

**T.C.**  
**KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**



**GÜNEŞ ENERJİSİ İLE BESLENEN KALICI MIKNATISLI  
SENKRON MOTOR İÇİN HİBRİT ORANSAL ENTEGRE  
TÜREV TABANLI HIZ KONTROL CİHAZI**

**Abdulfatah Misbah Alhadi SUMAYDAH**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Dr. Öğr. Üyesi Can Doğan VURDU**

**NİSAN - 2021**  
**KASTAMONU**

## TEZ ONAYI

**Abdulfatah Misbah Alhadi SUMAYDAH** tarafından hazırlanan “**Güneş Enerjisi ile Beslenen Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motor için Hibrit Oransal Entegre Türev Tabanlı Hız Kontrol Cihazı**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı **15.04.2021** tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy çokluğu ile Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı** Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

<b>Danışman</b>	Dr. Öğr. Üyesi Can Doğan VURDU Kastamonu Üniversitesi	.....
<b>Jüri Üyesi</b>	Dr. Öğr. Üyesi Cevat RAHEBİ Ayvansaray Üniversitesi	.....
<b>Jüri Üyesi</b>	Dr. Öğr. Üyesi Erdal ŞEHİRLİ Kastamonu Üniversitesi	.....

Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Enstitü Müdürü

Prof. Dr. İzzet ŞENER

.....

## TAAHHÜTNAME

*Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde 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 ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını, bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini bildirir ve taahhüt ederim.*

**Abdulfatah Misbah Alhadi SUMAYDAH**

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

#### GÜNEŞ ENERJİSİ İLE BESLENEN KALICI MIKNATISLI SENKRON MOTOR İÇİN HİBRİT ORANSAL ENTEGRE TÜREV TABANLI HIZ KONTROL CİHAZI

**ABDULFATAH MİSBAH ALHADİ SUMAYDAH**  
**KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**DANIŞMAN: Dr. Öğr. Üyesi Can Doğan VURDU**

Bu çalışmada, vektör kontrolü bazında PV dizisi tarafından beslenen sabit mıknatıslı senkron motorun (PMSM) hız kontrolü gerçekleştirilmiştir. Ayrıca PMSM için anahtarlama sinyalleri sinüzoidal darbe genişlik modülasyonu ile elde edildi ve hız üzerindeki etkileri karşılaştırıldı. Ayrıca DC-DC dönüştürücü kullanılarak artımlı iletkenlik yönteminden oluşan maksimum güç noktası izleme uygulandı. Bu çalışma MATLAB / SIMULINK kullanılarak yapılmıştır. Ayrıca, PV dizisinin ışınlama seviyesi ve ortam sıcaklığındaki değişim çalışmaya dahil edilmiştir. Simülasyonlarla, referans altındaki PMSM hızı ve yük değişiklikleri, PV dizi gücü ölçüldü.

**ANAHTAR KELİMELEER:** Oransal Entegre Türev, Hız Kontrol Cihazı, Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motor, Güneş Enerjisi.

Nisan 2021, 46 Sayfa

## **ABSTRACT**

### **MSC THESIS**

#### **HYBRID PROPORTIONAL INTEGRATED DERIVATIVE BASED SPEED CONTROLLER FOR PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR FED BY SOLAR ENERGY**

**ABDULFATAH MİSBAH ALHADİ SUMAYDAH**

**KASTAMONU UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE**

**DEPARTMENT OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING**

**SUPERVISOR: Assist. Prof. Dr. Can Doğan VURDU**

In this study, speed control of permanent magnet synchronous motor (PMSM) that is fed by PV array on the basis of vector control is realized. Besides, switching signals for PMSM are obtained by sinusoidal pulse width modulation (SPWM) and their effect on the speed is compared. Furthermore, maximum power point tracking (MPPT) consisting of incremental conductance method is applied by using DC-DC converter. This study is carried out by using MATLAB/SIMULINK. Also, the change of irradiation level and ambient temperature of PV array are included in the study. By simulations, PMSM speed under reference and load changes, PV array power are measured.

**KEYWORDS:**Proportional Integrated Derivative, Speed Controller, Permanent Magnet Synchronous Motor, Solar Energy.

April 2021, 46 Page

## TEŞEKKÜR

Bizi her zaman destekleyen ve ne kadar uzakta olursa olsunlar yanımızda olan bazı insanlar için teşekkür sözü yeterli değildir.

Öncelikle aileme, özellikle de anneme şükranlarımı sunmak istiyorum. Onlar için her zaman Allah'tan uzun ömür ve sağlık diliyorum. Ayrıca, eşime yurtdışında benimle birlikte olduğu için teşekkür ederim.

Tezimi bitirmeme yardımcı olan herkese, özellikle danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Can Doğan VURDU 'ya ve Bölüm Hocalarıma Dr. Öğr. Üyesi Cevat RAHEBİ, Dr. Öğr. Üyesi Seçil KARATAAY, Dr. Öğr. Üyesi Osman ÇİÇEK, Dr. Öğr. Üyesi Faruk ERKEN ve Dr. Öğr. Üyesi Erdal ŞEHİRLİ'ye benim için yaptıkları her şey için teşekkür ederim.

Abdulfatah Misbah Alhadi SUMAYDAH

Kastamonu, 2021

# İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>TEZ ONAYI</b> .....	<b>ii</b>
<b>TAAHHÜTNAME</b> .....	<b>iii</b>
<b>ÖZET</b> .....	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>v</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>vi</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>vii</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	<b>ix</b>
<b>TABLolar DİZİNİ</b> .....	<b>x</b>
<b>KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	<b>xi</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Problemin Tanımlanması .....	1
1.2 Geleneksel PI Kontrolörü .....	2
<b>2. SABİT SENKRON MOTORLAR</b> .....	<b>3</b>
2.1 Sabit Senkron Motorlar .....	3
2.2 Senkron Motor Kontrolü .....	4
2.3 Düzen ve İşleyiş .....	4
2.4 Avantajları ve Dezavantajları .....	5
2.5 Tek Fazlı Senkron Motorlar .....	5
2.6 Yardımcı Fazı Olan İki Fazlı Senkron Motorlar .....	7
2.7 Üç Fazlı Senkron Motorlar .....	7
2.8 Çalışma Prensipleri .....	7
2.9 Hız Kontrolü .....	8
2.10Yapı .....	9
2.11Verimlilik .....	10
<b>3. FOTOVOLTAİK SİSTEM FİZİĞİ</b> .....	<b>11</b>
3.1 Arkaplan .....	11
3.2 Fotovoltaik Etki .....	12
3.2.1 Foton Emilimi .....	12
3.2.2 PV Pili .....	13
3.3 Fotovoltaik Model .....	14
3.4 PV Pili Malzemelerinin Türleri .....	15
3.5 PV Pili Modellemesi .....	15
<b>4. MAKSİMUM GÜÇ NOKTASININ TAİBİ</b> .....	<b>18</b>
4.1 Arkaplan .....	18
4.2 MPPT Teknikleri .....	22
4.3 Pertürbe Et ve Gözle Algoritması .....	22
<b>5. SİMÜLASYON SONUÇLARI</b> .....	<b>24</b>
5.1 Arkaplan .....	24
5.2 Fotovoltaik Sistemin Simulink Modeli .....	24
5.3 DC-DC Yükseltme Dönüştürücü .....	27
5.4 Maksimum Güç Noktası İzleme .....	29
5.5 PMSM Detayları .....	31
5.6 Simulasyon Sonuçları .....	35

<b>6. SONUÇ</b> .....	<b>41</b>
<b>KAYNAKLAR</b> .....	<b>42</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	<b>46</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 1.1	(a) Geleneksel PI Kontrolörünün Yapısı, (b) Geleneksel PI Kontrolörünün Simulink modeli.....	2
Şekil 3.1	PV pili, Modülü ve Dizilimi (Afrouzi vd., 2013).....	11
Şekil 3.2	Yarıiletken için Enerji bandı grafiği (Richa, 2012).....	12
Şekil 3.3	p-n bağlantısı bandı grafiği (Van Zeghbroeck, 2004).....	13
Şekil 3.4	PV etkisi foton enerjisini p-n bağlantısı üzerinden gerilime (voltaj) dönüştürür (Lazaroiu vd., 2015).....	14
Şekil 3.5	Performans artırıcı özellikleriyle PV hücresinin inşası.....	14
Şekil 3.6	Kısa devre iletiminin gösterimi (Rasool vd., 2016).....	16
Şekil 3.7	Açık devre iletiminin gösterimi (Rasool vd., 2016).....	16
Şekil 3.8	PV piline denk devre (Cubas vd., 2014).....	17
Şekil 4.1	MPP I-V eğrisi için gösterim.....	18
Şekil 4.2	I-P özellik eğrisi 1000 w/m <sup>2</sup> .....	19
Şekil 4.3	PV modülleri.....	19
Şekil 4.4	Güneş ışınmasıyla I-V eğri varyasyonu.....	20
Şekil 4.5	Güneş ışınmasının farklı seviyelerinde fotovoltaik panelin güç çıktısı.....	20
Şekil 4.6	Güç/Voltaj Grafiği.....	23
Şekil 4.7	Pertürbe Et ve Gözle Algoritmasının Akış Çizelgesi.....	23
Şekil 5.1	PV'nin Devre Modeli.....	24
Şekil 5.2	a) PV modeli, b) Simulink'te PV'nin alt sistem modeli.....	26
Şekil 5.3	DC-DC yükseltme dönüştürücü.....	28
Şekil 5.4	DC-DC yükseltme dönüştürücünün Matlab Simulink modeli.....	28
Şekil 5.5	MPP için I-V eğrisi gösterimi.....	30
Şekil 5.6	P-V özellikleri eğrisi, 1 000 w/m <sup>2</sup> .....	30
Şekil 5.7	PV modülleri.....	31
Şekil 5.8	PMSM Parametreleri.....	32
Şekil 5.9	a) PMSM'nin simülasyon modeli, b) Boost Converter.....	33
Şekil 5.10	PV Parametreleri.....	34
Şekil 5.11	PV modül özellikleri.....	35
Şekil 5.12	PMSM'nin hız kontrolünün önerilen simülasyon modeli.....	35
Şekil 5.13	PMSM'nin hız kontrolü için PI parametresi.....	36
Şekil 5.14	PMSM'nin hız dalgaformu referans hızı ve gözlemlenen hızı.....	36
Şekil 5.15	Rotor hızı ve elektromanyetik tork.....	37
Şekil 5.16	Üç faz için stator akımı.....	37
Şekil 5.17	Üç faz için gerilim ve akım.....	38
Şekil 5.18	MPPT sink Modeli.....	38
Şekil 5.19	Basamak fonksiyonun sonucu.....	40

## TABLULAR DİZİNİ

### Sayfa

Tablo 4.1 Işınımın farklı seviyelerinde PV panelinin elektriksel özellikleri. ....	21
--	----

## KISALTMALAR DİZİNİ

<b>PV</b>	: Fotovoltaik teknolojisi
<b>PM</b>	: Kalıcı mıknatısların
<b>PMSM</b>	: Sabit Mıknatıslı Senkron Motorlar
<b>PID</b>	: Orantılı Entegre Türev
<b>Si</b>	: Silikon
<b>BoS</b>	: Balance-of Sistemi
<b>GaAs</b>	: Galyum Arsenit
<b>MPP</b>	: Maksimum güç noktası
<b>SM</b>	: Senkron makinelere
<b>PMSM</b>	: Sabit Mıknatıslı Senkron Motorlar

## 1. GİRİŞ

Teknolojinin hızlı gelişimi, diğer tüm alanları olduğu gibi elektrikli makineleri de etkilemiştir. Bugün, elektrikli makineler dünyadaki enerji tüketiminin yarısından fazlasını gerçekleştirmektedir. Bu hızlı gelişme ile endüstriyel üretim sistemleri, dayanıklı, yüksek verimli, kontrolü kolay ve az bakım gerektiren düşük maliyetli elektrikli makineler gerektirir. Bu durum, bir yandan makinenin performansını artırırken diğer yandan motor boyutlarının küçülmesine katkıda bulunmayı zorunlu hale getirmiştir. Kalıcı mıknatısların (PM) bakır kayıplarının azaltılması, bu makinelere olan ilgiyi artırmış ve asenkron motorların kullanıldığı bu sektörde, sabit mıknatısların fiyatlarındaki düşüğe kıyasla büyük ölçüde senkron makinelere (SM) olan ilgi artmıştır. Malzemelerin kalitesinin yanı sıra fiyatların gün geçtikçe düşmesi, elektrikli makinelerde mıknatısların kullanılmasını kolaylaştırmıştır. Tasarım, analiz ve kontrol sistemlerindeki gelişmelere ek olarak, yarı iletken ve güç elektroniğindeki gelişmeler sabit mıknatıs makinelerin kullanımı artmıştır (Jahns, Kliman, and Neumann 1986).

Sabit Mıknatıslı Senkron Motorlar (PMSM) diğer elektrik motorlarından, en yüksek ve en kaliteli güç yoğunluğu, verimlilik ve yüksek atalet momenti ile ayrılmaktadır (Pillay ve Krishnan, 1989; Miller, 1989; Krishnan, 2001; Sathyan vd., 2009; Gambetta ve Ahfock, 2009; Lai ve Lin, 2010; Bharatkar vd., 2011 ).

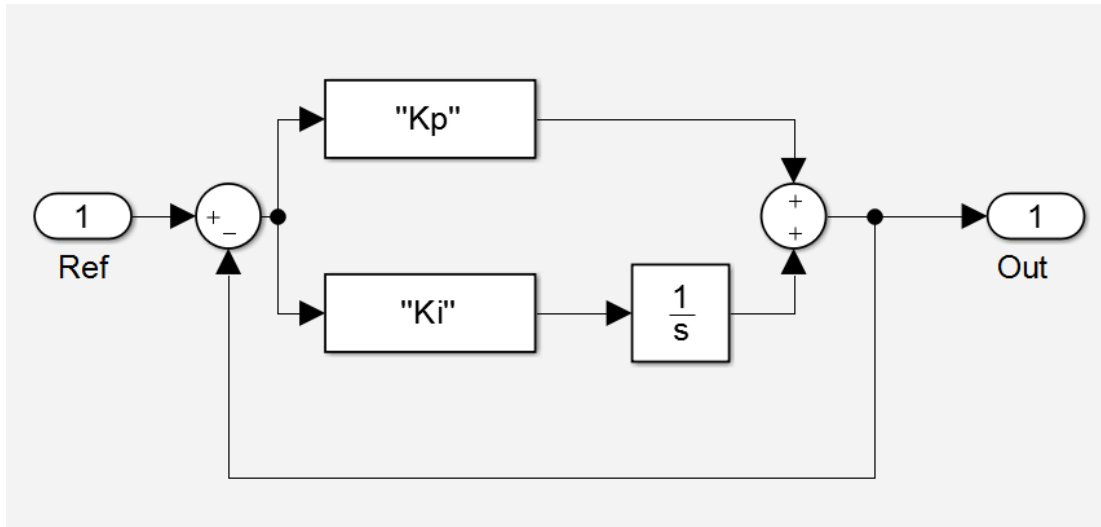
### 1.1 Problemin Tanımlanması

Orantılı Entegre Türev (PID) denetleyici, basit yapı ve düşük maliyetli kontrolör açısından avantajlara sahiptir. Tersine, doğrusal olmayan (non-linear) sisteme uygulandığında, PID kontrolörü en iyi performansı sağlayamaz. Fırçasız DC motor da doğrusal olmayan bir sisteme sahiptir. Yüksek performanslı Fırçasız DC motor sürücülerinin geliştirilmesi endüstriyel uygulamalar için çok önemlidir ve sürücü sistemi iyi dinamik hız komut izleme, yük düzenleme yanıtına sahip olmalıdır. Ayrıca sürücü, iyi kalitede zaman alanı özelliklerine ve entegre performans indekslerine sahip olmalıdır.

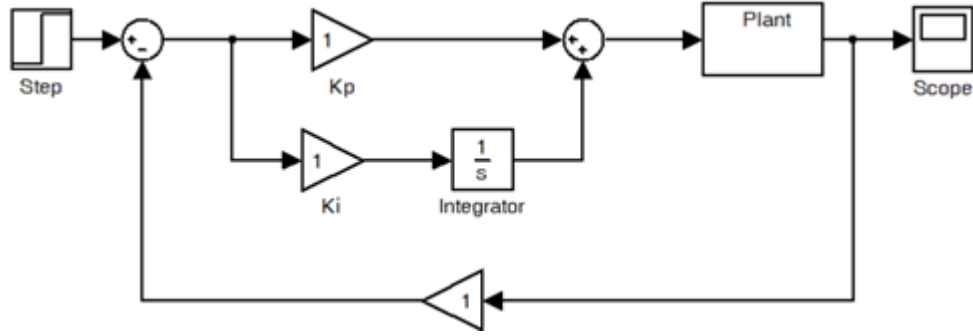
## 1.2 Geleneksel PI Kontrolörü

PI denetleyicisinin yapısı Şekil 1.1 (a) 'da gösterilmektedir. PI kontrolörünün zaman alanındaki kontrol çıkışı, denklem (6)'da şu şekilde ifade edilir (Panda, 2012; Franklin, vd., 2014; Wang, 2014; Shah ve Agashe; 2016):

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt \quad (1.6)$$



(a)



(b)

Şekil 1.1 (a) Geleneksel PI Kontrolörünün Yapısı, (b) Geleneksel PI Kontrolörünün Simulink modeli

$E(t)$ , izleme hızı hatasını, istenen giriş değeri ( $\omega_{ref}$ ) ve gerçek çıktı ( $\omega_{act}$ ) arasındaki farkı temsil ettiğinde,  $u(t)$  tesise kontrol sinyali,  $K_p$  orantılı kazanç,  $K_i$  integral kazancıdır ve  $K_d$ , PID kontrolörünün türevsel kazancıdır. PID denetleyicinin simulink modeli Şekil 1.1 (b) 'de gösterilmektedir.

## 2. SABİT SENKRON MOTORLAR

### 2.1 Sabit Senkron Motorlar

Bu tür bir motor, motorun statorunda, bu senkronizasyon hızında zaman içinde dönen bir manyetik alan yaratan elektromıknatıslar içerir (Fricke ve Becker 2019).

Makinenin hızını belirtilen parametrelerle ilişkilendiren matematiksel ifade şu şekildedir:

$$n = \frac{60 \times f}{P} = \frac{120 \times f}{p} \quad (2.1)$$

burada:

f: Makinenin bağlı olduğu ağıın frekansı (Hz)

P: Makinenin sahip olduğu kutup çifti sayısı

p: Makinenin sahip olduğu kutup sayısı

n: Makinenin senkronizasyon hızı (dakikadaki devir sayısı)

Örneğin, 50 Hz ağıına bağlı dört kutuplu bir makineniz (2 çift kutuplu) varsa, makine dakikada 1.500 devirde çalışacaktır (Gieras vd., 2018).

Bu motorlar bir alternatöre çok benzer şekilde çalışırlar. Senkron motorlar ailesi içinde şunları ayırt etmeliyiz:

- Senkron motorlar.
- Senkronize asenkron motorlar.
- Sabit mıknatıs motorları.

Senkron motorlar olarak adlandırılmalarının sebebi, rotorun hızının ve statorun manyetik alanının hızının eşit olmasıdır. Senkron motorlar, değişken yüke sahip ve sabit bir hıza ihtiyaç duyan büyük makinelerde kullanılır (Gieras vd., 2018).

## 2.2 Senkron Motor Kontrolü

Senkron motorların kontrolü durumunda, kontrol şemaları açık döngüde veya kapalı döngüde kullanılır, ikincisi otomatik pilotlu motor olarak adlandırılır (Xue vd., 2016).

## 2.3 Düzen ve İşleyiş

Rotordaki alan, sabit (kalıcı) mıknatıslar (kendi kendini uyarma, örneğin rotor olarak mıknatıslanmış ferrit silindir) veya elektromanyetik harici uyarma (rotor üzerindeki alan bobini, kayma halkaları aracılığıyla güç kaynağı) tarafından oluşturulur. Stator bobinleri bazen, özellikle büyük senkron makinelerde uygun, kontrollü bir alternatif akıma sahip bir frekans dönüştürücü tarafından çalıştırılır. Bu değişken hızla, yüksek performans elde edilebilir (Cochran, 2018).

Normal çalışmada, senkron motorda kayma olmaz. Yüklendiğinde rotor manyetik alanı, stator manyetik alanını belirli bir açıyla (rotor açısı) izler ve bu, artan yük ile artar. Ancak bu, yalnızca açının  $90^\circ$  olduğu maksimum bir ana kadar mümkündür. Yük torku bu devrilme momentini aşarsa, çark durur.

Açıldığında, stator döner alanı hemen senkron hızda döner. Bununla birlikte, çarkın atalet momenti nedeniyle hızlanmak için biraz zamana ihtiyacı vardır. Bu nedenle, bir senkron motorun çekiş yardımına ihtiyacı vardır. Bu, motorun senkron hıza ulaşana kadar üç fazlı asenkron makine olarak başladığı rotorda kısa devre bir kafestir. Rotor yaklaşık olarak senkron hıza ulaştığında, rotor sargısının uyarma akımı açılır, böylece rotor döner stator döner alanına (Caruso vd., 2017) çekilir.

Motorun dönüş yönü, stator döner alanı tarafından belirlenir; yön değişikliği için iki fazın tersine çevrilmesi gerekir.

Her bir sabit mıknatıslı senkron motor aynı zamanda senkron jeneratör olarak da çalışabilir. Örnekler bisiklet ve motosiklet alternatörleridir. Elektrik santrallerinde, elektrik jeneratörlerinde ve otomotiv alternatörü olarak harici uyarılı senkron makineler kullanılmaktadır (Toliyat ve Kliman, 2018). Senkron motorlar, tek fazlı alternatif akımla veya üç fazlı akımla çalıştırılabilir (bkz. Üç fazlı senkron makine). Nadiren iki fazlı senkron motorlara da rastlanır.

#### **2.4 Avantajları ve Dezavantajları**

Senkronize motorların, fırçalı DC motorlara kıyasla bir avantajı, çalışma akımı öncü fırçanın ortadan kaldırılmasıdır - rotora iletilen kayma halkaları ile yalnızca çok daha düşük uyarma gücüne sahiptir; sabit mıknatıslı motorlar ile bunlar da ortadan kalkar. Bu, fırçaların aşınmasını ortadan kaldırır ve verimlilik artar (Toliyat ve Kliman, 2018).

Senkron motorun asenkron motora göre bir avantajı, hızın ve açısal konumun çalışma frekansına sağlam bir şekilde bağlanmasıdır. Bu nedenle senkron motorlar, yükten bağımsız, sabit bir hızın gerekli olduğu aktüatörler ve diğer uygulamalar için uygundur. Ek olarak, sabit mıknatıslı senkron motorlar, özellikle daha küçük makineler için asenkron makinelere göre daha kompakt ve verimlidir. Üç fazlı bir senkron motorla, faz kaydırmalı çalışma da mümkündür. Bir dezavantaj, üç fazlı ağda kendi kendine başlamanın daha zor olmasıdır. Bu dezavantajı önlemenin bir yolu, motorun asenkron bir motor olarak çalışabilmesi için rotora ek bir kısa devre kafesinin takılmasıdır (Kakosimos ve Abu-Rub, 2017).

Senkron motorların tipik bir örneği, düzensiz yükleme veya enerji verme ile uyarılabilen, rotorun istenmeyen mekanik burulma titreşimleridir. Devrilme momentinin aşılmasına ve dengesiz bir torka neden olabilirler. Kısa devre sargıları ile (kısa devre kafesi veya rotor kutuplarının etrafındaki damper sargıları) önlenir. İnvörtörde çalışma için genellikle rotor konumu tespit edilir.

#### **2.5 Tek Fazlı Senkron Motorlar**

Tek fazlı senkron motorlar, "yetişmek" için bir başlatma yardımına ihtiyaç duyar, ancak, sabit mıknatıslı tek fazlı motorlar genellikle kendilerini, tanımlanmamış bir

yönde salınım hareketleriyle başlatır. Örnekler arasında küçük su pompaları (alkalin pompaları ve akvaryum pompaları) ve narenciye presleri bulunur.

Küçük sürücüler için, kılavuzları mıknatıslanmayan ve (ayrıca dişli) statorun manyetik alanını yoğunlaştırmak için dişlere sahip senkron motorlar da vardır. Bunlar prensip olarak relüktans motorlarına benzer. Ayrıca bir hızlı başlangıca (Isfahani vd., 2014) ihtiyaç vardır.

Senkron saatler için minyatürleştirilmiş senkron motorlar küçüktür ve doğru yönde kendi kendine etkinleşir. 1970'lerde ve 1980'lerde motorlar, 25 kutup çiftine kadar düzgünlüğü artırmak için donatıldı. Stator ve sabit mıknatıslı rotor bu nedenle 50'ye kadar kutba sahiptir. 3000 rpm yerine sadece 120 rpm'de döndüler. Günümüzün senkron saat motorları, pürüzsüzlüğü iyileştirmek için daha hafif bir çarka ve küçük dişlere sahip daha hafif dişlilere sahiptir. Uyarıcı sargısı yalnızca bir kutup çifti oluştursa da, stator laminasyonundaki dişler ve boşluklar, gerçek tamamlayıcı kutupların yerini alacak kadar yeterince farklı olan farklı manyetik akı derecelerine neden olur. Bu nedenle, dişler ve boşluklar birlikte kalıcı mıknatıs rotorundaki kutup sayısını verir (Glowacz, 2014).

Tek fazlı senkron motorlar, sabit hıza veya basit yapıya bağlı olduğu çeşitli küçük sürücülerde bulunabilir:

- Senkron ve yardımcı saatler (ana frekansa bağlı büyük saat kolları)
- Zamanlayıcılar, çamaşır makinelerinde program anahtarları ve zaman anahtarları
- Ayna bilyelerinin tahrikleri
- Akvaryum ve oda çeşme suyu pompaları
- Çamaşır makinelerindeki kostik pompaları (bunlar daha önce gölgeli kutuplu motorlardı)
- Mikrodalga fırınlarda döner tabla sürücüleri

- Reibrad ile ve kayış tahrikli tasarıma bağlı kayıt oynatıcı

## **2.6 Yardımcı Fazı Olan İki Fazlı Senkron Motorlar**

İki fazlı senkron motorlar genellikle daha az verimli kapasitörlü motorların yerine kullanılır. Tek fazlı senkron motorlardan daha iyi bir başlangıç performansına ve başlangıç torkuna sahiptirler ve tanımlanmış bir dönüş yönüne ve dönüş yönünün tersine çevrilmesine izin verirler. Uygulama örnekleri (Enesi, 2013):

- Pompa sürücüleri
- Valf aktüatörleri

## **2.7 Üç Fazlı Senkron Motorlar**

Üç fazlı senkron motorlar da, uygun sensörsüz elektronik güç kontrolünün geliştirilmesiyle, daha düşük güçlerde (Roberts, 1990), örneğin aktüatörler olarak giderek daha fazla kullanılmaktadır. Yüksek dinamik, yüksek tork ve yüksek verimlilik ile tanımlanmış bir rotor konumu avantajına sahiptirler (Kandiban ve Arulmozhiyal, 2012).

## **2.8 Çalışma Prensipleri**

Hem asenkron hem de senkron motorlarda, motor statörüne AC güç sağlanır ve zaman içinde AC salınımları tarafından dönen bir manyetik alan üretilir. Senkron motorlarda rotor, stator ile aynı hızda dönerken, asenkron motorlarda rotor statordan daha yavaş bir hızda döner. Bu nedenle asenkron motor statorunun manyetik alanı rotora göre azalır artar veya tümden değişir. İkincil bir sarmal motor, kısa devre veya kapalı bir harici empedans durumunda, bu endüksiyon, endüksiyon motorunda bir ters akım oluşturur. Manyetik akı dönüşü rotor sargılarında indüklenir, benzer şekilde akım transformatörün sekonder sargılarında indüklenir. Rotor sargılarındaki akımlar nedeniyle stator alanına tepki olarak rotorlarda manyetik alan oluşur. Lenz yasasına göre, oluşan manyetik alanın yönü, rotor sargıları boyunca akımdaki değişime karşı olacaktır. Rotor sargılarında indüklenen akımın nedeni stator manyetik alanının

dönmesidir. Yani rotor, rotor sargılarındaki akım değişikliklerine karşı dönen stator manyetik alanı yönünde dönmeye başlayacaktır. Rotor, indüklenen rotor akımı boyutu ve torku dengelenene kadar hız kazanır. Senkron hız dönüşü rotor akımının indüklenmemesine neden olacağından, asenkron motor hızı her zaman senkron motor hızından daha yavaştır. Gerçek ve senkronize hız veya kayma arasındaki fark, tasarım B tork eğimli endüksiyon motorlarında %0,5 ile %5,0 arasında değişir. Asenkron makinelerin temel özelliği, ayrı ayrı uyarılmak yerine, DC makinelerde veya sabit mıknatıslı motorlarda olduğu gibi yalnızca endüksiyonla senkronize edilmeleri veya kendiliğinden mıknatıslanmalarıdır (Krishnan, 2017).

Rotor akımlarının indüklenmesi için, fiziksel rotor hızı, stator dönen manyetik alandan (ns) daha düşük olmalıdır; aksi takdirde manyetik alan rotor iletkenlerine göre hareket edemez ve akımlar indüklenemez. Rotor hızının senkron hızın altına düşmesi ile rotorlarda manyetik alanın dönme hızı, sargılarda daha fazla akım indüksiyonu ve daha fazla tork ile artar. Rotorda indüklenen manyetik alanın dönme hızı ile stator dönme alanının dönme oranı arasındaki orana kayma denir. Yük, yük altında azalır ve yeterli tork oluşturmak için kaymayı artırır. Bu nedenle, asenkron motor bazen asenkron motor olarak adlandırılır. Bir endüksiyon motoru endüksiyon jeneratörü olarak kullanılabilir veya doğrudan doğrusal hareket üretebilen doğrusal bir asenkron motor oluşturabilir (İbrahim vd., 2014).

## **2.9 Hız Kontrolü**

Yarı iletken güç elektroniğinin geliştirilmesinden önce, frekansı değiştirmek zordu ve kafesli endüksiyon motorları genellikle sabit hızlı uygulamalarda kullanılıyordu. Değişken dış dirence bağlı sarım rotor motorları (WRIM) veya DC sürücüler, elektrikli gezer köprülü vinç uygulamalarında kullanılır ve rotor devresi için önemli bir kayma halkası aralığı veya hız kontrolü sağlar. Bununla birlikte, RIM'in düşük hızlı çalışmasıyla ilişkili direnç kayıpları, özellikle düşük yükler için maliyet açısından önemli bir dezavantajdır. Büyük kayma halkalı motor sürücülerini olarak da adlandırılan kayma enerjisi geri kazanım sistemleri, hala bazen rotor devresinden enerji geri kazanmak, düzeltmek ve VFD kullanarak güç sistemine geri dönmek için kullanılmaktadır. Pek çok endüstriyel değişken hızlı uygulamada, DC ve WRIM

sürücülerini, VFD tarafından beslenen kafesli asenkron motorlarla yer değiştiriyor. Yüklerin asenkron motor hızını kontrol etmenin en yaygın ve etkili yolu VFD'dir. Maliyet ve güvenilirlik faktörlerine bağlı olarak, VFD'nin benimsenmesinin önündeki engeller, son üç yılda önemli ölçüde azaldı. Sonuç olarak, bu tahrik teknolojisinin tüm yeni kurulan motorların% 30-40'ı tarafından benimsenmesi beklenmektedir (Rader, 1990).

## 2.10 Yapı

Bir endüksiyon motor statoru, bir manyetik alan oluşturmak için bir besleme akımı taşıyan kutuplardan oluşur. Manyetik alan dağılımını optimize etmek için, sargılar stator çevresindeki yuvalara dağıtılır. Manyetik alan aynı sayıda kuzey ve güney kutbuna sahiptir. Endüksiyon motorları en çok tek fazlı veya üç fazlı güçle çalıştırılır, ancak iki fazlı motorlar da vardır; Teorik olarak, asenkron motorlar herhangi bir sayıda faz olabilir. Çok sayıda iki fazlı tek fazlı motor, iki fazlı bir motor olarak incelenebilir. Bu nedenle kapasitör, faz tek fazlı güç kaynağından 90 derece ikinci bir güç fazı oluşturmak için kullanılır ve ikinci motor sargısını besler. Tek fazlı motorlar başlangıçta bir döner alan üretmek için bazı mekanizmalar gerektirir. Kafes asenkron motor rotor iletken çubukları genellikle gürültüyü azaltmak için kavislidir (Kim, 2017).

Bir asenkron motorun dönüş yönünü değiştirme yöntemi, üç fazlı veya tek fazlı bir makine olmasına bağlı olarak değişir. Bu durumda, üç faz için, herhangi iki fazın iletken bağlantısını değiştirerek ters dönüş gerçekleştirilir. Tek fazlı bölünmüş fazlı bir motorda bu, ilk devre ile birincil bobin arasındaki bağlantıyla elde edilir. Tek fazlı iki fazlı motorlar, birbirine bağlı birincil devre ve dahili olarak bağlı başlatma devresi için tasarlanmıştır. Rotasyon değiştirilemez. Ek olarak, tek fazlı gölge kutuplu motorlar sabit dönüşe sahiptir ve değiştirilemez (Kim, 2017).

Bu güç faktörü, endüksiyon motorlarındaki yüke göre değişir, genellikle 0,85, tam yüklü pozisyonda 0,90, stator ve rotor kaçağı ve mıknatıslanma reaktansları, yüksüz olması nedeniyle düşük yük konumuna kadar 0,12'dir. Güç faktörü, tek bir motor bazında veya tercihen ortak bir veri yolu üzerinde birkaç motor içeren bağlı kapasitörler vasıtasıyla geliştirilebilir. Ekonomik ve diğer hususlar için, güç sistemleri

nadiren kuvvet kuvvetleri birliğini doğrulayan g¼c fakt¼rleridir (Hutt ve Day, 1990). Kondansat¼rler, transformat¼rler arasındaki harmonik rezonansı ve devre reaktansını ¼nlemek i¼in harmonik akım, g¼c kondansat¼r uygulaması ile g¼c sistemi analizi gerektirir. Rezonans riskini en aza indirmek ve g¼c sistemi analizini basitleştirmek i¼in ortak veri yolu g¼c fakt¼r¼ d¼zeltmesi ¼nerilir (Rahideh vd., 2010).

## **2.11 Verimlilik**

Tam y¼k motor verimliliği yaklaşık %85 ile %97 arasında değişir, kabaca motor bozulmaları aşağıdaki gibidir:

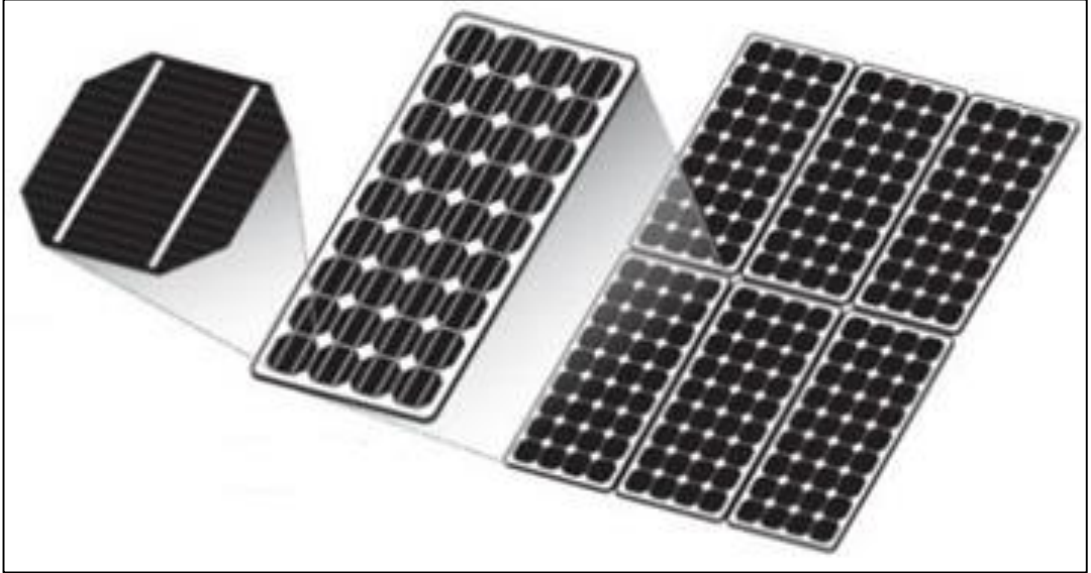
- S¼rt¼nme ve sargı, %5 - %15
- Demir veya ¼ekirdek kayıpları, %15 ila %25
- Stator kayıpları, %25 - %40
- Rotor kayıpları, %15 - %25
- Ka¼ak y¼k kayıpları, %10 - %20.

Bir¼ok ¼lkede, y¼ksek verimli elektrik motorlarının kullanımını teşvik etmek i¼in yasalar hazırlanmış ve y¼r¼rl¼đe konmuştur. Mevcut ve gelecekteki mevzuat, tanımlanmış cihazlarda birinci sınıf verimli end¼ksiyon tipi motorların kullanılmasını gerektirmektedir.

### 3. FOTOVOLTAİK SİSTEM FİZİĞİ

#### 3.1 Arkaplan

Fotovoltaik (PV) teknolojisi, güneş ışığını doğrudan elektriğe dönüştürmektir. Fotovoltaik kelimesi iki kelimenin birleşimidir. "Fotoğraf" kelimesi ışık ve "voltaik" elektrik anlamına gelir. Bir fotovoltaik (PV) hücre, güneş pili olarak da bilinir. Üzerine ışık düştüğünde elektrik üreten yarı iletken bir cihazdır. Fotovoltaik etki 1839'da Fransız bilim adamı Edmund Becquerel tarafından bulunmasına rağmen, ışık ve katı hal fiziği kuantum teorisinin gelişmesine kadar tam olarak anlaşılabilir değildi. Fotovoltaik sistemler, fotovoltaik hücreler ile tasarlanmıştır. Tipik bir fotovoltaik hücre, yüksek güç uygulaması için yaklaşık 0,5 volt dc'de 3 watt'tan az ürettiğinden, hücreler modüller halinde yapılandırılır ve modüller diziler olarak bağlanır. Modüller, birkaç watt ile 300 watt'ın üzerinde değişen en yüksek çıkış gücüne sahip olabilir. Çoğunlukla Fotovoltaik dizi çıkış gücü, megawatt dizisi mevcut olmasına rağmen, 100 watt ila kilo watt arasındadır (Khatri, 2016). Bu hücre, modül ve dizi yapıları Şekil 3.1'de gösterilmektedir.

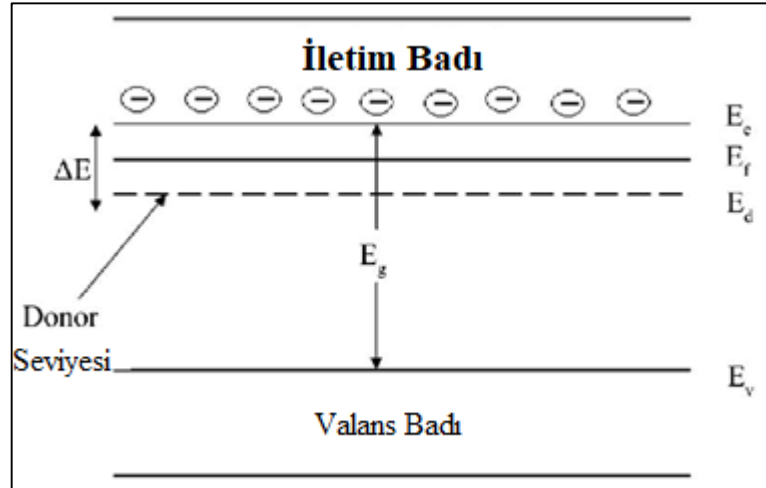


Şekil 3.1 PV pili, Modülü ve Dizilimi (Afrouzi vd., 2013)

## 3.2 Fotovoltaik Etki

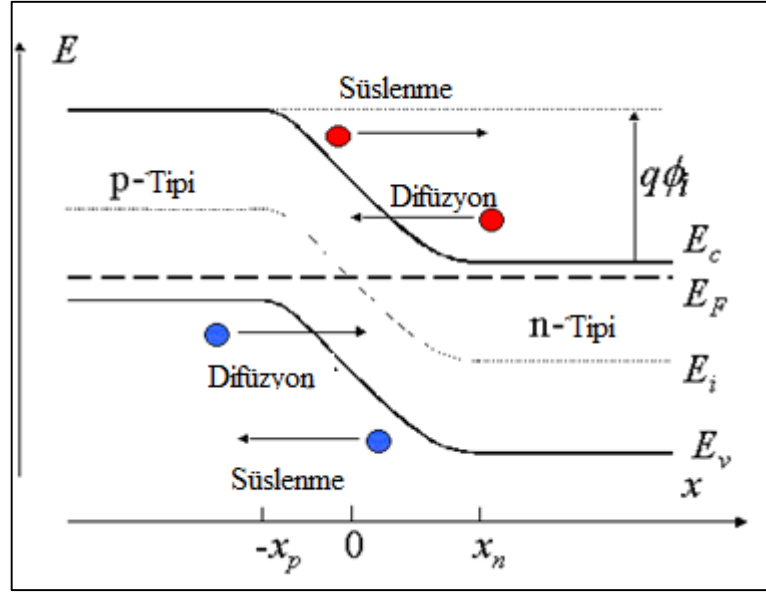
### 3.2.1 Foton Emilimi

Fotovoltaik enerji dönüşümünde, güneş enerjisini elektriğe dönüştürmeye çalışıyoruz. Bu, p-n bağlantı esasına göre çalışır. Silikon (Si) gibi bir yarı iletken malzeme, 3. veya 5. grup safsızlıklar (Ph, Br) ile katkılı ise, elektron boşluğu dengesi aşağıdaki gibi değişir: fosforlu safsızlık (Fazla Delikler) ile katkılı ve bor safsızlığı ile katkılı (Fazla Elektronlar) N-tipi. Fermi seviyesi genellikle böyle bir malzemenin hareketlerini gösterir, elektronlar iletim bandında iletilirken, boşluklar valans bandında gerçekleşir (Algora ve Rey-Stolle, 2016). Bu, Şekil 3.2'de gösterilmiştir. P tipi yarı iletken, Fermi seviyesi değerlik bandına daha yakındır, n-tipi malzemede ise Fermi seviyesi iletim bandına daha yakındır (Baghdadi vd., 2015; Chung vd., 2015).



Şekil 3.2 Yarıiletken için Enerji bandı grafiği (Richa, 2012)

Bir p-tipi yarı iletken, n-tipi bir yarı iletken ile birleştirilirse, Şekil 3.3'te görüldüğü gibi bir p-n bağlantı malzemesi oluşur. Her ikisinde de yaşanan zıt varyasyon nedeniyle, Fermi seviyesi ortada eşit ve dengeli hale gelir.



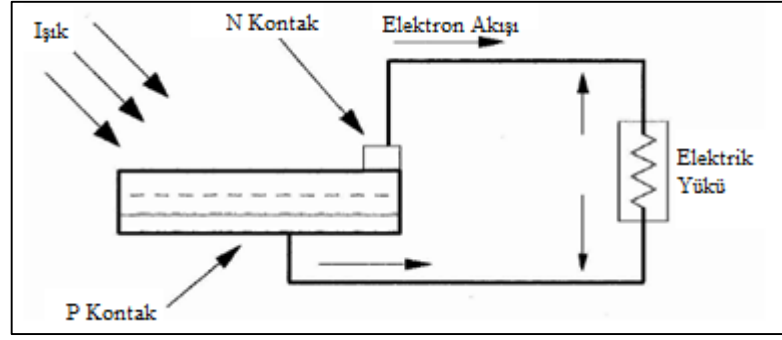
Şekil 3.3 p-n bağlantısı bandı grafiği (Van Zeghbroeck, 2004)

Bu fenomen nedeniyle elektronlar bant tepesine çıkmakta zorlanırlar ve delikler banttan aşağı inmeyi zor bulurlar.

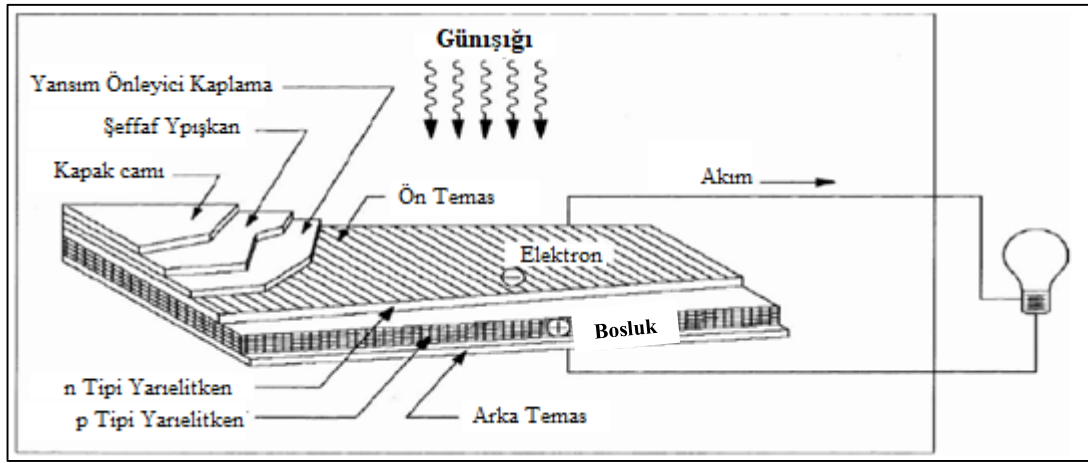
### 3.2.2 PV Pili

Fotovoltaik bir hücrede, ışık oluştuğunda ve bu ışık enerjisi bant aralığı enerjisinden (Fermi seviyesi) büyükse; elektronlar bu enerjiyi emecek ve konumlarından hareket edecek, böylece onu serbest bırakacak ve yerinde boşluklar oluşacaktır. Boşluklar yokuş yukarı giderken serbest hareket eden elektronlar yokuş aşağı akacaktır. Bu, n- tarafında büyük bir elektron konsantrasyonunun ve p-tarafında büyük bir boşluk konsantrasyonunun bir sonucu olacaktır (Lazaroiu vd., 2015; Kaplani, 2016).

Bu yükler çıkarılabilir ve Şekil 3.4'de gösterildiği gibi bağlanarak sisteme akım akışı sağlanabilir. Ayrıca, akım toplama gümüş ağ, yansıma önleyici kaplama ve kapak camı koruması gibi performans artırıcı özelliklere sahip temel PV hücresi yapısı Şekil 3.5'te gösterilmektedir.



Şekil 3.4 PV etkisi foton enerjisini p-n bağlantısı üzerinden gerilime (voltaj) dönüştürür (Lazaroiu vd., 2015)



Şekil 3.5 Performans artırıcı özellikleriyle PV hücresinin inşası (Olubukunmi, 2011).

### 3.3 Fotovoltaik Model

Komple Fotovoltaik sistem iki unsurdan oluşur. Biri güneş pillerini içeren bir modül, diğeri ise “Balance-of System” (BoS). BoS, esas olarak dönüştürücü, invertör, kablolama, destek yapıları, elektrik depolama ve güneş izleyici gibi elektronik bileşenlerden oluşur.

Yoğunlaştırıcı sistem, dağınık güneş ışığına odaklanamaz, bu nedenle bu sistem bulutlu koşullarda çalışmaz.

### 3.4 PV Pili Malzemelerinin Türleri

PV hücreleri yarı iletken malzemelerden yapılmıştır. Başlıca malzeme türleri, ışık soğurma ve enerji dönüşümünün etkinliği, üretim teknolojisi ve üretim maliyetine göre birbirinden farklı olan kristal ve ince filmlerdir (Park vd., 2016).

PV hücre türleri aşağıdaki gibi gösterilebilir:

#### a. Kristal Malzemeler

1. Tek kristal silikon
2. Polikristalin silikon
3. Galyum Arsenit (GaAs)

#### b. İnce Film Malzemeleri

1. Amorf Silikon (a-Si)
2. Kadmiyum Tellurid (CdTe)
3. Bakır İndiyum (CuInSe<sub>2</sub> veya CIS)

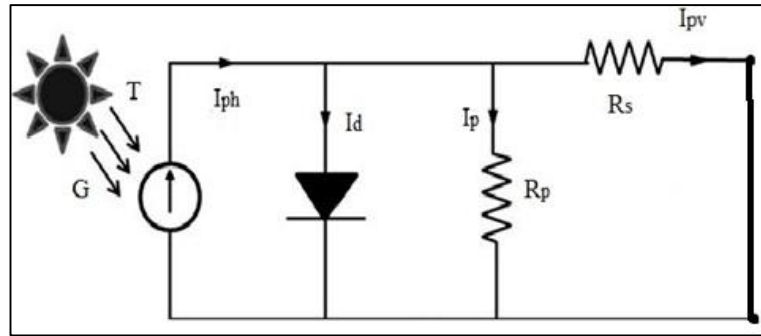
Kristalin silikon, son yirmi yıldır en yaygın olarak PV hücreleri için kullanılmıştır. Bununla birlikte, ince film teknolojisindeki son gelişmeler, birçok endüstri uzmanının, ince filmler PV hücrelerinin nihayetinde pazara hakim olacağına inanmasına neden olmuştur.

### 3.5 PV Pili Modellemesi

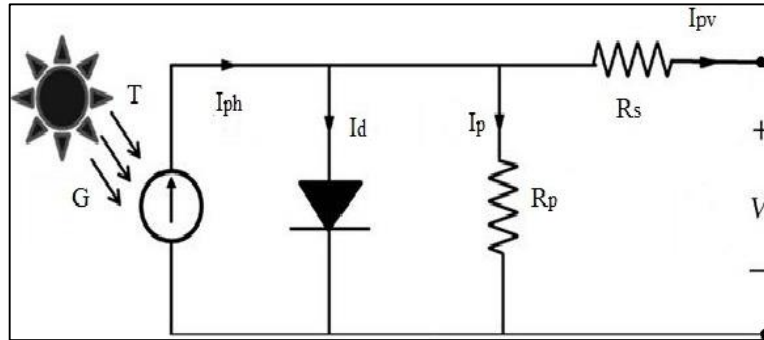
Eşdeğer devrelerin kullanılması, bir PV hücresinin özelliklerini modellemeyi mümkün kılar. Bir hücre için kullanılan bir PV modülünün modellenmesi için aynı modelleme tekniği de uygulanabilir.

Genellikle bir PV hücreni karakterize etmek için kullanılan iki temel parametre, kısa devre akımı ve açık devre voltajıdır.

Hücrenin terminalleri birbirine kısa devre yapıyorsa, foton tarafından üretilen akım ( $I_{ph}$ ), şekil 3.6'da gösterilen bir kısa devre akımı ( $I_{sc}$ ) olarak hücreden dışarı akacaktır. Bu nedenle,  $I_{ph} = I_{sc}$ , Şekil 3.7'de gösterilen PV hücresi (açık devre), foto üretilen akım dahili iç pn bağlantı diyotu tarafından şöntlenir (Vergura, 2016).



Şekil 3.6 Kısa devre iletiminin gösterimi (Rasool vd., 2016).

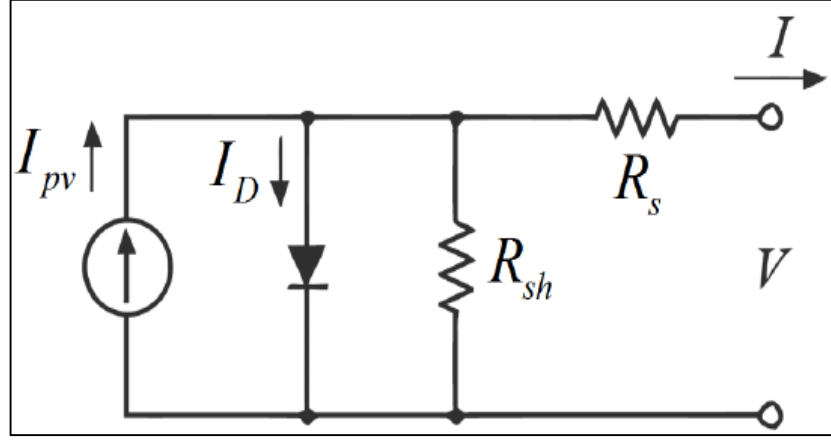


Şekil 3.7 Açık devre iletiminin gösterimi (Rasool vd., 2016).

PV'nin tasarımı, bir diyota paralel bir akım kaynağı olarak modellenmiştir. Herhangi bir akım üretmek için ışık olmadığında ve PV hücresi bir diyot gibi davranır. Kirchhoff'un mevcut yasasını Şekil 3.8'de gösterilen eşdeğer devreye uygulayarak PV hücresinin çıkış akımı  $I$  aşağıdaki gibidir,

$$I = I_{sc} - I_d \quad (3.1)$$

kısa devre akımıdır ve diyot aracılığıyla şant edilen akımdır.



Şekil 3.8 PV piline denk devre (Cubas vd., 2014).

Diyot akımı Shockley diyot denklemi (Shukla vd., 2015) ile verilir:

$$I_d = I_o (e^{qV_d / kT} - 1) \quad (3.2)$$

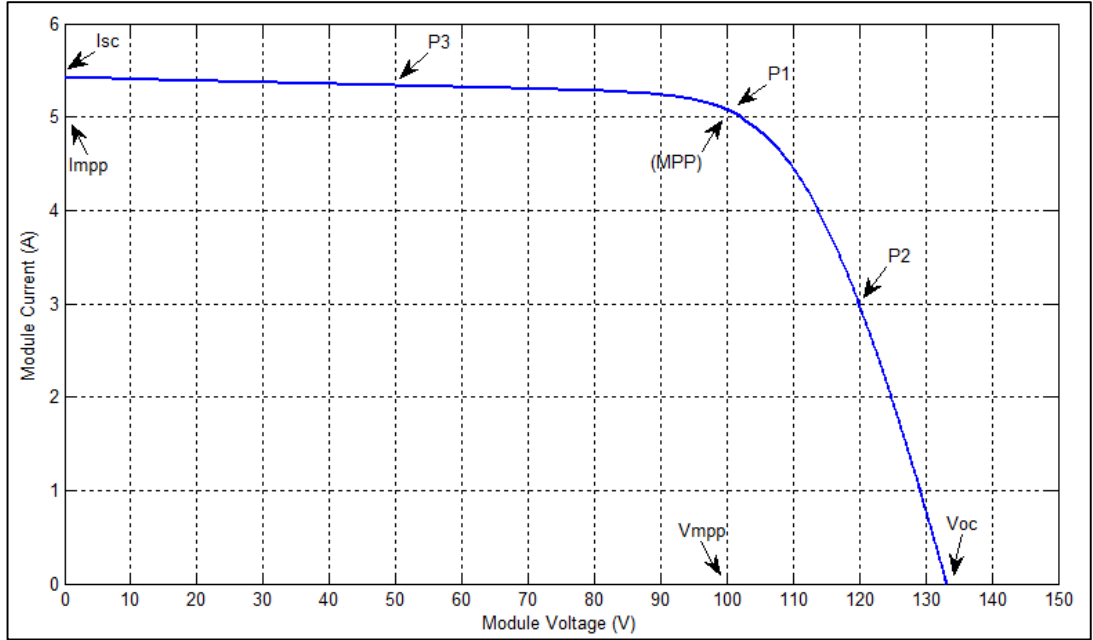
Burada, T,  $I_o$ , q,  $V_d$  ve K Kelvin K cinsinden birleşme sıcaklığı, diyotun ters doygunluk akımı, elektron yükü ( $1,602 \times 10^{-19}C$ ), diyot boyunca voltaj ve Boltzmann sabiti ( $1,381 \times 10^{-23}J/K$ ), sırasıyla. seri dirençtir Denklem (3.1) 'deki  $I_d$ 'nin denklem (3.2) ile değiştirilmesi, PV hücresinin Akım-Gerilim ilişkisini verir; bu denklem (3.3) 'te gösterilmiştir.

$$I = I_{sc} - I_o (e^{qV_d / kT} - 1) \quad (3.3)$$

## 4. MAKSİMUM GÜÇ NOKTASININ TAKİBİ

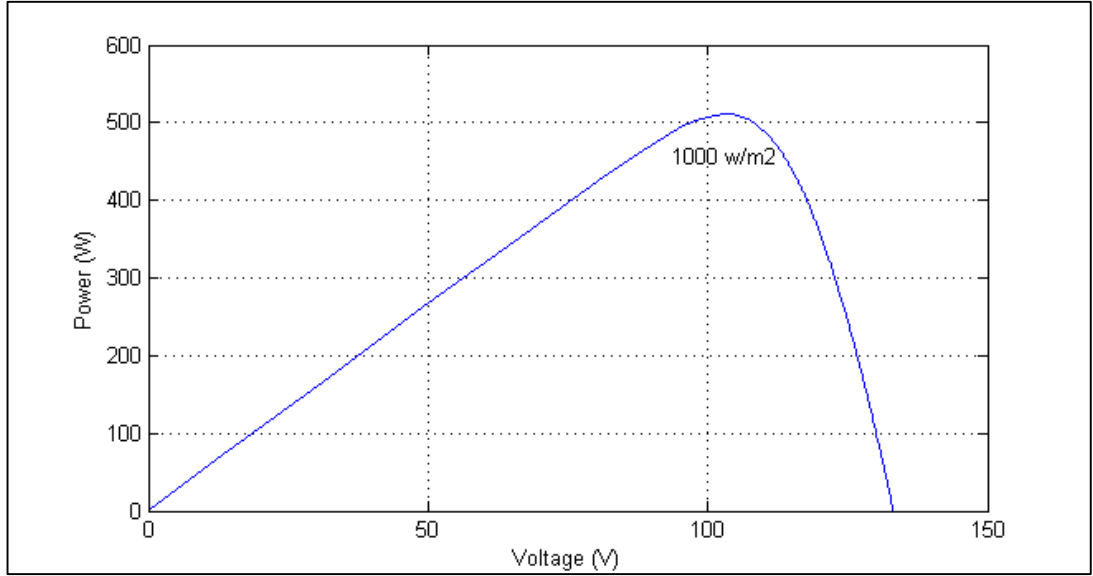
### 4.1 Arkaplan

Bir PV modülü, gücü I-V eğrisi üzerinde bulunan ve çalışma noktası olarak adlandırılan bir noktada üretebilir. Modülün maksimum verimlilikle çalıştığı ve maksimum çıkış gücünü ürettiği maksimum güç noktası (MPP) olarak adlandırılan I-V eğrisinin diz yakınında benzersiz bir noktası vardır (Subudhi ve Pradhan, 2012). Bu modeli simüle ettikten sonra  $1000 \text{ w} / \text{m}^2$  için I-V karakteristik eğrisi ve I-P karakteristik eğrisi elde ederiz. Bu durum Şekil 4.1 ve 4.2'de gösterilmektedir.



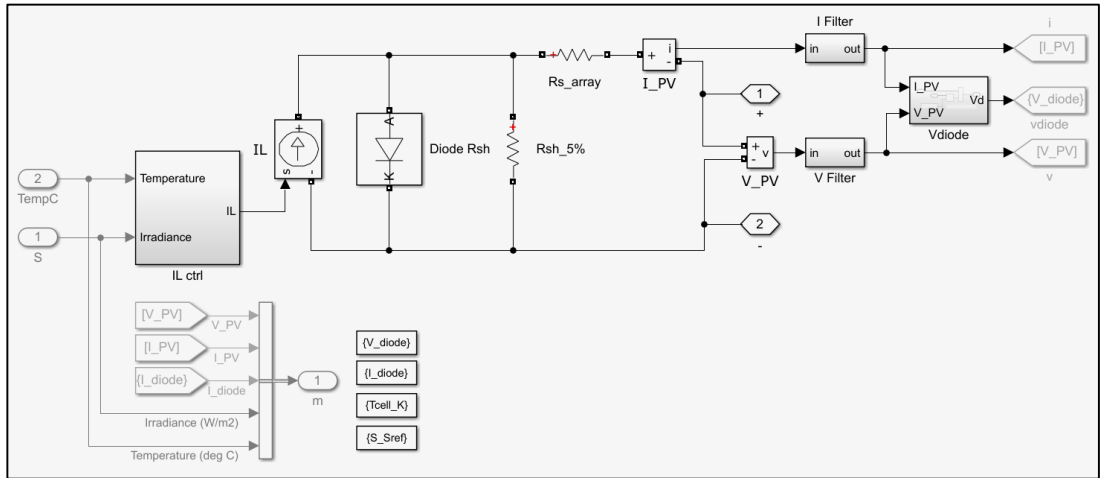
Şekil 4.1 MPP I-V eğrisi için gösterim

Bu Şekilde, nokta P2'deki güç ve akımın değerini gösterir, akımın değeri 3 A ve gerilim 120 V, dolayısıyla güç  $P = VI = 360 \text{ W}$  olur. Ayrıca P1'de görüldüğü gibi akım  $I_{mpp}$  değeri 5 A ve voltaj  $V_{mpp} = 100 \text{ V}$ , dolayısıyla güç  $P_{mpp} = V_{mpp}I_{mpp} = 500 \text{ W}$ . P3'te görüldüğü gibi akım  $I$  değeri 5,35 A ve voltaj  $V = 50 \text{ V}$ , dolayısıyla güç  $P = VI = 267,5 \text{ W}$ . Bunun için maksimum güç değeri P2 noktasında 500 W olur.



Şekil 4.2 I-P özellik eğrisi 1 000 w/m<sup>2</sup>.

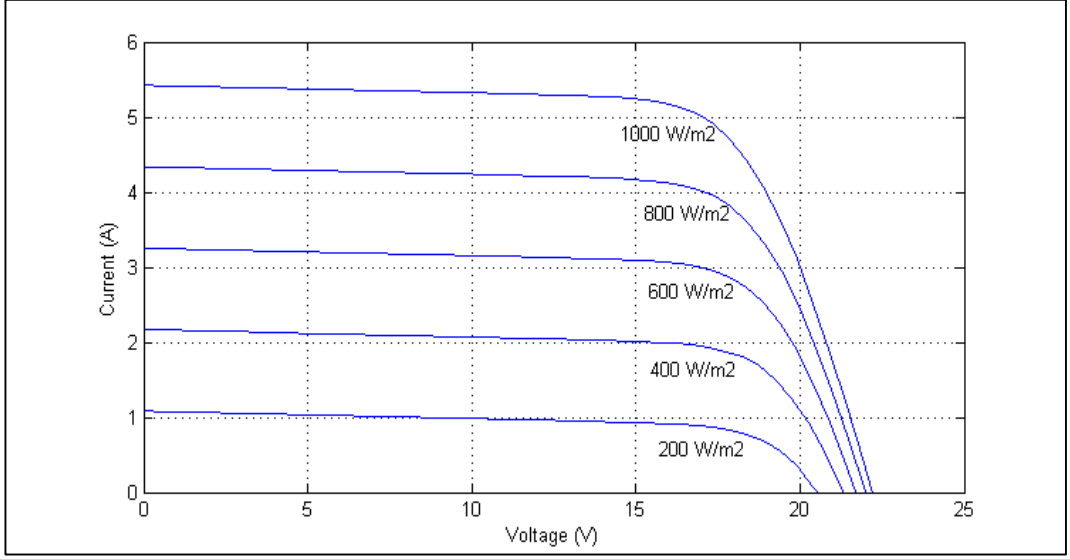
Yüze göre farklı ışına değerleri için [200, 400, 600, 800 ve 1 000 W / m<sup>2</sup>] analizi Şekil 4.3'te gösterilen MATLAB-SIMULINK modeli kullanılarak yapılmıştır.



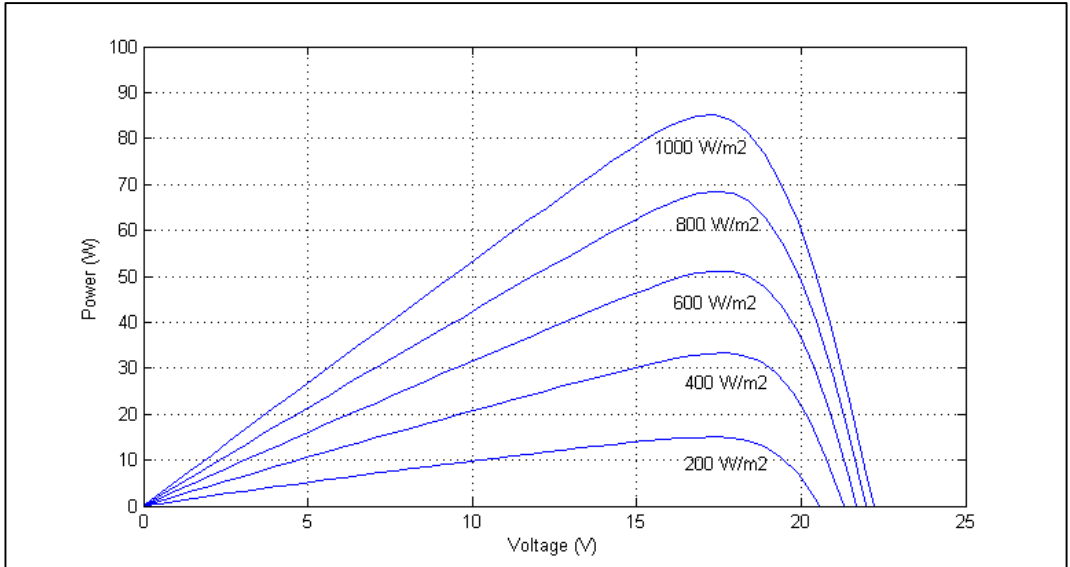
Şekil 4.3 PV modülleri

Bu şekil, farklı ışık şiddeti seviyeleri için I-V karakteristik eğrisi ve I-P karakteristik eğrisinin hesaplanmasını gösterir.

Simülasyondan sonra, farklı ışık şiddeti değerleri için I-V karakteristik eğrisi ve I-P karakteristik eğrisi. Bu sonuçlar Şekil 4.4 ve 4.5'te gösterilmektedir.



Şekil 4.4 Güneş ışınmasıyla I-V eğri varyasyonu



Şekil 4.5 Güneş ışınmasının farklı seviyelerinde fotovoltaik panelin güç çıktısı

Şekil 4.4'te, tipik bir PV panelinin çıkış akımının, güneş enerjisi ile orantılı olarak değiştiği görülmektedir. Öte yandan, I-V özellikleri panel yüzey sıcaklığındaki değişikliklere duyarlıdır. Sabit güneş ışınmasında panelden çıkarılabilen maksimum güç, panel sıcaklığı düştükçe önemli ölçüde artar.

PV panellerinden elde edilen güneş enerjisinin, güneş enerjisinin bulunmadığı zamanlarda bu enerjiyi kullanabilmesi için depolanması gerekmektedir. Güneş enerjisinin depolanması için şarj edilebilir piller kullanılmaktadır. Bu akülerin

olabildiğince verimli olması ve düşük kaçak akıma sahip olması gerekir. Pillerin kapasitesi bir günde panelden çıkarılabilecek maksimum güce göre belirlenmektedir.

Simülasyonda hücre sıcaklığı 25°C olarak kabul edilir. Burada çıkış voltajı, karşılık gelen ışınım değişiklikleriyle (200, 400, 600, 800, 1000 w / m<sup>2</sup>) maksimum gücü elde etmek için maksimum çıkış voltajına (17,5V) yakın dalgalanacaktır. Eğrinin alma noktası maksimum güç noktalarını gösterir. PV sistemi, ani ışınlama düşüşü veya yükselişindeki değişikliklere en duyarlı olanıdır. Aşırı veya düşük gerilim durumunda sistem tamamen çökebilir.

PV modülünün Maksimum çıkış güç noktasını izlemek için P&O algoritması kullanılmıştır. Yükseltici dönüştürücü kullanılarak voltaj, PV çıkış voltajından iki kat daha fazla yükseltilmiştir. Bu, farklı güneş ışınımı için seçilen PV modülü için maksimum çıkış voltajı aralığıdır.

Burada, tipik 60W PV modüllerinden oluşan PV paneli. Ana özellikleri Tablo 4.1'de gösterilmektedir.

Tablo 4.1 Işınımın farklı seviyelerinde PV panelinin elektriksel özellikleri.

Sembol	Ölçüm	Değer
T <sub>oc</sub>	V <sub>oc</sub> için sıcaklık katsayısı	-(70±10) mV/°C
P <sub>MPP</sub>	Maksimum Güç Noktası	60 W
T <sub>sc</sub>	I <sub>sc</sub> için sıcaklık katsayısı	(0,075±0,010)%/°C
V <sub>MPP</sub>	P <sub>MPP</sub> Voltajı	17,2 V
V <sub>ov</sub>	Açık Devre Voltajı	22,2 V
I <sub>MPP</sub>	IMPP Akım	4,95 A
I <sub>sc</sub>	Kısa devre akımı	5,45 A

Işık ışınlanması ve sıcaklık eğrilerinin işlevleri olarak fotovoltaiik sistemin güç çıkışı özellikleri doğrusal değildir ve sıcaklık ve güneş ışınımının etkisinden etkilenir. Bu nedenle, çok düşük verim veren PV modülünden dolayı PV güneş sistemindeki verimlilik çok düşüktür. Güneş pilinde bu sorunu çözmek için maksimum güç noktası izleme (MPPT) kullanılır. Bu teknik, güneş PV sisteminden mümkün olan maksimum gücü elde etmek için kullanılır. Diğer bir deyişle MPPT, maksimum gücü elde etmek

için PV sisteminin empedansını batarya ile eşleştirmeye çalışan bir cihazdır. Aşağıda listelenebilecek birçok MPPT denetleyici yöntemi vardır:

- Perturbe etme ve gözlem yöntemi.
- Artımlı İletkenlik.
- Parazitik Kapasitans yöntemi.
- Sabit Voltaj Yöntemi.
- Sabit Akım yöntemi.

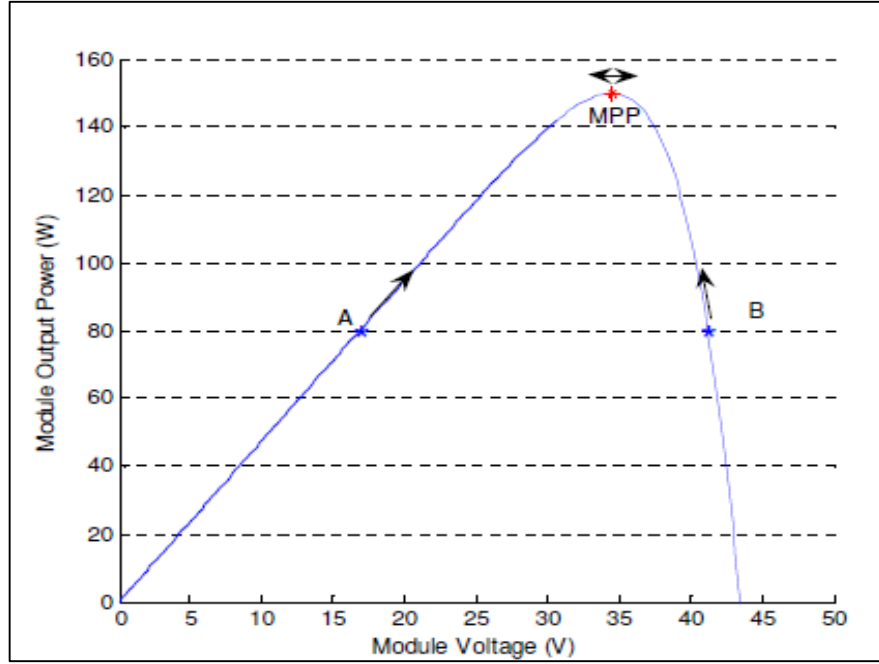
#### **4.2 MPPT Teknikleri**

Literatürde önerilen birkaç MPPT tekniği vardır. Bunlardan bazıları, Artımlı iletkenlik, Kesirli kısa devre akımı, Dalgalanma korelasyon kontrolü, Akım taraması, DC link kapasitör düşüş kontrolü, Yük akımı veya yük voltajı maksimizasyonu,  $dP / dV$  veya  $dP / dI$  Geri Besleme Kontrolü, Bulanık Mantık Kontrolü, Sınır Ağı Kontrolü.

Literatürde birçok MPPT tekniği önerilmiştir (Singh vd., 2015). Bu teknikler karmaşıklık, gereken sensörler, yakınsama hızı, maliyet, etkinlik aralığı, uygulama donanımı, popülerlik ve diğer açılardan farklılık gösterir (Singh vd., 2015; Rezk ve Eltamaly, 2015).

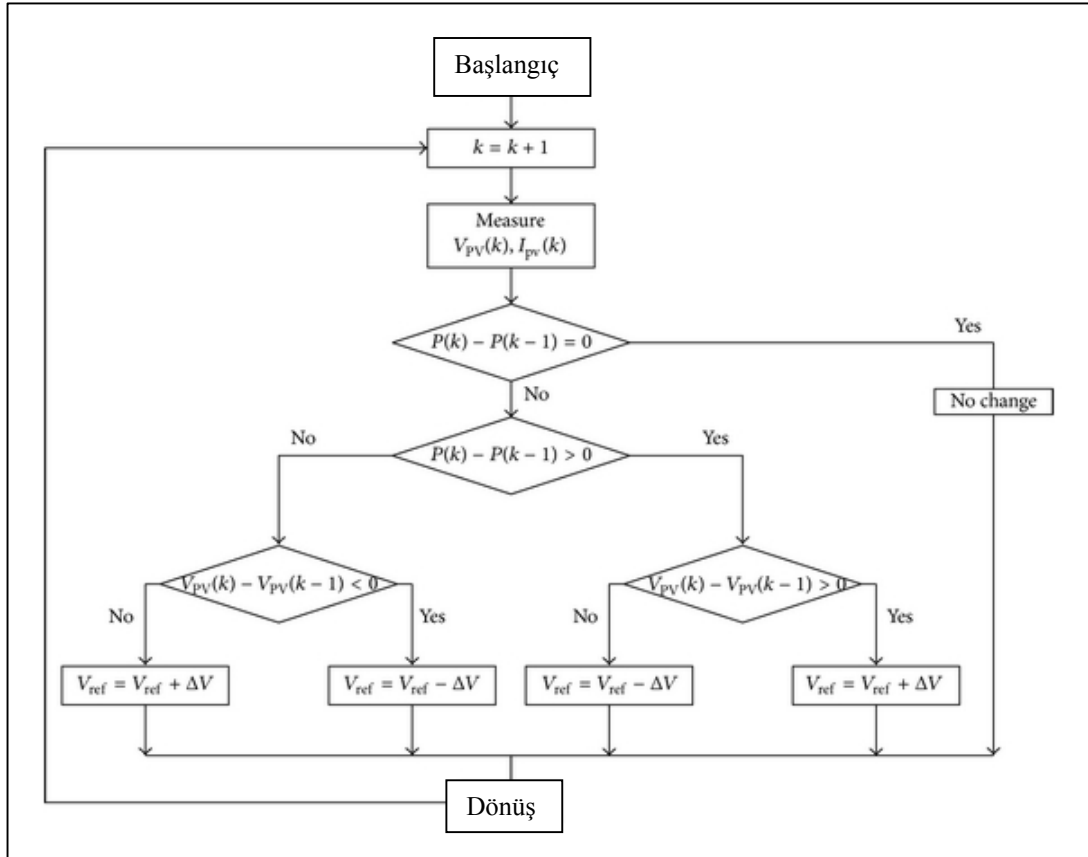
#### **4.3 Pertürbe Et ve Gözle Algoritması**

Perturbe et ve Gözle (P&O) algoritması yaygın olarak kabul görmektedir ve genellikle algoritmadaki basitliği ve uygulama kolaylığı nedeniyle pratikte kullanılmaktadır. Tepe tırmanma yöntemi olarak da bilinir. Şekil 4.6, PV modülünün MPP'den (nokta A veya B) uzaktaki bir noktada çalıştığını varsayarak, sabit parlaklıkta ve sabit modül sıcaklığında bir PV modülünün çıkış gücü-voltaj eğrisini (P-V eğrisi) gösterir (Al-Mohaya vd., 2013).



Şekil 4.6 Güç/Voltaj Grafiği

Şekil 4.7 bu algoritmanın akış şemasını göstermektedir.



Şekil 4.7 Pertürbe Et ve Gözle Algoritmasının Akış Çizelgesi (Hahm vd., 2015).

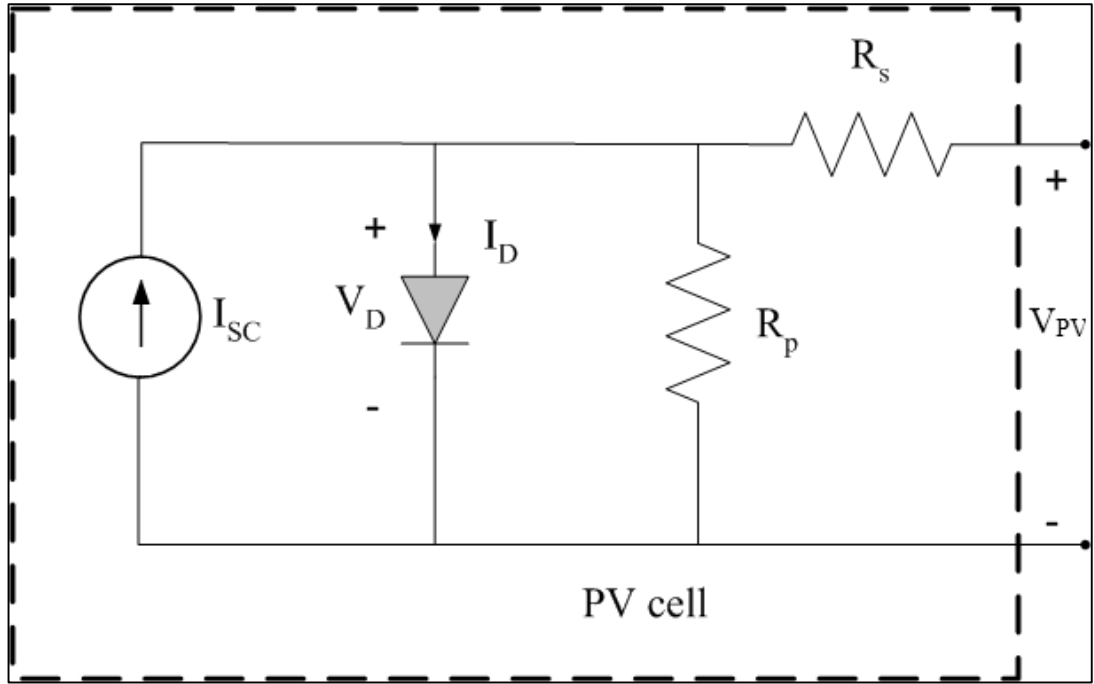
## 5. SİMÜLASYON SONUÇLARI

### 5.1 Arkaplan

Bu simülasyon çalışmasında, PI denetleyicisi kullanılarak PV ile çalışan sabit mıknatıslı senkron motorun hız kontrolü yapılmaktadır. Önerilen model Matlab ortamında geliştirilmiş ve çeşitli koşullar altında PMSM'nin hız kontrolü analiz edilmiştir.

### 5.2 Fotovoltaik Sistemin Simulink Modeli

PV'nin devre modeli Şekil 5.1'de gösterilmektedir.



Şekil 5.1 PV'nin Devre Modeli

Bu devre için Kirchhoff'un akım yasası uygulanırsa kısa devre akımı şu şekilde yazılabilir:

$$I_{sc} - I_D - \frac{V_D}{R_p} - I = 0 \quad (6.1)$$

burada  $R_p$  şönt direncidir ve  $I_{pv}$ , fotovoltaik akımdır. Diyot için akımın karakteristiği:

$$I_D = I_o (e^{V_D/V_T} - 1) \quad (6.2)$$

benzer şekilde Kirchhoff'un Gerilim Yasasını da uygulayabiliriz. Daha sonra PV pil voltajı şu şekilde yazılabilir:

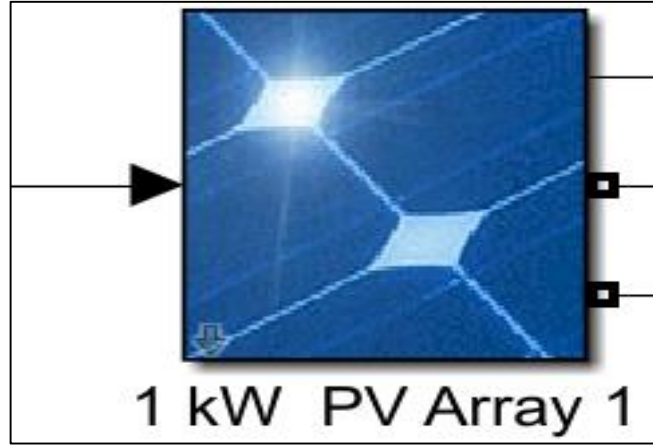
$$V_{PVcell} = V_D - R_s I \quad (6.3)$$

burada  $R_s$ , seri dirençtir. Dolayısıyla, PV voltajı:

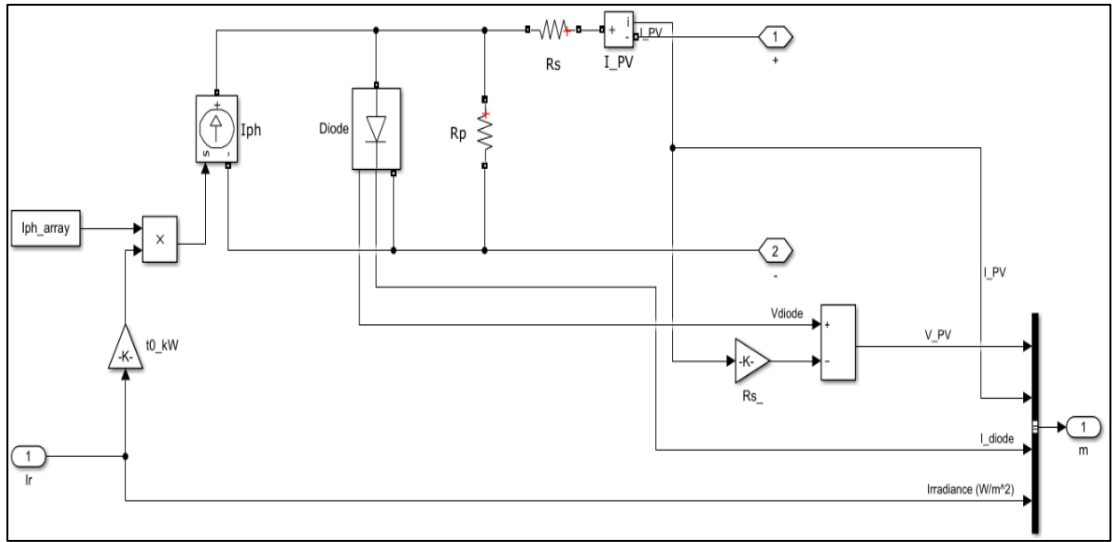
$$V_{PV} = N_s V_{PVcell} \quad (6.4)$$

burada  $N_s$  seri bağlı pil sayısıdır.

PV pil modeline dayalı PV modülünün Simulink modeli Şekil 5.2'de gösterilmektedir.



(a)



(b)

Şekil 5.2 a) PV modeli, b) Simulink'te PV'nin alt sistem modeli

Bu modelde kısa devre akımı 5,45 (A) ve açık devre gerilimi 22,2(V) olarak seçilmiştir.

İleri polarlama kullanırsak, baypas diyot voltajı

$$V_{Dbypass} = V_t \ln\left(\frac{I_{bypass}}{I_o} + 1\right) \quad (6.5)$$

Diyot karakteristiği

$$I_d = I_{sat} [\exp(V_d/V_T) - 1]$$

burada:

$I_d$  = diyot akımı (A)

$V_d$  = diyot voltajı (V)

$I_{sat}$  = diyot doygunluk akımı (A)

$V_T$  = sıcaklık voltajı =  $k * T / q * Q_d * N_{cell} * N_{ser}$

$T$  = pil sıcaklığı (K),

$k$  = Boltzman sabiti =  $1,3806e-23 \text{ J.K}^{-1}$

$q$  = elektron yükü =  $1,6022e-19 \text{ C}$

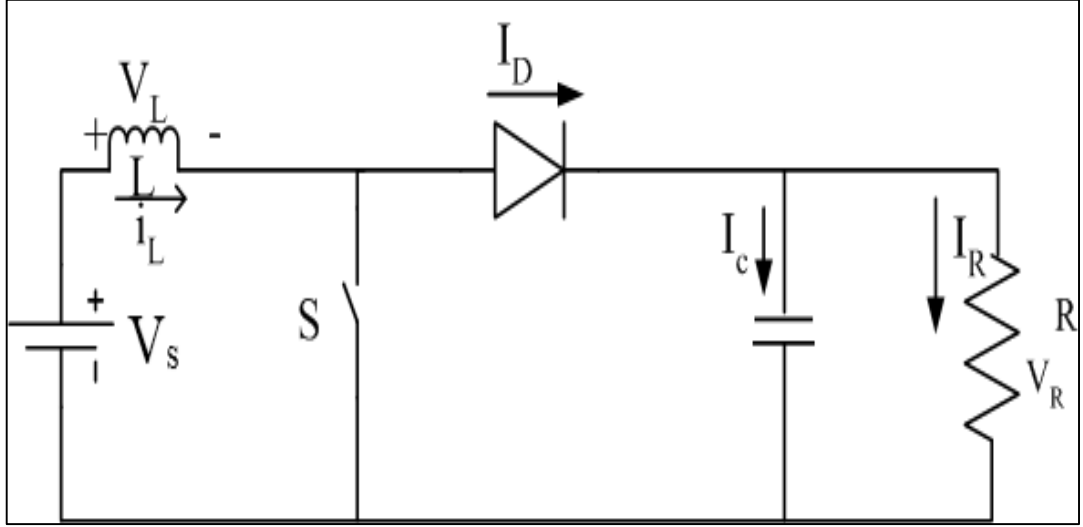
$Q_d$  = diyot kalite faktörü

$N_{cell}$  = modül başına seri bağlı hücre sayısı

$N_{ser}$  = dizi başına seri bağlı modül sayısı

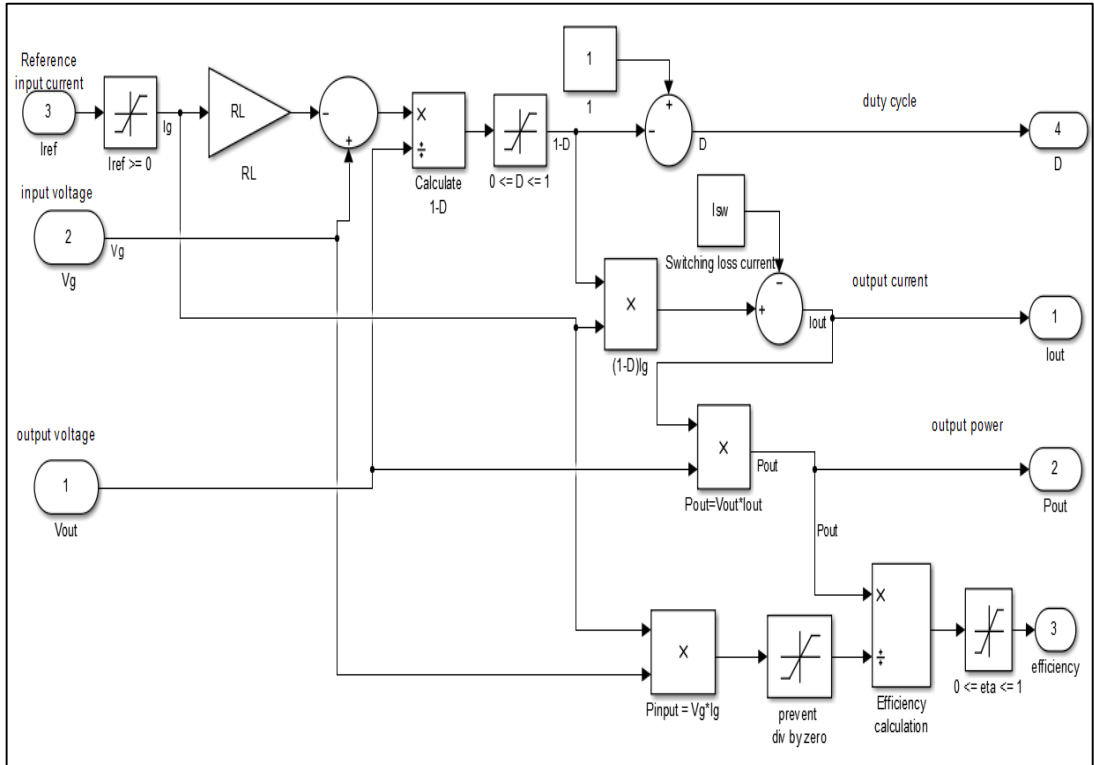
### **5.3 DC-DC Yükseltme Dönüştürücü**

DC-DC yükseltme dönüştürücü, PV voltajını artırır. Puls üreticinin görev döngüsünün değişmesine göre voltajı yükseltir. Bu tezde, Şekil 5.3'te gösterilen DC-DC yükseltici dönüştürücü kullanılmıştır.



Şekil 5.3 DC-DC yükseltme dönüştürücü

Ayrıca DC-DC güçlendirme dönüştürücüsünün Simulink modeli Şekil 5.4’te gösterilmektedir.



Şekil 5.4 DC-DC yükseltme dönüştürücüsünün Matlab Simulink modeli

Güçlendirilmiş DC-DC yükseltme dönüştürücü, panelin maksimum güç noktasında çalışmasına izin verir, böylece güneş girişinden elektrik çıkışına maksimum güç aktarımı sağlar. Yükseltme dönüştürücü için aşağıdaki denklemler geçerlidir:

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{1-D} \quad (6.6)$$

$$V_o = V_{in} * \frac{1}{(1-D)} \quad (6.7)$$

$$D = \frac{V_o - V_{in}}{V_o} \quad (6.8)$$

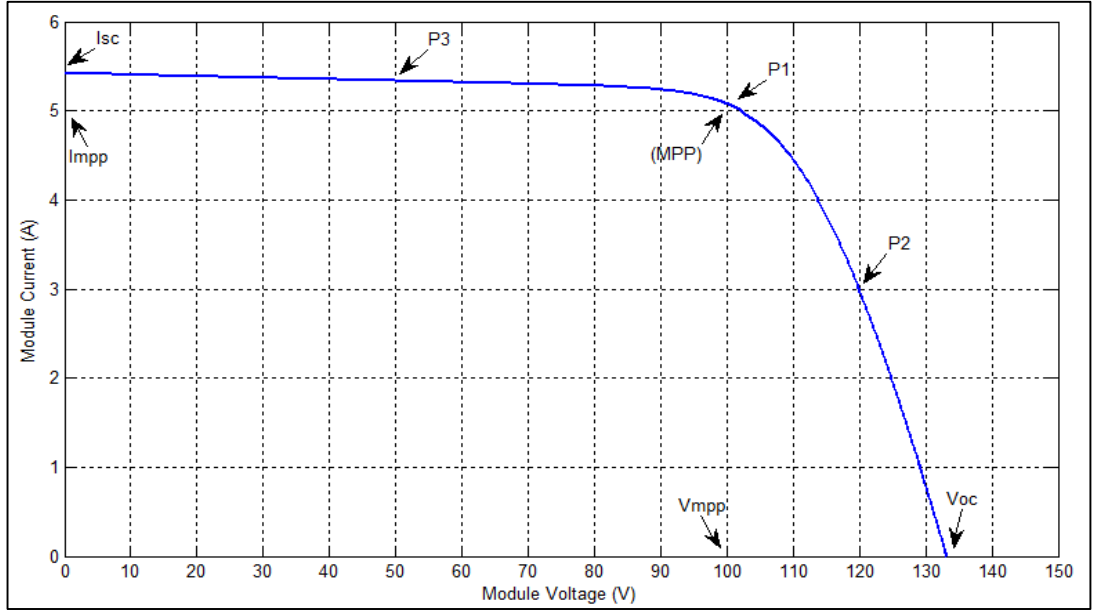
$$I_o = I_{in} * (1-D) \quad (6.9)$$

$$P = V_o * I_o \quad (6.10)$$

Burada  $D, I_{in}, I_o, V_{in}, V_o$  DC-DC yükseltme dönüştürücü için sırasıyla görev döngüsü, giriş akımı, çıkış akımı, giriş voltajı, çıkış voltajı ve çıkış gücüdür. DC-DC yükseltme dönüştürücü için, puls genişliği modülatörün (PWM) görev döngüsü artarsa çıkış voltajı artar. Giriş voltajını iki kat artırmak için, görev döngüsünün% 50'de sabitlenmesi gerekir.

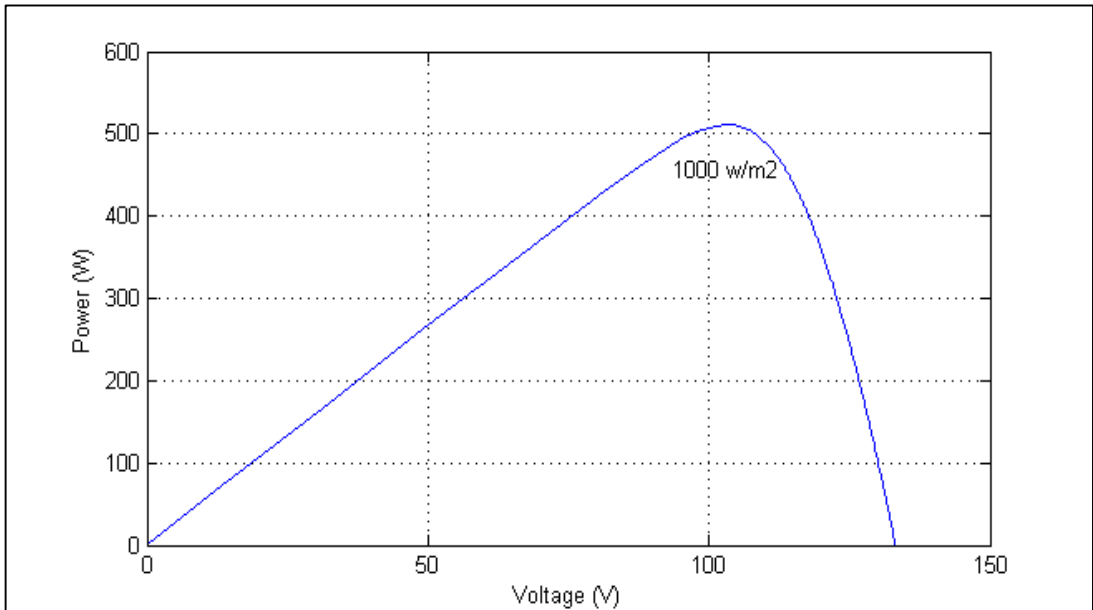
#### 5.4 Maksimum Güç Noktası İzleme

Bir PV modülü, gücü I-V eğrisi üzerinde bulunan ve çalışma noktası olarak adlandırılan bir noktada üretebilir. Modülün maksimum verimlilikle çalıştığı ve maksimum çıkış gücü ürettiği maksimum güç noktası (MPP) olarak adlandırılan, I-V eğrisinin diz yakınında benzersiz bir noktası vardır. Bu modeli simüle ettikten sonra 1 000 w/m<sup>2</sup> için I-V ve I-P karakteristik eğrilerini elde ederiz. Bu durum Şekil 5.5 ve 5.6'da gösterilmektedir. Bu durum, şekil 5.4'ün sonucudur.



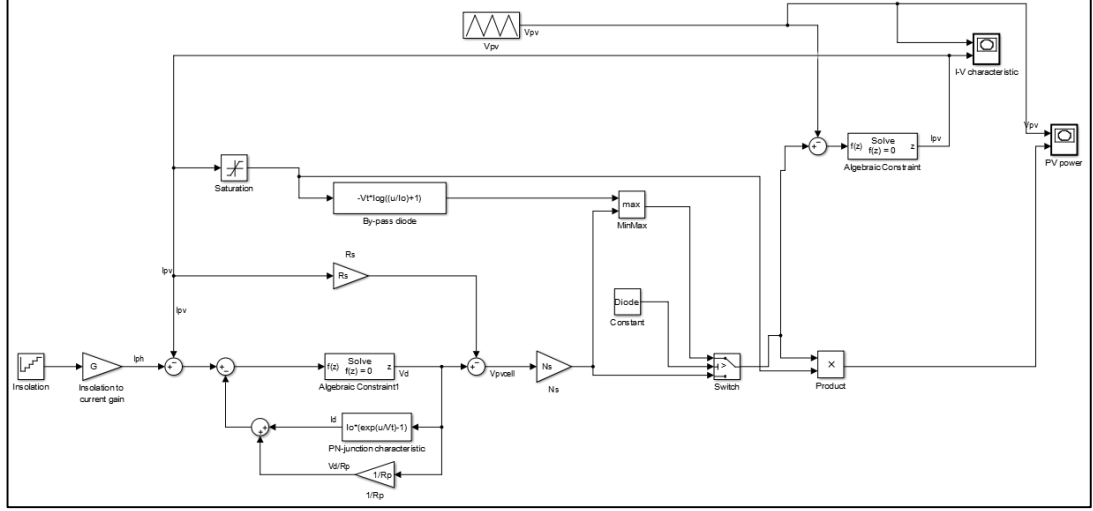
Şekil 5.5 MPP için I-V eğrisi gösterimi

Bu Şekilde 6 PV kullandık, dolayısıyla  $V_{oc}$   $6 * 22,2$  V olacaktır. Ayrıca  $I_{sc}$  5,5 A'dır. Noktalar,  $P_2$ 'deki güç ve akımın değerini gösterir, akımın değeri 3 A ve gerilim 120 V, dolayısıyla güç  $P = VI = 360$  W'dır. Ayrıca  $P_1$ 'de görüldüğü gibi akım  $I_{mpp}$  değeri 5 A ve voltaj  $V_{mpp} = 100$  V, dolayısıyla güç  $P_{mpp} = V_{mpp}I_{mpp} = 500$  W olur.  $P_3$ 'te görüldüğü gibi akım  $I$  değeri 5,35 A ve voltaj  $V = 50$  V, dolayısıyla güç  $P = VI = 267,5$  W olur. Bunun için maksimum güç değeri  $P_1$  noktasında 500 W olur.



Şekil 5.6 P-V özellikleri eğrisi, 1 000 w/m<sup>2</sup>.

Yüzeğe göre farklı ışınım değerleri için [200, 400, 600, 800 ve 1 000 W/m<sup>2</sup>] analiz Şekil 5.7'de gösterilen MATLAB-SIMULINK modeli kullanılarak yapılmıştır.



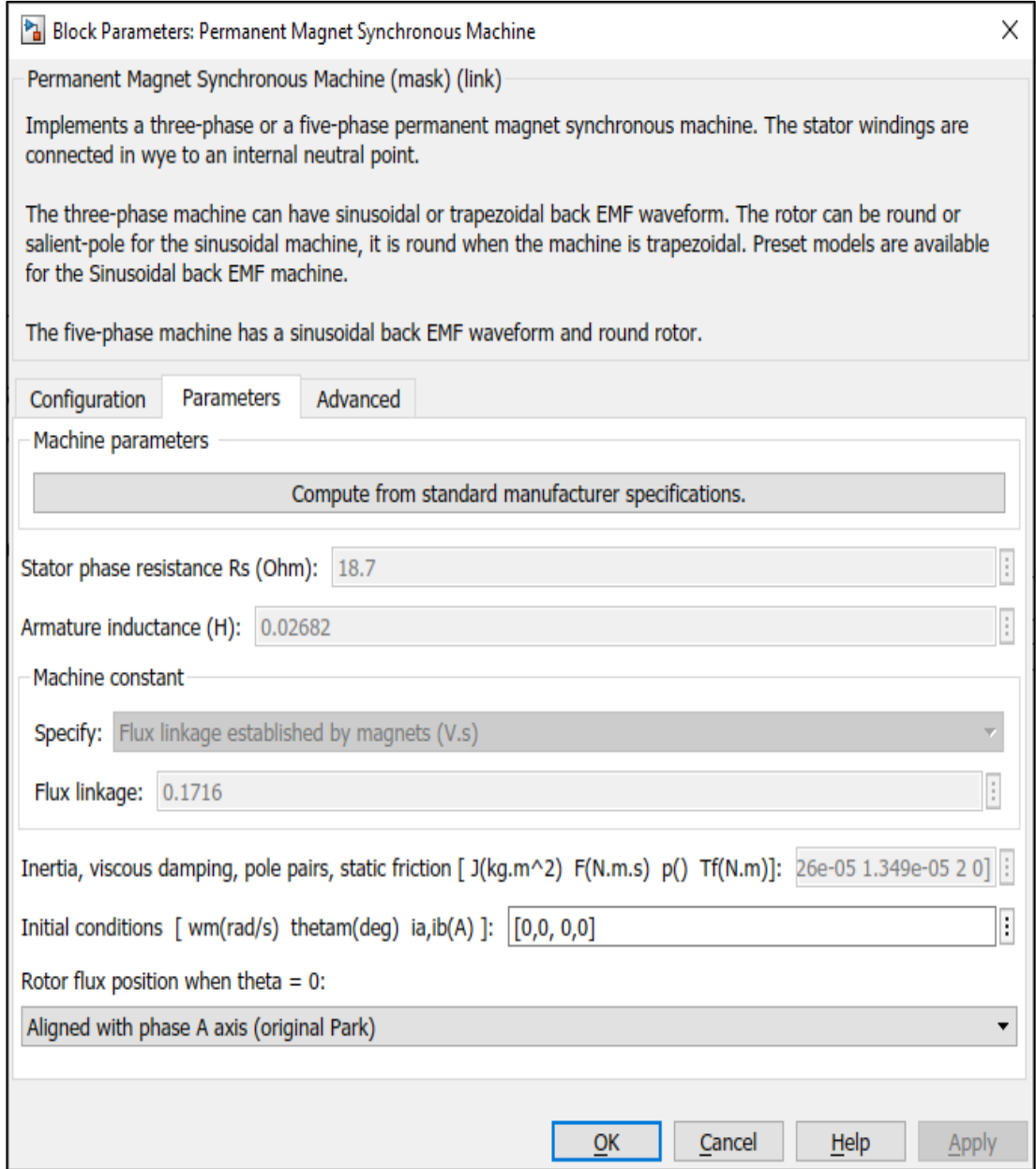
Şekil 5.7 PV modülleri

Bu şekil, farklı ışınım seviyeleri değerleri için I-V karakteristik eğrisi ve I-P karakteristik eğrisinin hesaplanmasını gösterir.

Simülasyondan sonra, farklı ışık şiddeti değerleri için I-V karakteristik eğrisi ve I-P karakteristik eğrisi verilmektedir.

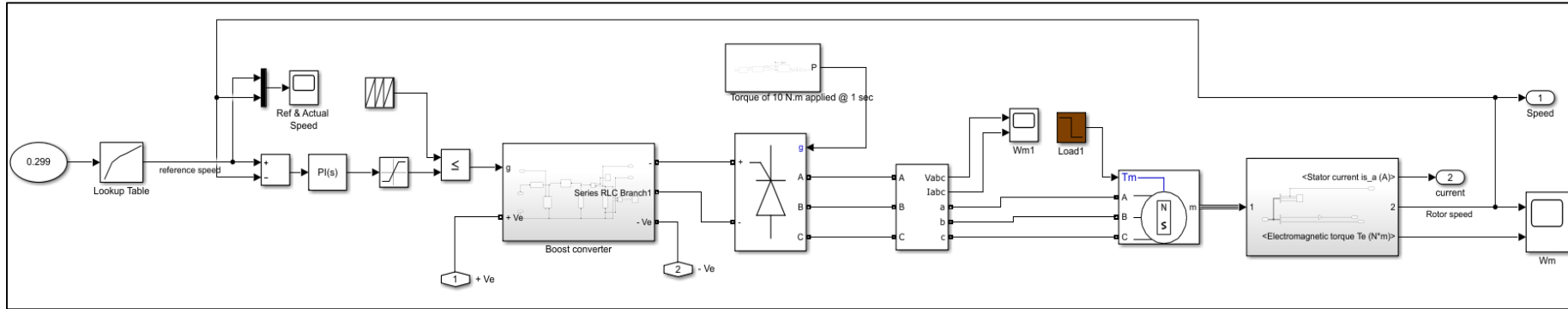
## 5.5 PMSM Detayları

PMSM parametreleri şekil 5.8'de verilmiştir.

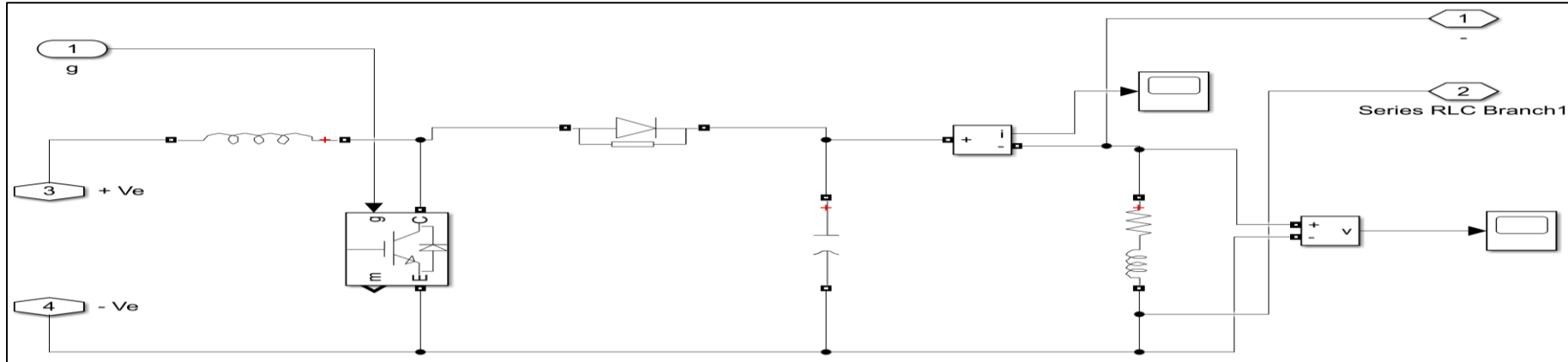


Şekil 5.8 PMSM Parametreleri

PMSM parametreleri Simulink'te simülasyon modeli geliştirmek için kullanılır ve Şekil 5.9'da PMSM'nin güç girdisi olarak PV kaynakları kullanılır.



(a)



(b)

Şekil 5.9 a) PMSM'nin simülasyon modeli, b) Boost Converter

## Simülasyon modeli

### PV modeli

PV parametreleri şekil 5.10'da verilmiştir.

Block Parameters: PV Array

PV array (mask) (link)

Implements a PV array built of strings of PV modules connected in parallel. Each string consists of modules connected in series.  
Allows modeling of a variety of preset PV modules available from NREL System Advisor Model (Jan. 2014) as well as user-defined PV module.

Input 1 = Sun irradiance, in W/m2, and input 2 = Cell temperature, in deg.C.

Parameters **Advanced**

Array data

Parallel strings 2

Series-connected modules per string 2

Module data

Module: LG Electronics LG300N1W-G3

Maximum Power (W) 302.72

Open circuit voltage Voc (V) 39.5

Voltage at maximum power point Vmp (V) 32

Temperature coefficient of Voc (%/deg.C) -0.3

Cells per module (Ncell) 60

Short-circuit current Isc (A) 10.05

Current at maximum power point Imp (A) 9.46

Temperature coefficient of Isc (%/deg.C) 0.03

Display I-V and P-V characteristics of ...

array @ 25 deg.C & specified irradiances

Irradiances (W/m2) [ 1000 500 100 ]

Plot

Model parameters

Light-generated current IL (A) 10.0926

Diode saturation current I0 (A) 3.3235e-11

Diode ideality factor 0.96984

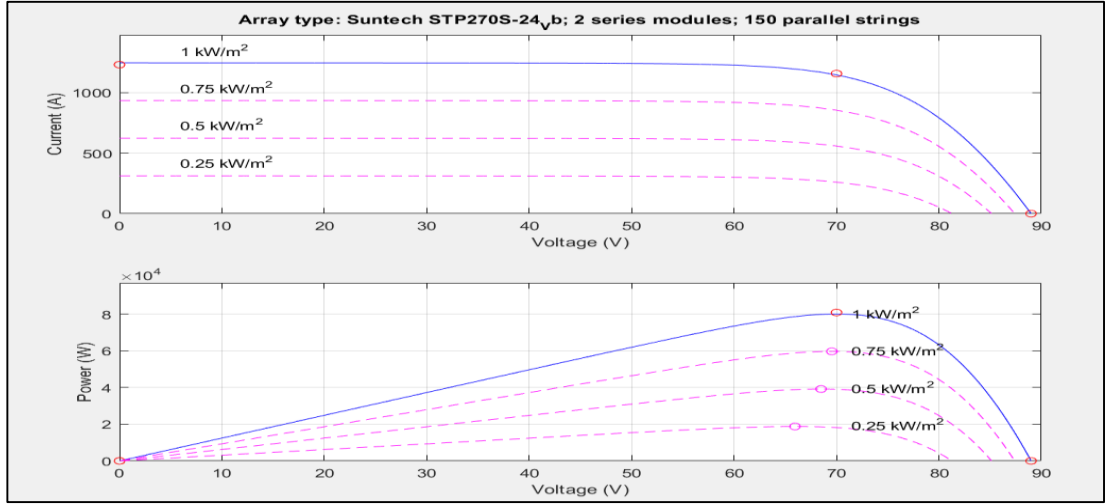
Shunt resistance Rsh (ohms) 212.8143

Series resistance Rs (ohms) 0.31448

OK Cancel Help Apply

Şekil 5.10 PV Parametreleri

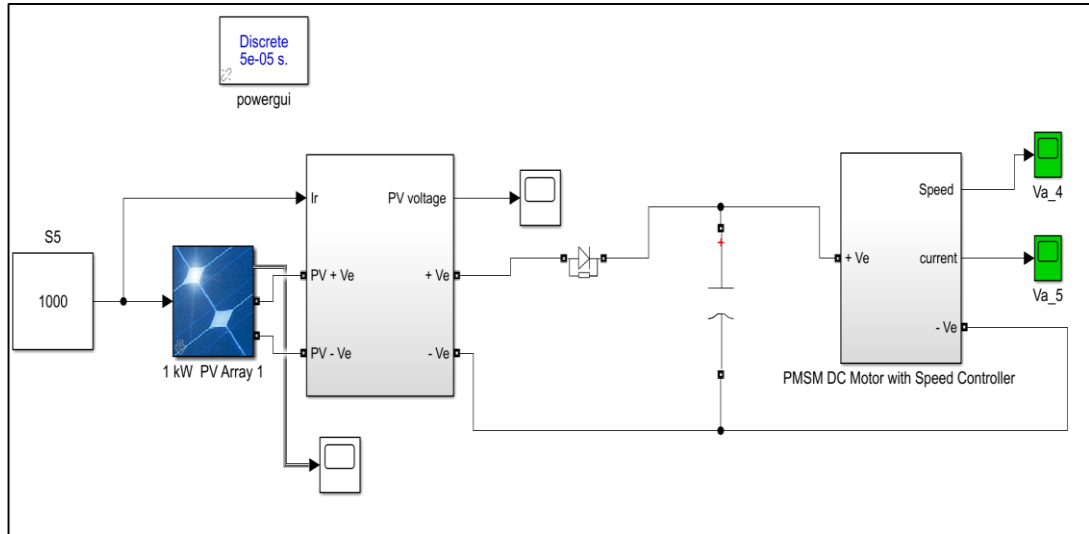
PV parametreleri Simulink'te simülasyon modeli geliştirmek için kullanılır ve Şekil 5.11'de çıkış DC gerilimini çıkış gerilimine yükseltmek için güçlendirme dönüştürücü tasarlanmıştır. PV modeli, çeşitli ışınım çalışma koşullarında analiz edilmiştir ve Gerilim-Akım ve Güç-Gerilim dalga biçimi gözlemlenmiş ve Şekil 5.11'de sunulmuştur.



Şekil 5.11 PV modül özellikleri

## 5.6 Simulasyon Sonuçları

Önerilen model, matlab ortamında geliştirilmiş ve PV sistemi ile güçlendirilmiş şekil 5.12'de gösterilmiştir.



Şekil 5.12 PMSM'nin hız kontrolünün önerilen simülasyon modeli

PI Denetleyici parametresi:

PI parametresi şekil 5.13'te gösterilmiştir.

Controller: PI Form: Parallel

Time domain:

Continuous-time  
 Discrete-time

Main PID Advanced Data Types State Attributes

Controller parameters

Source: internal [Compensator formula](#)

Proportional (P): 500

Integral (I): 0.01  $P + I \frac{1}{s}$

Select Tuning Method: Transfer Function Based (PID Tuner App) Tune...

Initial conditions

Source: internal

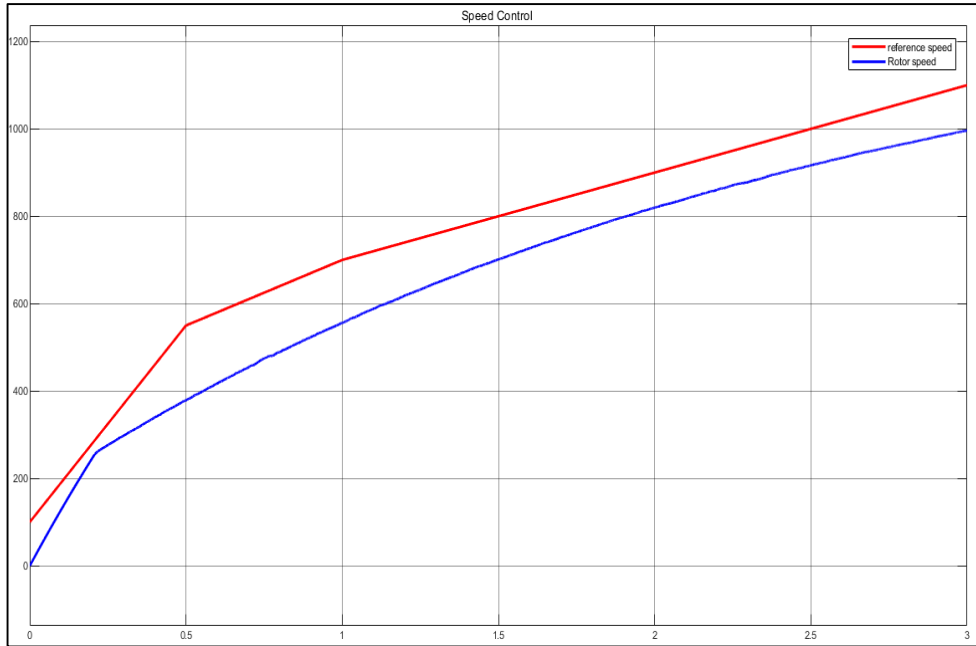
Integrator: 0

External reset: none

Ignore reset when linearizing  
 Enable zero-crossing detection

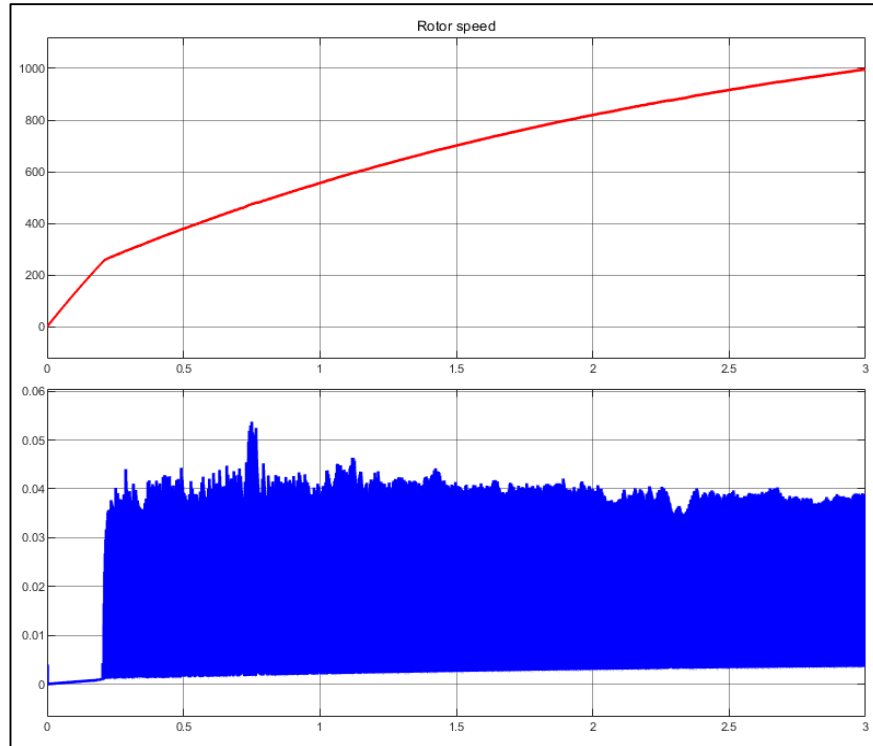
Şekil 5.13 PMSM'nin hız kontrolü için PI parametresi

Önerilen model Şekil 5.14'te gösterildiği gibi matlab ortamında geliştirilmiş ve PV sistemi güç kaynağı olarak kullanılmıştır. Önerilen sisteme referans hız uygulanmış ve Şekil 5.15'teki PMSM hızı gözlemlenmiştir. Önerilen PI kontrolörü, referans hıza göre PMSM'nin hızını etkin bir şekilde kontrol eder.



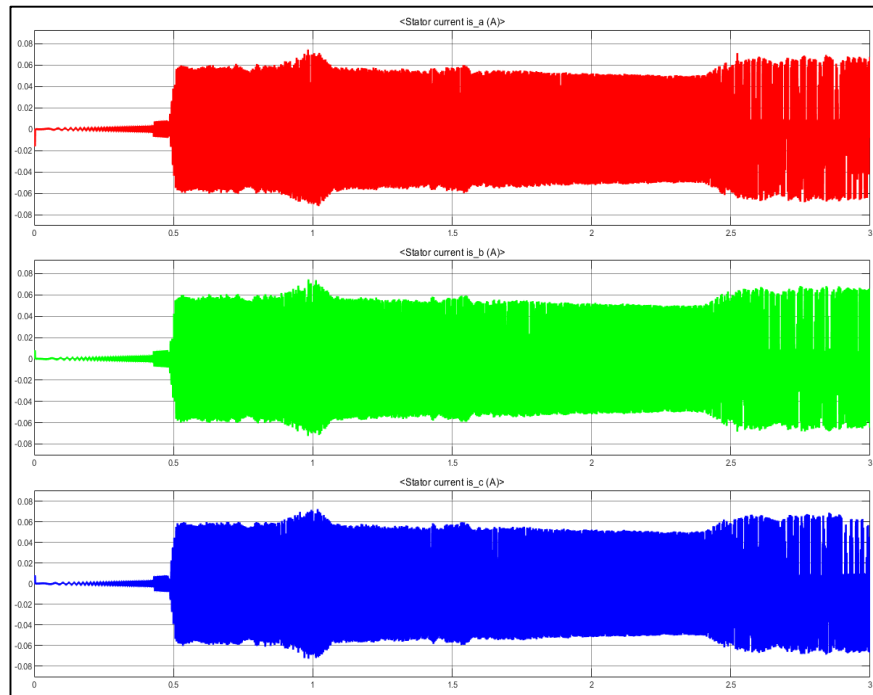
Şekil 5.14 PMSM'nin hız dalgaformu referans hızı ve gözlemlenen hızı

Rotor hızı ve elektromanyetik tork, şekil 5.15'te gösterilmektedir.



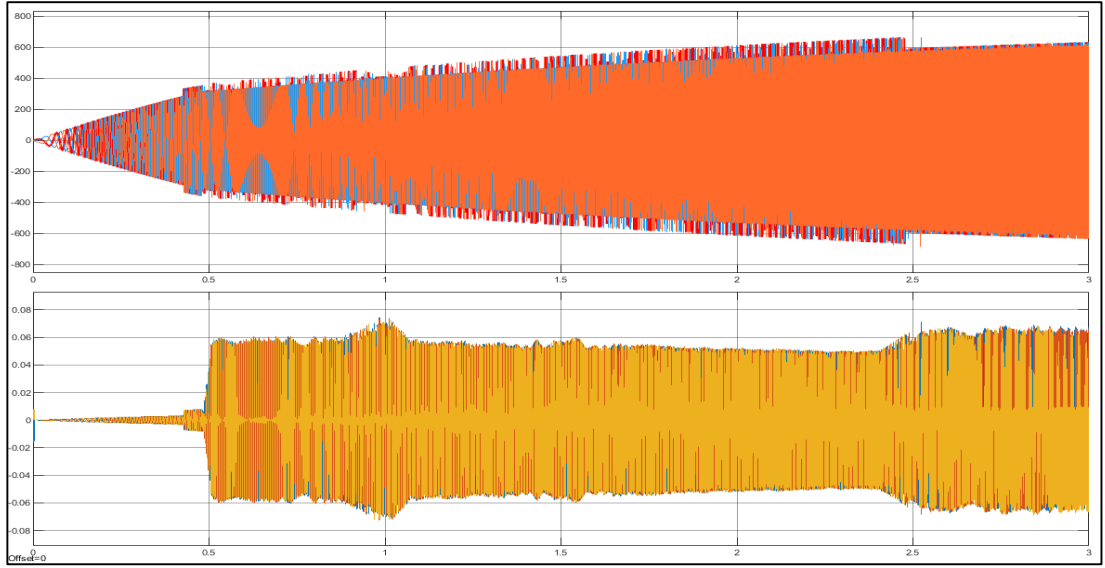
Şekil 5.15 Rotor hızı ve elektromanyetik tork

Üç faz için stator akımı şekil 5.16'da gösterilmektedir.



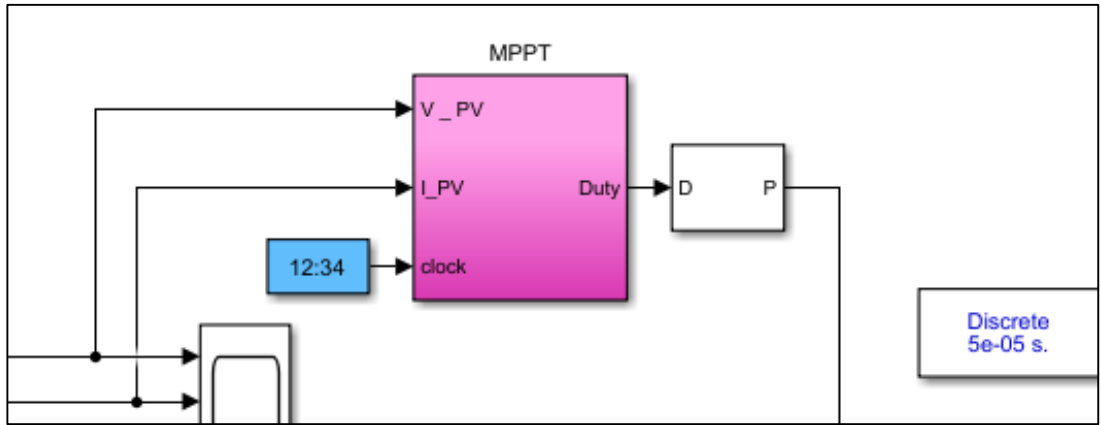
Şekil 5.16 Üç faz için stator akımı

Üç faz için gerilim ve akım şekil 5.17'de gösterilmektedir.



Şekil 5.17 Üç faz için gerilim ve akım

Bu tezde “**artımlı iletkenlik MPPT**” yöntemini kullandık ve simulinkte aşağıdaki şekil 5.18'de gösterilmektedir.



Şekil 5.18 MPPT sink Modeli

Bunun için kullanılan matlab kodu aşağıda gösterilmektedir.

```
function D = PO(V, I, T)
persistent P2 P1 dP d dd n;
if isempty(V)
    V=40;
end
```

```

if isempty(I)
    I=0;
end
if isempty(P2)
    P2=0;
end
if isempty(P1)
    P1=0;
end
if isempty(dP)
    dP=0;
end
if isempty(d)
    d=1;
end
if isempty(dd)
    dd=0;
end
if isempty(n)
    n=1;
end
%%%%%%%%%%
    if (T > n*0.02)    %chu ki lay mau 0.02s
        n = n + 1;
        P1=P2;
        P2=V*I;
        dP=P2-P1;
        if (dd==0)
            if dP>1
                dd=0.01;
                d=d+dd;
            else
                if dP<-1
                    dd=-0.01;
                    d=d+dd;
                else
                    dd=0;
                end
            end
        end
    else
        if ((dP<1) && (dP>-1))
            dd=0;
            d=d+dd;
        end
    end

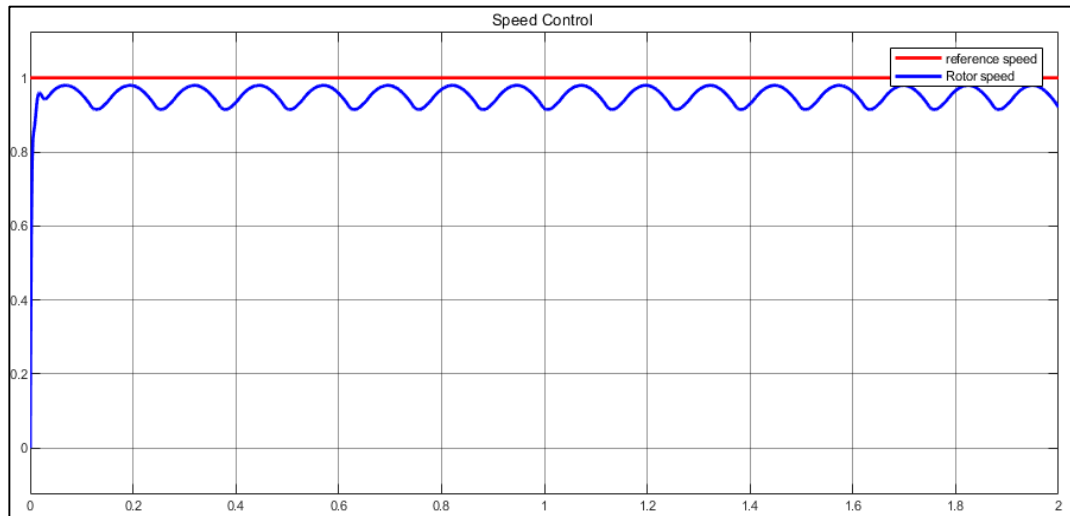
```

```

else
    if ((dP/dd)>0)
        dd=0.01;
        d=d+dd;
    else
        dd=-0.01;
        d=d+dd;
    end
end
end
end
D=d/(d+1);
if D<0.3
    D=0.3;
    d=D/(1-D);
else
    if D>0.9
        D=0.9;
        d=D/(1-D);
    else
        end
end
end
end

```

Son olarak bir basamak fonksiyonu uygulandı ve bunun sonucu aşağıdaki şekil 5.19'da gösterilmektedir.



Şekil 5.19 Basamak fonksiyonun sonucu

## 6. SONUÇ

Bu simülasyon, PI denetleyicisini kullanarak ve PV sisteminin güç kaynağı olarak kullanıldığı PMSM'nin konsantre hız kontrolünü çalıştırır. Önerilen modelin, çeşitli çalışma koşulları altında performansı değerlendirilmiştir.

Bu tezde MPPT ve DC-DC yükseltme dönüştürücü sunulacaktır. Güneş pili, güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştürmek için kullanılan güneş fotovoltaik sisteminde temel unsur olarak kabul edilir. Güneş pilinin performansı, çevreye ve güneşin sıcaklığı ve ışınlanması gibi hava şartlarına bağlıdır. Bu faktörler doğada sürekli olarak dalgalanmaktadır, yani devamlı artar/azalır. Normal koşulların etkisi altında, fotovoltaik benzersiz maksimum çalışma noktası üretir. Güneş PV optimum noktalarda çalıştığında, yükte maksimum verimlilik elde edilebilir. Güneş PV sisteminden yüksek verimlilik elde etmek için, yüksek verimlilik elde etmek için maksimum güç noktası izleme (MPPT) kullanılabilir. MPPT şarj kontrol tekniği, DC yükü ile PV modülü arasındaki koşullandırma sisteminin bir parçası olarak kullanılmalıdır. MPPT, gelen değişken DC elektrik enerjisini güneş PV'den sabit DC'ye dönüştürmek ve güneş PV modülünden maksimum gücü izlemek için kullanılır. Işın yoğunluğu seviyesi ve sıcaklık değişkenlik gösterdiğinde maksimum güç noktası da dalgalanmaktadır. Bu nedenle MPPT, DC-DC dönüştürücünün görev döngüsünü değiştirerek yük ve pil arasındaki empedansı eşleştirmek için kullanılır.

## KAYNAKLAR

- Afrouzi, Nabipour, H., Mashak, S. V., Abdul-Malek, Z., Mehrazamir, K., & Salimi, B., (2013). "Solar Array and Battery Sizing for a Photovoltaic Building in Malaysia." *Jurnal Teknologi* 64(4).
- Al-Mohaya, Mukarram A. M., Mahamad, A., & Saon, S., (2013). "Implementation of Field Programmable Gate Array Based Maximum Power Point Tracking Controller of Photovoltaic System." Pp. 718–21 in *2013 IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO)*. IEEE.
- Carlos, A., & Rey-Stolle, I., (2016). *Handbook of Concentrator Photovoltaic Technology*. John Wiley & Sons.
- Baghdadi, F., Mohammedi, K., Diaf, S. & Behar, O., (2015). "Feasibility Study and Energy Conversion Analysis of Stand-Alone Hybrid Renewable Energy System." *Energy Conversion and Management* 105:471–79.
- Bharatkar, S. S., Yanamshetti, R. Chatterjee, D. & Ganguli, A. K., (2011). "Dual-Mode Switching Technique for Reduction of Commutation Torque Ripple of Brushless Dc Motor." *IET Electric Power Applications* 5(1):193–202.
- Caruso, M., Di Tommaso, A. O., Miceli, R., Nevoloso, C., Spataro, C. & Viola, F., (2017). "Characterization of the Parameters of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors for a Loss Model Algorithm." *Measurement* 106:196–202.
- Chung, H. S., Wang, H., Blaabjerg, F. & Pecht, M. (2015). *Reliability of Power Electronic Converter Systems*. Institution of Engineering and Technology.
- Cochran, P., (2018). *Polyphase Induction Motors, Analysis: Design, and Application*. CRC Press.
- Cubas, J., Pindado, S. & De Manuel, C., (2014). "Explicit Expressions for Solar Panel Equivalent Circuit Parameters Based on Analytical Formulation and the Lambert W-Function." *Energies* 7(7):4098–4115.
- Enesi, A. Y., (2013). "Performance Characteristics and Double Revolving Theory of Single Phase Induction Motor." *Leonardo Journal of Sciences* (23):41–52.
- Franklin, G. F., Da Powell, J., & Emami-Naeini, A., (2014). *Feedback Control of Dynamic Systems*. Prentice Hall Press.
- Fricke, B. A. & Bryan, R. B., (2019). *Permanent Magnet Synchronous Motors for Commercial Refrigeration*. Oak Ridge National Lab.(ORNL), Oak Ridge, TN (United States).

- Gambetta, D. & Ahfock. A., (2009). “New Sensorless Commutation Technique for Brushless DC Motors.” *IET Electric Power Applications* 3(1):40–49.
- Gieras, J. F., Zbigniew, J. P., & Tomczuk, B., (2018). *Linear Synchronous Motors: Transportation and Automation Systems*. CRC press.
- Glowacz, A., (2014). “Diagnostics of Synchronous Motor Based on Analysis of Acoustic Signals with the Use of Line Spectral Frequencies and K-Nearest Neighbor Classifier.” *Archives of Acoustics* 39(2):189–94.
- Hahm, J., Baik, J., Kang, H., Lee, H., & Park, M., (2015). “Matlab-Based Modeling and Simulations to Study the Performance of Different MPPT Techniques Used for Photovoltaic Systems under Partially Shaded Conditions.” *International Journal of Photoenergy* 2015.
- Hutt, P. R. & Day, S., (1990). “Electronic Electricity Meters.”
- Ibrahim, H. E. A., Hassan, F. N. & Shomer, A. O., (2014). “Optimal PID Control of a Brushless DC Motor Using PSO and BF Techniques.” *Ain Shams Engineering Journal* 5(2):391–98.
- Isfahani, A. H., Vaez- Zadeh, S. & Hasanzadeh, S., (2014). “An Educational Toolbox for Performance Analysis of Line- start Permanent Magnet Synchronous Motors.” *Computer Applications in Engineering Education* 22(3):452–62.
- Jahns, T. M., Gerald, B. K., & Thomas, W., N., (1986). “Interior Permanent-Magnet Synchronous Motors for Adjustable-Speed Drives.” *IEEE Transactions on Industry Applications* (4):738–47.
- Kakosimos, P., & Abu-Rub, H., (2017). “Predictive Speed Control with Short Prediction Horizon for Permanent Magnet Synchronous Motor Drives.” *IEEE Transactions on Power Electronics* 33(3):2740–50.
- Kandiban, R. & Arulmozhiyal, R., (2012). “Speed Control of BLDC Motor Using Adaptive Fuzzy PID Controller.” *Procedia Engineering* 38:306–13.
- Kaplani, E., (2016). “PV Cell and Module Degradation, Detection and Diagnostics.” Pp. 393–402 in *Renewable Energy in the Service of Mankind Vol II*. Springer.
- Khatri, R., (2016). “Design and Assessment of Solar PV Plant for Girls Hostel (GARGI) of MNIT University, Jaipur City: A Case Study.” *Energy Reports* 2:89–98.
- Kim, S-H., (2017). *Electric Motor Control: Dc, Ac, and Bldc Motors*. Elsevier.

- Krishnan, R., (2001). *Electric Motor Drives: Modeling, Analysis and Control*. Prentice Hall.
- Krishnan, R., (2017). *Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives*. CRC press.
- Lai, Y-S., & Lin, Y-K., (2010). “A Unified Approach to Zero-Crossing Point Detection of Back EMF for Brushless DC Motor Drives without Current and Hall Sensors.” *IEEE Transactions on Power Electronics* 26(6):1704–13.
- Lazaroiu, G. C., Longo, M., Roscia, M., & Pagano, M., (2015). “Comparative Analysis of Fixed and Sun Tracking Low Power PV Systems Considering Energy Consumption.” *Energy Conversion and Management* 92:143–48.
- Miller, T. J. E. (1989). “Permanent Magnet and Reluctance Motor Drives.” *Oxf. Univ. Press, New York*.
- Olubukunmi, A. A., (2011). “Solar Driven Hydrogen Generation for a Fuel Cell Power Plant.”
- Panda, R. C. (2012). *Introduction to PID Controllers: Theory, Tuning and Application to Frontier Areas*. BoD–Books on Demand.
- Park, N-G, Miyasaka, T., & Grätzel, M., (2016). “Organic-Inorganic Halide Perovskite Photovoltaics.” *Cham, Switzerland: Springer*.
- Pillay, P. & Krishnan, R., (1989). “Modeling, Simulation, and Analysis of Permanent-Magnet Motor Drives. I. The Permanent-Magnet Synchronous Motor Drive.” *IEEE Transactions on Industry Applications* 25(2):265–73.
- Rader, R., (1990). “Trends in Biotechnology Patenting.” in *Unpublished manuscript presented to Division of Chemistry and Law, American Chemical Society National Meeting, Washington, DC, Autumn*.
- Rahideh, A., Korakianitis, T., Ruiz, P., Keeble, T., & Rothman, M. T., (2010). “Optimal Brushless DC Motor Design Using Genetic Algorithms.” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 322(22):3680–87.
- Rasool, F., Driberg, M., Badruddin, N., Singh, B., & Singh, M., (2016). “Modeling of PV Panels Performance Based on Datasheet Values for Solar Micro Energy Harvesting.” Pp. 1–5 in *2016 6th International Conference on Intelligent and Advanced Systems (ICIAS)*. IEEE.
- Rezk, H., & Eltamaly, A. M., (2015). “A Comprehensive Comparison of Different MPPT Techniques for Photovoltaic Systems.” *Solar Energy* 112:1–11.

- Richa, S., (2012). "Investigation on Temperature Sensing of Nanostructured Zinc Oxide Synthesized via Oxalate Route." *Journal of Sensor Technology* 2012.
- Roberts, G. D., (1990). "Electromagnetic Induction Devices with Multi-Form Winding and Reflected Magnetizing Impedance."
- Sathyan, A., Milivojevic, N., Lee, Y-J., Krishnamurthy, M., & Emadi, A., (2009). "An FPGA-Based Novel Digital PWM Control Scheme for BLDC Motor Drives." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 56(8):3040–49.
- Shah, P. & Agashe, S., (2016). "Review of Fractional PID Controller." *Mechatronics* 38:29–41.
- Shukla, A., Khare, M., & Shukla, K. N., (2015). "Modeling and Simulation of Solar Pv Module on Matlab/Simulink." *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology* 4(1).
- Singh, P., Palwalia, D. K., Gupta, A., & Kumar, P., (2015). "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques." *Int. Adv. Res. J. Sci. Eng. Technol* 2:138.
- Subudhi, B., & Pradhan, R., (2012). "A Comparative Study on Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Power Systems." *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 4(1):89–98.
- Toliyat, H. A., & Kliman, G. B., (2018). *Handbook of Electric Motors*. Vol. 120. CRC press.
- Vergura, S., (2016). "A Complete and Simplified Datasheet-Based Model of Pv Cells in Variable Environmental Conditions for Circuit Simulation." *Energies* 9(5):326.
- Wang, L., (2014). *From Plant Data to Process Control: Ideas for Process Identification and PID Design*. CRC Press.
- Xue, P., Pan, S., & Wei, W., (2016). "Design of Energy Feedback System of Permanent Magnet Synchronous Motor." *International Journal of Control and Automation* 9(4):73–80.
- Van Zeghbroeck, B., (2004). "Principles of Semiconductor Devices." *Colorado University* 34.