MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Kayma Mod Kontrol ile Ultrasonik Motor Hız Kontrolü

HÜSEYİN TAŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mekatronik Anabilim Dalı

Mekatronik Programı

DANIŞMAN

Doç. Dr. Mustafa Caner AKÜNER

İSTANBUL, 2018

MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Kayma Mod Kontrol ile Ultrasonik Motor Hız Kontrolü

HÜSEYİN TAŞ

(526213001)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mekatronik Anabilim Dalı

Mekatronik Programı

DANIŞMAN

Doç. Dr. Mustafa Caner AKÜNER

İSTANBUL, 2018

MARMARA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Öğrencisi Hüseyin TAŞ'ın **"Kayma Mod Kontrol ile Ultrasonik Motor Hız Kontrolü"** başlıklı tez çalışması, 08/02/2018 tarihinde savunulmuş ve jüri üyeleri tarafından başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri

Doç.Dr. Mustafa Caner AKÜNER (Danışman)

Marmara Üniversitesi ..... (İMZA).....

Yrd.Doç.Dr. İsmail TEMİZ (Üye)

Marmara Üniversitesi ..... (İMZA).....

Yrd.Doç.Dr. Fatih YALÇIN (Üye)

Gedik Üniversitesi ..... (İMZA).....

ONAY

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 19/02/2018 tarih ve 2018/06-02 sayılı kararı ile Hüseyin TAŞ'ın Mekatronik Programında Yüksek Lisans derecesi alması onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Prof. Dr. Bülent EKİCİ

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca beni yalnız bırakmayan, beni çalışmaya teşvik eden, en kıymetli zamanlarını benden esirgemeyen ve yolumu aydınlatan değerli Tez Danışmanım Sayın Doç. Dr. Mustafa Caner AKÜNER' e;

Bilgilerini ve tecrübelerini benimle paylaşan ve çalışmalarım boyunca yardımlarını esirgemeyen değerli arkadaşım Korhan KAYIŞLI' ya;

Her konuda beni yalnız bırakmayan ve benden hiç bir zaman umutlarını kaybetmeyen annem, babam ve kardeşlerime,

Azmimin ve gayretlerimin nedeni en değerli varlığım eşim Pınar TAŞ ve oğlum Kerem TAŞ'a

Teşekkürlerimi sunarım.

Ocak, 2018 **Hüseyin TAŞ**

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR i

ÖZET v

ABSTRACT vii

SEMBOLLER ix

KISALTMALAR xi

ŞEKİL LİSTESİ xiii

TABLO LİSTESİ xv

1.GİRİŞ 1

1.1 Ultrasonik Motorlar İle İlgili Yürütülen Bilimsel Çalışmalar 2

1.1.1. Genel Bilgiler 3

1.1.2 Piezo Motor Çalışma Prensibi 4

1.1.3 Ultrasonik Motorun Sürme Prensibi 5

1.2 Ultrasonik Motor Çeşitleri 6

2. ULTRASONİK MOTOR DEVRE ANALİZİ 8

2.1 Ultrasonik Motor Eşdeğer Devresi 8

2.2 Ultrasonik Motorun Eşdeğer Devre Parametrelerinin Bulunması ve Matlab Simscape Modelinin Oluşturulması 10

2.2.1 Elektrik Sinyalinin Harekete Dönüşümü ve Modellenmesi 13

2.3 Ultrasonik Motorun Kontrol Uygulaması 15

2.3.1 Transfer Fonksiyonu 15

2.3.2 Logaritmik Eğiriler (BODE Diyagramları) 16

3. KAYMA MOD KONTROL 17

3.1. Kayma Mod Kontrol ile İlgili Tanımlar 17

3.2 Kayma Mod Kontrol Tasarımı 17

3.2.1. Kayan Yüzey Tasarımı 18
3.2.2. Kontrolör Tasarımı 19
3.3 Kayma Mod Kontrolde Çatırdama 21
3.3.1 Sınır Katman Oluşturma Yöntemi 22
4. KONTROL SİMÜLASYONU 23
4.1 Ultrasonik Motorun Basitleştirilmiş Modeli 23
4.1.1 PID Kontrol ve Simülasyonu 23
4.1.1.1 PID Kontrolör Tasarımı 23
4.1.1.2 Ultrasonik Motorun PID Kontrolör ile Kontrol Simülasyonu 25
4.1.2 Kayma Mod Kontrolör Tasarımı 31
4.1.2.1 Ultrasonik Motorun Kayma Mod Kontrol Yöntemi İle Kontrolü 34
SONUÇLAR 43
KAYNAKLAR 47
ÖZGEÇMİŞ 49

ÖZET

Kayma Mod Kontrol ile Ultrasonik Motor Hız Kontrolü

Günümüzde kullandığımız sistemlerin tarihi düşünüldüğünde, elektromekaniksel sistemlerin gelişerek yaygın kullanım alanları oluşmuştur. İhtiyaçlar neticesinde elektrik motorları yaygın hale gelmiştir. Fakat teknolojik gelişmeler, endüstriyel sistemlerde kullanılan motorların boyutlarının küçültülmesi, üretim maliyetlerinin düşürülmesi ve ömürlerinin uzun olması yönündedir. Yeni nesil yürüyen dalga ultrasonik motorları bu bakımdan tercih edilen motorlardandır. Ultrasonik motorlar özellikle küçük yapılı ve bakım maliyetlerinin az olması gereken sistemlerde çokça tercih edilen motorlardandır.

Bu tezde piezomotor firması tarafından üretilen LR17 model ultrasonik motor temel alınarak kayma mod kontrol yöntemi ile sürülmesi Matlab simülasyonu ile incelenmiştir. Simulasyon sonuçları, en yaygın kullanılan sürücülerden biri olan PID kontroller ile yine Matlab ile LR17 model ultrasonik motorun simülasyonu ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Sürücü devrenin tasarım aşamaları ve ilgili parametrelerin seçimi için tahminler yapılmış ve en uygun parametreler bulunmuş ve doğrulukları sistemin cevabı ile test edilmiştir.

ABSTRACT

Ultrasonic Motor Speed Control with Sliding Mode Control

When we think about the history of the systems we use today, electromechanical systems have been developed and widely used. Electric motors became widespread as a result of needs. But technological developments are the downsizing of engines used in industrial systems, the reduction of production costs and the long life span. The new generations of walking wave ultrasonic motors are the preferred engines in this respect. Ultrasonic motors are especially preferred for systems that are small in size and require low maintenance costs.

In this thesis, sliding mode control method based on LR17 model ultrasonic motor produced by piezomotor firm was investigated by Matlab simulation. The simulation results are compared with the results obtained by simulation of PID controls which is one of the most commonly used drivers, and simulation of LR17 model ultrasonic motor with Matlab. Estimates were made for the design stages of the drive train and the selection of the relevant parameters, the most suitable parameters were found, and their accuracy has been tested with the response of the system.

SEMBOLLER

V	: Uygulanan voltaj
Δx	: Piezobacak konum değişimi
Δy	: Piezobacak boyundaki değişim
d_{33}	: Piezo elektrik şarj sabiti
L	: Piezobacak uzunluğu
D	: Piezobacağın yarıçap genişliği
u_1	: Sürücü gerilimi 1
u_2	: Sürücü gerilimi 2
t	: Piezo elektrik tabaka sertlik sabiti
C_d	: Blokaj kapasitansı
R_d	: Blokaj Direnci
R	: İç direnç
C_m	: Piezo seramik kapasitansı
L_m	: Piezo seramik endüktansı
Y_d	: Blokaj admitansı
Y_m	: Hareket admitansı
k	: Kutuplaj katsayısı
ω	: Açısal frekans
f_2	: Rezonans frekansı
K	: Yay sabiti
m	: Kütle
I	: Devre Akımı
u	: Kontrol sinyali
e	: Hata miktarı
s	: Kayma Yüzeyi

KISALTMALAR

USM	: Ultrasonik Motor
PZT	: kurşun-zirkonyum-titanyum
TF	: Transfer Fonksiyonu
PMS	: Piezo Motor Sürücü

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1.2. 1 Ultrasonik motorun yapısı 4
Şekil 1.1.2. 2 Piezo motor..... 5
Şekil 1.1.2. 3 Sinüzoidal gerilim ile ultrasonik motorun hareketi 5

Şekil 1.1.3. 1 Piezo bacak hareketi 6

Şekil 2.1. 1 USM' nin eşdeğer devresi 8

Şekil 2.2. 1 Motorun frekansa bağlı konum (a) - hız (b) grafikleri 12

Şekil 2.2.1. 1 USM' nin Matlab Simscape modeli 14

Şekil 3.3. 1 Kayan yüzey ve çatırdama 22

Şekil 4.1.1.1. 1 USM'nin PID kontroller ile simulink tasarımı 23
Şekil 4.1.1.1. 2 Matlab Simulink PID araç kutusu 24
Şekil 4.1.1.1. 3 Matlab Simulink PID katsayıları ayarlama penceresi 25

Şekil 4.1.1.2. 1 Matlab Simulink USM'nin PID tasarımı sabit genlik giriş 25
Şekil 4.1.1.2. 2 48 Volt sabit genlik - USM'nin PID kontrol yöntemi ile hızının zamana bağlı değişimi 26
Şekil 4.1.1.2. 3 140 Volt sabit genlik - USM'nin PID kontrol yöntemi ile hızının zamana bağlı değişimi 27
Şekil 4.1.1.2. 4 Matlab Simulink USM'nin PID tasarımı step genlik giriş..... 27
Şekil 4.1.1.2. 5 48 Volt step genlik - USM'nin PID kontrol yöntemi ile hızının zamana bağlı değişimi 28
Şekil 4.1.1.2. 6 140 Volt step genlik -USM'nin PID kontrol yöntemi ile hızının zamana bağlı değişimi 29
Şekil 4.1.1.2. 7 Matlab Simulink USM'nin PID tasarımı sinyal jenaratörlü değişken genlik giriş 29
Şekil 4.1.1.2. 8 Sinyal jenatartörü ile üretilen sinyal - USM'nin PID Kontrol yöntemi ile hızının zamana bağlı değişimi (yükselen kenar) 30
Şekil 4.1.1.2. 9 Sinyal jenatartörü ile üretilen sinyal - USM'nin PID Kontrol yöntemi ile hızının zamana bağlı değişimi (düşen kenar) 31

Şekil 4.1.2.1. 1 Kayma Mod Kontroller simulink tasarımı 34

Şekil 4.1.2.1. 2 Matlab Simulink USM'nin Kayma Mod Kontrol Tasarımı sabit genlik giriş 35

Şekil 4.1.2.1. 3 48 Volt sabit genlik - USM'nin Kayma Mod Kontrol yöntemi ile hızının zamana bağlı değişimi 35

Şekil 4.1.2.1. 4 140 Volt sabit genlik - USM'nin Kayma Mod Kontrol yöntemi ile hızının zamana bağlı değişimi 36

Şekil 4.1.2.1. 5 140 Volt sabit genlik - USM'nin Kayma Mod Kontrol yöntemi ile hızının zamana bağlı değişimi ($\lambda = 560$) 37

Şekil 4.1.2.1. 6 Matlab Simulink USM'nin Kayma Mod Kontrol tasarımı step genlik giriş 37

Şekil 4.1.2.1. 7 48 Volt step genlik - USM'nin Kayma Mod Kontrol yöntemi ile hızının zamana bağlı değişimi 38

Şekil 4.1.2.1. 8 140 Volt step genlik - USM'nin Kayma Mod Kontrol yöntemi ile hızının zamana bağlı değişimi) 39

Şekil 4.1.2.1. 9 140 Volt step genlik - USM'nin Kayma Mod Kontrol yöntemi ile hızının zamana bağlı değişimi ($\lambda = 560$ 39

Şekil 4.1.2.1. 10 Matlab Simulink USM'nin Kayma Mod Kontrolör tasarımı sinyal jeneratörlü değişken genlik giriş 40

Şekil 4.1.2.1. 11 Sinyal jenatartörü ile üretilen sinyal - USM'nin Kayma Mod Kontrol yöntemi ile hızının zamana bağlı değişimi (düşen kenar) 41

Şekil 4.1.2.1. 12 Sinyal jenatartörü ile üretilen sinyal - USM'nin Kayma Mod Kontrol yöntemi ile hızının zamana bağlı değişimi (yükselen kenar) 41

Şekil 4.1.2.1. 13 Sinyal jenatartörü ile üretilen sinyal - USM'nin Kayma Mod Kontrol yöntemi ile hızının zamana bağlı değişimi (düşen kenar, $\lambda = 150$) 42

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.2.1. 1 Ultrasonik motorun enerji sabiti K değerleri 14

1.GİRİŞ

Günümüzde robot ve otomotiv uygulamalarında servo sistem olarak özel ilgi çeşitli motorlar kullanılmaktadır. Endüstrideki gelişmelere paralel olarak motorların yüksek hız, yüksek moment, küçük boyut ve uzun ömürlü olmaları istenmektedir. Bu sebeplerden dolayı yeni motor tasarımları geliştirilmeye çalışılmaktadır. Ayrıca yarı iletken teknolojisinin gelişmesi sonucunda sürme devrelerinin daha ucuza sağlanabilmesi de motor tasarımlarına hız verilmesinde etkili olmaktadır. Yeni olarak geliştirilen ve yapısında piezo seramik malzemelerin kullanıldığı motorlara piezoelektrik motor veya ultrasonik motor (USM) denilmektedir.

Piezo seramik parça üzerine uygulanan uygun alternatif gerilim neticesinde elde edilen titreşimi, yapısında bulunan hareketli parçaya sürtünme kuvveti ile aktararak çalışan motorlara "Piezo-elektrik ultrasonik motorlar" denir. Ultrasonik denilmesinin nedeni ise bu motorların 20 KHz üzerindeki frekanslarda (ultrasonik frekans bölgesinde) çalışmasıdır [1].

Piezo seramik etkinin ilk ispatı Pierre Curie ve Jacques Curie kardeşler tarafından 1880 yılında yapılmıştır. Titreşim ve sürtünme kuvveti ile çalışan motor fikri 1942 yılında Alfred L. W. Williams ve Walter J. Brown tarafından düşünülmüştür. 1982 yılında da T. Sashida tarafından bu motor geliştirilmiş ve piezo seramik malzemenin yüzeyi dilimli şekilde metal elektrotlarla kaplanmış ve bu halkaların aralarında 90 derece faz farkı olan iki alternatif sinyalin uygulanması ile yürüyen dalga tipi ultrasonik motor elde edilmiştir [2].

Uygulamalarda kuvars, turmalin ve Rochelle tuzu gibi doğal monokristal malzemelerin piezo seramik etkisi nispeten az olmasından dolayı baryum titanat ($BaTiO_3$) ve kurşun zirkonat titanat (PZT) olarak polikristal ferroelektrik seramikler büyük yer değiştirmelere ya da daha büyük elektrik gerilimlerinin ortaya çıkması tercih sebebidir. PZT piezo seramik malzemeler çok çeşidi mevcuttur ve en yaygın aktüatör veya sensör uygulamalarında kullanılır.[3] Düşük hızlarda yüksek moment sağlama, gürültüsüz çalışma, elektromanyetik gürültülerden etkilenmeme, yüksek tutma momenti ve kısa sürede kararlı tepkilerinden dolayı zaman kaybının istenmediği yerlerde otomotiv sanayisinde enjeksiyon ve yanma sistemlerinde, fotoğraf makinelerinin ve kameraların lenslerin odaklanmasında, endüstriyel uygulamalarda, uzay uygulamalarında, robot kollarının hareket ettirilmesinde ve mikro boyutları nedeni ile tıp alanında mikro cerrahi, endoskopi gibi tıbbi müdahalelerde kalp ve damar cerrahisinde ve hastalıklarının tedavisi gibi uygulamalarda yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Boyutlarının küçük olması direkt sürülebilmesi, sürtünmelerden dolayı çalışmadığı durumlarda bulunduğu konumu koruması avantajları tercih edilmelerine sebeptir [1,4,5,6].

USM'lerin sürme sistemleri yüksek frekanslarla sürtünme kuvveti ve mekanik titreşim oluşturma düzeni üzerine kurulu olması dinamik karakteristiklerinin lineer olmamasına sebeptir. Ayrıca parametreleri çalışma ortamı ve şartlarına bağlıdır. USM'nin yapısında bulunan PZT'nin ortam sıcaklığından etkilenmesi en önemli dezavantajıdır [7]. Bu nedenlerden dolayı USM'nin matematiksel modellenmesi oldukça güçleşmektedir [8]. Piezo seramik elemanı sürmek yüksek kapasitanstan dolayı zordur. Bundan dolayı, motorun sürme frekansında rezonans sağlayacak bir frekans elde etmek için kapasitansa seri veya paralel endüktans bağlanması tercih edilmektedir. Bu şekildeki yaklaşım piezo seramik başlatıcının sürülmesi ve motorun çalışması için kolaylık sağlar. USM' nin uygun bir şekilde sürülmesi için seri-rezonans evirici ve paralel rezonans eviriciler kullanılmaktadır [9].

1.1 Ultrasonik Motorlar İle İlgili Yürütülen Bilimsel Çalışmalar

Ultrasonik titreşimler kullanılarak bir piezo seramik parçada sürtünmeli işletme gücü üreten motora USM denir. Son yıllarda geliştirilmeye başlanan USM' lerin yüksek tutma momenti, düşük hızda yüksek moment, sessiz çalışma, küçük boyut ve elektromanyetik parazitlerden etkilenmeme gibi önemli özellikleri vardır. Bu özellikleri nedeni ile ultrasonik motorların kullanım alanları gün geçtikte artmaktadır. Bu nedenle motorların avantaj ve dezavantajlarının tespiti ve karakteristiğini anlamaya yönelik bilimsel çalışmalar yapılmaktadır.

H. Hirata ve S. Ueha 1993 yılında USM' nin yük karakteristiği üzerine bilimsel çalışmalarda bulunmuşlardır. Yük karakteristiğinin performans değerlendirmesi üzerine motorun matematiksel modelini çıkartarak çeşitli deneyler yapmıştır ve yapılan çalışmalar ile başarılı sonuçlar elde etmişlerdir [10]. H.Hirata ve S.Ueha 1995 yılında USM için yeni bir model oluşturarak motorun rotoru ile titreşim arasındaki sürtmeyi tahmini gerçekleştirdiler (elastik kontak modeli); ayrıca bu model elektriksel ve mekaniksel parçalar arasındaki ilişkiyi de tahmin etmekte oldukça başarılı olmuştur [11].

T.Senjyu ve K.Uezato USM' nin yük torkunun ve ısınma nedeni ile oluşan hız değişikliklerine karşı önlemler almak için 1994 yılında adaptif hız kontrolü yöntemini geliştirmişlerdir. Bu alanda çeşitli deneyler yaparak başarılı sonuçlar elde etmişlerdir [12]. Senjyu ve arkadaşları tarafından 1997 yılında USM' nin matematiksel modeli üzerinde adaptif kontrolör kullanarak hız denetimini başarılı bir şekilde gerçekleştirmişlerdir, ilerleyen zamanlarda da USM' nin yüzey ısısı ölçümü ile motor kontrolünü gerçekleştirmişlerdir [13-14].

1999 yılında F.J. Lin ve arkadaşları tarafından USM' nin frekans değeri çeşitli deneyler ile bulunmuş olup, motor çalışırken ortaya çıkan ısıyı kompanze edip sabit tork altında motorun hız kontrolünü başarılı bir şekilde gerçekleştirmişlerdir [15].

2000'li yıllarda Hyeung ve arkadaşları tarafından USM' nin frekans kontrol ünitesine ihtiyaç duymadan maksimum hızda hız kontrolü gerçekleştirilmiştir [16].

2003 yılında Chau ve arkadaşları tarafından USM' nin yapısında bulunan zamansal nonlinearty değişimlerin önlenmesine yönelik neurofuzzy metodu ile hız kontrolü gerçekleştirilmiştir [17].

Ultrasonik motorun performansı, çalışma prensibine göre stator ve rotor arasındaki temas yüzeyine bağlıdır ve Zhou ve Qu tarafından bu anlamda yapılan çalışmalarda yeni bir yöntem geliştirmiş olup motorun anma torku ve gerilim-hız ölçümü yapılmıştır [18].

Yukarıdaki çalışmaların yanında doğrusal hareket eden ultrasonik motorlarla ilgili olarak, Roh ve Kwon tarafından doğrusal hareketli USM geliştirilerek öncülük edilmiştir [19].

1.1.1. Genel Bilgiler

Açısal ve doğrusal hareket eden USM' ler olarak iki şekilde üretilirler. Her iki tip için de kontrol sistemleri üzerinde çalışılmaktadır. USM' lerin kontrolleri için yarı iletken malzemelerden oluşan yüksek frekanslı bir sürücü devresine ihtiyaç vardır. USM' lerin yapısında bulunan piezo seramik malzemeyi titreştirmek yüksek kapasitansından dolayı zordur. Bu sebeple ultrasonik motorun sürülebilmesi için kapasitansa paralel veya seri endüktans bağlanır. Böylece motorun sürülebilmesi için gerekli olan frekans elde edilir. Bunun için paralel-rezonans veya seri-rezonans eviriciler kullanılır [20].

USM'lerin sahip olduğu önemli özellikleri:

- Yüksek Moment (tork) çıkışı (Düşük hızda yüksek tork),
- Doğrudan sürülebilme,
- Hız azaltmak için redüktör sistemine ihtiyaç duyulmaz (Değişik hızlarda yüksek torkla çalışma),
- Çalışırlarken elektromanyetik dalga üretmezler ve elektromanyetik dalgalardan etkilenmezler,
- Yüksek Tutma momenti,
- İstenilen konuma hatasız erişim ve Çalışma- durma anlarındaki kontrol karakteristiklerinin stabil olması,
- Standart basit ve küçük bir yapıya sahip olma,
- Düşük hızda yüksek yük altında çalışma,
- Pozisyon kontrolü hatasızdır,
- Elektrik kesintisinde rotor-stator arasındaki sürtünmeden dolayı rotor konumunu korur,

- Lineer motor tasarımı basittir,
- Sessiz çalışma [21-22].

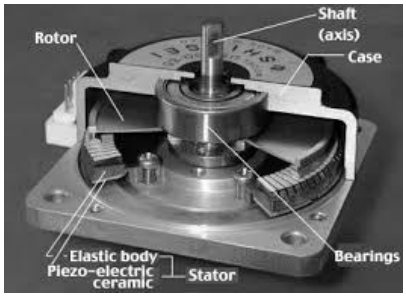
USM'ler birçok avantaja sahip olduğundan kendine birçok kullanım alanı bulmuştur. Bunlar:

- Otomotiv
- Uzay uygulamaları
- Radar sistemleri
- Mürekkep püskürtmeli yazıcılar
- Saatler
- Fotoğraf makineleri
- Bilgisayar disk sürücüleri
- Mikro konumlama tablaları
- Hava ve sıvı pompaları
- Lineer ölçekli enkoderler
- Robot ve mikro robot

1.1.2 Piezo Motor Çalışma Prensibi

Piezo motorların geliştirilmiş çok değişik tipleri bulunmaktadır. En yağın kullanılan tipi yürüyen dalga tipli USM' lerdir. En önemli özellikleri yüksek devir, hızlı tepki süresi doğrudan tahrikli olması ve geri tepmesiz hareket etmesidir. Aralarında 90 derecelik faz farkı bulanan iki yüksek frekanslı gerilimin statora uygulanması ile sürülen bir USM' dur. Motorun diğer doğru akım ve adım motorlara göre farkı rotor ile stator arasındaki sürtünme ile çalışmasıdır.

Şekil 1.1.2.1' de yürüyen dalga tipli USM' nin yapısı görülmektedir. Stator ve rotor olmak üzere iki parçadan oluşmaktadır. Statorun yapısında piezo seramik ve elastik bir malzeme bulunmaktadır. Rotor shaft üzerinden statora preslenmiş iletken malzemeden oluşmaktadır. Stator üzerine uygulanan 90 derecelik faz faklı yüksek frekanslı alternatif gerilim uygulandığında stator üzerinde eliptik dalgala oluşur ve bu oluşan dalgalar sayesinde rotor itilerek hareket başlar [23].

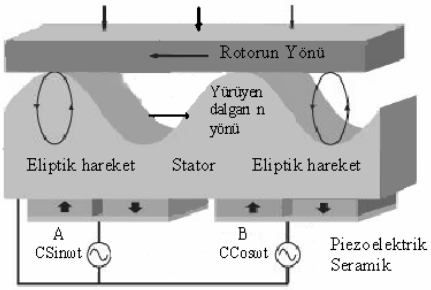


Şekil 1.1.2. 1 Ultrasonik motorun yapısı

Şekil 1.1.2.2' de bir USM görülmektedir. Bu tip motorları sürmek için Piezo Motor Sürücü (PMS) olarak PMD101 sürücü devresi kullanılmaktadır. PMS piezo motorun her uzanıp bükülen bacaklarının besleme sinyallerini kontrol eder. Sürücü bacakları hareketi döner disk boyunca sürtünme yoluyla iletilir.

Şekil 1.1.2. 2 Piezo motor

Piezo motorun sürülebilmesi için yapısında bulunan dört bacağında elektriksel sürülmesi, tahrik edilmesi gerekir. Besleme sinyali ile birlikte bu bacaklar harekete geçer ve bacakların sürtündüğü tahrik diski harekete geçer ve motorda bir döndürme hareketi ortaya çıkar [22]. Motora iki faz sinyali uygulandığında bacak uçlarında uzama ve bükülmeler oluşur. Bu uzama ve bükülmeler bacak uçlarının belli bir eğim ve yörünge hareketinde oluşur. Uygulanan gerilimin şekline göre bu hareket şekillenir rotor uygulanan sinyalin tersi yönde hareket eder ve genellikle uygun olan sinyal sinüzoidal dalgadır. Şekil1.1.2.3' de bu hareketi görebiliriz [4].



Şekil 1.1.2. 3 Sinüzoidal gerilim ile ultrasonik motorun hareketi

1.1.3 Ultrasonik Motorun Sürme Prensibi

USM' nin statorunda oluşan sürtünme dalgası uygulanan gerilimlerin frekansı ve faz açılarının değişimi ile kontrol edilebilir. Dolayısı ile motorun hız kontrolü yapılmış olur [24].

USM' nin hızı dış torka bağlıdır. USM' nin hızı frekans değerinin, bacak uzunluğu değeri kadardır. USM' ler iki şekilde sürülürler.

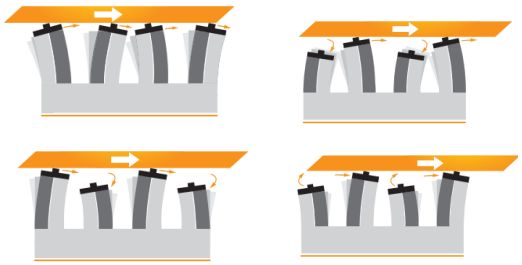
Temas yolu ile sürülmede stator yani bacaklar rotora yani tahrik diskine temas halindedir ve tüm hareketlerinde teması kesinlikle kesmezler. Bu mod da çalışan motorda yüksek hassasiyette hareket sağlanır ve konum kontrolü maksimum verimlikle sağlanır.

Adımlama modun da ise statoru oluşturan bacaklar iki çift olarak hareket sağlarlar. Böylece stator rotora sürekli temas etmez. Hareket sağlanırken sürekli sadece iki çift temas halindedir. Şekil1.1.3.1' de bu durum görülmektedir. Motor genellikle maksimum 48 V ile sürülmektedir. Hareketi sağlayan bacaklardaki uzama ve bükülmeleri matematiksel denklemi aşağıdaki denklem 1.1.3.1 ve denklem 1.1.3.2 ' de verilmiştir.

$$\Delta x=((3d_{33}L^2)(u_1-u_2))/(4tD) \qquad (1.1.3.1)$$

$$\Delta y=((d_{33}L)(u_1-u_2))/(2t) \qquad (1.1.3.2)$$

Yukarıda yer alan denklemlerde yer alan x ve y sapma ve uzama miktarlarındaki değişimi d_{33} piezo seramik şarj sabitini, L bacak uzunluğunu, D bacak yarıçap uzunluğu, t piezo seramik tabaka sertliği u_1 ve u_2 sürme gerilimini simgelemektedir [25].



Sekil 1.1.3. 1 Piezo bacak hareketi

1.2 Ultrasonik Motor Çeşitleri

Motorların kullanıldıkları alanlardaki gelişmelere paralel olarak motorların yüksek moment ve hız, küçük boyutlarda olması, kararlı yapılarda olması ve uzun ömürlü

olması istenmektedir. Bu durumda da sürekli ihtiyaçlar göz önünde bulundurularak yeni motorlar modellenmekte ve var olan motorlar geliştirilmektedir.

USM' ler yukarıda saydığımız nitelikler göz önüne alındığında, geliştirilen ve üzerinde çalışılan motorların başında gelmektedir. USM' lerin çeşitleri aşağıda yer almaktadır.

Duran dalga tipi ultrasonik motorlar:

- Düşük maliyet
- Tek titreşim kaynağı
- Yüksek verim
- Tek yönlü çalışma

bu tip motorlar hareket doğrultusuna göre ikiye ayrılırlar:

- Doğrusal çalışan USM' ler
  - Verimli çalışma %65
  - Rezonans frekansı 98 kHz
  - Dikdörtgen plaka USM' ler
- Döner çalışan USM' ler
  - 1500rpm hız, 0.08 Nm tork ve %80 oranında verimlik ile çalışma
  - Yüksek hız
  - Burulma bağlantı

Yürüyen dalga tipi ultrasonik motorlar:

- İki titreşimli kaynak ile sürme
- İki yönlü çalışma
- Sessiz çalışma

bu tip motorlar hareket doğrultusuna göre ikiye ayrılırlar:

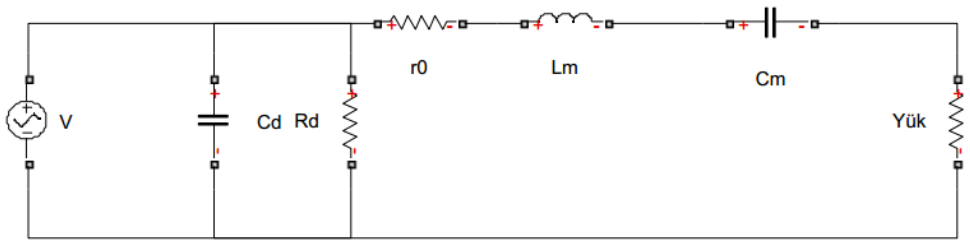
- Doğrusal çalışan USM' ler
  - Bükme Titreşimi ile hareket
  - Her iki ucunda iki piezo seramik elamanı ile çalışma
  - Yük direnci tam performanslı olarak ayarlanır
- Döner çalışan USM' ler
  - Sürtünme kuvveti ile rotor hareket eder
  - İki gerilim kaynağı ile sürülür
  - piezo seramik malzemenin titreşimi stator bacaklarının sert yapısı ile yükseltilir

2. ULTRASONİK MOTOR DEVRE ANALİZİ

2.1 Ultrasonik Motor Eşdeğer Devresi

USM' lerin çalışma koşulları birçok parametrenin değişken olmasından dolayı oldukça karmaşıktır. USM' un eşdeğer devresi geliştirilirken piezo seramik malzemenin etkileri ve matematiksel eşitliklerinden yararlanılmaktadır. Bu tip motorlarda temel olarak iki enerji dönüşümü olur. Elektriksel enerjinin mekanik titreşim enerjisine dönüşmesi ve titreşim enerjisinin de hareket enerjisine dönüşmesi enerji dönüşümleridir. Basit yapılı bir USM' nin eşdeğer devresi, eşdeğer endüktans, eşdeğer kapasitans ve eşdeğer dirençten oluşmaktadır.

Mekanik kavramlar ile birlikte elektriksel kavramlar göz önüne alınarak bir model üzerinde eşdeğer devre tasarlanmalıdır. Şekil 2.1.1' de USM' nin eş değer devresi görülmektedir.



Şekil 2.1. 1 USM' nin eşdeğer devresi

Yukarıdaki devrede USM' nin sadece piezo seramik malzemeden kaynaklanan devre elemanları değil piezo seramik malzemenin birleştirildiği metal motor elamanları da göz ününe alınarak tasarım gerçekleştirilmiştir [26].

Eşdeğer devre modelinde yer alan C_d ve R_d devre elamanları blokaj kapasitansı, blokaj direncidir. Piezo seramik malzemenin dielektrik özelliğinden dolayı oluşan kapasitansı simgeler. Bu kapasitans'tan dolayı oluşan empedansa da blokaj empedansı denir. Tüm iletken malzemelerde olduğu gibi piezo seramik malzemenin yapısından dolayı oluşan histerezis kayıplarından kaynaklanan ve eşdeğer devre üzerinde R ile ifade edilen iç direnç mevcuttur.Cm piezo seramik malzemenin esnekliğini L_m ise piezo elektrik malzemenin ağırlığından dolayı eşdeğer devrede gösterilen devre elamanlarıdır. Katalog bilgilerine göre ideal çalışma şartlarındaki değerler göz önüne alındı.

Şekil 2.1.1' de yer alan eşdeğer devredeki blokaj admitansı Y_d ve hareket admitansı Y_m denklemler aşağıda yer almaktadır [27].

$$Y_d = j\omega C_d \tag{2.1.1}$$

$$Y_m = \frac{1}{R + j\omega L_m + \frac{1}{j\omega C_m}} \tag{2.1.2}$$

Denklem 2.1.2 düzenlenerek adım adım Y_m hareket admitansı Denklem 2.1.5 elde edilir.

$$Y_m = \frac{1}{R + j(\omega L_m - \frac{1}{\omega C_m})} \tag{2.1.3}$$

$$Y_m = \frac{R - j(\omega L_m - \frac{1}{\omega C_m}}{R^2 + j^2\left(\omega L_m - \frac{1}{\omega C^m}\right)^2} \tag{2.1.4}$$

$$Y_m = \frac{r_0}{R^2 + \left(\omega L_m - \frac{1}{\omega C^m}\right)^2} + j\frac{\frac{1}{\omega C_m} - \omega L_m}{R^2 + \left(\omega L_m - \frac{1}{\omega C^m}\right)^2} \tag{2.1.5}$$

USM' nin süren akım değeri :

$$I_m = VY_m \tag{2.1.6}$$

Piezo seramik malzemenin titreşim hızı:

$$\nu = \frac{I_m}{A} \tag{2.1.7}$$

Titreşimin hızı akıma bağlı olmakla birlikte uygulanan voltaj değeri değiştiğinde sistem buna tepki verecektir. Piezo seramik malzemenin kutuplaj katsayısı k aşağıdaki gibi hesaplanır [25].

$$k = \sqrt{\frac{C_m}{C_d + C_m}} \tag{2.1.8}$$

Eşdeğer devrede yer alan LC seri devresindeki açısal frekans w_0:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{m}} \tag{2.1.9}$$

Rezonans frekansı f_r:

$$f_r = \frac{\omega_0}{2\pi} \tag{2.1.10}$$

denklemi ile hesaplanır.

2.2 Ultrasonik Motorun Eşdeğer Devre Parametrelerinin Bulunması ve Matlab Simscape Modelinin Oluşturulması

Yapısal olarak karmaşık olması USM' nin modellenmesini zor kılmaktadır. Yük, sürtünme ve sıcaklık gibi değerler doğrusal olmadığından dolayı USM' nin tepkilerinin farklı olacağını açıkça göstermektedir. Şu ana kadar yapılan USM' nin yapısındaki piezo elektrik malzemenin devre elamanları ile ifade edilmesine yönelik çalışmaları göstermektedir. Bu bölüm üzerinde Matlab üzerinde transfer fonksiyonu (TF) bulunarak motorun modeli oluşturulmak istenmektedir.

Şekil 2.1.1' de yer alan eşdeğer devrenin uygunluğunun incelenmesi için devre Matlab Simscape üzerine oluşturularak devre üzerinde USM' nin açısal hızı ölçülecek ve motorun katalog bilgileri ile karşılaştırıldı. Böylece USM için geliştirilen modelin uygunluğu ölçülmek istenmektedir.

Yapısındaki farklılıklar USM' nin diğer motorlardan farklı kılmaktadır. USM yapısında yer alan piezo seramik malzemeden dolayı araştırmalara konu olmaktadır.

USM' nin TF Şekil 2.1.1' de elde edilen eşdeğer devre üzerindeki devreye göre aşağıdaki aşamalara göre bulunmaktadır.

$$V(s) = \frac{1}{C_1 s} I_1(s) - \frac{1}{C_1 s} I_2(s) \tag{2.1.1}$$

$$RI_2(s) + LsI_2(s) + \frac{1}{C_2 s} I_2(s) + \frac{1}{C_1 s} I_1(s) = 0 \tag{2.1.2}$$

Denklem 2.1.2 düzenlendiğinde Denklem 2.1.3 elde edilir

$$I_2(s)\left[R + Ls + \frac{1}{C_2 s} + \frac{1}{C_1 s}\right] - \frac{1}{C_1 s} I_1(s) = 0 \tag{2.1.3}$$

Denklem 2.1.1 ve Denklem 2.1.3 ile Denklem 2.1.4 deki matris elde edilir.

$$\begin{bmatrix} I_2(s) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_1 s} & -\frac{1}{C_1 s} \\ -\frac{1}{C_1 s} & (R + Ls + \frac{1}{C_2 s} + \frac{1}{C_1 s}) \end{bmatrix} \tag{2.1.4}$$

Denklem 2.1.4 ifadesinden $I_2(s)$ önce Denklem 2.1.5, sonra Denklem 2.1.6' deki gibi formüle edilir.

$$I_2(s) = \frac{\begin{bmatrix} \frac{1}{C_1 s} & V(s) \\ -\frac{1}{C_1 s} & 0 \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} \frac{1}{C_1 s} & -\frac{1}{C_1 s} \\ -\frac{1}{C_1 s} & R+Ls+\frac{1}{C_2 s}+\frac{1}{C_1 s} \end{bmatrix}} \tag{2.1.5}$$

Denklem 2.1.5 düzenlendiğinde I2(s) Denklem 2.1.6'daki gibi elde edilir.

$$I_2(s) = \frac{-\frac{V(s)}{C_1 s}}{\left(R+Ls+\frac{1}{C_2 s}+\frac{1}{C_1 s}\right)\frac{1}{C_1 s} - \frac{1}{{C_1}^2 s}} \tag{2.1.6}$$

Denklem 2.1.7'de görüldüğü üzere çıkışın girişe oranı elde edilir.

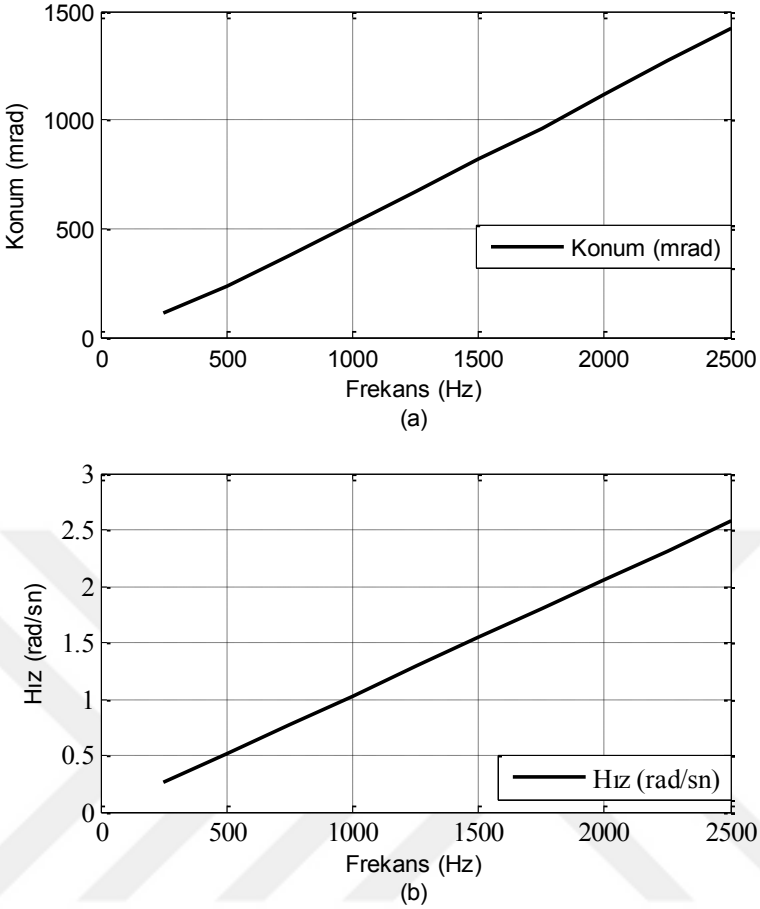
$$\frac{I_2(s)}{V(s)} = -\frac{1}{C_1 s} X \frac{1}{\frac{LsC_1 s + RC_1 sC_2 s + C_1 s + C_2 s}{{C_1}^2 sC_2 s} - \frac{1}{{C_1}^2 s}} \tag{2.1.7}$$

$\frac{I_2(s)}{V(s)}$ ifadesi yerine G(s) yazılarak Denklem 2.1.8 elde edilir.

$$G(s) = -\frac{{C_1}^2 sC_2 s}{sC_1 s + RC_1 sC_2 s + C_1 s + C_2 s - C_2 s} \tag{2.1.8}$$

Denklem 2.1.8 düzenlenerek G(s) Denklem 2.1.9'da görüldüğü üzere elde edilir.

$$G(s) = \frac{C_2 s}{(LsC_2 s + RC_2 s + 1)C_1 s} \tag{2.1.9}$$



Şekil 2.2. 1 Motorun frekansa bağlı konum (a) - hız (b) grafikleri

Tez çalışmasında kullanılan USM' ye ait konum bilgisinin frekansa bağlı değişimi Şekil 2.2.1 (a)'da hız bilgisinin frekansa bağlı değişimi (b)'de gösterilmektedir.

Elde edilen motor eşdeğer devresi üzerinden elde edilen TF sistem tanımlama tekniği ile araştırılarak motor parametreleri tahminleme yöntemi ile bulunur. Bu işlemin sonucunda zaman düzleminde 1 adet giriş, 1 adet çıkış 2 kutuptan oluşmaktadır ve sıfır sayısı 0'dır.

$$G(s) = \frac{C_2 s}{(Lsc_2 s + Rc_2 s)C_1 s} = \frac{2.335e06s}{s^2 + 3085s + 8.222e05}$$

$$C_2 = C_m = 2.335e06 \qquad C_2 = C_d = 8.822e05$$

$$L_m = 8.69954105x10^{-7} \qquad R = 2.683808414x10^{-3}$$

Değerleri modelden elde edilir.

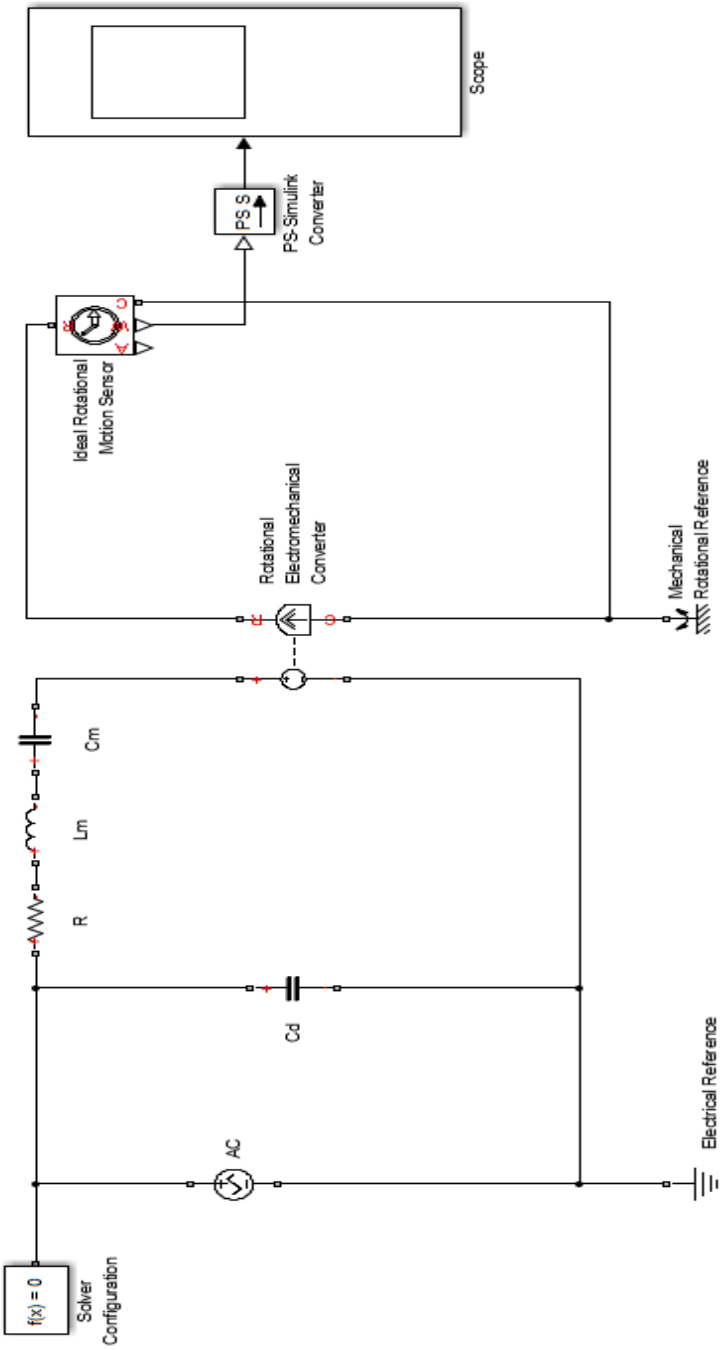
2.2.1 Elektrik Sinyalinin Harekete Dönüşümü ve Modellenmesi

Matlab üzerinde Simscape aracı üzerinde yer alan elektro-manyetik dönüştürücü aracı vasıtası ile elektriksel sinyal mekanik sinyale dönüştürülür. USM' nin dairesel hareketinin açısal hızını hesaplamak içinse Simscape üzerinde yer alan "Idela Rotational Motion Sensor" aracından yararlanılır.

USM' ye uygulanan gerilim ile açısal hızın oranı USM' nin enerji sabitini vermektedir. Buna göre:

Tablo 2.2.1. 1 USM' nin enerji sabiti K değerleri

Frekans (KHz)	Hız(rad/Sn)	K (enerji dönüşün sabiti)
0,25	0,2574	186,48
0,5	0,514	93,38
0,75	0,771	62,25
1	1,025	46,82
1,25	1,2872	37,29
1,5	1,5541	30,89
1,75	1,8	26,67
2	2,01	23,88
2,25	2,31	20,78
2,5	2,574	18,65



Şekil 2.2.1. 1 USM' nin Matlab Simscape modeli

2.3 Ultrasonik Motorun Kontrol Uygulaması

Otomatik sistemler üzerinde kontrol dört kısımda incelenir.

- Doğrusallığına göre;
  - Lineer sistemler
  - Nonlineer sistemler
- İşaretine göre;
  - Sürekli işaretli sistemler
  - Ayrık zaman işaretli sistemler
  - Olası işaretli sistemler
- Giriş - Çıkış sayısına göre;
  - Tek giriş-çıkılı sistemler
  - Çok girişli-çok çıkışlı sistemler
- Zamana göre;
  - Zamana göre değişen sistemler
  - Zamana göre değişmeyen sistemler

Bu tez çalışmasında motorun sistemi lineer- zamanla değişmeyen sürekli işaretli bir sistem olarak incelenmiştir. Matlab programı üzerinde modelimiz tasarlanarak formüller yardımı ile motor analizi yapılmıştır. Ayrıca frekans cevap eğrisi ve bode diyagramı çizdirilerek sistemin kararlılığı incelenir ve modelin doğrulu ispat edilir.

2.3.1 Transfer Fonksiyonu

TF olarak isimlendirilen fonksiyonlar genellikle lineer sistemlerin giriş-çıkış arasındaki ilişkiyi karakterize etmek için kullanılırlar.

TF doğrusal bir sistemin tüm başlangıç parametrelerinin sıfır varsayılarak çıkış fonksiyonun Laplace dönüşümünün giriş fonksiyonunun Laplace dönüşümüne oranı olarak tanımlanır. Buna göre TF ;

$$TF = \frac{\text{Çıkış}}{\text{Giriş}} \; veya \; TF = \frac{\text{Çıkış Fonksiyonunun Laplace Dönüşümü}}{\text{Giriş Fonksiyonunun Laplace Dönüşümü}} \qquad (2.3.1.1)$$

2.3.2 Logaritmik Eğiriler (BODE Diyagramları)

Logaritmik eğiriler logaritmik ölçekte frekansa, açısal hıza karşı çizilen karmaşık fonksiyonun G(jω) bir büyüklük, | G(jω) | ve birde faz açısı < G(jω) eğiri olmak üzere iki eğriden oluşmaktadır. Girişe uygulanan her frekans için ayrı ayrı Vç / Vg oranı hesaplanır ve değişim çizilir ki eğrilerden biri bu şekilde elde edilir. Değişimin daha yüksek bir bantta incelenmesi ancak yatay ve düşey eksenin logaritmik ölçeklendirilmesi ile mümkündür. İkinci eğiri ise çıkış fazı ile giriş fazı arasındaki farkın frekansa bağlı değişimidir.

3. KAYMA MOD KONTROL

Kontrol mühendisleri sistem belirsizliklerine karşı duyarsız kontrolör tasarlamak istemektedirler. Tüm endüstriyel alanlarda olduğu gibi USM' un çalışırken, yapısı itibarı ile ortaya çıkan mekanik etkileşimler, sürtünme ve genleşme gibi kontrol edilen sürecin yapısına bağlı olarak gözlemlenen nedenlerden dolayı USM' nin parametrelerinde değişikliklerin olması kaçınılmazdır.

Kayma mod kontrol uygun bir feedback kontrolü ve bir karar verme kuralından oluşur. Anahtarlama fonksiyonu olarak da adlandırılan karar verme kuralı, sistem durum değişkenlerinin anlık değerlerinden işaret üretir. feedback kontrolörü ise bu işaret yardımı ile sistemi kontrol etmeye çalışır [28]. Kayma mod kontrol yöntemi kapalı çevrim kontrol sistemlerine uygulanmasının amacı hatayı belirli bir hat üzerinde tutmaktır. Söz konusu hat kontrolöre adını veren kayma yüzeyidir. Hata sinyali bu yüzeye doğru itilerek sistemin çıkış sinyali kontrol altına alınmış olmaktadır [29].

Kayma mod kontrolde kontrolör yapısı sistem durumlarını anahtarlama fonksiyonuna doğru sürükleyecek ve burada tutacak şekilde tasarlanır. Kayma mod kontrol yaklaşımı ile iki önemli avantaj elde edilir. Birincisi, anahtarlama fonksiyonu tasarımı ile sistemin dinamik davranışı istenilen davranış modeli olarak belirlenmiş olur. İkinci olarak, kapalı çevrim sistemin davranışı sistem parametrelerindeki değişimlere ve gürültülerden etkilenmez [28].

3.1. Kayma Mod Kontrol ile İlgili Tanımlar

Kayan Yüzey: Kontrol edilmek istenen sisteme göre oluşturulan yüzeydir. Bu yüzeye kayan yüzey denmesinin nedeni, sistem durum yörüngesinin, yüksek frekanslı anahtarlama yapan kontrol işareti tarafından kaydırılıyormuş gibi görünmesidir. Sistemin bu yüzey boyunca hareketi; sistem çıkış davranışını temsil eder.

Ulaşma Fazı: Sistemin sahip olduğu başlangıç noktasından, kayan kipli kontrolün gerçekleşmesi için kayan yüzeye ulaşma durumudur. Ulaşma fazında sistem cevabı, parametre belirsizliklerine ve bozucu etkilere karşı duyarlıdır.

Kayma Fazı: Sistemin kayan yüzeye ulaştıktan sonra o yüzeyde orijine doğru kayma hareketi gerçekleştirdiği durumdur. Kayma fazı boyunca sistem, sistem parametrelerinden bağımsızdır.

3.2 Kayma Mod Kontrol Tasarımı

Kayma mod kontrol tasarımı Kayan Yüzey Tasarımı ve Kontrol Tasarımı olmak üzere iki aşamadan oluşmaktadır.

Belirlenen performans kriterlerini sağlayacak olan kayan yüzey tasarlanması öncelikle yapılması gereken işlemdir. İkinci işlem ise sistem durumlarını kayan yüzeye ulaşmasını sağlayacak ve burada tutacak olan kontrol kuralının belirlenmesidir [30].

3.2.1. Kayan Yüzey Tasarımı

n. dereceden tek girişli-tek çıkışlı sistemin sürekli zaman domeninde gösterimi Denklem 3.2.1.1' de verilmiştir [29].

$$X^n(t) = f(X(t),t) + g(x(t),t)u(t) + d(t) \qquad (3.2.1.1)$$

$$y(t) = x(t) \qquad (3.2.1.2)$$

$x(t) = \left(x(t), \dot{x}(t), \dots\dots\dots, x^{n-1}(t)\right) \varepsilon\, R^n$, sistemin ölçülebilir n. dereceden durum vektörleridir. y(t)∈ R sistem çıkışını ifade etmektedir.

f(x(t),t), g(x(t),t) tam olarak bilinmeyen sürekli fonksiyonlardır ve

$$0 < g_0 < g(x(t),t) < g_1$$

olup g_0 ve g_1 pozitif sabitlerdir.

u(t)∈ R kontrol girişidir ve d(t) ∈ R harici bozucudur.

Kayma mod kontrol yönteminde kontrolün amacı; istenen çıkış olan $y_d(t)$' yi sistem çıkışı olan y(t)' nin takip etmesi ve izleme hatası olan Denklem 3.2.1.3 oldukça küçük olmasını sağlayan u(t) kontrol kuralını belirlemektir.

$$e(t) = y(t) - y_d(t) \qquad (3.2.1.3)$$

$$e^{(i)}(t) = y^{(i)}(t) - y_d{}^{(i)}(t) \quad i=(1,2,\dots,n-1) \qquad (3.2.1.4)$$

(3.2.1.4) de bahsedilen yapı baz alınarak;

$e(t) = [e_1(t), e_2(t), \ldots\ldots, e_n(t)]^T = [e(t), \grave{e}, \ldots\ e^{n-1}(t)]^{\ t}) \in$ R olmak üzere kayan yüzey gösterimi denklem 3.2.1.5 ile gösterilebilir. e(t) hata sinyali olmak üzere sistem sonunda beklenen çıkış sinyali ile gerçekte görülen çıkış sinyali arasındaki farka eşittir.

s(t) = c * e(t) (3.2.1.5)

Denklem 3.2.1.5' de $c = [c_1, c_2, \ldots, c_{n-1}, 1]$ olup, Hurwitzian polinom katsayılarıdır ve

$$\lambda^{n-1} + c_{n-1}\lambda^{n-2} + \ldots. + c_1 = 0 \qquad \lambda > 0 \qquad (3.2.1.6)$$

polinomunun kökleri olup sol yarı düzlemdedir. RouthHurwitz kararlılık metoduna göre sistemin kararlı olduğunu işaret etmektedir.

Kayan yüzey için yaygın bir şekilde kullanılan gösterim denklem 3.2.1.7' de gösterilmiştir [29].

$$s(x,t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{n-1} e(t) \qquad \lambda > 0 \qquad (3.2.1.7)$$

[n=sistem derecesidir.]

Kayan yüzey tasarımı esnasında; s(x,t)=0 alınır. Bunun anlamı; s(x,t)=0 eşitlemesiyle, tek çözüm e(t)=0 olan homojen diferansiyel denklem elde ediliyor olmasıdır. Yani bu yüzeye göre hata sıfıra eşit olur.

3.2.2. Kontrolör Tasarımı

Kayma mod kontrolde n. mertebeden izleme problemi birinci mertebeden kararlılık problemine dönüştürülür. Bu sistemlerde kontrol kuralı önceden belirlenen ve sistemin durumuna bağlı olan kurallara göre, bilerek değiştirilmektedir. Böylece sistem kararlı ve kararsız yörüngeler arasında geçiş yaparak kayma yüzeyine ulaşır ve bu yüzey üzerinde hata değerleri sıfıra gider.

Zamana bağlı değişen sistemlerde kararlılığı sağlamak için Lyapunov yaklaşımına göre çözüme gidilebilir [29]. Lyapunov kararlılık fonksiyonuna göre:

$V = \frac{1}{2}s^2$ formülünden hareket edilerek V(0)=0, s>0 ve V(s)>0 durumunda sistemin kararlılık koşulu için denklem 3.2.1.6 elde edilir.

$$V = \frac{1}{2}\frac{d}{dt}s^2 \leq -\eta|s| \qquad (3.2.1.6)$$

η >0 için sistem kayan moda sokulur. Bunun anlamı; sisteme ait durum yörüngesi, s(x,t)=0 kayan yüzeyine erişir, o yüzeyde kalır ve aynı zamanda, sistemin belirsiz parametrelerinden ve bozucu etkilerden bağımsız olarak e=0'a doğru hızla kayar.

II. Dereceden bir sistem için eşdeğer kontrol kuralı yaklaşımı ile kontrolör tasarımı: Kayma Koşulu için sgn(s) $\leq -\eta$ ele alınırsa,

$$s(t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{n-1} e(t) \qquad (3.2.1.9)$$

ve sistem derecesi n=2 için Denklem 3.2.1.10 ve Denklem 3.2.1.11 elde edilir.

$$s(t) = \frac{d}{dt}e(t) + \lambda e(t) = 0 \qquad e(t) = x(t) - xd(t) \qquad (3.2.1.10)$$

$$\dot{s}(t) = \ddot{e}(t) + \lambda\,\dot{e}(t) = 0 \qquad \dot{e}(t) = \dot{x}(t) - \dot{x}d(t) \qquad (3.2.1.11)$$

Denklem 3.2.1.15 referans alınarak eş değer kontrol denklemi Denklem 3.2.1.16 ' daki şekilde ifade edilir.

$$\mathrm{sgn}(s)[f(x) + g(x)u(t) - \ddot{x}_d(t) + \lambda\dot{e}(t)] \leq -\eta \qquad (3.2.1.15)$$

$$u(t) = g^{-1}[-\dot{f}(x) + \ddot{x}_d(t) - \lambda\dot{e}(t) - K(x,\dot{x})sgn(s) \qquad (3.2.1.16)$$

f(x) = $\dot{f}$(x) + Δf(x) olmak üzere ve denklem 3.2.1.16 da oluşturulan kontrol işareti Denklem 3.2.1.15' de yerine konulduğunda aşağıdaki denklem elde edilir.

$$sgn[f(x) - \dot{f}(x) + \ddot{x}_d(t) - \lambda\dot{e}(t) - \ddot{x}_d(t) - \lambda\dot{e}(t) - K(x,\dot{x})sgn(s)] \leq -\eta \qquad (3.2.1.17)$$

yani ;

$$\mathrm{sgn}(s)[\Delta f(x) - K(x,\dot{x})\mathrm{sgn}(s)] \leq -\eta \qquad (3.2.1.18)$$

elde edilir.

s>0 ise sgn(s)=1 ; s<0 ise sgn(s)=-1 durumları dikkate alınarak Denklem 3.2.1.19 elde edilir.

$$\mathrm{sgn}(s)\ \Delta f(x) - K(x,\dot{x}) \leq -\eta \qquad (3.2.1.19)$$

$$K(x,\dot{x}) \geq -\eta + \mathrm{sgn}(s)\ [\Delta f(x)] \qquad (3.2.1.20)$$

Oluşan son duruma göre $V = \frac{1}{2}\frac{d}{dt}\ s^2\ \geq -\eta|s|$ koşulu sağlanmış olur.

Eşdeğer Kontrol Kuralı;

$$u(t) = u_{eg}(t) + u_s(t) = u_{eg}(t) - sgn(s)u_s(t) \qquad (3.2.1.21)$$

Denklem 3.2.1.21'de görüldüğü gibi iki terimden oluşur.

$u_{eg}(t)$ (Eşdeğer Terim) Kayma fazında s(t)=0 ve ṡ(t)=0 da sistemi kayma yüzeyinde tutar. Eşdeğer terim Denklem 3.2.1.22 de gösterilmiştir.

$$u_{eg}(t) = \dot{g}^{-1}[-\dot{f}(x) + \ddot{x}_g(t) - \lambda\dot{e}(t)] \qquad (3.2.1.22)$$

$$\dot{g} = (g_0, g_1)^{\frac{1}{2}} \qquad (3.2.1.23)$$

$u_s(t)$: (Anahtarlama Terimi) s(t)=0 iken yani sistem ulaşma fazındayken, sistemi kayan yüzeye getirir. Anahtarlama terimi denklem 3.2.1.24 de gösterilmiştir.

$$u_s(t) = \dot{g}^{-1}[\beta\ (F(x) + \lambda) + (\beta - 1)|u_{eg}(t)|] \qquad (3.2.1.24)$$

$$\beta = (\frac{g_1}{g0})^{\frac{1}{2}} \qquad (3.2.1.25)$$

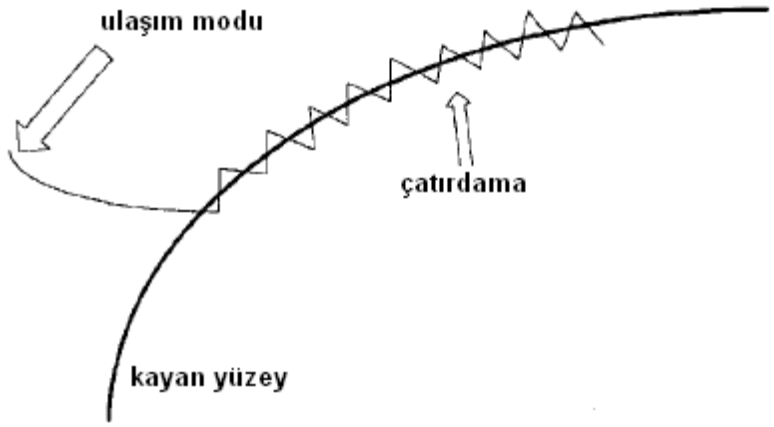
3.3 Kayma Mod Kontrolde Çatırdama

Kayma mod kontrol yönteminde sistemi kontrol ederken sistemi kararlı davranışa sokmak için tasarlanan kontrol işareti, yüksek frekans değerinde anahtarlama yapar. Bu durumdan dolayı da sistem çıkış sinyali referansı üzerine oturur. Kayma mod kontrolör yaptığı anahtarlamalar ile reel sistemler üzerinde fiziksel sınırlamalarından dolayı

sistem çıkış sinyalini kayan yüzeyde tutmaya çalışır. Bu işlem sırasında oluşan osilasyonlara çatırdama denir.

3.3.1 Sınır Katman Oluşturma Yöntemi

Kayma mod kontrolün en önemli dezavantajı çatırdama olayıdır; seçilen kayan yüzeye bitişik olacak şekilde, ince bir sınır katmanı oluşturularak kontrol sinyalinin sürekli olması sağlanır.



Şekil 3.3. 1 Kayan yüzey ve çatırdama

Kayma mod kontrol uygulamalarında sgn(s) kullanılmaktadır. Sınır katman kullanımı olarak anılan bu yöntem ile kontrol işaretinin özelliği olan keskin değişimler önlenmiş olmaktadır.

4. KONTROL SİMÜLASYONU

4.1 Ultrasonik Motorun Basitleştirilmiş Modeli

USM' nin basitleştirilmiş modeli olarak sürekli zaman açık çevrim TF aşağıda verildi.

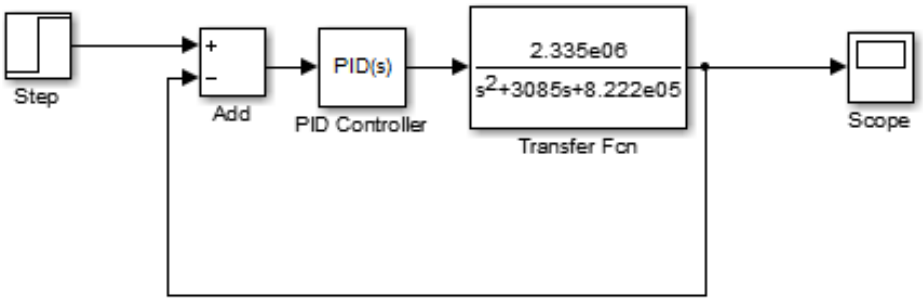
$$G_{usm}(s) = \frac{2.335e06}{s^2+3085s+8.222e05} \qquad (4.1.1)$$

Yapılacak olan simülasyon çalışmasında USM modeli üzerinde Kayma Mod yöntemi en yaygın yöntem olan PID yöntem ile karşılaştırıldı. Bu nedenle Denklem 4.1.1'de ki TF ayrıştırılarak model simule edildi.

4.1.1 PID Kontrol ve Simülasyonu

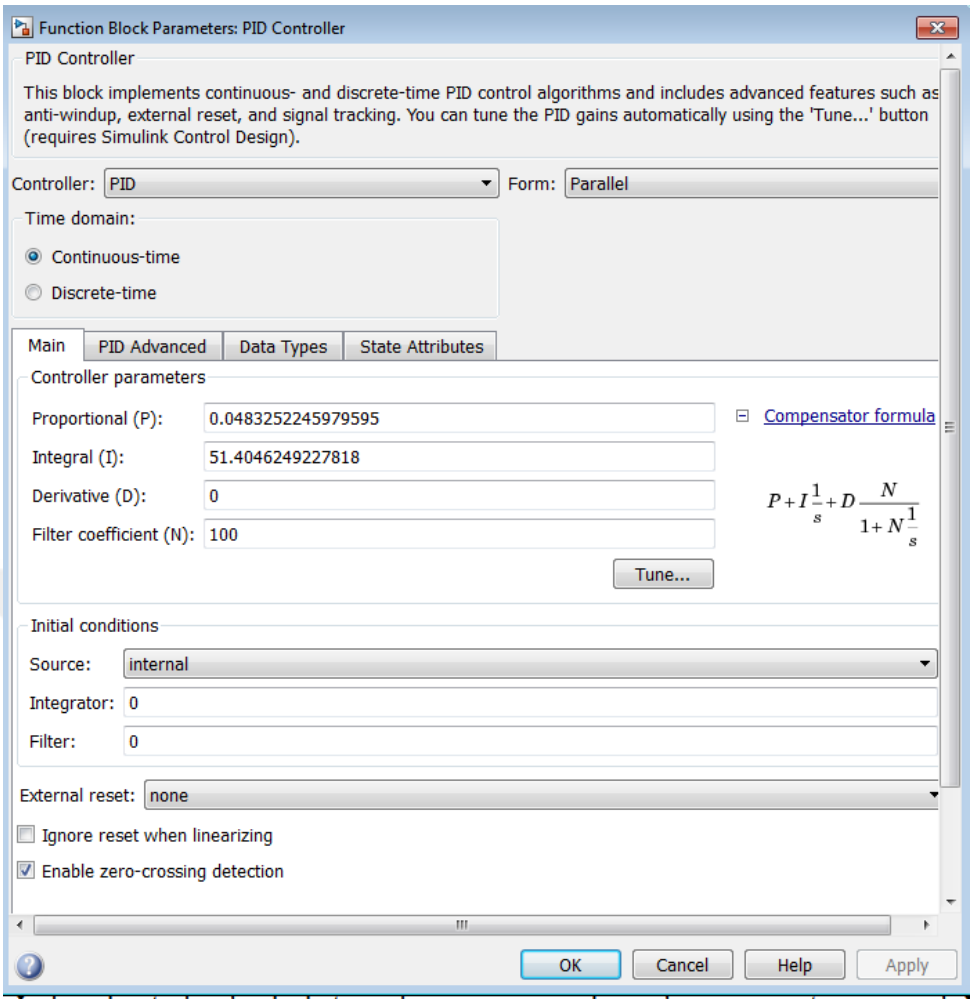
Tasarımın ilk safhasında sisteminin cevabına istenen performans kriterleri belirlenir. Örnekleme zamanı ele alınır. Matlab üzerinde Simulink üzerinde TF' ye bağlı kalınarak PID kontrol aracı kullanılıp sistemin kapalı çevrim modeli elde edildi.

4.1.1.1 PID Kontrolör Tasarımı



Şekil 4.1.1.1. 1 USM'nin PID kontroller ile simulink tasarımı

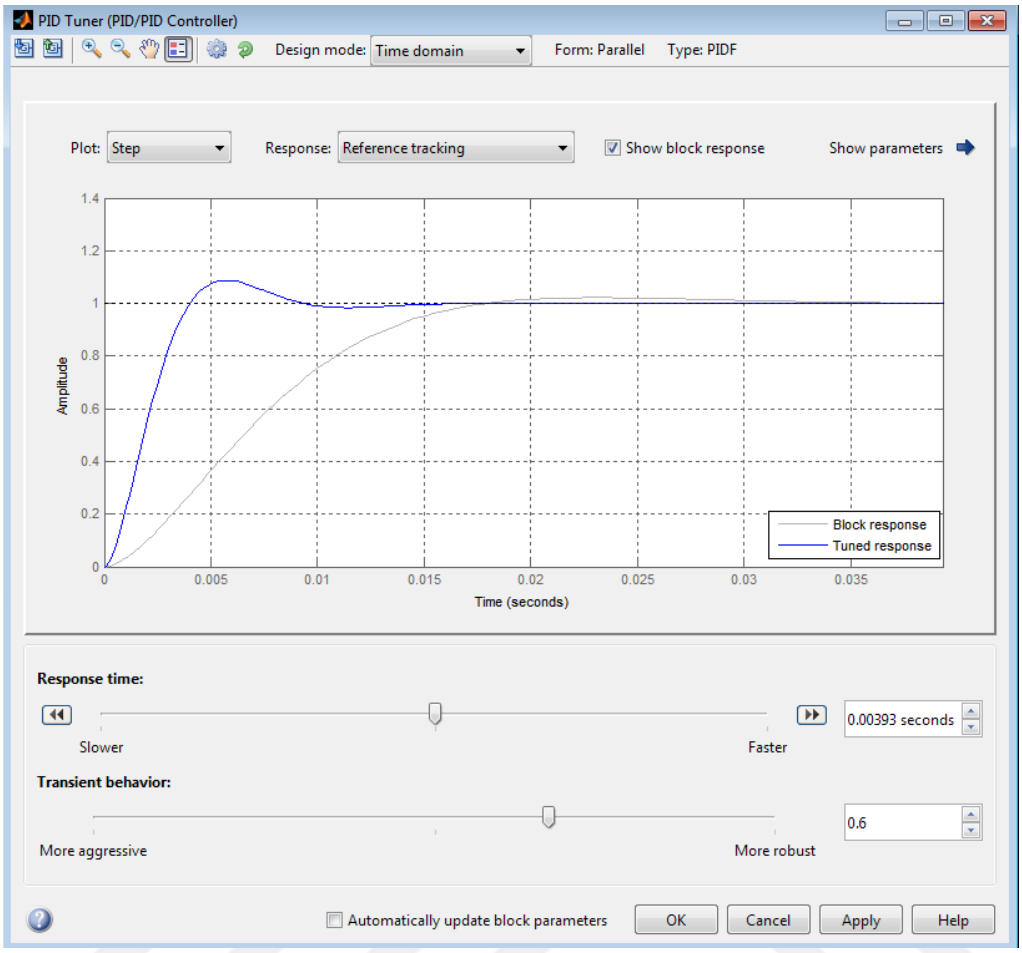
PID Kontrol aracı üzerinde K_P, K_I ve K_D katsayılarının bulunması aracın gerçek zamanlı olarak müdahale imkânı vermesi bakımından oldukça kullanışlı olduğunu göstermektedir. Elde edilen Grafik üzerinde yerleşme zamanı, yükselme zamanı gibi değerleri kontrol ederek katsayıları en uygun biçimde seçip sistem için doğru kontrolör tasarımı yapılmasına olanak sağlamaktadır.



Şekil 4.1.1.1. 2 Matlab Simulink PID araç kutusu

Şekil 4.1.1.1.2'de görüldüğü üzere KP, K_I ve K_D katsayıları sisteme uygun seçilebilmesi için kullanılan ara yüz görülmektedir. Sistem çalıştırıldığında K_P, K_I, K_D katsayıları seçilerek sistemin cevabı ayrı bir şekil 4.1.1.1.3'deki gibi görülmektedir.

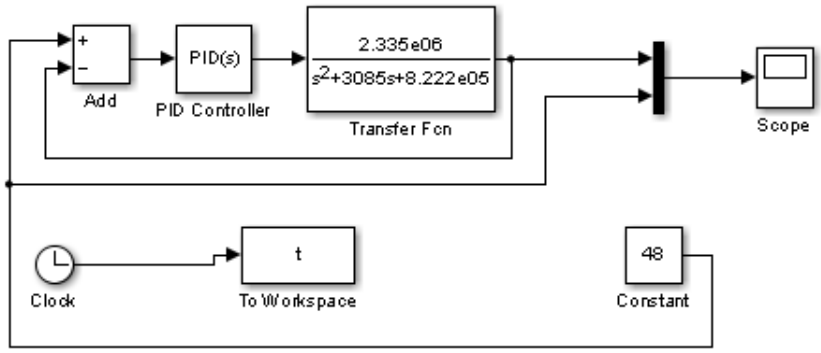
Şekil 3.1.1.1.3'deki ekranın altında yer alan skalalar yardımı ile sistemin verdiği cevabı daha uygun hale ya da istenilen performansa ayarlayıp, PID kontrolörü oluşturan K_P, K_I ve K_D katsayıları belirlenmiş olur.



Şekil 4.1.1.1. 3 Matlab Simulink PID katsayıları ayarlama penceresi

4.1.1.2 Ultrasonik Motorun PID Kontrolör ile Kontrol Simülasyonu

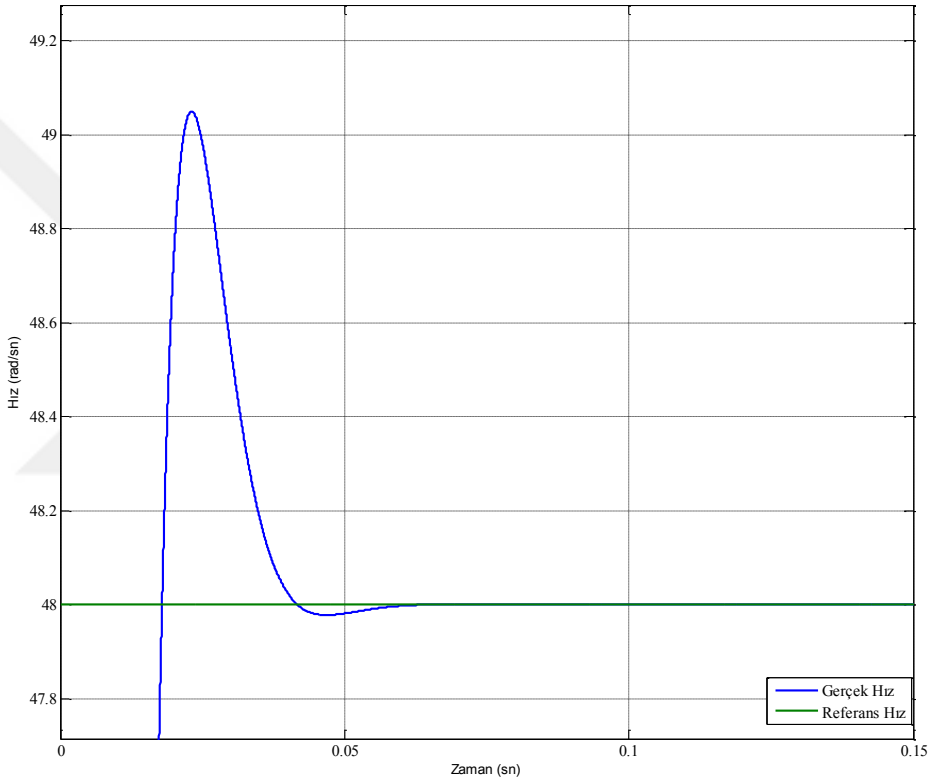
Sistemin kontrolöre cevabı girişe uygulanan farklı sinyaller üzerinden incelenmiştir. Girişe sabit genlikte sırası ile farklı iki sinyal uygulanmış ve sistemin cevabı incelenmiştir.



Şekil 4.1.1.2. 1 Matlab Simulink USM'nin PID tasarımı sabit genlik giriş

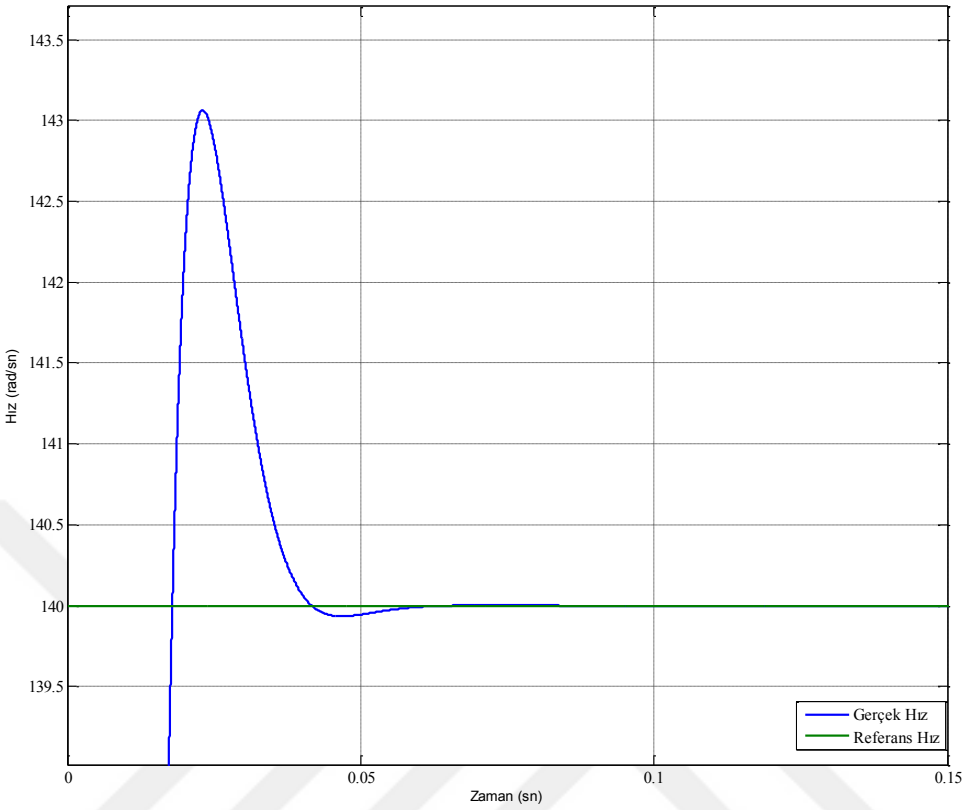
Şekil 4.1.1.2.1' de girişine sabit genlikte sinyalin uygulandığı modelimizin Matlab Simulink'deki tasarımı görülmektedir. Sistemin girişine uygulanan sabit genlikli sinyal ile elde edilen sonuçlar zaman bazlı olarak workspace'e ConstantPID isimli dizi içine alınmıştır.

Sisteme 48 Volt sabit genlikte referans giriş sinyali uygulandı. Zamana bağlı hız bilgisini Matlab workspace üzerinde **plot(t,ConstantPID)** komutu kullanılarak çizdirilmiştir. 48 Volt step referans girişine göre kontrol sinyalinin zamana bağlı grafiği Şekil 4.1.1.2.2' de görülmektedir.



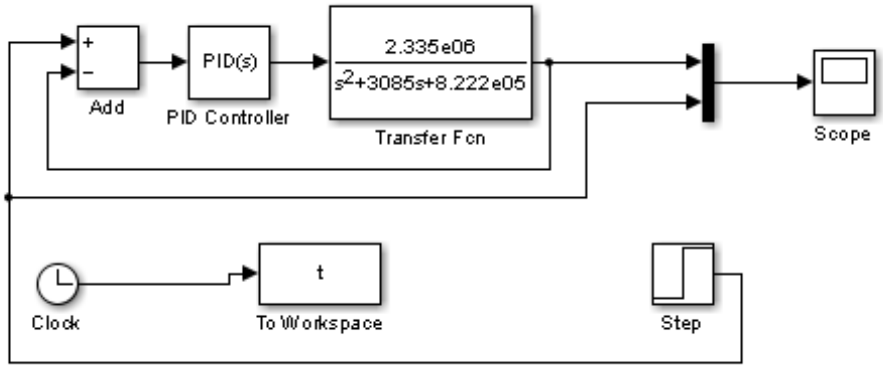
Şekil 4.1.1.2. 2 48 Volt sabit genlik - USM'nin PID kontrol yöntemi ile hızının zamana bağlı değişimi

Sisteme 140 Volt sabit genlikte referans giriş sinyali uygulandı ve kontrol sinyalinin zamana bağlı değişimi Şekil 4.1.1.2.3'de görülmektedir.



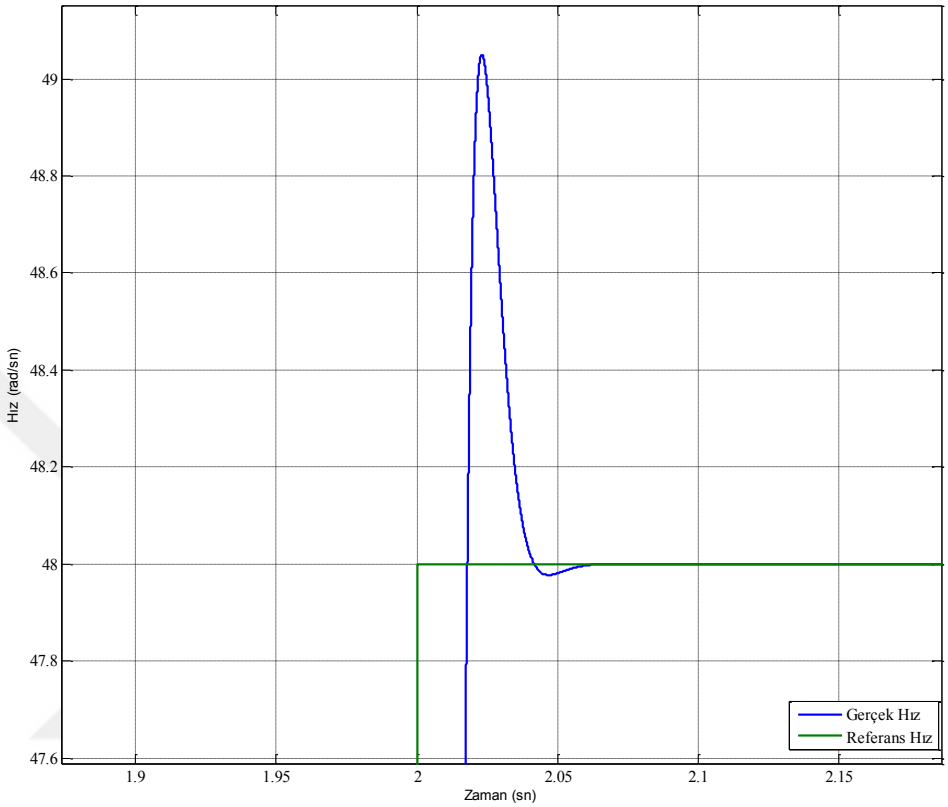
Şekil 4.1.1.2. 3 140 Volt sabit genlik - USM'nin PID kontrol yöntemi ile hızının zamana bağlı değişimi

Şekil 4.1.1.2.4'de sistemin girişine step fonksiyonu uygulanan model Matlab Simulink'deki tasarımı görülmektedir. Sistemin girişine uygulanan step sinyali ile elde edilen sonuçlar zaman bazlı olarak workspace'e StepPID isimli dizi içine alınmıştır.



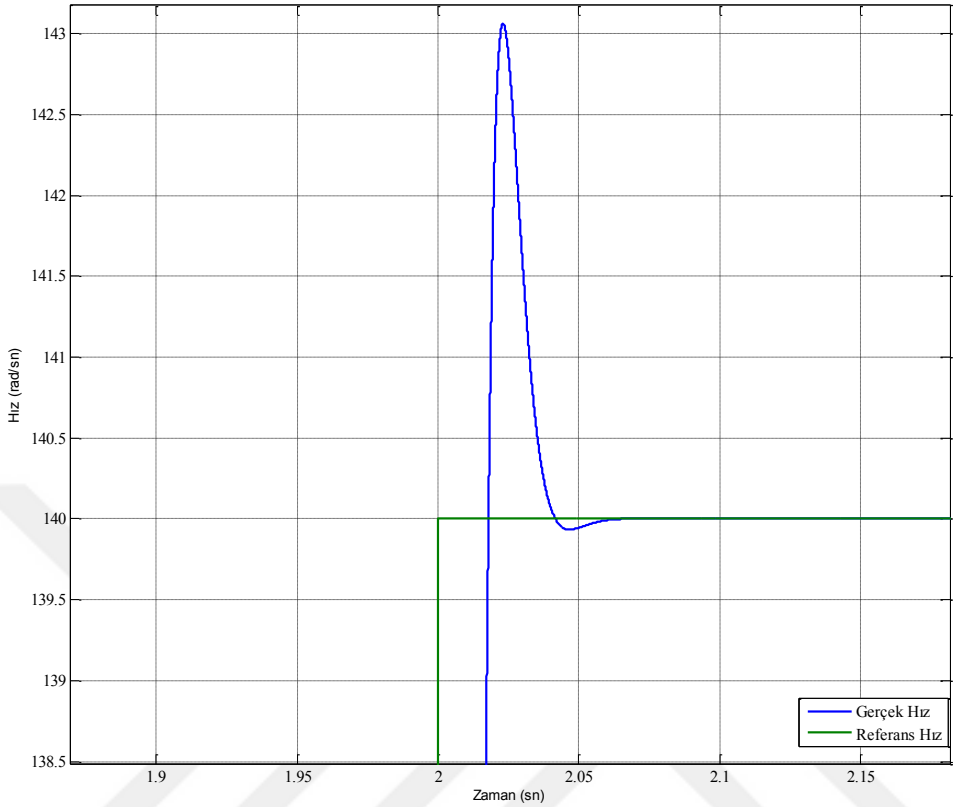
Şekil 4.1.1.2. 4 Matlab Simulink USM'nin PID tasarımı step genlik giriş

Sisteme 48 Volt step referans giriş sinyali uygulandı Zamana bağlı hız bilgisini Matlab workspace üzerinde **plot(t,StepPID)** komutu kullanılarak çizdirilmiştir. Elde edilen grafik Şekil 4.1.2.5'de görülmektedir.



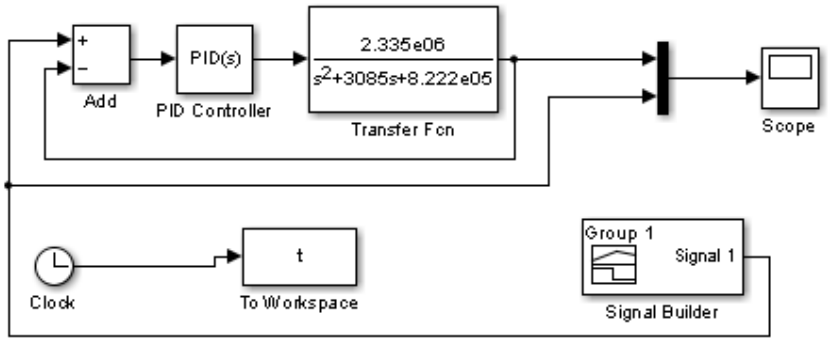
Şekil 4.1.1.2. 3 48 Volt step genlik - USM'nin PID kontrol yöntemi ile hızının zamana bağlı değişimi

Sisteme 140 Volt step genlikte referans giriş sinyali uygulandı ve kontrol sinyalinin zamana bağlı değişimi Şekil 4.1.1.2.6'da görülmektedir.



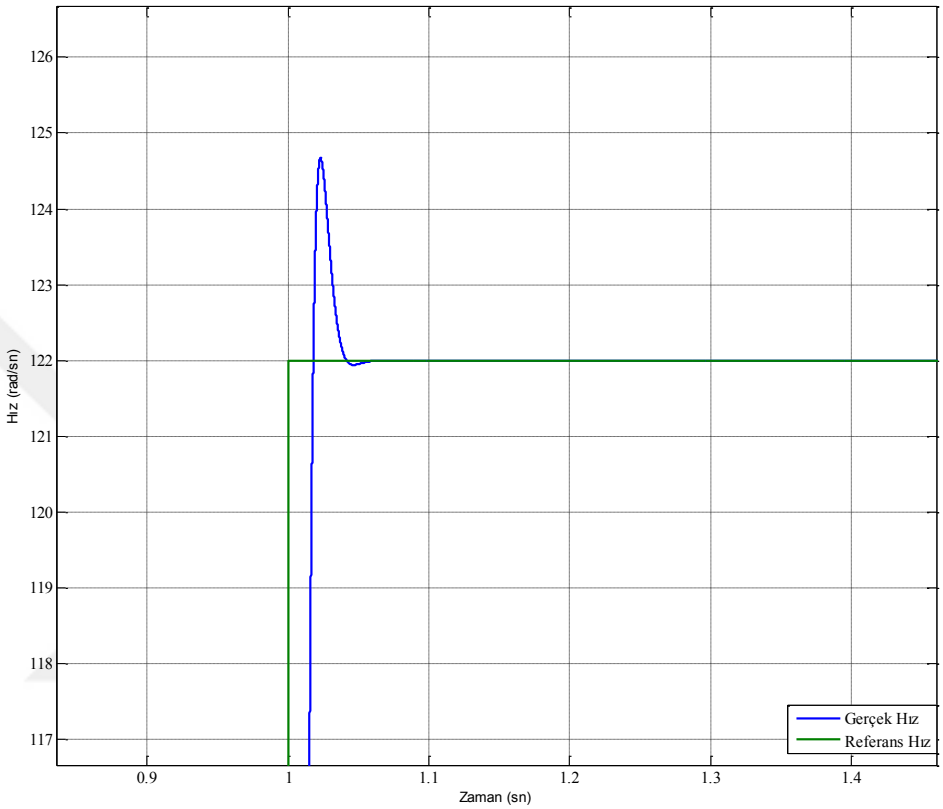
Şekil 4.1.1.2. 6 140 Volt step genlik -USM'nin PID kontrol yöntemi ile hızının zamana bağlı değişimi

Şekil 4.1.1.2.7 'de sistem girişine sinyal jeneratörü ile elde edilen sinyalin uygulandığı modelin Matlab Simulink'deki tasarımı görülmektedir. Sistemin girişine uygulanan sinyalin ile çıkışta gözlenen sonuçlar zaman bazlı olarak workspace'e multisignalPID isimli dizi içine alınmıştır.



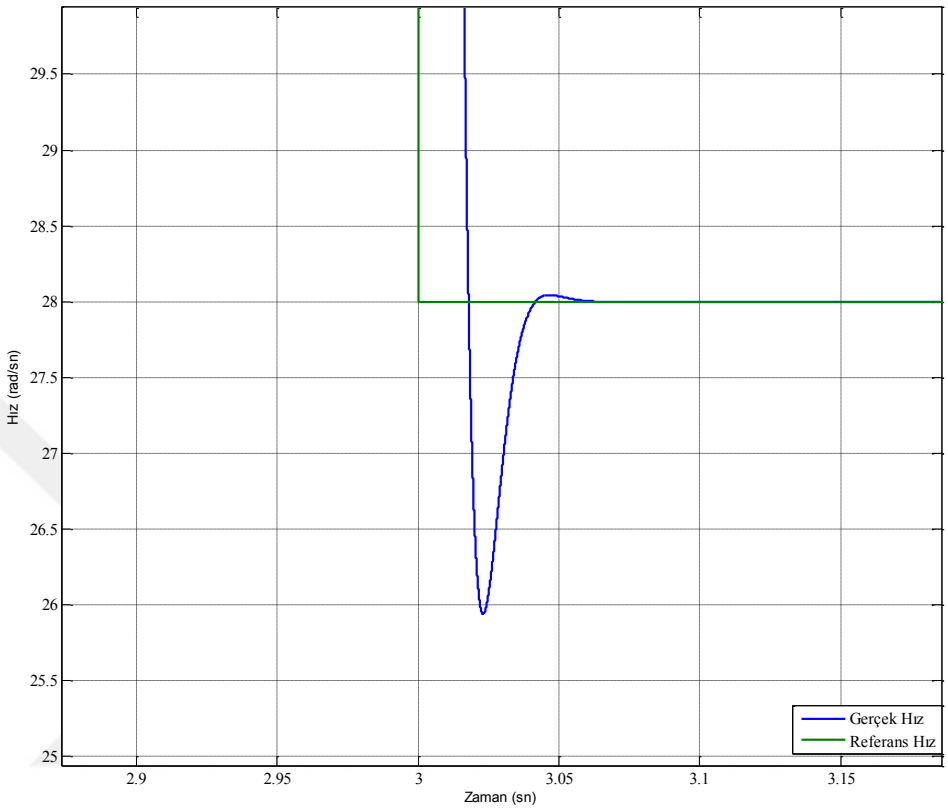
Şekil 4.1.1.2. 7 Matlab Simulink USM'nin PID tasarımı sinyal jeneratörlü değişken genlik giriş

Zamana bağlı hız bilgisini Matlab workspace üzerinde **plot(t,multisignalPID)** komutu kullanılarak çizdirildi. Uygulanan sinyalin yükselene kenara ait sistem hızının zamana bağlı değişimi Şekil 4.1.1.2.8'de görülmektedir.



Şekil 4.1.1.2. 4 Sinyal jeneratörü ile üretilen sinyal - USM'nin PID Kontrol yöntemi ile hızının zamana bağlı değişimi (yükselen kenar)

Uygulanan sinyalin düşen kenara ait sistem hızının zamana bağlı değişimi Şekil 4.1.1.2.9'da görülmektedir.



Şekil 4.1.1.2. 5 Sinyal jenatartörü ile üretilen sinyal - USM'nin PID Kontrol yöntemi ile hızının zamana bağlı değişimi (düşen kenar)

4.1.2 Kayma Mod Kontrolör Tasarımı

USM için elde edilen açık çevrim TF ;

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{2.335e06}{s^2+3085s+8.222e05} \qquad (4.1.2.2)$$

şeklindedir.

Kayan mod kontrolünü gerçekleştirebilmek için sistemin matematiksel modelinin durum denklemi tanımlanır.

$$2.335e06U(s) = s^2Y(s) + 3085sY(s) + 8.222e05Y(s) \qquad (4.1.2.2)$$

$$2.335e06u(t) = \frac{d^2}{dt^2}y(t) + 3085\frac{d}{dt}y(t) + 8.222e05 \qquad (4.1.2.3)$$

Sistem durum denklemi denklem (4.1.2.3)' den hareketle vektör matrisi elde edilir.

$$y(t) = x_1(t) \qquad x_1(t): Konum \qquad (4.1.2.4)$$

$$\dot{y}(t) = \dot{x}_1(t) = x_2(t) \qquad \dot{x}_1(t) = x_2(t): Hız \qquad (4.1.2.5)$$

$$\ddot{y}(t) = \dot{x}_2(t) \qquad (4.1.2.6)$$

$$\dot{x}_1(t) = x_2(t) \qquad (4.1.2.7)$$

$$\dot{x}_2(t) = (-3085)x_2 + 2.335e05u(t) \qquad (4.1.2.8)$$

durum denklemi elde edilir. Matris vektör formu aşağıda verilmiştir.

$$\begin{bmatrix}\dot{x}_1\\ \dot{x}_2\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}0 & 1\\ 0 & -3085\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}x_1\\ x_2\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}0\\ 2.335e06\end{bmatrix}u(t) \qquad (4.1.2.9)$$

e(t) aranılan referans konum $y_r(t)$ ile çıkış konumu y(t) arasındaki hata işareti olmak üzere aşağıdaki eşitlikler oluşturulur.

$$e(t) = y(t) - y_r(t) = x_1(t) - x_{lr}(t) \qquad (4.1.2.10)$$

$$\dot{e}(t) = \dot{y}(t) - \dot{y}_r(t) = \dot{x}_1(t) - \dot{x}_{lr}(t) \qquad (4.1.2.11)$$

$y_r(t)$ sabittir ve

$$\frac{d^2y_r(t)}{dt^2} = \frac{dy_r(t)}{dt} = 0 \qquad (4.1.2.12)$$

ifadesi elde edilir.

$$\dot{e}(t) = \dot{y}(t) = \dot{x}_1(t) \qquad (4.1.2.13)$$

elde edilir.

Hatanın tekrardan türevi alınır $\frac{d^2 y_r(t)}{dt^2} = 0$ olduğu dikkate alınarak;

$\ddot{e}(t)$ ifadesi $\ddot{e}(t) = \ddot{y}(t) = \dot{x}_2(t)$ (4.1.2.14)

olarak yazılabilir.

Elde edilen hata ifadelerinden sonra kayma yüzeyi tasarlanır. $y_r(t)$ ifadesi yerine λ katsayısı ifadesi kullanılarak

$$s(t) = \left[\frac{d}{dt} + \lambda\right]^{n-1} e(t) \qquad (4.1.2.15)$$

denklemi elde edilir. n=2 sistemin derecesi olmak üzere kayma yüzeyi ;

$$s(t) = \dot{e}(t) + \lambda e(t) \qquad (4.1.2.16)$$

ifadesi elde edilir.

$\mathrm{sgn}(s)\dot{s} \leq -\eta$ kayma koşuluna bağlı kalınarak η>0 için sistem kayma moduna sürülür.

İfadeler yerine koyulduğunda

$$\dot{s}(t) = -3085\, x_2 + 2.335e06u(t) \leq -\eta \qquad (4.1.2.17)$$

u(t) çekildiğinde ve kontrol sinyalinin sürekli kayma yüzeyinde tutunmasını sağlamak için -U sgn(s) ifadesi kullanılmalıdır.

$$u = \begin{cases} -U & s > 0 \\ U & s < 0 \end{cases}$$

olduğundan U yeterince büyük bir parametre olarak seçilmelidir.

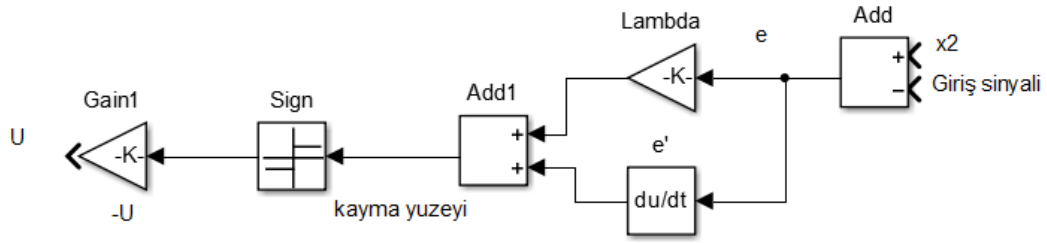
$$u(t) = \frac{1}{2.335e06}[(3085 - \lambda)x_2 - \text{U sgn}(\phi)] \qquad (4.1.2.18)$$

ifadesi elde edilir.

Kayan Mod kontrol simülasyonunda sınır katman uygulaması ile kontrol işaretindeki sert değişimler yumuşatılarak sonsuz frekansta anahtarlama yapılması önlenmiştir. Simülasyonda kullanılan parametreler λ=250 , U=3000 seçilerek kontrol sinyalinin istenilen seviyede tutulması sağlanmıştır.

4.1.2.1 Ultrasonik Motorun Kayma Mod Kontrol Yöntemi İle Kontrolü

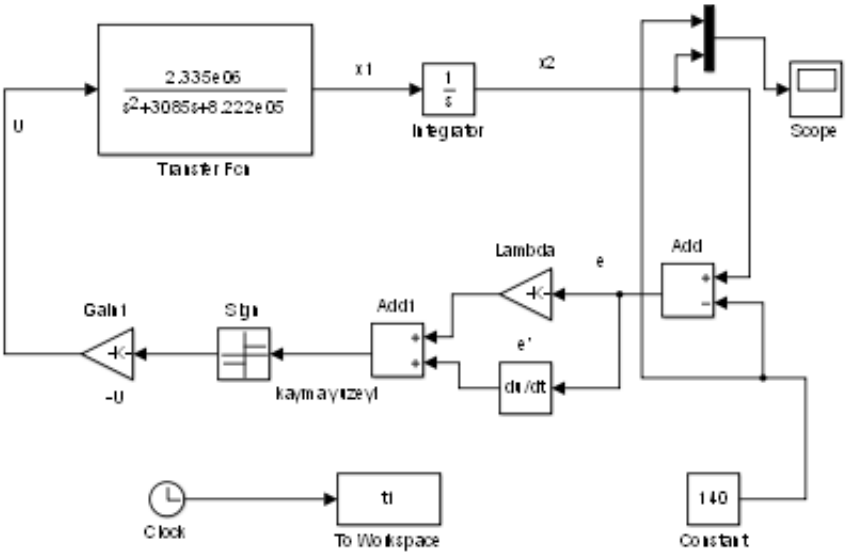
KMK yöntemi kullanılarak USM' nin kayma mod kontrolüne ait Matlab simulink modeli aşağıda verilmiştir.



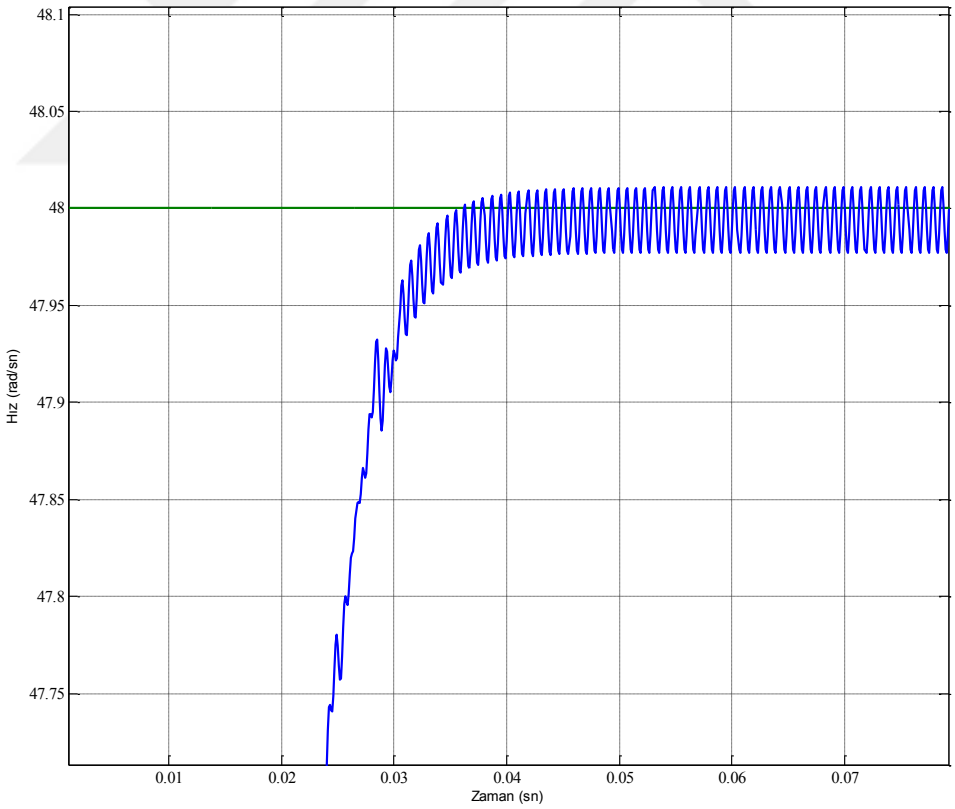
Şekil 4.1.2.1. 1 Kayma Mod Kontroller simulink tasarımı

Elde edilen simulink modeline giriş sinyali olarak PID kontrolde uygulanan sabit genlikte, step ve sinyal jeneratörü ile oluşturulan sinyalleri sırası ile uygulandı.

Sabit genlik uygulanan Matlab Simulink modeli Şekil 4.1.2.1.2'de görülmektedir. Sabit genlikte giriş sinyali uyguladığımız da PID kontrol yöntemindeki yöntem ile zaman ve giriş ve çıkış sinyali değerlerimiz Matlab workspace ortamına alındı ve **plot(t,ConstantSMC1)** komutu ile çizdirilmiştir. 48 Volt sabit genlik referans girişine göre kontrol sinyalinin zamana bağlı grafiği Şekil 4.1.2.1.3' de görülmektedir.

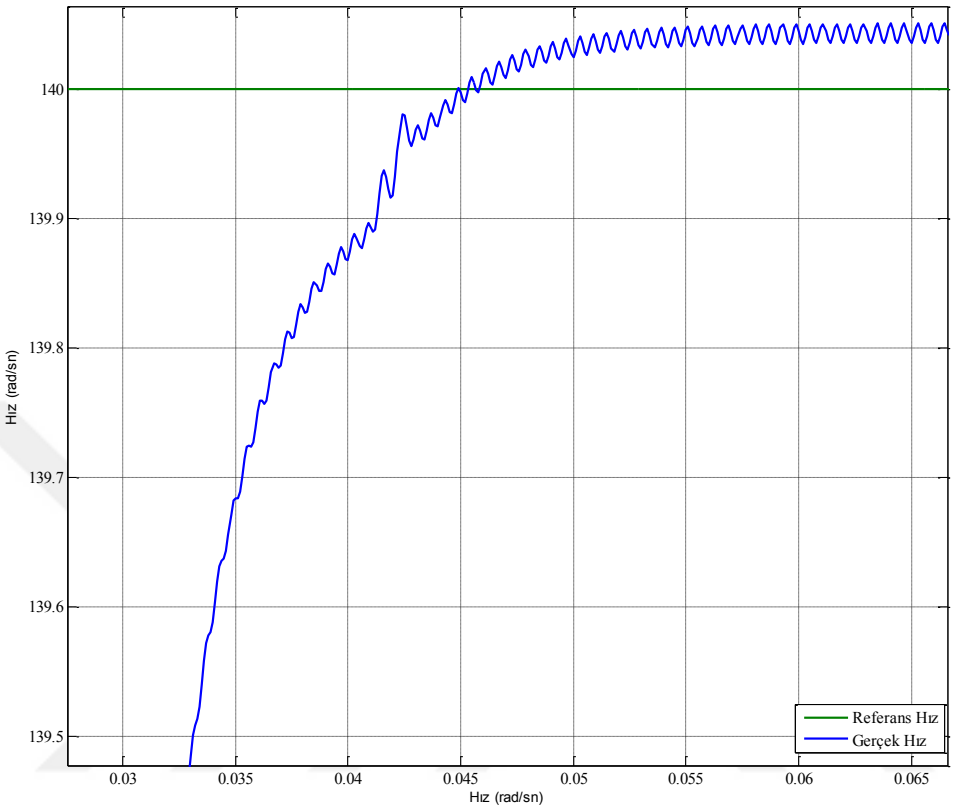


Şekil 4.1.2.1. 2 Matlab Simulink USM'nin Kayma Mod Kontrol Tasarımı sabit genlik giriş



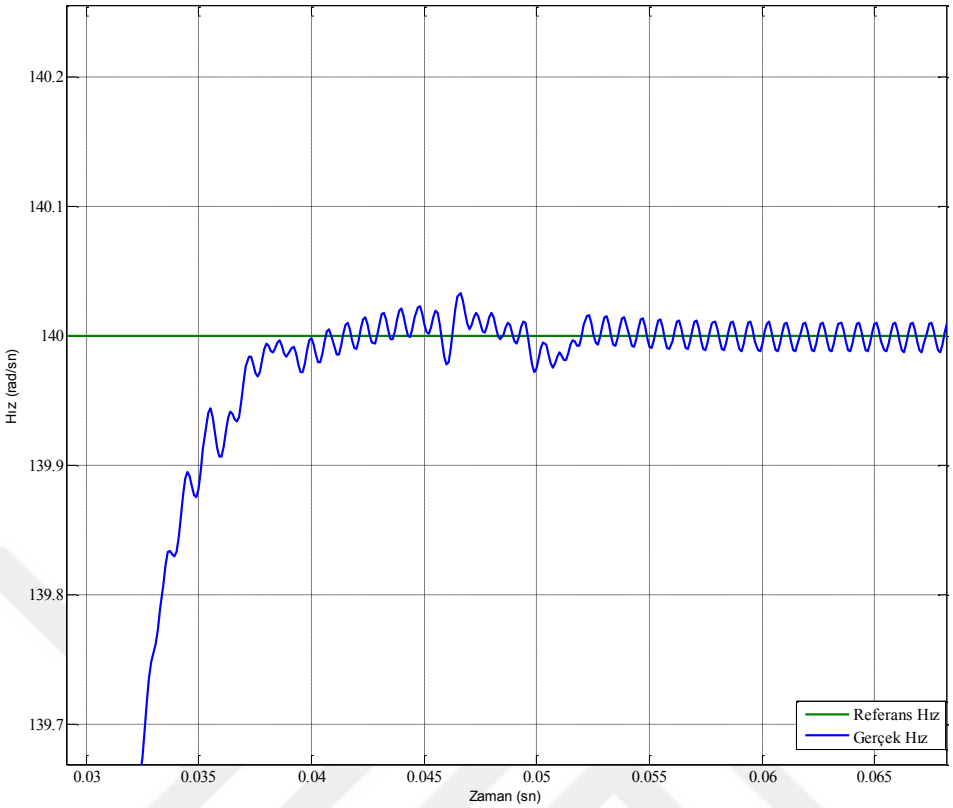
Şekil 4.1.2.1. 3 48 Volt sabit genlik - USM'nin Kayma Mod Kontrol yöntemi ile hızının zamana bağlı değişimi

140 Volt sabit genlik referans girişine göre kontrol sinyalinin zamana bağlı grafiği Şekil 4.1.2.1.4' de görülmektedir.

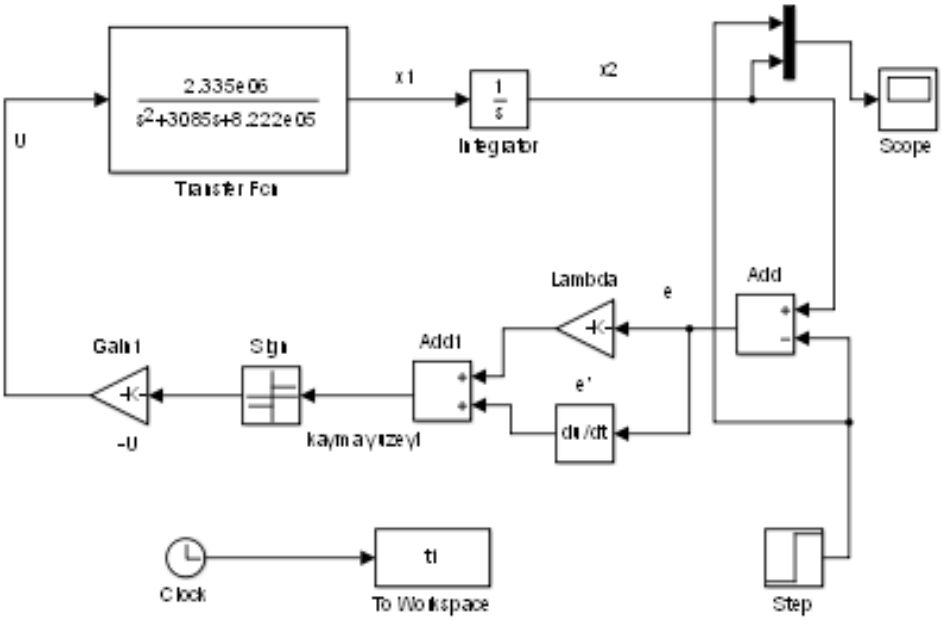


Şekil 4.1.2.1. 2 140 Volt sabit genlik - USM'nin Kayma Mod Kontrol yöntemi ile hızının zamana bağlı değişimi

Sistemin çıkışının referans değerden yüksek olması halinde Kayma Mod Kontrolör sabitlerinden λ değeri 250'den 560'a çıkarılarak çıkış sinyalinin referans sinyaline ait elde edilen grafik Şekil 4.1.2.1.5'de görülmektedir.

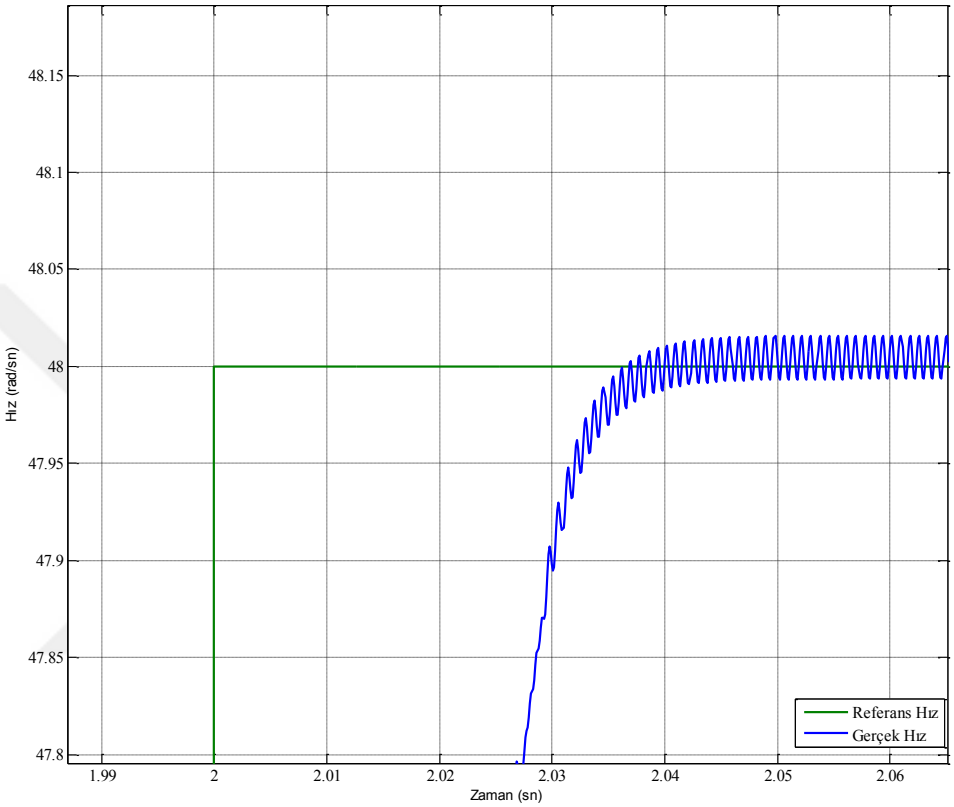


Şekil 4.1.2.1. 5 140 Volt sabit genlik - USM'nin Kayma Mod Kontrol yöntemi ile hızının zamana bağlı değişimi (λ = 560)



Şekil 4.1.2.1. 6 Matlab Simulink USM'nin Kayma Mod Kontrol tasarımı step genlik giriş

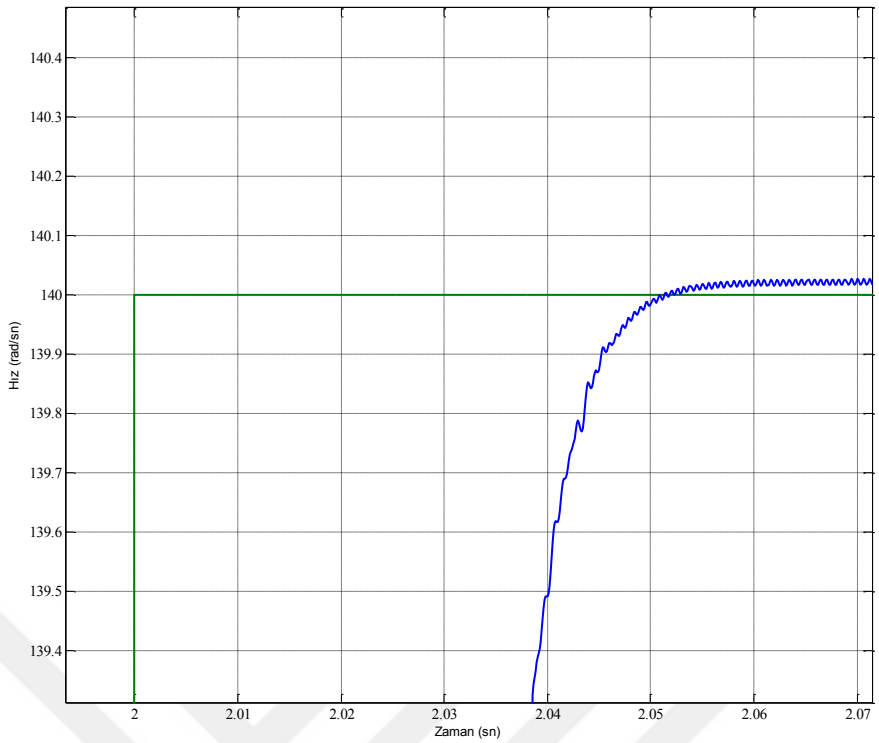
Step genlik uygulanan Matlab Simulink modeli Şekil 4.1.2.1.6'da görülmektedir. Step genlikte giriş sinyali uyguladığımız da zaman ve giriş ve çıkış sinyali değerlerimiz Matlab workspace ortamına alındı ve **plot(t,stepSMC1)** komutu ile çizdirilmiştir. 48 Volt step genlik referans girişine göre kontrol sinyalinin zamana bağlı grafiği Şekil 4.1.2.1.7' de görülmektedir.



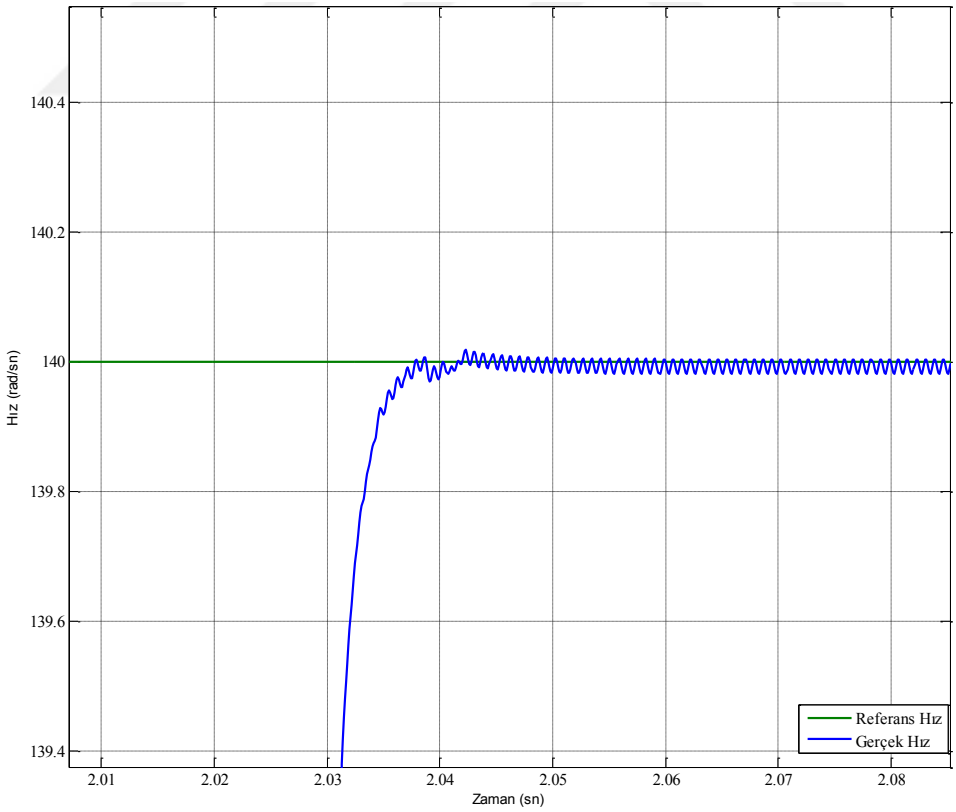
Şekil 4.1.2.1. 3 48 Volt step genlik - USM'nin Kayma Mod Kontrol yöntemi ile hızının zamana bağlı değişimi

140 Volt step genlik referans girişine göre kontrol sinyalinin zamana bağlı grafiği Şekil 4.1.2.1.8' de görülmektedir.

Sistemin çıkışının referans değerden yüksek olması halinde Kayma Mod Kontrolör sabitlerinden λ değeri 250'den 560'a çıkarılarak çıkış sinyalinin referans sinyaline ait grafik Şekil 4.1.2.1.9'da görülmektedir.

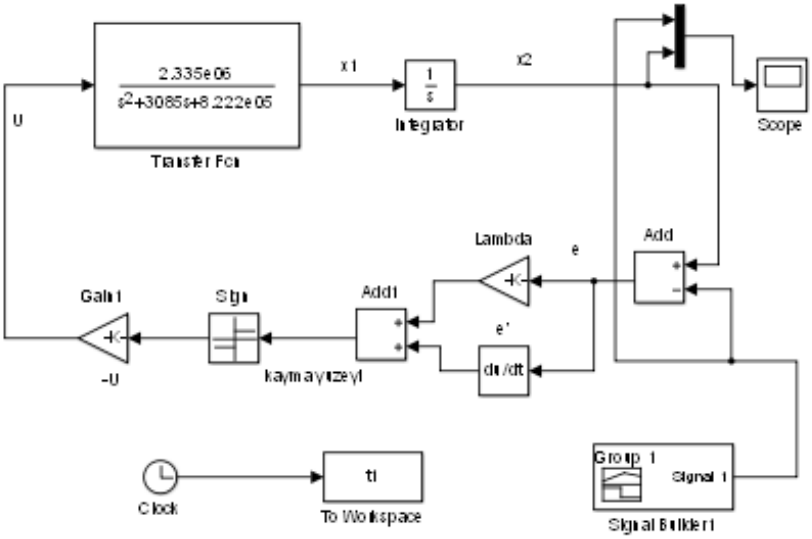


Şekil 4.1.2.1. 8 140 Volt step genlik - USM'nin Kayma Mod Kontrol yöntemi ile hızının zamana bağlı değişimi



Şekil 4.1.2.1. 9 140 Volt step genlik - USM'nin Kayma Mod Kontrol yöntemi ile hızının zamana bağlı değişimi (λ = 560)

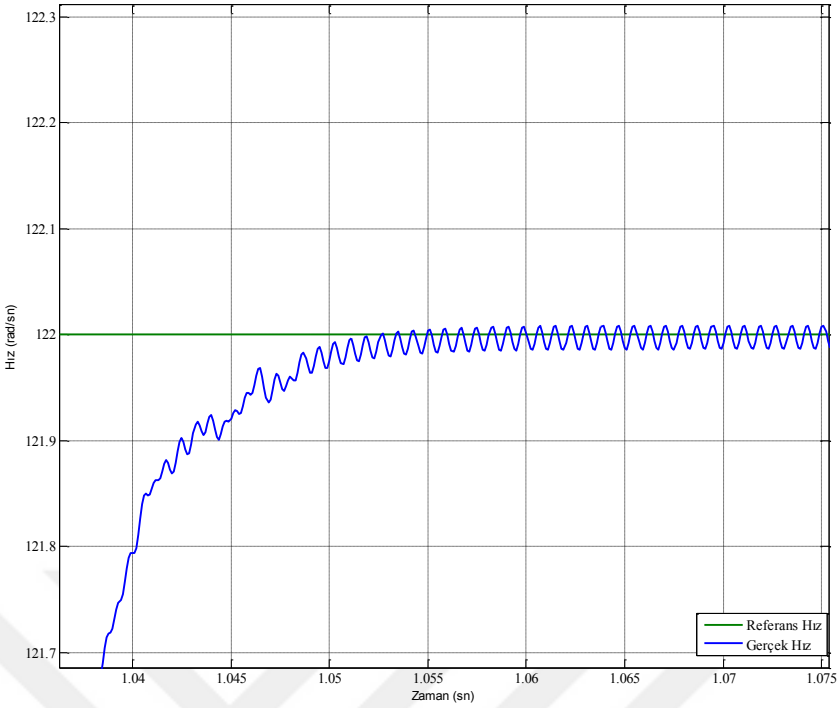
Şekil 4.1.2.1.10'da girişine sinyal jeneratörü ile elde edilen sinyalinin uygulandığı modelin Matlab Simulink'deki tasarımı görülmektedir. Sistemin girişine uygulanan değişken genlikli sinyal ile elde edilen sonuçlar zaman bazlı olarak workspace'e multisignalSCM isimli dizi içine alınmıştır.



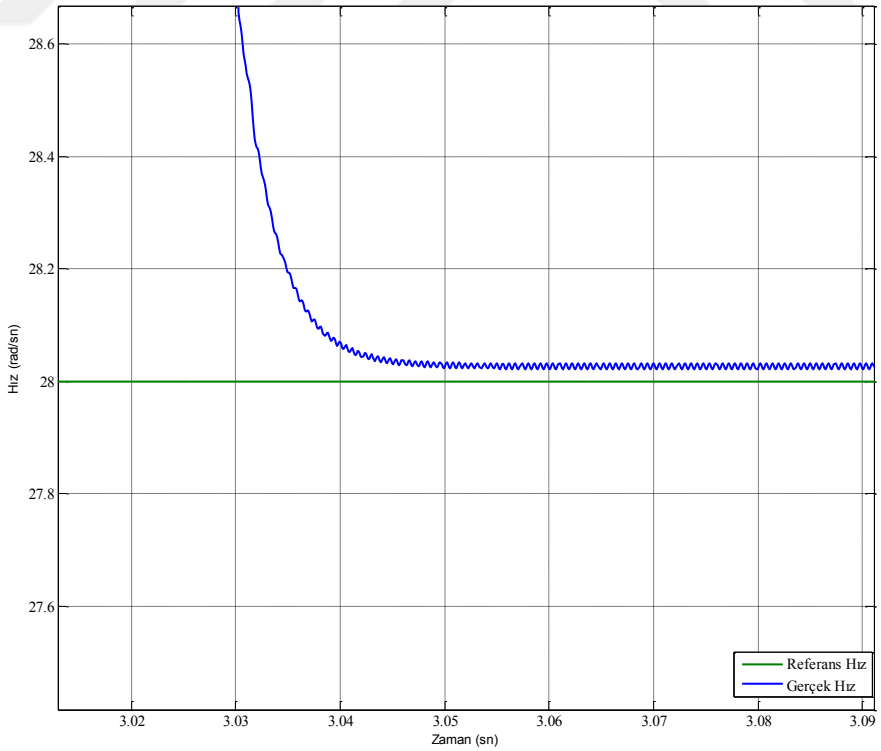
Şekil 4.1.2.1. 4 Matlab Simulink USM'nin Kayma Mod Kontrolör tasarımı sinyal jeneratörlü değişken genlik giriş

Sinyal jeneratörü ile üretilen sinyali uygulayarak Matlab workspace ortamında **plot(t,multisignalSCM)** komutu ile giriş sinyali ve kontrol sinyali çizdirilir. Uygulanan sinyalin yükselene kenara ait sistem hızının zamana bağlı değişimi Şekil 4.1.1.2.11'de görülmektedir.

Uygulanan sinyalin düşen kenara ait sistem hızının zamana bağlı değişimi Şekil 4.1.1.2.12'de görülmektedir.

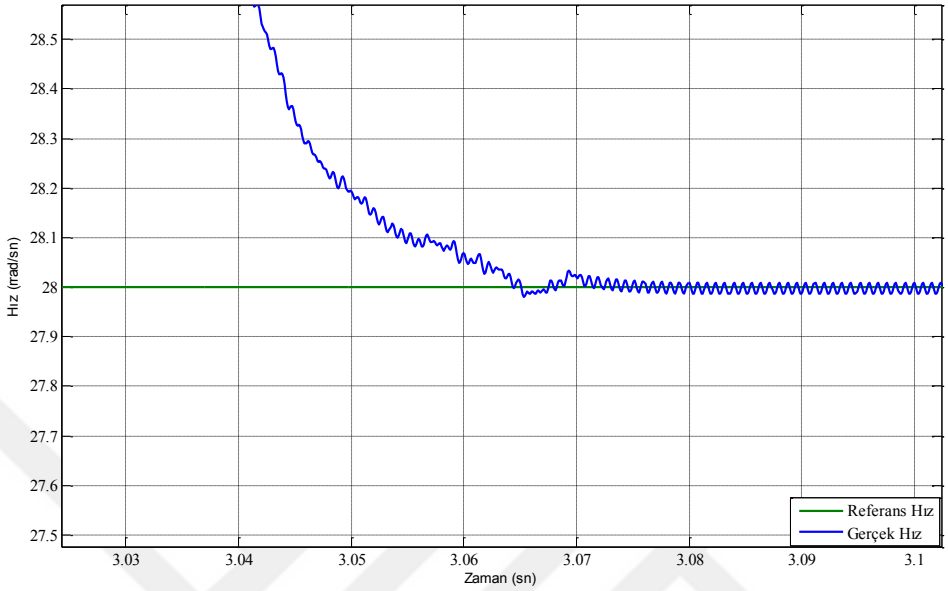


Şekil 4.1.2.1. 6 Sinyal jenatartörü ile üretilen sinyal - USM'nin Kayma Mod Kontrol yöntemi ile hızının zamana bağlı değişimi (yükselen kenar)



Şekil 4.1.2.1. 5 Sinyal jenatartörü ile üretilen sinyal - USM'nin Kayma Mod Kontrol yöntemi ile hızının zamana bağlı değişimi (düşen kenar)

Sistemin çıkışının referans değerden yüksek olması halinde Kayma Mod Kontrolör sabitlerinden λ değeri 250'den 150'ye düşürülerek çıkış sinyalinin referans sinyaline ait elde edilen grafik Şekil 4.1.2.1.13'de görülmektedir.



Şekil 4.1.2.1. 7 Sinyal jenatartörü ile üretilen sinyal - USM'nin Kayma Mod Kontrol yöntemi ile hızının zamana bağlı değişimi (düşen kenar, λ = 150)

SONUÇLAR

Çalışmada kullanılan piezo seramik malzemenin kullanıldığı bir motor çeşidi olan LR17 USM, endüstriyel uygulamalarda tercih edilen standart motorlara göre daha küçük düşük güçlerde maksimum torka sahip olması sessiz olması gibi üstün özelliklere sahip olması sebebi ile son zamanlarda tercih edilmeye başlanmıştır.

USM' de iki enerji dönüşümünden bahsedebiliriz. Yapısında bulunan piezo seramik malzemeye yani statora uygulanan yüksek frekanstaki gerilim ve buna bağlı piezo malzemenin uygun yapısı titreşim hareketi sergilemesi ve üzerine yapışık olarak kalan rotorun titreşime bağlı olarak hareket etmesi. Bu da elektriksel dönüşüm ve mekaniksel dönüşümün gerekliliğini göstermektedir. Motorun matematiksel modeli çıkarılırken bu iki dönüşüm göz önüne alınmalıdır. Matematiksel model çıkarılırken motorun yapısında bulunan piezo seramik malzemenin dielektrik özelliği ve buna bağlı olarak oluşacak olan histerisiz kayıpları da göz önüne alındı. Matlab üzerinde modelleme yapılmış olup motorun matematiksel modeli çıkarıldı.

Elde edilen matematiksel modele bağlı kalarak model oluşturma işlemi ve modele uygun kontrol tasarımı oldukça zordur. Ancak Matlab programının üzerinde modele bağlı kontroller tasarımında bize kolaylık gösteren ara yüzler ve arkalarında çalışan Kontrolör parametrelerini tahmin etmeye yönelik algoritmalar sayesinde daha kısa sürede ve doğru sonuçlar elde edildi.

Bu çalışmada iki farklı kontrol yöntemi kullanılarak USM konum kontrolü simulasonu gerçekleştirildi.

En yaygın kontrol yöntemlerinden olan PID kontrol yöntemi teorik olarak incelenmiş ve sistemin PID cevapları simulasyon ortamında incelenmiştir. PID kontroller tasarımında PID katsayıları Matlab simulink üzerinde PID araç kutusu üzerinde yer alan tunner ile hesaplanmıştır. Sabit genlik, step genlik 48 Volt ve 140 Volt giriş sinyaline, değişken genlik giriş sinyali uygulanan sisteme PID kontrolör bağlanarak kontrolörün sisteme etkisi simule edilerek incelenmiş ve sonuçları grafiksel olarak gösterilmiştir.

Çalışmanın temelini oluşturan kayan mod kontrol yöntemi ile sistemin tepkileri anahtarlama fonksiyonuna doğru sürüklenerek, sinyalin buraya tutunmasını sağlayacak kontrolör tasarlanmıştır. Modelin dinamik davranışı istenen performansa göre kontrolör parametreleri belirlenmiştir. Sabit genlik, step genlik 48 Volt ve 140 Volt giriş sinyaline, değişken genlik giriş sinyali uygulanan sisteme kayma mod kontrolör bağlanarak kontrolörün sisteme etkisi simule edilerek incelenmiş ve sonuçları grafiksel olarak gösterilmiştir.

Yapılan simülasyonlar neticesinde iki kontrol yöntemi incelendiğinde PID kontrörlü modelde çıkışın referans üzerine oturma süresi girişine uygulanan 48 Volt Step genlik ve 48 Volt sabit genlik için yaklaşık olarak 1.06 saniyedir ve çıkış sinyalinin referansa göre aşım görülmekte pik noktası 49,05 Volt seviyesidir; Kayma Mod Kontrolün kullanıldığı modelde çıkışın referans üzerine oturma süresi girişine uygulanan 48 Volt Step genlik ve 48 Volt sabit genlik için yaklaşık olarak 1.07 saniyedir ve çıkış sinyalinin referansa göre aşım görülmemektedir fakat çıkış sinyali kontrolör tarafından kayma yüzeyinde tutulmak istenmesi osilasyona neden olmaktadır. Bu nedenle çıkış sinyali referans sinyali üzerinde PID kontrolörün davranışından farklı olmaktadır. Osilasyon seviyesi çıkış sinyalini ±0,03 Volt kadardır ve kabul edilebilir bir değerdir. PID kontrollerin kullanıldığı sistemde sistemin cevabının %2 civarında aştığı salınımların kısa süre içinde sönüme uğradığı ve sinyalin referansa oturduğu gözlemlenmiştir. Kayma mod kontrollerin kullanıldığı sistemlerde cevabın hiç aşım yapmadan direkt referansa oturduğu tespit edilmiştir. Fakat çatırdama olayı çok küçük bir bant genişliği içerisinde olması itibarı ile sistem çıkış sinyali üzerinde sürekli rejim hatasına benzer bir görünüm görülmektedir. Sistemin çıkışının referansa oturma süresi PID kontrolörün kullanıldığı modelde Kayma Mod Kontrolörün kullanıldığı modeldekinden küçük bir farkla saniyenin 10 da biri oranında daha kısadır.

Sistemin girişine uygulanan gerilimin genliği yaklaşık 100 Volt arttırıldığında sistemin davranışı PID kontrolörün kullanıldığı model de değişmemektedir. Değişen sadece çıkış sinyalinin referansa oturma süresi ve maksimum aşım miktarı olmaktadır. Model üzerinde yapılan simülasyonda PID kontrolörlü modelde çıkışın referans üzerine oturma süresi girişine uygulanan 140 Volt Step genlik ve 140Volt sabit genlik için yaklaşık olarak 1.065 saniyedir ve çıkış sinyalinin referansa göre aşım görülmekte pik noktası 143.06 Volt seviyesidir. Kayma Mod Kontrolün kullanıldığı modelde çıkışın referans üzerine oturma süresi girişine uygulanan 140 Volt Step genlik ve 140 Volt sabit genlik için yaklaşık olarak 1.07 saniyedir. Çıkış sinyalinin referansa göre aşım görülmemektedir fakat giriş sinyalindeki yükselmeye bağlı olarak çıkış sinyalinin referansın üzerinde osliasyona devam etmektedir. bu nedenle kayma yüzeyinin belirlediği λ değeri 250'den 560'a çıkarılarak çıkış sinyalinin referans sinyali üzerinde yani kayma yüzeyinde tutulması sağlanabilmiştir.

Model üzerine sinyal jeneratörü ile üretilen sinyal uygulandığında çıkış sinyalinin referans sinyali üzerine oturması sırasında değişken genlik seviyelerinde kontrolörün parametrelerine müdahale gerekmektedir.

Kayma Mod Kontrol yönteminde motor parametrelerindeki değişim kontrolörün tepkisini değiştirmekte olup, Kontrolörün parametrelerine dolayısı ile sisteme müdahale gerektirmektedir.

USM' un çalışma parametrelerinin baskı, ısıya bağlı olarak oluşan sıcaklık, yük ve sürtünmelerden kaynaklı değiştiği bilinmektedir. Kayma mod kontrol yöntemi ile motorun bu parametreler ile ilişkisi incelenerek motor üzerindeki etkisi araştırılabilir.

Ayrıca sürekli zaman olarak tasarlanan kayan mod kontrol simülasyonu ayrık-zaman da uygulanabilir ve/veya simulasyon ortamında çalıştırılabilir.

KAYNAKLAR

[1] Koç, B., “Robotik2 piezo-elektrik ultrasonik motorlar”, Bilim ve Teknik dergisi 7:7(2003).

[2] Bekiroğlu, E. ve Bal, G.,“Ultrasonik motorlar II: Sürme ve kontrol devrelerinin incelenmesi”, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Vol. 14 (1), pp. 99-115, 2000.

[3] Bal, G. ve Bekiroğlu E., Bayındır, R. ve Görgün, A., “Yürüyen dalga tip ultrasonik motor denetimi ve bilgisayarla izlenmesi”, Politeknik Dergisi, Vol. 9 (4), pp. 225-231, 2006.

[4] Hüner E., Engin Ş.N., “Yürüyen Dalga Tipli Ultrasonik Motorun Modellenmesi”, Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 11. Ulusak Kongresi ve Fuarı, 2005.

[5] Gencer, A. “Yürüyen dalga ultrasonik motorun üç-mod çalışma özelliklerinin incelenmesi”, Doktora tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, pp. 8-100, 2011.

[6] Bekiroğlu, E., Bal, G., “Ultrasonik motorlar I: Yapılarının ve temel prensiplerinin incelenmesi”, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 13 (4): 1119-1128 (2000).

[7] Bal, G., Bekiroğlu, E., Bayındır. R., ve Uzel, H.“Microcontroller based digitally controlled ultrasonic motor drive system”, Journal of electroceramics, Vol. 20 (3-4) , pp. 265-270, 2008.

[8] Bal, G. ve Bekiroglu, E.“A highly effective load adaptive servo drive system for travelling wave ultrasonic motor”, IEEE Trans. Power Electron.,pp. 1143–1149, 2005.

[9] Bal, G., Bekiroglu, E, “Characteristics estimation of travelling wave ultrasonic motors using equivalent circuit model”, Int. Conf. on Electrical and Electronics Eng. ELECO'2001, Bursa-Turkey, 62-66 (2001).

[10] H.Hirata Ueha S. 1993, Charesteristic Estimation of a Traveling Wave Type Ultrasonik Motor, IEEE Transaction on Ultrasonic, Ferroelectics and Frequency Control, vol.40

[11] Hirata H, Ueha S. 1995, Desing of a Travelling Wave Type of Ultrasonic Motor, IEEE Transaction on Ultrasonic, Ferroelectics and Frequency Control, vol.42 no.2

[12] Senjyu T, Uezato K. 1994, Adjustable Speed Control of Ultrasonic Motors by Adaptive Control, IEEE.

[13] Senjyu T, Yokoda S, Miyazato H, Uezato K. 1997, Speed Control of Ultrasonic Motors by Adaptive Control with a Simplified Mathematical Model, IEEE Proc-Electr. Power Appl. Vol. 145 No.3.

[14] Senjyu T, Yoshida T, Uezato K, Urasaki N, Panda S.K. 2003, Spped Sensorless Control of Ultrasonic Motors Using Neural Network, IEEE.

[15] Lin F.J, Duan R.Y, Wai R.J, Hong C.M. 1997, LLCC Resonant Inverter for Piezzoelektrik Ultrasonic Motor Drive, IEE Prog-Electr. Power Appl. Vol.146. No.5.

[16] Hyeung Woo Kim,Shuxiang Dong, Pitak Laoratanakul, Kenji Uchino. 2002, Novel Metod for Driving the Ultrasonic Motor, IEEE Transaction on Ultrasonic, Ferroelectics and Frequency Control, vol.42 no.2

[17] Chau K.T, Chung S.W, Chan C.C. 2003, Neuro-Fuzzy Speed Tracking control of Travelling Wave Ultrasonic Motor Drives Using Direct Pulsewidth Modulation, IEEE Transaction on Industry Applications vol.39, No.4.

[18] Qu Jianjun, Zhou Tieying. 2003, An Elecric Contact Method to Measure Contact State Between Stator and Rotor in a Travelling Wave Ultrasonic Motor, Elseiver Ultrasonics 41.

[19] Roh Yongrae,Kwon Jaehwa. 2004, Development of a New Standing Wave Type Ultrasonic Linear Motor, Elseiver Sensors and Actuators

[20] Bal, G., Bekiroğlu, E., "Characteristics estimation of travelling wave ultrasonic motors using equivalent circuit model" Int. Conf. On Elektrical and Elektronics Eng. ELECO'2001, Bursa-Turkey,62-66(2001).

[21] Hirata, H., Ueha, S., Design of a traveling wave type ultrasonik motor, IEEE Transaction on Ultrasonic, Ferroelectrics and Frequency Control, 42 (2), 225-231(1995).

[22] [01.12.2017] https://www.piezomotor.com /products/rotary-piezo-motor/rotary-30mnm-standard-position-sensor/

[23] Bal, G., A Digitally controlled drive system for travelling wave ultrasonic motor, Tübitak 11(3), 155-168 (2003).

[24] [05.11.2017] https://www.piezomotor.com/wp-content/uploads/150063_LR17.pdf

[25] Edin Golubovic, Tarik Uzunovic, Zhenishbek Zhakypov, Asif Sabanovic Adaptive Control of Piezoelectic Walker Actuator, IEEE Internationa Conference on Mechatronics, ICM 2013, Vicenza (ITALY) - February 27-28, March 1 2013., in press.

[26] [16.12.2017] Hüner, Engin, Şeref Naci ENGİN. "Yürüyen dalga tipli ultrasonik motorun modellenmesi.", emo.org.tr

[27] Bekirkoğlu, E., Yürüyen dalha ultrasonik motorun hız ve konum denetiminin bulanık mantık denetleyici kullanılarak gerçekleştilmesi", Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 9-115 (2002).

[28] EDWARDS, C., SPURGEON, S.K., Sliding mode control theory and applications, Taylor&Francis, pp. 1-65, 1998

[29] HUNG, J.Y., GAO, W., HUNG, J.C., Variable structure control a survey, IEEE Trans, Ind.Elect., 40, 1, pp. 2-18,1993

[30] Kayışlı K. 2004. Asenkron Motorun Kayma Mod Algılayıcısız Hız Kontrolü. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ.

ÖZGEÇMİŞ

Hüseyin Taş, 01.05.1983 tarihinde Akhisar'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Akhisar'da tamamladı. Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektronik-Bilgisayar Eğitimi Bölümü Bilgisayar ve Kontrol Öğretmenliği programından 2008 yılında, Fen Bilimleri Enstitüsü Mekatronik Tezli Yüksek Lisans Programından 2018 yılında mezun oldu. 2011 yılında İstanbul Gelişim Üniversitesi Gelişim Meslek Yüksekokulu Bilgisayar Teknolojileri Bölümü Bilgisayar Programcılığı Programında Öğretim Görevlisi olarak göreve başladı. 2017 yılında İstanbul Gelişim Üniversitesi Gelişim Meslek Yüksekokulu'ndaki görevinden ayrılarak, Manisa Celal Bayar Üniversitesi Salihli Meslek Yüksekokulu Bilgisayar Teknolojileri Bölümü Bilgisayar Programcılığı Programında Öğretim Görevlisi olarak göreve başladı. Halen Aynı görevde çalışmaya devam etmektedir.