T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DOĞRUSAL SİSTEMLERİN MODEL BAĞIMSIZ KONTROLÜ

Fatih KORKMAZ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ŞANLIURFA
2019

T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DOĞRUSAL SİSTEMLERİN MODEL BAĞIMSIZ KONTROLÜ

Fatih KORKMAZ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ŞANLIURFA
2019

Dr. Öğrt. Üyesi Hasari KARCİ danışmanlığında, Fatih KORKMAZ'ın hazırladığı "Doğrusal Sistemlerin Model Bağımsız Kontrolü" konulu bu çalışma 31/05/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

		İmza
Danışman	: Dr. Öğrt. Üyesi Hasari KARCİ	.....
Üye	: Dr. Öğrt. Üyesi Taner İNCE	.....
Üye	: Prof. Dr. Ali KIRÇAY	.....

Bu Tezin Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yapıldığını ve Enstitümüz Kurallarına Göre Düzenlendiğini Onaylarım

Doç. Dr. İsmail HİLALİ

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET ii
ABSTRACT iii
TEŞEKKÜR iv
ŞEKİLLER DİZİNİ v
ÇİZELGELER DİZİNİ vii
1. GİRİŞ 1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR 4
3. MATERYAL ve YÖNTEM 8
3.1. Manyetik Levitasyon ve CE 152 Manyetik Levitasyon Laboratuvar Ekipmanı 8
3.1.1. CE 152 manyetik levitasyon sisteminin yapısı 9
3.1.2. Sistem karakteristiği ve CE 152 Simulink modeli 15
3.2. PID Kontrol 16
3.2.1. PID kontrol temelleri 17
3.2.2. PID optimizasyon metotları 18
3.3. Model Bağımsız Kontrol Metodu ve Intelligent PID (iPID) 19
3.3.1. F parametresinin gerçek zamanlı kestirimi 22
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA 24
4.1. CE 152 Manyetik Levitasyon Modelinin iPID ile Kontrolü 24
4.2. Model Bağımsız Kontrol Metodunda α Parametresinin Gerçek Zamanlı Kestirimi 27
4.3. iPID ve PID Kontrollü CE 152 Manyetik Levitasyon Modellerinin Sistem Karakteristiğindeki Değişimlere ve Dış Değişkenlere Karşı Performansı 31
4.3.1. Top kütle (m) değerinin değişimine karşı kontrolör performansları 32
4.3.2. Bobin parametresindeki değişime karşı kontrolör performansları 34
4.3.3. Referans değerindeki değişime karşı kontrolör performansları 37
4.3.4. Eyleyici sinyalindeki güç kaybına karşı kontrolör performansları 38
4.3.5. iPID kontrolör ile manyetik levitasyon sistemi kontrolünde α parametresinin güncellenmesinin kontrolör performansına etkisi 40
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 46
KAYNAKLAR 49
ÖZGEÇMİŞ 51
EKLER 52

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

DOĞRUSAL SİSTEMLERİN MODEL BAĞIMSIZ KONTROLÜ

Fatih KORKMAZ

Harran Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Hasari KARCİ
Yıl: 2019, Sayfa: 53

Bu çalışmada, doğrusal ve kararlı olmayan manyetik levitasyon sisteminin doğrusallaştırılmış sistem modeli kullanılarak model bağımsız kontrolü yapılmıştır. Akıllı PID kontrolün (iPID) ve klasik PID kontrolün performansı karşılaştırılmıştır. Manyetik levitasyon modeli üzerinde MATLAB-Simulink ortamında yapılan uygulamalar ile iPID kontrolörün PID kontrolöre sağladığı avantajlar gösterilmiş ve iki metot kapsamlı olarak karşılaştırılmıştır. Söz konusu iPID kontrol metodunun klasik PID kontrolöre göre avantajlarından bahsedilmiştir. Ayrıca, iPID kontrol metodunda kontrolör performansını etkileyen ve değeri deneme yanılma ile tespit edilen α parametresinin gerçek zamanlı kestirimini mümkün kılan bir algoritma kontrolör yapısına dahil edilmiştir. iPID kontrolörün model bağımsız karakteristiğini incelemek maksadıyla kurgulanan iki uygulama örneği üzerinde çalışılmıştır. Sistem modeline ait parametreler üzerinde yapılan değişikliklere ve dışardan dahil edilen bozucu etkilere karşı iPID ve klasik PID kontrolörün manyetik levitasyon modeli üzerinde aldığı sonuçlar karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. α parametresinin gerçek zamanlı kestirimini sağlayan algoritmanın dahil edildiği iPID kontrolör ile iPID kontrolörün aynı senaryolar karşısında aldıkları sonuçlar karşılaştırılmıştır. Böylece iPID uygulama metoduna dahil edilen bu güncellemenin metoda sağladığı katkı ve ilerleme gösterilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: model bağımsız kontrol, iPID, manyetik levitasyon

ABSTRACT

MSc Thesis

MODEL FREE CONTROL of LINEAR SYSTEMS

Fatih KORKMAZ

Harran University
Graduate School of Natural and Applied Sciences Department of Electrical-Electronics Engineering

Supervisor : Asst. Prof. Hasari KARCİ

Year: 2019, Page: 53

In this study, linearized system model of magnetic levitation system which is nonlinear and unstable has been controlled with model free control method. Intelligent PID (iPID) and conventional PID controller performances have been compared. It has been shown that advantages of iPID controller over conventional PID controllers on magnetic levitation model with MATLAB-Simulink environment and results were compared. The advantages of iPID controller over PID method have been explained. Also, a method is developed and included to controller structure for online estimation of the α parameter which is critically essential on controller performance and yet its value is identified by trials and errors on system. It has been studied on two application examples built to emphasize the model free characteristics of iPID controller. The results PID and iPID controllers acquired have been examined comparatively on magnetic levitation model despite of the changes built on system model and disruptive effects included externally. The results acquired for same setups by conventional iPID and iPID controller structure which is updated with online estimation algorithm of α parameter were compared. The contribution and advance by the relevant update algorithm which is included to iPID control method have been shown in this manner.

KEY WORDS: model free control, iPID, magnetic levitation

TEŞEKKÜR

Tez yazım aşamasında ilgi ve desteğini esirmeyen, bilgi ve tecrübesiyle bana yardımcı olan değerli hocam Dr. Öğretim Üyesi Hasari KARCİ'ye ve her zaman bana destek olan aileme ve dostlarıma sonsuz teşekkür ederim.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 3.1. CE 152 Manyetik Levitasyon Laboratuvar Ekipmanı (Chalupa ve ark., 2016) 9
Şekil 3.2. CE 152 Levitasyon Laboratuvar Ekipmanı Sistem Şeması (Chalupa ve ark.,2016) 10
Şekil 3.3. Manyetik Levitasyon Modeli Blok Diyagram Gösterimi (Chalupa ve ark., 2017) 12
Şekil 3.4. Durum Uzay Gösterimi 12
Şekil 3.5. CE 152 MLLE Simulink Modeli Genel Görünümü 16
Şekil 3.6. PID Kontrolör Blok Diyagramı ve Matematiksel İfadeleri 17
Şekil 3.7. Kapalı Döngü Model Bağımsız Kontrolör Blok Diyagramı 21
Şekil 4.1. Simulink Üzerinde PID Kontrol Metodu Uygulanmış Manyetik Levitasyon Modeli..... 25
Şekil 4.2. Simulink Üzerinde Model Bağımsız Kontrol Metodu Uygulanmış Manyetik Levitasyon Modeli 26
Şekil 4.3. Simulink Manyetik Levitasyon Modeli Üzerinde PID ve iPID Kontrol Düzenekleri Referans ve Çıkış Değerleri 26
Şekil 4.4. Transfer fonksiyonu üzerinde değişiklik yapılan sistem üzerinde PID ve iP Kontrol Düzenekleri Referans ve Çıkış Değerleri 29
Şekil 4.5. Transfer fonksiyonunda yapılan değişiklik sonrası klasik iP ve α parametresinin gerçek zamanlı kestirimini mümkün kılan algoritmanın dahil edildiği iP kontrolör düzenekleri referans ve çıkış değerleri..... 30
Şekil 4.6. α parametresinin gerçek zamanlı kestirimini mümkün kılan algoritmanın dahil edildiği kontrolör yapısı üzerinde söz konusu α parametresinin değişimi..... 31
Şekil 4.7. α parametresinin gerçek zamanlı kestirimini mümkün kılan algoritmanın dahil edildiği iPID kontrolör yapısı ve CE 152 manyetik levitasyon ünitesinin Simulink modeli..... 33
Şekil 4.8. Metal topun kütlesinin simülasyon süresince zamana karşı değişimi (kg)..... 33
Şekil 4.9. Metal topun ağırlığının 0.008 ve 0.6 kg aralığında değiştiği durumda PID ve α parametresi güncellemeli iPID kontrolörlerin manyetik levitasyon modeli üzerinde aldıkları çıkış değerleri..... 34
Şekil 4.10. CE 152 Manyetik levitasyon modeli üzerinde bulunan güç amplifikatörünün yapısı (Chalupa ve ark., 2016)..... 35
Şekil 4.11. Manyetik levitasyon modeli, güç amplifikatörünün yapısında bulunan elektromanyetik bobinin endüktans değerinin simülasyon süresince değişimi 36
Şekil 4.12. Manyetik Levitasyon modeli güç amplifikatörü üzerinde bulunan elektromanyetik bobin endüktans değerinde kurgulanan değişiklikler sonrası PID ve α parametresi kestirimli iPID kontrolör yapılarının referans ve çıkış değerleri..... 36
Şekil 4.13. 0.1 – 0.9 değerleri arasında 0.2 Hz frekansla salınım apan referans sinyali karşısında PID ve α parametresi kestirimli iPID kontrolör yapılarının referans ve çıkış değerleri 38
Şekil 4.14. Manyetik levitasyon modeli üzerinde iPID ve PID kontrolör yapıları için kontrol sinyalinin zamana karşı verilen grafiğinde 10.–11. saniyeler arasında yapay olarak oluşturulan güç kaybı görülebilmektedir. 39
Şekil 4.15. Kontrol sinyalinde 10.-11. Saniyeler arasında dahil edilen 0.6' lık kazanç değerine karşın PID ve α kestirimli iPID kontrolör yapılarının çıkış ve referans değerleri 39
Şekil 4.16. α parametresinin 1 olarak seçildiği iPID kontrolör ve α parametresi kestirimli iPID kontrolör yapılarının manyetik levitasyon modeli üzerinde uygulanan referans sinyaline karşı çıkış değerleri 41
Şekil 4.17. α parametresinin 0.5 olarak seçildiği iPID kontrolör ve α parametresi kestirimli iPID kontrolör yapılarının manyetik levitasyon modeli üzerinde uygulanan referans sinyaline karşı çıkış değerleri 41
Şekil 4.18. α parametresinin 0.75 olarak seçildiği iPID kontrolör ve α parametresi kestirimli iPID kontrolör yapılarının elektromanyetik bobin endüktans değerinin simülasyon süresince 0.5 ve 7.5 H aralığında değiştiği manyetik levitasyon modeli üzerinde uygulanan referans sinyaline karşı çıkış değerleri..... 42

Şekil 4.19. α parametresinin 1 olarak seçildiği iPID kontrolör ve α parametresi kestirimli iPID kontrolör yapılarının elektromanyetik bobin endüktans değerinin simülasyon süresince 0.5 ve 7.5 H aralığında değiştiği manyetik levitasyon modeli üzerinde uygulanan referans sinyaline karşı çıkış değerleri 43
Şekil 4.20. α parametresinin 0.75 olarak seçildiği iPID kontrolör ve α parametresi kestirimli iPID kontrolör yapılarının metal top kütlesinin simülasyon süresince 0.008 ve 0.6 kg aralığında değiştiği manyetik levitasyon modeli üzerinde uygulanan referans sinyaline karşı çıkış değerleri 43
Şekil 4.21. α parametresinin 0.75 olarak seçildiği iPID kontrolör ve α parametresi kestirimli iPID kontrolör kontrol sinyalinin 10.-11. saniyeler arasında 0.6' lık bir kazanç değeriyle çarpılarak güç kaybına uğratıldığı manyetik levitasyon modeli üzerinde uygulanan referans sinyaline karşı çıkış değerleri 45

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 3.1. Ziegler-Nichols Dönüşüm Tablosu……...19
Çizelge 4.1. Simulink manyetik levitasyon modeli için PID ve iPID kontrolörlere ait kontrol performansı parametreleri…….27

1. GİRİŞ

Kontrol sistemlerinin temel amacı kontrol edilen sistemin davranışlarını istenilen aralıkta veya değerde tutmaktır. Hassasiyet, tepki süresi ve değişken koşullara istenilen yanıtı verebilmesi bir kontrol sisteminden beklenen temel çıktılardan bazılarıdır.

Kontrol sistemlerinde, kontrolör tasarımı için sistemin modellenmesi temel adımlardandır. Endüstriyel anlamda kontrol edilmesi gereken birçok uygulama doğrusal olmayan süreçlerdir. Modelleme ve elde edilen doğrusal olmayan modellerin doğrusallaştırılması çoğu zaman zahmetli ve zaman alan süreçlerdir. Kontrol sistemlerinde modellemenin başarısı kontrolör performansını doğrudan etkilemektedir. Yakın dönemde çok başarılı ve hassas kontrol metotları geliştirilmesine rağmen, bu tasarımlar oldukça iyi modellenmiş sistemlerde başarılı sonuçlar vermektedir (Fliess ve Join, 2013). Sistem modellemesi sırasında yapılan varsayımlar ve sistemin davranışına etki eden tüm parametrelerin modele dahil edilememesi nedeni ile literatürdeki kontrol metotlarının başarısı düşmektedir. Bu sebepten kontrol uygulamalarında modelden bağımsız kontrolör tasarımını mümkün kılmayı amaçlayan metotlar geliştirilmeye çalışılmaktadır.

Literatürde modelden bağımsız bir kontrolör tasarımı için bulanık mantık veya yapay sinir ağları kullanarak; PID, gürbüz (robust) ve uyarlanabilir (adaptif) temelli kontrol metotları geliştirilmiştir. Modelden bağımsız kontrolörler modelleme gereksinimini azaltmaları ya da ortadan kaldırmalarının yanı sıra kontrolör bir modele bağımlı tasarlanmadığı için sistem modelinde ve çevresel şartlarda meydana gelmesi muhtemel değişikliklere rağmen süreci kontrol edebilmelerinden dolayı önem kazanmışlardır.

Fliess ve Join (2008, 2010) model bağımsız kontrol (model-free control) yaklaşımını öne sürmüşlerdir. Fliess ve Join ilgili çalışmalarında model

parametrelerinden kısmen ya da tamamen bağımsız olarak tasarladıkları PID temelli kontrolörü iPID (intelligent PID) olarak adlandırmışlardır. Model bağımsız kontrol metodu PID'nin yanı sıra birçok kontrol metoduyla bütünleştirilebilen bir yöntemdir. Model bağımsız kontrol metodunda sadelik adına sistem tek bir kontrol değişkeni u ve tek bir çıkış değişkeni y ile sınırlandırılmıştır. Dinamik bir sistemin model bağımsız v. dereceden türevsel giriş-çıkış ilişkisi denklem 1.1'de ifade edildiği gibi olsun:

$$y^{(v)} = F + \alpha u \tag{1.1}$$

Bu metot temelde sistem çıkışının, yukarıdaki denklemde de görülebileceği üzere sürekli güncellenen bir F değeri ve kontrol sinyali u'nun sistem davranışları gözlemlenerek deneme yanılma yoluyla belirlenen α katsayısıyla çarpımının toplamı olarak ifade edilmesi ve çıkış değerine göre F değerinin özgün bir yöntemle sürekli güncellenmesine dayanır.

Klasik yaklaşımda, geliştirilen matematiksel modelden yararlanılarak bir kontrolör tasarlanır. Kontrolör tasarımı yapılırken varsayılan model parametreleri, bozucu etmenler ve çevresel etkiler sabit kaldığı sürece kontrolörün iyi bir performans göstermesi beklenir. Fakat zamana, donanımsal problemlere ve çevresel şartlara bağlı olarak sistem modeline ait parametreler değişime uğradığında sistemin varsayılan modeli temel alınarak tasarlanan kontrolörlerin performansları azalmaktadır.

Standart kontrolör tasarımı için ihtiyaç duyulan yüksek doğruluktaki sistem modellerinin oluşturulması ve elde edilen doğrusal olmayan matematiksel denklemlerin doğrusallaştırılması gibi uğraştırıcı ve zaman alan süreçler göz önüne alındığında; model bağımsız kontrol yaklaşımı sistem modeline kısmen ihtiyaç duyması veya modele gereksinim duymaması sebebiyle büyük avantaj sağlamaktadır.

Bunun yanı sıra model bağımsız kontrol yaklaşımı uyarlanabilir (adaptif) olması sayesinde sistem parametrelerinde ve çevresel şartlarda meydana gelmesi muhtemel değişiklikleri tolere edebilmekte ve sistem kontrolünü klasik kontrol yaklaşımlarına göre çok daha geniş bir tolerans aralığında sağlayabilmektedir. Literatüre girdiği 2008

yılından itibaren başarılı uygulamaları yapılan model bağımsız kontrol metoduna ilişkin çalışmalar ikinci bölümde verilecektir.

Bu çalışmada Intelligent PID (iPID) kullanılarak dinamik, kararsız ve doğrusal olmayan bir karakteristiğe sahip manyetik levitasyon modelinin MATLAB-Simulink ortamında kontrolünü sağlamak maksadıyla bir uygulama yapılmıştır. Aynı zamanda bugüne kadar levitasyon modeli üzerinde yapılan model bağımsız kontrol uygulamalarından farklı olarak, kontrol edilen model parametreleri ve dış bozuculardaki bazı değişiklikler kurgulanmış ve iPID kontrolörün bu değişimlere karşı performansı değerlendirilmiştir. Tüm bu uygulamalarda iPID metodu ve klasik PID kontrol yaklaşımı karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Yapılan bu çalışmalar iPID kontrolörün modelden bağımsız yapısını vurgulaması açısından tercih edilmiştir.

Ayrıca bu çalışmada yine daha önce iPID üzerinde yapılan uygulamalardan farklı olarak model bağımsız kontrol yönteminde kontrolör performansını önemli ölçüde etkileyen denklem (1.1)' de görebileceğimiz α parametresinin belirlenmesi üzerine bir geliştirme önerilmiştir. Fliess ve Join (2013)' e göre α sistem davranışları göz önünde bulundurularak uygulayıcı tarafından belirlenen sabit bir parametredir. Önerilen geliştirme α parametresinin gerçek zamanlı kestirimine dayanmaktadır. α parametresinin güncellenmesinin iPID kontrol yöntemine sağladığı iyileştirmeler yine manyetik levitasyon modeli üzerinde karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Bu bölümde Fliess ve Join'in model bağımsız kontrol (model-free control) metoduna ilişkin detaylı bir literatür çalışması yapılmıştır ve önde gelen çalışmalar sıralanmıştır (Fliess ve Join, 2013).

Intelligent PID (iPID) konseptinin temelleri ilk olarak 2008 ve 2010 tarihli konferans bildirilerinde Michel Fliess ve Cédric Join tarafından tanıtıldı (Fliess ve Join, 2008; Fliess ve Join, 2010). Fliess ve Join (2013) yayınladıkları makale ile konuyla ilgili mevcut çalışmaları da temel alarak iPID kontrol sistemlerinin PID sistemlere sağladığı birçok avantajı ortaya koydular. İlgili çalışmada iPID kontrolörün doğrusal olmayan, zaman gecikmeli ve modeli kısmen bilinen sistemler üzerinde başarısı ayrı ayrı çalışmalarla gösterildi. Model bağımsız karakteristiği sayesinde iPID kontrolör bu uygulamalarda başarılı performans göstermiştir. Bunun yanı sıra doğrusal transfer fonksiyonuna sahip bir model üzerinde yapılan kök değişikliği ve eyleyici sinyalinde meydana getirilen güç kaybına karşın klasik PID kontrolöre göre alınan başarılı sonuçlar paylaşılmıştır. iPID kontrolör yapısının PID kontrolöre kıyasla model üzerinde ve çevresel etkenlerde meydana gelen değişikliklere rağmen kontrol performansını koruduğu görülmüştür.

Join ve ark. (2010) tarafından iPID kontrolör ile zaman gecikmeli sistemlerden olan hidroelektrik santrallerde su seviyesi kontrolü probleminde elde edilen başarılı sonuçları içeren bir çalışma yayınladı. Güç santrallerinin üzerine kurulu olduğu nehir yataklarının düzensiz ve kilometrelerce uzunluktaki öngörülemez yapısı, zaman ve konuma bağlı değişen ve doğrusal olmayan iki adet parçalı diferansiyel denklemle ifade edilen yavaş su akışı dinamiği, mevsimsel değişiklikler, sulama arzına göre değişen su seviyesi ve değişken elektrik üretim ihtiyacı söz konusu modeli oldukça karmaşık bir hale getirmektedir. İlgili çalışmada sürecin kesin bir modeli kullanılmadan, kontrolör üzerinde ayarlama yapmayı kolaylaştıran yalnızca üç kontrol parametresiyle ve su seviyesinin gelecek davranışını döngüye dahil etmek adına bir ileri beslemeli kontrol bileşeniyle geniş bir çalışma aralığında başarılı ve gürbüz bir kontrolör tasarlanmıştır. (Join ve ark., 2010).

De Miras ve ark. (2013) iPID yöntemini aktif manyetik rulman sistemi kontrolüne uyguladı. Endüstriyel anlamda yüksek devirle çalışan kompresör ve türbin uygulamalarından, uydu sistemleri ve biyomedikal cihazlara varan geniş bir skalada kullanılan, sürtünmesiz yapısıyla yüksek devirli uygulamalarda avantaj sağlayan bir sistem olan aktif manyetik rulman kontrolü, iki eksenli dört adet elektromanyetik mıknatıs kullanılarak bir düzenek üzerinde çalışılmıştır. iPID kontrolörün sistemin kısıtlı bir modeli kullanılarak oluşturulmasına rağmen PID kontrol kadar başarılı sonuçlar verdiği görüldü.

AI Younes ve ark. (2014) model bağımsız kontrol metodu ile quadrotor sisteminin (4 adet dikey konumlanmış motoru bulunan drone) kontrolünü başarılı bir şekilde sağladılar. Çoklu giriş çoklu çıkış (MIMO) şeklinde ifade edilen ve doğrusal olmayan bir drone uygulama için seçilmiştir. Zamanla değişen bozunumlara ve modellenmemiş sistem bileşenlerine rağmen model bağımsız kontrolör sistemi mevcut LQR geri beslemeli kontrolöre göre daha başarılı şekilde kontrol edebilmiştir.

Madadi ve Söffker (2015) özyineli öğrenen iPID kontrolör ile doğrusal olmayan sistemlerin kontrolüne ve aldıkları başarılı sonuçlara ilişkin bir çalışma yayınlamıştır. İlgili çalışmada doğrusal olmayan sistemler üzerinde farklı model bağımsız kontrol yöntemleri uygulanmıştır. Çalışmada özyineli öğrenen bir iPID kontrolör uygulaması geliştirilmiş ve geniş kapsamlı olarak incelenmiştir. Geliştirilen özyineli öğrenen iPID algoritmasının mevcut iPID yöntemine sağladığı performans iyileştirmeleri çalışmanın çıktıları arasında görülebilmektedir.

Model bağımsız kontrol metodu mevcut kontrol algoritmalarıyla birlikte hibrit olarak kullanıldığında söz konusu yaklaşımın performansını olumlu yönde etkilemektedir. Model bağımsız kontrol yaklaşımını temel alan bir hibrit kontrolör tasarımında kayan kipli denetim yöntemi ve iPID kontrolör birlikte kullanılmıştır. Söz konusu kontrolör ile rüzgar türbinlerinde hız kontrolü üzerine çalışılmıştır (Li, ve ark., 2015). Wang ve ark. (2016) yayınladıkları çalışmada kayan kipli denetim yöntemi ve iPID kontrolörü hibrit olarak kullanarak bir quadrotor modelinin kontrolüne ilişkin aldıkları başarılı sonuçları paylaştılar.

Fliess ve Join (2013)' in model bağımsız kontrol yaklaşımına ilişkin dikkat çeken çalışmalardan bazıları şöyle sıralanabilir; Lafont ve ark. (2015) çalışmalarında iPID kontrolör ile tarımsal amaçlı bir seranın kapsamlı bir şekilde kontrolünü sağlamışlardır. Yu ve Wu (2016) doğrusal olmayan ve yüksek derecede kararsız bir sistem örneği olan iki tekerlekli tersine sarkaç sisteminin kontrolüne ilişkin çalışmalarını yayınladı. Chand ve ark. (2016)'nın kuşkanadı yapısındaki mekanik uzuvlarını çırparak uçan bir robotun kontrolünü model bağımsız kontrol metodu kullanarak başarıyla sağladıkları çalışmaları bir diğer uygulama örneğidir.

Literatürde iPID kontrol metodu üzerine endüstriyel uygulamalarda karşılık bulabileceğimiz çok sayıda çalışma da mevcuttur. Zhou ve ark. (2016)'nın sabit mıknatıslı senkron motor kontrolünde model bağımsız kontrol metodunu uyguladıkları çalışmaları konuyla ilgili uygulama örnekleri arasındadır. Michel ve ark (2016) model bağımsız kontrol ile DC-DC dönüştürücü kontrolünü uygulamalı olarak çalışmışlardır. Trafik akışında kavşak katılım noktalarının sebep olduğu yoğunluğu düzenlemek adına oluşturulmuş bir konsept olan ramp metering üzerine Abouaïssa ve ark. (2017) model bağımsız kontrol metodu ile uygulama yaptıkları bir çalışma yayınladılar. Doublet ve ark. (2016) bilinmeyen gecikmeye sahip sistemlerin model bağımsız metodu ile kontrolü üzerine çalışmışlardır. Konuya ilişkin yayınlanan bir diğer önemli makalede bir aktif araç süspansiyonu sistemi modelinin kontrolü için kesirli dereceli sliding mod kontrol ile model bağımsız kontrol hibrit olarak kullanılmış ve başarılı sonuçlar alınmıştır (Wang ve ark., 2018). Abouaïssa ve Chouraqui (2019) endüstriyel anlamda yaygın olarak kullanılan bir 6 DOF robot kol sisteminin model bağımsız kontrolü üzerine çalışmışlardır. Doğrusal olmayan

ve zamanla değişen bir modeli olan bu uygulama için sistem modelinden bağımsız olarak bir kontrolör tasarlanmıştır. Model bağımsız kontrolör endüstriyel uygulamalarda kullanılan PD-Torque metodu kadar başarılı sonuçlar vermiştir. Sistem modeline ihtiyaç duyulmadan tasarlanması yönüyle model bağımsız kontrol metodu öne çıkmıştır.

Robotik uzuvların model bağımsız metoduyla kontrolüne ilişkin dikkat çekici çalışmalar şöyledir; Wang ve ark. (2017) robotik uzuv kontrolü üzerine konuya ilişkin

bir makale yayınlamıştır. Söz konusu sistem insan alt hareket uzuvlarını sembolize eden 10 DOF (Degree of Freedom) bir sistemdir. Bu sistemin kontrolü iPID ile sağlanmıştır. Bir alt iskelet yapısının kontrolü için Zhang ve ark. (2018)'nın yayınladığı çalışmada model bağımsız tabanlı bir yapay sinir ağı kontrol algoritması kullanılmıştır.

Kocaeli üniversitesinde yapılan bir doktora tezi çalışmasında kalıcı mıknatıslı senkron motorun model bağımsız kazanç uyarlamalı yüksek dereceli kayan kip yöntemi ile hız denetimine ilişkin bir çalışma gerçekleştirilmiştir. İlgili çalışmada model bağımsız denetim yöntemi ve uyarlamalı kazanç algoritması kullanıldığında, referans hız değerine karşılık kalıcı mıknatıslı senkron motor uygulamasında hız cevabı iyileştirilmekte, yük momentinin uygulandığı durumda cevap süresi kısalmakta ve referans hız değerinden sapma oldukça azalmaktadır (Kılıç, 2016).

Moraes ve De Silva (2015) bir laboratuvar düzeneği üzerinde manyetik levitasyon kontrolü için model bağımsız kontrol yöntemini kullanmışlardır. Pozisyon bilgisi için optik bir sensör ve MATLAB-Simulink uygulamalarının kontrol için gerçek zamanlı olarak kullanıldığı çalışmalarında laboratuvar ortamında oluşturdukları bir manyetik levitasyon modelinin kontrolünü sistemin eksiksiz bir modeline ihtiyaç duymadan sağlamışlardır. Bu tezde yapılan çalışma levitasyon modelinin PID yöntemi ile karşılaştırmalı olarak incelenmesi, sistem modeli ve dış bozucu etmenlerde değişiklikler kurgulanması ve iPID yöntemi üzerinde önerdiği iyileştirme ile Moraes ve De Silva (2015)'nın çalışmasından ayrılmaktadır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu bölümünde öncelikle çalışma konusu olarak seçilen CE 152 Manyetik levitasyon modeline ilişkin bilgiler verilmiştir. Manyetik levitasyon sisteminin temel donanım bileşenleri, bu bileşenlerin ve sistemin matematiksel denklemlerle ifadesi ve sistem karakteristiği hakkında açıklamalar yapılmıştır. Manyetik levitasyon sisteminin uygulamaların gerçekleştirildiği MATLAB-Simulink ortamında kullanılan modeli hakkında bilgi verilmiştir.

Çalışmada model bağımsız kontrolün üzerine kurulduğu platform olan ve aynı zamanda iPID kontrol yöntemiyle karşılaştırmalı olarak incelenen PID kontrol yöntemi ve PID optimizasyon tekniklerinden bahsedilmiştir.

Son bölümde ise çalışmamızın konusu olan model bağımsız (iPID) kontrol yöntemi teorik olarak detaylı bir biçimde açıklanmıştır.

3.1. Manyetik Levitasyon ve CE 152 Manyetik Levitasyon Laboratuvar Ekipmanı

Manyetik levitasyon temel olarak elektrik akımı ile enerjilendirilmiş bir ya da daha fazla eksenli bobinin oluşturduğu manyetik alan şiddeti ile metal bir nesneyi havada belli bir pozisyonda tutulmasıdır. Çalışmamızda modelini kullandığımız CE 152 manyetik levitasyon laboratuvar ekipmanı, Çek Cumhuriyeti merkezli bir kontrol ve model temelli tasarım firması tarafından üretilmiş bir cihazdır. CE 152 MLLE bir giriş ve bir çıkış parametreli, lineer ve kararlı olmayan çok hızlı ve dinamik bir sistemdir. Söz konusu karakteristik özellikleri dolayısıyla sistem dinamikleri ile klasik ve modern kontrol metotlarına dayanan kontrol algoritmaları üzerine çalışmak üzere geliştirilmiştir.

Manyetik levitasyon ünitesi üzerinde pozisyonu kontrol edilmek istenen nesnenin konumu endüktif ve doğrusal pozisyon sensörleri tarafından algılanır. Bu

bilgi bir kontrol ünitesine gönderilir ve işlenilen bilgi nesnenin pozisyonunu iyileştirmek adına bobine veya bobinlere gönderilen akımı düzenler. Giriş sinyali kontrol sinyalidir, çıkış sinyali ise metal topun pozisyonu hakkında bilgi verir. Her iki sinyal değeri belirli bir aralıkta ölçeklendikten sonra işlenir.



Şekil 3.1. CE 152 Manyetik Levitasyon Laboratuvar Ekipmanı (Chalupa ve ark., 2016)

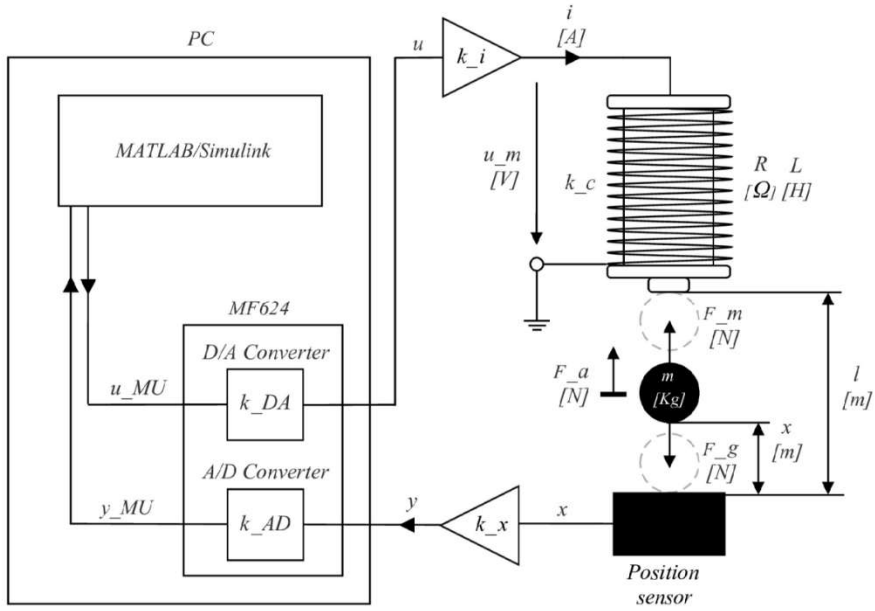
Bahsedildiği üzere doğrusal ve kararlı olmayan yapısı ve çok hızlı, dinamik bir sistem olması nedeniyle ciddi bir kontrol problemidir. Söz konusu karakteristiği dolayısı ile çalışmamızda model bağımsız kontrolörün başarısını ve modelden bağımsız karakteristiğini PID kontrol yaklaşımı ile karşılaştırmalı olarak incelemek adına uygun bir sistem modeli örneğidir.

3.1.1. CE 152 manyetik levitasyon sisteminin yapısı

Bu bölümde çalışmada MATLAB-Simulink modeli kullanılan CE 152 Manyetik levitasyon modelinin karakteristiğini ve donanımsal yapısını iyi analiz edebilmek ve kavrayabilmek adına sistem bileşenleri ve bu bileşenler arasındaki ilişki özetlenmiştir.

Sistem temel olarak bir manyetik levitasyon ünitesi, güç kaynağı ve bir veri toplama kartı MF624 içerir. MF624 üzerinde analog ve dijital giriş/çıkışları, sayıcılar, zamanlayıcılar, A/D, D/A dönüştürücüler bulunur ve sistem bu kart vasıtasıyla bir

bilgisayara bağlanır. Sistem üzerindeki temel elektronik bileşenler; D/A, A/D dönüştürücüler, pozisyon sensörü, güç amplifikatörü, metal top ve bobindir.



Şekil 3.2. CE 152 Manyetik Levitasyon Laboratuvar Ekipmanı Sistem Şeması (Chalupa ve ark.,2016)

Metal top D/A dönüştürücüye bağlı olan güç amplifikatörü tarafından beslenen bobinin oluşturduğu manyetik alan içerisinde havada asılı kalır. Metal topun pozisyon bilgisi A/D dönüştürücüye bağlı olan endüktif bir sensör tarafından alınır. Kontrol verileri ve ölçülen parametreler MATLAB-Simulink programına aktarılır.

Manyetik levitasyon sisteminde, sistemin temel bileşenlerinin matematiksel modellerini, ilgili parametreleri ve bu bileşenlerin fonksiyonlarını ifade etmek için Chalupa ve ark. 2017' nın çalışmasından yararlanılmıştır. Model bileşenlerini tanımlamak gerekirse referans sinyalinin sisteme dahil edildiği kısım olan D/A dönüştürücü işlemciden gelen u_{MU} dijital sinyalini analog bir sinyal olan u değerine dönüştürmektedir. D/A dönüştürücü doğrusal bir denklemle ifade edilebilir.

$$u = k_{DA}\, u_{MU} \tag{3.1}$$

u D/A dönüştürücü çıkış sinyali/bobin giriş voltajını [V], u_{MU} D/A dönüştürücü giriş sinyalini [MU] ve k_{DA} D/A dönüştürücü kazancını [V/MU] ifade etmektedir.

Güç amplifikatörü k_i kazanç değeri olmak üzere kontrol voltajıyla doğru orantılı bir akım çıkışı verir.

$$i = k_i\, u \tag{3.2}$$

Manyetik levitasyon sisteminde top ve bobin alt sistemini modellemek için Lagrange metodu kullanılabilir. Levitasyon sistemi için hareket denklemi sisteme etkiyen tüm kuvvetlerin dengelendiği bir eşitliğe dayanmaktadır.

$$m_k\ddot{x} + k_{fv}\dot{x} = \frac{i^2 k_c}{(x - x_0)^2} - m_k g \tag{3.3}$$

Söz konusu denklemde; g yerçekimi ivmesini $[m.s^{-2}]$, x topun konumunu [m], m_k topun kütlesini [kg], x_0 bobin offset değerini [m], k_c bobin sabitini $[-]$, i bobin akımını [A] ve k_{fv} damping (sönümleme) sabitini $[N.s.m^{-1}]$ temsil etmektedir.

Topun pozisyonunu ölçmek için kullanılan endüktif sensör, topun konumu x olmak üzere, top pozisyonu ve voltaj arasındaki bağıntıyla aşağıdaki denklem kullanılarak ifade edilebilir:

$$y = k_x\, x + y_0 \tag{3.4}$$

x topun pozisyonunu [m], y_0 pozisyon sensörü offset değerini [V], y pozisyon sensörü voltajını [V], k_x pozisyon sensörü kazancını ifade etmektedir.

A/D dönüştürücü, analog voltaj sinyali olan y değerini dijital y_{MU} sinyaline dönüştürür. A/D dönüştürücü doğrusal bir denklemle ifade edilmektedir.

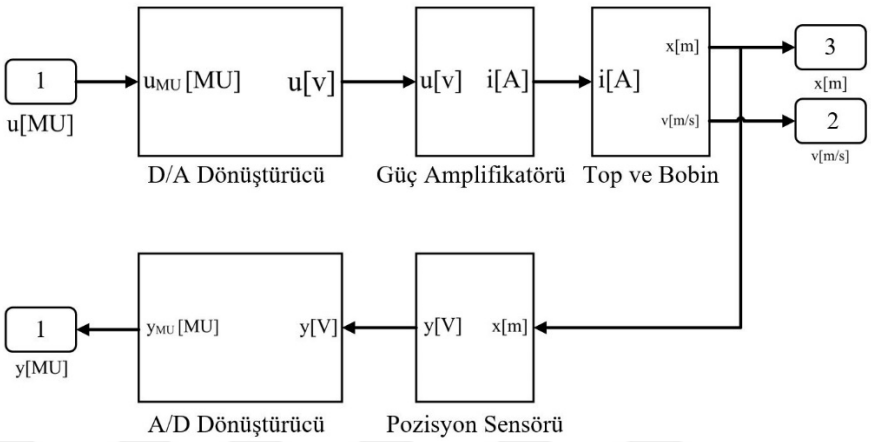
$$y_{MU} = k_{AD} y \tag{3.5}$$

y A/D dönüştürücü giriş sinyali/pozisyon sensörü voltajını [V], y_{MU} A/D dönüştürücü çıkış sinyalini [MU] ve k_{AD} A/D dönüştürücü kazancını [MU/V] ifade etmektedir.

Tüm sistemin blok diyagramı denklem (3.1) – (3.5) arası eşitlikler kullanılarak Şekil 3.3

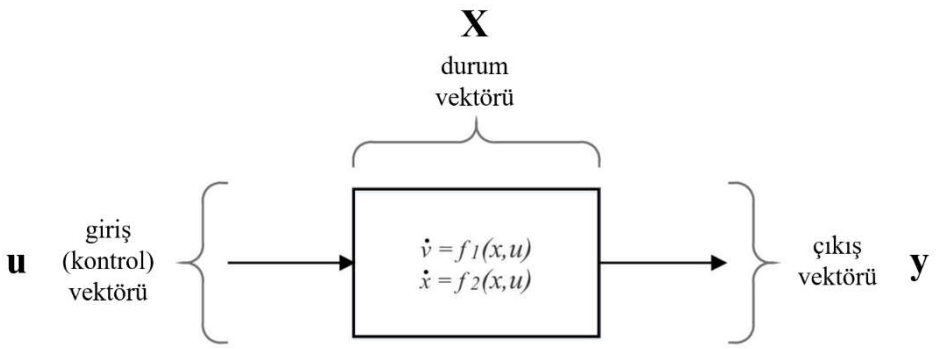
Şekil 3.3. Manyetik Levitasyon Modeli Blok Diyagram Gösterimi (Chalupa ve ark., 2017)

’ de gösterildiği gibi elde edilebilir.



Şekil 3.3. Manyetik Levitasyon Modeli Blok Diyagram Gösterimi (Chalupa ve ark., 2017)

CE 152 Manyetik levitasyon modelinin Tek Giriş Tek Çıkış (SISO) ile ifade edildiği, top hızı – v ve top konumu – x’ i içeren bir durum vektöründen oluşan doğrusallaştırılmış durum-uzay gösterimi Şekil 3.4’ de görülmektedir. Giriş voltajı u ve sistem çıkışı-A/D dönüştürücü çıkışı y ile temsil edilmektedir.



Şekil 3.4. Durum Uzay Gösterimi

Genel olarak doğrusal olmayan sürekli zamanlı bir SISO sistem aşağıdaki denklemlerle ifade edilebilir:

$$\dot{x} = f(x, u_{MU}) \tag{3.6}$$

$$y = g(x, u_{MU}) \tag{3.7}$$

X top hızı – v ve top konumu – x' i içeren bir durum vektörünü, u giriş sinyalini ve y çıkış sinyalini temsil etmektedir. CE 152 modeli için durum vektörü iki bileşenlidir:

$$X = [x, v]^T \tag{3.8}$$

Denklem (3.6) - (3.8) ile tanımlanan sistem bazı çalışma noktaları etrafında doğrusallaştırıldığında sistem matrisi (A), giriş matrisi (B), çıkış matrisi (C) ve (D) matrisi elde edilmektedir. Bu matrislerin parametreleri aşağıdaki diferansiyel denklemlerin seçilen (nominal) çalışma noktalarında doğrusallaştırılmasıyla elde edilmiştir.

$$\frac{dv}{dt} = \frac{(k_{DA} k_i u_{MU})^2 k_c}{m_k (x - x_0)^2} - \frac{k_{fv}}{m_k} v - g \tag{3.9}$$

$$\frac{dx}{dt} = v \tag{3.10}$$

$$y_{MU} = k_{AD} k_x x + k_{AD} y_0 \tag{3.11}$$

Matrisler diferansiyel denklemlerin seçilen çalışma noktalarındaki giriş ve durum değişkenlerine göre kısmi türevlerine dayanarak hesaplanır.

$$A = \frac{\partial f_i}{\partial x_i} (x, u_{MU}) \Big|_{v_{ss}, x_{ss}, u_{MUss}} \tag{3.12}$$

$$B = \frac{\partial f_i}{\partial u_i} (x, u_{MU}) \Big|_{v_{ss}, x_{ss}, u_{MUss}} \tag{3.13}$$

$$C = \frac{\partial g_i}{\partial x_i} (x, u_{MU}) \Big|_{v_{ss}, x_{ss}, u_{MUss}} \tag{3.14}$$

$$D = \frac{\partial g_i}{\partial u_i} (x, u_{MU}) \Big|_{v_{ss}, x_{ss}, u_{MUss}} \tag{3.15}$$

Kararlı durum varsayımı yapıldığında ve denklem (3.9) ve (3.10) için türev değerleri sıfıra eşitlendiğinde:

$$v_{ss} = 0 \tag{3.16}$$

$$u_{MUss} = \pm\sqrt{\frac{m_k g(x-x_0)^2}{k_c {k_{DA}}^2 {k_i}^2}} \tag{3.17}$$

Matrislerin nihai şekli aşağıdaki gibi olmaktadır:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{k_{fv}}{m_k} & -\frac{2g}{x_{ss}-x_0} \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \tag{3.18}$$

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{2k_{DA}k_i\sqrt{k_c g}}{\sqrt{m_k}\,(x_{ss}-x_0)} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{3.19}$$

$$C = [0 \quad k_{AD}k_x] \tag{3.20}$$

$$D = [0] \tag{3.21}$$

Durum uzay gösterimi transfer fonksiyonuna dönüştürülebilir. Söz konusu SISO model için transfer fonksiyonu gösterimi aşağıdaki gibi olmaktadır:

$$G(s) = \frac{b_0}{a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \tag{3.22}$$

Kısmi katsayılar b_0 ve a_0:

$$b_0 = \frac{2k_{DA}k_{AD}k_x k_i\sqrt{k_c g}}{\sqrt{m_k}\,(x_{ss}-x_0)} \tag{3.23}$$

$$a_0 = \frac{2g}{x_{ss}-x_0} \qquad a_1 = \frac{k_{fv}}{m_k} \qquad a_2 = 1 \tag{3.24}$$

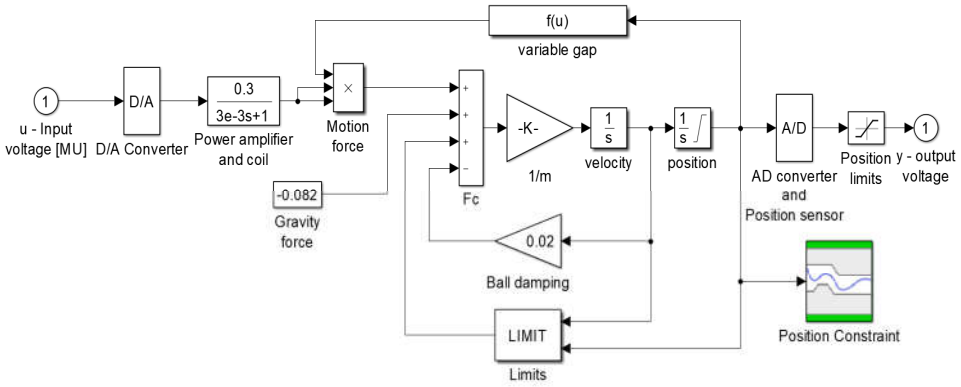
Bu bölümde manyetik levitasyon modelinin karakteristik özellikleri nedeniyle önemli bir kontrol problemi ve uygun bir çalışma konusu olduğu belirtilmiştir. CE 152 Manyetik levitasyon ünitesinin temel parçaları olan D/A, A/D dönüştürücüler, pozisyon sensörü, güç amplifikatörü, top ve bobin bileşenlerinin model üzerindeki işlevleri, aralarındaki ilişki ve bu bileşenlerin matematiksel eşitliklerle nasıl ifade edildiği açıklanmıştır. Son olarak CE 152 Manyetik levitasyon sisteminin durum uzay

gösterimi kullanılarak elde edilen ve denklem (3.12)-(3.15) ile ifade edilen matris bileşenlerinin doğrusallaştırılması sonrası bulunan transfer fonksiyonu ifadesi denklem (3.22)-(3.24) ile gösterilmiştir. Çalışmada kullanılan manyetik levitasyon sisteminin MATLAB-Simulink ortamındaki modeli bu denklemler kullanılarak elde edilebilir. Bu çalışmada MATLAB-Simulink kütüphanesinde mevcut olan CE 152 Manyetik levitasyon modeli kullanılmıştır.

3.1.2. Sistem karakteristiği ve CE 152 Simulink modeli

Bir sistem üzerinde kontrolör tasarımı yapmadan önce sistem karakteristiği ve model davranışlarına dair bilgi sahibi olmak ve çalışmaları bu bağlamda yönlendirmek önemlidir. Üzerinde çalışılan CE 152 Manyetik levitasyon modelinin davranış karakteristiğini ve Simulink ortamında kullandığımız modeli bu bölümde incelenmiştir. Daha önce bahsedildiği gibi CE152 MLLE doğrusal ve kararlı olmayan tek giriş-çıkış parametresine sahip dinamik bir sistemdir. Sisteme giriş olarak bir kontrol sinyali uygulandığında bobine belirli oranda güç iletilir. Bobine iletilen gücün ortaya çıkardığı elektromanyetik kuvvet topa etkiyen yerçekimi kuvvetini aştığı anda metal top yukarı yönde hareket etmeye başlar. Metal top bobine yaklaştıkça hareket ivmesi artan elektromanyetik alan yoğunluğundan dolayı artmaya başlar. Metal top bobin nüvesine temas ettiğinde kontrol sinyali kesilir. Daha yüksek giriş sinyali, daha fazla elektromanyetik kuvvet ve ivmelenme oluşturur. Eğer kontrol sinyali eşik değerinin altına düşerse, oluşturulan elektromanyetik kuvvet topa etkiyen yerçekimi kuvvetini aşamaz ve top aşağı yönde düşmeye başlar. Top sensör üzerine düştüğünde birkaç kez sekme hareketi yapar. Manyetik levitasyon modeline özgü sistem karakteristiği genel hatlarıyla açıklanmıştır.

Çalışmaları bilgisayar ortamında ve çeşitli senaryolar kurgulayarak, karşılaştırmalı bir şekilde sürdürmek amacıyla söz konusu sistem ile MATLAB-Simulink yazılımı kullanılarak çalışılmıştır. MATLAB kütüphanesinde CE 152 MLLE için oluşturulmuş bir Simulink modeli bulunmaktadır. Modele "`open_system('maglev_demo/Magnetic Levitation Plant Model')`" komutu ile erişilebilmektedir. Bölüm 3.1.1.' de doğrusallaştırılmış modeli verilen CE 152



Şekil 3.5. CE 152 MLLE Simulink Modeli Genel Görünümü

Manyetik levitasyon modeli için kullandığımız Simulink modeli Şekil 3.5' de görülebilir. Simulink modeli üzerinde, u giriş değeriyle başlayan ve sırasıyla D/A dönüştürücü, güç amplifikatörü, bobin, bobinin açığa çıkardığı hareket kuvvetiyle yerçekimi ivmesi, top kütlesi ve top sönümleme oranı gibi değerlerin etkileşimini gösteren bloklar ve son olarak topun pozisyon bilgisini A/D dönüştürücü vasıtasıyla çıkış değeri olarak işleyen endüktif pozisyon sensörünü temsil eden bloklar görülmektedir.

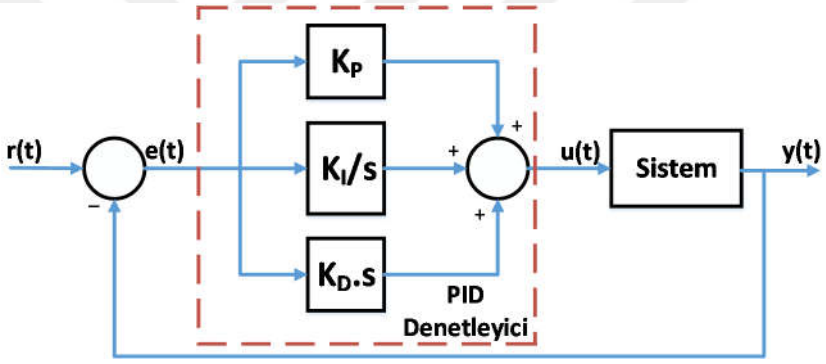
3.2. PID Kontrol

İncelenen Model bağımsız kontrol metodu PID temelli bir yaklaşımdır. Kontrolü sağlanmak istenen sistem üzerinde elde edilen hata değerine bağlı olarak PID kontrolör hata sinyalini azaltacak doğrultuda bir kontrol sinyali üretir. Fakat üretilen kontrol sinyalinin sistem çıkışını istenilen aralığa yeterince hızlı bir şekilde getirmeye yetmediği durumlarda kontrol sinyalindeki açık model bağımsız kontrolör yapısının bileşenlerinden olan ve sürekli olarak güncellenen F parametresi ile giderilmektedir.

Temel işleyişi açıklanan ve PID temelli bir yaklaşım olan model bağımsız kontrol metodu üzerindeki çalışmaların daha iyi kavranması adına bu bölümde PID kontrol yaklaşımı ve PID kontrol parametrelerinin optimizasyonu hakkında bilgiler verilmiştir.

3.2.1. PID kontrol temelleri

PID kontrolörler özellikle endüstriyel otomasyon uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. PID kontrolör, Oransal (Proportional), İntegral (Integral) ve Türevsel (Derivative) olmak üzere üç farklı kontrol biriminin ortak kullanımından oluşur.



Şekil 3.6. PID Kontrolör Blok Diyagramı ve Matematiksel İfadeleri

PID kontrolör sistemin çıkış değerini referans değerine eşitlemek için üç temel kontrol bileşeni kullanır:

Oransal Kontrol (P): Sistem çıkış değeri ile referans arasındaki mevcut hata değerine orantılı bir kontrol sinyali üretilir. Oransal sabit K_p değeri arttırıldığında kontrolörün tepki süresi kısalır. Tepki süresinin azalmasından dolayı maksimum aşım meydana gelebilir.

İntegral Kontrol (I): İntegral kontrol sürekli hal hatası sıfırlanana kadar hata sinyalinin integrali oranında bir çıkış sinyali üretmeye devam eder. Mevcut hata birikiminin bir fonksiyonudur. K_i katsayısının arttırılması kontrolör tepki süresini uzatır.

Türevsel Kontrol (D): Oransal kontrol kullanımı ile sistem tepki süresi azalır ancak bunun sonucu olarak maksimum aşım meydana gelir. Türevsel kontrol e(t) sinyalindeki hızlı düşüşün türevini alarak sistemin aşım yapmasını engelleyecek şekilde kontrol sinyali üretir.

3.2.2. PID optimizasyon metotları

PID kontrolörün işlevsel olabilmesi için kontrol edilecek sürece göre optimize edilmesi gerekmektedir. K_p, K_d ve K_i katsayılarının uygun şekilde ayarlanabilmesi için farklı yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler temel olarak açık ve kapalı döngü metotlar olarak ikiye ayrılırlar. İlgili metotlar aşağıda sıralanmıştır ve bu metotlardan deneme yanılma ve Ziegler-Nichols metotları kısaca açıklanmıştır.

Başlıca kapalı döngü PID parametresi optimizasyon yöntemleri; Ziegler-Nichols, Geliştirilmiş Ziegler-Nichols, Tyreus-Luyben ve Sönümlü Salınım (Damped oscillation) metotları olarak sıralanabilir. Açık döngü PID parametresi optimizasyon yöntemleri; Açık döngü Ziegler-Nichols, C-H-R, Cohen ve Coon, Fertik, Ciancone-Marline, IMC, Minimum hata kriteri (Minimum error criteria) (IAE, ISE, ITAE) metotlarıdır.

Deneme Yanılma Yöntemi: Sistem çalışır haldeyken kontrolör parametrelerini değiştirmenin mümkün olduğu durumlarda, sistem salınım haline gelinceye kadar oransal kazanç arttırılır. Daha sonra salınım duruncaya kadar integral kazancı arttırılır. Sonrasında sistem tepkisini hızlandıracak şekilde türevsel kazanç bileşeni kontrolör yapısına dahil edilir.

Ziegler-Nichols yöntemi: 1942 yılında Ziegler ve Nichols tarafından tanımlanmıştır. Bu metot ile PID parametrelerini belirleyebilmek için, sistem sabit bir genlikle salınım yapmaya başlayana dek oransal kazanç arttırılır. Bu durumdaki kazanç değeri K_u ve bu durumdaki salınım periyodu olan P_u değerleri belirlenir.

İntegral ve türevsel kontrol sabitleri Ziegler-Nichols dönüşüm tablosundan yararlanarak belirlenir.

Çizelge 3.1. Ziegler-Nichols Dönüşüm Tablosu

	K_c	T_I	T_D
P	$K_u/2$		
PI	$K_u/2.2$	$P_u/1.2$	
PID	$K_u/1.7$	$P_u/2$	$P_u/8$

Parametrelerin belirlenmesi için tamamlanması gereken deneme yanılma sürecinin zaman alması, sistemi kararsız davranışlara ve tehlikeli durumlara sebebiyet verebilecek şekilde kararlılık sınırlarında çalışmaya zorlanması, açık döngü halinde kararlı olmayan sistemler için uygulanabilir olmaması Ziegler-Nichols yönteminin başlıca dezavantajlarıdır.

Tüm klasik kontrol yaklaşımlarında olduğu gibi PID kontrol metodunda da kontrolör parametrelerinin doğru bir şekilde belirlenmesi sürecin başarılı kontrol edilebilmesi için elzemdir. Fakat kontrolör tasarımı ve parametrelerinin belirlenebilmesi için sistem modelinin bilinmesi ve ya yukarıda açıklanan tüm sistemler için uygulanması mümkün olmayan işlemlerin yapılması gerekmektedir. Bu durumda model bağımsız kontrol yaklaşımı önem kazanmaktadır.

3.3. Model Bağımsız Kontrol Metodu ve Intelligent PID (iPID)

Bu bölümde çalışmada manyetik levitasyon modeli üzerinde kontrol sağlamak için kullanılan ve PID kontrol ile karşılaştırmalı olarak incelenen model bağımsız (iPID) kontrol metodu çalışma ilkesi detaylı olarak açıklanmıştır.

Fliess ve Join (2013) model bağımsız kontrol metodunda kolaylık sağlaması için sistemin matematik modelini tek bir kontrol değişkeni (u) ve tek bir çıkış değişkeni (y) ile ifade etmiştir. Kompleks matematiksel model yerel model ile değiştirilmiştir.

$$y^{(v)} = F + \alpha u \tag{3.25}$$

- Türev derecesi olan v uygulayıcı tarafından mümkün olduğunca düşük bir değer seçilir. ($v \geq 1$)
- $\alpha \in R$ fiziksel olmayan sabit bir parametredir. Uygulayıcı tarafından αu ve $y^{(v)}$ sinyallerinin büyüklükleri eşit olacak şekilde seçilirler. Uygulamalarda α parametresinin değeri deneme-yanılma yöntemiyle belirlenmektedir. (Fliess ve Join, 2013).
- F, sistem modelinin bilinen temel noktalarından ve sisteme dair bilinen dış bozucu ve gürültü gibi verilerden yola çıkarak elde edilen ve sürekli güncellenen bir değişkendir. Model bağımsız kontrol metodunda elde edilen hata değerine bağlı olarak kullanılan kontrolör hata sinyalini azaltacak doğrultuda bir kontrol sinyali üretir. Fakat üretilen kontrol sinyalinin sistem çıkışını istenilen aralığa yeterince hızlı bir şekilde getirmeye yetmediği durumlarda kontrol sinyalindeki açık sürekli olarak güncellenen F parametresi ile giderilmektedir. iPID yönteminde F parametresinin, kontrol sinyali u' ya katkısı eşitlik 3.26' da gösterilmiştir. Eşitlikte görülen $\ddot{y}^*$ ifadesi referans sinyalinin v. dereceden türevini göstermektedir.

$$u = -\frac{F - \ddot{y}^* + K_P e + K_I \int e + K_D \dot{e}}{\alpha} \tag{3.26}$$

Model bağımsız kontrol metodundaki temel fonksiyonu açıklanan F parametresinin kestirimi için F değerine parçalı sabit bir fonksiyon olarak yaklaşılır. Fliess ve Sira-Ramirez (2003, 2008) cebirsel metotları eşitliğe uygulanır.

$$y^{(v)} = \phi + \alpha u \tag{3.27}$$

Denklem (3.25) için $v = 2$ seçildiği durumda:

$$\ddot{y} = F + \alpha u \tag{3.28}$$

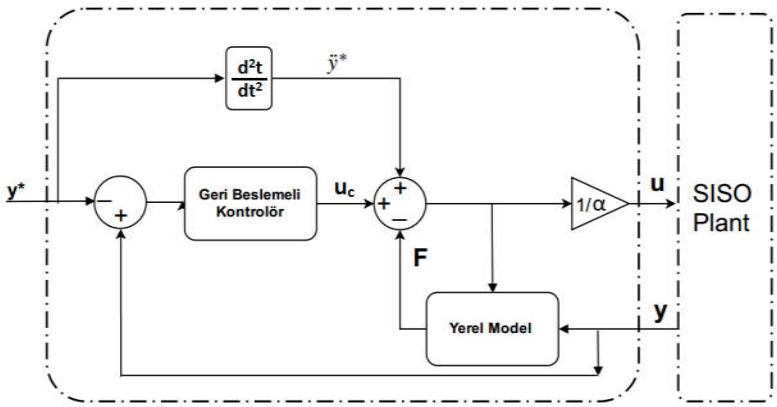
iPID ile kapalı döngü bir sistem elde edilirse kontrol sinyali (3.26) nolu denklemdeki gibi ifade edilmektedir (Fliess ve Join, 2013).

- y^*: Sistem çıkışında gözlemlenmesi istenen referans sinyalidir. Model bağımsız kontrol metodunda kontrol sinyalinin eldesi için (3.26) nolu denklemde belirtildiği üzere referans sinyalinin, seçilen sistem derecesi (v) değerince türevi döngüye dahil edilmektedir. Bu sebepten referans sinyali olarak basamak veya birim fonksiyonları yerine üstel fonksiyonlar gibi türevi alınabilir ifadeler seçilmelidir.
- e: Hata sinyali sistemin çıkış değeri ile sisteme giriş olarak verilen referans sinyalinin farkı alınarak hesaplanmaktadır.

$$e = y - y^* \tag{3.27}$$

- K_P, K_I, K_D: Oransal, İntegral ve Türevsel PID parametrelerini temsil etmektedir.

Daha önce bahsedildiği üzere elde edilen hata sinyaline bağlı olarak üretilen PID kontrol sinyalinin, sistem çıkışını istenilen aralığa getirmeye yeterli olmadığı durumlarda kontrol sinyalindeki açık sürekli olarak güncellenen F parametresi ile giderilmektedir. Kontrol sinyali u'nun (3.26) nolu eşitliğe bağlı olarak eldesi ve u'nun eldesine F parametresinin katkısı aşağıdaki şekilde verilen blok diyagramda belirtilmiştir. Sistem kapalı döngü bir PID döngüsü ile tamamlandığında elde edilen sistemin blok diyagramı şekildeki gibi olmaktadır (Al Younes ve Drak, 2016).



Şekil 3.7. Kapalı Döngü Model Bağımsız Kontrolör Blok Diyagramı

Geri beslemeli bir kontrolör olan PID ile elde edilen kontrolör çıkışı sürekli güncellenen F parametresi ile beslenmekte ve kontrol sinyalini ölçeklemek amacıyla

$1/\alpha$ kazanç değeriyle çarpılmaktadır. α parametresinin F değerinin kestiriminde de rol oynadığı not edilmelidir.

3.3.1. F parametresinin gerçek zamanlı kestirimi

Kontrol edilecek sistemi ifade etmek için belirtilen (3.25) nolu eşitliğinin bileşenlerinden olan F parametresinin gerçek zamanlı kestirimi için F parametresine parçalı sabit bir fonksiyon tarafından yaklaşılır ve Fliess ve Sira-Ramırez (2003,2008) teknikleri denkleme uygulanır. ϕ; sabit bir parametre, L1, L2 ∈ R [s s^{-1}]; laurent polinomları ve I ∈ R [s]; başlangıç koşulu olmak üzere:

$$L_1(s)Z_1 + L_2(s)Z_2 = \frac{\phi}{s} + I(s) \tag{3.28}$$

Eşitliğin her iki tarafının n. dereceden türevini almak başlangıç koşulu bileşenini elimine eder.

$$\frac{(-1)^N N!}{s^{N+1}}\phi = \frac{d^N}{ds^N}(L_1(s)Z_1 + L_2(s)Z_2) \tag{3.29}$$

Eşitliğin her iki tarafını S^{-M} ile çarpmak s' in pozitif kuvvetlerini (türev bileşenlerini) ortadan kaldırır.

Denklem (3.25) için $v = 1$ seçilirse:

$$\dot{y} = F + \alpha u \tag{3.30}$$

Denklem (3.28) ve (3.30)' dan y_0 başlangıç koşulu [t-L, t], α sabit katsayı olmak üzere aşağıdaki eşitlik elde edilir;

$$sY = \frac{\phi}{s} + \alpha U + y_0 \tag{3.31}$$

Her iki tarafın türevi alınarak, başlangıç koşulu elimine edildiğinde;

$$y + \frac{dy}{ds} = -\frac{\phi}{s^2} + \alpha\frac{du}{ds} \tag{3.32}$$

Eşitliğin ters laplace dönüşümü alındığında F parametresi belirlenmiş olur;

$$\phi = -\frac{6}{L^3}\int_{t-L}^{t}((L-2\sigma)y(\sigma)+\alpha\sigma(L-\sigma)u(\sigma))d\sigma \quad (3.33)$$

Sistem derecesi $v=1$ seçildiğinde ve döngü oransal kontrolör ile tamamlandığında F değeri aşağıdaki gibi olmaktadır (Fliess ve Join, 2013).

$$\phi = \frac{1}{L}\left[\int_{t-L}^{t}(\dot{y}^{*} - \alpha u - K_P e)d\sigma\right] \quad (3.34)$$

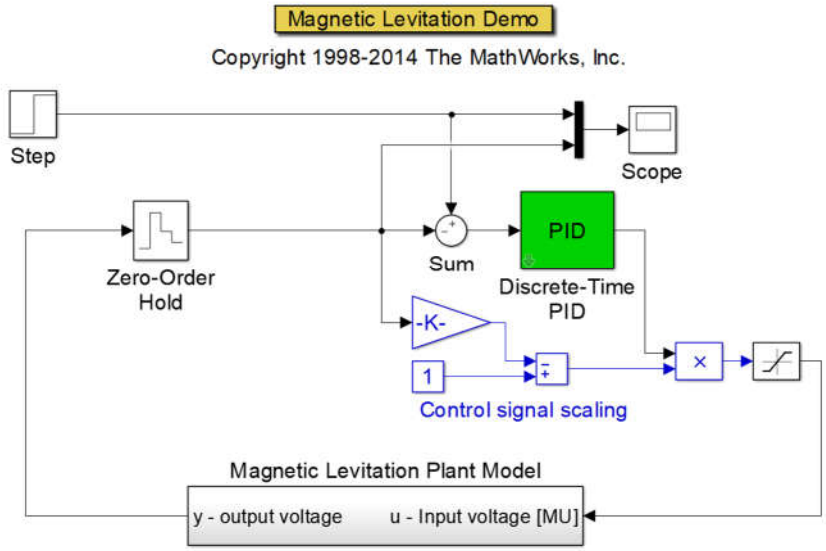
Simulink modeli üzerinde gerçekleştirilen model bağımsız kontrol uygulamalarında F parametresi için P kontrolör döngüsü ile tamamlandığı durum denklem (3.34) ile gösterilen ifade temel alınacaktır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu çalışmada Model Bağımsız Kontrol metodu ile manyetik levitasyon kontrolü sağlamak maksadıyla CE 152 Manyetik Levitasyon Kontrol Ünitesinin MATLAB-Simulink modeli kullanılmıştır. Daha önceki bölümlerde doğrusal olmayan yapısı ve dinamik karakteristiği dolayısı ile güç bir kontrol problemi olduğu belirtilen manyetik levitasyon modeli, model bağımsız kontrol yönteminin performansını klasik PID kontrolör yapısı ile karşılaştırmalı olarak gözlemlemek için seçilmiştir. Bu bölümde aynı zamanda iPID kontrolörün model bağımsız karakteristiğini vurgulamak maksadıyla sistem modeli ve çevresel koşullar üzerinde kurgulanan değişiklikler ile uygulamalar yapılmış ve Simulink üzerinde alınan sonuç grafikleri paylaşılmıştır. Son bölümde ise model bağımsız kontrol yöntemi üzerinde yapılan ve parametre güncellemesine dayanan iyileştirmeye ilişkin detaylar bulunmaktadır. Model bağımsız kontrol metodunda uygulayıcı tarafından sistem davranışları göz önüne alınarak seçilen sabit α parametresinin kestirimine ilişkin bir geliştirme yapılmıştır. α parametresinin kestirimine ilişkin yapılan güncelleme sonrası iPID kontrolörün, mevcut iPID kontrolör ile başarısı uygulamalı olarak karşılaştırılmıştır.

4.1. CE 152 Manyetik Levitasyon Modelinin iPID ile Kontrolü

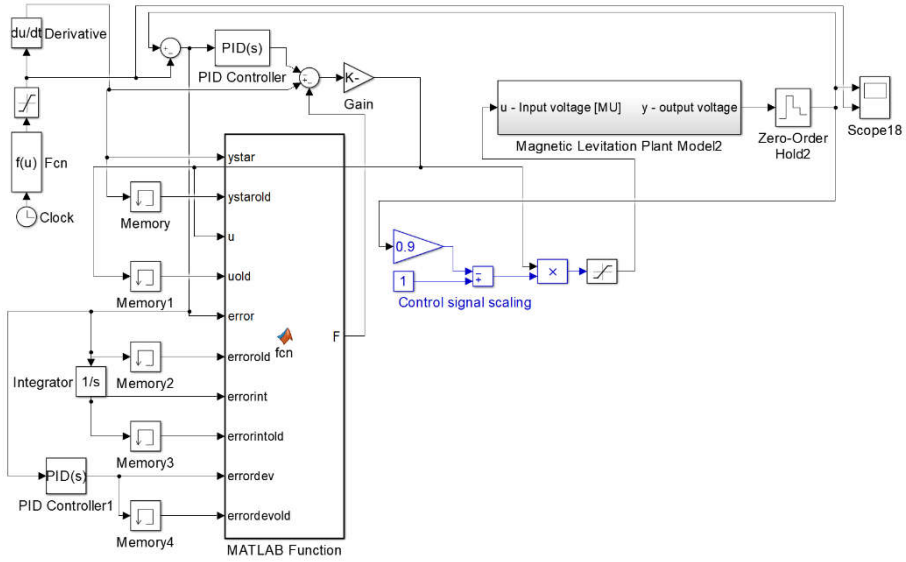
Manyetik levitasyon modelinde referans değeri, metal topun hareket edebileceği maksimum aralık olan 0 ve 1 değerleri arasında seçilebilmektedir. PID kontrol düzeneği için referans değeri olarak 0.5 birim fonksiyon seçilmiştir. PID kontrolörün oransal, integral ve türevsel katsayıları MATLAB PID Response Optimization arayüzü ile $K_p = 0.4931$, $K_i = 3.0841$, $K_d = 0.0456$ olarak belirlenmiştir. Şekil 4.1' de levitasyon modelinin PID ile kontrolü için oluşturulan simulink modeli görülmektedir.



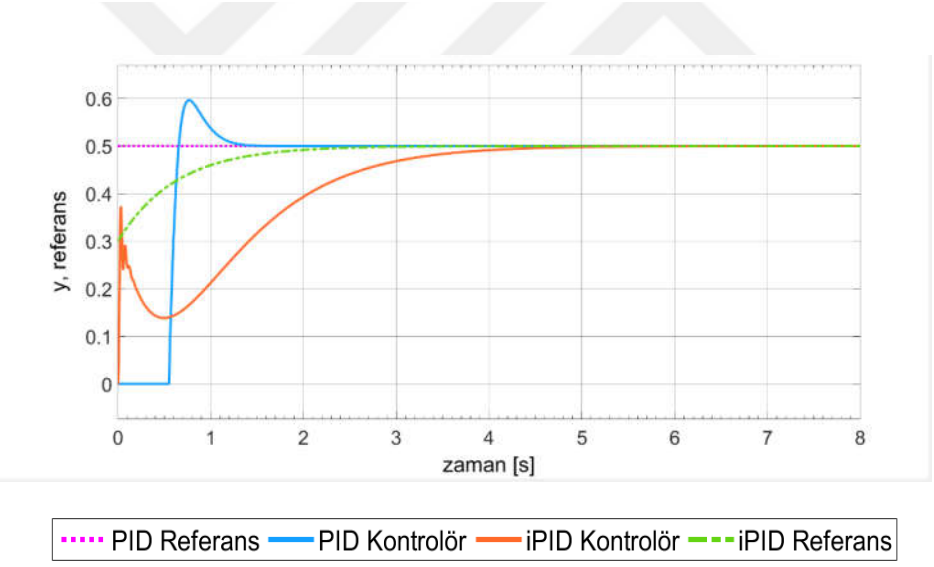
Şekil 4.1. Simulink Üzerinde PID Kontrol Metodu Uygulanmış Manyetik Levitasyon Modeli

iPID kontrol diyagramı için ise 0.5 birimlik referans değeri üstel bir fonksiyon olarak elde edilmiştir. Çünkü model bağımsız kontrol metodu (3.26) nolu eşitlikten de anlaşılacağı üzere F parametresinin gerçek zamanlı kestirimi için referans değerinin seçilen sistem derecesine göre her örnek zamanda v değeri kadar türevini alarak sonuca ulaşmaktadır. Bu bağlamda referans değeri olarak türevi alınabilir bir fonksiyon elde etmek adına $y^* = 0.5 - 0.2 \times e^{-1.6t}$ ifadesi seçilmiştir. Bu bölümde α parametresi için bir kestirim algoritması kullanılmamış, sistem davranışları gözlemlenerek en iyi sonucu alacak şekilde α = 0.4 değeri seçilmiştir. Şekil 4.2' de levitasyon modelinin iPID ile kontrolü için oluşturulan simulink modeli görülmektedir. Şekil 4.2' de görülen fonksiyon bloğu F değişkeninin gerçek zamanlı kestirimi için kullanılmıştır. Yerel modelin derecesi v= 1 olarak seçilmiştir. iPID döngüsünde F parametresinin gerçek zamanlı kestirimi için aşağıda verilen ve F parametresinin iPID döngüsünde eldesini gösteren eşitlik bir MATLAB fonksiyon bloğuyla oluşturulmuştur, fonksiyona EK 1' de ulaşmak mümkündür.

$$\phi = \frac{1}{L}\left[\int_{t-L}^{t}(\dot{y}^* - \alpha u - K_P e - K_I \int e - K_D \dot{e})\right] \quad (3.35)$$



Şekil 4.2. Simulink Üzerinde Model Bağımsız Kontrol Metodu Uygulanmış Manyetik Levitasyon Modeli



Şekil 4.3. Simulink Manyetik Levitasyon Modeli Üzerinde PID ve iPID Kontrol Düzenekleri Referans ve Çıkış Değerleri

Şekil 4.3' de verilen benzetim grafiğinde PID kontrolör için verilen 0.5 birim fonksiyon ve iPID kontrolör için verilen ve üstel olarak 0.5 değerine ulaşan referans değerleri görülebilmektedir.

iPID kontrolör yapısının çıkış değeri incelendiğinde bir müddet sonra referans değeri olan 0.5 birimi başarıyla takip ettiği ve manyetik levitasyon modelinin

kontrolünü sağlayabildiğini görmekteyiz. Çizelge 2.' de ki verilere bakıldığında PID kontrolörün referans değerini 1.5 saniyede % 19.24' lük bir aşım değeriyle takip ettiği görülmektedir. iPID kontrolör ise 4.2 saniyede aşım meydana gelmeden kontrolü sağlamaktadır. Manyetik levitasyon modeli için 0 -1 arası seçilebilen referans değeri 1 değerine daha yakın seçildiğinde PID kontrolörün aşım değerinin ve iPID kontrolörün yerleşme zamanının düştüğü not edilmelidir.

Çizelge 4.1. Simulink manyetik levitasyon modeli için PID ve iPID kontrolörlere ait kontrol performansı parametreleri

	PID Kontrolör	**iPID Kontrolör**
Yükselme Zamanı	0.65 s	4.2 s
Yerleşme Zamanı	1.5 s	4.2 s
Aşım Yüzdesi (%)	19.24	0

Çalışmanın bu bölümünde alınan sonuçlar incelendiğinde iPID kontrolör yapısının dinamik bir karakteristiğe sahip güç bir kontrol problemi olan manyetik levitasyon modelinin kontrolünü sağlayabildiği görülmektedir.

4.2. Model Bağımsız Kontrol Metodunda α Parametresinin Gerçek Zamanlı Kestirimi

Model bağımsız kontrol metodunda kontrol sinyalinin (u) elde edilmesinde ve F parametresinin güncellenmesinde (3.26) ve (3.35) numaralı denklemlerden de görülebileceği üzere α parametresi belirleyici bir rol oynamaktadır. Kontrol sinyalinin kazanç değeri de diyebileceğimiz α parametresinin belirlenmesinde sistem davranışları göz önüne alınarak bir değer belirlenmektedir (Fliess ve Join, 2013). Aldığı değerin F parametresini ve kontrolörün performansını doğrudan etkiliyor olması bu parametrenin belirlenmesini son derece önemli kılmaktadır. Literatürde model bağımsız kontrol üzerine yapılmış olan çalışmalarda α parametresinin optimizasyonu ve ya belirlenmesi için bir metot üzerinde durulmamıştır. Fliess ve Join (2013) uygulamalarında α parametresini sabit bir değer olarak belirlemişlerdir.

Çalışmanın bu bölümünde iPID kontrolör yapısı üzerinde α parametresinin gerçek zamanlı kestirimi için bir algoritma oluşturulmuş ve kontrolör yapısına dahil

edilmiştir. Yapılan bu güncelleme ile sistemin kontrol performansının hem önceki çalışmalarda hem de manyetik levitasyon modelinde elde ettiği ilerleme göze çarpmaktadır.

Bu uygulamada α parametresinin belirlenmesi ve gerçek zamanlı kestirimi için her örnekleme zamanında çıkış değeri ve referans değeri arasındaki farka bağlı olarak güncelleme yoluna gidilmiştir. α parametresi için öncelikle başlangıç değeri olarak α = 1 seçilir ve çıkış değeri ile referans değeri arasındaki anlık fark nispetinde çıkış kontrol sinyalini arttıracak ya da azaltacak şekilde parametre değişken bir kazanç değeriyle çarpılır. Bu işlem sırasında α değeri sistemin çıkışının kararsızlaşmasını önlemesi için belirli bir aralıkta tutulur.

α parametresinin değerini güncelleyen algoritmanın temel yapısı bir if döngüsü içerisinde aşağıdaki sözde kod ifadesinde görülmektedir.

```
eğer ref-y1>0.001
   alfayı 0.0001 azalt;
eğer ref-y1>ref*0.1
       alfayı %2 küçült;
eğer y1-ref>0.001
       alfayı 0.0001 arttır;
eğer y1-ref>ref*0.1
       alfayı %5 büyüt;
aksi takdirde
       alfa sabit kalır;
son
```

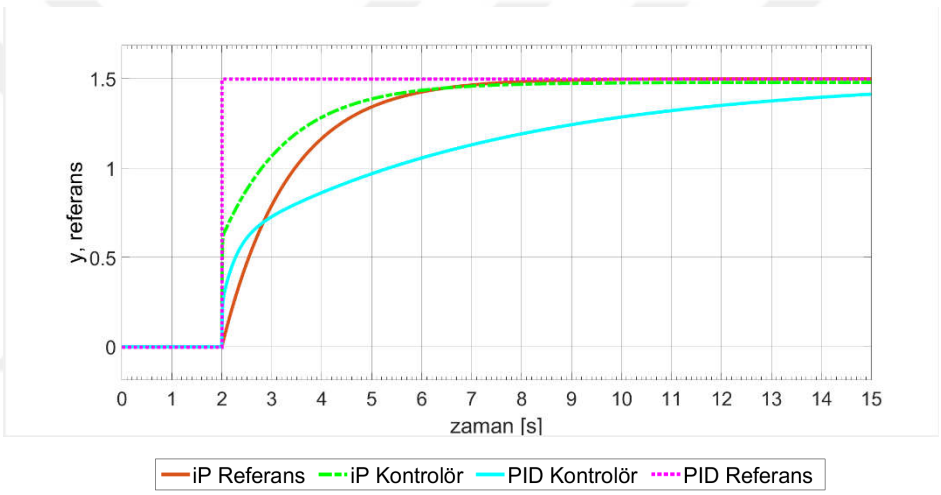
α parametresinin gerçek zamanlı kestirimi için oluşturulan algoritmanın kontrol performansına etkisini görebilmek adına bir örnek üzerinde inceleme yapılmıştır. Fliess ve Join (2013)' in Model bağımsız kontrol üzerine söz konusu çalışmaları bir örnek oluşturması maksadıyla tekrarlanmıştır. İlgili çalışmada iP kontrolörün PID kontrolör üzerinde avantajlarını göstermek amacıyla üzerinde çalışılan sistemin transfer fonksiyonu aşağıdaki denklemde görülmektedir.

$$H_1(s) = \frac{(s+2)^2}{(s+1)^3} \quad (4.1)$$

Söz konusu sistem için oluşturulan PID ve iP kontrolör yapıları referans değeri olan 1.5 birimi başarıyla takip edebilmişlerdir. Çalışmanın ikinci kısmında ise kontrol edilmek istenen sistemin transfer fonksiyonu üzerinde aşağıda verilen kök değişikliği yapılmıştır.

$$H_2(s) = \frac{(s+2)^2}{(s+2.2)^3} \quad (4.2)$$

Transfer fonksiyonunda yapılan bu değişiklik sonrası PID ve iP kontrolörlerin referans değerini takip etmedeki performanslarına ilişkin veriler Şekil 4.4' de verilen grafikte paylaşılmıştır.

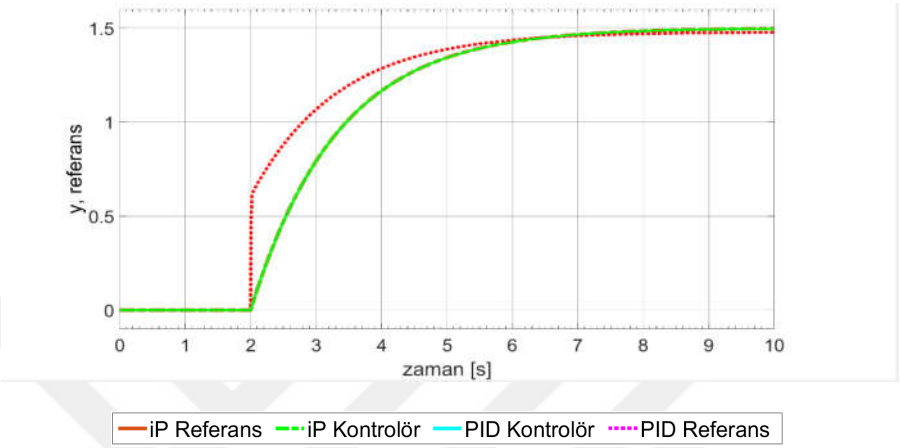


Şekil 4.4. Transfer fonksiyonu üzerinde değişiklik yapılan sistem üzerinde PID ve iP Kontrol Düzenekleri Referans ve Çıkış Değerleri

Şekil 4.4' de verilen grafikte görüldüğü gibi sistem modelinde yapılan değişikliğe rağmen iP kontrolör referans değerini bir miktar sapmayla dahi olsa yakalayabilmektedir. Buna karşın PID kontrolör yapısının sistem modelindeki değişiklik sonrası referans değerini yakalayamadığı görülmektedir. Bu çalışmada α parametresinin belirlenmesi için herhangi bir metot kullanılmamış yalnızca sistem davranışları gözlemlenmiştir. Bu yaklaşımın simülasyon ortamı dışında kontrolör tasarımı için kullanımının belirli kısıtlar dahilinde mümkün olduğu not edilmelidir. Çünkü bu yaklaşımda α parametresinin belirlenme metodu olan deneme yanılma yöntemi bazı sistemlerin salınıma girmesine sebebiyet verebilir.

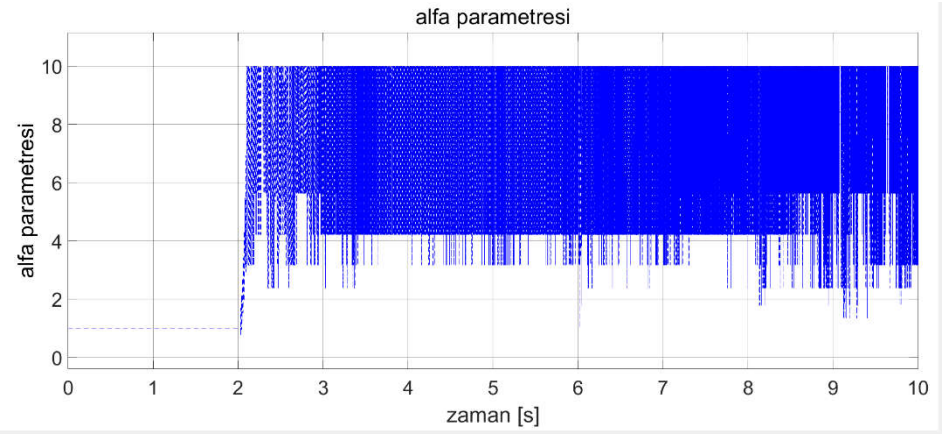
α parametresinin gerçek zamanlı olarak kestirimini mümkün kılan algoritmanın dahil edildiği iP kontrolör yapısı yukarıda bahsi geçen senaryoda kullanılmak ve klasik iP kontrolörün çıkış değerleriyle karşılaştırılmak üzere söz konusu sistem üzerinde uygulanmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen veriler

Şekil 4.5' de görülmektedir.



Şekil 4.5. Transfer fonksiyonunda yapılan değişiklik sonrası klasik iP ve α parametresinin gerçek zamanlı kestirimini mümkün kılan algoritmanın dahil edildiği iP kontrolör düzenekleri referans ve çıkış değerleri

Şekil 4.5' de verilen grafikte görüldüğü üzere α parametresinin gerçek zamanlı olarak kestirimini mümkün kılan algoritmanın dahil edildiği model bağımsız kontrolör yapısı herhangi bir müdahaleye gerek kalmadan α parametresini optimum olarak ayarlamış ve kontrolörün sistemin referans değerini sürekli olarak hatasız bir şekilde takibini mümkün kılmıştır. **Error! Reference source not found.**' de gösterilen grafikte görülebileceği gibi simülasyon boyunca kontrolörün referans değerini minimum hatayla takibini mümkün kılacak olan α parametresi sürekli olarak güncellenmiştir.



Şekil 4.6. α parametresinin gerçek zamanlı kestirimini mümkün kılan algoritmanın dahil edildiği kontrolör yapısı üzerinde söz konusu α parametresinin değişimi

α parametresinin gerçek zamanlı kestirimi için oluşturulan algoritma, F değerinin gerçek zamanlı kestirimi için oluşturulan algoritmaya dahil edilmiştir (EK 2).

Simulasyon sonuçları incelendiğinde α parametresini sabit bir değer olarak belirlemek yerine sürekli güncellendiği bir algoritma kullanmak kontrolör performansını arttırmaktadır. Bunun yanı sıra iPID kontrolör tasarımında α parametresinin belirlenmesi problemi de ortadan kalkmıştır. Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde geliştirilen güncelleme algoritmasının metoda sağladığı katkı sistem modelinin ve çevresel şartların standart dışı değiştirildiği uygulama örnekleriyle pekiştirilecektir.

4.3. iPID ve PID Kontrollü CE 152 Manyetik Levitasyon Modellerinin Sistem Karakteristiğindeki Değişimlere ve Dış Değişkenlere Karşı Performansı

Bu bölümde uygulama alanı olarak seçilen CE 152 Manyetik Levitasyon Modelinin P, I ve D kontrolörlerin dahil edildiği bir model bağımsız kontrol yapısıyla kontrolü sağlanmıştır. Daha önce bahsedildiği gibi manyetik levitasyon modeli doğrusal ve kararlı olmayan, çok hızlı ve dinamik bir uygulama örneğidir. Söz konusu karakteristik özellikleri dolayısıyla model bağımsız kontrolör metodunun başarısının sınanması açısından oldukça uygun bir örnek teşkil etmektedir. Fakat bu çalışmada

manyetik levitasyon modelinin 3.1.1. nolu bölümde verilen doğrusallaştırılmış bir matematiksel ifadeden elde edilmiş olan Simulink modeli kullanılmıştır.

Çalışmanın diğer bölümlerinde ise manyetik levitasyon modeli üzerinde kontrol sağlamayı zorlaştıracak ve iPID kontrolörün performansını değerlendirmemizi mümkün kılacak bazı temel değişiklikler yaptığımız uygulama örnekleri bulunmaktadır. Pozisyonu kontrol edilmek istenen metal topun kütlesi, manyetik alanı ve dolayısıyla kaldırma kuvvetini oluşturan bobin parametreleri sistem modelinin dışında değiştirilerek uygulama yapılmıştır.

Bunların yanı sıra referans değerinin zamana bağlı olarak değiştiği ve kontrol sinyalinin (u) güç kaybına uğradığı örnekler de kontrolör performansını gözlemlemek amacıyla kullanılmıştır. Yapılan çalışmalarda klasik PID kontrolör ve iPID kontrolör yapılarının performansları karşılaştırılmıştır.

Çalışmanın son bölümünde ise α parametresinin gerçek zamanlı kestirimini mümkün kılan iPID yapısı ile klasik iPID kontrolör yapılarının manyetik levitasyon modeli üzerindeki kontrol performansları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

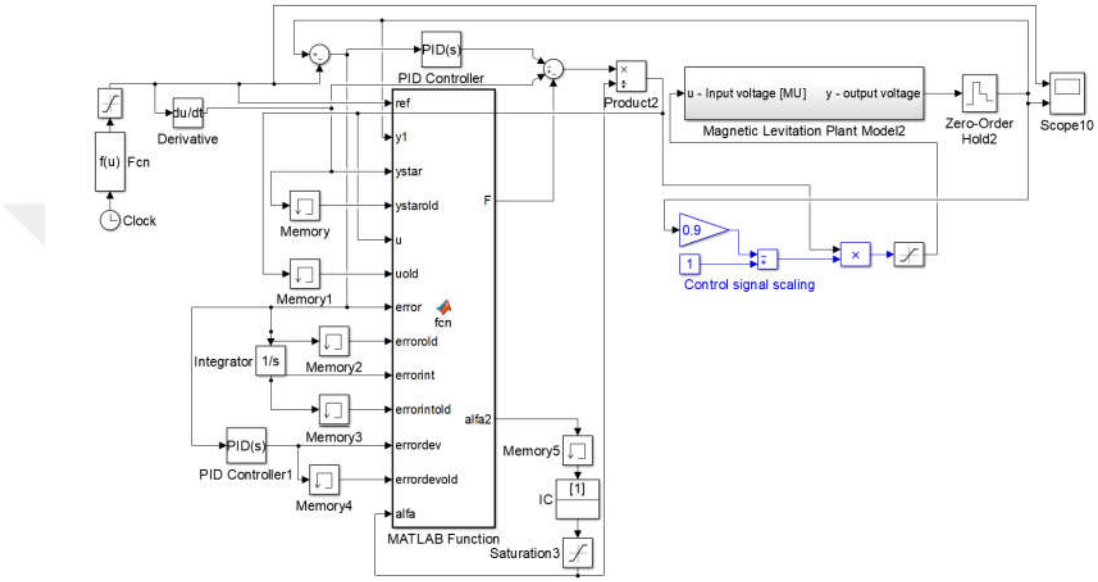
4.3.1. Top kütle (m) değerinin değişimine karşı kontrolör performansları

Çalışmanın 4.1. nolu bölümünde manyetik levitasyon modelinin PID ve iPID kontrolör yapıları ile kontrolü sağlanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştı. İlgili çalışmada kontrölör parametreleri; $K_p = 0.4931$, $K_i = 3.0841$, $K_d = 0.0456$ olarak Simulink PID Tuning Tool kullanılarak belirlenmişti. Bu bölümde ise pozisyonu kontrol edilmek istenen metal toğun ağırlığı benzetim süresince zamana bağlı değişen bir fonksiyon cinsinden ifade edilecektir ve iPID kontrolör yapısının sistem modelinde meydana gelen bu köklü değişiklik karşısında gösterdiği performans klasik PID kontrol yöntemiyle karşılaştırılacaktır.

CE 152 Manyetik Levitasyon modelinde standart olarak kullanılan ve kontrol parametrelerinin de belirlenmesinde rol oynayan metal topun ağırlığı $m = 8.37 \times 10^{-3}$ kg olarak belirtilmiştir (Chalupa ve ark., 2016). Söz konusu laboratuvar

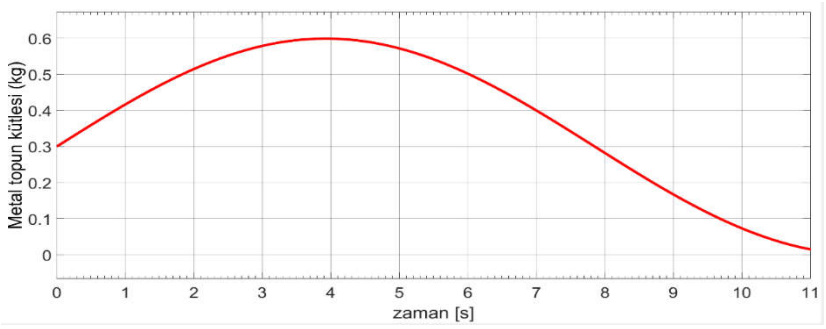
ekipmanı 0-5 V ve 0-1.5 A' lik aralıkta 7.5 W' lık bir güç çıkışına sahiptir. Bu güç değeri teorik olarak sistemin 600 gramın üzerindeki ağırlıkları dahi hızlı bir şekilde hareket ettirebilecek bir çıkışı kolaylıkla üretebileceğini göstermektedir.

Çalışmanın bu bölümünde metal topun ağırlığı 8.37×10^{-3} ve 0.6 kg değerleri arasında 0.4 rad/s' lik frekansla salınım yapacak şekilde bir fonksiyonla ilişkilendirilmiştir.



Şekil 4.7. α parametresinin gerçek zamanlı kestirimini mümkün kılan algoritmanın dahil edildiği iPID kontrolör yapısı ve CE 152 manyetik levitasyon ünitesinin Simulink modeli

iPID kontrolörün model bağımsız karakterini vurgulamak açısından önemli olan bu çalışma için oluşturulan Simulink modeli ve kontrol diyagramı Şekil 4.7' de görülmektedir. Bu çalışmada iPID kontrolör yapısına α parametresinin gerçek zamanlı kestirimini mümkün kılan algoritma da dahil edilmiştir.

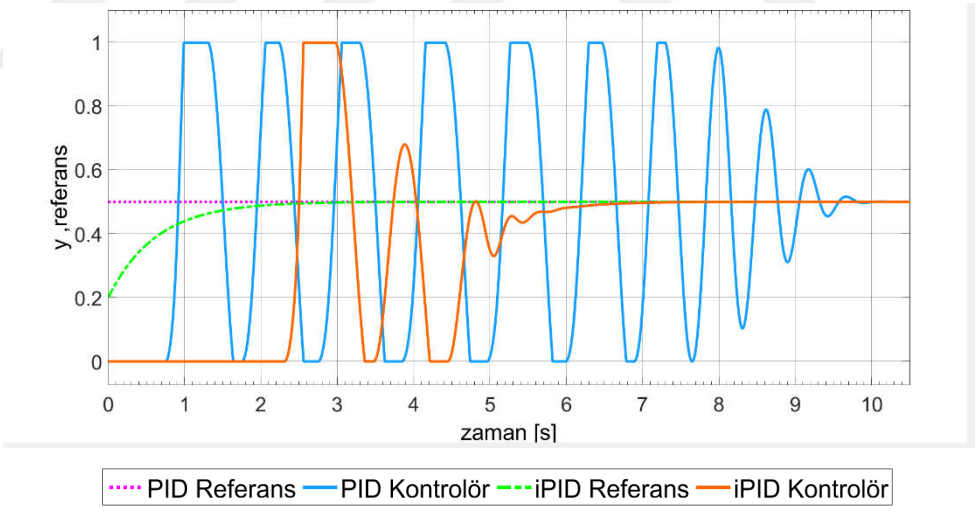


Şekil 4.8. Metal topun kütlesinin simülasyon süresince zamana karşı değişimi (kg)

PID ve iPID kontrolörlerin, metal topun ağırlığının 0.008 ve 0.6 kg değerleri arasında değiştiği manyetik levitasyon modeli üzerindeki referans değerleri ve çıkış değerlerini gösteren grafik Şekil 4.9' da görülebilir.

Şekil 4.9' da verilen grafik incelendiğinde her iki kontrolörün de belirli bir süre sonunda metal topun kütle değerindeki değişimin belirli bir periyotla devam ediyor olmasına rağmen referans değerini yakaladığı görülmektedir. Fakat iPID kontrolör yapısı PID kontrolöre göre belirgin şekilde daha az salınımla ve çok daha kısa sürede referans değerini yakalayabilmiştir.

Bu yönleriyle α parametresi güncellemeli iPID kontrolör yapısı klasik PID kontrolöre göre sistem modelinde meydana gelen ciddi bir değişiklik karşısında daha iyi bir performans göstermiştir. PID kontrolör yapısı referans değerini 9.8 s' de yakalarken iPID kontrolör ise 6.5 s' de referans değerini kararlı olarak takip etmeyi mümkün kılmıştır.

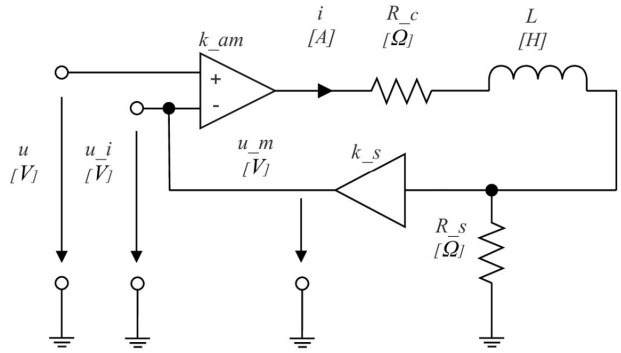


Şekil 4.9. Metal topun ağırlığının 0.008 ve 0.6 kg aralığında değiştiği durumda PID ve α parametresi güncellemeli iPID kontrolörlerin manyetik levitasyon modeli üzerinde aldıkları çıkış değerleri

4.3.2. Bobin parametresindeki değişime karşı kontrolör performansları

CE 152 manyetik levitasyon modelinde metal topu havada asılı tutabilmek için bir bobin tarafından üretilen elektromanyetik kuvvet kullanılmaktadır. Bobin metal

topun pozisyonunu belirlemesi açısından bu kontrol probleminde önemli bir yere sahiptir.



Şekil 4.10. CE 152 Manyetik levitasyon modeli üzerinde bulunan güç amplifikatörünün yapısı (Chalupa ve ark., 2016)

Manyetik alan kuvvetini oluşturan güç amplifikatörü aşağıdaki transfer fonksiyonu ile ifade edilmektedir. Transfer fonksiyonu üzerinde; k_{am} amplifikatör kazancını, k_s akım sensörü kazancını, L bobin endüktansını, R_c bobin direncini, R_s geri besleme direnç değerini göstermektedir (Chalupa ve ark., 2016).

$$\frac{I(s)}{U(s)} = \frac{\frac{k_{am}}{R_C + R_S + k_{am}R_S k_s}}{\frac{L}{R_C + R_S + k_{am}R_S k_s}s+1} \tag{15}$$

Yukarıdaki denklemden, güç amplifikatörü kazancı ve zaman sabiti değerlerinden oluşan aşağıdaki eşitlik elde edilmektedir.

$$G_{PA}(s) = \frac{I(s)}{U(s)} = \frac{k_i}{T_a s+1} \tag{16}$$

Manyetik levitasyon ünitesinin Simulink modelinde güç amplifikatörü transfer fonksiyonu ve parametreleri aşağıdaki gibidir.

$$G_{PA} = \frac{0.3}{3\times10^{-3}s+1} \tag{17}$$

$k_{am} = 100$

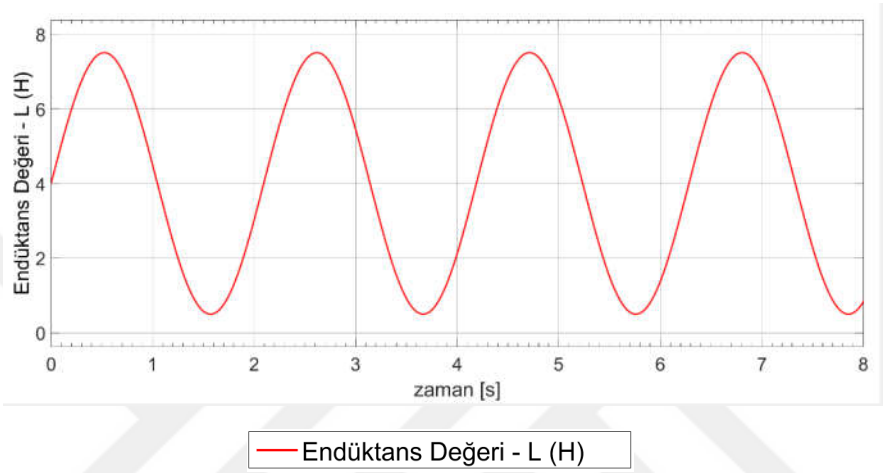
$k_s = 13.33$

$L = 1$ H

$R_c = 3.5\ \Omega$

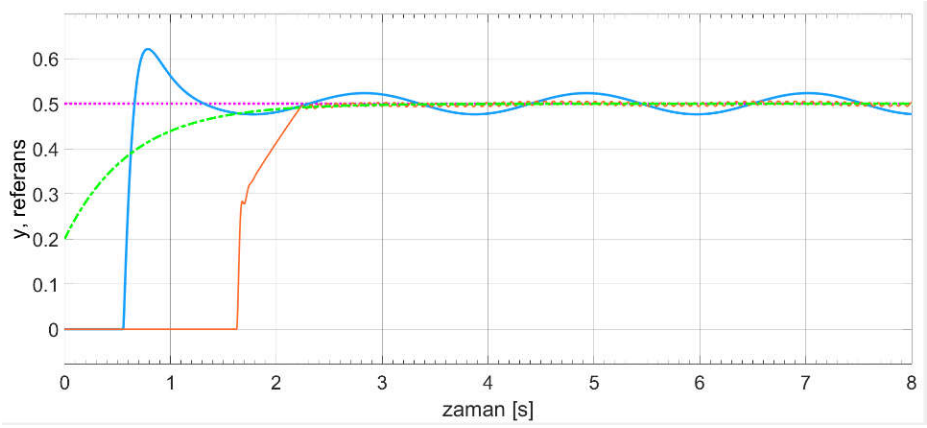
$R_s = 0.25\ \Omega$

Çalışmanın bu bölümünde iPID kontrolör yapısının modelden bağımsız karakteristiğinin avantajlarını vurgulamak adına simülasyon süresince güç amplifikatörü üzerinde bulunan bobinin, L = 1 H değerinde olan endüktans parametresi zamana bağlı olarak 0.5 – 7.5 H değerleri aralığında değişim gösteren bir fonksiyonla ilişkilendirilmiştir. Elektromanyetik bobinin endüktans değerinin simülasyon süresince değişimini gösteren grafik Şekil 4.11' de görülmektedir.



Şekil 4.11. Manyetik levitasyon modeli, güç amplifikatörünün yapısında bulunan elektromanyetik bobinin endüktans değerinin simülasyon süresince değişimi

Manyetik levitasyon modeli üzerinde kurgulanan yapısal değişiklikler sonrası PID ve α parametresi kestirimli iPID kontrolör yapılarının referans ve çıkış değerlerini gösteren grafik Şekil 4.12' de görülmektedir.



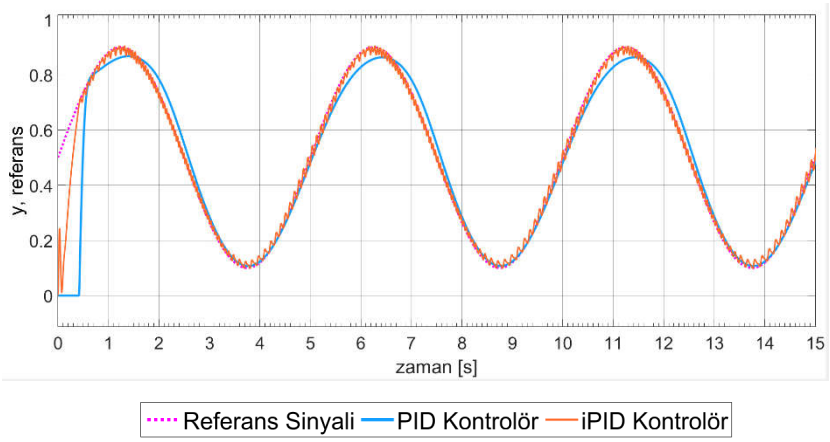
Şekil 4.12. Manyetik Levitasyon modeli güç amplifikatörü üzerinde bulunan elektromanyetik bobin endüktans değerinde kurgulanan değişiklikler sonrası PID ve α parametresi kestirimli iPID kontrolör yapılarının referans ve çıkış değerleri

Daha önce bahsedildiği üzere standart manyetik levitasyon modelinde L = 1 H' lik endüktans değerinde bir bobin bulunmaktadır. Çalışmanın bu bölümünde metal topun pozisyonunu belirlemede eyleyici görevi gören güç amplifikatörü üzerinde bulunan bu parametre nominal değerinin oldukça dışında olan 0.5 – 7.5 H değer aralığında değiştirilmiştir. Kurgulanan bu değişiklik karşısında PID kontrolör yapısı referans değerine iPID kontrolöre göre daha çabuk yakınlaşmasına rağmen sonrasında salınım durumundan çıkamayarak referans değerini takip edememiştir. α parametresi kestirimli iPID kontrolör yapısı ise 2.2 s' de referans değerini yakalamış ve çıkış değerini denge durumuna getirmiştir. Endüktans değerinin geniş bir aralıkta salınım yapıyor olmasına rağmen iPID kontrolör, PID kontrolörün aksine tam anlamıyla bu durumdan hiç etkilenmemiş ve referans değerini başarıyla takip etmiştir.

4.3.3. Referans değerindeki değişime karşı kontrolör performansları

Çalışmanın bu bölümünde iPID kontrolörün referans değerindeki değişimleri takip edebilme kabiliyetini incelemek amaçlanmıştır. Bu durumda referans değeri olarak 0.1 – 0.9 değerleri arasında 0.2 Hz frekansla salınım yapan bir sinüs sinyali seçilmiştir. Daha önce bahsedildiği üzere model bağımsız kontrol metodu F parametresinin kestirimi için referans sinyalinin türev değerine gereksinim duymaktadır. Bu sebepten referans değeri türev değeri oluşturacak şekilde değişim gösteren bir sinyal seçilmiştir.

Model bağımsız kontrol metodu için yine türevi alınabilir sinyaller olan üstel fonksiyonlar da referans değeri olarak kullanılabilirler. PID ve α parametresi kestirimli iPID kontrolör yapılarının referans ve çıkış değerlerini gösteren grafik Şekil 4.13' de görülmektedir.



Şekil 4.13. 0.1 – 0.9 değerleri arasında 0.2 Hz frekansla salınım yapan referans sinyali karşısında PID ve α parametresi kestirimli iPID kontrolör yapılarının referans ve çıkış değerleri

Şekil 4.13' de verilen grafikte PID kontrolörün referans sinyalini sürekli olarak yaklaşık 0.05 birimlik bir hatayla takip etmektedir. Buna karşılık iPID kontrolörün referans sinyalini ihmal edilebilir düzeyde salınımlarla başarılı olarak takip ettiği görülmektedir.

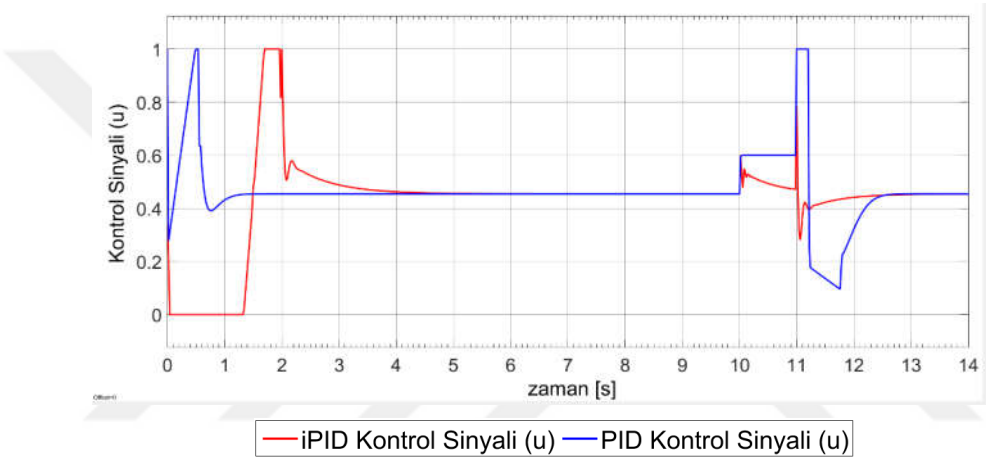
4.3.4. Eyleyici sinyalindeki güç kaybına karşı kontrolör performansları

Model bağımsız kontrolör yapısının öne çıkan özelliklerinden birisi de sistem modeli dışındaki çevresel değişimlerden ve ya donanımsal problemlerden doğabilecek sorunlara karşı da esneklik gösterebilecek ve kendisini adapte edebilecek bir kontrol algoritmasına sahip olmasıdır. Söz konusu olumsuz çevresel veya donanımsal etkilerin kontrolör performansına etkisini gözlemlemek amacıyla çalışmanın bu bölümünde kontrol sinyalinin gücü bir süreliğine kontrol performansını etkileyecek düzeyde sınırlandırılmıştır.

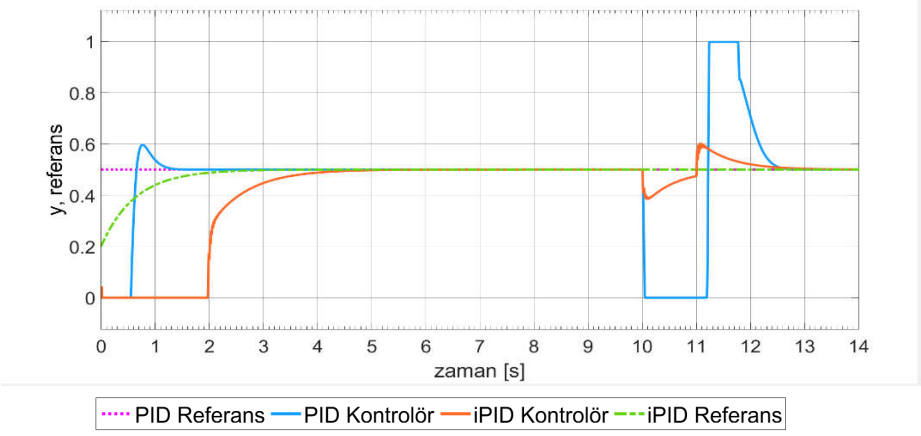
Simülasyonun 10.-11. saniyeleri arasında kontrol sinyali u, 0.6'lık bir kazanç değeriyle çarpılarak neredeyse yarı yarıya güç kaybına uğratılmıştır. Gerçek anlamda bir kontrol uygulamasında donanımsal bir problem nedeniyle sıklıkla görülebilecek ciddi bir sorun bu şekilde simüle edilmiştir.

Manyetik levitasyon modeli üzerinde PID ve iPID kontrol sinyallerinin zamana karşı grafikleri Şekil 4.14' de görülmektedir. PID ve α parametresi kestirimli iPID kontrolör yapılarının bu senaryo karşısında elde ettikleri çıkış değerleri ve referans sinyali ise Şekil 4.15' de verilmiştir.

Şekil 4.15' de verilen grafik incelendiğinde kontrol sinyalinin güç kaybına uğratıldığı 10. ve 11. saniyeler arasında PID kontrolör yapısının referans değerini takip edemediği ve sistemin mutlak sınırları olan 0 ve 1 pozisyonları arasında bir salınım yaptığı görülmektedir.



Şekil 4.14. Manyetik levitasyon modeli üzerinde iPID ve PID kontrolör yapıları için kontrol sinyalinin zamana karşı verilen grafiğinde 10.–11. saniyeler arasında yapay olarak oluşturulan güç kaybı görülebilmektedir.



Şekil 4.15. Kontrol sinyalinde 10.-11. Saniyeler arasında dahil edilen 0.6' lık kazanç değerine karşın PID ve α kestirimli iPID kontrolör yapılarının çıkış ve referans değerleri

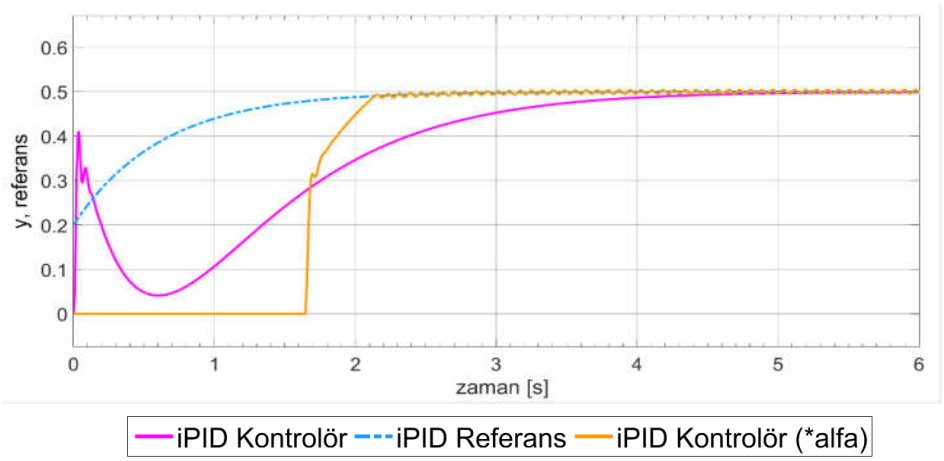
Buna karşılık iPID kontrolör yapısı u sinyali üzerinde kurgulanan bu ciddi değişime karşın ± 0.1 birimi aşmayan bir salınım yapmıştır. Endüstriyel bir uygulamada katastrofik bir sonuca sebep olabilecek bir değişime karşın, iPID kontrolör yapısı sistemin kontrolünü büyük ölçüde sürdürmüştür.

4.3.5. iPID kontrolör ile manyetik levitasyon sistemi kontrolünde α parametresinin güncellenmesinin kontrolör performansına etkisi

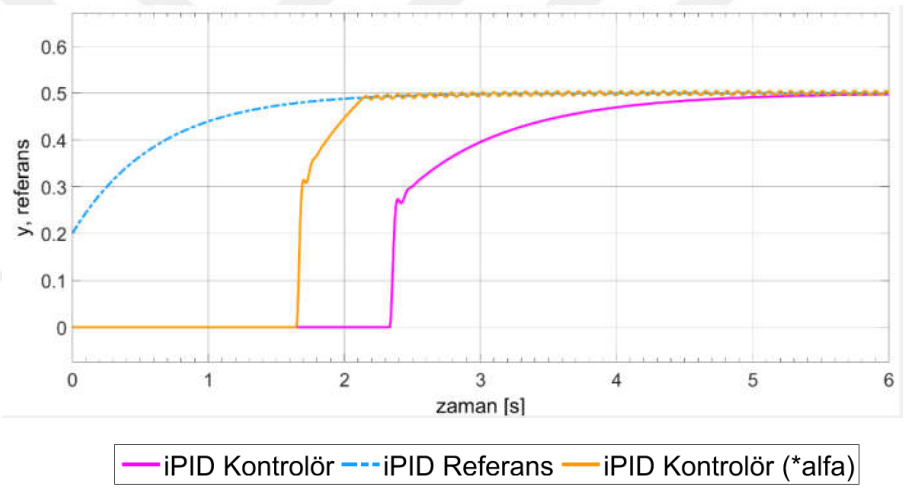
Daha önceki bölümlerde model bağımsız kontrol metodunun manyetik levitasyon modeli üzerinde başarılı bir şekilde kontrol sağladığı örnekler üzerinde çalışıldı. Bunun yanı sıra iPID kontrolörün sistem modelindeki çeşitli parametrelerde kurgulanan değişiklere rağmen referans değerini PID kontrolöre göre daha yüksek başarımlı takip edebildiği gözlemlendi.

Çalışmanın bu bölümünde iPID kontrolör yapısına dahil edilen ve α parametresinin gerçek zamanlı kestirimini mümkün kılan algoritma ile α parametresinin sabit bir değer olarak belirlendiği mevcut iPID kontrol yaklaşımıyla alınan sonuçlar karşılaştırılacaktır.

Herhangi bir sistem parametresinin ya da çevresel koşulun değişikliğe uğramadığı standart koşullarda gerçekleştirilen uygulamada iPID ve α parametresi güncellemeli iPID kontrolörün çıkış değerleri ile referans sinyalini gösteren grafik Şekil 4.16 ve Şekil 4.17‘ de görülmektedir. Elde edilen iki grafikte sırasıyla iPID kontrolörün sistem davranışları gözlemlenerek belirlenen α parametresi değerleri 0.5 ve 1 olarak seçilmiştir.



Şekil 4.16. α parametresinin 1 olarak seçildiği iPID kontrolör ve α parametresi kestirimli iPID kontrolör yapılarının manyetik levitasyon modeli üzerinde uygulanan referans sinyaline karşı çıkış değerleri

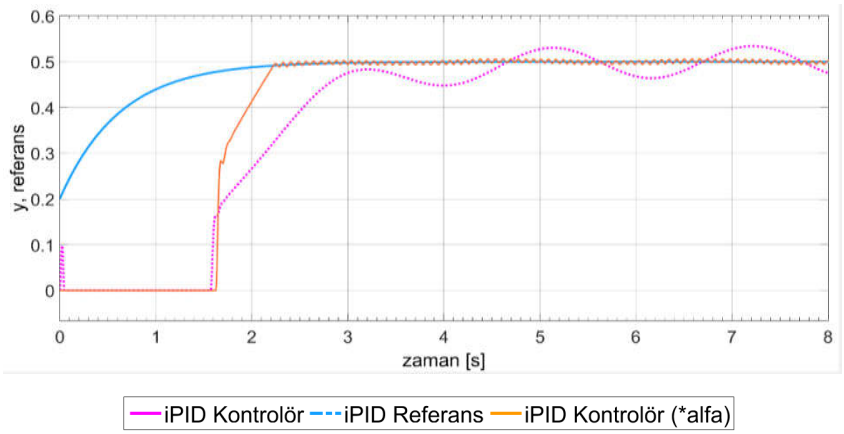


Şekil 4.17. α parametresinin 0.5 olarak seçildiği iPID kontrolör ve α parametresi kestirimli iPID kontrolör yapılarının manyetik levitasyon modeli üzerinde uygulanan referans sinyaline karşı çıkış değerleri

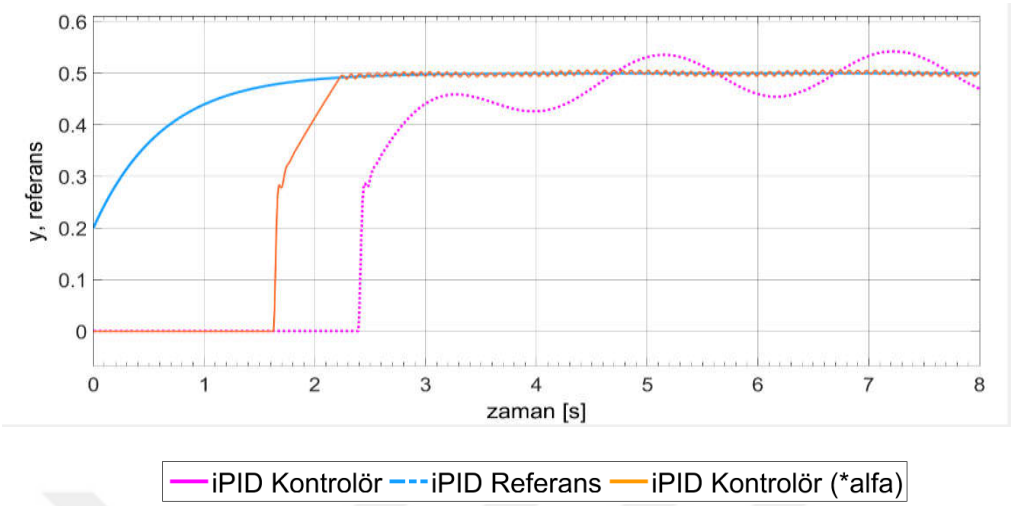
Bu uygulamada sistem davranışları gözlemlenerek α parametresi için iPID kontrolörün başarılı sonuç verdiği yani referansı takip edebildiği iki değer seçilmiştir. Paylaşılan grafiklerde görülebileceği üzere iPID kontrolör yapısı α parametresinin 0.5 ve 1 olarak belirlendiği her iki durum için de α parametresi kestirimli iPID metoduna göre referans değerini daha geç yakalayabilmiştir. α parametresi kestirimli iPID kontrolör yapısı referans değerini 2.2 saniyede yakalarken iPID kontrolör yapısı 5 saniyenin üzerinde bir sürede referans sinyalini yakalayabilmiştir.

Bölüm 4.3.2.' de üzerinde çalışılan uygulamada manyetik levitasyon modeli üzerinde bulunan bobinin endüktans değerinde 0.5 – 7.5 H aralığında değişime sebep olacak bir Simulink benzetimi kurgulanmıştı. Bu çalışmada iPID kontrolörün bobin endüktans değerindeki ciddi değişimlere rağmen referans sinyalini takip edebildiği görülmüştü. Çalışmanın bu bölümünde aynı benzetim senaryosu üzerinde α parametresi kestirimli iPID ve iPID kontrol yapılarının performansları değerlendirildi. Referans sinyali ve her iki kontrolör yapısının çıkış değerleri iPID kontrolör için α parametresinin 0.75 ve 1 olarak seçildiği iki durumda Şekil 4.18 ve Şekil 4.19' da görüleceği üzere karşılaştırıldı.

Şekil 4.18 ve Şekil 4.19' da görülebileceği üzere iPID kontrolör yapısı bobin endüktans değerinin simülasyon süresince belirli bir aralıkta değişime uğratıldığı bu uygulamada α parametresi için belirlenen her iki değer de göz önünde bulundurulduğunda referans sinyalini takip etmeyi başaramamıştır. Kontrolör referans sinyaline ± 0.05 birim uzaklıkta salınım halinden kurtulamamıştır. α parametresi kestirimli iPID kontrolör yapısı ise sistem modelinde meydana gelen değişiklikleri başarıyla tolere edebilmiştir. Referans sinyalini 2.1 saniyede yakalamış ve simülasyon süresince hatasız olarak takip etmiştir.

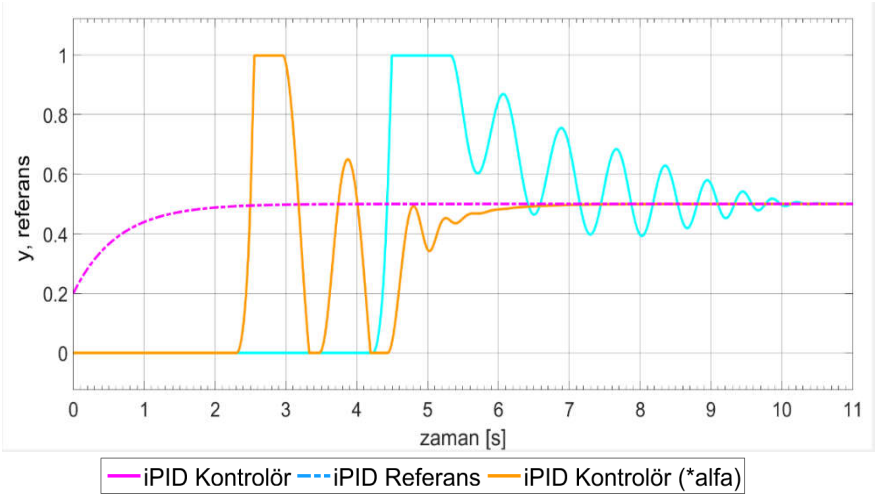


Şekil 4.18. α parametresinin 0.75 olarak seçildiği iPID kontrolör ve α parametresi kestirimli iPID kontrolör yapılarının elektromanyetik bobin endüktans değerinin simülasyon süresince 0.5 ve 7.5 H aralığında değiştiği manyetik levitasyon modeli üzerinde uygulanan referans sinyaline karşı çıkış değerleri



Şekil 4.19. α parametresinin 1 olarak seçildiği iPID kontrolör ve α parametresi kestirimli iPID kontrolör yapılarının elektromanyetik bobin endüktans değerinin simülasyon süresince 0.5 ve 7.5 H aralığında değiştiği manyetik levitasyon modeli üzerinde uygulanan referans sinyaline karşı çıkış değerleri

Çalışmanın 4.3.1. numaralı bölümünde iPID kontrolör yapısının model bağımsız karakteristiğini incelemek amacıyla manyetik levitasyon modeli üzerinde bulunan metal topun ağırlığının benzetim süresince 0.008 – 0.6 kg aralığında değiştiği bir senaryo kurgulanmıştı. Çalışmada iPID kontrolörün PID kontrolöre göre yerleşme zamanları göz önünde bulundurulduğunda daha başarılı olduğu gözlemlenmiştir. iPID



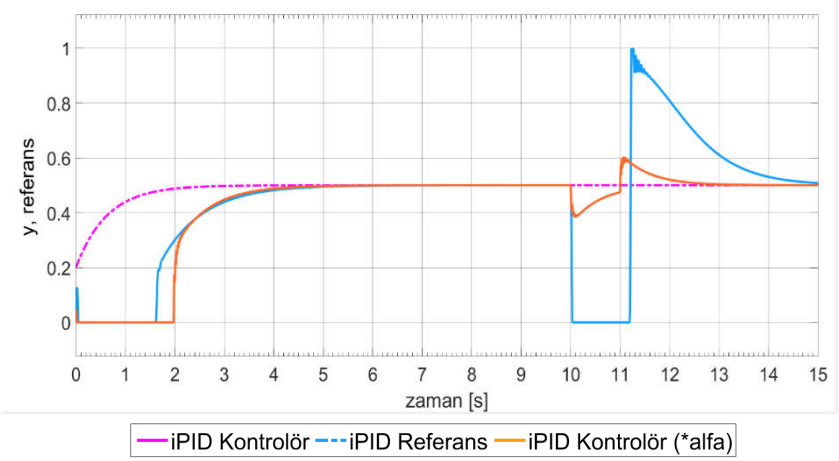
Şekil 4.20. α parametresinin 0.75 olarak seçildiği iPID kontrolör ve α parametresi kestirimli iPID kontrolör yapılarının metal top kütlesinin simülasyon süresince 0.008 ve 0.6 kg aralığında değiştiği manyetik levitasyon modeli üzerinde uygulanan referans sinyaline karşı çıkış değerleri

ve α parametresi kestirimli iPID kontrolör yapılarının bu senaryo üzerinde aldıkları sonuçlar Şekil 4.20' de görülmektedir.

Şekil 4.20' de verilen sonuçlar incelendiğinde iPID kontrolör yapısının her iki durum içinde referans sinyalini yakalayabildiği görülmektedir. iPID kontrolör sinyali 10.2 saniyede yakalarken α parametresi kestirimli iPID kontrolör 7 saniyenin altında bir sürede metal topun kütlesinde meydana gelen değişime rağmen referans sinyalini yakalayabilmiştir. α parametresinin belirlenmesinde güncelleme algoritmasının kullanılmasının özellikle model parametrelerinin veya çevresel etkenlerin zamana bağlı ve kontrolsüz olarak değiştiği uygulama örneklerinde çok daha başarılı sonuçlar alınmasını mümkün kıldığı görülmektedir.

Son olarak 4.3.4 numaralı bölümde çalışılmış olan eyleyici sinyalinde meydana gelen güç kaybına karşın söz konusu iki kontrolör yapısının performansları karşılaştırılmıştır. Kontrol sinyalinin 10.-11. saniyeler arasında 0.6'lık bir kazanç değeriyle çarpılarak güç kaybına uğratıldığı senaryoda iPID ve α parametresi kestirimli iPID kontrolör yapılarının aldıkları sonuçlar Şekil 4.21' de görülmektedir.

iPID kontrolör yapısı, kontrol sinyalindeki güç kaybı dolayısı ile 10.-15. saniyeler arasında sistemin mutlak limitleri olan 0 ve 1 değerleri arasında salınım yapmıştır. α parametresi kestirimli iPID kontrolör yapısı ise ± 0.1 birimi aşmayan kısa süreli bir sapma ile referans sinyalini çok daha kısa sürede ve çok daha düşük bir aşım değeri ile yakalamıştır.



Şekil 4.21. α parametresinin 0.75 olarak seçildiği iPID kontrolör ve α parametresi kestirimli iPID kontrolör kontrol sinyalinin 10.-11. saniyeler arasında 0.6' lık bir kazanç değeriyle çarpılarak güç kaybına uğratıldığı manyetik levitasyon modeli üzerinde uygulanan referans sinyaline karşı çıkış değerleri

Model bağımsız kontrol metodunun klasik PID kontrol algoritmasına göre birçok konuda daha esnek ve başarılı bir algoritma olduğunu yaptığımız çalışmalarda manyetik levitasyon modeli üzerinde gösterdik. Söz konusu metotta daha önce bahsedildiği üzere α parametresinin belirlenmesi için herhangi bir kriter belirtilmemiş, sistem davranışları gözlemlenerek bu parametrenin belirlenmesi yoluna gidilmiştir (Fliess ve Join, 2013).

Çalışmanın bu bölümünde α parametresinin gerçek zamanlı olarak kestirimini mümkün kılan ve bölüm 4.2.'de detaylarıyla açıklanan algoritmanın dahil edildiği iPID kontrolör yapısının standart iPID yaklaşımına karşı aldığı sonuçlar incelendi.

Çalışma sonuçları ve elde edilen çıkış grafikleri incelendiğinde daha önce belirtildiği üzere α parametresinin belirlenmesinde güncelleme algoritmasının kullanılması özellikle model parametrelerinin ve ya çevresel etkenlerin zamana bağlı ve kontrolsüz olarak değiştiği uygulama örneklerinde çok daha başarılı sonuç almamızı mümkün kıldı. Bu bölümde çalışılan dört farklı senaryodan alınan sonuçlar incelendiğinde α parametresi güncelleme algoritmasının iPID kontrolörün referans sinyalini belirgin şekilde daha düşük salınımla ve daha kısa sürede yakalamasını ve takip etmesini mümkün kıldığı görülmektedir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında CE 152 manyetik levitasyon sisteminin Simulink modeli kullanılarak model bağımsız (iPID) metoduyla kontrolü sağlanmaktadır. iPID kontrol metodu yapılan çalışmalarda klasik PID tekniğiyle benzetim yöntemiyle karşılaştırmalı olarak incelenmektedir.

iPID kontrolörün model bağımsız karakteristiğini incelemek maksadıyla sistem parametreleri ve bozucu etkiler üzerinde değişikliklerin kurgulandığı çalışmalar yapılmaktadır. Manyetik levitasyon modeli üzerinde pozisyonu kontrol edilmek istenen top kütlesi, bobin endüktans değeri, referans sinyalinde kurgulanan değişikliklere ve eyleyici sinyalinde oluşturulan güç kaybına karşı iPID ve PID kontrol yöntemleri karşılaştırmalı olarak incelenmektedir.

Model bağımsız kontrol metodunda, kontrol performansı üzerinde belirleyici etkiye sahip olan ve uygulayıcı tarafından deneme yanılma yoluyla belirlenen α parametresinin gerçek zamanlı kestirimine ilişkin bir geliştirme önerilmektedir. α parametresinin gerçek zamanlı güncellenmesini mümkün kılan algoritmanın dahil edildiği iPID kontrolör yapısı mevcut iPID yöntemiyle karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Benzetim sonuçları ve yapılan çalışmalar sırası ile karşılaştırmalı olarak incelendiğinde elde edilen veriler aşağıdaki paragraflarda açıklanmaktadır:

iPID kontrolör manyetik levitasyon modelinin kontrolünü aşım değeri olmadan başarıyla sağlayabilmektedir. PID kontrolör ise iPID yöntemine göre referans sinyalini daha çabuk yakalamakta fakat aşım değeri açığa çıkarmaktadır.

α parametresinin gerçek zamanlı kestirimini sağlayan algoritma iPID kontrolörün performansını doğrusal bir sistem örneği üzerinde kök değişikliği

uygulanan bir örnekte arttırmaktadır ve referans sinyalini hatasız olarak takibi mümkün kılmaktadır.

Manyetik levitasyon modelinde pozisyonu kontrol edilmek istenen top kütlesi standart değeri ile nominal aralığının bir hayli dışında olan 0.6 kg değeri arasında değiştirildiğinde α parametresi güncellemeli iPID kontrolör PID kontrolöre kıyasla referans değerini daha kısa sürede ve daha az salınımla takip edebilmektedir.

Levitasyon modelinde topun hareketini mümkün kılan bobinin endüktans değeri standart değeri olan $L = 1$ H yerine 0.5 ve 7.5 H değerleri arasında benzetim süresince değiştirildiğinde PID kontrolör modeldeki bu parametre değişimini tolere edememekte ve sürekli salınım halinde kalmaktadır. α parametresi güncellemeli iPID kontrolör ise modelde kurgulanan değişikliğe karşın sistem kontrolünü sağlamaktadır.

α parametresi güncellemeli iPID kontrolör referans değerinde kurgulanan zamana bağlı değişimleri 0.2 Hz frekans değerine kadar PID kontrolöre göre daha başarılı şekilde takip edebilmektedir.

Eyleyici sinyalinde oluşturulan % 40'lık güç kaybına karşı α parametresi güncellemeli iPID kontrolör PID kontrolöre göre daha başarılı sonuç vermektedir. PID kontrolör güç kaybı esnasında sistem kontrolünü kaybederken α parametresi güncellemeli iPID kontrolör bu değişimden çok daha az etkilenmekte ve kontrolü büyük ölçüde sürdürmektedir.

α parametresinin gerçek zamanlı kestirimini mümkün kılan algoritmanın dahil edildiği iPID yapısı, klasik iPID yöntemine karşı manyetik levitasyon modelinde daha başarılı olmakta ve referans sinyalini daha hızlı yakalamaktadır.

α parametresinin gerçek zamanlı kestirimini mümkün kılan algoritmanın dahil edildiği iPID kontrolör, manyetik levitasyon modeli üzerinde top kütlesinde kurgulanan değişikliğe rağmen kontrolü sağlamayı başarırken klasik iPID kontrolör salınım halinden çıkamamaktadır.

α parametresi güncellemeli iPID kontrolör manyetik levitasyon bobin endüktans değerindeki değişimlere karşı referans sinyalini iPID kontrolöre göre daha kısa sürede yakalamaktadır.

Levitasyon modelinde eyleyici sinyalinde meydana gelen güç kaybına karşın α parametresi güncellemeli iPID kontrolör, iPID kontrolöre göre bu değişimden çok daha az etkilenmekte ve sistem kontrolünü daha kısa sürede sağlamaktadır.

Sonuçlar incelendiğinde iPID kontrol yönteminin manyetik levitasyon modelinin kontrolünü sağlayabildiği görülmektedir. Özellikle sistem parametreleri ve çevresel şartlarda değişiklik kurgulanan durumlarda model bağımsız kontrolör PID yöntemine göre daha başarılı olmaktadır. PID kontrolör yapılan değişiklikler karşısında kontrolü sağlayamamakta veya geç tepkiler vermekte iken iPID kontrolör bu değişimleri PID metoduna göre daha başarılı bir şekilde tolere etmektedir.

α parametresinin gerçek zamanlı kestirimini mümkün kılan algoritma iPID metodunun tepki süresini iyileştirmekte, model parametrelerinde ve dış bozuculardaki meydana gelen değişimlere karşı tolerans aralığını arttırmaktadır. Aynı zamanda literatürde belirlenmesi için bir yöntem belirtilmeyen α parametresinin değerinin tespit edilmesi sorununa da çözüm getirmektedir.

KAYNAKLAR

ABOUAÏSSA, H. ve CHOURAQUI, S., 2019. On the control of robot manipulator: A model-free approach. Journal of Computational Science, 4 Ocak, 6-16.

ABOUAÏSSA, H., FLIESS, M. ve JOIN, C., 2017. On ramp metering: towards a better understanding of ALINEA via model-free control. International Journal of Control, 5(90), 1018-1026.

AL YOUNES, Y. ve diğerleri, 2014. Model-Free Control of a Quadrotor Vehicle. 2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems, ICUAS 2014 Orlando, IEEE, 1126-1131.

CHALUPA, P., MALY, M. ve NOVAK, J., 2016. Nonlinear Simulink Model of Magnetic Levitation. Regensburg, Curran Associates, Inc., 30th Conference on Modelling and Simulation, 293-299.

CHALUPA, P., NOVÁK, J. ve MALÝ, M., 2017. Modellıng and Model Predictive Control of Magnetic Levitation Laboratory Plant. Budapest, 31st European Conference on Modelling And Simulation, 367-373.

CHAND, A. N., KAWANISHI, M. ve NARIKIYO, T., 2016. Non-Linear Model-free Control of Flapping Wing Flying Robot using iPID. Stockholm, 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2930-2937.

DE MIRAS, J. ve diğerleri, 2013. Active magnetic bearing: A new step for model-free control. Florence, IEEE Conference on Decision and Control, 7449-7454.

DOUBLET, M., JOIN, C. ve HAMELIN, F., 2016. Model-free control for unknown delayed systems. Barcelona, IEEE Conference on Control and Fault-Tolerant Systems (SysTol), 630-635.

FLIESS, M. ve JOIN, C., 2008. Intelligent PID controllers. Mediterranean Conference on Control and Automation, Ajaccio, HAL, 326-331.

FLIESS, M. ve JOIN, C., 2010. A mathematical explanation via ”intelligent” PID controllers of the strange ubiquity of PIDs. 18th Mediterranean Conference on Control and Automation Marrakech, HAL, 395-400.

FLIESS, M. ve JOIN, C., 2013. Model-free control. International Journal of Control, 86:12 Taylor & Francis, 2228-2252.

FLIESS, M., ve SIRA-RAMIREZ, H., 2003. An algebraic framework for linear identification. ESAIM Control, Optimization and Calculus of Variations, 9: 151–168.

JOIN, C., ROBERT, G. ve MICHEL, F., 2010. Model-free based water level control for hydroelectric power plants, Control Methodologies and Technology for Energy Efficiency IFAC Proceedings Volumes, Elsevier, 43:1: 134-139.

KILIÇ, F., 2016. Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorun Model. Kocaeli: Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Kocaeli, 164s.

LAFONT, F., BALMAT, J.-F., PESSEL, N. ve FLIESS, M., 2015. A model-free control strategy for an experimental greenhouse. Computers and Electronics in Agriculture, 110: 139-149.

LI, S., WANG, H., TIAN, Y. ve AITOUCHE, A., 2015. A Sliding Model Control Based on Intelligent PID Control for Wind turbine System, Conference: Control Methodologies and Technology for Energy Efficiency Sousse, IEEE, 134-139.

MADADI, E. ve SÖFFKER, D., 2015. Model-Free Approaches Applied To The Control of Nonlinear Systems: A Brief Survey with Special Attentıon to Intelligent PID, Dynamic Systems and Control Conference Columbus, IEEE.

MICHEL, L., JOIN, C. ve FLIESS, M., 2010. Model-free control of dc/dc converters, IEEE 12th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics, COMPEL 2010. Boulder, Colorado, IEEE, 1-8.

MORAES ve DA SILVA, 2015. Model-Free Control Of Magnetic Levitation Systems Through Algebraic Derivative Estimation. 23rd ABCM International Congress of Mechanical Engineering, Rio de Janeiro

WANG, H., GHAZALLY, I. ve TIAN, Y., 2018. Model-free fractional-order sliding mode control for an active vehicle suspension system. Advances in Engineering Software, Issue 115, 452-461.

WANG, H., TIAN, Y., HAN, S. ve WANG, X., 2017. ZMP Theory-based Gait Planning and Model-Free Trajectory Tracking Control of Lower Limb Carrying. Studies in Informatics and Control, 2:26: 161-170.

WANG, H. ve diğerleri, 2016. Model-Free–Based Terminal SMC of Quadrotor Attitude and Position. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 5:52: 2519-2528.

YU, C. Y. ve WU, J. L., 2016. Intelligent PID Control for Two-wheeled Inverted Pendulums. Taiwan, Conference: 2016 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE), IEEE, 1-4.

ZHANG, X. ve diğerleri, 2018. Model-free based neural network control with time-delay estimation. Neurocomputing, 272: 178-188.

ZHOU, Y., LI, H. ve YAO, H., 2016. Model-free Control of Surface Mounted PMSM, 2016 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT*),* Taipei, IEEE, 175-180.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı **:** Fatih KORKMAZ
Uyruğu **:** T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi **:** Gaziantep / 16.06.1993
Telefon **:** 0505 370 73 46
Faks **:** -
e-mail **:** fkorkmaz@harran.edu.tr/fatihkorkmaz121@gmail.com

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Abdulkadir Konukoğlu AÖL Şahinbey/GAZİANTEP	2011
Üniversite	: Gaziantep Üniversitesi	2015

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2016-2017	Foton Sağlık Çözümleri	Servis Mühendisi
2017-Halen	Harran Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

YABANCI DİLLER

İngilizce (İleri), Almanca (Temel)

YAYINLAR

KORKMAZ F. ve KARCİ H., 2018. Model Bağımsız Kontrol Metodu ve Uygulamalarının İncelenmesi, Uluslararası VI. GAP Mühendislik Kongresi GAP2018, 890-896.

EKLER

EK 1

```
function F =
fcn(ystar,ystarold,u,uold,error,errorold,errorint,errorin
told,errordev,errordevold)

alfa=0.4;
L=0.001;
h=L;
Kp=0.4;
Ki=0.7;
Kd=0.013;

F=((0.5*h)/L)*(ystar+ystarold-alfa*(u+uold)-
Kp*(error+errorold)-Ki*(errorint+errorintold)-
Kd*(errordev+errordevold));

end
```

EK 2

```
function [F,alfa2]= fcn(t, ref, y1, ystar, ystarold, u,
uold, error, errorold, errorint, errorintold, errordev,
errordevold, alfa)

if ref-y1>0.001

    alfa2=alfa-0.0001;

elseif ref-y1>ref*0.1

    alfa2=alfa*0.98;

elseif y1-ref>0.001

    alfa2=alfa+0.0001;

   elseif y1-ref>ref*0.1

    alfa2=alfa*1.05;

else

    alfa2=alfa;
end

L=0.001;
h=L;
Kp=1.8177;
Ki=0;
Kd=0;

F=((0.5*h)/L)*(ystar+ystarold-alfa*(u+uold)-
Kp*(error+errorold)-Ki*(errorint+errorintold)-
Kd*(errordev+errordevold));

end
```