

**T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

## **MAKSİMUM GÜÇ İZLEYİCİSİ TASARIMI**

### **YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Zekiye ERDEM**

**Enstitü Anabilim Dalı : ELEK.-ELEKTR. MÜH.**  
**Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRONİK**  
**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Ayhan ÖZDEMİR**

**Temmuz 2009**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

## MAKSİMUM GÜÇ İZLEYİCİSİ TASARIMI

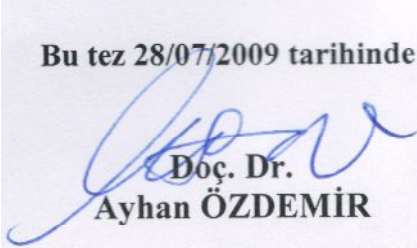
### YÜKSEK LİSANS TEZİ

Zekiye ERDEM

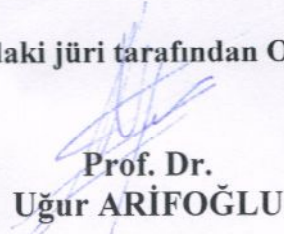
Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜH.

Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRONİK

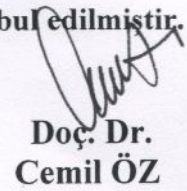
Bu tez 28/07/2009 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

  
Doç. Dr.  
Ayhan ÖZDEMİR

Jüri Başkanı

  
Prof. Dr.  
Uğur ARİFOĞLU

Üye

  
Doç. Dr.  
Cemil ÖZ

Üye

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MAKSİMUM GÜÇ İZLEYİCİSİ TASARIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Zekiye ERDEM**

**Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK-ELEKTRONİK  
MÜH.**

**Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRONİK**

**Bu tez 28 / 07 /2009 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.**

**Doç. Dr. Ayhan ÖZDEMİR  
Jüri Başkanı**

**Prof. Dr. Uğur ARİFOĞLU  
Üye**

**Doç. Dr. Cemil ÖZ  
Üye**

## ÖNSÖZ

Günümüzde dünyadaki yenilenemez enerji kaynakları hızla azalmakta ve bu kaynakların doğaya verdiği zararlar gelecek nesiller için tehlikeli boyutlara ulaşmaktadır. Gelecek nesillere kalıcı yaşanabilir ortamlar bırakmak ve bu kaynaklara alternatif kaynaklar olacak yenilenebilir temiz enerji kaynaklarına yönelmek kaçınılmaz olmuştur. Bu nedenle dünyamızdaki sonu gelmeyen en önemli yenilenebilir enerji kaynağı olan güneş enerjisini elektrik enerjisine çevirmek için çeşitli ürünler ve uygulamalar mevcuttur. Güncel olan güç çevrim sistemleri alanındaki araştırma ve geliştirmeler son onlu yıllarda büyük bir ivme kazanarak artmaya devam etmektedir.

Güneş enerjisi sistemlerini maksimum verimde kullanabilmek için, “maksimum güç izleyicileri” kullanmak gereklidir. Bu çalışmada şebekeye doğrudan bağlı maksimum güç izleyicisi sistemi tasarımı yapılacaktır. Buradaki amaç yeni metotlar ile geliştirilen MPPT sistemi ile literatüre katkıda bulunmak ve çift yönlü sayaç uygulaması için alt yapı oluşturmaktır. Çift yönlü sayaç uygulamaları ile MPPT sisteminde önemli bir maliyet oluşturan batarya sistemlerini ortadan kaldırarak üretilen güneş enerjisi devlete satılmaktadır. Böylece devlet tüketiciden az maliyetli enerji satın almaktadır.

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren, tecrübelerinden faydalandığım danışmanım Doç. Dr. Ayhan ÖZDEMİR’e, tez sürem boyunca yardımlarını esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. İrfan YAZICI’ya, tez sürecimde hep yanımda olup, sabırla bana destek olan sevgili eşime ve aileme sonsuz teşekkürü bir borç bilirim.

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ .....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ .....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xi
RESİMLER LİSTESİ .....	xvi
TABLolar LİSTESİ.....	xvii
ÖZET .....	xviii
SUMMARY .....	xix
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.	
GÜNEŞ PİLLERİ.....	7
2.1. Güneş Pillerinin Tarihsel Gelişimi ve Fiziksel Yapıları.....	8
2.2. Çalışma İlkesi .....	9
2.3. Panel Verimi.....	12
2.3.1. Panel maliyet analizi .....	13
2.4. Işınım Şiddeti.....	14
2.5. PV'lerin Türkiye'deki Durumu ve Işınım Haritaları .....	14
2.6. Optimum Panel Eğimi.....	18
2.7. PV Hücresi Elektronik Devre Modeli.....	19

2.7.1. İdeal PV hücre modeli.....	20
2.7.2. PV hücre modeli .....	21
2.8. PV Karakteristik Eğrileri.....	22
2.8.1. Güneş hücresine ışınımın etkisi .....	23
2.8.2. Güneş hücresine sıcaklığın etkisi.....	24
2.8.3. PV hücresine parçalı gölgelenme durumunun etkisi.....	25
2.9. PV Panel Verimini Etkileyen Faktörler .....	26
2.10. Sonuç.....	27

### BÖLÜM 3.

MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI İZLEYİCİLERİ .....	28
3.1. MPPT Tanımı ve Çalışma Prensipleri .....	28
3.2. MPPT Teknikleri .....	31
3.2.1. Dolaylı denetim.....	32
3.2.1.1. Sabit gerilim metodu.....	32
3.2.1.2. Sabit akım metodu .....	34
3.2.1.3. Pilot hücre metodu .....	35
3.2.2. Doğrudan denetim.....	35
3.2.2.1. Değiştir gözle metodu .....	36
3.2.2.2. Artan iletkenlik metodu.....	39
3.2.2.3. Parazitik kapasite metodu.....	41
3.2.2.4. Model bazlı MPPT algoritmaları .....	41
3.2.2.5. Bulanık mantık ve yapay sinir ağları metotları .....	41
3.2.2.6. Eğri uydurma metodu.....	42
3.2.2.7. Diğer metotlar.....	42
3.3. MPPT Tekniklerinin Karşılaştırılması ve MPPT Tasarımı için Algoritma Seçimi .....	42
3.3.1. MPPT tekniklerinin karşılaştırılması .....	42
3.3.2. MPPT tasarımı için algoritma seçimi.....	44

3.4. P&O Algoritmasındaki Osilasyon Probleminin Giderilmesi .....	45
3.5. Sonuç.....	46

## BÖLÜM 4.

MPPT SİSTEMLERİ VE ÇEVİRİCİLER.....	47
4.1. Doğrudan Şebekeye Bağlı Sistemler .....	48
4.2. Şebekeden Ayrı (Stand-Alone) Sistemler .....	50
4.3. MPPT Sistemlerinin Karşılaştırılması .....	51
4.4. Çevirici Tipleri .....	53
4.4.1. Temel DA-DA çeviriciler.....	53
4.4.1.1. Alçaltıcı (buck) çeviriciler .....	55
4.4.1.2. Yükseltici (boost) çeviriciler .....	58
4.4.1.3. Alçaltıcı-yükseltici çeviriciler .....	62
4.4.2. Temel DA-DA çeviricilerin karşılaştırılması .....	63
4.5. DA-DA Çevirici Çıkış Gerilimi Kontrolü.....	65
4.5.1. Kayan kipli kontrol yöntemi.....	65
4.5.1.1. Kayan kipli kontrolör tasarımı.....	69
4.5.2. Dinamik PI kontrol yöntemi .....	73
4.5.3. Ziegler Nichols PID parametre belirleme yöntemi.....	79
4.5.3.1. Basamak cevabı yöntemi.....	79
4.5.3.2. Osilasyon yöntemi .....	80
4.5.4. Çift döngülü kontrol.....	84
4.6. DA-AA Eviriciler (İnverterler).....	86
4.6.1. Kayıpsız ideal tek fazlı DA-AA eviriciler.....	87
4.6.2. Kayıplı ideal tek fazlı DA-AA eviriciler.....	92
4.7. Sonuç.....	93

## BÖLÜM 5.

TASARIM VE SİMÜLASYON .....	94
5.1. Panelin Modellenmesi ve Simülasyonu .....	96
5.1.1. İdeal fotovoltaik hücre model simülasyonu .....	96
5.1.2. Kayıplı fotovoltaik hücre modeli ve fotovoltaik modül simülasyonu .....	98
5.1.2.1. Işınım değişimine bağlı modül simülasyonu.....	99
5.1.2.2. Sıcaklık değişimine bağlı modül simülasyonu .....	103
5.1.3. Panellerdeki parçalı gölgelenmenin incelenmesi.....	106
5.2. P&O Algoritması Simülasyonu .....	109
5.3. P&O Algoritması Modifikasyonu .....	110
5.4. DA-DA Çevirici Tasarımı ve Çift Döngülü Kontrol.....	111
5.4.1. Yükseltici tip DA-DA çevirici simülasyonu .....	112
5.4.2. Çift döngülü kontrol simülasyonu .....	114
5.4.2.1. Ziegler-Nichols yöntemi simülasyonu .....	116
5.4.3. İdeal DA-AA evirici simülasyonu .....	119
5.4.3.1. Kayıpsız DA-AA evirici modeli.....	119
5.4.3.2. Kayıplı ideal DA-AA evirici modeli.....	120
5.5. MPPT Sistem Simülasyonu ve Sonuçlar .....	124

## BÖLÜM 6.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	131
KAYNAKLAR.....	134
EKLER.....	139
EK A .....	139
EK B .....	140
EK C .....	141



EK D.....	142
EK E .....	143
ÖZGEÇMİŞ .....	144

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
A	: Akım (Amper)
AA	: Alternatif Akım (Alternate Current)
C	: Kapasite (Farad)
D	: Diyot
D	: Doluluk Oranı (Duty Cycle)
d	: Ölü zaman
D <sub>b</sub>	: By-pass diyot
DA	: Doğru Akım (Direct Current)
f <sub>s</sub>	: Anahtarlama Frekansı (Hertz)
G	: Işınım Şiddeti (Sun=W.m <sup>2</sup> )
G <sub>STC</sub>	: Standart şartlar altındaki ışınım miktarı (1000W/m <sup>2</sup> )
I <sub>0</sub>	: Çıkış akımı (Amper)
I <sub>AVG</sub>	: Ortalama akım (Amper)
I <sub>bypass</sub>	: By-pass diyot akımı (Amper)
I <sub>IN</sub>	: Giriş akımı (Amper)
I <sub>I.Kritik</sub>	: Endüktansın sürekli akım durumundan süreksi hale geçiş değeri
I <sub>MP</sub>	: Maksimum güç noktası akımı (Amper)
I <sub>o</sub>	: Ters Satürasyon Akımı (Amper)
I <sub>SW</sub>	: Anahtarlama ve diğer kayıplar (Amper)
i <sub>C</sub>	: Kapasite akımı (Amper)
i <sub>D</sub>	: Diyot Akımı (Amper)
i <sub>L</sub>	: Endüktans akımı (Amper)
i <sub>PV</sub>	: Panel çıkış akımı (Amper)

$i_{ref}$	: MPPT algoritmasının ürettiği referans akım değeri (Amper)
$i_{SC}$	: Panel kısa devre akımı (Amper)
$K$	: Boltzman Sabiti ( $8,65 \times 10^{-5}$ eV/K)
$k$	: Sabit gerilim/Sabit akım metodu katsayısı
$K_d$	: Türevsel katsayı
$K_i$	: Integral katsayı
$K_p$	: Oransal katsayı
$K_p$	: Oransal katsayı
$K_u$	: Sistemin osilasyona girdiği andaki oransal katsayısı
$L$	: Endüktans (Henry)
$M(D)$	: Kazanç
$P_{PV}$	: Panel gücü
$R_p$	: Güneş Pili Paralel Direnci (ohm)
$R_s$	: Güneş Pili Seri Direnci (ohm)
$sgn(s)$	: S'in pozitif veya negatif olmasına göre çıkışın "0" veya "1" olması
$T, T_s$	: Anahtarlama Periyodu (sn)
$T_d$	: Türev zaman sabiti
$T_{on}$	: Anahtarın iletimde kalma süresi (sn)
$W$	: Aktif güç ölçü birimi (Watt)
$W_p$	: Aktif güç tepe değeri (Watt-peak)
$V$	: Panel çıkış gerilimi (Volt)
$V_{AA}$	: DA-AA çevirici çıkış gerilimi (Volt)
$V_D$	: Diyot Gerilimi (Volt)
$V_{Dbypass}$	: By-pass diyot gerilimi (Volt)
$V_{DA}$	: DA-AA çevirici giriş gerilimi (Volt)
$V_g$	: Panel giriş gerilimi (Volt)
$V_L$	: Endüktans Gerilimi (Volt)
$V_{MP}$	: Maksimum güç noktası gerilimi (Volt)
$V_o$	: Çıkış gerilimi (Volt)
$V_{OC}$	: Panel açık devre gerilimi (Volt)
$V_s$	: Kaynak Gerilimi (Volt)
$V_T$	: Isıl gerilim (Volt)
$T_i$	: Integral zaman sabiti

$T_u$	: Sistemin osilasyon periyodu
$x_1$	: Bobin akımı ( $i_L$ )
$x_2$	: Panel çıkış gerilimi (V)
$\alpha$	: Panel akım sıcaklık katsayısı
$\beta$	: Panel gerilim sıcaklık katsayısı
$\eta_{MPPT}$	: MPPT yöntemlerinin verimi (%)
$\lambda$	: Bobin gerilimi altında kalan alan
$\Delta T$	: Referans sıcaklık ile o anki panel sıcaklığı farkı [ $T-T_{ref}$ ] ( $^{\circ}C$ )

### **Kısaltmalar**      **Açıklama**

CC	: Sabit Akım (Constant Current)
CV	: Sabit Gerilim (Constant Voltage)
ÇDK	: Çift Döngülü Kontrol
D	: Diyot
DMİ	: Devlet Meteoroloji işleri
e	: Elektron
e(t)	: Hata işareti
EİE	: Elektrik işleri Etüt idaresi
EMI	: Elektro Manyetik Girişim
IC	: Artan İletkenlik (Incremental Conductance)
kcal	: Kilo kalori
KYK	: Kayan Kipli kontrol
MP	: En Fazla Güç
MPP	: En Fazla Güç Noktası
MPPT	: En Fazla Güç Noktası izleme
MW	: Mega Watt
n	: Sistem derecesi
P&O	: Değişir ve Gözle (Perturb and Observe)
PI	: Oransal İntegral (Proportional Integral)
PID	: Oransal İntegral Türevsel (Proportional Integral Derivative)
PSO	: Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization)
PV	: Fotovoltaik
PWM	: Darbe Genişlik Modülasyonu (Pulse Width Modulation)
RMS	: Ortalama karakök (Root mean square)
S	: Kayan Yüzey

TS : Türk Standardı  
UPS : Kesintisiz Güç Kaynağı  
 $\lambda$  : Kayan yüzey katsayısı

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Uygulama alanlarının yüzdelik dağılımı .....	2
Şekil 2.1.Çalışma ilkesi.....	7
Şekil 2.2. Bir güneş panelinin oluşması [18].....	8
Şekil 2.3. Güneş pili içyapısı [9] .....	9
Şekil 2.4. Güneş Pili elektriksel modeli .....	10
Şekil 2.5. Katkılanmış silikon molekülün yapısı.....	10
Şekil 2.6. Alıcı madde yapısı.....	11
Şekil 2.7. PV yapı maliyet oranları [9] .....	13
Şekil 2.8. Yıllara göre PV Maliyet grafiği .....	14
Şekil 2.9. $R_s$ ve $R_p$ dirençlerinin ihmal edildiği durumdaki güneş hücresi devre modeli .....	20
Şekil 2.10. Güneş hücresinin devre modeli.....	21
Şekil 2.11. Güneş hücresi gerilim-akım karakteristiği.....	23
Şekil 2.12. İdeal ve kayıplı hücrede $R_s$ ve $R_p$ dirençlerinin hücre akım-gerilim karakteristiğine etkisi .....	23
Şekil 2.13. Işınmının akım, gerilim ve güce etkisi [24].....	24
Şekil 2.14. Sıcaklığın akım, gerilim ve güce etkisi [24].....	25
Şekil 2.15. Eşit olmayan ışımaya maruz kalan seri bağlanmış 3 panel [47] .....	26
Şekil 2.16. PV modül değişkenlerinin çıkışa etkisi [9].....	27
Şekil 3.1. Doğrudan yüke bağlı PV panelinin akım-gerilim eğrisi.....	29
Şekil 3.2. 75 Watt gücündeki bir PV modülün standart Test koşulları altında Güç- Gerilim grafiği .....	30
Şekil 3.3. Panelin farklı ışınma koşulları altındaki eğrileri ve maksimum güç noktaları .....	30
Şekil 3.4. MPPT ve MPPT olmadan üretilen enerjilerin karşılaştırması[9].....	31
Şekil 3.5. Sabit gerilim metodu akış diyagramı.....	34
Şekil 3.6. Değiştir Gözle metodu ile denetlenen çevirici [9] .....	37

Şekil 3.7. P&O ve Tepeye-tırmanma (Hill Climbing) algoritmaları [32].....	37
Şekil 3.8. Değiştir ve Gözle (P&O) metoduna ait akış diyagramı .....	39
Şekil 3.9. Artan İletkenlik Metodu Çalışma Eğrisi [9] .....	39
Şekil 3.10. Artan İletkenlik Metoduna ait Akış Diyagramı .....	40
Şekil 3.11. Modifiye edilmiş P&O algoritması akış diyagramı .....	45
Şekil 4.1. MPPT sistemi.....	47
Şekil 4.2. Bir DA-DA çevirici sistemi [36].....	48
Şekil 4.3. (a) Doğrudan Şebekeye Bağlı Sistemlerin Çalışma Yapısı (b) Şebekeye Doğrudan Bağlı Sistem [37].....	50
Şekil 4.4. DA akım uygulamalı, şebekeden bağımsız tipik bir güneş enerji sistemi.	51
Şekil 4.5. DA ayarlayıcı Temel Devresi .....	53
Şekil 4.6. Seri bobin kullanarak süzme işlemi .....	54
Şekil 4.7. Paralel Kondansatör kullanarak süzme .....	54
Şekil 4.8. Alçaltıcı Çevirici Devresi [18].....	55
Şekil 4.9. Alçaltıcı Çevirici Devresi anahtarın iletimde olma durumu[18] .....	55
Şekil 4.10. Alçaltıcı Çevirici Devresi anahtarın kesimde olma durumu [18] .....	56
Şekil 4.11. (a) Azaltan çeviricide bobin üzerindeki gerilim değişimi .....	57
Şekil 4.12. Bobin gerilimindeki toplam alan [18] .....	57
Şekil 4.13. Yükseltici tip çevirici devre modeli [18].....	59
Şekil 4.14. Yükseltici Çevirici Devresi anahtarın iletimde olma durumu [18].....	59
Şekil 4.15. Yükseltici Çevirici Devresi anahtarın kesimde olma durumu [18].....	59
Şekil 4.16. Bobin üzerindeki gerilim dalga şekli [18] .....	60
Şekil 4.17. Alçaltıcı- Yükseltici Çevirici Devresi [18].....	62
Şekil 4.18. Temel Çevirici Kazanç değişimleri.....	65
Şekil 4.19. Kayan Kipli Kontrol Gösterimi.....	67
Şekil 4.20. Ulaşma Fazı, Yüksek Frekanslı Anahtarlama, Kayan Yüzey.....	69
Şekil 4.21. Kayan Kipli Kontrol Gösterimi I .....	73
Şekil 4.22. Kayan Kipli Kontrol Gösterimi II .....	73
Şekil 4.23. Geri beslemeli bir kontrol sistemi [49] .....	74
Şekil 4.24. $K_p$ katsayısının sistem yanıtına etkisi [49].....	77
Şekil 4.25. $K_i$ katsayısının sistem yanıtına etkisi [49].....	77
Şekil 4.26. $T_d$ katsayısının sistem yanıtına etkisi [49] .....	78
Şekil 4.27. Açık çevrim birim basamak yanıtı [49] .....	80

Şekil 4.28. $K_p = 0,75$ için sistem yanıtı [49] .....	82
Şekil 4.29. $K_p = 0,787$ için sistem yanıtı [49] .....	82
Şekil 4.30. PID kontrolörlü sistem blok gösterimi [49] .....	83
Şekil 4.31. Z-N yöntemi ile ayarlanmış PID kontrolörlü sistem yanıtı [49].....	84
Şekil 4.32. Çift Döngülü Kayan Kip Yükseltici tip DA-DA dönüştürücü kontrolü blok diyagramı.....	86
Şekil 4.33. Tek fazlı DA-AA evirici.....	87
Şekil 4.34. Anahtar 1 konumunda iken DA-AA çevirici.....	88
Şekil 4.35. Anahtar “2” konumunda iken DA-AA çevirici.....	88
Şekil 4.36. Evirici Kazanç-doluluk oranı grafiği.....	90
Şekil 4.37. DA-AA çevirici anahtarlama kontrolü .....	91
Şekil 4.38. Histerisiz ile karşılaştırma .....	91
Şekil 4.39. Kayıplı Tek fazlı DA-AA inverter .....	92
Şekil 4.40. Tek-fazlı DA-AA İnvertere ait Verimlilik-Güç grafiği.....	92
Şekil 4.41. Tasarlanan sisteme ait blok gösterim .....	93
Şekil 5.1. Hücre Modeli Karakteristiği .....	97
Şekil 5.2. Hücre modeli karakteristik eğrileri: (a) P-V panel çıkış güç-gerilim (b) I-V panel çıkış akım-gerilim.....	98
Şekil 5.3. Tasarlanan modülün giriş ve çıkışlardan oluşan görüntüsü.....	99
Şekil 5.4. PV modül simülasyonu.....	100
Şekil 5.5. İdeal ve kayıplı PV hücre modellerinin karşılaştırılması .....	100
Şekil 5.6. PV modüle ait parametre giriş ekranı.....	101
Şekil 5.7. Seri bağlanmış 6 adet modülün blok şeklinde gösterimi.....	102
Şekil 5.8. (a) PV modül P-V (güç-gerilim) (b) I-V (Akım-gerilim) karakteristikleri	103
Şekil 5.9. Sıcaklık değişimleri için PV Hücre modeli .....	105
Şekil 5.10. (a) Değişik sıcaklık koşulları için elde edilen P-V grafiği (b) I-V grafiği	105
Şekil 5.11. Parçalı gölgelenme durumu için MATLAB modeli.....	107
Şekil 5.12. (a) Parçalı Gölgeleme durumunda panel çıkış güç-gerilim eğrisi (b) akım-gerilim eğrisi.....	107
Şekil 5.13. (a) By-pass diyotların devreden çıkarılması ile elde edilen panel güç-gerilim (b) akım-gerilim eğrisi .....	108
Şekil 5.14. P&O algoritmasının Simulink ortamına aktarılması.....	109
Şekil 5.15. PV modüller ile algoritma bağlantısı.....	109



Şekil 5.16. Klasik P&O algoritması ile modifiye edilmiş P&O algoritmasının referans akım çıktılarının karşılaştırılması .....	111
Şekil 5.17. Yükseltici Tip Çeviriciye ait model .....	112
Şekil 5.18. DA-DA Çevirici modele ait giriş ve çıkışlar .....	113
Şekil 5.19. (a) Yükseltici Tip DA-DA çeviricinin $d=0.3$ için simülasyonda elde edilen zamana bağlı gerilim çıkışı (b) akım çıkışı .....	114
Şekil 5.20. (a) Yükseltici Tip DA-DA çeviricinin $d=0.5$ için simülasyonda elde edilen zamana bağlı gerilim çıkışı (b) akım çıkışı .....	114
Şekil 5.21. Çift Döngülü Kayan Kip Yükseltici tip DA-DA dönüştürücü kontrolü Simulink blok diyagramı.....	115
Şekil 5.22. Kayan Kip Yüzeyi Modeli.....	115
Şekil 5.23. Sistemin osilasyona girdiği andaki zamana bağlı gerilim grafiği.....	116
Şekil 5.24. Ziegler Nichols ile elde edilen PI parametreleri ile DA-DA çevirici gerilim çıkışı ve referans gerilim.....	117
Şekil 5.25. Ayarlanmış PI parametreleri ile DA-DA gerilim çıkışı .....	118
Şekil 5.26. Düzenlenen PI parametreleri ile değişik referans değerlerine karşın DA-DA çevirici cevabı.....	118
Şekil 5.27. Kayıpsız ideal DA-AA evirici modeli.....	119
Şekil 5.28. Kayıpsız DA-AA evirici çıkışları (a) $V_{aa}(t)$ , (b) $i_{aa}(t)$ , (c) anahtarlama kontrolü .....	120
Şekil 5.29. DA-AA evirici modeli MATLAB/Simulink görüntüsü .....	120
Şekil 5.30. Kayıplı DA-AA eviriciye ait MATLAB/Simulink Modeli .....	121
Şekil 5.31. DA-AA evirici (a) $V_{aa}$ , (b) $i_{aa}$ , (c) anahtarlama doluluk oranı (D).....	122
Şekil 5.32. Tek fazlı DA-AA evirici modelinde elde edilen giriş gücü ( $P_{giris}$ ) ,çıkış gücü ( $P_{cikis}$ ) .....	123
Şekil 5.33. Verimlilik-çıkış gücü eğrisi .....	123
Şekil 5.34. Tasarlanmış MPPT sistemi .....	124
Şekil 5.35. MATLAB/Simulink ortamında oluşturulmuş MPPT sistemi görüntüsü.....	124
Şekil 5.36. “Sinyal Oluşturma-Signal Builder” bloğu yardımıyla oluşturulmuş çeşitli ışım seviyeleri .....	125
Şekil 5.37. Klasik P&O algoritmasından elde edilen referans akım değerleri ve yaptığı osilasyon.....	126
Şekil 5.38. Modifiye edilmiş P&O algoritmasının ürettiği referans akım değerleri ..	126

Şekil 5.39. DA-DA çeviriciden elde edilen giriş, çıkış ve referans gerilimleri.....	127
Şekil 5.40. DA-AA evirici çıkışındaki $V_{ac}$ gerilimi .....	127
Şekil 5.41. DA-AA evirici çıkış akımı.....	128
Şekil 5.42. DA-AA evirici giriş akımı .....	129
Şekil 5.43. DA-AA eviricide elde edilen giriş gücü ile çıkış gücü.....	129
Şekil 5.44. Simülasyon sonucunda DA-AA eviriciden çekilen aktif ve reaktif güç, maksimum güç için PV modüllerden çekilmesi gereken ideal güç ve Panel çıkışındaki güç eğrileri.....	130

## RESİMLER LİSTESİ

Resim 1.1. (a) Şebekeden bağımsız PV Telekomünikasyon sistemi (b) PV trafik işareti (c,d) Şebekeden bağımsız doğrudan aküye bağlı sistemler .....	3
Resim 2.1. Dünya Işınım Haritası (kw/m <sup>2</sup> ) [9].....	16
Resim 2.2. Türkiye Işınım Haritası [9].....	17
Resim 2.3. Güneş ışınımının haziran ve aralık aylarında panele geliş açıları [18] .....	19
Resim 4.1. Şebekeye Elektrik Veren Güneş Pili (PV) Sistemi (1MW nominal güç)	49
Resim 4.2. Şebeke Bağlantılı 4,8 kW Güneş Pili Sistemi .....	50

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. Güneş Pili Türlerine göre verimlilikler .....	12
Tablo 2.2. Türkiye'nin aylık ortalama güneş enerjisi potansiyeli [9] .....	17
Tablo 2.3. Türkiye güneş enerjisi potansiyelinin bölgelere göre dağılımı [9] .....	18
Tablo 3.1. Sabit gerilim metodunun düşük ışımalarındaki verimliliği [29] .....	33
Tablo 3.2. Değişir gözle ve tepeye-tırmanma algoritmasına ait özet .....	37
Tablo 3.3. MPPT verimleri [26] .....	43
Tablo 3.4. MPPT Tekniklerinin Temel Özellikleri [9,32] .....	44
Tablo 4.1Çevirici Seçimi .....	64
Tablo 4.2 Çevirici Özeti.....	64
Tablo 4.3. PID katsayılarının etkileri[49] .....	76
Tablo 4.4. Basamak cevabı yöntemi için katsayı tablosu [49].....	80
Tablo 4.5. Osilasyon yöntemi için katsayı tablosu [49] .....	81
Tablo 5.1. Hücre karakteristiği eğrileri üzerinde elde edilen maksimum noktalar ....	98
Tablo 5.2. Değişik ışımalar altında seri bağlı modüllerin çıkış karakteristik eğrileri üzerinde elde edilen maksimum noktalar .....	103
Tablo 5.3. Çeşitli sıcaklık değerleri için maksimum noktalar .....	106
Tablo 5.4 By-pass diyodun maksimum güç üzerine etkisi .....	108
Tablo 5.5. Değişik Işınım Şartları altında Algoritma sonuçlarının karşılaştırılması	110

## ÖZET

Anahtar kelimeler: Maksimum Güç İzleyicisi, Yenilenebilir Enerji, DA-DA Çeviriciler, Çift Döngülü Kontrol, DA-AA çeviriciler

Güneş paneli sistemlerinin çıkış güç eğrisinde parçalı gölgelenme durumları hariç tek bir maksimum nokta oluşmaktadır. Doğrudan yüke veya akü grubuna bağlı sistemlerde sistemin maksimum güç noktasında çalışmadığı görülmüştür. Sistem maksimum güç noktasında çalışmadığı durumda güneş panelinden çekilebilecek güç miktarı düşecektir. Bu nedenle; güneş panelini daha verimli kullanmak ve güneş panelinden maksimum gücü çekebilmek için -MPPT-Maksimum Güç İzleyicisi kullanmak gereklidir.

Bu çalışmada çift yönlü sayaç uygulamasına yönelik içerisinde akü grubu bulundurmeyen şebekeye doğrudan bağlı özgün bir MPPT sistemi tasarlanmıştır.

Uygulanmasının kolay olması nedeni ile PV sistemlerinde en yaygın algoritma olan P&O (değiştir-gözle) algoritması seçilmiş, ve özgün bir biçimde modifiye edilerek tasarlanacak maksimum güç izleyicisi sistemine uygulanmıştır.

Tasarımda, DA-DA çevirici çıkış gerilim kontrolü için ise Çift Döngülü Kontrol yöntemi uygulanmıştır. Çift döngülü kontrol yöntemi ile sistemin verimliliğini artırılmış ve en az kayıplı, belirlenen performans kriterlerine göre davranabilen, değişen çevre şartlarından etkilenmeyen dayanıklı bir sistem geliştirilmiştir. DA-AA çevirici modeli olarak kayıplı ideal çevirici modeli kullanılmıştır.

# **MAXIMUM POWER POINT TRACKER**

## **SUMMARY**

Key Words: Maximum Power Point Tracker, Renewable Energy, DC-DC Converters, Two Loop Control, DC-AC Inverters

On output power curve of the Photovoltaic (PV) systems except the partial shaded occasion, only one maximum point arises. At the systems which are directly connected to load or battery groups, it is observed that maximum power point doesn't work. When the system is not running at maximum power, the amount of the power that can be absorbed from the solar panels will be decreased. Therefore, it is necessary to use –MPPT- Maximum Power Point Tracker for increasing PV efficiency and obtaining the maximum power through PV.

In this study, a specified MPPT system directly connected to grid which doesn't consist accumulator groups inside are designed towards to dual directional meter application.

In this study; due to its easy implementation, P&O (Perturb-Observe) which is the most common algorithm in PV systems is originally modified and chosen for the design of the maximum power tracker.

At design, Two Loop Control method is applied for DC – DC converter output voltage control. With two loop sliding mode controller, system with efficient and minimum losses, behaving according to the designated performance criteria's, acting like determined reference model, immune to alternating environment conditions is developed. For DC – AC inverter model, ideal inverter model with losses is used.

## BÖLÜM 1. GİRİŞ

Elektrik enerjisi üretimi için geleneksel enerji kaynakları hidroelektrik, fosil yakıtlar ve nükleer enerjidir. Dünya çapında sera gazları emisyonunun artması ve fosil yakıtların hızla tükenmesi yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi artırmıştır [1]. Ayrıca, çevrenin korunması, gelecekte insan yaşamı ve çevre dengeleri üzerinde oluşabilecek tehditlerin önlenmesi, ulusal kaynaklardan en üst düzeyde yararlanılarak ülkelerin enerji kaynakları arz güvenliğinin sağlanması, alternatif enerji kaynaklarının geliştirilmesini ve kullanılmasını gerekli hale getirmektedir [2]. Bu kaynaklar arasında fotovoltaikler en önemli yenilenebilir enerji kaynakları arasındadır [1]. Çünkü güneş dünyamıza gücü  $8 \times 10^{11}$  MW olan çok büyük miktarda bir enerji yaymaktadır ve bu enerji şu anda tüm dünyada tüketilen mevcut enerjinin bir kaç bin katıdır [3]. Yarı iletken teknolojisi ve güç elektroniğindeki hızlı gelişmeler elektrik güç uygulamalarında fotovoltaik (PV-photovoltaic) enerjiye olan ilgiyi artırmıştır [4].

PV sistemlerinin yenilenebilir kaynaklar arasında hızla önem kazanmasının bir başka nedeni ise temiz, düşük bakım maliyeti, gürültüsüz ve modüler yapısı ile birkaç watt'tan MegaWatt değerine kadar kolaylıkla tasarlanıp uygulanabilir olmasıdır. Düşük bakım maliyeti ve temiz enerji durumlarından dolayı avantajlı olan bu sistemler bunun yanında uygulamasının (geniş yer gereksinimi) zor olması, enerji ihtiyacının yoğun olduğu aylarda ışıma miktarının az olması ve maliyetinin yüksek olması gibi dezavantajlar içermektedir. Fotovoltaik panellerin düşük verimli olmaları bir başka dezavantajlarıdır [5]. Buna rağmen şebekeden uzak kalmış radar, telekomünikasyon gibi sistemlerde fotovoltaikler en ekonomik çözümlerdendir. Bunun yanı sıra PV teknolojilerinin gelişmesi ile şebekeye doğrudan bağlı sistem uygulamaları hızla artmaktadır bu da çeşitli amaçlar için fotovoltaik enerjinin cazip

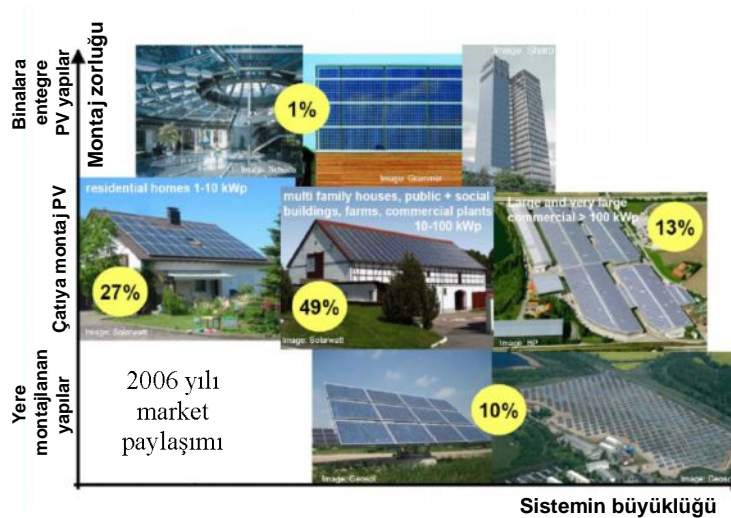
olduğunu göstermektedir [6]. Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü (DMİ) ile Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİE)'nin yaptığı araştırmaları başta Güney Doğu Anadolu ve Akdeniz Bölgeleri olmak üzere ülkemizin fotovolatik (PV) uygulamalarına elverişli olduğunu göstermektedir [7].

PV sistemlerinin en tipik ve en yaygın kullanım şekli, yerleşim yerlerinden uzak yörelerde enerji gereksinimini karşılayan bağımsız (stand - alone) sistemlerdir. Bu sistemler birkaç watt'tan birkaç yüz kW' lara kadar değişebilen güçlerde ve çok çeşitli türlerde yüklerin enerji talebini karşılayabilir. Bu tür sistemlerde yeterli sayıda güneş pili modülü, enerji kaynağı olarak kullanılır. Güneşin yetersiz olduğu zamanlarda ya da özellikle gece süresince kullanılmak üzere genellikle sistemde akümülatör bulundurulur. Güneş pili modelleri gün boyunca elektrik enerjisi üreterek bunu akümülatörde depolar, yüke gerekli olan enerji akümülatörden alınır.

Bağımsız güneş pili sistemlerinin kullanıldığı bazı tipik uygulama alanları aşağıda sıralanmıştır:

- Radyolink istasyonları, kırsal radyo, telsiz ve telefon sistemleri
- Elektrik ve su dağıtım sistemlerinde yapılan telemetrik ölçümler, hava gözlem istasyonları
- Bina içi ya da dışı aydınlatma

Güneş pili sistemlerinin uygulama alanlarının yüzdelik dağılımını gösteren grafik Şekil 1.1'de gösterilmektedir.



Şekil 1.1. Uygulama alanlarının yüzdelik dağılımı



Güneş pili sistemleri en çok iletişim alanında kullanılmaktadır. Radyolink istasyonlarının çoğunlukla elektriği bulunmayan yüksek ve ulaşım sorunu olan yerlerde güneş pili modülleri kullanmak uygun bir çözüm olmaktadır. Bu alanı, su pompalama ve aşı-ilaç koruma izlemektedir.

Bu gün dünyanın çeşitli yerlerinde, binlerce güneş pili sistemi kullanılmaktadır. Yapılan araştırmalarda güvenilirlik, yakıt, gerektirmeme ve çok az bakım isteme gibi özellikler nedeniyle bu sistemlerin kullanıldığı belirlenmiştir. Kullanılan güneş pili modülleri çoğu kez sistemi destekleyen elektronik bileşenlerden daha güvenilir ve dayanıklı bulunmuştur. Bu bileşenler dikkatle seçilirse PV bir sistemin uzun yıllar sorunsuz ve güvenilir olarak çalışması mümkündür [8].

Güneş pili uygulamalarına dair değişik uygulama örnekleri ise Resim 1.1'de verilmiştir.



(a)



(b)



(c)



(d)

Resim 1.1. (a) Şebekeden bağımsız PV Telekomünikasyon sistemi (b) PV trafik işareti (c,d) Şebekeden bağımsız doğrudan aküye bağlı sistemler

Günümüzde bu uygulamaların yanı sıra yatırımdan en yüksek faydayı sağlama düşüncesi öne çıkmış ve şebeke ile paralel çalışan veya şebekeye doğrudan enerji aktarabilen sistemler önem kazanmıştır. Bu tip uygulama örnekleri gün geçtikçe çoğalmaktadır. Güç kapasiteleri ise MW değerlerine ulaşmış olup, birçok ülkede şebeke etkileşimli PV enerji üretim merkezleri kurulmaya başlanılmıştır [9].

Fotovoltaik sistemler ister şebekeye doğrudan bağlı olsun ister şebekeden bağımsız olsun maliyetleri göz önüne alındığında maksimum verimde kullanılması gereken sistemlerdir. PV sistemlerinin çıkış güç eğrisinde parçalı gölgelenme durumları hariç tek bir maksimum nokta oluşmaktadır. Doğrudan yüke veya akü grubuna bağlı sistemlerde sistemin maksimum güç noktasında çalışmadığı görülmüştür. Bu nedenle; PV verimliliğini artırmak ve PV'den çekilecek maksimum gücü elde edebilmek için -MPPT-Maksimum Güç İzleyicisi (Maximum Power Point Tracker) kullanmak gereklidir. Sistemden çekilecek güç artacağı için daha düşük güçte güneş panelleri kullanmak mümkün olacak böylece bütün PV sistem maliyeti düşecektir.

Bu bağlamda bir PV sisteminden maksimum gücü elde etmek günümüz şartlarında önemli bir problem haline gelmiştir. MPPT çalışma mantığı ise şu şekilde açıklanabilir; normal bir hücrede, sabit ışınım ve sıcaklık altında, P-V eğrisinde tek bir maksimum nokta vardır. PV kaynağı ve yükü optimal değil ise PV sisteminin toplam verimliliği negatif yönde etkilenecektir. Güneş panelinden maksimum gücü çekmeyi amaçlayan “maksimum güç noktası izleyicileri” için (MPPT) güç elektroniği çeviricileri ve kontrol teorileri geliştirilmiştir. Bu teknikler “dolaylı denetim” ve “doğrudan denetim” olarak iki grupta ele alınabilir. Dolaylı denetim tekniğinde PV çıkış gerçek gücü sürekli olarak hesaplanmaz. Burada referans denetim sinyalinin oluşturulması işlemi PV hücre özelliğine bağlı olarak belirli aralıklarla ya da örnekleme hücresi yardımı ile modül açık devre gerilimi, modül kısa devre akımı, ışınım şiddeti, modül sıcaklığı gibi değerlerinin okunması ile yapılır. Doğrudan denetim tekniği ile oluşturulan sistemler sürekli olarak PV çıkış gücünü okuyarak gerçek MPPT noktasına ulaşmayı sağlayacak dönüştürücü referans sinyalini oluşturur. Dolaylı denetim yöntemleri hızlı olmalarına karşın PV panele bağımlıdırlar ve her zaman gerçek maksimum noktayı yakalayamazlar. Doğrudan yöntemler ise daha yavaş ancak PV panellerden bağımsızdırlar [9]. Bu çalışmada

doğrudan kontrol yöntemlerinden; literatür uygulamalarında en çok tercih edilen yöntem olan P&O (Perturb and Observe - değiştir ve gözle) metodu kullanılmıştır ancak bu metodun en önemli problemi olan maksimum güç noktası etrafındaki osilasyon problemi P&O algoritması modifikasyonu ile giderilmiştir. Maksimum güç noktası metotları ve P&O metodunun avantajları, dezavantajları ve P&O algoritması modifikasyonu bölüm 3’de ayrıntılı olarak verilecektir.

Maksimum güç izleyicileri için bir başka önemli nokta ise kullanılacak çeviricidir. Şebekeden bağımsız sistemler için DA-DA çeviriciler kullanılırken, şebekeye doğrudan bağlı sistemlerde DA-DA çevirici ve DA-AA evirici birlikte kullanılan sistemler veya sadece DA-AA evirici kullanılan sistemler mevcuttur. PV maliyeti göz önüne alındığında çeviricinin tipi ne olursa olsun yüksek verimde çalışması ve çevre şartları değiştirildiğinde çeviricinin değişen referans akımlarını hızlı ve doğrulukla takip etmesi MPPT’ler için son derece önemlidir. Bu çalışmada uygulanacak çift döngü kontrolü ile DA-DA çevirici, çevirici parametreleri değişimlerinden (giriş gerilimi,yük,kapasite ve endüktans gibi) etkilenmeyen ve istenilen performans kriterleri dahilinde referans gerilim sinyalini izleyen bir model olarak çalışacaktır. Tasarlanan MPPT sisteminde evirici modeli olarak kayıplı ideal DA-AA evirici modeli kullanılmıştır. Bu konular ile ilgili ayrıntılı bilgi ise bölüm 4’te aktarılacaktır.

Bu çalışmada MATLAB/Simulink ortamında MPPT sistemi tasarımı ve uygulaması yapılmıştır. Bölüm 5’te tasarım ve simülasyon sonuçları yer alan MPPT sistemi genel olarak iki ana gruptan oluşmaktadır;

- i. PV modüldeki maksimum güç noktasının tespit edilmesi,
- ii. Tespit edilen maksimum gücün panelden çekilerek doğrudan şebekeye aktarılmasıdır.

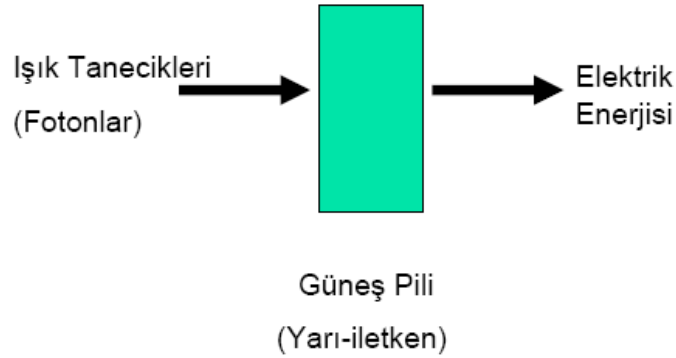
Bu çalışma enterkonnekte sisteme doğrudan bağlanan bir PV sistemi simülasyonu çalışmasıdır. Tasarım; panel modeli, algoritma modifikasyonu ve yazılımı, DA-DA çevirici modeli, DA-AA evirici modeli tasarımı ve kontrol yöntemi kısımlarından oluşmaktadır. Tasarımda izlenen adımlar ve uygulamalar ayrıntılı bir biçimde Bölüm

5'de aktarılacaktır. Tasarımda genel olarak izlenen yol özet olarak şu şekilde sıralanabilir;

- İdeal fotovoltaik güneş hücresi modeli eşdeğer devre modelinden faydalanılarak çıkarılacak ve MATLAB/Simulink simülasyon ortamında güneş hücresi güç-gerilim ve akım-gerilim karakteristikleri elde edilecektir.
- Kayıplı fotovoltaik güneş hücresi modeli oluşturulacak, bu hücrelerin seri veya paralel bağlanması ile fotovoltaik modül tasarımı yapılarak 6 adet modül seri bağlanarak istenilen güçte PV modül grubu oluşturulacaktır. (Yaklaşık 500 W) İstenilen giriş gücü bu şekilde elde edildikten sonra 6 adet modülün güç-gerilim ve akım-gerilim grafikleri elde edilerek maksimum güç noktaları tespit edilecektir.
- MPPT algoritması seçimi bölüm 3'te aktarılacaktır. Seçilen MPPT algoritma üzerinde yapılan modifikasyon ile daha performanslı çalışan MPPT algoritması elde edilecektir.
- DA-DA çevirici modeli oluşturulacak ve DA-DA çevirici çıkış gerilimi kontrolü çift döngülü kontrol yöntemi ile yapılacaktır.
- Son olarak kayıplı ideal DA-AA evirici sistem modeli oluşturulacaktır.
- Bütün sistem (paneller, algoritma, DA-DA çevirici ve DA-AA evirici) bir araya getirilerek, sistem performansı ve sonuçlar incelenecektir.

## BÖLÜM 2. GÜNEŞ PİLLERİ

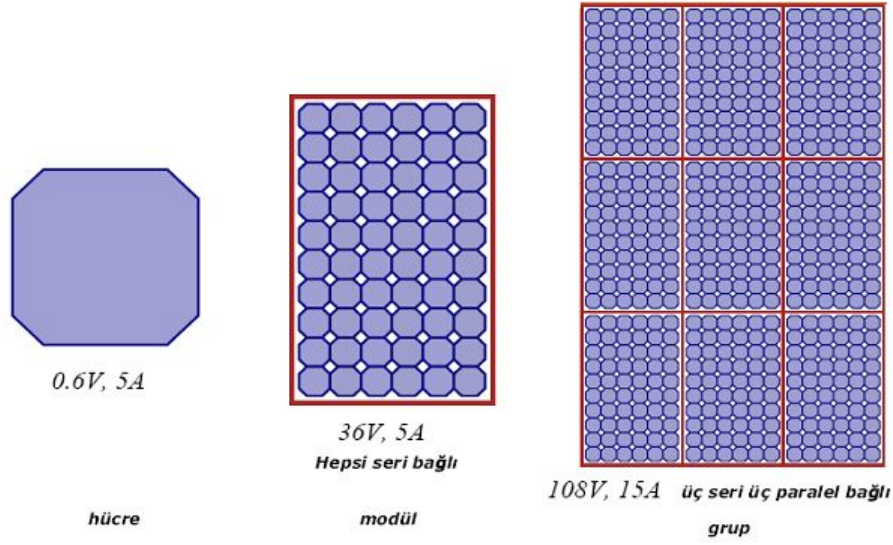
Güneş pilleri (fotovoltaik piller), yüzeylerine gelen güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarıiletken maddelerdir. Yüzeyleri kare, dikdörtgen, daire şeklinde biçimlendirilen güneş pillerinin alanları genellikle 100 cm<sup>2</sup> civarında, kalınlıkları ise 0,2-0,4 mm arasındadır. Yarı iletken bir diyot olarak çalışan güneş pili, güneş ışığının taşıdığı enerjiyi iç fotoelektrik reaksiyondan faydalanarak doğrudan elektrik enerjisine dönüştürür [10]. Güneş enerjisi, güneş pillerinin yapısına bağlı olarak %5 ile %20 arasında bir verimle elektrik enerjisine çevrilebilir. Sonsuz sayılabilecek bir kaynaktan beslenmeleri, atık madde oluşturmamaları en önemli tercih sebeplerindendir [9]. Şekil 2.1’de güneş pili çalışma ilkesi gösterilmektedir.



Şekil 2.1.Çalışma ilkesi

Çıkış gücünü artırmak amacı ile bir çok hücre Şekil 2.2’deki gibi birbirine seri veya paralel bağlanarak bir yüzey üzerine monte edilir, bu yapıya güneş pili modülü veya fotovoltaik modül adı verilir. Güç ihtiyacına bağlı olarak modüller birbirine seri veya

paralel bağlanarak birkaç Watt'tan MegaWatt'lara kadar PV sistemleri elde edilebilir.



Şekil 2.2. Bir güneş panelinin oluşması [18]

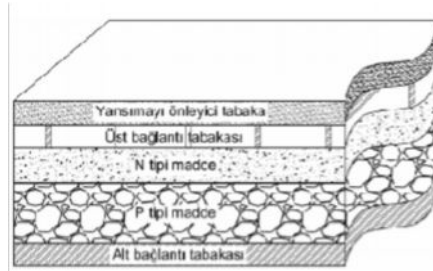
## 2.1. Güneş Pillerinin Tarihsel Gelişimi ve Fiziksel Yapıları

Güneş pilinin günümüzdeki haline gelene kadar yaklaşık 100 yıllık bir tarihçesi bulunmaktadır. İlk olarak 1839'ların başında Antoine-Cesar Becquerel tarafından güneş ışığına maruz kalan kimyasal yapıda bir bataryanın gelen ışık şiddetinin %1'i oranında gerilim ürettiği görülmüştür. Daha sonra 1873 yılında Willoughby Smith tarafından selenyum maddesinin güneşe karşı hassas olduğu keşfedilmiştir. Bu buluşun ardından 1877 yılında ise Adams ve Day tarafından selenyum maddesinin güneş ışığına maruz kaldığında akım üretebildiği gözlemlenmiştir. 1880'lerde Charles Fritts altın kaplama selenyum kullanarak yine %1 verimli ilk güneş hücresini yapmıştır. "%1 verimliliğe" rağmen, Fritts güneş hücreleri konusunda devrim yaptığını belirtmiştir. 1905 yılında Albert Einstein yaptığı açıklamada güneş hücresi üzerine fotoelektrik-metal abzorbesi ile daha çok güneş enerjisini çekmenin mümkün olduğunu belirtmiş böylece daha yüksek verimli güneş hücreleri yapmak söz konusu olmuştur. Bunun üzerine küçük gelişmeler daha yaşanmıştır, ancak en büyük gelişmeler Gordon Pearson, Darryl Chapin, and Cal Fuller gibi Bell bilim adamları tarafından 1954 yılında yarı iletken teknolojisi ile üretilen %4 verimli ilk silikon fotovoltajik hücreden sonra gerçekleşmiştir [11].

Günümüzde geline teknolojide değişik yapı ve tiplerde paneller üretildiği görölmektedir. Güneş panellerinin genelde en yaygın altı tipi bulunmaktadır;

- Tekli Kristal Silikon (Mono-Crystalline Silicon)
- Çoklu Kristal Silikon (Poly-Crystalline Silicon)
- İnce Film (Thin-Film)
- Amorf Silisyum Güneş Pilleri
- Kadmiyum Tellür İnce Film Güneş Pilleri
- Bakır İndiyum Diselenid Güneş Pilleri

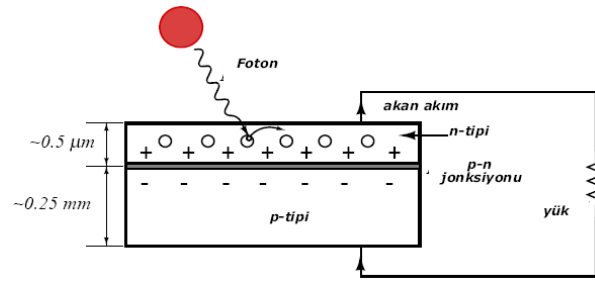
Kristal Silisyum, Galyum Arsenit (GaAs), Amorf Silisyum, Kadmiyum Tellurid (CdTe), Bakır İndiyum Diselenid (CuInSe<sub>2</sub>) gibi üretim maddeleri yaygın olarak kullanılmaktadır [9]. Şekil 2.3’de bir güneş pilinin iç yapısı verilmiştir.



Şekil 2.3. Güneş pili iç yapısı [9]

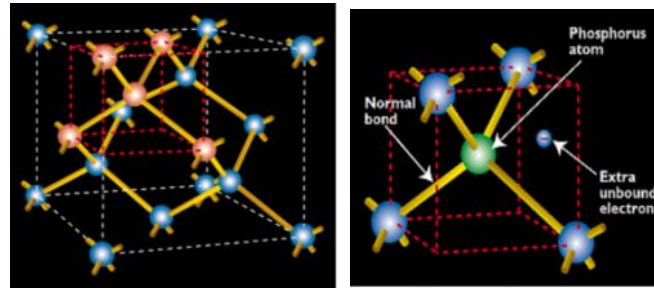
## 2.2. Çalışma İlkesi

Güneş ışığındaki elektromanyetik dalgalar, elektronları yarı iletken metalik bir yonga plakasının bir katmanından bir diğer katmanına hareket ettiren enerjiyi sağlar. Elektronların bu hareketi bir akım yaratır. İki tür güneş hücresi kullanılmaktadır: silikon ve gallium arsenid. Uydular gallium arsenidi kullanırlarken silikonlar ise genellikle yerküredeki uygulamalarda kullanılmaktadır.



Şekil 2.4. Güneş Pili elektriksel modeli

Yarı-iletken özellik gösteren birçok madde arasında güneş pili yapmak için en elverişli olanlar, silisyum, galyum arsenit, kadmiyum tellür gibi maddelerdir. Yarı-iletken maddelerin güneş pili olarak kullanılabilmesi için n ya da p tipi katkılanmaları gereklidir. Katkılama, saf yarıiletken eriyik içerisine istenilen katkı maddelerinin kontrollü olarak eklenmesiyle yapılır. Elde edilen yarı-iletkenin n ya da p tipi olması katkı maddesine bağlıdır. En yaygın güneş pili maddesi olarak kullanılan silisyumdan n tipi silisyum elde etmek için silisyum eriyiğine periyodik cetvelin 5. grubundan bir element, örneğin Şekil 2.5'teki gibi fosfor eklenir. Silisyum'un dış yörüngesinde 4, fosforun dış yörüngesinde 5 elektron olduğu için, fosforun fazla olan tek elektronu kristal yapıya bir elektron verir. Bu nedenle V. grup elementlerine "verici" ya da "n tipi" katkı maddesi denir



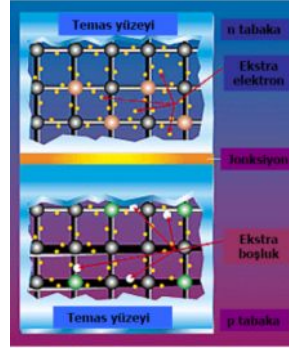
Silikon Molekül

Katkılanmış Molekül

Şekil 2.5. Katkılanmış silikon molekülünün yapısı

p tipi silisyum elde etmek için ise, eriyiğe 3. gruptan bir element (alüminyum, indiyum, bor gibi) eklenir. Bu elementlerin son yörüngesinde 3 elektron olduğu için kristalde bir elektron eksikliği oluşur, bu elektron yokluğuna hol ya da boşluk denir ve pozitif yük taşıdığı varsayılır. Bu tür maddelere de "p tipi" ya da "alıcı" katkı maddeleri denir. Şekil 2.6'da bu yapı verilmiştir.





Şekil 2.6. Alıcı madde yapısı

p ya da n tipi ana malzemenin içerisine gerekli katkı maddelerinin katılması ile yarıiletken eklemeler oluşturulur. n tipi yarıiletkende elektronlar, p tipi yarıiletkende holler çoğunluk taşıyıcısıdır. p ve n tipi yarıiletkenler bir araya gelmeden önce, her iki madde de elektriksel bakımdan nötrdür. Yani p tipinde negatif enerji seviyeleri ile hol sayıları eşit, n tipinde pozitif enerji seviyeleri ile elektron sayıları eşittir. pn eklem oluştuğunda, n tipindeki çoğunluk taşıyıcısı olan elektronlar, p tipine doğru akım oluştururlar. Bu olay her iki tarafta da yük dengesi oluşana kadar devam eder. pn tipi maddenin ara yüzeyinde, yani eklem bölgesinde, p bölgesi tarafında negatif, n bölgesi tarafında pozitif yük birikir. Bu eklem bölgesine "geçiş bölgesi" ya da "yükten arındırılmış bölge" denir. Bu bölgede oluşan elektrik alan "yapısal elektrik alan" olarak adlandırılır. Yarıiletken eklem güneş pili olarak çalışması için eklem bölgesinde fotovoltaik dönüşümün sağlanması gerekir. Bu dönüşüm iki aşamada olur, ilk olarak, eklem bölgesine ışık düşürülerek elektron-hol çiftleri oluşturulur, ikinci olarak ise, bunlar bölgedeki elektrik alan yardımıyla birbirlerinden ayrılır.

Yarıiletkenler, bir yasak enerji aralığı tarafından ayrılan iki enerji bandından oluşur. Bu bantlar valans bandı ve iletkenlik bandı adını alırlar. Bu yasak enerji aralığına eşit veya daha büyük enerjili bir foton, yarıiletken tarafından soğurulduğu zaman, enerjisini valans banttaki bir elektrona vererek, elektronun iletkenlik bandına çıkmasını sağlar. Böylece, elektron-hol çifti oluşur. Bu olay, pn eklem güneş pilinin ara yüzeyinde meydana gelmiş ise elektron-hol çiftleri buradaki elektrik alan tarafından birbirlerinden ayrılır. Bu şekilde güneş pili, elektronları n bölgesine, holleri de p bölgesine iten bir pompa gibi çalışır. Birbirlerinden ayrılan elektron-hol çiftleri, güneş pilinin uçlarında yararlı bir güç çıkışı oluştururlar. Bu süreç yeniden

bir fotonun pil yüzeyine çarpmasıyla aynı şekilde devam eder. Yarıiletkenin iç kısımlarında da, gelen fotonlar tarafından elektron-hol çiftleri oluşturulmaktadır. Fakat gerekli elektrik alan olmadığı için tekrar birleşerek kaybolmaktadırlar.

### 2.3. Panel Verimi

PV hücreler güneşten aldıkları enerjinin tamamını elektrik enerjisine dönüştüremezler. Birim alanda üretilen elektrik enerjisinin ışınım yolu ile gelen enerjiye oranı verimi vermektedir. Çeşitli üretim tekniklerinde ve değişik maddelerle üretilen PV panellerin verimleri her geçen gün daha da artarak günümüzde %21 değerine kadar ulaşmıştır [12]. Ayrıca yoğunlaştırıcı sistemler (concentrator) kullanılarak PV panel verimleri %35'lere kadar yükseltilmiştir [13].

Tablo 2.1'de değişik modül tiplerine göre panel verimlilikleri belirtilmiştir.

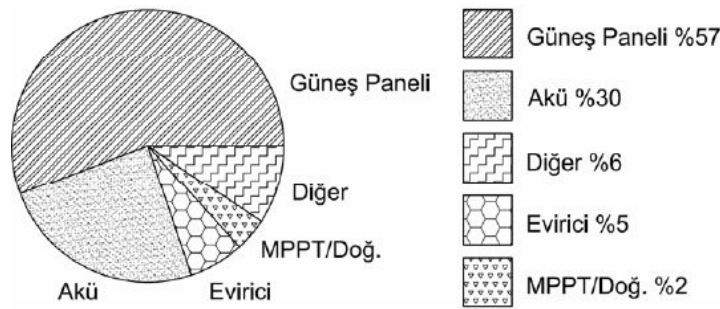
Tablo 2.1. Güneş Pili Türlerine göre verimlilikler

Güneş Pili Türü	Tipik Modül Verimliliği(%)	Laboratuarda Ölçülen Maksimum Güneş Pili Verimliliği (%)
Tek kristal silisyum	12-15	16-18-24
Çok kristalli Silisyum	11-14 (15.3)	18.6
Amorf Silisyum	6-7 (10.02)	14.7
Kadmiyum Tellür	7-8 (10.01)	15.8
Bakır İndiyum Diselenid	14.1	17.7

### 2.3.1. Panel maliyet analizi

Güneş pili sistemlerinin işletme ve bakım maliyetleri çok az olduğu için toplam sistem maliyetinin büyük bir kısmını ilk yatırım maliyeti oluşturur. Üretim teknolojisinin geliştirilmesi yüksek verimli pillerin yapılması, modül tasarım ve yapım tekniklerinin geliştirilmesi ile ilk yatırım maliyeti azalacaktır. Güneş pili sistemlerinin ilk yatırım maliyetleri arasında arazi, tesisat, montaj, inverter ve diğer güç cihazları gibi destek elemanlarının maliyeti yer alır. Destek sistemlerinin maliyeti bir güneş pili sistemini maliyetinin yaklaşık yarısını oluşturduğu için, bu tür maliyetleri azaltmak en az modül maliyetini azaltmak kadar önem taşır.

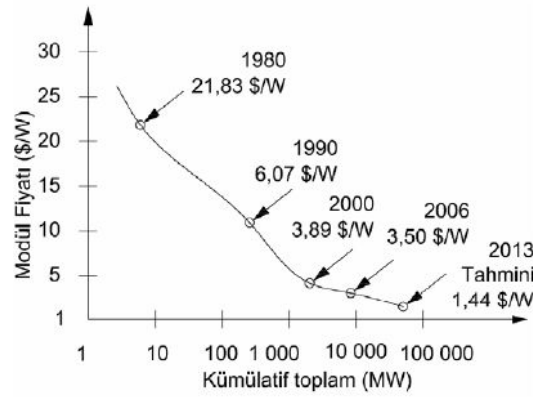
Şekil 2.7’de PV sistem elemanlarının maliyetini gösteren grafik yer almaktadır [14].



Şekil 2.7. PV yapı maliyet oranları [9]

Yakın geçmişe kadar alışla gelmiş elektrik enerjisi üretim biçimleri ile karşılaştırıldığında çok pahalı olan PV sistemlerinin kullanımı yalnızca iletişim, uzay çalışmaları gibi özel uygulama alanlarında sınırlı kalmıştır. Son yirmi yılda PV teknolojilerindeki gelişmelere ve PV pazarının büyümesi ile birlikte maliyetlerde de bir düşüş eğilimi gözlenmeye başlanmıştır. Bu gün gelinen durumda, PV güç üretiminin yılda %25-%30 dolayında artacağı tahmin edilmektedir.

Şekil 2.8’de PV panel fiyatlarının \$/W cinsinden yıllara göre değişimi ve gelecek yıllardaki tahmini sonuçları veren grafik verilmiştir [15]. Buradan hareketle PV sistemlerin yakın gelecekte enerji ihtiyacına oldukça ekonomik çözümler getireceği söylenebilir [7].



Şekil 2.8. Yıllara göre PV Maliyet grafiği

Fotovoltaik güç sistemlerinin anahtar teslim \$/W fiyatları sistemin büyüklüğüne, bulunduğu bölgeye, şebekeye bağlı ya da şebekeden bağımsız olmasına bağlı olarak, oldukça geniş bir aralıkta değişebilmektedir. Örneğin, şebekeden bağımsız 100-500W büyüklüğündeki güç sistemlerinin fiyatı 14\$/W– 41\$/W arasında değişirken, 1-4 kW sistemler için 10\$/W- 28\$/W arasında hesaplar çıkarılmıştır.

#### 2.4. Işınım Şiddeti

Birim alan başına düşen güneş gücü ışınım olarak adlandırılmaktadır. Birimi  $W/m^2$ 'dir ve tepe değeri  $1000 W/m^2$ , nominal değeri ise  $800 W/m^2$ 'dir. Bu nedenle PV modüle ait bir bilgilendirme formundaki değerler tepe değeri ışıma ve nominal değerdeki ışına bilgilerine göre verilmiştir. Işıma pironemetre denilen cihaz ile ölçülmektedir. Işınım şiddeti; güneş ışığının o anki yüksekliği ve açısı, hava koşulları, gibi değişkenlere bağlıdır. PV sistemler güneşten aldıkları enerjiyi verimleri oranında elektrik enerjisine dönüştürürler. Bu yüzden PV sistemlerinin ışınım şiddeti ve güneşlenme sürelerinin yüksek olduğu alanlarda daha verimli ve kullanışlı olmaktadır.

#### 2.5. PV'lerin Türkiye'deki Durumu ve Işınım Haritaları

Türkiye 'de elektrik enerjisi üretiminin %34 'ü fueloil ve motorin tüketilerek küçük kapasitelerde yapılmaktadır. 1 MW 'dan küçük 550 'den fazla bu güç üniteleri ile 1500 MW güç üretilmektedir. Ülkemizin dağlık bir yapıya sahip olması ve yerleşim merkezlerinin birbirinden uzak olması, bu yerleşim merkezlerine elektrik enerjisinin

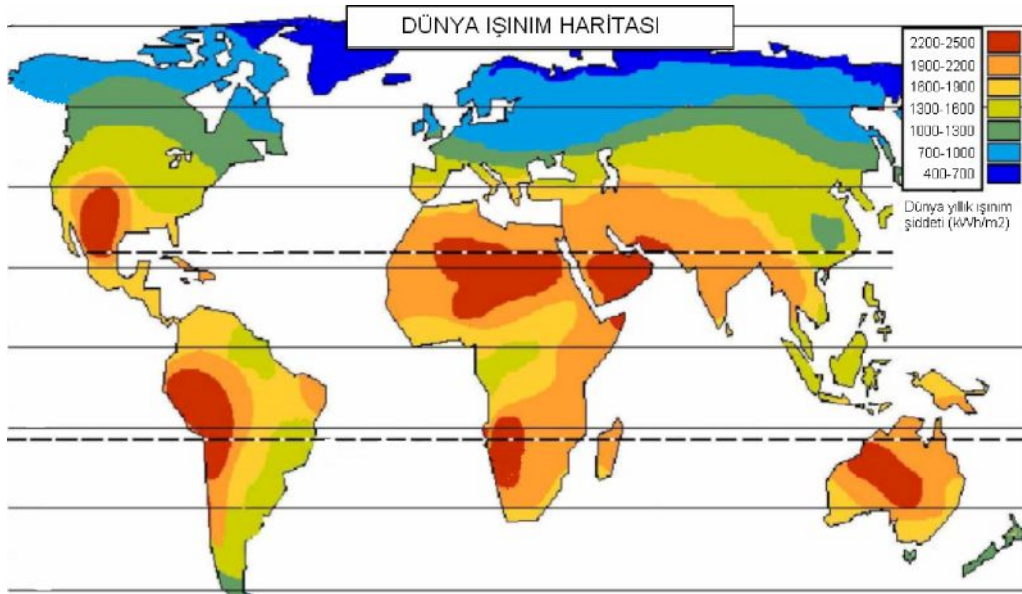
iletimini güçleştirmektedir. Üretimin ancak %3 'ü böyle uzak yörelerde tüketilebilmektedir. Bu bölgelerin enterkonnekte sisteme bağlanma maliyetlerinin çok yüksek olması ve üretilen enerjinin önemli bir bölümünün iletim ve dağıtım hatlarında kaybolduğu göz önüne alınırsa, bölgesel ve bağımsız olarak çalışacak küçük güneş enerjisi elektrik santrallerinin önemi belirginleşecektir.

Türkiye 'nin güneş enerjisi gücü ilk kez 1970 yılında, bir bilimsel araştırma kapsamında hesaplanmıştır. Belirlenen olgulara göre, Türkiye 'nin yıllık güneşlenme süresi 2608,8 saat olup, maksimum değer 361,8 saat ile Temmuz ayında ve minimum değer 97,8 saat ile Aralık ayında görülmektedir. Güneşlenme süresi yönünden en zengin bölge yılda 3015,8 saat ile Güneydoğu Anadolu 'dur. Karadeniz Bölgesi yılda 1965,9 saat ile en düşük değere sahiptir. Güneş radyasyon yoğunluğuna gelince, Türkiye ortalaması olarak yıllık değer 316,07 Cal/cm<sup>2</sup>gün kadardır. En yüksek değer 503,13 Cal/cm<sup>2</sup>gün ile yine Temmuz ayında ve en düşük değer de 132,04 Cal/cm<sup>2</sup>gün ile yine Aralık ayında belirlenmiştir. Güneydoğu Anadolu Bölgesi için yıllık ortalama güneş radyasyon yoğunluğu 341,23 Cal/cm<sup>2</sup>gün düzeyinde iken, bu değer Karadeniz Bölgesinde 246,55 Cal/cm<sup>2</sup>gün düzeyine düşmektedir. Yapılan değerlendirme sonuçları temel alınarak Türkiye 'nin bütün yüzeyine bir yılda düşen güneş enerjisi kuramsal biçimde hesaplanmış ve  $1,2 \cdot 10^{11}$  Cal bulunmuştur. Bir varsayım olarak, bu enerjinin binde birinin %30 verimle toplanması koşuluyla, yılda kullanılabilir enerji miktarı  $36 \cdot 10^6$  Cal olarak belirlenmiştir [16].

PV sistemleri genelde otoyol aydınlatma, otoyol sinyalizasyon, park bahçe aydınlatma, uzay uygulamaları, su pompalama, ev ve küçük işyerleri tipi sistemlerde kullanılmaktadır. Genel olarak gün boyunca alıcıları besleyerek ihtiyaç fazlası enerjiyi akülerinde depolayarak gerektiğinde alıcı sisteme aktaracak şekilde tasarlanırlar. Şebeke ile paralel çalışan ve şebekeye enerji gönderebilen sistemler son yıllarda önem kazanmış ve geniş uygulama alanı bulmuştur. Bahsi geçen uygulamalar dışında otomobil, sera ısıtma gibi çeşitli uygulamalarda da çalışmalar yapılmaktadır. Ülkemizde halen Telekom istasyonları, Orman Genel Müdürlüğü yangın gözetleme istasyonları, deniz fenerleri ve otoyol kullanılan güneş pili kurulu gücü 300 kW civarındadır. Ev, işyeri, kamudaki PV uygulamaların yanı sıra son yıllarda TÜBİTAK'ın destekleri ile ülkemizde güneş enerjili araç yapımında da

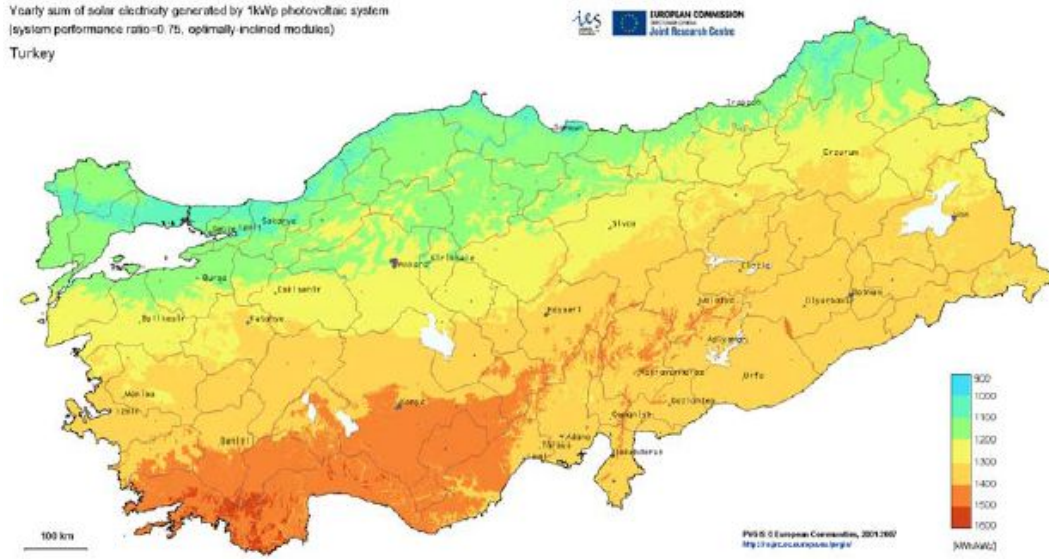
büyük ilerlemeler kaydedilmiştir. Her sene düzenlenen güneş arabaları yarışlarında Sakarya Üniversitesi dâhil olmak üzere Türkiye'deki birçok üniversite bu yarışlara katılarak güneş enerjisi teknolojileri konusunda önemli gelişmelere imza atmıştır. Aynı zamanda güneş enerjisi ile yapılan tekne gibi değişik uygulamalar da Sakarya Üniversitesi bünyesinde hayata geçirilmiştir.

Ülkemiz, coğrafi konumu nedeniyle sahip olduğu güneş enerjisi potansiyeli açısından birçok ülkeye göre daha elverişlidir. Resim 2.1'de dünya yıllık ışıınım şiddetini gösteren harita verilmiştir [9].



Resim 2.1. Dünya Işınım Haritası (kWh/m<sup>2</sup>) [9]

DMİ'nin 1966-1982 yılları arasında yaptığı güneşlenme süresi ve ışıınım şiddeti verilerinden yararlanarak EİE tarafından yapılan çalışmaya göre Türkiye'nin ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2640 saat (günlük toplam 7,2 saat), ortalama toplam ışıınım şiddeti de 1311 kWh/m<sup>2</sup>-yıl (günlük toplam 3,6 kWh/m<sup>2</sup>) olarak tespit edilmiştir. Resim 2.2'de Türkiye'nin güneşlenme haritası verilmekte ayrıca aylara göre Türkiye güneş enerji potansiyeli ve güneşlenme süresi değerleri ise Tablo 2.2'de belirtilmektedir [17].



Resim 2.2. Türkiye Işınım Haritası [9]

Tablo 2.2. Türkiye'nin aylık ortalama güneş enerjisi potansiyeli [9]

	Aylık toplam güneş enerjisi		Güneşlenme süresi
	Kcal/cm <sup>2</sup> -ay	kWh/m <sup>2</sup> -ay	(Saat/ay)
Ocak	4,45	51,75	103,0
Şubat	5,44	63,27	115,0
Mart	8,31	96,65	165,0
Nisan	10,51	122,23	197,0
Mayıs	13,23	153,86	273,0
Haziran	14,51	168,75	325,0
Temmuz	15,08	175,38	365,0
Ağustos	13,62	158,40	343,0
Eylül	10,60	123,28	280,0
Ekim	7,73	89,90	214,0
Kasım	5,23	60,82	157,0
Aralık	4,03	46,87	103,0
Toplam	112,74	1311	2640
Ortalama	308 Cal/cm <sup>2</sup> -gün	3,6 kWh/m <sup>2</sup> -gün	7,2 saat/gün

Türkiye'nin en fazla güneş enerjisi alan bölgesi Güney Doğu Anadolu Bölgesi olup, bunu Akdeniz Bölgesi izlemektedir. Güneş enerjisi potansiyeli ve güneşlenme süresi değerlerinin bölgelere göre dağılımı Tablo 2.3'de verilmiştir [9].

Tablo 2.3. Türkiye güneş enerjisi potansiyelinin bölgelere göre dağılımı [9]

<b>Bölge</b>	<b>Toplam Güneş Enerjisi (kWh/m<sup>2</sup>-yıl)</b>	<b>Güneşlenme Süresi (Saat/yıl)</b>
G.D. Anadolu	1460	2993
Akdeniz	1390	2956
Doğu Anadolu	1365	2664
İç Anadolu	1314	2628
Ege	1304	2738
Marmara	1168	2409

Ancak, bu değerlerin, Türkiye'nin gerçek potansiyelinden daha az olduğu, daha sonra yapılan çalışmalar ile anlaşılmıştır. 1992 yılından bu yana EİE ve DMİ, güneş enerjisi değerlerinin daha sağlıklı olarak ölçülmesi amacıyla enerji amaçlı güneş enerjisi ölçümleri almaktadırlar. Devam etmekte olan ölçüm çalışmalarının sonucunda, Türkiye güneş enerjisi potansiyelinin eski değerlerden %20-25 daha fazla çıkması beklenmektedir [17].

EİE'nin ölçüm yaptığı 8 istasyondan alınan yeni ölçümler ve DMİ verileri yardımı ile 57 ile ait güneş enerjisi ve güneşlenme süreleri değerleri hesaplanarak bir kitapçık halinde basılmıştır [17].

## **2.6. Optimum Panel Eğimi**

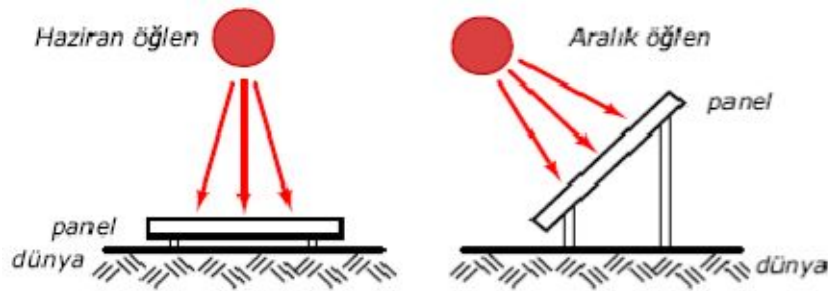
Panel eğiminin belirlenmesi tasarım aşamasında önemli bir etkidir. Panel eğimi genel olarak, konuma, sistem tipine ( PV sisteminin tek başına veya şebekeye bağlı olması durumu) ve uygulamaya bağlıdır. Eğer yıl boyunca elektrik talebi sabitse, tek başına çalışan bir sistem için panel eğimi genellikle en kötü ay veya en kötü mevsim güneş ışınımına göre belirlenir. Eğer elektrik talebi oldukça değişiyorsa, panel en



çok enerji gereken durumdaki güneş enerjisi maksimum olacak eğimde yerleştirilmelidir.

Örneğin Aralık ayında kuzey kutbu güneşten uzağa doğru eğiktir. Güneş ışınları kuzey yarım küreyi belli bir açıyla vurur ve güneş gökyüzünde daha aşağıda belirir bu da güneşin vereceği enerjinin daha düşük olacağı anlamına gelir. Buna karşılık Haziran ayında ise kuzey kutbu güneşe doğru eğiktir ve güneş ışınları kuzey yarım küreyi dik olarak vurur. Bu nedenle güneş gökyüzünde daha yukarıda belirir ve daha çok enerji verir.

Güneşten maksimum enerjiyi almak için haziran ve aralık aylarındaki optimum panelin konumları Resim 2.3’de belirtilmiştir.



Resim 2.3. Güneş ışınımının haziran ve aralık aylarında panele geliş açıları [18]

Panele mümkün olduğunca fazla ışınım alabilmek için kuzey yarım küre için panelin yüzeyi güneşe bakmalıdır ve panel güneşe doğru eğilmelidir. Eğer eğim açısı enleme eşitse panel yüzeyi mart ve eylül ortalarında güneş ışınlarına dik olacaktır.

Kısaca optimum panel eğimi için şebekeye bağlı sistemlerde panel eğimi yıllık enerji üretimi maksimum olacak şekilde seçilmelidir. Sabit panel eğimli sistemlerde bu açı yaklaşık olarak enlemin %90’ına eşit olarak alınır. Kuzey yarımküredeki paneller güneşe bakmalıdır, güney yarımküredeki paneller ise kuzeye bakmalıdır [18].

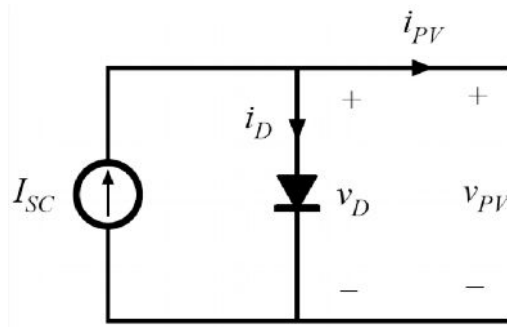
## 2.7. PV Hücresi Elektronik Devre Modeli

Güneş pilleri p-n yarı iletkenlerinin ince bir katman haline getirilerek birleştirilmesinden oluşur. Karanlıkta PV hücre çıkış  $I$ - $V$  karakteristiği diyot karakteristiğine çok benzer. Işığa maruz kaldığında fotonlar sayesinde elektron hareketi dolayısı ile akım sağlanır. PV panel kısa devre edildiğinde bu akım harici yük üzerinden, açık devre halinde bırakıldığında ise bu akım karakteristik p-n bileşimli diyot üzerinden devresini tamamlar [19].

### 2.7.1. İdeal PV hücre modeli

PV Hücreleri yapısında seri paralel bağlı dirençler bulunur. Bu dirençlerin PV çıkış akımına etkisi vardır.  $R_s$  direnci çok küçük bir dirençtir.  $R_p$  direnci ise büyük değerdedir. Bu direnç değerlerini en yüksek güç noktası (MPP) için hesaplamak mümkündür. Seri direnç  $R_s$  akan akıma gösterilen direnci belirtir ve p-n jonksiyonunun derinliğine, malzemenin mükemmel saf olmamasına ve kontakt (temas) direncine bağlıdır. Paralel direnç  $R_p$  toprağa olan kaçak akımla ters orantılıdır.

İdeal bir güneş hücresinde  $R_s = 0$  ve  $R_p = \infty$ 'dir. Bu nedenle ilk olarak hücreye seri ve paralel bağlı ideal PV hücre modeli incelenecektir. Bu modele ait devre şeması Şekil 2.9'da verilmiştir.



Şekil 2.9.  $R_s$  ve  $R_p$  dirençlerinin ihmal edildiği durumdaki güneş hücresi devre modeli

Yukarıda belirtilen güneş hücresine modeline ait denklemler denklem (2.1), (2.2) ve (2.3)'de belirtilmiştir. Burada  $I_o$  ters saturasyon akımı (amper),  $v_T$  ısıl gerilimi temsil etmekte,  $i_{SC}$  ise ışınım ile üretilen akımdır ve aynı zamanda hücrenin kısa devre akımına da eşittir.

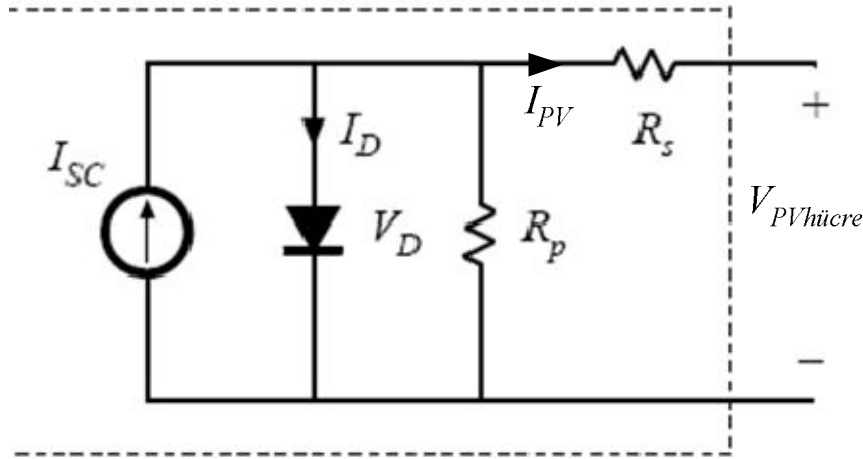
$$i_D = I_o(e^{v_D/v_T} - 1) \quad \text{formülünden;} \quad (2.1)$$

$$v_D = v_{PV} \quad \text{çıkış olduğundan,} \quad (2.2)$$

$$i_{PV} = i_{SC} - i_D \text{ 'ye eşit olur.} \quad (2.3)$$

### 2.7.2. PV hücre modeli

PV hücreleri ihmallerin göz önüne alınmadığı durumda; Şekil 2.9'daki gibi bir akım kaynağı, akım kaynağına paralel bağlı direnç ve diyot, oluşan yapıya seri bağlı bir direnç ile ifade edilirler [20]. Burada  $R_s$  direnci hücredeki iç direnci ve bağlantı dirençlerini temsil ederken,  $R_p$  direnci ise paralel kaçak direnci temsil etmektedir.



Şekil 2.10. Güneş hücresinin devre modeli

PV hücresine ait Matematiksel Model:

Güneş hücresinin çıkış akımını " $I_{PV}$ " ye ait denklemler (2.4), (2.5) ve (2.6)'da açıklanmaktadır;

Bu hücreye ait devreye Kirchoff akım kanunu uygulandığında;

$$I_{SC} - I_D - \frac{V_D}{R_p} - I_{PV} = 0 \quad \text{elde edilir.} \quad (2.4)$$

Diyot karakteristiğinden;

$$I_D = I_o(e^{V_D/V_T} - 1) \quad \text{bulunur.} \quad (2.5)$$

Buradan Kirchoff gerilim kanunu ile hücrenin çıkış gerilimi elde edilebilir.

$$V_{PVhücre} = V_D - R_s I_{PV} \quad (2.6)$$

Bir PV hücresinde oluşacak kaçak dirençlerden dolayı kayıpların küçük olması için;

$R_p \gg \frac{V_{OC}}{i_{SC}}$  olmalıdır. Fotovoltaik güç,  $R_s$  direncindeki küçük değişimlere

duyarlıdır, fakat  $R_p$  'deki değişimlere fazla duyarlı değildir.  $R_s$  üretilen  $I_{SC}$

akımından toprağa akan şönt akım  $\frac{V_D}{R_p}$  ve diyot akımı  $I_d$  ' nin farkına eşittir [21].

$R_s$  ve  $R_p$  eşitlikleri denklem (2.7) ve denklem (2.8)'de belirtilmiştir. direncindeki küçük bir artış çıkış gücünü oldukça azaltabilir. Dış devredeki yüke verilen akım, ışınlama

$$R_s = \frac{V_D - V_{PVhücre}}{I_{PV}} \quad (2.7)$$

$$R_p = \frac{V_{PVhücre}}{I_{SC} - I_D - I_{PV}} \quad (2.8)$$

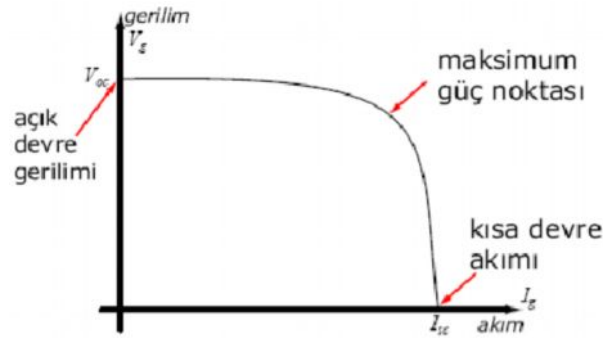
Hücresinin elektriksel performansını belirlemek için yaygın olarak kullanılan iki önemli parametre açık devre gerilimi  $V_{OC}$  ve kısa devre akımıdır  $I_{SC}$  'dir. Bu iki önemli parametre panellerin bilgilendirme formlarında yer almaktadır. Bunun haricinde; kısa devre akımı hücre çıkış terminallerinin kısa devre edilmesiyle nominal güneş ışınlama altında ölçülebilir. Bu akım aynı zamanda, sıfır terminal gerilimi altında küçük değerlerde olan diyot akımı ve toprak kaçak akımı ihmal edilerek, kısa devre durumunda ölçülen akım fotovoltaik akıma eşittir.

## 2.8. PV Karakteristik Eğrileri

PV modülünün ürettiği güç, panele gelen güneş ışınması ve panel sıcaklığına bağlıdır [22]. Güneş panelinin karakteristiği çevircinin ve kontrol sisteminin tasarımını

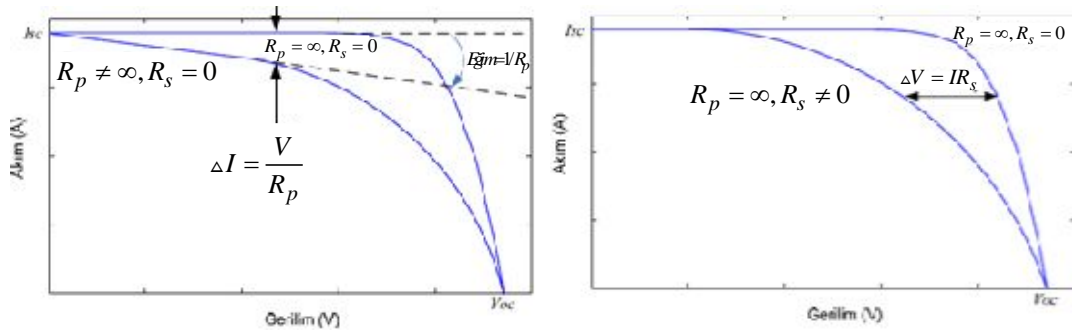
önemli ölçüde etkiler. Güneş paneli non-linear bir akım kaynağı olarak temsil edilebilir [23].

Bir PV hücresinin gerilim akım grafiği Şekil 2.11’de gösterilmektedir. Bu grafikte güneş hücresinin maksimum geriliminin  $V_{OC}$  olduğunu ve maksimum akımının ise  $I_{SC}$  olduğu görülmektedir. Ayrıca bir güneş hücresinin sabit ışınım altında çıkışında bir adet maksimum nokta oluşturduğunu görmekteyiz.



Şekil 2.11. Güneş hücresi gerilim-akım karakteristiği

PV hücre modelinde anlatılan (Bölüm 2.7) ideal PV hücresine seri ve paralel dirençlerin ( $R_s$  ve  $R_p$ 'nin )bağlanması ile hücre çıkış karakteristiği Şekil 2.12'deki gibi etkilenecektir.

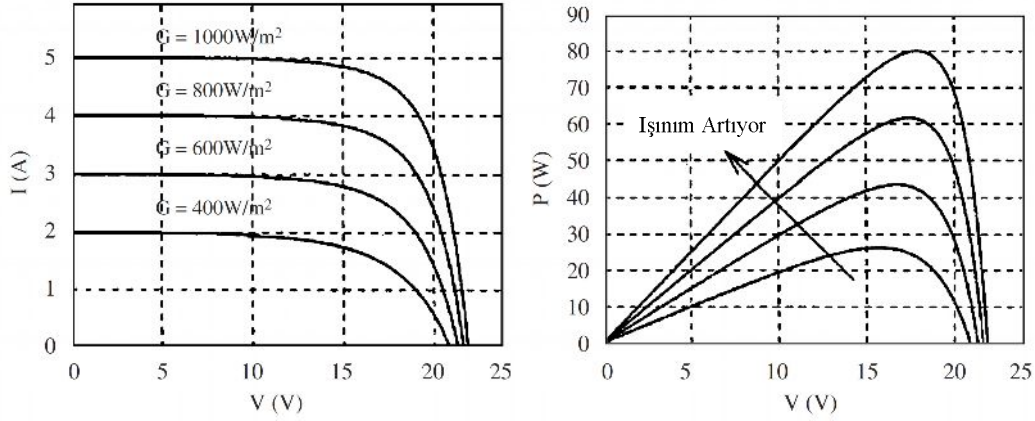


Şekil 2.12. İdeal ve kayıplı hücrede  $R_s$  ve  $R_p$  dirençlerinin hücre akım-gerilim karakteristiğine etkisi

### 2.8.1. Güneş hücresine ışınımın etkisi

Bir PV modülü değişik ışınım şartları altında tek bir maksimum noktası bulunan farklı genliklerde eğriler üretir. Örnek bir PV modülünün değişik ışınım şartları

altındaki çıkış akım-gerilim ve güç-gerilim değişimleri Şekil 2.13’de gösterilmiştir [24]. Eğrilerden de açıkça görüldüğü gibi ışınım seviyesi arttıkça çıkış akımı ve çıkış gücü yükselmektedir.



Şekil 2.13. Işınımın akım, gerilim ve güce etkisi [24]

### 2.8.2. Güneş hücresine sıcaklığın etkisi

Bir güneş hücresinde artan sıcaklık ile kısa devre akımı artar fakat açık devre gerilimi azalır.

Denklem (2.9),(2.10),(2.11) ve (2.12)’de sıcaklık değişiminin çıkış akım ve gerilimine etkisi verilmektedir.  $\Delta I$  çıkış akımı  $I_{PV}$  üzerindeki değişim ve  $\Delta V$  ise çıkış gerilimindeki  $V_{PV}$  üzerindeki değişimi ifade etmektedir. Burada  $\alpha$ ,  $I_{SC}$ ’ye ait ve  $\beta$  ise  $V_{OC}$ ’ye ait sıcaklık katsayıları olmak üzere hücrenin çıkış akımındaki değişimler denklem (2.9) ve (2.10)’da belirtilmiştir. Çıkış gerilimindeki değişimler ise denklem (2.11) ve (2.12)’de belirtilmiştir [41].

$$I_{PV} = I_{PV} - \Delta I \quad (2.9)$$

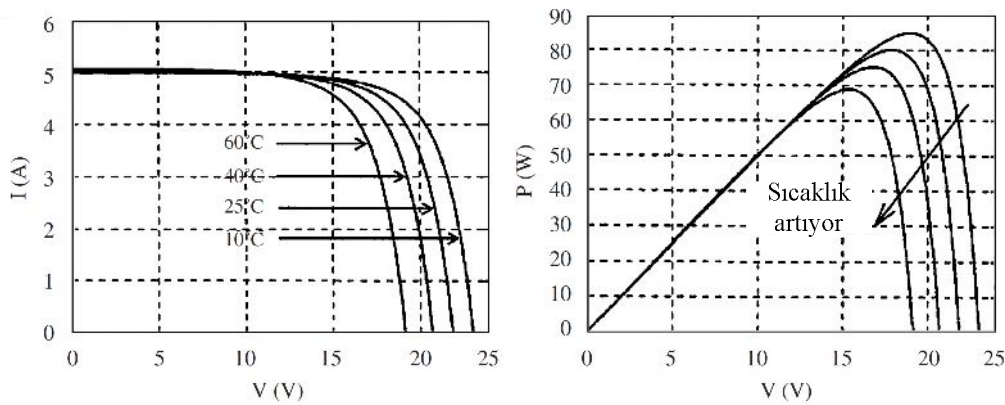
$$\Delta I = \left[ \alpha \left( 1 - \frac{G}{G_{STC}} \right) \cdot \Delta T \right] + \left( 1 - \frac{G}{G_{STC}} \right) \cdot I_{SC} \quad (2.10)$$

$$V_{PV} = V_{PV} - \Delta V \quad (2.11)$$

$$\Delta V = (\Delta T \cdot \beta - \Delta I \cdot R_s) \beta \quad (2.12)$$

Sıcaklığın artması ile ters orantılı olarak panel çıkış gerilimi düşmekte bu da çıkış gücünü negatif yönde etkilemektedir [48].

Sıcaklığın PV çıkış gerilimi ve PV çıkış gücündeki etkisini gösteren eğriler Şekil 2.14’de verilmektedir.



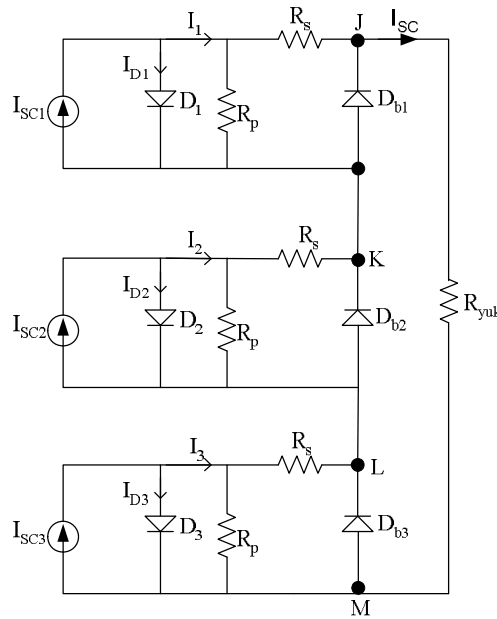
Şekil 2.14. Sıcaklığın akım, gerilim ve güce etkisi [24]

### 2.8.3. PV hücrelerine parçalı gölgelenme durumunun etkisi

PV hücrelerindeki önemli problemlerden biri de seri bağlanmış paneller üzerine eşit miktarda ışığa olmamasıdır. Bu durum literatürde “parçalı gölgelenme” olarak geçmektedir. Parçalı gölgelenme durumlarında PV hücresi üzerinden ters yönde akım akacağından hücrede aşırı ısınma bunun sonucunda da hücrenin tamamen işlevini yitirmesi gibi durumlar ortaya çıkabilir. Parçalı gölgelenme durumunda hücreleri korumak için by-pass diyotlar kullanılmaktadır.

Şekil 2.15’deki seri bağlı bu üç hücre eşit olmayan ışığa miktarlarına maruz kalmaktadır. Başka bir ifadeyle panelde “parçalı gölgelenme” durumu oluşmaktadır. Burada  $D_{b1}$ ,  $D_{b2}$  ve  $D_{b3}$  by-pass diyotlardır. İlk durumda by-pass diyotların olmadığı düşünülürse, ilk panele gelen ışığa miktarı en yüksek, ikinci panele orta seviyede ve üçüncü panele de en düşük seviyede geldiğinde,  $I_{SC1} > I_{SC2} > I_{SC3}$  olacaktır. Yüke giden  $I_{SC}$  akımı eğer  $I_{SC3}$  akımından daha düşük olursa,  $I_{D3} = I_{SC3} - I_{SC}$ ,  $I_{D2} = I_{SC2} - I_{SC}$  ve

$I_{D1}=I_{SC1}-I_{SC}$  olacaktır. Gelen ışımalar sonucunda;  $I_{SC}>I_{SC3}$ ,  $I_{SC}<I_{SC2}$  ve  $I_{SC}<I_{SC1}$  olacak ve  $I_{D3}$  ters yöndeki  $I_{SC} -I_{SC3}$  akımı yönünde akmaya başlayacaktır. Bu akımdan dolayı ters kutuplanacak olan  $D_3$  diyotu ise yüksek direnç göstererek,  $I_{SC}$  yük akımını önemli ölçüde düşürecektir. M noktası L noktasına göre daha pozitif olacak ve bu gerilim yükselecektir. Eğer ışınım seviyeleri arasındaki fark artarsa,  $D_3$  diyotu aşırı ısınmalardan dolayı zarar görecektir. Eğer başta by-pass diyot kullanılıyorsa  $I_{SC} - I_{SC3}$ 'ten dolayı akan ters akım by-pass diyot üzerinden akmaya başlayacak böylece panel zarar görmekten kurtulmuş olacaktır [47]. By pass diyotlar ile bu üç hücre birbirinden bağımsız bir şekilde çalışmaya başlamıştır.



Şekil 2.15. Eşit olmayan ışımaya maruz kalan seri bağlanmış 3 panel [47]

By-pass diyota ait karakteristik eşitlik, denklem (2.13)'de verilmektedir.

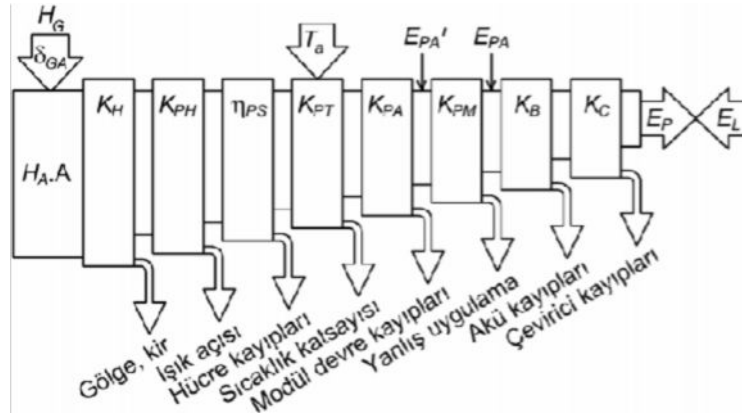
$$V_{Dbypass} = V_t \ln\left(\frac{I_{bypass}}{I_o} + 1\right) \quad (2.13)$$

## 2.9. PV Panel Verimini Etkileyen Faktörler

Güneş ışığını elektrik enerjisine çevirirken verimi etkileyen birçok etken vardır. Bu etkenlerden bir kısmı iyileştirilebilir de (örneğin panel açısı) modül özelliğine bağlı olanlar değiştirilemez [9].

Güneşten alınan enerjinin PV çıkışına iletilmesi esnasında meydana gelen kayıpları Şekil 2.16'da gösterilmiştir [25].





Şekil 2.16. PV modül değişkenlerinin çıkışa etkisi [9]

## 2.10. Sonuç

Ülkemizde enerji yatırımları yapılırken ülkemizin güneş enerjisi potansiyeli göz önüne alınmalıdır. Fosil yakıtların hızla tükenmesi, nükleer enerjinin tercih edilmemesi ve çevre şartları göz önüne alındığında yenilenebilir enerji kaynaklarından faydalanmak kaçınılmaz olacaktır.

Türkiye dünya sıralamasında güneş enerjisi potansiyelinden yararlanabilecek ülkeler arasındadır. PV sistemlerinin yatırım maliyetleri yüksek olsa da temiz, bakım maliyeti olmayan, özellikle enterkonnekte sisteme bağlanamayan son kullanıcılar için son derece elverişli sistemlerdir. Ayrıca yeni enerji yasalarının ve TÜBİTAK gibi kurumların destekleri ile PV teknolojileri kullanımı ülkemizde yaygınlaşacaktır. PV sistemlerinin çeşitli kullanım yöntemleri ve PV teknolojileri burada aktarılmıştır. Bölüm 3’de PV’den maksimum verimi alabilmek için kullanılan maksimum güç izleyicileri (MPPT) metotları hakkında bilgiler verilecektir. Bölüm 4’te ise MPPT sistemleri ve DA-DA çeviriciler, DA-AA eviriciler anlatılacaktır.

## **BÖLÜM 3. MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI İZLEYİCİLERİ**

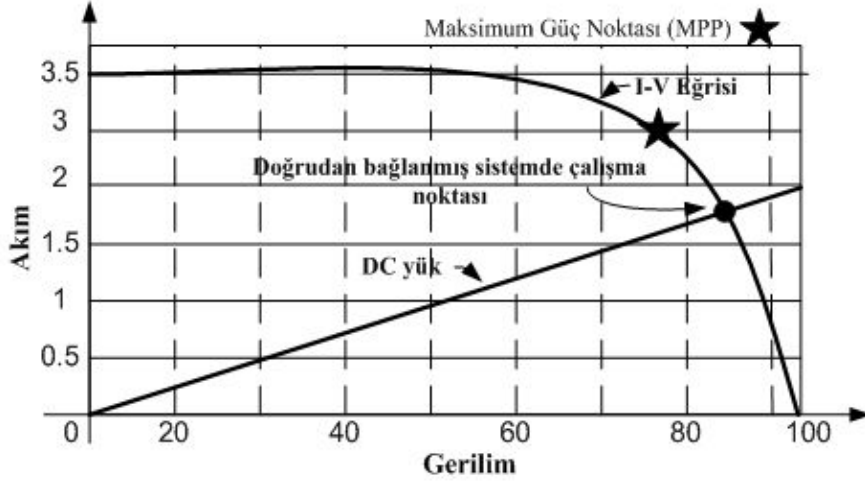
### **3.1. MPPT Tanımı ve Çalışma Prensipleri**

Maksimum Güç İzleyicileri (MGİ); PV ile batarya veya şebeke arasına yerleştirilen, yüksek frekanslı DA-DA veya DA-AA dönüştürücüler ve kontrol yöntemlerini içinde barındıran bütünlük sistemlerdir. MPPT cihazları; maksimum noktayı bulabilmek için bir algoritma, bu algoritmanın ürettiği çıkış gücünü panelden çekebilmek için DA-DA çevirici, DA-AA evirici veya hem evirici hem çevirici içeren bir sisteme ve bu sistemi kontrol edebilmek için ise bir kontrolcüye ihtiyaç duyarlar.

Maksimum güç izleyicileri PV modüllerin tam kapasitede üretebildiği maksimum gücü panellerden çekmeyi sağlayan “elektronik” güç izleme sistemidir. MPPT’ler panelleri güneşe en dik konuma doğru yönlendirerek “fiziksel hareket” sağlayan mekanik izleme sistemleri değildir. MPPT, izleme algoritmaları ile üretilen referans akımı, modülün elektriksel çalışma noktasını değiştirerek bu akımı modülden çeken, böylece modülden maksimum güç çekilmesini sağlayan elektronik sistemlerdir. Modülden çekilen bu ekstra güç ile batarya şarj akımı artırılmış olur. MPPT’ler mekanik izleme sistemleri ile birlikte kullanılabilir fakat bu iki sistem birbirinden tamamen farklıdır.

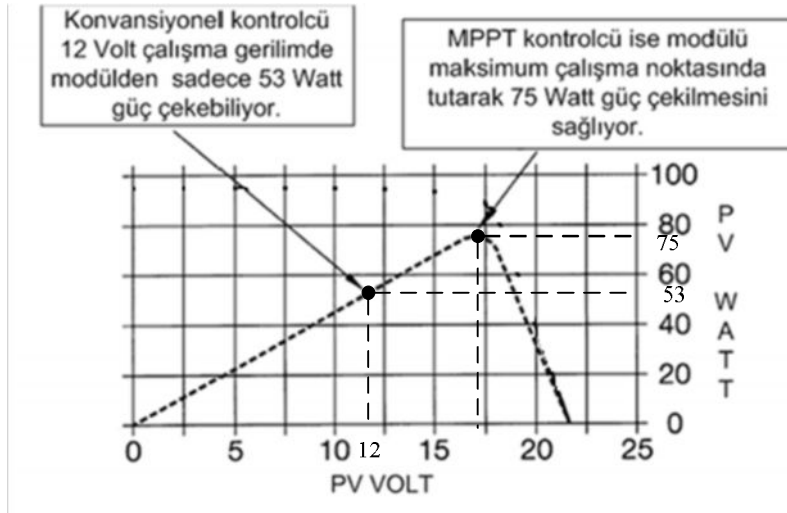
MPPT çalışma mantığını anlayabilmek için, öncelikle konvansiyonel (MPPT olmadan) çalışan bir PV şarj kontrolünü incelemek gerekir. Bir PV modül yüke doğrudan bağlandığında, (‘direct-coupled’) sistem çalışma noktası, Şekil 3.1’de

gösterildiği gibi I-V (akım-gerilim) eğrisinde panel ve yükün kesişme noktasında olacaktır [26].



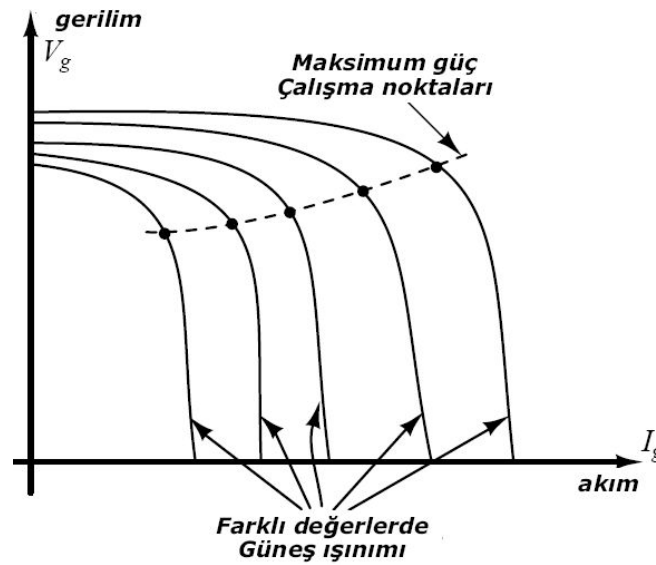
Şekil 3.1. Doğrudan yüke bağlı PV panelinin akım-gerilim eğrisi

PV modülü doğrudan aküye bağlama durumunda, modül akü geriliminde çalışmaya zorlanır ve modül üretebileceği maksimum gücün çok daha altında bir noktada çalışır. Şekil 3.2 PV modülün Güç/Gerilim/Akım eğrisinde 75 Watt gücünde standart test şartları altında ( $25^{\circ}\text{C}$  sıcaklık ve  $1000\text{W}/\text{m}^2$  ışımaya) geleneksel Akım/Gerilim eğrisini göstermektedir. Bu eğri aynı zamanda PV modülün, modül gerilimine göre verdiği gücü de göstermektedir. Örnekte belirtildiği gibi konvansiyonel kontrolcünün, modülü doğrudan aküye bağlamasından dolayı modül çalışma gerilimi 12V'tur. 75 Watt gücündeki modül 12 Volt geriliminde çalıştığı için, konvansiyonel kontrolcü yapay olarak modül çalışma gücünü yaklaşık olarak 53Watt'a sınırlamıştır [27].



Şekil 3.2. 75 Watt gücündeki bir PV modülün standart Test koşulları altında Güç-Gerilim grafiği

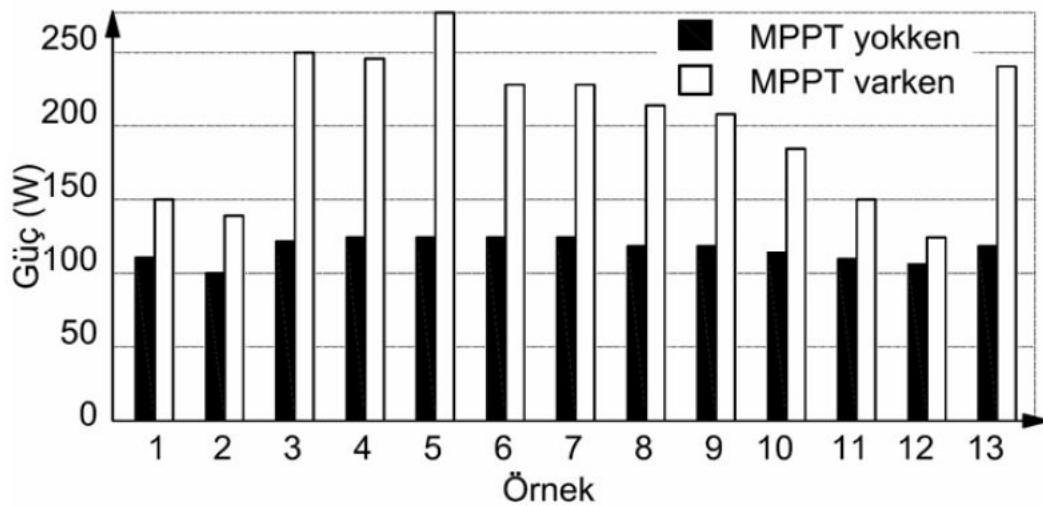
Maksimum güç izleyicilerine “izleyici” denmesinin sebebi paneli sürekli kontrol etme yani izleme zorunluluğudur. Çünkü fotovoltaik paneller değişik ışığa ve sıcaklık koşulları altında değişik çıkış karakteristikleri gösterirler ve her karakteristikte panel çıkışında farklı bir maksimum nokta oluşmaktadır bu durum Şekil 3.3 ‘de gösterilmektedir. Bu bağlamda MPPT algoritmaları bu değişimi sürekli takip etmek zorundadır ve MPPT algoritmaları çoğunlukla hat arama (line search) algoritmalarıdır.



Şekil 3.3. Panelin farklı ışığa koşulları altındaki eğrileri ve maksimum güç noktaları

Fotovoltaik sistemlerde, PV panellerinin maliyeti toplam maliyetin %57'si kadardır ve %30'u batarya sistemlerinin maliyetidir. MPPT ve inverter gibi diğer malzemelerin maliyeti ise toplam maliyetin %7'lik bir kısmını oluştururlar. MPPT maliyeti az olmasına rağmen PV sistemlerinde çok büyük öneme sahiptir çünkü PV'nin verimli kullanılmasını sağlayan en önemli yapı kuşkusuz MPPT'dir. Güneş hücrelerin maliyetinin fazla olmasından dolayı, PV panellerde maksimum noktada işlem yapmak son derece önemlidir [28].

Bir maksimum güç izleyicisi, güneş panelinin çıkış gücünü %45 artırmaktadır[14]. Değişik hava şartları altında gerçekleştirilen deneylerden elde edilmiş değişik 13 adet veriden elde edilen sonuçlar Şekil 3.4'de grafiksel olarak gösterilmektedir [9,28].



Şekil 3.4. MPPT ve MPPT olmadan üretilen enerjilerin karşılaştırması[9]

### 3.2. MPPT Teknikleri

Günümüzde birçok maksimum güç noktası belirleme tekniği kullanılmaktadır. Bu denetim teknikleri “*dolaylı denetim*” ve “*doğrudan denetim*” olarak iki ana grupta ele alınabilir. Dolaylı denetim tekniğinde PV çıkış gerçek gücü sürekli olarak hesaplanmaz. Burada referans denetim sinyalinin oluşturulması işlemi PV hücre özelliğine bağlı olarak belirli aralıklarla yada örnekleme PV hücresi yardımı ile

modül açık devre gerilimi, modül kısa devre akımı, ışınım şiddeti, modül sıcaklığı gibi değerlerinin okunması ile yapılır. Doğrudan denetim tekniği ile oluşturulan sistemler sürekli olarak PV çıkış gücünü okuyarak önceki çıkış gücü ile karşılaştırıp MPPT noktasına ulaşmayı sağlayacak dönüştürücü referans sinyalini oluşturur [9].

Bu bölümde MPPT sisteminde “maksimum güç noktasını tespit etme” teknikleri hakkında kısa bilgiler verilerek tasarım için uygun MPPT tekniği seçilecektir.

### 3.2.1. Dolaylı denetim

Dolaylı denetim tekniği PV karakteristiğine dayalı olarak deneysel sonuçlarla oluşturulmuş tabloları, modül açık devre gerilimi, modül kısa devre akımı, ışınım şiddeti, modül sıcaklığı gibi değerleri doğrudan yada matematiksel eşitlikler yardımı ile kullanarak MPPT noktasını tahmin etmeye dayalı bir yöntemdir. Bu yöntemle yaklaşık MP noktası bulunur.

Dolaylı denetim tekniklerinin içerisinde “Sabit Gerilim Metodu” “Sabit Akım Metodu” ve “Pilot hücre Metodu” yöntemleri yer almaktadır.

#### 3.2.1.1. Sabit gerilim metodu

Birçok güneş hücresinde maksimum güç noktasındaki çalışma gerilimi açık devre geriliminin belli bir oranına eşittir. Sabit gerilim metodu CV (Constant Voltage) metodu adıyla da literatürde kullanılır.

Bu yöntemde açık devre gerilimi  $V_{OC}$  ölçülerek panelin maksimum çalışma gerilimi  $V_{MP}$  belirlenir. Bu yöntemle ait denklem (3.1)'de belirtilmiştir.

$$V_{MP}=k \cdot V_{OC} \quad (3.1)$$

Her panel için k değeri değişmektedir. Örneğin yüksek kaliteli silikon hücreler için  $k=0,72$  olmalıdır ancak bu değer değişebilir.” k “ olarak belirtilen katsayı doldurma faktörü olarak geçmektedir. “k ” ifadesi denklem (3.2)'deki gibi yazılabilir.

$$k = \frac{\text{maksimum güç}}{\text{güç}\{V_{OC}, I_{SC}\}} = \frac{V_{MP} \cdot I_{MP}}{V_{OC} \cdot I_{SC}} \quad (3.2)$$

“k” katsayısı hücredeki şönt ve seri bağlı dirençlerin mertebesi hakkında bilgi vermektedir. İyi bir doldurma faktörü 0,6 ile 0,8 arasında değişmelidir çünkü hücre kalitesi zamanla azaldıkça seri direnci artmaya başlar ve bu da doldurma faktörünün düşmesine sebep olur.

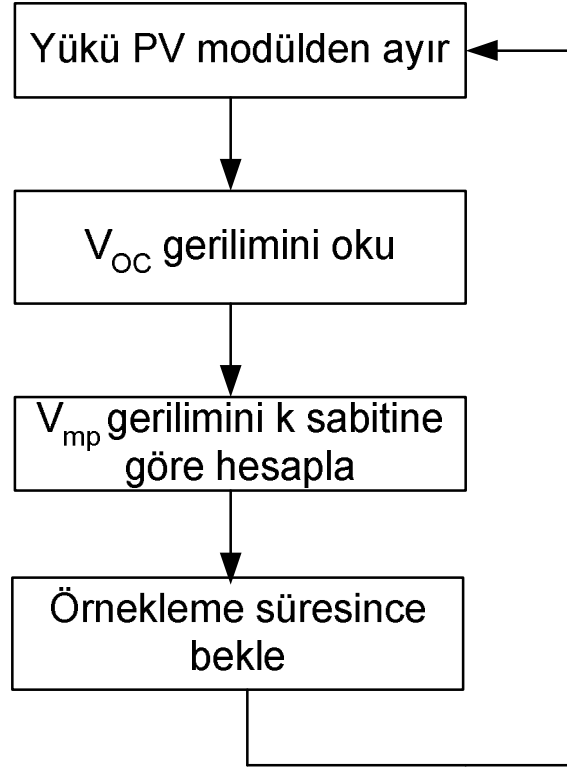
Burada k sabiti değişmediğinden MPPT gerilimi ( $V_{MPPT}$ ) açık devre gerilimi ( $V_{OC}$ ) yardımı ile kolaylıkla bulunabilir. Örnekleme işlemi çıkış yükü devrede değilken  $V_{OC}$  geriliminin okunması ile gerçekleşir [9].

Sabit gerilim metodu oldukça basit, karmaşık devreler gerektirmeyen, ucuz ve kullanışlı bir yöntemdir. Ayrıca sabit gerilim metodu düşük ışımalar altında diğer metotlara göre yüksek verimlilik gösterir. Tablo 3.1’de bu duruma ait deneysel bir örnek çalışma sonuçları verilmiştir [29]. Ancak referans işareti oluşturabilmek için gereken  $V_{OC}$  gerilim bilgisini okuyabilmek için PV modülden yükü ayırma gerekliliğinin yükler için sorun teşkil etmesi, bu esnada güneş enerjisinden faydalanılamaması, gerçek MPPT işleminin sürdürülememesinden dolayı güç kayıplarının oluşması, k noktasının tam olarak belirlenememesi ve zaman içinde bu katsayının değişme ihtimalinin yüksek olması olumsuz etkileridir.

Tablo 3.1. Sabit gerilim metodunun düşük ışımalarındaki verimliliği [29]

<b>İşıma</b>	<b>Sabit Gerilim</b>	<b>Artan İletkenlik</b>
1000 W/m <sup>2</sup>	96.6 %	97.4 %
800 W/m <sup>2</sup>	96.5 %	97.2 %
600 W/m <sup>2</sup>	96.3 %	97.5 %
400 W/m <sup>2</sup>	96.5 %	97.6 %
300 W/m <sup>2</sup>	96.5 %	82.1 %
200 W/m <sup>2</sup>	96.4 %	-
100 W/m <sup>2</sup>	38.9 %	-

Şekil 3.5 Sabit Gerilim metoduna ait akış diyagramını göstermektedir.



Şekil 3.5. Sabit gerilim metodu akış diyagramı

### 3.2.1.2. Sabit akım metodu

Sabit akım (CC-Constant Current) diğer ismiyle kısa devre akım metodu sabit gerilim metoduna çok benzer. PV modül MPPT akımı ( $I_{MP}$ ) kısa devre akımı ( $I_{SC}$ ) ile orantısal bir ilişki içerisindedir. Bu değer üretim tekniği ve çevresel koşullara bağlı olarak değişmekle birlikte %85'ler civarındadır [30].

Kısa devre akımı ile MPPT akımı arasındaki orantısal  $k$  sabiti sıcaklık ve ışınım değişikliğinde korunur. Kısa devre akımı ile MPPT akımı arasındaki bağıntı denklem 3.3 ile ifade edilebilir [31].

$$I_{MP} = k \times I_{SC} \quad (3.3)$$



Kısa devre akım metodu basit ve karmaşık devreler gerektirmeyen yapıda olmasına rağmen kısa devre akımının ölçülmesi gerekliliği, bu esnada enerji kaybı,  $k$  sabiti belirleme işlemi ve panel yüzeyinde meydana gelebilecek kirlilik v.b. sebeplerden kaynaklanan  $k$  sabiti sapmaları bu yöntemin olumsuz etkilerindedir. Sistem akış diyagramı ise sabit gerilim metodunda olduğu gibidir [9].

Bu algoritmanın avantajları şu şekilde sıralanabilir;

- i. Uygulamasının kolay ve ucuz olması, [32]
- ii. Hesap yükünün olmaması, [32]
- iii. Sabit durumlarda ve düşük ışımalarda diğer metotlara göre yüksek verimlilik göstermesi. [29]

Sabit akım metodunda; yukarıda belirtilen avantajların yanı sıra bir takım dezavantajlar mevcuttur. Örneğin; “ $k$ ” katsayısını belirlemek zordur ve genelde doğru “ $k$ ” katsayısı belirlenemez bu nedenle doğru MP noktası tam olarak yakalanamaz [26]. Parçalı gölgelenme durumu gibi PV çıkışında oluşacak birkaç MP noktasından global maksimum olanı seçemez [32]. Ayrıca kısa devre akımını ve açık devre gerilimi ölçülürken kayıplar oluşur [26].

### 3.2.1.3. Pilot hücre metodu

Bu metot kısa CV(sabit gerilim) ve CC (sabit akım) metotlarının bazı dezavantajlarını ortadan kaldırmak amacı ile geliştirilmiştir. Bu metotta bir pilot hücre seçilir ve bu hücreden kısa devre akımı ve açık devre gerilimi ölçümü yapılır. Böylece kısa devre akımını ve açık devre gerilimini ölçerken oluşan kayıplar giderilmiş olur ancak bununla birlikte bütün hücreler eşit ışımaya altında olduğu varsayımından dolayı doğru MPP noktasını yakalamama riski oldukça fazladır [26].

### 3.2.2. Doğrudan denetim

Doğrudan denetim MPPT algoritmaları üç ana grupta toplanabilir; model-tabanlı metotlar, yapay zekâ (öğretme-tabanlı) algoritmalar ve arama algoritmaları [33].

(a) Model tabanlı metotlar, maksimum gerilim noktasını veya maksimum akım noktasını hesaplayabilmek için bir matematiksel model veya tablodan bakma yöntemi kullanırlar.

(b) Yapay Zekâ (Öğretme-tabanlı) algoritmaları bulanık mantık ve yapay sinir ağları gibi yapay zekâ sistemlerini içerirler.

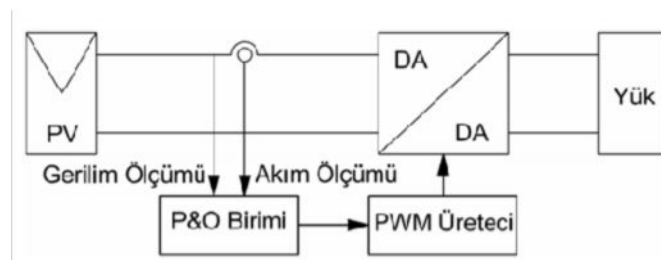
(c) Arama algoritmaları ise P&O (değiştir ve gözle) algoritmalarını ve IC (artan iletkenlik) algoritmaları panel akım ve gerilimini ölçerek değişik hava koşulları altında panel çıkışındaki maksimum noktayı bulmaya çalışırlar.

Doğrudan denetim metodu PV gerilim ve/veya akım değerlerini kullanır. Doğrudan denetim metodu devre çalışmaya devam ederken ölçüm ve maksimum noktayı tespit etme işlemlerini yapar, doğrudan denetimi dolaylı denetimden ayıran en önemli özellik de budur. Çalışma noktalarının değiştirilmesi ile en uygun nokta yakalanmaya çalışılır [9]. Bu yöntemin en önemli avantajları; maksimum güç noktası yakalanırken PV'nin MPPT sisteminden ayrılmaması ve zaman içinde değişen PV karakteristiğinin doğru maksimum noktayı yakalamayı etkilememesidir.

Bu bölümde doğrudan denetim metotları; Değiştir Gözle Metodu, Artan İletkenlik Metodu, Parazitik Kapasite Metodu, Model Bazlı MPPT Algoritmaları, Bulanık Mantık ve Yapay Sinir Ağları Metotları ve Diğer Metotlar tanıtılacaktır.

### 3.2.2.1. Değiştir gözle metodu

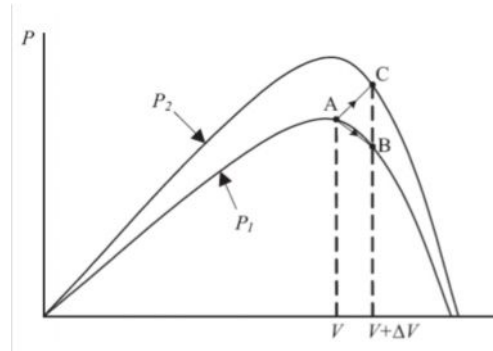
Değiştir Gözle (P&O- Perturb and Observe) algoritması uygulamasının kolay olması nedeni ile literatürde en çok kullanılan algoritmadır [26].



Şekil 3.6. Değiştir Gözle metodu ile denetlenen çevirici [9]

Şekil 3.6 bu metodun şebekeden bağımsız bir PV sisteminde nasıl kullanılacağını göstermektedir. P&O algoritması DA-DA çevircinin referans akımını veya gerilimini belirleyen bir algoritmadır. P&O algoritması tepeye tırmanma (hill-climbing) algoritması adı ile de anılır.

Şekil 3.7’de görülen P-V eğrilerinin düzgün sıcaklık ve ışımada bir adet global maksimum noktası olduğu söylenebilir [26]. Değiştir-gözle (P&O) yönteminde PV çıkış gücü sürekli olarak izlenir ve kontrol değişkeninin hareketi ile gücün hareketi arasında bir bağıntı kurularak referansın azaltmasına ya da artırılmasına karar verilir [9]. Güneş paneli bir güç çevircisine bağlıdır ve güç çevircisinin çalışma doluluk oranı değiştiğinde, PV çıkış akımı değişir ve buna bağlı olarak PV çıkış gerilimi değişir. Şekil 3.7’de MPP noktasının sol tarafında gerilim arttığında/azaldığında güç artmaktadır/azalmaktadır, MPP noktasının sağ tarafında ise gerilim arttığında/azaldığında, güç azalmaktadır/artmaktadır. Bu nedenle gerilim değiştirildiğinde güçte bir artma var ise aynı yönde değişim devam etmeli, eğer güçte bir azalma söz konusu ise değişim tersine çevrilmelidir [32]. Bu algoritmanın özeti Tablo 3.2’de yer almaktadır [9].



Şekil 3.7. P&amp;O ve Tepeye-tırmanma (Hill Climbing) algoritmaları [32]

Tablo 3.2. Değiştir gözle ve tepeye-tırmanma algoritmasına ait özet

Referans Değişimi	Güçteki Değişim	Sonraki Referanstaki Değişim
Pozitif	Pozitif	Pozitif
Pozitif	Negatif	Negatif
Negatif	Pozitif	Negatif

Negatif	Negatif	Pozitif
---------	---------	---------

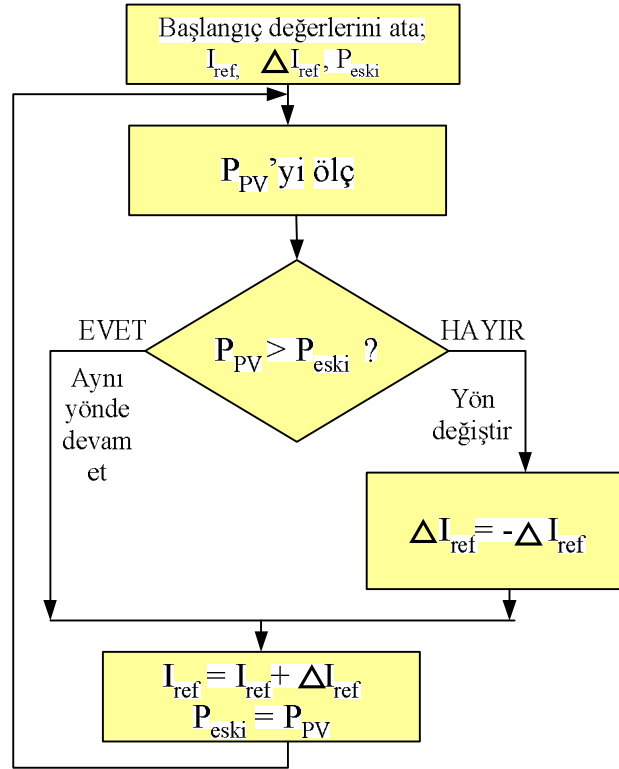
P&O algoritmaları hızlı hava değişimlerinde hatalı davranabilirler. Şekil 3.7’de A noktasından başlayan bir işlemde eğer ışınım sabit ise algoritma, PV çıkış geriliminde  $\Delta V$  kadar bir artım yapar ve panel çalışma noktası B’ye taşınır. Güçteki azalma sonucunda algoritma tekrar A noktasına gelirken eğer ışımada ani bir değişim olursa ve de güç eğrisi  $P_1$ ’den  $P_2$ ’ye taşınırsa, bu durumda A noktası C noktasına hareket eder. Bu da algoritma hala A noktasına göre işlem yapmaya devam edeceğinden gerilim artırılmaya devam eder. Yani C noktasının sağ tarafında yanlış bir noktaya gitmeye başlar. Ancak bir dahaki ölçümde bu hata fark edilir ve yön negatife çevrilir [32]. Burada oluşan algoritma hatasının düzeltilebilmesi için; maksimum nokta belirlenmeden önce akım ve gerilim işaretlerinin her birinden ikişer adet örnek alınır, bu örneklerden sırasıyla güçler hesap edilerek MP noktası bu iki güç karşılaştırılarak belirlenir.

Bu algoritmanın avantajları şu şekilde sıralanabilir;[23]

- Işımanın hızlı değişmediği durumlarda MP noktasını yüksek doğrulukla izler.
- Hesap yükü azdır ve uygulaması kolaydır.
- Modifiye edilmeye uygun bir algoritma yapısı vardır.

Yukarıda belirtilen avantajlarının yanı sıra Değiştir Gözle (P&O) Metodunun dezavantajı; algoritma MP noktası etrafında osilasyon yapar, bu da osilasyonun genliğine bağlı olarak güç kaybına sebep olur. Bu algoritmanın diğer bir dezavantajı ise hızlı hava değişimlerine tepki verememesidir [26]. Bu dezavantaj, son yıllarda gelişen işlemci teknolojileri ile algoritma örnekleme zamanı kısaltılarak ortadan kaldırılmıştır.

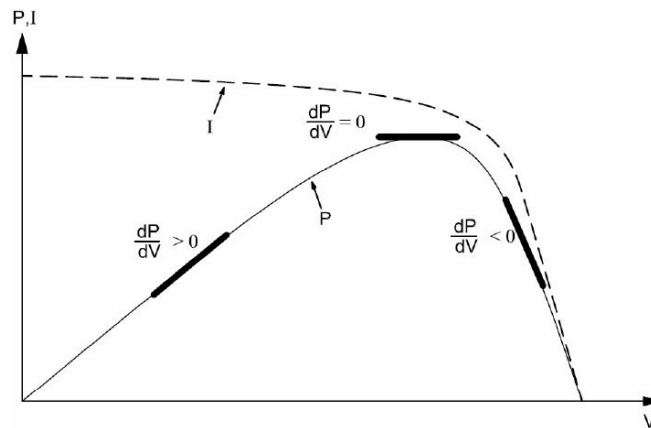
Değiştir Gözle metoduna ait akış diyagramı Şekil 3.8’de gösterilmektedir. Bu metotta akış diyagramında da görüldüğü gibi hem akım hem gerilim ölçümü yapmak gerekmektedir.



Şekil 3.8. Değiştir ve Gözle (P&O) metoduna ait akış diyagramı

### 3.2.2.2. Artan iletkenlik metodu

Şekil 3.9'da artan iletkenlik (IC-Incremental Conductance) yöntemi çalışma koşuluna ait grafik verilmiştir [18]. Artan iletkenlik metodunun temeli PV panel çıkış gücü eğiminin 0 olduğu yeri MPP, pozitif olduğu yeri MP noktasının solu, negatif olduğu yeri MP noktasının sağı olarak belirlemesine dayalıdır [16].



Şekil 3.9. Artan İletkenlik Metodu Çalışma Eğrisi [9]

Bu şekilde; PV eğrisindeki eğim, MPP noktasında sıfırdır ve bu eğim eğrinin sol tarafında pozitif, sağ tarafında ise negatiftir [32]. Bu duruma ait özet aşağıda belirtilmiştir;[9]

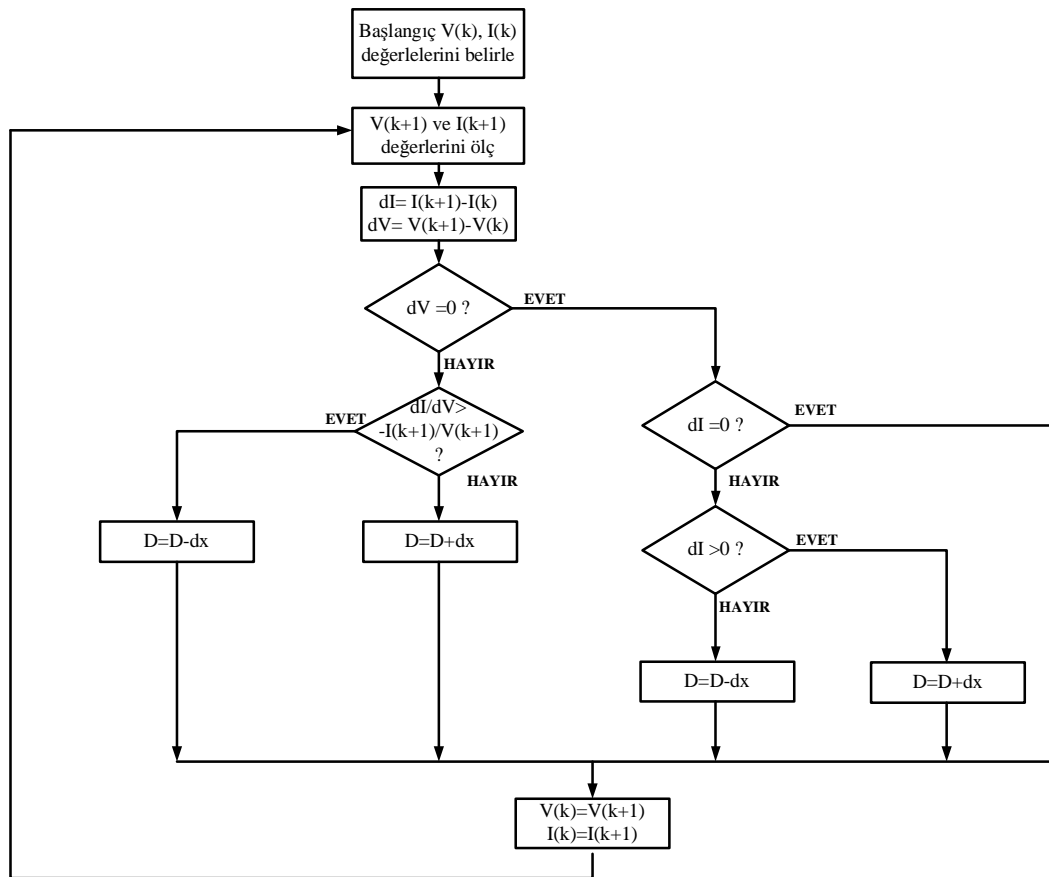
$dP/dV=0 \rightarrow$ MP noktasında,

$dP/dV>0 \rightarrow$ MP noktasının solunda,

$dP/dV<0 \rightarrow$ MP noktasının sağında,

Bu algoritmanın avantajı: Bir kere MPP noktasını yakaladığında o noktada sabit kalır ve yeni bir atmosferik değişim olmadığı sürece değişmez [32]. Bu algoritmanın dezavantajları ise; artan iletkenlik metodu değiştir gözle metoduna oranla MP noktasını tespit etmede daha başarılıdır fakat parçalı gölgelenme durumlarında doğru MP noktasına ulaşamaz. İşlem karmaşıklığı P&O algoritmasına göre daha fazladır.

Artan İletkenlik Metoduna ait akış diyagramı Şekil 3.10’de verilmiştir.



Şekil 3.10. Artan İletkenlik Metoduna ait Akış Diyagramı

### 3.2.2.3. Parazitik kapasite metodu

Artan iletkenlik metoduna benzer yapıdadır. Fakat PV çıkış kapasitesi  $C_p$  'nin işleme dâhil edilmesi ile gerçekleştirilir [26]. Denetim devresi yapısının karmaşık olması ve algoritmasındaki matematiksel işlemlerin fazlalığı metodun zayıf yönlerindedir [9].

### 3.2.2.4. Model bazlı MPPT algoritmaları

Verilen bir güneş hücresinin karakteristik denklemindeki değerler bilindiği takdirde panel üzerine düşen ışımaya ve sıcaklık değerlerinden sistemin maksimum gerilim ve maksimum akım noktası elde edilebilir [26]. Bu algorithmada MP noktası doğrudan tespit edebilir ve bu algoritma parçalı gölgelenme (birden fazla maksimum nokta oluşma) durumlarında da işe yaramaktadır. Ancak ışımaya sensörü sıcaklık sensörü gibi sensörler gerektirir. Aynı zamanda hesap yükü fazladır ve bazı PV katsayıları değişik ışımalar altında sabit olmayan bir değişim gösterirler bu nedenle bu algoritmanın doğru sonuç verecek şekilde uygulanması son derece zordur [26].

### 3.2.2.5. Bulanık mantık ve yapay sinir ağları Metotları

Son yıllarda mikroişlemciler ile bulanık mantık kontrolcülerini tasarlamak MPPT metotları arasında son derece popülerleşmiştir. Burada kural tabanı ve üyelik fonksiyonları oluşturularak PV'nin non-lineer karakteristiğinde ortaya çıkan karmaşık denklemler elimine edilir. Ancak bu metotta üyelik fonksiyonlarını doğru seçmek ve kural tablosunu doğru belirlemek son derece önemlidir. Bu kural tabanı doğru bir şekilde ayarlandığında, bulanık mantık metodu MP noktasının izlenmesinde hızlı ve yüksek doğrulukta işlem yapar. Burada uygulamadan gelen bir takım zorluklar bu metodun dezavantajı olarak gösterilebilir [32].

Bulanık mantık ile beraber popülerleşen bir başka MPPT metodu ise yapay sinir ağları yöntemidir burada ise yapay sinir ağı modeli değişik data setleri ile eğitilerek maksimum noktayı bulması sağlanır. Bu metotta doğru verilerin elde edilmesi ve bellek alanı çok büyük önem taşımaktadır [34]. Bu metotlar maliyeti ve işlem yükü sebepleriyle genellikle yüksek güçlü PV sistemlerinde tercih edilen metotlardandır.

### 3.2.2.6. Eğri uydurma metodu

PV 'nin maksimum noktadaki akımı ile panel gerilimi arasında lineer bir ilişki bulmaya çalışan bir tür sayısal analiz metodudur [34].

Fakat çeşitli hava koşullarında sıcaklık değerleri farklı değişimler gösterdiğinde bu metod işe yaramaz bu nedenle genelde düşük sıcaklık değişimi olan bölgelerde kullanılırlar [34].

### 3.2.2.7. Diğer metotlar

Yukarıda sayılan metotlar haricinde maksimum nokta arama metotları olarak; dalgalılık korelasyonu metodu, tablodan bakma yöntemi, akım alanı metodu, DA-link kapasite metodu, yük akımı ve yük gerilimi maksimizasyon metodu, Fibonacci arama algoritması, Parçacık sürü optimizasyonu (PSO-Particle Swarm Optimization) gibi çok çeşitli metotlar mevcuttur [32,35,22]. Bu metotların bir kısmı (model bazlı, akım alanı, Fibonacci, Fuzzy, PSO gibi) parçalı gölgelenme durumlarına çözüm getirmektedirler çünkü bu metotlar panel çıkış güç eğrisi üzerinde global maksimum araması yapmaktadır. Fakat bu metotlar karmaşık işlem yükü gibi bir takım uygulama zorlukları içermektedirler.

## 3.3. MPPT Tekniklerinin Karşılaştırılması ve MPPT Tasarımı için Algoritma Seçimi

Bu bölümde önceki bölümde anlatılan MPPT teknikleri karşılaştırılacaktır. Ardından literatürden alınan karşılaştırma tablosu yardımı ile, tez çalışmasında kullanılacak algoritma seçimi yapılacaktır.

### 3.3.1. MPPT tekniklerinin karşılaştırılması

Dolaylı denetim metotları basit yapılı ve maliyet yönünden avantajlı olmalarına karşın genelde MP noktasını doğru bir şekilde takip edemezler. Ayrıca örnekleme esnasında yüklerin devreden çıkartılması ve bu süre zarfında enerjinin kullanılmaması gibi zayıflıkları mevcuttur. Önceleri kullanışlı yöntemler sınıfında olsalar da günümüzde sayısal elektroniğin gelişimi ve yüksek hızlı mikro



denetleyicilerin üretilmesi doğrudan denetim tekniği uygulanabilen sistemleri ön plana çıkarmıştır. Dolaylı denetim metotları maliyetinin düşük olması sebebi ile halen küçük güçlü sistemler için kullanışlı yöntemler sınıfındadır [9].

Doğrudan denetim tekniği ile denetlenen sistemler atmosferik koşullar, yaşlanma gibi dolaylı denetim tekniğinin etkilendiği değişkenlerden etkilenmez, MP noktasını doğru bir şekilde takip ederler. Ancak sistem maliyeti ve denetim devreleri biraz daha karmaşıktır. Bu yüzden orta ve büyük güçlü sistemler için uygundur. Tablo 3.3'de denetim yöntemlerinin verim yönünden ( $\eta_{MPPT}$ ) karşılaştırılmasına ait grafik verilmiştir [26].

Tablo 3.3. MPPT verimleri [26]

Atmosfer.	Değiştir Gözle (P&O)		Artan İletkenlik (IC)		Sabit Voltaj (CV)	
	Gün	$\eta_{MPPT}$	Gün	$\eta_{MPPT}$	Gün	$\eta_{MPPT}$
Açık	20	98.7	17	98.7	20	90.4
Kısmen bulutlu	14	96.5	11	97.0	10	90.1
Bulutlu	9	98.1	11	96.7	6	93.1
Hepsi	43	97.8	39	97.4	36	91.2
Benzetim	99.3		99.4		93.1	

Tablo 3.4'de ise MPPT algoritmalarının yapıları ile ilgili karşılaştırmalar verilmiştir [16].

Tabloda her metodun özellikleri verilmiştir. Tasarımcı bu tablodan yararlanarak kendine uygun algoritmayı belirleyebilir. Her tasarım kendine özgüdür, örneğin uzaya gönderilecek bir uydu için izleme hızı, periyodik ayar, gerçek MPPT gibi noktalar önemli iken maliyet ve karmaşıklık önemsizdir. Fakat evimize kuracağımız bir MPPT sistemi için maliyet ön plana çıkabilir.

Tablo 3.4. MPPT Tekniklerinin Temel Özellikleri [9,32]

MPPT tekniği	PV panel bağımlılığı	Gerçek MP noktası tespiti	Analog & Sayısal	Periyodik ayar gerekliliği	İzleme hızı	Karmaşıklık	Gerekli bilgi
Değiştir Gözle (P&O)	Hayır	Evet	S&A	Yok	Değişken	Düşük	Akım, Gerilim
Artan İletkenlik (IC)	Hayır	Evet	S	Yok	Değişken	Orta	Akım, Gerilim
Açık devre Gerilim ( $V_{oc}$ )	Evet	Hayır	S&A	Var	Orta	Düşük	Gerilim
Kısa devre Akım ( $I_{sc}$ )	Evet	Hayır	S&A	Var	Orta	Orta	Akım
Bulanık Mantık Kontrol	Evet	Evet	S	Var	Hızlı	Yüksek	Değişken
Yapay Sinir Ağları	Evet	Evet	S	Var	Hızlı	Yüksek	Değişken
Model Bazlı MPPT	Evet	Evet	S&A	Var	Hızlı	Yüksek	Akım, Gerilim

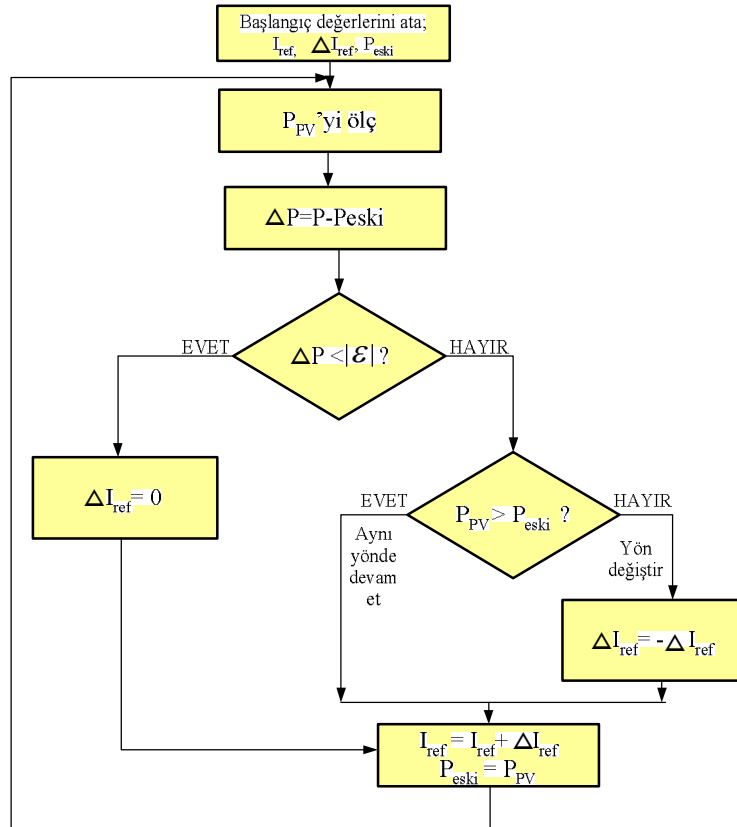
### 3.3.2. MPPT tasarımı için algoritma seçimi

MPPT tasarımı uygulaması için Tablo 3.4'ten yararlanılarak algoritma seçimi yapmak mümkündür. Buradaki önemli nokta tasarım önceliklerini belirlemektir. Bu tasarım için gerçek MPPT noktası tespiti yapan, periyodik ayar gerektirmeyen, izleme hızı uygulama biçimine bağlı olarak geliştirilebilen, karmaşıklığı düşük olan bir algoritma seçilmesi uygun görülmüştür. Bu kısıtlara uygun olarak da Tablo 3.4'ten P&O algoritması seçilmiştir. P&O algoritması literatür uygulamalarında en çok karşılaşılan algoritma olmasına rağmen önemli bir probleme sahiptir. Bölüm 3.2.1.1'de de bahsedildiği gibi P&O algoritması maksimum güç noktası etrafında

osilasyon yapar. Bu çalışmada seçilen bu algoritma üzerinde bir takım modifikasyonlar yapılarak bu osilasyon önlenecektir.

### 3.4. P&O Algoritmasındaki Osilasyon Probleminin Giderilmesi

P&O algoritmasının maksimum güç noktası etrafındaki osilasyonunu önlemek amacı ile Şekil 3.8’de belirtilen klasik P&O akış diyagramı Şekil 3.11’deki hale getirilmiştir. Buradaki  $\mathcal{E}$  olarak gösterilen değer güçteki en küçük değişim veya ( $\Delta P = P - P_{eski}$ ) algoritmanın osilasyona başladığı güç değişim değeri olarak kabul edilebilir. Bu değer “ $\mathcal{E} = \Delta I_{ref} * V * k$ ” şeklinde belirlenebilir. Güçteki bir önceki değer ile bir sonraki değer arasındaki mutlak fark  $\mathcal{E}$  değerinden az ise algoritmadaki referans akım değeri artırımı sıfırlanacak ( $\Delta I_{ref} = 0$ ) böylece osilasyon sona erecektir. Bu akış diyagramının uygulaması Bölüm 5’te simülasyon sonuçları ile birlikte aktarılacaktır.



Şekil 3.11. Modifiye edilmiş P&O algoritması akış diyagramı

### 3.5. Sonuç

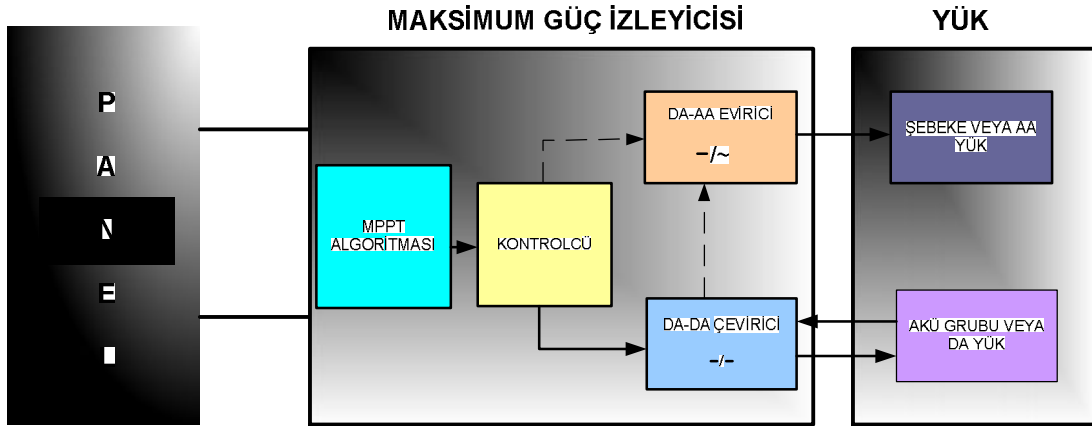
Bu bölümde MPPT sistemlerinde kullanılan algoritmalar, yöntemleri ve çalışma prensipleri hakkında özet bilgiler verilmiştir. Literatürde MPPT sistemlerine uygulanabilecek birçok yöntem yer almaktadır. Her PV uygulaması kendine özgü öncelikler içerdiğinden her tasarımcı kendi sistemine uygun bir algoritma seçimi yapar. Bu tez çalışmasında; Tablo 3.4'te öne çıkan özellikleri, literatürde en çok kullanılan algoritma olması ve modifikasyona uygun bir yöntem olması nedeniyle Değiştir-Gözle (P&O) metodu maksimum güç noktası algoritması olarak seçilmiştir. Bu algoritmadaki en önemli dezavantaj olan osilasyon problemi de algoritma üzerinde yapılan modifikasyon ile giderilmiştir. Böylece tez çalışmasına literatürde daha önce yer almayan özgün bir "modifiye edilmiş P&O" algoritması oluşturulmuş ve tez çalışmasına önemli bir özgünlük kazandırılmıştır.

## BÖLÜM 4. MPPT SİSTEMLERİ VE ÇEVİRİCİLER

MPPT sistemleri genel olarak iki ana gruptan oluşur;

- Panelin maksimum güç noktasını belirleyen arama algoritmasından oluşan yazılım kısmından;
- Maksimum güç noktasının belirlenmesinin ardından maksimum gücü panelden çeken ve yüke aktaran donanım (DA-DA ve/veya DA-AA çevirici) kısmından.

Şekil 4.1’de bir MPPT sistemine ait bloklar verilmiştir.

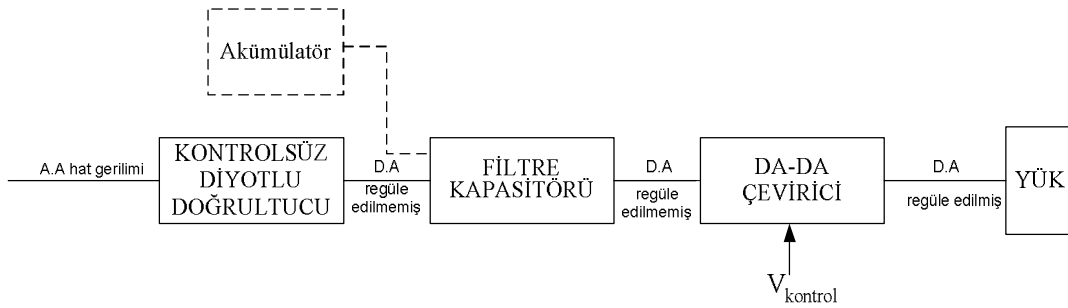


Şekil 4.1. MPPT sistemi

MPPT sistemleri şebekeden bağımsız ve şebekeye doğrudan bağlı sistemler olarak iki şekilde kurulabilir. Şebekeden bağımsız sistemler PV modül, MPPT ve buna bağlı akü grubundan oluşur, bu sistemler özellikle yerleşim yerlerinden uzak, elektrik şebekesi olmayan yörelerde, jeneratöre yakıt taşımının zor ve pahalı olduğu durumlarda kullanılırlar. Şebekeye doğrudan bağlı sistemler ise güneş panellerinden

üretileen elektrik enerjisi, Şebeke niteliklerine uygun çeviriciler ile elektriği doğrudan Şebekeye verir.

DA-DA eviriciler, MPPT sistemlerinde, ayarlanmış anahtarlamaalı DA-DA güç kaynaklarında ve DA motor sürücü uygulamalarında kullanılmaktadır. Şekil 4.2’de gösterildiği gibi, bu çeviricilerin girişinde hat geriliminin doğrultulmasıyla elde edilmiş, genellikle ayarsız doğru gerilim bulunmaktadır. Bu nedenle giriŐte, hat gerilimindeki deęiŐimlerin sonucunda iniŐ ıkıŐlar meydana gelir. Anahtarlamaalı DA-DA eviriciler, ayarsız DA girişi, istenilen gerilim kademesinde, kontrollü DA çıkışa çevirmek için kullanılırlar [36].



Şekil 4.2. Bir DA-DA evirici sistemi [36]

Bu bölümde Şebekeye doğrudan bağlı ve Şebekeden bağımsız sistemler incelenerek, örnekler verilecek ardından temel DA-DA eviriciler olan aaltıcı, yükseltici ve aaltıcı-yükseltici çeviriciler hakkında bilgilere yer verilecektir. Son olarak da DA-AA eviriciler genel olarak ele alınacaktır.

#### 4.1. Doğrudan Şebekeye Bağlı Sistemler

Bu tür sistemler iki baŐlık altında ele alınabilir;

1. Şebekeye bağlı PV güç santralleri: Gleri 10 kW<sub>p</sub> ile onlarca 100 MW<sub>p</sub> arasında değişen PV sistemler olup, çoğunlukla yerel enerji gereksinimlerine destek olmak üzere kurulmuŐlardır. Özellikle g gereksiminin arttığı saatlerde yerel PV sistemlerini devreye sokacak düzenlemeler için ticari olarak enerji hatlarının geliŐtirilmesinden daha çekici olabilmektedir. Resim 4.1’de Şebekeye bağlı PV sistemine ait bir görüntü yer almaktadır.

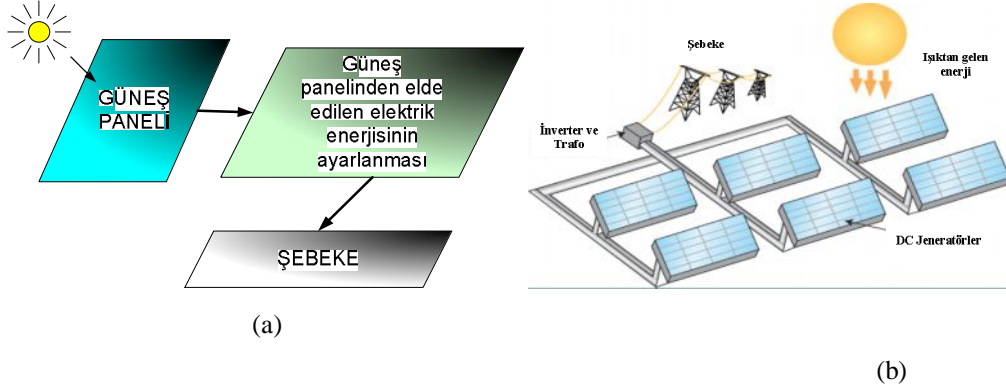


Resim 4.1. Şebekeye Elektrik Veren Güneş Pili (PV) Sistemi (1MW nominal güç)

2. Şebekeye Bağlı Dağıtılmış PV Güç Sistemleri: Son yıllarda yaygın hale gelen kullanıcıların bina çatı ve yüzeylerine yerleştirilen bu sistemler tipik olarak  $1\text{kW}_p$  ile  $50\text{ kW}_p$  arasında değişmektedir. Bu sistemlerde, üretilen fazla enerji iki yönlü sayaç uygulaması ile elektrik şebekesine satılır. Yeterli enerjinin üretilmediği durumlarda şebekeden enerji satın alınır. Böyle bir sistemde enerji depolaması yapmaya gerek yoktur, yalnızca üretilen DA elektriğin, AA elektriğe çevrilmesi ve şebeke uyumlu olması yeterlidir.

Avrupa Birliği'nin 2010 yılına kadar bir milyon küçük fotovoltaik sistem kuracağı açıklanmıştır. Japonya 2000 yılında 70000 çatıya PV sistem programını tamamlamıştır. Benzer olarak Hollanda, PV sistemlerini çatıda kur-işlet-sahip ol programını başlatmıştır.

Şekil 4.3 doğrudan şebekeye bağlı sistemlerin çalışma yapısını özet olarak göstermektedir.



Şekil 4.3. (a) Doğrudan Şebekeye Bağlı Sistemlerin Çalışma Yapısı (b) Şebekeye Doğrudan Bağlı Sistem [37]

#### 4.2. Şebekeden Ayrı (Stand-Alone) Sistemler

PV sistemlerinin en tipik ve en yaygın kullanım şekli, yerleşim yerlerinden uzak yörelerde enerji gereksinimini karşılayan bağımsız (stand - alone) sistemlerdir. Bu sistemler birkaç Watt'tan birkaç yüz kW' lara kadar değişebilen güçlerde ve çok çeşitli türlerde yüklerin enerji talebini karşılayabilir.

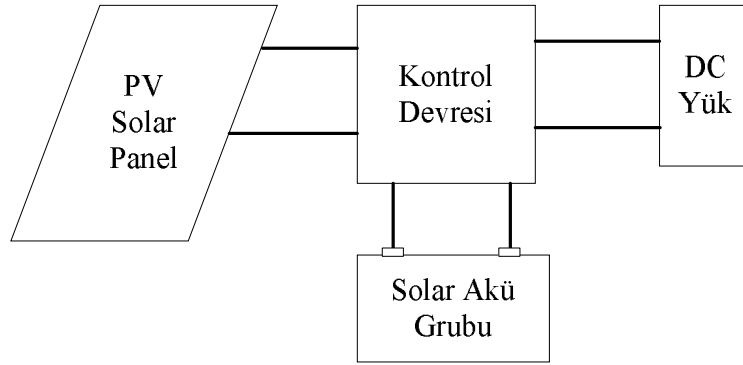
Enerji maliyetinin pahalı olması nedeniyle güneş pilleri genellikle şebekeden uzak yerlerdeki küçük güçlerin enerji talebinin karşılanmasında kullanılmıştır. Son yıllarda ise özellikle gelişmiş ülkelerde şebekeye bağlı güneş pili uygulamaları yaygınlaşmaktadır. Bu kapsamda EİE Didim Güneş ve Rüzgar Enerjisi Araştırma Merkezi'ne 4,8 kW gücünde şebeke bağlantılı güneş pili sistemi kurulmuştur. Bu sisteme ait görüntü Resim 4.2'de verilmiştir [8].



Resim 4.2. Şebeke Bağlantılı 4,8 kW Güneş Pili Sistemi



Bu tür sistemlerde yeterli sayıda güneş pili modülü, enerji kaynağı olarak kullanılır. Güneşin yetersiz olduğu zamanlarda ya da özellikle gece süresince kullanılmak üzere genellikle sistemde akümülatör bulundurulur. Güneş pili modelleri gün boyunca elektrik enerjisi üreterek bunu akümülatörde depolar, yüke gerekli olan enerji akümülatörden alınır. Akünün aşırı şarj ve deşarj olarak zara görmesini engellemek için kullanılan kontrol birimi ise akünün durumuna göre, ya güneş pillerinden gelen akımı ya da yükün çektiği akımı keser. Şekil 4.4'de şebekeden bağımsız bir güneş pili enerji sisteminin şeması verilmektedir.



Şekil 4.4. DA akım uygulamalı, şebekeden bağımsız tipik bir güneş enerji sistemi

### 4.3. MPPT Sistemlerinin Karşılaştırılması

MPPT sistemlerinde üzerinde en çok düşünülen konu sistemin ne tip olacağıdır. İlk olarak üzerinde durulması gereken husus şebekeye olan uzaklığıdır. Bataryalı sistemin avantajı enterkonnekte şebekede bir sorun olsa dahi enerji kesintisi söz konusu değildir. Fakat bu tip sistemlerde, maliyet fazladır. Bataryanın getireceği ek maliyet, bataryanın konacağı yer sorunu ve bakım gereksinimi, sistemin dezavantajlarıdır. Ayrıca bataryaların şarjı için şarj regülatörü gerekmektedir. Modül kapasitesi arttırıldıkça, akü kapasitesinin de aynı oranda arttırılması gerekmektedir [8].

Şebekeye bağlı sistemin avantajları:

- i. Batarya ihtiyacı yoktur. Sadece çok acil durumlar için sistem düşünülebilir.
- ii. PV sistemin ürettiği fazla elektrik enterkonnekte şebekeye satılabilir.
- iii. PV sistemdeki herhangi bir arızada veya PV sistemin yeterli olmadığı durumda şebeke doğrudan devreye girecektir.
- iv. Modül sayısı yani çıkış gücü istenildiği zaman arttırılabilir
- v. PV sistem tasarlanırken tüketicinin aşırı kullanımına göre modül boyutu belirlenmez. Toplam yükün belirli bir oranı PV tarafından karşılanması yeterlidir.

Şebekeye bağlı sistemin dezavantajları:

- i. Şebekede bir sorun olduğunda ve PV sistem yeterli gelmediğinde, tüketici enerjisiz kalacaktır.
- ii. Frekans, güç faktörü, harmonikler, dalga şekli gibi önemli elektriksel parametreler çok düzenli regülasyon ister. Bunu şebekeye bağlı sistemde yapmak için yüksek kalitede elektronik ekipmanlara ihtiyaç vardır. Bu da maliyeti arttırmaktadır. Eğer, az maliyetli ve güvenilir bir sistem isteniyorsa şebekeye bağlı ve küçük bir bataryalı sistem düşünülmelidir.
- iii. Şebekede bir sorun olduğunda veya kullanıcı PV sistemi şebekeden ayırmayı düşündüğünde, dual-mode inverter bataryadaki DA gerilimi AA gerilime çevirecektir. Ayrıca, şebeke kesintisi kötü ve yağışlı havalarda meydana geldiğinden, bu tip ortamlarda da PV sistem elektrik üretemeyeceğinden, bir jeneratör ihtiyacı doğabilir.

Şebekeye doğrudan bağlı sistemler yeni çıkacak enerji kanunu kapsamında hızla artış gösterecektir. Bu öngörü kapsamında bu çalışmada şebekeye doğrudan bağlı sistem uygulaması simülasyonu yapılacaktır. MPPT sisteminde panelden çıkan ayarsız gerilim DA-DA çevirici ile regüle edilerek yükseltilecek, ardından DA-AA evirici ile şebekeye aktarılacaktır. Burada gerilim kontrolü DA-DA çeviricide ve akım kontrolü ise DA-AA çeviriciden sağlanacaktır. Bu sistem ile bataryaya ihtiyaç duyulmadan panelden aldığı enerjiyi doğrudan şebekeye yansıtan az kayıplı sistem tasarlanması amaçlanmaktadır.

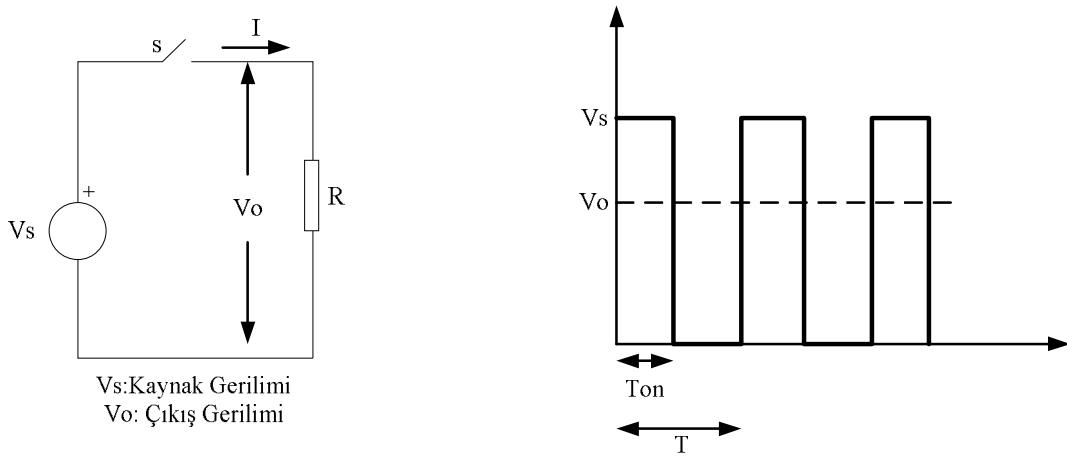
#### 4.4. Çevirici Tipleri

Bu bölümde temel DA-DA çevirici tipleri olan alçaltıcı, yükseltici ve alçaltıcı-yükseltici çeviricilerin çalışma prensibi hakkında özet bilgiler verilecektir.

##### 4.4.1. Temel DA-DA çeviriciler

DA-DA çeviriciler girişindeki DA bir seviyeyi başka bir DA seviyeye dönüştüren sistemlerdir. İdealde pasif elemanlar bulundurup enerji dönüşüm işlemi kayıpsız olarak yaparlar. Gerçekte ise verimleri %70 ile %95 arasında değişir [39].

Şekil 4.5’de görüldüğü gibi temel prensip olarak devredeki S anahtar yüksek frekansta ve belirli bir zaman oranında açılıp kapatılarak yüke aktarılan DA gerilimi denetlenebilir.



Şekil 4.5. DA ayarlayıcı Temel Devresi

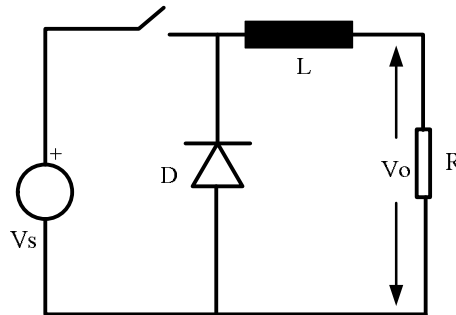
Böylece S anahtarını  $T_{on}$  süresi boyunca kapalı,  $T_{off}=T-T_{on}$  süresi boyunca da açık kalırsa yük uçlarındaki ortalama doğru gerilim değeri;

$$V_o = \frac{T_{on}}{T} V_s, T_{on} < T \text{ olur. Sabit değerli bir DA gerilimi yukarıda bahsedildiği gibi}$$

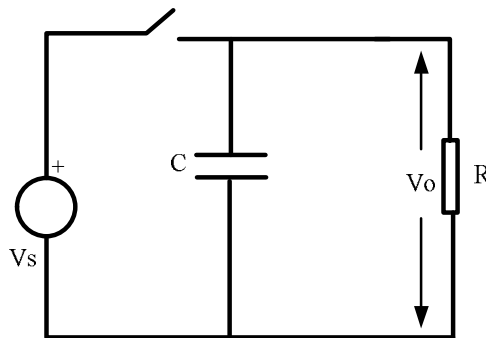
yüksek frekanslarda örneklendiği zaman elde edilen daha düşük değerli DA bileşen yanında istenmeyen AA bileşenler de meydana gelir. Saf bir DA şekli elde edebilmek için bu AA bileşenlerinin filtre edilmesi gerekir. Bu süzme işlemi için iki değişik yöntem kullanılır;

- a)Seri bobin  
b)Paralel kondansatör

Yüke seri bobin bağlanarak süzme işlemi yapılması Şekil 4.6’da görülmektedir. Bobin yük akımındaki dalgalılığı ve kondansatör ise çıkış gerilimindeki dalgalılığı azaltmaya yarar. Yük özelliğine göre gerekli düzeltme sağlamak için görev yaparlar. Bu devrede anahtar kapalı iken yolunu bobin üzerinden tamamlayan yük akımı bobinde bir enerji depolar. Depolanan enerjinin anahtar açıldığında yüksek gerilimlere neden olmaması ve faydalı enerjiye dönüşmesi için çıkışa ters yönlü paralel bir diyot bağlanır. Yüke paralel kondansatör bağlanarak süzme işlemi yapılması ise şekil 4.7’de görülmektedir. Bu uygulama yük uçlarındaki gerilim, anahtarın kapalı olduğu aralıklarda kaynak gerilimine eşit olur. Özellikle  $T_{on}/T$  oranı küçük ise, bu durum harmonik miktarını artırır. Yük uçlarındaki ortalama gerilim değeri de kondansatörün değerine bağlı olur.



Şekil 4.6. Seri bobin kullanarak süzme işlemi



Şekil 4.7. Paralel Kondansatör kullanarak süzme

Temel çevirici yapılarında hem bobin, hem kondansatör kullanılır.

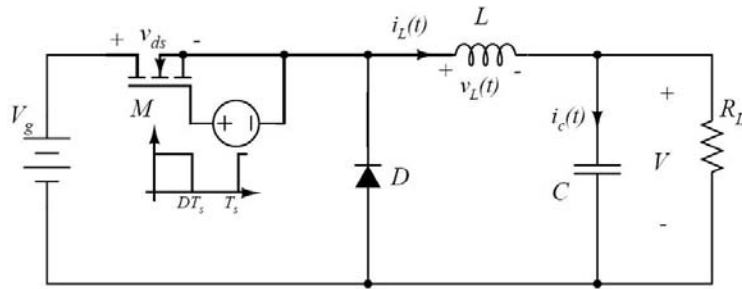
Temel olarak 3 tip çevirici vardır. Bunlar;

1. Alçaltıcı Çevirici (Step- Down, Buck)
2. Yükseltici Çevirici (Step- Up, Boost)
3. Alçaltıcı- Yükseltici Çevirici

#### 4.4.1.1. Alçaltıcı (buck) çeviriciler

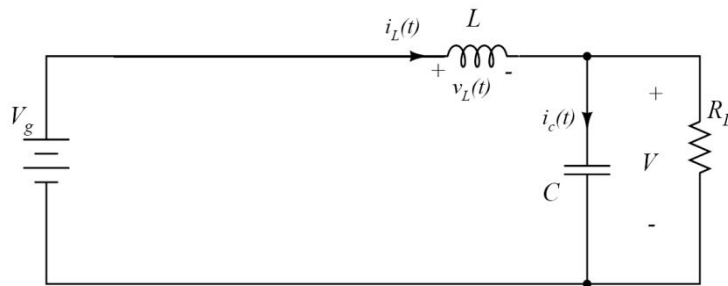
Alçaltıcı çeviriciler adından da anlaşılacağı gibi  $V_g$  doğru giriş geriliminden daha düşük bir seviyede bir ortalama çıkış gerilimi üretir. Temel uygulamaları ayarlı güç kaynakları ve DA motor hız denetimleridir [36].

Şekil 4. 8’de temel alçaltıcı çevirici devresi verilmiştir [18].



Şekil 4.8. Alçaltıcı Çevirici Devresi [18]

Anahtarın iletimde olması durumundaki devre topolojisi Şekil 4.9’de ve bu devreye ait denklemler denklem (4.1), (4.2), (4.3)’de belirtilmiştir.



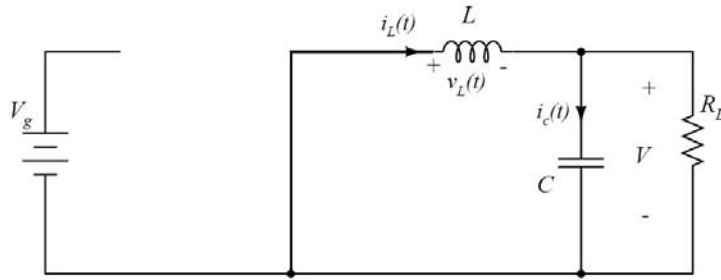
Şekil 4.9. Alçaltıcı Çevirici Devresi anahtarın iletimde olma durumu[18]

$$v_L = V_g - V \quad (4.1)$$

$$v_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} \quad (4.2)$$

$$\frac{di_L(t)}{dt} = \frac{v_L(t)}{L} = \frac{V_g - V}{L} \quad (4.3)$$

Anahtarın kesimde olması durumundaki devre topolojisi Şekil 4.10'da ve bu devreye ait denklemler denklem (4.4), (4.5)'de belirtilmiştir.



Şekil 4.10. Alçaltıcı Çevirici Devresi anahtarın kesimde olma durumu [18]

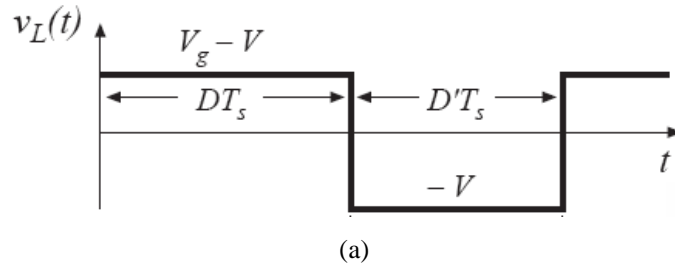
$$v_L = -V \quad (4.4)$$

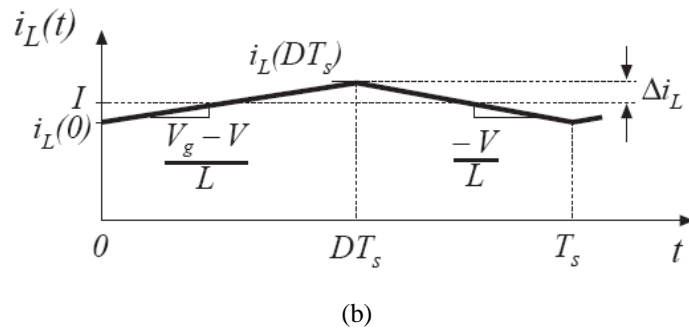
$$\frac{di_L(t)}{dt} = \frac{v_L(t)}{L} = \frac{-V}{L} \quad (4.5)$$

Anahtarın kesimde ve iletimde olmasına bağlı olarak bobin üzerindeki gerilim ve akım değişimlerini gösteren dalga şekilleri şekil 4.11 (a) ve 4.11 (b)'de ve bu dalga şekillerine bağlı denklemler denklem (4.6), (4.7), (4.8) ve (4.9)'da verilmiştir [18].

“D” anahtarın iletimde kalma süresidir. D’ anahtarın kesimde kalma süresidir.

$D+D'=1$ 'e eşittir.





Şekil 4.11. (a) Azaltan çeviricide bobin üzerindeki gerilim değişimi  
(b) bobin üzerindeki akım değişimi [18]

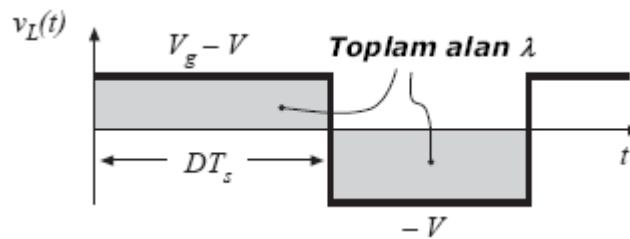
$$v_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} \quad (4.6)$$

$$i_L(T_s) - i_L(0) = \frac{1}{L} \int_0^{T_s} v_L(t) dt \quad (4.7)$$

$$0 = \int_0^{T_s} v_L(t) dt \quad (4.8)$$

$$0 = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} v_L(t) dt < v_L > \quad (4.9)$$

Bir anahtarlama periyodu boyunca, bobin üzerindeki ortalama gerilim miktarı sıfıra eşittir. Burada ortalama gerilim  $\lambda$  ile ifade edilmektedir;



Şekil 4.12. Bobin gerilimindeki toplam alan [18]

Ortalama gerilim formülünden;

$$\lambda = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} v_L(t) dt = (V_g - V)(DT_s) + (-V)(D'T_s) \quad \text{elde edilir.} \quad (4.10)$$

$$\langle v_L \rangle = \frac{\lambda}{T_s} = D(V_g - V) + D'(-V) \quad \text{eşitliğin sıfıra eşitlenmesi ile;} \quad (4.11)$$

$$0 = DV_g - (D + D')V = DV_g - V \quad (4.12)$$

olduğuna göre;

$$V = DV_g \text{ elde edilir.} \quad (4.13)$$

Girişteki güç miktarı ideal bir çeviricide aynen çıkışa iletileceğinden;

$$V_g * I_g = V * I \text{ olacaktır buradan,} \quad (4.14)$$

$$\frac{V}{V_g} = \frac{I_g}{I} = D \text{ elde edilebilir.} \quad (4.15)$$

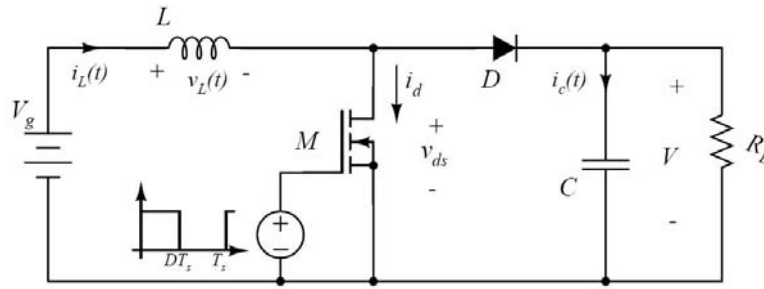
Sistemin sürekli durumda çalışması için bobinin alacağı kritik değer formülü ise;

$$I_{L,Kritik} = \frac{V_g}{2Lf_s} D(1 - D) \text{ şeklindedir.} \quad (4.16)$$

#### 4.4.1.2. Yükseltici (boost) çeviriciler

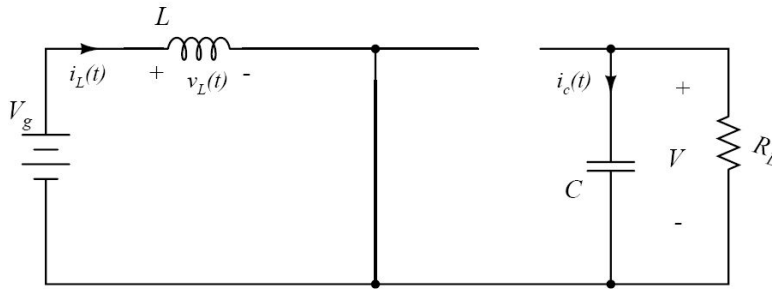
Bu çeviriciler en çok çıkış gerilimi ayarlı güç kaynakları olarak ve PV sistemlerinde panel gerilimini yükseltmek için kullanılırlar. Adından da anlaşılacağı gibi çıkış gerilimleri her zaman giriş gerilimlerinden büyük olur. Şekil 4.13 'de gösterilen devrede kontrollü anahtar iletme geçince diyot ters kutuplanır ve çıkış devresini girişten ayırır. Bu sırada girişten endüktansa enerji uygulanır. Anahtar kesime gidince devrenin çıkışına hem girişten hem de endüktanstan enerji gider [36].





Şekil 4.13. Yükseltici tip çevirici devre modeli [18]

Anahtarın iletimde olması durumundaki devre topolojisi Şekil 4.14'de ve bu devreye ait ifadeler sırasıyla denklem (4.17) ve (4.18)'de belirtilmiştir.

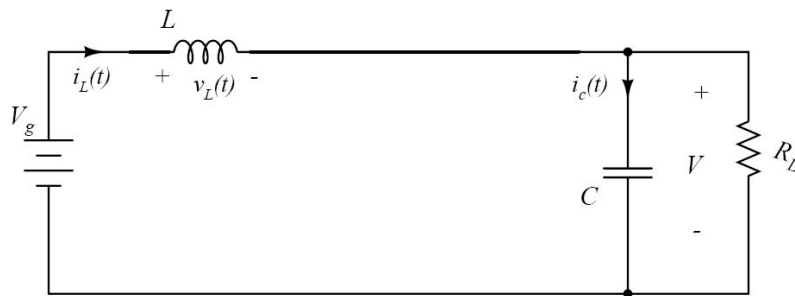


Şekil 4.14. Yükseltici Çevirici Devresi anahtarın iletimde olma durumu [18]

$$v_L = V_g \quad (4.17)$$

$$\frac{di_L(t)}{dt} = \frac{V_g}{L} \quad (4.18)$$

Anahtarın kesimde olması durumundaki devre topolojisi Şekil 4.15'de ve bu devreye ait ifadeler sırasıyla denklem (4.19) ve denklem(4.20)'de belirtilmiştir.

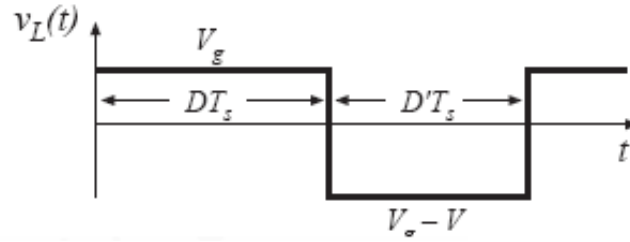


Şekil 4.15. Yükseltici Çevirici Devresi anahtarın kesimde olma durumu [18]

$$v_L = V_g - V \quad (4.19)$$

$$\frac{di_L(t)}{dt} = \frac{V_g - V}{L} \quad (4.20)$$

Bobin üzerindeki gerilim dalga şekli 4.16’da ve bu gerilim değerinin ortalaması ise denklem (4.21)’de belirtilmiştir. “D” anahtarın iletimde kalma süresidir.



Şekil 4.16. Bobin üzerindeki gerilim dalga şekli [18]

$$\int_0^{T_s} v_L(t) dt = (V_g)(DT_s) + (V_g - V)(D'T_s) \quad (4.21)$$

Bir anahtarlama periyodu boyunca bobin üzerindeki ortalama gerilim değeri sıfıra eşit olacağından;

$$V_g(D + D') - VD' = 0 \text{ denklemini elde edilir.} \quad (4.22)$$

Buradan sistemin kazancı;

$$M(D) = \frac{V}{V_g} = \frac{1}{D'} = \frac{1}{1-D} \text{ şeklinde elde edilir.} \quad (4.23)$$

Devreyi kayıpsız kabul ettiğimizde;

$$V_g \cdot I_g = V \cdot I \text{ olacaktır.} \quad (4.24)$$

Buradan;

$$\frac{I}{I_g} = 1 - D \text{ elde edilir.} \quad (4.25)$$

Sistemin sürekli durumda çalışması için bobinin alacağı kritik değer formülü ise;

$$I_{L,Kritik} = \frac{V_g}{2Lf_s} D \text{ şeklindedir.} \quad (4.26)$$

Yükseltici tip DA-DA dönüştürücünün dinamik davranışının incelenmesi yine Şekil 4.14 ve Şekil 4.15’deki gibi anahtarın iletimde ve kesimde olması durumuna göre

incelenmektedir. Bu dönüştürücünün dinamiği anahtar iletimde konumunda iken çeviriciye ait dinamik denklemler (4.27)'de belirtilmiştir.(E: giriş gerilimi, V:Çıkış gerilimidir.)

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}(E) \\ \frac{dV}{dt} = \frac{1}{C}\left(-\frac{V}{R}\right) \end{cases}, 0 < d < dT \text{ anahtar iletimde,} \quad (4.27)$$

Anahtar kesimde iken çeviriciye ait dinamik denklemler (4.28)'de belirtilmiştir.

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}(E-V) \\ \frac{dV}{dt} = \frac{1}{C}\left(i_L - \frac{V}{R}\right) \end{cases}, dT < d < T \text{ anahtar kesimde,} \quad (4.28)$$

Endüktans akımının değeri ortalama değer formülü hesabından hesaplanır ise;

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{T} \left[ \int_0^{dT} \frac{1}{L}(E)dt + \int_{dT}^T \frac{1}{L}(E-V)dt \right] \quad (4.29)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} \frac{(E)(dT)}{T} + \frac{1}{L} \frac{(E-V)(T-dT)}{T} \quad (4.30)$$

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{1-d}{L}V + \frac{1}{L}E \text{ elde edilir.} \quad (4.31)$$

Benzer şekilde çıkış gerilimi ortalama değeri;

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{T} \left[ \int_0^{dT} \frac{1}{C}\left(-\frac{V}{R}\right) + \int_{dT}^T \frac{1}{C}\left(i_L - \frac{V}{R}\right) \right] \quad (4.32)$$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1-d}{C}i_L - \frac{1}{RC}V \text{ elde edilir.} \quad (4.33)$$

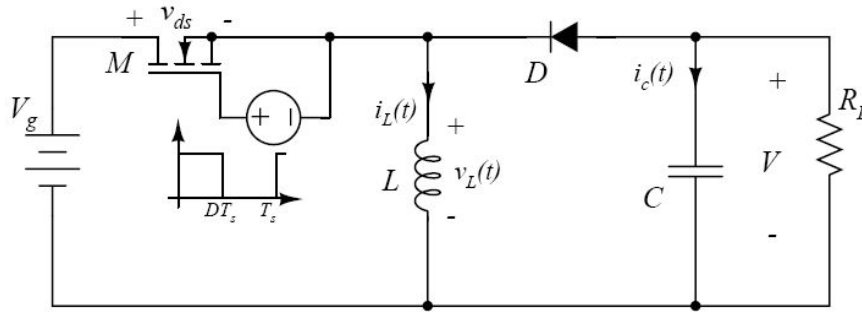
$i_L = x_1$  ve  $V = x_2$  'nin ortalama değerleri olarak alındığında; sürekli durumda yükseltici tip durum uzay modeli eşitlikleri denklem (4.34)'te verilmiştir.

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\frac{1-d}{L}x_2 + \frac{1}{L}E \\ \dot{x}_2 = \frac{1-d}{C}x_1 - \frac{1}{RC}x_2 \end{cases} \quad (4.34)$$

#### 4.4.1.3. Alçaltıcı-yükseltici çeviriciler

Alçaltıcı – Yükseltici çeviricilerin başlıca uygulaması, giriş uçlarına göre ters kutuplu çıkış gereken ve çıkış gerilimlerinin giriş geriliminden yüksek ya da düşük olduğu ayarlı DA güç kaynaklarıdır.

Alçaltıcı –Yükseltici Devre modeli Şekil 4.17’deki gibidir.



Şekil 4.17. Alçaltıcı- Yükseltici Çevirici Devresi [18]

Bir alçaltıcı – yükseltici çevirici, iki temel çeviricinin, alçaltıcı ve yükseltici çeviricinin ardı ardına bağlanmasıyla elde edilebilir. Sürekli durumda çıkış geriliminin giriş gerilimine oranı olan gerilim çevirme oranı, ard arda bağlı iki çeviricinin çevirme oranlarının çarpımıdır (çeviricilerin çalışma oranları eşit kabul edilir). Alçaltıcı-yükselticiye ait çıkış gerilimi ile giriş gerilimi arasındaki anahtarlama oranı denklem (4.35)’te verilmiştir.

$$\frac{V}{V_g} = D \frac{1}{1-D} \quad (\text{Denklem 4.13 ile denklem 4.23'den}) \quad (4.35)$$

Görüldüğü gibi, çıkış gerilimi giriş geriliminden, çalışma oranı “D”ye bağlı olarak düşük veya yüksek olabilir.

Alçaltıcı ve yükseltici devrelerin ardı ardına bağlanması ile şekil 4.17’de görüldüğü gibi tek bir alçaltıcı yükseltici çevirici devresi elde edilir. Kontrollü anahtarın iletime geçirilmesiyle, girişten endüktansa enerji uygulanır ve bu esnada diyot ters kutupludur. Anahtar kesime geçince kaynak devreden ayrılır, endüktansta biriken enerji çıkışa aktarılır. Bu sırada giriş tarafından enerji uygulanmaz. Burada gösterilen sürekli akım durum incelemesinde, çıkış kapasitesinin çok büyük olduğu ve dolayısıyla çıkış geriliminin sabit olduğu varsayılır [36].

#### 4.4.2. Temel DA-DA çeviricilerin karşılaştırılması

Yukarıda birçok çevirici topolojisine değinilmiştir. MPPT sisteminde kullanılacak topoloji seçiminde pil karakteristiği, kontrol kolaylığı, ebat, güvenilirlik ve sistem maliyeti gibi değerler sistem tipini belirleyen en önemli parametrelerdir. Ayrıca gerekli bileşenlerin düşük ebat, gerilim ve akımda olması kullanılabilirliğini artırmaktadır. Tablo 4.1’de çevirici tiplerine ait özellikler verilmiştir [9].

Temel çeviricilerin;

Avantajları,

- Basit ve ucuzdurlar.
- Fazla eleman içermediklerinden kontrolleri kolaydır.
- Verimleri yüksektir.

Olumsuzlukları,

- Yüksek güçlerde kullanışlı değildir.
- Alıcı sistem ile arasında elektriksel yalıtım olmadığından güvenirliliği düşüktür.
- Teorik olarak istenilen dönüştürme oranlarında olabileceği düşünülse de çok yüksek dönüştürme oranlarında yapılamazlar.

Tablo 4.1 Çevirici Seçimi

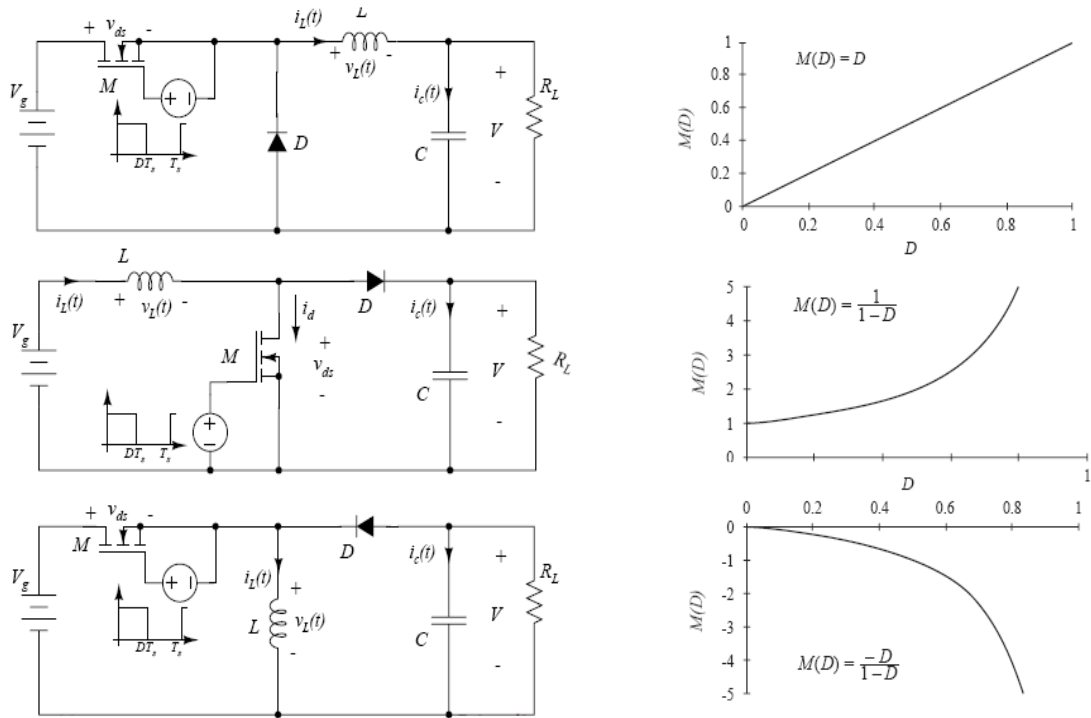
Ölçüt		Alçaltıcı	Yükseltici	Alçaltıcı-Yükseltici
Anahtar gerilimi		$V_{IN}$	$V_0$	$(V_{IN} + V_0)$
Anahtar akımı		$I_0$	$I_{IN}$	$(I_{IN} + I_0)$
$I_{RMS}$	Anahtar	$\sqrt{D}I_0$	$\sqrt{D}I_{IN}$	$\sqrt{D}(I_0 + I_{IN})$
$I_{AVG}$	Anahtar	$D \cdot I_0$	$D \cdot I_{IN}$	$D \cdot (I_0 + I_{IN})$
	Diyot	$(1 - D) \cdot I_0$	$(1 - D) \cdot I_{IN}$	$(1 - D) \cdot (I_{IN} + I_0)$
$I_L$		$I_0$	$I_{IN}$	$(I_{IN} + I_0)$
L'nin C'ye etkisi		Önemli	Az	Az
Darbeli akım		Giriş	Çıkış	Her ikisi

Bu bilgiler ışığında uygulanacak sistem açısından temel çeviriciler basit, ucuz yapıları ve özellikle PV sistemlerinde verim en önemli etken olduğu gerçeği göz önüne alındığında verimli olması bu tip çeviricileri cazip kılmaktadır. Tablo 4.2'de temel çeviricilerin genel özellikleri verilmiştir [9].

Tablo 4.2 Çevirici Özeti

	Alçaltıcı	Yükseltici	Alçaltıcı-Yükseltici
$V_0$	$V_{IN}D$	$V_{IN}/(1 - D)$	$-V_{IN}D/(1 - D)$
$I_{C(çıkış)}$ (RMS)	Düşük	Yüksek	Yüksek
Giriş akımı	Süreksiz	Sürekli	Süreksiz
Sürücü	Bağımsız	Topraklanmış	Bağımsız

Temel DA-DA çevirici yapılarında sürekli halde kazancın doluluk-boşluk oranı D'ye göre değişimleri Şekil 4.18'de sırası ile verilmiştir.



Şekil 4.18. Temel Çevirici Kazanç değişimleri

Bu çalışmada kullanılacak sistemde çeviriciye gelen gerilimin yükseltilerek istenen performans kriterleri dâhilinde DA-AA eviriciye aktarılması gerektiğinden çalışmada yükseltici tip çevirici kullanılacaktır.

#### 4.5. DA-DA Çevirici Çıkış Gerilimi Kontrolü

DA-DA çeviricinin çıkış geriliminin istenilen performans kriterlerine uygun bir şekilde davranabilmesi için kontrol edilmesi gerekir. Bu bölümde gerilim kontrolü için kullanılacak çeşitli kontrol yöntemleri hakkında özet bilgiler verilecektir.

##### 4.5.1. Kayan kipli kontrol yöntemi

Açık çevrim kontrolörler; sistemdeki belirsizliklerden dolayı ortaya çıkan hataların geri beslemelerine sahip değildirler. Bundan dolayı; kontrol sistemlerinde, sistemi belirsizliklere karşı dayanıklı hale getirecek, geri beslemeli kontrolör kullanmak daha iyi olacaktır. Kullanılacak olan geri beslemeli kontrol yöntemi; herhangi bir aşamada yapısal uyarımlara neden olmamalı ve parametre değişimlerine karşı dayanıklı olmalıdır. Klasik geri beslemeli sistemler bu isteklerin hepsine aynı anda

cevap veremediğinden dolayı; tüm bu istenen özelliklere sahip olan Kayan Kipli Kontrol Yöntemi oluşturulmuştur.

Kayan Kipli Kontrol Yöntemi; 1950'li yıllarda Sovyetler Birliği'nde ortaya çıkmış; fakat (Itkis 1976) ve (Utkin 1977) yayınlarına kadar Birlik dışına yayınlanmamıştır. Bu iki yayından sonra Kayan Kipli Kontrol; lineer ve nonlinear kontrol uygulamalarında hızlı bir şekilde yayılmaya ve geliştirilmeye başlamıştır. Başlangıç zamanlarında, Kayan Kipli Kontrol Yöntemi ikinci mertebeden lineer ve nonlinear sistemlerde kullanılmıştır. Ancak, Kayan Kipli Kontrol sistemleri Utkin'in 1977 yılındaki yayınına kadar mühendislik alanında yayılmamıştır. Bu yayından sonra özellikle 1980'lerden itibaren kontrol alanında yoğun ilgi görmeye başlamıştır.

Kayan Kipli Kontrol Yöntemi, Sovyetler Birliği'nde ortaya çıkmadan önce; bu yönteme temel oluşturan kayan mod uygulamalarına ilişkin bazı örnekler aşağıda verilmiştir;

- i. 1932 yılında V.Kulebakin tarafından yayınlanmış olan, teknik bildiride bir uçağa ait DA generatörün vibrasyon kontrolü amaçlı gerilim kontrolü yapılmıştır.
- ii. 1934 yılında Nikolski tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise bir geminin rota kontrolü yapılmıştır.

Kayan kipli kontrol yöntemi için aynı anlama gelen fakat farklı şekilde dile getirilen tanımlar mevcuttur. Kayan kipli kontrol yöntemi, en genel tanımıyla; kontrol edilen sistem kaynaklı model belirsizliklerine, modellenmemiş sistem dinamiklerine ve bozucu etkilere rağmen sistemin istenen çıkışı vermesi için uygun kontrol işareti değişimleri oluşturan ve tüm dış etkilere karşı sistemi duyarsız hale getiren oldukça etkili bir kontrol yöntemidir. Diğer bir tanım olarak; oldukça iyi derecede sistem kararlılığı, bozucu etki duyarsızlığı, yörünge izlemesi, hızlı dinamik sistem cevabı elde etmek amacıyla kullanılan bir gürbüz nonlinear kontrol algoritmasıdır.

Kayan Yüzey: Kayan kipli kontrol yöntemi uygulanmaya başlanırken, ilk olarak kontrol edilmek istenen sisteme göre oluşturulan yüzeydir. Bu yüzeye kayan yüzey denmesinin nedeni, sistem durum yörüngesinin, yüksek frekanslı anahtarlama yapan



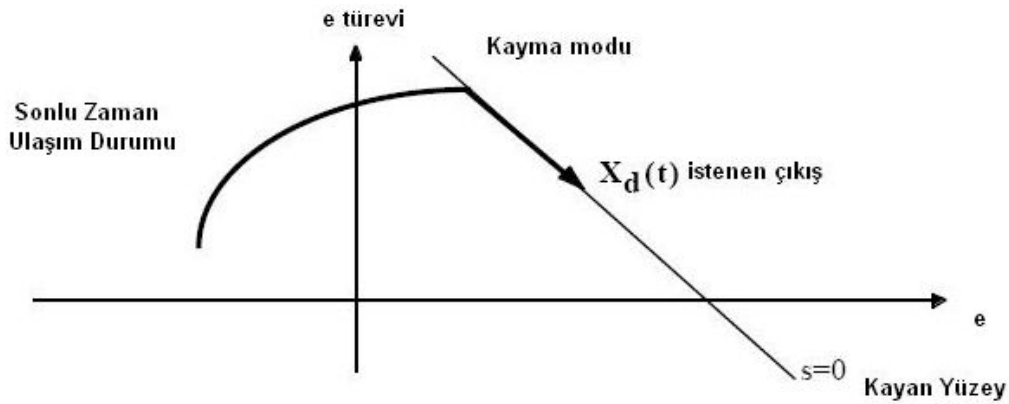
kontrol işareti tarafından kaydırılıyormuş gibi görünmesidir. Sistemin bu yüzey boyunca hareketi; sistem çıkış davranışını temsil eder. Kayan yüzeyin amaca uygun olarak dizayn edilmesiyle; Kayan kipli kontrol kuralı, sistem için istenen lineer ve istenen yörüngeyi izleyen performans sağlar.

$$s(x, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{n-1} e(t) \quad [n=\text{sistem derecesidir.}] \quad (4.36)$$

**Ulaşım Durumu:** Sistemin sahip olduğu başlangıç noktasından, kayan kipli kontrolün gerçekleşmesi için kayan yüzeye ulaşma modudur.

**Kayma Modu:** Sistemin kayan yüzeye ulaştıktan sonra o yüzeyde orjine doğru kayma hareketi gerçekleştirdiği durumdur.

Tanımlara ilişkin açıklayıcı grafik Şekil 4.19'da verilmiştir.



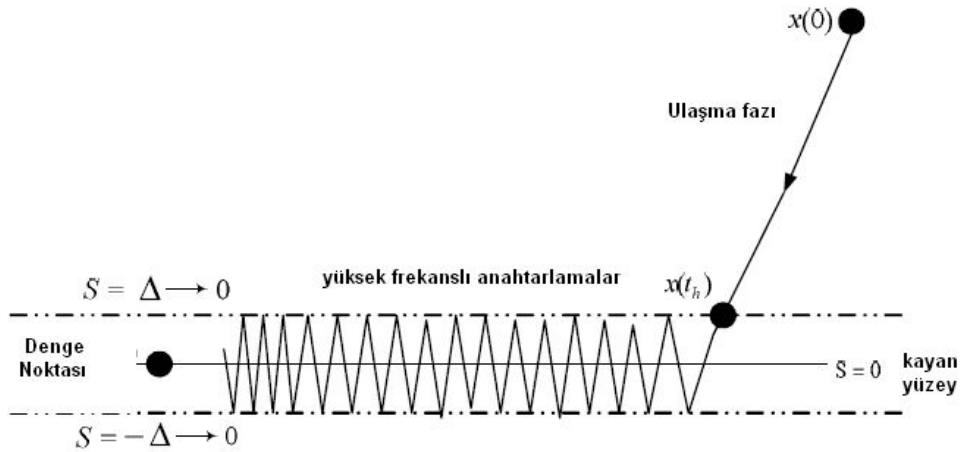
Şekil 4.19. Kayan Kipli Kontrol Gösterimi

Kayan Kipli Kontrol; Değişken Yapılı Kontrolden elde edilir. Değişken Yapılı Kontrol, kararsız olabilen çeşitli altyapılara sahiptir. Bu yapılar beklenmeyen yapılardır. Kayan Kipli Kontrol; dinamikleri tanımlayan hareket denklemlerinin sağ taraflarının, sistem faz uzayındaki kesin yüzeyler üzerinde süreksizliklere sahip olduğu zamanlar elde edilebilir.

“Kayan Kipli Kontrol”, “Değişken Yapılı Kontrolün” özel bir alt sınıfıdır.” Tüm Değişken Yapılı “Kontrolde olduğu gibi “Kayan Kipli” Kontrol yönteminde; sistem yapısı, yüksek hızlı bir anahtarlama yapan kontrol kuralı tarafından değiştirilir. Kayan Kipli Kontrol; bozuculara ve parametre değişimlerine rağmen ivme, dayanıklılık elde etmek ve çok değişkenli zamanla değişen nonlineer sistemler için yörünge izleme gibi eşsiz özelliklere sahiptir. Kayan Kipli Kontrol bu performansı; kesin hesaplamalar veya sistem parametreleri, nonlineerlikler, bozucular hakkında öngörülerde bulunmaksızın elde eder.

Kayan kipli kontrol iki aşamadan oluşmaktadır;

İlk aşama; sistem yörüngesinin herhangi bir başlangıç konumundan kayan yüzeye doğru hareket etmesinden oluşur. Bu aşamaya “ulaşma durumu” veya “ulaşma fazı” denir. Bu aşama boyunca; sistem cevabı, parametre belirsizliklerine ve bozucu etkilere duyarlıdır. İkinci aşama ise “kayma fazı” veya “kayma modu” dur. Bu aşama boyunca; durum yörüngesi, kayma yüzeyinde kayarak orijine doğru hareket eder. Kayan moddaki sistem yörüngesi; bir anahtarlama kontrol lojisi tarafından kayan yüzeyin iki tarafı arasında anahtarlanır. Bu esnada, durumlar kayma yüzeyini asla terk etmezler. Kayma fazı boyunca; anahtarlama yüzeyi denklemi tarafından elde edilen sistem, sistem parametrelerinden bağımsızdır. Ayrıca; kayma hareketi boyunca, yörünge dinamiklerinin mertebeleri, orijinal sistem mertebelerinden daha düşüktürler. Ulaşma fazının minimize edilmesiyle, dayanıklılık elde edilebilir. Ulaşma fazının minimize edilmesi yöntemlerinden biri; büyük geri besleme kazançları kullanılmasıdır. Bu tanıma ait gösterim Şekil 4.20’de verilmiştir.



Şekil 4.20. Ulaşma Fazı, Yüksek Frekanslı Anahtarlamalar, Kayan Yüzey  
Kayan Kip Kontrol yönteminin özellikleri sırasıyla aşağıdaki şekilde sıralanabilir;

- i. Kayan kipli kontrol yöntemi genel anlamda sürekli zamanlı sistemler için oluşturulmuştur. Ayırıklaştırmaya geçilince bu yöntem gürbüzlüğünü kaybedebilmektedir. Günümüzde bu konu ile ilgili araştırma ve geliştirme çalışmaları devam etmektedir.
- ii. Sistemin mertebesi yapılan işlemlerden sonra birinci mertebeye düşürülerek kontrol gerçekleştirilir.
- iii. Kontrol edilen sistemin modellenmemiş dinamikleri; kayan kipli kontrol yöntemi kullanılırken sadece ulaşma fazında etkili olabilirler.
- iv. Oluşturulan kontrol kuralı ile sistem istenen kayan yüzeye gitmeye zorlanır(ulaşma fazı) ardından tüm zamanlar için sistem kayan yüzeyde tutulur.
- v. Birçok kontrol yöntemi içerisinde; kayan kipli kontrol yönteminin tercih edilmesinin nedeni, kayan kipli kontrol yönteminin en önemli avantajı olan sistem belirsizliklerine ve bozucu etkilere duyarsız oluşudur.

#### **4.5.1.1. Kayan kipli kontrolör tasarımı**

Kayan Kipli Kontrolör tasarımı iki önemli aşamadan oluşmaktadır.

- i. Kayan Yüzey Seçimi: Kontrol edilen sistemin istenen dinamik karakteristiğini sağlayacak olan kayan yüzey olan  $s(t)$  seçilir.
- ii. Kontrolör Tasarımı: Sistemin kayan moda girmesini ve sonsuza kadar o modda  $s(t)=0$  için kalmasını sağlayacak süreksiz kontrolör tasarlanır.

Kayan Yüzey Seçimi: Kayan yüzeyler; yukarıda da belirtildiği gibi kontrol edilen sistemin dinamik karakteristiğini sağlarlar. Kayan yüzeyler, lineer veya nonlineer olabilir. Lineer sistemler için kayan yüzey tasarımı tam anlamıyla kolaylıkla gerçekleştirilebilir ve uygulanabilir. Ancak nonlineer kayan yüzey tasarımı oldukça zor aşamalar içermektedir.

Kayan yüzey tasarımı için her bir sisteme özel olarak uygulanabilecek kayan yüzey tasarım yöntemleri mevcuttur. Tez çalışmasında , “Zamanla Değişen Yörünge İzleyici Yüzey” yöntemi ele alınacaktır.

Zamanla Değişen Yörünge İzleyici Yüzey Uygulaması: n. dereceden bir girişli-bir çıkışlı (SISO) sistemin sürekli zaman domeninde, dinamik denklemi;

$$\begin{aligned} x^n(t) &= f(x(t),t) + g(x(t),t)u(t) + d(t) \\ y(t) &= x(t) \end{aligned} \quad (4.37)$$

$x(t) = (x(t), \dot{x}(t), \dots, x^{n-1}(t)) \in R^n$  , sistemin ölçülebilir n. dereceden durum vektörleridir.

$y(t) \in R$  sistem çıkışıdır.

$f(x(t),t)$ ,  $g(x(t),t)$  tam olarak bilinmeyen sürekli fonksiyonlardır ve  $0 < g_0 < g(x(t),t) < g_1$  olup;  $g_0$  ve  $g_1$  pozitif sabitlerdir.

$u(t) \in R$  kontrol girişidir.

$d(t) \in R$  harici bozucudur.

Kayan Kipli Kontrol yönteminde kontrolün amacı; sınırlı referans işareti ve istenen çıkış durumu olan  $y_d(t)$  yi sistem çıkışı olan  $y(t)$  nin takip edebilmesi için ve de izleme hatamız olan  $e(t) = y(t) - y_d(t)$  nin; yani

$$e^{(i)}(t) = y^{(i)}(t) - y_d^{(i)}(t) \quad i=(1, \dots, n-1) \quad (4.38)$$

oldukça küçük olabilmesi için uygun bir kontrol kuralı  $u(t)$ 'yi belirlemektir.

Kayan yüzey tasarımında da bahsedilen bu amaca göre hareket ederiz.

Yukarıda bahsedilen yapı baz alınarak;

$$e(t) = [e_1(t), e_2(t), \dots, e_n(t)]^T = [e(t), \dot{e}(t), \dots, e^{n-1}(t)]^T \in R \text{ olmak üzere;} \quad (4.39)$$

Kayan yüzey denklem (4.40)'daki gibi gösterilebilir.

$$s(t) = c * e(t) \quad (4.40)$$

Bu gösterimde;  $c = [c_1, c_2, \dots, c_{n-1}, 1]$  olup, Hurwitzian polinom katsayılarıdır ve  $\lambda^{n-1} + c_{n-1}\lambda^{n-2} + \dots + c_1 = 0$  polinomunun kökleri olup sol yarı düzlemedir.

Kayan yüzey için yaygın bir şekilde kullanılan ve tasarımıımızda da kullanılacak gösterim denklem (4.41)'deki gibidir.

$$s(x, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{n-1} e(t) \quad [n=\text{sistem derecesidir.}] \quad (4.41)$$

Kayan yüzey tasarımı esnasında;  $s(x, t)=0$  alınır. Bunun anlamı;  $s(x, t)=0$  eşitlemesiyle, tek çözüm  $e(t)=0$  olan homojen diferansiyel denklem elde ediliyor olmasıdır. Yani bu yüzeye göre hatamız sifıra eşit olur.

Kontrolör Tasarımı: Kayan Kipli Kontrol yönteminde kontrol edilmek istenen sisteme uygun olan bir kayan yüzey tasarlandıktan sonra; ikinci adım olarak; sistemimizi kayma moduna sokacak, kayan yüzeye ulaştıracak ve sonsuz süre boyunca sistemi kayan yüzeyde tutabilecek olan kontrolör tasarlamaktır.

Kontrolör Tasarım Aşamaları:

Kayma modu için kayma kuralları olarak farklı yöntemler mevcut olup, burada; "Lyapunov Fonksiyonu Yaklaşımı" anlatılacaktır.

Lyapunov Fonksiyonu Yaklaşımı: Lyapunov Fonksiyonu;

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad \text{dan hareket ederek;} \quad (4.42)$$

$V(0)=0$  ve  $s>0$  için  $V(s)>0$  seçersek;

Sistemin Kararlılık koşulu için;

$$\dot{V} = \frac{1}{2} \frac{d}{dt} s^2 \leq -\eta |s| \quad \text{ifadesi yazılır.} \quad (4.43)$$

Buradan hareketle; Yakınsama Koşulu olan,

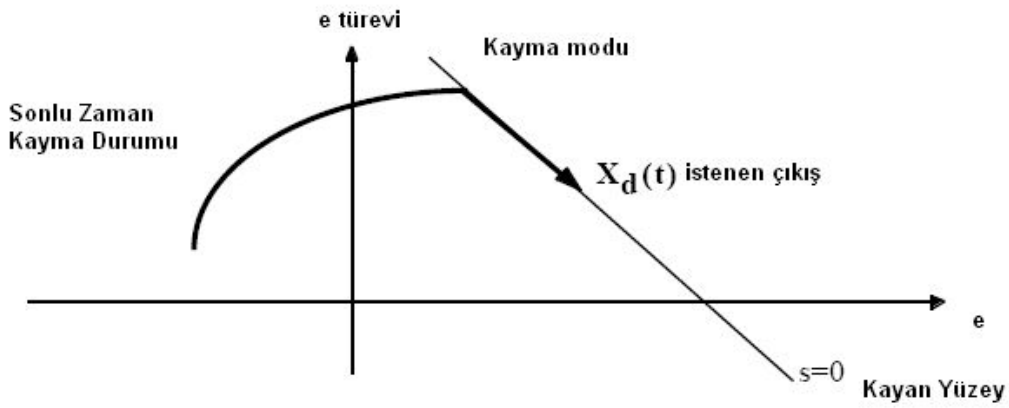
$$s\dot{s} \leq -\eta |s| \quad \text{olarak elde edilir.} \quad (4.44)$$

$$s\dot{s} \leq -\eta \operatorname{sgn}(s)s \quad \text{olup;} \quad (4.45)$$

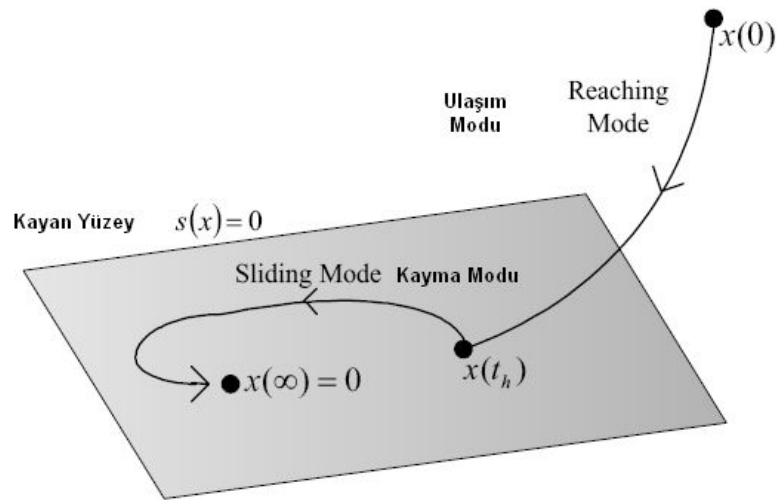
“Ulaşım Durumu” (Reaching condition) veya diğer adıyla “Kayma Modu” (Sliding condition) koşulu olan;

$$\dot{s} \operatorname{sgn}(s) \leq -\eta \quad \text{denkliği elde edilir.} \quad (4.46)$$

$\eta > 0$  için sistem kayan moda sokulur. Bunun anlamı; sistemimize ait durum ait durum yörüngesi,  $s(x,t)=0$  kayan yüzeyine erişir, o yüzeyde kalır ve aynı zamanda, sistemin belirsiz parametrelerinden ve bozucu etkilerden bağımsız olarak orijinimiz olan  $e=0$  a doğru hızla kayar. Bu durum Şekil 4.21 ve Şekil 4.22’de gösterilmiştir.



Şekil 4.21. Kayan Kipli Kontrol Gösterimi I



Şekil 4.22. Kayan Kipli Kontrol Gösterimi II

#### 4.5.2. Dinamik PI kontrol yöntemi

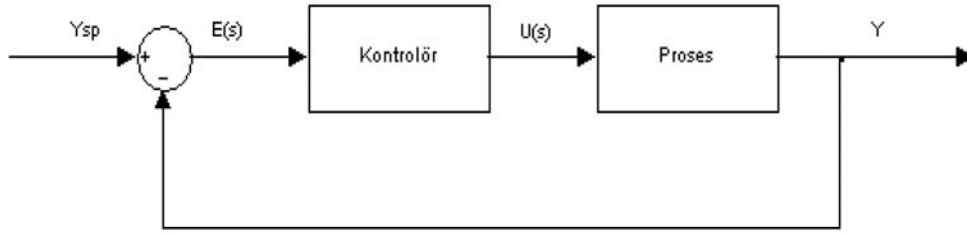
Hiç şüphesiz geri beslemeli kontrolör dendiğinde ilk olarak PID kontrolör akla gelir. Günümüzde gelişmiş birçok kontrol algoritması üzerinde sayısız araştırmalar yapılmasına rağmen PID kontrolörler endüstriyel kontrol uygulamalarının %95 den fazlasında kullanılmakta ve bu konuda rakip tanımamaktadır. Elbette bunun bazı nedenleri bulunmaktadır, bu nedenler sırasıyla aşağıdaki şekilde özetlenebilir;

i. PID kontrol algoritması esasen çok basit bir yapıya sahiptir dolayısıyla

kullanıcılar tarafından çok rahat anlaşılmaktadır.

- ii. Her çeşit uygulamada tatminkâr sonuçlar vermeyi başarmıştır. Maliyet/fayda oranı çok düşüktür.
- iii. Tek başına bir sistem olarak da piyasada bulunabildiği gibi rahatlıkla gömülü sistemlere algoritma olarak da entegre edilebilmektedir.

Uygulamalarda operatörler bazı durumlarda kontrolörün otomatik ayarını tercih edip kullanmakta bazı durumlarda ise kendileri sisteme göre deneyimlerinden faydalanarak elle ayar yapmaktadır. Fakat genelde her iki tip ayarlama da en optimal sonucu vermemektedir. Bu nedendir ki PID kontrolörlerin parametrelerinin optimum ayarları üzerinde birçok çalışma yapılmaktadır [49].



Şekil 4.23. Geri beslemeli bir kontrol sistemi [49]

PID algoritmasının en klasik haldeki formülü şu şekildedir:

$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \left( \frac{de(t)}{dt} \right) \right) \quad (4.47)$$

Formüldeki sembolleri tanımlamak gerekirse:

$u(t)$ : Kontrol İşareti

$e(t)$ : Hata işareti (sistemin ulaşması istenen değer “ $Y_{YSP}$ ” ile gerçek yanıtı “ $Y$ ” arasındaki fark)

$K_p$ : Oransal katsayı

$T_i$ : İntegral zaman sabiti

$T_d$ : Türev zaman sabiti



$K_p, T_i$  ve  $T_d$  katsayıları ayrıca kontrol parametreleri olarak da adlandırılmaktadır.

Formülden de hemen görülebileceği gibi PID algoritması en basit anlamda üç adet terimin toplanmasından oluşmaktadır ve zaten ismini de buradan almaktadır (Oransal + İntegral + Türev). PID kontrolcününün transfer fonksiyonu yazıldığında da bu durum açıkça görülmektedir.

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_P + \frac{K_i}{s} + K_D s \quad (4.48)$$

Bu nedenle PID kontrolörünü oluşturan kontrol parametrelerinin her birinin sistem üzerindeki etkileri iyi kavranmalıdır [49].

**Kontrolör Parametrelerinin Etkileri:**

Parametreleri tek tek ele alırsak öncelikle oransal kontrol katsayısı  $K_p$ 'nin etkisini anlamak gerekir. Denklem (4.47)'de verilen PID formülünde  $T_i$  yerine " $\infty$ ",  $T_d$  yerine ise "0" konursa geriye sadece oransal kontrol kalmış olur. Anlık kontrol hatasına dayanan oransal kontrol ile kararlı bir sistemi kontrol etmek mümkündür. Fakat gösterdiği performans oldukça sınırlıdır ve de sürekli hal hatasını yok etmek mümkün değildir. Ayrıca oransal kontrol edilen sistemlerde kazanç ( $K_p$ ) yükselirken hata azalırken diğer yandan sistemin osilasyona meyili artar.

Sürekli hal hatasını yok etmek için yapılması gereken şey oransal kontrole integral terimini de ilave etmektir. PI tipi kontrol halini alan kontrol işareti sayesinde oransal kontrolde her zaman olan sürekli hal hatasından kurtulunur. Integral doğası gereği oransal kontrole göre daha yavaş reaksiyon verir çünkü hatanın anlık değeri yerine belli bir zaman dilimindeki hataların toplamını ele almaktadır [49].

Elde ettiğimiz PI tipi kontrolöre bu kez de türev terimin katarsak sonuçta PID kontrolöre ulaşmış olur ve aynı zamanda türevin etkisini anlamış oluruz. Diyelim ki  $K_p$  ve  $T_i$  öyle seçilmiş olsun ki sistem kapalı çevrimde osilasyonda

olsun. Türevin etkisinin artması, yani  $T_d$  süresinin artması ile birlikte osilasyonda azalma diğer bir deyişle sönümde yükselme görülür. Ayrıca osilasyonun periyodu da  $T_d$  'nin artışıyla artar. Fakat  $T_d$  bir seviyeden sonra artmaya devam ederse sönüm yeniden azalır, osilasyon çoğalır. Bunu nedenini şu şekilde açıklayabiliriz. Türevin etkisi esasen hatanın bir öngörüsü olarak düşünülebilir.

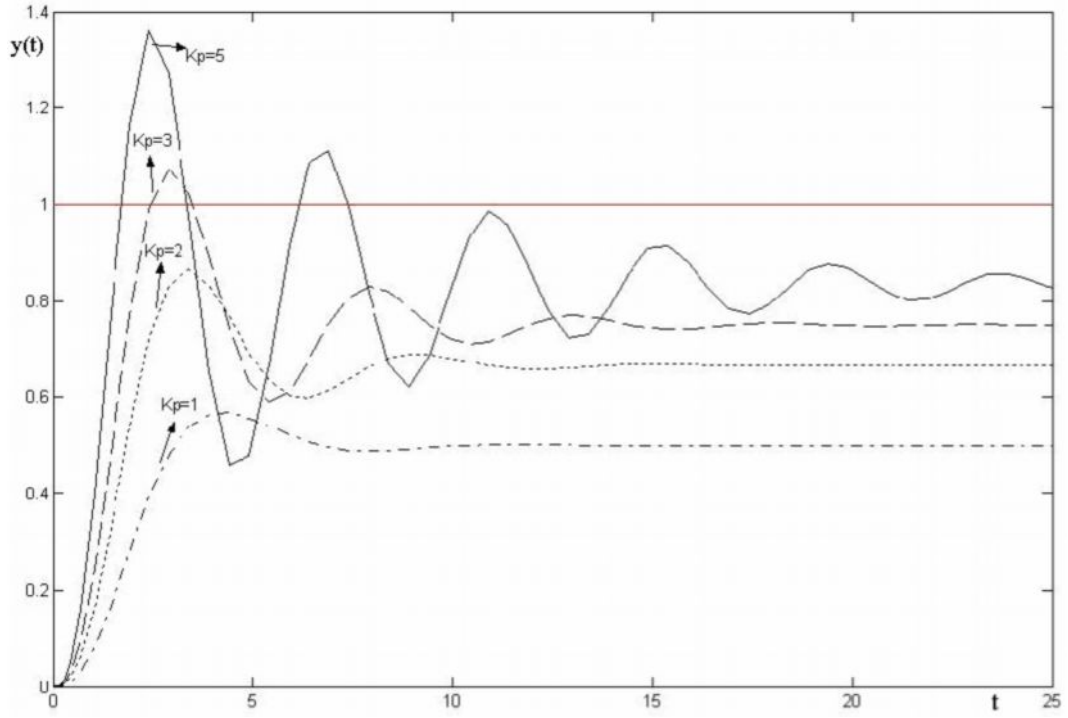
Dolayısıyla öngörü süresi  $T_d$  'nin gereğinden fazla olması sistemin kontrolünde yardımcı bir etki sağlamaz. Üç parametrenin de kapalı çevrimde bahsedilen

etkileri transfer fonksiyonu  $P(s) = \frac{1}{(s+1)^3}$  olan bir proses üzerinde aşağıdaki

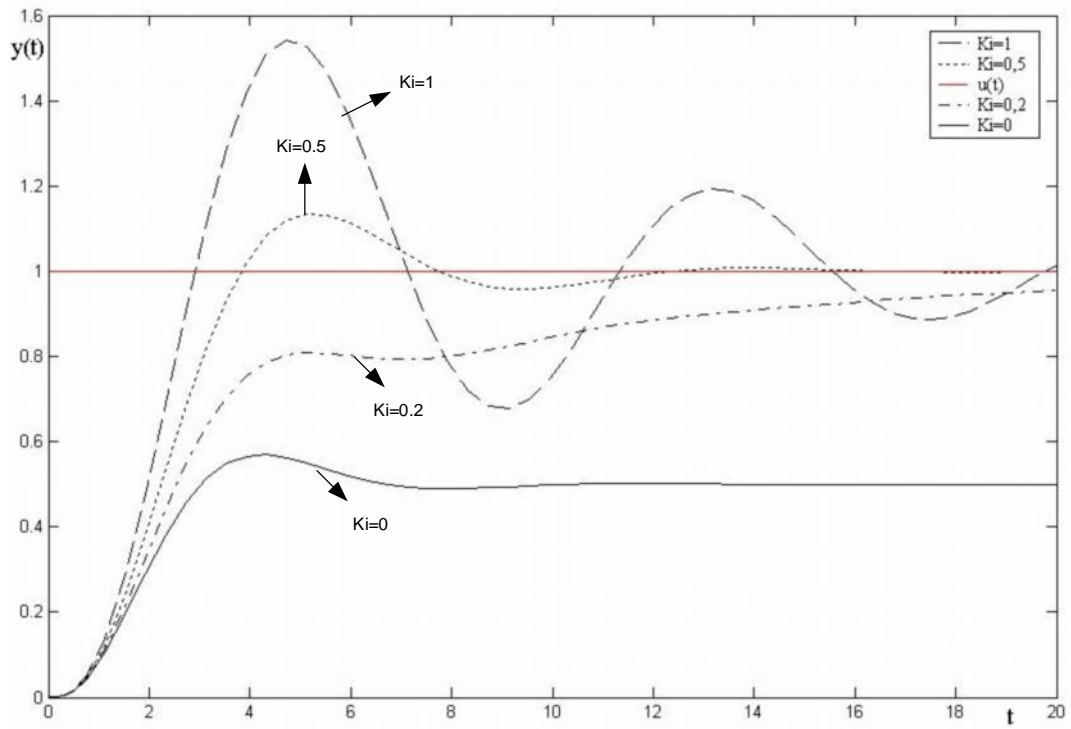
Şekil 4.24, Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'da gösterilmiştir. Ayrıca P,I ve D katsayılarının sistem üzerindeki etkileri kısaca Tablo 4.3'de verilmiştir [49].

Tablo 4.3. PID katsayılarının etkileri[49]

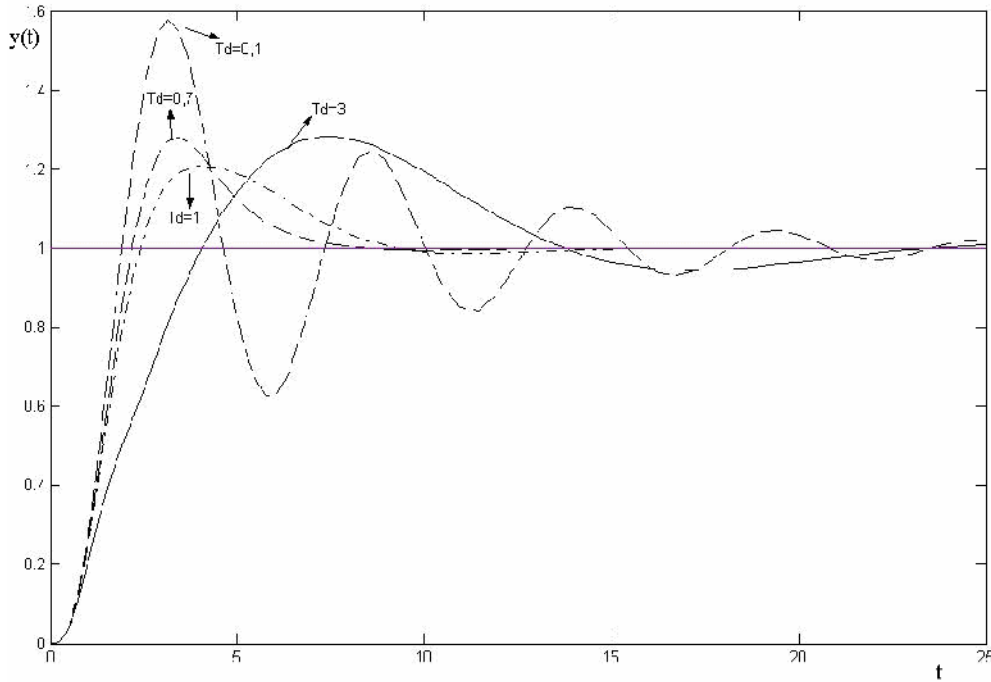
<b>PID Katsayısı</b>	<b>Yükselme Zamanı</b>	<b>Sistem Ani Tepkisi</b>	<b>Oturma Zamanı</b>	<b>Kararlı Durum Hatası</b>
<b><math>K_p</math> artarsa</b>	Azalır	Artar	Çok az etkilenir	Azalır
<b><math>K_i</math> artarsa</b>	Azalır	Artar	Artar	Yok olur
<b><math>K_d</math> artarsa</b>	Çok az etkilenir	Azalır	Azalır	Çok az etkilenir



Şekil 4.24.  $K_p$  katsayısının sistem yanıtına etkisi [49]



Şekil 4.25.  $K_i$  katsayısının sistem yanıtına etkisi [49]



Şekil 4.26.  $T_d$  katsayısının sistem yanıtına etkisi [49]

#### Kontrolör Parametrelerinin Ayarlanması:

PID Kontrolör tasarımının temel hedefi etkilerini daha önce incelediğimiz  $K_p$ ,  $T_i$  (veya  $K_i$ ) ve  $T_d$  ( $K_d$ ) parametrelerinin bulunması ve daha da önemlisi kapalı çevrim sistemin performans koşullarını sağlayacak şekilde ayarlanmasıdır. Bu katsayıların bulunmasında sistemin başlangıç tepkisi, gürültü yok edimi ve durum uzay hata özellikleri gibi kavramlardan faydalanılır. Fakat pratikte tasarımın tüm kavramlar açısından aynı derecede başarı göstermesi pek sağlanamaz. Örneğin kontrolör ayar noktası değişimlerine karşı iyi tepki verecek şekilde ayarlanmış ise (minimum üst tepe – “overshoot” – ve minimum oturma zamanı – “settling time” – için ayar yapılmış ise) genellikle gürültü değişimlerine verilen tepki daha ağır olur [49].

Tasarımda izlenebilecek temel basamaklar şunlardır:

- Sistemin açık çevrim transfer fonksiyonunun elde edilmesi

- Sisteme yükselme zamanını iyileştirme amacıyla oransal denetleyicinin eklenmesi
- Sistemde ani tepkinin iyileştirilmesi için türevsel denetleyicinin eklenmesi
- Kararlı durum hatasının yok edilmesi için integral denetleyicisinin sisteme eklenmesi
- Katsayıların sistemden istenilen genel karakteristik tepki sağlanana dek ayarlanması

Bu genel tasarım kurallarının haricinde PID kontrolörlerinin endüstriyel uygulamalarda çok yaygın kullanımından dolayı birçok kontrolör parametrelerini ayarlama yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemler arasında en çok kabul göreni ve uygulananı ise Ziegler Nichols metodudur. Bu metodun incelemesi sonraki bölümde kapsamlı bir şekilde ele alınacaktır [49].

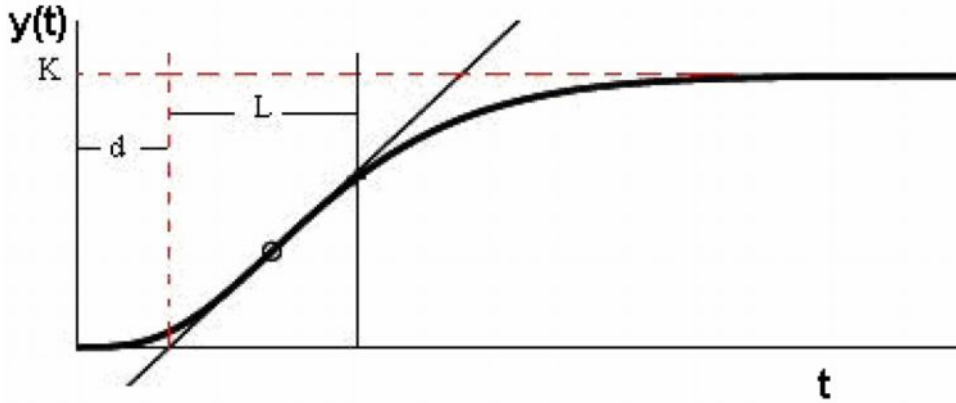
#### **4.5.3. Ziegler Nichols PID parametre belirleme yöntemi**

J.G. Ziegler Ve N.B. Nichols'ün 1942 yılında yayınladıkları "Optimum Settings for Automatic Controllers" adlı makale ile sundukları PID kontrolörler için tasarım metotları günümüzde halen en çok kabul gören ve kullanılan tasarım metodu olma özelliğini taşımaktadır. Makalede iki çeşit yöntem sunulmuştur ve her ikisi de proses dinamiğinin birkaç parametre ile karakterizasyonuna ve kontrolör parametreleri için basit denklemlere dayanmaktadır. Metotlar basamak cevabı yöntemi ve osilasyon cevabı yöntemi olarak adlandırılmaktadır [49].

##### **4.5.3.1. Basamak cevabı yöntemi**

Bu yöntem açık çevrim birim basamak cevabının incelenmesine ve analizinden proses ile ilgili bilgiler edinilmesine dayanmaktadır. Bu yöntem çok basit bir proses modelinin kullanıldığı, modelleme ve kontrole dayanan geleneksel bir metot olarak görülebilir. Yöntemde kullanılan proses modeli birinci dereceden zaman gecikmeli (FOPTD, *First Order Plus Time Delay*) bir modeldir ve aşağıdaki denklemlerle ifade edilmektedir:

$$G(s) = \frac{Ke^{-ds}}{Ls+1} \quad (4.49)$$



Şekil 4.27. Açık çevrim birim basamak yanıtı [49]

Yöntemi kısaca anlatmak gerekirse ilk olarak Şekil 4.27'de görüldüğü gibi basamak yanıtının eğiminin maksimum değere ulaştığı nokta belirlenir. Daha sonra ise bu noktadan tanjant doğrusu çizilir. Tanjant eğrisi ile koordinat eksenlerinin kesişimi  $d$  ve  $L$  parametrelerini verir. Kontrolör parametreleri ise Tablo 4.4 deki gibi seçilir [49].

Tablo 4.4. Basamak cevabı yöntemi için katsayı tablosu [49]

	$K_p$	$T_i$	$T_d$
<b>P</b>	$(L / K*d)$	-	-
<b>PI</b>	$0,9(L / K*d)$	$(K*d) / 0,3$	-
<b>PID</b>	$1,2(L / K*d)$	$2(K*d)$	$0,5(K*d)$

#### 4.5.3.2. Osilasyon yöntemi

Ziegler ve Nichols tarafından geliştirilen ikinci metot ise proses dinamiklerinin osilasyon cevabı yoluyla karakterizasyonuna dayanmaktadır. Tasarım proses transfer fonksiyonu  $P(s)$ 'in Nyquist eğrisinin negatif reel eksenini kestiği noktadan yola çıkmaktadır. Bu noktadaki frekans ( $w_{180}$ ) ve de o frekanstaki kazanç ( $k_{180} = |P(iw_{180})|$ ) olmak üzere iki parametre tanımlanabilir. Bu noktaya en son nokta

denmektedir ve de bu noktayı karakterize eden parametreler  $K_u = 1/K_{180}$  ile  $T_u = 2\pi/w_{180}$  sırasıyla en son nokta kazanç ve de en son nokta periyot adımı alır. Bu parametreler şu şekilde bulunabilmektedir. Öncelikle prosese bir kontrolör bağlanır ve bu kontrolör sadece oransal kontrol yapacak hale getirilir. Örneğin PID kontrolör bağlandıysa  $T_i = \infty$  ve  $T_d = 0$  yapılır. Daha sonra ise proses osilasyona başlayana dek oransal kazanç ifadesi yavaş yavaş artırılır. Osilasyon başlangıç anında ulaşılan kazanç  $K_u$  ve de osilasyon periyodu ise  $T_u$ ' dur. İstenilen parametreler bulunduktan sonra Tablo 4.5'e bakarak kontrolör için gerekli katsayı ayarları yapılır [49].

Osilasyon yöntemi görüldüğü üzere ampirik bir ayarlama prosedürüdür. Oransal kontrol için yapılması gereken tek işlem sistemi osilasyona sokan kazancı bulup yarısını almaktır.

Tablo 4.5. Osilasyon yöntemi için katsayı tablosu [49]

	$K_p$	$T_i$	$T_d$
<b>P</b>	$0,5K_u$	-	-
<b>PI</b>	$0,4K_u$	$0,8T_u$	-
<b>PID</b>	$0,6K_u$	$0,5T_u$	$0,125T_u$

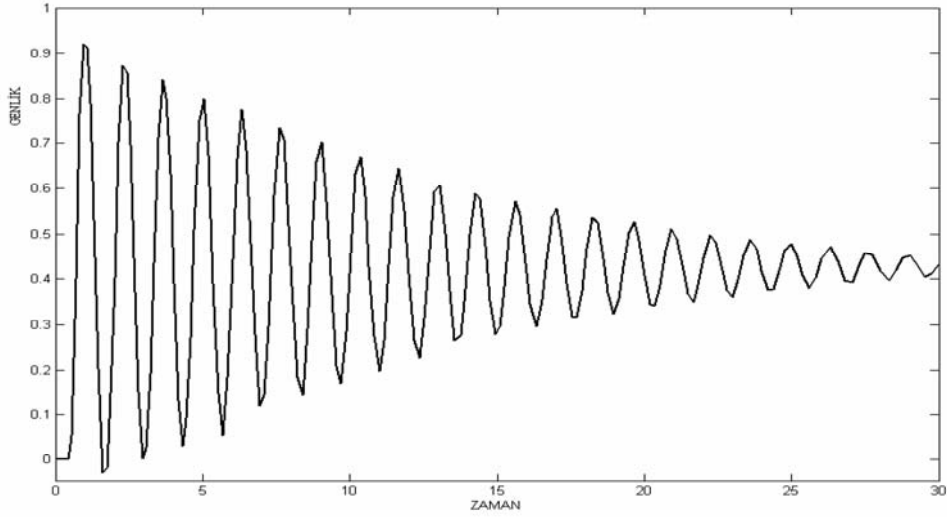
Nichols Ziegler Metodunun nasıl kullanıldığına dair bir MATLAB/Simulink örneği aşağıda yer almaktadır;

Örnek proses;

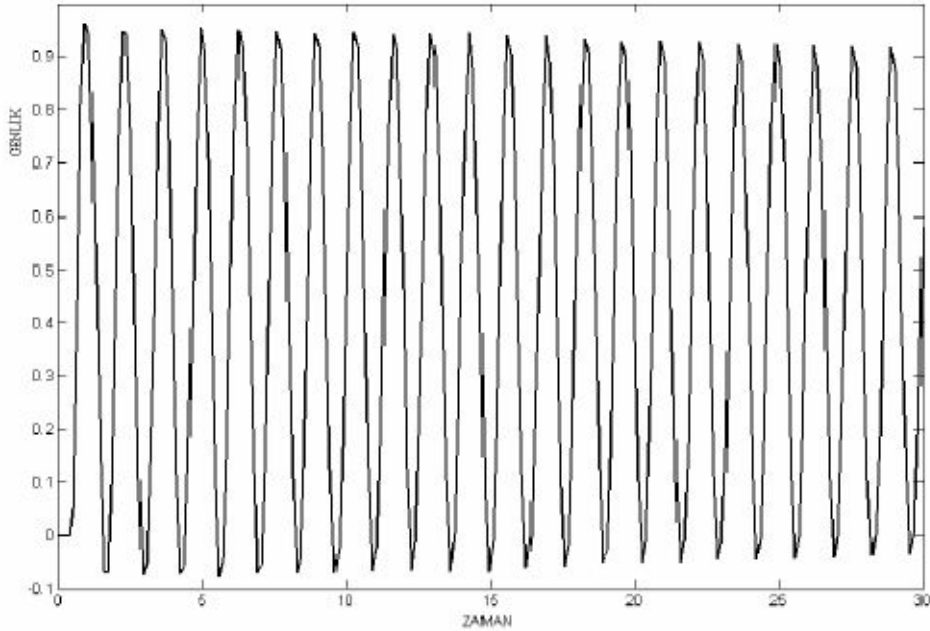
$$G(s) = \frac{49e^{-0,5s}}{s^2 + 5,6s + 49} \quad (4.50)$$

şeklinde transfer fonksiyonu verilmiş olan ikinci dereceden zaman gecikmeli ve az sönümlü bir sistem olsun. Burada doğal frekans,  $w_n = 7$  ve sönüm oranı,  $\zeta=0,4$  olduğu gözükmektedir. Metodu adım adım yerine getirirsek ilk önce osilasyonu sağlayacak oransal kazanç ifadesini bulmalıyız. Bu nedenle diyelim  $K_p$  ifadesini  $0,75$

seçtik. O zaman karşımıza çıkan sonuç henüz sistemin tam anlamıyla osilasyona girmediğidir fakat çok yaklaştığıdır. Bu durumda 0,75 ifadesini yavaş adımlarla artırınca sistemin tam olarak osilasyon haline girdiği kazanç ifadesi olarak 0,787 bulunur. Sistemin 0,75 için ve de 0,787 için verdiği yanıtlar aşağıda Şekil 4.28 ve Şekil 4.29’da verilmiş aradaki kazanç ifadeleri için ise yanıtların gösterimine gerek duyulmamıştır [49].



Şekil 4.28.  $K_p = 0,75$  için sistem yanıtı [49]



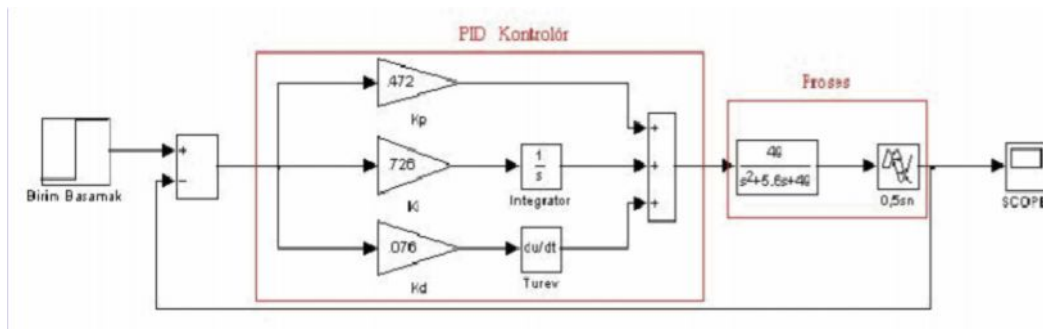
Şekil 4.29.  $K_p = 0,787$  için sistem yanıtı [49]



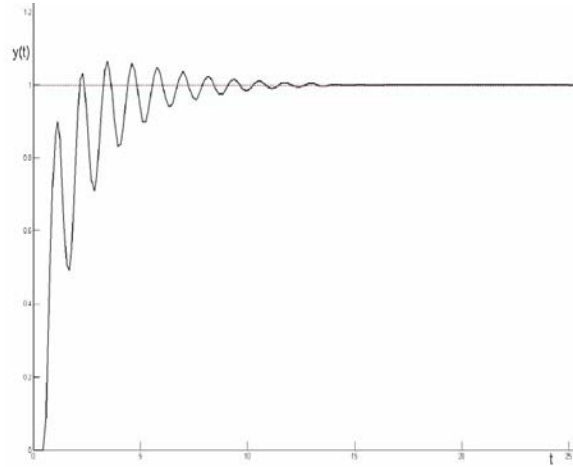
Sistem osilasyona girince geriye kalan osilasyon periyodunun bulunması işlemidir ki bu da zaten elimizdeki şekilden rahatça bulunabilir. Bulunan  $T_u$  ifadesi yaklaşık 1,3 sn'dir. Elbette burada bir parça da olsa hata payı bulunmaktadır fakat elde edilecek katsayıları etkileyebilecek derecede önemli bir hata söz konusu değildir.  $T_u = 1,3$  ve  $K_u = 0,787$  olarak belirlendikten sonra geriye sadece tablodaki formüllerden PID katsayılarımızı belirlemek kalır. Belirlenen katsayılar şu şekildedir:

$$K_p = 0,472 \quad K_i = 0,726 \quad K_d = 0,076$$

Burada dikkat edilmesi gereken husus tabloda  $T_i$  ve  $T_d$  için verilen formüllerden  $K_i$  ve  $K_d$ 'ye çevrim yaparken  $K_i = K_p/T_i$  ve  $K_d = K_p T_d$  olduğudur. Sonuç itibariyle kapalı çevrim PID kontrolörlü sistem aşağıda Şekil 4.30'da gösterilmiştir. Şekil 4.31'de ise Ziegler Nichols yöntemiyle katsayıları ayarlanan PID kontrolörü ile kontrol edilen ikinci dereceden zaman gecikmeli örnek sistemin birim basamak yanıtı görülmektedir. Anlaşıldığı gibi Ziegler Nichols yöntemi adım adım uygulanabilen ampirik bir prosedürdür ve de PID tasarım metodları arasında halen en çok kabul görendir [49]. Şu unutulmamalıdır ki Ziegler Nichols yöntemi bize sadece PID parametreleri için başlangıç değerleri verir, biz bu parametreleri ayarlayarak en iyi sonuca ulaşabiliriz. Bu sistemde de yöntemin cevabı başarılı bir sonuç vermiş sayılmaz ancak bir takım ayarlamalarla iyi sonuçlar elde edilebilir.



Şekil 4.30. PID kontrolörlü sistem blok gösterimi [49]



Şekil 4.31. Z-N yöntemi ile ayarlanmış PID kontrolörlü sistem yanıtı [49]

#### 4.5.4. Çift döngülü kontrol

DA-DA çeviricilerde, çıkış gerilimi anahtarlama çalışma oranı  $D$  ile orantılı olduğundan, kontrol sistemi de o şekilde tasarlanmalıdır ki, bu sistemin çalışma oranı değiştirilerek çıkış geriliminin verilen referans gerilimi izlemesi sağlansın. Böyle bir kontrol sisteminde çıkış gerilimi bir gerilim bölücü üzerinden algılanarak referans gerilim ile karşılaştırılıp ve aradaki hata işareti bir kompanzatör devresinden geçirilip bir darbe genişlik anahtarlama işareti ile de anahtarlama elemanı kontrol edilmektedir. Anahtarlama işaretinin çalışma oranı  $D$ , kontrol gerilimi ile doğru orantılıdır. İyi tasarlanmış böyle bir kontrol devresi yardımı ile çalışma oranı otomatik olarak konvertör çıkış geriliminin, istenen referans gerilimi izlemesi sağlanabilir. Kontrol işleminde kullanılan kompanzatörler çok farklı şekillerde tasarlanabilirler.

Tasarımda kullanılacak DA-DA çevirici modelinin değişken yapılı bir sistem olduğu bilindiğinden, bu çalışmada hem akım hem de gerilim kontrolü yapan çift döngülü kontrol yöntemi uygulanacaktır. Bu kontrol yönteminde iç döngüde DA-DA çeviricide anahtarlama elemanı durumunun 1 veya 0 olmasına göre DA-DA çevirici değişken yapıda bir sistem oluşturmaktadır. Değişken yapılı sistem kontrolünde de kayan kip kontrolcü kullanılmıştır. Dış döngü gerilim kontrolünden dolayı ÇDK oluşmaktadır. DA-DA çevirici ve kontrol bloğu alt bir sistem olarak ele alınmış ve Ziegler-Nichols yöntemi kullanılarak PI kontrolcüsü tasarlanmıştır.

Arzu edilen referans akım değeri  $I^*$ , PI kontrolör çıkışından elde edilmiştir. Kayma mod kontrolör çıkışında elde edilen  $d$  kontrol girişi ile dönüştürücüdeki anahtarlama elemanı sürülmüş ve bu anahtarlama elemanının çalışma süresi değiştirilerek istenen çıkış elde edilmiştir. Çalışma prensibi bölüm 4.4.1.2’de anlatılan yükseltici tip DA-DA dönüştürücü dinamik modeli;

$$\dot{x}_1 = -\frac{1-d}{L}x_2 + \frac{1}{L}E \quad (4.51)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1-d}{C}x_1 - \frac{1}{RC}x_2 \quad \text{şeklindedir.} \quad (4.52)$$

Değişken yapıli kontrol sistemlerinde amaç sistem hareketini;

$$S = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{n-1}e \quad (4.53)$$

Olarak tanımlanan bu yüzey üzerinde tutmaktır. Burada  $n$  sistem derecesini temsil etmektedir. Çift döngülü kayan kip kontrolünde sistemde sadece akım kontrolü için kayan kip kullanılacağından sistem derecesi  $n=1$  olarak alınabilir. Bu durumda kayan yüzey  $S$ ;

$$S = e \quad (4.54)$$

Olacaktır. Burada  $x_1 = i_L$  olduğundan anahtarlama fonksiyonu olarak;

$$S = x_1 - x_1^* \quad (4.55)$$

Seçilip  $x_1$ 'in arzu edilen  $x_1^*$ 'i sağlaması için  $\dot{S} = 0$  olması gereklidir. Bu durumda;

$$\dot{S} = \dot{x}_1 \text{ elde edilir.} \quad (4.56)$$

$$\dot{S} = \frac{1}{L}(E - (1-d)x_2) \text{ olur.} \quad (4.57)$$

Sistem durumlarının gerekli kayma yüzeyinde kalabilmesi için gerekli eşdeğer kontrol;

$$d_{eq} = d|_{\dot{s}=0} \text{ şeklinde elde edilir. Buradan;} \quad (4.58)$$

$$d_{eq} = 1 - \frac{E}{x_2} \text{ şeklinde elde edilir. Burada } x_2 = V \text{ 'dir.} \quad (4.59)$$

Bu durumda  $x_2 > E$  ve  $0 < d_{eq} < 1$  olur. Bu da göstermektedir ki, çıkış gerilimi giriş geriliminden büyük olduğu sürece kayma mod sağlanacaktır.

Kayma mod kontrolünde  $d$  kontrol girişi aşağıdaki şekilde ifade edilebilir;

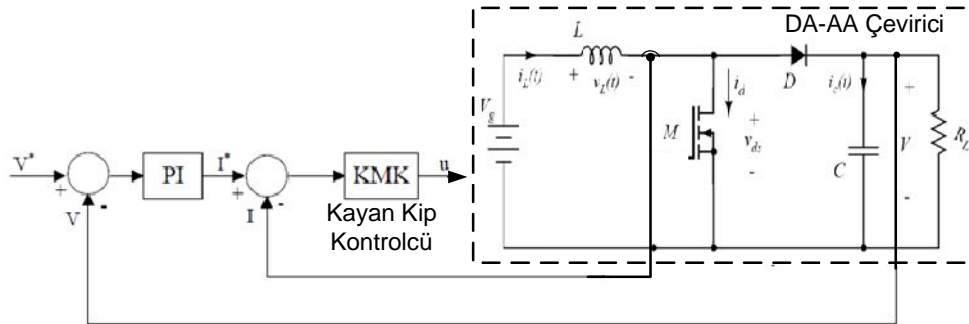
$$d = -k \operatorname{sgn}(S) + d_{eq} \quad (4.60)$$

Denklem (4.59), denklem (4.60)'da yerine konulduğunda;

$$d = -k \operatorname{sgn}(S) + \left(1 - \frac{E}{x_2}\right) \text{ şeklinde elde edilir.} \quad (4.61)$$

Burada " $k$ " bir sabit olup, maksimum kontrolör çıkışını belirtmektedir.

Çift döngülü kayan kipli DA-DA çevirici kontrolü genel blok diyagramı Şekil 4.32' de verilmiştir.



Şekil 4.32. Çift Döngülü Kayan Kip Yükseltici tip DA-DA dönüştürücü kontrolü blok diyagramı

#### 4.6. DA-AA Eviriciler (İnverterler)

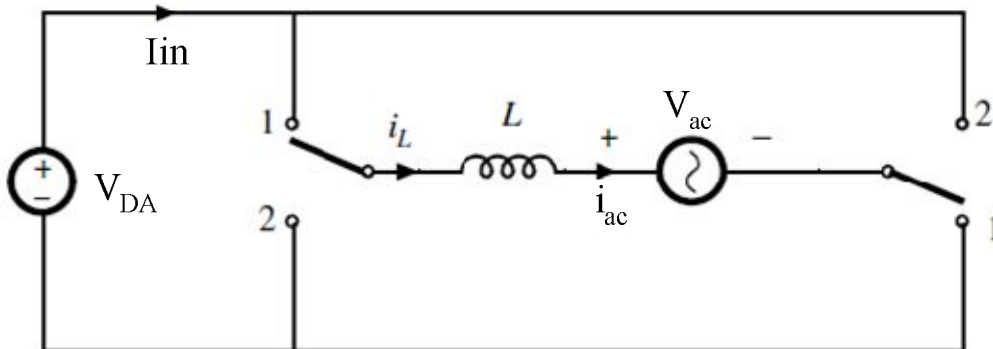
İnverter ünitesi veya başka bir deyişle DA-AA evirici, kontrol kartları, güç anahtarlama transistörleri, çıkış trafosu ve filtrelerden oluşur. On-Line Ups modellerinde sürekli olarak devrededir. Diğer modellerde şebekenin tolerans dışı yükselmesi, düşmesi veya kesilmesi durumunda çalışır. Genel olarak üç ayrı inverter ünitesinden bahsedebiliriz.

- 1- Kare dalga çıkışlı veya kare dalgadan pasif filtrelerle üretilmiş sinüs çıkışlı UPS inverterler
- 2- Sinüsoidal (Trapez dalga) çıkışlı UPS'lerin düşük frekanslı PWM'le çalışan inverterler
- 3- Sinüs çıkışlı UPS'lerin yüksek frekans PWM'le çalışan inverterler.

İnverter ünitelerinin gücü UPS çıkış gücü ile orantılıdır. Bütün sistemdeki en kritik bölge inverterlerdir. İnverterlerin görevi doğrultucu veya bataryalardan gelen DA gerilimi AA gerilime çevirmektir. Bu AA gerilim düzenlenip süzülerek kritik yükün ihtiyacı olan sinüzoidal gerilim oluşturulur. İnverterlerde dalga biçimlendirmede temel ilke, transistor veya tristör gibi anahtarlama elemanlarının iletim ve tıkama sürelerinin uygun bir biçimde belirlenmesidir. Bu belirleme ile birlikte elemanların anahtarlama sırası da çok önemlidir [40].

#### 4.6.1. Kayıpsız ideal tek fazlı DA-AA eviriciler

Bu çalışmada tek-fazlı evirici modeli kullanılacaktır. Kullanılacak tek-fazlı DA-AA evirici Şekil 4.33'de belirtilmiştir.



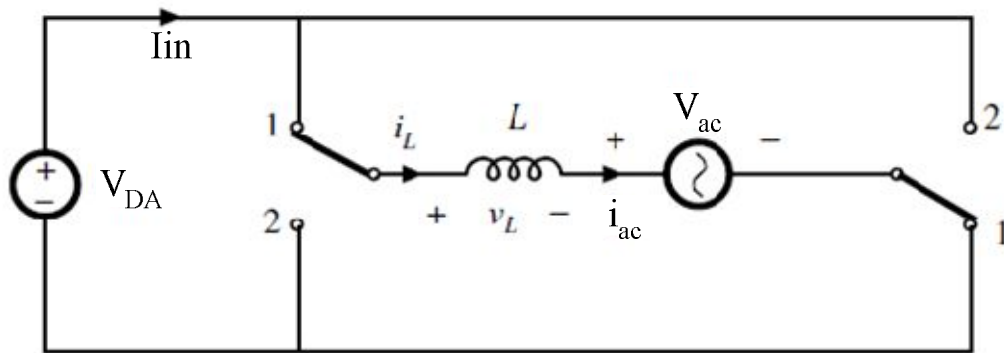
Şekil 4.33. Tek fazlı DA-AA evirici

Eviricide anahtar "1" konumunda iken iletimdedir ve  $T_s$  anahtarlama periyodu  $D$  doluluk oranı olmak üzere devrenin iletimde kalma süresi"  $D * T_s$  "kadardır. Benzer şekilde anahtar"2" konumundayken devrenin kesimde kalma süresi "  $(1 - D) * T_s$  " kadardır.

Anahtarlama frekansı  $f_s$  , AA hat frekansından (şebeke frekansı 50 Hz ) çok daha büyüktür.

Anahtarlamadaki doluluk oranı “D” kontrol edilerek, AA hat gerilimi ile aynı fazda küçük dalgalanmaya sahip AA akım ( $i_{aa}$ ) üretmek mümkündür. Buradaki en önemli nokta giriş DA geriliminin ( $V_{da}$ ) AA hat tepe geriliminden yeterince büyük olmasıdır.

Anahtar “1” konumuna getirildiğinde;



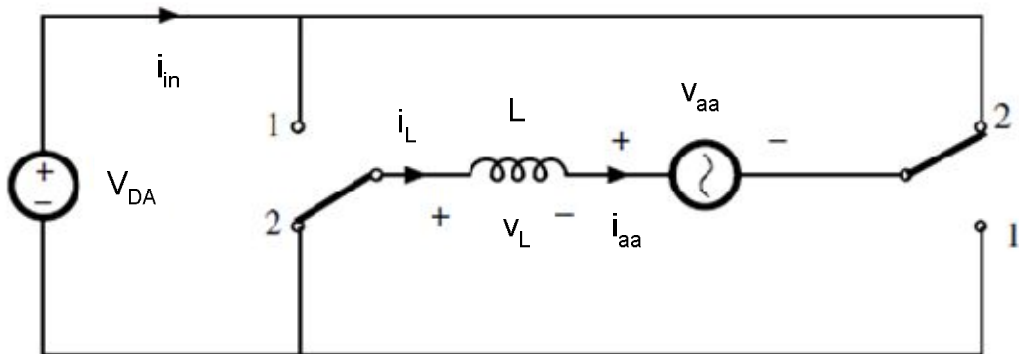
Şekil 4.34. Anahtar 1 konumunda iken DA-AA çevirici

$$V_L = V_{DA} - v_{aa} \quad (4.62)$$

$$i_L = i_{aa} \quad (4.63)$$

$$i_{in} = i_L \quad (4.64)$$

Anahtar “2” konumuna getirildiğinde;



Şekil 4.35. Anahtar “2” konumunda iken DA-AA çevirici

$$V_L = -V_{DA} - v_{aa} \quad (4.65)$$

$$i_L = i_{aa} \quad (4.66)$$

$$i_{in} = i_{aa} \quad (4.67)$$

Denklemleri elde edilir.

Burada anahtarlama frekansının AA hat frekansından çok daha büyük olduğu unutulmamalıdır. ( $f_s \gg f_{aa}$ )

Anahtarlama periyodu sona erdiğinde;  $v_{aa}(t) \approx \text{sabit}$  'tir.

Bu devrede endüktans gerilimi;

$$V_L = \begin{cases} +V_{DA} - v_{aa}, & 0 \leq t \leq DT_s \\ -V_{DA} - v_{aa}, & DT_s \leq t \leq T_s \end{cases} \quad \text{şeklindedir.} \quad (4.68)$$

Burada ortalama endüktans gerilimi bulunmak istenirse;

$$V_L = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} v_L(t) dt = D(V_{DA} - v_{aa}) + (1-D)(-V_{DA} - v_{aa}) \text{ elde edilir.} \quad (4.69)$$

Bir periyot boyunca endüktansta endüklenen toplam gerilim değeri sıfır olacağından;

$$V_L = (2D-1)(V_{DA} - v_{aa}) = 0 \text{ olur.} \quad (4.70)$$

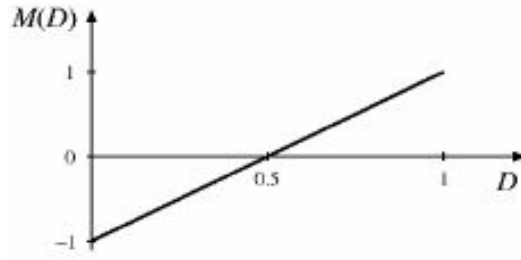
Buradan DA-AA çevirici kazancı;

$$M(D) = \frac{v_{aa}}{V_{DA}} = 2D - 1 \text{ elde edilir.} \quad (4.71)$$

M(D) kazancı;  $-1 \leq M(D) \leq 1$  arasında değer alabilir.

Bu şartın sağlanabilmesi için  $V_{DA}$  her zaman  $v_{aa}$ 'nin tepe değerinden daha büyük olmalıdır.

DA-AA evirici ait kazanç-doluluk oranı (M(D)-D) grafiği Şekil 4.36'da verilmiştir.



Şekil 4.36. Evirici Kazanç-doluluk oranı grafiği

AA hat akım Kontrolü: Kontrol amacı;

i. DA-AA çevirici tarafından çekilecek referans akım çekilerek AA akıma dönüştürülmeli ve hat gerilimi “ $v_{aa}(t)$ ” ile aynı fazda olmalıdır.

$$i_{aa} = I_{Mref} \sin(\omega t) \quad (4.72)$$

ii.  $I_{Mref}$  'in genliğine (veya RMS değerine) göre AA hatta aktarılabilecek güç kontrolü yapılmalıdır.

Modelin çıkarılması için gerekli formüller aşağıda verilmiştir;

$$v_{aa}(t) = \sqrt{2}V_{RMS} \sin(\omega t) \quad (4.73)$$

$$i_{aa}(t) = \sqrt{2}I_{RMS} \sin(\omega t) \quad (4.74)$$

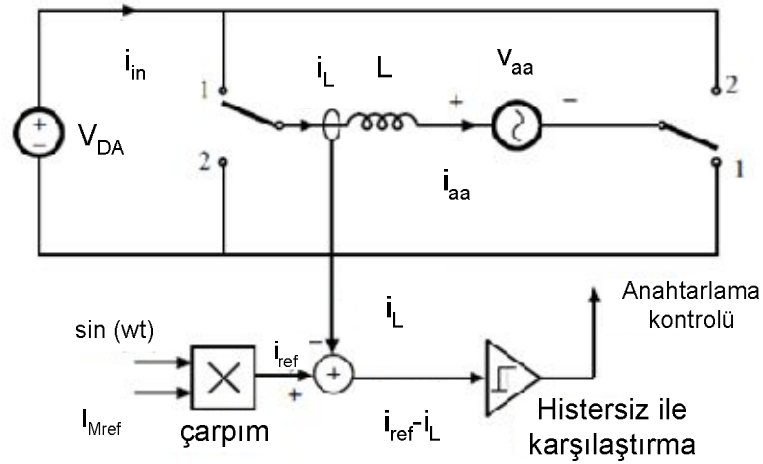
$$P_{aa} = v_{aa} \cdot i_{aa} = V_{RMS} \cdot I_{RMS} (1 - \cos(2\omega t)) \quad (4.75)$$

$$P_{aa} = V_{RMS} \cdot I_{RMS} \quad (4.76)$$

Basit akım kontrolü;

Anahtarlama oranını ayarlayarak Şekil 4.37'deki gibi basit bir akım kontrolü yapmak mümkündür;



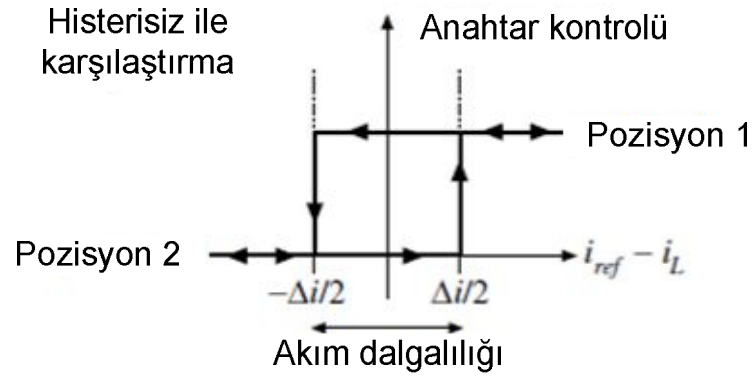


Şekil 4.37. DA-AA çevirici anahtarlama kontrolü

Burada;

$$i_{ref} = I_{Mref} \sin(\omega t) \text{ ' dir.} \quad (4.77)$$

Akım kontrolündeki histerisiz ile karşılaştırma ve anahtarlama konumuna göre akım dalgalılığı Şekil 4.38'deki gibi gösterilebilir,



Şekil 4.38. Histerisiz ile karşılaştırma

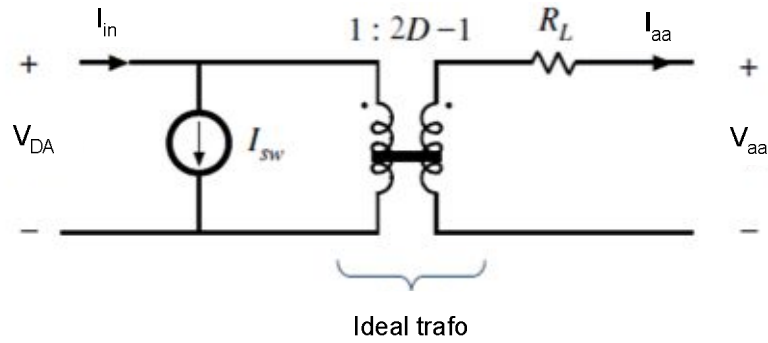
$i_L < i_{ref} - \Delta i / 2$  : anahtar pozisyon "1"de iken;

$i_L > i_{ref} + \Delta i / 2$  : anahtar pozisyon "2"de iken;

$i_L$  her zaman  $i_{ref}$ 'in  $\pm \Delta i / 2$  sınırları içerisinde.

#### 4.6.2. Kayıplı ideal tek fazlı DA-AA eviriciler

Bir önceki bölümde ideal DA-AA evirici modeli verilmiştir. Bu bölümde ise anahtarlama kayıpları ve endüktans direnci göz önüne alınarak bir evirici modeli verilmektedir. Kayıplı Tek fazlı inverter Şekil 4.39'da gösterilmektedir.



Şekil 4.39. Kayıplı Tek fazlı DA-AA inverter

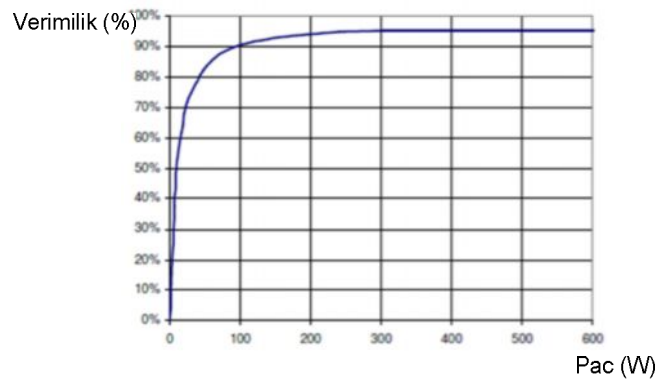
Burada;

$R_L$ : endüktans sarım direnci ve güç anahtarı direncidir.

$I_{sw}$ : anahtarlama ve diğer kayıplardır.

- i. Evirici verimliliği %95-96 civarlarındadır.
- ii. Yüksek güç seviyelerinde, iletim kayıpları  $R_L$ 'ye bağlıdır.
- iii. Düşük güç seviyelerinde ise verimlilikteki düşmeler anahtarlama ve diğer kayıplardan dolayıdır.

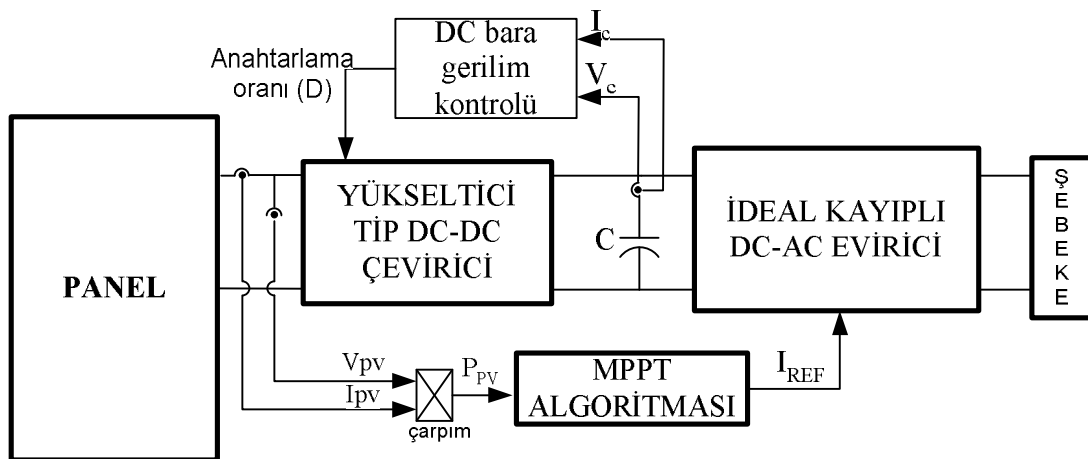
DA-AA eviriciye ait verimlilik-güç grafiği şekil 4.40'da gösterilmiştir.



Şekil 4.40. Tek-fazlı DA-AA İnvvertire ait Verimlilik-Güç grafiği

#### 4.7. Sonuç

Literatür taramasında referans [3,21,41,42,43,44,45]'de son yıllarda şebekeye doğrudan bağlı MPPT sistemlerine ait çalışmalar içermektedir. Dünyada güneş enerjisinin şebekeye doğrudan aktarılması üzerine yapılan çalışmalar son yıllarda hızla artmaktadır. Ülkemizde 2001 yılında yayımlanan elektrik piyasaları kanunu [46] gereğince şebekeye aktarılacak yenilenebilir enerji üretimi devlet tarafından da desteklenmeye başlanmıştır. Gerek bu kanun gereği gerekse ülkemizin de içerisinde yer aldığı Kyoto protokolü çerçevesinde ülkemizde özellikle şebekeye doğrudan bağlı güneş enerjisi sistemi kullanımının giderek yaygınlaşması öngörülmektedir. Bu çerçevede, bu çalışmada güneş panelinden alınan maksimum gücü şebekeye aktaran bir MPPT sistemi tasarlanmıştır. Bu uygulama için gerekli olan çevirici tipleri hakkında genel bilgiler bu bölümde aktarılmıştır. Yapılan çalışmada ilk olarak MPPT algoritması ile maksimum güç noktası tespiti yapılacaktır. Ardından, yükseltici tip DA-DA çevirici yardımı ile panel çıkış gerilimi çift döngülü kontrol ile yükseltilerek DA-AA eviriciye aktarılacaktır. Son olarak da ideal DA-AA çevirici ile panelden MPPT algoritmasının ürettiği referans akım çekilecek ve panelden çekilen bu maksimum güç şebekeye aktarılacaktır. Anlatılan MPPT sistemine ait genel blok diyagram şekil 4.41'de verilmiştir.



Şekil 4.41. Tasarlanan sisteme ait blok gösterim

## BÖLÜM 5. TASARIM VE SİMÜLASYON

Maksimum güç izleyicisi tasarımı ve simülasyonu için sırası ile aşağıdaki adımlar izlenmiştir. Bu adımların ayrıntılı açıklamaları ve uygulama sonuçları bu bölümde aktarılacaktır.

Bu çalışmada simülasyonlar için MATLAB/Simulink paket programının 2008b versiyonu kullanılmıştır.

Tasarım ve Simülasyon adımları;

- i. PV hücre modeli bölüm 2.7.1’de anlatılan ideal hücre modeli şeklinde Simulink ortamında oluşturularak, simülasyonu yapılmıştır.
- ii. İdeal PV hücre modeline seri ve paralel hücre dirençleri eklenerek PV hücre modeli oluşturulmuştur. Bölüm 2.7.2’de anlatılan bu hücre modelinin simülasyonu yapılarak Fotovoltaik hücre karakteristikleri elde edilmiştir.
- iii. PV hücreler seri bağlanarak panel bir modül olarak tasarlanmıştır. Tasarımda ilk olarak ışıma değişimlerine duyarlı modül simülasyonu yapıldıktan sonra istenilen gücün elde edildiği 6 adet modül seri olarak bağlanmıştır. Bu modüllerin sabit sıcaklık, değişik ışıma şartları altındaki güç-gerilim ve akım-gerilim değişimleri elde edilmiştir. Bölüm 2.8.2’deki formüller ile sıcaklık değişimlerine uygun hale getirilen model sabit ışınım ve değişken sıcaklık için tasarlanmış ve güç-gerilim, akım-gerilim simülasyon sonuçları elde edilmiştir.
- iv. Bu tasarım için gerçek MPPT noktası tespiti yapan, periyodik ayar gerektirmeyen, izleme hızı uygulama biçimine bağlı olarak geliştirilebilen, karmaşıklığı düşük olan bir algoritma seçilmesi uygun görülmüştür. Bu kısıtlara uygun olarak da Tablo 3.4’ten P&O algoritması seçilmiştir. Bölüm 3.2.2’de ayrıntılı bir biçimde anlatılan P&O (Değiştir-Gözle) algoritması Maksimum Güç İzleyicisi Sisteminde maksimum

güç noktasını tespit edecek algoritma olarak seçilmiştir. P&O algoritması istenilen kısıtlara sahip bir algoritma olmasına rağmen önemli bir probleme sahiptir. Bölüm 3.2.1.1’de de bahsedildiği gibi P&O algoritması maksimum güç noktası etrafında osilasyon yapar. Bu durum da MPPT sisteminde güç kayıplarına sebep olur. Bu çalışmada seçilen bu algoritma üzerinde bir takım modifikasyonlar yapılarak bu osilasyon önlenecek ve klasik P&O algoritma yöntemi ile modifiye edilmiş P&O algoritma yöntemi elde edilen simülasyon sonuçları ile karşılaştırılacaktır.

- v. Bölüm 4.4.1.2’de dinamik denklemleri elde edilen yükseltici tip çevirici modeli bu dinamik denklemlerden MATLAB/Simulink ortamında tasarlanmıştır. Tasarlanan çevirici için belirlenen anahtarlama oranları ile çevirici simülasyonu yapılmış ve yük altında çıkış gerilimi değişimleri incelenmiştir.
- vi. Yükseltici tip DA-DA çevirici gerilim ve akım kontrolünde Bölüm 4.5.4’te anlatılan, kararlılığı ve sistem belirsizliklerine karşı dayanıklılığı sağlayan “Çift Döngülü Kontrol (ÇDK)” yöntemi kullanılmıştır. Bu kontrol yönteminde iç döngüde DA-DA çeviricide anahtarlama elemanı durumunun 1 veya 0 olmasına göre DA-DA çevirici değişken yapıda bir sistem oluşturmaktadır. Değişken yapıda sistem kontrolünde de kayan kip kontrolcü kullanılmıştır. Dış döngü gerilim kontrolünden dolayı ÇDK oluşmaktadır. DA-DA çevirici ve kontrol bloğu alt bir sistem olarak ele alınmış ve Ziegler-Nichols yöntemi kullanılarak PI kontrolcüsü tasarlanmıştır.
- vii. Bölüm 4.6.1’de ayrıntılı olarak bahsedilen ideal kayıplı DA-AA çevirici modeli kullanılmıştır. Maksimum güç çekebilmek için amacı ile sistemde sürekli hal cevap için ideal çevirici modeli referans alınmıştır.
- viii. İstenilen gücün sağlandığı 6 adet PV modül, çift döngü kontrollü DA-DA çevirici, P&O algoritması ve ideal DA-AA çevirici birbirine bağlanarak MPPT sistemi oluşturulmuştur. Sonrasında ise sistem sorunları giderilmiş ve şebekeye doğrudan bağlı fotovoltaik sistemi için maksimum güç izleyicisi tasarımının verimliliği ve simülasyon sonuçları incelenmiştir.

Yukarıda i-viii maddeleri arasında anlatılan bu adımlar sırası ile bu bölümde gerçekleştirilecektir.

## 5.1. Panelin Modellenmesi ve Simülasyonu

### 5.1.1. İdeal fotovoltaik hücre model simülasyonu

İdeal Fotovoltaik hücre modeli Bölüm 2.7.1’de belirtilen şekilde tasarlanacaktır.

PV hücresinin çıkış akımı “ $I_{PV}$ ” ye ait denklemler (5.1),(5.2) ve (5.3)’de verilmektedir;

Burada;

- $I_o$  ters satürasyon akımı (amper),
- $v_T$  ısıl gerilim (volt),
- $i_{SC}$  ise hücre tarafından ışınım ile üretilen maksimum akımdır ve aynı zamanda hücrenin kısa devre akımına da eşittir.

$$i_D = I_o (e^{v_D/v_T} - 1) \quad (5.1)$$

$$v_D = v_{PV} \quad (5.2)$$

$$i_{PV} = i_{SC} - i_D \quad (5.3)$$

Formüllere ilişkin geniş açıklama Bölüm 2.7.1’de yer almaktadır.

MATLAB/Simulink ortamında yukarıda belirtilen karakteristik denklem modellenmiş ve simülasyonu yapılmıştır. PV hücre benzetimi için;

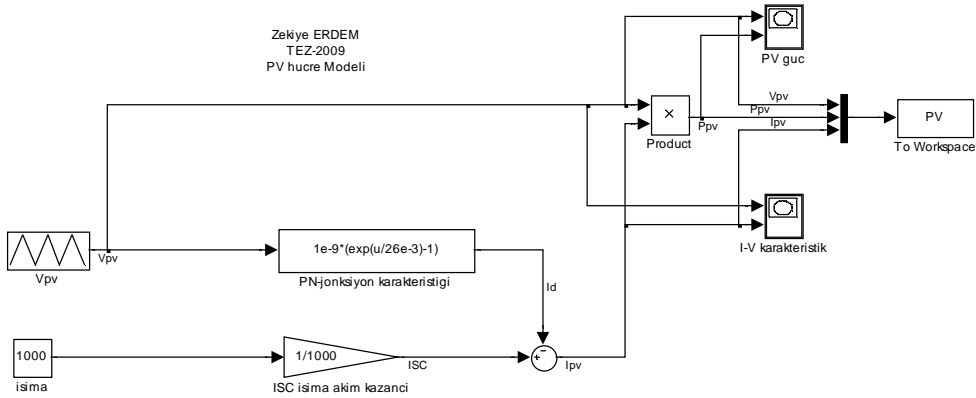
- Ters satürasyon akımı  $I_o = 10^{-19}$  A
- $T = 25^0$  C
- $V_T = 26 \cdot 10^{-3}$  V olarak seçilmiştir.

İdeal PV hücre modeline ait Simulink ortamında oluşturulmuş bloklar Şekil 5.1’de verilmektedir. Panel çıkış gücü  $P_{PV}$  ( $P_{PV} = i_{PV} \times v_{PV}$ ) gerilimin bir fonksiyonu olarak çizdirilmiş ve Şekil 5.2 (a)’da belirtilmiştir. Benzer şekilde akım-gerilim (I-V)

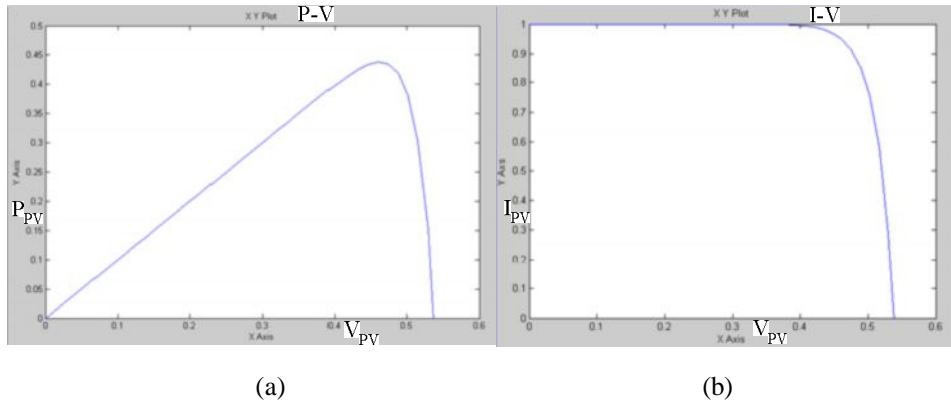
karakteristik eğrisinde  $i_{pV}$  de gerilimin bir fonksiyonu olarak çizilmiş ve Şekil 5.2(b)'de belirtilmiştir.

Bu karakteristlik eğrilerin Bölüm 2.7'de verilen eğrilere benzer özellikler taşıdığı görülebilir.

Sabit sıcaklık ( $25^{\circ}\text{C}$ ) ve sabit ışınım ( $1000\text{ W/m}^2$ ) altında panel karakteristlik eğrileri yükün arttırılması ile oluşturulmuştur. Burada yükün arttırılması  $V_{pV}$  geriliminin arttırılması ile sağlanmıştır. Panel gerilimi 0.5 Volt seviyesine ulaştığı andan itibaren  $I_{SC}$  akımının büyük bölümü diyot üzerinden geçmeye başlamıştır. Bu durumun sebebi kısaca şu şekildedir; çıkış geriliminin yükselmesi aynı zamanda diyot gerilimi  $V_D$ 'yi de yükseltmektedir. Denklem (5.1)'de  $V_D$  geriliminin yükselmesi diyot akımı  $I_D$ 'yi de yükselteceği görülebilir.  $I_D$  akımı  $V_D$ 'nin 0.5 V seviyesinden sonra eksponansiyel olarak artmakta ve 0.55 V seviyelerinde  $I_{SC}$  akımına eşit olmaktadır. Bu da bütün akımın diyot üzerinden akmasına sebep olmaktadır. Böylece bu durumda yük üzerinden akım akmamaktadır.



Şekil 5.1. Hücre Modeli Karakteristiği



Şekil 5.2. Hücre modeli karakteristik eğrileri: (a) P-V panel çıkış güç-gerilim (b) I-V panel çıkış akım-gerilim

İdeal PV hücresinin çıkış eğrileri üzerindeki maksimum noktalar tespit edilecektir. Bunun sebebi seçilen P&O algoritmasının verdiği sonuçları burada elde edilen sonuçlar ile kıyaslamaktır. Seçilen algoritmanın doğruluk testi bu şekilde yapılacaktır. Hücrenin çıkışındaki maksimum noktaların tespiti için simülasyonda elde edilen “panel çıkış gerilimi, çıkış akımı ve çıkış gücüne” ait veriler MATLAB çalışma ortamına (Workspace’e) aktarılmıştır. Burada EK A’de belirtilen yazılım kullanılarak simülasyon sonucundaki veriler üzerinden maksimum nokta tespiti yapılmıştır.

Elde edilen maksimum noktalar ise Tablo 5.1’de belirtilmiştir.

Tablo 5.1. Hücre karakteristiği eğrileri üzerinde elde edilen maksimum noktalar

<b>Işıma</b>	<b>MPP güç (W)</b>	<b>MPP gerilim (V)</b>	<b>MPP akım (A)</b>
1000 W/m <sup>2</sup>	0.4378	0.4600	0.9517

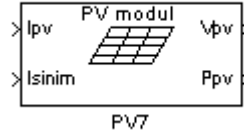
### 5.1.2. Kayıplı fotovoltaik hücre modeli ve fotovoltaik modül simülasyonu

Bu bölümde kayıplı Fotovoltaik Hücre Modeli oluşturulacak ardından bu hücreler birbirine seri bağlanarak Fotovoltaik modül tasarlanacak ve simülasyonları yapılacaktır.



### 5.1.2.1. Işınım değişimine bağlı modül simülasyonu

Bu çalışmada; PV hücrelerinin seri bağlanması ile istenilen akım ve gerilim değerlerine sahip PV modüller tasarlanacaktır. Bu modelde; girişler, PV akımı " $I_{PV}$ " (Amper) ve PV üzerine düşen ışınım miktarı " $I_{sinim}$ " ( $W/m^2$ ), çıkışlar; ise PV gerilimi " $V_{PV}$ " (Volt) ve PV çıkış gücü " $P_{PV}$ " (Watt) olarak belirlenmiştir. Bu modele ait genel görünüm şekil 5.3'de verilmektedir. Tasarlanan her modül maksimum 85 W üretme kapasitesindedir. Tasarlanan bu modüller daha sonra birbirlerine seri olarak bağlanacaktır. Bu çalışmada yaklaşık 500W gücünde bir MPPT sistemi yapılması amaçlanmaktadır. Bu nedenle MPPT simülasyonlarında giriş gücü olarak 6 adet modül seri olarak bağlanacaktır ( $85 \times 6 = 510$  W).



Şekil 5.3. Tasarlanan modülün giriş ve çıkışlardan oluşan görüntüsü

Bu model için kullanılan PV hücresine ait devre modelinde ideal PV hücre modeli tasarımına ek olarak hücreye seri bağlanan  $R_s$  ve paralel bağlanan  $R_p$  dirençleri dâhil edilmiştir. Bölüm 2.7.2'de bahsedilen PV hücre modeline ait denklemler aşağıda belirtilmiştir;

$$I_{SC} - I_D - \frac{V_D}{R_p} - I_{PV} = 0 \quad (5.4)$$

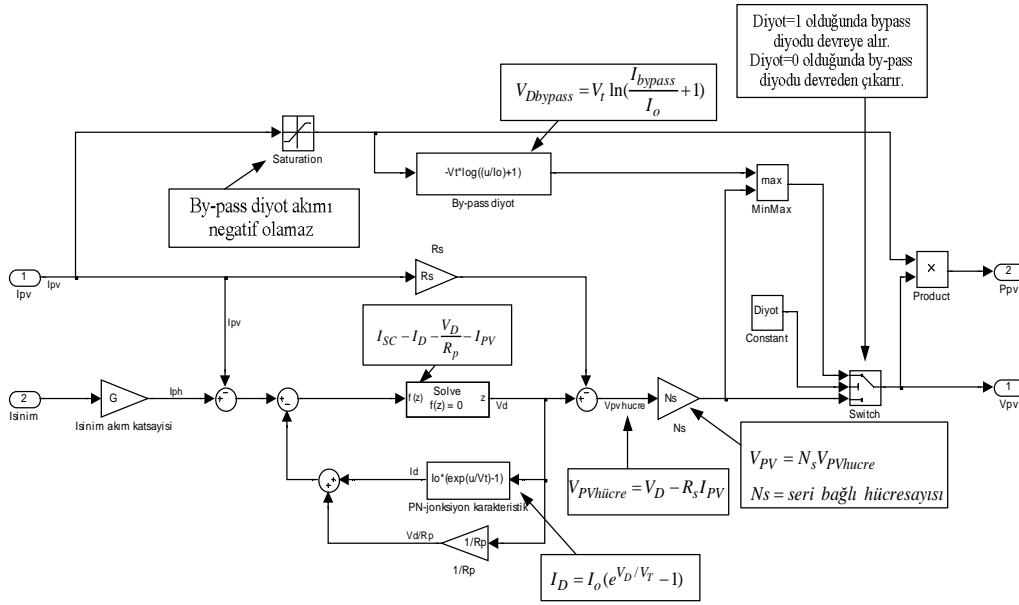
$$I_D = I_o (e^{V_D/V_T} - 1) \quad (5.5)$$

$$V_{PVhücre} = V_D - R_s I_{PV} \quad (5.6)$$

PV modül modeline Bölüm 2.8.3'de bahsedilen "parçalı gölgelenme" durumlarında oluşacak ters akımları giderecek olan by-pass diyotlar da eklenmiştir. By-pass diyota ait karakteristik eşitlik denklem (5.7)'de verilmektedir.

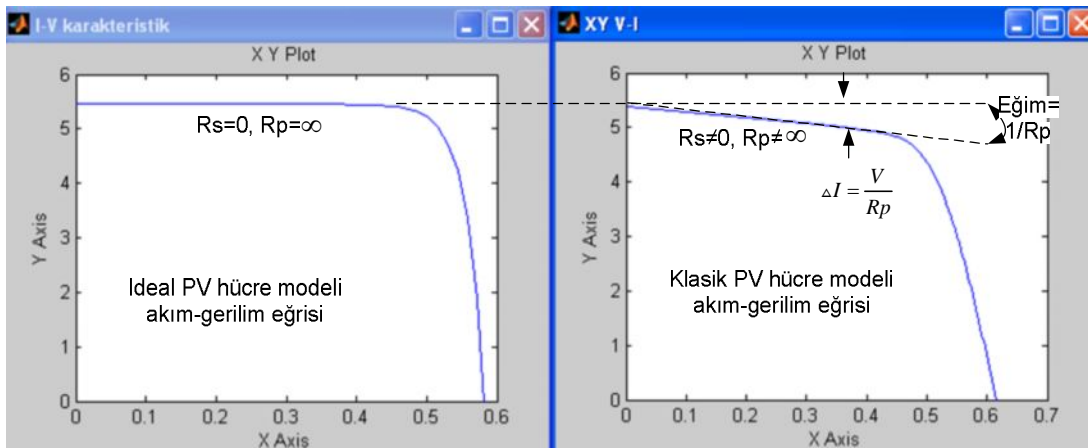
$$V_{Dbypass} = V_t \ln\left(\frac{I_{bypass}}{I_o} + 1\right) \quad (5.7)$$

PV modül simülasyonuna ait bloklar Şekil 5.4’de gösterilmektedir.



Şekil 5.4. PV modül simülasyonu

PV modül simülasyonunda  $R_s$  ve  $R_p$  dirençlerinin etkisinin daha iyi anlaşabilmesi için ideal hücreye ait akım-gerilim eğrisi ile kayıplı hücreye ait elde edilen akım-gerilim eğrisi karşılaştırılmıştır. Şekil 5.5’te hücreye seri bağlı ve paralel bağlı dirençlerin çıkış karakteristiği üzerindeki etkisi rahatça görülebilmektedir.



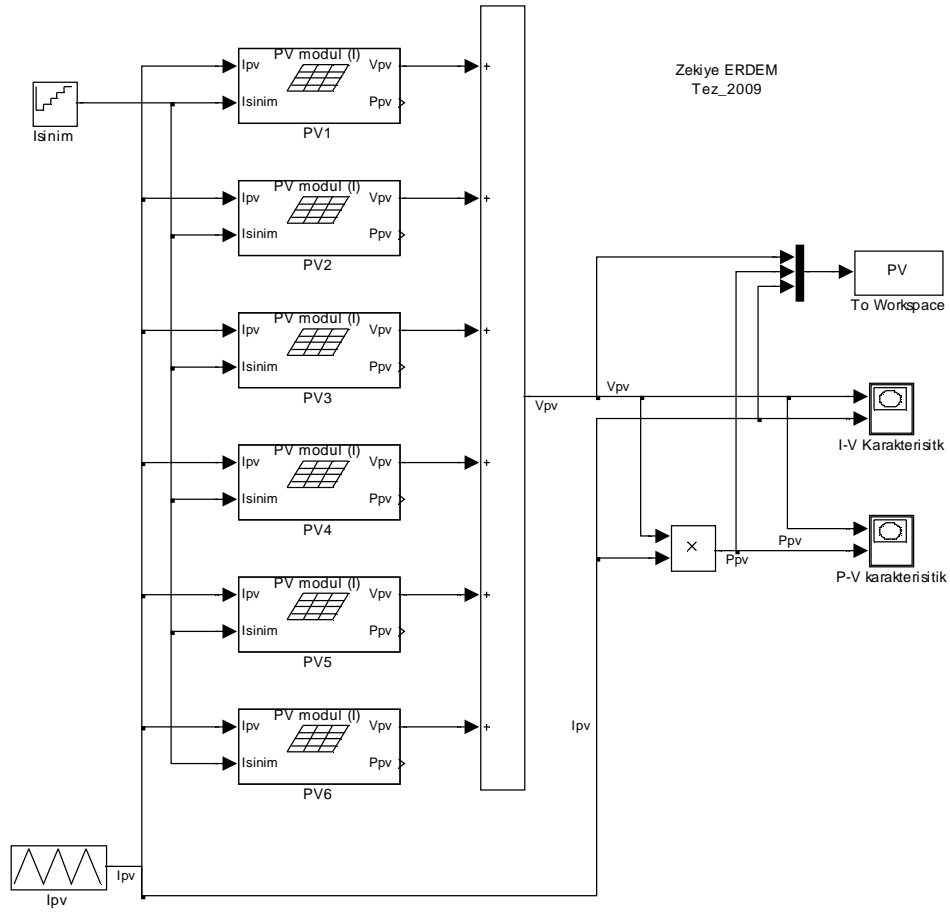
Şekil 5.5. İdeal ve kayıplı PV hücre modellerinin karşılaştırılması

Bu modelde ilk aşamada simülasyonu yapılacak PV'ye ait parametreler girilmelidir. Örneğin bu çalışmada Shell SQ85-P model parametreleri kullanılmıştır. Model için PV modülün kısa devre akımı, açık devre gerilimi,  $1000\text{W/m}^2$  ışığa ve  $25^\circ\text{C}$  sıcaklık standart şartları altında ölçülmüş maksimum güç noktasındaki akım ve gerilim bilgileri gerekmektedir. By-pass diyot istenildiği durumlarda devreden çıkabilecek durumda tasarım yapılmıştır. Şekil 5.6'da bu parametrelerin giriş ekranı gösterilmektedir. Parametrelerin alındığı Shell SQ85-P modeline ait veri sayfası ise EK E'de belirtilmiştir.

Şekil 5.6. PV modüle ait parametre giriş ekranı

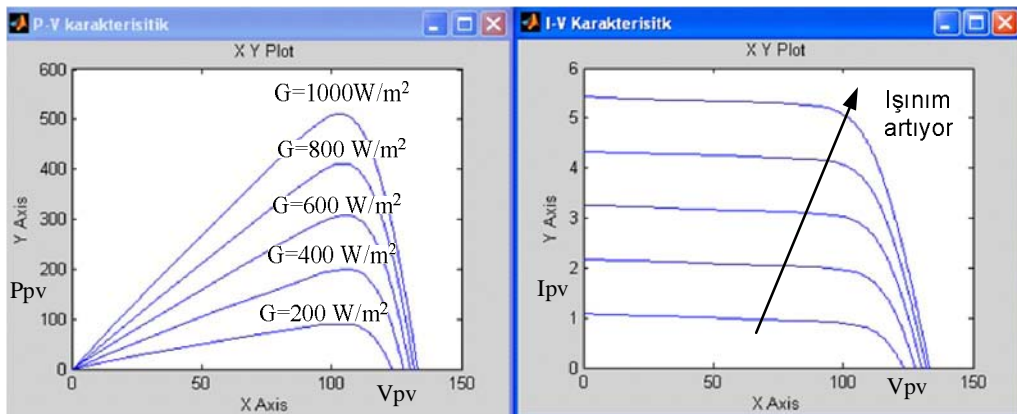
Fotovoltaik modüllerin veri sayfalarında hücre içinde yer alan  $R_s$  (seri bağlı direnç),  $R_p$  (paralel bağlı direnç),  $I_o$  (ters saturasyon akımı) ve seri bağlı hücre sayısı ( $N_s$ ) gibi bilgiler yer almaz, bu nedenle bu parametrelere veri sayfalarında verilen diğer parametreler aracılığı ile ulaşılmalıdır. EK B'de bu parametrelerin diğer parametreler üzerinden elde edildiği MATLAB yazılımı yer almaktadır.

MPPT simülasyonlarında 6 adet modül seri bağlanarak kullanılacağı daha önce açıklanmıştır. Bu seri bağlı modüllerin karakteristikleri bu bölümde Şekil 5.7'de belirtildiği gibi elde edilecektir. Böylece 6 adet modülün verdiği maksimum çıkış gücü ve maksimum çıkış akımı tespit edilecektir. Bu durum P&O algoritması doğruluk oranı performansı karşılaştırması için gerekmektedir.



Şekil 5.7. Seri bağlanmış 6 adet modülün blok şeklinde gösterimi

Sabit sıcaklıkta ( $25^{\circ}\text{C}$ ) PV modüllere ait değişik ışınma değerleri altında elde edilen güç-gerilim (P-V) ve akım-gerilim (I-V) karakteristik eğrileri Şekil 5.8'de verilmektedir.



Şekil 5.8. (a) PV modül P-V (güç-gerilim) (b) I-V (Akım-gerilim) karakteristikleri

Bu eğriler üzerindeki maksimum noktalar EK A'de verilen kodlar ile MATLAB ortamında elde edilmiştir. Bu değerler Tablo 5.2'de verilmiştir;

Tablo 5.2. Değişik ışımalar altında seri bağlı modüllerin çıkış karakteristik eğrileri üzerinde elde edilen maksimum noktalar

Işıma	MPP güç (W)	MPP gerilim (V)	MPP akım (A)
1000 W/m <sup>2</sup>	510.824	103.4057	4.9400
800 W/m <sup>2</sup>	411.324	104.5961	3.9325
600 W/m <sup>2</sup>	307.485	105.1233	2.9250
400 W/m <sup>2</sup>	199.8732	106.0335	1.8850
200 W/m <sup>2</sup>	90.0461	102.6166	0.8775

Tablo 5.2'de elde edilen değerler Bölüm 5.2'de seçilen P&O algoritmasının sonuçlarının doğrulamasında kullanılacaktır. Tablo 5.2'den görüleceği gibi ışımının değişimi, en çok panel akımını etkilemektedir. Panel gerilimi üzerinde pek fazla bir değişime yol açmaz. Bu nedenle panel çıkış gücünün düşüşü akıma bağlı olarak gerçekleşmektedir.

### 5.1.2.2. Sıcaklık değişimine bağlı modül simülasyonu

Bir önceki bölümde yalnız ışıma değişimlerinin gözlemlenebildiği PV modül modeli verilmişti. Bu modelde ise sabit ışımın, değişken sıcaklık değerlerine göre tasarlanan model verilecektir. Modelin iki ayrı parçada anlatılmasının amacı; MPPT sistem simülasyonlarında sadece ışımın değişimlerinin göz önüne alınacak olmasıdır. Bunun sebebi sıcaklık değişimlerinin panel akımı değil, panel gerilim değerlerinin değişmesine sebep olmasıdır. Bu durum, tasarlanan MPPT sisteminde önemli değildir çünkü gelen PV gerilimi kontrolcü ile istenilen seviyeye getirilmektedir. Sıcaklık değişimlerinin eklenmesi sadece simülasyonu karmaşıklaştıracak ve sonuçlara bir etkisi olmayacaktır. Ayrıca P&O algoritmasının bölüm 5.1.2.1'de anlatılan model üzerinde daha doğru şekilde çalıştığı gözlemlenmiştir.

Bölüm 2.8.2’de sıcaklığın panel üzerindeki etkisi ayrıntılı bir biçimde anlatılmıştır. Aşağıdaki denklemler doğrultusunda tasarlanan PV hücrenin modeli Şekil 5.9’da gösterilmektedir.

$$I_{PV} = I_{PV} - \Delta I \quad (5.8)$$

$$\Delta I = \left[ \alpha \left( 1 - \frac{G}{G_{STC}} \right) \cdot \Delta T \right] + \left( 1 - \frac{G}{G_{STC}} \right) \cdot I_{SC} \quad (5.9)$$

$$V_{PV} = V_{PV} - \Delta V \quad (5.10)$$

$$\Delta V = (\Delta T \cdot \beta - \Delta I \cdot R_s) \beta \quad (5.11)$$

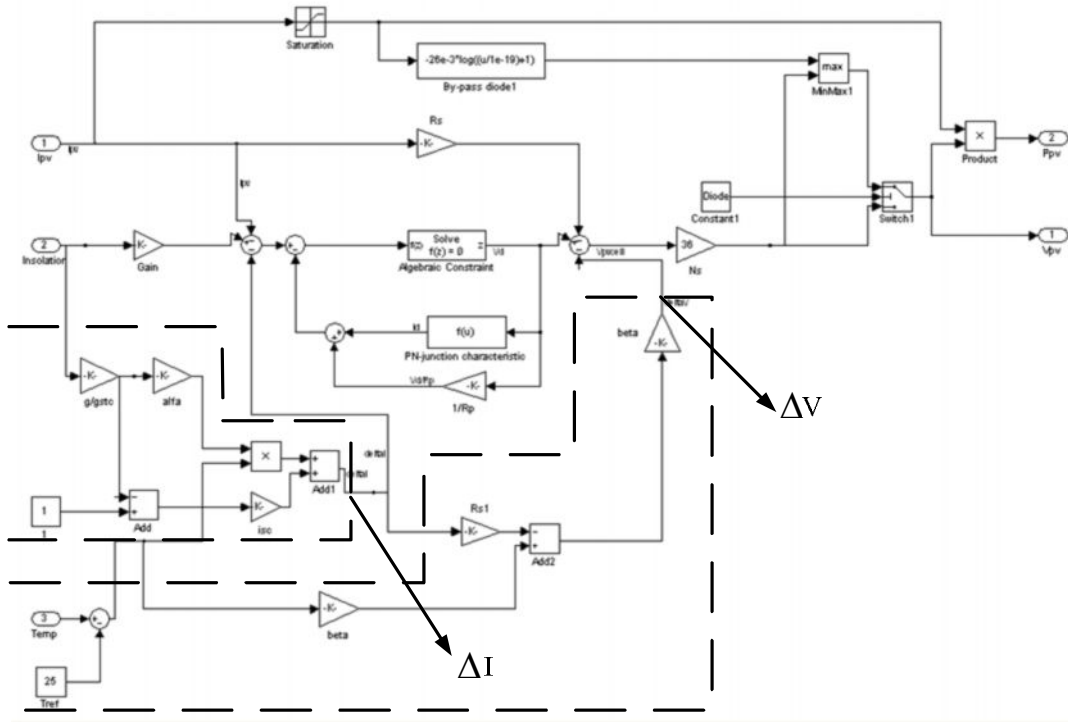
Model için gerekli olan  $\alpha$  ve  $\beta$  değerleri kullanılacak PV modele göre değişmektedir. Bu çalışmada kullanılan Shell SQ85-P modeli için gerekli parametreler aşağıda verilmiştir (Bu parametrelere EK E’de verilen veri sayfasından da ulaşılabilir.);

Akım sıcaklık katsayısı,

$$\alpha = 1.4$$

gerilim sıcaklık katsayısı,

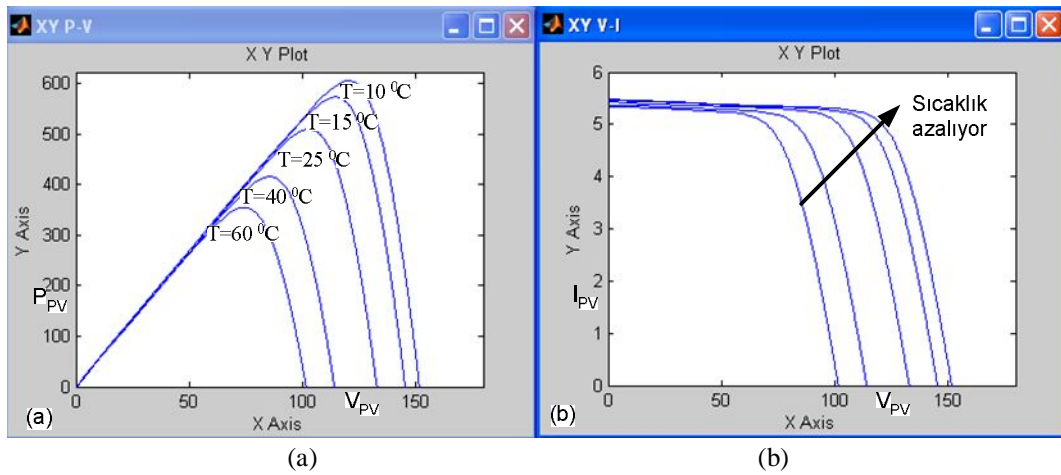
$$\beta = -64.5 \text{ 'tur.}$$



Şekil 5.9. Sıcaklık değişimleri için PV Hücre modeli

Bu modelde ışınım  $1000\text{W/m}^2$  değerinde sabit tutulmuş değişik sıcaklık koşulları altında Şekil 5.10 (a)'da güç-gerilim (P-V) ve 5.10 (b)'de ise akım-gerilim (I-V) eğrileri elde edilmiştir.

Burada Bölüm 2.8.2'de belirtilen eğrilere benzer karakteristikler elde edildiği açıkça görülebilir.



Şekil 5.10. (a) Değişik sıcaklık koşulları için elde edilen P-V grafiği (b) I-V grafiği Sıcaklık değişiminin gerilim üzerinde etkili olduğu PV karakteristik eğrilerinden görülebilir. Sıcaklığın artması veya azalması akım üzerinde önemli bir etki

yaratmazken, gerilim üzerinde kayda değer değişimlere sebep olmaktadır. Bunun sebebi ise gerilim sıcaklık katsayısı  $\beta$  'nın akım sıcaklık katsayısı 'dan çok daha büyük olmasıdır. Bu nedenle sıcaklıktaki küçük değişimler, PV gerilimine büyük etkiler yapmaktadır. Tablo 5.3'te çeşitli sıcaklık değerleri için elde edilen maksimum noktalar görölmektedir.

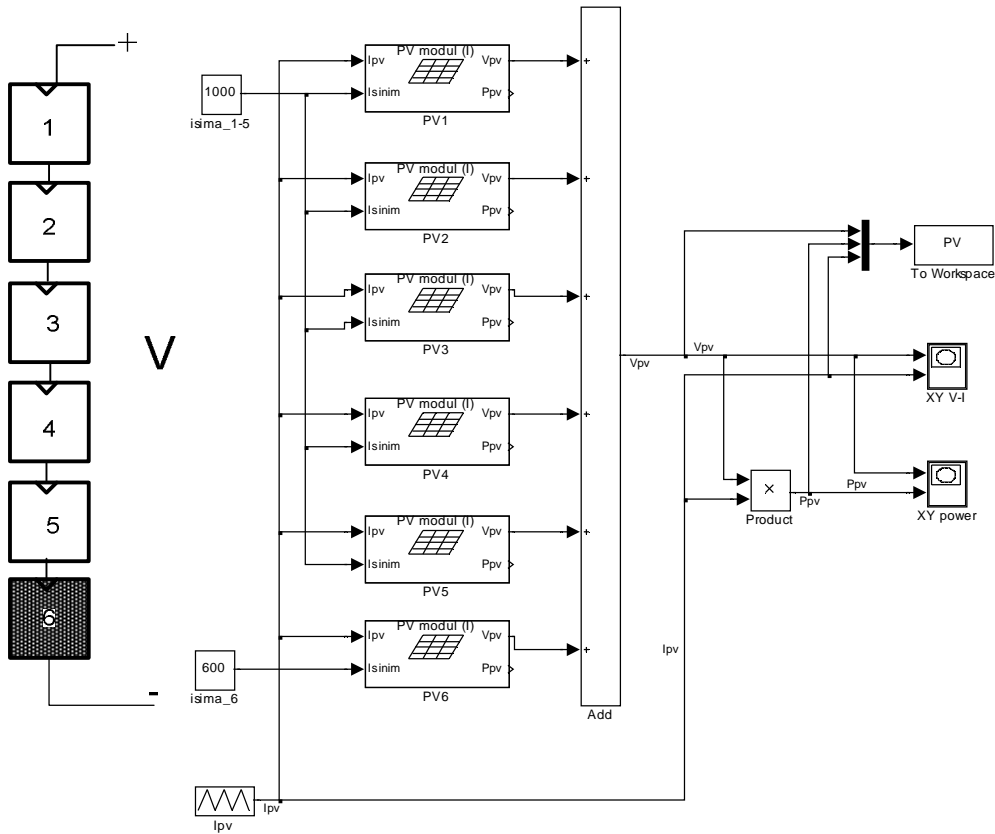
Tablo 5.3. Çeşitli sıcaklık değerleri için maksimum noktalar

Sıcaklık	MPP güç (W)	MPP gerilim (V)	MPP akım (A)
10 °C	605.4267	120.9644	5.0050
15 °C	573.4242	114.5703	5.0050
25 °C	513.8974	103.2181	4.9400
40 °C	416.1735	85.3689	4.8750
60 °C	295.0349	63.0416	4.6800

### 5.1.3. Panellerdeki parçalı gölgelemenin incelenmesi

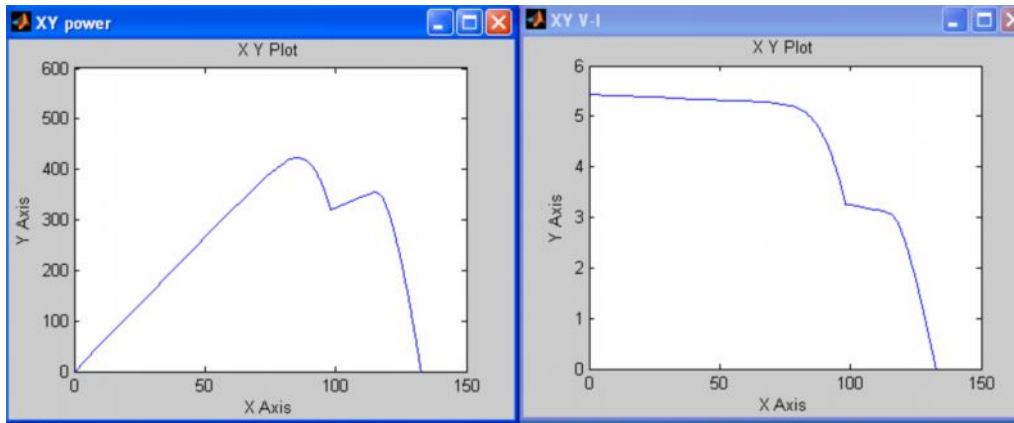
Bu bölümün amacı by-pass diyotlarının ve parçalı gölgelemenin panel üzerindeki etkisini incelemektir. Parçalı gölgeleme durumu ve by-pass diyotların çalışma mantığı hakkında ayrıntılı bilgiler Bölüm 2.8.3'de verilmiştir. Bölüm 5.1.2'de verilen modelde 6 adet modül seri bağlanarak eşit ışımaya maruz bırakılmıştı. Bu bölümde ise 5 adet modül  $1000\text{W}/\text{m}^2$  ışımaya maruz kalırken, 6. Modül  $600\text{W}/\text{m}^2$  ışımaya maruz kalacaktır, yani 6. Modül gölgede kalmaktadır. Bahsedilen modelin ekran görüntüsü Şekil 5.11'de verilmiştir.





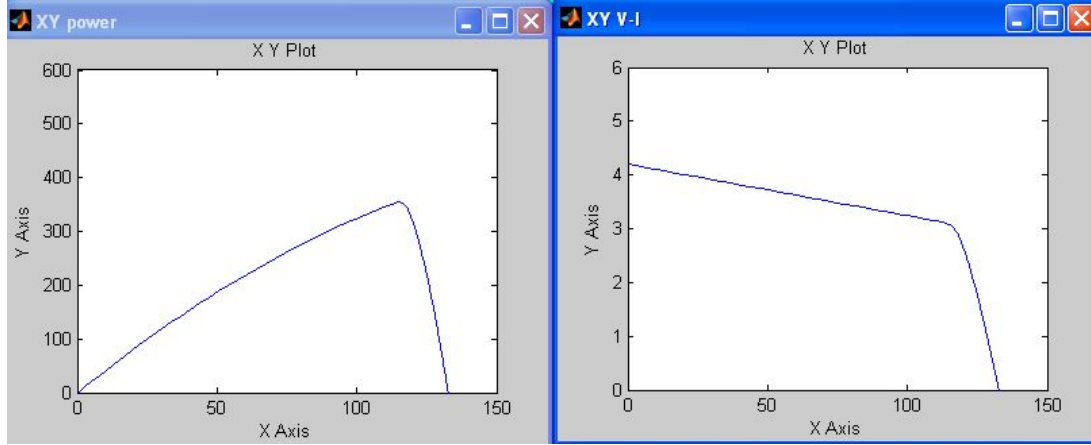
Şekil 5.11. Parçalı gölgeleme durumu için MATLAB modeli

Bu modelde simülasyon sonuçları by-pass diyotlar devredeyken alınmıştır. Verilen şartlar altında elde edilen simülasyon sonuçları Şekil 5.12’de gösterilmiştir. Bu sonuçlara bakıldığında PV çıkış güç eğrisinde birden fazla maksimum noktanın olduğu açıkça görülebilir. Bu nedenle parçalı gölgeleme durumlarında maksimum noktayı ancak global maksimum algoritmaları yakalayabilir.



Şekil 5.12. (a) Parçalı Gölgeleme durumunda panel çıkış güç-gerilim eğrisi (b) akım-gerilim eğrisi

By-pass diyotların devreden çıkarılması ile Şekil 5.13’de yer alan simülasyon sonuçları elde edilmiştir.



Şekil 5.13. (a) By-pass diyotların devreden çıkarılması ile elde edilen panel güç-gerilim (b) akım-gerilim eğrisi

Burada by-pass diyotlar kullanılmaması, parçalı gölgelenme durumundaki panel çıkışındaki akım ve güç eğrilerinde birden fazla maksimum nokta oluşma problemine bir çözüm gibi gözükse de aslında panelden çekilebilecek gücün çok daha altında bir güç çekilmektedir. Panelden çekilemeyen bu fazla güç ise gölgede kalan panelin diyodundan ters akım akıtarak geçer, bu durum da, gölgede kalan panelin zarar görmesine sebep olur.

Bu durumu daha iyi anlatabilmek için Şekil 5.12 ve Şekil 5.13’te verilen güç eğrilerinin maksimum noktaları tespit edilmiş ve Tablo 5.4’te yerleştirilmiştir.

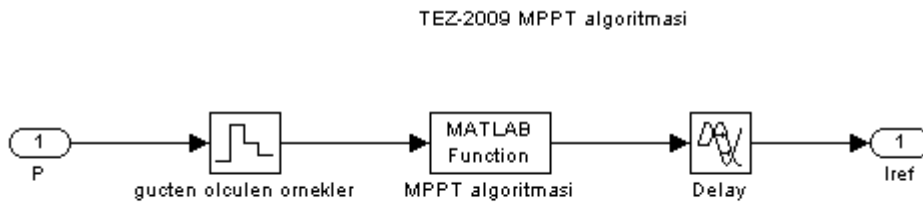
Tablo 5.4 By-pass diyodun maksimum güç üzerine etkisi

By-pass Diyot Devrede	By-pass Diyot Devrede Değil
$P_{MPP}$ (W)	$P_{MPP}$ (W)
422.6541	354.3074

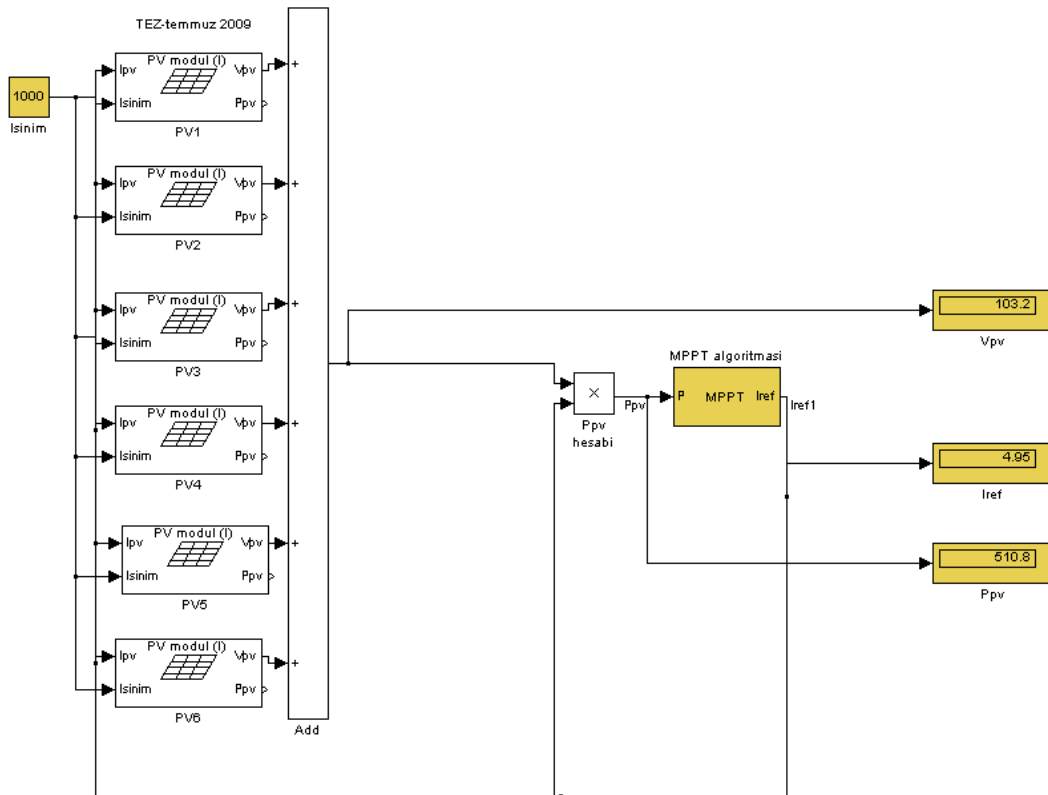
By-pass diyodun kullanılması ile yaklaşık 68 Watt’lık bir güç kazancı sağlanmıştır. Bu nedenle bu çalışmada yapılan bütün simülasyonlar, hücre modelinde by-pass diyot devrede iken yapılmıştır.

## 5.2. P&O Algoritması Simülasyonu

Bölüm 5'in başında niçin P&O algoritmasının seçildiği belirtilmişti. P&O algoritması hakkında ayrıntılı bilgi ve akış şeması (bkz. Şekil 3.8) Bölüm3.2.2.1'de verilmiştir. Bu algoritma MATLAB Editör ortamında yazılmış daha sonra Simulink simülasyon ortamına aktarılmıştır. Yazılıma ait kodlar EK C'de verilmiştir Şekil 5.14'de algoritmanın Simulink ortamında nasıl modellendiği ve Şekil 5.15'te ise PV modül ile algoritmanın bağlantısına ait bloklar yer almaktadır.



Şekil 5.14. P&O algoritmasının Simulink ortamına aktarılması



Şekil 5.15. PV modüller ile algoritma bağlantısı

Değişik ışınım şartları için (sırasıyla 1000 W/m<sup>2</sup>, 800 W/m<sup>2</sup>, 600 W/m<sup>2</sup>, 400 W/m<sup>2</sup>, 200 W/m<sup>2</sup>) P&O algoritması ile elde edilen sonuçlar ile Tablo 5.2’de yer alan maksimum güç noktaları Tablo 5.5 ‘te karşılaştırılmıştır.

Tablo 5.5. Değişik Işınım Şartları altında Algoritma sonuçlarının karşılaştırılması

Simülasyondan Sonuçları			P&O Algoritması Sonuçları			$\Delta I_{P\&O}(\Delta I_{MPP}^s)$ $-\Delta I_{MPP}^{P\&O}$	Işınım Şiddeti (W/m <sup>2</sup> )
$P_{MPP}^s$	$V_{MPP}^s$	$I_{MPP}^s$	$P_{MPP}^{P\&O}$	$V_{MPP}^{P\&O}$	$I_{MPP}^{P\&O}$		
510.82	103.40	4.94	510.79	103.4	4.94	0.0	1000
411.32	104.59	3.932	411.3	104.4	3.937	-0.0045	800
306.95	105.12	2.925	306.78	105.1	2.919	0.006	600
199.87	106.03	1.885	199.8	105.5	1.896	-0.011	400
90.04	102.61	0.877	90	103.2	0.872	0.005	200

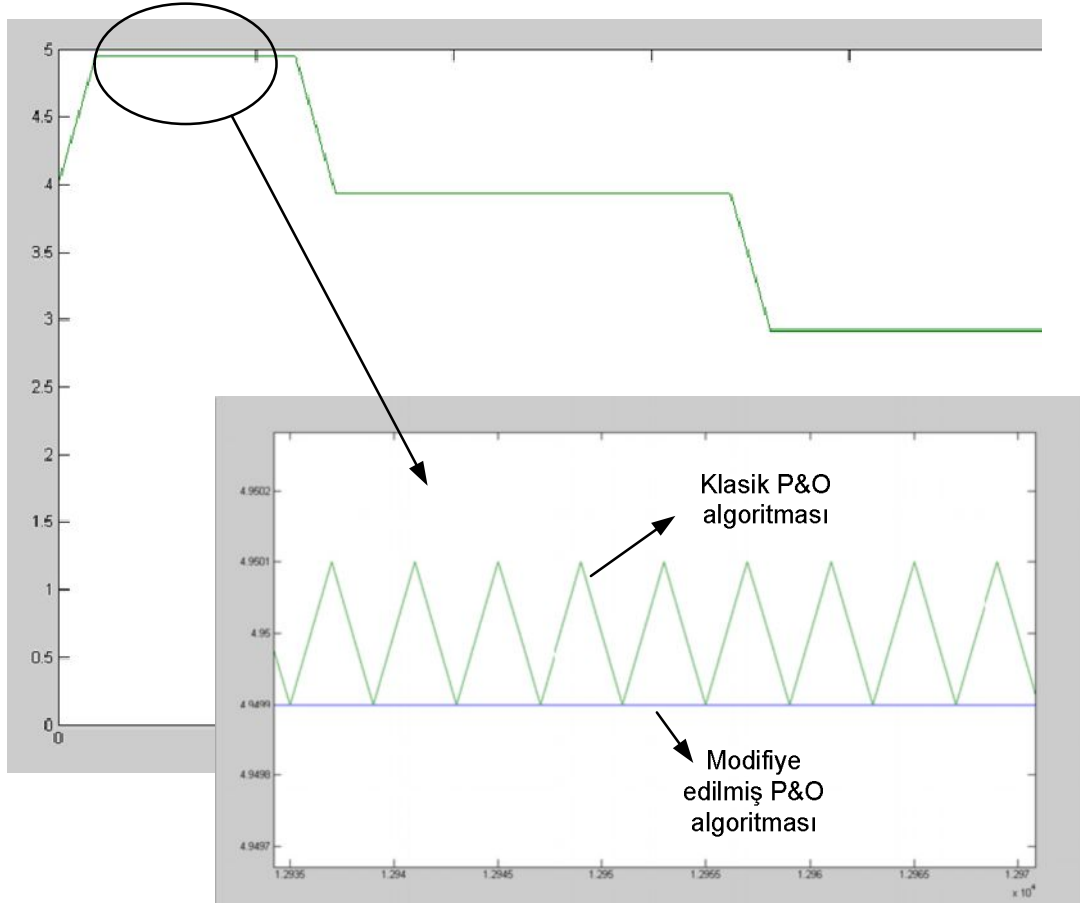
Bu sonuçlar P&O algoritmasının bulduğu maksimum akım noktalarının simülasyon sonuçlarına göre ( $\Delta I_{P\&O}$ ) %0.33 hata oranı (MAPE yöntemine göre) ile çalıştığını göstermektedir.

### 5.3. P&O Algoritması Modifikasyonu

Bölüm 3.4’de anlatılan ve Şekil 3.11’de akış diyagramı verilen P&O algoritmasındaki osilasyon problemine çözüm getiren “modifiye edilmiş P&O algoritması” uygulaması bu bölümde yapılacaktır. Algoritmanın MATLAB ortamında yazılmış kodları EK D’te belirtilmiştir.

P&O algoritması simülasyonunda algoritmaları karşılaştırmak amaçlı klasik P&O ile modifiye edilmiş P&O algoritması referans akım çıktıları aynı eksen üzerinde çizdirilmiştir. Şekil 5.16’da aynı zaman ekseninde çizdirilen her iki P&O algoritmasının şekil üzerindeki işaretlenen bölüme daha yakından bakıldığında üst üste gibi gözükken her iki algoritmanın aslında öyle olmadığı açıkça görülmektedir. Klasik P&O algoritması osilasyon yaparken, modifiye edilmiş P&O algoritmasının sabit bir değer üretmektedir.

P&O algoritması yöntemine yeni bir yaklaşım getirilmiş ve tez çalışmasına özgün değer katılmıştır. Bu modifikasyon ile klasik P&O algoritmasında osilasyon nedeni ile MPPT sisteminde güç kaybına sebep olan durum önlenmiş ve daha karalı bir algoritma geliştirilmiştir.



Şekil 5.16. Klasik P&O algoritması ile modifiye edilmiş P&O algoritmasının referans akım çıktılarının karşılaştırılması

#### 5.4. DA-DA Çevirici Tasarımı ve Çift Döngülü Kontrol

Bu çalışmada Bölüm 4.5.4’de ayrıntılı olarak bahsedilen “Çift Döngülü Kontrol” yöntemi kullanılacaktır.

Bu kontrole ait blok diyagram Bölüm 4.5.4 Şekil 4.33’de belirtilmiştir. Bu bölümde ilk olarak yükseltici tip DA-DA çevirici tasarımı gerçekleştirilecek ardından çift döngü kontrollü DA-DA çeviricinin Simülasyon sonuçları verilecek, son olarak da MPPT sisteminde kullanılan ideal DA-AA çevirici anlatılacaktır.

### 5.4.1. Yükseltici tip DA-DA çevirici simülasyonu

Bölüm 4.4.1.2’de ayrıntılı olarak bahsedilen yükseltici tip DA-DA çevirici modeli MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Çeviriciye ait dinamik denklemler;

$$\begin{cases} \dot{i}_L = -\frac{1-d}{L}V + \frac{1}{L}E \\ \dot{V} = \frac{1-d}{C}i_L - \frac{1}{RC}V \end{cases} \quad (5.12)$$

Şeklindeydi. Burada;

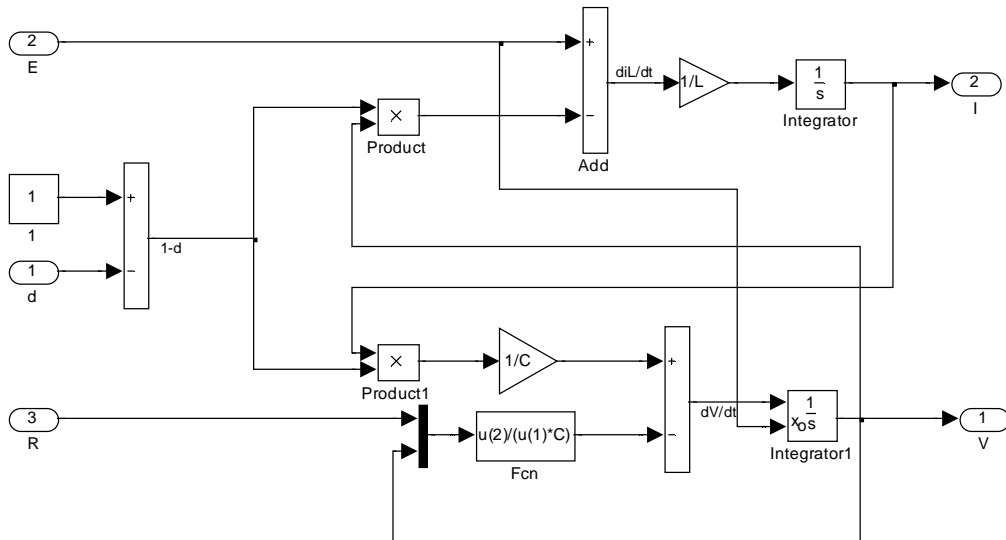
E= Giriş Gerilimi,

d= Anahtarın iletimde kalma oranı (duty cycle),

$i_L$ = Endüktans akımı

V= Çıkış gerilimi ‘dir.

Bu dinamik denklemlere göre MATLAB/Simulink ortamında DA-DA çevirici modellenmiştir. Modellemeye ait bloklar Şekil 5.17’de gösterilmektedir.



Şekil 5.17. Yükseltici Tip Çeviriciye ait model

Modelin oluşturulmasının ardından simülasyon aşamasına geçilmiştir. Bu aşama için DA-DA çeviriciye verilen anahtarlama, giriş gerilimi ve yük direncine karşılık sistemin zamana bağlı akım ve gerilim çıkışları incelenmiştir. Şekil 5.18’de DA-DA çevirici giriş ve çıkışları görülmektedir. Burada;

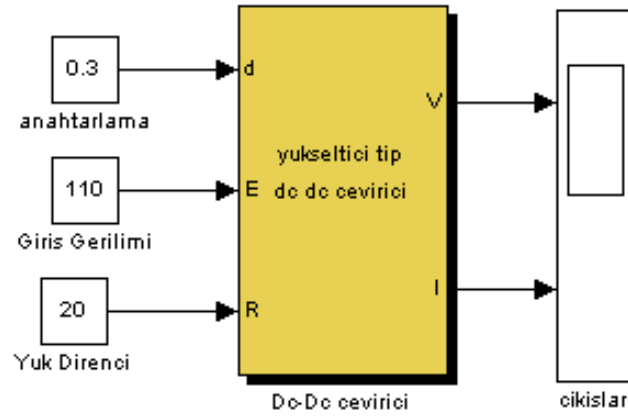
Anahtarlama,  $d=0.3$ ,

Giriş Gerilimi,  $E=110V$ ,

Yük direnci,  $R = 20 \Omega$ ,

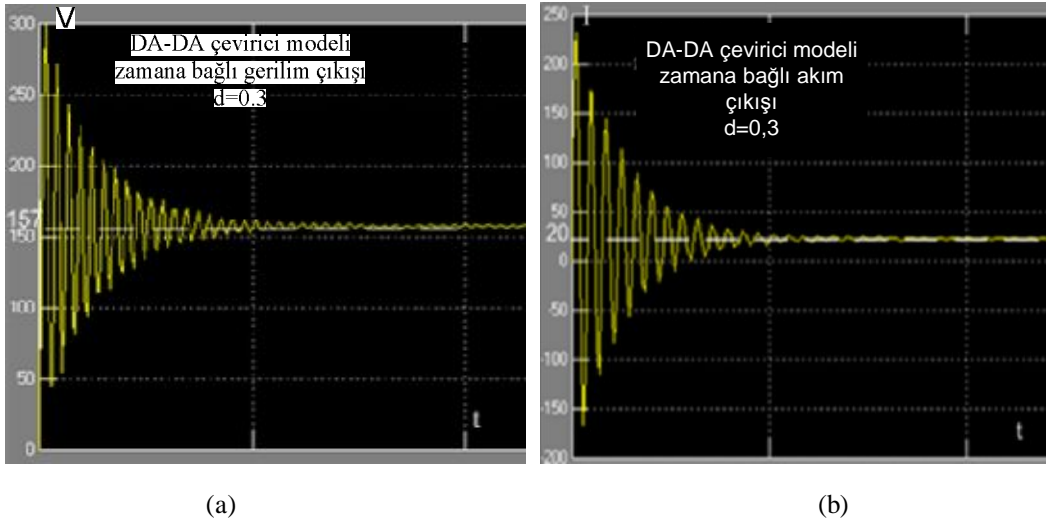
Kapasite değeri,  $C= 660 \mu F$ ,

Endüktans değeri,  $L= 570 \mu H$ , olarak belirlenmiştir.



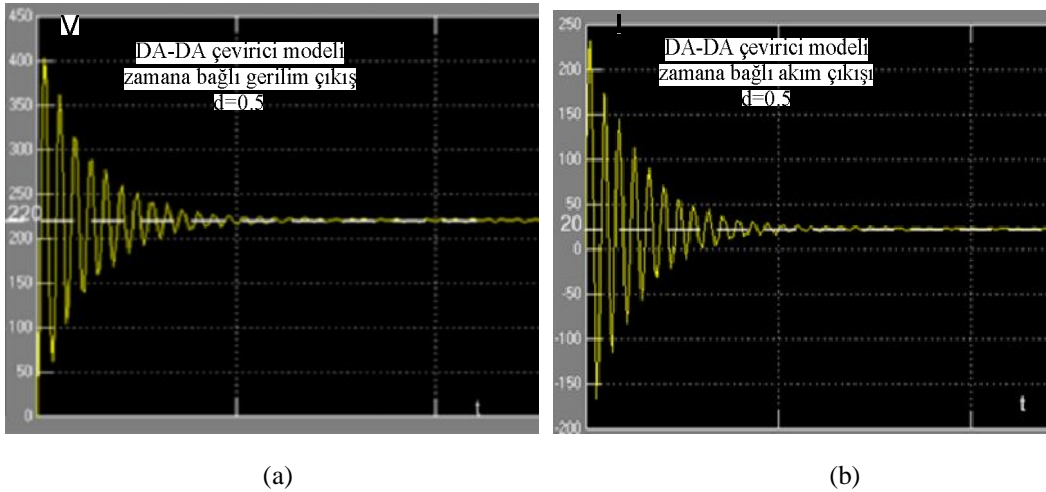
Şekil 5.18. DA-DA Çevirici modele ait giriş ve çıkışlar

Simülasyona ait zamana bağlı gerilim ve akım grafikleri sırasıyla Şekil 5.19 (a) ve (b)’de verilmiştir.  $d=0.3$  anahtarlama oranı için olması gereken çıkış gerilimi hesaplandığında  $157 V$  çıktığı görülebilir. Tasarlanan DA-DA çevirici olması gereken gerilime belli bir kararsız bölgeden sonra ulaşmıştır. Modelin sürekli hale geçmesi de yaklaşık  $0.1sn$  zaman almaktadır.



Şekil 5.19. (a) Yükseltici Tip DA-DA çeviricinin  $d=0.3$  için simülasyonda elde edilen zamana bağlı gerilim çıkışı (b) akım çıkışı

Şekil 5.20’de ise  $d=0.5$  için aynı simülasyon tekrarlanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 5.20(a) ve Şekil 5.20(b)’de gösterilmektedir.



Şekil 5.20. (a) Yükseltici Tip DA-DA çeviricinin  $d=0.5$  için simülasyonda elde edilen zamana bağlı gerilim çıkışı (b) akım çıkışı

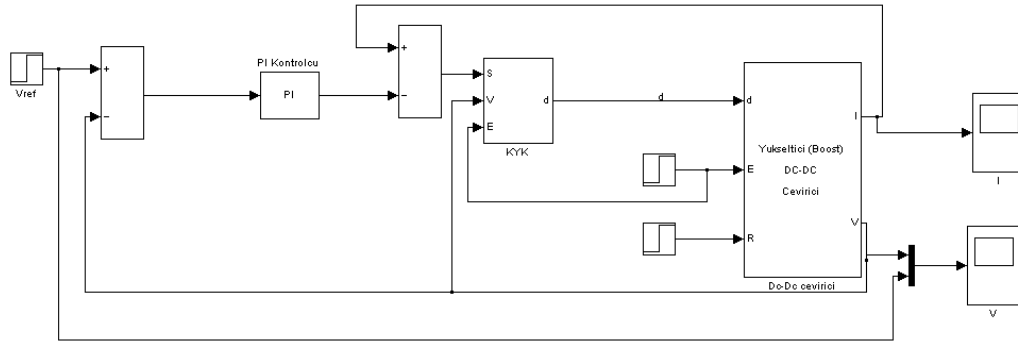
#### 5.4.2. Çift döngülü kontrol simülasyonu

DA-DA çevirici modelin simülasyon sonuçları incelendiğinde DA-DA çıkış gerilimi ve akımının başlangıç anında büyük oranda osilasyon yaptığı görülmektedir. Akım ve gerilimdeki bu aşırı salınım göz önüne alındığında bu durumun MPPT sistemini



etkileyeceği söylenebilir. Belirlenen performans kriterleri altında panel çıkış gerilimi yükselterek DA-AA çeviricinin girişine verilmelidir.

Bu amaç için, uygulanacak kontrol yöntemi ayrıntılı bir biçimde bölüm 4.5.4'te ele alınmıştır. Sistem modeli Çift döngülü kontrol yöntemine ait model Şekil 5.21'de gösterildiği şekilde MATLAB/Simulink ortamında oluşturulmuştur.

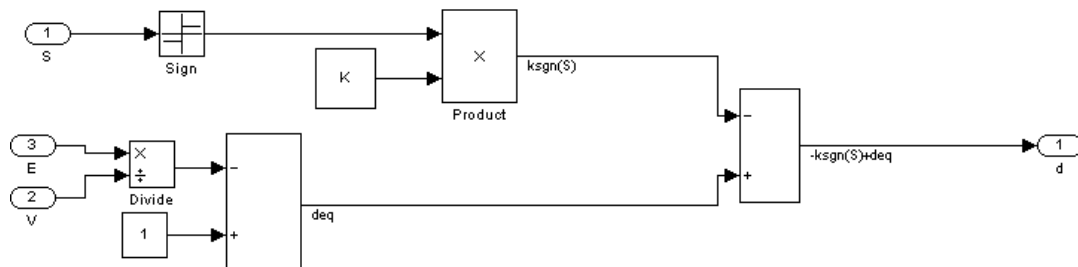


Şekil 5.21. Çift Döngülü Kayan Kip Yükseltici tip DA-DA dönüştürücü kontrolü Simulink blok diyagramı

ÇDK (Çift Döngülü Kontrol) için gerekli olan kayan kip yüzeyi Bölüm 4.5.4'te oluşturulmuştu. Denklem (5.12)'de kayan kip yüzey formülü verilmektedir;

$$d = -k \operatorname{sgn}(S) + \left(1 - \frac{E}{x_2}\right) \quad (5.12)$$

Kayan kip yüzeyi Simulink modeli Şekil 5.22'de verilmiştir.



Şekil 5.22. Kayan Kip Yüzeyi Modeli

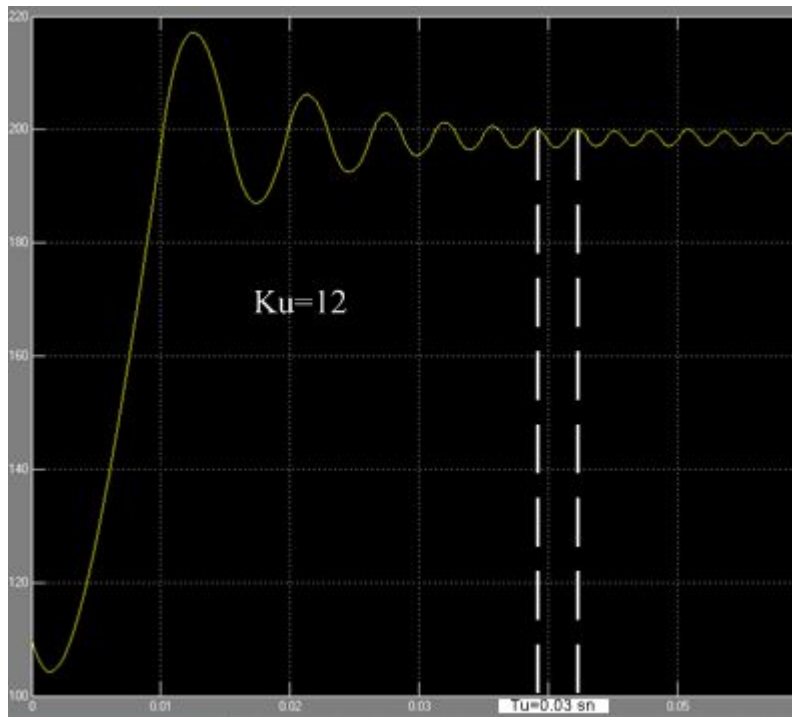
Kayan kip yüzeyi modelinde  $K=0.0175$  alınmıştır.

### 5.4.2.1. Ziegler-Nichols yöntemi simülasyonu

Gerilim kontrolü için dış döngüde yer alan dinamik PI kontrol parametrelerinin seçiminde Ziegler Nichols osilasyon yöntemi kullanılacaktır. Bu yöntem ayrıntılı bir biçimde Bölüm 4.5.3.2’de anlatılmıştır.

Bu yöntem için Şekil 5.21’de belirtilen kontrol edilecek sistemde PI kontrolcüsü kaldırılıp yerine oransal kontrolcü P koyulmuştur. Daha sonra oransal katsayı sistem osilasyona girene kadar arttırılmıştır. Sistem  $K_p=12$  değerinde osilasyona girmiştir. Sistemin osilasyona girdiği andaki gerilim grafiği Şekil 5.23’de gösterilmektedir. Simülasyon sırasındaki DA-DA çevirici parametreleri aşağıda belirtilmiştir;

$$V_{ref} = 200 \text{ V}, E = 110 \text{ V}, R_{yuk} = 20 \Omega$$



Şekil 5.23. Sistemin osilasyona girdiği andaki zamana bağlı gerilim grafiği

Bölüm 4.5.3.2’deki Tablo 4.5’e bakıldığında çevirici çıkış geriliminin osilasyona girdiği andaki osilasyon periyodu ile oransal katsayı değerlerinden PI parametreleri seçilebilir. Burada;

$$K_u=12;$$

$T_u=0.03\text{sn}$  değerleri elde edilmiştir.

Tablo 4.5 yardımıyla elde edilen PI değerleri aşağıda yer almaktadır;

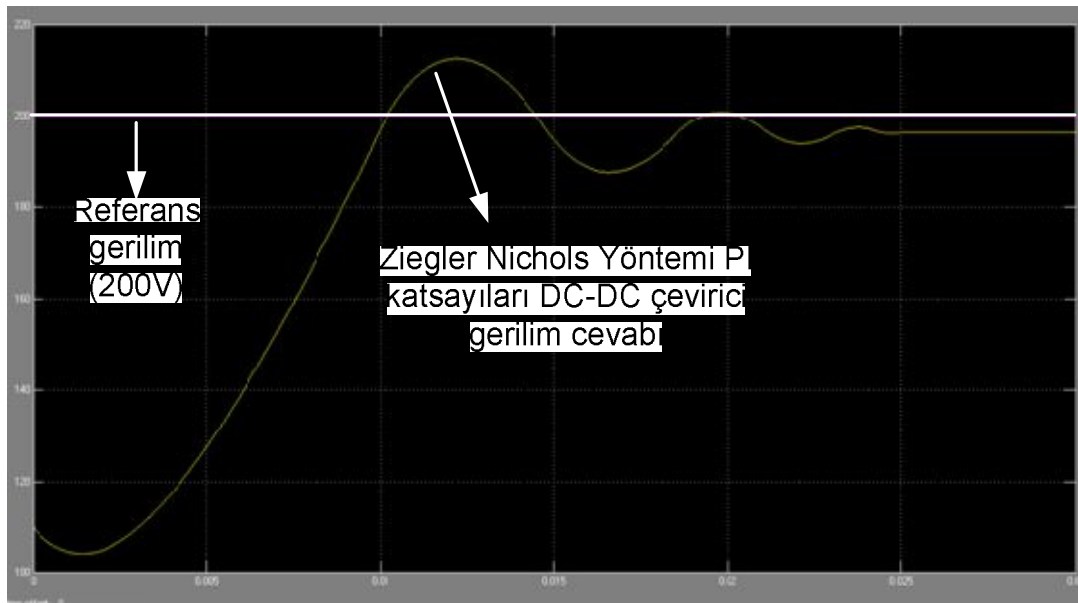
$$P = 0,4 * K_u = 4,8$$

$$I = 0,8 * T_u = 0,024$$

Seçilen PI parametrelerinin DA-DA gerilim çıkışında getirdiği sonuç ise Şekil 5.24'de verilmektedir. Burada Ziegler-Nichols yöntemi tasarımcıya sadece PI parametreleri için başlangıç koşullarını vermektedir. Ampirik bir yöntem olan Ziegler Nichols metodunun sonuçlarından yola çıkararak aşağıda belirtilen kriterler sonucunda PI parametreleri düzenlenmelidir;

Aşım,  $M_p < \%5$ ;

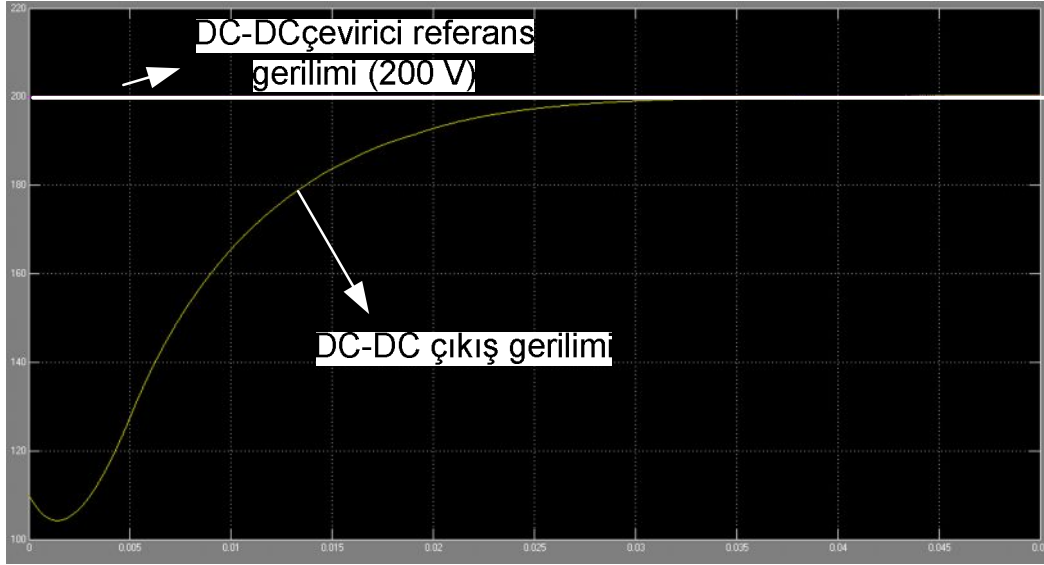
$T_s < 0.2\text{sn}$  (%1 kriterine göre)



Şekil 5.24. Ziegler Nichols ile elde edilen PI parametreleri ile DA-DA evirici gerilim çıkışı ve referans gerilim

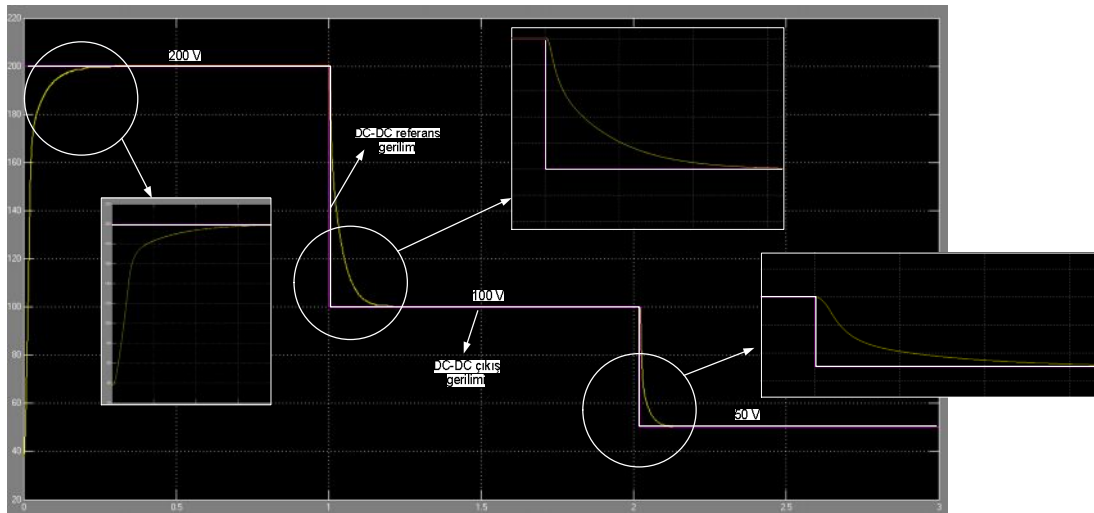
PI parametreleri çeşitli iterasyonlar sonucunda DA-DA evirici çıkışının istenilen performans değerlerini yakalayacak Şekilde belirlenmiştir. Belirlenen parametreler;

$P = 0.2; I = 12$ . Çift döngülü kontrolcüde;  $V_{ref} = 200 V$ 'a karşı Yükseltici tip DA-DA çevirici gerilim çıkışı şekil 5.25'de verilmiştir.



Şekil 5.25. Ayarlanmış PI parametreleri ile DA-DA gerilim çıkışı

Çift döngülü kontrolcüde belirlenen PI parametreler için; çeşitli referans girişlerine verdiği çıkış eğrileri ise Şekil 5.26'da belirtilmiştir.  $V_{giris} = 40 V$ , referans gerilim değerleri sırasıyla;  $V_{ref} = 200 V, 100 V$  ve  $50 V$  alınmıştır.

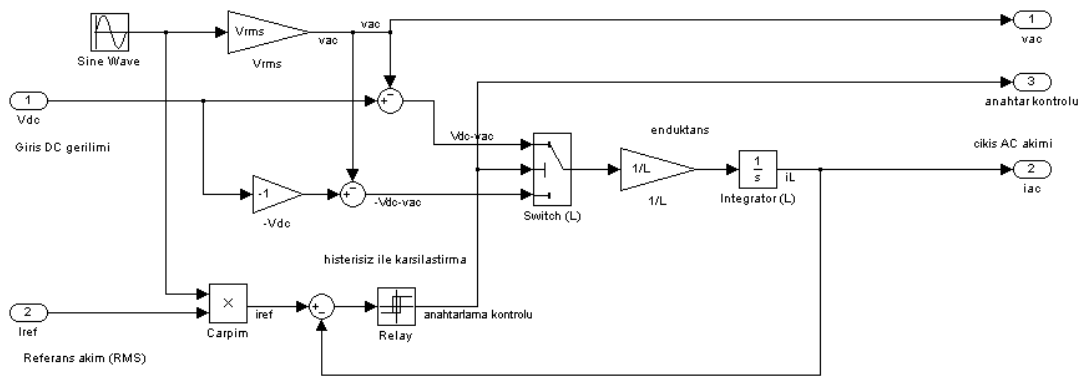


Şekil 5.26. Düzenlenen PI parametreleri ile değişik referans değerlerine karşın DA-DA çevirici cevabı

### 5.4.3. İdeal DA-AA evirici simülasyonu

#### 5.4.3.1. Kayıpsız DA-AA evirici modeli

Bölüm 4.6.1'de ayrıntılı olarak anlatılan kayıpsız ideal DA-AA eviriciye ait MATLAB/Simulink ortamında oluşturulmuş model Şekil 5.27'de verilmektedir.



Şekil 5.27. Kayıpsız ideal DA-AA evirici modeli

Burada;

Giriş gerilimi  $V_{DA}=200$  V;

$L=2$  mH;

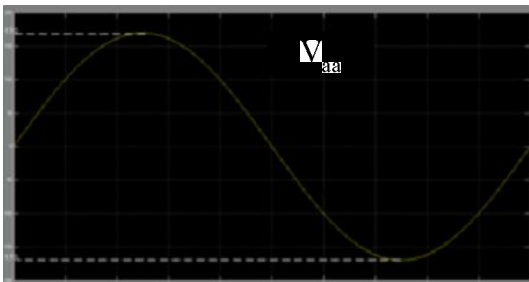
$AA=120V_{RMS}$ , 50 Hz;

$I_{Mref}= 4.2$  A;

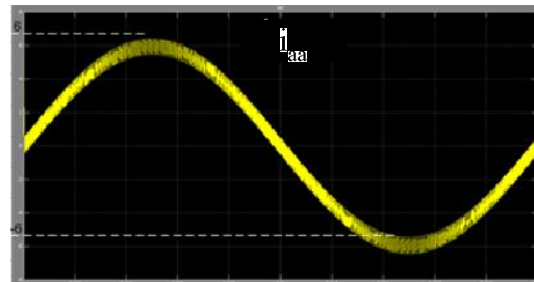
$\Delta I_L=1$  A;

$P_{aa}=360$ W alınmıştır.

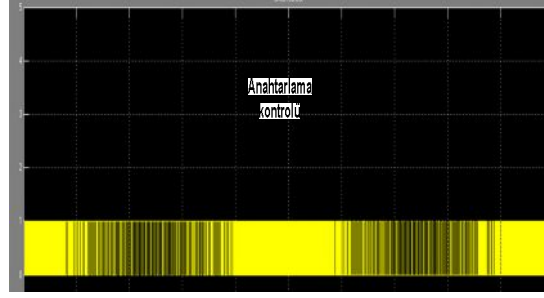
Bu değerlere ait Kayıpsız ideal DA-AA eviricinin  $V_{aa}(t)$ ,  $i_{aa}(t)$  ve bir AA hat periyodu (0.02 sn) boyunca olan anahtar kontrolü sırasıyla Şekil 5.28(a),(b) ve (c)'de verilmiştir.



(a)



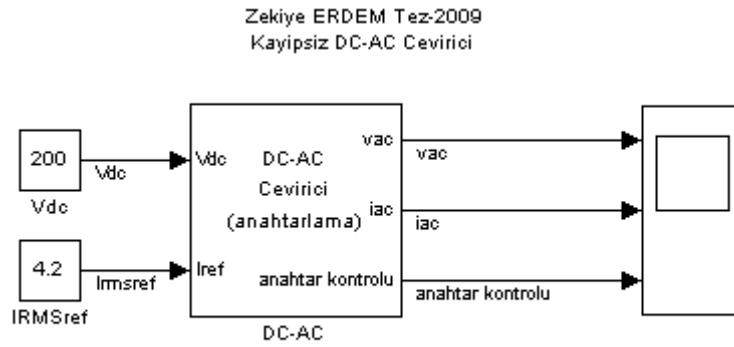
(b)



(c)

Şekil 5.28. Kayıpsız DA-AA evirici çıkışları (a)  $V_{aa}(t)$ , (b)  $i_{aa}(t)$ , (c) anahtarlama kontrolü

Kayıpsız DA-AA eviriciye ait model görüntüsü Şekil 5.29’da verilmiştir.



Şekil 5.29. DA-AA evirici modeli MATLAB/Simulink görüntüsü

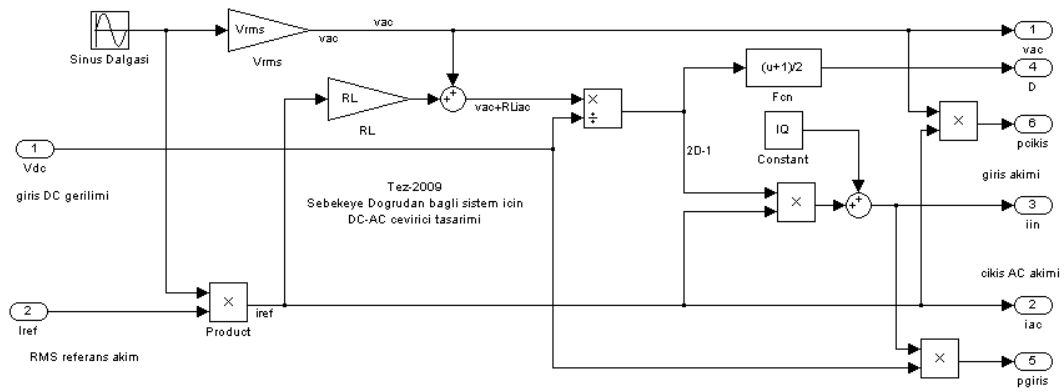
#### 5.4.3.2. Kayıplı ideal DA-AA evirici modeli

Bu tez çalışmasında DA-DA çevirici çıkışındaki DA gerilimi şebekeye uygun AA gerilime çevirecek olan kayıplı tek fazlı ideal DA-AA evirici kullanılmıştır. Şebekeye doğrudan aktarılacak MPPT sistemi için kullanılacak bu çevirici modeli aynı zamanda MPPT algoritmasının ürettiği referans akımı PV modüllerden çekecektir. Bölüm 4.6.1’de DA-AA eviriciye ait ayrıntılı bilgi yer almaktadır.

MPPT sistemi için tasarlanmış DA-AA evirici modeli Şekil 5.30’da gösterilmektedir. Bu modelde gelen DA gerilim değeri referans AA gerilim ile çarpılarak istenilen değerde AA gerilimin oluşmasını sağlamakta aynı zamanda anahtarlama ve çevirici kayıplarından kaynaklanan kayıpları da çevirici girişinde çekilen akıma

eklemektedir. MPPT algoritmasının ürettiği referans akımı da kayıp akımlarla toplayarak giriş gücünü hesaplamaktadır.

Kayıplı DA-AA eviriciye ait MATLAB/Simulinkte oluşturulmuş model Şekil 5.30'da verilmektedir. Burada  $I_Q$ : anahtarlama ve diğer kayıpları temsil ederken;  $R_L$ : Endüktans sarım direnci ve güç anahtarı dirençlerinden kaynaklanan kayıpları temsil etmektedir.

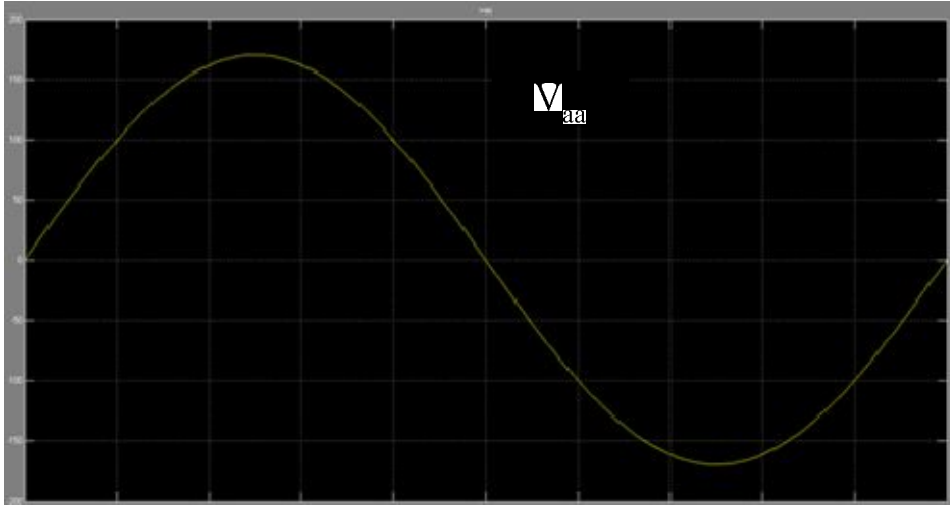


Şekil 5.30. Kayıplı DA-AA eviriciye ait MATLAB/Simulink Modeli

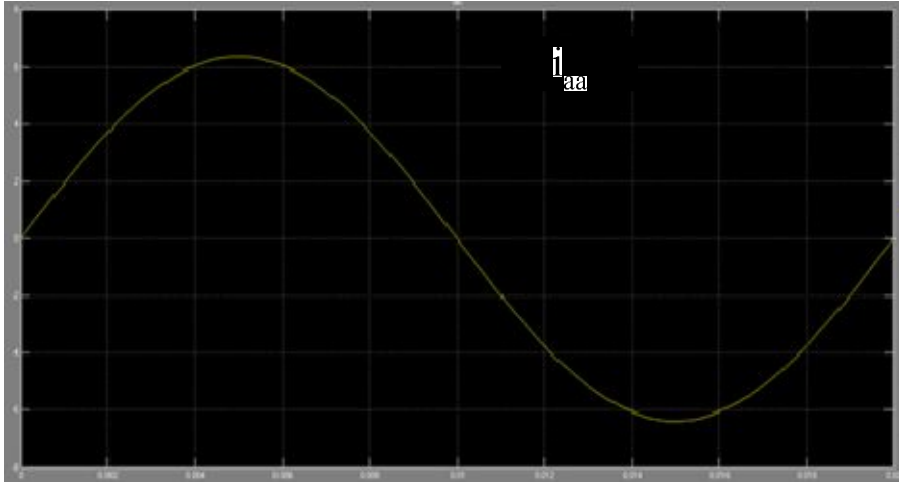
Tek fazlı DA-AA eviricinin çıkış gerilimi ( $V_{ac}$ ), çıkış akımı ( $i_{ac}$ ), anahtarlama doluluk oranı ( $D$ ) sırasıyla Şekil 5.31(a),(b),(c)'de elde edilmiştir.

Burada;

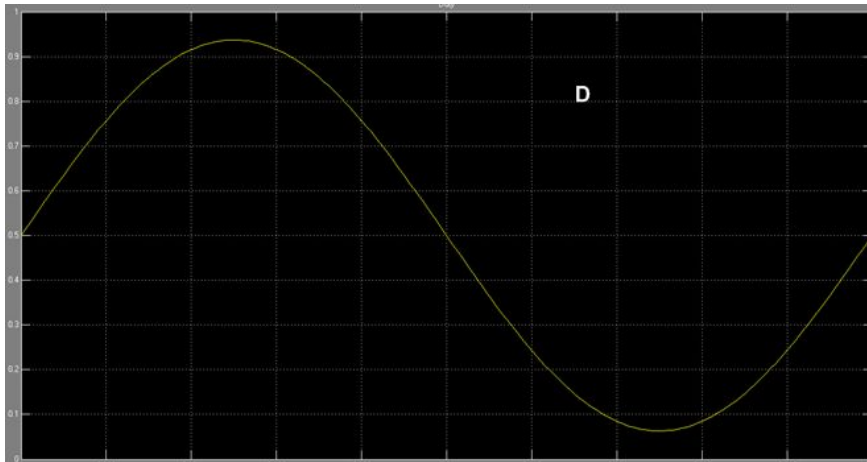
$V_{DA} = 200V$ ;  $R_L = 0.8 \Omega$ ,  $I_{SW} = 50 \text{ mA}$ ,  $P_{aa} = 0-600W$ ,  $I_{RMS} = 4.2 \text{ A}$  olarak alınmıştır.



(a)



(b)

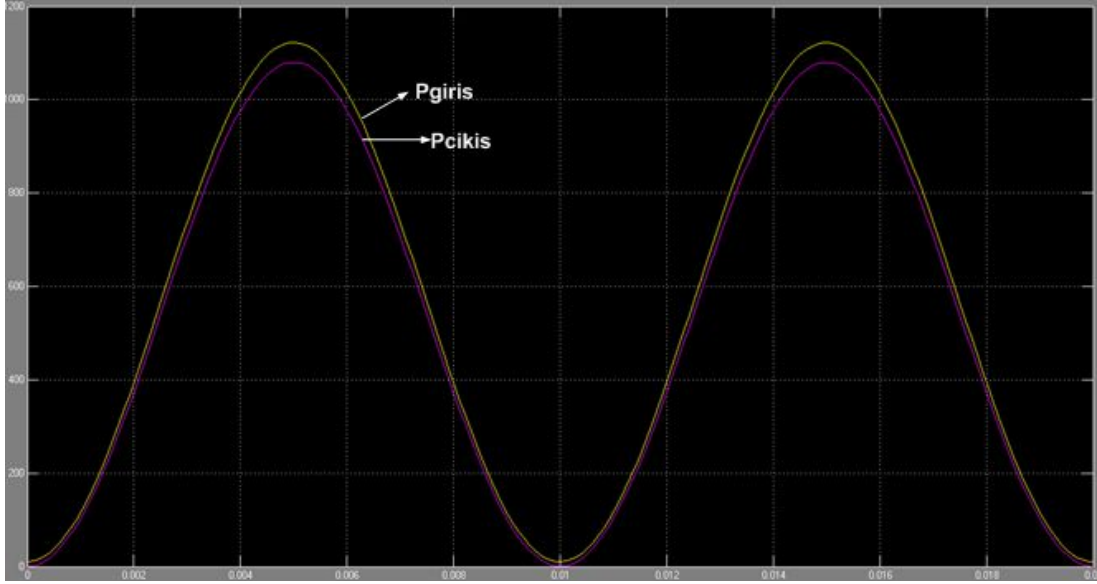


(c)

Şekil 5.31. DA-AA evirici (a)  $V_{aa}$ , (b)  $i_{aa}$ , (c) anahtarlama doluluk oranı (D)



Tek fazlı DA-AA evirici modelinde elde edilen giriş gücü ( $P_{giris}$ ), çıkış gücü ( $P_{cikis}$ ) Şekil 5.32’de gösterilmiştir.

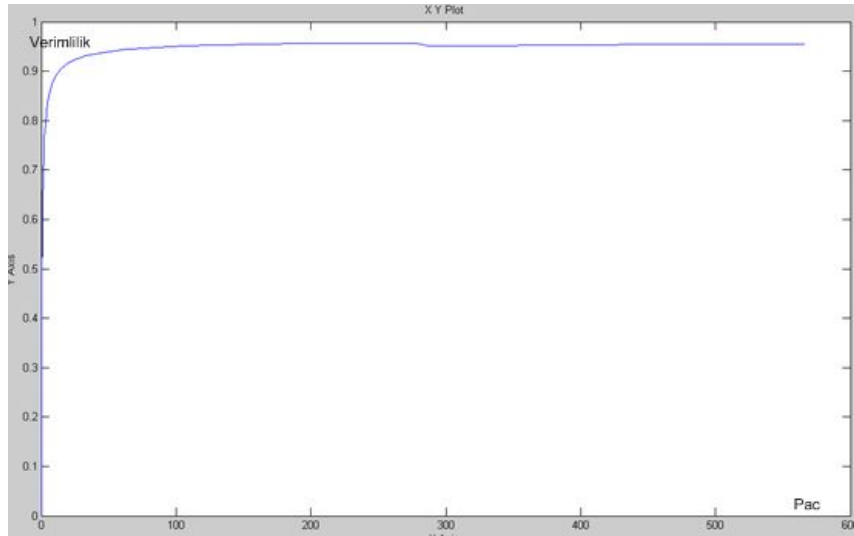


Şekil 5.32. Tek fazlı DA-AA evirici modelinde elde edilen giriş gücü ( $P_{giris}$ ), çıkış gücü ( $P_{cikis}$ )

Çeviricide çıkış gücü, giriş gücüne bölünerek evirici verimliliği elde edilmiştir.

$$\eta = \frac{P_{cikis}}{P_{giris}} = 0.96 \text{ elde edilmiştir.} \quad (5.13)$$

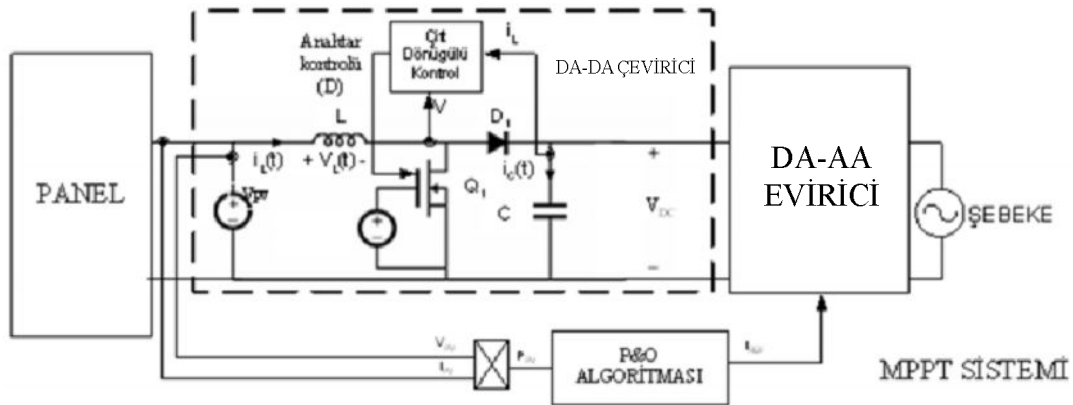
Verimliliğin çıkış gücüne göre eğrisi Şekil 5.33’de verilmiştir.



Şekil 5.33. Verimlilik-çıkış gücü eğrisi

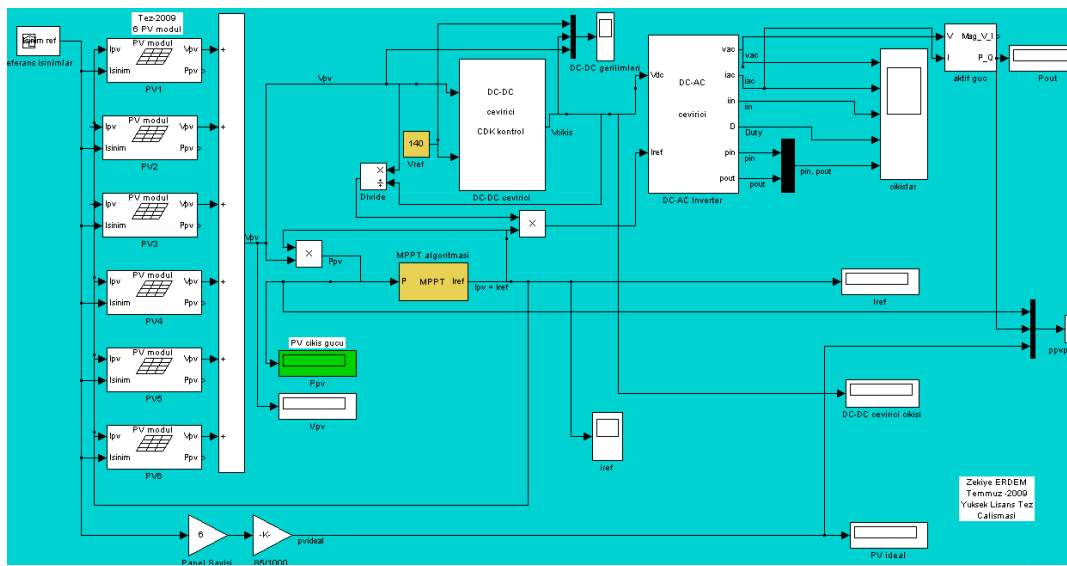
## 5.5. MPPT Sistem Simülasyonu ve Sonuçlar

MPPT sistemi istenilen güce sahip seri bağlı PV modüller, MPPT algoritması, DA-DA çevirici ve DA-AA eviriciden oluşmaktadır. Sistem elemanları bundan önceki bölümlerde teker teker ele alınarak modelleri çıkarılmış ve sonuçları incelenmiştir. Sistem elemanlarını bir araya getirilerek MPPT sistemi oluşturulacak ve Sistemin bir bütün halinde simülasyonu yapılacaktır. Tasarlanmış MPPT sisteminin bir bütün halinde görüntüsü Şekil 5.34’de verilmiştir.



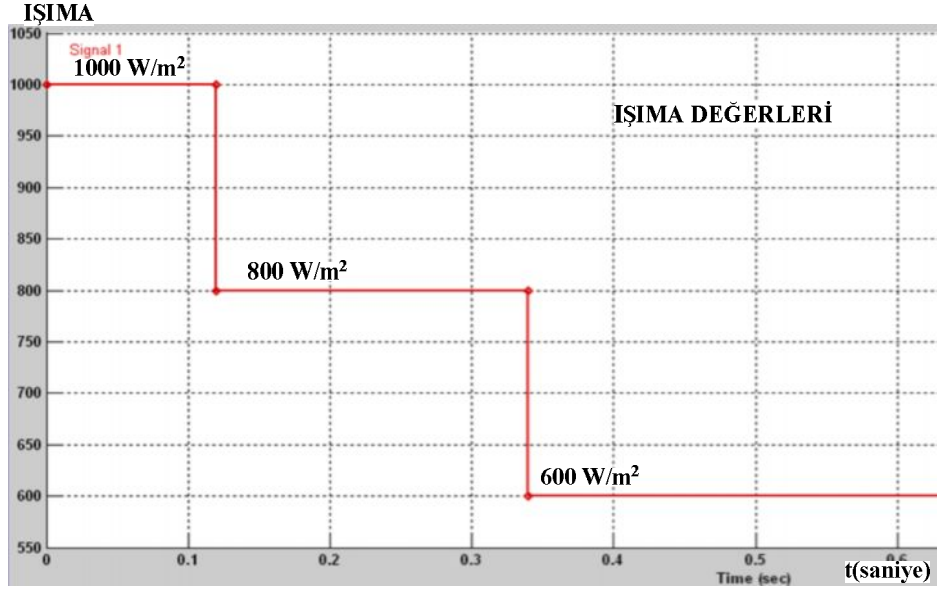
Şekil 5.34. Tasarlanmış MPPT sistemi

Şekil 5.35’de MPPT sisteminin MATLAB/Simulink ortamında bir bütün halinde oluşturulmuş blokları gözükmetedir.



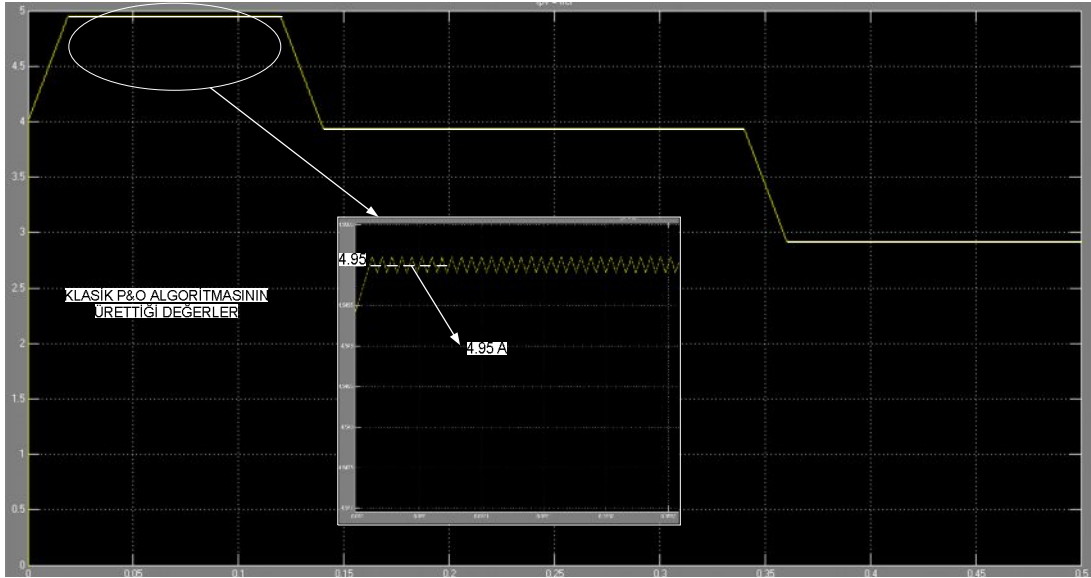
Şekil 5.35. MATLAB/Simulink ortamında oluşturulmuş MPPT sistemi görüntüsü

Değişik ışıma değerleri MATLAB/Simulink “Sinyal Oluşturma-Signal Builder” bloğu yardımıyla oluşturulmuştur. Oluşturulan değerler Şekil 5.36’da gösterilmektedir.

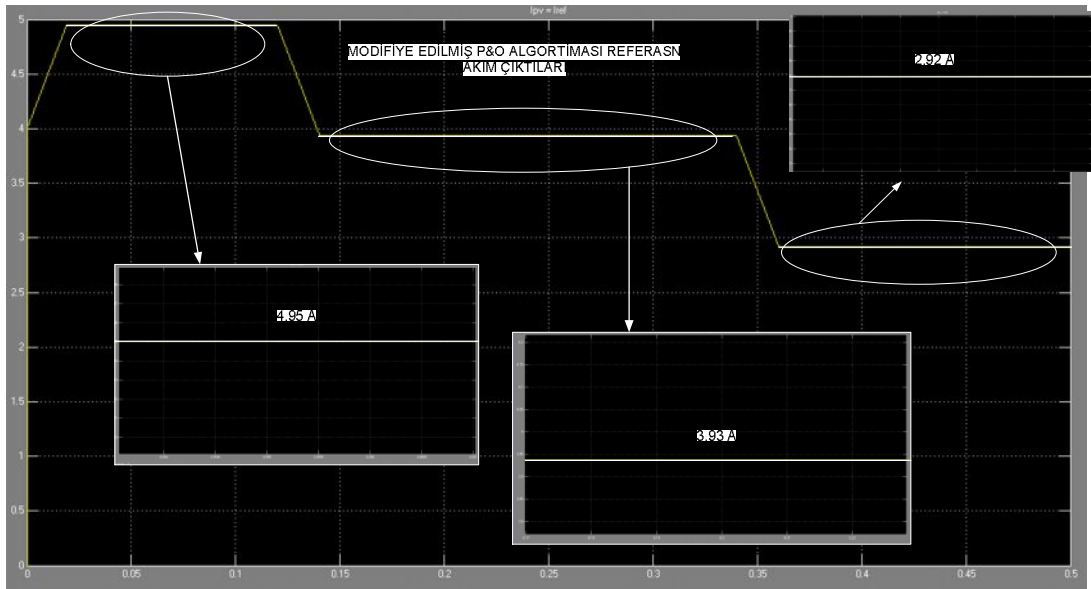


Şekil 5.36. “Sinyal Oluşturma-Signal Builder” bloğu yardımıyla oluşturulmuş çeşitli ışıma seviyeleri

1000 W/m<sup>2</sup>, 800 W/m<sup>2</sup>, 600 W/m<sup>2</sup> ışımaları altında klasik P&O algoritmasının çıkışında elde edilen referans akım değerleri şekil 5.37’de gösterilmiştir. Burada klasik P&O algoritmasının yaptığı osilasyonlar görülmektedir. Şekil 5.38’de ise modifiye edilmiş P&O algoritmasının referans akım değerleri verilmiştir. Modifiye edilmiş P&O algoritmada herhangi bir osilasyon olmadığı açıkça görülebilir. Her iki algoritmanın ürettiği değerlerin aynı olduğu ve bu değerlerin aynı zamanda Tablo 5.5’teki değerler ile de uyduğu görülebilir.



Şekil 5.37. Klasik P&O algoritmasından elde edilen referans akım değerleri ve yaptığı osilasyon

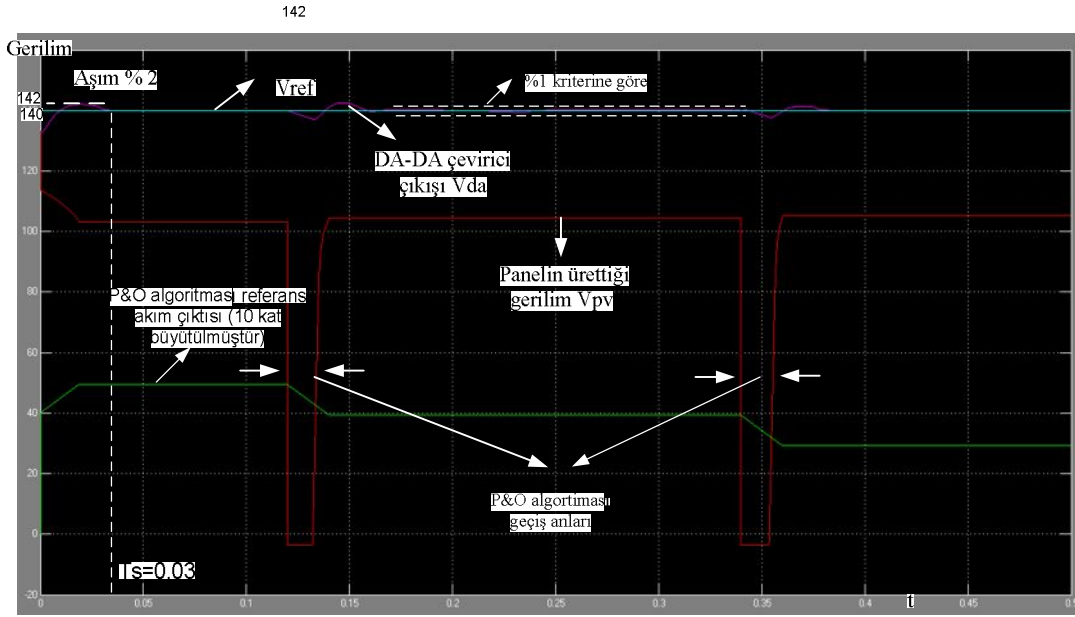


Şekil 5.38. Modifiye edilmiş P&O algoritmasının ürettiği referans akım değerleri

Aynı ışıma değerleri altında DA-DA çevirici çıkışı, DA-DA çevirici referans gerilimi ve DA-DA gerilim girişi incelenmiştir. Elde edilen bu eğriler Şekil 5.39’da gösterilmiştir. Burada çift döngü kontrollü yükseltici tip DA-DA çeviricinin P&O algoritması geçişi sırasında oluşan basamak değişimlerine karşın DA-DA çıkış geriliminin istenilen performans kriterlerine göre ( $M_p < \%3$ ,  $T_s < 0.2$  sn-%1 kriterine göre) referans gerilim değerini takip ettiği görülmektedir. Burada  $V_{ref} = 140$  V alınmıştır. DA-DA çevirici kapasite ve endüktans değerleri;

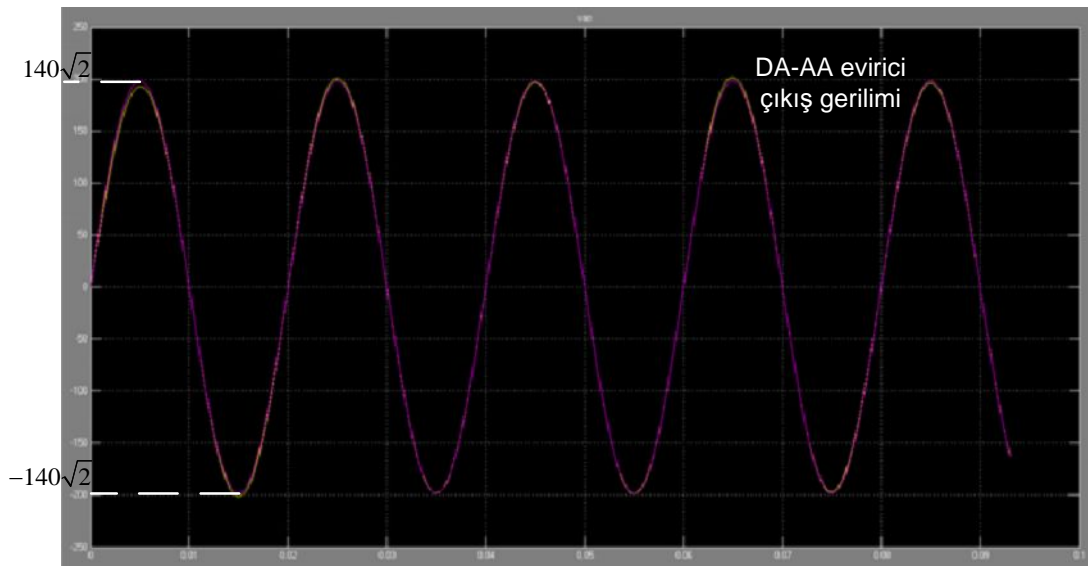
$$L = 570 \mu H$$

$C = 660 \mu F$  alınmıştır.



Şekil 5.39. DA-DA çeviriciden elde edilen giriş, çıkış ve referans gerilimleri

DA-AA evirici gerilim çıkışı  $V_{ac}$  gerilim Şekil 5.40'daki gibi elde edilmiştir.



Şekil 5.40. DA-AA evirici çıkışındaki  $V_{ac}$  gerilimi

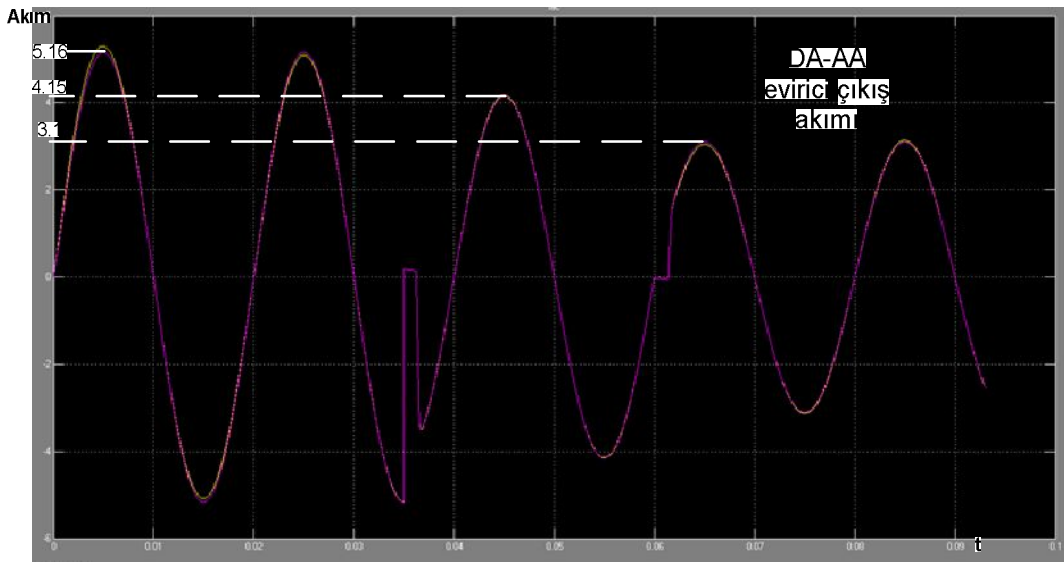
DA-AA evirici çıkışındaki AA akım, P&O algoritmasının ürettiği referans değerlere bağlı olarak değişmiştir. Bu değişim Şekil 5.41'deki gibi elde edilmiştir. Ancak çekilmesi gereken referans akım P&O algoritmasının ürettiği akım değildir çünkü DA-DA çeviricideki gerilim yükseltmesinden dolayı çekilecek gücün aynı kalabilmesi için DA-AA evirici giriş akımı, akım çevirme oranına bağlı olarak düşürülmelidir. Aşağıdaki formülle bu değer hesaplanmıştır;

$$i_{ref\ dcac} = \frac{V_{pv}}{V_{cikis}} \times i_{ref} \quad (5.14)$$

Çıkışta görülen değerler iac tepe değerlerinin de;

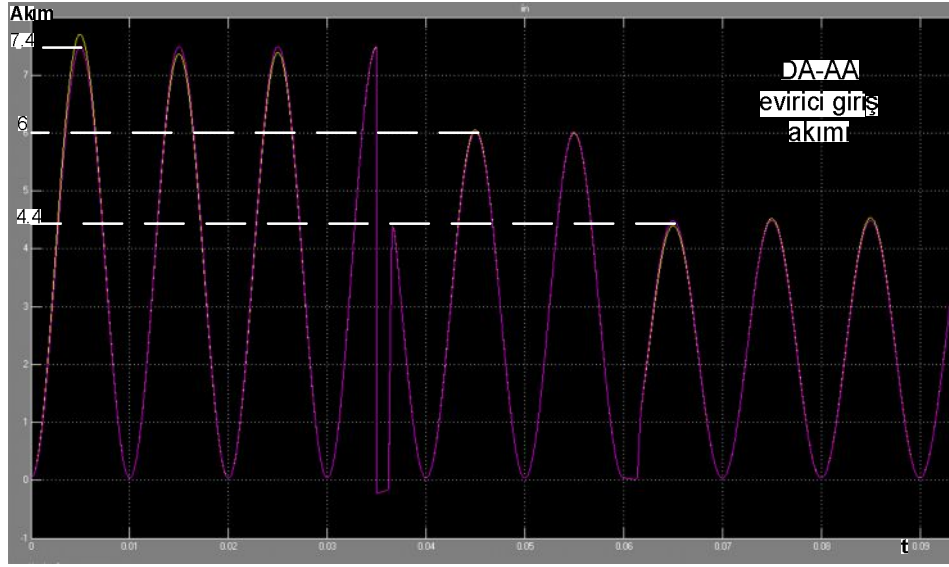
$$i_{ref\ dcac\ tepe} = i_{ref\ dcac} \times \sqrt{2} \text{ olduğu unutulmamalıdır.} \quad (5.15)$$

Işıma bağlı değişen akım değerleri arasındaki geçiş sırasında düzgün sayılabilecek ani yükselmeler olmayan geçişler yaşanmıştır. Bu da DA-AA eviricinin düzgün bir şekilde çalıştığını göstermektedir. Bu geçişler çeşitli yöntemler ile daha düzgün hale getirilebilir.



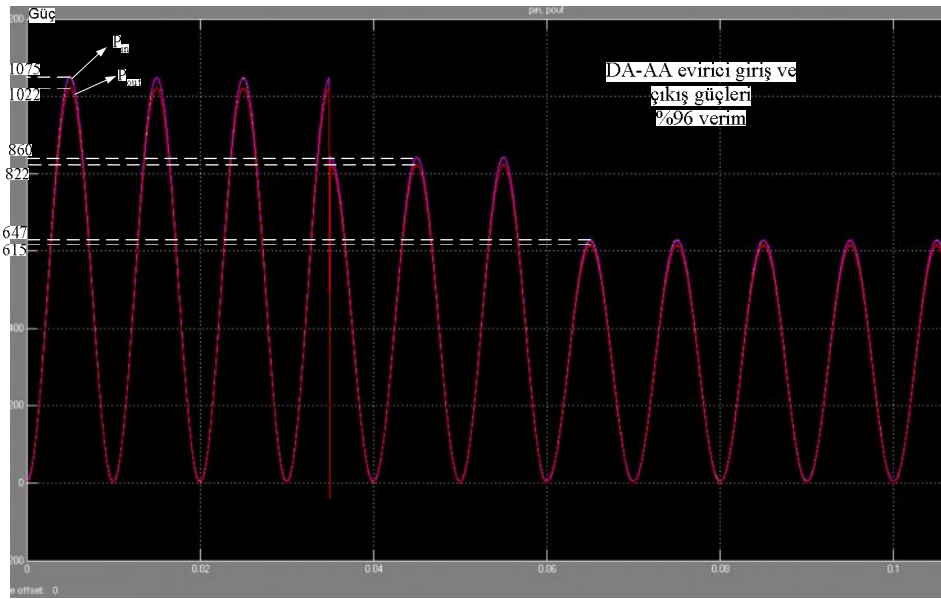
Şekil 5.41. DA-AA evirici çıkış akımı

DA-AA eviricide panelden çekilen giriş akımı değişimi Şekil 5.42’de verilmiştir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta çekilen akıma anahtarlama kayıpları, endüktans sarımı direnç kayıpları ve diğer kayıplar dâhil edildiğinden DA-AA evirici girişinden DA-AA evirici çıkış akımı değerlerinden daha yüksek akımlar çekilmiştir.



Şekil 5.42. DA-AA evirici giriş akımı

Son olarak güç karşılaştırılması yapılmıştır bu karşılaştırma ilk olarak DA-AA eviriciden elde edilen ani giriş gücü ile ani çıkış gücü eğrileri Şekil 5.43’de gösterilmiştir.

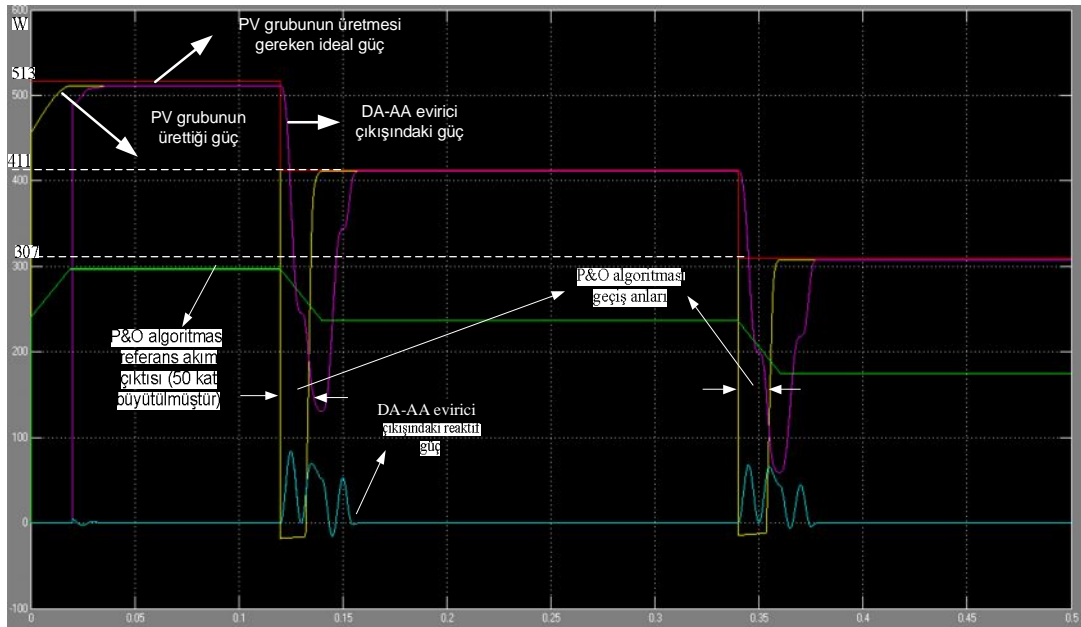


Şekil 5.43. DA-AA eviricide elde edilen giriş gücü ile çıkış gücü



Burada giriş gücü çıkış gücünden daha fazladır. Bunun sebebi giriş akımında sadece referans akım değerinin değil bunun yanında kayıp akımlarının da dâhil edilmesidir. Tasarımda DA-AA evirici Bölüm 5.4.3.2’de (bkz. Şekil 5.33) belirtildiği gibi %96 verimlilikte çalışmaktadır.

Şekil 5.44’de panelden çekilmesi gereken ideal gücü, panel çıkış gücünü ve DA-AA evirici çıkışındaki gücü gösteren eğriler verilmiştir. Burada elde edilen eğrilerde ışınım değişimleri sırasında P&O algoritmasının doğru değeri yakalaması süresince DA-AA evirici çıkış gücü panelden çekilen güçten fazla gibi gözükabilir. Ancak bunun sebebi bu geçişler sırasında DA-DA çevirici çıkışındaki kondansatörün depoladığı enerjiyi DA-AA evirici girişine aktarmaya devam etmesidir. Bu durumda önemli olan nokta; DA-AA evirici çıkışındaki güç eğrisinin altında kalan alanın, PV çıkışından üretilen güçten daha az olmasıdır. Bu alanlar hesaplatıldığında; panelin güç eğrisinin altında kalan alan 153.9 W olurken, DA-AA evirici çıkış gücü eğrisinin altında kalan alan ise 148.2 W olmaktadır. Buradan MPPT sistem veriminin %96 olduğu söylenebilir. ( $\eta_{MPPT}=148.2/153.9=0.96$ ) Panel çıkışındaki ve DA-AA evirici çıkışındaki enerji yani kW-saat birimleri de hesaplatılmıştır (0.5 sn için). DA-AA evirici çıkışında 0.003 kWh enerji üretildiğini, PV çıkışında ise 0.0031 kWh enerji üretildiği hesaplatılmıştır.



Şekil 5.44. Simülasyon sonucunda DA-AA eviriciden çekilen aktif ve reaktif güç, maksimum güç için PV modüllerden çekilmesi gereken ideal güç ve Panel çıkışındaki güç eğrileri



## **BÖLÜM 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER**

Bu çalışmada şebekeye doğrudan bağlı akü grubu içermeyen maksimum güç izleyicisi tasarımı yapılmıştır. Böylece doğrudan şebekeye bağlı MPPT sistemi ile önemli bir maliyete sahip olan batarya grupları ortadan kaldırılarak düşük maliyetli yüksek verimli bir MPPT sistemi tasarımı yapılmıştır.

Şebekeye doğrudan bağlı MPPT sistemleri genellikle çift yönlü sayaçlar ile tüketicinin enterkonnekte sisteme enerji vererek devlete elektrik enerjisi satması amacı ile kullanılan sistemlerdir. Çift yönlü sayaç uygulamalarına ülkemizde henüz başlanmamıştır. Ülkemizde yeni çıkacak enerji yasaları ile uygulamaya geçmesi öngörülen çift yönlü sayaçlar ile tüketici, üretici konumuna geçerek devlete düşük maliyetli enerji satabilecektir. Aynı zamanda üretilen temiz enerji ile doğamız da korunmuş olacaktır.

MATLAB/Simulink ortamında panel modeli, yükseltici tip DA-DA çevirici modeli, çift döngülü kontrolcü ve ideal DA-AA evirici modeli ayrı ayrı tasarlanarak hazırlanmış ve bütün bu alt sistemler birbirine bağlanarak MPPT sistemi oluşturulmuştur. Önce istenilen giriş gücüne sahip tasarlanan 6 adet PV modül seri bağlanarak PV güç sistemi modeli oluşturulduktan sonra ışınım ve sıcaklığa bağlı olarak değişen çıkış karakteristikleri elde edilmiştir. Bu karakteristikler literatürde yer alan gerçek karakteristik eğrileri ile karşılaştırılmış ve bu modelleme sonuçlarının tamamen uyduğu gözlenmiştir. Oluşturulan panel modelinde parametre giriş ekranı yer almaktadır. Her panelde kendine özgü olan kısa devre akımı, açık devre gerilimi, maksimum akım, maksimum gerilim gibi veriler bu parametre giriş ekranından değiştirilerek istenilen panel ile çalışmak mümkün kılınmıştır. Örneğin

bu çalışmada kullanılacak PV modül için gerekli parametreler Shell Q-85 tipi panelin verilerinden alınmıştır. Seçilen maksimum güç noktası algoritmasının (P&O) değişik ışımaya şartları altındaki MATLAB/Simulink uygulama sonuçları ile PV karakteristiği maksimum nokta simülasyon sonuçları ile karşılaştırıldığında P&O algoritmasının %0.3 hata oranı ile son derece başarılı olduğu görülmüştür. Ancak P&O algoritmasının en önemli dezavantajlarından biri ulaştığı maksimum nokta etrafında osilasyon yapmasıdır.

Bu çalışmada P&O algoritmasındaki osilasyon sorununu ortadan kaldıran klasik P&O algoritması modifiye edilmiştir. Bu modifikasyon ile P&O algoritması tarafından üretilen referans akım o noktada sabit kalmaktadır. Böylece bu çalışma ile klasik P&O algoritması osilasyon sorununa yeni bir çözüm yöntemi getirilerek, yapılan tez çalışmasına önemli bir özgünlük katılmıştır.

Tasarlanan MPPT sisteminde kullanılacak olan yükseltici tip DA-DA çevirici değişken yapılu bir sistem olduğundan, DA-DA çevirici çıkış gerilimi kontrolünde çift döngülü kontrol yöntemi kullanılmıştır. Dış döngüde PI denetimli gerilim kontrolü yapılırken iç döngüde kayan kip akım kontrolü yapılmaktadır. Bu kontrol yöntemi ile parametre değişimlerinden etkilenmeyen dayanıklı bir sistem oluşturularak, sistem panel çıkışındaki basamak gerilim değişimlerine karşı duyarsız hale getirilmiştir. Tasarlanan MPPT sisteminde panelden gelen gerilimin istenilen referans değerine kadar yükseltilerek sabit tutulması çift döngü kontrollü yükseltici tip DA-DA çevirici tarafından sağlanmakta, MPPT algoritmasının ürettiği maksimum güç noktası akımı ise DA-AA evirici tarafından panelden çekilmektedir. Böylece hem DA bara gerilim kontrolü sağlanmış, hem de istenilen güç yüksek verimlilikte PV modüllerden çekilmiştir.

Bu tez çalışmasının ilerletilebilmesi için getirilecek bir takım öneriler şu şekilde sıralanabilir; bu çalışmada şebekeye doğrudan bağlı MPPT sistemi tasarlanmış ancak şebeke senkronizasyonu dikkate alınmamıştır. Senkronizasyon için, referans şebeke gerilimine faz kenetleyici birim bağlanarak şebekenin “wt” anları belirlenebilir. Bu anlar DA-AA eviricide üretilen sinüs işaretinde kullanılarak şebekeyle senkron çalışan bir MPPT sistemi tasarlanabilir. Ayrıca elde edilen panel çıkış gerilimi

eğrilerinde, panel çıkışında gerilim çökmeleri gözlemlenmektedir. Bu durum mevcut algoritmada yapılacak modifiyeler ile giderilebilir. Gerilim değişimleri sırasında oluşan güç değişim bozunmaları ise çeşitli güç kontrol uygulamaları ile giderilebilir. Bu sisteme aynı zamanda batarya da bağlamak mümkündür Bu sayede şebekeye aktarılmayan enerjinin bir kısmı bataryada depolanacak, PV sistemin yeterli gelmediği ya da çalışmadığı durumlarda aküde depolanan enerji kullanılacaktır.

## KAYNAKLAR

- [1] JOU H. ; CHIANG W.; WU J. ;A Novel Maximum Power Point Tracking Method for the Photovoltaic System, Power Electronics and Drive Systems, 2007. PEDS '07. 7th International Conference, p.p.619 – 623, 27-30 Nov. 2007
- [2] ENSLIN, J. H. R., “Maximum Power Point Tracking: A Cost Saving necessity In Solar Energy Systems”, 16th IEEE Annual Industrial Electronics Society Conference, Pacific Grove, CA, USA, 1073-1077, 1990.
- [3] JAIN S., AGARWAL V.; New current control based MPPT technique for single stage grid connected PV systems; Energy Conversion an management, Volume 48, Issue 2, p.p. 625-644, February 2007
- [4] FANGRUI L., YONG K., ZHANG Y. AND DUAN S. ; Comparison of P&O and Hill Climbing MPPT Methods for Grid-Connected PV Converter; Industrial Electronics and Applications, 2008. ICIEA 2008. 3rd IEEE Conference on ; p.p. 804 - 807 3-5 ; June 2008
- [5] KAZUTAKA I., TAKEAKI M. ;A Single Sensor Type MPPT Control Method for PV Generation Systems; Power Electronics and Applications, 2007 European Conference on; p.p. 1 - 10 ; 2-5 Sept. 2007
- [6] WU L.; ZHAO Z.; LIU J.; LIU S.; YUAN L.; Modified MPPT strategy applied in single-stage grid-connected photovoltaic system; Electrical Machines and Systems, 2005. ICEMS 2005. Proceedings of the Eighth International Conference on Volume 2, p.p. 1027 - 1030 Vol. 2 ; 29-29 Sept. 2005
- [7] İnternet: Elektrik İşleri Etüt İdaresi “Türkiye’de Güneş Enerjisi”  
<http://www.eie.gov.tr/turkce/gunes/tgunes.html> (2007).
- [8] CEBECİ M. Ders Notları, Güneş Pili ve Teknolojik Uygulamaları; Güneş Pili Sistemleri; p.p. 12

- [9] ÖZDEMİR Ş. ; Fotovoltaik Sistemler için Mikrodenetleyicili En Yüksek Güç Noktasını İzleyen Bir Konvertörün Gerçekleştirilmesi; Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Aralık 2007
- [10] İnternet; [http://tr.wikipedia.org/wiki/Güneş\\_hücreleri](http://tr.wikipedia.org/wiki/Güneş_hücreleri)-19/04/2009
- [11] İnternet; <http://www.answers.com/topic/solar-cell> 19/04/2009
- [12] MULLIGAN, W. P., ROSE, D. H., CUDZINOVIC, M. J., CEUSTER, D. M. D., MCINTOSH, K. R., SMITH, D. D., SWANSON, R. M., “Manufacture Of Solar Cells With 21% Efficiency”, 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, France, p.p. 462-465, 2004
- [13] DIMROTH F., BAUR C., BETT A.W., MAUSEL M., STROBAL G., “3-6 Junction Photovoltaic Cells For Space And Terrestrial Concentrator Applications”, 31st IEEE Photovoltaic Specialist Conference, Orlando, Florida, USA, p.p.525-529, 2005.
- [14] ENSLIN, J. H. R., WOLF, M. S., SNYMAN, D. B., SWIEGERS, W., “Integrated Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Converter”, IEEE Transactions On Industrial Electronics, 44(6) p.p.: 769-773; 1997
- [15] MULLIGAN, B., “Cost Reduction of Silicon Photovoltaics”, 2th Annual IEEE Nanotech Symposium, San Jose, California, USA, 2:1-44 (2006).
- [16] GENÇOĞLU M., CEBECİ M. ; Türkiye'nin Enerji Kaynakları Arasında Güneş Enerjisinin Yeri ve Önemi; 2000
- [17] İnternet: <http://www.eie.gov.tr/turkce/YEK/gunes/tgunes.html>
- [18] YILDIRIM D. ; Fotovoltaik Sistemler; Elektrik Mühendisleri Odası Semineri;01.03.2009.
- [19] WALKER, G., “Evaluating MPPT Converter Topologies Using A Matlab PV Model”, Journal of Electrical & Electronics Engineering, 21(1) P.P. : 49-56 (2001)
- [20] MINEIRO, S. J. E., DAHER, S., ANTUNES, F. L. M., CRUZ, C. M. T., “Photovoltaic System For Supply Public Illumination In Electrical Energy Demand Peak”, 19th IEEE Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition Conference, Anaheim, California, USA, 3: P.P. 1501-1506 (2004)

- [21] SONG K.; Sliding mode controller for the single-phase grid-connected photovoltaic system; *Applied Energy*, Volume 83, Issue 10, October 2006, P.P. 1101-1115; October 2006
- [22] NABIL A. AHMED, MASAFUMI MIYATAKE; A novel maximum power point tracking for photovoltaic applications under partially shaded insolation conditions; *Electric Power Systems Research*, Volume 78, Issue 5, May 2008, P.P. 777-784, May 2008
- [23] CHIHCHIANG H., JONGRONG L.; A modified tracking algorithm for maximum power tracking of solar array; *Energy Conversion and Management*, Volume 45, Issue 6, P.P 911-925, April 2004
- [24] TAFTICHT T., AGBOSSOU K., DOUMBIA M.L., CHÉRITI A.; An improved maximum power point tracking method for photovoltaic systems; *Renewable Energy*, Volume 33, Issue 7, P.P.1508-1516; July 2008
- [25] KUROKAWA, K., "Realistic Values Of Various Parameters For PV System Design", *Renewable Energy*, 15(1): P.P. 157-164; 1998.
- [26] HOHM D. P., ROPP M. E.; Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms; *Prog. Photovolt: Res. Appl.*; 11: p.p. 47–62; 2003
- [27] RICHARD A. CULLEN; What is Maximum Power Point Tracking (MPPT) and How Does it Work?; Blue Sky Energy, Inc., 2007
- [28] JANCARLE L., FERNANDO A., ANIS C., CÍCERO C.; A maximum power point tracker for PV systems using a high performance boost converter; *Solar Energy*, Volume 80, Issue 7, p.p. 772-778, July 2006
- [29] DOROFTE, C.; BORUP, U.; BLAABJERG, F.; A combined two-method MPPT control scheme for grid-connected photovoltaic systems; *Power Electronics and Applications*, European Conference on 0-0 0 Page(s):10 pp. - P.1, 2005.
- [30] SALAS, V., OLÍAS, E., BARRADO, A., LÁZARO, A., "Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90(11): p.p. 1555–1578, 2006.
- [31] NOGUCHI, T., TOGASHI, S., NAKAMOTO, R., "Short-Current Pulse-Based maximum-Power-Point Tracking Method for Multiple Photovoltaic-and- Converter Module System", *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, 49(1): p.p. 217-223 2002.

- [32] ESRAM T., CHAPMAN P. L , Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques; IEEE transactions on energy conversion, vol. 22, no. 2, June 2007
- [33]ELGENDY, M.A.; ZAHAWI, B.; ATKINSON, D.J.; Analysis of the performance of DA photovoltaic pumping systems with maximum power point tracking; Power Electronics, Machines and Drives, 2008. PEMD 2008, 4th IET Conference, p.p. 426 – 430, April 2008
- [34] HUA C.,LIN J.; A modified tracking algorithm for maximum power tracking of solar array; Energy Conversion and Management, Volume 45, Issue 6, p.p. 911-925, April 2004
- [35] GHASARI, J.; HABIBI, M.; BAKHSHAI, A.; An MPPT Controller Design for Photovoltaic (PV) Systems Based on the Optimal Voltage Factor Tracking; Electrical Power Conference, 2007. EPC 2007. IEEE Canada, p.p. 359 – 362; 25-26 Oct. 2007
- [36] MOHAN N., UNDELAND, T.M., ROBBİNS W. P., Çevirenler; TUNCAY N., GÖKAŞAN M., BOGOSYAN S., Güç Elektroniği: Çeviriciler, Uygulamalar ve Tasarım, Literatür Yayıncılık,Birinci Basım, Eylül 2003
- [37] GÜLBAHAR L., Fotovoltaik Sistemler ve Enerji, Anel Grup, 18 Şubat 2009
- [38] AÇIKGÖZ N., ÇELİK A.N., 240 w Gücünde akü depolu bağımsız bir fotovoltaik enerji Sistem tasarımı ve uygulaması, TMMOB Makine Mühendisleri Odası Güneş Enerjisi Sistemleri Sempozyumu ve Sergisi,p.p. 23-32, 20-21 Haziran 2003
- [39] ERİCKSON, R. W., “DA-DA Power Converters”, Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering, 5: p.p. 53-63, 1999
- [40] İnverterler ve Hız Denetimi, İnternet:  
<http://www.elektrotekno.com/about29636.html&highlight=inverter>
- [41] NİKRAZ M., DEHBONEİ H., NAYAR C.; A DSP-Controlled photovoltaic system with maximum power point tracking; Aupec; p.p.129, 2003
- [42] LEE D.; NOH H.; HYUN D.; CHOY I.; An Improved MPPT Converter Using Current Compensation Method for Small Scaled PV- Applications; Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2003. APEC '03. Eighteenth Annual IEEE Volume 1, 9-13, p.p.540 - 545 vol.1, Feb. 2003

- [43] FEMIA, N.; FORTUNATO, M.; LISI, G.; PETRONE, G.; SPAGNUOLO, G.; VITELLI, M; Guidelines for the Optimization of the P&O Technique in Grid-connected Double-stage Photovoltaic Systems; Industrial Electronics, 2007. ISIE 2007. IEEE International Symposium on, p.p. 2420 - 2425, 4-7 June 2007
- [44] SERA, D.; TEODORESCU, R.; HANTSCHEL, J.; KNOLL, M.; Optimized Maximum Power Point Tracker for fast changing environmental conditions; Industrial Electronics, 2008. ISIE 2008. IEEE International Symposium, p.p. 2401 – 2407, July 2 2008
- [45] ZUE, A.O. CHANDRA, A. ; Simulation and stability analysis of a 100 kW grid connected LCL photovoltaic inverter for industry; Power Engineering Society General Meeting,. IEEE p.p. 6 , 2006
- [46] Elektrik Piyasaları Kanunu 4628 nolu kanun, İnternet:  
[www.osbuk.org/docs/Kanun/4628ElektrikPiyasasiKanunu.doc](http://www.osbuk.org/docs/Kanun/4628ElektrikPiyasasiKanunu.doc)
- [47] RAMAPRABHA, R.; MATHUR, B.L.; “Characteristics of solar PV array under partial shaded conditions”, TENCON 2008 IEEE Region 10 Conference, pp.1 – 5, 19-21 Nov. 2008.
- [48] ÇELİK A., KILIÇ I.M., Fotovoltaik Sistem Eğitimi İçin Bir Simulink Araç Kutusu Tasarım Ve Uygulaması, e-Journal of New World Sciences Academy, Natural and Applied Sciences, 3, (3), A0091, p.p. 499-514, July 2008
- [49] SONGÜLER Ö., Az Sönümlü Sistemlerde Ziegler-Nichols Yönteminin İyileştirilmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Haziran 2006
- [50] M. ASLAN, GÜLDEMİR H., Yükseltici Tip Da-Da Dönüştürücünün Kayma Mod Kontrolü, SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 9.Cilt, 2.Sayı, p.p. 18-24, 2005



## **EKLER**

### **EK A**

Datalardaki maksimum noktayı tespit eden MATLAB kodları;

```
% Zekiye ERDEM tez calismasi 2009
% üretilen datalardaki maksimum noktayı tespit etme
pmax = max(PV.signals.values(:,2));
vrangle = max(PV.signals.values(:,1));
irangle = max(PV.signals.values(:,3));
[tf,index]=ismember(pmax,PV.signals.values(:,2));
disp(' MPP guc: ')
disp(PV.signals.values(index,2));
disp(' MPP gerilim: ')
disp(PV.signals.values(index,1));
disp(' MPP akim: ');
disp(PV.signals.values(index,3));
figure(1)
plot(PV.signals.values(:,1),PV.signals.values(:,2)); % plot
P(Vpv)
axis([0 vrangle 0 pmax]);
figure(2)
plot(PV.signals.values(:,1),PV.signals.values(:,3)); % plot
Ipv(Vpv)
axis([0 vrangle 0 irangle]);
```

**EK B**

PV modül için başlangıç değerlerini ayarlayan MATLAB kodları;

```
% Pv modul baslangic parametrelerinin hesaplanması
% limit:sabit sicaklik
Ns = round(Voc/0.61); % seri baglanmis hucre sayisinin
hesaplanmasi
Vt = 26e-3; % termal gerilim
G = Isc/1000; % kısa devre akiminin isinim kazanci
Vmppc = Vmpp/Ns; % MPP'deki hucre gerilimi
Vocc = Voc/Ns; % Acik devre hucre gerilimi
Rmpp = Vmpc/Impp; % MPP'deki hucre yuk direnci
%
Rp = 100*Vocc/Isc; % Rp'nin baslangic degeri
Vdm = Vocc; % Vdm'nin baslangic degeri Rp,Io veRs hesabi icin
gereklidir
%
% Io, Rs, Rp'ye ait cozum
%
Idm = Isc - Ir - Vdm/Rp; % MPP'deli p-n jonksiyon (diyot)
akimi
Io = (Isc-Vocc/Rp)/(exp(Vocc/Vt)-1); % p-n jonksiyon ters
bias akimi
Vdm = Vt*log(Idm/Io+1); % MPP'deli p-n jonksiyon (diyot)
gerilimi
Rs = (Vdm-Vmpc)/Ir; % seri bagli direnc
Rd = (Rmpp - Rs)*Rp/(Rp-Rmpp+Rs); % MPP'de diyodun artan
direnci
Idm = Vt/Rd; % Artan dirence bagli olarak MP noktasindaki akim
Rp = Vdm/(Isc-Ir-Idm); % paralel hucre direnci
```

**EK C**

Değiştir gözle algoritması MATLAB kodları;

```
% Zekiye ERDEM Temmuz 2009 Yüksek Lisans Tez Calismasi
% Basit MPP "Degistir ve Gozle" Algoritmasi
% Peski, Iref ve Artim baslangic degerleri belirlenmeli
% Giris: Maksimum yapılacak guc degeri
% Cikis: referans akim
function y = MPPtrackIref(P)

global Peski;
global Iref;
global Artim;

IrefH = 5; % referans akim icin ust limit
IrefL = 0; % referans akim icin alt limit
DeltaI = 0.0001; % referans akim artirma orani

if (P < Peski)
    Artim = -Artim; % P azaliyorsa yonu degistir
end

% referans akimdaki artim
Iref=Iref+Artim*DeltaI;

% ust limiti kontrol et
if (Iref > IrefH)
    Iref = IrefH;
end

% alt limiti kontrol et
if (Iref < IrefL)
    Iref = IrefL;
end

% guc degerini sakla
Pold = P;
% referans akimi cikisa ver
y = Iref;
```

## EK D

Modifiye edilmiş Değiştir Gözle algoritması MATLAB kodları ;

```
% Zekiye ERDEM Temmuz 2009 Yüksek Lisans Tez Calismasi
% "Modifiye edilmiş Degistir ve Gozle" Algoritmasi
% Peski, Ire, Artim,epsilon baslangic degerleri belirlenmeli
% Giriş: Maksimum yapılacak guc degeri
% Cikis: referans akim
function y = MPPtrackIref_m(P)

global Pold;
global Iref;
global Increment;
global epsilon;

IrefH = 5; % referans akim icin ust limit
IrefL = 0; % referans akim icin alt limit
DeltaI = 0.0001; % referans akim artirma orani

DeltaP=P-Pold; % deltaPnin belirlenmesi

if (abs(DeltaP)<epsilon) % eger deltaP eprsilondan kucukse
DeltaI=0; % artirmayı sıfırla cikisa iref degerini ver
end
if (P < Pold)
    Increment = -Increment; % P azaliyorsa yonu degistir
end
Iref=Iref+Increment*DeltaI;
% referans akimdaki artim

% ust limiti kontrol et
if (Iref > IrefH)
    Iref = IrefH;
end

% alt limiti kontrol et
if (Iref < IrefL)
    Iref = IrefL;
end

% guc degerini sakla
Pold = P;
% referans akimi cikisa ver
y = Iref;
```

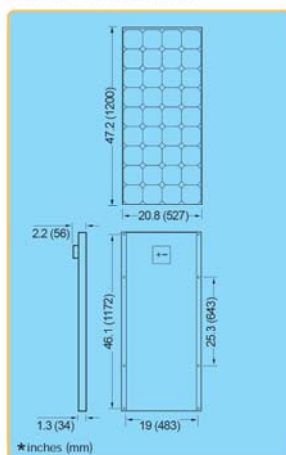
## EK E

## Shell SQ-5-P Model Güneş Paneli Veri Sayfası;

## Shell PowerMax™ Ultra 85-P/80-P

### Mechanical Specifications

A torsion and corrosion-resistant anodized aluminium frame ensures dependable performance, even under harsh weather conditions. Pre-drilled mounting holes are provided for ease of installation.

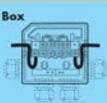


Outside dimensions (in)	47.2 x 20.8
Thickness (inc. junction box) (in)	2.2
Thickness (exc. junction box) (in)	1.3
Weight (lbs)	16.7
Junction box type	ProCharger™ IP54
Junction box dimensions (in)	5 x 4.4 x 1.8

The junction box allows for easy field replacement of diodes and cables assemblies.

#### ProCharger™ – CR Junction Box

Maximum conductor cross-section: 4 mm<sup>2</sup>  
Type of protection: IP54  
Number of bypass diodes: 2



### Electrical Characteristics

#### Data at Standard Test Conditions (STC)

STC: irradiance level 1000W/m<sup>2</sup>, spectrum AM 1.5 and cell temperature 25°C

	Shell PowerMax™	Ultra 80-P	Ultra 85-P
Rated power	P <sub>r</sub>	80W	85W
Peak power	P <sub>mpp</sub> *	80W	85W
Module efficiency	η	12.7%	13.4%
Maximum system voltage	V <sub>sys</sub>	600V (UL); 715V (TUV);	600V (UL); 715V (TUV);
Peak power voltage	V <sub>mpp</sub>	16.9V	17.2V
Peak power current	I <sub>mpp</sub>	4.76A	4.95A
Open circuit voltage	V <sub>OC</sub>	21.8V	22.2V
Short circuit current	I <sub>sc</sub>	5.35A	5.45A
Series fuse rating	I <sub>fuse</sub>	20A	20A
Minimum peak power	P <sub>mpp min</sub>	76W	80.75W
Tolerance on peak power	%	+/- 5	+/- 5

\*The abbreviation 'mpp' stands for Maximum Power Point.

#### Typical data at Nominal Operating Cell Temperature (NOCT) conditions

NOCT: irradiance level 800W/m<sup>2</sup>, spectrum AM 1.5, wind velocity 1m/s, T<sub>amb</sub> 20°C

		45.5°C	45.5°C
Temperature	T <sub>noct</sub>	45.5°C	45.5°C
Peak power	P <sub>mpp</sub>	59W	63W
Peak power voltage	V <sub>mpp</sub>	15.8V	16.4V
Open circuit voltage	V <sub>OC</sub>	20.0V	20.1V
Short circuit current	I <sub>sc</sub>	4.20A	4.25A

#### Temperature coefficients

		-0.43	-0.43
α P <sub>mpp</sub>	%/°C	-0.43	-0.43
α V <sub>mpp</sub>	mV/°C	-72.5	-72.5
α I <sub>sc</sub>	mA/°C	0.8	0.8
α V <sub>OC</sub>	mV/°C	-72.5	-72.5

#### Typical data at low irradiance

The relative reduction of module efficiency at an irradiance of 200W/m<sup>2</sup> in relation to 1000W/m<sup>2</sup> both at 25°C cell temperature and AM 1.5 spectrum is 8%.

For further information on all Shell Solar products contact:

**Shell Solar**  
4650 Adohr Lane, Camarillo CA 93012  
805-482-6800 Fax 805-388-6395  
www.shell.com/solar

V1/Power-Max/Off-Grid 12V/US/06/04



## ÖZGEÇMİŞ

Zekiye Erdem, 09.05.1985 de Antalya' da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Konya'da tamamladı. 2003 yılında Meram Anadolu Lisesinden mezun oldu. 2003 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünü 2007 yılında bitirdi. 2007 yılında Sakarya Üniversitesinde, "Çok fonksiyonlu Güç Çevrim Sistemi" adlı TUBİTAK projesinde 2 sene tam zamanlı proje asistanı olarak görev aldıktan sonra ve 2009 yılında Sakarya Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümüne Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. Şu anda halen Sakarya Üniversitesinde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.