



T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü



BLDC MOTORLU SİSTEMLERİN ALAN YÖNLENDİRMELİ
KONTROLÜNDE YÜK TANIMA ALGORİTMALARININ
GELİŞTİRİLMESİ YOLU İLE VERİMLİLİK İYİLEŞTİRMESİ

Yüksek Lisans Tezi

Ümit TARHAN

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

İzmir

2019

T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

**BLDC MOTORLU SİSTEMLERİN ALAN
YÖNLENDİRMELİ KONTROLÜNDE YÜK TANIMA
ALGORİTMALARININ GELİŞTİRİLMESİ YOLU İLE
VERİMLİLİK İYİLEŞTİRMESİ**

ÜMİT TARHAN

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Özkan AKIN

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Elektrik Elektronik Mühendisliği Yüksek Lisans Programı

İzmir

2019

Ümit TARHAN tarafından Yüksek Lisans tezi olarak sunulan “BLDC MOTORLU SİSTEMLERİN ALAN YÖNLENDİRMELİ KONTROLÜNDE YÜK TANIMA ALGORİTMALARININ GELİŞTİRİLMESİ YOLU İLE VERİMLİLİK İYİLEŞTİRMESİ” başlıklı bu çalışma Ege Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi'nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve __/__/2019 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:

İmza

Jüri Başkanı : Prof. Dr. Erkan MEŞE

.....

Raportör Üye: Dr. Öğr. Üyesi Özkan AKIN

.....

Üye: Prof. Dr. Sezai TAŞKIN

.....



EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI**

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “BLDC MOTORLU SİSTEMLERİN ALAN YÖNLENDİRMELİ KONTROLÜNDE YÜK TANIMA ALGORİTMALARININ GELİŞTİRİLMESİ YOLU İLE VERİMLİLİK İYİLEŞTİRMESİ” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

25 / 07 / 2019

İmzası

Ümit TARHAN



ÖZET**BLDC MOTORLU SİSTEMLERİN ALAN YÖNLENDİRMELİ
KONTROLÜNDE YÜK TANIMA ALGORİTMALARININ
GELİŞTİRİLMESİ YOLU İLE VERİMLİLİK İYİLEŞTİRMESİ**

TARHAN, Ümit

Yüksek Lisans Tezi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi. Özkan AKIN

Temmuz 2019, 92 sayfa

Tez kapsamında, motor eğrileri tam olarak bilinmeyen değişken hızlı bir fırçasız doğru akım motorlu santrifüj tipi pompanın kontrolü, alan yönlendirmeli vektör kontrolü tekniğiyle sağlanmıştır. Rotor pozisyonun kestirimi için bir tahmin edici kullanılmış ve harici bir pozisyon algılayıcısına gerek duyulmadan, sensörsüz bir kontrol sağlanmıştır.

Santrifüj pompanın bağlı olduğu sistemin eğrilerini tanımlamak için bir kalibrasyon metodu önerilmiştir. Kalibrasyon modunda sistemin anlık basma yüksekliği, hız, debi ve güç parametreleri, harici bir sensör kullanmadan, motor kontrol parametreleri kullanılarak tespit edilmiştir. Pompa çalışma noktasının belirlenmesi için “sistem eğrisi tabanlı tahmin yöntemi” kullanılmıştır. Ardından, kullanıcıya “en iyi sistem verimliliği modu”, “en iyi motor verimliliği modu”, “maksimum basınç modu”, “minimum basınç modu” ya da “manual mod” gibi çalışma modları sunulurken kullanıcının sistemi istediği şekilde kontrol etmesi sağlanmıştır.

Normal çalışma sırasında, motor sürekli olarak hata tanımlama rutinleriyle kontrol edilmekte ve herhangi bir işlemci hatası, motor hatası, büyük ölçekli sistem değişimi, rotorun kitlenmesi ve benzeri hatalar durumunda sistemin güvenli şekilde durarak kullanıcıyı bilgilendirmesi sağlanmaktadır.

Anahtar Sözcükler: Sensörsüz Fırçasız Doğru Akım Motor Kontrolü, Santrifüj Pompa, Alan Yönlendirmeli Kontrol, Hata Kontrol Modu.



ABSTRACT

**EFFICIENCY IMPROVEMENT BY IMPROVING LOAD
RECOGNITION ALGORITHMS IN FIELD ORIENTED
CONTROL OF BLDC MOTOR SYSTEMS**

TARHAN, Ümit

Master Thesis in Electrical & Electronics Engineering

Supervisor: Assistant Professor Özkan AKIN

July 2019, 92 pages

In this thesis, the control of a variable speed brushless DC motor centrifugal pump whose motor curves are not known is provided by field oriented vector control technique. An estimator was used for estimating the rotor position and a sensorless control was provided without the need for an external position sensor.

A calibration method has been proposed to define the curves of the system to which the centrifugal pump is connected. In calibration mode, instantaneous head, speed, flow and power parameters of the system are determined by using motor control parameters without using an external sensor. “System curve-based estimation method” was used to determine the pump operating point. Subsequently, the user can control the system as desired by presenting operating modes such as “best system efficiency mode”, “best engine efficiency mode”, “maximum pressure mode”, “minimum pressure mode” or “manual mode”.

During normal operation, the motor is continuously controlled by self diagnostic routines and the system is safely stopped to inform the user in the event of any processor error, motor error, large-scale system replacement, locking of the rotor and the like.

Keywords: Sensorless Brushless Direct Current Motor Control, Centrifugal Pump, Field Directed Control, Error Control Mode.

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında BLDC motorlu sistemlerin alan yönlendirmeli kontrolünde yük tanıma algoritmalarının geliştirilmesi yolu ile verimlilik iyileştirilmesi başlığı, açık pompa sistemlerinde kullanılan bir santrifüj pompası örneğinde incelenmiştir.

Küresel ısınma, yenilenebilir enerji ve enerji verimliliği gibi kavramların bu derece önem kazandığı günlerde bu tip çalışmaların önemi, anlattığı sistemin bahsedilen kavramların tamamıyla olan yüksek ilgisi sebebiyle her geçen gün artmaktadır.

Çalışma konusunun belirlenmesinde ve çalışmanın hazırlanma sürecinin her aşamasında bilgilerini, tecrübelerini ve değerli zamanlarını esirgemeyerek bana her fırsatta yardımcı olan değerli hocam Sayın Dr. Öğrt. Gör. Özkan AKIN'a, dostum ve hocam Erman SELİM'e teşekkürü bir borç bilirim.

İZMİR

27.06.2019

Ümit TARHAN



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ŞEKİL LİSTESİ	xvi
ÇİZELGE LİSTESİ	xx
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xxi
1 GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı.....	5
1.2 Benzer Çalışmalar.....	6
2 FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORU VE KONTORLÜ.....	9
2.1 Motor Tiplerinin Karşılaştırılması.....	9
2.2 Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Maliyet Değişimleri.....	10
2.3 Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Yapısı	11
2.4 Fırçasız Doğru Akım Motoru Çalışma Prensibi	14
2.5 Fırçasız Doğru Akım Motor Modeli.....	18
2.6 Motor Kontrolünün Temel Problemi	19
2.7 Alan Yönlendirmeli Kontrol Teorisi	20
2.8 Rotor Pozisyonu Tahmini.....	25
3 POMPA TEORİSİ	32
3.1 Pompalara Ait Temel Kavramlar.....	35
3.1.1 Akış (Flow, Q):.....	35
3.1.2 Basınç (Pressure, p)	35
3.1.3 Basma Yüksekliği (Head, H).....	36
3.2 Santrifüj Pompanın Eğrileri.....	37
3.3 Santrifüj Pompa Eşitlikleri	40
3.4 Pompa Sisteminin Karakteristikleri.....	42

3.4.1	Kapalı Sistemler	42
3.4.2	Açık Sistemler	43
3.5	Santrifüj Pompalarda Akış Kontrol Yöntemlerinin Karşılaştırması	44
3.5.1	Kıasma Kontrolü	45
3.5.2	Bypass Kontrolü	46
3.5.3	Paralel Pompa Yöntemi	48
3.5.4	Değişken Hızlı Pompalarla Debi Kontrolü	50
3.6	Değişken Hızlı Santrifüj Pompalarda Çalışma Noktası Tahmini	52
3.6.1	Q-H Eğrisi Tabanlı Tahmin Yöntemleri	53
3.6.2	Q-P Eğrisi Tabanlı Tahmin Metodu	54
3.6.3	Sistem Eğrisi Tabanlı Tahmin Yöntemi	54
4	SİSTEMİN TANIMLANMASI VE KULLANILAN METOTLAR	56
4.1	Sistemin Tanıtımı	56
4.2	Yöntemler	59
4.2.1	Motor Kontrol Yöntemi	59
4.2.2	Çalışma Noktası Tahmin Yöntemi	59
4.2.3	Çalışma Modları	65
4.2.4	Hata Modları	67
5	ALGORİTMA	69
5.1	Kalibrasyon Algoritması	69
5.2	Normal çalışma Modu	70
6	DENEYSEL SONUÇLAR	70
6.1	Test Düzenegi	70
6.2	Test Sonuçları	73
7	SONUÇLAR	86

TEŞEKKÜR	88
KAYNAKLAR DİZİNİ	89
ÖZGEÇMİŞ	92



ŞEKİL LİSTESİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 Yaşam döngüsü boyunca pompa sistem maliyetleri	5
1.2 Sabit ve değişken hızlı bir pompa için geri ödeme süresi	5
2.1 Kalıcı mıknatis maliyetlerindeki değişim	11
2.2 Kuzey Amerika BLDC Marketi Gelişimi Projeksiyonu	11
2.3 Dış ve iç rotorlu fırçasız doğru akım motoru (Brushless DC Motor Drivers'den, 2019)	12
2.4 Kalıcı mıknatısın rotordaki konumlarına göre fırçasız doğru akım motorları (IPM Motor Features'den, 2019)	12
2.5 BLDC ve PMSM Sürücüler için geri EMF dalga formları	13
2.6 a) Motorun başlangıç konumu b) Sadece A sarımı enerjilendirilmiş	15
2.7 a) Motorun B sargısı enerjilendirilmeden önceki konumu b) B sargısı enerjiliyken meydana gelen değişim.....	15
2.8 Rotorun tam tur dönüşü ardından sargılarda oluşan dalga şekilleri.....	15
2.9 a) Motor başlangıç konumundayken b) A ve B sargısı ters voltajla enerjilendirildiğinde	16
2.10 Tam tur sonunda sargı voltajları ve oluşan tork.....	16
2.11 Ayrık uyarılmalı yerine önerilen tek uyarımlı sargı şekli	16
2.12 3 faz köprü doğrultucu blok şeması	17
2.13 faz akımları, endüklenen faz-nötr ve faz-faz gerilimleri.....	17
2.14 Fırçasız doğru akım d-q eksen eşdeğer devreleri.....	18
2.15 Genel motor kontrol blok şeması	20
2.16 Alan yönlendirmeli kontrol şeması	21
2.17 Akım okunması için gerekli donanım şeması	21
2.18 d, q dönen referans çerçevesindeki stator akımı ve a, b ve c durağan referans çerçevesi ile olan ilişkisi. (Clarke & Park Transforms on the TMS320C2xx'den, 1997)	22

2.19 3 faz akımların referans sistemlerindeki dalga ve fazör gösterimleri.....	24
2.20 Rotor pozisyonu tahmin algoritması.....	29
2.21 $Y(s)=s/(s+ \omega_0)^2$ fonksiyonun Laplace gösterimi	30
2.22 $\omega_0=7.8125\text{rad}$ ($f_0 \approx 1.24\text{Hz}$), $f_{\text{giriş}}=50\text{Hz}$ iken kalıcı hal hatası.....	31
2.23 $\omega_0=7.8125\text{rad}$ ($f_0 \approx 1.24\text{Hz}$), $f_{\text{giriş}}=10\text{Hz}$ iken kalıcı hal hatası (Motor Control with RX62T, 2011).....	31
3.1 Endüstriyel uygulamalardaki pompa türleri kullanım dağılımı (Electric Motor Standards, Ecodesign And Global Market Transformation, 2003)	32
3.2 Pompaların çalışma prensibi (AEA Energy & Environments, 2008) a) Pozitif deplasmanlı pompalar, b) Rotodinamik pompalar.....	33
3.3 Santrifüj pompalarındaki sıvı akışı (Grundfos Pump Handbook, 2004)	34
3.4 Bir tankın altındaki basınç seviyesi, sıvı yüzey yüksekliğine bağlıdır. (Tutorial Centrifugal Pump Systems, 2005)	37
3.5 Basma yüksekliği kavramları (www.pumpfundamentals.com,2019).....	37
3.6 Santrifüjlü bir pompa için tipik performans eğrileri. (Pump Handbook'dan, 2004).....	38
3.7 Santrifüj pompaların tipik basma yüksekliği - akış eğrisi . (Pump Handbook'dan, 2004)	38
3.8 Santrifüj pompaların tipik verim eğrisi. (Pump Handbook'dan, 2004).....	39
3.9 Santrifüj pompaların tipik güç- akış eğrisi . (Pump Handbook'dan, 2004).....	39
3.10 Santrifüj pompaların tipik net pozitif emme yüksekliği . (Pump Handbook'dan, 2004).....	40
3.11 Sistem çalışma noktasının belirlenmesi	42
3.12 Örnek kapalı pompa sistemi diyagramı	43
3.13 Kapalı sistem eğrileri . (Pump Handbook'dan, 2004)	43
3.14 Örnek açık pompa sistemi diyagramı. (Pump Handbook'dan, 2004)	44
3.15 Açık sistem eğrileri.....	44
3.16 Kısmi kontrol konfigürasyonu	45

3.17 Kısmi kontrolünde pompa ve güç karakteristik eğrileri	45
3.18 By-pass kontrol konfigürasyonu	46
3.19 By-pass kontrolünde pompa ve güç karakteristik eğrileri	47
3.20 Paralel pompa yöntemi konfigürasyonu	48
3.21 Paralel pompa yöntemi kontrolünde pompa ve güç karakteristik eğrileri	49
3.22 Değişken hız uygulamaları için H-Q ve P-Q eğrileri.....	51
3.23 Tam ve yarım yüklerde değişken hızlı uygulamaların H-Q verim eğrisi	51
3.24 Q-H eğrisi tabanlı tahmin yöntemi adımları	53
4.1 Çalışılan sistemin şeması	56
4.2 Motorun elektriksel parametreleri.....	57
4.3 Pompanın hıza bağlı H-Q eğrisi.....	58
4.4 Motorun ebatları.....	58
4.5 H-i _q bağıntısı test düzeneği	60
4.6 Deneysel ve teorik debilerle Q-H eğrisi.....	62
4.7 Deneysel ve teorik debiler arasındaki hata	62
4.8 MATLAB Curve Fitting Tool ile debiölçer kalibrasyon tablosunu polinomlaştırma	64
4.9 (P/P _n , Q/Q _n)-n/n _n grafiği	67
5.1 Kalibrasyon Algoritması.....	69
5.2 Normal Çalışma Modu Algoritması.....	70
6.1 Sistemin temsili şeması.....	71
6.2 Test düzeneğinin fotoğrafı	71
6.3 GPA32-8 IV model pompa ile YF_S201C tip debiölçer	72
6.4 Textronik mdo3024 model osiloskop ve HEW IDE, debug ekranı	72
6.5 Kalkışta B fazının akımı	73
6.6 Açık çevrim-kapalı çevrim geçişi	73

6.7 Motor hızlanırken faz akımı	74
6.8 2000 rpm için faz akımı	74
6.9 2000rpm için anahtarlamalar	75
6.10 2500rpm için anahtarlamalar	75
6.11 3000rpm için anahtarlamalar	75
6.12 Yüksek toklarda bus voltajı dalgalanması	76
6.13 Düşük toklarda bus voltajı dalgalanması	76
6.14 Ani duruşlarda bus voltajı değişimi	76
6.15 1. Test için kaynak tankı	77
6.16 1. Test için hedef çıkış noktası	77
6.17 Kalibrasyon süresince parametrelerin değerleri	78
6.18 Test 1'deki sistemin H-Q eğrisi	79
6.19 Test1'deki sistemin P-Q eğrisi	79
6.20 H- Pompanın verimlilik ifadesi	80
6.21 H-1lt su için harcanan enerji	80
6.22 Test 1 için çalışma modlarında parametrelerin değişimi	81
6.23 5 lt suyu taşımak için gerekli enerjinin basma yüksekliğine göre değişimi ..	82
6.24 Test 3 kalibrasyonu süresince parametrelerin değişimi	83
6.25 Test 3 için sistemin H-Q eğrisi	84
6.26 Test 3 için sistemin P-Q eğrisi	84
6.27 Test 3 de 1 lt suyun taşınması için gereken enerji	84
6.28 Test 3 için motor verimliliği göstergesinin değişimi	85
6.29 Test 3 için çalışma modlarında parametrelerin değişimi	85

ÇİZELGE LİSTESİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 Motor tipleri karşılaştırması.....	1
1.2 Yaşam döngüsü boyunca pompa sistem maliyetleri	4
2.1 Motor tiplerinin detaylı karşılaştırması.....	9
2.2 BLDC ve PMSM motorların karşılaştırılması	13
4.1 Debisiz durumda H-i _q ilişkisi.....	60
4.2 $Q > 0$ iken H-i _q ilişkisi	61
4.3 Okunan debiölçer sinyaline karşılık sayısal debi değerleri.....	63
6.1 Testteki sistem için kalibrasyon sonuçları	78
6.2 Doldurma süresi testi sonuçları.....	81
6.3 Test3 için kalibrasyon sonuçları	83

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
R_s	: Stator fazı direnci
AC	: Alternatif akım
DC	: Doğru akım
BLDC	: Fırçasız doğru akım motoru
PMSM	: Kalıcı mıknatıslı senkron makine
SPM	: Yüzey kalıcı mıknatıs
IPM	: İç kalıcı mıknatıslı
i_a, i_b, i_c	: 3 faz sargı akımları
i_α, i_β	: Stator referansı akım bileşenleri
i_q, i_d	: Rotor referansı akım bileşenleri
EMF	: Elektromanyetik kuvvet
Back EMF	: Geri elektromanyetik kuvvet
L_q, L_d	: Rotor endüktans bileşenleri
ω_e	: Elektriksel hız
ω_m	: Mekanik hız
λ_m	: Kalıcı mıknatıs manyetik akısı
V_q, V_d	: Rotor referansı gerilim bileşenleri
V_α, V_β	: Stator referansı gerilim bileşenleri
$\lambda_\alpha, \lambda_\beta$: Stator referansı manyetik akı bileşenleri
T_e	: Elektromanyetik tork
T_E	: Elektromekanik tork
Λ_m	: Kalıcı mıknatıslar dolayısıyla oluşan akı bağlantısı
Q	: Debi
H	: Basma Yüksekliği
P	: Güç
p	: Basınç
ρ	: Sıvı yoğunluğu
v	: Sıvının hızı
g	: Yerçekimi ivmesidir.
D	: Çap
NPSH	: Pompa net emme yüksekliği

k	: Direnç katsayısı
η	: Verim
H_{dyn}	: Sistem dinamik basma yüksekliği
H_{sta}	: Sistem statik basma yüksekliği



1 GİRİŞ

Dünya genelinde üretilen enerjinin %40'a yakını endüstriyel uygulamalardaki elektrik motorları tarafından tüketilmekteyken Avrupa Birliği ülkelerinde bu oran %70'e kadar çıkmaktadır. (Almeida vd., 2008). Elektrik makinelerinin bu denli yaygın kullanılması, verimlilikleri konusundaki çalışmaların önemini arttırmaktadır.

Yarı iletken teknolojilerindeki gelişmelerle birlikte yarı iletken malzeme maliyetlerindeki düşüşler, motor üretim tekniklerindeki iyileşmeler ve teknik bilgi birikiminin artması, klasik motor kontrollerinin, yerini çok daha stabil ve verimli kontrol tekniklerine bırakmasına neden olmaktadır. Ayrıca, piyasada yaygın olarak kullanılan skaler kontrollü asenkron tip motorlar, yerini vektörel kontrollü asenkron, değişken relüktans (Variable Reluctance Motor - VRM) ve fırçasız doğru akım makinelerine bırakmaktadır. Özellikle fırçasız doğru akım (BrushLess Direct Current - BLDC) makinelerin kullanımı, %96'ya yaklaşan verimleri, yüksek güç yoğunlukları ve düşük rotor kayıpları sebebiyle her geçen gün artmaktadır. Her ne kadar stator Eddy Current kayıpları, yüksek maliyetleri gibi dezavantajları olsa da BLDC makineler, asenkron makinelerdeki hız limitleri, VRM'lerdeki yüksek tork dalgalanmaları, gürültü ve titreşim problemleri nedeniyle rakiplerinden ayrılmaktadır (Çizelge 1.1) (M. Amiryar, 2017) .

Çizelge 1.1 Motor tipleri karşılaştırması

Makine	Asenkron	VRM	BLDC
Güç	1.8 L/kW	2.6 L/kW	2.3 L/kW
Gerilme direnci	Normal	Normal	Düşük
Tork dalgalanması	Normal (%7,3)	Yüksek (%24)	Normal (%10)
Max/Baz Hız	Normal (>3)	Yüksek (>4)	Düşük (<2)
Verim	Yüksek (%93,4)	Yüksek (%93)	Çok Yüksek(%95,5)
Kontrol	Vektör kontrol	Senkron: Vektör Anahtarlamalı: DSP	Sinüzoidal: Vektör Trapezoidal: DSP
Maliyet	Düşük(22€/kW)	Düşük(24€/kW)	Düşük(38€/kW)

Boyut	1.8 L/kW	2.6 L/kW	2.3 L/kW
Avantajlar	<ul style="list-style-type: none"> - Düşük maliyet - Basit imalat - Teknolojik olgunluk - Değiştirilebilir güç faktörü - Demagnetizasyon yok - Yüksek enerji depolama 	<ul style="list-style-type: none"> - Aşırı ısınma dayanıklılığı - Aşırı akım kabiliyeti - Uyarma bobini tekrarlayabilir - Başlangıç torkundaki düşük kayıp - Isı yaymada kolaylık - Düşük kayıp, yüksek verim - Yüksek güç yoğunluğu 	<ul style="list-style-type: none"> - Düşük kayıp, yüksek verim - Yüksek güç yoğunluğu - Yüksek yük yoğunluğu - Yüksek tork yoğunluğu - Küçük hacim - Düşük rotor direnç kaybı - Field winding olmaması - Esnek şekil ve boyut - Basit kontrol modu - Yüksek güvenilirlik
Dezavantajlar	<ul style="list-style-type: none"> - Yüksek rotor kayma oranı - Kısıtlı hız - Yüksek hacim - Düşük "Power to Quality" oranı - Yüksek kayıp, düşük verim 	<ul style="list-style-type: none"> - Kompleks yapı - Üretim güçlüğü - Düşük güç faktörü - Tork dalgalanması, titreşim ve gürültü - Hız regülasyonundaki zorluklar 	<ul style="list-style-type: none"> - Isıya dayanıksızlık - De-magnetizasyon - Yüksek maliyet - Kırılgan malzeme - Zor hava boşluğu akı alanı ayarlaması

Yenilikçi motor ve bunların kontrol yöntemlerinin kullanımından önce endüstride elektrik motoru olarak daha çok sabit hızlı asenkron makine uygulamaları kullanılmaktaydı. Zamanla, değişken hızlı uygulama ihtiyaçlarının artması ile geçici hal cevabı yetersiz olan, bir açık çevrim tekniği olan, gerilimin frekansa oranının sabit tutulması fikrine dayanan ve "V/f" tekniği olarak bilinen yöntemlerle asenkron makinelerinin değişken hızlı kontrolleri sağlanmıştır. Daha sonra yarı iletken teknolojisinin gelişmesiyle azalan maliyetler, motor

teknolojilerin gelişmesiyle ortaya çıkan ve ucuzlayan yeni motor türleri ve artan işlemci güçleri daha gelişmiş ve karışık motor kontrol algoritmalarının geliştirilebilmesine olanak sağlamıştır. Bu tekniklerden en çok kullanılanlardan biri de yönlendirmeli kontrol (Field Oriented Control - FOC)'dür. Alan yönlendirmeli kontrol, stator akımını frekans kontrolü temelinde bir vektör niceliği olarak kontrol etmeye dayanır. Bu şekilde, vektör akımı olarak stator akımını kontrol ederek ancak motor sabitleri temelinde akı tespit edilmeden, hem rotor akısı hem de motor torku hızlı ve kararlı bir şekilde kontrol edilebilir (Nabae vd., 1980).

Alan yönlendirmeli kontrolün en büyük dezavantajlarından biri anlık rotor pozisyonu bilgisine ihtiyaç duymasıdır. Pozisyon bilgisini bir algılayıcıyla almanın maliyet, bakım ve sistem esnekliğine olumsuz etki etme gibi büyük dezavantajları bulunmaktadır. Bu yüzden pek çok uygulamada pozisyon bilgisi, algılayıcısı yerine tahmin edici yahut gözetleyici yardımıyla yazılımsal olarak tespit edilmektedir. Uygulamanın kalkışta yüksek hassasiyet gerektirmediği uygulamalar için gözetleyici hatta tahmin ediciler rotor pozisyonunun tespit için rahatlıkla kullanılabilir.

Yeni motor tiplerinin ve gelişmiş motor kontrol sistemlerinin kullanımlarının artması ile birlikte, verimliliğe yönelik iyileşmeler sadece motorun ve kontrol donanımının sisteme sağladığı iyileştirmeye kalmamış, motor kontrolünde kullanılan gelişmiş kontrol sistemlerinin hedef sistemi tanıyabilme ve hatta yeniden şekillendirebilme kabiliyeti sağlamasıyla ekstra verimlilik iyileştirmesi sağlayabilmiştir. Örneğin, bir çamaşır makinesinin verimliliği, skalar kontrollü bir asenkron makineden vektörel kontrollü bir fırçasız doğru akım motoruna geçiş ile birlikte, kontrol donanımının ve motorun doğası gereği artacaktır. Gel gelelim, ikinci makinelerde kullanılan gelişmiş kontrol sistemleri, çamaşır makinesinin içindeki yükün tipinin, konumunun vb. tanımlanabilmesine imkân verdiği için, yıkama algoritmasında buna uygun yapılacak iyileştirmelere imkân sağlayarak makine verimine ekstra katkı sağlayabilmektedir (Tarhan vd., 2015).

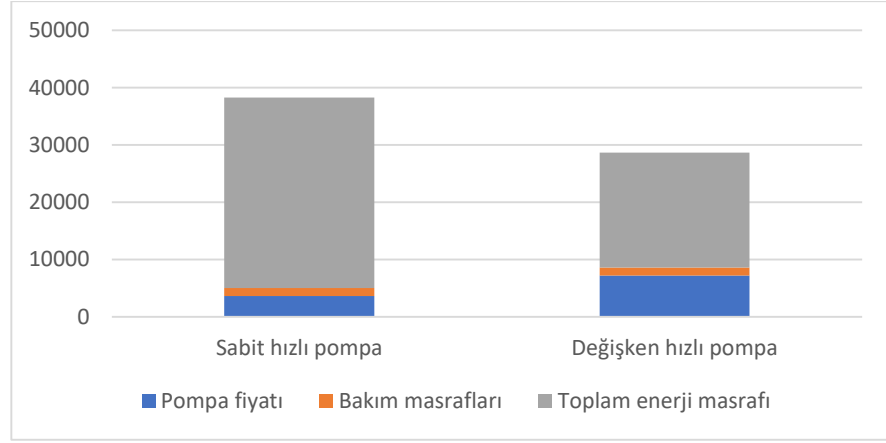
Benzer şekilde, santrifüj tipi sıvı pompalarında eskiden sıklıkla kullanılan sabit hızlı asenkron motor tipli motor kullanımı, sıkılaştıran verimlilik standartları sebebiyle yerini, ivedilikle, değişken hızlı vektör kontrollü sistemlere

bırakmaktadır (European Commission, 2001). Bu tip pompalarda, belirtilen avantajlarından ötürü BLDC motorların kullanımı hızla artmaktadır. Motor değişiminin doğasından gelen verim iyileştirmeleri yanında değişken hız kabiliyetinin birlikte getirdiği sıvı akış kontrolündeki verimlilik ve yine kontrol parametreleri yardımıyla sistem parametrelerini kestirilmesi yöntemiyle sistemdeki sensör sayısının ve dolayısıyla kurulum maliyetlerinin düşürülmesi, sistemlerin verimliliğini önemli ölçüde arttırabilmektedir.

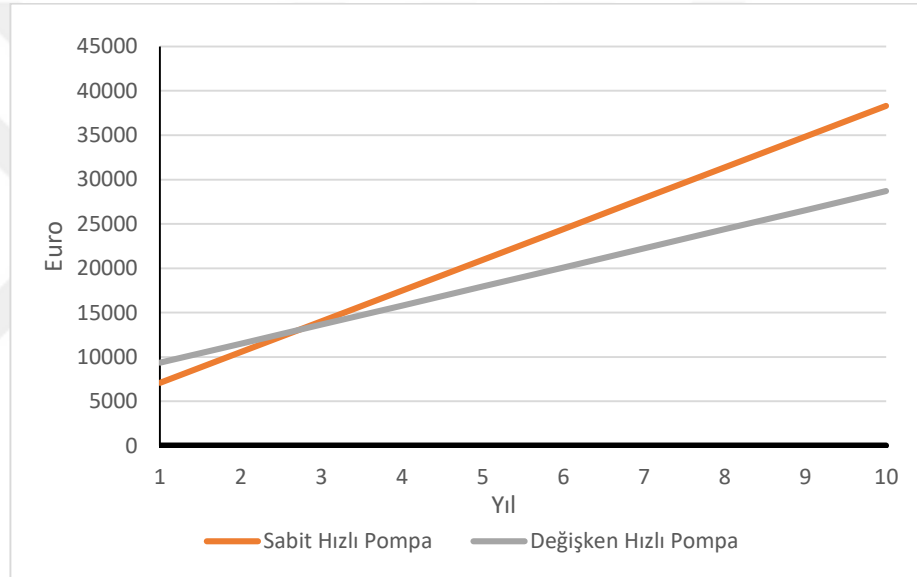
Değişken hız kontrolü santrifüj pompalarının kurulum maliyetleri daha yüksek olsa da aradaki yüksek verimlilik farkı sebebiyle yapılan tasarruf ile kurulum maliyetleri arasındaki fark yaklaşık 2 yıl içinde kapatılmakta (Şekil 1.2) ve değişken hızlı pompa kullanılan sistemler ömür süreleri sonunda çok daha avantajlı konuma gelmektedir. Çizelge 1.2’de de görüleceği üzere, her ne kadar kurulum maliyetleri sabit hızlı pompa sistemleri için çok daha düşük olsa da ortalama 10 yıllık yaşam döngüsü sonunda değişken hızlı pompa sistemlerinin toplam maliyetleri (Şekil 1.1) çok daha düşük olmaktadır (GRUNDFOS Management A/S, 2014).

Çizelge 1.2 Yaşam döngüsü boyunca pompa sistem maliyetleri

	Birim	Sabit Hızlı Pompa	Değişken Hızlı Pompa
Ortalama güç tüketimi	kW	18,76	11,31
Günlük çalışma saati	Saat	12	12
Yıllık çalıştığı gün sayısı	Gün	220	220
Hesaplama süresi	Yıl	10	10
Toplam enerji tüketimi	kWh	495.264	298.584
Elektrik gücü birim fiyatı	Euro/kWh	0,07	0,07
Pompa fiyatı	Euro	3602	7207
Bakım masrafları	Euro	1417	1417
Enerji tüketim masrafları	Euro	33.284	20.066
Toplam masraf	Euro	38.303	28.688



Şekil 1.1 Yaşam döngüsü boyunca pompa sistem maliyetleri



Şekil 1.2 Sabit ve değişken hızlı bir pompa için geri ödeme süresi

1.1 Tezin Amacı

Bu tezin amacı BLDC motorlu değişken hızlı santrifüj pompalarının kontrolünü, alan yönlendirmeli kontrol metodu ve basit bir tahmin edici algoritma ile sensörsüz olarak gerçekleştirdikten sonra pompanın çalışma noktasını belirleyen, belirlenen çalışma noktası üzerinden sistemi kullanıcının seçeceği “en verimli sistem modu”, “motorun en verimli modu”, “maksimum basınç modu”, “minimum basınç modu” vb. gibi amaçlarla tanımlanacak modlara taşıyabilen, sistemde oluşabilecek herhangi bir büyük değişimde yada oluşabilecek muhtemel arıza durumlarında kullanıcıyı uyarma kabiliyetine sahip bir yazılım geliştirmektir.

Verilen pompanın nominal hızı net olmaması ve sistem eğrisinin deney setinin doğası gereği dik olmasından dolayı klasik sensörsüz pompa çalışma noktası tahmin algoritmaları kullanılmamıştır. Bunun yerine pompanın bağlı olduğu sistemi sadece ilk çalışma için eklenecek bir debi ölçer ve anlık motor değerlerini kullanan bir kalibrasyon algoritması kullanarak otomatik olarak tanımlayan bir yöntem önerilmiştir.

1.2 Benzer Çalışmalar

Alan yönlendirmeli kontrol ilk defa 1971 yılında F. Blaschke (F. Blaschke, 1971) tarafından önerilmiştir. O günden bugüne yöntem teknik olgunluğa ulaşmış ve pek çok uygulama tarafından kullanılmıştır. İlk uygulamalarından biri 1980 yılında asenkron makine üzerinde yapılmıştır ve deneysel sonuçlar algoritmanın başarılı olduğunu göstermiştir (Nabae vd., 1980).

Diğer motor tipleri için alan yönlendirmeli kontrol çalışmalarının öncülerinden biri AC servo motor üzerinde yapılan ve karmaşık kontrol algoritmalarının işlemcilerle olan etkileşimlerini inceleyen çalışmadır. Bu çalışma bu çeşit karmaşık uygulamaların limitlerinin belirlenmesine ve geliştirilmesi gereken noktaların tespitine katkı sağlamıştır (R.G. Harley, 1990). 2000'li yılların ortalarında doğru kalıcı mıknatıs teknolojilerindeki gelişmelerle birlikte kalıcı mıknatıslı senkron makinelerin (Permanent magnet synchronous machine - PMSM) üzerine çalışmalar yaygınlaşmaya başlamıştır. Örneğin hafif raylı araçlar için yapılan çalışma alan zayıflatma bölgesi haricinde alan yönlendirme kontrol PMSM makinelerin bu tip araçlar için oldukça uygun olduğunu ortaya koymuştur (Simanek vd., 2008).

PMSM ve BLDC makinelerin sensörsüz kontrolündeki en büyük zorluklar olarak rotor pozisyonu tahmini, sıfır hızdaki tork ve ucuz maliyetli ve isabetli akım ölçümü olarak görülmektedir. Bununla birlikte sargıların komütasyonu esnasında oluşan anlık akım pikleri sebebiyle oluşan tork dalgalanmaları da özellikle sessizlik gerektiren uygulamalarda zorlayıcı durumlar oluşturmaktadır. Buna rağmen bu motorların çamaşır makinesi, bulaşık makinesi, buzdolabı ve klima gibi cihazlardaki kullanım oranı yüksek bir ivmeyle artmaya devam etmektedir (E. Persson, 2007).

Sensörsüz kontrolün en büyük zorluklarından biri olan rotor pozisyonu tahmini için çeşitli metotlar kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden harici sinyal enjeksiyonu metodunda bilinen bir harici sinyal sisteme enjekte edilir ve daha sonra işlenen sinyal endüktans bağımlı parametrelere göre giriş referans sinyali ile karşılaştırılır. Geri elektromanyetik güç (Back ElectroMagnetic Force - Back-EMF) tabanlı tahmin sisteminde geri elektromanyetik güç rotor pozisyonu motor eşdeğer devresi yardımıyla kestirilerek pozisyon tahmini yapılır. Endüktans tabanlı kontrolde Jun Cai ve Zhiquan Deng 2012 yılında darbeli enjeksiyon tekniği ile tam döngü için her faz endüktansını belirleyen SRM sensörsüz kontrol tekniği olan “Faz akımı eğim farkı” önerirken Hongwei tarafından 2004 yılında tüm rotor dönüşü için terminal fazı kullanarak artan endüktansı tahmin eden başka bir yöntem önerildi. Ayrıca pozisyon tahmini için pek çok durum gözetleyici yapay zekâ uygulaması da kullanılmaktadır. Bunlar arasında genişletilmiş Kalman filtresi (Enhanced Kalman Filtering, EKF), Luenberger gibi gözetleyiciler yanında PLL gibi algoritmalar da bulunmaktadır. Ayrıca pek çok bulanık mantık ve yapay sinir ağı uygulaması da rotor pozisyonu tahmininde kullanılmaktadır (I.G. Reza,2014).

Bunun yanında, değişken hızlı BLDC pompaların fotovoltaiik sistemlerde kullanımını inceleyen bir yayında basitlik, ekonomik, kompaktlık, verimlilik, güvenilirlik ve kullanılabilirlik bağlamında BLDC motorların değişken hızlı pompa sistemleri için uygun bir çözüm olduğunu ortaya koyulmuştur (R. Kumar, B Singh, 2015; S. Riyadi, 2016).

Değişken hızlı santrifüj pompalarının sabit hızlı olanlara göre olan avantajlarını gösteren pek çok yayın bulunmaktadır. Bunlardan bazıları kısma supabı, bypass metodu yada pervane çapını küçültme gibi sıvı akışı kontrol metotlarının motor hızını değiştirme metoduna göre verimsizliğini incelemiş ve değişken hızlı motorların verimliliğini ortaya koymuştur. (Grundfos, 2004; McGraw-Hill, 2001). Bunun yanında değişken hızlı pompa sistemlerin kullanımının ekonomik sonuçlarının incelenmesi sonucunda bu tip sistemlerin uzun vadede çok yüksek oranda enerji tasarrufu sağladığı gösterilmiştir. (Ferreira vd., 2011)

Son olarak, vektör kontrollü değişken hızlı pompa sistemlerinin kullanımında pompa çalışma noktasının tahmin konusunda yayınlar yapılmış ve

motorun anlık torku, hızı, gücü gibi parametrelerinin yardımıyla sistemin anlık çalışma noktasının kestirilmesi ortaya koyulmuştur. Bu çalışmalarda motorun nominal gücü ve hızı yada eğer biliniyorsa sistemin QH eğrisi ve benzeşme denklemleri kullanılarak pompanın anlık parametreleri hesaplanır. (T. Ahonen, 2009, 2010,2012)

Yapılan literatür araştırmasında pompa sistemlerinde çalışma noktası tahmininin fırçasız doğru akım motorunun alan yönlendirmeli kontrolünde uygulandığı bir çalışmaya rastlanmamıştır.



2 FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORU VE KONTORLÜ

Fırçasız doğru akım motoru, rotoru kalıcı mıknatıslardan yapılmış ve statorda sargılar bulunan; rotordaki kalıcı mıknatısın statordaki sargılardan geçen akım ile meydana gelen manyetik alanı takip etmesi yolu ile çalışan bir tür elektrik makinesidir.

2.1 Motor Tiplerinin Karşılaştırılması

Mıknatıs teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte fırçasız doğru akım motorlarının kullanımı önemli artış göstermiştir. Fırçasız doğru akım motorları pek çok avantajı ile diğer motor tiplerinin önüne geçmektedir. Pek çok diğer motor tipi ile BLDC motorların karşılaştırması Çizelge 2.1’de görülmektedir.

Çizelge 2.1 Motor tiplerininin detaylı karşılaştırması

Parametre	DC Motor	PMDC	Asenkron Motor	BLDC ya da PMSM
Voltaj	AC, DC	DC	AC	AC, DC
Güç	Çok Yüksek	Orta	Düşük- Orta	Yüksek
Verim	60-80	70-80	40-90	70-95
Ömür	Düşük	Orta	Çok Yüksek	Çok Yüksek
Gürültü	Gürültülü	Orta	Sessiz	Çok Sessiz
Hız Regülasyonu	Zayıf	Orta	İyi	Mükemmel
Başlangıç Torku	Yüksek	Çok Yüksek	Düşük- Orta	Çok Yüksek
Güvenilirlik	Daha Az	Orta	Yüksek	Yüksek
Kontrol Edilebilirlik	Düşük	Düşük	Orta	Orta
Maliyet	Düşük	Orta	Orta	Yüksek
Power Density	Çok Düşük	Düşük	Orta	Çok Yüksek

Buna göre BLDC motorun avantajları aşağıda listelenmiştir:

- Fırçasız motorlar, hızı gerilimi değil, akımın sağladığı frekansla belirlendiğinden daha verimlidir.

- Fırçalar olmadığından sürtünmeden kaynaklanan mekanik enerji kaybı daha azdır ve bu da verimliliği artırır.
- BLDC motor her koşulda yüksek hızda çalışabilir.
- Çalışma sırasında kıvılcım çıkmaz ve daha az gürültü olur.
- Daha hassas kontrol için stator üzerinde daha fazla elektromanyetik malzeme kullanılabilir.
- BLDC motorlar, düşük rotor ataletine sahip olduklarından kolayca hızlanır ve yavaşlar.
- Devasa bir hız aralığı üzerinde hacim başına büyük tork sağlayan yüksek performanslı bir motordur.
- BLDC motorlarda fırça olmadığı için çok fazla bakım gerektirmez, daha güvenilir, yüksek ömürlüdür.
- Komütatörden iyonize edici kıvılcım çıkmaz ve elektromanyetik girişim de azalır.
- Bu tür motorlar iletim ile soğutulur ve iç soğutma için hava akışı gerekmez.

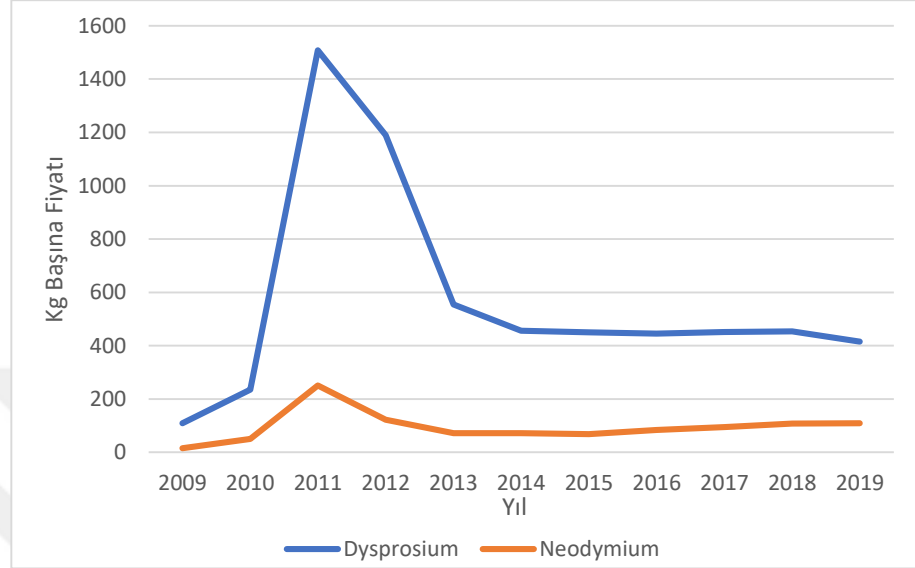
Bunun yanında bazı dezavantajları da vardır:

- BLDC motor, fırçalı bir DC motordan daha pahalıdır.
- Ek kontrol devresi gerektirir.
- BLDC motora sınırlı yüksek güç sağlanabilir, aksi takdirde çok fazla ısı mıknatısları zayıflatır ve sargı yalıtımı zarar görebilir.
- Karışık kontrol yazılımlar yüksek işlemci gücü gerektirir.
- Kontrol algoritmaları pozisyon bilgisi gerektirdiğinden pozisyon algılayıcı ek donanım ya da pozisyon algılayıcı algoritmalar için ek işlemci gücü gerektirir.

2.2 Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Maliyet Değişimleri

Şekil 2.1’de fırçasız doğru akım motorlarında en çok kullanılan kalıcı mıknatıslardan olan Disprosyum ve Neodimim elementlerinin 2009 yılından itibaren kg başına maliyet değişimi gösterilmektedir (Şekil 1.1). Buna göre 2011

yılında artan maliyetler, ilgili motorun pazarında önemli düşümlere sebep olmuş ve marketi duraklatmışsa da daha sonra fiyatların ucuzlamasıyla BLDC makinelerin kullanımındaki yaygınlaşma Kuzey Amerika örneğinde (Şekil 2.2) görüldüğü üzere artmaya devam etmiştir.



Şekil 2.1 Kalıcı mıknatıs maliyetlerindeki değişim



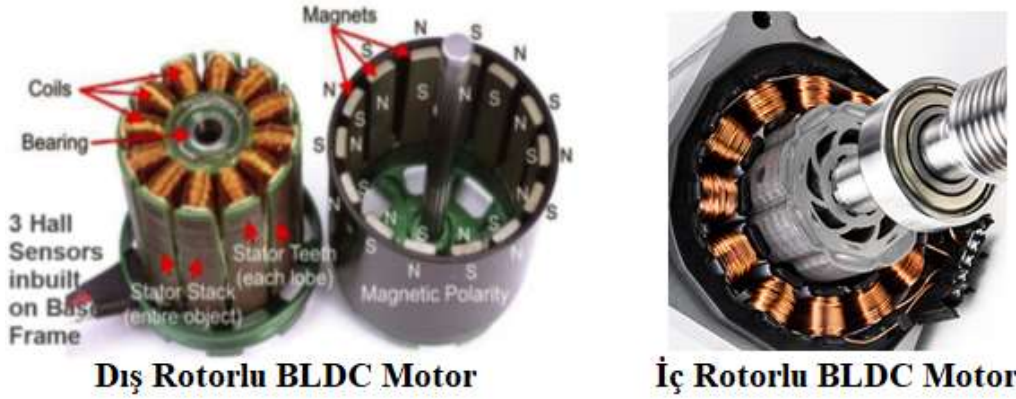
Şekil 2.2 Kuzey Amerika BLDC Marketi Gelişimi Projeksiyonu

2.3 Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Yapısı

Şekil 2.3'de görüldüğü gibi fırçasız doğru akım motorları rotorlarının konumları itibariyle iki şekilde bulunur (Chaudharil vd, 2016).

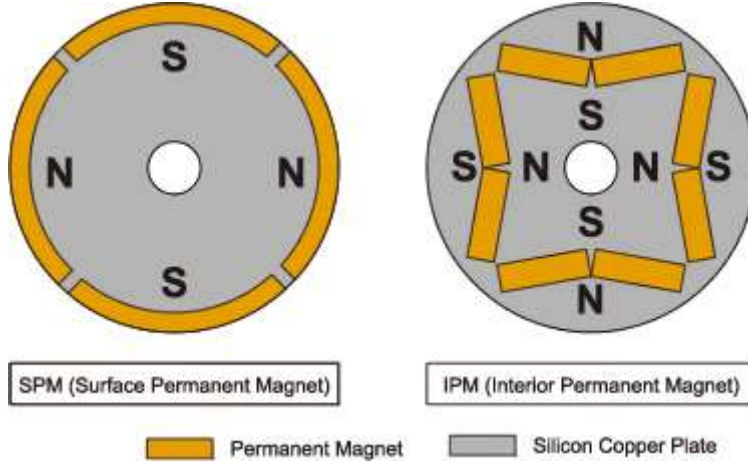
İç rotorlu makineler daha çok yüksek hız ve hassas konum gerektiren uygulamalarda sıklıkla kullanılır. Bu yapının avantajı atalet momentinin yüksek

olmasıdır. Buna karşın hız yükseldikçe kalıcı mıknatıslar üzerine uygulanacak açısal momentin artması kalıcı mıknatısların yerinden oynamasına neden olabilmektedir. Ayrıca stator sargılarının sarımlarındaki zorluk, bu tip makinelerin bir diğer zorluğudur. Sargıların dışarıda olması ise sargıların soğuması için daha geniş bir alan yaratacağından soğutma problemi daha azdır.



Şekil 2.3 Dış ve iç rotorlu fırçasız doğru akım motoru (Brushless DC Motor Drivers'den, 2019)

İç rotorlu doğru akım motorları, Şekil 2.4'de görüleceği gibi, rotordaki kalıcı mıknatısların konumları bakımından yüzey kalıcı mıknatıslı (Surface Permanent Magnet - SPM) ve iç kalıcı mıknatıslı (Inner Permanent Magnet - IPM) olmak üzere iki ayrı şekilde incelenirler.



Şekil 2.4 Kalıcı mıknatısın rotordaki konumlarına göre fırçasız doğru akım motorları (IPM Motor Features'den, 2019)

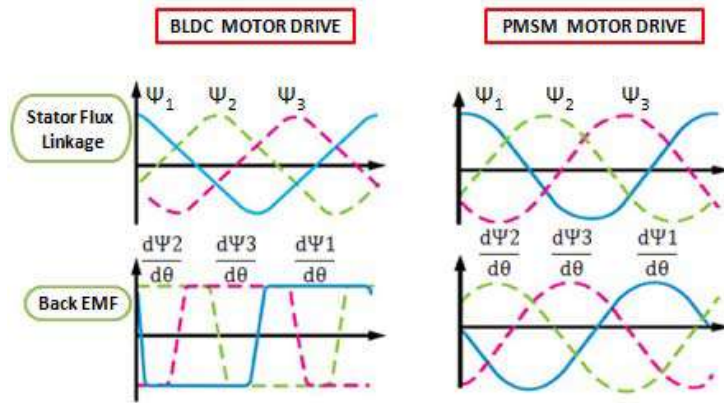
İç kalıcı mıknatıslı motorlarda mıknatıslar rotor saçının içine yerleştirilmiş olduğundan dolayı kalıcı mıknatısların açısal hız sebebiyle yerinden oynama ihtimali daha düşüktür. Ayrıca hava aralıkları 360 derece boyunca aynı olmayacağından dolayı endüktans değişimlerinde relüktans torku meydana gelir.

Ek olarak motor saçı ek hava aralığı gibi davranacağından manyetik devredeki hava aralığı etkisi daha büyük olacaktır. Dış kalıcı mıknatıslarda yüzey boyunca hava aralığı sabit ve düşüktür.

Dış kalıcı mıknatıslı motorlarda sargılar rotorun dış yüzeyinde olacağı için sarımı kolay olacaktır. Ayrıca kalıcı mıknatıslar iç bölgededir ve hız dolayısıyla savrulması daha zordur. Buna karşın sarsıntılara karşı oldukça hassas bir yapılı vardır. Bu tip motorlar daha çok çamaşır makineleri ve fan uygulamaları gibi uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır.

Fırçasız doğru akım motorları ile sabit mıknatıslı senkron motorlar arasındaki fark sarımların yapısından ileri gelmektedir. BLDC makineler konsantre sargılı iken PMSM makinelerde sarımlar sinüzoidal biçimde dağıtılmıştır.

Yapıları bu derece benzer olmasına rağmen sargılarındaki farklılık sebebiyle BLDC makinelerde indüklenen elektromanyetik güç (BackEMF) üçgensel iken PMSM makinelerde sinüzoidaldir. İki makine aralarındaki farklılık Şekil 2.5’de verilmiştir. PMSM ve BLDC motorlar arasındaki farklılıklar ‘de Sakunthala tarafından verilmiştir (S. Sakunthala, 2017).



Şekil 2.5 BLDC ve PMSM Sürücüler için geri EMF dalga formları

Çizelge 2.2 BLDC ve PMSM motorların karşılaştırılması

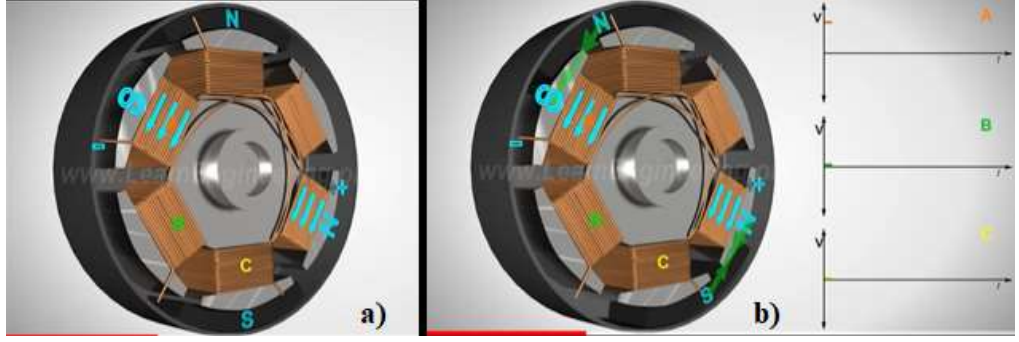
BLDC	PMSM
Senkron makine	Senkron makine

Doğrudan akımlarla beslenir	Sinüzoidal akımlarla beslenir
Üçgensel geri emf	Sinüzoidal geri emf
Her 60° için stator akı pozisyonu komütasyonu	Sürekli stator akısı pozisyon değişimi
Aynı anda sadece iki faz açık	Üç fazın aynı anda açık olması mümkündür
Değişimde tork dalgalanması var	Değişimde tork dalgalanması yok
Ses aralığında düşük dereceli akım harmonikleri	Sinüzoidal uyarma nedeniyle daha az harmonik
Harmonik içeriği nedeniyle yüksek çekirdek kayıpları	Daha az çekirdek kaybı
Daha az anahtarlama kaybı	Aynı anahtarlama frekansında yüksek anahtarlama kayıpları
Kontrol algoritmaları nispeten basittir	Kontrol algoritmaları matematiksel olarak yoğundur
Kontrolü kolay	Daha karmaşık kontrol
Düşük hız için daha iyi	Daha yüksek maksimum ulaşılabilir hız
Gürültülü	Sessiz
Daha düşük tork ve verim	Yüksek tork ve verim
Düşük maliyet	Yüksek maliyet
Dikdörtgen akım dalga formları	Sinüzoidal veya yarı-sinüzoidal akım dalga formları

2.4 Fırçasız Doğru Akım Motoru Çalışma Prensibi

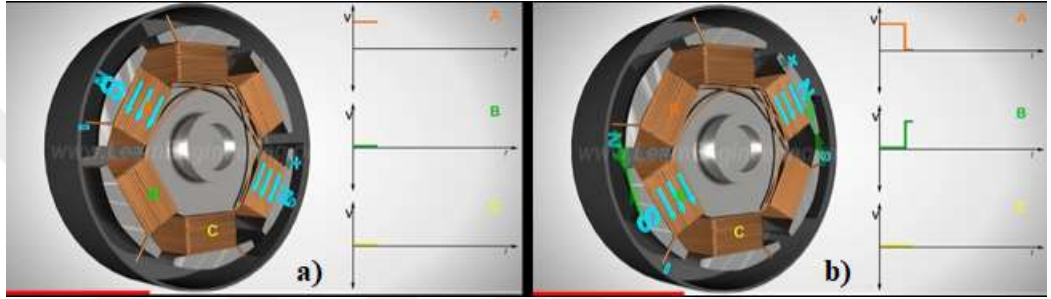
Fırçasız doğru akımlarının çalışması, daimî mıknatıslı motor rotorunun sargıları dolayısı ile elektromıknatıs özellik kazanmış stator ile etkileşimine dayanır. learnengineering.org' bu etkileşim Şekil 2.6 ile Şekil 2.11 arası şekiller arasında anlatılmıştır (learnengineering.org, 2019) .

Motor Şekil 2.6-a'daki konumdayken A sarımı enerjilendirildiğinde, A sargısından geçen akım sonucu meydana gelen manyetik kuvvet rotorun N kutbunu sargıya doğru hareket ettirir ve motor Şekil 2.6-b'deki hale gelir.



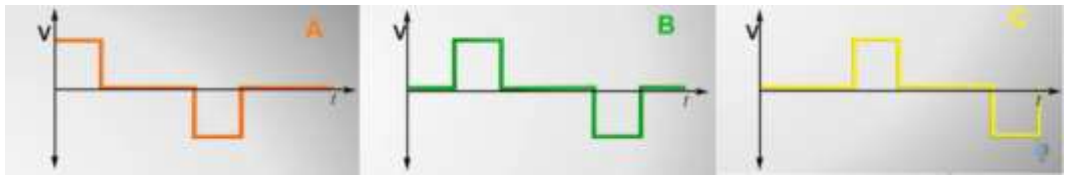
Şekil 2.6 a) Motorun başlangıç konumu b) Sadece A sarımı enerjilendirilmiş

Daha sonra motor şekil Şekil 2.7-a'daki konumundayken B sargısı enerjilendirilir ve rotor Şekil 2.7-b'deki konumuna gelir.



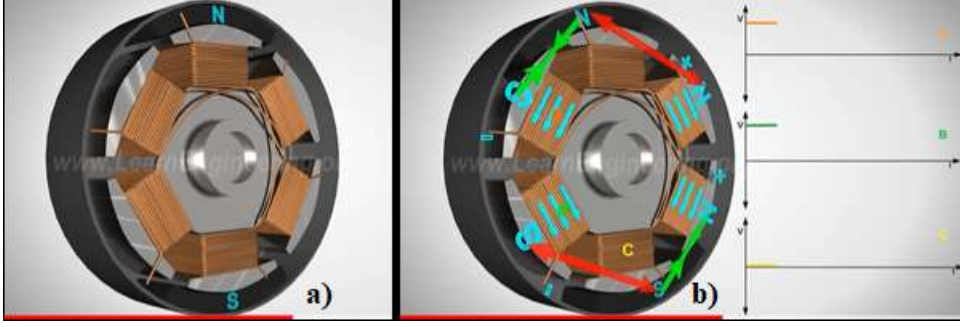
Şekil 2.7 a) Motorun B sargısı enerjilendirilmeden önceki konumu b) B sargısı enerjiliyken meydana gelen değişim

Bu şekilde bir sonraki sargı enerjilendirilmeye devam ederek rotorun sürekli dönüşü sağlanır. Motorun bir tam tur dönüşü sonrası 3 sargıda ortaya çıkan dalga şekli Şekil 2.8'da verilmiştir.

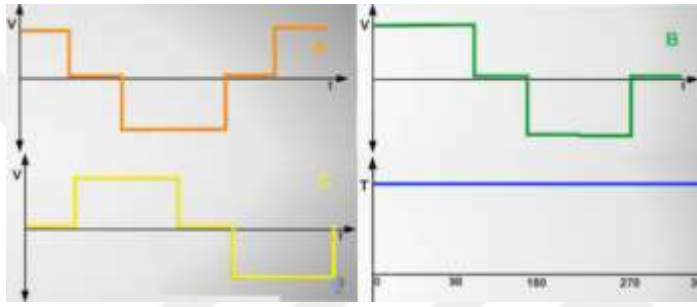


Şekil 2.8 Rotorun tam tur dönüşü ardından sargılarda oluşan dalga şekilleri

Şekil 2.8'da görüldüğü üzere her bir adımda sadece bir sargı enerjilendirilmiştir. Diğer ölü iki bobin motorun güç çıkışını önemli ölçüde azalttığı görülmektedir. Bu dezavantajı ortadan kaldırmak için başka bir teknik önerilmektedir. Buna göre motor Şekil 2.9-a'daki pozisyondayken A sargısı ve B sargısı birbirlerine ters voltajlarla enerjilendirildiğinde, A sargısında oluşan S kutbu rotorun R kutbunu çekerken diğer sargı itecek şekilde etki yapar. Bu durumda bir önceki tekniğe göre iki kat fazla güç oluşturulabilir.



Bu şekilde Şekil 2.10'de görüleceği üzere iki kat fazla güç ve sabit bir tork eğrisi elde edilir



Şekil 2.10 Tam tur sonunda sargı voltajları ve oluşan tork

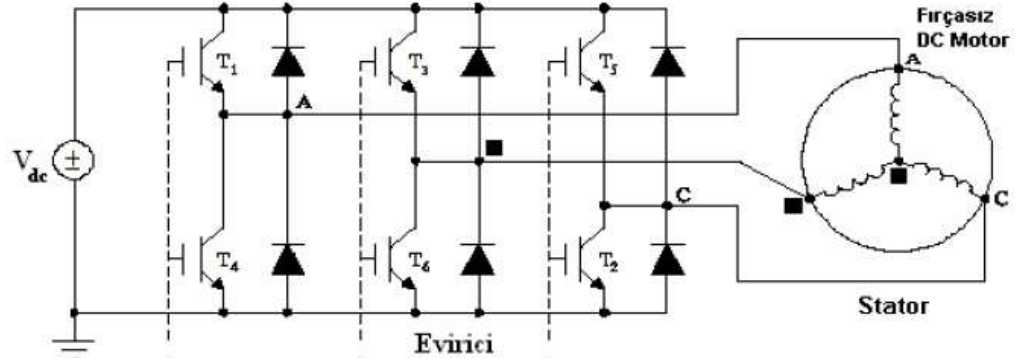
Sargılar bu şekilde olduğunda görüldüğü üzere her bir adım için tüm sargılar ayrı ayrı uyarılmak durumundadır. Bunun yerine A sargısının C sargısının girişine verildiği Şekil 2.11'de görülen topoloji uygulandığında, her bir sargının tek tek uyarılması yerine sadece A ve B uçları arasında güç uygulandığında da aynı dalga şekillerinin elde edileceği görülmektedir.



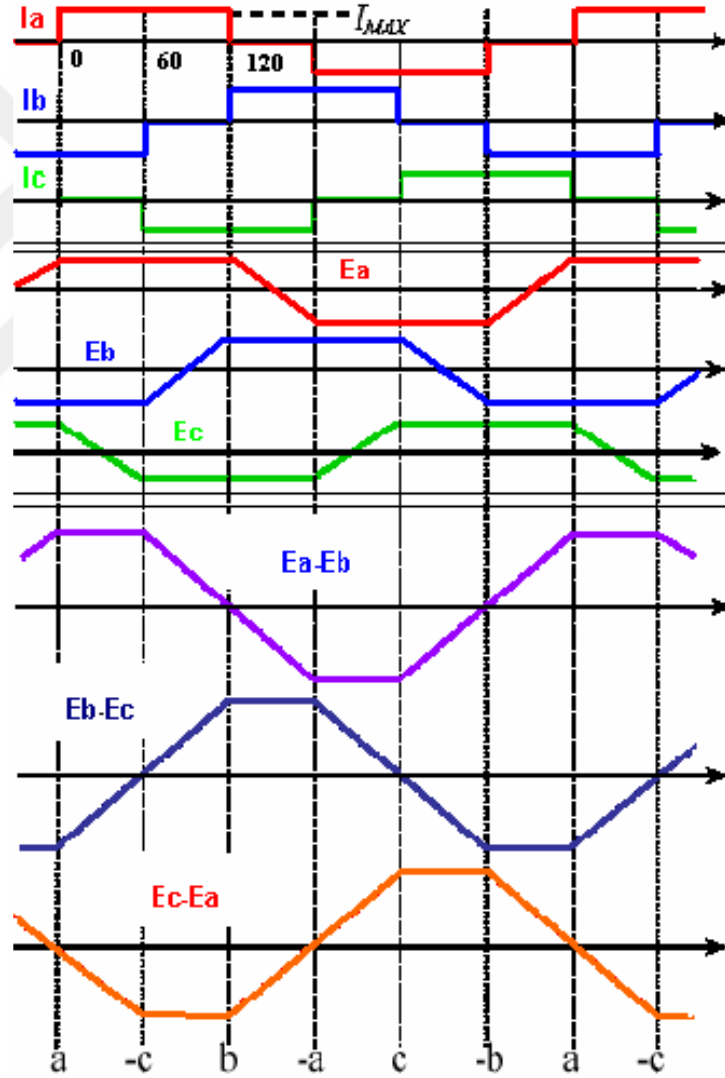
Şekil 2.11 Ayrık uyarılmalı yerine önerilen tek uyarımlı sargı şekli

Bu şekilde fırçasız doğru akım motorları en verimli şekilde çalıştırılmış olur. Sargıların bu şekilde enerjilendirilmesi için 3 fazlı köprü doğrultucu kullanılır. Aşağıda Şekil 2.12'te M. Yılmaz'dan alınan 3 faz köprü doğrultucu blok şeması ve

Şekil 2.13’de fırçasız doğru akım motorunun faz akımları, endüklenen faz-nötr ve faz-faz gerilimleri görülmektedir

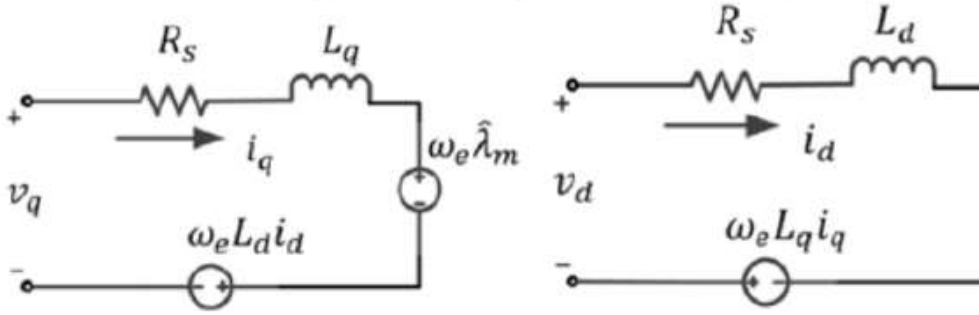


Şekil 2.12 3 faz köprü doğrultucu blok şeması



Şekil 2.13 faz akımları, endüklenen faz-nötr ve faz-faz gerilimleri

2.5 Fırçasız Doğru Akım Motor Modeli



Şekil 2.14 Fırçasız doğru akım d-q eksen eşdeğer devreleri

Şekil 2.14’de Fırçasız doğru akım motorun d-q eksen eşdeğer devreleri verilmiştir. Buna göre fırçasız doğru akım makineleri için motor denklemleri aşağıda verilmiştir. İzotropik daimî mıknatıslı senkron motorun stator referans sistemindeki denklemleri:

$$v_{\alpha} = R_s i_{\alpha} + \frac{d\lambda_{\alpha}}{dt} \quad (2.1)$$

$$\lambda_{\alpha} = L_s i_{\alpha} + \lambda_{\alpha m} \quad (2.2)$$

$$v_{\beta} = R_s i_{\beta} + \frac{d\lambda_{\beta}}{dt} \quad (2.3)$$

$$\lambda_{\beta} = L_s i_{\beta} + \lambda_{\beta m} \quad (2.4)$$

İzotropik daimî mıknatıslı senkron motorun rotor referans sistemindeki denklemleri aşağıdaki gibidir:

$$v_d = R_s i_d + \frac{d\lambda_d}{dt} - w\lambda_q \quad (2.5)$$

$$\lambda_d = L_s i_d + \Lambda_m \quad (2.6)$$

$$T = \frac{3}{2} n (\Lambda_m - (L_q - L_d) i_d) i_q \quad (2.7)$$

$$v_q = R_s i_q + \frac{d\lambda_q}{dt} - w\lambda_d \quad (2.8)$$

$$\lambda_q = L_s i_q \quad (2.9)$$

Ve bu denklemlerden aşağıdaki sonuç denklemleri elde edilebilir:

$$v_d = R_s i_d + L_s \frac{di_d}{dt} + \frac{d\Lambda_m}{dt} - \omega L_s i_q \quad (2.10)$$

$$v_q = R_s i_q + L_s \frac{di_q}{dt} + \omega L_s i_d + \omega \Lambda_m \quad (2.11)$$

Eşitliklerde V_d ve V_q : d ve q eksenli stator voltajları (birimi: V); i_q ve i_d : d ve q eksenli stator akımları (birimi: A), L_d ve L_q : d ve q eksen endüktansları, R_s : Stator sargı direnci (birimi: Ω), ω : rotor elektriksel açısal hızı (rad/sn), Λ_m : kalıcı mıknatıslar dolayısıyla oluşan akı bağlantısı (Web.sarım) olarak verilir.

Elektromanyetik tork ifadesi aşağıdaki gibi verilir:

$$T_E = \frac{3}{2} P [\lambda_m i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (2.11)$$

Burada T_e : Elektromanyetik tork (Birimi: Nm) ve P: Kutup sayısını ifade etmektedir.

Elektromekanik denklemler aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$T_e = T_m + B\omega_{rm} + j \frac{d\omega_{rm}}{dt} \quad (2.12)$$

Burada T_m : Mekanik tork (birimi: Nm), B: Sürtünme katsayısı (birimi: Nm/rad/sn), j: Eylemsizlik momenti (birimi: kgm^2), ω_{rm} : Mekanik rotor açısal hızı (birim: $\omega_{re} = P\omega_{rm}$) ifade eder.

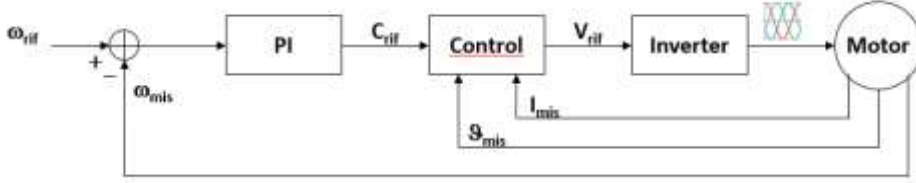
2.6 Motor Kontrolünün Temel Problemi

Bir elektrik motoru verildiğinde (bizim durumumuzda fırçasız bir doğru akım motoru), motora belirli bir açısal hız (veya belirli bir açısal konum) empoze edilmek istenir.

Aşağıdaki hususlar önemlidir:

- Regülasyon doğruluğu,
- Kararlı hal verimliliği,
- Referansa ulaşmak için (konum veya hız) veya yük farklılığından (dinamik performanslar) kaynaklanan bir hatadan kurtulmak için gereken süre.

Motoru sürmek için veri olarak verilen (çalışma modeli parametreleri) veya çalışma zamanında ölçülen bazı hız ve/veya parametreler bilgisine ihtiyacımız vardır (hız, akım...). Herhangi bir motor kontrolü için gerekli genel kontrol şeması Şekil 2.15 ile verilmiştir.



Şekil 2.15 Genel motor kontrol blok şeması

Hız döngüsü bir tork referansı üretir. Konum döngüsü (varsa) genellikle bir hız referansı oluşturur. Genel olarak, rotor açılal konumu, rotor hızı ve faz akımları bilgisine ihtiyaç duyarız.

2.7 Alan Yönlendirmeli Kontrol Teorisi

Alan yönlendirmeli kontrol, 3 fazlı stator akımlarının çeşitli dönüşümlerle rotor referansındaki tek bir fazöre indirgenmesinden sonra çeşitli PI kontrolörler yardımıyla rotorun istenilen yeni açığa yönlendirilmesi mantığına dayana, bir değişken hızlı motor kontrol yöntemidir. Alan yönlendirmeli kontrolde:

- Akım daima kontrol altındadır
- Sabit frekans davranışı mevcuttur
- Tork dalgalanması düşüktür
- Akustik gürültü düşüktür

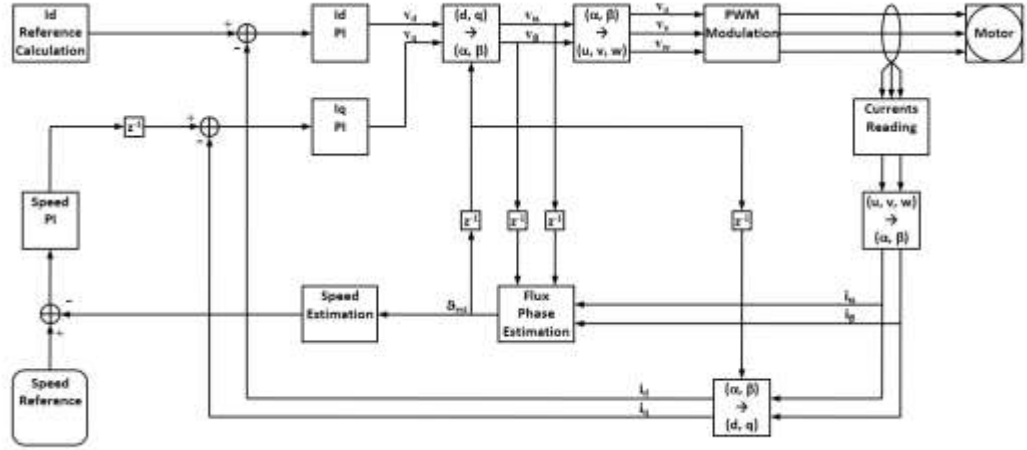
Buna karşın, daha fazla karmaşıklık, daha büyük işlem süresi alan yönlendirmeli kontrolün dezavantajlarıdır.

Alan yönlendirmeli kontrolün temel prensipleri olarak aşağıdaki ikisi gösterilebilir:

- Sistemi kontrol etmemize izin veren değişkenlerin sinüzoidal yerine DC büyüklükler (yavaşça değişen) olduğu bir referans sistemi vardır.
- Bu sayede klasik PI kontrolörlerinin kullanımına izin verir.

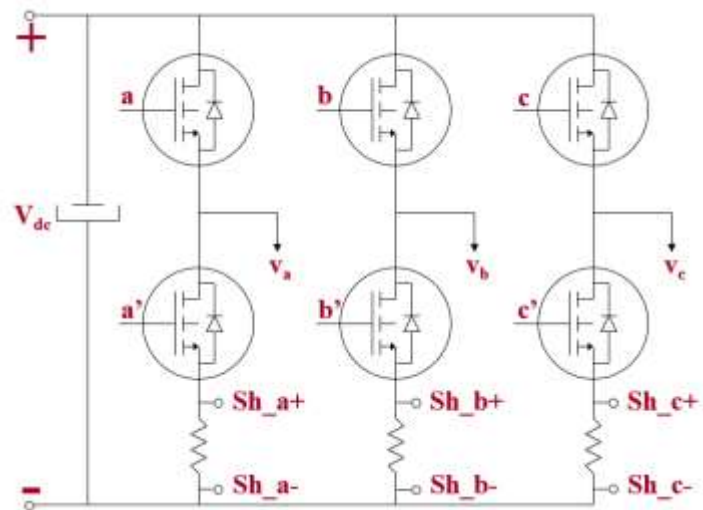
PI değişkenleri ile hangi değişkenlerin kontrol edildiği önemli değildir, ancak sadece bu değişkenleri DC nicelikleri olarak görmemize izin veren dönen bir referans sisteminde çalıştığımız gerçeği göz önünde tutulmalıdır. Klasik FOC şeması, sabit mıknatıs akısına (rotor) bağlı olan bir referans sisteminden görülen stator akımlarının kontrolünü sağlar.

Şekil 2.16 ile alan yönlendirmeli kontrol şeması verilmiştir.



Şekil 2.16 Alan yönlendirmeli kontrol şeması

Alan yönlendirmeli kontrol döngüsü faz akımlarının ölçülmesiyle başlar. Faz akımları 3 faz köprü doğrultucudaki alt IGBT'lere seri bağlanan şönt dirençleri aracılığıyla okunur. Akımları okumak için gerekli donanım şeması



Şekil 2.17 Akım okunması için gerekli donanım şeması

Hangi akımın ne zaman okunacağını tespiti önemlidir. Alt IGBT açık ise o zaman:

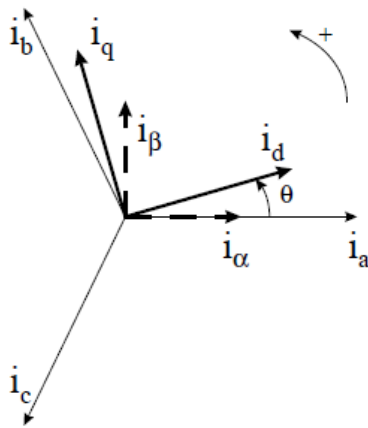
- Gate komutu sıfırdır.
- Kapalı olduğundan üst IGBT'den hiçbir akım geçemez
- Çıkış voltajı düşüktür
- Yüksek diyottan hiçbir akım geçemez, çünkü ters polarizedir, bu nedenle kapalıdır

Eğer daha düşük bir anahtar ON ise, faz akımı şönt içinden akar. Bir faz akımını okumak için, ilgili düşük anahtar ON olduğunda, şönt akımını okumalıyız.

Üç şönt sistemiyle iki akımı okumak her zaman mümkündür.

Sıradaki işlem okunan 3 adet olan faz akım vektörlerini, tek fazlı, döner rotor referansındaki DC akım vektörüne dönüştürecek dönüşümleri yapmaktır.

Clarke dönüşümü, iki fazlı dikey stator eksenindeki i_α ve i_β akımlarını hesaplamak için üç fazlı akımları i_a , i_b ve i_c kullanır. Sabit koordinat stator fazındaki bu iki akım, Park dönüşümü ile d, q çerçevesindeki i_{sd} ve i_{sq} akım bileşenlerine dönüştürülür. Bu akımlar (i_{sd} , i_{sq}) ve motor akı modeli tarafından hesaplanan anlık akı açısı r , bir fırçasız doğru akım motorunun elektrik torkunu hesaplamak için kullanılır.



Şekil 2.18 d, q dönen referans çerçevesindeki stator akımı ve a, b ve c durağan referans çerçevesi ile olan ilişkisi. (Clarke & Park Transforms on the TMS320C2xx'den, 1997)

Böyle bir dönüşümden sonra, stator değişkenleri (akımlar ve açı) bir akı modeline çevrilir. Bu akı modeli referans değerleri ile karşılaştırılır ve bir PI

kontrolörü tarafından güncellenir. Alandan stator koordinatlarına geri dönüşümden sonra, çıkış gerilimi darbe genişliği modülasyonu (Pulse Width Modulation - PWM) ile makineye uygulanacaktır.

Clarke dönüşümü adı verilen matematiksel dönüşüm, bir üç fazlı sistemi iki fazlı bir ortogonal sisteme değiştirir:

$$i_{\alpha} = \frac{2}{3}i_a + \frac{1}{3}(i_b + i_c) \quad (2.13)$$

$$i_{\beta} = \frac{2}{\sqrt{3}}(i_b - i_c) \quad (2.14)$$

$$i_0 = \frac{2}{3}(i_a + i_b + i_c) \quad (2.15)$$

Burada i_{α} ve i_{β} , ortogonal bir referans çerçevesinde bileşenlerdir. i_0 ise sistemin homopolar bileşenidir.

Birçok uygulamada, homopolar bileşen yoktur veya daha az önemlidir. Bu şekilde, homopolar bileşen yokluğunda, uzay vektörü $u = u_{\alpha} + ju_{\beta}$ orijinal üç faz giriş sinyalini temsil eder. i_{α} 'nın i_a ile süperpose olduğu ve $i_a + i_b + i_c = 0$ olduğu özel bir durum olduğu düşünülürse, bu durumda i_a , i_b ve i_c aşağıdaki matematiksel dönüşümle i_{α} ve i_{β} 'ye dönüştürülebilir:

$$i_{\alpha} = i_a \quad (2.16)$$

$$i_{\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}}i_a + \frac{2}{\sqrt{3}}i_b \quad (2.17)$$

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (2.18)$$

Clarke dönüşümü ile hesaplanan iki faz α , β stator akımları daha sonra rotor akısına bağlı olan d, q çerçevesini takip etmek için bir Θ açısı üzerinde döndürüldüğü bir vektör döndürme bloğuna beslenir. Θ açısı üzerinde dönüş, aşağıdaki formüllere göre yapılır:

$$i_{sd} = i_{\alpha} \cos(\theta) + i_{\beta} \sin(\theta) \quad (2.19)$$

$$i_{sq} = -i_{\alpha} \sin(\theta) + i_{\beta} \cos(\theta) \quad (2.20)$$

d, q vektörleri, iki faza α , β stator çerçevesine, aşağıdaki ters Park formülleriyle dönüştürülür:

$$i_{\alpha} = i_{sd} \cos(\theta) - i_{sq} \sin(\theta) \quad (2.21)$$

$$i_{\beta} = i_{sd} \sin(\theta) + i_{sq} \cos(\theta) \quad (2.22)$$

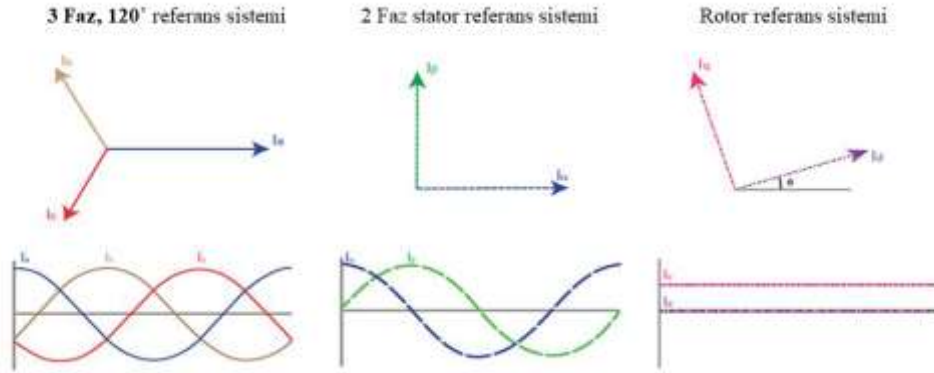
Son olarak da sistem ortogonal iki faz sistemden 3 faz sisteme aşağıdaki ters Clarke denklemleriyle dönüşür.

$$i_a = i_{\alpha} \quad (2.23)$$

$$i_b = -\frac{1}{2}i_{\alpha} + \frac{\sqrt{3}}{2}i_{\beta} \quad (2.24)$$

$$i_c = -\frac{1}{2}i_{\alpha} - \frac{\sqrt{3}}{2}i_{\beta} \quad (2.25)$$

Burada dikkat çeken nokta Park dönüşümlerindeki Θ açısıdır. Bu açı akım vektörünü rotor referansına oturtur ve akım vektörünü DC akım şekline sokar. Şekil 2.19 ile 360° bir elektriksel turda, torku ve hızı sabit olan bir motorun faz akımlarının değişik referans sistemlerindeki görünümünü vermektedir.



Şekil 2.19 3 faz akımların referans sistemlerindeki dalga ve fazör gösterimleri

Üç faz motor akımları rotor referans sistemine döndürüldükten sonra sırasıyla hız ve akım PI kontrolörüne geri besleme sinyali olarak verilecektir.

Üç faz stator akımlarının fazör bir rotor kısmına dönüştürülmesi sistemin tek bir parametreye kontrolünü mümkün kılar. Rotor akım fazörünün hesaplanmasından sonra sırada kontrolü vardır.

Fırçasız doğru akım motorlarında tork ifadesi (2.26) ile d ve q referansı akı ifadesi (2.27) ve (2.28) ile verilmiştir:

$$T = \frac{3}{2} n (\Lambda_m - (L_q - L_d) i_d) i_q \quad (2.26)$$

$$\lambda_d = L_S i_d + \Lambda_m \quad (2.27)$$

$$\lambda_q = L_S i_q \quad (2.28)$$

Eşitlik (2.26)'dan görüleceği üzere sistemin torku i_q akımı ile doğru orantılıdır. İzotropik, yani endüktanslarının q ve d bileşenleri eşit olan motorlardır tork denkleminde i_d direk olarak bulunmamakla birlikte i_d bileşeni Eşitlik (2.27) mıknatıs akısı üzerine etki etmektedir. (2.28)'da görüldüğü üzere akımın d bileşeninin mıknatıs akısı üzerine bir etkisi bulunmamaktadır. Pozitif i_d akıyı arttırırken toplam akım miktarındaki artışa etkisi daha fazla olacağı için verimsizlik getirecektir. Negatif i_d ise akıyı düşüreceğinden sistem torkunu düşürecektir. Anizotropik motorlarda ise bir miktar negatif i_d , sistemin torkuna küçük bir miktar olumlu etki yapar ki buna cogging tork denir.

Özetle, sistemin torkunu i_q direk etkileyeceği için amaç i_q 'yu olabilecek en yüksek seviyede tutarken i_d 'yi sıfırlamaktır. Bu yüzden id akım referansı izotropik motorlarda daima 0 olurken i_q komponenti sistemin talep edeceği tork ile sınırlandırılmalıdır.

Alan yönlendirmeli kontrol şemasında üç adet kontrol PI bloğu bulunmaktadır. İlk kontrolörde referans hız ölçülen hız hatasıyla düzenlenerek i_q cinsinden referans tork bilgisi elde edilir. Ardından bu referans tork bilgisi sistemden ölçülen i_q ile kontrolöre sokulur ve bunun sonucunda motora uygulanması gereken v_q bilgisi ortaya çıkar. Son kontrolör ise akımın d bileşenini sıfırlamak için kullanılır. Son olarak hesaplanan iki fazlı rotor referans sistemindeki voltajlar, önce 3 faz referans sistemine dönüştürülür ve ardından uygun modülasyon teknikleri ile motora uygulanarak alan yönlendirmeli kontrol döngüsü tamamlanır.

2.8 Rotor Pozisyonu Tahmini

Sabit mıknatıslı senkron makinelerin kontrolünde rotor pozisyonunun bilinmesi olmazsa olmazdır. Pozisyonun belirlenmesi amacıyla kullanılacak olan sensörler hem fazlardan maliyet getirecek hem de motor bakımını zorlaştıracaktır. Ayrıca bu sensörler motorun kurulumunu da zorlaştıracaktır. Ek olarak sensör

kullanımı sistemin eylemsizliğini arttıracak, sağlamlık ve güvenilirliğini azaltacak, elektromanyetik etkinin sebep olacağı elektriksel gürültü sebebiyle gürültü hassasiyetini arttıracaktır.

Rotor pozisyon / hız tahmin yöntemleri üç ana kategoriye ayrılabilir:

1. Rotor konum bilgisinin dolaylı olarak algılanan konum ile ilgili miktarlardan, örneğin geri EMF bileşenleri veya üçüncü harmonik geri EMF'den elde edildiği dolaylı konum algılama yöntemleri.
 - Bu yöntem kategorisinin temel fikri, rotor konum bilgisini dolaylı olarak rotor konumunun bir fonksiyonu olan geri EMF'nin anlık büyüklüğünden elde etmektir.
 - Bu yöntemlerin en büyük dezavantajı düşük hızlarda geri elektromanyetik gücün genliğinin düşük olması dolayısıyla tespitinin zor olmasıdır.
2. Rotor pozisyon bilgisini tahmin etmek için PMSM'nin temel frekans modelinin, ölçülen stator akımlarının ve ölçülen veya komut verilen stator voltajlarının kullanıldığı model tabanlı yöntemler.
 - Sabit mıknatıslı senkron motor modeline dayana bu metotlar sıklıkla kullanılan metotlardır. Bu model genelde orta ve yüksek hızlı uygulamalar için kullanılır. Açık devre hesaplamalar ve kapalı devre gözetleyiciler olarak iki gruba ayrılabilirler. Açık devre pozisyon tahmin edicilere aşağıdaki örnekler verilebilir.
 - o Geri EMF Tabanlı metotlar: Makine modeline göre, ölçülmüş PMSM stator faz akımları ve ölçülmüş veya komut verilen stator voltajları dikkate alındığında EMF bileşenleri hesaplanabilir. Ardından rotor konumu $\theta = \tan^{-1} (e_{\alpha} / e_{\beta})$ olarak hesaplanabilir. Bu yöntem karmaşık gözlemciler kullanmaz; basit, hızlı ve kolaydır. Bununla birlikte, bu yöntemin performansı algılanan akım / gerilim ve makine parametrelerinin doğruluğuna tabidir.
 - o Akı Bağlantısı tabanlı metotlar: Kalıcı halde rotor ve stator akımlarının zaman göre türevleri sıfıra yakınsar. Buna göre stator akısı tespit edilirse rotor akı açısı da tespit edilmiş olur. Stator referans sistemindeki gerilim ve akım bileşenleri, stator ve rotor akı

bağlantısını hesaplamak için kullanılabilir. Akı bazlı yöntemlerin doğruluğu, voltaj ve akım ölçümlerinin kalitesine ve doğruluğuna bağlıdır. Bu yöntemde entegratörlere ihtiyaç duyulduğundan, entegrasyonun başlangıç durumu ve akım sensörü DC ofseti, uygun şekilde ele alınması gereken problemlerdir. Ek olarak, bu yöntem kararlı durumda iyi çalışabilir, ancak geçici performans genellikle tatmin edici değildir.

- Endüktans tabanlı Yöntemler: Bu tür yöntemlerde kullanılan temel fikir, bir PMSM'nin faz endüktansının, özellikle L_d ve L_q arasında anlamlı bir fark olan makinelerde, rotor konumunun bir fonksiyonu olduğudur. Faz endüktansı, ölçülen voltaj ve akım bilgisinden hesaplanabilir. Ardından rotor pozisyonu hesaplanan faz endüktansına göre bulunabilir.
- Kapalı devre bir gözlemcide, sistemdeki hem kontrol girişleri hem de çıkış takip hatası, yani sistem çıkışları ile gözlemci arasındaki hata genellikle gözlemcinin girişi olarak kullanılır. Gözlemci kazançları, gözlemci çıktısını sistem çıktısıyla birleşmeye zorlamak için tasarlanmıştır. Böylece, sistem durumlarının tahmini değerleri gerçek değerlerine yakınlaşmaya zorlanır. Bu tip algoritmalarda kayma modu gözlemcileri (Sliding Mode Observer - SMO), genişletilmiş Kalman filtreleri (Extended Kalman Filter - EKF), Luenberger gözetleyici vb gibi birçok gözlemci önerilmiştir.
- 3. Rotor konum bilgilerinin pozisyona bağlı makine çıkıklığından ve yüksek frekans uyarımından çıkarıldığı motor çıkıklığı temelli yöntemler düşük hızlı uygulamalar için genellikle gereklidir.
- 3. Maddeden önceki konum tahmin teknikleri orta-yüksek hız aralığında yüksek isabetle çalışan teknikler olmasına rağmen düşü hızlarda oldukça verimsiz hale gelmektedir. Bu sınırlamanın üstesinden gelmek ve düşük hızda çalışma kabiliyetini arttırmak için, makine çıkıklık takibini kullanan rotor pozisyonu / hız tahmin yöntemleri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Bu yöntemlerde genellikle, frekans temel frekanstan çok daha yüksek olan bir yüksek frekans uyarılması kullanılır. PMSM'nin yüksek frekans (High

Frequency – HF) uyarımı altında ölçülen tepkisi kullanılarak, pozisyonla ilgili belirginlik sinyali elde edilebilir.

- Bu tip yöntemler için kalıcı mıknatıslı senkron makinenin yüksek frekans modelinin tespiti çok önemlidir. Makinenin yüksek frekans modeli belirlendikten sonra çok yüksek frekanslı v_{dh} ve v_{qh} sinyalleri sargılara enjekte edilir ve ortaya çıkan i_{qh} ve i_{dh} akımları incelenerek pozisyon bilgisi algılanır. (B. Kailas and P. Chinmay, 2015).

Bu projede model tabanlı bir tahmin edici kullanılmıştır. Pozisyon, akı bağlantısı tabanlı bir yöntemle tespit edilmiştir. Yöntemi aşağıdaki gibi özetleyebiliriz:

İki faz referans sistemindeki motor eşitliklerini tekrar yazmak gerekirse;

$$v_{\alpha} = R_s i_{\alpha} + \frac{d\lambda_{\alpha}}{dt} \quad (2.29)$$

$$v_{\beta} = R_s i_{\beta} + \frac{d\lambda_{\beta}}{dt} \quad (2.30)$$

$$\lambda_{\alpha} = \lambda_{\alpha 0} + \int_0^t (v_{\alpha} - R_s i_{\alpha}) dt = L_s i_{\alpha} + \lambda_{cm} \quad (2.31)$$

$$\lambda_{\beta} = \lambda_{\beta 0} + \int_0^t (v_{\beta} - R_s i_{\beta}) dt = L_s i_{\beta} + \lambda_{\beta m} \quad (2.32)$$

Yukarıdaki denklemlerden rotor kalıcı mıknatısları tarafından üretilen manyetik akı bileşenlerini aşağıdaki gibi elde edebiliriz.

$$\lambda_{cm} = \left(\lambda_{\alpha 0} + \int_0^t (v_{\alpha} - R_s i_{\alpha}) dt \right) - L_s i_{\alpha} \quad (2.33)$$

$$\lambda_{\beta m} = \left(\lambda_{\beta 0} + \int_0^t (v_{\beta} - R_s i_{\beta}) dt \right) - L_s i_{\beta} \quad (2.19)$$

Bu eşitliklerden rotor pozisyonun ve dolayısıyla hızını aşağıdaki gibi elde edebiliriz:

$$\vartheta = \arctg(\lambda_{\beta m} / \lambda_{\alpha m}) = \arctg \left[\frac{\left(\lambda_{\alpha 0} + \int_0^t (v_{\alpha} - R_S i_{\alpha}) dt \right) - L_S i_{\alpha}}{\left(\lambda_{\beta 0} + \int_0^t (v_{\beta} - R_S i_{\beta}) dt \right) - L_S i_{\beta}} \right] \quad (2.34)$$

$$\omega = d\vartheta/dt \quad (2.35)$$

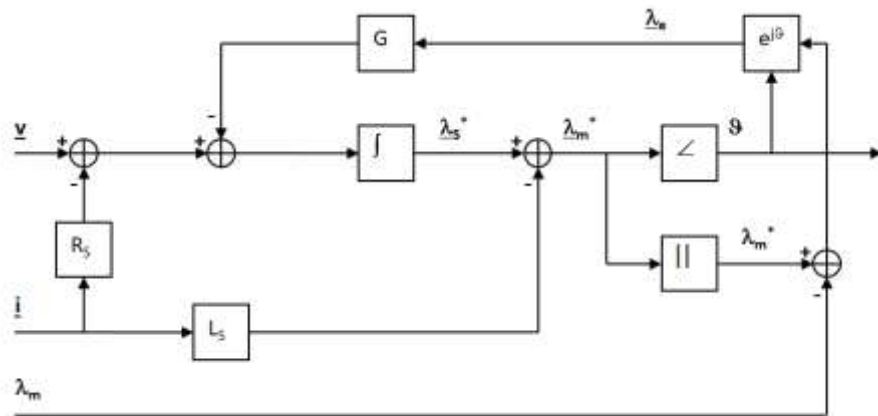
Eşitlik (2.34)'de verilen integral işlemini mikroişlemcide gerçekleştirmek kolay değildir. Bunun sebepleri şöyle sıralanabilir:

- Başlangıç değerleri tam olarak belli değildir.
- Elektriksel gürültü her zaman vardır geri EMF ile birlikte.
- Ölçüm hataları integralin fazla büyümesine sebep olur.
- Eviricinin doğrusal olmamasından kaynaklı hatalar mevcuttur.

Bu zayıflıkları gidermek için iki yöntem mümkündür:

- İntegral bir geri besleme sinyali ile düzeltilir
- Birtakım filtreleme işlemleri ile integrale yakınsatma yapılarak üstteki sınırlamalara uğramadan benzer sonuçlar elde edilmeye çalışılır.

İntegral işlemi, tahmin edilen faza göre hesaplanan akı genliği ile bir motor parametresi olan ve bilinen daimî mıknatıs akısının genliği arasındaki hata ile düzeltilir. Bu işlemler için stator direnci ve senkron endüktansın da bilindiği kabul edilir.



Şekil 2.20 Rotor pozisyonu tahmin algoritması

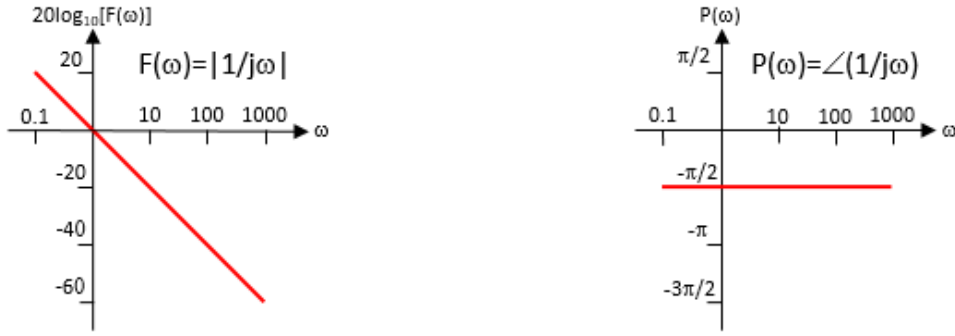
İntegrali yakınsatmak ($1/s$) için birinci dereceden alçak geçiren bir filtre ($1/(s+\omega_0)$) kullanılabilir, ancak bu hatanın sürekli bileşenlerini düzeltmez (yanlış başlangıç koşulları gibi). Sürekli hal hatasını sıfırlamak için ise bir yüksek geçiren filtre gerektirir. Bizim durumumuzda bu işlemi biz bir alçak geçiren filtre ve bir türev ile gerçekleştirebiliriz. ($s/(s+\omega_0)$). Bu yöntemle dijital uygulama oldukça basit hale gelir:

$$y(n) = \frac{k-1}{k} y(n-1) + \frac{1}{k} x(n) \quad (2.36)$$

$$d(n) = \frac{y(n) - y(n-h)}{hT_c} \quad (2.37)$$

$$z(n) = \frac{k-1}{k} z(n-1) + \frac{1}{k} d(n) \quad (2.38)$$

Bu yaklaşımın ($Y(s)=s/(s+\omega_0)^2$) Laplace gösterimi Şekil 2.21’de verilmiştir. Burada olduğu zaman benzerlik belirginleşir.



Şekil 2.21 $Y(s)=s/(s+\omega_0)^2$ fonksiyonun Laplace gösterimi

$\omega_0=7.8125\text{rad}$ ($f_0 \approx 1.24\text{Hz}$), $f_{\text{giriş}}=50\text{Hz}$ iken

- Kalıcı hal genlik hatası: %0,11
- Kalıcı hal faz hatası: -3.4°
- Dengelenme zamanı: 0,8 saniye



Şekil 2.22 $\omega_0=7.8125\text{rad}$ ($f_0 \approx 1.24\text{Hz}$), $f_{\text{giriş}}=50\text{Hz}$ iken kalıcı hal hatası

$\omega_0=7.8125\text{rad}$ ($f_0 \approx 1.24\text{Hz}$), $f_{\text{giriş}}=10\text{Hz}$ iken

- Kalıcı hal genlik hatası: %1,57
- Kalıcı hal faz hatası: $-14,28^\circ$
- Dengelenme zamanı: 0,8 saniye. (A. Ghirardello, 2011)



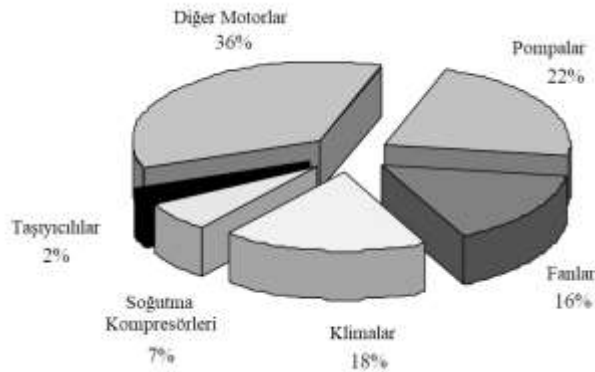
Şekil 2.23 $\omega_0=7.8125\text{rad}$ ($f_0 \approx 1.24\text{Hz}$), $f_{\text{giriş}}=10\text{Hz}$ iken kalıcı hal hatası (Motor Control with RX62T, 2011)

3 POMPA TEORİSİ

Pompalar, bir sıvıya enerji vermek için kullanılır, bu da tahliye basıncını veya pompanın basma yüksekliğini yükseltir. Bu basınç daha sonra sıvıyı bir noktadan diğerine taşımak için kullanılır.

Pompaların amacı sıvıyı kaynaktan bir hedef noktaya taşımaktır. Örneğin yüksekteki bir rezervuarı sıvı ile doldurmak için sıvı pompasına ihtiyaç vardır. Ayrıca pompalar sıvıları basınçlandırmak için de kullanılır. Örneğin dizel araçlarda ray denilen ve enjektörlere beslenen yakıtın basınçlandırıldığı parçadaki 3000 bara yaklaşan basınç yakıt pompası tarafından sağlanır. Kalorifer pompaları sıcak suyu bir noktadan başka noktaya taşıırken ısısını kaybeden suyu ısıtıcıya geri döndürür.

Avrupa birliğindeki enerji tüketiminin yaklaşık %22 si elektrik pompaları tarafından yapılmaktadır. Şekil 3.1’de endüstride kullanılan pompaların türlerine göre dağılımı gösterilmektedir. Buna ek olarak, pompalama sistemlerinin çoğu zaman gerçekte olduğundan daha düşük bir toplam verimle çalıştığı, dolayısıyla enerji tüketiminde önemli bir tasarruf potansiyeline sahip olduğu gösterilmiştir. (Almeida vd., 2003)



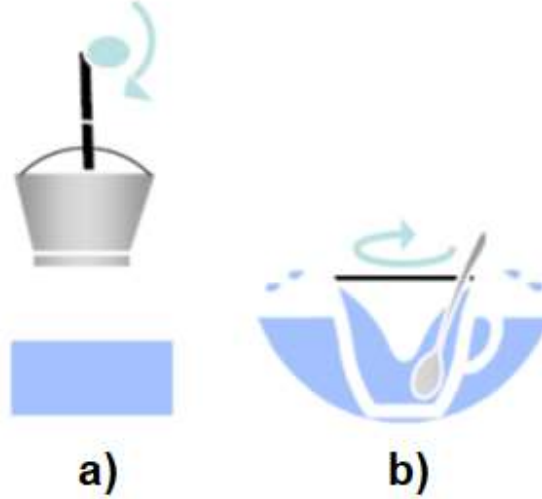
Şekil 3.1 Endüstriyel uygulamalardaki pompa türleri kullanım dağılımı (Electric Motor Standards, Ecodesign And Global Market Transformation, 2003)

Pompaların en verimli çalışma noktasına mümkün olduğunca yakın seçilmesinin önemi çok fazladır. Bu sadece enerji maliyetlerinde tasarruf sağlamakla kalmaz, başka birçok faydası vardır:

- Pompa olabildiğince az bozucu iç kuvvetlerle çalışmalı, böylece rulmanlar, aşınma halkaları, burçlar, kaplinler ve contalar gibi bileşenlerin erken arızalanması nedeniyle oluşabilecek bakım maliyetlerinde tasarruf sağlanmalıdır.
- Pompa bileşenlerinde kavitasyon nedeniyle oluşabilecek hasar riski azaltılmalıdır.
- Titreşim en aza indirilmelidir ve diğer ekipmanların titreşimden en az zararı görmesi sağlanmalıdır.
- Pompa yapısı iyileştirilerek gürültü azaltılmalıdır.
- Pompalama sistemindeki sorun riskini bir bütün olarak azaltacak olan basınç titreşimleri de en aza indirilmelidir.

Pompaları temel olarak iki kategoriye ayırabiliriz:

- Pozitif deplasmanlı pompalar
- Santrifüj (rotodinamik) pompalar



Şekil 3.2 Pompaların çalışma prensibi (AEA Energy & Environments, 2008) a) Pozitif deplasmanlı pompalar, b) Rotodinamik pompalar.

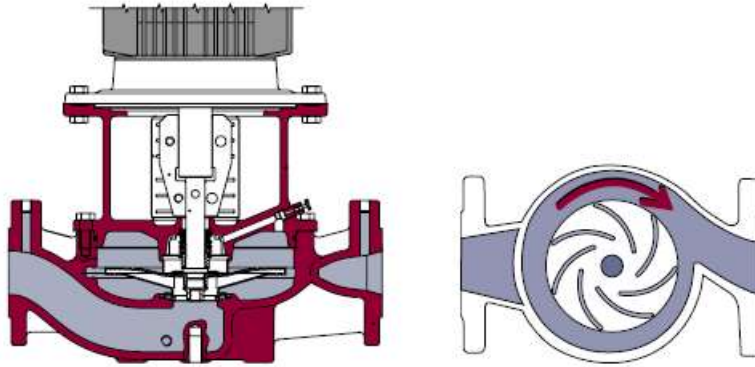
Şekil 3.2’de rotodinamik ve pozitif deplasmanlı pompa arasındaki temel farklar gösterilmektedir. En basit (ve en eski) olarak, pozitif deplasmanlı pompa, bir kuyudan veya nehirden su kaldıran bir kova ile tanımlanabilir. Bu örnek bu tip pompaların tümünün çalışma şeklini gösterir; Sıvı, çıkışa kapalı bir alan olan

pompa girişinde toplanır ve pompa tarafından yükseltilerek arttırılan basma yüksekliğinden boşaltılır. Rotodinamik pompanın temel prensibi ise bir fincan çay karıştırdığınızda bardağın içindeki uyun yükselerek çay tabağına dökülmesiyle benzerdir. Rotodinamik pompalarda sürekli akan bir sıvı dönen bir pervaneden geçer ve pervanenin enerjisi sıvıya aktarılır. Enerjilendirilen sıvı kıvrımlar ya da yönlendirme vanaları tarafından yönlendirilerek çıkışa ulaştırılır.

Pozitif deplasmanlı pompaların pompaladığı sıvının hacmi, devir sayılarıyla doğru orantılıdır. Kullanım oranları düşük olsa da kullanım çeşitliliği oldukça fazladır. Petrokimya, boya, kâğıt endüstrisi gibi alanlardır. (H.Ç. Çalışkan ve İ. Ekmekçi, 2003).

Bu çalışmanın kapsamı daha çok santrifüj pompalarını kapsamaktadır. Santrifüj pompa 1689'da fizikçi Denis Papin tarafından icat edildi ve bu tür pompalar bugün dünyada en çok kullanılan pompa tipidir. Santrifüj pompa basit bir prensip üzerine inşa edilmiştir: Sıvı, pervane göbeğine yönlendirilir ve merkezkaç kuvveti vasıtasıyla pervanelerin çevresine doğru akar.

Yapı oldukça ucuz, sağlam ve basittir ve yüksek hızı, pompanın doğrudan elektrik motoruna bağlanmasını mümkün kılar. Santrifüjlü pompa sabit bir sıvı akışı sağlar ve sıvı pompaya herhangi bir zarar vermeden kolayca atılabilir. Şekil 3.3'de sıvının pompa içerisindeki akışını gösterilmektedir. Bu yapı yüksek verim sağlar ve saf sıvıların taşınması için uygundur.



Şekil 3.3 Santrifüj pompalarındaki sıvı akışı (Grundfos Pump Handbook, 2004)

Birçok üretici artık pompaları değişken hızlı ve akıllı motor sistemleriyle birlikte sağlamaktadırlar. Bu, değişken hız kontrolünün kurulumunu hem daha kolay hem de çoğu zaman daha düşük maliyetli hale getirir. Kontrol algoritması

için hangi parametre daha önemli ise (örn. Sıcaklık, akış veya basınç) o parametre için geri bildirim eklenerek enerji tasarrufu sağlanabilir. Bu, değişken hız kontrolü popalar bölümünde daha ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

Tespit edilen sorunların olası nedenlerini de kendi kendine belirleyen pompalar da mevcuttur. Bu pompalar hem alarmları sesli olarak verebildiği hem de bakım ekibine teknik sorunların neler olabileceği konusunda fikir verebildiği için kullanışlıdır. Sorunların erken haber verilmesi, pompanın arızasından önce ayarlamalar veya onarımlar yaparak maliyet ve enerji tasarrufu sağlayabilir.

Akıllı kontrollerin pompalara takılması, neredeyse tüm uygulamalarda gelişmiş ekonomik performans sağlayacaktır ve bu nedenle memnuniyetle karşılanacaktır.

3.1 Pompalara Ait Temel Kavramlar

Pompa performansı incelenmek istendiğinde, bilinmesi gereken bazı kavramlar vardır.

3.1.1 Akış (Flow, Q):

Akış, belirli bir süre içinde bir pompadan geçen sıvı miktarıdır. Performans kavramları ile uğraşırken iki akış parametresini birbirinden ayırıyoruz: Hacim akışı ve kütle akışı. Hacim, bir pompanın sıvının yoğunluğundan bağımsız olarak birim zamanda (m^3 / saat olarak ölçülen) hareket ettirebildiği hacim miktarıdır. Örneğin; su temininde, hacim akışı en önemli parametredir, çünkü sulama veya içme suyunun temininde, pompanın belirli bir hacmi vermesi istenir. Kütle akışı, bir pompanın birim zaman başına hareket ettiği ve kg / saat cinsinden ölçülen kütledir. Sıvı sıcaklığı, sıvı yoğunluğu sıcaklıkla değiştiğinden, pompanın birim zamanda ne kadar büyük bir kütle hareket ettirebileceği üzerinde bir etkisi vardır. Isıtma, soğutma ve klima sistemleriyle bağlantılı olarak, kütle akışının bilinmesi gereken bir değerdir, çünkü kütle bir enerji taşıyıcısıdır (bkz. Isı kapasitesi).

3.1.2 Basınç (Pressure, p)

Basınç, birim alandaki kuvvet ölçüsüdür. Basıncı, statik basınç, dinamik basınç ve toplam basınç olarak sınıflandırabiliriz. Toplam basınç, statik basıncın ve dinamik basıncın toplamıdır. Statik basınç, akışa dik veya hareketli olmayan bir sıvıya yerleştirilmiş bir basınçölçer ile ölçülen basınçtır. Dinamik basınca ise sıvı

hızı neden olur. Dinamik basınç normal bir manometre ile ölçülemez, ancak aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$P_{dyn} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \quad (3.1)$$

Burada, ρ , [kg / m^3] cinsinden sıvının yoğunluğudur. v , [m / s] cinsinden sıvının hızıdır.

Dinamik basınç, sıvı hızını azaltarak statik basınca dönüştürülebilir ve bunun tersi de geçerlidir.

3.1.3 Basma Yüksekliği (Head, H)

Bir pompanın basma yüksekliği, pompanın sıvıyı ne kadar yükseğe kaldıracabileceğinin bir ifadesidir. Basma yüksekliği metre (m) cinsinden ölçülür ve sıvı yoğunluğundan bağımsızdır. Aşağıdaki formül, basınç (p) ve basma yüksekliği (H) arasındaki ilişkiyi gösterir:

$$H = \frac{p}{\rho \cdot g} \quad (3.2)$$

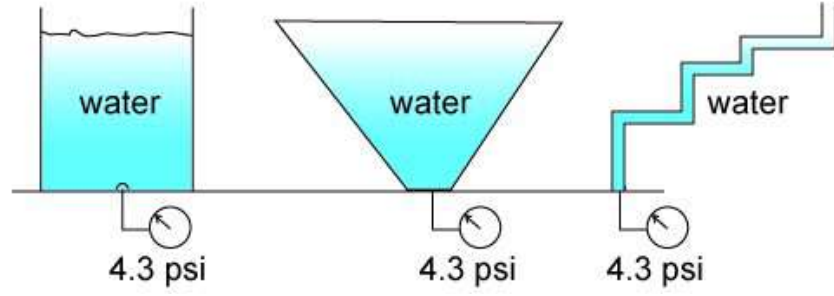
Burada, H [m] 'deki basma yüksekliğidir. p [$\text{Pa} = \text{N} / \text{m}^2$] cinsinden basınçtır. ρ [kg / m^3] cinsinden sıvı yoğunluğu, g [m / s^2] cinsinden yerçekimi ivmesidir.

Genelde, basınç, 105 Pa'ya eşit olan [bar] cinsinden ölçülür.

Pompanın rotoru tarafından transfer edilen tork doğrudan basma yüksekliğiyle orantılıdır. (H. Cholet, 1997)

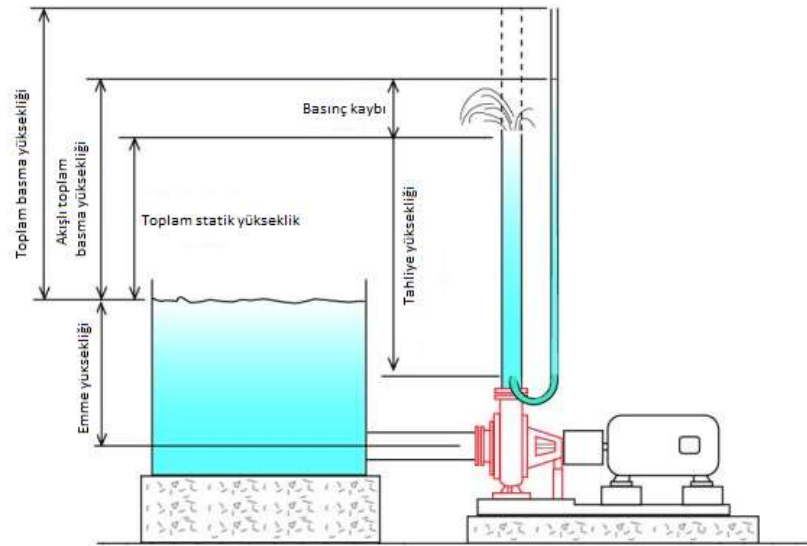
Pompanın basma yüksekliği sıvının tipine bağlıdır. Farklı sıvıların pompalanması farklı basma yüksekliklerine ve dolayısıyla farklı çalışma noktalarına neden olur.

Bir sıvının daha yüksek bir seviyeye taşınması için bir pompa kullanıldığında, genellikle düşük noktada veya ona yakın bir yerde pompa bulunur. Bir tankın altındaki **statik basma yüksekliği** adı verilen (Şekil 3.4), pompa çalıştırıldığında pompa üzerinde üstesinden gelinmesi gereken bir basınç üretecektir.



Şekil 3.4 Bir tankın altındaki basınç seviyesi, sıvı yüzey yüksekliğine bağlıdır. (Tutorial Centrifugal Pump Systems, 2005)

Sürtünme enerjisi, sıvının sistemdeki boru ve ek parçalardan geçmesi nedeniyle çevreye kaybedilen enerjidir. Basınç düşümü ise birim yükseklik başına düşen sürtünme enerjisi olarak tanımlanabilir.



Şekil 3.5 Basma yüksekliği kavramları (www.pumpfundamentals.com,2019)

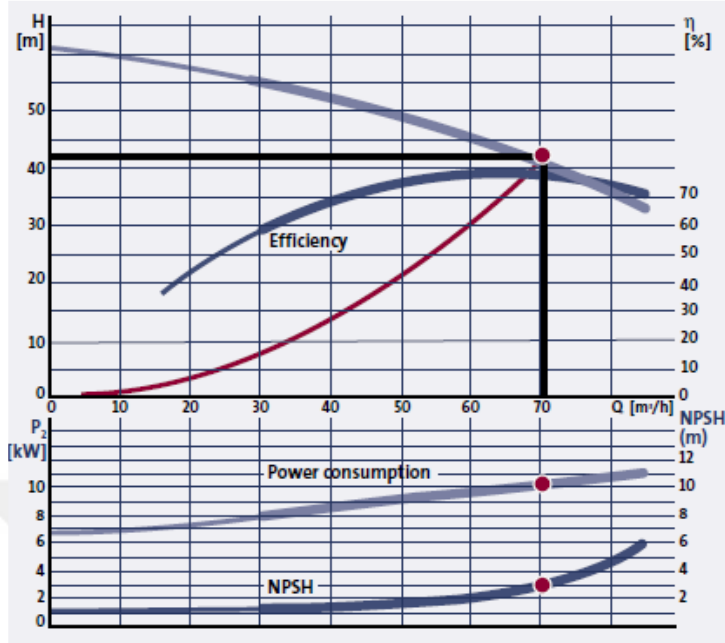
Toplam basma yüksekliği ise bir pompanın bir sıvıyı çıkarabileceği maksimum yükseklik olarak tanımlanabilir. Emme yüksekliği ise pompanın emme tarafında bulunan sıvının yüksekli olarak tanımlanabilir.

Tahliye yüksekliği ise, bir pompanın tahliyesindeki basınç olarak tanımlanabilir. Pompaya ait yükseklik kavramları Şekil 3.5 ile verilmiştir.

3.2 Santrifüj Pompanın Eğrileri

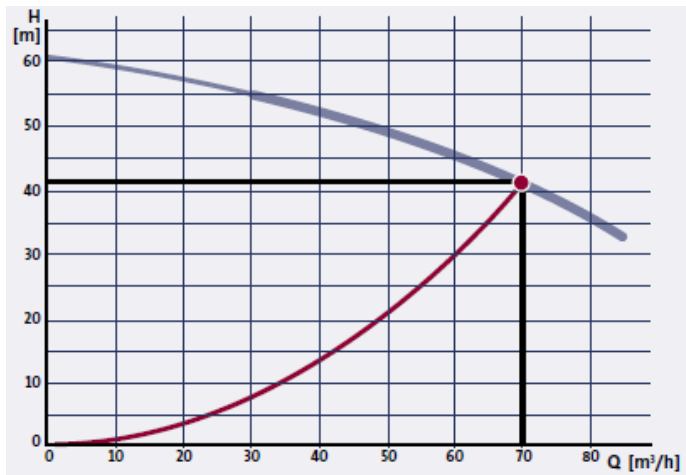
Bir santrifüj pompanın performansı, bir dizi performans eğrisi ile gösterilir. Santrifüjlü bir pompanın örnek bir performans eğrisi, Şekil 3.6'da gösterilmiştir.

Basma yüksekliği (Head), güç tüketimi, verimlilik ve net pozitif emme yüksekliği (Net Positive Suction Head, NPSH) akışın (Q) bir fonksiyonu olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.6 Santrifüjlü bir pompa için tipik performans eğrileri. (Pump Handbook'dan, 2004)

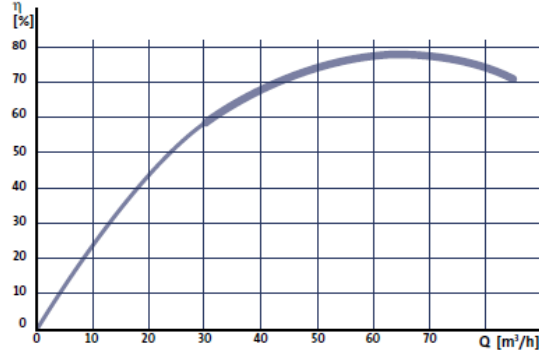
Normalde, kataloglardaki pompa eğrileri yalnızca pompa bölümünü kapsar. Bu nedenle, veri kitapçıklarında listelenen P₂ değeri olan güç tüketimi yalnızca pompaya giden gücü kapsar. Aynısı sadece pompa kısmını kapsayan verimlilik değeri için de geçerlidir ($\eta = \eta_P$).



Şekil 3.7 Santrifüj pompaların tipik basma yüksekliği - akış eğrisi . (Pump Handbook'dan, 2004)

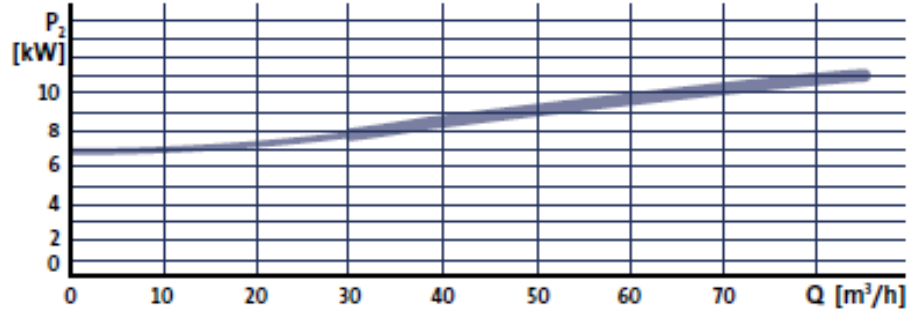
Şekil 3.7 santrifüj pompaların tipik basma yüksekliği – akış eğrilerinde bir örnektir. QH-eğrisi, pompanın belirli bir akışta gerçekleştirebileceği basma yüksekliğini gösterir. Basma yüksekliğinin birimi genelde metre[m] olarak verilir. Metreyi bir

pompanın basma yüksekliğinin ölçüm birimi olarak kullanmanın avantajı, QH eğrisinin pompanın taşınması gereken sıvı türünden etkilenmemesidir, çünkü pompalama sektöründe “Basma yüksekliği” çok uygun bir terimdir. Basınç terimi uygun değildir çünkü pompanın sağlayacağı basınç miktarı, pompalanan sıvının ağırlığına (özgül ağırlık) bağlıdır ve bildiğiniz gibi, özgül ağırlık sıvı sıcaklığı ve konsantrasyonu ile birlikte değişir. Bu sebeplerle basma yüksekliği ifadesi çok daha pratik bir kullanım sağlar.



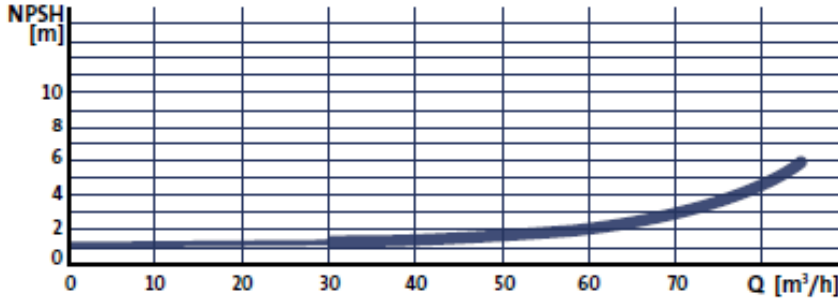
Şekil 3.8 Santrifüj pompaların tipik verim eğrisi. (Pump Handbook'dan, 2004)

Verimlilik, sağlanan güç ile kullanılan güç miktarı arasındaki ilişkidir. Pompa dünyasında, η verimliliği, pompanın suya (PH) verdiği güç ile şafta (P_2) giren güç arasındaki ilişkidir.



Şekil 3.9 Santrifüj pompaların tipik güç- akış eğrisi. (Pump Handbook'dan, 2004)

Şekil 3.9, bir santrifüj pompası için örnek bir güç tüketimi – akış eğrisidir. Hemen tüm santrifüj pompaları için bu eğri benzer şekilde gerçekleşmektedir.



Şekil 3.10 Santrifüj pompaların tipik net pozitif emme yüksekliği . (Pump Handbook'dan, 2004)

Bir pompanın pozitif emme yüksekliği değeri, kavitasyonu önlemek için pompanın emme tarafında bulunması gereken minimum mutlak basınçtır. Pozitif emme yüksekliği değeri [m] cinsinden ölçülür ve akışa bağlıdır; akış arttığında, Şekil 3.10'de görüldüğü gibi pozitif emme yüksekliği değeri de artar. (Grundfos Pump Handbook, 2004)

3.3 Santrifüj Pompa Eşitlikleri

Santrifüj pompalarda basma yüksekliği aşağıdaki eşitlikle verilir:

$$H = \frac{p_2 - p_1}{\rho \cdot g} + (h_1 - h_2) + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2 \cdot g} \quad (3.3)$$

Burada; H, [m] cinsinden gerçek pompa basma yüksekliği, p, [Pa = N / m²] 'deki flanşlardaki basınçtır. ρ [kg / m³] cinsinden sıvı yoğunluğu, g [m / s²] cinsinden yerçekimi ivmesidir. h [m] cinsinden jeodezik yüksekliktir. v [m / s] cinsinden sıvı hızıdır.

Sıvı hızı v, aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{4Q}{\pi \cdot D^2} \quad (3.4)$$

Burada, v [m / s] cinsinden hızdır, Q [m³ / s] cinsinden hacimsel akıştır. D, [m] cinsinden çıkış çapıdır.

Eşitlik (3.3) ve (3.4) birleştirildiğinde daha açık bir basma yüksekliği formülü elde edilir.

$$H = \frac{p_2 - p_1}{\rho \cdot g} + (h_1 - h_2) + \frac{8 \cdot Q^2}{g \cdot \pi^2} \cdot \left(\frac{1}{D_2^4} - \frac{1}{D_1^4} \right) \quad (3.5)$$

Basma yüksekliği ile akış arasındaki eşitlik basitçe aşağıdaki gibi verilir.

$$H_{dyn} = k \cdot Q^2 \quad (3.6)$$

H_{dyn} [m] cinsinden sistem dinamik basma yüksekliği, k dinamik basma yüksekliği katsayısıdır ve sistemin yapısı ile belirlenir. Q [m^3 / s] cinsinden hacimsel akıştır.

Sistemin Basma yüksekliği aşağıdaki ifadeyle verilir.

$$H_{sys} = H_{dyn} + H_{st} \quad (3.7)$$

H_{st} [m] cinsinden sistem statik basma yüksekliğidir.

Değişken hızlı pompalar için aşağıdaki eşitlikler verilir ve benzeşim denklemleri olarak anılır:

$$Q = \left(\frac{n}{n_n} \right) Q_n \quad (3.8)$$

$$H = \left(\frac{n}{n_n} \right)^2 H_n \quad (3.9)$$

$$P = \left(\frac{n}{n_n} \right)^3 P_n \quad (3.10)$$

$$NPSH_R = \left(\frac{n}{n_n} \right)^2 NPSH_{Rn} \quad (3.11)$$

Burada n alt indisiyle verilen parametreler verilen motor için nominal değerlerdir.

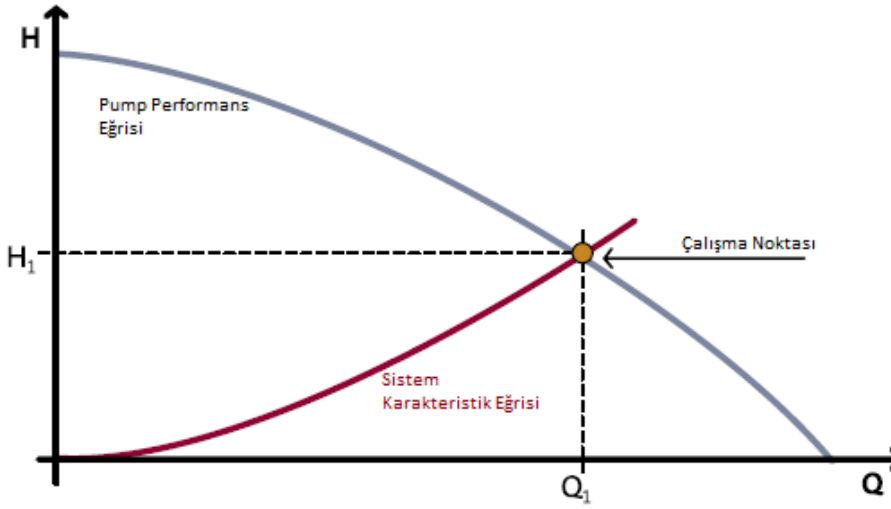
Verim ifadesi aşağıda verilmiştir.

$$\eta_0 = \frac{P_H}{P_2} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{P_2} \quad (3.12)$$

Burada, ρ sıvının kg/m^3 cinsinden yoğunluğudur, g m/s^2 cinsinden yerçekimi ivmesidir, Q m^3/s 'deki akış, H ise m cinsinden basma yüksekliğidir.

3.4 Pompa Sisteminin Karakteristikleri

Sistem karakteristiği bir sistemin basma yüksekliği ile akış miktarı arasındaki ilişkiyi belirler. Belirli bir sistemin çalıştığı her bir basma yüksekliğine karşılık gelen akış miktarları basma yüksekliği-debi eğrisinden bir noktaya denk gelir. Her bir noktanın birleşmesi ile oluşan eğri ise sistemin karakteristik eğrisidir. Sistem karakteristik eğrisi ile motor performans eğrisinin kesişme noktası, çalışma noktası olarak tanımlanır.



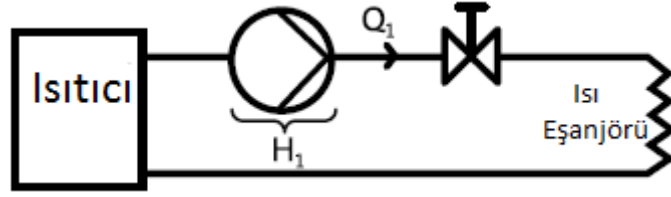
Şekil 3.11 Sistem çalışma noktasının belirlenmesi

Pompa sistemleri açık ve kapalı sistemler olarak ikiye ayrılabilirler.

3.4.1 Kapalı Sistemler

Tipik olarak, kapalı sistemler ısıtma sistemlerinde ısı enerjisini taşıyan, iklimlendirme sistemlerinde, proses soğutma sistemlerinde vs. çalışan sistemlerdir. Bu tip kapalı sistemlerin ortak bir özelliği sıvının dolaşımında olması ve ısı enerjisinin taşıyıcısı olmasıdır. Isı enerjisi, aslında sistemin asıl taşınması gereken şeydir.

Kapalı sistemler, sadece bileşenlerin ürettiği sürtünme kayıplarını aşması gereken pompaları olan sistemler olarak tanımlanır. Şekil 3.12, bir pompanın suyu bir ısıtıcıdan bir kontrol vanasından bir ısı eşanjörüne sirküle etmesi gereken kapalı bir sistemin şematik bir çizimini gösterir.

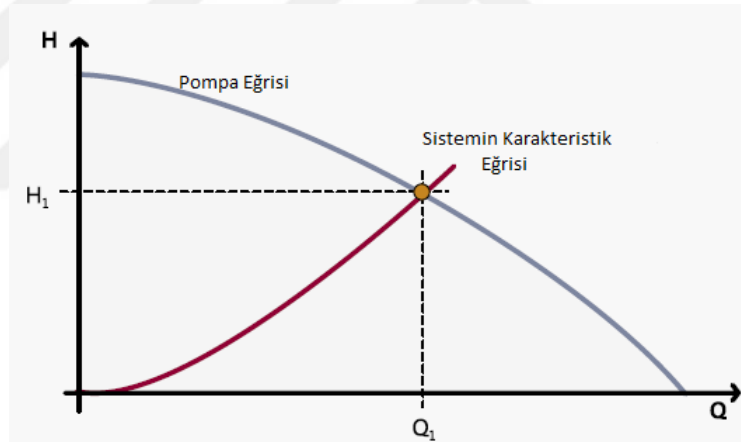


Şekil 3.12 Örnek kapalı pompa sistemi diyagramı

Tüm bu bileşenler, borular ve bağlantı parçaları ile birlikte, Şekil 3.13’de gösterilen sistem karakteristiğiyle sonuçlanır. Kapalı bir sistemde gerekli basınç, $(Q, H) = (0,0)$ noktasından başlayan bir paraboludur ve aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$H_{dyn} = k.Q^2 \quad (3.13)$$

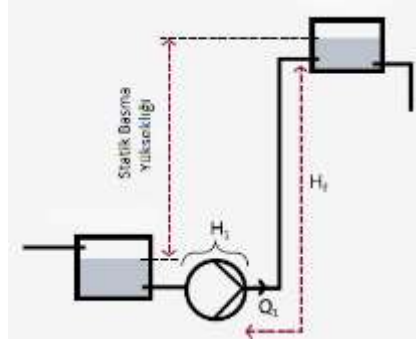
Formül ve eğrinin belirttiği gibi, akış düştüğünde basınç kaybı sıfıra yaklaşmaktadır.



Şekil 3.13 Kapalı sistem eğrileri . (Pump Handbook’dan, 2004)

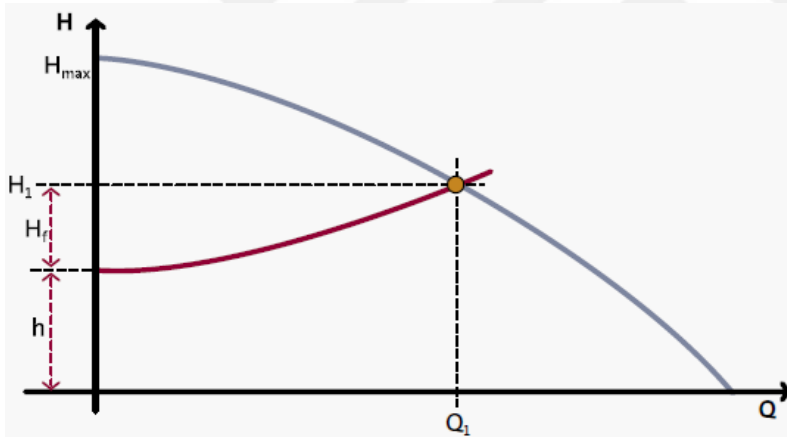
3.4.2 Açık Sistemler

Açık sistemler, pompanın sıvıyı bir noktadan diğerine taşımak için kullanıldığı sistemlerdir. Su temini sistemleri, sulama sistemleri, endüstriyel proses sistemleri açık sistem örnekleridir. Bu tür sistemlerde pompa, sıvının hem statik basma yüksekliği ile ilgilenmeli hem de borulardaki ve sistem bileşenlerinde sürtünme kayıplarını yenmek zorundadır. Örnek bir açık devre diyagramı Şekil 3.12 ile verilmiştir.



Şekil 3.14 Örnek açık pompa sistemi diyagramı. (Pump Handbook'dan, 2004)

Bir pompanın suyu yer seviyesindeki bir tanktan binanın tepesindeki bir tanka kadar taşınması gerekir. Her şeyden önce, pompanın suyun statik basma yüksekliğinden (h) daha fazla bir basma yüksekliği sağlaması gerekir. İkinci olarak, pompa, borulardaki, rakorlardaki, vanalardaki, vb. (H_f) iki tank arasındaki toplam sürtünme kaybının üstesinden gelmek için gerekli basma yüksekliğini sağlamalıdır. Basınç kaybı, akış miktarına bağlıdır, bkz. Şekil 3.13. (Grundfos Pump Handbook, 2008)

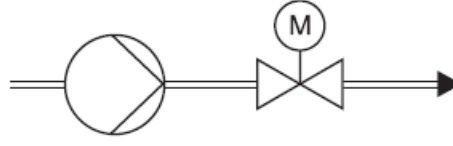


Şekil 3.15 Açık sistem eğrileri

3.5 Santrifüj Pompalarda Akış Kontrol Yöntemlerinin Karşılaştırılması

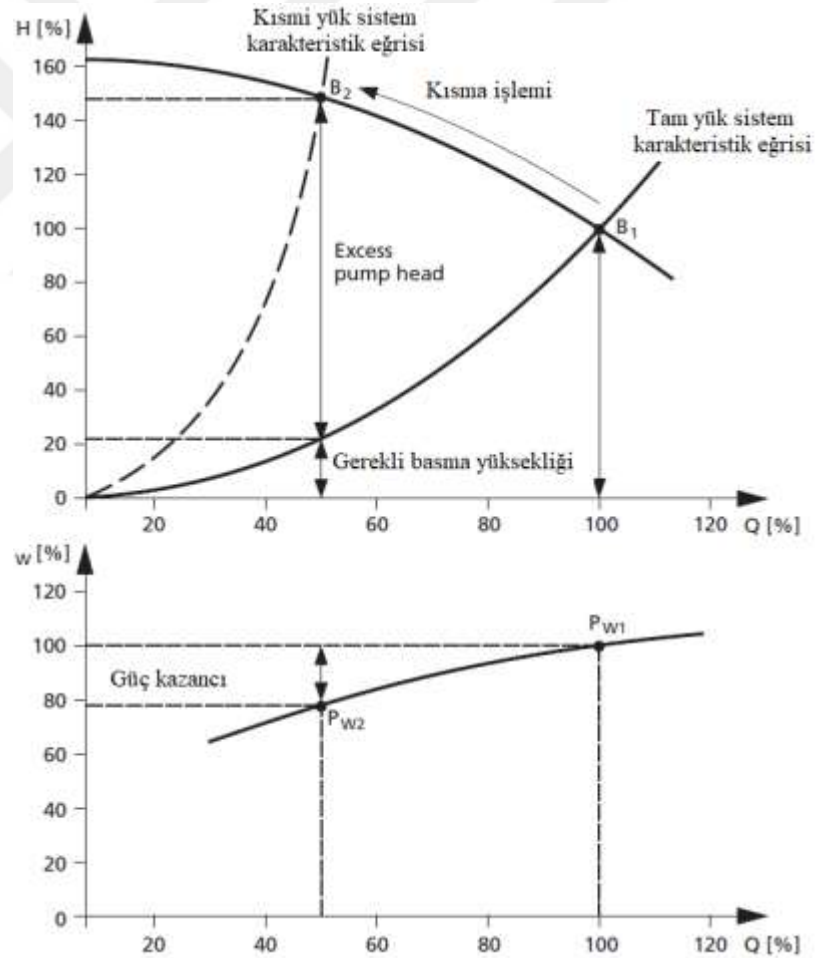
Pompa sistemlerindeki en büyük problemlerden biri debi kontrolüdür. Debi kontrolü için pek çok yöntem vardır ve en önemlileri aşağıda analiz edilmiştir.

3.5.1 Kısmi Kontrolü



Şekil 3.16 Kısmi kontrol konfigürasyonu

Kısmi kontrolü su akış hattına seri olarak bağlanan (Şekil 3.16) bir valf ile su akış hattının daraltma yolu ile sağlanan kontroldür. Kısılan nokta akış hattına bir direnç etkisi yapar ve su akışını kısar. Sistem dirençlerini arttırmanın amacı, ortaya çıkan sistem karakteristik eğrisini daha dik hale getirmektir. Sabit bir pompa hızında, pompa karakteristik eğrisi üzerindeki çalışma noktası daha düşük bir akış hızına hareket eder. (Bkz Şekil 3.17)



Şekil 3.17 Kısmi kontrolünde pompa ve güç karakteristik eğrileri

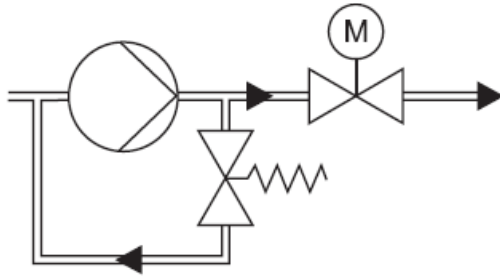
Avantajları:

- Kontrol maliyeti düşüktür
- Esas olarak tam yükte avantajlıdır.
- Kısa çalışma süresi olan uygulamalar için uygundur
- Düz pompa karakteristik eğrileri için çok uygundur.

Dezavantajları

- Pompa basıncı özellikle pompa karakteristik eğrisi dik olduğunda çok yüksektir.
- Kısmi yüklerde pompa verimi düşüktür
- Kısmi yüklerde güç tasarrufu azdır
- Yüksek basınçlarda kontrole elverişsizdir.
- Kısmi vana gereklidir
- Vana üzerindeki mekanik yük fazladır
- Yüksek basınçlarda (örneğin termostat valflerinde) akış gürültüsü tehlikesi yüksektir.

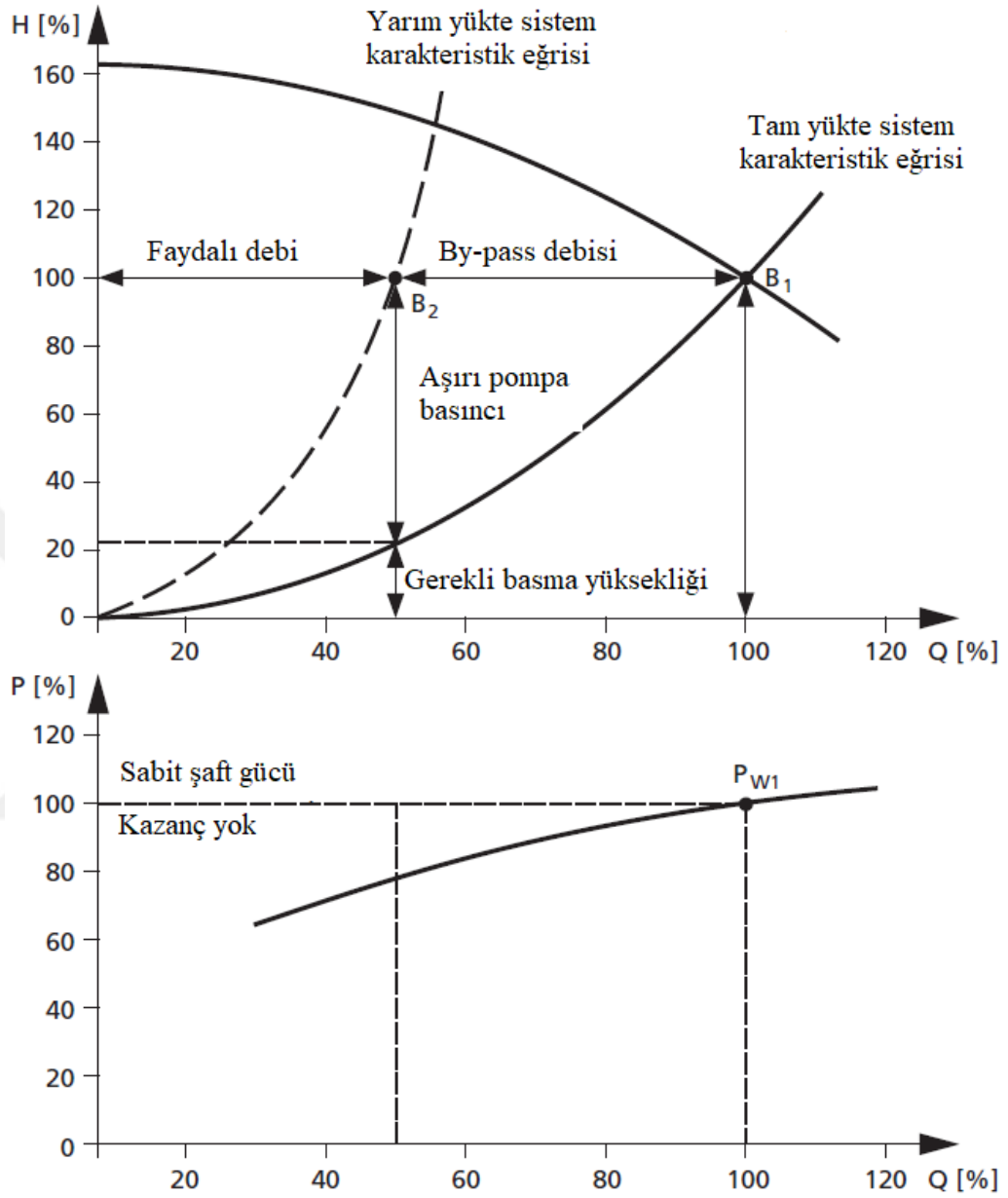
3.5.2 Bypass Kontrolü



Şekil 3.18 By-pass kontrol konfigürasyonu

Pompaya paralel olarak yerleştirilen bir kısma vanasıyla kontrol sağlanır. Böylece pompa akışı, sisteme akan yararlı akışa ve doğrudan veya dolaylı olarak pompanın giriş basıncı tarafına döndürülen bypass akışına bölünür (Şekil 3.18). Bir kontrol valfi vasıtasıyla by-pass akış hızını veya bypass hattı karakteristik eğrisini değiştirmek suretiyle yararlı akışın değiştirilmesine izin verir. Pompanın kendisi

neredeyse aynı çalışma noktasında, yani sistemin tasarım noktasında tam yükte çalışır.



Şekil 3.19 By-pass kontrolünde pompa ve güç karakteristik eğrileri

Avantajları:

- Kısmi yük işletiminde bile basma yüksekliğinde artış olmaz
- Kısmi uygulamasının aksine, akış ayarlandığında pompa basıncı sabit kalır
- Düşük basma yüksekliği, yüksek debilerle birleştirildiği durumlarda uygundur

- Tam yükler için çok uygundur

Dezavantajları:

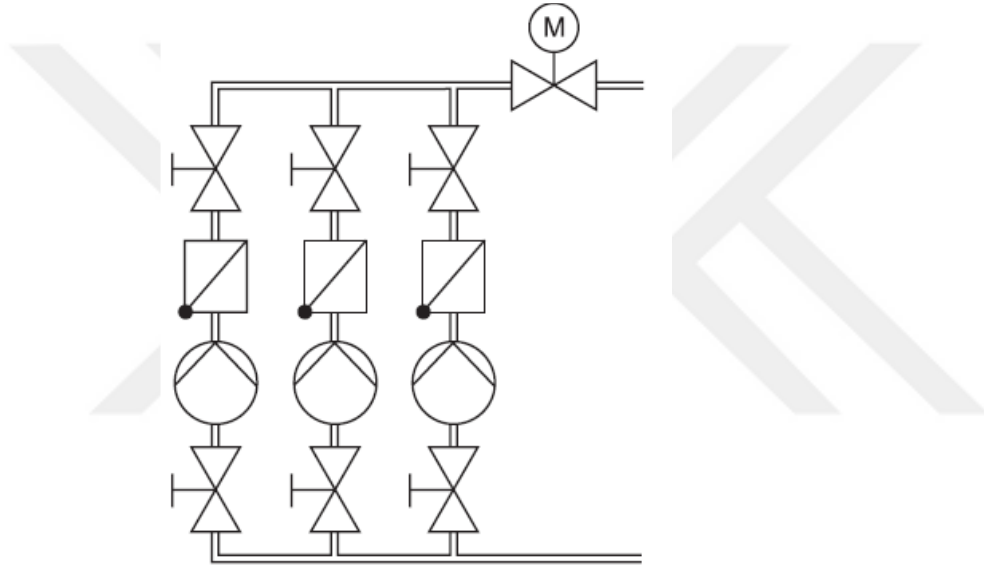
- Artan kurulum maliyetleri (by-pass devresi)

- Kısmi yüklerde güç tüketiminde azalma olmaz

- Kısmi yüklerde hala fazla basma yüksekliği var

- Bu akış hızı ayarlama yöntemi, kullanılan enerji açısından ekonomik değildir.

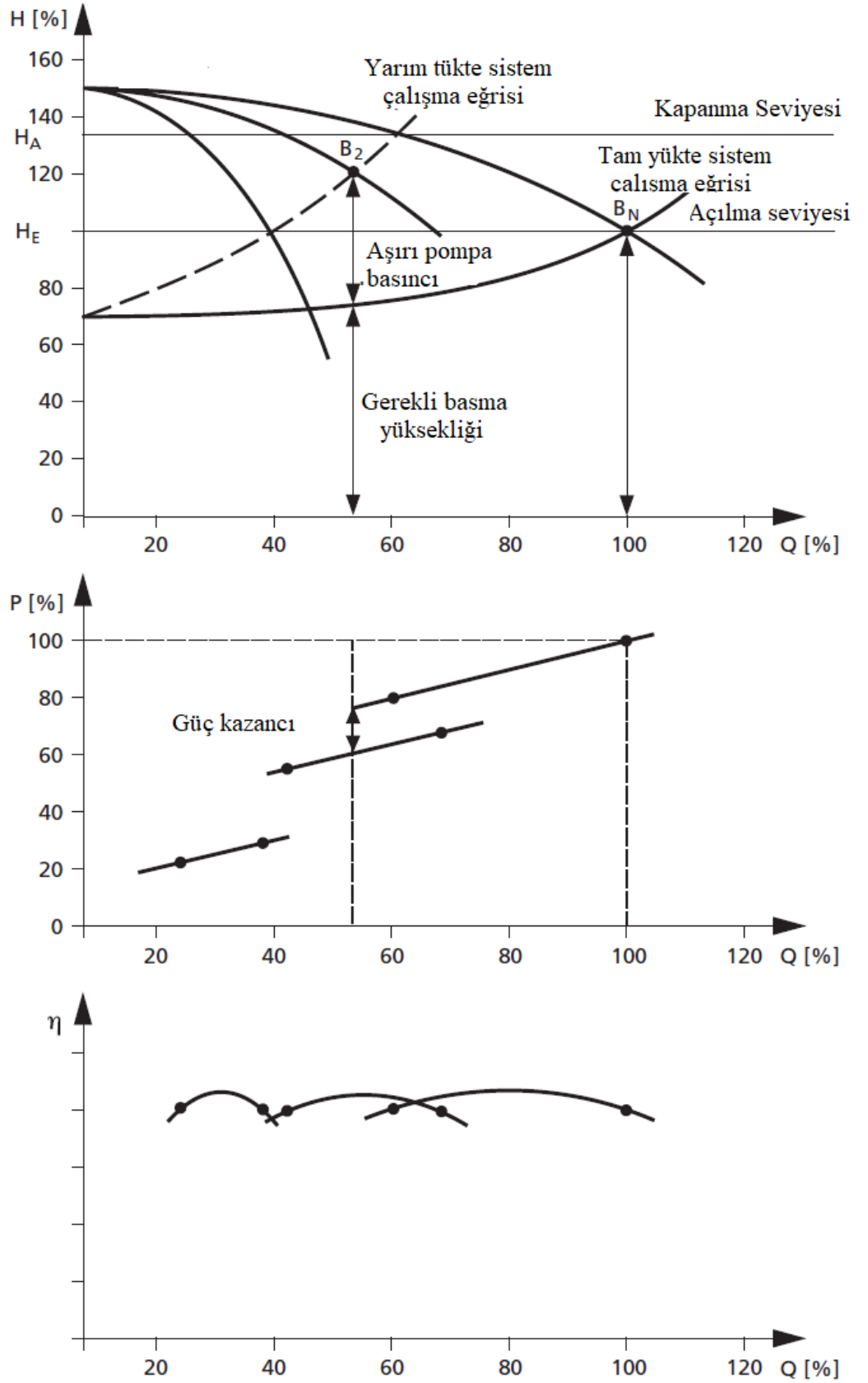
3.5.3 Paralel Pompa Yöntemi



Şekil 3.20 Paralel pompa yöntemi konfigürasyonu

Pompalar, Şekil 3.20’de gösterildiği gibi paralel bağlanırsa, kısmi akış hızları toplanır.

Paralel çalışma karakteristik eğrilerinin yapımı için, katılan tüm pompaların kısmi akış hızları birkaç farklı basınç seviyesinde toplanır (sıfır ve minimum basma yüksekliği arasında). Paralel karakteristik eğri, akış hızlarının aynı başlıkta toplanmasıyla bulunur. Uygulamada, akış hızı arttıkça sistem dirençlerinin de yükseldiği ve dolayısıyla paralel işlemdeki fiili çalışma noktasının da bu daha yüksek basınç seviyesinde olduğu dikkate alınmalıdır. Sonuç olarak, akış hızındaki artış başlangıçta beklenenden daha azdır (Şekil 3.21).



Şekil 3.21 Paralel pompa yöntemi kontrolünde pompa ve güç karakteristik eğrileri

Avantajları:

- Yüksek statik kafa bileşenli düz sistem karakteristik eğrileri için çok uygundur

- Yarım yüklerde uyumu yüksektir

- Yüksek sistem verimliliği vardır.

- Basınçlı pompa çalışması için düşük kontrol maliyeti ile uygundur

- Birkaç pompa sayesinde yüksek çalışma güvenilirliği vardır(yedeklilik)

- Artan inşaat maliyeti (boru, vana, pompa, alan gereksinimi)

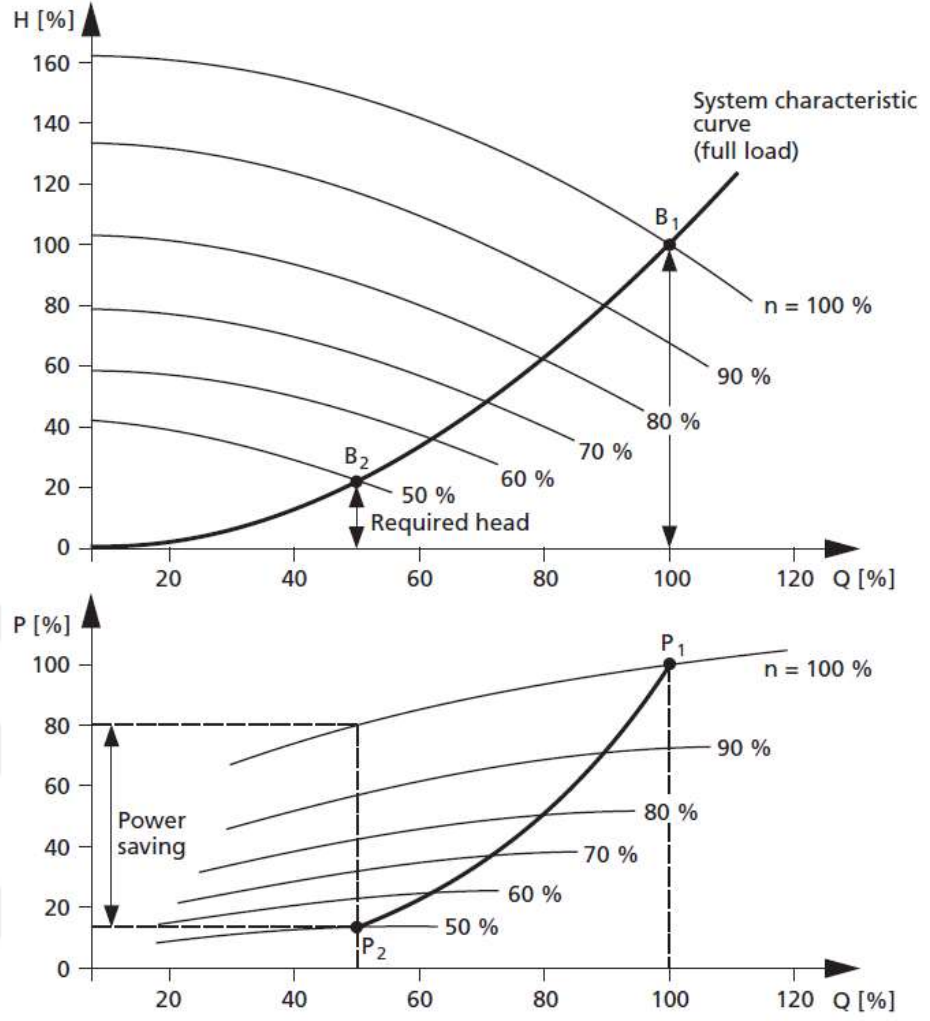
- Olumsuz sistem tasarımlarında yüksek anahtarlama frekansı

- Düz pompa/sistem karakteristik eğrileri durumunda, pompa çalışması akışa bağlıdır

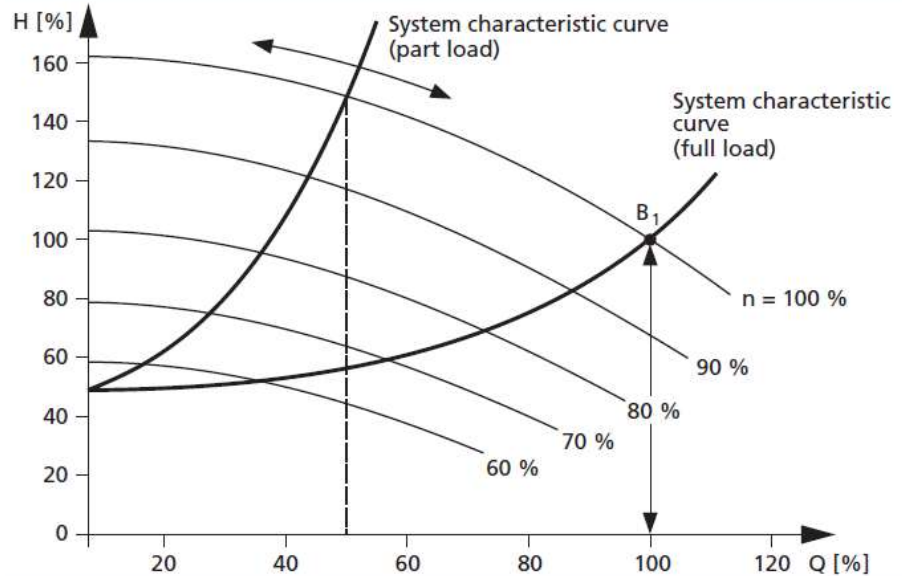
- Yüksek giriş basıncı dalgalanmaları durumunda problemlidir

3.5.4 Değişken Hızlı Pompalarla Debi Kontrolü

Yukarıdaki bölümlerde belirtilen akış hızı ayar prosedürlerinden farklı olarak, sürekli hız ayarı, pompa karakteristik eğrisini değiştirerek pompa çıktısının sistem gereksinimlerine sürekli olarak değiştirilmesine izin verir. Akış hızı doğrusal olarak artarsa, sistem direnci (boru karakteristiği eğrisi) kuadratik olarak artmaktadır. Santrifüjlü pompa benzer şekilde davranır. Doğrusal olarak artan akış hızı ve doğrusal olarak artan hız durumunda, sonuçta elde edilen basma kuvveti de kuadratik olarak artar. Bu ilişkilerin sonucu olarak nispeten küçük hız değişimleri bile geniş bir çalışma aralığını kapsar.



Şekil 3.22 Değişken hız uygulamaları için H-Q ve P-Q eğrileri



Şekil 3.23 Tam ve yarım yüklerde değişken hızlı uygulamaların H-Q verim eğrisi

Avantajları:

- Aşırı basınçtan korur
- Frekans dönüştürücü sayesinde yumuşak çalışma sağlanır
- Yumuşak çalışma sayesinde mekanik bileşenlerin korunması (aşınma azaltma)
- Hidrolik geri besleme etkilerinin azaltılması
- Yüksek güç tasarrufu
- Düşük başlangıç akımı nedeniyle düşük tepe yükleri
- Yaşam döngüsü maliyetlerinde azalma

Dezavantajlar

- Yüksek kontrol maliyetleri (Pump Control/System Automation, 2006)

3.6 Değişken Hızlı Santrifüj Pompalarda Çalışma Noktası Tahmini

Santrifüjlü bir pompanın çalışmasının hata takibi ve kontrolü, pompanın mevcut çalışma noktası konumu hakkında bilgi gerektirir. Tipik olarak, santrifüjlü bir pompa, pompa tarafından üretilen basma yüksekliği veya akış hızı ölçülürse, pompa çalışma noktasının yerini belirlemek suretiyle harici bir işlem ölçümü temelinde kontrol edilebilir. Uygulamada, sadece pompa çıkış basıncı ölçülebilir ve bu nedenle çalışma noktası konumunu belirlemek için ek ölçümler veya alternatif tahmin yöntemleri gerekir.

Çalışma noktasının belirlenmesinde “hesaplamalı yöntemler” ve “model tabanlı yöntemler” olarak iki yöntem kullanılır. Ölçüm tabanlı yöntemler her ne kadar piyasada en çok kullanılan yöntemler olsa da ek ölçüm elemanları gerektirmesi, ek kablolama ve montaj zorlukları ve ek sensör maliyetleri gibi bazı dezavantajlara sahiptir.

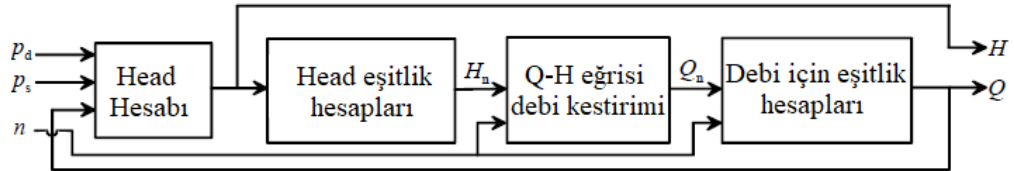
Bu tez kapsamında daha çok model tabanlı çalışma noktası tahmin yöntemleri anlatılacaktır. Ayarlanabilir, model tabanlı yöntemlerde, pompanın çalışma noktası konumu, pompa çalışması üzerindeki diğer ölçümler veya tahminler kullanılarak hesaplanır. Hesaplama için modeller, pompa, pompalanan sıvı ve pompalama sisteminin diğer bölümlerinde mevcut olan bilgilere göre

ayarlanır. Tipik olarak, model ayarlama için pompanın karakteristik eğrileri ve pompalanan sıvının temel özellikleri gerekir.

Doğrudan ölçümlerle karşılaştırıldığında, model tabanlı yöntemler belirli çalışma koşulları ve belirli bir pompalama sistemi için ayarlanmıştır ve bu nedenle yanlış tahmin sonuçları sağlayabilirler. Öte yandan, bir frekans dönüştürücünün iç ölçümlerini ve tahminlerini kullanarak pompalama sisteminin çalışma durumunu tahmin etme fırsatı sunarlar. Daha sonra, pompa çalışma durumunun tahmini için üç farklı model-temelli yöntem açıklanmaktadır.

3.6.1 Q-H Eğrisi Tabanlı Tahmin Yöntemleri

Bu yöntemde, pompa çalışma noktasının yeri, hesaplanan pompa basma yüksekliği ve tahmini pompa hızı değeri ile pompa QH eğrisinden tahmin edilir. Pompa basma yüksekliği, pompalanan sıvının yüksekliği olarak ifade edilen pompadaki toplam basınç farkına eşit olduğu için, bir basınç farkı algılayıcısıyla veya pompanın tahliye ve emme tarafına akışkanla doldurulmuş iki ayrı basınç algılayıcısıyla ölçülebilir. Modern frekans dönüştürücüler durumunda, pompa hızı n için bir tahmin ek ölçümler olmadan kolayca temin edilebilir. QH eğrisi kestirim yöntemi, Şekil 3.24'de gösterilen dört basamağa bölünebilir.



Şekil 3.24 Q-H eğrisi tabanlı tahmin yöntemi adımları

Bu yöntemde giriş ve çıkış basıncı bilindiğinden dolayı Eşitlik (3.5) kullanılarak sistem basma yüksekliği hesaplanır. Ardından Eşitlik (3.8), (3.9) ve (3.10) kullanılarak çalışma noktası tespit edilir. İlgili denklemler motora ait nominal hızın bilinmesi gerekmektedir.

Bu tahmin metodu harici proses ölçümleri gerektirdiğinden, kısmen ölçüm bazlı bir tahmin metodu olarak düşünülebilir ve kullanımını mevcut tesislerde sınırlı olabilir. Öte yandan, gerçek pompa basma yüksekliğinin ölçümü, yalnızca bir frekans dönüştürücünün tahminlerini kullanan yöntemlerle karşılaştırıldığında akış hızı tahmini doğruluğunu artırır. Ek olarak, eğer pompa aynı zamanda uygun

sıcaklık sensörleriyle donatılmışsa, bir santrifüjlü pompanın verimliliği, termodinamik yöntem uygulanarak tahmin edilebilir.

3.6.2 Q-P Eğrisi Tabanlı Tahmin Metodu

Bu yöntem, çalışma noktası konumunu belirlemek için hem pompa QH hem de QP karakteristik eğrilerini kullanır. Pompalama sisteminin tahmini hızı n ve shaft gücü P , tahmin edicinin girişleri olarak uygulanır. QH eğrisi temelli yöntemle karşılaştırıldığında, çalışma noktası konumunun belirlenmesi için yalnızca frekans dönüştürücünün tahmini gerekir. Öte yandan, QP karakteristik eğrisinin, bu tahmin yönteminin net sonuçlar üretmesi için sürekli olarak artması veya azalması gerekir.

Bu tahmin yöntemi için aşağıdaki bilgiler gereklidir:

- Sayısal biçimde pompa QP ve QH karakteristik eğrileri.
- Karakteristik eğrilerde uygulanan pompanın nominal hızı.
- Sıvının yoğunluğu.
- Yayınlanan QP eğrisinin olası kalibrasyonu için, pompanın mil gücü tüketim değeri kapalı bir deşarja veya bilinen diğer çalışma noktalarında belirlenmelidir.

Öncelikli olarak tahmini shaft gücü, nominal hız ve pompanın anlık hızı kullanılarak Eşitlik (3.10) kullanılarak anlık güç bilgisi tespit edilir. Ardından Q-P eğrisi kullanılarak debi bulunur ve yine Eşitlik (3.9) kullanılarak çalışma noktası tespit edilir.

Uygulamada, QP eğrisi yönteminin tahmin doğruluğunu etkileyen gerçek QP eğrisi, katalogda olandan önemli ölçüde farklı olabilir. Bu nedenle, yayınlanan QP eğrisi, örneğin kapalı bir tahliye vanasına karşı shaft güç tüketimini belirleyerek veya taşınabilir bir debimetre ile gerçek pompa QP eğrisini belirleyerek kalibre edilmelidir.

3.6.3 Sistem Eğrisi Tabanlı Tahmin Yöntemi

Pompa ve sistem QH eğrileri biliniyorsa, pompa çalışma noktasının konumu, bu eğrilerin kesişme noktası hesaplanarak belirlenebilir. Bu yöntemde, aşağıdaki bilgiler gereklidir:

- Sayısal biçimde pompa QH karakteristik eğrisi.

- Karakteristik eğrilerde uygulanan pompanın nominal hızı.

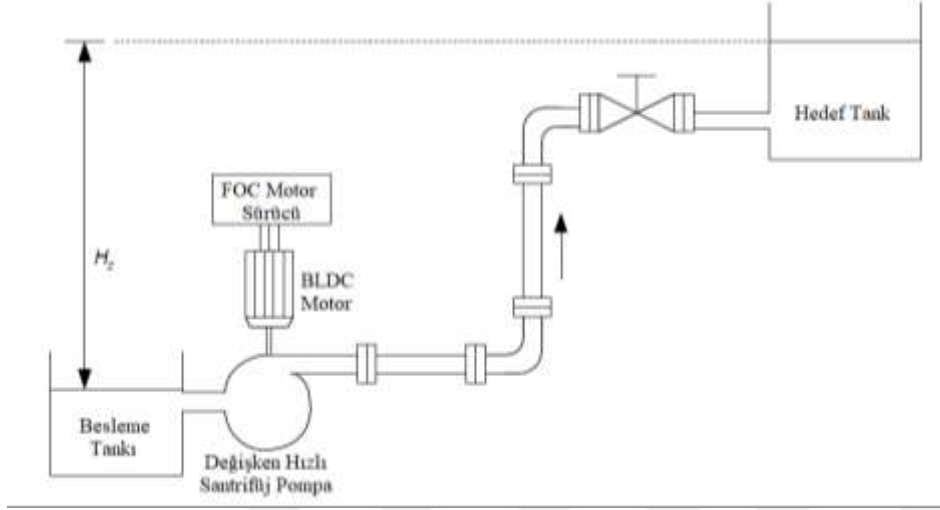
- Statik basma yüksekliği ve sistemin QH eğrisi şeklini tanımlayan dinamik basma yüksekliği katsayısı k . Alternatif olarak, sistem eğrisi şeklini tanımlayan bir dizi çalışma noktası da kullanılabilir.

İlk olarak, pompa QH eğrisi Eşitlik (3.8) ve (3.9) ile mevcut dönme hızına dönüştürülür. Daha sonra, pompa çalışma noktasının yerini belirlemek için sistem QH eğrisi ile karşılaştırılır. Sistem eğrisi şekli, sistem statik basma yüksekliği bilgisinden ve pompanın tek bir çalışma noktası konumundan elde edilebilir. Alternatif olarak, sistem eğrisi şekli, test ölçümleriyle belirlenebilir. Bununla birlikte, sistem eğrisi şekli, tahmin yönteminin doğruluğunu azaltan çeşitli koşullardan dolayı değişebilir. Bu nedenle, sistem eğrisi temelli tahmin yöntemi yalnızca sistem eğrisi şeklinin sabit kaldığı veya değişiminin örneğin ek ölçümlerle bilindiği uygulamalara uygulanabilir. (T. Ahonen, 2011)

4 SİSTEMİN TANIMLANMASI VE KULLANILAN METOTLAR

4.1 Sistemin Tanıtımı

Çalışılan kontrol sistemi, Şekil 4.1’de görüldüğü gibi bir açık devre pompa sistemleri için hazırlanmıştır. Kontrol sistemin ana amacı besleme tankındaki 5lt suyu H_z yüksekliğindeki hedef tanka, kullanıcının seçtiği çalışma modunda taşımaktır. Bu çalışma modları aşağıda listelenmiştir.



Şekil 4.1 Çalışılan sistemin şeması

- **Minimum basınç modu:** Bu modda motor çalışabileceği en düşük tork ile çalışır ve sisteme anlamlı akışın sağlandığı minimum gücü transfer eder. Bu modun amacı sistemi minimum kaynak enerjisiyle çalışabilir halde tutmaktır.

- **Maksimum basınç modu:** Motor bu modda verebileceği en yüksek torku pervanelere iletir ve akışı sistemin ve motorun karşılayabileceği en üst noktaya çeker.

- **Sistemin en verimli olduğu mod:** Bu modda sistemin en verimli noktası tespit edilir ve o noktada çalışması sağlanır.

- **Pompanın en verimli olduğu mod:** Bu modda pompanın en verimli noktası tespit edilir ve o noktada çalışması sağlanır.

- **Manual basınç modu:** Bu modda sistem kullanıcının belirleyeceği bir basma yüksekliği seviyesinde çalıştırılır. Kullanıcı istediği an referans besleme torkunu artırır. Makine istenilen basınç seviyesini dönme hızını ayarlayarak yakalar.

- **Manual Devir Modu:** Bu modda sistem kullanıcının belirleyeceği bir devre sabitlenir. Bu devir kullanıcı tarafından anlık olarak belirlenebilir.

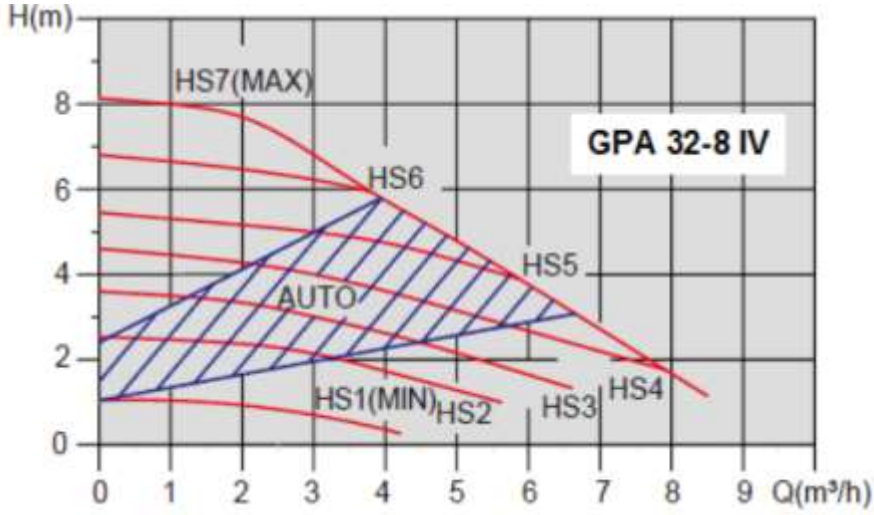
Kontrol sisteminin kalibrasyonu için, sadece kalibrasyon modunda kullanılacak olan bir adet debi ölçer ve yazılımın içinde gömülü olarak bulunan bir kalibrasyon algoritması önerilmiştir. Motor ilk çalıştırmadan önce debi ölçerle birlikte sisteme bağlanacak ve kalibrasyon modunda çalıştırılacaktır. Kalibrasyon modunda kontrolör sistemi öğrenecek ve sisteme ilişkin verileri kalıcı belleğe yazacak, sonra ileriki kullanımlarda bu bilgileri kullanacaktır. Ardında makine sisteme tek başına monte edildikten sonra başka herhangi bir harici algılayıcı kullanmadan sistemi istenilen modda çalıştırabilecektir.

Pompa sisteminde GPA32-8 model BLDC bir değişken hızlı santrifüj pompa kullanılmıştır. 3. bölümde de anlatıldığı gibi birçok üretici artık değişken hızlı pompaları motor kontrol sistemleriyle birlikte sağlamaktadırlar. Dolayısıyla üreticiler pompalarını satarken, pompa eğrilerini tasarladıkları sistemin değişkenlerini kullanarak modifiye edip kullanıcıya sunmaktadırlar. Bu yüzden pompaya ait pek çok saf veriye pompa kataloğundan ulaşılamamaktadır. Bunlar arasında pompanın kalıcı mıknatısın akısı, sarım direnç ve endüktansları, demanyetizasyon akımı gibi elektriksel parametreler vardır. Pompanın Q-H grafiğinde verim izohipsleri bulunmamakta ve hız eğrilerinde pek çok eksik veri bulunmaktadır. Ayrıca eğrinin sadece resmi bulunmakta, sayısal bilgilerin bulunduğu bir tablo bulunmamaktadır. Ek olarak motorun nominal hızı ve çeşitli hızların pompa üzerindeki etkilere ilişkin bir veri de bulunmamaktadır.

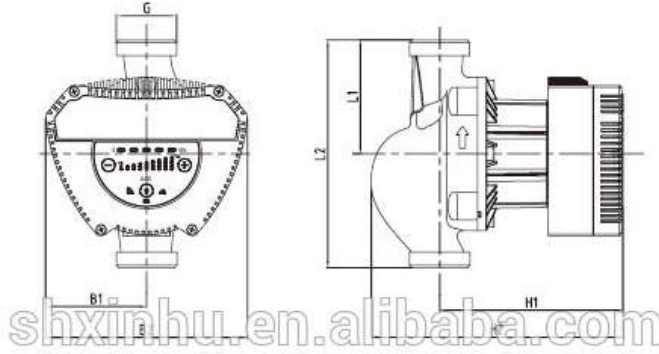
Pompaya ilişkin Q-H eğrisi ve pompanın katalog bilgileri ise Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'de verilmiştir.

Model	Max. Flow (m ³ /h)	Max. Head (m)	Power(W)		Current(A)		Voltage/Frequency (V/Hz)	Weight(kg)	
			Min.	Max.	Min.	Max.		G.W.	N.W.
GPA32-6 IV	6.5	6	6	90	0.06	0.63	230V AC 50/60Hz	5	5.5
GPA32-8 IV	8	8	8	130	0.08	0.9			
GPA32-10 IV	10	10	10	185	0.1	1.25			

Şekil 4.2 Motorun elektriksel parametreleri



Şekil 4.3 Pompanın hıza bağlı H-Q eğrisi



Model	Material of pump body		Dimension(mm)						
	Cast iron	Stainless Steel	L1	L2	B1	B2	H1	H2	G
GPA25-8 IV	●	●	90	180	80	160	144	199	1 1/2"
GPA32-8 IV	●		90	180	80	160	144	199	2"
GPA25-8 IV	●	●	90	180	80	160	144	199	1 1/2"
GPA32-8 IV	●		90	180	80	160	144	199	2"
GPA25-10 IV	●	●	90	180	80	160	144	199	1 1/2"
GPA32-10 IV	●		90	180	80	160	144	199	2"

Şekil 4.4 Motorun ebatları

Buna ek olarak, motor endüktansı 100 Henry olarak ölçülmüş ve daha önce çalışılan benzer tip motorlar göz önüne alınarak kalıcı mıknatıs akısı 100 Weber olarak belirlenmiştir. Motor sargı dirençleri motor kontrol algoritması ile çalışma boyunca ölçülmektedir. Bir sargının sargı direnci yaklaşık 10Ω olarak ölçülmüştür. Motor 3 kutuplu bir izotropik BLDC motordur.

Kullanılan santrifüj pompa 8 m³/saate kadar olan debileri desteklemektedir. Ancak bu kadar büyük miktar su ile çalışmak için uygun ortam yaratmak oldukça zor olmaktadır. Bu yüzden pompanın çıkış çapı 1/2'' e düşürülüp çıkış debisi fiziksel olarak kısılmıştır.

İşlemci olarak Renesas firmasına ait Rx63T model çip kullanılmıştır. Bu işlemci motor kontrol uygulamalarında sıklıkla kullanılan, 100MHz çalışma frekanslı, 165 DMIPS kapasiteli, 32 bitlik, floating point bir işlemcidir.

4.2 Yöntemler

4.2.1 Motor Kontrol Yöntemi

Çalışmada, fırçasız doğru akım motorunun kontrol yöntemi olarak alan yönlendirmeli kontrol (Bkz. bölüm 2.7) seçilmiştir. Pozisyon algılayıcısı olarak da bölüm 2.8'de anlatılmış olan model tabanlı ve akı bağlantısının stator ve rotor bileşenlerinin açısını hesaplama temeline oturtulmuş bir tahmin edici kullanılmıştır.

4.2.2 Çalışma Noktası Tahmin Yöntemi

Pompanın anlık çalışma noktasını belirlemek için 3.6.3'de anlatılan "sistem eğrisi tabanlı" tahmin yöntemi kullanılmıştır. Sistem eğrisini belirleme için ise sistem kurulu evresinde bir debi ölçer yardımı ile çalışan bir kalibrasyon algoritması kullanılmıştır.

Kalibrasyonun amacı sistemi tanımlamaktır. Sistemde sezilecek parametreler basma yüksekliği, güç, debi ve pompa hızıdır. Pek çok pompa hızı adımı için bu parametreler kaydedilerek çalışılan sisteme ait Q-H ve Q-P eğrileri çıkarılacaktır.

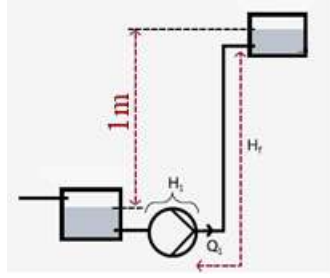
Motorun anlık basma yüksekliği değerinin motorun uyguladığı tork ile doğrudan orantılı olduğunun Cholet tarafından söylendiğinden bölüm 3.1.3'de bahsedilmişti. Bunun yanı sıra Eşitlik (2.6) ve (2.7)'yi tekrar hatırlayacak olursak:

$$\lambda_d = L_s i_d + \Lambda_m \quad (2.6)$$

$$T = \frac{3}{2} n (\Lambda_m - (L_q - L_d) i_d) i_q \quad (2.7)$$

Kullanılan motor izotropik olduğu için Tork ifadesinin yalnızca i_q terimine bağlı olduğu ve verimli bir çalışma için i_d referansı olarak 0 seçilmesi gerektiği bu

iki denklemde görülmektedir. i_q ve tork arasında izotropik makinelere için lineer bir ilişki olduğu yine bu iki eşitlikten açıkça görülmektedir.



Şekil 4.5 H- i_q bağıntısı test düzeneği

Üstteki 3 paragraf bize basma yüksekliği ile i_q arasında lineer bir ilişki olduğunu göstermektedir. Bu ilişki kullanılmadan önce test edilmiştir. Şekil 4.5’de şeması verilen sistemde hedef tank sırayla tabloda verilen yüksekliklere çıkarıldıktan sonra hız su akışının başlamasına ramak kalaya kadar yükseltildikten sonra i_q değerleri not edilmiştir. Ardından “ $H = H_{st} + kQ^2$ ” denkleminde debinin olmadığı durum göz önünde bulunarak tankın yüksekliği motorun anlık yüksekliği olarak not edilip tablodaki ölçümler arasındaki katsayı tespit edilmiştir.

Çizelge 4.1 Debisiz durumda H- i_q ilişkisi

H(cm)	n (rpm)	i_q (mA)	H/ i_q
50	400	60	0,83333
100	1000	125	0,8
150	1300	180	0,83333
200	1600	250	0,8
250	1850	310	0,80643
300	2150	375	0,8
350	2350	440	0,79545

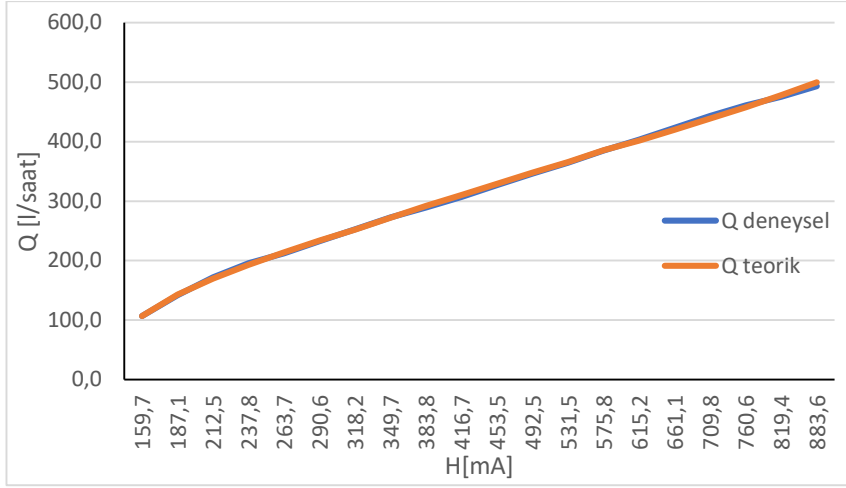
Tablodan da görüldüğü üzere statik basma kuvveti ile i_q arasında anlamlı lineer bir bağıntı söz konusudur.

Ardından aynı ilişki su akışının olduğu ortamda incelendi. Bunun için 1 metre yüksekliğe konulan bir hedef tanka çeşitli hızlarda su taşınmış ve ölçülen debi ve i_q değerleri kaydedilmiştir. Ardından her bir adım için k değerleri hesaplanmış ve gözlemlenmiştir. Hesaplanan k değerlerinde ciddi bir sapma olmadığı

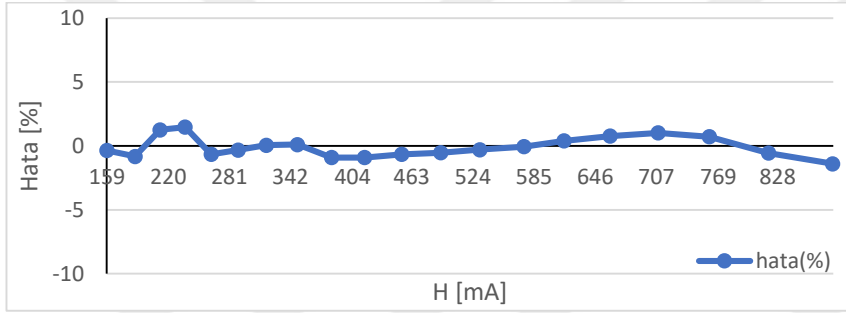
gözlenmiştir. Ardından hesaplanan k değerlerinin ortalaması olan “0,003035147” değeri formülde yerine konarak teorik debi değerleri hesaplanmış ve çizelgeye eklenmiştir. Ardından ölçülen deneysel debi ile teorik olarak hesaplanan debi karşılaştırılarak hata oranı hesaplanmıştır. Bunun sonucunda aşağıdaki gibi bir tablo görülürken statik basma kuvvetini karşılayan i_q akımı 125 mA olarak ölçülmüştür.

Çizelge 4.2 $Q > 0$ iken H- i_q ilişkisi

Ref Hız	Q [l/saat]	i_q (mA)	$k = \frac{H - H_{st}}{Q^2}$	$Q_{est} = \sqrt{\frac{H - H_{st}}{k}}$	Hata [%]
1100	106,6	159,7	0,00305707	106,9730563	-0,3605
1200	141,9	187,1	0,003085066	143,0491573	-0,819
1300	172,0	212,5	0,002959365	169,8138919	1,256296
1400	195,7	237,8	0,002946482	192,8188825	1,471456
1500	212,4	263,7	0,003075577	213,786819	-0,66383
1600	232,9	290,6	0,003054571	233,6172652	-0,31947
1700	252,5	318,2	0,003031481	252,3277718	0,060412
1800	272,4	349,7	0,003028925	272,1187312	0,102559
1900	289,4	383,7	0,003090459	291,988335	-0,90707
2000	307,2	416,7	0,00309066	310,0130568	-0,91035
2100	326,8	453,4	0,003074938	328,971433	-0,65337
2200	346,1	492,5	0,003067949	347,9748409	-0,53892
2300	364,9	531,4	0,003053258	365,9555025	-0,29792
2400	385,2	575,8	0,003038852	385,4006074	-0,06101
2500	403,5	615,1	0,003011274	401,8776991	0,394059
2600	423,5	661,0	0,002988881	420,2629724	0,765101
2700	443,5	709,8	0,002973679	438,9634974	1,017776
2800	460,9	760,6	0,002991779	457,6264274	0,716999
2900	475,6	819,4	0,00306945	478,3169842	-0,56352
3000	493,0	883,6	0,003120957	499,9455822	-1,40376



Şekil 4.6 Deneysel ve teorik debilerle Q-H eğrisi



Şekil 4.7 Deneysel ve teorik debiler arasındaki hata

Deneysel çalışma sonunda, Çizelge 4.1, Çizelge 4.2, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'da görüldüğü üzere, i_q ile basma yüksekliği arasında anlamlı lineer bir ilişki olduğu gözlenmiştir. Bu durumda, kontrol algoritması boyunca basma yüksekliği kavramı yerine i_q akımının rahatlıkla kullanılacağı görülmüştür.

Motorun sisteme uyguladığı anlık güç ise motor faz akımları ve uygulanan faz gerilimleri ile bulunur.

$$P_e = i_a \cdot v_a + i_b \cdot v_b + i_c \cdot v_c \quad (4.1)$$

Motora ait nominal hız, nominal debi ve nominal güç değerleri verilmediği için benzetim eşitliklerini kullanmak mümkün olmamaktadır. Bu nedenle debi miktarı debi ölçer ile ölçülmelidir. Her çalışma noktasında, basma yüksekliklerine karşın debi miktarları, çalışma modunda kullanılmak üzere kayıtlanacak ve çalışma modunda debi ölçer ihtiyacı kalmayacaktır.

Bu çalışmada YF-S201C tip bir debi ölçer kullanılmıştır. Debi ölçer kullanılırken dönüşüm katsayısının lineer olmadığı tespit edilmiş ve aşağıdaki yöntem debi ölçer kalibre edilmiştir:

- Öncelikle çeşitli debi değerlerinde üçer tekrarlı olmak üzere 5lt'lik şişeyi doldurma süresi kaydedilmiş ve aşağıdaki tablo elde edilmiştir:

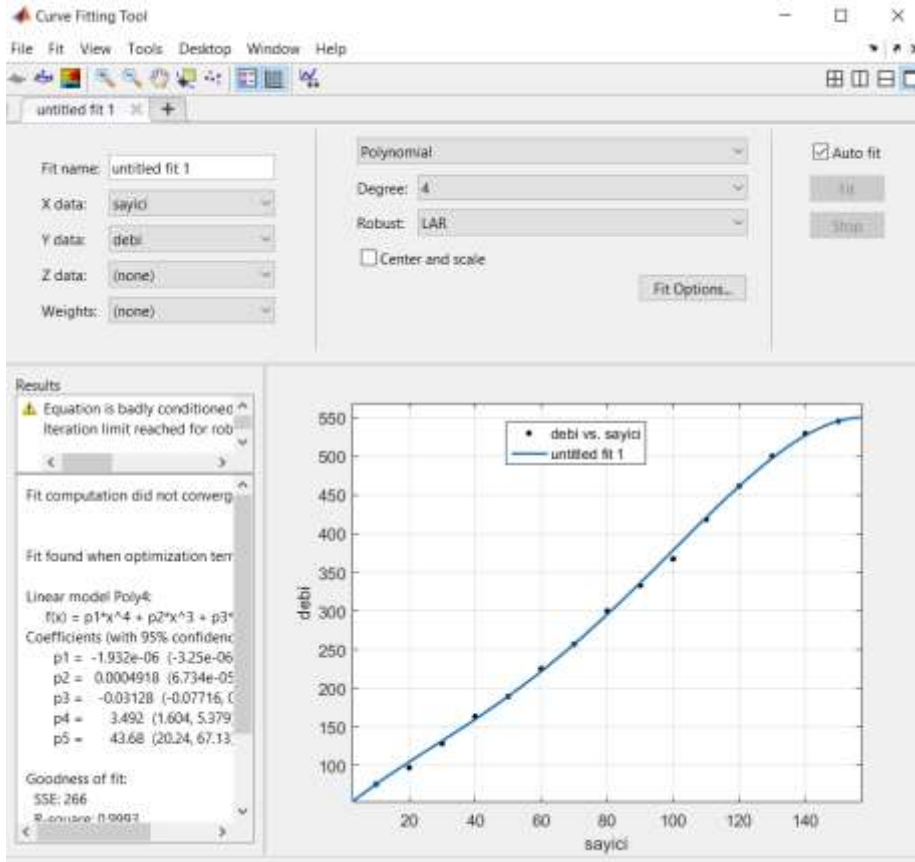
Çizelge 4.3 Okunan debiölçer sinyaline karşılık sayısal debi değerleri

5 litre için

Sayıcı	zaman [sn]	Sayıcı /sn	l/sn	l/saat
10	237	0,042	0,021	75,949
20	185	0,108	0,027	97,297
30	140	0,214	0,036	128,571
40	110	0,364	0,045	163,636
50	95	0,526	0,053	189,474
60	80	0,750	0,063	225,000
70	70	1,000	0,071	257,143
80	60	1,333	0,083	300,000
90	54	1,667	0,093	333,333
100	49	2,041	0,102	367,347
110	43	2,558	0,116	418,605
120	39	3,077	0,128	461,538
130	36	3,611	0,139	500,000
140	34	4,118	0,147	529,412
150	33	4,545	0,152	545,455

Ardından sayıcı değerine karşılık gelen “l/saat” birimle debi bilgisi MATLAB’in Curve Fitting Tool’u yardımıyla (Şekil 4.8) 4. dereceden bir polinom haline getirildi. Bu şekilde hem tespit edilmeyenler değerler arasındaki interpolasyon problemi aşılmış hem de yazılımda oldukça büyük bir yer kaplayabilecek olan tablo yerine bir dönüşüm formülü elde edilmiş olunur. Dönüşüm fonksiyonu (4.2) ile verilmiştir:

$$Q = -0,0000019 \cdot 32.t^4 + 0,0004918.t^3 - 0,03128.t^2 + 3,492.t + 43,68 \quad (4.2)$$



Şekil 4.8 MATLAB Curve Fitting Tool ile debiölçer kalibrasyon tablosunu polinomlaştırma

Bu şekilde motor kontrol algoritmaları yardımıyla hız, güç ve basma yüksekliği bilgileri elde edilmiş, debi ölçer yardımıyla da debi bilgisi alınmış olur. Kalibrasyon algoritması şöyle çalışır:

- Pompa hızı olarak tanımlanan en yüksek hız seçilir ve motorun bu hızı ulaşması beklenir. Bu sayede sistemdeki hava boşluğu ve benzer bozucu etkiye yüksek basınçla dışarı atılır.

- Pompa hızı ölçülür ve istenilen hıza ulaşıp ulaşılmadığı kontrol edilir. Pompa istenilen hıza ulaşmadıysa sistemin müsaade edeceği en yüksek çalışma hızına kadar belirlenen bir hız adımı mertebesinde referans hız düşürülür.

- Pompa referans hıza oturduktan sonra 30 saniye boyunca anlık hız, güç, i_q , debi örnekleri alınır. Erişilen ilk büyük hızdaki i_q , maksimum basınç işareti olarak kaydedilir.

- 30 saniyenin sonunda alınan örneklerin ortalaması alınarak ortalama hız, güç, i_q ve debi değerleri bulunur.

- Bulunan i_q , debi ve güç ortalamalarından o kalibrasyon adımı için en verimli çalışma noktası ve motor verimi testleri yapılır.

- Debi değeri kontrol edilir. Eğer debi belirlenen minimum seviyenin altında ise o adımdaki i_q minimum basınç noktası olarak işaretlenir, referans hızı olarak 0 verilir, kalibrasyon değerleri kaydedilir ve kalibrasyon işlemi tamamlanır. Eğer debi değeri minimum seviyenin üstündeyse referans hızı belirlenen kalibrasyon hız adımı kadar azaltılır ve bir sonraki hız seviyesi için örnekleme adımına geri dönülür.

4.2.3 Çalışma Modları

Kalibre edilmiş kontrol uygulaması seçilen belli amaçlı modlarda kullanılacaktır. Bu modların bazıları aşağıda verilmiştir.

- **Kalibrasyon Modu:**

Bu mod seçildiğinde uygulama çalışma modundan kalibrasyon moduna geçer ve bölüm 4.2.2’de anlatılan kalibrasyon algoritması çalıştırılır.

- **Minimum/Maksimum Basınç Modu:**

Bu modda öncelikli olarak motor orta üstü bir başlangıç hızına ulaştırılır ve sistemin hava boşluklarını atması sağlanır. Ardından kalibrasyon esnasında kaydedilen, akım cinsinden minimum/maksimum basma yüksekliği için gerekli olan hız referansı bir PID kontrol algoritması ile tespit edilir ve makine ilgili hızda çalıştırılır.

- **Manual Basınç Modu**

Bu mod seçildiğinde kullanıcı tarafından seçilen basma yüksekliği için gerekli olan hız referansı bir PID kontrol algoritması ile tespit edilir ve makine ilgili hızda çalıştırılır.

- **Manual Devir Modu**

Bu modda makine direk olarak kullanıcının seçtiği bir devir hızında çalıştırılır.

- En Verimli Sistem Çalışma Noktası Modu

Bu modda kontrol sistemi, kalibrasyon zamanında tespit edilen en verimli sistem çalışma noktasına ait basma yüksekliğine kitlenerek çalışır.

Sistemin en verimli çalışma noktasını teorik olarak bulmak için pompanın (3.8), (3.9) ve (3.10)'da verilen benzetim denklemleri kullanılabilir.

$$Q = \left(\frac{n}{n_n} \right) Q_n \quad (4.3)$$

$$H = \left(\frac{n}{n_n} \right)^2 H_n \quad (4.4)$$

$$P = \left(\frac{n}{n_n} \right)^3 P_n \quad (4.5)$$

Bir su taşıma sisteminde, 1 litrelik suyu besleme tankından hedef tanka taşımak için gerekli enerji aşağıda verilmiştir:

$$\frac{1[lt]}{Q \left[\frac{lt}{sa} \right]} \cdot P[W] = E[wsa] = \frac{P}{Q} \quad 4.6$$

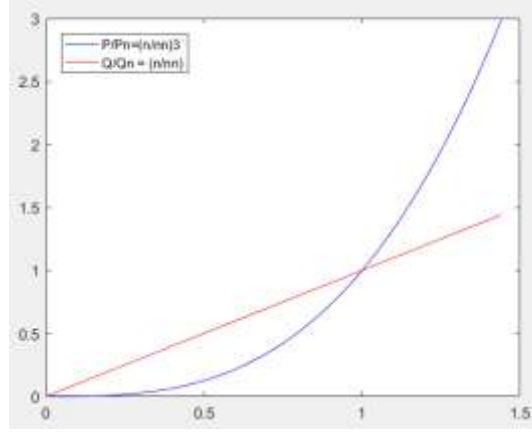
ile orantılı olduğu rahatlıkla söylenebilir. Burada P/Q teriminin en küçük olduğu nokta sistemin veriminin en yüksek olacağı çalışma noktası olacaktır.

“(P/P_n, Q/Q_n)-n/n_n” grafiği incelenirse Şekil 4.9'daki grafik elde edilecektir.

Burada P ve Q grafikleri aslındaki farkı aşağıdaki fonksiyonla ifade edebiliriz. Farkın maksimum olduğu nokta ise fark fonksiyonunun türevinin sıfır olduğu nokta olacaktır.

$$D(x) = x^3 - x \quad (4.7)$$

$$\frac{D(x)}{dx} = \frac{x^3 - x}{dx} = 3x^2 - 1 = 0 \Rightarrow x = \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (4.8)$$



Şekil 4.9 (P/P_n, Q/Q_n)-n/n_n grafiği

Görüleceği üzere n/n_n in $\frac{1}{\sqrt{3}}$ e eşit olduğu noktada verim maksimum olacaktır.

Projede kullanılan motorda nominal değerler bilinmediği için kalibrasyon esnasında her bir adım “P/Q” işlemine tabi tutulur ve değer minimum olduğu nokta sistemin en verimli noktası olarak seçilir.

- Pompanın Maksimum Verim Noktasında Çalışma Modu

Pompa verimi Eşitlik (3.12)’de aşağıdaki gibi verilmişti.

$$\eta_0 = \frac{P_H}{P} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{P} \quad (4.9)$$

Burada ρ ve g olası çalışma zamanları için sabit değerlerdir. Bu durumda geriye kalan Q , H ve P değerleri olacaktır ki yine her bir kalibrasyon adımında eşitlik uygulanarak motorun veriminin en yüksek olduğu nokta saptanır.

4.2.4 Hata Modları

Pompa sisteminde oluşacak bazı hatalar durumunda hata kontrol sistemi tarafından algılanarak hata modu işlemleri uygulanır ve motor durdurulur. Ardından kullanıcıya gerekli uyarı ve hata gösterimi işlemleri uygulanır. Sistem için tanımlanan bazı hata modları aşağıdaki gibidir:

- Sistem Katsayısı Değişimi:

Motor normal çalışma modundayken kalibrasyon modunda tespit edilen dönme hızı- basma kuvveti ve güç-basma kuvveti eğrilerini sürekli kontrol eder. Herhangi bir limit dışı değişiklik durumunda hata moduna geçilerek kullanıcı uyarılır.

- **Akış Durdu:**

Debinin 0 olması durumunda hız artsa dahi basma yüksekliği hıza ait statik basma yüksekliği değerini hiç geçmeyecektir. Bu durumda bir sebeple sıvı akışının durduğu bilgisi kullanıcıya verilerek hata moduna geçilir.

- **Kitli Rotor:**

Motorun rotorunun kitlenmesi durumunun kontrolü için rotor akımları düzenli olarak integrali alınarak kontrol edilir. Herhangi bir sıkıntı durumunda faz akımlarının integralinde sıfırlanma görülürse sistem hata moduna girer.

- **Faz Kopması**

Motor akımları anlık kontrol edilmekte ve herhangi bir fazda akımın kaybolması durumunda faz kopması hatası verilmektedir.

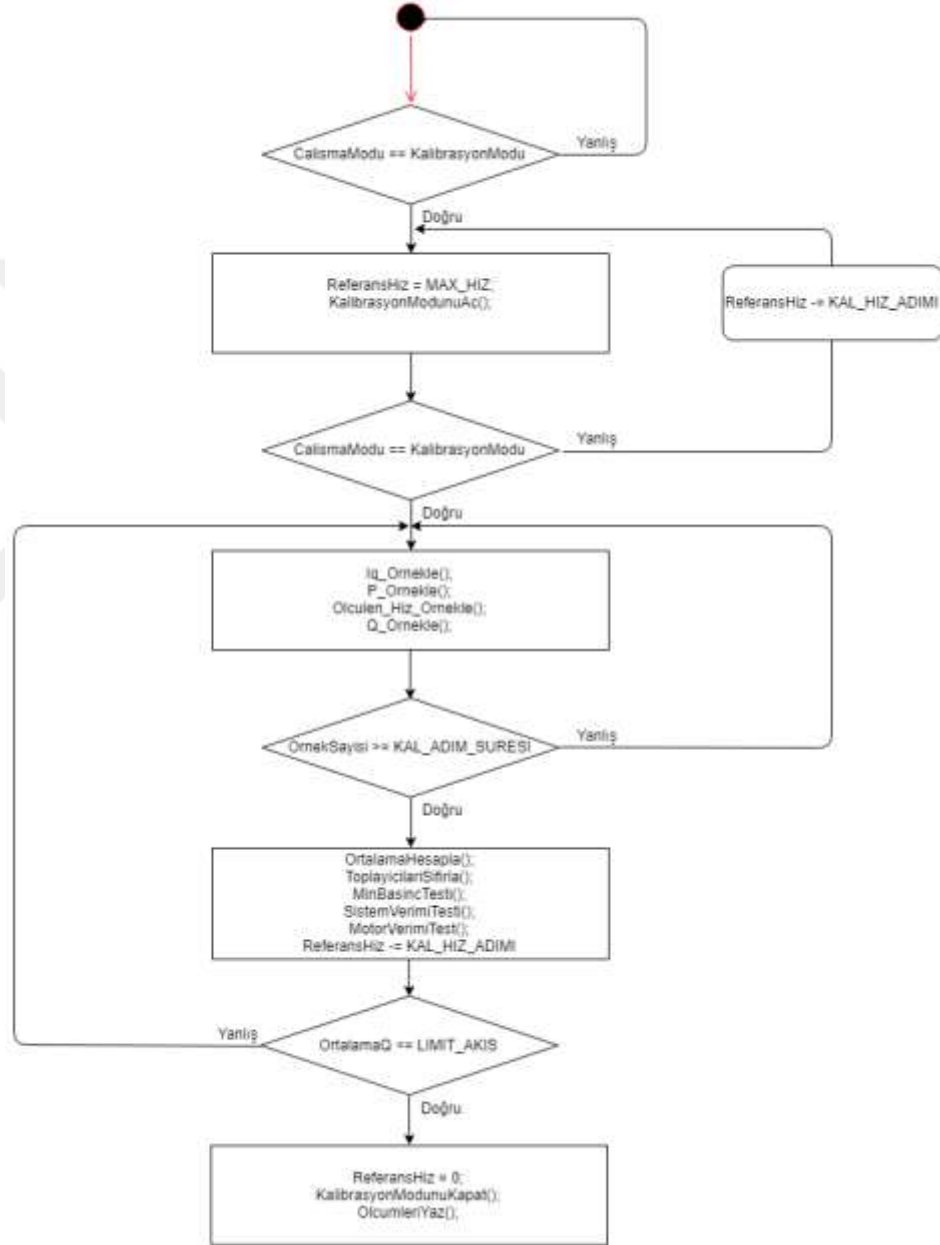
- **Sargıların Aşırı Isınma hatası**

Rotor sargılarının direnci belirli periyotlarda algoritma tarafından ölçülmektedir. Sargıların direnç değeri ise sargı sıcaklıklarıyla orantılı olarak değişmektedir. Sargı dirençlerindeki limit üstü değişikliklerde aşırı ısınma hatası verilmektedir.

5 ALGORİTMA

Bu bölümde bazı ana çalışma algoritmalarının algoritma şemaları verilmiştir.

5.1 Kalibrasyon Algoritması

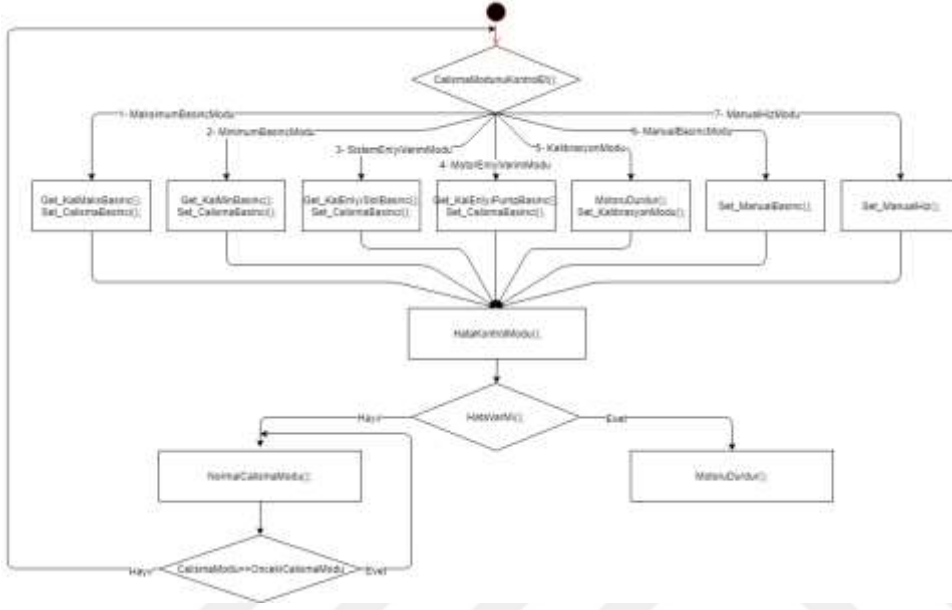


Şekil 5.1 Kalibrasyon Algoritması

Kalibrasyon modunda, bölüm 4.2.3'de bahsedildiği gibi devir hızı maksimuma hıza sabitlenerek oturması beklenir. Hız verilen hıza oturamazsa bir alt seviyeye düşürülür. Hız oturduktan sonra belirlene kalibrasyon adım süresi

boyunca kontrol parametreleri örneklenir. Adım süresi dolduğundan örneklenen verilerin ortalaması alınır ve debi kontrol edilir. Debi minimum seviyenin altına düştüğünde kalibrasyon algoritması sonlandırılır.

5.2 Normal çalışma Modu



Şekil 5.2 Normal Çalışma Modu Algoritması

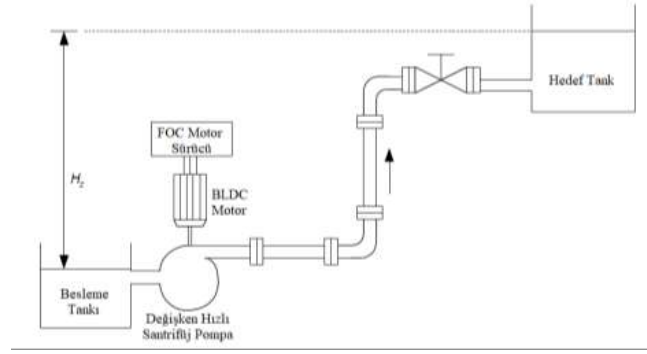
Normal çalışma modunda her adımda çalışma modu kontrol edilir. Eğer çalışma modu önceki çalışma modundan farklı ise çalışma modu için hazırlanan başlangıç fonksiyonuna dallanılarak ilgili mod başlatılır. Çalışma modu setlendikten sonra hata kontrol modları da çalışmaya başlar.

6 DENEYSEL SONUÇLAR

6.1 Test Düzenegi

Oluşturulan açık pompa sisteminin şeması ve fotoğrafı Şekil 6.1 ve Şekil 6.2 ile verilmiştir. Buna göre sistem kaynak tankından 2'' boru ile emilen su, maksimum 8m basma yüksekliği ve 8000 l/saat maksimum debisi olan fırçasız doğru akım motoruyla tahrik edilen santrifüj pompa tarafından basınçlandırılır. Makinenin çıkış debisi çalışma ortamımız için oldukça yüksek olacağı için çıkışa 2''- 0,5'' dönüştürücü takılarak çıkış debisi küçültülmüştür. Dönüştürücünün ardına, kalibrasyon ve test maksadıyla bir debi ölçer takılmış, debi ölçerin çıkışı ise

yüksekliği ayarlanabilir bir biçimde 0,5'' çaplı bir borunun ucuna koyulmuş bir vana ile sonlandırılmıştır.



Şekil 6.1 Sistemin temsili şeması



Şekil 6.2 Test düzeneğinin fotoğrafı

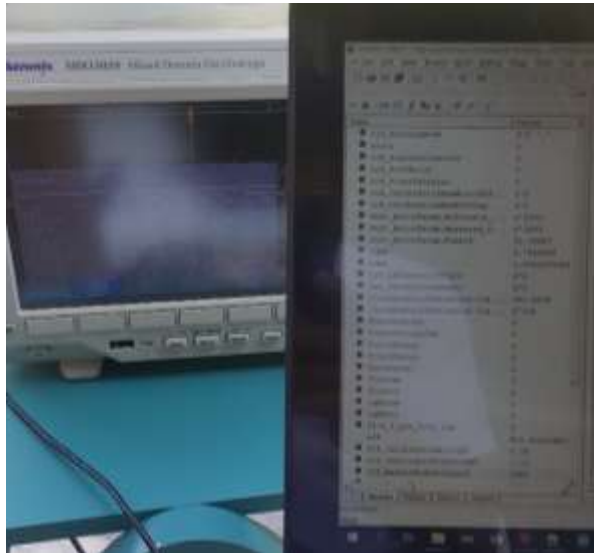
Pompa, Shinhoo markasının GPA32-8 IV model pompadır. Pompa çıkışına YF-S201C tip debi ölçer takılmıştır. Bu ikilinin fotoğrafı Şekil 6.3 ile verilmiştir.



Şekil 6.3 GPA32-8 IV model pompa ile YF_S201C tip debiölçer

Testler yapılırken faz akımları, bus voltajı, IGBT anahtarlamaları ve güç analizlerini görüntülemek için Textronik mdo3024 model bir osiloskop kullanılmıştır. Testlerde ölçülen güç değerlerinin doğrulaması için de yine aynı osiloskopun güç analizi modu kullanılmıştır.

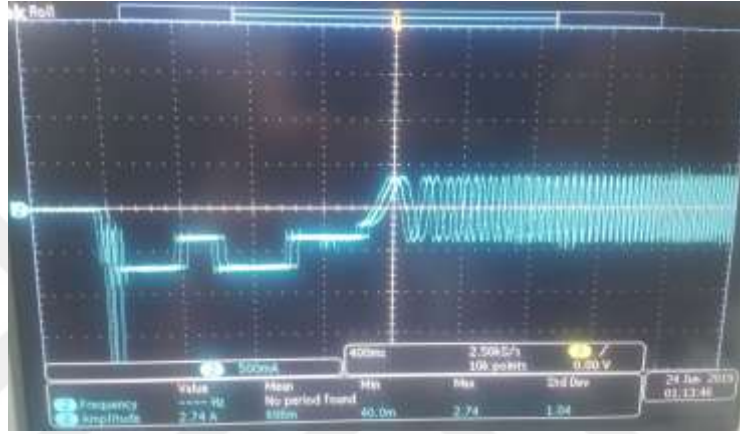
Testler kontrol kartında kullanılan Renesas firmasının Rx63 serisi işlemcisi için kullanılan IDE olan HEW (High Embedded Studio) Programı aracılığı ile Renesas firmasının E1 Model debuggerı kullanılarak ilgili IDE'nin debug ortamında bilgisayar ile yapılmıştır. Debug ekranı ve osiloskopun fotoğrafı Şekil 6.4'de verilmiştir.



Şekil 6.4 Textronik mdo3024 model osiloskop ve HEW IDE, debug ekranı

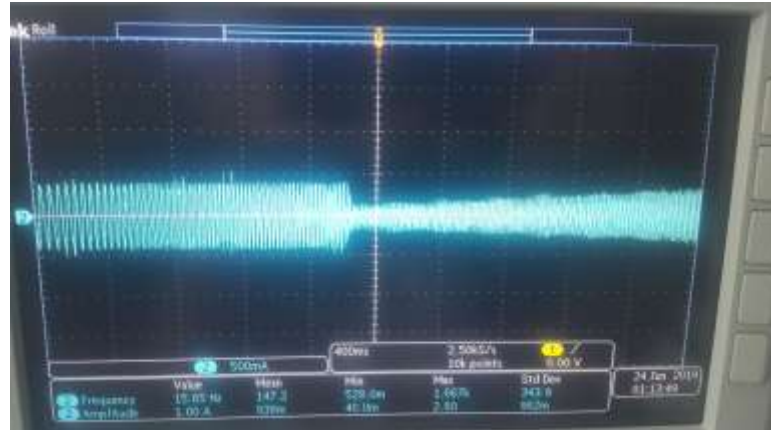
6.2 Test Sonuçları

- Motor kontrol çıktıları: Aşağıda motor kontrolüne ilişkin bazı çıktılar verilmiştir. Bunlardan ilki kalkışta faz akımlarıdır. Şekil 6.5 ile B fazından alınan akım bilgisi verilmiştir. Buna göre motora öncelikle sargı dirençlerinin ölçülmesi algoritması ile ilgili olarak 2 adım halinde bir DC gerilim uygulanır ve sargı dirençleri hesaplanır. Ardından belirlenmiş süre boyunca motor yine açık devre çalışma için belirlenmiş bir tork ile sürülür. Bu sırada frekans artırılarak motor kapalı çevrim başlangıç hızına kadar hızlandırılır.



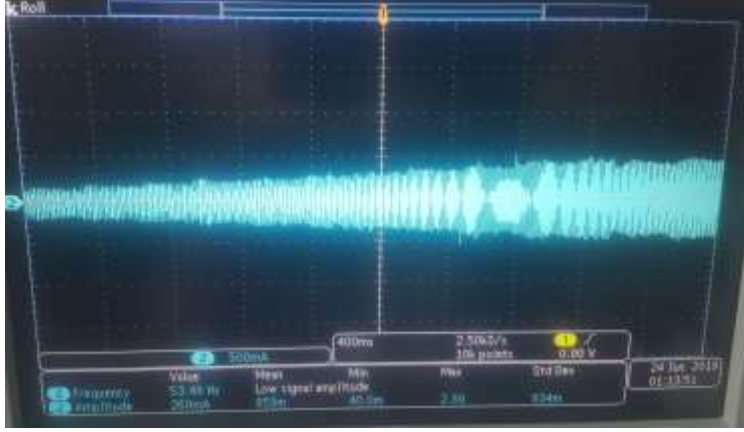
Şekil 6.5 Kalkışta B fazının akımı

Ardından Şekil 6.6'da görüldüğü gibi kapalı çevrim çalışmaya geçilir. Burada akım genliğinin düşüşü açıkça görülmektedir.



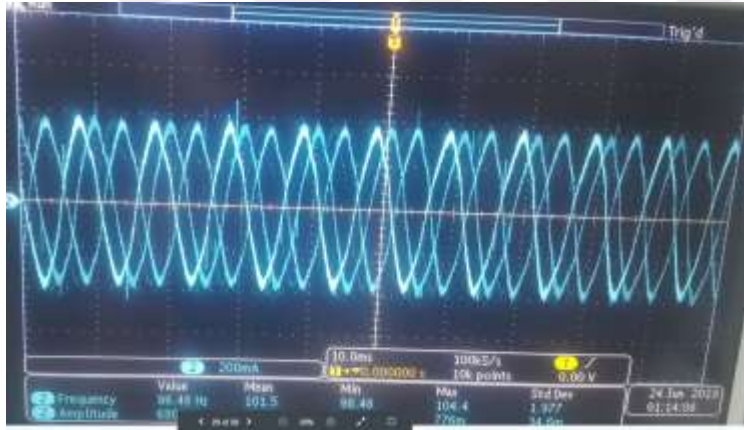
Şekil 6.6 Açık çevrim-kapalı çevrim geçişi

Ardından motor hızlanırken devir hızı artarken faz akımının değişimi Şekil 6.7 ile verilmiştir. Buna göre hız arttıkça sistemin tork ihtiyacı artacağından dolayı akım sinyalinin hem genliği hem frekansı artmaktadır.



Şekil 6.7 Motor hızlanırken faz akımı

Motor istenilen hıza oturduktan sonra faz akımının dalga şekli Şekil 6.8 ile verilmiştir. Burada frekansın ortalama 100 Hz olduğu anda motor hızı 2000 rpm'dir. Burada 100Hz, dakikada 6000 elektriksel devire işaret etmektedir. Motor 3 kutuplu olduğu için bu dakikada 2000 mekanik devire eşittir.

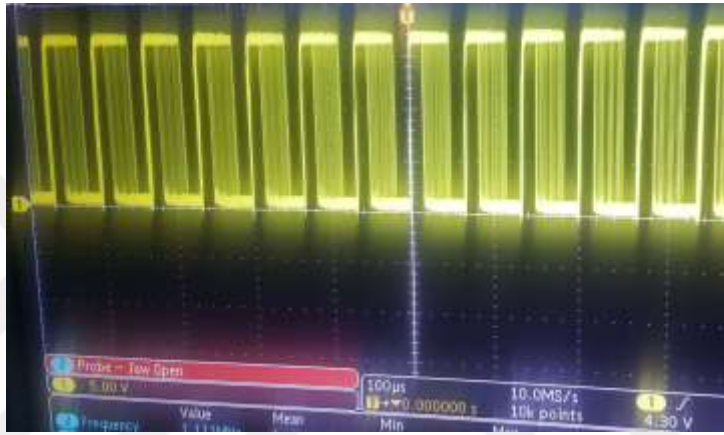


Şekil 6.8 2000 rpm için faz akımı

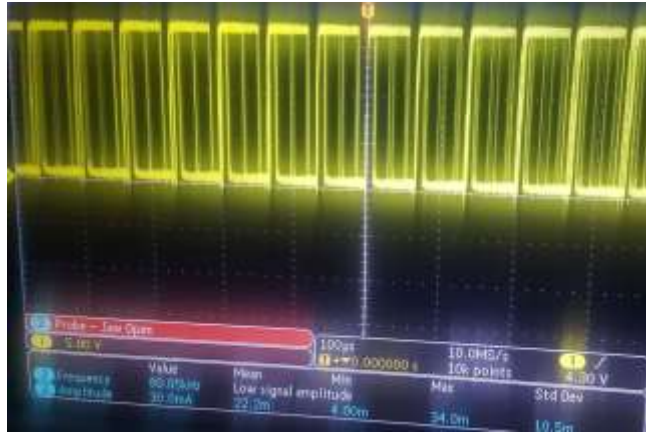
2000, 2500 ve 3000 rpm'deki C fazındaki anahtarlamalar Şekil 6.9, Şekil 6.10 ve Şekil 6.11 gösterilmektedir. Yine akım şekline paralel olarak burada da sistemin karakteristiği gereği doluluk artmaktadır.



Şekil 6.9 2000rpm için anahtarlamalar



Şekil 6.10 2500rpm için anahtarlamalar

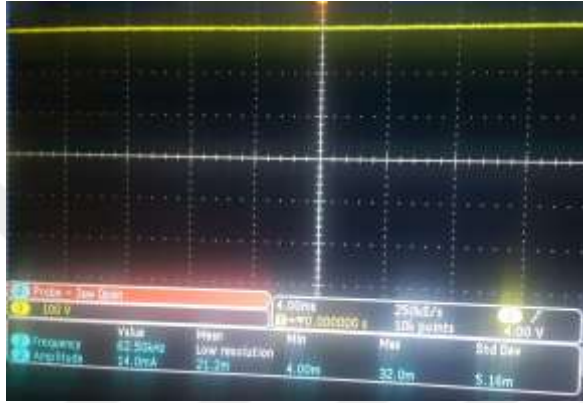


Şekil 6.11 3000rpm için anahtarlamalar

Ardından bu voltajları incelenmiştir. Yüksek torklarda bus voltajlarındaki dalgalanma Şekil 6.12 ile verilmiştir. Buna göre yüksek torklarda kabul edilebilir oranlarda bir değişim vardır. Düşük torklar için ise değişim Şekil 6.13’de görüldüğü üzere neredeyse hiç dalgalanma yoktur.

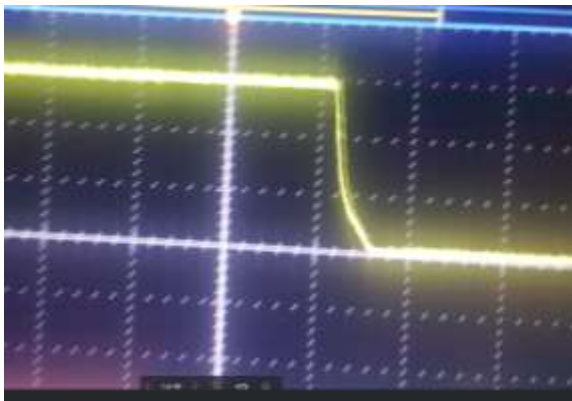


Şekil 6.12 Yüksek toklarda bus voltajı dalgalanması



Şekil 6.13 Düşük toklarda bus voltajı dalgalanması

Ayrıca motorun aniden durduğu anlarda yükün ataletinin olduğu durumlarda bus voltajının yükselmesi özellikle alan zayıflatma yapılan uygulamalarda önemli bir sorun arz etmektedir. Bizim uygulamamızda hem alan zayıflatma uygulanmaması hem de yük ataletinin düşük olması sebebiyle bu durumda sıkıntı oluşturmamaktadır.



Şekil 6.14 Ani duruşlarda bus voltajı değişimi

Motor kontrolü ile ilgili kontrollerden sonra uygulamaya ilişkin testlere geçilmiştir.

- Test1: 1. test için çıkış borusu 1 metreye kadar yükseltilmiş ve ucundaki vana 3 tur döndürülmüştür. Kaynak tankı ve hedef noktasına ait fotoğraflar Şekil 6.15 ve Şekil 6.16 ile verilmiştir.



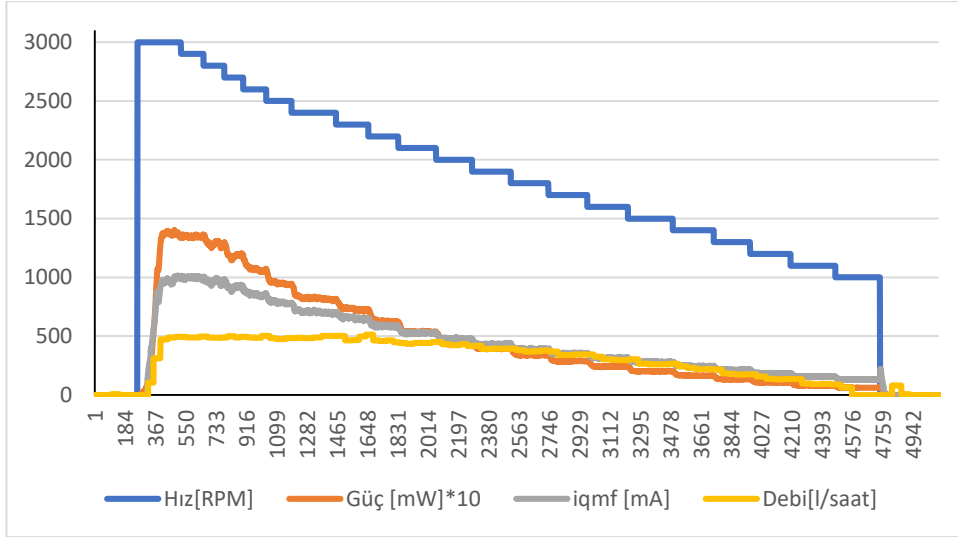
Şekil 6.15 1. Test için kaynak tankı



Şekil 6.16 1. Test için hedef çıkış noktası

Senaryoya göre, öncelikle sistem kalibrasyon modunda çalıştırıldı ve sistem eğrisi öğretildi. Ardından sistem sırasıyla minimum basınç, maksimum basınç, sistem en iyi verim noktası ve motor en iyi verim noktasında çalıştırıldı ve sonuçlar gözlemlendi. Son olarak çıkış hattının sonunda bulunan valfin açısı değiştirilerek sistem katsayısının değişimine sistemin tepkisi gözlemlendi.

Testin ilk adımı olan kalibrasyon modundayken, kontrol algoritmasında okunan bazı değerlerin örnekleme zamanına göre grafikleri verilmiştir.



Şekil 6.17 Kalibrasyon süresince parametrelerin değerleri

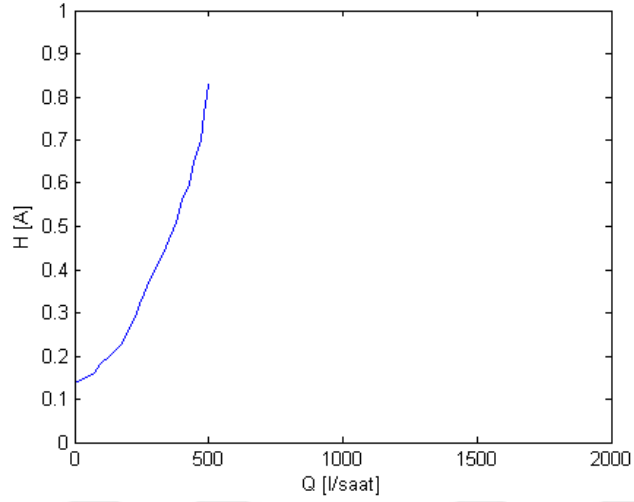
Her bir kalibrasyon adımında alınan referans hız, debi, filtrelenmiş i_q akımı (dolayısıyla A cinsinden basma yüksekliği değeri), güç, Eşitlik (3.12) ifadesinde verilen değişken değerler kullanılarak hesaplanmış bir motor verim değeri ve yine bölüm 4.2.3'de verilen enerji ifadesinin sonucu Çizelge 6.1 ile verilmiştir.

Çizelge 6.1 Testteki sistem için kalibrasyon sonuçları

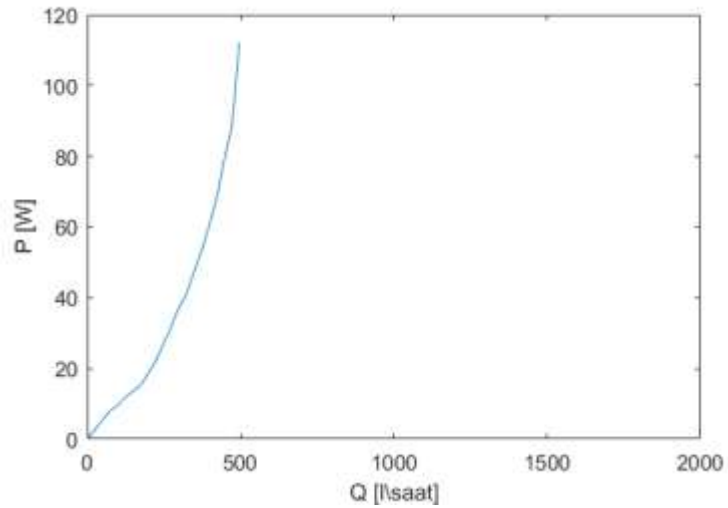
Hız [RPM]	Debi [l/saat]	H [A]	P [W]	Motor Verimi	1 lt için E [Wh]
2800	496,059	0,830	112,254	3,668	0,226
2700	483,154	0,757	98,783	3,704	0,204
2600	471,076	0,701	88,019	3,752	0,187
2500	445,385	0,650	78,462	3,690	0,176
2400	427,285	0,604	69,979	3,690	0,164
2300	402,580	0,557	61,772	3,631	0,153
2200	377,448	0,514	54,393	3,564	0,144
2100	350,794	0,474	47,869	3,473	0,136
2000	326,113	0,431	41,442	3,395	0,127
1900	291,767	0,393	35,822	3,202	0,123
1800	269,002	0,355	30,636	3,120	0,114
1700	244,307	0,321	26,110	3,005	0,107
1600	224,069	0,289	22,097	2,934	0,099
1500	198,263	0,259	18,530	2,772	0,093

1400	174,887	0,230	15,304	2,624	0,088
1300	129,453	0,196	12,191	2,080	0,094
1200	95,833	0,176	9,275	1,823	0,097
1100	75,033	0,155	8,046	1,450	0,107

Çizelge 6.1’de verilen bilgilere göre sistemin H-Q ve H-P grafikleri aşağıda verilmiştir.



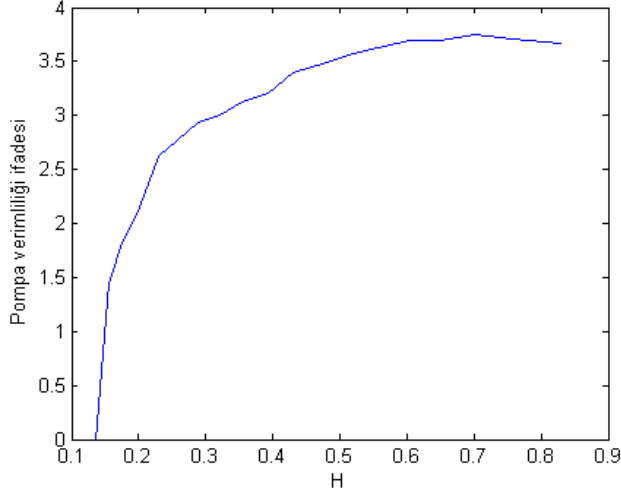
Şekil 6.18 Test 1’deki sistemin H-Q eğrisi



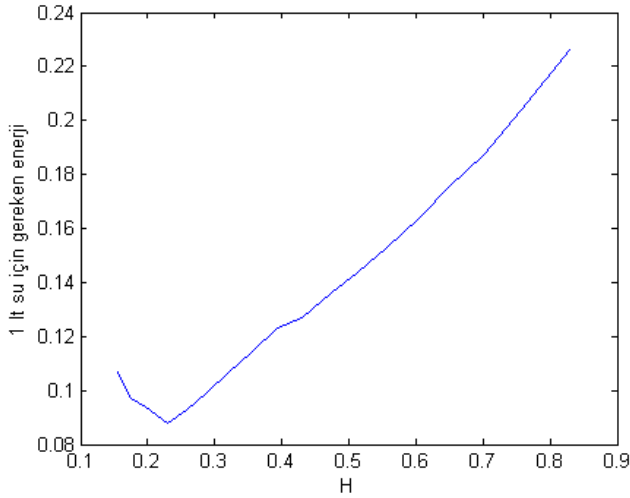
Şekil 6.19 Test1’deki sistemin P-Q eğrisi

Ayrıca 1lt suyu taşımak için gereken enerji miktarı ve motor verimliliğın değişimi Şekil 6.20ve Şekil 6.21ile verilmiştir. Buradan görüldüğü gibi motorun en verimli olduğı nokta basma yüksekliğinin 701 mA, sistem verimliliğının en yüksek

olduğu noktası ise 230mA olduğu bölgedir. Ayrıca buradan sistem verimliliğinin düşük debi bölgelerinde, motor verimliliğinin ise yüksek debi bölgelerinde fazlaştığını görüyoruz.



Şekil 6.20 H- Pompanın verimlilik ifadesi

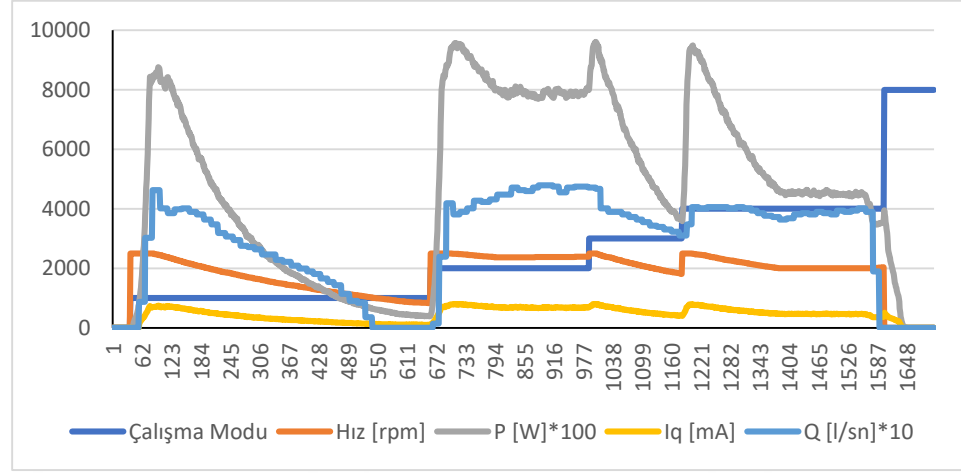


Şekil 6.21 H-1lt su için harcanan enerji

Ardından sistemin çalışma modları test edilmiştir. Testin sonunda ise çıkış hattının sonunda bulunan valfin konumu değiştirilmiş ve hata algılaması test edilmiştir. Çalışma modlarında sistemin davranışına ilişkin çıktı Şekil 6.22 ile verilmiştir.

Şekil 6.22’de, 1000 ile gösterilen çalışma modu “minimum basınç modu”, 2000 “Maksimum basınç modu”, 3000 “sistemin en verimli noktası”, 4000

“Motorun en verimli noktası” ve 8000 “Hata modu” olarak tanımlıdır. Görüldüğü üzere valfin kısıldığı noktada motor hata moduna geçmiştir.



Şekil 6.22 Test 1 için çalışma modlarında parametrelerin değişimi

Sistemin değişik çalışma modlarındaki çalışması Şekil 6.22'ten takip edilebilir.

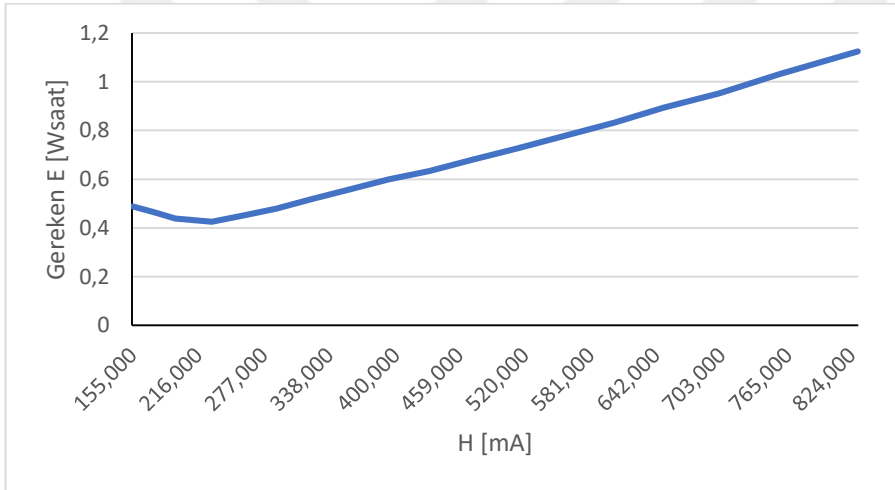
- Test2: Test1'deki düzenek ve kalibrasyonlar korunmuş ve 5lt bir şişenin çeşitli basma yüksekliklerinde dolma süresi incelenmiştir. Çizelgede çeşitli basma yüksekliklerindeki doldurma süresi, ortalama güç değeri ve harcan toplam enerji verilmiştir.

Çizelge 6.2 Doldurma süresi testi sonuçları

Hız [rpm]	H [A]	P [W]	Süre	E [Wsn]	E[Wsaat]
1085	0,155	8,046	218,7524	1760,003	0,48889
1170	0,176	9,275	180	1669,442	0,463734
1275	0,196	12,191	129,4385	1578,028	0,438341
1370	0,230	15,304	99,93259	1529,352	0,42482
1485	0,259	18,530	87,68641	1624,824	0,45134
1575	0,289	22,097	78,12574	1726,338	0,479538
1690	0,321	26,110	71,3892	1863,95	0,517764
1785	0,355	30,636	65,23634	1998,56	0,555155
1880	0,393	35,822	60,20935	2156,799	0,599111
1985	0,431	41,442	55,03031	2280,541	0,633484

2090	0,474	47,869	51,31212	2456,246	0,68229
2190	0,514	54,393	48,11219	2616,979	0,726939
2285	0,557	61,772	45,33332	2800,322	0,777867
2390	0,604	69,979	42,84924	2998,561	0,832934
2495	0,650	78,462	41,00948	3217,7	0,893805
2585	0,701	88,019	38,94227	3427,675	0,952132
2690	0,757	98,783	37,55714	3710,025	1,030563
2795	0,830	112,254	36,05468	4047,283	1,124245

5 litrelik suyu kaynaktan hedefe taşımak için gerekli olan enerjinin basma yüksekliğine göre değişimi verilmiştir.

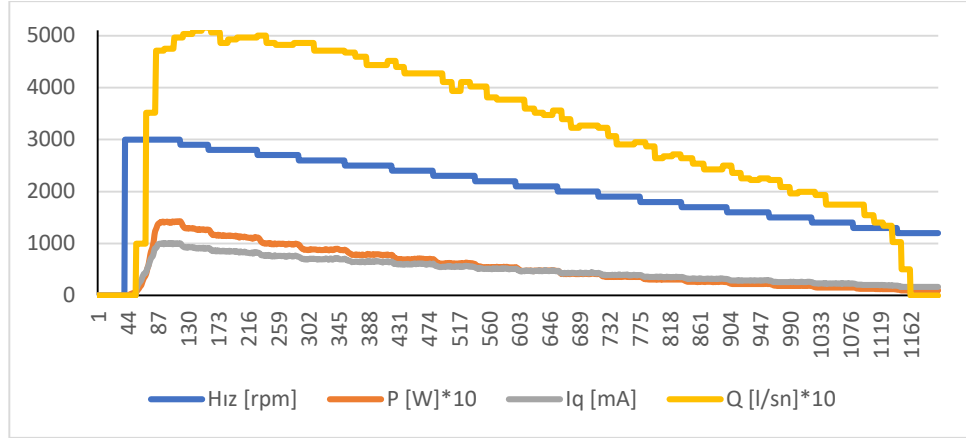


Şekil 6.23 5 lt suyu taşımak için gerekli enerjinin basma yüksekliğine göre değişimi

Test sonucunda düşük sapma oranlarıyla teorik olarak belirlediğimiz “en verimli sistem çalışma noktası” değerlerine ulaştığımız görülmektedir.

Test 3: 2. Test için çıkış sistemi yaklaşık 1,75 metre seviyesine yükseltilmiş, vana bir tur açma yönüne döndürülmüş, sistem yeniden kalibre edilmiştir. Bu testte amaç sistemdeki değişimin eğrilere etkisini gözlemlemektir.

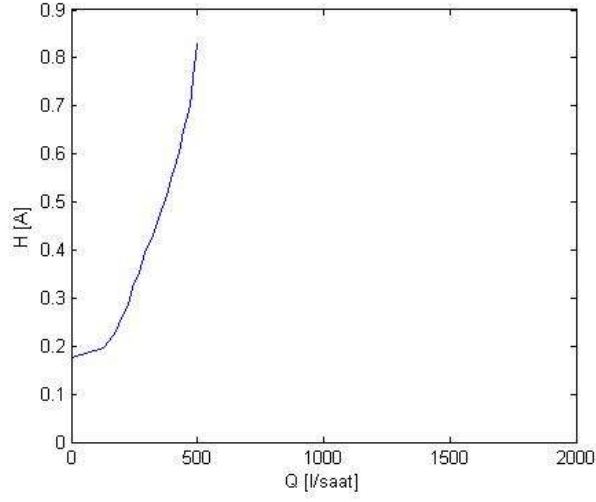
Test1’de olduğu gibi kalibrasyon aşamasında parametrelerin değişimi Şekil 6.24 ile, kalibrasyon sonuçları Çizelge 6.3 ile, sistem H-Q eğrisi eğrileri aşağıda verilmiştir.



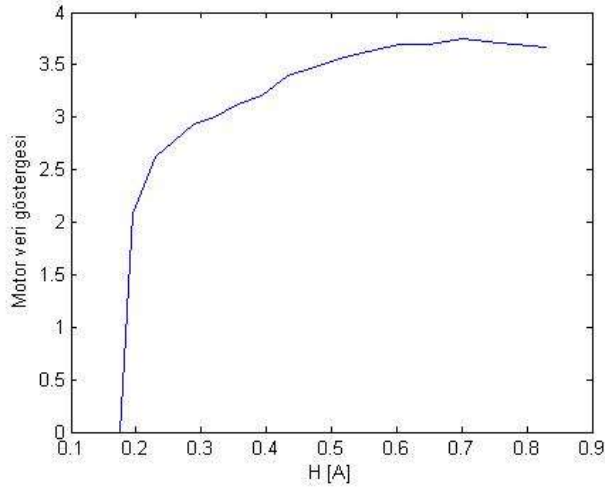
Şekil 6.24 Test 3 kalibrasyonu süresince parametrelerin değışimi

Çizelge 6.3 Test3 için kalibrasyon sonuçları

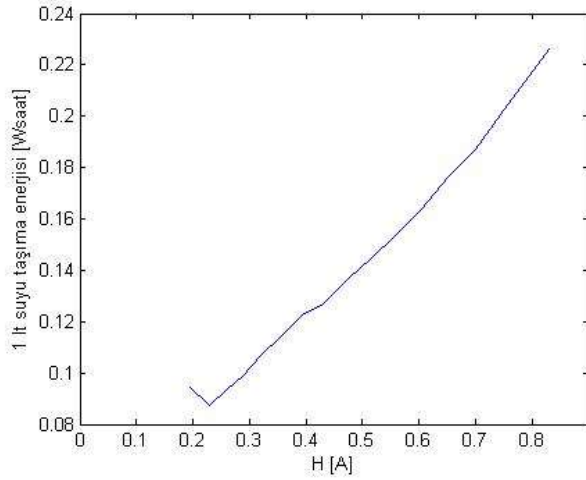
Hız[rpm]	Debi [l/saat]	H [A]	P [W]	Motor Verimi	1 lt için E [Wh]
2800	496,0586	0,830113	112,254	3,668331	0,2262918
2700	483,154	0,757308	98,78348	3,704023	0,2044555
2600	471,0757	0,701003	88,01941	3,751734	0,1868477
2500	445,3849	0,65	78,46233	3,68967	0,1761675
2400	427,2845	0,604398	69,97932	3,690373	0,1637769
2300	402,5796	0,557145	61,77182	3,63103	0,15344
2200	377,4482	0,513617	54,39326	3,564112	0,1441079
2100	350,7943	0,473859	47,86872	3,472558	0,1364581
2000	326,113	0,431382	41,44155	3,394644	0,1270773
1900	291,7674	0,39309	35,82167	3,20172	0,1227747
1800	269,0017	0,355287	30,63568	3,119657	0,1138866
1700	244,3069	0,321107	26,10969	3,004584	0,1068725
1600	224,0689	0,289315	22,09692	2,933735	0,0986166
1500	198,2631	0,259101	18,52994	2,772281	0,09346136
1400	174,8874	0,229607	15,30384	2,623876	0,08750685
1300	129,4532	0,195865	12,19134	2,079784	0,09417562
1200	0	0,175546	0	0	0



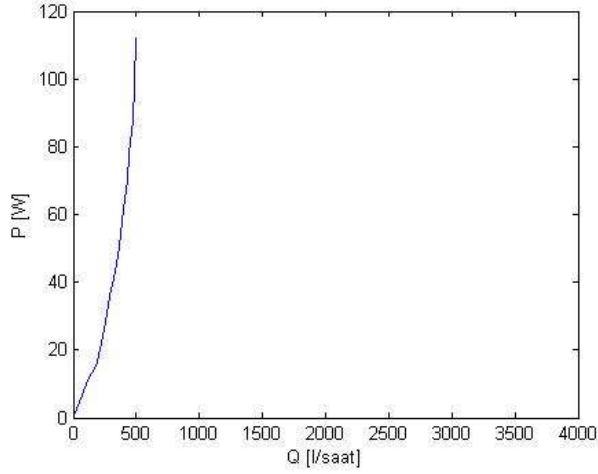
Şekil 6.25 Test 3 için sistemin H-Q eğrisi



Şekil 6.26 Test 3 için sistemin P-Q eğrisi



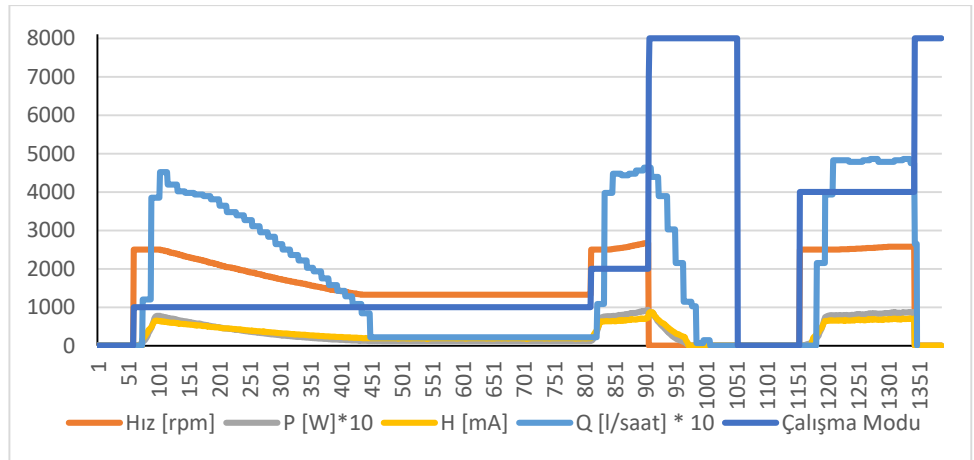
Şekil 6.27 Test 3 de 1 lt suyun taşınması için gereken enerji



Şekil 6.28 Test 3 için motor verimliliği göstergesinin değişimi

Eğrilerden de görüldüğü üzere sistemin H-Q ve H-P eğrileri biraz sağa yatmış, sistem verimlilik noktası ve motor verimlilik noktasında önemli bir değişiklik olmamıştır.

Test 3 için değişik çalışma modlarındaki parametre değişimleri aşağıda verilmiştir. Öncelikle grafikte 1000 ile ifade edilen minimum basınç çalışma sağlanmış, hız oturduktan sonra 2000 numaralı mod olan maksimum basınç modu seçilmiştir. Maksimum basınç modundayken çıkış vanası kapatılmıştır. Bunun sonucu olarak sistem 8000 ile gösterilen hata moduna geçmiş ve çalışma durdurulmuştur. Ardından vana eski haline getirilerek 4000 numaralı en iyi motor verimi modu seçilmiş ve bu noktada motora giden faz kablosu kesilmiştir. Burada motor hızı sıfırlanarak motor hata moduna geçmiştir.



Şekil 6.29 Test 3 için çalışma modlarında parametrelerin değişimi

7 SONUÇLAR

Çalışmada öncelikli olarak fırçasız doğru akım motorlu bir değişken hız santrifüj pompanın kontrolü alan yönlendirmeli kontrol metodu ile sensörsüz olarak sağlanmıştır. Pozisyon tahmin edici olarak ise akı bağlantısı hesabını kullanan bir model tabanlı tahmin edici hazırlanmıştır. Çalışma sonunda yapılan testlerde kontrol algoritmasının doğru bir şekilde çalıştırılabildiği gözlenmiştir.

Motor tipinin değişmesinin sistemin enerji tüketiminde önemli bir kazanç sağladığı aşikardır. Bununla birlikte motor tipinin yanında motorun kullanılacağı ortamın çalışma noktasının da gerek motor verimi gerek ise sistemin yapacağı iş üzerinde önemli bir etkisi vardır. Bu yüzden alan yönlendirmeli kontrolde elde edilen kontrol parametreleriyle sistemi öğrenebilmek ve çalışma noktasını ayarlayabilmek büyük önem arz etmektedir.

Pompa sistemlerinin çalışma noktasının tespiti için klasik yöntemlerde sensör kullanımı gerekir. Bununla birlikte bu algılayıcıların sistemin maliyeti ve esnekliği üzerine olumsuz etkileri oldukça fazladır. Bu yüzden son yıllarda pompa çalışma noktalarının sensörsüz tespiti üzerine olan çalışmalar yoğunluk kazanmıştır.

Özellikle asenkron motorlu sistemler üzerinde pek çok çalışma mevcutken fırçasız doğru akım motoruna ilişki böyle bir çalışma gözlenmemiştir. Fırçasız doğru akım motorun diğer motorlara göre avantajları göz önüne alındığından böyle bir çalışmanın önemi artmaktadır.

Çalışmada pompanın anlık çalışma noktası “sistem eğrisi tabanlı” tahmin yöntemi kullanılarak tespit edilmiştir. Sistemin tamamen sensörsüz çalışabilmesi için ise sistemin kurulum aşamasında bir debi ölçer ile kombine olarak çalışacak bir kalibrasyon algoritması önerilmiştir. Normal çalışma modunda ise herhangi bir sensör kullanılmayacaktır.

Pompa sisteminin çalışma noktasının öğrenilmesiyle birlikte bu bilgi kullanılarak pompanın kullanılacağı sistem tiplerine göre pek çok uygulanabilir. Bu çalışmada kullanıcıya özel 4 mod tanımlanmıştır. Bunlardan maksimum basınç ve minimum basınç modları daha çok kullanıcının anlık ihtiyaçları ile ilgilidir.

En iyi sistem basıncı modu ise özellikle açık pompa sistemlerindeki kullanımlara çok uygundur. Açık pompa sistemlerine en güzel örneklerden biri sulama sistemleridir. Bu modda pompanın çalışma noktası 1lt sıvının bir noktadan başka bir noktaya taşınabilecek minimum enerji ile taşınmasını sağlayacak noktaya getirilir. Bu noktanın hesabında ise yine sensörsüz olarak tespit edilen kontrol parametreleri kullanılır.

Bir diğer mod olan motor verimliliği modunda ise sistem çalışma noktasını motor verimliliğinin en yüksek olduğu noktaya taşır. Bu noktanın hesaplanmasında ise yine kontrol parametreleri kullanılır.

Ayrıca kontrol sistemi pek çok arıza tespit rutinini de sürekli olarak çalıştırmaktadır. Bu olası hatalar arasında rotor kitlenmesi, faz kesilmesi, su akışının kesilmesi, kalibre edilmiş sistem eğrisinin değişmesi, aşırı ısınma ve kontrol devresinde ya da mikroişlemcide meydana gelebilecek donanımsal problemler gibi durumlar bulunmaktadır. Sistemde meydana gelebilecek hataları önceden tespit etmek bakım ve onarım maliyetlerin oldukça büyük bir düşüş sağlayacaktır.

Yukarıda sayılan modlar kullanıcının pompa sistemini hem verimli hem de uzun ömürlü bir şekilde kullanmasını sağlayacaktır.

Çalışma sonunda motor kontrolünün, pompa çalışma noktasının tespitinin, kullanıcı modlarının ve hata tespit rutinlerinin testleri yapılmış ve tanımlamalara uygun olduğu gözlenmiştir.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca ve tez sürecinin her aşamasında katkı, yardım ve bilgileriyle beni yönlendiren danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Özkan AKIN'a çok teşekkür ederim.

Tez çalışmamda bana yardımcı olan, her aradığımda bütün sorularıma bıkmadan cevap vermeye çalışan sevgili dostum ve hocam Erman SELİM'e teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışma boyunca benden desteğini hiç esirgemeyen ve sürekli teşvik eden biricik eşim Filiz TAHİROĞLU TARHAN'a, tüm yaşamım boyunca her zaman yanımda olup bana destek olan annem Meziyet TARHAN'a sonsuz teşekkür ederim.

Son olarak, bugünümü borçlu olduğum babam Şaban TARHAN'ı rahmetle anıyor, bu çalışmamı ona adıyorum. Ruhu şad olsun.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- A.T. de Almeida, F.J.T.E. Ferreira, J.A.C. Fong and C.U. Brunner**, 2008, Electric Motor Standards, Ecodesign And Global Market Transformation, 2008 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, Vol. 30, No. 5, pp.1225-1233.
- M. Amiryar**, 2017, A Review of Flywheel Energy Storage System Technologies and Their Applications, Applied Science, Vol. 7, No: 286.
- Ü. Tarhan, O.S. Kirca and M. Alcı**, 2015, BLDC Çamaşır Makinesinin Dengesiz Yükünün Ağırlık Çarpanının Bulanık Mantıkla Kestirimi
- European Commission**, 2001, Study On Improving The Energy Efficiency Of Pumps
- Pump Handbook**, 2004, GRUNDFOS Management A/S.
- A. Nabae, K. Otsuka, H. Uchino and R. Kurosawa**, 1980, An Approach to Flux Control of Induction Motors Operated with Variable-Frequency Power Supply, IEEE Transactions On Industry Applications, Vol. Ia-16, No. 3,
- F. Blaschke**, “A new method for the structural decoupling of A.C. induction machines,” in Conf. Rec. IFAC, Duesseldorf, Germany, Oct. 1971, pp. 1–15.
- R. G. Harley M.R. Webster, G. Diana, D. C. Levy and M.R. Webster**, “A high performance, interactive, real time controller for field oriented controlled ac servo drives,” in Conf Rec. IEE IAS Conf Rec., ac Drives Ann. Mrg. (Seattle, WA), Oct. 1990.
- J. Simanek, J. Novak, O. Cerny, and R. Dolecek**, “Foc and flux weak-ening for traction drive with permanent magnet synchronous motor,” in Industrial Electronics, 2008. ISIE 2008. IEEE International Symposiumon. IEEE, 2008, pp. 753–758

- E. Persson**, "The Challenges of Using Variable-Speed Motor Drives in Appliance Applications," Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo, Oct., 2007.
- I.G. Reza**, 2016, Sensorless Rotor Position Estimation For Brushless DC Motors, Western University Electronic Thesis and Dissertation Repository
- Pump Handbook**, 2001, McGraw-Hill, Third Edition
- R. Kumar and B. Singh**, 2015, BLDC Motor Driven Water Pump Fed by Solar Photovoltaic Array Using Boost Converter, 2015 Annual IEEE India Conference (INDICON), New Delhi, 2015, pp. 1-6
- S. Riyadi**, 2016, Design of photovoltaic BLDC motor-water pump system with single converter, 3rd International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE)
- F.J.T.E.Ferreira, J.A.C.Fong and A.T. de Almeida**, 2011, Ecoanalysis of Variable-Speed Drives for Flow Regulation in Pumping Systems, IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol. 58, No. 6.
- P.S. Chaudharil; S.L. Pati and S.K. Pandey**, 2016, Application of SVM Technique or BLDC Motor Drive, 1st IEEE International Conference on Power Electronics. Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES-2016)
- B. Lehner and D. Gerling**, 2016, "Design and Comparison of Concentrated Winding Synchronous Reluctance Machines", 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2016.
- S.Sakunthala, R.Kiranmayi, P.N. Mandadi**, 2017, Comparison and Applications of PMSM and BLDC Motor Drives, International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS-2017)
- learnengineering.org**, 2019, <https://www.learnengineering.org/> (Erişim tarihi: 15 Haziran 2019)
- M. Yılmaz**, 2005, Fırçasız Doğru Akım Motorunun Algılayıcısız Kontrolünde Dalgacık Tekniğinin Uygulanması, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

- B. Kailas, P. Chinmay**, 2015, Review of Position Estimation Methods for Permanent Magnet Synchronous Motors, IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE), Volume 10, Issue 4 Ver. I (July – Aug. 2015), PP 48-52
- A. Ghirardello**, 2012, Motor Control with RX62T, BFG Engineering
- AEA Energy & Environments**, 2008, Appendix 5: Lot 11 - Water Pumps (in commercial buildings, drinking water pumping, food industry, agriculture), Report to European Commission, ED Number 02287, Issue Number 5
- H.Ç. Çalışkan, İ. Ekmekçi**, 2003, Pozitif deplasmanlı pompalar, SAU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 7.Cilt, 1.Sayı
- A. T. de Almeida, P. Fonseca, H. Falkner, and P. Bertoldi**, 2003, “Market transformation of energy-efficient motor technologies in the EU,” Energy Policy, vol. 31, no. 6, pp. 563–575.
- J. Chaurette**, 2005, Tutorial Centrifugal Pump Systems, Fluide Design Inc.,
- KSB Aktiengesellschaft**, 2006, Pump Control / System Automation, August 2006 Edition
- H. Cholet**, 1997, Progressing Cavity Pumps, Chapter 2.
- Brushless DC Motor Drivers**,
https://www.richtek.com/Applications/BLDC?sc_lang=en, (Erişim tarihi: 15 Haziran 2016).
- IPM Motor Features**, http://www.hamaco-ind.com/motor_technology/index.html, (Erişim tarihi: 15 Haziran 2019).
- T. Ahonen**, 2011, Monitoring Of Centrifugal Pump Operation By A Frequency Converter, Thesis for the degree of Doctor of Science, Lappeenranta University

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı: Ümit TARHAN

Doğum Yeri ve Tarihi: Bartın, 22.04.1987

Yabancı Dil: İngilizce (İleri Seviye)

Telefon: 05448185077

e-posta: umittarhan87@gmail.com

Eğitim Durumu

- Lise: Buca Anadolu Lisesi, 2000-2004
- Lisans: Ege Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği, 2005 – 2010

Çalıştığı Kurumlar:

- Kentkart Ege Elektronik AŞ, donanım mühendisi, 2010-2011
- Vestel Elektronik AŞ, kıdemli sistem tasarım mühendisi, 2012-2016
- Delphi Technologies, yazılım takım lideri, 2019-devam etmekte.

Yayınları:

- BLDC Motorlu Çamaşır Makinesinin Dengesiz Yükünün Çevrimiçi Hesabında Ağırlık Çarpanının Bulanık Mantıkla Kestirimi, Ümit TARHAN, Ömer Samet KIRCA, Prof. Dr. Musa ALCI, TOK 2015, Denizli

- Ümit TARHAN, Ö. AKIN, “Designing a General Purpose Pipeline CISC Processor with VHDL and Implementation on FPGA: Momentum” in Embedded Systems and Its Application Symposium 2008, Istanbul, booklet page: 23.

- Ümit TARHAN, Ö. AKIN, İrfan ALAN, “Computation with Education Oriented CISC Processor Implemented by Using FPGA and VHDL“ in The 1st International Symposium on Computing in Science & Engineering (ISCSE) will be organized by faculty of engineering, Gediz University.