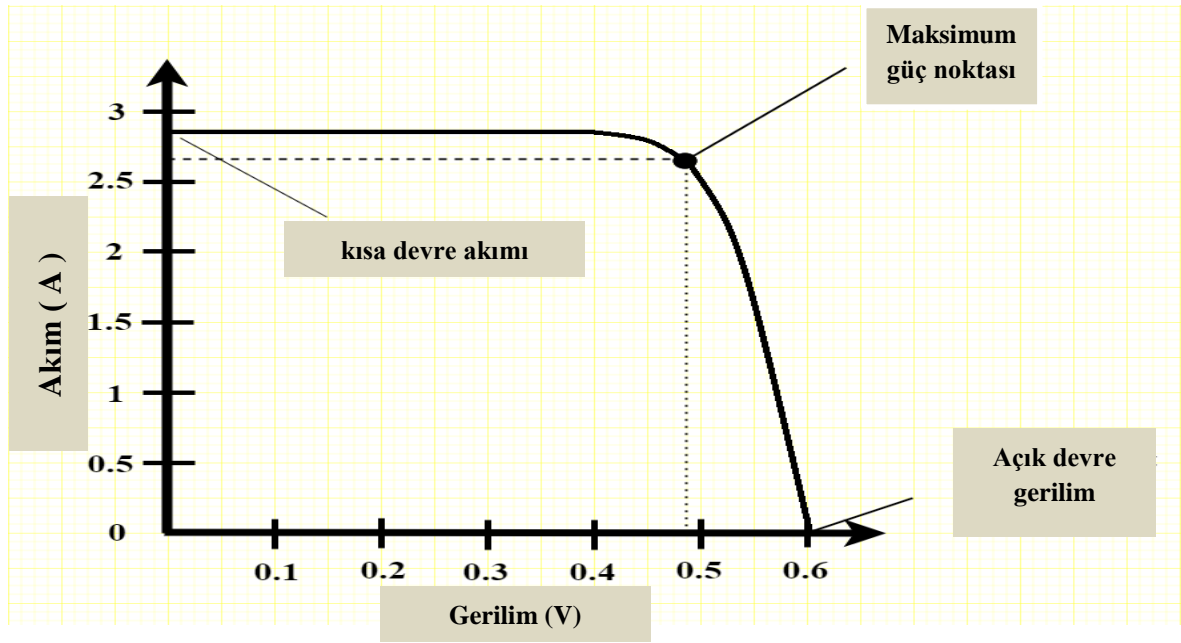


Şekil (3) PV hücresinin şematik diyagramı

Bir yarı iletken den gelen elektronlar, bir elektrik akımı oluşturmak için fotovoltaiik hücrede diğereine gider. Ayrıca, güçlendirilmiş bir “Si” yüzey ve yansıma önleyici bir yüzey kaplaması uygulanırsa, fotovoltaiik hücrenin foton absorpsiyonu muhtemelen artacaktır, devre sonsuz dirence sahiptir ve akımın en düşük (sıfır) değerde olduğu bulunursa açık devre gerilimi vardır. Devre akımı maksimum miktarı aştığında devre direnci sıfırdır ve kısa devrelere izin verilmez.

Direnç sonsuzdan sıfıra değışirse, voltaj ve akım da farklı olabilirse, güneş pilinin I-V özellik eğrisi karakterize edilebilir [33].

Güneş pilinin MPP’si Şekil (4)’te gösterilmiştir.

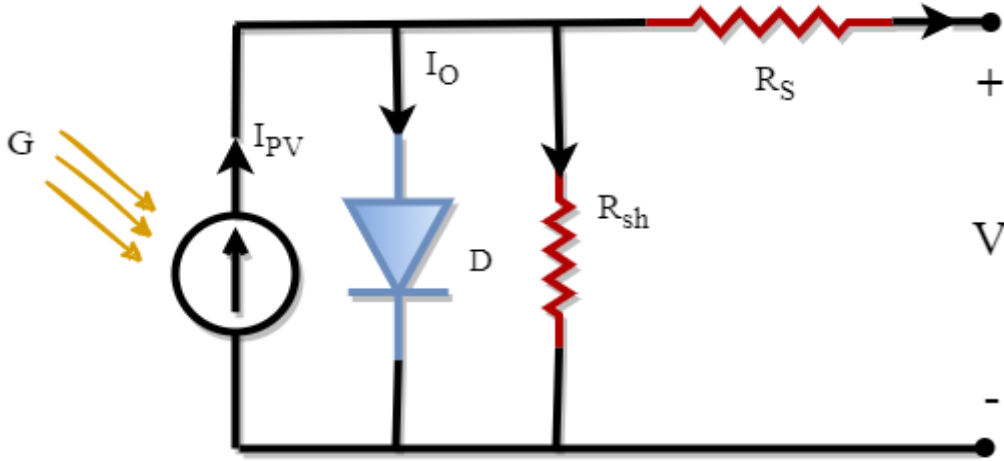


Şekil (4) I-V Silikon PV'nin karakteristik eğrisi

PV hücrelerinin güç çıkışını ölçmek için uluslararası standartlaştırılmış test ayarları da oluşturulmuştur. 1000W/m<sup>2</sup>'lik bir ışınım seviyesiyle, 1,5 güneş spektral ışınımı ile bir hücre bağlantısı arasındaki hava kütlesi bağlantısı 25°C'dir.

### 2.1.3. PV hücresinin modellenmesi

Güneş enerjisi, fotovoltaiik (PV) aracılığıyla doğrudan elektriğe dönüştürülür. Kesitsel bir ters akım PN diyotu, bir güneş pilinin ne olduğudur. Sıcaklık ve radyasyon, PV üretimini etkileyen iki anahtar değişkendir. Güneş sistemlerindeki voltaj, akım değışimi ve güç çıkışı, radyasyon ve sıcaklık değışimlerinden etkilenir. Şekil 5, PV hücresinin eşdeğer devresini göstermektedir.



Şekil (5) Fotovoltaik hücre eşdeğer devresi

PV hücre matematiksel modeli MATLAB/Simulink kullanılarak kurulabilir. Şekil (6)'da gösterilen Solar PV'nin (P-V ve I-V eğrisi) özellikleri, aşağıdaki PV akım denklemine göre karakterize edilir.

$$I = I_{pv} - I_0 \left[ \exp \left( \frac{q(V + l)}{N_{ser} \times K \times T \times a} \right) - 1 \right] - \frac{V + l \times R_S}{R_{sh}} \quad (1)$$

Burada :

$I_{pv}$  : PV akımı

$V_t$  : Dizi termal gerilimi

$I_0$  : Doyma akımı

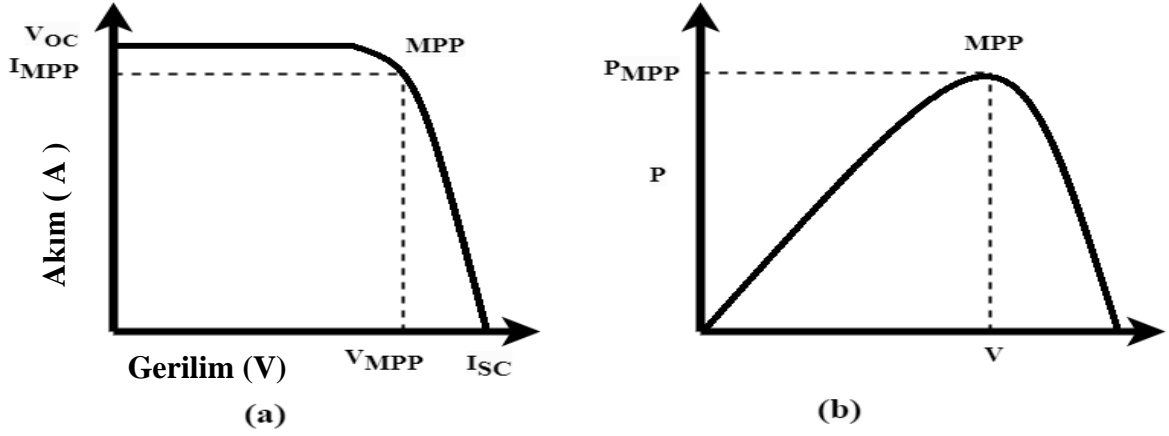
$a$  : İdeal diyot elemanı

$R_{sh}$ ,  $R_S$  : Seri ve paralel dizi direnci

$K$ : Boltzmann sabiti

$T$ : Hava sıcaklığı

$Q$ : Elektronun yükü



Şekil (6) (a) PV hücresi için V-I, (b) P-V

Seri olarak daha fazla hücre bağlayarak, PV derecelendirme voltajı yükseltilebilir ( $N_{ser}$ ). Ek paralel bağlantılar oluşturularak derecelendirme yükseltilebilir ( $N_p$ ).

Panelin kısa devre akımı, düşük ve yüksek olduğu için tam olarak PV panel akımına eşittir.

Sıcaklık ve ışınlamanın, PV'nin ürettiği akım üzerinde bir etkisi vardır ve bu Eşitlik 2 ile gösterilir.

$$I_{pv} = (I_{pv,st} + K \times \Delta T) \frac{G}{G_{st}} \quad (2)$$

Burada:

$I_{pv,st}$ : Normal sıcaklıkta indüklenen akım ve PV ışınımı

$\Delta T$ : Tipik olana göre sıcaklık değişimi

$G_{st}$ : Standart ışınlama

$G_{st}$ : Standart ışınlama

$G$ : Işınlanma

$$I_0 = I_{0,st} \left( \frac{T_{st}}{T} \right)^3 \exp \left[ \frac{q \times E_g}{a \times K} \left( \frac{1}{T_{st}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (3)$$

$E_g$ : yarı iletken bant aralığı enerjisi

$I_{0,st}$ : standart koşullar altında doyma akımı

$T_{st}$ : standart koşullar altında standart sıcaklık

$T$ : gerçek sıcaklık

$$I_{0,n} = \frac{I_{SC,n}}{\exp\left(\frac{V_{OC,n}}{a \times V_{t,n}}\right) - 1} \quad (4)$$

Güneş pilleri birkaç fotovoltaik modülde bulunur. PV dizisi, her biri sırayla bağlanan modüllerden oluşan paralel modül dizilerinden oluşur.  $I_d$  ve  $V_T$  denklemleri, tek bir modül için I-V diyotunu Eşitlik 5'teki gibi tanımlar:

$$I_d = I_0 \left( e^{\frac{V_d}{V_T}} - 1 \right), \quad V_T = \frac{KT}{q} nI \times N_{Cell} \quad (5)$$

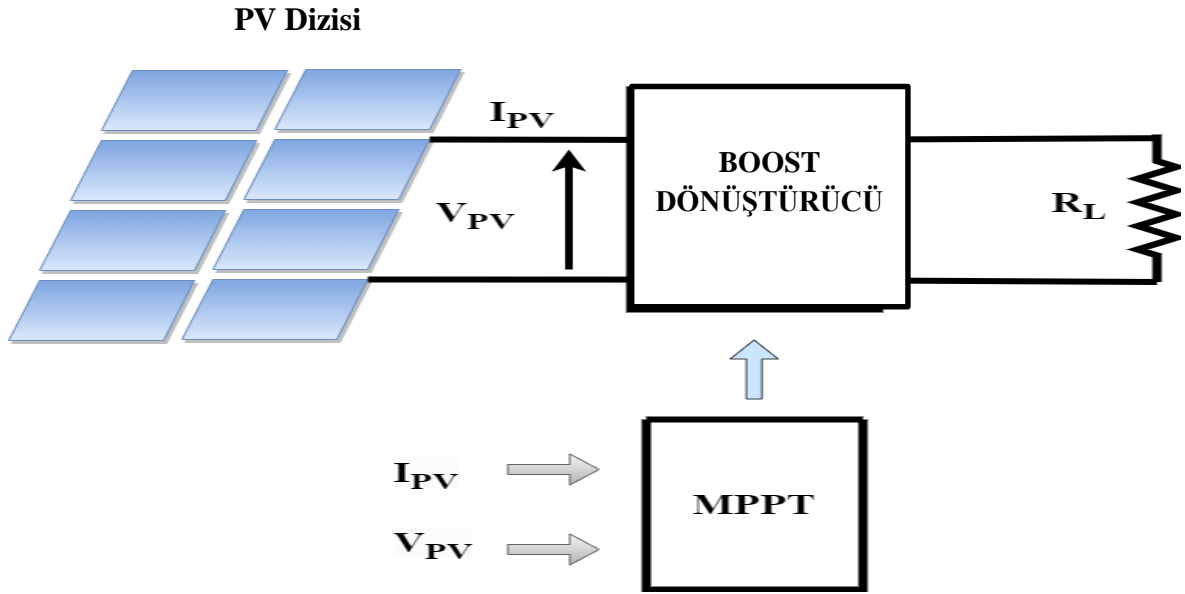
Düşük akım ve voltaj, tek diyotlu bir PV hücresi tarafından üretilir. PV hücrelerinde gerilim ve akımı iyileştirmek için hücreler arasındaki bağlantılar bir modül veya dizi oluşturacaktır [34]. Tutarlı güneş ışığı ile, büyük bir hassasiyet ve performansla çalışır.

#### 2.1.4. MPPT teknikleri

Şekil 4'te görülen maksimum güç noktası (MPP), çoğunlukla panelin sıcaklığından ve ışımamasından etkilenir. Bazen bulutlar veya bir nesnenin gölgesi radyasyonun kaymasına neden olarak MPP'nin değişmesine sebep olur.

Güneş panelinin çalışma noktasını sürekli olarak ölçen bir algoritma, en yüksek güç noktasında dinamik bir çalışma noktası oluşturur. Bu yöntemler MPPT (Maksimum Güç Noktası İzleme) adıyla anılır [35].

Şekil (7) MPPT devre şemasını göstermektedir. MPPT, yük gücünü artırmanın yanı sıra PV sisteminin ömrünü uzatacaktır [36]. İdeal güç seviyesini elde etmek için MPPT'nin PWM tabanlı DC-DC dönüştürücüsünün görev döngüsünü değiştirir.



Şekil (7) MPPT'nin blok diyagramı

Fotovoltaik sistemin en fazla gücü üretebilmesi için maksimum güç noktasının (MPP) düzenli olarak izlenmesi gerekir. Maksimum Güç Noktası İzleme (MPPT) adı verilen algoritmalar, PV sisteminin etkinliğini artırır. Bir fotovoltaik ünitenin maksimum güç noktası, (PV) şebekesine bağlı yüke, sıcaklığa ve parlaklığa bağlı olarak değişir.

Bu nedenle MPPT, gücün sıcaklık ve ışınım gibi harici parametrelerle sürekli dalgalandığı durumlarda maksimum güce geçişi sağlayarak PV panel kullanımını maksimuma çıkarmak için kullanılır.

Güneş enerjisi üretimini en üst düzeye çıkarmak için aşağıdakiler de dahil olmak üzere çeşitli yöntemler oluşturulmuştur:

- Sabit voltaj
- Açık voltaj
- PO (Pertürbasyon ve gözlem)
- Artan iletkenlik
- Bulanık Mantık Kontrol FLC
- Sinir ağları NN.

Bu teknikler aşağıdakilere göre değişir:

- Zorluk

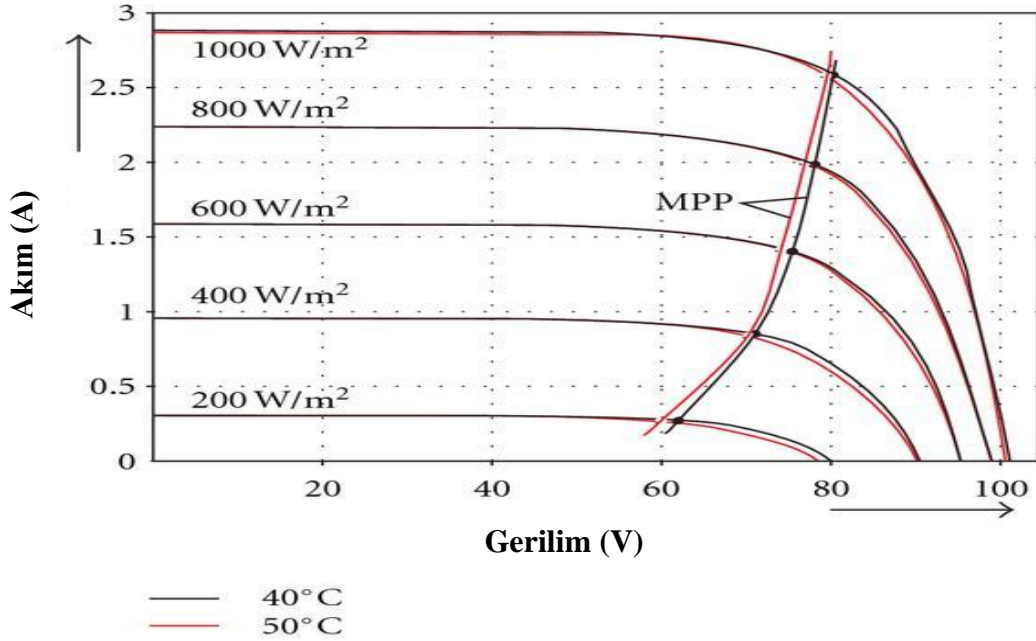


- Gider
- Etkinlik düzeyi ve izleme hızı
- Popülerlik
- Donanım vb.

Bu MPPT algoritmasının doğru bir maliyet analizi aşağıdakileri anlayarak hazırlanabilir:

- Kontrol sisteminde kullanılan yöntem (analog veya dijital)
- Kullanılan sensörlerin ve herhangi bir ek güç bileşeninin sayısı,
- Tüm ek maliyetleri (güç bileşenleri, elektronik bileşenler, panolar, ...) genel sistemlerde sabit tutulması

Çoğu, PV panelden aküye akan akım geçişleri ve I-V dalgalarındaki dalgalanmaları ayarlamak için maksimum güç noktası izleme kontrolleri kullanılır. Ek olarak, PV modülü, pil nominal değerinden daha yüksek bir voltajda çalıştırır [37].



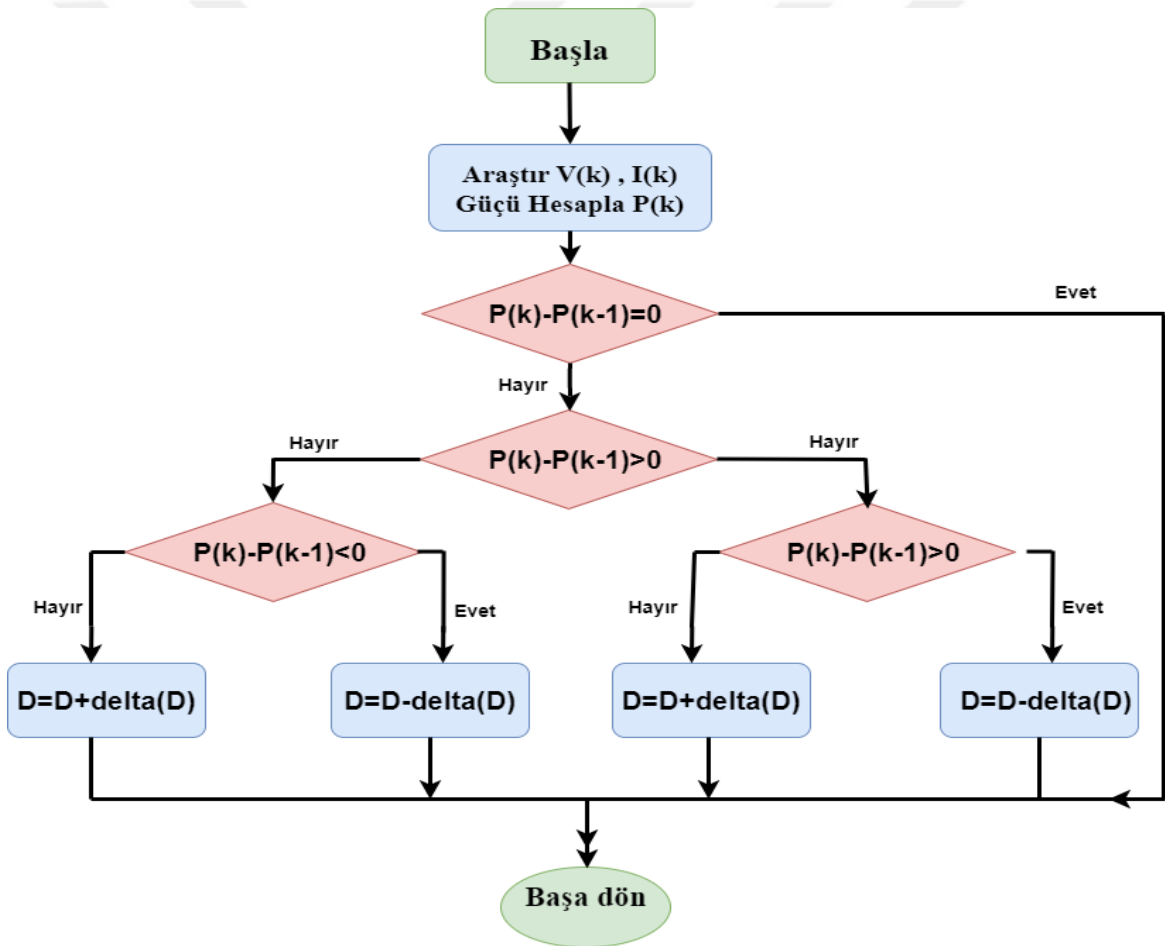
**Şekil (8)** MPP'nin değişimi

Hızlı yakınsamalarından dolayı, MPP'leri ararken güneş enerjili arabaları izlemek için FLC ve yapay sinir ağı algoritmaları kullanılır.

Akü, basit sabit voltaj ve açık devre voltaj teknikleri kullanılarak çalıştırılır, boşaltılır ve gün boyunca LED sokak lambaları kullanılır. IC ve P&O algoritmaları PV tekniğinde uygulanır [38].

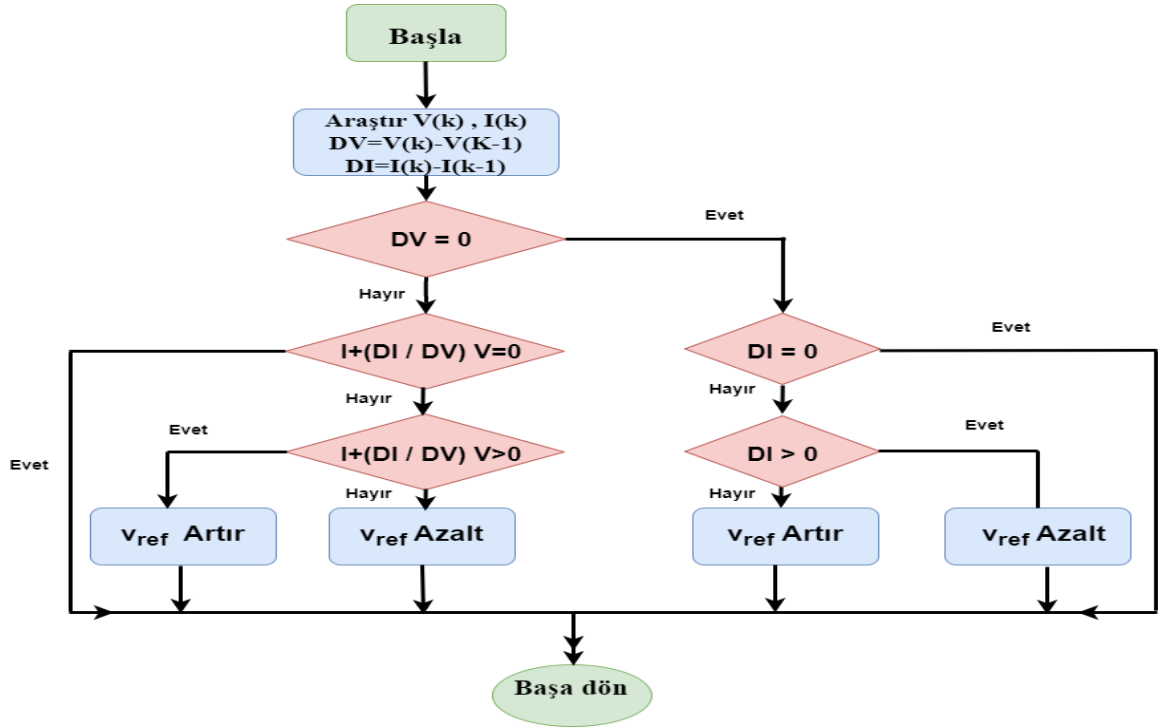
P&O tekniği, basit olduğu ve yalnızca bir sensöre ihtiyaç duyduğu için kullanılır. PV voltajındaki küçük bir artışı değiştirerek ve sonuçta ortaya çıkan güç değişimini takip ederek oluşturulur.

P pozitif ise pertürbasyon MPP'ye yaklaştırılır; P negatif ise, işlem noktası MPP' den daha uzağa taşınmıştır. Sonuç olarak, pertürbasyonu tersine çevirmek ve sonunda maksimum konuma ulaşmak mümkündür. Şekil 9, P&O yaklaşımı için akış şemasını göstermektedir.



Şekil (9) P&O MPPT algoritmasının akış şeması

Artımlı iletkenlik ile ilgili aşağıda gösterilen algoritma, artan iletkenliği bir PV sistemindeki anlık iletkenlikle karşılaştırır. Sonuca göre gerilimi maksimum güç noktasına (MPP) ulaşılan kadar artırır veya azaltır. P&O algoritmasından farklı olarak, MPP'ye ulaşıldığında voltaj sabit kalır.



Şekil (10) IC MPPT algoritmasının akış şeması

### 2.1.5. DC-DC dönüştürücüler

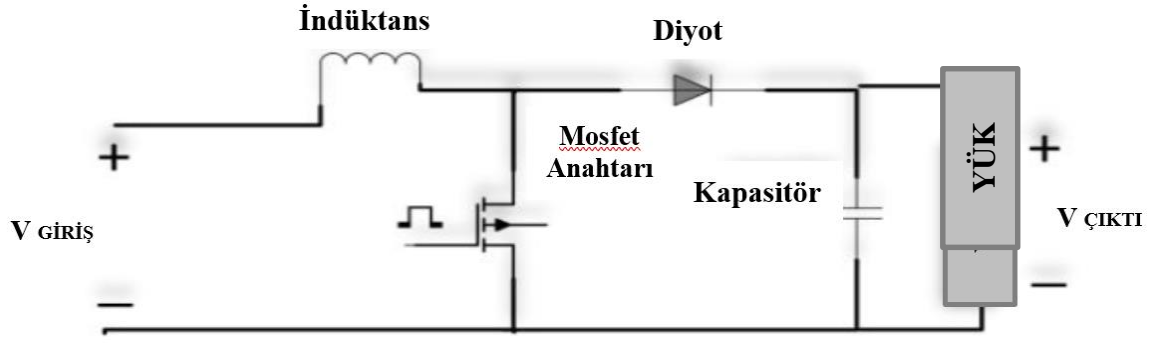
Hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinde güç dönüştürücüler; yenilenebilir enerji kaynaklarını esnek ve verimli bir şekilde bağlamak ve şebekeye bağlı veya bağımsız modda çalıştırmak için kullanılır. Bununla birlikte PV ve rüzgar sistemlerinin gelişigüzel ve öngörülemez doğası nedeniyle sistem talebi karşılamak için yeterli ve güvenilir elektrik üretmez.

DC şebeke bağlantılı güç sistemi için DC-AC inverterin çıkış gücü, iki bağımsız DC-AC inverterin birleşik güç derecelendirmelerinden daha azdır. İki bağımsız dönüştürücünün yerine çok girişli bir DC-DC dönüştürücü kullanılır.

Takviye dönüştürücü devresi, mümkün olan maksimum gücü üretmek için PV çıkışını yüklerle birleştirerek, PV paneli ile yük arasında bir arabirim görevi görür. Giriş DC gerilimlerinin büyüklüğünü değişken DC gerilimlere dönüştürür.

Temel güçlendirme dönüştürücü şunlardan oluşur:

- Anahtar
- Diyot
- Kapasitör
- Bobin



Şekil (11) DC-DC dönüştürücü devresi

Görev oranı, yükseltici dönüştürücü devresi tarafından sağlanan çıkış voltajını düzenlemek için kullanılır.

$$V_o = \frac{V_{in}}{1 - D} \quad (6)$$

Burada  $D$ ,  $V_{in}$ ,  $V_o$  görev oranı, giriş ve çıkış DC voltajıdır.

DC/DC yükseltici dönüştürücü, beş parçanın seçilmesini gerektirir: anahtarlama cihazı, diyot, indüktör, kapasitör ve direnç. Simülasyon için güç MOSFET anahtarlama sistemi ve ortak bir güç diyotu seçildi. Çünkü, bunlar genellikle düşük ila orta güçlü uygulamalarda kullanılmaktadır. Anahtarlama frekansı, anahtarlama kaybı ve indüktör kapasitesi arasında bir uzlaşma sağlandıktan sonra 20 kHz'de seçilir. Aşağıdaki ek unsurlar seçilir:

### 1. Direnç Seçimi:

PV dizisinin MPP'deki maksimum iç direnci ( $R_{MPP}$ ) ile yükseltici dönüştürücü yük direnci ( $R_L$ ) arasındaki ilişki aşağıdaki gibidir:

$$R_L = \frac{R_{MPP}}{(1 - D_{mpp})^2} \quad (7)$$

Maksimum güç noktası (MPP) dönüştürücü görev döngüsü,  $D_{mpp}$  ile gösterilir. Görev oranı ( $D$ ) aralığı 0 ila 1 olduğundan, maksimum gücü ölçmek için yükseltici dönüştürücünün yük direncinin PV'nin MPP'deki ( $R_L$   $R_{MPP}$ ) dahili maksimum direncinden büyük veya ona eşit olması gerekir. Azami güç izleme, yukarıda belirtilen gereklilik karşılanmadığında başarısız olur [39].

## 2. İndüktör Seçimi:

En yüksek güneş radyasyonu ( $1000\text{W}/\text{m}^2$ ) için MPP'nin izin verilen en büyük güç dalgalanmasına bağlı olarak indüktörün yükseltme değeri seçilir. Çıkış akımı, indüktör frekansı arttıkça azalır ve bunun tersi de geçerlidir. Endüktans diğer komponentlere göre en maliyetli komponent olduğu için indüktör değeri daha düşük konvertör kullanılması tercih edilir. İzin verilen dalgalanma akımı (DI) akımın %40'ına ve anahtarlama frekansı ( $f_s$ ) 20 kHz'e ayarlanmıştır. Sonuç olarak, minimum indüktör değeri aşağıdaki gibi belirlenir:

$$L = \frac{V_{mpp} \times D_{mpp}}{2 \times \Delta I_{out} \times f_s} \quad (8)$$

MPPT'nin tepki çalışması için piyasada bulunan 5 mH'lik indüktör alınır.

## 3. Kondansatör Seçimi:

%0,2 voltaj dalgalanma gereksinimini karşılamak için " $C_{in}$ " ve " $C_{out}$ " kondansatörleri kullanılır. Gerekli kapasitenin kabaca ifadesi verilir.

$$C_{min} = \frac{V_{out} \times D_{mpp}}{2 \times \Delta V_{out} \times R \times f_s} \quad (9)$$

### 2.2. Rüzgar enerjisi alt sistemi

Amerika Birleşik Devletleri'nde elektrik üreten ilk yel değirmeni 1890'da inşa edildi. Boon yakınlarındaki Howard Knob Dağı'nda, 1979'da maksimum 2 MW kapasiteli şebekeye bağlı bir rüzgar türbini generatörü hizmete girmiştir. İskoçya'nın Orkney bölgesindeki Hill'de, 3 MW'lık bir türbin 1988'de hizmete girmiştir [40].

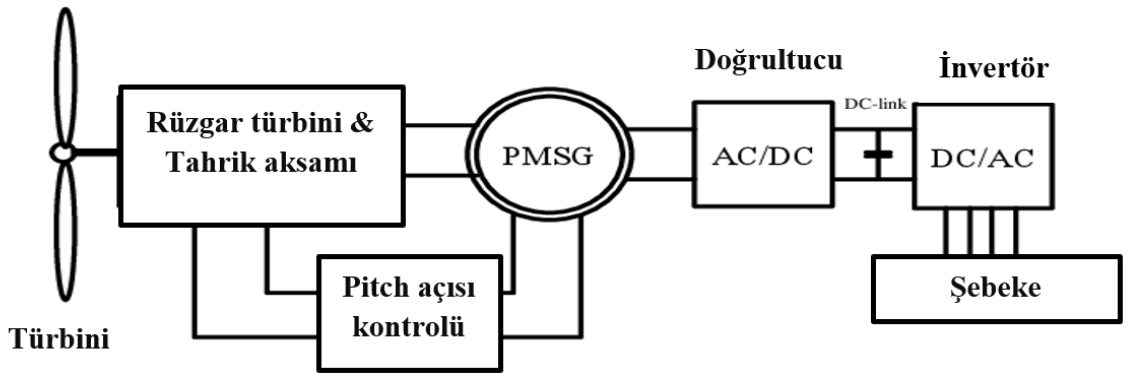
Rüzgârdan üretilen elektrikle şebekeye bağlı olmayan uzak yerlerde bulunan binalarda aydınlatma sağlanmaktadır.

Bağımsız sistemler için uygun olan küçük rüzgar enerjisi generatörleri ve elektrik şebekelerine bağlanabilen daha büyük yardımcı generatörler bugün hala mevcuttur. 2003 yılında toplam kurulu rüzgar enerjisi kapasitesi 39,294 MW idi.

#### 2.2.1. Yapılandırma

REDS'ye dayalı sabit mıknatıslı senkron generatör (PMSG) modelinin yapısı aşağıdadır:

- Rüzgar türbini, rüzgarın kinetik enerjisini dönme hareketine dönüştürür.
- Rüzgar enerjisi dönüşümü (Tahrik aksamı/dişli kutusu), türbin hızını generatör hızına uydurur.
- Rüzgar türbini eğim açısı kontrolörü.
- PMSG, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür.
- Doğrultucu.
- DC / DC dönüştürücü.
- Çevirici



Şekil (12) Rüzgar enerjisi dönüştürme sistemi (REDS)

### 2.2.2. Rüzgar türbini

Bir rüzgar türbini tipik olarak, bir göbek etrafında dönen bir dizi rotor kanatları ile motor bölümünün içine yerleştirilmiş bir dişli kutusu-generatör setinden oluşur.

Farklı boyutlarda ve teknolojik rüzgar türbinlerinin elektrik gücü üzerinde farklı etkileri olacaktır. Rüzgarın kütlesi ve hızı vardır ve ayrıca kinetik enerji içerir.

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2, m = \rho vS \quad (10)$$

Burada :

$m$ : hava kütlesi,  $v$ : rüzgar hızı,  $\rho$ : hava yoğunluğu,  $S$ : türbinin kapladığı yüzey.

Rüzgar enerjisi rüzgar türbini tarafından yakalanır ve rotor için dönme enerjisine dönüştürülür. Aşağıdaki denklemler, rüzgarın dönen kanatların süpürülen alanı A üzerindeki hızında sunduğu mekanik gücü verir:

$$P_{wind} = E_C = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\rho_{air}Sv^2 \quad (11)$$

Hava yoğunluğu sabit kabul edilir, 1,225 kg/m<sup>3</sup>. Aslında, sıcaklık ve nem gibi faktörlere bağlıdır. Güç katsayısı rüzgar türbininin mekanik verimini etkiler. Uç hız oranı ve eğim açısı olan  $C_p(\lambda, \theta)$  eğrisi, dönen bir rüzgar türbininin güç katsayısını verir.

2 MW'lık, üç kanatlı bir türbin, güncellenmiş  $C_p(\lambda, \theta)$  denklemiyle gerçekçi bir şekilde temsil edilir:

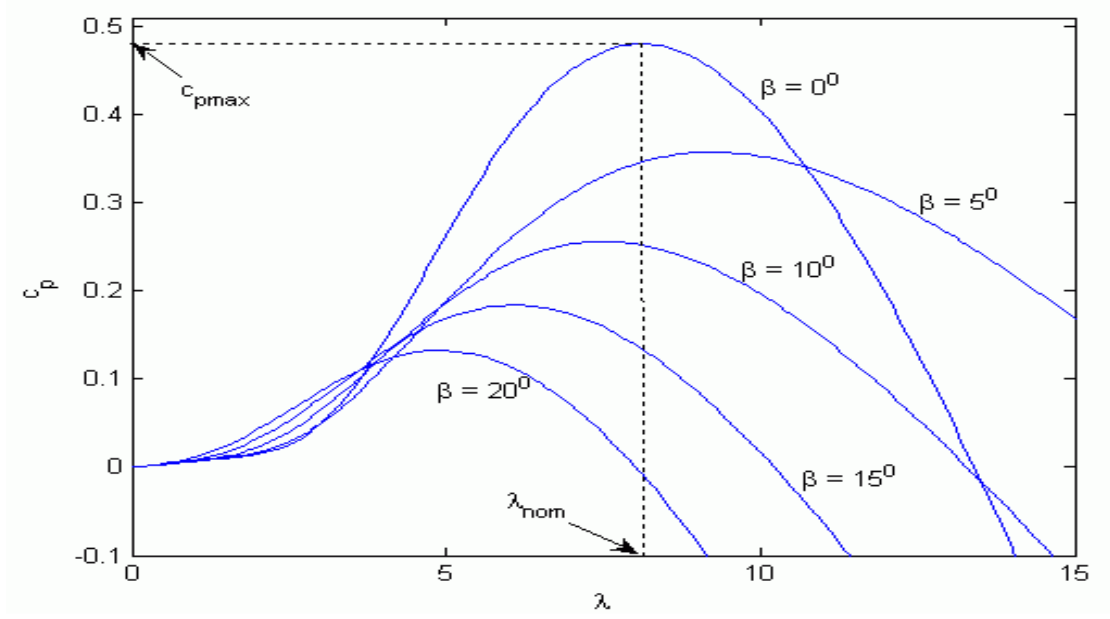
Bir rüzgar türbininin kullanılması, rüzgar enerjisinden mekanik tork üretir. Rüzgar gücünden elde edilen türbindeki mekanik güçten türbinin mekanik torku belirlenebilir. Rüzgar hızı, doğru olduğu gibi, türbinden sonra sıfır değildir. Daha sonra türbinin güç katsayısı ( $C_p$ ) uygulanır.

Türbin kanadının açısı olan eğim açısı ve dönme hızı ile rüzgar hızının ürünü olan uç hızı, güç katsayısını belirler. Betz limiti, ( $C_p$ )'nin en büyük güç katsayısıdır. Güç katsayısının formülü şu şekildedir:

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left( \frac{c_2}{\lambda_i} - c_3\beta - c_4 \right) e^{-c_5/\lambda_i} + c_6\lambda \quad (12)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (13)$$

Farklı  $\beta$  değeri için  $C_{p-\lambda}$ , Şekil 13'te gösterilmektedir.



**Şekil (13)** Farklı  $\beta$  değeri için  $C_p$

Güç katsayısı şu şekilde verilir:

$$C_p = \frac{P_m}{P_w}; C_p < 1 \quad (14)$$

$$P_m = C_p(\lambda, \beta) \frac{\rho S}{2} v_{wind}^3 \quad (15)$$

Burada,

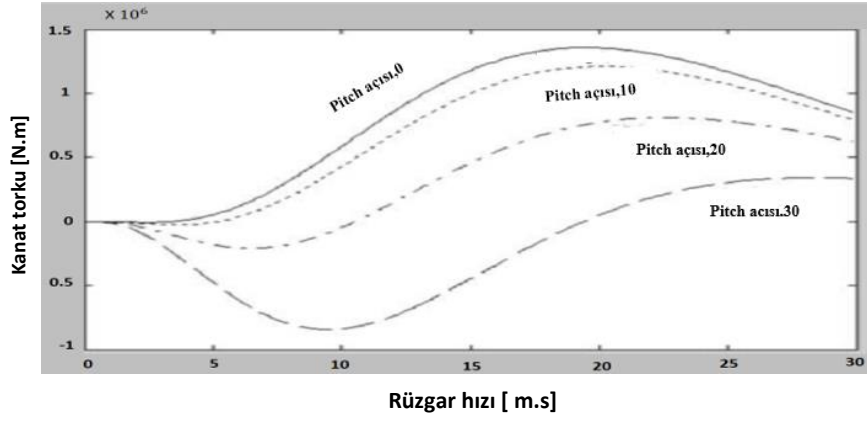
$P_m$  türbinin mekanik çıkış gücü performans katsayısıdır.

Mekanik tork şu şekilde verilir:

$$T_m = \frac{P_m}{\omega} \quad (16)$$

Rüzgar hızının ve eğim açısının bir fonksiyonu olarak kanatlardaki tork, Şekil (14)'te gösterilmektedir. Ek olarak, tork değeri negatif olduğunda, eğim açısının rüzgar türbininin dönüşünün yavaşlamasına neden olabileceği açıktır.





Şekil (14) Rüzgar hızı ve eğim açısının fonksiyonu olarak kanatlardaki tork

### 2.2.3. Rüzgar generatörü

Çeşitli araştırmalar, dinamik araştırmalar için rüzgar türbini modeli üretmiştir. Rüzgar türbini generatörü (RTG) durumunda, kontrolün mümkün olduğu tek bir yön vardır. Bu, sağlanan gücün talepten daha büyük olması durumunda, Rüzgar türbininden gelen gücün azaltılmasının veya bir düzeyde düzenlenmesinin mümkün olabileceği anlamına gelir. Rüzgar türbini sağlam bir şebekeye bağlıysa, şebekeye sürekli olarak nominal güç enjekte etmek düşünülebilir. Küçük, izole bir şebeke durumunda güç azaltılabilir.

Aşağıda görüleceği üzere RTG’de birçok kontrol mekanizması kullanılmıştır:

- Pitch kontrolü
- Pasif durma kontrolü
- Aktif durma kontrolü

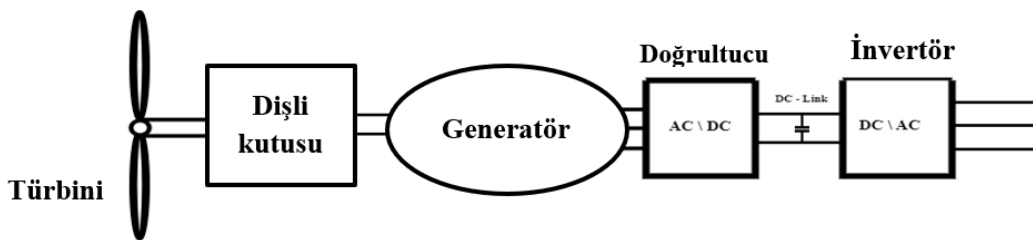
Yukarıda listelenen üç yaklaşımdan ikincisi, küçük RTG için uygundur. Rotor kanatları bu kontrol mekanizmasına sabit bir şekilde yerleştirilmiştir ve rotor kanatlarının aerodinamik özellikleri kullanılarak güç minimum seviyede tutulur. Rüzgar hızı devreye girme hızının üzerine çıkarsa, RTG aktif gücü sağlar. Doğrudan üç fazlı bir elektrik şebekesine bağlanan basit bir sincap kafesli endüksiyon generatörünün yardımıyla çok sayıda düşük güçlü rüzgar türbini inşa edilir. Sabit oranlı dişli kutusuna sahip bir shaft, türbini generatöre bağlar. Bu basit rüzgar türbinleri esas olarak verilen her çalışma noktasında sabit hızda çalışmak zorundadır.

Günümüzün yüksek güçlü rüzgar türbinleri değişken hızlarda çalışabilir. Sabit hızlı generatörlerin aksine, değişken hızlı generatörler aşağıdaki avantajlara sahiptir.

Generatörün düzenleme hızı (frekans), perde kontrol zaman sabitlerinin daha uzun olmasını sağlayarak perde kontrol karmaşıklığını ve tepe güç ihtiyaçlarını azaltır. Ucuzdurlar ve basit perde kontrolü sunarlar. Tipik olarak, eğim açısı rüzgar hızı daha düşük olduğunda ayarlanır. Perde açısı kontrolü yalnızca güçlü rüzgarlar sırasında maksimum çıkış gücünü azaltmak için kullanılır.

- Eğim açısı kontrolü yalnızca güçlü rüzgarlar sırasında maksimum çıkış gücünü azaltmak için kullanılır.
- Mekanik stresleri azaltırlar; enerji türbinin mekanik ataletinde tutulur ve tork titreşimlerini azaltan "esneklik" üretilir.
- Kulenin karşı basıncının neden olduğu tork ve güç titreşimlerini dinamik olarak düzeltirler. Bu karşı basıncın tork titreşimleri yaratma hızı, rotor kanatlarının sayısı ile çarpılan türbin rotor hızıyla orantılıdır.
- Rüzgar türbini sisteminin esnekliğinden dolayı tork titreşimlerini azaltarak güç kalitesini artırır. Sonuç olarak, artık herhangi bir elektrik gücü değişikliği veya titreşim olmaz.
- Sistem etkinliğini artırır; Optimum çıkış gücüne ulaşmak için, türbin hızı rüzgar hızına göre değiştirilir. Geniş bir güç aralığında, maksimum güç noktasında çalışma mümkündür.
- Düşük güç ayarlarında düşük hızda çalışma elde edilebildiğinden, akustik gürültüyü azaltırlar.
- Ayrıca, değişken hızlı generatörlere sahip rüzgar türbinlerinin çoğu bir adada çalışabilir.

Ayarlanabilir hız üreteçlerinin olası bir uygulama şeması Şekil (15)'te gösterilmektedir:



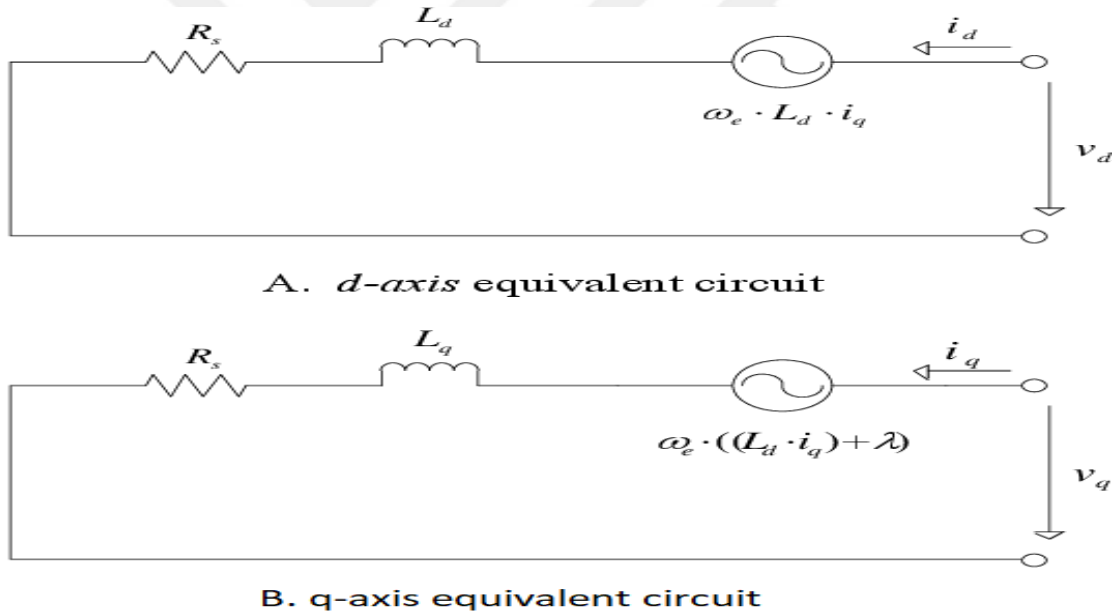
Şekil (15) Bir güç dönüştürücü ile seri bağlı bir senkron generatör

Senkron bir generatör tarafından değişken frekanslı AC elektrik üretilir. Güç, güç dönüştürücü tarafından değişken frekanstan sabit frekansa dönüştürülür. Değişken hızlı bu generatörün dezavantajları şunlardır:

- Güç dönüştürücü maliyetlidir ve toplam gücü 1 p.u. olarak derecelendirilmelidir.
- Dönüştürücü çıkış filtreleri ve EMI filtreleri 1 p.u. çıkış gücü derecesindedir bu da filtre tasarımını zorlu ve pahalı hale getirir.
- Dönüştürme verimliliği, genel sistem verimliliğinde önemli bir rol oynar.

d-q dönen referans çerçevesi, faz kilitlemeli bir döngü PLL kullanılarak abc üç fazlı çerçeve ile senkronize edilir.

Şekil (16)'daki PMSG eşdeğer devresi düşünülerek d-q senkron referans çerçevesinde, PMSG modeli oluşturulur.



**Şekil (16)** d-q referans çerçevesinde PMSG'nin eşdeğer devresi

Şekil (18)'de gösterilen PMSG'nin voltaj denklemleri şu şekilde verilmiştir:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} i_d &= \frac{1}{L_d} v_d - \frac{R}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} P \omega_r i_q \\ \frac{d}{dt} i_q &= \frac{1}{L_q} v_q - \frac{R}{L_q} i_q - \frac{L_d}{L_q} P \omega_r i_d - \frac{\lambda P \omega_r}{L_q} \end{aligned} \quad (17)$$

Elektromanyetik tork denklemini şu şekilde veririz:

$$T_e = 1.5\rho[\lambda i_q + (L_q - L_d)i_d i_q] \quad (18)$$

$L_q$ ,  $q$  eksenini endüktansdır,  $L_d$   $d$  eksenini endüktansdır.

$R$ , stator sargılarının direncidir,  $i_q$   $q$  eksenini akımıdır.

$i_d$   $d$  eksenini akımıdır,  $v_q$   $q$  eksenini voltajıdır,  $v_d$   $d$  eksenini voltajıdır.

$\omega_r$  rotorun açısal hızı,  $\lambda$  indüklenen akının genliğidir.

$P$  kutup çiftlerinin sayısıdır.

Dinamik denklemler şu şekilde veririz:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}\omega_r &= \frac{1}{J}(T_e - F\omega_r - T_m) \\ \frac{d}{dt}\theta &= \omega_r \end{aligned} \quad (19)$$

burada  $J$  rotorun ataletidir,  $F$  rotorun sürtünmesidir,  $\theta$  rotor açısalıdır.

#### 2.2.4. Güç dönüştürücü

Doğrultucu, DC-link ve invertör, bir güç dönüştürücünün bileşenleridir. PMSG'nin doğrultucusunun çıkışı DC gerilime dönüştürülecektir. Rüzgar hızı değiştiğinde, değişken hızlı bir rüzgar türbininin bir PMSG'den gelen voltaj çıkışı genlik ve frekansta dalgalanır; bu durumda, generatör güç çıkışı stabilize edilmelidir. Bu nedenle, üç fazlı bir doğrultucu, bu tasarımda PMSG'yi rüzgar türbini ile DC barasına bağlar.

Evirici, DC-link kondansatöründen gelen DC voltajını AC voltajının temel frekansına dönüştürecektir. Eşitlik 20, temel frekanstaki AC voltajı ile DC voltajı arasındaki ilişkiyi verir.

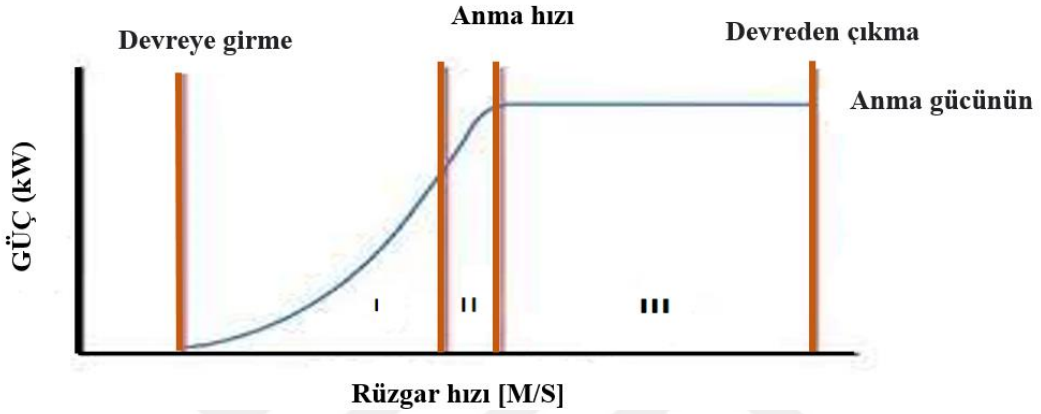
$$V_B = \frac{1}{2\sqrt{2}}m_B v_{dc} < \delta_B \quad (20)$$

$m_B$  = modülasyon indeksi ,  $\delta_B$  = kontrol dalgasının faz açısı.

### 2.3. Rüzgar türbini kontrolü

İlk olarak, uygun kontrol tipini, derecesini veya kapsamını seçmek için güç ve rüzgar hızı arasındaki bağlantıyı anlamak çok önemlidir.

Yaklaşan rüzgardan ne kadar güç alabileceğiniz, bunun için kullanabileceğiniz bir rakam olan güç eğrisi ile belirtilir. Bir rüzgar türbini için ideal bir güç eğrisi Şekil (17)'de bulunabilir.

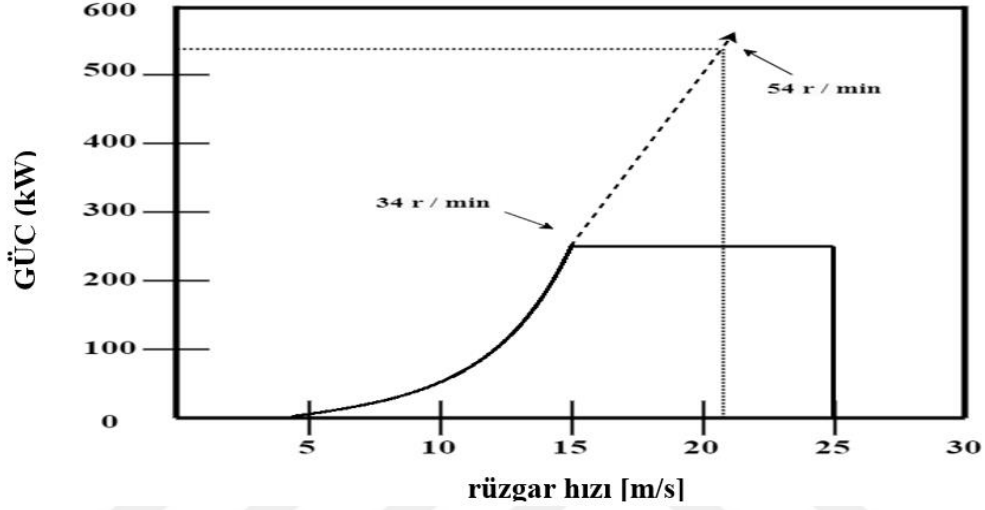


Şekil (17) İdeal bir rüzgar türbini güç eğrisi

Türbinin operasyonel sınırlamaları devreye girme ve devreden çıkma hızlarıdır. Mevcut enerjinin minimum eşiğin üzerinde olduğunu ve bu aralıkta tutularak yapısal sağlığın korunduğunu garanti edilmelidir. Üreticinin “nominal güç” olarak bilinen noktası, hem maliyeti hem de enerjiyi hesaba katar. Ek olarak, bu eşiğin üzerindeki rüzgar hızları nadir olduğundan, nominal rüzgar hızı kullanılmıştır. Genel olarak enerjisinin çoğunu belirtilen rüzgar hızında toplayan bir türbin tasarımının ekonomik olarak uygun olmadığı sonucuna varılabilir. Güç eğrisi, Şekil 17’de üç ayrı bölüme ayrılmıştır. Türbin, tüm gücü toplamak için maksimum verimlilikte çalıştırılır çünkü Bölge I düşük rüzgar hızlarına sahiptir ve nominal türbin çıkışının altındadır. Başka bir deyişle, türbin kontrolleri optimize edilmiştir. Bölge III ise güçlü rüzgar hızlarına sahiptir ve nominal türbin gücünde çalışmaktadır. Bu alanda çalışırken türbin, üretilen gücün maksimum miktarını hesaba katmak için ayarlamalar yapar. Son olarak, Bölge II, öncelikle rotor torkunu ve gürültüyü en aza indirmeye odaklanan bir geçiş bölgesidir.

### 2.3.1. Perde kontrolü

Nominal ve kesme rüzgar hızları arasında, türbinin güç çıkışı nominal seviyesine göre kontrol edilir. Şekil 18'deki noktalı çizgiler, kontrol edilmeseydi gücün rüzgar hızıyla nasıl artacağını göstermektedir. Şekil (18)'de 20 m/s'ye eşdeğer gücün sistemin anma gücünün iki katından fazla olduğunu görülebilir.



Şekil (18) Rüzgar hızı ile güç değişimi

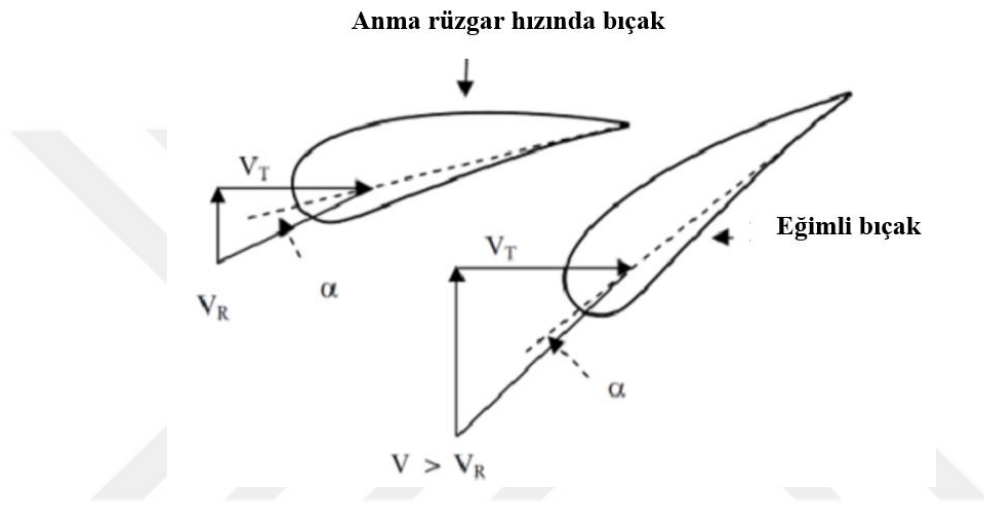
Görüldüğü gibi 20 m/s'ye eşdeğer güç, sistemin anma gücünün iki katından fazladır. Bununla birlikte, bu yüksek hızda bile türbini tam potansiyelinde kullanabileceksek, türbin daha fazla gücü kaldıracak şekilde inşa edilmelidir. Bu, sistem için daha güçlü bir iletimin ve daha büyük bir generatörün gerekli olacağını gösterir. Öte yandan, rüzgar rejimlerinin çoğunda, bu tür yüksek rüzgar hızlarının olasılığı nispeten düşüktür. Bu nedenle, sistemi yalnızca çok kısa bir süre için mevcut olacak ekstra gücü idare edecek şekilde aşırı tasarlanmanın bir anlamı yoktur.

Rotorun hızı rüzgarın hızıyla birlikte artar. Yukarıda belirtilen örnekte, hız 15 m/s'den 20 m/s'ye değişirken, rotor hızı 34 dev/dak'dan 54 dev/dak'ya yükselmektedir. Rotor, hızdaki bir artışla daha da hızlanabilir ve sonunda kaçak durumuna ulaşabilir. Bu hız artışının hızlı bir şekilde gerçekleştiği ve hızlı bir ivmeye yol açtığı vurgulanmalıdır.

Bu nedenle, türbin gücünün, nominal rüzgar hızından daha yüksek hızlarda sabit bir seviyede kontrol edilmesi önemlidir. Perde kontrolü, stall kontrolü, aktif stall kontrolü ve sapma kontrolü, gücü kontrol etmek için öne çıkan tekniklerdir. Belirli bir hücum açısında,

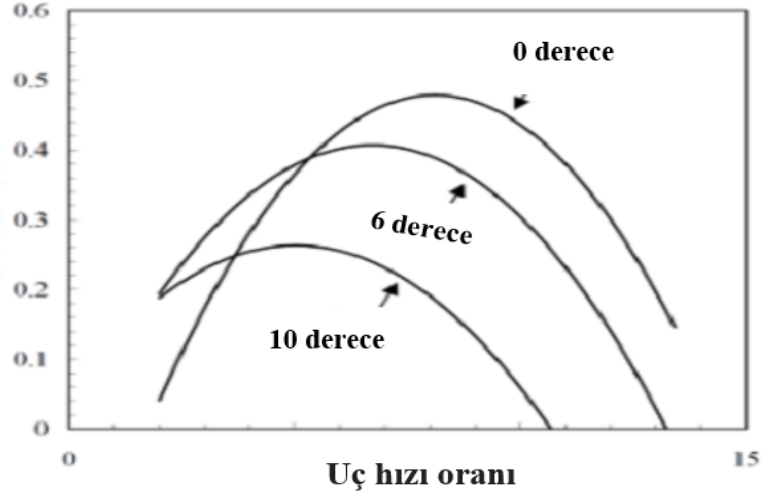
rüzgar türbini kanatları aerodinamik olarak en iyi şekilde çalışır. Belirli bir kanat profili ile ilgili olarak, hücum açısı, rotor hızına ve rüzgar hızına bağlı olarak değişir. Şekil (21) adım kontrol prensibini göstermektedir.

Burada  $V_R$ , nominal rüzgar hızını,  $V_T$  kanatların dönüşle ilgili hızını ve hücum açısını ifade eder. Kontrollü bir rüzgar türbinindeki elektronik sensörler, sistemin elektrik çıkışındaki değişiklikleri sürekli olarak izler. Çıkış gücü saniyede birkaç kez test edilir. Açık kontrol mekanizması, güç üretimindeki değişimlere yanıt olarak aşağıda gösterildiği gibi kanat açısını istenen açıda değiştirmek için çalıştırılır.



Şekil (19) Perde kontrol ilkesi

Bıçak eğimini ideal hücum açısına göre değiştirerek türbin, devreye girme ve nominal rüzgar hızları arasında mümkün olduğunca verimli çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Kontrol sistemi, rüzgar hızı  $V_R$ 'yi aştığında, şekil 19'da görüldüğü gibi hücum açısını değiştirerek kanat eğimini değiştirir. Şekil 22'de görüldüğü gibi, ideal hücum açısından herhangi bir sapma, rotorun verimliliğinde bir düşüşe neden olacaktır. Bu nedenle,  $V_R$ 'den daha yüksek rüzgar hızlarında, kanatların aerodinamik verimliliğini azaltarak fazla rotor gücü kaybedilmiş olur. Hız nominal değere veya altına düştüğünde kanatlar ideal konumlarına geri döner.



Şekil (20) Uç hızı oranı

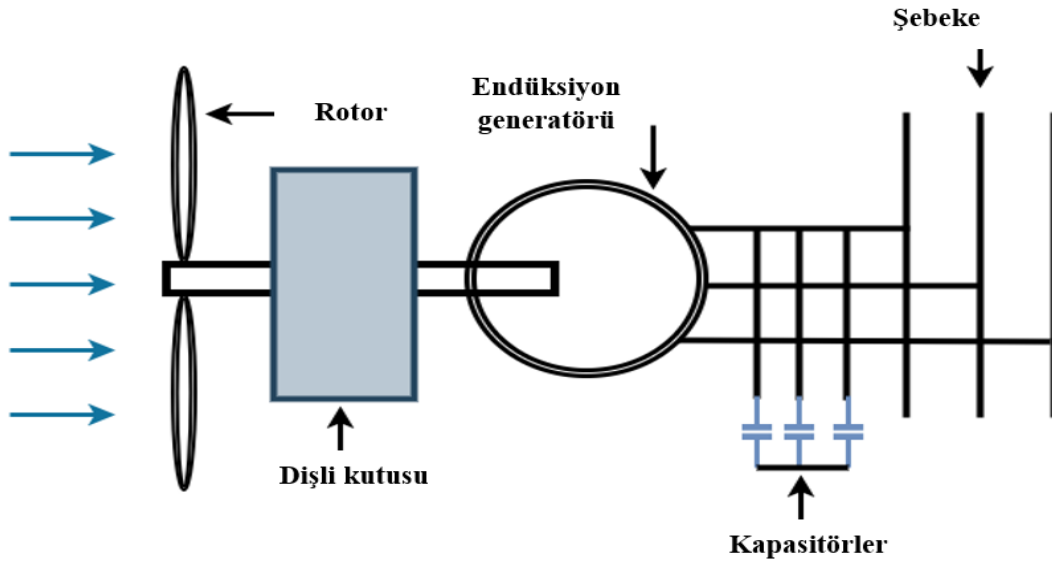
Açı kontrollü bir türbinde, eğim kontrol sistemi rüzgar hızındaki değişikliklere yanıt olarak kanatları uzunlamasına eksenleri boyunca döndürür. Hidrolik ve mekanik sistemler, hatve kontrol mekanizmalarına güç sağlamak için birlikte çalışır. Perde kontrol sistemi, rotorun beklenmeyen hızlanmasını veya yavaşlamasını önlemek için rüzgar hızındaki değişikliklere hızlı tepki vermelidir. En iyi performans için artışın uygun seviyede nasıl doğru olması gerektiğine benzer. Sonuç olarak perde kontrol mekanizması son derece hassas olmalıdır.

Perde kontrollü türbinler, ılımlı rüzgarlarda elektriği daha verimli bir şekilde toplayabilir, çünkü perdeleme, kanatların ideal hücum açısına ulaşmasını sağlar. Bu sistemlerin dezavantajı, kanadın açısını değiştirmek için kanadın kendisine hareketli parçaların eklenmesi gerekmesidir. Kontrol ünitesi ayrıca maliyetlerini artıran rüzgar değişimlerine karşı çok hassas olmalıdır.

### 2.3.2. Sabit ve değişken hızlı işlemler

Bir rüzgar türbini, sabit veya değişen hızlarda çalışacak şekilde inşa edilebilir. Şekil 21'de gösterildiği gibi, sabit hızlı türbinlerde rotor, hız arttırıcı dişliler vasıtasıyla bir asenkron generatöre bağlanır. Generatörün stator sargısı doğrudan şebekeye bağlıdır. Gördüğümüz gibi, endüksiyon generatörleri şebekeden sağlanan uyarma elektriği gerektirir. Bundan dolayı, özellikle düşük güçlü şebekelerde istenmeyen voltaj değişiklikleri ortaya çıkabilir. Bu sorunu önlemek için kapasitörler şemada gösterildiği gibi devreye dahil edilmiştir. Bu kurulumla, rüzgar türbini sabit (veya neredeyse sabit) bir hızda çalışacak ve şebekeye önceden tanımlanmış bir frekansta (50 Hz veya 60 Hz) elektrik sağlayacaktır.

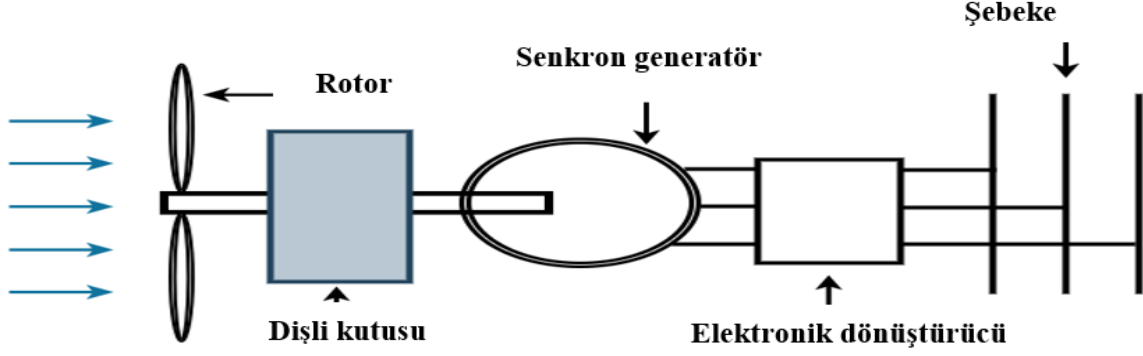




**Şekil (21)** Sabit hızlı rüzgar türbini

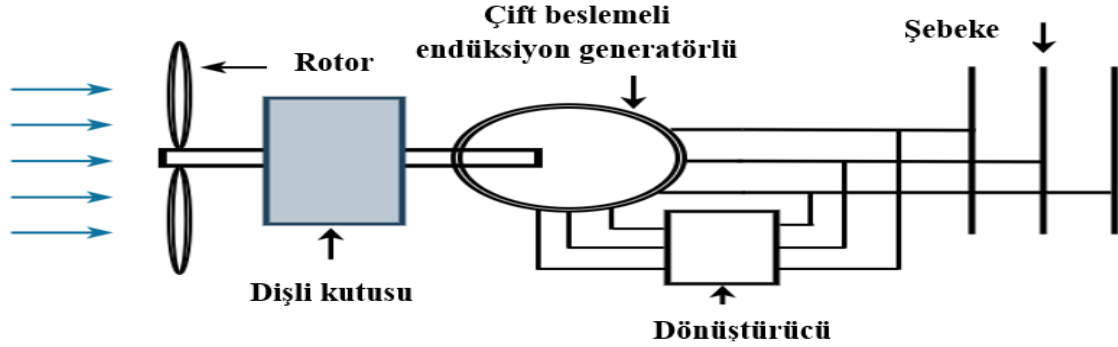
Değişken hızlara sahip rüzgar türbinlerinde ya senkron generatörler ya da çift beslemeli endüksiyon generatörleri kullanılır. Senkron generatörler kullanan sistemler, rüzgar hızındaki değişiklikler nedeniyle düzensiz çalışma hızı değişikliklerine sahiptir, bu da çıkış voltajını ve frekansını etkiler. Bu çıkışın düşük güç kalitesi, doğrudan şebekeye bağlanmasını engeller. Değişken hız seçeneği durumunda, rüzgar türbini şebekeden tamamen izole edilmiştir. Şartlandırmadan sonra, elektrik uygun bir ara yüz aracılığıyla şebekeye iletilir. Sonuç olarak, şebekeye beslenmeden önce senkron generatör tarafından üretilen AC, önce doğru akıma doğrultulur ve ardından geleneksel şebeke frekanslarında (50 Hz veya 60 Hz) tekrar AC'ye ters çevrilir.

Değişken hızlara sahip rüzgar türbinlerinde ya senkron generatörler ya da çift beslemeli endüksiyon generatörleri kullanılır. Senkron generatörler kullanan sistemlerde, çıkış voltajı ve frekansını da etkileyen rüzgar hızındaki değişiklikler nedeniyle düzensiz çalışma hızı değişiklikleri olur. Bu çıkışın düşük güç kalitesi, doğrudan şebekeye bağlanmasını engeller. Değişken hız seçeneği durumunda, rüzgar türbini şebekeden tamamen izole edilmiştir. Koşullandırmadan sonra şekil 22'deki gibi elektrik şebekesine uygun bir ara yüz aracılığıyla iletilir. Sonuç olarak, şebekeye beslenmeden önce senkron generatör tarafından üretilen AC, önce doğru akıma doğrultulur ve ardından geleneksel şebeke frekanslarında (50 Hz veya 60 Hz) tekrar AC'ye ters çevrilir.



**Şekil (22)** Senkron generatörlü değişken hızlı rüzgar türbini

Çift beslemeli asenkron generatörler kullanan değişken hızlı türbinlerde stator sargısı doğrudan şebekeye bağlıdır. Ancak rotor sargısını besleyen bir dönüştürücü şebekenin ihtiyacına göre elektrik frekansını değiştirebilir. Sonuç olarak, mekanik frekans ve elektrik frekansı farklıdır ve değişken hızlı çalışmayı akla yatkın hale getirir. Şekil (23), böyle bir sistemin tipik bir kurulumunu göstermektedir.



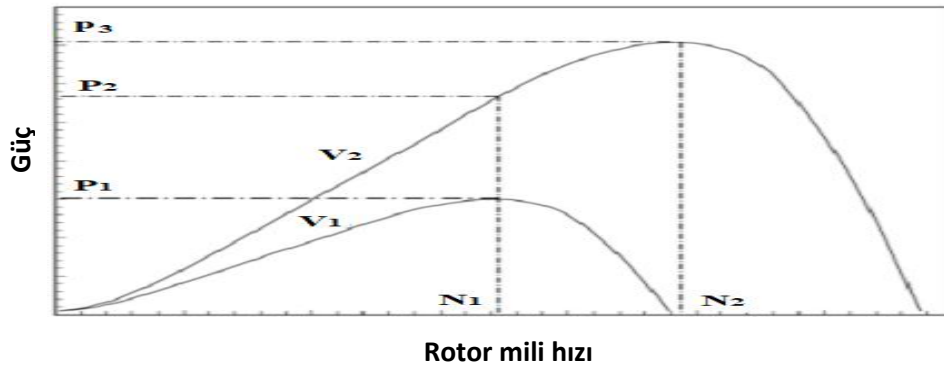
**Şekil (23)** Çift beslemeli endüksiyon generatörlü değişken hızlı rüzgar türbini

Değişken hızlı türbinlerden daha basit inşa edildikleri için, sabit hızlı türbinler genellikle daha ucuzdur. Bununla birlikte, sürekli değişen rüzgar hızına ayak uyduramadığı için enerji yakalama, sabit rüzgar hızlarına sahip sistemlere göre daha az etkilidir. Bir rüzgar rotoru, daha önce de belirttiğimiz gibi, en yüksek güç katsayısını tasarım uç hız oranında verir. Bu maksimum güç katsayısı, yalnızca türbinin tasarım rüzgar hızında çalışan sabit hız için Şekil 24'teki gibi elde edilebilir. Burada  $V_1$ , türbinin  $N_1$  hızında çalıştığı ve  $P_1$  gücü ürettiği tasarım rüzgar hızını temsil eder. Türbin, bu rüzgar hızında maksimum güç katsayısında çalışır.

Bununla birlikte, sabit hız sistemi yalnızca  $N_1$  hızında çalışabileceğinden, rüzgar hızı  $V_1$ 'den  $V_2$ 'ye dalgalandığında yaratılan güç  $P_2$ 'dir.

Sonuç olarak, türbin sabit  $N_1$  hızında çalışması gerektiğinden, sistem  $V_2$ 'de rotor tarafından üretilen  $P_3$  tepe gücünü tam olarak kullanamaz. Öte yandan, değişken hızlı çalışma mümkün ise, sistem  $V_2$  hızında  $N_2$  hızında çalışacak ve bu hızda en fazla gücü  $P_3$  üretecek şekilde kurulabilir.

Değişken hız seçeneği, türbinin geniş bir rüzgar hızı aralığında en iyi verimlilikte çalışmasını sağlar. Diğer bir deyişle, türbinin değişken hızda çalışması sağlanarak enerji toplama artırılabilir. Bu, son derece değişken rüzgar modellerine sahip alanlarda oldukça avantajlıdır. Belirli belirli yerlerde, enerji yakalama %8 ila 15 daha yüksek olabilir.



Şekil (24) İki farklı rüzgar hızında rotor hızına karşı güç

Aktarma organları üzerindeki baskı da değişken hızlı çalışma ile azaltılır. İletilen torktaki farklılıklar, farklı güç seviyeleri kullanılırken türbinin sabit bir hızda çalıştırılmasından kaynaklanmaktadır. Öte yandan, hızın değişmesine izin verilirse, tork geniş bir güç aralığında neredeyse sabit tutulabilir. Yapısal elemanlara binen gerilmeler azaltılarak türbin daha hafif ve daha ucuz hale getirilebilir.

Sert bir rüzgar olduğunda, rotorun değişken hızı hızlanarak daha fazla enerji toplayabilir ve ardından rüzgar yavaşladığında bunu sisteme geri verebilir. Titreşim sorunu daha az sorun olduğu için gelişmiş güç kalitesi sağlarlar.

Değişken hızlı türbinler, daha düşük rüzgar hızlarında dönme hızı düşük olduğundan daha az gürültülü olduklarından akustik olarak kabul edilebilirler.

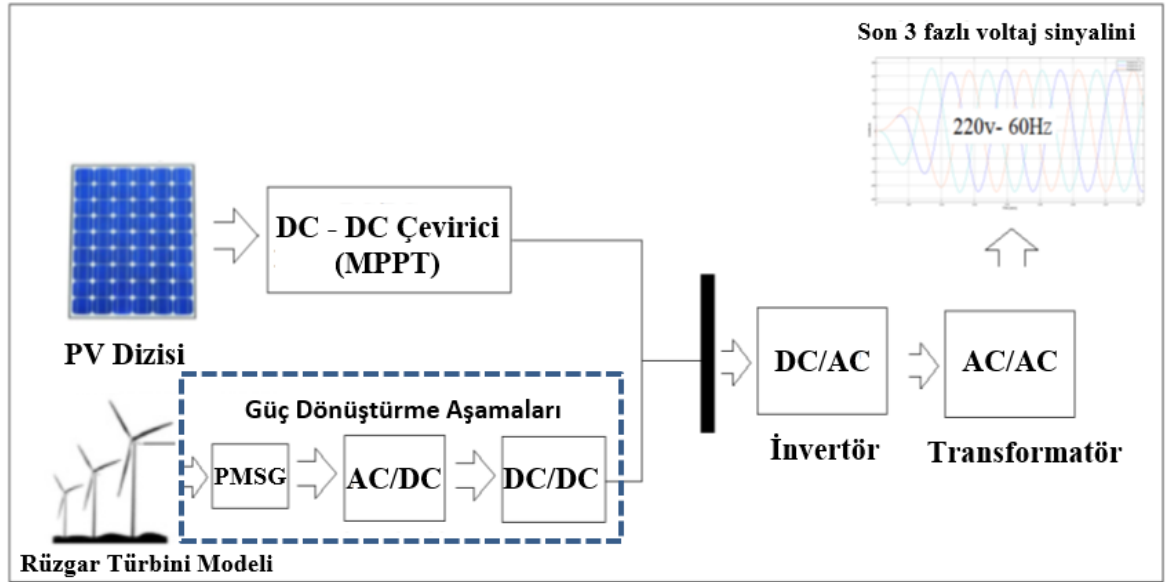
Bununla birlikte değişken hızlı türbinler, karmaşık ve pahalı güç elektroniğine ihtiyaç duyar. Yapısal rezonansın uyarılması ek bir konudur. Bunlara rağmen günümüzde değişken hızlı tasarım giderek yaygınlaşmaktadır. Özellikle açık deniz tasarımları için, birçok ticari üretici değişken hız seçeneğine geçmektedir.

### 3. Metodoloji

Bu bölüm, modelleme aşaması ve kontrol aşaması için çalışma metodolojimizi gözden geçirmektedir. Tasarım detayları önceki bölümde incelenen malzemelere bağlı olarak seçilmiştir.

#### 3.1. Sistem modelleme

Modelleme aşaması, bir blok diyagram gösteriminin gösterildiği Şekil 25'te gösterildiği gibi, fotovoltaik alt sistemin rüzgar türbini alt sistemiyle entegre edilmesini içerir. İki DC-DC dönüştürücünün yeri değiştirilir ve paralel olarak bağlanır.



Şekil (25) Hibrit sistem modelleme şeması

İki ayrı DC-AC invertörün toplam güç değerleri, DC-paralel şebeke bağlantılı güç sistemi için DC-AC invertörün çıkış gücünden daha büyüktür. Simulink modelleri bir sonraki bölümde verilecektir.

#### 3.2. Kontrol hedefi

Güç kalitesi gereksinimlerini ve güvenli çalışmayı sürdürürken enerji tedarik maliyetlerinin azaltılması; rüzgar türbinlerini düzenlemenin en uygun yolu, enerji yakalamanın en üst düzeye çıkarılması ve rüzgar enerjisi dönüştürme sistemlerinin (REDS) aşırı dinamik mekanik yüklerden korunması dahil olmak üzere enerji maliyetlerinin en aza indirilmesiyle belirlenir.

“Çalışma modları” rüzgar türbinlerinin çalışacak şekilde ayarlanabileceği sayısız yolu ifade eder. Rüzgar türbinleri çeşitli koşullar altında çalıştığından, bu çalışma modları, tüm operasyonel rüzgar hızları aralığındaki kontrol hedeflerine ulaşmak için genellikle birleştirilir. Sonuç olarak, kontrol amacına göre rüzgar türbinlerinin bölünebileceği dört kategori vardır:

- I. Sabit hızlı- sabit hatveli
- II. Sabit hızlı- değişken hatveli
- III. Değişken hızlı- sabit hatveli
- IV. Değişken hızlı- değişken hatvel

#### **Sabit hızlı- Sabit hatveli (FS-FP)**

Asenkron elektrik makinesi bu plan kapsamında doğrudan elektrik şebekesine bağlanır. Sonuç olarak tork karakteristiği değiştirilemez, generatör hızı güç hattının frekansına kilitlenir. Bu nedenle REDS'nin belirli bir hızda çalıştığı söylenir. Gerçekte kayma, hızın generatörün tork karakteristiği boyunca yüzde birkaç oranında değişmesine neden olur. FS-FP REDS nispeten basit ve ucuzdur çünkü kontrol planını gerçekleştirmek için kasıtlı olarak hiçbir ek donanım getirilmemiştir. Tersine, bu durum performanslarını oldukça zayıf hale getirme etkisine sahiptir.

#### **Sabit hızlı- Değişken hatveli (VS-FP)**

Maksimum güç dönüşümü, sabit hızlı çalışmada yalnızca tek bir rüzgar hızında mümkündür. Sonuç olarak, dönüşüm verimliliğini belirtilen rüzgar hızının altında optimize etmek imkansızdır. Tipik olarak, bu tür bir türbin, belirtilen rüzgar hızından daha düşük olan sabit bir eğimde çalışacak şekilde yapılandırılır. Bununla birlikte, hafif rüzgarlarda değişken perdeli çalışma, enerji yakalamayı biraz iyileştirmeye yardımcı olabilir. Yüksek rüzgar hızlarında, eğim açısı sürekli değiştirilerek güç sınırlandırılır.

#### **Değişken hızlı- Sabit hatveli**

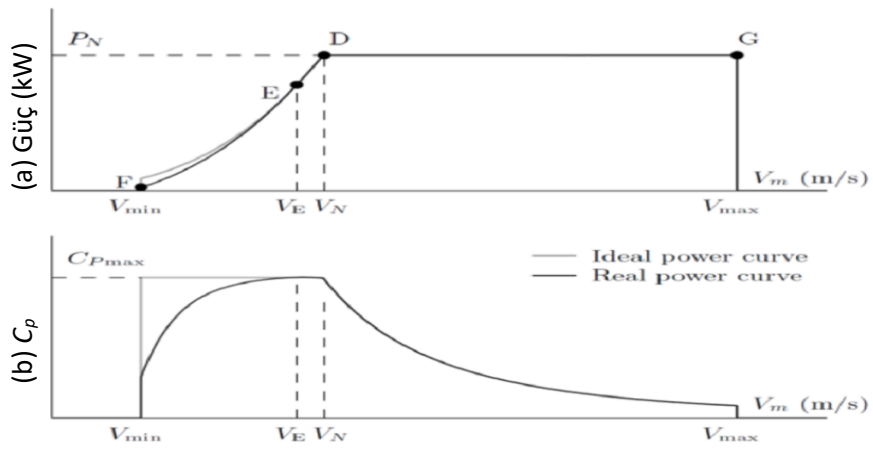
Değişken hızlı çalışmanın avantajları arasında artan enerji toplama, azaltılmış dinamik yükler ve iyileştirilmiş güç kalitesi yer alır. Şu anda yüksek penetrasyon oranlarına ulaşan rüzgar enerjisi ile, güç kalitesini artırma ihtiyacı, değişken hızlı sistemlerin kullanımına

önemli bir destek sağlamaktadır. Maksimum dönüştürme verimliliği  $\beta=\beta_0$  ve  $\lambda=\lambda_0$ 'de elde edilir, burada  $\beta$  kanat açısıdır ve  $\lambda$  uç hız oranıdır.

Bu nedenle, anma gücünün altında enerji yakalamayı maksimize etmek için hem eğim açısı hem de uç hızı oranı bu değerlerde sabit tutulmalıdır. Özellikle  $\lambda=\lambda_0$  kriter, rotor hızının rüzgar hızıyla doğru orantılı olarak dalgalanmasını gerektirir;

$$\Omega_{r_0} = \frac{\lambda_0 v}{R} \quad (21)$$

Bilindiği gibi, değişken hızlı çalışma, dönüş hızının hat frekansından ayrılmasını gerektirir.



**Şekil (26)** Temel sabit hızlı hatve kontrol stratejileri, (a) Çıkış gücü ve (b) Rüzgar hızına karşı güç verimliliği

Generatör tork karakteristiğinin daha yüksek veya daha düşük hızlara doğru paralel yer değiştirmeleri, altta yatan elektronik dönüştürücülerin uygun bir kontrolü ile üretilir. Sonuç olarak, türbin çeşitli konumlarda çalışacak şekilde düzenlenebilir. Aşağıdaki formülde  $\lambda$  torka karşı hız düzlemindeki maksimum güç konumu bulunabilir.

$$T_{r_0} = \frac{1}{2} \frac{\pi \rho R^5 C_{Pmax}}{\lambda_0^3} \Omega_{r_0}^2 \quad (22)$$

Bu, tork-dönme-hız düzlemindeki parabolün denklemdir. Değişken hızlara sahip rüzgar türbinleri, hafif rüzgarlarda bu  $C_{Pmax}$  konumunu az çok yakından takip edecek şekilde programlanmıştır. Sonuç olarak, gücün belirtilen rüzgar hızının üzerinde düzenlenme şekli, değişken hızlı kontrol sistemlerini etkili bir şekilde ayırt eder. VSFP rüzgar türbinleri için

sırasıyla pasif ve hız destekli durmaya dayalı iki strateji vardır. Araştırmamızı bu bölümde bu temel VS-FP kontrol teknikleriyle sınırlamaktayız.

### **Değişken hızlı- Değişken hatveli (VS-VP)**

Türbin, bu planda anma rüzgar hızının altında değişken hız ve sabit hatvede ve anma rüzgâr hızının üzerinde değişken hatvede çalışacak şekilde kurulur. Değişken hatveli çalışma, nominal rüzgar hızlarından daha yüksek etkili bir güç kontrolü sunarken değişken hızlı çalışma, düşük rüzgar hızlarında enerji yakalamayı geliştirir [41]. Optimum güç eğrisinin de bu kontrol yaklaşımıyla elde edildiğini unutmamak gerekir. Değişken hatve kullanımı da geçici gerilimleri azaltır. Bu, özellikle büyük ölçekli rüzgar türbinleri için VS-FP'lere göre bu kontrol yaklaşımının önemli bir avantajıdır.

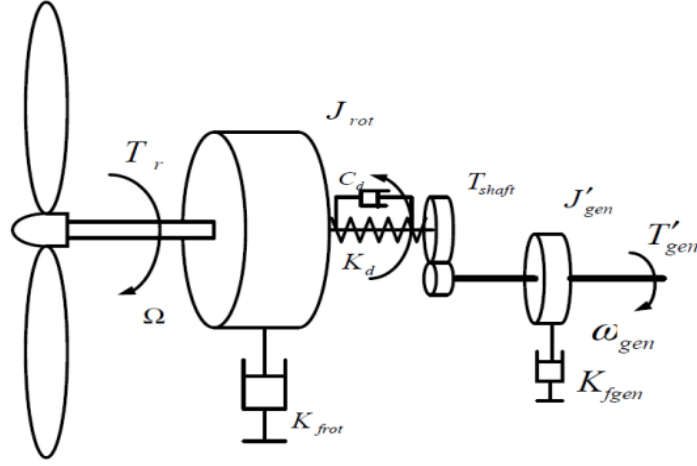
### **3.3. Rüzgar türbini durum uzayı modeli**

Tüm sistemin bir modelini oluşturmak temel hedeftir. Kontrol sisteminin gerçekçi bir tasarımı, doğru ancak son derece karmaşık bir modelden fayda sağlamayabilir. Bu nedenle, uygulanabilir bir yapısal modelde doğruluk ve verimlilikten taviz verilmesi gereken bazı alanlar olabilir. Modelin amacı, rüzgar türbininin davranışını doğru bir şekilde tahmin etmektir, böylece güç sınırlaması için kontrolörler tasarlanabilir ve analiz edilebilir.

Kontrollerin tasarımında gerçekten yardımcı olabilmesi için periyodik kararlı duruma ilişkin doğrusallaştırmadan, doğrusallaştırılmış bir model oluşturmak gerekir.

Rüzgar türbini modelleme çalışması, son yıllarda önemli ölçüde gelişen dinamik bir çalışma alanıdır. Dönüştürme zinciri, her biri ayrı ayrı modellenecek olan, sistem perspektifinden birbirine bağlı dört birincil bileşene bölünebilir. Aerodinamik alt sistem, yakalanan mekanik enerjiyi rüzgardan dönüştürmekten sorumludur [42]. Mekanik alt sistem iki temel görevi yerine getirir. Birincisi, torkun aktarma organları aracılığıyla rotordan elektrik generatörüne iletilmesidir. İkincisi, rotorun yüksekliğini desteklerken ek cihazların tutulmasını içerir. generatör şaftında, elektrik alt sistemi mekanik gücü elektriğe dönüştürür.

Kanatları uzunlamasına eksenleri etrafında döndüren (kısmen) saha açısını değiştiren hidrolik veya elektromekanik bir cihaz, hatve servo alt sistemini oluşturur. Yavaş veya hızlı hareket eden bir şaftın birinci dereceden bir hareket denklemini temsil ettiği bir aktarma organı modeli Şekil 27'deki gibi kullanılır.



Şekil (27) Aktarma organı modeli

Aerodinamik tork ifadesi [43] tarafından verilmektedir.

$$T_r = \frac{1}{2} \frac{\pi \rho R^2 C_p(\beta, \lambda)}{\lambda} v(t)^2 \quad (23)$$

Tork katsayısı  $C_p(\beta, \lambda)$ 'dir. Kanat hatve açısı  $\beta$  ve [44, 45]'e göre hız oranı  $\lambda$  ile değişir:

$$C_p(\beta, \lambda) = 0.22 \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{22.5}{\lambda_i}} \quad (24)$$

Burada,  $\rho$  hava yoğunluğu,  $R$  rotor yarıçapı,  $v(t)$  rüzgar hızı,  $\beta$  eğim açısı,  $\lambda$  uç hız oranı,  $\Omega$  rotor hızıdır.

Kontrol hedefleri, durum uzayı modeli kullanılarak uygulanır. Fiziksel bir sistem, diferansiyel denklemlerle birbirine bağlanan değişkenler, girdiler ve çıktılar açısından bu düzen kullanılarak tanımlanır. Durum ve giriş vektörlerini tanımlamak için hatve aktüatör dinamikleri, generatör dinamikleri, elastik kulenin uzunlamasına hareketi ve bir rüzgar türbininin doğrusal olmayan indirgenmiş toplu hatve modeli kullanılır.

$$\begin{aligned} x &= (d, \dot{d}, \Omega, \beta_e, \dot{\beta}_e, T_{ele})^T \\ u &= (\beta_c, T_{ele})^T \end{aligned} \quad (25)$$



$$A = \begin{bmatrix} \frac{(\gamma - C_d - K_{frot})}{J_{rot}} & \frac{-1}{J_{rot}} & \frac{C_d}{J_{rot}} \\ K_d & 0 & -K_d \\ \frac{C_d}{J_{gen}} & \frac{1}{J_{gen}} & \frac{-C_d - K_{fgen}}{J_{gen}} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \frac{\xi}{J_{rot}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{J_{gen}} \end{bmatrix}, \Gamma = \begin{bmatrix} \alpha \\ \frac{1}{J_{rot}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$C = [0 \quad 0 \quad 1]$$

$$D = [0]$$

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + \Gamma u_D \\ y = Cx + Du \end{cases} \quad (27)$$

Burada,

- $d$  kule üstü baş uç deplasmanı.
- $\beta_e$  etkili eğim açısı.
- $T_{ele}$  etkili elektriksel reaksiyon torku.
- Kardan milinin  $K_d$  elastik sabiti.
- Kardan mili üzerindeki  $C_d$  sönümleme sabiti
- $J_{rot}, J_{gen}$  Düşük hız tarafının ve generatörün dönüş ataleti.
- $K_{fgen}, K_{frot}$  Sırasıyla yüksek hız tarafının ve düşük hız tarafının sürtünme sabitleri.
- Sönümleme faktörü.
- $\lambda$ , kulenin ileri-geri hareketi sırasında görünen rüzgarla ilişkili düzeltilmiş TSR'dir.
- $a = \partial T_r / \partial V |_{(v_0, \Omega_0, \beta_0)}$

### 3.4. Denetleyici tasarımı

Parametre değerlerine sahip model kullanılarak aşağıdaki kontrolörler tasarlanmıştır.[24]

#### 3.4.1. PID denetleyici

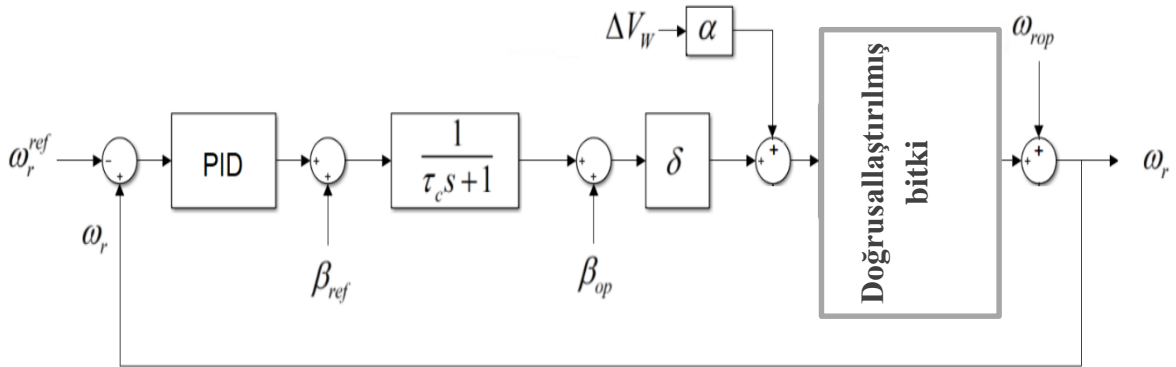
PID denetleyici, basitliği, doğrusal işleyişi ve kontrol sistemlerinde uygulama kolaylığı nedeniyle en esnek denetleyici olarak kabul edilir [46].

Hata sinyaline uygulanan geleneksel PID düzeltici, aşağıdaki kontrol sinyalini verir:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de}{dt} \quad (28)$$

Çıkış sinyali, bütünleştirici etki sayesinde sabit durum referans sinyali ile birleşir. Diferansiyel katsayısı yükseldikçe titreşim azalır, bu da stabiliteyi artırır. ( $V_o$ ,  $O_p$  ve  $r_{op}$ ) ideal değerlerini elde etmek için, rüzgar türbini sisteminin doğrusal olmayan dinamik parametreleri bu denetleyici oluşturulurken kendi çalışma noktalarında doğrusallaşır.

Bu çıkış modeli ve PID kontrolörü, Şekil 28’de gösterildiği gibi rüzgar türbini sistemi kanat açısını kumanda için kullanılır.



Şekil (28) Doğrusallaştırılmış model kullanan PID kontrolü

#### 3.4.2. PID kontrolü

Rüzgar türbinlerinde PID denetleyicisinin performansını iyileştirmek için aerodinamik torkun eğim açısına duyarlılığındaki değişimleri hesaba katmak için önerilen bir teknik olan kazanç programlama kullanılır [47, 48].

### 3.4.3. H-sonsuz

Kontrol teorisi, garantili performansla stabilizasyon için kontrolörleri sentezlemekte H-sonsuz tekniklerini kullanır. Kontrol problemini matematiksel bir optimizasyon problemi olarak ifade ederek ve ardından bu optimizasyonu çözen kontrolörü tanımlayarak, bir kontrol tasarımcısı H tekniklerini kullanabilir. Klasik kontrol teknikleriyle karşılaştırıldığında, H teknikleri, kanallar arasında çapraz kuplajlı çok değişkenli sistemleri içeren problemlere kolayca uyarlanabilme avantajına sahiptir [49]. H tekniklerinin dezavantajları, başarılı bir uygulama için gereken matematiksel karmaşıklık düzeyini ve kontrol edilecek sistemin oldukça doğru bir modelinin gerekliliğini içerir.

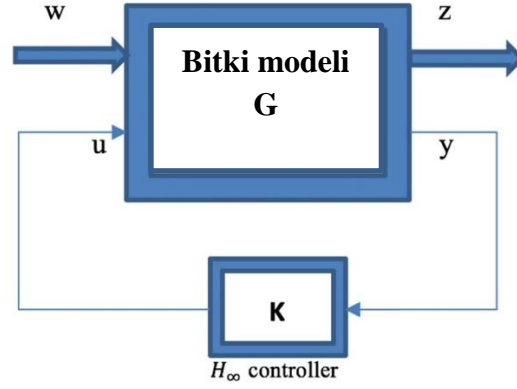
Nihai kontrolörün gerekli maliyet fonksiyonu açısından yalnızca optimum olduğunu ve oturma süresi, enerji kullanımı vb. gibi standart performans ölçütlerine dayalı olarak gerçekten en iyi kontrolör olmayabileceğini unutmamak çok önemlidir. Ek olarak, doyunluk gibi doğrusal olmayan sınırlamalar tipik olarak yeterince ele alınmaz.

Optimizasyonun gerçekleştirildiği matematiksel alanın adı, "H kontrolü" teriminin kaynaklandığı yerdir:  $Re(s)$  olarak gösterilen karmaşık düzlemin açık sağ yarısı, analitik, sınırlı, matris değerli fonksiyonların Hardy uzayıdır; H normu, fonksiyonun bu uzay üzerindeki en büyük tekil değeridir [50].

Bu temel olarak SISO sistemleri için frekans yanıtının maksimum büyüklüğüdür ve herhangi bir yönde ve herhangi bir frekansta maksimum kazanç olarak anlaşılabilir. Bir pertürbasyonun kapalı döngü etkisi, H yöntemleri kullanılarak azaltılabilir. Sorunun nasıl ifade edildiğine bağlı olarak, etki ya kararlılık ya da performans açısından değerlendirilecektir. H döngü şekillendirme, bunu başarmaya yaklaşan bir tekniktir; iyi sağlam performans elde etmek için kontrol tasarımcısının çok değişkenli frekans yanıtına geleneksel döngü şekillendirme ilkelerini uygulamasını sağlar ve ardından iyi sağlam stabilizasyon elde etmek için sistem bant genişliği yakınında yanıtı optimize eder.

H prensibi, sistem üzerinde meydana gelen gürültülerin ve bozulmaların etkisini, onlar hakkında hiçbir şey varsaymadan en aza indirmeyi amaçlamaktadır.

Şekil 29, önceki durum modelini kullanan klasik H kontrol sorununun kapalı döngü sistemini göstermektedir.



Şekil (29) H-Sonsuz kontrol problem diyagramı

Burada:

$$G = \begin{bmatrix} A & B_1 & B_2 \\ C_1 & D_{11} & D_{12} \\ C_2 & D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \quad (29)$$

Genelleştirilmiş doğrusal zamanla değişmeyen sistem  $G$ , aşağıdaki denklemle tanımlanır.

$H^\infty$  kontrol cihazının [51] tasarımında kontrolör sinyali  $u(t)$ , durum değişkenleri  $x(t)$ , kontrollü çıkışlar  $z(t)$ , ölçülen çıkışlar  $y(t)$ , bozucu sinyaller  $\omega(t)$ dir.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + B_1\omega(t) + B_2u(t) \\ z(t) &= Cx(t) + D_1\omega(t) + D_2u(t) \\ y(t) &= x(t) \end{aligned} \quad (30)$$

$\omega(t)$  ile  $z(t)$  arasındaki kapalı döngü durum uzayı modeli şu şekilde olur:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A_{cl}x(t) + B_{cl}\omega(t) \\ z(t) &= C_{cl}x(t) + D_{cl}\omega(t) \end{aligned} \quad (31)$$

Aşağıdaki formüle sahip bir statik geri besleme denetleyicisi:

$$u(t) = Kx(t) \quad (32)$$

simetrik pozitif  $Q$  ve  $R$  matrisi varsa vardır. Bu denetleyici sistemimizi stabilize eder.

$K = RQ^{-1}$  sonuç olarak en iyi  $H$  kontrol cihazını verir.

Dışbükeylik, aşağıdaki eşitsizliği üretmek için  $W=KX$  değiştirilerek elde edilir:

$$\begin{bmatrix} AX + XA^T B_2 W + W^T B_2^T & B_1 & xC_1^T + W^T D_{12}^T \\ B_1^T & -\gamma I & D_{11}^T \\ C_1 X + D_{12} W & D_{11} & -\gamma I \end{bmatrix} < 0 \quad (33)$$

#### 3.4.4. LQR kontrolü

Optimal kontrol teorisinin amacı, dinamik sistemleri mümkün olduğu kadar tasarruflu çalıştırmaktır. LQ sorunu, bir dizi doğrusal diferansiyel denklemin sistem dinamiklerini açıkladığı ve ikinci dereceden bir fonksiyonun maliyeti açıkladığı durumdur. Teorinin birincil sonuçlarından biri, denklemleri aşağıda verilen bir geri besleme denetleyicisi olan doğrusal-ikinci dereceden düzenleyicinin (LQR) cevabı sağladığıdır. Uzaklaşan bir ufukla, LQR tekrar tekrar gerçekleştirilebilir; bu bir tür model öngörülü kontroldür.

LQR ayrıca LQG (doğrusal-ikinci dereceden-Gauss) probleminin çözümünün önemli bir parçasıdır. LQR probleminin kendisi gibi, LQG problemi de kontrol teorisindeki en temel problemlerden biridir.

Kırpma noktasındaki düzenleme problemi, rüzgar türbini sistemi hatve kontrolü için önceki durum-uzay modeli ve durum geri beslemesi olarak doğrusal ikinci dereceden düzenleyici (LQR) kullanılarak aşağıdaki gibi karakterize edilebilir:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (\Delta y^T Q \Delta y + \Delta u^T R \Delta u) dt \quad (34)$$

$Q \geq 0$  ve  $R > 0$ , ortalama rüzgar  $V$  kullanılarak planlanabilen simetrik ağırlık matrisleridir, yani  $Q = Q(V)$  ve  $R = R(V)$ .

Belirli bir amaca yönelik performans için belirleme ağırlıkları [52]'de açıklanmıştır.

Maliyet değerini azaltan geri bildirim kontrolü aşağıdakiler tarafından sağlanır:

$$P_c \cdot A + A^T \cdot P_c - P_c \cdot B \cdot R^{-1} \cdot B^T \cdot P_c + Q = 0 \quad (35)$$

Sıfır olmayan bileşenlere sahip tüm köşegenlerin ölçeklenmesi ve optimizasyon kriterindeki değişkenlerin maksimum 1 değerine sahip olması için matrisler içerdiğini belirten Bryson kuralına [52] göre, ağırlıklandırma matrisleri  $R$  ve  $Q$  seçilir.

Ek olarak, durum vektörleri ve birimleri, hatve açısı ve elektromanyetik tork gibi çeşitli komut bileşenlerine bağlı olarak sayısal olarak değişir.

$R$  ve  $Q$  değerleri sisteme çok iyi performans sağlayacak şekilde seçilmiştir.

Modelleme, bir önceki bölümde açıklandığı gibi birbirine bağlı fotovoltaik alt sistem ve rüzgar alt sistemini içerir.

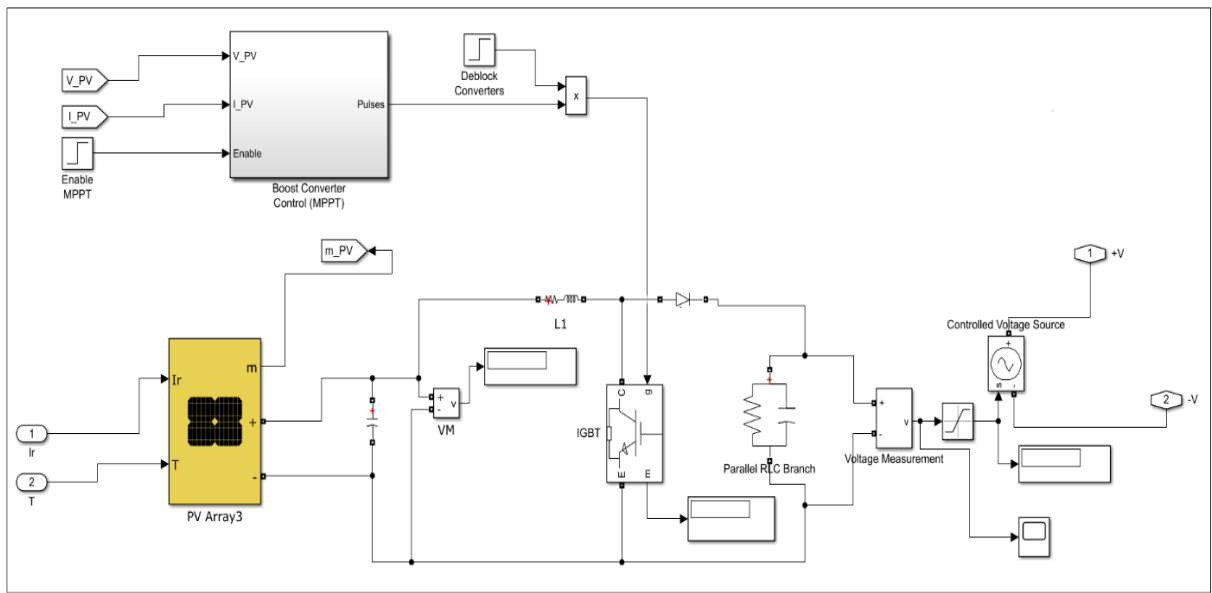
## 4. Simülasyon ve sonuçlar

Bu bölüm Simulink'te yerleşik sistem modelini sonuçlarla birlikte tanıtmaktadır. Modelleme, bir önceki bölümde açıklandığı gibi birbirine bağlı fotovoltaik alt sistem ve rüzgar alt sistemini içerir.

### 4.1. PV alt sistemi

Bir güneş paneli parçası, MPPT denetleyicili DC-DC güç dönüştürücü ve SPWM tek fazlı dönüştürücü, bir güç PV alt sisteminin ana bileşenlerini oluşturur (Şekil 30).

MPPT tekniği, sıcaklık ve ışınlama gibi dış etkenler nedeniyle güç sürekli değiştiğinde maksimum güç geçişini garanti ederek PV modüllerinin kullanımını en üst düzeye çıkarmak için kullanılır.



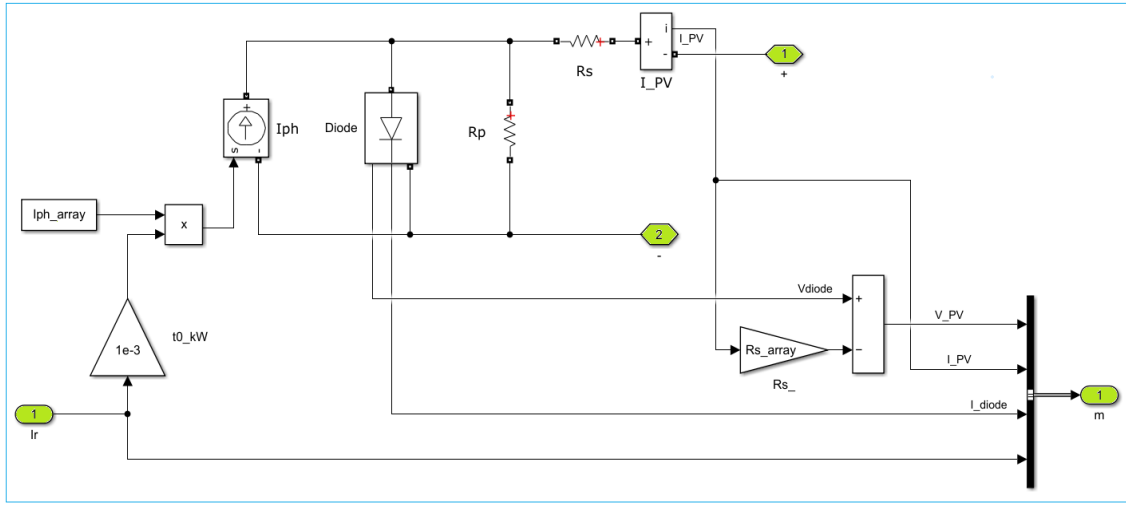
Şekil (30) MATLAB'de oluşturulan PV modeli

MPPT denetleyicisi, PV generatörünü maksimum güçte çalıştırmak için uygulanır, bu da güneş radyasyonundan yakalanan enerji miktarını artırır. PV generatörünün çıkış gücünü optimize etmek için sisteme bir MPPT kontrolörü P&O dahil edilmiştir.

#### 4.1.1. PV dizisi bloğu

Fotovoltaik (PV) dizi bloğu, bir PV modülleri koleksiyonu uygular. Dizinin her dizisi, seri bağlı modüllerden oluşur ve her dizideki modüller paralel bağlanır. Bu blok, hem

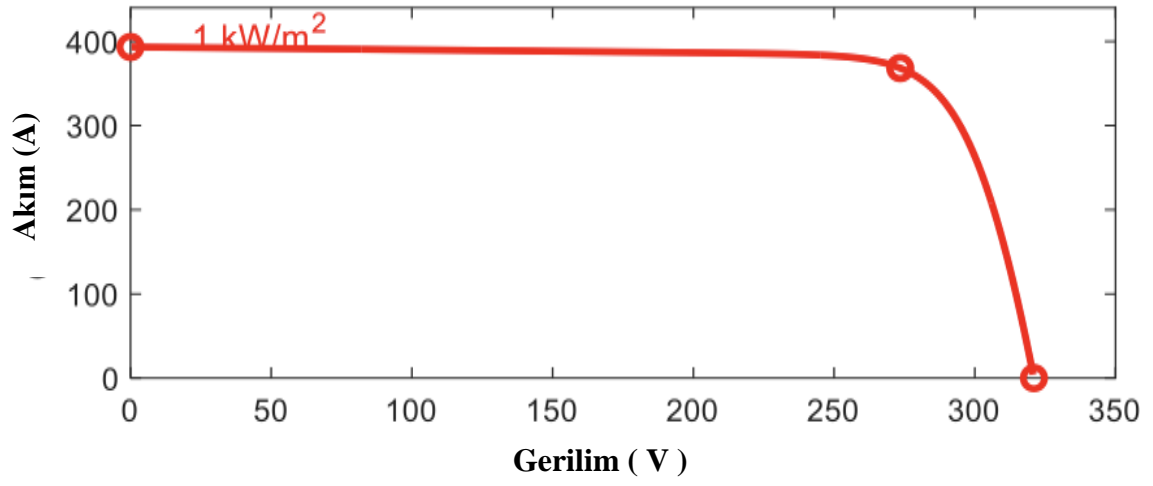
tanımladığımız PV modüllerini hem de Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) Sistem Danışmanı Modeli'nden ön ayarlı PV modüllerini simüle etmenizi sağlar.



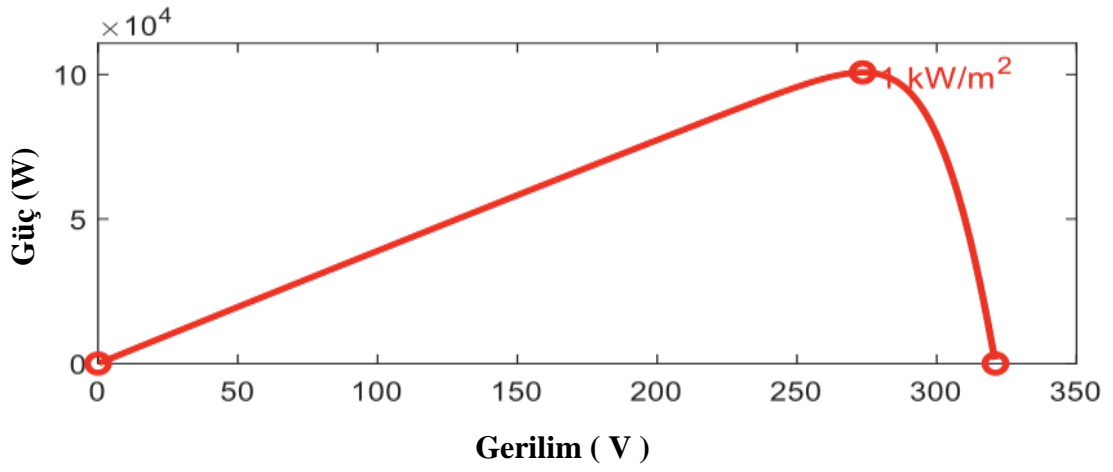
Şekil (31) PV bloğu detayları

PV Dizi bloğu, ışıkla üretilen bir akım kaynağı ( $I_{ph}$ ), diyot, seri direnç ( $R_s$ ) ve şönt direnci ( $R_p$ ) içeren beş parametrelili bir model kullanarak modüllerin ışınım ve sıcaklığa bağlı I-V özelliklerini temsil eder. I-V, P-V özellikleri:

Maksimum güç 100 kw @ 360 A, 275V.



(a) I-V

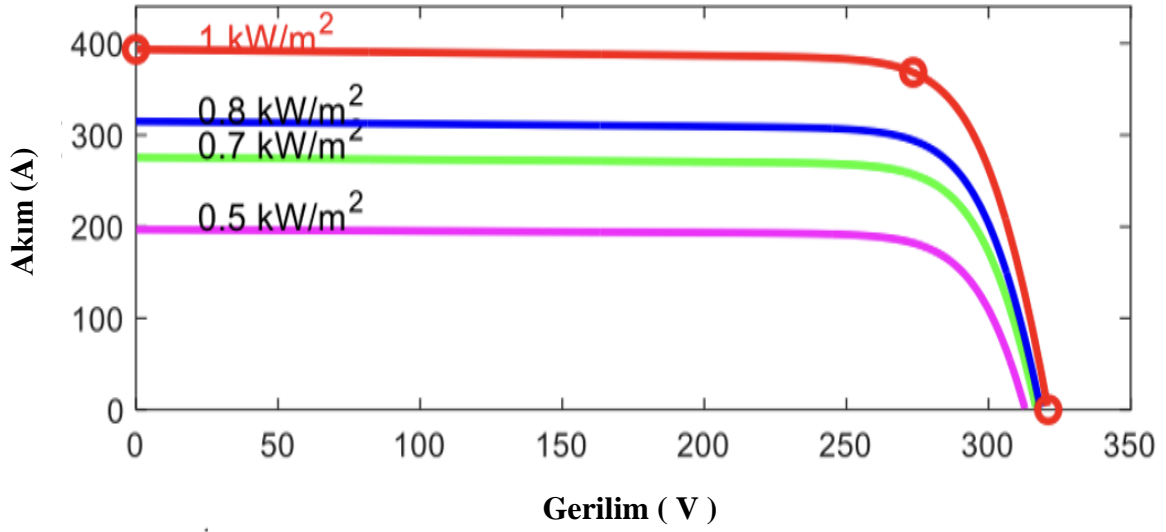


(b) P-V

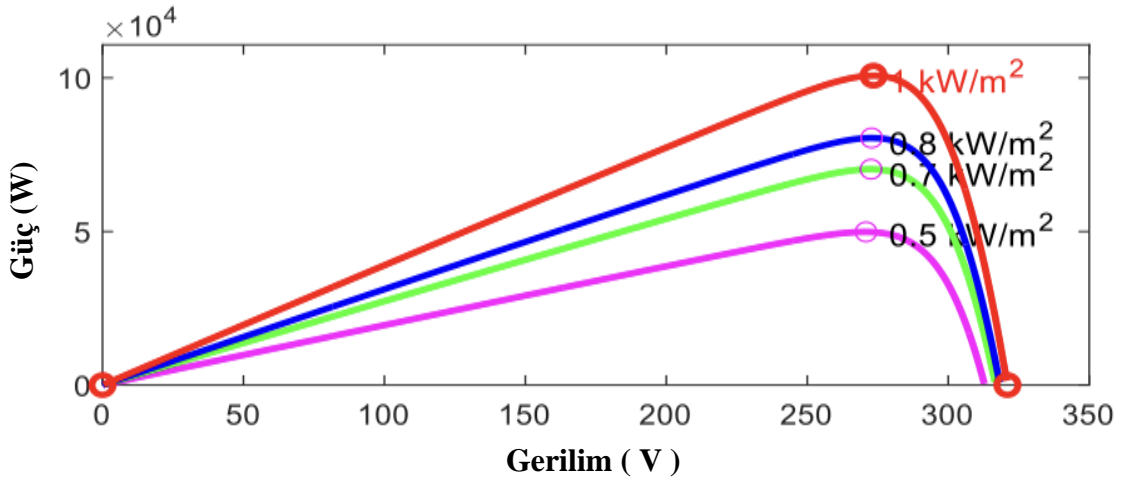
Şekil (32) (a) PV modülünün I-V eğrisi, (b) PV modülünün P-V eğrisi

Işınlama etkisi:





(a) I-V



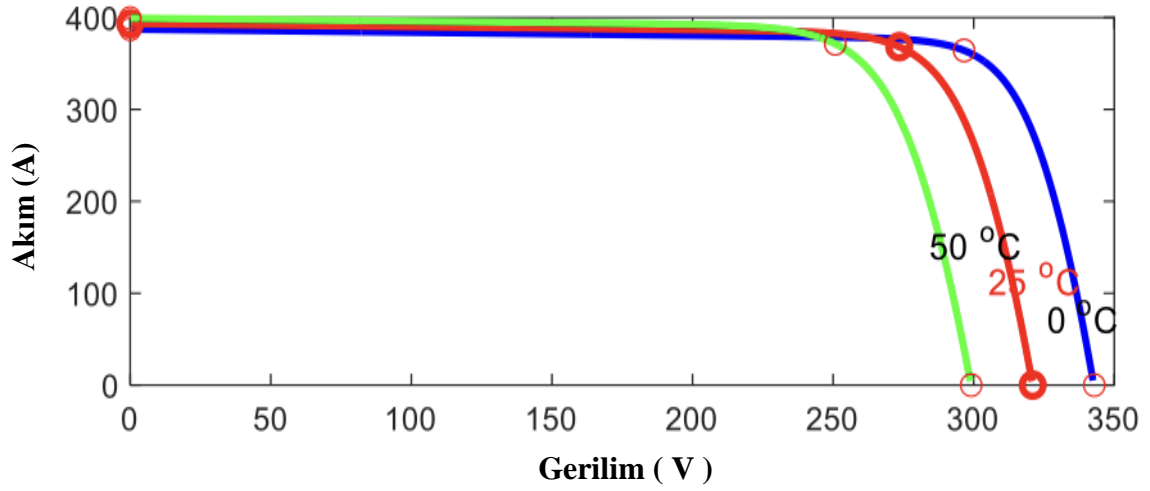
(b) P-V

Şekil (33) Işınlatma varyasyonunun (a) I-V ,(b) P-V üzerindeki etkisi

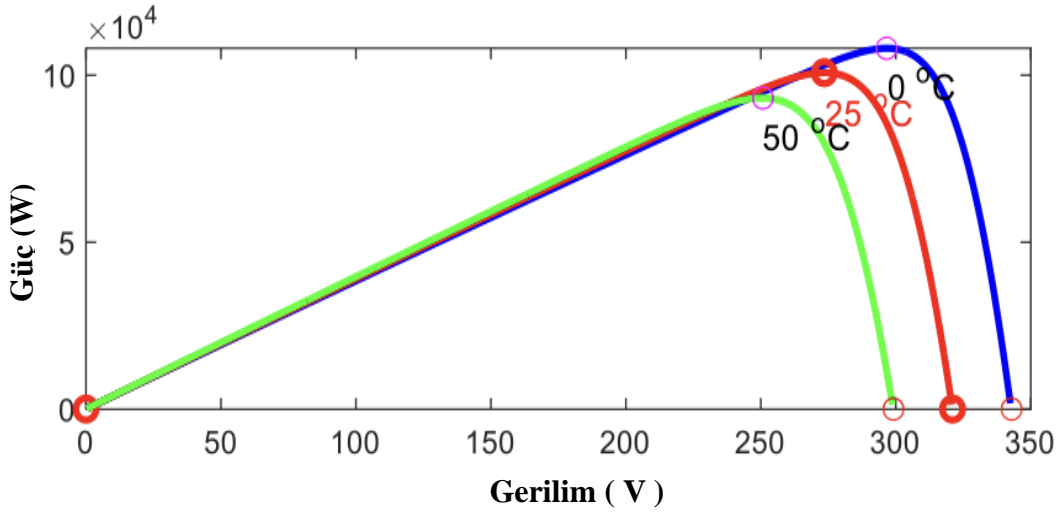
Güneş ışınımının artırılması kısa devre akımını artıracaktır. Güneş ışınımının değişimi çoğunlukla akıma etki eder, güneş ışınımının değişiminin gerilime etkisi çok düşüktür.

Güneş ışınımı arttıkça üretilen güç de artar. Güçteki artış esas olarak akımdaki artıştan kaynaklanır.

Sıcaklık etkisi: Sıcaklık değişimi çoğunlukla voltajı etkiler, artan sıcaklık voltajı düşürür ancak akım neredeyse değişmeden kalır. Artan sıcaklık, üretilen gücü azaltır, çünkü sıcaklık arttıkça voltaj düşer.



(a) I-V



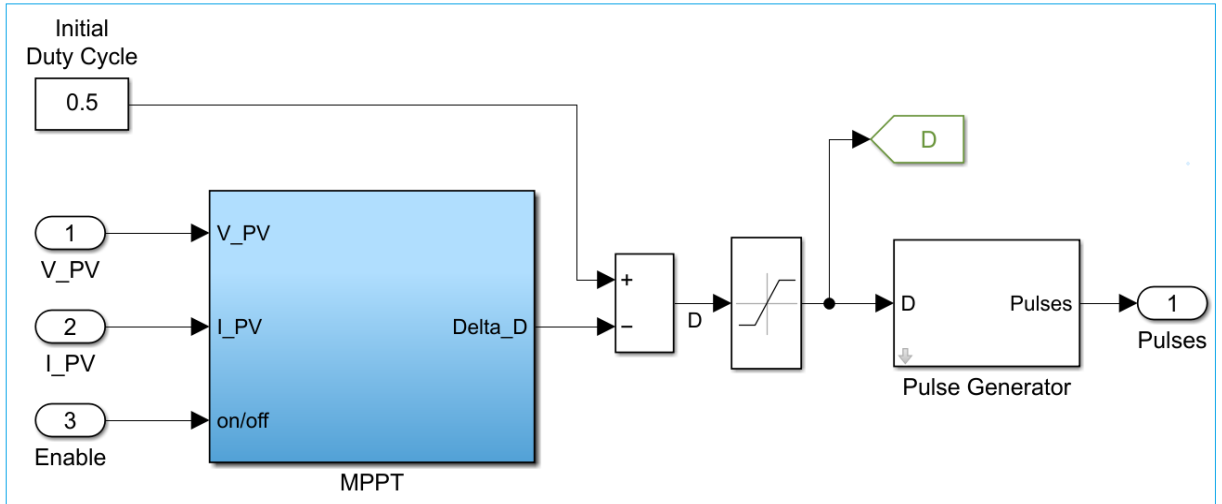
(b) P-V

Şekil (34) Sıcaklık değişiminin (a) I-V ,(b) P-V üzerindeki etkisi

#### 4.1.2. MPPT modellemesi

MPPT sistemine dayalı bir yükseltici dönüştürücü, Şekil (35)'teki gibi mümkün olan en yüksek gücü elde etmek için tasarlanmıştır. Bu yöntem, daha fazla harmonik azaltma sağlar ve PV panelinin kullanımını artırır.

MPPT, 'Artımlı İletkenlik + İntegral Düzenleyici' tekniği kullanılarak bir Simulink® modeli aracılığı ile uygulanır.



Şekil (35) MPPT bloğu

PV gerilimindeki küçük bir artışın bozulması ve güç değişiminin gözlenmesiyle oluşturulur.

Maksimum güç noktası;  $P = V \times I$  olduğunda elde edilir.

$$\frac{dP}{dV} = 0, \quad P = V \times I \quad (36)$$

$$\frac{d(V \cdot I)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} = 0 \quad (37)$$

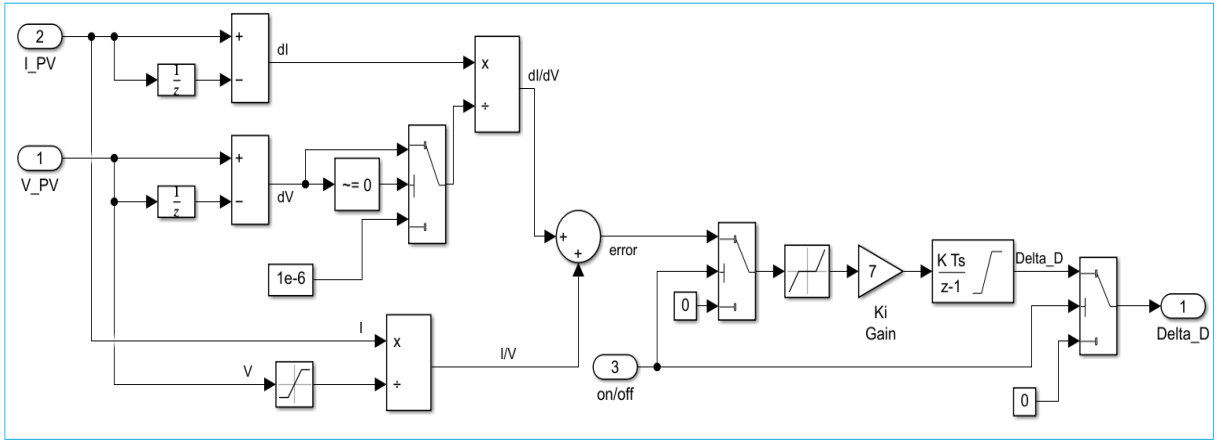
$$\Rightarrow dv = -\frac{I}{V}$$

$dI$ ,  $dV$ : kayan zaman penceresi  $T_{MPPT}$  ile ölçülen  $I$  ve  $V$  dalgalanmalarının temel bileşenleri.

$I$ ,  $V$ : kayan zaman penceresi  $T_{MPPT}$  ile ölçülen  $V$  ve  $I$  ortalama değerleri

Entegre regülatör hatayı en aza indirir  $I + V \frac{dI}{dV}$

Regülatör çıkışı = Görev döngüsü düzeltmesi



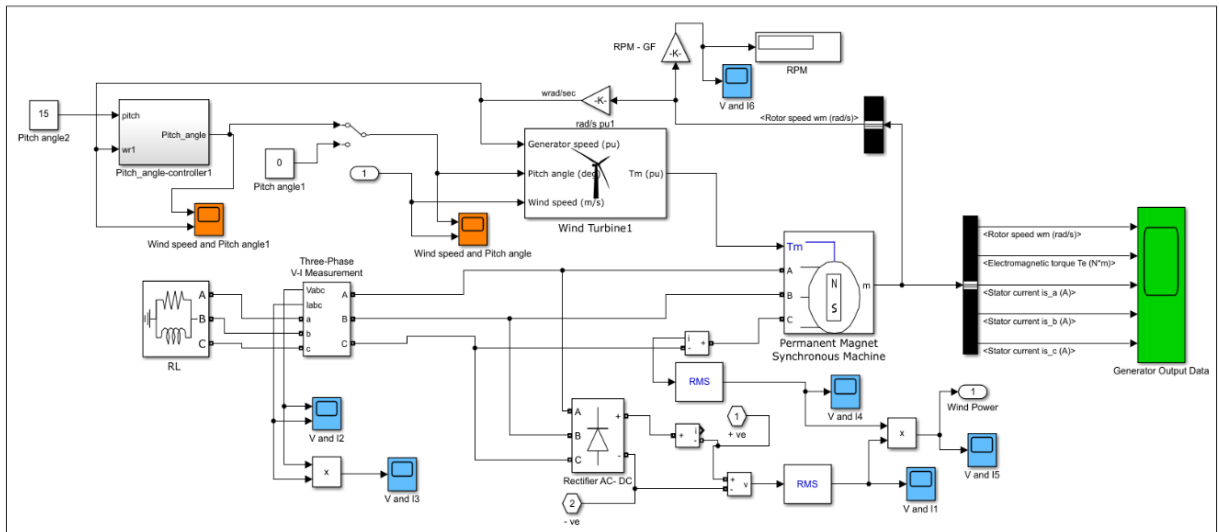
Şekil (36) MPPT'nin (IC) simulink modeli

#### 4.2. Rüzgar alt sistemi

Rüzgar enerjisi dönüştürme sistemi konfigürasyonuna dayalı Kalıcı Mıknatıslı Senkron generatör (PMSG) modeli (Şekil 39'da gösterilmektedir) şunlardan oluşur:

- Rüzgar Enerjisi Dönüşümü
- Rüzgar Türbini
- PMSG
- İnvörtör

Sistem üzerinde kontrol yöntemini uygulamak için eğim açısı denetleyicisi eklenmiştir.



Şekil (37) MATLAB'da oluşturulan rüzgar enerjisi modeli

## Rüzgar türbini modeli bloğu

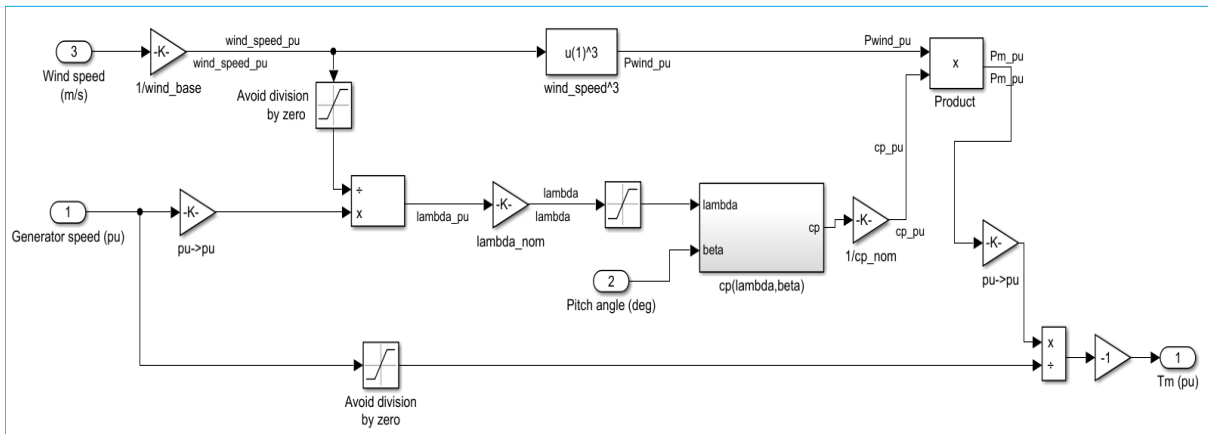
Bu blokta değişken hatveli bir rüzgar türbini modeli uygulanmaktadır. Rüzgar gücüne bölünen türbinin mekanik çıkış gücü; rüzgar hızını, dönüş hızını ve eğim açısını (beta) bağlı olan performans katsayısını ( $C_p$ ) verir. Sıfır betada,  $C_p$  maksimum değerine ulaşır. Türbin özelliklerini seçilen eğim açısında çizmek için rüzgar türbini güç özellikleri ekranı seçilir.

- İlk giriş, generatör temel hızının birimi başına generatör hızıdır.
- Bir senkron veya asenkron generatör için temel hız senkron hızdır.
- Sabit mıknatıslı bir generatörün temel hızı, yük yokken nominal voltajın üretildiği hızdır.
- Derece cinsinden kanat hatve açısı (beta) ikinci girdidir.
- m/s cinsinden rüzgar hızı üçüncü girdidir.

Generatör miline uygulanan tork, generatör değerlerinin bir yüzdesi olarak çıktıdır.

Generatörün ataleti, türbinin ataleti ile artırılmalıdır.

Aşağıdaki Şekil (38), Simulink®'te oluşturulan türbin modelini göstermektedir.



Şekil (38) Rüzgar türbini bloğunun Simulink modeli

Burada üç giriş, generatörün nominal hızının pu cinsinden generatör hızı ( $\omega_r$  pu), derece cinsinden eğim açısı ve m/s cinsinden rüzgar hızıdır.  $\lambda\_nom$ 'un pu cinsinden uç hız oranı  $\lambda$ , temel dönme hızının pu cinsinden rasyonel hızın ve temel rüzgar hızının pu cinsinden rüzgar hızının bölünmesiyle elde edilir. Çıktı, generatör miline uygulanan torktur.

Temel rüzgar hızı (m/s): Rüzgar hızının temel değeri, 12'dir (varsayılan). Birim başına sistemde kullanılan saniyede metre cinsinden temel rüzgar hızı. Öngörülen rüzgar hızının ortalama değeri, temel rüzgar hızı olarak bilinir. Bu temel rüzgar hızı tarafından üretilen mekanik güç genellikle türbinin nominal gücünden daha azdır.

### **Temel dönme hızı:**

Temel rüzgar hızı için tam güçte 1,2'dir. Temel rüzgar hızı verilen en büyük dönme hızı. Temel generatör hızı, pu cinsinden temel dönüş hızı olarak ifade edilir. Temel hız, bir asenkron veya senkron generatör için senkron hızdır. Sabit mıknatıslı bir generatörün temel hızı, yük yokken nominal gerilim üreten hızdır.

Rüzgar türbini parametrelerini kullanma:

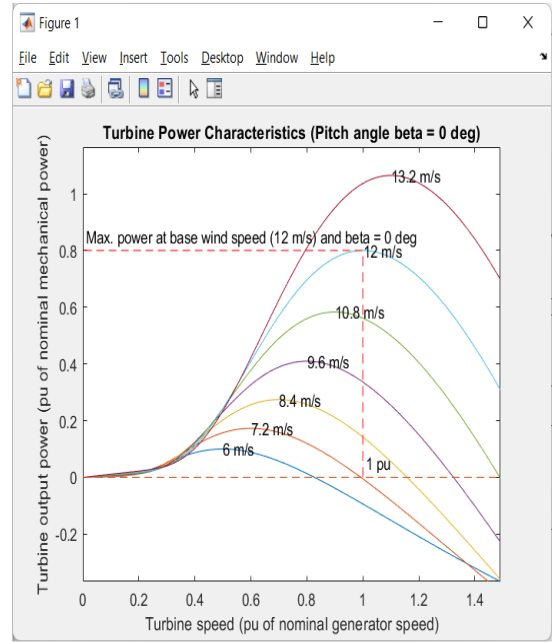
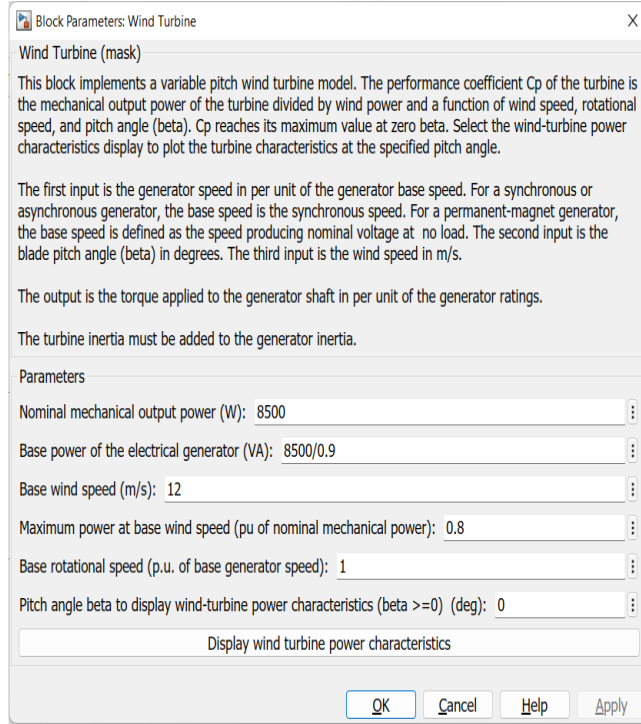
- Temel güç 8.5 Kw
- Temel rüzgar hızı 12 m/s
- Temel rüzgar hızında maksimum güç 0.8
- Temel dönüş hızı 1 pu

### **PMSG bloğu**

PMSG, fırçaları ortadan kaldırmak için DC uyarma devresi yerine kalıcı mıknatıslara sahip standart bir senkron makinedir. PMSG daha küçük bir fiziksel boyuta ve fırçalar ve kayma halkaları olmaksızın düşük atalet momentine sahiptir, bu da hacim oranı başına daha yüksek güvenilirlik ve daha yüksek güç yoğunluğu ile sonuçlanır. Ek olarak, rotor devresindeki sabit mıknatısların varlığı ile rotordaki elektrik kayıpları ortadan kaldırılır.

PMSG modeli burada, kaçak endüktanslara ve çıkışlara seri bağlı dirençlere (Thevenin eşdeğeri) sahip ideal bir gerilim üç fazlı generatör aracılığıyla temsil edilmektedir

Farklı rüzgar hızlarında güç karakteristiklerinden rüzgar hızı arttıkça türbin çıkış gücünün de arttığını gözlemleyebiliriz.

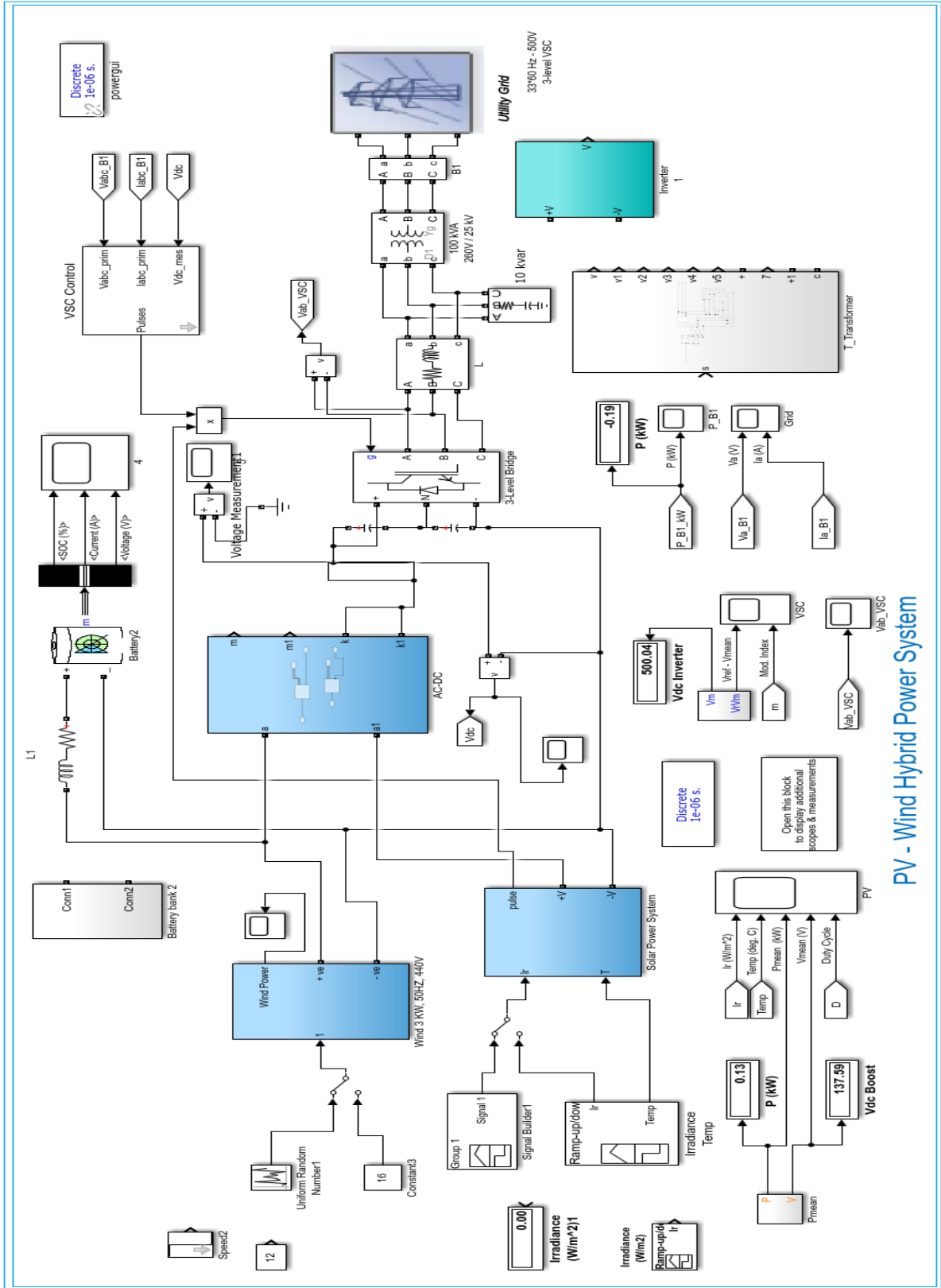


Şekil (39) Türbin gücü özellikleri

### 4.3. Sistem entegrasyonu

Sunulan metodolojiye göre, tüm hibrit sistem Şekil (40)'ta gösterildiği gibi Simulink'e entegre edilmiştir. Pil kullanan depolama sistemi eklenmiştir.

- Şebeke modeli, tipik 25 kV dağıtım fiderlerinden ve 120 kV eşdeğer iletim sisteminden oluşur.
- Dönüştürücüyü şebekeye bağlamak için 100-kVA 260V/25kV üç fazlı kuplaj trafosu kullanılır.



PV - Wind Hybrid Power System

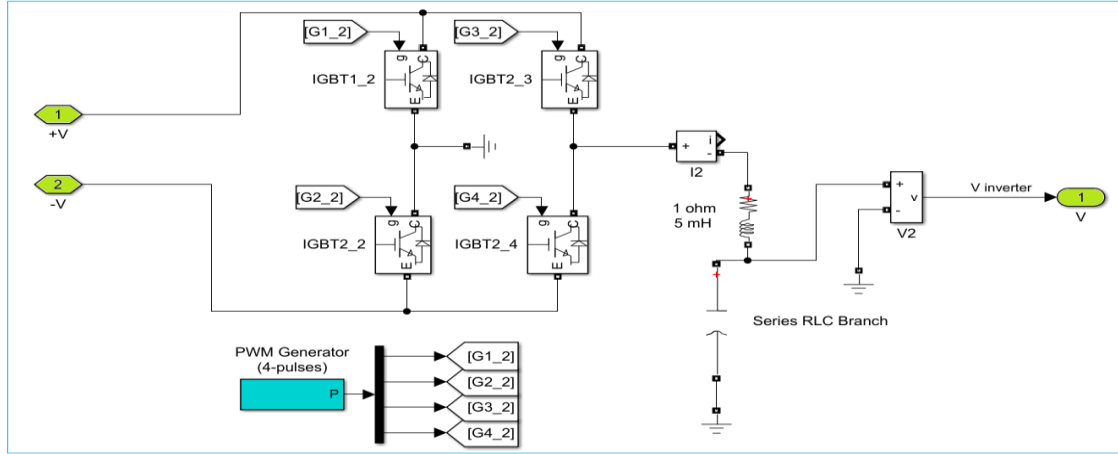
Şekil (40) Tüm hibrit sistem

Son 3 fazlı voltaj sinyalini 220 V-60 Hz elde etmek için daha önce sunulduğu gibi güç dönüştürme aşamaları uygulandı. Sinüsoidal bir AC voltajı oluşturmak için bir yük boyunca



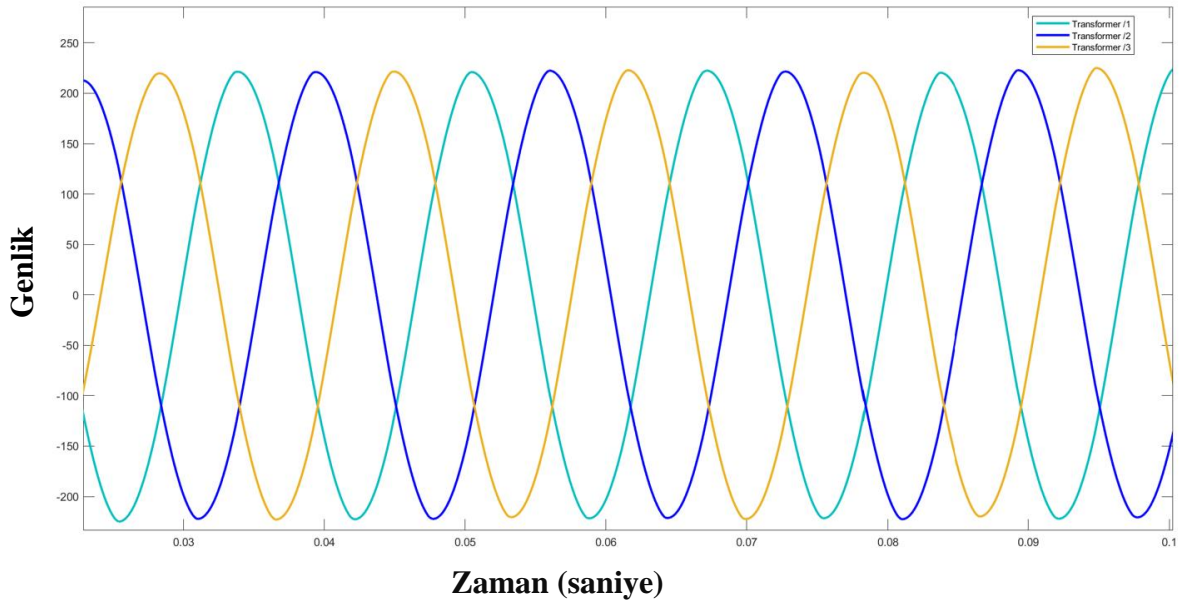
her iki yönde voltaj uygulanmasını sağlayan bir elektrik devresi olan bir invertör kullanıldı. Böylece H-Bridge, dört IGPT anahtarının birleştirilmesiyle oluşturuldu ve darbe genişlik modülasyonu (SPWM) yöntemine göre kontrol edildi, şekil (41)'deki gibi.

Üçgen dalga formuna sahip bir sinüzoidal, bu tür bir sinyalin oluşturulmasıyla karşılaştırıldı.



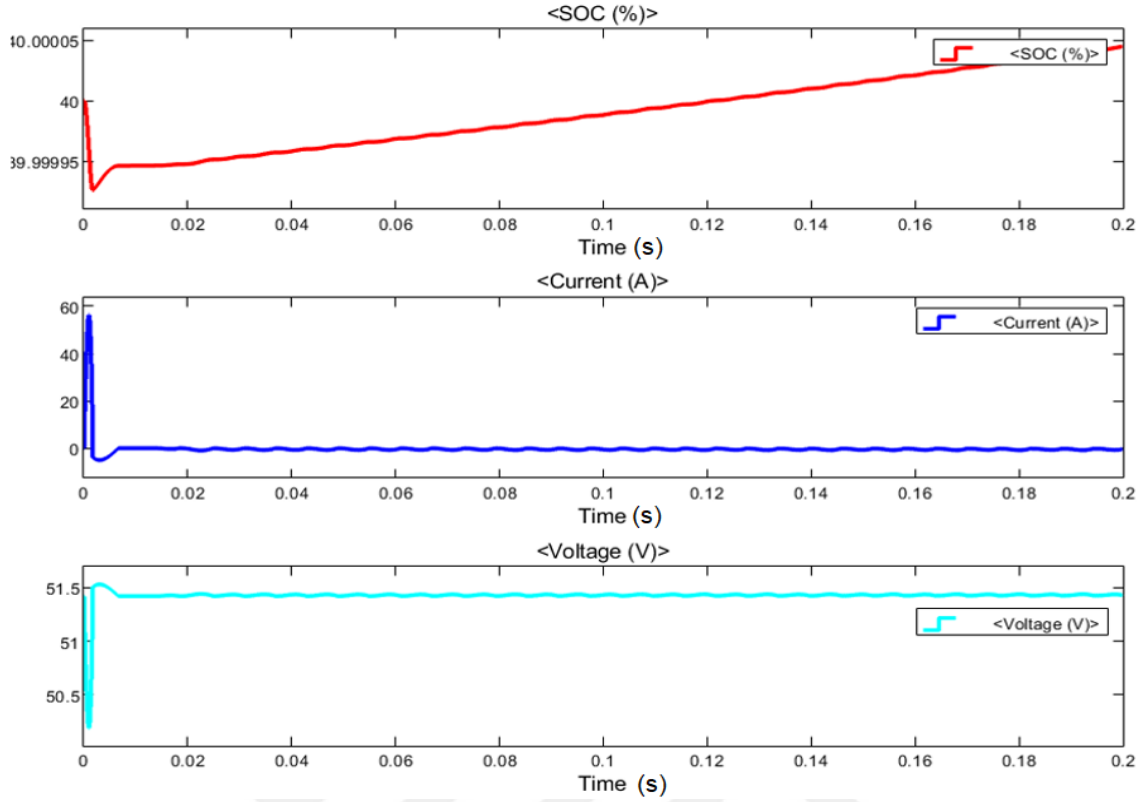
Şekil (41) H köprüsü inverter bloğu

Sekonder voltajı istenen seviyeye yükseltmek için üç tek fazlı transformatör kullanan üç fazlı bir transformatör (iki sargı) kullanılarak, Şekil (42)'de nihai voltaj sinyali elde edilir.



Şekil (42) Son üç fazlı gerilim sinyali (220V - 60Hz)

$4 \times 12 = 48$  V'luk en popüler pil türleri (Lityum-İyon) için genel bir pil modeli kullanılmıştır. Şarj durumundaki voltaj ve akım Şekil 43'te gösterilmiştir.



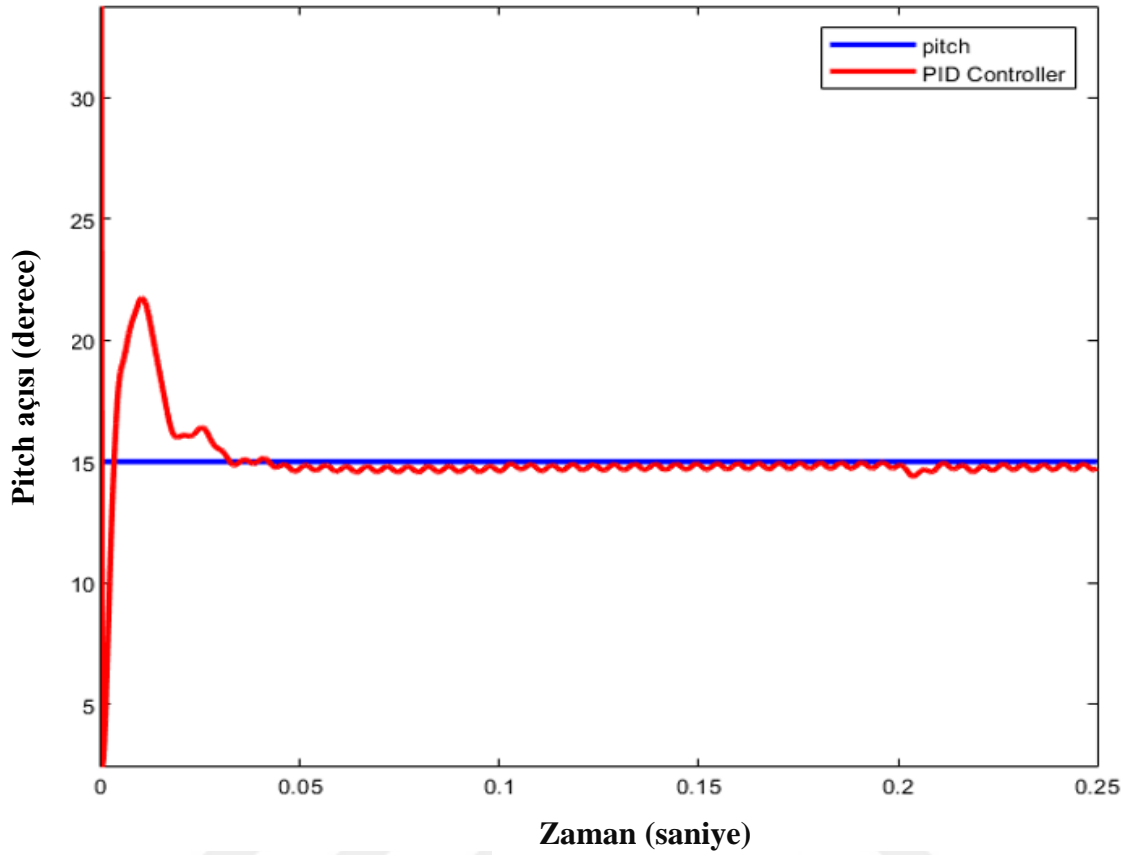
Şekil (43) Pil şarj durumu

#### 4.4. Pitch açısı kontrolü

##### Pitch kontrolü olan ve olmayan açı.

Türbin göbeğinde bulunan pitch kontrol sistemi, generatörden gelen bir geri bildirim sinyaline dayanarak generatör hızını hassas bir şekilde kontrol etmek için üç değişken aralıklı türbin kanadını birlikte döndürür. Rüzgar türbini pitch kontrolü inşa edilerek şebekeye bağlanmıştır. PID parametreleri  $K_P=1.25$ ,  $K_I=0.1$ ,  $K_D=0.01$  dillerinde en iyi yanıtı verecek şekilde ayarlandı. Orantılı bir kontrolör, yükselme süresini azaltma etkisine sahip olacak ve kararlı durum hatasını azaltacak ancak asla ortadan kaldırmayacaktır. İntegral bir kontrol, sabit veya adım girişi için kararlı durum hatasını ortadan kaldırma etkisine sahip olacaktır, ancak geçici yanıtı yavaşlatabilir ve salınımlar oluşturabilir. Bir türev kontrol, sistemin kararlılığını artırma, aşımı azaltma ve geçici yanıtı iyileştirme etkisine sahip olacaktır.

### Pitch açısı (derece)

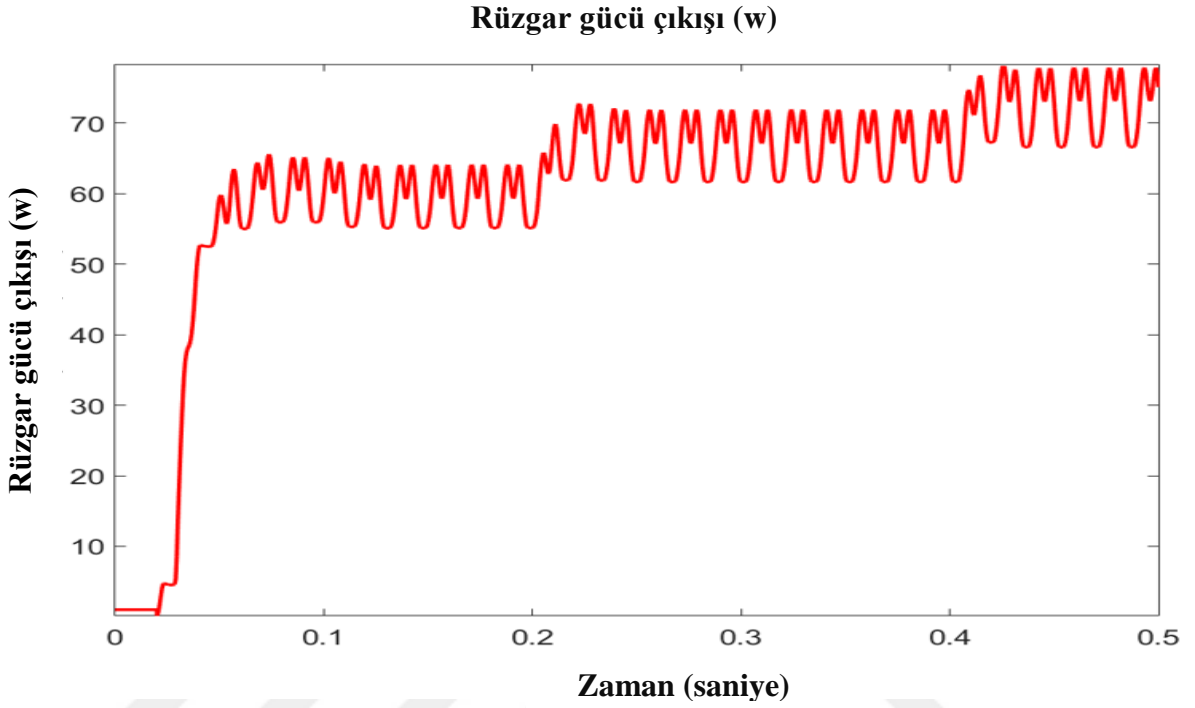


Şekil (44) Pitch açısının PID kontrolü.

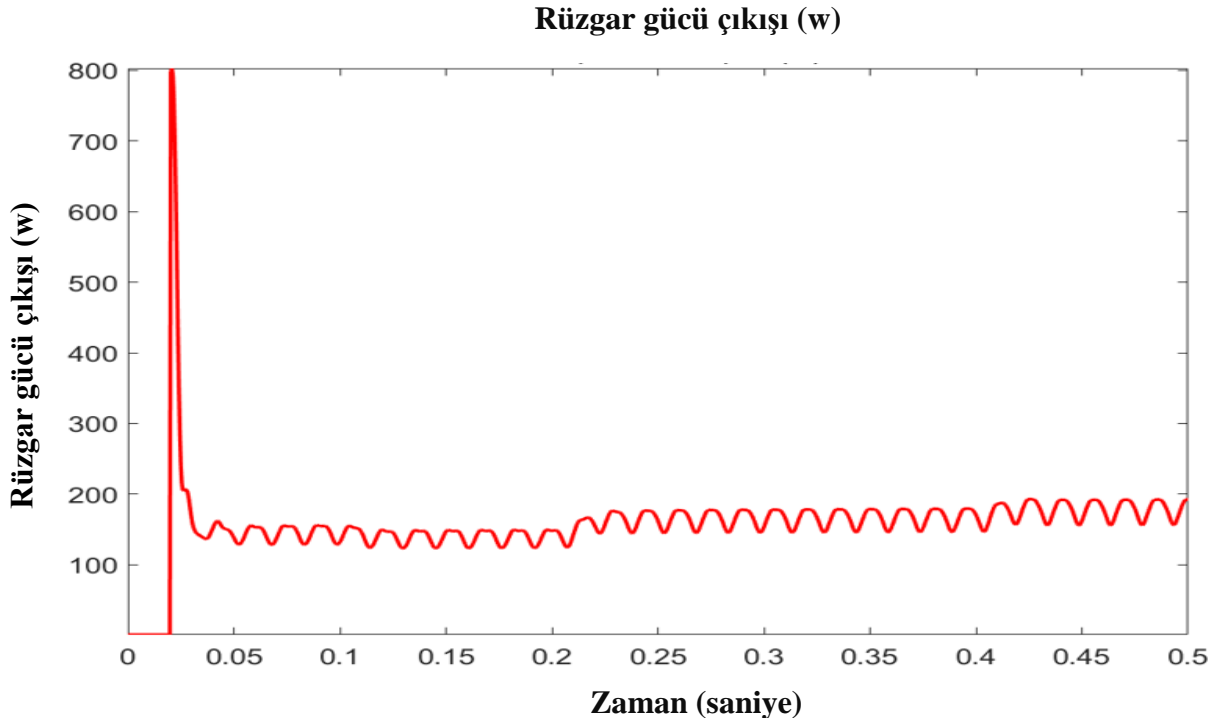
Pitch açısı kontrolünün amacı şu şekilde ifade edilebilir:

- Rüzgar türbini enerji üretiminin iyileştirilmesi. En büyük güç için, rüzgar hızı derecelendirmenin altında olduğunda perde ayarı en yüksek değerinde olmalıdır.
- Mekanik güç girişini tasarımın sınırlarını aşmaktan uzaklaştırmak. Eğim açısı kontrolü, rotor tarafından üretilen aerodinamik gücü ve yükleri nominal değere göre yönetmek için güvenilir bir yol sunar.
- Mekanik türbin bileşeninin yorulma gerilimlerinin azaltılması. Türbinin maruz kaldığı yükler, kontrol sisteminin eylemlerinden önemli ölçüde etkilenebilir. Kontrolör tasarlanırken yüklerin etkisi göz önünde bulundurulmalı ve kontrolör, kontrol eyleminin aşırı yüklerle yol açmayacağından emin olmalıdır. Bunun ötesinde, kontrolörü tasarlarken belirli yorulma yüklerinin azaltılmasını ekstra bir hedef olarak açıkça dahil etmek mümkündür.

Rüzgar enerjisi üzerindeki kontrol etkisi Şekil 45- 46 gösterilebilir. Eğimdeki küçük bir değişiklik, mevcut enerjinin çıkarılması, torkun azaltılması ve şebekeye çıkış gücü değişimi üzerinde etkilidir. Elde edilen rüzgar enerjisinin en üst düzeye çıkarılması gerçekleştirilebilir.



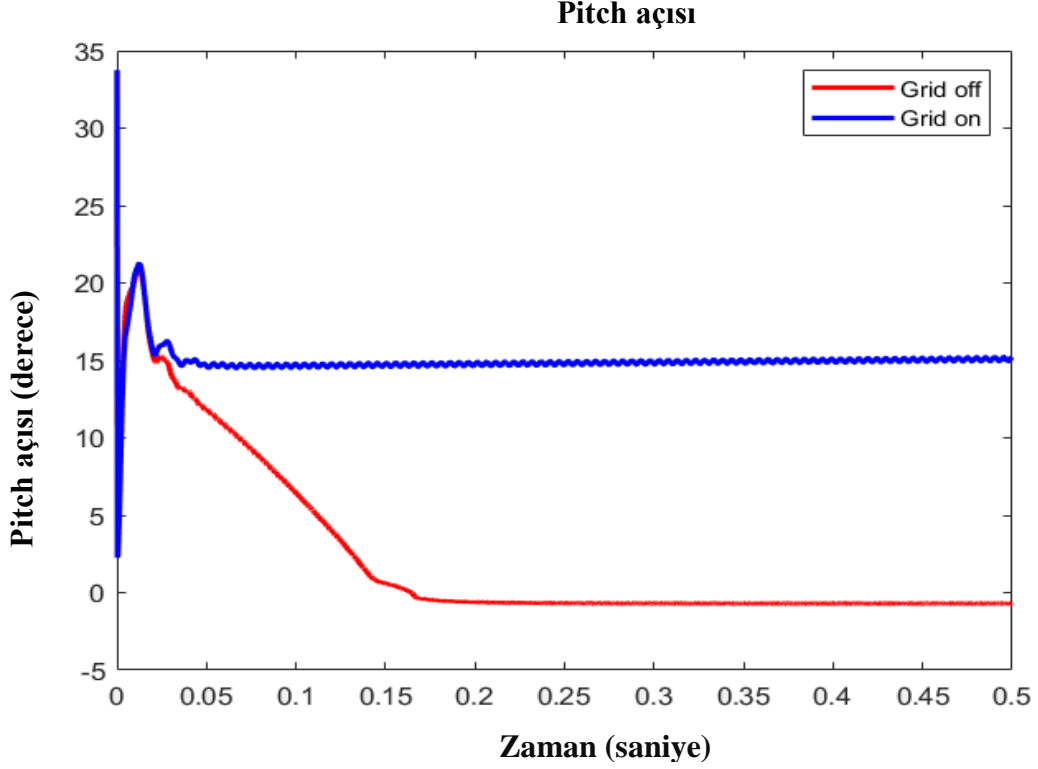
Şekil (45) Pitch kontrolü olmadan rüzgar enerjisi çıkışı.



Şekil (46) PID pitch kontrollü rüzgar enerjisi çıkışı.

## Şebeke modunda ve adalı modda perde açısı

Şebeke dışı durumda perde açısının karşılaştırılması Şekil 47’de gösterilmiştir. Şekil (47)’de mikro şebeke sistemi konumunu değiştirdiğinde perde açısı kontrol mekanizmasının doğrusal olarak değiştiğini göstermektedir. Böyle bir durumda, ihtiyaç duyulması halinde fazla enerji pil grubuna yönlendirilebilir.

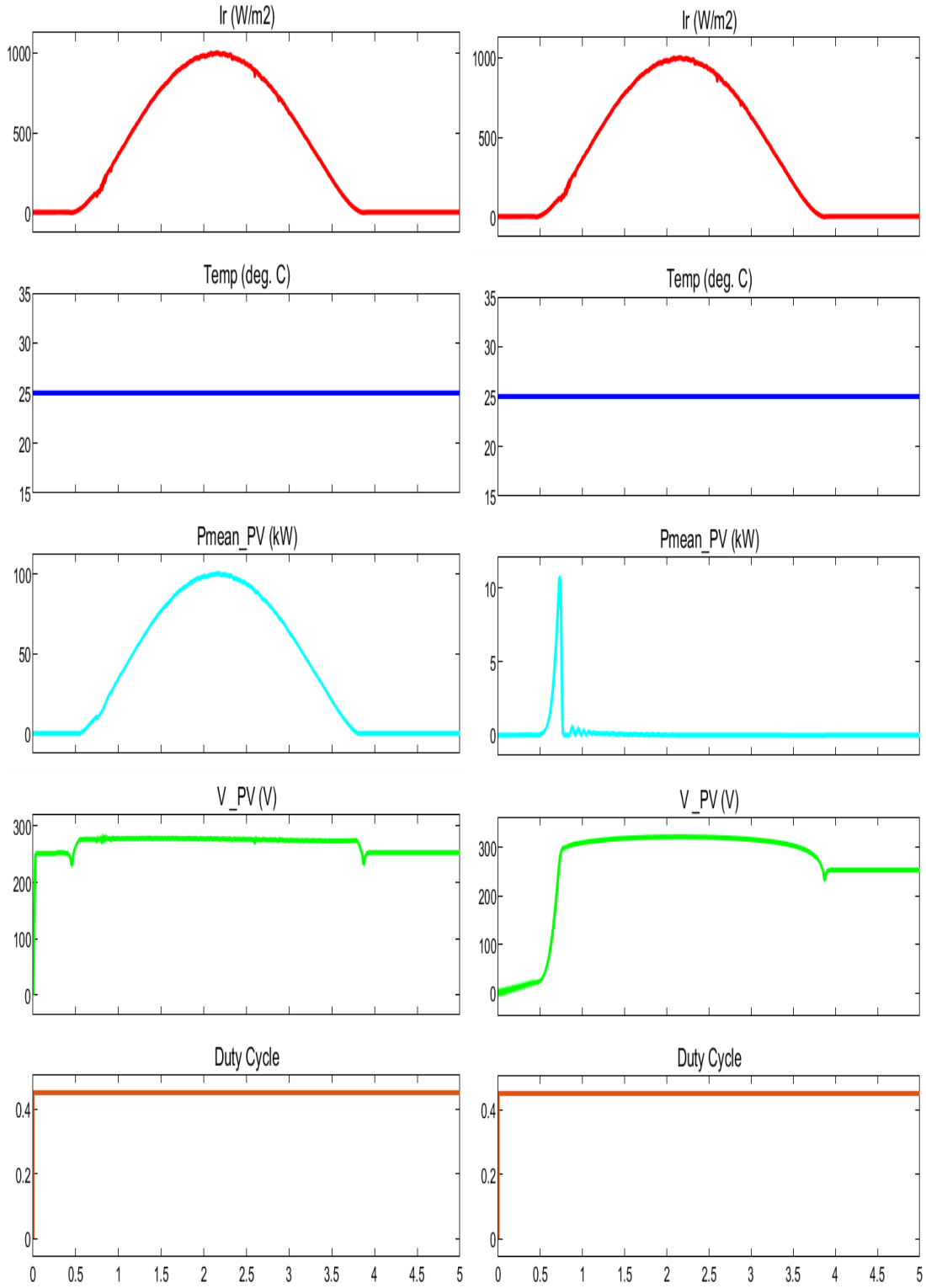


Şekil (47) Pitch açısı ve rüzgar hızı, şebeke bağlı, şebeke kapalı.

## 4.5. Sistem çıkışı

### PV sisteminin şebeke modunda ve adalı modda çıkışları

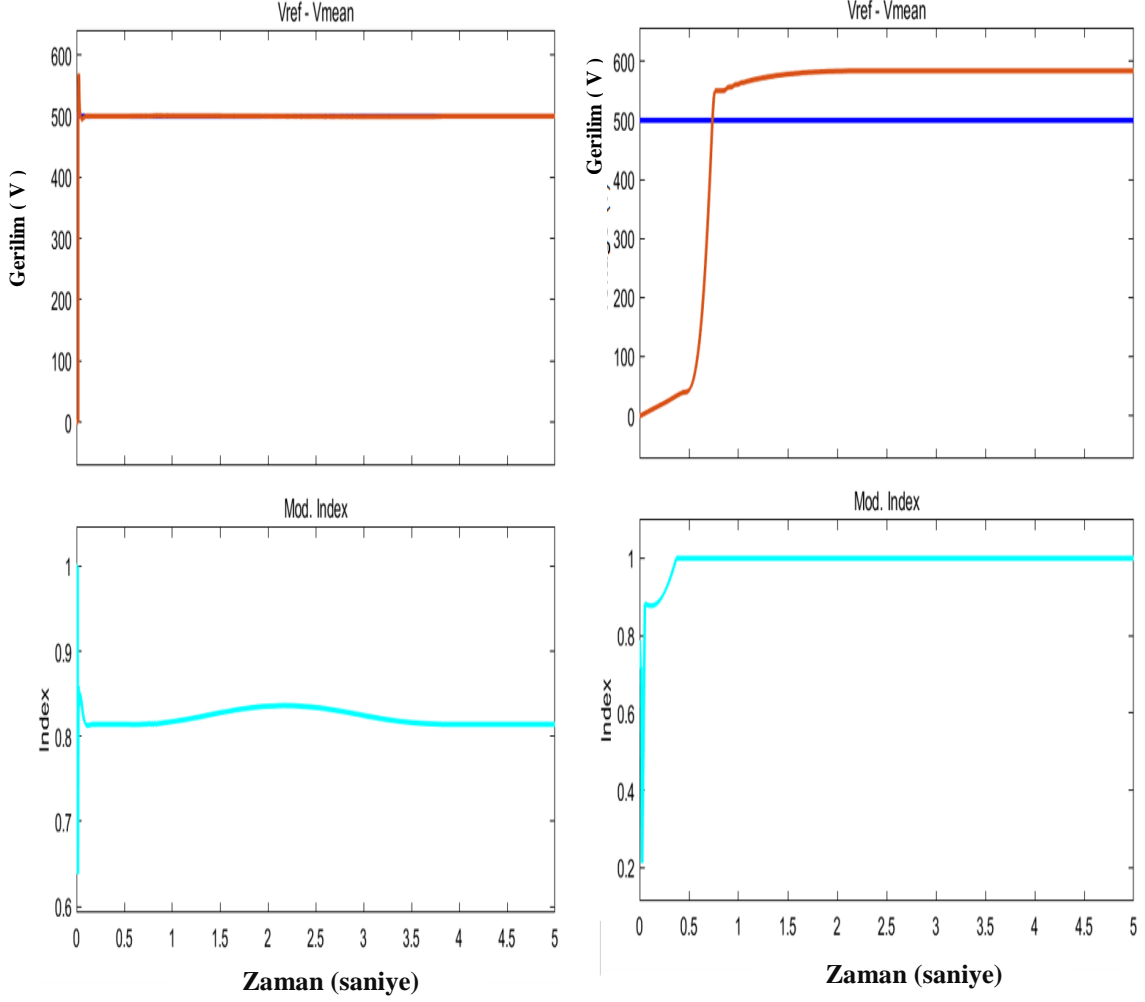
Şebekeye iletilen çıkış, sinyal oluşturucu kullanılarak gün ışığının simüle edilmesiyle ortaya çıkan çıkış gücü ile değişir. Şebeke bileşenleri PV sistemi için yükleri temsil eder, Şekil. 48, şebekeye bağlı ve şebekeye bağlı olmayan PV sinyallerini gösterir.



**Şekil (48)** Şebekeye bağıyken PV eğrileri (solda), Şebekeye bağı değilken (sağda).

## VSC sisteminin Şebeke modunda ve adalı modda ıkıŐları

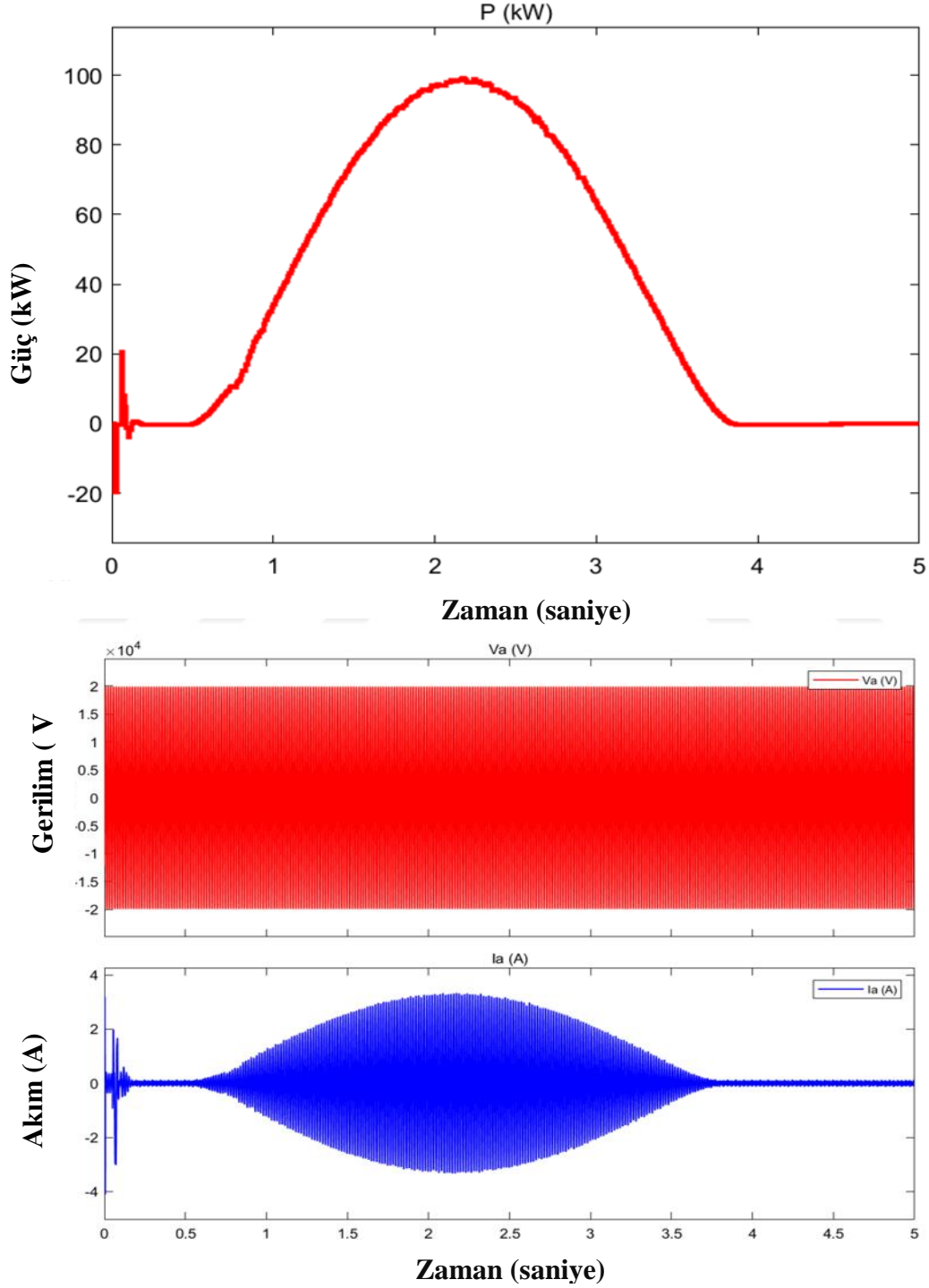
Karşılık gelen voltaj kaynağı dönüştürücü (VSC) sinyalleri Şekil 49’da gösterilmiştir. Şebeke bağlanırken modülasyon indeksinin 0,81 değerine düŐtüđü görülmektedir.



Şekil (49) VSC ıkıŐı, Şebekeye bağlı (solda), Şebekeye bağlı değilken (sağda).

## Toplam mikro şebeke sisteminin çıkışları.

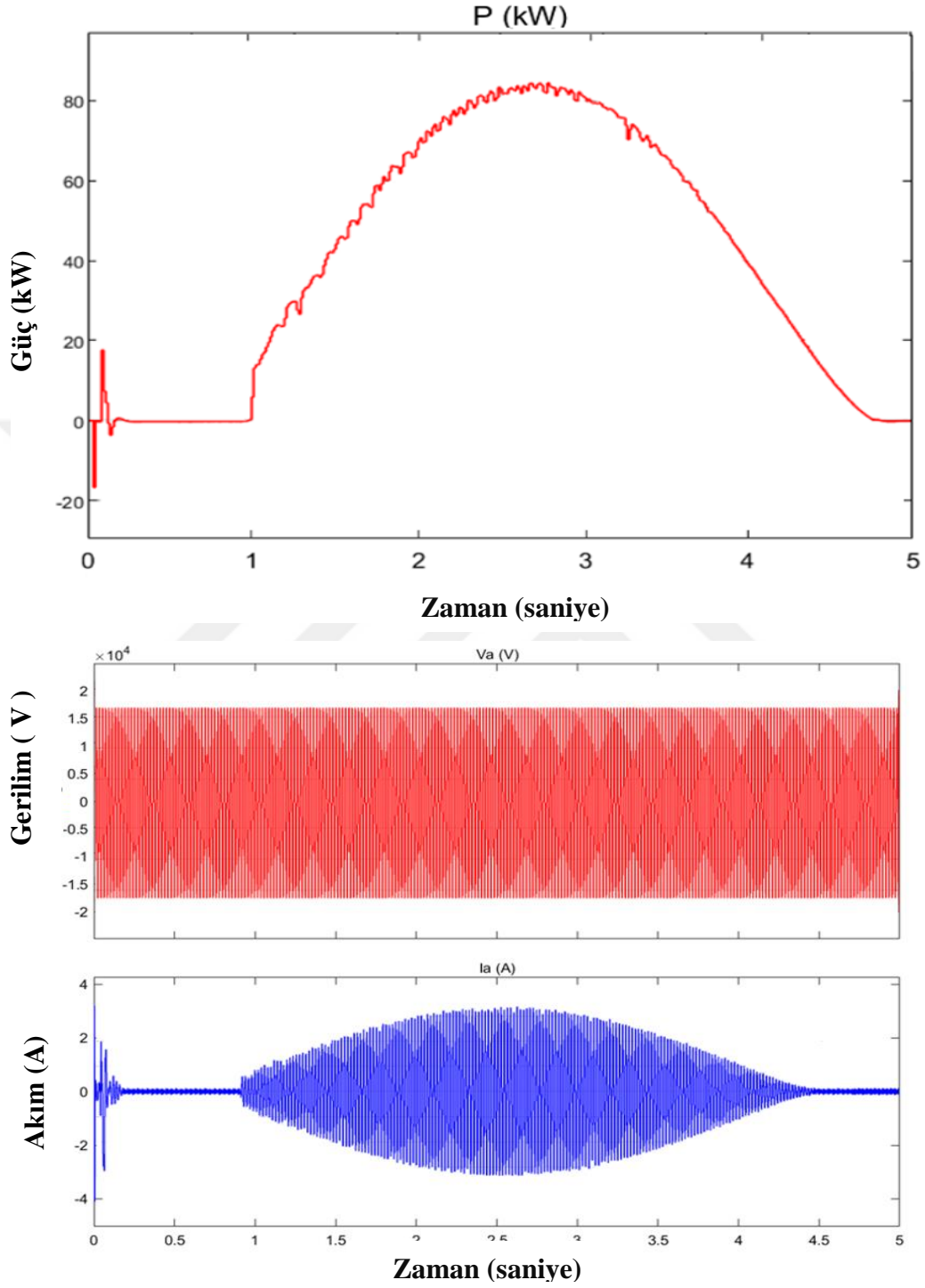
Çıkış hem fotovoltaik güç sistemi çıkışını hem de rüzgar enerjisi sistemi çıkışını içerir. H-sonsuz uygulandığında, maksimum güç, giriş ışımaya sinyale karşılık gelen pürüzsüz sinyalle 100 kW'a eşittir.



Şekil (50) H-sonsuz uygulandığında şebeke sinyalleri.

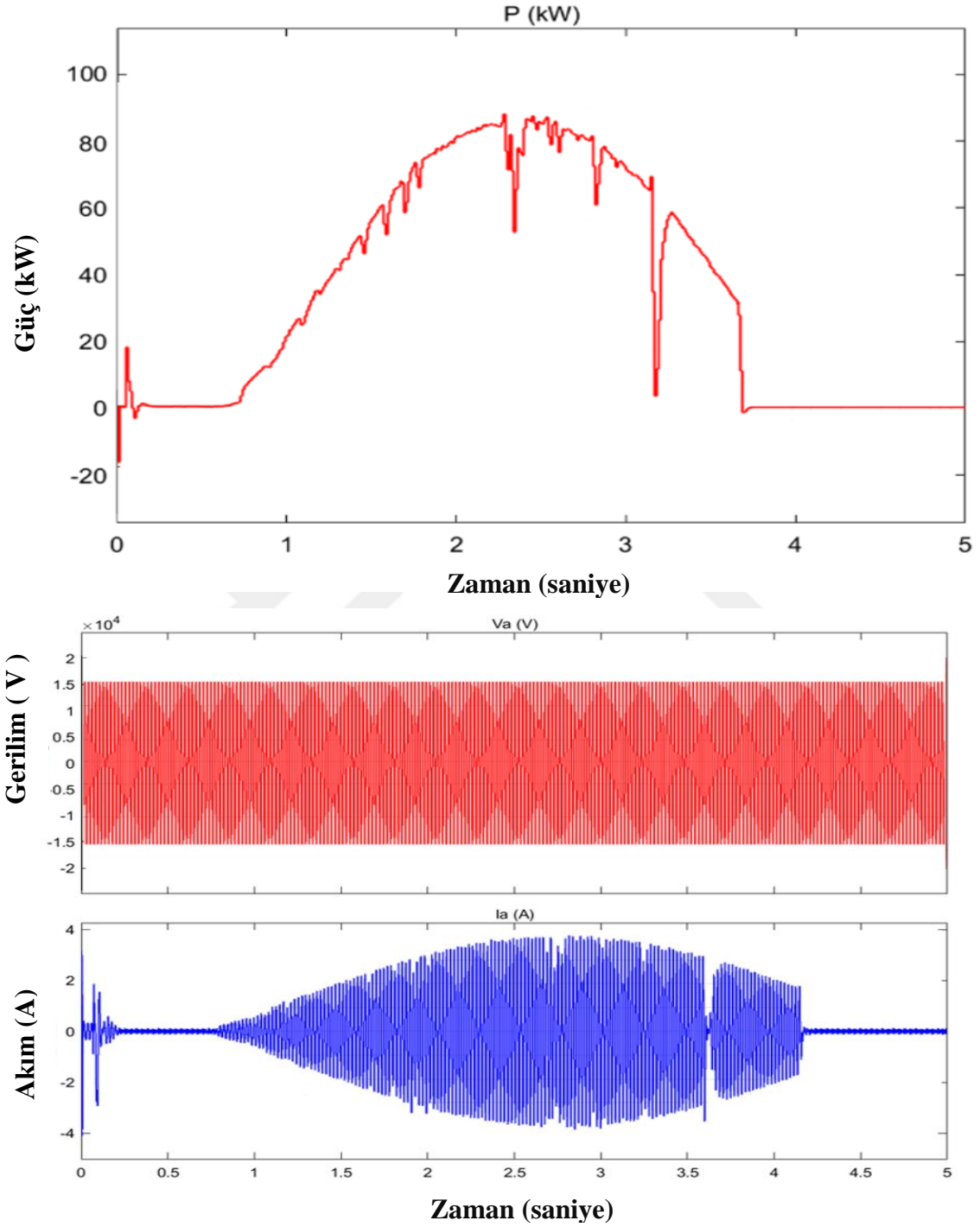


LQR’de, maksimum güç, güç sinyalindeki salınımlarla 85 kW idi ve giriş ışına sinyali süresinin yaklaşık % 8’lik bir gecikmesiyle başlamıştır.



Şekil (51) LQR uygulanırken şebeke sinyalleri.

PID, güç sinyalindeki düşmeler ve salınımlarla maksimum 88 kW güç verirken, giriş ışımaya sinyal süresinin yaklaşık% 7'lik bir gecikmesi olmuştur.



Şekil (52) PID uygulanırken şebeke sinyalleri.

#### 4.6. Sistem alanı temsilini kullanarak hatve kontrolü

Bu kısım, rüzgar türbini hatve açısı için bir durum uzay modeli temsili kullanılarak ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Amaç, daha önce de belirtildiği gibi, hatve aktüatörünün hareketini azaltmak ve generatör dönüş hızında iyi bir kontrol performansı sağlamaktır.

6 m/s'lik ortalama rüzgar hızı, sistemin doğrusallaştırılması için simülasyonda çalışma noktası olarak hizmet eder. PID regülasyonu için simülasyon sonucu, KP (=6), KI (=1.5), Şekil 53'te gösterilmektedir.

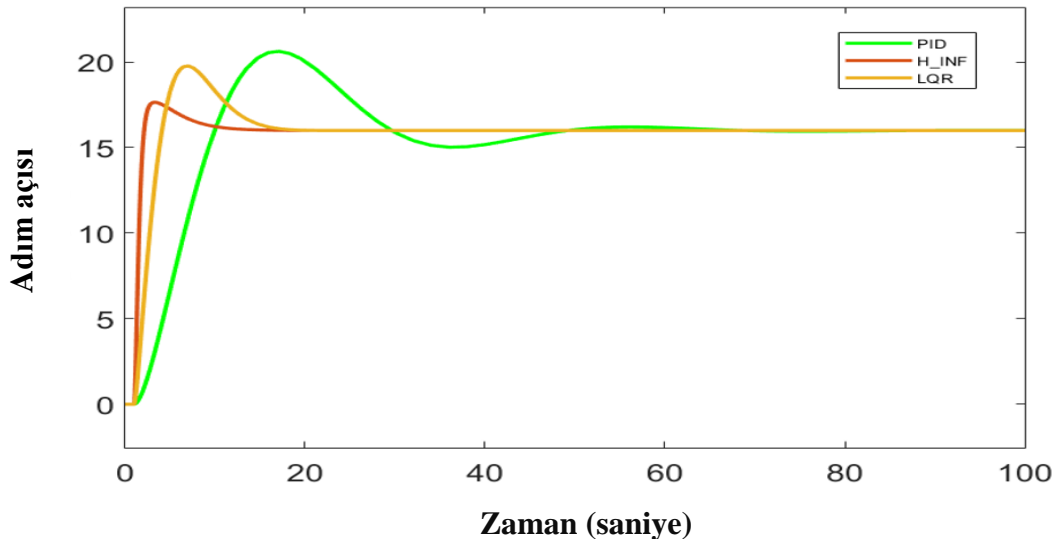
LQR için seçenekler:

$$R = 1, \quad Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 10^{-11} & 0 \\ 0 & 0 & 40 \end{bmatrix} \quad (38)$$

A, B, Q ve R matrisinden, durum geri besleme matrisi:

$$K = [2.2 \quad 10^{-7} \quad -1.2] \quad (39)$$

H-sonsuz, Linear Matrix Inequality LMI optimizer (Yalmip ve Sedumi) kullanılarak MATLAB'da hesaplanmıştır.



Şekil (53) Farklı denetleyiciler kullanılarak eğim açısı kontrolü

PID yöntemi 60 saniyede stabil hale gelirken, H-sonsuz 10 sn'de, LQR 16 sn'de çalışma durumuna geldi. Bu üç yöntem arasında, H-sonsuz 10 saniyede stabilize edildi ve LQR'de

overshoot 10.3% ile en düşük overshoot ile en hızlı kontrol yöntemi olurken, PID 23.5%, 28.8 %'dir.

$$Overshoot(H_{\infty}) = \frac{17.65 - 16}{16} 100 = 10.3\% \quad (40)$$

H-sonsuzun hızlı stabilizasyonu, toplam güç üretimini 50 saniye daha hızlı hale getirdi.

Bu nedenle, H-sonsuz algoritması, PID den çok daha küçük bir aşım ve zaman tepkisine sahiptir, bu da perde aktüatörünün hareketini azaltabilir.

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, hibrit bir rüzgâr-PV sisteminin modellenmesi ve bu sistem üzerinde farklı kontrol yöntemlerinin performansının incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Özellikle rüzgâr türbini eğim açısı kontrolü için PID, LQR ve H-sonsuz kontrol yöntemleri kullanılmıştır. PID kontrolünün basit ve etkili bir yöntem olduğu, ancak doğrusal olmayan rüzgâr türbini sistemlerinde ve rüzgâr hızının aniden değiştiği durumlarda zayıf performans gösterdiği tespit edilmiştir.

LQR kontrol yöntemi, karmaşık sistemler üzerinde lineer ve optimal kontrol sağlar. Hareketleri düzgün bir şekilde kontrol etme yeteneği ile bu yöntem, ekipmandaki aşınma ve yıpranma miktarını azaltabilir ve sistemin genel verimliliğini artırabilir.

H-sonsuz kontrol yönteminin performansının çevresel değişikliklere karşı yönetilebileceği ve sistem parametrelerinin kısa vadeli bir tahminciye ihtiyaç duymadığı tespit edilmiştir. Ancak, bu kontrol yönteminin etkinliği lineer türbin modeline bağlıdır.

Sonuç olarak, H-sonsuz kontrol yönteminin iyi performans gösterdiği ve etkili olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, rüzgâr türbinlerinin eğim açısının kontrolü için bu yöntemin kullanılması tavsiye edilir. Ayrıca, daha titiz araştırmalar ve testler, bu alandaki bilgi birikimini ve uygulamaların etkinliğini artırabilir. H sonsuz kontrol yöntemi, 17,5°'lik en düşük eğim açısına ulaşarak rüzgâr türbini için daha optimize edilmiş ve kararlı bir konfigürasyona işaret eder.

LQR kontrol yöntemi, 20°'lik bir eğim açısına sahiptir; bu, H-sonsuz yöntemine kıyasla biraz daha az kararlı bir konfigürasyon sağlar, ancak yine de kabul edilebilir bir aralık içindedir.

PID kontrol yönteminde, 21°'lik diğer iki yönteme kıyasla daha az kararlı bir konfigürasyona işaret eden en yüksek eğim açısı elde edilir. Bu sonuç, bozulmalara ve potansiyel dalgalanmalara karşı daha yüksek bir duyarlılık anlamına gelir.

Sonuç olarak, sonuçlara dayanarak, H-sonsuz kontrol yöntemi rüzgâr türbini için en hızlı kararlılık süresini (18 s.) gösterir ve en düşük eğim açısına (17,5°) ulaşır. LQR kontrol yöntemi, stabilite süresi (20 s.) ve eğim açısı (20°) açısından yakından takip eder. Bununla birlikte, PID kontrol yöntemi, çok daha uzun bir kararlılık süresi (65 s.) ve daha yüksek bir eğim açısı (21°) ile daha az optimize edilmiş bir kontrol konfigürasyonunu gösterir.



## REFERANSLAR

1. Carlos Domenici Massanet, Marc Cheah Mañé, WIND TURBINE MODEL WITH IMPLEMENTATION OF A PITCH CONTROLLER, Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona, January 2022.
2. Maaruf, M.; Khan, K.; Khalid, M. Robust Control for Optimized Islanded and Grid-Connected Operation of Solar/Wind/Battery Hybrid Energy. *Sustainability* 2022, 14, 5673. <https://doi.org/10.3390/su14095673>.
3. Ali, A. J., Suliman, M. Y., Khalaf, L. A., Sultan, N. S., "Performance investigation of standalone induction generator based on STATCOM for wind power application", *International Journal of Electrical & Computer Engineering*, (2088-8708), 10(6), 2020.
4. A. N. Hussain, A. J. Ali, F. S. Ahmed, "Power quality improvement based on hybrid coordinated, design of renewable energy sources for DC link channel DSTATCOM", *International Journal of Electrical & Computer Engineering*, (2088-8708) 10.5 (2020)
5. K. Tazi, M. F. Abbou, and F. Abdi, "Performance analysis of micro-grid designs with local PMSG wind turbines," *Energy Syst.*, pp. 1–33, 2019.
6. A. S. Saleh, R. K. Antar, and A. J. Ali, "Design and Implementation of Single-Phase PV Power System," *Ann. Rom. Soc. Cell Biol.*, vol. 25, no. 6, pp. 12078–12087, 2021.
7. H. M. Ridha, C. Gomes, H. Hizam, M. Ahmadipour, D. H. Muhsen, and S. Ethaib, "Optimum design of a standalone solar photovoltaic system based on novel integration of iterative-PESA-II and AHP-VIKOR Methods," *Processes*, vol. 8, no. 3, 2020.
8. M. Gengaraj, J. Jasper Gnanachandran, "Modeling of a standalone photovoltaic system with charge controller for battery energy storage system," *International Journal of Electrical Engineering*, vol.6, no. 3, 2013.
9. Mihnea Rosu-Hamzescu, Sergiu Oprea, "Practical guide to implementing Solar panel MPPT algorithm," *Microchip technology Inc*, 2013.
10. A. M. T. IbraheemAlnaib, "Simulation and Characteristics Study of Solar Photovoltaic Array using Matlab/Simulink," *J. Tech.*, vol. 29, no. 1, 2016.
11. M. T. Chughtai, "Temperature compensated bias supply circuit for photodiodes," *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 94, no. 10, pp. 207–209, 2018.
12. F. Khater and A. Omar, "A review of direct driven PMSG for wind energy systems," *J. Energy Power Eng.*, vol. 7, no. 8, 2013.

13. H. I. Karim Belmokhtar and M. L. Doumbi, "A Maximum Power Point Tracking Control Algorithms for a PMSG-based WECS for Isolated Applications: Critical Review," *Wind Turbines Des. Control Appl.*, p. 199, 2016.
14. Z. M. Abdullah, A. M. T. I. Alnaib, and O. T. Mahmood, "Design of Wind Turbine Energy System Based on Matlab/Simulink," *Eng. Tech. J.*, vol. 32, 2014.
15. E. Mattos, A. M. S. S. Andrade, G. V. Hollweg, J. R. Pinheiro, and M. L. da Silva Martins, "A review of boost converter analysis and design in aerospace applications," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 16, no. 2, pp. 305–313, 2018.
16. T. C. C. Saibabu and J. S. Kumari, "Modeling and simulation of pv array and its performance enhancement using MPPT (P&O) technique," *IJCSCN*, vol. 1, pp. 9–16, 2011.
17. J. Chauhan, P. Chauhan, T. Maniar, and A. Joshi, "Converters Based Photovoltaic Systems," pp. 476–481, 2013.
18. B. Sah and G. V. E. S. Kumar, "A comparative study of different MPPT techniques using different dc-dc converters in a standalone PV system," in *2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON)*, 2016, pp. 1690–1695.
19. Aakash Gobi, Eugene Priyanka Leenus, Kishore Ramakrishnan, Thenmozhi Venkatesan, *OPTIMAL CONTROL OF VARIABLE SPEED WIND TURBINES OPERATING IN BELOW AND ABOVE RATED SPEED*, Department of Electrical and Electronics Engineering, 1845 Fairmount Street, Wichita State University, Wichita, KS-67260, 2008.
20. Ehsan Hosseini, Ghazanfar Shahgholian, *Different Types of Pitch Angle Control Strategies Used in Wind Turbine System Applications*, Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran, 2017.
21. Er.Sujan Acharya, *Simulation and Control of Pv-Wind-HydroHybrid Renewable Energy System and Possibility in Nepal*, *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Volume 7, Issue 8, August-2016 1540 ISSN 2229-5518.
22. SANDEEP KUMAR, *MODELING AND SIMULATION OF HYBRID WIND/PHOTOVOLTAIC STAND-ALONE GENERATION SYSTEM*, Master of Technology in Industrial Electronics Department of Electrical Engineering, 2013.
23. Andreea Pinteau, Nicolai Christov, Pierre Borne, Dumitru Popescu.  $H_{\infty}$  controller design for variable speed wind turbines. 18-th International Conference on Control Systems and Computer Science, May 2011, Bucharest, Romania. fhal-00719473.

24. Aliakbar Dabbaghmanesh, Linear Optimal Control of Wind Turbines in Region III, Santa Clara University, MASTER OF SCIENCE IN MECHANICAL ENGINEERING, 2010.
25. C. L. Bottasso, A. Croce, “Advanced Control Laws for Variable-Speed Wind Turbines and Supporting Enabling Technologies”, Scientific Report DIA-SR 09-01, 2009.
26. R. Datta, V. T. Ranganathan, “Variable-Speed Wind Power Generation Using Doubly Fed Wound Rotor Induction Machine-A Comparison with Alternative Schemes”, *IEEE Trans. on Energy Conversion*, 2002.
27. Zhou Xuesong, Song Daichun, Ma Youjie, Chen Deshu, “The simulation and design for MPPT of PV system based on Incremental conductance method,” *Wase International conference on information engineering*, 2010.
28. SiyuGuo, Timothy Michael Walsh, “Analyzing partial shading of PV module by circuit modeling,” *IEEE* 2011.
29. Mohammed Abdulazeez, Ires Iskender, “Simulation and experimental study of shading effect on series and parallel connected PV modules,” *IEEE transaction on energy conversion*, vol.27, no.2, March 2008.
30. Marcelo Gradella Villalva, Jonas Rafel Gazoli, “Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays,” *IEEE transaction on power electronics*, vol.24, no.5, May 2009.
31. Nabil A. Ahmed, Masafumi Miyatake, “A stand-alone hybrid generation system combining solar photovoltaic and wind turbine with simple maximum power point tracking control,” *IPEMC 2006, IEEE*, 2006.
32. S. Meenakshi, K.Rajambal, S. Elangovan “Intelligent controller for stand-alone hybrid generation system,” *IEEE*, May. 2006.
33. B. L. Yong, D. B. Chia, R. K. Rajkumar, V. K. Ramachandaramurthy, and J. Pasupuleti, “Operation and management of an islanded mode hybrid power system e a Malaysian perspective,” 2010.
34. R. K. Rajkumar, V. K. Ramachandaramurthy, B. L. Yong, and D. B. Chia, “Techno-economical optimization of hybrid pv/wind/battery system using Neuro-Fuzzy,” *Energy*, vol. 36, no. 8, pp. 5148–5153, 2011.
35. P. Thounthong, S. Sikkabut, P. Sethakul, and B. Davat, “Control algorithm of renewable energy power plant supplied by fuel cell/solar cell/supercapacitor power source,” in *The 2010 International Power Electronics Conference-ECCE ASIA-*, 2010, pp. 1155–1162.



36. G. Tian, X. Ding, and J. Liu, "Study of control strategy for hybrid energy storage in windphotovoltaic hybrid streetlight system," in 2011 IEEE international workshop on open-source software for scientific computation, 2011, pp. 77–81.
37. T. C. C. Saibabu and J. S. Kumari, "Modeling and simulation of pv array and its performance enhancement using MPPT (P&O) technique," IJCSCN, vol. 1, pp. 9–16, 2011.
38. F.D. Kanellos, N.D. Hatziargyriou, "A new control scheme for variable speed wind turbines using neural networks", Power Engineering Society Winter Meeting, IEEE, 2002.
39. Mathew Sathyajith, "Wind Energy Fundamentals, Resource Analysis and Economics" Springer, 2006.
40. F Bianchi, H. De Battista, R.J. Mantz, "Wind Turbine Control Systems – Principles, Modeling and Gain Scheduling Design", Springer, London, 2006.
41. C. L. Bottasso, A. Croce, "Advanced Control Laws for Variable-Speed Wind Turbines and Supporting Enabling Technologies", Scientific Report DIA-SR 09-01, 2009.
42. Hiren Patel and Vivek Agarwal, "Matlab based modeling to study the effect of partial shading on PV array characteristics," *IEEE transaction on energy conversion*, vol.23, no.1, March 2008.
43. Mihnea Rosu-Hamzescu, Sergiu Oprea, "Practical guide to implementing Solar panel MPPT algorithm," *Microchip technology Inc*, 2013.
44. C. Lin, S. yang, G.W. Wu, "Study of a non-isolated bidirectional dc-dc converter," *IET power electronics*. vol.6, 2013.
45. Mohd. Hasan Ali, "WIND ENERGY SYSTEMS Solutions for Power Quality and Stabilization" 2012.
46. Zhilling Liao, Xinbo Ruan, "Control strategy of bi-directional dc-dc converter for a novel stand-alone photovoltaic power system," *IEEE vehicle power and propulsion conference (VPPC)*, September 2008.
47. M. Ahmadi, K. Shenai, "New, Efficient, low-stress buck-boost bidirectional dc-dc converter," *IEEE*, 2012.
48. Eftichios Koutroulis, Kostas Kalaitzakis, "Design of a maximum power tracking system for wind-energy conversion application," *IEEE Transaction on industrial electronics*, vol. 53, no.2, April 2006.
49. S. Rahmani, Ab. Hamadi, A. Ndtoungou, "Performance evaluation of a PMSG-based variable speed wind generation system using maximum power point tracking," *IEEE electrical power and energy conference 2012*.

50. Roger Gules, Juliano De pellegrin Pacheco, "Maximum power point tracking system with Parallel connection for PV stand-alone application," *IEEE transaction on industrial electronics*, vol.55, no.7, July 2008.
51. T. Taftichat, K. Agbossou, "Output power maximization of a permanent magnet synchronous generator based stand-alone wind turbine system," *IEEE ISIE* July 9-6 2006.
52. Azadeh Safari, Saad Mekhilef, "Simulation and Hardware Implementation of Incremental Conductance MPPT with Direct Control Method Using Cuk Converter," *IEEE transaction on industrial electronics*, vol. 58, no. 4, april 2011.



## ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Karam Sabri Hadith AL-JANABI
Doğum Yeri	
Doğum Tarihi	
Uyruğu	<input type="checkbox"/> T.C. <input checked="" type="checkbox"/> Diğer:

Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	Northern Technical University
Fakülte	Technical Engineering College of Mosul
Bölümü	Electrical Power Technology Engineering
Mezuniyet Yılı	2018

Yüksek Lisans	
Üniversite	Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı	İleri Teknolojiler Anabilim Dalı
Programı	
Mezuniyet Tarihi	2023

Makale ve Bildiriler	
<ol style="list-style-type: none"><li>1. Karam Sabri Hadith Al-Janabi, Hayber Ş. E., “Different Control Methods Design for Wind Turbe in Hybrid Photovoltaic -Wind System” International Journal of Mechanical and Production Engineering (IJMPE), vol. 10, no. 12, pp. 26-30, 2022.</li><li>2. Karam Sabri Hadith Al-Janabi, Hayber Ş. E., “<u>Different Control Methods Design for Wind Turbine in Hybrid Photovoltaic-Wind System</u>” 2022 IIER 1440th International Conference on Recent Innovations in Engineering and Technology (ICRIET), Muscat, Oman, November 12-13, 2022.</li></ol>	