

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

**FOTOVOLTAİK VE ANAHTARLI RELÜKTANS MOTOR TABANLI BİR SU POMPA  
SİSTEMİNİN TASARIMI**

**YÜKSEKLİSANS TEZİ**

**Akın ÖZEL**

**Anabilim Dalı: Elektrik-Elektronik Mühendisliği**

**DANIŞMAN  
Prof. Dr. Hasan KÜRÜM**

**İKİNCİ DANIŞMAN  
Yrd. Doç. Dr. Zeki OMAÇ**

**KASIM-2012**

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

**FOTOVOLTAİK VE ANAHTARLI RELÜKTANS MOTOR TABANLI BİR SU POMPA  
SİSTEMİNİN TASARIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Akın ÖZEL**

(091103102)

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 02.11.2012  
Tezin Savunulduğu Tarih: 22.11.2012**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hasan KÜRÜM (FÜ)**

**İkinci Danışman: Yrd. Doç. Dr. Zeki OMAÇ (TÜ)**

**Diğer Juri Üyeleri: Yrd. Doç. Dr. Zeki OMAÇ (TÜ)**

**Yrd. Doç. Dr. Eyyüp ÖKSÜZTEPE (T.Ü)**

**Yrd. Doç. Dr. Hüseyin ERİŞTİ (T.Ü)**

**KASIM-2012**

Akın ÖZEL tarafından hazırlanan FOTOVOLTAİK VE ANAHTARLI RELÜKTANS MOTOR TABANLI BİR SU POMPA SİSTEMİNİN TASARIMI adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Hasan KÜRÜM

Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. Bu tez, Tunceli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

Başkan : Yrd. Doç. Dr. Eyyüp ÖKSÜZTEPE (T.Ü)

Üye : Yrd. Doç. Dr. Zeki OMAÇ (T.Ü)

Üye : Yrd. Doç. Dr. Hüseyin ERİŞTİ (T.Ü)

Tarih : 22.11.2012

## ÖNSÖZ

Bu çalışmada bana yardımcı olan ve yenilenebilir enerji konusuna dikkatimi çeken değerli danışman hocam **Sayın Prof. Dr. Hasan KÜRÜM** 'e ve daima çok büyük yardım ve desteğini gördüğüm değerli danışman hocam **Sayın Yrd. Doç. Dr. Zeki OMAÇ**'a teşekkür ederim. Yardımlarını esirgemeyen **Dr. M. Temel ÖZDEMİR**'e ve burada adını anamadığım yardımını gördüğüm herkese teşekkür ederim.

Tunceli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi **TÜNİBAP**'a; bu teze katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Ayrıca bana yardım ve desteklerini esirgemeyen eşime ve tüm aileme teşekkürlerimi sunarım.

Akın ÖZEL

TUNCELİ – 2012

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ.....	I
İÇİNDEKİLER.....	II
ÖZET.....	V
SUMMARY.....	VI
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	VII
TABLolar LİSTESİ.....	XI
SEMBOLLER LİSTESİ.....	XII
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1. Tezin Amacı.....	1
1.2. Tez İçeriği.....	2
<b>2. GÜNEŞ ENERJİSİ VE GÜNEŞ PİLLERİ.....</b>	<b>3</b>
2.1. Güneş Enerjisi Uygulamalarının Tarihsel Gelişimi.....	4
2.2. Türkiye'de Güneş Enerjisi.....	5
2.2.1. Türkiye'nin Güneş Enerjisi Potansiyeli.....	5
2.2.2. Güneş Enerjisi Kullanımı.....	7
2.2.2.1 Güneş Kollektörleri.....	7
2.2.2.2. Güneş Pilleri-Fotovoltaik Sistemler.....	7
2.3. Kurumların Çalışmaları.....	8
2.4. Güneş Pilleri.....	8
2.4.1. Güneş Hücrelerinin Yapımında Kullanılan Malzemeler.....	9
2.4.2. Son Yıllarda Üzerinde Çalışılan Güneş Pilleri.....	10
2.4.3. Güneş Pili Sistemleri.....	11
2.4.4. Güneş Pillerinin Tarihçesi.....	15
2.6.5. Güneş Pillerinin Yapısı.....	18
2.6.6. Güneş Pillerinin Çalışma Prensipleri.....	19
2.6.7. Güneş Pili Eşdeğer Devresi.....	21
2.6.8. Güneş Pillerinde Verim.....	25
2.7. Fotovoltaik (PV) Güç Sistemleri.....	26
2.7.1. Şebekeden Bağımsız Sistemler.....	27
2.7.2. Şebekeye Bağlı Sistemler.....	28
<b>3. DOĞRU AKIM –DOĞRU AKIM ÇEVİRİCİLER.....</b>	<b>29</b>
3.1. Giriş.....	29
3.2. DA-DA Çeviricilerin Kontrolü.....	29
3.3. Boost Çevirici.....	30
3.4. İdeal Olmayan Durumda Boost Çevirici.....	34
<b>4. ANAHTARLI RELÜKTANS MOTORLAR.....</b>	<b>38</b>
4.1. Giriş.....	38
4.2. Anahtarlı Relüktans Motor Üzerine Yapılan Çalışmalar.....	38
4.3. Anahtarlı Relüktans Motor Avantaj Ve Dezavantajları.....	44
4.4. Motor Avantajları.....	44
4.5. Motor Dezavantajları.....	45
4.6. Konvertör Avantajları.....	47
4.7. Konvertör Dezavantajları.....	47
4.8. Denetleyici Avantajları.....	48
4.9. Denetleyici Dezavantajları.....	48

4.10.	Anahtarlı Relüktans Motor Temel Bilgileri.....	49
4.11.	Anahtarlı Relüktans Motorun Çalışma Esası.....	52
4.12.	ARM Eşdeğer Devresi.....	55
4.13.	ARM'ler İçin Sürücü Seçim Ve Tasarım Kriterleri.....	56
4.14.	ARM'ler İçin Konvertör Düzenekleri.....	57
4.15.	ARM Besleme Devreleri.....	58
4.16.	ARM'de Komütasyon İşlemi.....	58
4.17.	Güç Anahtarı Seçimi.....	59
4.18.	ARM Denetim Teknikleri.....	60
4.19.	Denetleyici Devresi.....	61
4.20.	Kontrol Sisteminin Elemanları.....	62
4.21.	Kullanılan Anahtarlı Relüktans Motorun Ölçüleri.....	63
4.22.	Anahtarlı Relüktans Motorda Oluşan Kayıplar.....	64
4.23.	Anahtarlı Relüktans Motorun Sürülmesi.....	65
4.24.	Anahtarlı Relüktans Motorun Moment-Hız Karakteristiği.....	66
<b>5.</b>	<b>ANAHTARLI RELÜKTANS MOTORUN KONTROLÜ.....</b>	<b>68</b>
5.1.	Giriş.....	68
5.2.	Kontrol Prensibi.....	69
5.3.	ARM'nin Doğrusal Çalışma Modeli.....	71
5.4.	ARM'nin Doğrusal Çalışma Modeline Ortak Endüktansların Dahil Edilmesi.....	74
5.5.	ARM Sürücünün Kapalı Çevrim Hız Kontrolü.....	75
5.6.	ARM Sürücünün Kapalı Çevrim Akım Kontrolü.....	75
5.7.	ARM Sürücünün Moment Kontrolü.....	77
5.8.	Anahtarlı Relüktans Motorun Matlab/Simulink Ortamında Benzetimi.....	78
5.9.	Anahtarlı Relüktans Motorun Kontrolünde Kullanılan Donanım ve Yazılım.....	82
5.9.1.	Güç Devresi.....	82
5.9.2.	IGBT Sürücü Devresi.....	86
5.9.3.	Konum Okuyucu.....	88
5.9.3.1.	Artımlı Konum Kodlayıcı.....	89
5.9.3.2.	Mutlak Konum Kodlayıcı.....	90
5.9.4.	Denetleyici Teknolojisi Seçimi.....	90
5.9.5.	Sayısal İşaret İşlemci (DSP) ile ARM Denetimi.....	92
5.9.6.	Denetleyici Kart (DS1103).....	92
5.10.	Deney Seti ve Tanıtımı.....	93
5.11.	Yazılım Kısmı.....	96
<b>6.</b>	<b>POMPALAR.....</b>	<b>98</b>
6.1.	Giriş.....	98
6.2.	Santrifüj Pompalar.....	99
6.3.	Santrifüj Pompanın Çalışma Prensibi.....	100
6.4.	Pompa Tipleri.....	101
6.5.	Kullanım Amacına Göre Pompa Tipleri.....	103
6.6.	Suyun Borulardaki Akışı.....	107
6.6.1.	Suyun Fiziksel Özellikleri.....	108
6.6.2.	Kütle ve Ağırlık.....	108
6.7.	Viskozite.....	109
6.8.	Kavitasyon.....	109
6.9.	Bernoulli Denklemi.....	111

6.10.	SürekliDenklemi.....	113
<b>7.</b>	<b>SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>	<b>114</b>
7.1	ÖNERİLER.....	120
	<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>122</b>
	<b>EKLER.....</b>	<b>129</b>
	<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>130</b>

## ÖZET

Güneş enerjisi temiz bir enerjidir. Bu nedenle tüm dünyada giderek kullanımı artmaktadır. Bu çalışmada fotovoltaiik (PV) kullanarak anahtarlı relüktans motor(ARM) ile bir su pompası tahriki tasarlanmıştır. (PV) geriliminin yükseltilmesinde boost dönüştürücü kullanılmıştır. Söz konusu sistemin matematiksel modeli Matlab/Simulink ortamında oluşturulmuş ve benzetim sonuçları alınmıştır.50 Khz anahtarlama frekansında PID kontrolör kullanılarak boost dönüştürücü çıkış gerilimi kontrol edilmiştir. Su pompası olarak santrifüj pompa kullanılmıştır.

Boost dönüştürücü ve ARM sürücüsü tasarlanmıştır. Boost kontrolünde Microchip firmasının ürettiği sekiz bitlik 16F877A mikrokontrolörü kullanılmıştır. PV panellerinden elde edilen elektrik enerjisi akülerde depolanmıştır. Akü şarjını kontrol etmek amacıyla akü şarj cihazı kullanılmıştır.

Dspace firmasının ürettiği DS1103 ACE kiti kullanılarak ARM'nin hız ve akım kontrolü yapılmıştır. Akım bilgileri hall etkili akım algılayıcıları kullanılarak algılanmış ve analog dijital dönüştürücü girişi kullanılarak sayısal sinyal işlemciye (DSP) aktarılmıştır. ARM'nin rotor konumunun tesbitinde ve rotor hızının kontrolünde bir turda 5000 darbe üreten artımlı bir enkoder kullanılmıştır. Benzetim sonuçlarının doğruluğu deneysel sonuçlarla kanıtlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Güneş Enerjisi, Anahtarlı Relüktans Motor, Boost Dönüştürücü, PV(fotovoltaiik),Sayısal Sinyal İşlemci(DSP)



## SUMMARY

Solar energy is a clean energy and it is increasingly being used all over the world. In this study, a water pump drive has been designed with a switched reluctance motor (SRM) by using photovoltaic (PV). Boost converter has been used in the voltage rise of PV. The mathematical model of the stated system has been composed in the Matlab/Simulink setting and simulation results have been obtained. The output voltage of Boost converter has been controlled by using PID controller at 50 kHz switching frequency. A centrifugal pump has been used as a water pump.

Boost converter and SRM driver has been designed. In the control of Boost converter, an eight bit PIC16F877A micro-controller which was produced by the Microchip firm has been used. The electrical energy obtained by PV panels has been stored in batteries. Battery charge testers have been used in order to control the battery charge.

The speed and current control of; SRM has been done by using DS1103 Ace kit produced by the Dspace firm. The current information has been perceived by using current sensors with hall generators and transferred to digital signal processor by using analog-digital converter. In detection and control of rotor position and speed of SRM, an incremental encoder producing 5000 pulses in per revolution has been used. The accuracy of simulation results has been validated through the experimental results.

**Key Words:** Solar Energy, Switched Reluctance Motor, Boost Converter, PV (Photovoltaic), digital signal processor (DSP)

## ŞEKİLLER LİSTESİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
Şekil 2.1. Güneşten gelen ışınımın dağılımı.....	3
Şekil 2.2. Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeli atlası.....	6
Şekil 2.3. Tezde kullanılan PV modül.....	9
Şekil 2.4. Şebekeden bağımsız bir güneş pili enerji sisteminin şeması.....	12
Şekil 2.5. Günümüzde güneş pili uygulama alanları.....	15
Şekil 2.6. Güneş pilinin içyapısı.....	19
Şekil 2.7. p – n eklemnin oluşması.....	20
Şekil 2.8. Elektronun iletken banda geçişi.....	21
Şekil 2.9. Güneş pili.....	22
Şekil 2.10. p – n kavşağının oluşturulması ve kavşağa düşen foton enerjisi ile iletkenlik temini.....	22
Şekil 2.11. Güneş pili eşdeğer devresi ve V-I grafiği.....	23
Şekil 2.12. 34 watt'lık bir güneş pilinde akım-gerilim eğrileri.....	25
Şekil 2.13. Şebekeden bağımsız bir güneş pili sistem örneği.....	27
Şekil 2.14. Şebeke bağlantılı sistem.....	28
Şekil 3.1. Boost çevirici.....	31
Şekil 3.2. Boost çevirici akım ve gerilimleri.....	32
Şekil 3.3. Çeviricilerin çıkış gerilimi-D (iş zamanı) ilişkisi.....	33
Şekil 3.4. İdeal elemanlarıyla boost çevirici olmayan devre.....	34
Şekil 3.5. Anahtar kapalı olduğunda boost çevirici.....	35
Şekil 3.6. Anahtar açık olduğunda boost çevirici.....	35
Şekil 4.1. ARM yapıları.....	50
Şekil 4.2. Çeşitli tiplerde anahtarlama relüktans motorlar (ARM), (a) 4/2, (b) 8/6, (c) 6/4, (d) 12/8.....	51
Şekil 4.3. ARM'nin çalışması, (a) c fazı örtüşen pozisyonda, (b) a fazı örtüşen pozisyonda...	52

Şekil 4.4.	Selenoid ve karakteristikleri, (a) Selenoid, (b) mmk-akı karakteristiği.....	53
Şekil 4.5.	ARM'nin bir faz eşdeğer devresi.....	56
Şekil 4.6.	ARM'de komütasyon işlemi, (a) Basitleştirilmiş devre, (b) Dalga şekilleri.....	59
Şekil 4.7.	Faz başına iki transistörlü denetleyici devresi.....	61
Şekil 4.8.	Denetleyici devrenin yumuşak kıyıcı işlemi süresince sargı, transistör ve diyot akımlarının dalga biçimleri.....	62
Şekil 4.9.	Denetleyici devrenin PWM gerilim işlemi süresince sargı, transistör ve diyot akımlarının dalga biçimleri.....	62
Şekil 4.10.	ARM kontrol sisteminin yapısı.....	63
Şekil 4.11.	Anahtarlı relüktans motor sürücü devresi.....	66
Şekil 4.12.	ARM moment-hız karakteristiği.....	67
Şekil 5.1.	Akım kontrollü ARM sürücü.....	70
Şekil 5.2.	ARM sürücünün bir fazının eşdeğer devresi.....	71
Şekil 5.3.	18/12 kutuplu ARM'nin ön görünüşü. 1-1', 4-4' ve 6-6' kutupları üzerindeki sargıların seri bağlanması ile A fazı oluşmuştur.....	72
Şekil 5.4.	ARM sürücünün kapalı çevrim hız kontrol şeması.....	75
Şekil 5.5.	ARM sürücünün kapalı çevrim akım kontrol blok diyagramı.....	76
Şekil 5.6.	PWM işaretin elde edilişi.....	76
Şekil 5.7.	Matlab/Simulink'te hazırlanan ARM sürücünün benzetim şeması.....	79
Şekil 5.8.	Boost dönüştürücü PID gerilim kontrolör blok şeması.....	79
Şekil 5.9.	Boost dönüştürücü akım kontrolör blok şeması.....	79
Şekil 5.10.	Boost dönüştürücü blok şeması.....	80
Şekil 5.11.	ARM blok şeması.....	80
Şekil 5.12.	Yük blok şeması.....	81
Şekil 5.13.	A fazı endüktansı blok şemasının içeriği.....	81
Şekil 5.14.	Fazlara göre iletim ve kesim açılarının tespit edildiği bloğun ayrıntıları.....	82
Şekil 5.15.	Güç elektroniği elemanlarının anahtarlama yapabildiği akım, gerilim ve frekans değerleri.....	83
Şekil 5.16.	Bir faz için iki anahtar kullanarak gerçekleştirilen ARM güç devresi.....	84

Şekil 5.17.	40N120C3D1 IGBT için farklı $V_{GE}$ gerilimleri için $V_{CE} - I_C$ grafiği.....	85
Şekil 5.18.	Akım sensörü.....	86
Şekil 5.19.	Gerilim sensörü.....	86
Şekil 5.20.	Optokuplör karakteristiği.....	87
Şekil 5.21.	Tezde kullanılan optokuplör (4506) devre bağlantısı.....	87
Şekil 5.22.	TD351 sürme entegresinin uygulaması.....	88
Şekil 5.23.	Bir atımlı optik konum okuyucunun A, B ve Z çıkışlarının dalga şekilleri.....	90
Şekil 5.24.	Mutlak konum kodlayıcıların dönen diski.....	91
Şekil 5.25.	DSP denetleyici kart (DS1103).....	93
Şekil 5.26.	PV modülleri.....	94
Şekil 5.27.	ARM-pompa ve akü grubu.....	94
Şekil 5.28.	ARM sürücü devresi fotoğrafı.....	95
Şekil 5.29.	Sigorta kutusu, şarj regülatörü ve boost dönüştürücü.....	95
Şekil 5.30.	Anahtarlı relüktans motorun kontrolü için hazırlanan programın bloklar halinde gösterilişi.....	97
Şekil 6.1.	Merkezkaç Pompa içindeki akışkanın yolu.....	101
Şekil 6.2.	Santrifüj pompaların çeşitli tipleri.....	102
Şekil 6.3.	Çeşitli santrifüj pompa tipleri için debi ve basma yüksekliği.....	102
Şekil 6.4.	Hidrolik kısımlar.....	103
Şekil 6.5.	Bir merkezkaç pompanın tipik performans eğrileri. NPEY, emme yüksekliği, güç tüketimi ve verim debinin fonksiyonu olarak verilmiştir.....	104
Şekil 6.6.	Bir santrifüj pompa için tipik H-Q eğrisi; düşük debili yüksek basma yüksekliği ve yüksek debide düşük basma yüksekliği elde edilir.....	105
Şekil 6.7.	Pompaj tesisi şematik görünümü.....	106
Şekil 6.8.	Kavitasyon kabarcıklarının, çark kanatçıklarının arkasındaki iç patlamaları.....	110
Şekil 6.9.	Pompada kavitasyon durumundaki pompa eğrisi.....	111
Şekil 6.10.	Kesiti değişen boruda akışkanın akımı.....	112
Şekil 7.1.	Tüm sistemin blok görünüşü.....	114
Şekil 7.2.	Boost dönüştürücü.....	114

Şekil 7.3.	Boost dönüştürücü anahtarlama frekansı 50kHz olarak ayarlanmıştır.....	115
Şekil 7.4.	Akü grubu boşken ilk şarj akımı değeri yaklaşık 6,5 olarak ölçülmüştür.....	116
Şekil 7.5.	Akü grubu şarj oldukça PV'den çekilen akım düşmüştür.....	116
Şekil 7.6.	Akü grubu en düşük şarj akımı değeri.....	118
Şekil 7.7.	Boost dönüştürücü bobin akımı değişimi.....	117
Şekil 7.8.	Boost dönüştürücü deneysel ölçülen akım grafiği.....	117
Şekil 7.9.	Boost dönüştürücü çıkış gerilimi.....	118
Şekil 7.10.	80 V'ta ARM ölçülen hız değişimi .....	118
Şekil 7.11.	80 V'ta ARM simülasyon hız değişimi.....	119
Şekil 7.12.	80 V'ta simülasyon sonucunda elde edilen $i_a$ , $i_b$ , $i_c$ akımlarının değişimleri .....	119
Şekil 7.13.	80 V'ta deneysel olarak ölçülen $i_a$ , $i_b$ , $i_c$ akımlarının değişimleri.....	120

## TABLULAR LİSTESİ

### Sayfa No

Tablo 2.1. Ülkemizde bölgelere göre güneşlenme değerleri .....	6
Tablo 2.2. Ülkemizde yıllara göre güneş enerjisi üretimi .....	7
Tablo 2.3. Fotovoltaik Modül Verimi .....	13
Tablo 2.4. 2012 yılına kadar Dünya genelinde PV Kurulu gücü değişimi .....	14
Tablo 2.5. Dünyada önemli PV pazarına sahip ülkeler .....	14

## SEMBOLLER LİSTESİ

<b><math>\dot{I}</math></b>	: Faz akımı
<b><math>L_{max}</math></b>	: Çakışık konum faz indüktansı
<b><math>L_{min}</math></b>	: Çakışık olmayan konum faz indüktansı
<b><math>N_r</math></b>	: Rotor kutup sayısını
<b><math>N_s</math></b>	: Stator kutup sayısı
<b><math>q</math></b>	: Faz sayısı
<b><math>\theta</math></b>	: Rotor konumu(radyan)
<b><math>R</math></b>	: Faz direnci
<b><math>D_1</math></b>	: Birinci diyot
<b><math>D_2</math></b>	: İkinci diyot
<b><math>S_1</math></b>	: Birinci yarıiletken anahtar
<b><math>S_2</math></b>	: İkinci yarıiletken anahtar
<b><math>\Psi</math></b>	: Faz akısı
<b><math>T_e</math></b>	: Üretilen toplam moment
<b><math>V</math></b>	: Akışkan hızı
<b><math>A</math></b>	: Boru kesiti
<b><math>D</math></b>	: Boru çapı
<b><math>J</math></b>	: Eylemsizlik momentini
<b><math>B</math></b>	: Sürtünme katsayısı
<b><math>Q</math></b>	: Debi
<b><math>H</math></b>	: Yükseklik
<b><math>\omega</math></b>	: Açısal hız
<b><math>T_y</math></b>	: Yük momentini

## KISALTMALAR LİSTESİ

<b>AA</b>	: Alternatif Akım
<b>ARM</b>	: Anahtarlamalı Relüktans Motor
<b>EİE</b>	: Elektrik İşleri Etüd İdaresi
<b>DA</b>	: Doğru Akım
<b>DA-DA</b>	: Doğru Akım Doğru Akım
<b>PID</b>	: Oransal-İntegral-Türev
<b>PI</b>	: Oransal-İntegral
<b>PWM</b>	: Darbe Genişlik Modülasyonu
<b>D</b>	: İş zamanı
<b>DSP</b>	: Sayısal İşaret İşlemci (Digital Signal Processor)
<b>PV</b>	: Fotovoltaik
<b>Si</b>	: Silisyum
<b>NPEY</b>	: Net Pozitif Emme Yüksekliği
<b>GTO</b>	: Kapıdan tıkamalı tristörler
<b>BJT</b>	: Bipolar transistörler
<b>BG</b>	: Beygir Gücü HP
<b>KW</b>	: Kilowatt
<b>MPPT</b>	: Maksimum güç noktası takibi

<b>emk</b>	: Elektromotor kuvvet
<b>IGBT</b>	: Yalıtılmış kapılı çift kutuplu transistor (Isulated Gate Bipolar Transistor)
<b>MCT</b>	: MOS kontrollü tristör ( MOS Controlled Thyristor)
<b>MOSFET</b>	: Metal oksit yarıiletken alan etkili transistor (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)
<b>mSS</b>	: metre sıvı sütunu



# 1. GİRİŞ

Günümüzde çevre bilinci giderek artmakta ve buna bağlı olarak çevreye duyarlı teknolojiler geliştirilmektedir. Klasik enerji kaynakları olan termik, nükleer ve hidroelektrik santrallerin çevreye tahribatlar yaptığı görülmektedir. Yarıiletken teknolojisinin gelişimi bu noktada önem kazanmaktadır. Bu teknoloji tükenmeyen ve çevreye zararlı olmayan enerji kaynağı olarak güneş enerjisinin kullanımını zorunlu kılmaktadır. Özellikle gelişmiş ülkelerde çevre dostu enerji kaynakları teşvik kapsamına alınmaktadır. Ülkemiz; temiz enerji kaynağı olan güneş ve rüzgâr enerjisi potansiyeli bakımından önemli bir yere sahiptir.

## 1.1 Tezin Amacı

PV (Fotovoltaik) Pompa sistemleri; solar enerjinin giderek artan teknolojik ve kullanım alanının gelişiminin bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır. PV'li pompa sistemleri genel olarak PV modül, motor ve pompadan oluşmuştur. Motor olarak genelde indüksiyon motorları ve (doğru akım) DA motorları kullanılmaktadır.

İndüksiyon motorları ucuz ve basit yapıdadırlar. Ama indüksiyon motorlarının çalışması için PV pildeki DA gücü minimum harmoniklerle (alternatif akım) AA güce çeviren kompleks inverterlere ihtiyaç duyulmaktadır(Mona ve Aziza,1997).Böylece bu motorların karmaşıklıkları arttıkça çalışma güvenilirlikleri azalır.

DA motorları ise çok karışık ve pahalı motorlardır. Komütatör ve fırçalarının varlığı beraberinde bakım problemlerini de getirir. Ayrıca DA motorlarının ark problemlerinin yanında sınırlı boyut ve hıza da sahiptir.

Anahtarlı relüktans motorlar (ARM) ise basit, ucuz, sağlam ve güvenilir yapılarıyla beraber ataletine oranla yüksek moment gibi avantajlara sahiptir. Bununla beraber basit güç elektroniği dönüştürücüsüne, yüksek verimlilik, yüksek hız yeteneklerine sahiptir(Belliwalli, 2011).

Yukarıdaki sayılan avantajlarından dolayı; bu tezde güneş enerjisine bağlı akü grubundan beslenen boost çeviricili su pompasına bağlı 18/12 kutuplu ARM incelenmiştir.

Önce motor için sürücü devre ve boost çeviriciler tasarlanmıştır. Matlab/Simulink programında simülasyon oluşturulmuş ve tüm sistem simülasyonu yapılmıştır. Sonuç olarak simülasyon sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Tüm sistemin incelenmesi, simülasyon sonuçları ile deneysel çalışmaların kıyaslanması yanında bölgemizdeki güneş enerjisi/yeşil enerji kullanımı çalışmalarına katkı hedeflenmiştir.

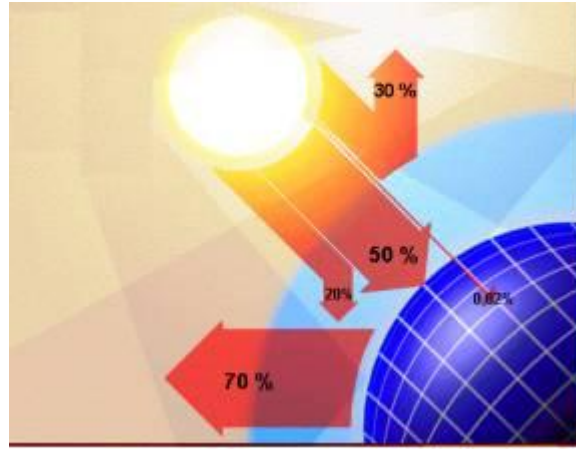
## 1.2. Tez İçeriği

1. Bölümde tez hakkında bilgi ve tezin amacı verilmiştir.
2. Bölümde güneş enerjisi ve güneş panelleri hakkında bilgi verilmiştir.
3. Bölümde Boost evirici avantajları, dezavantajları, yapısı, çalışma ilkesi, kontrolü ve tasarım kriterleri incelenmiştir.
4. Bölümde anahtarlı relüktans motorların (ARM) zellikleri avantajları, dezavantajları, yapısı, çalışma ilkesi, kontrolü ve tasarım kriterleri incelenmiştir.
5. Bölümde anahtarlı relüktans motorların (ARM) kontrolü hakkında bilgi verilmiştir.
6. Bölümde pompa eşitleri hakkında bilgi verilerek, tezde kullanılan santrifüj pompa incelenmiştir.
7. Bölümde tez deneysel sonuçları açıklanarak simülasyon sonuçları ile karşılaştırılıp ileride yapılacak çalışmalara ilişkin öneriler sunulmuştur.

## 2. GÜNEŞ ENERJİSİ VE GÜNEŞ PİLLERİ

Güneş enerjisi, güneşin çekirdeğinde yer alan füzyon süreci ile açığa çıkan ışıma enerjisidir, güneşteki hidrojen gazının helyuma dönüşmesi şeklindeki füzyon sürecinden kaynaklanır. Dünya atmosferinin dışında güneş enerjisinin şiddeti, aşağı yukarı sabit ve  $1370 \text{ W/m}^2$  değerindedir, ancak yeryüzünde  $0-1100 \text{ W/m}^2$  değerleri arasında değişim gösterir. Bu enerjinin dünyaya gelen küçük bir bölümü dahi, insanlığın mevcut enerji tüketiminden kat kat fazladır. Güneş enerjisinden yararlanma konusundaki çalışmalar özellikle 1970'lerden sonra hız kazanmış, güneş enerjisi sistemleri teknolojik olarak ilerleme ve maliyet bakımından düşme göstermiş, çevresel olarak temiz bir enerji kaynağı olarak kendini kabul ettirmiştir (URL-1, 2012).

Güneş ışınımının tamamı yer yüzeyine ulaşmaz, %30 kadarı dünya atmosferi tarafından geriye yansıtılır. Güneş ışınımının %50'si atmosferi geçerek dünya yüzeyine ulaşır. Bu enerji ile Dünya'nın sıcaklığı yükselir ve yeryüzünde yaşam mümkün olur. Rüzgar hareketlerine ve okyanus dalgalanmalarına da bu ısınma neden olur (URL-1, 2012).



Şekil 2.1. Güneşten gelen ışınımın dağılımı (URL-1,2012).

Güneşten gelen ışınımının %20'si atmosfer ve bulutlarda tutulur. Yeryüzeyine gelen güneş ışınımının %1'den azı bitkiler tarafından fotosentez olayında kullanılır. Bitkiler, fotosentez sırasında güneş ışığıyla birlikte karbondioksit ve su kullanarak, oksijen ve şeker üretirler. Fotosentez, yeryüzünde bitkisel yaşamın kaynağıdır. Dünya'ya gelen bütün güneş ışınımı, sonunda ısıya dönüşür ve uzaya geri verilir(URL-1, 2012).

Güneş enerjisi teknolojileri yöntem, malzeme ve teknolojik düzey açısından çok çeşitlilik göstermekle birlikte iki ana gruba ayrılabilir:

Fotovoltaik Güneş Teknolojisi : Fotovoltaik hücreler denen yarı-iletken malzemeler güneş ışığını doğrudan elektriğe çevirirler.

Isıl Güneş Teknolojileri : Bu sistemlerde öncelikle güneş enerjisinden ısı elde edilir. Bu ısı doğrudan kullanılabilceği gibi elektrik üretiminde de kullanılabilir(URL-1, 2012).

Günlük güneş enerjisinin seyreltik ve kesikli olması, bu enerjinin daha etkin ve verimli kullanılmasında sorun olmaktadır. Oysa bugün dünyaya gelen güneş enerjisi, dünyada kullanılan tüm enerjinin 15–16 bin katı dolayındadır. Bu durumda, dünya üzerinde bu enerjiyi olabildiğince verimli ve etkin kullanabilme yolunu bulmamız gerekmektedir(Güçlü, 2009 ).

## **2.1. Güneş Enerjisi Uygulamalarının Tarihsel Gelişimi**

İnsanların güneş enerjisini kendi geliştirdiği yollarla başka enerjilere dönüştürmesi, bir hayli eskilere dayanır. Bilinen ilk uygulamalardan biri, Arşimed'in Sirakuza'da güneş ışınlarını büyük aynalarla yoğunlaştırarak düşman gemilerine odaklaması ve onları yakması olarak bilinir. 17.yüzyılda, yine aynalarla güneş ışınlarının yoğunlaştırılarak odun yığınlarının yakılmasında kullanıldığı, 18. yüzyılda yoğunlaştırılmış güneş ışınlarının kimyasal tepkimelerde ve güneş ocaklarında kullanıldığı görülür. 19. yüzyılda ise güneş enerjisi uygulamaları artmıştır.

Yoğunlaştırılmış güneş enerjisi ile metal eritme, su dağıtma, buhar üretme, güneşle çalışan buhar makinası, baskı makinası gibi yapılan çalışmalar, uygulama örnekleri olarak gösterilebilir. 20. yüzyılda insanların yaşamına giren petrol, güneş enerjisi kullanımıyla ilgili gelişmeleri bir ölçüde frenlemiştir. Bununla birlikte, 1974'de petrol fiyatlarının artması sonucu güneş enerjisi üzerindeki çalışmalar, yeniden hız kazanmıştır. Özellikle evlerde sıcak su sağlanmasında güneş toplacıları kullanımı bu yüzyılda yaygınlaşmıştır. Yine, yoğunlaştırılmış güneş enerjisinin kullanıldığı güneş santralleri bu yüzyılda yapılmaya başlanılmıştır.

1954 yılında Bell laboratuvarında güneş pillerinin geliştirilmesi ile güneş pilleri güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren aygıtlar olarak giderek yaygın kullanım alanları bulmuşlardır. Güneş pillerinin ilk büyük ölçekli uygulama alanı, uzay

çalışmalarında olmuştur. Uzay araçlarına enerji sağlamada bu piller en uygun araçlar olmuşlardır. Önceleri küçük ölçeklerde çeşitli yerlerde kullanılan güneş pilleri giderek daha geniş kullanım alanlarına yayılmışlardır. Yaygın kullanımla birlikte bu pillerin fiyatları da oldukça düşmüştür. Bu gün bu pillerle çalıştırılan güneş otomobilleri, güneş uçağı, elektrik şebekesine uzak yerlerdeki uygulamalar, güneş pilleri ile çalışan elektrik santralleri bulunmaktadır.

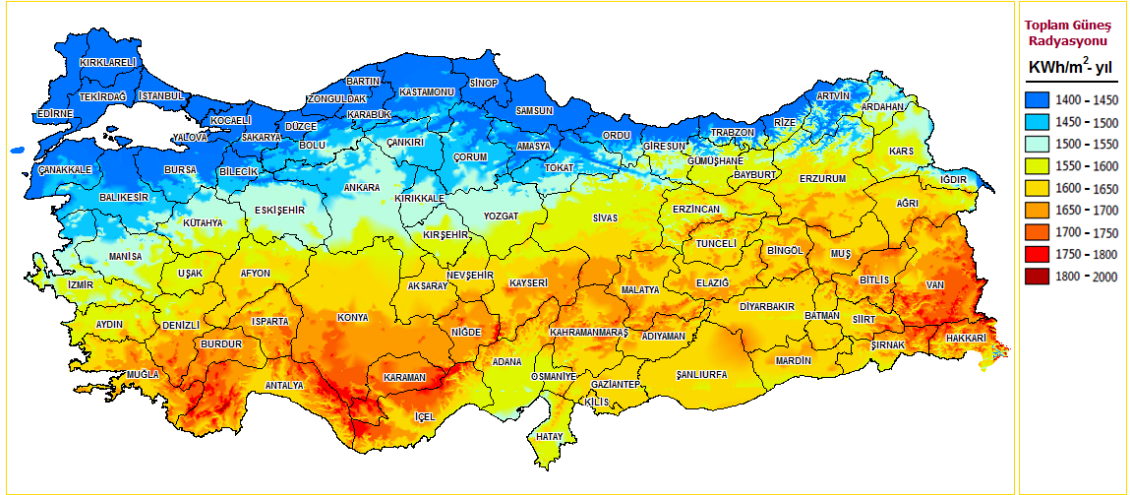
Güneş enerjisi dışında kullanılan enerjiler ise, yerin iç ısısından (jeotermal enerji) yararlanma, Dünya-ay arasındaki çekim enerjisinden yararlanma (gel-git enerjisi) ve çekirdeksel yakıtlardan yararlanma (nükleer enerji) olarak sıralanabilir. Çekirdeksel yakıtlar yeryüzünde sınırlı miktarlarda bulunmaktadır. Aynı şekilde, depolanmış güneş enerjisi olarak kullanılan fosil yakıtlar da sınırlı miktarda bulunmaktadır ve tüketim hızıyla orantılı olarak oluşmamaktadırlar. Bu yönleriyle, gerek fosil yakıtlar, gerekse çekirdeksel yakıtlar, tükenir enerji kaynaklarıdır. Oysa diğer kaynaklar tükenmez enerji kaynaklarıdır ve bu gün artık dünya bu tükenmez enerji kaynaklarının daha verimli ve yaygın kullanılmasına yönelik teknolojik çalışmaların hızlandırıldığı bir döneme girilmiştir(Güçlü, 2009 ).

## **2.2. Türkiye’de Güneş Enerjisi**

### **2.2.1. Türkiye’nin Güneş Enerjisi Potansiyeli**

Ülkemiz, coğrafi konumu nedeniyle sahip olduğu güneş enerjisi potansiyeli açısından birçok ülkeye göre şanslı durumdadır. Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğünde (DMİ) mevcut bulunan 1966-1982 yıllarında ölçülen güneşlenme süresi ve ışınım şiddeti verilerinden yararlanarak Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİE) tarafından yapılan çalışmaya göre Türkiye'nin ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2640 saat (günlük toplam 7,2 saat), ortalama toplam ışınım şiddeti 1311 kWh/m<sup>2</sup>-yıl (günlük toplam 3,6 kWh/m<sup>2</sup>) olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 2.2’de Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü’nün (YEGM) vermiş olduğu Türkiye’nin güneş enerjisi potansiyeli atlası gösterilmiştir.



**Şekil 2.2** Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyeli atlası GEPA (URL-2, 2012).

Türkiye'nin en fazla güneş enerjisi alan bölgesi Güney Doğu Anadolu Bölgesi olup, bunu Akdeniz Bölgesi izlemektedir.

**Tablo 2.1.** Ülkemizde bölgelere göre güneşlenme değerleri (URL-2, 2012).

Bölge	Toplam Güneş Enerjisi (KWh/m <sup>2</sup> -yıl)	Güneşlenme (saat/yıl)
G. Doğu Anadolu	1460	2993
Akdeniz	1390	2956
Doğu Anadolu	1365	2664
İç Anadolu	1314	2628
Ege	1304	2738
Marmara	1168	2409
Karadeniz	1120	1971

## 2.2.2. Güneş Enerjisi Kullanımı

### 2.2.2.1. Güneş Kolektörleri

Ülkemizde çoğu Akdeniz ve Ege Bölgelerinde kullanılmakta olan, güneş enerjisini ısı enerjisine dönüştüren sıcak su üretme sistemleridir. Halen ülkemizde kurulu olan güneş kolektörü miktarı yaklaşık 12 milyon m<sup>2</sup> olup, yıllık üretim hacmi 750 bin m<sup>2</sup>'dir ve bu üretimin bir miktarı da ihraç edilmektedir. Güneş enerjisinden ısı enerjisi yıllık üretimi 420 bin Ton Eşdeğer Petrol (TEP) civarındadır. Bu haliyle ülkemiz dünyada kayda değer bir güneş kolektörü üreticisi ve kullanıcısı durumundadır.

Güneş kolektörlerinin ürettiği ısı enerjinin birincil enerji tüketimimize katkısı yıllara göre aşağıda yer almaktadır.

**Tablo 2.2.** Ülkemizde yıllara göre güneş enerjisi üretimi (URL-3,2012).

Yıl	Güneş Enerjisi Üretimi (bin TEP)
1998	210
1999	236
2000	262
2001	290
2004	375
2007	420

### 2.2.2.2. Güneş Pilleri – Fotovoltaik Sistemler

Güneş pilleri, halen ancak elektrik şebekesinin olmadığı, yerleşim yerlerinden uzak yerlerde ekonomik yönden uygun olarak kullanılabilir. Bu nedenle ve istenen güçte kurulabilmeleri nedeniyle genellikle sinyalizasyon, kırsal elektrik ihtiyacının karşılanması vb. gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Ülkemizde çoğunluğu Orman Bakanlığı Orman Gözetleme Kuleleri, Türk Telekom, deniz fenerleri ve otoyol aydınlatmasında, Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü, Muğla Üniversitesi, Ege Üniversitesi gibi kamu kuruluşlarında olmak üzere küçük güçlerin karşılanması ve araştırma amaçlı kullanılan güneş pili kurulu gücü 1 MW'a ulaşmıştır.

### 2.3. Kurumların Çalışmaları

Güneş enerjisi araştırma ve geliştirme konularında Elektrik İşleri Etüt İdaresi'nin (EİE) yanında Tübitak Marmara Araştırma Merkezi ve üniversiteler (Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Araştırma Enstitüsü, Muğla Üniversitesi, ODTÜ, Kocaeli Üniversitesi, Fırat Üniversitesi) çalışmalar yapmaktadır.

Güneş enerjisi verilerinin ölçülmesi konusunda Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü faaliyet göstermektedir. Elektrik İşleri Etüt İdaresi de 1991 yılından bu yana kendi güneş enerjisi gözlem istasyonları kurmaktadır.

Güneş enerjisi ile ilgili standartlar hazırlanması konusunda Türk Standartları Enstitüsü;  
-TS 3680 - Güneş Enerjisi Toplayıcıları-Düz

-TS 3817 - Güneş Enerjisi - Su Isıtma Sistemlerinin Yapım, Tesis ve İşletme Kuralları konulu standartları hazırlamıştır. Elektrik İşleri Etüt İdaresi bu standartların hazırlanmasında görev aldığı gibi, ısı performans testlerini de gerçekleştirmektedir (URL-3, 2012) .

### 2.4. Güneş Pilleri

Yıllardır kullanılan geleneksel enerji kaynaklarının yükselen maliyeti ve kaynaklarının sınırlı olması ve fotovoltaik enerjinin kirlilik yapmaması ve dünyanın her yerine uygun olması gibi avantajları ile fotovoltaik enerjinin kullanımı giderek artmaktadır. Şu anda dünyanın uygun iklim koşullu bölgelerinde özellikle solar enerji uygulamalarına büyük ilgi vardır. Bu uygulamalar olarak aydınlatma, su pompalama ve şebekeden bağımsız siteler ilk sırada yer almaktadır (Lotfi Khemissi, vd., 2011).

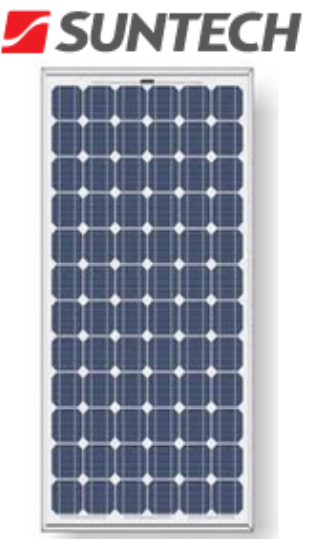
Güneş hücreleri (fotovoltaik hücreler), yüzeylerine gelen güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarıiletken maddelerdir. Yüzeyleri kare, dikdörtgen, daire şeklinde biçimlendirilen güneş hücreleri alanları genellikle 100 cm<sup>2</sup> civarında, kalınlıkları ise 0,2- 0,4 mm arasındadır (URL-4, 2012) .

Güneş hücreleri fotovoltaik ilkeye dayalı olarak çalışırlar, yani üzerlerine ışık düştüğü zaman uçlarında elektrik gerilimi oluşur. Hücrenin verdiği elektrik enerjisinin kaynağı, yüzeyine gelen güneş enerjisidir (URL-4, 2012) .



Fotovoltaik sistemin enerji kaynağı olan yarıiletken güneş hücreleri seri veya paralel kombinasyonlarıyla panelleri oluştururlar. Bu fotovoltaik panellerin performansları değişik şekillerde tanımlanabilir. Seçilen çalışma koşulları altındaki karakteristik bilgileri genelde üretici firmalardan alınır(Belmili, 2010).

Güneş enerjisi, güneş hücresinin yapısına bağlı olarak % 5 ile % 20 arasında bir verimle elektrik enerjisine çevrilebilir. Güç çıkışını artırmak amacıyla çok sayıda güneş hücresi birbirine paralel ya da seri bağlanarak bir yüzey üzerine monte edilir, bu yapıya güneş hücresi modülü ya da fotovoltaik modül adı verilir. Güç talebine bağlı olarak modüller birbirlerine seri ya da paralel bağlanarak bir kaç Watt'tan megaWatt'lara kadar sistem oluşturulur (URL-4, 2012).



Model	Suntech Power STP140 Solar Module
	140 Wp
Cell	Monokristal silikon -715V
V nominal	17.4V
Voc	22.0V
A	8.00A
	12kg
	1482 X 676 X 35
Kabel	LAPP Kabel / Suntech (Stuttgart)
	CE IEC TUV

Şekil 2.3. Tezde kullanılan PV modül

#### 2.4.1.Güneş Pillerinin Yapımında Kullanılan Malzemeler

Güneş pilleri pek çok farklı maddeden yararlanarak üretilebilir. Günümüzde en çok kullanılan maddeler şunlardır:

Kristal Silisyum: Önce büyütülüp daha sonra 200 mikron kalınlıkta ince tabakalar halinde dilimlenen Tekkristal Silisyum bloklardan üretilen güneş pillerinde laboratuvar şartlarında

%24, ticari modüllerde ise %15'in üzerinde verim elde edilmektedir. Dökme silisyum bloklardan dilimlenerek elde edilen Çokkristal Silisyum güneş pilleri ise daha ucuza üretilmekte, ancak verim de daha düşük olmaktadır. Verim, laboratuvar şartlarında %18, ticari modüllerde ise %14 civarındadır.

Galyum Arsenit (GaAs): Bu malzemeyle laboratuvar şartlarında %25 ve %28 (optik yoğunlaştırıcılı) verim elde edilmektedir. Diğer yarıiletkenlerle birlikte oluşturulan çok eklemlili GaAs pillerde %30 verim elde edilmiştir. GaAs güneş pilleri uzay uygulamalarında ve optik yoğunlaştırıcılı sistemlerde kullanılmaktadır.

İnce Film: Piyasaya giren yeni bir güneş pili türüdür. Daha az üretim malzemesi kullanılarak yapılan dolayısıyla daha düşük maliyetli güneş pilleridir.

Amorf Silisyum: Kristal yapı özelliği göstermeyen bu Si pillerden elde edilen verim %10 dolayında, ticari modüllerde ise %5-7 mertebesindedir. Günümüzde daha çok küçük elektronik cihazların güç kaynağı olarak kullanılan amorf silisyum güneş pilinin bir başka önemli uygulama sahasının, binalara entegre yarısaydam cam yüzeyler olarak, bina dış koruyucusu ve enerji üretici olarak kullanılabilmesi tahmin edilmektedir.

Kadmiyum Tellürid (CdTe): Çokkristal yapıda bir malzeme olan CdTe ile güneş pili maliyetinin çok aşağılara çekileceği tahmin edilmektedir. Laboratuvar tipi küçük hücrelerde %16, ticari tip modüllerde ise %7 civarında verim elde edilmektedir.

Bakır İndiyum Diselenid (CuInSe<sub>2</sub>): Bu çokkristal pilde laboratuvar şartlarında %17,7 ve enerji üretimi amaçlı geliştirilmiş olan prototip bir modülde ise %10,2 verim elde edilmiştir.

Optik Yoğunlaştırıcılı Hücreler: Gelen ışığı 10-500 kat oranlarda yoğunlaştıran mercekli veya yansıtıcı araçlarla modül verimi %17'nin, pil verimi ise %30'un üzerine çıkılabilmektedir. Yoğunlaştırıcılar basit ve ucuz plastik malzemeden yapılmaktadır.

#### **2.4.2. Son Yıllarda Üzerinde Çalışılan Güneş Pilleri**

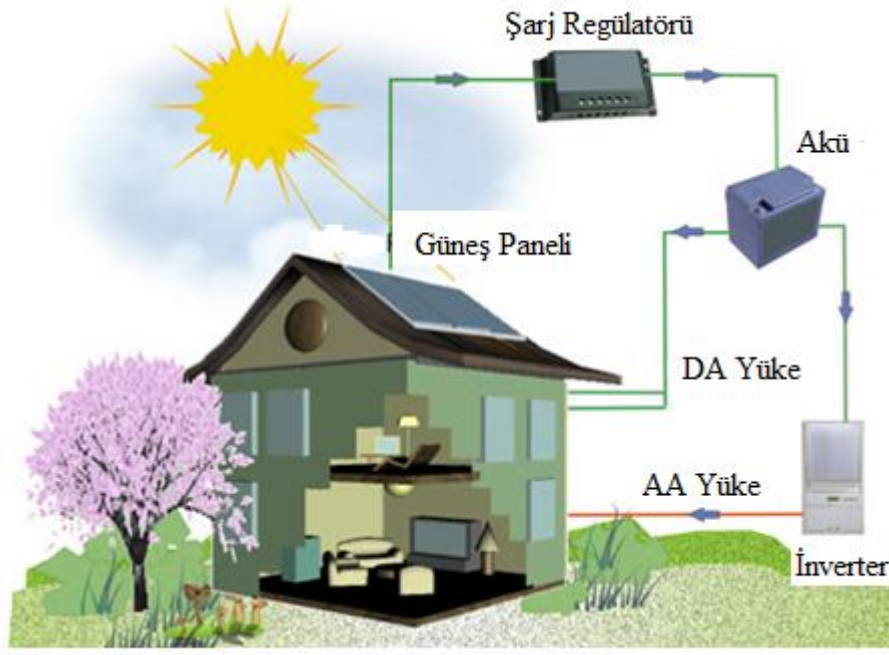
Ticari ortama girmiş olan geleneksel Si güneş pillerinin yerini alabilecek verimleri aynı ama üretim teknolojileri daha kolay ve daha ucuz olan güneş pilleri üzerinde de son yıllarda çalışmalar yoğunlaştırılmıştır.

Bunlar; fotoelektrokimyasal çok kristalli Titanyum Dioksit piller, polimer yapılı Plastik piller ve güneş spektrumunun çeşitli dalgaboylarına uyum sağlayacak şekilde üretilebilen enerji bant aralığına sahip Kuantum güneş pilleri gibi yeni teknolojilerdir.

### **2.4.3. Güneş Pili Sistemleri**

Güneş pilleri, elektrik enerjisinin gerekli olduğu her uygulamada kullanılabilir. Güneş pili modülleri uygulamaya bağlı olarak, akümülatörler, invertörler, akü şarj denetim aygıtları ve çeşitli elektronik destek devreleri ile birlikte kullanılarak bir güneş pili sistemi (fotovoltaik sistem) oluştururlar. Bu sistemler, özellikle yerleşim yerlerinden uzak, elektrik şebekesi olmayan yörelerde, jeneratöre yakıt taşımının zor ve pahalı olduğu durumlarda kullanılırlar. Bunun dışında dizel jeneratörler ya da başka güç sistemleri ile birlikte karma olarak kullanılmaları da mümkündür.

Bu sistemlerde yeterli sayıda güneş pili modülü, enerji kaynağı olarak kullanılır. Güneşin yetersiz olduğu zamanlarda ya da özellikle gece süresince kullanılmak üzere genellikle sistemde akümülatör bulundurulur. Güneş pili modülleri gün boyunca elektrik enerjisi üreterek bunu akümülatörde depolar, yüke gerekli olan enerji akümülatörden alınır. Akünün aşırı şarj ve deşarj olarak zarar görmesini engellemek için kullanılan denetim birimi (şarj regülatörü) ise akünün durumuna göre, ya güneş pillerinden gelen akımı ya da yükün çektiği akımı keser. Şebeke uyumlu alternatif akım elektriğinin gerekli olduğu uygulamalarda, sisteme bir invertör eklenerek akümülatördeki DC gerilim, 220 V, 50 Hz.lik sinüs dalgasına dönüştürülür(Akkaya ve Kulaksız, 2004). Benzer şekilde, uygulamanın şekline göre çeşitli destek elektronik devreler sisteme katılabilir. Örneğin bu tezde olduğu gibi boost konvertör kullanmak gerekebilir(Ponniran ve Said, 2009). Bazı sistemlerde, güneş pillerinin maksimum güç noktasında çalışmasını sağlayan maksimum güç noktası izleyici cihazı bulunur. Aşağıda şebekeden bağımsız bir güneş pili enerji sisteminin şeması verilmektedir.



Şekil 2.4 Şebekeden bağımsız bir güneş pili enerji sisteminin şeması








Şebeke bağlantılı güneş pili sistemleri yüksek güçte-santral boyutunda sistemler şeklinde olabileceği gibi daha çok görülen uygulaması binalarda küçük güçlü kullanım şeklindedir. Bu sistemlerde örneğin bir konutun elektrik gereksinimi karşılanırken, üretilen fazla enerji elektrik şebekesine satılır, yeterli enerjinin üretilmediği durumlarda ise şebekeden enerji alınır. Böyle bir sistemde enerji depolaması yapmaya gerek yoktur, yalnızca üretilen DA elektriğin, AA elektriğe çevrilmesi ve şebeke uyumlu olması yeterlidir.

Güneş pili sistemlerinin şebekeden bağımsız (stand-alone) olarak kullanıldığı tipik uygulama alanları aşağıda sıralanmıştır.

- Haberleşme istasyonları, kırsal radyo, telsiz ve telefon sistemleri
- Petrol boru hatlarının katodik koruması
- Metal yapıların (köprüler, kuleler vb) korozyondan koruması
- Elektrik ve su dağıtım sistemlerinde yapılan telemetrik ölçümler, hava gözlem istasyonları
- Bina içi ya da dışı aydınlatma
- Dağevleri ya da yerleşim yerlerinden uzaktaki evlerde TV, radyo, buzdolabı gibi elektrikli aygıtların çalıştırılması
- Tarımsal sulama ya da ev kullanımı amacıyla su pompası

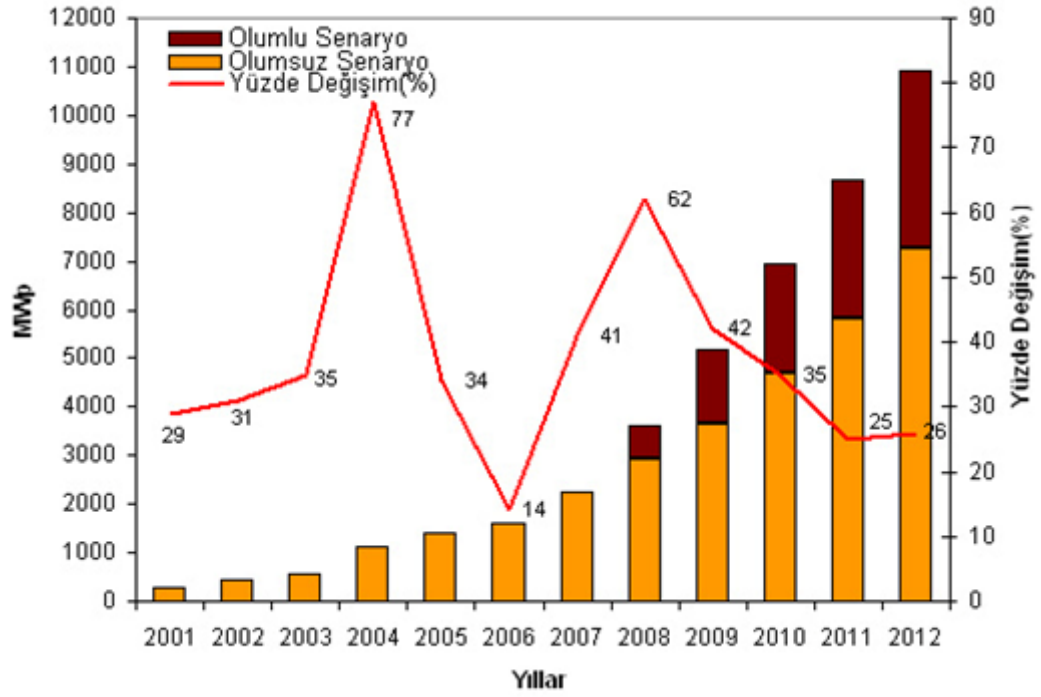
- Orman gözetleme kuleleri
- Deniz fenerleri
- İlkyardım, alarm ve güvenlik sistemleri
- Deprem ve hava gözlem istasyonları
- İlaç ve aşı soğutma (URL-4,2012).

**Tablo2.3.** Fotovoltaik Modül Verimi

Technology	Thin Film					Crystalline Silicon	
	(a-Si)	(CdTe)	Cl(G)S	a-Si/ $\mu$ c-Si	Dye s. cells	Mono	Multi
							
Cell efficiency							
Module efficiency	4-8%	10-11%	7-11%	7-9%	2-4% (LAB)	13-19%	11-15%
Area Needed per KW (for modules)	~ 15 m <sup>2</sup>	~ 9m <sup>2</sup>	~ 10m <sup>2</sup>	~12m <sup>2</sup>		~7m <sup>2</sup>	~8m <sup>2</sup>

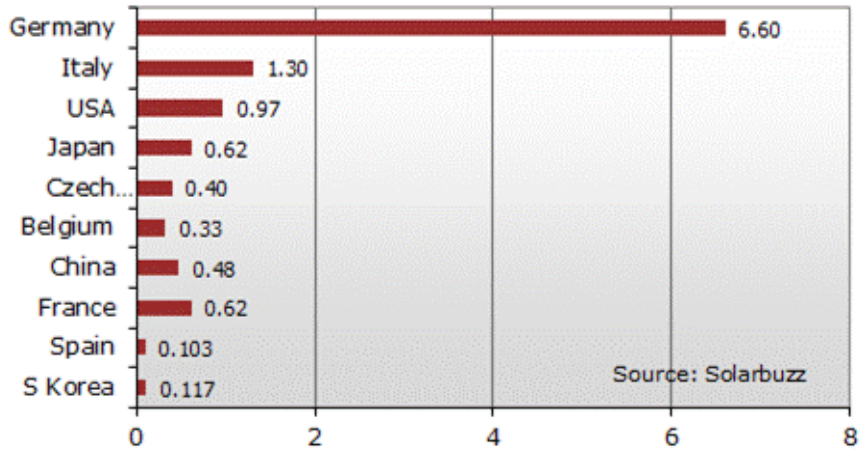
Source: EPIA 2010, Photon international, March 2010, EPIA analysis  
Efficiency based on Standard Test conditions.

**Tablo 2.4.** 2012 yılına kadar dünya genelinde PV kurulu gücü değişimi



Kaynak: EPIA (Avrupa PV Endüstrisi Birliği), [www.epia.org](http://www.epia.org)

**Tablo 2.5.** Dünyada önemli PV pazarına sahip ülkeler





Şekil 2.5 Günümüzde güneş pili uygulama alanları

#### 2.4.4. Güneş Pillerinin Tarihçesi

İlk kez 1839 yılında Becquerel, elektrolit içerisine daldırılmış elektrotlar arasındaki gerilimin, elektrolit üzerine düşen ışığa bağımlı olduğunu gözlemleyerek Fotovoltaik olayını bulmuştur. Katılarda benzer bir olay ilk olarak selenyum kristalleri üzerinde 1876 yılında G.W. Adams ve R.E. Day tarafından gerçekleştirilmiştir. Bunu izleyen yıllarda çalışmalar bakır oksit ve selenyuma dayalı foto diyotların, yaygın olarak fotoğrafçılık alanında ışık metrelerinde kullanılmasını beraberinde getirmiştir. 1914 yılında fotovoltaik diyotların verimliliği %1 değerine ulaşmış ise de gerçek anlamda güneş enerjisini % 6 verimlilikle elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik diyotlar ilk kez 1954 yılında Chapin tarafından silikon kristali üzerinde gerçekleştirilmiştir. Fotovoltaik güç sistemleri için dönüm noktası olarak kabul edilen bu tarihi izleyen yıllarda araştırmalar ve ilk tasarımlar, uzay araçlarında kullanılacak güç sistemleri için yapılmıştır. Fotovoltaik güç sistemleri 1960'ların başından beri uzay çalışmalarının güvenilir kaynağı olmayı sürdürmektedir.

Güneş pillerinin yeryüzünde de elektriksel güç sistemi olarak kullanılabilmesine yönelik araştırma ve geliştirme çabaları 1954'lerde başlamış olmasına rağmen, gerçek anlamda ilgi



1973 yılındaki 1. petrol bunalımını izleyen yıllarda olmuştur. Amerika'da, Avrupa'da, Japonya'da büyük bütçeli ve geniş kapsamlı araştırma ve geliştirme projeleri başlatılmıştır. Bir yandan uzay çalışmalarında kendini ispatlamış silikon kristaline dayalı güneş pillerinin verimliliğini artırma çabaları ve diğer yandan alternatif olmak üzere çok daha az yarı iletken malzemeye gerek duyulan ve bu nedenle daha ucuza üretililecek ince film güneş pilleri üzerindeki çalışmalara hız verilmiştir. 1964 yılında Nimbug isimli uzay aracı 470 W'lık güneş pili ile uzaya gönderilmiştir. 1966 yılında ise 1 kW'lık güneş pili sistemine sahip Orbiting Astronomik gözlemci yörüngeye oturmuştur. 1977 yılına gelindiğinde ise Amerika Birleşik Devletleri'nde ulusal yenilenebilir enerji laboratuvarı açılmıştır. 1982 yılında Dünya çapında güneş pili üretimi 21,3 MW'a kadar yükselmiştir.

2000'li yıllara gelindiğinde ise Almanya'da 100.000 çatının güneş pilleri ile kaplanması için çalışma başlatılmıştır. Aynı dönemlerde Japonya'da 10.000 çatı programı başlatılmıştır. 2004 yılında, Almanya'nın Neustadt kentinde 2 MW kurulu güce sahip güneş fotovoltaik güç tesisi şebekeye bağlanmıştır. Tesis 70.000 m<sup>2</sup> alan üzerine 7000 adet 300 W'lık panelden oluşmuştur. Yine Almanya'da, Saarbrück en havaalanında 1,4 MW'lık güneş pili tesisi Ocak ayında hizmete girmiştir. Tesis 40.000 m<sup>2</sup>'lik alan üzerine kurulmuştur. Tesisin yaklaşık kurulum maliyeti 6,5 milyon Euro olup 166 özel yatırımcı tarafından da desteklenmiştir.

2004 yılının sonuna gelindiğinde Almanya'da güneş pili toplam kurulu gücü yaklaşık 53 MW olmuştur. Aynı yıl içinde Dünya Bankası 29 ülkede 30'dan fazla projeye destek vermek için bir fon açmıştır. Malta'da Malta Üniversitesi bünyesinde kurulmuş bulunan şebekeye bağlı sistemin kurulu gücü 7,5 kWp'dır. Sun Poker firması, A-300 silisyum güneş pili için Amerikan ulusal yenilenebilir enerji laboratuvarında (NREL) ölçüm yaptırarak %21,5'lik bir verime sahip olan bu güneş pilini mart ayında satışa sunmak için harekete geçmiştir. Amerika'da Brockton şehrinde Massachusetts Teknoloji firması tarafından 500 kW'lık bir güneş pili tesisi daha hizmete girmiştir. Polonya'da 2004 yılı sonunda kurulu güç toplamda 107 kilowattpeak (kWp) olup bunun 47 kWp bölümü şebekeye bağlıdır. Çek Cumhuriyeti'nde ise toplam kurulu güç 150 kWp olup bunun 120 kWp'luk bölümü şebekeye bağlıdır. Hindistan'da 2004 yılı sonunda toplam PV Kurulu gücü 475 kWp olmuştur. 2004 yılı eylül ayında ise Türkiye Büyük Millet Meclisi yeni bir yenilenebilir enerji yasasını çıkarmıştır. Bu yasa gelecek 5 yıllık dönemde 4-5 MW'lık bir yenilenebilir enerji kurulumunu desteklemektedir.



2004 yılı ikinci yarısında; Sharp, Sanyo, Kyocera ve RWE Schott Solar gibi firmalar kurulu üretim kapasitelerini artıracaklarını açıklayarak bu alandaki teknolojik yatırımların ve gelişmelerin süreceğinin sinyallerini veriyorlardı. Sharp firması; 315 MW yıllık üretim kapasitesi ile en çok üretim yapan tesisi olarak Shinjo tesisinin olduğunu açıklarken, Sanyo elektronik firması; 2005 yılı üretim kapasitesinin %140'lık bir artışla 153 MW olacağını bildirmiştir. Kyocera ise üretim kapasitesini mart ayı itibariyle %25'lik bir artış oranıyla 100 MW ve haziran sonunda %20'lik artışla 120 MW olarak açıkladı. Bununla birlikte Avrupa'nın en geniş fotovoltaik pil üretim ağına sahip olan RWE Schott Solar firması 40 milyon Euro olan yatırımını artıracığını açıklamıştır. BP Solar ve Romag, PowerGlaz olarak adlandırdıkları cam levhali güneş pilini geliştirdiklerini açıkladılar ve sistemin yılsonuna doğru satışa sunulacağını bildirdiler. Bu sistemin boyutları 3,3 m x 2,2 m olup bina dış cephelerine rahatlıkla uygulanabilecek düzeydedir. Santo Kuzey Amerika firması 200 kW'lık bir sistemi San Diego'da kurmuştur. Bu sistem 1056 adet Sanyo HIT-190 güneş pilinden oluşmaktadır. Bu sistemin enerji dönüşüm oranı %18,5'dir. Japon hükümeti, 2010 yılına kadar ülkedeki toplam kurulu PV gücünü 4820 MW olarak hedeflemiştir. Bu değer 2003 yılı sonunda 887 MW olarak açıklanmıştır. Japon PV Pazarı gelecek 5 yıl içinde yıllık ortalama %20 büyümenin devam ettirileceğini umut etmektedir.

Güneş enerjisini elektrik enerjisine çevirmenin, basit, çevre dostu olan fotovoltaik sistemlerin araştırılması ve geliştirilmesi, maliyetinin düşürülerek yaygınlaştırılması görevi uzun yıllar üniversitelerin yüklendiği ve yürüttüğü bir görev olmuş ve bu nedenle kamuoyunda hep laboratuarda kalan bir çalışma olarak kalmıştır. Ancak son yirmi yılda dünya genelinde çevre konusunda duyarlılığın artmasına bağlı olarak kamuoyundan gelen baskı, çok uluslu büyük şirketleri fosile dayalı olmayan yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları konusunda çalışmalar yapmaya zorlamışlardır. Büyük şirketlerin devreye girmesiyle fotovoltaik piller konusundaki teknolojik gelişmeler ve güç sistemlerine artan talep ve buna bağlı olarak büyüyen üretim kapasitesi, maliyetlerin hızla düşmesini de beraberinde getirmiştir. Yakın geçmişe kadar alışıla gelmiş elektrik enerjisi üretim yöntemleri ile karşılaşıldığında çok pahalı olarak değerlendirilen fotovoltaik güç sistemleri, artık yakın gelecekte güç üretimine katkı sağlayabilecek sistemler olarak değerlendirilmektedir. Özellikle elektrik enerjisi üretiminde hesaba katılmayan ve görünmeyen maliyet olarak değerlendirilebilecek 'sosyal maliyet' göz önüne alındığında,

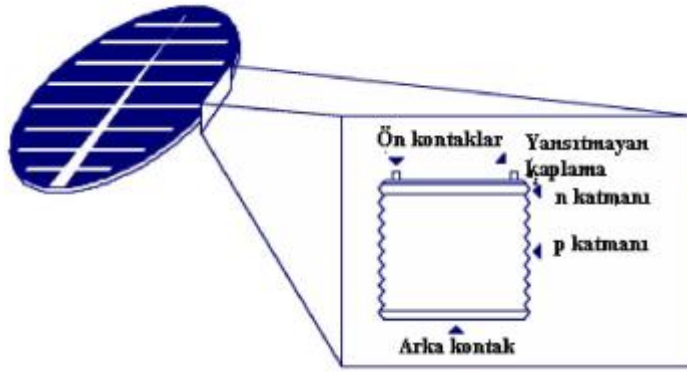
fotovoltaik sistemler fosile dayalı sistemlerden daha ekonomik olarak değerlendirilebilir(Güçlü, 2009).

### **2.6.5.Güneş Pillerinin Yapısı**

Güneş pilleri birçok farklı maddeden üretilmektedir. Günümüzde ticari olarak en çok kullanılan pil teknolojisi Monokristalin, Polikristalin ve İnce Film yapısına sahip olan yarı iletkenler; Amorf Silisyum, Kadmiyum Tellürid, Bakır İndiyum Diseleneid'tir(Nema vd. 2010).

Kullanılan malzeme, üretim şekilleri ve diyotların çalışma ilkeleri, temelde benzerdir. Elektronik sanayisinin en önemli malzemelerinden olan silisyum kristali, bugün güneş pillerinin çoğunluğunun üretiminde kullanılmaktadır. Silisyum, teknolojik önemi nedeni ile en iyi bilinen yarı-iletken malzemelerden biridir. Tek kristalli silisyum güneş pilinin rengi koyu mavi olup, ağırlığı 10 gram'dan azdır. Pilin üst yüzeyinde, pil tarafından üretilen akımı toplayacak ve malzemesi genellikle bakır olan ön kontaklar vardır. Kontakların altında 150 mm kalınlığında, yansıtıcı özelliği olmayan bir kaplama tabakası vardır. Bu tabaka olmazsa, silisyum, üzerine düşen ısınının üçte birine yakın kısmını yansıtacaktır. Pilin ön yüzeyi, normal olarak yansıyan ışığın bir kısmını daha yakalayabilmek amacıyla, piramitler ve konikler şeklinde dizayn edilmiştir. Yansıtıcı olmayan kaplamanın altında, pilin elektrik akımının ortaya çıktığı yapı bulunmaktadır.

Güneş pilleri, güneş-elektrik çevriminin kalbi olup, optiksel ve elektriksel özellikleri bu dönüşüme uygun olarak seçilen yarı iletken malzemedan yapılmış diyotlardır. PV hücreler, gerçekte birbirine benzemeyen iki zayıf yarı-iletken malzemedan oluşmaktadır (p tipi yarı iletken ve n tipi yarı iletken). Yarı iletken malzemeler başlangıçta silikon malzemelerle yapılırken daha sonralarda farklı malzemelerden üreilmeye başlanmıştır. Basit bir güneş pilinin içyapısı şekil 2.6'da görülmektedir.



Şekil 2.6. Güneş Pilinin iç yapısı

Güneş pilinin iç yapısı, iki farklı katman halindedir. n katmanı, fosfor atomları eklenmiş silisyumdan oluşan ve pilin negatif tarafını oluşturan katmandır. p katmanı ise, bor atomları eklenmiş silisyumdan oluşmuş, pilin pozitif tarafıdır. İki katman arasında, p-n kavşağı denilen, pozitif ve negatif yüklü elektronların karşılaştığı bir bölge bulunur. Pilin arka yüzeyinde, elektronların girdiği pozitif kontak görevi gören arka kontak yer alır (Güçlü, 2009).

#### 2.6.6. Güneş Pillerinin Çalışma Prensibi

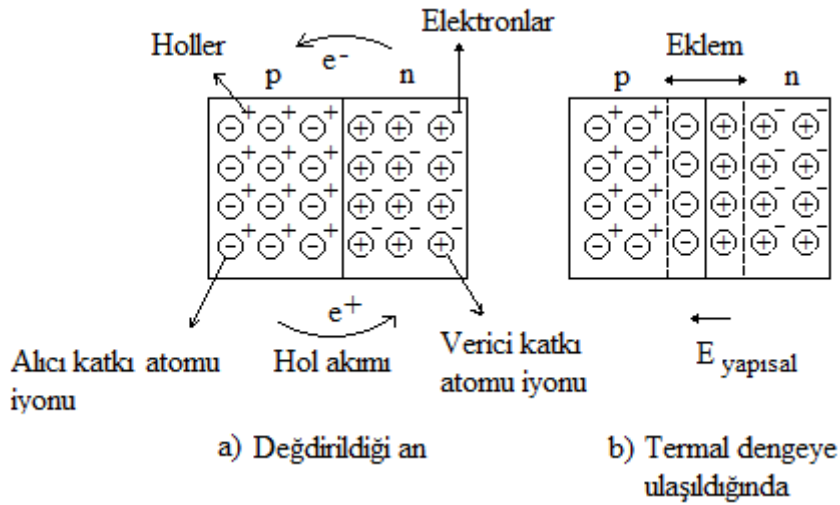
Günümüz elektronik ürünlerinde kullanılan transistörler, doğrultucu diyotlar gibi güneş pilleri de, yarı-iletken maddelerden yapılırlar. Yarı-iletken özellik gösteren birçok madde arasında güneş pili yapmak için en elverişli olanlar, silisyum, galyum arsenit, kadmiyum tellür gibi maddelerdir.

Yarı-iletken maddelerin güneş pili olarak kullanılabilmesi için n ya da p tipi katkıları gereklidir. Katkılama, saf yarıiletken eriyik içerisine istenilen katkı maddelerinin kontrollü olarak eklenmesiyle yapılır. Elde edilen yarı-iletkenin n ya da p tipi olması katkı maddesine bağlıdır. En yaygın güneş pili maddesi olarak kullanılan silisyumdan n tipi silisyum elde etmek için silisyum eriyiğine periyodik cetvelin 5. grubundan bir element, örneğin fosfor eklenir. Silisyum'un dış yörüngesinde 4, fosforun dış yörüngesinde 5 elektron olduğu için, fosforun fazla olan tek elektronu kristal yapıya bir elektron verir. Bu nedenle V. grup elementlerine "verici" ya da "n tipi" katkı maddesi denir.

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

p ve n tipi katkılandırılmış malzemeler bir araya getirildiğinde yarıiletken eklemler oluşturulur. n tipi yarıiletkende elektronlar, p tipi yarıiletkende holler çoğunluk taşıyıcısıdır. p ve n tipi yarıiletkenler bir araya gelmeden önce, her iki madde de elektriksel bakımdan nötrdür.

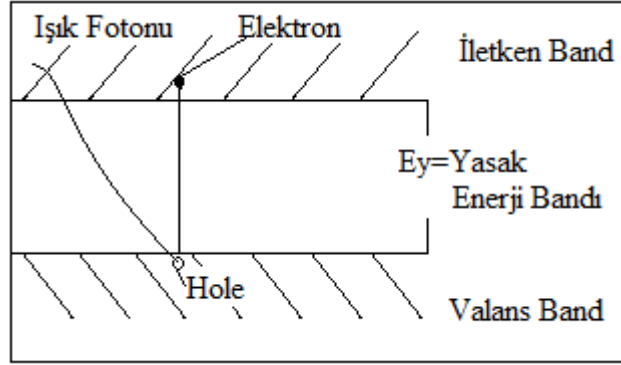
Yani p tipinde negatif enerji seviyeleri ile hol sayıları eşit, n tipinde pozitif enerji seviyeleri ile elektron sayıları eşittir. pn eklem oluştuğunda, n tipindeki çoğunluk taşıyıcısı olan elektronlar, p tipine doğru akım oluştururlar. Bu olay her iki tarafta da yük dengesi oluşana kadar devam eder. pn tipi maddenin ara yüzeyinde, yani eklem bölgesinde, p bölgesi tarafında negatif, n bölgesi tarafında pozitif yük birikir. Bu eklem bölgesine "geçiş bölgesi" ya da "yükten arındırılmış bölge" denir. Bu bölgede oluşan elektrik alan "yapısal elektrik alan ( $E_y$ )" olarak adlandırılır. Şekil 2.7'de pn eklem oluşması şematize edilmiştir.



Şekil 2.7. p-n eklem oluşması

Yarıiletken eklem güneş pili olarak çalışması için eklem bölgesinde fotovoltaik dönüşümün sağlanması gerekir. Bu dönüşüm iki aşamada olur, ilk olarak, eklem bölgesine

ışık düşürülerek elektron-hol çiftleri oluşturulur, ikinci olarak ise, bunlar bölgedeki elektrik alan yardımıyla birbirlerinden ayrılır.



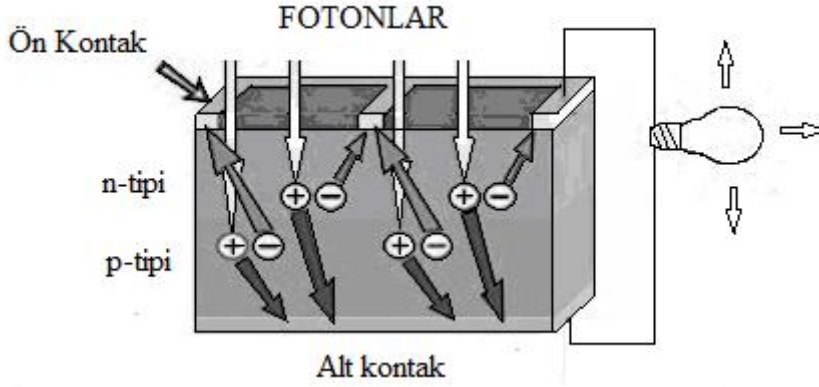
Şekil 2.8. Elektronun iletken banda geçişi

Yarıiletkenler, bir yasak enerji aralığı tarafından ayrılan iki enerji bandından oluşur. Bu bandlar valans bandı ve iletkenlik bandı adını alırlar. Bu yasak enerji aralığına eşit veya daha büyük enerjili bir foton, yarıiletken tarafından soğurulduğu zaman, enerjisini valans banddaki bir elektrona vererek, elektronun iletkenlik bandına çıkmasını sağlar. Böylece, elektron-hol çifti oluşur. Bu olay, pn eklem güneş pilinin ara yüzeyinde meydana gelmiş ise elektron-hol çiftleri buradaki elektrik alan tarafından birbirlerinden ayrılır. Bu şekilde güneş pili, elektronları n bölgesine, holleri de p bölgesine iten bir pompa gibi çalışır. Birbirlerinden ayrılan elektron-hol çiftleri, güneş pilinin uçlarında yararlı bir güç çıkışı oluştururlar. Bu süreç yeniden bir fotonun pil yüzeyine çarpmasıyla aynı şekilde devam eder. Yarıiletkenin iç kısımlarında da, gelen fotonlar tarafından elektron-hol çiftleri oluşturulmaktadır. Fakat gerekli elektrik alan olmadığı için tekrar birleşerek kaybolmaktadırlar (URL-5, 2012).

### 2.6.7. Güneş Pili Eşdeğer Devresi

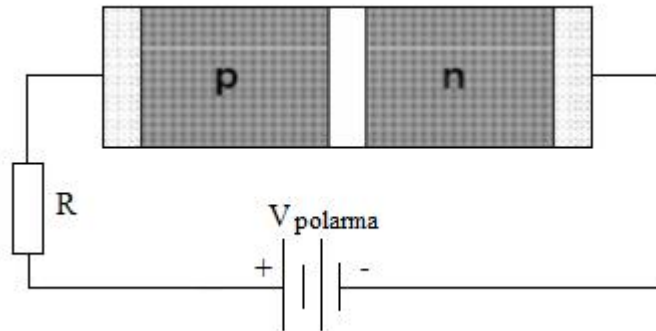
Güneş pili bir yarı iletken düzendir. Çoğunluk yük taşıyıcıları elektronlardan oluşan n tipi ile çoğunluk yük taşıyıcıları oyuklardan oluşan p tipi yarı iletken yan yana getirilir. Işık

enerjisi bu birleşme noktasına düşürülürse dış devreden bir akım geçebilmektedir (Şekil 1.9).



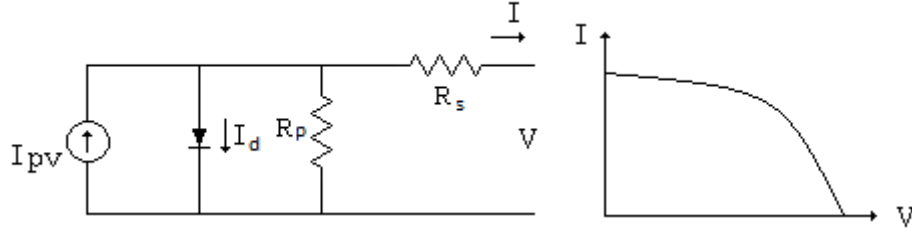
Şekil 2.9. Güneş pili

p-n yarı iletken kavşağında, elektronlar p tipi bölgeye geçerek birleşme yüzeyine yakın bölgelerde boşluk yük taşıyıcısındaki elektron eksikliğini tamamlayıp (-) iyonlar oluştururken n tipi bölgede de (+) iyon duvarı oluşacaktır. Dış tesir olmazsa bu enerji duvarı akımın geçmesini önleyecektir. Işın demeti bu bölgeye düşerse, yük taşıyıcı elektronlar çok az oranlarda olduğundan, muhtemelen bir valans elektrona enerjisini bırakacak ve onu p tipi bölgeye doğru itecektir. Dış devre akımı ise p'den n'ye doğru olacaktır (Şekil 1.10).



Şekil 2.10. p – n kavşağının oluşturulması ve kavşağa düşen foton enerjisi ile iletkenlik temini

Bir güneş pilinde n tipi bölgede elektron üreten bir elektromotor kuvveti düşünülebilir. Şekil 1.11’de fiziksel eşdeğer devre görülmektedir. Devre elemanları bir elektromotor kuvvet, bir iç diyot ve bir iç direnç şeklinde sembolize edilebilir ( Güçlü, 2009).



Şekil 2.11. Güneş pili eşdeğer devresi ve V-I grafiği

Güneş pili denklemleri aşağıdaki gibidir.

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

Burada

I:kısa devre akımı

$I_d$ : diyot akımı

Q:elektron yükü  $q=1.602 \times 10^{19}$ (C)

A:eğri uydurma faktörü

K:Boltzman sabiti  $1.381 \times 10^{-23}$  (J/K)

$T_c$ : pil sıcaklığı

$I_0$ : doyma akımı(A)

$$I_{pv} = I_0 \left( e^{\frac{qV}{AKT_c}} - 1 \right) \quad (1.2)$$

Denklemleri yeniden düzenlersek

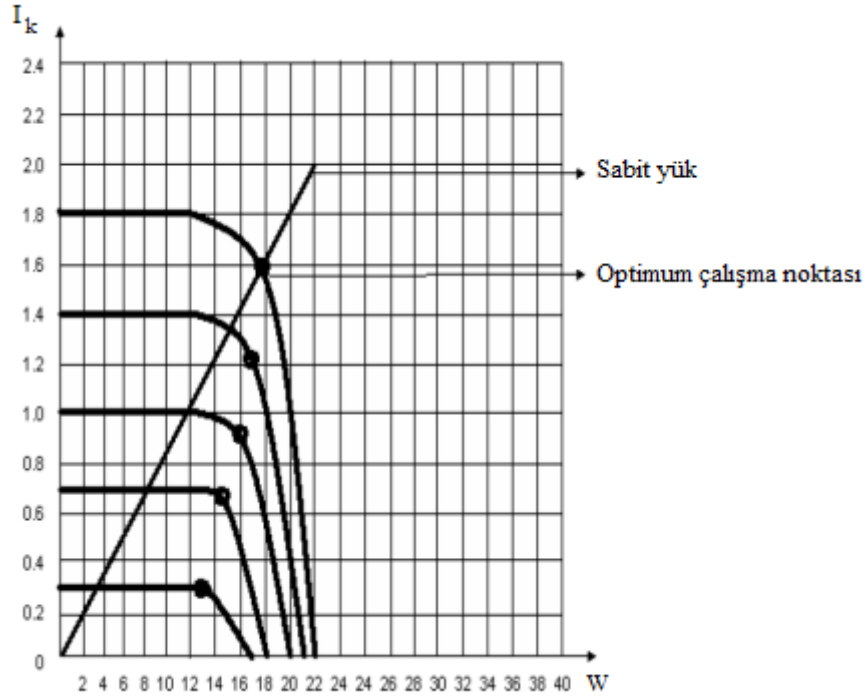
$$I_{pv} = I - I_0 \left( e^{\frac{qV}{AKT_c}} - 1 \right) \quad (1.3)$$

Pil için akım değeri bulunur. Burada  $I_{pv}$  sıcaklık ve güneş ışınımı ile lineer olarak değişir. Denklemlerde  $R_s$  ve  $R_p$  değerleri ihmal edilmiştir (Aymen C., vd., 2010; Kun vd., 2011; Marcelo vd., 2009; V. Di Dio, vd. .2009; Chandrasekaran, vd. 2012; Mellit, vd., 2011).

Güneş pilleri, belli güneşlenme şartlarında, birim alan başına belirli bir akım ve gerilim üretirler. İstenen bir enerji için birçok pili seri ve paralel olarak bağlamak gerekir. Böylece güneş panelleri oluşturulur. Şekil 2.11’de eşdeğer şeması verilen güneş pilinde dış devre akım şiddeti ve uçlardaki gerilim ölçülebilir. Ayarlanabilir bir dış dirençle, gerilim ve akım açık devreden kısa devreye kadar değiştirilerek Şekil 2.12’deki gerilim akım şiddeti eğrileri elde edilebilir. 1 cm<sup>2</sup>’lik pil güneşlenme alanı için ışınım şiddeti 0.5 – 1.0 kW/m<sup>2</sup> arasında değişirken, optimum çalışma noktaları ve sabit yük eğrisi bu şekilde gösterilmiştir.

Ölçümler 27 °C sıcaklıkta yapılmış olup yüzey sıcaklığı arttıkça gerilim düşer. Akım şiddeti, güneş ışınım yoğunluğu ve pil ışınım alanı ile orantılı olarak değişir. Sıcaklığın gerilime tesiri 0.022 W/ °C oranında olmaktadır. Şekil 2.12’de 40 adet seri bağlanmış 10x10 cm ebadında pilin, 1 kW/m<sup>2</sup> ışınım şartlarında akım şiddeti gerilim karakteristiği değişik sıcaklıklar için verilmiştir (Güçlü, 2009).





Şekil 2.12. 34 watt''lık bir güneş pilinde Akım-Gerilim eğrileri (Güçlü, 2009).

### 2.6.8. Güneş Pillerinde Verim

Bir fotovoltaik pil (PV) , hücre ya da güneş hücresinin dönüşüm verimliliği bir PV pili üzerinde elektrik enerjisine veya elektriğe dönüşen güneş ışınım enerjisinin yüzdesidir. Bu dönüşüm verimliliğini artırma araştırmacılar için önemli bir hedeftir ve enerjinin daha geleneksel kaynakları ile maliyet olarak rekabet edebilen PV teknolojileri yapılmasına yardımcı olur. Bu amaçla fotovoltaik uygulamaların verimliliğini artırmak amaçlı maksimum güç noktası takibi (MPPT) için yapay sinir ağları (ANN) gibi teknikler kullanılmaktadır(Aymen vd., 2010). MPPT nin avantajları ise şunlardır: PV panelin boyutlarını düşürmek, daha küçük akü grubu kullanmak ve daha yüksek performans sağlamaktır(Brunelli, vd. 2009).

## **Verimi Etkileyen Faktörler**

PV (fotovoltaik pil) hücresine ulaşan güneş ışığı elektriğe dönüştürülmeden önce enerjinin büyük bir miktarı kaybolur. Ayrıca güneş pili malzemelerinin bazı özellikleri de aldığı güneş ışığını dönüştürmek için pilin verimini sınırlamaktadır.

### **Işığın Dalga Boyu**

Işık ya da foton dalga boyu olarak değişik dalga boyu paketlerinden oluşur. Bazı fotonlar güneş hücresinin yüzeyine çarptığında, yansıtılır ve hücreye girmez. Diğer fotonlar malzemenin içine geçer.

### **Rekombinasyon**

Bir güneş pilindeki şarj taşıyıcıları elektronlar ve delikler elektrik devresi haline getirilmeden önce yanlışıklıkla recombine (birleşebilir) olabilir. Işık oluşturulan elektron ve delikler birbirine rastgele ve birleşirse bazı malzemeler için büyük bir sorundur.

### **Doğal Direnç**

Bir pilde elektron akışına karşı koyan doğal direnç pilin verimliliğini azaltmaktadır.

### **Sıcaklık**

Güneş hücreleri malzeme özelliklerine bağlı olarak, düşük sıcaklıklarda en iyi şekilde çalışır. Tüm pillerde malzemelerde sıcaklık arttıkça verimlilik azalır.

### **Yansıtma**

Bir pilin verimi pil yüzeyinden yansıyan ışık miktarını azaltarak artırılabilir. Örneğin, işlenmemiş silikon gelen ışığın % 30'dan daha fazlasını yansıtır(URL-6,2012).

## **2.7. Fotovoltaik (PV) Güç Sistemleri**

Fotovoltaik etki; iki farklı malzemenin birleşim (eklem) noktasının yayılan fotonlarla ışıklandırılması sonucu ortaya çıkan potansiyel farkıdır (voltaj). Fotovoltaik pilin yapısı p-n eklemli diyoda çok benzer (Mukund, 1999). Güç üretimi güneş ışınımına ve panel sıcaklığına (ortam koşullarına) bağlı olan PV panellerinden alınan güç üretimini sürekli maksimum düzeyde tutmak için Maksimum Güç Noktasının (MPPT) sürekli olarak takip edilmesi gerekir (Mellit vd., 2011; Tsengenes ve A, 2011). Son zamanlarda PV sistemden maksimum güç almak için (Maksimum Güç Noktası Takibi için) kayma mod

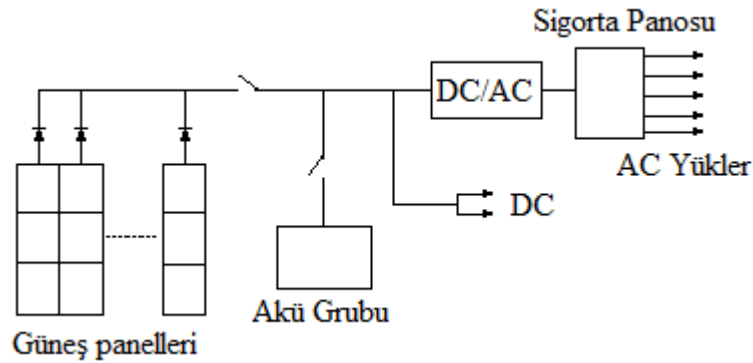
kontrolü,yapay sinir ağları (ANN), karıştır gözle (PO) ve Fuzzy (bulanık) kontrol gibi yöntemlere araştırmalar odaklanmıştır (Konstantopoulos ve Alexandridis,2011; Lee H.H. vd., 2010).

Fotovoltaik enerji; yüksek ilk kurulum maliyetlerinden dolayı şebekeden daha ucuza elektrik alan tüketiciler için ilgi çekmemiştir (Pradeep vd.,2011). Son yirmi yılda PV teknolojilerindeki gelişmelere ve PV pazarının büyümesine koşut olarak, maliyetler sürekli bir düşüş eğilimindedir (Mukund, 1999). PV güç sistemleri rüzgar güç sistemleriyle beraber kullanıldığı zaman (birbirlerini tamamladıkları için) tüketiciler için tek kaynaklı sistemlere göre daha güvenilir olmaktadır. Bu nedenle bütün dünyada bu sistem (hibrit) dikkat çekmeye başlamıştır(Dali vd.,2010;Dali vd. ,2010;Soler-Bientz vd.,2011).

PV güç sistemleri, şebekeden bağımsız ve şebekeye bağlı olmak üzere iki ana gruba ayrılır (Mukund, 1999).

### 2.7.1. şebekeden Bağımsız Sistemler

Tipik olarak PV şebekeden bağımsız sistemler solar panel ve ona bağlı batarya sisteminden oluşur. Paneller gün boyunca yükü ve aküyü besler. Karanlıkta ise; akü grubu inverter üzerinden yükü besler (Mukund, 1999). Enerji saklamak için kullanılan bataryalar ve yakıt hücreleri gücün tepe yaptığı değer dikkate alınarak hesaplanır( Adib ve Farzanehfard, 2009).



Şekil 2.13. Şebekeden bağımsız bir güneş pili sistemi örneği (Mukund, 1999).

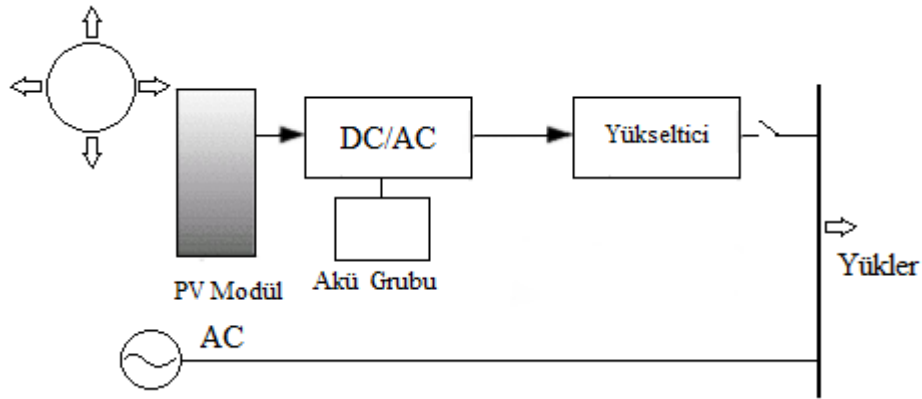
Gelişmekte olan ülkelerde uzak bölgelerde sulama ve pompalama amaçlı uygulamalar için fotovoltaik enerji kaynaklarının kullanımı önemsenmektedir. Çünkü bu ülkelerde

ulusal şebeke ağını uzak bölgelere bağlamak ekonomik değildir. Böyle sistemler geçici hal gibi olumsuzlukları barındırmadığı için açık çevrim kontrol çalışır. Ek olarak bu sistemler uzun süreli olarak sürekli durumda da çalışırlar (Betka ve Attali,2010 ).

### 2.7.2. Şebekeye Bağlı Sistemler

Şebekeye bağlı fotovoltaik sistemlerde enerji üretim ve dağıtımın teknolojisinin geleceğinin anahtar kelimesi güç ayar sistemleridir (Choi ve Lai,2010).

Son yıllarda büyük ölçekli fotovoltaik güç sistemlerinin şebekeye bağlanmasında önemli gelişmeler devam etmektedir. İngiltere ve Amerika’da şebekeye bağlı fotovoltaik sistemler kullanılmaktadır. Şekil1.14’te bir şebekeye bağlı sistem örneği gösterilmiştir ( Mukund, 1999).



Şekil 2.14. Şebeke bağlantılı sistem ( Mukund, 1999)

### **3. DOĞRU AKIM –DOĞRU AKIM ÇEVİRİCİLER**

#### **3.1. GİRİŞ**

Doğru akım–doğru akım (DA-DA) eviriciler yüksek verimlilik ve kararlılıklarından dolayı ev uygulamaları mobil haberleşme endüstriyel uygulamalar gibi alanlarda kullanılmaktadırlar. DönüŐtürücünün analizi ve tasarımı araŐtırmaların temel konusu olmaktadır. DA-DA eviriciler sürekli ve süreksiz çalışma modu olmak üzere iki temel çalışma moduna sahiptir(Xie vd., 2010).

Son zamanlarda yapılan araŐtırmalarda DA dağıtım g teknolojisi geleceğin güç sistemi olmaya aday olarak ortaya konulmaktadır. Ancak DA g çeviricileri verimlilik ve güvenilirlik açısından AA eviricilerle (transformatrlerle) henüz yarıŐabilecek durumda değildirler (Chung vd., 2011).

#### **3.2. DA-DA eviricilerin Kontrolü**

DA-DA eviricilerde, çıkış doğru gerilimi öylesine denetlenmelidir ki giriş gerilimi ve çıkış yükü deđiŐse bile, çıkış geriliminin ortalaması istenen değerde olmalıdır. Anahtarlmalı DA-DA eviriciler doğru akımı bir düzeyden diğerine dönüŐtürürken bir veya birden fazla anahtar kullanır. Verilen bir giriş gerilim değeri için bir DA-DA eviricide çıkış gerilimi, anahtarların iletimde ve kesimde olduğu srelerin denetlenmesiyle ayarlanır( Mohan vd., 2007).

Orantı+İntegral+Türev (PID) kontrol çoğu uygulamalarda kullanılan geleneksel lineer bir metoddur. PID kontrolörün tasarımı da Bode diyagramı ile yapılır. PID kontrol tipik olarak tek bir çalışma noktası için yapılır. Oysaki DA-DA dönüŐtürücülerin çalışma noktasındaki değişimle sinyal modeli değişir. Bu nedenle dönüŐtürücülerin çalışma noktasındaki deđiŐimlere iyi cevap vermeyebilir. Bu nedenle bu sorunu zmek için dönüŐtürücülere lineer olmayan kontrol yöntemleri uygulanır. Bu yöntemleri kullanan kontrolörler ise kayma mod kontrolörler ve bulanık mantık (fuzzy) kontrolörlerdir( Guo vd, 2011).

Buck (Azaltan) evirici: Giriş gerilimi düşük bir gerilime dönüştürülür. Bu tip çeviricide giriş gerilimi izolesiz olarak dönüştürülür ve bu tarz çeviriciler düşük güçlü

devrelerin besleme kaynağı olarak yoğun bir şekilde çevremizdeki birçok cihazda kullanılmaktadır.

Boost (Arttıran) Çevirici: Giriş gerilimi daha yüksek bir gerilime dönüştürülür. Yalıtılmamış çıkış gerilimi her zaman için giriş geriliminden yüksektir. Bu tarz çeviriciler daha çok batarya ile beslenen devrelerde gerekli yüksek gerilimleri üretmek için kullanılır.

Buck-Boost (Azaltan Arttıran) Çevirici: Giriş gerilimini negatif gerilime dönüştürülür(Kordkheili vd., 2010). Tek besleme gerilimi olan ya da batarya ile beslenen devrelerde ihtiyaç duyulan negatif besleme gerilimini üretmek için bu tarz çeviriciler tercih edilmektedir.

Fly-Back (Tepkili) Çevirici: Giriş geriliminden bir ya da birden fazla yalıtılmış çıkış gerilimi üretir. Çıkış geriliminin seviyesi pozitif ya da negatif olmak üzere 1-250 katı olabilir. Bu tarz çeviriciler genellikle düşük güçlü çevrim uygulamalarında kullanılmaktadır. Örneğin televizyonların horizontal katları ve bilgisayar güç kaynaklarında.

Forward (İleri) Çevirici: Yalıtılmış olarak yaklaşık 1000W'a kadar olan güçlerdeki çevrimlerde kullanılır.

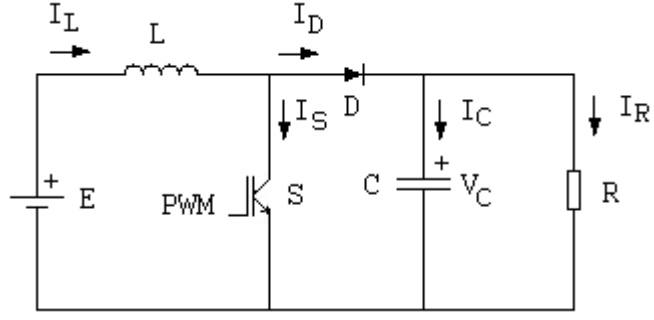
Push-Pull Çevirici: KW seviyesindeki çıkış güçlerine ihtiyaç duyan çeviricilerde kullanılır.

Bu çalışmada boost çevirici kullanıldığı için boost çevirici üzerinde durulmuştur.

### **3.3. Boost Çevirici**

Buck çevirici üzerinde yapılacak küçük bir değişimle boost çevirici elde edilebilir. Boost devresi Şekil 3.1'de verilmiştir. Boost çeviriciler giriş gerilimini daha yüksek çıkış gerilimlerine çevirebilirler. Bu çeviricilerin diğer bir adı ise step-up çeviricilerdir.

Veri iletiminde, ses yükselticilerinde ve sinyal üreticilerinde kullanılan negatif çıkışlı boost çeviriciler de bulunmaktadır(Wang ve Ma, 2011).



Şekil 3.1. Boost çevirici

Anahtarın kapalı olduğu zaman süresinde, bobin akımı (3.1) denkleminde verilen türevle doğrusal olarak artar.

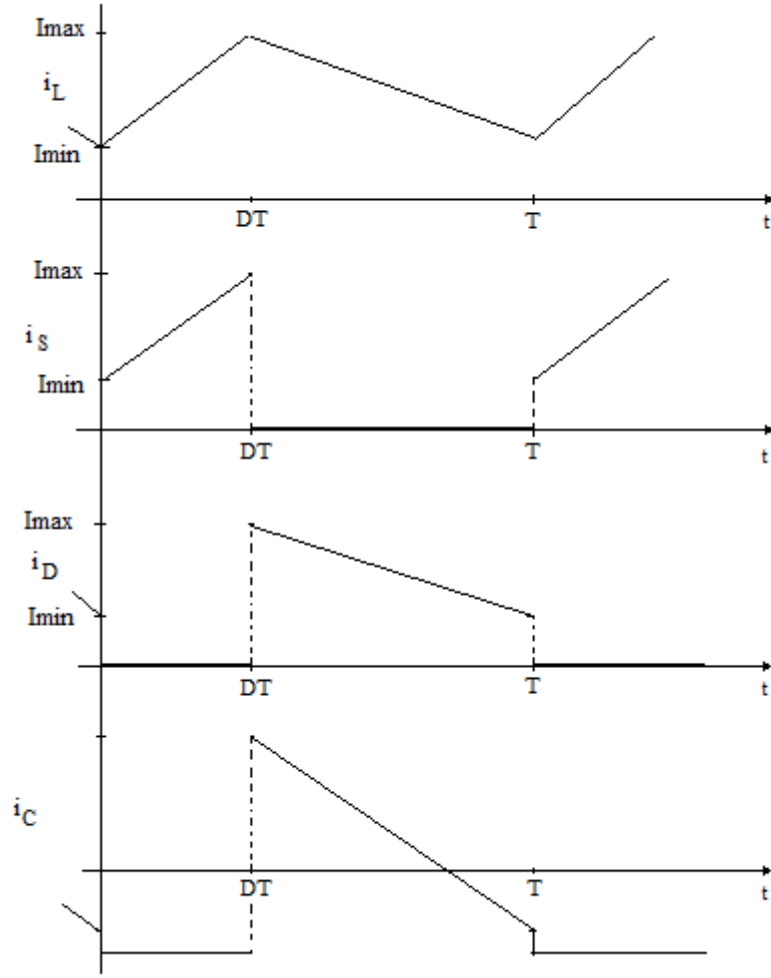
$$\frac{di_L}{dt} = \frac{E}{L} \quad (3.1)$$

$$i_C = -\frac{V_C}{R \cdot C} \quad (3.2)$$

Aynı zamanda bu aralıkta diyot ters polarmalandırılmıştır. Kondansatör yüke akım sağlar ve  $i_C$  negatiftir. Anahtar açılınca, bobinin üzerindeki gerilim ters olarak düşünülebilir ve E gerilimine seri bağlı bir kaynak şeklinde çalışır. Bu durumda bobin akımı doğrusal olarak azalmaktadır. Bu durum şekil 3.2’de gösterilmiştir. Denklem (3.3)’de ise anahtarın açık olduğu zamandaki akımın değişimi ifade edilmiştir.

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{E - V_C}{L} \quad (3.3)$$

$$i_C = i_L - \frac{V_C}{R} \quad (3.4)$$



Şekil 3.2. Boost çevirici akım ve gerilimleri

Bobin akımının, anahtarın kapalı olduğu zamandaki değişimi ile anahtarın açık olduğu zamandaki değişimi eşit olduğu için aşağıdaki eşitlikler yazılabilir.

$$I_{max} - I_{min} = \frac{E}{L} DT \quad (3.5)$$

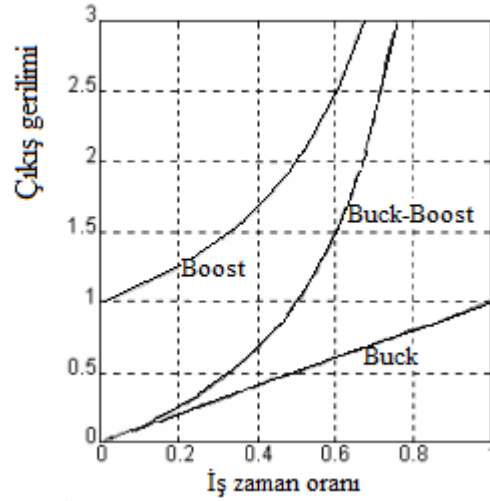
$$I_{max} - I_{min} = \frac{E - V_C}{L} (1 - D)T \quad (3.6)$$

Denklemleri eşitlersek

$$V_C = \frac{E}{(1 - D)} \quad (3.7)$$



elde edilir (Thammasiroj vd., 2010; Hasaneen ve Elbaset , 2008). (3.7) Eşitliğinden devrenin giriş gerilimini arttırdığı anlaşılmaktadır. Şekil 3.3’de bu durum grafikte karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Çeviricilerin çıkış gerilimi-D (İş zamanı) ilişkisi

Şekil 3.2’de işlemin bir periyottaki, bütün akımları görülmektedir. Diğer akımların bulunabilmesi için,  $I_{max}$  ve  $I_{min}$  değerlerinin de bulunması gerekir. Devredeki elemanları ideal olarak kabul ettiğimiz için giriş gücünü çıkış gücüne eşitleyerek bu değerlere ulaşabiliriz.

$$P_{in} = \frac{(I_{max} + I_{min})}{2} \quad (3.8)$$

$$P_{out} = \frac{V_C^2}{R} \quad (3.9)$$

(3.5) eşitliğini, giriş-çıkış gerilim ilişkilerini de kullanarak, bu güç değerlerinin çözümü ile denklem (3.10) elde edilir (Sunan, 2006).

$$I_{max} + I_{min} = 2 \frac{E}{R(1 - D)} \quad (3.10)$$

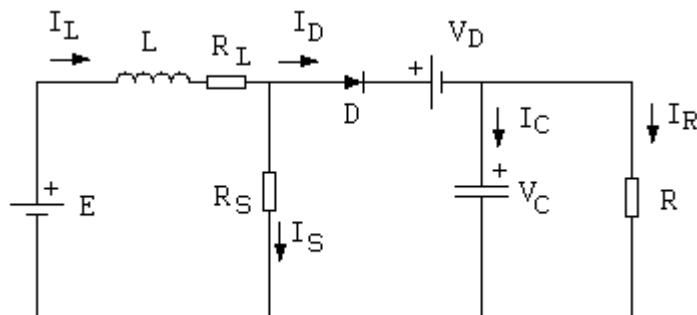
### 3.4. İdeal Olmayan Durumda Boost Çevirici

DA-DA çeviricilerle ilgili olarak şu ana kadar yapılan analizler devrede kullanılan elemanların ideal özellikleri içerdiğini varsayılarak yapıldı. Çevirici devrelerindeki ideal olmayan devre elemanlarının devrenin genel çalışmasına yaptığı etki az olmasına karşın yine de tasarım sırasında bu etkilerinde hesaplara dâhil edilmesi ve seçilen malzemelere uygun toleransların verilmesi gereklidir.

DA-DA çeviricilerde tasarım aşamasında ideal olmayan durumları dikkate alınması gereken elemanlar, yarı iletken elemanlar, bobin ve çıkış kondansatörüdür. Anahtarlamalı çeviricilerde anahtarlama elemanı olarak genelde BJT'ler ve MOSFET'ler kullanılmaktadır. MOSFET'lerin ideal olmayan durumunu anahtarlama elemanına seri bağlanmış bir direnç ile ifade edebiliriz. Bu direncin değeri ise MOSFET'in veri sayfalarında belirtilmektedir. Dikkate alınması gereken başka bir direnç de, çeviricideki bobininin sahip olduğu omik dirençtir. Bu direnç çok küçük olmakla birlikte yüksek akımlı sistemlerde ve duty-cycle oranının yüksek tutulduğu sistemlerde devrenin çalışmasındaki etkileri artmaktadır. Devrede kullanılan çıkış kondansatörünün sahip olduğu ESR'de (Equivalence Serial Resistor) ideal olmayan durumlardan birini oluşturur. Bu değer oldukça küçük bir değerdir ve kondansatörün veri sayfalarından öğrenilebilir.

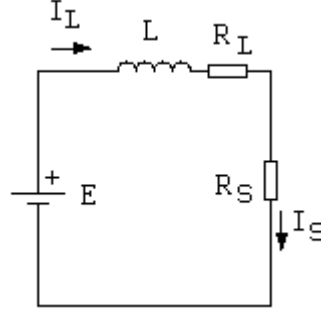
Devrede kullanılacak kondansatör Low-ESR olarak üretilen sınıftan olması sistemin verimini arttıracaktır.

DA-DA çeviricilerde kullanılan diyotların sisteme olan istenmeyen etkisi ise ileri sürüm gerilim düşümüdür. Her diyot ileri yönde iletme geçtiği zaman üzerinde bir miktar gerilim düşümüne sebep olmaktadır. Bu gerilim düşümü tercih edilen diyotun veri sayfasından öğrenilebilir.



Şekil 3.4. İdeal olmayan devre elemanlarıyla boost çevirici

Şekil 3.1'deki devreye ideal olmayan elemanların eşdeğerlerinin eklenmesiyle şekil 3.5'deki devre elde edilmiştir.

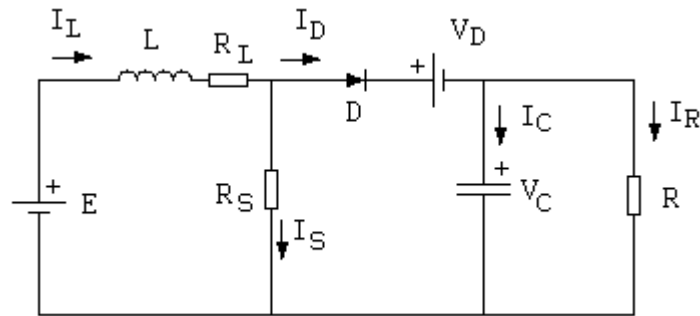


Şekil 3.5. Anahtar kapalı olduğunda boost çevirici

Devrenin yeni haliyle matematiksel ifadesini çıkartmak için anahtarın kapalı ve açık olduğu durumlar yeniden ele alınmalıdır. Anahtar kapalı olduğunda (3.11) ve (3.12) denklemleri elde edilir.

$$E = \frac{di_L}{dt}L + i_L(R_L + R_S) \quad (3.11)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{E - i_L(R_L + R_S)}{L} \quad (3.12)$$



Şekil 3.6. Anahtar açık olduğunda boost çevirici

Anahtarın açık olduğu durumda ise denklem (3.13) ve (3.14) elde edilir.

$$E = \frac{di_L}{dt}L + i_L \cdot R_L + V_D + V_C \quad (3.13)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{E - i_L \cdot R_L - V_D - V_C}{L} \quad (3.14)$$

Şekil 3.2’de boost çeviricinin akım ve gerilim şekilleri görülmektedir.  $i_L$ ’nin maksimum ve minimum değerleri her periyot için benzer olacağından bu eşitliklerden yola çıkarak çıkış gerilimini bulabiliriz. Şekil 3.2’deki  $i_L$  akımının eğimi aynı zamanda türevi olan  $di_L/dt$ ’ye eşit olacağından denklem (3.15) ve (3.16) yazılabilir.

$$I_{max} - I_{min} = \left( \frac{E - i_L(R_L + R_S)}{L} \right) DT \quad (3.15)$$

$$I_{min} - I_{max} = \left( \frac{E - i_L \cdot R_L - V_D - V_C}{L} \right) (1 - DT) \quad (3.16)$$

Bu iki eşitliğin çözülebilmesi için  $i_L$ ’nin eşdeğer ilişkisine ihtiyacımız vardır.  $i_L$  akımının ortalama değeri  $i_L$  akımına eşit olmalıdır. Bu durumu göz önünde bulundurarak denklem (3.17) yazılabilir.

$$i_L(1 - D) = i_R = \frac{V_C}{R} \quad (3.17)$$

Denklem (3.15), (3.16) ve (3.17) birleştirildiğinde çıkış gerilimini hesaplayan (3.18) denklemi elde edilir.

$$V_C = \frac{E - V_D \cdot (1 - D)}{1 - D + \frac{D \cdot R_S + R_L}{R \cdot (1 - D)}} \quad (3.18)$$

Her iki denklem (3.7) ve (3.18) arasındaki fark ideal olmayan devre elemanlarının DA-DA çeviricinin çalışma performansı üzerindeki etkisini göstermektedir. Çeviricideki diyotun ileri yön gerilim düşümü, anahtarlama elemanı olan MOSFET’in iç direnci ve bobinin omik direnci, kritik çalışma durumu olan çeviricilerde (yüksek verim gerekliliği ya

da çok yüksek güçteki çeviriciler) hesaplara katılması gereken önemli değerlerdir. Bu değerlerin idealden uzaklaşması özellikle de yüksek dolu oranlı PWM sinyallerinde çeviricinin çalışması üzerinde önemli ölçüde olumsuz etkileri vardır. Bu olumsuz etkiler ise formüllerden çıkartılabileceği gibi çevirici veriminin düşmesi ve gerilim çevrim oranlarının kısıtlanmasıdır(Sunan 2006; Chandrasekaran vd. 2012).

PV sistemin boyutlandırılması sırasında seçilecek olan konvertör tipi kullanılacak yüke bağlı olarak belirlenir. Mesela yük olarak kullanılan kompresörlü soğutucu motorunun gücü 1184 W'tır. Sistemde bu değer üzerinde çıkış veren bir invertörün seçilmesi gerekmektedir. Ayrıca yarı iletken anahtarların içerisinde geçen akımın ortaya çıkardığı ısı kayıpları da çevirici için en önemli faktördür(Arifujjaman vd. , 2009).

PV modülündeki üretici toleransından kaynaklanan çevresel etki ve gölgelenme gibi problemler önemli kayıplara neden olur. Bu problemleri çözmek için DA-DA çeviricileri kaskad bağlanır(Kim vd., 2010).

Çeviricilerin önemli sorunlarından biride anahtarlama kayıplarıdır. Ayrıca DA-DA çeviricilerde sert anahtarlama tekniği güç kaybı yanında parazit de oluşturur( Delshad ve Farzanehfard, 2011 ).

Çeviricilerin verimini ve ortalama gücünü artırmak için yumuşak anahtarlama teknikleri kullanılarak anahtarlama kayıpları en aza indirilmelidir. Bu tekniklerde aktif veya pasif snubber devreleri ile uygulanır( Guo vd, 2011).

## 4. ANAHTARLI RELÜKTANS MOTORLAR

### 4.1. GİRİŞ

Değişken relüktanslı motorlar (Variable Reluctance Motors, VRM) adını rotor konumuna göre hava aralığının değişmesi dolayısıyla relüktansın değişmesinden almaktadır. Doğrudan bir kaynağa bağlanarak çalışmadıkları için bu motorlarda bir sürme (anahtarlama) devresinin kullanılması gerekmektedir. Hem değişken relüktanslı motoru hem de sürme devresini birlikte ifade etmek için anahtarlı relüktans motor (ARM) adı kullanılmaktadır. Değişken relüktanslı motor kuramı uzun zamandır bilinmesine rağmen ancak 1980'li yıllardan itibaren değişken veya ayarlı hız uygulaması için kullanılmaya başlamıştır. Son yıllarda bu motorların mühendislik uygulamalarında yaygınlaştığı görülmektedir. Ucuz ve yüksek güçlü anahtarlama elemanlarının getirdiği avantajlar bu motorun yeniden keşfini sağlamıştır. ARM yapı olarak çok basittir. Ancak denetimi karmaşıktır. Örneğin, moment üretimi için faz sargılarının uygun sırada tetiklenmesi işlemi rotorun konum bilgisini gerektirmektedir. Sadece son yıllarda, yaygın ve düşük maliyetli mikroişlemci ve güç elektroniği elemanlarının elde edilebilmesiyle, ARM'lerin diğer DA ve AA motorları ile rekabet edebilmesi sağlanmıştır(Gürdal, O., 2001; Bal G., 2011;Cacciato vd, 2008; Belliwali vd., 2011).

ARM sürücüsü motor ve konvertör yapısı olarak birçok avantajlara sahiptir. Geniş hız aralığına sahip olması nedeniyle de özellikle elektrikli araçlar için yüksek uygulama potansiyeline sahiptir. Mevcut ARM dönüştürücüleri arasında asimetrik köprü dönüştürücü en çok kullanılanıdır. Anahtarlama yeteneği ve anahtar sayısı düşünüldüğünde Miller dönüştürücüsü muhtemelen en iyi seçim olacaktır(Chang ve Liaw, 2009).

### 4.2. Anahtarlı Relüktans Motor Üzerine Yapılan Çalışmalar

ARM'lerin çalışma prensipleri 1840 yılında Wheatsone ve Davidson tarafından tanımlanmasına karşın yarıiletken teknolojisinin gelişmeye başladığı 1960'lı yıllara kadar çok önemli bir gelişme sağlanamamıştır.

Bu bağlamda ilk önemli adım 1969 yılında Nasar ve Ofsenani tarafından atılmıştır. Bunu takip eden yıllar içerisinde yarı iletken ve kontrol tekniklerinin de gelişimine paralel olarak ARM'ler literatürde sıkça yer almıştır (Gücüyemez, 2005).

Öncelikli olarak 1970 ile 1980 yılları arasında Anahtarlı Relüktans motor üzerine sınırlı sayıda yayın çıkmıştır.

Bu çalışmalardan birini Ray ve Davis yapmıştır. Bu çalışmada Ray ve Davis 6/4 kutuplu bir ARM sürücü devresini tristör kullanarak tasarlamış ve bu sürücü devresini incelerken ARM'nin doğrusal modelini kullanmıştır.

1980 yılında Lawrenson vd. yaptıkları çalışma ARM üzerine yapılan en kapsamlı çalışma olmuştur. Bu çalışmada anahtarlı relüktans motorların yapısı ve çalışması ayrıntılı bir şekilde ele alınmış aynı güçte ARM ve asenkron motor karşılaştırılmıştır.

Arumugam vd. Sonlu Elemanlar Metodunu kullanarak değişik uyarma akımları ve farklı rotor konumları için ARM'nin magnetik alan dağılımını sunmuştur. ARM'nin doğrusal olmayan modelinin analitik olarak incelendiği çalışmada Miller, konverterlerin güç gereksinimlerinin hesaplanması üzerinde durmuş, ARM ve asenkron motor konverterlerinin güç gereksinimlerini karşılaştırmıştır.

Bose vd. İntel 8751 mikroişlemcisini kullanarak 5 BG gücünde bir ARM sürücünün kapalı çevrim hız ve moment kontrollünü gerçekleştirmiştir.

Lindsay vd. iki boyutlu Sonlu Elemanlar Yöntemini kullanarak bir stator kutbunda iki dış olan bir ARM'nin bir faz indüktans ve akısını farklı rotor konumları ve uyarma akımları için hesaplamıştır.

Harris vd. üç farklı güçte ARM ile eşdeğer güçte asenkron motoru birim hacimdeki moment, verim, konverterin kVA gereksinimi ve moment/eylemsizlik oranı büyüklükleri yönünde karşılaştırmıştır. ARM'nin moment/eylemsizlik oranının daha büyük olduğu belirtilmiştir.

Ray vd. yüksek performanslı ARM tahrik sistemlerini incelemiş ve 7.85 KW gücünde bir ARM'yi aynı güçte asenkron motor ile kVA gereksinimi açısından karşılaştırılmıştır. Ayrıca bu çalışmada 50 KW gücünde bir ARM'nin farklı hızlarda verimleri sunulmuştur.

Ray vd. yaptığı çalışmada GTO ve BJT ile gerçekleştirilen iki değişik ARM konverter devresi incelenmiştir.

Dawson vd. 7.5 KW gücünde bir ARM'nin ürettiği momenti Sonlu Elemanlar Yönteminde hesaplamış ve elde edilen teorik sonuçları deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Ehsani vd. tarafından C-boşalma (C-dump) kondansatörlü ARM konverter devresi ayrıntılı incelenmiştir.

Ilic'-Spong vd. nonlinear kontrolün en son tekniklerini kullanarak ARM'nin geri beslemeli lineer kontrolünü ortak indüktansın etkilerini içerecek şekilde geliştirmiştir.

Fauchez, ARM'nin iki boyutlu magnetik analizini sınır eleman ve sonlu eleman metotlarını birlikte kullanarak yapmıştır. Doymanın etkilerinin meydana geldiği demir bölgesi sonlu eleman; hava aralığı, stator sargıları gibi motorun magnetik olmayan kısımları için sınır eleman metodu kullanarak ARM'nin konuma bağlı indüktans ve momentini hesaplamıştır.

Mizia vd. ARM ve lineer asenkron motor için moment ve itme kuvvetini Sonlu Elemanlar Yönteminde üç farklı metotta hesaplayarak sonuçları karşılaştırmıştır.

Petrovic ve Mandic Sonlu Elemanlar Yönteminden (SEY) elde edilen alan dağılımından ARM'nin faz indüktanslarını hesaplamıştır.

Krishnan vd. anahtarlı relüktans motorun tasarımı için Sonlu Elemanlar Yönteminde hazırladıkları bir bilgisayar programını tanıtmıştır.

Harris ve Lang inverter sürücülü 6/4 kutuplu bir ARM için basit bir hareket tahmin ediciyi Intel 8031 mikroişlemcisini kullanarak tasarlamıştır.

Krishnan vd. Siemens SAB 80535 mikro denetleyicisini kullanarak 6/4 kutuplu bir ARM'nin kapalı çevrim hız ve akım kontrolünü gerçekleştirmiştir.

Moghbelli vd. 10 BG'de 8/6 kutuplu bir ARM'nin davranışını Sonlu Elemanlar Yönteminde hesaplamış ve aynı güçte asenkron motorların davranışı ile karşılaştırmıştır. Bu çalışmada, asenkron motorlara göre 10 BG'de ARM'nin veriminin daha yüksek, kayıplarının ve sargıların ısınmasının daha az olduğu belirtilmiştir.

Preston ve Lyons herhangi bir uyarda aynı anda birden fazla fazı uyarılan ARM'ye ilişkin ortak indüktansın etkilerini içeren magnetik eşdeğer devre modelini tanımlamıştır. ARM'nin magnetik eşdeğer devre modeli sonuçları ile SEY sonuçları karşılaştırılmıştır.

Moallem ve Ong 8/6 kutuplu, 4 KW gücünde bir ARM'nin kararlı hal çalışma karakteristiğini geniş bir moment-hız aralığında incelemiştir.

Moghbelli vd. Tasc Drive Ltd. şirketi tarafından üretilen 8/6 kutuplu bir ARM'nin Sonlu Elemanlar Yönteminde anlık akım ve moment dalga şekillerini hesaplayarak deneysel sonuçlarla karşılaştırmıştır.

Konum sensörü ve akım sensörü kullanılmayan bu çalışmada MacMinn vd. 6/4 kutuplu, 5.5 A ve 450 W gücünde bir ARM'yi mikroişlemci kullanarak kontrol etmiştir. Bu



çalışmada, rotor konumu faz indüktansı ölçümlerinden belirlenmiş, güç MOSFET'leri üzerindeki pilot elemanlarla faz akımı algılanmıştır.

Jack vd. ARM'nin tasarımında gerek duyulan uyarma akımı ve konuma bağlı motorun faz akısının hesaplanmasını Sonlu Elemanlar Yönteminde yapan yeni bir metot tanımlanmıştır.

Bölmeleme, sınır değerleri, malzeme bilgileri, denklem çözümü, çözümden sonra makine bilgilerinin çıkarılması işlemlerini otomatik yapan bir bilgisayar programı tanıtılmıştır.

Wallace ve Taylor ARM'nin momentindeki dalgalanmayı azaltan yeni bir metot sunmuştur. Referans akımının tepe değerini azaltmayı ve değişimini ayarlamayı esas alan bu yeni yöntemin davranışı üç farklı motor modeli üzerinde analitik, sayısal ve deneysel olarak gözlenmiştir.

Becerra vd. Anahtarlı relüktans motorların çok yaygın tipleri için komutasyon şemaları sunmuştur. Bu çalışmada, yarıklı diskle rotor konumu tespit edilen ve basit lojik kontrolle kontrol edilen ARM sürücünün dört bölgede çalışması incelenmiştir.

Faiz ve Finch, ARM'nin performansını optimize eden  $t/\lambda$  (diş genişliği/diş adımı) için geliştirdikleri bir bilgisayar programı statorunda kutup başına tek diş olan bir ARM'nin tasarımına uygulamıştır.

Krishnan ve Materu, ARM için faz başına tek bir anahtarı olan düşük maliyetli bir konverteri tasarlayarak incelemiştir. Bilinen bir konverter olduğu ancak ayrıntılı incelemenin daha önce yapılmadığı ifade edilmiştir.

Arkadan ve Kielgas, elektromagnetik elemanlarda kullanılan çelik alaşımın magnetik özelliklerine sıkıştırmanın etkilerini incelemiştir. Sıkıştırmanın ARM sargı indüktansı dalga şeklini dolayısıyla motorun davranış karakteristiklerini etkilediği ispat edilmiştir.

Bolognani vd. C boşalma (C-Dump) kondansatörlü sürücü devresinden beslenen bir ARM'de kıyıcı akımının genliğini ve kondansatör geriliminin denetimini kayan kip kontrol kullanarak gerçekleştirmiştir.

Buja vd. tarafından bir anahtarlı relüktans motor sürücünün değişken yapılı sistem (Variable Structure System= $V_{SS}$ ) kontrolü sunulmuştur. Bu çalışmada,  $V_{SS}$  kontrol ile ARM'nin momentindeki dalgalanma azaltılmıştır.

Michaelides ve Pollock, dört fazlı, 8/6 kutuplu bir ARM'nin akıma bağlı akının değişimini ve konuma bağlı momentin değişimini Sonlu Elemanlar Yönteminde ARM'nin

iki boyutlu ve üç boyutlu modellerini kullanarak hesaplamıştır. İki boyutlu model sonuçlarına göre üç boyutlu modelin sonuçlarının deneysel sonuçlara daha uyumlu görülmüştür.

Buja ve Valla, magnetik doyumda ARM'nin kontrolünü yapmıştır. Bu çalışmada, motor momenti ile kontrol değişkenleri arasındaki ilişkiler akım ve gerilim kontrollü ARM sürücüsü için ayrı ayrı tanımlanmıştır.

Iqbal ve Ehsani ARM'nin dolaylı rotor konum algılayıcı şemalarında oluşan hataların analizinde yeni bir metot sunmuştur.

Iqbal ve Ehsani, enerjilenen bir ARM fazına komşu veya karşısında duran aktif olmayan bir fazda ortak indüktans gerilimini ölçmeye dayanan yeni bir dolaylı rotor konum algılama yöntemini tanımlamıştır.

Arkadan ve Kielgas, bir faz sargısında meydana gelen kısmi kısa devrede ve konverter devresindeki bir transistörün arızalanmasında ARM sürücü sisteminin dinamik davranışını belirleyen yinelemeli (iteratif) bir yaklaşım sundular.

Ehsani vd., iletişim sistemlerinde yaygın kullanılan modülasyon tekniklerine dayanan ARM'in dolaylı rotor konumunu algılayan iki yeni metot sunmuştur .

Kjaer vd., gerilim kontrollü bir ARM'de elektrik enerjisi tüketimini azaltan ve verimi %8 arttıran bir iletim açısı kontrol algoritması geliştirmiştir. Uygulamada 6/4 kutuplu bir ARM ve 8 bitlik SAB 80C517A mikroişlemcisi kullanılmıştır.

Iqbal ve Ehsani, düşük hızlarda ARM'nin momentindeki dalgalanmayı azaltan yeni bir PWM akım kontrol tekniğini sundular.

Panda ve Dash, ARM'nin doğrusal olmayan kontrolü için doğrusal geri beslemeli bir denetleyici tasarladılar. Bu çalışmada, ARM'nin matematiksel modelinde magnetik doyum hesaba katılmıştır.

Bolognani ve Zigliotto, ARM sürücüsünün hızını bulanık mantık hız kontrolör ile kontrol etmiştir.

Kjaer vd., dört çalışma bölgesinde, geniş bir hız aralığında yüksek verim, momentte az dalgalanma sağlayacak şekilde ARM'nin moment kontrolünü yapmıştır. Bu çalışmada, 3 BG gücünde 8/6 kutuplu bir ARM'nin kontrolünde 32 bitlik Motorola MC68332 mikroişlemcisi kullanılmıştır.

Henao vd., düşük ve yüksek hızlarda ARM'de akım kontrolü için üç farklı PWM akım kontrol tekniği sunmuştur.

Mir vd., ARM'nin nonlinear modeline ilişkin parametreleri kapalı çevrim faz akımı ve gerilimi bilgilerinden belirleyen bir yinelemeli tanımlama sunmuştur. Pratik uygulama TMS320C30 sayısal sinyal işlemcisi ile gerçekleştirilmiştir.

Russa vd., geniş bir hız aralığında çalışma gerektiren uygulamalar için ARM momentinde dalgalanmayı azaltan bir teknik sunmuştur .

Sahoo vd., ARM'de momentte dalgalanmayı azaltmak amacıyla bulanık mantık tabanlı bir akım modülatör tasarladılar.

Pillay ve Cai, ARM'de statorun dışının yuvarlak ve çıkıntılı olması durumu için statorda oluşan titreşim hareketlerini incelediler. Çıkıntılı statorda titreşimlerin daha fazla olduğunu kanıtladılar.

Mir vd., ARM'nin momentindeki dalgalanmayı azaltmak için ARM'ye adaptif bulanık kontrol uygulayıp, bu çalışmada, bulanık kontrol parametrelerini başlangıçta rastgele seçtiler. Ancak daha sonra bu parametreler ayarlanarak en iyi değere getirilmiştir.

Choi vd., yüksek hız uygulamalarında ARM'nin moment davranışını iyileştiren yeni bir tasarım yöntemi sunmuştur. Bu yöntemde yüksek hızlarda moment eğrisi birkaç bölgeye bölünerek sonlu elemanlar yöntemi ile birlikte bulanık optimizasyon algoritması kullanılarak motor optimum olarak tasarlanmıştır.

Rahman vd., elektrikli taşıtlar ve hibrit elektrikli taşıt uygulamalarında ARM'nin üstünlüklerini sunmuştur. ARM'nin SEY'den hesaplanan statik karakteristikleri motorun dinamik davranışını belirlemek için geliştirilen nonlinear modelde kullanılmıştır. Elektrikli taşıtlarda ARM'nin davranışını indüksiyon motor ve fırçasız DA motor performansları ile karşılaştırılmıştır.

Anwar ve Iqbal, ARM'de oluşan akustik gürültünün şiddetini belirlemek ve radyal kuvveti hesaplanmak için analitik bir yöntem sundular. Analitik model kullanarak hesaplanan radyal kuvvetin doğruluğu, sonlu elemanlar yönteminde hesaplanan sonuçlar ile ispatlamıştır.

Bu ve Xu, konum algılayıcısız ARM'de dururken ve dönerken rotor konumunu doğru belirleyen yeni bir yöntem sunmuştur. Bu çalışmada geliştirilen algorithmada, kısa bir süre (0.5ms) stator faz sargılarına DA bir darbe gerilim uygulayarak rotor başlangıç konumu tespit edilmiştir.

Rahman vd., yapay sinir ağlarına dayanan optimal moment kontrol şeması sunmuştur. Biri düşük hızlar için ve diğeri de yüksek hızlar için olmak üzere iki ayrı yapay sinir ağı eğitilmiştir.

Bouji vd., yaptığı çalışmada, ARM sürücü sistemi normal şartlarda ve arıza durumlarında bulanık mantık kontrol ile kontrol edilmiştir(Omaç,2006).

Ülkemizde ise son zamanlarda ARM'ler üzerine çalışmalar artmıştır.

### **4.3. ARM'nin Avantaj ve Dezavantajları**

Literatürde ARM'nin özellikleri çokça tartışılmıştır ve ARM'nin motor, sürücü ve kontrol olarak üç bölümde avantaj ve dezavantajları incelenmiştir (Bal, 2011).

### **4.4. Motor avantajları**

Basit ve sade yapı: Mekaniksel bakışla ARM çok basit bir yapıya sahiptir. Rotorda sabit mıknatıslar ve iletkenler yoktur. Statordaki sargılar oldukça basittir. Sargılar önceden bir kalıp üzerinde sarılarak stator kutuplarına yerleştirilebilir. Bu sade yapıdan dolayı üretim maliyeti oldukça düşüktür (Venkatesan G. vd.,2006).

Mıknatıs yoktur: Küçük elektrik makinalarında yeni eğilim sabit mıknatıslar kullanılarak verimi artırmaktır. Bunun bir avantaj olup olmadığı uygulamaya bağlıdır. Çünkü elde edilecek enerji tasarrufu ekstra üretim maliyetini karşılamayabilir. Diğer bir önemli özellik sıfır akımda zıt emk üretilmemesidir. Bir fırçasız DA motorun inverteri generator modunda yüksek hızlarda zıt emk dan dolayı zarar görebilir .

Rotorda iletken yoktur: ARM' de önemli bir avantajda rotorda iletken bulunmamasıdır. Bunun anlamı rotor kayıplarının ve bundan dolayı rotor sıcaklığının DA motorlarına ve endüksiyon motorlarına göre daha az olmasıdır. Bu iyi bir avantajdır, çünkü rotordaki sıcaklığı ortadan kaldırmak oldukça zordur. Rotorda iletken ve mıknatıs olmadığı için yüksek hızlara çıkmak mümkündür. Merkezkaç kuvveti iletkenleri veya mıknatısları yerinden çıkararak motora zarar verebilir. Bu problem ARM'de yoktur.

Düşük atalet: Uygulamada özellikle başlatma ve durdurmada referans hız çok değişir. Hızlanma momentinin artabilmesi için düşük atalet çok önemlidir. Verim açısından

hızlanma ve büyük atalet her zaman kötü bir durumdur. ARM'nin rotoru diğer elektrik makinalarıyla karşılaştırıldığında düşük bir atalete sahiptir.

Kısa sargı uçları: Genel olarak motorlarda moment üretimine etkisi olan rotora paralel sargılardır. Sargıların uç kısımları ve sargılar arası bağlantıların momente küçük bir etkisi vardır. İletken boyunun uzamasından dolayı kayıpları artırmaktadır. Ama ARM'de kısa sargı uçları büyük bir avantajdır. Sargıların çapraz bağlantıları olmadığından ve toplam sargı boyunun daha kısa olacağından dolayı sargı ucu kayıpları düşüktür.

Az oyuk ve sargı: Klasik bir 6/4 ARM'de sadece 6 sargı bulunur. Bunun karşılığı olarak 3 fazlı bir endüksiyon motorunda en az 12 oyuk bulunur ve bu nadiren kullanılır. Normal olarak standart bir endüksiyon motoru harmonik etkilerini azaltmak için 12 oluktan daha fazla olarak imal edilirler. Sargı ve oluk sayısının az olması üretimi kolaylaştırır.

Arıza (hata) toleransı: ARM'nin fazları arasında çapraz bağlaşım (cross-coupling) etkileri daha az olduğu için motorun arıza durumu azdır. 3 fazlı bir motor 1 fazlı moment üretir. Bunun anlamı diğer iki faz aktif değildir ya da arızalıdır. Arızada fazlar yeniden başlatılır bu her pozisyon için mümkün değildir.

Yüksek verim: Bunu farklı motor tiplerinin verimiyle karşılaştırmak çok zordur. Çünkü bununla ilgili bir standart veya kural son zamana kadar yoktur. Boyut, üretim, fiyat, malzeme, sürücü, kontrol, uygulama, ömür vb. gibi çok fazla etki vardır. Ama genel eğilim ARM'ler yüksek bir verime sahiptir.

Fırçasızdır: ARM fırçasız bir motordur. DA motorlarla karşılaştırıldığında bakıma ihtiyaç duymazlar. Basit ve popüler sıfır-geçisin kullanıldığı fırçasız DA motorlarda da fırça yoktur ve bu motorlar karşılaştırıldığında ARM için bu durum avantaj değildir (Fenercioğlu, 2006; Staley, 2001).

#### **4.5. Motor Dezavantajları**

Rüzgar: Çıkıntılı kutuplardan dolayı yüksek hızlarda rüzgar kayıpları oluşur. Tipik elektrik motorlarında hız 3000 rpm'dir. Ama ARM'de daha yüksek hızlarda ve geometrinin çıkıntılı olmasından dolayı rüzgar kayıplarının etkisi dikkatte alınır.

Çift çıkıntılı yapı: ARM'nin hem rotor, hem statorunda çıkıntılar vardır. Temel kare dalga uyarımı ile yüksek gürültü, titreşimler ve moment dalgalanmaları meydana gelir. Moment dalgalanması büyük bir dezavantaj sayılmaz çünkü bu moment dalgalanmaları

çoğu motor uygulamalarında ortaktır. Bir üniversal motor veya 1 fazlı endüksiyon motoru kullanılan uygulamaların hepsinde moment dalgalanması vardır. Silindir sayısının az olduğu yanmalı makinanın kullanıldığı uygulamalarda da moment dalgalanması meydana gelir.

Çok kablo: Eger ARM klasik ve çok esnek asimetrik H-köprü inverteri ile enerjilenirse, motor ve sürücü arasındaki kabloların sayısı faz sayısının iki katı olacaktır. Farklı tasarlanmış bazı konvertör topolojileri artı bir faz sayısına sahiptir. Davis'in bir patentinde üç fazlı motor için 3 kablolu topoloji geliştirilmiştir. Fakat ARM'nin bağlantı kutusuna 3 tane diyotun yerleştirilmesi gerekmektedir.

Artık malzeme: Sargıları sarılmadan önce oyuklar doludur. Burada sargıları yerleştirmek için demir malzeme kaldırarak elde edilen boşluğa sargı yerleştirilmiştir. Bunun sonucu da demir malzeme artık olarak çıkmaktadır.

Rotor pozisyonuyla senkronize edilmiş komütasyon: ARM komütasyonu, adım motorunun komütasyon metodundan farklıdır. Normalde adım motorunun kullanıldığı uygulamalarda, pozisyonun kontrol edilmesi ve verim kısmen önemli değildir. Bunun anlamı adım sabit görevli açık döngülü bir frekansı takip eder. ARM için bu aynı değildir. Çünkü ARM verimi dikkate alarak elektrik enerjisini dönüştürür. Bunun için rotor pozisyonuyla senkronize olmuş bir komütasyon açısı çok önemlidir. Bunun anlamı denetleyici rotor pozisyon bilgisine gerek duyar. Bu bilgi pozisyon algılayıcılarından ya da algılayıcısız metotla elde edilir.

İlk başlatma zorluğu: Eğer rotorun başlangıç pozisyonu bilinmiyorsa, ilk çalıştırma karmaşıktır. Temel olarak rampa frekanslı açık çevrimli yöntem ilk çalıştırma için kullanılır. Diğer yöntemde ise fazlar için küçük uyarım darbeleri verip akımı gerilimi ölçerek buradaki faz endüktansları hesap edilebilir.

Sürücü (inverter) gerekliliği: ARM'yi çalıştırmak için bir sürücüye gerek vardır. Bu nedenle fiyat olarak üniversal motorlar ve endüksiyon motorlar ile yarışması zordur. Değişken hızın elde edilmesi için inverter gerekir. Adım motoru ve fırçasız DA motorlarda da inverter gerektiği için, bu motorlarla kıyaslandığında bir dezavantaj sayılmaz.

Karmaşık tasarım: Elektrik motorlarının tasarımında önemli bir etken de geçmiş tecrübedir. Günümüzde endüksiyon motorları ile karşılaştırıldığında, ARM için bu çok önemli değildir. ARM tasarımı farklıdır. Klasik makina tasarım teorileri ARM için yeterli değildir. Doğrultusuz (örtüşmeyen) pozisyonun etkileri, bu durumdaki düzensiz akı

dağılımları, doyum, unipolar akı yoğunluğu dalga formları, demir kayıpları, inverter topolojileri ve kontrol stratejisi tasarımı etkilediği için diğer makinalara göre tasarımı karmaşıktır(Fenercioğlu, 2006; Staley, 2001).

#### **4.6. Konvertör Avantajları**

Unipolar akımlar: ARM'deki unipolar akımlardan dolayı çoğu konvektör topolojisi faz başına ikiden daha az anahtara gerek duyarlar. Aslında ARM için literatürde 20 den fazla topoloji gösterilmektedir. Topolojiler arasındaki fark çoğu kez ucuz fiyat için esneklik sağlamaktadır. Yapılacak uygulamaya göre uygun olan topoloji seçilmelidir(Fenercioğlu, 2006).

#### **4.7. Konvertör (dönüştürücü) Dezavantajları**

Elemanlar için daha yüksek VA oranı: Geçmişte diğer sürücülerle karşılaştırıldığında elemanların yüksek VA oranı hakkında bazı tartışmalar vardı. Bu başlıca küçük güç faktörü olarak nitelendirilir (genelde 0,4 den daha küçük olabilir). Manyetize ve demanyetize periyodunun eşit olduğu tek pals kontrolünde ARM için maksimum gerilim oluşacaktır. Eğer 3 fazlı bir ARM zaman aralığının 1/3 de bir manyetize periyot ile varsayılırsa rms gerilimi DA gerilimin 2/3 katının kareköküne eşittir. Bu da DA hat geriliminin % 82'dir. ARM'de güç faktörü endüksiyon motorların yarısı etrafında bir değerdir. ARM'de DA kullanır ve endüksiyon motoru kadar verimlidirler.

İnverterler için geliştirilen faz bacak modüllerinin kullanılmaması: Motor terminal kutusundaki 3 diyot ve iki fazın aynı anda manyetize edilmemesi konvertör topolojisinin bazı dezavantajlarından. Konvertör ve kontrol stratejisi çift gerilim kaynağı veya ayırıcı kapasitör grubuna gerek duyar. Konvertör ve kontrol stratejisinin bir dezavantajı elemanlar için tepe akımın klasik H-köprüsü ile karşılaştırılan akımın iki katıdır. Ama dönüşte her anahtar sadece yarım zamanda iletir. Konvertörün sıfır noktası yoktur ve eğer kapasitör grubu kullanıyorsa düşük hızlarda problemler vardır. Bu konvertör konfigürasyonlarının avantajlarının olduğu bir alan mümkündür. Burada normalde alan etkili transistör (FET)'lerin kullanıldığı düşük gerilim uygulamalarında, düşük iletim kayıplarından dolayı avantaj olabilir.

FET'lerin doğasından dolayı paralellik olmayan diyotlar kullanılabilir. Bu da fiyat dezavantajlarından dolayı gerekli olmayacaktır. Bu konvertör için diğer önemli bir etken 3 fazlı bir motor için 4 kablo gerekir. Burada H-köprü konvertörleri için 6 kablo kullanılır(Fenercioğlu, 2006).

#### **4.8. Denetleyici Avantajları**

Seçenekler çoktur: ARM'ler için kontrol algoritmaları oldukça geniş üretilir. Bunların bazıları çok karmaşık ve zeki iken, bazıları çok basittir. Gerçekten farklı uygulamalarda kontrol stratejilerinin uyumu vardır. Temel olarak dört alanda odaklanmıştır. Bunlar enerji optimizasyonu, sabit moment, algılayıcısız pozisyon kontrol ve akustik gürültü azaltma kontrol stratejileridir.

Makina parametrelerinin düşük değişimi: Kontrol sistemi tam bir motor modeline ve makine parametrelerine ihtiyaç duyar. Burada sabit mıknatıslı makinalardaki ısınmadan ve mıknatıslardaki remenansdan dolayı ARM denetleyicisinin avantajları vardır.

Ölü-zaman etkisi yoktur: Eğer klasik asimetrik H-köprü konvertör kullanılıyorsa, ölü zaman yoktur. Bu kontrol algoritmalarını sadeleştirir. Çünkü ölü-zaman üretilmez bu nedenle kompanzasyona gerek kalmaz.

Fazlar arasında düşük kuplaj: Eğer ARM büyük kesitlerde dikkatli olarak tasarımılandığında, motorun paylaşılan bölümlerinde kuplaj çok azdır. Bunun anlamı her faz tek basına kontrol edilebilir ve toplam moment her faz momentlerinin bir süper pozisyonu olacaktır(Fenercioğlu, 2006).

#### **4.9. Denetleyici dezavantajları**

Sınırlı servo bant genişliği: ARM'ler sabit mıknatıslı senkron motorlardan farklıdır. Fark senkron motorlarda alan yükselen zamanda oluşur. Yüksek hızlarda büyük boy konvertörler dışında moment dalgalanmalarını düşürmek için bu mümkün değildir. Normal olarak bir ARM'nin çalışma hızı yüksek bir moment dalgalanmasının verildiği tek pals çalışması için bulunur veya tanımlanır.

Akımla moment arasında doğrusal olmayan ilişki: Çoğu motor sürücülerinde akımla moment arasında basit bir ilişki vardır. Ama ARM'de bu geçerli değildir. ARM'de sabit



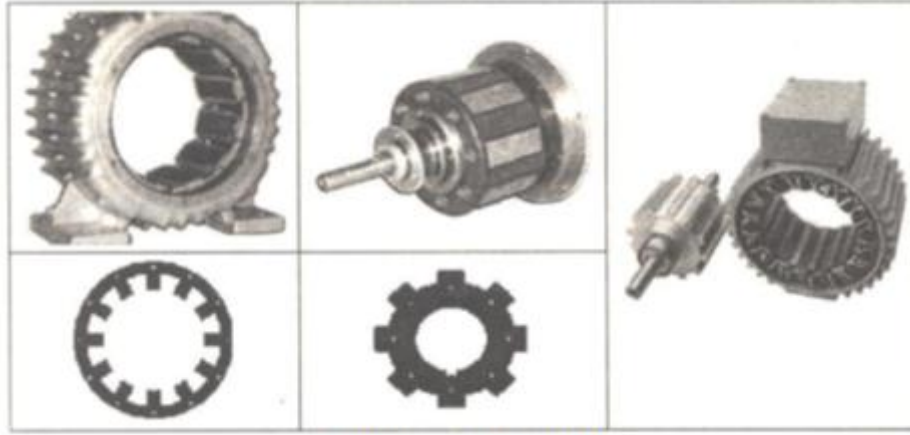
moment üretmek bu nedenle daha karmaşıktır. Kontrol algoritmasında daha fazla bilgiye ihtiyaç vardır. Motor tasarımı ile kontrol arasındaki uzlaşma olması daha iyi sonuçları verir.

Kontrol tarafının uyumsuzluğu: Kontrol algoritmaları ile her şeyi iyiye götürmek mümkün değildir. Örneğin düşük akustik gürültü veya sabit moment her ikisi de yüksek verim için optimum akımda daha düşük bir verim verir. Eğer genel amaçlı bir ARM kontrol edilecekse uygulama için denetleyicinin her ikisi de tasarımılanabilir.

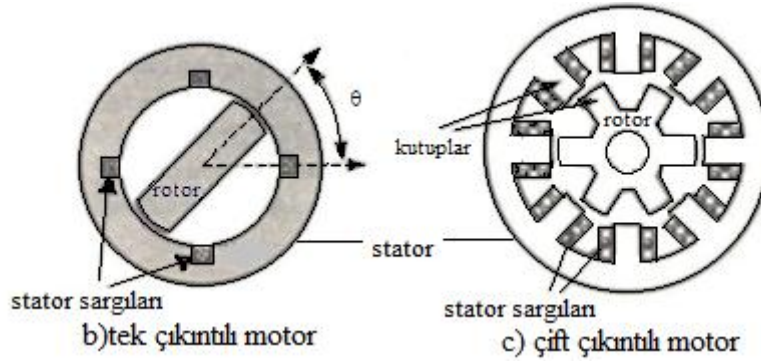
Çok sayıda kontrol parametresi: Temel olarak ARM için 3 kontrol parametresi vardır. Bunlar On, Off ve kıyılmış gerilim. Diğer motorlarda sadece bir veya iki tanedir. DA motoru kıyılmış gerilimle ve AA motoru ise kıyılmış gerilim ve frekans arasındaki ilişki (V/F) ile kontrol edilir. ARM'de kontrol parametreleri fazla olduğu için dezavantajlıdır(Fenercioğlu, 2006).

#### **4.10. Anahtarlı Relüktans Motor Temel Bilgileri**

ARM, yapı olarak en basit döner elektrik motoru olarak sayılabilir. ARM'ler tek çıkıntılı ve çift çıkıntılı, iki tip olarak sınıflandırılabilir. Her iki tipte de rotor üzerinde herhangi bir sargı veya mıknatısın bulunmaması dikkate değerdir. ARM'ler için sadece bir uyartım kaynağı vardır. Bu kaynak stator sargılarını uyarmaktadır. Bu çok önemli özelliğin anlamı, bir ARM'de sadece stator üzerindeki sargıların bir direnç kaybının olması demektir. Statorun soğutulması rotora göre daha kolaydır. Diğer motorlara göre aynı güç için ARM daha küçük bir motordur. ARM'lerde stator kutup sayısının ( $N_s$ ), rotor kutup sayısına ( $N_r$ ) oranı ( $N_s/N_r$ ), motor temsilinde önemli bir veridir ve motor özellikleri belirlenirken  $n_s/n_r$  oranı da verilir(Bal, 2011).



a)stator ve rotor yapısı

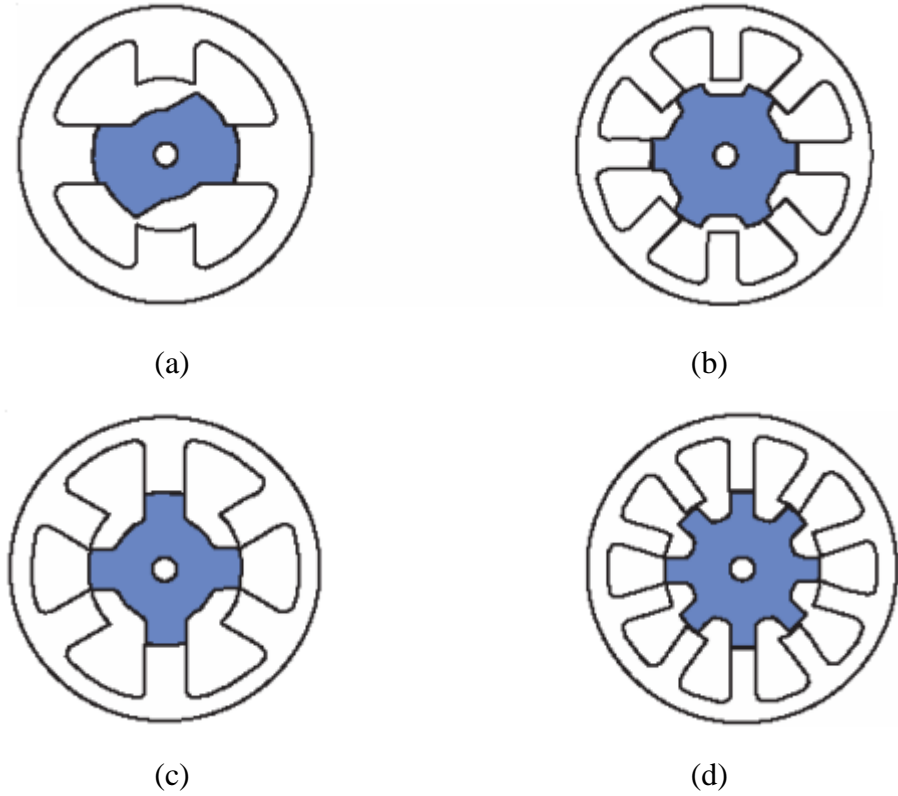


Şekil 4.1. ARM yapıları

ARM'lerin moment üretebilmesi için stator sargılarının endüktansları rotor konumu ile değişecek şekilde tasarlanmalıdır. Şekil 4.1 (a)'da ARM parçaları, şekil 4.1 (b) tek çıkıntılı ARM'nin kesit görünüşü verilmektedir. Bu örnekteki motor, çıkıntısız (silindirik) bir statora ve iki kutuplu çıkıntılı bir rotora sahiptir. Hem stator hem de rotor yüksek manyetik geçirgenlikli malzemedendir yapılmıştır. Şekilde sadece iki stator fazı gösterilmiş olmasına rağmen daha fazla sayıda faz sargılarının kullanılması daha yaygındır. Her bir sargının endüktansı rotor konumu ile değişmektedir. Rotor eksenini, stator fazının manyetik eksenini ile aynı eksene geldiğinde o fazın endüktansı maksimum olmakta, bu iki eksen birbirlerine dik iken endüktans minimum olmaktadır(Bal., 2011).

Şekil 4.1 (c), dört-fazlı çift çıkıntılı bir ARM'nin kesit görünüşünü vermektedir. Çıkıntılı stator 8-kutba ve her bir kutup bir sargıya sahiptir. Ancak, karşılıklı kutuplardaki sargılar aynı faza aittir ve analiz amaçları için bu sargıların seri veya paralel bağlı oldukları düşünülebilir. Böylece bu motor, şekil 4.1 (b)'de gösterilen iki-fazlı ve iki çıkıntılı kutuplu rotoru olan motora benzerdir. Rotor eksenini ile stator faz eksenini üst üste geldiğinde sargı

endüktansı maksimum olurken, bu eksenler birbirine dik olduğunda endüktans minimum olacaktır. Bu iki motorun konfigürasyonu arasındaki önemli farklılık statorun çıkıntılı olması dolayısıyla maksimum ve minimum endüktanslar arasındaki farkın artmasıdır. Bu fark motorun moment üretme karakteristiğini daha da kuvvetlendirir. Çeşitli tiplerde ARM'lerin kesit görüntüleri şekil 4.2'de verilmiştir(Bal, 2011).



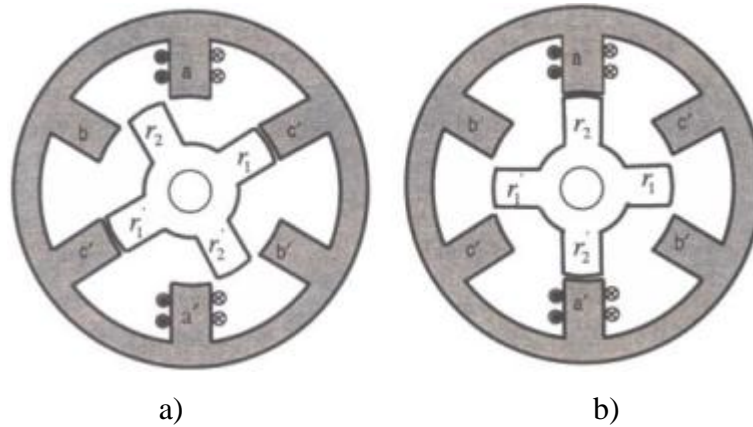
Şekil 4.2. Çeşitli tiplerde anahtarlı relüktans motorlar (ARM), (a) 4/2, (b) 8/6, (c) 6/4, (d) 12/8

Karşılıklı stator kutup sargıları uyarıldığı zaman, rotor bu stator kutuplarının ekseniyle aynı eksene gelmeye çalışır. Bir manyetik devrede uyarım anında döner kısım (rotor), en düşük relüktansın oluşacağı konuma gelmeye çalışır. Rotor kutupları bu stator kutupları ile aynı eksene gelirken rotor kutuplarının bir diğer ikilisi farklı bir stator kutup ikilisi ile farklı ancak yakın eksendedir. Sonra bu iki stator kutupları uyarılarak rotor kutuplarının bu yeni eksene gelmesi sağlanır. Benzer bir şekilde, stator sargıları uygun sıra ile anahtarlanarak sargılara akım uygulanır ve rotor döndürülür. Rotorun hareketiyle birlikte moment ve güç üretilir. Rotor hareket ederken relüktansta bir değişim olduğu an stator

sargılarına uygulanan akımların anahtarlanması gerekir. Bundan dolayı bu değişken hızlı motor, bir anahtarlı relüktans motor (ARM) ve sürücüsü olarak adlandırılır (Fenercioğlu, 2006).

#### 4.11. Anahtarlı Relüktans Motorun Çalışma Esası

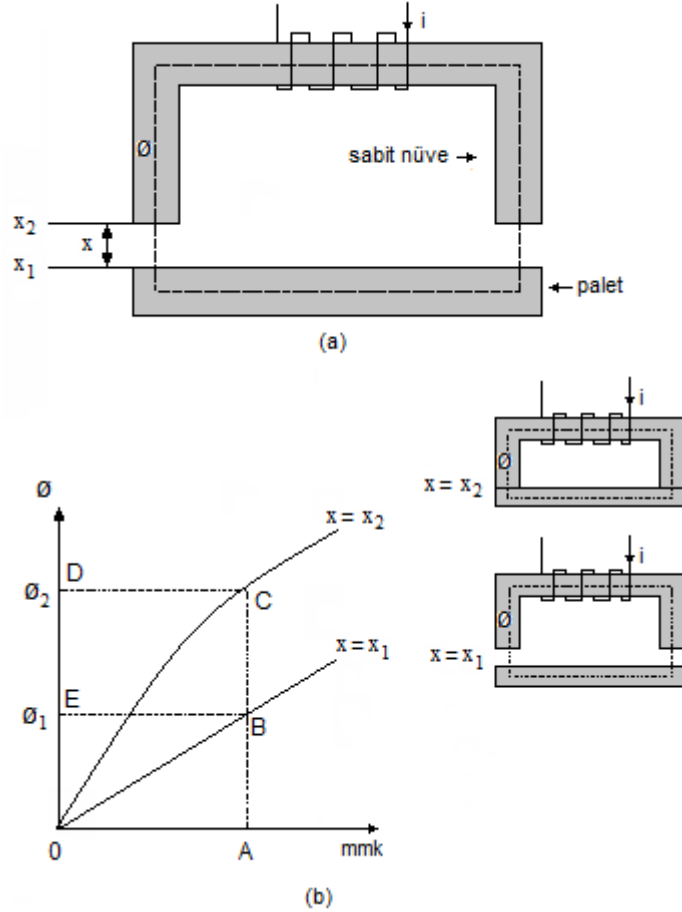
Şekil 4.3 (a)'daki motorda  $r_1$  ve  $r_1'$  rotor kutupları ile c ve c' stator kutuplarının aynı ekseninde olduğunu (örtüşen pozisyonda olduğunu) kabul edelim. Şekil 4.3 (a)'da gösterilen yönde a-fazına bir akım uygulanırsa, a ve a' stator kutupları ile  $r_2$  ve  $r_2'$  rotor kutupları içinde bir akı üretilir. Bu akı,  $r_2$  ve  $r_2'$  rotor kutuplarını a ve a' stator kutuplarına doğru çekmeye çalışır. Kutuplar aynı eksene geldiklerinde, a-fazının akımı kesilir ve bunun sonucunda oluşan durum şekil 4.3 (b)'de gösterilmiştir. Şimdi statorun b-sargısı uyarılır,  $r_1$  ve  $r_1'$  şekilde, c-fazının enerjilenmesi sonucu  $r_2$  ve  $r_2'$  kutupları c ve c' kutupları ile aynı eksene gelir. Bu anahtarlama sırasına göre  $90^\circ$  hareket ettirmek için abc sırasına göre üç fazın enerjilenmesi gerekir. Rotorun bir devirlik hareketi, her fazın akımlarının rotor kutupları sayısı kadar anahtarlanmasıyla üretilir. Akımların a, b, c sırasında anahtarlanması rotor dönüş yönünün ters çevrilmesini sağlar. Bu durum şekil 4.3 (a) ve (b) yardımıyla görülebilir (Bal, 2011).



Şekil 4.3. ARM'nin çalışması, (a) c fazı örtüşen pozisyonda, (b) a fazı örtüşen pozisyonda

ARM'nin moment üretimi bir solenoidde elektromekanik enerji çevriminin temel esasları kullanılarak açıklanabilir. Şekil 4.4 (a)'daki solenoid N sarımlıdır ve sargı i akımı ile uyarıldığı zaman bir  $\phi$  akısı üretir. Uyarım akımının artırılması paleti sabit nüveye

doğru hareket ettirecektir. Hava aralığının  $x_1$  ve  $x_2$  ( $x_1 > x_2$ ) değerleri için mmk'e karşı oluşan manyetik akı ( $\phi$ ) şekil 4.4 (b)'de çizilmiştir.  $x_1$  için çizilen akı doğrusaldır. Çünkü manyetik yolda hava aralığının relüktansı egemen olup manyetik devrede akının daha küçük olmasına neden olur(Bal, 2011).



**şekil 4.4.** Selenoid ve karakteristikleri, (a) Selenoid, (b) mmk-akı karakteristiği

Anahtarlı Relüktans Motorda;

1. Moment akımın karesi ile değişir. Bundan dolayı tek yönlü (unipolar) moment üretmek için akım da tek yönlü olabilir. Bu AA motorlarına göre ters bir durumdur. Tek yönlü akım gerektirmesi, bir fazlı akımı kontrol etmek için sadece bir güç anahtarı (muhtemelen transistör) kullanılması üstünlüğu sağlar. Bu özellik, motoru sürmek için kullanılan konvertörde en az sayıda güç anahtarları kullanılması imkânı verir ve böylece konvertör (sürücü) daha ekonomik hale gelir.

2. Moment sabiti, endüktansın rotor konumuna göre türevi ile belirlenir. Bir stator sargısının endüktansı hem rotor konumunun hem de sargı akımının bir fonksiyonudur ve bundan dolayı doğrusal değildir. Doğrusal olmayan yapıdan dolayı ARM için basit eşdeğer devresi geliştirmek mümkün değildir.
3. Moment akımın karesiyle değişmesinden dolayı, bu motor bir DA motoruna benzer karakteristiğe sahiptir ve iyi bir başlangıç momenti üretir.
4. Akım tek yönlü olmasına rağmen generatör özelliğini (endüktans eğrisinin negatif eğiliminde çalıştırarak) yerine getirebilir.
5. Dönüş yönü, stator uyartım sırası değiştirilerek kolayca ters çevrilebilir.
6. 1, 4 ve 5. maddelerdeki özelliklerden dolayı bu motor bir konvertör yardımıyla dört-bölgede çalıştırılmaya uygundur.
6. Bu motor üç-fazlı şebekeden veya kaynaktan doğrudan çalıştırılmaz, kontrol edilebilir bir konvertör gerektirir. Bundan dolayı sabit hız uygulamaları için bu motor asenkron ve senkron motora göre daha pahalıdır.
7. Moment ve hız kontrolü konvertörün kontrolü ile gerçekleştirilir.
8. Görevini yerine getirebilmesi için bir güç konvertörü ile beraber bu motor, yapı olarak ayarlı-hızlı bir motor sürme sistemini oluşturmaktadır.
9. ARM'de motor faz sargıları arasında küçük bir ortak endüktans vardır ve genellikle bütün uygulamalarda ihmal edilebilir. Ortak manyetik bağın olmadığı kabul edildiğinden dolayı bütün fazlar birbirinden elektriksel olarak bağımsızdır. Bu emsalsiz özellik sadece ARM'ye özgü olup bir faz sargısındaki kısa devre arızası diğer fazlar üzerinde herhangi bir etkiye sahip değildir. ARM'nin bu özelliği, emniyetli kullanımın önemli olduğu yerlerde tercih sebebi olmaktadır.
10. Dört-bölge çalışma için bir yönlü akımın yeterli olması, her bir sargının seri bağlı bir güç anahtarı ile kontrolünü mümkün kılmaktadır.

Yukarıdaki açıklamalara göre ARM'nin aşağıdaki özellikleri dışında adım motoruna çok benzer olduğu görülür. ARM'nin farklı özellikleri şunlardır.

1. Çok az kutup sayısı
2. Daha geniş adımlama açısı
3. Kutup başına genellikle bir diş kullanılması
4. Daha yüksek güç çıkış kapasitesi(Bal, 2011)

#### 4.12. ARM Eşdeğer Devresi

ARM için bir temel eşdeğer devre, fazlar arasındaki ortak endüktans ihmal edilerek şöyle elde edilebilir. Bir faza uygulanan gerilim; sargı direncinde düşen gerilim ile sargı akısının değişiminin toplamına eşittir ve Eş.4.1 ile

$$v = R \cdot i + \frac{d\lambda(\theta, i)}{dt} \quad (3.1)$$

verilir. Burada R bir faz direnci,  $\lambda$  faz başına sargı akısıdır ve Eş. 4.2’de verilmiştir.

$$\lambda = L(\theta, i)i \quad (4.2)$$

Burada L endüktans olup rotor konumuna ve faz akımına bağlıdır. Faz gerilimi denklemi, Eş. 4.3’de verilmiştir.

$$v = Ri + \frac{d\{L(\theta, i)\}}{dt} = Ri + L(\theta, i) \frac{di}{dt} + i \frac{d\theta}{dt} \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \quad (4.3)$$

Bu Eş. 3.3’deki denklemin sağ tarafındaki üç terim sırayla omik gerilim düşümü, endüktif gerilim düşümü ve endüklenen emk’i temsil etmektedir ayrıca, eş. 4.3 DA seri motor gerilim denklemine çok benzerdir.

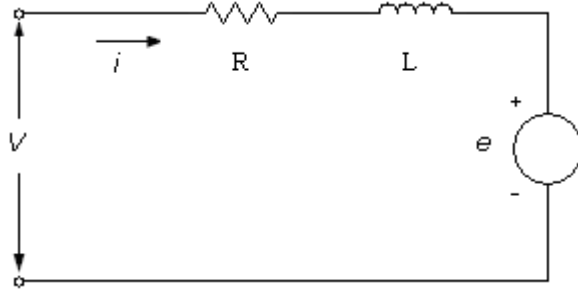
Endüklenen emk, Eş. 3.4’de

$$e = \frac{dL(\theta, i)}{dt} \omega_m i = K_b \omega_m i \quad (4.4)$$

olarak tanımlanır. Burada  $K_b$ , seri uyarımlı DA makinasının emk sabitine benzer olarak düşünülebilir ve Eş. 3.5’de

$$K_b = \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \quad (4.5)$$

olarak tanımlanır. Emk sabiti çalışma noktasına bağlıdır ve o noktada sabit akımda elde edilir. Gerilim denklemi ve endüklenen emk ifadelerinden elde edilen ARM’nin bir faz eşdeğer devresi şekil 4.5’de gösterilmiştir. (Bal, 2011).



Şekil 4.5. ARM'nin bir faz eşdeğer devresi

#### 4.13. ARM'ler için Sürücü Seçim Ve Tasarım Kriterleri

ARM'lerde moment, faz akımının yönüne bağlı olmadığından tek yönlüdür ve tek kutuplu denetim devresinin kullanımına müsaade etmektedir. Bu da alternatif akımla çalışan aynı sürücü devrelere göre bazı avantajlara sahip olduğunu göstermektedir. Akımın tek yönlü olmasının ikinci bir avantajı da histerizis kayıplarının azalmasına olan etkisidir.

Motor faz akımlarının komütasyonunda gerekli olan yüksek seviyeli enerji ile faz akımlarının yakın denetimindeki zorluk ARM için konvertör tasarımında karşılaşılan iki önemli problemdir. Bu problemler, motor faz endüktans değerinin büyük ve rotor pozisyonu ile geniş bir aralıkta değişmesinden kaynaklanmaktadır.

İdeal durumda, dalgalanması az bir moment üretmek için konvertörün motor sargılarına kare dalga akım sağlaması gerekmektedir. Bu durum, bir sargıdan diğerine mümkün olduğunca hızlı bir komütasyonu gerektirmekte ve akımın iletim periyodu boyunca regüle edilmesini zorunlu kılmaktadır. Motor sargılarında depolanan enerji seviyesi yüksek iken, komütasyon zamanını düşürmek için güç anahtarları üzerindeki gerilim baskısının artırılması gerekmektedir. Diğer bir ifadeyle, yüksek değerli ve değişken endüktanstan dolayı motor sargılarındaki akımın regülasyonunda bazı problemler meydana gelmektedir. Akım regülatörünün yüksek hızlarda motor sargı endüktansındaki hızlı değişmeye cevap verebilmesi için yeterince hızlı olması gerekmektedir. Aynı zamanda, sistem parametreleri değişken olduğu için sabit parametrelili denetleyiciler uygun olmayabilmektedir. Bu yüzden motor faz akımlarının yakın denetimli bir uyumlu denetleyiciyi gerektirmektedir.

ARM'yi beslemek için birçok konvertör yapısı literatürde tavsiye edilmiş ve bunlar üzerinde çalışılmıştır. Bu konvertörler bir fazdan diğerine komütasyon boyunca kullanılan



besleme devreleri ve enerjiyi geri toplama teknikleri bakımından birbirinden farklılık göstermektedirler(Dursun, 2002).

#### **4.14. ARM' ler İçin Konvertör Düzenekleri**

ARM'lerde moment, faz akımının yönüne bağlı olmadığından tek yönlüdür ve tek kutuplu kontrol devresinin kullanımına müsaade etmektedir. Bu da AA ile çalışan aynı sürücü devreler göre bazı avantajlara sahip olduğunu göstermektedir. Akımın tek yönlü olmasının ikinci bir avantajı da histerizis kayıplarının azalmasına etkisidir.

ARM için konvertör tasarımında karşılaşılan en önemli problemler ise şunlardır:

1. Motor faz akımlarının komütasyonunda gerekli olan yüksek seviyeli enerji.
2. Motor faz akımlarının yakın kontrolündeki zorluk.

Bu problemler motor indüktanslarının yüksek olması ve bu değerlerin rotor pozisyonu ile geniş aralıkta değişmesinden kaynaklanmaktadır.

İdeal durumda, düşük dalgalanmalı moment üretmek için konvertörün motor sargılarına kare dalga akım sağlaması gerekmektedir. Bu durum bir sargıdan diğerine mümkün olduğunca hızlı bir komütasyonu gerektirmekte ve akımın iletim periyodu boyunca regüle edilmesini zorunlu kılmaktadır. Motor sargılarında depolanan enerji seviyesi yüksek iken, komütasyon zamanını düşürmek için güç anahtarları üzerindeki baskısının artırılması gerekmektedir. Başka bir deyişle, yüksek değerli ve değişken indüktanstan dolayı motor sargılarındaki akımın regülasyonunda bazı problemler meydana gelmektedir. Akım regülatörünün yüksek hızlarda motor sargı indüktansındaki hızlı değişmeye cevap vermesi için yeterince hızlı olması gerekmektedir. Aynı zamanda, sistem parametreleri değişken olduğu için sabit parametrelili denetleyiciler uygun olmayabilmektedir. Bu yüzden motor faz akımlarının yakın kontrolü bir adaptif denetleyici gerektirmektedir.

ARM'yi beslemek için birçok konvertör yapısı literatürde tavsiye edilmiş ve bunlar üzerinde çalışılmıştır. Bu konvertörler bir fazdan diğerine komütasyon boyunca kullanılan besleme devreleri ve enerji toplama (recovery) teknikleri bakımından birbirinden farklılıklar göstermektedirler(Bay, 1996).

#### 4.15. ARM Besleme Devreleri

ARM'ler için temel olarak iki çeşit besleme devresi tasarlanabilir. Bunlar gerilim denetimli ve akım denetimli besleme devreleridir. Her devrenin kendine has avantaj ve dezavantajları vardır.

Akım denetimli besleme özellikle düşük hızlı çalışmalarda uygun olmaktadır. Bu şekildeki çalışmada, motor momenti sabit moment bölgesinde minimum dalgalanma ile denetim yapılabilir. Gerilim denetimli besleme ise yüksek hızlarda zıt emk'nın yüksek olması ve dolayısıyla sabit akım sağlamanın zor olmasından dolayı yüksek hızlı çalışma için uygun olmaktadır (Fenercioğlu, 2006).

#### 4.16. ARM'de Komütasyon İşlemi

Kullanılan besleme devresinden bağımsız olarak, bir sargıdan diğerine komütasyon, depo edilmiş ve boşaltılması gereken yüksek seviye enerjili bir akım komütasyonudur. Bu durum komütasyon işleminde yüksek değerli motor endüktansından kaynaklanmaktadır. ARM'lerde bir fazdan diğerine komütasyon şekil 4.6'da görülen devre ve dalga şekilleri ile açıklanabilir. Burada A fazından B fazına komütasyon dikkate alınmaktadır.

Pozitif moment üretmek amacıyla A sargısı, endüktansının yükselmeye başladığı anda enerjilendirilmektedir.  $S_1$  anahtarı  $t_a$  anında ilettime geçmekte ve  $t_b$  anında kesime gitmektedir. Bu anda  $S_2$  anahtarı B sargısına enerji sağlamak için ilettime geçirilmektedir.  $t_b$  anında  $S_1$  anahtarı kesime getirildiği zaman, A sargısındaki akım  $I$  ve endüktansı ise tam örtüşen pozisyondaki endüktansa yakın olmaktadır. A sargısında depo edilen enerji Eş. 4.6'da verilmiştir.

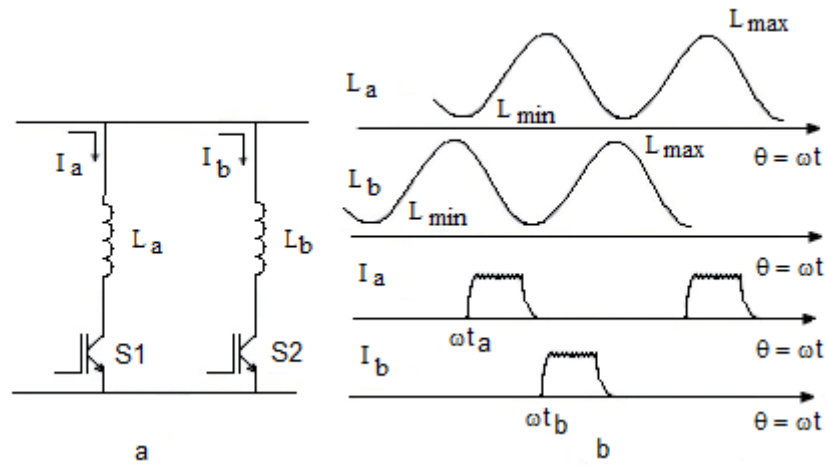
$$W_a = \frac{1}{2} L_a I^2 \quad (4.6)$$

Negatif moment darbeleri üretmekten kaçınmak için akım düşme zamanını azaltmak gerekmektedir. Bunun içinde depo edilen bu enerjinin hızlı bir şekilde tahliye edilmesi veya yok edilmesi gerekir. Bu problem için değişik çözüm şekilleri vardır.

Bunlar;

1. Pasif toparlamada depolanmış enerji bir direnç veya bir zener diyot vasıtasıyla yok edilmektedir.
2. Aktif toparlamada, depolanmış enerji güç kaynağına döndürülmekte veya yüksek gerilim kaynağı devresinde saklanmaktadır.
3. Gerilim beslemeli konvertörde, depolanmış enerji geçici olarak bir filtre kondansatöründe saklanmakta ve takip eden faz sargısına gönderilmektedir.

Akım beslemeli konvertörde ise depolanmış enerji komütasyon kondansatöründe saklanmaktadır (Fenercioğlu, 2006).



Şekil 4.6. ARM'de komütasyon işlemi, (a) Basitleştirilmiş devre, (b) Dalga şekilleri

Akım veya gerilim kaynaklı beslemenin her ikisinde de komütasyon zamanları arasındaki birbirine geçiş ve güç anahtarları üzerine düşen yüksek gerilim dikkate alınmak zorundadır (Fenercioğlu, 2006).

#### 4.17. Güç Anahtarı Seçimi.

Konvertörlerde kullanılacak güç anahtarlarının seçimi sistemin performans ve maliyetini doğrudan etkilediğinden büyük önem taşımaktadır. Konvertörlerde kullanılacak yarıiletkenler tristörler, kapıdan tıkamalı tristörler (GTO – Gate Turn-off Thyristors), bipolar transistörler (BJT), MOSFET ve yalıtılmış kapılı bipolar transistörlerdir. (IGBT-Isolated Gate Bipolar Transistors) Anahtar seçiminde anahtarın maliyeti, sürülmesinin kolaylığı, snubber ihtiyacı, anahtarlama hızı, iletim kayıpları, motorun çalışma akım ve gerilimini içeren güç ihtiyacı dikkate alınmalıdır.

Düşük güçlü ARM'lerde (2-3 KW'a kadar) MOSFET'ler kullanılabilir. 3 KW'dan daha güçlü motorlar için yüksek iletim kayıplarından dolayı MOSFET'ler ekonomik olmamaktadır. Bu sebeple orta güçlerde IGBT'ler tercih edilmektedir. Yüksek güçlü ARM'ler için yüksek gerilim ve akım kabiliyetlerinden dolayı GTO'lar daha uygun olmaktadır.

İletim karakteristiğindeki üstünlüğü ayrı tutulursa IGBT'lerin anahtarlama karakteristikleri, güç MOSFET'leri ile hemen hemen aynıdır. IGBT'ler MOSFET'lere göre yüksek gerilim ve sert anahtarlama daha avantajlıdır. Bu avantajlar düşük iletim kayıpları, aynı çıkış gücü için küçük boyut dolayısıyla düşük giriş kapasitansı ve maliyet olarak belirtilebilir(Dursun, 2002).

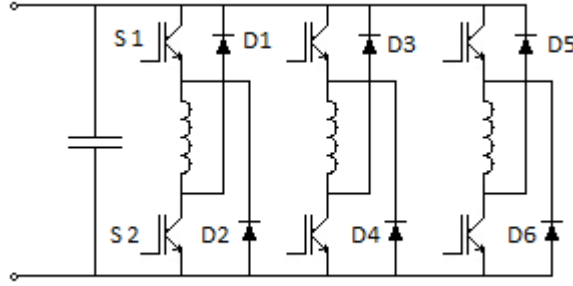
#### **4.18. ARM Denetim Teknikleri**

İyi bir denetleyiciden beklenen temel özellik, dört bölgede çalışabilen, düşük moment dalgalanmalarına, hızlı tepkiye, iyi bir kararlılığa sahip olması ve sıfır hızda motorun çalışmasını sağlamasıdır. ARM'lerden farklı olarak diğer DA ve AA motor denetim devreleri bu özellikleri karşılamaktadırlar. ARM'de akım, hız ve ateşleme açıları doğrusal yapıda olmadığından ve moment yük ile hızın fonksiyonları olarak değiştiğinden aynı şey geçerli değildir. Bu nedenle, diğer AA ve DA motorlara uygulanan denetim metotlarından elde edilen verimin ARM'lere uygulanan denetim metotlarında da elde edilebilmesi için çok sayıda çalışma yapılmış ve yapılmaya devam edilmektedir(Fenercioğlu, 2006).

Anahtarlı relüktans motorlar yapısı gereği ihtiyaç duydukları, hassas rotor pozisyon bilgisi rotora bağlanan bir pozisyon algılayıcısından elde edilir. Bu durum motora ek maliyet getirmekte, motorun zor çalışma ortamlarında çalışmasını sınırlandırmakta ve güvenliğini azaltmaktadır. Bu dezavantajın ortadan kaldırılabilmesi için yapılmış olan pek çok çalışma literatürde mevcuttur. Bu çalışmalarda esas prensip motorun yapısı itibarıyla kendi başına bir pozisyon algılayıcısı oluşturabileceği varsayımdır. Bu nedenle ARM denetim metotlarını pozisyon algılayıcı ve pozisyon algılayıcısız olmak üzere iki ana gruba ayırmak mümkündür(Fenercioğlu, 2006).

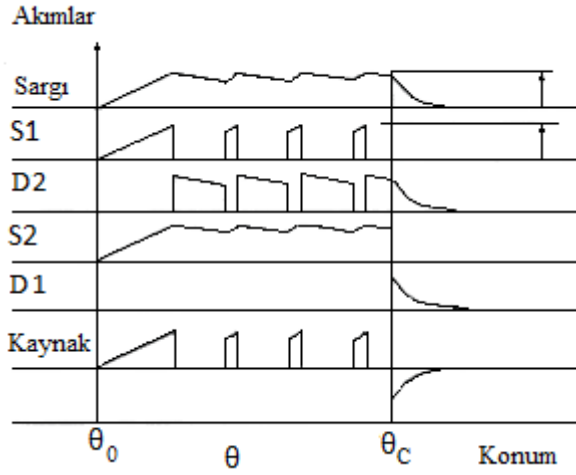
#### 4.19. Denetleyici Devresi

En yüksek verim, güvenilirlik ve kontrol esnekliği Şekil 4.7'deki gibi her faz için bağımsız yarım koprüye sahip bir devre ile elde edilir. Şekildeki devre 3 fazlı olmasına rağmen istenilen faz sayısı kullanılabilir. Bu devre en az pasif bileŐenler ile maksimum kontrol esnekliği ve verim sağlar(Fenercioğlu, 2006).

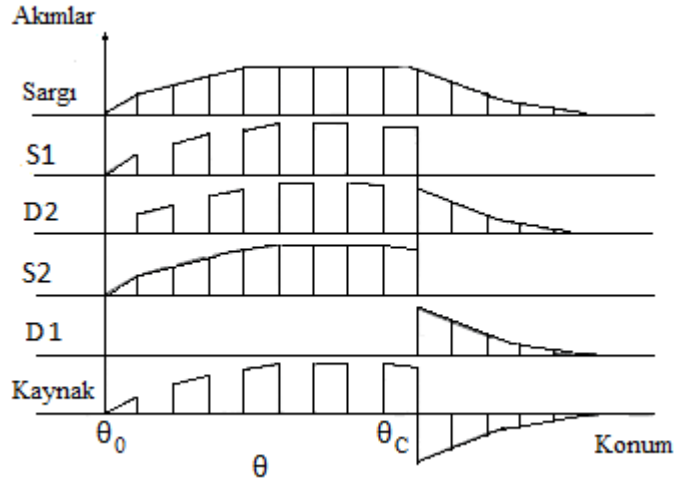


Şekil 4.7. Faz bağına iki transistörlü denetleyici devresi

Bu devrede st ve alt transistörlerin bağımsız olarak kontrol edilmesiyle yumuşak kıyıcı işlemi, maksimum regeneratif frenleme yeteneği ve ileri ve ters yönde eşit performans ile olası bütün tetikleme açıları kullanılabilir. Bu devrenin muhtelif kollarındaki dalga biçimleri yumuşak kıyıcı işlemi ve gerilim PWM ile sırasıyla Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da görülmektedir(Fenercioğlu, 2006).



**Şekil 4.8.** Denetleyici devrenin yumuşak kıyıcı işlemi süresince sargı, transistör ve diyot akımlarının dalga biçimleri

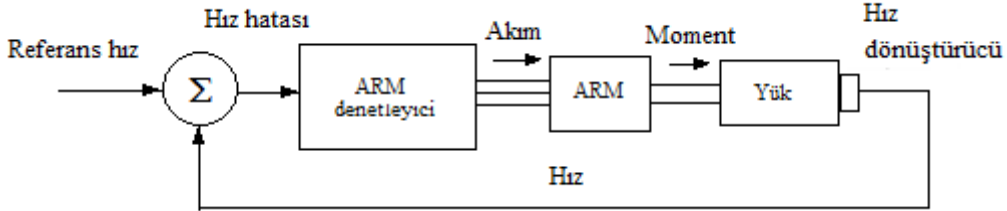


**Şekil 4.9.** Denetleyici devrenin PWM gerilim işlemi süresince sargı, transistör ve diyot akımlarının dalga biçimleri

#### 4.20. Kontrol Sisteminin Elemanları

Şekil 4.10'da kapalı döngü kontrol sistemi ile yüke bağlanmış anahtarlı relüktans motorunun blok diyagramı görülmektedir. Kontrolörün yapısı AA ve DA sürücülerininkine benzemektedir. Anahtarlı relüktans motor girişi akım ve çıkışı moment olan bir kutu olarak düşünülebilir. Akım bütün faz akımlarını içermekte ve dalga biçimi saf DA veya AA

olmadığından ve hem hız ve hem de yükü değiştirdiğinden genliği ile beraber dalga biçiminin de kontrolünün yapılması gerektiği anlaşılmaktadır. Bazı uygulamalarda moment dalgacığının en aza indirilmesi için önceden belirlenmiş tam bir davranışla akımın dalga biçiminin kontrolü gerekebilir(Fenercioğlu, 2006).



Şekil 4.10. ARM kontrol sisteminin yapısı

Kontrolör girişi hız hatası ve çıkışı motor akımı olarak bir kutu olarak görülebilir. Hız hatası istenilen (referans) hız ile gerçek hız arasındaki farktır, gerçek hız yüke veya motora akuple edilmiş bir hız dönüştürücüsünden çıkartılabilir. Benzer diyagramlar bir moment denetleyicisi veya generatör denetleyicisinin oluşturulması için bir araya getirilebilir(Fenercioğlu,2006).

Hız dönüştürücüsü olarak optik, alan (hall) etkili veya diğer algılayıcı tipleri kullanılabilir. Bunların fonksiyonu fırçasız sabit mıknatıslı DA motor sürücüsündeki kare dalga tipi ile aynı fakat anahtarlama hassasiyetinin anahtarlı relüktans sürücüde özellikle akım dalga biçiminin tetikleme açılarına bağlı olduğu yüksek hızlarda daha kritik olduğu rahatlıkla söylenebilir. Tetikleme açılarında  $0,5^\circ$  ve hatta  $0,25^\circ$  'lik hassasiyet istenilir(Fenercioğlu, 2006).

#### 4.21. Kullanılan Anahtarlı Relüktans Motorun Ölçüleri

Statorunda 18 kutup ve rotorunda ise 12 kutup bulunan ARM kullanılmıştır. ARM'de karşılıklı iki stator kutbu üzerindeki sargıların seri bağlanarak fazların oluşturulmasından farklı olarak burada, karşılıklı altı stator kutbu üzerinde bulunan sargılar birbirine seri bağlanmak suretiyle motorun bir fazı oluşturulmuştur. Bu şekilde fazların oluşturulmasında, toplam faz sayısını üçe indirerek motorun sürülmesinde kullanılacak yarı iletken anahtar sayısını azaltarak maliyetin düşürülmesi amaçlanmış ve üretilen toplam momentin daha büyük olması sağlanmıştır(Omaç, 2006).

#### 4.22. Anahtarlı Relüktans Motorda Oluşan Kayıplar

Anahtarlı relüktans motorda meydana gelen kayıplar bakır, demir, sürtünme ve rüzgar kayıplarının toplamıdır. Demir kayıpları histerezis ve girdap akımı (fuko) kayıplarından oluşur.

Böylece toplam kayıp için

$$P_k = P_{cu} + P_h + P_g + P_{stm} \quad (4.7)$$

formülü yazılabilir. Burada,

$P_k$ : Toplam kayıp güç (W)

$P_{cu}$ : Bakır kayıpları (W)

$P_h$ : Histerezis demir kayıpları (W)

$P_g$ : Girdap akımı demir kayıpları (W)

$P_{stm}$ : Sürtünme ve rüzgâr kayıpları (W)

simgelemektedir.

Bakır kayıpları stator kutup sargılarının direnci üzerinde meydana gelen ısı kayıplarındır ve faz akımının genliğinin karesi ile değişir. Bakır kayıpları

$$P_{cu} = q \cdot R \cdot i^2 \quad (4.8)$$

bağıntısı ile hesaplanır. Burada  $q$  faz sayısı,  $R$  bir faz sargısı direnci ve  $i$  ise bir faz akımını ifade etmektedir.

Gerilim kontrollü bir ARM'de faz akımı  $\theta_{on}$  akım verme açısı ve  $(\theta_{off} - \theta_{on})$  iletim açısının bir fonksiyonu olarak değişir. Eğer  $\theta_{on}$ ,  $\theta_{off}$  akımı kesme açısına çekilirse moment üretimi olmayacaktır.

ARM'de demir çekirdekte meydana gelen  $P_h$  histerezis ve  $P_g$  girdap akımı kayıpları akı yoğunluğu ve uyarma frekansına bağlıdır. Demir kayıpları Steinmetz denklemi kullanarak hesaplanır:

$$P_h = C_h \cdot f \cdot B_m^{a+bB_m} \quad (4.9)$$



$$P_g = C_e \cdot f \cdot B_m^2 \quad (4.10)$$

$$P_{Fe} = P_h + P_g \quad (4.11)$$

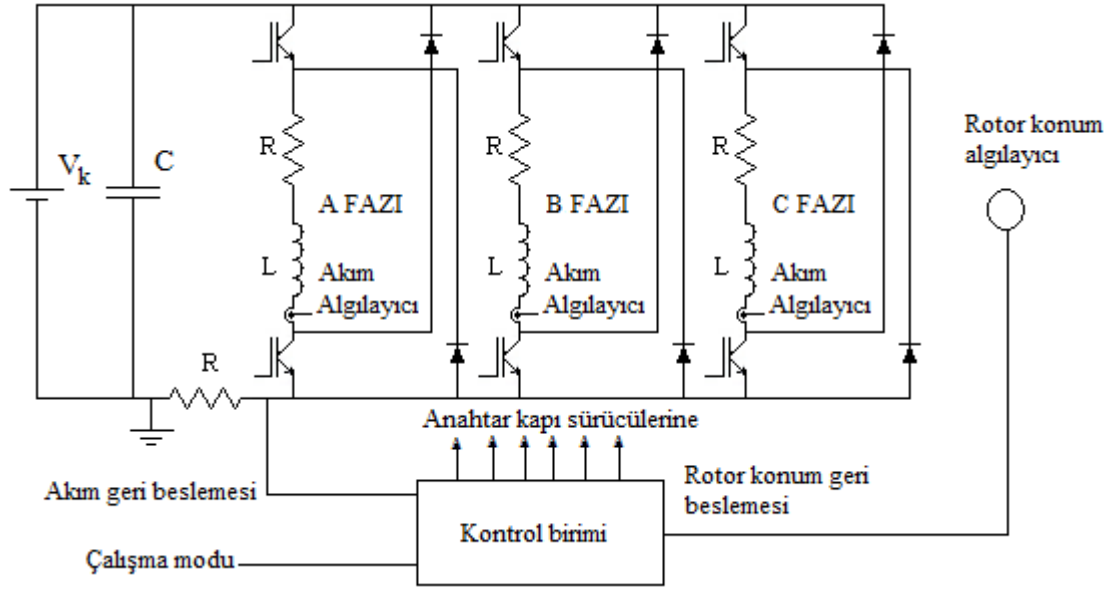
Burada  $C_h$  ve  $C_e$  katsayılar,  $f$  uyarma akımı frekansı,  $P_{Fe}$  toplam demir kaybı,  $a$  ve  $b$  sabitlerdir.  $B_m$  akı yoğunluğunun maksimum değeridir.

ARM' de demir kayıpları çekirdekte eşit dağılmış değildir. ARM stator ve rotor kutuplarında ve ayrıca stator karkası ile rotor karkasında meydana gelen demir kayıpları farklıdır. ARM' de yüksek frekanslarda demir kayıpları ve düşük frekanslarda bakır kayıpları fazla olacaktır(Omaç, 2006).

#### **4.23. Anahtarlı Relüktans Motorun Sürülmesi**

Anahtarlı relüktans motorun faz sargılarından sırayla akım akıtılması için rotor konumunun bilinmesi gerekir. Rotor konum algılayıcı ile ARM'nin rotor konumu tespit edilir.

Şekil 4.11'de bir faz devresinde iki anahtar olan üç fazlı bir ARM sürücü devresi verilmiştir. Kontrol birimi rotor konumu, motor akımı ve motorun çalışma moduna (ileri çalışma veya geri çalışma durumuna) göre anahtarların her biri için anahtar kapı işaretlerini üretir. Akım geri beslemesi R direnci üzerinden sağlanır(Omaç, 2006).



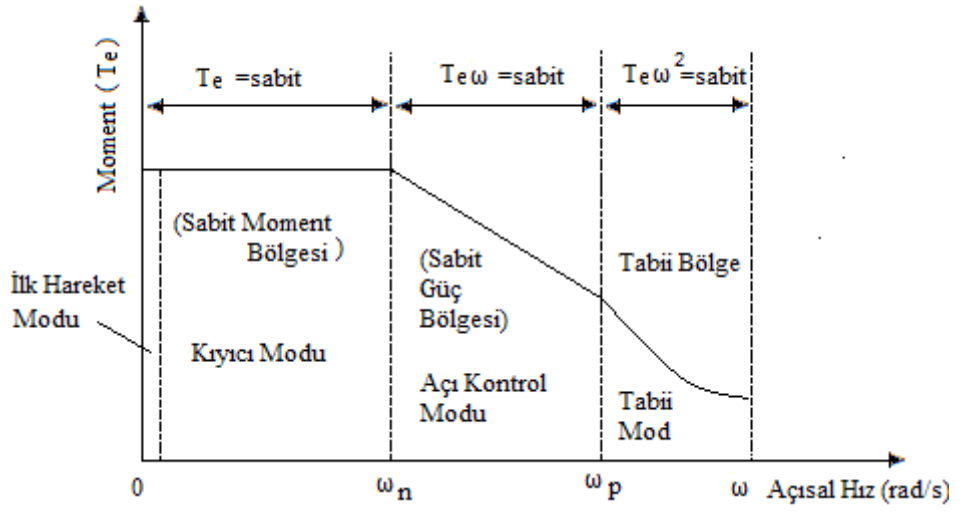
Şekil 4.11. Anahtarlı relüktans motor sürücü devresi

#### 4.24. Anahtarlı Relüktans Motorun Moment-Hız Karakteristiği

ARM'nin moment-hız grafiği şekil 4.12'de gösterildiği gibi üç bölgeye ayrılır: Sabit moment bölgesi,  $\omega_n$  nominal hızın altındaki bölgedir. Nominal hız ( $\omega_n$ ) nominal gerilimde sabit ateşleme açısıyla motora uygulanabilen en büyük akımda ulaşılan en yüksek hız olarak tanımlanır. Düşük hız çalışma bölgesinde zıt emk küçük olduğu için iletimden sonra akım ani olarak yükselir. Bu bölgede, histerisiz denetleyici veya PWM gerilim denetleyici gibi ayarlayıcılarla akım istenilen sabit seviyede tutulabilir.

Yüksek hızlarda zıt emk önemlidir. Böylece faz için ileri iletim açısı gerekli olmaktadır, böylece daha düşük bir emk ile istenilen seviye akıma yine yükselebilir. Zıt emk DA gerilimi aştığı zaman, akım düşmeye zorlanır, kutup üst üste binmeye başlar ve darbe genişlik modülasyonu (PWM) veya kıyıcı kontrol artık mümkün olmaz. Motor ondan sonra tek darbe modda çalışır, moment üretimi  $\theta_{dwell}$  iletim açısı (dwell açısı) ve  $\theta_{adv}$  ileri açısının ayarlanmasıyla yeterli yüksek seviyede sürdürülür.

Bu bölge sabit güç ( $T_{eo}$ ) bölgesidir,  $\omega_p$  hızına kadar  $\theta_{dwell}$  ve  $\theta_{adv}$  sınırlarına ulaşıncaya kadar devam eder. Bu hızın ötesinde moment sadece tabii karakteristiği ile kontrol edilir ve çok dik bir eğim ( $1/\omega^2$ ) ile düşer (Omaç, 2006).



Şekil 4.12.ARM moment-hız karakteristiği

## 5. ANAHTARLI RELÜKTANS MOTORUN KONTROLÜ

### 5.1 GİRİŞ

ARM'nin yapısındaki basitlik, sağlamlık ve düşük maliyet avantajı ARM'yi değişik genel amaçlı hızı ayarlanabilir uygulamalar için uygun bir seçenek yapmaktadır. ARM, yüksek derecede güvenilirlik gerektiren uygulamalarda basit güç elektroniği sürücü devresi ihtiyacı ve arızasız konverter üstünlüklerini sunar. Bir ARM'nin milindeki mekanik çıkış gücü eşdeğer indüksiyon motordan daha yüksektir ve rotorda sargılar olmaması nedeniyle moment–atalet oranı daha yüksektir.

Klasik makinalarla karşılaştırıldığında bir ARM'nin birinci dezavantajı akustik gürültü ve titreşime neden olan momentteki yüksek dalgalanmadır. ARM'de momentteki dalgalanmanın kaynağı moment üretim mekanizmasının ayrık tabiatı ve yüksek nonlineerliktir. ARM 'de toplam moment fazların bağımsız ürettiği momentlerin toplamına eşittir. ARM'de akımın bir fazdan diğer faza geçtiği komütasyon anında momentte dalgalanma daha fazla olmaktadır.

Yüksek performanslı servo uygulamalarda momentin düzgün olması ve momentte dalgalanmanın küçük olması çok önemlidir. Momentteki dalgalanmayı azaltan tekniklerin geliştirilmesiyle ARM'nin mükemmel pozitif özellikleri servo sistemlerde kullanılabilir. Bu tip sürücüler otomotiv endüstrisinde, direkt sürücü makine aletlerinde yaygın uygulamalara sahiptir

Motor sürücülerinden istenen özellik yüksek verim ve düşük maliyettir. ARM'nin fiziki yapısının basit olması beraberinde düşük üretim maliyeti getirmektedir. Ancak motorun elektronik kısmını oluşturan güç anahtarları, konum algılayıcı, akım algılayıcıları, analog-dijital (A/D) veya dijital–analog(A/D) dönüştürücüler, opto-izolatörler ve mikroişlemciler ARM sürücünün maliyetini arttırmaktadır.

Fazların iletim ve kesim açıları ile motora uygulanan gerilimin kontrolü ARM denetiminin anahtar parametreleridir. Düzgün moment yanında tepe değeri düşük bir akım dalga şekli ARM'nin istenilen sonuçlarından biridir. Motorun doğru bir dinamik modelinin oluşturulması, ani moment ve akım değişimlerinin belirlenmesinde kolaylık sağlayacaktır.

Parametre değişimlerine karşı duyarsız olmak, bozuculardan etkilenmemek ve dayanıklılık bir denetleyiciden beklenen özelliklerdir. Momentteki dalgalanmayı önlemek

veya küçültmek, sıfır hız dâhil geniş bir hız aralığında dört bölgede çalışma sağlamak ve gürültüyü en aza indirmek bir ARM kontrolünde gerçekleşmesi hedeflenen noktalardır.

Anahtarlı relüktans motor gerek bir fazının eşdeğer devresi ve gerekse akımın karesine bağlı olarak büyük momentler üretme yönü ile doğru akım seri uyarmalı motora benzer. Bu benzerlikten hareketle doğru akım seri uyarmalı motorun kontrolüne benzer bir kontrolü ARM'ye uygulamak mümkün değildir. Çünkü ARM'de indüktans hem rotor konumuna hem de faz akımına bağlı değişmektedir. Bundan dolayı Bir ARM sürücü sistemi için bir kontrol yöntemi geliştirmek kolay olmamaktadır. Tam aksine, diğer tüm elektrik makinelerinde kontrol yöntemleri değişik uyarmalarda sabit makine parametrelerine bağlı oluşturulur.

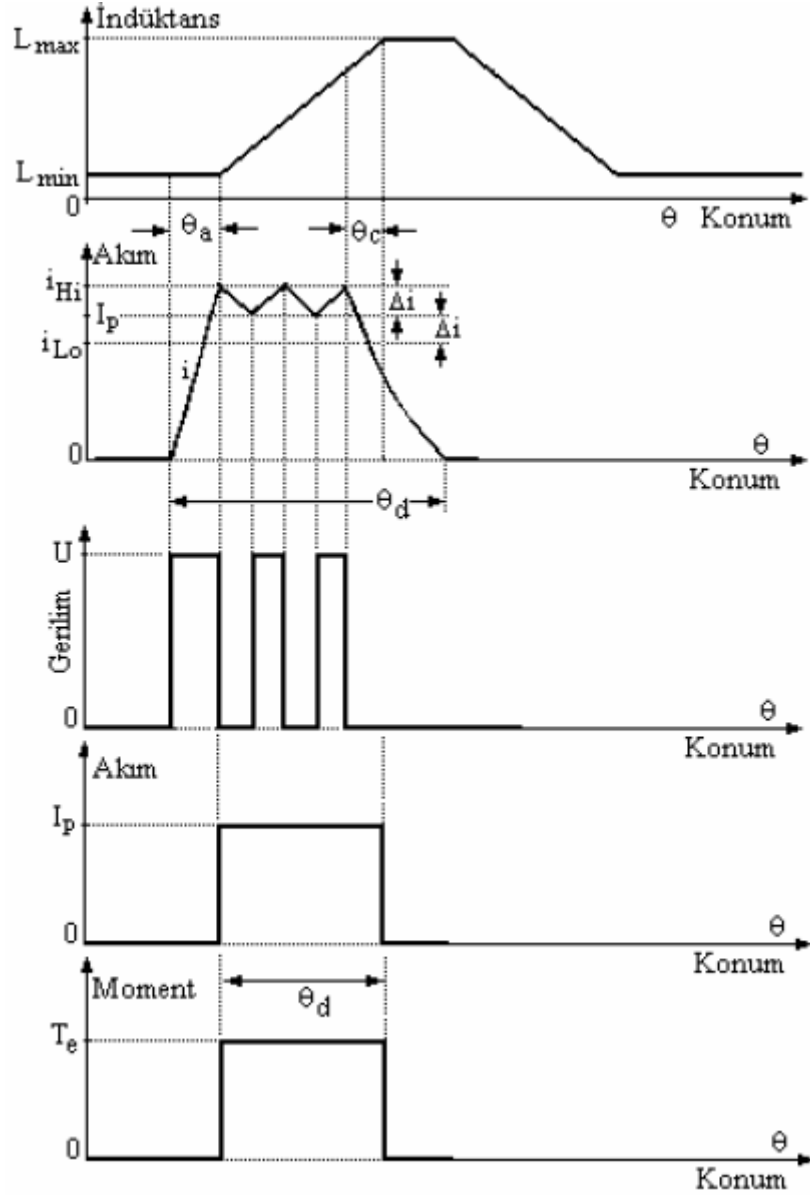
## 5. 2. Kontrol Prensipleri

Motor çalışmada ARM'nin bir fazın indüktansı ile üretilen momentin değişimi şekil 5.1'de gösterilmiştir. Makinanın tüm fazlarının ürettiği elektromagnetik moment darbelerinin ani değerlerinin toplamı ortalama moment verecektir. Makine ayırık moment darbeleri üretir, ancak faz indüktans grafiklerinin kısmen üst üste bindirilmesi ile sürekli bir moment üretmek mümkündür.

Şekil 5.1'de görüleceği üzere ortalama moment sargı akımının  $I_p$  genliği ayarlanarak veya iletim açısı  $\theta_d$  değiştirilerek kontrol edilebilir. Momentteki dalgalanmayı azaltmak için iletim açısının sabit tutulması ve sargı akımı genliğinin değiştirilmesi tavsiye edilir (Krishnan ve R., 2001).

Ani moment üretiminin oluşumu için indüktansın arttığı kısımda akım akıtılmalıdır. Bobin içeren devrede bobin, akımın ani olarak yükselmesine ve ani olarak düşmesine müsaade etmez. Bu sebeple akımın pozitif eğimli indüktans başlangıcında tepe değere ulaşması için ileri gerilim uygulamak ve negatif eğimli indüktans bölgesinden önce akımı sıfıra çekmek için ileri komütasyon gerekir.  $\theta_a$  ileri açısında faz sargısına gerilim uygulanır ve akım kesimi  $\theta_c$  ileri açısında başlatılır.  $\theta_a$  ve  $\theta_c$  açıları  $i_p$  faz akımının tepe genliğine ve rotor hızına bağlıdır.

Transistörlerin açılıp kapatılmasıyla akım  $i_p$  genliğinde tutulur. Akımın  $\pm \Delta i$  kadar değişmesine izin verilir. Bu bant aralığı anahtarlama frekansının küçültülmesine ve iletim, kesim kayıplarının azalmasına olanak sağlar.

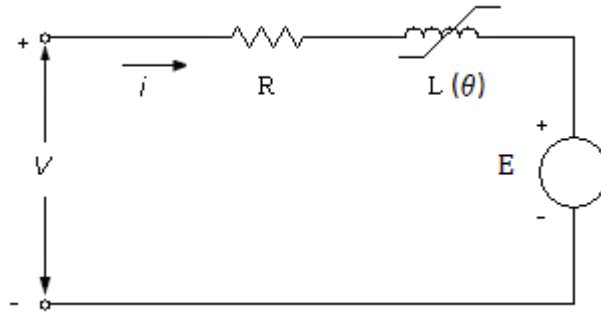


Şekil 5.1. Akım kontrollü ARM sürücü

Boştaki hızın altında zıt emk hat geriliminden daha düşük olduğundan ARM'de akım, Şekil 5.1'de gösterildiği gibi, darbe genişlik modülasyon yöntemi (Pulse Width Modulation =PWM) ile kontrol edilir. Bunun sonucu moment kontrol edilmiş olur. Boştaki hızın üstünde, yüksek emk nedeniyle PWM akım kontrolü mümkün değildir. Sabit güç çalışma bölgesinde iletim ve kesim açıları ile ARM'nin hız kontrolü yapılır (Rahman

vd.,2001) Boştaki hızın üstünde kontrol parametreleri yalnız faz iletim ve kesim açılarıdır (Moghbelli vd.,1991).

### 5.3. ARM'nin Doğrusal Çalışma Modeli



Şekil 5.2. ARM sürücünün bir fazının eşdeğer devresi

Doğrusal çalışmada endüktansın akımla değişmediği ve magnetik doyumun olmadığı varsayılır. Fazlar arasındaki ortak endüktans çok küçük olduğu için ihmal edilir. Anahtarlı relüktans motorun bir fazına ilişkin şekil 5.2'deki eşdeğer devreden hat gerilimi için

$$V = Ri + \frac{d\psi(\theta, i)}{dt} \quad (5.1)$$

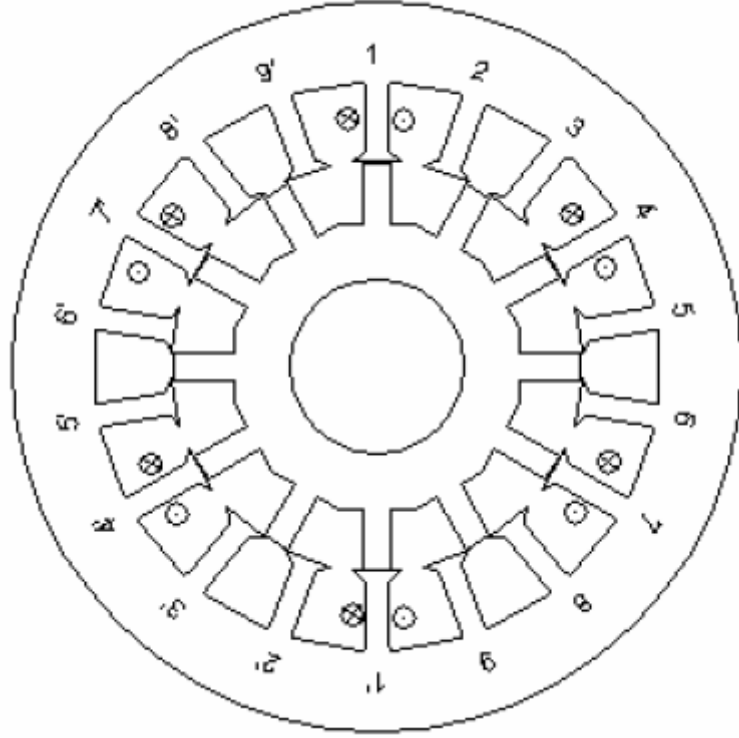
yazılabilir. Burada V şebeke gerilimi, i faz akımı, R faz direnci ve  $\Psi$  faz akısıdır. ARM'nin bir faz akısı  $\theta$  rotor konumu ve faz akımının bir fonksiyonudur. Akım ve konuma göre türev almak için birini sabit tutup diğerinin kısmi türevini alıp çarpmak ve toplamak gerekir.

$$V = Ri + \frac{\partial \psi}{\partial i} \frac{di}{dt} + \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (5.2)$$

Açısal hız  $\omega$  ile konum  $\theta$  arasındaki ilişki,

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (5.3)$$

şeklindedir.



Şekil 5.3. 18/12 kutuplu ARM'nin ön görünüşü. 1-1', 4-4' ve 6-6' kutupları üzerindeki sargıların seri bağlanması ile A fazı oluşmuştur.

Endüktans bağıntısı için

$$L = \frac{\partial \psi}{\partial i} \quad (5.4)$$

yazılabilir. Akı ile endüktans arasında doğrusal ilişki kullanılırsa

$$\psi = i \cdot L \quad (5.5)$$

yazılabilir. (4.3), (4.4) ve (4.5) ifadeleri (4.2)'de yerine yazılırsa

$$V = Ri + L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{d\theta} \omega \quad (5.6)$$

elde edilir. (4.6) eşitliğinde eşitliğin sol tarafındaki üçüncü terim sargıda endüklenen zıt elektro motor kuvveti (emk) verir.

$$E = i \frac{dL}{d\theta} \omega \quad (5.7)$$

E bir faz sargısında endüklenen zıt emk'yi verir.



Basitleştirmek amacıyla nominal akımda endüktansın sadece konuma bağlı olarak çakışık olmayan konum endüktansı ( $L_{\min}$ ) ile çakışık konum endüktansı ( $L_{\max}$ ) arasında değiştiği kabul edilmiştir. Endüktansın rotor konumuna göre türevi sabit alınmıştır. Bu türev motorun çalışma aralığında çok az değişir.

Şekil 5.3'de gösterilen 18/12 kutuplu, üç fazlı ARM'nin her bir fazı için gerilim bağıntıları yazılırsa sırasıyla (5.8), (5.9) ve (5.10) ifadeleri elde edilir.

$$V_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + i_a \frac{dL_a}{d\theta} \omega \quad (5.8)$$

$$V_b = R_b i_b + L_b \frac{di_b}{dt} + i_b \frac{dL_b}{d\theta} \omega \quad (5.9)$$

$$V_c = R_c i_c + L_c \frac{di_c}{dt} + i_c \frac{dL_c}{d\theta} \omega \quad (5.10)$$

olur. Buradaki indisler fazları göstermektedir.

Doğrusal çalışma şartlarında bir fazın ürettiği moment,

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \quad (5.11)$$

bağıntısından hesaplanabilir. Fazlar için ayrı ayrı moment ifadeleri yazıldığında,

$$T_a(\theta, i_a) = \frac{1}{2} i_a^2 \frac{dL_a(\theta)}{d\theta} \quad (5.12)$$

$$T_b(\theta, i_b) = \frac{1}{2} i_b^2 \frac{dL_b(\theta)}{d\theta} \quad (5.13)$$

$$T_c(\theta, i_c) = \frac{1}{2} i_c^2 \frac{dL_c(\theta)}{d\theta} \quad (5.14)$$

bağıntıları elde edilir. Toplam üretilen moment ise fazların bağımsız ürettiği momentlerin toplamına eşittir:

$$T_e(\theta, i_a, i_b, i_c) = T_a(\theta, i_a) + T_b(\theta, i_b) + T_c(\theta, i_c) \quad (5.15)$$

ARM'nin mekanik hareket denklemi,

$$T_e = J \frac{d\theta^2}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} + T_L \quad (5.16)$$

şeklinindedir. Burada,  $T_e$  motor tarafından üretilen moment,  $T_L$  yük moment,  $B$  sürtünme katsayısı ve  $J$  eylemsizlik momentidir. (5.3) ifadesi (5.16) denkleminde yerine yazılırsa,

$$T_e = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_L \quad (5.17)$$

elde edilir. ARM sisteminin durum değişkenlerini  $i$  faz akımı ve  $\omega$  rotor hızı oluşturur. Gerilim ve moment denklemleri düzenlendiğinde durum değişkenleri denklemleri elde edilir.

ARM'nin durum denklemleri,

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{1}{L_a} \left[ V_a - (R_a i_a + i_a \frac{dL_a}{d\theta} \omega) \right] \quad (5.18)$$

$$\frac{di_b}{dt} = \frac{1}{L_b} \left[ V_b - (R_b i_b + i_b \frac{dL_b}{d\theta} \omega) \right] \quad (5.19)$$

$$\frac{di_c}{dt} = \frac{1}{L_c} \left[ V_c - (R_c i_c + i_c \frac{dL_c}{d\theta} \omega) \right] \quad (5.20)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} [T_e - (B\omega + T_L)] \quad (5.21)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (5.22)$$

olur.

#### 5.4. ARM'nin Doğrusal Çalışma Modeline Ortak Endüktansların Dahil Edilmesi

ARM'nin doğrusal çalışma modeline ortak endüktans dahil edilmesi halinde faz gerilimleri için (5.23)'de verilen matris eşitliği yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{aa} & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ab} & L_{bb} & M_{bc} \\ M_{ac} & M_{bc} & L_{cc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_{aa} & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ab} & L_{bb} & M_{bc} \\ M_{ac} & M_{bc} & L_{cc} \end{bmatrix} \quad (5.23)$$

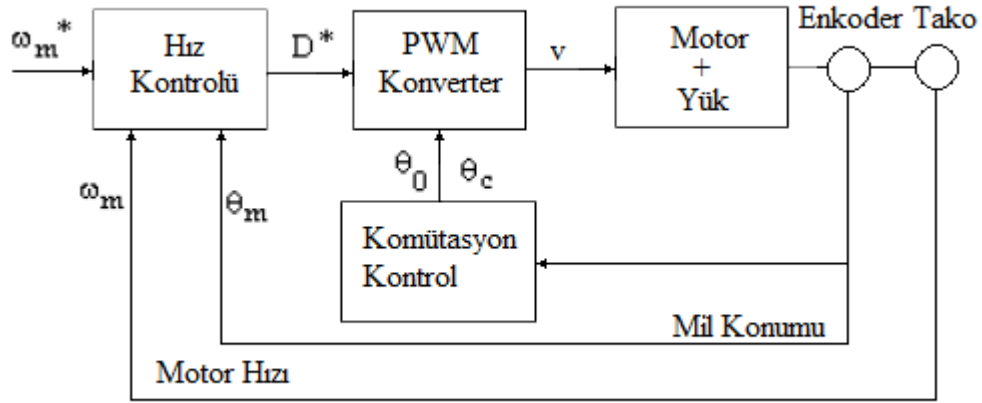
Ortak indüktansın dahil edildiği ARM'nin doğrusal moment bağıntısı için,

$$T = \frac{1}{2} [i_a \quad i_b \quad i_c] \frac{d}{d\theta} \begin{bmatrix} L_{aa} & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ab} & L_{bb} & M_{bc} \\ M_{ac} & M_{bc} & L_{cc} \end{bmatrix} \quad (5.24)$$

yazılabilir.

### 5.5. ARM Sürücünün Kapalı Çevrim Hız Kontrolü

Kapalı çevrim hız kontrolünde ARM sürücünün bir fazında yer alan anahtarlar hız kontrolör çıkışı ile bir  $f_{chop}$  frekansı ile  $t_{on} \cdot f_{chop} = t_{on}/T_{chop}$  ile açıklanan D görev periyodu içinde açılır ve kapatılır.  $T_{chop}=1/f_{chop}$  anahtarlama periyodudur. Kapalı çevrim hız kontrolünde kapalı çevrim ani akım kontrolü yapılmaz. Kaynak gerilimi  $D \times U_{dc}$  kadar kıyılır. Şekil 5.4'de ARM'nin kapalı çevrim hız kontrol şeması verilmiştir.



Şekil 5.4. ARM sürücünün kapalı çevrim hız kontrol şeması

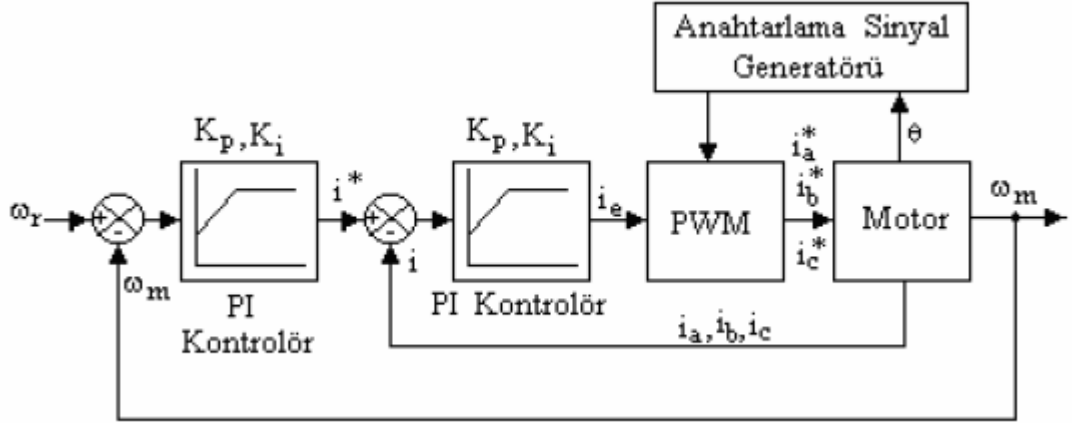
### 5.6. ARM Sürücünün Kapalı Çevrim Akım Kontrolü

Gerilim denkleminde rotor hızı ile akımın çarpımı terimi olması sebebiyle ARM nonlineerdir. Sistemdeki nonlineerite kontrolör tasarımını zorlaştırır. Eğer sistem lineerleştirilirse lineer kontrol sistemi teorisi kontrolör tasarımına uygulanabilir. Değişken hızlı bir ARM sürücünde çalışma noktası sürekli değiştiği için belli bir çalışma noktası için tasarlanmış nonlineer bir kontrolör akım çevriminde doğrusal çalışma koşulları ile beraber ortak indüktansın etkilerini de karşılar ve bunun sonucu davranışı da iyi olur. Akım kontrolörü tasarımında üç farklı yaklaşım vardır:

- 1- Lineerleştirilmiş akım kontrolörü tasarımı,

- 2- Lineerleştirilmiş geri beslemeli nonlinear akım kontrolörü tasarımı,
- 3- Ortak indüktansın etkilerini içeren nonlinear akım kontrolörü tasarımı.

Bütün bu yöntemler akım komutunu üretmek için darbe genişlik modülasyonu (PWM) kullanılır, fakat pratikte bazen histeresiz akım kontrolörle de karşılaşılır. Bu kontrolörü gerçekleştirmek daha kolaydır ve PI akım kontrolörlere gerek duymaz (Krishnan ve R., 2001).



Şekil 5.5. ARM sürücünün kapalı çevrim akım kontrol blok diyagramı

Hızın referans hızdan çıkarılmasıyla bir hız hatası üretilir. Hız hatası bir PI kontrolörden geçirilir. PI kontrolör çıkışı akım komutunu verir:

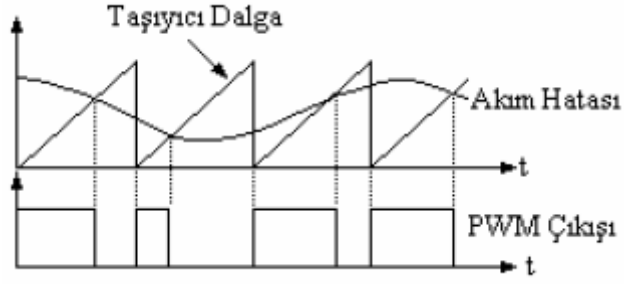
$$i^* = K_p(\omega_r - \omega_m) + K_i \int (\omega_r - \omega_m) dt \quad (5.25)$$

Burada  $\omega_r$  ve  $\omega_m$  sırasıyla şekillendirilmiş referans hız ve rotor hızıdır.  $K_p$  değeri 30 ile 50 arasında seçilebilirken  $1/K_i$  yaklaşık 0.05 alınabilir. Üç fazlı bir ARM için üç bağımsız akım çevrimi vardır.  $i_a^*$ ,  $i_b^*$ ,  $i_c^*$ , üç faz akımı komutu üretmek için üç akım çevrimi için PI kontrolör çıkış ( $i^*$  akım komutunu) verir.

PI Akım kontrolör ile,

$$i_e = K_p(i^* - i) + K_i \int (i^* - i) dt \quad (5.26)$$

$i_e$  çıkışı elde edilir. Burada,  $i^*$  kumanda akımı ve  $i$  gerçek sargı akımıdır.



Şekil 5.6. PWM işaretin elde edilişi

Gereken darbe genişlik modülasyon (PWM) kontrol işaretini üretmek için şekil 4.6'da gösterildiği gibi akım hatası genliği, anahtarlama frekanslı taşıyıcı üçgen dalga işaret ile karşılaştırılır. Eğer taşıyıcı genlik akım hatasından daha büyükse çıkış sıfır olur ve anahtar açılır. Eğer akım hatası taşıyıcı işaretten küçük ise çıkış bir yapılır ve anahtar kapatılır.

### 5.7. ARM Sürücünün Moment Kontrolü

Tüm elektrik makinalarında akımın kontrolü ile hava aralığındaki moment tam düzgünleştirilir. Örneğin doğru akım motorlarında hava aralığı momentini uyarma akımı ile doğru orantılıdır. Böylece, bu makinalarda moment kontrolü lineer bir moment kontrolör ile sağlanır.

ARM sürücü sisteminde ise hava aralığı momentini ile uyarma akımı arasında böyle lineer bir ilişki yoktur. Çünkü akı, uyarma akımı ve rotor konumu arasındaki üç boyutlu ilişki hava aralığı momentini ile uyarma akımı ve rotor konumu arasında nonlineer üç boyutlu bir ilişki oluşturmaktadır.

ARM'de komütasyon sırasında akım iki fazda akar. Akımın kesilmeye başladığı fazda akım kontrolsüz ve sadece akımın yeni akmaya başladığı fazda akım kontrol ediliyorsa iki fazın birlikte oluşturduğu hava aralığındaki toplam moment bu aralıkta sabit olmayacaktır.

Komütasyon aralığı denilen bu aralıkta momentte dalgalanma artar. Yüksek performanslı bir sürücü sisteminde momentteki salınım hızda daha büyük salınıma ve daha yüksek makine kayıplarına sebep olacağından istenmez.

Komütasyon aralığında bir fazın akımı azalırken diğer fazın akımı artmaktadır. Bu aralıkta akım sabit değildir. Bu nedenle ancak üretilen toplam moment sabit tutulabilir.

Anahtarlı relüktans motorda komütasyon aralığında faz akımları karelerinin toplamı kontrol edilerek momentteki dalgalanma önlenir. Üç fazlı bir ARM'nin ürettiği toplam moment a,b,c fazlarının ürettiği momentlerin toplamına eşit olur. ARM'nin doğrusal çalışma modelinde toplam moment için

$$T_e(\theta, i_a, i_b, i_c) = \frac{1}{2} i_a^2 \frac{dL_a(\theta)}{d\theta} + \frac{1}{2} i_b^2 \frac{dL_b(\theta)}{d\theta} + \frac{1}{2} i_c^2 \frac{dL_c(\theta)}{d\theta} \quad (5.27)$$

bağıntısı yazılabilir. (5.27) eşitliğindeki endüktansların türevi için

$$K_b = \frac{dL_a(\theta)}{d\theta} = \frac{dL_b(\theta)}{d\theta} = \frac{dL_c(\theta)}{d\theta} \quad (5.28)$$

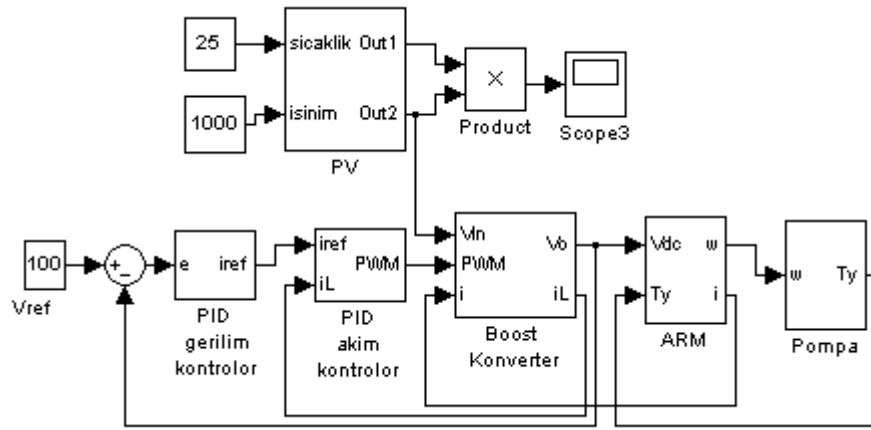
yazılır ve (5.27)'de yerine konulursa,

$$T_e(\theta, i_a, i_b, i_c) = \frac{1}{2} K_b (i_a^2 + i_b^2 + i_c^2) \quad (5.29)$$

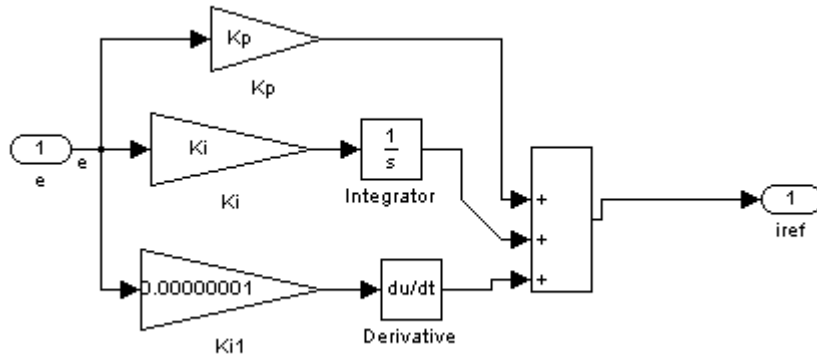
bağıntısı elde edilir. (5.29) bağıntısında  $(i_a^2 + i_b^2 + i_c^2)$  faz akımı karelerinin toplamı sabit tutulursa üretilen momentin de sabit tutulabileceği açıkça görülmektedir. Matlab/Simulink'te incelenen ARM'nin faz akımları karelerinin toplamı kontrol edilerek benzetim sonuçları elde edilmiştir. Faz akımı karelerinin toplamı kontrolü ile komütasyon aralığında da momentteki dalgalanma önlenmiştir.

## 5.8. Anahtarlı Relüktans Motorun Matlab/Simulink Programında Benzetimi

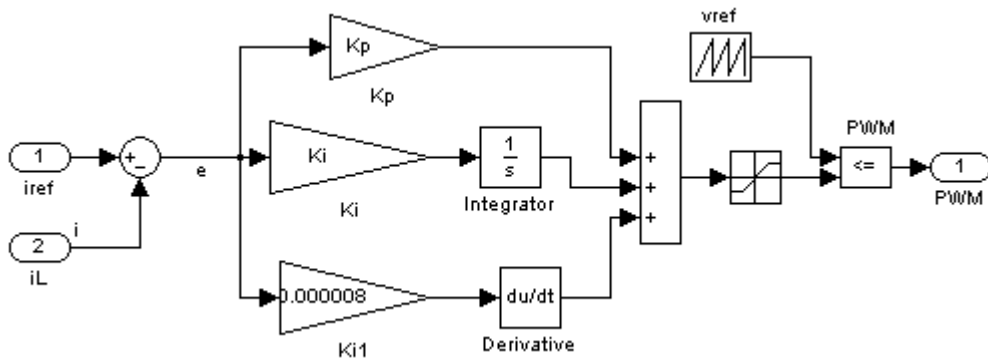
Matlab/Simulink programında anahtarlı relüktans motorun benzetiminde ARM'nin doğrusal çalışma modeli kullanılmıştır. Benzetim şemasını oluşturan tüm sistemin Matlab/Simulink modeli ve alt blokları aşağıda gösterilmiştir.



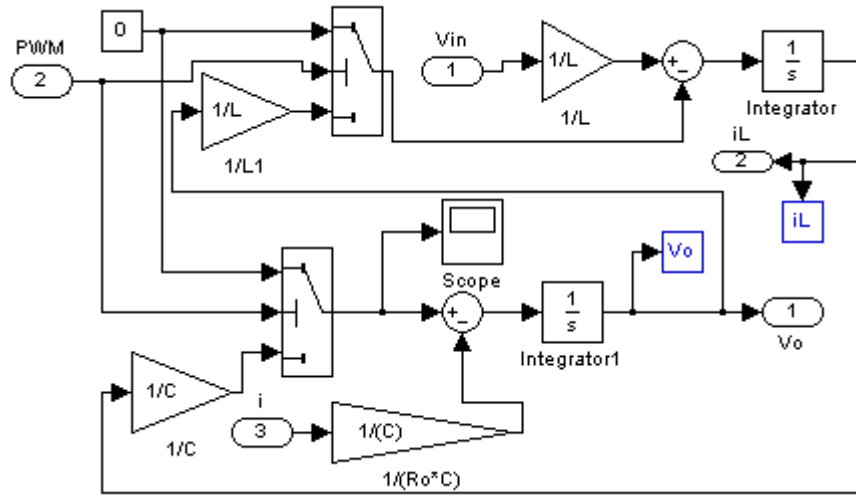
Şekil 5.7. Matlab/Simulink'te hazırlanan PV, ARM ve pompa sistemin benzetim şeması



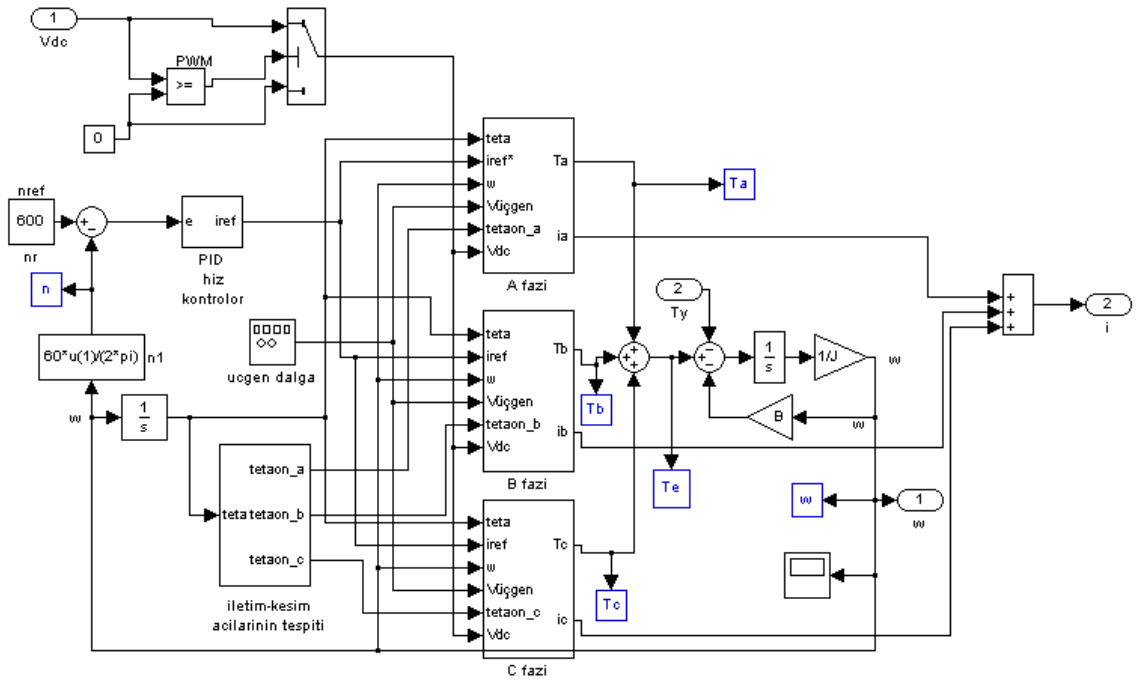
Şekil 5.8. Boost dönüştürücü PID gerilim kontrolör blok şeması



Şekil 5.9. Boost dönüştürücü PID akım kontrolör blok şeması

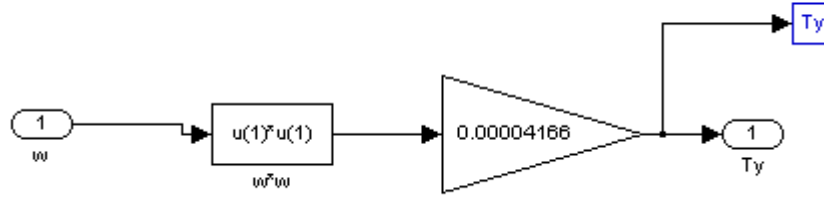


Şekil 5.10. Boost dönüştürücü blok şeması



Şekil 5.11. ARM blok şeması





Şekil 5.12. Yük blok şeması

İletim ve kesim açıları ile faz endüktanslarının değişimi hariç faz bloklarının içeriği aynıdır. Bu nedenle mevcut A, B, C fazlarından sadece A fazına ait kontrol bloğunun ayrıntısı verilmiştir. Kapalı çevrim hız kontrolünde bu blokta akım kontrolü yapılmaz. Ancak Anahtarlı Relüktans motorun akım kontrolü yapıldığında referans akım faz akımından çıkarıldıktan sonra elde edilen hata sinyali bir PI kontrolörden geçirilerek PWM kontrol işaretleri üretilir.

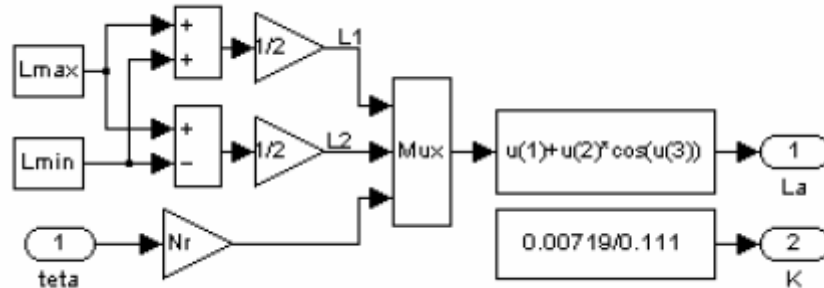
İncelenen  $N_s/N_r = 18/12$  kutuplu ARM'nin faz endüktansları için

$$L_a = L_1 + L_2 \cos(12\theta) \quad (4.30)$$

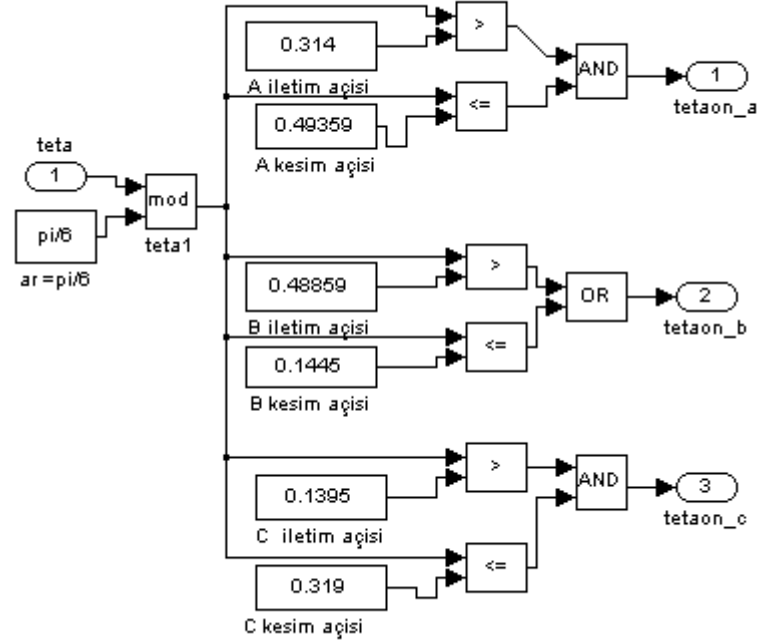
$$L_b = L_1 + L_2 \cos\left(12\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (4.31)$$

$$L_c = L_1 + L_2 \cos\left(12\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (4.32)$$

bağıntıları kullanılır.



Şekil 5.13. A fazı endüktansı blok şemasının içeriği



Şekil 5.14. Fazlara göre iletim ve kesim açılarının tespit edildiği bloğun ayrıntıları

## 5.9. Anahtarlı Relüktans Motorun Kontrolünde Kullanılan Donanım ve Yazılım

IGBT anahtarlar kullanarak gerçekleştirilen motor güç devresi, IGBT sürücü devresi ve sayısal sinyal işlemcili kart, hızın ve akımların ölçülmesi, deneysel çalışmanın donanım kısmını meydana getirir. Hız ve faz akımı bilgilerinin işlenmesi, uygun PWM darbelerinin üretilmesi ise deneysel çalışmanın yazılım kısmını oluşturur.

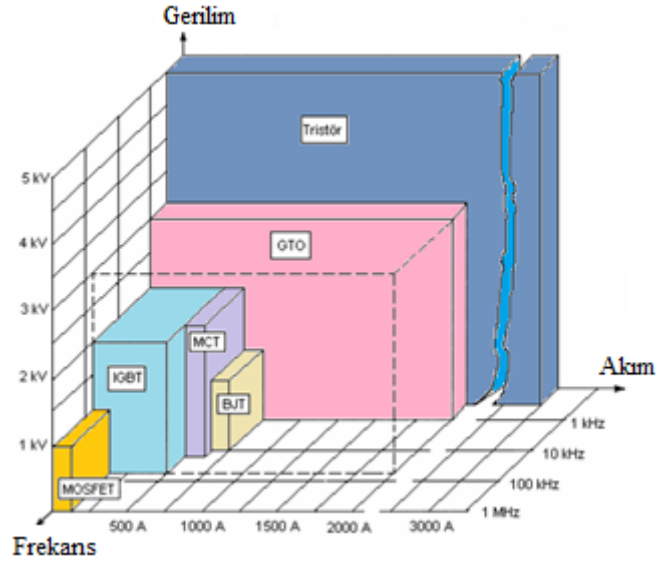
### 5.9.1 Güç Devresi

Elektrik motorlarının sürücü devresinde kullanılacak güç elektroniği elemanlarının seçimi yapılırken güç elektroniği elemanlarının maliyeti, sürülme kolaylığı, snubber ihtiyacı, anahtarlama hızı, iletim kayıpları, motorun çalışma akım ve gerilimini içeren güç ihtiyacı kriterleri göz önünde bulundurulur.

Güç elektroniği anahtarlama elemanları transistör, tristör, kapıdan söndürmeli tristör (GTO), MOSFET, IGBT ve MOS kontrollü tristördür.

Akım kontrollü bir eleman olan transistörün sürülmesi zor olup 15 kHz frekansa kadar anahtarlama yapabilmektedir. Taşıyabileceği en büyük akım 800A ve çalışabileceği en yüksek gerilim 1200 voltur.

Tristör (SCR) ve GTO akım kontrollü elemanlardır. Sürülmeleri zor olup tristörler 1kHz frekansa kadar, GTO'lar ise 6 kHz frekansa kadar anahtarlama yapabilmektedir. Tristörün çalışabileceği en yüksek gerilim 6000 volt ve en büyük akım 3500 amperdir. GTO'ların ise çalışabileceği en yüksek gerilim 4500 volt ve en büyük akım 3000 amperdir.



Şekil 5.15. Güç elektroniği elemanlarının anahtarlama yapabildiği akım, gerilim ve frekans değerleri

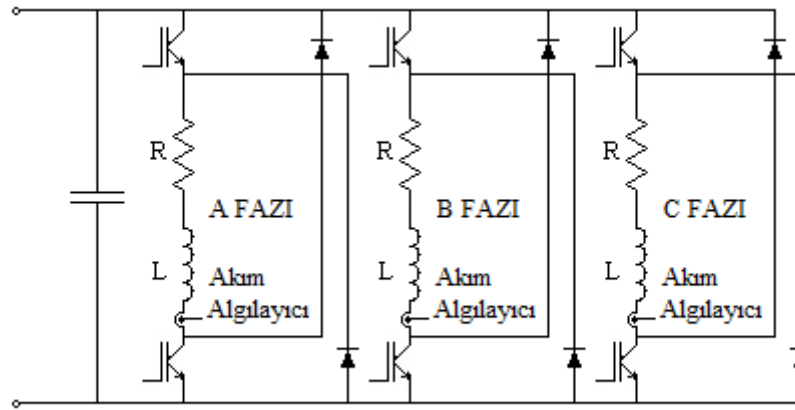
MOSFET'ler hızlı anahtarlama elemanlarıdır. 100 kHz ile 500kHz frekanslara kadar anahtarlama yapabilmektedir. MOSFET gerilim kontrollü bir eleman olup sürülmeleri kolaydır. Ancak anahtarlama güçleri küçüktür. Taşıyabilecekleri en büyük akım 140 A ve çalışabilecekleri en yüksek gerilim 500 voltur.

IGBT'ler gerilim kontrollü elemanlar olup sürülmesi kolaydır. 100 kHz frekansa kadar anahtarlama yapabilmektedir. Taşıyabilecekleri en büyük akım 500A ve çalışabilecekleri en yüksek gerilim 2000 voltur.

MOS kontrollü tristör kısaca MCT olarak da adlandırılır. MCT gerilim kontrollü bir eleman olup sürülmesi basittir. 20 kHz anahtarlama frekansına kadar kullanılır. En yüksek çalışma gerilimi 1200 V ve taşıyabileceği en büyük akım 630 amperdir.

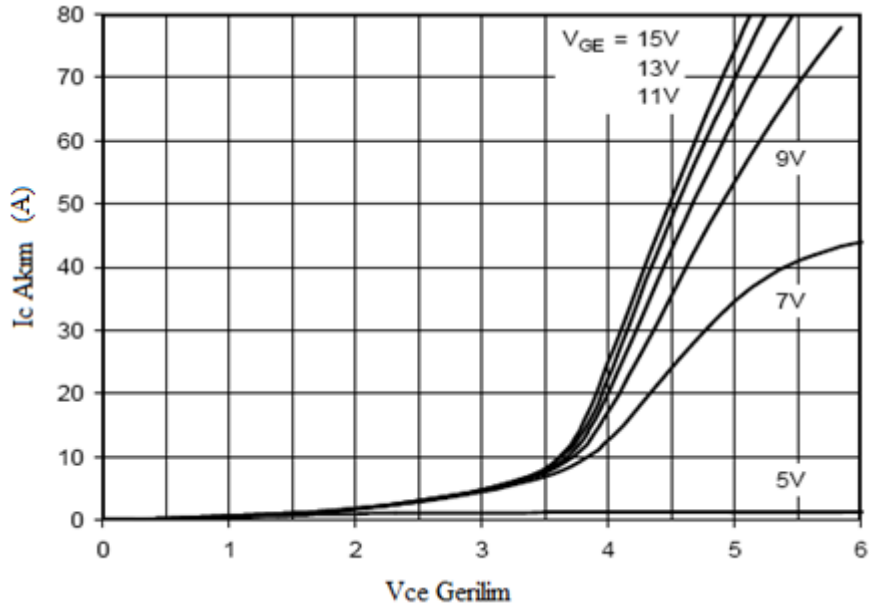
Yukarıda adı geçen güç elektroniği elemanlarının çalışabildiği akım, gerilim ve frekans değerleri şekil 5.15’de toplu olarak gösterilmiştir.

Anahtarlama hızı yüksek, sürülmesi kolay ve anahtarlama kayıpları düşük olduğu için anahtarlı relüktans motorun sürücü devresinde anahtarlama elemanı olarak IGBT seçilmiştir.



Şekil 5.16. Bir faz için iki anahtar kullanarak gerçekleştirilen ARM güç devresi

ARM'nin (Anahtarlı Relüktans Motor) kontrolünde kullanılan güç devresi şekil 5.16'da gösterilmiştir. Deney setinde IXYS firmasının 40N120C3D1 kodlu IGBT'si kullanılmıştır. Bu IGBT 1200 V, 40 A ve 20-50 kHz anahtarlama hızında çalışabilen yüksek hızlı bir anahtardır. Kullanılan IGBT'nin 25° deki çıkış grafiği şekil 5.17'de gösterildiği gibidir.

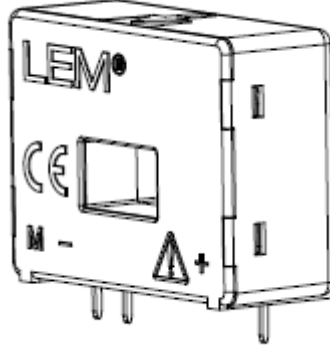


Şekil 5.17. 40N120C3D1 IGBT için farklı  $V_{GE}$  gerilimleri için  $V_{CE}$ - $I_C$  grafiği

Toparlama devresinde DSEI 60-06A hızlı diyotu kullanıldı. Bu diyotun üzerinde taşıyabileceği ortalama akım  $I_{FAVM} = 60$  A dir. Ters yönde dayanabileceği en büyük gerilim değeri  $V_{RRM} = 600$  V'dur. Geri toplama zamanı  $t_{tr} = 35$  ns dir. TO-247 kılıfında imal edilmiştir.

Faz akımlarının ölçülmesinde LA 55-P kapalı çevrim çok kademeli Hall duyargalı akım algılayıcısı kullanılmıştır. LA 55-P ile 70 ampere kadar akımlar ölçülebilmektedir.

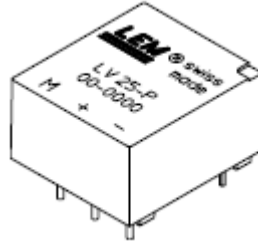
LA 55-P akım algılayıcısı 200 kHz'e kadar geniş bir frekans aralığında çalışabilmektedir. LA 55-P akım algılayıcısının giriş akımına bağlı çıkış geriliminin değişimi doğrusal olarak değişmektedir. Anahtarlı relüktans motorun üç faz akımını ayrı ayrı ölçmek için üç adet bağımsız akım algılayıcısı kullanılmıştır. Akım sensörleri ile algılanan akım bilgileri DSP'nin analog-dijital dönüştürücüsünün ADC0, ADC1 ve ADC2 girişleri üzerinden DSP'ye aktarılmıştır.



Şekil 5.18. Akım sensörü

Faz geriliminin ölçülmesinde ise LV 25-P kapalı çevrim çok kademeli Hall duyarlı gerilim algılayıcısı kullanılmıştır. LV 25-P dönüştürme oranı 2500:1000 olup 500V'a kadar gerilimler ölçülebilmektedir.

LV 25-P gerilim algılayıcısı 200 kHz'e kadar geniş bir frekans aralığında çalışabilmektedir. LV 25-P gerilim algılayıcısının giriş akımına bağlı çıkış geriliminin değişimi doğrusal olarak değişmektedir.

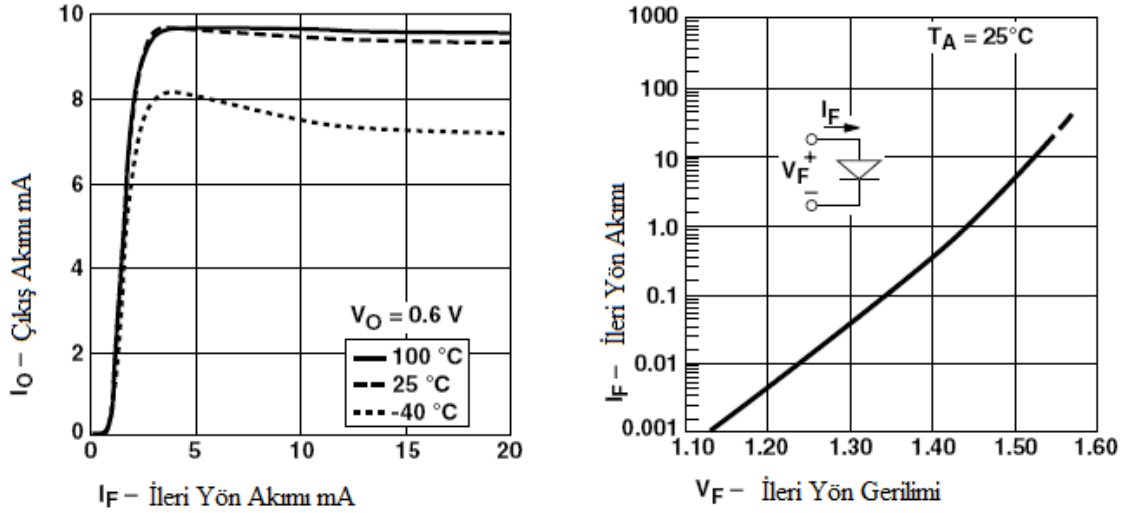


Şekil 5.19. Gerilim sensörü

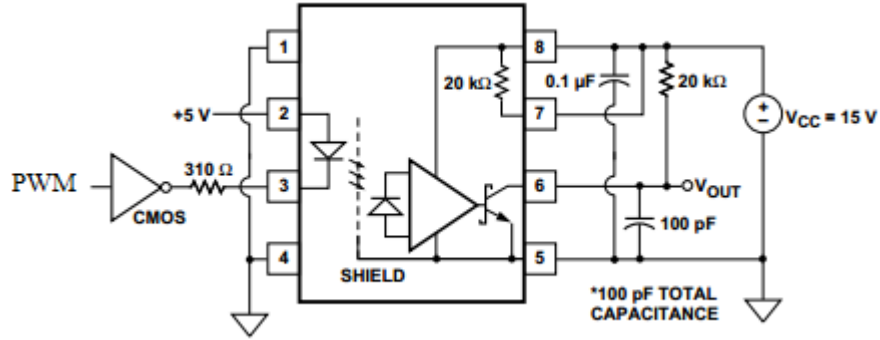
### 5.9.2 IGBT Sürücü Devresi

IGBT sürücü devresi motorun A fazı için şekil 5.22'de gösterilmiştir. Diğer fazların IGBT sürücü devresi A fazının aynısıdır. Bu devrede optocoupler olarak AVAGO firmasının marka 4506 entegresi kullanılmıştır. Optocoupler'in karakteristikleri şekil 5.20'de gösterildiği gibidir. Böylece sayısal sinyal işlemci ile IGBT sürücü devresi

elektriksel olarak yalıtılmıştır. 4506 TTL teknolojisinde yapılmış tek kanallı bir optokoplördür. Yükselme/düşme zamanı 24/10 ns, yalıtım gerilimi 2500 Volt ve iletim hızı 10 MB bauddur.



Şekil 5.20. Optokoplör karakteristiği

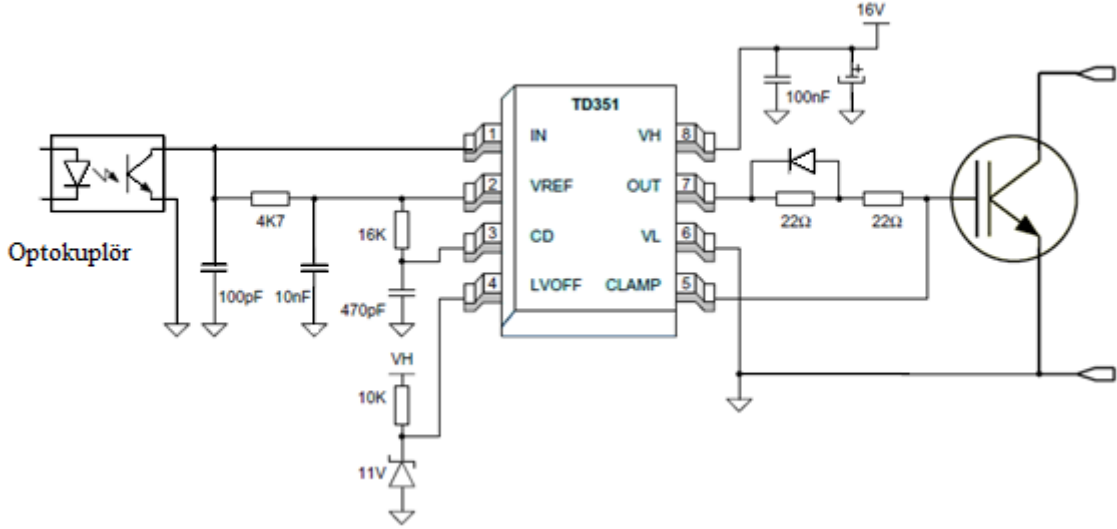


Şekil 5.21. Tezde kullanılan optokoplör (4506) devre bağlantısı

Snubber devresi tasarımında ise 33Ω 17W'lık bir taş direnç ile 630 V 0.22µF'lık kondansatör ile IXYS firması DSEI 30-12 A modeli kullanılmıştır. Hızlı toparlama diyotu olarak IXYS firmasının DSEI 60-06 modeli kullanılmıştır

Bu tezde DSP ile optokoplör arasında 4049 değil kapı entegresi kullanılmıştır(şekil 5.21).

IGBT'lerin sürülmesi için STMIKROELEKTRONICS firmasının TD351 entegresi kullanılmıştır. Yüksek güvenilirlikli sistemlerin tasarımını sağlamaktadır. TD351 entegresinin uygulaması şekil 5.22'de gösterildiği gibidir.



Şekil 5.22. TD351 sürme entegresinin uygulaması

TD351 yüksek ve alçak olmak üzere bağımsız iki çıkışlı, yüksek hızlı güç MOSFET'i ve IGBT sürücü entegresidir. Çalışma gerilimi  $V_{OFFSET} = 500$  V, çıkış gerilimi  $V_{OUT} = 10-20$  Volt, tipik iletim kesim zamanı  $t_{on/off} = 120$  ve  $94$  ns dir. DIL14 kılıfında üretilmiştir.

Ayrıca entegre devreyle MUR160 diyotu kullanılmıştır. MUR160 diyotunun ters yönde dayanma gerilimi  $600$  Volt, üzerinde taşıyabileceği ortalama akım  $I_{F(AV)} = 1$  Amper, yükselme zamanı  $t_{tr} = 75$  ns dir.

### 5.9.3. Konum Okuyucu

Dairesel mekanik hareketlerde enkoder, kontrol ünitesi ile mekanik kısım arasında çok önemli bir dönüşümü sağlar. Enkoderler, dairesele veya doğrusal hareketi elektriksel darbelere çevirir. Enkoderlerin yarık sayısı dolayısıyla bir devirde oluşan darbe sayısı hareketin doğru ölçülmesini belirleyen faktördür. Çok değişik dijital enkoder tipleri vardır. Bunlardan biri de optik enkoderlerdir. Bir optik enkoderin (konum kodlayıcının) dört ana parçası vardır: Işık kaynağı, kodlanmış disk (yarıklar), ışık algılayıcı ve sinyal

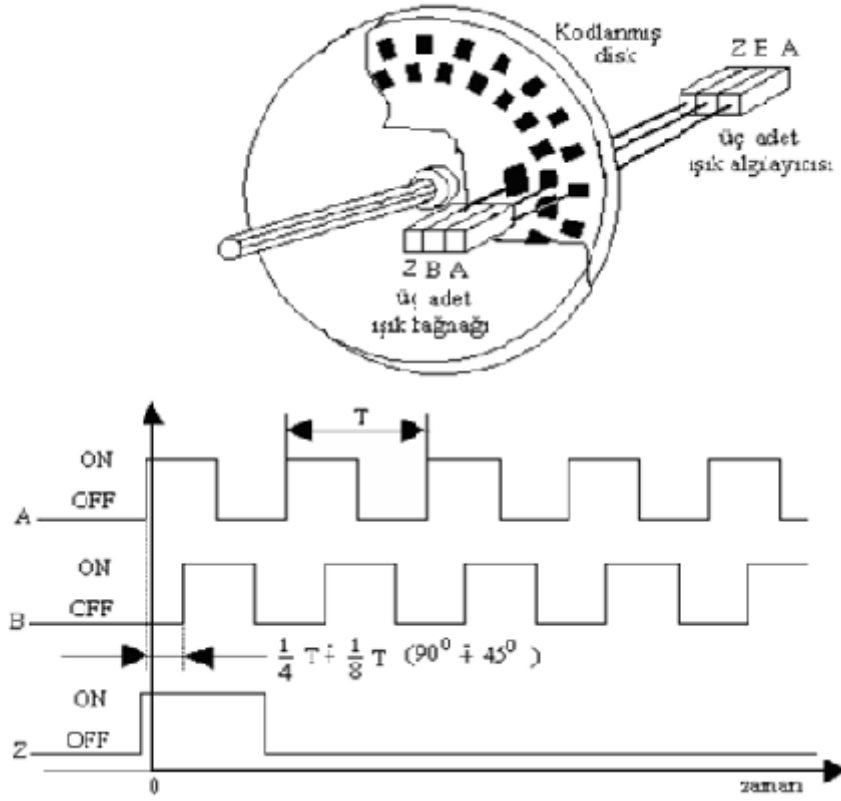


düzenleyicidir. Optik konum okuyucular, artımlı (incremental) ve mutlak (absolute) enkoder olmak üzere ikiye ayrılır (Omaç, 2006).

### **5.9.3.1. Artımlı Konum Kodlayıcılar**

Artımlı bir konum kodlayıcı bir disk üzerine dizili şekilde yerleştirilmiş yarıklar vasıtasıyla eşit darbeler üretir. Kodlanmış disk yarıklarından ışık geçince karşısındaki ışık algılayıcılar darbe üretir. En içte tek yarık vardır. Dıştaki iki sıra yarıkların sayısı eşittir. Ancak B sırası A sırasından belli bir açı farkıyla yerleştirilmişlerdir. Konum tespiti üretilen darbelerin sayılması ile sağlanır. A ve B darbelerin oluşum sırasına göre ileri-geri dönüş yönü belirlenir. İndex darbesi özelliği olan konumkodlayıcılarda her bir devirde bir index darbesi oluşur, bu ise mekaniksel mutlak referans noktasının belirlenmesini sağlar. Artımlı konum okuyucular basit bir yapıya sahiptir ve buna bağlı olarak pahalı değildir.

Motorun pozisyon bilgisi için Autonics marka E50S8-5000-3-T-5 artımlı enkoderi kullanılmıştır. Bu enkoder motor milinin dairesel bir tur atması durumunda 5000 darbe üretmektedir. Enkoder 5V DA güç kaynağı ile beslenmektedir.



Şekil 5.23. Bir atımlı optik konum okuyucunun A, B ve Z çıkışlarının dalga şekilleri

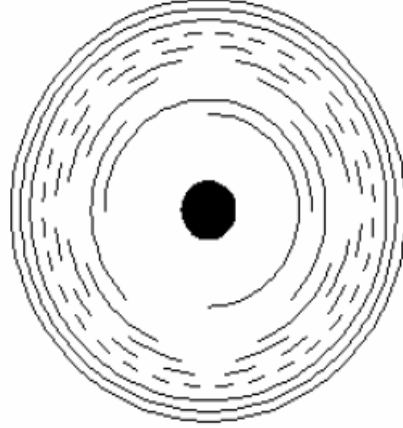
### 5.9.3.2. Mutlak Konum Kodlayıcılar

Mutlak açısal konum algılayıcı temel yapısı artımlı konum kodlayıcıların aynısıdır. Dönen diskin ince ve uzun yarık düzeni şekil 4.19'da gösterilmiştir. Bit sayısına göre dıştan merkeze doğru ince ve uzun yarıklar aynı merkezli birer çember halinde düzenlenmiştir. Bu durumda dönen diskin en dışındaki çember en düşük biti gösterir.

Mutlak konum kodlayıcı x ekseni ile yapılan mutlak açığı tespit eder. Artımlı konum kodlayıcılardan farklı olarak enerji bağlı değilken bir önceki konumu unutmaz. Böylece her an konumu doğru tespit eder.

Artımlı konum kodlayıcılara göre mutlak konum kodlayıcıların sakıncası küçük ölçülerde üretme ve düşük üretim maliyeti zorluğudur. Bit sayısı arttıkça çıkış sinyal kablosu sayısı artar.

Mutlak konum kodlayıcılar çıkış kodları ikili taban ve onlu taban kodlar halinde sınıflandırılır. İkili tabanda kodlama doğal ikili kodlama ve Gray ikili kodlama olmak üzere ikiye ayrılır. Gray kodlamada herhangi bir durumda kodlamada sadece bir bit değişir.



Şekil 5.24. Mutlak konum kodlayıcıların dönen diski

#### 5.9.4. Denetleyici Teknolojisi Seçimi

Anahtarlı relüktans motorun denetiminde geçmişten günümüze kadar üç farklı teknoloji kullanılmıştır:

- 1- Analog ve ayrık sayısal tümleşik devreler,
- 2- Mikro denetleyici,
- 3- Sayısal sinyal işlemci.

1970 yıllarının başında anahtarlı relüktans motorların kontrolünde TTL teknolojisinden yapılmış işlemsel yükseltici, karşılaştırıcı ve 7400 serisinden oluşan mantık devreleri kullanımı tasarımcılar için tek çözüm olmuştur.

1970'li yılların sonunda ve 1980'li yılların başında piyasaya çıkan 8 bitlik mikroişlemci ve mikro denetleyiciler gerçek zamanda kontrol uygulamalarında yeni bir çağı başlatmıştır ve bunlar anahtarlı relüktans motorların kontrolünde kullanılmıştır (Bose vd.,1986). Kontrol stratejilerindeki ilerlemelerden dolayı hızı yeterli olmadığından mikro denetleyicilerin kullanılması azalmaya başlamıştır( Miller ve T., 2001).

En son geliştirilen denetleyici teknolojisi sayısal sinyal işlemciler olmuştur. Sayısal sinyal işlemciler, sayısal işlem kapasitelerinden dolayı tüm motor kontrollerinde kullanılmaya başlanmıştır. Sayısal sinyal işlemciler kontrol işlemi için doğrudan uygulanabilen donanım optimizasyonlarına sahiptir. Bu özelliklerinden bazıları, komut işleme zamanının kısa olması, her saykılta bir komut işlemesi ve bir saykılta bir çarpma işlemini gerçekleştirebilmesi olarak sayılabilir. Benzer özelliklere sahip farklı firmaların ürettikleri sayısal sinyal işlemciler mevcuttur. Bu çalışmada sayısal sinyal işlemci olarak Dspace firmasının geliştirdiği DS1103 ACE kiti kullanılmıştır.

### **5.9.5. Sayısal İşaret İşlemci (DSP) ile ARM Denetimi**

Sayısal İşaret İşlemcileri (DSP) hareket kontrolü alanında yoğun bir şekilde kullanılmaktadırlar. Özellikle denetim algoritmasının çok hızlı bir şekilde gerçekleşmesini gerektiren uygulamalarda yüksek performanslı DSP'ler kullanılmaktadır. Denetleyici algoritmaları karmaşıktıkça istenen süre içerisinde gerekli işlemlerin yapılması için daha hızlı DSP'lere ihtiyaç duyulmaktadır. Son yıllarda çok hızlı DSP'lerle aynı anda birden fazla sistemin denetimi eş zamanlı olarak yapılabilmektedir.

Günümüzde kullanılan birçok denetleyicide mikroişlemci kullanılmaktadır. Herhangi bir sistem denetiminde güvenilirliği artırmak için mikroişlemci kullanılabilir. Ayrıca maksimum esnekliği sağlamak amacıyla denetleyici fonksiyonları yazılım ile yapılabilmekte ve daha sonra denetleyici yapısındaki istenilen değişiklik sadece yazılımda değişiklik yapılarak elde edilebilmektedir.

ARM denetiminde mikroişlemci kullanımını ilk olarak Bose ve arkadaşları Intel 8751 işlemcisi ile 1986 yılında yapmışlardır. Daha sonra 1989 yılında Roche 16 bit Intel 8089 ile ARM denetimi yapmıştır (Akcayol, 2001).

### **5.9.6. Denetleyici Kart (DS1103)**

Karmaşık kontrol algoritmalarının çözümü, mikroişlemci teknolojisinin gelişmesiyle birlikte olanaklı bir hal almıştır. Özellikle mikroişlemcilerin hızının ve aynı karttaki işlemci sayısının artmasıyla birlikte önceden olanaksız gibi görünen birçok karmaşık algoritma günümüzde rahat bir şekilde çözülmeye başlamıştır. DSP'ler karmaşık

matematiksel işlemleri hızlarından ve ek donanımlarından dolayı kısa sürede yapabilmektedir. Ayrıca DSP'ler yapay sinir ağları, genetik algoritma ve bulanık mantık gibi akıllı sistemlerinde gerçek zamanlı uygulamalarına müsaade sağlamaktadır.

Tez çalışmasında denetleyici olarak şekil 4.16'da verilen DS1103 dSPACE kartı kullanılmıştır. Kart üzerinde, PowerPC 750GX (1GHz) ve Texas Instruments TMS320F240 (20MHz) olmak üzere iki işlemci mevcuttur. DS1103 denetleyici kart ISA kartı bulunan ve bazı şartları sağlayan her türlü bilgisayara takılabilir. DSP modülde 32 bit giriş/çıkış (I/O) portları ile 16 bit analog dijital dönüştürücü ile artımsal konum ve hız algılayıcı girişi bulunmaktadır. Kullanılan DS1103 denetleyici kartın teknik özellikleri, mimari yapısı ve blok kütüphaneleri EK-1'de verilmiştir.



Şekil 5.25. DSP denetleyici kart (DS1103)

DSP kartı bilgisayara takılıp yüklendikten sonra gerçekleştirilmek istenilen kontrol algoritmaları Matlab/Simulink'de benzetimi yapılır sonra “Simulink Real-Time Workshop” yazılımı ile gerçek zamanlı koda dönüştürülür. “Real-Time Interface” yazılımı ile dönüştürülen kodlar denetleyici karta yüklenir. Bununla birlikte Control Desk Developer” yazılımı ile denetleyici kart tarafından hesaplanan ve ölçülen sistem parametreleri grafiksel bir platform üzerinden gözlenebilir ve bu veriler sonradan işlenmek üzere kaydedilebilir (Öksüztepe, 2008; Polat, 2010).

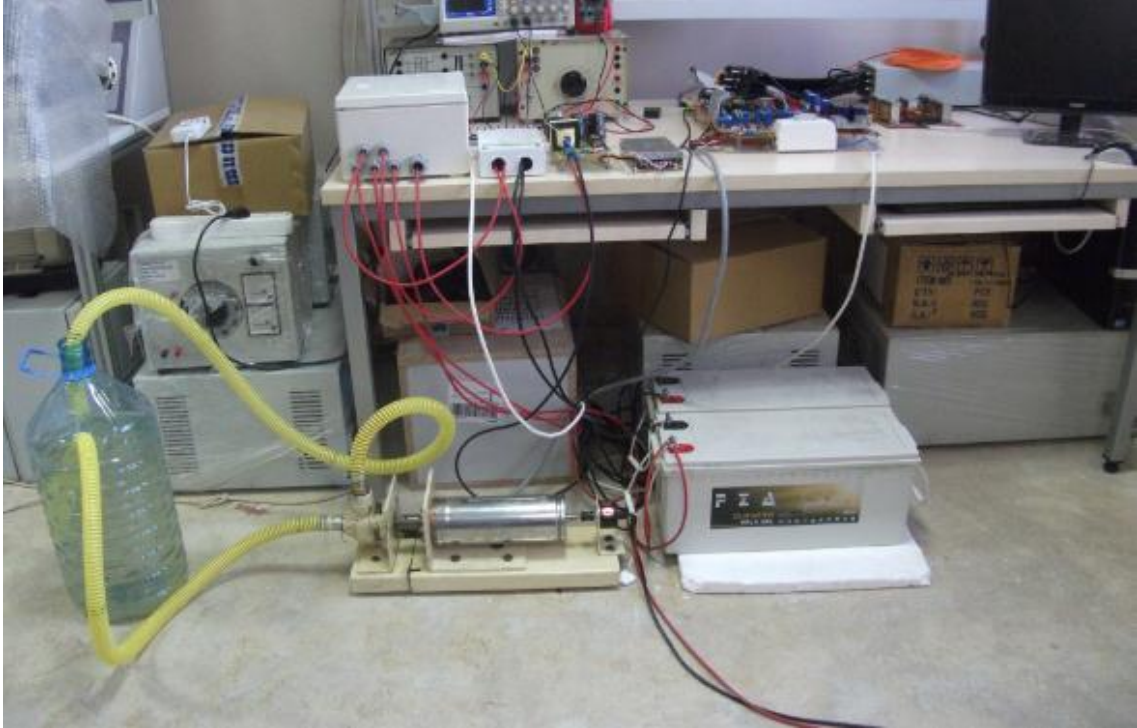
## 5.10. Deney Seti ve Tanıtımı

Oluşturulan deney düzeneği için kullanılan PV modül fotoğrafı şekil 5.21'de görülmektedir. Fotoğraflarda tüm sistemin sırasıyla görünümü verilmiştir. Sistemde

öncelikle güneş panelleri ardından akü gurubu sigorta panosu regülatör boost konvertör sürücü devresi motor pompa gurubu ve pompa düzeneği gösterilmiştir.

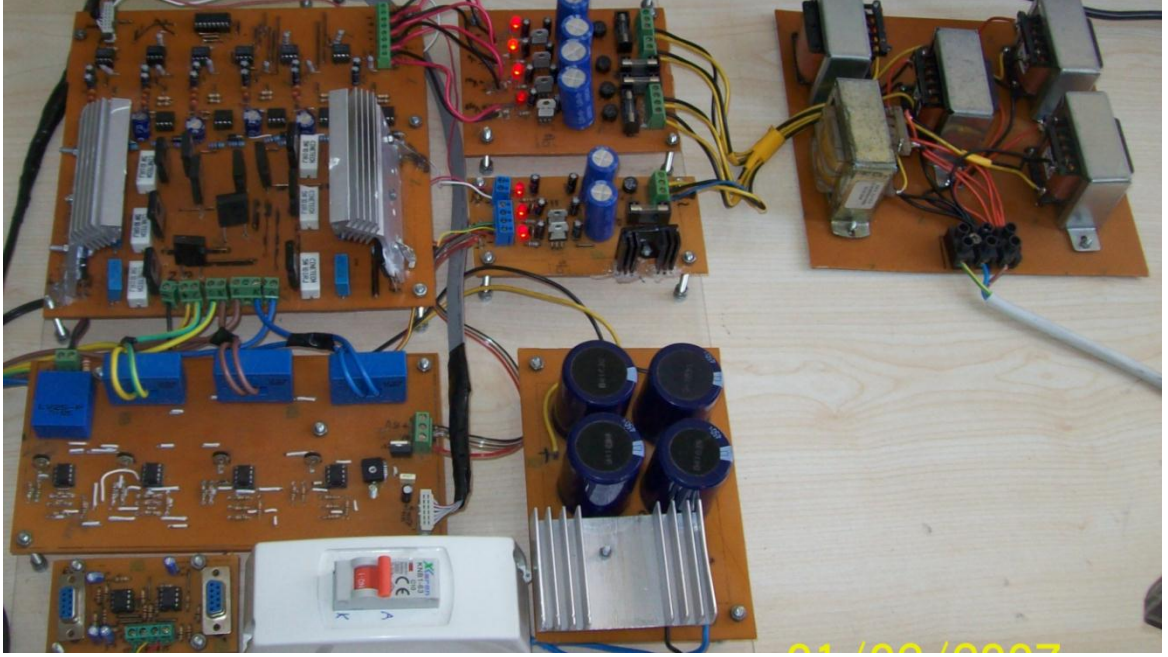


Şekil 5.26. PV modülleri



Şekil 5.27. ARM-pompa ve akü grubu





Şekil 5.28. ARM sürücü devresi fotoğrafı

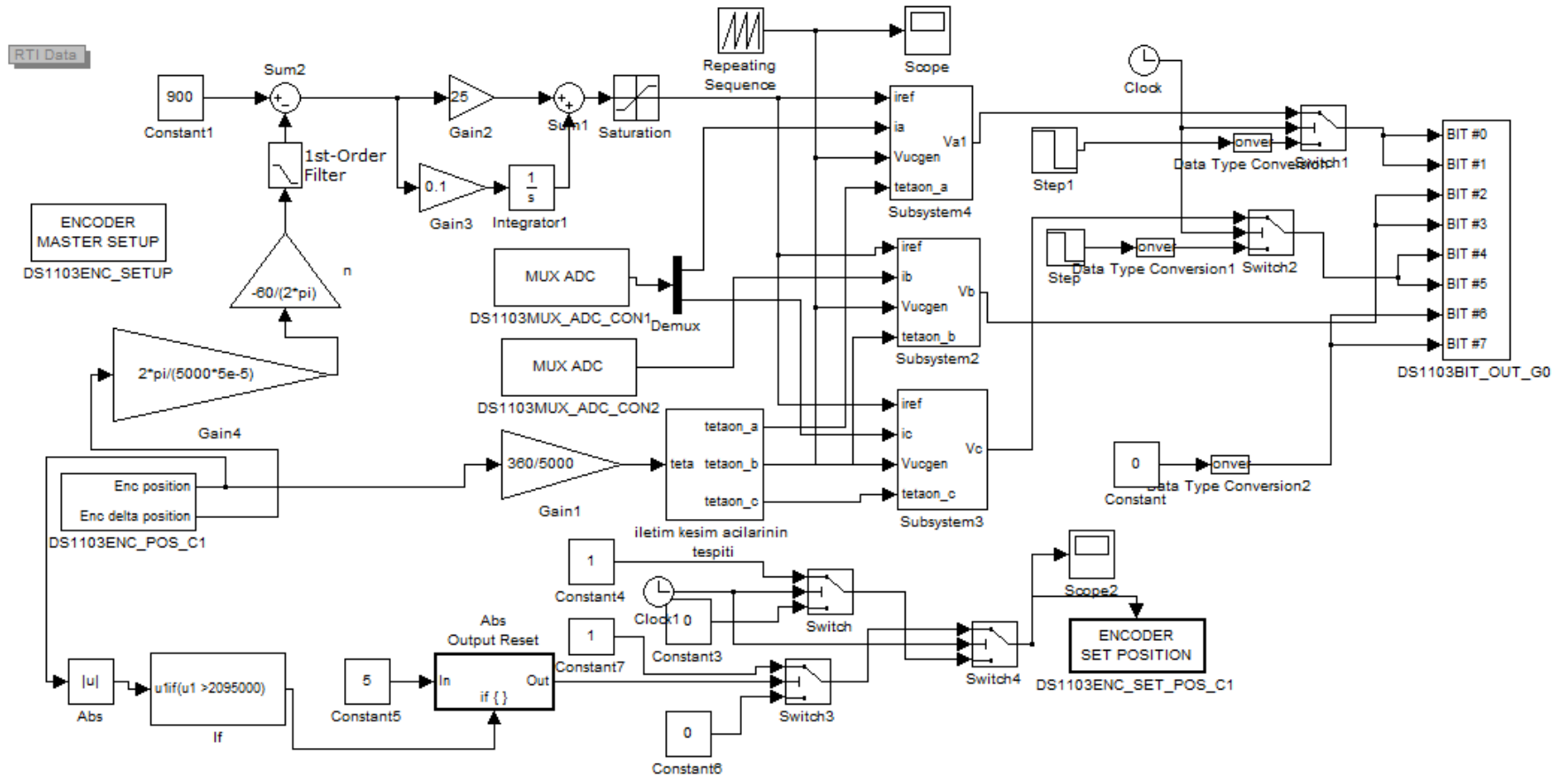


Şekil 5.29. Sigorta kutusu, şarj regülatörü ve boost dönüştürücü

### 5.11. Yazılım Kısmı

DS1103 Ace kiti tarafından kullanılan kod dosyası Matlab/Simulink'te bloklar hazırlanıp derlendikten sonra çalıştırılabilmektedir. Matlab/Simulink programıyla oluşturulan benzetim sonrasında kod dosyası daha hızlı çalışabilmesi için derleyici tarafından optimize edilmektedir. Bu çalışmada ARM denetimi için hazırlanan yazılım MATLAB/Simulink kullanılarak hazırlanmış ve DSP ile bilgisayar arasında haberleşmeyi sağlayan fiber optik bağlantı sayesinde doğrudan DSP ye aktarılmıştır.





Şekil 5.30. Anahtarlı relüktans motorun kontrolü için hazırlanan programın bloklar halinde gösterilişi



## 6. POMPALAR

### 6.1. GİRİŞ

Pompalar mekanik enerjiyi hidrolik enerjiye çeviren iş makineleri olarak tanımlanır. Pompalar, bir iş makinası olarak çok değişik tiplerde yapılmaktadır. Pompalar hacimsel ve santrifüj ( rotodinamik) olmak üzere ikiye ayrılır.

(1452–1519) yılları arasında yaşayan LEONARDO DA VİNCİ santrifüj pompalarla sıvıların bir yerden diğer bir yere naklini düşünerek, ilk ana fikri açıklamıştır. Fakat ilk santrifüj pompanın asıl sahibi (bulucusu) Fransız fizikçisi DENİS PAPİN ,(1647–1714) yılları arasında neşrettiği kitabında, suyun santrifüj pompa ile nasıl nakledileceğini ilk defa kesinlikle ortaya atmıştır.

Bugün halen, DENİS PAPİN'in o zamanda ortaya attığı ana prensipler kullanılmaktadır.

Daha sonraları Papin, salyangoz gövde içinde dönen ve günümüze kadar, uygulamasını sürdüren santrifüj pompaların asıl bulucusu olarak gösterilmektedir.

Papin'den sonra, REISEL (1695), KERNELIEN LE DEMOUR (17329 VE DANIEL GABRIEL FAHRENHEIT (1736) yıllarında santrifüj pompa üzerinde çalışmalar yapmıştır. Fakat hiçbiri, Papin pompasında esaslı bir gelişme ve yenilik sağlayamamışlardır.

1707 yılında LEONAR EULER, hidrolik tübinler üzerine; su reaksiyonu ile ilgili olarak “Theori plus complete des machines qui sont mises au mouvement par la Reaction de l'eau” adlı kitabında açıkladığı matematiksel yol santrifüj pompaların gelişmesinde önemli rol oynamamıştır.

Santrifüj pompalar, ancak 1818 senesinde Amerika'daki Massachusetts pompa fabrikasının santrifüj pompaları seri halde imal etmesiyle gelişmeye başlamıştır.

1850 yılında İngiliz fizikçisi ve mühendisi J. THOMSON pompa verimini kılavuz kanatlar kullanarak yükseltmeye muvaffak olmuştur.

250 yılı geçkin bir süre içinde santrifüj pompalar binlerce gayelere uyacak şekilde dizayn ve imal edilmişlerdir. Her yıl geliştirilmiş bir pompa dizaynı batıda geniş ölçüde ilgi görmektedir. Teknolojik gelişmelerde pompaların geniş bir payı vardır(Gökelim, 2001).

Sulama pompaj tesislerinin, en önemli elemanı pompadır. Bir pompaj tesisine en uygun pompa seçiminde, sistemin mevcut durumunun iyi bir şekilde araştırılması ile tesisten tatmin edici bir performans sağlanabilir. Verilen bir sistem için, uygun ve yüksek verimli bir pompa seçiminden önce, sistemin tasarım sınırları, sulama yöntemi ve istenilen esneklik iyi bir şekilde araştırılmalıdır(Çalışır vd., 2002).

## 6.2. Santrifüj Pompalar

Pompalar güç kaynağından aldığı enerjiyi mekanik enerjiye çevirerek suyu akarsu, gölet, gölet, kuyu gibi kaynaklardan alarak istenilen yere en kısa zamanda gönderen makinelerdir. Güç kaynağı olarak benzinli ve dizel motorlar ile elektrik motorları kullanılmaktadır.

Pompalar imalat şekli ve çalışma prensiplerine göre hacimsel ve santrifüj pompalar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Hacimsel pompalarda akışkana verilen enerji kesikli olduğu için pompaj uygulamalarında santrifüj pompalar kullanılmaktadır. Ayrıca santrifüj pompaların yük karakteristikleri güneş panellerinin maksimum güç noktası takip sistemine daha uygundur(Benlarbi vd., 2004)

Santrifüj pompaların hacimsel pompalara göre farklılıkları aşağıda sıralanmaktadır:

- a. Santrifüj pompalarda akışkanın hareketi sürekli dir. Akışkan bir yandan emilirken diğer yandan basılmaktadır. Akışkanın önce enerjisi yani hızı artırılmakta daha sonra hız basınca dönüştürülmektedir.
- b. Santrifüj pompaları devir sayıları daha yüksek durumdadır.
- c. Santrifüj pompalarda verim, debi ile basınç arasındaki ilişkiye bağlıdır.
- d. Santrifüj pompaların havayı emme yetenekleri bulunmamaktadır. Pompanın çalışabilmesi için emme borusunun su ile doldurulması gerekmektedir.
- e. Santrifüj pompalar daha az yer kaplayıp daha ucuzdurlar.

Santrifüj pompalar tasarım şekli ve uygulamalarına göre de 4 gruba ayrılmaktadır:

- a. Salyangoz (volüt) gövdeli pompalar
- b. Difüzör gövdeli pompalar
- c. Türbin pompalar (milli ve dalgıç tip derin kuyu)
- d. Pervaneli (eksenel) pompalar

Pompa milinin durumuna göre de 3 e ayrılmaktadır:

- a. Yatay milli pompalar
- b. Düşey milli pompalar
- c. Eğik milli pompalar

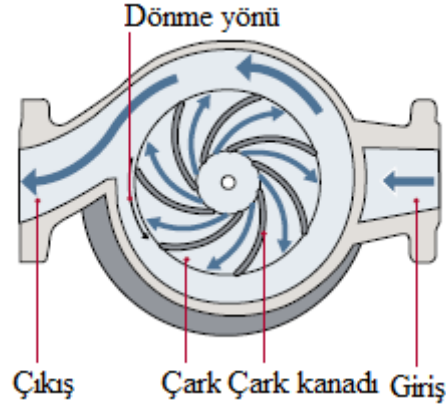
Volüt gövdeli pompalar genellikle suyun 7 metreden daha az derinlikten alınacağı yerlerde kullanılmaktadır. Kurulumun kolay ve maliyetinin düşük olması nedeniyle yatay milli salyangoz gövdeli pompalar tavsiye edilmektedir. Bununla birlikte, emmedeki net pozitif yükün sağlanması amacıyla derin kuyular ve bazı yüzey suları dalgıç pompalara gereksinim duyulabilir. Emme yüksekliğinin 7 metreden fazla olması durumunda pompalama işleminde yatay milli santrifüj pompaların kullanımı kavitasyon problemlerine neden olmaktadır. Böyle bir sistemde, derin kuyu pompaları tercih edilebilir.

Sulama sistemi için gerekli olan basınç ve debi değerini sağlayabilecek nitelikteki uygun pompalar imalatçı kataloglarına başvurularak saptanabilir. Sulama sistemine uygun pompanın belirlenebilmesi için bu pompalara ait karakteristik eğriler incelenmesi gerekmektedir. Hesapla bulunan debi ve basınç değerlerinden oluşan sürtünme eğrisi ile pompa karakteristik eğrileri karşılaştırılmakta ve verimi en yüksek pompa için seçim yapılmaktadır( Yenice O. T, 2009).

### **6.3. Santrifüj Pompanın Çalışma Prensibi**

Santrifüj Pompa dünyada en çok kullanılan pompa türüdür. Santrifüj pompanın çalışma prensibi basittir. Pompa çalıştığı zaman pompanın girişinden çıkışına doğru akışkanının basıncında bir artış oluşur. Bu basınç farkı sıvıyı sistemin içinden dışarı atar. Santrifüj pompanın motorundaki mekanik enerji dönen çark içindeki akışkana transfer edilerek basınçta bir artış yaratır. Akışkan çark merkezinden bıçakların dışına doğru akar. Böylece merkezkaç kuvvet akışkan hızını artırır ve sonuçta kinetik enerji basınca dönüştürülmüş olur(Grundfos, 2012). Santrifüj pompalar özellikle doğrudan güneş panelleri ile çalışacaksa ; düşük emme yükseklikleri için kullanılırlar.Santrifüj pompalar bağıl olarak yüksek verimliliğe ve yüksek su pompalama hacmine sahiptirler(Chandrasekaran N.vd., 2012). Fotovoltaik pompa pazarında birkaç pompa ve motor tipi mevcuttur. En çok kullanılan pompa tipi ise santrifüj pompadır. Fotovoltaik pompa sistemlerinde en çok

kullanılan pompa motor tipi ise kalıcı magnetli fırçalı DA motorudur( Elgendy M.A. vd.,2010).



Şekil 6.1. Merkezkaç Pompa içindeki akışkanın yolu

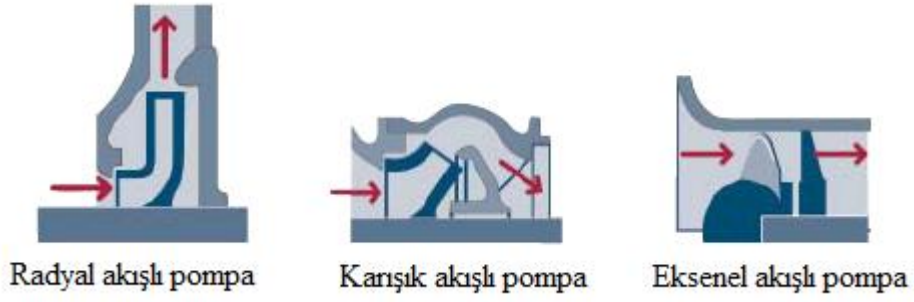
Atık su pompaları gibi saf olmayan sıvıları taşımak durumunda olan pompalar ise, maddelerin pompa içinde birikmesini önlemek üzere özel olarak tasarlanmış çarklara sahiptir.

#### 6.4. Pompa Tipleri

Santrifüj pompaların çeşitli tipleri çoğunlukla sulamada ve drenaj sistemlerinde kullanılır.

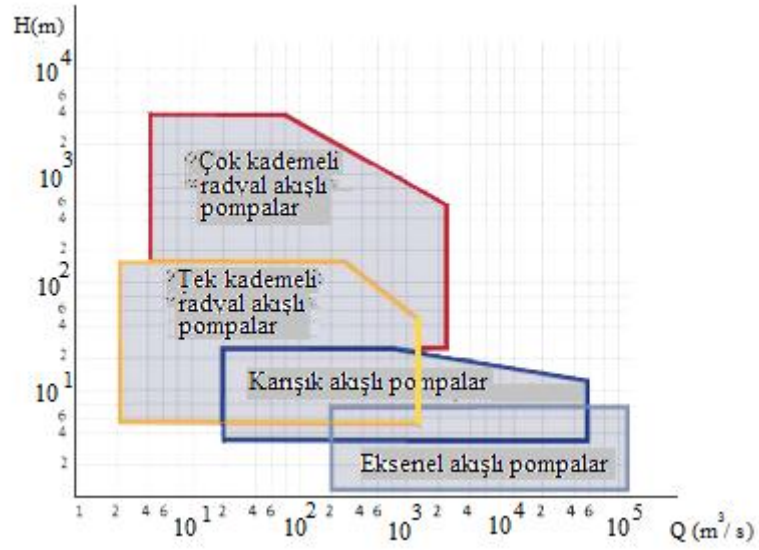
Beklenen tüm çalışma koşulları için pompa seçimi mümkün olmayabilir. Eğer debideki değişimler önemli ise yüksek debi gereksinimi gerektiren zamanlarda ana pompaya paralel bir ek pompa kullanılabilir(Çalışır vd., 2002).

Şekil 6.2 de görüldüğü gibi santrifüj pompalar çeşitli gruplara ayrılırlar. Bunlar radyal akışlı pompalar, karışık akışlı pompalar ve eksenel akışlı pompalar. En sık kullanılan tipleri ise radyal akışlı ve karışık akışlı pompalardır.



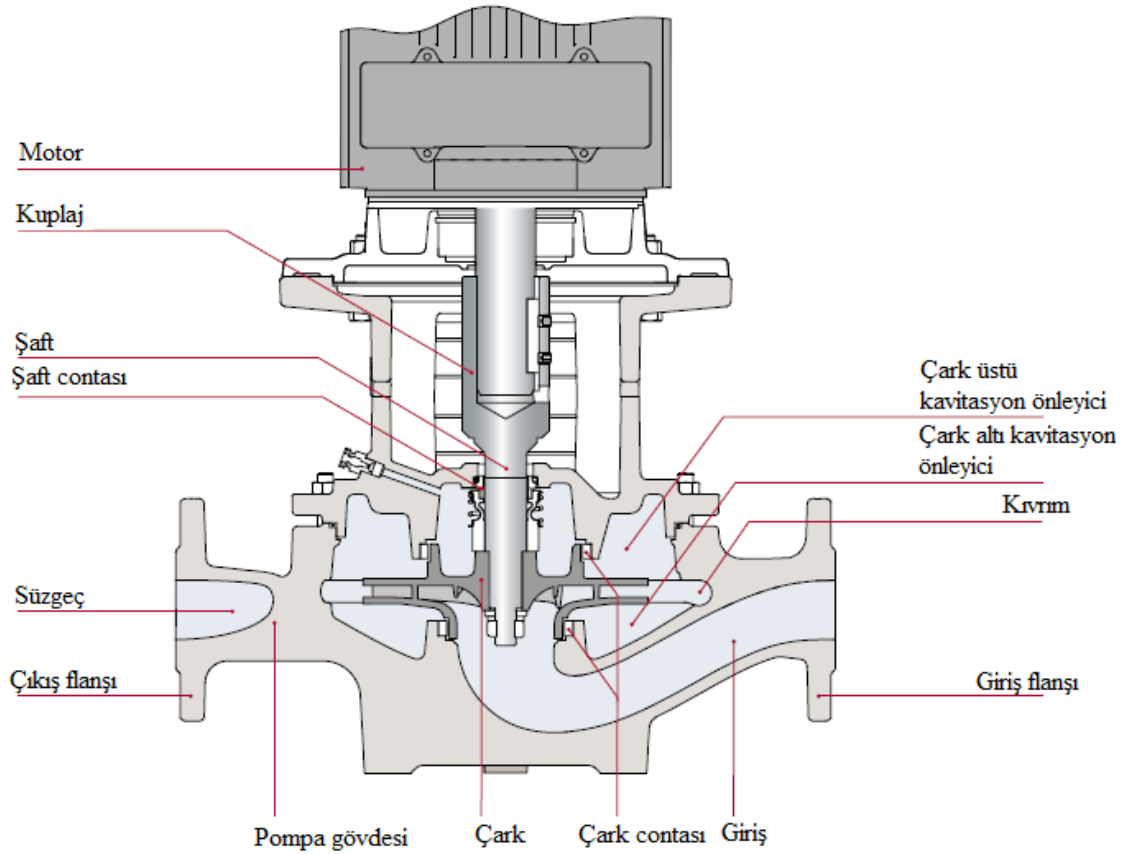
Şekil 6.2. Santrifüj pompaların çeşitli tipleri

Santrifüj pompaların performansları, özellikle basma yüksekliği, debi yerleşimi ve ayrıca ekonomik çalışma ile ilgili taleplerin farklılık göstermesi, bu kadar çok çeşitli pompanın bulunmasının sebeplerinden birkaçıdır. Şekil 6.3’de basınç ve debiye göre pompa tipleri gösterilmiştir.



Şekil 6.3. Çeşitli santrifüj pompa tipleri için debi ve basma yüksekliği

Çoğu santrifüj pompa için hidrolik parçaları ortaktır. Hidrolik parçalar akışkanla temas eden parçalardır. Aşağıdaki şekilde tek kademeli bir pompadaki hidrolik kısımlar görülmektedir. Alt bölümlerde girişten çıkışa doğru bölümler tanımlanmıştır.



Şekil 6.4. Hidrolik kısımlar

## 6.5. Kullanım Amacına Göre Pompa Tipleri

Pompalar beş tip olarak ele alınabilir. Bunlar Sirkülasyon pompaları, basınç artırma pompaları, sulama pompaları, endüstriyel pompalar ve atık su pompalarıdır.

Sirkülasyon Pompaları; bina içi ısıtma sistemlerinde olduğu kadar klima, soğutma ve ısıtma sistemleri gibi kapalı sistemlerde suyun sirkülasyonu için kullanılır. Bu sistemde sıcak su borularla sürekli olarak sirküle edilir.

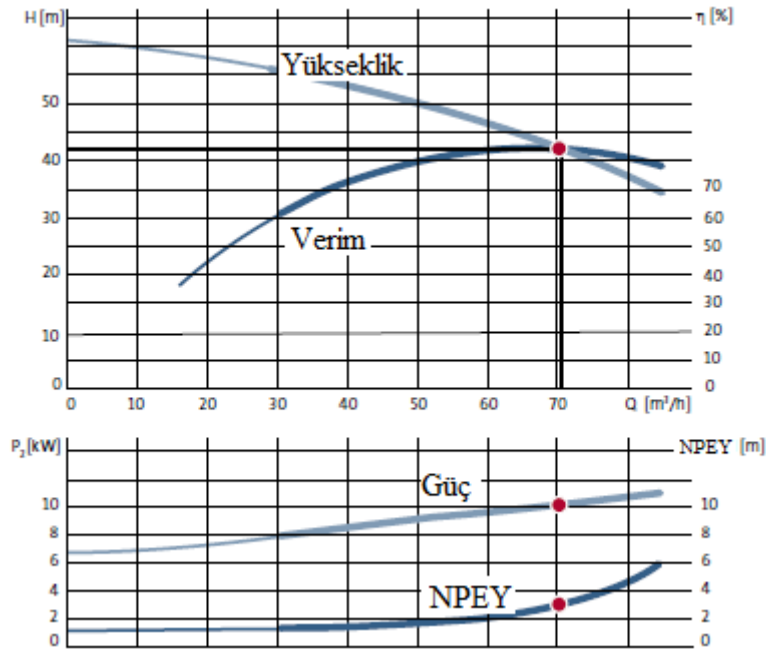
Basınç artırma pompaları; buhar kazanları için buharın yoğunlaştırılması ve soğuk suyun basıncını artırmak için kullanılır.

Sulama pompaları; bu pompalar iki şekilde kullanılır. Ya kuyu içerisinde suyun içinde ya da yeryüzünde susuz ortamda çalışanlar. Sulama pompalarında kirece ve kuma karşı dayanıklılık talep edilir.



Endüstriyel Pompalar; isminden de anlaşıldığı gibi, endüstrinin her türlü koşullarında çalışan pompalardır. Korozyon, asit ve patlayıcı maddelere maruz kaldıklarından tamamen kapalı ve korozyona dayanıklı yapıda olmaları gerekir.

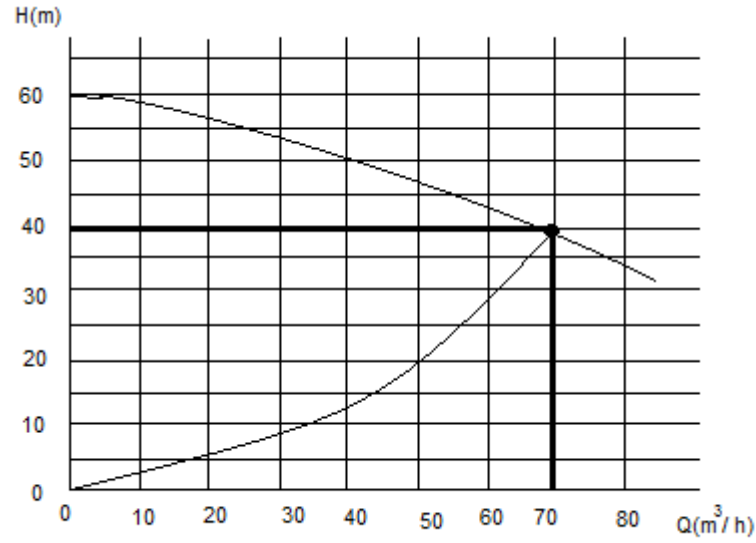
Atık su pompaları; endüstriyel sistemlerde ve arıtma tesislerinde atık suyu pompalamak için kullanılır. Bu pompalar yüksek miktarda katı parçacıkları içeren sıvıları pompalamak için tasarlanırlar.



Şekil 6.5. Bir merkezkaç pompanın tipik performans eğrileri. NPEY, emme yüksekliği, güç tüketimi ve verim debinin fonksiyonu olarak verilmiştir(Grundfos, 2012).

Burada  $P_2$  çekilen güç değeri sadece pompaya iletilen gücü kapsamaktadır. Aynı durum verim değeri içinde geçerlidir. Yani sadece pompa kısmını kapsar. ( $\eta = \eta_p$ )

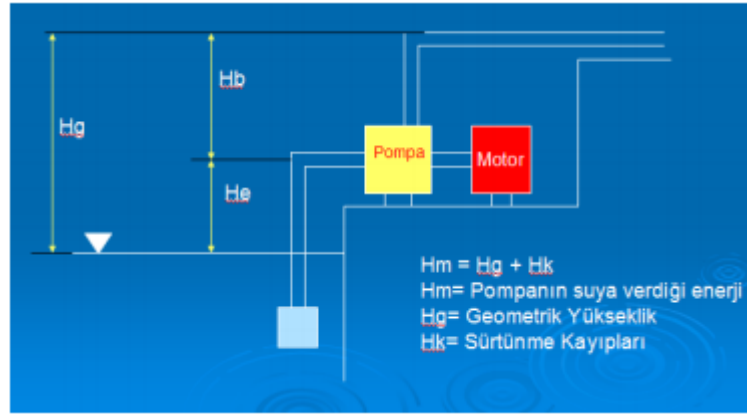
Net Pozitif Emme Yüksekliği (NPEY) , güç tüketimi ve pompa verimi verilen performans eğrilerinden bulunabilir. Verimlilik eğrisi özel koşullarda çalışan çok verimli pompaları seçmek için kullanılır.



**Şekil 6.6.** Bir santrifüj pompa için tipik H-Q eğrisi; düşük debide yüksek basma yüksekliği ve yüksek debide düşük basma yüksekliği elde edilir(Grundfos,2012)

Sulama sistemlerinde suyun kaynağından alınarak sulanacak bölgeye iletilmesinde suya kinetik enerji kazandırılması gerekmektedir. Bu amaç için kullanılan aletlerin hepsine birden pompaj tesisi denmektedir. Pompaj tesisinin genel hedefi; sulama suyunun zamanında, yeterli miktarda, en az enerji tüketimi ve en az işletme gideri ile iletmektir. Pompaj tesisinde kullanılan ekipmanlar aşağıda sıralanmaktadır. Sistemin çalışma şeması şekil 6.7’de gösterilmiştir( Yenice O. T., 2009).

- a. Pompa (iş makinesi)
- b. Motor (kuvvet kaynağı)
- c. Boru hatları
- d. Yardımcı parçalar



Şekil 6.7. Pompaj tesisi şematik görünümü

Şekil 6.7’de gösterildiği gibi pompa motor tarafından tahrik edilmekte ve suyu kaynağından alıp sisteme göndermektedir. Burada  $H_e$  ile ifade edilen emme yüksekliği,  $H_b$  ile ifade edilen ise basma yüksekliğidir. İki yüksekliğin toplamı ise geometrik yüksekliği vermektedir ( $H_g$ ). Borulardan ve yardımcı parçalardan dolayı oluşan sürtünme kayıpları da eklenerek manometrik yükseklik ile ifade edilen  $H_m$  değeri bulunmaktadır. Bütün  $H$  değerleri metre sıvı sütunu (mSS) olarak ifade edilmektedir. 10 mSS 1 atm basıncı göstermektedir( Yenice O. T., 2009).

Enerjiyi suya kazandıran pompanın, suyu en az manometrik yüksekliğe kadar çıkarabilmesi gerekmektedir. Pompaj tesisinde suyun iletilmesi için genelde santrifüj pompalar kullanılmaktadır( Yenice O. T., 2009).

Kuvvet kaynağı olarak benzin, dizel ya da elektrik motorları kullanılmaktadır. Suyun iletilmesinde kullanılan parçalar ise borulardan oluşmaktadır. Metal ya da plastikten oluşan boruların özellikleri ileriki bölümlerde anlatılacaktır. Boruların birbirine bağlanmasında ve dönüşlerde kullanılan yardımcı parçalar da sisteme dahil edilmektedir. Borularda sürtünmeden dolayı oluşan kayıplar da dahil edilerek bulunan manometrik yükseklik değeri pompanın gücünü bulmakta önemli bir parametredir( Yenice O. T., 2009).

$$h_{BG} = \frac{QH_m\gamma}{75} \quad (6.1)$$

$h_{BG}$ : Pompanın suya verdiği hidrolik güç (BG)

Q: Sistem debisi (l/s)

$\gamma$ :Suyun özgül ağırlığı (1 kg/l)

Bu değer yararlı güç ya da çıkış gücü olarak bilinmektedir. Pompada bir takım sürtünme kayıpları oluşmaktadır. Bundan dolayı pompaya verilen gücün hidrolik güçten büyük olması gerekmektedir. Böylece yararlı güç karşılanabilmektedir. Bu güce ise fren gücü denilmektedir. Hidrolik gücün pompa randımanına oranı ile hesaplanmaktadır( Yenice O. T., 2009).

$$f_{BG} = \frac{h_{BG}}{\eta_P} \quad (5.2)$$

$f_{BG}$ : Pompanın ihtiyaç duyduğu fren gücü (BG)

$\eta_P$ : Pompa verimi (%)

Yukarıdaki eşitlikler pompaj tesisinin temel denklemleri olarak bilinmektedir. Bu denklemi oluşturan dört parametre bulunmaktadır. Sistem debisi; tesisinin kurulduğu yerdeki bitkinin cinsine, toprak ve iklim tipine, sulanacak alanın genişliğine bağlı olarak hesaplanmaktadır. Manometrik yükseklik; geometrik yükseklik ile sürtünmeden dolayı oluşan kayıplara bağlı olarak hesaplanan işletme basıncıdır. Pompa gücü; sistemi çalıştıran pompanın ihtiyaç duyduğu minimum güç olarak ifade edilmektedir. Pompa verimi ise kullanılacak pompanın yapısal özelliklerine bağlıdır. Verimin yüksek olması enerji kaybının az olacağına bir göstergesidir( Yenice O. T., 2009).

Pompa kuvvet kaynağına direk bağlanmışsa kuvvet kaynağı mil gücü pompa giriş gücüne eşit alınabilir. Eğer motor ile pompa arasında bir güç iletim düzeni varsa iletim verimi de göz önüne alınmalıdır. Verilen enerjiye karşı yapılan işin maksimum olabilmesi için toplam tesis veriminin yüksek olması gerekmektedir. Bu değer yüksek olması ise sistemi oluşturan parametre değerlerinin en uygununu seçilmesiyle mümkün olmaktadır(Yenice O. T. , 2009).

## 6.6. Suyun Borulardaki Akışı

Suyun borulardaki akışını inceleyen bilim dalına akışkanlar mekaniği denmektedir. Sıvının borulardan geçerken yapmış olduğu davranışlara bağlı olarak, boruya ilk giren sıvı ile çıkışı arasında fark olmaktadır. Farkın oluşmasına neden olan önemli parametreler;

sürtünme kayıpları, boru tipi, boru iç çapı, sıvı akış hızı, borunun eğimidir. Suyun borulardan akarken bir takım özellikleri bu bölümde incelenecektir ( Yenice O. T. ,2009).

Suyun borulardan akışında çeşitli birim sistemleri kullanılmaktadır. Fakat yaygın olarak kabul edilen birim sistemi IS (International System of Units) birim sistemi kullanılmaktadır. Bu sistemde; uzunluk (m), zaman (s) ve kütle (kg) olarak kabul edilmiştir. Ağırlık ve kuvvetin birimi Newton (N)'dur( Yenice O. T. ,2009).

### 6.6.1. Suyun Fiziksel Özellikleri

Borudan geçen akışkanın davranışlarını anlayabilmek için bazı fiziksel özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir( Yenice O. T. , 2009).

### 6.6.2. Kütle ve Ağırlık

Kütle değişmeyen fiziksel bir özelliktir. Maddelerin kütlesi her yerde aynıdır. Fakat kütlelerin yer çekimi ile çarpılması sonucu cismin ağırlığı bulunmaktadır( Yenice O. T., 2009).

$$W = m. g \quad (6.3)$$

W: Suyun ağırlığı (kg)

M: Suyun kütlesi (kg.s<sup>2</sup>/m)

g: Yerçekimi ivmesi (9,81 m/s<sup>2</sup>)

Ağırlık akışkana yerin uyguladığı çekim kuvvetidir. Dolayısı ile vektörel bir büyüklüktür.

Birim hacimdeki akışkanın ağırlığına özgül ağırlık denir.

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (6.4)$$

$\gamma$ : akışkanın özgül ağırlığı (kg/m<sup>3</sup>)

W:akışkanın ağırlığı(kg)

V:hacim(m<sup>3</sup>)

Suyun özgül ağırlığı işlemlerde yaklaşık olarak  $1000 \text{ kg/m}^3$  alınmaktadır.

Özgül kütle ( $\rho$ ), birim hacimdeki madde miktarıdır. Özgül kütle akışkanın tipine göre farklılıklar göstermektedir. Özgül kütle sıvılarda basınç ve sıcaklık değişimlerinden çok az etkilenmektedir( Yenice O. T. ,2009).

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{W}{g.V} \quad (6.5)$$

$\rho$ : Özgül kütle ( $\text{kg.s}^2/\text{m}^4$ )

m: Kütle ( $\text{kg.s}^2/\text{m}$ )

V: Hacim ( $\text{m}^3$ )

W: Ağırlık (kg)

### 6.7. Viskozite

Viskozite akışkanın akmaya karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanmaktadır. Sıvıların viskozluğu molekül yapıları ve moleküller arası etkileşmelerle yakından ilgilidir. Herhangi bir boru içinde akan bir sıvının akış hızı, akımı sağlayan yürütücü kuvvet ile akımı engellemeye çalışan direncin büyüklüğüne bağlıdır. Akımın yürütücü kuvveti borunun iki ucu arasındaki basınç farkından, engelleyici kuvvet ise sıvı moleküllerinin birbiri ile ve aktıkları borunun çeperleri ile yaptıkları sürtünmelerden doğmaktadır. Viskozite sıcaklıkla da orantılıdır( Yenice O. T., 2009).

Sıcaklık değeri arttıkça akışkanın viskozitesi azalmaktadır. Mutlak viskozite ve kinematik viskozite olmak üzere iki çeşit viskozite vardır. Mutlak viskozitenin akışkanın özgül kütlelerine oranı kinematik viskoziteyi vermektedir. Mutlak viskozite  $\mu$  sembolü ile gösterilmekte olup birimi Poise'dir. Suyun  $20^\circ\text{C}$ 'deki viskozitesi 0,01 Poise'dir. Kinematik viskozitenin sembolü ise  $\nu$  ile gösterilmekte olup birimi ( $\text{m}^2/\text{s}$ )'dir ( Yenice O. T. , 2009).

### 6.8. Kaviteasyon

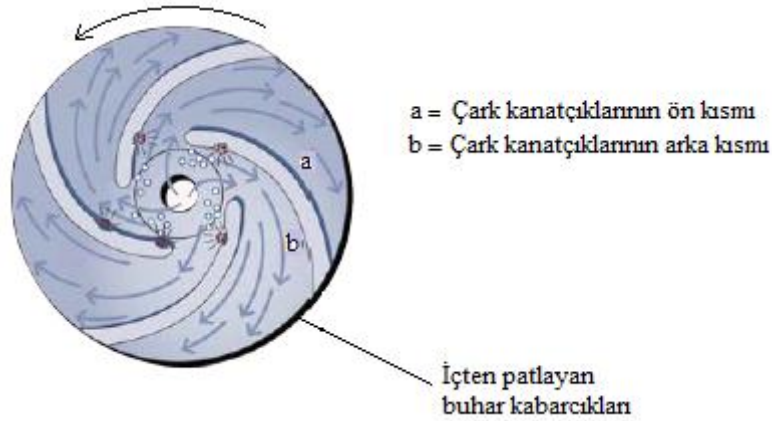
Kapalı bir sistem içerisinde hareket etmekte olan suyun herhangi bir noktasındaki basıncı, sıcaklığına bağlı bulunan buhar basıncının altına düşerse erimiş gazlar ayrılmakta

ve su buharı baloncukları oluşmaktadır. Buhar baloncukları su ile birlikte hareket ederken yüksek basınç bölgesine rastlandığında parçalanır ve buhar yoğunlaşarak su haline dönüşmektedir. Baloncukların parçalanması sert bir yüzeyin yakınında olduğunda meydana gelen kuvvetler çok yüksek basınçlar yaratarak sert yüzeylerde darbelerle neden olmaktadır.

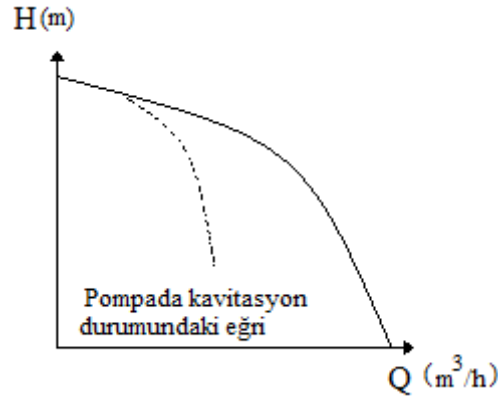
Bu darbeler sonucu boru iç yüzeyinde meydana gelen bozulmalara kavitasyon denmektedir.

Boruda oluşan bu deformasyonlar pompada ses ve titreşimlere yol açmaktadır. Emme boru hattında emme yüksekliği hesaplanmasında yapılan hatalar kavitasyonun meydana gelmesine sebep olmaktadır.

Kavitasyon emme borusundaki su hızının yüksek olmasına ve emme borusundaki kayıpların çok olmasına bağlıdır. Bu nedenle pompaj tesislerinde kavitasyonu önlemek için emme koşullarının iyi irdelenmesi gerekmektedir.



**Şekil 6.8.** Kavitasyon kabarcıklarının, çark kanatçıklarının arkasındaki iç patlamaları(Grundfos,2012).



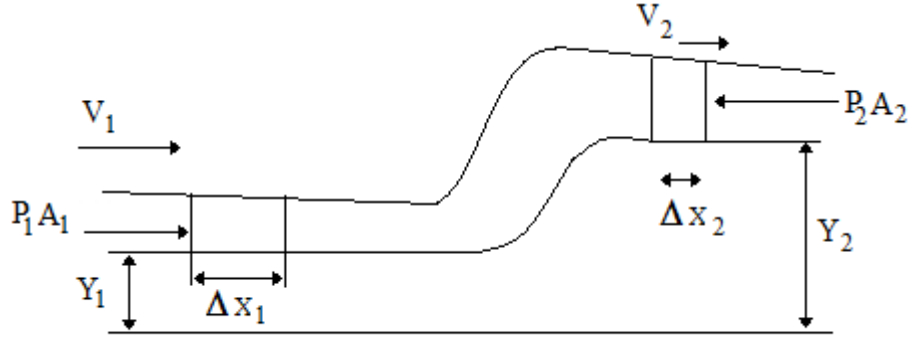
Şekil 6.9. Pompada kavitasyon durumundaki pompa eğrisi(Grundfos,2012).

Kavitasyon kaynaklı hasarlar, genellikle sadece pompa söküldüğünde görülebilmektedir. Ayrıca kavitasyon, gürültü ve titreşimleri artırarak yataklar, salmastralar ve kaynak yerlerinin zarar görmesine sebep olur ( Yenice O. T., 2009).

### 6.9. Bernoulli Denklemi

Daniel Bernoulli tarafından ortaya konulan denklem suyun akışını incelemek üzere ortaya konulan enerji eşitliğidir. Su boru içinden akarken sürtünmeden dolayı tüketilen enerjiye karşılık suyun hareketini sağlayan enerjide bir azalma gözlemlenmektedir. Pompaj tesislerinin projelenmesinde bu kaybın belirlenmesi önemlidir. Şekil 6.10 akışkanın boru içindeki akışını, borunun giriş ve çıkışlardaki çap farklarını, borunun kot farkını göstermektedir. Bu özelliklere göre enerji korunumu ile Bernoulli eşitliği ortaya çıkmaktadır.





Şekil 6.10. Kesiti değişen boruda akışkanın akımı

Akışkanın içinde bulunduğu borunun alt kısmının bir referans seviyesinden yüksekliği  $Y_1$ , kesit alanı  $A_1$ 'dir. Borunun üst kısmının referans seviyesinden yüksekliği  $Y_2$ , kesit alanı  $A_2$ 'dir. Akışkan borunun dar olan alt kısmından üst kısmına doğru hareket ettiğini düşünürsek, alt taraftaki 1 konumunda basınç  $P_1$ , hız  $V_1$ , üst taraftaki geniş kısımda 2 konumunda ise hız  $V_2$ , basınç  $P_2$  olmaktadır. Hareketi kesit alanı içindeki  $m$  gram sıvıkütlesinin 1 konumundan girmesi ve buna eşit kütleli 2 konumundan çıkması şeklinde düşünebiliriz. Akışkan sıkıştırılmaz olduğundan aynı kütleyle sahiptir.

Akışkanın sahip olduğu enerji 3 kısımdan oluşmaktadır. Bunlar; yerçekimi kuvvetinin yaptığı iş, basınç kuvvetinin yaptığı iş ve akışkanın hareketinden kaynaklanan kinetik enerjidir. Akışkanın  $y_1$  yüksekliğindeki kesitte sahip olduğu ağırlık ve basınç kuvvetlerinin yaptıkları işin bir kısmı, akışkanın harekete geçmesiyle kinetik enerjiye dönüşmekte, ağırlık ile basınç kuvvetlerinin yaptığı işteki değişim kinetik enerjideki değişime eşit olmaktadır.

$y_1$  kesitindeki enerji toplamı;

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 + \gamma y_1 = \text{sabit} \quad (6.6)$$

$y_2$  kesitindeki enerji toplamı;

$$P_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2 + \gamma y_2 = \text{sabit} \quad (6.7)$$

Buna göre enerji eşitliğinden bernoulli denklemi ortaya çıkmaktadır.

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 + \gamma y_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2 + \gamma y_2 \quad (6.8)$$

Yukarıdaki eşitlikte basıncın pompaj tesislerinde metre sıvı sütunu (mSS) olarak kullanıldığı düşünülürse, her bir terim özgül ağırlığa bölündüğünde denklemin mmSS cinsinden değeri;

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + y_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + y_2 \quad (6.9)$$

Her bir bileşen metre cinsine dönüştürülmüştür. Basınç terimi basınç yükü ile ifade edilmekte olup basıncın elde edilmesindeki akışkan yüksekliğidir. Hız terimi hız yükü olup, akışkanın V hızına ulaşması için gerekli düşü yüksekliğidir. Böylece hız yükü, basınç yükü ve potansiyel yükün toplamının akışkanın akış yönünde sabit olduğunu göstermektedir( Yenice O. T., 2009).

### 6.10. Süreklilik Denklemi

Süreklilik denklemi, borudan geçen akışkanın hızı, debisi ve boru kesit alanı arasındaki ilişkiyi gösteren bir denklemdir. Borulardaki akışta debinin sabit kaldığı düşünüldüğünde boru kesit alanı hız ile ters orantılıdır. Kesit alanı azaldığında akış hızı artmaktadır.

$$Q_1 = Q_2 \quad (6.10)$$

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 = \text{sabit} \quad (6.11)$$

Süreklilik denkleminin genel ifadesi ise;

$$Q = A.V \quad (6.12)$$

Şeklinde ifade edilmektedir.

Tam dolu akışta boru kesit alanı  $\pi.D^2/4$  olarak alındığında denklem aşağıdaki şekle dönüşmektedir ( Yenice O. T. ,2009).

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} V \quad (6.13)$$

Q:Debi(m<sup>3</sup>/s)

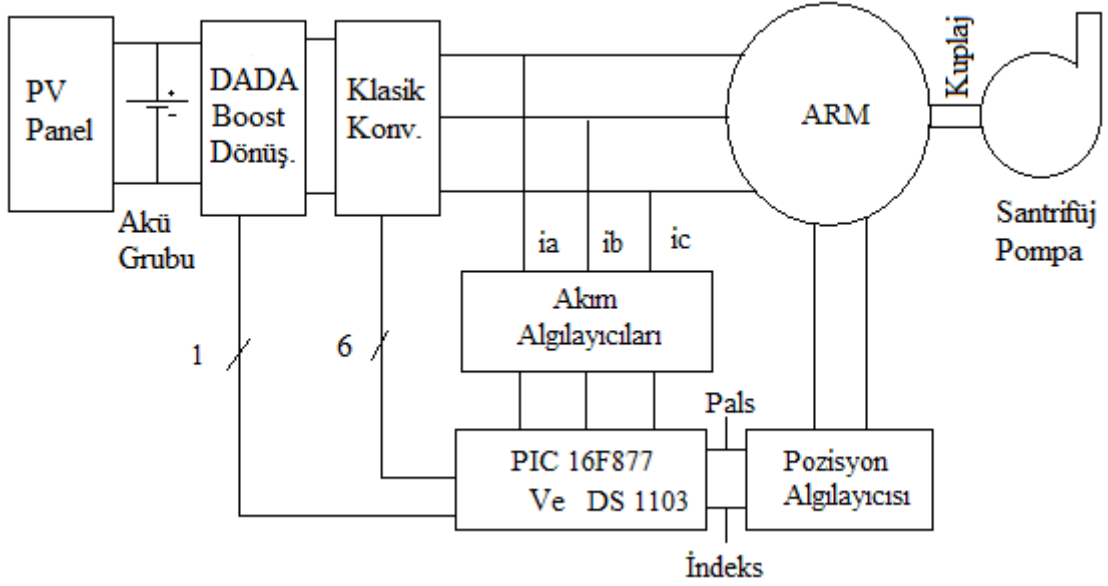
V:Hız(m/s)

A:kesit alanı(m<sup>2</sup>)

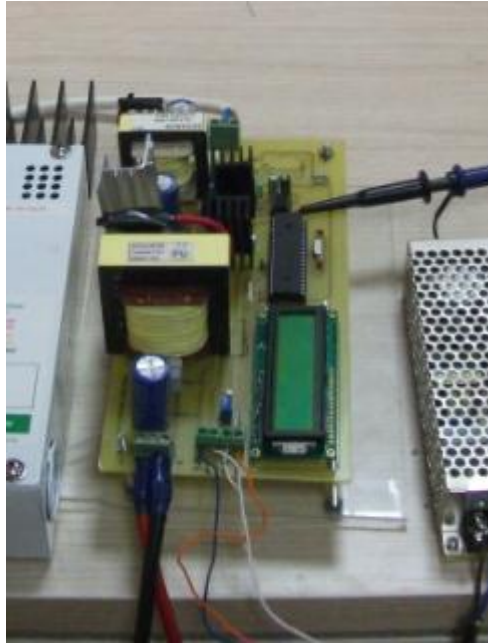
D: Boru çapı (m)

## 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Üzerinde çalışılan sistemin uygulaması gerçekleştirilmeden önce benzetim çalışması yapılmıştır. Benzetim için Matlab/Simulink programı kullanılmıştır. Öncelikle DA akü gerilimini (24V) artırmak için DA-DA Boost dönüştürücü katı tasarlanmış ve imal edilmiştir (Şekil7.2).



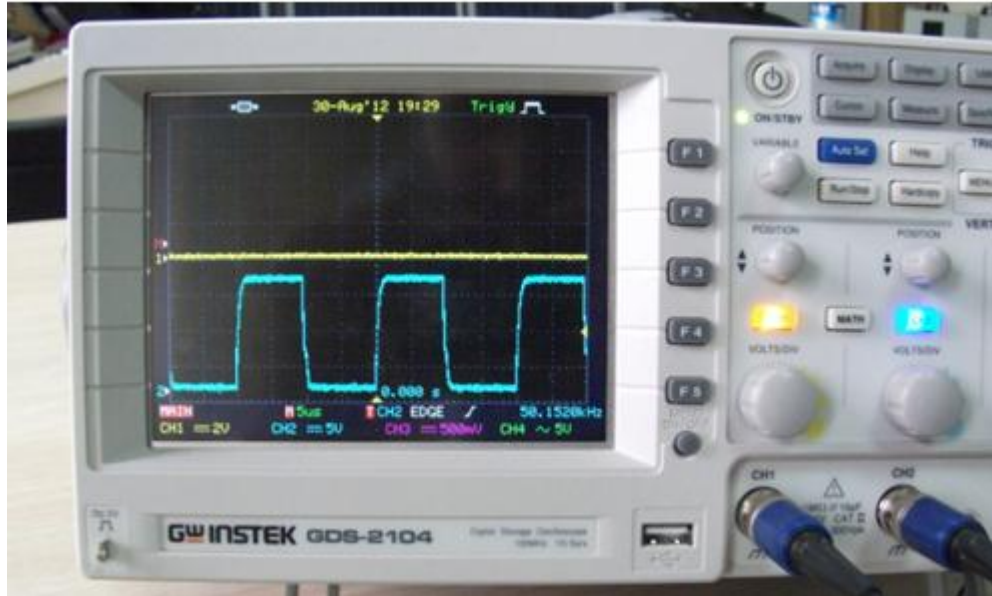
Şekil 7.1. Tüm sistemin blok görünüşü



Şekil 7.2. Boost dönüştürücü

Uygulama aşamasında öncelikle sistemin ARM'nin sürücüsünün baskı devre tasarımı yapılmıştır. Ardından besleme ve ölçme devreleri tasarlanarak baskı devreleri imal edilmiştir. Sürücü sisteminin bağlantıları yapılarak sistem çalışır duruma getirilmiştir. Gerekli testler, ayarlar ve ölçümler yapıldıktan sonra devreler çalışır hale getirilmiştir. Şebekeye bağlı olarak tüm sistem enerji verilerek çalıştırılmıştır.

Daha sonra Boost dönüştürücü tasarlanmıştır. Baskı devresi yapılarak test ve ölçümlere geçilmiştir. Boost dönüştürücü anahtarlama frekansı 50 Khz olarak CCS C programında yazılarak çıkış gerilimi 80 V olarak ayarlanmıştır. Osiloskoplula da anahtarlama frekansı takip edilmiştir(şekil 7.3).



Şekil 7.3. Boost dönüştürücü anahtarlama frekansı 50 kHz olarak ayarlanmıştır

Elektronik devreler çalışır hale getirildikten sonra pompaya bağlı motorun beslemesini yapacak olan PV panellerin ve akünün kurulum aşamasına geçilmiştir. Motor gücünü karşılayacak olan 150 W gücündeki dört adet güneş panellerinin 30° eğimli olarak sehpaları tasarlanarak imalatı yapılmıştır. Her biri 20V olan paneller seri bağlanarak çıkış gerilimi 80 V gerilim elde edilmiştir. Böylece elde edilen akım düşürülerek kablolarda güç kaybı azaltılmıştır.

Paneller, şarj regülatörü ve aküler arasındaki bağlantılar ve ayarlar yapılmıştır. Kullandığımız şarj regülatörü üç görev yapabilme özelliğine sahip olması dikkate alınarak

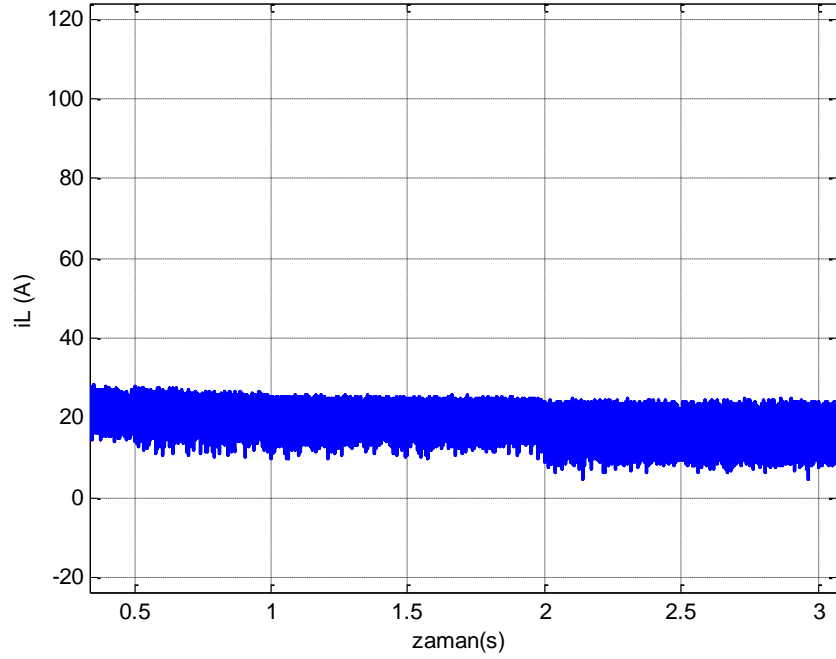


**Şekil 7.4.** Akü grubu boşken ilk şarj akımı değeri yaklaşık 6,5 amper olarak ölçülmüştür.

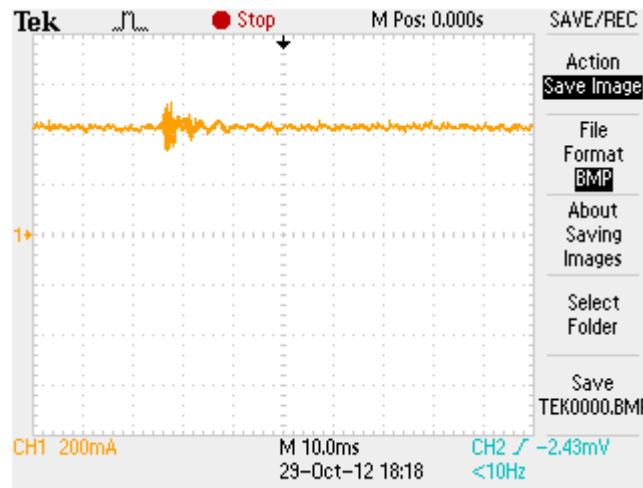


**Şekil 7.5.** Akü grubu şarj oldukça PV'den çekilen akım düşmüştür

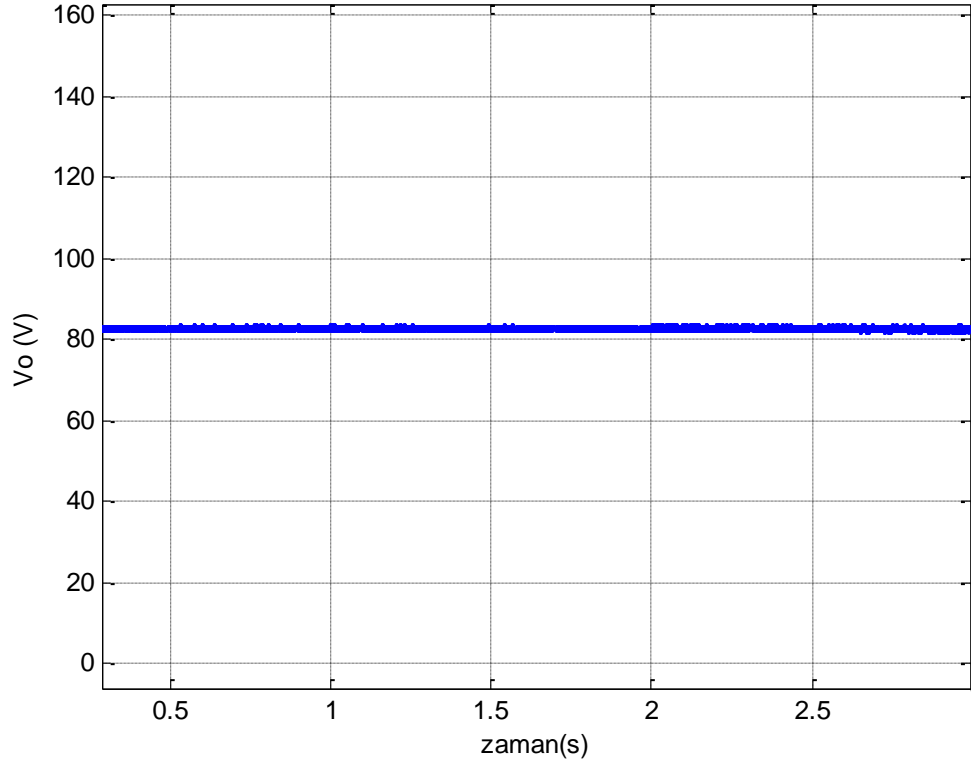
akü şarj kontrolü amaçlı kablo montajı yapılmıştır. Güvenli çalışma amacıyla bu güç sistemine sigorta kutusu ilave edilmiştir. PV paneller, şarj regülatörü ve akü grubu ilave edildikten sonra tüm sistemin test ve çalıştırması işlemine geçilmiştir. Akü grubunun şarj akımları kontrol edilerek ölçümler yapılmıştır. Şarj akım değerinin 6,5 A den azalarak sıfıra düştüğü gözlemlenmiştir (Şkl 7.4, Şkl 7.5).



Şekil 7.7. Boost dönüştürücü bobin akımı değişimi

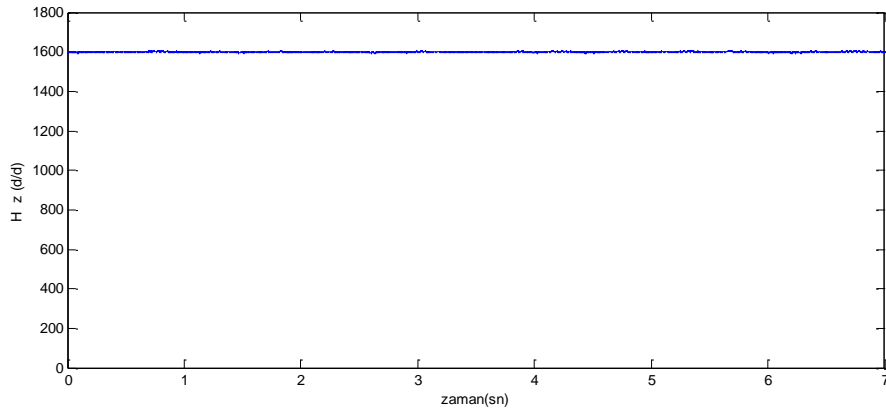


Şekil 7.8. Boost dönüştürücü deneysel ölçülen akım grafiği  
(akım değeri 50 kat küçültülmüştür)



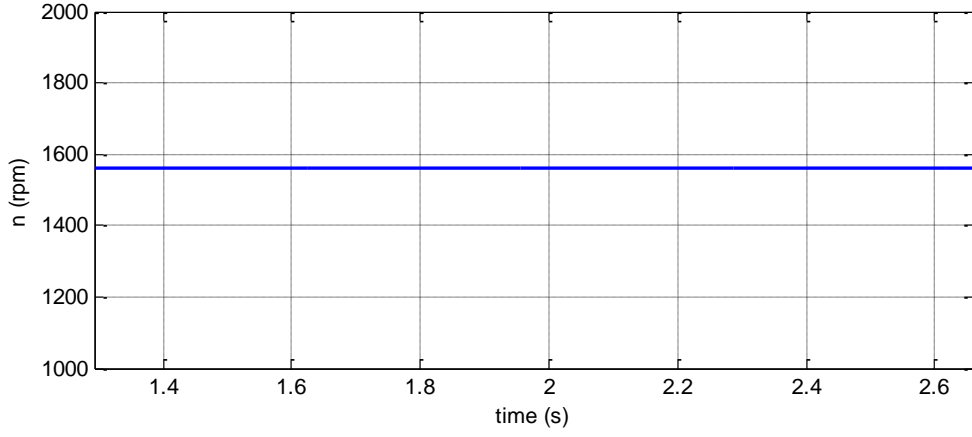
**Şekil 7.9.** Boost dönüştürücü çıkış gerilimi

Yapılan ARM'li pompa sisteminin simülasyon ve uygulama deneylerinde akım değerleri yaklaşık olarak birbirine yakın değerleri yakaladığı gözlemlenmiştir. Bu değerlerin değişimi yukarıdaki şekil6.4 ve şekil6.5 te görülmektedir.



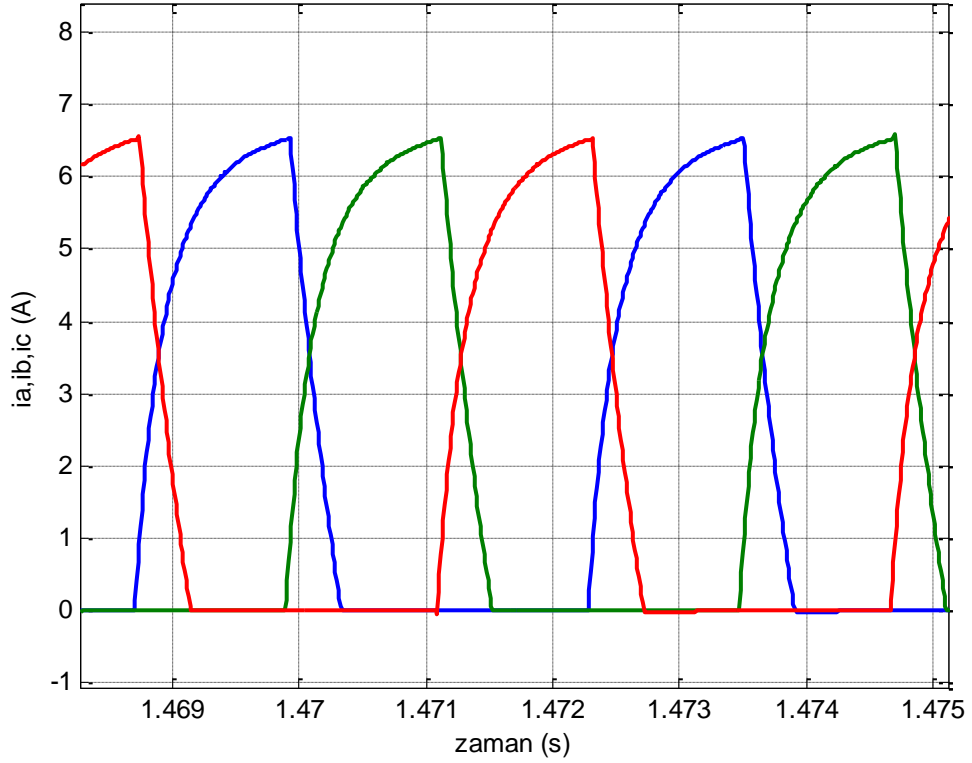
**Şekil 7.10.** 80 V' ta ARM ölçülen hız değişimi



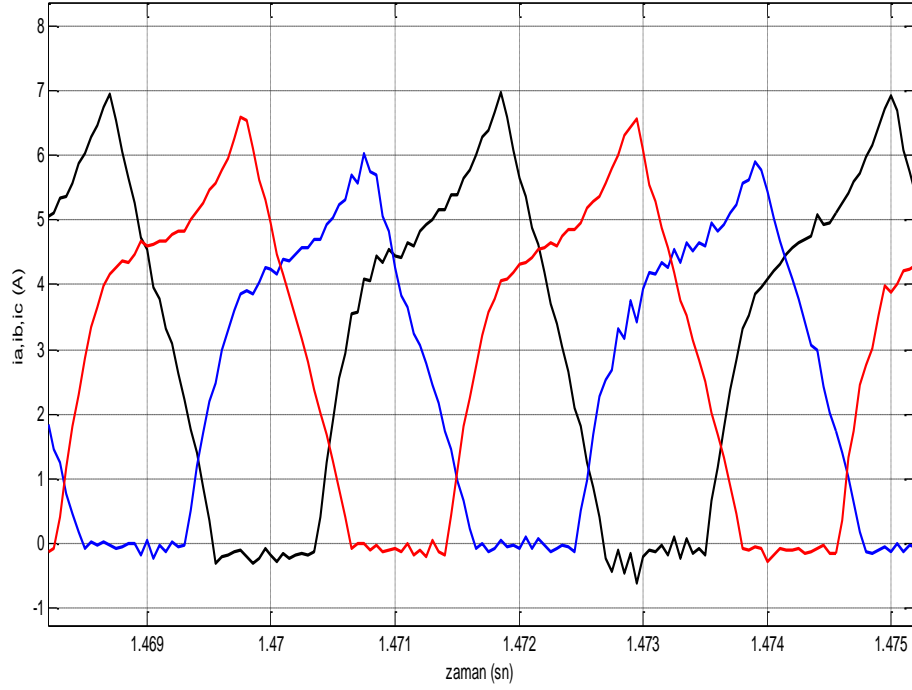


**Şekil 7.11.** 80 V' ta ARM simülasyon hız değışimi

Yapılan ARM'li pompa sisteminin simülasyon ve uygulama deneylerinde hız değeri bir birine yakın olduğu gözlemlenmiştir. Bu değeri değışimi yukarıdaki şekil 7.6 ve şekil 7.7'de görülmektedir.



**Şekil 7.12.** 80 V' ta simülasyon sonucunda elde edilen  $i_a, i_b, i_c$  değışimleri



**Şekil 7.13.** 80 V' ta deneysel olarak ölçülen  $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$  akımlarının değişimleri

ARM'li pompa sisteminin uygulama deneylerinde düşük hız değerlerinde debinin düştüğü gözlemlenmiştir. Yüksek devirle çalışan merkezkaç pompalar için bu durum beklenen bir durumdur. Yüksek hızlarda yani pompanın nominal devrine yakın değerlerde debinin oldukça arttığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak pompa verimini artırmak için yüksek devirlerde çalışması gerektiği gözlemlenmiştir.

## 7.1. ÖNERİLER

Bu çalışmada güneş enerjisi ile beslenen ARM'li pompa sisteminin önce simülasyonu yapıp sonuçlar alınmış ve sistemin laboratuvar ortamında deney ve testi yapılmıştır.

Çalışmada kutup sayısı 18/12 olan ARM (anahtarlı relüktans motor) kullanılmıştır. Deneysel olarak elde edilmiş verilerle simülasyon kıyaslaması yapılmış ve yapılan analizlerin örtüştüğü gözlemlenmiştir.

Uygulamada önce sürücü devresi ve Boost dönüştürücü tasarlanmıştır. ARM'nin pompa çalışma hızını ve referans hızı yakalaması hedeflenmiştir. Pompa yükü ile yapılan çalışma

durumlarında motorun gerçek hızının referans hızı kısa bir süre içerisinde yakaladığı ve gerçek hızın referans hızı yakalamasının ardından salınım yapmadığı görülmüştür.

Bu projeyi daha ekonomik hale getirmek ve geliştirmek için bundan sonraki çalışmalarda aşağıdaki işlemlerin yapılması önerilmektedir.

Ancak mikrokontrolörle kontrol yapılması durumunda bu dezavantaj ortadan kaldırılmış olacaktır.

DSP nin pahalı olduğu dikkate alınırsa bu çalışmanın daha ekonomik ve daha uygulanabilir olması için; kontrol yöntemi olarak mikrokontrolörlü kontrol tercih edilmelidir. Ayrıca sistemdeki kontrol ve güç kartları dahada küçültülmelidir. Sürücü sistemin küçültülmesi hedeflenmelidir. Yarıiletkenlerle imal edilen entegre ve anahtarlar ithal devre elemanları olduğu için hem ekonomik olarak projenin uygulanabilirliğini, hemde arıza durumunda temin olanaklarını sınırlamaktadır. Bu elemanların az sayıda kullanımı düşünülmelidir. Bunun için uygun entegre ve tasarım yöntemi uygulanmalıdır. Besleme katında ise sistemde şebekeye bağlılığı ortadan kaldırmak için; güç kaynağı olarak zaten var olan akü grubundan faydalanılması önerilebilir.

Sistemin ticari ve ülkemiz tarımına katkısı düşünülerek gerekli ekonomik değişiklikler ve tasarımlar yapılmalıdır.

Yurdumuzda toplu ulaşım araçlarının çevre kirliliğine büyük etkisi olduğu ve güneş alma yüzeylerinin büyük olması nedeni ile bu araçlarda güneş enerjisine geçilmesi sera gazı salınımlarını büyük oranda azaltacaktır. Ayrıca toplu ulaşım ücretleri düşürülmüş olacaktır. Bu durumda cazip hale gelen toplu ulaşım araçları küçük araçların kullanımını azaltacak bu araçların çevreye verdiği zararı da ortadan kaldıracaktır. Bu durum ulaşım hatları üzerindeki trafik yoğunluklarını da ortadan kaldıracaktır.

İlimizin zengin güneş potansiyeline sahip olduğu düşünülecek olursa; bu çalışma ilimizde güneş enerjisi çalışmalarına katkıda bulunacaktır. Güneş enerjisi yenilenebilir ve temiz enerji olduğu için ilimizde bu enerjiden faydalanma olanakları artırılmalıdır. Doğu Anadolu bölgesinde kış mevsiminin uzun sürmesi nedeni ile ısınma giderleri aile ekonomisinde büyük bir paya sahip olmaktadır. Deneyle elde edilen ve ölçülen güç değerleri dikkate alındığında görülmüştür ki; güneş enerjisi ısınma giderlerini azaltmak için kullanılabilir.

Yukarıda sayılan avantajlarından dolayı güneş enerjisi projelerine gerekli destek verilmeli ve bu konudaki bilgi ve finansman sorunları çözülmelidir.

## KAYNAKLAR

- Aijuan S. , Yali Cao D. G., 2010.** Study of Based Fuzzy-PID Control for Switched Reluctance Motor, *International Conference On Computer Design And Appliations*, vol 3, 558-561.
- Akcayol, M., 2001.** Bir Anahtarlamalı Relüktans Motorun Sinirsel-Bulanık Denetimi, *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Akkaya R., Kulaksiz A. A.,2004.** A microcontroller-based stand-alone photovoltaic power system for residential appliances, , Elsevier, *Applied Energy* 78 (2004) 419-431
- Anwar M. N. , Husain I. , Radun A. , 2001.** A Comprehensive Design Methodology for Switched Reluctance Machines, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 37(6):1684-1692
- Arifujjaman Md., Iqbal M.T., Quaicoe J. E.,2009.** Reliability Analysis of Grid Connected Small Wind Turbine Power Electronics, Elsevier, *Applied Energy* 86 (2009) 1617–1623
- Arrouf M., Ghabrour S. 2007.** Modelling and simulation of a pumping system fed by photovoltaic generator within the Matlab/Simulink programming environment, Elsevier, *Desalination* 209 (2007) 23–30
- Assaf M., Seshsachalam D. , Chandra D., Tripathi R. K. , 2005.** DC-DC Converters Via Matlab/Simulink ACMOS05 Proceeding of the 7th WSEAS International Conference on Automatic Control, Modeling And Simulation Pages 464-471
- Aymen, C., Rashad M.K., Ken N. 2010.** A Novel Multi Model Neuro-Fuzzy Based MPPT for Three-Phase Grid-Connected Photovoltaic System, *Solar Energy*, Science Direct
- Bal, G., 2011.** Özel Elektrik Makinaları , Seçkin Yayıncılık, Ankara, 155-175.
- Bay Ö. F. 1996.** Anahtarlamalı Relüktans Motorun Bulanık Mantık Tabanlı Modellenmesi Ve Kontrolü, *Doktora Tezi*, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Belliwali S., Chakravarti A. , Raju A. B., 2011.** Mathematical Modelling and Simulation of Directly Coupled PV Water Pumping System Employing Switched Reluctance Motor, *IEEE Pes Innovative Smart Grid Technologies–INDIA*

- Belmili H., Salah M.A.C., Haddadi M., Larbes C.,**2010.Design and development of a data acquisition system for photovoltaic modules characterization *Renewable Energy* 35 (2010) 1484-1492
- Benlarbi K., Mokrani L., Nait-Said M.S. ,** 2004.A Fuzzy Global Efficiency Optimization of a Photovoltaicwater Pumping System ,*Science Direct ,Solar Energy* 77 203-216
- Betka A. , Attali A.** 2010.Optimization of a photovoltaic pumping system based on the optimal control theory, *Science Direct, Solar Energy* 84 (2010) 1273–1283
- Bose, B. K., Miller T. J. E., Szczesny P. M., Bicknell W. H.,** 1986, Microcomputer Control of Switched Reluctance Motor, *IEEE Transaction on Industry Applications*, Vol. IA-22,No. 4, pp. 708–715, July/August.
- Brunelli D., Dondi D., A.Bertacchini, L.Larcher, P.Pavan, L.Benini,**2009. Photovoltaic Scavenging Systems: Modeling and Optimization, *Elsevier Microelectronics Journal* 40 (2009) 1337–1344
- Cacciato M., Consoli A., Scarcella G. , Scelba G..** 2008. A Switched Reluctance Motor Drive for Home Appliances with High Power Factor Capability ,*IEEE*
- Chandrasekaran N.,B. Ganeshprabu, K. Thyagarajah,** 2012. Comparative Study of Photo voltaic Pumping System Using a DC Motor and PMDC Motor *IEEE-International Conference On Advances In Engineering, Science And Management (ICAESM -2012)* March 30, 31, 129
- Chang Hung-C. , Liaw C..** 2009. A Battery Powered Switched-Reluctance Motor Drive Established using Three-Phase Power Module
- Chung I.,Liu W.,S.K. ,Cartes D.**2011. Integration of a Bi-directional DC-DC Converter Model Into a Real-time System Simulation of A Shipboard Medium Voltage DC System, *Elsevier ,Electric Power Systems Research* 81 (2011) 1051–1059
- Çalışır S. ,Şeflek A.Y.,Erkol A.,**2002. Sulama Pompaj Tesislerinde Pompa Seçimine Etki Eden Faktörler, *KHGM web sitesi Kütüphane Yayınları, Ankara*
- Delshad M., Hosein F.,**2011.A new soft switched push pull current fed converter for fuel cell applications ,*Elsevier ,Energy Conversion and Management* 52 (2011) 917–923.
- Dursun, M.,** 2002. Anahtarlamalı Relüktans Motorla Su Pompası Tahriki , *Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.*
- Ehsan A., H. Farzanehfard,**2009 Soft Switching Bidirectional DC–DC Converter for Ultracapacitor–batteries Interface, *Elsevier Energy Conversion and Management* 50 (2009) 2879–2884.

- Elgendy M.A., Zahawi B., Atkinson D. J.,** 2010.Comparison of Directly Connected and Constant Voltage Controlled Photovoltaic Pumping Systems IEEE Transactions On Sustainable Energy, Vol. 1, No. 3, October 2010.
- Fakham H. , Di L., Bruno F. ,** 2011. Power Control Design of a battery charger in a Hybrid Active PV generator for loadfollowing applications IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol. 58, Iss. 1 , pp. 85-94, Jan., TIE-09-1370
- Fenercioğlu A.,** 2006. Helisel Yapılı Anahtarlamaalı Relüktans Motorun (Hy-Arm) Tasarımı Ve Analizi, *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Ankara.
- Guo L., Hung J.Y., Nelms R.M. .**2011.Comparative Evaluation of Sliding Mode Fuzzy Controller and PID Controllerfor a Boost Converter ,Elsevier, Electric Power Systems Research 81 (2011) 99–106.
- Gürdal O.,** 2001. Elektrik Makinalarının Tasarımı, *Atlas Yayın Dağıtım*, İstanbul, 201-240.
- Gökelim, A. T.** 2001 .“Pompalar” , Birsen Yayınevi İstanbul, 1–12.
- Grundfos, 2012.** Pompa El Kitabı.
- Gücüyetmez M.** 2005. Anahtarlamaalı Relüktans Motorlarda Akustik Gürültünün Azaltılması Yüksek Lisans Tezi Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri
- Güçlü S.,** 2009. Dumlupınar Üniversitesi Merkez Kampüs Çevre Aydınlatma Elektrik Enerjisinin Güneş Enerjisi İle Sağlanması Yüksek Lisans Tezi Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya
- Güvenç U., Y.Sönmez,C. Yılmaz, H. H. Sayman,** 2009 .Anahtarlamaalı Relüktans Motorun Doğrudan Moment Denetimi POLİTEKNİK DERGİSİ, CİLT 12, SAYI 4
- Hasaneen B. M. , Elbaset M. A. A.,** 2008 Design And Simulation Of DC/DC Boost Converter, IEEE ,The Twelfth International Middle East Power System Conference, MEPCON'2008, South Valley University, Faculty of Eng., Aswan, Egypt, Vol. I, March 13-15, 2008
- Khemissi L., B. Khiari, Ridha A., Adnane C.,** 2011.Low Cost and High Efficiency of Single Phase Photovoltaic System Based on Microcontroller ,Sciencedirect, Solar Energy 86 (2012) 1129–1141

- Kim H., Kim J., Kim H., Lee K., Kim J., Yoo D., Shin D.** , 2010. A high efficiency photovoltaic module integrated converter with the asymmetrical half-bridge flyback converter, Sciencedirect, Solar Energy 84 (2010) 1376–1381.
- Konstantopoulos G. C., A T. Alexadridis.** 2011. An Innovated Nonlinear Voltage Regulator For dc/dc Converters: Theoretical And Experimental Results On Pv Applications, IEEE.
- Kordkheili R.A., Asrami Y.M., Sayidi A.M.,** 2010. Making DC-DC Converters Easy to Understand for Undergraduate Students, Conference on open systems, IEEE.
- Krishnan, R.,** 2001, Switched Reluctance Motor Drives Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications, CRC Press.
- Kun D., XinGao B., HaiHao L.,** 2011. Matlab Simulink Based Modeling to Study the Influence of Nonuniform Insolation Photovoltaic Array, College of Mechanical & Electronics Engineering ,IEEE, China.
- Lee H.H., Phan Q. D., Le D.K., Le M. P., Nguyen T.D. V.,** 2010. The New Maximum Power Point Tracking Algorithm using ANN-Based Solar PV Systems 978-1-4244-6890-4/10, IEEE.
- Marcelo G. V., Jonas R. G., Ernesto R.F.,** 2009. Modeling And Circuit Based Simulation Of Photovoltaic Arrays ,IEEE, University of Campinas (UNICAMP), Brazil.
- Mellit A., H. Rezzouk , A. Messai , B. Medjahed,** 2011. FPGA-Based Real Time Implementation of MPMPT-controller for Photovoltaic Systems, Renewable Energy, Elsevier.
- Miller T. J. E.,** 2001, Electronic Control of Switched Reluctance Machines, Newnes Power Engineering Series.
- Moghbelli H., Adams G. E., Hoft R. G.,** 1991, Performance of a 10 Hp Switched Reluctance Motor and Comparison with Induction Motors, IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 27, No. 3, 531– 538, May/June.
- Mohan N., Undeland T.M., Robbins P.W.** 2007, Güç Elektroniği, İkinci Baskı, Literatür Yayıncılık, İstanbul.
- Mona N. E., A. Zaki,** 1997. A Maximum Efficiency Photovoltaic Induction Motor Pump System A Renewable Energy, Vol. 10, No. 1, pp. 53 60, Elsevier Science.
- Mukund R P.** 1999. Wind And Solar Power Systems, CRC Press, Fırat Üniversitesi Kütüphanesi, Elazığ.

- Nema S., Nema R.K., Agnihotri G.** 2010, Matlab / simulink Based Study of Photovoltaic Cells / modules / array and Their Experimental Verification Volume 1, Issue 3, 2010 pp.487-500 ISSN 2076-2895 (Print), ISSN 2076-2909 IEEF International Energy & Environment Foundation.
- Omaç, Z.,** 2006. Yeni Bir Anahtarlı Relüktans Motorun Tasarımı Ve Akım Kontrolü, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Öksüztepe, E.,** 2008. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorların Algılayıcısız Kontrolü, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Pırog S., Stala R., Stawiarski L..** 2009. Power electronic converter for photovoltaic systems with the use of FPGA-based real-time modeling of single phase grid-connected systems Bulletin of The Polish Academy of Sciences Technical Sciences Vol. 57, No. 4.
- Polat, M.,** 2010. Anahtarlmalı Relüktans Motorda Algılayıcısız Konum Kontrolü Ve Moment Dalgalılığın Azaltılması, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Ponniran A. , Said A. F. M.** 2009,DC-DC Boost Converter Design for Solar Electric System IEEE, International Conference on Instrumentation, Control & Automation ICA2009, Bandung, Indonesia
- Pradeep E., Ganeshmurthy R. , Sekar K., Arun E. ,** 2011.Automation of PV Farmers Pump,Chennai and Dr.MGR University Second International Conference on Sustainable Energy and Intelligent System (SEISCON 2011), IEEE,Dr. M.G.R. University, Maduravoyal, Chennai, Tamil Nadu, India. July. 20-22, 2011.
- Rahman K M., Fahimi B., Suresh G. , Rajarathnam A.V., Ehsani M.** 2000.Advantages of Switched Reluctance Motor Applications to EV And HEV:Design and Control Issues, IEEE Transactions On Industry Applications, Vol. 36, No. 1, 111-121,January/February.
- Sefa, İ.,** 1997. Sliding Mode Yaklaşımı ile Anahtarlmalı Relüktans Motorun Hız Kontrolü, *Doktora Tezi*, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Soler-Bientz R, Ricalde-Cab L., Barahona P. L. F. , Carrillo B.J. G.,**2011.Study Of A Pv-Wind System In Tropical Conditions,IEEE.
- Staley A.M.,**2001.Design and Implementation of A Novel Single-PhaseSwitched Reluctance Motor Drive SystemMaster of ScienceinElectrical Engineering Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University



**Sunan M.**,2006. Güneş Enerjisi ile Çalışan Aracın Elektrik Ve Elektronik Sistemini Mikrodenetleyiciler İle Tasarım Ve Uygulaması, *Yüksek Lisans Tezi*, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.

**Thammasiroj W., Nuchkrua T., S. Ruayariyasub, 2010.** Sliding Mode Control for Stabilizing DC-link of DC-DC Converter in Photovoltaic Systems 2010 2nd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems

**Tsengenes G., Adamadis G.**2011. Investigation of the Behavior of a Three Phase Grid-Connected Photovoltaic System to Control Active and Reactive Power, Elsevier, Electric Power Systems Research 81 (2011) 177–184.

URL-1, [www.yegm.gov.tr/turkce/YEK/gunes/gunes.html](http://www.yegm.gov.tr/turkce/YEK/gunes/gunes.html) ,31.08.2012

URL-2, [www.yegm.gov.tr/MyCalculator/Default.aspx](http://www.yegm.gov.tr/MyCalculator/Default.aspx) , 31.08.2012

URL-3,[www.eie.gov.tr/turkce/yek/gunes/tgunes.html](http://www.eie.gov.tr/turkce/yek/gunes/tgunes.html) , 01.09.2012

URL-4,[www.eie.gov.tr/turkce/YEK/gunes/gunespv.html](http://www.eie.gov.tr/turkce/YEK/gunes/gunespv.html) ,01.09.2012

URL-5, [www.eie.gov.tr/turkce/YEK/gunes/pvilke.html](http://www.eie.gov.tr/turkce/YEK/gunes/pvilke.html) , 07.09.2012

URL-6,

[www.eere.energy.gov/basics/renewable\\_energy/pv\\_cell\\_conversion\\_efficiency.html](http://www.eere.energy.gov/basics/renewable_energy/pv_cell_conversion_efficiency.html) ,01.09.2012

**Venkatesan G., Arumugam R. , Vasudevan M. , Paramasivam S., Vijayan S.** 2006.Modeling and Simulation of a Novel Switched Reluctance Motor Drive Systemwith Power Factor Improvement American Journal of Applied Sciences 3 (1): 1649-1654, ISSN 1546-9239,Science Publications.

**V. Di Dio, D. L. Cascia, R. Miceli,C. Rando,**2009 A Matemathical Model to Determine the Electrical Energy Production in Photovoltaic Fields Under Mismatch Effect,IEEE.

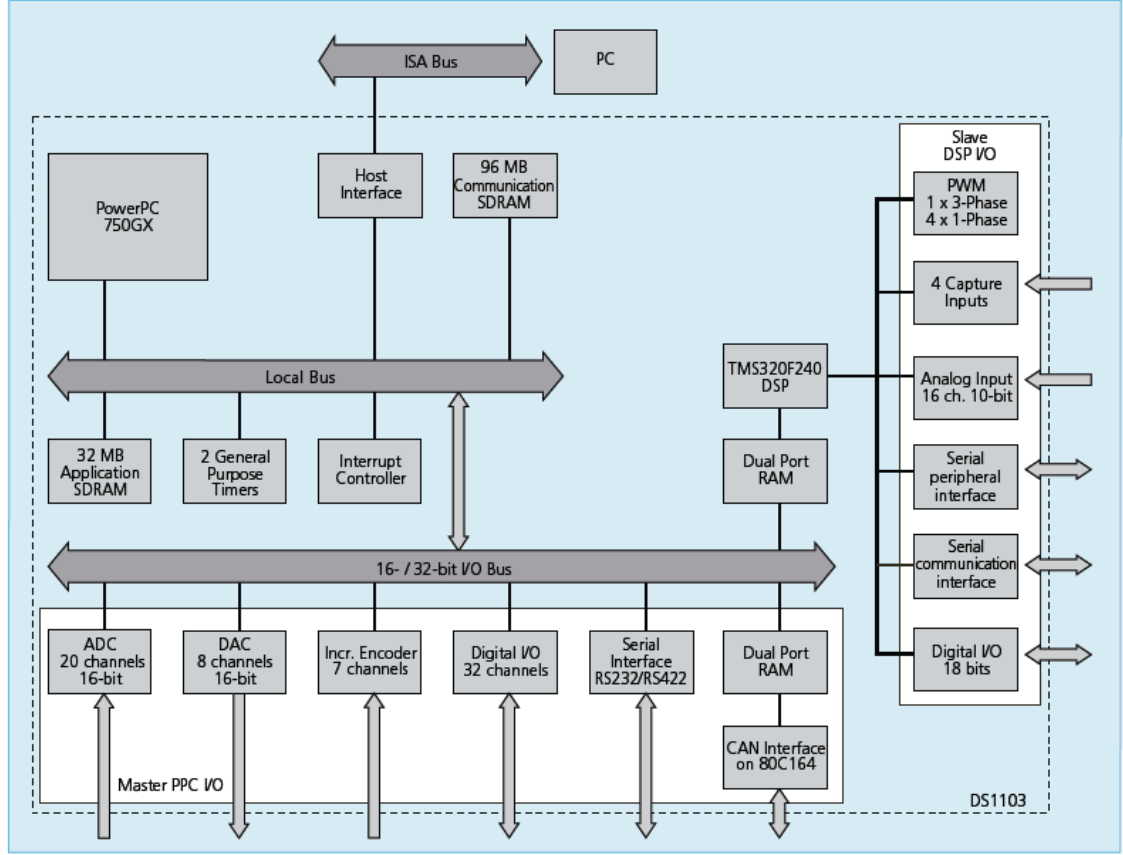
**Woo-Young C. , J.Lai** 2010. High-efficiency Grid-connected Photovoltaic Module Integrated Converter System With High-speed Communication Interfaces for Small-scale Distribution Power Generation, Elsevier, Solar Energy 84 (2010) 636–649.

**Wang Fa-Qiang, Ma X.** 2011. Stability and Bifurcation In A Voltage Controlled Negative-output KY Boostconverter, Elsevier, Physics Letters A 375 (2011) 1451-1456.

- Wu, W., Dunlop, J.B., Collocott, S.J., Kalan, B.A., 2003.** Design Optimization of a Switched Reluctance Motor by Electromagnetic and Thermal Finite-Element Analysis, *IEEE Transactions on Magnetics*, 39(5):3334-3336.
- Xie Guang-jun ,Hai-bin F., Xin C., 2010.**Non-ideal Models and Simulation of BoostConverters Operating in DCM International Journal of Computer and Electrical Engineering, Vol. 2, No. 4, August, 2010 1793-8163.
- Yenice O. T. 2009.** Sulamada Pompaj, Hazırlayan Tarım Ve Köyışleri Bakanlığı Tarım Reformu Genel Müdürlüğü, Ankara

## EK-1

DS1103 denetleyici kartın iç mimarisi Şekil Ek1.1 de verilmiştir.



Şekil Ek1.1 DS1103 denetleyici kartın iç mimarisi

## **ÖZGEÇMİŞ**

1971 yılında Elazığ'da doğdu. İlk ve Orta öğrenimini Elazığ'da tamamladı. 1988 yılında Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünde lisans eğitimine başladı. 1993 yılında Elektrik-Elektronik Mühendisi olarak mezun oldu.1994 yılında Fırat Üniversitesi'ne bağlı olan F.Ü. Bingöl Meslek Yüksekokulu Elektrik Programında Öğretim Görevlisi olarak çalışmaya başladı. 2009 yılında Tunceli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Yüksek Lisans öğrenimine başladı. Halen Bingöl Üniversitesi TBMYO Elektrik Programında görevine devam etmektedir.