

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇOK SERBESTLİK DERECELİ KARMA
MANYETİK LEVİTASYON SİSTEMİ İÇİN SIFIR
GÜÇ DENETLEYİCİ TASARIMLARI**

Tayyip Ensar ÖZKAYA

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Mekatronik Mühendisliği Programı

Danışman
Doç. Dr. Kadir ERKAN

Temmuz, 2023

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇOK SERBESTLİK DERECELİ KARMA MANYETİK
LEVİTASYON SİSTEMİ İÇİN SIFIR GÜÇ DENETLEYİCİ
TASARIMLARI

Tayyip Ensar ÖZKAYA tarafından hazırlanan tez çalışması 04.07.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı Mekatronik Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Kadir ERKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Kadir ERKAN, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Hüseyin ÜVET, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Üye. Korhan KAYIŞLI, Üye
Gazi Üniversitesi

Danışmanım Doç. Dr. Kadir ERKAN sorumluluğunda tarafımda hazırlanan ÇOK SERBESTLİK DERECELİ KARMA MANYETİK LEVİTASYON SİSTEMİ İÇİN SIFIR GÜÇ DENETLEYİCİ TASARIMLARI başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Tayyip Ensar ÖZKAYA

İmza

Aileme



TEŞEKKÜR

Bu çalışma sürecince tüm bilgilerini benimle paylaşarak oldukça verimli bir yüksek lisans dönemi geçirmemi sağlayan, her konuda desteğini benden esirgemeyen ve tezimde büyük emeği olan çok değerli danışman hocam Doç. Dr. Kadir Erkan'a ve öğrencileri olan Yüksek Mekatronik Mühendisi Ahmet Fevzi Bozkurt'a, Yüksek Mekatronik Mühendisi Enes Göker'e ve tüm YTÜ Maglev ekip üyelerine teşekkürlerimi sunarım. Bu çalışmada maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, her zaman arkamda duran canım aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tayyip Ensar ÖZKAYA

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
TABLO LİSTESİ	xiii
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xvi
1 GİRİŞ	1
2 TEKNİĞİN BİLİNER DURUMU VE LİTERATÜR TARAMASI	4
2.1 Manyetik Levitasyon Sistemlerinin Kontrolü	5
2.2 Dört Kutuplu Hibrit Manyetik Askılama	6
3 DÖRT KUTUPLU ARTI TİPİ MAGLEV SİSTEMİNİN YAPISI	9
4 DÖRT KUTUPLU ARTI TİPİ MAGLEV SİSTEMİNİN MODELLENMESİ	12
5 KONTROLÇÜ TASARIMLARI	22
5.1 Kontrolcü Temelleri	22
5.2 Gerilim Uyarımlı Kontrol	38
5.3 Akım Uyarımlı Kontrol	60
6 SONUÇ	81
KAYNAKÇA	86
A DURUM DENKLEMLERİ	89
A.1 Gerilim Uyarımlı Temel Sistem Dinamiği	89
A.2 Gerilim Uyarımlı Hava Aralığı Kontrolü İntegral ile Genişletilmiş Sistem Dinamiği	89

A.3 Tam Dereceli Gerilim Uyarımlı Bozucu Gözlemci Dinamiği	89
A.4 İndirgenmiş Dereceli Gerilim Uyarımlı Bozucu Gözlemci Dinamiği	90
A.5 Gerilimi Sıfıra Götüren Sıfır Güç Kontrolü Sistem Dinamiği	90
A.6 Tahmini Akımı Sıfıra Götüren Sıfır Güç Kontrolü Sistem Dinamiği .	91
A.7 Akım Uyarımlı Temel Sistem Dinamiği	91
A.8 Akım Uyarımlı Sıfır Güç Kontrolü İntegral ile Genişletilmiş Sistem Dinamiği	91
A.9 Akım Uyarımlı Hava Aralığı Kontrolü İntegral ile Genişletilmiş Sistem Dinamiği	91
A.10 Akım Uyarımlı Hava Aralığı Kontrolü Bölütlenmiş Sistem Dinamiği	92

TEZDEN ÜRETİLMİş YAYINLAR **93**



SİMGE LİSTESİ

k_d	Bozucu kuvvet kompanzasyonu katsayısı
F_m	Bütün maglev sisteminin ağırlığını temsil eden kuvvettir
$F_d(t)$	Dış bozucu kuvvet
$i(t)$	Elektromıknatıs bobininden geçen akım
L	Elektromıknatısın endüktansı
R	Elektromıknatısın iç direnci
E	Enerji
F_{toplam}	Etki eden toplam kuvvet
e	Gözlemci hatası
\tilde{x}	Gözlemci tarafından tahmin edilen durum vektörü
K_e	Gözlemcinin geri besleme kazancı
O	Gözlemlenebilirlik matrisi
V	Hacim
$K_{i_z,0}$	Hareket dinamiği $i_z(t)$ -bileşeni kısmi türev sabiti
$K_{z,0}$	Hareket dinamiği $z(t)$ -bileşeni kısmi türev sabiti
$f_z(t)$	Hibrit elektromıknatısın ürettiği manyetik kuvvet
ε	Kayan kipli kontrolde katman kalınlığı parametresi
ρ_c	Kayan kipli kontrolün sgn fonksiyonu katsayısı
e_l	Kayan kipli kontrolün doğrusal bileşeni
e_{nl}	Kayan kipli kontrolün doğrusal olmayan bileşeni
σ	Kayma fonksiyonu
λ_c	Kayma fonksiyonunun P -bileşeni katsayısı
S	Kesit alan

P_n	Kessler kanonik formu polinomu
γ_n	Kessler kanonik formu polinomunun kararlılık katsayıları
a_n	Kessler kanonik formu polinomunun katsayıları
m	Maglev sisteminin kütlesi
$z(t)$	Maglev sisteminin yüksekliği (hava aralığı)
Φ	Manyetik akı
B	Manyetik akı yoğunluğu
H	Manyetik alan şiddeti
μ_0	Permeabilite sabiti
N	Sargı sayısı
l_{PM}	Sürekli mıknatısın uzunluğu
τ	Toplam belirsizlik sabiti
l	Uzunluk
k_{YS}	Yarı sıfır güç kontrol katsayısı
τ	Zaman sabiti
J_α	α eksenindeki atalet momenti
J_β	β eksenindeki atalet momenti
$e_z(t)$	z eksenine için uygulanan gerilim
$C_{O,z}$	z ekseninin gözlemci çıkış matrisi
$B_{O,z}$	z ekseninin gözlemci giriş matrisi
$A_{O,z}$	z ekseninin gözlemci sistem matrisi
$A_{z,i}$	z ekseninin integral ile genişletilmiş sistem matrisi

KISALTMA LİSTESİ

<i>const.</i>	Sabit
EDS	Elektrondynamic Suspension
EMS	Electromagnetic Suspension
MMK	Manyetomotor Kuvvet
<i>sgn</i>	İşaret Fonksiyonu
SM	Sürekli Mıknatıs
TRI	Transrapid International
YS	Yarı Sıfır
3B	3 Boyutlu

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	Tezin genel yapısı	3
Şekil 2.1	6 Serbestlik derecesine sahip maglev sistemi [6]	6
Şekil 2.2	Dört kutuplu hibrit maglev sistemi [15]	7
Şekil 3.1	Elektromanyetik alt sistemin farklı açılardan görünüşü	9
Şekil 3.2	Sürücü (b) ve akım sensörlerinin (a) görünüşü	10
Şekil 3.3	4 Kutuplu artı tipi maglev sisteminin görünüşü	11
Şekil 4.1	Maglev sisteminin yapısı ve etki eden mekanik büyüklükler	13
Şekil 4.2	Manyetik yastığın yapısı	13
Şekil 4.3	Maglev sistemine etki eden elektromanyetik kuvvetler	14
Şekil 4.4	Manyetik yastığın hareket dinamiğinin blok şeması	18
Şekil 4.5	Manyetik yastığın hareket dinamiğinin blok şeması	21
Şekil 5.1	Sıfır kutup haritası	24
Şekil 5.2	Birim basamak girişine ilişkin sistem tepkisi	24
Şekil 5.3	Durum geri beslemeli kontrol şeması	26
Şekil 5.4	Durum geri beslemeli kontrol birim basamak cevabı	27
Şekil 5.5	Bozucu gözlemcisi temel girdileri ve çıktıları	28
Şekil 5.6	Tam dereceli gözlemcinin iç dinamiği	29
Şekil 5.7	Bozucu kompanzasyonu katsayısı blok diyagramı	31
Şekil 5.8	Durum geri beslemeli kontrol ve gözlemci tasarımı	33
Şekil 5.9	İndirgenmiş dereceli gözlemci dinamiği	35
Şekil 5.10	İndirgenmiş dereceli gözlemci ve kontrolcü tasarımı	37
Şekil 5.11	Tam dereceli gözlemcili gerilimi sıfıra götüren sıfır güç kontrolcüsü şeması	38
Şekil 5.12	Sıfır güç kontrolünde hava aralığı ölçümü	40
Şekil 5.13	Sıfır güç kontrolünde akım ölçümü	41
Şekil 5.14	İndirgenmiş dereceli gözlemci ile gerilimi sıfıra götüren sıfır güç kontrolcüsü şeması	41
Şekil 5.15	İndirgenmiş dereceli gözlemci ile gerilimi sıfıra götüren sıfır güç kontrolünde hava aralığı ölçümü	42
Şekil 5.16	İndirgenmiş dereceli gözlemci ile gerilimi sıfıra götüren sıfır güç kontrolünde akım ölçümü	43

Şekil 5.17	Tam dereceli gözlemci ile tahmini akımı sıfıra götüren sıfır güç kontrolcüsü şeması	44
Şekil 5.18	Tam dereceli gözlemci ile tahmini akımı sıfıra götüren sıfır güç kontrolünde hava aralığı ölçümü	46
Şekil 5.19	Tam dereceli gözlemci ile tahmini akımı sıfıra götüren sıfır güç kontrolünde akım ölçümü	47
Şekil 5.20	İndirgenmiş dereceli gözlemci ile tahmini akımı sıfıra götüren sıfır güç kontrolcüsü şeması	47
Şekil 5.21	İndirgenmiş dereceli gözlemci ile tahmini akımı sıfıra götüren sıfır güç kontrolünde hava aralığı ölçümü	48
Şekil 5.22	İndirgenmiş dereceli gözlemci ile tahmini akımı sıfıra götüren sıfır güç kontrolünde akım ölçümü	49
Şekil 5.23	Tam dereceli gözlemci ile yarı sıfır güç kontrolcüsü şeması	50
Şekil 5.24	Tam dereceli gözlemci ile yarı sıfır güç kontrolünde hava aralığı ölçümü	51
Şekil 5.25	Tam dereceli gözlemci ile yarı sıfır güç kontrolünde akım ölçümü	52
Şekil 5.26	İndirgenmiş dereceli gözlemci ile yarı sıfır güç kontrolcüsü şeması	52
Şekil 5.27	İndirgenmiş dereceli gözlemci ile yarı sıfır güç kontrolünde hava aralığı ölçümü	53
Şekil 5.28	İndirgenmiş dereceli gözlemci ile yarı sıfır güç kontrolünde akım ölçümü	54
Şekil 5.29	Tam dereceli gözlemci ile kayan kipli sıfır güç kontrolcüsü şeması	58
Şekil 5.30	Tam dereceli gözlemci ile kayan kipli sıfır güç kontrolünde hava aralığı ölçümü	59
Şekil 5.31	Tam dereceli gözlemci ile kayan kipli sıfır güç kontrolünde akım ölçümü	59
Şekil 5.32	short	60
Şekil 5.33	Akımı sıfıra götüren sıfır güç kontrolünde hava aralığı ölçümü	62
Şekil 5.34	Akımı sıfıra götüren sıfır güç kontrolünde akım ölçümü	62
Şekil 5.35	short	63
Şekil 5.36	Tam dereceli gözlemci ile akımı sıfıra götüren sıfır güç kontrolünde hava aralığı ölçümü	64
Şekil 5.37	Tam dereceli gözlemci ile akımı sıfıra götüren sıfır güç kontrolünde akım ölçümü	64
Şekil 5.38	short	65
Şekil 5.39	İndirgenmiş dereceli gözlemci ile akımı sıfıra götüren sıfır güç kontrolünde hava aralığı ölçümü	66
Şekil 5.40	İndirgenmiş dereceli gözlemci ile akımı sıfıra götüren sıfır güç kontrolünde akım ölçümü	66

Şekil 5.41	short	67
Şekil 5.42	Tam dereceli gözlemci ile yarı sıfır güç kontrolünde hava aralığı ölçümü	68
Şekil 5.43	Tam dereceli gözlemci ile yarı sıfır güç kontrolünde akım ölçümü	69
Şekil 5.44	short	69
Şekil 5.45	İndirgenmiş dereceli gözlemci ile yarı sıfır güç kontrolünde hava aralığı ölçümü	70
Şekil 5.46	İndirgenmiş dereceli gözlemci ile yarı sıfır güç kontrolünde akım ölçümü	71
Şekil 5.47	short	72
Şekil 5.48	Klasik kayan kipli yarı sıfır güç kontrolünde hava aralığı ölçümü .	74
Şekil 5.49	Klasik kayan kipli yarı sıfır güç kontrolünde akım ölçümü	75
Şekil 5.50	short	75
Şekil 5.51	İndirgenmiş dereceli gözlemci ile klasik kayan kipli yarı sıfır güç kontrolünde hava aralığı ölçümü	76
Şekil 5.52	İndirgenmiş dereceli gözlemci ile klasik kayan kipli yarı sıfır güç kontrolünde akım ölçümü	76
Şekil 5.53	short	77
Şekil 5.54	Tam dereceli gözlemci ile süper burulma kayan kipli yarı sıfır güç kontrolünde hava aralığı ölçümü	78
Şekil 5.55	Tam dereceli gözlemci ile süper burulma kayan kipli yarı sıfır güç kontrolünde akım ölçümü	78
Şekil 5.56	short	79
Şekil 5.57	İndirgenmiş dereceli gözlemci ile süper burulma kayan kipli yarı sıfır güç kontrolünde hava aralığı ölçümü	79
Şekil 5.58	İndirgenmiş dereceli gözlemci ile süper burulma kayan kipli yarı sıfır güç kontrolünde akım ölçümü	80
Şekil 6.1	Akım uyarımlı sistemde uygulanan kontrolcülerin hava aralığı ölçümleri	83
Şekil 6.2	Akım uyarımlı sistemde uygulanan kontrolcülerin akım ölçümleri	83
Şekil 6.3	Akım uyarımlı sistemde uygulanan kontrolcülerin enerji harcaması	84

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1	Üretim parametreleri	10
------------------	--------------------------------	----



ÇOK SERBESTLİK DERECELİ KARMA MANYETİK LEVİTASYON SİSTEMİ İÇİN SIFIR GÜÇ DENETLEYİCİ TASARIMLARI

Tayyip Ensar ÖZKAYA

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı
YÜKSEK LİSANS Tezi

Danışman: Doç. Dr. Kadir ERKAN

Manyetik Levitasyon, ya da maglev, birçok sektörde ilgi gören bir konumlama ve tahrik teknolojisidir. Bu teknoloji, yıllardır araştırılmaktadır ve ulaştırma, üretim ve enerji üretimi gibi birçok alanda devrim oluşturabilecek potansiyele sahiptir. Maglev sistemleri, özellikle mekanik bir temas olmadan tahrik edilebilmesinden doğan avantajlardan dolayı ön plana çıkmaktadır. Temassız bir şekilde hareket ettiğinden dolayı diğer tahrik yöntemlerinde ana enerji kaybı faktörü olan sürtünme minimuma indirilmiş oluyor ve böylelikle yüksek hassasiyete sahip konumlama sistemleri geliştirilebilmesine yol açmaktadır. Bununla beraber sürtünmeden dolayı ortaya çıkan aşınan parçalar da bulunmamaktadır. 20. yüzyılın başlarından beri farklı konfigürasyonlarda maglev sistemleri geliştirilmiştir. Bunlar özellikle taşıyıcı sistemler olarak yüksek hızlı trenlerde ve hassas konumlama sistemi olarak işlemci üretiminde olduğu gibi tozsuz, yağsız ve yüksek hassasiyetin gerekli olduğu durumlarda kullanılmaktadır. Maglev sistemlerinin sürtünmeden kazandırdığı enerji tasarrufuna ek olarak elektromıknatısların bütün yükü taşıması için harcanan enerjiyi de minimize etmek için 1960'lı yıllardan beri kalıcı elektromıknatısların da bulunduğu karma maglev sistemleri geliştirilmiştir. Bu çalışmada ele alınan maglev sistemi artı konfigürasyonunda dört kutuplu bir karma sistemdir. Her bir kutbu yük taşıyıcı olarak kalıcı bir mıknatıstan ve dengeyi sağlayıcı olarak bir elektromıknatıstan oluşmaktadır. Bu konfigürasyon ile sistemin yüksekliği, yunuslaması ve yatışı olmak üzere üç serbestlik derecesinin regülasyonunu mümkün olmaktadır. Maglev sistemleri genelde kararsız sistemler olduğundan

dolayı konum kontrolü aktif kontrolcü ile sağlanması gerekmektedir. Bu tez, dört kutuplu artı konfigürasyonunda hibrit bir manyetik levitasyon sisteminin voltaj uyarımı ve akım uyarımı modlarında farklı kontrolcülerin geliştirilmesini ve uygulanmasını konu almaktadır.

Anahtar Kelimeler: Manyetik levitasyon, hibrit elektromıknatıs, sıfır güç kontrol, durum geri beslemeli kontrol.



ABSTRACT

Zero Power Controller Designs for Multi Degree of Freedom Hybrid Magnetic Levitation System

Tayyip Ensar ÖZKAYA

Department of Mechatronics Engineering
Master of Science Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Kadir ERKAN

Magnetic Levitation, or maglev, is a positioning and propulsion technology that has garnered interest in many sectors. This technology has been researched for years and has the potential to revolutionize various fields such as transportation, manufacturing, and energy production. Maglev systems stand out particularly due to their ability to be propelled without mechanical contact. By moving without contact, the main energy loss factor in other propulsion methods, which is friction, is minimized, allowing for the development of highly precise positioning systems. Additionally, there are no wearing parts resulting from friction. Maglev systems have been developed in various configurations since the early 20th century. They are used especially as carrier systems in high-speed trains and as precise positioning systems in processor manufacturing, where dust-free, oil-free, and high precision are required. In addition to the energy savings gained from frictionless movement, hybrid maglev systems have been developed since the 1960s, which include permanent electromagnets to minimize the energy consumed by electromagnets to carry the entire load. The maglev system addressed in this study is a four-pole hybrid system in its plus configuration. Each pole consists of a permanent magnet as the load carrier and an electromagnet as the stabilizer. This configuration enables the regulation of three degrees of freedom: height, pitching, and yawing of the system. Since maglev systems are generally unstable, position control needs to be achieved with an active controller. This thesis focuses on the development and implementation of different controllers in the voltage excitation and current excitation modes for a hybrid magnetic levitation system in the four-pole plus

configuration.

Keywords: Magnetic levitation, hybrid electromagnet, zero power control, state feedback control.

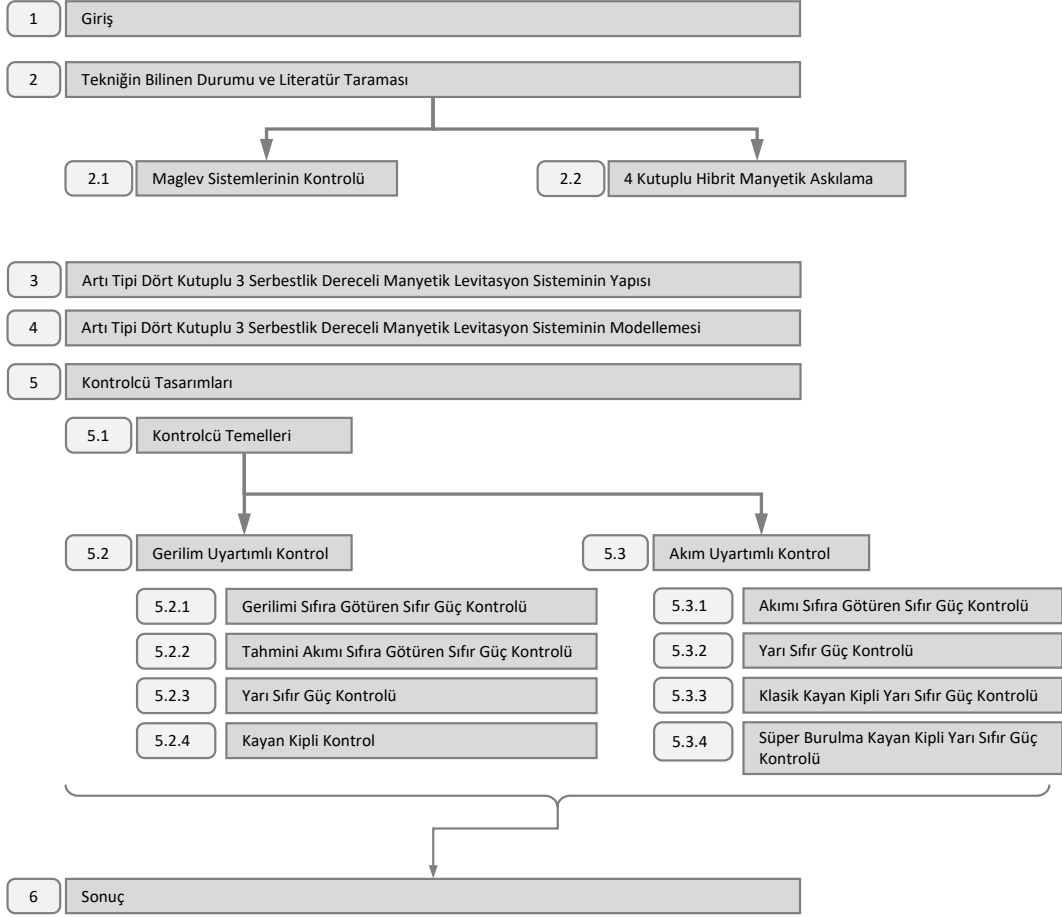


**YILDIZ TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF SCIENCE AND ENGINEERING**

1 GİRİŞ

Manyetik levitasyon (maglev), nesnelerin manyetik alanlar kullanılarak yerçekimine karşı kaldırılması prensibine dayanan bir teknolojidir. Bu teknoloji, nesnelere manyetik kuvvetlerle kontrol etme ve yüksekliklerini ayarlama yeteneği sayesinde birçok endüstriyel uygulamada önemli bir rol oynamaktadır. Manyetik levitasyon prensibi, elektromanyetik kuvvetlerin çekme ve itme etkilerini kullanır. Bir nesneye manyetik bir alan uygulandığında, nesne manyetik alanın etkisiyle yükselir ve yerçekimiyle aşağı çekilmemesi sağlanır. Bu durumda, nesne manyetik kuvvetler tarafından denge noktasında tutulur ve sürtünme olmaksızın serbestçe hareket edebilir. Manyetik levitasyonun temel avantajları arasında sürtünmenin olmaması, enerji verimliliği, sessizlik, yüksek hızda hareket kabiliyeti ve düşük bakım gereksinimi bulunmaktadır. Bu teknoloji, çeşitli endüstriyel uygulamalarda büyük potansiyele sahiptir. Özellikle yüksek hızlı ulaşım sistemlerinde (maglev trenler), manyetik levitasyonun avantajları ön plana çıkar. Maglev trenleri, manyetik kuvvetlerle desteklenen raylar üzerinde sürtünme olmadan hareket ederler. Bu sayede, geleneksel trenlere kıyasla daha yüksek hızlara ulaşabilirler. Maglev trenleri, hızlı, güvenli, enerji verimli ve çevre dostu bir ulaşım seçeneği sunar. Bunun yanı sıra, manyetik levitasyon teknolojisi malzeme taşıma sistemlerinde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle hassas ve kırılabilir malzemelerin taşınması gereken endüstrilerde manyetik levitasyon, malzemelerin düzgün ve titreşimsiz bir şekilde hareket etmesini sağlar. Bu da üretim süreçlerinde kaliteyi artırır ve ürün kayıplarını en aza indirir. Diğer endüstriyel uygulamaları arasında yüksek hassasiyetli ölçüm cihazları, döner makineler, mikroelektronik üretim ekipmanları ve tıbbi cihazlar bulunur. Bu uygulamalarda manyetik levitasyon, yüksek stabilite, hassasiyet ve kontrol edilebilirlik sağlayarak performansı artırır ve daha etkili işlemler gerçekleştirilmesine olanak tanır. Bu tez çalışması, daha önce literatürde ele alınmış olan 4 kutuplu maglev sistemleri yerine artı (+) konfigürasyonuna sahip bir maglev sisteminin kontrolünü ele almaktadır. Artı konfigürasyonu, manyetik yüksüzleme için daha istikrarlı bir yapı sunmakta ve daha hassas bir kontrol

imkanı sağlamaktadır. Tezin temel amacı, farklı kontrol algoritmalarının bu artı konfigürasyonlu maglev sistem üzerindeki performansını araştırmaktır. Bu çalışmada, geliştirilecek kontrol algoritmaları arasında gerilim uyarımlı sıfır güç kontrolü, gerilim uyarımlı akımı sıfıra götüren sıfır güç kontrolü, gerilim uyarımlı yarı sıfır güç kontrolü, akım uyarımlı akımı sıfıra götüren sıfır güç kontrolü ve akım uyarımlı yarı sıfır güç kontrolü yer almaktadır. Bu algoritmalar, maglev sisteminin istenen performans özelliklerini sağlamak ve enerji verimliliğini artırmak amacıyla tasarlanmıştır. Bu tez çalışması kapsamında, artı konfigürasyonlu maglev sistemi deneysel olarak gerçekleştirilerek farklı kontrol algoritmalarının performansı deneysel olarak incelenecektir. Deneysel sonuçlar, kontrol algoritmalarının maglev sistemi üzerindeki etkinliği ve verimliliği hakkında değerli bilgiler sunacaktır. Tezin yapısı aşağıdaki şekilde düzenlenmiştir: İkinci bölümde, literatürdeki ilgili çalışmalar ve maglev sistemlerinin kontrolü ile ilgili önceki çalışmalar incelenecektir. Üçüncü bölümde dört kutuplu artı tipi maglev sisteminin elektromanyetik ve mekanik yapısı ele alınacaktır. Dördüncü bölümde, artı konfigürasyonlu maglev sisteminin matematiksel modeli ve kontrol problemi ele alınacaktır. Beşinci bölümde, tasarlanan kontrol algoritmaları ayrıntılı olarak açıklanacak ve analitik olarak incelenecek ve deneylerin sonuçları gösterilecektir. Sonuçlar altıncı bölümde sunulacak ve tez çalışmasının genel çıktıları değerlendirilecektir. Tezin genel yapısı Şekil 1.1’de gösterilmiştir. Bu tez çalışması, artı konfigürasyonlu maglev sistemlerinin kontrolü konusunda yeni bir bakış açısı sunmakta ve farklı kontrol algoritmalarının performansını deneysel olarak değerlendirmektedir. Elde edilecek sonuçlar, maglev teknolojisinin geliştirilmesine ve endüstriyel uygulamalarının yaygınlaştırılmasına katkı sağlayacaktır.



Şekil 1.1 Tezin genel yapısı

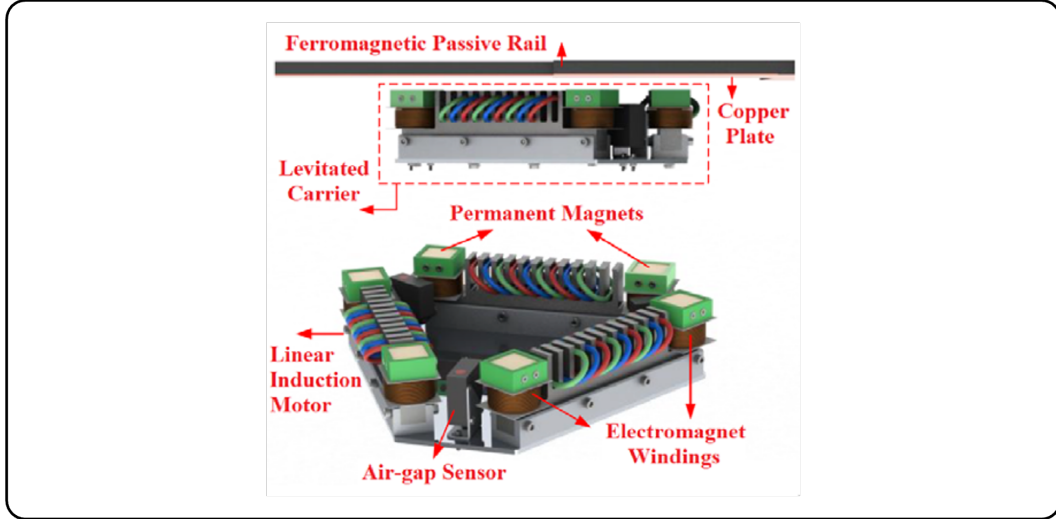
2 TEKNİĞİN BİLİNER DURUMU VE LİTERATÜR TARAMASI

Bu başlıkta, çalışmaya konu olan konseptler ve teorik temeller anlatılmaktadır. Bu çerçevede evvela kontrolü hedeflenen Manyetik Levitasyon sistemlerinin çeşitleri ve uygulama biçimleri ardından da bu sistemlerin kontrolünde kullanılan yöntemlerden bahsedilmektedir. Bu bilgiler sonraki başlıklar için bir bilgi altyapısı durumundadır. Manyetik Levitasyon veya Maglev teknolojisi, birçok alanda kullanım alanı olan çok ilginç bir konsepttir. Maglev, ekolojik ve ekonomik faktörler üzerindeki etkileri nedeniyle popülerlik kazanmaktadır. Örneğin, maglev trenleri gibi modern ulaşım sistemlerindeki maglev teknolojisi, enerjinin genel olarak daha verimli kullanılmasına, düşük bakım maliyetine ve daha az sayıda aşınan parçaya sahip olmasına olanak tanır [1]. Maglev bu nedenle çeşitli otomasyon görevlerinde kullanılmakta ve ulaşım (maglev trenleri, kişisel hızlı transit), savunma (silahlar, roketçilik), nükleer mühendislik (nükleer reaktör santrifüjü), kimya mühendisliği (yiycek ve içecekleri analizi), mimari ve iç tasarım (lamba, sandalye, kanepeler, yatak), biyomedikal alan (kalp pompası), inşaat mühendisliği (manyetik yatak, asansör, fan, kompresör, soğutucular, pompa ve jeotermal ısı pompaları), yarı iletken endüstrisi (wafer işlenmesi sürecinde) vb. gibi farklı alanlarda önemli uygulamaları kapsamaktadır [2]. Maglev birçok farklı alanda kullanılmakla birlikte, ulaşım en başından beri teknolojinin ana odak noktalarından biri olmuştur. Maglev teknolojisinin gelişimi [3]'te sunulmuştur. Ulaşım amaçlı maglevin icadına katkıda bulunan birçok kişi arasında, Alman bir mühendis olan Hermann Kemper'in 1922'deki çalışması en çok alıntı yapılanlardan biridir. Kemper buluşunun patentini DRP 643 316 patent numarasıyla "manyetik alanlar vasıtasıyla yüzer halde tutulan, tekerlekleri takılı olmayan monoray aracı" adı altında almıştır [4]. İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra Kemper'in çalışmaları devam etmiş ve özellikle 70'li ve 80'li yıllarda, sonunda Siemens AG ve ThyssenKrupp'un ortak girişimi olan Transrapid International'a (TRI) dönüşen birçok başka prototip geliştirilmiş, test edilmiş ve kurulmuştur. Kemper'den

önce, 1914 yılında Fransa doğumlu Amerikalı bir mucit olan Emile Bachelet, posta ve küçük paketler gibi nesnelere için bir maglev taşıma sistemi sunmuş ve bu sistemin patentini "levite eden iletim aparatı" adı ve 1,020,942 patent numarasıyla Birleşik Devletler Patent Ofisi'ne vermiştir. Buluşunun çalışma prensibi, Japon "Linimo of Aichi" gibi maglev trenleri için ilham kaynağı olmuştur. Genel olarak maglev, nesnelere manyetik alan kuvveti aracılığıyla havalandırmasını sağlayan kavramın adıdır. Elektrik gücünü manyetik güç aracılığıyla kinetik güce dönüştürdüğünden, çoğunlukla stabilizasyon, enerji verimliliği ve sürtünmeden kaçınmanın önemli olduğu senaryolarda kullanılır. Bu nedenle maglev trenlerinin geliştirilmesi için birçok girişimde bulunulmuştur. Maglev sistemleri manyetik kuvvetin türü ile karakterize edilir. Sırasıyla çekim ve itme tabanlı kaldırma sistemleri olan elektromanyetik süspansiyon (Electromagnetic Suspension, EMS) ve elektrodinamik süspansiyon (Electrodynamic Suspension, EDS) vardır [5]. Farklı konfigürasyonlar ve hibrit tipler hakkında daha fazla ayrıntı Bölüm 2.2'de değerlendirilmiştir.

2.1 Manyetik Levitasyon Sistemlerinin Kontrolü

Bu sistemler genellikle doğrusal olmayan ve kararsız sistem yapısına sahiptir ve kapsamlı bir şekilde tasarlanmış kontrol sistemleri gerektirir. Maglev sistemlerinde kararlılık elde etmek için farklı türde kontrol stratejileri uygulanmaktadır. Bu kontrolörlerin çoğu, maglev dinamiklerinin idealize edilmiş ve doğrusallaştırılmış veya idealize edilmemiş yaklaşım modellerine dayalı olarak uygulanmaktadır. Genel olarak, kontrol sistemleri kapalı bir geri besleme döngüsünden oluşur ve burada amaç, kontrol edilecek değişken belirli bir referans değerini takip edecek şekilde sistemin bir kontrol edilebilir değişkenlerini manipüle etmektir. Sisteme dışarıdan gelen bozucu etkenler nedeniyle, kontrol edilen değişken referans değerden sapar. Bu nedenle, kontrol edilen değişkenin gerçek değeri ölçülür ve referans değerle karşılaştırılır. Bu değerler arasındaki fark, kontrol sapması olarak adlandırılır. Bu sapma daha sonra manipüle edilen değer için yeni bir ayar değerini tekrar hesaplayan kontrolör için bir girdi olarak kullanılır. Bu süreç iteratif bir şekilde yürütülür. Manipüle edilen değer nasıl değiştirileceğinin hesaplanması kontrolör tarafından yapılır. Çoğu zaman kontrolör, kontrol edilecek sistemin matematiksel modeline dayalı olarak hesaplanan bir transfer fonksiyonudur. Bu adımdan, sistemi istenildiği gibi kontrol edebilmek için sistemin matematiksel modelinin bilinmesi gerektiği görülebilir (Antsaklis 1990), bu da farklı sistem tanımlama yöntemleri ile gerçekleştirilir. Keza bu tez kapsamında gerçekleştirilen geliştirmeler de bu doğrultudadır.

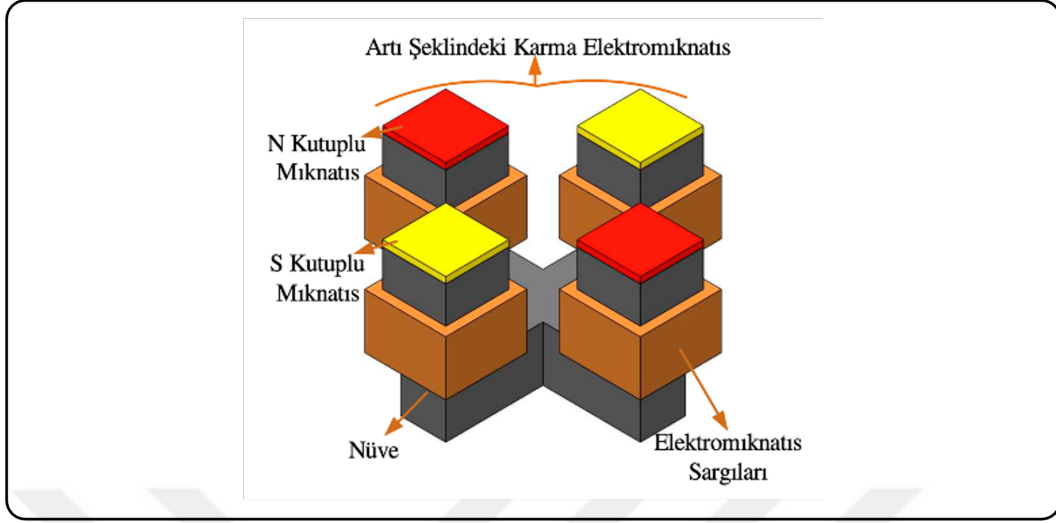


Şekil 2.1 6 Serbestlik derecesine sahip maglev sistemi [6]

2.2 Dört Kutuplu Hibrit Manyetik Askılama

Bölüm 2.1’de de değinildiği üzere kullanım senaryosuna göre farklı maglev konfigürasyonları geliştirilmiştir. 20. yüzyılın başlarından beri çalışılan maglev teknolojisi birçok farklı yöntemlerle özellikle taşımacılık ve manyetik rulmanlar üzerinde uygulaması gerçekleştirilmiştir [7]. Burada sadece bu çalışma kapsamında kontrolü hedeflenen dört kutuplu hibrit manyetik askılama yöntemi anlatılacaktır. Kalıcı mıknatıslar ile birlikte elektromıknatısların da bulunduğu hibrit maglev sistemleri 1960’lardan beri çalışılmaktadır. Bu konfigürasyon ile ilgili ilk çalışmalar [8–10]’da yayınlanmıştır. Kalıcı mıknatıslı maglev sistemlerinin uygulanmasında öncü olanlardan bir tanesi [11]’dur. Bu çalışmada geliştirilen elektromanyetik süspansiyon prensibi gösterilmiş ve sabit mıknatıslarla sıfır güç kontrolü metodu tanıtılmıştır. Sıfır güç kontrolü metodunda hava tutulacak kütlelerin toplam ağırlığı kalıcı mıknatıslarla taşınması sağlanmaktadır. Bozucu etkiler ve bozucu etkilere karşı sistemi kararlı hale getirmek ve dengede tutmak için ise elektromıknatıslar kullanılmaktadır. Denge için üretilen manyetik alan kuvvetinin çektiği akım bu konfigürasyonda sıfırın etrafında olduğundan dolayı bu kontrol metoduna sıfır güç kontrolü denmiştir. 1993’te Onuki ve Toda kalıcı mıknatıslardan ve elektromıknatıslarda oluşan hibrit maglev sistemlerinin optimizasyonu üzerine çalışmışlardır [12]. [13]’de ise bu hibrit maglev sistemlerinin orta ve düşük hızlarda seyreden maglev trenleri üzerinde uygulanması üzerine çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar yükün taşınması için harcanan enerjinin büyük ölçüde azaltılabildiği olmuştur. Hibrit maglev sisteminin serbestlik derecelerini çoğaltmak için birbirinden bağımsız olarak çalışabilen birden fazla kutba sahip olması gerekmektedir. Üç serbestlik derecesine sahip bir maglev sistemi [14], [15] ve [16]’de sunulmuştur. Bu çalışmalarda 4 adet kutup ile yükseklik, yunuslama ve

yatış hareketleri sağlanmıştır. Altı serbestlik dereceli maglev sistemleri üzerine [6]'da çalışılmıştır (Şekil 2.1).



Şekil 2.2 Dört kutuplu hibrit maglev sistemi [15]

Bu çalışma kapsamında hedeflenen maglev sistemi de 4 kutuplu hibrit yapıya sahip bir sistemdir.

Manyetik yastıklama, maglev, sistemleri fiziksel dinamikleri gereği kararsız sistemlerdir. Bu sebeple maglev sistemlerinin kalıcı durumlarını kararlı hale getirmek için, referans takibini mümkün hale getirmek için ve sisteme uygulanan bozucu etkilere karşı kararlılığını koruyabilmesi için aktif kontrolcülere ihtiyaç duyulmaktadır. Maglev sistemlerinin kontrolü ile ilgili literatürde geniş yer ayrılmıştır. Maglev sistemleri elektromekanik sistemler olarak giriş ve çıkış değişkenlerinin hepsi yüksek çözünürlüklü olarak ölçülebilmekte ve bütün büyüklüklerin birbirleriyle olan ilişkisi fiziksel kanunlara dayandırılarak formüle edilebilmekte. Bundan dolayı matematik model tabanlı kontrolcüler tercih edilmektedir. Maglev sistemlerinin kontrolü için kullanılan yöntemlerin en başında PID denetleyiciler ve türevleri gelmektedir. Kendisini endüstride ispat etmiş olan PID denetleyiciler hem algoritma olarak ağır işlemler içermediğinden dolayı donanımsal gereksinimleri en aza indirmeye olanak sağlar hem de özellikle matematiksel olarak modellenebilen sistemler için geliştirilmesi kabul görmüş yöntemler sayesinde standardize edilmiş başka kontrolcülere nispeten uygulanması daha basittir. Bu sebeple PID denetleyicileri ve türevleri maglev sistemlerinde de çok kullanılmaktadır [17–20]. Durum geri beslemeli denetleyiciler, PID denetleyicilere göre daha yüksek kontrol hassasiyeti ve kararlılık sağlamaktadır. PID denetleyiciler, sadece anlık hata değerini kullanırken, durum geri beslemeli denetleyiciler, kontrol edilen sistemin tüm durum değişkenlerini kullanır ve böylelikle daha gürbüz ve kararlı sistem kontrolü sağlar. Durum geri beslemeli

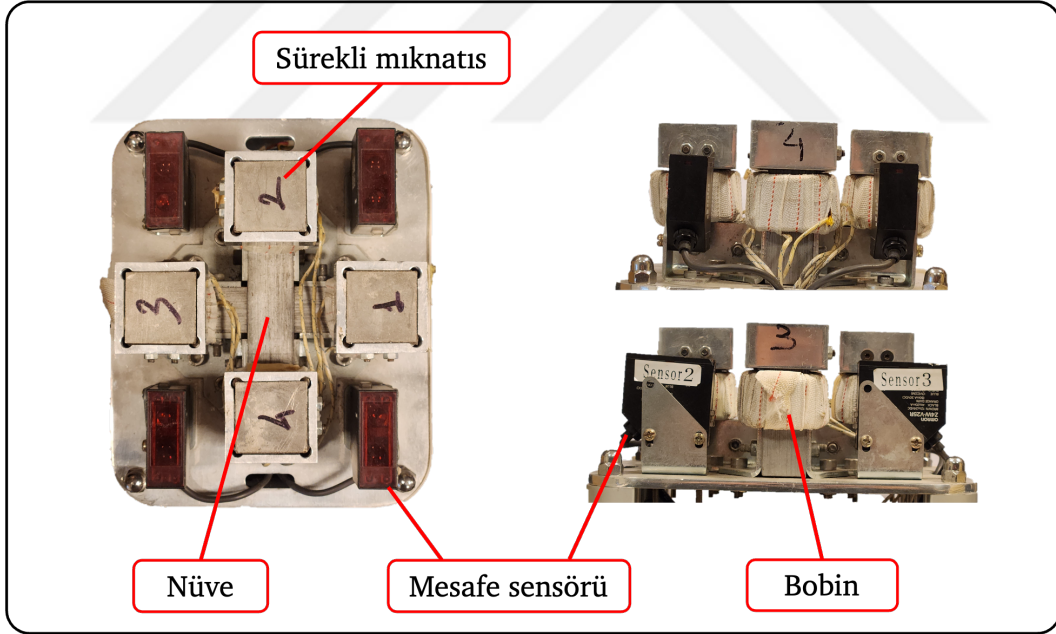
denetleyiciler tüm durum değişkenlerinin ölçülebilir olduğunu şart koşmaktadır. Bunun mümkün olmadığı sistemlerde ise gözlemci tasarımlarının yapılması gerekmektedir. Böylelikle kontrol döngülerine ek bir işlem daha katılmaktadır. Durum geri beslemeli denetleyicilerinin bir dezavantajı ise tam performansı yakalamak için kontrol edilen sistemin doğrusal olması gerektiğidir. Bu şartın üstesinden sistem doğrusallaştırma yöntemleri ile gelinir ancak performanstan ödün vermek anlamına gelir. Doğrusal olmayan sistemlerin kontrolüne ilişkin, farklı birçok metot bulunmaktadır. Kayan kipli kontrol, yapay sinir ağı tabanlı kontrol ve bulanık mantık tabanlı kontrol sistemleri bunlardan bazılarıdır.



3

DÖRT KUTUPLU ARTI TİPİ MAGLEV SİSTEMİNİN YAPISI

Dört kutuplu artı tipi maglev sistemi özünde elektromanyetik ve elektrik sistemleri olmak üzere iki alt sistem olarak tanımlanabilir. Elektrik alt sistem, elektromanyetik sistemini sürme işlevini görmektedir. Elektromanyetik sistem artı işareti şeklinde düzenlenmiş dört adet kutuptan ibarettir. Her bir kutup bir elektromıknatıs ve bir sürekli mıknatıstan oluşmaktadır. Bu şekilde üretilen hibrit elektromıknatısın üstten yandan ve önden görünüşleri Şekil 3.1’te gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Elektromanyetik alt sistemin farklı açılardan görünüşü

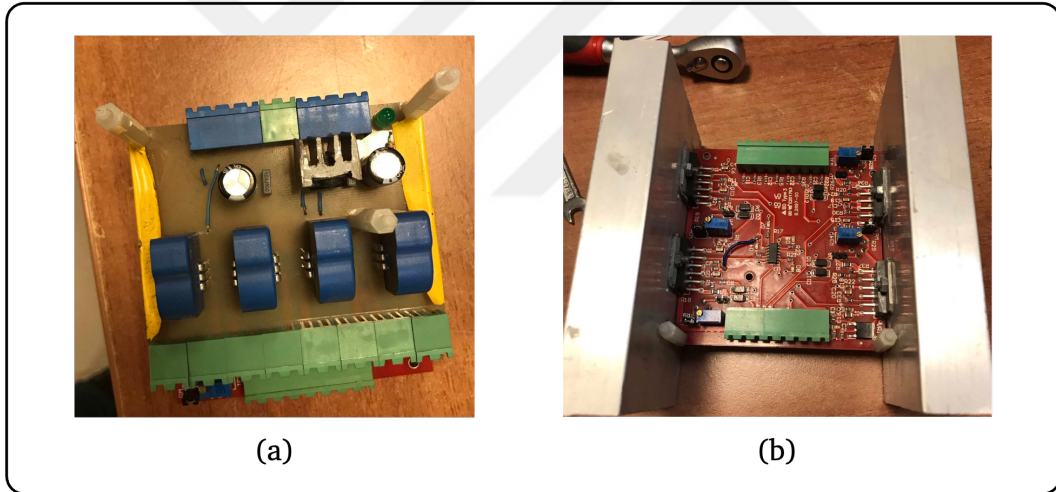
Üretim parametreleri [21]’te açıklanan 3B sonlu elemanlar analizlerin sonucunda tespit edilip uygulanmıştır. Elektromıknatıslar, 0,5 mm’lik saclardan oluşan demir nüve etrafında emaye kaplı bakır bobin teli ile 200’er sargı ile üretilmiştir. Kutup başı boyutu 3,5x3,5 mm² ve nüve kol boyutu 2,5x2,5 mm² olarak seçilmiştir. Kalıcı mıknatıslar kutup başının boyutunda kutup başına yerleştirilmiştir. Böylelikle kayıp ve kaçak akıyı minimize edilmesi hedeflenmiştir. Kalıcı mıknatıs kalınlığı yine

yapılan sonlu elemanlar analizi sonucunda 3,5 mm olarak seçilerek üretilmiştir. Bu parametreler Tablo 3.1’te listelenmiştir.

Tablo 3.1 Üretim parametreleri

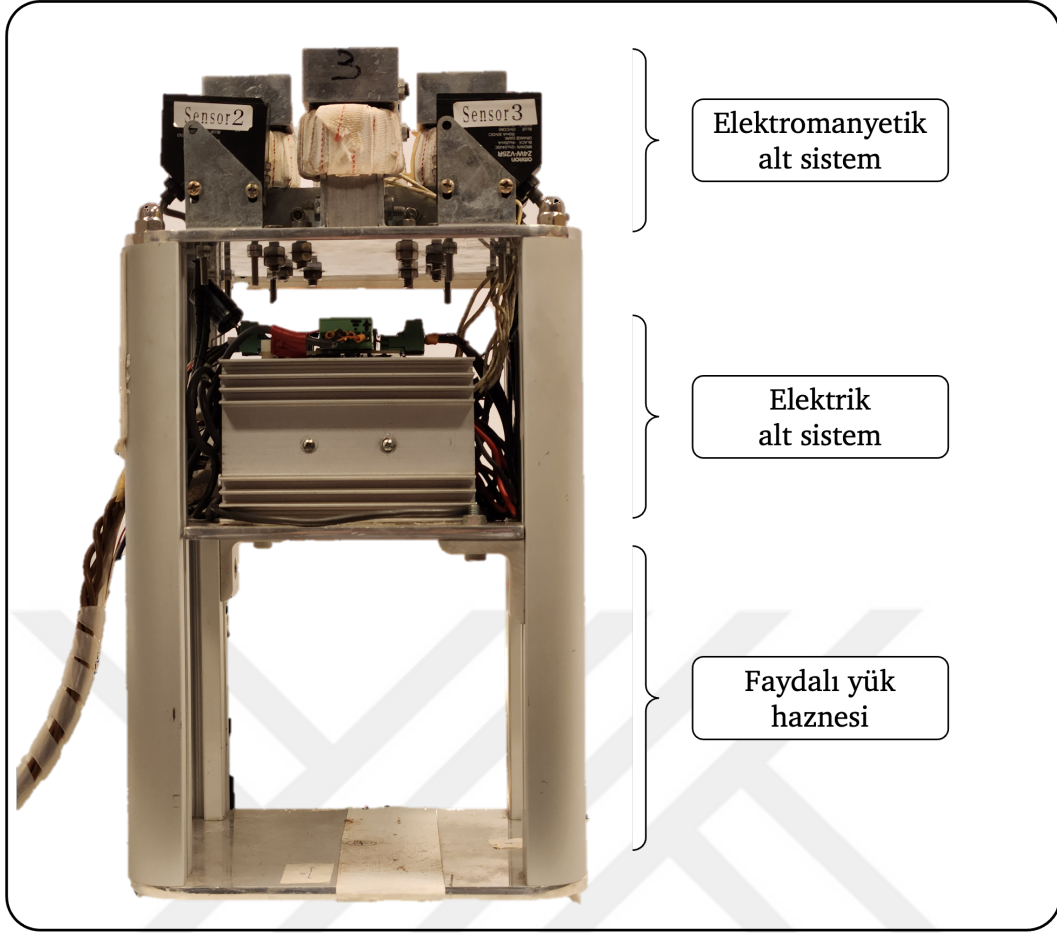
Parametre	Değeri
Sac kalınlığı	0,5 mm
Kutup başı boyutu	3,5x3,5 mm ²
Nüve kol boyutu	3,5x3,5 mm ²
Sürekli mıknatıs boyutu	3,5 mm
Sürekli mıknatıs kalınlığı	3,5 mm

Hava aralığının ölçümü için kutupların yanlarına mesafe sensörleri yerleştirilmiştir. Omron Z4W-V modeli mesafe sensörleri -4 mm ile +4 mm arası mesafeler için 4 mA ile 20 mA arasında değerler vermektedir. Elektrik alt sistem elektromıknatısların sürücülerinden ve akım sensörlerinden oluşmaktadır. Elektrik alt sistemin yapıları Şekil 3.2’te gösterilmiştir. Üretim aşamaları [21]’te anlatılmış olup burada tekrar edilmeyecektir.



Şekil 3.2 Sürücü (b) ve akım sensörlerinin (a) görünüşü

Şekil 3.3’te de görüldüğü üzere maglev sisteminin elektromanyetik ve elektrik alt sistemleri üst üste yerleştirilmiştir. Alüminyum bir iskele ile sabitlenmiş ve altına da faydalı yük taşıyabilmesi için bir hazne tasarlanıp üretilmiştir.



Şekil 3.3 4 Kutuplu aktif tipi maglev sisteminin görünüşü

4

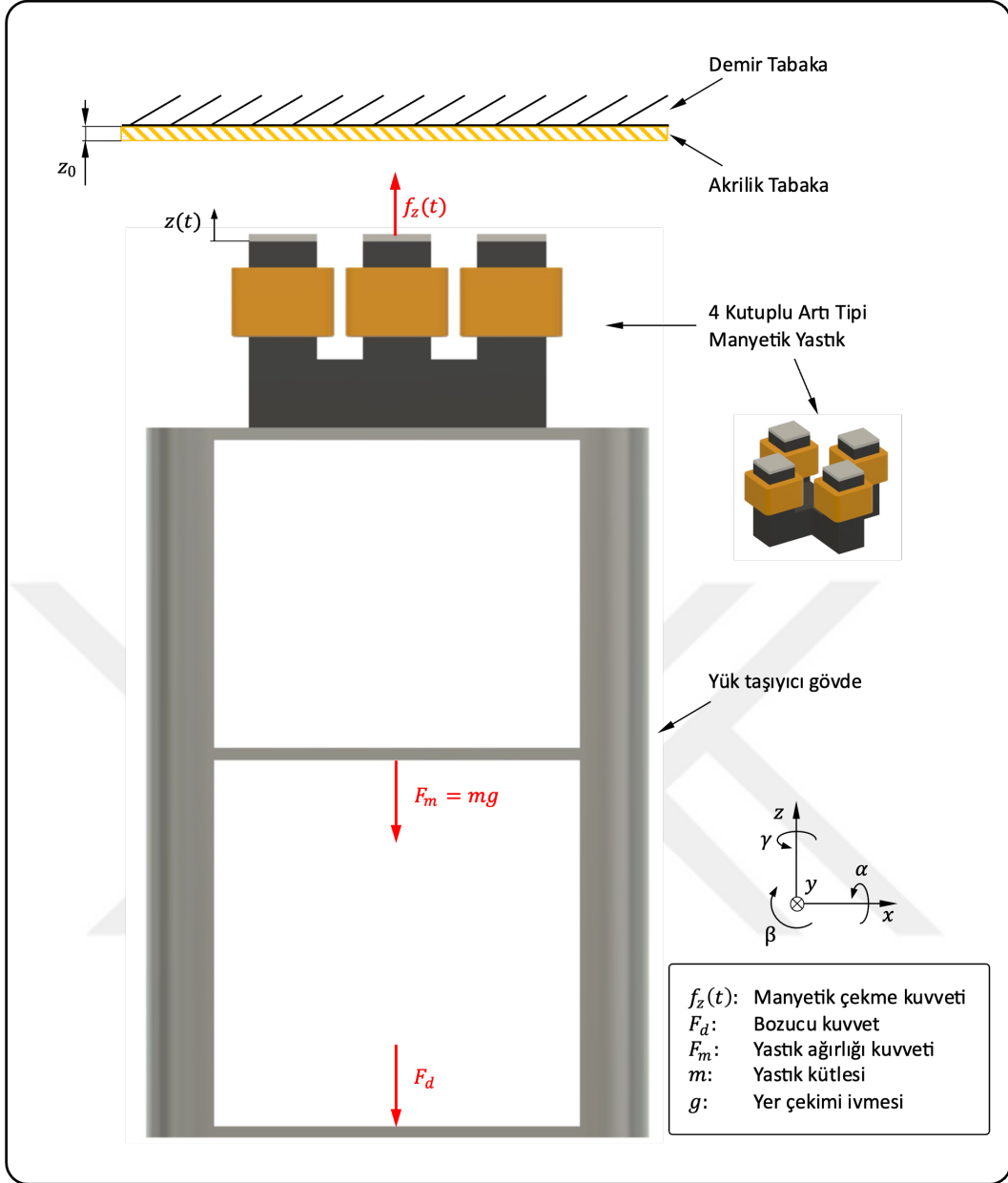
DÖRT KUTUPLU ARTI TİPİ MAGLEV SİSTEMİNİN MODELLENMESİ

Bu başlıkta, çalışma kapsamında kontrolü hedeflenen dört kutuplu artı tipi hibrit maglev sisteminin matematiksel modellenmesi ele alınacaktır. Hedef, sistemin konumunu kontrol etmektir. Bu mekanik bir manipülasyon olduğundan dolayı modellemeye sisteme etki eden mekanik kuvvetlerin incelenmesi ile başlanacaktır. Ardından bu mekanik kuvvetlerin içinden sistemin kontrolü için manipüle edilecek olan manyetik kuvvetlerinin, akım ve gerilim uyarımlarına göre formülasyonu yapılacaktır. Sistemin yapısı genel olarak üç parçadan oluşmaktadır. Birincisi, manyetik yastığın çekme ve itme uygulayabileceği ferromanyetik bir tabaka. Tabaka demirden oluşmaktadır. İkincisi manyetik yastığın kendisi. Üçüncüsü ise manyetik yastığın taşıdığı yük. Şekil 4.1 ve 4.2 bu yapıyı etki eden kuvvetlerle birlikte göstermektedir.

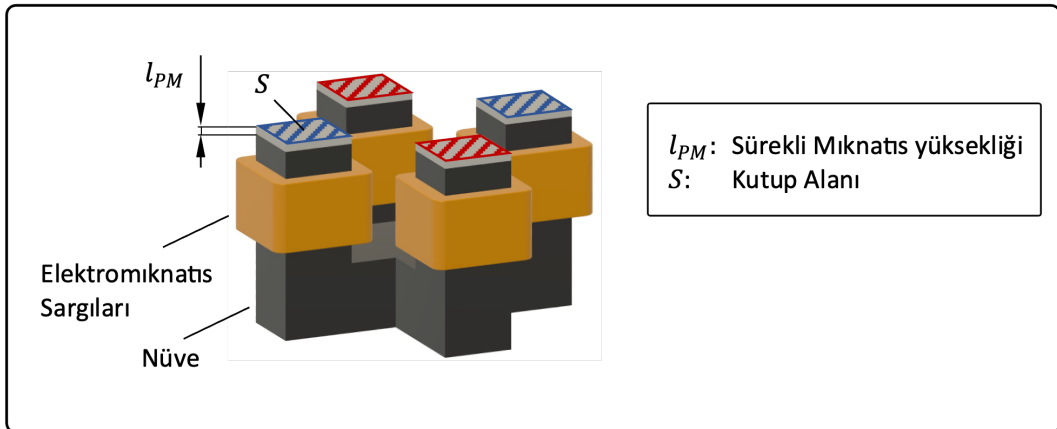
Etki eden kuvvetler üç tanedir. Bunlar Şekil 4.1’de kırmızı olarak işaretlenmiştir. F_m , bütün maglev sisteminin ağırlığını temsil eden kuvvettir. Üzerinde çalışılan sistemin ağırlığı $m = 9,7kg$ ’dır ve sabittir. F_d , sisteme dışardan etki eden kuvvetleri temsil eder. Bu zamanla değişen veya değişmeyen, periyodik olan veya olmayan herhangi bir bozucu kuvvet veya bir yük olabilir. Son olarak bozucu kuvvete ve sistem yüküne karşı uygulanacak manyetik kuvvet $f_z(t)$ sisteme etki etmektedir. İkinci Newton yasasına göre, bir nesneye etki eden kuvvetlerinin toplamı, kütesinin ivmelenmesi ile çarpımına eşittir:

$$F_{toplam} = ma \quad (4.1)$$

Bu denklemden yola çıkarak, ivme, yer değiştirmenin ikinci türevi olarak görüldüğünde manyetik yastığın z eksenindeki konumu, üzerine etki eden kuvvetler ile ilişkilendirilebilir:



Şekil 4.1 Maglev sisteminin yapısı ve etki eden mekanik büyüklükler



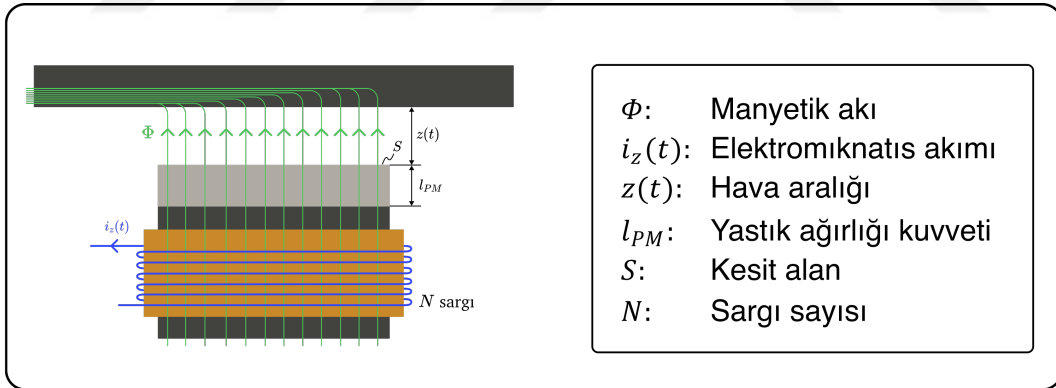
Şekil 4.2 Manyetik yastığın yapısı

$$f_z - F_d - F_m = m \frac{d^2 z(t)}{dt^2} \quad (4.2)$$

Manyetik yastıklamanın hedefi belli bir konumda cihazın sabit durmasını sağlamak olduğundan dolayı kullanılacak kontrolörün hedefi, hibrit elektromıknatısın ürettiği $f_z(t)$ manyetik kuvvetinin bozucu kuvvet F_d ve cihaz ağırlığı F_m 'nin toplamına eşit olması ve böylelikle

$$f_z(t) - F_d - F_m = 0; \quad m \frac{d^2 z(t)}{dt^2} = 0 \quad (4.3)$$

eşitliğinin sağlanmasıyla sistemin hareketsiz durmasını sağlamaktır. Hibrit elektromıknatısın ürettiği $f_z(t)$ kuvveti ise sürekli mıknatısın ve elektromıknatısın hava aralığı boyunca ürettiği toplam manyetik akıya bağlıdır. Sistemde kontrol edilebilen büyüklük akım olduğundan dolayı transfer fonksiyonunu elde etmek için $f_z(t)$ kuvvetinin akıya bağlı olarak formüle edilmesi gerekmektedir. Maglev sisteminin dört adet birbirine eşit ve simetrik konumlandırılmış hibrit elektromıknatıs kutbu olması sebebiyle burada öncelikle sadece tek bir kutbun denklemleri türetilmiştir. Bu kutba etki eden fiziksel büyüklükler Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3 Maglev sistemine etki eden elektromanyetik kuvvetler

Tek bir hibrit elektromıknatısın ürettiği kuvvet $f(t)$ 'nin formülasyonu, enerji denklemi temel alınarak yapılmaktadır. Kuvvetin yol ile çarpımının enerjiye eşit olduğu bilinmektedir:

$$E = f(t) l \Leftrightarrow f(t) = \frac{E}{l} \quad (4.4)$$

Buradaki enerji E , l uzunluğuna sahip bir manyetik devre parçasının depoladığı manyetik enerjidir. Maxwell denklemlerinden türetilmiş olarak manyetik enerji,

manyetik alan H 'nin manyetik akı yoğunluğu B 'nin karesinin çarpımının hacim üzerinden integrali olarak hesaplanır. Analiz edilen hacim incelenen sistem kapsamında belli olduğundan dolayı bu işlem integral yerine çarpım ile basitleştirilebilir:

$$E = \frac{1}{2} \int H \cdot B \, dV \implies E = \frac{H \cdot B \cdot V}{2} \quad (4.5)$$

Söz konusu hacim V , hibrit elektromıknatısın kesit alanı S 'nin ve analiz edilen manyetik devre parçasının uzunluğu $l = l_{PM} + z(t)$ ile çarpımından oluşmaktadır. Kuvvet hesabı için kullanılacak enerji formülasyonu böylelikle

$$E = \frac{H \cdot B \cdot S \cdot (l_{PM} + z(t))}{2} \quad (4.6)$$

halini almaktadır. (4.6) denkleminde (4.4)'teki enerji denklemi yerleştirildiğinde kuvvet manyetik büyüklüklere bağlı olarak ifade edilebilmektedir:

$$f(t) = \frac{H \cdot B \cdot S \cdot (l_{PM} + z(t))}{2l} = \frac{H \cdot B \cdot S}{2} \quad (4.7)$$

Kuvvetin akım cinsinden formülasyonuna ulaşmak için manyetik alan H 'nin ve manyetik akı yoğunluğu B 'nin manyetomotor kuvvet ile ilişkisi kullanılmaktadır. Öncelikle manyetik akı yoğunluğunun manyetik alanla permeabilite sabiti μ_0 ile olan doğrudan ilişkisi ile denklem (4.7) sadeleştirilmektedir:

$$\begin{aligned} B &= \mu_0 \cdot H \\ f(t) &= \frac{H \cdot B \cdot S}{2} \\ &= \frac{\mu_0 \cdot H^2 \cdot S}{2} \end{aligned} \quad (4.8)$$

Manyetik alanın akım ile ilişkisini saptamak için manyetomotor kuvvet MMK kullanılmaktadır:

$$H = \frac{MMK}{l} \quad (4.9)$$

Toplam manyetomotor kuvvet ise elektromıknatısın manyetomotor kuvveti

$MMK_{EM} = N \cdot i(t)$ ve sabit olan sürekli mıknatısın eşlenik manyetomotor kuvveti MMK_{PM} 'nin toplamına eşittir. Bunlar $l = l_{PM} + z(t)$ ile beraber denklem (4.8)'e yerleştirildiğinde

$$f(t) = f(z, i) = \frac{\mu_0 \cdot S}{2} \left(\frac{MMK_{PM} + N \cdot i(t)}{l_{PM} + z(t)} \right)^2 \quad (4.10)$$

denkleme ulaşılmaktadır. Bu denklem sayesinde kuvvet, akıma ve hava aralığı mesafesine bağlı olacak şekilde hesaplanabilmektedir. Böylelikle, hava aralığı ölçülen bir kutba verilecek akımın hangi kuvveti oluşturacağı tespit edilebilmektedir. Son olarak tek bir kutbun ürettiği $f(z, i)$ kuvvetini z ekseninde etki eden kuvvetlerin toplamını ifade etmesi için 4 ile çarpılmaktadır;

$$f_z(z, i_z) = 2 \mu_0 \cdot S \left(\frac{MMK_{PM} + N \cdot i(t)}{l_{PM} + z(t)} \right)^2 \quad (4.11)$$

(4.9) denklemi, (4.2)'te ifade edilen hareket dinamiğinde yerleştirildiğinde ise bütün sistemin akıma ve hava aralığına bağlı olarak dinamiği gösterilmiş olacaktır;

$$2 \mu_0 \cdot S \left(\frac{MMK_{PM} + N \cdot i_z(t)}{l_{PM} + z(t)} \right)^2 - F_d - F_m = m \frac{d^2 z(t)}{dt^2} \quad (4.12)$$

Bu diferansiyel denklemin doğrusal olmadığı görülmektedir. Kullanılacak kontrol algoritmalarında ise sistem dinamiğinin doğrusal olması gerektiğinden dolayı doğrusallığı bozan $f_z(z, i_z)$ kuvveti tekrar ele alınmaktadır. $f_z(z, i_z)$ kuvvetinin modellendiği bölge $f_z(z, i_z) = F_d + F_m$ (denge noktası) gayet küçük olduğundan ve dinamiği bu bölge için doğrusallaştırma için elverişli olduğundan dolayı $f_z(z, i_z)$ kuvveti bu denge noktasındaki hava aralığı z_0 ve akımı $i_{z,0}$ etrafında doğrusallaştırılmaktadır. Doğrusallaştırma işlemi için $(z_0, i_{z,0})$ çalışma noktası etrafındaki $z(t)$ ve $i_z(t)$ değişkenlerin küçük oynamalar,

$$\begin{aligned} \Delta z(t) &= z_0 + z(t) \\ \Delta i_z(t) &= i_{z,0} - i_z(t) \end{aligned} \quad (4.13)$$

olarak tanımlanmaktadır. Akım azaltıldığında hava aralığı daralacağından dolayı $i_z(t)$ 'daki değişim negatif iken $z(t)$ değişimi pozitif olarak tanımlanmaktadır. Bu yeni tanıma göre $f_z(z, i_z)$ artık $f_z(z_0 - \Delta z(t), i_{z,0} + \Delta i_z(t))$ olarak yazılabilir.

Taylor doğrusallaştırma formülüne göre çalışma noktası etrafında artık bu denklem

$$f_z(z_0 - \Delta z(t), i_{z,0} + \Delta i_z(t)) = f_z(z_0, i_{z,0}) + \frac{\partial f_z}{\partial z} \Big|_{(z_0, i_{z,0})} \Delta z(t) + \frac{\partial f_z}{\partial i_z} \Big|_{(z_0, i_{z,0})} \Delta i_z(t) \quad (4.14)$$

olarak yazılarak doğrusallaştırılır. Denklemden belirtilen türevler hesaplandığında elde edilen faktörler şu şekildedir;

$$K_{z,0} = \frac{\partial f_z}{\partial z} \Big|_{(z_0, i_{z,0})} = - \frac{4 \mu_0 \cdot S (MMK_{PM} + N \cdot i_{z,0})^2}{(z_0 + l_{PM})^3} \quad (4.15)$$

$$K_{i_z,0} = \frac{\partial f_z}{\partial i_z} \Big|_{(z_0, i_{z,0})} = \frac{4 \mu_0 \cdot S \cdot N (MMK_{PM} + N \cdot i_{z,0})}{(z_0 + l_{PM})^2} \quad (4.16)$$

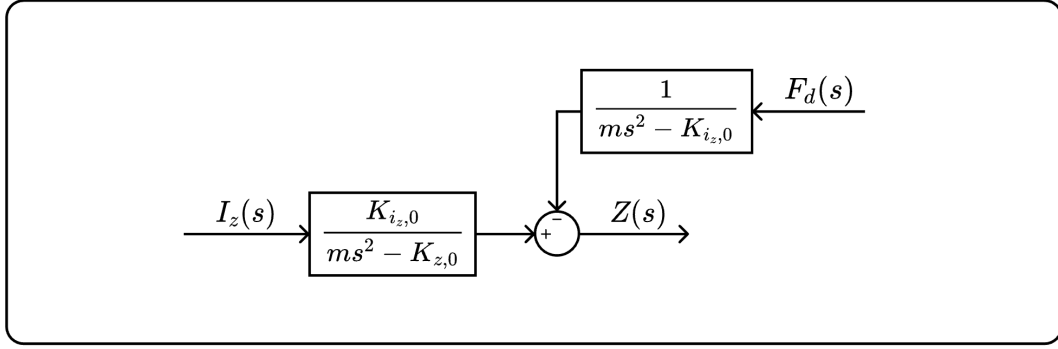
Denge noktasında üretilen $f_z(z_0, i_{z,0})$ kuvveti yastıklanan ağırlığın çekme kuvveti F_m 'ye eşittir, dolayısıyla bunlar birbirini götürmektedir. Böylelikle z ekseninin hareket dinamiği şu hali almaktadır:

$$\begin{aligned} m \frac{d^2 z(t)}{dt^2} &= f_z(z_0, i_{z,0}) - \frac{\partial f_z}{\partial z} \Big|_{(z_0, i_{z,0})} \Delta z(t) + \frac{\partial f_z}{\partial i_z} \Big|_{(z_0, i_{z,0})} \Delta i_z(t) - F_d - F_m \\ &= K_{z,0} \cdot \Delta z(t) + K_{i_z,0} \cdot \Delta i_z(t) - F_d \end{aligned} \quad (4.17)$$

$$\frac{d^2 z(t)}{dt^2} = \frac{K_{z,0}}{m} \Delta z(t) + \frac{K_{i_z,0}}{m} \Delta i_z(t) - \frac{1}{m} F_d \quad (4.18)$$

Doğrusallaştırılmış olan bu diferansiyel denklemi en temel haliyle denklem (4.19)'daki gibi durum uzayında gösterilebilir. Bu gösterimde, kontrol edilecek durum değişkeni olarak $\Delta z(t)$ ve kontrol esnasında stabilite artıran durum değişkeni olarak $\Delta \dot{z}(t)$ seçilmektedir.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta z(t) \\ \Delta \dot{z}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{K_{z,0}}{m} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta z(t) \\ \Delta \dot{z}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_{i_z,0}}{m} \end{bmatrix} \Delta i_z(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{m} \end{bmatrix} F_d(t) \quad (4.19)$$



Şekil 4.4 Manyetik yastığın hareket dinamiğinin blok şeması

Denklem (4.18)'teki doğrusallaştırılmış diferansiyel denklemin $\Delta z(t)$ 'ye göre laplace dönüşümü alındığında ise elde edilen z ekseninin hareket dinamiğinin transfer fonksiyonu şöyle hesaplanır;

$$Z(s) = \frac{K_{i_z,0}}{ms^2 - K_{z,0}} I_z(s) - \frac{1}{ms^2 - K_{i_z,0}} F_d(s) \quad (4.20)$$

Transfer fonksiyonunun blok şema hali ise Şekil 4.4'te gösterilmiştir.

z eksenini için denklemlerin ve formüllerin türetilmesi için izlenen yol analog olarak α ve β açısal eksenler için de izlenecektir. Bu bağlamda açısal hareket dinamiği α ve β eksenleri için şu şekilde tanımlanır;

$$J_\alpha \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} = T_\alpha(\theta, i_\alpha) \quad (4.21)$$

$$J_\beta \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} = T_\beta(\theta, i_\beta) \quad (4.22)$$

Hareket denklemlerinden de görüldüğü üzere açısal hareket dinamiklerinde etki eden sadece elektromıknatısların ürettiği momentler vardır. Elde edilen bu transfer fonksiyonlarının uyarım değişkeni akımdır. Dolayısıyla bu transfer fonksiyonların temel alındığı kontrol algoritmalarında sistem uyarımı da yine bir akım kaynağı ile yapılması gerekmektedir. Genelde ise elektromıknatıs enerjilendirmeleri voltaj kaynakları ile yapıldığından dolayı, bu çalışma kapsamında akım uyarımına ek olarak voltaj uyarımı ile de çalışılmaktadır. Bu sebeple akım uyarımının sistemin kontrolü için baz alınacak transfer fonksiyonuna ek olarak uygulanan voltajdan, sargılardan geçen akımı hesaplamasını mümkün kılan bir formülasyon gerekmektedir. Uygulanan $e(t)$ uyarım geriliminin elektromıknatıs üzerinde oluşturduğu akımı tespit etmek için genelde

$$e(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad (4.23)$$

denklemleri kullanılmaktadır. Burada R ve L bobinin iç direncini ve endüktansını temsil etmektedir. Ancak oluşan elektromanyetik kuvvet sadece elektromıknatıstan değil, sürekli mıknatıstan da kaynaklı olduğundan dolayı sürekli mıknatısın etkisini katmak için Faraday yasası dikkate alınarak

$$e(t) = Ri(t) + N \frac{d\Phi(t)}{dt} \quad (4.24)$$

denklemleri kullanılacaktır. Manyetik akı üzerinden tekrar akıma ulaşmak için

$$\Phi(t) = S \cdot B \quad (4.25)$$

ve

$$B = \mu_0 \frac{MMK}{l} \quad (4.26)$$

ilişkileri kullanılarak denklem (4.24)'e yerleştirildiğinde

$$e(t) = R \cdot i(t) + N \frac{d}{dt} \left(\mu_0 S \frac{MMK}{l} \right) \quad (4.27)$$

denklemleri elde edilir. Denklem düzenlendiğinde ve MMK ve l yerine ilgili değerler yerleştirildiğinde z eksenini için elde edilen diferansiyel elektriksel dinamik denklem şu hali almaktadır:

$$e_z(t) = R \cdot i_z(t) + N \cdot \mu_0 \cdot S \frac{d}{dt} \left(\frac{MMK_{PM} + N \cdot i_z(t)}{l_{PM} + z(t)} \right) \quad (4.28)$$

Denklem yine $(z_0, i_{z,0})$ çalışma noktası etrafında doğrusallaştırıldığında ise

$$\begin{aligned} \Delta e_z(t) &= R_z \Delta i_z(t) + L_z \frac{d\Delta i_z}{dt} + \frac{K_{z,0} L_z}{K_{i_z,0}} \frac{d\Delta z(t)}{dt} \\ &= \frac{R_z}{L_z} \Delta i_z(t) + \frac{d\Delta i_z}{dt} + \frac{K_{z,0}}{K_{i_z,0}} \frac{d\Delta z(t)}{dt} \end{aligned} \quad (4.29)$$

elde edilir. z eksenli sistem dinamiğinde gerilim uyarımlı yapıyı elde etmek için bu denklemde $\frac{d\Delta i_z}{dt}$ ifadesi sol tarafa geçirilir:

$$\frac{d\Delta i_z(t)}{dt} = \Delta e_z(t) - \frac{R_z}{L_z} \Delta i_z(t) - \frac{K_{z,0}}{K_{i_z,0}} \frac{d\Delta z(t)}{dt} \quad (4.30)$$

Böylelikle maglev sisteminin iki dinamik denklemi olduğu saptanmış olmaktadır:

$$\frac{d^2 z(t)}{dt^2} = \frac{1}{m} f_z(z_0, i_{z,0}) + \frac{K_{z,0}}{m} \Delta z(t) + \frac{K_{i_z,0}}{m} \Delta i_z(t) - \frac{1}{m} F_d \quad (4.31)$$

$$\frac{d\Delta i_z(t)}{dt} = \Delta e_z(t) - \frac{R_z}{L_z} \Delta i_z(t) - \frac{K_{z,0}}{K_{i_z,0}} \frac{d\Delta z(t)}{dt} \quad (4.32)$$

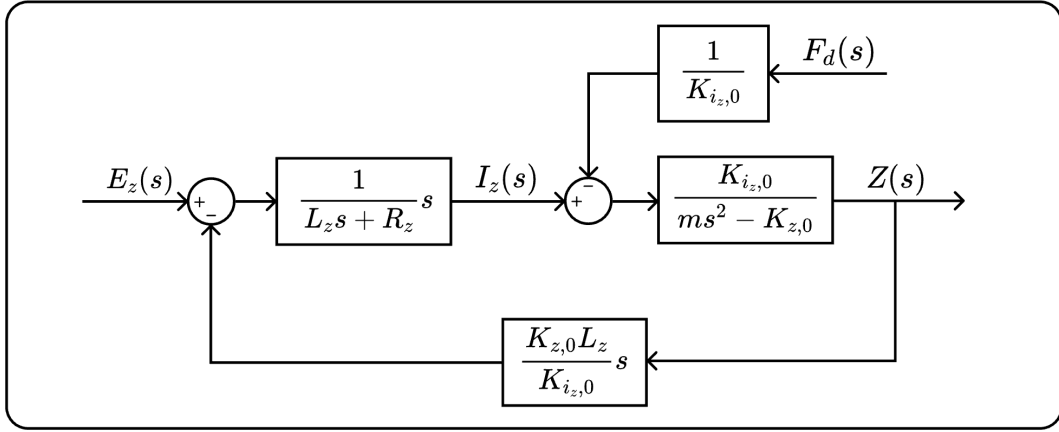
Geliştirilecek kontrol algoritmaları için bu denklemler durum uzayında ifade edilmelidir. Durum değişkenleri olarak $\Delta z(t)$ ve $\Delta \dot{z}(t)$ 'ye ek olarak $\Delta i_z(t)$ de seçilmektedir. Bu durumda sistem dinamiği durum uzayında aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta z(t) \\ \Delta \dot{z}(t) \\ \Delta i_z(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{K_{z,0}}{m} & 0 & \frac{K_{i_z,0}}{m} \\ 0 & -\frac{K_{z,0}}{K_{i_z,0}} & -\frac{R_z}{L_z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta z(t) \\ \Delta \dot{z}(t) \\ \Delta i_z(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_z} \end{bmatrix} \Delta e_z(t) + \\ &+ \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{m} \\ 0 \end{bmatrix} F_d(t) \end{aligned} \quad (4.33)$$

Elektriksel dinamiğinin transfer fonksiyonunu ise $\Delta z(t)$ 'ye göre laplace dönüşümü alındığında elde edilir;

$$I_z(s) = \frac{1}{L_z s - R_z} \left(E_z(s) - \frac{K_{z,0} L_z}{K_{i_z,0}} s Z(s) \right) \quad (4.34)$$

z ekseninin tüm sistem dinamiğini elde etmek için tespit edilen $I_z(s)$, denklem (4.20)'deki yerine konulduğunda elde edilir ve böylelikle Şekil 4.4'e ek olarak elde edilen elektriksel dinamiğin transfer fonksiyonu da eklendiğinde Şekil 4.5'teki gösterildiği şekliyle z ekseninin sistem dinamiği elde edilmektedir.



Şekil 4.5 Manyetik yastığın hareket dinamiğinin blok şeması

5

KONTROLCÜ TASARIMLARI

Bu bölümde maglev sisteminin kontrolü için kullanılan yöntemler ve deneysel sonuçları açıklanmaktadır. Bu yöntemler, kontrol ettikleri durum değişkeni veya kontrol şekilleri üzerinden farklılık göstermektedir ancak temel aldıkları kontrol yöntemi hepsinde tam durum geri beslemeli kontroldür. Bu sebeple evvela durum geri beslemeli kontrolcünün temel yapısı *gerilim uyarımı ile hava aralığı kontrolü* üzerinden anlatılmıştır. Ardından bu çalışma kapsamındaki maglev sisteminin kontrolü için bir gereklilik olan ve yine bütün kontrol yöntemlerinde kullanılan gözlemci tasarımı anlatılmıştır. Geliştirilen kontrolcülerin ortak teorik altyapısı böylelikle oluşturulduktan sonra kontrolcülerin kendileri anlatılacaktır. Bu çalışma kapsamında geliştirilen kontrolcüler “Gerilimi sıfıra götüren sıfır güç kontrolü”, “Tahmini akımı sıfıra götüren sıfır güç kontrolü”, “Yarı sıfır güç kontrolü” ve “Kayan kipli sıfır güç kontrolü” olmak üzere dört tipten oluşmaktadır.

5.1 Kontrolcü Temelleri

5.1.1 Durum Uzayında Tam Durum Geri Beslemeli Kontrol

Bu başlıkta durum uzayında tam durum geri beslemeli kontrol tekniği gerilim, manyetik levitasyon sisteminin gerilim uyarım modu üzerinden anlatılmaktadır. Durum uzayında tam durum geri beslemeli kontrol, temelinde kutup atama yöntemine dayanmaktadır. Sistemin gerilim uyarımlı durum uzayı denklemleri şu şekilde tespit edilmiştir:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta z(t) \\ \Delta \dot{z}(t) \\ \Delta i_z(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{K_{z,0}}{m} & 0 & \frac{K_{i_z,0}}{m} \\ 0 & -\frac{K_{z,0}}{K_{i_z,0}} & -\frac{R_z}{L_z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta z(t) \\ \Delta \dot{z}(t) \\ \Delta i_z(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_z} \end{bmatrix} \Delta e_z(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{m} \\ 0 \end{bmatrix} F_d(t) \quad (5.1)$$

Bu sistem, maglev sistemlerinin çoğunda olduğu gibi, doğası gereği kararsız bir sistemdir ve kararlı hale getirilebilmesi için bir kontrolcüye ihtiyaç duyar. Sistemin kararsızlığını tespit etmek için sıfır kutup haritası çizdirilebilir. Aşağıdaki MATLAB kodu ile harita çizdirildiğinde Şekil 5.1 'teki haritada bir kutbun eksenin sağ tarafında kaldığı görülmektedir. Bu sistemin kararsızlığını göstermektedir.

```

R = 1;
L = 0.016;
m = 10;
Kz0 = 12473;
Kiz0 = 9.88;

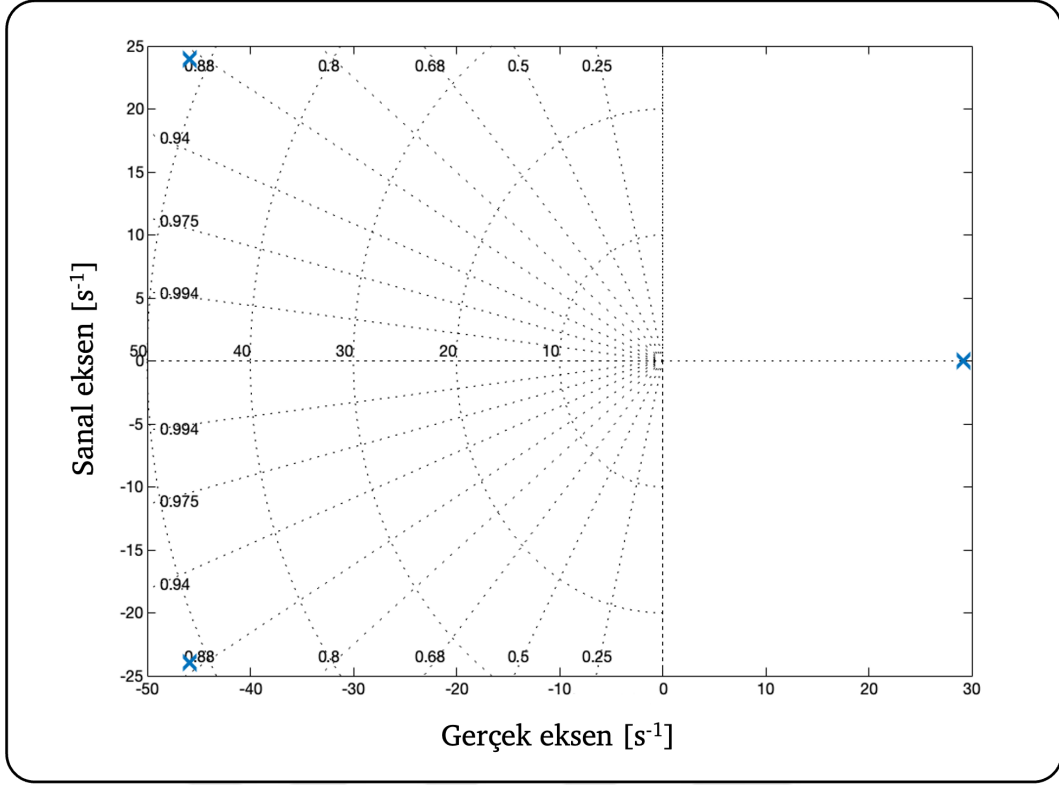
AZ = [ 0      1      0; ...
       Kz0/m  0      Kiz0/m; ...
       0      -Kz0/Kiz0 -R/L];
BZ = [ 0; ...
       0; ...
       1/L];
CZ = [ 1      0      0];

sys = ss(AZ, BZ, CZ, 0)
pzplot(sys)
step(sys)

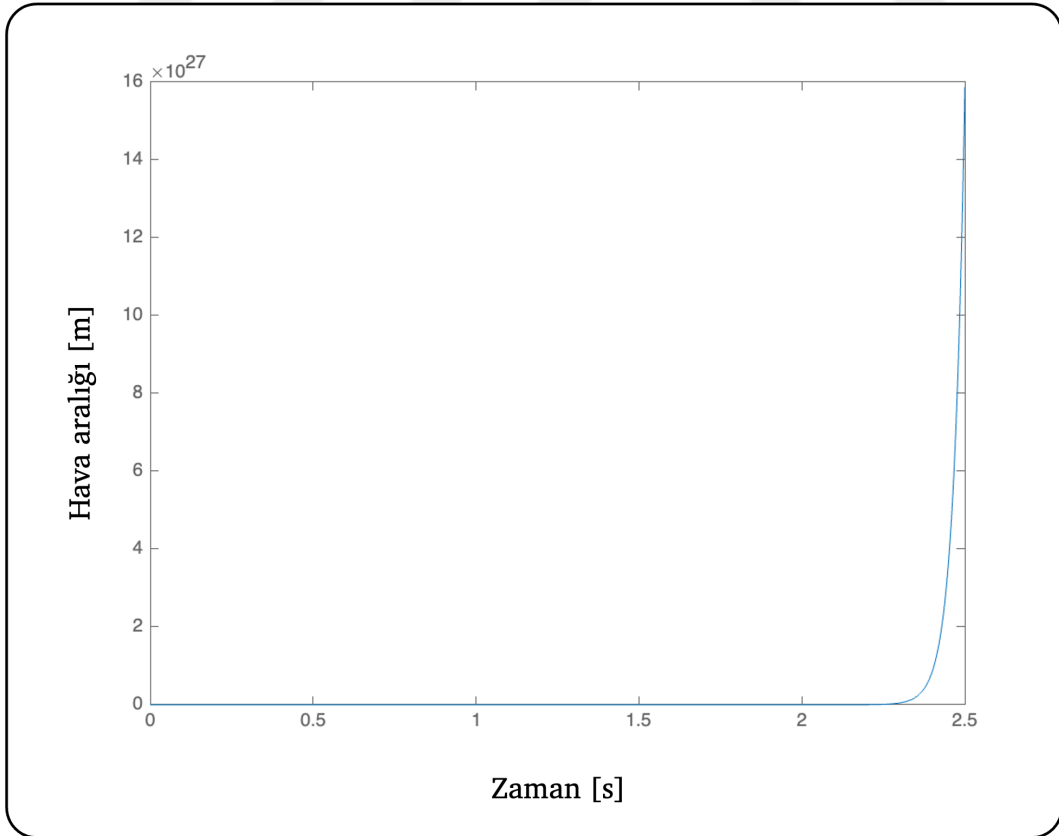
```

Bir kutbun eksenin sağ tarafında kalmasının da işaret ettiği gibi sistem denklemlerinin birim basamak girişine ilişkin tepkisi de sonsuza gitmektedir. Şekil 5.2 bunu göstermektedir.

Sistemin durum uzayında kontrol edilebilmesi için kontrol edilebilirliği tespit edilmelidir. Bunun için kontrol edilebilirlik matrisinin rankı durum değişkenlerinin



Şekil 5.1 Sıfır kutup haritası



Şekil 5.2 Birim basamak girişine ilişkin sistem tepkisi

sayısına eşit olmalıdır.

$$C = \begin{bmatrix} B_z & A_z B_z & A_z^2 B_z \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

$$\text{rank}(C) = n \quad (5.3)$$

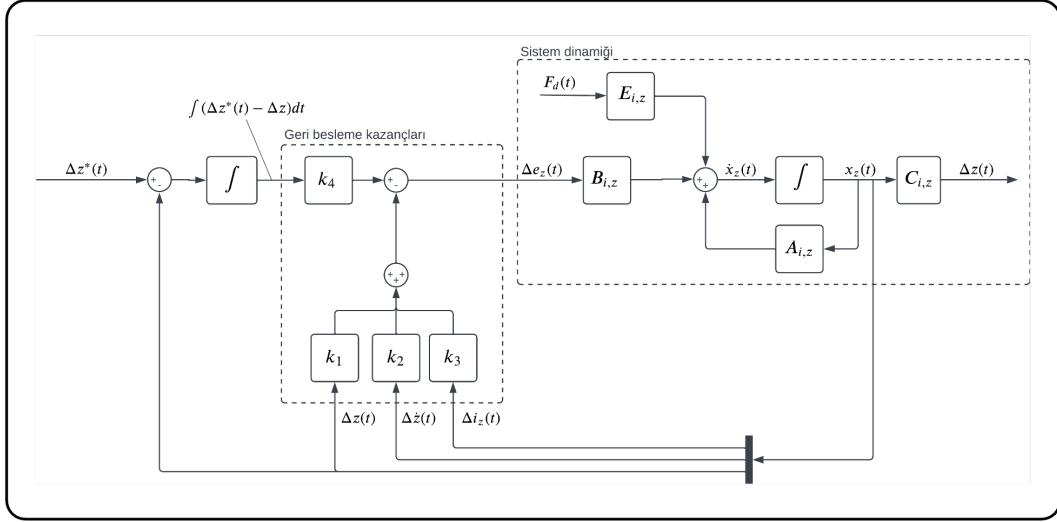
MATLAB’da aşağıdaki kod çalıştırıldığında sistemin kontrol edilebilirlik matrisinin rankının tam çıktığı görülmektedir.

```
Co = ctrb(AZ, BZ);
rank(Co)
```

Tam durum geri beslemeli kontrol yöntemine göre, sistemin kararlı bir şekilde, kalıcı hata olmadan referans takibi yapabilmesi için dinamiğinde bir integratörünün bulunması gerekmektedir. Eğer bu yoksa, ki bu dört kutuplu artı tipi maglev sisteminde bu şekildedir, sistem dinamiğine bir integratör eklenmelidir. Böylelikle integral ile genişletilmiş sistem matrisleri $A_{z,i}$, $B_{z,i}$ ve $C_{z,i}$ ve durum değişkenleri $x_{z,i}$ elde edilmektedir:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta z(t) \\ \Delta \dot{z}(t) \\ \Delta i_z(t) \\ \Delta \int (0 - \Delta z^*(t)) dt \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{K_{z,0}}{m} & 0 & \frac{K_{i_z,0}}{m} & 0 \\ 0 & -\frac{K_{z,0}}{K_{i_z,0}} & -\frac{R_z}{L_z} & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta z(t) \\ \Delta \dot{z}(t) \\ \Delta i_z(t) \\ \Delta \int (0 - \Delta z^*(t)) dt \end{bmatrix} + \\ &+ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_z} \\ 0 \end{bmatrix} \Delta e_z(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{m} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} F_d(t) \end{aligned} \quad (5.4)$$

Yine aynı yöntem ile bu sistem dinamiğinin de kontrol edilebilirlik şartını sağladığı görülebilir. Dolayısıyla kutup atama yöntemi ile geri besleme kazançları hesaplanabilir. Bu doğrultuda kutup yerleri 4. Dereceden Kessler referans polinomu kullanılarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.3 Durum geri beslemeli kontrol şeması

$$P_4(s) = a_4s^4 + a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0 \quad (5.5)$$

Bu polinomun katsayıları şu şekilde hesaplanabilir:

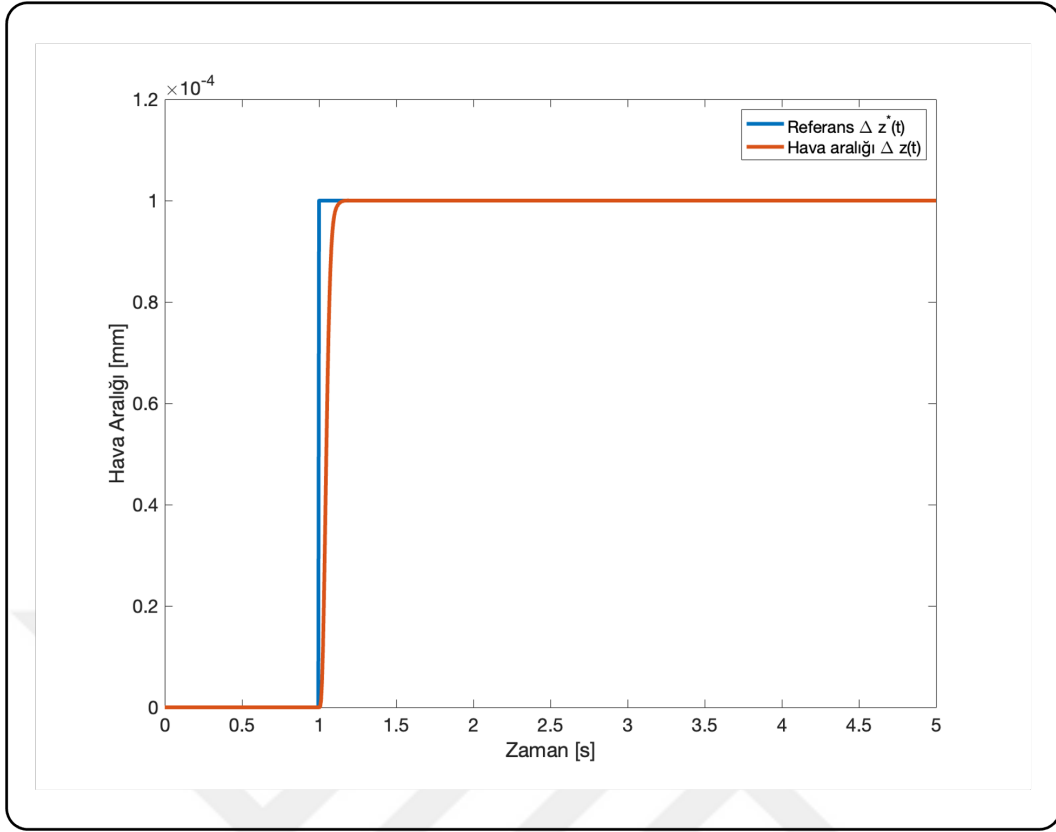
$$\frac{a_1^2}{a_2a_0} = \gamma_1; \quad \frac{a_2^2}{a_3a_1} = \gamma_2; \quad \frac{a_3^2}{a_4a_2} = \gamma_3; \quad \frac{a_1}{a_0} = \tau \quad (5.6)$$

Burada γ_1 , γ_2 ve γ_3 kararlılık indeksleri, τ ise sistemin tepki hızını etkileyen bir parametredir. Bu parametrelerin değerleri genellikle $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = 2$ alınır. Ancak S. Manabe'ye göre sistemin kararlılığını arttırmak için $\gamma_1 = 2,5$ alınmalıdır [22]. Zaman sabiti $\tau = 0,05s$ olarak seçilmiştir. Bu değerler kullanılarak polinomun katsayıları hesaplanır.

Kontrol şeması Şekil 5.3'te gösterilmiştir. Referans polinom durum uzayı denklemlerinden elde edilen karakteristik denklem ile eşleştirilerek sistem kökleri karakteristik kökleri verecek biçimde geri besleme kazançları belirlenir.

Sistem bu şekilde MATLAB'de simüle edildiğinde birim basamak cevabı Şekil 5.4'teki gibi elde edilmektedir.

Tam durum geri beslemeli kontrol için bütün sistem durum değişkenlerinin ölçülmesi gerekmektedir. Çalışılan maglev sistemi üzerinde sadece hava aralığı sensörü kullanılabildiğinden dolayı burada bir gözlemci tasarımına ihtiyaç duyulmaktadır.

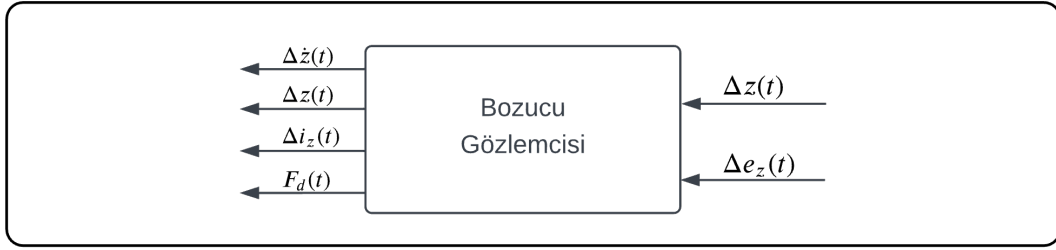


Şekil 5.4 Durum geri beslemeli kontrol birim basamak cevabı

5.1.2 Gözlemci Tasarımı

Durum uzayında kontrol durum geri beslemeli kontrol yöntemlerinde bütün durum değişkenlerinin ulaşılabilir olması varsayılmaktadır. Ancak pratikte bütün durumlar ölçülebilir olmayabiliyor veya ölçülmesi çok maliyetli olabiliyor. Bu sebeple soft-sensor olarak da adlandırılan gözlemciler tasarlanmaktadır. Gözlemciler sistemin dinamiğini dikkate alarak belli girdiler ile durum değişkenlerini tahmin ederler. Çalışmaya konu olan maglev sisteminde de durum böyledir, zira gerilim uyarımı ile çalışan kontrolcünün ihtiyacı olan akım durumunu ölçecek sistemin üzerinde yeterince doğru ölçüm yapabilen akım sensörü bulunmamaktadır. Seçilen durum değişkenlerinden sadece hava aralığı yeterince doğrulukta ölçülebilmektedir. Dolayısıyla geri besleme kazançları gözlemci tarafından tahmin edilen Δz , $\Delta \dot{z}$ ve Δi_z üzerinde uygulanacaktır. Buna ek olarak sisteme bozucu kuvvetler uygulandığında gözlemcinin durum değişkeni tahminleri yanlış hesaplandığı bilinmektedir [23]. Dolayısıyla gözlemcinin sadece durum değişkenlerini değil, bozucu kuvveti de tahmin etmesi gerekmektedir. Bozucu kuvvet de tahmin edildiğinde tespit edilen bozucu kuvvete karşılık uyarım işaretine bir bozucu kuvvet kompanzasyonu eklenmesi kontrol performansına gürbüzlük katacaktır. Tasarlanan bozucu gözlemciden beklenen, sistem uyarımı ve ölçülen sistem durumu verildiğinde bütün durum değişkenlerini ve bozucu etkilerini de doğru bir

şekilde tahmin etmesidir (Şekil 5.5).



Şekil 5.5 Bozucu gözlemcisi temel girdileri ve çıktıları

Bozucu gözlemcisi tasarımının gerçekleştirilmesi için durum uzayı denklemlerine bozucu kuvvet $F_d(t)$ durum değişkeni olarak eklenir:

$$\frac{d}{dt} \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta \hat{z}(t) \\ \Delta \dot{\hat{z}}(t) \\ \Delta \hat{i}_z(t) \\ \hat{F}_d(t) \end{bmatrix}}_{\hat{x}} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{K_{z,0}}{m} & 0 & \frac{K_{i_z,0}}{m} & -\frac{1}{m} \\ 0 & -\frac{K_{z,0}}{K_{i_z,0}} & -\frac{R_z}{L_z} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{A_{O,z}} \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta \hat{z}(t) \\ \Delta \dot{\hat{z}}(t) \\ \Delta \hat{i}_z(t) \\ \hat{F}_d(t) \end{bmatrix}}_{\hat{x}} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_z} \\ 0 \end{bmatrix}}_{B_{O,z}} \Delta e_z(t) \quad (5.7)$$

$$\hat{y} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{C_{O,z}} \hat{x} \quad (5.8)$$

Gözlemcinin bu durum uzayı denklemlerinin gözlemlenebilirlik şartının sağladığını tespit etmek için gözlemlenebilirlik matrisi

$$\mathcal{O} = \begin{bmatrix} C_{O,z} \\ C_{O,z}A_{O,z} \\ C_{O,z}A_{O,z}^2 \\ C_{O,z}A_{O,z}^3 \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

tam rankının olduğu, yani durum değişkeni sayısı n 'e eşit olduğu kontrol edilmelidir. Bu doğrultuda aşağıdaki MATLAB kodu çalıştırıldığında gözlemlenebilirlik şartının sağlandığı görülmektedir.

```
R = 1;
L = 0.016;
m = 10;
```

$$Kz0 = 12473;$$

$$Kiz0 = 9.88;$$

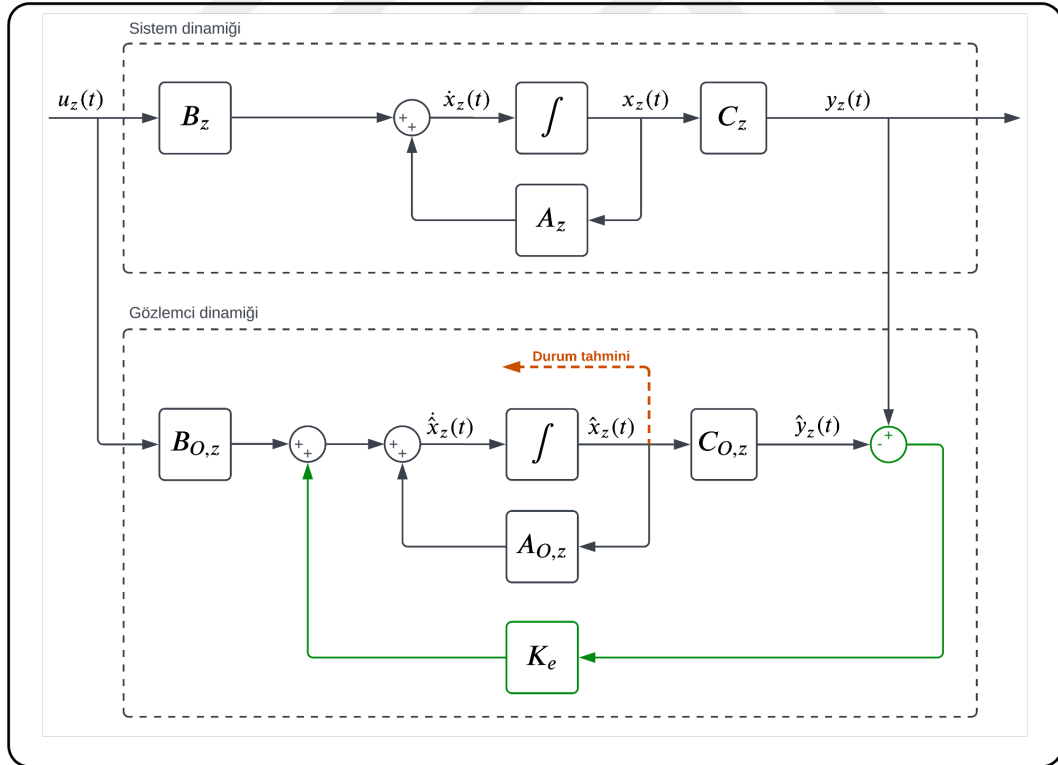
$$A_o = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0; \dots \\ Kz0/M & 0 & Kiz0/M & -1/M; \dots \\ 0 & -Kz0/Kiz0 & -R/L & 0; \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$C_o = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$O_b = \text{obsv}(A_o, C_o)$$

$$\text{rank}(O_b)$$

Gözlemci tasarımı için Şekil 5.6'te gösterildiği gibi literatürde çokça anlatımı bulunan tam dereceli gözlemci seçilmiştir. Bu yapıya göre gözlemcinin matematiksel olarak işlevi, sistemden ölçülen durumların ve tahmin edilen durumların arasındaki farkı sıfıra indirmek. Bunun için gözlemci durum denklemlerine K_e kazancı eklenir.



Şekil 5.6 Tam dereceli gözlemcinin iç dinamiği

Şekilden de anlaşılacağı üzere gözlemci yapısı tam durum geri beslemeli kontrolcünün yapısına benzemektedir. Matematiksel olarak da bu böyledir. Dolayısıyla kontrol için geri besleme kazançları için kullanılan kutup atama

yöntemi aynı şekilde gözlemcinin de geri besleme kazancını hesaplamak için kullanılacaktır. Atanacak kutupların yerleri yine Kessler kanonik referans polinomu üzerinden hesaplanmaktadır. Hesaplanan bu kutuplar belli bir katsayıyla çarpılarak gözlemci dinamiğinin tepki performansı artırılmaktadır. K_e kazancının bulunması için gözlemcinin hata dinamiğini ifade eden

$$\dot{e} = \dot{x}_z - \dot{\hat{x}}_z \quad (5.10)$$

ilişkisi üzerinden bulunur. Bunun için \dot{x}_z ve $\dot{\hat{x}}_z$ Şekil 5.6'te gösterildiği gibi tanımlanır:

$$\dot{x}_z = A_z x_z + B_z u_z \quad (5.11)$$

$$\dot{\hat{x}}_z = A_{O,z} \hat{x}_z + B_{O,z} u_z + K_e \hat{y} \quad (5.12)$$

Bu denklemler üzerinde bir takım cebirsel işlemler yapıldıktan sonra

$$\dot{e} = (A - K_e C) e \quad (5.13)$$

bağıntısı elde edilir. Bu denklem temel alınarak kutup atama yöntemi uygulanır. Kullanılan kutup atama yöntemi durum geri besleme kontrolünde açıklandığından dolayı burada tekrar edilmeyecektir. Ayrıca bu yöntem literatürde de çokça anlatılmaktadır [24]. MATLAB'da gözlemcinin geri besleme kazancının kutup atama süreci şu şekilde programlanabilir:

$$A_o = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0; \dots \\ K_{z0}/M & 0 & K_{iz0}/M & -1/M; \dots \\ 0 & -K_{z0}/K_{iz0} & -R/L & 0; \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$C_o = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$\text{poles} = \text{mypoles}(A_o, C_o)$$

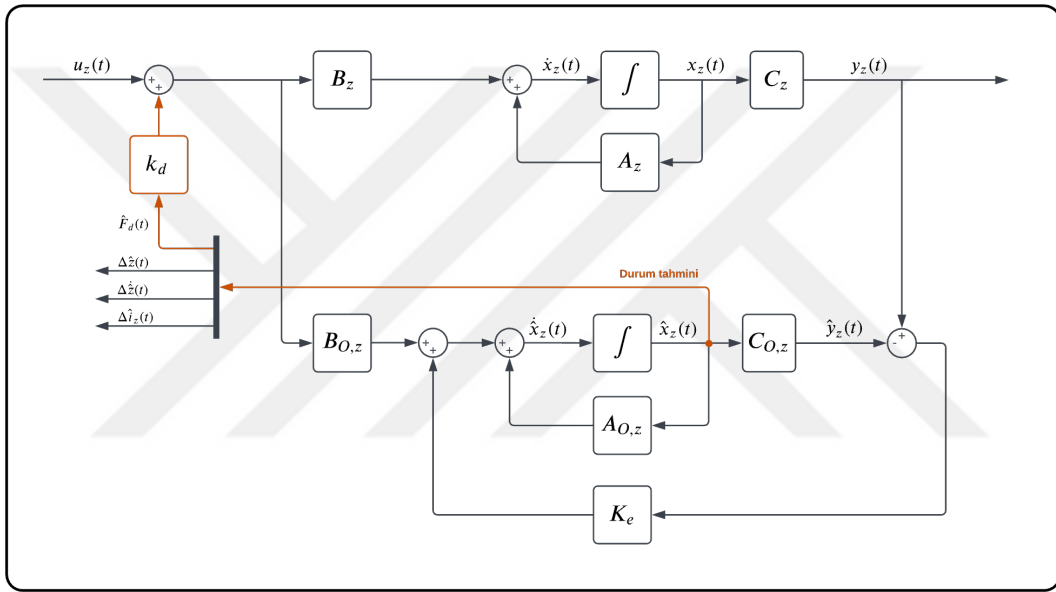
$$n = 8$$

$$K_e = \text{place}(A_o', C_o', n * \text{poles})$$

Gözlemcinin tahmin ettiği bozucu etki de kontrol performansına katkı olması için bozucu kompanzasyonu katsayısı k_d ile çarpılıp kontrol sinyali ile toplanır. Tespit edilen kutuplar $n = 8$ faktörü ile çarpılarak gözlemcinin tepki süresi kısaltılarak performansı artırılmaktadır.

5.1.3 Bozucu Kompanzasyonu

Bozucu kompanzasyonu katsayısı, bozucu etkilerin kontrol performansına katkı sağlaması için kontrol sinyali ile toplanması gereken katsayıdır. Gözlemci ile beraber kullanımını Şekil 5.7’te gösterilmiştir.



Şekil 5.7 Bozucu kompanzasyonu katsayısı blok diyagramı

Bozucu kompanzasyonu katsayısının hesabı için sistemin sonsuzda, yani kararlı rejimdeki durumu incelenir, çünkü bozucu etkilerin kontrol performansına katkısı kararlı rejimdeki durumda ortaya çıkmaktadır. Bu duruma göre sistemde herhangi bir oynamanın olmaması gerekmektedir:

$$\begin{aligned}
 \lim_{t \rightarrow \infty} \Delta z(t) &= 0 \\
 \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{d}{dt} \Delta z(t) &= 0 \\
 \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{d^2}{dt^2} \Delta z(t) &= 0 \\
 \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{d}{dt} \Delta i_z(t) &= 0
 \end{aligned} \tag{5.14}$$

Buradan $\dot{x}_z = 0$ olarak da yazılabilir. Eğer herhangi bir oynama varsa bu da bozucudan kaynaklanması gerektiği aşıkardır. Kararlı rejimde sistemin durum denklemleri şu şekilde yazılabilir:

$$0 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{K_{z,0}}{m} & 0 & \frac{K_{i_z,0}}{m} \\ 0 & -\frac{K_{z,0}}{K_{i_z,0}} & -\frac{R_z}{L_z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta z(t) \\ \Delta \dot{z}(t) \\ \Delta i_z(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_z} \end{bmatrix} \Delta e_z(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{m} \\ 0 \end{bmatrix} F_d(t) \quad (5.15)$$

Durum denklemleri çıkartıldığında:

$$\begin{aligned} 0 &= \Delta \dot{z}(t \rightarrow \infty) \\ 0 &= \frac{K_{z,0}}{m} \Delta z(t \rightarrow \infty) + \frac{K_{i_z,0}}{m} \Delta i_z(t \rightarrow \infty) - \frac{1}{m} F_d(t \rightarrow \infty) \\ 0 &= -\frac{K_{z,0}}{K_{i_z,0}} \Delta \dot{z}(t \rightarrow \infty) - \frac{R_z}{L_z} \Delta i_z(t \rightarrow \infty) + \frac{1}{L_z} \Delta e_z(t \rightarrow \infty) \end{aligned} \quad (5.16)$$

Denklemler ile sadeleştirildiğinde:

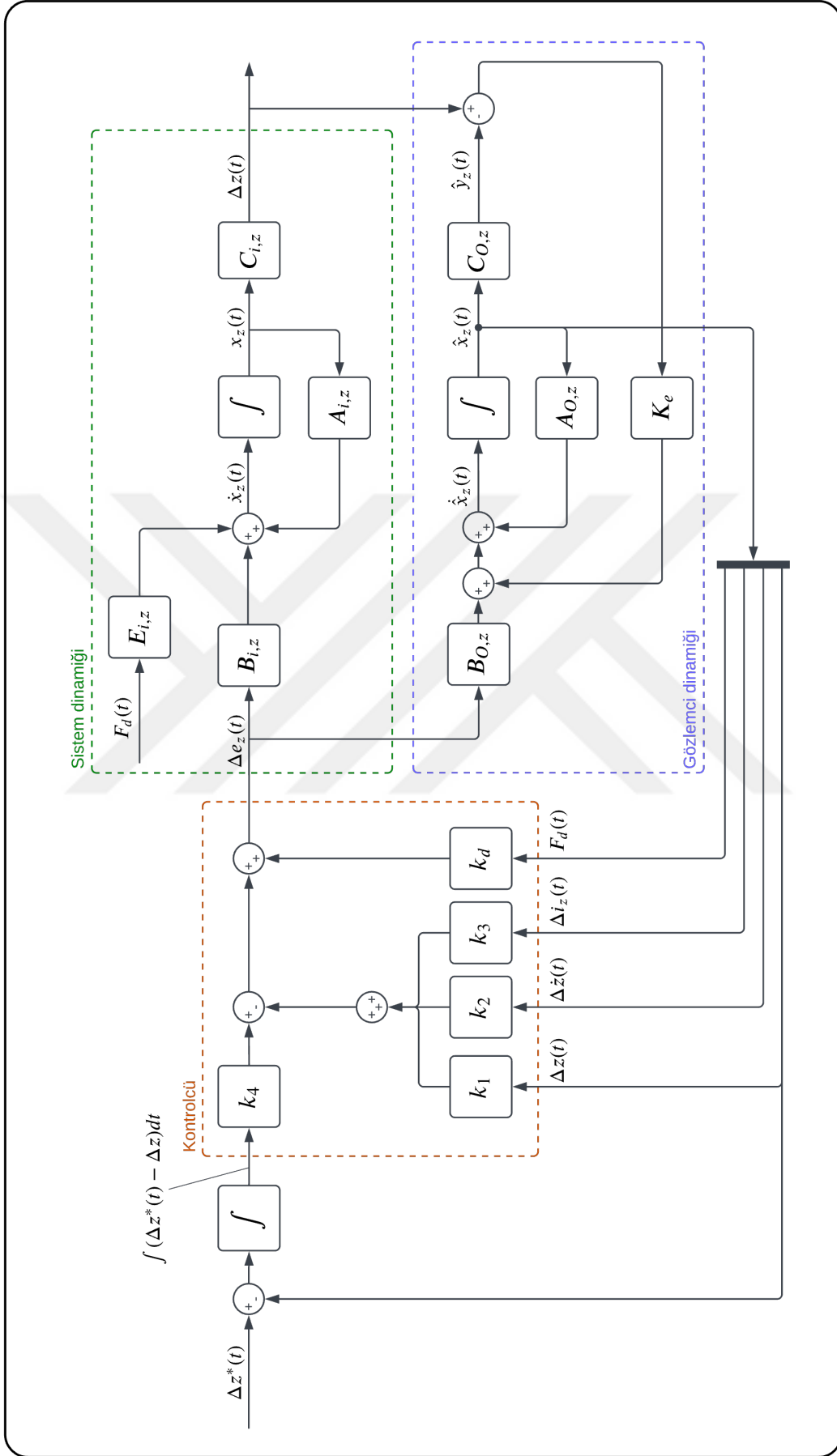
$$\begin{aligned} \frac{K_{i_z,0}}{m} \Delta i_z(t \rightarrow \infty) - \frac{1}{m} F_d(t \rightarrow \infty) &= 0 \\ -\frac{R_z}{L_z} \Delta i_z(t \rightarrow \infty) + \frac{1}{L_z} \Delta e_z(t \rightarrow \infty) &= 0 \end{aligned} \quad (5.17)$$

$$\begin{aligned} F_d(t \rightarrow \infty) &= K_{i_z,0} \Delta i_z(t \rightarrow \infty) \\ \Delta e_z(t \rightarrow \infty) &= R_z \Delta i_z(t \rightarrow \infty) \end{aligned} \quad (5.18)$$

$$\frac{F_d(t \rightarrow \infty)}{\Delta e_z(t \rightarrow \infty)} = \frac{K_{i_z,0}}{R_z} \quad (5.19)$$

Kompanzasyon katsayısı böylelikle $\frac{K_{i_z,0}}{R_z}$ olarak bulunur.

Bu iki başlıkta anlatılan kontrolcü ve gözlemci tasarımları maglev sisteminin hava aralığı kontrolü için birleştirildiğinde Şekil 5.8'teki gibi bir yapı ortaya çıkmaktadır.



Şekil 5.8 Durum geri beslemeli kontrol ve gözlemci tasarımı

5.1.4 İndirgenmiş Dereceli Gözlemci

Başlık 5.1.2’de anlatılan gözlemci, literatürde tam durum gözlemcisi (*full state observer*) olarak bilinmektedir. Tam durum gözlemcileri, daha önce de açıklandığı gibi, bütün durum değişkenlerinin ölçülemediği durumlarda ancak tam durum geri beslemeli kontrol gibi bütün durum değişkenlerine ihtiyaç duyulduğu zaman kullanılır. Ancak bu proje kapsamında da olduğu gibi, bazen durum değişkenlerinden biri veya çoğu gayet hassas bir şekilde ölçülebilmektedir ve bu durumların da gözlemci tarafından tahmin edilmeye çalışması gereksiz, ve hesap gücü israfıdır. Bu sebeple indirgenmiş dereceli gözlemciler kullanılmaktadır. Bu gözlemci tipleri İngilizce literatürde *reduced order-* veya *minimum order observer* olarak yazılmaktadır.

Bu çalışmaya konu olan maglev sisteminde de indirgenmiş dereceli gözlemci kullanmak elverişlidir, zira kullanılan mesafe sensörleri sayesinde gayet hassas bir şekilde Δz durumu ölçülebilmektedir. Diğer durum değişkenleri $\Delta \dot{z}$ ve Δi_z için bu söylenemez ve gözlemci tarafından tahmin edilmesi zorunludur.

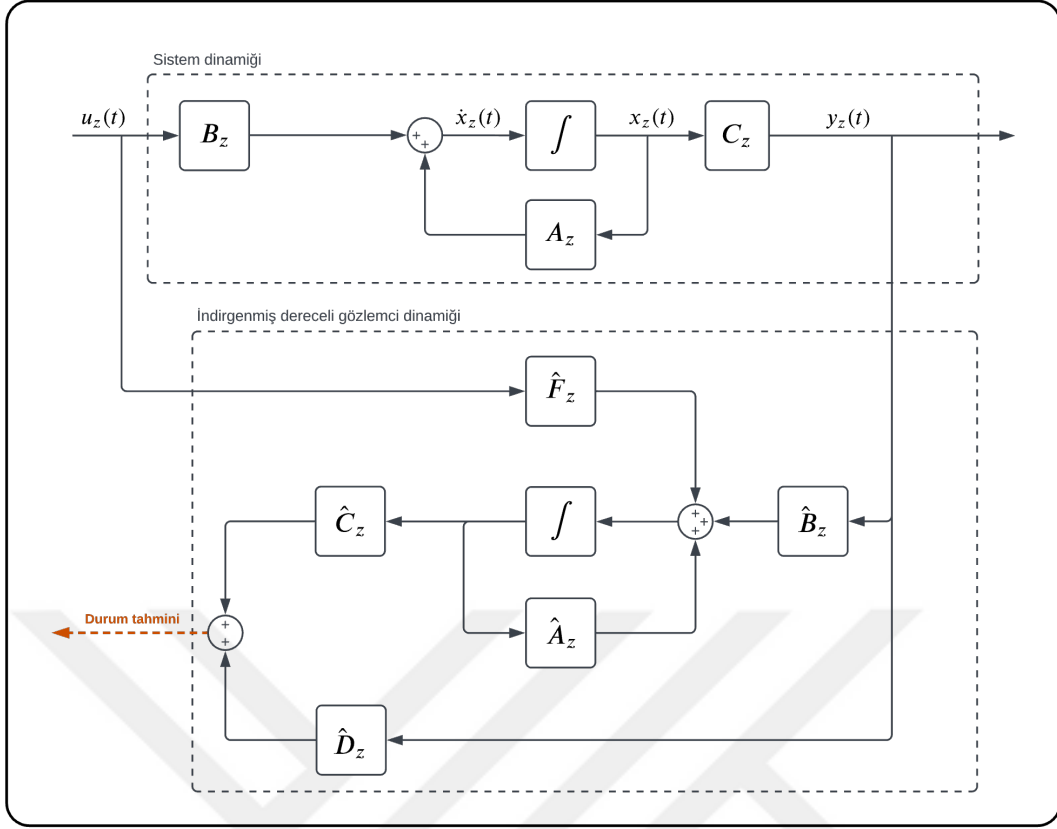
İndirgenmiş dereceli gözlemci yöntemine göre gözlemci için genişletilmiş olan durum uzayı denklemleri (denklem (5.7)) ölçülen x_a ve ölçülmeyen x_b durumlar olarak ayrıştırılır. Bu durum değişkenlerine bağlı olarak durum uzayı denklemlerinin geriye kalanları da ayrıştırılır:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta z(t) \\ \Delta \dot{z}(t) \\ \Delta i_z(t) \\ F_d(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{K_{z,0}}{m} & 0 & \frac{K_{i_z,0}}{m} & \frac{1}{m} \\ 0 & -\frac{K_{z,0}}{K_{i_z,0}} & -\frac{R_z}{L_z} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta z(t) \\ \Delta \dot{z}(t) \\ \Delta i_z(t) \\ F_d(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_z} \\ 0 \end{bmatrix} \Delta e_z(t) \quad (5.20)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{aa} & A_{ab} \\ A_{ba} & A_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_a \\ B_b \end{bmatrix} \Delta e_z(t) \quad (5.21)$$

İndirgenmiş dereceli gözlemci, tanımlanan bu yeni durum değişkenleri ve durum matrisleri üzerinde uygulanan bir takım cebirsel işlemler neticesinde Şekil 5.9’teki gibi tasarlanır:

İndirgenmiş dereceli gözlemcinin şekildeki blokların elde edilmesi için ise ayrıştırılmış sistem matrisleri ile gözlemci kazançları kullanılarak aşağıdaki işlemler yapılır:



Şekil 5.9 İndirgenmiş dereceli gözlemci dinamiği

$$\hat{A}_z = A_{bb} - K_e A_{ab} \quad (5.22)$$

$$\hat{B}_z = \hat{A}_z K_e + A_{ba} - K_e A_{aa} \quad (5.23)$$

$$\hat{C}_z = \begin{bmatrix} 0 \\ I_{n-1} \end{bmatrix} \quad (5.24)$$

$$\hat{D}_z = \begin{bmatrix} 0 \\ K_e \end{bmatrix} \quad (5.25)$$

$$\hat{F}_z = B_b - K_e B_a \quad (5.26)$$

Denklemlerden görüldüğü üzere K_e kazanç matrisi haricindeki matrisler sabittir ve gözlemci durum uzayı denklemlerinden elde edilmektedir. K_e kazanç matrisi ise

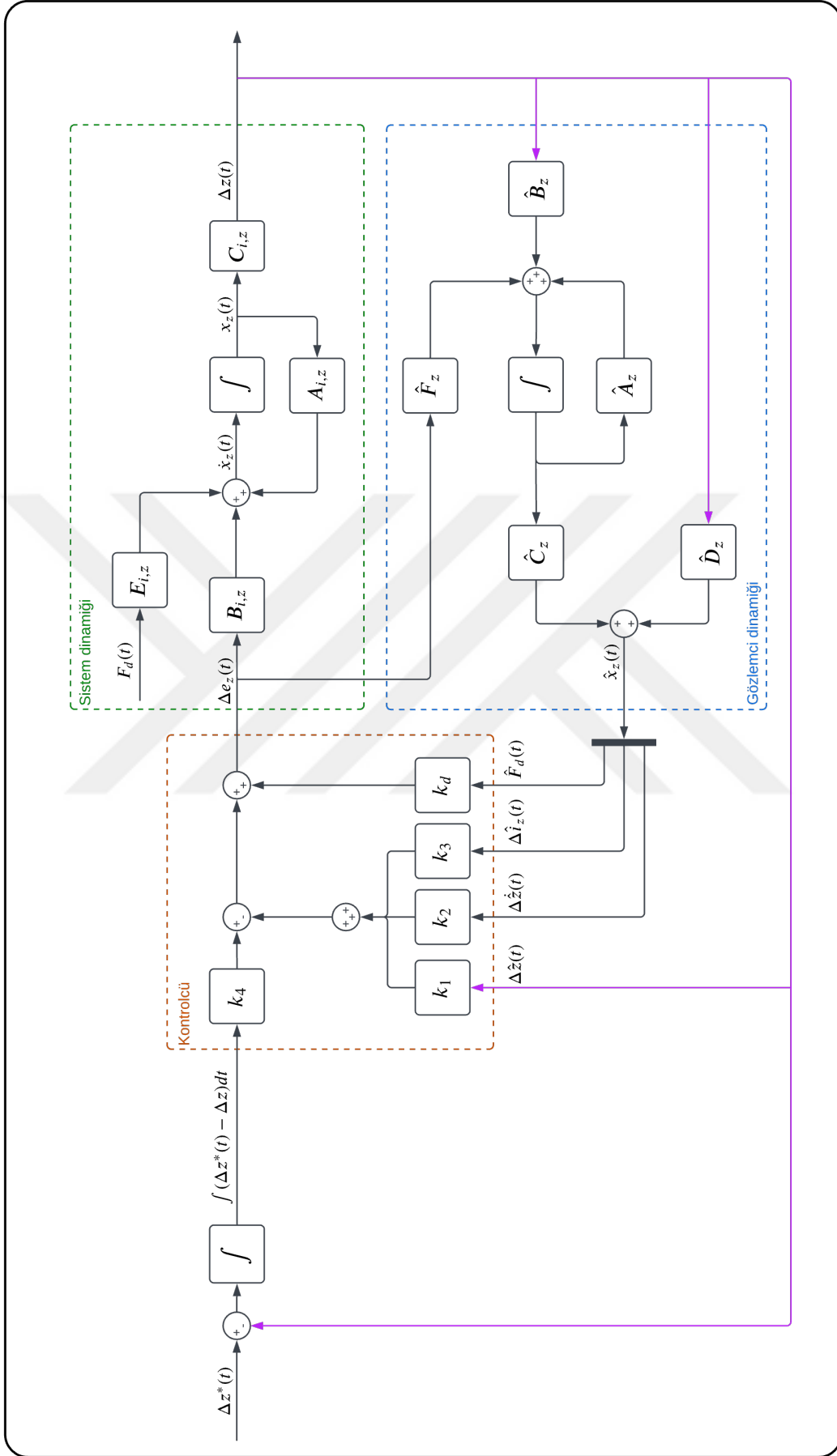
indirgenmiş dereceli gözlemcinin hata dinamiği olan

$$\dot{e} = (A_{bb} - K_e A_{ab}) e \quad (5.27)$$

denklemini temel alınarak kutup atama metodu ile tespit edilmektedir. Kutup atama işleminin yapılabilmesi için indirgenmiş dereceli gözlemcinin gözlemlenebilirlik matrisi olan

$$O = \begin{bmatrix} A_{ab} \\ A_{ab}A_{bb} \\ A_{ab}A_{bb}^2 \end{bmatrix} \quad (5.28)$$

matrisinin rankının $n - 1$ 'e eşit olması şartını sağlamalıdır. n , gözlemcinin durum sayısını temsil eder. Bu şart sağlanmaktadır. Durum geri besleme kontrolü ile birleştirildiğinde Şekil 5.10'daki gibi bir yapı ortaya çıkmaktadır. İndirgenmiş dereceli gözlemcinin dinamiğindeki değişiklikler mor ile işaretlenmiştir. Şekilden de anlaşılacağı gibi, tam durum geri besleme kontrolcüsünün geri besleme kazançlarından k_1 tam durum gözlemcisi kullandığı zamanki gibi gözlemciden değil, direkt x_z 'nin $C_{i,z}$ ile çarpımından, yani ölçülen durum değişkeninden gelen değer ile çarpılmaktadır. Aynı şekilde hava aralığı hatası yine direkt ölçülen hava aralığı üzerinden hesaplanmaktadır.

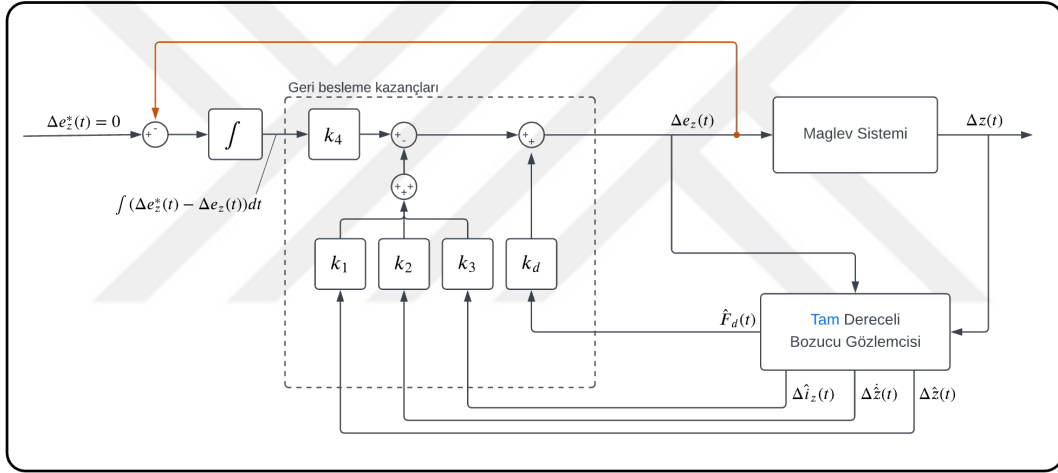


Şekil 5.10 İndirgenmiş dereceli gözlemci ve kontrolcü tasarımı

5.2 Gerilim Uyarımlı Kontrol

5.2.1 Gerilimi Sıfıra Götüren Sıfır Güç Kontrolü

Maglev sistemleri lojistik esneklik, hassasiyet ve enerji tasarrufu ile öne çıkmaktadır. Bazı durumlarda hassasiyetten ödün vererek enerji harcamasını daha da indirmek elverişli olmaktadır. Bu doğrultuda sıfır güç kontrol algoritmaları geliştirilmiştir. Maglev sisteminin kararlı rejimde $(z_0, i_{z,0})$ çalışma noktasında $(\Delta z = 0, \Delta i_z = 0)$ olacağı için ve böylelikle teorik olarak enerji harcamayacağı için sıfır güç kontrolünün amacı, çekilen akımın sıfıra yaklaşması ve bütün kütlenin sadece sürekli mıknatıslar tarafından taşınmasını sağlamasıdır. Sistemin çektiği akım uygulanan gerilim ile doğrudan orantılı olduğundan dolayı gerilim modunda uyarım sinyali olan gerilimin kontrolcü tarafından sıfıra götürülmesi de aynı sonucu verecektir. Böylelikle temel durum değişkenlerini değil, uyarım sinyalini kontrol eden bir kontrolcü yapısı tasarlanmıştır (Şekil 5.11).



Şekil 5.11 Tam dereceli gözlemcili gerilimi sıfıra götüren sıfır güç kontrolcüsü şeması

Ancak durum uzayında durum geri beslemeli kontrol kullanılacağından dolayı, uyarım işareti de durum değişkeni olarak durum uzayı denklemlerine eklenir:

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta z(t) \\ \Delta \dot{z}(t) \\ \Delta i_z(t) \\ \int (0 - \Delta e_z(t)) dt \end{bmatrix}}_{x_{z,e_0}} &= \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{K_{z,0}}{m} & 0 & \frac{K_{i_z,0}}{m} & 0 \\ 0 & -\frac{K_{z,0}}{K_{i_z,0}} & -\frac{R_z}{L_z} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{A_{z,e_0}} \begin{bmatrix} \Delta z(t) \\ \Delta \dot{z}(t) \\ \Delta i_z(t) \\ \int (0 - \Delta e_z(t)) dt \end{bmatrix} + \\
&+ \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_z} \\ -1 \end{bmatrix}}_{B_{z,e_0}} \Delta e_z(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} F_d(t)
\end{aligned} \tag{5.29}$$

Daha önce açıklandığı gibi söz konusu sistemin kalıcı rejim hatasının sıfır olmasını sağlamak için integral ile genişletilmesi gerektiğinden dolayı, durum olarak uyarım sinyalinin integrali eklenmektedir. Geri besleme kazançları k_1 , k_2 , k_3 ve k_4 , durum değişkeni sayısı $n = 4$ 'üncü dereceden Kessler polinomundan γ_n kararlılık katsayıları ile hesaplanan kutupların A_{z,e_0} ve B_{z,e_0} matris çiftinden oluşan sistem dinamiğine atanması ile elde edilir. Bu işlemler aşağıdaki MATLAB kodları ile gerçekleştirilebilir:

```

AZ_e0 = [ 0      1      0      0; ...
          Kz0/M  0      Kiz0/M  0; ...
          0      -Kz0/Kiz0 -R/L  0; ...
          0      0      0      0];

BZ_e0 = [ 0; ...
          0; ...
          1/L;
          -1];

poles = mypoles(AZ_e0, BZ_e0)
[k_1, k_2, k_3, k_4] = place(AZ_e0, BZ_e0, poles)

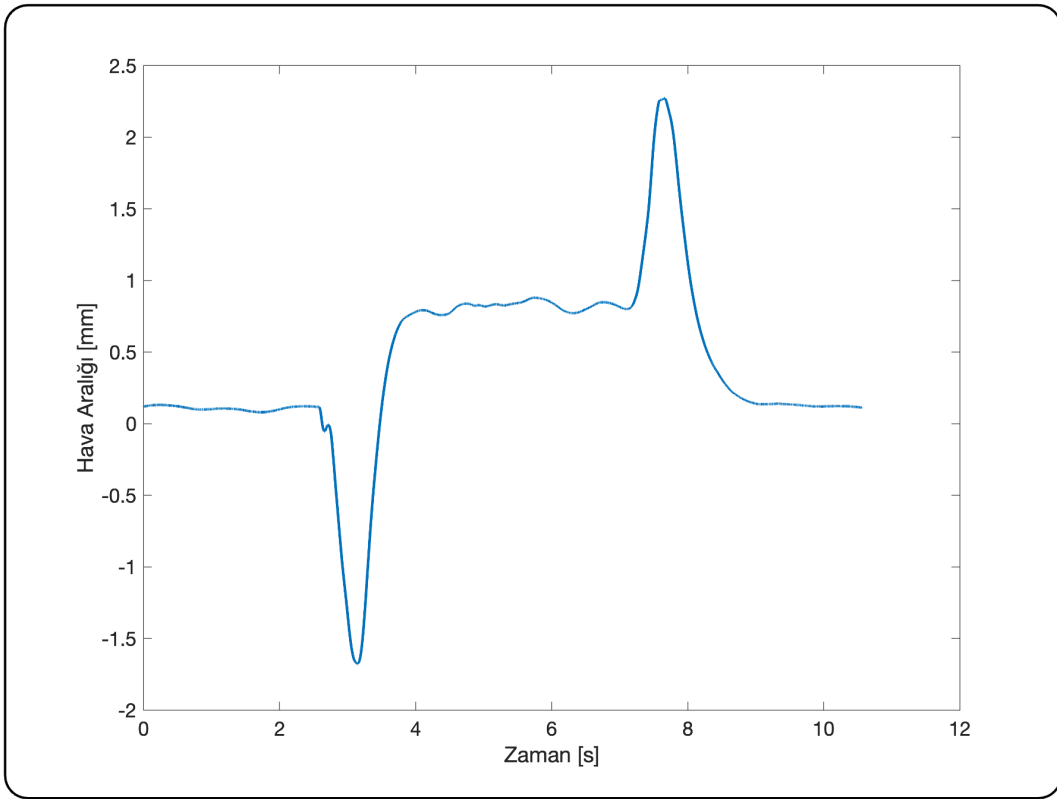
```

Kodun içerisindeki `mypoless()` fonksiyonu söz konusu Kessler polinomundan kutupların hesaplanması için yazılan özel bir fonksiyondur.

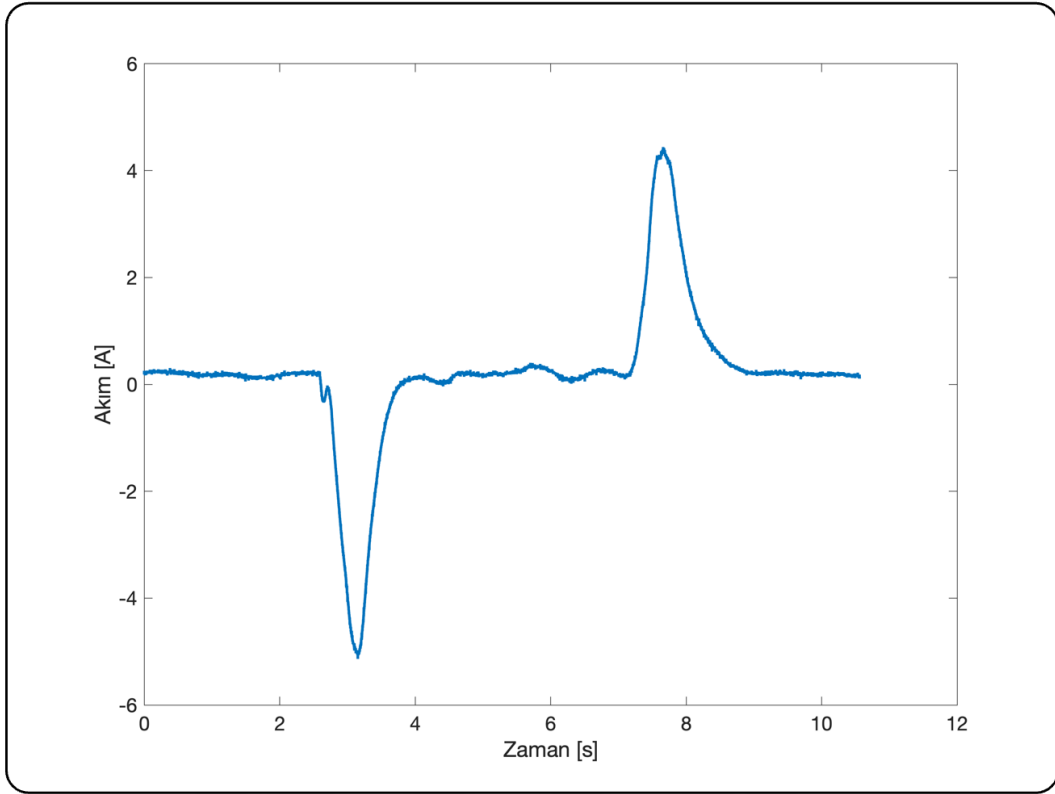
Bozucu kompanzasyonu katsayısı k_d Denklem (5.19)'de gösterildiği gibi $\frac{K_{i_z,0}}{R_z}$ olarak seçilir. Bozucu gözlemcisi olarak denklem (5.7)'teki tam dereceli durum

gözlemci dinamiği kullanılmıştır. Gözlemcinin K_e geri besleme kazancını tespit etmek için 5.1.2 Başlığında anlatılan süreç uygulanır.

Bu kontrolcü ve gözlemci yapısı MATLAB Simulink'te programlandığında ve sisteme uygulandığında Şekil 5.12 ve 5.13'te gösterilen hava aralığı ve akım grafikleri kaydedilmiştir. Grafiklerde ikinci saniyede yük haznesine birim basamak şeklinde konulan ve yedinci saniyede hazneden alınan ağırlığın tepkisi gözükmektedir. Şekillerde görüldüğü gibi, kontrolcü başarılı bir şekilde sistemi kalıcı rejimde sıfır akım çekecek pozisyonda tutmakta ve yük bindirildiğinde sistemi z ekseninde yukarıya doğru taşıyarak demir plakaya daha yakın olacağı için eklenen yükü kalıcı mıknatıslara taşıtmaktadır.

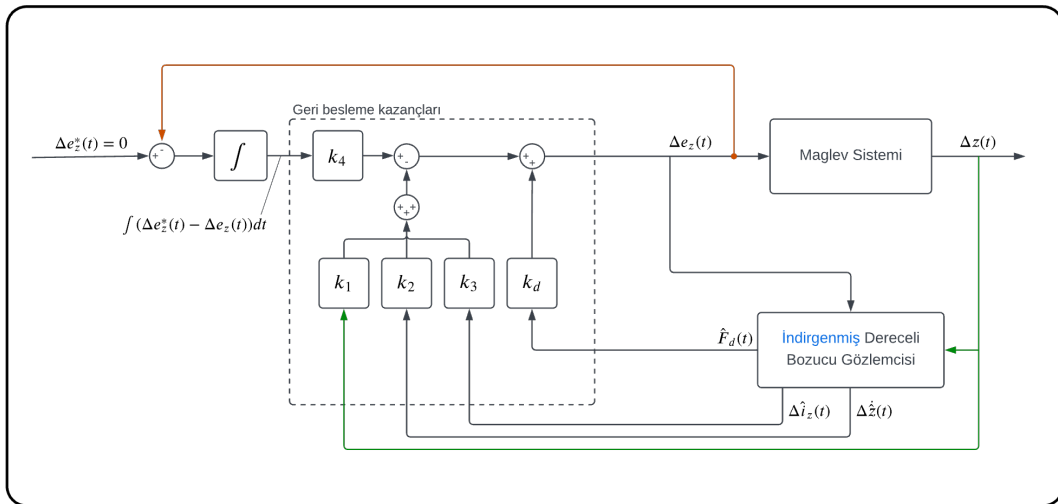


Şekil 5.12 Sıfır güç kontrolünde hava aralığı ölçümü



Şekil 5.13 Sıfır güç kontrolünde akım ölçümü

Tam dereceli durum gözlemcisi yerine indirgenmiş dereceli durum gözlemcisi de kullanılmıştır. Şekil 5.14'te indirgenmiş dereceli gözlemcinin kontrolcü yapısındaki etkisi yeşil ile işaretlenmiştir.

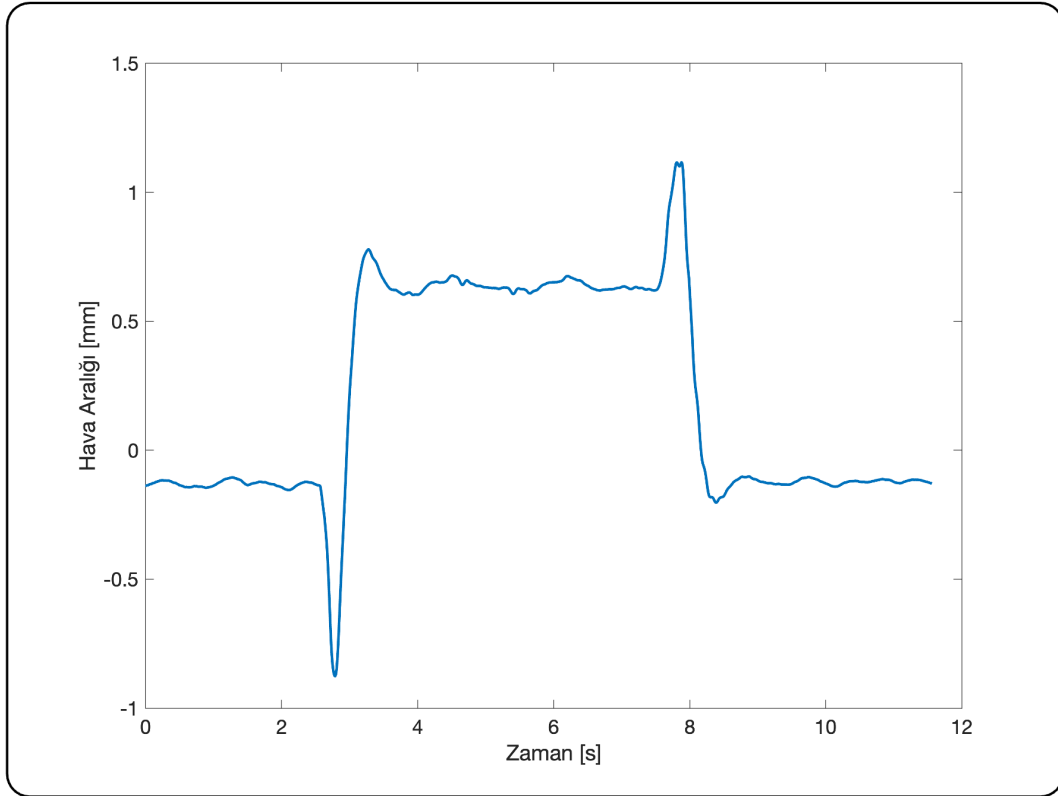


Şekil 5.14 İndirgenmiş dereceli gözlemci ile gerilimi sıfıra götüren sıfır güç kontrolcüsü şeması

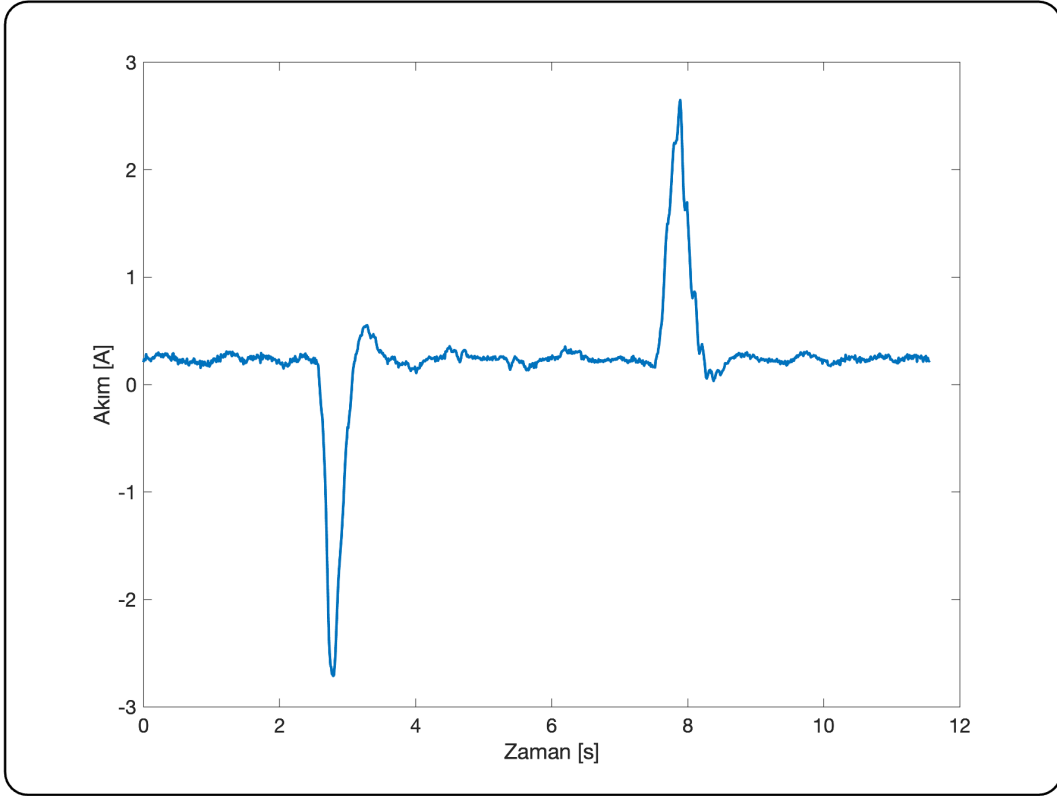
İndirgenmiş dereceli bozucu gözlemcisinin tam dereceli bozucu gözlemcisinden farkı sadece iç yapısı olduğundan dolayı, kontrolcü ile arayüzünde ve kontrolcünün tasarlanmasında bir farklılık gerektirmemektedir. Dolayısıyla tam dereceli

gözlemci için kullanılan geri besleme kazançları aynı şekilde kullanılmıştır. Gözlemcinin yapısı ve kazanç matrislerinin hesabı başlık 5.1.4'te anlatıldığı gibi gerçekleştirilmiştir.

İndirgenmiş dereceli bozucu gözlemcisi ile beraber kontrolcü MATLAB Simulink'te programlanıp sistem üzerinde çalıştırıldığında Şekil 5.15 ve 5.16'te gösterilen hava aralığı ve akım grafikleri elde edilmektedir. Kayıt esnasında yine basamak şeklinde bozucu kuvvet uygulanmıştır. Grafiklerden de anlaşılacağı üzere, kontrolcü başarılı bir şekilde çekilen akımı sıfırda tutmayı başarmıştır. Akım grafiğinde kalıcı rejimde kalıcı hata gibi görünen kayma, sistemin çalıştırılması için gereken akımı göstermektedir. Elektromıknatısların sürücüleri ve sensörler buna dahildir.



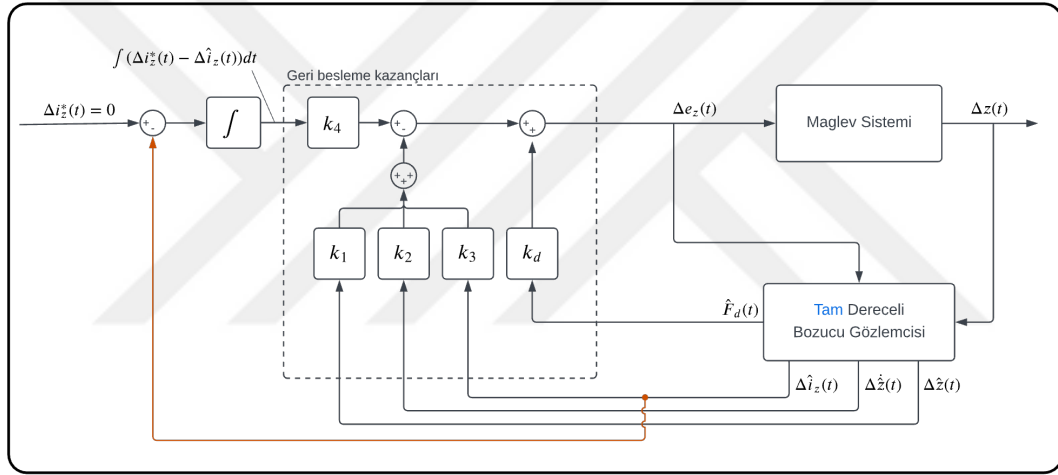
Şekil 5.15 İndirgenmiş dereceli gözlemci ile gerilimi sıfıra götüren sıfır güç kontrolünde hava aralığı ölçümü



Şekil 5.16 İndirgenmiş dereceli gözlemci ile gerilimi sıfıra götüren sıfır güç kontrolünde akım ölçümü

5.2.2 Tahmini Akımı Sıfıra Götüren Sıfır Güç Kontrolü

Maglev sisteminin ana enerji tüketim aktuatörü elektromıknatıstır. Bir önceki başlıkta elektromıknatıslara uygulanan gerilim uyarımı çektiği akım ile doğrudan orantılı olduğu için kontrolcünün uyguladığı gerilimi sıfıra götürmesi stratejisi uygulanmıştır. Ancak kutupların çektiği akım Δi_z halihazırda sistemin bir durum değişkenidir ve gözlemci tarafından tahmin edilmektedir. Dolayısıyla tahmin edilen bu durum değişkeni kontrol edilebilir ve maglev sisteminin yine kararlı rejimde $(z_0, i_{z,0})$ çalışma noktasında ($\Delta z = 0, \Delta i_z = 0$)'a getirilerek sıfır güç tüketimine ulaşılabilir. Bu başlıkta tahmin edilen bu akımın kontrolcü tarafından sıfıra götürülmesi kontrol stratejisi ele alınmaktadır. Bu evvela tam dereceli bozucu gözlemcisi ile ardından indirgenmiş dereceli gözlemci ile gösterilecektir. Şekil 5.17’te önerilen tam dereceli gözlemcili durum geri beslemeli kontrol yapısı gösterilmektedir.



Şekil 5.17 Tam dereceli gözlemci ile tahmini akımı sıfıra götüren sıfır güç kontrolcüsü şeması

Tahmini akımın kontrolcü tarafından sıfıra götürülebilmesi için Δi_z sistemin durum uzayı denklemlerine eklenir:

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta z(t) \\ \Delta \dot{z}(t) \\ \Delta i_z(t) \\ \int (0 - \Delta \hat{i}_z(t)) dt \end{bmatrix}}_{x_{z,i_{est},0}} &= \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{K_{z,0}}{m} & 0 & \frac{K_{iz,0}}{m} & 0 \\ 0 & -\frac{K_{z,0}}{K_{iz,0}} & -\frac{R_z}{L_z} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{A_{z,i_{est},0}} \begin{bmatrix} \Delta z(t) \\ \Delta \dot{z}(t) \\ \Delta i_z(t) \\ \int (0 - \Delta \hat{i}_z(t)) dt \end{bmatrix} + \\
&+ \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_z} \\ -1 \end{bmatrix}}_{B_{z,i_{est},0}} \Delta e_z(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} F_d(t)
\end{aligned} \tag{5.30}$$

Sistemin kalıcı hata karakteristiğinden dolayı tahmini akım integral olarak durum değişkenlerine eklenir.

Geri besleme kazançları k_1 , k_2 , k_3 ve k_4 , durum değişkeni sayısı $n = 4$ 'üncü dereceden Kessler polinomundan γ_n kararlılık katsayıları ile hesaplanan kutupların $A_{z,i_{est},0}$ ve $B_{z,i_{est},0}$ matris çiftinden oluşan sistem dinamiğine atanması ile elde edilir. Bu işlemler aşağıdaki MATLAB kodları ile gerçekleştirilebilir:

```

AZ_iest0 = [ 0      1      0      0; ...
            Kz0/M  0      Kiz0/M  0; ...
            0      -Kz0/Kiz0 -R/L   0; ...
            0      0      0      0];

BZ_iest0 = [ 0; ...
            0; ...
            1/L;
            -1];

poles = mypoles(AZ_iest0, BZ_iest0)
[k_1, k_2, k_3, k_4] = place(AZ_iest0, BZ_iest0, poles)

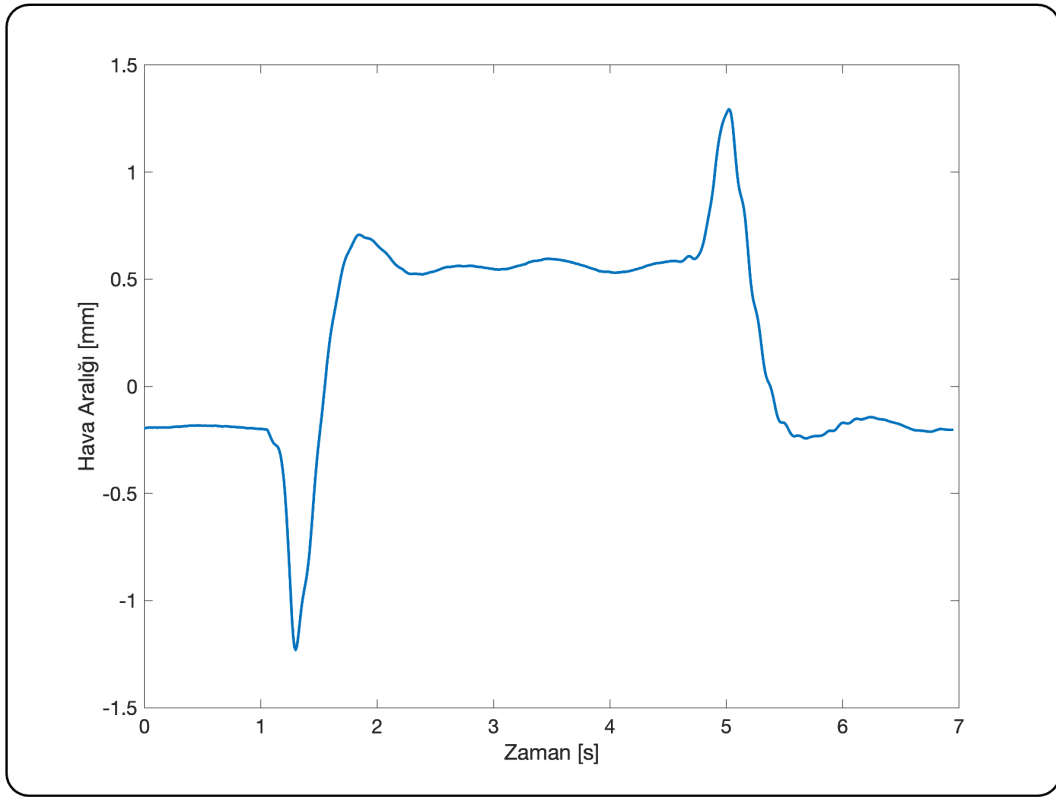
```

Koddaki `mypoless()` fonksiyonu söz konusu Kessler polinomundan kutupların hesaplanması için yazılan özel bir fonksiyondur.

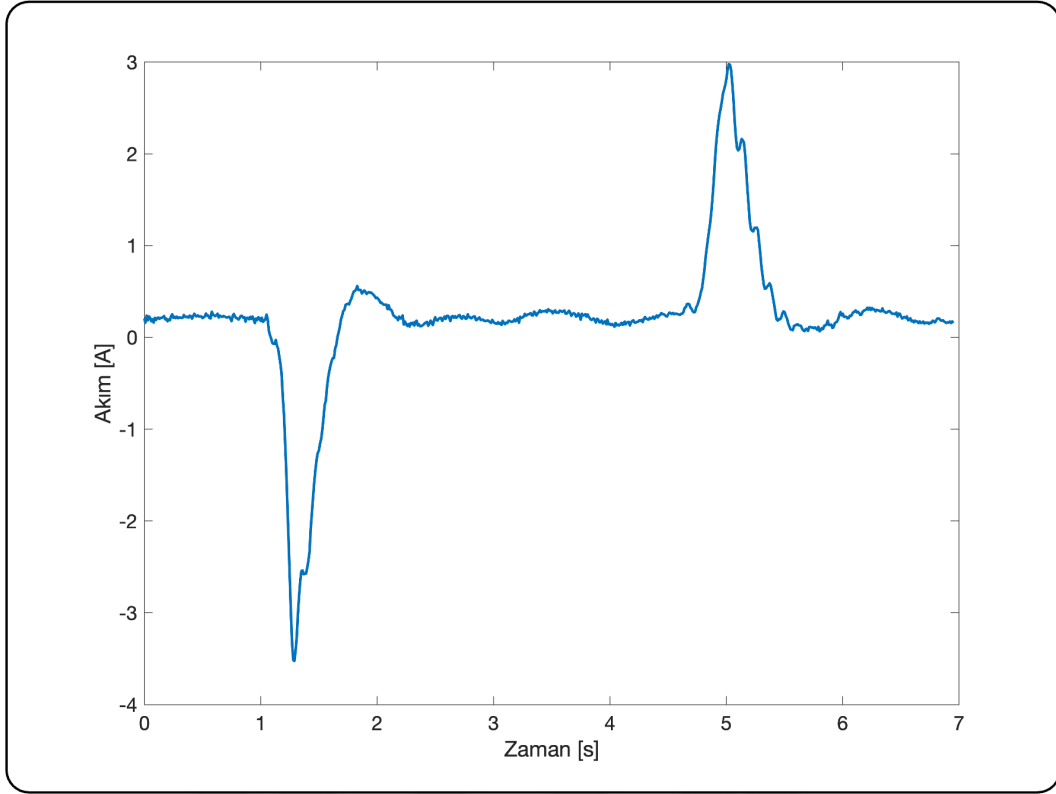
Bozucu kompanzasyonu katsayısı k_d Denklem (5.19)'de gösterildiği gibi $\frac{K_{iz,0}}{R_z}$ olarak seçilir. Bozucu gözlemcisi olarak denklem (5.7)'teki tam dereceli durum

gözlemci dinamiği kullanılmıştır. Gözlemcinin K_e geri besleme kazancını tespit etmek için 5.1.2 Başlığında anlatılan süreç uygulanır.

Bu kontrolcü ve gözlemci yapısı, MATLAB Simulink üzerinde programlandığında ve sisteme uygulandığında elde edilen sonuçlar Şekil 5.18 ve 5.19'te gösterilen hava aralığı ve akım grafikleri şeklinde kaydedilmiştir. Grafikler, 2. saniyede birim basamak şeklinde yük bindirildiğinde ve 7. saniyede yük alındığında sistem tepkisini göstermektedir. Görsellerde görüldüğü gibi, kontrolcü başarılı bir şekilde sistemi kararlı rejimde sıfır akım çekme konumunda tutarak yükün sisteme etkisini minimize etmekte ve yük bindirildiğinde ise mıknatısları demir plakaya yaklaştırarak ek yükü mıknatıslara taşıtmaktadır.

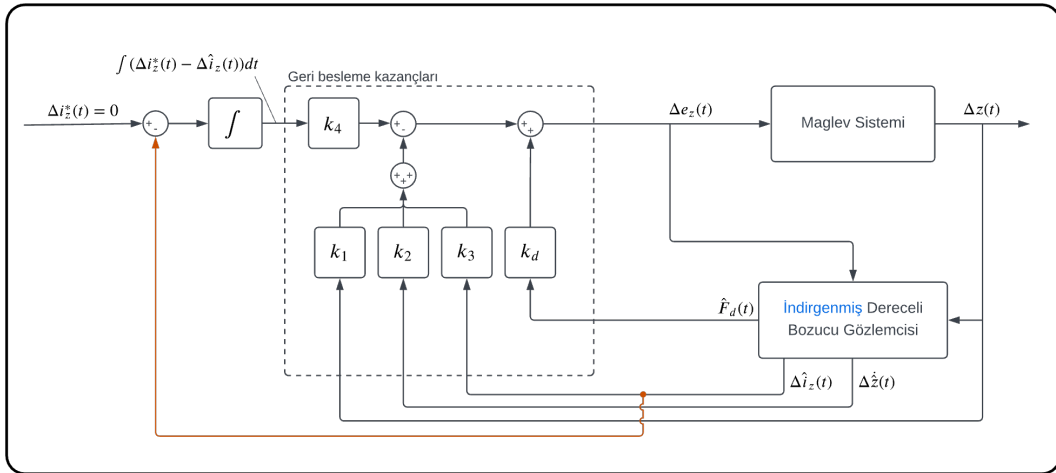


Şekil 5.18 Tam dereceli gözlemci ile tahmini akımı sıfıra götüren sıfır güç kontrolünde hava aralığı ölçümü



Şekil 5.19 Tam dereceli gözlemci ile tahmini akımı sıfıra götüren sıfır güç kontrolünde akım ölçümü

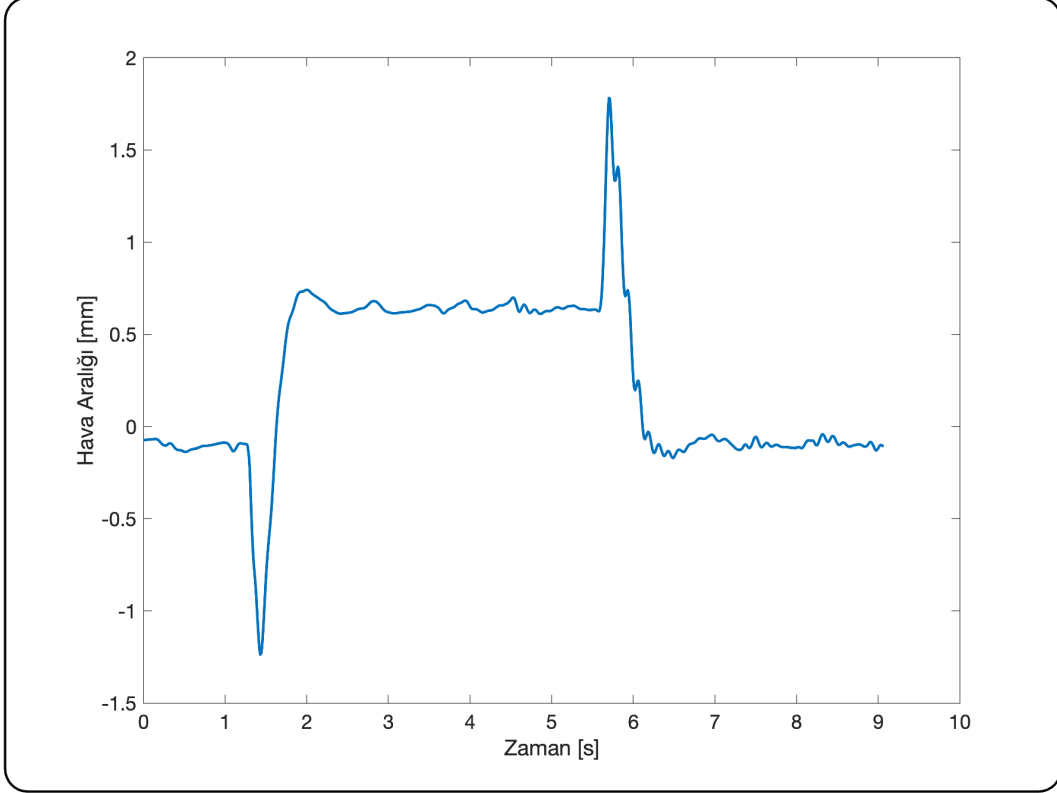
Tahmini akımı sıfıra götüren kontrol stratejisi aynı şekilde indirgenmiş dereceli bozucu gözlemcisi ile de yapılabilir. Bunun için önerilen kontrolcü-gözlemci yapısı Şekil 5.20’te gösterilmektedir.



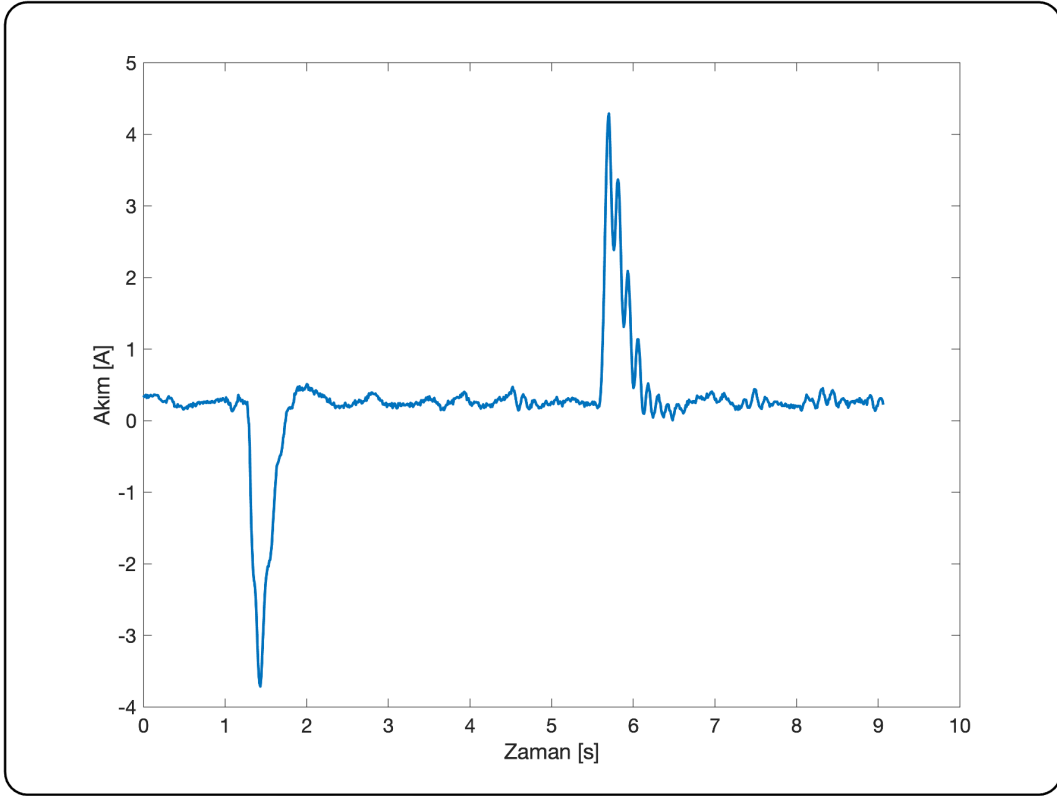
Şekil 5.20 İndirgenmiş dereceli gözlemci ile tahmini akımı sıfıra götüren sıfır güç kontrolcüsü şeması

Bu kontrolcü konfigürasyonunda da sistem matrisleri aynı olduğundan dolayı durum geri besleme kontrolcüsünün geri besleme kazançları k_1 , k_2 , k_3 ve k_4 ve bozucu kuvvet kompanzasyonu katsayısı k_d aynı seçilmektedir. İndirgenmiş

dereceli bozucu gözlemcinin matrisleri yine 5.1.4 Başlıkta anlatıldığı gibi elde edilmektedir. Kontrolcü ve gözlemci MATLAB Simulink'te programlanıp sistem üzerinde çalıştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar hava aralığı ve akım grafikleri olarak Şekil 5.21 ve 5.22'te gösterilmektedir.



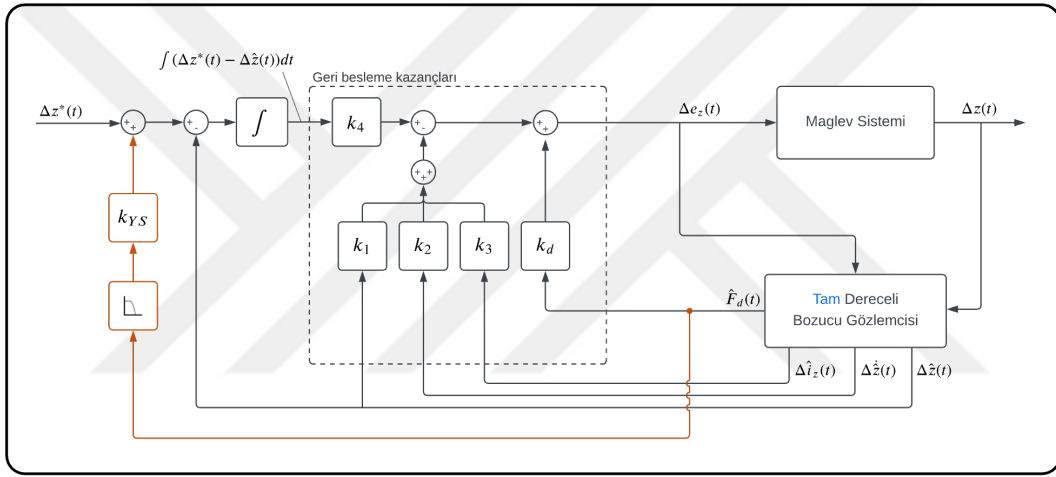
Şekil 5.21 İndirgenmiş dereceli gözlemci ile tahmini akımı sıfıra götüren sıfır güç kontrolünde hava aralığı ölçümü



Şekil 5.22 İndirgenmiş dereceli gözlemci ile tahmini akımı sıfıra götüren sıfır güç kontrolünde akım ölçümü

5.2.3 Yarı Sıfır Güç Kontrolü

Yarı sıfır güç kontrolü periyodik bozucu kuvvetlere karşı etkili bir kontrolcüdür. Bu kontrol stratejisinin temelinde hava aralığı kontrolü yatmaktadır. Nitekim referans işareti de hava aralığı referansıdır. Normal hava aralığı kontrolünden farkı ise referans hava aralığının sıfır akım çekeceği konumun hesaplanarak verilmesidir. Kontrolcünün genel yapısı Şekil 5.23'te gösterilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere, durum geri beslemeli hava aralığı kontrolü ile arasındaki tek fark, bozucu gözlemcisinin tahmin ettiği bozucu kuvvetin geri beslenmesidir. Tahmin edilen bozucu kuvvet bir alçak geçiren filtresinden geçirilir ve k_{YS} katsayısı ile çarpılarak referans sinyali ile toplanır. Böylelikle tahmin edilen bozucu kuvvetin içerisinde sadece frekansı düşük olan yani periyodik olarak anlamlı bir etkisi olan bozucu kuvvetler kontrol işaretine etkisi olması sağlanmaktadır.



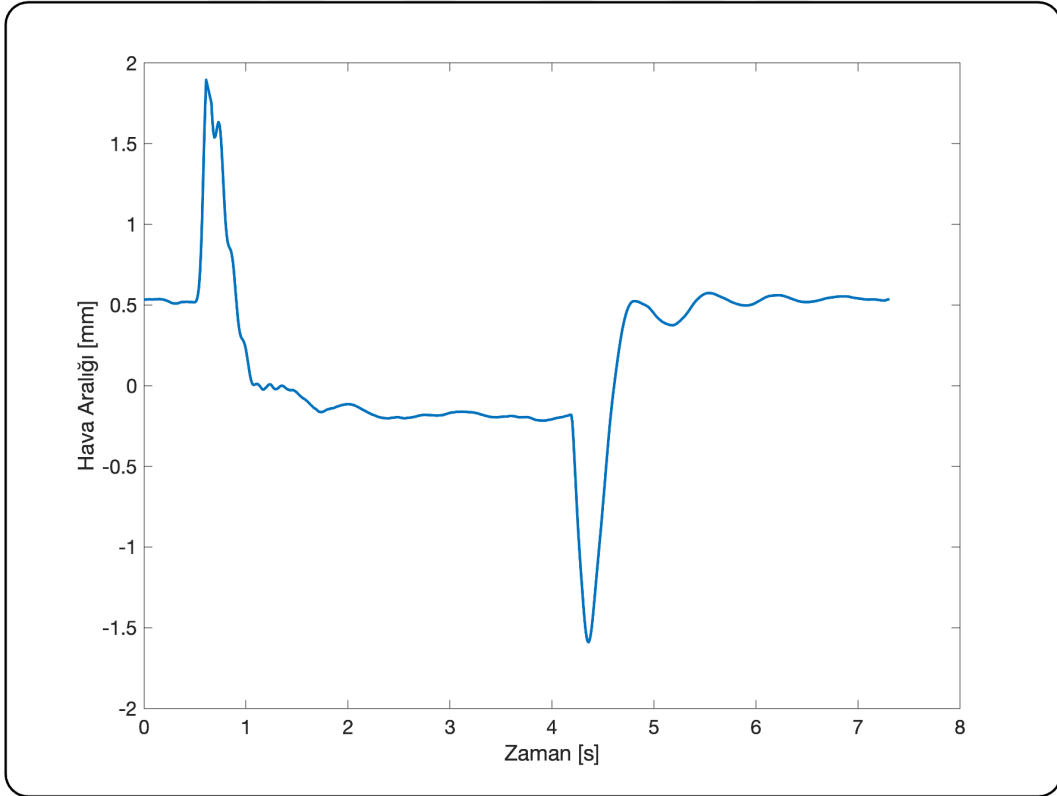
Şekil 5.23 Tam dereceli gözlemci ile yarı sıfır güç kontrolcüsü şeması

Bu nedenle, hava aralığı denetleyicisi, tahmin edilen bozucu girişe bağlı olarak hava aralığını değiştirerek sıfır güç noktasına ulaşır. Bu noktada, alçak geçiren filtre tasarımı büyük önem taşır. Filtrenin kesim frekansı sıfır olarak ayarlanırsa, denetleyici hava aralığı denetleyici özelliğine sahip olur. Öte yandan, kesim frekansı yeterince büyük seçilirse, sıfır güç denetleyicisi formuna ulaşılır. Kesim frekansının doğrudan kararlılığa etkisi bulunmamaktadır. Deneysel çalışmanın sonucunda, kesim frekansı 0.35 Hz olarak belirlenmiştir.

Yarı sıfır güç kontrolü için gerekli geri besleme kazançları hava aralığı kontrolü için kullanılan durum uzayı denkleminde elde edilir. Bu durum uzayı denklemi aşağıdaki gibidir:

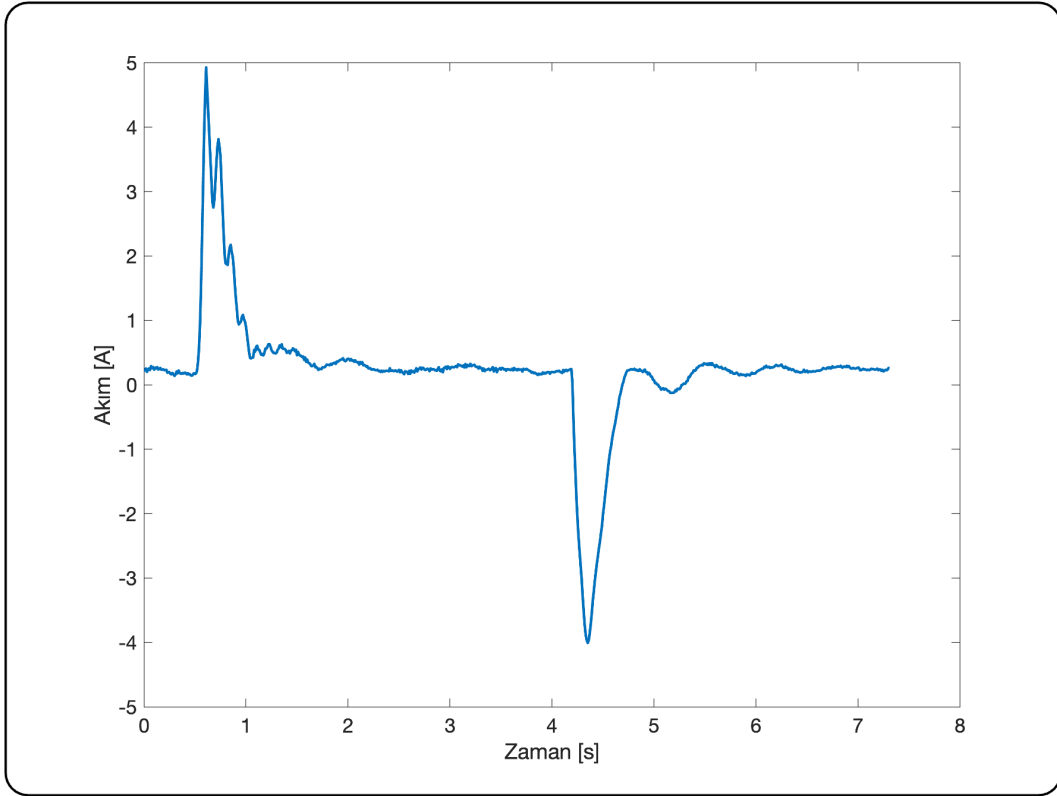
$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta z(t) \\ \Delta \dot{z}(t) \\ \Delta i_z(t) \\ \Delta \int (0 - \Delta z^*(t)) dt \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{K_{z,0}}{m} & 0 & \frac{K_{i_z,0}}{m} & 0 \\ 0 & -\frac{K_{z,0}}{K_{i_z,0}} & -\frac{R_z}{L_z} & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta z(t) \\ \Delta \dot{z}(t) \\ \Delta i_z(t) \\ \Delta \int z(t) dt \end{bmatrix} + \\
&+ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_z} \\ 0 \end{bmatrix} \Delta e_z(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{m} \\ 0 \end{bmatrix} F_d(t)
\end{aligned} \tag{5.31}$$

Durum geri besleme kontrolcüsünün geri besleme kazançları daha önceki başlıklarda anlatıldığı için burada tekrar edilmeyecektir. Kontrol algoritması bu şekilde MATLAB Simulink'te programlanıp sistem üzerinde çalıştırıldığında Şekil 5.24 ve 5.25'teki hava aralığı ve akım grafikleri elde edilmektedir.



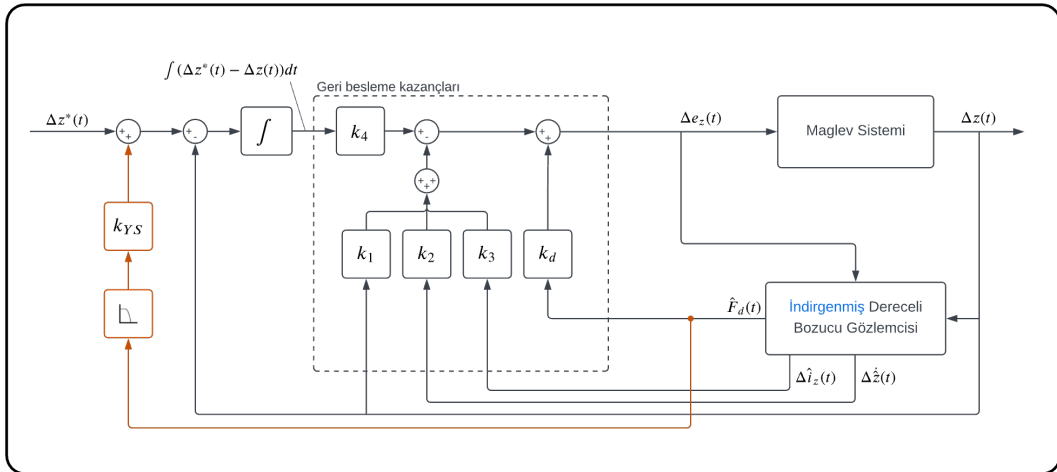
Şekil 5.24 Tam dereceli gözlemci ile yarı sıfır güç kontrolünde hava aralığı ölçümü

Şekillerden de anlaşılacağı gibi, yarı sıfır güç kontrolcüsü başarılı bir şekilde çekilen akımı minimize etmekte ve bozucu kuvvetlere karşı etkin kontrol sağlamaktadır. Tam dereceli gözlemci yerine indirgenmiş dereceli gözlemci de



Şekil 5.25 Tam dereceli gözlemci ile yarı sıfır güç kontrolünde akım ölçümü

kullanılabilir. İndirgenmiş dereceli gözlemci ile önerilen kontrol şeması Şekil 5.26'te gösterilmiştir.

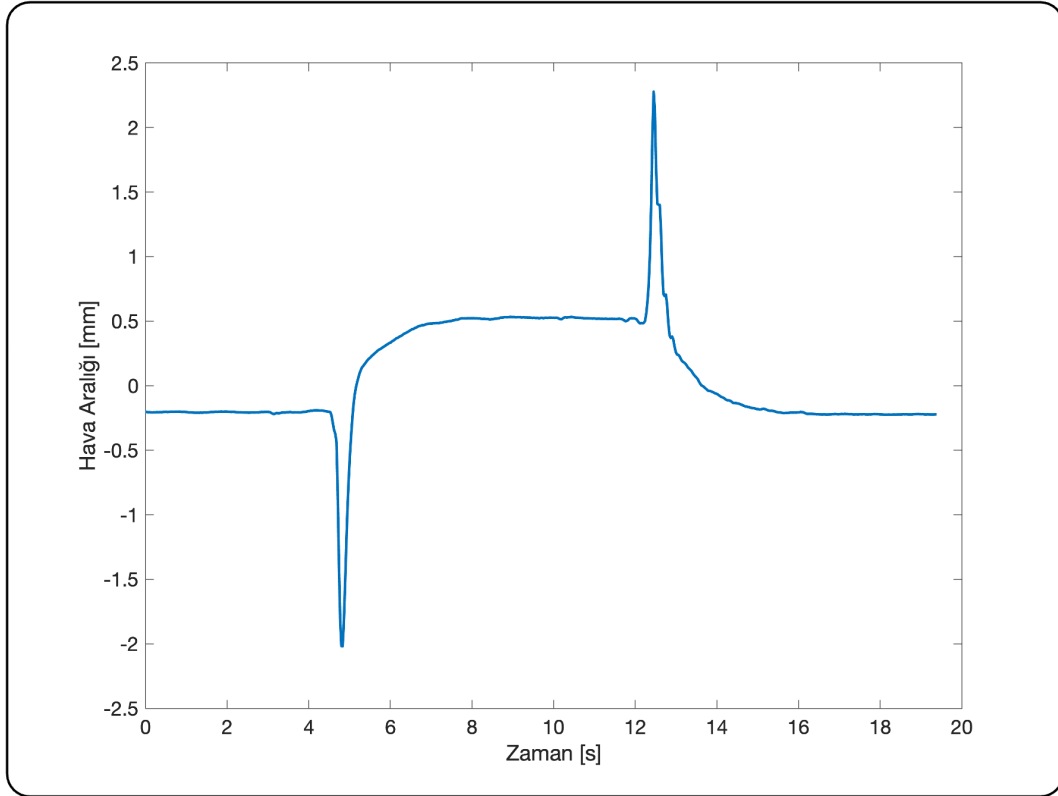


Şekil 5.26 İndirgenmiş dereceli gözlemci ile yarı sıfır güç kontrolcüsü şeması

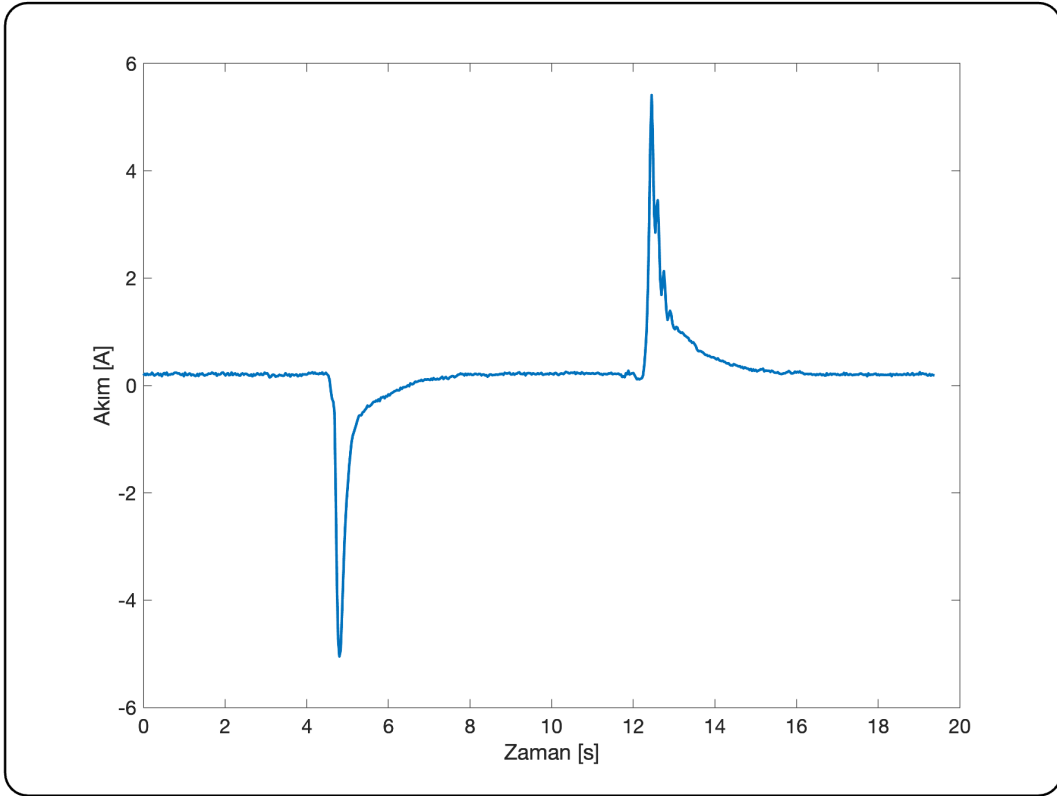
Önceki kontrol yöntemlerinde olduğu gibi yarı sıfır kontrolde de gözlemcinin indirgenmiş dereceli bir gözlemcinin olması, kontrolcüyü etkilememektedir. Dolayısıyla tam durum gözlemcisi için önerilen kontrol stratejisi aynı şekilde indirgenmiş dereceli gözlemcisi için de geçerlidir.

Önerilen indirgenmiş dereceli bozucu gözlemcili yarı sıfır güç kontrolcüsü

MATLAB Simulink'te programlandığında ve sistem üzerinde uygulandığında Şekil 5.27 ve 5.28'te gösterilen sonuçlar elde edilmektedir. Görüldüğü gibi sistem başarılı bir şekilde kalıcı rejimde sıfır güç kontrolü yapıyor ve bozucu etkisine karşı kalıcı hata olmaksızın konum kontrolünü gerçekleştiriyor. Sistem cevabı beklendiği gibi sıfır güç ve hava aralığı kontroldekinden daha yavaş tepki vermektedir.



Şekil 5.27 İndirgenmiş dereceli gözlemci ile yarı sıfır güç kontrolünde hava aralığı ölçümü



Şekil 5.28 İndirgenmiş dereceli gözlemci ile yarı sıfır güç kontrolünde akım ölçümü

5.2.4 Kayan Kipli Sıfır Güç Kontrolü

Kayan kipli kontrol (*sliding mode control*), belirsizlik içeren dinamik sistemlerin gürbüz kontrolünü sağlayan doğrusal olmayan bir kontrol tekniğidir. Bu kontrol yöntemi, değişken yapılı doğrusal olmayan sistemlerde etkin bir şekilde kullanılır. Kontrolör, bir kayma yüzeyi üzerinde kayma hareketi gerçekleştirir ve sistemi bu yüzeye iterek belirlenen hedef duruma ulaşmasını sağlar. Bu sayede, sistemin belirsizliklere ve dış etkilere karşı dirençli olması ve istenilen kontrol performansını sağlaması hedeflenir.

Sistemin durum uzayındaki denklemlerinden $\Delta\ddot{z}(t)$ bileşeni çıkarıldığında aşağıdaki denklem elde edilmektedir.

$$\Delta\ddot{z}(t) = \left(\frac{K_{z,0}}{m}\right) \Delta z + \left(\frac{K_{i_z,0}}{m}\right) \Delta i_z + \left(\frac{1}{m}\right) F_d(t) \quad (5.32)$$

Bu denklemdeki sabit katsayılar şu şekilde tanımlanır:

$$\begin{aligned} a_z &= \left(\frac{K_{z,0}}{m}\right) \\ b_z &= \left(\frac{K_{i_z,0}}{m}\right) \\ d_z &= \left(\frac{1}{m}\right) F_d \end{aligned} \quad (5.33)$$

a_z, b_z , katsayıları sistem dinamiğinin parametreleridir. Bu durumda $\Delta\ddot{z}(t)$ denklemi aşağıdaki hali alır:

$$\Delta\ddot{z}(t) = a_z \Delta z + b_z \Delta i_z + d_z \quad (5.34)$$

Sistem dinamiğinin parametreleri ölçülen değerlerdir ve hata kaynağı olabilir. Dolayısıyla her bir parametrenin nominal (alt indisi n) değeri ve belirsizliği (Δ ile işaretlenmiş) vardır:

$$\begin{aligned} a_z &= a_{z,n} + \Delta a_z \\ b_z &= b_{z,n} + \Delta b_z \end{aligned} \quad (5.35)$$

Yeni tanımlanan bu sistem parametreler dinamik denkleme yerleştirildiğinde aşağıdaki yapı elde edilir:

$$\Delta\ddot{z}(t) = (a_{z,n} + \Delta a_z) \Delta z + (b_{z,n} + \Delta b_z) \Delta i_z + d_z \quad (5.36)$$

Sistemdeki bütün belirsizlikler bozucu etken d_z ile beraber τ değişkeninde toplanırsa

$$\Delta\ddot{z}(t) = a_{z,n}\Delta z + b_{z,n}\Delta i_z - \tau \quad (5.37)$$

denklemini elde edilir. Toplam belirsizlik τ tam olarak bilinmese de belli bir eşik değerini aşmayacağı kabul edilir:

$$|\tau| \leq \tau_{max} \quad (5.38)$$

Kayan kipli kontrol kapsamında bir kayma fonksiyonu σ tanımlanır. Kayan kipli kontrolün amacı parametrik belirsizlik ve bozucu etken olsa da referans ile sistem çıkışı arasındaki fark olarak da tanımlanabilir. Sistemin referans izleme hatası

$$\tilde{z} = z^* - z \quad (5.39)$$

olarak tanımlanır. z^* referans işaretini temsil etmektedir. Referans değerinin 0 olduğu denge noktası kabul edilirse hata dinamiği şu şekilde tanımlanır:

$$\begin{aligned} \tilde{x}_1 &= \tilde{z} \\ \tilde{x}_2 &= \dot{\tilde{z}} \end{aligned} \quad (5.40)$$

Bu durumda

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}\tilde{x}_1 &= \tilde{x}_2 \\ \frac{d}{dt}\tilde{x}_2 &= a_{zn}\Delta z + b_{zn}\Delta i_z - \tau \end{aligned} \quad (5.41)$$

elde edilir. Toplam belirsizlik τ 'nun kontrol kanalından etki ettiği kabulü ile

$$\tau = b_{zn}\delta \quad (5.42)$$

tanımlanır.

Kayan kipli kontrolcünün tasarlanması için evvela kayma fonksiyonu belirlenmelidir. Bunun için farklı yöntemler vardır. Literatürde farklı kayma fonksiyonları önerilmektedir. Burada kullanılacak olan kayma fonksiyonu PD kontrolcüsü benzeri bir fonksiyondur. Hata dinamiği optimize edilen durum değişkeni olarak temel alınarak şu kayma fonksiyon tanımlanır:

$$\sigma = \lambda_c \tilde{x}_1 + \tilde{x}_2; \quad \lambda_c = const.; \quad \lambda_c > 0 \quad (5.43)$$

Kayma fonksiyonu belirlendikten sonra durum değişkenlerini kayma fonksiyonu üzerinde yönlendirmeyi yapacak olan kontrol işaretinin belirlenmesi gerekmektedir. Önerilen kontrol işareti şu şekildedir:

$$e_{z,SMC} = e_l + e_{nl} \quad (5.44)$$

Burada e_n lineer kontrolcü ve e_{nl} doğrusal olmayan kontrolcüdür. Bunlar aşağıdaki şekliyle tanımlanır:

$$e_l = k_1 z + k_2 \dot{z} + k_3 \int_0^t \tilde{x}_1 d\tau \quad (5.45)$$

$$e_{nl} = k_4 \sigma + \rho_c \operatorname{sgn}(\sigma)$$

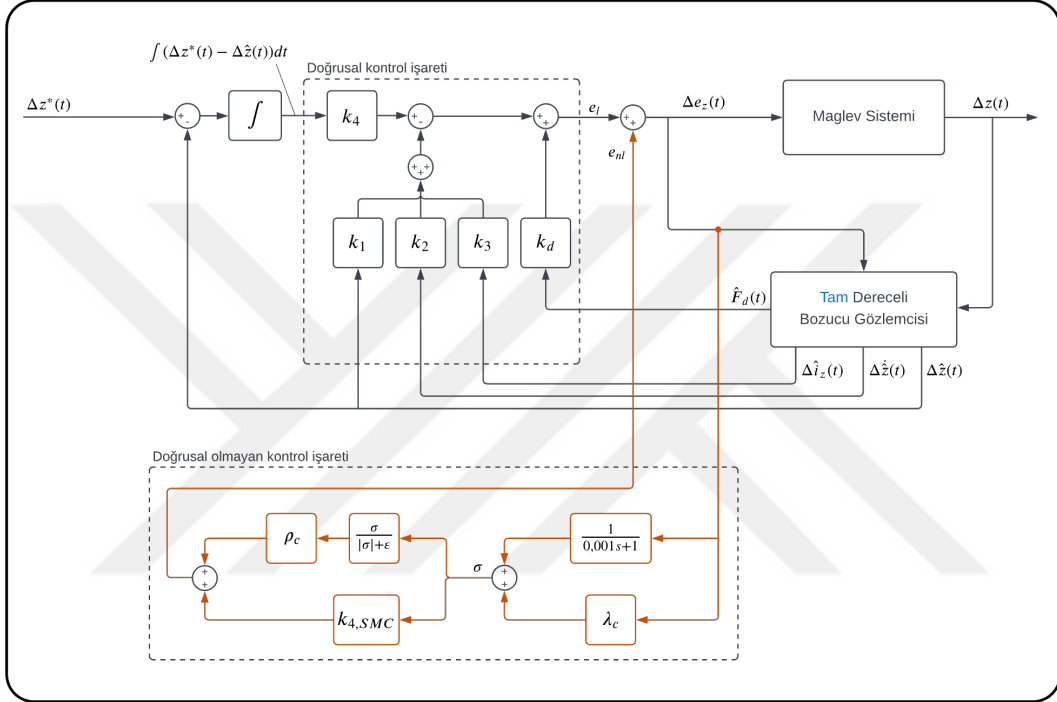
Denklemlerde kullanılan k_1 , k_2 , k_3 , k_4 ve ρ pozitif kontrol kazançlarını ifade etmektedir. Kontrol işaretinin bu şekilde seçilmesi, doğrusal bileşenin referans takibi ve kalıcı hata kompanzasyonu sağlaması ve doğrusal olmayan bileşenin de belirsizlik ve dış bozucu etkilere karşı gürbüzlük katması içindir. Doğrusal olmayan kontrol işareti bileşenindeki $\operatorname{sgn}(\sigma)$ fonksiyonu pratikte çatırtıya sebep olduğundan dolayı benzer bir karakteristiği olan ancak daha yumuşak geçişler sağlayan

$$\frac{\sigma}{|\sigma| + \varepsilon} \quad (5.46)$$

fonksiyonu kullanılmaktadır. ε küçük pozitif bir katsayı olup sınır katman kalınlığını kontrol etmektedir. Böylelikle kontrol işaretinin doğrusal olmayan bileşeni şu hale getirilir:

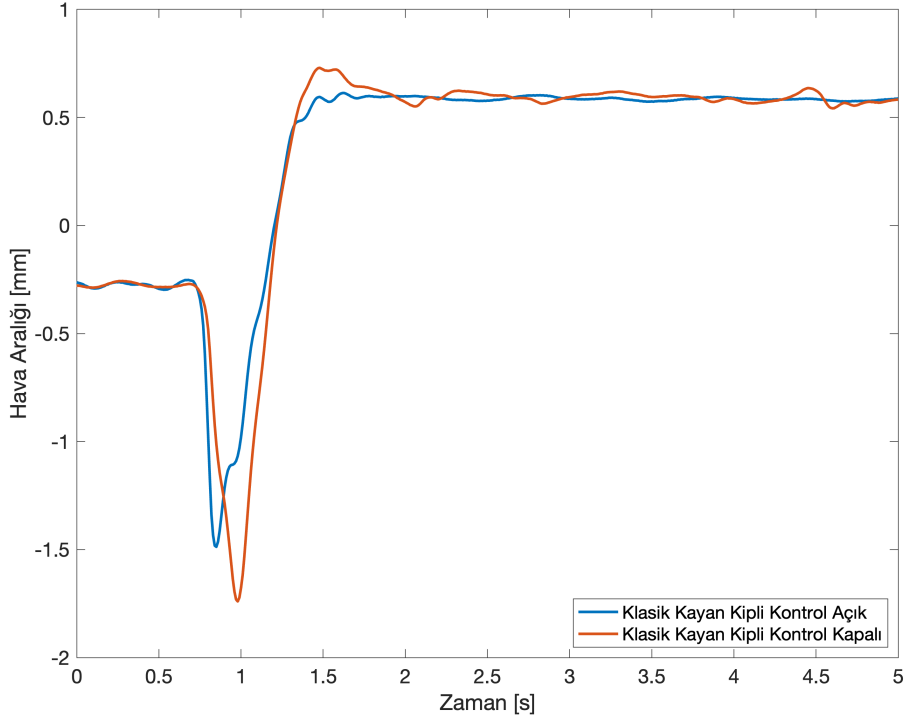
$$e_{nl} = k_4 \sigma + \rho_c \frac{\sigma}{|\sigma| + \varepsilon} \quad (5.47)$$

Şekil 5.29'te kayan kipli kontrol stratejisinin genel yapısı gösterilmektedir.

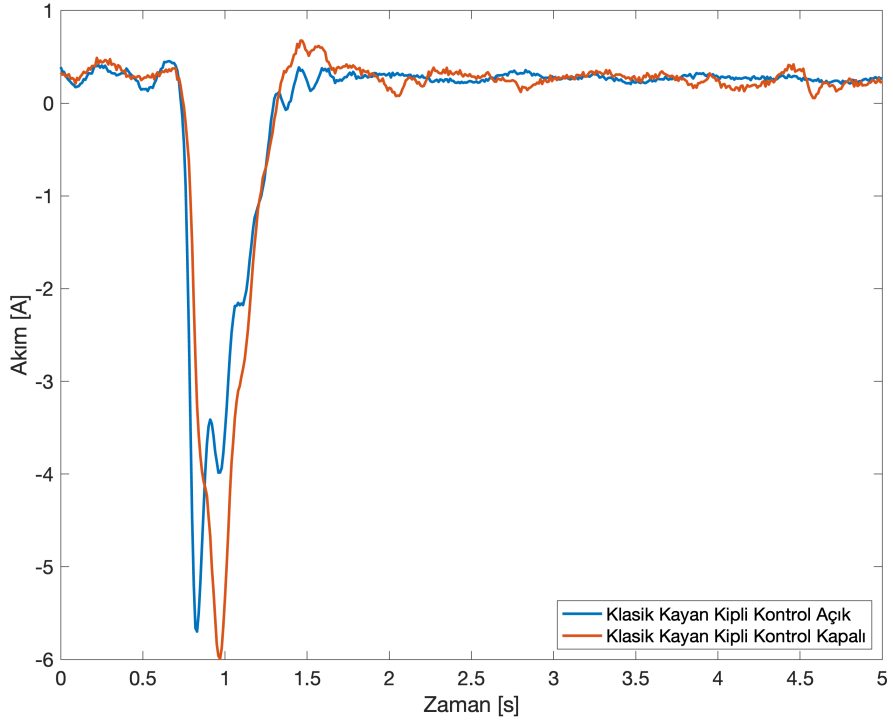


Şekil 5.29 Tam dereceli gözlemci ile kayan kipli sıfır güç kontrolcüsü şeması

Kayan kipli kontrolcü bu şekilde MATLAB Simulink ile programlandığında ve sisteme uygulandığında Şekil 5.30 ve 5.31'teki gösterilen grafikler elde edilmektedir.



Şekil 5.30 Tam dereceli gözlemci ile kayan kipli sıfır güç kontrolünde hava aralığı ölçümü



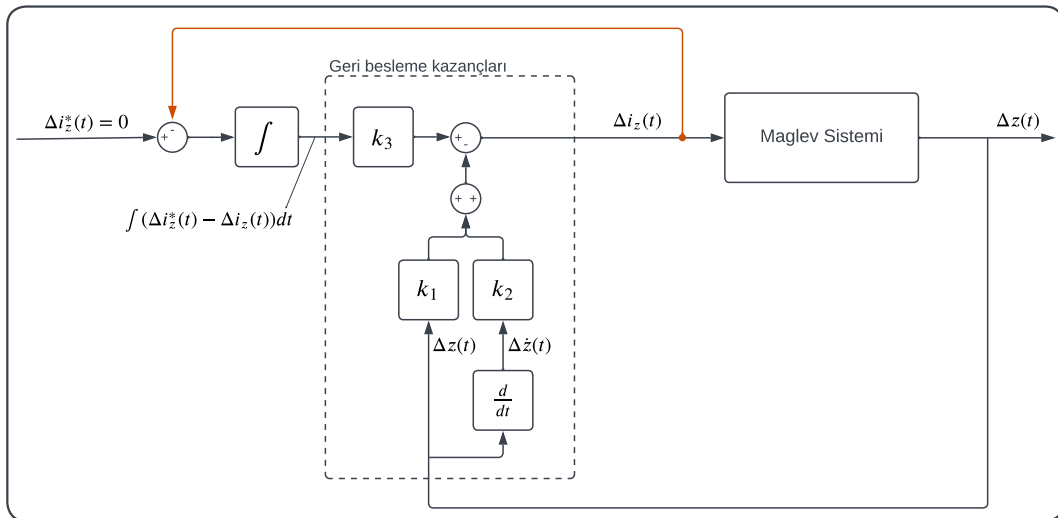
Şekil 5.31 Tam dereceli gözlemci ile kayan kipli sıfır güç kontrolünde akım ölçümü

5.3 Akım Uyarımlı Kontrol

Durum uzayı tam geri beslemeli kontrol stratejisine göre bütün durum değişkenleri erişilebilir olması gerekmektedir. Başlık 5.2’te anlatılan gerilim uyarımlı kontrol metodunun gerçekleşmesi için bütün durum değişkenlerine erişilemediğinden dolayı bir durum gözlemcisine gerek duyulmaktadır, çünkü $\Delta \dot{z}$ basit bir türev alma işlemi ile yakınsanabilse de Δi ölçülmüyor. Ancak akım uyarımlı kontrol metodunun durum değişkenlerinde akım zaten olmadığından dolayı, gözlemci olmadan da tam durum geri beslemeli kontrol uygulanabilmektedir. Bu sebeple bu başlıkta gösterilecek olan kontrolcüler hem gözlemcinin olduğu hem de gözlemcinin olmadığı varyasyonları olarak ele alınmıştır. Bununla beraber, doğrusal kontrol metotları olan durum geri beslemeli kontrol stratejisinin yanında bu başlıkta doğrusal olmayan kayan kipli kontrol stratejisi de ele alınmıştır. Bu doğrultuda klasik kayan kipli ve süper burulma kayan kipli kontrol stratejileri uygulanıp sonuçları gösterilmiştir.

5.3.1 Akımı Sıfıra Götüren Sıfır Güç Kontrolü

Diğer kontrolcülerde olduğu gibi akımı sıfıra götüren sıfır güç kontrolcüsü de tam durum geri beslemeli kontrolcü ile gerçekleştirilmiştir. Kontrolcünün genel yapısı Şekil 5.32’te gösterilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere, kontrolcüde durum geri besleme kontrolcüsü ve bozucu gözlemcisi bulunmamaktadır. Bunun sebebi, akım modunda durum değişkenlerinin sadece hava aralığı $z(t)$ hava aralığının türevi $\dot{z}(t)$ olmasıdır, ki bunlardan $z(t)$ zaten ölçülmektedir ve $\dot{z}(t)$ basit bir türev alma işlemi ile yakınsanabilmektedir. Bu nedenle, bozucu gözlemcisi olmadan da akımı sıfıra götüren sıfır güç kontrolcüsü gerçekleştirilebilmektedir. Kontrol stratejisinde sıfır güç kontrolünü sağlayan geri besleme sinyali şekilde turuncu olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.32 Akımı sıfıra götüren sıfır güç kontrolcü şeması

Akım uyarımlı sistemin durum uzayı denklemi Denklem 5.48'te gösterilmiştir.

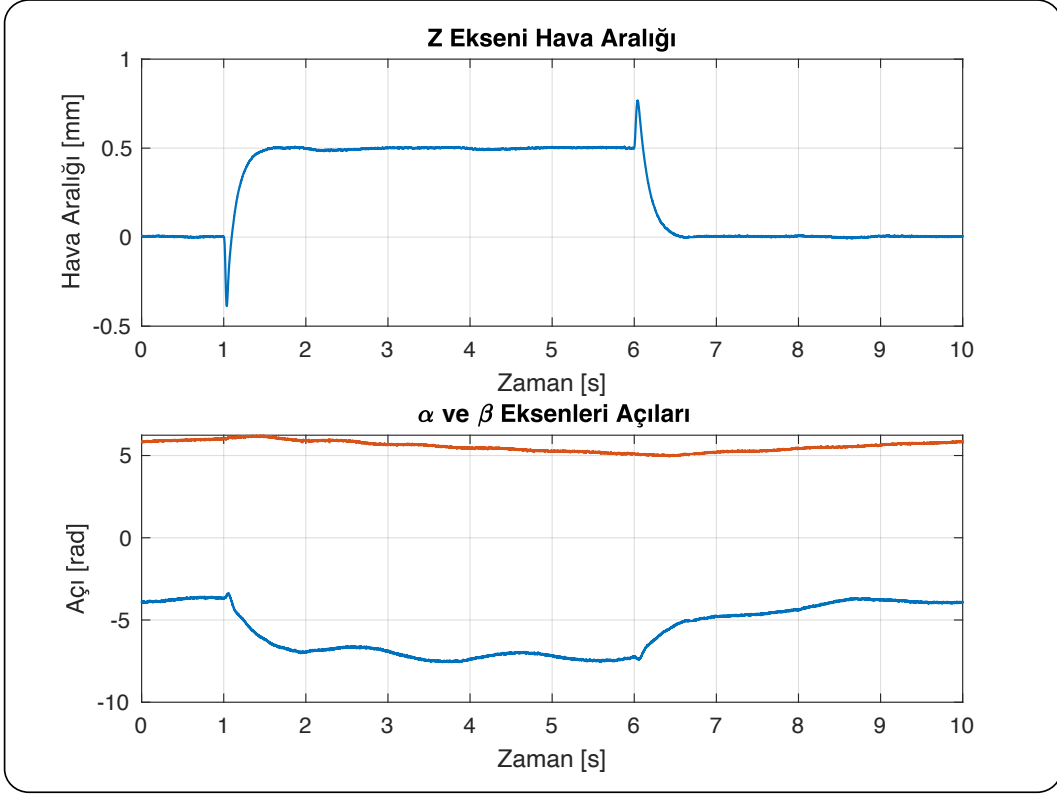
$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta z(t) \\ \Delta \dot{z}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{K_{z,0}}{m} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta z(t) \\ \Delta \dot{z}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_{i_z,0}}{m} \end{bmatrix} \Delta i_z(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{m} \end{bmatrix} F_d(t) \quad (5.48)$$

Şekil 5.32'teki sıfır akım kontrolcü tasarımı için sistem dinamiği akım durum değişkeni hatasının integrali ile genişletilerek aşağıdaki denklem elde edilir:

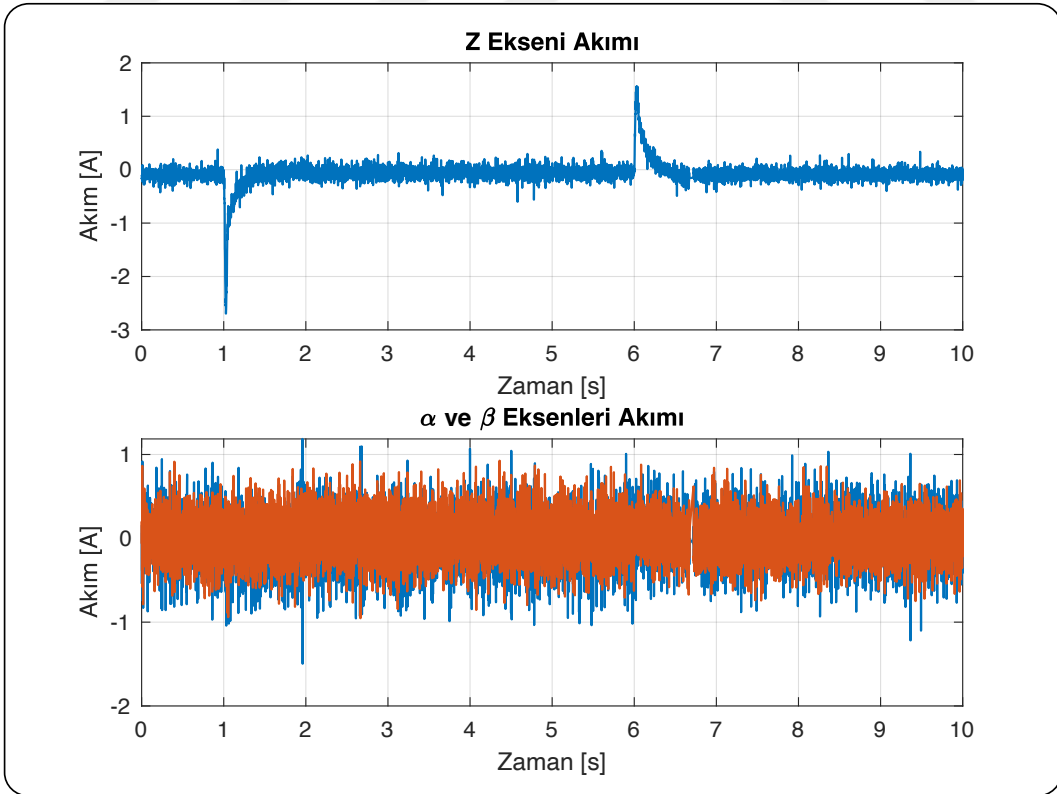
$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta z(t) \\ \Delta \dot{z}(t) \\ \int 0 - \Delta i_z(t) dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{K_{z,0}}{m} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta z(t) \\ \Delta \dot{z}(t) \\ \int 0 - \Delta i_z(t) dt \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_{i_z,0}}{m} \\ -1 \end{bmatrix} \Delta i_z(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{m} \\ 0 \end{bmatrix} F_d(t) \quad (5.49)$$

Tanımlanan durum değişkenlerinin geri besleme kazançlarının hesaplanması önceki başlıklarda anlatıldığı için burada tekrar edilmeyecektir. Kontrolcü tasarımı bu şekilde MATLAB Simulink'te programlandığında ve sisteme uygulandığında Şekil 5.33 ve 5.34'teki gösterilen grafikler elde edilmektedir. Görüldüğü gibi sistem başarılı bir şekilde kalıcı rejimde sıfır güç kontrolü yapıyor ve bozucu etkisine karşı kalıcı hata olmaksızın kontrolünü gerçekleştiriyor. Sistem üzerine uygulanan yüklem 10 N olarak seçilmiştir.

Açısal eksenlerin de sıfır güç performansını göstermek için yüklem noktası tam merkezi bir şekilde seçilmemiştir. Böylelikle sisteme açısal momentin uygulanması sağlanmıştır. Bunun etkisi Şekil 5.33'te mavi olarak gösterilen α açısı grafiğinde görülmektedir. Yüklemin uygulandığı an alpha açısı sıfır akım çekeceği açıya getirilerek kalıcı rejime ulaşmaktadır. Grafiklerde görünen açısal ölçümlerdeki sallantılar sisteme bağlı olan kablolardan dolayı kaynaklandığı saptanmıştır.

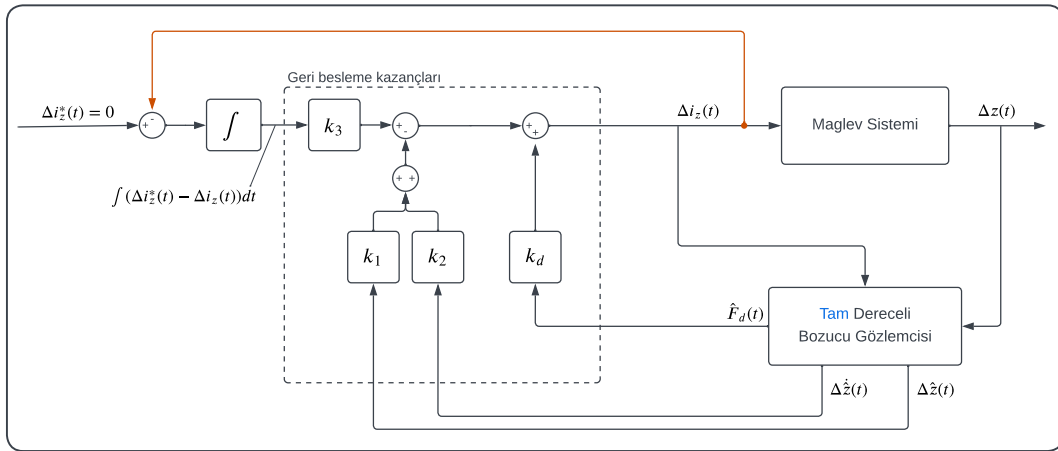


Şekil 5.33 Akımı sıfıra götüren sıfır güç kontrolünde hava aralığı ölçümü



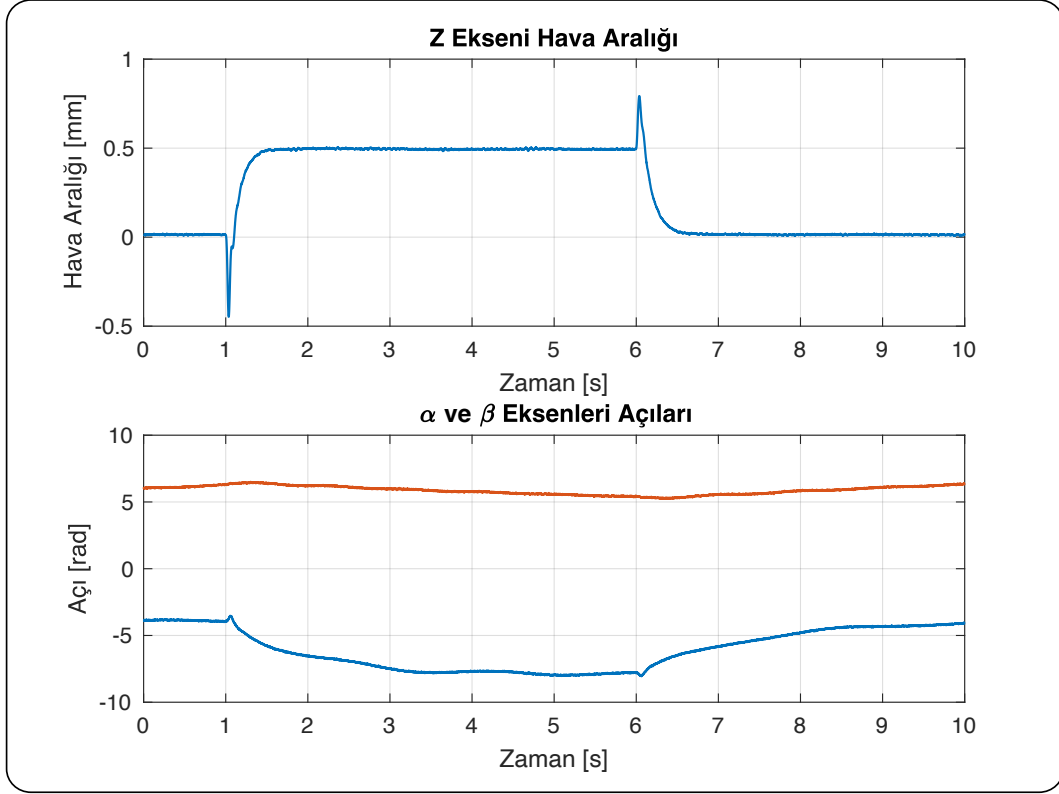
Şekil 5.34 Akımı sıfıra götüren sıfır güç kontrolünde akım ölçümü

Gözlemcisiz olarak uygulanan sıfır güç kontrolüne gözlemci de eklendiğinde artık tahmin edilebilen bozucu Kuvvet F_d 'nin de kontrolcü tarafından kompanse edilmesi mümkün olmaktadır. Bu durumda kontrolcü şeması Şekil 5.35'teki gibi olmaktadır. Şekilden de anlaşılacağı üzere, geri besleme sinyali yine turuncu olarak gösterilen uyarım akımı $i_z(t)$ 'dir. Tam dereceli gözlemcinin sistemin iki durum değişkeni olan hava aralığı $z(t)$ ve hava aralığının türevi $\dot{z}(t)$ 'yi tahmin edebilmesi için uyarım sinyali $i_z(t)$ ve ölçülen hava aralığı $z(t)$ gözlemciye verilmektedir. Gözlemci, buradan hem durum değişkenlerini hem de bozucu kuvveti F_d 'yi tahmin etmektedir. Tahmin edilen durum değişkenleri ve bozucu kuvvet genişletme için oluşturulan referans akım hatasının integrali ile birlikte kontrolcüye geri besleme olarak verilmektedir.

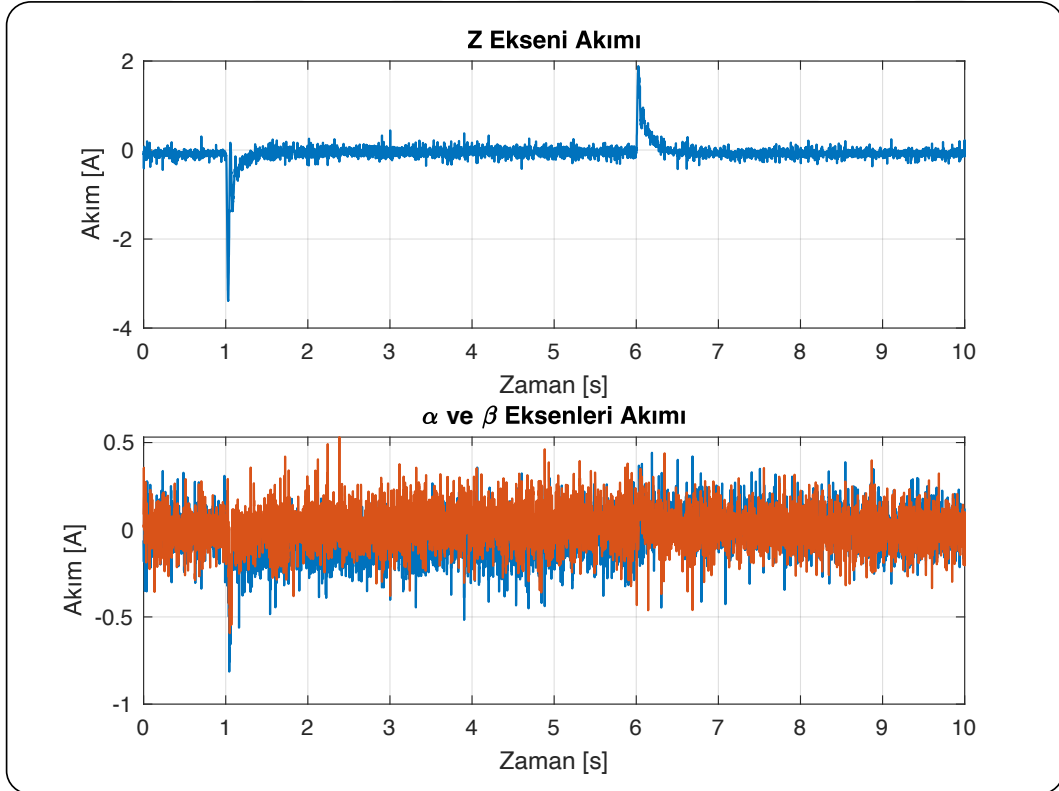


Şekil 5.35 Tam dereceli gözlemci ile akımı sıfıra götüren sıfır güç kontrolcü şeması

Kontrolcü bu doğrultuda MATLAB Simulink ortamında programlanıp sisteme uygulandığında Şekil 5.36 ve 5.37'teki gösterilen grafikler elde edilmektedir. Grafiklerden, kontrolcünün yine başarılı bir şekilde sıfır güç kontrolünü sağladığı ve bozucu etkisine karşı kalıcı hata olmaksızın kontrolünü gerçekleştirdiği görülmektedir. Sisteme uygulanan yükleme 10 N olarak seçilmiştir. Yine açılal eksenlerin de sıfır güç performansını göstermek için yükleme noktası tam merkezi bir şekilde seçilmemiştir. Bunun etkisi de yine açı ölçümlerinde görülmektedir. Tam dereceli gözlemci uygulandığında z , α ve β eksenlerinin akım sinyallerinin genliklerinin daha küçük olduğu görülmektedir.

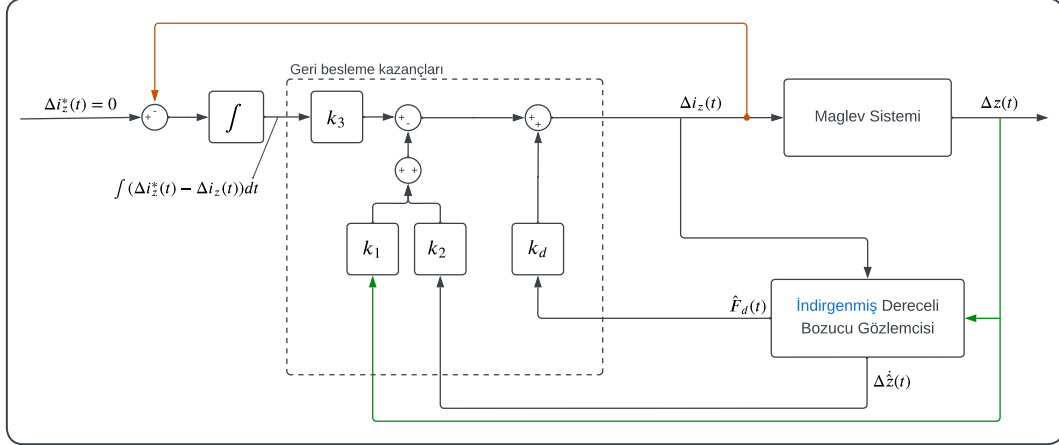


Şekil 5.36 Tam dereceli gözlemci ile akımı sıfıra götüren sıfır güç kontrolünde hava aralığı ölçümü



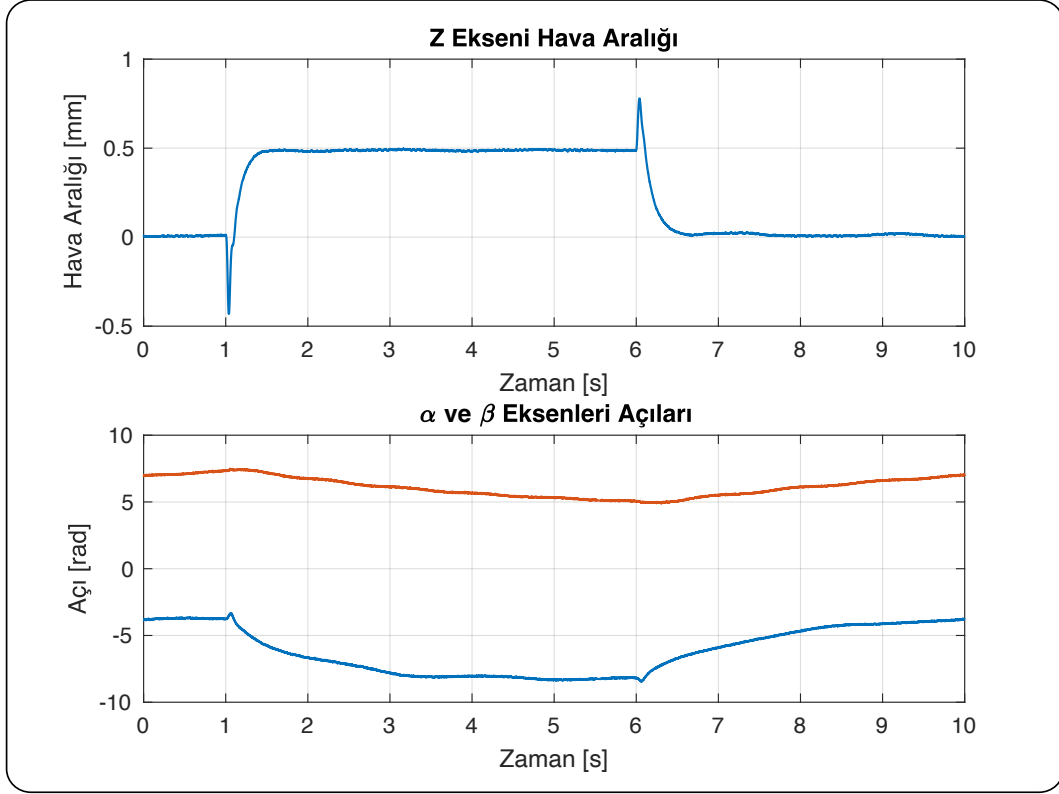
Şekil 5.37 Tam dereceli gözlemci ile akımı sıfıra götüren sıfır güç kontrolünde akım ölçümü

Tam dereceli gözlemci yerine indirgenmiş dereceli gözlemci kullanıldığında kontrolcü şeması Şekil 5.38'teki gibi olmaktadır. Kontrolcü açısından buradaki tek fark, hava aralığı sinyali $z(t)$ 'nin gözlemci tarafından tahmin edilmeyip doğrudan ölçümün geri besleme için kullanılmasıdır. Şekilde bu sinyal yeşil olarak işaretlenmiştir.

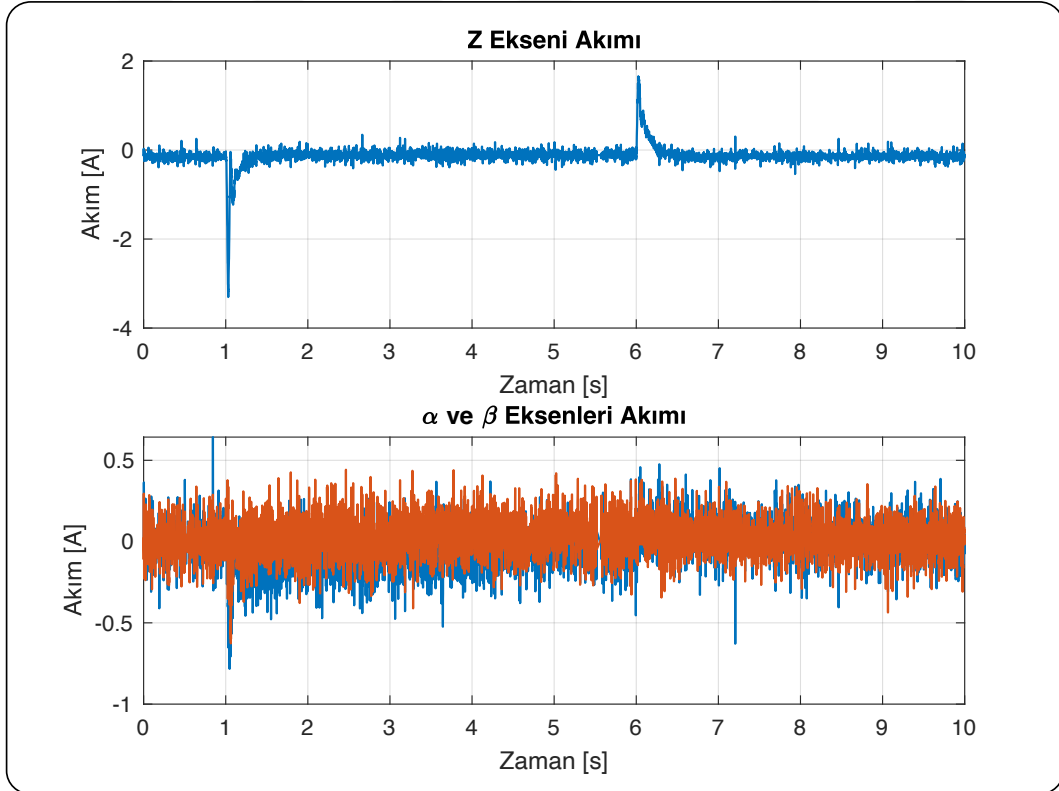


Şekil 5.38 İndirgenmiş dereceli gözlemci ile akımı sifıra götüren sıfır güç kontrolcü şeması

İndirgenmiş dereceli gözlemci uygulamasında sistem dinamiği ve kontrolcü dinamiğinde herhangi bir değişiklik olmamaktadır. Kontrolcü bu şekilde MATLAB Simulink ortamında programlanıp sisteme uygulandığında Şekil 5.39 ve 5.40'teki gösterilen hava aralığı ve akım ölçümleri elde edilmektedir. Deney esnasında sisteme 10 N'luk bir yükleme 6 saniye boyunca uygulanır. Yükleme yine açılal eksenlerin de sıfır güç performansını göstermek için tam merkezi bir şekilde uygulanmamaktadır. Şekillerden anlaşılacağı üzere, indirgenmiş dereceli gözlemci ile gerçekleştirilen sıfır güç kontrolcüsü de başarılı bir şekilde sıfır güç kontrolünü sağlamaktadır. Hem z ekseninin hem de α ve β eksenlerinden ölçülen akımlar 0 Amper civarında seyretmektedir.



Şekil 5.39 İndirgenmiş dereceli gözlemci ile akımı sıfıra götüren sıfır güç kontrolünde hava aralığı ölçümü

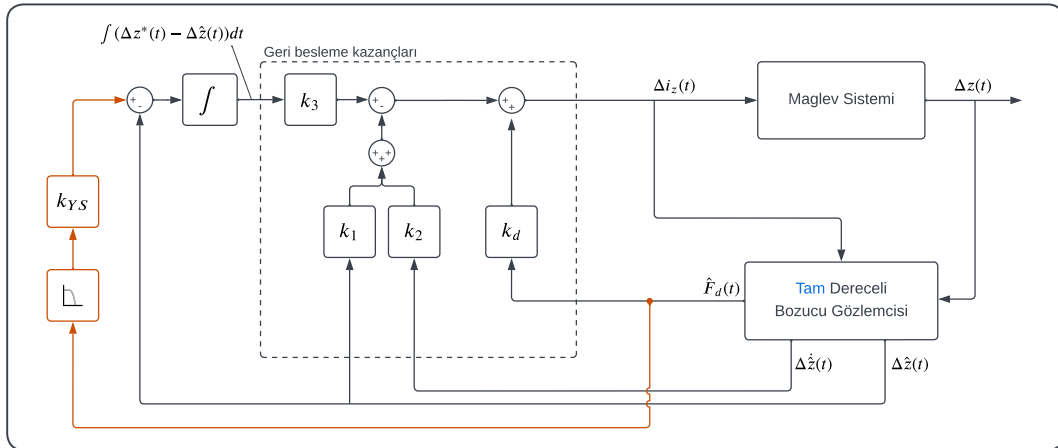


Şekil 5.40 İndirgenmiş dereceli gözlemci ile akımı sıfıra götüren sıfır güç kontrolünde akım ölçümü

5.3.2 Yarı Sıfır Güç Kontrolü

Akım uyartımlı sistemin yarı sıfır güç kontrol stratejisi, voltaj uyartımlı sistemin yarı sıfır güç kontrolü ile aynıdır. Sistemin sıfır akım çekeceği hava aralığı bozucu kuvvet F_d 'nin tahmini üzerinden hesaplanarak hava aralığı kontrolüne referans girdisi olarak verilmektedir. Bu tahmin için bozucu kuvvet tahmini şart olduğundan dolayı gözlemcinin kullanılması şarttır. Bu sebeple yarı sıfır güç kontrolcüsü için gözlemci olmadan bir kontrolcü tasarlanamamaktadır. Bu başlıkta gösterilecek olan kontrolcüler dolayısıyla tam dereceli ve indirgenmiş dereceli olmak üzere iki tanedir.

Tam durum geri beslemeli kontrolcünün genel yapısı Şekil 5.41'te gösterilmiştir. Hava aralığı referansı olarak kullanılan sıfır akım noktası tahmini turuncu olarak gösterilmektedir. Bu sinyal tam dereceli gözlemcinin bozucu kuvveti tahmininin bir alçak geçiren filtresinden geçirilip k_{YS} katsayısı ile çarpılması ile elde edilmektedir. Hava aralığı kontrolünün gerçekleşmesi için ise gözlemcinin tahmin ettiği hava aralığı $\Delta\hat{z}(t)$ ve hava aralığının türevi $\Delta\dot{\hat{z}}(t)$ geri besleme kazançları ile çarpılıp toplanmaktadır. Ardından kalıcı hatayı sıfıra götürmesi için sistemin integral ile genişletilmesi sonucunda eklenen hava aralığı hatasının integrali de geri besleme kazancı k_3 ile çarpılarak geri beslemeli kontrolcünün toplam uyartım sinyali elde edilmektedir. Ayrıca gözlemcinin tahmin ettiği bozucu kuvvet F_d , bozucu kompanzasyonu katsayısı k_d ile çarpılarak uyartım sinyaline eklenmektedir.

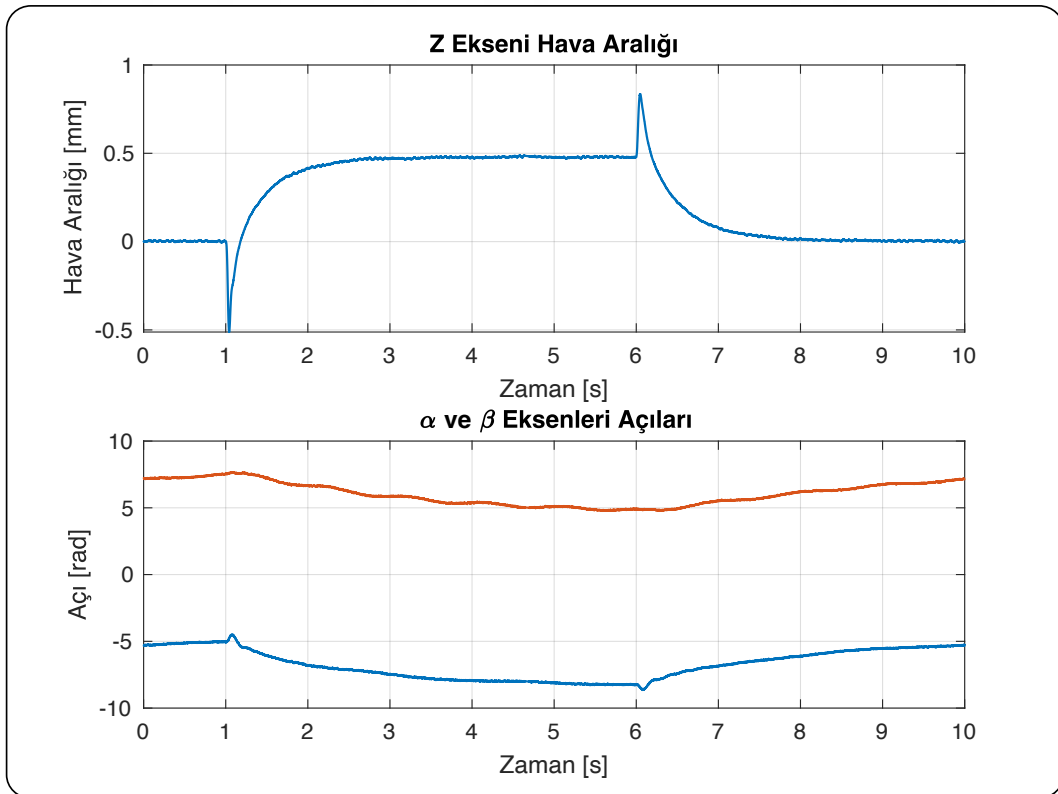


Şekil 5.41 Tam dereceli gözlemci ile yarı sıfır güç kontrolcü şeması

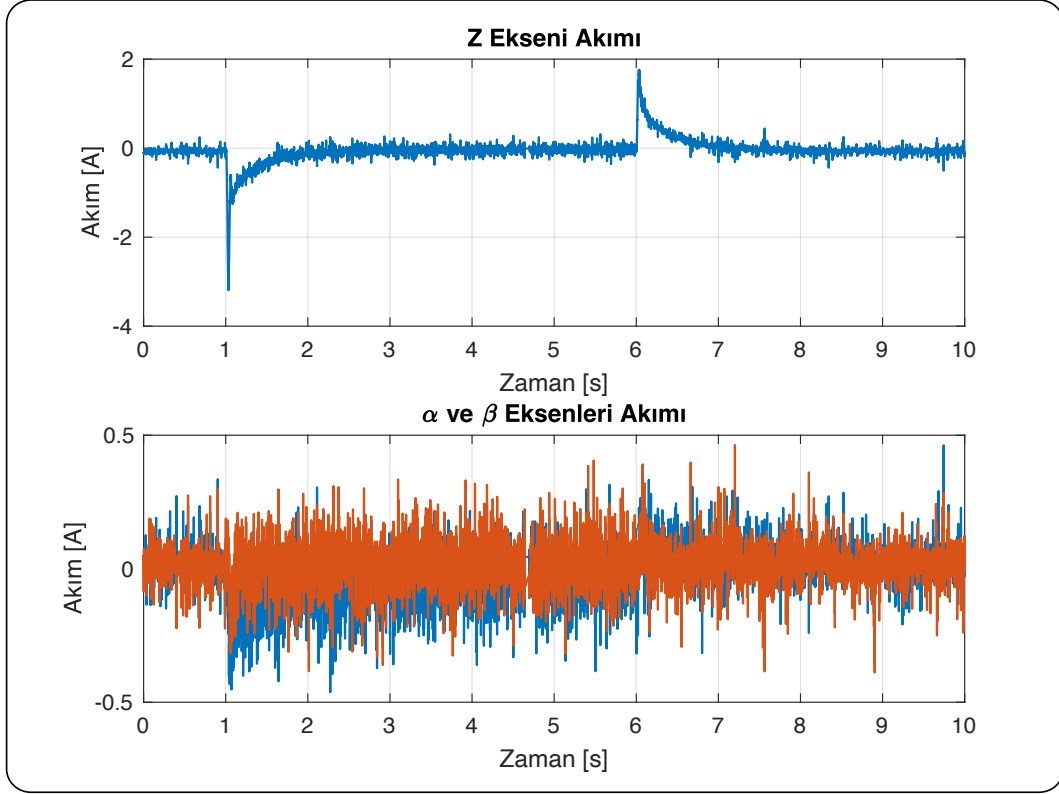
Geri besleme kazançları k_1 , k_2 ve k_3 'ün hesaplanması önceki başlıklarda anlatıldığı gibi kutup ataması yöntemi ile yapılmaktadır. Bunun için Şekil 5.41'te işaret edilen hava aralığı hatasının integrali ile genişletilmiş sistem dinamiği Denklem 5.50'de gösterilmiştir.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta z(t) \\ \Delta \dot{z}(t) \\ \int (0 - \Delta z(t)) dt \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{K_{z,0}}{m} & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta z(t) \\ \Delta \dot{z}(t) \\ \int (0 - \Delta z(t)) dt \end{bmatrix} + \\ &+ \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_{i_z,0}}{m} \\ 0 \end{bmatrix} \Delta i_z(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{m} \\ 0 \end{bmatrix} F_d(t) \end{aligned} \quad (5.50)$$

Bu şekilde tasarlanan kontrolcü MATLAB Simulink ortamında sisteme uygulandığında elde edilen deneysel sonuçlar Şekil 5.42 ve 5.43’de gösterilmiştir. z , α ve β eksenlerinin akım grafiklerinden de görüleceği üzere, uygulanan yarı sıfır güç kontrol stratejisi ile sistemin akımı başarılı bir şekilde 0 A etrafında tutulabilmektedir. Yarı sıfır güç kontrolünde referans pozisyonu bir alçak geçiren filtresinden geçirilerek hesaplandığından dolayı, sistem cevabının sıfır güç kontrolcüsüne göre daha yavaş cevap vermesi beklenmektedir. Nitekim, deney sonucunda da bu beklendiği gibi kendisini göstermektedir. Deney esnasında yine yarı sıfır güç kontrolcüsünün davranışını göstermek için 10 N’luk bir yük sisteme uygulanmış ve 5 saniye boyunca tutulmuştur. Yük tam merkezden verilmediği için eksenel yarı sıfır güç kontrolcülerinin de tepkileri grafiklerden gözükmektedir.

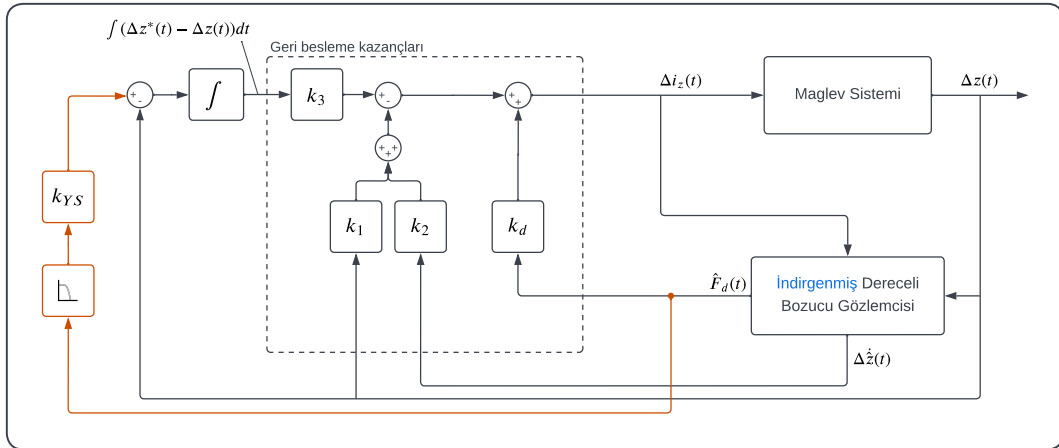


Şekil 5.42 Tam dereceli gözlemci ile yarı sıfır güç kontrolünde hava aralığı ölçümü



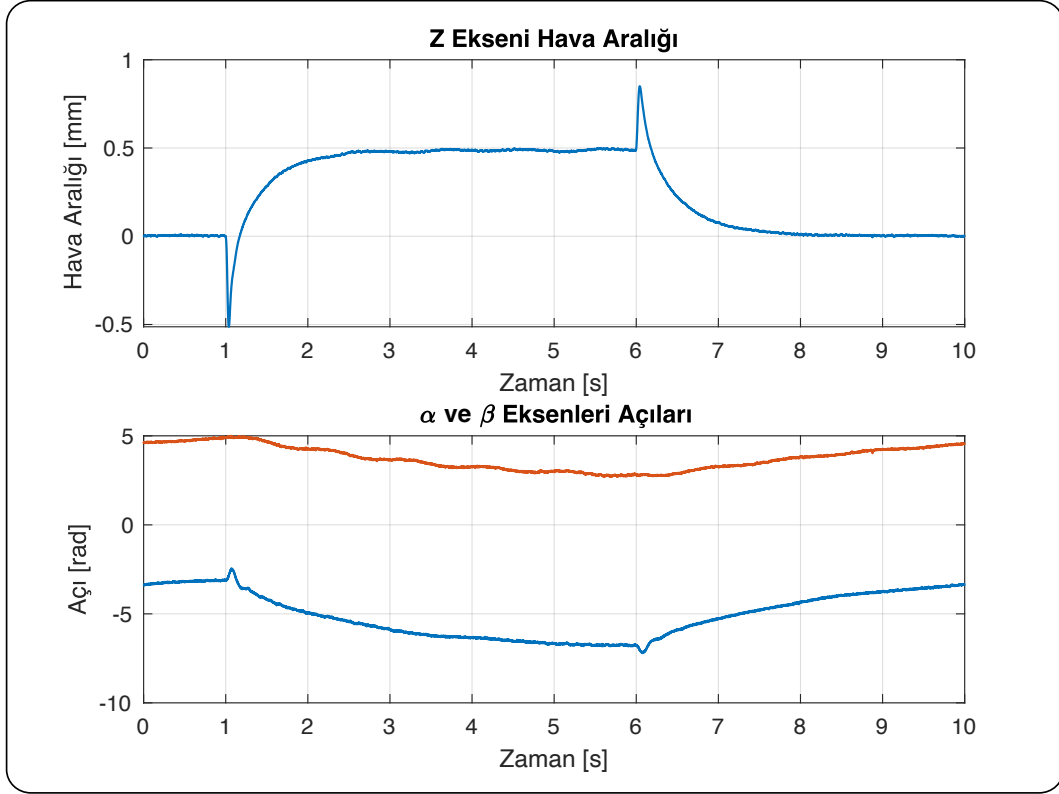
Şekil 5.43 Tam dereceli gözlemci ile yarı sıfır güç kontrolünde akım ölçümü

Tam dereceli gözlemci yerine indirgenmiş dereceli gözlemci ile yarı sıfır güç kontrolü uygulanmıştır. Bu kontrol stratejisinin genel yapısı Şekil 5.44'te gösterilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere, tam dereceli gözlemci ile arasındaki tek fark, hava aralığı Δz 'nin gözlemci tarafından tahmin edilmeyip doğrudan sensör ölçümünden geri besleme için kullanılmasıdır. Dolayısıyla indirgenmiş dereceli gözlemcinin tahmin ettiği tek değişkenler hava aralığının türevi $\Delta \dot{z}$ ve bozucu kuvvet F_d 'dir. Bu değişkenlerin tahmin edilmesi için gözlemciye uyarım akımı Δi_z ve ölçülen hava aralığı $\Delta z(t)$ verilmektedir.

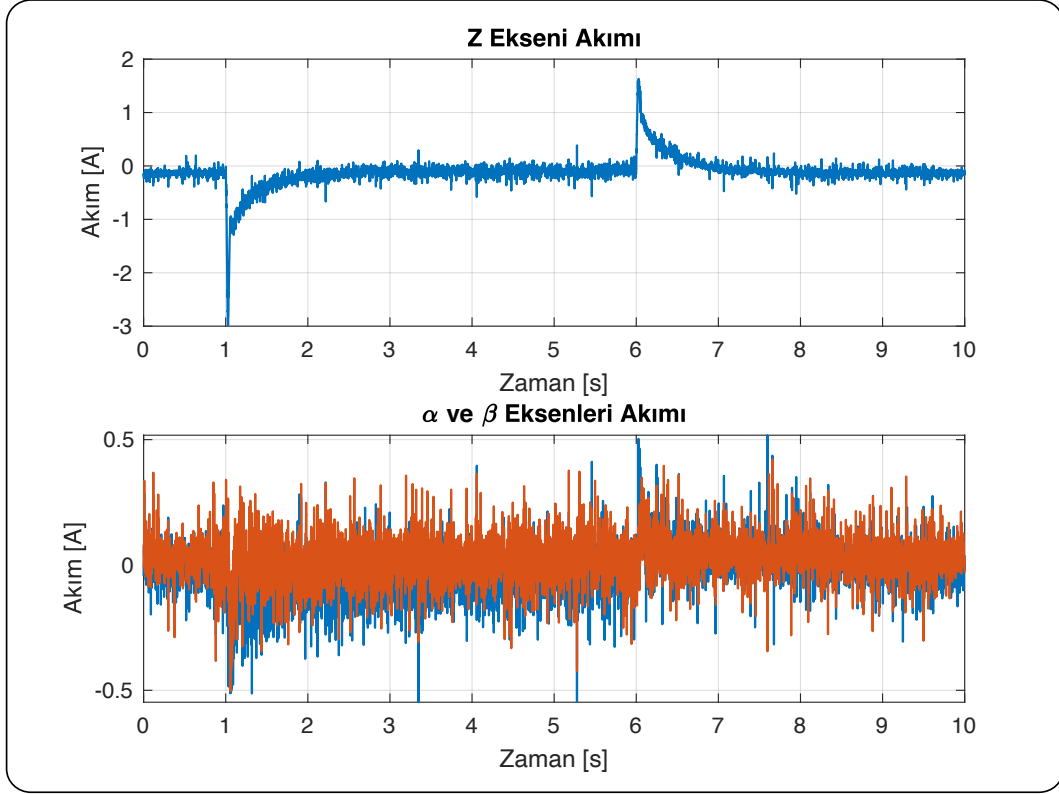


Şekil 5.44 İndirgenmiş dereceli gözlemci ile yarı sıfır güç kontrolcü şeması

İndirgenmiş dereceli gözlemci ile yarı sıfır güç kontrolcüsü sisteme uygulandığında elde edilen hava aralığı ve akım ölçümleri Şekil 5.45 ve 5.46'de gösterilmiştir. Şekillerden, indirgenmiş dereceli gözlemci ile yarı sıfır güç kontrolünün de başarılı bir şekilde çalıştığı anlaşılmaktadır. Akım grafiklerine bakıldığında, hem z ekseninde hem de α ve β eksenlerinde akımın 0 A etrafında tutulduğu görülmektedir. Hava aralığı grafiğine bakıldığında ise, yine beklendiği gibi hava aralığının sıfır güç pozisyonuna ulaşması düz sıfır güç kontrolüne göre daha yavaş olmaktadır ancak tam dereceli gözlemcili yarı sıfır güç kontrolcüsüne nispeten gözle görülür bir fark sergilememektedir.



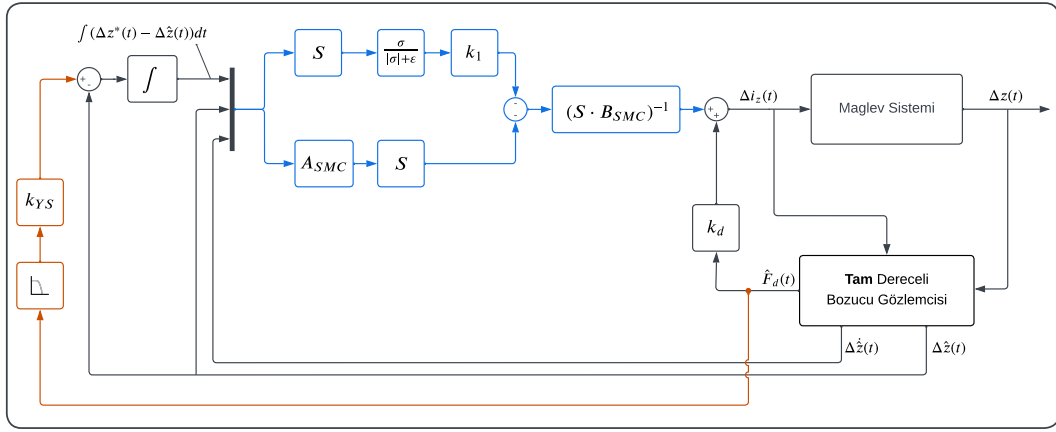
Şekil 5.45 İndirgenmiş dereceli gözlemci ile yarı sıfır güç kontrolünde hava aralığı ölçümü



Şekil 5.46 İndirgenmiş dereceli gözlemci ile yarı sıfır güç kontrolünde akım ölçümü

5.3.3 Klasik Kayan Kipli Yarı Sıfır Güç Kontrolü

Klasik kayan kipli yarı sıfır güç kontrolü stratejisi Şekil 5.47’te gösterilmiştir. Burada voltaj modunda uygulanan kayan kipli kontrol stratejisinden farklı olarak durum geri beslemeli kontrol temel alınıp kayan kipli kontrol buna eklenmemiştir. Aksine, kontrol sinyali salt bir şekilde kayan kipli kontrolcüden elde edilmektedir. Bu kontrol sinyali mavi ile işaretlenmiş bloklardan ibaret kayan kipli kontrolcüden üretilmektedir. Şekilden anlaşılacağı üzere, yarı sıfır güç kontrol stratejisine göre, yine hava aralığı kontrolü temel alınmaktadır. Referans hava aralığı bozucu kuvvet F_d üzerinden hesaplanan sıfır güç konumu alınmaktadır. Kontrol stratejisine göre, sistem dinamiğinin durum değişkenleri olan hava aralığı $z(t)$ ve hava aralığının türevi $\dot{z}(t)$ ’e ek olarak hava aralığının hatasının integrali $\int(0 - z(t))dt$ de eklenerek sistem genişletilmiştir.



Şekil 5.47 Tam dereceli gözlemci ile klasik kayan kipli yarı sıfır güç kontrolcü şeması

Genişletilmiş sistem dinamiği Denklem 5.51’de gösterilmiştir.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \int(0 - \Delta z(t))dt \\ \Delta z(t) \\ \Delta \dot{z}(t) \end{bmatrix} &= \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{K_{z,0}}{m} & 0 \end{bmatrix}}_{A_{SMC}} \begin{bmatrix} \int(0 - \Delta z(t))dt \\ \Delta z(t) \\ \Delta \dot{z}(t) \end{bmatrix} + \\ &+ \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{K_{i_z,0}}{m} \end{bmatrix}}_{B_{SMC}} \Delta i_z(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{m} \end{bmatrix} F_d(t) \end{aligned} \quad (5.51)$$

S matrisinin tanımlamaları ise aşağıdaki gösterildiği gibidir.

$$S = \begin{bmatrix} S_1 & S_2 \end{bmatrix}$$

$$S_1 = K_{SMC} \cdot S_2$$

S_2 bir tasarım parametresi olup bu kapsamda 0.1 olarak seçilmektedir. S_1 böylelikle sadece K_{SMC} katsayısına bağlıdır. K_{SMC} katsayısı ise kutup ataması yöntemi ile hesaplanmaktadır. Bunun gerçekleştirilmesi için denklem A.11'te gösterilen bölütleme yöntemi kullanılmaktadır.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \int(0 - \Delta z(t))dt \\ \Delta z(t) \\ \Delta \dot{z}(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{K_{z,0}}{m} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \int(0 - \Delta z(t))dt \\ \Delta z(t) \\ \Delta \dot{z}(t) \end{bmatrix} + \\ &+ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{K_{z,0}}{m} \end{bmatrix} \Delta i_z(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{m} \end{bmatrix} F_d(t) \end{aligned} \quad (5.52)$$

Elde edilen bölütlenmiş sistem dinamiği Denklem kısaltılmış olarak Denklem 5.53'de gösterilmiştir.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} \Delta i_z(t) \quad (5.53)$$

Kessler kanonik polinomu ile hesaplanan kutuplar, A_{11} ve A_{12} 'den oluşan bölütlenmiş dinamik sistemin geri besleme kazançlarının hesaplanması için ataması kullanılır. Buradan elde edilen geri besleme kazançları ise K_{SMC} 'yi vermektedir. Şekil 5.47'de gösterilen σ değişkeni S matrisinin durum vektörünün çarpımı ile elde edilmektedir:

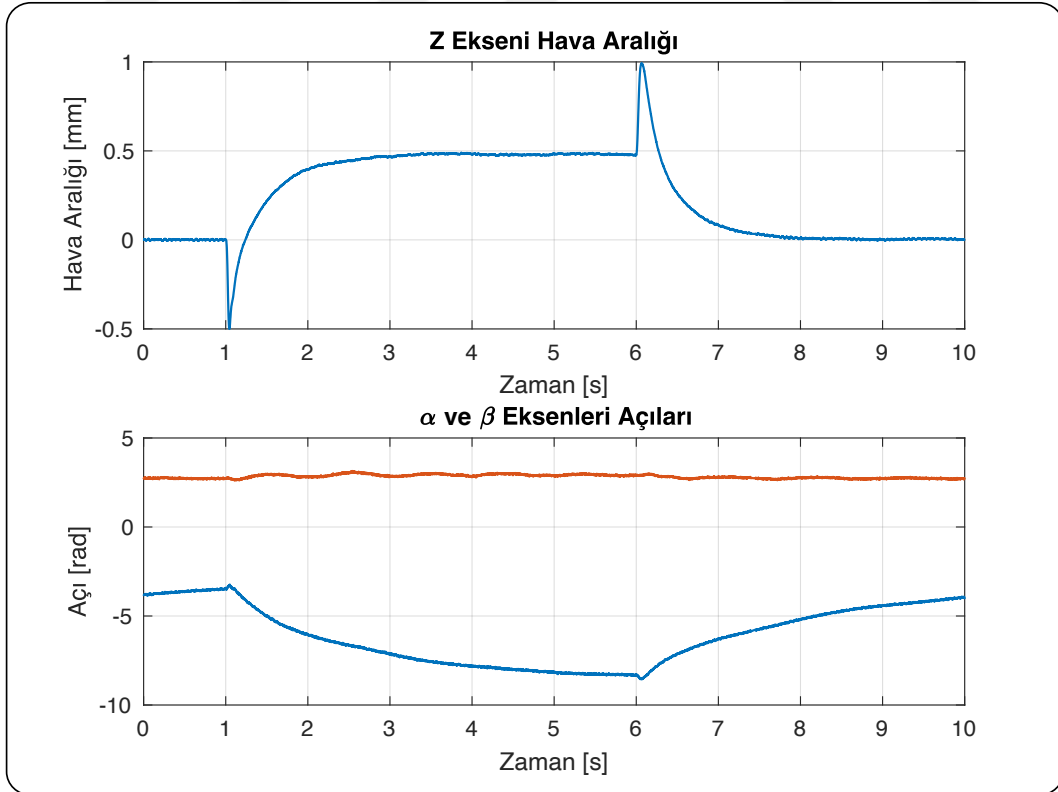
$$\sigma = S \cdot x \quad (5.54)$$

Ayrıca yine Şekil 5.47'de gösterilen

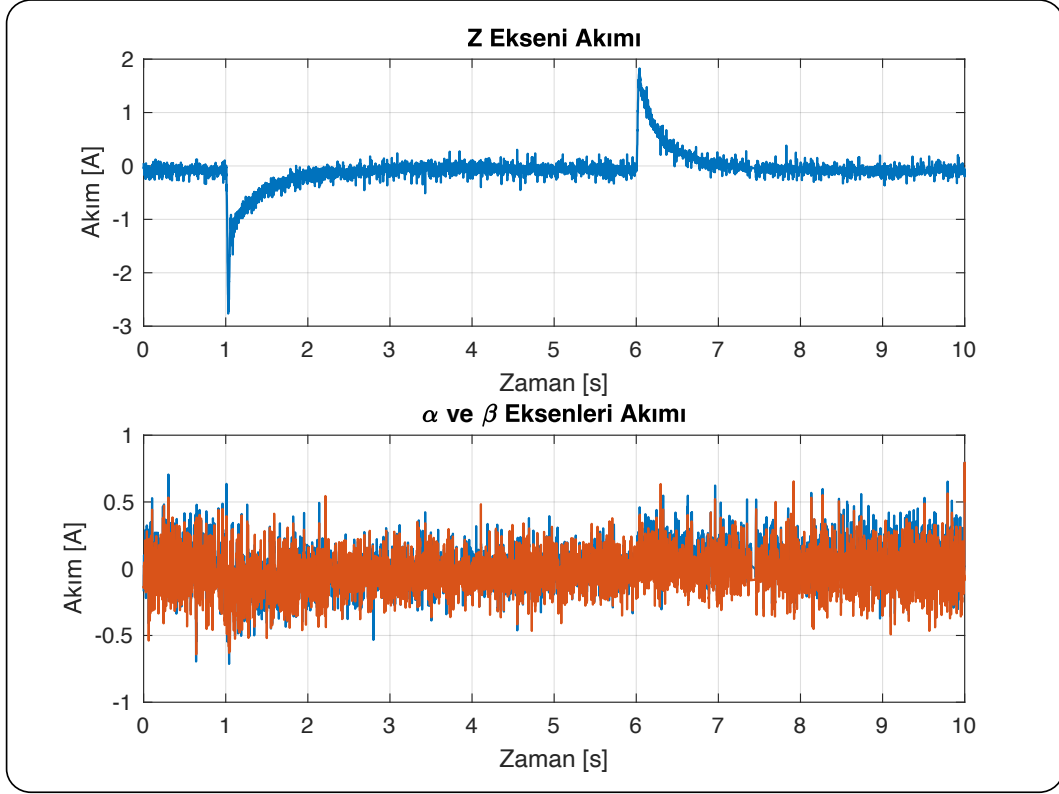
$$\frac{\sigma}{|\sigma| + \varepsilon} \quad (5.55)$$

denklemleri kayan kipli kontrol metodunun doğrusal olmayan kısmını oluşturmaktadır. Burada ε küçük bir pozitif sabittir. Bu sabitin amacı, aslında teorik olarak olması gereken $sgn(\sigma)$ olan işaret fonksiyonunu yumaşatarak kontrol esnasındaki çatlardı etkisini bastırmaktır. ε değeri 0.002 olarak seçilmiştir. k_1 katsayısı ise bir tasarım parametresi olup simülasyon ve deneysel testler sonucunda 0.15 olarak seçilmiştir.

Bu şekilde tasarlanan kontrolcü MATLAB Simulink ortamında programlanıp sisteme uygulandığında Şekil 5.48 ve 5.49'teki gösterilen hava aralığı ve akım ölçümleri elde edilmektedir. Şekillerden, klasik kayan kipli yarı sıfır güç kontrolcüsünün de başarılı bir şekilde sıfır güç kontrolünü sağladığı anlaşılmaktadır. Akım grafiklerine bakıldığında, hem z ekseninde hem de α ve β eksenlerinde akımın 0 A etrafında tutulduğu görülmektedir. Hava aralığı grafiğine bakıldığında ise, yine beklendiği gibi hava aralığının sıfır güç pozisyonuna ulaşması düz sıfır güç kontrolüne göre daha yavaş ulaşmaktadır ancak durum geri beslemeli yarı sıfır güç kontrolcüsüne nispeten gözle görülür bir fark ortaya koyarak daha iyi bir sonuç vermektedir. Deney esnasında yine yarı sıfır güç kontrolcüsünün davranışını göstermek için 10 N'luk bir yük sisteme uygulanmış ve 5 saniye boyunca tutulmuştur. Yük tam merkezden verilmediği için ekstenel yarı sıfır güç kontrolcülerinin de tepkileri grafiklerden gözlemlenebilmektedir.

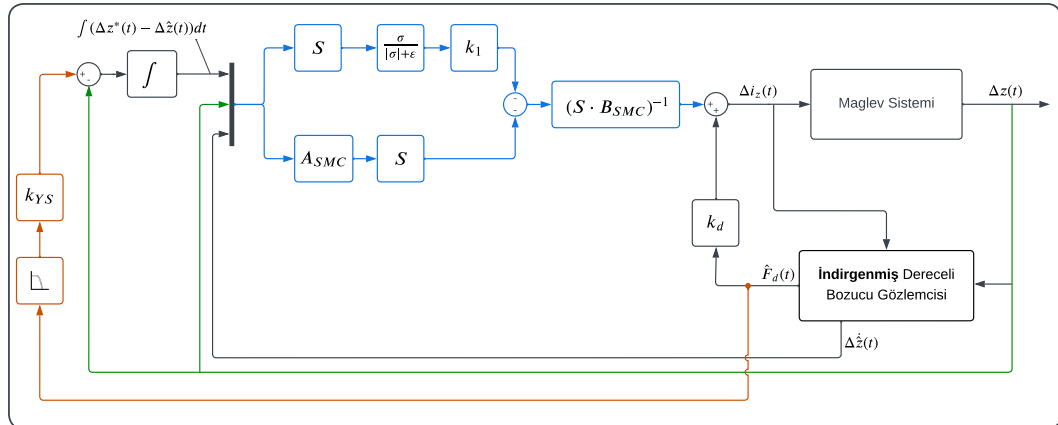


Şekil 5.48 Klasik kayan kipli yarı sıfır güç kontrolünde hava aralığı ölçümü



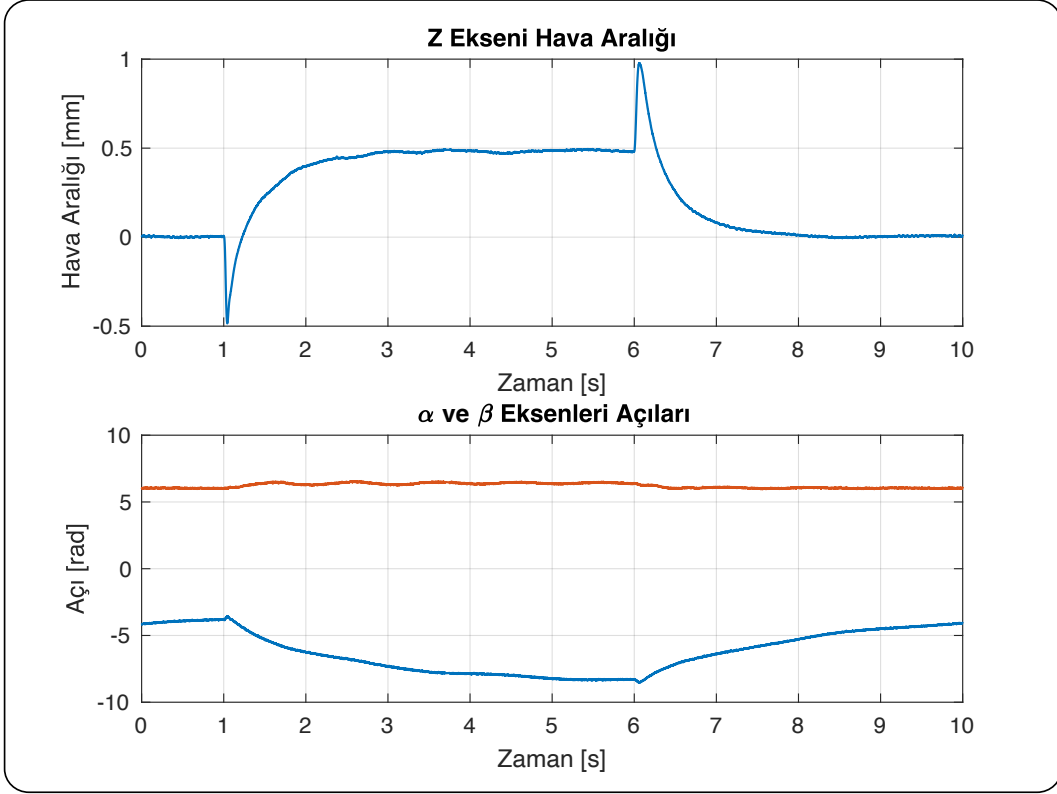
Şekil 5.49 Klasik kayan kipli yarı sıfır güç kontrolünde akım ölçümü

Yukarıda gösterilen tam dereceli gözlemciyle klasik kayan kipli yarı sıfır güç kontrolünde gözlemci olarak indirgenmiş dereceli gözlemci de kullanılmıştır. Bu kontrol stratejisinin genel yapısı Şekil 5.50’te gösterilmiştir. Tam dereceli gözlemci ile uygulanan kontrolcü arasındaki fark hava aralığı durum değişkeninin gözlemci üzerinden değil doğrudan geri beslenmesidir. Şekilde bu sinyal yeşil ile işaretlenmiştir.

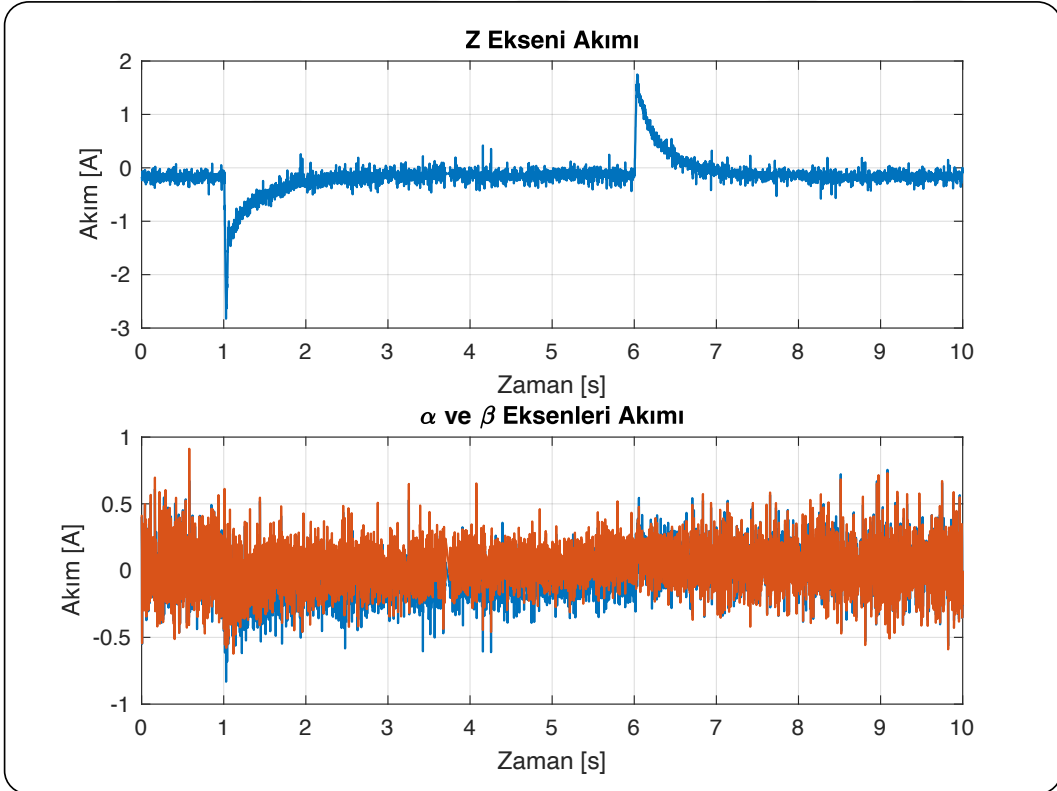


Şekil 5.50 İndirgenmiş dereceli gözlemci ile klasik kayan kipli yarı sıfır güç kontrolcü şeması

MATLAB Simulink ortamında bu kontrolcü programlanıp aynı şekilde uygulandığında elde edilen ölçümler Şekil 5.51 ve 5.52’de gösterilmiştir.



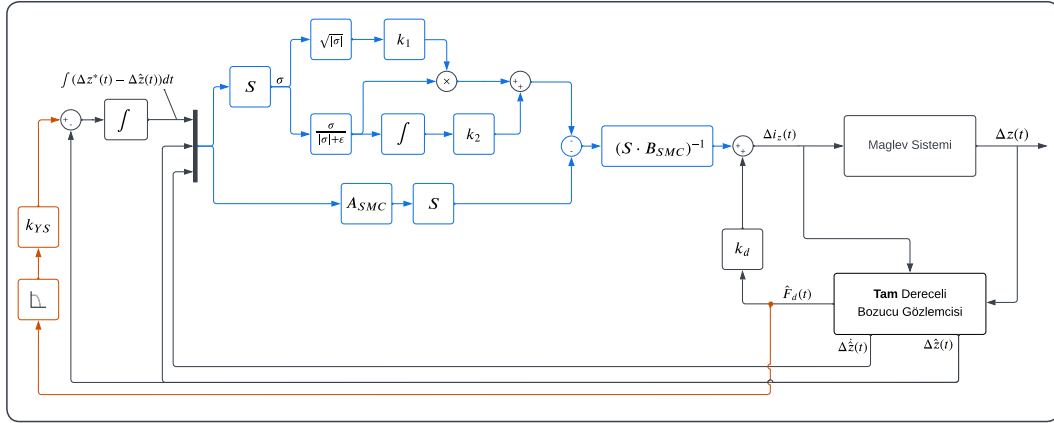
Şekil 5.51 İndirgenmiş dereceli gözlemci ile klasik kayan kipli yarı sıfır güç kontrolünde hava aralığı ölçümü



Şekil 5.52 İndirgenmiş dereceli gözlemci ile klasik kayan kipli yarı sıfır güç kontrolünde akım ölçümü

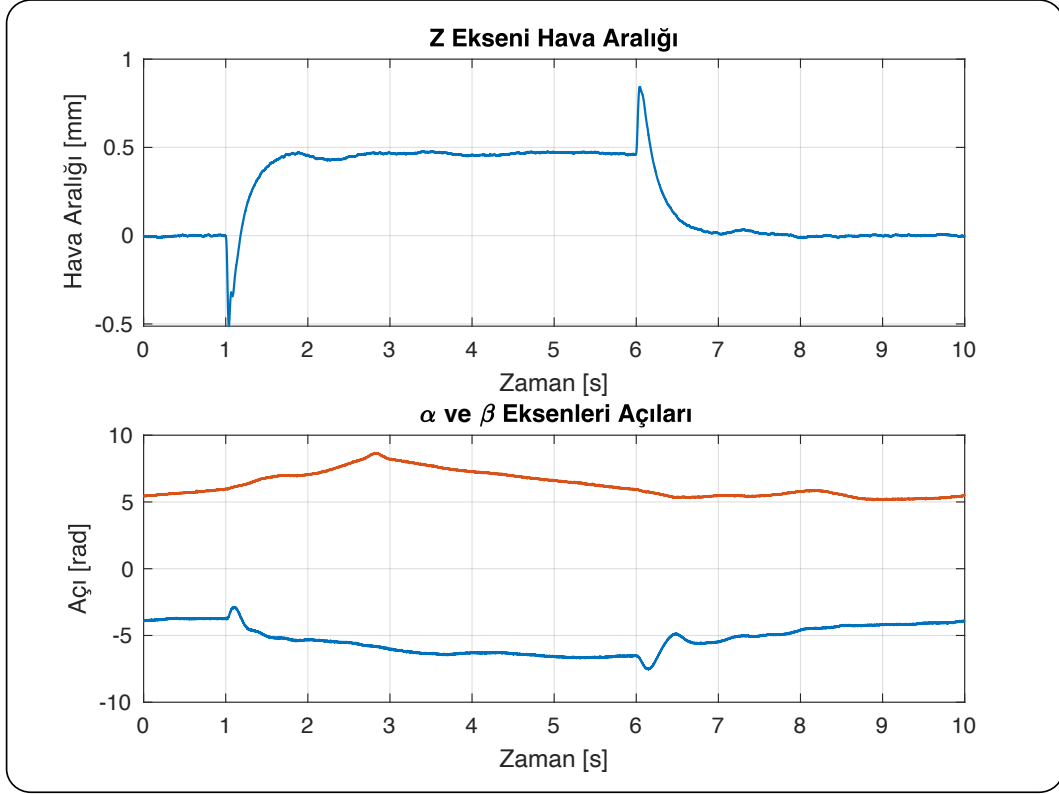
5.3.4 Süper Burulma Kayan Kipli Yarı Sıfır Güç Kontrolü

Klasik kayan kipli kontrolcüsüne nazaran, süper burulma kayan kipli yarı sıfır güç kontrolcüsü, kendisini konfigürasyon olarak ayrıştırmaktadır. Şekil 5.53'te mavi olarak gösterilen bu kontrolcünün matematiksel işlemleri de klasik kayan kipli kontrolcü ile aynı olduğundan dolayı burada tekrar edilmeyecektir. Bu kontrol stratejisinde Şekilde k_1 ve k_2 olarak gösterilen tasarım parametreleri simülasyon ve deneysel testler sonucunda 10 ve 3 olarak seçilmiştir.

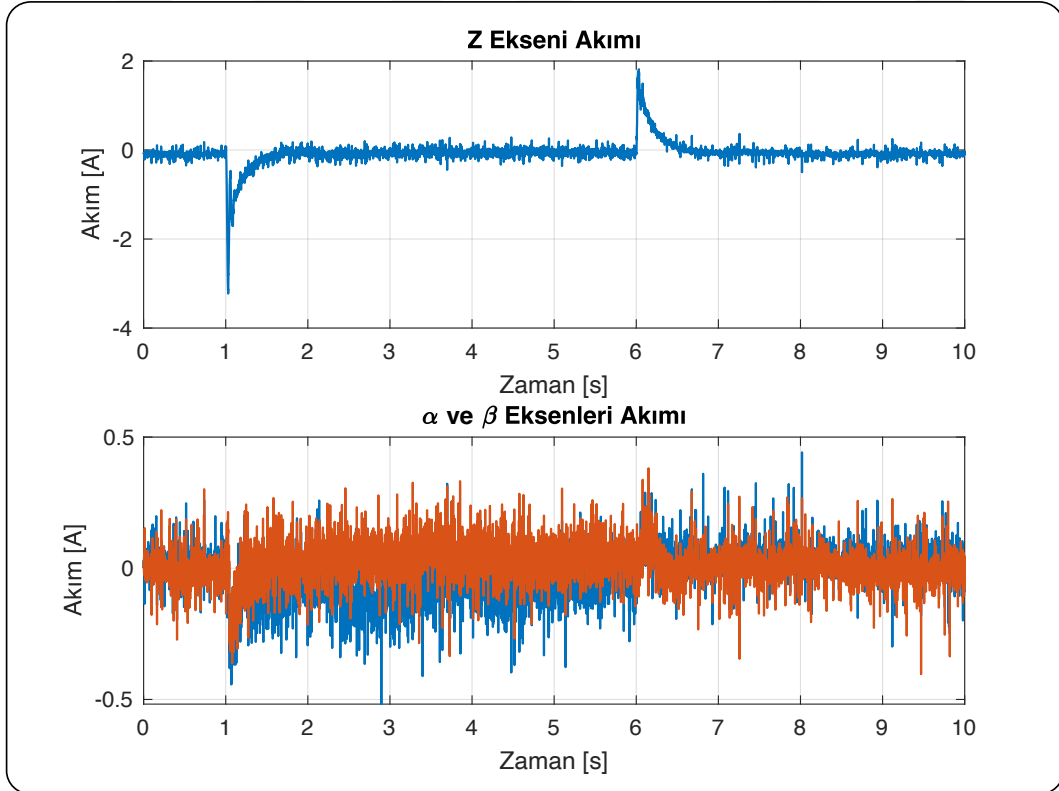


Şekil 5.53 Tam dereceli gözlemci ile süper burulma kayan kipli yarı sıfır güç kontrolcü şeması

Bu kontrolcü MATLAB Simulink ortamında programlanıp sisteme uygulandığında elde edilen hava aralığı ve akım ölçümleri Şekil 5.54 ve 5.55'de gösterilmiştir.

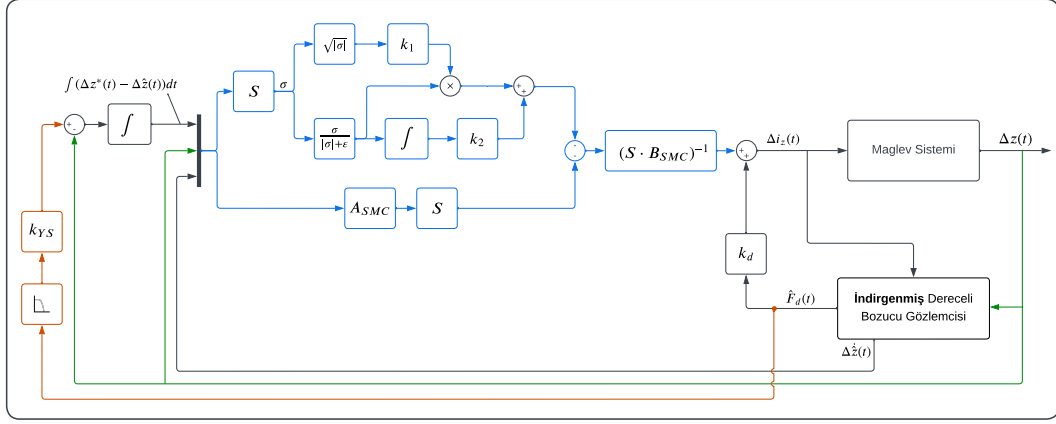


Şekil 5.54 Tam dereceli gözlemci ile süper burulma kayan kipli yarı sıfır güç kontrolünde hava aralığı ölçümü

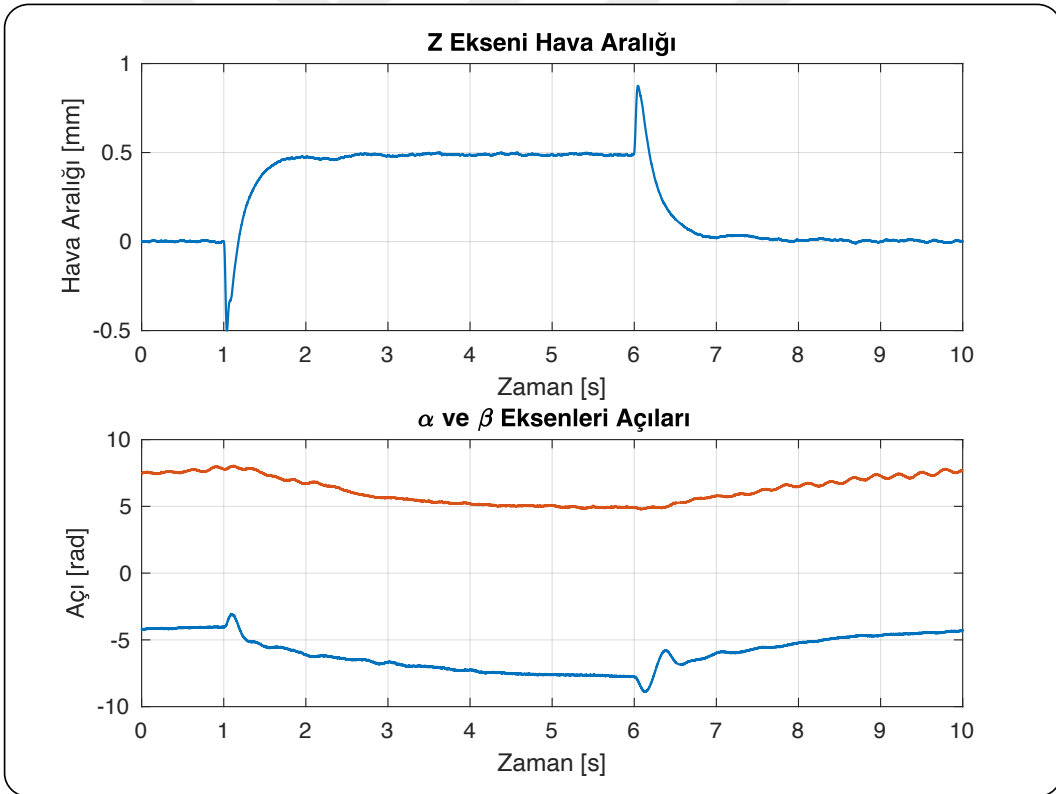


Şekil 5.55 Tam dereceli gözlemci ile süper burulma kayan kipli yarı sıfır güç kontrolünde akım ölçümü

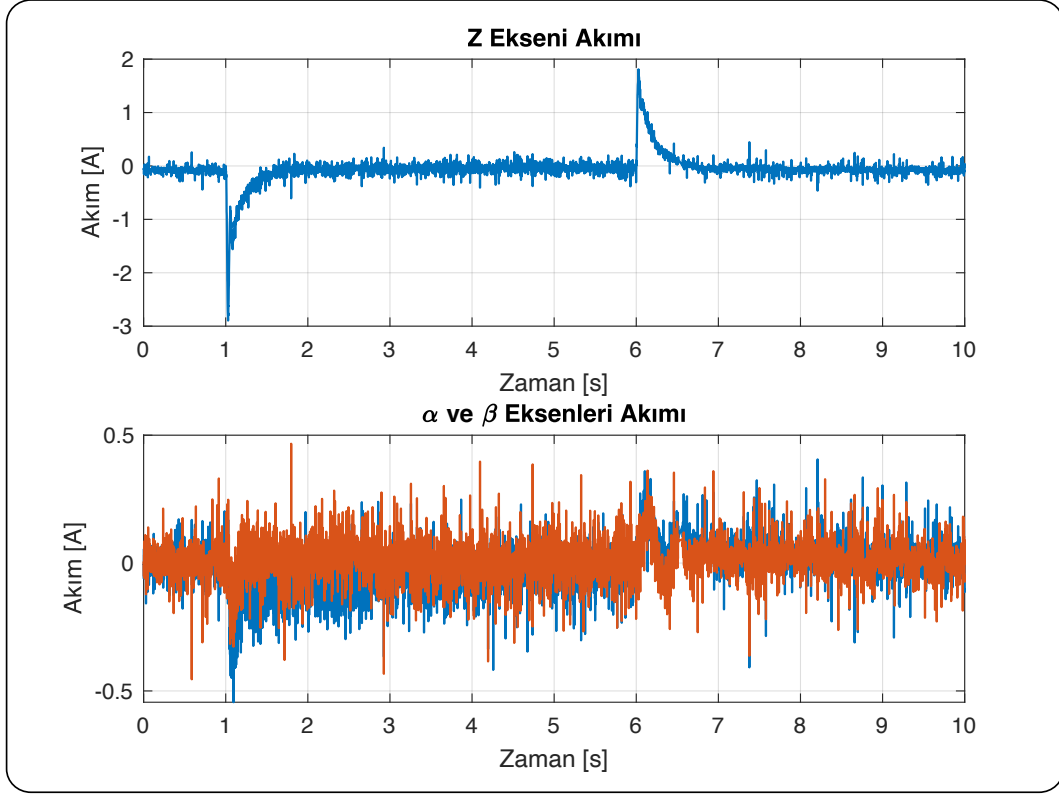
Şekil 5.56’te gösterilen indirgenmiş dereceli gözlemci ile süper burulma kayan kipli yarı sıfır güç kontrolcüsü de MATLAB Simulink ortamında programlanıp aynı şekilde uygulandığında ise elde edilen ölçümler Şekil 5.57 ve 5.58’de gösterilmiştir.



Şekil 5.56 İndirgenmiş dereceli gözlemci ile süper burulma kayan kipli yarı sıfır güç kontrolcü şeması



Şekil 5.57 İndirgenmiş dereceli gözlemci ile süper burulma kayan kipli yarı sıfır güç kontrolünde hava aralığı ölçümü



Şekil 5.58 İndirgenmiş dereceli gözlemci ile süper burulma kayan kipli yarı sıfır güç kontrolünde akım ölçümü

6 SONUÇ

Bu çalışma kapsamında, dört kutuplu artı konfigürasyonunda hibrit elektromıknatıslı manyetik levitasyon sisteminin hem gerilim uyarımlı hem akım uyarımlı olarak sıfır ve yarı sıfır güç kontrolleri gerçekleştirilmiştir. Bu başlıkta ise elde edilen sonuçların genel değerlendirmeleri yapılmıştır. Akım uyarımlı sistemin kontrolcü deneylerinin yapılmasındaki yük bindirme düzeneği daha standart ve karşılaştırılabilir olduğundan bu başlıkta akım uyarımlı kontrolcülerin karşılaştırılmasına daha geniş yer ayrılmıştır. Gerilim uyarımlı sistemde

- Uyarım gerilimini sıfıra götüren sıfır güç kontrolü
- Yarı sıfır güç kontrolü
- Tahmini akımı sıfıra götüren sıfır güç kontrolü

kontrolcülerinin gözlemci tabanlı ve baz alınan kontrolcü tabanlı farklı varyasyonları uygulanmıştır. Akım uyarımlı sistemde ise

- Uyarım akımını sıfıra götüren sıfır güç kontrolü
- Yarı sıfır güç kontrolü

kontrolcülerinin yine gözlemci tabanlı ve baz alınan kontrolcü tabanlı farklı varyasyonları uygulanmıştır.

Gerilim uyarımlı sistemde sıfır güç kontrolü için tam durum geri beslemeli kontrolün tam ve indirgenmiş dereceli gözlemci tabanlı varyasyonları uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlardan, kontrolcülerin başarılı bir şekilde sıfır güç denetimini yaptığı görülmektedir. Ayrıca indirgenmiş dereceli gözlemcinin uygulanması tam dereceli gözlemciye göre hava aralığının oturma

performansının karşılaştırılmasında beklendiği gibi gözle görülür bir fark oluşturmadığı gözükmektedir.

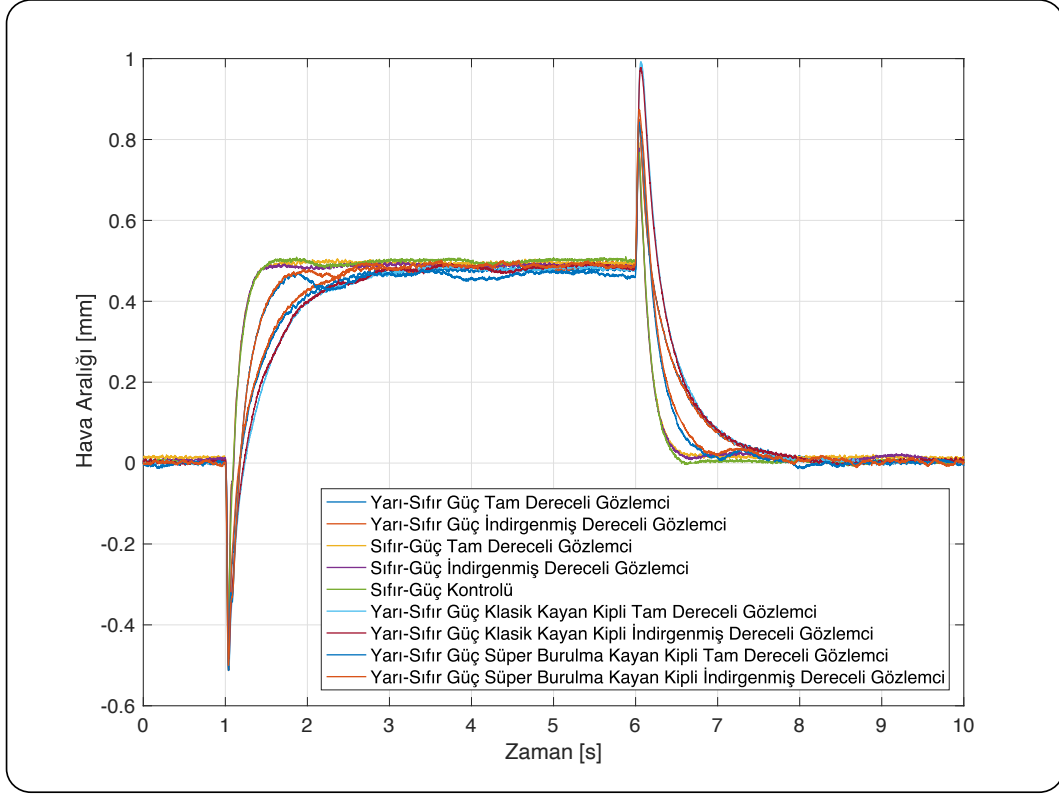
Gerilim uyarımlı sistemde sıfır güç kontrol stratejisinde ayrıca durum geri beslemeli kontrole klasik kayan kipli kontrolcü de ekleme yöntemi ile uygulanmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlardan da görüldüğü üzere, kayan kipli kontrolcü açık olduğunda hem üst aşım minimuma indirgenmekte, hem de sistem daha hızlı cevap vermektedir.

Gerilim uyarımlı sistemin yarı sıfır güç kontrolü için de yine tam dereceli ve indirgenmiş dereceli gözlemci ile sisteme uygulanmıştır. Yarı sıfır güç kontrolünün alçak geçiren filtresi gereği sıfır güç kontrolüne göre daha yavaş tepki vermesi ve daha geç sıfır güç konumuna ulaşması beklenmektedir. Nitekim ilgili başlıktaki deneysel sonuçlardan da bu gözükmektedir. Tam ve indirgenmiş dereceli gözlemcinin uygulanmasındaki farklılık yine gözle görünür olmadığı görülmektedir.

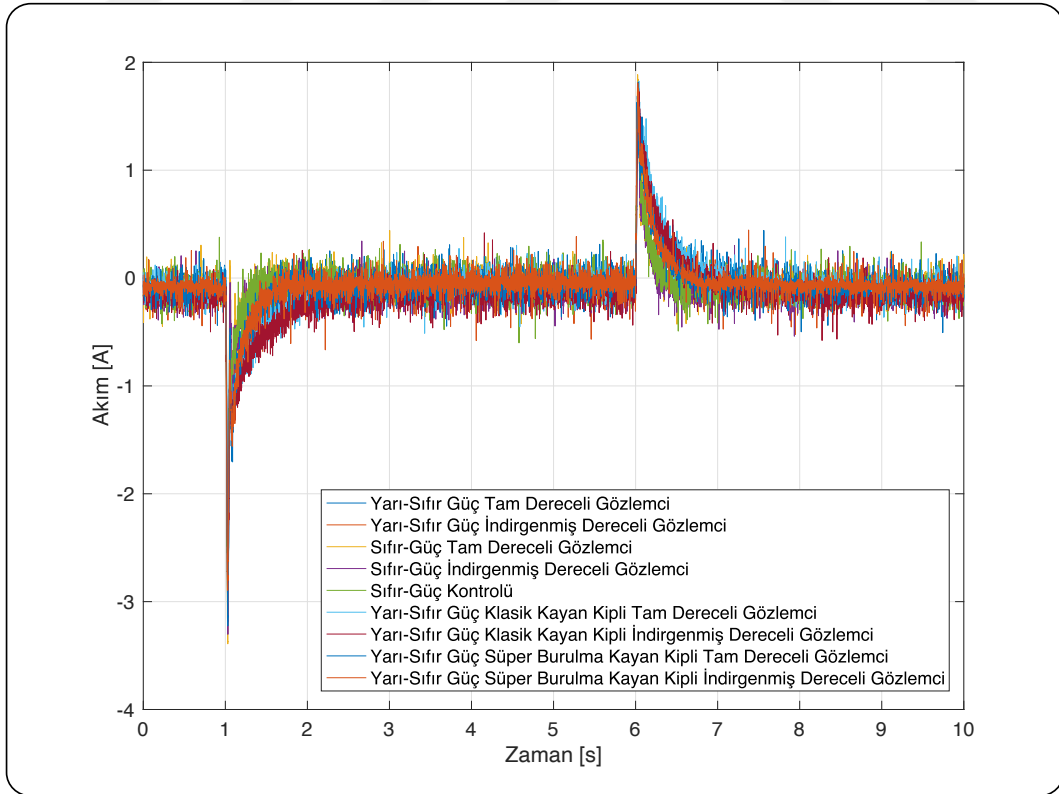
Son olarak tahmini akımı sıfıra götüren sıfır güç denetleyicisi uygulanan gerilim uyarımlı sistemden elde edilen sonuçlara bakıldığında yine başarılı bir şekilde sıfır güç denetimi yaptığı gözlemlenebilmektedir.

Akım uyarımlı sistemde uygulanan kontrolcülerin hava aralığı ölçümleri Şekil 6.1'de gösterilmiştir. Şekil üzerinden bir performans karşılaştırması yapılması gerekirse, en hızlı cevabı doğrudan sıfır güç kontrolcüsün verdiği gözükmektedir. Sıfır güç kontrolcüsünün gözlemcisiz, tam veya indirgenmiş dereceli gözlemci ile çalışmasının performans üzerinde sadece çok düşük bir etkisi olduğu, bu üç kontrolcünün de hava aralığı grafiklerinin neredeyse üst üste çıkmasından anlaşılmaktadır. En yavaş tepkiyi ise yarı sıfır güç ve klasik kayan kipli yarı sıfır güç kontrolleridir. Yarı sıfır güç kontrolün teorik olarak da sıfır güç kontrolüne göre daha yavaş tepki vermesi beklenmektedir. Kayan kipli yarı sıfır güç kontrolcünün uygulanması da düz yarı sıfır güç kontrolünün performansını düz sıfır güç kontrolün performansına yakınsamaktır. Nitekim bu iyileşme, şekildeki süper burulma kayan kipli yarı sıfır güç kontrolünün deneysel sonuçlarından net bir şekilde gözlemlenebilmektedir.

Kalıcı rejime oturma hızının yanında, sıfır güç kontrolcülerinin performans kriterlerinden biri de harcadığı enerjidir, zira bu kontrolcülerin amacı zaten minimum enerji harcayan levitasyon denetimi yapmaktır. Bu kapsamda harcanan enerjiyi karşılaştırmak için ölçülen akımın zaman üzerinden integrali E performans ölçütü olarak belirlenmiştir:



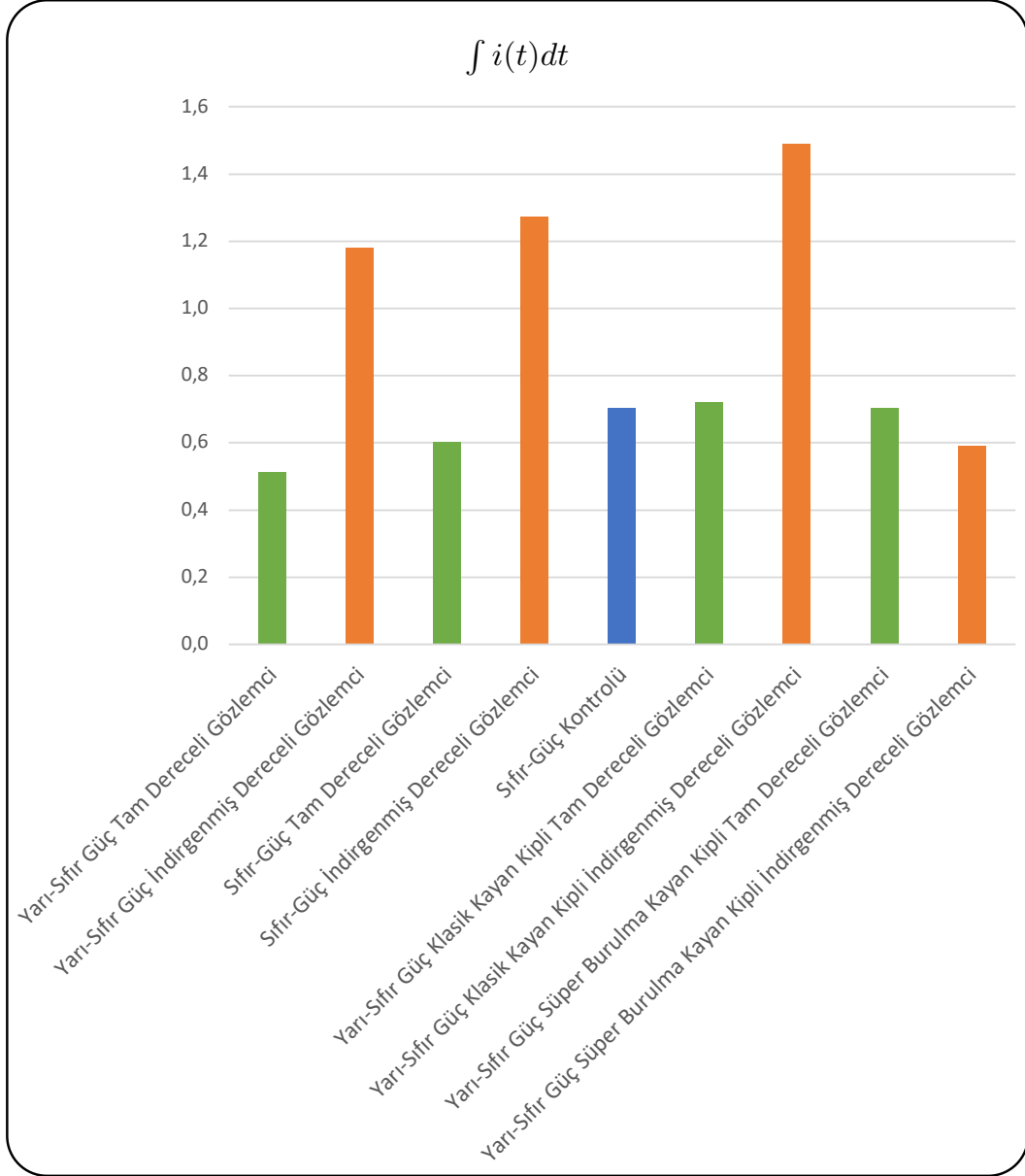
Şekil 6.1 Akım uyarımlı sistemde uygulanan kontrolcülerin hava aralığı ölçümleri



Şekil 6.2 Akım uyarımlı sistemde uygulanan kontrolcülerin akım ölçümleri

$$E = \int |i(t)| dt \quad (6.1)$$

Şekil 6.2’de gösterilen akım ölçümlerinin zaman üzerinden integrali alınıp, kontrolcülerin enerji harcamasının performansı Şekil 6.3’de gösterilmiştir.



Şekil 6.3 Akım uyarımlı sistemde uygulanan kontrolcülerin enerji harcaması

Şekildeki sütunlar, kullanılan gözlemci tipine göre seçilmiştir. Tam dereceli gözlemci yeşil, indirgenmiş dereceli gözlemci turuncu ve gözlemcisiz kontrol de mavi olarak belirlenmiştir. Grafikten de görüldüğü üzere indirgenmiş dereceli gözlemcilerin harcadığı akım daha fazladır. Bunun sebebi hava aralığı geri besleme sinyali gözlemciden değil, direkt ölçüm olarak alındığındandır. Gözlemci, yaptığı

tahminin yanında sinyal için bir filtre gürültü filtresi görevi de gördüğünden dolayı, gözlemci kullanıldığında kullanılan sinyaller daha temiz olmakta ve ölçüm gürültüsünün kontrole etkisi en aza indirgenmektedir.

Bunun yanında, şekilden de anlaşılacağı hava aralığı oturma süresindeki performanssırlamasının aksine, güç tüketiminde yarı sıfır güç kontrolcü en iyi performansı sağlamaktadır. Bu da yarı sıfır güç kontrolcünün, sıfır güç kontrolcüsüne göre daha yavaş oturmasına rağmen, oturması ancak daha az enerji harcadığı anlamına gelmektedir.



- [1] P. S. Divekar, D. T. Ekbote, “Design and Analysis of Maglev Trains,” 2019. (visited on 06/07/2023).
- [2] A. Pati, V. K. Verma, R. Negi, S. K. Nagar, “Real Time Implementation of Series Expansion Based Digital Controller for Magnetic Levitation System,” *Intelligent Control and Automation*, vol. 07, no. 04, pp. 110–128, 2016, issn: 2153-0653, 2153-0661. doi: 10 . 4236 / ica . 2016 . 74011. (visited on 06/07/2023).
- [3] A. Jacob, N. Monteiro, “A new concept of superelevation in magnetic levitation – prodynamic,” *Transportation Systems and Technology*, vol. 4, no. 4, pp. 77–111, Dec. 2018, issn: 2413-9203. doi: 10 . 17816 / transsyyst20184477–111. (visited on 06/07/2023).
- [4] J. Meins, “Chancen und Risiken bei der Entwicklung elektrotechnischer Systeme: Magnetschwebetechnik als exemplarischer Fall,” in *Verantwortung von Ingenieurinnen und Ingenieuren*, L. Hieber, H.-U. Kammeyer, Eds., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014, pp. 129–136, isbn: 978-3-658-05529-5 978-3-658-05530-1. doi: 10 . 1007 / 978 - 3 - 658 - 05530-1_13. (visited on 06/07/2023).
- [5] J. He, D. Rote, H. Coffey, “Study of Japanese electrodynamic-suspension maglev systems,” Tech. Rep. ANL/ESD–20, 10150166, Apr. 1994, ANL/ESD–20, 10150166. doi: 10 . 2172 / 10150166. (visited on 06/07/2023).
- [6] A. Bozkurt, O. Guney, K. Erkan, “Multi degrees of freedom robust magnetic levitation control of a flexible transport mover with disturbance observer and state feedback control,” *Control Engineering and Applied Informatics*, vol. 20, pp. 50–59, Jan. 2018.
- [7] H. Bleuler, “A Survey of Magnetic Levitation and Magnetic Bearing Types.,” *JSME international journal. Ser. 3, Vibration, control engineering, engineering for industry*, vol. 35, no. 3, pp. 335–342, 1992, issn: 0914-8825. doi: 10 . 1299 / jsmec1988 . 35 . 335. (visited on 06/07/2023).
- [8] G. R. Polgreen, “Paper C: Magnetic Suspension,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Conference Proceedings*, vol. 181, no. 7, pp. 145–150, Jun. 1966, issn: 0367-8849, 2058-3362. doi: 10 . 1243 / PIME_CONF_1966_181_131_02. (visited on 06/07/2023).
- [9] G. Polgreen, “The ideal magnet—fully controllable permanent magnets for power and transport,” *Electronics and Power*, vol. 17, no. 1, p. 31, 1971, issn: 00135127. doi: 10 . 1049 / ep . 1971 . 0027. (visited on 06/07/2023).

- [10] D. Atherton, "Maglev using permanent magnets," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 16, no. 1, pp. 146–148, Jan. 1980, issn: 0018-9464. doi: 10.1109/TMAG.1980.1060564. (visited on 06/07/2023).
- [11] M. Morishita, T. Azukizawa, S. Kanda, N. Tamura, T. Yokoyama, "A new MAGLEV system for magnetically levitated carrier system," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 38, no. 4, pp. 230–236, Nov. 1989, issn: 1939-9359. doi: 10.1109/25.45486.
- [12] T. Onuki, Y. Toda, "Optimal design of hybrid magnet in maglev system with both permanent and electromagnets," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 29, no. 2, pp. 1783–1786, Mar. 1993, issn: 1941-0069. doi: 10.1109/20.250751.
- [13] Z. Zhang, L. She, L. Zhang, C. Shang, W. Chang, "Structural optimal design of a permanent-electro magnetic suspension magnet for middle-low-speed maglev trains," *IET Electrical Systems in Transportation*, vol. 1, no. 2, pp. 61–68, Jun. 2011, issn: 2042-9746. doi: 10.1049/iet-est.2010.0018. (visited on 06/07/2023).
- [14] K. Erkan, B. Acarkan, T. Koseki, "Zero-Power Levitation Control Design for a 4-Pole Electromagnet on the Basis of a Transfer Function Approach," in *2007 IEEE International Electric Machines & Drives Conference*, vol. 2, May 2007, pp. 1751–1756. doi: 10.1109/IEMDC.2007.383695.
- [15] E. M. Göker, A. F. Bozkurt, B. Baykal, K. Erkan, *Air Gap Control of the Novel Cross (+) Type 4-Pole MAGLEV Carrier System*, Jun. 2022. arXiv: 2206.08603 [cs, eess]. (visited on 06/07/2023).
- [16] J. Liu, T. Koseki, "3 Degrees of Freedom Semi-Zero-Power Maglev Scheme for Two-Dimensional Linear Motor,"
- [17] Z. Y. Guo, J. Li, "PID Control of Maglev Levitation System Based on Disturbance Observer," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 519–520, pp. 1353–1359, 2014, issn: 1662-7482. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.519-520.1353. (visited on 06/07/2023).
- [18] M. Moazen, M. Sharifian, H. Afshari, "PID control of Maglev Guiding System for Linear Elevator," in *2012 IEEE 5th India International Conference on Power Electronics (IICPE)*, Delhi, India: IEEE, Dec. 2012, pp. 1–6, isbn: 978-1-4673-0934-9 978-1-4673-0931-8 978-1-4673-0933-2. doi: 10.1109/IICPE.2012.6450409. (visited on 06/07/2023).
- [19] E. M. Göker, A. F. Bozkurt, B. Baykal, K. Erkan, "Air Gap Control of the Novel Cross (+) Type 4-Pole MAGLEV Carrier System," 2022. doi: 10.48550/ARXIV.2206.08603. (visited on 06/07/2023).
- [20] J. P. Rickwärtz, J. Kolb, K. Hameyer, "Control, Simulation and Validation of a Hybrid Actuator for a Maglev Train Model on a Scale of 1:20," in *2020 21st International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM)*, Dec. 2020, pp. 1–6. doi: 10.1109/REM49740.2020.9313869.
- [21] M. Bucak, A. Bozkurt, K. Erkan, H. Uvet, *A New Design Concept of Magnetically Levitated 4 Pole Hybrid Mover Driven by Linear Motor*. May 2017, p. 601. doi: 10.1109/ICRA.2017.7989073.

- [22] S. Manabe, “Importance of coefficient diagram in polynomial method,” in *42nd IEEE International Conference on Decision and Control (IEEE Cat. No.03CH37475)*, vol. 4, Dec. 2003, 3489–3494 vol.4. doi: 10.1109/CDC.2003.1271687.
- [23] H. Shim, “Disturbance Observer,” in 2020, pp. 1–8. doi: 10.1007/978-1-4471-5102-9_100068-1. arXiv: 2101.02859 [cs, eess]. (visited on 06/07/2023).
- [24] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, 5th Edition. Boston, Mass.: Pearson Custom Publishing, Jan. 2009, isbn: 978-0-13-713337-6.



A.1 Gerilim Uyarımlı Temel Sistem Dinamiği

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta z(t) \\ \Delta \dot{z}(t) \\ \Delta i_z(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{K_{z,0}}{m} & 0 & \frac{K_{i_z,0}}{m} \\ 0 & -\frac{K_{z,0}}{K_{i_z,0}} & -\frac{R_z}{L_z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta z(t) \\ \Delta \dot{z}(t) \\ \Delta i_z(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_z} \end{bmatrix} \Delta e_z(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{m} \\ 0 \end{bmatrix} F_d(t) \quad (\text{A.1})$$

A.2 Gerilim Uyarımlı Hava Aralığı Kontrolü İntegral ile Genişletilmiş Sistem Dinamiği

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta z(t) \\ \Delta \dot{z}(t) \\ \Delta i_z(t) \\ \int (0 - \Delta z^*(t)) dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{K_{z,0}}{m} & 0 & \frac{K_{i_z,0}}{m} & 0 \\ 0 & -\frac{K_{z,0}}{K_{i_z,0}} & -\frac{R_z}{L_z} & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta z(t) \\ \Delta \dot{z}(t) \\ \Delta i_z(t) \\ \int \Delta z(t) dt \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_z} \\ 0 \end{bmatrix} \Delta e_z(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{m} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} F_d(t) \quad (\text{A.2})$$

A.3 Tam Dereceli Gerilim Uyarımlı Bozucu Gözlemci Dinamiği

$$\frac{d}{dt} \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta z(t) \\ \Delta \dot{z}(t) \\ \Delta i_z(t) \\ F_d(t) \end{bmatrix}}_{\hat{x}} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{K_{z,0}}{m} & 0 & \frac{K_{i_z,0}}{m} & -\frac{1}{m} \\ 0 & -\frac{K_{z,0}}{K_{i_z,0}} & -\frac{R_z}{L_z} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{A_{O,z}} \begin{bmatrix} \Delta z(t) \\ \Delta \dot{z}(t) \\ \Delta i_z(t) \\ F_d(t) \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_z} \\ 0 \end{bmatrix}}_{B_{O,z}} \Delta e_z(t) \quad (\text{A.3})$$

A.4 İndirgenmiş Dereceli Gerilim Uyarımlı Bozucu Gözlemci Dinamiği

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta z(t) \\ \Delta \dot{z}(t) \\ \Delta i_z(t) \\ F_d(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{K_{z,0}}{m} & 0 & \frac{K_{i_z,0}}{m} & 0 \\ 0 & -\frac{K_{z,0}}{K_{i_z,0}} & -\frac{R_z}{L_z} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta z(t) \\ \Delta \dot{z}(t) \\ \Delta i_z(t) \\ F_d(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_z} \\ 0 \end{bmatrix} \Delta e_z(t) \quad (\text{A.4})$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{aa} & A_{ab} \\ A_{ba} & A_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_a \\ B_b \end{bmatrix} \Delta e_z(t) \quad (\text{A.5})$$

A.5 Gerilimi Sıfıra Götüren Sıfır Güç Kontrolü Sistem Dinamiği

$$\frac{d}{dt} \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta z(t) \\ \Delta \dot{z}(t) \\ \Delta i_z(t) \\ \int (0 - \Delta e_z(t)) dt \end{bmatrix}}_{x_{z,e_0}} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{K_{z,0}}{m} & 0 & \frac{K_{i_z,0}}{m} & 0 \\ 0 & -\frac{K_{z,0}}{K_{i_z,0}} & -\frac{R_z}{L_z} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{A_{z,e_0}} \begin{bmatrix} \Delta z(t) \\ \Delta \dot{z}(t) \\ \Delta i_z(t) \\ \int (0 - \Delta e_z(t)) dt \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_z} \\ -1 \end{bmatrix}}_{B_{z,e_0}} \Delta e_z(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} F_d(t) \quad (\text{A.6})$$

A.6 Tahmini Akımı Sıfıra Götüren Sıfır Güç Kontrolü Sistem Dinamiği

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dt} \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta z(t) \\ \Delta \dot{z}(t) \\ \Delta i_z(t) \\ \int (0 - \Delta \hat{i}_z(t)) dt \end{bmatrix}}_{x_{z,i_{est},0}} &= \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{K_{z,0}}{m} & 0 & \frac{K_{i_z,0}}{m} & 0 \\ 0 & -\frac{K_{z,0}}{L_z} & -\frac{R_z}{L_z} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{A_{z,i_{est},0}} \begin{bmatrix} \Delta z(t) \\ \Delta \dot{z}(t) \\ \Delta i_z(t) \\ \int (0 - \Delta e_z(t)) dt \end{bmatrix} + \\
 &+ \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_z} \\ -1 \end{bmatrix}}_{B_{z,i_{est},0}} \Delta e_z(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{m} \\ 0 \end{bmatrix} F_d(t)
 \end{aligned} \tag{A.7}$$

A.7 Akım Uyarımlı Temel Sistem Dinamiği

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta z(t) \\ \Delta \dot{z}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{K_{z,0}}{m} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta z(t) \\ \Delta \dot{z}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_{i_z,0}}{m} \end{bmatrix} \Delta i_z(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{m} \end{bmatrix} F_d(t) \tag{A.8}$$

A.8 Akım Uyarımlı Sıfır Güç Kontrolü İntegral ile Genişletilmiş Sistem Dinamiği

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta z(t) \\ \Delta \dot{z}(t) \\ \int 0 - \Delta i_z(t) dt \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{K_{z,0}}{m} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta z(t) \\ \Delta \dot{z}(t) \\ \int 0 - \Delta i_z(t) dt \end{bmatrix} + \\
 &+ \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_{i_z,0}}{m} \\ -1 \end{bmatrix} \Delta i_z(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{m} \\ 0 \end{bmatrix} F_d(t)
 \end{aligned} \tag{A.9}$$

A.9 Akım Uyarımlı Hava Aralığı Kontrolü İntegral ile Genişletilmiş Sistem Dinamiği

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta z(t) \\ \Delta \dot{z}(t) \\ \int (0 - \Delta z(t)) dt \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{K_{z,0}}{m} & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta z(t) \\ \Delta \dot{z}(t) \\ \int (0 - \Delta z(t)) dt \end{bmatrix} + \\
 &+ \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_{i_z,0}}{m} \\ 0 \end{bmatrix} \Delta i_z(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{m} \\ 0 \end{bmatrix} F_d(t)
 \end{aligned} \tag{A.10}$$

A.10 Akım Uyarımlı Hava Aralığı Kontrolü İntegral ile Genişletilmiş Bölütlenmiş Sistem Dinamiği

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \int (0 - \Delta z(t)) dt \\ \Delta z(t) \\ \Delta \dot{z}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{K_{z,0}}{m} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \int (0 - \Delta z(t)) dt \\ \Delta z(t) \\ \Delta \dot{z}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{K_{z,0}}{m} \end{bmatrix} \Delta i_z(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{m} \end{bmatrix} F_d(t) \quad (\text{A.11})$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} \Delta i_z(t) \quad (\text{A.12})$$

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirisi

1. T. E. Özkaya ve K. Erkan, "Neural Network Modeling of a 4-Pole 3-DoF Magnetic Levitation System based on NARX Architecture", 3rd International Eurasian Conference on Science, Engineering and Technology (EurasianSciEn Tech 2021), Ankara, Türkiye, 17.12.2021.

