İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ROTOR-AMY SİSTEMİNİN BULANIK DENETLEYİCİ İLE KONTROLÜ VE DENGE AKIMININ ENİYİLEŞTİRİLMESİ

DOKTORA TEZİ

Y. Müh. Ahu Ece HARTAVİ

Anabilim Dalı : ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ

Programı : ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ

ARALIK 2005

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ROTOR-AMY SİSTEMİNİN BULANIK DENETLEYİCİ İLE KONTROLÜ VE DENGE AKIMININ ENİYİLEŞTİRİLMESİ

DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Ahu Ece HARTAVİ
(504002102)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 30 Haziran 2005
Tezin Savunulduğu Tarih : 20 Aralık 2005

Tez Danışmanı : Prof.Dr. R. Nejat TUNCAY
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Oruç BİLGİÇ (Y.T.Ü.)
Prof.Dr. Asıf ŞABANOVİÇ (S.Ü.)
Yrd.Doç.Dr. Levent OVACIK (İ.T.Ü.)
Yrd.Doç.Dr. Selçuk PAKER (İ.T.Ü.)

ARALIK 2005

ÖNSÖZ

Tez konumun belirlenmesinde ve hazırlanmasında bana her yönden destek olan değerli hocam Prof. Dr. R. Nejat TUNCAY'a, benden hiçbir zaman yardımlarını esirgemeyen ve Bath Üniversitesindeki imkanlardan yararlanmamı sağlayan değerli hocam Mehmet N. ŞAHİNKAYA'ya, verdiği desteklerden dolayı Ana Bilim Dalı Başkanımız Prof. Dr. Faik MERGEN'e ve sevgili hocam Doç. Dr. Belgin TÜRKAY'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım değerli hocalarıma, Yrd. Doç. Dr. Özgür ÜSTÜN'e, Bath üniversitesindeki arkadaşım Abdul-hadi G. ABULRUB'a, bana her zaman destek olan sevgili eşine, deney düzeneği ile ilgili konularda yardımlarını esirgemeyen Graham FELLS'e ve emeği geçen herkese ayrıca teşekkür ederim.

Eğitimimin ve tezimin her aşamasında bana hem maddi hem de manevi yönden her zaman destek sağlayan aileme en içten sevgilerimi ve saygılarımı sunarım.

Haziran 2005 Ahu Ece HARTAVİ

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR v
TABLO LİSTESİ vı
ŞEKİL LİSTESİ vıı
SEMBOL LİSTESİ ıx
ÖZET xı
SUMMARY xıv

1. GİRİŞ 1
1.1. Çalışmanın Amacı 1

2. TARİHSEL GELİŞİM VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 3
2.1. Tarihsel Gelişim 3
2.2. Literatür Araştırması 4
2.2.1. Manyetik yatak tasarımına ilişkin araştırmalar 5
2.2.2. Manyetik yatak sistemlerine uygulanan kontrol yöntemlerine ilişkin araştırmalar 8

3. AKTİF MANYETİK YATAKLI SİSTEMLER 12
3.1. Aktif Manyetik Yatağın Çalışma Prensibi 12
3.2. AMY'nin Matematiksel Modeli 13
3.2. AMY'nin Kapalı Çevrim Kontrolü 19

4. DİNAMİK SİSTEMLERİN MODELLENMESİ 20
4.1. Lagrange Mekaniği 20
4.2. Turbomoleküler Pompa- AMY Sistemi 21
4.2.1. Turbomoleküler Pompalar 21
4.2.2. TMP'lerin Çalışma İlkesi 22
4.2.3. TMP-AMY Sistemi 22
4.2.4. TMP-AMY Sistemi Benzetim Modeli 23
4.3. Rotor-AMY Sistemi Benzetim Modeli 26
4.3.1. Rotor-AMY Sistemi Deney Düzeneği 27

5. BULANIK KONTROLÜN AMY SİSTEMİNE UYGULANMASI 30
5.1. Bulanık Mantık 30
5.2. Bulanık Mantığın AMY'lere Uygulanması 30
5.3. Bulanık Denetleyici Kontrolör 34
5.4. Rotor-AMY Sisteminin Bulanık Denetleyici Kontrolör İle Kontrolü 36

6. AKIM KONTROL YÖNTEMLERİ VE ENERJİ KAYIPLARININ ENİYİLEŞTİRİLMESİ **42**
6.1. Çift ve Tek Yönlü Sürme Modu 42
6.2. Enerji Kayıplarının Eniyileştirilmesi 44

7. AMY'Lİ SİSTEMLERİN DİJİTAL KONTROLÜ **49**
7.1. DSP Tabanlı Kontrol Sistemleri 49
7.2. Rotor-AMY Sisteminin Dijital Kontrolü 50

8. DENEYSEL SONUÇLAR **52**
8.1. Rotor-AMY Sistemi Gerçek Zaman Modeli 52
8.2. Deneysel Sonuçlar 53

9. SONUÇLAR **69**

KAYNAKLAR **71**

EKLER **77**

ÖZGEÇMİŞ **83**

KISALTMALAR

AMY	**:** Aktif Manyetik Yatak
AMB	**:** Active Magnetic Bearing
BDK	**:** Bulanık Denetleyici Kontrolör
BK	**:** Bulanık Kontrolör
ÇYSM	**:** Çift Yönlü Sürme Modu
DMCC	**:** Differential Mode Current Control
DDAKY	**:** Değişken Denge Akımı Kontrol Yöntemi
DSP	**:** Dijital İşaret İşleme
EİA	**:** Enerji İyileştirme Algoritması
FSC	**:** Fuzzy Supervisory Controller
KM	**:** Kütle Merkezi
MY	**:** Manyetik Yatak
PID	**:** Orantı İntegral Türev Kontrol
RCP	**:** Rapid Control Prototyping
SCD	**:** Serbest Cisim Diyagramı
TMP	**:** Turbomoleküler Pompa
TYSM	**:** Tek Yönlü Sürme Modu
UMCC	**:** Unidirectional Mode Current Control
VDBC	**:** Variable Differential Bias Control

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 6.1. Benzetim modeli sonuçları..... 48
Tablo 8.1. ÇYSM ve DDAK yöntemi sonuçları 63
Tablo 8.2. PID ve BDK+EİA yöntemi deneysel sonuçları 67
Tablo B.1. TMP sistemi parametreleri 79
Tablo B.2. Rotor-AMY sistemi parametreleri 79

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 3.1 : Çekme ilkesi ile çalışan MY 13
Şekil 3.2 : Elektromıknatısa ait manyetik eşdeğer devresi 14
Şekil 3.3 : Akı-akım karakteristiği 15
Şekil 3.4 : AMY'ye ait köklerin yer eğrisi 19
Şekil 3.5 : AMY sistemi kapalı çevrim blok diyagramı 19
Şekil 4.1a : Atmosferdeki yüzey 21
Şekil 4.1b : Yüksek vakumdaki yüzey kirliliği..... 21
Şekil 4.2 : Rotor-stator yapısı..... 22
Şekil 4.3 : TMP-AMY sistemi deney düzeneği 23
Şekil 4.4 : Manyetik yataklı dikey rotor taslağı 24
Şekil 4.5 : TMP-AMY sistemi benzetim modeli 25
Şekil 4.6 : Manyetik yataklı yatay rotor taslağı 26
Şekil 4.7 : Rotor-AMY sistemi benzetim modeli 29
Şekil 4.8 : Rotor-AMY sistemi deney düzeneği..... 28
Şekil 5.1 : AMY'de kuvvet / akım / hava aralığı ilişkisi 31
Şekil 5.2 : AMY'nin PID+BK ile kontrolü 32
Şekil 5.3 : Adaptif kontrolör yapısı 33
Şekil 5.4 : Bulanık denetleyici kontrolör yapısı 35
Şekil 5.5 : TS-tipi denetleyici bulanık kontrolör yapısı 38
Şekil 5.6 : Artan dengesizlik durumunda $K_{eşd}$ değişimi 38
Şekil 5.7 : Bulanık denetleyici kontrolör ve AMY sistemi 39
Şekil 5.8 : Artan dengesizlik durumunda rotor konumları 40
Şekil 5.9 : Azalan dengesizlik durumunda $K_{eşd}$ değişimi 40
Şekil 5.10 : Azalan dengesizlik durumunda rotor konumları 41
Şekil 6.1 : AMY'nin çalışma prensibi 42
Şekil 6.2 : Çift yönlü sürme modu 43
Şekil 6.3a : $f > 0$ durumu 44
Şekil 6.3b : $f < 0$ durumu 44
Şekil 6.4 : K_p ve I_b'nin farklı eşdeğer katılık durumlarındaki eğrisi 46
Şekil 6.5a : $K_{eşd}=10^6$N/m durumu için güç kaybının denge akımı ile değişimi-0,4 g_0 seviyesindeki titreşim 46
Şekil 6.5b : $K_{eşd}=10^6$N/m durumu için güç kaybının denge akımı ile değişimi-0,1 g_0 seviyesindeki titreşim 46
Şekil 6.6 : $(I_b,K_p)=(5,5996)$ durumunda benzetim modelinin izlediği yörünge..... 47
Şekil 6.7 : $(I_b,K_p)=(2.7,6283)$ durumunda benzetim modelinin izlediği yörünge 47
Şekil 7.1 : Dijital kontrol sistemi yapısı 49
Şekil 7.2 : Rotor-AMY sistemi kapalı çevrim blok diyagramı 51
Şekil 8.1 : Rotor-AMY sistemi PID kontrolörü gerçek-zaman modeli 52

Şekil 8.2 : Sistemin denge durumundaki konumu 53
Şekil 8.3 : Sistemin sinüzoidal bozucu etkisi altında izlediği yörünge.....53
Şekil 8.4 : Sistemin farklı genlikteki ($F_1 < F_2$) bozuculara cevabı.....54
Şekil 8.5 : İki farklı kuvvet durumunda üst elektromıknatıs akımı 55
Şekil 8.6 : İki farklı kuvvet durumunda alt elektromıknatıs akımı 55
Şekil 8.7 : Yumuşak katılık ve F_1=27 N durumunda rotor yörüngesi 56
Şekil 8.8 : Normal katılık ve F_2=55 N durumunda rotor yörüngesi 56
Şekil 8.9 : Sert katılık ve F_3=130 N durumunda rotor yörüngesi 56
Şekil 8.10 : Harcanan enerji-denge akımı değişimi 57
Şekil 8.11 : Harcanan enerji-statik akım değişimi 58
Şekil 8.12 : (I_b,K_p)=(5,7996) durumunda sistemin izlediği yörünge 58
Şekil 8.13 : (I_b,K_p)=(5,7996) durumunda benzetim modelinin izlediği yörünge.....59
Şekil 8.14 : Benzetim modeli ve deneysel çalışma durumu konum bilgileri 59
Şekil 8.15 : Rotor-AMY sistemi benzetim modeli akımları 60
Şekil 8.16 : Rotor-AMY sistemi akımları 60
Şekil 8.17 : (I_b,K_p)=(2.5,10520) durumunda sistemin izlediği yörünge 61
Şekil 8.18 : (I_b,K_p)=(2.5,10520) durumunda benzetim modelinin izlediği yörünge 61
Şekil 8.19 : Benzetim modeli ve gerçek konum bilgileri 62
Şekil 8.20 : Rotor-AMY sistemi benzetim modeli akımları 62
Şekil 8.21 : Rotor-AMY sistemi akımları 63
Şekil 8.22 : BDK+EİA gerçek-zaman modeli 65
Şekil 8.23 : PID kontrolör durumunda sistemin izlediği yörünge (1) 64
Şekil 8.24 : BDK durumunda sistemin izlediği yörünge (1) 66
Şekil 8.25 : PID kontrolör durumunda sistemin izlediği yörünge (2) 66
Şekil 8.26 : BDK durumunda sistemin izlediği yörünge (2) 67
Şekil 8.27 : Rotor-AMY sistemi kontrol paneli 68
Şekil A.1 : AMY'ye ait indirgenmiş blok diyagramı 77
Şekil C.1 : (I_b,K_p)=(4.8,8020) durumunda sistemin izlediği yörünge 80
Şekil C.2 : (I_b,K_p)=(4.8,8020) durumunda benzetim modelinin izlediği yörünge 80
Şekil C.3 : Benzetim ve deneysel konum bilgileri karşılaştırılması 81
Şekil C.4 : Rotor-AMY sistemi benzetim modeli akımları 81
Şekil C.5 : Rotor-AMY sistemi akımları 82

SEMBOL LİSTESİ

A : Kutup yüzeyi kesit alanı
B : Manyetik akı yoğunluğu
C : Sönüm matrisi
d_u : Dengesizlikten kaynaklanan bozucular
dx : Yer değiştirme
f_g : Yerçekimi vektörü
F : Kuvvet
F_e : Elektromanyetik kuvvet
F_1 : Birinci elektromıknatıs tarafından üretilen kuvvet
F_2 : İkinci elektromıknatıs tarafından üretilen kuvvet
F_x : x yönündeki kuvvet
F_y : y yönündeki kuvvet
F_z : z yönündeki kuvvet
g_0 : Sisteme ilişkin hava aralığı
G(s) : İleri yol transfer fonksiyonu
H : Manyetik alan şiddeti
H(s) : Geri yol transfer fonksiyonu
i : Akım
i_b : Denge akımı
i_c : Kontrol akımı
i_d : Örneklenmiş akım bilgisi
i_g : Gerçekte ölçülen akım
I_t : Translasyonel eylemsizlik momenti
I_p : Polar eylemsizlik momenti
I_1 : Birinci elektromıknatıstan akan toplam akım
I_2 : İkinci elektromıknatıstan akan toplam akım
L : Lagrange denklemi
l_{ba} : Sağ AMY'ın KM'ne olan mesafesi
l_{bb} : Sol AMY'ın KM'ne olan mesafesi
l_{sa} : Sağ algılayıcının KM'ne olan mesafesi
l_{sb} : Sol algılayıcının KM'ne olan mesafesi
k : Geometrik katsayı
$K_{eşd}$: Eşdeğer katılık
K_D : Türevsel katsayı
K_i : Akım katılığı
K_I : İntegral katsayı
K_P : Oransal katsayı
K_x : Konum katılığı
m : Kütle
M : Kütle matrisi

$\mathbf{N}$: Sarım sayısı
$\mathbf{P_{ort}}$: Ortalama kayıp güç
$\mathbf{q}$: Genelleştirilmiş koordinatlardaki konum vektörü
$\mathbf{Q}$: Genelleştirilmiş koordinatlardaki kuvvet vektörü
$\mathbf{R}$: Direnç
$\mathbf{s}$: Senkron cevap genliği
$\mathbf{S}$: Kararlı hal senkron cevabı
$\mathbf{T}$: Kinetik enerji
$\mathbf{T(s)}$: Kapalı çevrim transfer fonksiyonu
$\mathbf{u_a}$: Analog gerilim bilgisi
$\mathbf{u_d}$: Örneklenmiş gerilim bilgisi
$\mathbf{x}$: Yatay eksen yönündeki hava aralığı
$\mathbf{x_{KM}}$: Yatay eksen yönündeki kütle merkezi koordinatı
$\mathbf{\nu}$: Yüzey hızı
$\mathbf{V}$: Potansiyel enerji
$\mathbf{V_{ref}}$: Referans gerilim
$\mathbf{V_g}$: Gerçek ölçülen gerilim
$\mathbf{W}$: AMY'da harcanan enerji
$\mathbf{W_c}$: Koenerji
$\mathbf{W_e}$: Elektromanyetik enerji
$\mathbf{W_m}$: Mekanik enerji
$\mathbf{y}$: Düşey eksen yönündeki hava aralığı
$\mathbf{y_{KM}}$: Düşey eksen yönündeki kütle merkezi koordinatı
$\mathbf{z}$: Dikey eksen yönündeki hava aralığı
$\mathbf{z_d}$: Örneklenmiş konum bilgisi
$\mathbf{z_g}$: Gerçek konum bilgisi
$\mathbf{z_{KM}}$: Dikey eksen yönündeki kütle merkezi koordinatı
$\mathbf{\Phi}$: Akı
$\mathbf{\theta}$: Amper sarım
$\mathbf{\theta_x}$: X-ekseni yönündeki kütle merkezi eğiklik açısı
$\mathbf{\theta_y}$: Y-ekseni yönündeki kütle merkezi eğiklik açısı
$\mathbf{\theta_z}$: Z-ekseni yönündeki kütle merkezi eğiklik açısı
$\mathbf{\rho}$: Yerçekimi ivmesi
$\mathbf{\Re}$: Manyetik direnç
$\mathbf{\mu_o}$: Boşluğun manyetik alan geçirgenliği
$\mathbf{\Omega}$: Dairesel hız

ROTOR-AMY SİSTEMİNİN BULANIK DENETLEYİCİ İLE KONTROLÜ VE DENGE AKIMININ ENİYİLEŞTİRİLMESİ

ÖZET

Bu tez çalışmasında, Rotor-Aktif Manyetik Yatak (AMY) sistemi için Bulanık Denetleyici Kontrolör ve Enerji Eniyileştirmesi Algoritması (EİA) geliştirilmiştir. Bu amaç doğrultusunda konular aşağıda verilen sıra ile ele alınmıştır;

1. AMY sisteminin tasarımına ve kontrolüne ilişkin literatür araştırması.
2. AMY'nin çalışma prensibinin açıklanması.
3. AMY'ye ait matematiksel modelin geliştirilmesi.
4. Manyetik olarak yataklanmış Turbomoleküler Pompa'nın (TMP) çalışma ilkesinin açıklanması.
5. Dinamik sistem modellenmesinde kullanılan metodların ve Lagrange dinamiğinin incelenmesi.
6. Manyetik olarak yataklanan TMP'nin ve Rotor-AMY sisteminin modelinin PID kontrolör kullanılarak gerçeklenmesi ve her iki sistem benzetim sonuçlarının MATLAB®/Simulink ortamında elde edilmesi.
7. BDK'nın çalışma ilkesinin açıklanarak TMP ve Rotor-AMY sistemine uygulanması.
8. Çift Yönlü Sürme Modu (ÇYSM) ve Tek Yönlü Sürme Modu (TYSM) yöntemlerinin enerji kaybı açısından incelenmesi.
9. Denge akımı eniyileştirilmesinin statik yükün olduğu ve / veya akımın kontrollü olarak belirli bir değerin altına azaltılamadığı manyetik olarak yataklanmış makinelerdeki faydasının ortaya konulması.
10. AMY'li sistemlerde dijital kontrolün faydalarının incelenmesi ve Rotor-AMY sistemine uygulanması ile elde edilen deneysel sonuçların benzetim modelleri ile olan uyumluluğunun gösterilmesidir.

Manyetik yataklar rotoru hiç bir fiziksel temas olmaksızın havada asılı tutan ve kılavuzlayan elektromanyetik yapılardır. Temassız çalışması, sürtünmesiz işletme, düşük titreşim, sesiz çalışma, yüksek işletme hızı, özel ortamlarda kullanılabilirlik ve az bakım gereksinimi gibi bir takım avantajları beraberinde getirmektedir. Bu avantajlar ise AMY'lerin endüstride geniş uygulama alanı bulmalarına neden olur. Sonuç olarak AMY'ler bugün;

- Turbomoleküler pompalar,
- Yüksek hızlı takım tezgahları,
- Enerji depolamada kullanılan volanlar,
- Jiroskoplar,
- Kiroyojenik turbomakineler,
- Kalp pompa cihazları,
- Jeneratörler

gibi bir çok yerde kullanım alanı bulmuştur. AMY'ler doğal olarak kararsız yapıları nedeni ile kapalı çevrim kontrolüne ihtiyaç duyarlar. Bunun içinde literatürde bir çok farklı kontrol tekniklerinden faydalanılmaktadır. Temel olarak AMY'li sistemlerde yer alan kontrol yöntemleri iki ana sınıfta toplanılabilir. Bunlar Doğrusal Kontrol Metotları ve Doğrusal olmayan kontrol metotlarıdır. Bu alanda yapılan araştırmalar incelendiğinde AMY'lerin kontrolünde basit tasarımları ve kolay uygulanabilirlikleri nedeni ile daha çok doğrusal kontrol metotlarının tercih edildiği görülmektedir. Ancak bu metotların tercih edilmesi durumunda manyetik yapıdaki nonlineerlikler ve belirsizlikler kontrolör etkinliğini ve sistemin kararlı olduğu bölgeyi sınırlamaktadır. Bu tür problemlerin üstesinden gelebilmek için bir takım araştırmacılar, doğrusal kontrol metotlarına nazaran daha karmaşık ve zaman alıcı olan doğrusal olmayan kontrol metotlarına yönelmişlerdir. Bu tez çalışmasında, AMY'lerin doğrusal olmayan dinamiğinden kaynaklanan problemleri çözmek için ilk kez BDK'den faydalanılmıştır. Tasarımı gerçekleştirilen kontrolör ile sistem eşdeğer katılığı değişen çalışma şartlarına uygun olarak ayarlanarak rotorun güvenli bir biçimde çalışması gerçekleştirilmiştir. Böylece kontrolör performansı diğer doğrusal olmayan kontrol tekniklerine kıyasla daha basit ve daha hızlı gerçekleştirilmiştir.

Kontrolör yapısının tasarımının ardından denge akımının enerji kaybı üzerine olan etkisi literatürde yer alan iki farklı yöntem için incelenmiştir. Bunlardan ilki ve en yaygın olanı ÇYSM'dir. Bu yöntemde üretilen kontrol akımı, denge akımı üzerine

birbirin zıt yönde yerleştirilmiş olan bobinlere ters işaretli olacak şekilde eklenmektedir. Fakat bu yapı yükün olmadığı durumlarda veya dikey makinelerde sürekli olarak denge akımının olması nedeni ile enerji kaybına sebep olmaktadır. Özellikle TMP'de oluşan ısının ortamdan uzaklaştırılmasının oldukça zor olması bu tür sistemlerde enerji kaybının daha da önemli bir hale gelmesine neden olmaktadır. Bu nedenle ÇYSM yöntemi bu tür uygulamalarda pek fazla tercih edilmemektedir. Literatürde yer alan bir diğer kontrol yöntemi ise TYSM olup sistemde harcanılan enerjinin azaltılmasının istendiği durumlarda tercih edilmektedir. Ancak bu yöntemin nonlineerliği arttırması sistemde doğrusal olmayan kontrol yöntemlerinin kullanılmasına yol açmaktadır. Her iki yöntemin incelenmesi ile denge akımının çalışma koşullarına uygun olacak biçimde eniyileştirilmesinin, akımın kontrollü olarak belirli bir değerin altına düşürülemediği veya statik yük bulunduğu yatay makinelerde nedenli faydalı olduğu sonucu elde edilmiştir. Böylelikle ilk kez Değişken Denge Akımı Kontrol (DDAK) yöntemi geliştirilmiştir Geliştirilmiş olan DDAK yönteminin yer aldığı Enerji Eniyileştirme Algoritması (EİA) ve ilk kez bu çalışmada tasarlanmış olan BDK, sistemden istenilen performans doğrultusunda birbirleri ile seri olarak bağlanmıştır. Elde edilen yapı daha sonra değişken katsayılı PID kontrolör, AMY ve rotor modeli ile birleştirilerek MATLAB® / Simulink ortamına aktarılmıştır. Böylece MY'lerin çalışmaları esnasında harcanan enerji azaltılmış ve farklı çalışma şartlarına uygun olarak sistemin belirlenen sınır dahilinde çalışması sağlanmıştır. Benzetim sonuçlarının elde edilmesinin ardından deneysel sonuçları elde edebilmek için dSPACE modülünün hızlı kontrol prototipleme (RCP) tekniğinden faydalanılmıştır. Böylece zaman alıcı olan programlama işleminden kurtulunmuştur. Daha sonra elde edilen gerçek zaman modeli, ana denetim bilgisayarının, DS1005 PPC, DS2002 ADÇ, DS2103 DAÇ kartlarının, güç elektroniği devrelerinin, konum algılayıcılarının ve manyetik olarak yataklanmış olan rotorun yer aldığı deney düzeneğine uygulanmıştır.

Sonuç olarak ilk kez bu çalışmada geliştirilmiş olan BDK ve EİA ile artan dengesizlik sonucunda oluşan rotor titreşimleri sınırlandırılmış ve sistemde harcanan enerji miktarı azaltılmıştır. Gerçekleştirilen deneyler ile öncelikle sistem dinamiğinin daha az enerji harcanarak korunduğu 8. bölümde yer alan Şekil 8.18 ve 8.21'de gösterildikten sonra artan dengesizlik durumları için sistemin en az enerjiyi harcayacak şekilde çalışması Şekil 8.24'de, Şekil 8.26'da ve Tablo 8.2'de elde edilen sonuçlar ile gösterilmiştir.

THE FUZZY SUPERVISORY CONTROL AND BIAS CURRENT OPTIMIZATION OF ROTOR-AMB SYSTEM

SUMMARY

In this study a control technique and a bias current optimization algorithm is developed for a magnetically levitated Turbomolecular pump (TMP) and a Rotor-Active Magnetic Bearing (AMB) system using fuzzy decision making. In order to reach this aim, the steps are handled in the following order;

1. Review of literature on AMB system design and control.
2. Working principle of AMB is explained.
3. A mathematical model is developed for AMB.
4. Working principle of a magnetically levitated Turbomolecular pump (TMP) is explained.
5. Methods for modeling dynamical systems are presented and Lagrangian Dynamics is explained.
6. Simulation models of magnetically levitated TMP and Rotor-AMB system are investigated using PID controller in MATLAB®/Simulink environment.
7. Working principle of Fuzzy Supervisory Controller (FSC) is explained and applied to both TMP and Rotor-AMB systems.
8. Unidirectional and differential current control strategies are studied from energy loss point of view.
9. The benefits of optimising the bias current according to operational conditions were shown for magnetically levitated machines where the bias current is necessary for the static load or where you can not decrease the current controlibily below a certain limit.
10. Digital control is explained and applied to the Rotor-AMB system using RCP (Rapid Control Prototype) technique of dSPACE system. Then, with the help of

simulation model it is also shown that the results obtained from the theory developed in this study are in good agreement with experimental results.

Magnetic bearings (MB) levitate, suspend and guide rotors by magnetic forces without any physical contact. The non-contact support offers many advantages such as frictionless operation, low vibration, quietness, high rotational speed, usefulness in special environments and low maintenance. These avantages and opportunities make the AMBs to be used in a wide variety of applications. In order to illustrate the wide application areas of MBs, a list of those is given below.

- Turbomolecular pumps
- High-speed spindles for machine tools
- Flywheels for energy storage
- Gyroscopes
- Cryogenic turbomachines
- Artifical heart pumps
- Generators and etc.

Since the AMBs are inherently unstable, it is necessary to use a closed loop control to achieve a stable levitation. Different types of control techniques are applied to the AMB systems. Mainly, they are grouped into two such as Linear and Nonlinear Control Methods. Generally, linear design techniques are used to control the natural instability of AMBs because of their simple design and easy implementation. However, the magnetic nonlinearity and system uncertanities limit the effectiveness of these controllers and the region of the stable performance. To overcome these problems some of the researchers dealt with nonlinear control methods. In fact, these controllers are more complicated and their design procedures are more time consuming than linear controllers. In this thesis, the nonlinear dynamics of the AMBs are tried to be overcome by FSC. The developed controller is used to adapt the dynamics of the system to different operational conditions. Thus, the performance of the system is broaden to a wide range.

In the second part of the thesis, the effect of bias current on energy consumption is studied for two different current control techniques. The first and the most widely used one is called Differential Mode Current Control (DMCC) technique. In this scheme control current is superimposed to the bias currents of the electromagnets

placed reciprocal to each other with opposite signs. When this technique is preferred, the existence of the bias current, even in no load conditions or in vertical machines, causes great amount of power consumption. Especially in TMP applications, energy consumption becomes an important subject since the dissipation of the generated heat is very difficult. As a solution, unidirectional current control (UCC) strategy comes into consideration. Even though this method reduces the power consumption, the nonlinearity of the system increases. As a result the use of nonlineer control methods become a necessity. Thus, Variable Differential Bias Current (VDBC) control technique is developed to reduce the amount of power consumed during the opeartions of the magnetic bearings. As its name implies, the VDBC technique uses a variable bias current that gives better efficiency compared with unidirectional and bidirectional approach. In this method the better efficiency is obtained by choosing the optimum bias current as a function of the desired bearing stiffness and the rotor vibration amplitudes.

The research presented in this thessis focuses on the effectiveness of the Variable Differential Bias Current (VDBC) control technique and FSC which is used to decide the equivalent stiffness of the system for different operating conditions. Thus, the Fuzzy Supervisory Controller and the bias current optimization algorithm are connected in series with each other and parallel to both PID controller and whole system model in MATLAB®/Simulink environment.

Finally, the real-time model of the controller and the energy optimization algorithm (EOA) are obtained using RCP technique which avoids tedious programming procedure of DSPs by producing automatic C codes for the simulation models developed in the MATLAB®/Simulink environment. Then, the real-time model of the FSC + EOA is applied to the experimental set-up to show the effectiveness of the developed technique. The results show that the rotor vibrations are limited for higher unbalances while transmitted force and the power consumption are minimised (Table 8.1 and 8.2). Thus, the new operational conditions are observed with minimum noise and vibration. It is also shown that the results of the simulations are in good agreement with those of experiments.

1 GİRİŞ

1.1 Çalışmanın Amacı

Manyetik yataklar (MY) günümüzde bilim ve teknoloji çevrelerinin üzerinde yoğun olarak çalıştığı konulardan biridir. Özellikle sanayide güvenilir imalat yöntemlerine yönelinmesi ve mekanik yatakların yüksek hız uygulamalarında ve özel çalışma sahalarında bu ihtiyaca cevap verememesi bu sistemleri daha da çekici kılmıştır .

MY'ler bir mili veya rotoru manyetik alanının oluşturduğu kuvvetler yardımı ile hiçbir fiziksel temas olmaksızın havada asılı olarak tutan elektromekanik yapılardır. Özellikle fiziksel temasın olmaması klasik sistemlerin neden olduğu sürtünme, ısınma, kirlenme gibi olumsuz özelliklerin ortadan kalkmasına neden olmaktadır. Bunun bir sonucu olarak MY'lere çalıştıkları sistemlerin hem daha uzun ömürlü hem de daha az bakım gerektirecek şekilde çalışmasına imkan sağlarlar .

Literatürde MY'ler yapısal özellikleri açısından pasif, aktif, karma ve süper karma olmak üzere dört ana sınıfa ayrılırlar. Pasif MY'lerde sürekli mıknatıslar, aktif MY'lerde elektromıknatıslar, karma MY'lerde hem elektromıknatıslar hem sürekli mıknatıslar, süper karma MY'lerde ise karma yapı ile birlikte ses bobinleri kullanılmaktadır.

Manyetik yatak ve askı sistemleri kuramının kurucusu olan Earnshaw, 1842 yılındaki çalışmasında sabit yük, mıknatısiyet veya akım taşıyan herhangi bir cismin, değişmeyen bir elektrik veya manyetik alan tarafından kararlı olarak tutulmayacağını ortaya koymuştur [1]. Ancak MY'ler ile ilgili çalışmalar 1930'lu yıllarda başlamıştır. Araştırmalar ilk önceleri pasif sistemler üzerine yoğunlaşsa da, sonraları aktif sistemlere yönelmiştir. Araştırmacıların yoğun bir biçimde bu sistemleri tercih etmelerinin başında MY'ler ile ulaşılan hız sınırının klasik yataklar tarafından karşılanamaması gelmektedir. Bu durumda MY sistemleri kullanıldıkları yapılarda karşımıza bir elektromekanik kontrol problemi olarak çıkmaktadır. Bu ise sistemde aktif kontrole ihtiyaç duyulmasına neden olmaktadır. Ancak etkin denetimin gerekli olduğu aktif manyetik yataklar (AMY) için, o zaman ki teknoloji yeterli olamamıştır.

Bu nedenledir ki MY teknolojisinin gelişimini hızlandıran nedenlerin başında: yüksek enerjili sürekli mıknatıs malzemelerinin ve yüksek doymalı manyetik malzemelerinin geliştirilmesi ile kontrol sistemlerindeki ilerlemeler gelmektedir.

Günümüzde, MY'ler ticari olarak piyasaya sunulmakta ve geliştirme çalışmaları da hız kazanarak sürmektedir. Bunun nedeni ise AMY'lerin sürtünmesiz çalışmasından kaynaklanan avantajlarının yanı sıra birer izleme cihazı olarak da kullanılabilmelerdir. Örneğin, ilk defa işletmeye alınan bir sistemin yataklanmasını veya sistemin işletme esnasındaki durumlarını kontrol etmede kullanılabilmektedirler. Bunlara ek olarak gelişen teknoloji ile yeni denetim tekniklerinin de uygulamaya geçmesi MY'lerin kullanımını destekleyen diğer bir unsur olmuştur.

Sonuç olarak gerek yataklama da sağladıkları üstünlükler gerekse farklı işlevlerde kullanılabilmeleri nedeni ile manyetik askı sistemleri gittikçe artan bir önem kazanarak bilim çevrelerinin ilgisini çekmiştir. Bugün manyetik askı sistemleri yüksek hızlı elektrik makinelerinde, sıvı helyum pompalarında, turbomoleküler pompalarda, kompresörlerde, kayıpların azaltılmasının istendiği uzay gemilerinde, uydular için enerji depolayan sistemlerde, yüksek sıcaklıklara çıkılan ortamlarda, ve doğrusal askı makineleri (tekerleksiz trenlerde) gibi bir çok yerde uygulama alanı bulmuştur.

Bu tez çalışmasında, Rotor-AMY sisteminde harcanan enerjinin azaltılmasını sağlamada kullanılan Değişken Denge Akımı Kontrol (DDAK) yöntemi ile sistemdeki belirsizliklerden ve doğrusal olmayan yapıdan kaynaklanan etkileri bastırmada kullanılan Bulanık Denetleyici Kontrolör (BDK) tasarlanmıştır. Böylece sistemde harcanan enerji en aza indirilirken farklı bozucular karşısında uygun eşdeğer katılık değeri seçilmesi sureti ile askıya alınan rotorun belirlenen sınırlar içerisinde çalışması sağlanmıştır.

2 TARİHSEL GELİŞİM VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1 Tarihsel Gelişim

Manyetik askı sistemlerine yönelik çalışmalar ilk defa 1842 yılında Earnshaw tarafından gerçekleştirilmiştir [1]. Kavram ilk olarak 1842'de ele alınmasına rağmen manyetik yatak sistemlerine ait çalışmalar ancak 1930'lu yıllarda başlamıştır.

Araştırmalar ilk başta manyetik askı olayını basit olarak gerçekleştiren pasif sistemler üzerine yoğunlaşmış olsa da ilerleyen teknoloji ile birlikte aktif sistemlere yönelmiştir.

AMY'ye ilişkin ilk örnek, 1946 yılında Virginia Üniversitesinde fizik profesörlüğü yapan Jesse W.Beams'in fotoelektriksel konum geri beslemeli, 16.600 dev./d'lik hız ile dönen santrifüj motoru olmuştur. Bu nedenle Beams manyetik yatak sistemlerinin kurucusu olarak kabul edilmektedir [2]. Ancak bu dönemde gelişmiş kontrol unsurlarının olmaması nedeni ile aktif MY'ler üzerindeki çalışmalar oldukça azdır. Bunun bir sonucu olarak da AMY'ler ile ilgili asıl çalışmalar, 1957'li yılların başlarında başlamıştır. Ancak kontrol sisteminde kullanılan elemanların yüksek fiyatları ve büyük boyutları nedeni ile geniş ölçüde sürdürülememiştir. Bu yıllarda Hispana Suiza, elektromanyetik yataklar ve endüktif algılayıcıların kullanılmasına ilişkin patent alımında bulunmuşlardır.

1960'lı yılların ortalarında, Cambridge Termoiyonik Anonim Şirketi, Uluslararası Havacılık ve Uzay Yönetimi, Gaddard Uzay Uçuş Merkezi için girdap akımı söndürücülü tamamen pasif Jiroskop ve savurma tekerlekleri tasarlamıştır. Sperry Uçuş Sistemleri Bölümü ve Fransız SNIAS ise makul bir performans kazanabilmek için bu yapılarda karmaşık söndürüm sistemlerini kullanılmayı tercih etmişlerdir.

1969 yılında Avrupa Güç Cemiyeti (SEP), pasif ve aktif manyetik askı sistemlerinin karakteristiklerini karşılaştırmıştır. Bunu yaparken de amaçlarının uydular için savurma tekerlekleri geliştirmek olduğunu belirtmişlerdir.

1970'li yılların başlarında aktif sistemlerin ticari olarak kullanılabilir bir teknoloji haline gelmesine Fransızlar öncülük etmişlerdir. Buna müteakip, bir çok Amerikan ve Japon firması bu sistemler üzerine lisans alımında bulunmuşlardır. Böylece 1970'lerin ilk yarısından başlayarak MY sistemleri üzerine patent alımları ve ticari girişimler hız kazanmıştır. Bu girişimler sonucunda manyetik yatakların uygulama alanları genişlemiştir. Özellikle MY'ler yüksek verimliliğin ve güvenirliliğin önemli olduğu uzay uygulamaları için oldukça çekici bir hale gelmişlerdir. Aktif ve pasif sistemlerin ticari olarak kullanılabilir hale gelmesi ile her iki sistem avantajlarının birleştirilmesi fikrini ortaya çıkarmıştır. Bunun sonucu olarak da 1970'li yılların başında NASA tarafından uydularda kullanılan momentum tekerlekleri için karma manyetik yatakların geliştirilmesi üzerine çalışmalar başlamıştır [3].

Günümüzde, manyetik yataklar ticari olarak piyasaya sunulmakta ve geliştirme çalışmaları da hız kazanarak sürmektedir. Teknolojik gelişmeler ile birlikte yeni malzeme arayışları ve yeni denetim tekniklerinin uygulamaya geçmesi de bu sistemlerin gelişimini desteklemektedir.

2.2 Literatür Araştırması

Manyetik yataklar ile ilgili literatüre bakıldığında bu alandaki araştırmaların temel olarak iki başlık altında toplandığı görülmektedir. Bunlar MY'lerin tasarımına ve kontrolüne ilişkin çalışmalardır.

MY'lerin tasarımına ilişkin araştırmalar doğal olarak en çok ilgi gören alanı oluşturmaktadır. Bu çalışmalarda temel olarak MY'lerin ve rotor modellerinin elde edilmesi ile üretim aşaması öncesinde sonlu elemanlar yöntemi ile yatak modellerinin uygunluğunun incelenmesi ve test edilmeleri yer almaktadır.

Kontrole yönelik araştırmalar ise bir bakıma otomatik kontrol teorisinin rotor sistemlerine uygulanması biçimindedir. MY'lere uygulanan kontrol yöntemlerini temel olarak 7 sınıfta toplamak mümkündür. Araştırmacıların çoğu MY kontrolünde pratikte en çok tercih edilen klasik kontrol yöntemlerini kullanmışlardır. Bu yapılar bugün halen basit yapıları ve ucuz maliyetleri nedeni ile oldukça güçlü bir kontrol yaklaşımı olmaya devam etmektedirler. Diğer bir sınıfta ise, MY'nin doğrusal olmayan yapısından kaynaklanan etkileri kompanze etmeye yönelik olarak tercih edilen doğrusal olmayan kontrol yöntemleri yer almaktadır. Son zamanlarda oldukça ilgi gören gürbüz kontrolde MY'lere uygulanan diğer bir kontrol yaklaşımıdır. Özellikle çok değişkenli kontrol sistemleri için modellerde yer alan belirsizliklere ve

hatalara karşı daha az duyarlı olan bu yaklaşım oldukça ilgi görmektedir. MY'lerin çok değişkenli ve karmaşık yapısı sistem parametrelerinin belirlenmesini ve modellerinin tam olarak ortaya konmasını oldukça zorlaşmaktadır. Bu nedenle bir takım araştırmacılar MY'lerin kontrolünde adaptif kontrol yöntemlerini kullanmaya yönelmişlerdir. Bir diğer grupta ise, sistemin tam matematiksel modeline gerek duymayan ve modern kontrol olarak adlandırabileceğimiz yöntemler (bulanık kontrol gibi) yer almaktadır. Gelişen teknoloji ile son zamanlarda yüksek hızlı ve hassasiyetli dijital ve paralel işlemcilerin geliştirilmesi AMY'lerin dijital kontrolünde oldukça büyük ilerlemelere neden olmuştur. Böylece geliştirilen kontrol metotları AMY'li sistemlere daha hızlı bir biçimde uygulanmıştır.

2.2.1 Manyetik yatak tasarımına ilişkin araştırmalar

Yukarıda işaret edildiği üzere aktif manyetik yatak tasarımına ait ilk pratik çalışma 1946 yılında Beams tarafından gerçekleştirilmiştir [2]. Gelişen teknolojiye paralel olarak araştırmalar AMY'lerin pratikte yer alan sistemlere uygulanmasına yönelmiştir. 1974 yılında Schweitzer esnek rotorların aktif kontrolünü ortaya koyan ilk kişi olmuştur. 1976 yılında Schweitzer ve Lange MY'lerin rotor sistemlerindeki titreşimleri aktif olarak kontrol etmede kullanılmalarını açıklamışlardır [4]. 1977 yılında Kirk ve Studer manyetik manyetik askı sistemlerinin enerji depolamada kullanılan volanlara uygulanmasına yönelik çalışmalar yapmışlardır [5]. Uygulamalarındaki gerekçe askıya alma işlemini en az enerji harcayarak yapmak olduğu için tasarım esnasında sürekli mıknatıslı sistemler üzerine yoğunlaşılmıştır. 1978 yılında Studer ilk karma MY tasarımını ortaya koymuş ve on yıllık bir dönemdeki yenilikçi MY tasarımcısı olmuştur [6]. Çalışmalarının büyük bir kısmında verimliliğin başta geldiği uzay araçlarına MY sistemlerinin uygulanması gelmiş ve Kirk sürekli mıknatısların bu tür uygulamalarda geniş bir şekilde kullanılmasını sağlamıştır. 1981 yılında Ohkami ve diğerleri sürekli mıknatısların kullanıldığı bir çok tasarımı gözden geçirmişlerdir [7].

1970 yılına kadar yapılan tüm tasarımlar manyetik devrelerin basit modelleri ile sınırlanmıştır. 1985 yılında Britcher incelemelerinde rüzgar tüneli testi için kullandığı manyetik askı sistemlerinin test modellerine uygulamıştır [8]. 1985 yılında Hebbale doktora çalışmasında doğrusal olmayan yapıyı ve girdap akımı etkilerini ele almıştır [9]. 1989 yılında Springer kutuplarda oluşan histerezisin elektromıknatıslar tarafından üretilen kuvvetlere olan etkisini incelemiştir [10].

1980'li yıllarda MY'lerin pratiğe uygulanmalarında gelişmeler olmuştur. 1983 yılında Maresca rotor sistemlerinde gelişmiş manyetik aksam-konum algılayıcısının her iki sisteminin birlikte kullanılması yardımı ile geliştirilmesini açıklamıştır [11]. Aktif sönümleme 1984 yılında Ulbrich ve Anton tarafından tekrar araştırılmıştır [12]. Yapılan araştırmalar sonucunda algılayıcı ve manyetik aksamın optimum performans için birlikte yerleştirilmeleri gerektiğini belirlemişlerdir. Aynı sene Salm ve Schweitzer MY'ler ile ortak olarak yerleştirilemeyen algılayıcıların sistemin kontrolü üzerine olan etkilerini incelemişlerdir [13]. Araştırmalar sonucunda Salm bu tür düzenlerin karasızlığı içeren bozulmalara yol açtığını ortaya koymuştur [14]. 1984 yılında Traxler ve Schweitzer ayarlı karıştırıcılarda esas olarak kullanılan manyetik aktüatörlerin performansını belirleyen test sonuçlarını elde etmişlerdir [15]. 1985 yılında Allaire ve diğerleri tamamen aktif sistemlerin doğrusal manyetik devre teorisini esas alarak davranışlarını karakterize eden geniş çaplı bir araştırma gerçekleştirmişlerdir [16].

1990'lı yıllarda MY'ler ticari olarak gerçeklenebilir bir hale gelmiştir. Böylece çalışmalar MY'lerin çeşitli sistemlere uygulanabilecek şekilde tasarlanması yönüne dönüşmüştür. 1988 yılında Banerjee kaçak ve saçaklanma akılarının incelenmesini içeren eksenel yatak prosedürü sunmuştur [17]. 1988 yılında Nikolajsen her zaman ki olağan zıt manyetik kutupların birbirlerini çekmesi yerine indüklenen girdap akımları nedeni ile oluşan itme türü oldukça yeni bir yatak türünü incelemiştir. Bu yaklaşımın en büyük avantajı sistemin geri besleme olmaksızın kararlı olmasıdır [18]. Aynı yılda turbomoleküler pompalar ve elektrik enerjisi sayaçlarında kullanılan sürekli mıknatıslı sistemleri üzerine de çalışmalarda bulunmuştur. 1989 yılında Hibner ve Bansal MY'lerin uçak motorlarına uygulanmaları ile ilgilenmişlerdir. Bunun içinde MY tasarımında gelinen son noktayı etraflı bir şekilde gözden geçirerek sadece tasarım alanındaki genişliğini göstermekle kalmamışlar aynı zamanda bu konuda ki bilgilerini de ortaya koymuşlardır [19]. Bu alanda gelinen son noktanın gözden geçirilmesine yönelik benzer bir çalışma AC rezonans devreleri içeren, itme türü MY'leri, değişken manyetik direnç devrelerini ve çekme türü sistemleri inceleyen bir çalışma 1989 yılında Meeks tarafından gerçekleştirilmiştir [20]. 1990 yılında Imlach, ticari olan konik motor pompaları için yatak tasarımının detaylarını anlatmıştır [21]. Aynı yılda Studer'in çalışmaları Sortore tarafından sürekli mıknatıslar kullanılarak yüksek özel yük kapasiteli yatakların tasarlanmasında kullanılmıştır [22].

Hız sınırlarının genişletilmek istenmesi iş makinelerinin yüksek verimle çalışabilmeleri için yüksek hızlara ihtiyaç duymalarından kaynaklanmaktadır. 1988

yılında Brunet M., aktif manyetik yatakların endüstrideki uygulanma alanlarını içeren bir çalışma hazırlamıştır [23].

1991 yılında mastır tezine ek olarak Imlach ve diğerleri radyal AMY'lerde kuvvet ve katılığı doğrusal manyetik devre teorisini kullanarak belirlemeye çalışmışlardır. Konik motor pompalarında kullanılmış olan AMY'ler üzerinde ölçümler yapmışlar ve sonuçların merkezden kaçıklığının az olması durumunda iyi sonuçlar verdiklerini gözlemlemişlerdir . 1992 yılında Bleuler farklı teknik çözümler ve elektromanyetik askı sistemlerinin geniş çaplı gözden geçiren çalışmada bulunmuştur [24].

Son zamanlarda süper iletken malzemelerin araştırmacıların oldukça ilgisini çekmiş ile bu sistemlere ilişkin araştırmalarda literatürde yer alamaya başlamıştır. 1997 yılında Matsumura F. ve diğerleri manyetik yatak sistemlerinin son durumunu anlatan kapsamlı bir çalışma gerçekleştirmişlerdir [25].

1998 Antila ve diğerleri aktif manyetik yataklardaki kuvvet hesaplamalarını sonlu elemanları (SEM) metodunu kullanarak hesaplamışlardır. Manyetik kuvvetlerin ve doğrusallaştırılmış parametrelerin hesaplamalarında doğrusal olmayan iki boyutlu SEM yöntemini kullanmışlardır [26]. Yine Antila ve diğerleri, 1999 yılında yayınladıkları çalışmalarında aktif manyetik yatakların yüksek hızlardaki uygulamalarını açıklamışlardır [27].

1995 ve 1998 yıllarındaki gerçekleştirilen çalışmalarda manyetik yatakların yüksek hızlarda kullanılması üzerine bir çok çalışma gerçekleştirilmiş ve makinenin hızının artması ile güç/boyut oranlarının ve bununla birlikte güç yoğunluğunun, kayıp güç oranının arttığı vurgulanmıştır. Bunun sonucu olarak da çalışmalarda makine soğutmasının özel bir dikkat istediği de açıklanmıştır. Bu durum daha sonraki çalışmalarda enerji kayıplarının ön plana çıkmasına neden olmuştur.

2000'li yıllarda gerek üniversitelerde gerekse sanayide yapılan çalışmalarda MY tasarımlarının özellikle pratikte kullanılabilir hale gelmesi için basit, ekonomik ve az enerji harcayacak şekilde tasarlanılması ön plana çıkmıştır. Manyetik alan teknolojisinin gelişimi ile yüksek enerjili sürekli mıknatıs malzemelerinin ve yüksek doymalı manyetik malzemelerin birlikte kullanıldığı karma sistemlerin her ne kadar harcanan enerji açısından verimli olduğu öne sürülse de gerek işletme sıcaklığının mıknatısların üzerindeki olumsuz etkisi gerek tasarımların karmaşıklığı ve bunun sonucu olan yüksek maliyet, araştırmaların büyük ölçüde aktif sistemler üzerine yoğunlaşmasına neden olmuştur.

Nonami ve diğerleri enerji harcamasının önemli olduğu volanlarda tek yönlü kontrol metodunu H_∞ kontrolörü kullanarak uygulamış ve sonuç olarak klasik sabit denge akımının kullanıldığı fark yöntemine göre daha az enerjinin harcandığı tek yönlü akım kontrolünü uygulamıştır. Özellikle H_∞ kontrolörünü kullanmaktaki amacını ise doğrusal olmayan yapının net bir şekilde modellenemeyen etkilerinin kompanze edilmesi olarak özetlemiştir [28]. Tüm bu gelişmelerin sonucunda MY'lerin uygulama alanlarını gittikçe artmış ve buna paralel olarak farklı tasarımlar ve yöntemler gerçekleştirilmiştir.

2.2.2 Manyetik yatak sistemlerine uygulanan kontrol yöntemlerine ilişkin araştırmalar

Harvey E.M. AMY'ler ile ilgili olarak yaptığı çalışmasında, manyetik askı sistemlerinin tasarımı durumunda ortaya konulan kontrol problemini,

"Sabitlenmiş kuvvet aktüatörleri ve algılayıcı takımları tarafından oluşturulmuş dinamik bir sistemde, algılayıcıların çıkışları aktüatör kuvvetlerini ayarlamada en iyi nasıl kullanılır?"

şeklinde ifade etmiştir [29]. Böylece kontrol problemi net bir şekilde girişleri algılayıcılardan alınan işaretler ve çıkışları aktüatörlere aktarılan kontrol işaretleri olan bir sistemin kontrolü olarak ortaya konmuştur.Literatürde yer alan AMY sistemlerine uygulanan kontrol yöntemlerinin büyük bir kısmını PD ve PID kontrol sistemlerinin kullanıldığı düzenler oluşturmaktadır.

1983 yılında Allaire, Lewis ve Knight PD kontrolörün kullanıldığı manyetik olarak askıya alınan rotor sistemlerinin teorik incelenmesini içeren bir çalışma yapmışlardır [30]. 1985 yılında Habermann ve Brunet Rotor-AMY sisteminin kontrolünü açıklayan bir rapor yazmışlardır. Kullanılan kontrol algoritması PID kontrolör ile birlikte senkron Notch filtresinden oluşmaktadır [31]. 1986 yılında Humpris ve diğerleri çalışmalarında kontrolör algoritmalarının MY'li bir rotor sistemine etkilerini incelemişlerdir [32]. Aynı senede Reinig ve Desrochers sistem kontrolünde hoc Notch filtreleri kullanmadan dengesizliğin giderilebileceğini göstermişlerdir [33]. 1988 yılında Keith çalışmasında benzer performansı sağlayan dijital bir kontrol sistemini belgelemiştir [34].

Lewis, Maslen ve Humpris 1988 yılında MY'li bir sisteme ait teorik ve deneysel cevapların karşılaştırıldığı bir çalışmayı ortaya koymuşlardır [35]. Aynı yılda Beatty dengesizlikten kaynaklanan kuvvetleri azaltmak amacı ile milin dönmesi ile eş

çalışan Notch filtrelerin kullanımlarını araştırmış ve bu filtreleri kullanılarak oluşturulan sistemlerin kararlılığını incelemiştir [36].

1981 yılında Stanway ve Burrows MY'lere ek olarak yağlamalı yatakların bulunduğu bir sistem için durum kestirimli geri-beslemeli çalışma için ilk hazırlığı yerine getirmiştir. Yağlamalı yatakların bulunmasının model referans kontrolörlerin uygulanmasında bu yatakların özelliklerinin yeterince iyi tanımlanması nedeni ile zor olduğunu göstermiştir [37]. 1984 yılında Bleuler Rotor-AMY sistemlerinde yapısal olarak basit kararlı kontrolörler elde etmek amacı ile bölgesel kontrolörlerin uygulanmasını araştırmıştır [38].

1985 yılında Lange sabit yapılı üçüncü dereceden filtre geri-beslemesi temeline dayanan yüksek hız momentum tekerleklerinin kontrolü üzerine çalışmalar gerçekleştirmiştir. Bu tarz bir tasarım yöntemine gitmesine neden olarak ise sabit kontrolör parametrelerini bulmak olduğunu vurgulamıştır. Çalışmasında etkileşimli (*kuplajlı)* ve etkileşimsiz kontrolörlerin kullanılması durumunu incelemiş ve etkileşimli kontrolörün etkileşimsiz kontrolöre göre daha iyi sonuç sergilediğini göstermiştir [39]. Ancak daha sonraları manyetik devrelerde kutupların yerleştirilmesinin de bu konuda önemli rol oynadığına dikkat çekilmiştir.

Matsumura ve Yoshimoto 1986 yılında yüksek devir hızına sahip MY'li rotor sisteminin tam durum geri beslemeli kontrolünü açıklamıştır [40]. 1987 yılında Johnson oldukça enerji depolayan sistemlerin kontrolünde kullanılan durum uzay modellerini ve klasik geri besleme kontrolünü karşılaştırmıştır[41].Gürleyen F. 1994 ve 2005 yıllarındaki çalışmalarında manyetik askı sistemlerinde dayanıklı kontrolörlerin kullanılması yoluna gitmiştir. 1994 yılındaki çalışmasında manyetik askı sistemi için doğrusallaştırıcı kontrol stratejisi geliştirirken son çalışmasında kural tabanı değişken olan kontrolör tasarımını ortaya koymuştur [42-43].

Literatürde MY'ler ile ilgi diğer ilginç bir çalışma alanını ise AMY'ler yardımı ile askıda tutulan rotorun herhangi bir iç veya dış bozucu nedeni ile durağan olan statora çarpması durumunda oluşan dinamiğin incelenmesi oluşturmaktadır. MY'lerin sınırlı yük kapasiteleri olması nedeni ile statorda yer alan kutupların ve laminasyonların koruması için MY'ler yardımcı mekanik yataklar ile birlikte kullanılmaktadır. Rotorun yardımcı yataklara çarpması durumunda sistem doğrusal olmayan bir dinamik yapı sergileyerek kontrolörün yetersiz kalmasına ve devre dışı bırakılmasına yol açar. Bu gibi bir durum MY'lerin sürücü devrelerinin arızalanması, enerji kesintisi veya iç veya dış etkilerden dolayı gerçekleşebilir. Bu nedenle kontrolörün

kararlılıkla birlikte titreşimlerin belirli sınırlar dahilinde kalmasını da sağlayabilmelidir Şahinkaya M.N. ve diğerleri çalışmalarında herhangi bir arıza nedeni ile çarpmanın oluşması durumunu incelemişlerdir [44].

Bu zamana kadar MY'lere uygulanan kontrol yöntemlerinin ortak noktası hepsinde rotor konumunu algılayabilmek için yüksek hassasiyetli algılayıcılara ihtiyaç duyulmasıdır. Bu nedenle farklı bir kontrol yaklaşımı olarak Algılayıcısız Kontrol yöntemine başvurulmuştur. Amaç algılayıcı fiyatını azaltmak ve fiziksel yer açmak ve 1984 yılında Ulbrich ve Anton tarafından ortaya konulan algılayıcılar ile MY'lerin eş merkezli yerleştirilememesinden kaynaklanan sorunları ortadan kaldırmaktır. Bu temel fikir her ne kadar araştırmaların başında ortaya atılmış olsa da bu konudaki asıl gelişmeler 1993 yılında Visher ve Bleuler tarafından gerçekleştirilmiştir [45]. Bir takım araştırmacılar ise doğrudan bir konum algılaması yerine konumu tayin etmek için akı ölçümlerinden yararlanılmıştır. Akı ölçümünü yapabilmek için hall algılayıcılar kullanılmıştır. Ancak bu yöntem her ne kadar bir takım araştırmacılar tarafından algılayıcısız kontrol olarak tanımlansa da aslında daha ucuz olan hall algılayıcıların kullanıldığı 'Fiyat Etkili Kontrol' yöntemidir. 2005 yılında İsviçreli firma tarafından üretime geçirilmesi planlanan baskı devre şeklinde tasarlanan algılayıcıların kullanılmaya başlanması ile birlikte MY'lerdeki eş merkezlenme probleminin oldukça azaltılacağı ve bununla birlikte kısa boyutlu miller gibi yerin sınırlı olduğu uygulamalarda algılayıcıların yerleştirilmesinden doğan problemlerin büyük ölçüde çözülmesi beklenmektedir. Böylece algılayıcısız kontrol yönteminin avantajlarından biri olan fiziksel yer açılması problemi algılayıcı kullanılması durumunda da çözülmüş olacaktır.

Son zamanlarda bulanık mantık, yapay sinir ağları ve genetik algoritmaların yer aldığı ve akıllı kontrol yöntemi olarak adlandırılan yöntemlerde MY kontrolü ile ilgilenen araştırmacıların ilgisini çekmiştir. 1994 yılında Weidemann ve diğerleri MY'lerin kontrolünde bulanık kontrolörü (BK) kullanmışlar ve her MY'nin kontrolünü yapan bulanık kontrolör tasarlamışlardır [46]. Koskinen ve diğerleri ise asıl olarak PID kontrolörü kullanmışlar ve türev katsayısını bulanık kontrol yardımı ile ayarlamışlardır. Bunu yapmalarındaki amaçlarını sinüzoidal dalgalanmaların oluşturduğu gürültüyü bastırmak olarak ifade etmişlerdir [47]. 1995 yılında Hung J.Y. ise farklı olarak karma bir kontrol yapısını kullanmayı tercih etmiştir. Karma olarak ifade ettiğimiz yapıda klasik PID kontrolör, bulanık kontrolör ile birlikte seri olarak kullanmıştır. Böylece her iki kontrol yöntemini faydalarını birleştirmeyi hedeflemiştir. Sonuç olarak doğrusal kontrol işaretini, doğrusal olmayan etkileri

kompanze edecek şekilde ayarlamıştır [48]. Liebert W. de çalışmalarında doğrusal kontrol ile bulanık kontrolü birlikte kullanma yoluna gitmiştir. Ancak Hung'dan farklı olarak kontrolörleri paralel olarak kullanma yoluna gitmiştir [49]. Hong ve Langari ise 2000 yılında sadece bulanık kontrolörü kullanarak harmonik bozucuların oluşturduğu titreşimleri bastırmaya çalışmışlardır [50]. 2002 yılında Xu ve diğerleri ise bulanık mantığı AMY'nin modellenmesinde kullanmışlar ve kontrolör olarak da Kayan Kipli kontrolörden faydalanmışlardır. AMY'nin bulanık modelini elde etmede Bulanık-yapay-sinir ağlarından faydalanmış ve kontrolör olarak kayan modlu kontrolü tercih etmiştir. Bunu tercih etmesindeki neden olarak AMY'lerin matematiksel modelinin elde edilmesindeki güçlükler olduğunu ileri sürmüşlerdir [51]. 2003 yılında Hartavi A.E, Tuncay R.N ve diğerleri ise bir serbestlik dereceli AMY'ye geleneksel PD ve Bulanık kontrolörü (BK) uygulayarak iki farklı kontrol yöntemini karşılaştırmışlardır. Çalışmalarından elde ettikleri sonuçlardan hareket ile BK'nın PD kontrolöre göre daha iyi sonuç verdiğini ancak bunun BK'nın tercih edilmesi için yeterli olmadığını belirtmişlerdir [52].

1998 yılında çalışmaların bazılarında akıllı kontrol yöntemlerinden bir diğeri olan, yapay sinir ağları yardımı ile AMY'lerin kullanıldığı sistemlerdeki dengesizlik problemi çözülmeye çalışılmıştır Titreşimler her ne kadar klasik metotlar ile basit anlamda ölçülerek kaldırılsa da tamamen yok edilemediği bunun sonucu olarak da radyal kuvvetlerin etkin durumda kaldığı ortaya konulmuştur. Schroder ve diğerleri ise çalışmalarında, literatürde uygulanan ileri modern kontrol tekniklerinin iyi sonuç vermelerine karşın kesin modellerin geliştirilmesine ihtiyaç duyulduğunu ve bunun ise karmaşık tasarım işlemleri ile engellendiğini belirtmişlerdir. Tipik endüstriyel tasarımın kaba bir modelden hareket ile PID kontrolörü tasarımına başlandığını ve istenilen performansın ancak prototip üzerinde elle ayar yapılmak sureti ile elde edildiğini açıklamışlardır. Buradan hareketle Schroder ve diğerleri PID kontrolör parametrelerini Genetik Algoritmadan (GA) yararlanarak gerçekleştirmişlerdir.Sonuç olarak ise klasik iyileştiricilerin oldukça doğrusal olmayan yapılar ve gelişi güzel gürültüler karşısındaki zorlukların GA'nın dayanıklılık özelliği ile giderilebileceğini göstermişlerdir [53].

Literatürde kontrol teorisi ve uygulama yöntemlerindeki ilerlemelere paralel olarak MY sistemlerinin yapısına uygun olan daha bir çok kontrol algoritmaları geliştirilmekte ve uygulamalara özel değişik tasarımlar yapılmaktadır.

3 AKTİF MANYETİK YATAKLI SİSTEMLER

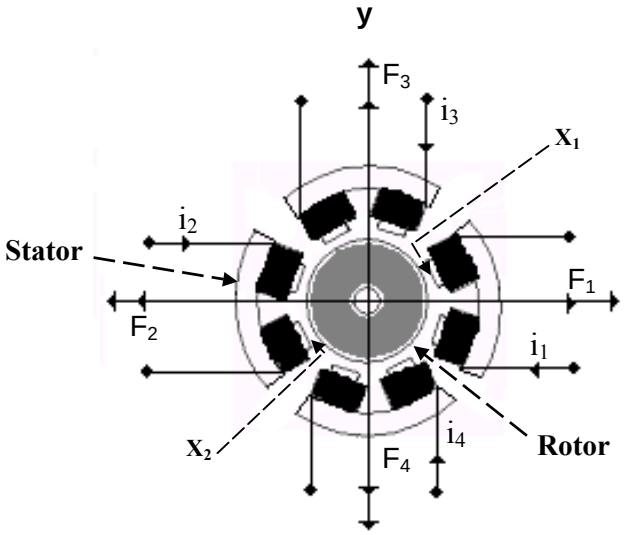
3.1 Aktif Manyetik Yatağın Çalışma Prensibi

MY'ler bir mili veya rotoru manyetik alanın oluşturduğu kuvvetler yardımı ile hiçbir fiziksel temas olmaksızın havada asılı tutan elektromekanik yapılardır. Bu çalışmada, rotor ile stator arasındaki etkileşim kuvvetinin çekme türünde olması nedeni ile Aktif Manyetik Yataklar göz önüne alınmıştır. AMY'ler temel olarak üç farklı öğeden meydana gelirler. Bunlar :

- Elektromekanik yapı,
    - Stator
    - Rotor
- Algılayıcı,
- Kontrol ünitesi

dir. Bunlardan ilki olan elektromekanik aksam havada asılı olarak tutulmak istenen cismin dengede kalması için gerekli kuvveti sağlar. Stator ve rotor olmak üzere iki parçadan meydana gelmektedir. Stator yapı olarak tipik bir elektrik motorunun statorunu andırmaktadır. Rotor ise stator ile arasındaki çekme kuvvetinin oluşabilmesi için ferromanyetik malzemeden yapılır. Statorda yer alan elektromıknatıslardan denge akımı geçirilmesi ile elektromanyetik kuvvetler oluşumu sağlanır. Eşit büyüklükte ve birbirine zıt yönde olan bu kuvvetler rotora etkiyerek, cismin havada asılı tutulmasını sağlar (Şekil 3.1). Ancak elektromıknatısların herhangi birinden kontrol edilmemiş bir akımın geçmesi veya dış bir bozucunun sisteme etkimesi durumunda rotor statora doğru hızla hareket eder ve çarpar. Bu nedenle AMY'ler doğal olarak kararsız yapılardır. Sistemin kararlı bir biçimde çalışması için algılayıcılara ve kontrol ünitesine ihtiyaç duyulmaktadır. Rotor konumunu algılamada çoğunlukla kapasitif veya endüktif tip algılayıcılar kullanılır. Algılanan konum bilgisi kontrolöre uygulanarak rotorun denge konumuna

geri gelmesi için gerekli olan kontrol işareti üretilir. Böylece sistemin kararlı olarak çalışması sağlanmış olur.



Şekil 3.1 Çekme ilkesi ile çalışan MY

3.2 AMY'nin Matematiksel Modeli

AMY'ye ait matematiksel model Newton'un Doğrusal Hareket yasasının sisteme uygulanması ile elde edilir. İncelemeler esnasında basitlik sağlaması açısından MY'nin sadece x-ekseni hareketi göz önüne alınmıştır. Bu durumdaki hareket denklemi

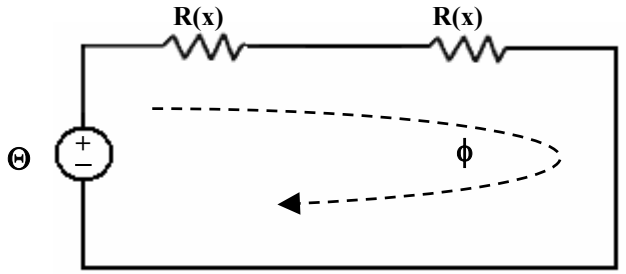
$$m\frac{d^2x}{dt^2} = F_2 - F_1 \tag{3.1}$$

ile ifade edilir. Burada yer alan F_1 ve F_2, elektromıknatıslar tarafından üretilen elektromanyetik kuvvetleri, x ise denge konumundan uzaklaşma miktarını göstermektedir. Elektromanyetik kuvvetlere ait açık ifade yazılmak istenirse manyetik eşdeğer devreden ve koenerjiden faydalanmak gerekir. Elektromıknatıslara ait manyetik eşdeğer devre Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Eşdeğer devrenin elde edilmesi aşamasında ferromanyetik malzemenin manyetik geçirgenliğinin havanınkinden çok daha büyük olması nedeni ile manyetik alan şiddetinin hava aralığında yoğunlaştığı kabul edilmiştir. Sonuç olarak stator ve rotor manyetik

dirençleri ihmal edilmiştir. Eşdeğer devrede yer alan hava aralığı manyetik direnci ise elektromıknatısın kesit alanı A, hava aralığı x ve manyetik geçirgenlik μ_o kullanılarak

$$\sum R(x) = 2R(x) = \frac{2x}{\mu_0 A} \qquad (\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H/m) \qquad (3.2)$$

biçiminde ifade edilmiştir.



Şekil 3.2 Elektromıknatısa ait manyetik eşdeğer devre

Eşdeğer devredeki amper sarım tarafından oluşturulan manyetik akı ise çevre denklemi kullanılarak bulunabilir. Bu durumda manyetik akıya ilişkin ifade

$$\Phi(i,x) = \frac{N.i}{\Sigma R(x)} = \frac{\mu_0 ANi}{2x} \qquad (3.3)$$

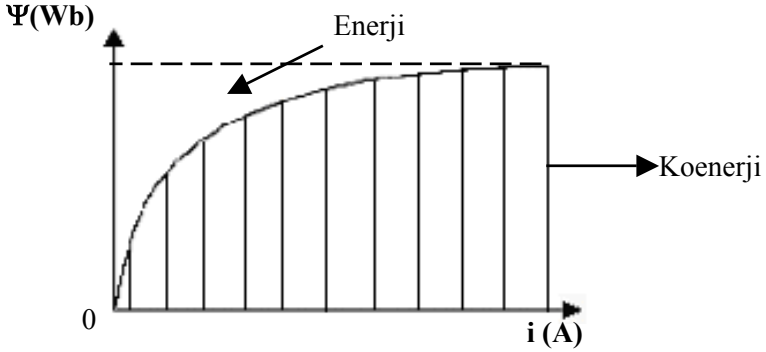
dir. Buradaki N sarım sayısı, i bobinden akan akım, R(x) hava aralığı manyetik direnci, μ_o havanın manyetik geçirgenliği, A elektromıknatıs kesit alanı ve x ise hava aralığını göstermektedir. N sarımlı manyetik çekirdekte oluşan halkalanma akısı ise

$$\Psi(i,x) = N\Phi = \frac{\left(\mu_0 AN^2\right)i}{2x} \qquad (3.4)$$

dir. Eşdeğere devredeki ifadelerin belirlenmesinden sonra koenerji kolaylıkla hesaplanılabilir. Koenerjiye Şekil 3.3'de gösterilen eğrinin altında kalan alan olup matematiksel olarak

$$W_c(i,x) = \int \psi(i,x)\, di \tag{3.5}$$

biçiminde ifade edilir. Halkalanma akısının devre parametreleri türünden yazılmış ifadesi (3.4), (3.5) denkleminde yerine yazılır ise koenerji eşdeğer devre parametreleri cinsinden bulunur.



Şekil 3.3 Akı-akım karakteristiği

$$W_c(i,x) = \int \frac{(\mu_0 AN^2)i}{2x}\, di = \frac{\left(\mu_o AN^2 i^2\right)}{4x} \tag{3.6}$$

Bu durumda her bir elektromıknatıs tarafından üretilen elektromanyetik kuvvet ifadesi Koenerji den hareketle

$$F_e = \frac{\partial W_c}{\partial x} = -\frac{\left(\mu_0 AN^2\right)i^2}{4x^2} \tag{3.7}$$

biçiminde yazılır. Elektromanyetik kuvvet denklemi, üretilen kuvvetin akım ile doğru, yer değiştirme ile ters orantılı olduğunu göstermektedir. Denklemin önünde yer alan eksi işareti ise kuvvetin çekme yönünde olduğunu belirtmektedir. Kuvvet ifadesi (3.1) denkleminde yerine yazılırsa AMY'nin x-ekseni hareket denklemi

$$m.\frac{dx^2}{dt^2} = k\left[\left(\frac{i_2{}^2}{x_2{}^2}\right) - \left(\frac{i_1{}^2}{x_1{}^2}\right)\right] \tag{3.8}$$

olarak ifade edilir. Buradaki m askıda tutulan cismin kütlesini, i_1, i_2, x ekseninde karşılıklı yer alan elektromıknatısların akımlarını, x_1 ve x_2 ise elektromıknatıslar ile rotor arasındaki mesafeyi göstermektedir. Bu denklem elektromıknatıs akımlarının

ve hava aralığının eşit olduğu durumda rotora etkiyen çekme kuvvetlerinin de eşit olacağını göstermektedir. Uygulanan çekme kuvvetlerinin eşit olduğu ve dışarıdan hiç bir bozucu etkinin olmadığı bu durum "Denge Durumu" olarak adlandırılır. Ancak elektromıknatısların herhangi birinden fazla bir akım geçmesi veya bozucu bir kuvvetin etkimesi durumunda sisteme etkiyen net kuvvet sıfırdan farklı olur. Bu fark kuvveti ise rotorun kuvvetin fazla olduğu yöne doğru hareket etmesine neden olur. Rotora etkiyen kuvvetlerin kontrol edilememesi durumunda rotor hızlanarak statora çarpar. Sonuç olarak AMY'ler doğal olarak son derece kararsız, çok değişkenli ve zamanla değişen elektromekanik yapılardır.

Sistemin kararsız yapısı AMY'nin herhangi bir eksenine ilişkin transfer fonksiyonu incelendiğinde görülebilmektedir. Sisteme ait hareket denklemine bakıldığında denklemin doğrusal olmadığı görülmektedir. Bu durumda ele alınan denklemin genel ve doğrudan doğruya bir çözümü yoktur. Doğrusal olmayan matematiksel modellerin analitik çözümü olmasa da bilgisayarla ve denklemlerin doğrusallaştırılması ile olmak üzere iki çözüm yolu bulunmaktadır.

Bu çalışmada, doğrusal yapıda olmayan AMY denklemlerinin çözümünde ikinci yöntem olan doğrusallaştırma yöntemi kullanılmıştır. Bunun içinde AMY'nin hareket denklemi Taylor serisine açılmıştır. İşlemlerin anlaşılabilmesi için denklemde yer alan elektromanyetik kuvvetler sırası ile Taylor serisine açılmış ve daha sonra denklemdeki yerlerine yazılmıştır.

AMY tarafından üretilen elektromanyetik kuvvet akım ve konum olmak üzere iki değişkene bağlıdır. Bu tür bir fonksiyonun f(x,y), sistemin denge durumunu ifade eden denge noktası etrafında (x_o,y_o) Taylor serisine açılımı

$$f(x,y) = f(x_o,y_o) + \frac{1}{1!}\left[f_x(x_o,y_o)(x-x_o)\right] + f_y(x_o,y_o)(y-y_o) + \ldots] \tag{3.9}$$

biçiminde ifade edilir. Aynı biçimde en genel hali ile elektromanyetik kuvvet ifadesi yazılarak denge noktası olan (i_o,x_o) civarında Taylor serisine açılır ve ilk iki terimi alınırsa

$$F_e(i,x) = F_e(i_o,x_0) + \frac{1}{1!}\left[F_e(i_0,x_0)(i-i_0) + F_e(i_0,x_0)(x-x_0)\right] \tag{3.10}$$

ifadesi bulunur. Bu ifadede sırası ile x-ekseninde yer alan elektromıknatıs kuvvetleri yazılır ise sırası ile birinci ve ikinci elektromıknatıslar için

$$F_{e1}(i_1, x_1) = k\left(\frac{i_{10}}{x_{01}}\right)^2 + \frac{1}{1!}\left[2k\left(\frac{i_1}{x_{01}^{\ 2}}\right)(i_1 - i_{10}) - 2k\left(\frac{i_1^2}{x_{01}^3}\right)(x_1 - x_{01})\right] \tag{3.11}$$

$$F_{e2}(i_2, x_2) = k\left(\frac{i_{20}}{x_{02}}\right)^2 + \frac{1}{1!}\left[2k\left(\frac{i_2}{x_{02}^{\ 2}}\right)(i_2 - i_{02}\ ) - 2k\left(\frac{i_2^2}{x_{02}^3}\right)(x_2 - x_{02})\right] \tag{3.12}$$

denklemleri elde edilir. Bu ifadeler (3.8) denkleminde yazılır ve daha sonra i_{10} ve i_{20} denge akımları yerine i_b, x_{01} ve x_{02} denge konumları yerine g_o yazılarak düzenlenir ise

$$m\frac{dx_1^{\ 2}}{dt^2} = 4k\left[\left(\frac{i_b}{g_0^{\ 2}}\right)i_c - \left(\frac{i_b^{\ 2}}{g_0^{\ 3}}\right)\Delta x\right] \tag{3.13}$$

denklemi bulunur. Buradaki Δx denge konumundan uzaklaşma miktarını, i_c kontrol akımını ve g_0 denge konumunu göstermektedir. Burada kontrol akımı ve yer değiştirmenin önünde yer alan terimler akım katılığı K_i ve konum katılığı K_x olarak tanımlanmaktadır.

$$K_i = \left[4k\frac{i_b}{g_0^2}\right] \tag{3.14}$$

$$K_x = \left[4.k\frac{i_b^2}{g_0^3}\right] \tag{3.15}$$

Konum ve akım katılığı olarak tanımlanan terimler daha önceki denklemde yerine yazılır ise

$$m\frac{dx_1^2}{dt^2} = K_i\, i_c + K_x \Delta x \tag{3.16}$$

ifadesi bulunur. Daha sonra $\Delta x=x_1-x_{o1}$ ifadesinin ikinci türevi alınır ve (3.16) denkleminde yerine yazılırsa

$$\frac{d^2x_1}{dt^2}=\frac{d^2\Delta x}{dt^2} \tag{3.17}$$

$$m.\frac{d^2\Delta x}{dt^2}=K_i i_c+K_x\Delta x \tag{3.18}$$

eşitliği elde edilir. Bu ifadenin Laplace dönüşümü alınır

$$m s^2\Delta x(s)=K_i i_c(s)+K_x\Delta x(s) \tag{3.19}$$

ve elde edilen denklem düzenlenirse AMY transfer fonksiyonu T(s)

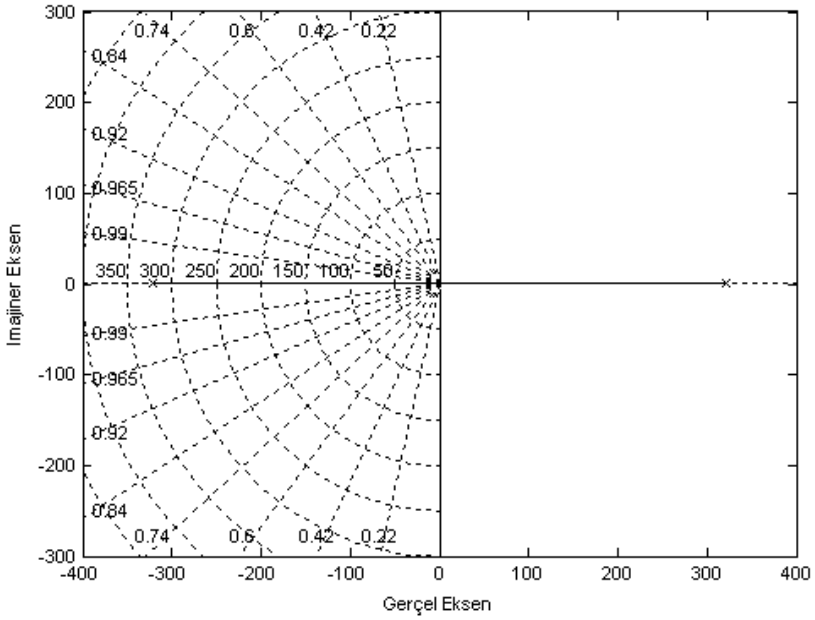
$$T(s)=\frac{\Delta x(s)}{i_c(s)}=\frac{K_i}{ms^2-K_x} \tag{3.20}$$

olarak bulunur. Sistemin karakteristik denklemi olan payda $q(s) = ms^2-K_x$ ele alınırsa denklem kökleri $s_1=+\sqrt{\frac{K_x}{m}}$ ve $s_2=-\sqrt{\frac{K_x}{m}}$ olarak bulunur. Denklem kökleri incelendiğinde s_1 kökünün sağ yarı düzlemde olduğu görülür. Bu ise sistemin kararsız olmasına neden olur (Şekil 3.4). AMY'lerin kararsız olan bu yapıları aktif kontrole ihtiyaç duymalarına neden olur. Uygun kontrol yaklaşımı ile rotorun denge konumundan uzaklaşma miktarı ölçülerek kontrolöre uygulanır. Böylelikle üretilen kontrol işareti elektromıknatıslara uygulanarak sistemin tekrar denge konumuna gelmesi sağlanır. Ancak sistemin kontrolü esnasında kararsız yapının yanı sıra algılayıcı etkileri, dengesizlikten kaynaklanan titreşimler ve rotor dinamiğinin de göz önüne alınması gerekmektedir.

3.3 AMY'nin Kapalı Çevrim Kontrolü

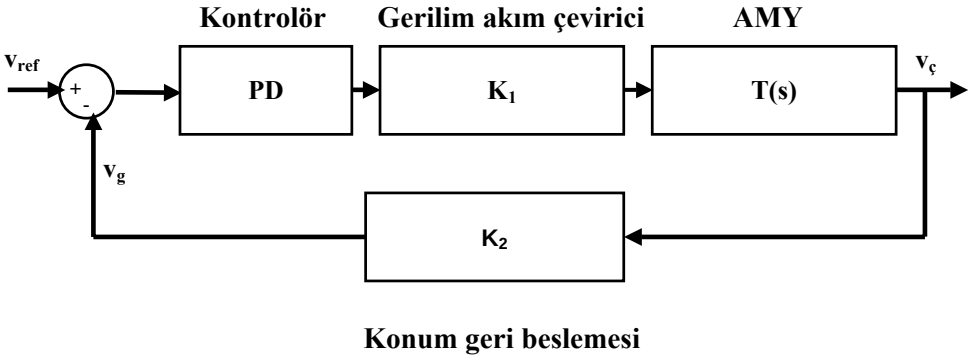
AMY'ler kararsız yapıları nedeni ile kapalı çevrim kontrolüne ihtiyaç duyarlar. Şekil 3.5'de AMY kontrolünde oldukça sık kullanılan klasik PD kontrolörün yer aldığı kapalı çevrim blok diyagramı gösterilmiştir. Daha önceden belirlenmiş olan referans

bilgisi algılayıcıdan gelen konum bilgisi ile karşılaştırılır. Karşılaştırma sonucunda elde edilen hata bilgisi PD kontrolöre uygulanır.



Şekil 3.4 AMY'ye ait köklerin yer eğrisi

Böylece kontrolör tarafından sistemi denge konumuna getirecek olan kontrol işareti üretilir. Üretilen kontrol işareti gerilim akım çeviriciden geçtikten sonra AMY'ye uygulanarak sistemin denge konumuna gelmesi sağlanır. Sisteminin kararlı çalışmasını sağlayan kontrolör katsayıları, karakteristik denkleme Routh-Hurwitz kriteri uygulanarak belirlenir (Ek A).



Şekil 3.5 AMY sistemi kapalı çevrim blok diyagramı

4 DİNAMİK SİSTEMLERİN MODELLENMESİ

4.1 Lagrange Mekaniği

Turbomoleküler Pompalar (TMP) ve Rotor-AMY sistemleri, kütlesi ve birbirine göre bağıl hareket yapan kısımları olan yapılardır. Bu nedenle her iki yapıda dinamik sistem olarak tanımlanır. Dinamik sistemlere ait hareket denklemleri 2 yöntem kullanılarak elde edilir. Bunlar:

- Newton Mekaniği
- Lagrange Mekaniği

dir. Newton Mekaniğinde kuvvet, momentum, hız ve ivme gibi vektörel büyüklükler kullanır. Ayrıca sisteme ait dinamik denklemler yazılırken serbest cisim diyagramından (SCD) faydalanılır. Sistemdeki her kütle ve her bağlantı noktası diğer bağlantılardan izole edildikten sonra her birine ait SCD çizilir. Daha sonra herbirine etkiyen kuvvetler kullanılarak sistem dinamik denklemi yazılır.

Lagrange mekaniğinde ise skaler ifadeler olan kinetik enerji, potansiyel enerji ve virtüel iş prensibi kullanılmaktadır. Yöntem oldukça çok yönlüdür ve diğer yöntemlerin uygulanması durumunda karşılaşılan zorluklardan ve karışıklıklardan uzaktır. Bu neden ile TMP ve Rotor-AMY sistemlerinin modellemesinde Lagrange dinamiğini kullanılmıştır.

Lagrange denklemi, sistem kinetik enerjisi (T) ve potansiyel enerjisi (V) arasındaki fark olarak tanımlanır ve genelleştirilmiş formda

$$L = T - V = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{N} a_{ii}.q_i^2 + \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=i}^{i-1} a_{ij}.\frac{dq_i}{dt}\dot{q}_i.q_j + \sum_{i=1}^{N} a_{io}.\frac{dq_i}{dt} + a_{oo} \qquad (4.1)$$

denklemi ile ifade edilir. Buradaki a_{ij} katsayıları, q_i ise genelleştirilmiş koordinatları göstermektedir. Lagrange denkleminde yer alan terimler daha açık bir biçimde

yazılabilir. Bunun için kinetik enerji ve değişimi ile potansiyel enerji ve değişimi genelleştirilmiş konumların ve hızın fonksiyonu olarak ifade edilir. Böylece Lagrange denklemi

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial q_i}\right)-\frac{\partial L}{\partial q_i}+\sum_{j=1}^{N-M}\lambda_j f_{ji}=Q_i \tag{4.2}$$

biçiminde ifade edilir. Buradaki $f_{ji,}$ j inci sınırlayıcı denklemin q_i inci genelleştirilmiş koordinata göre türevini, λ_i Lagrange çarpanını, Q_i, genelleştirilmiş koordinatlardaki i inci kuvveti ve q_i genelleştirilmiş koordinatları göstermektedir.

4.2 Turbomoleküler Pompa-AMY Sistemi

Bu çalışmada TMP-AMY sisteminin dinamik denklemi Lagrange mekaniği yardımı ile elde edilmiştir. Ancak TMP'nin dinamik denklemine geçilmeden önce sistemin daha iyi anlaşılabilmesi için TMP'nin yapısı ve çalışma ilkesi tanımlanmıştır.

4.2.1 Turbomoleküler Pompalar

Gaz ile çalışan pompaların temel işlevleri bulundukları ortamlardaki gazları sistem dışına çıkarmak olarak tanımlanır. Pompalar vakum, yüksek vakum ve ultra-yüksek vakum olmak üzere 3 ana gurupta toplanır. Sanayide vakuma ihtiyaç duyulma nedeni özel bir takım üretim safhalarında, gazların dahi bulunmadığı mümkün olduğunca temiz ortamlar oluşturarak yüksek kaliteli imalatlar yapabilmektir (Şekil 5.1).



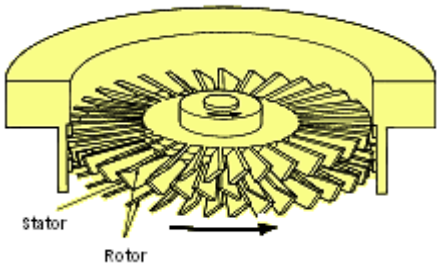
Şekil 4.1 a.) Atmosferdeki yüzey b.) Yüksek vakumdaki yüzey kirliliği

Gazların ortamdan uzaklaştırıldığı vakum uygulamaları sadece kirlenmenin oluşmasını engellemek ile kalmaz ayrıca gazın ısınması veya soğuması sonucunda oluşan hava akımı, ısı yalıtımı, radyasyon emilimi ve oksitlenme gibi bazı istenmeyen fiziksel ya da kimyasal olayları da engeller. Netice olarak vakum uygulamaları ile oldukça kontrollü bir ortam elde edilir [54].

Günümüzde yeni geliştirilen fabrikasyon tekniklerin ile dayanıklılığı yüksek, ağırlığı az alaşımların geliştirilmesi ve değişik yatak tasarımlarının sistemlere uygulanabilirliği oldukça özel bir pompa türü olan TMP'lerin gelişimine büyük katkıda bulunmuştur. Özellikle manyetik yataklı TMP'lerin üretimi ile bu pompaların uygulama alanları daha da genişlemiştir.

4.2.2 TMP'lerin Çalışma İlkesi

TMP'nin çalışma ilkesi açıklanırken en çok kullanılan yöntem rotorun üst kısmında yer alan mekanizmanın yapısal olarak kendine benzeyen pencere fanı ile karşılaştırılmasıdır. TMP'ler Şekil 4.2'de gösterildiği gibi rotora eklenmiş olan bir dizi kanatçıklar içerir. Bunlar birbiri ardına yerleştirilmiş olan pervanelere benzetilebilir. Pencere fanları, atmosferik basınçta çalışan ve yapısındaki kanatçıkları yardımı ile hava moleküllerini hareket ettiren cihazlardır. TMP'ler de benzer şekilde ortamda yer alan gaz moleküllerini kanatçıkları yardımı ile dışarıya atan yapılardır. Ancak bu işlemi pervanelerden farklı olarak düşük bir basınçta gerçekleştirirler.



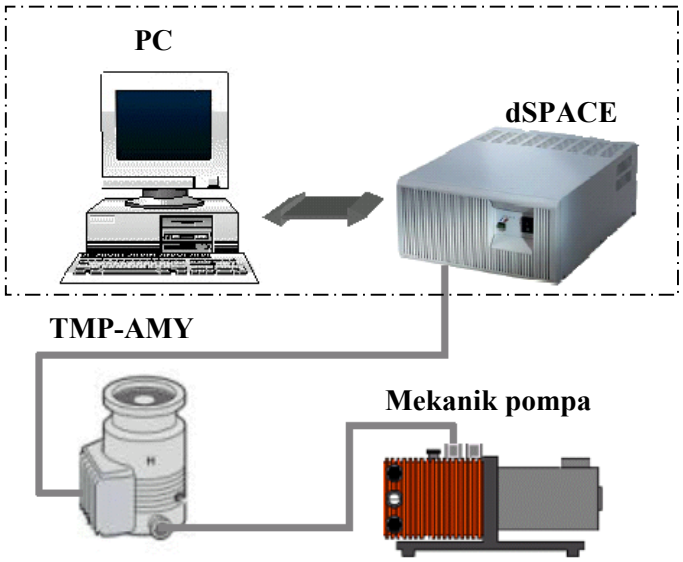
Şekil 4.2 Rotor-stator yapısı

Pompalamanın etkili olabilmesi içinde kanatçık hızının, pompalanan gazın molekül hızıyla yaklaşık olarak aynı olması gerekir. Bu ise daha etkin bir pompalama için daha yüksek hızlara çıkılmasının nedenli önemli olduğunu göstermektedir. Bugün MY'ler sağladıkları yüksek hız seviyeleri ile TMP'lerde oldukça tercih edilen elektromekanik yapılardır. TMP'lerde kullanılmaları halinde sisteme sağladıkları yüksek hıza ek olarak yağlama gerektirmemeleri, hidrokarbon kirlenmeye yol açmamaları, sistem dinamiğinin kontrolüne imkan tanımları ve daha yüksek sıcaklıklarda çalışılabilmeleri sisteme sağladıkları diğer avantajlardır.

4.2.3 TMP-AMY Sistemi

Tipik bir vakum sistemi bir veya daha fazla pompanın vakum istenen hazneye bağlanması ile oluşturulur. Vakum sistemlerinde pompalar arasında çeşitli tüpler, vanalar ve o-halkaları gibi parçalar bulunur. Bunlar sistemin uygun bir biçimde

çalışması için gereklidirler. Ancak sistem yapısının daha karmaşık bir hale gelmesine neden olurlar. AMY'lerin kullanıldığı tipik bir TMP sistemi ise Şekil 4.3'de gösterilmiştir. Sistemde mekanik yatakların kullanıldığı TMP'lerden farklı olarak aktif denetim için gerekli olan cihazlar yer almaktadır. Bir başka deyişle rotorun askıya alınmasını sağlayan radyal ve eksenel AMY'ler ile birlikte ana denetim bilgisayarından, dSPACE modülünden, konum algılayıcılarından, güç elektroniği devrelerinden ve yardımcı yataklardan oluşmaktadır.



Şekil 4.3 TMP-AMY sistemi deney düzeneği

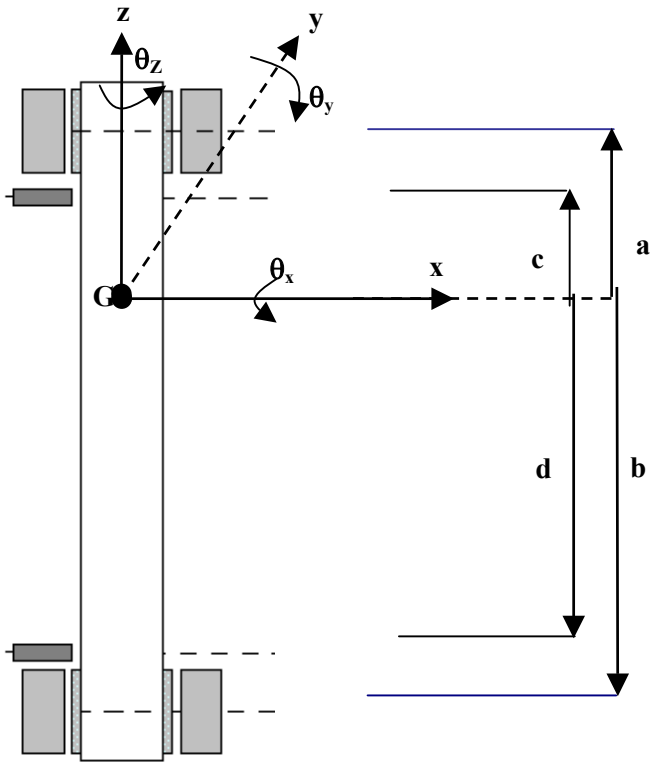
4.2.4 TMP-AMY Sistemi Benzetim Modeli

TMP-AMY sistem modeli Lagrange mekaniği kullanarak elde edilmiştir. Bunun içinde ilk olarak sistemin kütle merkezinden geçtiği farz edilen sabit bir xyz eksen takımı tanımlanmıştır. Şekil 4.4'de TMP'nin MY'ler ile askıya alınan rotor taslağı gösterilmiştir. Ayrıca şekilde AMY'lerin ve algılayıcıların rotor üzerindeki yerleşim noktalarıda belirtilmiştir. Ancak *yGz* düzleminde simetrik olarak yerleştirilmiş olan AMY'ler, algılayıcılar ve yardımcı yataklar şekil üzerinde gösterilememiştir.

Şekil 4.4'e bakıldığında G kütle merkezini (KM), x_{km}, y_{km}, z_{km} KM koordinatlarını, θ_x, θ_y ve θ_z eğiklik açılarını, a, b MY koordinatların, c, d ve z ise ölçüm koordinatlarının KM'ye olan mesafesini göstermektedir. Koordinatları ve kuvvetleri kütle merkezine göre ifade edilen TMP-AMY sistemi hareket denklemi

$$[M]\left\{\frac{d^2q}{dt^2}\right\}+\Omega[C]\left\{\frac{dq}{dt}\right\}=Q+f_g+d_u \tag{4.3}$$

ile ifade edilir. Hareket denklemindeki matris ve vektörlerin açık ifadeleri ise (4.4), (4.5), (4.6), (4.7) ve (4.8) denklemlerinde verilmiştir.



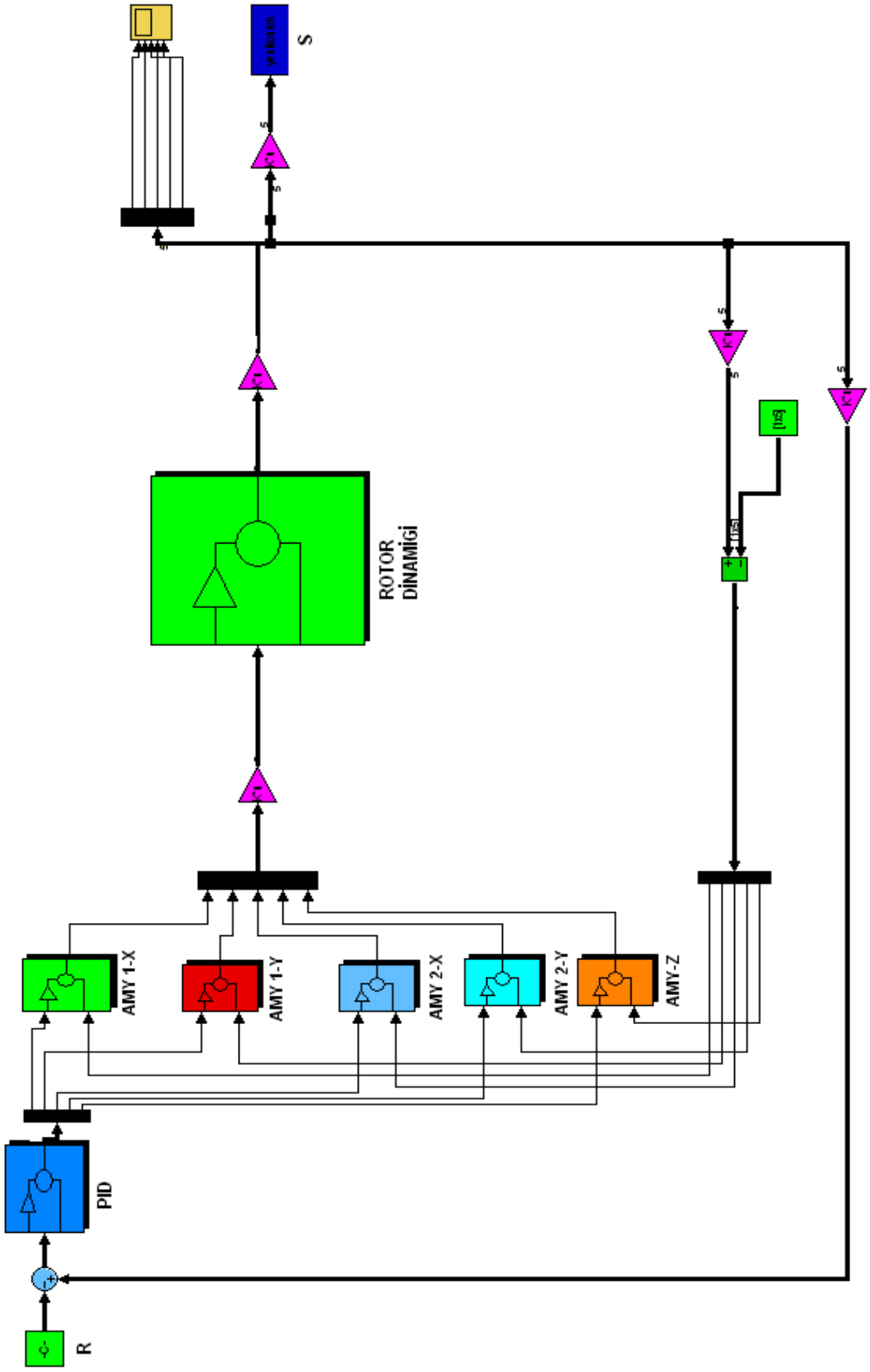
Şekil 4.4 Manyetik yataklamalı dikey rotor taslağı

$$M = diag\left[m, m, I_t, I_t, m\right] \tag{4.4}$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_p \\ 0 & 0 & 0 & -I_p & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{4.5}$$

$$Q = \left[F_x, F_y, M_x, M_y, F_z\right] \tag{4.6}$$

$$q = \left[x, y, \Theta_x, \Theta_y, z\right]^T \tag{4.7}$$



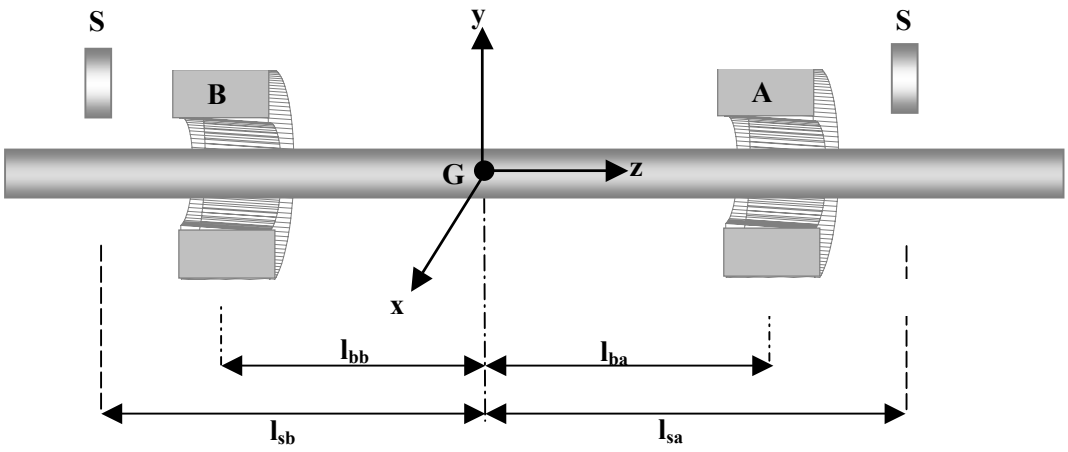
Şekil 4.5 TMP-AMY sistemi benzetim modeli

$$f_g = [0,0,0,0,m]^T \tag{4.8}$$

Buradaki Ω milin açısal hızını, q=genelleştirilmiş koordinat vektörünü, Q=genelleştirilmiş kuvvet vektörünü, M=kütle matrisini, C=sönüm matrisini, f_g=yerçekimi vektörünü ve d_u=dengesizlikten kaynaklanan bozucuları ifade etmektedir. TMP'ye ait hareket denkleminin elde edilmesinden sonra TMP-AMY sistemi benzetim modeli elde edilmiştir. Bunun içinde, rotora dinamik denklemi, AMY modelleri, PID kontrolör,Tablo B.1'deki parametreleri ile Matlab®/Simulink ortamına aktarılmıştır. Şekil 4.5 TMP-AMY sistemi benzetim modeli gösterilmiştir.

4.3 Rotor-AMY Sistemi Benzetim Modeli

Rotor-AMY sisteminin değişik çalışma şartlarındaki dinamik davranışını incelenmek maksadı ile dinamik modeli elde edilmiştir. Bunun için TMP'nin modellenmesinde kullanılan Lagrange mekaniğinden faydalanılmıştır. Şekil 4.6'da Rotor-AMY sistemi rotor taslağı gösterilmektedir. Askıya alınan rotorun her iki ucunda x ve y eksenlerine yerleştirilmiş iki adet AMY takımı yer almaktadır. KM2nin sağında yer alan AMY 'A', solunda kalan ise 'B' harfi ile gösterilmiştir. Rotor konumunu ölçmede kullanılan algılayıcılar ise AMY'lerin her iki yanına yerleştirilmiş ve S harfi ile gösterilmiştir.



Şekil 4.6 Manyetik yataklı yatay rotor taslağı

AMY koordinatlarının KM'ne olan mesafeleri l_{ba} ve l_{bb} ile gösterilirken algılayıcıların KM'ne olan mesafeleri l_{sa} ve l_{sb} ile gösterilmiştir. Rotor-AMY sistemine ait hareket denklemi ise şekil üzerinde G harfi ile gösterilmiş olan KM'den

geçtiği kabul edilen eksen takımına göre elde edilmiştir. KM koordinatları x_{km}, y_{km}, eğiklik açıları ise θ_x ve θ_y olarak tanımlanmıştır. Sonuç olarak Rotor-AMY sisteminin genelleştirilmiş koordinatlardaki hareket denklemi en genel hali ile

$$[M]\left\{\frac{d^2q}{dt^2}\right\}+\Omega[C]\left\{\frac{dq}{dt}\right\}=Q+f_g+d_u \tag{4.9}$$

biçiminde ifade edilmiştir. İfadede yer alan kütle matrisi, sönüm matrisi, genelleştirilmiş kuvvet, genelleştirilmiş konum ve yerçekimi kuvveti vektörleri sırasıyla

$$M = diag\left[m, m, I_t, I_t\right] \tag{4.10}$$

$$C=\begin{bmatrix}0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & -I_p\\ 0 & 0 & I_P & 0\end{bmatrix} \tag{4.11}$$

$$Q=\left[F_x, F_y, M_x, M_y\right] \tag{4.12}$$

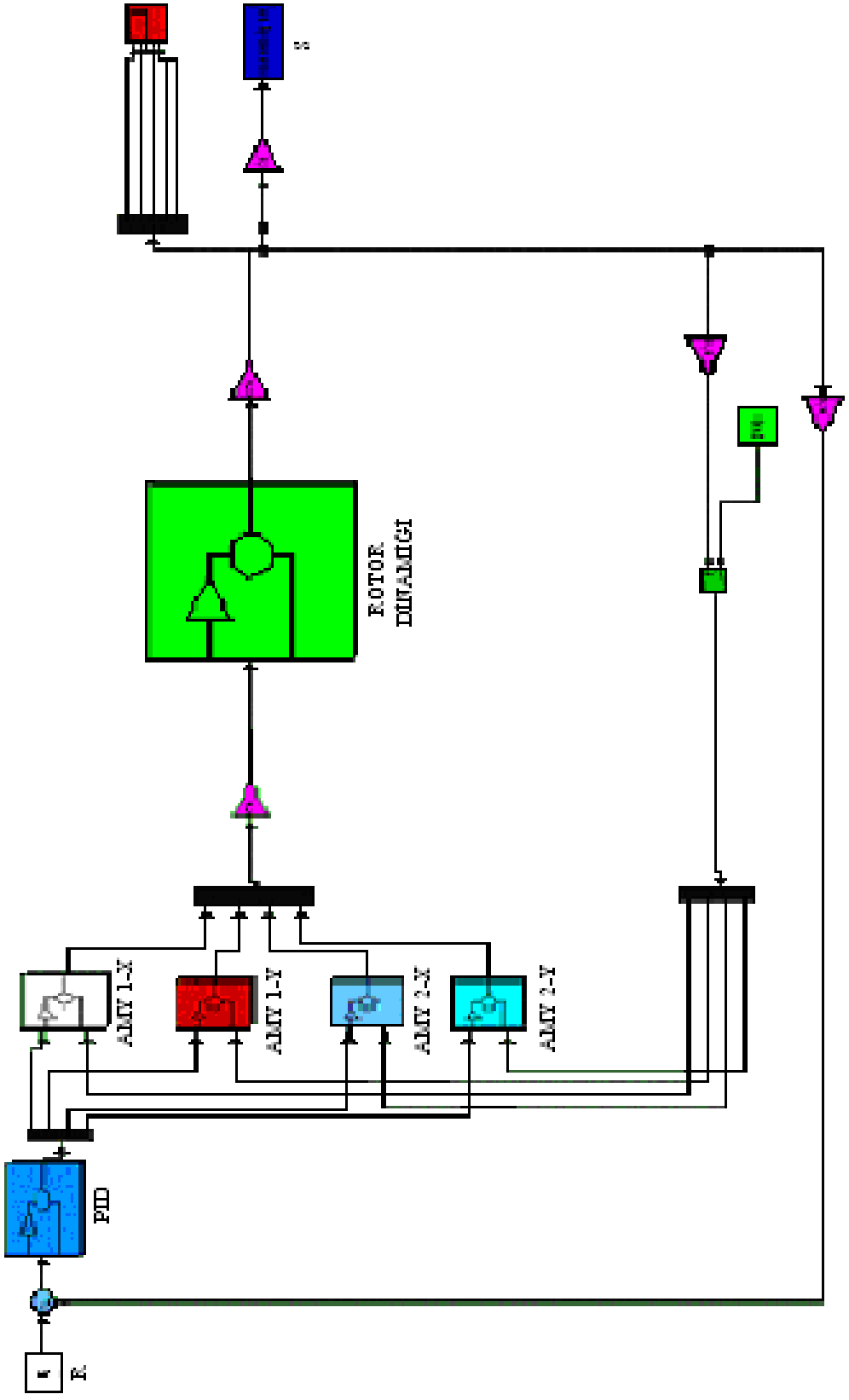
$$q=\left[x, y, \Theta_x, \Theta_y\right]^T \tag{4.13}$$

$$f_g=\left[-m/\sqrt{2}, -m/\sqrt{2}, 0, 0\right]^T \tag{4.14}$$

olarak tanımlanmıştır. Manyetik olarak yataklanmış olan rotora ait dinamik model, AMY modelleri ve Tablo B.2'de verilmiş parametreler kullanılarak Matlab®/Simulink ortamına aktarılmıştır. Şekil 4.7'de Rotor-AMY sistemi benzetim modeli gösterilmiştir.

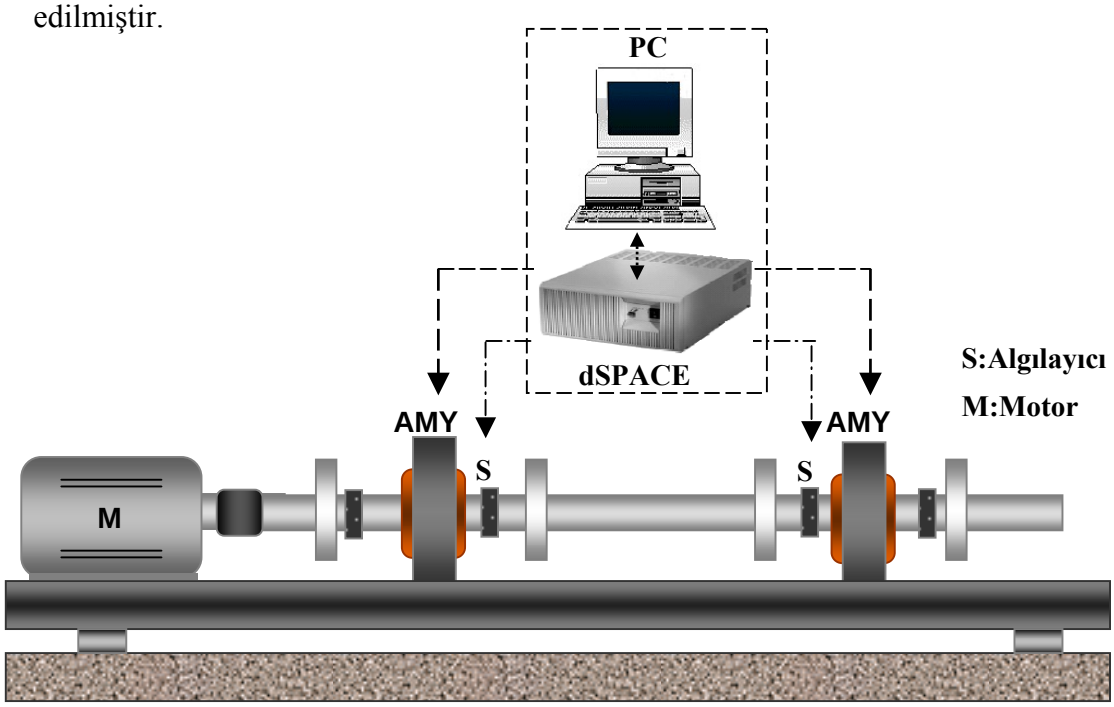
4.3.1 Rotor-AMY Sistemi Deney Düzeneği

Deneysel çalışmaların gerçekleştirildiği Rotor-AMY sistemi Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Deney düzeneği rotor, ana denetim bilgisayarı, dSPACE modülü, algılayıcılar ve güç elektroniği devrelerinden oluşmaktadır.



Şekil 4.7 Rotor-AMY sistemi benzetim modeli

Ayrıca sistemde algılayıcılar ve güç elektroniği devreleri de yer almaktadır. Tüm bunlara ek olarak, deney düzeneğinde rotorun herhangi bir enerji kesintisi durumunda stator ile temasını önlemede kullanılan yardımcı yataklarda bulunmaktadır. Ancak bunlar şekil üzerinde gösterilmemiştir. Rotorun yataklanmasın da kullanılan AMY'ler klasik yapıda olup, statoru ve rotoru ferromanyetik malzemeden yapılmıştır. Manyetik olarak askıya alınan rotor ise üzerinde kütle merkezinden eşit uzaklıklara yerleştirilmiş dört adet diskin yer aldığı bir milden oluşmaktadır. Geri besleme işaretinin kararlı çalışma için oldukça önemli olması nedeni ile algılayıcı seçimi dikkatli bir biçimde yapılmıştır. Bu nedenle sistemde ölçümü oldukça hassas ve hızlı bir biçimde yapan girdap akımı algılayıcıları tercih edilmiştir.



Şekil 4.8 Rotor-AMY sistemi deney düzeneği

Rotor-AMY sisteminin kararlı halde çalışabilmesi için gerekli olan hesaplamalar ve kontrolör ana denetim bilgisayarı ve dSPACE modülü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tasarlanılan kontrolörün aldığı giriş bilgisine bağlı olarak üretmiş olduğu konum bilgisi daha sonra düzenekte yer alan güç elektroniği devresine uygulanmıştır. Böylece sistemin dengede kalması için gerekli olan kuvvet üretimi sağlanmıştır.Özellikle dSPACE modülünün kullanılması ile kontrolör gerçek zamanlı olarak sisteme uygulanabilmiştir.

5 AMY'LERİN BULANIK MANTIKLA KONTROLÜ

5.1 Bulanık Mantık

Tıpkı her insanın günlük yaşamında kesin olarak bilinmeyen bazen de önceden kesinmiş gibi düşünülen durumlar olduğu gibi mühendislikte de bütün teori ve denklemler gerçek dünyayı ve sistemleri ancak yaklaşık bir şekilde ifade eder. Bir çok gerçek sistem doğrusal olmamasına rağmen bunların klasik yöntemler ile incelenmesinde doğrusallığı kabul etmek için her türlü çaba sarf edilir.

1965 yılında Azerbaycan asıllı Lütfü (Askerzade) Zadeh bulanık ilkeleri ortaya koyarak sistem çözümlerinin araştırılmasına farklı bir bakış açısı kazandırmıştır. Zadeh, bulanık girdi ve çıktı bilgilerinden, bulanık mantık kurallarının elde edilmesi ile anlamlı ve yararlı çözüm çıkarımlarının yapılabileceğini ortaya koydu. Bu yeni bakış açısı, 1970'li yıllardan sonra Doğu dünyasında bulanık mantık kavramının oldukça önem kazanmasına neden olmuştur. Bunun bir sonucu olarak da bulanık mantık bugün teknolojik cihazların yapım ve işleyişinde dünyada oldukça yaygın bir halede kullanılmaktadır.

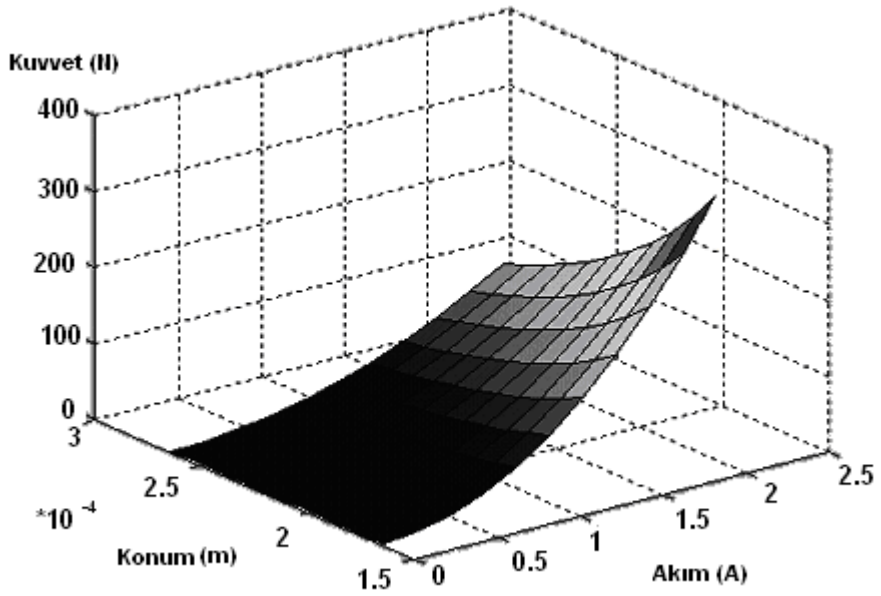
5.2 Bulanık Mantığın AMY'lere Uygulanması

Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde AMY'lere uygulanan kontrol yöntemlerinin doğrusal ve doğrusal olmayan kontrol yöntemleri olarak ikiye ayrıldığı görülmektedir. AMY'lerin kararlı halde çalışmasını sağlamak için kullanılan doğrusal kontrolör tasarımları, sistem denklemlerinin doğrusallaştırılmasından hareketle elde edilmektedir. Bu yaklaşım özellikle doğrusal yapıda olmayan ve parametreleri zamanla değişen sistemlerin denge konumu civarında kararlı olmasını sağlarken, denge konumundan uzaklaşılması durumunda performanslarının bozulmasına neden olur. Sistem performansının arttırılmak istendiği durumlarda ise doğrusal olmayan kontrol yöntemleri tercih edilir.

Doğrusal olmayan, iyi tanımlanamamış ve parametre değişimleri olan sistemlerin insan deneyimi yardımı ile kontrol edilmesinde Bulanık kontrolörün (BK)

kullanılması tercih edilen diğer bir yöntemdir. Klasik doğrusal olmayan kontrol yöntemleri yerine BK'ya yönelinmesin de klasik yöntemlerin tasarımlarının karmaşık ve zaman alıcı olması oldukça etkili olmuştur. Bunun yanı sıra üreticilerin kolay uygulanabilir yöntemleri tercih etmesi de BK'nın ilgi görmesini destekleyen ikinci bir unsur olmuştur.

Bu çalışmada AMY'nin ve rotor dinamiğinin doğrusal olmayan yapısı ve belirsizlikleri nedeni ile tasarımı ve uygulanabilirliği kolay olan Bulanık Kontrolör kullanımı tercih edilmiştir. Şekil 5.1'de elektromanyetik yapının doğrusal olmayan kuvvet / akım / hava aralığı ilişkisi gösterilmiştir.



Şekil 5.1 AMY'de kuvvet / akım / hava aralığı ilişkisi

Literatürde yer alan araştırmalarda bulanık mantığın AMY'lere 2 farklı şekilde uygulandığı görülmektedir. Bunlar:

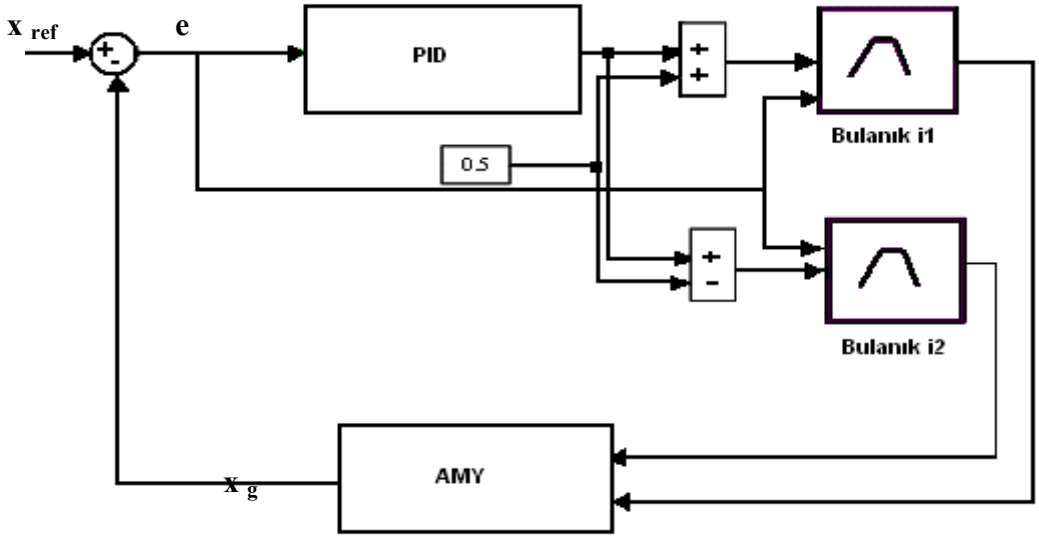
1. Bulanık Kontrol: BK'nın asıl kontrolör olarak kullanılması

2. Karma Kontrol: BK'nın diğer kontrolörler ile birlikte kullanılması

biçimindedir.

AMY'lerle ilgili çalışmalara bakıldığında, 1994 yılında Weidemann ve diğerlerinin Rotor-AMY sisteminde bulanık kontrolörü tek başına kullandıkları görülmektedir

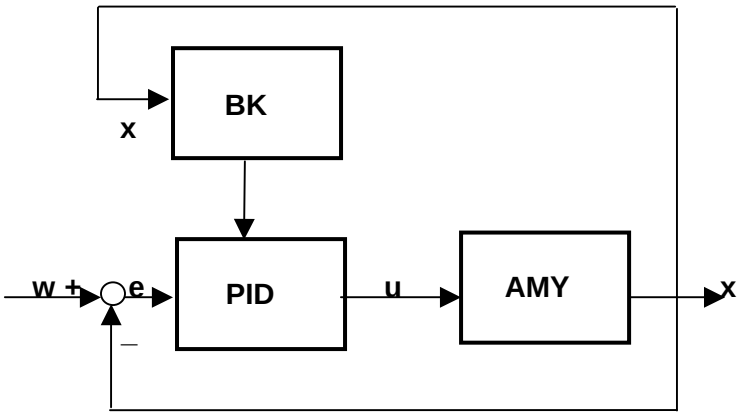
[46]. Ancak diğer bir takım araştırmacılar, AMY'lerin doğrusal olmayan yapısından kaynaklanan etkileri bulanık mantık yardımı ile kompanze etmeye çalışırlarken, doğrusal modelin geçerli olduğu denge bölgesinde ise pratikte oldukça sık kullanılan PID kontrolörü kullanmayı tercih etmişlerdir. Bunu yapmalarındaki amaçlarını ise her iki yöntemin faydalarını birleştirmek olarak belirtmişlerdir. Bu fikre paralel olarak da Koskinen ve diğerleri AMY'ler de karma kontrolör kullanmışlardır. AMY'nin asıl kontrolünde PID yapısı yer alırken, kontrolör katsayısını bulanık kontrolör ile ayarlamışlardır. Bunu yapmalarındaki amaçlarını gürültüyü bastırmak olarak belirtmişlerdir [47]. Benzer fikirle 1995 yılında Hung J.Y. AMY'nin kontrol performansını arttırmak için karma kontrol yapısını kullanmışlardır. Hung çalışmasında PID kontrolörü kararsızlığı kontrol etmede kullanırken, tüm çalışma bölgesinin kullanılması durumunda performans bölgesini genişletmek için BK'yı kullanmıştır. Hung J.Y tasarladığı karma kontrol yapısında doğrusal kontrolör çıkışından aldığı akım bilgisini doğrusal olmayan yapıyı göz önüne alacak şekilde BK'dan geçirmiştir. Bunu yaparken de akım ve konum bilgilerini giriş olarak kabul eden bir takım bulanık kurallar tanımlamıştır. Şekil 5.2'de AMY'nin kontrolünde kullanılan karma yapı gösterilmiştir [48].



Şekil 5.2 AMY'nin PID+BK ile kontrolü

Liebert W'de Hung gibi çalışmasında PID ve BK'yı birlikte kullanma yoluna gitmiştir. Doğrusal kontrolör katsayısını BK ile ayarlama yoluna gitmiştir. Ancak bunu diğerlerinden farklı bir şekilde yapmıştır. Liebert W. tasarladığı kontrolör yapısında PID kontrolörü kararlılıktan sorumlu tutarken, bulanık kontrolörü ile PID kontrolörün

orantı katsayısını ayarlamıştır. Bu duruma ait blok diyagram Şekil 5.3'de gösterilmiştir.



Şekil 5.3 Adaptif kontrolör yapısı

Liebert'in tasarladığı adaptif yapıda kullanıldığı bulanık kurallar,

- Şayet top çalışma noktasının altında ise kazancı artır,
- Şayet top çalışma noktasında ise kazancı değiştirme,
- Şayet top çalışma noktasının üstünde ise kazancı azalt

olarak tanımlanmıştır. Tasarlanan yapının gerçek sisteme uygulanması esnasında BK'nın doğrusal kontrolöre nazaran daha fazla hesaplamaya ihtiyaç duyması nedeniyle güçlü bir donanıma olan DSP'den faydalanılmıştır. Ayrıca çalışmada benzetim ve deneysel sonuçlar karşılaştırılarak birbirleri ile olan uyumluluğu gösterilmiştir [49].

Hong ve Langari ise 2000 yılında gerçekleştirdikleri çalışmalarında Rotor-AMY sistemindeki titreşimleri BK kullanarak bastırmaya çalışmışlardır. Bunu yaparken de doğrusal kontrol yöntemlerinin kullanılmasının sistemin doğrusal olmaması ve belirsizlikler içermesi durumunda bir takım zorluklara yol açacağı bu nedenle de bulanık yapının bilinmeyen çalışma koşullarında daha dayanıklı bir davranış sergileyeceğini ileri sürmüşlerdir. Kontrolör tasarımına geçmeden öncede sistemi bulanık biçimde modellemişlerdir. Bunun içinde TSK (Takagi - Sugena - Kang) yaklaşımını kullanarak, sistemi bölgesel doğrusal modeller takımı ile yaklaşık olarak ifade etmişlerdir. Buna neden olarak da sistemin denge konumu civarında doğrusallaştırılmasının yeterli olmayacağını, çünkü değişkenlerin denge konumundan uzaklaştıkça büyük ölçüde değişeceğini savunmuşlardır. Bulanık model

kontrol yapılarında olduğu gibi ***If – then*** kuralları ile tanımlamıştır. Böylece doğrusal olmayan sistemin giriş – çıkış ilişkileri gösterilmiştir. Her bir alt sistemi ifade etmede kullandıkları kural yapısını (5.1) ifadesi ile tanımlamışlardır.

$$If\ x_i(t)\ is\ L_{xi}\ and\ u(t)\ is\ L_{ui}, then\ \frac{dx_i}{dt} = A_i x_i + B_i u + d_i \qquad (5.1)$$

Buradaki $x_i(t)$ ve $u(t)$ bulanık kontrol girişleri olup sırası ile sistem durumunu ve kontrol işaretini, L_{ji}, ise i inci çalışma noktasındaki bulanık kümeleri göstermektedir. AMY'nin BM yardımı ile modellenmesinden sonra Koşut Dağıtımlı Kontrolör tekniği kullanılarak sisteme ilişkin kontrolörü tasarlamışlardır. Böylece çalışmalarında tasarladıkları yapı ile Rotor-AMY sistemindeki titreşimleri azalttıklarını deneysel sonuçlar ile göstermişlerdir [50]. Xu ve diğerleri ise bulanık mantığı AMY'nin kontrolü yerine modellemesinde kullanmışlardır. Modeli elde ederken bulanık mantığı, yapay-sinir ağları ile birlikte kullanmışlardır. Buna neden olarak da AMY'lerin matematiksel modelinin elde edilmesindeki güçlükleri göstermişlerdir. Bu şekilde modelini elde ettikleri AMY sisteminin kontrolünde ise kayan modlu kontrolörden faydalanmışlardır [51]. Bu çalışmada ise karma kontrol yöntemi tercih edilmiştir. Böylece sistemin dengesizlikten kaynaklanan farklı sinüzoidal bozucular karşısında kendini adapte ederek belirlenen sınırlar içinde karalı bir biçimde çalışması sağlanmıştır [55].

5.3 Bulanık Denetleyici Kontrolör

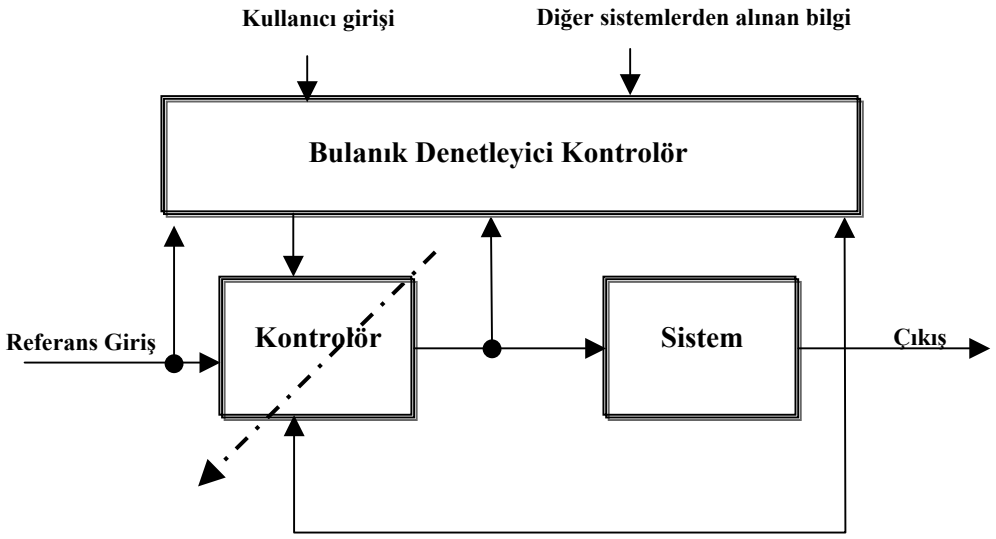
Bugün endüstride kullanılan kontrolörlerin çoğunu PID kontrolörler oluşturmaktadır. Bu yapıların sistemlerde kullanılması içinde ilk olarak uygun koşullarda çalışmayı sağlayacak olan parametrelerin belirlenmesi gerekmektedir. PID kontrolörlerin tasarımı aşamasında orantı, integral ve türev katsayıları olmak üzere 3 parametre belirlenmesi gerekmektedir. Bugüne kadar uygun kontrolör parametrelerinin belirlenmesini sağlayacak metotların geliştirilmesi içinde oldukça büyük çabalar sarf edilmiştir. Ancak katsayıların belirlenmesinde kullanılan bir çok kontrol tekniği ve algoritması, pratikteki sistemlerin doğrusal olmaması ve/veya tam tanımlanamaması nedeni ile sistem üzerinde ayarlama yapılmasını gerektirmektedir. Literatürde yer alan PID kontrolörler 2 sınıfa ayrılırlar. Bunlar:

1. **Sabit katsayılı PID Kontrolörler:** Kontrol esnasında katsayılar sabit olup hesaplanmalar belirli bir sonuca yönelik olarak önceden yapılır. Yapısal olarak

basitlerdir. Ancak sabit yapıları nedeni ile değişken parametreli sistemlerin kontrolünde her zaman etkin değillerdir.

2. **Değişken katsayılı PID Kontrolörler:** Bu kontrolörlerde ise parametreler değişkendir. Parametrelerin belirlenebilmeleri sistem hakkında bir takım bilgilerin önceden bilinmesini gerektirmektedir. Parametrelerinin zamanla değişken olması nedeni ile kontrolör Adaptif bir yapıya sahiptir.

Son zamanlarda bilgi temelli sistemlerin kontrol yöntemleri olarak uygulanması gittikçe önem kazanmaktadır. Özellikle bulanık kontrolün bu alanındaki büyümesi oldukça fazladır. Bunun nedeni ise BK'nın kullanıldığı bir sistemde, kontrol yapan uzman kişilerin dilbilimsel tanımlamalarının kontrol yapısında ifade edilebilmesine olanak sağlamasıdır. Böylece sisteme ait bilgiler daha sonra sistem durumlarını gösteren bir takım veriler ve sonuç çıkarım mekanizması ile birlikte kontrol yapısını belirlemede kullanılabilmektedir. BK'ların bir sistemin kontrolündeki görevi asıl veya denetleyici olmasına göre iki farklı şekilde olabilir. Bu tez çalışmasında, bulanık yapı sistemde denetleyici olarak kullanılmıştır. Denetleyici kontrolörler sistemin güncel davranışının tanımlanmasında kontrol sisteminden elde edilen herhangi bir bilgiyi kullanabilirler. Böylece kontrol parametrelerini nasıl değiştireceğini bilir ve istenilen özellikleri nihai olarak sağlamaya çalışır. Buna ek olarak, denetleyici yapı karar-verme mekanizmasını sisteme ait diğer bilgileri aktarmada da kullanabilir. Bulanık kontrolör yardımı ile PID kontrolör katsayılarının on-line olarak ayarlandığı yapı "Bulanık Denetleyici Kontrolör" olarak adlandırılır. Şekil 5.4'de BDK yapısı gösterilmiştir.



Şekil 5.4 Bulanık denetleyici kontrolör yapısı

Denetleyici kontrolör kontrol bilgisinden toplanılan ve/veya deneysel olarak elde edilen bilgiler ile gerçeklenir. Ancak bu bilgi veya veriler, basit bir bulanık kontrol probleminden farklıdır. Örneğin, kontrol bilgisinden elde edilen bilgi 2 şekilde olabilir. Bunlar

- Sistemi kontrol eden kişiden alınan bilgiler: Sisteme ait kontrol bilgileri sistemin davranışını gözlemleyen ve kontrolörün çeşitli işletme şartlarında nasıl ayarlanması gerektiğini bilen birinden elde edilir.
- Kontrol mühendisi tarafından toplanılan bilgiler: Bu türden olan bilgiler ise farklı çalışma şartları altında kontrolör parametrelerinin belli bir takım kurallara göre nasıl ayarlanması gerektiğini bilen teknik bir kişi tarafından elde edilir.

Tüm bu açıklamalardan hareketle denetleyici kontrol ile klasik BK arasındaki fark anlaşılabilmektedir. Bu tarz bir yapının "Denetleyici" olarak farklı bir şekilde tanımlanmasındaki ana unsur diğer kontrolör yapılarındaki geleneksel girişlerin kullanılmaması ve çıkışlarının da sisteme doğrudan uygulanan girişler olmamasıdır. Bunlar yerine, denetleyiciler değişimlerini kontrolöre dikte ederler ve bunu yaparken de kontrolör performansının ilerlemesini sağlarlar. Bulanık Denetleyici Kontrolörler denetledikleri kontrolör türlerine göre 2 sınıfa ayrılırlar. Bunlar:

- **Klasik kontrolörlerin denetlenmesi:** Bugün endüstride kullanılan birçok sistemde klasik kontrol metotları kullanılmaktadır. Sanayide kullanılan kontrolörlerin %90'ından fazlası PID kontrolörler oluşturur. Buna nedeni ise bu yapıların anlaşılmasının, başkalarına açıklamasının ve uygulamasının kolay olmasıdır. Endüstride çoğu zaman kontrolörler uygun olarak ayarlanamamakta ve bir çok PID kontrolörler sürekli gözlemlenmeyi ve ayarlanmayı gerektirmektedir. İşte bu noktada denetleyici olarak bulanık kontrol yöntemlerinden faydalanılmakta ve kontrolör parametreleri uygun olarak ayarlanabilmekte veya yönlendirebilmektedir.
- **Bulanık kontrolörlerin denetlenmesi:** Denetlenilen kontrolörlerde tıpkı ana kontrolör gibi bulanık kontrolör olup sadece bir takım yapısal farklılıklar içermektedir.

5.4 Rotor-AMY Sisteminin Bulanık Denetleyici Kontrolör ile Kontrolü

AMY'ler sınırlı yük kapasitelerine sahip yapılardır.Bu nedenle kullanıldıkları sistemlerde yardımcı yataklara ihtiyaç duyulur. Böylece herhangi bir arıza

durumunda rotorun, statora zarar vermesini engellenir. Aksi taktirde hem stator zarar görür ve hem de sistem doğrusal olmayan bir dinamik yapı sergileyerek kontrolörün yetersiz kalmasına yol açar. AMY'li sistemlerde bu gibi durumlar sürücü devrelerin arızalanması, enerji kesintisi, iç veya dış bozucuların sisteme etkimesi sonucunda oluşabilir. İç ve dış bozucular hariç diğer durumlarda yapılabilecek tek şey sistemi güvenli bir biçimde kapatarak mekanik yataklar üzerine yatırmaktır.

Bu çalışmada, tasarlanan kontrolör yapısında PID kontrolör ve Bulanık Kontrolör birlikte kullanılmıştır. Tasarlanılan karma yapı ile geleneksel yapıdan farklı olarak sistem dinamiği farklı çalışma şartlarına uygun olacak biçimde ayarlanmıştır. Sisteme ait eşdeğer katılık ifadesi ise MY kuvvetin rotor konumuna göre türevi alınarak hesaplanmıştır. AMY sisteminin katılık ifadesi

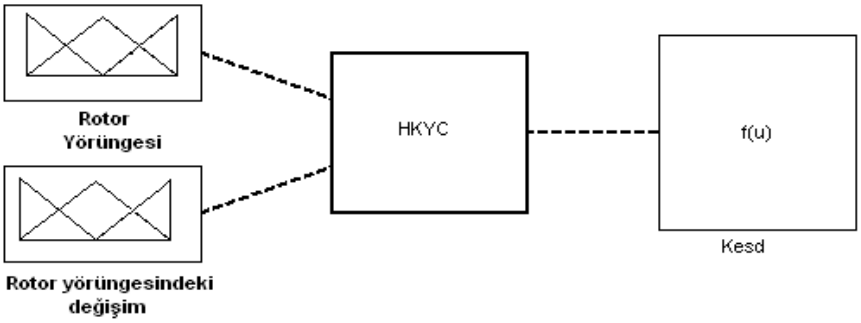
$$K_{esd} = \frac{k}{g_o^{\,3}}(I_b^{\,2} - K_p I_b g_o) \tag{5.2}$$

dir. Buradaki k yapısal bir sabit olup, I_b denge akımını, I_c kontrol akımını, g_0 ise denge konumundaki hava aralığını göstermektedir. Kontrolörden beklenilen performans kriterleri doğrultusunda gerçeklenen BDK yapısında Takagi-Sugeno (TS) türü bulanık mantık kuralları kullanılmıştır. TS ile kurulan denetleyici kontrolör yapısında yer alan bulanık kural yapısı genel olarak

$$If\ (e_1\ \ is\ \ A_1)\ \ and\ \ (e_2\ \ is\ \ A_2)\ \ then\ \ y = g(e_1, e_2) \tag{5.3}$$

biçiminde ifade edilir. Buradaki e_1, e_2 girişleri, A_1, A_2 bulanık kümeleri ve $g(e_1,e_2)$ çıkış fonksiyonunu göstermektedir. Tasarlanan BK'nın girişleri sırası ile rotor yörüngesi ve değişimi, çıkışı ise eşdeğer katılık olarak seçilmiştir. Şekil 5.5'de sistemin kontrolünde kullanılan BDK yapısı gösterilmiştir. Kontrolör girişinden aldığı rotor yörüngesi ve değişimine göre çıkışında ürettiği katılık bilgisini enerji eniyileştirme (Eİ) bloğuna uygular. BK çıkışına seri olarak bağlanan Eİ bloğu ise aldığı giriş bilgisine bağlı olarak çıkış bilgisini üretir.Böylece sistemde harcanan enerjiyi azaltacak olan akımını ve kontrolör katsayısı. çiftini belirler. Sonrada hem kontrolör hem de sistem parametrelerini eş zamanlı olarak değiştirir .Bu prensip ile çalışması istenen kontrol mekanizması benzetim modelinde BDK, PID kontrolör, AMY'ler ve rotor modeli bir araya getirilerek gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.6'da BDK'nın kullanıldığı Rotor-AMY sistemi benzetim modeli gösterilmiştir. Şekilde

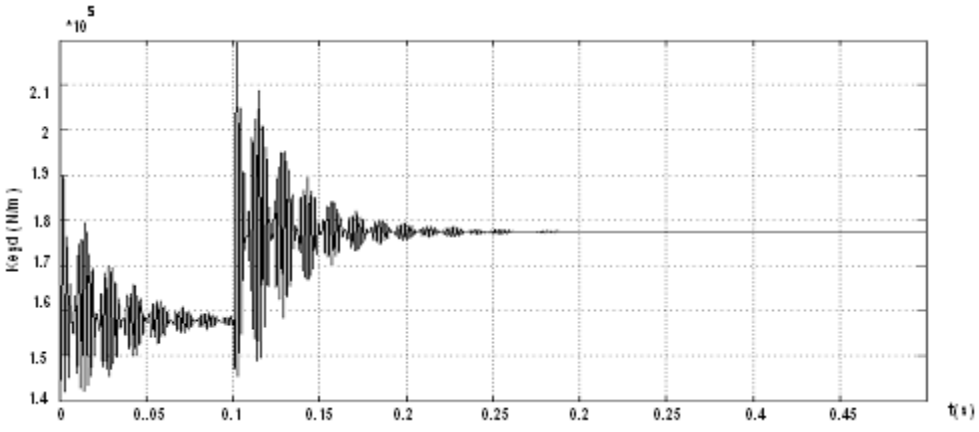
gösterilen benzetim modeli hem TMP hem de Rotor-AMY sistemi için benzer olup tek farklılık sistemlerin serbestlik dereceleridir.



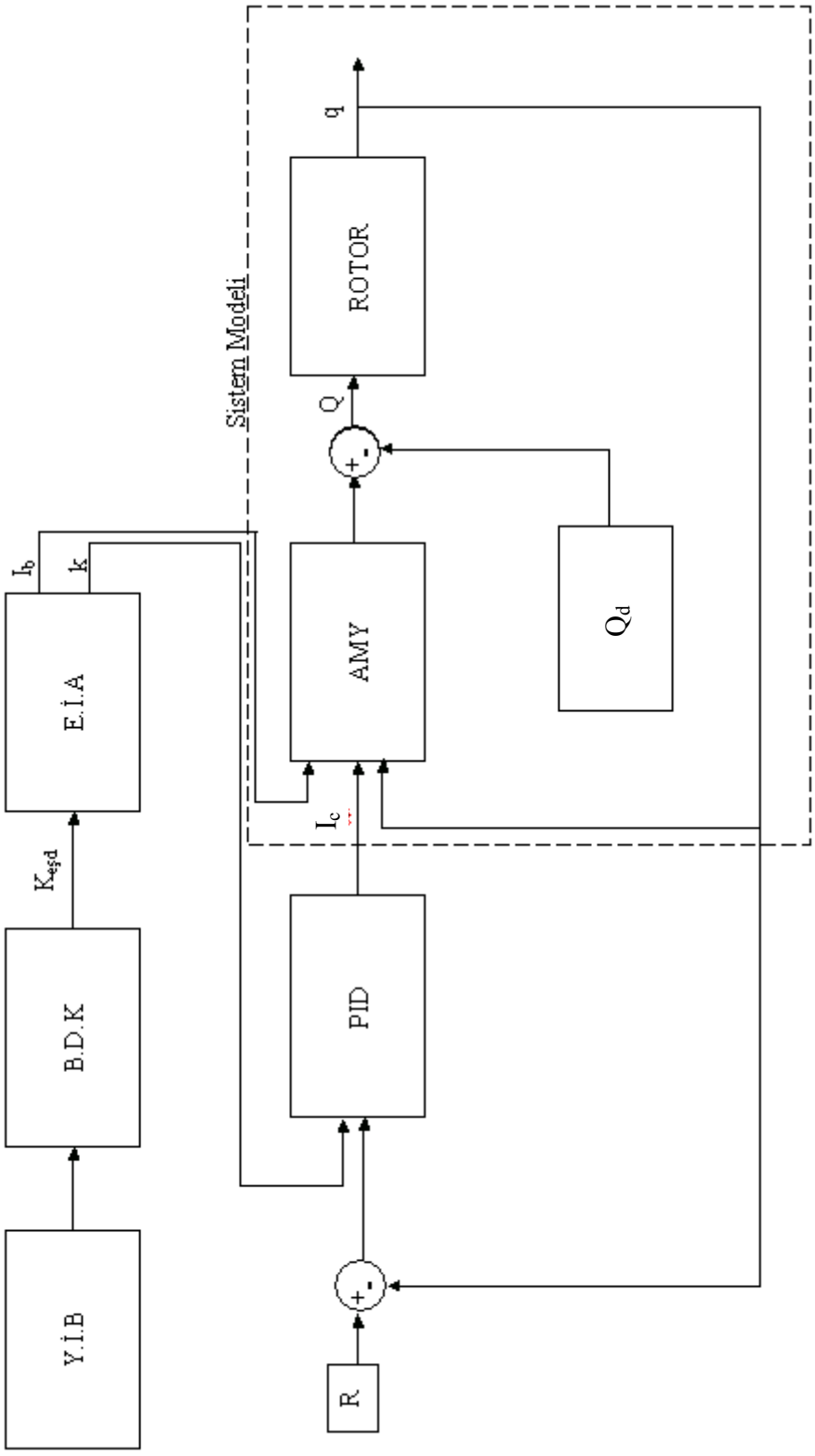
Şekil 5.5 TS-tipi denetleyici bulanık kontrolör yapısı

Benzetim modeline bakıldığında PID kontrolörün konum bilgisine göre bir komut işareti üretirken, BDK istenilen sistem cevabını verebilecek olan kontrol işaretini enerji eniyileştirme bloğuna gönderir. Eİ bloğu ise aldığı giriş bilgisine göre harcanan enerjiyi en aza indirgeyecek olan akım ve kontrolör katsayısını eş zamanlı olarak PID'ye ve AMY'lere uygular. Böylece hem sistem dinamiği istenilen şekilde ayarlanmış ve hem de enerji kaybı azaltılmıştır.

Benzetim modeli sonuçları farklı çalışma durumları için ele alınmıştır. İlk olarak sistem dengesizliği aniden arttırılmış ve hem kontrolör hem de sistem cevabı incelenmiştir. Şekil 5.6'da artan dengesizlik durumunda kontrolör cevabı gösterilmiştir. Şekilde sistemin normal çalışma durumunda istenen çalışma kriterlerini sağlan $K_{eşd1}$ değerinin, dengesizliğin 0.1s'de anide artması ile $K_{eşd2}$ değerine yükseltildiği görülmektedir.

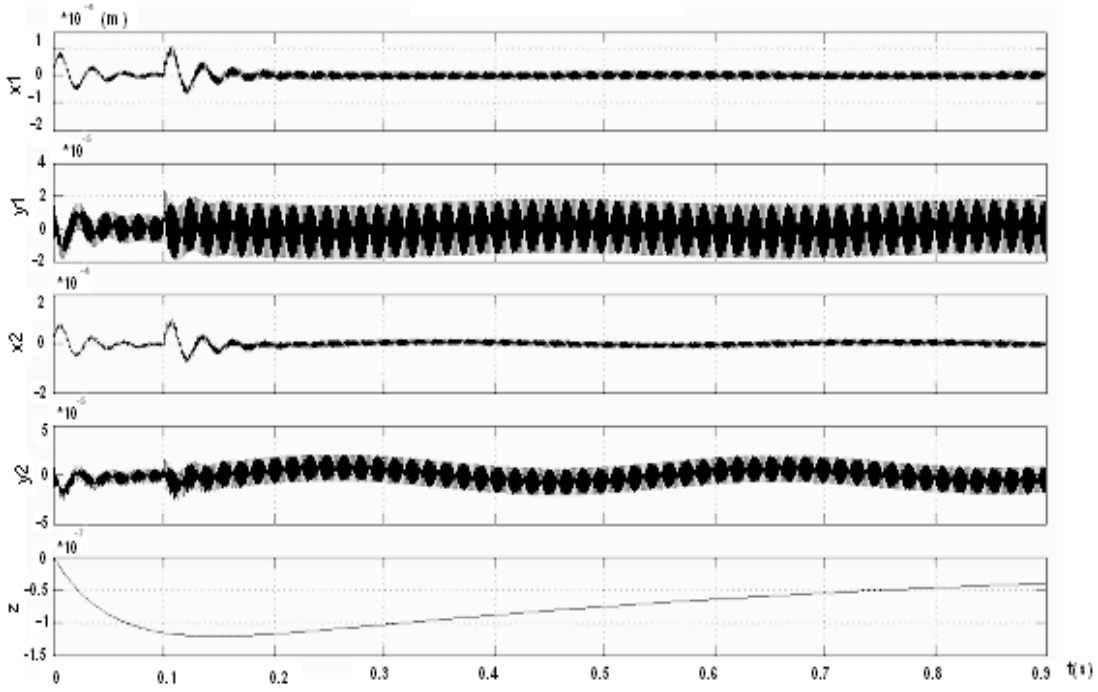


Şekil 5.6 Artan dengesizlik durumunda $K_{eşd}$ değişimi



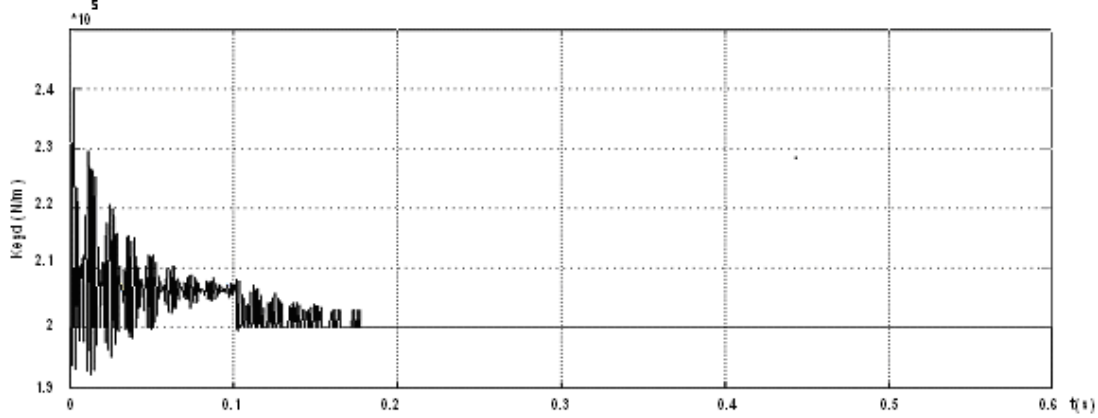
Şekil 5.7 Bulanık denetleyici kontrolör ve AMY sistemi

Aynı durum için sistem yanıtı ise Şekil 5.7'de gösterilmiştir. Şekilden sistemin 0.1 saniyede artan dengesizlik ile denge konumundan ayrıldığı ancak kontrolörün sistem katılığını arttırması ile tekrar denge konumuna geri geldiği görülmektedir. Daha sonra sistem dengesizliğinin kaldırılması durumu göz önüne alınmıştır. Bu durumdaki kontrolör yanıtı ise Şekil 5.8'de gösterilmiştir.



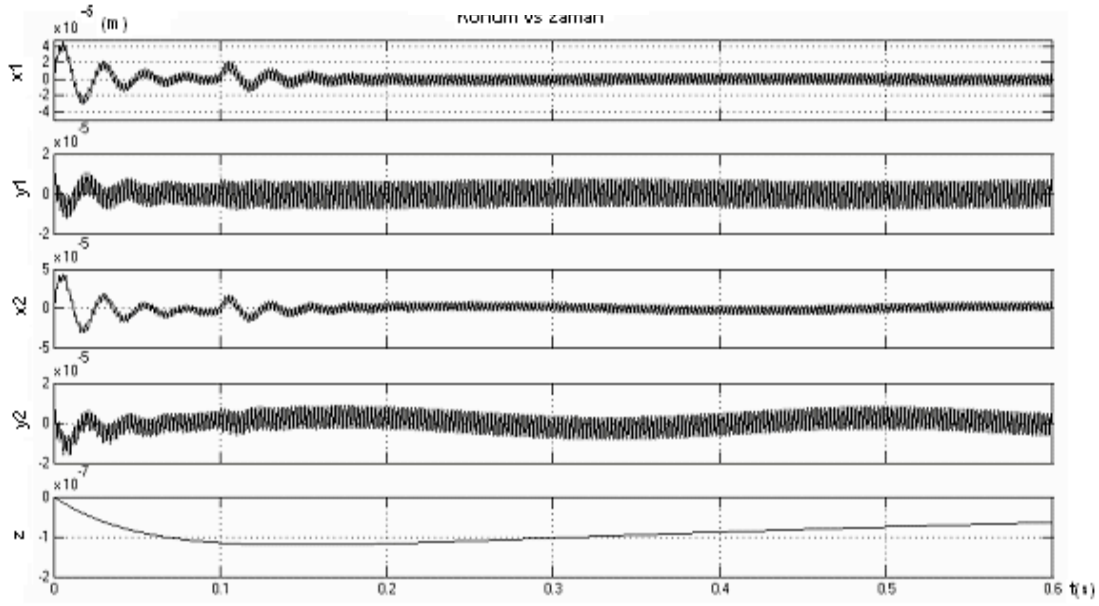
Şekil 5.8 Artan dengesizlik durumunda rotor konumları

Bu durumda ise kontrolörün $K_{eşd1}$ değerini dengesizliğin 0.1s'de aniden azalması ile birlikte $K_{eşd2}$ değerine değiştirdiği görülmektedir. Şekil 5.9'da ise kontrolörün kararı sonucunda sistemdeki konum cevabı gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde sistemin 0.1 saniyede sönen geçici halden sonra tekrar denge konumuna geldiği görülmektedir.



Şekil 5.9 Azalan dengesizlik durumunda $K_{eşd}$ değişimi

Özetle benzetim sonuçları, dengesizliğin artması veya azalması durumunda sistem cevabının kontrolör tarafından uygun bir biçimde ayarlandığını göstererek ortaya konulan teoriyi desteklemiştir.



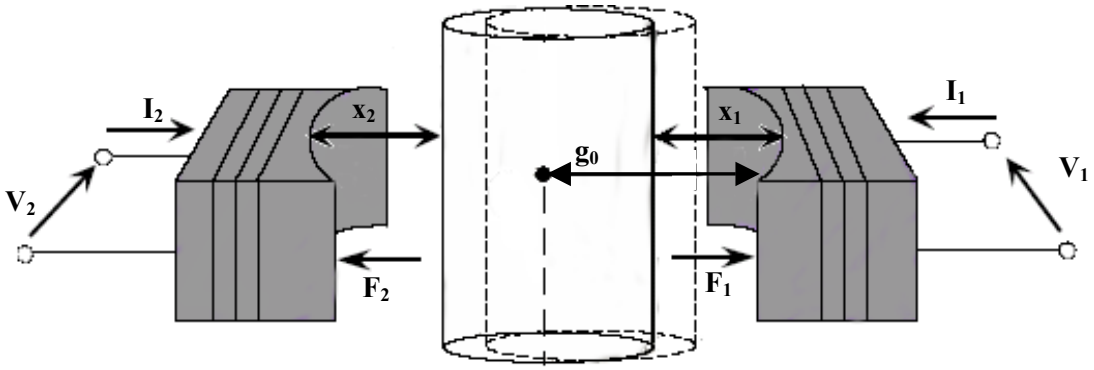
Şekil 5.10 Azalan dengesizlik durumunda rotor konumları

Sonuç olarak bu çalışmada, literatürdeki AMY sistemlerine uygulanan kontrol yöntemlerinden gerek yapı gerekse kontrol kriterleri farklı olan değişken parametreli bir kontrol mekanizması tasarımı gerçekleştirilmiştir. Böylece sistem cevabı çalışma şartlarına uygun olarak değiştirilmekle kalmamış aynı zamanda BDK'nın EİA ile birlikte çalışması ile sistemde harcanan enerjide azaltılmıştır.

6 AKIM KONTROL YÖNTEMLERİ VE ENERJİ KAYIPLARININ ENİYİLEŞTİRİLMESİ

6.1 Çift ve Tek Yönlü Sürme Modu

AMY'lerde rotoru dengede tutmak için gerekli olan kuvvet elektromıknatısa uygulanan kontrol gerilimi ile elde edilir. Gerekle olan kontrol kuvvetinin üretiminde ise yaygın olarak PID kontrolörler kullanılmaktadır. Kontrolör parametrelerinden integral katsayısı sürekli hal hatasını küçültürken, türev terimi sisteme sönüm sağlamaktadır. Ancak sistemin kararlı çalışmasında en önemli olan orantı katsayısıdır. Şekil 6.1'de AMY'nin çalışma prensibi açıklanmaya çalışılmıştır. Rotorun denge konumundan ayrılması ile karşılıklı yer alan elektromıknatıslara kontrol akımı uygulanarak rotor tekrar eski konumuna getirilmeye çalışılır.



Şekil 6.1 AMY'nin çalışma prensibi

Rotorun tekrar denge konumuna gelmesi için elektromıknatıslara uygulanan kontrol akımı denge konumundan uzaklaşma miktarı ile orantılı olarak

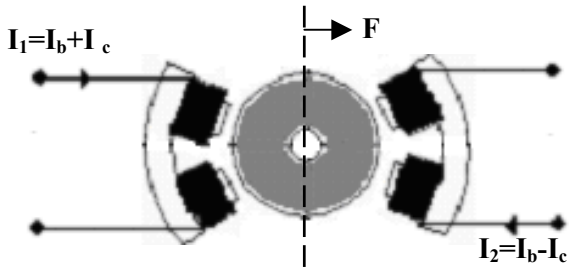
$$I_c = -K_p x \tag{6.1}$$

biçiminde ifade edilir. Buradaki I_c kontrol akımını, K_p orantı katsayısını ve x denge konumundan uzaklaşma miktarını göstermektedir.

Kontrolörün üretmiş olduğu kontrol akımının sisteme uygulanmasında 2 yöntem bulunmaktadır. Bunlardan ilki ve çok kullanılanı *Çift Yönlü Sürme Modudur*. Bu yöntemde kontrol akımı birbirine zıt işaretli olarak, karşılıklı yerleştirilmiş olan elektromıknatısların denge akımları üzerine eklenir. Bu durumda karşılıklı elektromıknatıslara ilişkin akım ifadeleri

$$\begin{aligned} I_1 &= I_b + I_c = I_b - K_p\, x \\ I_2 &= I_b - I_c = I_b + K_p\, x \end{aligned} \tag{6.2}$$

dir. Bu ifadelere bakıldığında kontrol akımlarının sabit genlikli denge akıma eklendiği görülür. Bunun yapılmasındaki neden sistemin doğrusallığın arttırılmak istenmesidir.Ancak bu durum hiçbir kontrol kuvvetine ihtiyaç duyulmadığı zamanda dahi bobinlerden sabit bir akım akmasına ve dolayısı ile enerji kaybına yol açmaktadır. Bu durumdaki çalışma prensibi Şekil 6.2'de gösterilmiştir.



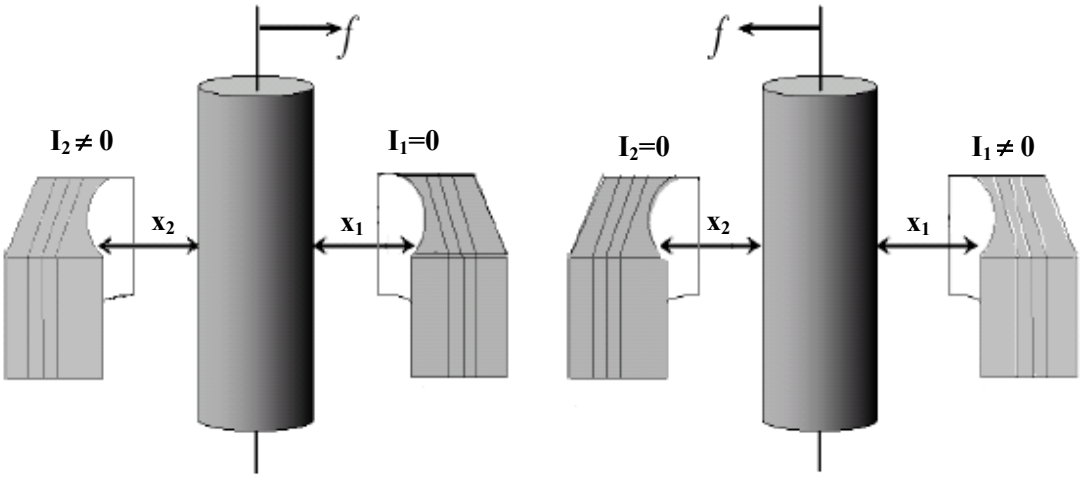
Şekil 6.2 Çift yönlü sürme modu

Son yıllarda AMY'lerin kullanım alanlarının artması ile bu sistemlerde harcanan enerji kayıplarının azaltılması yönündeki çalışmalarda hız kazanmıştır. Özellikle AMY'lerin sürtünmesiz çalışmaları enerji depolayan sistemlerde ve ısı iletiminin zor olduğu vakum uygulamalarında tercih edilmelerine neden olur. Araştırmalar denge akımının kayıpların önemli bir kısmına neden olduğu göstermiştir. Bu sonuç doğrultusunda ise Kontrol akımının uygulanmasında kullanılan diğer bir yöntem ise *Tek Yönlü Sürme Modu*dur (TYSM) ortaya konmuştur. ÇYSM'den farklı olarak kontrol akımı sadece konum değişimine neden olan kuvvete zıt yöndeki elektromıknatısa uygulanır. Kısacası tek yönlü kontrolde her durumda sadece tek bir elektromıknatısa kontrol akımı uygulanmaktadır. Bu durumdaki akım ifadeleri

$$I_1 = \begin{cases} I_b + 2|I_c| \Leftarrow I_c > 0 \\ I_b \Leftarrow I_c < 0 \end{cases} \tag{6.3}$$

$$I_2 = \begin{cases} I_b \Leftarrow I_c < 0 \\ I_b + 2|I_c| \Leftarrow I_c > 0 \end{cases} \tag{6.4}$$

biçiminde yazılabilir. Şekil 6.3'de TYSM'ye ilişkin çalışma prensibi gösterilmiştir.



Şekil 6.3 a.) $f > 0$ durumu b.) $f < 0$ durumu

Bu yöntem ile ÇYSM'ye göre her ne kadar enerji tasarrufu yapılmış ise de sistem doğrusallıktan uzak ve bozuculara karşı hassas bir yapı sergilemesine neden olur.

6.2 Enerji Kayıplarının Eniyileştirilmesi

AMY sistemlerinde harcanan enerji hesabının yapılabilmesi için öncelikle sistem nasıl bir kontrol kullanıldığına bakmak gerekmektedir. Denge konumu etrafında Ω açısal hızı ile dönen bir rotora dönme hızının fonksiyonu olan sinüzoidal bozucu kuvvetler etkir. Bu durum ise rotorun hava aralığında titreşmesine neden olur. Ω açısal hızı ile dönmekte olan bir rotorun kararlı hal senkron cevabı

$$x = X \sin(\Omega t + \Theta) \tag{6.5}$$

şeklinde ifade edilir. Buradaki X senkron cevabın genliğini θ ise fazını göstermektedir. Bu noktada rotorun kararlılığını sağlamak için üretilen kontrol akımı, denge akımı ile birlikte elektromıknatıslara uygulanır. Bu durumda karşılıklı olarak yerleştirilmiş olan elektromıknatıs akımları ise

$$I_{1,2} = I_b \pm I_c . \sin \Omega t \tag{6.6}$$

dir. Bu ifade yer alan $I_{1,2}$, I_b ve I_c sırası ile elektromıknatısların toplam akımlarını, denge akımını, kontrol akımını, Ω ise rotorun açısal hızını göstermektedir. Bu durumda AMY'de harcanan ortalama güç ifadesi

$$P_{ort} = \frac{1}{T}\int_0^T p(t)\,dt = \frac{R}{2\pi}\int_{\Omega t=\theta}^{2\pi-\theta} (I_1{}^2 + I_2^2)\,d(\Omega t) \tag{6.7}$$

dir. Buradaki R bobin direnci, I_1 ve I_2 ise toplam bobin akımlarıdır. Bir periyot da harcanan enerji ise

$$W = T \times P_{ort} \tag{6.8}$$

olarak ifade edilir. Dikey makine durumunda ÇYSM'de bir periyot da harcanan enerji ifadesi dikey makine için

$$W = 2\pi R I_b^2 + \pi K_p^2 y^2 R \tag{6.9}$$

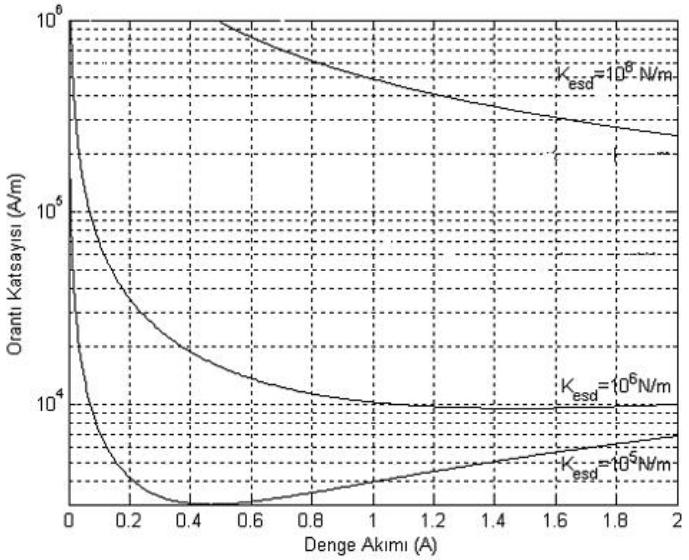
olarak belirlenir. Buradaki I_b denge akımını, K_p orantı katsayısını, y titreşim genliğini ve R ise sargı direncini göstermektedir. Yatay makinede harcanan enerji ifadesi ise

$$W = 2\pi R I_b^2 + 2\pi K_p^2 y^2 R + 2\pi I_b^2 R \tag{6.10}$$

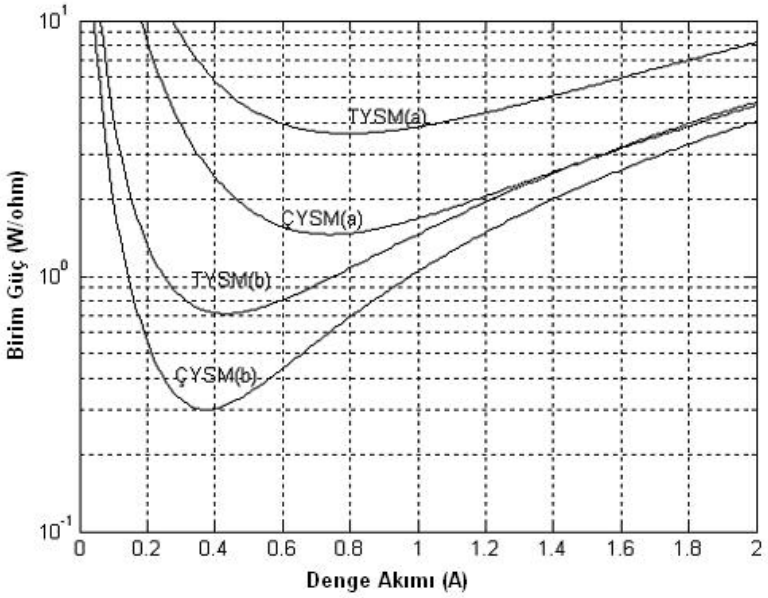
dir. TYSM yönteminin kullanılması halindeki enerji ifadesi ise

$$W = 2\pi R(I_{b1}^2 + I_{b2}^2) + 4\pi K_p^2 y^2 R + 8RK_p y(I_{b1} + I_{b2}) \tag{6.11}$$

dir. AMY'lerde harcanan enerjinin azaltılmasına ilişkin olarak ÇYSM ve TYSM yöntemleri sonuçları incelendiğinde denge akımının harcanan enerjiye olan etkisi görülmektedir. Bu nedenle çalışmada sabit bir denge akımı yerine değişken denge akımının kullanıldığı Değişken Denge Akımı Kontrol (DDAK) yöntemi geliştirilmiştir. Ancak bu yapılırken sistem dinamiği de göz önüne alınmıştır. Şekil 6.4'de farklı K_{esd} değerleri için denge akımı-orantı katsayısı çiftlerinin değişimi gösterilmiştir. Şekil 6.5'de ise 10^6N/m eşdeğer katılığında sistemde harcanan enerjinin denge akımı ile değişimi gösterilmiştir.



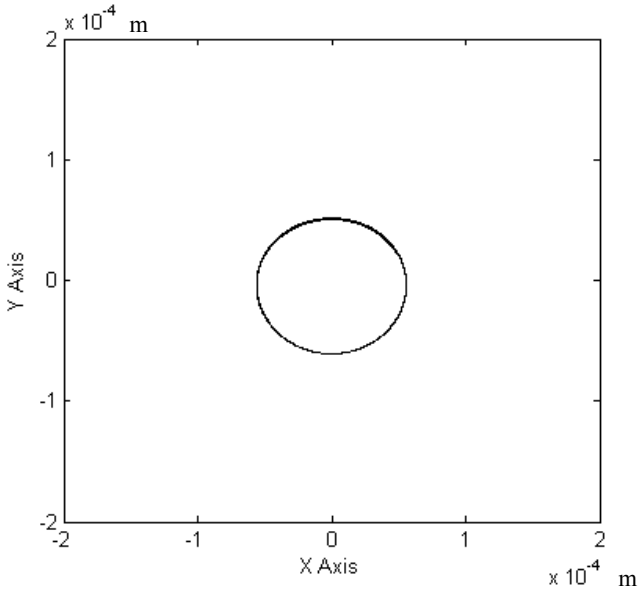
Şekil 6.4 K_p ve Ib'nin farklı eşdeğer katılık durumlarındaki eğrisi



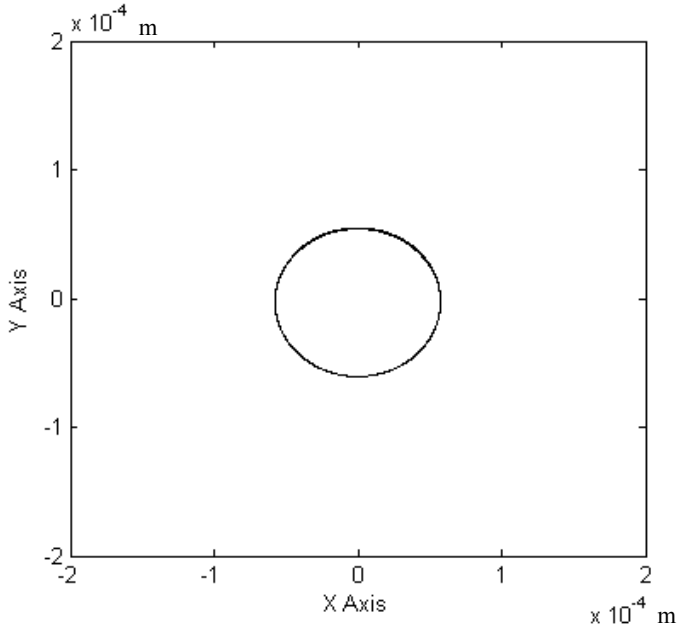
Şekil 6.5 $K_{eşd}$ =10^6N/m durumu için güç kaybının denge akımı ile değişimi

a.) 0,4 g_0 seviyesindeki titreşim b.) 0,1 g_0 seviyesindeki titreşim

Rotor-AMY sistemi modeli dinamik cevabın aynı olması durumunda sırası ile ÇYSM ve DÇYSM için incelenmiştir. Sistem ilk önce denge akımının 5A olarak belirlendiği ÇYSM'de çalıştırılmıştır. Daha sonra bu değer DDAK yöntemi ile 2.8A'e azaltılmıştır. Rotor yörüngeleri de her iki durum için incelenmiş ve sırası ile Şekil 6.6 ve Şekil 6.7'de gösterilmiştir. Şekiller incelendiğinde rotor yörüngelerinin her iki durumda aynı kaldığı görülmüştür.



Şekil 6.6. (I_b, K_p)=(5, 5996) durumunda benzetim modelinin izlediği yörünge



Şekil 6.7. (I_b, K_p)=(2.7, 6283) durumunda benzetim modelinin izlediği yörünge

Benzetim modelinden elde edilen sonuçlar Tablo 6.1'de gösterilmiştir. Sonuç olarak AMY'lerde DDAK yöntemi ile denge akımının, sistem cevabı aynı kalacak şekilde değiştirilmesi ile harcanan enerji miktarının azaltılabileceği gösterilmiştir

Tablo 6.1 Benzetim modeli sonuçları

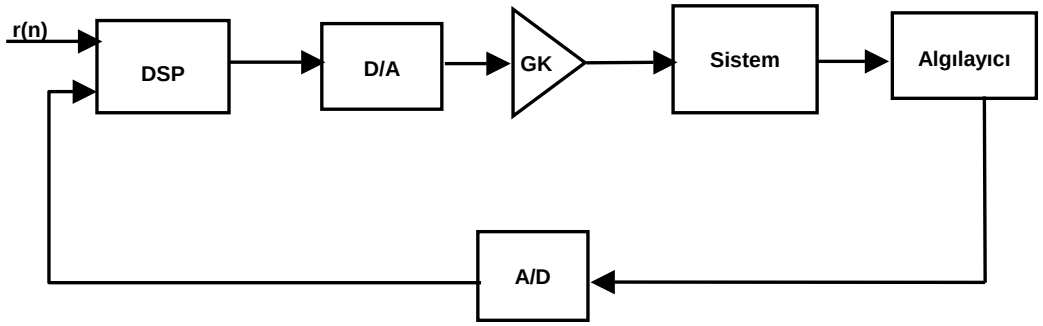
	F_d (N)	**I_b (A)**	**$K_{eşd}$ (N/m)**	**W (J)**
ÇYSM	55	5	2.1×10^6	20.63
DDAK	55	2.7	2.1×10^6	7.54

7 AMY SİSTEMLERİNİN DİJİTAL KONTROLÜ

7.1 DSP Tabanlı Kontrol Sistemleri

Kontrol sistemleri istenilen çıkış bilgisini elde etmede kullanılan yapılardır. Kontrolör, kontrol edilen elemanın komutlara mümkün olan en kısa zamanda ve bütün işletme koşullarında kararlı cevap vermesini sağlamalıdır. Tüm bu işlemlerin kontrolörün hesaplama elemanları tarafından gerçeklenir. Hesaplama elemanları yapısal olarak analog, dijital veya ikisinin ortak kullanımından oluşan karma bir yapıya sahip olabilir.

Analog kontrolörler sistemin frekans cevabını ayarlayan filtreler gibi düşünülebilirler. İşlevsel olarak çoğu oransal (P), integral (I), diferansiyel (D) veya bunların birleşiminden oluşan karakteristikte klasik kontrol teorisi içerisinde yer alırlar. Dijital kontrol sistemlerinin yapısında ise temel olarak A/D, D/A, ve işaret işleyicilerden yer alır. Dış dünyadan alınan analog bilgi A/D çevirici ile dijital işarete dönüştürüldükten sonra mikroişlemciye iletir. Daha sonra gerekli hesaplama işlemleri yapılarak sisteme uygulanacak olan kontrol işareti üretilir. Üretilen işaret D/A çevirici ile analog işarete çevrildikten sonra güç kuvvetlendiricisi üzerinden sisteme uygulanır. Son zamanlarda mikroişlemci performansının ve güvenirliliğinin artması ile, birçok uygulamada analog kontrolör yerine dijital kontrolör kullanımı tercih edilmektedir. Gelişen teknolojiye paralel olarak yüksek hızlı DSP'lerin üretilmesi ile bugün dijital kontrolün uygulanabilirliğini oldukça kolaylaşmıştır. Şekil 7.1'de dijital kontrol sistemine ait yapı gösterilmiştir.



Şekil 7.1 Dijital kontrol sistemi yapısı

Dijital kontrol sistemlerinin analog sistemlere olan üstünlükleri:

- Sistem kontrolünün yanı sıra filtreleme gibi ek işlevler yapmada kullanılabilmeleri (sistem maliyetini azaltır),
- Sıcaklıktan bağımsız olmaları,
- Eleman yaşlanmasından bağımsız yapıya sahip olmaları,
- Modern kontrol teorisinin getirdiği gelişmiş kontrol tekniklerinin uygulanmasına imkan sağlamaları,
- Donanım değişimine ihtiyaç duymaksızın kontrol stratejisinin kolaylıkla değiştirilmesine imkan tanımaları,
- Küçük ve hafif bir yapıda olmaları,
- Gürültü açısından daha iyi olmalarıdır.

Ayrıca dijital kontrol sistemleri sağladıkları tüm bu avantajlarının yanı sıra ek bir maliyet gerektirmezler. Ancak dijital sistem performansının da seçilen işlemciye oldukça bağlı olduğu unutmamalıdır. Özellikle seçilen işlemci hem kontrolörün davranışında hem de performansında etkilidir. Bunun için seçim yapılırken mimari, performans ve çevre birimleri ile uyumluluk oldukça dikkat edilmesi gereken hususlardır.

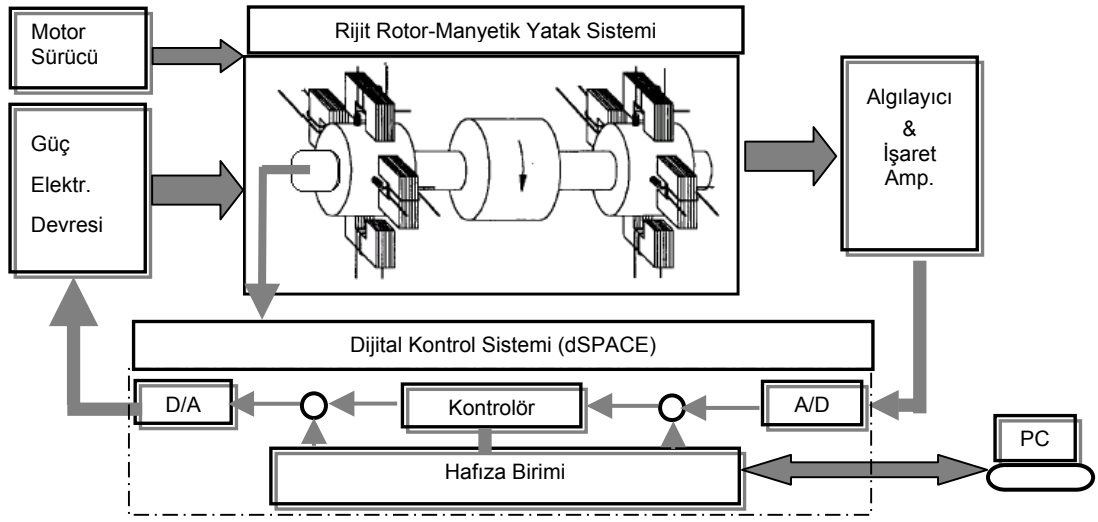
7.2 Rotor-AMY Sisteminin Dijital Kontrolü

AMY'ler yapıları gereği doğrusal kontrol metotları ile istenilen performansın tam olarak sağlanamamasına neden olurlar. Bunun için AMY'lerin kontrolünde daha çok doğrusal olmayan kontrolör yapıları tercih edilir. Bu ise karmaşık tasarımlar ve hesaplama işlemlerinin artması anlamına gelmektedir. Ayrıca sistemin tam olarak modellenememesinden kaynaklanan belirsizlikler hesaplamalar yolu ile tayin edilen değerlerin deney düzeneğine uygulanmadan tekrar ayarlanmasını ve hızlı bir kontrole ihtiyaç duyulmasını da gerektirmektedir. Bu sorunlar AMY'li sistemlerin kontrolünde dijital işaret işleyiciler gibi gelişmiş donanımların kullanılmasına yol açmıştır.

Deneysel çalışmaların gerçekleştirildiği Rotor-AMY sistemi kontrolünde gerekli hesaplamaları ve kontrolü yapmak için ana denetim bilgisayarı ile birlikte dSPACE

modülü kullanılmıştır. Sistemde dSPACE modülünün tercih edilme nedeni kontrolörün MATLAB®/Simulink ortamında modellenerek otomatik kod üretimi ile makine diline tek bir tuş yardımı ile aktarılmasına imkan sağlamasıdır. Böylece kontrolör gerçek sisteme uygulanabilir hale getirilmiş ve üzerinde istenilen değişiklikler hiçbir maliyete gerek duyulmadan kolaylıkla gerçekleştirilmiştir.

Geliştirilen kontrol yapısı deneyler yapılarak desteklenmek istenmiş ve bu nedenle test düzeneği kurularak bir takım deneyler gerçekleştirilmiştir. Şekil 7.2'de tüm sisteme ilişkin kapalı çevrim modeli gösterilmiştir.



Şekil 7.2 Rotor-AMY sistemi kapalı çevrim blok diyagramı

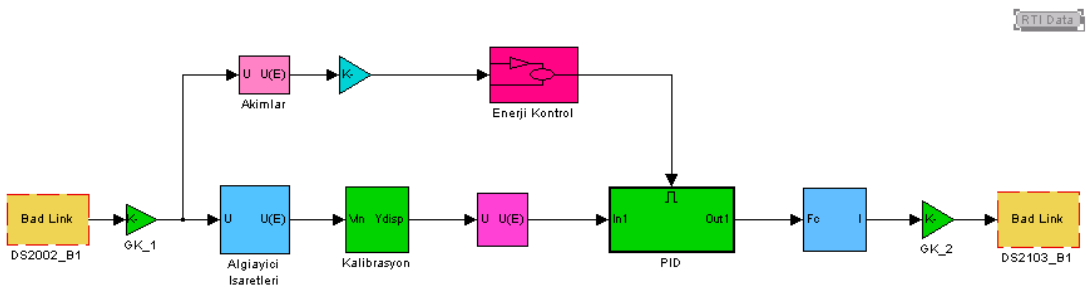
Sistemin kararlı çalışması için, girdap akımı probları ile rotordan alınan konum bilgileri, A/D çeviriciler ile örneklendikten sonra dijital kontrolöre aktarılmıştır. Daha sonra kontrolörde elde edilen kontrol işareti D/A çevirici ile analog işarete dönüştürülmüş ve güç elektroniği devresine uygulanmıştır. Böylece elektromıknatıslardan istenilen akımın geçirilerek rotorun denge konumuna geri gelmesi sağlanmıştır. Sistemde bu tarz bir kontrol yapısının kullanılması ile kontrolörün tasarım süreci kısaltılmış ve sisteme esneklik sağlanmıştır. Diğer bir deyişle herhangi bir değişikliğin sadece benzetim modeli üzerinde değiştirilmesi ile istenen parametrelere ve yapıya sahip kontrolör yazılımı oldukça kısa sürede elde edilmiştir.

8 DENEYSEL SONUÇLAR

8.1 Rotor-AMY Sistemi Gerçek Zaman Modeli

Tasarlanan BDK kontrolörü ve EİA'sını test etmek amacı ile Rotor-AMY sistemi üzerinde bir takım deneyler yapılmıştır. Deneysel çalışmalar, Rotor-AMY sisteminin, dSPACE'in Rapid Control Prototyping (RCP) programının, Math Works'ün Matlab®/Simulink ve Realtime Workshop programlarının, güç kuvvetlendiricilerinin ve konum algılayıcılarının yer aldığı deney düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Böylece gerçekleştirilen çalışmalara ait sonuçlar deneysel olarak kanıtlanmıştır. Bunun için manyetik olarak yataklanmış dinamik sistemin farklı katılıklarda, farklı bozucular karşısında ve farklı akımları ile beslenmesi durumundaki yörüngeleri ve enerji hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Deneyler esnasında rotor yörüngesini ve AMY akımlarını ölçmek için konum ve akım algılayıcılarından faydalanılmıştır. Özellikle deney düzeneğinde dSPACE sisteminin kullanılması, farklı kontrolör tasarımlarına, sistemin izlenmesine ve deneylerin gerçek zamanlı olarak Rotor-AMY sistemine uygulanmasına imkan sağlamıştır.

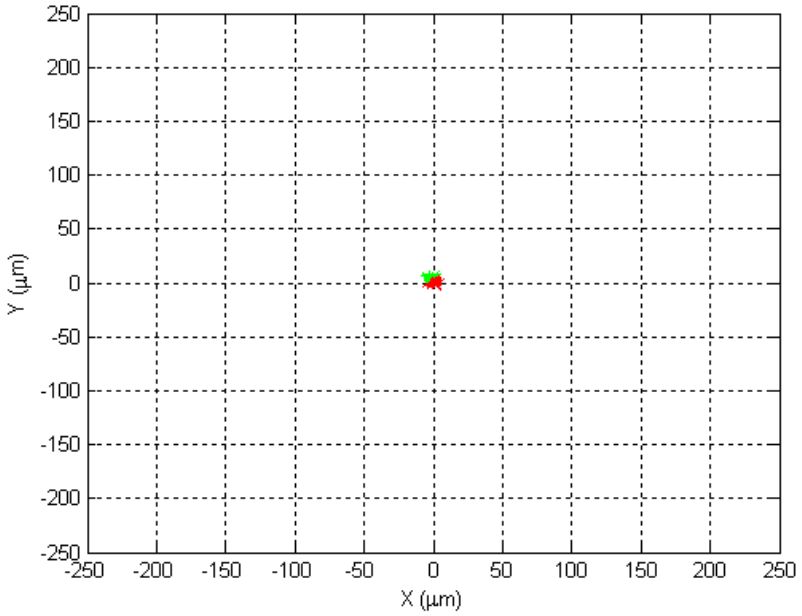
Deneysel çalışmalar geçilmeden önce BDK ve EİA, Simulink programında yer alan bloklar yardımı ile oluşturulmuştur. Daha sonra elde edilen yapının RCP tekniği ile gerçek zaman modeli elde edilmiştir. Böylece sistem kontrolüne ait gerçek zaman modeli ile hiçbir programlamaya gerek duyulmaksızın Rotor-AMY test düzeneğine uygulanmıştır. İlk olarak Şekil 8.1'de gösterilen, sistemin 4 serbestlik derecesinin kontrolünde kullanılan gerçek-zaman modeli gerçekleştirilmiştir.



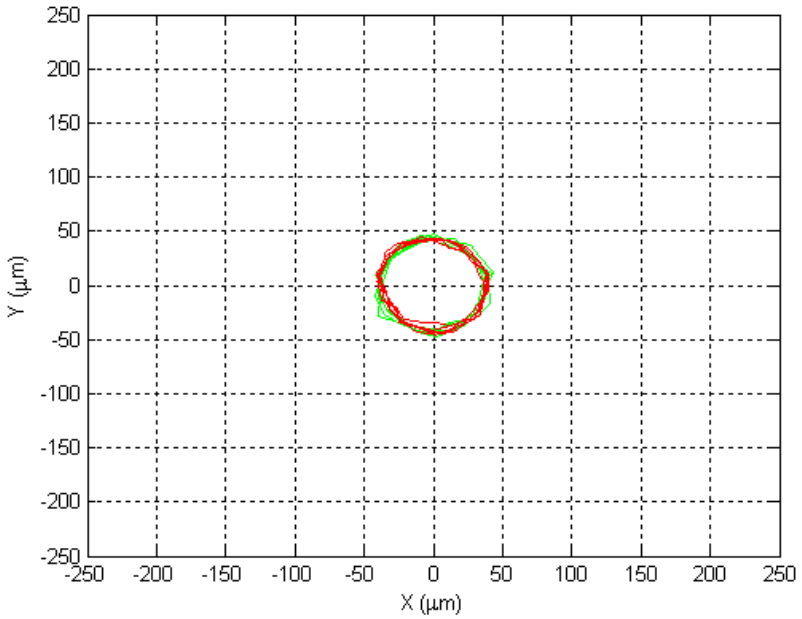
Şekil 8.1 Rotor-AMY sistemi PID kontrolörü gerçek-zaman modeli

8.2 Deneysel Sonuçlar

Kontrolöre ait gerçek zaman modelinin elde edilmesi ile ilk olarak sistemin dengede tutulması sağlanmıştır. Şekil 8.2'de rotorun denge konumunda kararlı bir biçimde manyetik olarak askıya alınışı gösterilmiştir. Rotorun her iki ucuna ait konumlar ayırt edilebilmek maksadı ile yeşil ve kırmızı gibi iki farklı renkle gösterilmiştir.



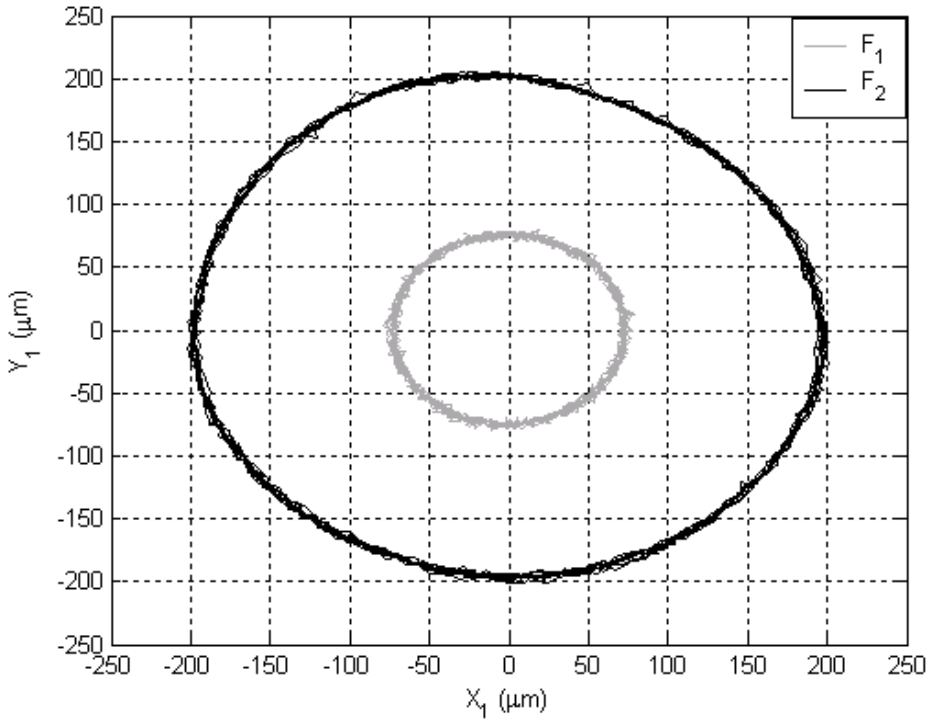
Şekil 8.2 Sistemin denge durumundaki konumu



Şekil 8.3 Sistemin sinüzoidal bozucu etkisi altında izlediği yörünge

Sisteminin kararlı bir biçimde yataklanmasının ardından dengesizlik olması durumu incelenmiştir. Şekil 8.3'de sistemin 5Hz frekanslı sinüzoidal bozucu etkimesi durumunda izlemiş olduğu yörünge gösterilmiştir. Buradan rotorun yardımcı yataklardan oldukça uzak olarak güvenli bir biçimde çalıştığı görülmektedir.

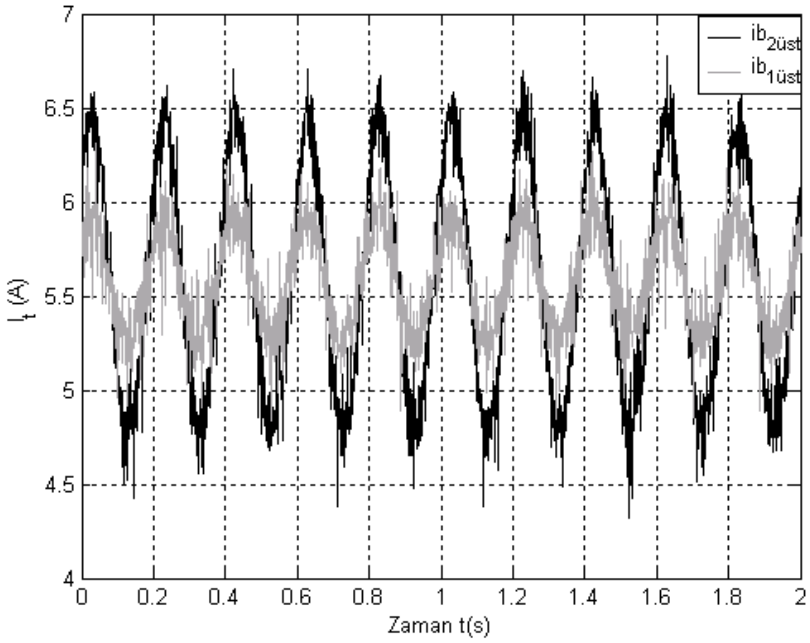
Bir sistemde AMY'lerin kullanılmasındaki asıl neden rotorun hiçbir fiziksel temas olmaksızın havada asılı tutulmasıdır. Ancak AMY'ler buna ek olarak ürettikleri kontrol kuvvetleri yardımı ile sistemde oluşan titreşimleri bastırmada da kullanılırlar. Bu durumun anlaşılabilmesi içinde rotorun aynı katılığa sahip olması durumunda farklı genlikteki bozuculara verdiği cevap incelenmiştir. Sisteme ilk olarak F_1 kuvveti daha sonrada şiddet olarak F_1 kuvvetinden büyük olan F_2 kuvveti uygulanmıştır. Şekil 8.4'de bu durumda rotorun izlemiş olduğu yörüngeler siyah ve gri renkleri ile gösterilmiştir. Buradan artan kuvvet ile rotor yörüngesinin genişleyerek yardımcı yataklara yaklaştığı görülmektedir.



Şekil 8.4 Sistemin farklı genlikteki ($F_1 < F_2$) bozuculara cevabı

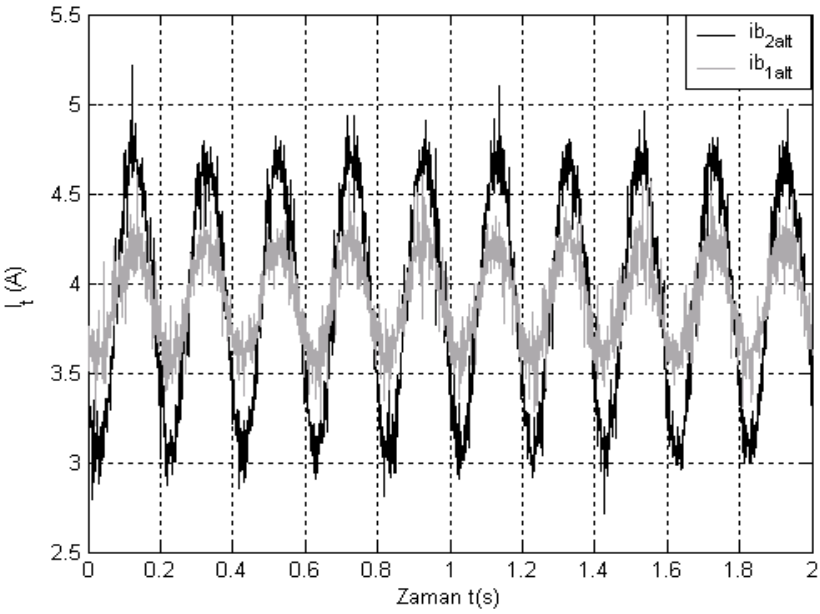
Rotorun denge konumundan ayrılması ile kontrolör devreye girmiş ve gerekli olan kontrol akımlarını AMY'lere uygulayarak rotorun kararlı bir biçimde çalışmasını sağlamıştır. Şekil 8.5'de her iki çalışma durumunda AMY'deki üst

elektromıknatıstan akan akımlar gösterilmiştir. F_1 kuvvetinin etkimesi durumundaki akım gri renk ile gösterilirken, F_2 durumu siyah renk ile gösterilmiştir.



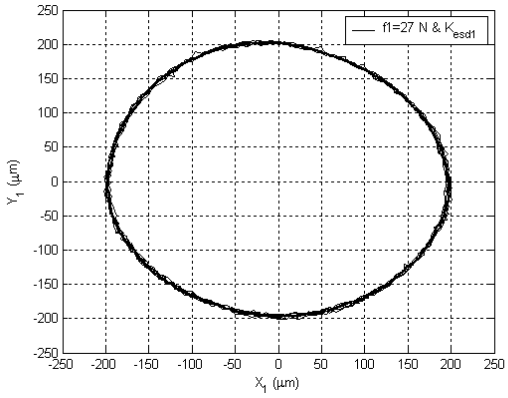
Şekil 8.5 İki farklı kuvvet durumunda üst elektromıknatıs akımı

Şekil 8.8'de ise yine her iki durumda AMY'nin alt elektromıknatısından akan akımlar gösterilmiştir. F_1 kuvvetinin etkimesi durumundaki akım gri renk ile gösterilirken, F_2 durumu siyah renk ile gösterilmiştir.

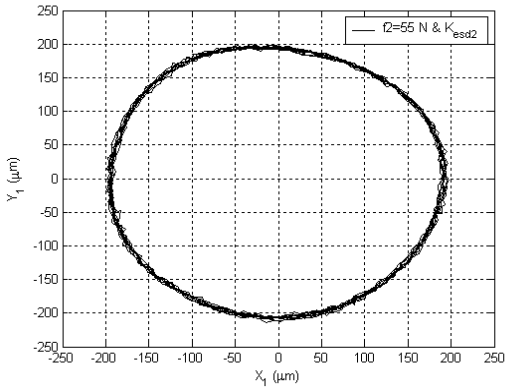


Şekil 8.6 İki farklı kuvvet durumunda alt elektromıknatıs akımı

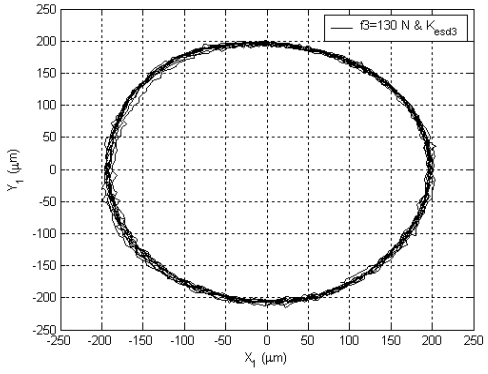
Kontrolörün Rotor-AMY sistemine uygulanan farklı bozucular karşısındaki davranışından sonra katılığın sistem üzerine olan etkisi incelenmiştir. Bunun içinde katılık değeri sistemin dinamik cevabı aynı olacak şekilde ayarlanmıştır. Şekil 8.7'de sisteme 27N'luk bir bozucu etkimiş ve buna paralel olarak da katılık istenen seviyenin altına indirilmiştir.



Şekil 8.7 Yumuşak katılık ve F_1=27 N durumunda rotor yörüngesi



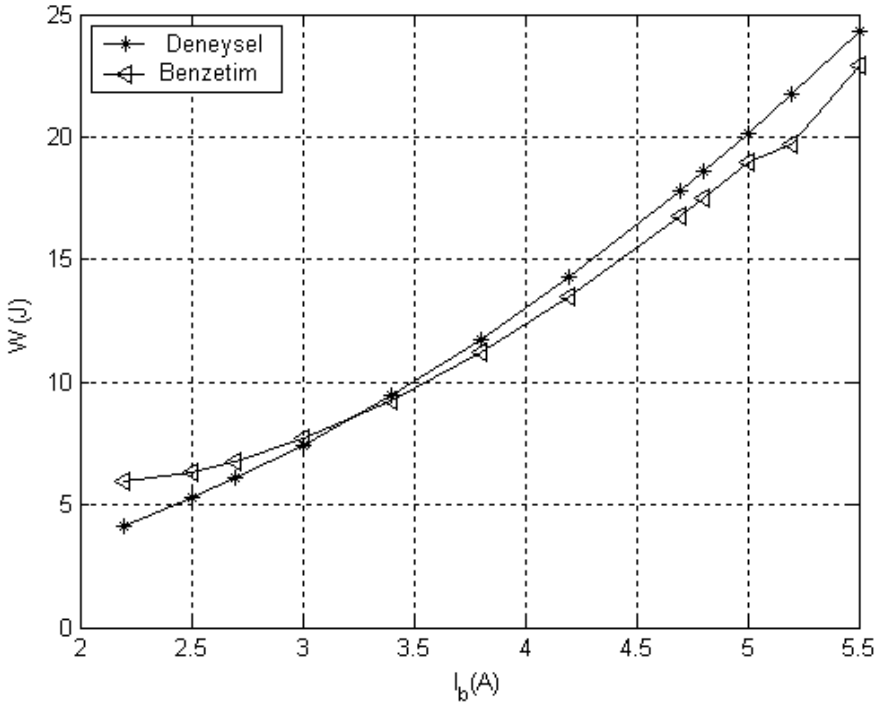
Şekil 8.8 Normal katılık ve F_2=55 N durumunda rotor yörüngesi



Şekil 8.9 Sert katılık ve F_3=130 N durumunda rotor yörüngesi

Şekil 8.8 ve Şekil 8.9'da ise sırası ile sisteme 55N ve 130N'luk bozucu kuvvetlerin etkimesi durumunda sistem cevabının aynı kalmasını sağlamak için katılığı kademeli olarak arttırılmıştır.

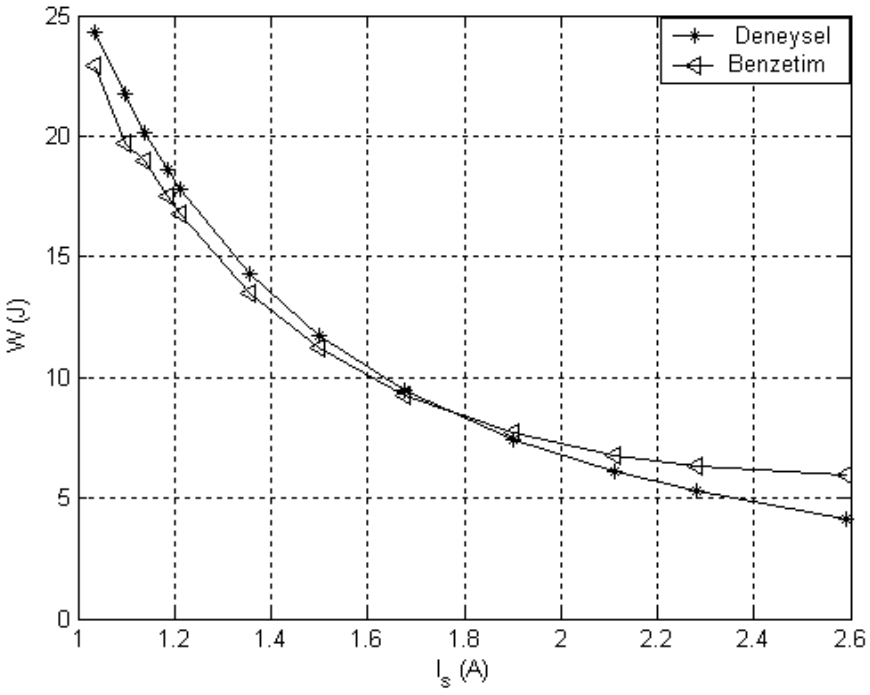
Deneysel çalışmaların ikinci kısmında ise denge akımının sistemde harcanan enerji üzerine olan etkisi incelenmiştir. Bunun için manyetik yataklar farklı denge akımları ile beslenerek sistemde harcanan enerji değeri sargı direncinin 1 ohm olması durumu için hesaplanmıştır. Şekil 8.10'da sistem katılığının 2.1×10^6 N/m ve rotor yörüngesinin 75 μm olması durumu için harcanan enerjinin denge akımı ile değişimi benzetim modeli ve deneysel sonuçlar için gösterilmiştir.



Şekil 8.10 Harcanan enerji -denge akımı değişimi

Aynı zamanda klasik yöntemden farklı olarak TYSM yöntemi sadece dikey makinelere uygulanırken değişken denge akımı yöntemi ilk olarak bu tez çalışmasında yatay makineye uygulanmıştır. Yöntemin yatay makineye uygulanması durumunda denge akımı ile birlikte statik akımda değiştirilmektedir. Şekil 8.11'de statik akımın harcanan enerji ile değişimi gösterilmiştir.

Böylece Rotor-AMY sisteminde harcanan enerjinin azalan denge akımı ile azaldığı ve bu yöntemin yatay sisteme uygulanması durumunda statik akımında eş zamanlı olarak kararlılığı korumak amaçlı olarak değiştirilebilmesi gerektiği gösterilmiştir.

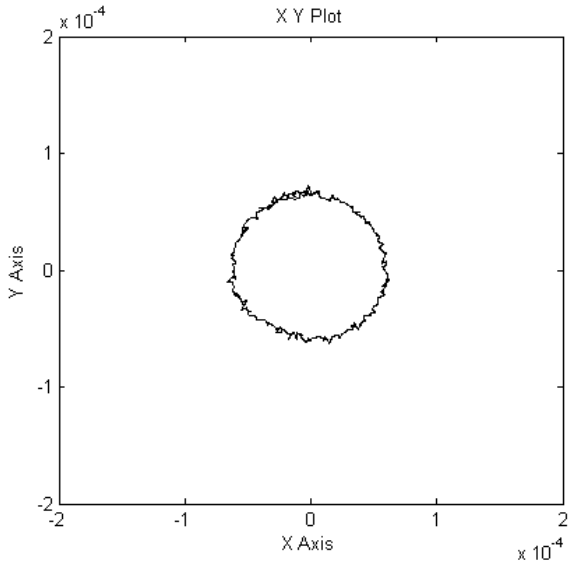


Şekil 8.11 Harcanan enerji -statik akım değişimi

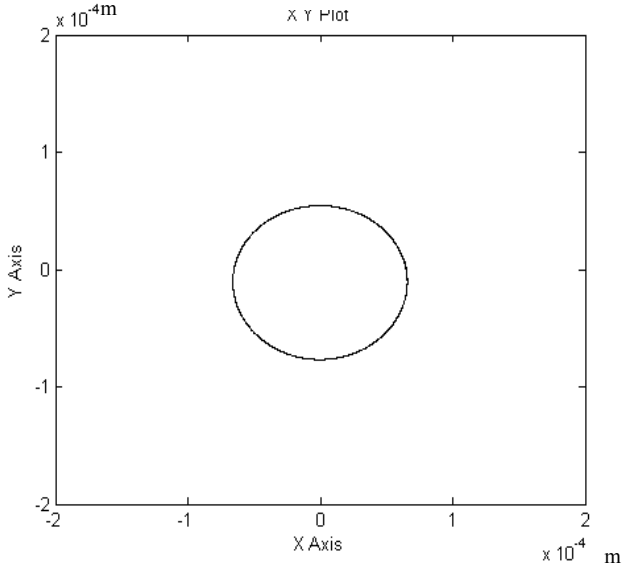
Deneysel çalışmanın diğer bir bölümünde sistem dinamiği göz önüne alınmıştır. Sistem dinamiğinin birden fazla (I_b,K_p) çiftleri tarafından sağlanabildiği gösterilmiştir. Bunun içinde (I_b,K_p) çiftleri hem benzetim modeline hem gerçek sisteme uygulanmış ve sonuç karşılaştırmalı bir biçimde gösterilmiştir. Şekil 8.12 ve 8.13'de sistem katılığının 4.1×10^6 N/m olması durumunda geleneksel ÇYSM uygulanması durumundaki deneysel ve benzetim sonuçları gösterilmiştir.

m

m

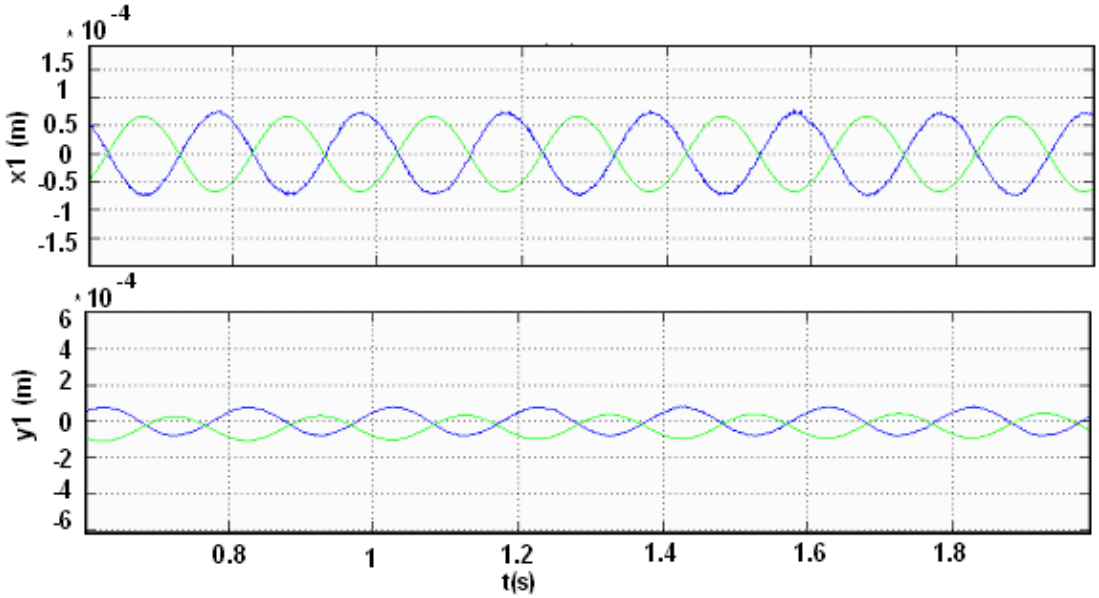


Şekil 8.12. (I_b, K_p)= (5, 7996) durumunda sistemin izlediği yörünge



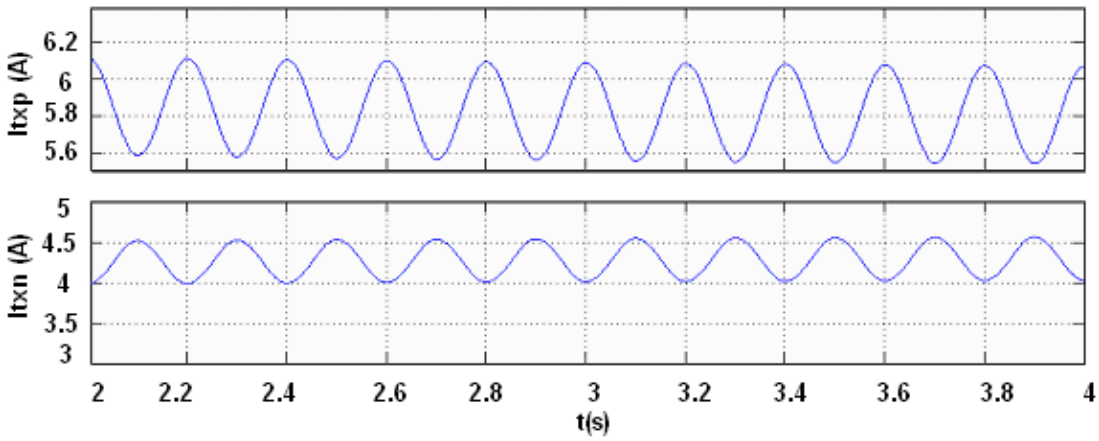
Şekil 8.13. (I_b, K_p)=(5, 7996) durumunda benzetim modelinin izlediği yörünge

Şekil 8.14'de Rotor-AMY sisteminin 4.1×10^6 N/m olması ve F=130 N'luk bir kuvvet etkimesi durumundaki benzetim modelinden ve gerçek sistemden elde edilen konumlar karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Konum bilgileri arasındaki faz farkı karşılaştırmasının daha net bir biçimde gösterilebilmesi amacı ile oluşturulmuştur.



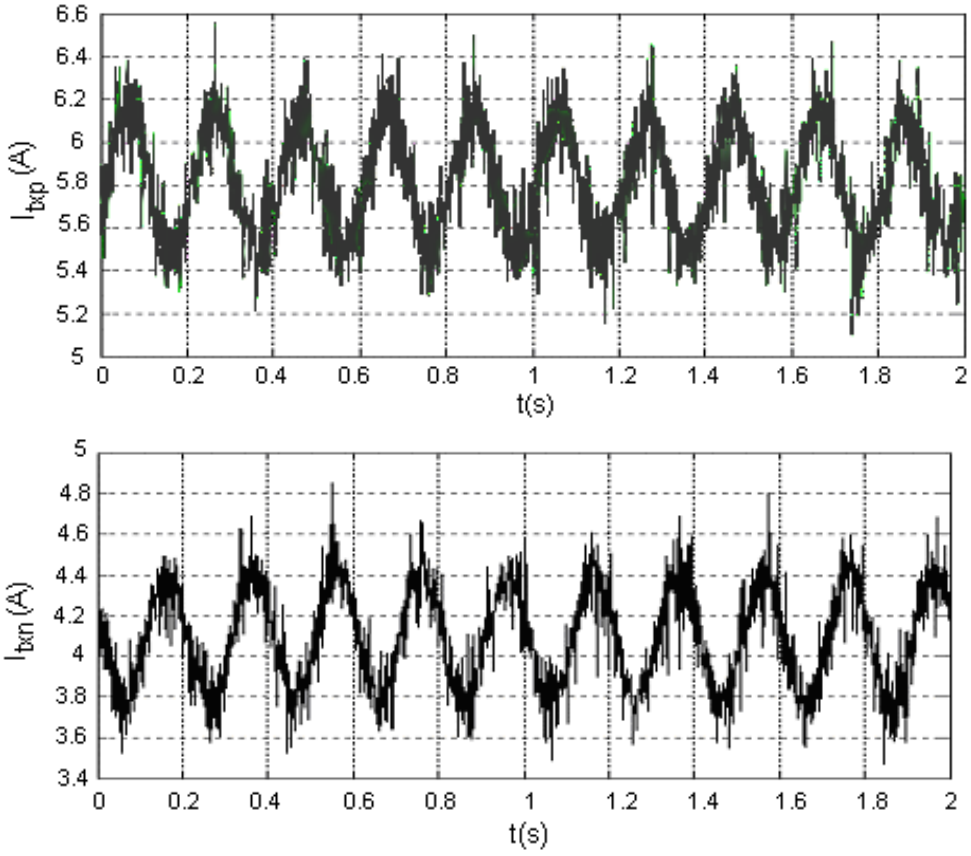
Şekil 8.14 Benzetim modeli ve deneysel çalışma durumu konum bilgileri

Sonuç olarak gerçek sistemin ve benzetim modelinin konum bilgilerinin oldukça büyük bir yaklaşıklık da olduğu gösterilmiştir. Daha sonra bu durumda elektromıknatıslara uygulanan akım bilgileri karşılaştırılmıştır. Şekil 8.15'de benzetim modelinde elektromıknatıslardan akan akımlar gösterilmiştir.



Şekil 8.15 Rotor-AMY sistemi benzetim modeli akımları

Şekil 8.16'da ise aynı durumda gerçek sistemde karşılıklı elektromıknatıslardan akan akımlar gösterilmiştir.

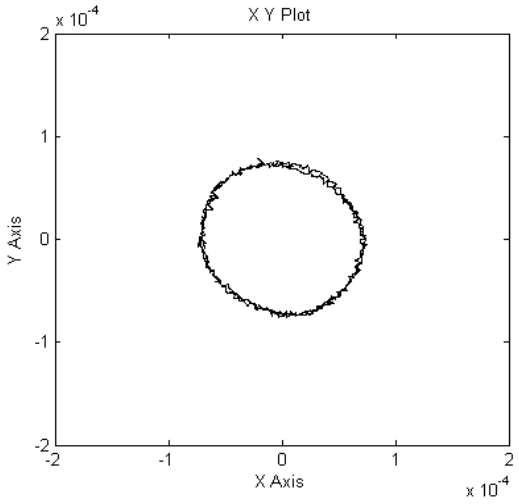


Şekil 8.16 Rotor-AMY sistemi akımları

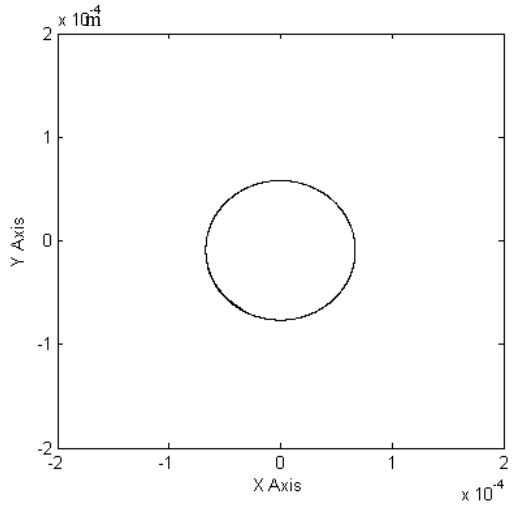
Üst ve alt elektromıknatısın tepe değerleri deneysel çalışmada 6.3 ve 4.5A olarak elde edilirken, benzetim modelinde 6.1 ve 4.5A olarak elde edilmiştir. Buradan benzetim modeli ile deneysel değerlerin birbirleri ile örtüştüğü görülmektedir. Buradan sistem modelinin gelecekte deney düzeneğinin olmadığı çalışmalarda kullanılmaya uygun olduğu görülmektedir.ÇYSM'den sonra aynı durum için DDAK yöntemi uygulanmıştır. Böylece farklı denge akımı orantı katsayısı çifti ile sistemin klasik yöntem ile aynı dinamiği daha az enerji harcayarak sağladığı gösterilmiştir. Şekil 8.17 ve 8.18'de 4.1×10^{6} N/m katılık değerinde, denge akımının 2.5A yani klasik yöntemde uygulanan akımın yarısı olduğu durum göz önüne alınmıştır

m

m

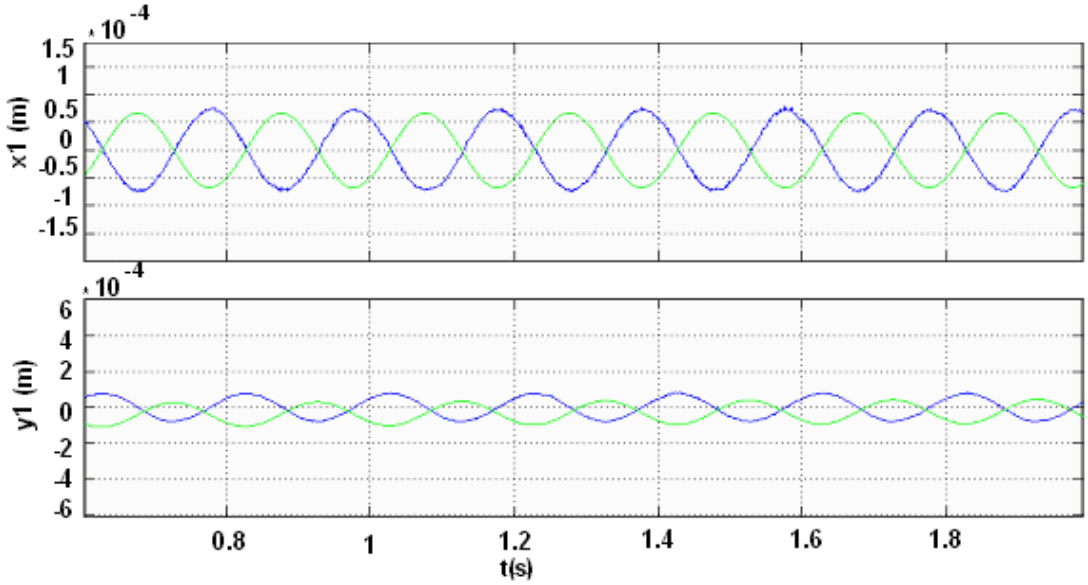


Şekil 8.17. (I_b,K_p)= (2.5,10520) durumunda sistemin izlediği yörünge



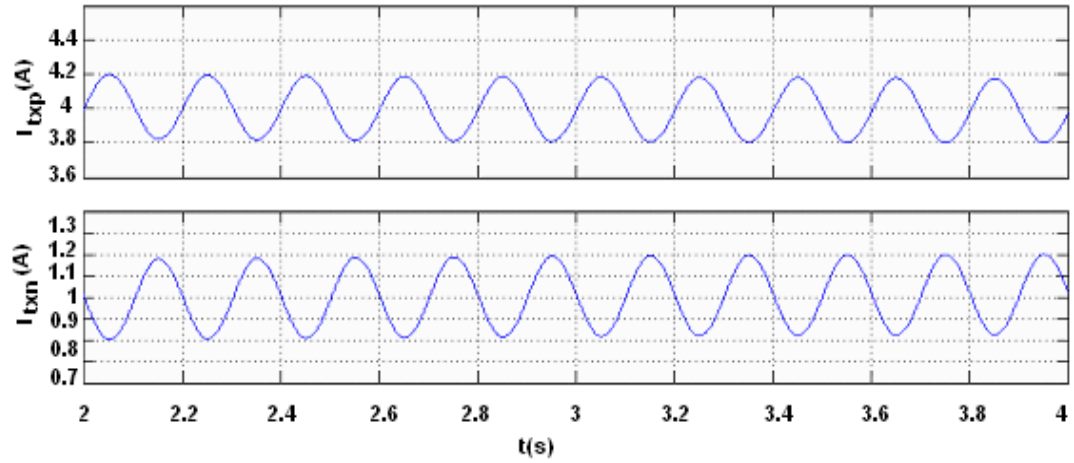
Şekil 8.18 (I_b, K_p)=(2.5, 10520) durumunda benzetim modelinin izlediği yörünge

Şekil 8.19'da Rotor-AMY sisteminin 4.1×10^6 N/m katılığında ve denge akımının yarı yarıya olduğu durumdaki konum değişimleri benzetim modeli ve gerçek sistem için karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Buradan denge akımının yarı yarıya düşürülmesi durumu içinde gerçek sistem konumunun benzetim modeli ile büyük bir yaklaşıklık sergilediği görülmektedir.

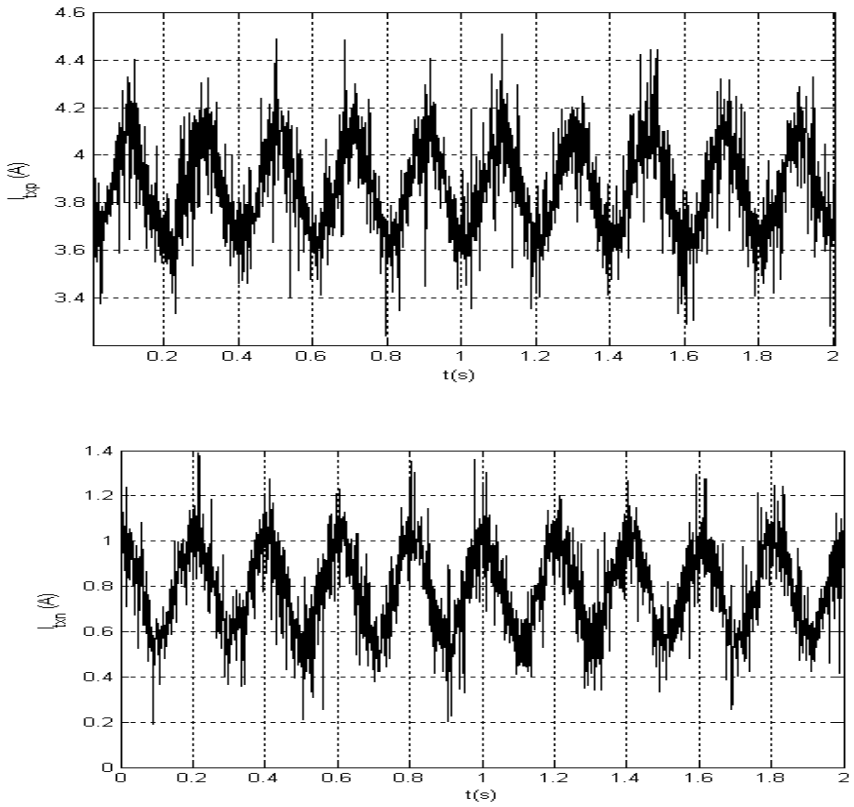


Şekil 8.19 Benzetim modeli ve gerçek konum bilgileri

Sistemin 4.1×10^{6} N/m katılığında ve F=130N'luk bozucu kuvvet karşısında elektromıknatıs akımları Şekil 8.20 ve 8.21'de benzetim modeli ve gerçek sistem için gösterilmiştir.



Şekil 8.20 Rotor-AMY sistemi benzetim modeli akımları

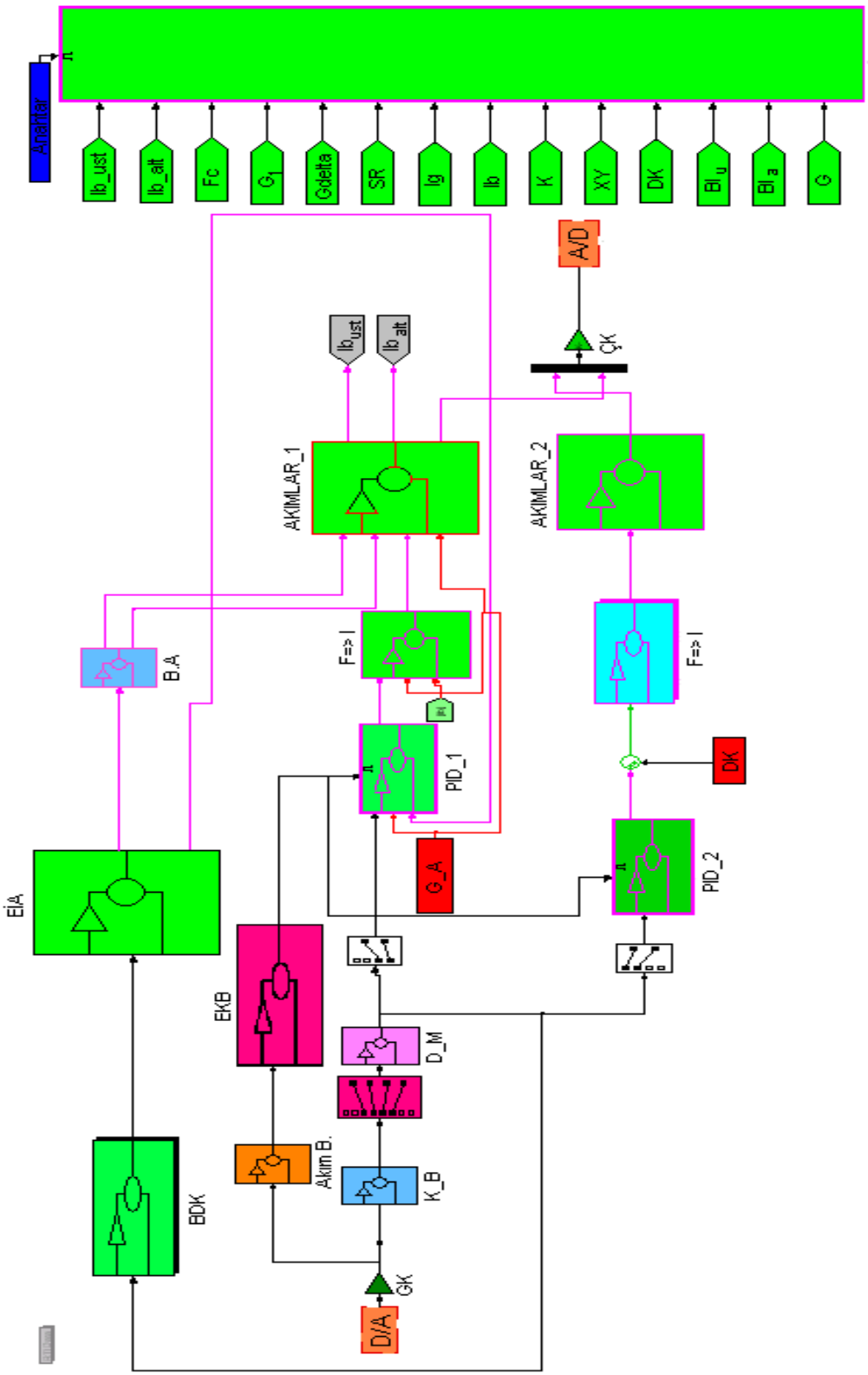


Şekil 8.21 Rotor-AMY sistemi akımları

ÇYSM'nin ve DDAK yönteminin sistem dinamiğini koruyacak şekilde sisteme uygulanması durumundaki benzetim modeli ve deneysel çalışma sonuçları Tablo 8.1'de gösterilmiştir. Denge akımının 4.8A olması durumu Ek C'de gösterilmiştir.

Tablo 8.1 ÇYSM ve DDAK yöntemi sonuçları

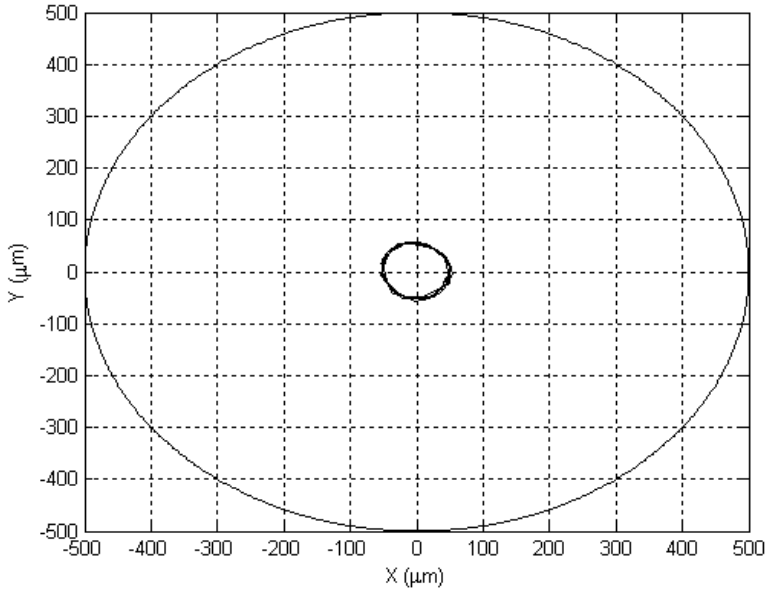
	F_d (N)	**I_b (A)**	**$K_{eşd}$ (N/m)**	**W (J)**
I.DURUM (Benzetim)	130	5	4.1×10^6	20.91324
I.DURUM (Deneysel)	130	5	4.1×10^6	21.78
II.DURUM (Benzetim)	130	4.8	4.1×10^6	18.2332
II.DURUM (Deneysel)	130	4.8	4.1×10^6	18.59
III.DURUM (Benzetim)	130	2.5	4.1×10^6	6.809
III.DURUM (Deneysel)	130	2.5	4.1×10^6	5.5282



Şekil 8.22 BDK+EİA gerçek-zaman modeli

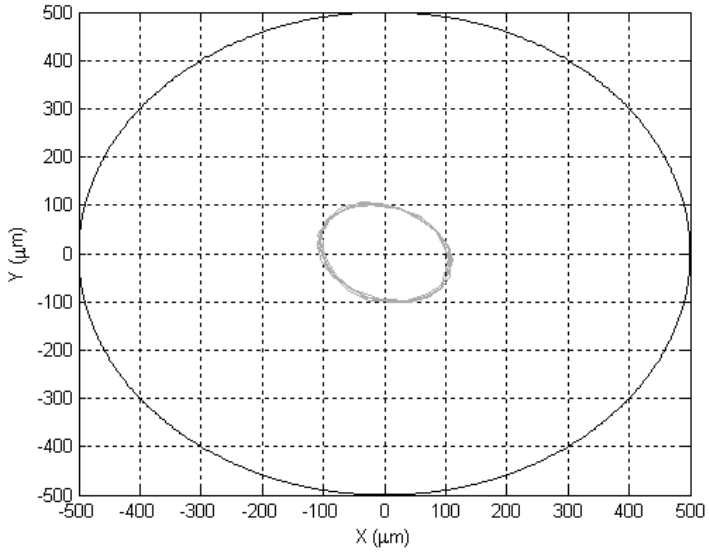
Şekilleri ve Tablo 8.1 incelendiğinde deneysel ve benzetim sonuçlarının sistem katılığının korunduğu durumda farklı denge akımı, orantı katsayısı çiftleri ile sağlanabildiği ve sonuçlarında büyük bir yaklaşıklıkla aynı olduğu görülmektedir. Bu durum geliştirilen yöntem ile Rotor-AMY sistemi için değişik çalışma şartlarına uyum sağlayabilen bir kontrol yapısının gerçeklenebilirliği göstermektedir. Bunlara ek olarak DDAK yöntemi ile ÇYSM'ye göre sisteminde harcanan enerjinin de azaldığı hem deneysel hem de benzetim sonuçlarından görülmektedir.

Deneysel çalışmanın son kısmında BDK'nın enerji iyileştirme algoritması (EİA) ile birlikte çalışması durumu incelenmiştir. Bunun için değişken yapılı PID kontrolörü denetleyecek olan BK ve EİA sisteme yerleştirilmiştir. Böylece farklı bozucular ile karşılaşılması halinde sistem için gerekli olan katılık bilgisi Eİ bloğuna aktarılarak değiştirilmesi gereken kontrolör parametresi ve akım bilgileri elde edilmektedir. Ancak bu işlem sistemde harcanan enerjinin azaltılmasını sağlayacak olan parametrelerin belirlenmesine ek olarak gövdeye iletilen kuvvetin küçültülmesi durumu da göz önüne alınarak gerçekleştirilmektedir. Şekil 8.22'de BDK, PID kontrolör ve EİA'nın yer aldığı gerçek zaman modeli Şekil 8.22'de gösterilmiştir. Sistemin aynı bozucularla karşılaşması durumunda ÇYSM ve BDK+EİA yöntemlerinin kullanılması ile elde edilen sonuçları incelenmiştir. Sisteme ilk önce 30 N'luk bir bozucu kuvvet uygulanmıştır. Şekil 8.23'de rotorun ÇYSM'nin kullanılması durumundaki yörüngesi gösterilmiştir.



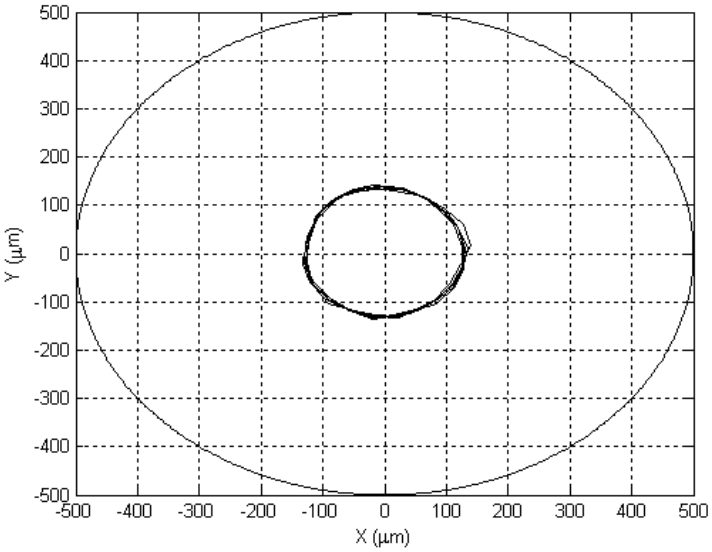
Şekil 8.23 PID kontrolör durumunda sistemin izlediği yörünge(1)

Şekil 8.24'de ise BDK+EİA'nın kullanılması durumunda rotor yörüngesi gösterilmiştir.



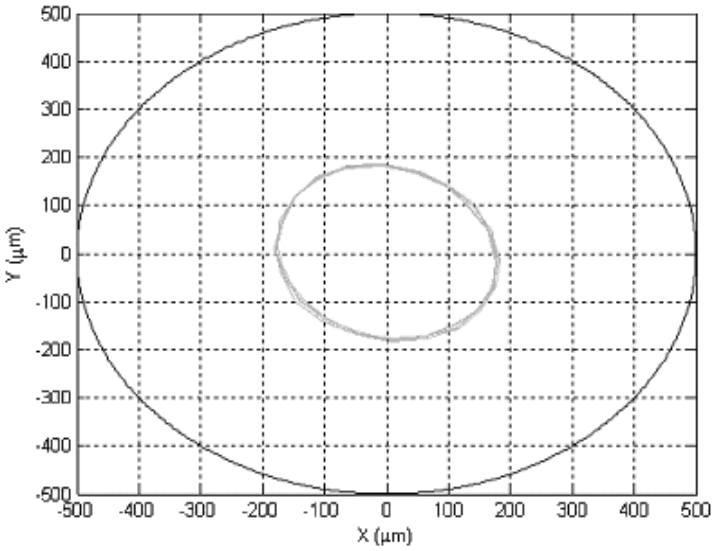
Şekil 8.24 BDK durumunda sistemin izlediği yörünge (1)

Sisteme uygulanan 30N'luk bozucu kuvvet daha sonra 85 N'ye çıkarılmış ve rotorun bu durumda her iki yöntemden elde edilen sonuçları incelenmiştir. Şekil 8.25'de ÇYSM yönteminin uygulanması durumunda rotorun izlediği yörünge gösterilmiştir.



Şekil 8.25 PID kontrolörün durumunda sistemin izlediği yörünge(2)

Şekil 8.26'da ise BDK+EİA yöntemi durumundaki rotor yörüngesi gösterilmiştir.



Şekil 8.26 BDK kullanılması durumunda sistemin izlediği yörünge (2)

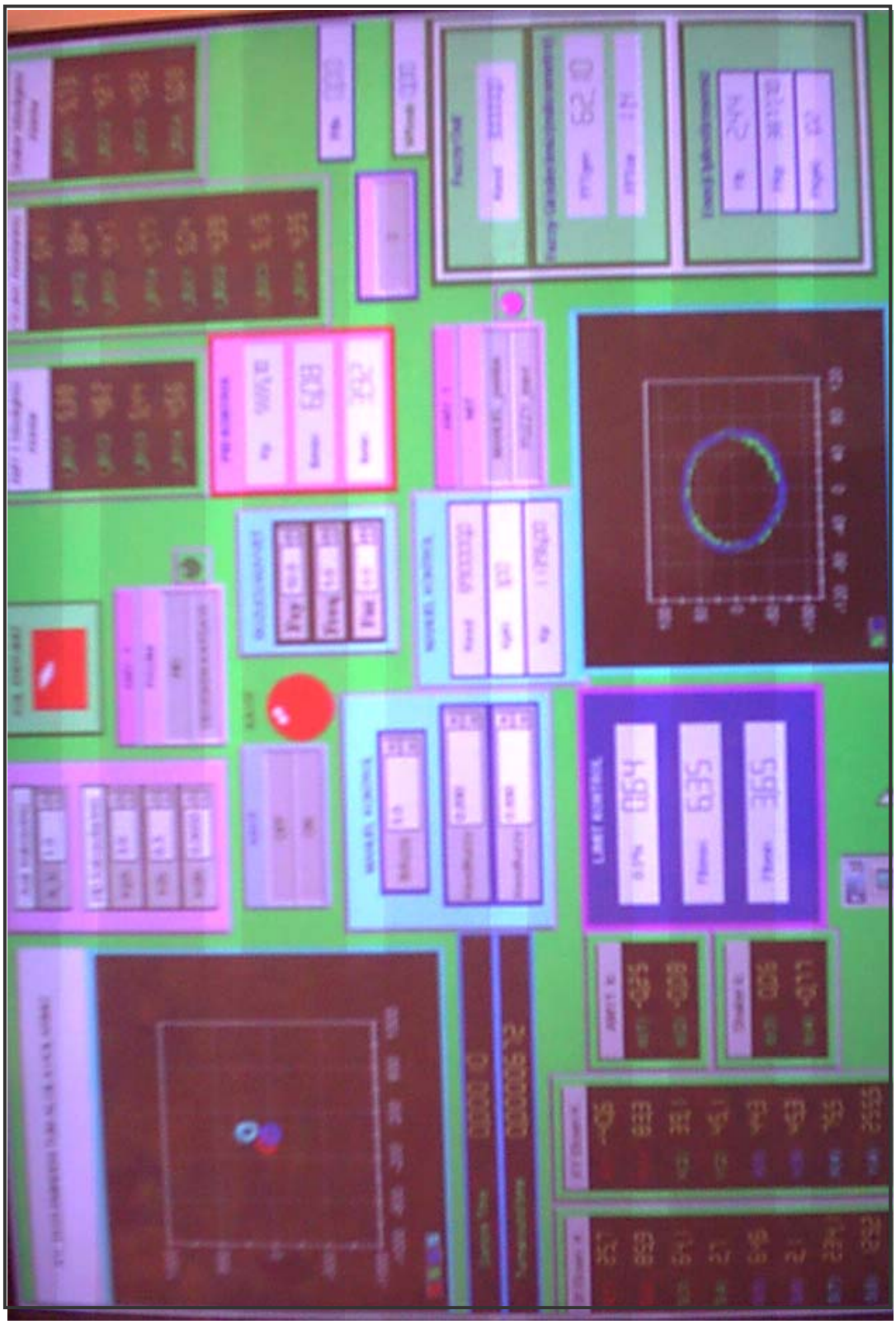
Tablo 8.2'de BDK+EİA yöntemi ile klasik PID kontrolörün farklı bozucular karşısında belirlediği parametreler gösterilmiştir.

Tablo 8.2 PID ve BDK+EİA yöntemi deneysel sonuçları

	F_d (N)	I_b (A)	$K_{eşd}$ (N/m)
PID	30	5	0.89×10^6
BDK+EİA	30	2.5	0.30×10^6
PID	85	5	0.89×10^6
BDK+EİA	85	2.78	0.40×10^6

Tablo 8.2'deki sonuçlara bakıldığında BDK+EİA yöntemi ile bozucular karşısında denge akımının ve katılığın geleneksel yöntemde olduğu gibi sabit olmayıp kontrolörden beklenilen performans kriterleri doğrultusunda farklı değerlere ayarlandığı görülmektedir. Sistemin 30N'luk bir bozcu ile karşılaşılması durumunda akım değeri BDK+EİA yardımı ile 2.5A'e ayarlanırken sistem katılığı da 0.89×10^6 N/m'den 0.30×10^6 N/m'ye azaltılmıştır. Benzer şekilde sistemin 85N'luk bir bozucu ile karşılaşması durumunda da akım değeri 2.78A katılık bilgisi ise 0.40×10^6 N/m olarak belirlenmiştir. Böylece AMY akımları azaltılarak sistemde harcanan enerji miktarı azaltılmakla kalmamış aynı zamanda katılık değerini de ayarlanarak sistem gövdesine iletilen kuvvet miktarı sistem kararlılığını bozmayacak şekilde

azaltılmıştır. Şekil 8.27'de Rotor-AMY sisteminin gerçek zamanlı kontrolünde dSPACE'in kontrol masasında kullanılan kontrol paneli yapısı gösterilmiştir.



Şekil 8.27 Rotor-AMY sistemi kontrol paneli

9 SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, dinamik sistemlerde kullanılan alışılagelmiş mekanik yatakların neden olduğu aşınma, kirlilik, ömür ve güvenirlilik gibi çeşitli olumsuzlukları büyük ölçüde ortadan kaldıran Aktif Manyetik Yatakların (AMY) kullanıldığı Turbomoleküler Pompa (TMP) ve Rotor-AMY sistemleri ele alınmıştır.

Tez çalışmasının ilk kısmında AMY'ler ile ilgili literatür araştırması yapılarak bu alandaki çalışmaların geldiği son nokta ortaya konmuştur. Bu noktadan hareketle tez çalışmasından istenilenler genel hatları ile sistem yapısına uygun ve çalışma şartlarına göre kendini ayarlayabilen kontrolör tasarımı ve AMY'lerde harcanan enerji miktarının azaltması olarak belirlenmiştir.

Tez çalışmasının ikinci kısmında ise çalışma kriterlerinin doğrultusunda AMY'lerin yer aldığı sistem modelleri geliştirilmiştir. Bunun için ilk önce AMY'nin doğrusal olmayan modeli, manyetik eşdeğer devresi ve Koenerji prensibi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Daha sonra Lagrange Mekaniği yardımı ile rotor modelleri sırası ile beş ve dört serbestlik dereceli sistemler için oluşturulmuştur. Geliştirilen modeller, rotora ve AMY'lere ait parametrelerinde kullanılması ile Matlab®/Simulink ortamına aktarılmıştır. Böylece biri dikey diğeri yatay olan her iki sistemin benzetim modeli elde edilmiştir. Bir sonraki aşamada ise AMY'lerin kararlı olarak çalışmasını sağlayacak olan kontrolör tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan kontrolör, sistemin kararlı bir biçimde çalışmasını sağlamak ve sistemin farklı çalışma şartlarındaki dinamiğini inceleyebilmek için sistem matematiksel modelinin yer aldığı Matlab®/Simulink ortamına aktarılmıştır.

Tez çalışmasının bir sonraki aşamasında ise AMY'li sistemlerin bozucular karşısındaki davranışları ve harcadıkları enerji konuları ele alınmıştır. Bu bağlamda, sistem cevabının belirlenmesinde etkili olan eşdeğer katılık ifadesi geliştirilerek fonksiyonu olduğu parametreler ortaya konmuştur. Bir sonraki adımda ise incelemelerden elde edilen sonuçlar doğrultusunda sistemdeki belirsizlikleri, doğrusal olmayan yapıdan kaynaklanan etkileri ve dengesizlik sonucunda oluşan titreşimleri bastırmak amacı ile literatürde yer alan kontrolörlerden tamamen farklı bir yaklaşımın kullanıldığı Bulanık Denetleyici Kontrolör (BDK) tasarımı

gerçekleştirilmiştir. Sistem dinamiğinin incelenmesi ve bu doğrultuda tasarlanan kontrolör yapısının geliştirilmesinin ardından AMY'lerde harcanan enerji konusu ele alınmıştır. Bunun için literatürde yer alan iki farklı akım kontrol yöntemi incelenerek denge akımının enerji kaybına olan etkisi gösterilmiştir (Şekil 6.5). Elde edilen sonuç dan hareketle Değişken Denge Akımı Kontrol yöntemi (DDAK) geliştirilerek AMY'lerde harcanan enerji miktarı azaltılmıştır. İlk kez bu tez çalışmasında geliştirilen yöntem yardımı ile ortaya konan teori daha sonra hem benzetim modeli hem de deneysel sonuçlar yardımı ile ispat edilmiştir (Şekil 8.10, Tablo 8.1).

Tez çalışmasının bir sonraki aşamasında ise, farklı çalışma şartlarında hem sistemde harcanılan enerji miktarının azaltılması ve hem de sistem dinamiğinin ayarlanması işlemlerini aynı anda gerçekleştirmek için ilk kez BDK ve DDAK yönteminin yer aldığı, Enerji İyileştirme Algoritması (EİA) birbirleri ile seri olarak bağlanmıştır. Tasarlanan yapı ile farklı bozucular karşısında kontrolör ve AMY katsayıları eş zamanlı olarak değiştirilerek hem dinamik yapı istenen biçimde ayarlanmış hem de harcanan enerji miktarı azaltılmıştır.

Sonuç olarak, BDK + EİA'nın yer aldığı benzetim modelinin gerçek zaman modeli dSPACE'in RCP (Hızlı kontrol prototipleme) tekniği kullanılarak elde edilmiş ve Rotor-AMY sistemine uygulanmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar benzetim modeli sonuçları ile karşılaştırılarak geliştirilen yöntemin doğruluğu ve ÇYSM'ye olan üstünlüğü hem gövdeye iletilen kuvvetin küçültülmesi ve hem de sistemde harcanan enerji açısından gösterilmiştir (Tablo 8.2).

KAYNAKLAR

[1] **Earnshaw, S.,** 1842. On the Nature of the Molecular Forces which Regulate the Constitution of the Luminiferous Ether, *Transactions of Cambridge Philosophical Society*, 97-112.

[2] **Beams, J.W., Young, J.L., ve Moore, W.,** 1946. The Production of High Centrifugal Fields, *Journal of Applied Physics*, 886-890.

[3] **Habermann, H. ve Liard, G.L**, 1979. Practical Magnetic Bearings, *IEEE Spectrum,* **16**, 26-30.

[4] **Schweitzer, G., ve Lange, R.**, 1976. Charachteristics of a Magnetic Rotor Bearing for Active Vibration Control, *Technische Universitat Munchen, IMECHE*.

[5] **Kirk, J.A. ve Studer, P.A.,** 1977. Flywheel Energy Storage, *International Journal of Mechanical Society*, **19**, 233-245.

[6] **Studer, P. A.,** 1978. Magnetic Bearings Flywheel Energy Storage, *International Journal of Mechanical Society,* **19**, 133-145.

[7] **Ohkami, Y.,** 1981. A Comarison Study of Various Types of Magnetic Bearings Utilizing Permanent Magnets, *International Workshop on Rare Earth-Cobalt Permanent magnets and Their Applications,* Roanoke.

[8] **Britcher, C. P.,** 1985. Progress Toward Magnetic Suspension and Balance Systems for Large Wind Tunnels, *Swiss Federal Technical Institute*, Zurich*, Switzerland*.

[9] **Hebbale, K. V.,** 1985. A Theoretical Model for the Study of Nonlineer Dynamics of Magnetic Bearings, *PhD Thesis,* Cornell University, Ithaca*, NY.*

[10] **Springer, H.,** 1989. Nonlinearities and Hystersis Effect in Ferromagnetic Circuits of Electromagnetic Bearings, *University of Virginia, ROMAC Laboratories*, UV/643092/MAE89/405.

[11] **Maresca R. L.,** 1983. An Integrated Magnetic Actuator and Sensor For Use In Linear or Rotary magentic Bearings*, IEEE Transactions on Magnetics,* **22,** 2094-2096.

[12] **Ulbrich H.,** 1987. Control of Flexible Rotors by Active Elements*, 11th Biennial ASME Design Engineering Division Conference on Vibrations and Noise, Session on Rotating Machinery Dynamics,* 27-30.

[13] **Schweitzer, G. and Salm, J.,** 1984. Modelling and Control of a Flexible Rotor with Magnetic Bearings*, Proceedings of the Conference on Vibrations in Rotating Machinery IMECHE Transactions on Magnetics, York University,1227-1230*.

[14] **Salm, J.,** 1987. Active Electromagnetic Suspension of An Elastic Rotor: Modeling, Control, and Experimental Results, *Conference on Vibration and Noise,* 27-30.

[15] **Traxler, A. and Schweitzer, G.,** 1984. Measurement of the Force Charachteristics of a Contacless Electromagnetic Bearing*, Symposium on Measurement and Estimation Proceedings,* 187-191.

[16] **Allaire, P. E., Humpris, R. R., and Kelm, R. D.,** 1985. Magnetic Bearings for Vibration Reduction and Failure Prevention*, 40th Meeting of the Mechanical Failures Prevention Groups.*

[17] **Banerjee, B. B.,** 1988. Analysis and Design of Magnetic Thrust Bearings*, Master's Thesis University of Virginia, Charlotessville, VA.*

[18] **Nikolajsen, J. L.,** 1988. Experimental Investigation of Eddy-Current Bearing*, Proceedings of the First International Symposium,* Zurich,137-146.

[19] **Hibner, D. H. and Bansal P. N.,** 1989. Magnetic Bearing Feasibility and Development*, Interim Project Report to Wright-Patterson AFB, U.S. Air Force, Ref.No: AFWAL-TR-88-2124.*

[20] **Meeks, C.,** 1989. Trends in Magnetic Bearing Design*, Naval Sea Systems Command Magnetic Bearing Forum, Washington, D.C.*

[21] **Imlach, J.,** 1990. The Design and Testing of Radial Magnetic Bearings for An Industrial Canned Motor Pump*, Master's Thesis University of Virginia,* Charlotessville, VA.

[22] **Sortore, C. K.,** 1990. Design of Permanent Magnet Biased Magnetic Bearings for a High Speed Rotor*, Master's Thesis University of Virginia,* Charlotessville, VA.

[23] **Brunet, M.,** 1988. Practical Applications of Active Magnetic Bearings to the Industrial World*, Proceedings of the First International Symposium on Magnetic Bearings,* Zurich.

[24] **Bleuler, H.,** 1992. A Survey of Magnetic Levitation and Magnetic Bearing Types*, JSME International Journal, Series III,* **35**,3-9.

[25] **Matsumura, F., Okada, Y., Fujita, M., Namerikawa, T.,** 1997. State of Art of Magnetic Bearing*, JSME International Journal, Series III,* **40**, 44-48.

[26] **Antila, M., Lantto, E., Arkkio, A.,** 1998. Determination of Forces and Linearized Parameters of Radial Magnetic Bearing By Finite Element Techniques*, IEEE Transactions on Magnetics,* **34,** 684-694.

[27] **Antila, M., Arkkio A., Lantto, E. and Jokinen, T,** 1999. Active Magnetic Bearing For High Speed Electric Machines*, 3rd International Symposium on Advanced Electromechanical Motion***,** 959-964.

[28] **Antila, M., Arkkio, A., Lantto, E. and Jokinen, T.,** 1999. Active Magnetic Bearing For High Speed Electric Machines*, 3rd International Symposium on Advanced Electromechanical Motion***,** 959-964.

[29] **Mashlen, E.,** 1991. Magnet Bearing Synthesis for Rotating Machinery*, PhD. Thesis University of Virginia*, Charlotessville, VA.

[30] **Allaire, P. E., Lewis, D. W., and Knight, J. D.,** 1983. Active Vibration Control of A Single mass Rotor on Flexible Supports, *Journal of the Franklin Institute,* **315,** 211-222.

[31] **Habermann, H. and Brunet, M.,** 1985. The Active Magnetic Bearing Enables Optimum Control of Machine Vibrations, *Gas Turbine Conference and exhibit Institute,*Houstan, TX.

[32] **Humphris, R. R., Kelm, R. D., Lewis, D.W., and Allaire, P. E.,** 1986. Effect of Control Algorithms on Magnetic Journal Bearing Properties, *Transactions of ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power,* **108,** 624-632.

[33] **Reinig, K. D and Desrochers, A. A.,** 1986. Disturbance Accomodating Controllers for rotating Mechanical Systems, *ASME Design Engineering Division Conference and exhibition on Mechanical Vibration and Noise,* Cincinnati, OH.

[34] **Keith, F. J.,** 1988. Digital Control Sytem Design for Active Magnetic Bearings, *Master's Thesis University of Virginia*, Charlotessville, VA.

[35] **Lewis, D.W, Mashlen E., and Humpris R. R.,** 1988. Dynamic Response of a Magnetically Supported Rotor, *Proceedings of the First International Symposium on Magnetic Bearings,* Zurich..

[36] **Beathy, R.,** 1988. Notch Filter Control of Magnetic Bearings to Improve Rotor Synchronous Response, *Master's Thesis Massachusetts Institute of Technology*, Boston, MA.

[37] **Stanway, R., and Burrows C. R.,** 1981. Active Vibration Control of A Flexible Rotor on Flexibly Mounted Journal Bearings, *ASME Journal of Dynamic Systems Measurement and Control,* **103***,* 383-388.

[38] **Bleuler H.,** 1984. Decentralized Control of Magnetic Rotor Bearing Systems*, PhD's Thesis, Swiss Federal Technical Institute*, Zurich, Switzerland.

[39] **Lange T.,** 1985. Optimal Magnetic Bearing Control for High Speed Momentum Wheels*, J.Guidance,* 737-742.

[40] **Matsumura F., And Yoshimoto, T.,** 1996. System Modelling and Control of A Horizontal Shaft Magnetic Bearing System*, IEEE Transactions on Magnetics,* **22,** 196-203.

[41] **Johnson C. D.,** 1987. Active Control of a Flexible Two-Mass Rotor Suspended in Magnetic Bearings*, 11th Biennial ASME Design Engineering Division Conference on Vibrations and Noise,* 27-30.

[42] **Gürleyen, F.,** 1994. Magnetik Askı Sistemi İçin Bir Lineerleştirici Robust Kontrol Stratejisi, *Otomatik Kontrol Bilimsel Toplantısı, FM Kültür Merkezi,* İstanbul, 241-252.

[43] **Gürleyen, F.,** 2005. PID+Kural Tabanı-Değişken Yapılı Kontrol İle Aktif Manyetik Yataklamalı Yüksek Hızlı Rotorlar, *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, İstanbul Teknik Üniversitesi,* 125-130.

[44] **Şahinkaya, M. N., Abulrub, A. G., Keogh, P. S. and Burrows, C.,** 2005. Effective Model Reduction Magnetically Levitated Flexible Rotors Including Contact Dynamics*, ASME 2005 International Design Engineering Technical Conferences & Engineering and Computers and Information in Engineering Conference*,Long Beach, USA*,* 27-30.

[45] **Bleuler, H. and Vischer.,** 1988. A New Approach To Sensorless And Voltage Controlled AMB's based On Network Theory Concepts*, Proceedings of the First International Symposium on Magnetic Bearings,* Zurich.

[46] **Weidmann, E.,** 1988. A Nonlinear Fuzzy Controller For Magnetic Bearings Without Premagnetization*, Proceedings of the First International Symposium on Magnetic Bearings,* Zurich, 59-65.

[47] **Koskinen, H.,** 1994. A Nonlinear Fuzzy Controller For Magnetic Bearings Without Premagnetization*, Proceedings of the Fourth International Symposium on Magnetic Bearings,* Switzerland, 89-95.

[48] **Hung, J.Y.,** 1995. Magnetic Bearing Control Using Fuzzy Logic*, IEEE Transactions on Industrial Applications* **, 31**, no.6 1492-1497.

[49] **Liebert, W.,** 1995. Performance Evaluation of A Fast Digital Fuzzy Controller for an AMB*, Proceedings of the First ICSC Symposium on Fuzzy Logic***,** Zurich, Switzerland.

[50] **Hong, S. K., Langari, R.,** 2000. Robust Fuzzy Control of a Magnetic Bearing System Subject to Harmonic Disturbances*, IEEE Trans. On Contr. Systems Tech*., **8,** 366-371.

[51] **Xu, Y. and Nonami, K.,** 2002. A Fuzzy Modelling of AMB System and Sliding Mode Control With Robust Hyperplane Using μ-Synthesis Theory ,

Proceedings of the Eight International Symposium on Magnetic Bearings, Mito, Japan, 451-459.

[52] **Hartavi, A. E., Üstün Ö., Tuncay R. N., Gürleyen, F.,** 2003. A Comparative Approach on PD and Fuzzy Control of AMB Using RCP, *International Electric Machines and Drives Conference,* Wisconsin,USA, 110-119.

[53] **Schroder, P., Fleming, P. J.,** 1998. On-Line Genetic Auto-tuning of Magnetic Bearing Controllers*, Proceedings of the Sixth International Symposium on Magnetic Bearings*, MIT, Cambridge.

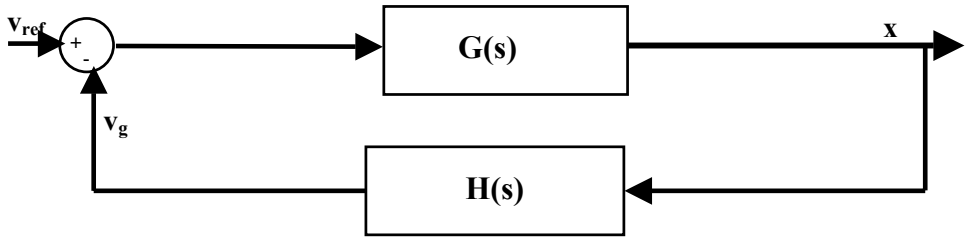
[54] **Harris, N. S,** 2001. Modern Vacuum Practice*, 2nd Edition, Bell & Bain Ltd., Glasgow.*

[55] **Şahinkaya, M. N., Hartavi, A. E., Tuncay, R. N., Burrows, C. R.,** 2004. Bias Current Optimization and Fuzzy Controller for Magnetic Bearings in TMPs, *Proceedings of the Nineth International Symposium on Magnetic Bearings*, Lexington, Kentucky.

Ek A

A.1 AMY X-Ekseni Transfer Fonksiyonu

AMY'ye ait karakteristik denklemin köklerinden bir tanesinin sağ yarı düzlemde olması nedeni ile sistemin doğal olarak kararsız bir yapıya sahiptir. Sisteme ait kapalı çevrim modelinin Matlab®/Simulink ortamında elde edilmiş ve kontrolör katsayıları Routh-Hurwitz kararlılık kriteri yardımı ile belirlenmiştir. Şekil A.1'de AMY'nin indirgenmiş kapalı çevrim blok diyagramı gösterilmiştir.



Şekil A.1 AMY'nin indirgenmiş kapalı çevrim blok diyagramı

Şekil A.1'de G(s) ile gösterilen ileri yol transfer fonksiyonunu PD kontrolör ve (3.20) denklemi ile verilmiş olan AMY transfer fonksiyonundan

$$G(s) = (K_P + sK_D)K_1T(s) \tag{A.1}$$

olarak belirleyebiliriz. (A.1) ifadesi T(s) ifadesini yerine yazılarak daha açık olarak

$$G(s) = (K_P + sK_D)K_1\frac{K_i}{ms^2 - K_x} \tag{A.2}$$

yazılabilir. Sistem ait geri yol transfer fonksiyonu H(s) ise konum algılayıcısına ait transfer fonksiyon olup K_2 ile gösterilir. Bu durumda sisteme ait kapalı çevrim transfer fonksiyonu $T_s(s)$

$$T_s(s) = \frac{G(s)}{\left(1 + G(s)H(s)\right)} \tag{A.3}$$

ile ifade edilir. (A.2) ve H(s) ifadeleri (A.3)'de yerine yazılır ise

$$T_s(s) = \frac{K_1 K_i (K_P + sK_D)}{s^2 + sK_D K_1 K_2 K_i + K_1 K_2 K_i K_P - \frac{K_x}{m}} \tag{A.4}$$

olarak bulunur. Routh-Hurwitz kararlılık kriterine göre sisteme ait transfer fonksiyonunun paydasını göz önüne almak gerekir. Bu durumda yeni karakteristik denklem $q_x(s)$

$$q_x(s) = s^2 + K_D K_1 K_2 K_i s + K_1 K_2 K_i K_P - \frac{K_x}{m} \tag{A.5}$$

olarak yazılır.

$$\begin{array}{l|ll} s^2 & 1 & K_1 K_2 K_i K_P - \frac{K_x}{m} \\ s^1 & K_D K_1 K_2 K_i & 0 \\ s^0 & K_1 K_2 K_i K_P - \frac{K_x}{m} & \end{array} \tag{A.6}$$

Routh-Hurwitz kararlılık kriterine göre bir sistemin kararlı olabilmesi için birinci sütunda yer alan elemanlarının pozitif işaretli olması gerekmektedir. Bu durumda

$$K_D K_1 K_2 K_i > 0 \tag{A.7}$$

ve

$$K_1 K_2 K_i K_P - \frac{K_x}{m} > 0 \tag{A.8}$$

şartları bulunur. (A.7) ve (A.8) eşitsizlikleri düzenlenirse PD kontrolörün türev ve orantı katsayılarının sırası ile (A.9) ve (A.10) şartlarını sağlaması gerektiği belirlenmiş olur.

$$K_D > 0 \tag{A.9}$$

$$K_P > \frac{K_x}{m K_1 K_2 K_i} \tag{A.10}$$

Ek B

Turbomoleküler pompaya ve Rotor-AMY sistemine ait parametreler sırası ile Tablo B.1 ve Tablo B.2'de verilmiştir.

Tablo B.1 TMP sistemi parametreleri

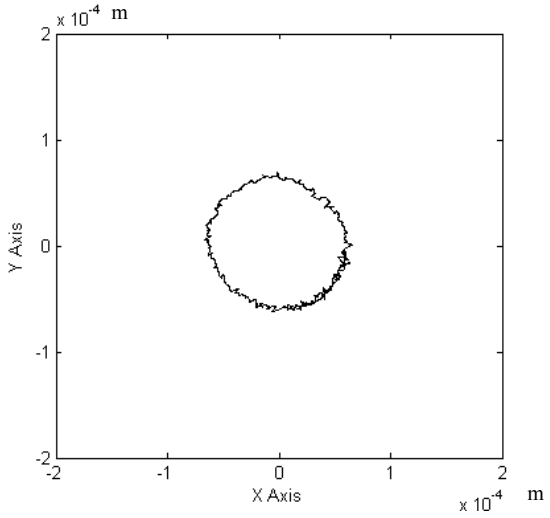
Parametre	Değeri	Birim
m	4.49	kg
I_t	0.02132	kgm^2
I_p	0.01054	kgm^2
c	$0.143*10^{-3}$	m
d	$56.4*10^{-3}$	m
a	$22.8*10^{-3}$	m
b	$74.9*10^{-3}$	m

Tablo B.2 Rotor-AMY sistemi parametreleri

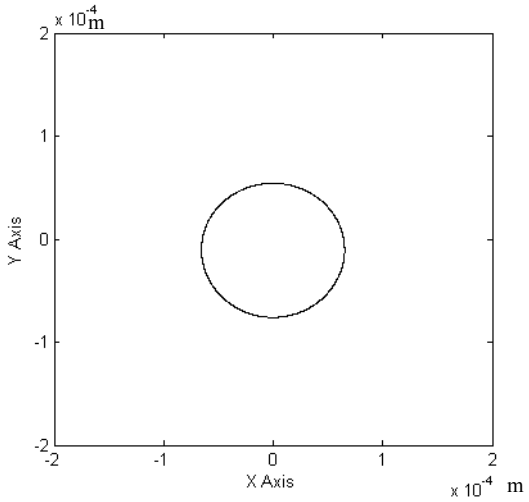
Parametre	Değeri	Birimi
m	102	kg
g_o	500	μm
N	158	-
l_r	2	m
I_t	44.6622	kgm^2
I_p	0.1373	kgm^2
l_{ba}	$385*10^{-3}$	m
l_{bb}	$385*10^{-3}$	m
l_{sa}	$300*10^{-3}$	m
l_{sb}	$300*10^{-3}$	m

Ek C

Bu bölümde Rotor-AMY sisteminde eşdeğer katılık ve etkiyen bozucu kuvvetin aynı olması ancak denge akımının 4.8A olarak değiştirilmesi durumundaki davranışı incelenmiştir. Şekil C.1 ve Şekil C.2'de sistemin eşdeğer katılığının 4.1×10^6 N/m olması ve F=130 N'luk bir kuvvetin etkimesi durumunda izlediği yörüngeler deneysel ve benzetim modeli için gösterilmiştir.

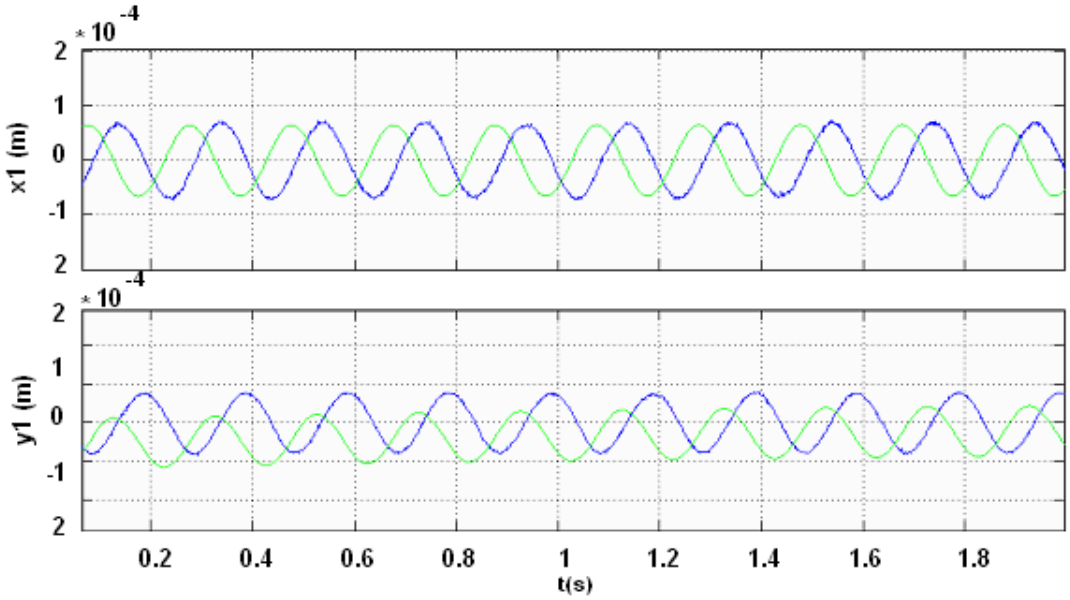


Şekil C.1 (I_b, K_p)=(4.8, 8020) durumunda sistemin izlediği yörünge



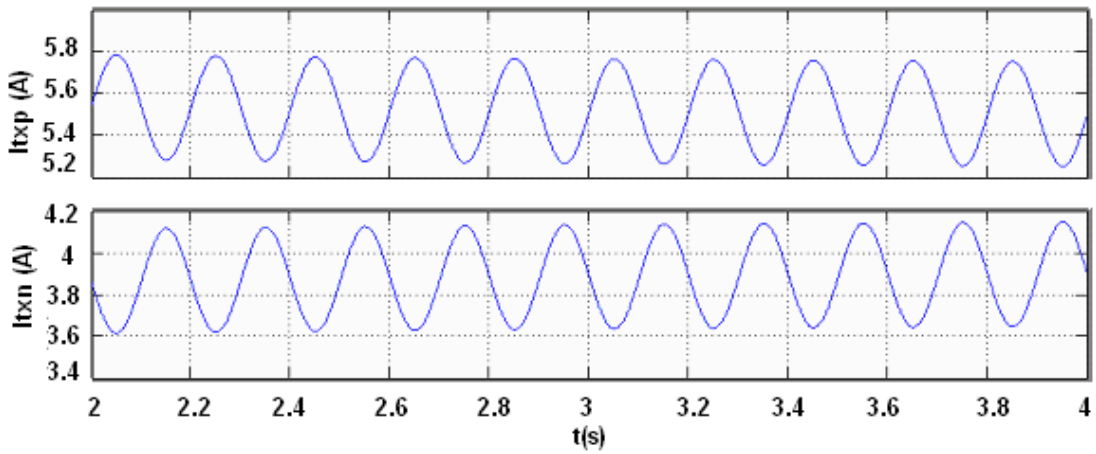
Şekil C.2 (I_b, K_p)=(4.8, 8020) durumunda benzetim modelinin izlediği yörünge

Şekil C.3'de ise Rotor-AMY sistemin aynı durumdaki konum bilgileri karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.



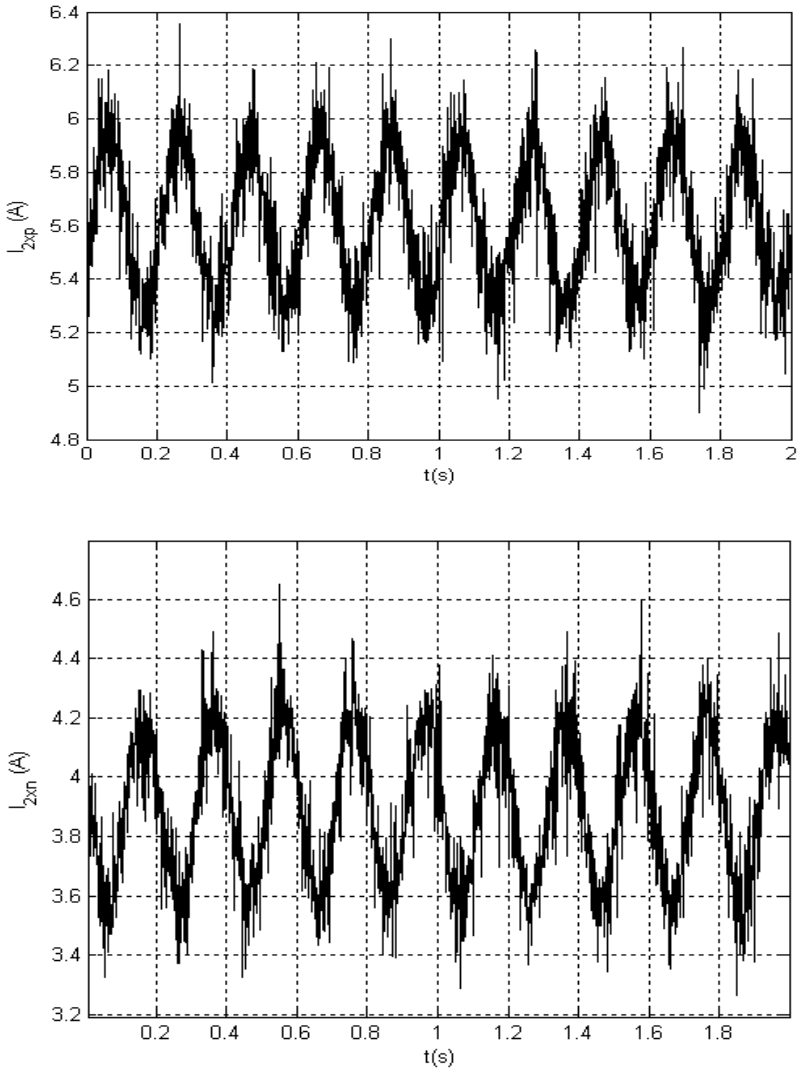
Şekil C.3 Benzetim ve deneysel çalışmadaki konum bilgilerinin karşılaştırması

Şekil C.3 incelendiğinde konum bilgilerinin birbirleri ile büyük bir yaklaşıklık gösterdiği görülmektedir. Şekil C.4'de ise bu durumdaki benzetim modeli akımları gösterilmiştir. Burada yer alan It_{xp} üst elektromıknatıs akımını, I_{txn} ise alt elektromıknatısın akımını göstermektedir.



Şekil C.4 Rotor-AMY sistemi benzetim modeli akımları

Şekil C.5'de ise yine aynı durumda bu defa deneysel çalışma esnasındaki akım bilgileri gösterilmiştir. Benzer şekilde I_{2xp} üst elektromıknatıs akımını, I_{2xn} ise alt elektromıknatısın akımını göstermektedir.



Şekil C.5 Rotor-AMY sistemi akımları

ÖZGEÇMİŞ

Ahu Ece Hartavi 15 Temmuz 1976 yılında Ankara'da doğdu. Sırası ile Ankara Maltepe İlköğretim okulunu ve Antalya Anadolu Lisesi'ni bitirdi. 1993 yılında okumaya hak kazandığı lisans eğitimini İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde yaparak bu bölümden 1997 yılında Elektrik Mühendisi ünvanını alarak mezun oldu. Mezun olduğu yıl Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans yapmaya hak kazandı ve 2000 yılında Yüksek Elektrik Mühendisi ünvanını alarak bu bölümden de mezun oldu. Yüksek lisansını bitirmesi ile Fen Bilimleri Enstitüsünün Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde doktora yapmaya hak kazandı.