ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORLA SU POMPASI TAHRİKİ

125789

MAHİR DURSUN

DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK EĞİTİMİ

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AĞUSTOS 2002
ANKARA

Mahir DURSUN tarafından hazırlanan ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORLA SU POMPASI TAHRİKİ adlı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Çetin ELMAS

Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından Elektrik Eğitimi Anabilim Dalında Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof.Dr. İsmail COŞKUN

Üye : Prof.Dr. Çetin ELMAS

Üye : Doç.Dr. Güngör BAL

Üye : Doç.Dr. Şeref SAĞIROĞLU

Üye : Yrd.Doç.Dr. Aydın ÇETİN

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET i
TEŞEKKÜR iii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ iv
ŞEKİLLERİN LİSTESİ v
SEMBOLLER VE KISALTMALAR viii

1.GİRİŞ 1

2. SU POMPALARI ve KARAKTERİSTİKLERİ 12
2.1 Giriş
2.2 Endüstriyel Tesislerde Pompaların Kullanılması 13
2.2.1 Endüstriyel pompalama sistemleri 13
2.2.1.1 Doğrudan su pompalama sistemleri 13
2.2.1.2 Kimyasal madde pompalama sistemleri 14
2.2.1.3 Atık madde pompalama sistemleri 15
2.2.1.4 Pompalanacak maddeye göre pompa tipleri 16
2.3 Pompalama Terminolojisi 16
2.3.1 Pompalarda yükseklik kavramı 19
2.3.1.1 Toplam yüksekliğin bulunması 19
2.3.1.2 Emme yüksekliği 20
2.3.1.3 Emme derinliği 21
2.3.1.4 Dalgıç ve düşey şaftlı türbin pompalarda toplam yükseklik hesabı 21
2.3.1.5 Toplam enerjiye karşı mevcut net pozitif emme yüksekliği (NPEY) 22
2.3.1.6 Mevcut (NPEY) Net pozitif emme yüküne karşı gerekli NPEY 23
2.4 Pompa Performans Eğrileri 24
2.4.1 Verim eğrileri 24
2.4.2 Pompa güç eğrileri 24
2.4.3 Yükseklik-kapasite eğrileri 25
2.4.4 NPEY eğrileri 26
2.4.5 Güç ihtiyacının belirlenmesi ve bu güce uygun motor seçimi 27
2.5 Genel Santrifuj (merkezkaç) Pompalar 28
2.5.1 Santrifuj pompaların çalışma prensipleri 29
2.5.2 Santrifuj pompaların bölümleri 30
2.5.3 Santrifuj bir pompanın manometrik yüksekliği 31
2.5.4 Politropik yükseklik 32
2.5.5 Santrifuj pompalarda güç ve tork ifadeleri 33
2.5.6 Gerçek çalışma şartlarında karakteristik eğrinin durumu 36
2.5.7 Özgül hız ve benzerlik 37
2.5.8 Özgül hıza göre pompanın genel karakteristiğinin değişimi 38
2.5.9 Santrifuj pompalarda verim ve verimli çalışma bölgesi 39
2.5.10 Pompalarda kavitasyon 40
2.5.11 Hız değişiminin pompa karakteristiğine etkisi 42
2.5.12 Devir sayısının verim üzerindeki etkisi 43

3.ARM'nin YAPISI VE KARAKTERİSTİKLERİ 46

3.1 ARM'nin yapısı 48
3.2 ARM'nin Çalışma Prensibi 49
3.3 ARM'de Enerji Dönüşümü, Tork Üretimi ve Endüktans Değişimi 51
3.4 Doyumsuz ARM'nin Özel Durumu 56
3.5 Ortalama Tork Üretimi 57
3.6 Dinamik Çalıştırma 61
3.6.1 Bir darbelik çalışma 61
3.6.2 Kıyıcılı akım regülasyonu 62
3.7 Faz Endüktansının Modeli 63
3.8 ARM'nin Eşdeğer Devre Modeli 64
3.9 ARM'nin Tork-Hız Karakteristiği 66
3.10 ARM'nin Dinamik Eşitlikleri 67
3.11 ARM'ler İçin Sürücü Seçim ve Tasarım Kriterleri..... 68
3.11.1 ARM'nin besleme devreleri 69
3.11.2 ARM'de komütasyon işlemi 69
3.11.3 Güç anahtarı seçimi 71
3.12 ARM Denetim Teknikleri 72
3.12.1 Sensörlü çalışmaya dayalı denetim teknikleri 73
3.12.2 Bulanık mantık denetleyici ve yapay sinir ağları ile modelleme 74
3.12.3 Kayma kipli denetim..... 75
3.12.4 Değişken yapılı sistem ve ARM'ye uygulanması 76
3.13 ARM için Konvertör Tasarımı 77
3.13.1 Anahtarlama modlu DA-DA konvertörler..... 77
3.13.2 DA-DA konvertör çeşitleri 78
3.13.3 DA-DA Konvertörün PWM tekniği ile denetimi 79
3.13.4 ARM için sert anahtarlamalı konvertör devreleri 80
3.13.5 Buck (gerilim azaltan) konvertör 85
3.13.6 Buck konvertördeki akım gerilim ilişkileri 87
3.13.7 Buck konvertörlerin tasarım faktörleri 88
3.13.8 Buck konvertörlerin durum denklemlerinin oluşturulması..... 88
3.13.8.1 Anahtarın kapalı olması durumu 88
3.13.8.2 Anahtarın açık olması durumu 90
3.14 Buck Konvertörlü ARM'nin PI Tekniği ile Hız Denetimi Simülasyonu..92

4. ARM ile SU POMPASI TAHRİKİ..... 100
4.1 ARM Hız Denetimi Bölümü 100
4.1.1 Besleme gerilimi..... 101
4.1.2 Anahtarlama bölümü..... 101
4.1.3 Alçak geçiren filtre 101
4.1.4 Serbest döngü diyodu 102
4.1.5 Klasik konvertör devresi 102
4.1.6 Akım algılama ve indeks işareti 106
4.1.7 Denetleyici 106
4.1.7.1 Denetleyici yazılımı 107
4.1.7.2 Denetleyici donanımı 109
4.1.7.3 Tuş takımı 109
4.1.7.4 LCD karakter kümesi 111

4.1.7.5 PIC16F877'nin programlanması 111
4.2 ARM'nin Tuş Takımı ile Çalışmaya Başlatılması 112
4.2.1 ARM çalışırken hızın değiştirilmesi 113
4.3 Su Pompası 114

5. UYGULAMA SONUÇLARI ve DEĞERLENDİRME 115
5.1 Yöntem 115
5.2 Asenkron Motorla Su Pompasının Tahriki 115
5.2.1 Asenkron motorun boşta çalıştırılması 117
5.2.2 Asenkron motorla su pompasının tahrik edilmesi 117
5.3 ARM Uygulamaları 122
5.3.1 ARM'nin boşta çalıştırılması 122
5.3.2 ARM ile su pompasının tahrik edilmesi 126
5.3.3 ARM sabit hızda döndürülerek çıkış vanasıyla debi denetimi 126
5.3.4 ARM hızının değiştirilerek debi denetimi 129
5.4 Çıkış vanasıyla debi denetiminde ARM'li ve asenkron motorlu pompa sistemlerinin verim ve toplam yükseklik yönünden karşılaştırılması ... 132
5.5 Asenkron motor ve ARM'li pompalama sistemlerinde debi denetiminin sistem maliyeti bakımından karşılaştırılması 134

6. SONUÇ VE ÖNERİLER 138

KAYNAKLAR 141

ÖZGEÇMİŞ 147

ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORLA SU POMPASI TAHRİKİ
(Doktora Tezi)

Mahir DURSUN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ağustos 2002

ÖZET

Bu tezde, hız denetimi yapılan anahtarlamalı relüktans motor (ARM), doğrusal olmayan karakteristiğe ve düşük verime sahip bir su pompasını tahrikte kullanılmıştır. Su pompasının debi ve basma yüksekliği, pompanın hızı değiştirilerek denetlenmiştir. Elde edilen uygulama sonuçları, ARM ile çalıştırılan pompa sisteminin toplam veriminin, aynı güce sahip asenkron motor ile çalıştırılan pompa sisteminin toplam veriminden %27,62 daha yüksek olduğunu göstermiştir.

ARM'nin hız denetimi, PIC16F877 mikrodenetleyici ile tasarlanan bir denetleyicide PI tekniği kullanılarak sağlanmıştır. Motorun faz akımları tasarlanan klasik konvertör, hız ise gerilim azaltan (step-down) konvertör ile denetlenmiştir. Motorun hızı, su pompasının emme ve basma yükseklikleri tasarlanan deney düzeneğinde bulunan 2x16 karakterli LCD ekranda gözlenebilmekte, 16 karakterli tuş takımı ile motor hızı değiştirilebilmektedir.

Bilim Kodu : 626.01.01
Anahtar Kelimeler : ARM, Hız denetimi, Su pompası, PIC16F877
Sayfa Adedi :147
Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Çetin ELMAS

WATER PUMP SYSTEM DRIVEN BY SWITCHED RELUCTANCE MOTOR

(PhD Thesis)

Mahir DURSUN

GAZ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
August 2002

ABSTRACT

In this thesis, a speed controlled switched reluctance motor (SRM) has been used to drive a water pump that has nonlinear characteristics and low efficiency. Capacity and total head have been adjusted by changing the speed of the water pump. Experimental results show that efficiency of the water pump system driven by a SRM is %27,62 much higher than efficiency of the water pump system driven by induction motor that has equal power rating with SRM.

The SRM was controlled with microcontroller PIC16F877. A classical converter for both operation and the current control, and a step-down converter for speed control and the voltage control of the SRM were designed and implemented. The motor speed, input and output heads can be observed on a LCD display with 2x16 characters, and the motor reference speed can be set, or altered by a 16 characters push-button set placed on the experimental set.

Science Code : 626.01.01
Keywords :SRM, Speed control, Water pump, PIC16F877
Page number :147
Adviser : Prof. Dr. Çetin ELMAS

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım, katkı ve yönlendirmeleriyle sabırla destekleyen değerli hocam Prof. Dr. Çetin ELMAS'a, tezin oluşumunda büyük katkıları bulunan Doç. Dr. Şeref SAĞIROĞLU ve Doç. Dr Güngör BAL'a, manevi desteğini her zaman yanımda hissettiğim ve tecrübelerinden her zaman büyük istifade ettiğim Yrd. Doç. Dr. Aydın ÇETİN'e teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Bu vesile ile bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım bütün hocalarıma, arkadaşlarıma ve her zaman destek olan, sabırla destekleyen aileme teşekkürlerimi sunarım.

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 5.1 Asenkron motor boşta çalışırken ölçülen akım, gerilim, şebekeden çektiği güç ve Cosϑ değerleri 117

Çizelge 5.2 Asenkron motorla su pompası tahriki uygulama sonuçları 118

Çizelge 5.3 ARM'nin boşta çalışmasında hıza göre çektiği güç ve faz gerilimleri 123

Çizelge 5.4 ARM'nin su pompası tahrikinde çıkış vanasıyla debi denetimi uygulama sonuçları 127

Çizelge 5.5 ARM'nin su pompası tahrikinde hız değiştirilerek debinin denetimi uygulama sonuçları 130

Çizelge 5.6 Asenkron motorun yıldız üçgen metoduyla kalkındırmada Seimens firmasına ait malzemelerin fiyatları ve toplam maliyet 135

Çizelge 5.7 Frekans konvertörü ile yapılan değişken sürücülü debi denetimi için kullanılan malzemelerin fiyatları ve toplam maliyet 135

Çizelge 5.8 ARM ile yapılan denetimde kullanılan malzemeler ve toplam maliyeti 136

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1 Tipik bir doğrudan su besleme sistemi şeması 14

Şekil 2.2 Ölü uçlu ve devir daimli sıcak su pompalama sistemleri şeması 14

Şekil 2.3 Atık madde pompalama düzeni şeması 15

Şekil 2.4 Kimyasal atık madde pompalama sistemi şeması 15

Şekil 2.5 Emme derinliği ile çalışan pompa 17

Şekil 2.6 Emme yüksekliği ile çalışan pompa 18

Şekil 2.7 Statik yükün uygulama resmi 19

Şekil 2.8 Emme yüksekliği şartında toplam yüksekliğin hesaplanması ... 20

Şekil 2.9 Emme derinliği şartında toplam yüksekliğin hesaplanması 21

Şekil 2.10 Mevcut NPEY-emme derinliği şartı 23

Şekil 2.11 Pompa performans eğrileri 25

Şekil 2.12 Yükseklik kapasite(debi) eğrisi 26

Şekil 2.13 Güç çeşitleri ve yerleri 27

Şekil 2.14 Tek girişli santrifuj pompanın kesit görünüşü şeması 30

Şekil 2.15 Teorik ile gerçek hız üçgeni arasındaki fark 36

Şekil 2.16 Gerçek çalışma şartlarında karakteristiğe geçiş şeması 37

Şekil 2.17 Üç farklı çark tipi ve bunlara ait genel karakteristik eğrileri 39

Şekil 2.18 Özgül hız ve debiye bağlı olarak pompa verimi 40

Şekil 2.19 Kavitasyonsuz çalışmaya karşı gelen $H_m = f(Q)$ karakteristiği 42

Şekil 2.20 Devir sayısı ile karakteristiğin değişimi 44

Şekil 2.21 Devir sayısı ile verimin değişimi 45

Şekil 3.1 8/6 Kutuplu bir ARM'nin kesit görünüşü 48

Şekil 3.2 8/6 kutuplu ARM ve yarı köprü tipi sürme devresi 49

Şekil 3.3 Rotor pozisyonu ve akım değerlerine bağlı olarak endüktans değişimi ile pozitif- negatif tork darbeleri 52

Şekil 3.4 Dört fazlı bir ARM'de üst üste binmenin olmadığı durumda faz akımları 53

Şekil 3.5 Depo edilen alan enerjisi W_f ve koenerji W^*'nin tanımı 53

Şekil 3.6 Sabit akımda koenerjinin değişme oranı ile ani torkun değişimi ..54

Şekil 3.7 Sıfır hava boşluğu ile en iyi B/H eğrisi veren ideal doyumlu nüve malzemesiyle elde edilebilen mıknatıslama eğrisi..... 55

Şekil 3.8 Manyetik doyma olmayan bir motorda mıknatıslama eğrileri 56

Şekil 3.9 Ortalama tork enerji dönüşüm çevrimi,(a) transistör iletim peryodu, (b) diyot iletim peryodu, (c) toplam peryot 59

Şekil 3.10 Bir darbelik ideal endüktans, manyetik akı ve akım dalga şekilleri 61

Şekil 3.11 Akım regülasyonu ve sert anahtarlama 63

Şekil 3.12 Kosinüs teoremine göre elde edilen endüktans eğrileri 64

Şekil 3.13 ARM nin bir fazı için eşdeğer devre 65

Şekil 3.14 ARM'nin genel tork-hız karakteristiği 66

Şekil 3.15 ARM'de komütasyon işlemi (a) Basitleştirilmiş devre b)Dalga şekilleri 70

Şekil 3.16 ARM için kullanılan genel bir hız denetim sistemi yapısı 73

Şekil 3.17 Bir DA-DA konvertör sistemi blok diyagramı 78

Şekil 3.18 PWM denetim sinyali üretimi blok diyagramı 79

Şekil 3.19 PWM tekniğinde, testere dişi sinyal ile denetim sinyalinden çıkış geriliminin ayarlanması şeması 80

Şekil 3.20 Klasik konvertör devresi 81

Şekil 3.21 n+1 Konvertör devresi 82

Şekil 3.22 Split-link DA konvertör devresi 83

Şekil 3.23 Bifılar sargılı konvertör devresi 83

Şekil 3.24 C-Dump konvertör devresi 84

Şekil 3.25 Söndürme dirençli konvertör devresi 84

Şekil 3.26 Çift eğimli konvertör devresi 85

Şekil 3.27 Buck konvertör ve 4 fazlı ARM'ye bağlantı şeması 86

Şekil 3.28 Buck konvertörden beslenen bir yük akımının dalga şekli 87

Şekil 3.29 Anahtar kapalı iken buck konvertörün eşdeğer devresi 89

Şekil 3.30 Anahtar açık iken buck konvertörün eşdeğer devresi 91

Şekil 3.31 Program akış diyagramı..... 94

Şekil 3.32 115 V kaynak geriliminde 8/6 kutuplu ARM'nin boşta kalkınmada hızın zamana göre değişimi..... 95

Şekil 3.33 115 V kaynak gerilimiyle boşta kalkınmada ARM'nin 4 faz akımı 96

Şekil 3.34 ARM'nin anma hızda boşta çalışmada A fazının büyütülmüş şekli..... 97

Şekil 3.35 ARM'nin 115 V kaynak gerilimi ile 1000 dev/dk hızda çalışması durumunda hız-zaman grafiği 97

Şekil 3.36 ARM'nin 115 V kaynak gerili ile 750 dev/dk boşta çalışma hızı .98

Şekil 3.37 500 dev/dk hızda 115 V kaynak geriliminde hızın dalga şekli 99

Şekil 3.38 ARM'nin 260V ile kalkınmasında hızın zamana göre değişimi ...99

Şekil 4.1 ARM uygulama devre şeması 100

Şekil 4.2 Klasik konvertör devresi ile ARM'nin sürücüye bağlantı uçları.. ..103

Şekil 4.3 Klasik konvertör devresi bir fazı ile motor bir fazının bağlantısı ve koruma devresi şeması 104

Şekil 4.4 IGBT sürme devresindeki 9 adet sürme devresinden bir tanesine ait açık devre şeması 105

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON

Şekil 4.5 IGBT'nin eşdeğer devre şeması 105

Şekil 4.6 PIC16F877 mikrodenetleyicilerle gerçekleştirilen denetleyici program yapısı 108

Şekil 4.7 Gerçekleştirilen denetleyicinin açık devre bağlantısı şeması 110

Şekil 4.8 ARM sürme devresinin fotoğrafı 112

Şekil 4.9 ARM ve pompa uygulama devre şeması 114

Şekil 5.1 ARM ile su pompası tahriki deney düzeneği fotografı. 115

Şekil 5.2 Asenkron motorun çeşitli frekanslarda hıza göre tork değişimi .. 116

Şekil 5.3 Santrifuj pompa hız-tork grafiği 116

Şekil 5.4 Asenkron motorun çektiği güç ve pompa tarafından işe dönüştürülen su gücü 120

Şekil 5.5 Asenkron motorla 1453 dv/dk hızda yapılan tahrikte toplam yükseklik ve verimin debiye göre değişimi 121

Şekil 5.6 ARM faz geriliminin hıza göre değişimi 123

Şekil 5.7 ARM'nin hıza ile şebekeden çektiği toplam akım 124

Şekil 5.8 ARM 1500 dev/dk hızda boşta çalışırken faz akımlarının şekli ... 125

Şekil 5.9 ARM'nin boşta çalışmada hız ile şebekeden çektiği gücün değişimi..... 125

Şekil 5.10 ARM ile pompa tahrikinde çıkış vanasıyla yapılan debi denetiminde verim ve toplam yüksekliğin değişimi 128

Şekil 5.11 ARM ile pompa tahrikinde debi değişiminde harcanan güç ve su gücü 129

Şekil 5.12 ARM hızı ile toplam yükseklik değişimi 131

Şekil 5.13 ARM'nin hızının değişimi ile pompa debisinin değişimi 132

Şekil 5.14 Çıkış vanasıyla debi denetiminde ARM ve asenkron motorun harcadığı güçler ile üretilen su gücünün değişimi 133

Şekil 5.15 Çıkış vanasıyla debi denetiminde ARM ve asenkron motorlu sistemin verim ile toplam yüksekliğinin debiye göre değişimi.....134

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Semboller	Açıklama
ω	Açısal hız
h_1	Emme yüksekliği
h_2	Basma yüksekliği
Hm	Toplam yükseklik
p_1, p_2	Giriş ve çıkış basınçları
d	Sıvının özgül ağırlığı
g	Yerçekimi ivmesi (9.806 m/sn^2)
V_1	Sıvının giriş hızı
V_2	Sıvının çıkış hızı
La,Lb,Lc,Ld	ARM faz endüktansları
Lmax	Faz endüktansının maksimum değeri
Lmin	Faz endüktansının minumum değeri
t_{off}	Kesime geçme zamanı
t_{on}	İletime girme zamanı
V_r	Referans sinyalin genliği
V_a, V_b, V_c, V_d	Fazlar arası gerilimler
$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, ...\alpha_n$	Faz gerilimine ait anahtarlama açıları
τ	Zaman sabiti
C_f	Filtre kondansatörü
C_s	Snubber kondansatörü
f_{sw}	Anahtarlama frekansı
V	DA kaynak gerilimi
V_{cs}	Snubber kondansatör gerilimi
W	Elektromanyetik enerji

W'	Koenerji
W_f	Depo edilen manyetik enerji
W_e	Elektriki enerji
I, i	DA kaynak akımı
i'	Bir önceki sargı akımı
$i_{a,b,c,d}$	Ani faz akımları
J	Toplam atalet momenti
B	Sürtünme katsayısı
ω	Rotorun açısal hızı
ω_n	Rotorun istenilen çalışma (referans) hızı
θ	Rotor pozisyonu
θ_{on}	İletim açısı
θ_u	Uzatma aralığı
θ_{off}	Kesim açısı
θ_e	Söndürme aralığı
ψ	Manyetik akı
M(θ)	Bitişik fazlar arasındaki karşılıklı (mutual) endüktans
T_L	Yük torku
T_e, T	Motorun ürettiği tork
S	Güç anahtarı
$R_{a,b,c,d}$	ARM faz sargı dirençleri
$L_{a,b,c,d}$	ARM faz sargı endüktansları
L_{min}	Sargı endüktansının minumum değeri
L_{max}	Sargı endüktansının maksimum değeri
Nr, Ns	Rotor ve stator kutup sayısı
β_s, β_s	Stator, rotor kutup yayı
α_s, α_r	Rotor stator kutup aralığı (pole pitch)
q	Stator faz sayısı
e	Zıt elektromotor kuvvet
P	ARM tarafından çekilen güç
P_{su}	Enerji kazandırılan suyun gücü

C_v	Sabit hacimdeki özgül ısı
C_p	Sabit basınçtaki özgül ısı

Kısaltmalar

SDD	Serbest dönüşüm diyodu
PWM	Darbe genişlik modülasyonu
AA	Alternatif akım
DA	Doğru akım
IGBT	İzole kapılı bipolar transistör
PC	Kişisel bilgisayar

1. GİRİŞ

Bir sistemin tasarımında sistemin tesis maliyetinin düşük, çalışmasının güvenli ve verimli olması en önemli etkendir. Endüstriyel uygulamalarda sistemin çalışması veya uygulanan işlem gereği çoğu kez sıvı debisi ya da sistem basıncının denetlenmesi gerekir.

Debi ve basınç aralığı, pompa gücünün belirlenmesinde temel rol oynar. Pompa gücü, debi ve basıncın çarpımı ile orantılıdır. Pompayı tahrik eden motorun gücü, pompanın gerektirdiği maksimum güce göre seçilir. Düşük debi ve basınçta çalışmada, motorun çektiği gücün de debi ya da basınçla orantılı olarak azalması beklenir. Fakat klasik basınç ya da debi denetim sistemleri bu beklentiyi sağlamadan oldukça uzaktır[1]. Bu nedenle de klasik debi denetim sistemlerinin verimi düşüktür.

Pompalama sistemlerinin tasarımında, ilerideki ihtiyaçlar göz önünde bulundurularak, debinin %25, yüksekliğin de %10 artırılması yaygın bir uygulamadır[2]. Fakat pompaların maksimum verimli çalışma noktaları maksimum debide sağlandığı için bu seçim yöntemi ile pompaların en iyi verimde çalışma noktasından uzaklaşılır. Ayrıca normal çalışmada debi fazla geldiği için çeşitli metotlarla debi denetimi yapılır.

Debi denetiminde kullanılan klasik yöntemler;

- Geri aktarma,
- Çıkış vanası,
- Periyodik çalıştırma ve
- Kaydırmalı kaplin yöntemleridir[2,3].

Pompa sistemlerinde debi veya basınç denetiminde kullanılan bu yöntemlerin ortak özelliği, pompaların genellikle doğrudan şebekeden beslenen asenkron motorlarla tahrik edilmeleridir. Çıkış vanası kısılarak debi düşürülmesi en yaygın uygulamadır. Fakat bu sistemlerin verimleri oldukça düşüktür ve ilave enerji sarfiyatına da sebep olunmaktadır. Son yıllarda elektrik motorlarıyla

yapılan pompa tahrik ünitelerinde frekans konvertörü ile hızı değiştirilebilen asenkron motorlar kullanılmaya başlanmıştır. Pompa tahrikinde verimi artırmak için farklı motor türlerinin kullanımı ile ilgili araştırmalar da vardır[4].

Elektrik enerjisi ile çalışan pompalama sistemleri, şebekedeki elektrik enerjisinin çok büyük bir miktarını tüketen, endüstriden tarıma, barajlardan evlere kadar çok farklı alanlarda kullanımı kaçınılmaz olan sistemlerdir[2]. Fakat, pompa yükünün doğrusal özellik göstermeyişi ve kullanılan elektrik motoru ile pompa arasındaki karakteristik uyuşmazlık nedeniyle bu sistemlerin toplam verimleri oldukça düşüktür[5].

Elektrik motorları ile çalışan ve doğrusal olmayan yük sistemleri, elektrik şebekeleri ve tahrik sistemleri için önemli bir problem oluşturmaktadırlar. Su pompalama sistemleri, hava üfleme fanları ve kompresörler gibi sistemler de elektrik sistemlerinde doğrusal olmayan yüklerin önemli bir bölümünü oluştururlar [3].

Pompalama sistemleri evlerde çamaşır makineleri, bulaşık makineleri, kombi cihazları, şehir şebekesine su sağlayan su pompalama sistemleri, tarımsal amaçlı sulama sistemleri ve endüstrideki basınçlı yıkama, yağlama ve taşıma sistemleri gibi çok farklı alanlarda kullanılmaktadır [2,3].

Son yıllarda debi ve basınç denetiminde değişken devirli pompa kullanımı yaygınlaşmaktadır[6,7]. Gelişmiş yöntemlerle debi ve basınç denetiminde, pompayı büyük debili ve yüksek güçlü seçmek yerine mevcut pompanın devrini artırarak sistemin karakteristiğini değiştirmeden istenen debi ya da basınç elde edilebilmektedir. Ayrıca pompaların çalıştırılmasında veya durdurulmasında oluşan darbeyi önlemek veya ilk kalkınma akımlarını sınırlamak için değişken devirli pompa kullanımı kaçınılmazdır[5,8].

Yatay milli santrifuj pompalarda en iyi basma yüksekliği, çark çapının en büyük değerinde elde edilir[1]. Genel pompa uygulamalarında basınç ya da toplam yüksekliğin artmasının istenmediği durumlarda pompa çarkı

tornalanıp küçültülerek basınç ya da toplam yükseklik azaltılmaktadır[8,9]. Pompa karakteristik eğrileri incelenirse çark çapının tornalanarak bir daha eski haline getirilemeyecek şekilde küçültüp en yüksek verimde çalışma noktasından uzaklaşmak yerine, pompayı daha düşük devirlerde döndürerek debi veya basma yüksekliği denetiminin daha uygun bir yöntem olduğu görülür. Hız değiştirilerek debi veya basınç denetiminde, pompanın verimi sabit kaldığı için daha az enerji tüketilir[9].

Mevcut bir sistemdeki debi ya da basıncın yeterli olmadığı durumlarda, pompayı değiştirerek daha büyük güçlü pompa ve elektrik motoru kullanmak yerine, pompa hızını artırarak ihtiyacın karşılanması daha ekonomik olmaktadır. Bu tür sistemler için değişken devirli pompalar daha uygundur[5,9]. Değişken devirli pompalar için değişken devirli motor sürücülerinin kullanılması gerekir[5,6,7].

Pompa tahrik etmede; bir buhar veya gaz türbini, benzin ya da dizel motor hatta rüzgar enerjisi bile kullanılmasına rağmen pompaların %80-90'ı, sincap kafesli elektrik motorları ile tahrik edilirler [8]. Hdyrolic Institute tarafından yapılan bir araştırmada ise gelişmiş ülkelerde tüketilen enerjinin %20'sinin pompalar tarafından tüketildiği ve iyi bir pompa sistemi tasarımı ile tüketilen bu enerjinin %30 azaltılabileceği belirtilerek pompalama sistemlerinin elektrik enerjisinin tüketimindeki önemi vurgulanmaktadır [3,7].

Sektörlere göre değişmekle birlikte, madencilikte harcanan elektrik enerjisinin %65'i pompa motorlarında harcanmaktadır[1]. Elektrik motorlarında değişken hızlı sürücü ve uygun denetim yöntemi kullanmamaktan dolayı gelişmiş ülkelerde bile %25'e kadar ulaşan bir enerji kaybı olduğu düşünülecek olursa, Türkiye gibi endüstrisinde gelişmiş en son teknolojinin henüz kullanılamadığı ülkelerde bu kayıp oranın daha da büyük olduğu tahmin edilmektedir[5].

Dünyada üretilen elektrik enerjisinin önemli bir kısmı, pompaları tahrik eden elektrik motorlarında tüketildiğinden, debi ve basınç kontrolünde kullanılan

sistemlerin seçimi ve verimli çalışmaları oldukça önemlidir. Debi denetiminin kontrol vanaları ile gerçekleştirildiği klasik yöntemler, artık yerlerini değişken hızlı motor sürücülerin uygulandığı modern sistemlere bırakmaktadır. Pompa sistemlerinde yeni yatırımlar veya modernizasyon projelerinde uygun denetim sisteminin seçimi için başta denetim mantığı olmak üzere; verimlilik, güç faktörü, yatırım ve işletme maliyetleri, tasarım, montaj, güvenilirlik, bakım gibi kriterler dikkate alınmaktadır[5,7].

Bu çalışmada verim kriter olarak seçilerek klasik denetim yöntemleri ile değişken hızlı motor denetim yöntemlerinden ARM'nin pompa sistemlerindeki performansı ve verimi karşılaştırılmıştır.

Uygulamalarda en sık kullanılan santrifuj ve pervaneli pompalarda, genel olarak debi (Q) hız ile doğru, basınç (H) hızın karesi ve güç (P) hızın küpü ile doğru orantılıdır [5,7].

Debinin çıkış vanası ile denetlendiği bir su pompası sisteminde, doğrudan şebekeye bağlı ve tam yükte çalışan asenkron motor kullanılması durumunda, güç faktörü (Cosϑ) genellikle 0.95 civarındadır. Bu değer, motorun küçük güçlü olması veya nominal yükün altındaki çalışmalarında 0.65'e kadar inebilir. Buna göre; gelecekteki olabilecek ihtiyaçları dikkate alarak daha büyük güçlü su pompası ve elektrik motoru kullanmak verim düşmesinin yanında düşük güç katsayısı ile çalışma anlamına gelmektedir. Değişken hızlı sürücülerin kullanıldığı sistemlerde ise, güç faktörü (Cosϑ) 1 civarında olmaktadır[5].

Pompalama sistemlerinde değişken hızlı sürücü kullanılmasının avantajları;

- Değişken hızlı sürücülerle pompa basınç veya debisinin denetimi, klasik sistemlere göre daha az enerji harcayan verimli yöntemlerdir.
- Kontrol vanası gibi diğer denetim sistemlerine göre daha az eleman kullanılır.

- Özellikle küçük güçlü sistemlerde kontrol vanası sistemlerine göre çok daha verimli ve ekonomiktir.
- Değişken hızlı sürücülerin yüksek dinamiği, hassasiyet ve doğruluğu, proses işleminde kontrol vanaları ile ulaşılamayacak kadar hassasiyet ve performans sağlamasıdır.

Sakıncaları ise;

- İşletme sırasında pompa istasyonunda mekanik kaynaklı, hidrolik kaynaklı veya elektrik kaynaklı titreşim problemleri ortaya çıkabilir[10,11] veya
- Kavitasyon oluşabilir[11,12,13,14].

Değişken sürücülerle debi ve basınç denetiminde, diğer yöntemlere göre daha fazla verim elde edilmiş olmasına rağmen, frekans dönüştürücülerle yapılan hız denetimli asenkron motorlarla yapılan pompalama sistemlerinde de pompa ve asenkron motor arasındaki karakteristik uyuşmazlık nedeniyle sistem verimi istenilen optimum seviyede değildir.

n_1 devir sayısı ile döndürülen bir pompanın devir sayısı n_2 yapılırsa yeni bir karakteristik eğri ortaya çıkar [4,12]. Pompa tesisi tasarımında, imalatçılar tarafından verilen karakteristik eğriler kullanılmaktadır. Bu karakteristik eğrilerin çıkarılması sırasında pompanın devir sayısını sabit tutmak amacıyla pompayı döndürmek için ya senkron motor kullanılmakta ya da asenkron motorun hızı çeşitli elektronik devrelerle sabit tutulmaya çalışılmaktadır.

Pompa tesisi uygulamalarında kullanılan asenkron motorların hemen hemen tamamı klasik yıldız/üçgen olarak denetleyicisiz çalıştırılmaktadır. Uygulamada pompa yüklendikçe, pompayı döndüren asenkron motordaki kayma nedeniyle motor hızı ile birlikte pompanın devir sayısı da düşmektedir [8,9]. Pompa tesislerinde asenkron motor kullanılması, pompa imalatçılarının pompa kataloglarında vermiş oldukları karakteristik eğrilerdeki uygun çalışma bölgesi, debi, emme yüksekliği, basma yüksekliği ve verim değerlerinin arasında büyük farklılıklar meydana gelmesine yol açar.

Pompa sistemlerinde verim artışı sağlamak için bu güne kadar literatüre giren çalışmalar; pompa çarkının geometrik şekilleri ve kullanılan malzemelerin kalitelerinin artırılması, yüzey pürüzlülüğünün azaltılması gibi alanlardadır. Pompayı tahrik eden elektrik motorunun bu tür bir yüke uygun olup olmadığının araştırılmamış olması dikkati çekmektedir. Ancak Belmans[4] tarafından TMS320C31 DSP işlemci ile denetlenen Kalman filtre denetimli pozisyon sensörsüz çalıştırılan 3.8 kW senkron relüktans motor güneş enerjisi ile çalıştırılmıştır.

Su pompalama tesislerinde daha yüksek verimli çalışan anahtarlamalı relüktans motor (ARM)'lerin kullanılması, hem enerji tasarrufu yönünden hem de tesisin ve pompanın verimli çalışabilmesi açısından iyi bir seçim olacaktır.

Ayrıca, hızı ayarlanabilir pompa ve kompresör sistemlerine gittikçe artan bir talep gözlenmektedir. Bu sistemler, otomasyona geçmiş fabrikalardaki robotlar ve elektrikli servo sürücüler (ayarlanabilir hız ve pozisyon) ile daha da etkili hale getirilmişlerdir [8]. Değişken hız gerektiren uygulamalarda yük/kapasite oranı ile ilgili olan klima, kompresör ve su pompalarında asenkron motor kullanma yerine değişken hız karakteristiğine uygun ARM kullanımı, sistemin verimini oldukça yükseltecektir.

Son yıllarda, bir çok faktörün bir araya gelmesi ile güç elektroniği alanında ortaya çıkan ilerlemeler, denetleyicilerle de desteklenince farklı alanlarda değişik uygulama kolaylığı sağlamıştır[16]. Mikroelektronik alanındaki endüstriyel gelişme bir çok denetleyicinin de gelişmesine yol açmıştır. Bu alandaki ilerleme yarıiletken malzeme üretim tekniklerindeki ilerlemelerle de desteklenince, güç yarıiletkenlerinin akım ve gerilim tutma kapasiteleri de artmıştır. Böylece güç denetimi oldukça önem kazanarak büyük bir gelişme alanı bulmuştur. Yük/kapasite oranı için; klimalar, su pompaları ve kompresörler güç elektroniği ile güç denetiminin uygulama alanlarıdır [16,18].

Bütün güç dönüşüm sistemlerinde azda olsa bir miktar güç kaybı vardır. Bu güç kaybı, enerjinin boşa gitmesine sebep olup verimi düşürmektedir. Ayrıca

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU

ortaya çıkan ısının sistemden uzaklaştırılması da başlı başına bir problem oluşturmaktadır[16]. Çünkü ortaya çıkan ısının etkilerini azaltmak için sisteme dahil edilen soğutma sistemi gerçek sistemin toplam büyüklüğünü, ağırlığını ve kuruluş maliyetini artırır, verimini ise azaltır.

Güç elektroniğinde ortaya çıkan bu gelişmeler ile denetim tekniğindeki ilerlemeler, yeni araçların ve sistemlerin kullanılabilmesi imkanını sağlamıştır [16]. Bu araçlardan birisi de değişken hızlı sürücülerde kullanım kolaylığı sağlayan anahtarlamalı relüktans motor (ARM)'dir[19]. ARM'nin hız-tork karakteristiği incelendiğinde değişken devirli su pompalarının karakteristiğine çok benzediği görülür. Bu çalışmada birbiriyle uyumlu olan su pompası ile ARM karakteristikleri hakkında ikinci ve üçüncü bölümlerde ayrıntılı bilgi verilecektir.

ARM'ler, tasarımı ilk yapılan motorlardan olmasına rağmen klasik sürücülerle çalıştırılamamışlar ve uzun yıllar kendisine uygulama alanı bulamamışlardır. Bilinen ilk Anahtarlamalı Relüktans Motor (ARM) 1838 yılında imal edilmiş olmasına rağmen 1970'li yıllara kadar denetim güçlüğü nedeniyle kullanılamamıştır[20]. Ancak, son yıllarda güç elektroniği ve denetim tekniğinde meydana gelen büyük ilerlemeler sayesinde, diğer elektrik motorlarına göre verimleri daha yüksek olan bu motorlar, büyük ilgi odağı haline gelmişlerdir. Yarıiletken teknolojinin geliştiği 1960'lı yıllardan sonra ise hızlı bir gelişme kaydetmişlerdir.

İlk ARM uygulamasının, 1838'de Davidson tarafından İskoçya'da Glasgow-Edinburg arasında çalışan lokomotifi hareket ettirmek amacıyla yapıldığı bilinmektedir[20]. Aynı yıllarda 1840'ta W.H. Taylor relüktans motor patentini almıştır[21]. Ancak motorun çalışması için mekanik komitatöre ihtiyaç duyulması ve denetimde ortaya çıkan problemler nedeniyle bu motorlara rağbet olmamıştır. Fakat, 1957 yılında tristörün icadıyla güç elektroniğinde meydana gelen hızlı gelişmeler sayesinde 1960'lı yılların sonunda diğer alanlarla birlikte ARM'lerde de büyük ilerlemeler sağlanmıştır. Çünkü o zamana kadar ARM'lerin sürülmesinde ihtiyaç duyulan mekaniki

komitatörlerin yerini elektronik komitatörler almıştır. Bu gelişmelerin yaşandığı tarihlerde bilgisayar teknolojisinin de gelişimi, ARM'leri kısa sürede ilgi odağı haline getirmiştir.

Aynı zaman diliminde, sınırlı da olsa aynı prensibe dayalı, "döner-hava yastıklı motor", "fırçasız relüktans motor", "değişken relüktans motor" ve "komitasyonlu relüktans motor" gibi değişik isimlerle motorlar tasarlanmıştır [22]. Modern anlamdaki ilk anahtarlamalı relüktans motor, 1972 yılında ABD'de Bedford ve Hoft tarafından gerçekleştirilmiştir [24]. 1974'de eksenel boşluğu da içeren tristör denetimli bir ARM ilk defa Ford Motor Şirketi elemanlarından Unnewehre ve Koch tarafından, 1978'de de Bausch tarafından üretilmiştir[23,24]. Avrupa'da ARM'lerin piyasa değeri Bryne tarafından anlaşılmıştır[25]. 1980'de Lawrenson ve diğerleri, ARM'lerin değişken hızlı sürücülerde kullanılabileceğini göstermişlerdir[26].

Bu çalışmalardan sonra ARM sürücüleri üzerine yapılan çalışmalar büyük ivme kazanmıştır. 1984'te Ray ve diğerleri[27], 1986'da Obradowic[28] ARM'nin çıkış karakteristiklerinin DA seri motoru ile benzer olduğunu göstermiş, kapalı döngü denetim uygulamalarındaki özellikleri Bose ve diğerleri tarafından yayınlanmıştır[29]. 1992 yılında Elmas ve Z. De La Parra tarafından, bu motorun sayısal işaret işlemcileri ile çok geniş hız sınırlarında etkili olarak çalışabildiği gösterilmiştir[30]. 1988 yılında Arumugam[31] , stator ve rotor kutup oranlarının motor performansı üzerine olan etkilerini incelemiş, Çetin[32] ARM'nin pozisyon sensörsüz çalıştırılması, Krishnan ve diğerleri de ARM'lerin tasarımı için gerekli yöntem ve kriterleri yayınlamışlardır[33]. Daha sonraki yıllarda yapılan bilimsel çalışmalar hızla artmış, ARM'lerin yapısı, çalıştırılması ve denetimi ile ilgili literatüre çok sayıda yayın girmiştir.

Yapılan bilimsel çalışmaların yanında, endüstride de ARM'ler üzerine yapılan çalışmalar ve uygulamalar hızla devam etmiştir. Endüstride gücü 100 W-300 kW, hızları da 250-50000 d/d arasında değişen ARM'ler kullanılmaktadır[32]. ARM'lerin kullanım alanını daha da genişletmek amacıyla yapılan çalışmalar sonucu tekstil endüstrisinde sarım amaçlı kullanılmak üzere hızı 30 000 d/d

olan bir ARM geliştirilmiştir. SR Drives Ltd. ise daha da ileri giderek endüstride kullanılmak üzere 750 kW'lık bir ARM üretmiştir. Gerçekleştirilen uygulama alanları arasında; ofis araçları, uzay araçları, otomobil endüstrisi, elektrikli araçlar, radarlar, madencilik, robotlar, tekstil makineleri, servo sistemler, santrifüjler ve elektrikli ev aletleri sayılabilir[22]. Son yıllarda, özellikle elektrikli otomobil endüstrisinde çok geniş kullanım alanı bulmaya başlamışlardır.

ARM'lerin başlıca üstünlükleri sıralanırsa;

- Asenkron motor veya diğer motorlara göre daha basit ve dayanıklı bir yapıya sahiplerdir,
- Basit yapıları nedeniyle düşük maliyetle imal edilebilirler,
- Kalkış torkları yüksektir,
- Diğer motorlara göre daha düşük sıcaklık değerlerinde yüksek hızda çalışabilirler,
- Stator faz sargıları birbirinden bağımsızdır,
- Üretilen tork sargılardan geçen akımın yönünden bağımsızdır,
- Dört bölgede de çalışabilirler,
- Geniş bir alanda sabit tork-güç özelliği gösterirler.
- Doğrusal olmayan yük karakteristiklerinde performansları daha iyi, verimleri daha yüksektir.
- Hız denetimi geniş bir alanda kolayca yapılabilir.

ARM'lerin başlıca sakıncaları ise;

- Anahtarlamalı denetim nedeniyle torkda oluşan dalgalanmalar ve akustik gürültülerin meydana gelmesi,
- Motorun çalışmasında hassas rotor pozisyon bilgisine ihtiyaç duyulması nedeniyle maliyet artışı ve kullanım alanın sınırlı olması,

- Stator ile rotor arasındaki hava aralığının motor torkuna etkisinin büyük olması nedeniyle hava aralığı toleransı küçüktür. Bu da akustik gürültüye sebep olur.

Tork dalgalanması problemi, ileri denetim metotları ile çözülebilir. Hız denetiminin de çok düşük hızlardan çok yüksek hızlara kadar kolaylıkla gerçekleştirilebilmesi nedeniyle bu motorlar, evdeki uygulamalardan uzay çalışmalarına kadar bir çok alanda diğer motorlara alternatif hale gelmektedir.

Elektrik enerjisinin önemli bir bölümünü tüketen ve elektrik motorlarına doğrusal olmayan yük olarak yansımakta olan su pompalarının tahrik edilmesinde diğer elektrik motorlarına göre verimi oldukça yüksek, aynı zamanda yapı bakımından doğrusal olmayan yük karakteristiklerine de oldukça uygun olan ARM'lerin kullanılması önemli miktarda verim artışı sağlayacaktır.

Ülkemizde elektrik enerjisinin, pompalama sistemlerinde kullanım oranı ile ilgili herhangi bir istatistik bilgi yoktur. Amerika Birleşik Devletleri'nde bu konu ile ilgili detaylı bir istatistik çalışması yapılmıştır[1]. Rapor sonucuna göre ülkedeki elektrik enerjisi tüketiminin %32.7'i klima, fan, kompresör, evaparatör, merkezi ısıtma ya da soğutma sistemleri gibi pompa ya da pompa ile benzer yük karakteristiği gösteren her sistemler tararından tüketildiği, bu sistemlerle sabit hızlı motorlar yerine değişken hızlı ve yüksek verimli motorlar ile çamaşır makinalarında %13, evlerdeki fanlı soğutma sistemlerinde %50, klimalarda %75, kompresörlerde %10, merkezi fanlı ısıtma sistemlerinde %29, merkezi kompresörlü ısıtma sistemlerinde %%35, kondanser fanlarında %77 ve kompresörlerde %20 enerji tasarrufu yapılabileceği vurgulanmıştır. Türkiye'de böyle bir istatistik olmasa bile pompalama sistemlerinin toplam verimlerinin ABD'dekinden daha iyi olmadığı açıktır. Bu nedenle pompalama sistemlerinin verimlerinde sağlanacak her artış ülkemize ve enerji tasarrufuna önemli bir katkı sağlayacaktır.

Bu tezin amacı, anahtarlamalı relüktans motorun bir su pompası tesisinde hızını denetleyerek, sistemden en yüksek verimi elde etmektir. Bu tez altı bölümden oluşmaktadır.

Tezin birinci bölümü giriş bölümünden oluşmaktadır ve burada konunun önemi vurgulanmaktadır.

Tezin ikinci bölümünde su pompalama sistemleri tanıtılarak klasik bir pompalama sistemi ve su pompalarının karakteristikleri incelenmiştir ve debi denetim sistemleri hakkında kısa bilgiler verilmiştir.

Üçüncü bölümde, ARM'ler ve karakteristikleri incelenerek matematik modeli çıkartılmış, ARM denetim teknikleri, PWM sinyallerinin elde edilmesi, ARM konvertör çeşitleri tanıtılarak gerilim azaltan bir konvertörün matematik modeli çıkartılmıştır. Matematik modeli çıkartılan konvertörün PI metoduyla ARM'nin hız denetimi simülasyonu yapılmıştır. Simülasyon sonuçları ile pompa karakteristikleri karşılaştırılmıştır.

Dördüncü bölümde, bir önceki bölümde tasarımı ve simülasyonu yapılan ARM'nin hız denetimini sağlamak için denetleyici devresi, sürme devresi ve konvertör tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Beşinci bölümde hız denetimi gerilim ile sağlanan 8/6 kutuplu, 4 kW gücündeki, 1500 d/d nominal hızlı ARM'nin değişik hızlarda, boşta ve su pompası yükü altında çektiği akım ve gerilim değerleri kaydedilmiştir. Pompa yükü altında motorun çektiği akım, gerilim ve güç değerleri ile pompanın emme yüksekliği, basma yüksekliği, pompa devri ve debi değerlerinden pompa karakteristik eğrisi çıkartılmıştır. Daha sonra, 3 kW gücündeki, 6 kademeli santrifuj pompa 4 kW gücünde ve 1435 d/d anma hızındaki asenkron motor ile tahrik edilerek pompa çeşitli yüksekliklerde debi değerleri kaydedilmiştir. Kaydedilen bu değerlerden pompanın verim eğrisi çıkartılmış ve asenkron motor ile ARM'nin verimleri karşılaştırılmıştır.

Çalışmaya ait sonuç ve öneriler altıncı bölümde değerlendirilmiştir.

2. SU POMPALARI ve KARAKTERİSTİKLERİ

2.1 Giriş

Günümüz endüstrisinde pompalar, elektrik motorlarından sonra en yaygın olarak kullanılan makineler olarak bilinmektedir. Pompalama sistemleri endüstride; akışkanların borular içerisinde nakledilmesi, daha yüksek yerlere çıkarılması ya da basınç altında depolanma amacıyla kullanılmaktadır. Hatta çimento ya da başka katı madde taşımasında da pompalama sistemleri kullanılmaktadır[6].

Su sistemleri ise endüstride ve tarımda en yaygın olan pompalama sistemleridir[6]. Dizel veya başka sistemlerle çalışanları da olmasına rağmen tamamına yakını elektrik motorları ile tahrik edilirler. Su şebekeleri ve sıcak su dağıtım sistemleri su pompalama sistemi örnekleridir.

Doğrudan su pompalama sistemi ve onun değişikliğe uğramış türleri fabrikalara su sağlamak üzere kullanılmaktadır. Kimyasal maddelerin suya ilave edilme zorunluluğu olduğu zamanlar, dozaj pompaları bir çok kez sistemin bir parçası haline gelmektedir. Sıcak su dağıtım sistemleri, belirli bir alanda gerekli olan su miktarına bağlı olarak, ya ölü uçlu ya da devir daimli sistemler olabilir[6].

Kimyasal madde pompalama sistemlerinin özel tasarım ve yapı ihtiyaçları vardır. Pompalanacak maddelerin viskozitesi, seçilecek olan pompanın tipini ve enerji gereksinimini belirler. Pozitif yer değiştirmeli pompalar, kimyasal madde pompalama sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadırlar.

Atık madde pompalama sistemlerinde genellikle santrifuj pompa kullanılmaktadır[6]. Bu tür sistemler pompalanacak maddelere bağlı olarak, korozyona dayanıklı malzemelerden yapılırlar.

Pozitif iletimli pompalar ise yüksek viskositeli malzemeleri pompalamak için kullanılırlar. Katı madde pompalama sistemleri de küçük birkaç ayrıntı dışında yüksek viskoziteli madde pompalamasına benzemektedir[6].

2.2 Endüstriyel Tesislerde Pompaların Kullanılması

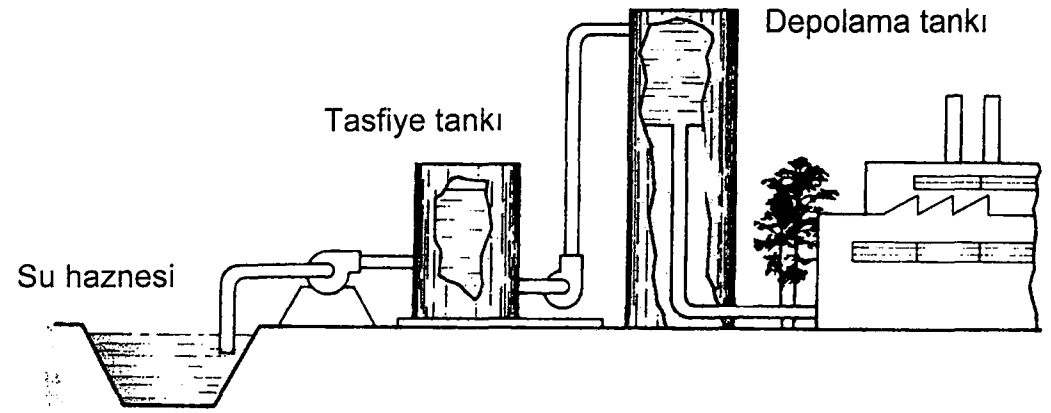
Endüstriyel tesislerde, kazan besleme suyu sistemini andıran bir çok kimyasal katkı maddesi sistemleri mevcuttur. Katkı maddesi ekleme yerlerinde dozaj pompası kullanılmalıdır. Bu çok basit pompalama sistemlerinde bile birkaç uygulama problemi mevcuttur. Bunlardan ilki uygun pompa türünün seçimidir. Ayrıca pompa basınçları, suyun yükseklik değişmeleri ve boru donanımındaki basıncı yenebilecek güçte olmalıdır. Aynı zamanda korozyondan da sakınılmalıdır[12,13,14].

2.2.1 Endüstriyel su pompalama sistemleri

Endüstride su pompalama sistemleri, farklı amaçlar için kullanılmaktadır. Fabrikalardaki su pompalama sistemleri; yüksek basınçlı su, kimyasal olarak arıtılmış su ya da fabrika içerisinde su dolaşım sistemi olarak çeşitlilikler gösterir. Kullanım amacına göre pompalama sisteminin yapısı da değişir.

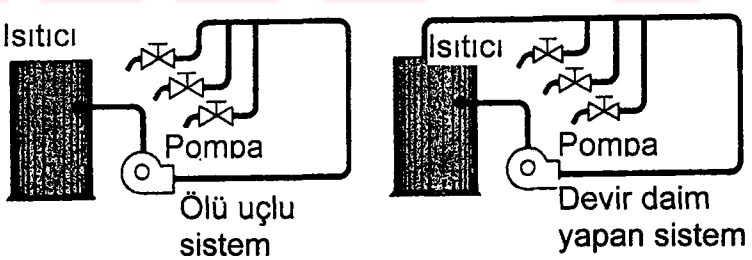
2.2.1.1 Doğrudan su besleme sistemi

Doğrudan su besleme sistemleri endüstride kullanılan en yaygın pompalama sistemleridir. Şekil 2.1'de tipik bir doğrudan su besleme sistemi şeması görülmektedir. Bu sistem için genellikle santrifuj bir pompa kullanılır. Bu pompa; suyu bir su haznesinden, göl, nehir gibi su kaynağından emerek çeker ve bir tasfiye tankına boşaltır. Burada su; yumuşatma, filtreleme, çökertme veya kimyasal arıtma gibi işlemlerden geçirilir. Tasfiye tankındaki bu su daha sonra başka bir pompa vasıtasıyla depolama tankına aktarılır oradan da ihtiyaç olan yerlere dağıtım yapılır.



Şekil 2.1 Tipik bir doğrudan su besleme sistemi şeması

Şekil 2.2'da ölü uçlu ve devir daimli sıcak su pompalama sisteminin şeması görülmektedir. Sıcak su pompalama sistemleri belirli bir alanda ne kadar suya ihtiyaç duyulacağına bağlı olarak; ya ölü uçlu ya da devir daimli sistemler olabilir.



Şekil 2.2 Ölü uçlu ve devir daimli sıcak su pompalama sistemleri şeması

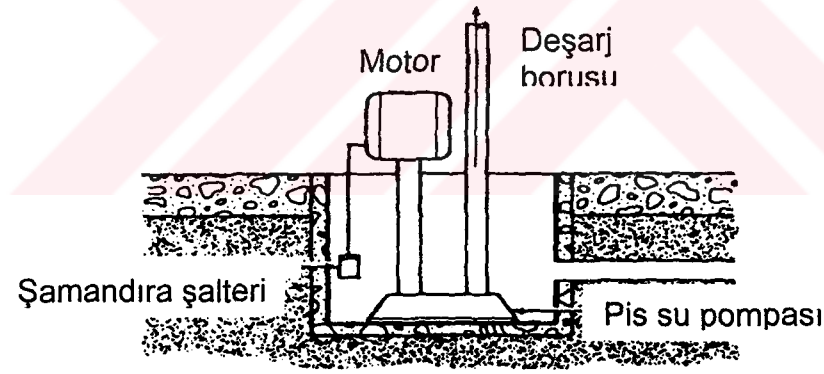
2.2.1.3 Kimyasal madde pompalama sistemleri

Kimyasal madde pompalama sistemleri tasarımları yönünden çok farklıdır. Pompalanacak kimyasal maddenin şekli ve işlem yöntemi sistemin tasarımında en belirleyici faktördür. Buna göre;

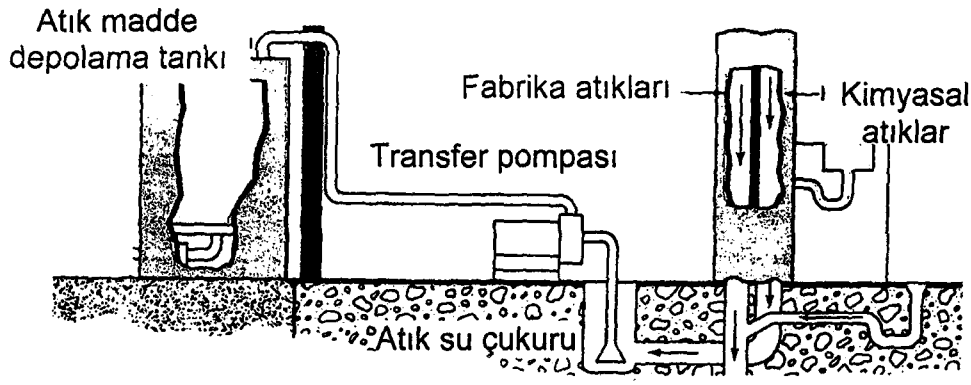
- Kimyasal maddelerin suya ilave edilmesi söz konusu olduğu zaman dozaj pompaları kullanılır.
- Kimyasal maddenin viskozitesi, seçilecek pompanın tipini ve enerji ihtiyacını belirler.

2.2.1.3 Atık madde pompalama sistemleri

Atık madde pompalama sistemleri de kimyasal madde sistemleri gibi uygulamada çok çeşitlilikler gösterirler. Şekil 2.3'de normal bir atık pompalama sistemi şeması, Şekil 2.4'de ise kimyasal bir atık pompalama sistemi şeması görülmektedir [6]. Kimyasal atık madde pompalama sisteminde kimyasal atığın atık su çukurunda dinlendirildiğine dikkat edilmelidir.



Şekil 2.3 Atık madde pompalama düzeni şeması



Şekil 2.4 Kimyasal atık madde pompalama sistemi şeması

2.2.1.4 Pompalanacak maddeye göre pompa tipleri

Yapı ve amaç bakımından çok değişik pompalama sistemleri vardır. Değişik pompalama sistemlerine;

- Çimento şerbeti pompalama sistemi,
- Gres yada macun pompalama sistemleri ve
- Boya püskürtme sistemlerinde pistonlu pompalar

örnek olarak verilebilir. Bu gibi yüksek viskositeli madde pompalamasında pozitif iletimli pompalar daha fazla kullanılmaktadır.

2.3 Pompalama Terminolojisi

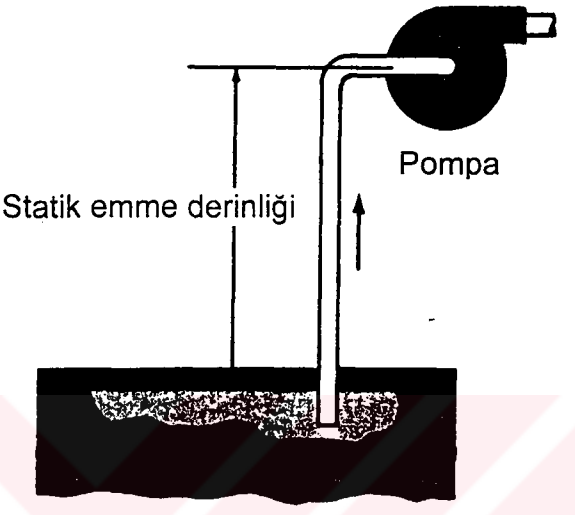
Pompalara gerek bakım, gerekse işlem yapmak için pompa hidroliği temel bilgilerinin önceden bilinmesi önemlidir. Devir sayısının ya da emme şartlarının, güç gereksinimleri, çıkış basıncı ya da debi üzerinde yapacağı etkiyi değerlendirmek zorunludur.

Pompa çarkının gözü akışkan sıvı seviyesinin üstünde ise *emme derinliği koşulu* denir. Pompa çalışmadığı zaman pompa koşulları statik, pompa çalıştığı zaman dinamik olarak tanımlanır. Şekil 2.5'de emme derinliği ile çalışan bir pompa sistemi şeması görülmektedir.

Dikey bir borunun içinde bulunan sıvı, borunun dibindeki, yatay .yüzey üzerine belirli bir basınç yapar. Bu basınç, birimleri (kg/cm^2, psi) yada dikey yükseklik metre (m) cinsinden ifade edilir. Basınç, m cinsinden yükseklik olarak Eş. (2.1) ile;

$$h = \frac{g * p}{d} \ (m) \qquad (2.1)$$

ifade edilir. Eş. (2.1)'de; h:Yükseklik (metre), d:özgül ağırlık (kg/m^3), g :yerçekimi ivmesi (9,806 m/sn^2), p :basınç (Kg/cm^2) dir.



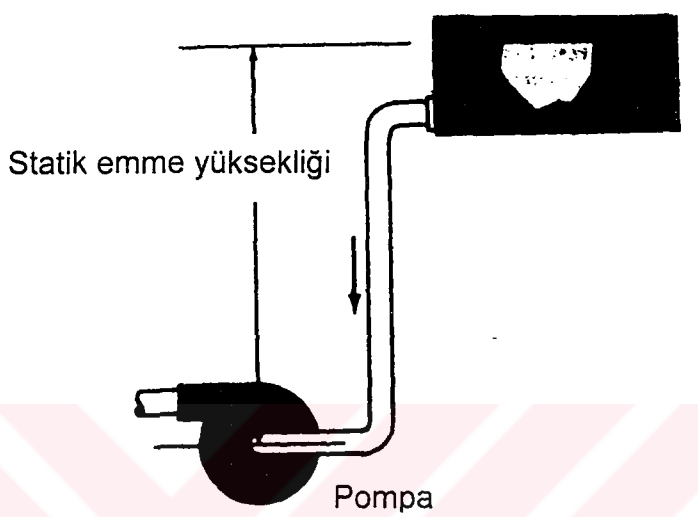
Şekil 2.5 Emme derinliği ile çalışan pompa

Şekil 2.6'da emme yüksekliği ile çalışan bir pompa şekli görülmektedir. Şekil 2.6'daki gibi çarkın gözü sıvı seviyesinin aşağısında ise *pozitif emme* ya da *taşmalı emme koşulu* deyimleri kullanılır.

Bir pompayı tahrik etmek için gereken güç, sıvının debisine (iletim kapasitesine) ve sıvıya karşı koyarak bastığı yüksekliğe (manometrik yükseklik) bağlıdır. Bir pompanın karşı koyarak çalıştığı toplam manometrik yükseklik, temelde emme ve basma koşullarını da içeren boru direnci, pompalanacak sıvının özgül ağırlığı, viskositesi ve yoğunluğu gibi birkaç etmene bağlıdır.

Pompa kapalıyken, emme sıvı seviyesi ile basma sıvı seviyesi arasındaki fiziki yükseklik farkına *statik yükseklik* ya da *kaldırma yüksekliği* denir[11,15]. Statik yükseklik iki bileşene ayrılabilir. Emilecek sıvı yüzeyinden çarkın gözüne kadar olan uzaklık *statik emme derinliği* adını alır. Çarkın gözünden,

boşaltılan (basılan) sıvının üst seviyesine olan yüksekliğe statik basma yüksekliği denir [11,15].



Şekil 2.6 Emme yüksekliği ile çalışan pompa

Pompalar enerji harcayan elemanlardır. Harcadıkları toplam enerji, sadece basılan sıvıyı hareket ettirmek için gerekli olan enerji değildir. Bu toplam enerji içerisinde boru cidar pürüzlüğü ve boru bağlantı parçaları dolayısıyla oluşan sürtünme kayıpları da vardır. Bu kayıpların toplamına yükseklik kayıpları yada sürtünme yüksekliği denir. Yükseklik kayıpları çoğunlukla m cinsinden ifade edilir.

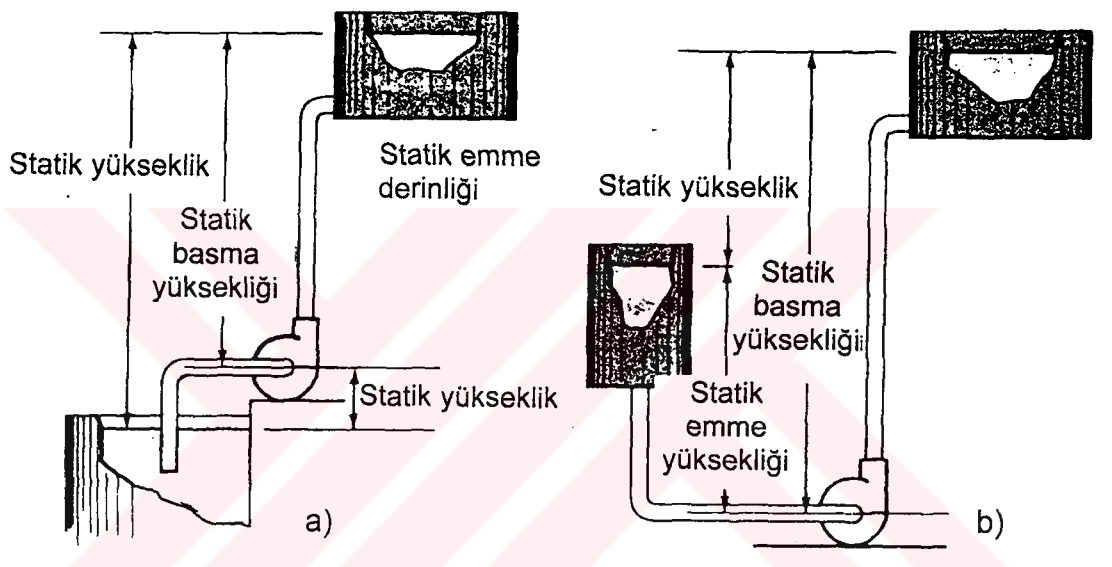
Hız yüksekliği basılan sıvının hızıyla doğrudan ilişkilidir. Hız yüksekliği, aynı hıza ulaşmak için sıvının yer çekimi ivmesiyle düşmesi gereken yükseklik değerine eşittir. Bu değer Eş. (2.2) ile ;

$$h = \frac{V^2}{2g} \qquad (2.2)$$

olarak ifade edilir. Eş. (2.2)'de V: Hız (m/sn), g: Yer çekimi ivmesi: 9,806 m/sn^2'dir.

Pompalarda emme borusu basma borusundan daha geniş ise debi aynı olduğundan basma borusundaki sıvının hızı daha büyüktür.

Şekil 2.7'de statik yükün uygulama şeması görülmektedir. Şekil 2.7'de görüldüğü gibi toplam yükseklik (statik yükseklik), sıvı yüzeyi ile pompanın boşaltma ağzı arasındaki yüksekliktir.



Şekil 2.7 Statik yükün uygulama şeması

2.3.1 Pompama sistemlerinde yükseklik kavramı

Pompa sistemlerinin anlaşılabilmesi için yükseklik kavramlarının ayrı ayrı bilinmesi gerekir.

2.3.1.1 Toplam yüksekliğin bulunması

Pompalama tesislerinde tasarım yapılırken, yükseklik kayıpları için formüller ve tablolar kullanarak teorideki toplam yükseklik hesaplanır. Bu hesaplar varsayılan bir akış esasına dayanır. Gerçek toplam yükseklik ise ancak pompa monte edildikten sonra hesaplanabilir[12]. Bu değerle birlikte çarkın

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU

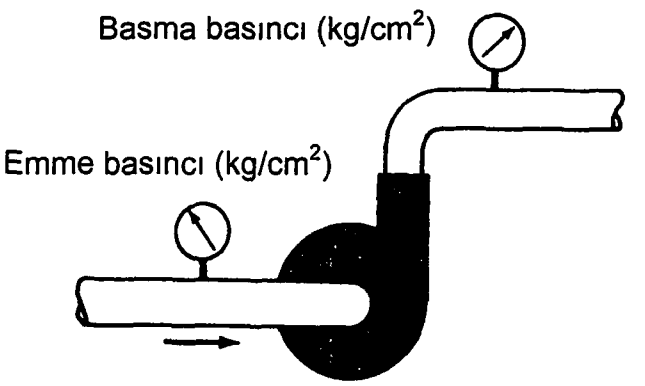
çapı biliniyorsa ve pompanın karakteristik eğrileri de mevcutsa o pompaya ait teorik akış hesaplanabilir. Genel pompa şartlarının tespiti amacına yönelik olarak, bu değer pompanın gerçek akışı ile daha sonra kıyaslanabilir. Gerçek toplam yüksekliğin hesaplanabileceği üç farklı durum vardır. Bunlar; emme yüksekliği koşulu, emme derinliği koşulu ile dalgıç ve düşey mili türbin pompalarıdır [12,15,18]. Bu örneklerin her birinde basılan sıvı sudur. Diğer sıvılar için, bir özgül ağırlık tablosundan ilgili sıvının özgül ağırlığının bulunması gerekir.

2.3.1.2 Emme yüksekliği

Şekil 2.8'de Emme yüksekliği şartında toplam yüksekliğin hesaplanması amacıyla yapılan deney şeması görülmektedir. Bu deneyde, pompanın giriş ve çıkışına birer basınç göstergesi takılmalı ve pompa çalışırken her iki basınçta kaydedilmelidir. Bu şartlarda toplam yükseklik Eş. (2.3) ile;

$$h = \frac{(pç - pg) * 9.806}{d} \qquad (2.3)$$

olarak bulunabilir. Burada pç: çıkış basıncı (kg/cm^2), pg: emme basıncı (kg/cm^2), d: özgül ağırlık (gr/cm^3) tür.



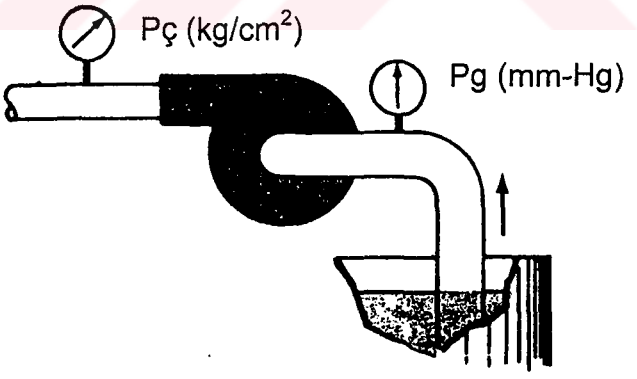
Şekil 2.8 Emme yüksekliği şartında toplam yüksekliğin hesaplanması

2.3.1.3 Emme derinliği

Emme yüksekliğini bulmak amacıyla Şekil 2.9'da emme yüksekliği şartında toplam yüksekliğin hesaplanması deney şeması görülmektedir. Emme derinliği koşullarının ölçülebilmesi için emme hattında bir emme göstergesi ve basma tarafında bir barometreye ihtiyaç duyulur. Göstergelerde okunan değerlerden toplam yükseklik Eş. (2.4) ile;

$$h = \frac{pç * 9.806(m) + 1{,}36.pg}{d}(m) \qquad (2.4)$$

olarak bulunur. Burada pç (kg/cm^2) olarak çıkış basıncı, pg (mm-Hg) olarak emme basıncı, d (gr/cm^3) olarak özgül ağırlıktır. 1,36 (m/mm) çarpanı ise, vakum değerini ft cinsiden yüksekliğe çevirmek içindir. Bu değer, emilen sıvı seviyesi ile çarkın gözü arasında gerçek bir ölçüm yapıldığında elde edilecek değerle aynı olur[6,12,18].



Şekil 2.9 Emme derinliği şartında toplam yüksekliğin hesaplanması

2.3.1.4 Dalgıç ve düşey milli türbin pompalarda toplam yükseklik hesabı

Dalgıç ve düşey milli türbin pompalar sù seviyesinde ve suyun özgül ağırlığı da 1 olduğundan çıkış basıncı ile derinliğin toplamına eşittir. Yine de özgül ağırlığı hesaba katarak, Eş. (2.5) ile toplam yükseklik;

$$h = \frac{(pç * 9.806) + derinlik(m)}{d} \text{ (m)} \qquad (2.5)$$

ile bulunur. Eş. (2.5), mümkün olan maksimum toplam yüksekliği değil, mevcut şartlar altında geçerli gerçek toplam yüksekliği vermektedir. Toplam yükseklik; hız yüksekliği, yük kayıpları ve statik yüksekliklerin bir göstergesidir[6].

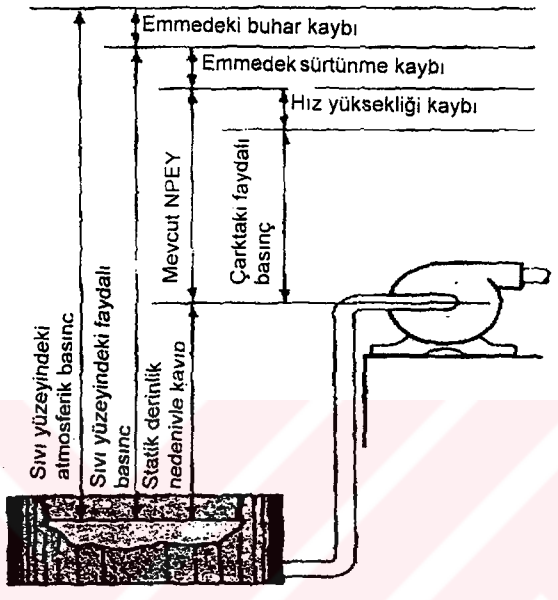
Bu hesaplar pompa performanslarının kıyaslanmasında faydalı olmalarının yanı sıra, toplam yüksekliğe ilişkin, beygir gücü gereksinmelerinin belirlenmesinde de kullanılabilir[6,12].

2.3.1.5 Toplam enerjiye karşı mevcut net pozitif emme yüksekliği (NPEY)

Şekil 2.10'da NPEY hesaplanmasının uygulama şeması görülmektedir. Bir pompa emme yüksekliği altındayken tek mevcut enerji, 1.0332 kg.f/cm^2 yada yaklaşık 10.033 m su sütununa eşit atmosfer basıncıdır[6]. Bir kaç faktör birleşerek bu atmosfer basıncının etkisini azaltır. Enerji tüketim faktörlerinin karşılanmasından sonra kalan enerji miktarına, yararlanılabilen net pozitif emme yüksekliği (NPEY) denir[6,12]. Bir kolondaki sıvı vakum altına konulursa, sıvının bir kısmı buharlaşır. Meydana gelen bu buharlaşma enerjinin bir kısmını azaltır. Bu buhar basıncı sıvı sıcaklığının artmasıyla artar.

Sıvının kaldırılması gereken mesafe yükünü yenmek, sıvının hareketini (hız yüksekliğini) sağlamak ve sürtünme yükü (yükseklik kayıpları) nü karşılamak için enerji ihtiyacı vardır. Buna göre yararlanılabilir NPEY, açık hava basıncından buhar basıncı, statik emme derinliği ve sürtünmeden kaynaklanan yükseklik kayıplarının çıkarılması ile bulunur[6]. Çarkta basınç azalmasına, katkıda bulunan en büyük faktör, emme derinliğinin kendisidir.

Çark gözünün aşağısında kalan sıvı yüksekliğindeki küçük değişmeler bile basılan sıvı miktarı üzerinde önemli bir etki yapar.



Şekil 2.10 Mevcut NPEY-emme derinliği şartı

Mutlak basınç açısından pompanın çalışabilmesi için sıvının, çark gözüne pozitif basınç altında girmesi zorunludur. Pozitif basınç ne kadar yüksekse, pompanın debisi o kadar büyük olur.

Bir pompanın çark gözü, emişi sağlayan (emme yüksekliği koşulu) sıvı kaynağı seviyesinin aşağısında olduğu zaman yararlanılabilir NPEY, atmosfer basıncıyla çarkın gözü üstündeki sıvı yüksekliği toplamından buhar basıncı ve sürtünme kayıplarının toplamının çıkartılmasıyla oluşan sonuca eşittir.

2.3.1.6 Mevcut (NPEY) Net Pozitif Emme Yüküne Karşı Gerekli NPEY

Genel olarak pompa eğrilerinin çoğu, gerekli NPEY'ni de verir. Eğrilerin geçerli olması için faydalanılabilir NPEY'nin en az gerekli NPEY kadar olması

gerekir. Bununla birlikte, emme yüksekliği şartları için, uygulamada çarkın gözü üstündeki yükseklik ölçülür. Eğer bu mesafe, gerekli NPEY'ni karşılar yada geçerse, eğri tarafından tanımlanan şekliyle pompa koşulları kullanılabilir. Buradaki varsayım atmosfer basıncının, sürtünme, hız yüksekliği ve buhar basıncından kaynaklanan kayıpların toplamından büyük olmasıdır

2.4 Pompa performans eğrileri

Pompa eğrileri, belirli bir şarta uygun bir pompanın seçiminde, çark çapı, hız ve emme derinliğinde yapılan değişikliklerin, beygir gücü gereksinimleri, debi ve verim üzerinde gösterdiği etkilerin bilinmesi amacıyla kullanılır. Şekil 2.11'de genel performans eğrileri görülmektedir[6].

Santrifüj pompalar için kullanılan üç temel eğri vardır. Bunlar; yükseklik kapasite eğrisi, verim eğrisi ve beygir gücü talep eğrisidir. Bazı pompa eğrileri NPEY içinde ayrıca bir eğri daha içerirler. Bu eğriler incelenirken pompa hızı ve pompa çarkının çapı mutlaka bilinmelidir[12].

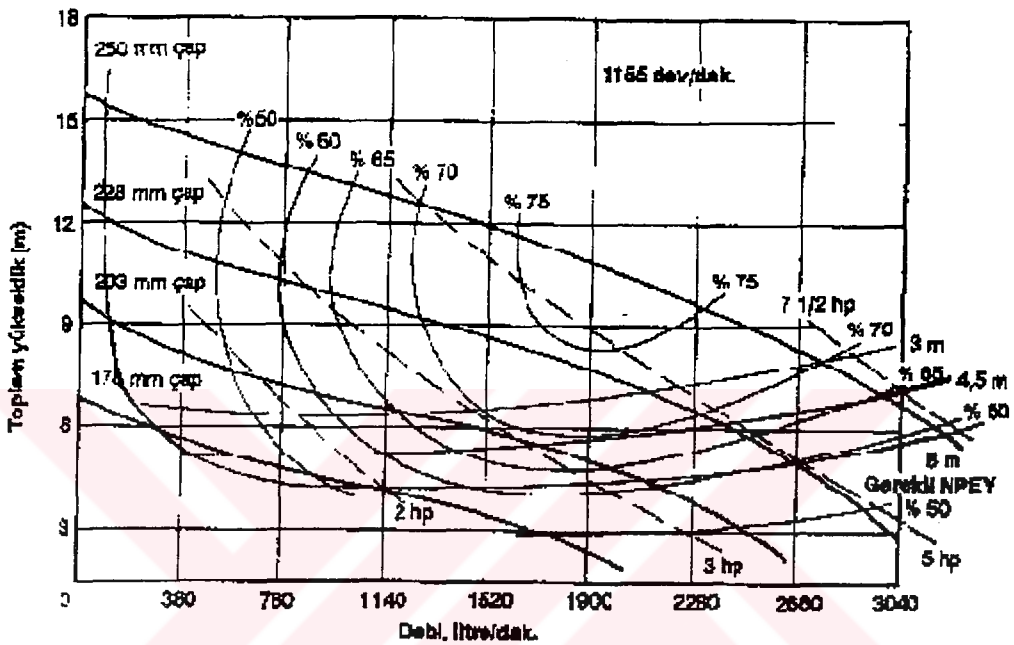
2.4.1 Verim eğrileri

Bir güç sisteminin tasarımında sistemin ekonomik ve verimli çalışması birinci şart olarak göz önünde bulundurulur. Bu durum pompalar içinde geçerlidir. Bu nedenle pompalarda verim oldukça önemlidir. Verim eğrisi hangi toplam yükseklikte en iyi enerji transferinin gerçekleşeceğini gösterir[6].

2.4.2 Pompa güç eğrileri

Beygir gücü eğrileri motorun çıkış gücünden ziyade, pompanın gerektirdiği beygir gücüne ilişkin bilgi verir. Debi arttıkça beygir gücü ihtiyacı da artar.

Azami güç pompa çıkışı tam açıkken, asgari güç ise pompa çıkış vanası tam kapalıyken gerekli olan güçtür[2,3].



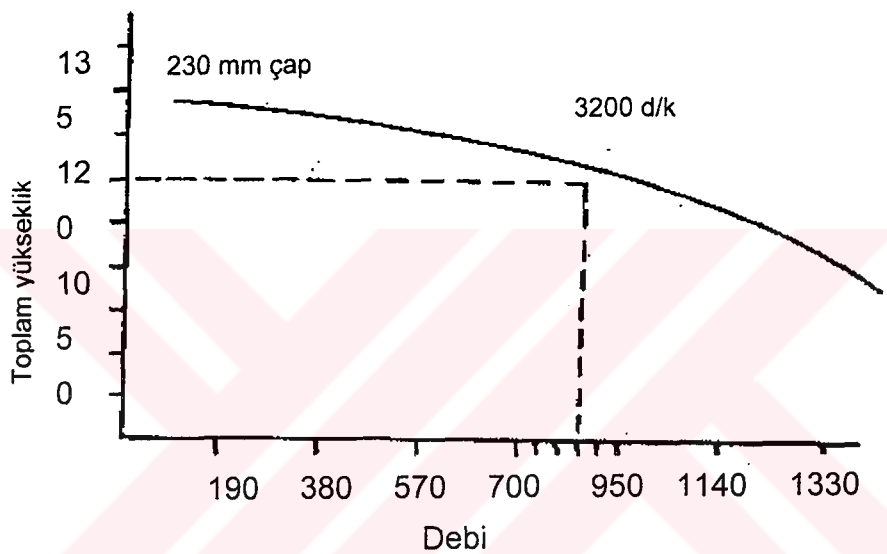
Şekil 2.11 Pompa performans eğrileri

2.4.3 Yükseklik kapasite eğrileri

Yükseklik kapasite eğrisi pompa eğrileri arasında en temel ve faydalı olanıdır. Bu eğri toplam yükseklik ile akış şartları arasındaki ilişkinin grafik olarak görüntüsüdür. Pompa eğrilerinde verilen herhangi bir yükseklik için sadece bir tek akış şartı ve bir de bunun tersi bulunur. Pompa yükseklik eğrisindeki yüksekliğe emme derinliği, basma statik basıncı ve hem emme hem de basma tarafındaki sürtünme kayıpları da dahildir. Bu maksimum yüksekliğe (azami basınç) pompa kapatıldığı zaman erişilebilir ve buna *kapatma yüksekliği* denir[3].

Şekil 2.12'de örnek bir pompa sisteminden alınan devi-yükseklik eğrisi görülmektedir.

Bir pompanın meydana getirdiği basınç aynı zamanda pompa devir sayısı ile de doğru orantılıdır. Bu nedenle hız azaldıkça pompa yükseklik-kapasite eğrisi aşağıya, hız artarsa eğride yukarı kayar. Fakat eğri kendisine ait temel şekli her zaman korur. Aynı durum çark çapı içinde geçerlidir.



Şekil 2.12 Yükseklik kapasite(debi) eğrisi

2.4.4 NPEY Eğrileri

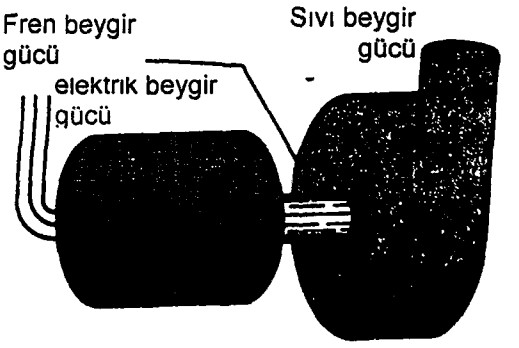
NPEY eğrisi, tek bir eğri olarak ya da bir eğriler grubu halinde bulunabilir. Bu eğrilerle gösterilen NPEY, mevcut olan değil gerekli olan yüksekliktir. NPEY, debiyi yükseklikten daha çok etkiler[6].

Bir pompanın debisini ve emme yeteneğini belirleyen diğer bir etki pompa hızıdır. NPEY pompalanan sıvının özgül ağırlığı, pompanın çalıştığı ortamın deniz seviyesinden yüksekliği ve sıvı sıcaklığı ile doğrudan ilişkilidir[12].

2.4.5 Güç ihtiyacının belirlenmesi ve bu güce uygun motor seçimi

Tipik bir pompa tesisinde bilinmesi gereken fren beygir gücü, elektrik beygir gücü ve sıvı beygir gücü olmak üzere birbiriyle ilişkili üç tür beygir gücü vardır. Şekil 2.13'de pompa ve elektrik motoru sisteminde güç çeşitleri ve yerleri gösterilmiştir. Pompanın pompalanan sıvıya ilettiği hidrolik güce *sıvı beygir gücü* denir. Pompaya sağlanan beygir gücü girişi fren beygir gücü olarak tanımlanır. Bu değer, pompa verimini gösteren bir çarpan kadar sıvı beygir gücünden daha büyüktür. Motoru çalıştırmak için (gerekli fren beygir gücünü vermek için) gerekli *elektrik beygir* gücü, motor verimini gösteren bir çarpan kadar fren beygir gücünden daha büyüktür. Hesaplamaya sıvı beygir gücü ihtiyacından başlanmıştır. Belirli bir miktar sıvıyı belirli bir yüksekliğe çıkarmak için gerekli enerji miktarı kilogram-metre (kg-m) gibi birimlerle ölçülür. 1 kg.m'lik enerji, 1 kg sıvıyı 1 m yüksekliğe kaldırmak için gereken enerji miktarıdır.

Belli bir miktar sıvıyı hareket ettirmek için gerekli enerji miktarı, toplam yükseklikten etkilenmektedir. Hareket ettirilen sıvının ağırlığı, litre cinsinden ağırlığa çevrilen akışın bir göstergesidir.



Şekil 2.13 Güç çeşitleri ve yerleri

Buradaki beygir gücü sıvı beygir gücüdür ve pompadan sıvıya aktarılan gerçek enerjiyi gösterir. Birimden birime bütün bu çevrimlerin yapılmış olması nedeniyle, sıvı beygir gücüne ilişkin bir Eş. (2.6) yazılırsa;

$$P_{BG}=\frac{h(m)*Q(lt/dak.)*d(kg/lt)}{4.500\ (Kg.m/dak)}\,BG \qquad (2.6)$$

olur. Fren beygir gücünü hesaplamak sıvı beygir gücü pompanın verimine bölünerek Eş (2.7),

$$BG_{fren}=\frac{P_{BG}(BG)}{\%\eta} \qquad (2.7)$$

elde edilir. Bu enerji, pompanın gerektirdiği enerji girdisidir. Aynı zamanda beklenen enerji üretimine de denktir. Elektrik beygir gücünün hesaplanması fren beygir gücü ile motor verimine bağlı olup Eş. (2.8)

$$BG_{elektrik}=\frac{\text{fren beygir gücü}}{\text{motorun \% verimi}} \qquad (2.8)$$

ile bulunur. Fren beygir gücü ile elektrik beygir gücü arasındaki fark toplam kayıpları vermektedir.

2. 5 Genel Santrifüj Pompalar

Pompa, genel olarak mekanik enerjiyi hidrolik enerjiye çeviren bir su makinesidir. Suyun veya benzeri bir sıvının enerji düzeyinde bir yükselme sağlama yoluyla pompalama işlemi gerçekleşeceğine göre bir sıvının enerji seviyesini gösteren formül Eş. (2.9)

$$H = h + \frac{p}{d} + \frac{V^2}{2g} \qquad (2.9)$$

şeklindedir. Eş. 2.9'daki üç terimden her birine göre ayrı bir pompa şekli düşünmek mümkündür. 1. Yükselti, 2. terim basınç, 3. terim ise hız enerjisine karşılık gelir.

Pompalarda genellikle, suyun basınç, hız ve yükselti enerjisinden birkaçı birden değiştirilir. Fakat özellikle tek cins enerji seviyesi ile ilgili pompalama işlemlerine örnek olarak:

- birinci terime (yükselti enerjisine) karşın maden kuyularından su çeken tijli pompalar (sağma tulumbalar),
- ikinci terime (basınç enerjisine) karşın kazan besi pompaları (tulumbaları),
- üçüncü terime (hız enerjisine) karşın itfaiye pompaları gösterilebilir [2].

2.5.1 Sanrifüj pompaların çalışma prensipleri

Silindirik bir kap içine radyal paletleri olan ve dışardan çevrilebilen bir çark koyulup bu çark sabit ω dönme hızı ile çevrilirse kap içindeki sıvı bir zorlu vorteks hareketi yapar ve blok halinde katı cisim gibi döner. Bu harekette merkez ile çevre arasında Eş. (2.10) ile ifade edilebilen;

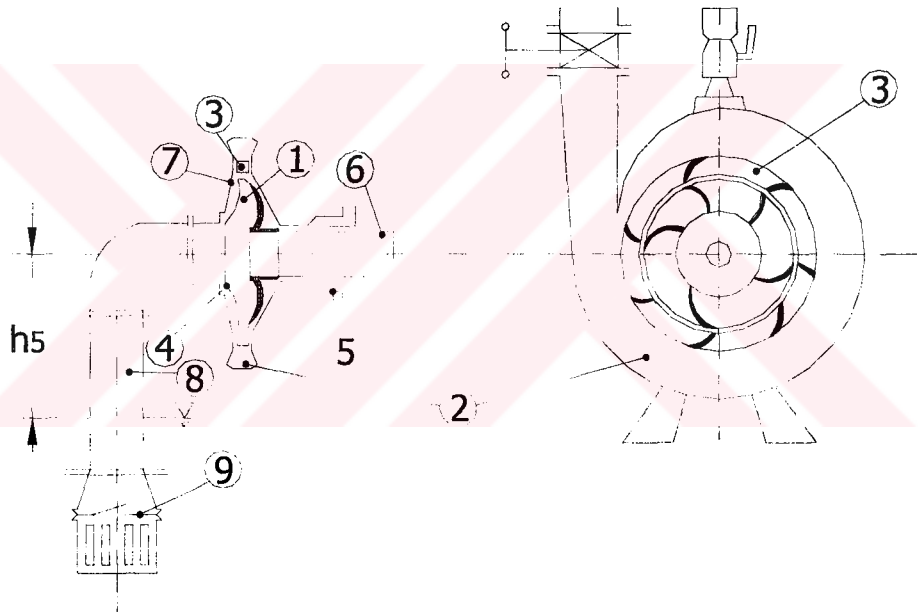
$$\frac{p_2 - p_1}{d} = \frac{\omega^2 r_2^2}{2g} - \frac{\omega^2 r_1^2}{2g} \qquad (2.10)$$

bir basınç farkı doğar. Kabın çevresinden bir çıkış deliği açılır ve merkez kısmı bir su haznesine bağlanırsa kabın çevresinde basınç ile fışkıran suyu karşılamak üzere merkezden su emilir. Bu suretle içten dışa bir akış doğar.

Sonuç olarak bir santrifüj pompa gerçekleştirilmiş olur. Pompa içinde akış başlayınca giriş ile çıkış arasındaki basınç farkı artık Eş. (2.10)'u sağlamaz.

2.5.2 Santrifüj pompanın bölümleri

Şekil 2.14'de Tek girişli ve tek kademeli bir pompa detayları gösterilmiştir. Bu santrifüj pompa numaralanmış sıraya göre şu kısımlardan oluşur:



Şekil 2.14 Tek girişli santrifuj bir pompanın kesit görünüşü şeması

1. *Çark:* mekanik enerjiyi hidrolik enerjiye dönüştüren ve üzerinde çok sayıda kıvrık kanatlar bulunan organdır.

2- *Salyangoz:* Çarktan çıkan suyu toplayıp basma borusuna veren kısımdır.

3- *Difüzör (yayıcı):* Bazı pompalarda çark ile salyangoz arasına yerleştirilen ve çarktan çıkan suyun hızını azaltarak yüksek kinetik enerjisinin bir kısmını basınç enerjisi haline dönüştüren halka şeklindeki kısımdır. Bu halka üzerinde suya yön verici kanatlar vardır.

4- *Yıpranma halkası ve hidrolik conta:* Dönen çark ile pompa gövdesi arasında bulunan ve çarkın basma kısmından emme kısmına bu geçit yolu ile kaçan akışkan miktarını önlemek için alınmış düzendir.

5- *Salmastra kutusu:* Mil ile gövde arasında doğacak kaçakları önlemek için oluşturulan düzenektir .

6- *Mil:* Tahrik organı ile çark arasını bağlayan ve çarkı taşıyan organdır.

7- *Gövde:* Pompanın salyangoz ve diğer organlarını taşıyan gövde kısmıdır.

8- *Emme borusu:* Emme haznesi ile pompa girişi arasındaki borudur.

9-*Dip klapesi ve süzgeç:* Dip klapesi emme borusunun girişindedir ve tek taraflı akış sağlar. Yani pompa dururken pompa içindeki ve emme borusundaki suyun geri boşalmasını engeller. Genel olarak bu klape bir süzgeç içine konmuştur. Sirkülasyon pompalarında ve emme haznesi yüksekte olan hallerde süzgece gerek yoktur.

2.5.3 Santrifuj bir pompanın manometrik yüksekliği

Manometrik yükseklik, birim ağırlıktaki sıvının pompa girişi ile çıkışı arasında kazandığı enerji olarak tanımlanır. Birimi, göz önüne alınan sistemdeki uzunluk birimi olur. Metrik sistemde ise birimi Kg.m/kg=metre olur. Manometrik yüksekliğin tanım denklemi (1) pompa girişi , (2) pompa çıkışını göstermek üzere Eş. (2.11);

$$h_m = (h_2 + \frac{P_2}{d} + \frac{V_2^2}{2g}) - (h_1 + \frac{P_1}{d} + \frac{V_1^2}{2g}) \qquad (2.11)$$

olduğu görülür.

Pompanın basma yüksekliğinin ölçülmesi ise pompanın giriş ve çıkışına bir manometre bağlanılarak $V_1=V_2$ kabul edilirse Eş. (2.12),

$$h_m = \frac{d_0 - d_{su}}{d_{su}}.\Delta h = 12.6\Delta h \qquad (2.12)$$

olduğu görülür. Böylece manometreden yapılan ölçmeyle doğrudan doğruya manometrik yüksekliği elde etmek mümkündür. Pompa giriş ve çıkış ağızlarının çapları aynı değilse yani$V_1 \neq V_2$ ise manometrik yükseklik hesap edilirken gerekli düzeltme yapılmalıdır.

2.5.4 Politropik yükseklik

Pomparlarla diğer turbo makineler kıyaslama ve genelleştirme yapılacak olursa vantilatörler halinde havanın sıkışması ihmal edilebilir derecede küçük olduğu için Eş. (2.11) kullanılabilir. Körükler ve kompresörler ise sıkışma etkisini göz önüne alarak daha genel bir tanım verilmelidir[12]. Gerçekten, sıkıştırılabilen akışta h_m yükü akışkanın enerji seviyesini vermez. Üstelik sürtünme kayıplarının yarattığı ısı da akışkanın basıncını arttırır.

Akışkan makineye, p_1, V_1, h_1, T_1 şartları ile giriyor ve p_2, V_2, h_2, T_2 şartları ile çıkıyor ise bu dönüşümü sürtünmesiz ve tersinir şekilde gerçekleştirmek için gerekli enerji, birim ağırlık için manometrik yükseklik yerine, net enerji kavramından, politropik yükseklik Eş.2.13 ile;

$$H_p = \frac{n}{n-1}\left(\frac{p_2}{d_2} - \frac{p_1}{d_1}\right) + \left(\frac{V_2}{2g} - \frac{V_1}{2g}\right) + (h_2 - h_1) \qquad (2.13)$$

elde edilir. Net enerji n, Eş. (2.14) ile;

$$\frac{n}{n-1} = \frac{\log \frac{p_2}{p_1}}{\log \frac{T_2}{T_1}} \qquad (2.14)$$

bulunur. Eş. (2.14), makinenin 'net enerjisi'ni ifade eder. Aynı şekilde politropik yükseklik, manometrik yükseklik yerine net enerji kavramı kullanılarak tanımlanır. Eğer sıkıştırma oranı bilinir ve çıkış sıcaklığı bilinmezse hidrolik verim tahmini yapılarak net enerji 'n' bulunur. Sıkıştırılamayan akışkanlar halinde Eş. (2.14), manometrik yüksekliği vermektedir.

2.5.5 Santrifuj pompalarda güç ve tork ifadeleri

Bir santrifüj pompada efektif, hidrolik ve su gücü olmak üzere 3 türlü moment ve güç vardır. P_e efektif gücü motor tarafından pompaya verilen enerjiyi gösterir. Pompa ile motor arasındaki güç, milin taşıdığı M_e momenti cinsinden Eş. (2.15);

$$P_e = \frac{\omega . M_e}{75} = \frac{\pi . n}{30} . \frac{Me}{75} \qquad (2.15)$$

ile ifade edilir. Pompa miline verilen bu enerji aynen suya uygulanamaz. Yatak ve salmastralardaki mekanik sürtünmeler ile çarkın ön ve arka yüzlerindeki disk sürtmesi yüzünden çarkın suya uygulayacağı moment azalır[12]. Bütün bu kayıplar mekanik verimin içine alınırsa çarkın suya verdiği P_h hidrolik gücü Eş. (2.16);

$$P_h = \eta_m . P_e \qquad (2.16)$$

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

olur. Radyal bir çarkta birim zamanda çarkın hareket miktarı bölgeye uygulanan momente eşit olur. Bu moment açısal hız ile çarpılırsa hidrolik güç Eş. (2.17);

$$P_h = \frac{d}{g}.\frac{Q}{75}.\omega \qquad (2.17)$$

ile bulunur.

Çark tarafından suya verilen bu enerji tüm olarak faydalı güç haline geçmez. Çünkü çarkın içinden geçerken çeşitli sürtünme ve çalkantı kayıpları doğar. Ayrıca salyangozda da kayıp olur[12]. Bütün bu kayıpları içine almak üzere bir hidrolik verim tanımlanır. Bu verim kullanılarak suyun kazandığı güç Eş.(2.18) ile;

$$P_0^{'} = P_h.2h \qquad (2.18)$$

olarak ifade edilir. 1 kg. suyun pompanın giriş ve çıkışı arasında kazandığı enerji manometrik yüksekliğe eşit olduğundan Eş. (2.18);

$$P_0^{'} = \frac{d.Q.H_m}{75} \qquad (2.19)$$

Eş. (2.19) şeklinde yazılır.

Çarktan çıkan Q debisi basma borusuna aynen geçmez. Yani suyun bir kısmı, varsa labirentlerden, yoksa doğrudan çarkın dış tarafından tekrar emme tarafına kaçar. Debideki bu azalma kaçak verim ile tarif edilir. Sonuç olarak pompadan çıkan suyun debisi Q_p ile gösterilirse, pompayı terk eden suya verilen enerjiye karşılık gelen eden güç Eş. (2.20);

$$P_0 = \frac{d.Q_p.H_m}{75} \qquad (2.20)$$

olur Pompalarda pratikte iki kanat arasında oldukça geniş bir kanal vardır. Bunun ne gibi etkisi olabileceğini düşünülürse çark kanallarından birinin giriş ve çıkışını şekildeki tarzda kapatılarak çark, ekseni etrafındaki hareketine devam ederken, bir an için sürtünmeleri yok sayılırsa her sıvı taneciği kendi eksenini korumak ister. Halbuki tanecikler kapalı bölgede çark ekseni etrafında bir dönme hareketi yaptıklarından parçacıklar zorunlu olarak sürüklenirler ve kendi ataletlerinden dolayı kapalı bölge içinde bağıl olarak (dönüşün aksi yönünde) bir dönme hareketi (*sirkülasyon*) doğar. Sonuç olarak kanal içindeki akışta hızlar düzgün dağılımlı olmaz ve kanadın arka yüzünde hız artar, ön yüzünde ise azalır[12,18].

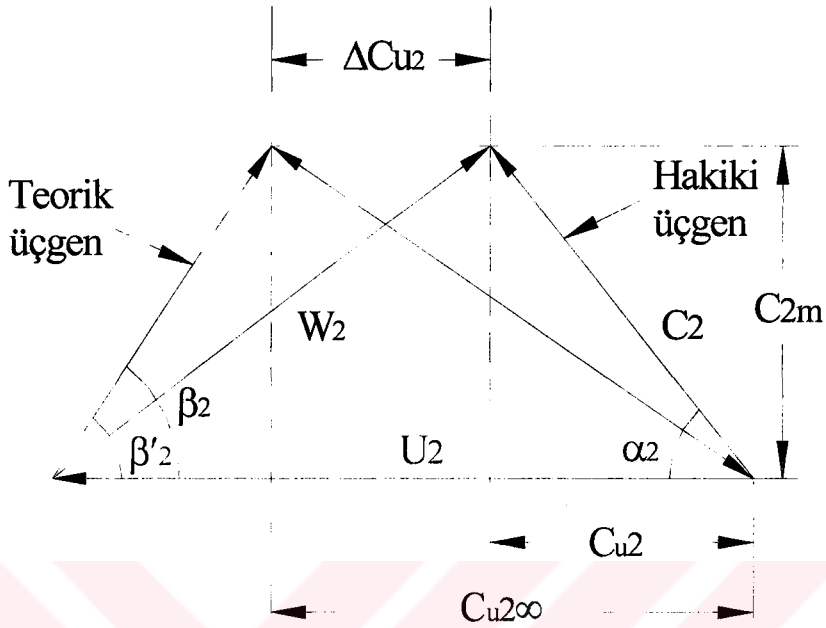
Şekil 2.15'de teorik hız üçgeni ile gerçek hız üçgeni arasındaki fark gösterilmiştir. Şekil 2.15'de örüldüğü gibi gerçek üçgende bağıl hızın açısının küçülmesi α_2 açısını büyütmüştür. Bunun sonucunda da mutlak hızın teğetsel bileşeni olan C_{U2} küçülmüştür. Bu nedenle manometrik yükseklik Eş. (2.21);

$$H_m = \frac{Cu_2U_2}{g} \qquad (2.21)$$

şeklindedir. Bu denkleme göre, C_{u2}'nin küçüldüğü oranda manometrik yükseklikte küçülmüş olacaktır. Yani Eş. (2.22);

$$\frac{H_m}{H_{t\infty}} = \frac{CU_2}{CU_{2\infty}} \qquad (2.22)$$

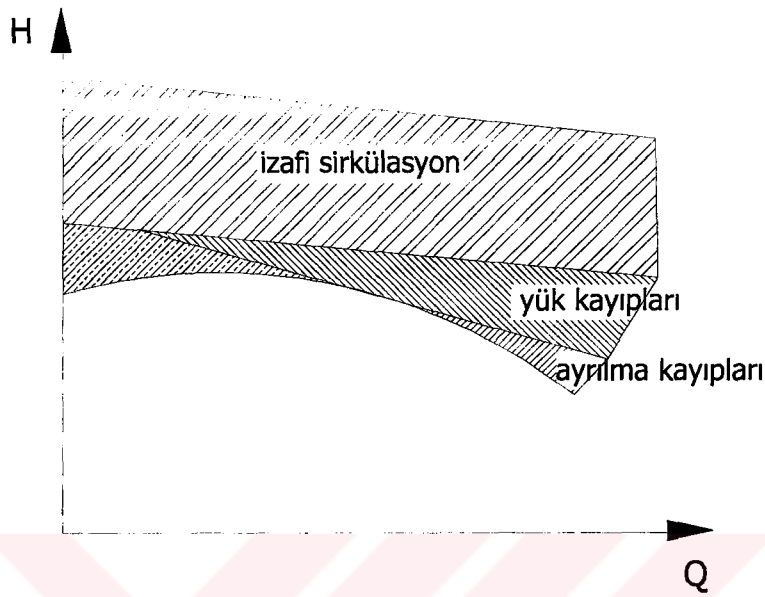
sağlanır.



Şekil 2.15 Teorik ile gerçek hız üçgeni arasındaki fark

2.5.6 Gerçek çalışma şartlarında debi ve yükseklik karakteristiği

Şekil 2.16'da gerçek çalışma şartlarında yüksekliğin debi ile değişim karakteristiği görülmektedir. Gerçek çalışma şartlarında Şekil 2.16'da görüldüğü gibi debiye göre yükseklik karakteristik eğrisi Sirkülasyon yüzünden doğrusal olarak daha aşağıya kayar. Kayma sonrası debi-yükseklik karakteristiği, kayıplar yüzünden tekrar değişime uğrar[5]. Normal hidrolik sürtünme kayıpları (yük kaybı), debinin karesi ile orantılı olduğundan Şekil 2.16'da görüldüğü gibi karakteristik eğri aşağıya doğru bükülür. Diğer taraftan pompa (optimum) çalışma durumundan sapınca yani debi nominal değerinden daha büyük veya daha küçük bir debi ile su basınca kanat giriş ve çıkışlarında ek olarak çarpma (kanat girişinde cidardan ayrılmalar) doğmaktadır. Kayıplar sapma ile daha fazla artığından $H_m=f(Q)$ karakteristiği Şekil 2.16'daki formu alır.



Şekil 2.16 Gerçek çalışma şartlarında yüksekliğin debi ile değişim karakteristiği

2.5.7 Özgül hız ve benzerlik

Özgül hız, pompanın kendisine benzer olan ve 1 m manometrik yükseklikte 1 m^3/sn debi veren pompanın devir sayısıdır. Benzer pompaların özgül hızları da aynen diğerine eşit olur. Bir pompa için debi, güçten daha önemli olduğundan özgül hız ifadesinde güç yerine debinin bulunması daha doğru olur. Bu yüzden gücün debi ve manometrik yükseklik cinsinden değeri yerine konularak hız Eş. (2.29)'dan;

$$n_s = \frac{n\sqrt{P_o}}{H_m^{5/4}} = \frac{n\sqrt{d\frac{H_m Q}{75}}}{H_m^{5/4}}. \qquad (2.29)$$

elde edilir. Suyun özgül ağırlığı yerine 1 konularak Eş. (2.29);

$$n_s = 3{,}65\frac{n\sqrt{Q}}{H_m^{3/4}} \qquad (2.30)$$

Eş. (2.30) elde edilir.

Reynols benzerliği; örnek olarak seçilen bir pompa ile ona benzetilerek tasarlanan pompa arasındaki benzerlik oranıdır. Pompalarda Reynolds benzerliği çoğu zaman ihmal edilemez. Özellikle Reynolds benzerliği sağlanmadan geometrik olarak benzer ve özgül hızları aynı olan pompaların verimleri eşit değildir[12,18].

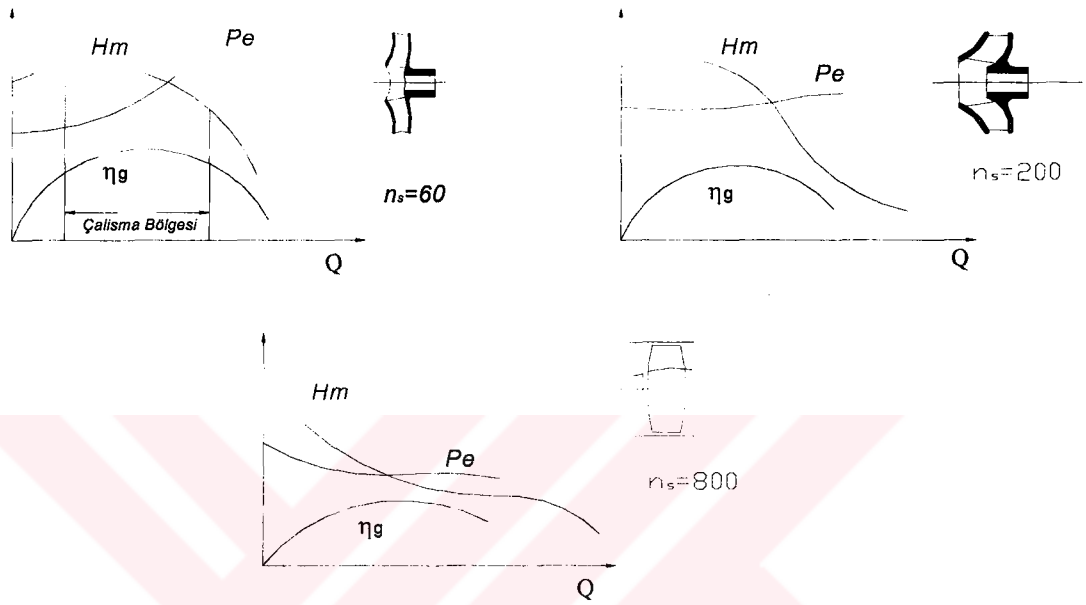
2.5.8 Özgül hıza göre pompanın genel karakteristiğinin değişimi

Uygulamada pompanın tipini özgül hız belirler. Rotadinamik pompalarda özgül hızın yükselmesiyle akış radyal halden eksenel hale döner. Çarkın çapı küçülür ve genişliği artar. Hızlı pompalar tam eksenel tiplerdir[12,18]. Pompa tipi ve özgül hızları;

Tam santrifüj pompalar	n_s=60-150
Yarı santrifüj ve Heliko santrifüj	n_s=150-400
Yarı eksenel	n_s=400-700
Eksenel pompalarda ise	n_s=700-1000

arasındadır[12,18]. Özgül hızın büyümesi ile, çark çapının çark çıkış genişliğine oranı küçülür. Özgül hız küçülünce, geçiş kanalı daralmakta, özgül hız büyüdükçe kanal genişlemekte ve kısalmaktadır[12]. Küçük özgül hızlı pompaların verimlerinin düşük oluşunun bir nedeni budur. Şekil 2.17'de a,b ve c olarak 3 tip pompa çarkına ait birer örnek alınarak her biri için karakteristik eğriler gösterilmiştir. Bu karakteristiklerin hepsi sabit hız karakteristikleridir. Görüldüğü gibi tam ,santrifüj tipte P_e efektif gücünün en küçük değeri sıfır debisine karşılık gelmektedir. Yani pompa çıkış vanası kapalı iken motordan en küçük güç çekilir. Bu yüzden bu pompalara yol verirken çıkış vidasını kapamak doğru olur. Bunun tersi olarak eksenel

pompalarda debi sıfır iken, yani kapalı vana ile çalışmada en büyük güç çekilir. Bu nedenle bu pompalara ise açık vana ile yol vermek gerekir.



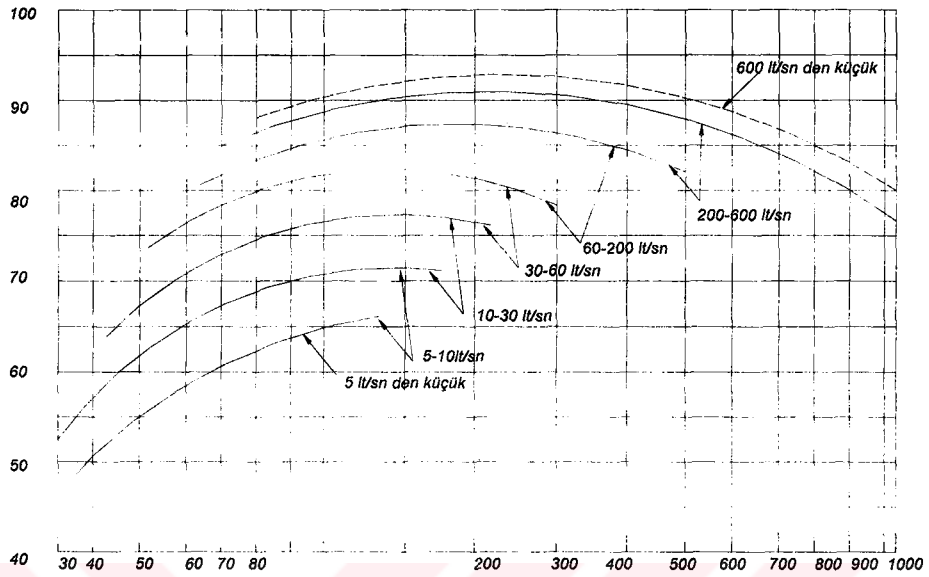
Şekil 2.17 Üç farklı çark tipi ve bunlara ait genel karakteristik eğrileri

İkinci bir değişim de $H_m=f(Q)$ karakteristiğinde olur. Eksenel pompaların karakteristiğinde optimum durum yakınlarında bir bölge vardır. Hatta bazen bu bölge kararsızlığa dahi sebep olabilir.

2.5.9 Santrifüj pompalarda verim ve çalışma bölgesi

Şekil 2.18'de özgül hız ve debiye bağlı pompa verim eğrileri görülmektedir. Şekil 2.18'de görüldüğü gibi verim eğrisi vana kapalı iken sıfırdır. Debinin artmasıyla önce yükselir sonra tekrar alçalarak sıfıra düşer. Bunun nedeni P_e ifadesinde Q=0 ve H_m =0 değerleri için P_e değerinin sıfıra gitmesidir.

Bir santrifüj pompanın tek bir manometrik yüksekliği ve debisi olmayıp $H_m=f(Q)$ karakteristiğine uygun olarak sonsuz değer vardır. Bunlar arasında maksimum verim civarında olan verime karşı gelen değerler şüphesiz en çok



Şekil 2.18 Özgül hız ve debiye bağlı pompa verim eğrileri

göz önüne alınmaya değen değerlerdir. Pompayı bir tesisat için seçerken veya pompa ile birlikte tesisat projesi yapılırken verimin '*çalışma bölgesi*' denilen bölge göz önüne alınmalı ve çalışma noktasının bu nokta içinde kalması sağlanmalıdır[10,12]. Aksi halde enerji kaybı fazla olur. Pompanın nominal özgül hızı da bu bölgedeki optimum çalışma durumuna göre hesaplanır. Santrifüj, heliko santrifüj ve eksenel pompaların maksimum verimleri genel olarak özgül hız ile birlikte artmaktadır. Ayrıca pompanın büyüklüğü de verimi etkilemektedir. Bunun nedenlerinden biri küçük pompalarda kanalların dar ve bağıl pürüzlülüğün büyük olması diğeri de mekanik verimin düşük olmasıdır.

2.5.10 Pompalarda kavitasyon

Pompa girişi ile emme seviyesi arasındaki kot farkı (emme yüksekliği) h_s olan tek kademeli bir santrifüj pompa düşünülüp emme haznesinde iki giriş noktası arasında Bernoulli teoremi uygulanarak, süzgeç, dip klapesi ve emme borusuna ait tüm kayıplar ile gösterilirse, Eş. (2.31);

$$\frac{p_1}{d} = h_s + \frac{p_1}{d} + \frac{V_1^2}{2g} + \xi_{01} \qquad (2.31)$$

yazılır[12]. (1)noktasındaki basınç Eş. (2.32);

$$\frac{p_1}{d} = \frac{p_a}{d} - h_s - \xi_{01} - \frac{V_1^2}{2g} \qquad (2.32)$$

olarak elde edilir. Eş. (2.32)'den giriş kesitindeki basıncın, atmosfer basıncının altında olduğu anlaşılmaktadır. Emme yüksekliği, emme kayıpları ve giriş hızı bu basıncı azaltan ek faktörlerdir. Ayrıca emme borusundaki kayıplar da basıncı azaltmaya çalışmaktadır.

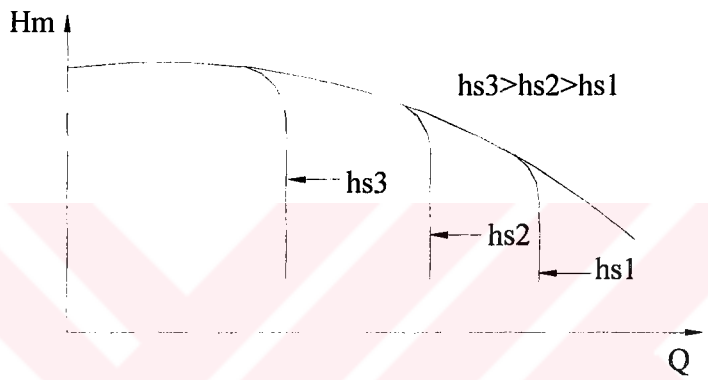
Bir noktada basıncın buharlaşma basıncının altına inmesi, *kavitasyon* olayının doğmasına neden olur. Gerek teori ve gerekse deney sonuçları değerlerine göre pompa çarkı içinde basıncı en düşük olan nokta giriş noktası değil, çarkın içinde ve kanatların arka yüzü üzerinde girişe yakın bir bölgedir[12]. Minimum basıncın buharlaşma basıncından fazla olma şartı Eş.(2.33);

$$p_{min} > h_b \qquad (2.33)$$

dır. Emmedeki net pozitif yük (ENPY) pompanın giriş ağzında yükün buharlaşma basıncından ne kadar yüksek olduğunu göstermektedir. Burada referans yükseklik pompanın giriş ağzıdır. Kavitasyon faktörü ile ENPY arasında bağlantı kurulmak istenirse σ kavitasyon faktörü olmak üzere;

$$\sigma = \frac{ENPY}{h_m} \qquad (2.34)$$

dir. Buradan pompanın kavitasyon yapmaması için ENPY değerinin belli bir değerin altına düşmemesi gerektiği anlaşılmalıdır. Kavitasyon yapmayan bir pompanın eğrisinde, debi artarken basma yüksekliği de kavisli bir şekilde eğri çizerek azalır. Ancak bu pompanın emme yüksekliği artırılırsa bu basma yüksekliği eğrisi kavisli değil Şekil 19'da görüldüğü gibi dik olarak azalır.



Şekil 2.19 Kavitasyonsuz çalışmaya karşı gelen $H_m = f(Q)$ karakteristiği

2.5.11 Hız değişiminin pompa karakteristiğine etkisi

Bir pompanın kendisine benzer olarak çalışması halinde devir sayısı değiştirilince manometrik yükseklik devir sayısının karesi ile; debi ise devir sayısının birinci kuvveti ile orantılı olur. Manometrik yükseklik çapın karesi, debi ise çapın küpü ile orantılı olur. Her iki etki birlikte göz önüne alınarak sırasıyla Eş(2.35), Eş(2.36), Eş(2.37),

$$Q_m \sim nD^3 \qquad (2.35)$$

$$h_m \sim n^2D^2 \qquad (2.36)$$

$$N \sim n^3D^5 \qquad (2.37)$$

yazılabilir. Pratikte mevcut bir pompanın çark çapını değiştirerek pompayı yeni şartlara uydurmak metodu çok kullanılır. Bu durumda eğer devir sayısı değiştirilmemiş ise yeni pompanın manometrik yüksekliği çapın takriben karesi ile orantılı olarak azalır. Fakat debi, çark çıkışındaki alan eşit olduğu için çapın küpü ile azalmaz. Ancak çapın birinci kuvveti ile orantılı olarak azalır. Bu şartlar altında yükseklik Eş.(2.38), debi Eş (2.39) ve hız Eş. (2.40);

$$Q \sim nD^2 \qquad (2.38)$$

$$h_m \sim n^2D^2 \qquad (2.39)$$

$$N \sim n^3D^4 \qquad (2.40)$$

olur. Bununla birlikte bu bağıntılar ancak çapın küçük değişimleri halinde doğrudur. Çünkü benzerlik tam olmadığı için verindeki değişme fazla olabilir. Santifuj pompa çarkları çoğu zaman, yaklaşık olarak radyal hız sabit olacak şekilde boyutlandırılır. Yani D ve D' çaplarında kesit alanı aynı değerde olabilir. Bu durumda ise çapın birinci kuvveti ile orantılı olur.

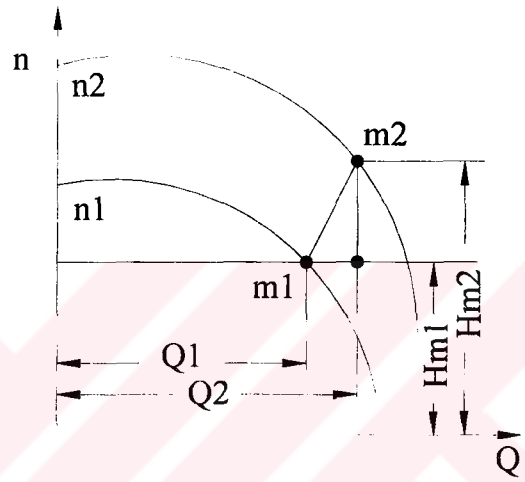
2.5.12 Devir sayısının verim üzerindeki etkisi

Şekil 2.20'de n_1 ve n_2 sabit hızlarında dönen santrifuj bir pompanın debi-yükseklik karakteristiği görülmektedir. Burada pompa hızı değiştirilince yeni bir debi ve yükseklik eğrisi çıktığı görülmektedir. Bu yeni karakteristiği bulmak için ilk karakteristiğin her M noktası için ;

$$\frac{H_{m2}}{H_{m1}} = \frac{n_2^2}{n_1^2} \qquad (2.41)$$

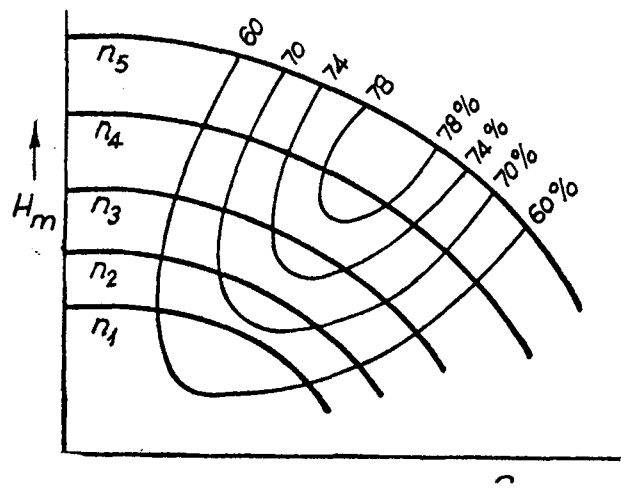
$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{n_2}{n_1} \qquad (2.42)$$

Eş. (2.42) bağıntısı vardır. Bu şekilde teorik olarak her bir M_1 noktası M_2 noktasına karşılık gelir. Teoridek M_1 noktası ile M_2 noktasının verimlerinin de aynı olması beklenirse de pratikte aynı noktaların verimleri farklılık göstermektedir. Bu farklılığın nedeni Reynols benzerliğinin gerçekleştirilememesidir.



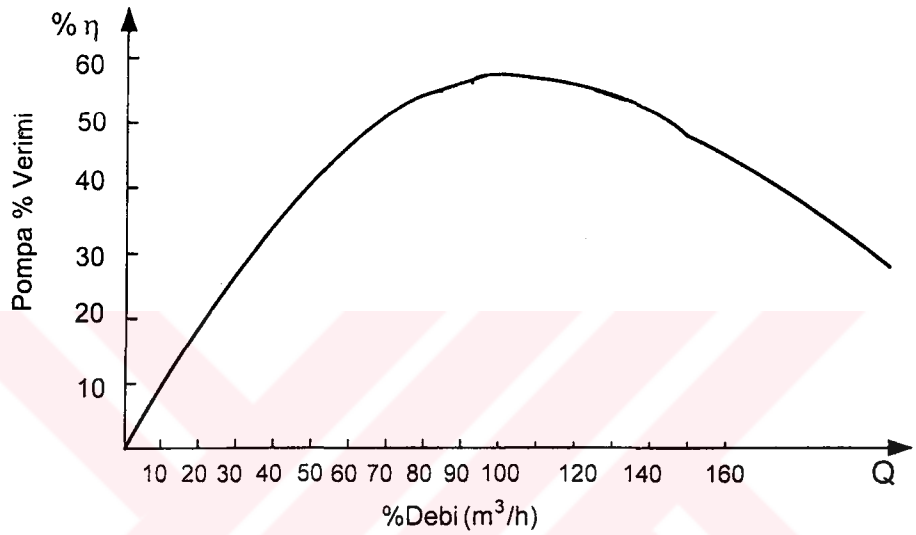
Şekil 2.20 Santrifuj bir pompanın debi-yükseklik karakteristiği

Şekil 2.21'de bir santrifuj pompanın devir sayısı ile verimin değişimi eğrileri görülmektedir. Bu eğrilerin tepe noktasından geçen karakteristiğe karşı gelen devir sayısı pompanın en iyi devir sayısı adını alır. Reynols etkisi ihmal edilirse bu eğriler yerine, orijinden geçen paraboller bulunur[12].



Şekil 2.21 Devir sayısı ile verimin değişimi

Şekil 2.22'de santrifuj pompanın debi ile verim değişim eğrisi görülmektedir. Şekil 2.22 incelendiğinde, pompanın maksimum veriminin maksimum debi ile yüklendiğinde alınmış olduğu görülür.



Şekil 2.22 Pompa debisi ile pompa veriminin değişimi

Şekil 2.21 ile Şekil 2.22'ye göre;

- Santrifuj pompalarda en yüksek verim pompa debi kapasitesinin %100'ü ile çalıştırıldığında elde edilir, pompaların devir sayıları azaldıkça yeni bir yükseklik debi karakteristiği ortaya çıkar ve verim düşer.

- Sabit devirli pompalama sistemlerinde debi azaltma yöntemlerinden en az kayıp olan yöntem değişken devirli pompalama sistemleridir[5].

3. ARM'nin YAPISI VE KARAKTERİSTİKLERİ

Anahtarlamalı Relüktans Motorlar (ARM) verimi yüksek olan elektrik makinelerindendir. Fakat yapıları nedeniyle doğrusal özellik göstermediğinden matematik modellerinin tam olarak elde edilememesi problemi ile karşı karşıya kalınmıştır. Motorun verimli çalışması ve düzgün tork elde edilmesi, motorun performans yapısı ve matematik modeli ile ilişkilidir. ARM'lerin performansını artırmak ve maliyeti düşürmek amacıyla yapılan çalışmalar motor ve konvertör tasarımı, matematiksel modelleme, sürme devreleri ve denetleme yöntemleri gibi konuları ayrı ayrı ya da hepsini aynı anda inceleyen literatürde çok sayıda yayına rastlamak mümkündür.

ARM konusunda yapılan ilk çalışmalar genelde motorun yapısı, modeli ve analizi üzerinedir. Bu çalışmalardan Lavrenson[26] 1980 yılında rotor ve kutup yayı/kutup adımı oranının seçim yöntemi, Arumugam[31] ve arkadaşları 1988 yılında kutup yayı/kutup oranının ARM'nin performansın üzerinde etkisini araştırmışlardır. 1988 yılında Krishnan[33] ve arkadaşları ARM için yeni bir tasarım yöntemi araştırmışlar ve ARM'lerde kullanılabilecek faz sayısının motor tasarım performansına olan etkileri üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca yapılan bu çalışmada motor faz sayısındaki azalmanın motor momentindeki dalgalanmayı artırdığı vurgulanmıştır. 1995 yılında Radun[34], ARM'lerde tasarım için göz önüne alınması gereken konuları belirtmiştir. ARM'nin modellenmesi ve analizi konusunda farklı yaklaşımlar kullanılmıştır. Bunlardan Arumugam ve arkadaşları[35,36], Stephenson[37] motorun manyetik devresi üzerinde farklı modelleme çalışmaları yapmışlardır. Fulton[38], Miller[39], Shmitt and McGilp[40] CAD programı ile; Giesselman[41], Fransceschini[42] ve Mahdavi[43] ise PSPICE programı ile motorun modelleme ve analizini gerçekleştirmişlerdir. Motorun doğrusal olmayan yapısını modellemek için de farklı yaklaşımlar kullanılmıştır. Bunlardan Manzer et al.[44] motorun doğrusal olmayan özelliklerini dikkate alarak modellemesini yapmışlardır. Lumsdaine ve

Lang[45]., ARM'nin modelini durum uzay formunda çıkararak denetim için durum gözlemciyi önermişlerdir. Elmas ve arkadaşları ise doğrusal olmayan yapı için Luenberger gözlemci modelleri[46,47], Bulanık mantık yöntemleri[48,49] ve yapay sinir ağları ile modellemelerini[50] sunmuşlardır. Moghbelli[51], Moallem[52] ve Buja [53] ARM'nin ani ve kararlı durum çalışma karakteristikleri üzerine incelemeler yapmışlardır. Athani[54] de ARM'ler için basit bir RL eşdeğer devre modeli önermiştir. ARM'lerin değişken hızlarda kullanımının kolaylığının anlaşılmasından sonra motorun performansını artırmak, motor ve denetleyici maliyetini ise düşürmek amacıyla yapılan çalışmalar hız kazanmıştır.

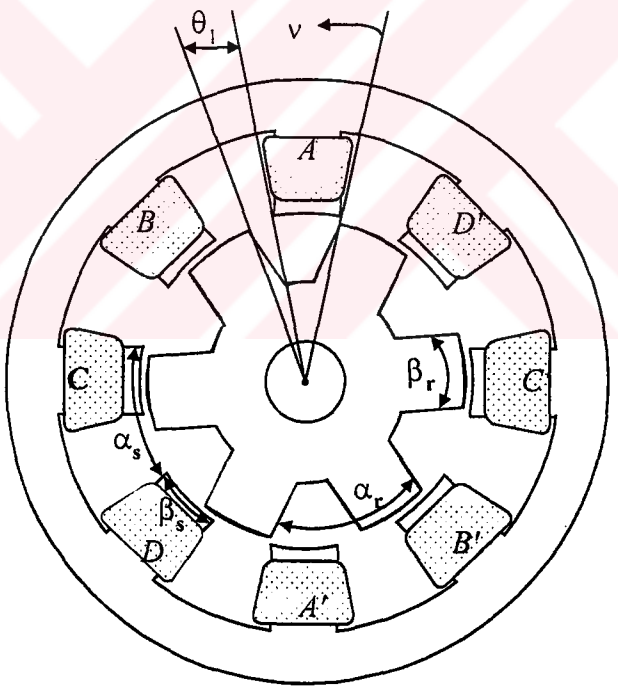
Bu çalışmaların tamamı modellemeler ve kontrol yöntemleri üzerinedir. İçinde bulunduğumuz 2002 yılı içerisinde ARM konusunda yayınlanan çalışmaların çoğunluğu ise elektrikli araçlar üzerinedir[55-65]. Bu çalışmada ise; modellemenin yanında su pompası gibi doğrusal olmayan bir karakteristiğe sahip yük üzerinde ARM'nin çalışmasının yanında performansı da test edilmiştir.

ARM'ler herhangi bir denetleme ve sürme devresi olmadan çalışamazlar. Bu nedenle ARM'lerde kullanılabilecek sürme devreleri konusunda da çok sayıda çalışma yapılmıştır. ARM'ler için geliştirilmiş sürme devreleri ile ilgili araştırmalar, bu devrelerin birbirlerine göre üstünlükleri yada sakıncalarının yanısıra kullanılan anahtarlama elemanlarının seçimi ile ilgili yayınlar literatürde mevcuttur[66,67,68]. Ayrıca ARM'lerde kullanılan sürme devreleri, motor performansına ve şebekeye olan etkileri, denetim yöntemleri, yapısından kaynaklanan torkdaki dalgalanmaları ve bu dalgalanmaları azaltma yöntemleri aslında birbirleriyle doğrudan ilişkili konulardır. Bu yüzden bahsedilen konular literatüre giren çalışmalarda bazen ayrıntıya girilerek tek başına incelenmiş bazen de bu konular birbirleri ile yakından ilişkili oldukları için sınıflara ayrılmayarak tamamı birden incelenmiştir[69,70,71]. Aynı şekilde

momentte meydana gelen dalgalanmaları en aza indirmek için uygulanan denetim yöntemleri de ele alınmış ve çok sayıda yayın literatüre girmiştir.

3.1 ARM'nin Yapısı

Şekil 3.1'de Stator kutup sayısı 8, rotor kutup sayısı 6 olan bir ARM'nin kesit görünüşü verilmiştir. ARM'ler çift çıkıntılı ve tek yönlü uyartımlı motorlardır. Yani stator ve rotor çıkıntılı kutupludur. Sadece statorda kutup sargıları mevcuttur. Bu sargılar karşılıklı olarak yerleştirilerek birbirlerine seri şekilde bağlanmışlardır. Karşılıklı olarak seri bağlanan her iki sargı ise bir fazı oluşturur.



Şekil 3.1 8/6 Kutuplu bir ARM'nin kesit görünüşü

Bir faza ait sargılar enerjilendirildiği anda stator kutupları büyük bir elektromıknatıs haline gelirler. Elektomoknatıs haline gelen stator kutupları belli bir büyüklükteki tork ile en yakın rotor kutuplarını kendilerine doğru çekerler. Oluşan hareket başlangıçta ayrık pozisyonda bulunan rotor kutupların hizalı pozisyona gelinceye kadar devam eder. Rotor kutbu hizalı

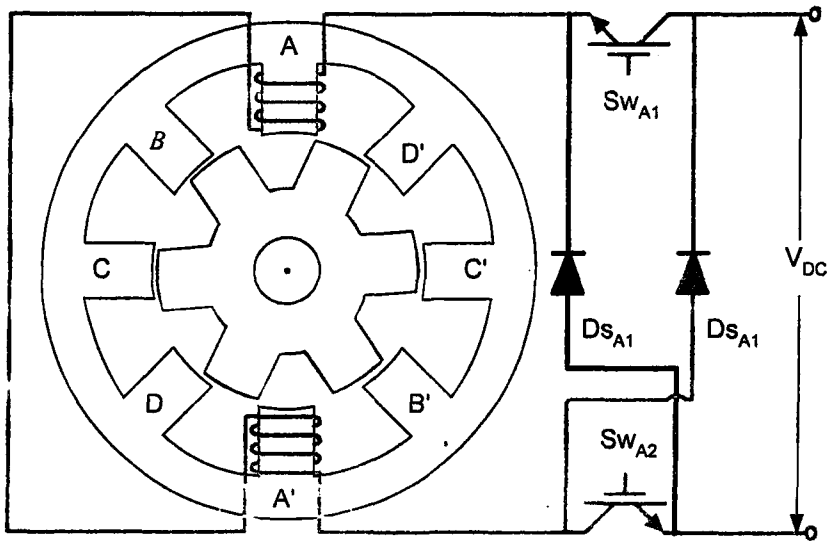
pozisyona geldiği anda da eğer bu fazın enerjisi kesilip sıradaki faz enerjilendirilmez ise rotor hareketi sona erer.

Motor kutuplarında kullanılan demirin mıknatıslanması manyetik akının yönünden bağımsız olduğundan ve devrenin simetrik çıkıntılara sahip olması nedeniyle rotor torku stator sargılarına uygulanan akımın yönünden bağımsızdır.

ARM'nin davranışı manyetik akı(flux) Ψ, akım i ve rotor pozisyonu θ ile açıklanır. Bu değişkenlerin eğrileri, manyetik devrenin demir bölümünün ve hava aralığının manyetik geçirgenliğine bağlıdırlar[36,39]. Ayrık pozisyonda, eğri doyum olmadığı için doğrusaldır. Fakat rotor hizalı pozisyona yaklaştıkça demirdeki doymadan dolayı bu eğrilerde doğrusal değildir[37,39].

3.2 ARM'nin Çalışma Prensibi

ARM'lerin stator ve rotorları çıkıntılı kutuplu olarak imal edilirler. Şekil 3.1'de kesit görünüşü verilen 8/6 kutuplu bir ARM'nin, Şekil 3.2'de bir faza ait yarı köprü tipi bir sürme devresi ile birlikte çalışma şeması verilmiştir.



Şekil 3.2 8/6 kutuplu ARM ve yarı köprü tipi sürme devresi

Şekil 3.2'deki A sargısı enerjilendirildiğinde oluşan manyetik alan kendisine en yakın olan rotor kutbunu kendisine doğru çeker. Bu çekme ile birlikte, rotor pozisyonuna bağlı olarak hava aralığından dolayı relüktans minimuma doğru azalır. Bu sargı endüktansının en büyük, reaktansının ise en küçük olduğu durumdur.

Relüktans minumum olduğu zaman, rotor kutbu da ayrık pozisyondan hizalı pozisyona gelmiş olur. Bu pozisyonda A fazına enerji verilmeye devam edilirse rotorda herhangi bir faydalı tork üretilmez. Aksine frenleme etkisi oluşur. Bu nedenle rotor hizalı pozisyona geldiği anda hizalı pozisyona gelmeye sebep olan kutuptaki bobinin enerjisi ani olarak sıfırlanarak sıradaki faza enerji verilir. Böylece rotorda hareket devamlılığı sağlanır. Bu durumda A fazına enerji verilip rotor hizalı pozisyona gediği anda bu fazın enerjisi kesilerek sırasıyla B,C ve D fazları da aynı şekilde enerjilendirilerek motorun hareket devamlılığı sağlanmış olur.

Bu çalışma prensibine bağlı olarak anahtarlama hızı ayarlanarak motorun değişik hızlarda çalışması da mümkündür. Bu çalışma prensibine bağlı olarak uygun fazlar sırasıyla enerjilendirildiğinde üretilen torkun faz sargısındaki akımın yönüne değil rotor pozisyonuna bağlı olduğu anlaşılır. Bu nedenle motor tek bir yönde uygulanan bir akımla çalışabileceğinden anahtarlama elemanı sayısı da yarıya düşmüş olur. Fakat rotor pozisyonu motorun çalışması açısından önemli olduğundan rotor pozisyonunu algılayabilecek başka eleman ve devrelere ihtiyaç vardır. Bu da motor maliyetini artırdığı gibi çalışma alanlarını da sınırlandırmaktadır. Motorun kısıtlı çalışma alanlarını genişletmek amacıyla pozisyon sensörsüz çalıştırılma yöntemleri üzerine yapılan çalışmalarda mevcuttur [32].

Bu motorların ilk kalkınma momentinin yüksek olması nedeniyle elektrikli araçlar gibi alanlarda da kullanılması uygundur[55-64]. Ayrıca asansörlerde de kullanılabileceği düşünülmektedir.

3.3 ARM'de Enerji Dönüşümü, Tork Üretimi ve Endüktans Değişimi

ARM'nin çalışmasını açıklamak için pozisyon, endüktans, akım ve tork eğrileri Şekil 3.3'de gösterilmiştir. Başlangıçta rotorun ayrık pozisyonda olduğunu varsayalırsa manyetik relüktans minimum, manyetik endüktans ise maksimumdur[19,72,73]. ARM'nin sargılarından uygun olanı enerjilendirildiği anda Şekil 3.3'te görüldüğü gibi rotor kutbu ayrık pozisyondadır. Bu durumda manyetik devrede hava aralığı en büyük değerindedir ve endüktans minimumdur. Demir nüve ise doyumda değildir[74].

Rotor hizalı pozisyona yaklaştıkça manyetik devredeki hava aralığı azalır ve endüktans doğrusal olarak artar. Rotor daha fazla pozisyon değiştirdikçe demir nüvede doyum başlar. Bu durumda önceleri doğrusal olarak değişen endüktans eğrisi de bozularak Şekil 3.3'deki gibi doğrusal olmayan bir eğri haline gelir. Rotor hizalı pozisyona geldiği durumda ise hava aralığı minimum olduğundan endüktans maksimumdur. Bu bölgede artık tork üretilmez. Çünkü hizalı pozisyonda stator kutbu rotor kutbunu çekerek frenleme yaptırır. Aksine rotor kutbu hizalı pozisyondan kurtulurken de negatif bir tork üretilir. Motorda tork üretilebilmesi için rotorun bu pozisyondan kurtulup hareketine devam etmesi gerekir. Bu nedenle bu kutba ters bir enerji ve sırası gelen kutba da doğru bir enerji verilerek hareket sürdürülür Rotorun dönüş yünü daima en yakın çakışma pozisyonuna doğru olur. Dolayısıyla, motorda üretilen ileri yönde ve pozitif tork; sadece rotorun ayrık pozisyon ile bir sonraki çakışık pozisyon arasında iken üretilir.

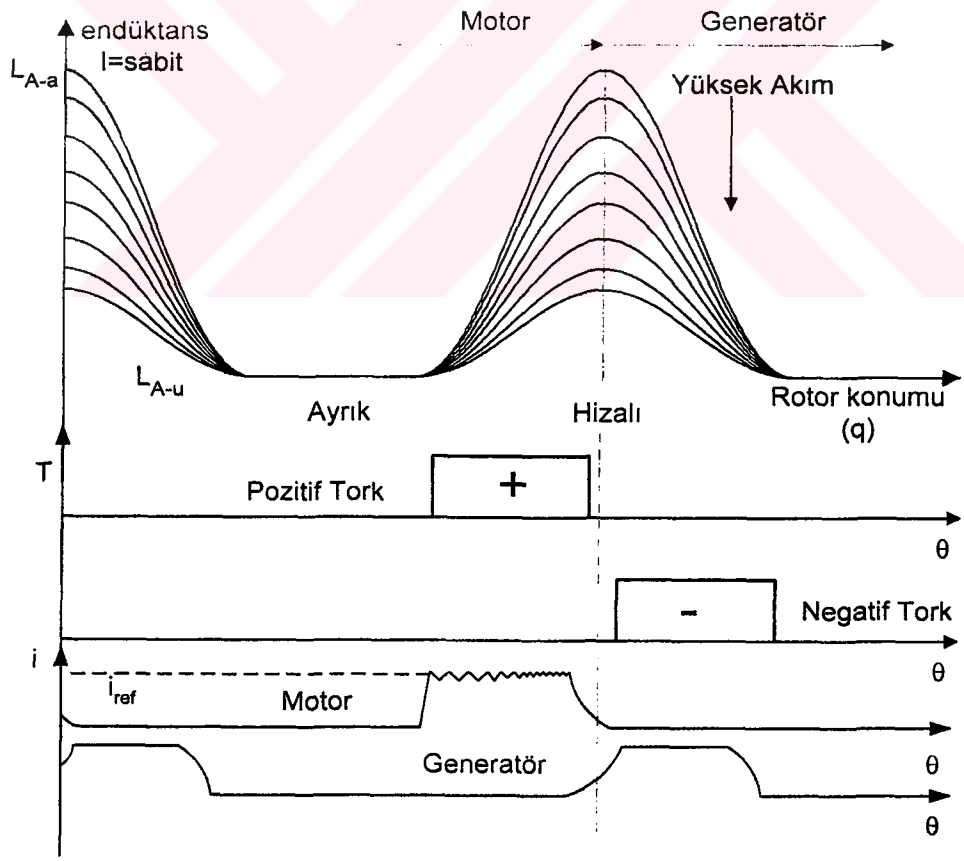
Eğer rotor ve stator kutupları simetrik ise her bir faz kutup yayının yarısında tek yönlü olarak tork üretilebilir. Sonuç olarak rotorun tüm pozisyonlarında bir Şekil 3.4'te kutup oranı 8/6 olan bir ARM'de tek yönlü tork üretimi için faz akımları gösterilmiştir. Görüldüğü gibi faz akımlarında üste bir mikrar binme vardır. Dört fazlı bir ARM'de üst üste binme açısının maksimum değeri, bir faz akımının kendisinden iki sonraki akım başlamadan son bulması gereken

açı değeri kadardır. Yani i_c akımı başlamadan i_a akımı son bulmalıdır. Aksi durumda negatif tork üretimine sebep olunmaktadır[75,76,77]. Bu da ortalama torku düşürür. Akımın düşen kenarının eğimi, endüktans ve o andaki zıt emk'nın değerine bağlıdır.

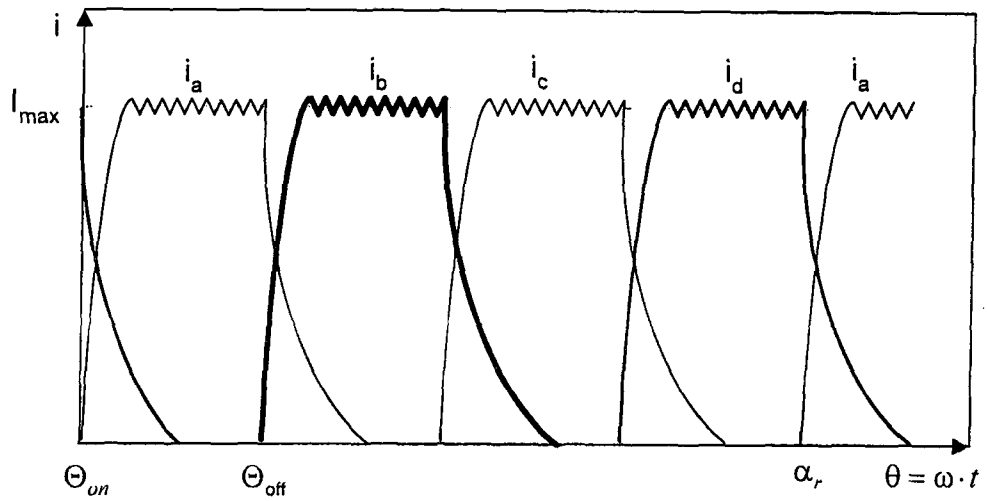
Herhangi bir rotor pozisyonunda bir fazın ürettiği tork;

$$T = \left[\frac{\partial W^*}{\partial \theta}\right]_{i=sabit} \tag{3.1}$$

olmaktadır.



Şekil 3.3 Rotor pozisyonu ve akım değerlerine bağlı olarak endüktans ve pozitif-negatif tork darbeleri

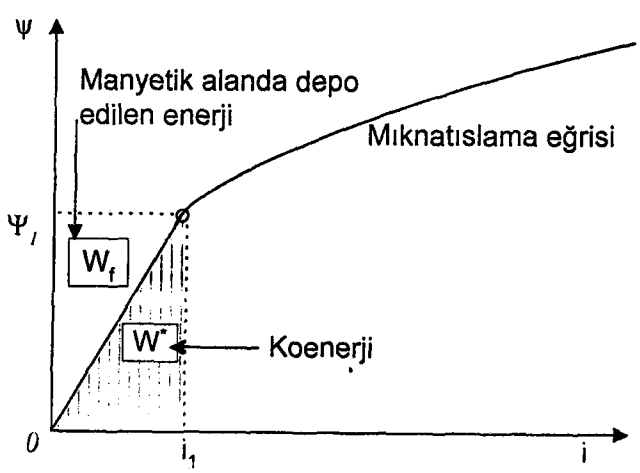


Şekil 3.4 Dört fazlı bir ARM'de üst üste binmenin olduğu durumda faz akımları

Burada W* koenerjidir. Herhangi bir pozisyonda koenerji Şekil 3.5'de gösterildiği gibi mıknatıslama eğrisinin altında kalan alandır. Şekil 3.5'den koenerji,

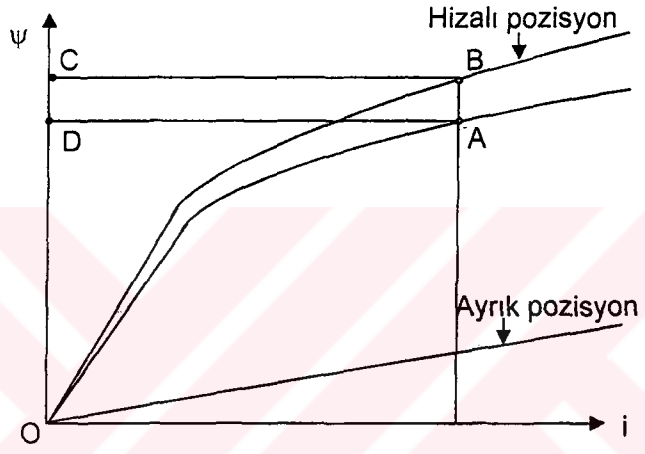
$$W^* = \int_0^{i_1} \psi \, di \qquad (3.2)$$

şeklinde yazılabilir. Eş. (3.1) ve Eş. (3.2)'den elde edilen ani tork, grafik olarak Şekil 3.5'de gösterilmiştir.



Şekil 3.5 Depo edilen alan enerjisi W_f ve koenerji W^*'nin tanımı

$\Delta W_m/\Delta\theta$ iştir. ΔW_m, rotor çok küçük bir $\Delta\theta$ aralığında hareket ederken sabit akımda elde edilir. Böyle bir yer değiştirme esnasında kaynak ile enerji alışverişi vardır ve depo edilen alan enerjisinde de bir değişiklik mevcuttur. Sabit akım sınırlandırması, böyle bir yer değiştirme esnasında yapılan mekanik işin koenerjideki değişim miktarına tam eşit olmasını sağlar[19,78].



Şekil 3.6 Sabit akımda koenerjinin değişme oranı ile ani torkun değişimi

Şekil 3.6'daki grafikten sabit akımda rotor pozisyonun A'dan B'ye doğru $\Delta\theta$ kadar yer değişiminde kaynak ile yapılan enerji alışverişi;

$$\Delta W_e=ABCD \qquad (3.3)$$

depo edilen alan enerjisindeki değişiklik ise,

$$\Delta W_f=OBC-OAD \qquad (3.4)$$

olarak hesaplanır. Bu durumda, yapılan mekanik iş;.

$$\Delta W_m=T\Delta\theta$$

$$\Delta W_m=\Delta W_e-\Delta W_f$$

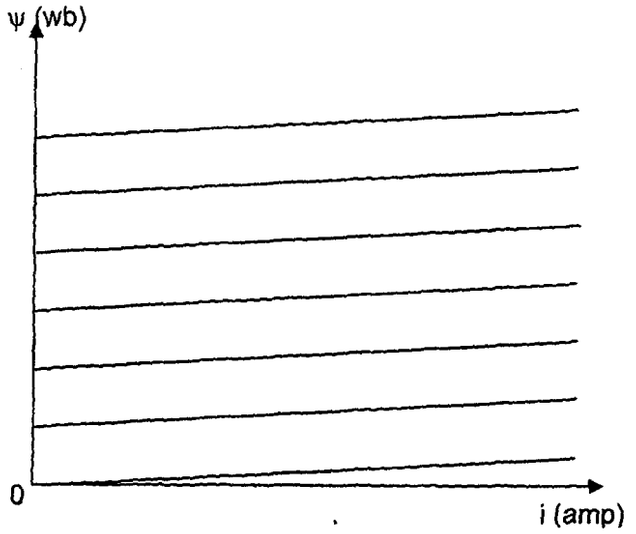
ΔW_m=ABCD-(OBC-OAD)

ΔW_m=(ABCD+OAD)-OBC

ΔW_m=OAB (3.5)

olmaktadır.

Kaynaktan elde edilen enerjinin tamamı mekanik işe dönüşmemektedir. Bunun bir kısmı manyetik alanda depo edilmektedir. Manyetik alanda depo edilen enerji boşa gitmemektedir. Ama A'dan B'ye hareket süresince bu enerji, enerji dönüşümü için de kullanılmamaktadır. Bu durum denetleyicinin oranlaması ve gerekli filtre kondansatörü üzerinde önemli etkiye sahiptir. Bu etki AA motorların geri güç katsayısı ile çalıştırılmasına benzer. Şekil 3.7'de görüldüğü gibi, çakışık endüktans mıknatıslama eğrileri ideal doyumlu kabul edilirse, rotorun hareket ettiği anda depo edilen alan enerjisi değişimi ihmal edilebilir. Bu durumda kaynaktan elde edilen enerjinin tamamı ani olarak mekanik işe dönüştürülmüş olurdu. Şekil 3.7'de gösterilen eğriler önemli bir idealleştirmedir.

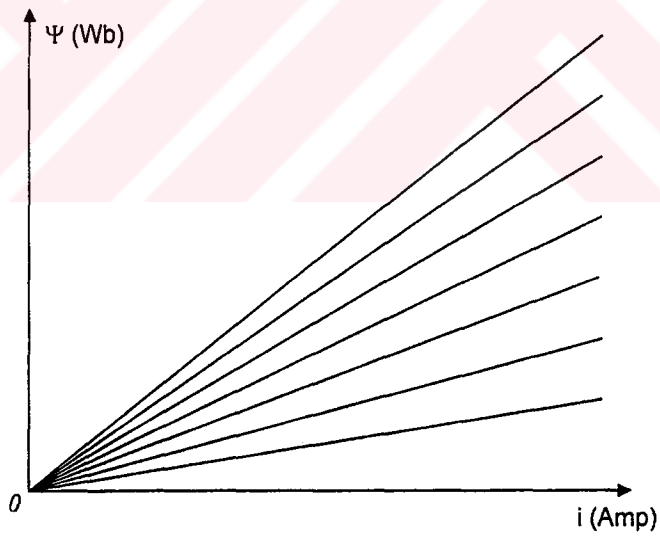


Şekil 3.7 Sıfır hava boşluğu ile en iyi B/H eğrisi veren ideal doyumlu nüve malzemesiyle elde edilebilen mıknatıslama eğrisi

Gerçek ARM'de çakışık durum endüktansı, hava boşluğu küçük ve kobalt-demir alaşımlı makinalarda bile sonsuz olmayıp, mıknatıslama eğrisi hiçbir bölgede ideale yakın değildir. Tasarımda çakışık olan ve çakışık olmayan endüktans oranı (L_{max}/L_{min}) en azından 10 olması istenilen bir durumdur[19]. Bu durum sadece hava boşluğunun küçük ve kutup sayısının göreceli olarak az olması ile mümkündür.

3.4 Doyumsuz ARM'nin Özel Durumu

Manyetik doymanın olmadığı bir motorda mıknatıslama eğrisi Şekil 3.8'de görüldüğü gibi doğrusaldır. Herhangi bir pozisyonda, koenerji ve depolanan manyetik enerji birbirine eşit olup Eş. (3.6)'da



Şekil 3.8 Manyetik doyma olmayan bir motorda mıknatıslama eğrileri

$$W_f = W^* = 1/2(Li^2) \qquad (3.6)$$

olarak verilmiştir. Burada L belirli bir pozisyondaki endüktans değeridir. Bu durumda ani tork Eş.(3.7)'de,

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \qquad (3.7)$$

olarak sadeleştirilebilir.

Doyumsuz motor için L(θ) eğrisi Şekil 3.8'de gösterilen formdadır. Üst üste çakışma peryodu süresince dL/dθ sabittir. Bu durumda, peryot süresince akım sabit tutulursa, tork da sabit olur. Şekil 3.8 ARM için sık sık kullanılmış olmasına rağmen doyumsuz motor pratikte mümkün değildir: Eğer bir motor yeterince büyük hava boşluklu ve doyumu önlemek için kalın kesitli yapılmış olsaydı birim hacim başına tork değeri çok küçük, denetleyicisi de aşırı büyük olurdu.

3.5 Ortalama Tork Üretimi

ARM'de ani torkun sabit olması gerekmemektedir. Torkdaki dalgalanma problemi bir kenara bırakılırsa, ortalama tork kullanıcı açısından daha önemlidir. Ortalama tork, Eş. (3.1)'in integrali alınarak hesaplanabilir. Fakat enerji dönüşüm eğrisi üzerindeki alanlardan elde etmek daha kolaydır. Bu durum Şekil 3.9'da görüldüğü gibi üç aşamada gerçekleştirilmiştir.

Motorun sabit hızda döndüğü ve kutupların çakışık olmadığı bölgenin yakınlarında gerilimin birinci sargıya uygulandığı kabul edilirse, manyetik akı Eş. (3.8)'e göre artış gösterir.

$$\psi = \int (V_k - Ri)dt = \frac{1}{\omega} \int (V_k - Ri)d\theta \qquad (3.8)$$

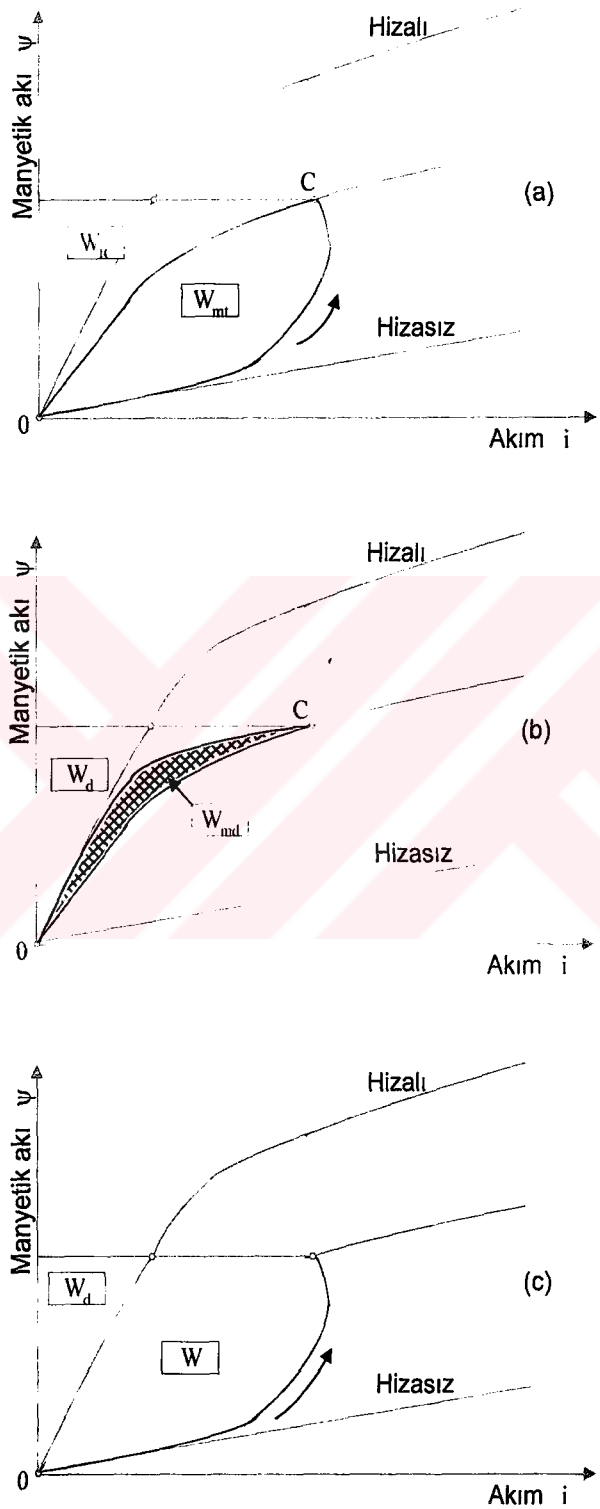
Eğer kaynak gerilimi V_k sabit ve faz direnci R küçük ise, manyetik akı ψ, rotor pozisyonu ile doğrusal olarak artar. Kutupların çakışık olmayan pozisyon civarında endüktans düşük ve yaklaşık olarak sabit iken, akım ilk anda

doğrusal olarak artar. Fakat kutuplar çakıştığı anda endüktans da artar ve zıt emk oluşturarak akımdaki artış oranını azaltır. Dolayısıyla (i,ψ) çalışma noktası, Şekil 3.9'deki 0 ile C noktası arasında gösterilen eğriyi takip eder. C noktasında faz anahtarı terslenir. Bu durumda kaynak gerilimi ters çevrilmiş olup akım, diyot üzerinden serbestçe dönüş sağlar. Şekil 3.9.a'da çakışık ve ayrık kutup pozisyonları için mıknatıslama eğrileri ve komütasyon açısı θ_C gösterilmektedir.

C noktasında kaynaktan elde edilen enerji, toplam alan $U=W_{mt}+W_{fc}$ 'ye eşittir. Depo edilen manyetik enerji W_{fc}'dir. Böylece 0-C arasında yapılan mekaniki iş W_{mt} olur. Bu durum transistör iletimde olduğu sürece oluşur. Şekil 3.9'da gösterildiği gibi (W_{mt}) alanı W_{fc} ile karşılaştırırsa, sağlanan enerjinin sadece yarısı mekanik işe dönüştüğü görülür. Diğer yarısı ise manyetik alanda depo edilmektedir.

Şekil 3.9.b'de komütasyondan sonra kaynak gerilimi ters çevrilip ve W_d enerjisinin kaynağa geri aktarıldığı durum görülmektedir. 0 noktasında akım ve manyetik akının ikisi birden yok olduğundan depolanan manyetik enerjide yoktur. 0-C arasında yapılan mekanik iş $W_{md}=W_{fc}-W_d$'ye eşit olup, Şekil 3.9.b'de görüldüğü gibi W_{fc}'nin yarısından azdır.

Şekil 3.9.a ve Şekil 3.9.b'deki taralı alanlardan, basit bir enerji dengesi çıkarılabilir. Pozisyon 0-C arasında iken transistörün iletim peryodu süresince (fluxing) denetleyiciden sağlanan enerji $U= W_{mt}+W_{fc}=100J$ olduğu kabul edilirse C noktasında 50J mekanik işe dönüştürülür ve 50J ise manyetik alanda depo edilir. Pozisyon C ve 0 arasında iken diyodun iletimi süresince (de-fluxing) $W_d=35J$ kaynağa geri aktarılır ve $W_{md}=15J$ ise mekanik işe dönüşür. Dolayısıyla toplam mekanik iş $W=W_{mt}+W_{md}=50+15=65J$ veya denetleyiciden sağlanan enerjinin %65'i olur. Kaynağa dönen enerji ise $W_d=35J$ veya her darbede denetleyicinin sağladığı enerjinin %35'i olur. Darbenin tamamı Şekil 3.9.c'de gösterilmiştir.



Şekil 3.9 Ortalama tork enerji dönüşüm çevrimi,(a) transistör iletim peryodu, (b) diyot iletim peryodu, (c) toplam peryot

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

Kaynağa dönen enerji $R=W_d$ iken enerji dönüşümü W alanı olarak gösterilir Denetleyiciden sağlanan orjinal enerji, U=W+R 'dir. Lawrenson, bu orjinal enerji dönüşümünün varlığını ifade etmek için E enerji oranını önermiştir [26].

$$E = \frac{W}{W+R} = \frac{W}{U} \tag{3.9}$$

dir. Enerji oranı, A.C makinalarındaki güç katsayısına benzer şekilde algılanmalıdır. Fakat gerçekte bu daha genel bir kavram olup AA makinaları için bile enerji akışını analiz etmekte kullanılabilir. Önceki basit işlemde E=0.65 bulunmuştu.

Ortalama tork, her devirdeki enerji dönüşüm çevrimi sayısından tanımlanırsa, her devirdeki darbe sayısına eşittir. Bir devirde tüm Nr kutupları tüm m fazları tarafından enerjilendirilmelidir. Bir devirdeki darbe sayısı mNr ve dolayısıyla, bir devir boyunca ortalama tork;

$$T = \frac{mN_r}{2\pi} W \tag{3.10}$$

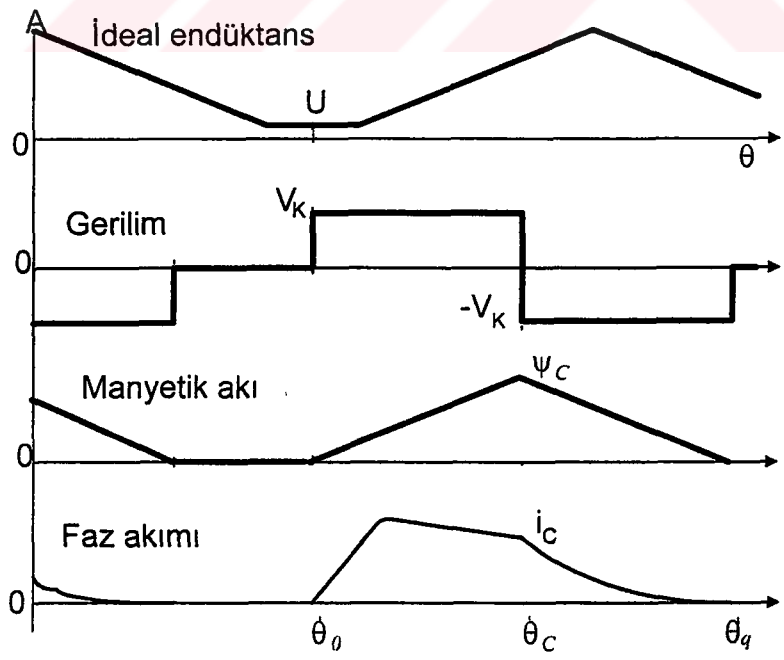
olur. Eğer W joul biriminden verilir ise tork Nm'dir. Bu teori tüm fazlar için enerji dönüşüm çevrimlerinin aynı olduğunu kabul eder. Uygulamada fazlar arasında belirli bir oranda etkileşim olabileceğinden bu kabulden uzaklaşılabilir. Bu etkileşim üretim hatası bulunmayan ideal makinalarda bile olabilir ve kutup ve faz sayısına ve sargıların bağlantı ve sarım şekline bağlıdır[69]. Üretimde geometrik asimetriliği veya eksenden kayıklığı azaltarak ve manyetik devrenin ortak kısımlarında yeterli derecede nüve kesiti sağlayarak, fazlar arasındaki etkileşimin azaltılmasına çalışılır[19].

3.6 Dinamik çalıştırma

ARM'nin dinamik hareketi bir darbedeki dinamik tepkisi ve bir faz boyunca gerçekleşen kıyıcılı akım regülasyonları ile açıklanabilir.

3.6.1 Bir darbelik çalışma

Şekil 3.10'da yeterince yüksek hızdaki bir darbelik çalışmada; manyetik akı, akımın iletim ve kesim açıları, ideal endüktans ve gerilimin dalga şekli görülmektedir. Şekil 3.10'da görüldüğü gibi bir darbelik çalışmada manyetik akı sabit değildir. Ancak her darbede sıfırdan başlatılmalıdır. Bu işlem peryodik olarak rotor kutupları, uyarılması gereken fazın stator kutuplarına yaklaşırken gerçekleştirilir. Akım, güç kaynağından enerjinin sargıya θ_0'da uygulanması ve komütasyon açısı θ_C'de kesilmesi ile kontrol edilir.



Şekil 3.10 Bir darbelik ideal endüktans, manyetik akı ve akım dalga şekilleri

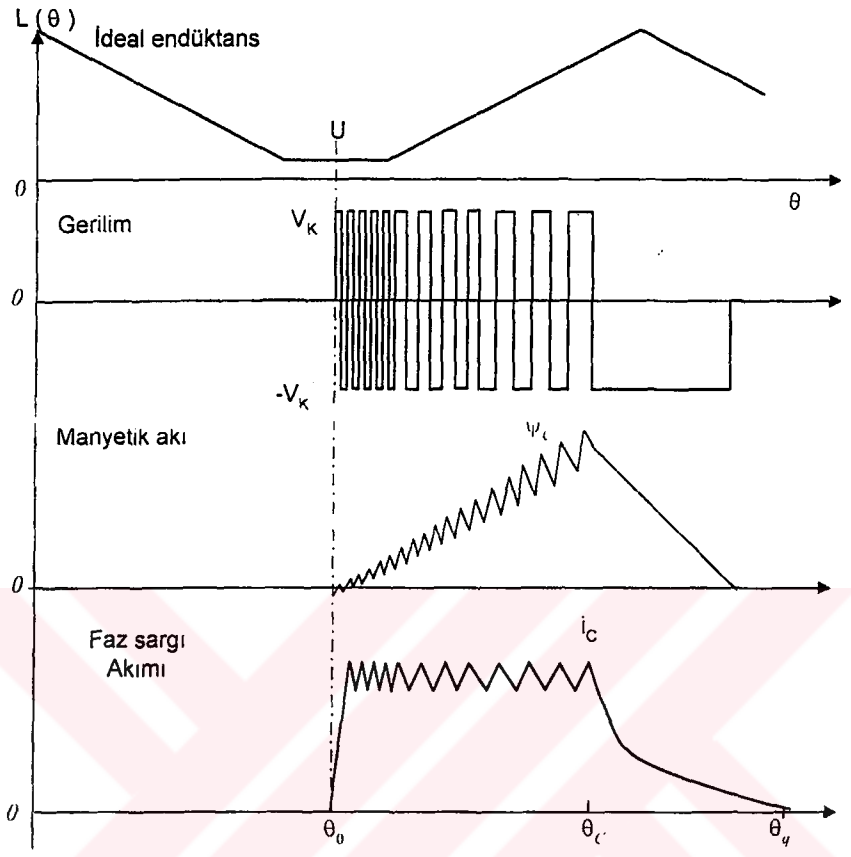
Her bir fazın iki transistörle kontrol edildiği durumda transistörlerin her ikisi birden θ_0'da iletimde ve θ_C 'de kesimdedir. Şekil 3.10'daki dalga formları ile motorun çalıştırılması bir darbelik çalışma olarak adlandırılır. Saçak akısı olmayan ve sonsuz geçirgenliği olan rotor ve stator ile elde edilen endüktans idealleştirilmiş endüktans olarak bilinir. Bu endüktans, aktif fazın üzerindeki stator ve rotor kutupları arasındaki çakışmanın miktarını doğrudan gösterdiğinden, dalga şekilleriyle rotor pozisyonu arasında ilişki kurmak için kullanılır.

3.6.2 Kıyıcılı akım regülasyonu

Histerezis tip akım regülatörü ile elde edilen dalga formları Şekil 3.11'de gösterilmiştir. Burada güç transistörlerinin iletime veya kesime götürülmesi, motor faz akımın referans akımdan büyük veya küçük olmasına göre gerçekleştirilir.

Ani faz akımı geniş band aralıklı akım dönüştürücüleri ile ölçülür. Ölçülen bu akım toplama noktasına geri besleme olarak gönderilerek hata sinyali elde edilir. Elde edilen hata güç transistörlerinin durumunu kontrol etmek için doğrudan kullanılır. Yumuşak ve sert anahtarlama şemalarını kullanmak mümkündür. Şekil 3.10'da sert anahtarlama dalga şekilleri gösterilmiştir. Yumuşak anahtarlama dalga şekilleri de benzer özelliktedir.

Basit bir histerezis denetleyici, akım dalga şeklinin histerezis bandı içerisinde yani bandın üst ve alt sınırlar dahilinde olmasını sağlar. Kaynak geriliminin sabit olduğu durumda, faz endüktansı yükselirken anahtarlama frekansı azalması Şekil 3.11'de görülmektedir. Burada, ortalama akım sabit kalırken endüktans ve manyetik akı artmaktadır. Güç transistörlerinin durumlarına bağlı olarak faz sargısına uygulanan kaynak gerilimi V_K, $-V_K$ veya sıfır olabilir.



Şekil 3.11 Akım regülasyonu ve sert anahtarlama

3.7 Faz Endüktans Modeli

Endüktansın modellenmesinde diğer metotlara göre oldukça basit olan kosinüs metodu kullanılabilir. Bu yöntemle dört fazlı bir ARM için self endüktans aşağıdaki şekilde kabul edilebilmektedir.

$$L_a = L_1 + L_2 \cos 6\theta \quad (3.11)$$

$$L_b = L_1 + L_2 \cos (6\theta + 2\pi/4) \quad (3.12)$$

$$L_c = L_1 + L_2 \cos (6\theta - 2\pi/4) \quad (3.13)$$

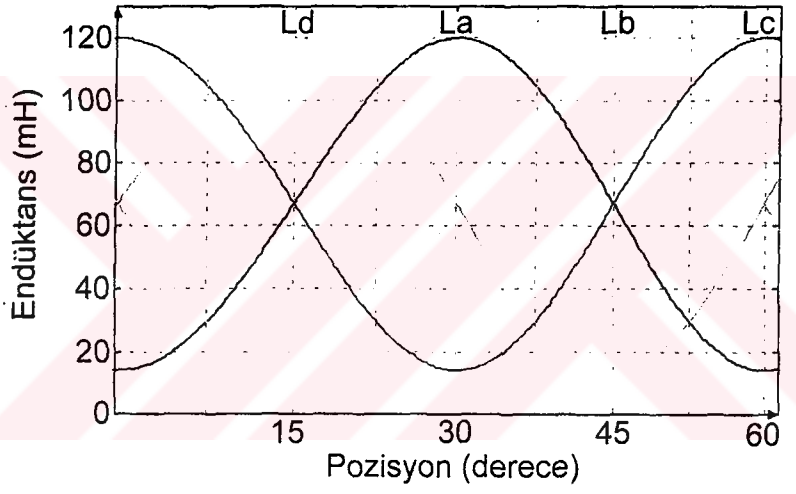
$$L_d = L_1 + L_2 \cos (6\theta + \pi) \quad (3.14)$$

Burada;

$$L_1 = (L_{max} + L_{min})/2 \quad (3.15)$$

$$L_2 = (L_{max} - L_{min})/2 \quad (3.16)$$

dir. Bu modelden elde edilen 4 faz endüktans değişim eğrileri Şekil 3.15'de gösterilmiştir.



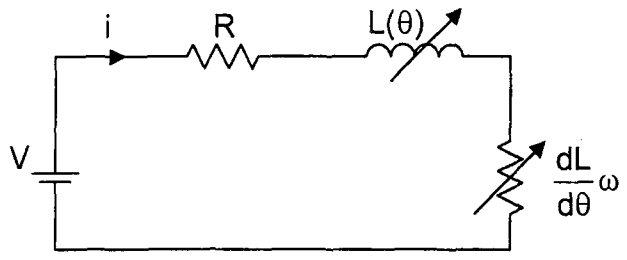
Şekil 3.12 Kosinüs teoremine göre elde edilen endüktans eğrileri

3.8 ARM'nin Eşdeğer Devre Modeli

Bir faz için ARM'nin eşdeğer devresi Şekil 3.13'de görülmektedir. Eşdeğer devreden her bir stator sargısı (her bir faz) için gerilim diferansiyeli Eş.(3.17),

$$V = Ri + \frac{d\psi(\theta,i)}{dt} - M(\theta)\frac{di'}{dt} \quad (3.17)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada, V kaynak gerilimi, R stator sargı direnci,



Şekil 3.13 ARM nin bir fazı için eşdeğer devre

ψ manyetik akı, i sargı (faz) akımı, M(θ) karşılıklı endüktans, θ rotor pozisyon açısı, i' ilgili fazdan önce uyarılan sargı akımıdır.

Doyum ihmal edildiğinde flux ψ=L(θ)i olduğundan Eş. (3.17) yeniden düzenlendiğinde,

$$V = Ri + \frac{d(L(\theta),i)}{dt} - M(\theta)\frac{di'}{dt} \qquad (3.18)$$

olmaktadır. Burada L(θ) faz endüktansını göstermektedir. Türevsel ifade parçalara ayrıldığında Eş. (3.18);.

$$V = Ri + L(\theta)\frac{di}{dt} + i\frac{dL(\theta)}{dt} - M(\theta)\frac{di'}{dt} \qquad (3.19)$$

şekline gelmektedir. Karşılıklı endüktans değeri minumum endüktansdan ihmal edilebilecek kadar çok küçüktür. Bu ihmal edildiğinde Eş. (3.29),

$$V = Ri + L(\theta)\frac{di}{dt} + i\frac{dL(\theta)}{dt} \qquad (3.20)$$

Eş (3.30) şekline gelir. Aynı zamanda

$$\frac{dL(\theta,i)}{dt} = \frac{dL(\theta,i)}{d\theta}\omega \qquad (3.21)$$

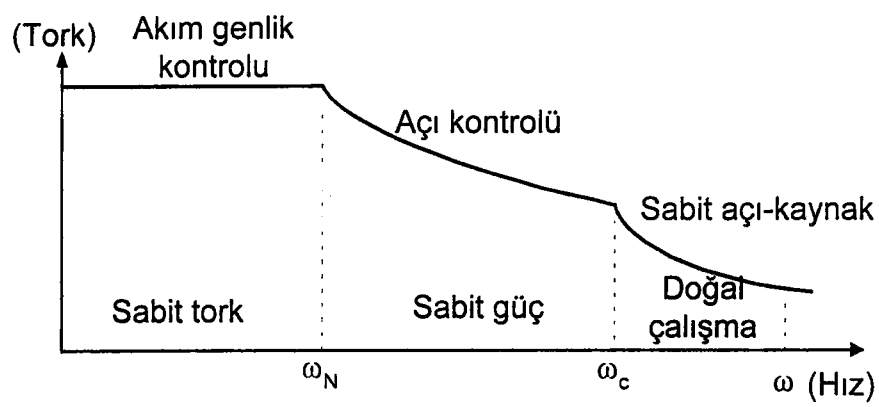
$$\frac{di}{dt} = \frac{di}{d\theta}\omega \qquad (3.22)$$

olmaktadır. Burada ω açısal hızdır. Eş. (3.21)'de gerekli işlemler yapılarak yeniden düzenlendiğinde Eş. (3.23) yazılabilir.

$$V = Ri + L(\theta)\frac{di}{d\theta}\omega + i\frac{dL(\theta)}{d\theta}\omega \qquad (3.23)$$

3.9 ARM'nin Tork-Hız Karakteristiği

Bir ARM'nin genel tork-hız karekteristiği Şekil 3.14'de görülmektedir. ARM için çalışma şartları motor hızına göre üç bölgeye ayrılmaktadır. Bunlar,düşük ve orta hızlarda oluşan sabit tork, yüksek hızlarda oluşan sabit güç ile çok yüksek hızlarda oluşan sabit $T\omega^2$ bölgeleridir.



Şekil 3.14 ARM'nin genel tork-hız karakteristiği

- *Sabit tork bölgesinde çalışma*

Taban hız ω_N'nin altındaki hızlar için, konvertör ateşleme açısı sabit bir değerde tutulmakta ve böylece motor torku en az dalgalanma ile en büyük değere çıkarılmaktadır. Motor ortalama torku motor faz akımları ayarlanarak denetlenmektedir. ARM'lerde motor fazları sıralı bir şekilde enerjilendirilmektedir. Böylece bir anda sadece bir faz aktif olmaktadır. İki fazında geçici olarak aktif olduğu komütasyon peryotları bunun dışındadır. Tork denetim modunda çalışmada, aktif fazdaki akım bir akım regülatörü tarafından denetlenmektedir.

- Sabit güç bölgesinde çalışma

Anma hız ω_N'in üzerindeki hızlar için, akım regülatörü etkili olamamaktadır. Çünkü bu çalışma bölgesinde zıt emk yükselmekte ve kaynak gerilimi sabit akım sağlamak için yeterli olmamaktadır. Konvertör iletim açısının hızın bir fonksiyonu olarak arttırılması ile motor hızı arttırılabilmekte ve böylece $T\omega$ değeri sabit hale getirilmektedir.

- *Doğal çalışma bölgesinde çalışma*

Motor hızı ω_C hızından büyük olduğu zaman, konvertör iletim açısı en büyük değerine getirilebilmektedir. ARM böylece doğal tork-hız karakteristiği ile çalışabilmektedir. Yani, $T\omega^2$ değeri DA seri motorda olduğu gibi yaklaşık sabit olmaktadır[19,75,79].

3.10 ARM'nin Dinamik Eşitlikleri

ARM'nin dinamik davranışını tanımlayan tork Eş.likleri Eş. (3.24);

$$T = J\frac{d\theta^2}{dt} + B\frac{d\theta}{dt} + T_L \qquad (3.24)$$

ve Eş.(3.25)

$$T = J\frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_L \qquad (3.25)$$

dir. Burada; T motor torku, J toplam atalet momenti, B sönüm katsayısı ve T_L ise yük torkudur.

Tanımlanan bu modelde histerezis ve Eddy-akımlarından dolayı meydana gelen kayıplar dikkate alınmamıştır. Bu modelin hassasiyeti, motor endüktansının modellenme hassasiyetine bağlıdır.

3.11 ARM'ler için Sürücü Seçim ve Tasarım Kriterleri

ARM'lerde tork, faz akımının yönüne bağlı olmadığından tek yönlüdür ve tek kutuplu denetim devresinin kullanımına müsade etmektedir. Bu da AA ile çalışan aynı sürücü devrelere göre bazı avantajlara sahip olduğunu göstermektedir. Akımın tek yönlü olmasının ikinci bir avantajı da histerezis 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 tork üretmek için konvertörün motor sargılarına kare dalga akım sağlanması gerekmektedir. Bu durum, bir sargıdan diğerine mümkün olduğunca hızlı bir komütasyonu gerektirmekte ve akımın iletim peryodu 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 parametreli denetleyiciler uygun olmayabilmektedir. Bu yüzden motor faz akımlarının yakın denetimli bir uyumlu denetleyiciyi gerektirmektedir[80].

ARM'yi beslemek için bir çok konvertör yapısı literatürde tavsiye edilmiş ve bunlar üzerinde çalışılmıştır. Bu konvertörler bir fazdan diğerine komütasyon boyunca kullanılan besleme devreleri ve enerjiyi geri toparlama teknikleri bakımından birbirinden farklılık göstermektedirler.

3.11.1 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 avantajları ve dezavantajları vardır. Besleme devreleri hakkında ayrıntılı çalışmalar literatürde mevcuttur[80,81,82].

Akım denetimli besleme özellikle düşük hızlı çalışmalarda uygun olmaktadır. Bu şekildeki çalışmada, motor torku sabit tork bölgesinde minumum dalgalanma ile denetim edilebilir. 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[21].

3.11.2 ARM'de komütasyon işlemi

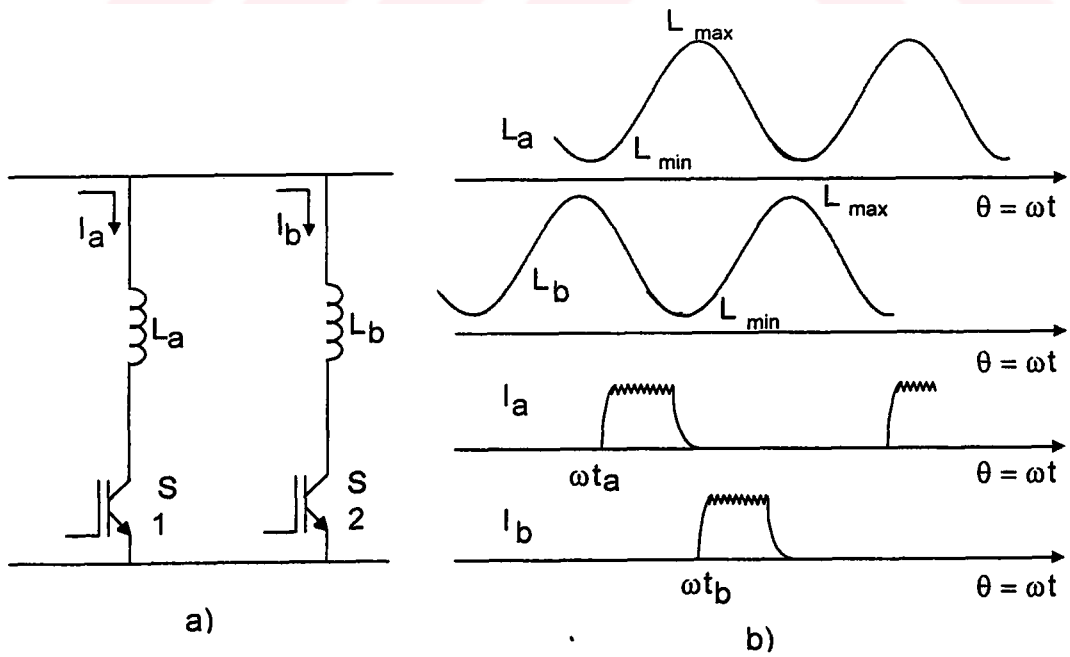
Kullanılan besleme devresinden bağımsız olarak, bir sargıdan diğerine komütasyon, depo edilmiş ve tahliye edilmesi gereken yüksek seviye enerjili

bir akım komütasyonudur. Bu durum komütasyon işleminde yüksek değerli motor endüktansından kaynaklanmaktadır. ARM'lerde bir fazdan diğerine komütasyon Şekil 3.18'de görülen devre ve dalga şekilleri ile açıklanabilir. Burada A fazından B fazına komütasyon dikkate alınmaktadır.

Pozitif tork üretmek amacıyla A sargısı, endüktansının yükselmeye başladığı anda enerjilendirilmektedir. S_1 anahtarı t_a anında iletime geçmekte ve t_b anında kesime gitmektedir. Bu anda, S_2 anahtarı B sargısına enerji sağlamak için iletime geçirilmektedir. t_b anında S_1 anahtarı kesime getirildiği zaman, A sargısındaki akım I_0 ve endüktansı ise L_{max} ya da L_{max}'a yakın olmaktadır. A sargısında depo edilen enerji,

$$W = \frac{1}{2} L_{max} I_0^2 \qquad (3.26)$$

olmaktadır.



Şekil 3.15 ARM'de komütasyon işlemi (a) Basitleştirilmiş devre b)Dalga şekilleri

Negatif tork darbeleri üretmekten kaçınmak için akım düşme zamanını azaltmak gerekmektedir. Bunun için de 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[46].

3. Gerilim beslemeli konvertörde, depolanmış enerji geçici olarak bir filtre kondansatöründe saklanmakta ve takip eden faz sargısına gönderilmektedir[21].

4. Akım beslemeli konvertörde ise depolanmış enerji komütasyon kondansatöründe saklanmaktadır[21].

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

3.11.3 Güç anahtarı seçimi

Konvertörlerde kullanılacak güç anahtarlarının seçimi sistemin performans ve maliyetini doğrudan etkilediğinden büyük önem taşımaktadır. Konvertörlerde kullanılabilecek yarı iletkenler tristörler, kapıdan tıkamalı tristörler (Gate Turn-off Thyristors -GTO), bipolar transistörler (BJT), MOSFET ve yalıtılmış kapılı bipolar transistörler (IGBT-Isolated Gate Bipolar Transistors) dir. Anahtar seçiminde anahtarın maliyeti, sürülmesinin kolaylığı, snubber ihtiyacı,

anahtarlama hızı, iletim kayıpları, motorun çalışma akım ve gerilimini içeren güç ihtiyacı dikkate alınmalıdır[21,65].

Düşük güçlü ARM'lerde (2-3 kW'a kadar) MOSFET'ler kullanılabilmektedir. 3kW'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 ise yüksek gerilim ve akım kabiliyetlerinden dolayı GTO'lar daha uygun olmaktadır [70].

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 anahtarlamada daha avantajlıdırlar[67]. Bu avantajlar: düşük iletim kayıpları, aynı çıkış gücü için küçük boyut dolayısıyla düşük giriş kapasitansı ve maliyet olarak belirtilebilir.

3.12 ARM Denetim Teknikleri

İyi bir denetleyiciden beklenen temel özellik; dört bölgede çalışabilen, düşük tork dalgalanmalarına, hızlı tepkiye, iyi bir kararlılığa sahip olması ve sıfır hızda motorun çalışmasını sağlamasıdır[21]. 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 tork 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[68].

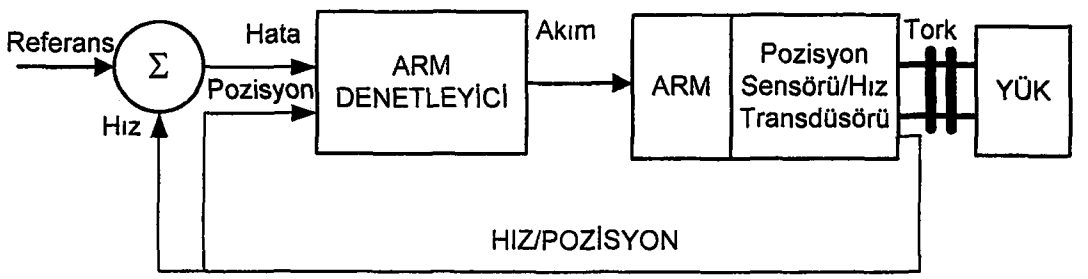
Anahtarlamalı Relüktans motorlar yapısı gereği ihtiyaç duydukları, hassas rotor pozisyon bilgisi rotora bağlanan bir pozisyon sensöründen elde edilir. Bu durum motora ek maliyet getirmekte, motorun zor çalışma ortamlarında çalışmasını sınırlandırmakta ve güvenirliğini azaltmaktadır. Bu dezavantajın ortadan kaldırılabilmesi için yapılmış olan pek çok çalışma literatürde

mevcuttur. Bu çalışmalardaki esas prensip motorun yapısı itibarı ile kendi başına bir pozisyon sensörü oluşturabileceği varsayımıdır [49]. Bu nedenle ARM denetim metotlarını pozisyon sensörlü ve pozisyon sensörsüz olmak üzere başlıca iki ana gruba ayırmak mümkündür.

3.12.1 Sensörlü çalışmaya dayalı denetim teknikleri

ARM'lerde kullanılan denetleyici yapısı diğer AA ve DA sistemlerde kullanılan denetleyici yapılarına benzer özelliktedir. Şekil 4.1 de bir ARM için kapalı-döngü hız kontrolü için blok diyagramı görülmektedir[39].

Blok diyagramda ARM ve ARM ile birlikte bir hız/pozisyon sensörü görülmektedir. Burada giriş akım ve çıkış tork olarak değerlendirilebilir. Benzer şekilde, ARM denetleyici de girişi referans hız ile gerçek hız arasındaki farktan oluşan hata ile çıkışı akım olarak değerlendirilebilir. Blok diyagramda verilen akım tüm faz akımlarını kapsamaktadır. Bu akımlar tamamıyla DA veya AA değildir. Üstelik faz akımları hem yük hem de hıza göre değişirler. Bazı uygulamalarda tork dalgalanmalarının da belirli bir değerin altında olması istendiğinden akım dalga şeklinin de kontrolü gerekir.



Şekil 3.16 ARM için genel bir hız denetim sistemi yapısı

Şekil 3.16'daki diyagram genel bir yapı olup buna benzer bir çok denetleyici yapısı geliştirilebilir. ARM'lerin performansını arttırmak amacıyla PI gibi klasik denetim tekniklerinin dışında, daha gelişmiş denetim teknikleri üzerine çalışmalar da gerçekleştirilmiştir. Bunların başlıcaları olarak ARM'lerin

bulanık mantıkla ve yapay sinir ağlarıyla modellenmesi ve denetimi ile kayma modlu denetim sayılabilir.

3.12.2 Bulanık mantık denetleyici ve yapay sinir ağları ile modelleme

Bir denetim sisteminde bulanık denetim algoritması; bir operatörün, tasarımcının ve araştırmacının tecrübelerini ve sezgilerini içine almaktadır. Bulanık mantık uygulamasında denetlenecek sistemin kesin matematiksel modelinin bilinmesine gerek yoktur. Bu nedenle modeli tam olarak bilinmeyen veya iyi tanımlanamayan sistemler için oldukça uygun bir denetim metodu olarak görülmektedir. Bulanık mantık temelli denetleyiciler; karmaşık, doğrusal olmayan çok boyutlu sistemlerin kontrolünde uygun sonuçlar vermektedir[49].

ARM'lerin yapısının doğrusal bir özellik göstermemesi ve endüktans modelinin tam olarak çıkarılamaması, bulanık mantık temelli denetleyicileri cazip hale getirmiştir. Bu amaçla bu çalışmada da kullanılan 4 kW HP gücündeki Oulton tipi bir ARM'nin bulanık mantık tabanlı modellenmesi ve denetimi BAY (1995) tarafından gerçekleştirilmiştir[49]. Gerçekleştirilen çalışmada ARM'nin doğrusal olmayan manyetik yapısı bulanık mantık kullanılarak modellenmiştir. Bu modelden elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla kıyaslanması sonucu, metodun uygulanabilirliğinin görüldüğü belirtilmektedir [54]. Bu çalışmada aynı zamanda bulanık mantık denetleyici ile klasik PI denetleyici uygulamaları kıyaslanmıştır. Bulanık mantık denetleyicinin PI denetleyiciye göre daha iyi tepki verdiği ve çalışma şartlarının değişiminden daha az etkilendiği bildirilmektedir. Bulanık mantık denetleyicinin parametrelerinin deneme yanılma yoluyla optimum sonuç alınıncaya kadar değiştirilmesi tasarım süresini uzatmaktadır. Ayrıca bulanık mantık denetleyici için belirli bir tasarım prosedürü olmaması da bir dezavantajdır. Bu nedenle bulanık mantık denetleyici tasarımında parametrelerin optimum tasarımı için genetik algoritmalar veya yapay sinir

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

ağları kullanılması tasarım süresini kısaltılması bakımından tavsiye edilmektedir.

Yapay sinir ağları sağladığı avantajlar dolayısıyla bir çok alanda uygulama alanı bulmuştur. Bu avantajlar öğrenme kabiliyeti ve uyumu, genelleştirilebilmesi, az bilgi gereksinimi, gerçek zamanlı uygulamalarda hızlı çalışması ve uygulama kolaylığı olarak sayılabilir [47,48,49,50]. ARM'lerin yapay sinir ağları ile modellenmesi konusunda bir çalışma Elmas ve diğerleri tarafından gerçekleştirilmiştir [50]. Sistemin eğitimi ve testi için gerekli veriler deneysel olarak motordan alınmaktadır.

4.12.3 Kayma modlu denetim

Kayma modlu denetim (değişken yapılı denetim) özelliğinden dolayı güçlü ve cazip metotlardan birisidir. Değişken yapılı denetim sistemi, geçici işlem süresince denetim yapısını değiştirmesiyle, diğer denetim sistemlerinden farklıdır. Geleneksel denetim sistemlerinde denetim işlemi süresince denetim yapısı sabit olmaktadır. Adaptif denetimde bile adaptasyon mekanizmasına göre katsayıların devamlı değişmesine rağmen aynı yapılar denetim işlemi süresince muhafaza edilmektedir [48,49].

Kayma modlu denetim teorisi yakın zamanlarda, DA motor sürücülerine, asenkron motor sürücülerine, fırçasız DA motor sürücülerine ve konvertörlere uygulanarak başarılı sonuçlar elde edilmiştir[21]. Literatürde kayma modlu denetimin ARM'ye uygulanması konusunda yapılmış çalışma mevcuttur [21]. Ancak, bu çalışmada motorun doğrusal bölgede çalıştığı varsayılmıştır. Halbuki, ARM'ler doyum bölgesinde çalıştırılmak üzere tasarlanmış motorlardır.

Uygulamada, bir ARM sürücüsü V_N genliğinde bir gerilim kaynağına bağlanılarak motor iki seviyeli gerilim (V_N, $-V_N$) ile beslenir. Faz akımlarının profili pals şeklinde olmayıp sürücü çalışmasına bağımlıdır. ARM'nin çalışmasında iki temel çalışma durumu bulunmaktadır. 1. Durum, anma

hızına kadar yani, gerilim üretici zıt emk'dan büyük olduğu zaman ($l_m\omega_n > i_j\omega$) olan durumdur. 2. Durum ise nominal hızın üzerinde ($l_m\omega_n < i_j\omega$) olan çalışma durumudur[30, 32].

3.12.4 Değişken yapılı sistem ve ARM'ye uygulanması

Değişken yapılı sistem (DYS) denetimin amacı. bir sistemin durumlarını (x, y), durum uzayındaki belirli bir yüzeyde kaymaya zorlamaktır. Faz düzleminde tanımlanan sistem durumları, çalışma süresince bu yüzeyde kalmaya devam etmektedir. Düzlemin zaman sabitelerinden çok daha büyük bir anahtarlama frekansı, noktanın hareketini yüzeye yeterince yakın mesafede tutar [21].

Bir DYS denetimin bir ARM sürücüsüne uygulanması, öncelikle değiştirilen değişkenlerinin ve anahtarlama stratejisinin tanımına ihtiyaç duyar. Bir ARM sürücüsünün üç giriş değişkeni olan faz gerilimi, iletim ve kesim açıları arasından sadece faz gerilimi yüksek frekansta anahtarlanabilir. Halbuki, iletim ve kesim açıları her α_r/q derecesinde anahtarlanır. Dolayısıyla faz gerilimi anahtarlabilen değişken olan tek giriştir. Bu gerilim sadece iki değer alabildiği için anahtarlanmış değişken stratejisinin kullanımı zorunlu olmaktadır.

ARM sürücüsünün hızını denetlemek ve faz akımlarını I_n'de sınırlamak amacıyla bir DYS denetimi SEFA tarafından tasarlanmıştır[21]. Sistem, motorun ilgili fazının beslenmesi amacıyla, pozisyon bilgisi ve faz akımlarının algılanmasına ihtiyaç duyar. Faz gerilimi, kıyıcı işlem aralığında anahtarlanmakta, söndürme aralığında ise faza uygulanan gerilim kaynağı tamamen evirilmektedir.

PI'da denetim metoduyla ARM'de üretilen tork dalgalıdır. Kayma modlu ile yapılan denetimde, iletim aralığının $((\alpha_r/q)+\theta_u)$ olması durumunda dalgalanma miktarı büyük oranda azalmaktadır[21].

3.13 ARM için Konvertör Tasarımı

Alternatif akım (AA) devrelerinde, bir gerilim seviyesinden diğerine geçiş transformatörler vasıtasıyla kolaylıkla yapılabilmektedir. Doğru akım (DA) uygulamalarında doğru akımdan doğru akıma (DA-DA) güç değişimi ancak güç konvertörleri vasıtasıyla yapılabilmektedir.

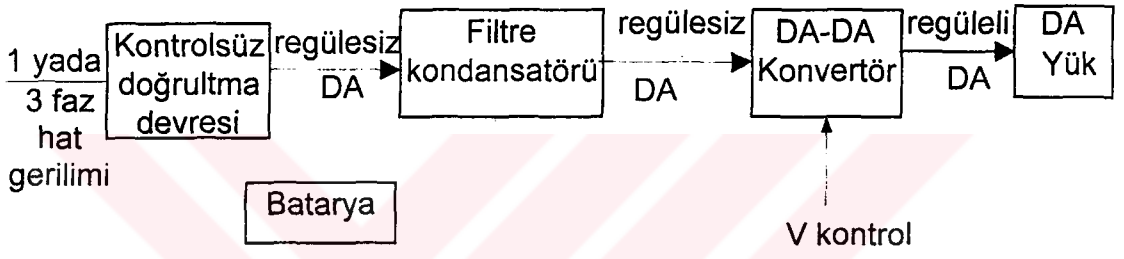
DA-DA konvertörler genellikle DA motor sürücü devrelerinde ve regüleli DA güç kaynaklarında kullanılırlar. DA motor sürücülerindeki konvertörlerin çalışmasında giriş gerilimi sabitken, çıkış gerilimi darbeleme oranı (D) ile ayarlanır. Anahtarlama modlu güç kaynaklarında ise yük değişimi karşısında giriş gerilimi (V) sabitken, D vasıtasıyla çıkış gerilimi ($V_ç$) kontrol edilerek sabit tutulur. Güç kaynaklarında çıkış gerilimini sabit tutmak amacıyla kullanılan DA-DA konvertörler genelllikle sürekli akım modunda çalışırlar[16].

3.13.1 Anahtarlama modlu DA-DA konvertörler

Alternatif akım (AA)'dan doğrultma yapılan ve çıkışında sabit bir gerilim bulundurmayan regülesiz güç kaynaklarının çıkış gerilimini istenen değerde sabit tutmak amacıyla gerilimin seviyesini değiştiren DA-DA konvertörleri kullanılır. Anahtarlama modlu DA-DA güç konvertörlerini flayback, forward, push pull gibi diğer tip konvertörlerden ayıran temel fark anahtarlama modlu DA-DA güç konvertörlerinde izalasyon trafosunun bulunmamasıdır [16]. Bu durum anahtarlama modlu konvertörün önemli bir dezavantajıdır. Özellikle motor sürme devrelerinde ve diğer bazı uygulamalarda giriş ile çıkış arasında elektriksel bir yalıtımın olması tercih edilir. Bu yüzden DA motor sürücülerinde anahtarlama modlu DA güç kaynaklarının hemen hemen tamamında izalasyon trafosu kullanılır. .

3.13.2 DA-DA konvertör çeşitleri

DA-DA konvertörler, güç kaynakları ve DA motor sürücülerinde çok sık olarak kullanılırlar. DA-DA konvertör sistemi besleme giriş katı ve anahtarlamalı tip DA-DA konvertör katı olmak üzere iki kısma ayrılır. Konvetörlerde giriş kaynağının, bir batarya devresi gibi sıfır iç empedansa sahip olduğu kabul edilir.



Şekil 3.17 Bir DA-DA konvertör sistemi blok diyagramı

Çıkış gerilimini düşürücü konvertör olarak bilinen Step down (buck) konvertörler ve çıkış gerilimini giriş geriliminden daha da yükselten step up (boost) konverteler temel konvertör topolojileridir. Step down/step up (buck-boost) konvertörler ise bu konvertörlerin kombinezonlarından oluşmuştur. Cuk konvertörler de step down konvertörlerin özel bir şeklidir[16].

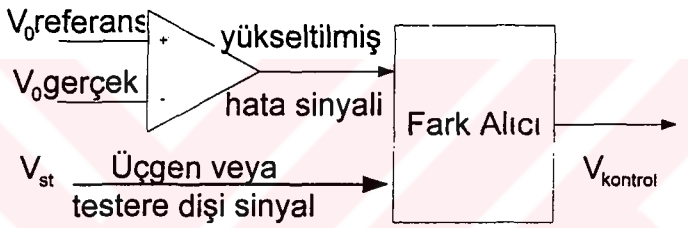
Konvertörlerin çıkış katındaki küçük kapasiteli filtre kondansatörü, DA-DA konvertörlerin tamamlayıcı bir parçasıdır. Anahtarlamalı tip güç kaynaklarında çıkışın, eşdeğer bir dirençle temsil edilen bir yükü beslediği kabul edilir.

3.13.3 DA-DA Konvertörün PWM Tekniği ile Denetimi

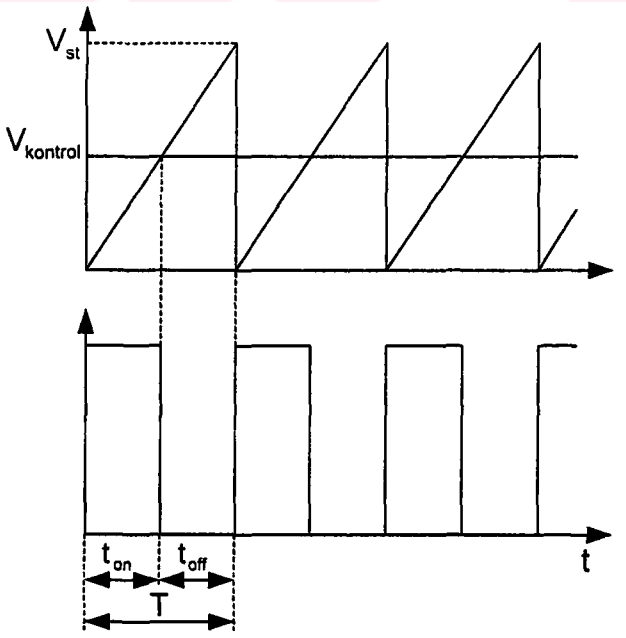
DA-DA konvertörlerde çıkış gerilimi istenen değere önceden ayarlanır. Fakat gerilimin şekli dalgalı olabilir. Anahtarlama modlu DA-DA konvertörlerde ise

anahtarların açılıp kapanma süresi ayarlanarak değişik seviyelerde çıkış gerilimi elde etmek mümkündür.

Şekil 3.18'de çıkış gerilim seviyesinin ayarlanmasında önemli bir rol oynayan kontrol sinyalinin elde ediliş blok diyagramı görülmektedir. Blok diyagramda, gerçek sinyal ile referans sinyal bir fark alıcı devresinden geçirilerek hata sinyali üretilir. Bu hata sinyali yükseltilir ve üçgen yada testere dişi sinyalle birlikte bir fark alıcı devreden geçirilerek kontrol sinyali elde edilir.



Şekil 3.18 PWM kontrol sinyali üretme blok diyagramı



Şekil 3.19 PWM tekniğinde, testere dişi sinyal ile kontrol sinyalinden çıkış geriliminin ayarlanması şeması

Bu işlemde anahtarlama freansı f_a ve anahtarlama peryodu T sabittir. Bu sabit anahtarlama peryodunda D= t_{on} /T ile görev oranı bulunur. Çıkış gerilimi $V_ç$', D ile giriş gerilimi V_g'nin çarpımına eşit olmaktadır. Bu metot, pulse with modulation (PWM) anahtarlama tekniği olarak bilinir.

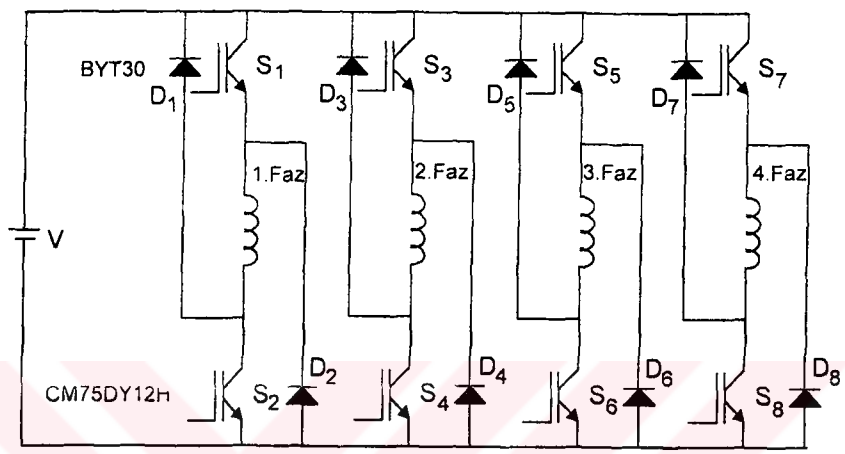
Ayrıca zorlanmış komitasyonlu tristor kullanılarak hem anahtarlama frekansı hem de anahtarların açılma-kapanma (on–off) süresi ayarlanabilen DA konvertör tipleri de vardır[16].

3.13.4 ARM için sert anahtarlamalı konvertör devreleri

Klasik konvertör devresi olarak bilinen ARM sürücü devresi Şekil 3.20'de görülmektedir. Fazlar birbiriyle bağımsız olduğu için her fazın ayrı kontrol edilebilmesi mümkün olmakta ayrıca kullanılan anahtarlar düşük gerilime maruz kalmaktadır[21]. Bu özellikleriyle ARM sürücüleri, AA invertörlerinden farklıdır. ARM sürücülerinde sargılar güç anahtarları ile seri bağlı olduğundan AA sürücülerindeki gibi kısa devre ihtimali yoktur. Sargıların alt ve üst kısımlarındaki güç anahtarları her iletim peryodu veya tork darbesi başlangıcında birlikte çalışmakta ve komütasyon noktasında birlikte kesime gitmektedirler. Kontrol stratejisinin tipine göre anahtarlardan biri veya ikisi birden kıyıcı olarak çalışabilir. Böylece akımın tanımlanan histerezis bandı (kontrol bandı) içerisinde kalması sağlanmaktadır. Bu çalışma modu, motorun zıt emk'sının kaynak gerilimine göre oldukça küçük olduğu düşük hızlarda kullanılmaktadır. Yüksek hızlarda ise her iki anahtar da iletimde olmakta ve böylece akımın dalga şekli hız ve torka bağlı olarak doğal halini almaktadır.

Mantıksal tasarımda, bir anahtarı komütasyon diğerini de regülasyon için kullanmak uygun olmaktadır[32]. İletim peryodu sonunda her iki anahtar da birden kesime getirildiğinde, mekanik enerjiye dönüştürülmemiş sargıda depo edilen manyetik enerji hızlı diyotlar üzerinden kaynağa döndürülmektedir. Diyotlar ileri yönlü kutuplandırıldığında, sargı uçlarına kaynak gerilimi ters

uygulanmış olmaktadır. Enerji kesildiğinde sargıdaki polarite ters yönlü olmakta ve enerji ne kadar kısa sürede kaynağa aktarılırsa kesilmesi istenilen manyetik akı da o kadar çabuk sıfıra düşmektedir.

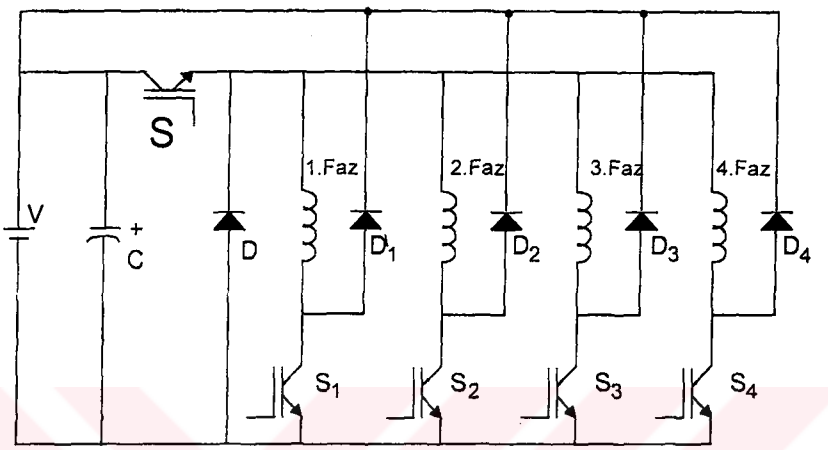


Şekil 3.20 Klasik konvertör devresi

Düşük hızlı sürücülerde bütün hız aralığı boyunca darbe genişlik modülasyonu (PWM) tekniği kullanılmaktadır. Şekil 3.21'de ARM klasik konvertör devresindeki güç anahtarlarının sayısını azaltmak suretiyle elde edilen n+1 konvertör devresi görülmektedir. Bu durumda kıyıcı olarak bütün fazlar için ortak tek güç anahtarı kullanılabilmektedir. Şekil 3.21'deki şemanın alt kısmındaki anahtarlara pozisyon sensörü ve diğer sürme devrelerinin denetimi altında, faz sargılarına sıralı olarak kıyılmış gerilimi uygulamaktadırlar. Bu devre n fazlı bir motor için n+1 tane anahtar ve n+1 tane diyot gerektirmektedir. Dört fazlı bir ARM için 5 tane anahtar ve 5 tane de diyot gerekmektedir. Bu devrenin en büyük dezavantajı yüksek hızlarda fazlar arasında üst üste binmenin meydana gelmesidir[21]. Yüksek hızlarda sargılar diyotlar üzerinden yeteri kadar hızlı deşarj olamamaktadırlar. Çünkü kontrol anahtarı iletim pozisyonunda uzun bir süre kalmaktadır.

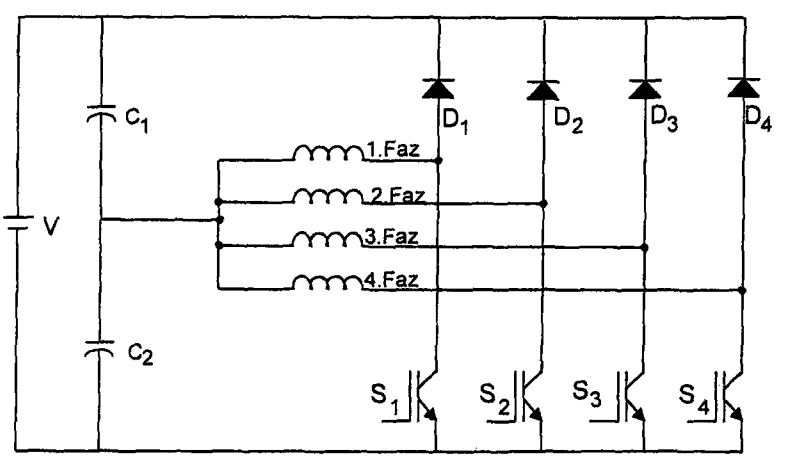
Rotor hizalı pozisyona geldiği halde halen önemli miktarda diyot akımı mevcutsa zıt emk negatif olur. Bu da negatif tork üretimine sebep olmaktadır. Kıyıcı görev saykılının (chopping duty cycle) süresi artarsa ve/veya hız daha

da yükselirse negatif torkdan dolayı, net tork hızla düşmekte ve kayıplar artmaktadır. Bu tip problemler hız çalışma aralığının geniş olduğu durumlarda ortaya çıkmaktadır.



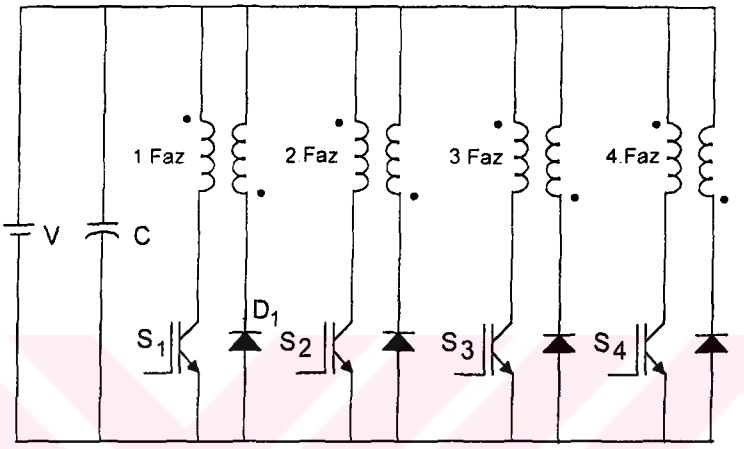
Şekil 3.21 n+1 Konvertör devresi

Anahtar sayısını faz sayısına indirmeye yönelik başka devreler de geliştirilmiştir. Şekil 3.22'de Tasc Drives Ltd. tarafından 4-8 kW sürücü aralığında GTO kullanılarak başarı ile gerçekleştirilen split link devresi görülmektedir. Bu devrede anahtar sayısı faz başına bire indirildiğinden fazladan pasif elemanlar gerekmekte veya kontrol sınırlamalarından dolayı bazı problemler ortaya çıkmaktadır.



Şekil 3.22 Split-link DA. konvertör devresi

Şekil 3.23'de bifılar sargılı konvertör devresi görülmektedir. Bu devredeki bifılar sargı bağlantı sayısını ikiye katlamakta ve bakırın verimsiz kullanımına yol açmaktadır. Ayrıca sargılar arasındaki eşit olmayan etkileşimden doğan gerilim sıçramaları (spike) sebebiyle problemler çıkabilir.

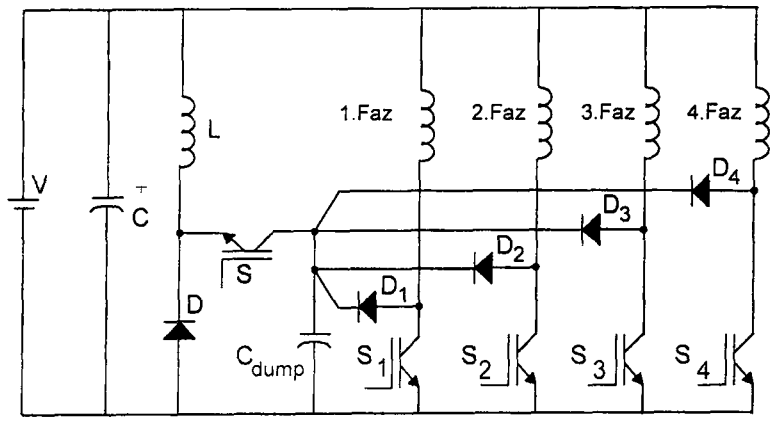


Şekil 3.23 Bifılar sargılı konvertör devresi

Şekil 3.24'de C-dump konvertör devresi görülmektedir. Bu devrede depolanmış enerjiyi boşaltma kapasitörü C'den kaynağa step-down kıyıcı devresi ile iletecek anahtar dahil toplam anahtarlama eleman sayısı n+1 olmaktadır. Ortalama kapasitör gerilimi, komütasyondan sonra hızlı boşalmayı (de-fluxing) sağlamak için kaynak geriliminden yüksek tutulur. Bu devrenin verimi yüksektir. Ancak, ilave elemanlar gerektirir ve kontrolu karmaşıktır.

Enerji deşarj devresindeki bir kontrol hatası, boşaltma kapasitöründe hızlı bir şarj oluşumuna yol açmakta ve eğer koruyucu tedbirler alınmaz ise bütün konvertör elemanları yüksek gerilimden dolayı bozulabilmektedir[21].

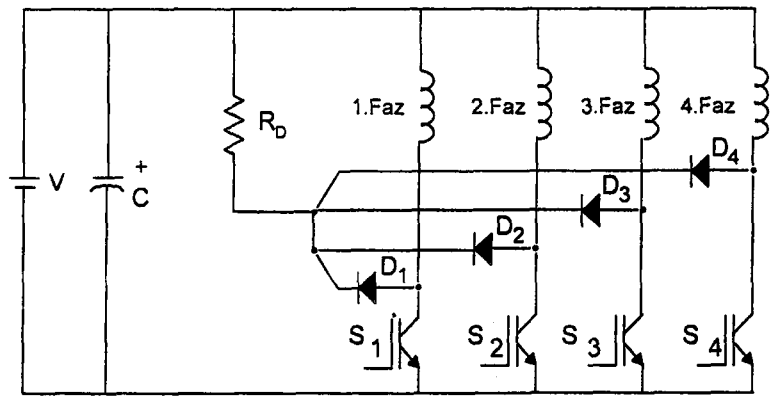
Eğer motor faz sayısı 3'ten fazlaysa her faz için eleman sayısında önemli azalma sağlanmaktadır [19,20].



Şekil 3.24 C-Dump konvertör devresi

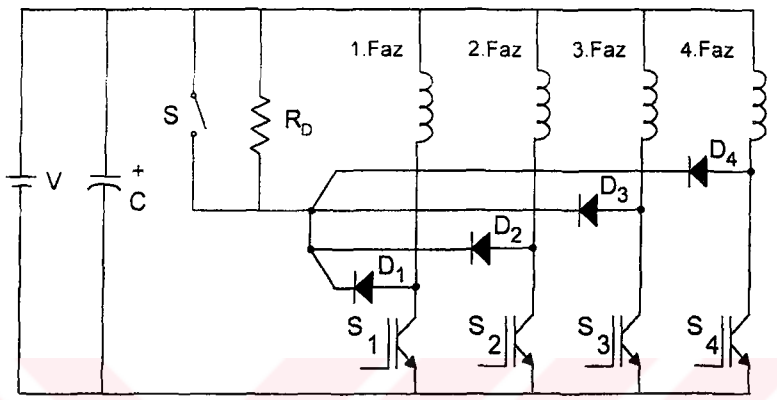
Şekil 3.25'de konvertör düzenekleri içerisinde en ekonomik olanı söndürme dirençli konvertör devresi (supression resistor circuit) görülmektedir. Bu devre düşük performans ve maliyet istenilen uygulamalar için iyi bir seçenek olup kontrolu basittir. Konvertör her bir faz için bir diyot ve bir anahtar gerektirir. Depolanan enerji serbest dönüşüm esnasında R_D direnci üzerinde harcanır.

R_D direncinin değeri oldukça önemlidir. Direncin küçük değerli olması durumunda; hız yüksek iken kuyruk akımının (tail current) uzun olmasına dolayısıyla bozucu tork üretimine sebep olur ve verim düşer. Direncin büyük değerli seçilmesi durumunda ise; komütasyondaki faza bağlı anahtarda yarı iletken elemanlar için tehlike olan büyük değerli gerilim sıçramaları oluşur.



Şekil 3.25 Söndürme dirençli konvertör devresi

Söndürme dirençli konvertör devresinin yukarda bahsedilen sakıncaları düşük verimli olması gibi dezavantajları dikkate alınarak, Şekil 3.26'da görülen çift eğimli (dual decay) konvertör devresi tasarlanmıştır.



Şekil 3.26 Çift eğimli konvertör devresi

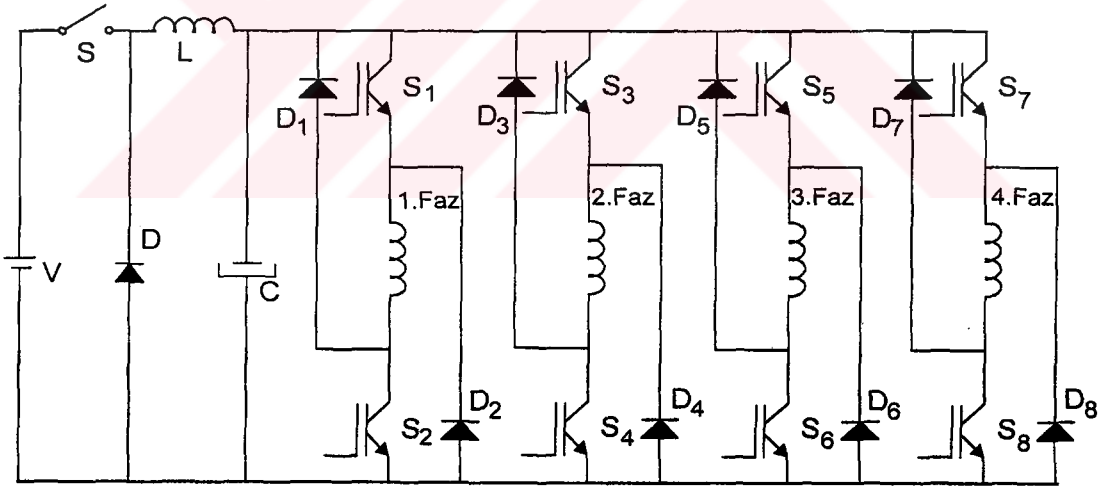
R_D direncine paralel bir anahtar eklenerek oluşturulan bu devre, elektrikli otomobil gibi düşük gerilimli uygulamalar için çok elverişlidir. Sürücü boyutları küçük ve faz başına eleman sayısı azdır. Amaç söndürme direncindeki enerji kaybını azaltmaktır. Düşük hızlı çalışmada, istenilen torku elde etmek için histerezis kontrol vasıtasıyla faz akımı sabit tutulur. Serbest dönüşüm anahtarı, kıyıcı işlem aralığında enerjiyi sönüm direncinde harcamak yerine sargıda tutar. Serbest dönüşüm anahtarı S'nin uygun denetimiyle faz komütasyonundan sonra enerji depolamak mümkündür [21].

3.13.5 Gerilim azaltan (buck) konvertör

Gerilim azaltan konvertörlerde (step down yada buck konvetör) çıkış gerilimi Vç, giriş gerilimi V'den daha küçüktür. Gerilimi azaltan konvertörler genellikle regüleli DA güç kaynaklarında ve DA motor sürücülerinde kullanılır.

Şekil 3.27'de 4 faz ARM yükü ve ideal anahtarlarla oluşturulmuş bir gerilim step down (Buck konvertör) konvertör devresi görülmektedir. Devredeki bobin

ve kondansatör alçak geçiren filtredir ve yükün durumuna bağlı olarak gerekli filtre işlemini yaparlar. Böylece çıkış gerilimindeki dalgalanma mümkün olduğunca azaltılmış olur. Buck konvertörler pratikte sürekli akım iletim, süreksiz akım iletim modları olmak üzere iki ayrı iletim modunda da çalışabilirler. Bu yüzden konvertör tasarlanırken her iki modda da çalışabileceği göz önünde bulundurulur. Konvertörün çalışacağı akım modunu konvertördeki bobinin değeri belirler. Eğer bobinin değeri yeterince büyükse, devrenin çalışma akımı kesinlikle sıfır olmaz, pozitif bölgede dalgalanma yapar. Bu çalışma moduna sürekli akımda çalışma modu denir. Eğer bobinin değeri yeterince büyük değilse her yarım saykılın bir kısmında bobin akımı sıfır olur. Bu çalışma moduna da süreksiz akım modu denir. Konvertör tasarımında her iki tip için ayrı ayrı analiz yapılır.



Şekil 3.27 Buck konvertör ve 4 fazlı ARM'ye bağlantı şeması

Eğer çıkış gerilimi Şekil 3.19'daki testere dişi sinyalin tepe değeri ile denetim sinyalinden bulunmak istenirse;

$$V_{ç} = \frac{V_{kontrol}}{V_{st}}.V \qquad (3.28)$$

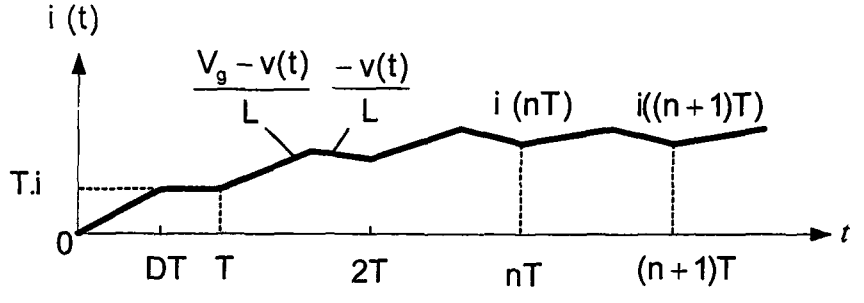
Eş (3.28) elde edilir. Görev oranı ise Eş. (3.29)

$$D = \frac{t_{on}}{T} = \frac{V_{kontrol}}{V_{st}} \qquad (3.29)$$

dir. Anahtarın t_{on}/T oranı değiştirilerek $V_ç$ kontrol edilebilir. Sabit anahtarlama frekansında PWM sinyali; anahtarların açılıp kapanma (on/off) süresi, testere dişi sinyal ile ayarlı $V_{kontrol}$ sinyalleri karşılaştırılarak elde edilir. Bu sinyal genellikle hata sinyalinin yükseltilmesiyle oluşturulur.

3.13.6 Gerilim azaltan konvertördeki akım gerilim ilişkileri

Şekil 3.27'deki devrede bütün elemanların ideal olduğu kabul edilerek bobin akımının sürekli olduğu durum Şekil 3.28'de görülmektedir. Kondansatör çok büyük iken, çıkış gerilimi Vç değerinde sabit tutulur. Anahtarlama peryodu T'dir. Anahtar kapalı iken DT zaman aralığı, anahtar açık iken (1-D)T zaman aralığı geçerlidir.



Şekil 3.28 Buck konverterden beslenen omik bir yük akımının dalga şekli

Devrenin çalışması sırasında anahtar kapalı olduğunda diyot ters kutuplandırılmış olur. Giriş kaynağı şekilde görüldüğü gibi bobin ile birlikte yüke enerji girişi sağlar. Anahtar açık olduğu zaman ise bobin akımı diyot

üzerinden devresini tamamlar. Bobinde depo edilen enerjinin bir kısmı ise yüke aktarılır.

3.13.7 Gerilim azaltan konvertörlerin tasarım faktörleri

Gerilim azaltan konvertörler çoğunlukla sürekli akım işlemi için tasarlanır. Eğer anahtarlama frekansı yeterince yüksek seçilirse, minimum değerdeki bobin sürekli akim modunda çalışmayı sağlar ve minimum kondansatör değerinde, kritik değerde bir çıkış gerilim dalgalanması oluşur. Bu nedenle için kondansatör ve bobinin her ikisi de anahtarlama frekansının yüksek olmasını gerektirir. Fakat anahtarlama frekansının yükselmesi ile anahtarlarda oluşacak kayıplar artacağı için anahtarlama frekansı çok fazla büyük seçilemez. Genellikle anahtarlama frekansı 4 kHz ile 20 kHz arasında seçilir.

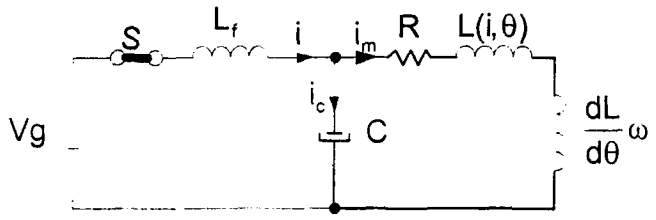
3.13.8 Gerilim azaltan konvertörün durum denklemlerinin oluşturulması

Anahtarlamalı devrelerde analiz için anahtarların açık ve kapalı olduğu durumların incelenmesi ve her iki durum içinde durum denklemlerinin yazılması gerekir.

3.13.8.1 Anahtarın kapalı olması durumu

Anahtar kapalı iken gerilim azaltan konvertörün eşdeger devresi Şekil 4.29'da verilmiştir. Verilen devrenin çevre denklemine göre elde edilen eşitlikleri yazılırsa;

$$V = \omega L_f \frac{di}{d\theta} + Vc \qquad (3.30)$$



Şekil 3.29 Anahtar kapalı iken buck konvertörün eşdeğer devresi

$$i = i_a + i_b + i_c + i_d + \omega C \frac{dv_c}{d\theta} \tag{3.31}$$

eşitlikleri elde edilir. Eş. (3.30)'daki bobin akımı ve Eş. (3.31)'deki kondansatör gerilimi durum değişkeni seçilerek yeniden düzenlenirse, Eş. (3.32) ve Eş.(3.32);

$$\frac{di}{d\theta} = \frac{1}{\omega} \cdot \frac{V - V_c}{L_f} \tag{3.32}$$

$$\frac{dv_c}{dt} = \frac{i - i_m}{C} \tag{3.33}$$

elde edilir.

$$K_a = R + \omega(dL_a / d\theta) \tag{3.34}$$

$$K_b = R + \omega(dL_b / d\theta) \tag{3.35}$$

$$K_c = R + \omega(dL_c / d\theta) \tag{3.36}$$

$$K_d = R + \omega(dL_d / d\theta) \tag{3.37}$$

olmak üzere, Eş.(3.32) ve Eş.(3.33) durum uzay genel formu olan Eş. (3.38)'e benzetilirse

$$\dot{x} = A_1 x + B_1 u \tag{3.38}$$

tüm anahtarlar kapalı iken devrenin durum denklemi;

$$\dot{X}\begin{bmatrix} i \\ i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_d \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\omega L_f} \\ 0 & -\frac{K_a}{\omega L_a} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\omega L_a} \\ 0 & 0 & -\frac{K_b}{\omega L_b} & 0 & 0 & -\frac{1}{\omega L_b} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{K_c}{\omega L_c} & 0 & -\frac{1}{\omega L_c} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{K_d}{\omega L_d} & -\frac{1}{\omega L_d} \\ \frac{1}{\omega C} & -\frac{1}{\omega C} & -\frac{1}{\omega C} & -\frac{1}{\omega C} & -\frac{1}{\omega C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_d \\ V_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{\omega L_f} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [V] \tag{3.39}$$

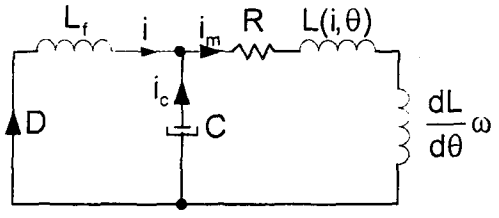
Eş. (3.39) ile ifade edilir. Durum denklemindeki u vektörü giriş gerilimi V'dir. Durum uzay şartlarında hız ω'ın sabit olduğu varsayılır.

3.13.8.2 Anahtarın açık olması durumu

Şekil 3.30'da anahtarın açık olma durumu görülmektedir. Şekil 3.30'daki devrenin akım ve gerilim denklemleri, Kirchoff'un akımlar kanunundan Eş (3.40) ve Eş.(3.41) olarak elde edilmiştir.,

$$0 = \omega L_f \frac{di}{d\theta} + Vc \tag{3.40}$$

$$i = i_a + i_b + i_c + i_d - \omega C \frac{dv_c}{d\theta} \qquad (3.41)$$



Şekil 3.30 Anahtar açık iken buck konvertörün eşdeğer devresi

Eş. (3.40)'da akım, durum değişkeni seçilerek,

$$\frac{di}{d\theta} = \frac{1}{\omega} \cdot \frac{-V_c}{L_f} \qquad (3.42)$$

Eş. (3.42) elde edilir. Aynı şekilde Eş. (3.417)'de kondansatör gerilimi durum değişkeni seçilerek Eş. (3.43),

$$\frac{dv_c}{d\theta} = \frac{1}{\omega} \cdot \frac{i_m - i}{C} \qquad (3.43)$$

olarak elde edilir. Benzer şekilde kaynak akımı i, kondansatör gerilimi V_c ve faz akımları durum değişkeni seçilerek Eş. (3.44)'deki genel durum uzay denklemi yazılabilir.

K_a Eş (3.34), K_b Eş (3.35), K_c (3.36) ve K_d Eş(3.37)'de verilmiştir.

$$\dot{X}\begin{bmatrix} i \\ i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_d \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\omega L_f} \\ 0 & -\frac{K_a}{\omega L_a} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\omega L_a} \\ 0 & 0 & -\frac{K_b}{\omega L_b} & 0 & 0 & -\frac{1}{\omega L_b} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{K_c}{\omega L_c} & 0 & -\frac{1}{\omega L_c} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{K_d}{\omega L_d} & -\frac{1}{\omega L_d} \\ -\frac{1}{\omega C} & \frac{1}{\omega C} & \frac{1}{\omega C} & \frac{1}{\omega C} & \frac{1}{\omega C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_d \\ V_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [V] \quad (3.44)$$

3.14 Buck Konvertörlü ARM'nin PI Tekniği ile Hız Denetimi Simülasyonu

Bir sistemin simülasyonunun başarısı sistem parametrelerinin doğru şeçimi ve modellemenin doğruluğuna bağlıdır. Bu çalışmada kullanılan ARM'nin parametreleri;

Motor gücü=4 kW, 5.5 Hp

V_K=430 volt, L_{max}=120 mH, L_{min}=14 mH (1 Amp. için)

I_n=9 Amper R_f=0.96 Ω J= 0.053 Kgm^2

n_{max}=1500 d/d N_s/N_r=8/6 B= 0.008 Nm sn rad^{-1}

olarak alınmıştır. ARM'ye bağlı bulunan pozisyon sensörü bir devirde 1080 pals ve 1080. palste bir de reset sinyali vermektedir. Buna göre ARM'nin 1^0'lik pozisyon hareketinde 3 pals alınmaktadır.

ARM 4 fazlı ve rotoru 6 kutuplu olduğundan her fazın pozisyona göre endüktans değişimi daha önce Şekil 3.12'de verilmişti. Endüktans değişim

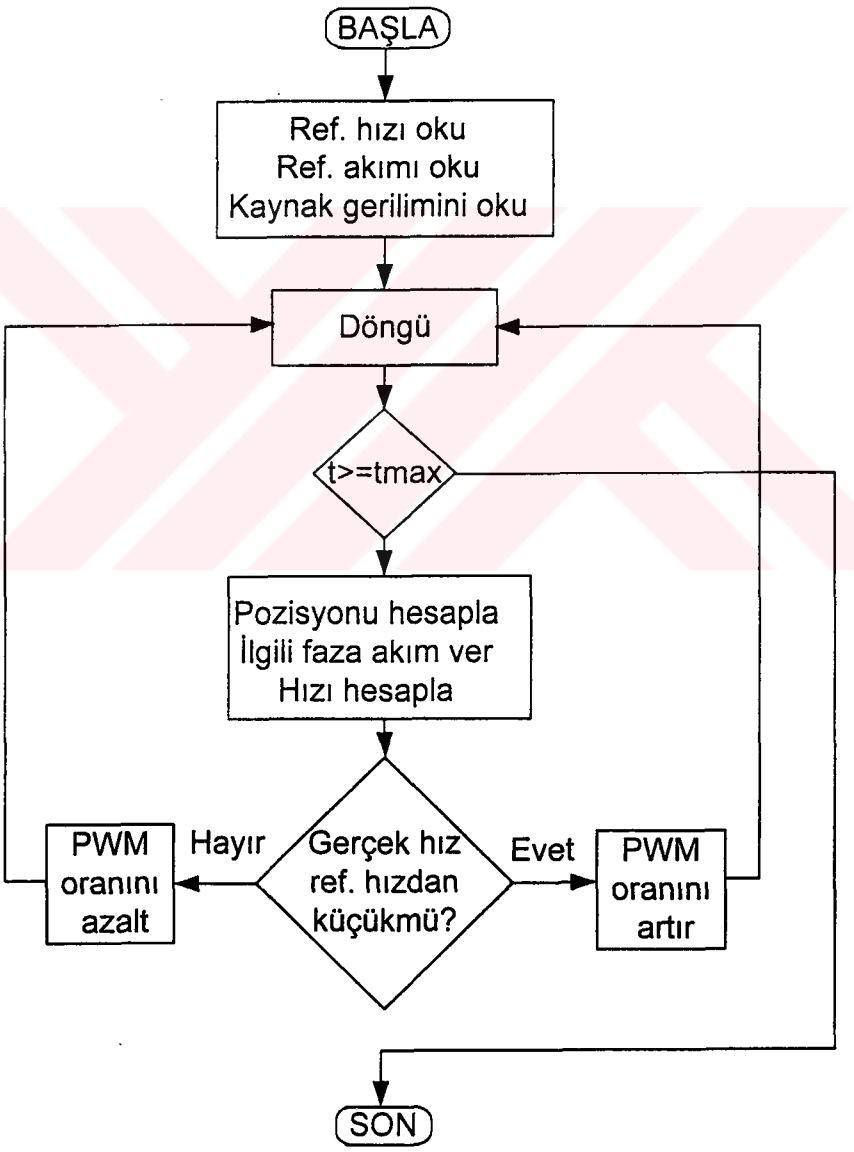
eğrilerine göre rotorun 360^0 'lik hareketinde 1 fazın endüktansı 6 kez tekrarlanır. Simülasyonda ve uygulamada ARM'nin iletim açısı 20^0 ve ortak iletim açısı 5^0 olarak sabit tutulmuştur. ARM'nin faz ateşlemeleri klasik konvertör ile sağlanacağından pozisyona göre faz ateşleme sinyallerinin durumu Çizelge 3.1'de verilmiştir. ARM'nin hız denetimi ise hız geri beslemesi ile PI tekniği kullanılarak sağlanmıştır. Motorun ilk kalkınmasında yada çalışmasında herhangi bir nedenle faz akımları referans değeri geçerse ilgili fazın anahtarlarının sinyali referans değere gelinceye kadar "0" yapılarak koruma sağlanır.

Çizelge 3.1 Pozisyon ve faz akımlarına göre anahtarların açık-kapalı durumu

pozisyon	Faz akımları	Anahtar pozisyonu
15 pals $0\text{-}5^0$	ia ve id < iref	11000011
	ia ve id >iref	00000000
	ia<iref ve id>iref	11000000
	ia>iref ve id<iref	00000011
30 pals $5\text{-}15^0$	ia < iref ve id>0	11000000
	ia > iref ve id>0	00000000
15 pals $5\text{-}20^0$	ia ve ib < iref	11110000
	ia ve ib >iref	00000000
	ia<iref ve ib>iref	11000000
	ia>iref ve ib<iref	00110000
30 pals $20\text{-}30^0$	ia>0 ve ib < iref	00110000
	ia>0 ve ib >iref	00000000
15 pals $30\text{-}35^0$	ib ve ic < iref	00111100
	ib ve ic >iref	00000000
	ib<iref ve ic>iref	00110000
	ib>iref ve ic<iref	00001100
30 pals $35\text{-}45^0$	ib >0 ve ic<iref	00001100
	ib >0 ve ic>iref	00000000
15 pals $45\text{-}50^0$	ic ve id < iref	00001111
	ic ve id >iref	00000000
	ic<iref ve id>iref	00001100
	ic>iref ve id<iref	00000011
30 pals $50\text{-}60^0$	ia>0 ve id < iref	00000011
	ia>0 ve id >iref	00000000

Çizelge 3.1'e göre faz akımları denetlenen ARM'nin hız denetimi simülasyonu, PI tekniği ile motor faz geriliminin ayarlanması ile yapılmıştır. Motor faz gerilimi, PWM sinyalinin genişliği ile ayarlanır.

Simülasyon için hazırlanan programın akış diyagramı Şekil 3.31'de görülmektedir.

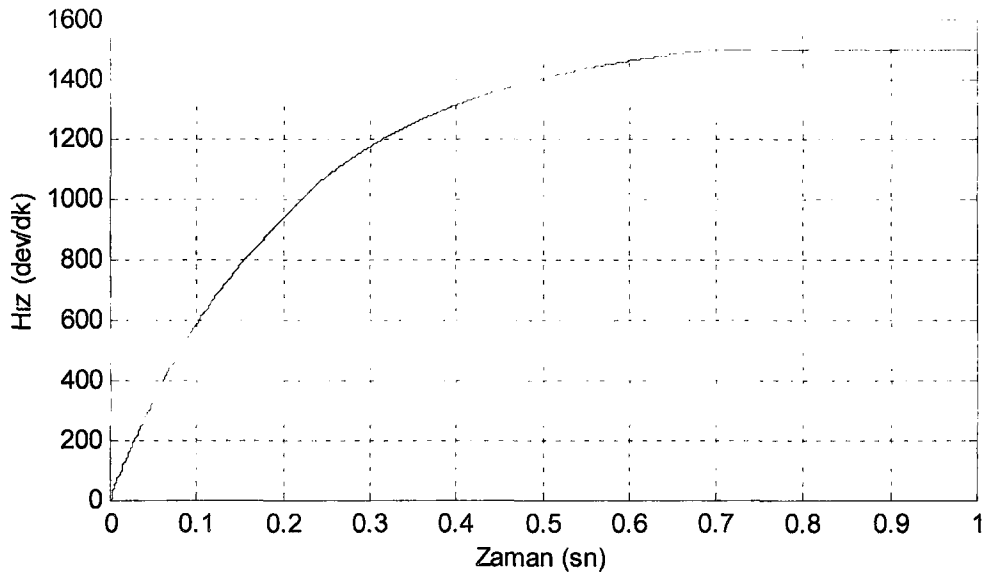


Şekil 3.31 Program akış diyagramı

Simülasyon için Turbo C programlama dili kullanılmıştır. Simülasyon amacıyla motorun parametrelerine göre C programlama dilinde oluşturulan simülasyon programı C program programı editöründe derlenmiştir. DOS ortamında oluşturulan veri dosyaları Windows ortamında MATLAB 5.3 paket programı ile grafik olarak izlenmiştir.

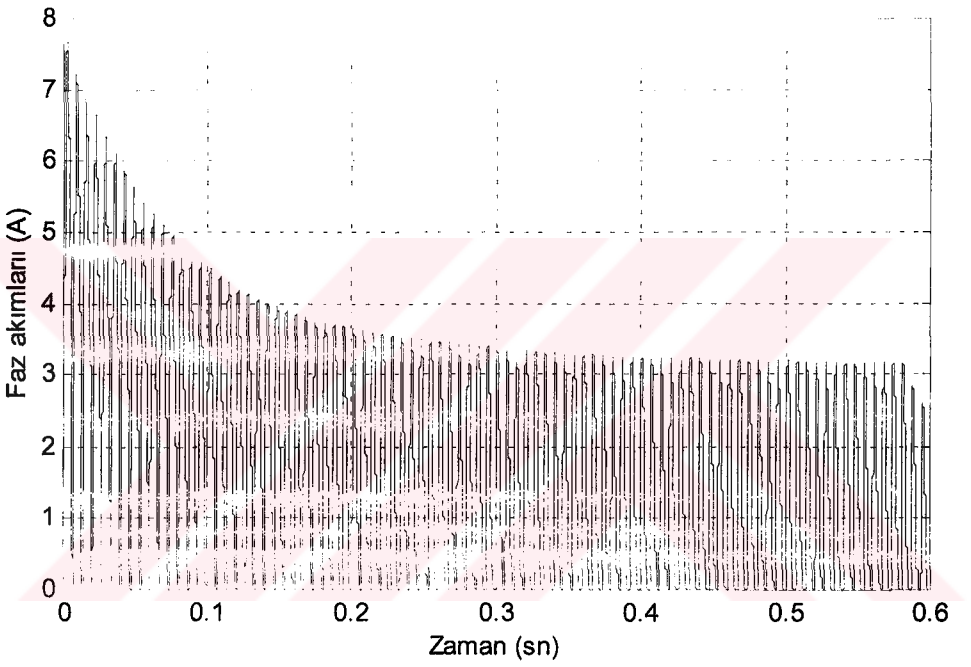
Simülasyon; motorun pozisyon, hız veya faz akımlarına göre Eş. (3.39) veya Eş. (3.44)'in 4° runge kutta metodu kullanılarak çözdürülmesi ile gerçekleştirilmiştir. Programda runge kutta ile diferansiyel denklemlerin çözümü için 0.00001 sn zaman aralığı kullanılmıştır.

Şekil 3.32'de verilen parametrelere göre 115 V kaynak gerilimine göre gerçekleştirilen programdan elde edilen ARM'nin hız-zaman grafiği görülmektedir. Bu simülasyon sonucuna göre ARM yaklaşık 0.7 sn'de anma hızına ulaşmaktadır. Motor anma hızına ulaştıktan sonra da hızda dalgalanmanın olmadığı görülmektedir.



Şekil 3.32 115 V kaynak geriliminde 8/6 kutuplu ARM'nin boşta kalkınmada hızın zamana göre değişimi

Aynı kalkınmada ARM 4 fazın akımları Şekil 3.33'de görülmektedir. Faz akımlarının şekline göre ARM ilk hareketinde 0.05 sn'lik bir süre için anma akımı olan 9'de daha küçük bir değere ulaşmaktadır. Bu süre sonunda ilk hareketin sağlanmasıyla faz sargılarında oluşan zıt emk nedeniyle akım hızla normal boş çalışmadaki değerine düşmektedir.

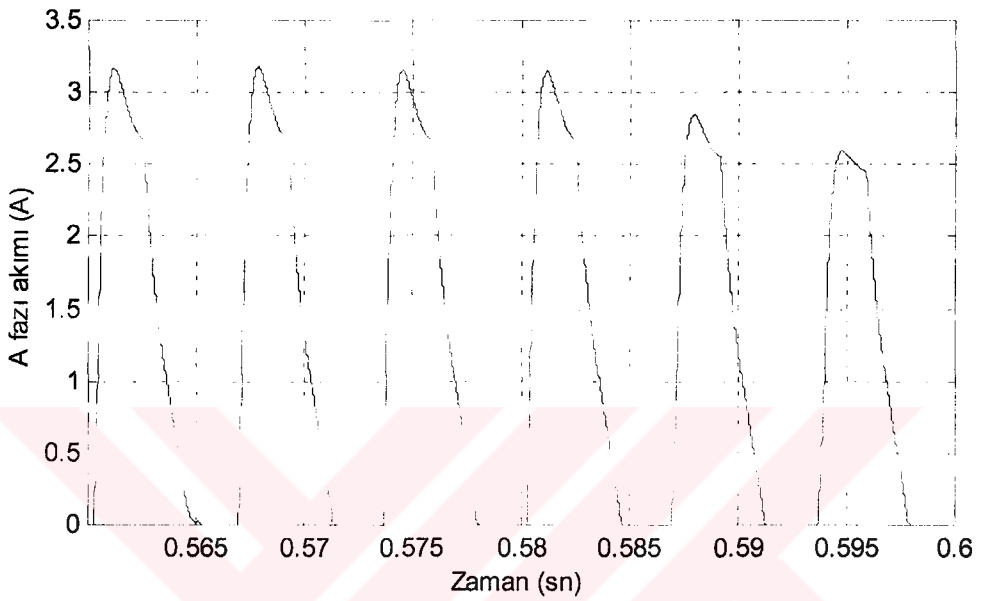


Şekil 3.33 Boşta 115 V kaynak gerilimiyle kalkınmada ARM'nin 4 faz akımı

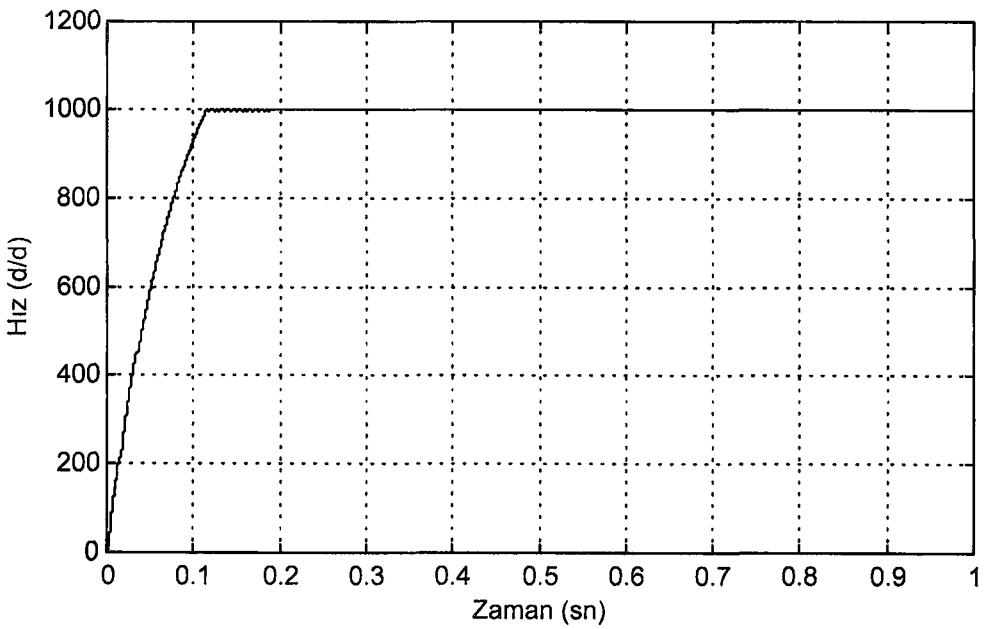
Şekil 3.34'de aynı kalkınmada anma hız ulaşırken A fazı akımının büyütülmüş şekli görülmektedir. Şekil 3.34'de de görüldüğü gibi faz akımında her hangi bir kırpma söz konusu değildir. Faz peryodunun başlarında akım en büyük değerine ulaşırken çok kısa bir süre sonra kendiliğinden bir miktar düşmektedir. Daha sonra faz peryodu tamamlandığında negatif torka sebep olmamak için anahtarlar açılarak faz sargılarındaki enerji kaynağa aktarıldığı için akım hızla sıfıra gitmektedir.

Şekil 3.35'de 115 V kaynak gerilimi ile ARM'nin 1000 dev/dk hızda çalışması durumunda hız-zaman grafiği görülmektedir. Bu şekildeki bir çalışmada ARM

yaklaşık 0.11 sn'de anma hızına ulaşmasına rağmen hızda yaklaşık 0.7 sn salınım meydana geldiği görülmektedir.



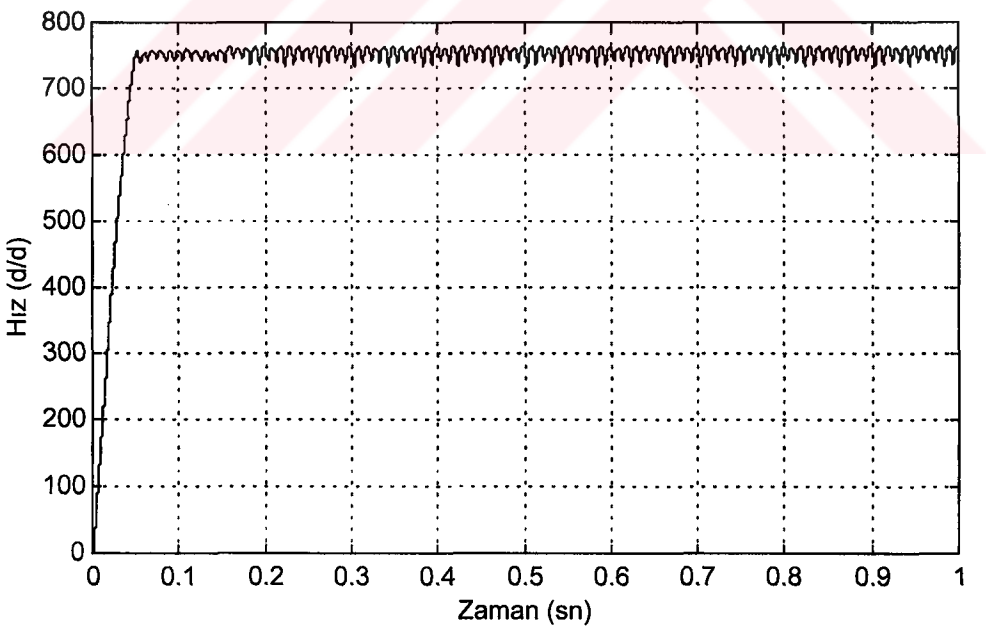
Şekil 3.34 ARM'nin anma hızda boşta çalışmada A fazının büyütülmüş şekli



Şekil 3.35 ARM'nin 115 V kaynak gerilimi ile 1000 d/d hızda çalışması durumunda hız-zaman grafiği

Şekil 3.36'da ARM'nin boşta çalışmada 115 V kaynak geriliminde 750 dev/dk hızda çalışması halinde hızın dalga şekli görülmektedir. Bu şekilde hızdaki dalgalanmanın bir 1000 dv/dk hız ile karşılaştırıldığında bir miktar daha artığı anlaşılmaktadır.

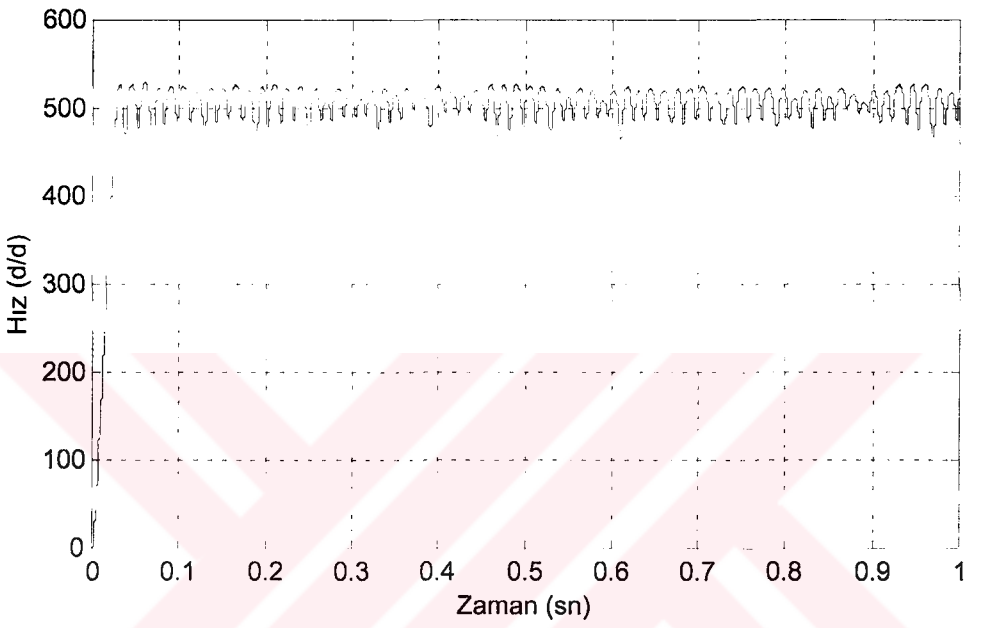
Şekil 3.37'de aynı kaynak geriliminde aynı ARM'nin 500 dev/dk hızda çalışması durumunda hızın şekli görülmektedir. 500 dev/dk hızdaki çalışmada motor hızında oluşan dalgalanmalar iyice artmış ve kararsızlığa doğru gitmektedir. Hız düştükçe artan dalgalanmanın nedeni hızın denetimini yapan PWM görev oranı değerinin de düşmesidir. PWM görev oranının düşmesiyle gerilimde oluşan dalgalanmalar da artmıştır. Motor faz gerilimini sağlayan kaynak geriliminde oluşan bu dalgalanma motor hızının da dalgalı olmasına neden olmuştur.



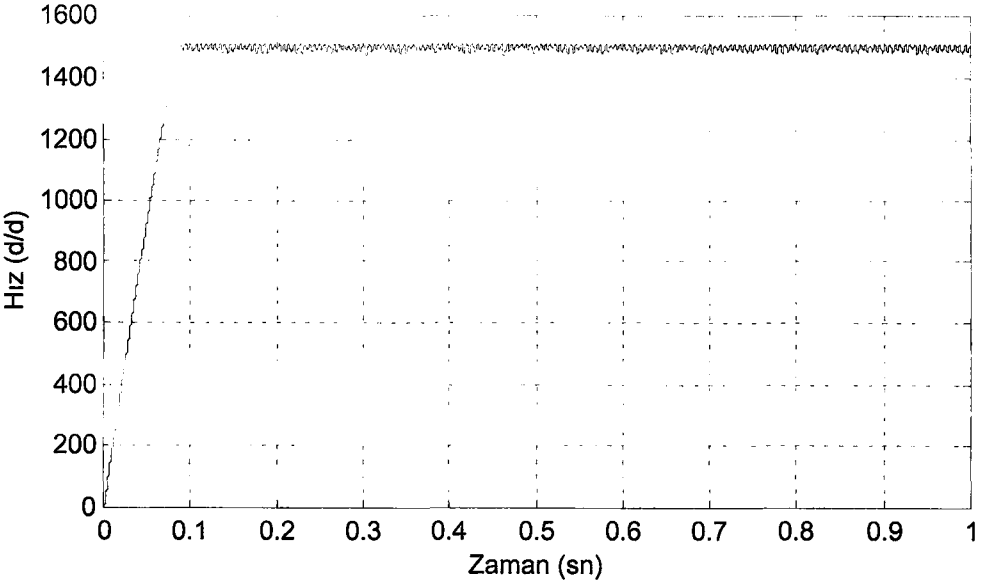
Şekil 3.36 ARM'nin 115 V kaynak geriliminde 750 d/d boşta çalışma hızı

Şekil 3.38'de ARM'nin kaynak gerilimini artırarak 260 V ile çalışmasında oluşan hız dalga şekli görülmektedir. Bu şekildeki çalışmada da ARM anma hızda olmasına rağmen hızda dalgalanma oluşmuştur. Bunun da nedeni motorun çalışması için gerekenden çok fazla gerilimin olması ve

denetleyicinin hızı sabit tutmak amacıyla PWM görev oranını düşürmesi ve gerilim dalgalanmalarını önleyecek filtre yada anahtarlama frekansından birinin yetersiz kalmasıdır.



Şekil 3.37 500dev/dk hızda 115V kaynak geriliminde hızın dalga şekli



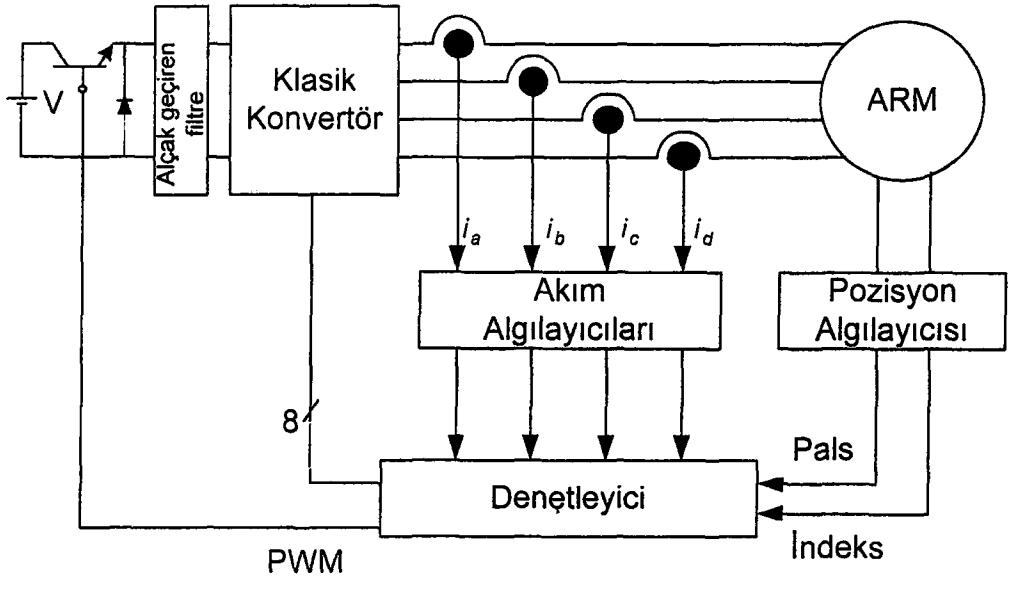
Şekil 3.38 ARM'nin 260V ile kalkınmasında hızın zamana göre değişimi

4. ARM ile SU POMPASI TAHRİKİ

ARM ile su pompası tahriki iki ana bölümden oluşmaktadır. Birincisi ARM'nin hızının denetlenmesi, ikincisi su pompası kısmıdır.

4.1 ARM hız denetimi bölümü

Şekil 4.1'de ARM'nin hız denetimi bölümünün kapalı şeması verilmiştir. ARM'nin hız denetimi; şebekedeki AA gerilimi DA'a çeviren 3 faz tam dalga doğrultma devresi, gerilim seviyesini değiştirmek için anahtar, anahtar çıkışındaki dalgalanmayı azaltmak amacıyla alçak geçiren LC filtre, ARM faz akımlarının denetlenmesi amacıyla kullanılan klasik konvertör, ARM, pozisyon sensörü, faz akımlarını gerilime dönüştüren akım algılayıcıları ve denetleyiciden oluşturulmuştur. Denetleyici bölümü; iki adet PIC16F877, bir adet 2x16 LCD gösterge ve 16 karakterli tuş takımının uygun şekilde birleştirilmesi ile oluşturulmuştur.



Şekil 4.1 ARM uygulama devre şeması

4.1.1 Besleme Gerilimi

Besleme geriliminin elle de değiştirilebilmesi için varyak kullanılmıştır. 3 faz varyak çıkışı 3 faz köprü doğrultma devresinden oluşturulmuştur. Doğrultma devresi 6 adet PBY283 metal kılıflı diyotun uygun şekilde bağlanması ve soğutucularından yapılmıştır. Çıkıştaki gerilim dalgalanmalarını en aza indirmek için 500 V maksimum gerilimde çalışabilecek, 10000μF eşdeğerli bir kondansatör elde edilmiştir.

4.1.2 Anahtarlama bölümü

Doğrultma devresi çıkışındaki kondansatör fazlar arası gerilim değerinin maksimum değeri olan $\sqrt{2}/2$ katı ile sarj olur. Bu gerilimin etkin değeri, 10 KHz'lik anahtarlama frekansında PWM tekniği kullanılarak uygun değere getirilmektedir.

Anahtarlama elemanı olarak katoloğunda; kısa süreli maksimum 75A akıma ve normal akım taşıma kapasitesi olarak 25A'e ve 20 KHz anahtarlama frekansında çalışabileceği belirtilen CM75DY12H tibi bir adet IGBT kaynak ve yük arasına seri olarak bağlanmıştır. Bu anahtarlama elamanını korumak için 0.22μF, 600 V kondansatör, 25 Ω seramik direnç ve katoloğunda iletime geçme süresi 40 nanosaniye olarak belirtilen 1200V, 60A'lik plastik kılıf, hızlı toparlama diyodu IXYS120-60 kullanılmıştır. Anahtarlama darbesinin genişliği, denetleyiciden gelen sinyalin sürücüden geçirilerek anahtarlama elemanının gate'ne aktarılması ile gerçekleşir.

4.1.3 Alçak geçiren filtre

Anahtarlama elamanın çıkışında ortalama değeri azalan gerilimin şekli kesikli kare dalga şeklindedir. Dolayısıyla akımda aynı şekilde dalgalı olacaktır. ARM de üretilen tork ise Eş. (4.1)'e göre ;

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \qquad (4.1)$$

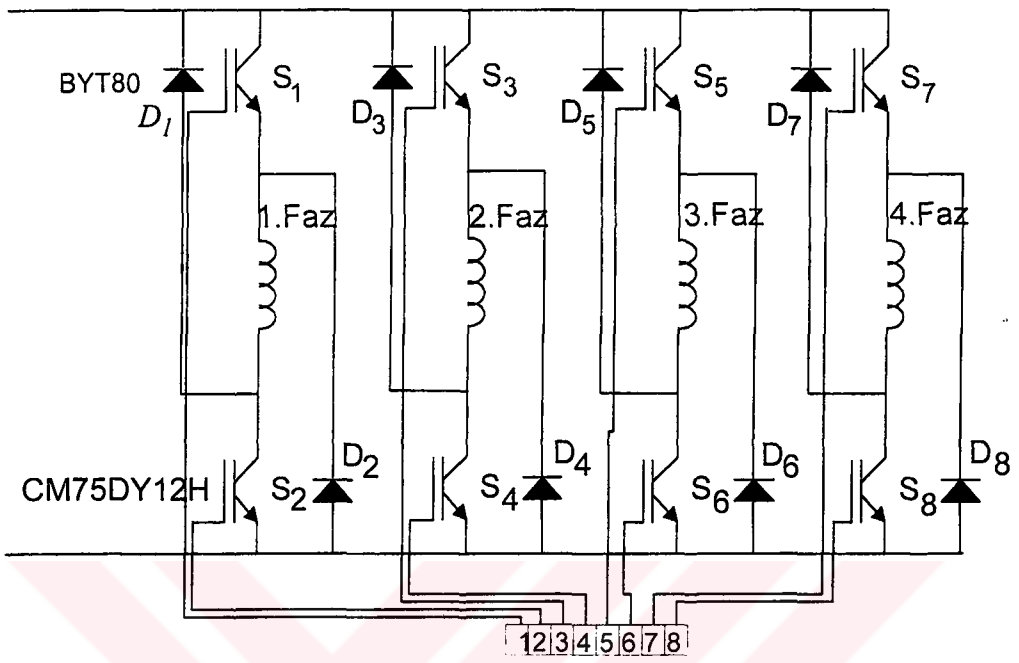
olarak akımın karesi ile değiştiği için tork dalgalanmasını minumum hale getirmek için anahtarlama elemanı çıkışına alçak geçiren bir LC filtre konulmuştur. 10 KHz frekansta 8 A akımın en fazla %5'lik bir dalgalanmasına müsaade edecek bobinin endüktansı 60 mH, kondansatörün değeri ise 500V, 5000 μF'tır. Filtre bobinindeki endüktans değerinin büyük olması nedeniyle anahtarın kesime gitmesi sırasında ters yönlü bobin emk'sından dolayı oluşacak ters gerilimin anahtarlama elemanına zarar vermesini önlemek için anahtar ile bobin arasına ayrıca bir diyot daha eklenmiştir. Bu diyodun tüm özellikleri snubber devresindeki diyod ile aynıdır.

4.1.4 Serbest döngü diyodu

Bu diyot, anahtarlama elemanında kullanılan snubber diyodu ile aynı özelliklere sahiptir. Anahtarlama elemanının kesimde olduğu süre içerisinde, motor faz akımlarının, alçak geçiren filtredeki bobin ve kondansatörde depo edilen enerji ile beslenerek motor torkunun sürekliliğini ve LC arasındaki osilasyonun tek yönlü olmasını sağlar. Anahtar çıkışına ters bağlıdır.

4.1.5 Klasik konvertör devresi

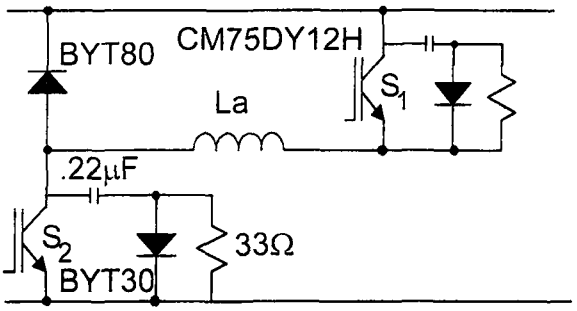
Klasik konvertör devresi Şekil 4.2 de görüldüğü gibi faz başına iki adet CM75DY-12H IGBT, BYT80 hızlı toparlama diyotları ve koruma devreleri (snubber)'den oluşmaktadır. IGBT sürülürlen gate devresine mutlaka seri bir direnç bağlanmalıdır. Bağlanacak gate direnci (R_G)'nin değeri IGBT'nin iletime geçmesi ve dinamik davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. IGBT, Şekil de verilen eşdeğer devresinde önemli bir etkiye sahiptir. IGBT,



Şekil 4.2 Klasik konvertör devresi şeması ve sürücüye bağlantı uçları

Şekil 4.3'de klasik konvertör devresinin motorun bir fazına ait bağlantısı ve koruma elamanları görülmektedir. IGBT'yi sürmek amacıyla kullanılan sürme devresinin şeması Şekil 4.4'te görülmektir. Şekil 5.5'te ise IGBT'nin eşdeğer devresi verilmiştir. Eşdeğer devrede bulunan C_G kondansatörünün şarj olmasıyla iletime ve deşarj olmasıyla kesime gider. R_G'nin küçük olması durumunda zaman sabiti $\tau = R_G.C_G$ düşük olacağından IGBT daha kısa sürede iletime geçer ve daha kısa sürede kesime gider. Bu da IGBT'nin daha yüksek anahtarlama frekansında çalışabilmesi ve daha az anahtarlama kayıplarının oluşumu imkanı sağlar. Ancak IGBT'nin kesime gitmesi anında ya da kısa devre durumunda dv/dt oranının büyük olmasına, IGBT'nin kollektör-gate arasındaki kondansatörü nedeniyle gate devresinden bir akım geçmesine neden olur. Eğer gate devresinden geçen akım yeterli büyüklükte ise, gate direnci R_G üzerinde düşen gerilim IGBT'nin kontrolsüz bir şekilde iletime geçmesine neden olabilir. Küçük değerdeki R_G direnci bunu önlese de, gate-emiter devresinden kondansatörü ve gate devresindeki kablonun parazitik endüktansı nedeniyle, iletim anında oluşan yüksek di/dt oranı ve

kesime gitme anında oluşan yüksek dv/dt dolayısıyla toparlama anında yüksek surge gerilimleri meydana gelir.



Şekil 4.3 Klasik konvertör devresi bir fazı ile motor bir fazının bağlantısı ve koruma devresi şeması

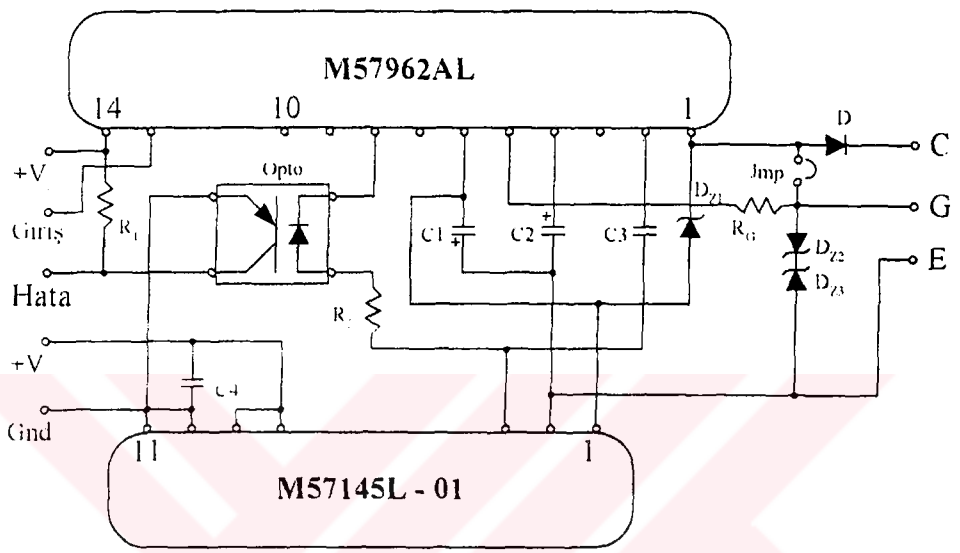
Bu sakıncaları gidermek amacıyla iletim ve kesim kayıpları artsa da genelllikle daha yüksek değerde R_G kullanılır. Ancak çok yüksek R_G direnci, osilasyon problemini çözerek IGBT'nin doğrusal bölgede çalışmasını sağlamasına rağmen anahtarlama kayıplarını artırır, anahtarlama frekansını azaltır. Bu yüzden R_G 'nin optimum değerinin sağlanması kullanıcıya ve tercihe bağlıdır.

R_G'nin seçiminde en önemli kriter IGBT'yi korumak ve güvenli sınırlar içerisinde çalışmasını sağlamaktır. Bu nedenle çalışma sırasında IGBT'den geçecek ani akım değeri IGBT akım değerini geçmemelidir. Buna sağlamak için kullanılan sürme devresinin şeması Şekil 4.4'te görülmektir. Sürme devresinde kullanılacak minumum R_G değeri kullanılan sürme devresindeki M57962L'nin çıkış akımı ile belirlenebilir. Bu değer;

$$R_{G(min)}=V_{CC}-V_{EE}/I_{IGBT} \qquad (4.2)$$

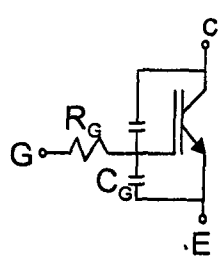
dir. V_{CC}=15V ve V_{EE}=-10V olduğundan; $R_{G(min)}$=(15+10)/5=5 ohm olmalıdır.

Kullanılan CM75DY-12H tipi IGBT için minumum R_G değeri katoloğunda 8.3 ohm olarak verilmiştir.



Şekil 4.4 IGBT sürme devresindeki 9 adet sürme devresinden bir tanesine ait açık devre şeması

Kullanım sırasında IGBT'nin güvenli çalışması için gate ve emiter uçları kesinlikle açık bırakılmamalıdır. IGBT'nin çalışması sırasında kollektör-emiter arası gerilim değeri de 50V değerini geçmemelidir. Aynı zamanda IGBT'nin güvenli çalışma bölgesi (SOA), katolog değerlerinden 25A olarak alınmıştır. IGBT 75A akıma dayanabildiği halde ancak 25A akım değerinde güvenli çalışabilmektedir.



Şekil 4.5 IGBT'nin eşdeğer devre şeması

4.1.6 Akım algılama ve indeks işareti

Faz akımlarını ölçmek amacıyla LEM firmasının LTA50:SP1 tipi akım transdüsörü kullanılmıştır. Bu transdüsör 50A akım değerine kadar ani akımları ölçebilen bir transdüsördür. Ölçülecek akımın hassasiyetini ayarlamak ve aynı zamanda herhangi bir şekilde ani akım yükselmesi nedeniyle kontrolörün ADC girişini yüksek gerilim değerinden korumak amacıyla transdüsörün nüvesine 4 tur sarım yapılmıştır. Bu şekilde 12.5A akım değerinde 12V çıkış gerilimi verecek şekilde ayarlanmıştır.

ARM'nin çalışması sırasında meydana gelebilecek mekaniki pozisyon hatalarını her devirde sıfırlamak amacıyla motor miline bağlı bulunan 1080 pals/devir özelliğinde toplar (incremental) tip pozisyon algılayıcısı kullanılmıştır. Bu pozisyon algılayıcısı bir devirde 1080 pals ve 1080 pals sonunda bir de reset sinyali vermektedir. 1080. pals sonunda farklı bir kanaldan gelen reset sinyali kontrolörün harici kesme girişine uygulanmıştır. Böylece her kesme gelişinde muhtemel pozisyon hataları sıfırlanmış olmaktadır. Bu durumda motor her 3 pals geldiği zaman toplam1 mekaniki açıda dönmüş olur.

4.1.7 Denetleyici

ARM hız kontrolü için tipi seçilen ve modellemesi yapılan gerilim azaltan konvertör ile sağlanabilmesi için denetleyici olarak, fiyat bakımından ucuz, ARM'nin denetlenebilmesi için ise yeterli olann PIC16F877 mikrodenetleyicisi kullanılmıştır. DSP (sayısal sinyal işaret işlemcileri) gibi aynı amaç için kullanılan kontrolörlerle PIC16F877 kıyaslandığında işlem kapasitesi ve hızı daha düşük, veri yolu bit sayısı daha az olmasına rağmen fiyat bakımından çok büyük bir avantajı vardır. TMSF240 ile PIC16F877 denetleyicileri fiyat bakımından kıyaslanacak olursa PIC16F877 yaklaşık 200 kat daha ucuzdur. Denetleyici seçiminde temel kriter, denetleyici kapasitesi ile fiyatıdır. İlk tesis

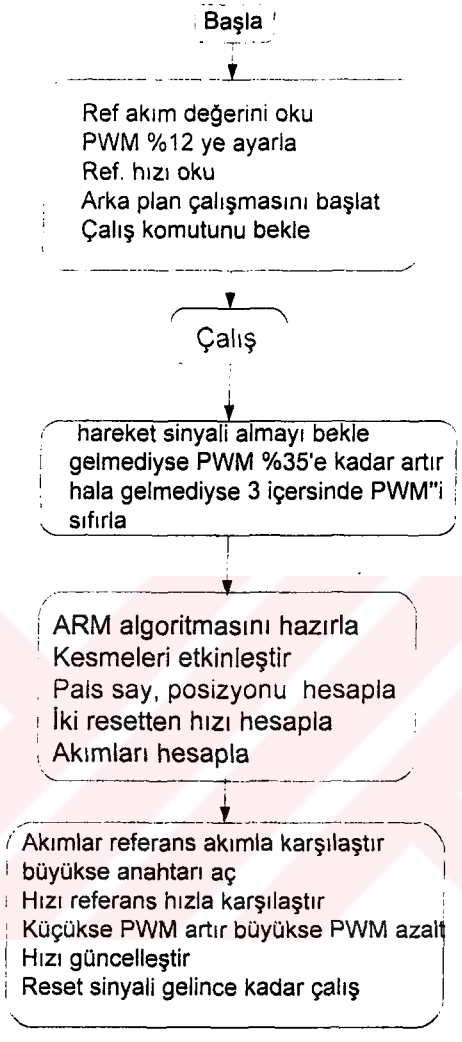
maliyetini cazip hale getirme amacıyla hız kontrolünde kullanılacak kontrolörün mümkün olduğunca yüksek kapasiteli ama maliyetinin de düşük tutulmasına çalışılmıştır.

4.1.7.1 Denetleyici yazılımı

Program assembly dilinde yazılmış ve MPLAB programı ile makine dilinde derlenmiştir. Makine diline çevrilen hex uzantılı program, donanım ve yazılımı Ponyprog adlı yükleyici program ile denetleyicilere yüklenmiştir. Ponyprog donanımı kişisel bilgisayarın seri portundan çalıştığı için kullanımı paralel portlardan çalışan programlardan daha kullanışlıdır. PonyProg programı Windows masa üstünde çalışmaktadır.

PIC16F877'de 8 adet 10 bit A/D bulunmaktadır. ARM 4 fazlı olduğundan faz akımlarının algılanması için 4 kanal yetmektedir. Ancak 10 bit bir kanal A/D dönüşümün denetleyicideki çevrim süresi 25nSn'dir. ARM'den optimum verim ve tork alınabilmesi için iki fazın ortak iletim süresi daha önce 5^{o} olarak belirlenmişti. Bu durumda aynı anda en az iki faz akımının algılanması gerekmektedir. ARM'nin anma hızında pozisyonun tam olarak algılanabilmesi için gerekli olan sürenin bilinmesi gerekmektedir.

Pozisyon sensöründen 1 devirde 1080 pals ve bir reset sinyali gelmektedir. ARM, anma hızı olan 1500 d/d hızda dönerken palsin frekansı 1500.1080/60=27000 Hz olmaktadır. Bu frekanstan daha büyük frekanstaki sinyaller denetleyici tarafından tam olarak algılanamaz. Tam olarak algılanabilecek sinyalin kritik peryodu bulunursa T=1/f formülünden T=1/27000=37.37μSn olmaktadır. Eğer denetleyicinin çevrim hızı bu sürenin altında kalırsa yada daha yüksek frekanslı sinyaller gelirse denetleyici sinyalleri kaçırır ve motor kararlı çalışamaz. Denetleyicide kullanılan yazılımın akış diyagramı Şekil 4.6'da görülmektedir.



Şekil 4.6 PIC16F877 mikrodenetleyicilerle gerçekleştirilen denetleyici program yapısı

Denetleyicinin üretici firması tarafından 20 Mhz kristal kullanılarak 10 bit A/D dönüşüm yapılırsa bir kanal için 25μSn çevrim süresi geçeceği belirtilmiştir. Motor faz akımlarının aynı anda ikisi 10 bit A/D dönüştürücü ile algılanırsa oluşacak en çevrim süresi 20Mhz kristal kullanıldığında 2.25=50 μSn olur. Bu süre, anma hızında kararlı çalışma süresinden büyük olduğu için uygun değildir. Bu nedenle akım algılama 8 bit olarak gerçekleştirilmiştir. 8 bit A/D kullanılırsa bir kanal için 17.3μSn ve toplam çevrim süresi 17.3x2=34.6 <<37.37μSn olmaktadır ki bu süre kararlı çalışma için yeterlidir. Ancak motorun çalışması için sadece akım algılaması yetmez. Programdaki diğer

komutlarında yerine getirilebilmesi için hızın hesaplanması, pozisyonun tam olarak algılanması, ekranda yazdırılması gibi diğer hesaplamalar nedeniyle geçecek sürelerde dikkate alındığında bu çevrim süreside yetmediğinden bu gibi diğer işlemlerin yapılması için 16 Mhz ile çalıştırılan ayrıca bir denetleyici daha kullanılmış ve motorun kararlı çalışması sağlanmıştır.

Görüldüğü gibi motorun çalışması sırasında referans akım dikkate alınmamıştır. Eğer her çevrimde referans akımda algılanmış olsaydı denetleyicilerin çevrim süreleri yine yetmeyecekti. Fakat motorun ve güç devresi elemanlarının korunabilmesi için referans akımın mutlaka dikkate alınmalıdır. Bu problem, denetleyiciye enerji verilip motoru çalıştır komutu verilinceye kadar geçen sürede bir defa algılanarak çalışma boyunca aynı kalması sağlanmıştır. Bu nedenle motor çalışırken referans akım değeri değiştirilememektedir. Referans akım değiştirilmek istendiğinde, motor durdurularak bu iş için kullanılan pot ile referans akım değeri ayarlanıp yeniden çalıştırılmıştır.

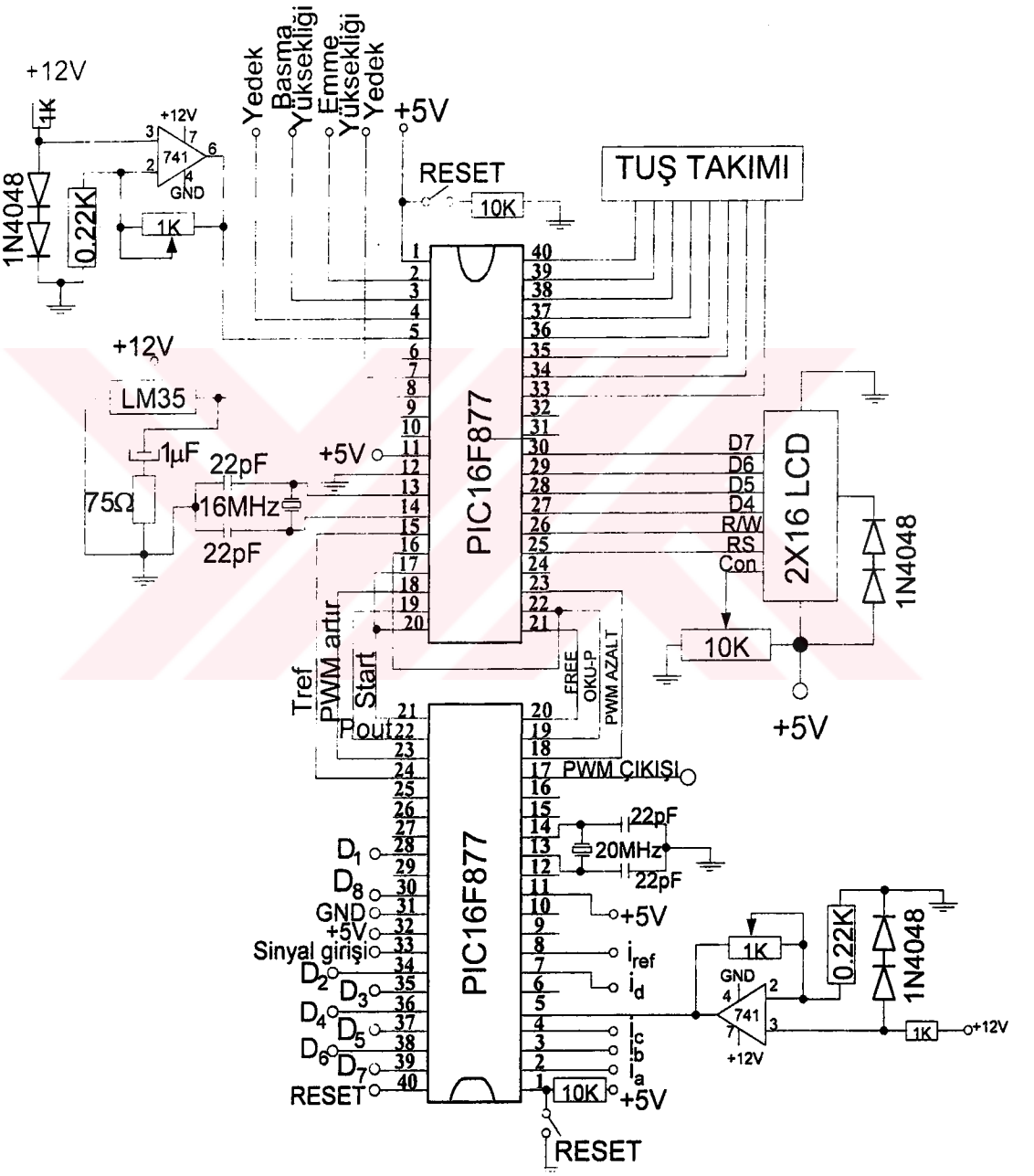
4.1.7.2 Denetleyici Donanımı

Tasarımı gerçekleştirilen ARM denetleme devresinin fotoğrafı Şekil 5.7'de görülmektedir. Bu denetleyiciye ait açık devre şeması Şekil 4.8'de görülmektedir. Her iki şekilden de anlaşıldığı gibi donanım iki adet mikrodenetleyici, 16 karakterli tuş takımı ve 2X16 LCD göstergeden oluşmaktadır.

4.1.7.3 Tuş Takımı

Bu tasarımda kullanılan klavye 16 karakterli telefon tuş takımından oluşmaktadır. Klavye üzerinde bulunan karakterlerden 13 tanesi bu çalışmada aktif olarak kullanılmaktadır. Bu karakterlerin tanesi 10 rakam,

diğerleri ise “#, * ve HB” tuşlarıdır. Referans hızın değiştirilmesine “#” tuşu ile başlanır,“*” tuşu ile bitirilir.



Şekil 4.7 Gerçekleştirilen denetleyicinin açık devre bağlantısı şeması

4.1.7.4 LCD Karakter Kümesi

LCD gösterge önceden progranlanmış veya kullanıcı tarafından tanımlanan karakterleri gösterebilmektedir. LCD kontrolörü, 192 adet karakter içeren bir karakter üreteci ROM'a (CGROM) sahiptir. Karakterler belirli kodlarla seçilirler. Bu karakterlerden 96 tanesi ASCII karakterler ile seçilirler, 64 tanesi Japonca karakter (Kana alfabesi) ve 32 adedi de Yunan alfabesi gibi özel karakterlerdir.

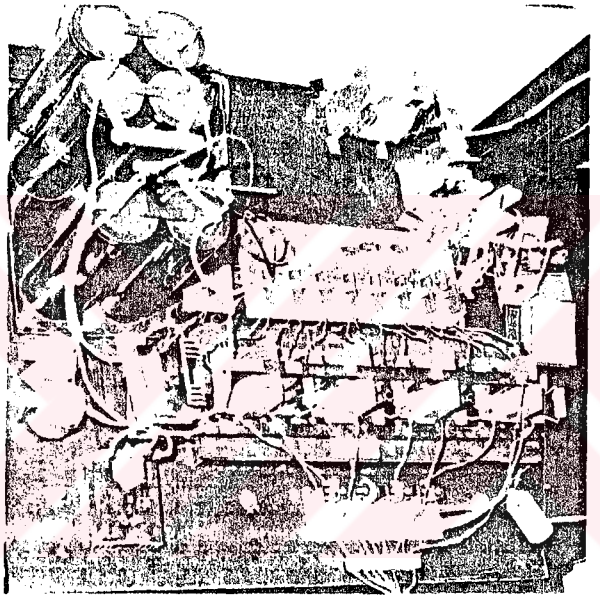
LCD kontrolörü aynı zamanda, Karakter Üreteci RAM (CGRAM) olarak adlandırılan ve kullanıcı tarafından tanımlanabilen 8 karakter içeren bir hafızaya sahiptir. Bu karakterler kullanılmadan önce tanımlanmalı, CGRAM'a yüklenmeli ve gösterilmek istenen yerlerde çağrılmalıdır. Bu karakter tanımlarını gösteren tablo ek xxx de verilmiştir.

Bu tezde 16 haneli 2 satırlı (2x16 karakterli) LCD kullanılmıştır. Üst satırda; HIZ 0000 DEV/DAK, Alt satırda ise; REF HIZ xxxx DEV/DAK yazıları ekranda görülmektedir. HB tuşuna basıldığı sürece ekrandaki bu yazıların yerine birinci satırda emme yüksekliğini ifade eden "EMME YUK 000" ikinci satırda ise basma yüksekliğini ifade eden "BASMA YUK 000" yazıları görülür. Bu tuş bırakılırsa tekrar önceki ekran görülür.

4.1.7.5 PIC16F877'nin Programlanması

ARM'nin hız kontrolünün tam olarak sağlanabilmesi için hızlı kontrolörlere ihtiyaç duyulur. Bu nedenle uygulamada algoritmanın sağlanabilmesi için Microchip firmasının üretmiş olduğu iki adet 8 bit PIC16F877 kullanılmıştır. Şekil de uygulanan sistemin şeması görülmektedir. Motor akım algılaması yapan denetleyici 20 MHz, sayısal işlemleri yerine getiren denetleyici16 MHz de çalıştırılmıştır. Ancak bu tip denetleyicilerde komut işlem hızının kendisini

süren kristal osilatör hızının ¼ 'ü kadar olduğu unutulmamalıdır. ARM'nin faz ateşlemeleri IGBT'lerden oluşan ve 10 KHz'de anahtarlanan klasik bir konvertör devresi ile sağlanmaktayken, konvertör gerilimi 10KHz ile tetiklenen ve konvertöre seri bağlı olan IGBT'nin iletim ve kesim süresinin PWM ile ayarlanmasıyla değiştirilmiştir.



Şekil 4.8 ARM sürme, filtre ve anahtarlama devresinin fotoğrafı

4.2 ARM'nin Tuş Takımı ile Çalışmaya Başlatılması

Tasarlanan denetleyiciye enerji verildiği anda, kursor LCD üzerindeki ikinci satırda bulunan REF HIZ'ı belirten 4 rakamlı sayının binler basamağı üzerinde durmaktadır. Bu sayı kontrolöre daha önceki verilen referans hızın rakamlarıdır. Eğer anahtarlamalı relüktans motor aynı referans hızda çalıştırılmak istenirse Tuş takımının "*" tuşu ile onay verilerek motor çalıştırılmaya başlar. Eğer referans hız değiştirilmek istenirse kursor önce binler hanesinin üzerindedir. Binler hanesine sayı girilirse binler hanesinde bulunan kursor otomatik olarak yüzler hanesine kayar. Yüzler hanesine de rakam yazılırsa onlar hanesine kayar. Böylece aynı şekilde birler hanesine de

rakam girildikten sonra "*" tuşu ile onay verilerek motor yeni bir referans hızda çalışmaya başlatılır.Yeni referans hızın girilmesi sırasında ekranda daha önce bulunan ve değiştirilmek istenmeyen rakamlar "#" tuşu ile atlanabilir. Ayrıca yeni referans hızın girilmesi sırasında yapılabilecek Muhtemel yanlış rakam yazılımları olduğunda yeni hız onaylanmayabilir Birler hanesinde bulunan kursor yeni bir rakam girilirse tekrar binler hanesine döner ve istenilen yeni hız girilebilir. Yada "#" tuşu ile kursor kaydırılarak sadece istenilen rakam değiştirilebilir. Onay vermek için kursorun bulunduğu basamak önemli değildir.

4.2.1 ARM çalışırken hızın değiştirilmesi

ARM çalışırken "#" tuşuna basılırsa kursor referans hızın binler hanesinde belirir. Değiştirilmek istenen hız rakamları girildikçe yada "#" tuşuna her basıldığında kursor bir sonraki basamağa kayar. Bu işlem sırasında birler hanesine bir defa değer yazıldıktan sonra tekrar bir rakam daha girilirse kursor yine binler basamağına kayar. Yeni referans hızın girilmesi için "#" tuşuna basıldığı andaki hız bu tuşa basmadan önceki çalışma şartlarında devam eder. "*" tuşu ile onay verilirse ARM kararlı duruma geldikten sonra yeni hızda çalışmaya başlar.

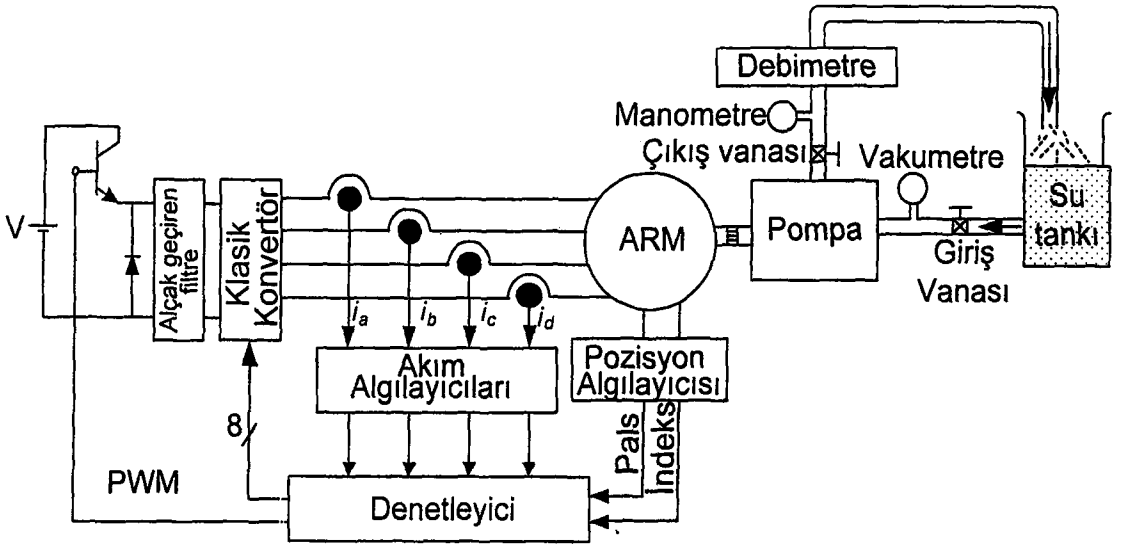
Denetleyici olarak kullanılan PIC16F877'nin genel özellikleri sıralanırsa;

- 256 byte EEPROM belleği,
- 368x8 byte kullanıcı RAM,
- 33 adet Giriş/Çıkış port sayısı,
- Timer0, Timer1, Timer2 olmak üzere 3det timer
- 8 kanal 10 bit A/D çevirici,

- 10 bit PWM, 16 bit Capture 16 bit Compare çözünürlük
- Seri çevresel arayüz,SPI (Master) ve 12C (Master/Slave) modunda SPI portu (senkron seri port)
- Seri çevresel arayüz,SPI (Master) ve 12C (Master / Slave) modunda SPI portu (senkron seri port)
- Harici RD, WR ve CS kontrollu 8 bit, paralel slave port,
- 9 bit adresli USART / SCI özelliklerine sahiptir.

4.3 Su pompası

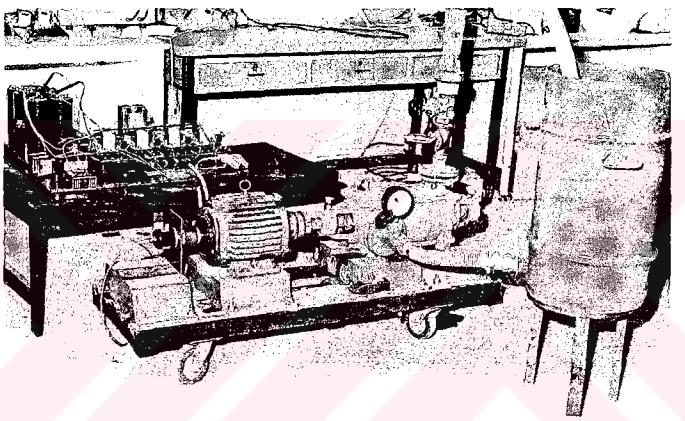
Deneyler için kullanılan su pompası 3 Kw gücünde, 6 kademeli yatık tip bir santrifuj pompadır. Pompanın basma tarafında bir 16 Bar maksimum skalalı bir manometre, emme tarafında ise mmHg cinsinden emme yüksekliğini gösteren bir vakumetre bağlanmıştır. Pompa maksimum çıkış yüksekliği ile emme ağzı arasındaki 0.2 m'lik kot farkı toplam yüksekliğe ilave edilmiştir. Şekil 4.9'da Uygulama devresinin şeması görülmektedir.



Şekil 4.9 ARM ve pompa uygulama devre şeması

5. DENEY SONUÇLARI ve DEĞERLENDİRME

Şekil 5.1'de, 4. Bölümde tasarımı yapılan ARM ile su pompası deney düzeneğinin montajı tamamlanmış olarak fotoğrafı görülmektedir. Fotoğrafta da görüldüğü gibi deney düzeneği; ARM, ARM denetleme devresi, buck konvertör, su pompası ve pompa üzerinde bulunan ölçme aletlerinden oluşmaktadır.



5.1 ARM ile su pompası tahriki deney düzeneği fotografı

5.1 Yöntem

Uygulama, asenkron motorun boşta çalıştırılması, asenkron motorla su pompasının tahrik edilmesi, ARM'nin boşta çalıştırılması ve ARM ile su pompasının tahrik edilmesi olmak üzere dört aşamada gerçekleştirilmiştir.

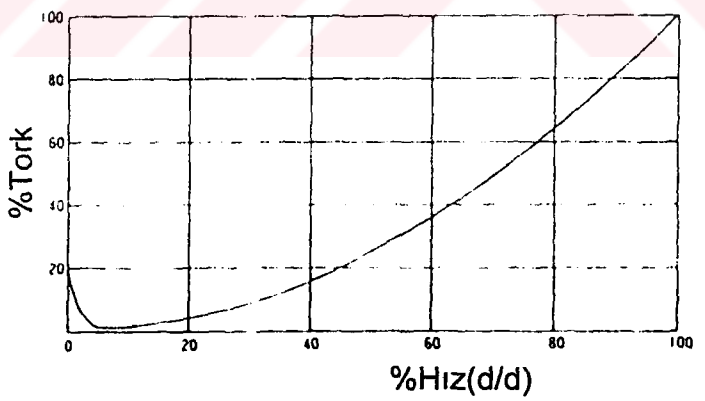
5.2 Asenkron motorla su pompası tahriki

Asenkron motorlar yapıları gereği ilk kalkınmada normal çalışma akımını 3-5 katı fazla akım çekerler. Bu nedenle ilk kalkınmada çektiği akımı azaltmak için önce yıldız olarak yol verilir ve nominal hızın %70'i civarında üçgen hale geçirilir. Asenkron motorun ilk hareketinde tork en yüksek değerinde

olmaktadır. Oluşan yüksek torku karşılamak için de şebekeden büyük miktarda akım çekilir. Şekil 5.2 de asenkron motorun çeşitli frekanslarda oluşan hız ile torkun değişimi görülmektedir. Şekil 5.3'de ise su pompalarının hız ve tork grafiği görülmektedir.



Şekil 5.2 Asenkron motorun çeşitli frekanslarda hız ile tork değişimi grafiği



Şekil 5.3 Santrifuj pompa hız-tork grafiği

Asekron motorun hızının düşmesiyle torkda da azalma meydana gelmesi su pompası için istenen bir durum değildir. Çünkü motor torku pompayı da etkilemiştir. Bu yüzden değişken devirli sürücüler ile su pompası tahrikinde torkun sabit kalması istenir. Bu özellik bakımından Şekil 3.14'de gösterilen ARM torku, hız değişiminde anma hıza kadar sabit kaldığı için pompa tahrikinde daha uygun olur. Şekil 5.2 ile Şekil 5.3 kıyaslanırsa Su pompası hız-tork karakteristiğinin asenkron motorla uyuşmadığı anlaşılmaktadır.

5.2.1 Asenkron motorun boşta çalıştırılması deneyi

4 Kw 1435 d/d anma hızlı asenkron motor boşta, yıldız bağlı olarak çalıştırılmış ve ölçülen; akım ve gerilim değerleri ile şebekeden çektiği aktif ve reaktif güç kaydedilmiştir. Elde edilen değerler Çizelge 5.1'de görülmektedir.

Çizelge 5.1 Asenkron motor boşta çalışırken ölçülen akım, gerilim, şebekeden çektiği güç ve Cosϑ değerleri

Uh (V)	Ih (A)	P (W)	Q (VAR)	Cosϑ
387	5.35	2070	1715	0.56

5.2.2 Asenkron motorla su pompasının tahrik edilmesi

Boşta çalışma değerleri kaydedilen B3 sınıfı, 1LA2113-4AA20TK16Z, IEC 112M 872746504016, 1435 l/min, VDE 0530 etiket numaralı asenkron motor yıldız bağlı olarak, 3 kW, 6 kademeli,1453 d/dk anma hızlı su pompasına bağlanmıştır. Santrifuj pompaların çektikleri genel güç eğrisi Şekil 2.17 a'da verilmişti. Bu şekil tekrar incelenirse santrifuj pompaların en az gücü, debinin sıfır olduğu durumda yani pompa çıkış vanası kapalıyken çektiği görülür. Buradan bu tür pompaların asenkron motorla tahrik edilmesi sırasında çıkış vanasının mutlaka kapalı hale getirilip motor kalkındıktan sonra vana açılarak gerekli debinin sağlanması gerektiği anlaşılır.

Deney sırasında, santrifuj pompanın asenkron motorla tahrikinde çıkış vanası açık pozisyonda iken kalkınma problemi yaşanmış ve sık sık sigortaların attığı görülmüştür. Santrifuj pompaların hıza göre tork eğrileri Şekil 5.2'te, asenkron motorların hıza göre tork eğrileri Şekil 5.3'de verilmiştir. Bu iki şeklin kıyaslanmasıyla anlaşılabilen uyumsuzluk, deney sırasında asenkron motorla santrifuj su pompası tahrikinde daha ilk kalkınmada görülmüştür.

Deneyde kullanılan su pompası küçük güçlü olduğundan pompanın normal hıza ulaştıktan sonra çıkış vanasını açmakta bir problem yaşanmamıştır. Fakat özellikle çok büyük güçlü sistemlerde çıkış vanası, çıkış tarafındaki borularda kalan suyun aşağı doğru basıncı ile pompanın uyguladığı yukarıya doğru büyük değerdeki basınç arasında kaldığından çok büyük bir basınca maruz kalmaktadır. Bu yüksek basınçta vanayı açma-kapama güçleşmekte ve ek makine düzeneklerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Çıkış vanası kapatılarak asenkron motorla ilk kalkınması sağlanan su pompasının sıfır debide şebekeden çektiği güç kaydedilmiştir. Bundan sonra çıkış vanası yavaş yavaş açılmıştır. Çıkış vanası açılırken çıkış tarafına bağlanan çapı 80 mm, 10 m^3/h ölçme kapasiteli debi metreden okunan değer lt/sn'ye çevrilerek, pompanın emme ve basma yükseklikleri ile motorun şebekeden çektiği akım, gerilim, güç ve Cosϑ değerleri kaydedilmiştir. Kaydedilen değerler ile hesaplanan toplam yükseklikler ve sistem verimleri Çizelge 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.2 Asenkron motorla su pompası tahriki deney sonuçları

Giriş bas. (mmHg)	Giriş Bas. (mSS)	Çık. Bas. (bar)	Bas. Yük. (mSS)	kot farkı (m)	Top. yük (m)	Debi Q (l/sn)	Hat ger. (Uh)	Hat Ak. (lh)	cosϑ	Mot. gücü (W)	Su gücü (W)	verim %η
0.3	0.4	7.36	73.6	0.2	74.23	0.00	406	5.60	0.56	2205	0	0.0
0.4	0.55	7.18	72.6	0.2	73.40	0.56	406	6.50	0.58	2645	403	15.24
0.6	0.82	7.1	71.0	0.2	72.03	1.07	407	6.94	0.61	2980	756	25.37
0.8	1.09	6.8	68.8	0.2	70.08	1.26	407	7.12	0.63	3056	866	28.33
1.	1.36	6.7	67.6	0.2	69.20	1.43	406	7.14	0.65	3110	970	31.18
1.2	1.63	6.5	64.5	0.2	66.30	1.86	407	7.33	0.68	3250	1209	37.20
1.3	1.77	7.3	60.4	0.2	62.35	2.23	406	7.50	0.71	3370	1390	41.24
1.44	1.96	5.75	57.5	0.2	59.60	2.55	407	7.60	0.75	3420	1490	43.57
1.44	1.96	6.2	53.1	0.2	55.30	2.97	406	7.80	0.78	3723	1610	43.25

Şekil 5.4'de deneyden alınan değerlere göre çizilen asenkron motorun şebekeden çektiği güç ve bu gücün pompa tarafından suya aktarıldıktan sonra oluşan su gücü görülmektedir. Şekilde özellikle düşük debilerde sudan alınan güç oldukça düşüktür. Bu düşük debilerde verimin de düşmesi anlamına gelmektedir. Yüksek debilerde ise çekilen ise suya verilen güç

daha çok arttığı halde işe dönüşen güç aynı oranda artmamıştır. Bu nedenle anma debilerin üzerinde verimin tekrar düşmektedir.

Emme yüksekliğinin hesaplanması

Deneyde emme yüksekliğini ölçen vakumetre ile mmHg cinsinden emme basıncı ölçülmektedir. Vakumetrenin gösterdiği değeri mm/m'ye çevirmek için giriş basıncı 1.36 ile çarpılarak mSS cinsinden yüksekliğe çevrilir. Eş. (2.4)'deki ikinci terim Eş. (5.1) olarak tekrar yazılırsa;

$$Pg = \frac{1{,}36.Pg}{d} \qquad (5.1)$$

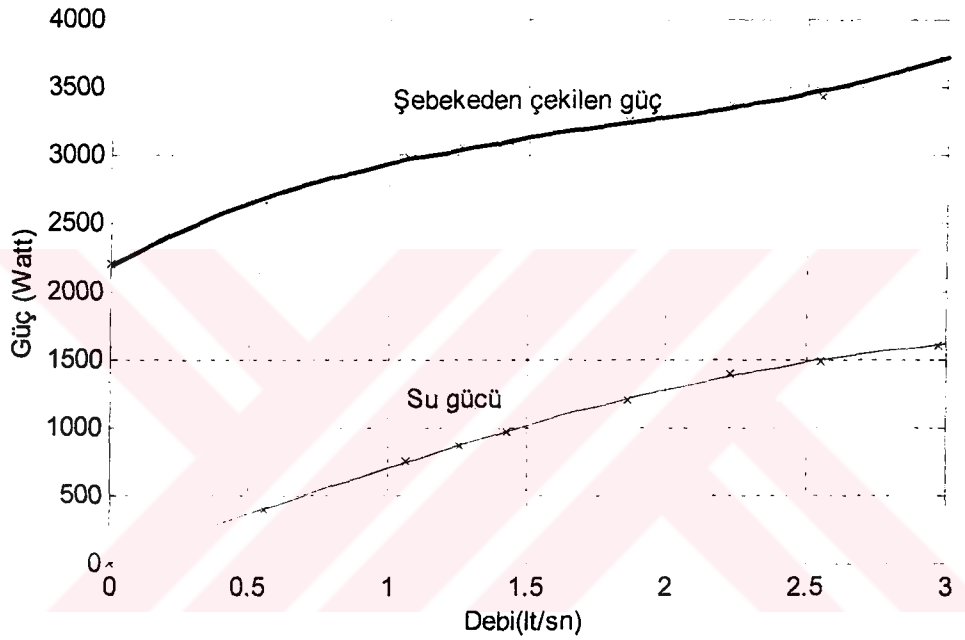
eşitliği elde edilir. Suyun özgül ağırlığı 1 olarak alındığından işleme dahil edilmeyebilir.

Basma yüksekliğinin hesaplanması

Basma yüksekliğini ölçen farklı cihazlar mevcuttur. Burada esas önemli olan, çıkış basıncının metre su sütünu (mSS) cinsinden çıkış yüksekliğinin bulunmasıdır. Deneyde çıkış yüksekliğinin bulmak amacıyla basıncı hem mSS cinsinden ölçen manometre hem de bar cinsinden ölçen barometre ile ölçme yapılmıştır.

Deneyden alınan değerlere göre çizilen debi- toplam yükseklik eğrisi Şekil 5.2'de görülmektedir. Debi arttıkça sıkış basıncı azalmaktadır. Çizelge 5.2'deki toplam yüksekliğin teorik bir yükseklik değeri olduğu unutulmamalıdır. Toplam yüksekliğin ancak sistem tamamlandıktan sonra deneyle bulunabileceği Bölüm 2'de daha önce belirtilmişti. Gerçektende çıkış basıncının azalmasıyla boru yüzeyindeki sürtünme kuvveti ile birlikte boru

direnci de azalır. Hesaplamalarda boru direnci dikkate alınmamıştır. Çünkü, boru direnci çıkış tarafından ölçülen basınca dahildir. Boru direnci çıkışta ölçülen basıncı değil verimi etkilediğinden sistemin hesaplanan verim değerleri içerisinde yer alır.



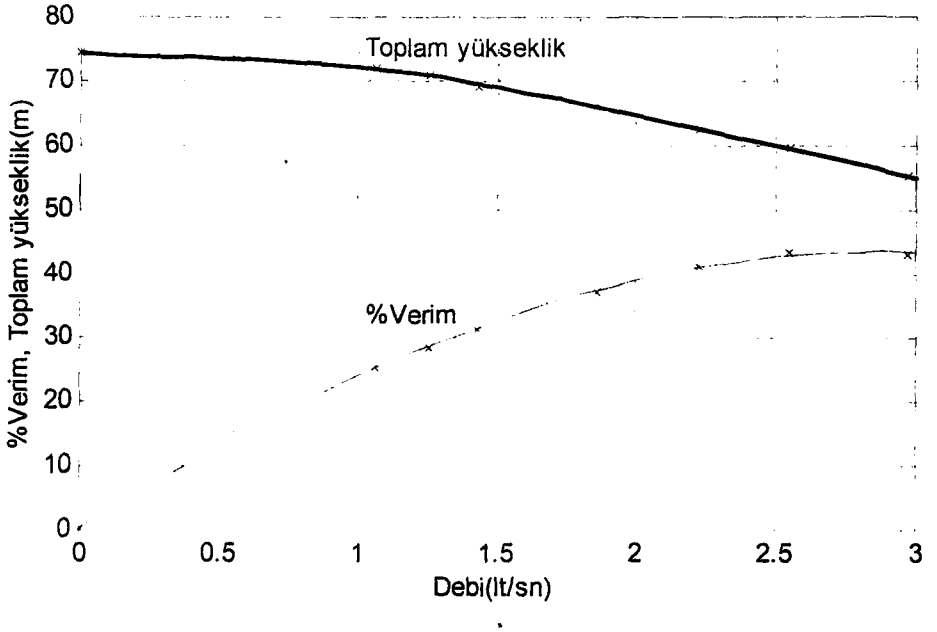
Şekil 5.4 Asenkron motorla 1453 d/d hızda yapılan tahrikte debiye göre şebekeden çekilen güç ve işe dönüştürülen su gücü

Çıkış basıncını bulmak için doğrudan mSS cinsinden ölçme yapan bir manometre kullanıldığında cihazdan okunan değer doğrudan çıkış yüksekliği olarak alınmıştır. Eğer bar yada kg/cm^3 cinsinden ölçme yapan bir barometre ile ölçme yapılmışsa yerçekimi ivmesi 10 alınıp $g=10\ kgm/sn^2$ ile çarpılarak çıkış basıncı mSS sütununa çevrilmiştir. Deneyde her iki tür ölçmede yapılmış ve aynı değerler bulunmuştur.

Verimin hesaplanması

Pompa sistemlerinde verim, su gücünün çekilen güce oranıdır. Verim hesaplamasında motor ve pompa veriminin ayrı ayrı hesaplanarak yanıltıcı yüksek verimler bulma yerine, sistemin verimi esas alınmıştır. Bu nedenle Çizelge 5.2'deki verim değerlerinin, piyasada bulunan pratik su pompalama sistemlerindeki verimlerle kıyaslandığında çizelge değerlerinin düşük görülmesi şaşırtıcı olmamalıdır. Çünkü pompa katalogları sadece pompa verimini yayınlarlar. Çizelge 5.2'deki verim değerleri ise sistem verimidir.

Yapılan araştırmada asenkron motor imalatçıları, motor kataloglarında tam yükte elde etmiş oldukları verim değerlerini yayınlamaktadırlar. Pompa imalatçıları da pompa verimlerini hesaplarken pompaya uygulanan net mekaniki gücü bulmak yerine asenkron motor imalatçılarının verdikleri verim değerlerini kullanmaktadırlar. Bu şekilde verim hesaplama yönteminde hata ihtimali son derece fazladır.



Şekil 5.5 Asenkron motorla 1453 d/d hızda yapılan tahrikte toplam yükseklik ve verimin debiye göre değişimi

Ayrıca bir sistemde sadece bir elemanın veriminin yüksek olması, sistemin toplam veriminin yüksek olması anlamına gelmez. Sistemin verimi, pompanın verimi ile asenkron motorun verimin çarpımına eşit olduğundan özellikle pompa imalatçılarının yayınladıkları belgelerindeki verim ile pratikte elde edilecek verim arasında çok büyük bir fark vardır.

5.3 ARM deneyleri

ARM'nin hız denetimi 4. Bölümde detayları açıklanan PIC16F877 denetleyicileri kullanılarak PI denetim metodu ile sağlanmıştır. ARM besleme devresi olarak tasarımı yapılan detayları açıklanan Buck konvertör kullanılmıştır.

5.3.1 ARM'nin boşta çalıştırılması

ARM, 50-1650 d/d hızları arasında boşta çalıştırılarak kararlı çalışma sınırları deneyle de ispatlanmıştır. Bu deney boyunca 50 d/d hızdan başlayarak 1650 d/d aralıklarda ölçülen hız, akım ve gerilim değerleri kaydedilmiştir. Kaydedilen 200-1650 d/d aralığında akım ve gerişim değerleri Çizelge 5.4'de verilmiştir. Çizelgede hız devir/dakika, Vk buck konvertörün giriş gerilimi (kaynak gerilimi), buck konvertörün çıkışından klasik konvertöre verilen motor faz sargı gerilimi Uf, motorun şebekeden çektiği akım Iş ve P şebekeden çekilen akım ile gerilim değerlerinden hesaplanan güçtür.

Çizelge 5.3'e göre motor hızı ile faz gerilimin değişimi Şekil 5.8'de grafik olarak gösterilmiştir. Şekil 5.8' göre hıza arttıkça faz geriliminin de orantılı olarak arttığı görülmektedir.

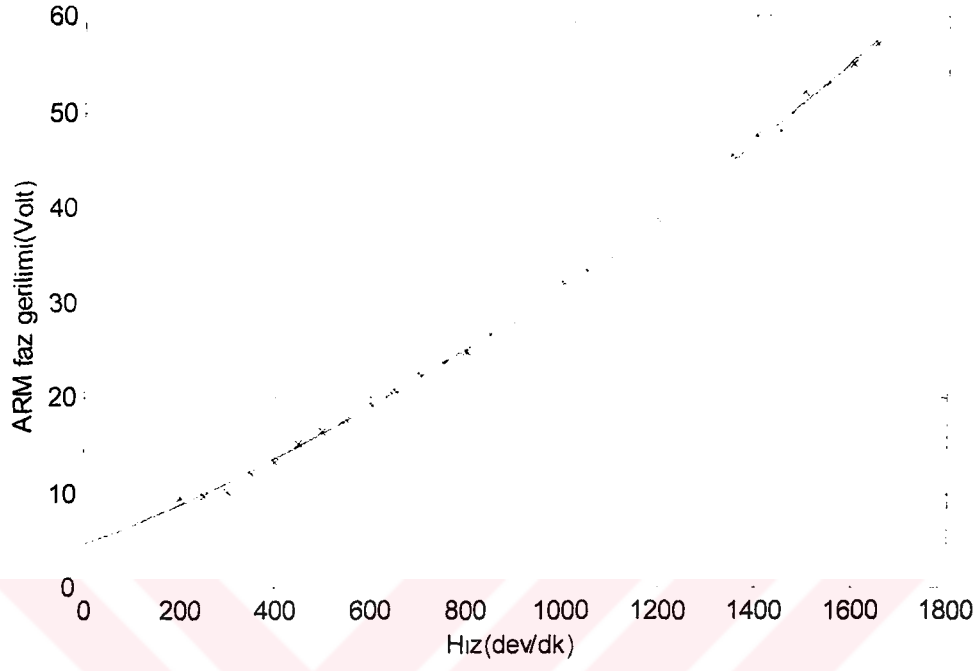
ARM'nin boşta çalışma deneyinden elde edilen hıza göre faz akımın değişimi Şekil 5.7'de görülmektedir. ARM'nin faz akımları da faz gerilimlerinin de, hız ile doğru orantılı olarak değiştiği açık bir şekilde görülmektedir.

Çizelge 5.3 ARM'nin boşta çalışmasında hıza göre çektiği güç ve faz gerilimleri

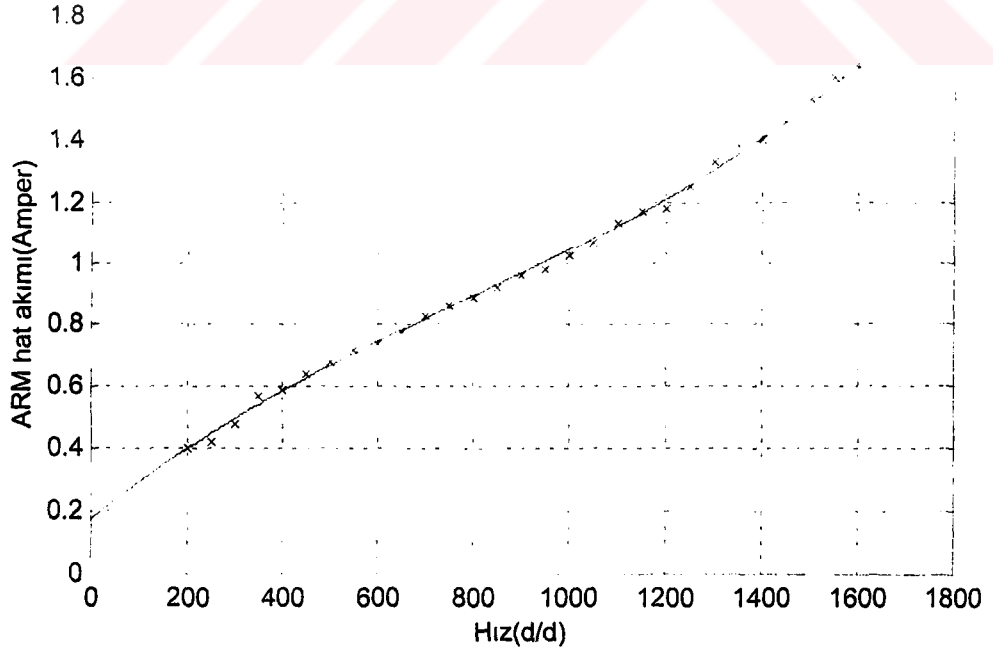
Hız dv/dk	Vk (V)	Uf (V)	İş (A)	P (W)	Hız d/dk	Vk (V)	Uf (V)	İş (A)	P (W)
200	80.5	9.5	0.4	3.8	950	78.3	29.5	0.98	28.91
250	80.5	9.6	0.42	4.032	1000	78.2	32.3	1.02	32.95
300	80.3	10.2	0.48	4.896	1050	78.1	33.3	1.07	35.63
350	80.2	12	0.57	6.84	1100	78	34.8	1.13	39.32
400	80	13.2	0.59	7.788	1150	78	36.9	1.17	43.17
450	79.7	15.2	0.64	9.728	1200	77.5	38.5	1.18	45.43
500	79.6	16.4	0.68	11.152	1250	77	40	1.25	50.00
550	79.5	17.6	0.72	12.672	1300	76.8	43.3	1.33	57.60
600	79.3	19.4	0.74	14.356	1350	76.7	45.5	1.38	62.79
650	79.2	20.8	0.78	16.224	1400	76.6	47.6	1.40	66.64
700	79.1	22.5	0.83	18.675	1450	76.6	48	1.46	70.08
750	79	23.6	0.86	20.296	1500	76.5	52	1.53	79.56
800	78.9	24.9	0.89	22.161	1550	76.4	53	1.6	84.8
850	78.8	26.5	0.92	24.38	1600	76.4	55	1.63	89.65
900	78.5	27.8	0.96	26.688	1650	75.9	57	1.68	95.76

Şekil 5.8'de ARM'nin faz akımlarının osiloskop ile ölçülen dalga şekilleri görülmektedir. En üstte A fazı en altta ise D faz akımı olarak sıralanmıştır. C faz akımının başladığı anda A faz akımının sıfıra çok yaklaşmış durumdadır. Eğer C fazına akım verildiği anda A fazının akımı hala devam etmiş olsaydı negatif tork üretimine neden olunurdu. Faz akımları arasında 15 derecelik faz farkı olduğu görülmektedir.

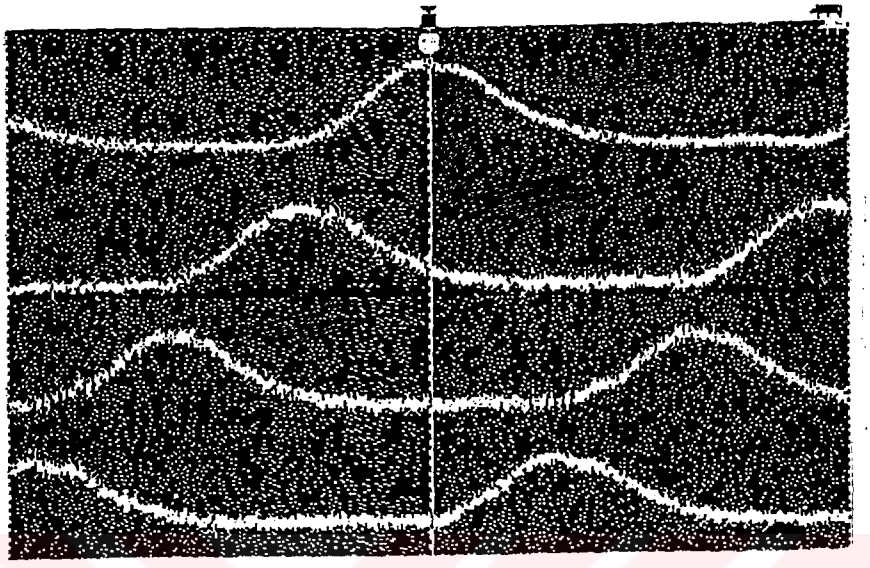
Şekil 5.9'da ARM'nin hıza göre şebekeden çektiği güç eğrisi görülmektedir. Bu eğri, akım ve gerilim değerlerinin çarpımı ile bulunmuştur. ARM'nin boşta çalışmadaki akım ve gerilim ile şebekeden çektiği güç değerleri asenkron motorun boşta çalışma deneyinden elde edilen değerlerle kıyaslanırsa ARM'nin boşta aynı hızda çalışmada yaklaşık az güç çektiği görülür.



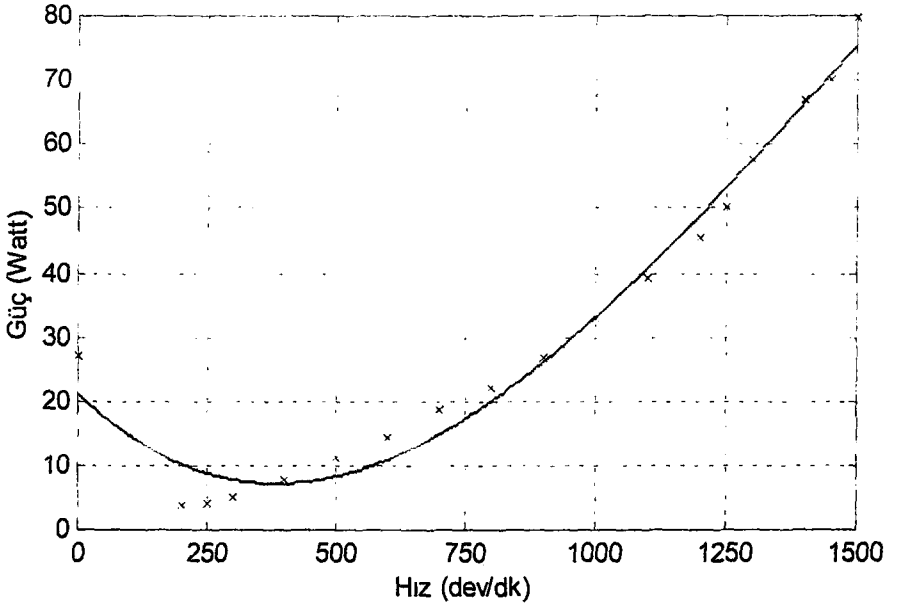
Şekil 5.6 ARM faz geriliminin hıza göre değişimi



Şekil 5.7 ARM hat akımının hıza göre değişimi



Şekil 5.8 ARM 1500 d/d hızda boşta çalışırken faz akımlarının osiloskop ile görüntüsü



Şekil 5.9 ARM'nin boşta çalışmada hız ile şebekeden çektiği gücün değişimi

5.3.2 ARM ile su pompasının tahrik edilmesi

Asenkron motor ile su pompası tahrikinden elde edilen verim ile ARM'nin tahrikinden elde edilen verimin kıyaslanabilmesi için ARM ile su pompası tahriki iki farklı metot ile yapılmıştır.

5.3.3 ARM sabit hızda döndürülerek çıkış vanasıyla debi denetimi

Asenkron motor değişik devirlerde döndürülemediğinden sağlıklı ve gerçekçi bir verim kıyaslaması yapılabilmesi için asenkron motor ile yapılan debi denetimindeki şartlar aynen sağlanarak ve ARM sabit hızda döndürülerek yapılmıştır.

ARM'ye yük altında yol verilirken PWM görev oranının başlangıç değeri %16 olarak ayarlanmıştır. Eğer motor bu gerilim ile kalkınamaz ise program her döngüde görev oranına %1 daha ilave etmektedir. Bu şekilde %35 değerine geldiği halde motordan hala pozisyon sinyali alınamamışsa 1 sn sonra görev oranı %0 olarak motor sargı gerilimi sıfırlanır ve enerji verilen sargının akımı kesilerek yanması önlenir. Eğer motor %16-35'lik gerilim değerinin hangisinde ilk hareketi yapmış ise dada sonra motorun hızlanmasına bağlı olarak referans hıza ulaşılıncaya kadar gerilim artırılır. Referans hıza ulaşıldığında görev oranı sabit kalır. Eğer referans hızdan sapma olursa hızın durumuma göre PWM oranı; denetleyici tarafından artırılır yada azaltılır. Böylece motor daha uzun sürede anma hızına ulaşmasına rağmen kalkınma akımı asenkron motorda olduğu gibi 3-5 kat fazla olmayıp aksine çok yavaş bir şekilde ve motor hızıyla orantılı olarak normal değerine ulaşmaktadır. Bu şekilde ARM ile tahrik edilen su pompasının vanasının önce kapatılıp sonra açılmasına gerek olmadığı görülmüştür. Bu yöntem özellikle büyük güçlü sistemlerde ilk kalkınmada büyük bir avantaj oluşturabilir.

ARM'nin su pompası tahrikinde asenkron motor ile aynı hızda döndürülmüş ve 1453 d/d hızda çekmiş olduğu güç ile su pompasının emme ve basma

yükseklikleri karşılaştırılmıştır. Aynı hızda yapılan her iki deneyde de pompanın emme ve basma yüksekliğinde dolayısıyla toplam yükseklikte herhangi bir değişme olmamıştır. Fakat eşit hızda eşit miktarda toplam yükseklik elde edilirken ARM'nin şebekeden çektiği güç ile asenkron motorun şebekeden çektiği güç arasında büyük bir fark olduğu görülmektedir. Böylece sistemin toplam verimi bakımından ARM ile su pompası tahrikinde önemli bir verim avantajı elde edilmiş olmaktadır.

ARM ile yapılan tahrik sisteminde de vana kısılarak asenkron motor ile yapılan deney tekrarlanmış ve alınan akım, gerilim, debi, emme ve basma yükseklikleri Çizelge 5.4'te verilmiştir.

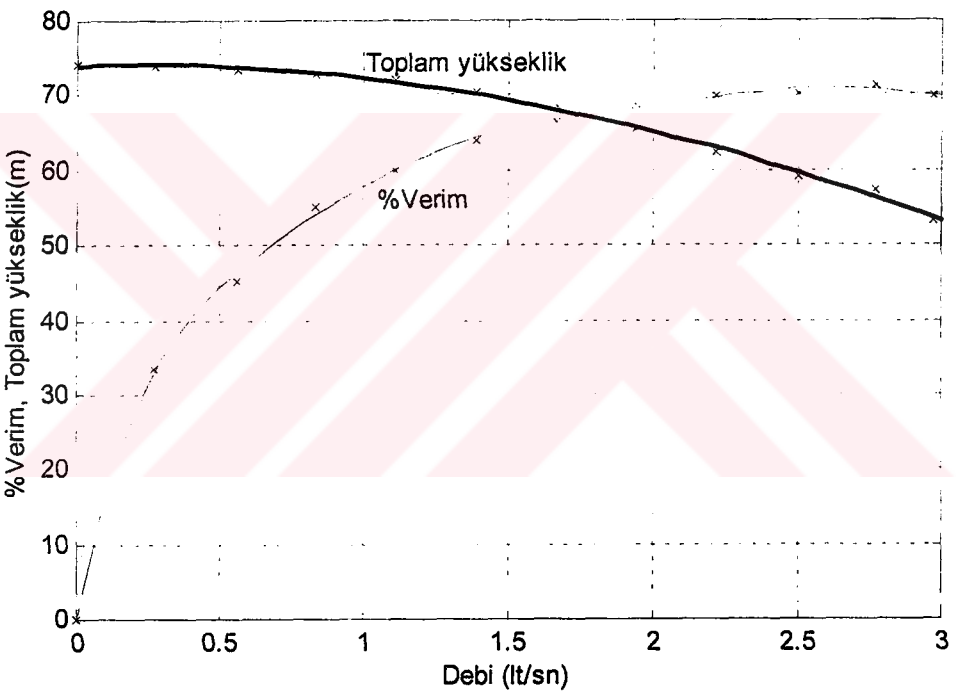
Çizelge 5.4 ARM'nin su pompası tahrikinde çıkış vanasıyla debi ayarı deney sonuçları

Debi lt/sn	Vk (V)	Uf (V)	Iş (A)	Pg (mSS)	Hm (m)	P_m (W)	P_{su} (m)	η
0.0	300	101	4.4	0.54	74.23	444	0	0
0.27	300	110	4.6	0.54	73.80	506	195	38.53
0.56	300	168	5.3	0.54	73.40	891	403	45.21
0.83	300	192	5.6	0.54	72.90	1076	593	55.11
1.11	300	195	6.7	0.54	71.90	1305	782	59.88
1.39	300	210	7.1	0.79	70.40	1498	959	64.02
1.67	300	219	7.75	0.79	68.5	1698	1121	66.03
1.94	300	228	7.9	0.79	65.33	1807	1242	68.7
2.22	300	242	8.0	0.82	62.36	1940	1357	69.96
2.5	300	249	8.3	0.90	59.25	2068	1452	70.02
2.77	300	252	8.6	1.22	57.15	2179	1552	71.2
2.97	300	260	8.8	1.43	55.30	2292	1601	69.83

Çizelge 5.4'de Pg emme basıncını mmHg, Pç çıkış basıncının mSS"na çevrilmiş değeri, ARM 'nin Watt olarak şebekeden çektiği gücü P_m, pompa tarafından işe dönüştürülen su gücünü P_s ve verimi ise; P_{su}/P_m oranından elde edilen verimi η temsil etmektedir.

Şekil 5.10'da ARM ile pompa tahrikinde çıkış vanası ile debi denetiminde toplam yükseklik ve verimin debi ile değişimi görülmektedir. ARM ile pompa

tahriki deney sonuçları ile asenkron motorlu su pompası tahriki deney sonuçları karşılaştırıldığında toplam yükseklik hemen hemen hiç değişmemişken verim ARM ile tahrikte artmıştır. Bunun nedeni çıkış vanası kısıldıkça sabit tork da ARM'nin şebekeden çektiği gücünde azalmış olması ve ARM kayıplarının da normalde asenkron motordan daha az olmasından kaynaklanmaktadır.

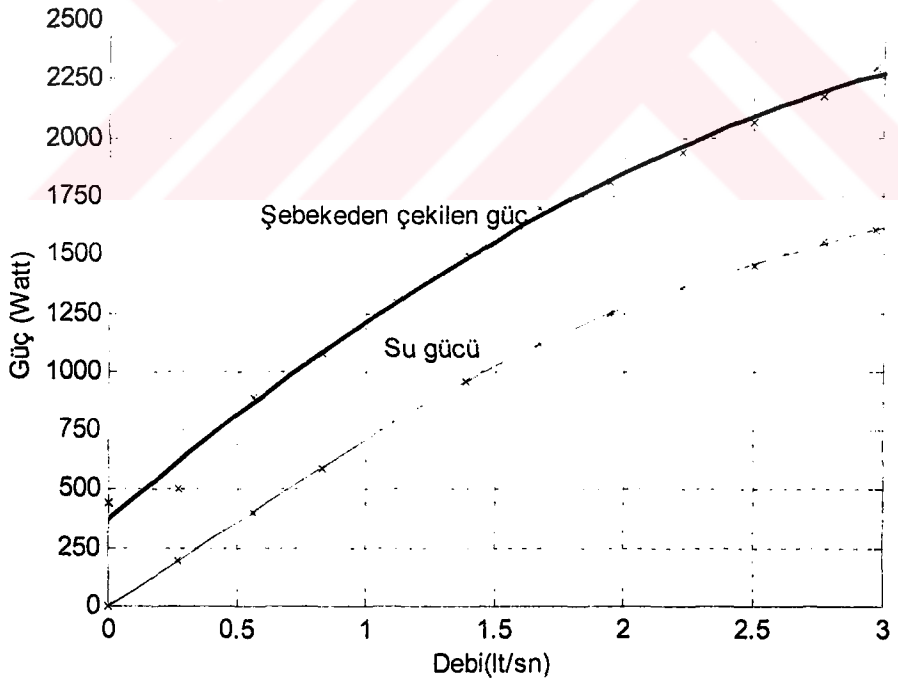


Şekil 5.10 ARM ile 1450 d/d hızda pompa tahrikinde çıkış vanasıyla yapılan denetimde verim ve toplam yüksekliğin debi ile değişimi

ARM'ye yol verilirken çıkış vanasının kapatılmasına gerek duyulmamıştır. ARM'nin bu ilk kalkınması şekli su pompaları ve diğer pompalama sistemleri içinde son derece uygundur. Çünkü asenkron motor ile ilk kalkınmada; çekilen fazla akım bir yana bırakılırsa, su pompasının çark dişleri de ani olarak hızlanmak isteyeceğinden durmakta olan suya büyük bir ani darbe vurur. Sürekli tekrarlanan bu darbe, kavitasyon gibi zamanla çark dişleri ve pompa gövdesinde erozyon oluşturur. Bu erozyonun pompa karakteristiğinin

bozulmasına olan etkisi Bölüm 2.'de kavitasyonun pompa karakteristiğine olan etkisi başlığında anlatılmıştı. Bu sakıncayı gidermek için endüstride asenkron motorların da yumuşak kalkındırılmasına çalışılmaktadır. ARM sisteminde ise ek bir düzeneğe ihtiyaç duyulmadan yumuşak kalkındırma şekli de başarılmış olmaktadır.

Şekil 5.11'de çıkış vanası ile debi denetiminde şebekeden çekilen güç ile işe dönüşen su gücünün debi ile değişimi gösterilmiştir. Asenkron motor ile yapılan benzer debi denetimiyle kıyaslandığında yaklaşık aynı miktar su gücü elde edilmiş olmasına rağmen şebekeden çekilen güç ARM'de daha düşük olduğu görülmektedir. Bunun nedeni ARM ile yapılan tahrikte daha iyi verim alınmış olmasıdır.



Şekil 5.11 ARM ile 1450 d/d hızda yapılan pompa tahrikinde debiye göre harcanan güç ve işe dönüşen su gücünün değişimi

5.3.4 ARM hızının değiştirilerek debi denetimi

Asenkron motorla debi denetimi için kullanılan 4 farklı metot vardır. Literatürde bu metotların kıyaslanması sonucunda en verimin değişken devirle tahrik edilen pompalama sistemlerinden elde edildiği ancak en yaygın kullanılan sisteminde çıkış vanasıyla yapıldığı bildirilmektedir.

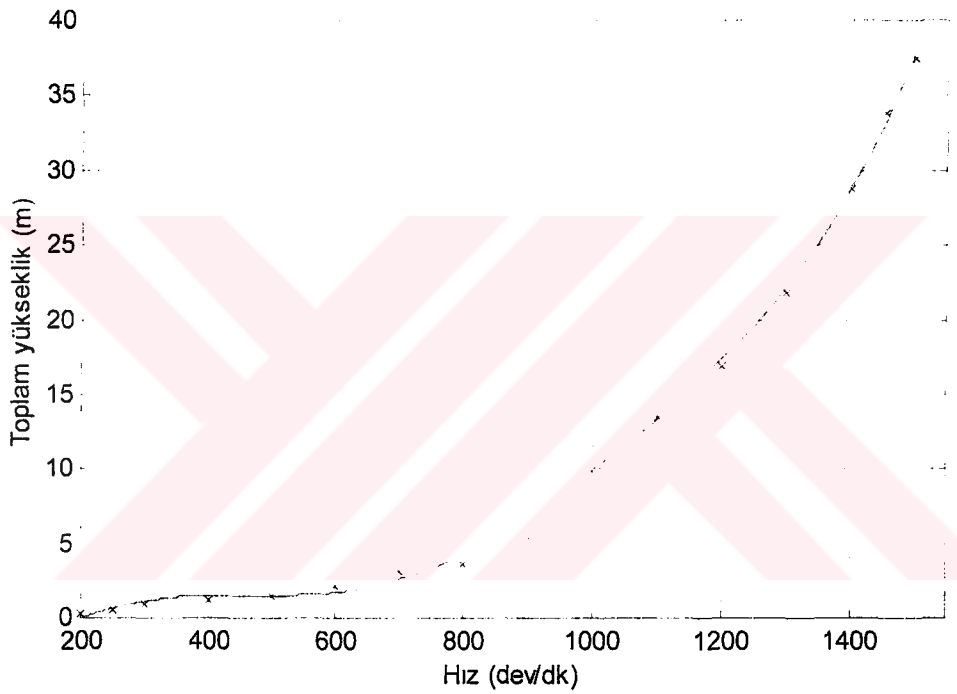
ARM'nin sabit hızla döndürülerek su pompası tahrikinden elde edilen verilerden elde edilen verim ile asenkron motorla yapılan su pompası tahriki uygulamasında bulunan verimler kıyaslandığında ARM ile tahrikin daha verimli olduğu ispat edilmişti.

Literatür bilgilerinden, frekans konvertörüyle hız denetimi sağlanan asenkron motorla değişken hızlı debi kontrolünden çıkış vanası pozisyonu ile debi kontrolünden daha iyi verim alındığı bildirilmekte idi. Bu bilgilere ve tecrübelere dayanarak ARM ile de değişken devirli debi kontorlü yapılmış ve deneyden elde edilen sonuçlar Çizelge 5.5'da verilmiştir.

Çizelge 5.5 ARM hızının değiştirilerek debinin denetimi deney sonuçları

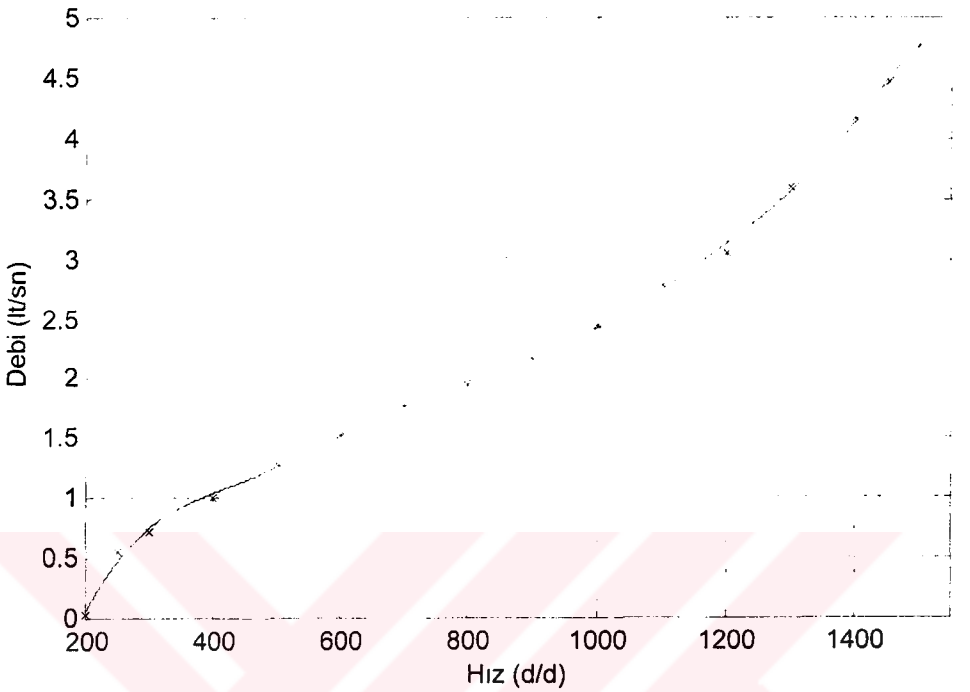
Hız d/dk	Debi lt/sn	Vk (V)	Uf (V)	Iş (A)	Hm (m)
200	0.028	300	15.0	3.9	0
250	0.56	300	17.4	4.0	0.5
300	0.72	300	25.0	4.2	1.1
400	1.00	300	35.0	4.4	2.1
500	1.28	300	47.5	4.8	2.9
600	1.53	300	59.7	5.4	3.60
700	1.78	300	64.0	5.8	5.35
800	1.94	300	95.0	6.0	5.95
900	2.16	300	1190	6.38	8.30
1000	2.44	300	138.0	6.9	10.50
1100	2.77	300	151.2	7.0	13.5
1200	3.05	300	203.0	7.2	16.8
1300	3.59	300	223.0	7.6	21.85
1400	4.16	300	243.0	7.75	28.5
1453	4.47	300	260.0	8.8	33.9
1500	4.77	300	273.0	9.2	37.5

Şekil 5.12'de ARM'nin hızının değiştirilerek yapılan debi denetiminde toplam hız ile toplam yüksekliğin değişimi görülmektedir. Bu deneyde çıkış vanası sonuna kadar açıldığından debi oldukça artmış buna karşılık toplam yükseklik sabit hız ile kıyaslandığında azalmıştır. Bunun nedeni debinin hız ile toplam yüksekliğin ise hızın karesi ile orantılı olmasıdır.



Şekil 5.12 ARM hızı ile toplam yükseklik değişimi

Şekil 5.13'de çıkış vanası sabit tutularak hız ile debinin değişimi görülmektedir. Debi hız ile doğru orantılı olarak artmıştır. Şekil 5.12 ve Şekil 5.13 yardımıyla istenen debi ve toplam yüksekliği elde etmek mümkündür. Bu nedenle bir pompa sistemi tasarımında ilerdeki ihtiyaçları göz önünde bulundurarak daha büyük motor ve pompa kullanımına ihtiyaç olmadığı görülmüştür. Ayrıca gereğinden büyük güçlü sistemde debi ayarı için vananın kısılarak düşük verimle çalışmak yerine daha ekonomik ve kullanımı kolay olan ARM'nin hızının değiştirilerek debi ayarı hem kolay hem de ekonomik olmaktadır.



Şekil 5.13 ARM'nin hızı ile pompa debisinin değişimi

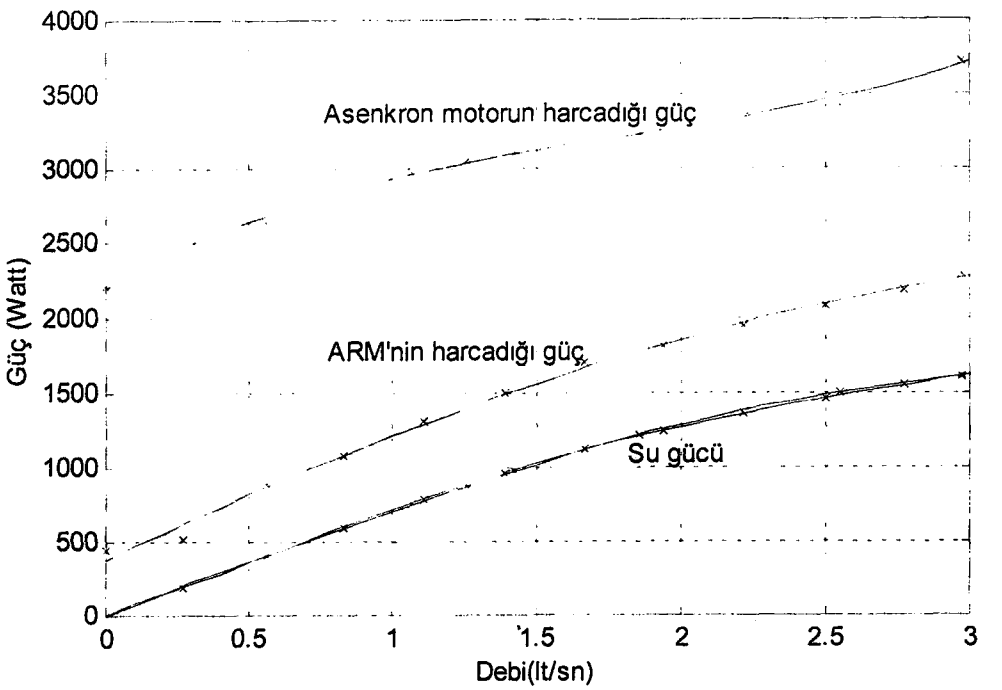
Şekil 5.12 ve 5.13'te 1000 d/d' nın altında debi ve toplam yüksekliğin oldukça düştüğü dikkati çekmektedir. Fakat pompa standartlarında zaten %40'tan daha fazla hız değişimlerine izin verilmez. Ayrıca bu noktadan sonra kavitasyon oluştuğu gözlenmektedir. Değişken hızlı debi kontrolünün en büyük dezavantajı ise değişik hızlarda rezonans hıza gelerek standart dışı titreşimlerin oluşma ihtimalinin olmasıdır.

5.4 Çıkış vanasıyla debi denetiminde ARM'li ve asenkron motorlu pompa sistemlerinin verim ve toplam yükseklik yönünden karşılaştırılması

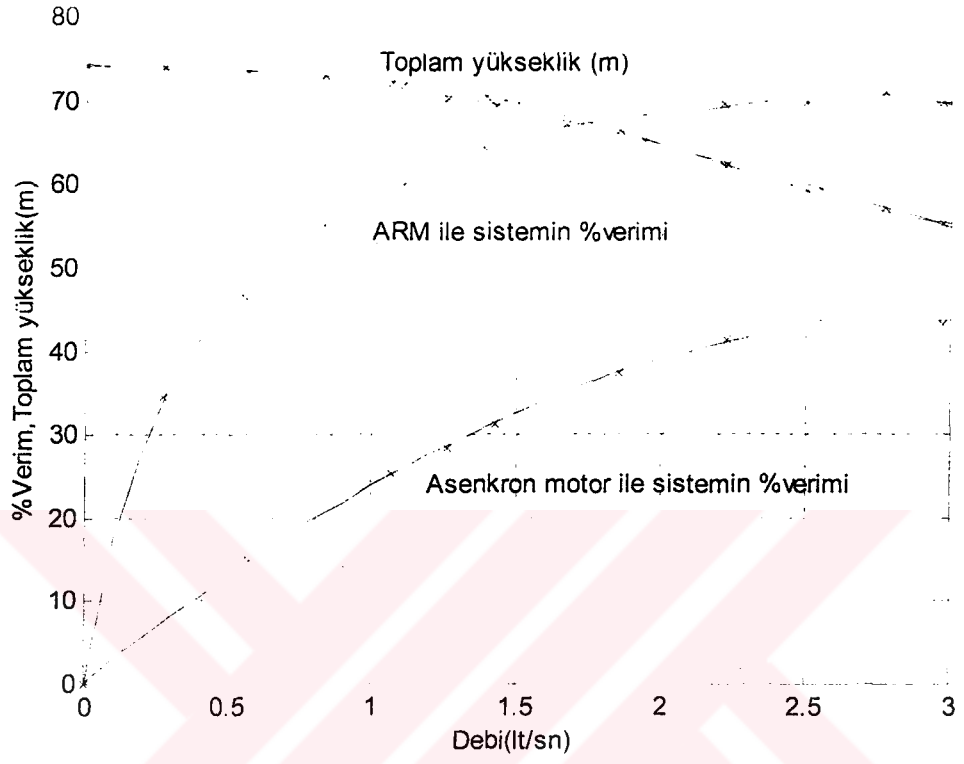
ARM ve asenkron motorlu tahrik sistemlerinde güç tüketimi ve elde edilen su gücünün daha kolay kıyaslanabilmesi için Şekil 5.4 ve Şekil 5.11üst üste bindirilerek Şekil 5.14 elde edilmiştir. Aynı şekilde Şekil 5.5 ve 5.10 üst üste bindirilerek Şekil 5.15 elde edilmiştir. Şekil 5.14'de Çıkış vanasıyla debi

denetiminde ARM ve asenkron motorun harcadığı güçler ile üretilen su gücünün değişimi, Şekil 5.15'de ise ARM ve asenkron motorlu sistemin verim ile toplam yüksekliğinin debiye göre değişimi görülmektedir. Her iki şekilde de toplam yükseklik ve su gücünün yaklaşık olarak aynı kaldığı görülmektedir. Şekil 5.14'de ARM ve asenkron motorlu tahrikte yaklaşık aynı su gücü elde edilmiş olmasına rağmen ARM tarafından harcanan güç, asenkron motorlu sisteme göre daha düşük olmuştur. ARM tarafından çekilen gücün daha düşük olmasının nedeni ARM veriminin asenkron motora göre daha yüksek olması ve ARM ile su pompasının tork-hız karakteristiğinin uyuşmasıdır. Şekil 5.15'de Uygulama sonuçlarından elde edilen verim ve toplam yüksekliğin debiye göre değişim eğrilerinde ARM'li sistemin verim değişiminin asenkron motorlu sisteme göre daha yüksek çıkmış olması ARM ile pompa karakteristiğinin uyuştuğunu gösterir.

Şekil 5.14'de görülen su gücü pompalama sistemi tarafından yükseklik kazandırılan sudaki potansiyel enerjinin Watt birimine dönüştürülmüş şeklidir.



Şekil 5.14 Çıkış vanasıyla debi denetiminde ARM ve asenkron motorun harcadığı güçler ile üretilen su gücünün değişimi



Şekil 5.15 Çıkış vanasıyla debi denetiminde ARM ve asenkron motorlu sistemin verim ile toplam yüksekliğinin debiye göre değişimi

5.5 Asenkron motor ve ARM'li pompalama sistemlerinde debi denetiminin sistem maliyeti bakımından karşılaştırılması

Son yıllarda asenkron motorlu pompalama sistemlerinde, çıkış vanasıyla debi denetimi yerine verim daha yüksek olduğu için frekans konvertörü ile yapılan değişken sürücülü debi denetim yöntemi kullanılmaktadır. Bu çalışmada asenkron motorlu pompalama sisteminde debi denetiminde çıkış vanası ile denetim metodu kullanıldığı için maliyet hesabı klasik yıldız üçgen ve frekans konvertörlü olmak üzere iki farklı şekilde yapılmıştır.

Asenkron motorun klasik yıldız üçgen metoduyla kalkındırılarak pompa tahrik edilmesinde kullanılan Seimens firmasına ait malzemelerin 19 Kasım 2001 tarihinde yayınlanmış olan fiyatları ve toplam maliyet Çizelge 5.6'da, frekans konvertörü ile yapılan değişken sürücülü debi denetimi için kullanılan

malzemelerin fiyatları ve toplam maliyet ise Çizelge 5.7'de verilmiştir. Çizelge 5.8'de ise ARM ile yapılan denetimde kullanılan malzemeler ve toplam maliyeti verilmiştir. Çizelgelerdeki 1 Euro 19 Kasım 2001 tarihinde 1.250.000 Türk Lirasına, 1 USD'nin 1.350.000 TL'ye eşit olduğu kabul edilmiştir.

Çizelge 5.6 Asenkron motoru yıldız üçgen metoduyla kalkındırmada kullanılan Seimens marka malzemelerin fiyatları ve toplam maliyet

Malzemenin Cinsi	**Tipi**	**Fiyatı**	**Toplam Tutar(TL)**
4 Kw asenkron motor	1LA7113-4AA11	263 Euro	328.750.000TL
Motor koruma şalteri	3RV1011-1JA10	55.400.000 TL	55.400.000TL
Termik röle	3RU1116-1FB0	35.200.000 TL	35.200. 000 TL
Hat konnektörü	3RT1015-1AP01	35. 200.000 TL	35.200. 000 TL
Üçgen kontaktörü	3RT1015-AP01	35.200.000 TL	35.200.000 TL
Yıldız kontaktörü	3RT1015-AP01	35.200.000TL	35.200.000 TL
Yumuşak yolverici	3RW3024-AB14	175 Euro	218.000.000TL
Zaman rölesi	3RP1540-1AN30	71.800.000	71.800.000
TOPLAM			**814.750.000 TL**

Çizelge 5.7 Frekans konvertörü ile yapılan değişken sürücülü klasik debi denetimi için kullanılan malzemelerin fiyatları ve toplam maliyet

Malzemenin Cinsi	**Tipi**	**Fiyatı**	**Toplam Tutar(TL)**
4 Kw asenkron motor	1LA7113-4AA11	263 Euro	328.750.000TL
Motor koruma şalteri	3RV1011-1JA10	55.400.000 TL	55.400.000TL
Termik röle	3RU1116-1FB0	35.200.000 TL	35.200. 000 TL
Hat konnektörü	3RT1015-1AP01	35. 200.000 TL	35.200. 000 TL
Üçgen kontaktörü	3RT1015-AP01	35.200.000 TL	35.200.000 TL
Yıldız kontaktörü	3RT1015-AP01	35.200.000TL	35.200.000 TL
Yumuşak yolverici	3RW3024-AB14	175 Euro	218.000.000TL
Zaman rölesi	3RP1540-1AN30	71.800.000	71.800.000TL
4Kw frekans konvertörü		1263Euro	1.578.750.000TL
TOPLAM			**2.393.500.000 TL**

Malzemenin Cinsi	Tipi	Fiyatı	Toplam Tutar(TL)
4 Kw ARM	Oulton Drives	2350 Euro	2.937.500.000
IGBT Sürücüsü	9xM57962AL-0701	9x10.9=98 $	132.300.000
Sürücü güç kaynağı	9xM57145L-01	13.8X9=124$	167.400.000
IGBT	9xCM75DY-12H	34.5x9=230$	310.500.000
Inc poz. sensörü.	British Drives	250$	337.500.000
Akım sensörü	LEM50LT	4x25$=100$	135.000.000
2x16 LCD		10$	13.500.000
16'lı Tuş takımı		5$	6.750.000
TOPLAM			**4.040.450.000 TL**

Üç farklı uygulamada da aynı su pompası kullanıldığı için Çizelge 5.6, Çizelge 5.7 ve Çizelge 5.8'de yer alan malzemeler uygulamada kullanılan malzemelerin tamamı değil sadece tahrik sistemlerinde kullanılan malzemelerdir. Bu üç çizelgedeki toplam maliyetler kıyaslandığında en düşük tahrik maliyeti 814.750.000 TL ile klasik yıldız üçgen metodu olduğu görülmekte ise de uygulamalarda verimin daha yüksek olması, motor kalkınma akımının denetlenebilmesi, yumuşak kalkındırma yapılabilmesi ve hız ile debi ve toplam yüksekliğin daha kolay denetlenebilmesi nedeniyle 2.393.500.000 kurulum maliyeti olan frekans konvertörlü sistem tercih edilmektedir. Bu, pompa kullanıcılarının verim ve kullanım avantajları nedeniyle aradaki 1.578.750.000 TL'lik yatırım maliyetini kabullendiklerini göstermektedir. Bu çalışmada önerilen ARM'li pompa tahrik sisteminin maliyeti ise Çizelge 5.8'de görüldüğü gibi 4.040.450.000 TL'dir. Mevcut kullanımdaki en ucuz maliyetten 3.225.700.000 TL, frekans konvertörlü sistemden ise 1.646.950 TL daha pahalıdır.

Ülkemizde elektrik enerjisinin fiyatı aylık olarak otomatik artmaktadır. Maliyet hesabının yapıldığı tarihte uygulanan tarifeye göre 150 Kwh'ten daha az tüketim için 1 kWh'te 50 bin TL, üzeri için %25 daha fazla ödenmekteydi. Bu fiyata çeşitli vergiler de dahil edildiğinde 1 kWh için ödenecek net rakam 82.500 TL olmaktadır.

Bu tezde tasarlanan ARM'li tahrik sisteminin asenkron motorlu klasik yıldız üçgen tahrik sistemine göre verim %27.63 daha yüksektir. 2.97. lt/sn olan en yüksek debide asenkron motor 3723 W, ARM ise 2292 W güç çekmiştir. Aynı su gücü için ARM 3723-2292=1431 W daha az güç harcamış olduğundan saatte 1.431 Kw enerji tasarrufu yapılmış olacaktır.

Amorti süresi hesaplanacak olursa, klasik sistemle uygulanan sistem arasındaki fiyat farkı olan 3.225.000.000 TL, 1 saatlik çalışmada elde edilecek olan 1.431 kW saatlik tasarrufun bedeli olan 82.500x1.431=118058TL'ye bölünerek 27317 saat bulunur.

Bu çalışmada 4 KW gücündeki asenkron motor 3.723 kW ileyaklaşık anma gücünde yüklendiği için bulunan verim motorun maksimum verimine daha yakındır. Ancak 4 Kw gücündeki ARM 2.292 kW ile yaklaşık yarı yükte çalıştırılmış olmaktadır.

ARM'li sistemde maliyeti esas artıran ARM'nin kendisidir. Bu motorun yapısı asenkron motordan daha basit olduğu için işçilik ücretleri ve maliyetinin de daha ucuz olması gerekir. Ancak henüz yaygın olarak kullanılmadığından özel olarak imal edilmektedir. Bu nedenle de fiyatı gerçek maliyetin çok üzerindedir. Ancak yaygın olarak kullanıldığında ARM fiyatı asenkron motordan daha ucuz olacaktır.

Bundan sonraki yapılacak çalışmalarda aynı uygulama için daha küçük güçlü ARM kullanıldığında aradaki verim farkının daha yüksek çıkması beklenmektedir. Yaygın kullanımda ARM fiyatı da azalacağından amorti süresi daha da kısalacaktır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tezde öncelikle ARM'nin hız denetimi çok ucuz maliyetle gerçekleştirilmiştir. Bu işlemi gerçekleştirmek amacıyla bir gerilim azaltan (step-down) diğer adıyla buck konvertör tasarlanmıştır. Tasarlanan denetleyici ve konvertör ile hız denetimi yapılan 4 kW gücündeki bir ARM ile 3 KW'lık 6 kademeli bir su pompası tahrik edilmiştir. Aynı pompa, ARM ile aynı güçte olan ve aynı hızda dönen bir asenkron motor ile de tahrik edilerek elde edilen verim kıyaslanmıştır. Sonuçta ARM ile su pompası karakteristiklerinin birbiri ile uyuşması nedeniyle anma debide %27.63 daha yüksek bir verim elde edildiği görülmüştür.

ARM denetiminde denetleyici olarak fiyat bakımından emsallerine göre daha ucuz olan iki adet PIC16F877 mikrodenetleyicisi kullanılmıştır. ARM'nin hız denetimi, sürücü ya da işlemci maliyetlerini artıracak ileri denetim metotları yerine klasik PI denetim metodu ile gerçekleştirilmiştir.

PI kontrol metodunun tepkisi; PID, Fuzzy, yapay sinir ağları, genetik algoritma gibi denetim metotlarına göre daha yavaş olması nedeniyle başka uygulamalar için tercih edilmeyebilir. Ancak klasik su pompası uygulamalarında tepkinin yavaş olması tercih nedenidir. Bu nedenle denetim algoritmasında hız tepkisi özellikle yavaş tutulmuştur.

Gerçekleştirilen gerilim azaltıcı konvertörlü ARM hız denetim düzeneği yardımıyla yapılan ARM ile su pompası tahrik uygulaması sonuçlarından, su pompası tesisinde asenkron motor yerine ARM'nin kullanılması durumunda %27.62 daha yüksek verim sağlandığı görülmüştür. Pompalama sistemlerindeki elektrik enerjisi tüketiminin, toplam tüketimdeki payı büyük olduğu düşünüldüğünde yapılan çalışma, enerji tasarrufu sağlamada büyük bir katkı sağlayacaktır. Sistemin ilk kurulum maliyeti 19 Kasım 2001

fiyatlarına göre 3.225.700.000 TL daha pahalı olsa da yaklaşık 27.317 saatlik bir çalışma sonunda bu rakam amorti edilebilecektir.

Bu çalışmada ARM'nin besleme gerilimi varyak vasıtasıyla değiştirilmiş fakat ARM sabit hızda çalışmaya devam etmiştir. Böylece bu sistemde, yaz aylarında elektrik hatlarında meydana gelen ısınma ile hat direncinin artması sonucu gerilim azalması nedeniyle asenkron motorlarda meydana gelen tork düşmesi ve aşırı akım çekilmesi gibi riskler ortadan kalktığı için pompalama sistemlerinde verim düşmesi, motor yanması, motor koruma rölelerinin devreye girerek sistemin durması gibi arızalar meydana gelmez. Bu özellik sayesinde, ARM kullanan su pompalama sistemlerinin asenkron motor kullanan sistemlere göre daha kesintisiz hizmet verebileceği düşünülmektedir.

Debi ve basınç denetiminin çıkış vanasının pozisyonu ile yapılmasında görülen verim düşmesinin, devir değiştirilerek yapılan debi ve basınç denetimi ile azaldığı görülmüştür.

Bu tez çalışmasında ARM yük altında, 200-1610 d/dk gibi çok geniş hız aralığında bile çalıştırılabilmişse de TSE'nin kabul etmiş olduğu ISO 9905 ve ISO 9908 pompa standartlarına göre hız %40'dan daha fazla düşürülemez.

Asenkron motorların hızı ancak frekans konvertörü ile değiştirilmektedir. Fakat, asenkron motorda hız ile birlikte tork da azalırken frekans konvertöründe oluşacak kayıplar artacak, sistem verimi ise düşecektir. Oysa ARM'li sistemin verim hesabına konvertör kayıpları dahil edildiği halde frekans konvertörsüz asenkron motora göre verim daha yüksek olmuştur. ARM'lerin hıza göre sabit tork üretebilme özelliği sayesinde su pompalarında debi ve basınç denetimi için daha yüksek verim elde edilebileceği sonucuna varılmıştır.

Türkiye'de imal edilen ya da kullanılan bir pompa, Türk Standardları Enstitüsünün kabul etmiş olduğu ISO 9905 ve ISO 9908 pompa imal etme ve çalıştırma standardlarına göre; normal çalışma hızının %10 değişiminde rezonans hıza gelmemesi ve normal çalışma hızının %10 artışında titreşim oranı 2.8'i geçmemesi gerekir. Bu amaçla TSE'ye kalite uygunluk belgesi için müracaat eden bir firmanın su pompasına TSE görevlilerinin de hazır bulunduğu ortamda rezonans hız ve titreşim testleri yapılmış, test sonuçları Üniversitemiz aracılığı ile ilgili kuruma iletilmiştir.

Şimdiye kadar ARM'nin hız ve tork kontrolü ile elektrikli araçlara uygulanması konusunda pek çok çalışma literatürde bulunmasına rağmen, su pompaları gibi karakteristikleri doğrusal olmayan yükler üzerindeki performanslarının araştırılması ile ilgili literatüre giren herhangi bir çalışmaya rastlanılamamıştır. Bu bakımdan gerçekleştirilen çalışmanın, bu alanda daha sonraki çalışmalara da temel oluşturabileceği düşünülmektedir.

Ayrıca değişik hız ve tork gerektiren çimento fabrikaları, güneş enerjili su pompalama sistemleri, hava üfleme fanları ya da ilk kalkınmada daha fazla tork gerektiren büyük özgül hızlı su pompalarında ya da asansörlerde de kullanılabilmesi için başka araştırma ve uygulamaların yapılması gerekmektedir.

Uygulamada besleme gerilimi varyak ile düşürülerek ARM güneş panelleri şartlarında da çalıştırılmış ancak gerçek uygulama yapılabilmesi ve güneşten daha fazla yararlanılabilen bölgede bulunduğu için Muğla Üniversitesine araştırma projesi olarak teklifte bulunulmuştur.

KAYNAKLAR

1. Arthur D. Little, 1999, **Opportunities for Energy saving in the residential and Com. Sec. With Higt-eff. Electric Motors,** Depart. Of Energy USA

2. Kutman T.,2001, Pompa Kontrolünde Değişken Hızlı Motor Sürücüler, **4. Pompa Kong.,** Harbiye İstanbul, s. 11-18

3. 1990, **Drives and Servos Yearbook, Cont. Tech. PLC**, Newtown, UK

4. Belmans R., **Efficiency Meas. of Induction Motor, Drive Tech.,** www.esat.kuleuven.ac.be/elen/research/download/ Drive_techonology.pdf

5. Spitzer,S.W., 1990, **Var. Speed Drives-Princ. and App. for Energy Cost Saving,** Ins. Of Society of America

6. Seyhan N., 1994, Pompaların Çalışmasını Kavrama, Çeviri, **MEB Yardımcı ve Kaynak Kitaplar Dizisi,**71

7. Öğüt S., 2001, Pompalarda Tahrik Üniteleri, **4. Pompa Kong.,** S. 19-23,Harbiye İstanbul

8. Öğüt S., 2001, Pompalarda Enerji Tasarrufu, **4. Pompa Kong.,** s. 186-191,Harbiye İstanbul

9. Ertöz E. ve Duymuş E, 2001, Değişken Devirli Pompa Seçimi, **4. Pompa Kong.,** 24-32, Harbiye İstanbul

10. Karadoğan H., 2001, Değişken Devirli Pompa Kullanan Büyük İstasyonları Bekleyen Bazı Sorunlar, Değişken Devirli Pompa Seçimi, **4. Pompa Kong.,** s. 61-68,Harbiye İstanbul

11. Çağlayan H. İ. , 2001, Değişik Tip Pompalarda Titreşim Ölçüm ve Analizi ile İlgili Arıza Tanımı, Değişken Devirli Pompa Seçimi, **4. Pompa Kong.,** s. 167177,Harbiye İstanbul

12. Özgür C., 1983, Su Makinaları Dersleri, İTÜ Kütüphanesi, Sayı:1260

13. TS EN 25199, 2001, **I. Sınıf Santrifuj Pom. ve Tek. Özel,. Res. Gazete** , 24500 sayı, sayfa 360-399

14. TS EN ISO 9905 ve TS EN ISO 9908,2001, **I. Sınıf Santrifuj Pom. ve Tek. Özel. I. Sınıf Santrifuj Pom. ve Tek. Özel,. Res. Gazete** , sayı 24500, sayfa 290-360

15. Ebara,1997, **Pump System Engineering Handbook,** Tokyo, Japon

16. N. Mohan, T. R. Undeland, W. P. Robbins, **Power Electronics, Converters, Application and Design,** Second Edition 1995.

17. P. Vas, 1992, **Electrical Machines and Drives, Clarendon Press-** Oxford

18. Kaya B.,1979, Santrifuj Pompalar, Hesap, Çizim ve Kontrol Özellikleri, İTÜ Kütüphanesi, Sayı:1149

19. TJE Miller, 1993, Switched Reluctance Motors and Their Control, **Magna Physics Publishing and Clarendon Press,** Oxford

20. Pollock ve B.W. Williams, 1990, Power converter circuits for switched reluctance motors with the minimum number of switches, **IEE Proc.** Vol.137, Part B, No.6, p. 374-384

21. İ. Sefa, 1997,Sliding Mode Yaklaşımı İle Anahtarlamalı Relüktans Motorun Hız Kontrolü, Doktora Tezi, **Erciyes Ün. Fen Bilimleri Enstitüsü,**

22. Bedford B. D, **US patent no 3678352 ve 3679953**

23. Unnewehr L. E ve Koch W. H, 1993, An Axial air-gap reluctance motor for variable speed applications, **IEEE Transactions , PAS-93,** p. 367-376

24. Bausch H. ve Reike B.,1993, Speed and torque control of thyristor-fed reluctance motors, **Procedings ICEM-1978 Vienna,** pt:1, pp 128.1-128.10

25. Bryne ve J.G. Lacy, 1976,Characteristics of saturable stepper and reluctance motors, **IEE conf. Publ. No.136,** small electrical machines, p. 93-96

26. P.J Lawrenson et al., 1980, Variable-speed switched reluctance motors, **Proceedings IEE,** Vol.127 Part B, p. 253-265

27. W.F Ray et al., 1984, Industrial switched reluctance drives-concepts and performance, **Drives/Motors/Controls,** p.357-360

28. I.J Obradowic, 1986, Correspondence on switched reluctance motor for rail traction, **IEE proc. B, Electr. Power apply.,** p. 133

29. B.K Bose et al., 1986, Microcomputer Control of Switched Reluctance Motor Drive, **IEEE Trans. On Ind. App.** Vol. IA-22, pp 708-715

30. Ç.Elmas and H. Z. De La Parra, Spain 1992, A DSP Controlled Switched reluctance Drive System For Wide Range of Operating Speeds, **IEEE PESC'92** Toledo, p. 844-850

31. Armugam et al., October 1988, Sensivity of SRM output on the pole arc ratio, **IEEE-IAS Annual meeting**, Pittsburgh

32. A. Çetin, 2001,Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsi Doktora Tezi

33. Krishnan et al., 1988, Design procedure for switched reluctance motors, **IEEE Trans. on Ind. Appl.** Vol. 24 No.3

34. V. Radun, 1995, Desing considerations for the Switched Reluctance Motors, **IEEE Trans. On Ind. App.** September/October., Vol. 5, p. 1078-1087

35. R. Arumugam et al.,1985, Magnetic Field Analysis of Switched Reluctance Motors Using 2D finite Element Method, **IEEE Trans. On Magnetic.**, Vol. MAG-21, No.1 , p. 1883-1898.

36. J. F. Lindsay, R. Arumugam ve R. Krishman,1986, Magnetic Analysis of Switched Reluctance Motor with Multiple Teeth Per Pol, **IEEE Proceedings**, Vol. 1, Part B, No.6 , p.347-353

37. Stephenson and M.A. El-Khazender, 1989, Saturation in Doubly Salient Reluctance Motors, **IEE Proc. Pt. B,** Vol. 1,

38. N.N Fulton, 1978,The Application of CAD to Switched Reluctance Motor Drives, **Proc. Of IEE EMD conf**. No:282, p. 275-279

39. T.J.E Miller and M.McGilp, 1990, Non-Linear Theory of the Switched Reluctance Motor for Rapid Computer Aided Design, **IEE Proc. Pt. B,** Vol. 6,

40. M. Schmitt ve M.McGilp, 1997, Nonlinear Theory of the Switched Reluctance Motors, **PCIM Magazine**, p. 22-30

41. M. G. Giesselmann, 1996, Dynamic of Switched Reluctance Machines with PSPICE for Windows, **IEEE IAS'96**, p. 298-303

42. G. Fransceschini et. al.,1991, Spice Assisted Simulation of Controlled Electric Drives: An App. to Switched Reluctance Motor Drives, **IEEE Trans. On. Ind. Appl.,** Vol. 27, p. 1103-1110.

43. J. Mahdavi et al., 1997, Dynamic Modeling of Nonlinear SRM Drive with PSPICE, **IEEE IAS'97**, p. 661-667.

44. D. G. Manzer, M. Varghese ve J.S. Thorp, 1990, Variable Reluctance Motor Drive, **IEE Proceedings**, Vol. 137, Part B., No.1, p. 56-63.

45. A. Lumsdaine ve J.H. Lang, 1990, State Observers for Variable-Reluctance Motors, **IEEE Trans. On. Ind. Elec.**, Vol. 37, no.2, p. 133-142

46. Ç.Elmas, June 1993, A Position Sensorless Operation of A Switched Reluctance Motor Drive Based on A Non-Linear Observer, **PhD. Thesis, School Of Electronic & Electrical Engineering University of Birmingham,**

47. Ç.Elmas and H. Z. De La Parra, 1996, Application of A Full Order Extended Luenberger Observer for a Position Sensorless Operation of A Switched Reluctance Motor Drive, **IEE Proc. Cont. Theo.** Appl. Vol. 5, p. 401-408.

48. Ç.Elmas and Ö.F. Bay, Modelling and Operation of A Nonlinear Switched Reluctance Drive Based on Fuzzy Logic, **EPE'95** Sevilla, Spain, September 1995, Vol.3 p. 592-597

49. Ö. F. Bay,1996, Anahtarlamalı Relüktans Motorun Bulanık Mantık Tabanlı Modellenmesi ve Kontrolü, **Doktora Tezi, Erciyes Ün. Fen Bilimleri Enstitüsü** ,Mayıs

50. Ç.Elmas et al., 1994, Nonlinear Modeling of A Switched Reluctance Drive Based on Neural Networks, **IEEE MELECON,** p. 809-812

51. H. H Moghbelli, G.E Adams ve R.G. Hoft,1988, Prediction of the Instantaneous and Steady-State Characteristics of the Switched Reluctance Motor Using The Finite Element Method, **IEEE IAS'88,** p. 59-70

52. M. Moallem ve C.M. Ong.,1991, Prediction the Steady State Perfornance of a Switched Reluctance Machine, **IEEE Trans. On. Ind. Appl., Vol. 27, No. 6. P. 1087-1097**

53. G.S. Buja ve M.I. Valla, 1991, Control Characteristics of SRM Drives Part I. Operation in the Linear Region, **IEEE Trans. On. Ind. Elect.** Vol. IE-38, No 5, p. 313-321

54. V.V Athani ve V.N. Walivadekar,1994, Equivalent Circuit for Switched Reluctance Motor, **Elec. Mac. and Power Systems**, p. 533-543

55. K. Rahman et al, 2001, Design of high-eff. and high density switched reluctance mot. cont. for vehicle propulsion, **IEEE Trans. on Ind. App., 38. IAS Meeting**. Vol.3, p. 2104-2110

56. K. Rahman et al, 2001, High-per. Fully Digital Switched Reluctance. Motor Control for Vehicle Propulsion, **IEEE Trans. on Ind. App.**, 38. IAS Meeting. Vol.1, p.18-25

57. K. Rahman, 2002, High-per. Fully Digital Switched Re. Mot. Cont. for Vehicle Propulsion, **IEEE Trans. on Ind. App**., 38., No.4, p. 1062-1071, July-August

58. Ramumurthy SS ve Balda J. C., 2002, Sizing a switched reluctance motor for electrical vehicles, **IEEE Trans. and Ind. App.,** Vol. 37, No. 5, p. 1256-1264, September.

59. Wu W et al., 2002, Optimization of switched reluctance motors for hybrid electrical vehicles, **Power Electronics, Machine Drives, Int. Conf. Publ.** No:487, p. 177-182

60. Emadi A, 2001, Feasibility power electronic converters for low-voltage (42V) drives in mildly hybrid electric **trac. EEEE int.Sys, Elec. Mac. and Dri. Conf.,** p. 585-587.

61. Fahimi B. et al., 2001, On the Suitability of. Switched Reluctance Motor Drives for 42 Volt High Speed Operation Application to fuel cells, **IEEE Ind. Elect. Society, IECON '01. The 27. Annual Conf**. Vol. 3, P. 1947-1952

62. Chen H.,2001,Two quadrants control of the Switched Reluctance Motor drive application in electric drive bicycle, Systems, Man, and Cybernetics, **IEEE Int. Conf**. On, Vol. 5, P. 3163-3168

63. Wei G. et al,2001, A new current control mode for switched reluctance Motor drive controller, electrical machines and systems, **ICEMS 2001**, V. 2, p. 1017-1021

64. Jack A et al , 2000, Switched Reluctance and permanent magnet motors suitable for drives-a comparison, **IEE seminear**, p 6/1-6/5

65. L. Huy et al., 1989, Unipolar Converters for Switched Reluctance Motors, **IEEE IAS 1989 Ann. Meetingconf. Rec.,** San Diego, , p. 551-560

66. H.L Huy et al., 1991, A Current-Controlled Quasi-Resonant Converter for Switched Reluctance Motor, **IEEE Trans. on Ind. Apl.,** Vol. 38, No:5, p.355-362

67. S.Vukasovic and V. R. Stefanovic, 1991,SRM Inverter Topologies: A comparative Evaluation, **IEEE Trans. on Ind. Apl.,** Vol.27,no.6, p.1034-1047

68. Z. De La Parra and Çetin Elmas,'Frenze 1991, Computer Analysis of Drive Systems for the Switched Reluctance Motor, **EPE'91,**p. 201-206

69. Takashi et al., 1993, A Comparison of Output Power Control Methods of Switched Reluctance Motors, **PCC,** Yokohama, p. 390-395

70. P.J. Lawrenson, 1992, Switched reluctance motor drives: A perspective, **ICEM92,** Vol. 1, p. 12-22

71. Pollock et al.,1989, The design performance of multiphase switched reluctance drive, **EPE conf. Part I,** p. 29-34, Aachen

72. C. Becerra et al., Commutation of SR Motors, **IEEE Trans. on Power Elec.** Vol.8, No.3, July 1993, p. 257-263

73. M.Ehsani et al.,1993, Dual-Decay Converter for Switched Reluctance Motor Drives in Low-Voltage Applications, **IEEE Trans. on Power Elec.** Vol.8, No.3, p. 224-230

74. I. Husain and M.Ehsani, 1996, Torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Motor Drives by PWM Current Control, **IEEE Trans. on Power Elec.** Vol.11, No. 1, p. 83-88

75. M.O Bilgiç et al., 1995, Torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Motor, **IEEE APEC,** Vol. 1., p. 406-410

76. P.Pillay et al., 1995, A Chopper Controlled SRM Drive for Reduced Acoustic Noise and Improved Ride-Trough Capability Using Super Capacitors, **IEEE Trans. on Ind. Appl. Vol. 5**

77. V. Radun, 1995, Design Considerations for the Switched Reluctance Motor, **IEEE Trans. on Ind. Appl.** Vol. 5, p. 1078-1087

78. M. Sugden et al., 1989, The Control of SR Drives, **EPE'89,** , p. 35-40, Aachen

79. Davis et al., 1981, Inverter Drive for Switched Reluctance Motor: Circuits and Component Ratings, **IEE Proc. Part B,** Vol. 2, , p. 126-136

80. T. Bass et al., 1985, Development of a Unipolar Converter for Variable Reluctance Motor Drives, **IEEE IAS'85,** p. 1062-1068

81. L. Huy et al., A Novel Unipolar Converter for Switched Reluctance Motor, **PESC'89,** Milwauke, 1989, p. 3-10

82. Pollock and B. H. Williams, 1987, An Integrated Approach to Switched Reluctance Motor Design, **EPE'87,** Grenoble

ÖZGEÇMİŞ

Mahir Dursun 1970 yılında Çorum-Osmancık'ta doğdu. 1993 yılı Temmuz ayında Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi Bölümünden mezun oldu. 1994 yılında Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Yüksek Lisans Eğitimine ve Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Makineleri Eğitimi Anabilim Dalında Araştırma Görevliliğine başladı. 1996 yılında "Doğrusal Olmayan Yükler için Aktif Güç Filtresi Tasarımı, Matematiksel Modellemesi ve Bilgisayarla Simülasyonu" adlı bir tez hazırlayarak yüksek lisansını bitirdi. 1997 yılında Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Doktora Programına başladı. Mayıs 2002 de Elektrik Makinaları Eğitimi Anabilim Dalında öğretim görevliliğine başladı ve halen bu görevini sürdürmektedir. Evli ve bir çocuk babasıdır.

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ