

**BİR DC MOTOR İLE SÜRÜLEN  
KONUM KONTROL SİSTEMİNİN  
KONUM ALGILAYICISIZ KONTROLÜ**

**Alper Kürşad ÇOLAK**

**Y. Lisans Tezi  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı  
Prof. Dr. Adnan DERDİYOK  
2008  
Her hakkı saklıdır**

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**BİR DC MOTOR İLE SÜRÜLEN KONUM KONTROL  
SİSTEMİNİN KONUM ALGILAYICISIZ KONTROLÜ**

Alper Kürşad ÇOLAK

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ERZURUM  
2008  
Her hakkı saklıdır

Prof. Dr. Adnan DERDİYOK danışmanlığında, Alper Kürşad ÇOLAK tarafından hazırlanan bu çalışma 23.10:2008 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Y. Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.


Başkan : Prof. Dr. Adnan DERDİYOK

İmza: 

Üye : Doç. Dr. İrfan KAYMAZ

İmza: 

Üye : Yrd. Doç. Dr. Birol SOYSAL

İmza: 

**Yukarıdaki sonucu onaylarım**

Prof. Dr. Ömer AKBULUT

**Enstitü Müdürü**

## ÖZET

Y. Lisans Tezi

### BİR DC MOTOR İLE SÜRÜLEN KONUM KONTROL SİSTEMİNİN KONUM ALGILAYICISIZ KONTROLÜ

Alper Kürşad ÇOLAK

Atatürk Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Adnan DERDİYOK

Günümüzde DC motorlar, ucuz olmaları, boyutlarının küçük olması ve kolay kontrol edilebilmeleri nedeniyle endüstriyel alanda ve robotik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Bu kadar yaygın kullanım alanı olan DC motorların kontrolü için ucuz ve daha az karmaşık donanım kullanılması mühendislik uygulamaları açısından oldukça önemlidir.

Bu çalışmada, kayan kipli kontrol yöntemi kullanılarak, hem bir DC motorun kontrolü gerçekleştirilmiş hem de DC motorun durum kestirimi yapılmıştır.

DC motorun akım ve hız kestiriminin gerçekleştirilebilmesi için bir gözlemci tasarlanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda gözlemci tarafından kestirilen DC motorun akım ve hız işaretlerinin, DC motorun gerçek akım ve hız işaretleriyle örtüştüğü tespit edilmiştir. Ayrıca bozucu faktörlerin sistem üzerindeki etkisi incelenmiştir. Kestirimi yapılan akım ve hız sinyallerinin, yüksek frekanslı bileşenlerinden arındırılabilmesi için alçak geçiren filtre kullanılmış ve filtreden dolayı oluşan gecikme problemi dışında yöntemin uygulanabilir olduğu deneysel sonuçlar ile gösterilmiştir.

**2008, 47 Sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** DC Motor, Kayan Kipli Kontrol, Akım Gözetleyici, Hız Tahmini

## **ABSTRACT**

MS. Thesis

### **SENSORLESS CONTROL OF A POSITIONING SYSTEM DRIVEN BY A DC MOTOR**

Alper Kürşad ÇOLAK

Ataturk University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Electrical & Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Adnan DERDİYOK

Nowadays DC motors have been used commonly in industrial and robotic applications due to low cost, small dimensions and easily controllable. Using low cost and less complex hardware for the control of DC motors that have many usage areas is very important from engineering application point of view.

In this study, sliding mode control method is both used for control and state estimation of a DC motor.

In order to realize the current and speed estimation of DC motor, an observer is designed. The experimental results show that the estimated currents and speed of the DC motor match real ones. Moreover the effect of the disturbance on system is also investigated. A low pas filter is used to eliminate high frequency components of the estimated current and speed signals. Experimental results show that the considered method is applicable except the problems of delay due to usage of low pas filter.

**2008, 47 pages**

**Keywords:** DC Motor, Sliding Mode Control, Current Observer, Speed Estimation

## TEŞEKKÜR

Tez konusunun belirlenmesi ve deneylerin yapılması aŐamalarında yardımlarını esirgemeyen danıŐmanım Sayın Prof. Dr. Adnan DERDİYOK'a teşekkür ederim.

AraŐtırmanın bütün aŐamalarında yakın ilgi, destek ve teŐviklerini esirgemeyen eŐime ve aileme teşekkür eder, Őükranlarımı sunarım. AraŐtırmada ortaya konulan sonuçların, bu konuda çalışma yapacaklara yararlı olacağını ümit ediyorum.

Alper Kürşad ÇOLAK

Ekim 2008

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELERDİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	viii
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. KURAMSAL TEMELLER.....</b>	<b>7</b>
2.1. DC Motorun Elektrik ve Mekanik Modeli ile Dinamik Denklemleri.....	7
2.2. Kayan Kipli Denetim Yöntemi.....	8
2.3. DC Motorun Kaskad Kontrol Yapısı.....	10
2.4. DC Motorun Akım Kontrolü.....	11
2.5. DC Motorun Hız Kontrolü.....	14
2.6. Gözlemci Gereksinimi ve Durum Kestirimi.....	20
2.6.1. Gözlemci gereksinimi.....	20
2.6.2. DC motorda yük torku kestirimi.....	20
2.6.3. DC motorda açısal ivme kestirimi .....	22
2.6.4. Algılayıcısız hız kontrolü için gözlemci dizaynı.....	24
<b>3. MATERYAL ve YÖNTEM.....</b>	<b>28</b>
3.1. Giriş.....	28
3.2. Gerçek Sistem Blok Diyagramı.....	29
3.3. Gözlemleyici Model Blok Diyagramı.....	30
3.4. Kontrol İşareti Blok Diyagramı.....	31
3.5. $di/dt$ ve İntegral Alıcı Devre Blok Diyagramı.....	32
<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....</b>	<b>34</b>
4.1. Giriş.....	34
4.2. Farklı Referans Sinyallerine ait Deneysel Sonuçlar.....	35
4.3. Bozucu Etki Altında Elde Edilen Deneysel Sonuçlar.....	40
<b>5. SONUÇ ve TARTIŞMA.....</b>	<b>45</b>
KAYNAKLAR.....	46
ÖZGEÇMİŞ.....	48

## SİMGELER DİZİNİ

$c$	Pozitif yakınsama oranı
$E_a$	Ters emk
$i$	Armatür akımı
$\hat{i}$	Kestirilen akım
$\bar{i}$	Akım kestirim hatası
$i_r$	Referans akım
$J$	Atalet momenti
$k_t$	Tork sabiti
$l$	Gözetleyici kazanç sabiti
$L$	Armatür endüktansı
$R$	Armatür direnci
$s$	Anahtarlama fonksiyonu
$T_e$	Motorun ürettiği tork
$U$	Giriş gerilimi
VSS	Variable structure system
$\lambda_o$	Ters emk sabiti
$\tau_l$	Yük torku
$\omega$	Açısal hız
$\hat{\omega}$	Kestirilen hız
$\omega_r$	Referans hız

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. DC motorun elektriksel modeli.....	7
Şekil 2.2. Kayma yüzeyinin faz diyagramında gösterimi.....	9
Şekil 2.3. Kayan kipli denetimin ve kontrol edilen sistemin blok diyagramı.....	9
Şekil 2.4. DC motorun kaskad kontrol yapısı.....	10
Şekil 2.5. DC motorun akım kontrolü.....	13
Şekil 2.6. DC motorun hız kontrolü.....	18
Şekil 2.7. Kayan kipli denetimin akım cevabı.....	19
Şekil 2.8. Kayan kipli denetimin s anahtarlama fonksiyonu cevabı.....	19
Şekil 2.9. Yük torku kestirim grafiği.....	21
Şekil 2.10 Açısal ivme kestirim grafiği.....	23
Şekil 2.11 Algılayıcısız hız kestirimi grafiği.....	26
Şekil 2.12. Algılayıcısız hız kestirimi işleminde hız hatası grafiği.....	27
Şekil 3.1. Deney düzeneği blok diyagramı ve resmi.....	28
Şekil 3.2. Gerçek sistem blok diyagramı.....	30
Şekil 3.3. Gözlemleyici model blok diyagramı.....	31
Şekil 3.4. Kontrol işareti blok diyagramı.....	31
Şekil 3.5. Akımın türevi di/dt blok diyagramı.....	32
Şekil 3.6. İntegral alıcı devre blok diyagramı.....	33
Şekil 4.1. Testere dişi sinyali için akım kestirimi grafiği.....	35
Şekil 4.2. Testere dişi sinyali için hız kestirimi grafiği.....	36
Şekil 4.3. Testere dişi sinyali için kontrol işareti grafiği.....	36
Şekil 4.4. Kare dalga sinyali için akım kestirimi grafiği.....	37
Şekil 4.5. Kare dalga sinyali için hız kestirimi grafiği.....	38
Şekil 4.6. Kare dalga sinyali için kontrol işareti grafiği.....	38
Şekil 4.7. Sinüs sinyali için akım kestirimi grafiği.....	39
Şekil 4.8. Sinüs sinyali için hız kestirimi grafiği.....	39

Şekil 4.9. Sinüs sinyali için kontrol işareti grafiği.....	40
Şekil 4.10. Sinüs sinyalinin bozucu etki altında akım kestirim grafiği.....	41
Şekil 4.11. Sinüs sinyalinin bozucu etki altında hız kestirim grafiği.....	41
Şekil 4.12. Sinüs sinyalinin bozucu etki altında kontrol işareti grafiği.....	42
Şekil 4.13. Sabit değerli sinyalin bozucu etki altında akım kestirim grafiği.....	43
Şekil 4.14. Sabit değerli sinyalin bozucu etki altında hız kestirim grafiği.....	43
Şekil 4.18. Sabit değerli sinyalin bozucu etki altında kontrol işareti grafiği.....	44

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Simülasyonlarda kullanılan DC motora ait parametreler.....	12
Çizelge 4.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan DC motora ait parametreler.....	34

## 1. GİRİŞ

Elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren doğru akım (DC) motorları, ilk kez 1821 yılında Faraday tarafından ortaya konulan “ Manyetik alan içerisinde bulunan bir iletkenin elektrik akımı geçirilirse iletkene bir kuvvet etkir ve bu kuvvet nedeniyle iletken hareket eder ” prensibi ile çalışmaktadır.

Günümüzde DC motorlar ucuz olmaları, boyutlarının küçük olması ve kolay kontrol edilebilmeleri açısından endüstriyel alanda ve robotik uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadırlar.

DC motor kullanılan uygulamalarda, en önemli husus kullanım amacına göre DC motorun en az maliyette ve en etkin şekilde kontrol edilmesidir. Bu motorların kullanım alanlarının, yaygın olması nedeniyle servo motorlarda kullanılan optik algılayıcıların yerine akım, akı ve hız gözlemcileri üzerinde birçok çalışma yapılmıştır. Aşağıda DC motorun kontrolü ve gözlemcileri üzerine yapılan önemli yaklaşımlar ile ilgili literatür araştırmaları verilmiştir.

Utkin (1993a), değişken yapılı sistemlerin kontrol işleminde kayan kipli denetim yöntemini kullanmış, kayan kipli denetim yöntemini kapsayan ana konuları (dereceyi indirgeme, bağımsız denklem tasarımı, karışıklıkları ayıklama, parametre değişikliklerinden etkilenmeme vb.) inceleyerek açıklamıştır. Yöntemin çok yönlü olduğunu ve kontrol hedefini sağlıklı bir şekilde yakaladığını tespit etmiştir.

Ohnishi vd (1994) tarafından elektrik motorları ile sürülen hareket sistemlerinin hem kontrol değişkenleri ve parametrelerini tanımlama hem de kestirim işleminin nasıl yapılacağı açıklanmış, modern elektrikselse sürücü sistemlerinde elektrikselse ve mekanik yönler ayrı ayrı irdelenerek, toplam sistem içerisindeki öneminin dikkate alınması gerektiği bildirilmiştir. Ayrıca AC sürücülerde kontrol değişkenleri ve parametrelerinin

tanımlanması ve kestirimine yönelik önemli teknikler sunulmuş, ileri kontrol teknikleri kullanılarak sağlıklı parametre tanımlama ve kestirim işlemi yapıldığı belirtilmiştir.

Acarney ve Tayie (1997), DC motor sürücüsünün kapalı çevrim hız kontrolü için hız ölçüm devresi kullanmış, bu ölçüm devresinin motora giden elektriksel bağlantı sayısı ve sürücü maliyetini artırdığını tespit etmişlerdir. Bu olumsuz etkiler nedeniyle hız ölçüm devresini sistemden çıkararak, hız kestirim işlemi için motor akım ve gerilim ölçümlerine dayanan bir yöntem önermişlerdir. Ayrıca ısı etkisini hız kestirim işlemine dahil ederek, kestirim işleminin ısı değişimlerinden etkilenmemesi için hatanın en aza indirgenmesini sağlamış ve ortalama rotor sıcaklığını tahmini olarak elde etmişlerdir. Motorun ısı, mekanik ve elektriksel modellerini kullanarak, rotor ısısı ve hız kestirim işlemi için genişletilmiş Kalman filtreli gözlemci tasarlamış, faz kontrollü doğrultucudan kaynaklanan sabit alan akımlı 3 kW'lık makinenin özel durumu için gözlemcinin kalıcı ve geçici performansını gösteren deneysel sonuçlar ile kontrol ve kestirim işleminin doğruluğunu göstermişlerdir.

Mehta ve Chiasson (1998), seri DC motor kontrol problemini göz önüne alarak, seri DC motorun doğrusal olmayan matematiksel modeli için bir doğrusallaştırma kontrol yaklaşımı sunmuşlardır. Ayrıca doğrusal olmayan bir gözlemci kullanmış, sadece DC motor akımını ölçerek, hız ve yük torku kestirimi yapmış, kestirim işleminin doğruluğunu deneysel sonuçlar ile göstermişlerdir.

Kim vd (1999), bulanık mantık ilkesi ile çalışan tekli tip kontrolör kullanarak, DC motor sistemini kontrol eden bir yöntem önermişler ve uygulanan yöntemin geniş bir asimptotik kararlılıkta olduğunu garanti ederek, kontrol işleminin doğruluğunu simülasyon sonuçları ile açıklamışlardır.

Jahmeerbacus vd (1999), DC-DC konverter ile sürülen bir DC motor için algılayıcısız motor hız kontrolü uygulamasını incelemiş, konverter çıkış gerilimi ve akım ölçümünü kullanarak, algılayıcısız motor hız kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. Konverter giriş

gerilimi ve yük torkunda meydana gelen değişimler için sistemin büyük doğrulukta hız kontrolü yapabildiğini deneysel sonuçlar ile göstermişlerdir.

Mukherjee vd (2001) tarafından yük çeviricili motor sürücüsü ile algılayıcısız kontrol uygulaması için bir yöntem sunulmuştur. Bu yöntem ile sürücünün enkoder aracılığıyla çalışmaya başladığı ve 4, 5 periyot sonra algılayıcısız olarak çalışmayı gerçekleştirdiği durumlar ayrı ayrı incelenmiş, enkoderli ve algılayıcısız çalışmalara ilişkin dalga şekilleri birlikte değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, algılayıcısız kontrol uygulamasının önemli özelliklerinden söz edilerek, deneysel sonuçlar ile ani yük değişiklikleri ve değişken giriş gerilimi için sağlıklı bir kontrol işleminin yapılabildiği tespit edilmiştir.

Gargouri vd (2002), quadratic kararlılık konusu ile ilgili bazı sonuçları LQG/LTR kontrolörü ile birlikte bir yöntem olarak sunmuş, bu yöntemin uygulanması için gerekli şartları açıklamışlardır. Ayrıca dinamik kompanzator tasarımı çıkışı için LQG/LTR sentezine alternatif bir yaklaşım önererek, tüm kontrol çevrimi kararlılığının, gözlemci kazancı ve kontrol işlemi ile garanti altına alındığını belirtmişlerdir.

Karadeniz vd (2004) tarafından doğru akım motorunun dinamiğinin anlaşılması için armatür endüktansı, armatür direnci, rotorun eylemsizliği, rotor yatağındaki sürtünme gibi ana parametrelerin bilinmesinin gerektiği bildirilerek, tüm bu parametrelerin belirlenmesi için ayrı ayrı deneyler yapılmasının gerektiği belirtilmektedir. Motor parametrelerinin motorun çalışması sırasındaki koşullara bağlı olarak değişmekte olduğu ve parametrelerin değişmediği varsayılarak tasarlanmış olan denetleyicinin performansının çalışma sırasındaki değişimlerden etkilenerek düştüğü ayrıca açıklanmıştır. Motor parametrelerinin belirlenmesine gerek kalmadan, motor hızının istenildiği gibi davranış gösterdiği bir uyarlamalı denetim yöntemi sunulurken, motor hızının önerilen yöntem ile kontrol edilebileceği simülasyon sonuçları ile gösterilmiştir.

Hacıoğlu (2005), bir değişken yapılı kontrol yöntemi olan kayan kipli kontrolcünün performansını iyileştirmek amacıyla, bulanık mantıklı kayan kipli kontrolcü önermiş, çatırtısız kayan kipli kontrolcünün kontrol kazancı ve kayma düzeyi eğiminin sistemin

durumuna göre iki farklı bulanık mantık algoritması ile ayarlandığını belirtmiştir. Önerilen kontrolörü üç serbestlik derecesine sahip DC motorlar tarafından sürülen bir robotun yörünge takibinde kullanmış, kontrolcü performansını sabit kayma yüzeyi eğimi ve sabit kontrol kazancına sahip kayan kipli kontrolcü performansı ile karşılaştırmış, robotun son uzvunun kütleinde beklenmeyen bir değişiklik oluşturarak kullanılan kontrolcülerin sağlıklı çalışıp çalışmadığını ayrıca incelemiştir.

Trusca vd (2006), geri besleme çevrimindeki küçük bir gecikmenin etkisini irdeleyerek, bunun kaçınılmaz bir şekilde sistemi kararsızlığa götürdüğünü göstermiş ve uzaktan elle çalışan robot uygulaması üzerinde çalışma ve analizler sunmuşlardır. Ayrıca harici bozulmalı ve parametrik belirsizliği olan fırçalı bir DC motor tarafından uyarılan robot sistemi için uyarlanır kontrolör geliştirmişlerdir. Bu kontrolörün geri besleme için pozisyon ve armatür akımı ölçümlerine ihtiyaç duyduğunu, uyarlayıcının bağlantısız cevabı nedeniyle bu ölçümlerin geciktiğini ve mümkün olduğu kadar küçük izleme hatasının bütün durum ve işaretlerde sıçramaya neden olurken uyarlanır kontrolör kapalı çevriminde yerel kararlılığa sebep olduğunu bildirmişlerdir. Önerilen yönteme ait avantajın, kestirim işlemi yapılan parametre sayısının mekanik sistemin bilinmeyen parametre sayısına tamamıyla eşit olmasına bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Robot sisteminin elektriksel sürücü kontrolünde, toplayıcı geri adım yöntemini (integrator backstepping technique) kullanarak, gereksiz parametrelerin yok edildiğini ve simülasyon sonuçları ile önerilen yaklaşımın doğruluğu gösterilmiştir.

Compus-Delgado vd (2007), çalışmalarında farklı DC motor konfigürasyonlarının kontrolü için birleştirilmiş modeller sunmuş, kontrol yapısını elektrik makinelerinin eylemsizlik özelliğine dayandırmışlardır. Bu sebeple ayırık tetikleme, paralel ve seri konfigürasyonlar için benzer kontrol felsefesiyle çalışmış, basitleştirme yapmamışlardır. Konfigürasyonların, her bir rotor bağlantı bölgesi için doğrusal olmayan dinamikler oluşturması nedeniyle kontrol işareti gerilimlerinden farklı olduğunu bildirmişlerdir. Üstelik her kontrol kuralını algılayıcısız çalışmaya uygun hale getirmiş, yük torkunun ölçülebildiği varsayımı altında durum bilgilerini kullanarak bir gözlemci tasarlamışlardır. Kontrol sistemi performansını deneysel sonuçlar ile göstermişlerdir.

Guerreiro vd (2007), DC motor sürücüsünün algılayıcısız kontrolünü incelemiş, kayan kipli denetim yöntemini kullanarak hız kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. Rotor hız ölçümünün yerine harici tork ve hız gözlemcisinden analiz işlemiyle sonuç çıkararak hız ve tork kestirimi yapmışlardır. Motor yalıtılmış kapılı bipolar transistör çevirici modülü tarafından beslenmiştir. Güç anahtarlamaları için bütün kapı işaretleri, hız ve tork kestirimini yapabilmeleri için motordan alınan akım ve gerilim bilgisini analiz eden bir mikroşlemci tarafından her bir örnekleme anında belirlenmiş ve deneysel sonuçlar ile motor sürücü performansının iyi olduğunu, hız ve tork kestiriminin sağlıklı bir şekilde yapıldığını göstermişlerdir.

Yuan vd (2007), algılayıcısız DC motor hız kestirimi işlemini gerçekleştirerek, her çeşit DC motor için algılayıcısız motor hız kestiriminin genel formülünü sunmuşlardır. DC motor ile bir deney gerçekleştirerek, sağlıklı bir kestirim işleminin yapıldığını deneysel sonuçlar ile göstermişlerdir.

Son zamanlarda fırçasız DC motorlar yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu motorların algılayıcısız kontrolü üzerine çok yoğun çalışmalar yapılmakta olup, fırçasız DC motorların algılayıcısız kontrolü için yapılan önemli birkaç literatür araştırması aşağıda verilmiştir.

Matsui ve Shigyo (1992) tarafından fırçasız bir DC motorun akım kontrolü için genellikle bir rotor pozisyon algılayıcısı (enkoder) kullanıldığı, ancak enkoderlerin maliyet ve motor boyutlarını artırmaları sebebiyle endüstriyel motor sürücü uygulamalarını sınırlandırdığı belirtilmiştir. Buna göre fırçasız bir DC motor için pozisyon ve hız algılayıcısı olmaksızın yeni bir strateji sunulmuş ve bu kontrol işleminin bir sayısal işaret işleme yazılımı ile yapıldığı bildirilmiştir. Deneysel sonuçlar ile sistemin sağlıklı bir şekilde kontrol işlemini gerçekleştirdiği tespit edilmiştir.

Tomita vd (1998), fırçasız bir DC motorun matematiksel modelini kullanarak, bozucu etkiyi önleyici bir gözetleyici ile birlikte uyarlanır hız kestirim yöntemini önermiş ve

motorun algılayıcısız kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışma ile bozucu etkiyi önleyici gözetleyicinin, uygun kutup yerleşimiyle pozisyon kestirimi kararlılığını, Popov'un hiper kararlılık teorisiyle de uyarlanır hız kestirimi kararlılığını garanti etmiş, deneysel sonuçlarla önerilen yöntemin etkin bir kontrol sağladığını göstermişlerdir.

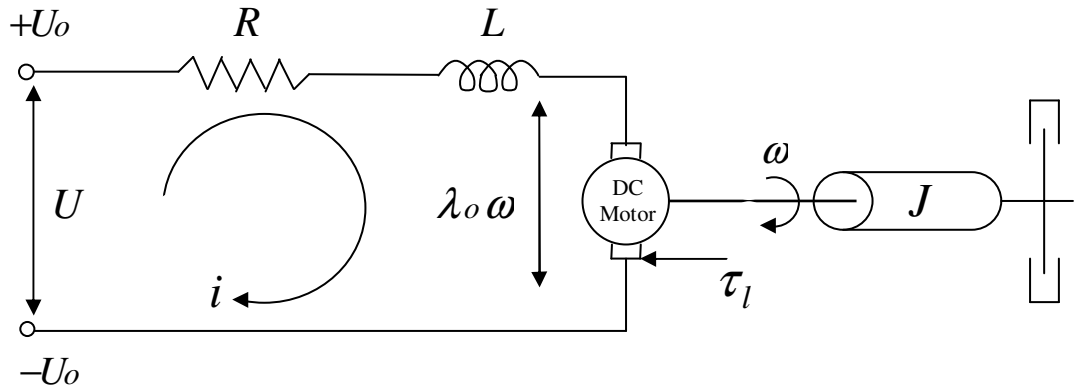
Chen vd (2000), araştırmalarında fırçasız bir DC motorun algılayıcısız hız ve pozisyon kontrolü için kayan kipli bir gözlemci önermiş, gözlemci kararlılığını motorun doğrusal matematik modeline dayandırarak, garanti etmişlerdir. Gözlemciyi akım kestirimi için kullanmış ve kayan kipli mod altında derecesini indirgemiş, yapılan analiz işlemi ile kutup tayini tarafından sağlıklı hız ve pozisyon kestirimine ulaşmışlardır. Deneysel sonuçların dikkate değer doğrulukta olduğunu göstermişlerdir.

Bu tez çalışmasında, kayan kipli denetim yöntemi kullanılarak bir DC motorun akım ve hız kontrolü yapılmış, aynı zamanda sensörsüz kestirim işlemi yapılabilmesi için bir gözlemci tasarlanarak, DC motorun akım, hız, yük torku ve açısal ivme kestirimi gerçekleştirilmiştir. Filtreden kaynaklanan gecikmeler dışında DC motorda akım ve hız kestiriminin büyük doğrulukta olduğu deneysel sonuçlar ile tespit edilmiştir. Sistemin bozucu etkilere karşı davranışı ayrıca incelenmiştir. Bu tez kapsamında yürütülen tüm simülasyon programları Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Laboratuvarında kurulu lisanslı MATLAB programı ile gerçekleştirilmiş, deneysel çalışmalar ise Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü laboratuvarında yapılmıştır.

## 2. KURAMSAL TEMELLER

### 2.1. DC Motorun Elektrik ve Mekanik Modeli ile Dinamik Denklemleri

Elektrik ve mekanik modeli Şekil 2.1’de verilen bir DC motorun dinamik denklemleri aşağıdaki eşitlikler ile



Şekil 2.1. DC motorun elektrik ve mekanik modeli

$$U = Ri + L \frac{di}{dt} + E_a \quad (2.1)$$

$$T_e = J \frac{d\omega}{dt} + \tau_l \quad (2.2)$$

$$E_a = \lambda_o \omega \quad (2.3)$$

$$T_e = k_t i \quad (2.4)$$

verilir. (2.3) ve (2.4) eşitlikleri kullanılarak, (2.1) ve (2.2) eşitlikleri yeniden düzenlenirse;

$$\frac{di}{dt} = \frac{U}{L} - \frac{Ri}{L} - \frac{\lambda_o \omega}{L} \quad (2.5)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{k_t i}{J} - \frac{\tau_l}{J} \quad (2.6)$$

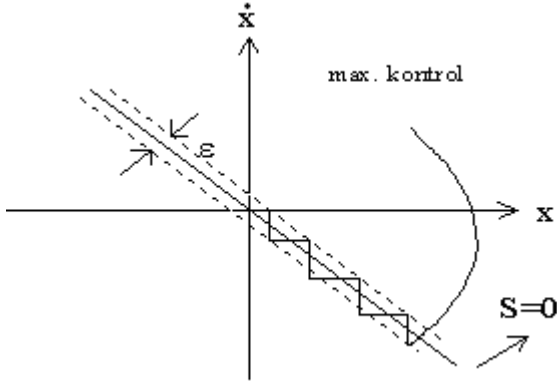
elde edilir. Bu denklemler matris biçiminde yazılırsa,

$$\begin{bmatrix} \frac{di}{dt} \\ \frac{d\omega}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{\lambda_o}{L} \\ \frac{k_t}{J} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{U}{L} \\ -\frac{\tau_l}{J} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

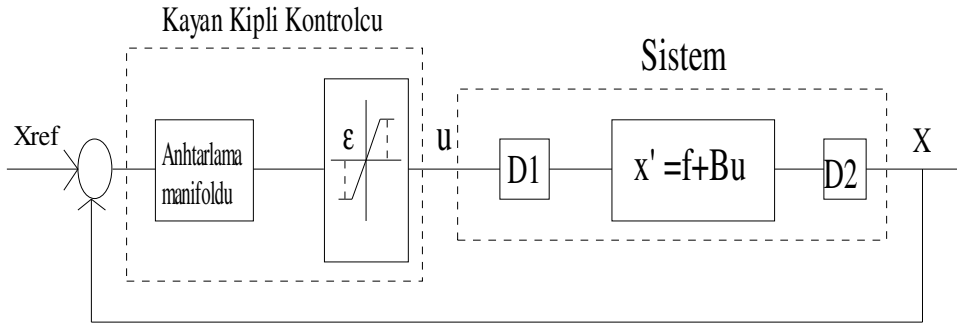
elde edilir.

## 2.2. Kayan Kipli Denetim Yöntemi

Utkin (1993b) tarafından DC motor sürücü sistemine uygulanan kayan kipli denetim yöntemi açıklanarak, etkinliği ortaya konulmuştur. Değişken yapılı sistem (VSS), süreksiz kontrol davranışına sahip, doğrusal olmayan kontrol yöntemlerinden biridir ve kontrolün uygulanabilmesi için anahtarlama fonksiyonlarının seçilmesi gerekir. Sistemin dinamik davranışı bu anahtarlama fonksiyonunun denetimindedir. Süreksiz kontrol davranışlarından dolayı faz planındaki yörünge, anahtarlama manifoldlarını kestiğinde kayma modları oluşur. Sistemin hareketi anahtarlama yüzeyinde tutulursa, o zaman hareket “kayma modunda”dır denir. Şekil 2.2’de kayma yüzeyi faz yörüngesi ve Şekil 2.3’de ise kayan kipli denetimin blok diyagramı gösterilmiştir.



**Şekil 2.2.** Kayma yüzeyinin faz diyagramında gösterimi



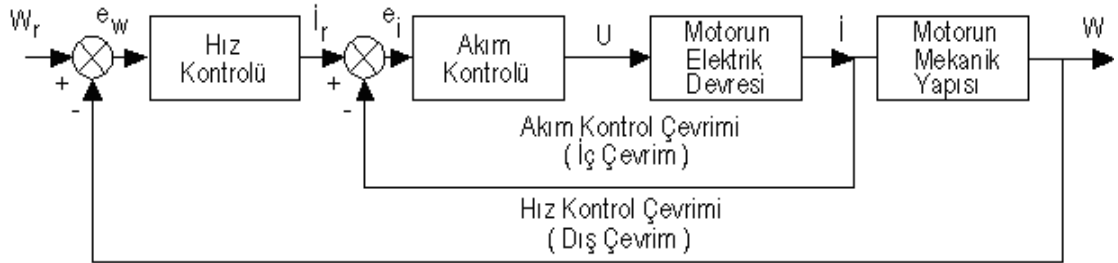
**Şekil 2.3.** Kayan kipli denetimin ve kontrol edilen sistemin blok diyagramı

Bu yöntemin ana özelliği, hatayı anahtarlama yüzeyi olarak tanımlanan bir bölgeye çekerek sistemi bu yüzeyde kaydırması ve dış bozucu etkilere, parametre değişimlerine ve sistemdeki belirsizliklere karşı duyarsız kalmasıdır. Kayma hareketini gerçekleştirmek için uygun bir anahtarlama yüzeyi ( $\sigma(x,t)=0$ ) denkleminin tanımlanması gerekir.  $\sigma(x,t)$ 'in değeri VSS' in değişimlerini şöyle yönlendirir:  $\sigma(x,t)>0$  olduğunda yapı değişecektir ve VSS'in denetim değişkenleri,  $\sigma(x,t)$ 'i azaltır. Şayet  $\sigma(x,t)<0$  olduğunda bu sefer VSS,  $\sigma(x,t)$ 'i artıracak şekilde değişkenlerini düzenleyecektir. Bunun sonucunda sistemin kapalı çevrim kontrolü  $\sigma(x,t)$  ile gerçekleştirilecektir. Durum uzayında  $\sigma(x,t)$  fonksiyonu, bir nokta olarak gösterilir. Bu nokta, her seferinde  $\sigma(x,t)=0$  yüzeyini geçecektir (kesecektir) ve bu yüzeyden uzaklaşmaya çalışacaktır. Ancak, VSS'teki değişim bu yüzeyden uzaklaşmaya çalışan

bu noktayı, yüzeye doğru çekerek yüzey üzerinde kayma hareketi yapmasına sebep olacaktır. Gerçekte bu noktanın kayma yüzeyinde kesin (tam) olarak kalabilmesi için VSS' in anahtarlama frekansı sonsuz olmalıdır. Ancak bu mümkün olmamakla birlikte, kontrol edilen sistemin zaman sabitinden daha büyük bir anahtarlama frekansının seçilmesi, bu noktayı kayma yüzeyine yakın tutmak için yeterlidir. Kayan kipli kontrolün tasarımı ve uygulamalarıyla ilgili bilgiler için Utkin (1993c) ve Utkin vd (1999a) referansları incelenebilir.

Sadece teorik çalışmalar değil, aynı zamanda birçok simülasyon ve deneysel çalışmalar da bu tekniğin üstünlüğünü göstermiştir. Kayan kipli denetimle ilgili bilgiler birçok makale ve kitapta sunulduğundan burada fazla ayrıntıya girilmemiştir.

### 2.3. DC Motorun Kaskad Kontrol Yapısı



**Şekil 2.4.** DC motorun kaskad kontrol yapısı

Şekil 2.4'de verilen DC motora ait kaskad kontrol yapısı kullanılarak, DC motor akımı ve motor hızı kontrol edilmektedir. Hız kontrol çevrimi incelendiğinde, hızın kontrol edilebilmesi için akımın kontrol edilmesi gerektiği anlaşılmaktadır.

## 2.4. DC Motorun Akım Kontrolü

Şekil 2.4'de yer alan hız kontrol çevrimi (dış çevrim) ile  $i_r$ , referans akım sağlanmakta olup;

$$s = i_r - i \quad (2.8)$$

ile verilen anahtarlama fonksiyonundan yararlanılarak;

$$U = U_o \text{sign}(s) \quad (2.9)$$

kontrol işareti elde edilmektedir. Böylece, DC motor giriş geriliminin kontrol edilmesi ile DC motorda akım kontrolü yapılmaktadır.

Yukarıda adı geçen signum (sign), gerçel sayıların işaretini bulmamızı sağlayan ve

$$\text{sign}(s) = \begin{cases} -1 & s < 0 \\ 1 & s \geq 0 \end{cases} \quad (2.10)$$

ifadesi ile tanımlanan bir fonksiyondur. Ayrıca

$i_r$  : Referans akım

$i$  : Ölçülen akım

olarak tanımlanmaktadır.

$s$  anahtarlama fonksiyonuna ait durumlar incelendiğinde iki durum ortaya çıkmaktadır.

a)  $i_r < i$  olması durumunda ölçülen akım değeri referans akım değerini aşmakta  $s$  anahtarlama fonksiyonu negatif olmakta ve dolayısıyla ölçülen akım referans akım seviyesine ininceye kadar DC motora uygulanan giriş geriliminin  $-U_o$  olması sağlanmaktadır.

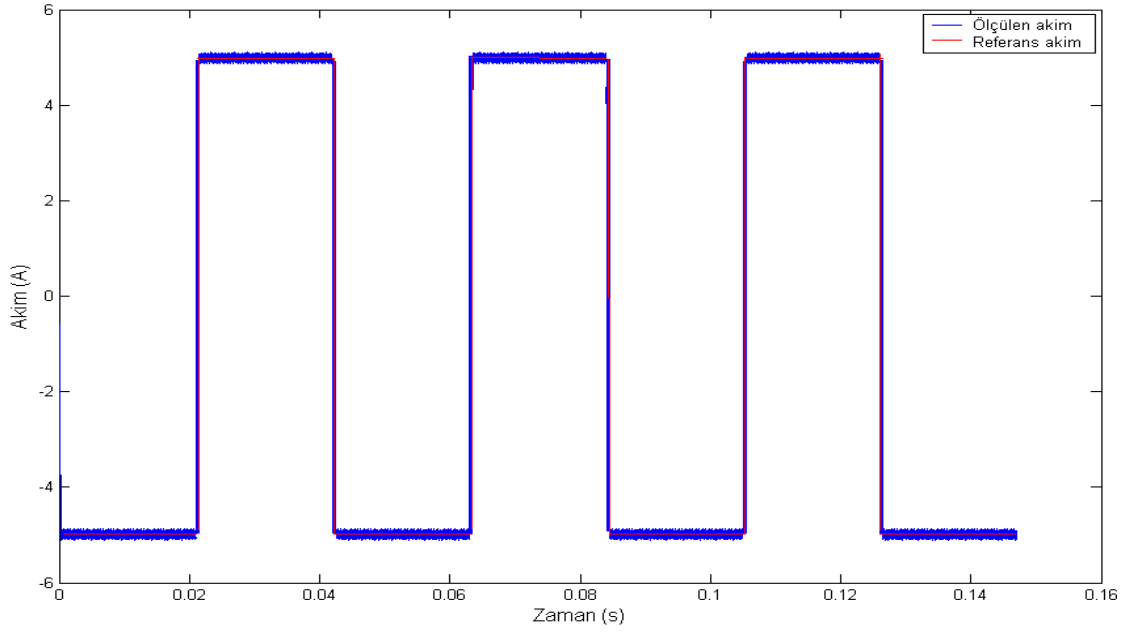
b)  $i_r > i$  olması durumunda ise ölçülen akım değeri referans akım değerine ulaşamamakta  $s$  anahtarlama fonksiyonu pozitif olmakta ve dolayısıyla ölçülen akım referans akım seviyesine ulaşınca kadar DC motora uygulanan giriş geriliminin  $+U_o$  olması sağlanmaktadır.

Yukarıda açıklanan  $s$  anahtarlama fonksiyonuna ait durumlar, DC motor akımının istenen referans akım seviyesinde kararlılığa ulaşabilmesi için sürekli tekrarlanmaktadır.

Tüm simülasyon uygulamaları, Çizelge 2.1.'de parametreleri verilen DC motor kullanılarak yapılmış olup, Şekil 2.5'de gösterilen simülasyon sonuçları ile bu akım kontrol işleminde ölçülen akımın, hiçbir zaman tam anlamıyla referans akım değerine oturmadığı, sadece referans akım çevresinde yüksek frekanslı bir işaret olarak referans akımı takip ettiği görülmektedir.

**Çizelge 2.1.** Simülasyonlarda kullanılan DC motora ait parametreler

Sembolü	Adı	Değeri	Birimi
$L$	Armatür endüktansı	1.0	mH
$R$	Armatür direnci	0.5	ohm
$J$	Atalet momenti	0.001	kgm <sup>2</sup>
$k_t$	Tork sabiti	0.008	Nm/A
$\lambda_o$	Ters emk sabiti	0.001	Vs/rad
$U$	Giriş gerilimi	20	V



**Şekil 2.5.** DC motorun akım kontrolü

Burada dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta ise (2.9) denkleminde verilen  $U_o$ 'ın nasıl seçileceğidir.

Lyapunov kararlılık kriterine göre, (2.8) eşitliği ile verilen,  $s$  anahtarlama fonksiyonu ile pozitif olarak tanımlı  $v$  Lyapunov fonksiyonu kullanılarak;

$$v = s \frac{s}{2} > 0 \quad (2.11)$$

$$\dot{v} = s\dot{s} = s\left(\frac{di_r}{dt} - \frac{di}{dt}\right) < 0 \quad (2.12)$$

(2.11) ve (2.12) eşitsizliklerinin sağlanması gerekmektedir. (2.12) eşitsizliği, (2.1) eşitliği kullanılarak yeniden düzenlenirse;

$$\dot{v} = s\left[\frac{di_r}{dt} - (U_o - Ri - \lambda_0 \omega) / L\right] < 0 \quad (2.13)$$

$$\dot{v} = s\left[\frac{di_r}{dt} + (Ri + \lambda_0 \omega) / L\right] < s \frac{U_o}{L} \quad (2.14)$$

$$U_o > \left| L \frac{di_r}{dt} + Ri + \lambda_0 \omega \right| \quad (2.15)$$

elde edilir ve sistemin kararlı olabilmesi için  $U_o$ , uygun büyüklükte seçilmeli ve DC motor giriş geriliminin maksimum değerini geçmemelidir.

## 2.5. DC Motorun Hız Kontrolü

DC motorun hız kontrolü için genellikle Şekil 2.4'de yer alan kaskad kontrol yapısı kullanılmaktadır. Bu kontrol yapısında, akım kontrol çevrimi, hız kontrol çevrimi için yaklaşık referans akım değerinde akım üreten ideal bir akım kaynağıymış gibi görev yapar. Bu varsayım ancak elektriksel zaman sabiti, mekanik zaman sabitinden daha küçük olan sistemlerde ya da hız kontrolü dinamik cevabının önemli bir problem oluşturmadığı sistemlerde geçerlidir. DC motor giriş gerilimi,  $U$ , motor çıkış gücüne bağlı olarak sürekli veya süreksiz kontrol işareti ile denetlenebilir. Düşük güçlü sistemler için sürekli kontrol işareti kullanılırken, yüksek güçlü sistemlerde ise yüksek akım, motor giriş gerilim işaretinin sürekli olmasını zorlaştırmakta olduğundan süreksiz kontrol uygulaması kullanılmaktadır. Herhangi bir kontrol tasarım tekniği doğrusal veya doğrusal olmayan, PID ya da daha sofistike bir metot örneğin; kayan kipli denetim gibi gelişmiş birçok denetim tekniği hız kontrolü için kullanılabilir. (Utkin vd 1999b)

Kayan kipli denetim; hem düşük güç sistemlerinde hem de yüksek güç sistemlerinde kullanılabilmesi ile denetim hassasiyetinin çok iyi olması açısından süreksiz denetim uygulamasına iyi bir örnektir. Kayan kipli denetimin Şekil 2.4'de yer alan akım

çevriminde kullanılması ile hız kontrolü için başka bir kayan kipli denetim kullanılırsa, hız denetiminin çıkışında yer alan referans akım,  $i_r$ , süreksiz olmakta dolayısıyla  $\frac{di_r}{dt}$  sonsuza gitmektedir. Bu durumda DC motor giriş gerilimi,  $U_o$  için elde edilen (1.15) eşitsizliği sağlanamamakta ve sistem kararsız bir davranış göstermektedir (Utkin vd 1999c).

Endüstride kullanılan bir çok sistemde basitliği nedeniyle PI denetleyici kullanılmakta, ancak denetim hassasiyeti, mekanik alt sistemlerin oluşturduğu karışıklıklardan oldukça etkilenmektedir.

DC motorda hız kontrolü için hız izleme hatasının eksponansiyel kararlılık gösterdiği kabul edilirse bu durumda;

$$c(\omega_r - \omega) + (\dot{\omega}_r - \dot{\omega}) = 0 \quad (2.16)$$

yazılabilir.

$c$ , pozitif yakınsama oranı olmak üzere (2.16) eşitliği; (2.6)'da verilen motor mekanik denklemi, referans akım ( $i_r$ ) cinsinden yeniden düzenlenirse;

$$i_r = \frac{J}{k_t} c(\omega_r - \omega) + \frac{J}{k_t} \dot{\omega}_r - \frac{1}{k_t} \tau_l \quad (2.17)$$

eşitliği elde edilmektedir. Ancak bu eşitlik, normalde bilinmeyen motor parametre bilgilerine  $J$ ,  $k_t$  ve  $\tau_l$ 'ye ihtiyaç duymaktadır.

Şekil 2.4'de verilen kaskad kontrol yapısı için hız yörüngesini takip eden ve kayan kipli denetim prensibine dayanan bir yöntem Utkin vd (1999d) tarafından sunulmaktadır. Bu

yöntemde, kaskad kontrol yapısında yer alan akım kontrol çevrimi çıkarılarak akım kontrol işlemi dolaylı olarak yapılmaktadır. Sunulan yöntemin hem elektriksel hem de mekanik bozulmalara karşı daha sağlıklı sonuç vermesi ile birlikte hızlı dinamik cevap vermesi, onun en önemli avantajlarındanıdır.

Bu yöntem kullanılarak yapılan hız kontrolü, (referans hız  $\omega_r$ , ölçülen hız  $\omega$ , olmak üzere;)

$$e = \omega_r - \omega = x_1 \quad (2.18)$$

$$\dot{e} = \dot{\omega}_r - \dot{\omega} = x_2 \quad (2.19)$$

(2.5) ve (2.6)'da ifade edilen motor dinamik denklemleri, (2.18)'de verilen hız izleme hatası ve (2.19)'da verilen hız izleme hatasının türevi cinsinden ifade edilen denklemler yeniden düzenlenerek elde edilen eşitliklerin çözümü ilkesine dayanmaktadır.

Buradan hareketle,

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (2.20)$$

$$\dot{x}_2 = \ddot{\omega}_r - \ddot{\omega} \quad (2.21)$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{J}(k_t i - \tau_l) \quad (2.22)$$

$$\ddot{\omega} = \frac{1}{J}\left(k_t \frac{di}{dt} - \dot{\tau}_l\right) \quad (2.23)$$

$$\dot{i} = \frac{1}{L}(U - Ri - \lambda_o \omega) \quad (2.24)$$

$$\ddot{\omega} = \frac{1}{J} \left[ k_t \frac{1}{L} (U - Ri - \lambda_o \omega) - \dot{\tau}_l \right] \quad (2.25)$$

$$i = \frac{J}{k_t} \left( \dot{\omega} + \frac{\tau_l}{J} \right) \quad (2.26)$$

$$\ddot{\omega} = \frac{k_t}{JL} \left[ U - \frac{RJ}{k_t} \left( \dot{\omega} + \frac{\tau_l}{J} \right) - \lambda_o \omega \right] - \frac{\dot{\tau}_l}{J} \quad (2.27)$$

$$\ddot{\omega} = \frac{k_t}{JL} U - \frac{R}{L} \dot{\omega} - \frac{R}{JL} \tau_l - \frac{k_t \lambda_o}{JL} \omega - \frac{1}{J} \dot{\tau}_l \quad (2.28)$$

elde edilir. (2.28)'de verilen eşitlik kullanılarak, (2.21)'de verilen denklem yeniden düzenlenirse;

$$\dot{x}_2 = \ddot{\omega}_r - \frac{k_t}{JL} U + \frac{R}{L} \dot{\omega} + \frac{R}{JL} \tau_l + \frac{k_t \lambda_o}{JL} \omega + \frac{1}{J} \dot{\tau}_l \quad (2.29)$$

eşitliği elde edilmiş olur.

Ancak (2.29) eşitliğinde yer alan sabitler, aşağıdaki şekilde tekrar düzenlenirse;

$$a1 = \frac{k_t \lambda_o}{JL} \quad (2.30)$$

$$a2 = \frac{R}{L} \quad (2.31)$$

$$b = \frac{k_t}{JL} \quad (2.32)$$

$$f(t) = \ddot{\omega}_r + a2\dot{\omega}_r + a1\omega_r + \frac{R}{JL}\tau_l + \frac{1}{J}\dot{\tau}_l \quad (2.33)$$

$$\dot{x}_2 = -a1x_1 - a2x_2 + f(t) - bU \quad (2.34)$$

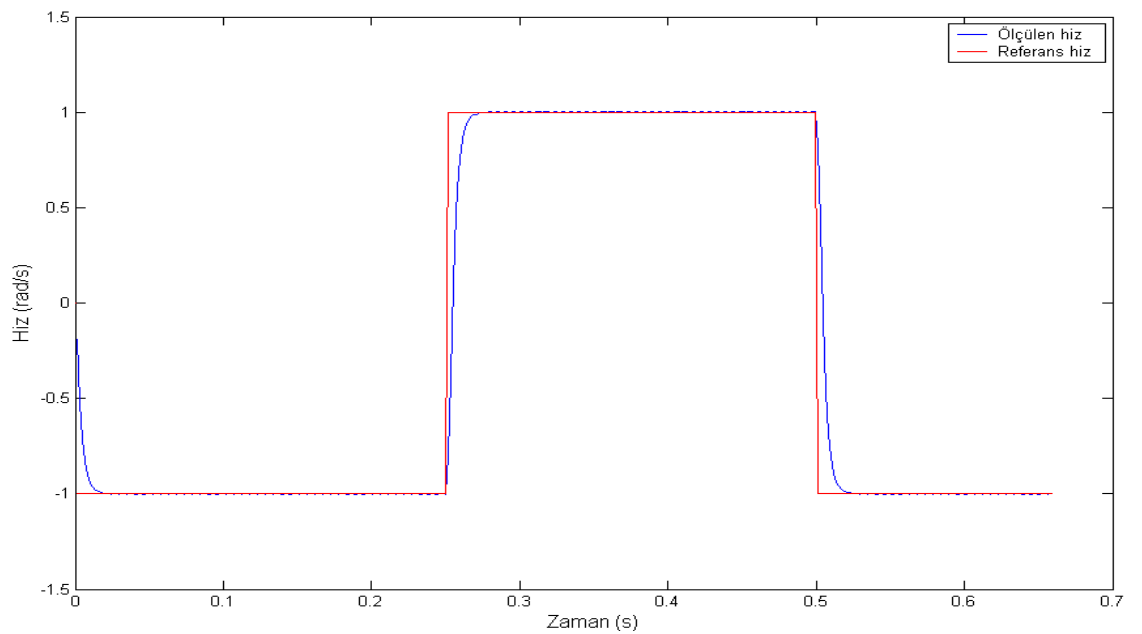
Sonuç olarak, (2.5) ve (2.6)'da verilmiş olan DC motor dinamik denklemleri;  $x_1$ ,  $x_2$  cinsinden yeniden düzenlenerek, (2.20) ve (2.34)'de verilen eşitliklere dönüşmekte ve bu denklemlerin çözümü ile  $x_1$  ve  $x_2$  bulunmaktadır.

$x_1$  ve  $x_2$ 'nin bulunması ile hızı kontrol etmek için denetleyicinin;

$$s = cx_1 + x_2 \quad (2.35)$$

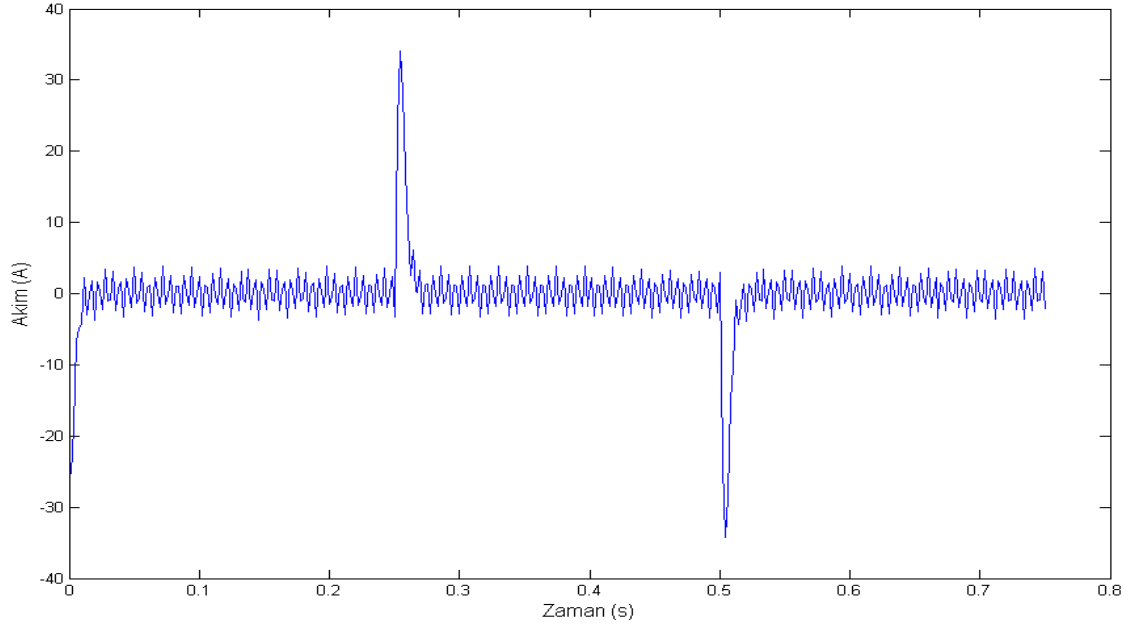
ile verilen anahtarlama fonksiyonundan yararlanılarak, (2.9)'da verilen eşitlik ile DC motor giriş geriliminin kontrolü sağlanmaktadır.

Şekil 2.6'da gösterilen simülasyon sonuçları ile bu hız kontrol işleminde ölçülen hızın, referans hızı iyi bir doğrulukta takip ettiği görülmektedir.

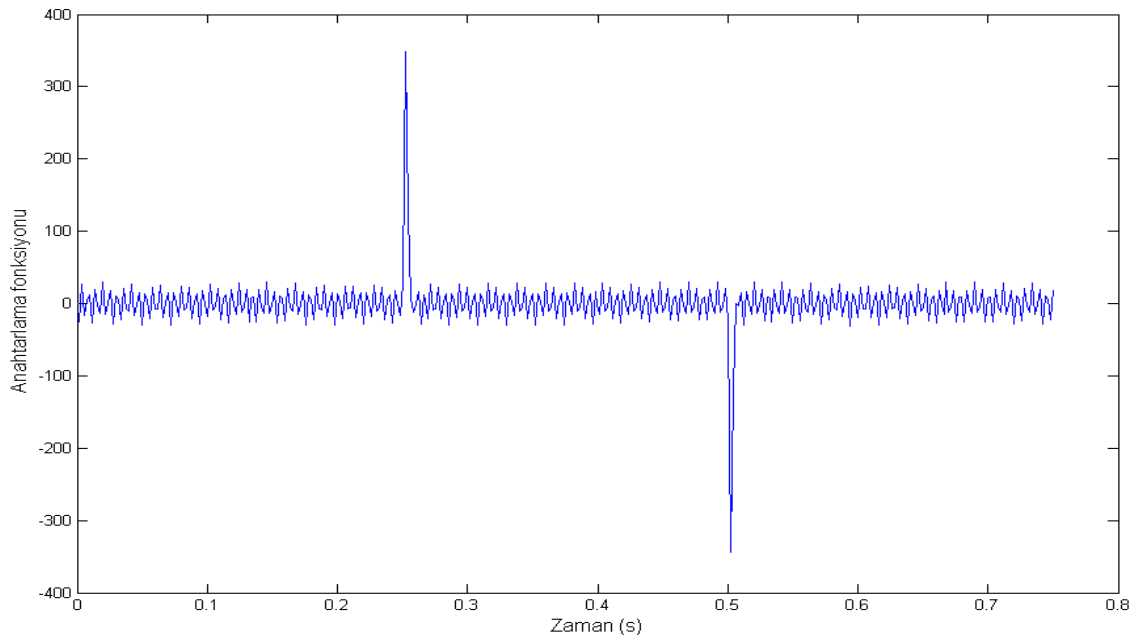


**Şekil 2.6.** DC motorun hız kontrolü

Ayrıca kayan kipli denetimin akım cevabı ile anahtarlama fonksiyonu cevabı Şekil 2.7 ve Şekil 2.8'de sırasıyla gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Kayan kipli denetimin akım cevabı



Şekil 2.8. Anahtarlama fonksiyonu cevabı

## 2.6. Gözlemci Gereksinimi ve Durum Kestirimi

### 2.6.1 Gözlemci gereksinimi

Kayan kipli denetleyicinin (2.35) eşitliği ile verilen anahtarlama fonksiyonunu hesaplayabilmek için (2.19) eşitliğinde yer alan açısız ivme değerine ihtiyaç duyulmaktadır. Fakat pratik olarak açısız ivme değerinin ölçülmesi oldukça zordur. Bu sebeple daha kolay ölçülebilen açısız hızın sayısal türevi alınarak, açısız ivme değeri elde edilebilir. Ancak bu durumda açısız ivme sinyali yüksek değerlerde gürültü işareti içermektedir. Ayrıca açısız ivme değeri;  $J$ ,  $k_l$  parametreleri ile bilindiği varsayılan  $\tau_l$  yük torkunun kullanılması neticesinde (2.6) eşitliğinden yararlanılarak hesaplanabilir.  $\tau_l$  yük torkunun bilinmediği durumlarda ise  $\dot{\tau}_l = 0$  varsayımı altında yük torku değeri gözlemci tarafından kestirilmektedir. Bir sistemin matematiksel modelinden yararlanılarak, o sistemde ölçülmesi zor ya da masraflı olan parametrelerin, gerçeğe yakın bir şekilde kestirilmesi işlemi için gözlemciye gereksinim duyulmaktadır (Utkin vd 1999e).

### 2.6.2 DC motorda yük torku kestirimi

DC motorda yük torku kestirimi işlemi için gözlemci kullanılarak (2.36) eşitliğinde verilen yeni bir değişken tanımlanmaktadır.

$$z = \tau_l + l\omega \quad (2.36)$$

$l$ , gözlemci kazanç sabiti olmak üzere;  $\dot{\tau}_l = 0$  varsayımı altında (2.36)'da verilen eşitliğin türevi alınarak;

$$\dot{z} = l\dot{\omega} \quad (2.37)$$

eşitliği elde edilmektedir.

(2.6) eşitliği ile verilen açısal ivme değeri, (2.37) eşitliğinde yerine konur ve  $\tau_l$ , yük torku için (2.36) eşitliği kullanılırsa (Utkin vd 1999f);

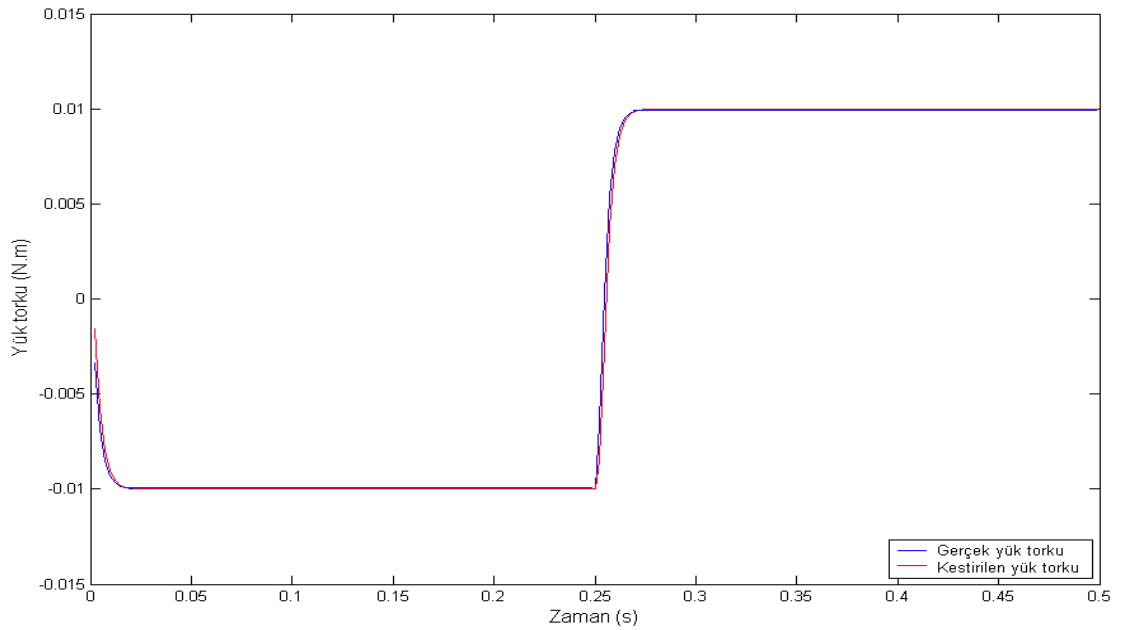
$$\dot{z} = l\left(\frac{k_t i}{J} - \frac{\tau_l}{J}\right) \quad (2.38)$$

$$\dot{z} = l\left(\frac{k_t i}{J} - \frac{z - l\omega}{J}\right) \quad (2.39)$$

$$\dot{z} = \frac{1}{J}(lk_t i - lz + l^2\omega) \quad (2.40)$$

eşitliği elde edilecektir.

Sonuç olarak, (2.40) eşitliğinde yer almakta olan yeni değişken  $z$  bulunarak; (2.36) eşitliğinde yerine konursa, yük torku  $\tau_l$ 'nin değeri gözlemci tarafından kestirilerek bulunmuş olacaktır.



**Şekil 2.9.** Yük torku kestirim grafiği

Şekil 2.9’da gösterilen simülasyon sonuçları ile gözlemci tarafından kestirimi yapılan yük torkunun, gerçekte uygulanan yük torkunu büyük bir doğrulukta izlediği görülmektedir.

### 2.6.3 DC Motorda açısal ivme kestirimi

DC motorda açısal ivme kestirimi işlemi, yük torku kestirimi işlemindeki gibi gözlemci kullanılarak yapılmaktadır. Buna göre DC motor sisteminin gerçek çalışma şartlarına ait açısal hız ve açısal ivme değerleri için kestirim ifadeleri aşağıda tanımlanmaktadır (Utkin vd 1999g).

$$z_1 = \omega \quad (2.41)$$

$$z_2 = \dot{\omega} \quad (2.42)$$

$$\hat{z}_1 = \hat{\omega} \quad (2.43)$$

$$\hat{z}_2 = \hat{\dot{\omega}} \quad (2.44)$$

Yeni değişkenlere göre sistemin gerçek çalışma şartlarına ait dinamik denklemler için

$$\dot{z}_1 = z_2 \quad (2.45)$$

$$\dot{z}_2 = \frac{k_t \dot{i}}{J} - \frac{\dot{\tau}_l}{J} \quad (2.46)$$

$\dot{\tau}_l = 0$  varsayımı ile (2.5) eşitliği kullanılarak, (2.46) eşitliği yeniden düzenlenirse;

$$\dot{z}_2 = \frac{k_t}{JL}(U - Ri - \lambda_0 z_1) \quad (2.47)$$

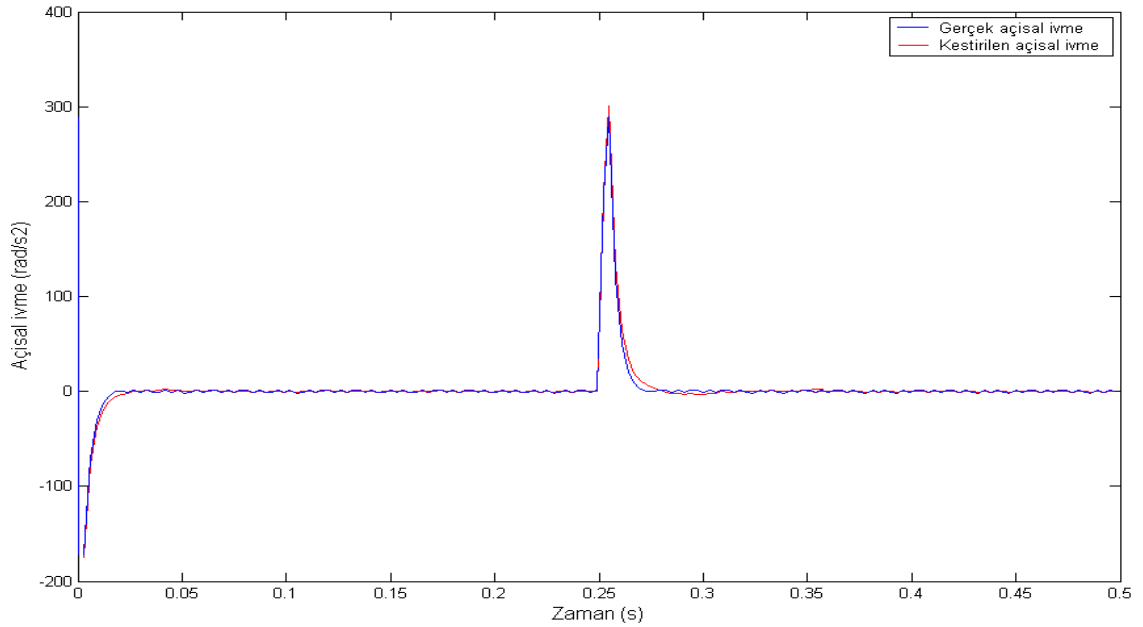
(2.45) ve (2.47) eşitlikleri verilmekte olup;

$$\dot{\hat{z}}_1 = \hat{z}_2 - l_1(\hat{z}_1 - z_1) \quad (2.48)$$

$$\dot{\hat{z}}_2 = \frac{k_t}{JL}(U - Ri - \lambda_o \hat{z}_1) - l_2(\hat{z}_1 - z_1) \quad (2.49)$$

denklemleri ile sistemin kestirim işlemleri tanımlanmaktadır.

Uygun  $l_1$  ve  $l_2$  gözlemci kazanç sabitleri seçilerek, (2.48) ve (2.49) eşitliklerinin çözümünden elde edilen açısal ivme kestirim değerinin ( $\hat{z}_2$ ), (2.45) ve (2.47) eşitliklerinin çözümünden elde edilen sistemin gerçek açısal ivme değerini ( $z_2$ ) yüksek doğrulukta takip ettiği Şekil 2.10'da verilen simülasyon sonuçları ile görülmektedir.



**Şekil 2.10.** Açısal ivme kestirim grafiği

#### 2.6.4 Algılayıcısız hız kontrolü için gözlemci dizaynı

Bazı değişkelerin ölçülmesi ile bilinmeyen değişkenlere ait kestirimler yapıldığı için “algılayıcısız” kelime anlamı olarak tamamıyla doğru değildir. Bir elektrik sürücü sisteminin algılayıcısız denetim işlemi, herhangi bir mekanik değişken için algılayıcı kullanılmamasını göstermekte olup; ancak motor akımı ve gerilimi gibi elektriksel parametreler ölçülebilir ya da elde edilebilir olmalıdır.

DC motorun hız kestirimi için bir akım gözlemcisi kullanılmaktadır. Akım kestirim hatası;

$$\bar{i} = \hat{i} - i \quad (2.50)$$

$i$  = Ölçülen akım

$\hat{i}$  = Kestirilen akım

$\bar{i}$  = Akım kestirim hatası

olarak tanımlanmaktadır.

(2.50) eşitliği ile  $l_1$  gözlemci kazanç sabiti sıfırdan büyük olmak üzere gözlemcinin matematiksel formu aşağıda verilmiştir.

$$L \frac{d\hat{i}}{dt} = U - R\hat{i} - l_1 \text{sign}(\bar{i}) \quad (2.51)$$

$$L \frac{d\bar{i}}{dt} = L \frac{d\hat{i}}{dt} - L \frac{di}{dt} \quad (2.52)$$

(2.51) ve (2.5) denklemleri kullanılarak; (2.52) denklemi yeniden düzenlenirse;

$$L \frac{d\bar{i}}{dt} = -R\bar{i} + \lambda_o \omega - l_1 \text{sign}(\bar{i}) \quad (2.53)$$

eşitliği elde edilir.

Sistemin Lyapunov kararlılık kriterine göre sistemin kararlı olabilmesi için;

$$l_1 > |\lambda_o \omega - R\bar{i}| \quad (2.54)$$

$l_1$ , gözlemci kazancı (2.54) eşitsizliğine uygun seçilmelidir.

Bu şartlar altında  $\bar{i}$  sonlu zamanda sifıra yaklaşmaktadır. Eşdeğer kontrol yaklaşımı kullanılarak;

$$L \frac{d\bar{i}}{dt} = -R\bar{i} + \lambda_o \omega - l_1 \text{sign}(\bar{i})_{eq} = 0 \quad (2.55)$$

eşitliği elde edilmiş olup;  $\lambda_o$ , ters emk sabiti bilindiğinden açısal hız için,

$$\omega = l_1 \text{sign}(\bar{i})_{eq} / \lambda_o \quad (2.56)$$

eşitliği elde edilmektedir.

(2.56) eşitliğinde yer alan,  $l_1 \cdot \text{sign}(\bar{i})_{eq}$ , yüksek frekanslı işaretler içermesi sebebiyle alçak geçiren filtreden geçirilmelidir. Alçak geçiren filtre kullanılarak,  $l_1 \cdot \text{sign}(\bar{i})_{eq}$ 'in sürekli değerleri elde edilebilmektedir.

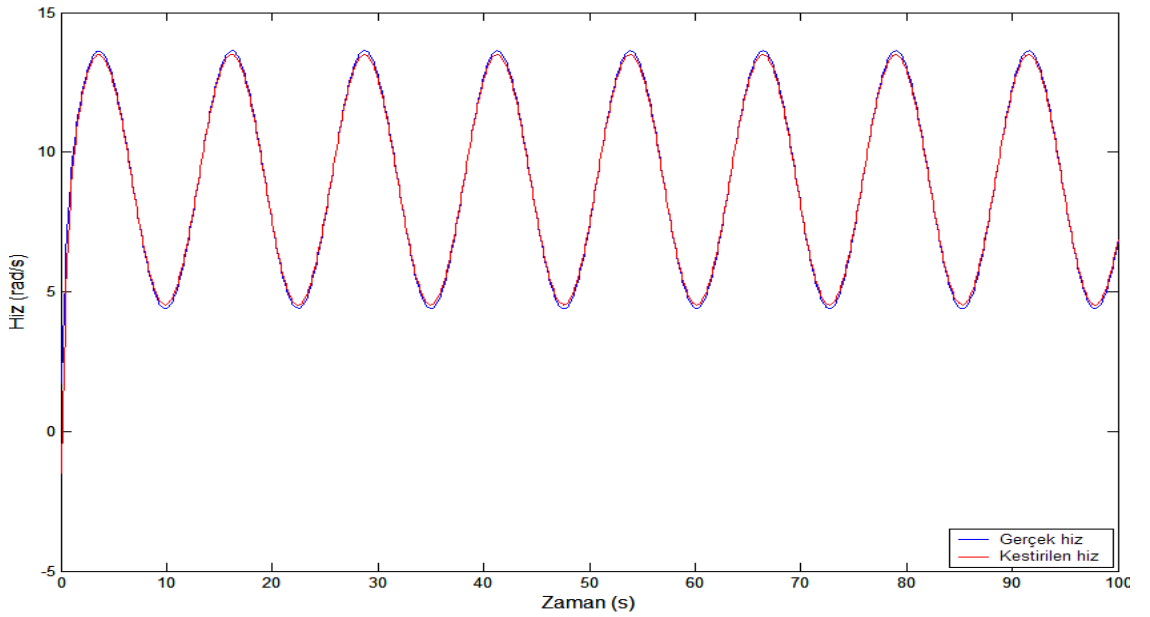
$$z = \frac{1}{(1 + \mu s)} l_1 \text{sign}(\bar{i})_{eq} \quad (2.57)$$

eşitliğinde kullanılan filtrenin zaman sabiti  $\mu$ , sürekli bileşenler içerir ve yüksek frekans bileşenlerini de eleyebilecek şekilde seçilmektedir. Gözlemci tarafından (2.56) eşitliği ile kestirimi yapılan motor hızı, (2.57) eşitliği ile verilen alçak geçiren filtreden geçirilmekte ve sonuç olarak,

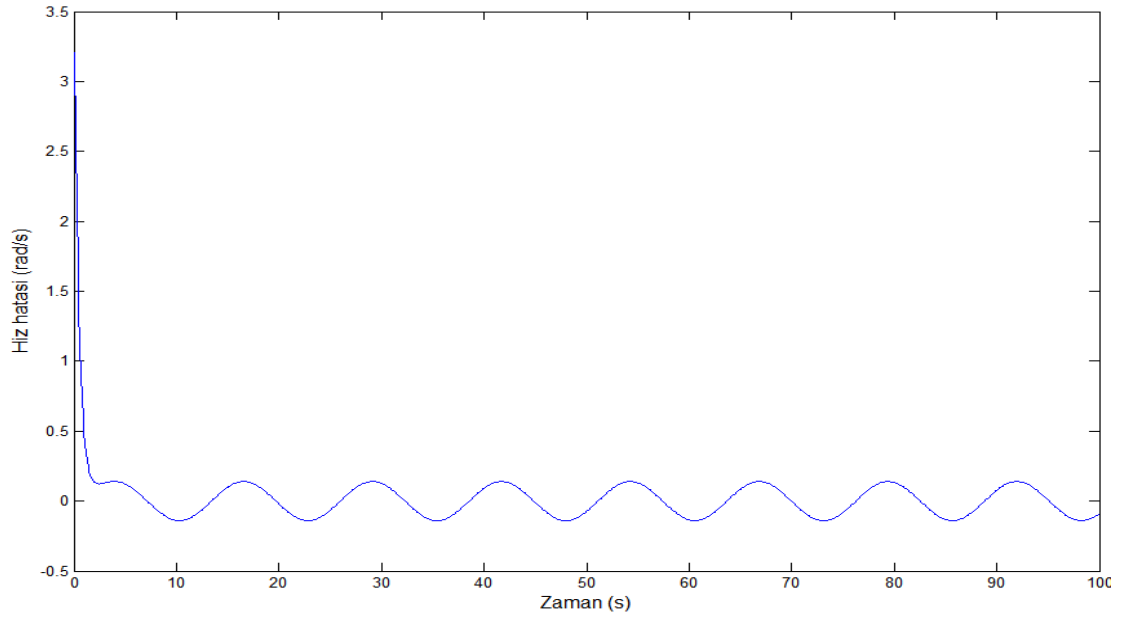
$$\hat{\omega} = \frac{z}{\lambda_o} \quad (2.58)$$

eşitliği ile motor hızı gözlemci tarafından tespit edilmektedir.

Şekil 2.11’de gösterilen simülasyon sonuçları ile algılayıcısız olarak gözlemci tarafından kestirimi yapılan açısal hızın, gerçek açısal hızı büyük bir doğrulukta izlediği görülmektedir. Kestirim işleminde oluşan hız hatası ise Şekil 2.12’de verilmektedir.



**Şekil 2.11.** Algılayıcısız hız kestirimi grafiği

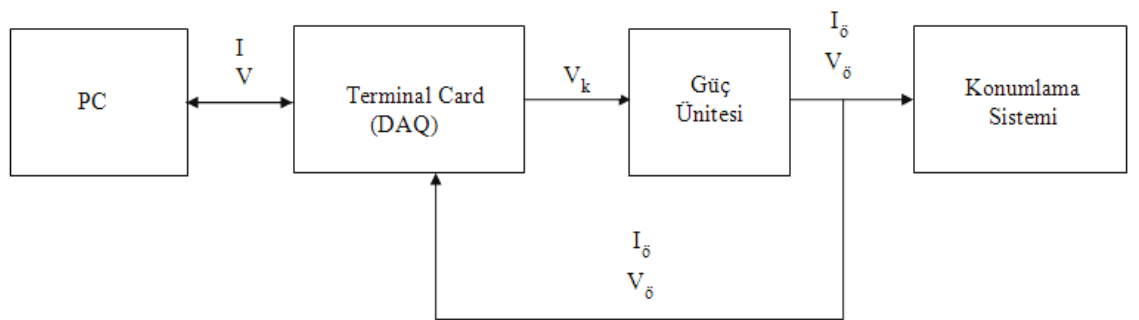


**Şekil 2.12.** Algılayıcısız hız kestirimi işleminde hız hatası grafiği

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1 GİRİŞ

DC motor için akım ve hız kestirimi işlemi, Şekil 3.1'de resmi ve blok diyagramı verilen deney düzeneği kullanılarak yapılmış, elde edilen deneysel sonuçlar ile kullanılan yöntemin doğruluğu görülmüştür.



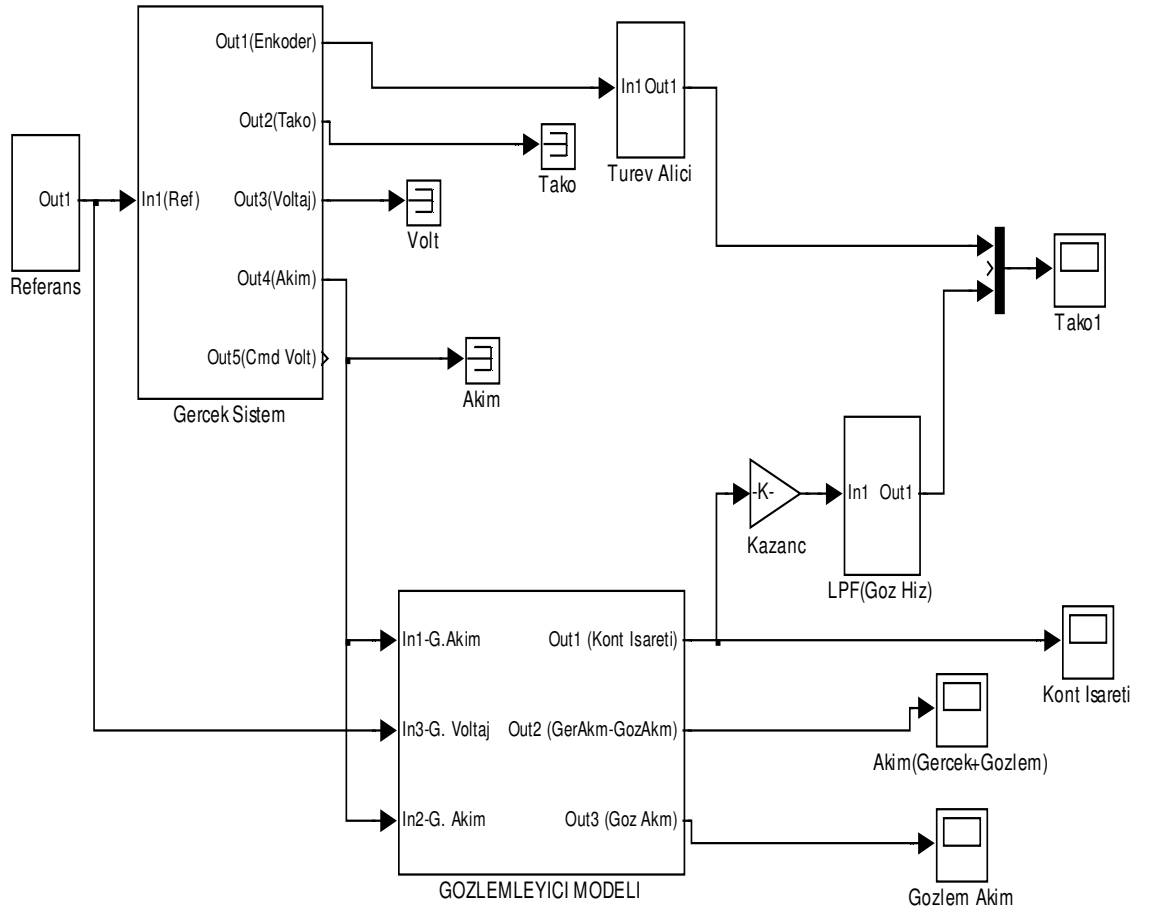
Şekil 3.1. Deney düzeneği resmi ve blok diyagramı

Şekil 3.1’de verilen blok diyagramı incelendiğinde, deney düzeneğinin; DAQ kartı, sistemi yöneten (PC) bilgisayar, sistemin çalışması için gerekli olan gerilimi sağlayan güç ünitesi ve içerisinde DC motor, enkoder ve takometre bulunan konumlama sisteminden oluşmaktadır.

Deney düzeneğinin çalışması kısaca açıklanacak olursa, bilgisayar yazılımı kullanılarak oluşturulan sisteme, referans bir işaret verilmiş, DC motorun gerçek akım ve hız bilgileri ile önceki bölümde ayrıntılı olarak açıklanan yöntem kullanılarak, tasarlanan gözlemci tarafından kestirimi yapılan DC motor akım ve hız bilgileri karşılaştırılmıştır. Ayrıca gözlemci tarafından kestirim işlemi yapılırken, ayrı referans gerilimleri için bozucu faktörlerin sisteme etkisi incelenmiş, bozucu faktörlere rağmen kestirimi yapılan DC motor akım ve hız işaretlerinin, DC motorun gerçek akım ve hız işaretlerini yüksek doğrulukta takip ettiği görülmüştür. Aşağıda kestirim işleminin nasıl yapıldığı blok diyagramları ile ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

### **3.2. Gerçek Sistem Blok Diyagramı**

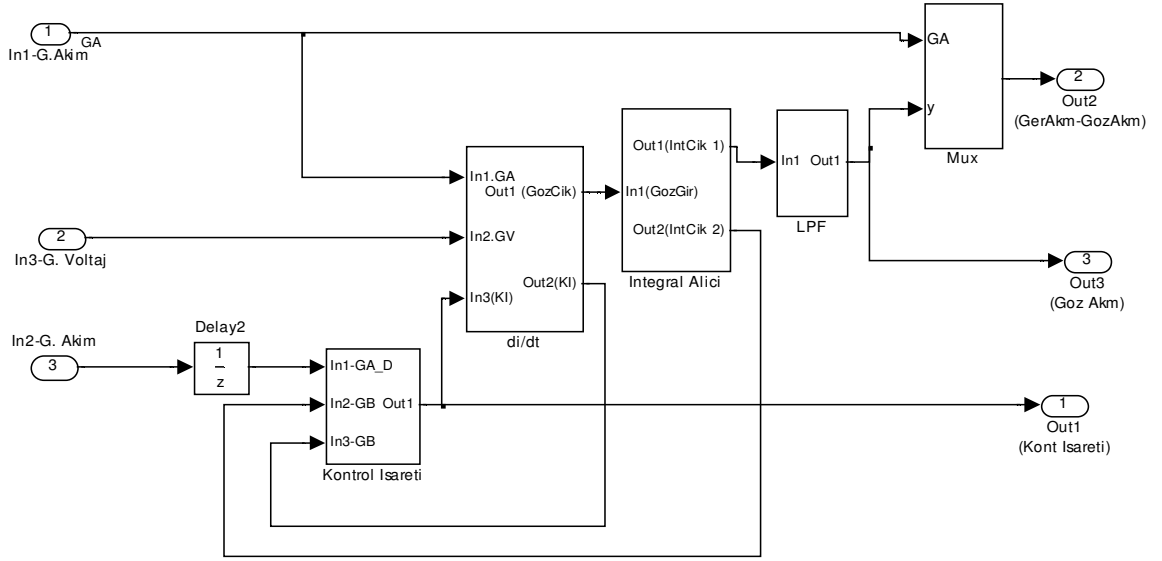
Şekil 3.2’de yer alan gerçek sistem blok diyagramından da görüleceği gibi sisteme bir referans hız işareti uygulanmış, enkoder çıkışından alınan pozisyon bilgisi türev alıcı devreden geçirilerek elde edilen gerçek hız bilgisi ve takometre çıkışından alınan hız bilgisi ile gözlemleyici model çıkışında kestirimi yapılan hız bilgisi alçak geçiren filtre ile yüksek frekanslı bileşenlerinden arındırılarak karşılaştırılmıştır. Aynı zamanda DC motorun çekmiş olduğu gerçek akım işareti, gözlemleyici tarafından kestirimi yapılan akım işareti ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak karşılaştırılan gerçek hız bilgisi, takometre çıkışından alınan hız bilgisi ve gözlemleyici tarafından kestirimi yapılan hız bilgisinin birbirleri ile örtüştüğü, ayrıca gözlemleyici tarafından kestirimi yapılan akım işaretinin, gerçek akım işaretini takip ettiği görülmüştür.



**Şekil 3.2.** Gerçek sistem blok diyagramı

### 3.3. Gözlemleyici Model Blok Diyagramı

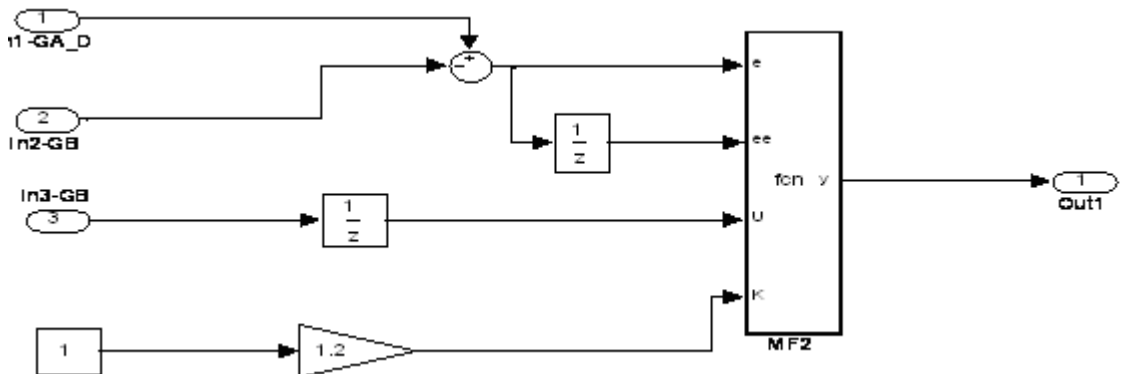
Şekil 3.3'de yer alan gözlemleyici model blok diyagramını incelendiğinde, aşağıda ayrıntılı olarak açıklanacak olan  $di/dt$  ve kontrol işareti blok diyagramları kullanılarak, kontrol işareti ile gözlemci tarafından kestirimi yapılan DC motor akımının türevi  $di/dt$  elde edilmiştir. Elde edilen DC motor akımının türevi ( $di/dt$ ), integral alıcı devreden ve alçak geçiren filtreden geçirilmiş, sonuç olarak kestirimi yapılan DC motor akımı elde edilmiş ayrıca DC motorun çekmiş olduğu gerçek akımla karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.3. Gözlemleyici model blok diyagramı

### 3.4. Kontrol İşareti Blok Diyagramı

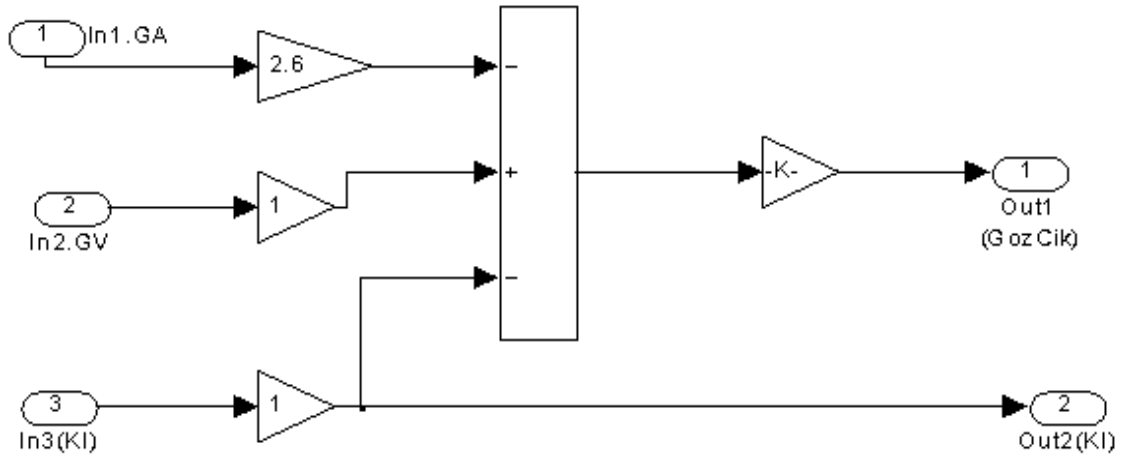
Şekil 3.4’de yer alan kontrol işareti blok diyagramı incelendiğinde, DC motorun çekmiş olduğu gerçek akım ile gözlemleyici tarafından kestirimi yapılan akım karşılaştırılmış ve oluşan hatanın bir fonksiyonu olarak kontrol işareti üretilmiştir.



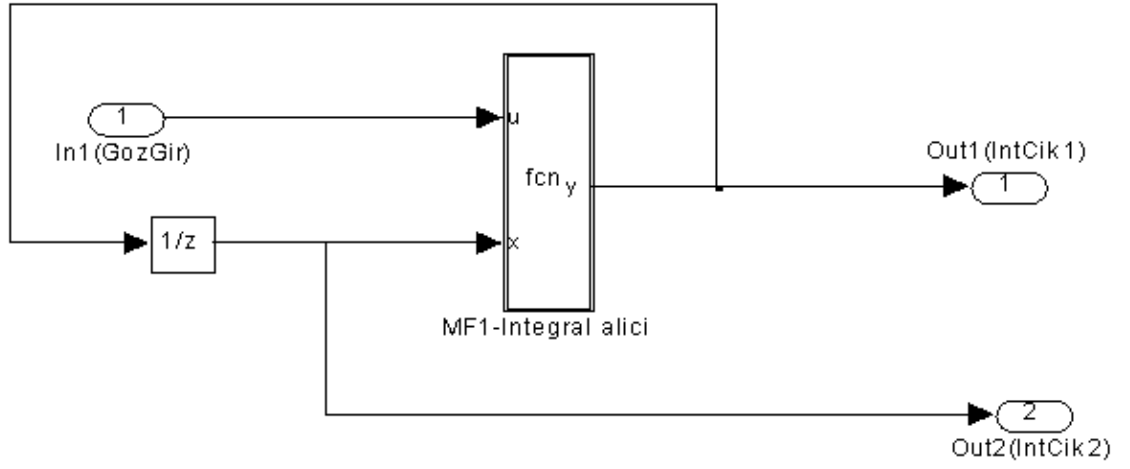
Şekil 3.4. Kontrol işareti blok diyagramı

### 3.5. di/dt ve İntegral Alıcı Devre Blok Diyagramları

Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da yer alan di/dt blok diyagramı ile integral alıcı devre blok diyagramı birlikte incelendiğinde di/dt blok diyagramında DC motor akımına bağlı dinamik denklem ile kontrol işareti kullanılarak gözlemci tarafından kestirimi yapılan DC motor akımının türevi elde edilmiş, integral alıcı devre blok diyagramında ise elde edilmiş olan akımın türevi integral alıcı devre girişine uygulanarak, sayısal integral işlemine tabi tutulmuş, sonuç olarak gözlemci tarafından kestirimi yapılan DC motor akımı elde edilerek, yüksek frekanslı bileşenlerinden arındırılmak üzere alçak geçiren filtreden geçirilmiştir.



Şekil 3.5. Akımın türevi di/dt blok diyagramı



**Şekil 3.6.** İntegral alıcı devre blok diyagramı

## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

### 4.1 Giriş

DC motor akım ve hız kestirimi işlemi için bir dizi deney yapılmıştır. Sistem girişine uygulanan farklı referans işaretler için gözlemleyici tarafından kestirimi yapılan DC motor akım ve hız işaretlerinin, gerçek akım ve hız işaretlerini takip ettiği görülmüştür. Gözlemleyici tarafından yapılan kestirim işleminde bozucu faktörlerin sistem üzerinde oluşturduğu etkiler ayrıca incelenmiştir. Referans işaret olarak sistem girişine, testere dişi, sinüs, kare dalga ve sabit değerli sinyaller uygulanmıştır. Aşağıda bu referans işaretler için ayrı ayrı yapılan deneylere ait sonuçlar ayrıntılı olarak verilmiştir.

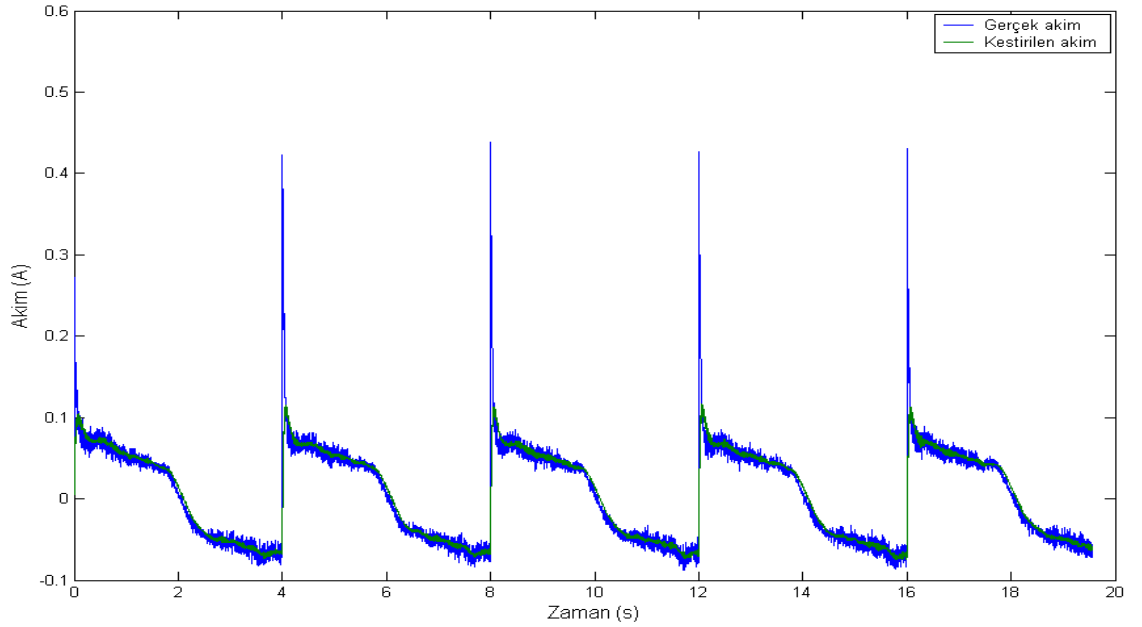
Deneysel çalışmalarda kullanılan DC motora ait parametreler aşağıdaki çizelgede yer almaktadır.

**Çizelge 4.1.** Deneysel çalışmalarda kullanılan DC motora ait parametreler

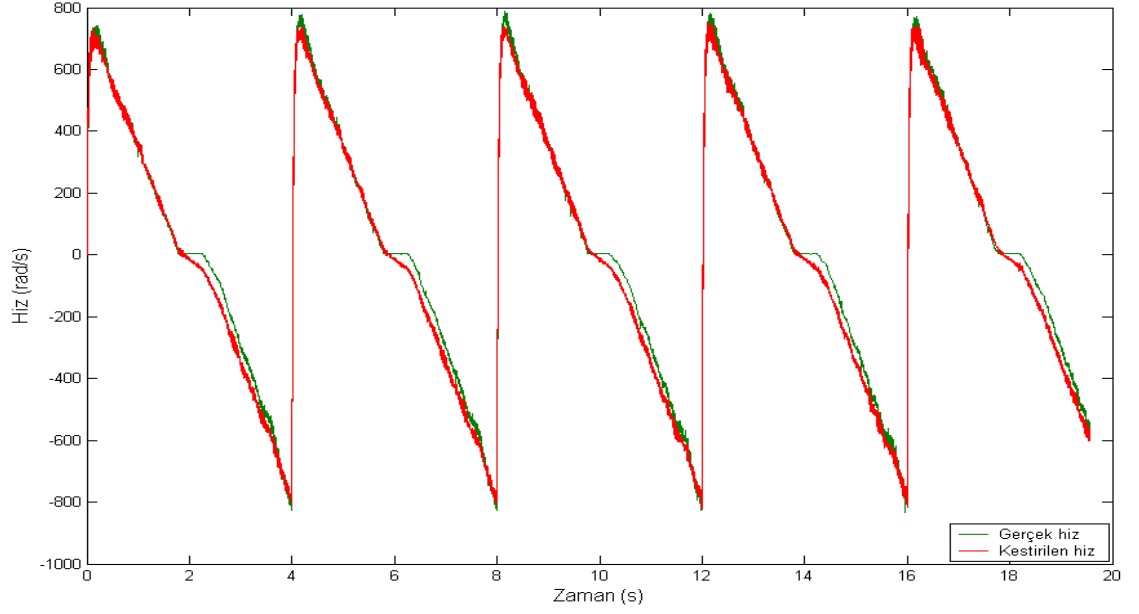
Sembolü	Adı	Değeri	Birimi
$L$	Armatür endüktansı	0.18	mH
$R$	Armatür direnci	2.6	ohm
$J$	Atalet momenti	$3.87 \cdot 10^{-7}$	$\text{kgm}^2$
$T_e$	Motorun ürettiği tork	0.00767	Nm
$\lambda_o$	Ters emk sabiti	0.00767	Vs/rad
$U$	Giriş gerilimi	6	V

## 4.2. Farklı Referans Sinyallerine ait Deneysel Sonuçlar

Deney sistemi girişine sırasıyla referans işaret olarak testere dişi, kare dalga ve sinüs sinyali uygulanmış ve Şekil 4.1, Şekil 4.4 ve Şekil 4.7’de verilen deneysel sonuçlar ile gözlemleyici tarafından kestirimi yapılan DC motor akım işaretlerinin gerçek DC motor akım işaretlerini izlediği gösterilmiştir. Kestirimi yapılan akım işaretlerinin alçak geçiren filtreden (AGF) geçirilmesi ile yüksek frekanslı bileşenlerinden arındırılması sağlanmış, ancak bu işaretlerin belirli noktalarda gerçek akım işaretlerinden bir miktar sapmalarına neden olmuştur.

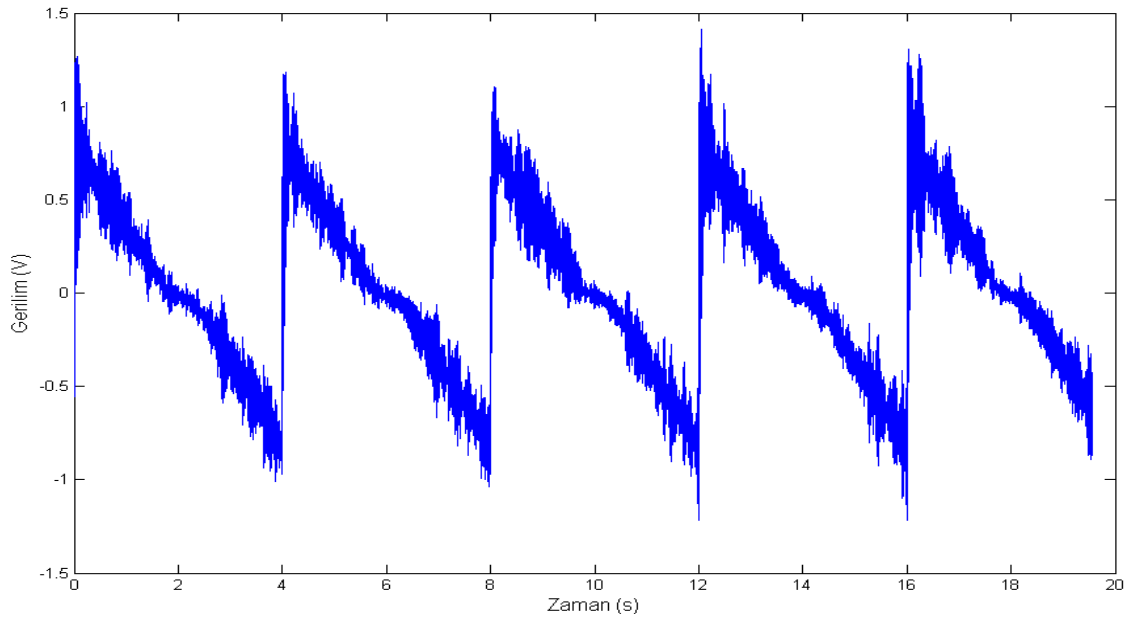


**Şekil 4.1.** Testere dişi sinyali için akım kestirimi grafiği



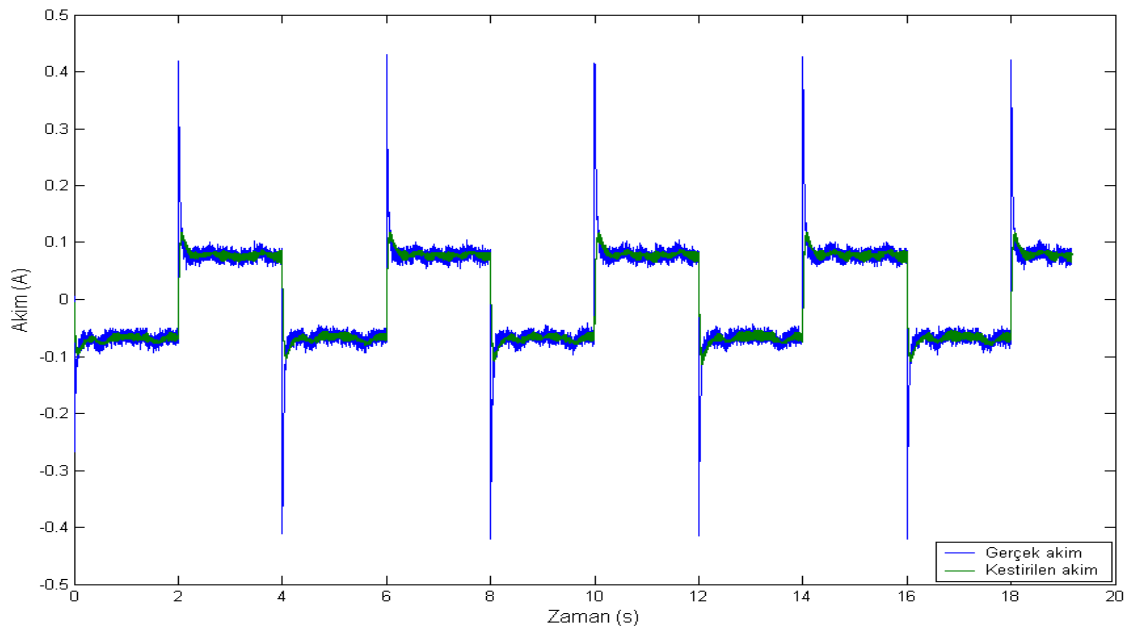
**Şekil 4.2.** Testere dişi sinyali için hız kestirimi grafiği

Şekil 4.2, Şekil 4.5 ve Şekil 4.8'de verilen deneysel sonuçlar, gözlemleyici tarafından kestirimi yapılan hız işaretlerinin DC motor gerçek hız işaretlerini büyük doğrulukta takip ettiğini göstermektedir.

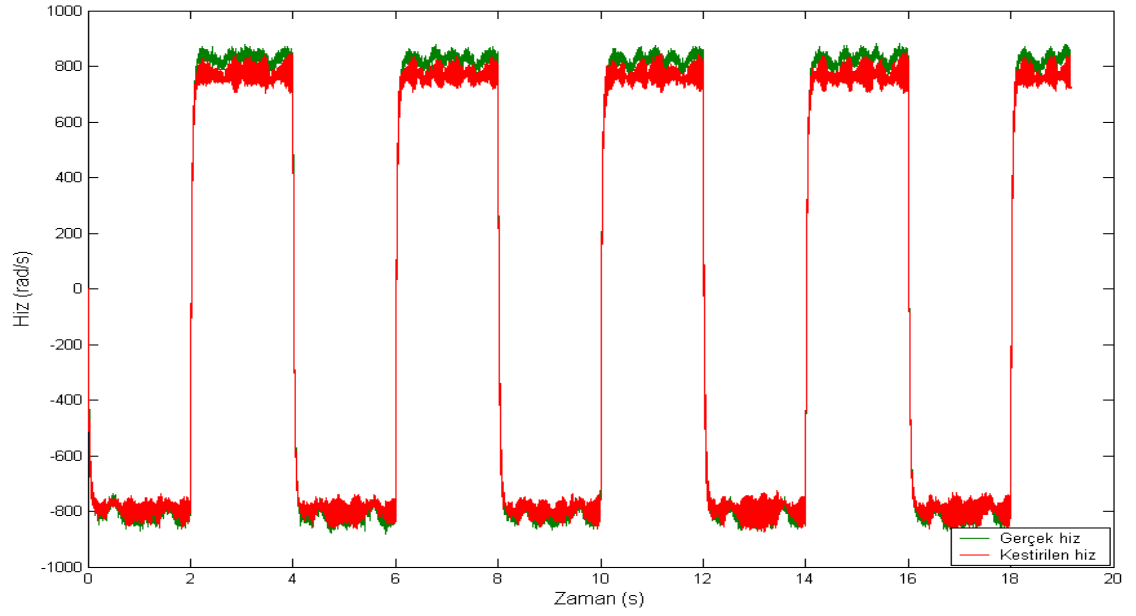


**Şekil 4.3.** Testere dişi sinyali için kontrol işareti grafiği

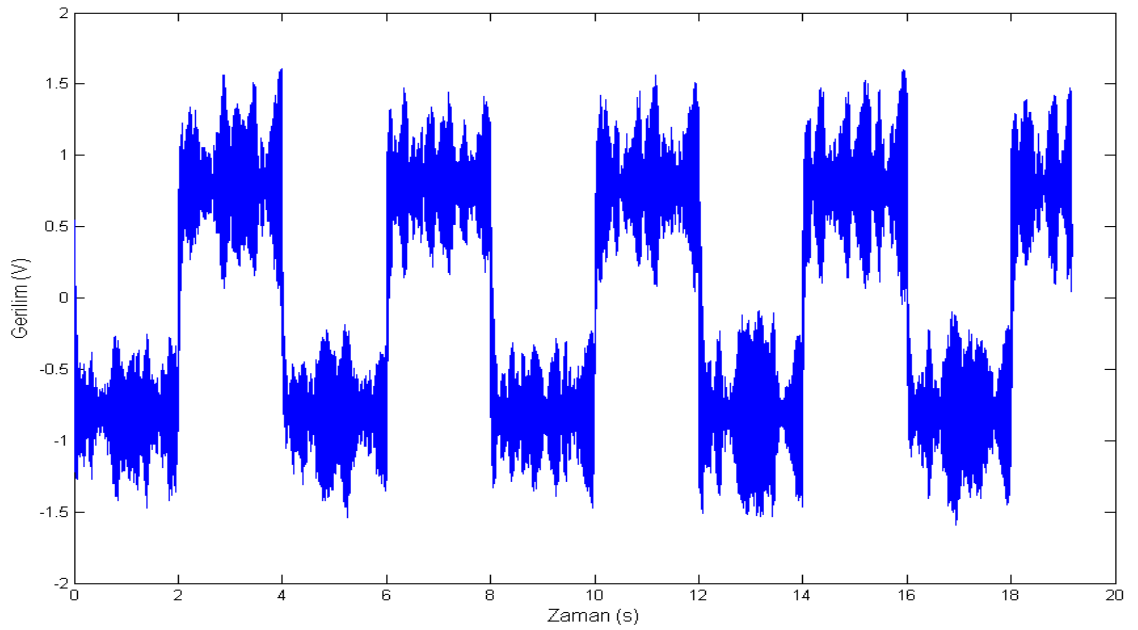
Kontrol işareti deney sistemi girişine uygulanan referans işarete göre sistemi yönlendirerek, gözlemleyici tarafından DC motor akım ve hız kestirimi yapılırken önemli bir rol almaktadır. Referans işaretler olarak deney sistemi girişine sırasıyla testere dişi, kare dalga ve sinüs sinyalleri uygulanarak, Şekil 4.3, Şekil 4.6 ve Şekil 4.9’da yer alan deneysel sonuçlar ile kontrol işaretlerinin referans işaretlerle uyum içinde oldukları gösterilmiştir.



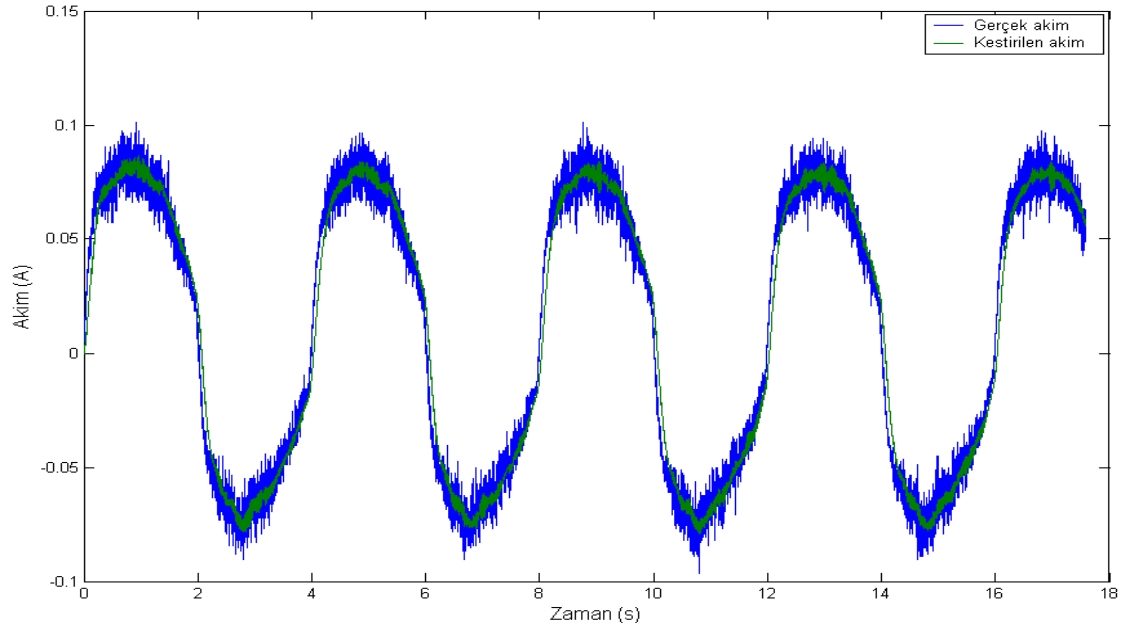
**Şekil 4.4.** Kare dalga sinyali için akım kestirimi grafiği



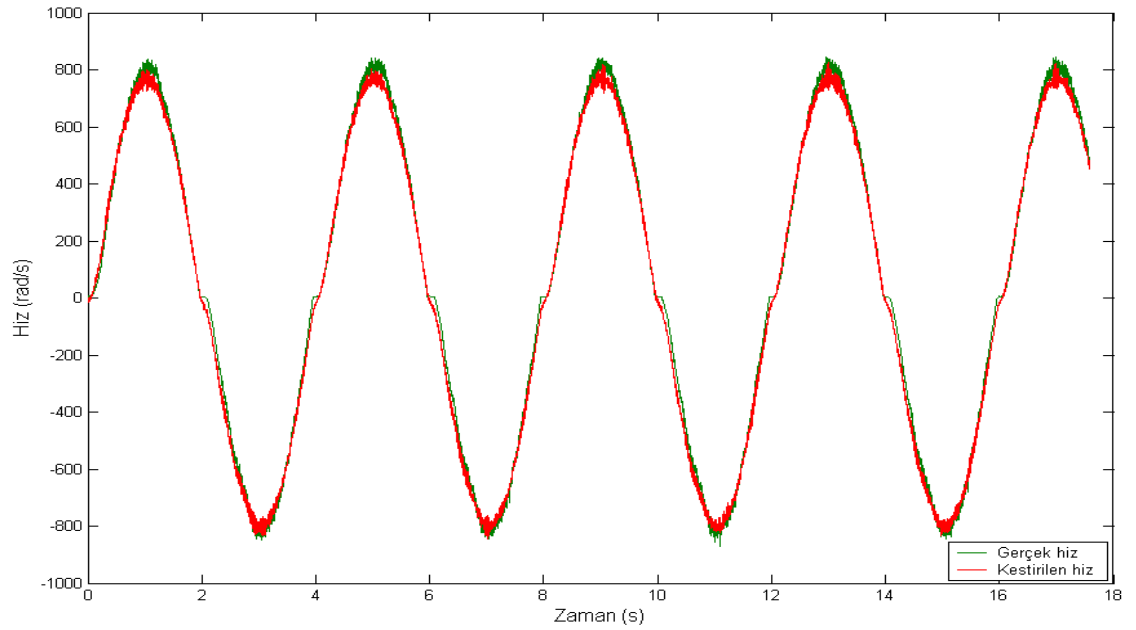
Şekil 4.5. Kare dalga sinyali için hız kestirimi grafiği



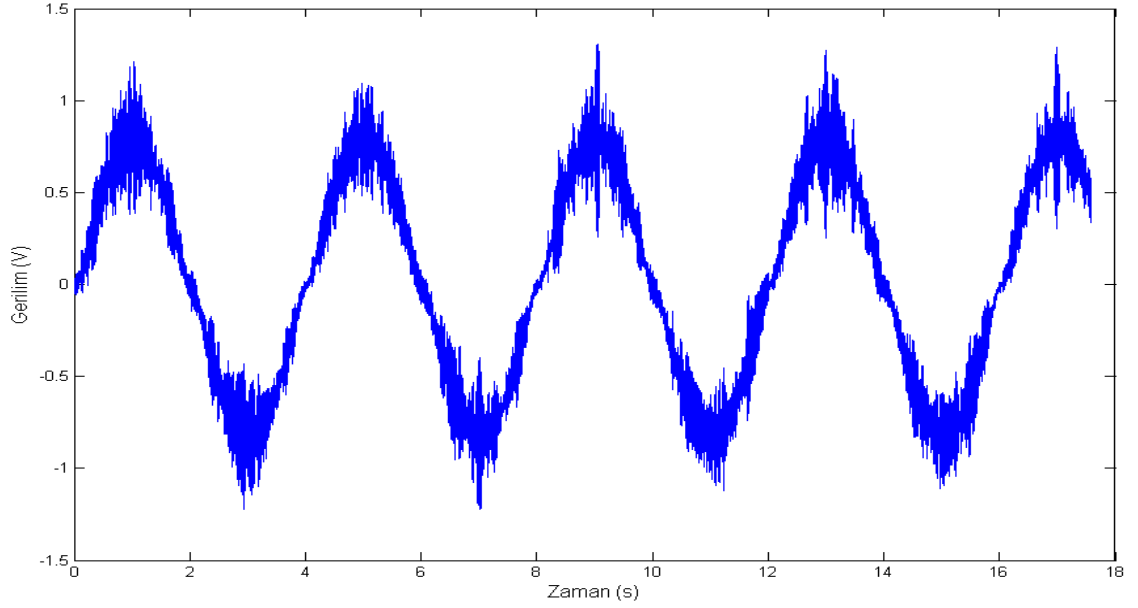
Şekil 4.6. Kare dalga sinyali için kontrol işareti grafiği



Şekil 4.7. Sinüs sinyali için akım kestirimi grafiği



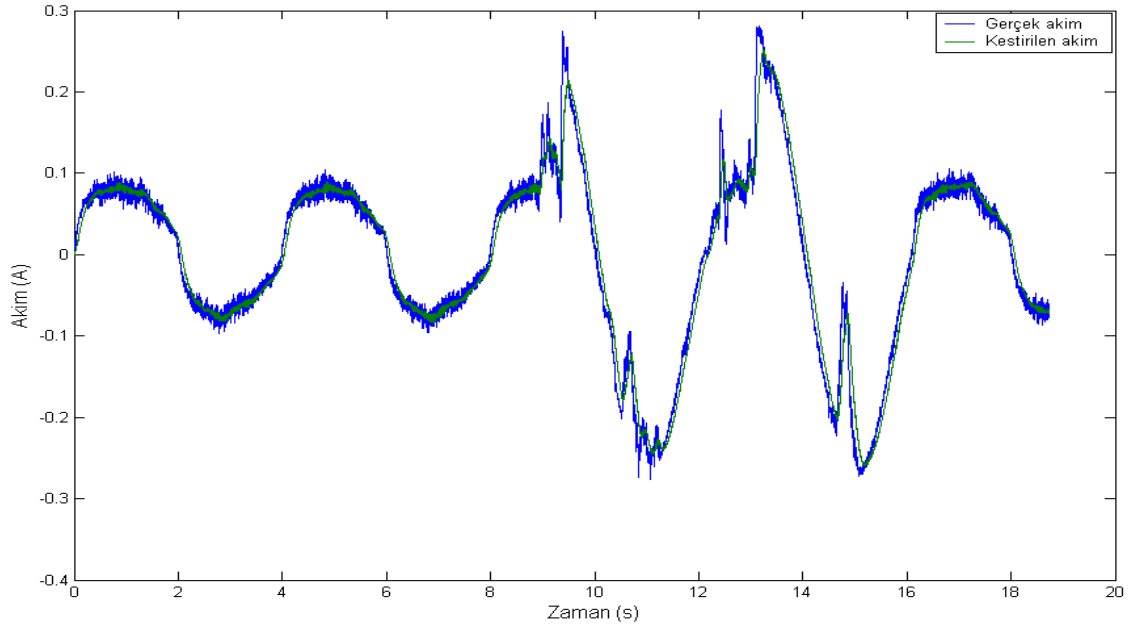
Şekil 4.8. Sinüs sinyali için hız kestirimi grafiği



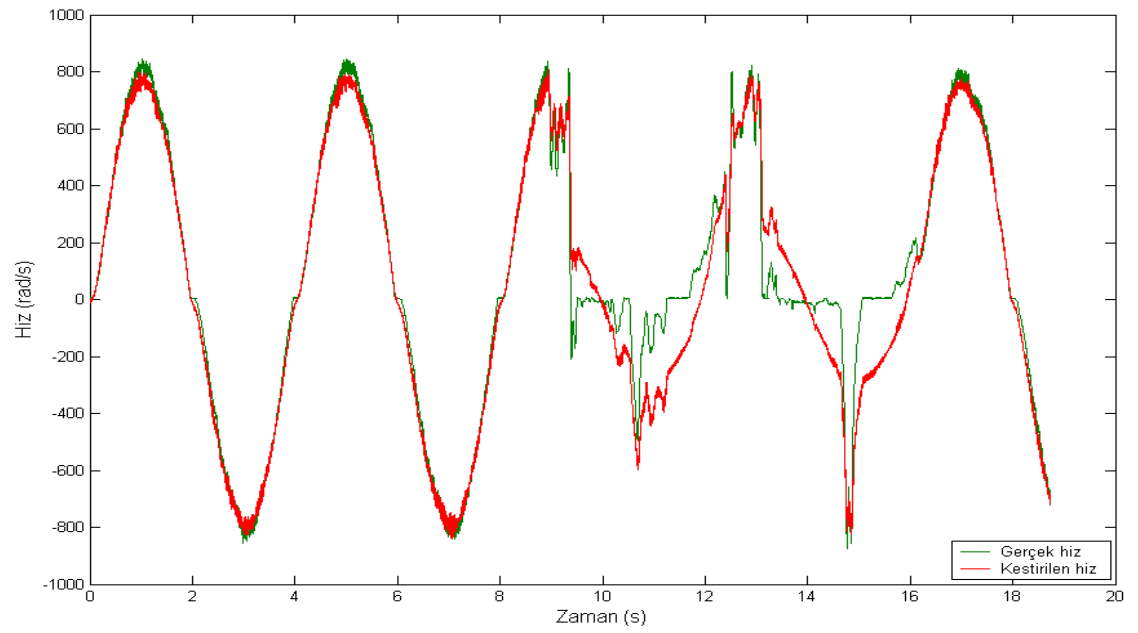
**Şekil 4.9.** Sinüs sinyali için kontrol işareti grafiği

### 4.3. Bozucu Etki Altında Elde Edilen Deneysel Sonuçlar

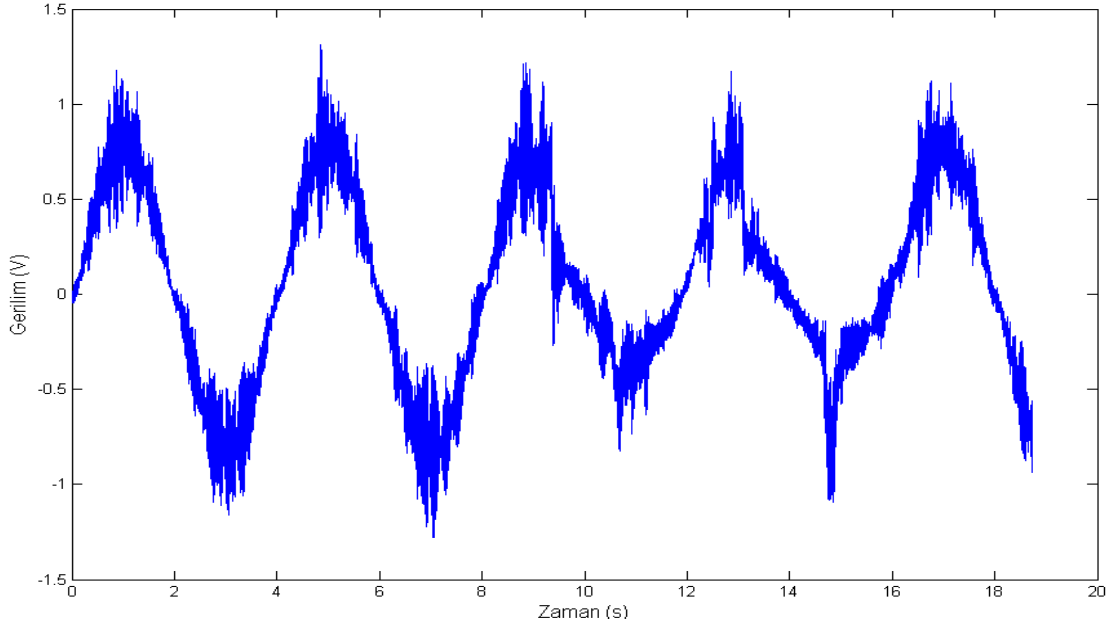
Referans işaret olarak deney sistemi girişine sinüs sinyali uygulanırken, sisteme dışarıdan bozucu etki uygulanmış ve Şekil 4.10, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de yer alan deneysel sonuçlar elde edilmiştir. Buna göre Şekil 4.10 incelendiğinde gözlemleyici tarafından kestirimi yapılan DC motor akımının bozucu faktörlere rağmen gerçek DC motor akımını büyük bir doğrulukta takip ettiği gösterilmiştir. Şekil 4.11’de bozucu etki altında gözlemleyici tarafından kestirimi yapılan DC motor hızı üzerinde AGF zaman sabitinden kaynaklanan gecikmeden dolayı olumsuz bir etki oluştuğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.12’de ise bozucu faktörlerin kontrol işareti üzerindeki etkisi gösterilmiştir.



**Şekil 4.10.** Sinüs sinyalinin bozucu etki altında akım kestirim grafiği

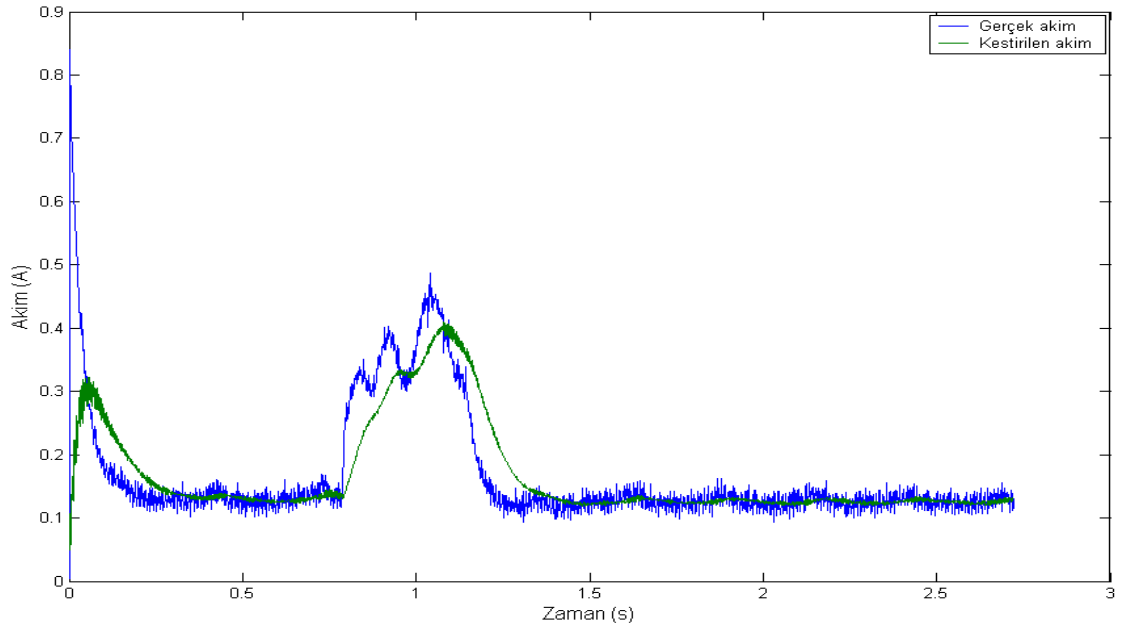


**Şekil 4.11.** Sinüs sinyalinin bozucu etki altında hız kestirimi grafiği

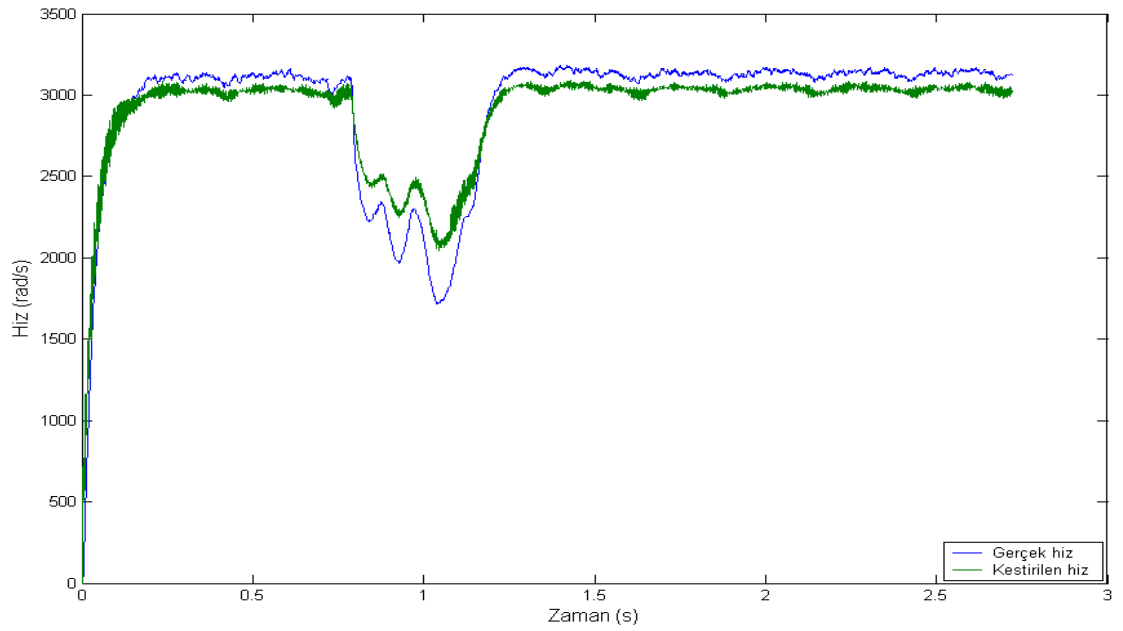


**Şekil 4.12.** Sinüs sinyalinin bozucu etki altında kontrol işareti grafiği

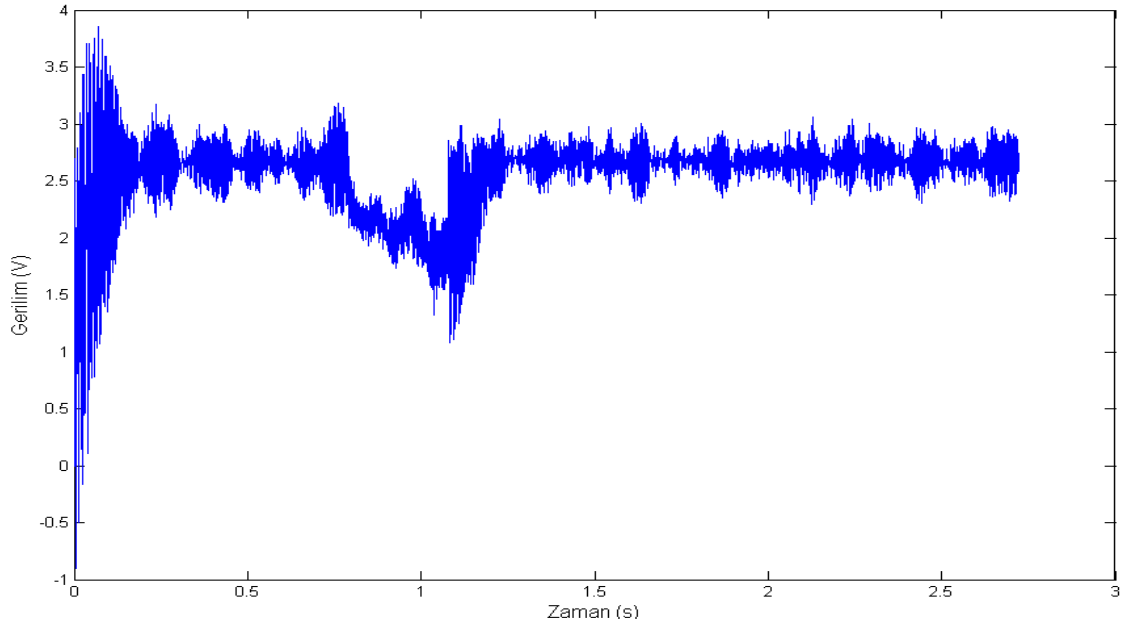
Referans işaret olarak deney sistemi girişine sabit değerli bir sinyal uygulanırken, sisteme dışarıdan bozucu etki uygulanmış ve Şekil 4.13, Şekil 4.14 ve Şekil 4.15’de yer alan deneysel sonuçlar elde edilmiştir. Buna göre Şekil 4.13’de kestirilen akımın dar bir zaman aralığında meydana gelen yüksek frekanslı değişimleri takip etmekte zorlandığı görülmektedir. Şekil 4.14 incelendiğinde ise gözlemleyici tarafından kestirimi yapılan DC motor hızı üzerinde AGF zaman sabitinden kaynaklanan gecikmeden dolayı olumsuz bir etki oluştuğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.15’de ise bozucu etki altındaki kontrol işareti gösterilmiştir.



**Şekil 4.13.** Sabit değerli sinyalin bozucu etki altında akım kestirimi grafiği



**Şekil 4.14** Sabit değerli sinyalin bozucu etki altında hız kestirimi grafiği



**Şekil 4.15.** Sabit değerli sinyalin bozucu etki altında kontrol işareti grafiği

## 5. SONUÇ ve TARTIŞMA

DC motor akım ve hız kontrolü ile yük torku ve açısal ivme kestirimine kayan kipli denetim yöntemi ayrı ayrı uygulanmış, MATLAB ortamında yapılan simülasyonlarla kontrol ve kestirim işlemine ait sonuçlar verilmiştir. Algılayıcısız hız kontrolü için gözlemci tasarlanarak, DC motor hız kestirimi yapılmış ve deneysel sonuçlar ile kestirim işleminde yapılan hız hatasının makul değerlerde olduğu gösterilmiştir.

Kuramsal Temeller bölümünde ayrıntılı olarak açıklanan yöntemler, simülasyon ortamında denenmiş ve bu yöntemlere ilişkin bir dizi deney yapılmıştır. Bu deneyler ile DC motor sistemi girişine farklı referans işaretler uygulanmış, akım ve hız kontrolü ile birlikte akım ve hız kestirimi yapılmıştır. Her bir referans işaret için gözlemci tarafından kestirimi yapılan DC motor akım ve hız sinyalinin, gerçek akım ve hız sinyalini takip ettiği deneysel sonuçlar ile gösterilmiştir. Ayrıca bozucu faktörlerin sistemde oluşturduğu etkiler, farklı referans işaretler için ayrı ayrı incelenmiştir.

Kestirimi yapılan DC motor akım ve hız işaretlerinin yüksek frekanslı bileşenlerinden arındırılabilmesi için alçak geçiren filtre (AGF) kullanılmıştır. Ancak AGF, değişimlere hızlı cevap verememe ve sistemde gecikmelere neden olmaktadır. AGF'den kaynaklanan bu durumdan dolayı gözlemci tarafından kestirimi yapılan DC motor akım ve hız işaretlerinin, DC motor gerçek akım ve hız işaretlerinden bir miktar saptığı deneysel sonuçlarda görülmektedir. Sistemin çalışmasını olumsuz etkileyen bu durumun en aza indirgenebilmesi bundan sonraki araştırmalar için bir çalışma olarak önerilebilir.

**KAYNAKLAR**

- Acarly P.P., Al-Tayie J.K., Estimation of speed and armature temperature in a brushed DC drive using the extended Kalman filter, IEEE Proc. Electr. Power Appl., Vol. 144, No.1, January 1997.
- Chen Z., Tomita M., Doki S. and Okuma S., New Adaptive Sliding Observers for Position- and Velocity-Sensorless Controls of Brushless DC Motors, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 47, No.3, June 2000.
- Compos-Delgado D.U., Palacios E. and Espinoza-Trejo D.R., Passivity Based Control of Nonlinear DC Motors Configurations and Sensorless Applications, Industrial Electronics 2007. ISIE 2007. IEEE International Symposium on 4-7 June 2007 Page(s): 3379 – 3384.
- Derdiyok A., Anahtarlamalı Relüktans Motorun Doyma Modelinde Ortak Endüktans Etkilerinin İncelenmesi ve Bulanık ve Kayan Kipli Denetleyicilerle Moment Dalgalanmasının Azaltılması 1997. Şubat 1997 Doktora Tezi YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Gargouri L., Zaafouri A., Kochbati A. and Ksouri M., LQG/LTR control of a direct current motor, Systems, Man and Cybernetics, 2002 IEEE International Conference on Volume 5, 6-9 Oct. 2002 Page(s):5 pp. vol.5.
- Guerreiro M., Foito D. and Cordeiro A., A Microcontroller Sensorless Speed Control of a Direct Current Motor, Industrial Electronics 2007. ISIE 2007. IEEE International Symposium on 4-7 June 2007 Page(s): 1143 – 1146.
- Hacıoğlu Y., Bulanık Mantıklı Kayan Kipli Kontrol Tasarımı ve Robot Yörünge Takibinde Uygulanması, II. Mühendislik Bilimleri Genç Araştırmacılar Kongresi MBGAK 2005 İstanbul 17-19 Kasım 2005.
- Jahmeerbacus M.I., Oolun M.K., Bhurtun C. and Soyjaudah K.M.S., Speed Sensorless Control of a Converter-fed DC Motor, AFRICON, 1999 IEEE Volume 1, 28 Sept.-1 Oct. 1999 Page(s):453-456 vol.1.
- Karadeniz M., İskender İ. ve Yüncü S., Doğru Akım Motor Hızının Uyarlamalı Kutup Yerleştirme Denetimi, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. Cilt 19, No 3, 327-334, 2004.
- Kim E., Lee H. and Park M., Fuzzy Control of a Direct Current Motor System with the Guaranteed Stability, 1999 IEEE International Fuzzy Systems Conference Proceedings August 22-25, 1999, Seoul, Korea.
- Matsui N., Shigyo M., Brushless DC Motor Control without Position and Speed Sensors, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 28, No.1, January/February 1992.
- Mehta S., Chiasson J., Nonlinear Control of a Series DC Motor: Theory and Experiment, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 45, No.1, February 1998.
- Mukherjee K., Sengupta S., Bhattacharya T.K., Bhadra S.N. and Chattopadhyay A.K., Sensorless Operation of a Thyristorized Commutatorless Series Motor Drive, Electrical Machines and Systems, 2001. ICEMS 2001. Proceedings of the Fifth International Conference on Volume 2, 18-20 Aug. 2001 Page(s): 950- 953 vol.2.
- Ohnishi K., Matsui N. and Hori Y., Estimation, Identification and Sensorless Control in Motion Control System, Proceedings of the IEEE, Vol. 82, No. 8, August 1994.
- Tomita M., Senjyu T., Doki S. and Okuma S., New Sensorless Control for Brushless DC Motors Using Disturbance Observers and Adaptive Velocity Estimations, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 45, No.2, April 1998.

- Trusca M., Lazea G. and Dobra P., Effects of the small delays in robotic control systems, 1-4244-0361-8/06/\$20.00©2006 IEEE.
- Utkin V.I., Sliding Mode Control Design Principles and Applications to Electric Drives, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 40, No.1, February 1993.
- Utkin V.I., Guldner J. and She J., 1999. Sliding Mode Control in Electromechanical Systems Taylor and Francis.
- Yuan B., Hu Z. and Zhou Z., Expression of Sensorless Speed Estimation in Direct Current Motor with Simplex Lap Winding, Proceeding of the 2007 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation August 5-8, 2007, Harbin, China.

## ÖZGEÇMİŞ

1977 yılında Erzurum'un Horasan İlçesinde doğan Alper Kürşad ÇOLAK, ilköğrenimini Diyarbakır, orta ve lise öğrenimini Sakarya'da tamamladı. 1995 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nü kazandı ve 1999 yılında aynı bölümden mezun oldu. 2003 yılında TEDAŞ Erzurum İl Müdürlüğünde kamu görevine başladı ve Elektrik Elektronik Mühendisi olarak görevine devam etmektedir.