

ULUSAL ŞEBEKEYE BAĞLI GÜNEŞ PİLİ SİSTEMLERİNİN MODELLENMESİ VE GERÇEKLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Müh. Sezgin PARMAKSIZ

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 9 Haziran 1997

Tezin Savunulduğu Tarih : 26 Haziran 1997

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Metin GÖKAŞAN

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. M. Kemal SARIOĞLU

Prof. Dr. Emin TACER

HAZİRAN 1997

ÖNSÖZ

Bu tezin hazırlanması sırasında, yaptığı değerli eleştirilerle çalışmama yön veren ve yardımlarını esirgemeyen danışman hocam , Sayın Doç. Dr. Metin GÖKAŞAN' a , özellikle yeni güneş pili modelinin geliştirilmesindeki katkılarından dolayı Sayın Prof. Dr. Hakan KUNTMAN' a, ayrıca tezin değişik aşamalarında bana destek olan değerli çalışma arkadaşlarım Uzman Taner ARIKAN, Araş. Gör. Tankut ACARMAN ve Araş. Gör. Kanat ÇAMLİBEL'e teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Sezgin PARMAKSIZ

Haziran 1997



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	ii
SEMBOL LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	ix
TABLO LİSTESİ	xiii
ÖZET	xiv
SUMMARY	xv
BÖLÜM 1 GİRİŞ	1
1.1 Enerji ve Gelişmişlik	1
1.2 Neden Güneş Enerjisi	2
1.3 Türkiye'nin Enerji Dengesi	4
1.4 Türkiye'nin Güneş Enerjisi Potansiyeli	5
1.5 Güneş Enerjisi Uygulamaları	6
BÖLÜM 2 GÜNEŞ PİLLERİNİN YAPILARI VE ÖZELLİKLERİ	12
2.1 Giriş	12
2.2 Güneş Pillerinin Tarihi Gelişimi	13
2.3 Yarı İletkenlerde Işığın Soğurulması	14
2.4 Fotoiletkenlik	16
2.5 p-n Jonksiyonu	20
2.6 Temel Güneş Hücresi Parametreleri	24
BÖLÜM 3 GÜNEŞ PİLİ DİZİLERİNİN MODELLENMESİ VE SİMÜLASYONU	27
3.1 Giriş	27
3.2.1 Güneş Pili Hücrelerinin Eşdeğer Devre Yaklaşımı ile Modellenmesi	28
3.2.2 Güneş Pili Dizilerinin PSPICE'da Simülasyonu	30
3.2.3 Simülasyon Sonuçları	31
3.3.1 Güneş Pillerinin Akım-Gerilim Karakteristiklerinin Nümerik Analize Dayalı Simülasyonu	34
3.3.2 Güneş Hücresinin Simülasyonu	35

3.3.3 Simülasyon Sonuçları	36
3.4.1 Güneş Pili Hücrelerinin Modellenmesinde Yeni Bir Yöntem	38
3.4.2 Simülasyon Sonuçları	44
3.5 Üç Ayrı Modelden Elde Edilen Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması	46
BÖLÜM 4 GÜNEŞ PİLİ DİZİLERİNDEN ŞEBEKEYE ENERJİ AKTARIMI	49
4.1 Giriş	49
4.2 Güneş Pili Dizilerinden Şebekeye Enerji Aktaran Düzenekler	50
4.3.1 Küçük ve Orta Ölçekli Sistemler İçin Yüksek Frekans Transformatörlü Çevirici	52
4.3.2 Güç Devresinin Kontrolü	53
4.3.3 Simülasyon Sonuçları	56
4.4.1 Akım Kontrolü Kırıyıcı ile Yapılan Çevirici Yardımı ile Şebekeye Enerji Aktarımı	62
4.4.2 Simülasyon Sonuçları	68
4.5.1 Güneş Pili Dizilerinden Şebekeye Akım Kontrollu Üç Fazlı Evirici ile Enerji Aktarımı	72
4.5.2 Sistemin Simülasyonu	73
BÖLÜM 5 GÜNEŞ PİLİNDEN ELDE EDİLEN ENERJİNİN KONTROLÜ	76
5.1 Giriş	76
5.2 Kısa Devre Akımı ile Optimum Güç Noktasının İzlenmesi	76
5.3 Doğrudan Çıkış Gücü Yardımıyla Maksimum Gücün İzlenmesi	78
BÖLÜM 6 PRATİK KISMA İLİŞKİN TASARIMLAR	81
6.1 Güç Katının Oluşturulması	81
6.2 Kontrol Katın Oluşturulması	81
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	84
KAYNAKLAR	86
EK A EŞDEĞER DEVRE YAKLAŞIMINA DAYANAN GÜNEŞ PİLİ MODELİNİN PSPICE KODU	90
EK B NÜMERİK ANALİZE DAYALI PİL MODELİNE AİT MATLAB PROGRAMI	92
EK C YENİ GELİŞTİRİLEN PİL MODELİNE AİT PSPICE KODU	93
EK D GERÇEK DEĞER İLE SİMÜLASYON SONUÇLARI ARASINDAKİ HATAYI HESAPLAYAN MATLAB PROGRAMI	94

EK E YÜKSEK FREKANS TRANSFORMATÖRLÜ ÇEVİRİCİYE AİT PSPICE KODU	95
EK F AKIM KONTROLU KIYICI İLE YAPILAN ÇEVİRİCİNİN PSPICE KODU	98
EK G AKIM KONTROLLU ÜÇ FAZLI EVİRİCİYE AİT PSPICE KODU	103
ÖZGEÇMİŞ	107



SEMBOL LİSTESİ

D	: Malzemenin içerisine nüfuz eden oran
n_c	: Kırılma indisi
K	: Sönme katsayısı
R	: Yansımaya katsayısı
$S_0(\lambda)$	: Foton sayısı
$\alpha(\nu)$	: Soğurma katsayısı
ν	: Gelen ışığın frekansı
c	: Işık hızı
$\beta(\nu)$	: Kuantum verimi
E_g	: Eşik enerjisi
p_0, n_0	: Katkı yoğunlukları
N_c, N_v	: İletim ve valans bandı yoğunlukları
e	: Elektron yükü
E_{Fn}, E_{Fp}	: Elektron ve boşluklar için Fermi enerjisi
n, p	: Elektron ve boşlukların yoğunlukları
J_p, J_n	: Elektron ve boşluk akıları
μ_n, μ_p	: Taşıyıcıların hareket yeteneği
D_n, D_p	: Yayınma katsayıları
S_p, S_n	: Yüzey birleşme hızları
G_n, G_p	: Elektron ve delik oluşma hızları
τ_n, τ_p	: Elektronların ve boşlukların ömürleri

E	: Elektrik alanı
σ	: İletkenlik
W_p, W_n	: p ve n bölgelerinin genişlikleri
A	: Aktif güneş hücresi alanı
I_p	: Güneş enerjisi tarafından oluşturulan toplam akım
I_s	: Doyma akımı
F_n, F_p	: Elektron ve deliklerin birleşme hızları
R_0	: Geçiş bölgesindeki elektron ve deliklerin birleşme hızları
R_s, R_{sh}	: Hücresinin seri ve paralel dirençleri
R_L	: Yük direnci
I_{sc}	: Kısa devre akımı
V_{oc}	: Açık devre gerilimi
P	: Elektriksel çıkış gücü
P_{in}	: Güneş hücresine gelen ışının toplam gücü
V_m	: Maksimum güç noktasındaki gerilim
I_m	: Maksimum güç noktasındaki akım
I_t	: Kısa devre akımı sıcaklık katsayısı
I_s	: Diyot akımı
I_0	: Diyodun ters doyma akımı
I_{0r}	: Diyodun referans sıcaklıktaki ters doyma akımı
V_L	: Yük gerilimi
S_N	: Normalize aydınlık şiddeti
S	: Aydınlık şiddeti
A, B	: Üretici firmalar tarafından verilen diyot ideallik faktörleri

T_c	: Hücree alışma sıcaklığı
T_r	: Referans hücree sıcaklığı
N_p	: Paralel panel sayısı
N_s	: Seri panel sayısı
k	: Boltzmann sabiti
$\mathcal{E}$	: Hata
E	: Gerilim kontrollu gerilim kaynağı
H	: Akım kontrollu gerilim kaynağı
Ψ	: Transformatör akısı



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1 Enerji Tüketimi ve Ekonomik Gelişme Arasındaki İlişki	1
Şekil 1. 2 1860 Yılından Bu Yana Dünya Enerji Tüketimindeki Değişim	2
Şekil 1. 3 Birincil Enerji Üretiminin Kaynaklara Göre Dağılımı	5
Şekil 1. 4 Birincil Enerji Tüketiminin Kaynaklara Göre Dağılımı	5
Şekil 1. 5 Nihai Enerji Tüketiminin Kaynaklara Göre Dağılımı	6
Şekil 1. 6 Nihai Enerji Tükeminin Sektörel Dağılımı	6
Şekil 2. 1 Silikon Güneş Hücrelerinde Elektron-Boşluk Çifti Yaratılmasında Enerji Kullanımı	16
Şekil 2. 2a Has Germanyum Kristalinin Sembolik Gösterimi	17
Şekil 2. 2b Arsenik Katkılanmış Germanyum Kristalinin Sembolik Gösterimi	17
Şekil 2. 3 Yarı İletkenlerin Enerji Seviyeleri	18
Şekil 2. 4a p-n Jonksiyonu İç Akım	21
Şekil 2. 4b p-n Jonksiyonu Enerji Seviyeleri	21
Şekil 2. 5 Bir Güneş Hücresinin Çift Diyotlu Elektriksel Eşdeğer Devresi	24
Şekil 2. 6 Bir Güneş Pili Hücresinin Akım-Gerilim Karakteristiği	25
Şekil 3. 1 Güneş Hücresinin Elektriksel Eşdeğer Devresi	28
Şekil 3. 2a I-V karakteristiklerinin aydınlanma şiddeti ile değişimi	29
Şekil 3. 2b I-V karakteristiklerinin sıcaklık ile değişimi	29
Şekil 3.3 Güneş Pili Dizilerinin PSPICE Modeli	31

Şekil 3.4 Standart Test Koşulları İçin ($S=1000 \text{ W/m}^2$ ve $T=25^\circ\text{C}$), Simülasyondan Elde Edilen Sonuçlar ile Katologdan Elde Edilen I-V Eğrisinin Karşılaştırılması	32
Şekil 3. 5 Farklı Aydınlanma Seviyeleri İçin I-V Karakteristikleri	32
Şekil 3.6 $S=200 \text{ W/m}^2$, $S=600 \text{ W/m}^2$ ve $S=1000 \text{ W/m}^2$ için P-V Eğrileri ($T=25^\circ\text{C}$)	33
Şekil 3.7 Değişik Ortam Sıcaklıklarında $S=1000 \text{ W/m}^2$ için I-V Karakteristikleri	33
Şekil 3.8 Değişik Sıcaklıklar İçin P-V Eğrileri ($S=1000 \text{ W/m}^2$)	34
Şekil 3.9 Bir Güneş Hücresinin Çift Diyotlu Elektriksel Eşdeğer Devresi	35
Şekil 3.10 Standart Test Koşulları İçin Gerçek Değerler ile Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması	37
Şekil 3.11 $S= 500 \text{ W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$ İçin Sonuçların Karşılaştırılması	37
Şekil 3.12 $S=1000 \text{ W/m}^2$, $T=47^\circ\text{C}$ İçin Sonuçların Karşılaştırılması	38
Şekil 3.13 Güneş Pili Hücresinin Akım-Gerilim Karakteristiği	38
Şekil 3.14 Güneş Pili Modeli	39
Şekil 3.15 V_1 Geriliminin Eğri Üzerindeki Etkisi	40
Şekil 3.16 Tek Kırılma Noktalı Model İle İki Kırılma Noktalı Modelin Karşılaştırılması	41
Şekil 3.17 H_1 Akım Kontrollu Gerilim Kaynağının Eğri Üzerindeki Etkisi	42
Şekil 3.18 R_2 Direncinin Eğri Üzerindeki Etkisi	42
Şekil 3.19 R_3 Direncinin Eğri Üzerindeki Etkisi	43
Şekil 3.20 R_1 Direncinin Eğri Üzerindeki Etkisi	43
Şekil 3.21 V_2 ve V_3 gerilimlerini Eğri Üzerindeki Etkisi	44
Şekil 3.22 Değişik Test Koşulları için Simülasyon Sonuçları ile Ölçü Sonuçlarının Karşılaştırılması	45
Şekil 3.23 Simülasyondan Elde edilen Güç Değerleri ile Gerçek Güç Değerlerinin Karşılaştırılması	46

Şekil 4.1 Yüksek Frekanslı Trafoya Sahip Güç Dönüştürücü	52
Şekil 4.2. Yüksek Frekanslı Evirici İçin İdeal Dalga Şekilleri	53
Şekil 4.3 Güç Devresinin Kontrolü	54
Şekil 4.4 Şebekeye Aktarılan Akımın Dalga şekli	58
Şekil 4.5 IGBT'lerin ve Tristörlerin Kesime Gitmeleri	59
Şekil 4.6 Pil Uçlarındaki Gerilimin Dalga Şekli	60
Şekil 4.7 Pilden Çekilen Akımın Dalga Şekli	60
Şekil 4.8 Güneş Pili Dizisinden Çekilen Güç	61
Şekil 4.9 Şebekeye Aktarılan Güç	61
Şekil 4.10 Akım Referansının Basamak Şeklinde Arttırılması Durumunda Eviricinin Yanıtı	62
Şekil 4.11 Sistemin Blok Diyagramı	63
Şekil 4.12 Sistemin Güç Devresi	64
Şekil 4.13 Tolerans Band Kontrolü ile Akım Kontrolü	65
Şekil 4.14 Köprü Eviricideki Tristörlerin İletimde Kaldıkları Süreler	66
Şekil 4.15 Analog Kontrol Devresi	67
Şekil 4.16 Optik İzolasyon ve Sürme Devresi	67
Şekil 4.17 Akım Kontrolü Doğru Akım Tarafında Yapılan Çeviriciden Şebekeye Aktarılan Akım	68
Şekil 4.18 Akım Referansı ile Şebekeye Verilen Akım Arasındaki Fark	69
Şekil 4.19 Eviricide Tristör Yerine IGBT Kullanılması Durumunda Şebekeye Aktarılan Akım	70
Şekil 4.20 Snubber Kullanılmaması Durumunda Eleman Uçlarında Oluşan Gerilim (V_u)	71
Şekil 4.21 Snubber Kullanılması Durumunda Eleman Uçlarında Oluşan Gerilim (V_u)	71
Şekil 4.22 Akım Kontrollü Üç Fazlı Eviricinin Güç Katı	72
Şekil 4.23 Tolerans Bant Kontrolü ile Akım Kontrolü	73

Şekil 4.24 Bir Peryot Boyunca Şebekeye Aktarılan Akımlar	74
Şekil 4.25 Pil Uçlarındaki Gerilimin Değişimi	74
Şekil 4.26a Yarım Peryot Boyunca Şebekeye Uygulanan Gerilim	75
Şekil 4.26b Yarım Peryot Boyunca Şebekeye Uygulanan Akım	75
Şekil 5.1 Güneş Pili Dizisinin Çıkış Karakteristiği	77
Şekil 5.2 Kısa Devre Akımı ile Maksimum Güç Noktasının İzlenmesi	78
Şekil 5.3 Mikroişlemci Kısımında Akım Referansının Üretilmesi	79
Şekil 5.4 Maksimum Güç Noktasının İzlenmesi	80
Şekil 6.1 Güç Devresi	81
Şekil 6.2 Akım Kontrolü ve Darbe Üretme	82
Şekil 6.3 Akım Kontrol ve Darbe Üretme Katı Bloğu	83
Şekil 6.4 Mikrokontrolör Katı	83

TABLO LİSTESİ

		<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1	Yıllık Ortalama Güneş Enerjisi Potansiyelinin Aylara Göre Dağılımı	7
Tablo 1.2	Mevcut Politikalar Sonucu Elde Edilebilecek Güneş Enerjisi İle İlgili Projeksiyonlar	10
Tablo 1.3	Bazı Ülkelerin Güneş Kurulu Gücü ve Enerji Üretimi	11
Tablo 3.1	M55 Modülünün Elektriksel Karakteristikleri	31
Tablo 3.2	Model Parametreleri	39
Tablo 3.3	Anma Çalışma Koşulları İçin Modellerden Elde Edilen Temel Parametreler ile Gerçek Parametrelerin Karşılaştırılması	46
Tablo 3.4	Bağıl Hata Hesabı	47
Tablo 4.1	Orta Ölçekli Sistemler için Değişik Tasarımların Karşılaştırılması	51
Tablo 4.2	PSPICE'dan Elde Edilen Fourier Analizi Sonuçları	59
Tablo 4.3	PSPICE'dan Elde Edilen Fourier Analizi Sonuçları	70

ÖZET

Bu çalışmada ulusal şebekeye bağlı bulunan üç farklı güneş pili sistemi incelenmiştir. Bu sistemler güneş pili, evirici, filtre ve transformatörden oluşmuş olup, güneş pillerinden elde edilen doğru akım biçimindeki enerjiyi alternatif akıma dönüştürerek senkron olarak şebekeye aktarmak için kullanılırlar. İncelenen sistemler PSPICE 'da simüle edilerek eviricilerin çalışması incelenmiş, eleman değerleri belirlenmiş ve elde edilen çıkış dalgaları üzerinde gerekli analizler yapılmıştır. Ayrıca, benzer modellerle karşılaştırıldığında oldukça küçük hataya sahip olan simülasyon amaçlı yeni bir güneş pili modeli geliştirilmiştir.



SUMMARY

Each and every society's capability of development, or indeed its ability to survive, depends on continuing access to energy in appropriate forms and quantities, and at acceptable levels of costs (Cook, 1976). There is a relationship, which changes over time, between the degree of development in a society (economy) and the use of energy. This illustrated in Fig. 1. Until recently (when a small number of wealthy and highly industrialized countries have started to use less energy), this relationship has been one of an increasingly intensive use of energy as development proceeded. Thus the gradual transformation of the world over the last 200-plus years, from a world in the mid-eighteenth century made up largely of primitive and peasant societies which were largely subsistence in their structure and organization to a world now consisting mainly of post-industrial, industrial and industrializing economies, has led

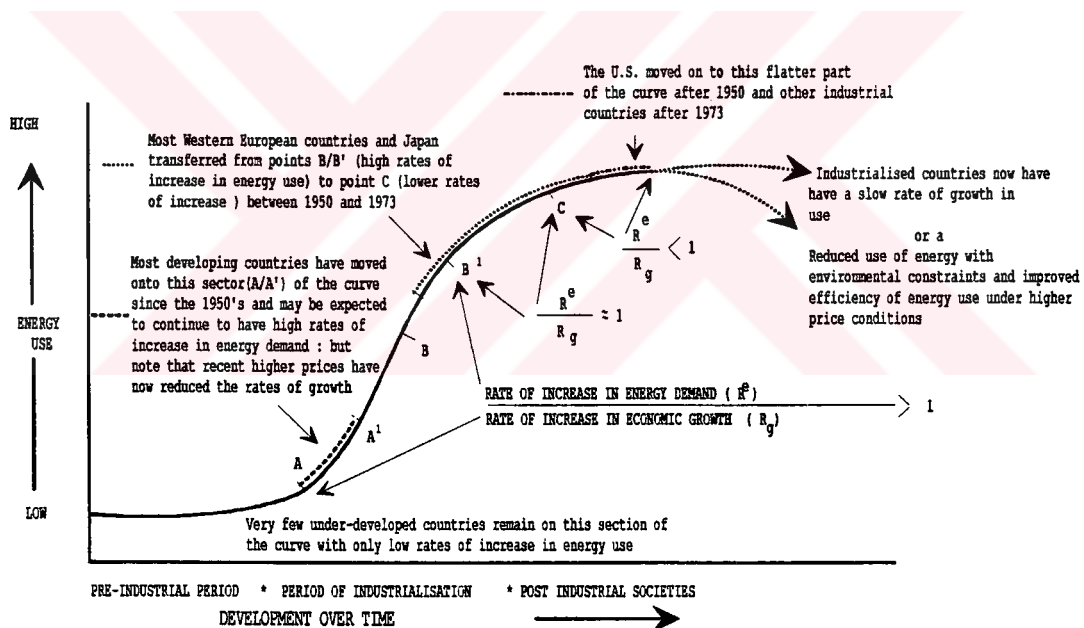


Fig. 1 The Relationship between Energy Use and Economic Development : the rate of increase(decrease) in energy use is a function of the stage of economic development

to a global use of energy which is now 20 times greater than its estimated to have been in 1860- the earliest date for which world energy use can be estimated with any degree of confidence (Marchetti and Nakicenovic, 1979).

The sun is responsible for most of the earth's energy in one way or another. Plant photosynthesis provided the basis of our fossil fuels such as coal and oil. Heat from the sun and specifically its effect on weather patterns, is indirectly responsible for that other common form of renewable energy, wind power. Solar power, in its accepted working definition, is the supply of energy directly from the sun. It is essentially made up of two very distinct technologies, solar thermal and solar photovoltaics. The first technology is based on the principle of using the sun's direct heat energy and is most commonly used for supplying hot water for houses and swimming pools. However, it is photovoltaics which is of interest here. This is a technology where the light from the sun is converted directly into DC electricity.

The photovoltaic effect - the conversion of light into electricity - was first noticed over 150 years ago by the French scientist Becquerel. He observed a light dependent voltage between two electrodes immersed in an electrolyte. Further practical application of this work had to wait until the acceleration of the space programme during the late 1950s. Solar power electric power became the only viable energy source for orbiting satellites, despite its initial high costs. Any fuel carried would have only a limited life and the more fuel carried the larger the initial weight, in turn requiring more fuel to send the device into space. The satellite programme therefore provided the initial impetus in the use of solar electric power supplies and formed the basis of the technology used in today's terrestrial applications.

In the 1980s there came a greater public awareness of the environmental costs of traditional energy generation. These issues came to the fore adding fresh impetus. Pollution and global warming became issues discussed by heads of government. Solar which emits no carbon dioxide, sulfur or nitrous oxide emissions offered one potential avenue to alleviate the inevitable consequences of global warming.

The main benefit of solar power system is their use of "free" fuel from the sun, resulting in only minimal running costs. Equally important for users is the minimal maintenance requirement, with the critical element, the solar modules having no moving parts. Indeed examples of life-cycle costing show a strong advantage when compared to diesel generators or even in some cases the electricity grid system, when maintenance costs are taken into consideration.

The basic component of any solar electric system is the solar cell, which, using a simple analogy, operates in a manner similar to a diode. The principal raw material silicon is intensely refined to remove all the unwanted impurities. Half is then doped with boron which has excess positive electrons and half with phosphorus which has excess negative electrons. When light energy (photons) falls on the front surface of the cell, an excess of energy results in the movement of electrons between layers exactly in a P-N junction diode. This then collected, by a metal backplate and grid on the cell, as electricity.

A model of photovoltaic cell is important for simulation of photovoltaic systems. The new model for modeling photovoltaic cell which is based on equivalent electrical circuit approach is developed. The new model is shown in Fig. 2.

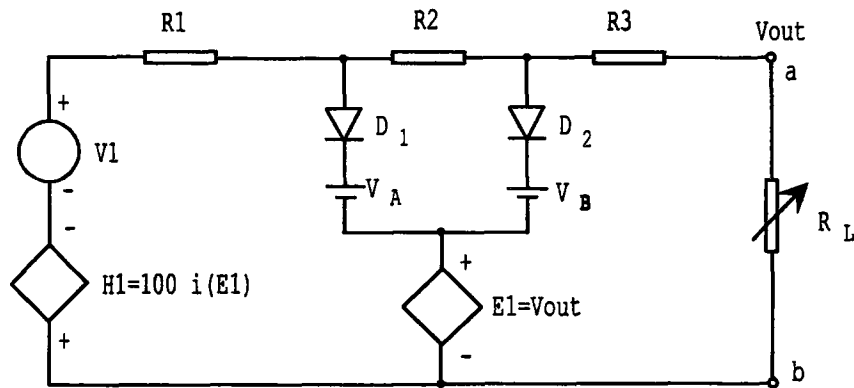


Figure 2 The New Model of Photovoltaic Cell

The current-voltage characteristic of the model for nominal conditions (600 W/m^2 , 25°C) is given in Fig. 3 . The error of the model is about 0.02.

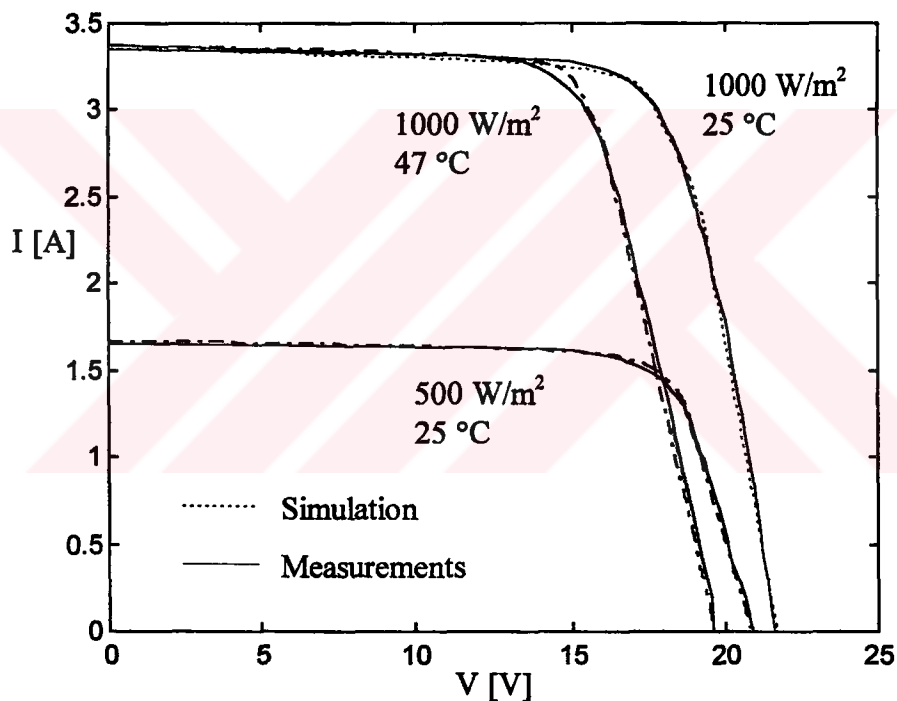


Figure 3 Simulations and Measurements Results for Nominal Conditions

There are two basic types of solar power system. Most common are self contained power systems. In the developed world however increasingly important are so-called grid-connected systems. These are subtly different as they work with rather than instead of the electrical grid.

Where solar is used as the only power supply system the remaining elements of a complete solar electric power system are specifically designed batteries to store energy and thus ensure continuity of power supply when the sunlight is insufficient either during the night or period of poor weather e.g. heavy cloudcover, and a charge

control unit to create an effective and efficient battery charging regime between the solar modules and batteries.

Grid connected systems do away with the need for batteries. In these systems the solar panels are simply interconnected via safety equipment and an inverter to grid (subjected to local legislation). When more power is required than the solar panels can provide the grid supplements this. At other times (again subject to regulation) the solar panels may contribute to grid when more power is produced than used.

Utility interactive residential photovoltaic systems offer the advantage, with regard to systems using batteries, of overcoming the problem of energy storage through injection of the photovoltaic power by means of an electronic inverter directly into the utility grid. Such an inverter should produce a sinusoidal current with low harmonics and should perform with high efficiency over a large of input power and voltage.

Most of the inverters for photovoltaic applications discussed in the literature have been modifications of existing conversion equipment. Two type of systems have been proposed, the current-fed line-commutated thyristor inverter and the voltage-fed forced-commutated inverter. The technological advances in semiconductor switching devices, dc-capacitor and ferrite-cored inductivity have made possible the realization of new types of inverters with high-frequency switches. The resulting circuits show significantly better performances such as higher efficiency especially at lower power levels, lower harmonic distortion, and reduced weight and volume as compared to conventional inverters.

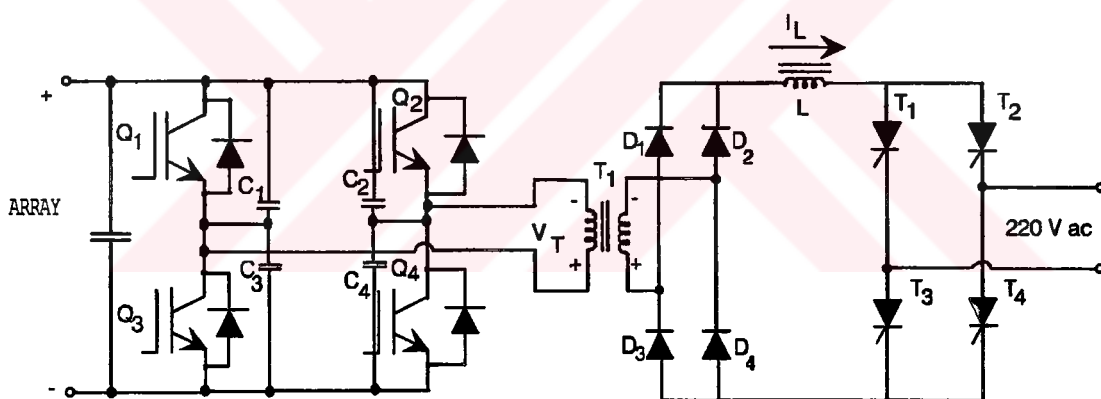


Figure 4 Utility Interactive Power Converter with High- Frequency Transformer

Fig.4 shows such a system which use high-frequency link converter, to convert variable dc voltage of the photovoltaic array into constant ac voltage which is in phase with utility. In this system, a high-frequency PWM inverter feeds a high-frequency isolation transformer with a sinusoidally shaped current. The output of the transformer is rectified with diode bridge rectifier. Four thyristor, used as 50-Hz switches, reverse the polarity of the rectified current on every other half-cycle of the utility voltage. This reversal is accomplished slightly before the natural zero crossing of the voltage, thereby providing commutation for the thyristor. Sample computer simulation result is given in Fig.5

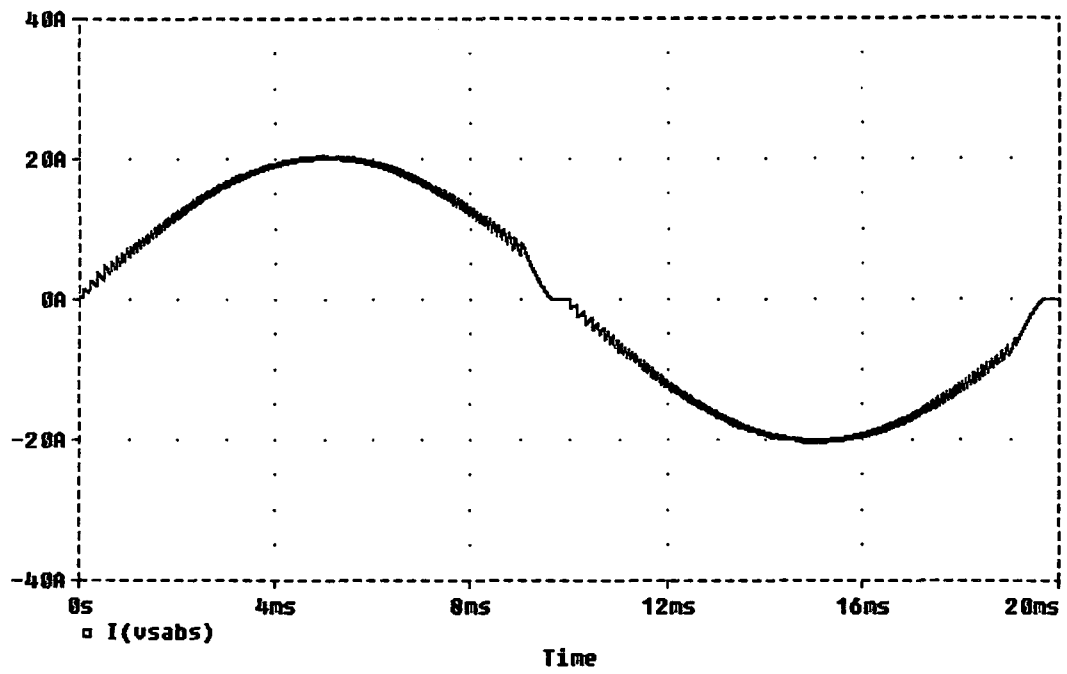


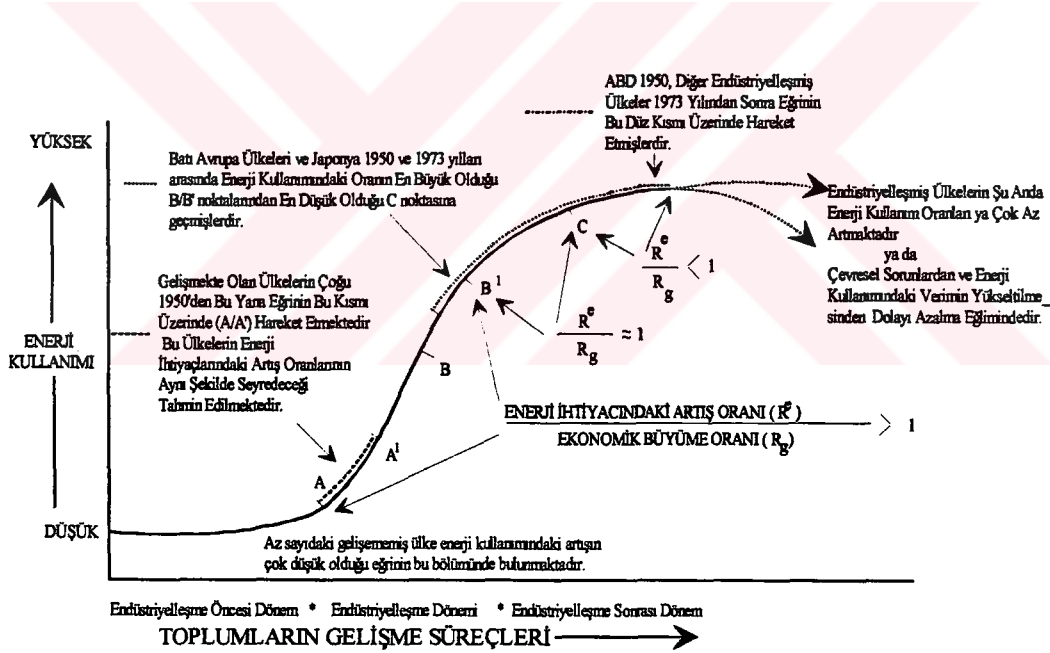
Figure 5 Line Current

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 Enerji ve Gelişmişlik

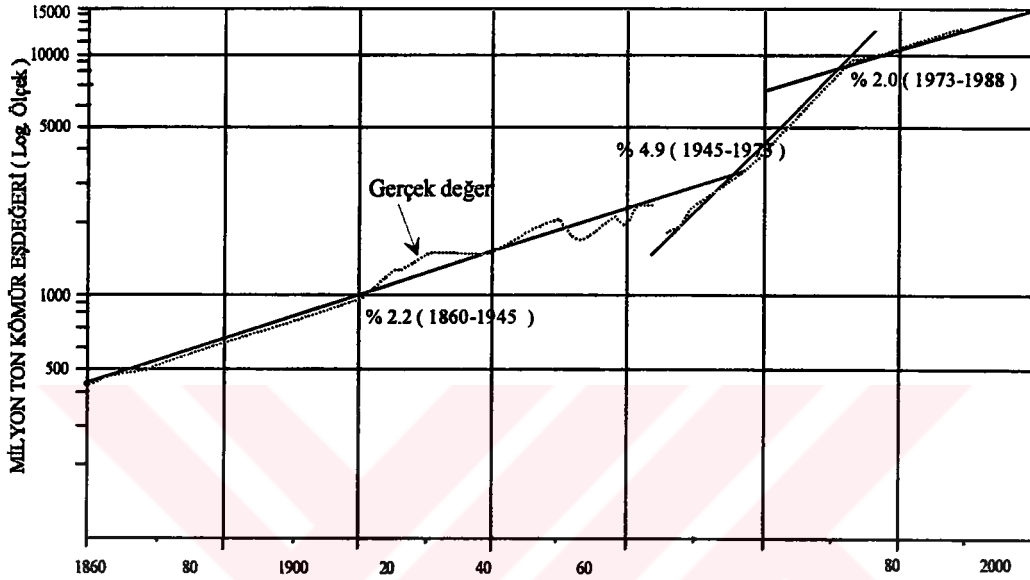
Bütün toplumların gelişebilmeleri, daha doğrusu yaşamlarını sürdürebilme yetenekleri, uygun yapı ve miktardaki enerjiye kabul edilebilir seviyelerdeki maliyetler ile ulaşmayı sürdürebilmelerine bağlıdır (Cook, 1976). Toplumların gelişmişlik seviyesi ile kişi başına tüketilen enerji miktarı arasında yakın bir ilişki vardır. Bu ilişki Şekil 1.1’de gösterilmiştir.



Şekil 1.1 Enerji Tüketimi ve Ekonomik Gelişme Arasındaki İlişki : Enerji tüketimindeki artış (azalış) oranı ekonomik gelişmedeki aşamaların bir fonksiyonudur

Klasik termodinamikte iş yapabilme kabiliyeti olarak tanımlanan enerji sanayileşmiş toplumların ayrılmaz bir parçasıdır. Son 200 yıl boyunca dünyanın kademeli olarak büyük ölçüde ilkel ve köylü topluluklarından oluşan 18. yüzyılın ortalarındaki dünyadan, yine büyük ölçüde endüstriyelleşen, endüstriyelleşmiş ve endüstriyelleşme ötesine geçmiş olan ekonomilerden oluşan şu andaki dünyaya

dönüşmesi süreci boyunca global enerji tüketimi, 1860 yılında tüketildiği tahmin edilen rakamın 20 katına yükselmiştir. 1860 yılı dünya enerji tüketiminin güvenli bir biçimde tahmin edilebildiği en erken tarihtir (Marchetti ve Nakicenovic, 1979). Şekil 1.2'den de görüldüğü gibi dünya enerji tüketimi 1860 yılından bu yana yaklaşık %2.2 oranında artarken, bu oran 1945-1973 yılları arasında %4.9'a fırlamıştır. [1]



Şekil 1.2 1860 Yılından Bu Yana Dünya Enerji Tüketimindeki Değişim

1.2 Neden Güneş Enerjisi ?

Gerçekte bütün enerji kaynakları güneşten türemiştir. Yaygın olarak kullanılan fosil yakıtlar, çağlar önce güneşten aldıkları enerji sayesinde karakteristiklerini değiştirmişler ve bugünkü kullanılır şekillerini almışlardır.

Endüstri devriminin gerçekleşmesinden sonra dünya enerji tüketimi hızla artarken enerji kaynaklarında bir artış olmadığı gibi bilinen yakıt rezervleri daha daha hızla tüketilmeye başlanmıştır. Yeni rezervler aranmaya, bazı doğal enerjiler kullanılabilir duruma sokulmaya çalışmasına rağmen yine de kullanılan enerjinin ana kaynağı fosil yakıtlardan olan petrol ve kömürdür.

Günümüzde artık fosil yakıtlara tükenme ömürleri biçilmektedir. Bu yakıtların 35 yıl (doğal gaz) ile 200 yıl (kömür) arasında tükenecekleri tahmin edilmektedir. Yüzyılımız ortasında kullanıma sokulan nükleer enerji umut verici görünse de, bugünkü kullanım teknolojisiyle önemli sorunları vardır. [2]

1970’li yılların başında tüm dünyayı sarsan ve ülkelerin enerji plan ve programlarının değişmesine neden olan “ Dünya Enerji Krizi ”, petrol üreten ülkelerin üretimlerini belli oranda kısmalarından ve petrol fiyatlarına sürekli olarak zam yapmalarından kaynaklanmıştır. Bu artışlar tüm ülkelerin ekonomik yapılarını etkilerken, özellikle gelişmekte olan ülkelerin ekonomilerini temelden sarsmıştır. Gelişmiş ülkeler bir yandan artan petrol fiyatları karşısında ithal petrole olan bağımlılığı azaltan bir dizi önlemler alırken, diğer yandan da ürettikleri mamul madde fiyatlarına yaptıkları zamlarla artan petrol fiyatlarının getirdiği ekonomik yükün büyük bir kısmını, gelişmekte olan veya gelişme sürecini henüz tamamlayamamış olan ülkelere yansıtmışlardır. Bu nedenle ülkemizin de içinde bulunduğu bu ülkeler, enerji dengelerinin ithal petrole bağımlı olması nedeniyle, bir taraftan artan petrol fiyatlarının getirdiği ekonomik yükü, diğer taraftan da gelişmiş ülkelerin teknoloji transferlerine, hammadde ve yatırım mallarına yaptıkları zamlar nedeniyle ortaya çıkan ilave yükü, ister istemez karşılamak durumunda kalmışlardır.

Gelişmiş ülkeler ekonomik durgunluğu aşmak ve gerekli büyümeyi sağlamak amacıyla oluşturdukları politikaları 1973 yılından itibaren uygulamaya koymuşlardır. Bunlar genellikle, petrole olan bağımlılığın azaltılması, ulusal enerji kaynaklarından azami yararlanma, enerji teknolojisinde dışa bağımlılığın azaltılması ve mümkün oranda yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanma olarak sıralanabilir.[3]

Yenilenebilir enerji kaynakları, Türkiye’de halen kullanılmakta oluşlarına ve pratik kolaylıklarına göre aşağıdaki öncelik sırasını taşırlar :

- Güneş Enerjisi
- Biogaz Enerjisi
- Jeotermal Enerji
- Rüzgar Enerjisi
- Alçak Seviyeli Bentlerden Enerji Elde Edilmesi

Bunlardan jeotermal enerji ülkemizde çok bol olmasına rağmen, uzun jeofizik etüdleri, çok yerel olması ve bazı çevre sorunlarını beraberinde getirmesi, alçak seviyeli bentler büyük yatırım gerektirmesi, rüzgar enerjisi gerekli aygıtlarının henüz güvenilir kalitelere ulaşmamış olması, biogaz ise üretiminin sanayinin ihtiyaçlarına

cevap verebilmesi için büyük miktarlarda hammadde nakliyatını gerektirmesi nedeniyle yakın bir gelecekte petrole alternatif olarak görülmemektedir. [4]

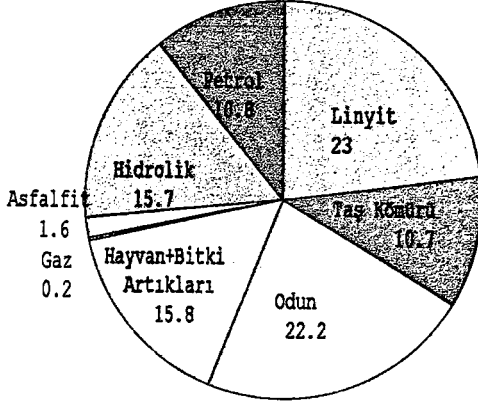
Tükenmeyen, çevreyi kirletmeyen, dış alım gerektirmeyen ve bir ölçüde de tesis edildikten sonra bedava sayılabilecek bir kaynak olan güneş enerjisi, dünyanın en iyi güneş alan bölgelerinden biri olan ülkemiz için kısa vadede en iyi alternatifi oluşturmaktadır.

Güneşten dünyaya gelen enerjinin yoğunluğu atmosferin üzerinde m^2 başına 1.35 kW kadardır. Bu yoğunluk ile dünya çapının kapladığı alana gelen güneş gücü 178 PW ($1 \text{ PW} = 10^{15} \text{ W}$) düzeyinde olup, dünyadaki kurulu elektrik santrallerinin toplam gücünün 100 bin katı düzeyindedir. İnsanlığın enerji sistemi 8-9 TW ($1 \text{ TW} = 10^{12} \text{ W}$) güçle karşılanabileceğinden, güneşten gelen güç bunun 20 bin katıdır. Dünyanın tüm yüzeyine bir yılda düşen güneş enerjisi 1.22×10^{14} TET (ton eşdeğer petrol) gibi görkemli boyuttadır. Bir başka anlatımla, bir yılda gelen güneş enerjisi bilinen kömür rezervinin 50 katı ve bilinen petrol rezervinin 800 katıdır.

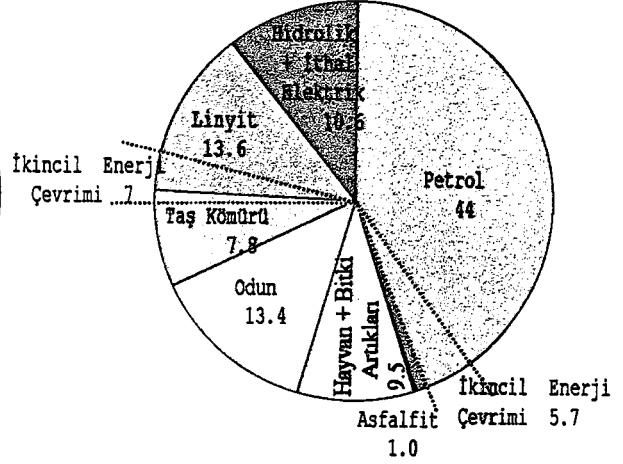
1.3 Türkiye'nin Enerji Dengesi

Ülkemiz enerji üretim-tüketim dengesinin üretim bölümünü birincil enerji üretim kaynakları olarak bilinen taşkömürü, linyit, asfaltit, doğal gaz, petrol, hidrolik enerji ve odun ile hayvan ve bitki artıkları oluşturmaktadır. Bu birincil enerji kaynaklarının 1982 yılı itibarıyla üretim ve tüketim durumlarının kaynaklara göre dağılımı Şekil 1.3 ve Şekil 1.4' te gösterilmiştir.

Toplam tüketimimizde %44'lük paya sahip petrolün üretimimizde %10.8'lik paya sahip olması, ülkemiz enerji dengesinin ithal petrole bağımlılık derecesinin önemini göstermektedir. Gerekli önlemlerin zamanında alınamaması veya alınan önlemlerin gerektiği hızda uygulanamaması nedeniyle ülkemiz geçtiğimiz yıllarda döviz gelirlerinin tamamına yakın bir kısmını ithal petrole ödemek zorunda kalmıştır. Dış ticaret açığının giderek tehlikeli boyutlara ulaşmasıyla da, başta sanayi hammaddesi olmak üzere bir çok girdinin temin edilemediği bir kriz dönemine girmiştir.



Şekil 1.3 Birincil Enerji Üretiminin Kaynaklara Göre Dağılımı
%100=32454x10³ TET



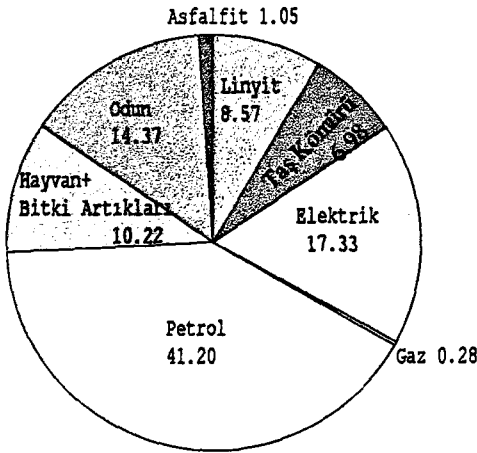
Şekil 1.4 Birincil Enerji Tüketiminin Kaynaklara Göre Dağılımı
%100=53974x10³ TET

Günümüzde bu dönemin belirli oranada atlatılmış olmasına rağmen, tesis edilmiş hassas enerji dengesinin hızlı nüfus artışı ve sanayileşme nedeniyle dinamik bir biçimde artmakta olan enerji talebine uygun olarak sağlanması ülkemiz açısından oldukça önemlidir.

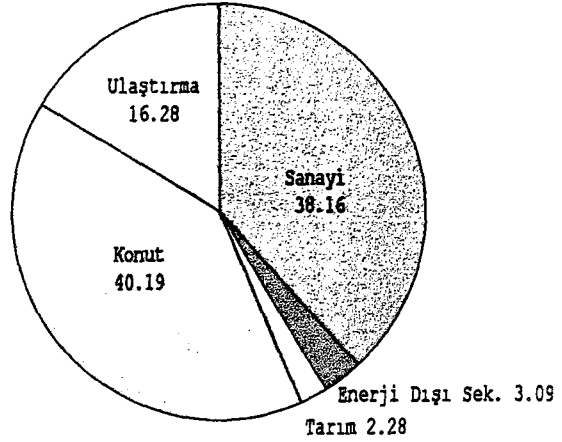
Çevrim tesislerinde ve diğer tesislerde oluşan kayıplar sonucunda, sanayi, ulaştırma, konut, tarım ve enerji dışı diğer sektörlerde kullanılan nihai enerji tüketimimizin kaynaklara ve sektörlerle göre dağılımı Şekil 1.5 ve Şekil 1.6'da verilmektedir. [2]

1.4 Türkiye'nin Güneş Enerjisi Potansiyeli

Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğünden elde edilen güneşlenme süreleri ve güneş ışıyım şiddeti verilerine dayandırılarak ülkemiz güneş enerjisi potansiyeli saptanmıştır. Buna göre, Türkiye'nin yıllık güneşlenme süresi 2608.8 saat olup, maksimum değer 361.8 saat ile Temmuz ayında, minimum değer 97.8 saat ile Aralık ayında görülmektedir. Güneşlenme süresi yönünden en zengin bölge yılda 3015.8 saat ile Güneydoğu Anadolu, en fakir bölge yılda 1965.9 saat ile Karadeniz bölgesidir. Ülkemizin yıllık ortalama güneş radyasyon yoğunluğu 316.07 cal/cm².gün kadardır. En yüksek değer 503.13 cal/cm².gün ile Temmuz ayında en düşük değer 132.04 cal/cm².gün ile Aralık ayında saptanmıştır. Güneydoğu Anadolu bölgesi için



Şekil 1.5 Nihai Enerji Tüketiminin Kaynaklara Göre Dağılımı
 $\%100 = 53974 \times 10^3$ TET



Şekil 1.6 Nihai Enerji Tükeminin Sektörel Dağılımı
 $\%100 = 50138 \times 10^3$ TET

yıllık ortalama güneş radyasyon yoğunluğu $341.23 \text{ cal/cm}^2.\text{gün}$ düzeyinde iken, bu değer Karadeniz bölgesinde $246.55 \text{ cal/cm}^2.\text{gün}$ düzeyine düşmektedir. Güneş enerjisi potansiyelinin aylara göre değişimi Tablo 1.1'de verilmiştir. [5]

Yapılan değerlendirme sonuçları temel alınarak, Türkiye'nin bütün yüzeyine bir yılda düşen güneş enerjisi kuramsal biçimde hesaplanmış ve 1.2×10^{11} TET (120 milyar ton taşkömürü eşdeğeri) bulunmuştur. Bir varsayım olarak , bu enerjinin binde birinin $\%30$ verimle toplanması koşulunda, yılda kullanılabilecek güneş enerjisi miktarı 36×10^6 TET ya da 23 milyon ton eşdeğer petrol olarak saptanmıştır.[2]

1.5 Güneş Enerjisi Uygulamaları

Teknik açıdan güneş enerjisi uygulamaları aşağıdaki gibi gruplandırılabilir :

- 1- 100°C 'nin altındaki alçak sıcaklık ısı uygulamaları (Düz yüzeyli kollektörler)
- 2- 3000°C düzeylerine dek ulaşabilen yüksek sıcaklık ısı uygulamaları (Odaklı kollektörler)
- 3- Işıl elektrik uygulamaları (Güneş pilleri)
- 4- Güneş termik elektrik uygulamaları (Heliostat odaklı kollektörler ve özel güneş kuleleri, güneş ısı havuzları)
- 5- Fotosentetik işlevler (Özel bitki plantasyonları yada biokollektörler)

6- Fotokimyasal işlevler (Özel tip odaklı kolektörler)

Tablo 1.1 Yıllık Ortalama Güneş Enerjisi Potansiyelinin Aylara Göre Dağılımı

<i>Aylar</i>	<i>Cal/cm² - gün</i>	<i>10⁷ TET</i>	<i>Aylık %</i>
Şubat	194.4	606	5
Ocak	143.5	495	4
Mart	268.2	926	7
Nisan	530.3	1179	9
Mayıs	426.9	1470	12
Haziran	482.6	1616	13
Temmuz	486.4	1679	13
Ağustos	439.5	1517	13
Eylül	353.2	1180	9
Ekim	249.3	860	7
Kasım	174.3	582	5
Aralık	130.1	449	4

Bugün hala hazırda güneş enerjisinden yararlanılan su ısıtıcıları, güneşli hava ısıtıcı ve kurutucuları, güneş ocakları, güneş enerjisinden yararlanılan buhar üreteçleri, soğutucular, güneş metalurjik fırınları, güneş enerjisiyle çalışan termik motorlar ve su pompaları, güneş pilleri, güneş generatörleri ve termik elektrik santralleri geliştirilip uygulamaya konulmuşlardır. Isıtmadan soğutmaya ve iklimlendirmeye, pişirmeden maden ergitmeye, deniz suyundan içme suyu ve magnezyum üretimine, petrol türevleri yerine kullanımı başlamakta olan yakıt hidrojenin sudan elde olunmasına, uzaydaki ısı elektrik güneş generatörlerinden yeryüzündeki ısı elektrik panellere ve güneş termik santrallerine dek çeşitli yerlerde kullanılabilen güneş enerjisi, tüm teknik aşamalara karşı enerji bütçeleri açısından, ancak birincil kaynakları destekleyen bir yardımcı kaynak durumundadır.

Dünya enerji bütçesinin geleceğini sağlıklı bir biçimde kestirmek olanaklı olmasa da, bazı ülkelerin güneş enerjisi için önemli hedefler saptadıkları gözlenmektedir. Örneğin Amerika Birleşik Devletleri enerji tüketiminin 1985 yılında %0.8'ini, 2000 yılında %7'sini ve 2020 yılında %25'ini ısısal, elektriksel ve biomasa

dayalı güneş enerjisi uygulamalarıyla karşılamayı çok önceden planlamıştır. 1985-1990 döneminde güneşle ısınabilen konut sayısının bir milyona ulaştırılması tasarımı, Amerika'da bir ulusal atılım olarak benimsenmiştir. Yine Amerika'da Sandia National Laboratories tarafından 5 MW'lık ve CRTF'in 10 MW'lık güneş termik elektrik santralleri kurulurken, İtalya'da 1 MW'lık ADRANO güneş termik santral işletmeye sokulmuş, Fransa'da da 0.5 MW'lık VIGNOLA güneş termik santral yapılmıştır. Bunların yanısıra Japonya'da 1986-1990 dönemi için 10 MW'lık termik elektrik ve 1 MW'lık ısı elektrik güneş santral güçleri hedef alınarak çalışmalara girilmiştir. [2]

Son yıllarda evlerin çatılarına yerleştirilmiş küçük güçlü güneş pili sistemleri oldukça önem kazanmıştır. Güneş pillerinin çatılara yerleştirilmesi ile, modüller için gerekli olan yer ihtiyacı ortadan kalkmaktadır. Bu tür uygulamalar ilk olarak 1980 yılında Amerika'da başlamış ve Amerikan Enerji Dairesinin desteği ile MIT tarafından 7.5 kW'lık bir sistem gerçekleştirilmiştir. Bugün 15 ülke ev tipi güneş pili sistemlerinin geliştirilip, yaygınlaştırılması için koordineli bir şekilde çok değişik programlar yürütmektedir.

Dünya üzerindeki toplam ev tipi güneş pili uygulamaları 1984 yılında 3.13 MW iken, bu rakam 1994 yılında 16.47 MW' a ulaşmıştır. Amerika, Avrupa ve Japonya' da uygulanan programlar ile bu rakamın 2010 yılında 1600 MW' a ulaşması beklenmektedir. Japonya 1993 yılında yedi yıllık bir program başlatmıştır. Bu program çerçevesinde 3 kW' a kadar olan sistemler devlet tarafından sübvans edilerek bu asrın sonuna kadar 62000 evde toplam 185 MW'lık güneş pili sistemi kurulması hedeflenmektedir. Çevre politikalarına önem veren Avrupa ülkeleri de bu uygulamalara önem vermektedir. Alman hükümeti 1990 yılından itibaren yüzde yetmişini destekleyerek 1 kW ile 5 kW arasındaki güçlerde 1000 ev tipi sistem gerçekleştirmiş, daha sonra ise hedefini 2500 sisteme çıkarmıştır. Bu sistemlerin 1990 ile 1995 yılları arasındaki maliyetleri ortalama 16 \$/W olmuştur. Hollanda hükümeti de çoğunluğu ev tipi olan 250 MW'lık güneş pili sistemini 2010 yılında tamamlamayı planlamaktadır. Amerikan Enerji Dairesi de, bu tür sistemlerin geliştirilmesini teşvik etmek amacıyla, değişik firmalar aracılığı ile beş yıl boyunca masrafların paylaşımına dayanan yeni projeler başlatmıştır. Bu projeler sayesinde 4 kW'lık bir sistemin fiyatı 1992 - 1995 yılları arasında 15 \$/W ' dan 6.87 \$/W ' a düşmüştür. Ayrıca yarı saydam ve değişik renklerde modüller imal edilerek son yıllarda yüksek binaların ve

gökdelenlerin dış cephelerinin dekoratif bir biçimde güneş pilleri ile donatılması mümkün olmuştur.

Ev tipi güneş pili uygulamaları ulusal enerji şebekesine uzak bölgelerde şebekeden ayrı olarak gerçekleştirilebildiği gibi, şebekenin bulunduğu yerleşim bölgelerinde şebekeye bağlı olarak da gerçekleştirilmektedir. Gündüzleri genelde evde tüketilen enerji az, buna karşın güneş pillerinden üretilen elektrik enerjisi yüksek olmaktadır. Bundan dolayı şebeke bağlantılı sistemlerde evin tüketiminden arta kalan enerji, şebeke ile senkron çalışan bir evirici yardımıyla alternatif gerilime dönüştürüldükten sonra sayaç üzerinden şebekeye aktarılabilir. Bu aktarma işlemi enerji satmak değil, enerji depolamak biçiminde düşünülmelidir. Çünkü, gece ve havanın kötü olduğu durumlarda gerekli olan enerji başka bir sayaç üzerinden şebekeden sağlanmaktadır. Çift elektrik sayacının yer aldığı sistemde çekilen ve şebekeye aktarılan enerjiler kaydedilmekte, ay sonunda yapılacak bir bilanço ile iki sayacın yazdığı değerler karşılaştırılarak borç-alacak hesapları çıkarılmakta, hesaplar sonucunda güneş enerjisinden elde edilen enerji miktarı şebekeden çekilen miktardan fazla ise yapılan özel bir anlaşma ile fazla enerji ulusal şebeke şirketine en düşük maliyet fiyatı üzerinden satılmaktadır. Aksi durumda ise kullanıcı elektrik şirketinden sağlamış olduğu enerji miktarı bedelini şirkete standart fiyat üzerinden ödemektedir.

Bu uygulama sayesinde güneş pili sisteminin sahibi, fazla enerjisini akümülatörlerde depo edecek sistemi kurma zahmetinden kurtularak, şebekeyi yedekleme amacıyla kullanmaktadır. Şebeke de enerjinin en çok gerekli olduğu saat dilimi içerisinde, en düşük maliyet ile kullanabileceği yedek bir elektrik enerjisi kaynağına sahip olmaktadır. Enerji bir bakıma kullanıldığı yerde üretildiği için iletim kayıpları da en aza inmektedir. Böylece, iki taraflı fayda sağlayan bir uygulama ortaya çıkmıştır. Ayrıca, o bölgede yaşayan halk, temiz ve yenilenebilir bir enerji kaynağı kullanıldığı için çevre kirliliğinden kurtulmuş olmaktadır. Net ölçüm olarak adlandırılan yukarıdaki uygulama halen Japonya, İsviçre, Almanya' nın bir bölümü ve 14 Amerikan eyaletinde uygulanmaktadır. Bazı ülkelerin elektrik idareleri ise küçük üreticilerden enerji satın alımını kabul etmemektedirler. [6]

Bazı ülkelerin güneş kurulu gücü ve enerji üretimi Tablo 1.2'de, mevcut politikalar sonucu elde edilebilecek güneş enerjisi ile ilgili projeksiyonlar ise Tablo 1.3'te verilmiştir. [7], [8]-[12]

Tablo 1.3 Bazı Ülkelerin Güneş Kurulu Gücü ve Enerji Üretimi (1990)

Ülkeler	Fotovoltaik		Termo-elektrik		Yıllık Isı Üretimi	
	Kurulu Güç	Yıllık Üretim	Kurulu Güç	Yıllık Üretim	Aktif	Pasif
	kW	MWh	kW	MWh	TJ	TJ
ABD	12000	-	279000	700000	-	-
Almanya	1346	534	-	-	212	-
Avusturya	2000	-	25	-	-	3060
Belçika	15	-	-	-	-	-
Burundi	4124	18	-	-	-	-
Çin	1000	960	-	-	-	-
Eski SSCB	100	20	5000	15	-	-
Fransa	1000	1000	-	-	-	-
Gana	5982	39	-	-	-	-
Hollanda	400	450	-	-	150	-
İngiltere	32	-	-	-	357	4.2
İspanya	3160	6320	-	-	1663	-
İsrail	80	200	-	-	6790	-
İsveç	10	8	-	-	30	-
İtalya	700	-	-	-	520	-
Japonya	1811	-	-	-	-	-
Kanada	800	900	-	-	620	-
Meksika	2000	4418	-	-	687	-
Norveç	1600	2000	-	-	1	-
Pakistan	266	326	-	-	-	-
Tayvan	10	-	-	-	715	-
Ürdün	40	73	-	-	-	432

BÖLÜM 2

GÜNEŞ PİLLERİNİN YAPILARI VE ÖZELLİKLERİ

2.1 Giriş

Elektrik üretiminde güneş enerjisinden iki şekilde faydalanmak mümkündür. Bunlardan ilki dolaylı yöntemdir. Bu yöntemde, güneş kolektörü ile basınçlı buhar elde edilir ve elde edilen buhar türbin generatör grubu kullanılarak elektrik çevrilir. Çevrim veriminin yüksek olması için, buhar üretecinde ısı verme işlemi mümkün olduğu kadar yüksek sıcaklıkta gerçekleşmelidir. Yüksek sıcaklıkta ısı verme düzlem kolektörle mümkün olmadığından odaklamalı kolektör kullanılması gerekir. Çevrim verimi %30 olabilmektedir. [13]

İkinci yöntem ise güneş ışınımını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren güneş pili düzeneklerinin kullanılmasıdır. Güneş pillerinin olumlu ve olumsuz özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir ;

Olumlu Özellikleri :

- Herhangi bir yakıtı ihtiyaç göstermez. Dolayısı ile yakıt taşınma ve depo edilmesine harcanacak masraflar da yer almaz.
- Güneş enerjisini elektrik enerjisine çeviren tüm doğrudan enerji dönüştürücüler içinde en yüksek verime sahip olanıdır (Ticari modüllerde verim %14-17 arasında, laboratuarlarda özel olarak imal edilen deneysel güneş hücrelerinde verim %30'lara kadar ulaşabilmektedir).
- Güneş pili modüllerinin güvenilirliği, dizel ve rüzgar generatörlerine göre oldukça yüksektir.
- İşletme ve periyodik bakım ihtiyaçları yok denecek kadar azdır.

- Modüler yapısı nedeniyle güç ve gerilim seviyesi kolaylıkla artırılıp, azaltılabilir.
- Modüllerden bir grup devre dışı kalsa bile güç üretimi devam edebilir.
- İletim hattına gereksinim göstermez. İhtiyacın olduğu yere kurulabilir. Bu sayede en uzak kırsal alanlara enerji sağlanabilir.
- Kömür ve petrol gibi ithal yakıtlara olan bağımlılığın ve ödenecek döviz miktarının azalmasından dolayı ulusal ekonomiye katkı sağlar.
- Birim ağırlık başına oldukça yüksek çıkış gücüne sahiptir.
- Ham maddesi silisyum, dünyada en bol bulunan maddelerdendir.
- Sessiz ve temizdir, çevre kirlenmesine neden olmaz.
- Uzun ömürlüdür. 20-25 yıllık kullanımı süresince performansında çok az düşme olur.

Olumsuz özellikleri :

- İlk yatırım maliyeti yüksektir.
 - Üretilen elektrik enerjisi doğru akım şeklinde olduğu için, doğru akımla çalışan cihazlara yada eviricilere ihtiyaç gösterir.
 - Sürekli bir üretim yapılamadığı için üretilen enerjinin bir batarya grubu ile depolanması gerekir.
 - Güneşlenme yönünden zengin bölgelere ihtiyaç vardır.
 - Kilowatt başına yaklaşık 10 m² alana ihtiyaç vardır.
 - Çok fazla güneş ışını alan bölgelerde, sıcaklık nedeni ile verim azalmaktadır.
- [14],[15]

2.2 Güneş Pillerinin Tarihi Gelişimi

Fotovoltaik etki ilk olarak 1839 yılında A. H. Becquerel tarafından gözlenmiştir. Becquerel, basit bir elektrokimyasal pilin bir yüzüne ışık düşürüldüğü zaman üretilen akımın arttığını görmüştür. 1870' lerde selenyumun fotovoltaik özellikleri üzerine yapılan çalışmalar sonucunda ilk selenyum fotovoltaik pil 1883 yılında üretilmiştir. 1904 yılında bakır ve bakıroksit yapıların ışığa duyarlılık özellikleri keşfedilmiştir. 1905 yılına gelindiğinde ise artık ışığa duyarlı maddelerin yaydığı elektron sayılarının ve enerji seviyelerinin, üzerlerine düşürülen ışığın yoğunluğu ve

dalga boyu ile değiştiği bilinmekteydi. Fotovoltaik hücrelerin ışığı doğrudan elektriğe dönüştürdüğü kanıtlanmasına rağmen, bu dönüşüm işleminin fiziksel anlamını anlamak biraz daha zaman almıştır.

Bunu izleyen yıllarda, pratik olarak gerçeklenebilecek fotovoltaik cihazlar üzerindeki çalışmalar devam etmiştir. Selenyum ve bakıroksit fotovoltaik hücrelerdeki gelişmeler sonucunda, fotoğrafik ışık ölçer ve küçük ışık algılayıcılarını da içeren birtakım uygulamalar gerçeklenmiştir. 1941 yılında yaklaşık olarak %1 verimle ışık elektriğe dönüştüren cihazlar geliştirilmiştir. Daha sonra tekli kristal hücrelerin üretilmesi için, büyütülmüş p-n jonksiyonu olarak bilinen yeni bir teknik geliştirilmiş, 1950'lerin ortasında ise silikon katkılı kristaller kullanılarak verimi %6' ya kadar ulaşan güneş dönüştürücülerini elde etmek mümkün olmuştur.

Western Electric Company 1955 yılında silikon fotovoltaik teknoloji için ticari lisans satmaya başlamış, bu arada bazı özel uygulamalara güneş enerjisinden g   sağlanması amacıyla pratik bir takım sistemlerin geliştirilmesi için teşebbüsler olmuştur. Bununla beraber, elektrik güç generatörleri olarak kullanılabilir kadar yüksek dönüştürme verimli kristal silikon güneş hücrelerinin geliştirilmesi 1950'li yılların sonlarına kadar mümkün olmamıştır.

Kristal silikon güneş hücrelerinin geliştirilmesindeki en önemli itici güç uzay programları olmuştur. Enerjisi güneş pillerinden sağlanan ilk uydu olan Vanguard I, Amerika Birleşik Devletleri tarafından 1958 yılında uzaya gönderilmiştir. Bu tarihten sonra uzaya gönderilen uyduların tamamı, binlerce kristal silikon güneş hücresinden oluşan güneş modülleri tarafından beslenilmektedir. [14]

2.3 Yarı iletkenlerde Işığın Soğurulması

Elektromagnetik ışınım tarafından üretilen akımın değeri yarı iletkenin soğurma davranışı tarafından belirlenir. Işığı soğuran malzemenin gerçekte içerisine nüfuz eden oran $D=I-R$ olarak ifade edilir. Kırılma indisi $n_c=n-iK$ ifadesinden hesaplanabilir. Burada K s nme katsayısıdır. R yansıması ise

$$R = \frac{(n-1)^2 + K^2}{(n+1)^2 + K^2} \quad (2.1)$$

şeklinde verilir. $n(\lambda)$ ve $K(\lambda)$ gelen ışının λ dalga boyuna bağlıdır. Uygun değerler yerine konulduğunda, birçok yarı iletken için gelen ışının önemli bir kısmının yansdığı görülmektedir. Yansımayı azaltmak amacı ile kırılma indisi havanın kırılma indisi ile silisyumunki arasında bulunan ince bir yansımaya önleyici kaplama (örneğin SiO yada TiO_2) kullanılması verimi yükseltir.

Pil içerisinde üretilen akım, yaratılan elektron-delik çifti sayısına doğrudan bağlıdır ve bu sayı, enerjileri elektronları valans bandından iletim bandına geçirmeye yetecek foton sayısı ile belirlenir. Birim zamanda, birim alana düşen, birim enerjiye sahip foton sayısına $S_0(\lambda)$ dersek, kristalin içerisinde x mesafesindeki foton akısı

$$S(x, \nu) = S_0(\nu) \exp(-\alpha x) \quad \text{ve} \quad \alpha(\nu) = \frac{4\pi K\nu}{c} \quad (2.2)$$

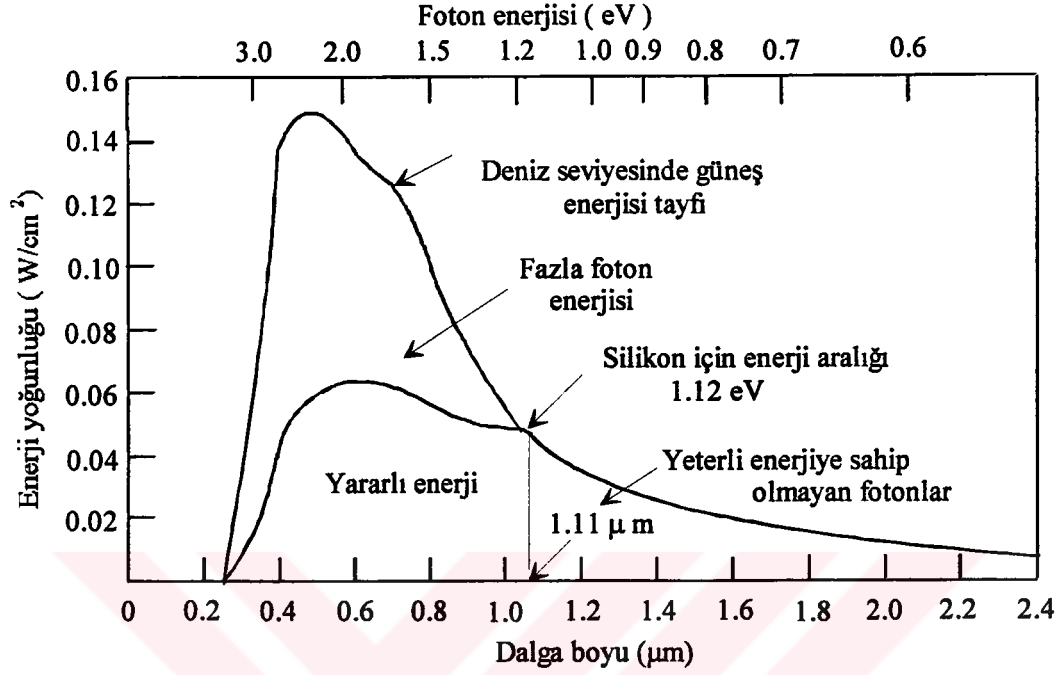
$\alpha(\nu)$ soğurma katsayısı yukarıdaki gibi olacak biçiminde üstel olarak azalır. Burada ν gelen ışığın frekansı, c ise ışık hızıdır. Kristal içerisine nüfuz eden fotonların oranı $S_0(\nu)(1-R)$ biçiminde verildiğinden, x ile $x+\Delta x$ arasındaki hacimde birim zamanda üretilen elektron-delik çifti sayısı, (2.2) ifadesinin x 'e göre türevi alınarak

$$G(x, \nu) = \alpha(\nu) S_0(\nu) (1-R) \exp(-\alpha(\nu) x) \quad (2.3)$$

şeklinde hesaplanabilir. Soğurulan foton enerjisinin yalnızca belirli bir oranının elektron-delik çiftinin üretimini sağladığını göz önüne alabilmek için ifadeye $\beta(\nu)$ kuantum verimi ilave edilmiştir. Çoğu bileşik yarı iletken için soğurum kenarı yakınlarında $\beta(\nu) \ll 1$ olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, elementel germanyum ve özellikle silikon için oda sıcaklığında soğurum kanarlarında dahi $\beta(\nu) \approx 1$ olarak ölçülmüştür. [15]

Güneş hücreleri, üzerlerine düşen ışık tayfının yalnızca dalga boyu uygun olan kısmına yanıt verdiklerinden, elde edilebilecek maksimum verim %20-30 arasındadır. Silikon için yasak enerji bandı aralığı E_g , 1.12 eV' tur. Yalnızca, enerjisi E_g 'den

büyük fotonlar elektron-delik çifti oluşturabileceklerinden, dalga boyu $1.11 \mu\text{m}$ 'den büyük ışınım silikon güneş pilinde fotovoltaik akımın oluşmasına katkıda



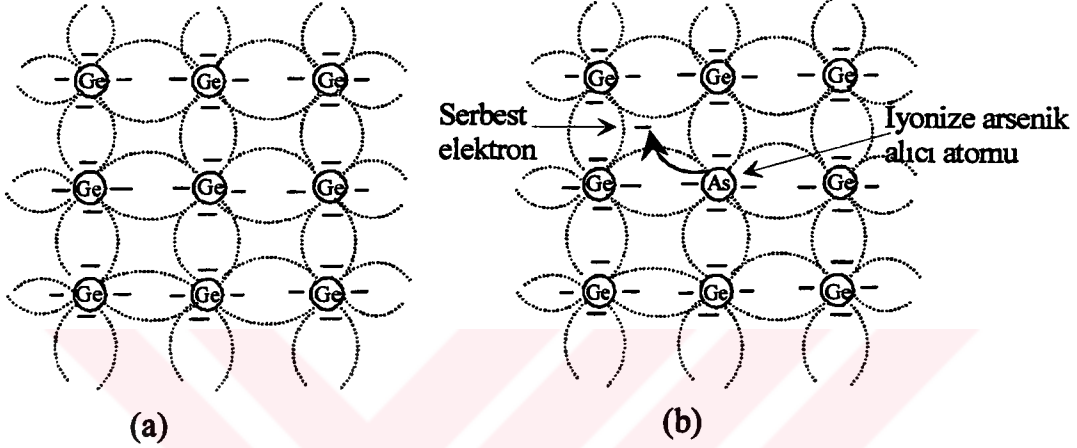
Şekil 2.1 Silikon Güneş Hücrelerinde Elektron-Boşluk Çifti Yaratılmasında Enerji Kullanımı

bulunamazlar ($\lambda = h.c/E_g$). Şekil 2.1'de elektron-delik çifti yaratabilecek enerjiye sahip fotonlara karşı düşen dalga boyu aralığı gösterilmiştir. Her bir foton yalnızca bir elektron-delik çifti oluşturabileceğinden, E_g 'nin üzerindeki enerji, yalnızca yarı iletkenin termal olarak ısınmasına neden olur. En yüksek foton enerjisi yeşil ışık için $h.\nu = 2.5 \text{ eV}$ civarındadır. [15], [18]

2.4 Fotoiletkenlik

Yarı iletken devre elemanlarının yapımında en çok kullanılan silisyum (Si) ve germanyum (Ge), atomlarının dış yörüngelerinde dörder valans elektronları bulunan elemanlardır. Bu tipten bir malzeme, içindeki yabancı atomlardan arıtıldıktan sonra gerektiği şekilde kristalleştirilirse düzgün bir yapı meydana getirir (has yarı iletken). Bu kristal yapıda atomların dörder tane olduğunu söylediğimiz valans elektronlarında her biri, iki Si atomu tarafından ortaklaşa kullanılır (Şekil 2.2 (a)). Valans elektronları

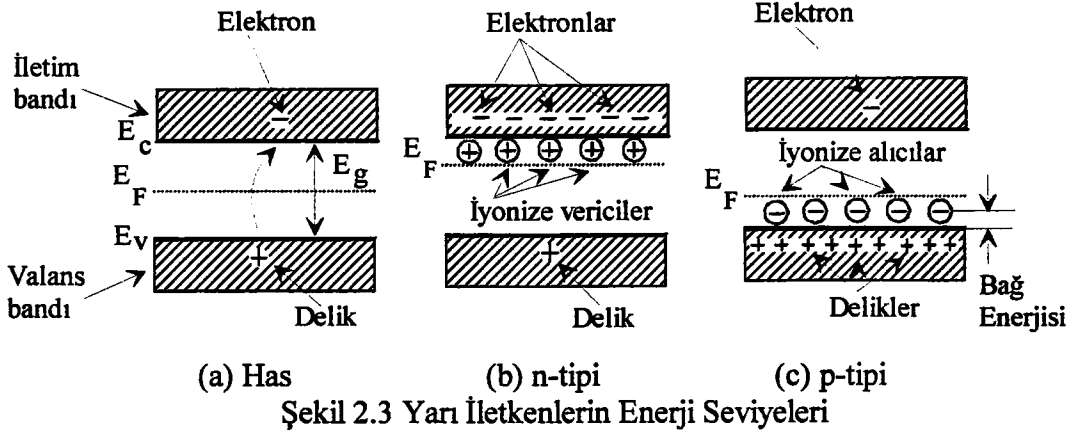
geçmesi için gerekli enerji yarı iletkenin cinsine bağlıdır. Oda sıcaklığında silisyum için $E_g = 1.12$ eV, germanyum için $E_g = 0.72$ eV 'dur. Demek oluyor ki bir uyarma ile kristal yapıdan bir elektron kopması yapı içinde iki tane akım taşıyıcısının (elektron-delik çiftinin) ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bir elektronun serbest hale geçmesi durumunda meydana gelen elektron eksikliği, o yerde bir pozitif yükün bulunması şeklinde yorumlanabilir. Bu -sözde- pozitif yüke delik denir.



Şekil 2.2 Germanyum Kristalinin Sembolik Gösterimi
(a) Has (b) Arsenik Katkılanmış

Düzgün kristal yapıya sahip bir has yarı iletkene dış kabuklarında beşer valans elektronu bulunan yabancı atomlar (örneğin ; P,As gibi) katılırsa, bu katkı atomları kristal yapıya, sanki birer yarı iletken atomu gibi, dört dış yörünge elektronları ile komşu atomlara bağlanarak yerleşirler (Şekil 2.2 (b)) . Açıkta kalan beşinci elektron, çekirdeğine valans bandı ile değil, elektrostatik çekim kuvveti ile bağlıdır. Dolayısıyla, bu elektronun iletim bandına geçerek serbest elektron haline geçmesi için gerekli bağ enerjisi çok düşüktür (fosfor için 0.044 eV). Bu şekilde oluşturulmuş yapılara n tipi yarı iletken denir (Şekil 2.3 (b)).

Has yarı iletkene dış yörüngelerinde üçer valans elektronu bulunan yabancı atomlar (örneğin Al, B gibi) katılırsa, bu atomların kristal yapıya yerleşebilmeleri için yakınlarındaki yarı iletken atomlarından birer elektron almaları gerekir. Böylece kendileri, yapı içinde yerleri belirli ve sabit olan birer negatif iyon haline geçerlerken, aldıkları elektronlardan kalan delikler, -sözde- pozitif yükler olarak kristal içinde rastgele dolaşmaya başlarlar (Şekil 2.3 (c)). Bu şekilde oluşturulmuş yapılara da p tipi yarı iletken denir. [13], [16], [17]



Eğer p_0 ve n_0 ışık altındaki homojen bir yarı iletkenin alıcı ve verici katkı yoğunluklarının belirlediği taşıyıcı yoğunlukları ise, elektron ve delik yoğunluklarındaki değişimler,

$$\delta p = p - p_0 \quad \text{ve} \quad \delta n = n - n_0 \quad (2.4)$$

şeklinde verilir. Bu durumda düzgün kristal yapıya sahip bir yarı iletken için taşıyıcı yoğunlukları,

$$p = N_v \exp \left(\frac{E_v - e\phi - E_{Fp}}{kT} \right) \quad (2.5a)$$

$$n = N_c \exp \left(-\frac{E_c - e\phi - E_{Fn}}{kT} \right) \quad (2.5b)$$

şeklinde verilir. Burada ϕ , $E = -\text{grad}(\phi)$ biçiminde ifade edilen elektrik alanını yaratan potansiyeldir. N_c ve N_v sırasıyla iletim ve valans bandı yoğunluklarını, e elektron yükünü, E_{Fn} ve E_{Fp} elektron ve boşluklar için Fermi enerjilerini, n ve p ise bunların yoğunluklarını göstermektedir.

İşık altındaki bir yarı iletkenindeki elektron ve boşluk akılarını veren en basit ifadeler,

$$J_p = e (p \mu_p E - D_p \text{grad } p) \quad J_n = e (n \mu_n E - D_n \text{grad } n) \quad (2.6)$$

akı yoğunluğu denklemleri ile aşağıdaki süreklilik denklemleridir.

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{e} \operatorname{div} J_p + G_p - \frac{\delta p}{\tau_p} \quad \frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{e} \operatorname{div} J_n + G_n - \frac{\delta n}{\tau_n} \quad (2.7)$$

D_n ve D_p yayınma katsayıları, μ_n ve μ_p taşıyıcıların hareket yeteneği olmak üzere, $D = (KT/e)\mu$ şeklindeki genel Einstein denkleminde bulunurlar. Işık tarafından yaratılan taşıyıcılar için, elektron ve delik oluşma hızları eşittir ($G_n = G_p = G$). τ_n ve τ_p elektronların ve boşlukların ömürlerini göstermektedir.

Dışarıdan bir E elektrik alanı uygulandığı ve akım aktığı zaman, toplam akım yoğunluğu (2.6) ifadesinden,

$$J = J_p + J_n = \sigma E \quad (2.8)$$

şeklinde elde edilir. Burada iletkenlik,

$$\sigma = e (p\mu_p + n\mu_n) \quad (2.9)$$

biçimindedir. (2.4) ifadesindeki n ve p yukarıdaki ifadede yerlerine konulursa, iletkenlik σ_0 karanlık iletkenlik ve σ_{ph} fotoiletkenlik olacak biçimde iki kısma ayrılabilir.

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_{ph} \quad (2.10)$$

$$\sigma_0 = e (p_0\mu_p + n_0\mu_n) \quad (2.11)$$

$$\sigma_{ph} = e (\mu_p + \mu_n) G\tau \quad (2.12)$$

Katkılanmış kristallerde karanlık iletkenlik çoğunluk taşıyıcıların yoğunluğuna ve hareket yeteneğine bağlı iken, fotoiletkenlik azınlık taşıyıcıların ömürleri ile belirlenir. [15]

2.5 p-n Jonksiyonu

Fotovoltaik enerji dönüşümü için, elektron ve boşlukların bir iç elektriksel alan tarafından birbirlerinden ayrılması gerekir. Güneş hücresi yarı iletkenlerinde bu amaç için kullanılan en yaygın yapı p-n jonksiyonudur.

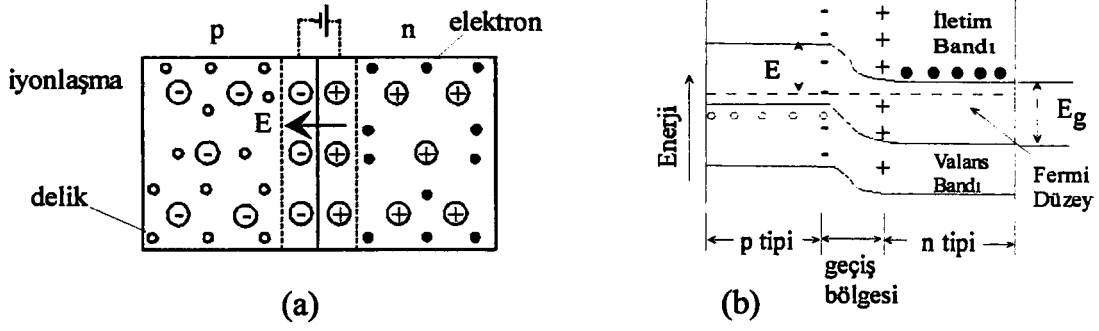
Bir yarı iletken parçasının bir bölgesinin p tipi, bir bölgesinin de n tipi olacak şekilde katkılanmasıyla elde edilen yapıya (p-n jonksiyonu) $h\nu$ foton enerjisi, E_g çıkış enerjisinden büyük bir elektromagnetik ışıınım geldiği zaman, valans bandında bulunan elektronlar iletim bandına geçmek için gerekli enerjiyi kazanırlar ve elektron-delik çifti oluştururlar. Bunun sonucunda p tipi bölgede çok sayıda bulunan delikler n tipi bölgeye doğru ve n tipi bölgede çok sayıda bulunan elektronlar p tipi bölgeye doğru difüzyonla yayılmaya başlarlar. Ancak bu olay sürüp gidemez ; n tipi bölge sınırını geçen delikler bu bölgede çok sayıda bulunan elektronlarla birleşerek birbirlerini yok ederler, benzer şekilde p tipi bölge sınırından içeriye giren elektronlar da bu bölgedeki deliklerle birleşirler. Bu birleşmeler sonucunda p-n geçiş yüzeyinin (jonksiyonunun) iki yanındaki serbest taşıyıcılar hızla azalarak taşıyıcılar bakımından fakirleşmiş bir bölge meydana gelmesine yol açarlar. Bu fakirleşmiş bölge yahut geçiş bölgesinin n tipi yarı iletken içinde kalan kısmında, kristal yapıya yerleşirken birer elektron vererek pozitif iyon haline gelen katkı atomları, pozitif bir yük oluştururlar. Benzer şekilde geçiş bölgesinin p tipi yarı iletken içinde kalan kısmında da negatif bir yük birikimi oluşur . Bunun sonucunda Şekil 2.4 (a)' da görüldüğü gibi bir elektrik alan ve jonksiyon uçlarında potansiyel farkı oluşur ve elektronların sağdan sola doğru, deliklerin de soldan sağa doğru hareketleri yavaşlar ve sonunda durur. Bu potansiyel farkı, her iki bölgenin Fermi seviyeleri aynı seviyeye gelene kadar p tipi bölgenin enerji seviyesinin yukarıya çıkmasına, n tipi bölgenin enerji seviyesinin ise aşağıya inmesine neden olur ve sistem denge durumuna erişir (Şekil 2.4 (b)).

Işık ön yüzeyden içeri girip kristal içerisine nüfuz ettiği zaman, x uzaklığında yaratılan elektron ve deliklerin sayısı $G(x, \nu)$ oluşma hızı tarafından belirlenir. [18]

Jonksiyonun p ve n bölge sınırlarındaki Fermi enerjileri,

$$E_{Fp} = E_F - eU \quad x = x_n \quad (2.13a)$$

$$E_{Fn} = E_F + eU \quad x = x_p \quad (2.13b)$$



Şekil 2.4 p-n Jonksiyonu (a) İç Akım (b) Enerji Seviyeleri

olup taşıyıcı yoğunlukları,

$$\delta_p = \frac{n_i^2}{N_D} \left(\exp \frac{eU}{kT} - 1 \right) \quad x = x_n \quad (2.14a)$$

$$\delta_n = \frac{n_i^2}{N_A} \left(\exp \frac{eU}{kT} - 1 \right) \quad x = x_p \quad (2.14b)$$

şeklinde. Jonksiyon dışındaki elektrik alan ihmal edilirse, n ve p bölgelerindeki taşıyıcı yoğunlukları,

$$D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = -G + \frac{\delta p}{\tau_p} \quad D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} = -G + \frac{\delta n}{\tau_n} \quad (2.15)$$

olarak elde edilir. Yarı iletkenin dışarıdan bir kaynak tarafından uyarılmadığı durumda sınır koşulları $x = x_n$ için $\delta p \approx 0$ ve $x = x_p$ için $\delta n \approx 0$ olmaktadır. Ön ve arka yüzeylerdeki taşıyıcı yoğunlukları S_p ve S_n yüzey birleşme hızları tarafından belirlenir.

$$D_p \frac{\partial p}{\partial x} = S_p \delta_p \quad x = 0 \quad (2.16a)$$

$$-D_n \frac{\partial n}{\partial x} = S_n \delta_n \quad x = W_p + x_p \quad (2.16b)$$

Burada W_p ve W_n sırasıyla p ve n bölgelerinin genişlikleridir. Bu durumda azınlık akım yoğunlukları,

$$J_p = -eD_p \frac{\partial p}{\partial x} \quad J_n = eD_n \frac{\partial n}{\partial x} \quad (2.17)$$

olmakta, bu ifadeler genel çözümde yerlerine konulduklarında ise sonuçta,

$$J_p = e\beta S_0(1-R) \frac{\alpha L_p}{(\alpha L_p)^2 - 1} \{F_{p1} - F_{p2} \exp(-\alpha W_n)\} \quad (2.18)$$

$$J_n = e\beta S_0(1-R) \frac{\alpha L_n}{(\alpha L_n)^2 - 1} \exp(-\alpha x_p) \{F_{n1} - F_{n2} \exp(-\alpha W_p)\} \quad (2.19)$$

olarak elde edilmektedir. Bu arada geçiş bölgesinde de bir miktar fotovoltaiik akım oluşmaktadır. Bu bölgede elektrik alan yüksek olduğundan, üretilen elektron ve delikler bölgenin dışına doğru hareketlendirilirler. Eğer birleşerek yok olmaları yine dikkate alınmazsa, bu durumda elde edilecek akım yoğunluğu, soğurulan foton sayısına eşit olur.

$$J_{dp} = e\beta S_0(1-R) \exp(-\alpha x_n)(1 - \exp(-\alpha W)) \quad (2.20)$$

Burada $W = x_p - x_n$ geçiş bölgesinin genişliğidir.

Azınlık akımları için türetilen bu ifade, soğurulan ışığın frekansına bağlıdır. Dolayısıyla, toplam I_p akımı, $J_p = J_p + J_n + J_{dp}$ fotoakım yoğunluklarının tüm güneş tayfı üzerinden entegre edilmesinden hesaplanabilir.

$$I_p = A \int_{\nu_m}^{\infty} (J_p + J_n + J_{dp}) d\nu \quad (2.21)$$

Burada $h\nu_m$ elektron-delik çifti oluşturabilecek en küçük foton enerjisini, A ise aktif güneş hücresi alanını göstermektedir. Yukarıdaki ifadede yer alan terimlerin tümü $eS_0(1-R)$ faktörü ile orantılıdır. Dolayısıyla, I_p fotovoltaiik akımı kristale giren ışığın şiddeti ile orantılıdır.

Bir güneş hücresinden elde edilebilecek maksimum akım I_p ' dir. Bir elektrik devresine bağlı bulunan güneş hücresinin vereceği akım ise, cihazın akım-gerilim karakteristiği üzerindeki çalışma noktası ve dış yük direnci tarafından belirlenen daha düşük bir değer olacaktır. V jonksiyon üzerindeki gerilim düşümü olmak üzere, p-n jonksiyonlu ideal bir güneş hücresinin akım-gerilim karakteristiği,

$$I = I_S \left\{ \exp \frac{eV}{kT} - 1 \right\} - I_p \quad (2.22)$$

şeklinde olur. Yukarıdaki ifadede yer alan I_S doyma akımı ise, F_n ve F_p elektron ve deliklerin birleşme hızlarına bağlı katsayılar olmak üzere,

$$I_S = e A N_c N_v \left\{ \frac{D_n F_p}{L_n N_A} + \frac{D_p F_n}{L_p N_D} \right\} \exp \left(- \frac{E_g}{k T} \right) \quad (2.23)$$

biçimindedir.

Geçiş bölgesindeki birleşmeler göz önüne alınırsa, (2.22) ifadesindeki difüzyon akımının yanısıra bir birleşme akımı da söz konusu olacaktır. Eğer geçiş bölgesindeki elektron ve deliklerin R_0 birleşme hızları sabitse, birleşme akımı,

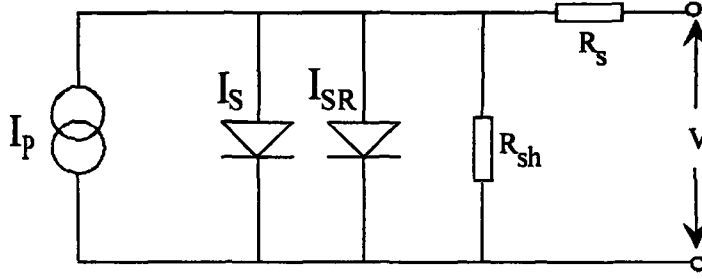
$$I_{rec} = I_{SR} \left(\exp \frac{eV}{2kT} - 1 \right) \quad (2.24)$$

olur. Bu durumda bir p-n jonksiyonunun akım-gerilim karakteristiklerini veren en genel ifade, (2.22) ve (2.24) ifadeleri birleştirilerek,

$$I = I_p - I_S \left\{ \exp \frac{eV}{kT} - 1 \right\} - I_{SR} \left(\exp \frac{eV}{2kT} - 1 \right) \quad (2.25)$$

şeklinde elde edilir.

Yarı iletkenin kütle direnci ile kontakların direncini ifade eden R_s seri direnci ve hücrenin uçları çevresindeki kaçak akımları ifade eden R_{sh} paralel direnci de göz



Şekil 2.5 Bir Güneş Hücresinin Çift Diyotlu Elektriksel Eşdeğer Devresi

önüne alınırsa, bir p-n jonksiyonun akım-gerilim karakteristiğini veren eşdeğer Şekil 2.5'deki gibi, ifade ise aşağıdaki gibi olur; [15], [19], [20]

$$I = I_p - I_S \left\{ \exp \frac{e(V + IR_s)}{kT} - 1 \right\} - I_{SR} \left(\exp \frac{e(V + IR_s)}{2kT} - 1 \right) + \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.26)$$

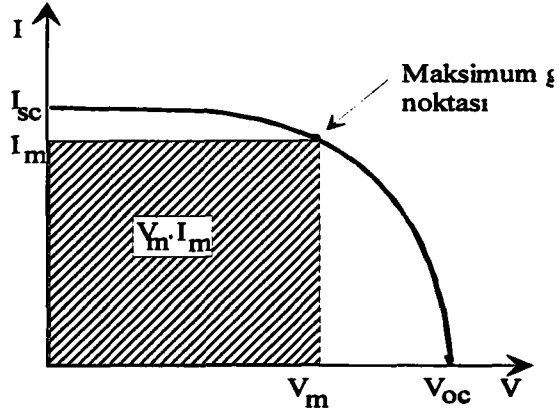
2.6 Temel Güneş Hücresi Parametreleri

Bir güneş hücresinin performansını tümüyle anlatabilmek için hücrenin akım-gerilim bağıntısına ihtiyaç vardır. Bununla birlikte, özellikle pratik amaçlar için çoğu zaman akım-gerilim bağıntısını yalnızca birkaç parametre ile karakterize etmek yeterlidir.

Bir güneş hücresinin Şekil 2.6'da gösterilen tipik akım-gerilim eğrisi göz önüne alınırsa, hücrenin elektriksel davranışı üç parametre ile tanımlanabilir.

Bu parametrelerin ilki, $V = 0$ için elde edilen I_{sc} kısa devre akımıdır. (2.26) ifadesini göz önüne alırsak, R_s seri direncinin sıfır olması durumunda I_{sc} 'nin ışık tarafından üretilen I_p akımına eşit olacağı açıktır ($I_{sc} = I_p$). R_s direncinin sıfırdan farklı olması durumunda, I_{sc} akımı bu değerden daha düşük bir değer alır.

İkinci parametre, $I = 0$ için elde edilen V_{oc} açık devre gerilimidir. Yine (2.26) ifadesi göz önüne alınırsa, V_{oc} 'nin ancak $I_{SR} = R_s = 0$ ve $R_{sh} = \infty$ ideal durumu için nümerik olarak olarak çözülebileceği ve,



Şekil 2.6 Bir Güneş Pili Hücresinin Akım-Gerilim Karakteristiği

$$V_{oc} = \frac{kT}{e} \ln \left\{ \frac{I_p}{I_s} + 1 \right\} \quad (2.27)$$

biçiminde analitik olarak ifade edilebileceği görülür. V_{oc} açık devre gerilimi I_p/I_s oranı tarafından belirlenmektedir.

Bir güneş hücresinin akım-gerilim eğrisi üzerindeki çalışma noktası, yük direnci tarafından belirlenir. Elektriksel çıkış gücü $P = I.V$, bu çalışma noktasının V ve I değerleri tarafından belirlenen dikdörtgenin alanına eşittir. Basitlik açısından, (2.22) ifadesinde verilen ideal diod davranışı göz önüne alınırsa,

$$P = \left\{ I_p - I_s \left[\exp \left(\frac{eV}{kT} \right) - 1 \right] \right\} V \quad (2.28)$$

şeklinde olur. Bu ifadenin V 'ye göre türevi alınıp sifıra eşitlenirse, maksimum çıkış gücünü veren V_m gerilimi bulunur.

$$\left\{ I_p - I_s \left[\exp \left(\frac{eV}{kT} \right) - 1 \right] \right\} + V_m \left\{ -I_s \left[\frac{e}{kT} \exp \left(\frac{eV_m}{kT} \right) \right] \right\} = 0 \quad (2.29)$$

yada,

$$\exp \left(\frac{eV_m}{kT} \right) \left(1 + \frac{eV_m}{kT} \right) = 1 + \frac{I_p}{I_s} \quad (2.30)$$

Gücü maksimum yapan V_m gerilimi, eğer I_{sc} kısa devre akımı, I_s ters yöndeki doyma akımı ve T mutlak sıcaklığı biliniyorsa, yukarıdaki ifadeden bulunabilir.

Çıkış gücünü maksimum yapan I_m akımı ise, yukarıda bulunan V_m ifadesi (2.22) ifadesinde yerine konularak,

$$I_m = I_{sc} - I_s \left[\exp\left(\frac{eV_m}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.31)$$

$$= \frac{e V_m / kT}{1 + (e V_m / kT)} (I_{sc} + I_s) \quad (2.32)$$

şeklinde elde edilir. Bu durumda P_{in} , güneş hücresine gelen ışının toplam gücü olmak üzere, bir güneş hücresinden elde edilebilecek maksimum verim,

$$\eta_m = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{V_m I_m}{P_{in}} \quad (2.33)$$

şeklinde olur. [21]

BÖLÜM 3

GÜNEŞ PİLİ DİZİLERİNİN MODELLENMESİ VE SİMÜLASYONU

3.1 Giriş

Güneş pili modüllerden elde edilen enerji, aydınlanma seviyesi ve ortam sıcaklığı gibi çevresel parametrelere bağlı olduğundan, modüller için bu faktörleri değişken kabul eden simülasyon modellerinin kurulması istenilir. Simülasyon, karmaşık olayların ve durumların modellenmesi ya da ifade edilmesidir. Bu modeller, çıkış gücü için doğru tahminlerin yapılmasına izin vereceği gibi, değişik iklim koşullarının sistem performansı üzerindeki etkilerinin incelenmesine de izin verir

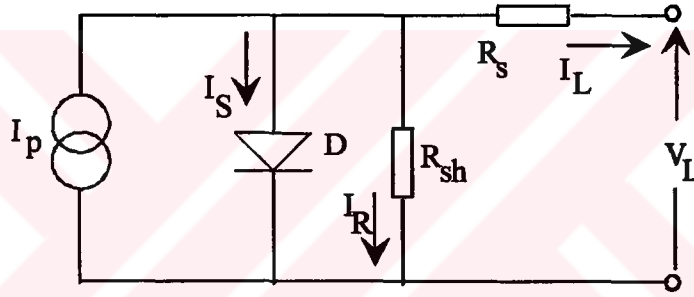
Güneş pili hücrelerini simüle etmek için SPICE yada benzeri bir simülasyon program paketinin kullanılması, güneş sistemi modelini oldukça esnek ve güvenilir yapar. Bu, sistem tasarımcısının, parametreleri geniş bir aralıkta değiştirmek suretiyle sistemin çalışma karakteristiklerini araştırmasına imkan tanır. Hesaplama süresi bu çeşit uygulamalar için sınırlayıcı bir faktör değildir. Ayrıca, modeli basitleştirmek için güneş hücresinin sıcaklığı ve paralel direnci gibi parametrelerin etkisini ihmal etmeye gerek yoktur. Her bir parametre değişiminin etkisi kolaylıkla incelenebilmektedir. [22],[23]

Bu bölümde ilk olarak güneş pili hücrelerinin akım-gerilim karakteristiklerini elektriksel devre elemanları ile simüle eden bir model incelenmiştir. İkinci olarak hücrelerin akım-gerilim karakteristiklerinin nümerik olarak simülasyonlarına imkan veren diğer bir yöntem araştırılmıştır. Son kısımda ise güneş pili hücrelerinin modellenmesinde yine temel elektriksel devre elemanları kullanılarak geliştirilen yeni bir yöntem önerilmiştir. Ayrıca bu yeni model ile eşdeğer devre ve nümerik analize dayanan diğer

modellerden elde edilen simülasyon sonuçları, gerçek elemanın davranışı ile karşılaştırılmış ve bağıl hatalar hesaplanmıştır. [24]-[27]

3.2.1 Güneş Pili Hücrelerinin Eşdeğer Devre Yaklaşımı İle Modellenmesi

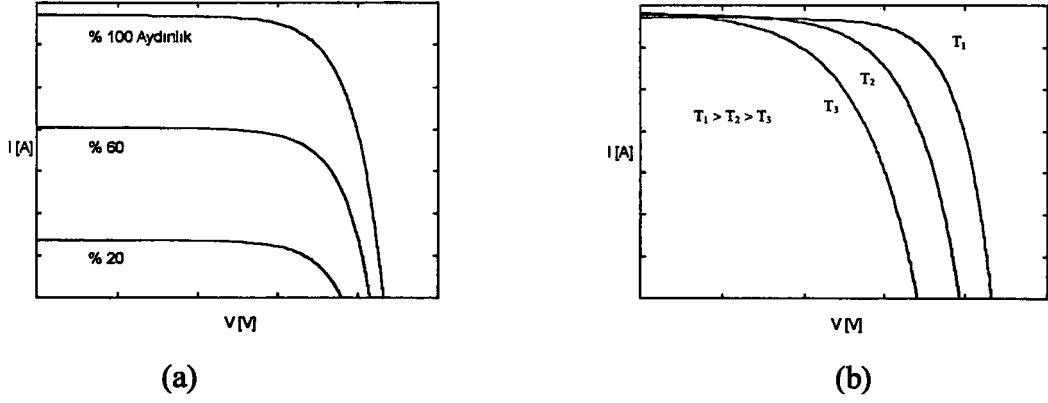
Güneş hücresi, güneş radyasyonunu elektriksel enerjiye dönüştüren yarı iletken bir elemandır ve Şekil 2.5’de gösterildiği gibi lineer olmayan bir akım-gerilim karakteristiğine sahiptir. p-n jeksiyonun geçiş bölgesindeki elektron ve delik birleşmelerinin ihmal edilmesi durumunda, bir güneş hücresinin eşdeğer devresi Şekil 3.1’deki gibi olur. Devredeki I_p akım kaynağı ışık tarafından üretilen akımı, D diyodu silikon hücrenin p-n jonksiyonunu, R_{sh} ve R_s ise güneş hücresinin paralel ve seri iç dirençlerini temsil etmektedir. [28]



Şekil 3.1 Güneş Hücresinin Elektriksel Eşdeğer Devresi

I_p akımının değeri (2.21) ifadesinde verilen yarı iletken karakteristiklerine, hücre sıcaklığına ve aydınlanma seviyesine bağlıdır. I_p akımı sıcaklık arttıkça çok az miktarda artarken, aydınlanma seviyesine doğrudan bağlıdır ve doğru orantılıdır.

Kısa devre gerilimi ise sıcaklık arttıkça Şekil 3.2’de gösterildiği gibi azalmaktadır. Bunun bir sonucu olarak, hücreden elde edilebilecek çıkış gücü sıcaklıkla azalır. Silikon için, çıkış gücünün $^{\circ}\text{C}$ başına % 0.4 - 0.5 azaldığı kanıtlanmıştır.



Şekil 3.2 I-V karakteristiklerinin (a) aydınlanma şiddeti (b) sıcaklık ile değişimi

Bir güneş pili dizisinin simülasyonu, dizinin çalışmasını analitik olarak ifade eden matematiksel modelin geliştirilmesine dayanır. Yukarıdaki eşdeğer devrede yer alan parametrelerin analitik ifadeleri aşağıda verilmiştir :

$$I_p = \{I_{sc} S_N + I_t(T_c - T_r)\} N_p \quad (3.1)$$

$$I_s = \left\{ I_0 \left[e^{\frac{q V_L}{A k T_c N_s}} - 1 \right] \right\} N_p \quad (3.2)$$

$$I_0 = I_{or} \left[\frac{T_c}{T_r} \right]^3 e^{\frac{q E_g}{B k} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_c} \right)} \quad (3.3)$$

$$S = 100 \sin[15xSH - 90^\circ] \quad (3.4)$$

burada,

I_p = Işık tarafından üretilen akım [A]

I_t = Kısa devre akımı sıcaklık katsayısı [A/ °K]

I_s = Diyot akımı [A]

I_0 = Diyodun ters doyma akımı [A]

I_{0r} = Diyodun referans sıcaklıktaki ters doyma akımı [A]

V_L = Yük gerilimi

S_N = Normalize aydınlık şiddeti

S = Aydınlık şiddeti [W/m^2]

A, B = Üretici firmalar tarafından verilen diyot ideallik faktörleri

T_c = Hücre çalışma sıcaklığı [$^{\circ}K$]

T_r = Referans hücre sıcaklığı [$^{\circ}K$]

N_p = Paralel panel sayısı

N_s = Seri panel sayısı

E_g = Yarı iletken malzemenin band aralığı [1.11V]

k = Boltzmann sabiti

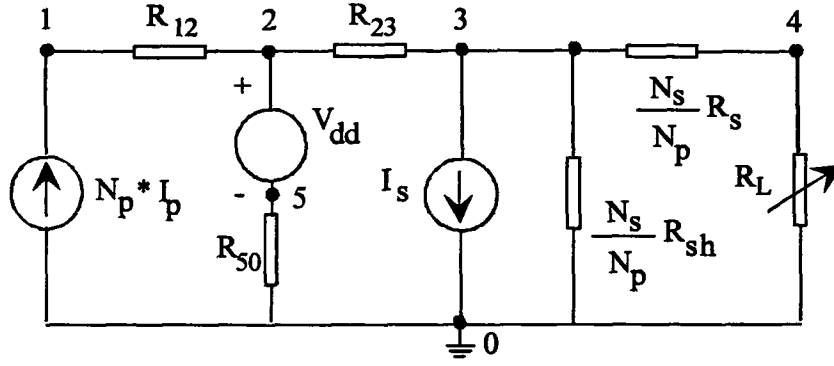
q = Elektrik yükü [C]

SH = Zaman [6a.m.-6p.m.]

3.2.2 Güneş Pili Dizilerinin PSPICE 'da Simülasyonu

Güneş pili dizilerini PSPICE 'da simüle etmek amacıyla kullanılan model Şekil 3.3' te gösterilmiştir. Bu model yukarıda verilen ifadelerin elektriksel devre karşılığıdır. PSPICE algoritması, I_p akım kaynağı ile diyodun akımını temsil eden I_s akım kaynağı arasında kısa devre akımı oluşmasını önlemek amacıyla çok küçük değerli de olsa R_{12} , R_{23} dirençleri gerektirmektedir. Program kodu EK A' da verilmiştir.

Güneş pili dizilerinin I-V karakteristiklerini çıkarmanın en kolay yolu, yük olarak değişken değerli bir direnç kullanmaktır. Önceden de anlatıldığı gibi, kısa devre akımı aydınlık şiddetine bağlıdır. Verilen modelde aydınlık şiddetinin (3.4) ifadesi ile günün belirli saatlerinde belirli değerler aldığı kabul edilmiştir. Eğer analiz için belirli bir aydınlık şiddetine ihtiyaç varsa, bu değer program koduna parametre olarak girilebilir.



Şekil 3.3 Güneş Pili Dizilerinin PSPICE Modeli

Simülasyon için Siemens M55 modülleri referans alınmıştır. M55 modülünün standart test koşulları altındaki (1000 W/m^2 ışık şiddeti ve 25°C çevre sıcaklığı) elektriksel karakteristikleri Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1 M55 Modülünün Elektriksel Karakteristikleri

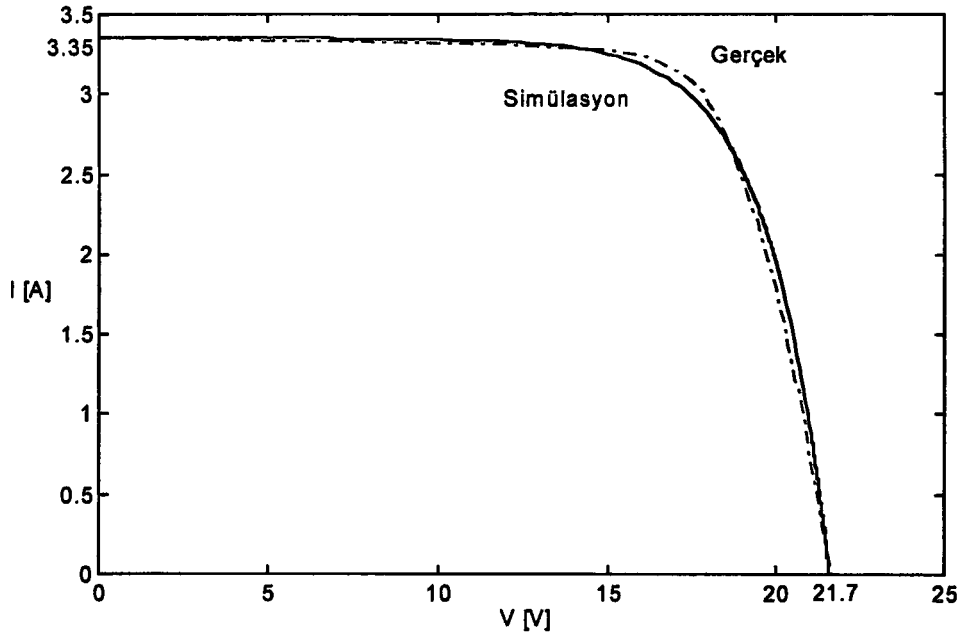
Maksimum Güç	53 W
Açık Devre Gerilimi (V_{oc})	21.7 V
Kısa Devre Akımı (I_{sc})	3.35 A
Anma Gerilimi	17.4 V
Anma Akımı	3.05 A

3.2.3 Simülasyon Sonuçları

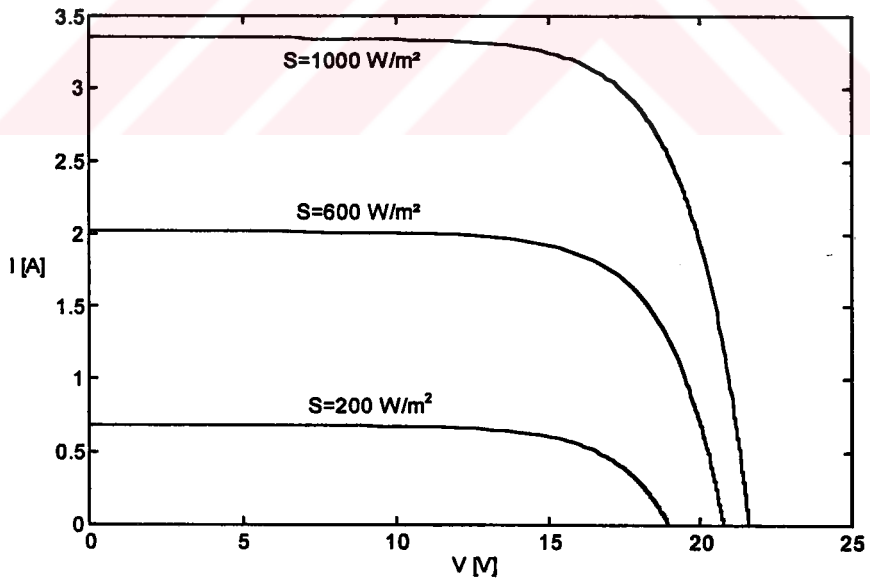
Standart test koşulları için, yukarıda kullanılan modelden elde edilen simülasyon sonuçları ile M55 modülünün katalogunda verilmiş olan I-V eğrileri Şekil 3.4’de karşılaştırılmıştır.

Değişik ışık şiddetleri için (200 , 600 ve 1000 W/m^2) elde edilen I-V ve P-V eğrileri sırasıyla Şekil 3.5 ve Şekil 3.6’da verilmiştir. Buradan da görüldüğü gibi, ışık şiddeti ile güneş pillerinden elde edilen güç artmaktadır.

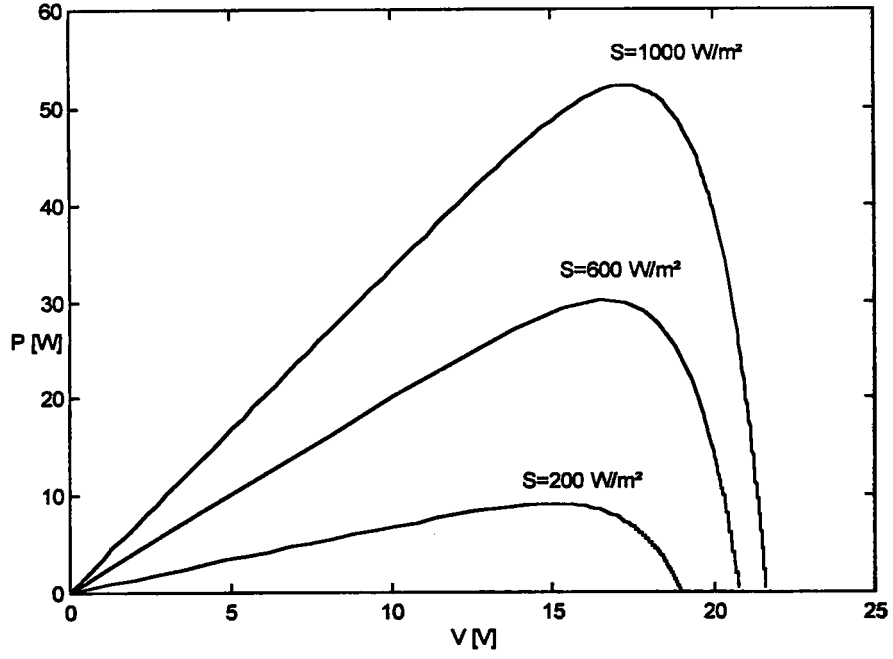
Yukarıda da bahsedildiği gibi, sıcaklığın güneş pili hücresinin daha çok açık devre gerilimi V_{oc} üzerinde etkisi vardır. Bu etkiyi incelemek üç değişik sıcaklık için



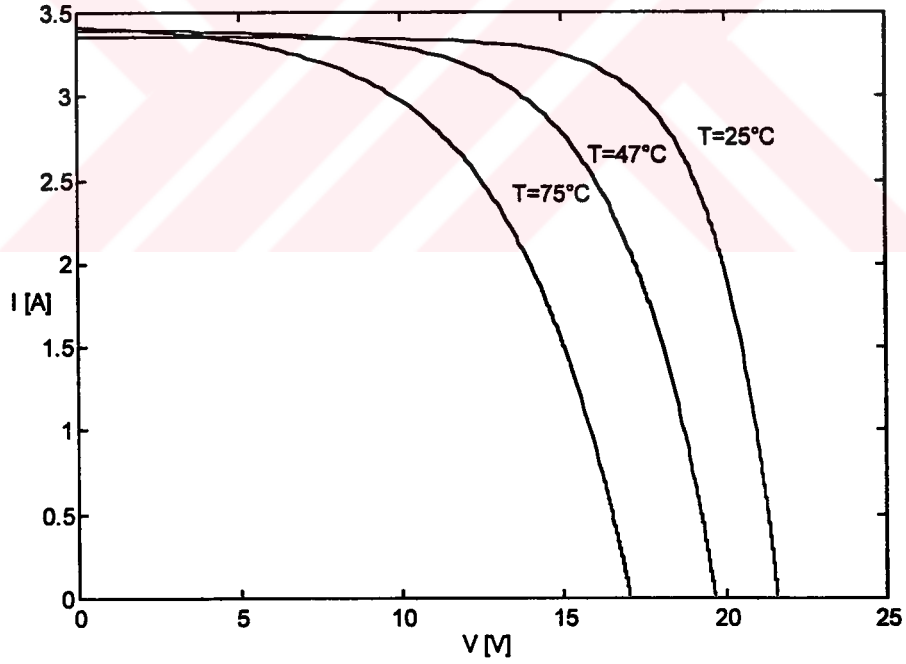
Şekil 3.4 Standart Test Koşulları İçin ($S=1000 \text{ W/m}^2$ ve $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$), Simülasyondan Elde Edilen Sonuçlar ile Katologdan Elde Edilen I-V Eğrisinin Karşılaştırılması



Şekil 3.5 Farklı Aydınlanma Seviyeleri İçin I-V Karakteristikleri ($T=25 \text{ }^\circ\text{C}$)

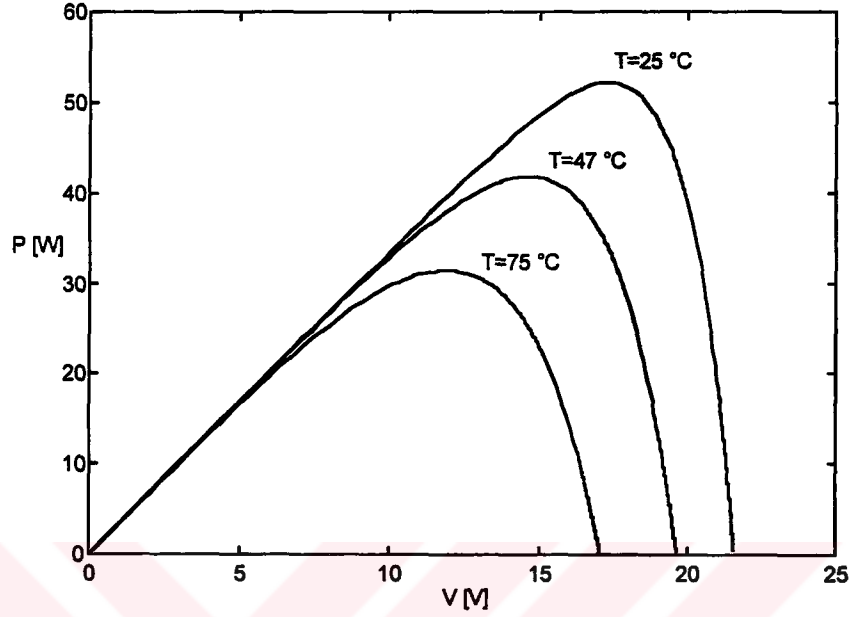


Şekil 3.6 $S=200 \text{ W/m}^2$, $S=600 \text{ W/m}^2$ ve $S=1000 \text{ W/m}^2$ için P-V Eğrileri ($T=25^\circ\text{C}$)



Şekil 3.7 Değişik Ortam Sıcaklıklarında $S=1000 \text{ W/m}^2$ için I-V karakteristikleri

(25, 47 ve 75 °C) simülasyon yapılmıştır. Şekil 3.7'deki simülasyon sonuçlarından da görüldüğü gibi sıcaklık arttıkça açık devre gerilimi azalmaktadır. Açık devre geriliminin düşmesi pilden elde edilebilecek gücün azalmasına neden olmaktadır (Şekil 3.8).



Şekil 3.8 Değişik Sıcaklıklar İçin P-V Eğrileri ($S=1000 \text{ W/m}^2$)

3.3.1 Güneş Pillerinin Akım-Gerilim Karakteristiklerinin Nümerik Analize Dayalı Simülasyonu

Güneş pili hücrelerinin elektriksel karakteristiklerinin incelenmesinde, ikinci bölümde türetilen iki diyotlu model yaygın olarak kullanılmaktadır. Aşağıda eşdeğer devresi verilen bu modelin akım ve gerilimleri arasındaki ilişki Kirchhoff' un ilk kanununa uygun biçimde, bir fonksiyon olarak aşağıdaki gibi yazılabilir ;

$$0 = f(V, I) \quad (3.5)$$

$$= I_P - I_S \left(\exp\left(\frac{V + IR_s}{m_1 V_T}\right) - 1 \right) - I_{SR} \left(\exp\left(\frac{V + IR_s}{m_2 V_T}\right) - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} - I$$

Burada;

I_p = fotovoltaiik akım

I_s = birinci diyodun doyma akımı (difüzyon akımı)

I_{SR} = ikinci diyodun doyma akımı (yeniden birleşme akımı)

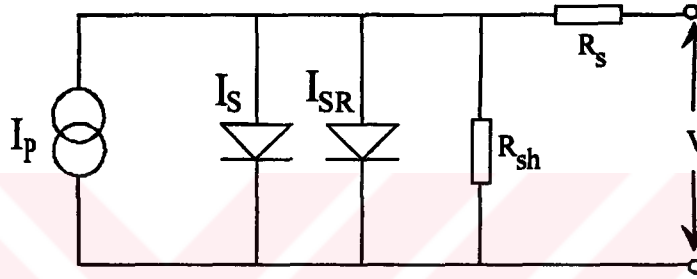
I = güneş hücresi çıkış akımı

m_1, m_2 = diyotların ideallik faktörleri

$V_T (kT/q)$ = sıcaklık gerilimi

R_s = güneş hücresi seri iç direnci

R_{sh} = güneş hücresi paralel direnci



Şekil 3.9 Bir Güneş Hücresinin Çift Diyotlu Elektriksel Eşdeğer Devresi

Diyotların doyma akımları, sıcaklık gerilimi ve fotovoltaiik akım sıcaklığa bağımlı parametrelerdir. Fotovoltaiik akım aynı zamanda aydınlanma seviyesine de bağımlıdır. Dolayısıyla, ışık şiddeti ve sıcaklık değıştikçe bu parametreler değıştirilmelidir. [29]

3.3.2 Güneş Hücresinin Simülasyonu

Hücresinin akım-gerilim eğrisini modelleyebilmek için, verilen her bir V gerilim değeri için I akımını hesaplamak gereklidir. Hücresinin akım-gerilim denklemi açık (explicit) yapıda olmadığı için, karakteristik eğriyi belirleyebilmek için normal olarak nümerik yöntemler kullanılır.

Güneş pili hücrelerinin $f(V, I) = 0$ biçimindeki denklemi yukarıda verilmiştir. Verilen herhangi bir V gerilimindeki I akımının değeri, (3.5) denkleminin tek olduğu umulan kökünden bulunur. Tek olan bu kökü belirleyebilmek için, diğer yöntemlere göre

önemli bazı avantajları olan Newton-Raphson yönteminin kullanılması tavsiye edilmektedir. Bu algoritmanın ana fikri aşağıda kısaca anlatılmıştır. I_0 başlangıç koşulundan başlayarak, aşağıdaki iterasyon gerçekleşir :

$$I_{i+1} = I_i - \frac{f(V, I_i)}{\frac{\partial f(V, I_i)}{\partial I}} \quad (3.6)$$

İterasyon esnasında hesaplanan ardışıl iki değer arasındaki farkın mutlak değeri belirli bir ε değerinin altına düştüğü zaman iterasyon durdurulur ($|I_{i+1} - I_i| < \varepsilon$). (3.6) ifadesinin türevi aşağıdaki gibidir ;

$$\frac{\partial (V, I)}{\partial I} = -\frac{I_s R_s}{m_1 V_T} \exp\left(\frac{V + I R_s}{m_1 V_T}\right) - \frac{I_{SR} R_s}{m_2 V_T} \exp\left(\frac{V + I R_s}{m_2 V_T}\right) - \frac{R_s}{R_p} - 1 \quad (3.7)$$

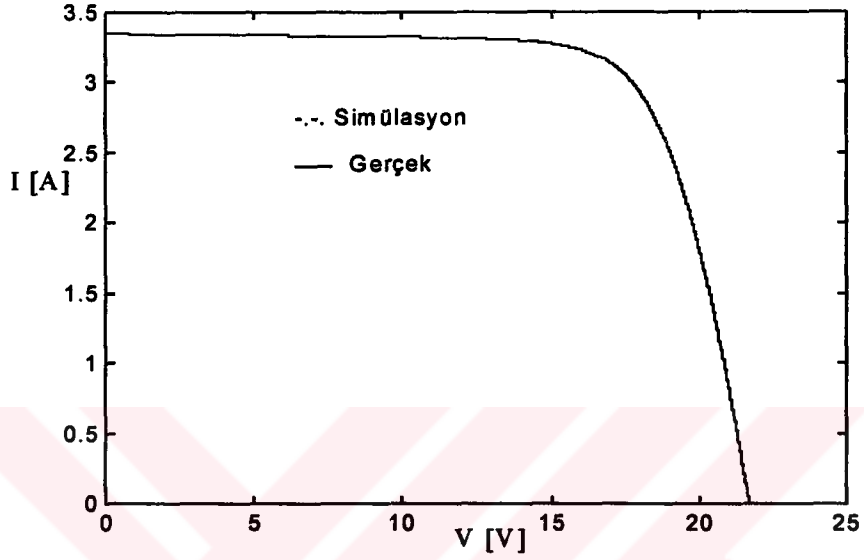
Newton-Raphson algoritması herhangi bir bilgisayar programı ile kolaylıkla gerçekleştirilebilir. Bu algoritma, kökün yakınlardaki başlangıç değerleri için oldukça hızlı ve kuadratik olarak yakınsadığı için birkaç adımda çözüme ulaşılabilir.

3.3.3 Simülasyon Sonuçları

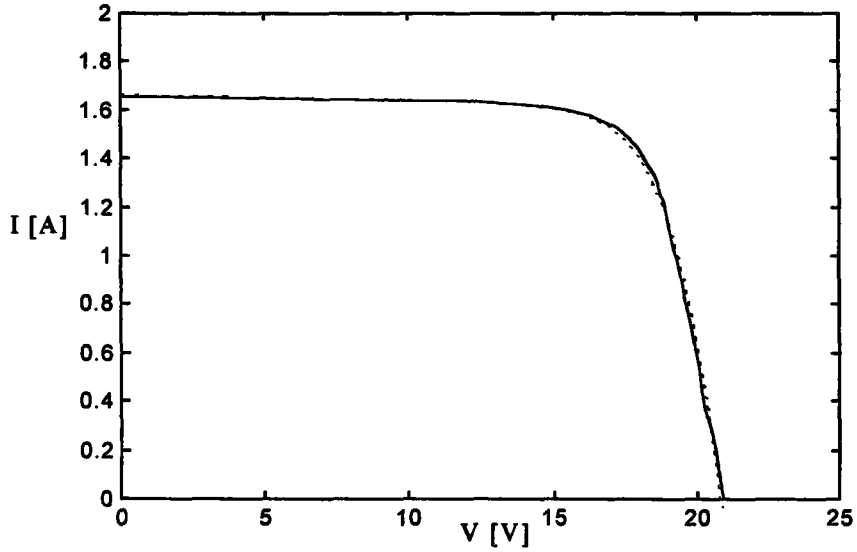
Güneş pili hücrelerinin akım-gerilim karakteristiklerinin Newton-Raphson yöntemi ile elde edilebilmeleri için gerekli olan algoritma MATLAB programında oluşturulmuştur. EK-B' de program kodu verilen algorithmada $\varepsilon = 1e-4$ alınmıştır. Başlangıç değeri olarak, sıfır ile kısa devre akımı arasındaki herhangi bir değerin alınması durumunda, algoritmanın çözüme doğru ve hızlı bir şekilde yakınsadığı görülmüştür.

Simülasyon bir önceki modelde olduğu gibi yine Siemens M-55 modülleri için yapılmıştır. Standart test koşulları için (1000 W/m^2 ışık şiddeti ve 25°C çevre sıcaklığı) yukarıda kullanılan modelden elde edilen simülasyon sonuçları ile M-55 modülünün

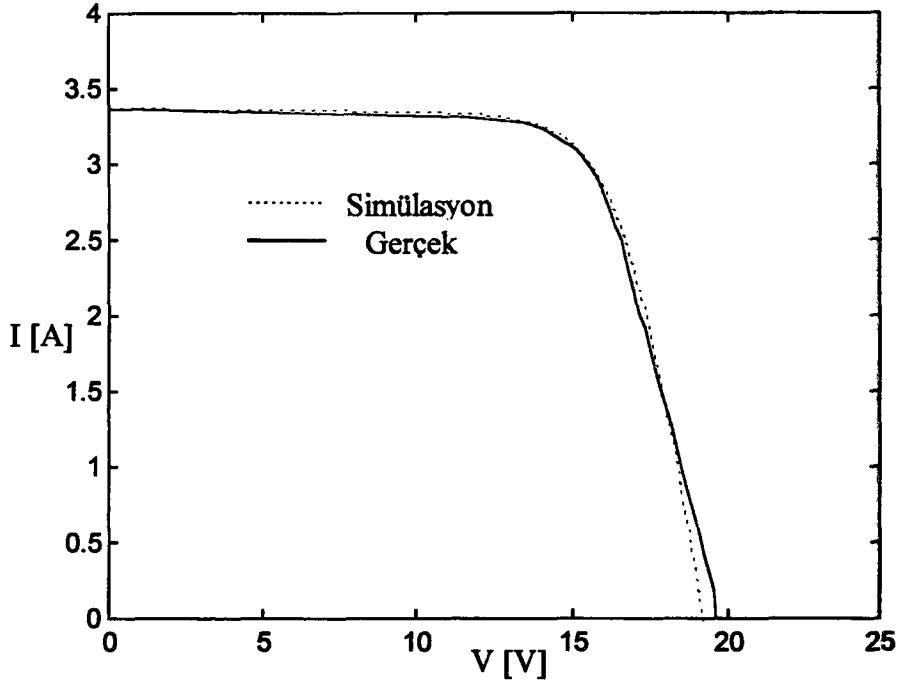
katalogunda verilmiş olan I-V eğrileri Şekil 3.10'da karşılaştırılmıştır. Şekilden de görüldüğü gibi standart test koşullarında M-55 modüllerinin I-V eğrileri büyük bir doğrulukla elde edilmiştir. Şekil 3.11, 500 W/m^2 ışık şiddeti ve 25°C sıcaklık, Şekil 3.12 ise 1000 W/m^2 ışık şiddeti ve 47°C sıcaklık için simülasyon sonuçları ile gerçek katalog bilgilerini göstermektedir.



Şekil 3.10 Standart Test Koşulları İçin Gerçek Değerler ile Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması



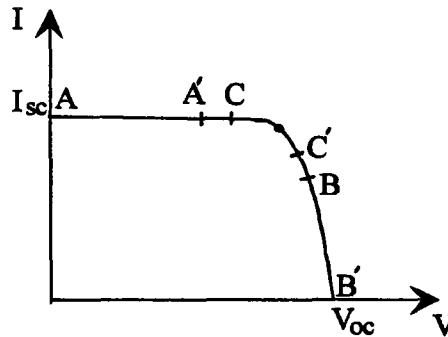
Şekil 3.11 $S = 500 \text{ W/m}^2$, $T = 25^\circ \text{C}$ İçin Sonuçların Karşılaştırılması



Şekil 3.12 $S=1000 \text{ W/m}^2$, $T=47^\circ\text{C}$ İçin Sonuçların Karşılaştırılması

3.4.1 Güneş Pili Hücrelerinin Modellenmesinde Yeni Bir Yöntem

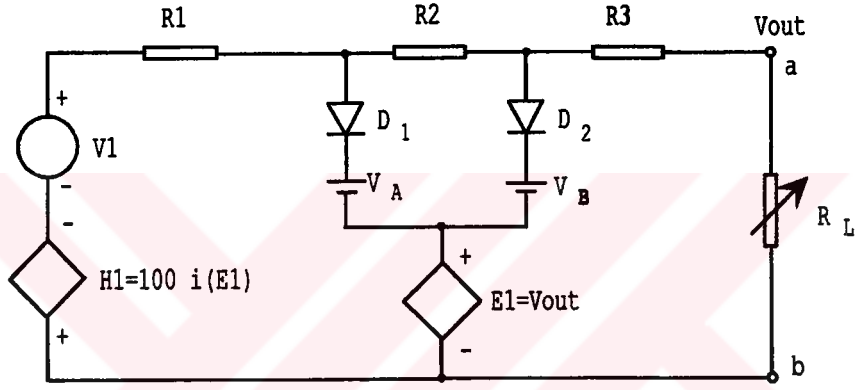
Güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren güneş pili hücrelerinin akım ve gerilimleri arasında Şekil 3.13’ de gösterildiği gibi nonlinear bir ilişki vardır. Pil hücresinin akım-gerilim karakteristiklerini veren bu eğri sabit akım bölgesi (A/A’), sabit gerilim bölgesi (B/B’) ve dirsek bölgesi (C/C’) olmak üzere üç ayrı bölgeye ayrılabilir.



Şekil 3.13 Güneş Pili Hücresinin Akım-Gerilim Karakteristiği

Güneş pili hücrelerinin modellenmesinde geliştirilen yeni model, temel elektriksel devre elemanlarını kullanarak pillerin değişik sıcaklık ve ışık şiddetlerindeki akım - gerilim karakteristiklerini elde etmeye dayanmaktadır. Bu amaç için önerilen devre modeli aşağıda verilmiştir.

Model, bağımlı gerilim kaynaklarından, diyotlardan ve dirençlerden meydana gelmektedir. İki uçlu bir elemanın akım - gerilim karakteristiğini çıkarmanın en kolay yolu, elemanın uçlarına değişken değerli bir direnç koyarak, direncin değerini sıfır ile sonsuz arasında değiştirmektir. Burada da bu yol izlenerek elemanın uçlarına (a-b) değişken R_L direnci eklenmiştir.



Şekil 3.14 Güneş Pili Modeli

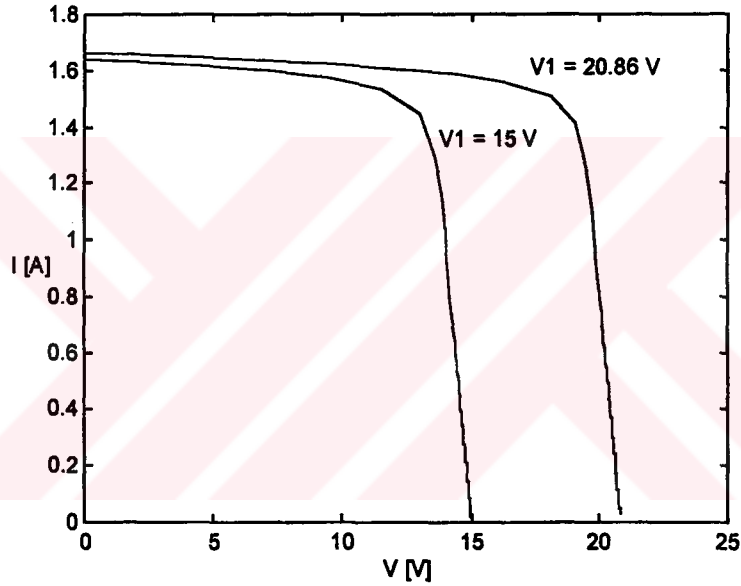
Model üzerindeki elemanların işlevleri aşağıda tablo halinde verilmiştir.

Tablo 3.2 Model Parametreleri

Parametre	İşlevi
$R_0 = R_1 + R_2 + R_3$	Çıkış Direnci
V_1	Açık Devre Gerilimi
H_1	Dirsek Noktası Düzeltme Gerilimi
D_2, V_B	Birinci Kırılma Noktasının Belirlenmesi
D_1, V_A	İkinci Kırılma Noktasının Belirlenmesi
E_1	Kısa Devre Sezme

Güneş pilinin açık devre gerilimi V_1 gerilim kaynağı ile temsil edilmektedir. Bu kaynağın gerilimi, sıcaklığın ve aydınlık şiddetinin bir fonksiyonudur. Her sıcaklık ve aydınlık şiddeti için yeni değer girilmelidir. V_1 geriliminin etkisi Şekil 3.15’de görülmektedir. Eğriden de görüldüğü gibi V_1 gerilimi doğrudan V_{∞} açık devre gerilimini vermektedir.

Güneş pili karakteristiği kademeli doğrusal yaklaşım yardımıyla elde edilmektedir. Bu nedenle yapının çıkış direnci R_1 , R_2 , R_3 biçiminde üç parçalı yapılmış, böylece dirsek bölgesindeki geçişin aslına uygun biçimde modellenmesi sağlanmıştır. [30], [31]



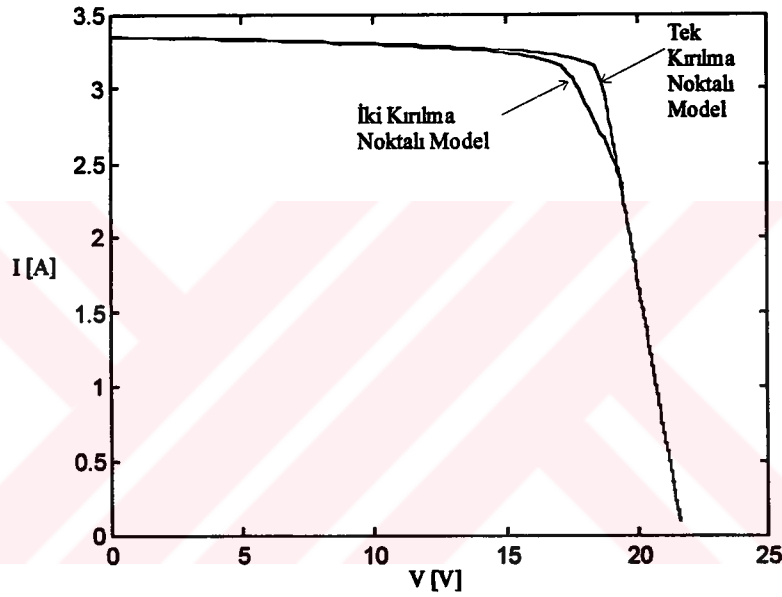
Şekil 3.15 V_1 Geriliminin Eğri Üzerindeki Etkisi

D_2 , V_B elemanları ilk kırılma noktasını, D_1 , V_A elemanları ise ikinci kırılma noktasını belirlemektedir. Devreye yeni diyot ve gerilim kaynağı çiftleri ekleyip dirsek bölgesindeki kırılma noktalarının sayıları arttırılarak dirsek bölgesinde gerçek eğriye çok daha iyi yaklaşılabilmesine karşın, simülasyonlarda iki kırılma noktasının yeterli olduğu görülmüştür. Bu da modelin basit kalmasını sağlamıştır. D_1 , V_A elemanlarının yer

almadığı tek kırılma noktalı model ile iki kırılma noktalı önerilen model Şekil 3.16’ da karşılaştırılmıştır.

E_1 gerilimle yönetilen gerilim kaynağı kısa devre sezme elemanıdır.

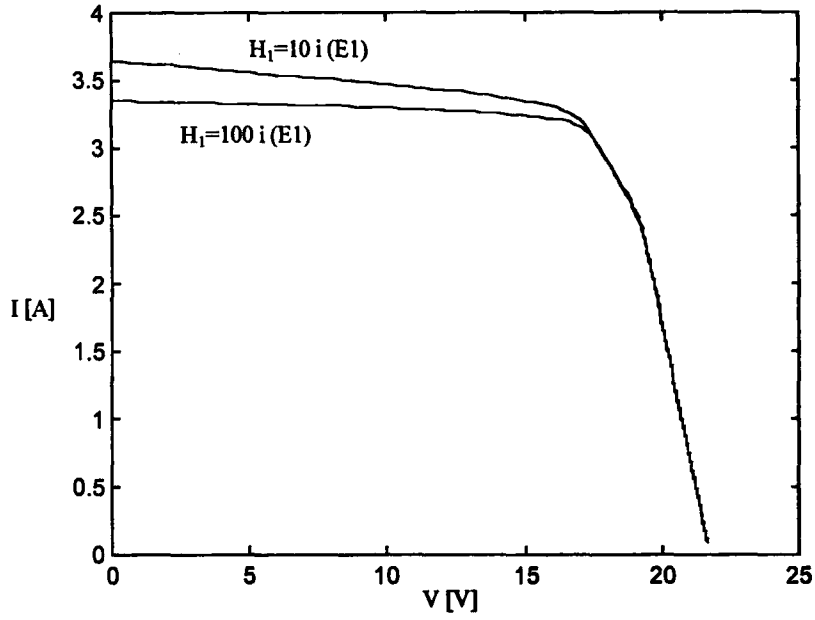
H_1 akım kontrollü gerilim kaynağı ilk kırılma noktasında karakteristiğın değişimini düzeltmek üzere öngörölmüştür. E_1 gerilim kaynağından geçen akım ile orantılı olarak V_1 gerilim kaynağını zayıflatacak yönde hareket etmektedir. Bu sayede eğrinin sabit akım bölgesi olarak adlandırılan kısmı elde edilmiştir. Eğrinin bu bölgedeki eğimi H_1 ’ in katsayısı ile ayarlanmaktadır. H_1 ’ in eğri üzerindeki etkisi Şekil 3.17’ de görölmektedir.



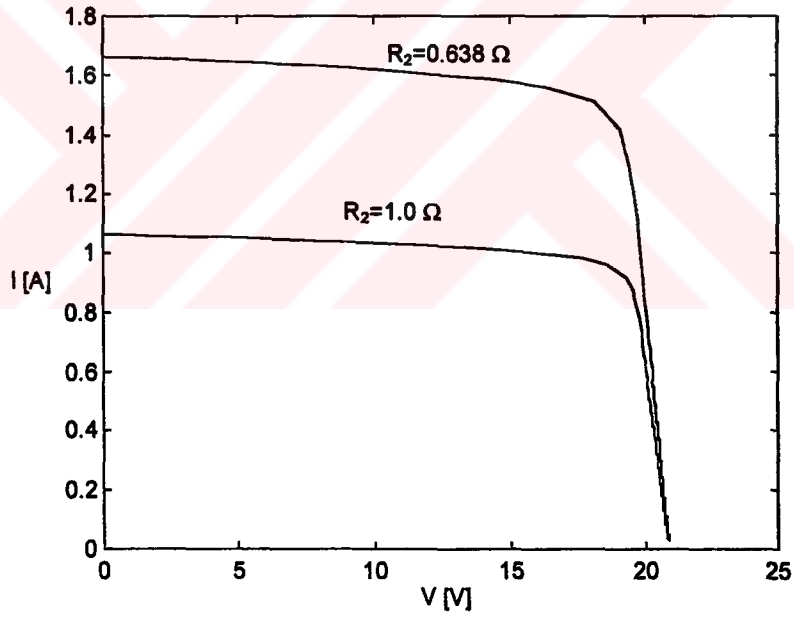
Şekil 3.16 Tek Kırılma Noktalı Model ile İki Kırılma Noktalı Modelin Karşılaştırılması

Devre üzerindeki diğer elemanların eğri üzerindeki etkileri ayrı ayrı aşağıda incelenmiştir.

İlk olarak R_2 direncinin etkisi incelenecek olunursa, R_2 direncinin değeri arttıkça Şekil 3.17’ den hem kısa devre akımının azaldığı, hem de sabit gerilim bölgesinde eğrinin eğiminin az da olsa azaldığı görölmektedir.

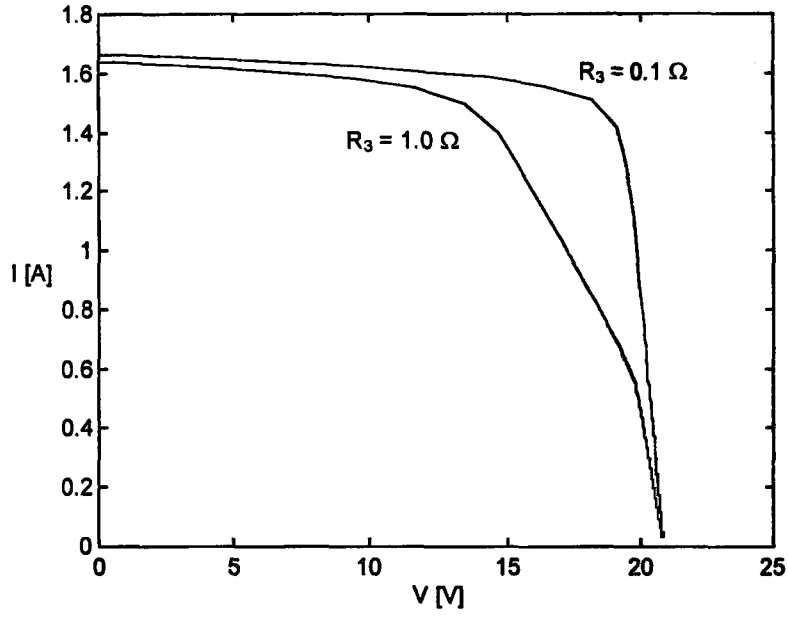


Şekil 3.17 H_1 Akım Kontrollü Gerilim Kaynağının Eğri Üzerindeki Etkisi



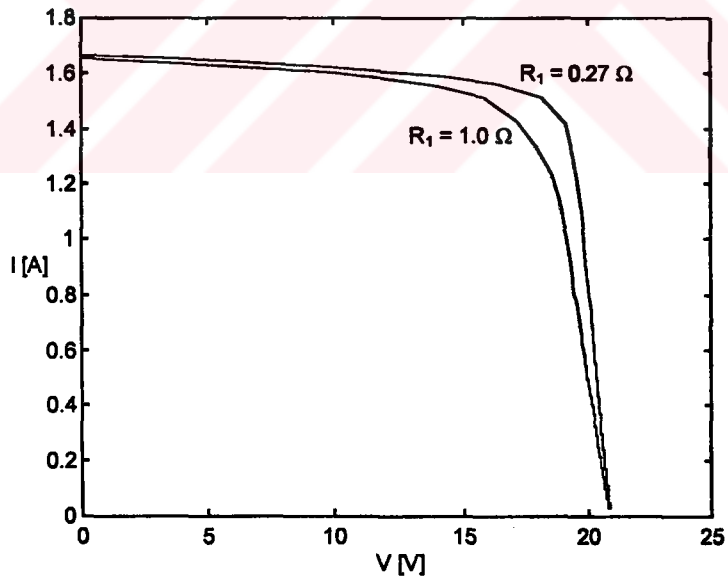
Şekil 3.18 R_2 Direncinin Eğri Üzerindeki Etkisi

İkinci olarak R_3 direncinin etkisi incelenecek olunursa, R_3 'ün dirsek bölgesinde etkili olduğu görülmektedir.



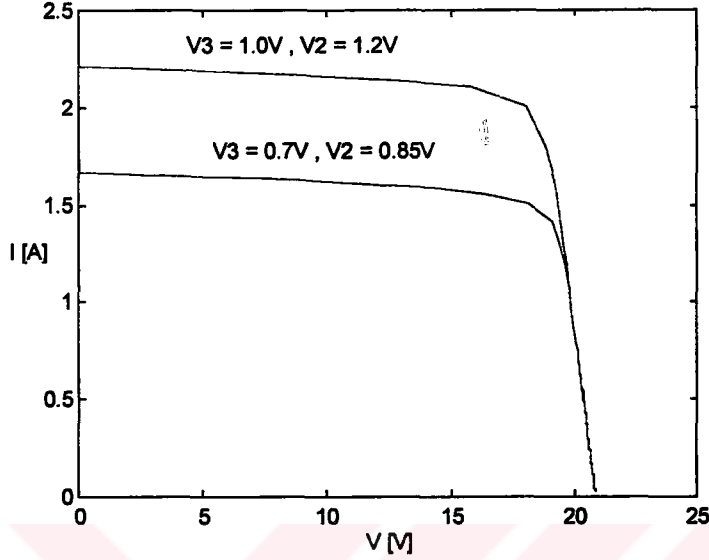
Şekil 3.19 R_3 Direncinin Eğri Üzerindeki Etkisi

R_1 direncinin etkisi incelendiği zaman, bu direncin de R_3 direnci gibi dirsek bölgesi üzerinde etkili olduğu görülmektedir.



Şekil 3.20 R_1 Direncinin Eğri Üzerindeki Etkisi

Son olarak diyotların eşiklerini belirleyen V_2 ve V_3 gerilimleri ile oynanırsa V_2 ve V_3 'ün doğrudan I_{sc} kısa devre akımını belirlediği, diğer parametreleri değiştirmedeği görülmektedir.



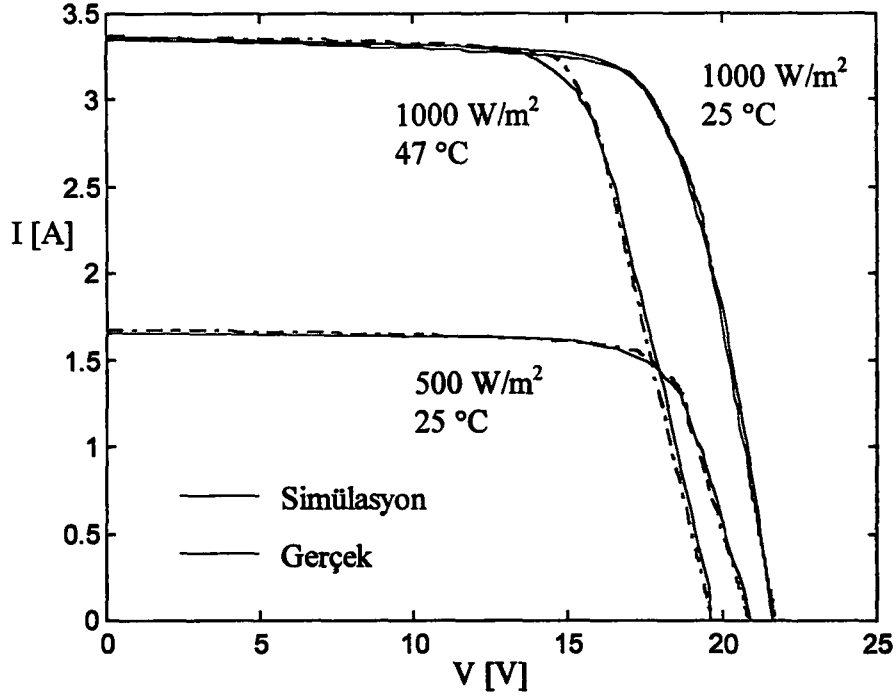
Şekil 3.21 V_2 ve V_3 gerilimlerini Eğri Üzerindeki Etkisi

Bütün bunlardan şu sonuçlar çıkarılabilir :

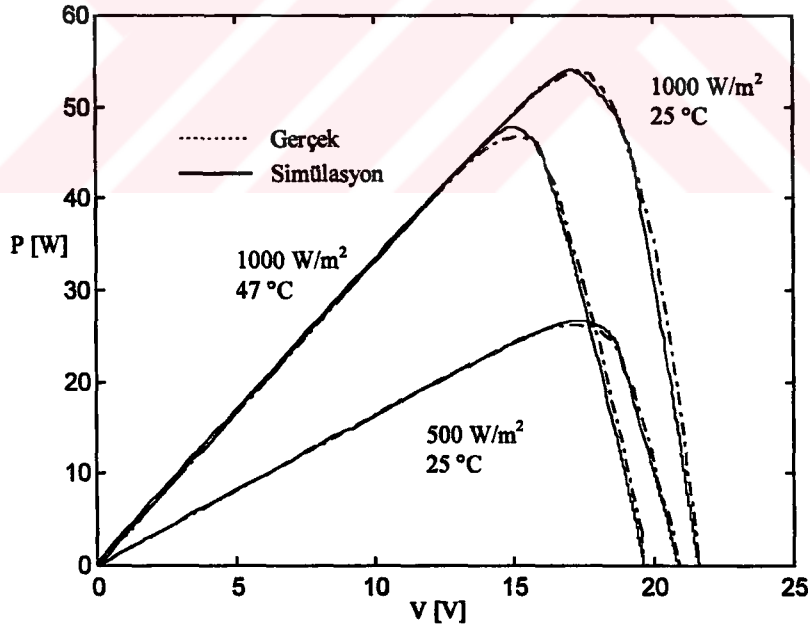
1. Dirsek bölgesi R_1 ve R_3 dirençleri ile ayarlanmalıdır.
2. Açık devre gerilimi V_1 gerilimi ile ayarlanmalıdır.
3. Kısa devre akımı V_A ve V_B gerilimleri ile ayarlanmalıdır.
4. Sabit gerilim bölgesinin eğimi R_2 direnci ile ayarlanmalıdır.
5. Sabit akım bölgesinin eğimi H_1 akım kontrollü gerilim kaynağı ile ayarlanmalıdır.

3.4.2 Simülasyon Sonuçları

Geliştirilen modelle Siemens M-55 tipi güneş pili için model parametreleri belirlenmiş, farklı aydınlık şiddeti ve sıcaklık değerleri için pil karakteristikleri çıkartılmıştır. Simülasyon için kullanılan modelin PSPICE kodu EK-C' de verilmiştir.



Şekil 3.22 Değişik Test Koşulları için Simülasyon Sonuçları ile Ölçü Sonuçlarının Karşılaştırılması



Şekil 3.23 Simülasyondan Elde edilen Güç Değerleri ile Gerçek Güç Değerlerinin Karşılaştırılması

Elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla birlikte Şekil.4’de verilmiştir. Simülasyonla elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla uyumlu oldukları ve % 2.12 ’lik hata ile ölçü sonuçlarına yaklaşıldığı belirlenmiştir.

Farklı test koşulları için simülasyondan elde edilen güç değerleri ile elemanın gerçek güç değerlerinin gerilimle değişimi Şekil 3.23’ de verilmiştir.

3.5 Üç Ayrı Modelden Elde Edilen Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması

Yukarıda anlatılan modellerin iyilik derecelerinin belirlenmesinde dört ayrı kriterin göz önünde bulundurulması gerekir.

Bunlardan ilki, güneş pillerinin en önemli parametrelerinin (V_{oc} açık devre gerilimi, I_{sc} kısa devre akımı vb.) modelden elde edilen değerleri ile gerçek değerleri arasındaki farktır. Tablo 3.3 her üç ayrı modelden elde edilen değerler ile gerçek değerleri ve bunlara bağlı hataları göstermektedir. Tablodan da görüldüğü gibi genelde açık devre gerilimi ve kısa devre akımı büyük bir doğrulukla elde edilirken, maksimum güç noktasında her üç ayrı modelde de bir miktar hata oluşmaktadır.

İkinci kriter modelden elde edilen simülasyon sonuçları ile gerçek karakteristik arasındaki bağıl hatalardır. Akım-gerilim ilişkisi birer eğriler ile verilen iki farklı model ile gerçek sistem arasındaki bağıl hata,

$$\mathcal{E} = \frac{\|A - B\|}{\|A\|} \quad (3.8)$$

Tablo 3.3 Anma Çalışma Koşulları İçin Modellerden Elde Edilen Temel Parametreler ile Gerçek Parametrelerin Karşılaştırılması

Siemens	Üretici	Eşdeğ.	Devre	Nümerik	Analiz	Yeni	Model
M-55	Değer	Değer	% Hata	Değer	% Hata	Değer	% Hata
V_{oc}	21.7	21.65	2.3	21.68	0.9	21.7	0.00
I_{sc}	3.35	3.355	1.49	3.35	0.00	3.351	0.05
P_m	53.07	52.177	1.68	53.05	0.03	53.85	1.47
V_m	17.4	17.26	0.80	17.38	0.11	17.26	0.80
I_m	3.05	3.023	0.88	3.052	0.06	3.12	2.29

olarak tanımlanabilir. Burada A vektörü, gerçek elemanın belirli V gerilimi değerlerinde I akımının aldığı değerlerden oluşmaktadır. B vektörü ise modelin belirli V değerlerinde I akımının aldığı değerlerden oluşmuştur. İfadede kullanılan norm Öklid normudur. Yukarıdaki norm alma işleminin yapılabilmesi için A-B vektörünün bulunması gereklidir. Bunun için A ve B vektörlerinin boyutlarının aynı olması ayrıca A ve B vektörlerindeki I değerlerinin aynı V değerleri içinelde edilmiş olması gereklidir. Kısaca aşağıda şekilde görülen V_1 ve V_2 vektörlerinin aynı olması gereklidir.

Tablo 3.4 Bağlı Hata Hesabı

A	I_{11}	I_{12}	I_{13}	I_{14}	...	I_{1n}
V_1	V_{11}	V_{12}	V_{13}	V_{14}	...	V_{1n}

B	I_{21}	I_{22}	I_{23}	I_{24}	...	I_{2n}
V_2	V_{21}	V_{22}	V_{23}	V_{24}	...	V_{2n}

Oysa gerçek elemanın A ve V_1 vektörleri ölçü sonuçlarından, modeldeki B ve V_2 vektörleri ise PSPICE' dan elde edilmiş olup V_1 ve V_2 vektörleri birbirinden farklıdır. Bundan dolayı gerçek elemandaki V_1 vektörünün herhangi bir değeri için modelde bir I değeri karşı düşmüyorsa interpolasyon ile bir I değeri karşı düşürmek, aynı şekilde modeldeki V_2 vektörünün herhangi bir değeri için gerçek elemanda bir I değeri karşı düşmüyorsa yine interpolasyon ile bir I değeri bulmak gerekmektedir. Bu enterpolasyon işleminin yapılabilmesi için V_1 ve V_2 vektörlerinin tek değerlilikli olması gerekmektedir. Oysa PSPICE' dan elde edilen simülasyon sonuçlarında model pil uçlarına bağlı yük direncinin belirli bir değerinden sonra bazı V değerleri için birden fazla I değeri bulunabilmektedir. Bu sebepten dolayı bu I değerlerinden yalnızca biri alınmalıdır. Bu I değerleri birbirlerine çok yakın olduğu için, B vektöründeki aynı V değeri için elde edilmiş ilk I değeri o gerilim değeri için geçerli olan I değeri olarak alınabilir. Bu hususları dikkate alarak bağlı hatayı hesaplayan MATLAB programı EK-D' de verilmiştir.

Yapılan hesaplamalar sonucunda nümerik analize dayalı simülasyon sonuçlarının % 0.24, geliştirilen yeni modelin %2.12, eşdeğer devre yaklaşımına dayanan ilk modelin ise %4.05' lik bir hata ile ölçü sonuçlarına yaklaştığı belirlenmiştir.

Üçüncü kriter ise, bu üç ayrı model simülasyon amacıyla bilgisayarda koşulduğu zaman geçen süredir. Aynı bilgisayarda akım-gerilim karakteristiğini çıkarmak için yapılan en basit testlerde ilk model 15.55sn, yeni model 14.12sn, nümerik analize dayalı simülasyon ise 19.07sn süre almıştır. Daha karmaşık, örneğin güç elektroniği devrelerinin de yer aldığı sistemlerin simülasyonlarında, gerekli olan süreler arasındaki bu farklar daha da artmaktadır.

Son kriter ise, elde edilen modellerin hangi amaca yönelik olarak kullanılacağı ile ilgilidir. Güneş pilleri genelde güç elektroniği devrelerinin yer aldığı sistemlerde yer almaktadır. Devre simülasyonu amacıyla kullanılan en yaygın program PSPICE'dır. İlk model ile geliştirilen yeni model eşdeğer devre yaklaşımına dayandıklarından PSPICE'da doğrudan kullanılabilirler. Nümerik analize dayalı modeli ise böyle doğrudan kullanmak mümkün değildir. Bu da model seçiminde önemli bir etkidir.

Bütün bu kriterler dikkate alındığı zaman (uygulanabilirlik, hata, süre, ıraksama vb.) geliştirilen yeni modelin diğer modellere göre avantajlı olduğu görülmektedir.

BÖLÜM 4

GÜNEŞ PİLİ DİZİLERİNDEN ŞEBEKEYE ENERJİ AKTARIMI

4.1. Giriş

Güneş pillerinin fiyatları son yıllarda oldukça uygun düzeylere gelmiş olup, ileriki yıllarda çok daha fazla ucuzlayacağı beklenmektedir. Bu sebeple, özellikle güneş enerjisi yönünden zengin, fakat geleneksel yakıtlar yönünden fakir olan ve çevresel etkileri yönünden nükleer enerji kullanmak istemeyen ya da teknolojileri buna imkan vermeyen ülkeler için şebekeye bağlı güneş pili uygulamalarının ayrı bir önemi vardır. Bir çok ülke, yenilenebilir enerji kaynaklarına daha fazla yönelme yönünde politik kararlılık gösterirken, İsveç gibi bazı ülkeler yeni nükleer santrallerin kurulmamasına karar vermişlerdir.

Elektronik eviriciler vasıtasıyla şebekeye doğrudan enerji veren şebeke bağlantılı sistemler depolama amaçlı akümülatörlere ihtiyaç duymadıklarından, şebekeden ayrı olan güneş pili sistemlerine göre hem daha basit hem de daha ucuzdurlar. Şebeke hem enerji alma hem de enerji verebilme özelliğinden dolayı, enerji depolama işlevini doğal olarak yerine getirebilir. Evlerin ve binaların çatılarına yerleştirilmiş birkaç kilowatt mertebesindeki güneş pili dizilerinden ya da büyük alanlara kurulmuş olan megawattlar mertebesindeki güneş pili santrallerinden elde edilen d.a. elektrik enerjisi, 50 Hz'lik alternatif enerjiye dönüştürülerek bir ya da üç fazlı olarak şebekeye aktarılabilir. Güneş enerjisinin elde edilebildiği zaman aralığında yerel ve şebekeye bağlı tüketiciler beslenirken, ışık şiddetinin enerji dönüşümü için yeterli olmadığı zamanlarda (örneğin bulutlu havalarda ve geceleri) tüketiciler şebekeden beslenebilirler. [32]-[37]

4.2 Güneş Pili Dizilerinden Şebekeye Enerji Aktaran Düzenler

Şebeke ile güneş pili dizileri arasında arabirim görevini gören güç dönüştürücüleri üzerindeki geçmiş çalışmalar, genelde mevcut güç dönüştürücü donanımın değiştirilerek kullanılması üzerinde yoğunlaşmıştır. Bu amaçla akım ara devreli doğal komutasyonlu tristör evirici ve gerilim ara devreli zorlanmış komutasyonlu evirici olmak üzere iki tip sistem önerilmiştir. Akım, gerilim ve güç değerlerinin yüksek, buna karşın maliyetlerinin diğer anahtarlama elemanlarına göre düşük olmasından dolayı bu tip sistemlerde genellikle tristör kullanılmıştır. Tristörlerin olumsuz tarafı, bu tip elemanların kullanıldığı eviricilerde zorlanmış komutasyonun ve filtreleme işleminin büyük miktarda yardımcı güç elemanı gerektirmesidir (tristörler, kapasiteler, endüktanslar, dirençler ve kontrol elemanları). Bu ilave elemanlar sistem maliyetini arttırmakta ve sistem verimini etkilemektedirler.

Yüksek gerilimli bipolar transistör, MOSFET (field-effect transistör), GTO (gate turn-off thyristör) ve IGBT (insulated gate bipolar transistör) gibi anahtarlama elemanları ile dc kapasitör ve ferrit çekirdekli endüktanslardaki teknolojik gelişmeler, yüksek anahtarlama frekanslı yeni tip eviricilerin gerçekleşmesini mümkün kılmıştır. Bunun yanında, güç transformatörlerinde amorf metallerin kullanılması, kayıpların ve maliyetin azaltılmasını sağlamıştır. Son olarak mikroişlemci tabanlı kontrol sistemleri, fotovoltaiik/şebeke güç dönüştürücülerinin optimum olarak kontrol edilebilmelerine izin vermiştir. Bütün bunların sonucunda, geleneksel eviriciler ile karşılaştırıldığında, daha düşük harmonik distorsiyon, ağırlık ve hacim azalması, maliyetin düşmesi ve özellikle düşük güçlerde verimin yükselmesi gibi iyileştirmeler elde edilmiştir.

Küçük ve orta ölçekli sistemler için düşünülen tasarımlar ve bu tasarımların temel özellikleri ile tahmini bağıl maliyetleri Tablo 4.1’de verilmiştir. Bu tabloda maliyet olarak, %5’ten daha küçük toplam akım harmonik distorsiyonunu elde edebilecek filtreye sahip doğal komutasyonlu evirici baz alınmıştır. Genelde, PWM etkisi ile hat akımına şekil verilerek, büyük d.a. şok bobinleri ve harmonik filtreleri ortadan kaldırılmış bu da maliyeti büyük ölçüde azaltmıştır.

Yüksek frekanslı transformatör kullanılan sistemde daha fazla güç yarı iletkeni kullanılmasına rağmen, 50 Hz'lik transformatör kullanımından kurtulunmasından dolayı net boyut, ağırlık ve maliyet bakımından diğer sistemlere göre avantajlara sahiptir. Yüksek frekanslı transformatör çekirdeği olarak amorf ve ferrit malzemenin her ikisi de kullanılabilir.

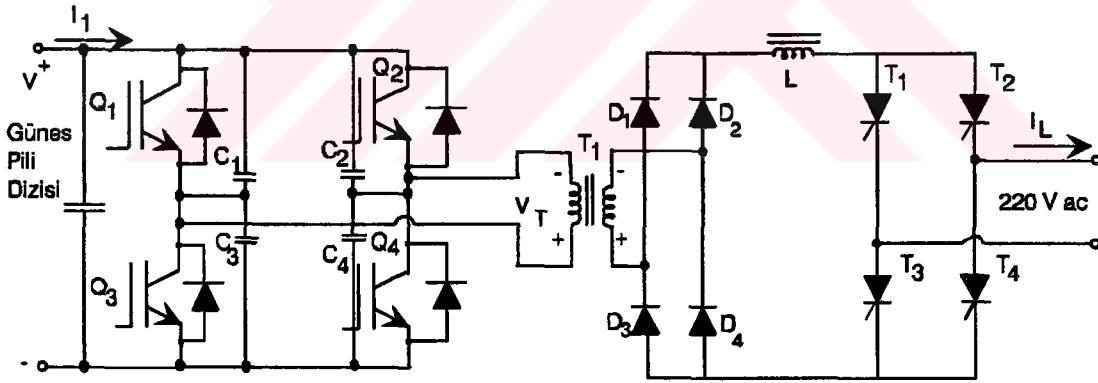
Tablo 4.1. Orta Ölçekli Sistemler için Değişik Tasarımların Karşılaştırılması

	Özellik	Güç Devresinin Bağıl Maliyeti
Doğal komutasyonlu evirici	Büyük d.a. şok bobini ve a.a. filtresi gerektirir. Güç faktörü düşüktür. 50 Hz'lik Transformatör kullanılır.	1
Kıyıcı ile akımı kontrol edilen doğal komutasyonlu evirici	Transistörlü kıyıcı eviriciyi yarım sinüs dalgaları ile besler. A.a. filtresine gerek yoktur. Güç faktörü 1'e yakındır. 50 Hz'lik Transformatör kullanılır.	0.76
Tam köprü PWM evirici	Güç faktörü 1'e yakındır. A.a. filtresine gerek yoktur. 50 Hz'lik transformatör kullanılır.	0.99
Yüksek frekans Transformatörlü çevirici	Güç faktörü 1'e yakındır. A.a. filtresine gerek yoktur. Yüksek frekanslı trans. kullanılır. Verimi yüksektir.	0.74
Yüksek frekanslı doğrudan çevirici	Güç faktörü yüksektir. A.a. filtresine gerek yoktur. Yüksek frekanslı transformatörden etkin olarak faydalanılamaz.	0.86

4.3.1 Küçük ve Orta Ölçekli Sistemler için Yüksek Frekans

Transformatörlü Çevirici

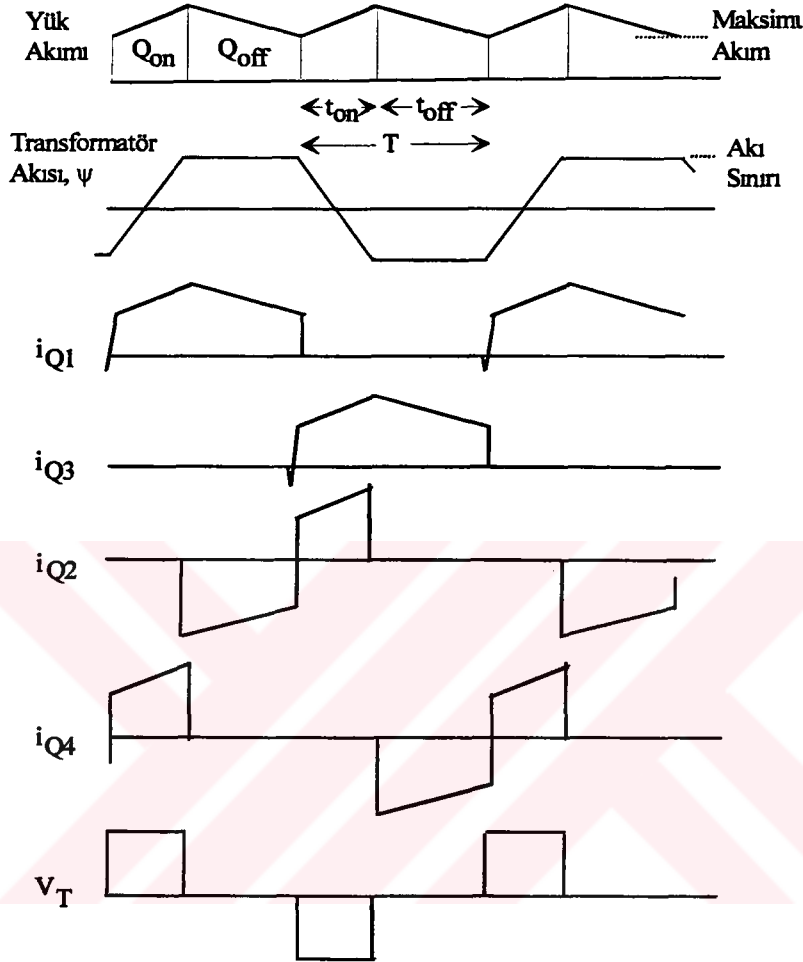
Güneş pili dizilerinden elde edilen enerjiyi şebekeye aktarmak amacıyla seçilen tasarım Şekil 4.1’de, ideal dalga şekilleri ise Şekil 4.2’de gösterilmiştir. 10 ile 20 kHz arasında çalışan bir tam köprü evirici güneş pili dizilerinin doğru gerilimini alternatif akıma çevirerek, yüksek frekanslı T_1 transformatörüne uygular. *IGBT*’lerin uygun şekilde anahtarlama ile T_1 ’in çıkış akımının genliği PWM yöntemiyle kontrol edilirken T_1 transformatörünün doyması önlenir. T_1 ’in sekonderindeki yüksek frekanslı gerilim, D_1 - D_4 hızlı diyotları ile doğrultulur. *IGBT*’ler, L endüktansındaki akım yarım sinüs dalgası şeklinde olmaya zorlanacak biçimde PWM yöntemiyle kontrol edilirler. Şebeke denetimli T_1 - T_4 tristörleri, L endüktansındaki bu akımı, şebeke gerilimi ile aynı fazda olan tam dalga sinüs biçiminde şebekeye verebilmek için, çift yönlü anahtarlama yapan bir dönüştürücü gibi davranırlar. Tristörlerdeki akımın her bir yarım periyodun sonuna yakın bir yerde sıfıra gitmesine, böylece tristörlerin doğal komutasyonuna izin verilir. [38],[41]



Şekil 4.1 Yüksek Frekanslı Trafoya Sahip Güç Dönüştürücü

Bu tasarımda güç üç kez çevrilmektedir. Bu çevirme işlemlerinin ikisinin (doğrultma ve şebeke denetimli evirme) veriminin yüksek olması ayrıca, kayıpsız snubberlardan (C_1 - C_4) dolayı transistörlü eviricinin veriminin de yüksek olması toplam verimi yüksek olmasını sağlar. Evirici tarafından kontrol edilen yüksek frekanslı L

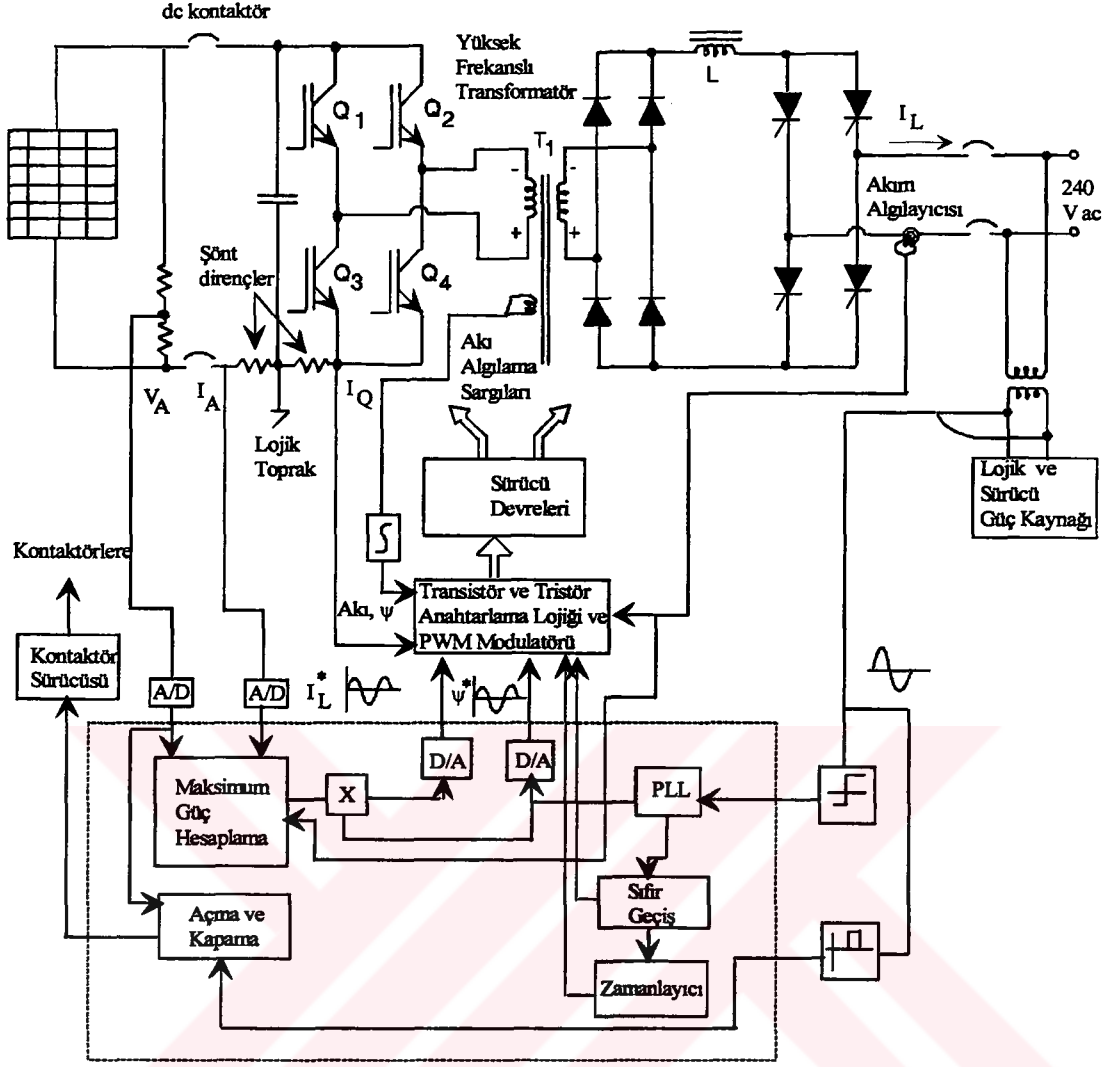
süzülmesi için filtre kullanılmasına gerek yoktur. Yalnızca evirici çıkışında, şekilde gösterilmeyen EMI filtresi gerekli olacaktır.



Şekil 4.2. Yüksek Frekanslı Evirici İçin İdeal Dalga Şekilleri

4.3.2 Güç Devresinin Kontrolü

Güç devresinin kontrolüne ait blok şema Şekil 4.3'de gösterilmektedir. Güç devresi ile birlikte, gerekli algılayıcılar ve bu algılayıcılar ile kontrol devresi arasındaki arabirim elemanları şeklin üst kısmında verilmiştir. Şekil 4.2'de verilen ideal dalga şekillerinin yardımı ile, güç ve kontrol devrelerinin çalışma prensipleri aşağıda açıklanmıştır.



Şekil 4.3 Güç Devresinin Kontrolü

Lojik güç kaynağı ve akım referansı için gerekli olan senkronlama işareti, şebekeye bağlı olan 50 Hz'lik transformatörden sağlanmaktadır. Faz kilitleme devresi (PLL), şebeke ile aynı fazda olan saf sinüs şeklinde bir akım kontrol işareti üretir. Üretilen bu akım kontrol işaretinin genliği, maksimum güç izleyicisi tarafından belirlenmektedir. Bu işaret aynı zamanda, ψ^* referans akı işaretini de kontrol eder. Hat akımının ani değeri, basit bir akım transformatörü ile algılanıp PWM modulatörüne verilir. Transformatörün akısı, yüksek frekanslı transformatörün üzerine sarılmış olan düşük gerilim sargılarından elde edilen işaretin integre edilmesi suretiyle belirlenir ve yine

modülatör bloğuna verilir. I_Q ani transistör akımı, transistör köprüsünün karşıt köşelerindeki elemanlar iletimdeyken, yine basit bir şönt direnç üzerinden okunur ve modülatör bloğuna verilir. Bu işaret, devre üzerinde bir hata oluşması durumunda, güç transistörlerini korumak amacıyla kullanılır. Güneş pili dizisinin akım ve gerilimi de yine ucuz bir akım şöntü ve gerilim bölücü kullanılarak algılanır.

Devrenin çalışma prensibi I_L akımının, I_L^* referans sinüs dalgasını izleyecek biçimde, uygun transistörlerin anahtarlanmasına dayanmaktadır. PLL sıfır geçiş dedektörü, çıkış eviricisinde bulunan tristörleri ateşlemek amacıyla da kullanılır. Bu arada zamanlayıcı, her yarım periyodun sonlarına yakın bir yerde bütün transistörleri açarak, tristörlerin doğal komutasyonla kesime gitmelerini sağlar. Yük akımını referans dalgayı izlemeye zorlamak için, önce Q_1 ve Q_4 transistörleri iletime sokulur. Böylece L endüktansındaki akım ve T_1 transformatöründeki akı yükselmeye başlar. T_1 transformatöründeki akı Ψ^* tarafından belirlenen sınıra ulaştığı zaman, Q_4 transistörü kesime götürülür. Bunun sonucunda Q_2 'nin diyodu iletime geçerek transformatörü kısa devre eder. Bu zaman aralığında transformatör akısı sabit kalırken, yükten geçen akım, L endüktansı ve doğrultucu üzerinden dolaşarak zamanla azalır. Akım algılayıcısı tarafından algılanan yük akımı I_L^* referans akımı seviyesine düştüğü zaman, Q_1 'in kesime götürülüp, Q_3 'ün iletime sokulması, yük akımının tekrar yükselmesine, transformatör akısının ise yönünün ters çevrilmesine neden olur. Transistörler, transformatör akısı yön değiştirip $-\Psi^*$ tarafından belirlenen negatif sınıra ulaşınca kadar iletimde bırakılırlar. Akı bu sınıra ulaştığı zaman, Q_2 transistörü kesime götürülür ve yük akımı tekrar I_L^* seviyesine düşüncüye kadar bu durumda bırakılır. Anahtarlama işlemi böyle devam ettirilerek hem yük akımının I_L^* referans akımını izlemesi hem de maksimum akı seviyesinin belirli bir seviyede sınırlanması sağlanır. Maksimum akı seviyesinin kontrol edilmesi, transformatörün doymasını engelerken aynı zamanda daha iyi bir yük akımı dalga şeklinin elde edilmesini sağlar. Bunun yanında, her yarım periyodun sonunda, tristörlerin doğal komutasyonuna izin verebilmek için dört IGBT de açıldığı zaman, transformatör akısı hızla sıfıra düşer. Böylece, diğer yarım periyodun başında akımın belirli bir değerde olduğundan emin olunulur.

Şekilde görülen modulatör bloğu, doğru *IGBT* ve tristörlerin uygun zamanlarda ateşlenmesini sağlayan bir lojik devredir. Bu devre, gerçek baz ve kapı sürme devrelerine küçük bir darbe transformatörü üzerinden akuple edilmiştir. Baz ve kapı sürme devreleri için gerekli olan güç, lojik güç kaynağı transformatörü üzerindeki izole sargılardan elde edilir. Dizi gerilimi, eviriciye ne zaman start verileceğini (dizi minimum bir gerilim seviyesine ulaştığı zaman) ve eviricinin ne zaman kapatılacağını (dizinin gerilimi çok düştüğü zaman) belirlemek amacıyla algılanır. Bunun yanında, şebekenin belirlenen sınırlar içinde olup olmadığını belirlemek için hat gerilimini de algılamak gereklidir. Eviriciyi kesime götürmek için *IGBT*' lerin iletim izinlerini yasaklamak yeterlidir.

Kesikli çizgilerle çerçevelenmiş bloğun içerisinde gösterilen fonksiyonların çoğu, uygun bir mikroişlemci tarafından yerine getirilir. *IGBT* ve tristör anahtarlama lojiji, hızlı olarak gerçekleşmesi gereken arabirim fonksiyonlarını ve buna paralel olarak koruma fonksiyonlarını içerdüğinden, donanım olarak gerçekleşmiştir.

4.3.3 Simülasyon Sonuçları

Eviricinin çalışmasını inceleyerek, eleman değerlerini belirlemek ve sistemin çeşitli noktalarındaki dalga şekillerinin analizini yapabilmek için yüksek frekans transformatörlü sistem PSPICE'da simüle edilmiştir. Program kodu EK-E' de verilmiştir.

Simülasyonda güneş pili dizisi olarak, üçüncü bölümde ayrıntılı olarak incelenen yeni geliştirilmiş güneş pili modeli kullanılmıştır. 24 adet seri modülden oluşan 7 adet grubun paralel bağlanması sonucu elde edilen dizinin çıkış elektriksel büyüklükleri şunlardır;

Dizi Anma Gücü	$53 \text{ W} \times 24 \times 7 = 8904 \text{ W}$
Dizi Anma Akımı	$3.05 \text{ A} \times 7 = 21.35 \text{ A}$
Dizi Anma Gerilimi	$21.07 \text{ V} \times 24 = 417.6 \text{ V}$
Dizi Kısa Devre Akımı	$3.35 \text{ A} \times 7 = 23.45 \text{ A}$
Dizi Açık Devre Gerilimi	$21.7 \text{ V} \times 24 = 520.8 \text{ V}$

Simülasyonda kullanılan IGBT'ler IRGPH50M modeli olup anma değerleri 1200V-23A'dır. Güneş pili dizisinin çıkış gerilimi güç akışının şebekeye doğru olmasını sağlayacak değerde olduğundan yüksek frekanslı transformatörün çevirme oranı $ü=1$ olarak alınmıştır. Simülasyon boyunca transformatör akısı, pirimer geriliminin integre edilmesiyle $\Psi = \int V_{pri} dt$ hesaplanmış olup, akı referansının tepe değeri olarak $\Psi' = 0.012$ Volt.saniye alınmıştır. Eviricide kullanılan IGBT'lerin yukarıda anlatıldığı gibi hem akım, hem de akı kontrolü yapılacak biçimde kontrol edilmelerini sağlayan anahtarlama lojisi aşağıdaki gibidir;

Akı hatası $ERRFLX = |\Psi| - \Psi'$ Q_2 ve Q_4 anahtarlarını kontrol eder.

$$(ERRFLX) > 0 \text{ .AND. } (\Psi > 0) \Rightarrow Q_4 \text{ OFF, } Q_2 \text{ ON}$$

$$(ERRFLX) > 0 \text{ .AND. } (\Psi < 0) \Rightarrow Q_4 \text{ ON, } Q_2 \text{ OFF}$$

Bunların dışındaki diğer durumlarda $\Rightarrow$ değişiklik yok.

Akım Referansı I_L^* , gerçek akım I_L ile karşılaştırılarak Q_1 ve Q_3 anahtarları kontrol edilir.

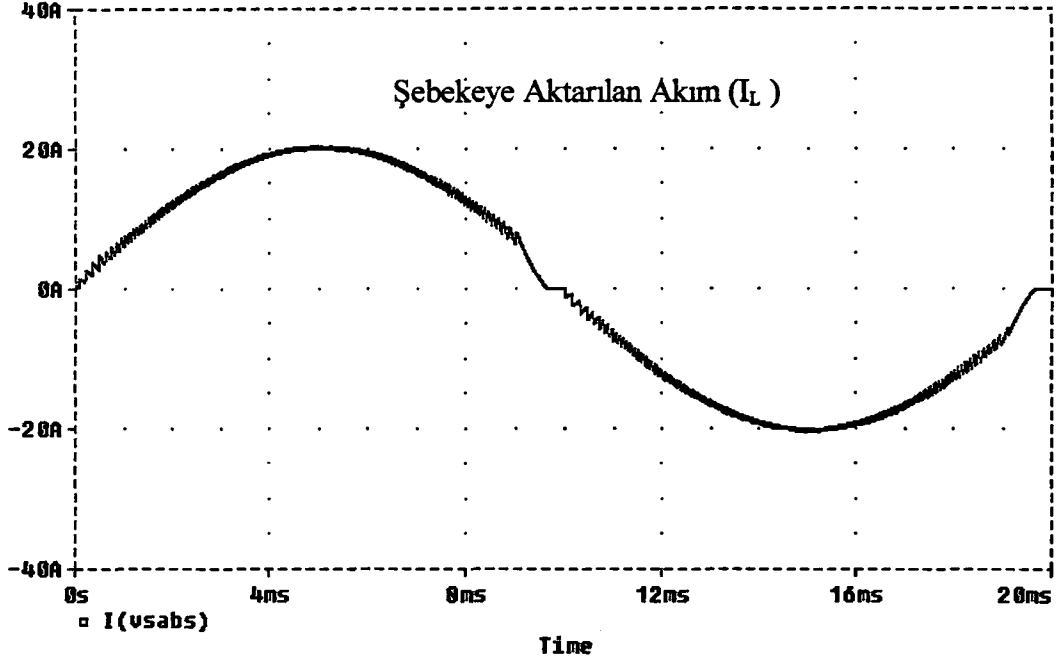
$$(I_L < I_L^*) \text{ .AND. } Q_4 \text{ ON} \Rightarrow Q_1 \text{ ON, } Q_3 \text{ OFF}$$

$$(I_L < I_L^*) \text{ .AND. } Q_4 \text{ OFF} \Rightarrow Q_1 \text{ OFF, } Q_3 \text{ ON}$$

Bunların dışındaki diğer durumlarda $\Rightarrow$ değişiklik yok.

Şebeke faz akım referansı $I_L^* = 20$ A ve şebeke gerilimiyle aynı fazda olacak biçimde güneş pili dizininden güç dönüşümünün simülasyonu yapılmıştır. Şebekeye aktarılan akım Şekil 4.4'de görülmektedir.

Şebekeye aktarılan akımın temel bileşenini ve diğer harmoniklerini belirlemek için yapılan Fourier analizinin sonuçları Tablo 4.2'de verilmiştir. Tablodan da görüldüğü gibi şebekeye verilen akım için temel bileşenin 3,5,7, ve 9 katlarındaki harmonikler etkili olmaktadır.



Şekil 4.4 Şebekeye Aktarılan Akımın Dalga şekli

I_L şebekeye aktarılan akım, I_{L1} bu akımın temel bileşeni, ϕ_1 ise bu iki akım arasındaki faz farkı olmak üzere,

$$\% THD = 100 \cdot \frac{[I_L^2 - I_{L1}^2]^{1/2}}{I_{L1}} \quad (4.1)$$

biçiminde verilen toplam harmonik distorsiyon %3 bulunmuştur. Güç faktörü ifadesi ise,

$$GF = \frac{I_{L1}}{I_L} \cdot \cos\phi_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + (THD)^2}} \cdot \cos\phi_1 \quad (4.2)$$

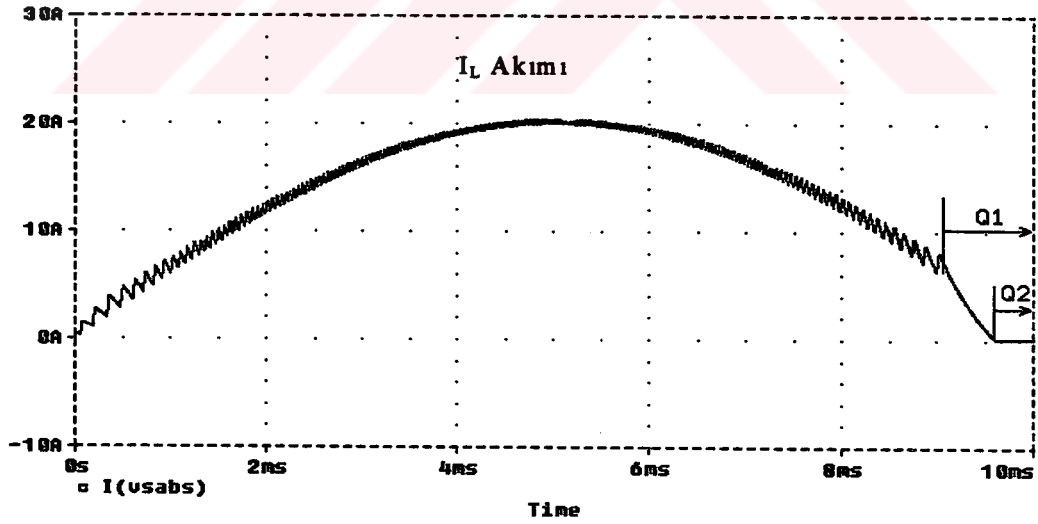
biçimindedir. Fourier analizi sonuçlarından $\phi_1 = 0.67$ derece alınarak güç faktörü 0.99 olarak hesaplanır. [39]

Şekil 4.5'te Q_1 açısı bütün IGBT'lerin iletimlerinin kesildiği süreyi (yukarıda 900 μs), Q_2 ise tristörlerin kesime gidebilmeleri için izin verilen süreyi ($\approx 400 \mu s$) bağlı olduğu

görülmüştür. Bundan dolayı, tristörlerin komutasyonlarına izin verecek en küçük komutasyon açısıyla çalışmaya gayret gösterilmelidir.

Tablo 4.2 PSPICE'dan Elde Edilen Fourier Analizi Sonuçları

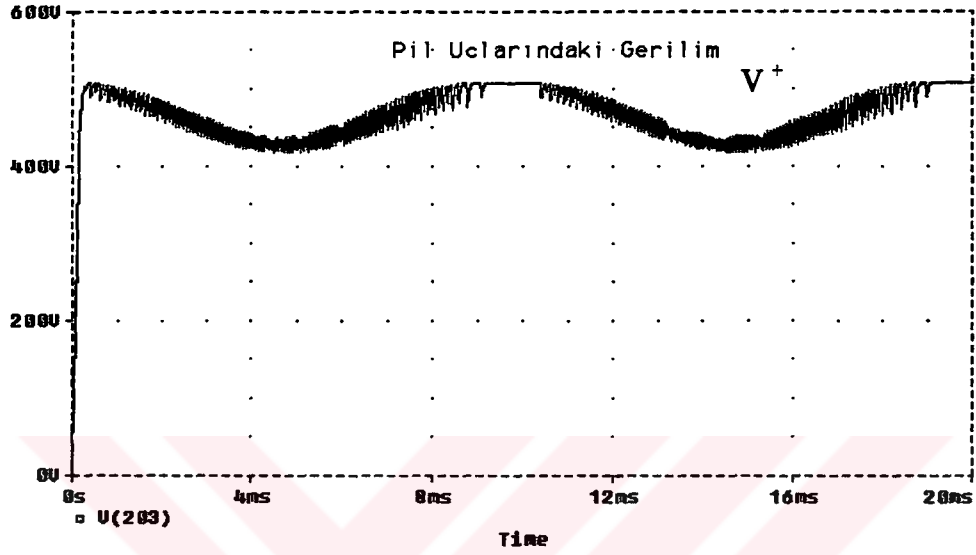
DC Bileşen : -2.914E-02					
Hamonik No	Frekans (Hz)	Fourier Bileşeni	Normalize Bileşen	Faz (Derece)	Normalize Faz (Der.)
1	5.000E+01	1.998E+1	1.000E+0	6.968E-01	0.000E+00
2	1.000E+02	5.742E-02	2.873E-03	-9.47E+01	-9.55E+01
3	1.500E+02	3.944E-01	1.973E-02	9.403E+01	9.333E+01
4	2.000E+02	5.635E-02	2.820E-03	-1.01E+02	-1.01E+02
5	2.500E+02	3.142E-01	1.572E-02	1.060E+02	1.053E+02
6	3.000E+02	5.532E-02	2.768E-03	-1.07E+02	-1.08E+02
7	3.500E+02	2.366E-01	1.184E-02	1.257E+02	1.250E+02
8	4.000E+02	5.309E-02	2.657E-03	-1.13E+02	-1.14E+02
9	4.500E+02	1.967E-01	9.845E-03	1.531E+02	1.524E+02
Toplam	Harmonik	Distorsiyon	3.007E-02		



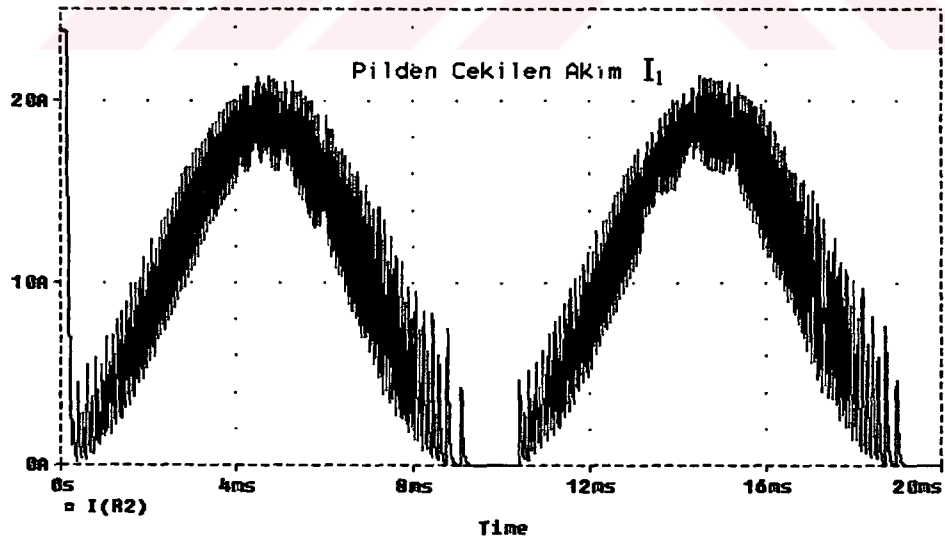
Şekil 4.5 IGBT'lerin ve Tristörlerin Kesime Gitmeleri

göstermektedir. Güç faktörünün ve harmonik akım distorsiyonun Q_1 açısı ile değişimleri incelendiğinde, akım distorsiyonun komutasyon açısına güç faktöründen çok daha fazla

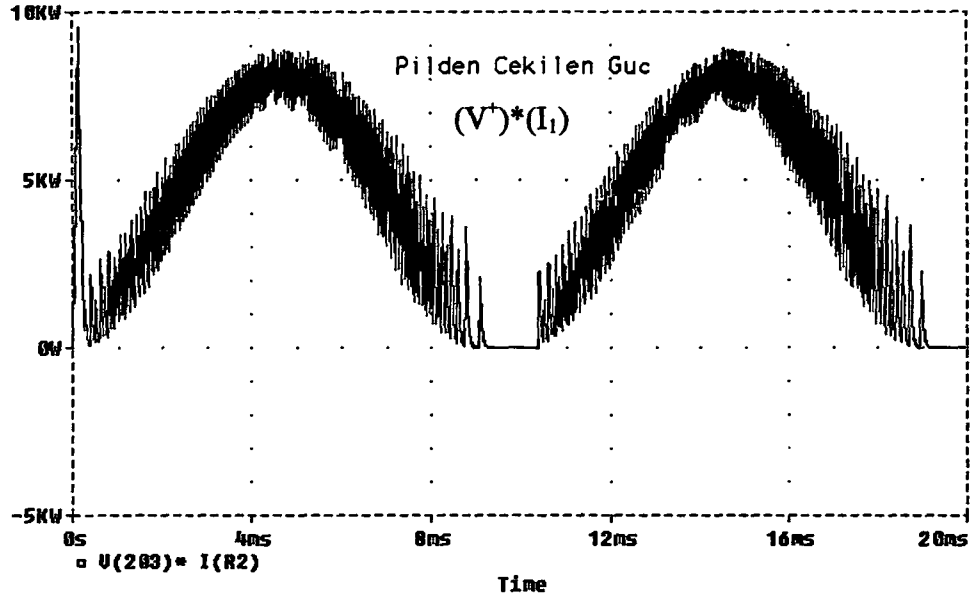
Güneş pili dizisinin gerilim ve akım dalga şekilleri ile şebekeye aktarılan güç, şebekeye verilen akımın temel bileşeninin iki katı olan 100 Hz'de salınım yapmaktadırlar.



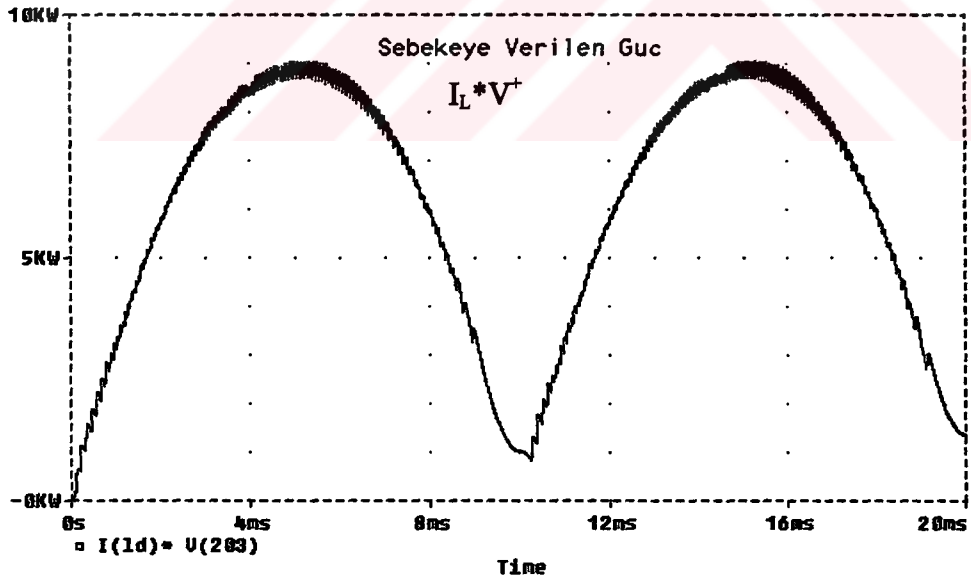
Şekil 4.6 Pil Uçlarındaki Gerilimin Dalga Şekli



Şekil 4.7 Pilden Çekilen Akımın Dalga Şekli

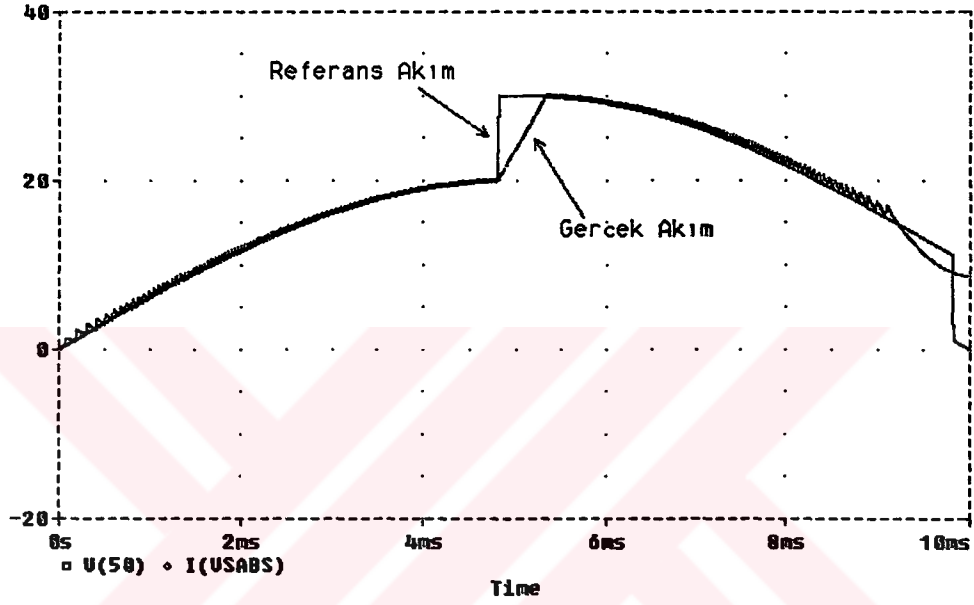


Şekil 4.8 Güneş Pili Dizisinden Çekilen Güç



Şekil 4.9 Şebekeye Aktarılan Güç

Akım referansının çalışma esnasında değiştirilmesi durumunda eviricinin buna vereceği yanıt ayrıca incelenmiştir. Şekil 4.10'da görüldüğü gibi akım referansının 90° yakınlarında basamak şeklinde arttırılması durumunda evirici, aşısız bir şekilde, gerilimin o andaki değerinin ve L endüktansının belirlediği bir hızda referansı izlemiştir.

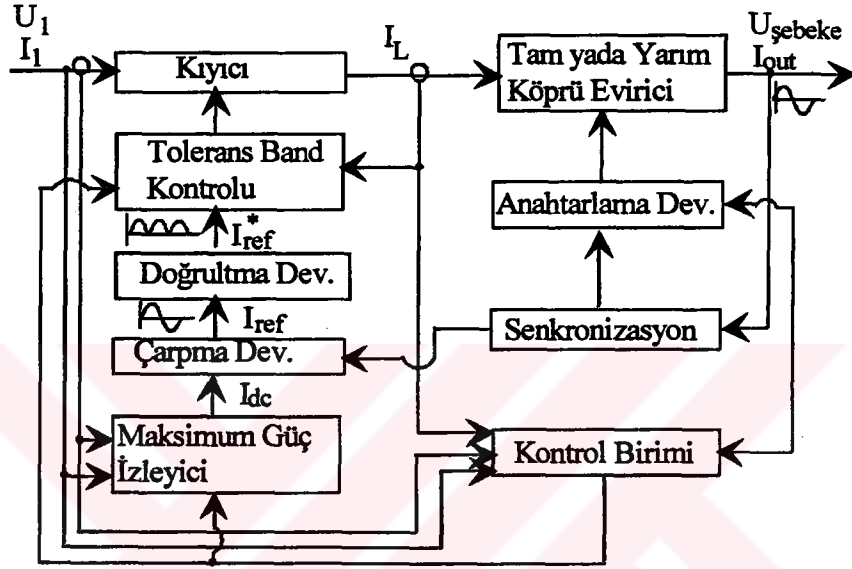


Şekil 4.10 Akım Referansının Basamak Şeklinde Arttırılması Durumunda Eviricinin Yanıtı

4.4.1 Akım Kontrolü Kıyıcı ile Yapılan Çevirici Yardımı ile Şebekeye Enerji Aktarımı

Güneş pillerinden sağlanan enerjiyi bir fazlı olarak şebekeye aktarmak amacıyla düşünülen ikinci tasarımın blok diyagramı Şekil 4.11'de verilmiştir. Bu tasarımda, buck tipi bir kıyıcı darbe genişlik modülasyonu kullanarak güneş pili dizilerinden elde edilen değişken I_1 dc akımını, doğrultulmuş sinüs bandı içinde değişecek biçimde I_L akımına dönüştürür. Doğal komutasyonlu tam köprü bir tristör evirici ise, doğrultulmuş sinüs

biçimli bu akımı evirerek 50 Hz'lik sinüzoidal akım olarak transformatör üzerinden şebekeye verir. Transformatörün dönüştürme oranı, evirici girişindeki minimum çalışma gerilimi U_1 'i belirler. Akımın transformatör üzerinden şebekeye verilerek hem dizi geriliminin seçiminde esneklik sağlanır hem de güneş pilleri ile şebeke arasında galvanik bir yalıtım temin edilir. Bu yalıtım şebekeye dc akım verilmesini önlediği gibi bir hata halinde dizi ile şebekeyi birbirinden yalıtarak personelin güvenliğini de artırır.

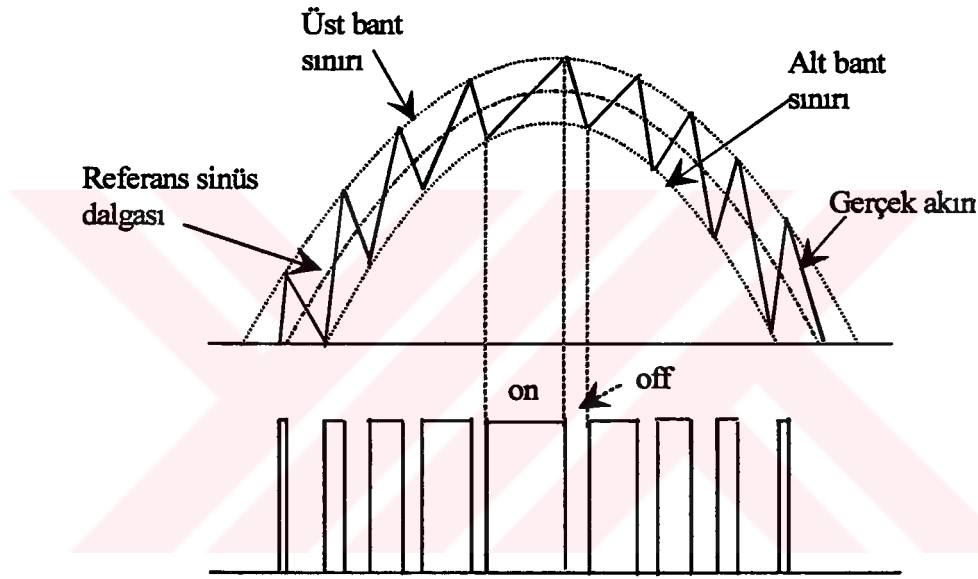


Şekil 4.11 Sistemin Blok Diyagramı

Bu sistemde, şebekeye bağlı 50 Hz'lik küçük bir transformatör üzerinden elde edilen işaret maksimum güç izleyicisi tarafından belirlenen I_{dc} işareti ile çarpılarak, güneş pillerini maksimum güç noktasında çalıştıran ve şebeke gerilimi ile senkronize olan sinüzoidal referans akım işareti I_{ref} 'i oluşturulur. Bu işaret doğrultularak, kıyıcı için referans akım olan doğrultulmuş sinüs biçimli I_{ref}^* elde edilir. Şebekeye aktarılan akımı, I_{ref} referans akımı izlemeye zorlamak için kıyıcı tolerans bant ya da histeriz bant kontrolü olarak bilinen yöntemle kontrol edilir.

Tolerans bant kontrolü, çıkış işaretinin, referans işaret çevresindeki önceden belirlenen bir bant içerisinde kalmaya zorlanması prensibine dayanır. Bunun için Şekil 4.3 'de gösterildiği I_{ref}^* referans akımı, gerçek faz akımı I_L ile karşılaştırılır.

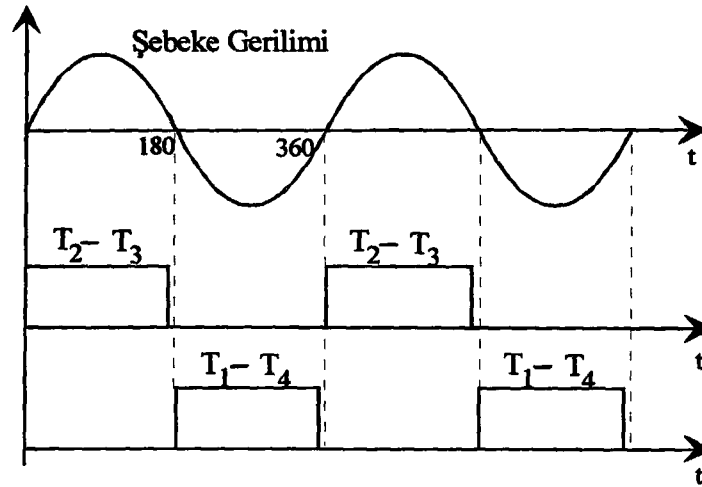
eğimiyle D_1 hızlı diyodu (fast-recovery diode) üzerinden azalması sağlanır. Akım alt banda ulaştığı zaman, Q_1 anahtarı tekrar kapatılarak akımın belirlenen bantlar arasında kalması sağlanır. Anahtarlama frekansı, akımın alt sınırdan üst sınıra yükselme ve üst sınırdan alt sınıra düşme hızına bağlıdır. (4.3) ve (4.4) ifadeleri göz önünde bulundurulursa, anahtarlama frekansının U_1 dizi gerilimine, şebeke geriliminin ani değerine ve L endüktansına bağlı olduğu ve sabit olmayıp akım boyunca değiştiği görülmektedir. Fiziksel olarak kıyıcıda IGBT kullanılacağından ± 1 A 'lik sabit tolerans bandı ve anahtarlama frekansı 20 kHz'i geçmeyecek şekilde akım değişimini sınırlamak için kullanılan endüktansın değeri 4 mH olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.13 Tolerans Band Kontrolü ile Akım Kontrolü

Kıyıcı çıkışındaki yarım sinüs biçimli akım, bir köprü evirici ile (T_1 - T_4) tam sinüs dalgasına dönüştürülerek güç akışının sürekli olarak güneş pili dizisinden şebekeye doğru olması sağlanır. Her 10 ms'de bir anahtarlama yapan köprü eviricide anahtarlama elemanı olarak ucuz maliyetinden ötürü tristör tercih edilmiştir. Tristörlerin doğal komutasyonlarına izin verebilmek için, her bir periyodun sonlarına yakın bir yerde Q_1 anahtarı açılarak iletimde bulunan tristörlerin üzerlerinden akan akımın sıfıra gitmesi sağlanır. Burada anahtarlama elemanı olarak IGBT kullanılması durumunda Q_1 anahtarı

daha geç bir noktada açılarak toplam harmonik distorsiyonun daha küçük olması sağlanabilir. Simülasyonlarda her iki durum ayrı ayrı incelenmiştir.

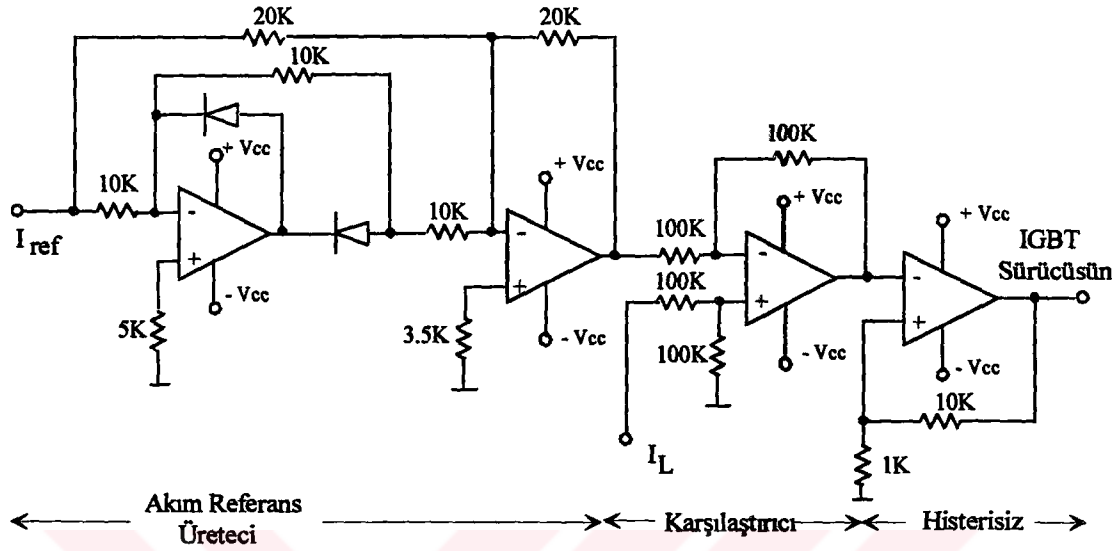


Şekil 4.14 Köprü Eviricideki Tristörlerin İletimde Kaldıkları Süreler

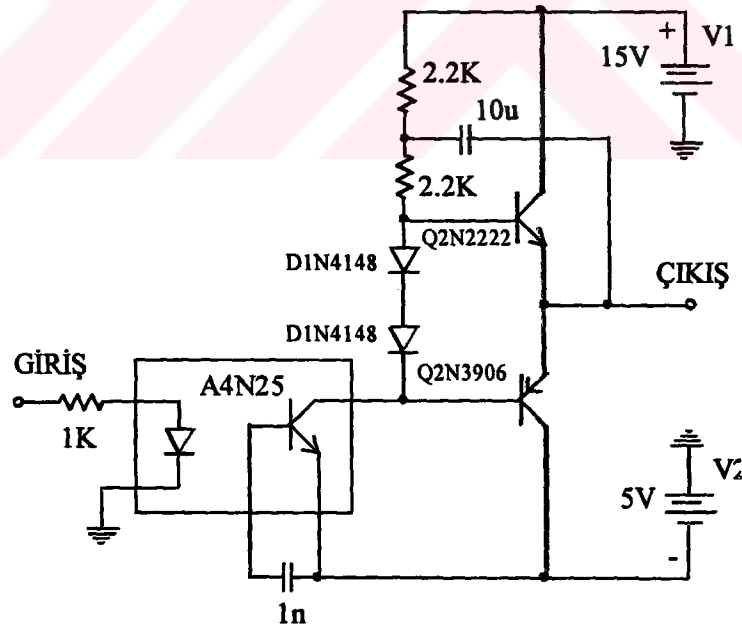
Şekil 4.12'deki güç devresinde gösterilen akım referans üretici, karşılaştırmacı ve histerisiz blokları işlemcide yazılım olarak gerçekleştirilebileceği gibi hızlı karşılaştırmacılar kullanılmak suretiyle işlemcinin dışarısında analog olarak Şekil 4.15 'deki gibi gerçekleştirilebilir. Simülasyonda bu analog yapı aynen kullanılmıştır.

Güç transistörlerinin kazançları düşük olduğu için, özellikle yüksek güçlü çeviricilerde kullanılan anahtarlama elemanlarının baz akımları yüksek olmaktadır. Kontrol amaçlı lojik devreler güç transistörlerini doğrudan sürmek için bu değerdeki akımları sağlayamayacakları için sürücü devrelere ihtiyaç duyulur. Çoğu kez sürücü devrelerin anahtarlama elemanının kesime götürülmesi esnasında negatif gerilim sağlaması gerekir. Aksi taktirde, kesim süresi uzayacağı gibi, kesim esnasındaki kayıplar da fazla olur. Pratikte kullanılan sürücü devrelerinde, birden fazla anahtar elemanının tetiklenmesi gerekir. Ayrıca, büyük güçlü çeviricilerde kontrol devresinin bir ucu gürültünün azaltılması ve güvenlik açısından şebekeye ait topraklama hattına bağlanır. Bu gibi durumlarda baz sürücü devre ile güç devresi arasında elektriksel yalıtımı sağlamak amacıyla bir darbe transformatörüne ya da opto izolatöre ihtiyaç duyulur. İstenilen bu özellikleri yerine getiren push-pull yapıdaki basit bir sürücü devre aşağıda verilmiştir.

Bu devre simülasyonlara dahil edilmiş olup, girişindeki 0V/5V aralığındaki işareti -5V/+15V 'a dönüştürmektedir. Bu sayede güç devresi doğrudan mikrokontrolör çıkışlarından sürülebilmektedir.



Şekil 4.15 Analog Kontrol Devresi

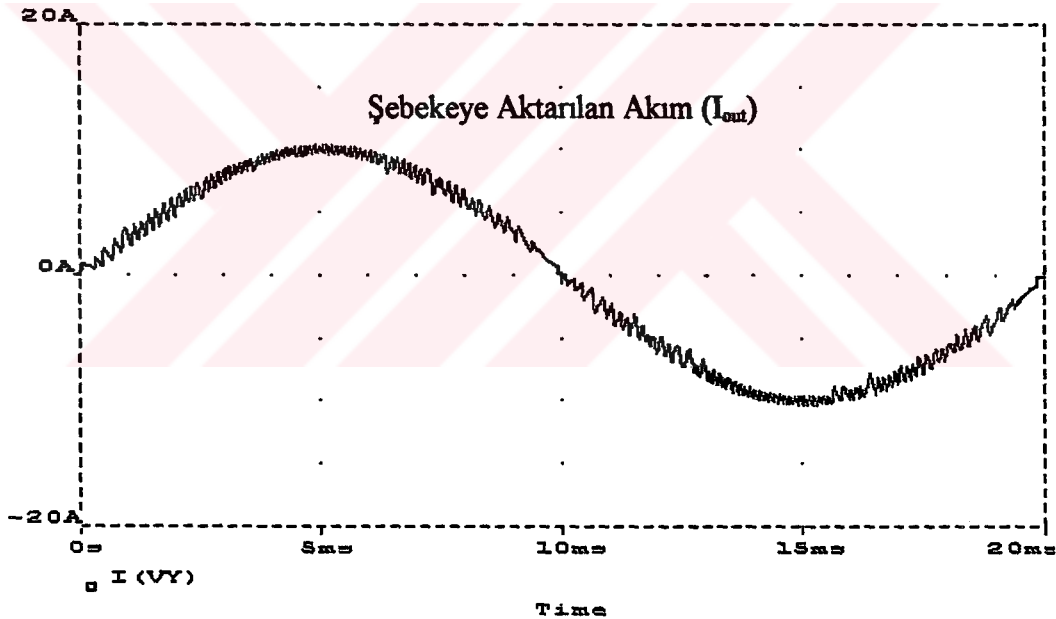


Şekil 4.16 Optik İzolasyon ve Sürme Devresi

4.4.2 Simülasyon Sonuçları

Yukarıda anlatılan sistemin değişik noktalarındaki dalga şekillerinin belirlenebilmesi için gerekli olan simülasyonlar PSPICE’ da yapılmıştır. 220V’luk şebekeye aktarılan sinüs biçimli akımın tepe değeri 10A olup şebeke ile senkronudur.

Simülasyonlar sırasında güneş pili dizisi olarak bir önceki tasarımda olduğu gibi yine, yeni geliştirilen model kullanılmıştır. Anahtarlama elemanı olarak anma değerleri 1200V-23A olan IRGPH50M tipinde IGBT’ler ve modeli ana program parçasında yer alan, üzerinden geçen akım 0.1A’ın altına düştüğü zaman kesime giden tristörler kullanılmıştır. Simülasyonların gerçeğe yakın olabilmesi için yukarıda yer alan sürücü devre ve analog kontrol devresi simülasyonlara dahil edilmiştir. Güç devresi ile birlikte bu devreleri de içeren PSPICE program kodu EK-F’ de verilmiştir. Transformatör ve kullanılan diğer elemanlara ait modeller bu programda yer almaktadır.

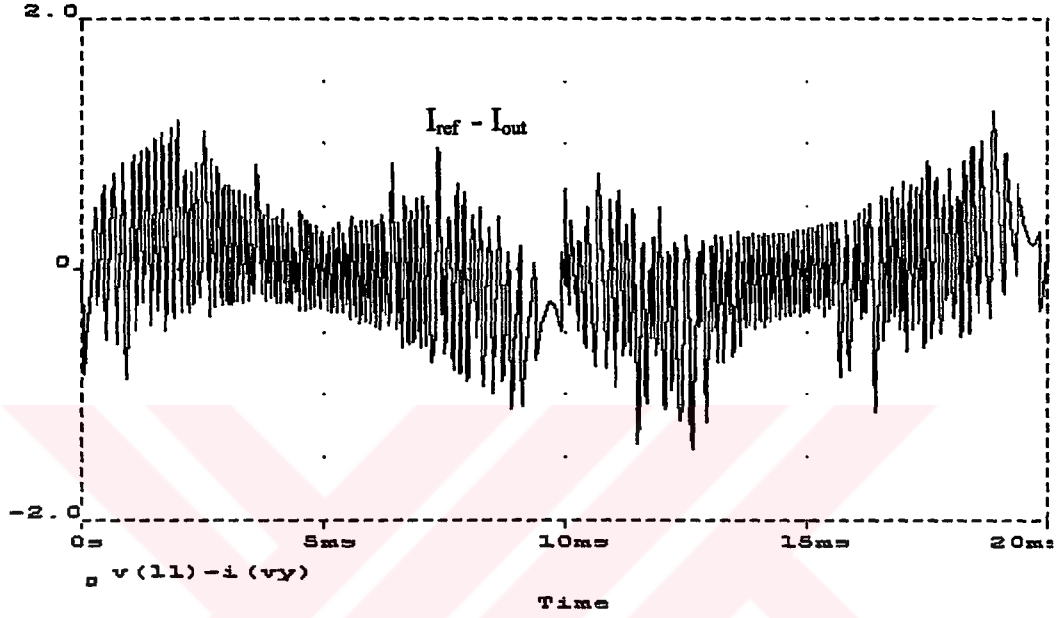


Şekil 4.17 Akım Kontrolü Doğru Akım Tarafında Yapılan Çeviriciden Şebekeye Aktarılan Akım

İlk olarak evirici kısmında tristörler bulunan sistemin simülasyonu yapılmıştır. Tristörlerin komutasyonlarına izin verebilmek için, tolerans bant kontrolü ile kontrol edilen kıyıcı kısmındaki IGBT her yarım periyodun sonuna gelmeden 600 μ s önce kesime

götürülmüştür. Bu durumda bir peryod boyunca şebekeye aktarılan akımın dalga şekli aşağıda görülmektedir.

Sistemde kullanılan elemanlar $\pm 1A$ 'lık bir bant genişliği elde edilecek biçimde seçilmiştir. Referans akım ile şebekeye verilen akım arasındaki farkı gösteren Şekil 4.18' den bu bant sınırları içerisinde kaldığı görülmektedir.



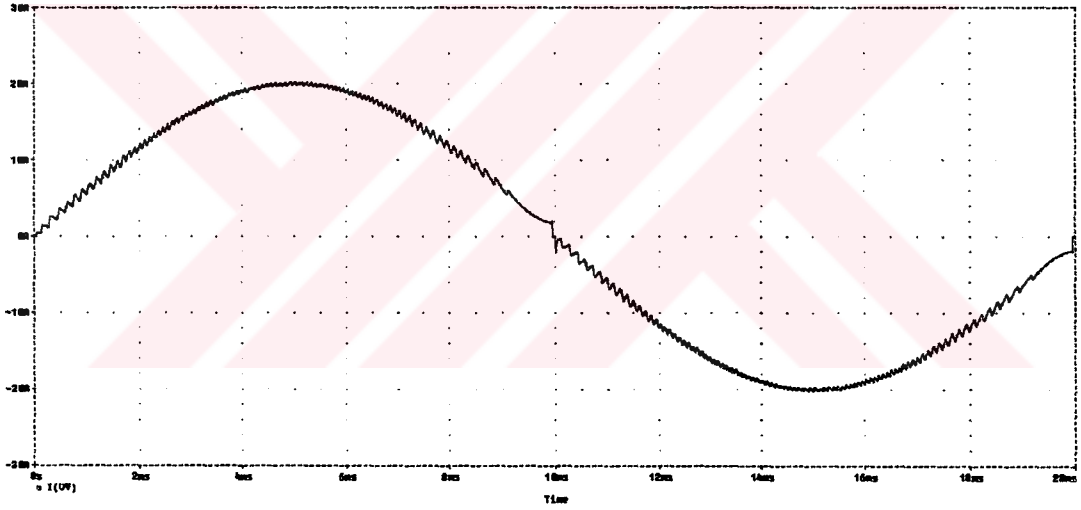
Şekil 4.18 Akım Referansı ile Şebekeye Verilen Akım Arasındaki Fark

Yapılan Fourier analizine ilişkin sonuçlar Tablo 4.3' de verilmiştir. Buna göre toplam harmonik distorsiyon %1.342, güç katsayısı ise (4.2) denkleminde 0.99 olarak bulunmuştur.

Yapılan ikinci simülasyonda akım referansı olarak 20A alınıp, evirici kısmında tristör yerine IGBT kullanılmıştır. Bu durumda tristörlerde olduğu gibi bir komutasyon sorunu ile karşılaşmadığı için peryodun sonlarına daha fazla yaklaşılabilmiştir. Bunun sonucunda toplam harmonik distorsiyon %0.872'ye düşmüş, zaten yüksek olan güç katsayısı biraz daha yükselmiştir. Fakat kısa devre olayına izin vermemek için yine de 100 μs 'lik bir güvenlik payı bırakılmıştır. Simülasyon sonucunda elde edilen dalga şekli aşağıda verilmiştir.

Tablo 4.3 PSPICE'dan Elde Edilen Fourier Analizi Sonuçları

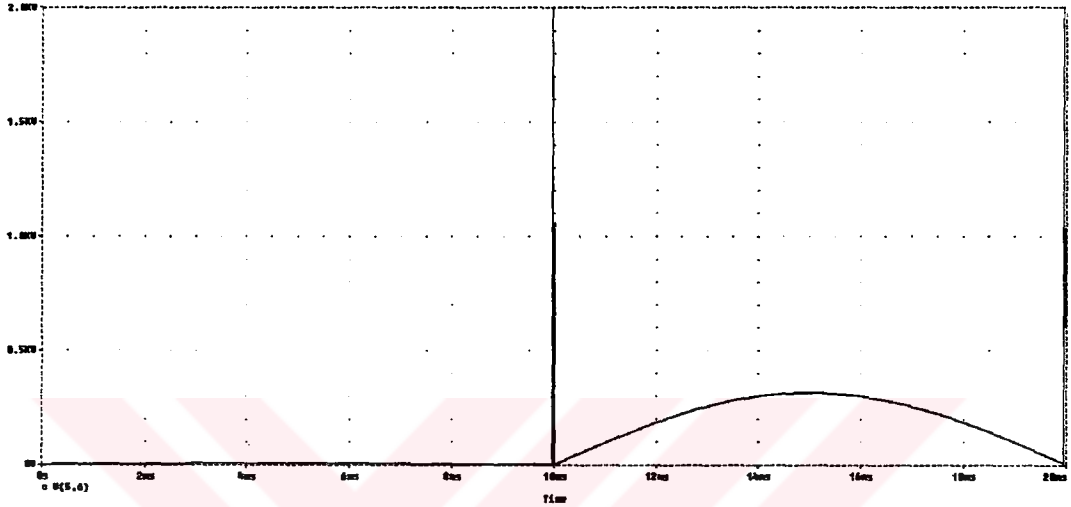
DC Bileşen : -1.302E-02					
Hamonik No	Frekans (Hz)	Fourier Bileşeni	Normalize Bileşen	Faz (Derece)	Normalize Faz (Der.)
1	5.000E+01	9.941E+00	1.000E+00	-1.402E+00	0.000E+00
2	1.000E+02	4.215E-02	4.240E-03	-1.041E+02	-1.027E+02
3	1.500E+02	1.585E-02	1.594E-03	-3.326E+00	-1.923E+00
4	2.000E+02	1.399E-02	1.407E-03	1.894E+01	2.034E+01
5	2.500E+02	1.113E-01	1.119E-02	1.866E+01	2.006E+01
Toplam Harmonik Distorsiyon		1.342E-2			



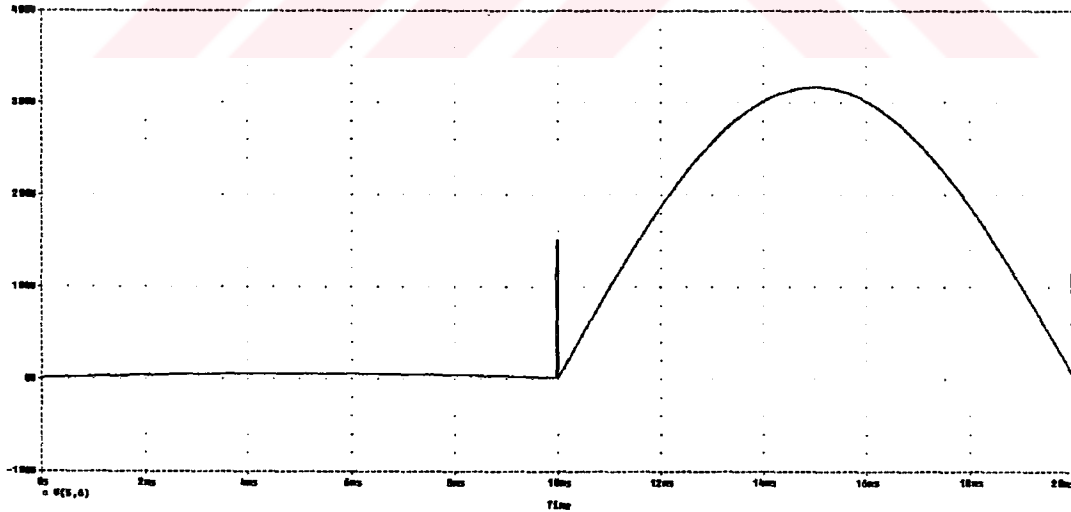
Şekil 4.19 Eviricide Tristör Yerine IGBT Kullanılması Durumunda Şebekeye Aktarılan Akım

Anahtarlama elemanlarının açılıp, kapanmaları esnasında oluşan yüksek gerilimler elemana zarar verecek düzeylere ulaşabilmektedir. Elemanı bu zararlı etkiye karşı korumak amacıyla “Snubber” olarak adlandırılan devreler kullanılmaktadır. Simülasyonlarda snubber olarak elemanın kollektör ve emetör uçlarına paralel olarak

bağlanan, birbirine seri bağlı $100\ \Omega$ ' luk bir direnç ve 220nF ' lik bir kondansatör kullanılmıştır. Snubber kullanılması ve kullanılmaması durumunda eleman uçlarında oluşan gerilimler aşağıda gösterilmiştir. Görüldüğü gibi snubber kullanılmaması durumunda anahtarlama esnasında kV' lar mertebesinde gerilimler oluşmaktadır.



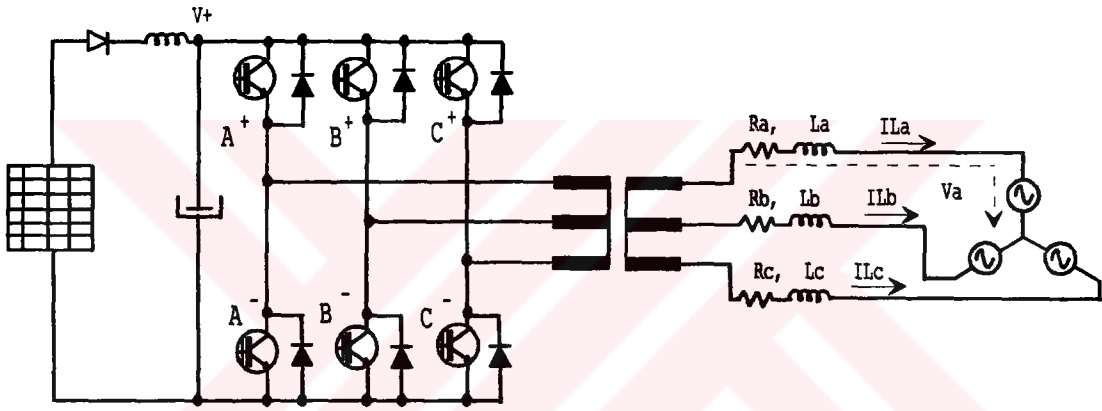
Şekil 4.20 Snubber Kullanılmaması Durumunda Eleman Uçlarında Oluşan Gerilim (V_u)



Şekil 4.21 Snubber Kullanılması Durumunda Eleman Uçlarında Oluşan Gerilim (V_u)

4.5.1 Güneş Pili Dizilerinden Şebekeye Akım Kontrollü Üç Fazlı Evirici ile Enerji Aktarılması

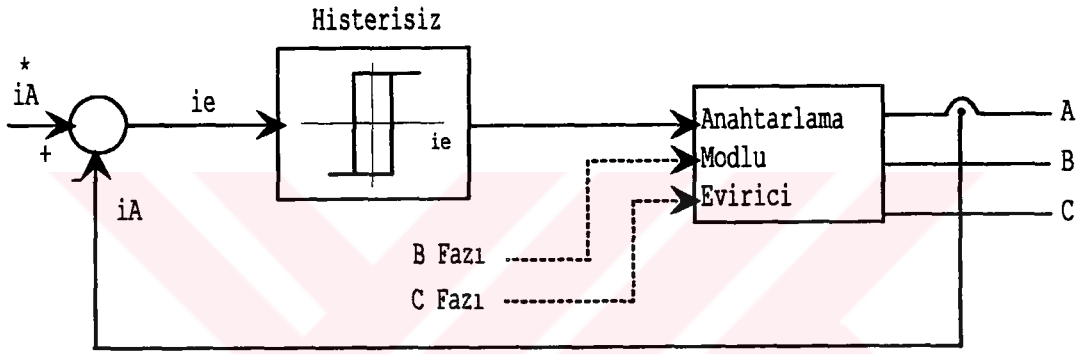
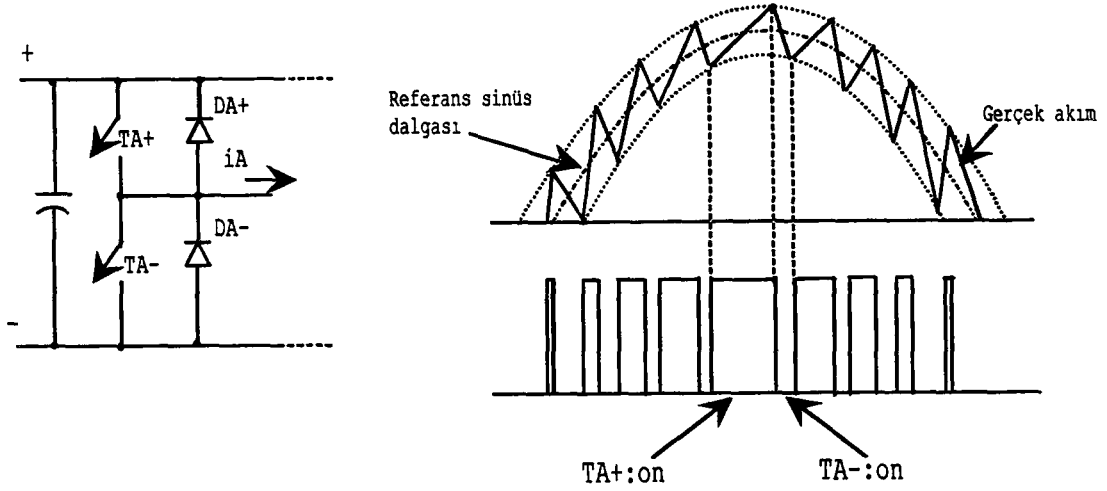
Güneş pili dizilerinden şebekeye üç fazlı olarak enerji aktarmak amacıyla tasarlanan sistemin güç devresi Şekil 4.22 'de verilmiştir. Güç devresi, anahtarlama elemanı olarak ters diyotlara sahip IGBT' ler kullanılan ve anahtarlama modunda çalışan üç fazlı bir evirici, üç fazlı bir transformatör, akımın yükselme ve düşme hızını istenen değerlerde sağlayacak direnç ve endüktanslardan oluşmaktadır. Ayrıca güç devresinin girişine bir filtre ve şebekeden güneş pili dizisine enerji akışını önlemek amacıyla bir diyot eklenmiştir.



Şekil 4.22 Akım Kontrollü Üç Fazlı Eviricinin Güç Katı

Sistemde aralarında 120 derece faz farkı olan her bir fazın akım kontrolü ayrı ayrı Şekil 4.23 'de gösterildiği gibi tolerans bant kontrolü ile yapılmaktadır. Akım üst bant sınırına ulaşana kadar üst koldaki eleman, üst sınırdan alttaki sınıra kadar ise alt koldaki eleman iletimde kalarak akımın belirli bir referansın etrafında önceden belirlenen sınırlar içerisinde kalması sağlanmaktadır.

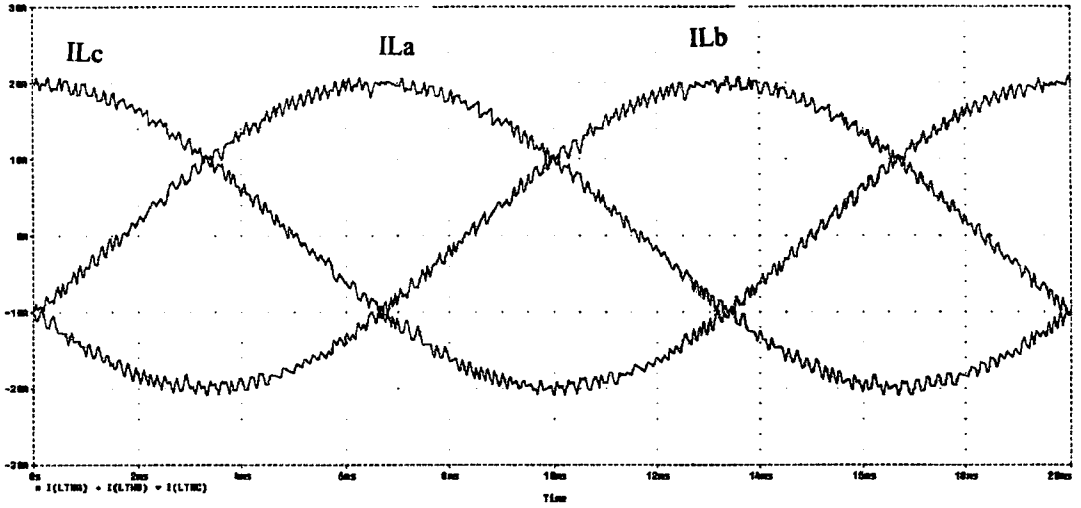
Bunun için gerçek faz akımı bir önceki tasarımda anlatıldığı gibi referans sinüs akımı ile karşılaştırılarak bir hata işareti oluşturulur. Daha sonra bu hata işareti bir histerisiz bloğuna sokularak gerekli kontrol işaretleri oluşturulur.



Şekil 4.23 Tolerans Bant Kontrolü ile Akım Kontrolü

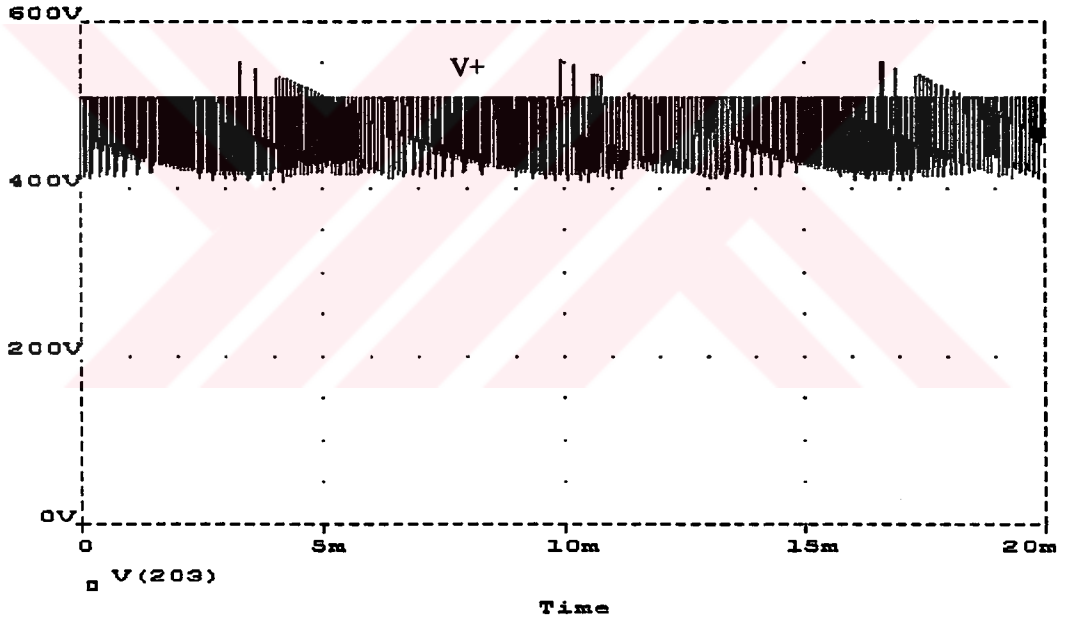
4.5.2 Sistemin Simülasyonu

Sistemin simülasyonu diğer tasarımlarda olduğu gibi yine PSPICE' da yapılmıştır. Anahtarlama elemanı olarak AA anahtar modeli ve uçlarında snubber olan diyot modeli kullanılmıştır. EK-G' de verilen program kodunda kullanılan tüm elemanların modelleri verilmiştir. Direnç ve endüktans değerleri 0.8Ω ve 10mH seçilip, 20A 'lık akım referansı için $\pm 1\text{A}$ 'lık bir bant genişliği öngörülmüştür. Simülasyon sonucunda bir periyot boyunca her üç fazdan şebekeye aktarılan akımların dalga şekilleri aşağıda verilmiştir.



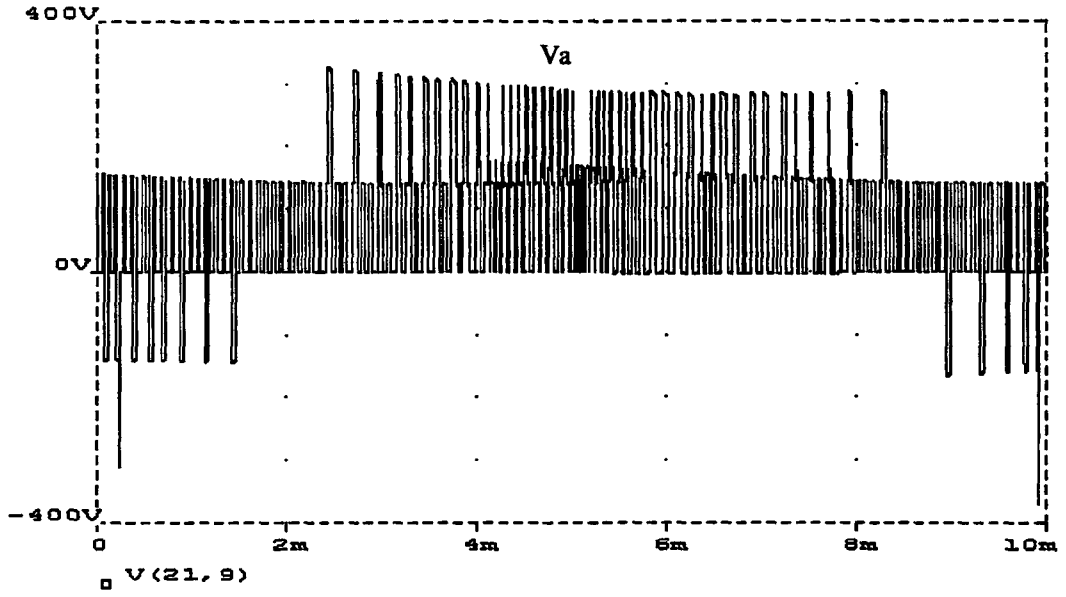
Şekil 4.24 Bir Peryot Boyunca Şebekeye Aktarılan Akımlar

Üç fazlı sistemde pil uçlarındaki gerilimin değişimi Şekil 4.25’ de verilmiştir.



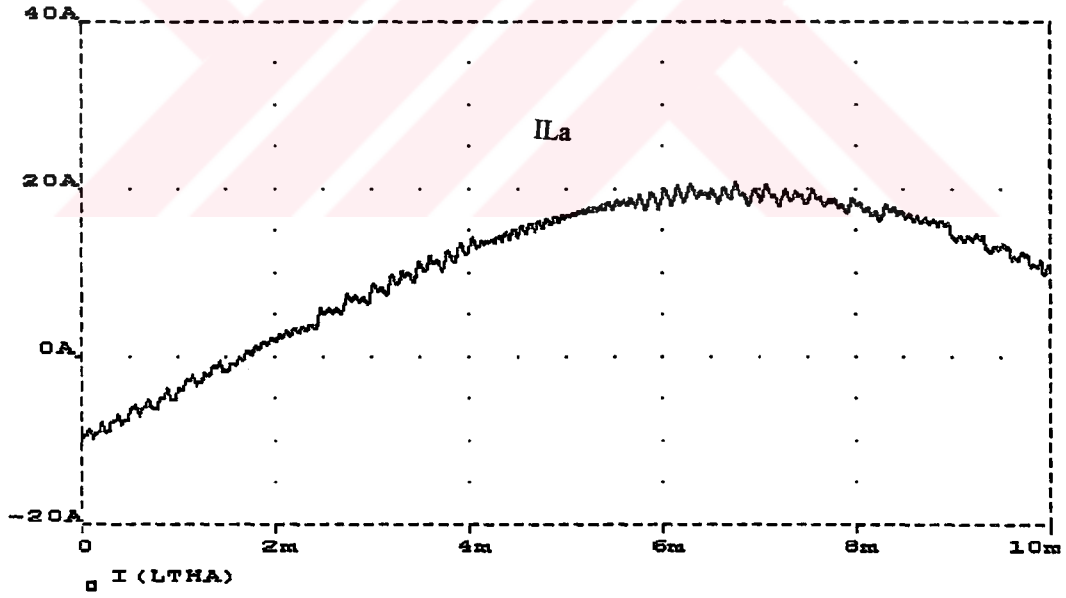
Şekil 4.25 Pil Uçlarındaki Gerilimin Değişimi

Yarım periyot boyunca A fazından şebekeye uygulanan gerilim ve aktarılan akım aşağıdaki şekilde verilmiştir. Evirici anahtarlama modunda çalıştığı için şekilde de görüldüğü gibi şebekeye anahtarlama gerilimleri uygulanmaktadır. Simülasyon sonucunda elde edilen toplam harmonik distorsiyon % 0.5856’dır.



Time

(a)



Time

(b)

Şekil 4.26 Yarım peryot boyunca Şebekeye Uygulanan (a) Gerilim (b) Akım

BÖLÜM 5

GÜNEŞ PİLİNDEN ELDE EDİLEN ENERJİNİN KONTROLU

5.1 Giriş

Kontrol açısından yapılan çalışma güneşten maksimum gücün yüke aktarılması üzerinedir. Maksimum güç noktası, ışık şiddetine ve sıcaklığa bağlı olarak dinamik bir şekilde değişmektedir. Bu nedenle kontrol algoritması ile söz konusu noktanın sürekli izlenmesi ve uygun kontrol işaretlerinin üretilmesi gerekir. Bu amaçla iki yöntem ele alınabilir. Bunlardan biri güneş pili modeli kullanarak bu pilin kısa devre akımının ölçülmesi ve bu akımdan hareketle o anki ışık şiddeti ve sıcaklığa bağlı olarak değişen maksimum güç noktasının saptanmasına, diğeri ise nominal pil dizisi çıkış akımından hareket ederek akım referans değerlerine artımlar vererek maksimum noktanın yakalanmasına dayanır. Maksimum güç noktası bir kere bulunduğundan sonra artık nominal değer yerine bulunan değere ilişkin akım büyüklüğü baz alınarak maksimum noktanın dinamik aramasına gerçek zamanda devam edilir.

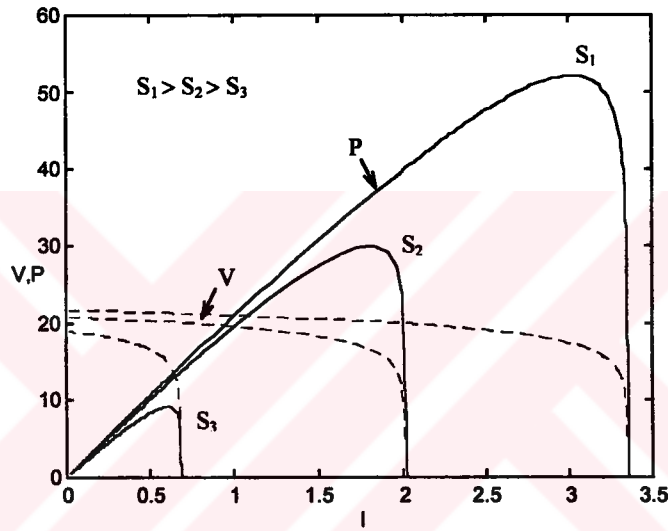
5.2 Kısa Devre Akımı ile Optimum Güç Noktasının İzlenmesi

Parametre olarak S_n aydınlık şiddeti alındığı zaman bir güneş pili dizisinin çıkış karakteristiği Şekil 5.1'deki gibi olmaktadır. Burada I_s , V_s ve P_s sırası ile dizinin çıkış akımını, gerilimini ve gücünü göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi dizinin maksimum güç noktası S_n aydınlık şiddetine bağlı olarak sürekli değişmektedir. Maksimum güç noktasındaki çıkış akımı maksimum akım, pil dizisinin uçları kısa devre edildiği zaman akan akım ise kısa devre akımı olarak adlandırılır.

Şekil 5.2 (a) deneysel olarak elde edilmiş olup [42], $I_{sc}(S_n)$ kısa devre akımı ile $I_{op}(S_n)$ optimum akım ilişkisini göstermektedir. Şekil 5.2 (a)' dan $I_{op}(S_n)$ ' nin , $I_{sc}(S_n)$ ile doğru orantılı olarak değiştiği görülmektedir. Yani ; k_1 orantı katsayısı olmak üzere,

$$I_{op}(S_n) = k_1 I_{sc}(S_n) \quad (5.1)$$

olmaktadır. (5.1) ilişkisi aynı zamanda teorik olarak da ispatlanmıştır [43]. Bu ilişki maksimum güç noktasının izlenmesinde büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Çünkü,



Şekil 5.1 Güneş Pili Dizisinin Çıkış Karakteristiği

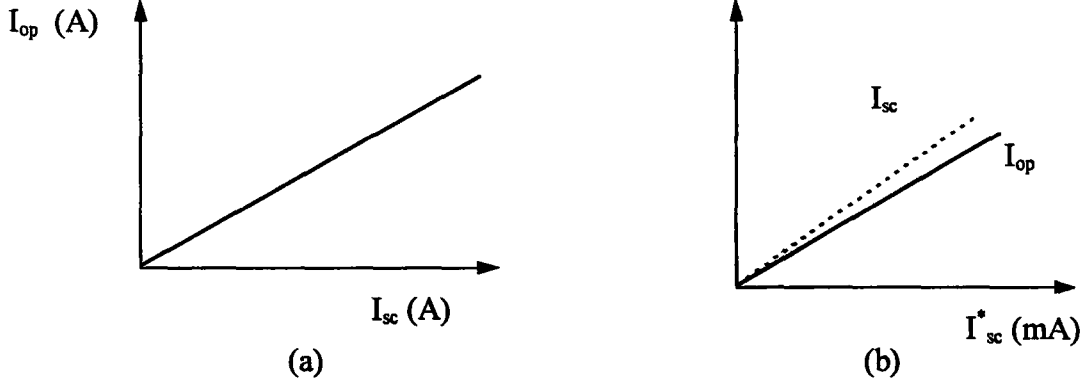
davranışı ana güneş pili dizisi ile aynı olan bir izleyici (monitör) pil hücresi kullanıldığı zaman, izleyici pil hücresinin kısa devre akımı olan $I_{sc}^*(S_n)$ dizinin kısa devre akımı olan $I_{sc}(S_n)$ ile orantılı olacaktır. k_2 dizide paralel olarak bağlı bulunan hücre sayısı olmak üzere,

$$I_{sc}(S_n) = k_2 I_{sc}^*(S_n) \quad (5.2)$$

olacaktır. (5.1) ve (5.2) ifadeleri birleştirilirse,

$$I_{op}(S_n) = k_1 k_2 I_{sc}^*(S_n) = k^* I_{sc}^*(S_n) \quad (5.3)$$

olur. Burada $k^* = k_1 k_2$ 'dir.



Şekil 5.2 Kısa Devre Akımı ile Maksimum Güç Noktasının İzlenmesi

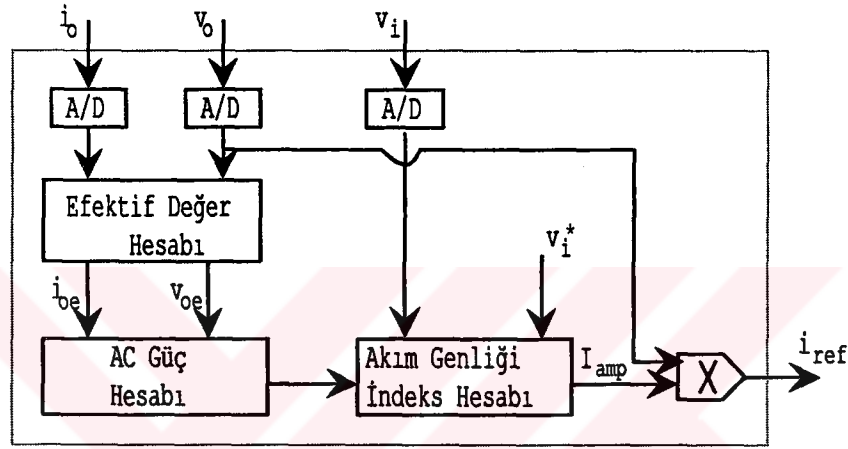
(5.2) ve (5.3) ifadeleri Şekil 5.2 (b)'de görülen deney sonuçları ile de doğrulanmıştır. [42] Dolayısıyla, $I_{sc}^*(S_n)$ monitör güneş hücresi kısa devre akımı referans girişi olarak kullanılıp, $I_{op}(S_n)$ optimum akım tespit edilerek, dizinin maksimum güç noktasını izlemesi sağlanabilir.

5.3 Doğrudan Çıkış Gücü Yardımıyla Maksimum Gücün İzlenmesi

Bu yöntemde güneş pili dizisinin maksimum güç noktasına, doğrudan gücün izlenmesiyle ulaşılır. [44] Güç olarak pilin çıkış gücü alınabileceği gibi, amaca göre yükün uçlarındaki güç de alınabilir. Örnek olarak evirici üzerinden şebekeye maksimum güçte enerji aktaran bir sistem alınırsa, bu durumda evirici çıkışındaki efektif gücün izlenmesi gerekir. Böyle bir uygulamada efektif güç, birer A/D çevirici üzerinden mikroişlemciye verilen evirici çıkışındaki (i_0) akım ve (v_0) gerilim değerlerinden hesaplanır. Dizin maksimum güç noktasında çalışmasını sağlayacak (i_{ref}) akım referansı birkaç farklı şekilde elde edilebilir. Şekil 5.3 akım referansının tümüyle mikroişlemci içerisinde elde edilmesini göstermektedir. Bu tasarımda şebeke ile senkronize olan akım referansı, (v_0)

şebeke gerilimi ile hesaplanan (I_{amp}) akım indeksi çarpılarak elde edilir. Bu çarpma işlemi yazılım olarak yapılabileceği gibi mikroişlemci dışında analog olarak da yapılabilir.

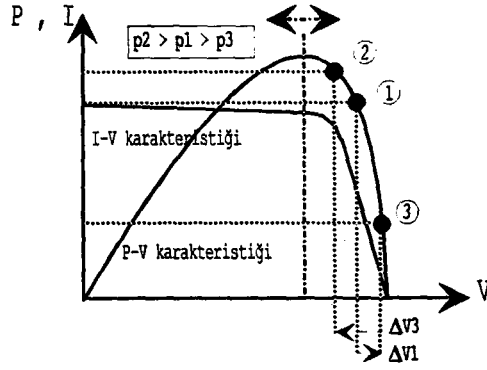
Şekil 5.4 güneş pili dizilerinin maksimum güç noktasının izlenmesine yönelik kontrol yöntemini kavramsal olarak göstermektedir. Güneş hücresinin çalışma noktası $\Delta V1$ kadar arttırılarak şu anki çalışma noktası olduğu varsayılan (1) noktasından ($V1, P1$), (3) noktasına ($V3, P3$) getirilsin ($V3 \geq V1$). Bu durumda üretilen güçte azalma olduğu için ($P3 \leq P1$), pil geriliminin arttırılmak yerine azaltılması gerektiğini görürüz.



Şekil 5.3 Mikroişlemci Kısımında Akım Referansının Üretilmesi

Çalışma noktası bir öncekinin tersi yönde $\Delta V3$ kadar kaydırılarak ($\Delta V3 \geq \Delta V1$) (2) noktasına getirilerek dizinin çıkış gerilimi düşürülürken ($V2 \leq V3$), çıkış gücü arttırılmış olur ($P2 \geq P3$). Bu işlemin birkaç kez tekrar edilmesi çalışma noktasını maksimum güç noktasına her defasında daha da yaklaştıracaktır. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, dizinin çıkış geriliminin güvenli çalışma noktasının dışına çıkmasına izin verilmemesidir.

Maksimum güç noktasının aranması sırasındaki ΔV değişimlerinin genliği, dizinin ürettiği güçteki dalgalanmaların daha hızlı izlenmesini sağlamak amacıyla arttırılırsa, güneş hücresinin çalışma noktası daha hızlı değişir ve maksimum güç noktasına daha hızlı erişilebilir. Fakat bu durumda da, maksimum güç noktasına erişilmesi durumunda dahi, bu nokta etrafında büyük salınımlar meydana gelebilmektedir. ΔV değişimlerinin çok küçük alınması durumunda ise, daha stabil bir çalışma elde edilmesine karşın, evirici,



Şekil 5.4 Maksimum Güç Noktasının İzlenmesi

güneş pili dizisi tarafından üretilen güçteki dalgalanmalara yeteri kadar hızlı yanıt verememektedir.

Bu sakıncaları ortadan kaldırmak amacıyla maksimum güç noktasına karşı düşen zahiri bir (V_i^*) noktası tanımlanır. Başlangıç için bu nokta anma çalışma koşullarındaki maksimum güç noktasına karşı düşebilir. Ölçülen V_i gerilimi (V_i^*) noktasının uzağında olduğunda ΔV değişimleri büyük alınarak maksimum güç noktasının yakınlarına çok çabuk bir şekilde yaklaşılabilir. (V_i^*) noktasına yakın yerlerde ise ΔV değişimleri küçük alınarak maksimum güç noktasının oldukça hassas bir şekilde izlenmesi sağlanabilir.

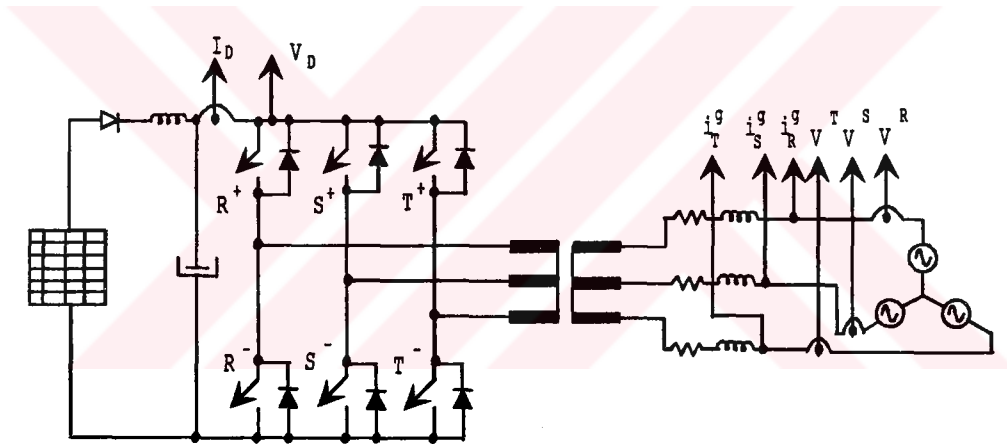
(V_i^*) noktası ışık şiddeti, sıcaklık vb. dış etkenlerle nominal değerinden uzaklaşabilir. Bu durumda arama işleminde (V_i^*) olarak önceki anma değerini kullanmak yerine, maksimum güçte ve kararlı çalışan sistemin o anki ölçülen V gerilimi kullanılır. Ölçme işlemi 15 ms' de bir tekrarlanarak (V_i^*) değeri değiştirilebilir.

BÖLÜM 6

PRATİK KISMA İLİŞKİN TASARIMLAR

6.1 Güç Katının Oluşturulması

Güç katında anahtarlama kayıpları az olan IGBT' ler kullanılacaktır. 10 kHz anahtarlama frekansında çalışacak olan sistem çıkışındaki özel yapılı bir transformatör üzerinden güneş pil sisteminden elde edilen enerji şebekeye aktarılacaktır.

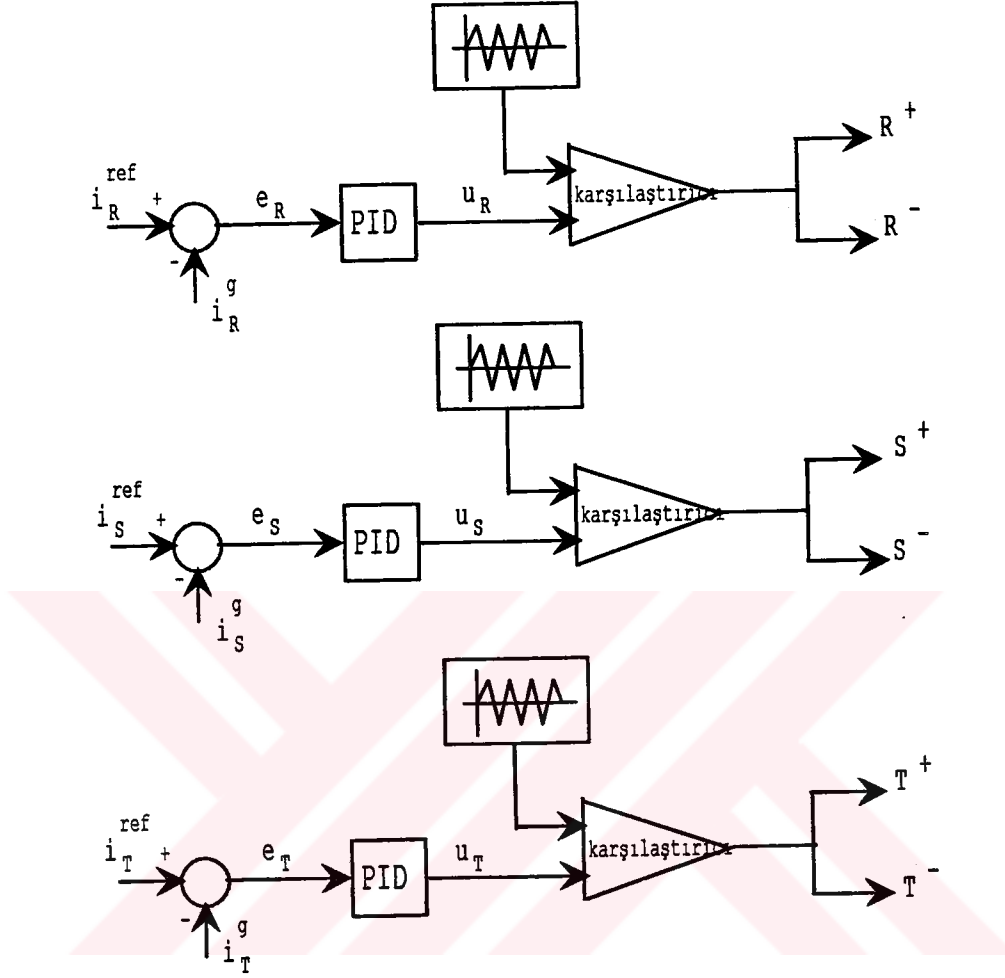


Şekil 6.1 Güç Devresi

6.2 Kontrol Katının Oluşturulması

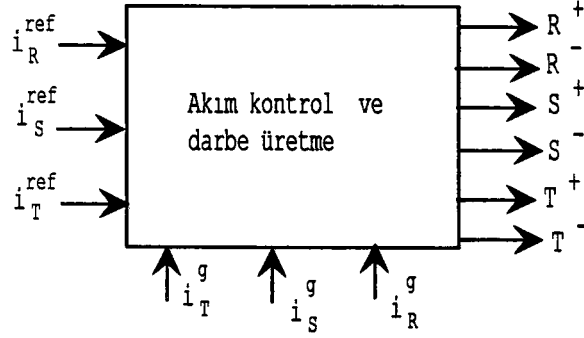
Sistemin kontrol işlevi için pil gerilimi ve akımı özel Hall sondalı yarı iletken algılayıcılar (LEM akım ve gerilim birimleri) kullanılarak ölçülecektir. Bu sayede maksimum güç noktasının saptanmasında bu değerlerden yararlanılacaktır. Üretilen üç fazlı referans akım değerleri ile şebeke tarafında akım transformatörleri veya yine LEM' ler kullanılarak elde edilen gerçek akım değerleri karşılaştırılarak elde edilen hata işaretleri her bir faz için bir tane olmak üzere PID kontrolörler ile işlenip elde edilen çıkış anahtarlama frekansını belirleyen üçgen dalga ile karşılaştırılacaktır.

Karşılaştırma sonuçları ise IGBT' lere uygulanacak anahtarlama dizilerini üretecektir. Bu yapıya ilişkin blok şema aşağıda verilmiştir.



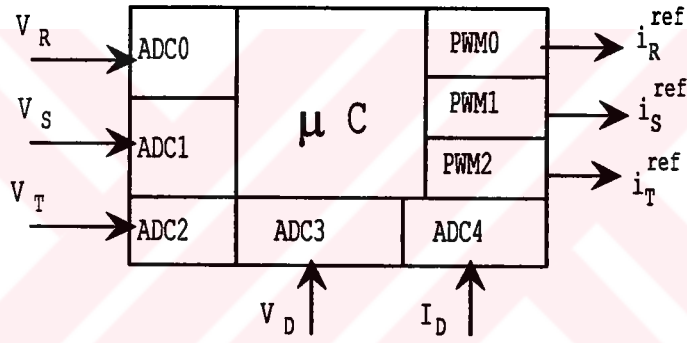
Şekil 6.2 Akım Kontrolü ve Darbe Üretme

Akım referansı bir mikrokontrolör üzerinden şebeke ile senkron bir sinüzoidal işaret biçiminde üretilmektedir. Şebeke senkronizasyonunun sağlanması için şebeke gerilimleri gerilim transformatörleri yardımı ile alınmaktadır. Analog olarak ölçülen şebeke gerilim değerlerinden yararlanılarak akım referans işaretinin şebeke ile senkronizasyonu sağlanacak hem de pil gerilimi ile karşılaştırılarak pil geriliminin düşük olduğu anlarda anahtarlama yapılması engellenecektir. Üretilen akım referanslarının genlikleri, ölçülen pil gerilim ve akımından hareketle maksimum gücü verebilecek akım genliği kontrolör tarafından hesaplanır ve bu değer ile şebeke normalize işareti her örnekleme anında çarpılarak akım referans değerleri kontrolörün



Şekil 6.3 Akım kontrol ve darbe üretme katı bloğu

PWM darbe üretici çıkışlarında oluşturulur. Oluşturulan işaretler alçak geçiren bir filtre çıkışı ile sinüzoidal işaretlere dönüştürülüp, karşılaştırmaya uygulanır. Mikrokontrolör ve bunda yer alan çevre birimlerini gösteren blok şema aşağıda verilmiştir.



Şekil 6.4 Mikrokontrolör Katı

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Fosil yakıtların ömürlerinin sınırlı olması ve kullanımlarının çevrede oluşturduğu kötü etkilerinden dolayı alternatif enerji kaynakları yüzyılımızın ikinci yarısından itibaren önem kazanmaya başlamışlardır. Bu alternatif enerji kaynakları arasında, temiz ve ucuz bir kaynak olan güneş enerjisinin, dünyanın en iyi güneş alan bölgelerinden biri olan ülkemiz için ayrı bir yeri vardır.

Güneş enerjisinden doğrudan elektrik enerjisi üretimi, yarı iletken fotodiyotlardan oluşan güneş modülleri ile yapılmaktadır. Bu yolla sağlanan elektrik enerjisinin üretimi aşamasında diğer üretim sistemlerinde olan gürültü, titreşim, atık, kirlenme vb. sorunlar yoktur. Güneş pili modüllerinin verimi düşük, kullanım ömürleri 30-40 yıl dolayındadır.

DPT desteği ile Kontrol ve Kumanda Anabilim Dalı tarafından gerçekleştirilmekte olan bir proje çerçevesinde, güneş pili modüllerinden sağlanan elektrik enerjisinin ulusal şebekeye aktarılmasına çalışılmaktadır. Şebeke bağlantılı sistemlerde, şebeke bir depolama birimi olarak kullanıldığı için fazla enerjiyi akümülatörlerde depo edecek sistemi kurma zahmetinden kurtulmuş olunmaktadır.

Gerçekleştirilecek sistem gerek güç katının boyutlandırılması gerekse de kontrol algoritmalarının gerçekleştirilmesi için öncelikle modellenmiştir. Sistemin en önemli kısımları güç katı ve mikrokontrolör ünitesidir. Güç katının modellenmesi özellikle kullanılacak yarı iletken anahtar elemanlar ve filtre devrelerinin tasarlanması için oldukça önemlidir. Güç katı, güneş pili modülleri, evirici katı ve filtre devrelerinden oluşmaktadır. Bu oluşum içinde kaynak elemanımız güneş pili modüllerinin modellenmesi oldukça önemlidir. Bu amaçla geniş bir literatür taraması yapılarak değişik güneş pili modelleri elde edilmiş ve bu modeller çeşitli devre analiz programları ile simüle edilmiştir. Bu arada elde edilen bu modeller ile karşılaştırıldığında hatası oldukça küçük ve basit yapıda olan eşdeğer devre yaklaşımına dayalı yeni bir model geliştirilmiştir. Bu modele ilişkin çalışma yurt içinde bir konferansta sunulmak üzere kabul edilmiştir.

Güneş pili enerjilerinden sağlanan enerjiyi şebekeye aktarmak amacıyla ikisi bir fazlı, biri üç fazlı olmak üzere üç farklı tasarım incelenmiştir. Bu tasarımlar simüle edilirken elde geldiğince gerçeğe en yakın modeller kullanılmaya çalışılmıştır. Bu tasarımların her üçü de oldukça iyi sonuçlar vermiş olmasına karşın özellikle akım kontrollu üç fazlı evirici basit yapısı ve kontrol düzeneği ile en iyi alternatif olarak görülmektedir.

Güneş pili hücrelerinden maksimum verimi alabilmek için, güneş pili hücresinin maksimum güç noktası olarak adlandırılan noktada çalıştırılması gerekmektedir. Son bölümde bu noktada çalışmayı sağlayacak değişik yöntemler incelenmiştir.



KAYNAKLAR

- [1] ODELL, R.P., Continuing Long-Term Hydrocarbons Dominance of World Energy Markets : An Economic And Societal Necessity, Energy and the Environment Into the 1990s, Vol. 1, Pergamon Press,1990
- [2] ÜLTANIR, M.Ö., Türkiye'nin Enerji Planlaması ve Politikası Kapsamında Güneş Enerjisinin Yeri Ne Olmalıdır ?, Güneş Enerjisi Konferansı Tebliğleri, Ankara , 16-18 Mayıs 1984
- [3] KONAKLIOĞLU, T., Enerji Dengemiz, Yeni ve Yenilenebilir Enerji Kaynaklarımız, Güneş Enerjisi Konferansı Tebliğleri, Ankara , 16-18 Mayıs 1984
- [4] KANATLIGİL, C.,Güneş Enerjisi İçin Genel Değerlendirmeler ,Güneş Enerjisi Konferansı Tebliğleri, Ankara , 16-18 Mayıs 1984
- [5] EİEİ-Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Zamansal ve Alansal Dağılımı, Haziran 1983
- [6] STEVENS, J.S., Power Windows, Building-integrated photovoltaics IEEE Spectrum, Vol. 33 October, pp 49-55
- [7] WEC Report 1993 RenewableEnergy Resources Oppurtunities and Constraints,1990-2020,WEC Survey of Energy Resources,1992, 2000'li Yıllarda Türkiye'nin Enerji Politikası, MÜSİAD Araştırma Raporları-14
- [8] HAMMONDS, M., Photovoltaics in 1996, Power Quality International Product News, Vol. 2, No. 3, Issue 3/96
- [9] SCHAEFER, J.C., Review of Photovoltaic Power Plant Performance and Economics, IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 5, No. 2, June 1990
- [10] ACARMAN,T., Güneş Pillerinden Şebekeye Enerji Aktarılmasının Analizi veTasarımı, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans Tezi, Ocak 1995
- [11] POST,H.N., THOMAS,M.G., Photovoltaic Systems For Current and Future Applications, Solar Energy, Vol. 41, No. 5, pp. 465-473, 1988
- [12] ABENAVOLI,R.I., Technical and Economic Comparison of Electric Generators for Rural Areas, Solar Energy, Vol. 47, No. 2, pp. 127-135, 1991

- [13] UYAREL, A.Y., SAİT ÖZ, E., Güneş Enerjisi ve Uygulamaları, pp 1-2, 159-172, 1987
- [14] McNELIS,B., The Direct Conversion of Solar Energy to Electricity, United Nations Publication, New York, 1992
- [15] MÖLLER, J., Semiconductors For Solar Cells, Norwood, USA, 1993
- [16] GREINER,R.A., Semiconductor Devices and Applications, Mc GRAW-HILL, 1961
- [17] MESSENGER,R.A, ASH,M.S., The Effects of Radiation on Electronic systems, Van Nostrand Reinhold, New York,1986
- [18] HSIEH,J.S., Solar Energy Engineering, Prentice-Hall, New Jersey, 1986
- [19] CHIRLIAN,P.M., ZEMANIAN,A.H., Electronics McGRAW-HILL, 1961
- [20] LEBLEBİCİ,D., Elektronik Elemanları Ders Notu, İ.T.Ü. Elektrik Elektronik Fak., Ofset Baskı Atölyesi, 1990
- [21] AGCBAYAR,D., ENBISH,N., Nümerical Analysis of Current-Voltage and Spectral Response Characteristics of Solar Cells, Dept of Solid State Physics, Inst. of Mongolian Academy of Science, Ulaanbaatar, Mongolia
- [22] RASHID,M.H., Spice For Power Electronics and Electric Power, Indiana Universty, Fort Wayne, USA
- [23] MOHAN,N., Power Electronics: Computer Simulation, Analysis, and Education Using Pspice, Minnesota Power Electronics Research and Education, Minneapolis, USA
- [24] CRAPARO,J.C., THACHER,E.F., A Solar -Electric Vehicle Simulation Code, Solar Energy, Vol. 55, No.3, pp. 221-234, 1995
- [25] LAWRENCE,W.B., WICHERT,B., A Versatile PV Module Simulation Model Based on PSI/e, Solar Energy, Vol. 52, No.2, pp. 191-195, 1994
- [26] CHAN,C.H., WONG,K.P., An Equivalent Circuit Approach to Solar Cell Modeling, Dep. of Electrical and Electronic Eng., Hong Hong University
- [27] KHOUZAM,K., HOFFMAN,K., Real-Time Simulation of Photovoltaic Modules, Solar Energy, Vol. 56, No.6, pp. 521-526, 1996
- [28] KATAN,R., AGELIDIS,V.G., NAYAR,C.V., PSPICE Modeling of Photovoltaic Arrays, International Journal of Electrical Engineering Education, Vol. 32, No. 4, pp. 319-332, Oct. 1995

- [29] QUASCHNING,V., HANITSCH,R., Numerical Simulation of Current-Voltage Characteristics of Photovoltaic Systems with Shaded Solar Cells, Solar Energy, Vol. 56, No.6, pp. 513-520, 1996
- [30] KUNTMAN,H., Simple and Accurate Nonlinear OTA Macromodel for Simulation of CMOS OTA-C Active Filters, International Journal of Electronics, Vol. 77, No.6, pp. 993-1006, 1994
- [31] TARIM,N., YENEN,B., KUNTMAN,H., Simple and Accurate Nonlinear Current Conveyor Macromodel, Melecon 96, Vol. 1, pp. 447-450, Italy, 1996
- [32] HARADA,K., ZHAO,G., Controlled Power Interface Between Solar Cells and AC Source, IEEE Tran. on Power Electronics, Vol. 8, No. 4, pp. 654-662, October 1993
- [33] VACHTSEVANOS,G., KANG,H., Simulation Studies of Islanded Behavior of Grid-Connected Photovoltaic System, IEEE Tran. on Energy Conversion, Vol. 4, No. 2, pp. 177-183, June 1989
- [34] FUJIMOTO,H, KUROKI,K., Photovoltaic Inverter with a Novel Cycloconverter for Interconnection to a Utility Line, IEEE Tran. on Industrial Electronics, Vol.7, pp. 2461-22467, 1995
- [35] KALAITZAKIS,K.C., VACHTSEVANOS,G., On The Control and Stability of Grid Connected Photovoltaic Sources, IEEE Tran. on Energy Conversion, Vol. EC-2, No. 4, pp. 556-562, Dec. 1987
- [36] WASYNCZUK,O., ANWAH,N.A, Modeling and Dynamic Performance of a Self-Commutated Photovoltaic Inverter System, IEEE Tran. on Energy Conversion, Vol. 4, No. 3, pp. 322-328, Sep. 1989
- [37] RAHMAN,S., CHOWDHURY,B.H, Simulation of Photovoltaic Power Systems and Their Performance Prediction, IEEE Tran. on Energy Conversion, Vol. 3, No. 3, pp. 440-446, Sep. 1988
- [38] STEIGERWALD,R.L., FERRARO,A., TURNBULL,F.G., Application of Power Transistors to Residential and Intermediate Rating Photovoltaic Array Power Conditioners, IEEE Tran. on Industry Applications, Vol. IA-19, No. 2, March/April 1983
- [39] MOHAN,N., Power Electronics : Converters, Applications, and Designs, John Wiley and Sons, 1989, USA
- [40] BOEGLI,U., ULMI,R., Realization of a New Inverter Circuit for Direct Photovoltaic Energy Feedback into the Public Grid, IEEE Tran. on Industry Applications, Vol. IA-2, No. 2, March/April 1986

- [41] NAKATA,H., KODAMA,H., TAKEBAYASHI,T., FUJII,S., HIYOSHI,K.,
Utility Interactive PV Inverter with High-Frequency Transformer
Link,IPEC'95.,pp 962-966
- [42] MATSUO,H., KUROKAWAF., New Solar Cell Power Supply Using a Boost
Type Bidirectional DC-DC Converter, IEEE Tran. on Industry Applications,
Vol. IE-31, No. 1, Feb. 1984
- [43] TAKAHASHI,K., HAMAKAWA,Y., USHIKORAWA,A., Solar Cell Power
Generation, Tokyo, Japan : Morikata, 1980
- [44] MAKINO,M., TANAKA,K., MACKAWA,M., Digital Control Method for a
Photovoltaic Power Ssystem, IPEC-Yokohoma, pp. 197-202, 1995



EK A

Eşdeğer Devre Yaklaşımına Dayanan Güneş Pili Modelinin PSPICE Kodu

Güneş Pili Dizilerinin Eşdeğer Devre Yaklaşımına Göre PSPICE Simülasyonu

```
*****
* PSPICE Parameterleri *
*
.OPTIONS RELTOL=0.01 LIMPTS=0 ITL5=0
.PROBE
*
*****
*                               SABİTLER                               *
*****
*   NP   : Paralel Hücre Sayısı *
*   NS   : Seri Hücre Sayısı   *
*   T    : Ortam Sıcaklığı     *
*   IT   : Kısa Devre Akımı Sıcaklık Katsayısı (2.3 E-4) *
*   TR   : Referans Hücre Sıcaklığı (300K) *
*   K    : Boltzman Sabiti (1.38e-23) *
*   Q    : Elektron Yüktü (1.6022E-19) *
*   A,B  : Üretici Katsayıları (A= 2.47, B=3) *
*   EG   : Yarı iletken Malzemenin Band Aralığı(1.11) *
*   IOR  : Diyotun Referans Sıcaklıktaki Ters Doyma Akımı (2.1E-7) *
*   ISC  : Kısa devre Akımı (3.36) *
*   SN   : Normalize Aydınlik Şiddeti *
*   SOLR : Aydınlik Şiddeti *
*   TC   : Hücre Çalışma Sıcaklığı *
*   SH   : Zaman *
*****
*
.PARAM NP=1 NS=21 T=75 IT=2.3E-4 TR=300 K=1.38E-23 Q=1.6022E-19
+A=2.47 B=3 EG=1.11 IOR=2.1E-7 ISC=3.36 RL1={5}
+R1={(NS/NP)*60} R2={(NS/NP)*.555} SH={6.0} VDD={(NS)*(.)}
+ANGLE={((15*SH)-90)*(6.281/360)} SOLR=1000 SN={SOLR/1000}
+TC={(SOLR/800)*23+273+(6.5*T)}
+IO={(IOR*(PWR((TC/TR),3)))*EXP(((Q*EG)/(B*K)))*((PWR(TR,-1))-
(PWR(TC,-1))))}
*
*****
*                               Akım Kaynağı Fonksiyonları                               *
*****
GP 0 1 VALUE {(ISC*SN)+(IT*(TC-TR))*NP}
```

```
GD 3 0 VALUE {{{(IO*(EXP((Q*V(4))/(A*K*TC*NS))))*NP)}}
```

```
*
```

```
*****
```

```
*
```

Paralel ve Seri Dirençler

```
*
```

```
*****
```

```
RSH 3 0 {R1}
```

```
RS 3 4 {R2}
```

```
R12 1 2 0.0001
```

```
R23 2 3 0.0001
```

```
R50 5 0 20MEG
```

```
*
```

```
*****
```

```
*
```

Değişken Değerli Direnç

```
*
```

```
*****
```

```
RL1 4 0 RMOD 1
```

```
*
```

```
*****
```

```
*
```

Diyot Gerilimi

```
*
```

```
*****
```

```
E1 2 5 VALUE {VDD}
```

```
.MODEL RMOD RES (R=1)
```

```
*****
```

```
*.STEP PARAM TC 300 350 25
```

```
*.STEP PARAM SH 6 12 1
```

```
.PRINT DC V(4),I(RL1)
```

```
.DC RES RMOD(R) 0.01 300 0.1
```

```
*****
```

```
.END
```

EK B

Nümerik Analize Dayalı Pil Modeline Ait MATLAB Programı

```
Iph=3.35;
Is1=2.4e-10;
m1=1;
Is2=3.6e-6;
m2=2;
Rs=50e-2;
Rp=500;
Vbr=-41.5;
a=0.22e-3;
n=3;
Vt=0.935;
V=0:0.01:21.7;
I=[];
for v=V
    v;
    i=1.2;
    di=100;
    while abs(di)>0.000001
        f=Iph-Is1*(exp((v+i*Rs)/(m1*Vt))-1)-Is2*(exp((v+i*Rs)/(m2*Vt))-1)-
        (v+i*Rs)/Rp-i*a*(v+i*Rs)*(1-(v+i*Rs)/Vbr)^(-n);
        df=-((Is1*Rs)/(m1*Vt))*exp((v+i*Rs)/(m1*Vt))-
        ((Is2*Rs)/(m2*Vt))*exp((v+i*Rs)/(m2*Vt))-(Rs/Rp)-1-a*Rs*(1-
        (n*(v+i*Rs)/(v+i*Rs-Vbr)))*(1-(v+i*Rs)/Vbr)^(-n);
        i1=i-f/df;
        di=i-i1;
        i=i1;
    end
    I=[I i];
end
```

EK C

Yeni Geliştirilen Pil Modeline Ait PSPICE KODU

YENİ PİL MODELİ

```
*
*****
*                               Diyot Modeli                               *
*****
* D1N4001 model created using Parts version 5.0 on 09/09/96 at 10:44
.model D1N4001 D(Is=100u N=1 Rs=.1 Ikf=0 Xti=3 Eg=1.11 Cjo=1p M=0.333
Vj=.6
+      Fc=.5 Isr=100p Nr=2 Bv=100 Ibv=100u Tt=.1n)
*
H1 1 0 V2 -100
V1 6 1 DC 21.7V
R1 6 7 0.27
R4 7 2 0.1
R2 2 3 0.8
D1 2 4 D1N4001
D2 7 8 D1N4001
V2 4 5 DC 3.55V
V3 8 5 DC 3.7V
V4 5 9 DC -1.08V
E1 9 0 3 0 1
*
*****
*                               Değişken Değerli Direnç                               *
*****
R3 3 0 A1 1
.MODEL A1 RES (R=1 TC1=0 TC2=0)
*****
*
*****
*                               PSPICE Parametreleri                               *
*****
.DC RES A1(R) 0.01 500 .1
.PRINT DC V(3),I(R3)
.PROBE
*****
.END
```

EK D

Gerçek Değer ile Simülasyon Sonuçları Arasındaki Hatayı Hesaplayan MATLAB Programı

```
clear;
% Simülasyon ve Gerçek Karakteristik Değerlerini Yükle
load gerkarak.dat;
load simsonuc.dat;
XX=X1(1,2);
YY=X1(1,3);
the=XX;
for k=2:1084;
    if the~=X1(k,2)
        the=X1(k,2);
        XX=[XX the];
        YY=[YY X1(k,3)];
    end;
end;
XX(1)=0;
A1=[A(:,1)*10/87 A(:,2)*4/105];
A1(42,1)=21.69;
xa=A1(:,1)';
ya=A1(:,2)';
xb=XX;
yb=YY;
ya1=interp1(xa,ya,xb);
yb1=interp1(xb,yb,xa);
[xxa i]=sort([xa xb]);
yya=[ya ya1'];
yya=yya(i);
[xxb i]=sort([xb xa]);
yyb=[yb yb1'];
yyb=yyb(i);
plot(xxa,yya,'w.',xxb,yyb,'y.',xxa,yya-yyb,'r-');
plot(xxa,yya-yyb,'r-')
ess=norm(yya-yyb,2)/norm(yya,2)
```

EK E

Yüksek Frekans Transformatörlü Çeviriciye Ait PSPICE Kodu

Yüksek Frekans Transformatörlü Çevirici

*Güneş Pili Modeli

.model D1N4001 D(Is=1000u N=1 Rs=.1 Ikf=0 Xti=3 Eg=1.11 Cjo=1p M=0.333
Vj=.6

+ Fc=.5 Isr=100p Nr=2 Bv=100 Ibv=100u Tt=.1n)

H1 201 0 V2 -100

V1 206 201 DC 508V

R1 206 202 1.5

R2 202 203 2.75

D1 202 204 D1N4001

V2 204 205 DC 65.0V

E1 205 0 203 0 1

*

*Kontrol İşaretlerinin Üretilmesi

EFLUX 51 0 LAPLACE { V(2,3) } = { 1 / s }

REFLUX 51 0 1MEG

ERRFLX 52 0 TABLE {V(51)} = (-0.015, -1.1) (-0.012, -1) (0.012, 1) (0.015, 1.1)

RERRFL 52 0 1MEG

*

XCOMP1 52 53 COMPHYS PARAMS: VHYS=.1V IC_SW=11V

ESIGB1 54 0 VALUE = { -1 * V(53) }

*

VSIF 60 0 PULSE(0 1V 0 0 0 9.1MS 10MS)

RSIF 60 0 1MEG

EA1 61 0 VALUE={V(60)*V(58)}

EA2 62 0 VALUE={V(60)*V(57)}

EB1 63 0 VALUE={V(60)*V(54)}

EB2 64 0 VALUE={V(60)*V(53)}

*

RSF1 54 0 1MEG

RSF2 58 0 1MEG

*

ESIGIL 55 0 TABLE {I(VISENS) - V(50)} = (-1, 1.1) (-0.001, 1) (0, 0) (1, 0)

RSIGIL 55 0 1MEG

ESIGA 56 0 VALUE = { V(55) * V(53) }

RSIGA 56 0 1MEG

XCOMP2 56 57 COMPHYS PARAMS: VHYS=.1V IC_SW=11V

ESIGA1 58 0 VALUE = {-1 * V(57) }

*

*Anahtarlama Elemanları

SWA1 203 2 61 0 SWITCH
XDA1 2 203 SW_DIODE_WITH_SNUB
SWA2 2 0 62 0 SWITCH
XDA2 0 2 SW_DIODE_WITH_SNUB

*

SWB1 203 3 63 0 SWITCH
XDB1 3 203 SW_DIODE_WITH_SNUB
SWB2 3 0 64 0 SWITCH
XDB2 0 3 SW_DIODE_WITH_SNUB

*

*Evirici Kısım

XTHY1 8 71 SCR PARAMS: TDLY=0 ICGATE=2V
XTHY3 71 0 SCR PARAMS: TDLY={HALF_PERIOD} ICGATE=0V
XTHY2 8 72 SCR PARAMS: TDLY={HALF_PERIOD} ICGATE=0V
XTHY4 72 0 SCR PARAMS: TDLY=0 ICGATE=2V

*

*Transformatör

EPRI 2 33 4 5 1.
VSENSE 33 3 0V
FSEC 5 4 VSENSE 1.

*

Ld 6 7 5mH
VISENS 7 8 0V

*

*Doğrultucu Katı

XD1 4 6 DIODE_WITH_SNUB
XD3 5 6 DIODE_WITH_SNUB
XD2 0 5 DIODE_WITH_SNUB
XD4 0 4 DIODE_WITH_SNUB
RSNUB 5 21 100.0
CSNUB 21 0 1uF

*

*Şebeke

VSABS 71 72 SIN(0 311.13 50 0 0 0)

*

*Akım Referansı

EILREF 49 0 VALUE = { 20 * ABS(sin(314.16*time)) }
RILREF 49 0 1MEG

*

*Tristör Modeli

SUBCKT SCR 101 103 PARAMS: TDLY=1ms ICGATE=0V

SW 101 102 53 0 SWITCH

VSENSE 102 103 0V

RSNUB 101 104 200

CSNUB 104 103 1uF

*

VGATE 51 0 PULSE(0 1V {TDLY} 0 0 {PULSE_WIDTH} {PERIOD})

RGATE 51 0 1MEG

EGATE 52 0 TABLE {I(VSENSE)+V(51)} = (0.0,0.0) (0.1,1.0) (1.0,1.0)

RSER 52 53 1

CSER 53 0 1uF IC={ICGATE}

*

*Diyot Modeli

.SUBCKT SW_DIODE_WITH_SNUB 101 102

DX 101 102 POWER_DIODE

RSNUB 102 103 100.0

CSNUB 103 101 10nF

.MODEL POWER_DIODE D(CJO=0.001fF, IS=1E-6, RS=0.01)

.ENDS

*

*Histerisiz Alt Devresi

.SUBCKT COMPHYS 161 164 PARAMS: VHYS = 1V IC_SW=11V

RDIFF 162 161 10MEG

RIN 0 162 10K

ECOMP 163 0 TABLE { V(162,161) } = (-1, -11) (-0.001, -11) (0.001, 11)
+ (1, 11)

ROUT 163 164 0.1K

COUT 164 0 5.0NF IC={IC_SW}

RHYS 164 162 {(110/VHYS - 10)*1000}

.ENDS

*

*PSPICE Parametreleri

.MODEL SWITCH VSWITCH (RON=0.01)

.OPTIONS abstol=0.0002A chgtol=0.0002C itl5=0 reltol=0.002 vntol=0.001

.PARAM HALF_PERIOD={1/100}

.PARAM PULSE_WIDTH=1MS

.PARAM PERIOD={1/50}

.TRAN 10us 10ms 0s 5us uic

.FOUR 50HZ i(vsabs)

.PROBE

.END

EK F

Akım Kontrolü Kırıyıcı ile Yapılan Çeviricinin PSPICE Kodu

Akım Kontrolü Kırıyıcı ile Yapılan Çevirici

.INC C:\PS5\LIB\UA741.MOD

***** Guc Kati *****

V1 1 0 PWL(0 0 1NS 400V 20MS 400V)

XT 1 53 2 IRGBC20K

XOPTO 30 0 53 2 OPTO

DG 0 2 DMOD

.MODEL DMOD D(IS=2.2E-15 BV=1200V TT=0 CJO=2PF)

RG 2 3 0.125

RCG 6 0 2MEG

VX 4 5 DC 0V

LG 3 4 10MH

XT1 71 101 6 IRGBC20K

XOPTO1 9 0 101 6 OPTO

XT3 73 102 0 IRGBC20K

XOPTO3 61 0 102 0 OPTO

XT2 72 10 7 IRGBC20K

XOPTO3 10 0 103 7 OPTO

XT4 74 62 0 IRGBC20K

XOPTO4 62 0 104 0 OPTO

VD1 5 71 DC 0V

VD3 7 73 DC 0V

VD2 5 72 DC 0V

VD4 6 74 DC 0V

VS 6 8 SIN(0 311 50HZ)

VY 8 7 DC 0V

VT1 9 0 PULSE (0V 20V 0 1NS 1NS 9.98MS 20MS)

VT3 61 0 PULSE (0V 20V 0 1NS 1NS 9.98MS 20MS)

VT2 10 0 PULSE (0V 20V 10MS 1NS 1NS 9.98MS 20MS)

VT4 62 0 PULSE (0V 20V 10MS 1NS 1NS 9.98MS 20MS)

*****Tam Dalga dogrultucu ile referans akimin uretilmesi*****

VS1 11 0 SIN(0 10V 50HZ)

R1 11 12 10K

R2 15 16 10K

R3 12 15 10K

R4 11 16 20K

R5 13 0 5K

R6 17 0 3.5K

RF 16 18 20K

```
VCC 19 0 DC 25V
VEE 20 0 DC -25V
D2 14 12 DMOT
D1 15 14 DMOT
.MODEL DMOT D
X1 13 12 19 20 14 UA741
X2 17 16 19 20 18 UA741
*****Histerisiz Kati*****
```

```
H1 21 0 VX 1
R11 21 22 100K
R12 22 0 100K
R13 18 24 100K
R14 24 25 100K
R15 25 0 2MEG
R16 30 29 99K
E1 53 2 30 0 2
R17 29 0 1K
VS2 26 0 DC 15V
VS3 27 0 DC -15V
XOP1 22 24 26 27 25 UA741
XOP2 29 25 26 27 30 UA741
*
```

*Sürücü Kati

```
*****
.SUBCKT OPTO 2 12 11 13
* MODEL +Input -Input +Output -Input
R01 10 11 10
R02 9 8 2.2K
R03 8 7 2.2K
R06 2 1 3K
C02 8 10 10UF
CO4 5 4 1NF
DO1 6 3 D1N4148
DO2 7 6 D1N4148
XO1 1 12 4 3 5 A4N25
QO2 9 7 10 10 Q2N2222
QO3 10 3 4 4 Q2N3906
VO1 9 13 DC 30V
VO2 13 4 DC 5V
```

*-----

* Library of optocoupler models

* Copyright 1992 by MicroSim Corporation

* This is a reduced version of MicroSim's Opto-coupler components library.

* You are welcome to make as many copies of it as you find convenient.

* The parameters in this model library were derived from the data sheets for

* each part.

*\$

```

*.model 4N25
* 6-pin DIP: pin #1 #2 #4 #5 #6
*      | | | | |
.subckt A4N25      pin1 pin2 pin4 pin5 pin6      params: rel_CTR=1
*      Motorola      pid=4N25
*      88-01-04 pwt
*      88-01-18 pwt rework Cje approximation

```

* The data sheet used for this model is from Motorola: it was the most
 * complete for DC and switching parameters, and is was easy to find the
 * component IR-LED and phototransistor as separate devices for further
 * specifications.

```

d_MainLED pin1 pin2      MainLED
d_PhotoLED pin1 1      PhotoLED .001
v_PhotoLED 1 pin2      0

f_TempComp      0 2      v_PhotoLED 1.7
r_TempComp      2 0      TempComp {rel_CTR}

```

```

g_BaseSrc 5 6 2 0      .9
q_PhotoBJT 5 6 4      PhotoBJT
r_C      5 pin5      .1
r_B      6 pin6      .1
r_E      4 pin4      .1

```

* Since active devices dominate pin-to-pin capacitance on each "side" of the
 * optocoupler, isolation is modeled by identical capacitances and resistances
 * linked to a common point; this gives isolation of .5pF and 1E+11 ohms

```

c_1      pin1 7      .4p
r_1      pin1 7      .12T
c_2      pin2 7      .4p
r_2      pin2 7      .12T
c_4      pin4 7      .4p
r_4      pin4 7      .12T
c_5      pin5 7      .4p
r_5      pin5 7      .12T
c_6      pin6 7      .4p
r_6      pin6 7      .12T

```

* Similar to Motorola MLED15.

```

.model MainLED D(Is=10.01e-21 Rs=2.049 Ikf=11.84 N=1.053 Xti=3 Cjo=40p
M=.34
+      Vj=.75 Isr=30n Nr=3.8 Bv=6 Ibv=100u Tt=.5u)

```

* Models photon generation: same as MainLED except no AC effects, no breakdown.

```

.model PhotoLED D(Is=1.1p Rs=.66 Ikf=30m N=1.9 Xti=3 Cjo=0 M=.34 Vj=.75
+      Isr=30n Nr=3.8 Bv=0 Tt=0)

```

* Temperature compensation for system: 1.38x @ -55°C, .54x @ +100°C, all @ 10mA
 * Note: the photo BJT has its own temperature corrections, which must be kept
 * as the transistor is electrically available.
 .model TempComp RES(R=1 Tc1=-11.27m Tc2=43.46u)

* Similar to Motorola MDR3050; Hfe=325 @ Ic=500uA, Vce=5V
 * Use beta variation (w/Parts) to model change in current-transfer ratio (CTR).
 * Hand adjust reverse beta (Br) to match saturation characteristics.
 * Set Isc to model dark current.
 * Hand adjust Cjc to match fall time @ Ic=10mA (which yields rise time, too).
 * Hand adjust reverse transit-time (Tr) to match storage time @ Ic=10mA.
 * Delay time set by LED I-V and C-V characteristics; set Cje to 25% of Cjc,
 * inspection of phototransistor chip layouts show the emitter area is 20%-25%
 * that of the collector area. The same layouts show that base resistance is
 * made negligible by design; also, the operating currents are small.
 * Hand adjust forward transit-time (Tf) to match MDR3050 pulse data. Check
 * against 4N25 frequency response (Fig 11, 12).

.model PhotoBJT NPN(Is=10f Xti=3 Vaf=60

+ Bf=400 Ne=3.75 Ise=580p Ikf=.26 Xtb=1.5
 + Br=.04 Nc=2 Isc=3.5n
 + Cjc=10p Mjc=.3333 Vjc=.75 Tr=88u
 + Cje=2.5p Mje=.3333 Vje=.75 Tf=1.5n)

.ends a4N25

*\$

.model Q2N2222 NPN(Is=14.34f Xti=3 Eg=1.11 Vaf=74.03 Bf=255.9 Ne=1.307

+ Ise=14.34f Ikf=.2847 Xtb=1.5 Br=6.092 Nc=2 Isc=0 Ikr=0 Rc=1
 + Cjc=7.306p Mjc=.3416 Vjc=.75 Fc=.5 Cje=22.01p Mje=.377 Vje=.75
 + Tr=46.91n Tf=411.1p Itf=.6 Vtf=1.7 Xtf=3 Rb=10)
 * National pid=19 case=TO18
 * 88-09-07 bam creation

*\$

.model Q2N3906 PNP(Is=1.41f Xti=3 Eg=1.11 Vaf=18.7 Bf=180.7 Ne=1.5
 Ise=0

+ Ikf=80m Xtb=1.5 Br=4.977 Nc=2 Isc=0 Ikr=0 Rc=2.5 Cjc=9.728p
 + Mjc=.5776 Vjc=.75 Fc=.5 Cje=8.063p Mje=.3677 Vje=.75 Tr=33.42n
 + Tf=179.3p Itf=.4 Vtf=4 Xtf=6 Rb=10)
 * National pid=66 case=TO92
 * 88-09-09 bam creation

*** Switching Diodes ***

*\$

.model D1N4148 D(Is=2.682n N=1.836 Rs=.5664 Ikf=44.17m Xti=3 Eg=1.11
 Cjo=4p

+ M=.3333 Vj=.5 Fc=.5 Isr=1.565n Nr=2 Bv=100 Ibv=100u Tt=11.54n)

.ENDS OPTO

.SUBCKT irgph50m 1 2 3

* Model Generated by MODPEX *

Copyright(c) Symmetry Design Systems

* All Rights Reserved *

* UNPUBLISHED LICENSED SOFTWARE *

* Contains Proprietary Information *

* Which is The Property of *

* SYMMETRY OR ITS LICENSORS *

*Commercial Use or Resale Restricted *

* by Symmetry License Agreement *

*Model generated on Apr 23, 96

* Model format: SPICE3

*Symmetry IGBT Model (Version 1.0)

*External Node Designations

*Node 1 -> C

*Node 2 -> G

*Node 3 -> E

M1 9 6 8 8 MSUB L=100u W=100u

* Default values used in MSUB:

* The voltage-dependent capacitances are

* not included. Other default values are:

* RD=0 RS=0 LD=0 CBD=0 CBS=0 CGBO=0

.MODEL MSUB NMOS LEVEL=1

+VTO=4.60416 KP=0.180582 LAMBDA=1.10951e-07 CGSO=3.44819e-06

RD 7 9 0.000723826

RS 4 8 0.987788

Q1 4 7 1 QSUB OFF

.MODEL QSUB PNP

+IS=4.18987e-17 BF=9482.61 NF=0.952864 VAF=366743

+IKF=1.97239e+06 ISE=1e-06 NE=2.81326 BR=1.00019

+NR=1.17561 VAR=60455.6 IKR=1000 ISC=1.00174e-11

+NC=2.12686 RB=0.00010001 IRB=1e-05 RBM=0.000100009

+RE=1e-08 RC=0.00829043 XTB=0.0598922 XTI=1.51724e-13

+EG=0.5 CJC=6.83904e-10 VJC=1.50313 MJC=0.9

+CJE=1.36781e-08 VJE=9.71347 MJE=0.9 TF=9.67722e-09

RDS 7 4 1e8

RER 4 3 0.164983

RG 6 2 28.6038

RL 10 11 1

D2 12 11 DCAP

* Default values used in DCAP:

* RS=0 EG=1.11 XTI=3.0 TT=0

* BV=infinite IBV=1mA

.MODEL DCAP D IS=1e-32 N=50

+CJO=6.49463e-10 VJ=0.4 M=0.9 FC=0.5

D3 0 11 DL

* Default values used in DL:

* EG=1.11 XTI=3.0 TT=0 CJO=0

* RS=0 BV=infinite IBV=1mA

.MODEL DL D IS=1e-10 N=0.4

```
VFI2 12 0 0
FI2 6 7 VFI2 -1
EV 10 0 7 6 1
CAP 10 13 2.03618e-10
RCAP 10 14 1
D4 0 14 DL
VFI1 13 14 0
FI1 6 7 VFI1 -1
.ENDS irgph50m
.PROBE
.OPTIONS RELTOL=0.1
.TRAN 50US 20MS 1NS 50US
.END
```



EK G

Akım Kontrollu Üç Fazlı Eviriciye Ait PSPICE Kodu

Üç Faz Akım Kontrollu Evirici

*

*Güneş Pili Modeli

.model D1N4001 D(Is=1000u N=1 Rs=.1 Ikf=0 Xti=3 Eg=1.11 Cjo=1p M=0.333
Vj=.6

+ Fc=.5 Isr=100p Nr=2 Bv=100 Ibv=100u Tt=.1n)

H1 201 0 V2 -100

V1 206 201 DC 508V

R1 206 202 1.5

R2 202 203 2.75

D1 202 204 D1N4001

V2 204 205 DC 65.0V

E1 205 0 203 0 1

*

*Akım Referansları

VREFA 60 0 SIN(0 20 50. 0 0 -30.0)

RREFA 60 0 1MEG

*

VREFB 70 0 SIN(0 20 50. 0 0 -150.0)

RREFB 70 0 1MEG

*

VREFC 80 0 SIN(0 20 50. 0 0 -270.0)

RREFC 80 0 1MEG

*

*Kontrol İşareti Üreticileri

EIDIFFA 61 0 VALUE = { I(VSENSEA) - V(60) }

XLOGICA 61 62 COMPHYS PARAMS: VHYS = 1V IC_SW=11V

ESW2A 63 0 VALUE={-1 * V(62)}

*

EIDIFFB 71 0 VALUE = { I(VSENSEB) - V(70) }

XLOGICB 71 72 COMPHYS PARAMS: VHYS = 1V IC_SW=-11V

ESW2B 73 0 VALUE={-1 * V(72)}

*

EIDIFFC 81 0 VALUE = { I(VSENSEC) - V(80) }

XLOGICC 81 82 COMPHYS PARAMS: VHYS = 1V IC_SW=11V

ESW2C 83 0 VALUE={-1 * V(82)}

*

***Anahtarlama Elemanları**

SWA1 203 21 62 0 AC_SWITCH

XDA1 21 203 SW_DIODE_WITH_SNUB

*

SWA2 21 0 63 0 AC_SWITCH

XDA2 0 21 SW_DIODE_WITH_SNUB

*

SWB1 203 31 72 0 AC_SWITCH

XDB1 31 203 SW_DIODE_WITH_SNUB

*

SWB2 31 0 73 0 AC_SWITCH

XDB2 0 31 SW_DIODE_WITH_SNUB

*

SWC1 203 41 82 0 AC_SWITCH

XDC1 41 203 SW_DIODE_WITH_SNUB

*

SWC2 41 0 83 0 AC_SWITCH

XDC2 0 41 SW_DIODE_WITH_SNUB

*

***Üç Fazlı Transformatör**

RTOP1 9 0 1MEG

RTOP2 55 0 1MEG

*

XTR1 21 51 52 55 TRANS_IDEAL

XTR2 31 51 53 55 TRANS_IDEAL

XTR3 41 51 54 55 TRANS_IDEAL

*

***Direnç ve Endüktanslar**

RTHA 52 22 0.8

RTHB 53 32 0.8

RTHC 54 42 0.8

*

LTHA 22 23 4.0mH IC=-10A

LTHB 32 33 4.0mH IC=-10A

LTHC 42 43 4.0mH IC=20A

*

***Akım Algılayıcılar**

VSENSEA 23 24 0V

VSENSEB 33 34 0V

VSENSEC 43 44 0V

*

***Üç Fazlı Şebeke**

VEMFA 24 9 SIN(0 311V 50.0 0 -12.36)

```
VEMFB 34 9 SIN(0 311V 50.0 0 -132.36)
VEMFC 44 9 SIN(0 311V 50.0 0 -252.36)
```

```
*
```

```
*AC Anahtar Modeli
```

```
*****
```

```
.MODEL AC_SWITCH VSWITCH (VOFF=-1V, RON=0.1)
```

```
*
```

```
*Snubber'a Sahip Diyot Modeli
```

```
*****
```

```
.SUBCKT SW_DIODE_WITH_SNUB 101 102
```

```
DX 101 102 POWER_DIODE
```

```
RSNUB 102 103 100.0
```

```
CSNUB 103 101 10nF
```

```
.MODEL POWER_DIODE D(CJO=0.001fF, IS=1E-6, RS=0.01)
```

```
.ENDS
```

```
*
```

```
*Histerisiz Alt Devresi
```

```
*****
```

```
.SUBCKT COMPHYS 161 164 PARAMS: VHYS = 1V IC_SW=11V
```

```
RDIFF 162 161 10MEG
```

```
RIN 0 162 10K
```

```
ECOMP 163 0 TABLE { V(162,161) } = (-1, -11) (-0.001, -11) (0.001, 11)
+ (1, 11)
```

```
ROUT 163 164 0.1K
```

```
COUT 164 0 5.0NF IC={IC_SW}
```

```
RHYS 164 162 {(110/VHYS - 10)*1000}
```

```
.ENDS
```

```
*
```

```
*Transformatör Modeli
```

```
*****
```

```
.SUBCKT TRANS_IDEAL 101 103 104 105
```

```
EPRI 101 102 104 105 1.0
```

```
VSENSE 102 103 0V
```

```
FSEC 105 104 VSENSE 1.0
```

```
.ENDS
```

```
*
```

```
*PSPICE Parametreleri
```

```
*****
```

```
.TRAN 10us 20ms 0s 10us UIC
```

```
.PROBE v(21) v(22) v(23) v(31) v(32) v(33)
```

```
.PROBE v(41) v(42) v(43) v(9)
```

```
.PROBE i(LTHA) i(LTHB) i(LTHC) v(203) v(60) v(70) v(80)
```

```
.PROBE v(61) v(62) v(71) v(72) v(81) v(82)
```

```
.FOUR 50hz i(LTHA)
```

```
.END
```