

T.C.
ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



MANYETİK KALDIRMA SİSTEMİNİN GÜRBÜZ
KONTROLÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ŞABAN KARAÇAM

BOLU, EYLÜL - 2017

T.C.
ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM
DALI



MANYETİK KALDIRMA SİSTEMİNİN GÜRBÜZ
KONTROLÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ŞABAN KARAÇAM

BOLU, EYLÜL - 2017

KABUL VE ONAY SAYFASI

Şaban KARAÇAM tarafından hazırlanan “MANYETİK KALDIRMA SİSTEMİNİN GÜRBÜZ KONTROLÜ” adlı tez çalışması Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda 21.09.2017 tarihinde Abant İzzet Baysal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi olarak Kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Danışman
Yrd. Doç. Dr. Alper BAYRAK
Abant İzzet Baysal Üniversitesi

Üye
Yrd. Doç. Dr. Seda POSTALCIOĞLU
Abant İzzet Baysal Üniversitesi

Üye
Yrd. Doç. Dr. Uğur HASIRCI
Düzce Üniversitesi

İmza







21.09.2017

Prof. Dr. Duran KARAKAŞ 

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



Aileme,

ETİK BEYAN

Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Şaban KARAÇAM



ÖZET

**MANYETİK KALDIRMA SİSTEMİNİN GÜRBÜZ KONTROLÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ŞABAN KARAÇAM
ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI:YRD. DOÇ. DR. ALPER BAYRAK)**

BOLU, EYLÜL - 2017

Bu çalışmada, manyetik kaldırma sistemi ele alınmıştır. Sistem, mekanik ve elektriksel olarak iki kısma ayrılmış ve kaskat bir denetim yapısı kullanılarak denetlenmiştir. Mekanik kısmın denetimi HİDT (Hatanın işaretinin dayanıklı tümlevi) denetleyici ile, elektriksel kısmın denetimi ise OT (Oran-tümlev) denetleyici ile sağlanmıştır. HİDT denetleyici ile elde edilen denetim sinyali, elektriksel kısmın denetiminde referans sinyal olarak kullanılmıştır. Bilimsel yazından farklı olarak, bu çalışma ile, ilk defa, manyetik kaldırma sisteminin denetiminde, HİDT denetleyici kullanılmıştır. Denetleyicinin performansı, benzetim çalışmaları ile denenmiş ve başarılı sonuçlar alınmıştır.

ANAHTAR KELİMELELER: Manyetik kaldırma sistemi, Gürbüz kontrol, HİDT

ABSTRACT

**ROBUST CONTROL OF A MAGNETIC LEVITATION SYSTEM
MSC THESIS
ŞABAN KARAÇAM
ABANT IZZET BAYSAL UNIVERSITY GRADUATE SCHOOL OF
NATURAL AND APPLIED SCIENCES
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING
(SUPERVISOR: ASSIST. PROF. DR. ALPER BAYRAK)**

BOLU, SEPTEMBER 2017

In this paper, magnetic levitation system is considered. The system is separated into two parts as mechanical and electrical, and controlled with a cascade control structure. The control of mechanical part is provided with RISE (Robust integral of sign of error) controller while PI (Proportional-integral) controller is used for electrical part. The control signal obtained with the RISE controller is used as the reference signal in the control of the electrical part. The performance of the controller is evaluated by conducting numerical simulations and satisfactory results were taken.

KEYWORDS: Magnetic levitation system, Robust control, RISE

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	v
ABSTRACT	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
TABLO LİSTESİ	ix
KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ	x
TEŞEKKÜR	xi
1. GİRİŞ	1
1.1 Manyetik Kaldırma Sistemi Denetimi Üzerine Bilimsel Yazın Taraması	2
1.2 HİDT Denetleyici Üzerine Bilimsel Yazın Taraması	7
2. MANYETİK KALDIRMA SİSTEMİ	10
2.1 Mekanik Kısımın Modeli	11
2.2 Elektriksel Kısımın Modeli	12
3. MANYETİK KALDIRMA SİSTEMİNİN DENETİMİ	14
3.1 Mekanik Kısımın Denetimi	14
3.1.1 Kararlılık Analizi	17
3.2 Elektriksel Kısımın Denetimi	17
4. SAYISAL BENZETİM ÇALIŞMALARI	19
4.1 Sabit Referans Takibi	21
4.2 Yörünge Takibi.....	26
4.3 Değişken Referans Takibi	31
5. SONUÇ	36
6. KAYNAKLAR	38
7. EKLER	48
EK A	48
8. ÖZGEÇMİŞ	53

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Manyetik kaldırma sistemi.	10
Şekil 3.1. Manyetik kaldırma sisteminin denetim şeması.....	14
Şekil 3.2. OT denetim sistemi.....	18
Şekil 4.1. Manyetik kaldırma sistemi MATLAB Simulink devresi.	19
Şekil 4.2. Gürültüsüz durumda sabit referans takibi konum grafiği.	21
Şekil 4.3. Gürültüsüz durumda sabit referans takibi akım grafiği.	22
Şekil 4.4. Gürültüsüz durumda sabit referans takibi gerilim grafiği.....	22
Şekil 4.5. 30 dB gürültülü durumda sabit referans takibi konum grafiği.	23
Şekil 4.6. 30 dB gürültülü durumda sabit referans takibi akım grafiği.....	23
Şekil 4.7. 30 dB gürültülü durumda sabit referans takibi gerilim grafiği.	24
Şekil 4.8. 20 dB gürültülü durumda sabit referans takibi konum grafiği.	24
Şekil 4.9. 20 dB gürültülü durumda sabit referans takibi akım grafiği.....	25
Şekil 4.10. 20 dB gürültülü durumda sabit referans takibi gerilim grafiği.	25
Şekil 4.11. Gürültüsüz durumda yörünge takibi konum grafiği.	26
Şekil 4.12. Gürültüsüz durumda yörünge takibi akım grafiği.	27
Şekil 4.13. Gürültüsüz durumda yörünge takibi gerilim grafiği.	27
Şekil 4.14. 30 dB gürültülü durumda yörünge takibi konum grafiği.....	28
Şekil 4.15. 30 dB gürültülü durumda yörünge takibi akım grafiği.....	28
Şekil 4.16. 30 dB gürültülü durumda yörünge takibi gerilim grafiği.	29
Şekil 4.17. 20 dB gürültülü durumda yörünge takibi konum grafiği.....	29
Şekil 4.18. 20 dB gürültülü durumda yörünge takibi akım grafiği.....	30
Şekil 4.19. 20 dB gürültülü durumda yörünge takibi gerilim grafiği.	30
Şekil 4.20. Gürültüsüz durumda değişken referans takibi konum grafiği.	31
Şekil 4.21. Gürültüsüz durumda değişken referans takibi akım grafiği.	32
Şekil 4.22. Gürültüsüz durumda değişken referans takibi gerilim grafiği.	32
Şekil 4.23. 30 dB gürültülü durumda değişken referans takibi konum grafiği.	33
Şekil 4.24. 30 dB gürültülü durumda değişken referans takibi akım grafiği.	33
Şekil 4.25. 30 dB gürültülü durumda değişken referans takibi gerilim grafiği.	34
Şekil 4.26. 20 dB gürültülü durumda değişken referans takibi konum grafiği.	34
Şekil 4.27. 20 dB gürültülü durumda değişken referans takibi akım grafiği.	35
Şekil 4.28. 20 dB gürültülü durumda değişken referans takibi gerilim grafiği.	35

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 4.1. Model parametre değerleri.....	20
Tablo 4.2. Kazanç değerleri.....	20



KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ

HİDT	: Hatanın işaretinin dayanıklı tümlevi
OT	: Oran tümlev
OTH	: Oran tümlev hız
KKD	: Kayan kip denetleyici
DA	: Doğru akım
OTT	: Oran tümlev türev
BCO	: Barium copper oxide
YBCO	: Yttrium barium copper oxide
dB	: Desibel
m	: Metre
kg	: Kilogram
A	: Amper
mH	: Milihenry
Ω	: Ohm
N	: Newton
R	: Bobin direnci
R_s	: Akım duyu direnci
k	: Elektromıknatis kuvvet sabiti
L	: Bobin endüktansı
V	: Besleme gerilimi
I	: Bobin akımı

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada, manyetik kaldırma sisteminin gürbüz kontrolü ele alınmıştır. Çalışma konusunun belirlenmesi ve hazırlanması sürecinde kıymetli bilgi ve tecrübeleri ile beni yönlendiren değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Alper BAYRAK'a en içten dileklerle teşekkür ederim. Eęitim-öğretim hayatım boyunca değerli bilgilerini benimle paylaşan değerli hocalarıma ve her zaman benden desteklerini esirgemeyen aileme teşekkür ederim.



1. GİRİŞ

Manyetik kaldırma sistemleri, yer çekim kuvvetine karşı bobin tarafından üretilen manyetik alan yardımıyla ferromanyetik (demir, kobalt, nikel vb.) cismin havaya kaldırılmasını veya havada belirlenen bir konumda dengede tutabilmeyi sağlayan sistemlerdir (Duka vd., 2016).

Manyetik kaldırma sistemleri:

- i. Yüksek hızlı manyetik alanla çalışan yolcu trenleri,
- ii. Sürtünmesiz rulmanlar,
- iii. Elektromanyetik vinçler,
- iv. Rüzgar tünel modellerinin kaldırılması,
- v. Hassas makinaların titreşim izolasyonu,
- vi. İndüksiyon fırınlarında dökme metalin kaldırılması,
- vii. Üretim sırasında metal levhaların kaldırılması,

gibi birçok endüstriyel sistemde kullanılmaktadır (Eroğlu ve Ablay, 2016).

Manyetik kaldırma sisteminde (bkz. Şekil 2.1), hareket alanı, cismin hareket alanında yerini belirleyen konum sensörü, cismin havaya kaldırılması için yer çekim kuvvetine karşı zıt bir kuvvet oluşturmak için direnç ve bobinden oluşturulmuş elektromıknatıs devresi, besleme gerilim kaynağı ve sistemin çalışması sırasında devrenin üzerinde oluşan akım değerlerini ölçmek için akım sensörü bulunmaktadır.

Manyetik kaldırma sistemlerinin, yüksek dereceden doğrusal olmayan dinamik yapıya ve kararsız denge noktasına sahip olmaları denetimlerini zorlaştırmaktadır (Eroğlu ve Ablay, 2016).

Manyetik kaldırma sisteminin denetimini sağlamak amacıyla birçok denetim yöntemi uygulanmıştır. En çok kullanılan denetim sistemleri:

- i. Oran tümlev artı oran tümlev türev,
- ii. Bulanık mantık denetimi,
- iii. Faz ilerletici kompanzasyon,
- iv. Öngörülü denetleyici,

- v. Kayan kip denetleyicisi,
- vi. Bulanık mantık oran tümlev türev tipi denetleyiciler,
- vii. Yapay sinir ağları,

gibi yöntemlerdir (Shao vd., 2016; Duka vd., 2016). Verilen denetim yöntemlerinden farklı olarak bu uygulamada manyetik kaldırma sisteminin denetiminde HİDT (Hatanın işaretinin dayanıklı tümlevi) denetleyicisi kullanılmıştır.

Bu çalışmada, manyetik kaldırma sistemi, mekanik ve elektriksel olarak, iki kısma ayrılarak ele alınmıştır. Bu iki kısım kaskat bir denetim yapısı kullanılarak denetlenmiştir. Mekanik kısmın denetimi, HİDT denetleyici kullanılarak sağlanmıştır. Elektriksel kısım ise OT (Oran-tümlev) denetleyici ile denetlenmiştir. HİDT denetleyici ile elde edilen denetim sinyali, elektriksel kısmın denetiminde referans sinyal olarak kullanılmıştır. Yöntemin etkinliğini sınamak için sayısal benzetim çalışmaları yapılmış ve başarılı sonuçlar alınmıştır.

Bu çalışma kapsamında, manyetik kaldırma sistemi ve tezde kullanılmış olan HİDT denetleyici üzerine bilimsel yazın taraması yapılmıştır. Manyetik kaldırma sistemi üzerine yapılan bilimsel yazın taramasında, sistem üzerinde daha önce kullanılan denetleyici sistemleri incelenmiş ve manyetik kaldırma sisteminin denetiminde, şimdiye kadar, HİDT denetçisinin kullanılmadığı görülmüştür.

HİDT üzerine yapılan bilimsel yazın taramasında ise, bu denetim sisteminin daha önce kullanıldığı alanlar ortaya çıkartılmıştır.

Her iki literatür taraması, bu bölüm içerisinde, ilerleyen alt başlıklar altında verilmiştir.

1.1 Manyetik Kaldırma Sistemi Denetimi Üzerine Bilimsel Yazın Taraması

Yapılan araştırmalarda manyetik kaldırma sistemlerinin denetimleri üzerine birçok çalışma bulunmuştur. Lashin vd. (2014), Ackermann ve Utkin yöntemine dayanan kayan kip denetleyicisi tarafından geliştirilen tam ileri beslemeli doğrusallaştırma denetleyicisi ile bulanık kazanç çizelgelemesi denetim yaklaşımları arasında karşılaştırma yapmıştır. Ishigaki vd. (2009), alan soğutmalı disk şeklinde veya küre şeklinde yüksek sıcaklıkta süper iletken kütlelerden ve demir çekirdeği

olmayan dikey olarak yığılmış halka şeklindeki elektromıknatıslardan oluşan aktif manyetik kaldırma sistemini geliştirmeye çalışmıştır. Ito vd. (2006), geri besleme denetim teorisine ve YBCO hacminin süper iletken özelliklerini göz önüne alan elektromanyetik alan analizlerine dayalı dikey yönde kontaklı konum denetim sistemi kurmuştur. Sarmad vd. (2016), yapısal belirsizlikleri olan manyetik kaldırma sistemi için örneklenmiş veri gürbüz denetim tasarımı sunmuş ve klasik Faz Gecikmeli-İlerletici denetleyici ile karşılaştırmıştır. Akram vd. (2015), elektromanyetik kaldırma sisteminin doğrusallaştırılması için geri besleme doğrusallaştırma tekniği ve harici arızaların varlığında, tasarlanmış denetim sisteminin işleyişini görmek için kayan kip denetleyicisinin tasarımı üzerinde vurgu yapmıştır. Eroğlu ve Ablay (2016), manyetik kaldırma sisteminin denetimini izlemek için integral KKD artı çıktı geri beslemeli KKD tabanlı ve OTH artı OT kaskat bağlı kademeli denetleyiciler tasarlamıştır. Patel vd. (2012), daimi mıknatıslar yerine mıknatıslanmış BCO hacimleri kullanılarak yeni taşıyıcı tasarım çalışmasının ilerlemesini bildirmiştir. Alia vd. (2013), havaya kaldırmada sabit mıknatıs ile salınımlı, harici kaynak tarafından uyarılan yüksek T_c süper iletken arasındaki bir etkileşim tarafından üretilen kaldırma sisteminin dinamik özelliklerinin sayısal analizini sunmuştur. Rubio vd. (2017), kaldırma sisteminin modelini tanıtmış, elektromanyetik parametrenin tahmininde sinir ağı kullanmıştır. Al-Araji (2016), bilişsel bağlantılı otomatik ayarlama algoritmasına dayanan geri adımlama yöntemini kullanarak doğrusal olmayan manyetik küre kaldırma sisteminde konum izleme denetim algoritmasının geliştirilmesini önermiştir. Jalili-Kharaajoo vd. (2003), voltaj denetimli manyetik kaldırma sisteminin konum denetimi için kayma kip denetleyicisi önermiştir. Bachle vd. (2013), manyetik kaldırma sistemi için hızlı, doğrusal olmayan model öngörme denetim şeması sunmuştur. Deshpande ve Badrilal (2010), asılı nesnenin konumunu algılamak için rezonans yöntemine dayanan sensör içermeyen manyetik kaldırma sistemini uygulamıştır. Choi ve Baek (2002), tek eksenli manyetik yerçekimi sistemine zaman geciktirme denetimi uygulamıştır. Hernández-Casañas vd. (2016), manyetik kaldırma sistemi için uygulanan bir bulanık denetleyici uygulaması göstermiştir, manyetik aktüatörün karakterizasyonunu ANSYS® analiziyle hesaplamıştır. Hasirci vd. (2013), hava çekirdekli boru şeklindeki doğrusal indüksiyon motoruyla sürülen yeni bir manyetik kaldırma treninin tasarımı, yapımı ve özellikle test edilmesini ele almıştır. Hasirci vd. (2015), hava çekirdekli boru şeklindeki doğrusal indüksiyon motoruyla çalıştırılan manyetik

kaldırma treninin 3 boyutlu sonlu eleman yöntem analizini ele almıştır. Bandal ve Vernekar (2009), manyetik kaldırma sistemi uygulaması için oran tümlev anahtarlama yüzeyi kavramına dayalı kayan kip denetleyicisi tasarlamıştır. Bandal ve Vernekar (2010), manyetik kaldırma sistemi için ayırık zamanlı kayan kip denetimi ve çok kademeli çıktı geri besleme tabanlı ayırık zamanlı kayan kip denetiminin tasarımını önermiştir. Beltran-Carbajal vd. (2015a), manyetik askıya alma sisteminde gürbüz dengeleme ve izleme görevleri için yeni bir çıkış geri besleme denetim şeması önermiştir. Beltran-Carbajal vd. (2015b), kütle yaylı sönümleyici mekanik sistemlerin verimli aktif denetim problemine doğrusal olmayan manyetik kaldırma sisteminin uygulanmasını sunmuştur. Stettinger vd. (2017), bağlantı kusurlarının etkisi altında manyetik kaldırma sistemini denetlemek için denetim stratejisi sunmuştur. Benomair vd. (2016), bulanık kayma kip denetleyici olan doğrusal olmayan, tam düzen gözlemci temelli bir denetim cihazını, aktif bir manyetik kaldırma sistemini kararlı hale getirmek için bulanık kayma kip denetleyicisi olarak önermiştir. Berkelman ve Dzadovsky (2013), iki sabit disk mıknatısı içeren platformun havada durmasında 16 silindirik bobinin düzlemsel dizisini kullanan manyetik kaldırma sistemini anlatmıştır. Lin ve Chen (2015), denetim problemlerinin çözümü için kullanılan kendi kendini düzenleyen parçacık sürüsü optimizasyon algoritmasına dayanan tekrarlı sinirsel bulanık denetleyici yaklaşımı önermiştir. Lin vd. (2011), karmaşık ve doğrusal olmayan sistem olan manyetik kaldırma sisteminin, metalik küre konumunu denetlemek için uyarlanabilir oran tümlev türev denetim sistemi geliştirmiştir. Chiang vd. (2011), bulanık kompensatörlü ikinci dereceden kayma kip denetleyicisini ilk önce tanıtmış ve yükseklik denetimi için manyetik kaldırma denetleyicisine uygulamıştır. Lin vd. (2009), tekrarlı Elman sinir ağı kullanan gürbüz dinamik kayma kip denetleyici sistemi, belirsizlikleri göz önüne alarak, manyetik kaldırma sisteminde cismin konumunu denetlemek için kullanmıştır. Shao vd. (2016), üstel ulaşma yasası yöntemiyle birleştirilen kayan kip denetleyicisini, yaptığı çalışmada kayma kipi değişken yapı denetim ilkesine dayalı olarak tasarlamıştır. Li ve Chiou (2014), alana duyarlı manyetik askıya alma sisteminin iki boyutlu bulanık kayan kip denetimini sunmaktadır. He vd. (2015), modül askıya alma denetim sistemi için mühendislik odaklı ayrıştırıcı denetleyici tasarımı önermiştir. Davey K (2004), denetim elektronikini basitleştiren yeni bir yöntemi araştırmıştır. Muresan vd. (2015), kararlılık analizi prensipleri kullanılarak, ikinci dereceden kararsız işlem sınıfı için kademe dereceli denetleyicilerinin

ayarlanması ve tasarlanmasında yöntem geliştirmiştir. Yetendje vd. (2010), manyetik kaldırma sisteminin üzerinde hataya dayanıklı anahtarlama denetim stratejisi uygulamıştır. Duka vd. (2016), doğrusal olmayan kararsız süreç için iç model denetim tabanlı OTT denetleyicisinin tasarım prosedürünü göstermiştir. Eissa vd. (2015), temel ve parametrik uyarılara ikinci dereceden ve kübik doğrusal olmayan manyetik kaldırma sisteminde yatay titreşimi azaltmada zaman gecikmeli oran türev denetleyici önermiştir. Morales vd. (2014), sistemin fiziksel parametrelerindeki belirsizliklerden kaynaklanan modelleme hatalarının varlığında voltaj denetimli manyetik kaldırma sisteminin konum izleme problemini ele almıştır. Yu vd. (2011), sinirsel denetleyici ve kayan kip denetleyiciyi seri olarak bağlayan manyetik kaldırma için yeni bir denetleyici önerirken, sinirsel kayma kipi denetleyicide sinirsel denetleyici ve kayan kip denetleyiciyi paralel olarak birleştirmiştir. Maia ve Galvão (2007), ikinci dereceden doğrusal olmayan diferansiyel denklem ile modellenen manyetik kaldırma sistemi için gürbüz öngörme denetim yasası tasarlamıştır. Qin vd. (2014), manyetik kaldırma sisteminde çelik kürenin pozisyonunu denetlemede veri odaklı modelleme yaklaşımı ve denetleyici stratejisi sunmuştur. Ginoya vd. (2016), kaskatlı kayma kip denetleyicisi, genellikle elektrik düğümü ve elektromekanik düğümden oluşan manyetik kaldırma sistemi için tasarlanmıştır. Hajjaji ve Ouladsine (2001), deneysel ölçümlerle doğrulanmış manyetik kaldırma sistemleri için doğrusal olmayan bir model önermiştir. Kai ve Huang (2016), manyetik kaldırma sisteminde zamanla değişen belirsizlikleri ve harici bozuklukları önlemek için uyarlanabilir denetleyici tasarlamıştır. Huba ve Kamenský (2005), doğrusal olmayan, kararsız ve hızlı manyetik kaldırma sisteminin çift integratör denetimine dayalı kısıtlı denetleyici tarafından basitçe denetlenebileceğini göstermiştir. Shamelı vd. (2008), manyetik kaldırma cihazında gerçek zamanlı denetim ve manyetik alan hesaplamasını basitleştirmede yaklaşım metodu sunmuştur. Hurley vd. (2004), manyetik askıya alma sisteminde darbe genişlik modülasyonu dönüştürücüsünün çalışmasını açıklamıştır. Kim vd. (2017), yarı yüksek hızlı (220 km / s maksimum hız) maglev trenleri için havalanma ve yönlendirme sisteminin tasarımını sunmuş ve özelliklerini analiz etmiştir. Kumar ve Jerome (2013), bir serbestlik dereceli manyetik kaldırma sisteminin modellenmesi ve denetlenmesini araştırmıştır. Zhang vd. (2013), yeni geliştirilen manyetik askıya alma aşamasının dinamik modellemesi ve hareket denetimini sunmuştur. Zhang vd. (2011), sistemi üçüncü derece doğrusal olmayan diferansiyel denklem ile formüle

etmiştir. Yang vd. (2008), akım geri besleme güç amplifikatörü olan manyetik kaldırma sisteminin konum izleme problemine uyarlanabilir gürbüz çıkış geri besleme denetleyicisi önermiştir. Miyazaki vd. (2004), fiziksel parametrelerin belirsizliklerinden dolayı modelleme hatalarının varlığında manyetik kaldırma sisteminin konum izleme problemini ele almıştır. Yang vd. (2004), fiziksel parametrelerin belirsizliklerinden ötürü modelleme hatalarının varlığında manyetik yer çekim sisteminin konum izleme problemini ele almıştır. Tran ve Kang (2014), belirsiz dinamikleri ve harici bozukluklara sahip manyetik kaldırma sistemine, isteğe bağlı sınırlı zaman izleme denetim yöntemi geliştirmiştir. Khan vd. (2016), harici bozukluklara maruz bırakılan akım denetimli ve voltaj denetimli şemaları için Takagi-Sugeno bulanık model denetim tekniği kullanan manyetik kaldırma sistemi için gürbüz H_{∞} denetleyicisi sentezlemiştir. Lee vd. (2013), çift kutuplu elektromanyetik kaldırma hassas konum sisteminde gürbüz izleme denetim problemini araştırmıştır. Li ve Yu (2010), sinirsel kayma kip denetleyicisinde, kayma kip denetleyicisinin çatırdama özelliğini azaltılabileceğini ve sınır denetleyicisinin denetim hassasiyetini artırılabilirliğini araştırmıştır. Lin vd. (2005), manyetik kaldırmada nesnenin konumunu denetlemek için hibrid hesaplanmış kuvvet denetim sistemini uygulamıştır. Lin vd. (2007), manyetik kaldırma sisteminde cismin konumunu denetlemede radyal temelli fonksiyon ağı kullanan akıllı kayan kip denetleyici sistemi önermiştir. Shieh vd. (2010), manyetik kaldırma sisteminin konumunu izlemek için gürbüz ve ideal kayma kip denetim yaklaşımı sunmuştur. Zhang vd. (2015), parametre belirsizlikleri ve harici bozulmaların varlığında manyetik kaldırma sistemi için üstel izleme denetim problemini araştırmışlardır. Mittal ve Menq (1997), parametre değişiklikleri ve harici bozucu kuvvetlerden mustarip manyetik askıya alma sistemleri ile yol almayı gerçekleştirmek için gürbüz doğrusal olmayan dengeleme algoritması sunmaktadır. Yadav vd. (2016), manyetik kaldırma sisteminde kürenin pozisyonunu denetlemek ve uygun hale getirmek için oran tümlev türevli denetim cihazı tasarlamıştır. Pradhan ve Subudhi (2016), sistemde doğrusal olmayan ve sensör sesleri altında manyetik kaldırma sistemini denetlemek için Lie türevlerine dayanan geri besleme doğrusallaştırmaya dayalı yeni bir doğrusal olmayan denetleyici sunmuştur. Queiroz ve Pradhananga (2007), azaltılmış elektrik kayıpları ile manyetik kaldırma sisteminin denetim problemi ele alınmıştır. Yang ve Tateishi (2001), yerçekimi önyargılı serbestlik dereceli manyetik

kaldırma sisteminin konum izleme sorunu için geri adımlamalı tasarım yaklaşımı ile uyarlanabilir gürbüz ve doğrusal olmayan denetleyici önermiştir.

1.2 HİDT Denetleyici Üzerine Bilimsel Yazın Taraması

HİDT denetleyicinin kullanıldığı bilimsel yazılar da araştırılmış ve birçok çalışma bulunmuştur. Khadra vd. (2016), HİDT denetleyicisini kaotik sistemlere uygulamıştır. Saadia vd. (2015), belirsizliği gidermek, asimptotik izleme performansı elde etmek için, sinir ağı ileri besleme ve HİDT geri besleme yöntemleri ile zenginleştirilen denetim yöntemi önermiştir. Waheed vd. (2015), kuadro rotor insansız hava aracı için, HİDT yöntemi kullanarak konum izleme denetleyicisi geliştirilmiştir. Bidikli vd. (2013), belirsizlik içeren doğrusal olmayan sistemler için, uyarlamalı kazanca sahip bir HİDT denetleyici geliştirmişlerdir. Bennehar vd. (2014), HİDT geri besleme ile model tabanlı ileri besleme uyarlama terimini birleştiren yeni HİDT tabanlı uyarlanabilir denetleyici geliştirmiştir. Fischer vd. (2011), çok katmanlı sinir ağı ile birleştirilen HİDT denetim şeması, otonom su altındaki aracın sürekli, atalet yörüngeyi izlemesine imkan vermektedir. Sharma vd. (2012), sürekli gürbüz denetim yöntemi, sabit zaman gecikmelerinin bilinmeyen durumları ile belirli doğrusal olmayan sistem sınıfı için tasarlanmıştır. Bidikli vd. (2014), HİDT geri besleme yöntemini doğrusal olmayan dinamik sistemlere uygulamıştır. Rkhissi-Kammoun vd. (2015a), HİDT geri besleme denetimi ile geri adımlamalı yöntemi birlikte indüksiyon motor sistemi için tasarlamıştır. Rkhissi-Kammoun vd. (2015b), HİDT geri besleme denetçisini, doğrusal olmayan ve çok değişkenli dinamik, indüksiyon motor sistemi için tasarlamıştır. Taktak-Meziou vd. (2014a), sabit disk sürücü servo konumlandırma sistemine uygulanan HİDT tabanlı sinir ağı denetimi için tahmin tabanlı optimal kazanç seçim yaklaşımı sunulmuştur. Taktak-Meziou vd. (2014b), sabit disk sürücüsünün Okuma / Yazma başlığının izini takip etme problemini, HİDT tabanlı sinir ağı yöntemiyle ele alınmıştır. Yao vd. (2017), hidrolik hareket sisteminin yüksek hassas izleme denetimi için HİDT geri besleme ile uyarlanabilir kompanzasyon geliştirilmiştir. Dierks ve Jagannathan (2009), engellerin yokluğunda, liderin ve izleyicilerin dinamiklerini göz önüne alan, HİDT geri beslemesiyle geri adım atmayı kullanarak, lider, takipçisi temelli düzen denetimi için denetleyiciyi takip eden bir asimptotik olarak kararlı sinir ağı sunmuştur. Dupree vd. (2008), Hamilton-Jacobi-Bellman optimizasyon şemasına dayanan ikinci derece performans

endeksini en aza indiren bir yardımcı denetim terimi ile HİDT geri besleme yöntemini güçlendirmiştir. Patre vd. (2008), yarı küresel asimptotik izlemeyi başarmak için sürekli HİDT geri besleme yönteminin sinir ağı tabanlı ileri besleme terimi ile nasıl birleştirilebileceği açıklanmıştır. Dupree vd. (2009), optimal denetleyicide, ileri besleme sinir ağı yöntemi ile HİDT geri besleme yöntemini birleştirmiştir. Fischer vd. (2012a), sinir ağları ile güçlendirilmiş HİDT denetleyicisini, zamanla değişen durum gecikmeleri ve belirsiz doğrusal olmayan sistemler için kullanmıştır. Fischer vd. (2012b), zamanla değişen ve doğrusal olmayan parametrelili fonksiyonları ve katkıya bağlı sınırlamaları içeren belirsiz lineer olmayan Euler-Lagrange sistem sınıfı için sürekli doymuş denetleyici sağlamaktadır. Fischer vd. (2014a), sistem belirsizliklerini ve yeterli derecede pürüzsüz dışsal bozuklukları telafi etmek için sürekli HİDT denetim yapısı kullanan, tamamen harekete geçirilmiş otonom su altı araç için doğrusal olmayan denetim tasarımının geliştirilmesine odaklanmıştır. Fischer vd. (2014b), sürekli doymuş denetleyiciyi, zamanla değişen ve doğrusal olmayan parametreleştirilmiş fonksiyonları ve belirsiz doğrusal olmayan sistem sınıfı için geliştirmiştir. Feemster (2014), titreşim bozulmalarını telafi etmek için yönlendirilmiş enerji uygulaması HİDT kullanan denetim yaklaşımını sunmuştur. Feemster (2015), HİDT denetim yöntemini, lider, takipçi konvoy sistemi içerisinde önceki araç hız davranışına göre aralıklı mesafeyi düzenlemek için kullanmıştır. Jian vd. (2014), esnek bağlantı manipülatörü için uyarlanabilir HİDT denetim algoritmasını önermiştir. Kawai vd. (2013), antagonistik-artikular kaslarla birlikte iki serbestlik dereceli insan alt uzuvları için HİDT denetimini ele almıştır. Yang vd. (2011), tek girişli-tek çıkışlı, yüksek dereceli, doğrusal olmayan sistem sınıfı için sinir ağı ve HİDT yöntemini birleştirerek yeni bir sürekli denetim tasarımı önermiştir. Yang vd. (2012), bilinmeyen dinamikler ve bozucu girdileri olan çok girişli-çok çıkışlı, sürekli zamanlı, doğrusal olmayan sistem sınıfının izleme denetimi için denetim yasası sunmuştur. Yang vd. (2016), genişletilmiş arıza gözlemcisi ve sürekli HİDT'yi birleştiren bir bileşik denetim stratejisi önermektedir. Yao vd. (2014), sürekli statik sürtünme modeli ile doğrudan DA motorlarla çalışan yüksek performanslı gürbüz hareket sistemleri için HİDT tabanlı denetim cihazı geliştirmiştir. Fan ve Ju (2012), otoyol için büyük ölçüde doğrusal olmayan ve belirsiz trafik akış modelinin karakteristiğine göre, rampa ölçümünü HİDT yöntemiyle tasarlamıştır. Kawai ve Namerikawa (2013), iletişim gecikmeli, doğrusal olmayan teleoperasyon sistem için

gürbüz pasif ve HİDT tabanlı denetim önermiştir. Malekzadeh vd. (2015), yakın zamanda geliştirilen HİDT geri besleme denetleyicisi, Genesisio-Tesi kaotik sistemini denetlemek için uyarlamalı sinirsel gözlemci ile birleştirmiştir. Wang vd. (2016), doğrusal olmayan sürtünme ve harici bozukluklara sahip servo mekanizmalar için yeni gürbüz denetleyici önermiştir.



Mekanik ve elektriksel sistemlerin modelleri alt bölümlerde ayrı ayrı incelenmiştir.

2.1 Mekanik Kısımın Modeli

Mekanik sistemdeki topun davranışını veren dinamik model, Newton'un ikinci kanunu kullanılarak, aşağıdaki gibi elde edilebilir,

$$M\ddot{x} = F(x, I) - Mg. \quad (2.1)$$

Burada M , topun kütlesi, x , topun konumu, g , yerçekimi ivmesi, $F(x, I)$, elektromıknatısın topa uygulamış olduğu kuvvettir (Pradhan ve Subudhi, 2016).

$F(x, I)$, kuvvet bağıntısı aşağıdaki gibi verilebilir,

$$F(x, I) = -\frac{I^2}{2} \frac{dL(x)}{dx}. \quad (2.2)$$

Burada $L(x)$, elektromıknatıs endüktansı ve x de metal cismin konumudur (Eroğlu ve Ablay, 2016). Bobinin endüktansı metal cismin bulunduğu konum değerine göre değişim göstermektedir. Metal cismin konumu denge noktasında iken $x = x_0$ olacak ve bobinin endüktansı $L_1 + L_0$ değerini alacaktır. Metal cisim, sistemde olmadığı veya elektromıknatısla temas etmediğinde ise bobin endüktansı L_1 değerini alacaktır (Eroğlu ve Ablay, 2016). Değişken bobin endüktans denklemi,

$$L(x) = L_1 + \frac{L_0 x_0}{x} = L_1 + \frac{k}{x} \quad (2.3)$$

formülü ile ifade edilir. Burada x_0 , çalışma noktası ve L_0 , cisim x_0 çalışma noktasında iken, bobinin endüktansıdır (Eroğlu ve Ablay, 2016). $L(x)$ değeri çekim kuvveti formülünde yerine yazılıp işlem yapıldığında, elektromıknatıs tarafından üretilen çekim kuvveti,

$$F(x, I) = -\frac{I^2}{2} \frac{dL(x)}{dx} = \frac{k}{2} \left(\frac{I}{x}\right)^2 \quad (2.4)$$

olarak bulunur (Eroğlu ve Ablay, 2016; Kumar ve Jerome, 2013).

Çekim kuvveti ikinci dereceden sistemde yerine yazılırsa, sistem modeli,

$$M\ddot{x} = \frac{k}{2} \left(\frac{l}{x}\right)^2 - Mg \quad (2.5)$$

olarak elde edilir (Kumar ve Jerome, 2013). Burada I^2 sistem girişidir. Sistem girişi yalnız bırakılacak şekilde model aşağıdaki gibi yeniden düzenlenebilir:

$$m(x)\ddot{x} + f(x) = u \quad (2.6)$$

$$y = x. \quad (2.7)$$

Burada

$$m(x) = \frac{2Mx^2}{k}, \quad (2.8)$$

$$f(x) = \frac{2Mgx^2}{k}, \quad (2.9)$$

$$u = I^2 \quad (2.10)$$

ve y , çıkış olarak verilmektedir.

Not 1: Sistemde hareket etmekte olan metal bilye, Şekil 2.1’de görüldüğü gibi sınırlı bir alanda hareket ettiği için, bilye konumu, x , sınırlıdır. Bu sebeple $m(\cdot)$ ve $f(\cdot)$ fonksiyonları, pozitif değerli, sınırlı, ikinci dereceye kadar türevlenebilir, doğrusal olmayan fonksiyonlardır.

Ayrıca, $x=0$ durumunun fiziksel olarak engellendiği ve elektromanyetik kuvvetin sınırlandırıldığı varsayılmaktadır. Bu durumda, metal bilyenin hızı ve ivmesi de sınırlıdır.

2.2 Elektriksel Kısımın Modeli

Manyetik kaldırma sisteminin elektriksel kısmının modeli iki şekilde ifade edilir:

1. Metal cismin sistemde olmadığı durumda sabit sargılı endüktans için doğrusal bir model,
2. Metal cismin elektromıknatısla teması durumunda zamanla değişen endüktans için doğrusal olmayan model (Eroğlu ve Ablay, 2016).

Elektriksel kısmın modelini bulmak için kirchoff gerilim yasasını kullandığımızda,

$$V = IR + IR_s + L \frac{dI}{dt} \quad (2.11)$$

doğrusal model formülü elde edilir (Eroğlu ve Ablay, 2016).

Akımın zamana göre türevi denklemde yalnız bırakılırsa,

$$\frac{dI}{dt} = \frac{1}{L} V - \frac{R+R_s}{L} I \quad (2.12)$$

olarak bulunur (Eroğlu ve Ablay, 2016).

Elektriksel kısmın modelinde zamanla değişen endüktans dikkate alındığında, doğrusal olmayan model denklemi,

$$V = IR + IR_s + \frac{d(IL)}{dt} \quad (2.13)$$

$$V = IR + IR_s + L \frac{dI}{dt} + I \frac{dL}{dt} \quad (2.14)$$

$$\frac{dI}{dt} = \frac{1}{L} V - \frac{(R+R_s)}{L} I + \frac{k \dot{x}}{L x^2} I \quad (2.15)$$

olarak bulunur (Eroğlu ve Ablay, 2016).

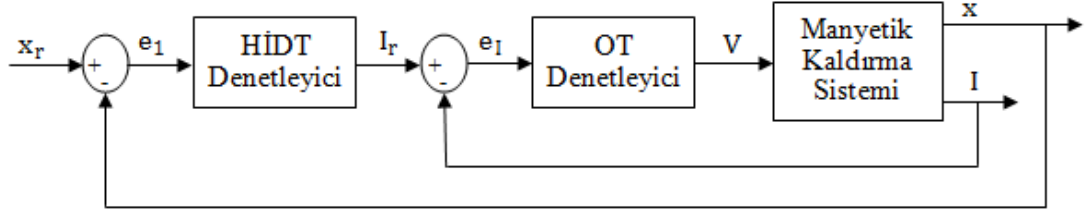
(2.15)'te bulunan metal cismin konumu Not 1'de $x > 0$ olarak tanımlıdır.

Metal cismin konumu bobin endüktansı üzerinde parametre belirsizliğine neden olmuştur. Bu parametre belirsizlikleri sistem üzerinde istenmeyen etkilerin oluşmasına yol açar. Bu etkileri ortadan kaldırmak için gürbüz bir denetleyici kullanılması gerekir (Eroğlu ve Ablay, 2016).

3. MANYETİK KALDIRMA SİSTEMİNİN DENETİMİ

Manyetik kaldırma sisteminin denetimi, Şekil 3.1’de görüldüğü gibi, iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, mekanik kısım için giriş sinyali olan bobin akımı elde edilmiştir. İkinci kısımda, bu bobin akımı elektriksel kısmın denetiminde referans akım olarak kullanılmış ve devre akımının bu referans akımı takip etmesi sağlanmıştır.

Denetleyici tasarımında, metal bilyenin konumunun, hızının ve devre akımının elde edilebilir olduğu varsayılmıştır.



Şekil 3.1. Manyetik kaldırma sisteminin denetim şeması.

3.1 Mekanik Kısımın Denetimi

Mekanik kısmın denetiminde amaç, metal topun konumu, x 'in, referans konumu takip etmesi için gerekli I , akım sinyalini hesaplamaktır.

Bu bölümde kullanılan HİDT denetim yöntemi Xian vd. (2004)'ten alınmıştır. Xian vd. (2004)'te genel formda verilen yöntem, manyetik kaldırma sisteminin mekanik kısmı için ikinci dereceden sisteme indirgenerek verilmiştir. Xian vd. (2004)'ten farklı olarak, (3.3) eşitliğinde, e_2 sinyali içerisine α_1 kazancı eklenmiştir.

Sistemin hata sinyali,

$$e_1 = x_r - x \quad (3.1)$$

olarak tanımlanmıştır. Burada $x_r(t) \in \mathbb{R}$, dördüncü dereceye kadar sürekli türevlenebilen referans yörüngedir ve aşağıda gösterildiği gibi kendisi ve türevleri sınırlıdır:

$$x_r^{(i)}(t) \in \mathcal{L}_\infty, i = 0, \dots, 4. \quad (3.2)$$

Filtre edilmiş hata sinyalleri,

$$e_2 = \dot{e}_1 + \alpha_1 e_1 \quad (3.3)$$

$$r = \dot{e}_2 + \alpha_2 e_2 \quad (3.4)$$

olarak tasarlanmıştır. Burada α_1 ve α_2 pozitif sabitlerdir ve

$$\dot{r} = \ddot{e}_2 + \alpha_2 \dot{e}_2 \quad (3.5)$$

olarak elde edilir. (3.5) eşitliğinin her iki tarafı m ile çarpılır ve (3.3) eşitliğinin birinci ve ikinci türevleri alınarak yerine konursa

$$m\dot{r} = m(\ddot{x}_r - \ddot{x} + \alpha_1 \dot{e}_1 + \alpha_2 \dot{e}_2) \quad (3.6)$$

eşitliği elde edilir. (2.6) eşitliğinin türevi,

$$m\ddot{x} = -\dot{m}\dot{x} - \dot{f} + \dot{u} \quad (3.7)$$

olarak elde edilir. (3.7) eşitliği, (3.6) eşitliğinde yerine konursa

$$m\dot{r} = m(\ddot{x}_r + \alpha_1 \dot{e}_1 + \alpha_2 \dot{e}_2) + \dot{m}\dot{x} + \dot{f} - \dot{u}$$

$$m\dot{r} = -\frac{1}{2}\dot{m}r - e_2 - \dot{u} + N \quad (3.8)$$

elde edilir. Burada

$$N(x, \dot{x}, \ddot{x}) = \dot{f} + e_2 + \dot{m}\left(\ddot{x} + \frac{1}{2}r\right) + m(\ddot{x}_r + \alpha_1 \dot{e}_1 + \alpha_2 \dot{e}_2) \quad (3.9)$$

olarak tanımlanmıştır. (3.8) eşitliğindeki, denetim işareti,

$$\dot{u} = (k_s + 1)r + \beta \text{sgn}(e_2) \quad (3.10)$$

olarak tasarlanmıştır (Xian vd., 2004).

Not 2: (3.10) eşitliğindeki ifadenin integrali alınırsa giriş işareti,

$$u = (k_s + 1)(e_2(t) - e_2(0)) + \int_0^t [(k_s + 1)\alpha_2 e_2(t) + \beta \text{sgn}(e_2(t))] dt \quad (3.11)$$

olarak elde edilir. (3.11) eşitliğinden görüleceği gibi denetim sinyali, elde edilemeyen herhangi bir sinyal içermemektedir.

Not 3: (2.10) eşitliğinde, denetim işareti, akımın karesi olarak verilmiştir. Denetim işlemi kaskat olarak yapıldığı ve burada bulunan akım değeri elektriksel kısmın denetiminde referans işareti olarak kullanılacağı için, denetim işareti,

$$u = I_r^2 \quad (3.12)$$

olarak alınacaktır.

Not 4: (3.12) eşitliğinden, referans akım değeri,

$$I_r = \sqrt{u} \quad (3.13)$$

olarak bulunur. Giriş işaretinin negatif değerleri için akım değeri gerçel olamayacağı için, u , işareti, aşağıda verilen doyum fonksiyonuna tabi tutulmuştur:

$$\text{sat}(a) = \begin{cases} a & a \geq 0 \\ 0 & a < 0 \end{cases} \quad (3.14)$$

(3.10) eşitliği, (3.8) eşitliğinde yerine yazılırsa

$$m\ddot{r} = -\frac{1}{2}\dot{m}r - e_2 + (k_s + 1)r + \beta \text{sgn}(e_2) + \tilde{N} + N_r \quad (3.15)$$

elde edilir. Burada

$$N_r(t) = N|_{\substack{x=x_r \\ \dot{x}=\dot{x}_r \\ \ddot{x}=\ddot{x}_r}}$$

$$N_r(t) = \dot{f}(x_r, \dot{x}_r) + \dot{m}(x_r, \dot{x}_r)\ddot{x}_r + m(x_r, \dot{x}_r)\ddot{x}_r \quad (3.16)$$

ve

$$\tilde{N}(x, \dot{x}, \ddot{x}, t) = N - N_r \quad (3.17)$$

olarak tanımlanmaktadır.

Not 5: (3.9) eşitliğinde tanımlanan N sürekli türevlenebilir olduğu için, \tilde{N} , aşağıda gösterildiği gibi üstten sınırlanabilir,

$$\|\tilde{N}\| \leq \rho(\|z\|)\|z\|. \quad (3.18)$$

Burada, $\|\cdot\|$, Öklid normu, $\rho: \mathbb{R}_{\geq 0} \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}$ küresel olarak terslenebilir, azalmayan fonksiyon ve

$$z := [e_1 \quad e_2 \quad r]^T \quad (3.19)$$

olarak ifade edilmektedir.

3.1.1 Kararlılık Analizi

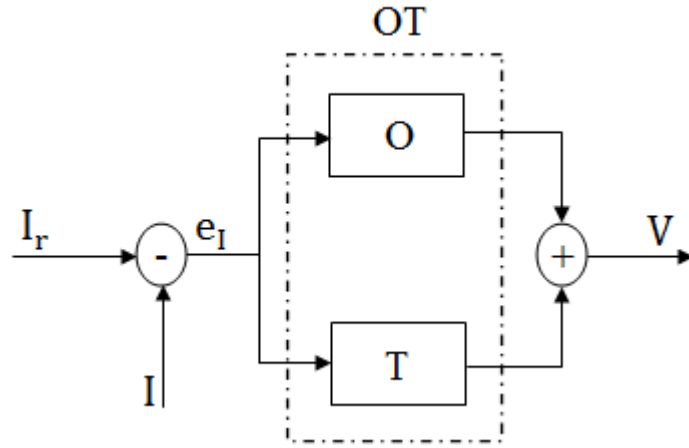
Kullanılan denetleyici, Not 1'de verilen koşullar altında, $\alpha_1, \alpha_2 > 1/2$, k_s , sistem başlangıç koşullarına göre yeterince büyük,

$$\beta > \|N_r(t)\|_{\mathcal{L}_\infty} + \frac{1}{\alpha} \|\dot{N}_r(t)\|_{\mathcal{L}_\infty}, \quad (3.20)$$

burada $\|\cdot\|_{\mathcal{L}_\infty}$, \mathcal{L}_∞ normudur, olacak şekilde seçilirse, tüm sistem sinyallerinin sınırlı olmasını ve (3.1) eşitliğindeki hata sinyali ve bu sinyalin birinci ve ikinci türevlerinin zamanla sifıra gitmesini yarı-küresel olarak garanti eder (Xian vd., 2004). Kararlılık analizi Ek A'da verilmiştir.

3.2 Elektriksel Kısımın Denetimi

Elektriksel kısımın denetiminde amaç, bobin akımının, referans akımı takip etmesidir. Bu kısımın denetiminde OT denetleyici kullanılmıştır. OT denetleyici yapısı Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2. OT denetim sistemi.

Mekanik kısmın denetiminde elde edilen akım değeri, referans akım olarak alınmıştır ve I_r olarak ifade edilecektir.

Elektriksel kısmın denetim sisteminde hata sinyali,

$$e_I = I_r - I \quad (3.21)$$

olarak tanımlanmıştır. (2.15) eşitliğinde verilen sistem modeli için, giriş gerilimi V ,

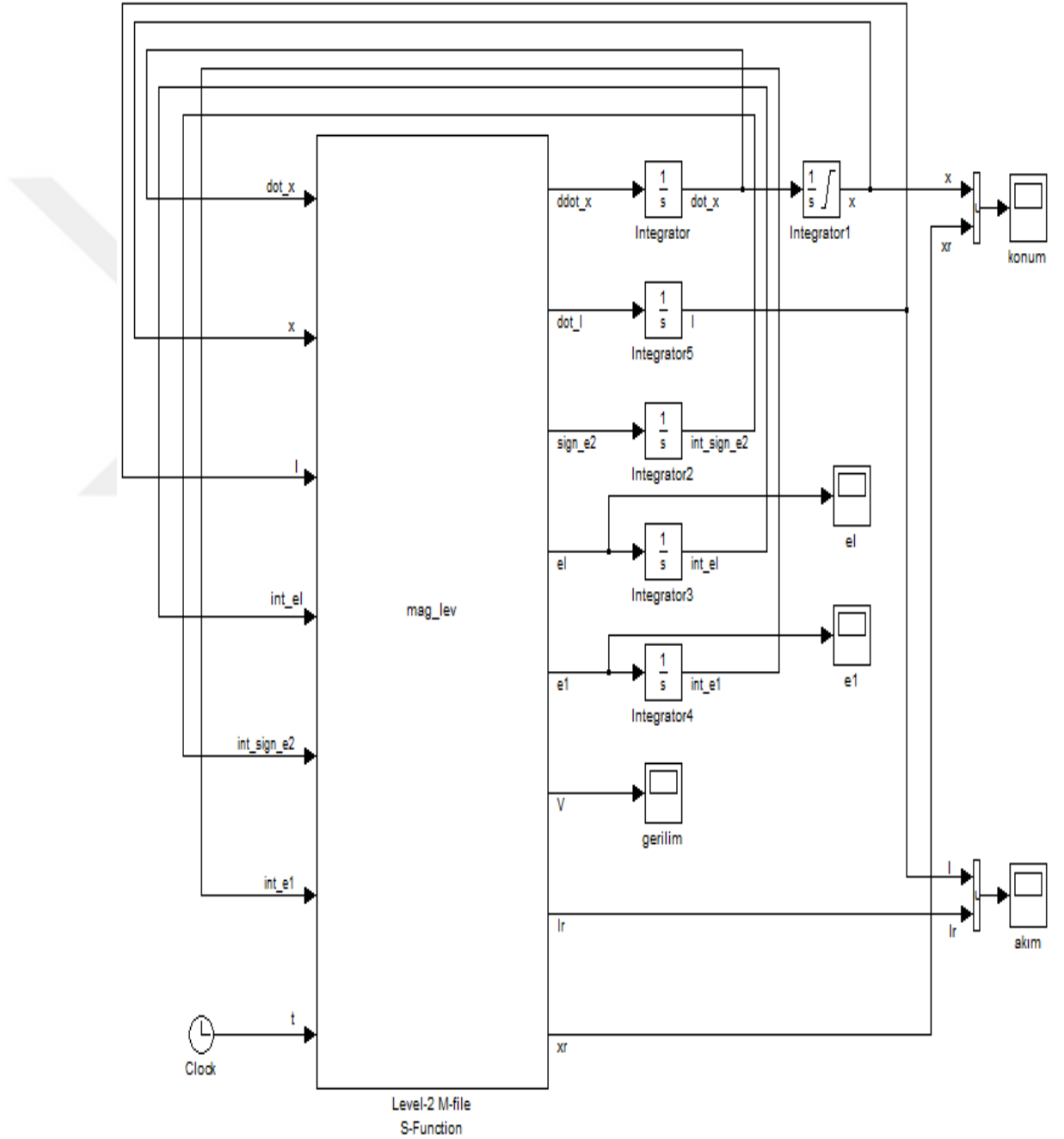
$$V(t) = k_p e_I(t) + k_I \int e_I(t) \quad (3.22)$$

olarak tasarlanmıştır. Kullanılan gerilim kaynağının sınırlı olması göz önüne alınarak, giriş sinyali, aşağıdaki doyum fonksiyonuna tabi tutulmuştur:

$$\text{sat}(a) = \begin{cases} a & 0 \leq a \leq 30 \\ 0 & a < 0 \\ 30 & a > 30 \end{cases} \quad (3.23)$$

4. SAYISAL BENZETİM ÇALIŞMALARI

Sayısal benzetim çalışmaları, MATLAB Simulink programı ile yapılmıştır. Benzetim çalışmalarında kullanılan, blok diyagram Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Manyetik kaldırma sistemi MATLAB Simulink devresi.

Benzetim çalışmalarında, (2.6) ve (2.12) eşitliklerinde verilen sistem modelleri ve (3.11) ve (3.22) eşitliklerinde verilen denetim işaretleri kullanılmıştır. Model parametreleri ve denetleyici kazançları, sırasıyla, Tablo 1 ve 2’de verilmiştir.

Benzetim çalışmaları, sabit referans, yörünge takibi ve değişken referans olmak üzere üç durum için yapılmıştır. Denetleyicilerin etkinliğini göstermek amacıyla, her üç durum için, durum sinyallerine gürültü eklenmiş ve eklenmemiş benzetim çalışmalarının sonuçları verilmiştir. Gürültü eklenmiş durumda, konum, hız ve akım sinyallerine sinyal-gürültü oranı 30 dB ve 20 dB olan ek-beyaz-Gauss gürültüsü eklenmiştir. Tüm durumlar için aynı kazanç değerleri kullanılmıştır. Tüm durumlar için başlangıç değerleri, konum için 0.006 m, hız, akım ve gerilim için 0’dır. Gerilim değeri 30 V ile sınırlandırılmıştır.

Tablo 4.1. Model parametre değerleri (Eroğlu ve Ablay, 2016) .

Parametre	Değer
L	412,5mH
R	10 Ω
R _s	1 Ω
K	6,53*10 ⁻⁵ Nm ² /A ²
M	0,068 kg

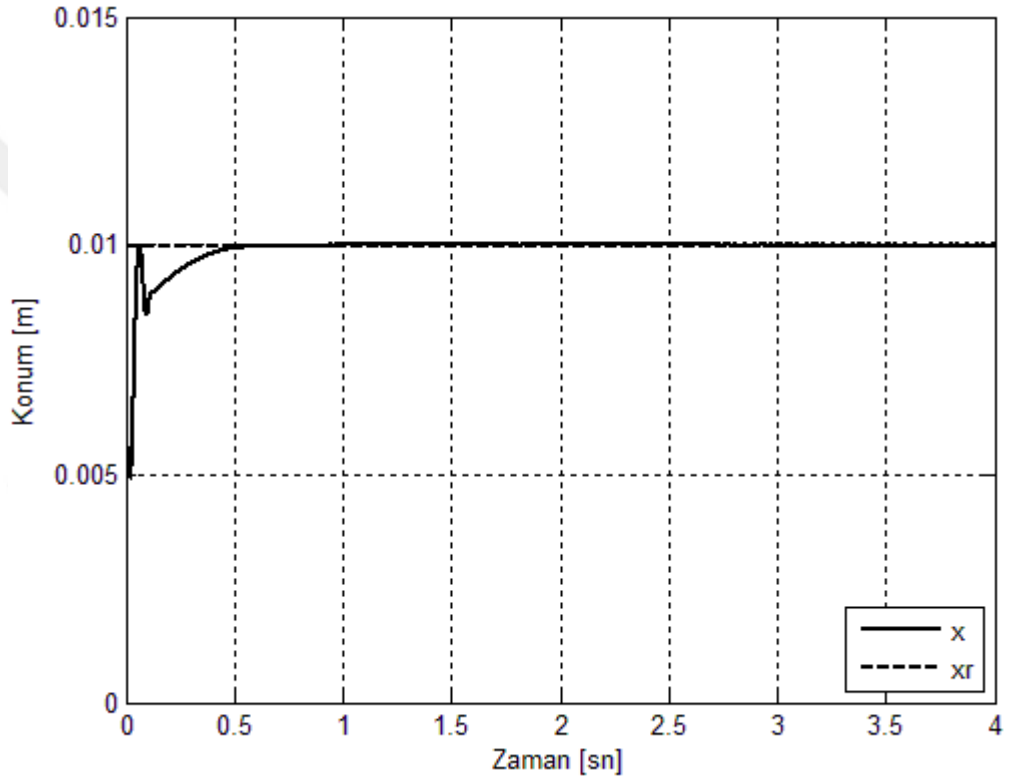
Tablo 4.2. Kazanç değerleri.

Kazanç	Değer
k _p	150
k _i	150
α_1	10
α_2	10
B	1.2
k _s	42

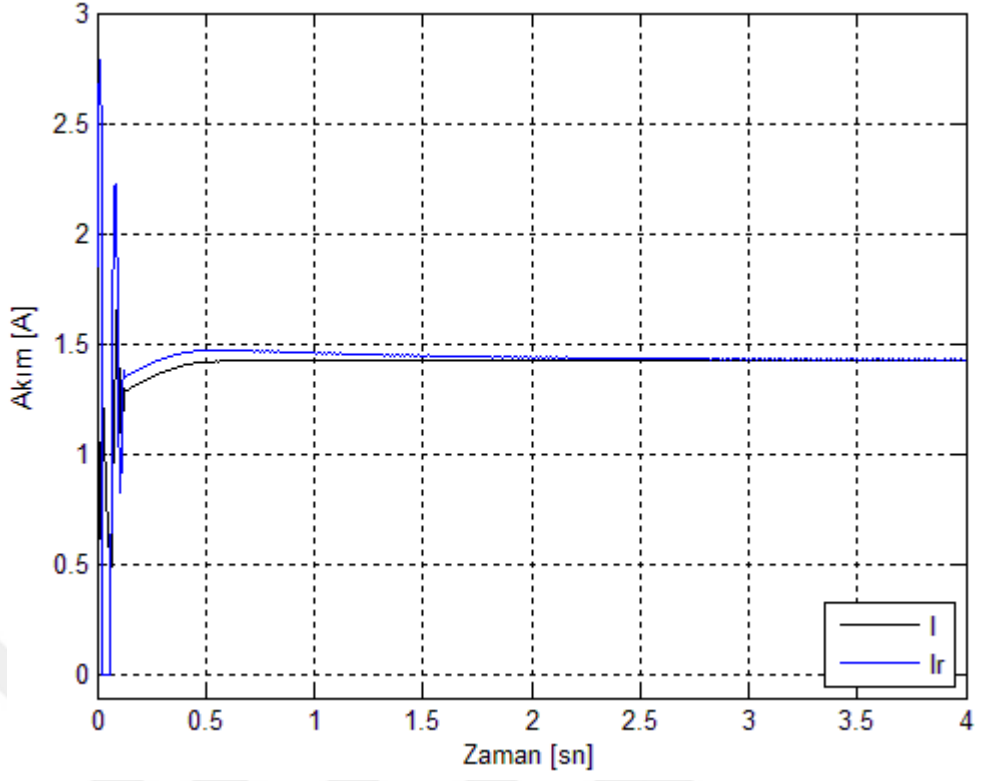
4.1 Sabit Referans Takibi

Sabit referans takibi durumunda, referans değeri $x_r=0.01$ m olarak alınmıştır. Şekil 4.2, 4.3 ve 4.4'te gürültüsüz, Şekil 4.5, 4.6 ve 4.7'de 30 dB gürültülü, Şekil 4.8, 4.9 ve 4.10'da 20 dB gürültülü durum için, sırasıyla, konum, akım ve gerilim grafikleri görülmektedir.

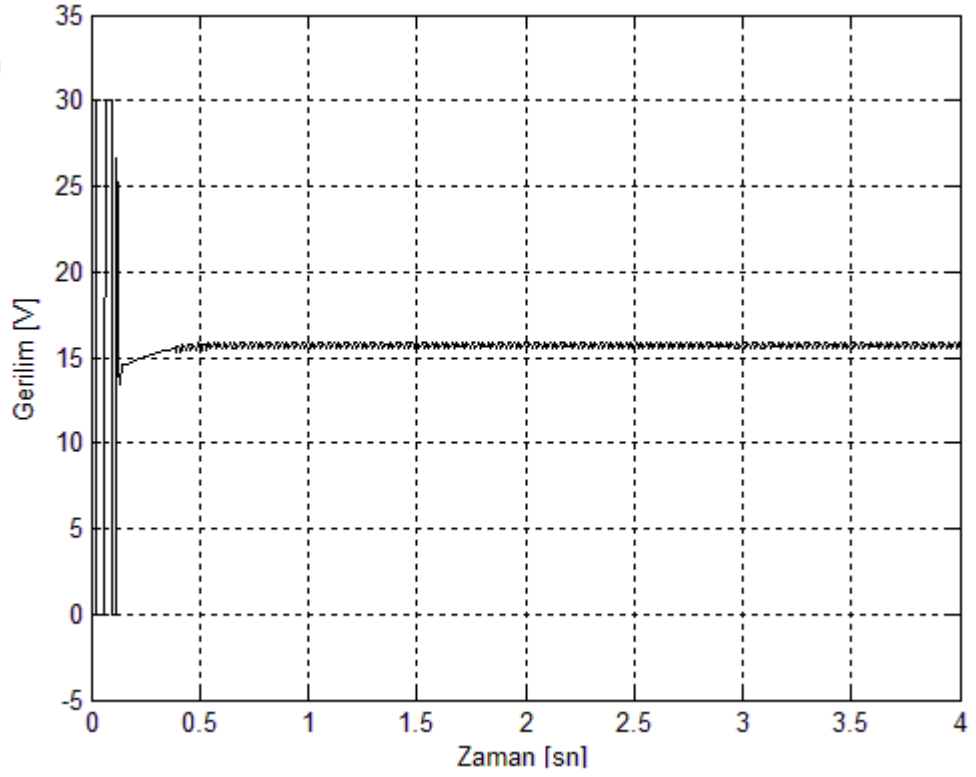
Şekil 4.2, 4.5 ve 4.8'den görülebileceği gibi hem gürültüsüz hem de gürültülü durumda, denetim amacına ulaşılmıştır.



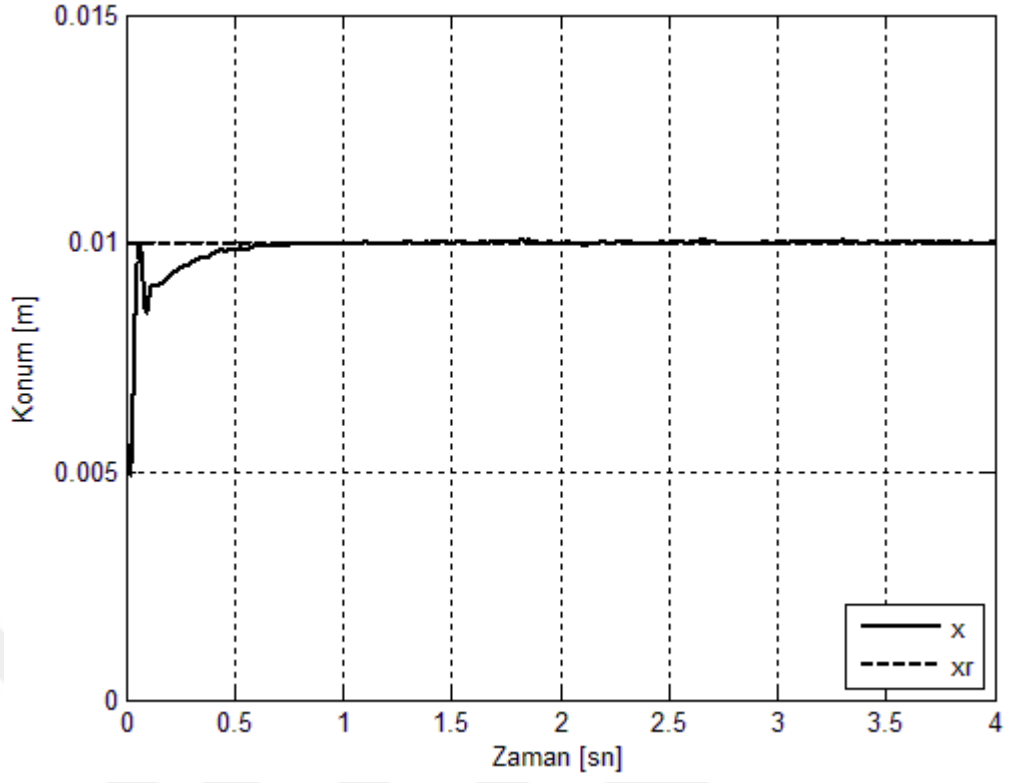
Şekil 4.2. Gürültüsüz durumda sabit referans takibi konum grafiği.



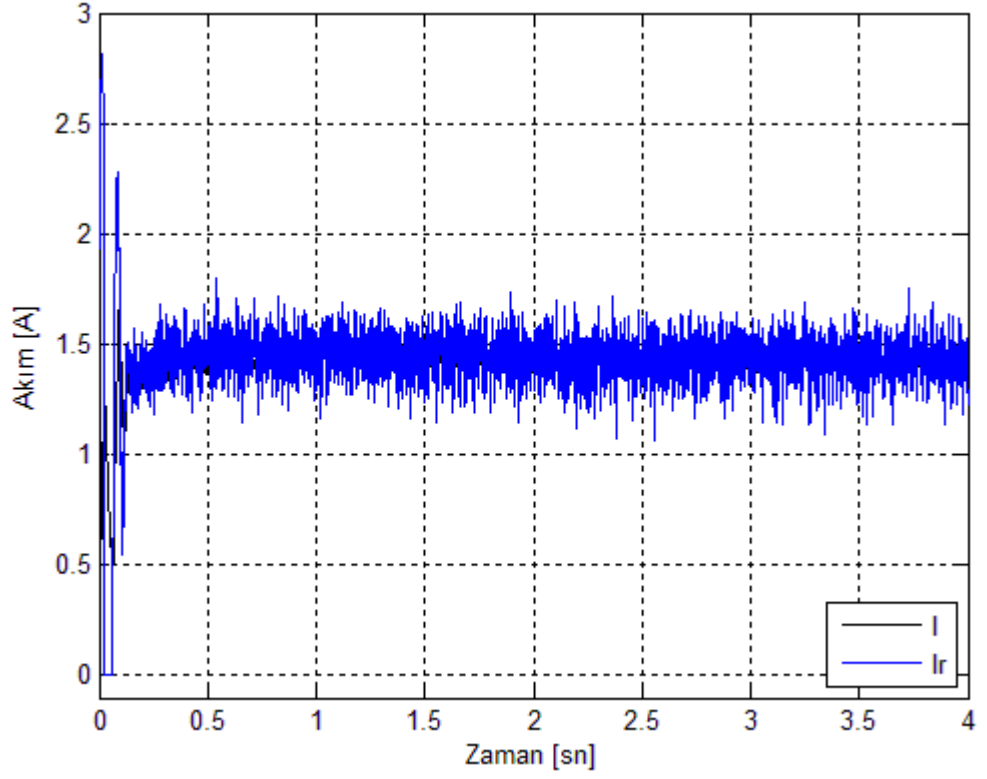
Şekil 4.3. Gürültüsüz durumda sabit referans takibi akım grafiği.



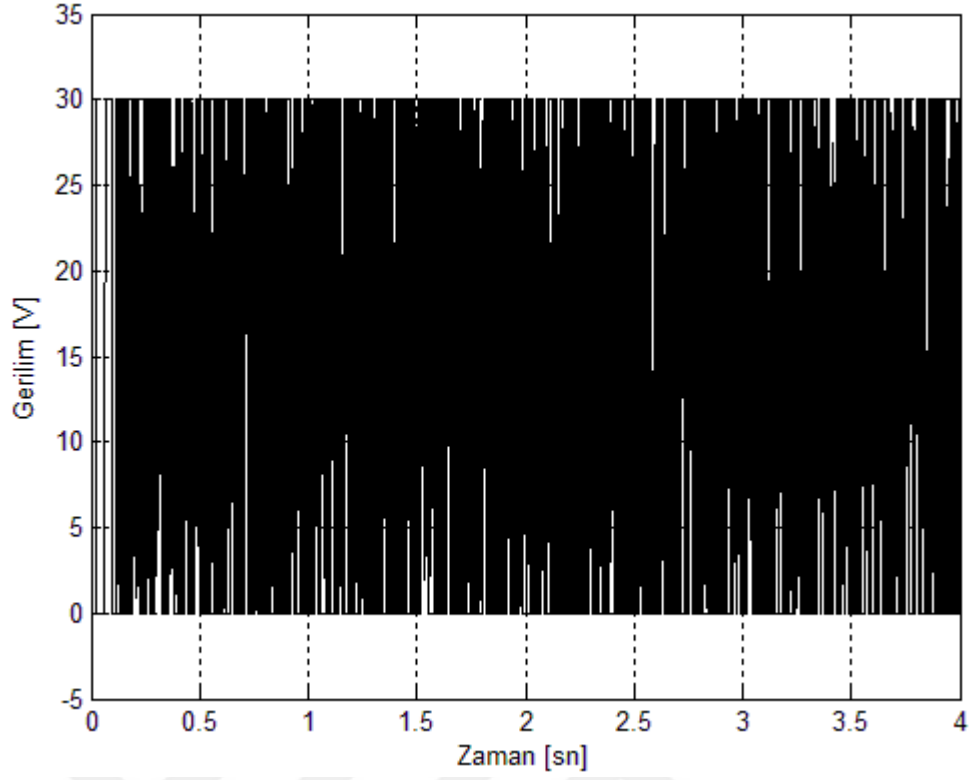
Şekil 4.4. Gürültüsüz durumda sabit referans takibi gerilim grafiği.



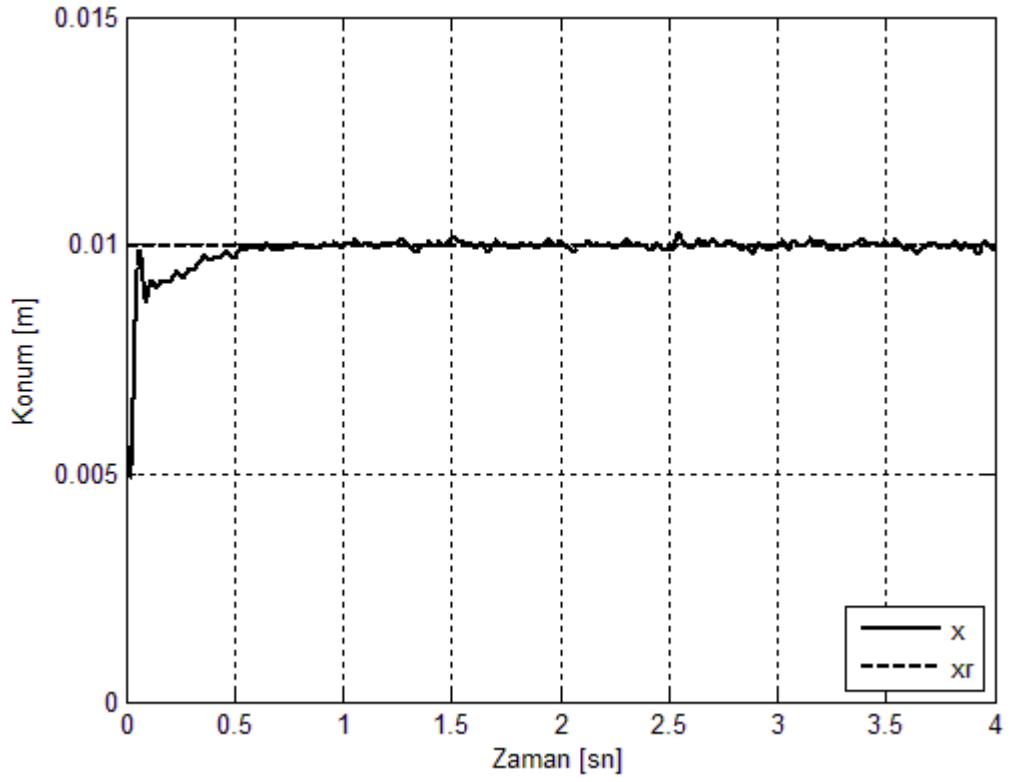
Şekil 4.5. 30 dB gürültülü durumda sabit referans takibi konum grafiği.



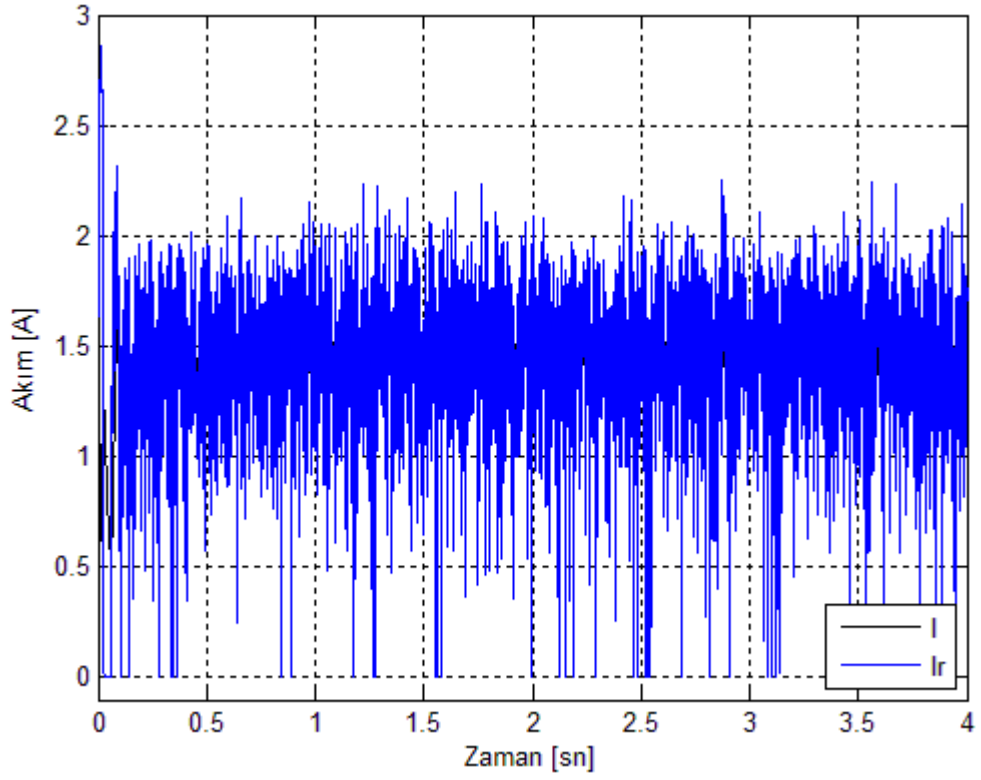
Şekil 4.6. 30 dB gürültülü durumda sabit referans takibi akım grafiği.



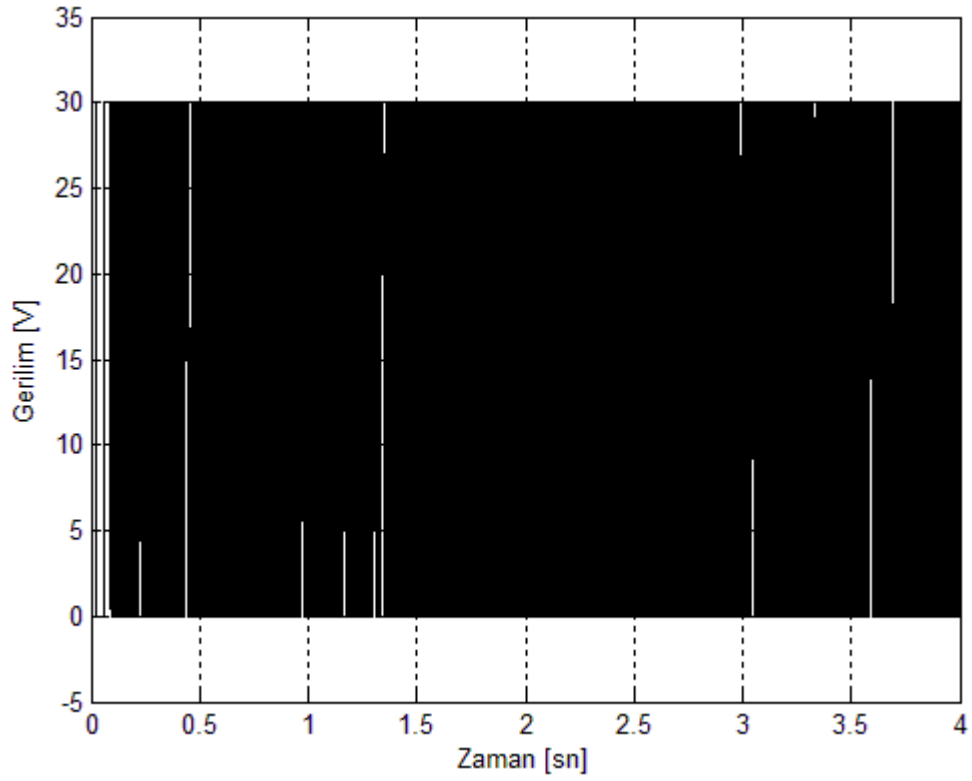
Şekil 4.7. 30 dB gürültülü durumda sabit referans takibi gerilim grafiği.



Şekil 4.8. 20 dB gürültülü durumda sabit referans takibi konum grafiği.



Şekil 4.9. 20 dB gürültülü durumda sabit referans takibi akım grafiği.



Şekil 4.10. 20 dB gürültülü durumda sabit referans takibi gerilim grafiği.

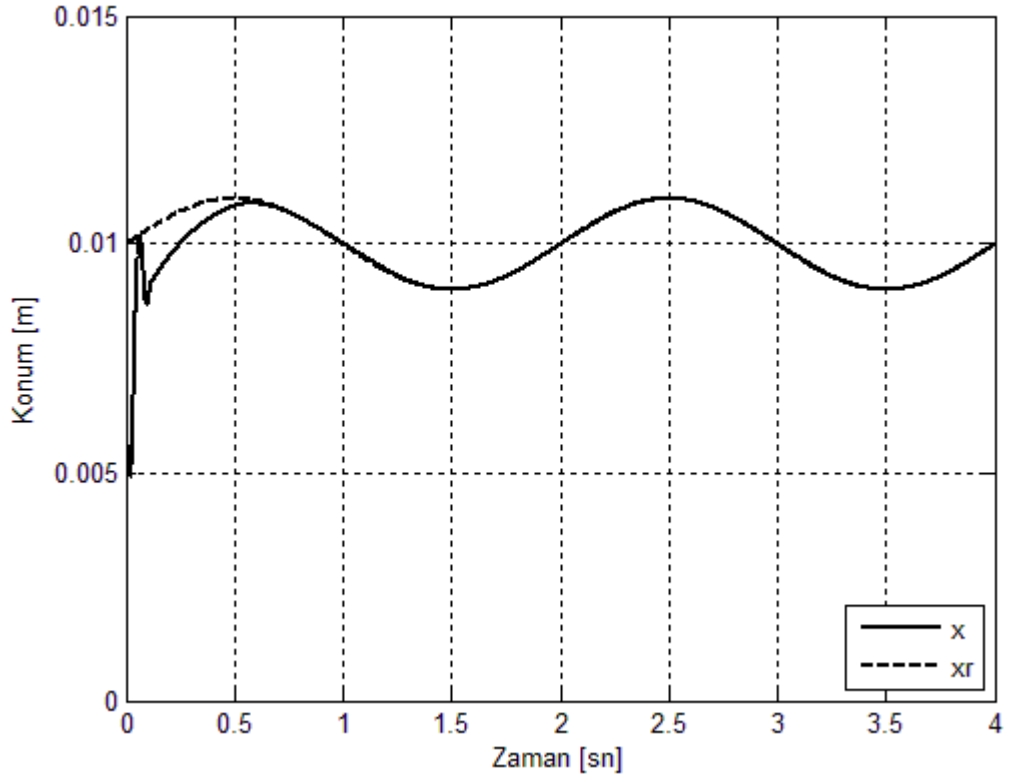
4.2 Yörünge Takibi

Yörünge takibi durumunda, referans değeri,

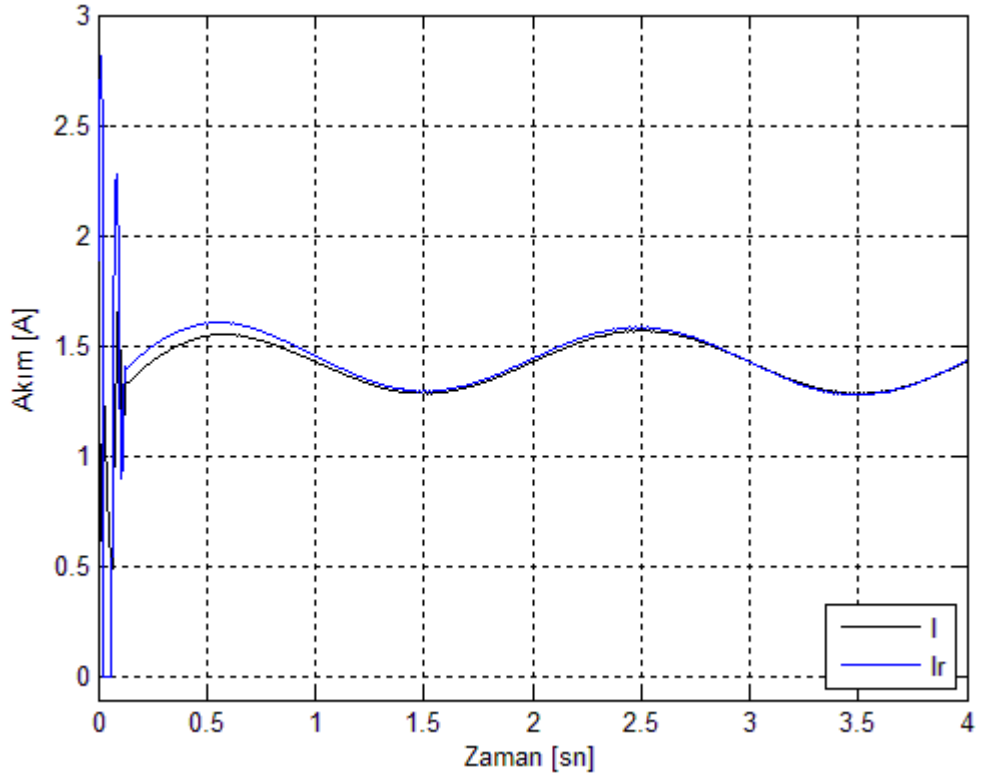
$$x_r = 10 \cdot 10^{-3} + 10^{-3} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \quad (4.1)$$

olarak alınmıştır. Burada $f=0.5$ Hz'dir. Şekil 4.11, 4.12 ve 4.13'de gürültüsüz, Şekil 4.14, 4.15 ve 4.16'da 30 dB gürültülü ve Şekil 4.17, 4.18 ve 4.19'da 20 dB gürültülü durum için, sırasıyla, konum, akım ve gerilim grafikleri görülmektedir.

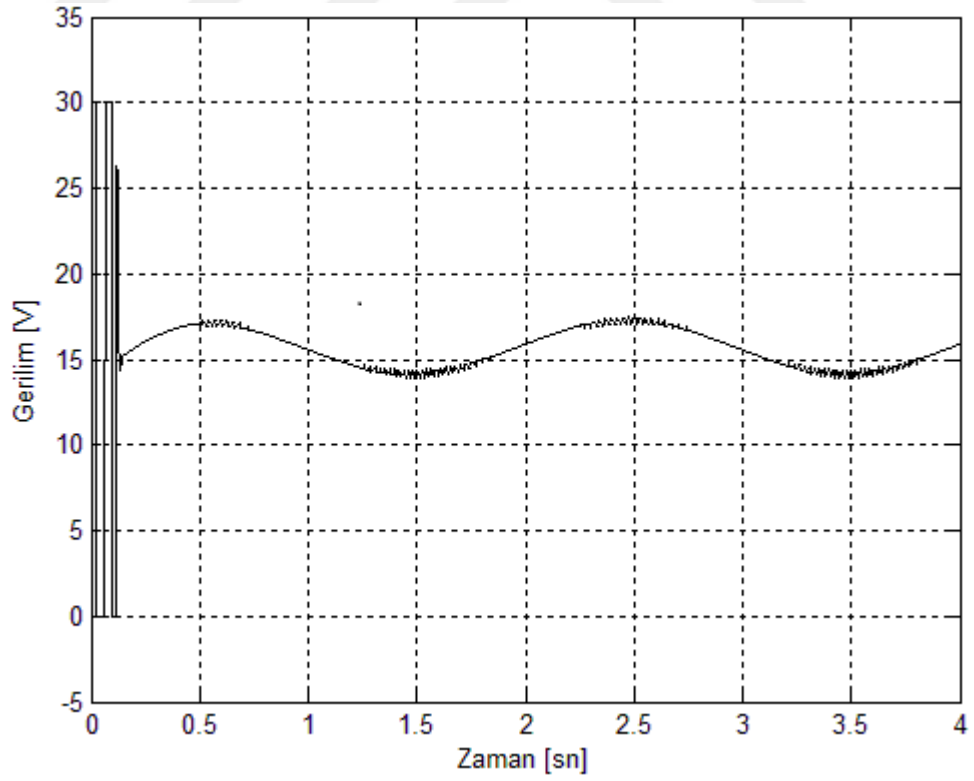
Şekil 4.11, 4.14 ve 4.17'den görülebileceği gibi hem gürültüsüz hem de gürültülü durumda, denetim amacına ulaşılmıştır.



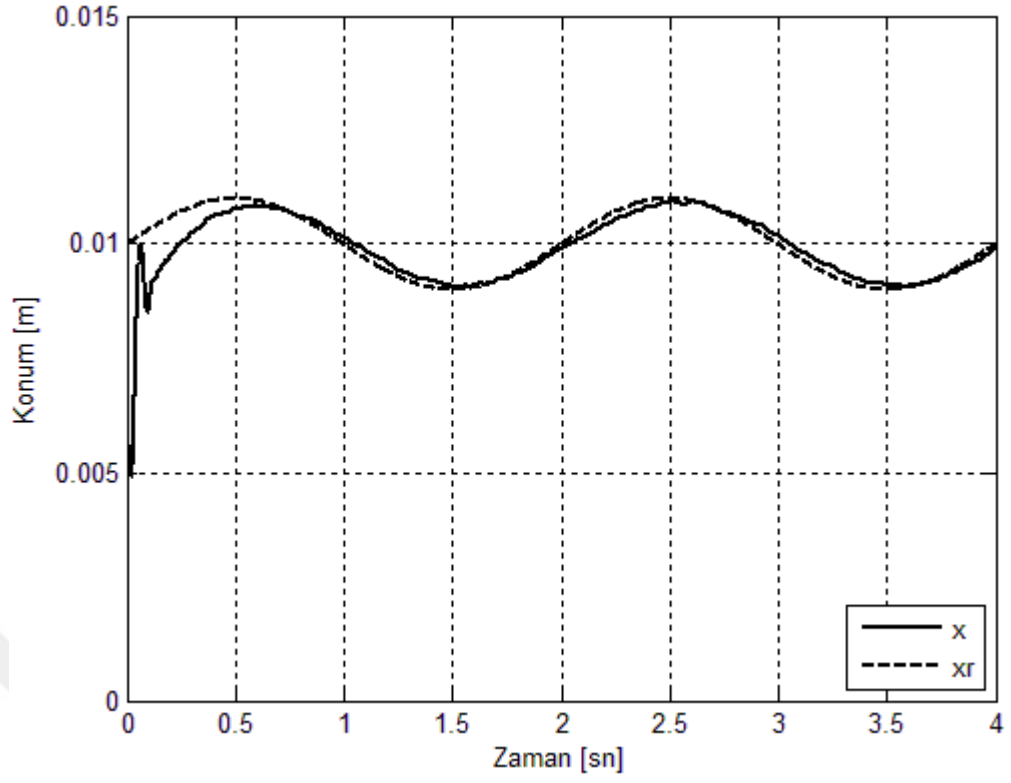
Şekil 4.11. Gürültüsüz durumda yörünge takibi konum grafiği.



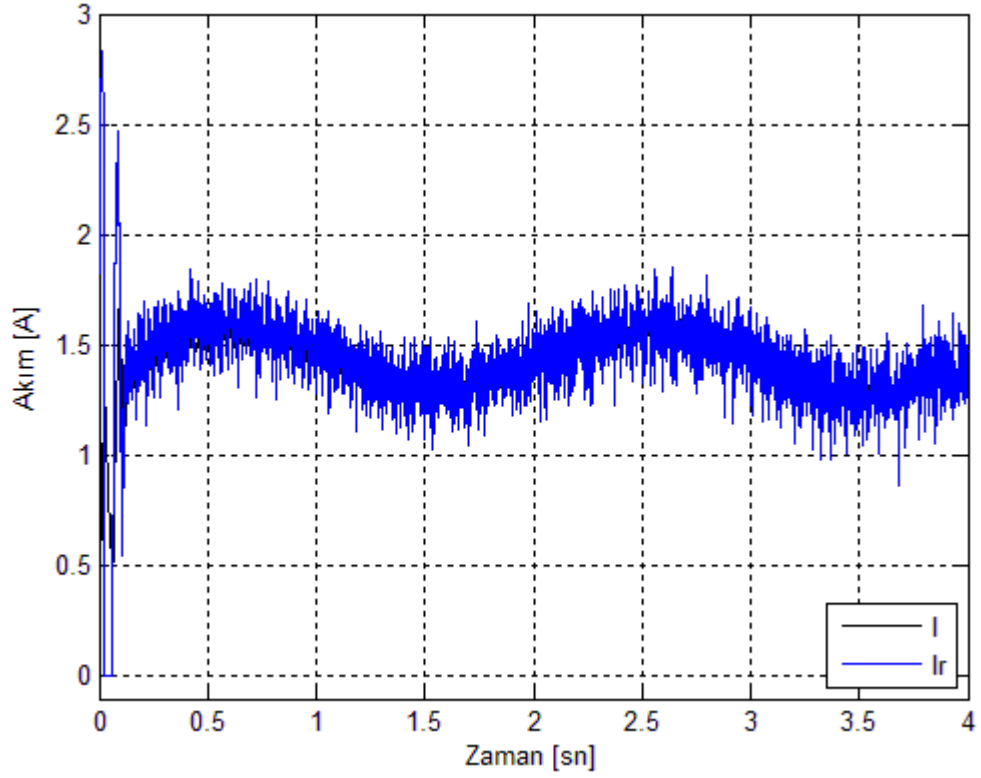
Şekil 4.12. Gürültüsüz durumda yörünge takibi akım grafiği.



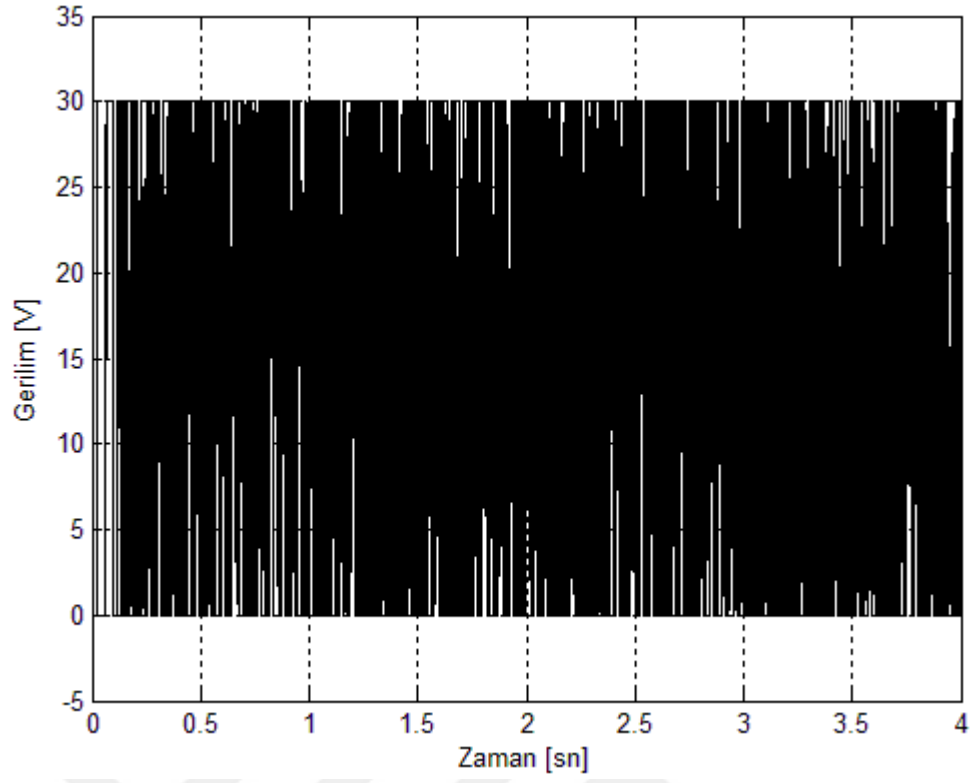
Şekil 4.13. Gürültüsüz durumda yörünge takibi gerilim grafiği.



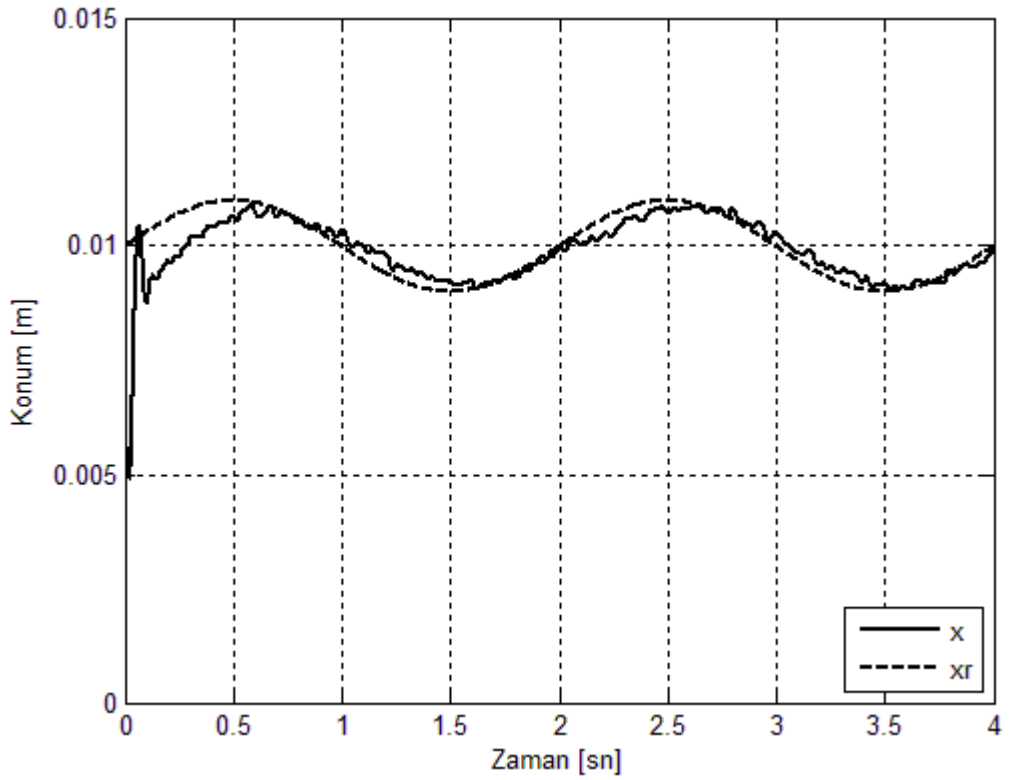
Şekil 4.14. 30 dB gürültülü durumda yörünge takibi konum grafiği.



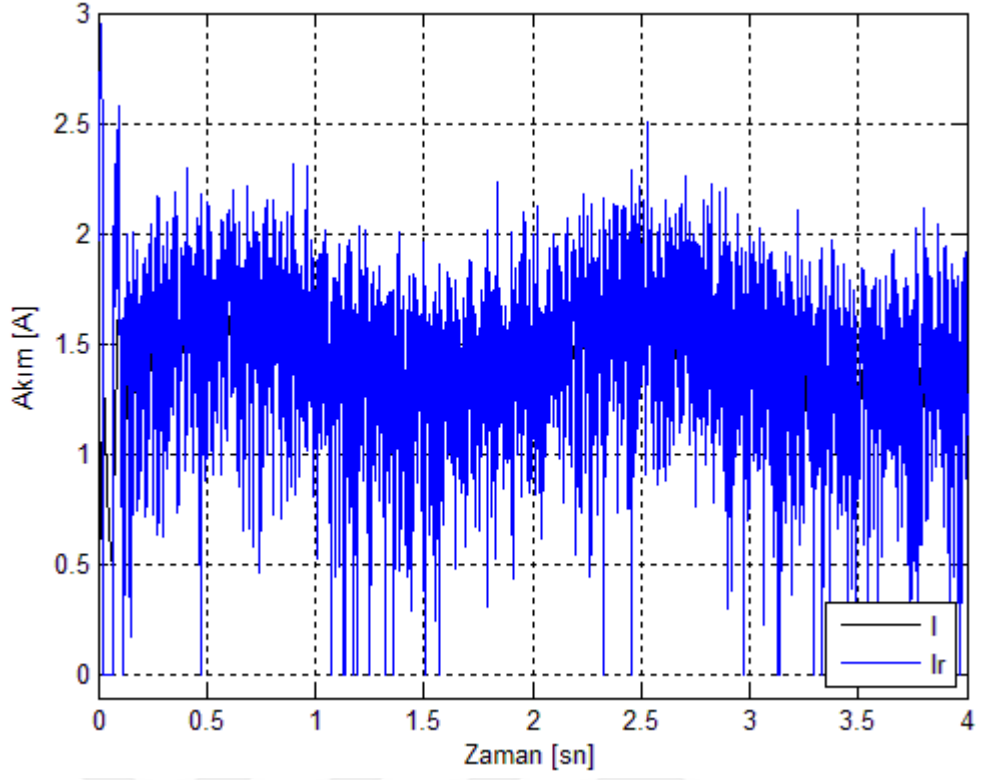
Şekil 4.15. 30 dB gürültülü durumda yörünge takibi akım grafiği.



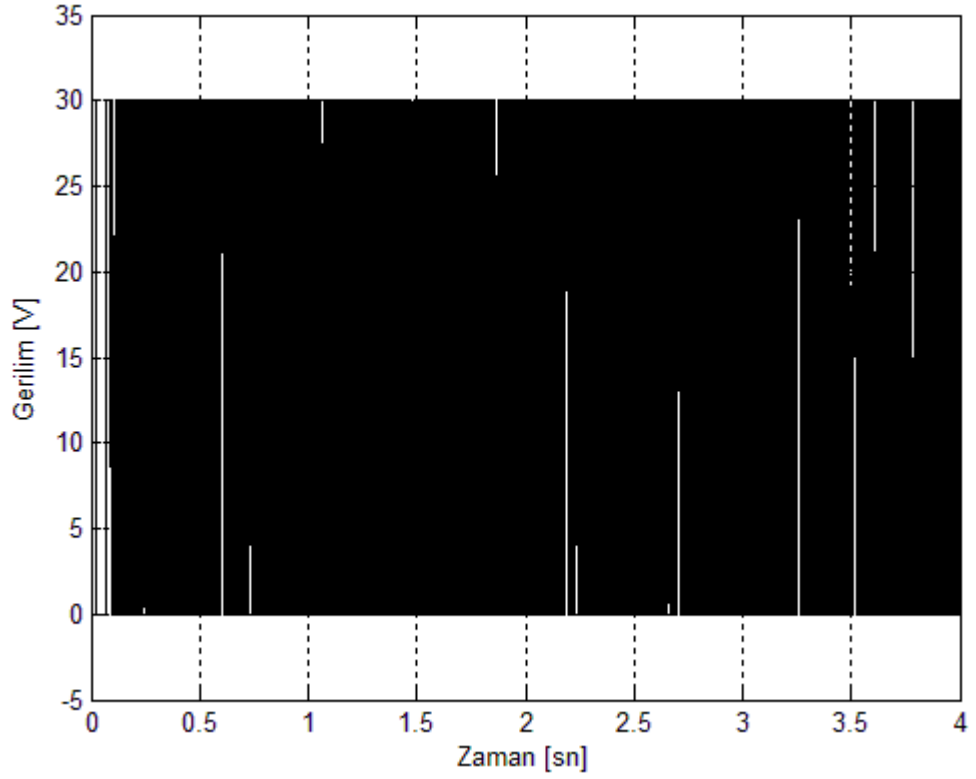
Şekil 4.16. 30 dB gürültülü durumda yörünge takibi gerilim grafiği.



Şekil 4.17. 20 dB gürültülü durumda yörünge takibi konum grafiği.



Şekil 4.18. 20 dB gürültülü durumda yörünge takibi akım grafiği.

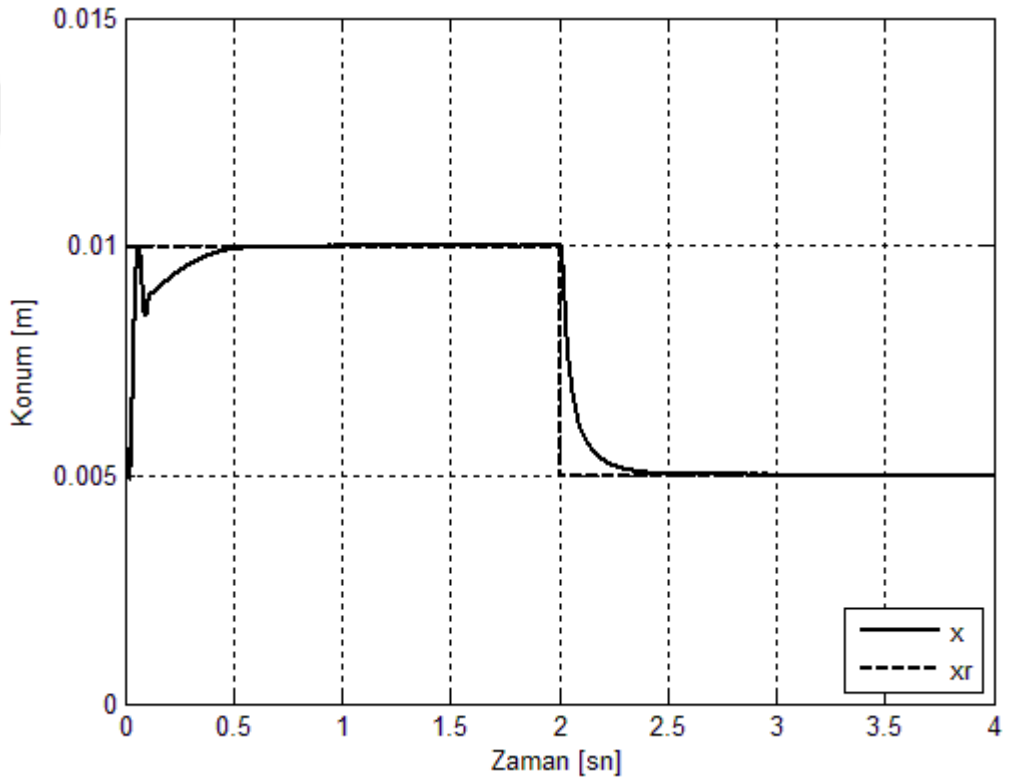


Şekil 4.19. 20 dB gürültülü durumda yörünge takibi gerilim grafiği.

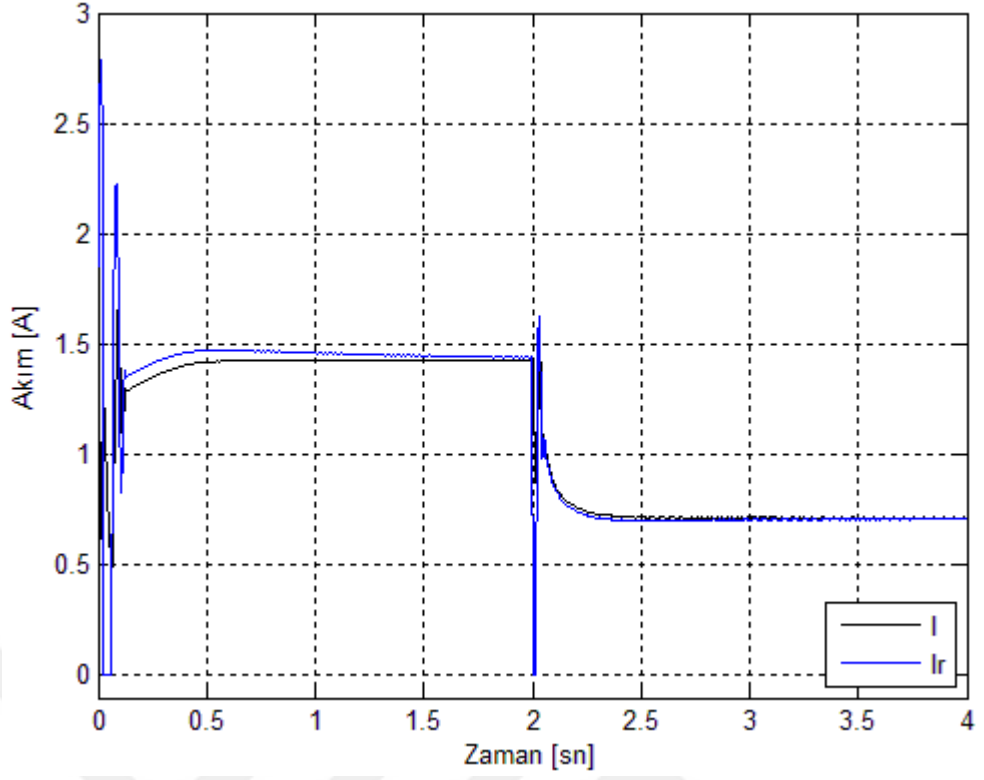
4.3 Değişken Referans Takibi

Değişken referans takibi durumunda sabit referans değeri, başlangıçta $x_r=10 \cdot 10^{-3}$ olarak alınmış, 2 saniye sonra $x_r=5 \cdot 10^{-3}$ olarak değiştirilmiştir. Şekil 4.20, 4.21 ve 4.22'de gürültüsüz, Şekil 4.23, 4.24 ve 4.25'de 30 dB gürültülü ve Şekil 4.26, 4.27 ve 4.28'de 20 dB gürültülü durum için, sırasıyla, konum, akım ve gerilim grafikleri görülmektedir.

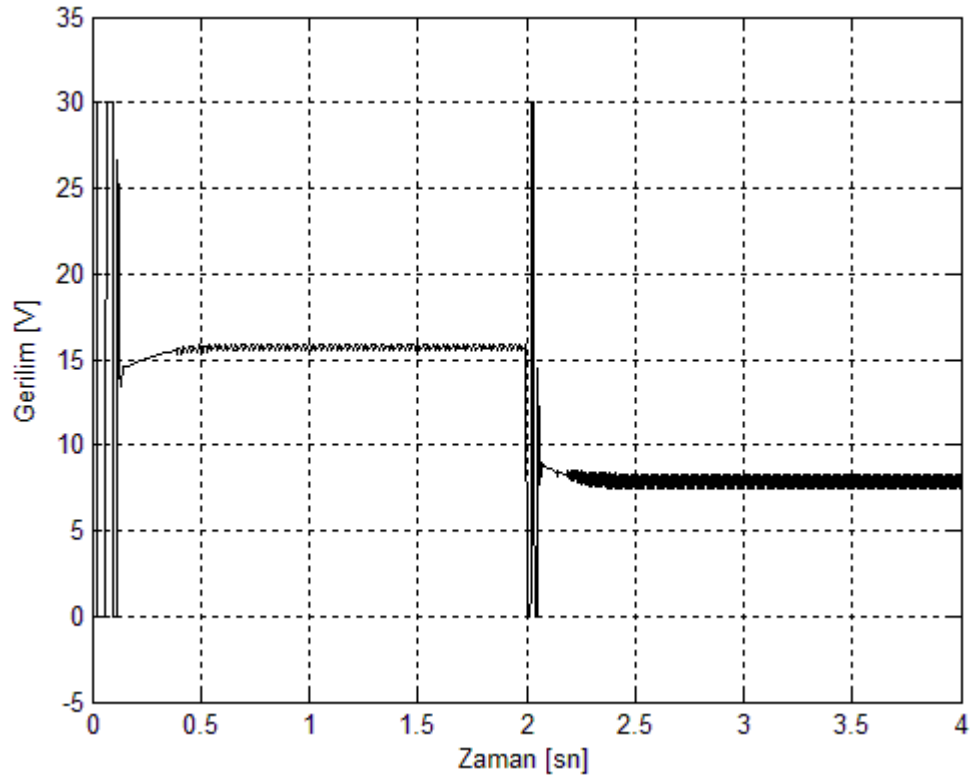
Şekil 4.20, 4.23 ve 4.26'dan görülebileceği gibi hem gürültüsüz hem de gürültülü durumda, denetim amacına ulaşılmıştır.



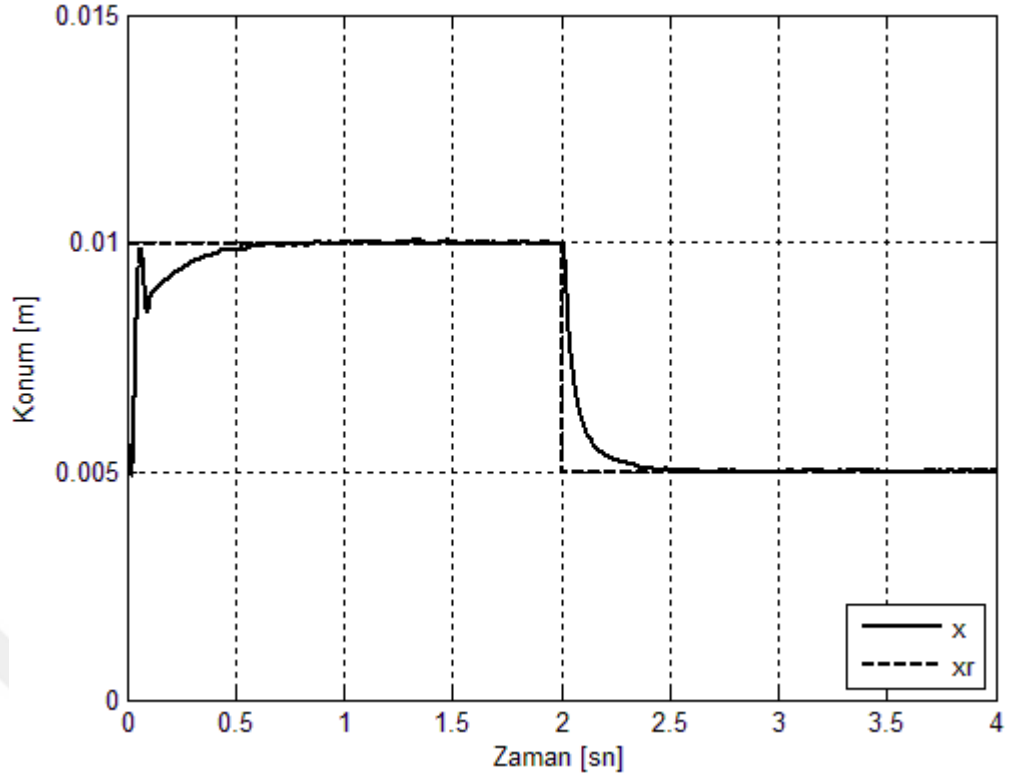
Şekil 4.20. Gürültüsüz durumda değişken referans takibi konum grafiği.



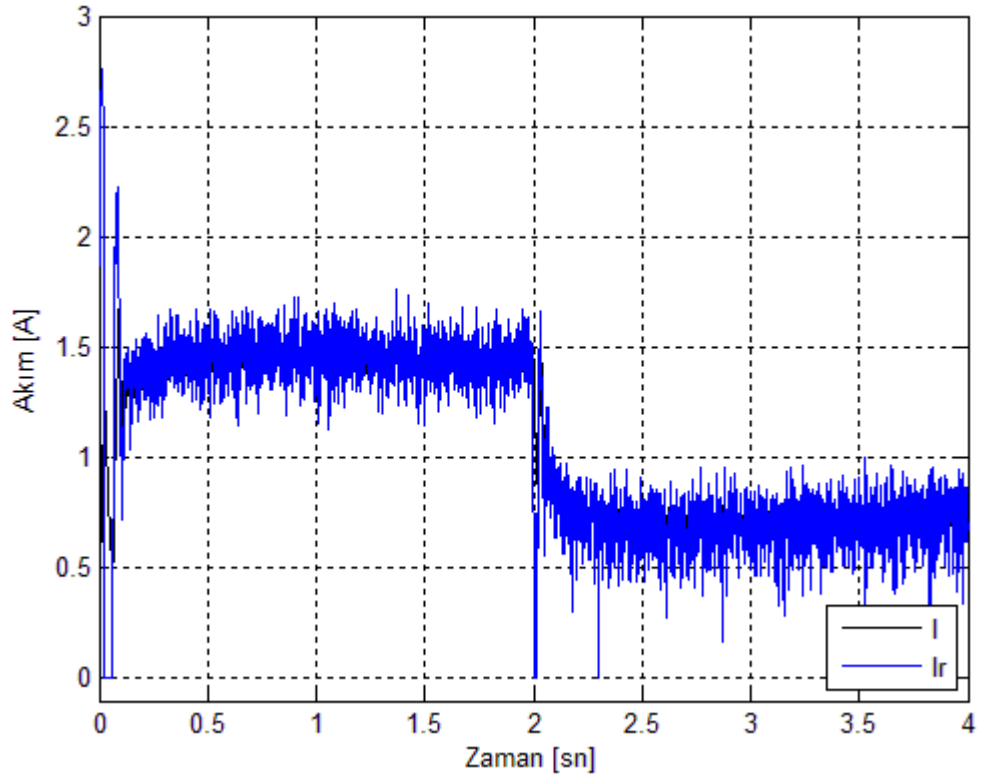
Şekil 4.21. Gürültüsüz durumda değişken referans takibi akım grafiği.



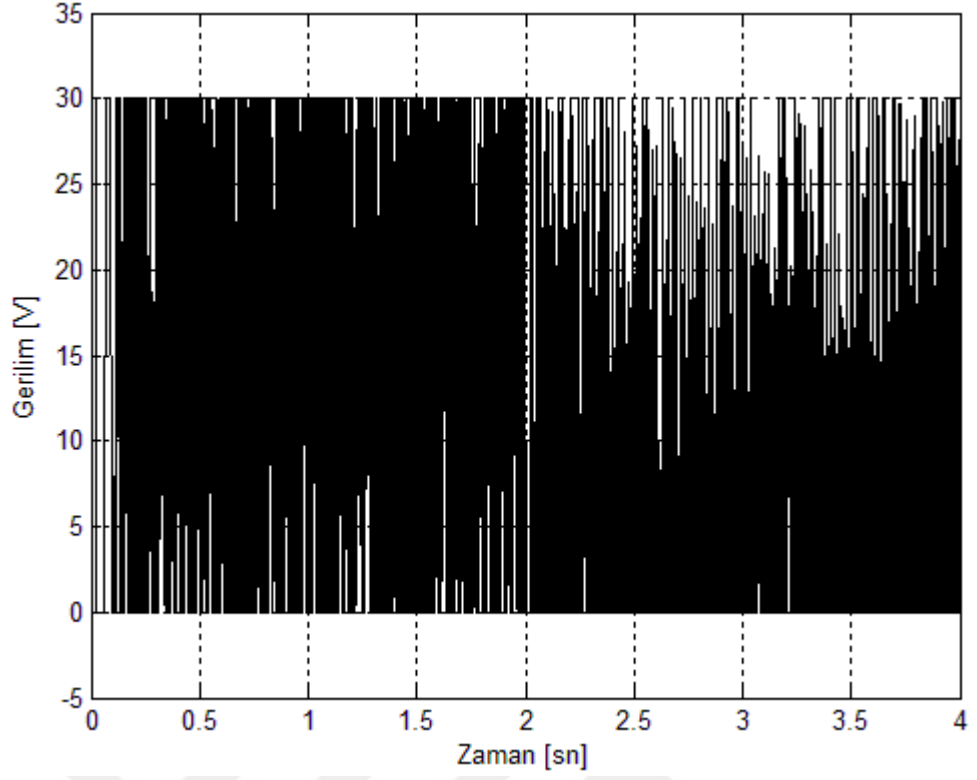
Şekil 4.22. Gürültüsüz durumda değişken referans takibi gerilim grafiği.



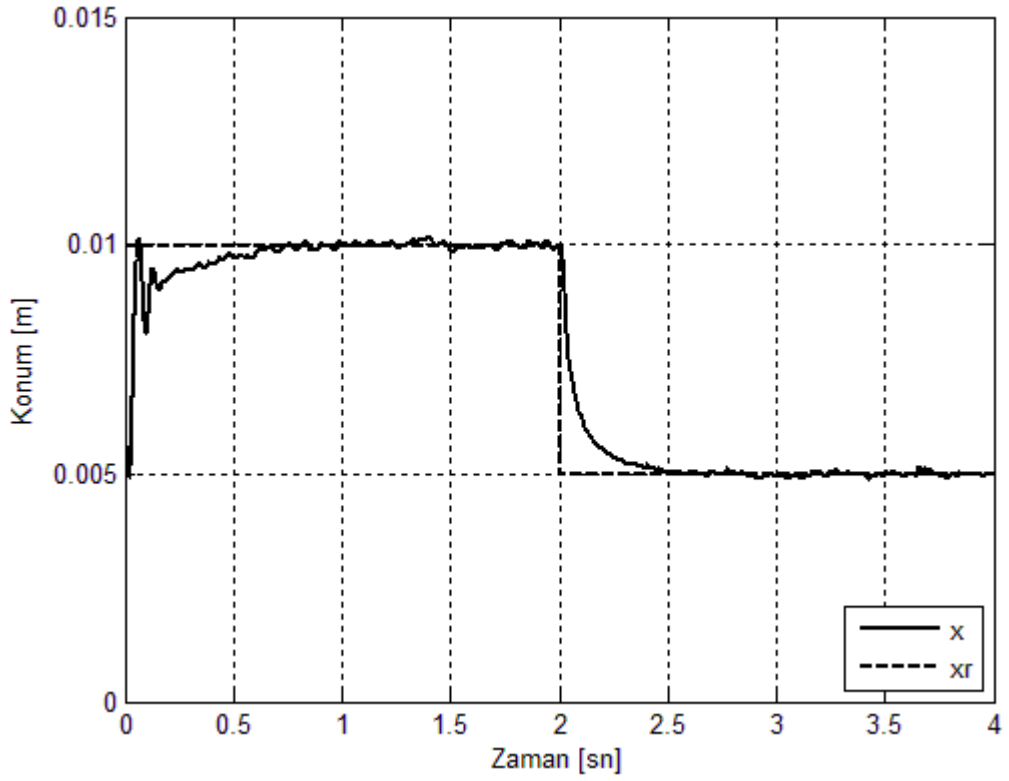
Şekil 4.23. 30 dB gürültülü durumda değişken referans takibi konum grafiği.



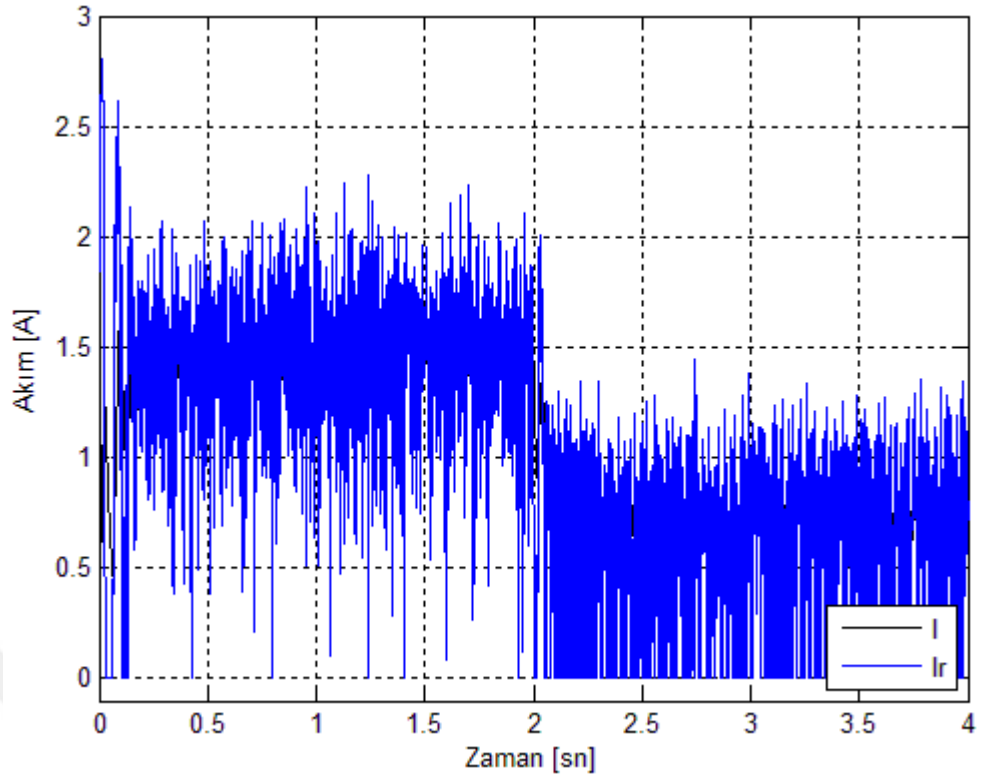
Şekil 4.24. 30 dB gürültülü durumda değişken referans takibi akım grafiği.



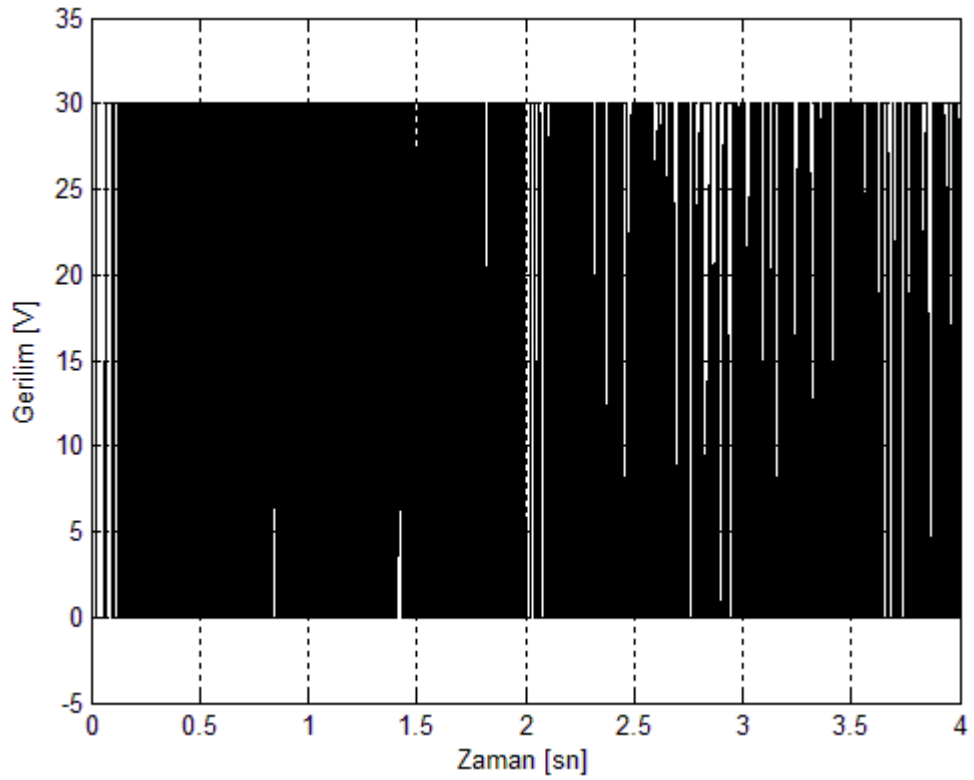
Şekil 4.25. 30 dB gürültülü durumda değişken referans takibi gerilim grafiği.



Şekil 4.26. 20 dB gürültülü durumda değişken referans takibi konum grafiği.



Şekil 4.27. 20 dB gürültülü durumda değişken referans takibi akım grafiği.



Şekil 4.28. 20 dB gürültülü durumda değişken referans takibi gerilim grafiği.

5. SONUÇ

Manyetik kaldırma sistemlerinde amaç, ferromanyetik cismin havaya kaldırılması veya havada belirlenen bir konumda sabit tutulmasıdır. Sistem, yüksek dereceden doğrusal olmayan dinamik yapıya ve kararsız denge noktasına sahip olduğu için, denetim uygulanması gerekmektedir. Bu çalışmada, sistem gürbüz denetim yöntemleri kullanılarak denetlenmiştir.

Manyetik kaldırma sisteminde, metal bilyeye uygulanan elektromanyetik kuvvet, sargıya uygulanan akım ile kontrol edilir. Sargıdan istenen değerde akımın geçmesi ise, elektrik devresini besleyen gerilim kaynağı tarafından sağlanır. Bu sebeple, manyetik kaldırma sistemi iki kısımda ele alınmıştır: mekanik kısım ve elektriksel kısım. Mekanik kısım, metal bilyenin hareketi ile elektromanyetik kuvvet arasındaki ilişkiyi içerirken, elektriksel kısım, sargıdan geçen akım ile besleme gerilimi arasındaki ilişkiyi içermektedir.

Denetim sisteminde, metal bilyenin konumu, Hatanın İşaretinin Dayanıklı Tümlü denetim yöntemi kullanılarak denetlenmiştir. Bu denetim yöntemi, hata işaretinin tümlüğünü içermekte ve denge noktasının yarı-küresel asimtotik kararlılığını sağlamaktadır. HİDT denetleyicisi kullanılarak elde edilen giriş sinyali, sargı üzerinden geçmesi istenen, akım değeridir. Bu akım değerinin elde edilmesi için, elektriksel kısma da kontrol sinyali uygulanması gerekir. Bu amaçla, elektriksel kısımda Oran-Tümlü denetim yöntemi kullanılmıştır. HİDT denetleyicisinden elde edilen denetim sinyali, OT denetleyicisinin referans akım değeri olarak alınmış ve kaskat bir denetim yapısı oluşturulmuştur.

Denetleyicinin başarımı, sayısal benzetim çalışmaları ile denenmiştir. Sayısal benzetim çalışmaları, Matlab Simulink programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışmaları, sabit referans takibi, yörünge takibi ve değişken referans takibi olmak üzere üç durum için yapılmıştır. Her durum için gürültülü ve gürültüsüz ortam benzetimleri yapılmıştır. Gürültülü ortam benzetimlerinde, akım, konum ve hız değerlerine, 30 dB ve 20 dB ek-beyaz-Gauss gürültüsü eklenmiştir. Benzetim çalışmaları sonucunda, hem gürültüsüz hem de 30 dB ve 20 dB gürültülü

durumlarda, denetim amacına, başarılı bir şekilde ulaşılmıştır. Bu sonuçlar ışığında, HİDT denetleyicisinin manyetik kaldırma sistemlerinde, kullanılabileceği görülmüştür.



6. KAYNAKLAR

- Akram MA, Haider I, Khalid HUR ve Uddin V (2015) "Sliding Mode Control for Electromagnetic Levitation System Based on Feedback Linearization", Pattern Recognition Association of South Africa and Robotics and Mechatronics International Conference, 26-27 November 2015, Port Elizabeth.
- Alia KB, Alloui L, Bouillault F ve Mimoune SM (2013) "The Influence of Excitation Frequency on Magnetic Levitation Systems with a High-Tc Superconductor", Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 26 (4): 1275-1281.
- Al-Araji AS (2016) "Cognitive Non-Linear Controller Design for Magnetic Levitation System", Transactions of the Institute of Measurement and Control, 38 (2): 215-222.
- Bachle T, Hentzelt S ve Graichen K (2013) "Nonlinear Model Predictive Control of a Magnetic Levitation System", Control Engineering Practice, 21 (9): 1250-1258.
- Bandal VS ve Vernekar PN (2009) "A New Approach to a Sliding Mode Controller Design for a Magnetic Levitation System", Asia-Pacific Conference on Computational Intelligence and Industrial Applications, 28-29 November 2009, Wuhan.
- Bandal VS ve Vernekar PN (2010) "Design of a Discrete-Time Sliding Mode Controller for a Magnetic Levitation System Using Multirate Output Feedback", American Control Conference, 30 June-2 July 2010, Baltimore.
- Beltran-Carbajal F, Valderrabano-Gonzalez A, Favela-Contreras A ve Rosas-Caro JC (2015a) "Active Disturbance Rejection Control of a Magnetic Suspension System", Asian Journal of Control, 17 (3): 842-854.
- Beltran-Carbajal F, Valderrabano-Gonzalez A, Rosas-Caro JC ve Favela-Contreras A (2015b) "Output Feedback Control of a Mechanical System Using Magnetic Levitation", Isa Transactions, 57: 352-359.
- Bennehar M, Chemori A ve Pierrot F (2014) "A Novel RISE-Based Adaptive Feedforward Controller for Redundantly Actuated Parallel Manipulators", IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 14-18 September 2014, Chicago.
- Benomair AM, Firdaus AR ve Tokhi MO (2016) "Fuzzy Sliding Control with Non-linear Observer for Magnetic Levitation Systems", 24th Mediterranean Conference on Control and Automation, 21-24 June, Athens.
- Berkelman P ve Dzadovsky M (2013) "Magnetic Levitation Over Large Translation and Rotation Ranges in All Directions", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 18 (1): 44-52.

- Bidikli B, Tatlicioglu E, Bayrak A ve Zergeroglu E (2013) "A New Robust 'Integral of Sign of Error' Feedback Controller with Adaptive Compensation Gain", 52nd IEEE Annual Conference on Decision and Control, 10-13 December 2013, Florence.
- Bidikli B, Tatlicioglu E ve Zergeroglu E (2014) "A Self Tuning RISE Controller Formulation", American Control Conference, 4-6 June 2014, Portland.
- Chiang HK, Fang CC ve Chen GW (2011) "Second-Order Sliding Mode Control with Fuzzy Compensator for a Magnetic Levitation System", Second International Conference on Digital Manufacturing & Automation, 5-7 August 2011, Zhangjiajie, Hunan.
- Choi JS ve Baek YS (2002) "A Single DOF Magnetic Levitation System Using Time Delay Control and Reduced-Order Observer", KSME International Journal, 16 (12): 1643-1651.
- Davey K (2004) "New Electromagnetic Lift Control Method for Magnetic Levitation Systems and Magnetic Bearings", IEEE Transactions on Magnetics, 40 (3): 1617-1624.
- Deshpande M ve Badrilal M (2010) "Sensorless Control of Magnetic Levitation System Using Sliding Mode Controller", International Conference on Computer Applications and Industrial Electronics, 5-8 December 2010, Kuala Lumpur.
- Dierks T ve Jagannathan S (2009) "Neural Network Control of Mobile Robot Formations Using RISE Feedback", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics), 39 (2): 332-347.
- Duka AV, Dulău M ve Oltean SE (2016) "IMC Based PID Control of a Magnetic Levitation System", Procedia Technology, 22: 592-599.
- Dupree K, Patre PM, Wilcox ZD ve Dixon WE (2008) "Optimal Control of Uncertain Nonlinear Systems Using RISE Feedback", 47th IEEE Conference on Decision and Control, 9-11 December 2008, Cancun.
- Dupree K, Patre PM, Wilcox ZD ve Dixon WE (2009) "Optimal Control of Uncertain Nonlinear Systems Using a Neural Network and RISE Feedback", American Control Conference, 10-12 June 2009, St. Louis.
- Eissa M, Kandil A, El-Ganaini WA ve Kamel M (2015) "Analysis of a Nonlinear Magnetic Levitation System Vibrations Controlled by a Time-Delayed Proportional-Derivative Controller", Nonlinear Dynamics, 79 (2): 1217-1233.
- Eroğlu Y ve Ablay G (2016) "Cascade Sliding Mode-Based Robust Tracking Control of a Magnetic Levitation System", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part I- Journal of Systems and Control Engineering, 230 (8): 851-860.

- Fan X ve Ju Y (2012) "Freeway Ramp Metering Based on Robust Integral of The Sign of The Error", International Conference on Automatic Control and Artificial Intelligence, 3-5 March 2012, Xiamen.
- Feemster M (2014) "Jitter Reduction in a Directed Energy Application Using RISE", American Control Conference (ACC), 4-6 June 2014, Portland.
- Feemster MG (2015) "A RISE Controller for an Electric Convoy", ASME 2015 Dynamic Systems and Control Conference, 28-30 October 2015, Ohio.
- Fischer N, Bhasin S ve Dixon WE (2011) "Nonlinear Control of an Autonomous Underwater Vehicle: A RISE-Based Approach", American Control Conference, 29 June-1 July 2011, San Francisco.
- Fischer N, Hughes D, Walters P, Schwartz EM ve Dixon WE (2014a) "Nonlinear RISE-Based Control of an Autonomous Underwater Vehicle", IEEE Transactions on Robotics, 30 (4): 845-852.
- Fischer N, Kamalapurkar R, Sharma N ve Dixon WE (2012a) "RISE-Based Control of an Uncertain Nonlinear System with Time-Varying State Delays", IEEE 51st IEEE Conference on Decision and Control, 10-13 December 2012, Maui.
- Fischer N, Kan Z ve Dixon WE (2012b) "Saturated RISE Feedback Control for Euler-Lagrange Systems", American Control Conference, 27-29 June 2012, Montreal.
- Fischer N, Kan Z, Kamalapurkar R ve Dixon WE (2014b) "Saturated RISE Feedback Control for a Class of Second-Order Nonlinear Systems", IEEE Transactions on Automatic Control, 59 (4): 1094-1099.
- Ginoya D, Gutte CM, Shendge PD ve Phadke SB (2016) "State-and-Disturbance-Observer-Based Sliding Mode Control of Magnetic Levitation Systems", Transactions of the Institute of Measurement and Control, 38 (6): 751-763.
- Hajjaji AE ve Ouladsine M (2001) "Modeling and Nonlinear Control of Magnetic Levitation Systems", IEEE Transactions on Industrial Electronics, 48 (4): 831-838.
- Hasirci U, Zabar Z, Balikci A ve Birenbaum L (2013) "Experimental Performance Investigation of a Novel Magnetic Levitation System", IEEE Transactions on Plasma Science, 41 (5): 1174-1181.
- Hasirci U, Balikci A, Zabar Z ve Birenbaum L (2015) "3-D FEM Analysis of a Novel Magnetic Levitation System", IEEE Transactions on Plasma Science, 43 (5): 1261-1265.
- He G, Li J ve Cui P (2015) "Decoupling Control Design for the Module Suspension Control System in Maglev Train", Mathematical Problems in Engineering, 2015: 865650.
- Hernández-Casañas JJ, Márquez-Vera MA ve Balderrama-Hernández BD (2016) "Characterization and Adaptive Fuzzy Model Reference Control for a

- Magnetic Levitation System”, Alexandria Engineering Journal, 55 (3): 2597-2607.
- Huba M ve Kamenský M (2005) ”Constrained Magnetic Levitation Control”, IFAC Proceedings Volumes, 38 (1): 901-906.
- Hurley WG, Hynes M ve Wölfle WH (2004) ”PWM Control of a Magnetic Suspension System”, IEEE Transactions on Education, 47 (2): 165-173.
- Ishigaki Y, Ueda H, Agatsuma K ve Ishiyama A (2009) “Accurate Position Control of Active Magnetic Levitation Using Sphere-Shaped HTS Bulk for Inertial Nuclear Fusion”, IEEE Transaction on Applied Superconductivity, 19 (3): 2133-2136.
- Ito Y, Ueda H, Agatsuma K ve Ishiyama A (2006) ”Position Control of Active Magnetic Levitation Using YBCO Bulk and Multiple Electromagnets”, Journal of Physics Conference Series, 43: 987-990.
- Jalili-Kharaajoo M, Tousi MM, Bagherzadeh H ve Ashari AE (2003) ” Sliding Mode Control of Voltage-Controlled Magnetic Levitation Systems”, Proceedings of 2003 IEEE Conference on Control Applications, 23-25 June 2003, İstanbul.
- Jian L, Wen T ve Fuchun S (2014) ”Adaptive RISE Control of a Multi-Link Flexible Manipulator Based on Integral Manifold Approach”, International Conference on Multisensor Fusion and Information Integration for Intelligent Systems, 28-30 September 2014, Beijing.
- Kai CY ve Huang AC (2016) “Adaptive Control of Magnetic Levitation System Subject to External Disturbances”, Journal of the Chinese Institute of Engineers, 39 (4): 513-520.
- Kawai Y, Kawai H ve Fujita M (2013) “RISE Control for 2DOF Human Lower Limb with Antagonistic Bi-articular Muscles”, IEEE International Conference on Control Applications, 28-30 August 2013, Hyderabad.
- Kawai Y ve Namerikawa T (2013) “Passivity and RISE Based Robust Control for Bilateral Teleoperation System with Communication Delay”, IEEE International Conference on Control Applications, 28-30 August 2013, Hyderabad.
- Khadra FA, Qudeiri JA ve Alkahtani M (2016) “Optimization of the Parameters of RISE Feedback Controller Using Genetic Algorithm”, Mathematical Problems in Engineering, 2016: 3863147.
- Khan M, Siddiqui AS ve Mahmoud ASA (2016) ”Robust H_{∞} Control of Magnetic Levitation System Based on Parallel Distributed Compensator”, Ain Shams Engineering Journal.
- Kim M, Jeong JH, Lim J, Kim CH ve Won MC (2017) “Design and Control of Levitation and Guidance Systems for a Semi-High-Speed Maglev Train”, Journal of Electrical Engineering & Technology, 12 (1): 117-125.

- Kumar EV ve Jerome J (2013) "LQR Based Optimal Tuning of PID Controller for Trajectory Tracking of Magnetic Levitation System", *Procedia Engineering*, 64: 254-264.
- Lashin M, Elgammal AT, Ramadan A, Abouelsoud AA, Assal SFM ve Abo-Ismael A (2014) "Fuzzy-Based Gain Scheduling of Exact FeedForward Linearization Control and Sliding Mode Control for Magnetic Ball Levitation System: A Comparative Study", *IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics*, 22-24 May 2014, Cluj-Napoca.
- Lee JD, Khoo S ve Wang ZB (2013) "DSP-Based Sliding-Mode Control for Electromagnetic-Levitation Precise-Position System", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 9 (2): 817-827.
- Li JH ve Chiou JS (2014) "Two-Dimensional Fuzzy Sliding Mode Control of a Field-Sensed Magnetic Suspension System", *Mathematical Problems in Engineering*, 2014: 386796.
- Li X ve Yu W (2010) "Neural Sliding Mode Control for Magnetic Levitation Systems", *IEEE International Conference on Control Applications*, 8-10 September 2010, Yokohama.
- Lin CJ ve Chen CH (2015) "A Recurrent Neural Fuzzy Controller Based on Self-Organizing Improved Particle Swarm Optimization for a Magnetic Levitation System", *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 29 (5): 563-580.
- Lin CM, Lin MH ve Chen CW (2011) "SoPC-Based Adaptive PID Control System Design for Magnetic Levitation System", *IEEE Systems Journal*, 5 (2): 278-287.
- Lin FJ, Chen SY ve Shyu KK (2009) "Robust Dynamic Sliding-Mode Control Using Adaptive RENN for Magnetic Levitation System", *IEEE Transaction on Neural Networks*, 20 (6): 938-951.
- Lin FJ, Shieh HJ, Teng LT ve Shieh PH (2005) "Hybrid Controller with Recurrent Neural Network for Magnetic Levitation System", *IEEE Transactions on Magnetics*, 41 (7): 2260-2269.
- Lin FJ, Teng LT ve Shieh PH (2007) "Intelligent Sliding-Mode Control Using RBFN for Magnetic Levitation System", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 54 (3): 1752-1762.
- Maia MH ve Galvão RKH (2007) "Robust Constrained Predictive Control of a Magnetic Levitation System", *IFAC Proceedings Volumes*, 40 (20): 418-423.
- Malekzadeh M, Khosravi A, Rasouli H ve Noei AR (2015) "A Genesio-Tesi Chaotic Control Using an Adaptive-Neural Observer Based RISE Controller", *2nd International Conference on Knowledge-Based Engineering and Innovation*, 5-6 November 2015, Tehran.

- Mittal S ve Menq CH (1997) "Precision Motion Control of a Magnetic Suspension Actuator Using a Robust Nonlinear Compensation Scheme", IEEE-Asme Transactions on Mechatronics, 2 (4): 268-280.
- Miyazaki K, Yang ZJ, Kanae S ve Wada K (2004) "Adaptive Robust Nonlinear Control of a Magnetic Levitation System via DSC Technique", Electrical Engineering in JAPAN, 149 (4): 42-51.
- Morales R, Sira-Ramírez H ve Feliu V (2014) "Adaptive Control Based on Fast Online Algebraic Identification and GPI Control for Magnetic Levitation Systems with Time-Varying Input Gain", International Journal of Control, 87 (8): 1604-1621.
- Muresan CI, Ionescu C, Folea S ve Keyser RD (2015) "Fractional Order Control of Unstable Processes: the Magnetic Levitation Study Case", Nonlinear Dynamics, 80 (4): 1761-1772.
- Patel A, Giunchi G, Albisetti AF, Shi Y, Hopkins SC, Palka R, Cardwell DA ve Glowacki BA (2012) "High Force Magnetic Levitation Using Magnetized Superconducting Bulks as a Field Source for Bearing Applications", Physics Procedia, 36: 937-942.
- Patre PM, MacKunis W, Kaiser K ve Dixon WE (2008) "Asymptotic Tracking for Uncertain Dynamic Systems Via a Multilayer Neural Network Feedforward and RISE Feedback Control Structure", IEEE Transactions on Automatic Control, 53 (9): 2180-2185.
- Pradhan SK ve Subudhi B (2016) "Nonlinear Control of a Magnetic Levitation System Using a New Input-Output Feedback Linearization", IFAC-PapersOnLine, 49 (1): 332-336.
- Qin Y, Peng H, Ruan W, Wu J ve Gao J (2014) "A Modeling and Control Approach to Magnetic Levitation System Based on State-Dependent ARX Model", Journal of Process Control, 24 (1): 93-112.
- Queiroz MSD ve Pradhananga S (2007) "Control of Magnetic Levitation Systems With Reduced Steady-State Power Losses", IEEE Transactions on Control Systems Technology, 15 (6): 1096-1102.
- Rkhissi-Kammoun Y, Ghommam J, Boukhnifer M ve Mnif F (2015a) "RISE-Backstepping Feedback Control for Induction Machine in Electric Vehicle Applications", 23rd Mediterranean Conference on Control and Automation, 16-19 June 2015, Torremolinos.
- Rkhissi-Kammoun Y, Ghommam J, Boukhnifer M ve Mnif F ve (2015b) "RISE Feedback Control for Induction Machine in Electric Vehicle Applications", 7th International Conference on Modelling, Identification and Control, 18-20 December 2015, Sousse.
- Rubio JDJ, Zhang L, Lughofer E, Cruz P, Alsaedi A ve Hayat T (2017) "Modeling and Control with Neural Networks for a Magnetic Levitation System", Neurocomputing, 227: 113-121.

- Saadia H, Awan AU, Khan KFA, Liaquat M ve Waheed S (2015) "Adaptive Control of Air-To-Air Missile Using Multilayer NN Feedforward and RISE Feedback Terms", 10th Asian Control Conference, 31 May – 3 June 2015, Kota Kinabalu.
- Sarmad M, Ahmed S, Shami MB ve Hamid T (2016) "Sampled Data Robust Control for a Magnetic Levitation System – Some Practical Considerations", 13th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology, 12-16 January 2016, Islamabad.
- Shameli E, Khamesee MB ve Huissoon JP (2008) "Real-Time Control of a Magnetic Levitation Device Based on Instantaneous Modeling of Magnetic Field", *Mechatronics*, 18 (10): 536-544.
- Shao XJ, Meng FB, Chen ZM ve He QS (2016) "The Exponential Reaching Law Sliding Mode Control of Magnetic Levitation System", Chinese Control and Decision Conference, 28-30 May 2016, Yinchuan.
- Sharma N, Bhasin S, Wang Q ve Dixon WE (2012) "RISE-Based Adaptive Control of a Control Affine Uncertain Nonlinear System with Unknown State Delays", *IEEE Transactions on Automatic Control*, 57 (1): 255-259.
- Shieh HJ, Siao JH ve Liu YC (2010) "A Robust Optimal Sliding-Mode Control Approach for Magnetic Levitation Systems", *Asian Journal of Control*, 12 (4): 480-487.
- Stettinger G, Benedikt M, Horn M, Zehetner J ve Giebenhain C (2017) "Control of a Magnetic Levitation System with Communication Imperfections: A Model-Based Coupling Approach", *Control Engineering Practice*, 58: 161-170.
- Taktak-Meziou M, Chemori A, Ghommam J ve Derbel N (2014a) "A Prediction-Based Optimal Gain Selection in RISE Feedback Control for Hard Disk Drive", *IEEE Conference on Control Applications*, 8-10 October 2014, Juan Les Antibes.
- Taktak-Meziou M, Chemori A, Ghommam J ve Derbel N (2014b) "RISE Feedback Control for a R/W Head Track Following in Hard Disc Drives", *IEEE 11th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices*, 11-14 February 2014, Barcelona.
- Tran XT ve Kang HJ (2014) "Arbitrary Finite-time Tracking Control for Magnetic Levitation Systems", *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 11: 157.
- Waheed S, Awan AU, Khan KFA ve Liaquat M (2015) "Robust Tracking of Quadrotor UAV Using RISE Controller with Input Saturation", 34th Chinese Control Conference, 28-30 July 2015, Hangzhou.
- Wang S, Ren X, Na J ve Li D (2016) "Robust Integral of Sign of Error and Neural Network Control for Servo System with Continuous Friction", 35th Chinese Control Conference, 27-29 July 2016, Chengdu.

- Xian B, Dawson DM, Queiroz MSD ve Chen J (2004) "A Continuous Asymptotic Tracking Control Strategy for Uncertain Nonlinear Systems", IEEE Transactions Automatic Control, 49 (7): 1206-1211.
- Yadav S, Verma SK ve Nagar SK (2016) "Optimized PID Controller for Magnetic Levitation System", IFAC-PapersOnLine, 49 (1): 778-782.
- Yang Q, Jagannathan S ve Sun Y (2011) "NN/RISE-Based Asymptotic Tracking Control of Uncertain Nonlinear Systems", IEEE International Symposium on Intelligent Control, 28-30 September 2011, Denver.
- Yang Q, Jagannathan S ve Sun Y (2012) "Robust Integral of Neural Network and Sign of Tracking Error Control of Uncertain Nonlinear Affine Systems Using State and Output Feedback", 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference, 12-15 December 2011, Orlando.
- Yang Y, Li H, Jia P ve Wang Y (2016) "RISE-Based Tracking Control of Inertial Stabilized Platform with Extended Disturbance Observer", 12th IEEE International Conference on Control and Automation, 1-3 June 2016, Kathmandu.
- Yang ZJ, Kunitoshi K, Kanae S ve Wada K (2008) "Adaptive Robust Output-Feedback Control of a Magnetic Levitation System by K-Filter Approach", IEEE Transactions on Industrial Electronics, 55 (1): 390-399.
- Yang ZJ, Miyazaki K, Kanae S ve Wada K (2004) "Robust Position Control of a Magnetic Levitation System Via Dynamic Surface Control Technique", IEEE Transactions on Industrial Electronics, 51 (1): 26-34.
- Yang ZJ ve Tateishi M (2001) "Adaptive Robust Nonlinear Control of a Magnetic Levitation System", Automatica, 37 (7): 1125-1131.
- Yao J, Deng W ve Jiao Z (2017) "RISE-Based Adaptive Control of Hydraulic Systems with Asymptotic Tracking", IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 14 (3): 1524-1531.
- Yao J, Jiao Z ve Ma D (2014) "RISE-Based Precision Motion Control of DC Motors with Continuous Friction Compensation", IEEE Transactions on Industrial Electronics, 61 (12): 7067-7075.
- Yetendje A, Seron MM, Doná JAD ve Martínez JJ (2010) "Sensor Fault-Tolerant Control of a Magnetic Levitation System", International Journal of Robust and Nonlinear Control, 20 (18): 2108-2121.
- Yu W, Francisco PC ve Li X (2011) "Two-Stage Neural Sliding-Mode Control of Magnetic Levitation in Minimal Invasive Surgery", Neural Computing & Applications, 20 (8): 1141-1147.
- Zhang J, Mei X, Zhang D, Jiang G ve Liu Q (2013) "Application of Decoupling Fuzzy Sliding Mode Control with Active Disturbance Rejection for MIMO Magnetic Levitation System", Proceedings of the Institution of Mechanical

Engineers Part C-Journal of Mechanical Engineering Science, 227 (2): 213-229.

Zhang J, Tao T, Mei X, Jiang G ve Zhang D (2011) "Non-Linear Robust Control of a Voltage-Controlled Magnetic Levitation System with a Feedback Linearization Approach", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part I- Journal of Systems and Control Engineering, 225 (1): 85-98.

Zhang Y, Xian B ve Ma S (2015) "Continuous Robust Tracking Control for Magnetic Levitation System with Unidirectional Input Constraint", IEEE Transactions on Industrial Electronics, 62 (9): 5971-5980.





EKLER

7. EKLER

EK A

Ön kuram 1 (Xian vd., 2004):

Aşağıdaki gibi tanımlanmış bir $L(t) \in \mathbb{R}$ fonksiyonumuz olsun:

$$L \triangleq r(N_r - \beta \text{sgn}(e_2)). \quad (7.1)$$

Eğer β , kontrol kazancı, aşağıdaki gibi seçilirse,

$$\beta \geq \|N_r(x)\|_{\mathcal{L}_\infty} + \frac{1}{\alpha} \|\dot{N}_r(x)\|_{\mathcal{L}_\infty}, \quad (7.2)$$

burada $\|\cdot\|_{\mathcal{L}_\infty}$, \mathcal{L}_∞ normudur (Xian vd., 2004). O zaman

$$\int_0^t L(\tau) d\tau \leq \zeta_b \quad (7.3)$$

durumu sağlanır. Burada

$$\zeta_b := \beta |e_2(0)| - e_2(0) N_r(0) \quad (7.4)$$

olarak tanımlanmaktadır.

İspat için Xian vd. (2004)'e bakılabilir.

Ön kuram 2 (Xian vd., 2004):

$\dot{\xi} = f(\xi, t)$ sistemini ele alalım, burada $f: \mathbb{R}^m \times \mathbb{R}_{\geq 0} \rightarrow \mathbb{R}^m$ çözümü mevcut bir fonksiyondur. $\mathcal{D} := \{\xi \in \mathbb{R}^m \mid \|\xi\| < \varepsilon\}$ bölgesi tanımlansın, burada, ε pozitif bir sabit ve $V: \mathcal{D} \times \mathbb{R}_{\geq 0} \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}$, aşağıda verilen koşulu sağlayan, sürekli türevlenebilir bir fonksiyon olsun,

$$W_1(\xi) \leq V(\xi, t) \leq W_2(\xi) \text{ ve } \dot{V}(\xi, t) \leq -W(\xi), \quad (7.5)$$

burada $\forall t \geq 0$ ve $\forall \xi \in \mathcal{D}$ olarak verilmektedir. $W_1(\xi)$ ve $W_2(\xi)$ sürekli pozitif tanımlı fonksiyonlardır ve $W(\xi)$ tekdüze sürekli pozitif yarı-tanımlı fonksiyondur. Eşitlik (7.5)'in sağlanması ve $\xi(0) \in S$ olması koşuluyla,

$$t \rightarrow \infty \text{ iken } W(\xi(t)) \rightarrow 0 \quad (7.6)$$

durumu elde edilir. Burada S ile belirtilen bölge aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$S := \{\xi \in \mathcal{D} | W_2(\xi) \leq \delta\}, \quad (7.7)$$

burada

$$\delta < \min_{\|\xi\|=\varepsilon} W_1(\xi), \quad (7.8)$$

δ , pozitif bir sabittir.

İspat için Kaynak Xian vd. (2004)'e bakılabilir.

Aşağıdaki gibi tanımlanmış bir $P(t) \in \mathbb{R}$ fonksiyonumuz olsun:

$$P \triangleq \zeta_b - \int_0^+ L(\tau) d\tau. \quad (7.9)$$

Ön kuram 1'den $P(t) \geq 0$ olduğu görülebilir.

Kararlık analizi için Lyapunov fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$V(y, t) = \frac{1}{2} e_1^2 + \frac{1}{2} e_2^2 + \frac{1}{2} m(x)r^2 + P, \quad (7.10)$$

burada

$$y := [z^T \quad \sqrt{P}]^T. \quad (7.11)$$

Not 1'de $x > 0$ olarak tanımlandığı için, $m(x)$ için aşağıdaki sınırlama yazılabilir:

$$\underline{m} \leq m(x) \leq \bar{m}(\|y\|), \quad (7.12)$$

burada \underline{m} pozitif bir sabit ve $\bar{m}: \mathbb{R}_{\geq 0} \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}$, azalmayan bir fonksiyondur. Buradan yola çıkarak (7.10) eşitliğindeki fonksiyonu aşağıdaki gibi sınırlandırabiliriz:

$$\lambda_1 \|y\|^2 \leq V \leq \lambda_2 (\|y\|) \|y\|^2, \quad (7.13)$$

burada

$$\lambda_1 := \frac{1}{2} \min\{1, \underline{m}\} \quad (7.14)$$

ve

$$\lambda_2 (\|y\|) := \max\left\{\frac{1}{2} \bar{m} (\|y\|), 1\right\}. \quad (7.15)$$

(7.10) eşitliğinin türevini alıp, (3.3), (3.4) ve (3.15) eşitliklerini yerine koyarsak,

$$\dot{V} = e_1 \dot{e}_1 + e_2 \dot{e}_2 + \frac{1}{2} \dot{m} r^2 + m r \dot{r} - L$$

$$\dot{V} = e_1 \dot{e}_1 + e_2 \dot{e}_2 + \frac{1}{2} \dot{m} r^2 + r \left(-\frac{1}{2} \dot{m} r - e_2 - (k_s + 1)r - \beta \operatorname{sgn}(e_2) + \tilde{N} + N_d \right) - L$$

$$\dot{V} = e_1 \dot{e}_1 + \alpha_2 e_2^2 - r^2 (k_s + 1) - r \beta \operatorname{sgn}(e_2) + r(\tilde{N} + N_d) - L$$

$$\dot{V} = e_2 \dot{e}_1 - \alpha_1 e_1^2 - \alpha_2 e_2^2 - r^2 + r \tilde{N} - k_s r^2 + [r(N_d - \beta \operatorname{sgn}(e_2))] - L \quad (7.16)$$

olarak elde ederiz. (7.1) eşitliğinde verilen L tanımından, (7.16) eşitliğinde, köşeli parantez içindeki terim gider. $e_1 e_2 \leq \frac{1}{2} (e_1^2 + e_2^2)$ özelliği ve (3.18) eşitliği kullanılarak, \dot{V} , aşağıdaki gibi sınırlandırılabilir:

$$\dot{V} \leq -\lambda_3 \|z\|^2 + |r| \rho(\|z\|) \|z\| - k_s r^2$$

$$\dot{V} \leq -\left(\lambda_3 - \frac{\rho^2(\|z\|)}{4k_s} \right) \|z\|^2, \quad (7.17)$$

burada $\alpha_1, \alpha_2 > \frac{1}{2}$ ve $\lambda_3 \triangleq \min\left\{\left(\frac{1}{2}\right), \alpha_1 - \left(\frac{1}{2}\right), \alpha_2 - \left(\frac{1}{2}\right)\right\}$ olarak verilir.

(7.17)'den

$$k_s > \frac{1}{4\lambda_3} \rho^2(\|z\|) \quad (7.18)$$

veya

$$\|z\| < \rho^{-1}(2\sqrt{\lambda_3 k_s}) \quad (7.19)$$

şartı ile

$$\dot{V} \leq -\gamma\|z\|^2, \quad (7.20)$$

burada γ , pozitif sabittir.

Bu noktadan sonra, eşitlik (7.13) ve (7.18)'e Ön kuram 2 uygulanacaktır. Eşitlik (7.13) 'da, eşitlik (7.10) için alt ve üst sınırlar aşağıdaki gibi verilmiştir:

$$W_1(y) = \lambda_1\|y\|^2 \quad W_2(y) = \lambda_2(\|y\|)\|y\|^2. \quad (7.21)$$

Eşitlik (7.10)'ün türevi ise aşağıdaki gibi sınırlandırılmıştır:

$$W(y) = \gamma\|z\|^2. \quad (7.22)$$

Eşitlik (7.19) kullanılarak, Ön kuram 2'de belirtilen \mathcal{D} bölgesi aşağıdaki gibi belirlenebilir,

$$\mathcal{D} := \{y \in \mathbb{R}^{n+1} \times \mathbb{R}_{\geq 0} \mid \|y\| < \rho^{-1}(2\sqrt{\lambda_3 k_s})\}. \quad (7.23)$$

Eşitlik (7.13) ve (7.18)'ten, $V(y(t), t) \in \mathcal{L}_\infty$ olduğunu biliyoruz, dolayısıyla $e_1(t), e_2(t), r(t) \in \mathcal{L}_\infty$ olur. Bu durumda, eşitlik (3.4)'den, $\dot{e}_2(t) \in \mathcal{L}_\infty$ olur. Eşitlik (3.1) ve (3.2) kullanılarak $x^{(i)}(t) \in \mathcal{L}_\infty$ $i = 0, 1, \dots, n$ olduğunu gösterilebilir. $m(x), f(x) \in \mathcal{L}_\infty$ olduğu zaten biliniyor. Son olarak eşitlik (2.6), $u(t) \in \mathcal{L}_\infty$ olduğunu göstermek için kullanılabilir.

Buraya kadar bahsedilen sınır ifadelerinden yola çıkarak, eşitlik (3.15), (3.19) ve (7.22)'dan $\dot{W}(y(t)) \in \mathcal{L}_\infty$ olduğu açıkça görülebilir. Şimdi aşağıda gösterildiği gibi bir S bölgesi tanımlarsak:

$$S := \left\{ y \in \mathcal{D} \mid W_2(y) < \lambda_1 \left(\rho^{-1}(2\sqrt{\lambda_3 k_s}) \right)^2 \right\}, \quad (7.24)$$

Ön kuram 2'yi kullanarak, $t \rightarrow \infty$ iken $\|z(t)\|^2 \rightarrow 0$, $\forall y(0) \in S$, durumunu gösterebiliriz. Bu durumda, eşitlik (3.19)'den, $t \rightarrow \infty$ iken $e_1(t), e_2(t), r(t) \rightarrow 0$, $\forall y(0) \in S$, olduğu görülür. Eşitlik (3.3) ve (3.4)'den, $t \rightarrow \infty$ iken $\dot{e}_1(t), \dot{e}_2(t) \rightarrow 0$,

$\forall y(0) \in S$ bulunur. Son olarak, eşitlik (3.3)'nin türevinden, $t \rightarrow \infty$ iken $\dot{e}_1(t) \rightarrow 0$, $\forall y(0) \in S$ olduğu gösterilebilir (Xian vd., 2004).

Eşitlik (7.24)'deki bölge, k_s kontrol kazancını ayarlayarak, istenen başlangıç koşullarını içerecek şekilde genişletilebilir. Diğer bir deyişle, yarı-küresel kararlılık sonucu elde edilmiş olur (Xian vd., 2004).



8. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı :Şaban Karaçam

Doğum Yeri ve Tarihi :Bolu 01.01.1989

Lisans Üniversite :Bülent Ecevit Üniversitesi

Elektronik posta :saban_karacam@hotmail.com

İletişim Adresi :Aktaş Mahallesi Evliya Sokak No:5/2
MERKEZ/BOLU