

T.C.
KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI



FİRÇASIZ DC MOTORUN HIZ KONTROLÜ İÇİN BULANIK
AKILLI SİSTEM UYGULAMASI

ESMAEL OMMAR MAHDI OMMAR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

PROF. DR. AYBABA HAÇERLİOĞULLARI

HAZİRAN - 2021

KASTAMONU

TEZ ONAYI

Esmael Ommar Mahdı OMMAR tarafından hazırlanan “**FİRÇASIZ DC MOTORUN HIZ KONTROLÜ İÇİN BULANIK AKILLI SİSTEM UYGULAMASI** ” adlı tez çalışmasının savunma sınavı **25.05.2021** tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Danışman	Prof. Dr. Aybaba HANÇERLİOĞULLARI Kastamonu Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Prof. Dr .Erol KURT Gazi Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Dr. Öğrt. Üyesi Ümit Tökeşer Kastamonu Üniversitesi	

Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Enstitü Müdürü	Prof. Dr. İzzet ŞENER	
----------------	-----------------------	-------

TAAHHÜTNAME

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu; ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını, bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini bildirir ve taahhüt ederim.

Esmael Ommar Mahdi OMMAR

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FIRÇASIZ DC MOTORUN HIZ KONTROLÜ İÇİN BULANIK AKILLI SİSTEM UYGULAMASI

ESMAEL OMMAR MAHDİ OMMAR

KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
DANIŞMAN: PROF.DR. AYBABA HANÇERLIOĞULLARI

Bu çalışmada bulanık akıllı sistem kullanılmış ve fırçasız DC hızlı motor kontrolü için analiz edilmiştir. Orantılı kontrolör, motorun hızını kontrol etmek için kullanılmıştır. Sugeno, dokuz rol ile bulanık mantık denetleyicisinde kullanılmıştır. Bulanıklığın girdisi hata ve hatanın türevidir. Ayrıca bu tezde güç ve bulanık mantık araç kutusu kullanılmıştır. Bu tezde, model referans tabanlı bulanık denetleyici kullanarak BLDC motor kontrolünü gerçekleştiriyoruz. Bu sistemin uygulanması üç aşamalıdır. İlk adım, referans modelin tasarlanmasıdır. İkinci adım ise Santral Modelidir. Santral modeli için BLDC motor kullanıyoruz. Son adım, bulanık denetleyiciyi tasarlanmasıdır. Modelin uygulanması için MATLAB- Simulink 2020a sürümü kullanılmıştır.

ANAHTAR KELİMELEER: DC motor kontrolü, bulanık mantık, orantılı kontrolör

Haziran 2021, 43 Sayfa

ABSTRACT

MSC THESIS

AN APPLICATION OF FUZZY INTELLIGENT SYSTEM FOR BRUSH LESS DC SPEED MOTOR CONTROL

ESMAEL OMMAR MAHDİ OMMAR

**KASTAMONU UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING
SUPERVISOR: PROF.DR. AYBABA HANÇERLIOĞULLARI**

In this study the fuzzy intelligent system is used and analyzed for brush less dc speed motor control. The proportional controller was used to control the speed of the motor. The Sugeno is used in the fuzzy logic controller with nine rules. The input of the fuzzy was error and derivative of the error. Also the power and fuzzy logic toolbox is used in this thesis. In this thesis, we perform BLDC motor control using a model reference based fuzzy controller. The implementation of this system has three stages. The first step is to design the reference model. The second step is the Power Plant Model. We use BLDC motor for the power plant model. The final step is designed the fuzzy controller. For implementation of the model we used the MATLAB – Simulink version 2020a.

KEYWORDS: DC motor control, Fuzzy logic, Proportional controller

June 2021, 43 Page

TEŞEKKÜR

Bu bölümde, tezi hazırlayan tarafından vurgulanmak istenen çalışma ile ilgili ek bilgilerden, çalışmayı kısıtlayıcı ve / veya olumlu etkenlerden söz edilir. Bu bölüm bir sayfayı geçmemelidir. Gerekliyse bu bölümün son kısmında, tez çalışmasında ve tezin hazırlanmasında doğrudan katkısı bulunan kişilerle, doğrudan ilgili olmadığı halde olağan görevi dışında katkıda bulunmuş kişi ve kuruluşlara teşekkür edilmelidir. Teşekkür edilen kişilerin varsa unvanı, adı soyadı, parantez içinde görevli olduğu kuruluş ve çalışmaya olan katkısı kısa ve öz biçimde belirtilmelidir. Tez çalışması bir proje kapsamında gerçekleştirilmişse, projenin adı ve numarası ile ilgili kuruluşun adı da bu bölümde belirtilmelidir.

Esmael Ommar Mahdi OMMAR

Kastamonu, 2021

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEZ ONAYI	ii
TAAHHÜTNAME	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
TABLolar DİZİNİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	x
1. GİRİŞ.....	1
2. FIRÇASIZ DC MOTOR.....	3
2.1 Arka Plan.....	3
2.2 Servo Kontrol İçin Doğrusal Motorlar	5
2.3 Doğrusal Sürücülerle İ̇sabetli Konum Kontrolü.....	9
2.4 Takım Tezgâhı Sürücülerini İçin Performans Ölçümleri	11
2.5 Doğrusal Motorlu Dirençli Hareket Kontrolörleri	11
2.6 Değişken Dinamikli Sistemlerin Hareket ve Titreşim Kontrolü	17
2.7 Modüler Hareket Kontrol Sistemleri	19
3. BULANIK MANTIK	21
3.1 Temel Bilgi.....	21
3.2 Uygulama	21
3.3 Komutasyon.....	21
3.4 Sensör Kontrollü Komutasyon	22
3.5 Sensörsüz Komutasyon	22
3.6 Diğer Fırçasız Makineler	23
3.7 Bulanık Mantık ve Karar Verme	23
3.8 Bulanık Kümeler ve Üyelik İşlevleri.....	27
3.9 Bulanık Mantığın Avantajları ve Dezavantajları.....	27
3.9.1 Avantajlar.....	27
3.9.2 Dezavantajlar	28
3.10 Bulanık Mantığın Kullanım Alanları	28
4. BENZETİM SONUÇLARI	31
4.1 Model Referansı Tabanlı Bulanık Denetleyiciyi Kullanarak DC Motor Kontrolü.....	31
4.1.1 Referans Model.....	31
4.1.2 Bulanık Denetleyici	31
4.1.3 Sistemin Blok Diyagram Modelini Oluşturma	32
4.1.4 Model Referans Uyarlamalı Kontrol Sistemi	33
4.2 Bulanık Mantık.....	34
5. SONUÇ VE TARTIŞMALAR	39
KAYNAKLAR	40
ÖZGEÇMİŞ.....	43

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 Fırçalı doğrusal DC servo motor.....	6
Şekil 2.2 Demir çekirdekli doğrusal fırçasız servo motor.....	6
Şekil 2.3 Simetrik olarak düzenlenmiş, demirsiz çekirdekli, doğrusal fırçasız servo motor.....	8
Şekil 2.4 Doğrusal hibrit adımlama motoru.....	8
Şekil 2.5 Doğrusal motorlu paralel kinematik makine.....	10
Şekil 2.6 Modüler makine tasarımı	10
Şekil 2.7 Genel hareket kontrol şeması: C denetleyiciyi temsil eder; G, kontrol edilecek sürücüyü ve yükü temsil eder; d harici müdahaledir (kesme kuvveti, sürtünme, vb.); y_{ref} referans yörüngedir ve y sonuçta ortaya çıkan yörüngedir.	12
Şekil 2.8 Yük kütesini değiştirmek için farklı hareket kontrolörlerinin direnç davranışı.....	13
Şekil 2.9 Doğrusal sürücülere sahip modüler XY tablosu	14
Şekil 2.10 XY tablosu deneyleri için kontrolör yapısı.....	14
Şekil 2.11 Kontur hataları. (a) Saf geri besleme, (b) Geri besleme + ileri hızlanma beslemesi, (c) Geri besleme + hızlanma + ileri hız beslemesi	15
Şekil 2.12 Konturlama sırasında çeyrek aksaklık, sol: kademeli denetleyici ile, sağ: kayan mod denetleyici ile.....	16
Şekil 2.13 Tornalama için hızlı doğrusal tahrikli eklentili uç tutucu.....	17
Şekil 2.14 Doğrusal sürücülere sahip kızaklı al ve yerleştir makinesi.....	18
Şekil 2.15 Değişken düzenlenimliler için dirençli hareket ve titreşim kontrolü.....	18
Şekil 2.16 Yüksek performanslı merkezi olmayan hareket kontrol sistemi.....	20
Şekil 3.1 Klasik Bulanık Küme.....	25
Şekil 3.2 Bulanık mantık üyelik işlevi	26
Şekil 3.3 Bulanık Mantık Çıkarım Sisteminin Genel Yapısı	27
Şekil 4.1 Referans model	31
Şekil 4.2 Bulanık denetleyici	32
Şekil 4.3 Jeneratör darbe fonksiyonu	33
Şekil 4.4 Oda sıcaklığı için bulanık mantık	34
Şekil 4.5 SIMULINK'te bulanık denetleyici.....	35
Şekil 4.6 Giriş e 'nin Bulanık Alt Küme Dağılımı	35
Şekil 4.7 Bulanık alt küme dağılımı.....	36
Şekil 4.8 Du'nun Bulanık Alt Küme Dağılımı	36
Şekil 4.9 Kural görünümü	37
Şekil 4.10 e, de ve du'nun yüzeyi.....	37
Şekil 4.11 Bulanıkta kullanılan kurallar.....	38
Şekil 4.12 Önerilen yöntemin benzetim sonucu	38

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2.1 Sık kullanılan doğrusal motor tiplerinin göze çarpan özellikleri.....	9
Tablo 3.1 Klasik Mantık ile Bulanık Mantık arasındaki Temel Farklar	24
Tablo 3.2 Bulanık kontrol uygulamaları	41



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

$^{\circ}$ el. : Uzay vektörü gösteriminin açısı

Kısaltmalar

ALU	: Aritmetik Mantık Birimi
ANFIS	: Adaptive Neural Fuzzy Inference System
BLDC	: Brushless Direct Current Motor
CPU	: Merkezi İşlem Birimi
DSP	: Dijital Sinyal İşlemci
EMI	: Elektromanyetik Girişim
PWM	: Darbe Genişliği Modülasyonu
VCM	: Ses Bobini Motorları

1. GİRİŞ

Fırçasız DC motorlar, yüksek verimlilikleri, düşük EMI (Elektromanyetik Girişim) ve yüksek mekanik güvenilirlikleri sebebiyle silah sistemleri (Muniraj ve Arulmozhiyal, 2015), robotik, endüstriyel ve ticari uygulamalar gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Fırçasız bir DC motor, geniş bir hız aralığında çalışırken, fırçalanmış bir motorun hız aralığı, komütasyon özellikleri nedeniyle sınırlıdır. Fırçaların bulunmaması nedeniyle fırçasız motorlarda fırça kaynaklı EMI ortadan kaldırılmıştır. Endüksiyon makinelerine kıyasla, rotorda mekanik bir komütatör olmadığından daha hızlı yanıt vermeyi sağlayan daha düşük ataletlere sahiptirler. Bununla birlikte, fırçasız bir motor, konum ve hız/tork kontrolü, algoritmalar, güç elektroniği devresi (Rodriguez ve Emadi, 2007) ve sayısal hesaplamalar (Kos vd., 2006) açısından daha karmaşıktır.

Güdümlü bir füzenin kontrol çalıştırma sisteminin BLDC (Fırçasız Doğru Akım) motor kontrol sistemindeki elektronik kart sayısının azaltılması, bu çalışmanın ana nedenini oluşturmaktadır. Mevcut motor kontrol sistemi iki elektronik kart ve dört fırçasız DC motor içerir. İki elektronik kart üzerindeki motor kontrol yapıları, alan, fiyat, tasarım süresi ve esneklik açısından zorluklar yaratabilir. Ancak bu sistemde çoklu kartların kullanılmasının ana nedenleri, aralarında oluşabilecek elektromanyetik parazitlerden dolayı dijital ve güç elektronik parçalarının izole edilmesi ve farklı platformlarda akım ve konum kontrolörlerinin uygulanmasıdır. Örneğin; pozisyon kontrolörü, bir DSP (Dijital Sinyal İşlemci) çipinde ve akım kontrolörü, analog entegre devrelerin yardımıyla kart üzerinde uygulanır. Ek olarak, PWM (Darbe Genişliği Modülasyonu) uygulaması ve bazı I/O işlevleri için bir FPGA çipi de kullanılır. Bu sistemdeki elektronik kartlardan biri FPGA, güç elektroniği devresi ve akım kontrolü için analog entegre devreler içerirken, diğer kart DSP çipini ve diğer bazı motor pozisyon sensörü arayüzlerini içerir. Kart sayısının azaltılması için panolarda bileşen sayısının azaltılmasına yönelik yeni bir kontrol şeması uygulanmalıdır. Çalışmanın başında; motor kontrol alanındaki kontrol şemaları incelenir ve yeni kontrol sistemi için en uygun yapı seçilir.

Motor kontrol alanında farklı kontrol şemaları bulunmaktadır. DSP artı FPGA tabanlı yapı en popüler olanıdır ve motor kontrol alanında yaygın olarak kullanılmaktadır (Wang vd., 2008). Ek olarak, bu yapı aynı zamanda mevcut sistemin kontrol sisteminde de kullanılmaktadır. Tersine, FPGA'nın DSP çipleri ile kullanılması elektronik kartların karmaşıklığını artırır, sistemin güvenilirliğini azaltır ve tasarım sürecini karmaşıklaştırır. Bu kontrol şemasında; FPGA çipleri tam olarak değerlendirilmemekte ve PWM uygulaması, I/O (Giriş Çıkış) fonksiyonları, iletişim arayüzleri için tutkal mantığı vb. gibi basit fonksiyonlar için kullanılmamaktadır (Shao ve Sun, 2006).

Bununla birlikte, yüksek örnekleme hızı ve konum kontrol algoritmaları gerektiren karmaşık akım kontrol algoritmaları, dijital sinyal işlemci çiplerinde uygulanmaktadır.

Sonuç olarak tasarımcı, yüksek akım örnekleme hızı ile konum kontrol frekansı arasında bir seçim yapmak zorundadır çünkü DSP çipleri sıralı bir şekilde çalışır.

Bu kontrol şemasının bir başka handikapı, DSP çiplerinin hız (saniye başına işlem), CPU sayısı (Merkezi İşlem Birimi), ALU (Aritmetik Mantık Birimi) çekirdekleri ve PWM kanallarının sayısı bakımından sınırlı kapasiteye sahip olması nedeniyle, bağımlı ve bağımsız şekilde kontrol edilmesi gereken N tane motor gerektiren uygulamalarda ortaya çıkmaktadır (Ayasrah vd., 2006). DSP çiplerinin hesaplama yükünü azaltmak, mevcut örnekleme oranını ve akım güncelleme frekansını artırmak için, akım kontrol döngüsü analog devrede uygulanmaktadır (Tzou ve Kuo, 1997).

DSP yükündeki azalışa rağmen, elektronik kartların boyutu, elektronik tasarım sürecinin karmaşıklığı ve kartlarda problem olasılığı, analog devrede akım kontrol döngüsünün uygulanması nedeniyle önemli ölçüde artmaktadır. Bu dezavantajlara ek olarak; PI denetleyicisi ve yüksek akım sınırları gibi diğer parametreler açısından akım denetleyicisinin yapılandırılması, dijital uygulamaya göre daha zor hale gelir.

Bu çalışmada bulanık akıllı sistem kullanılmış ve fırçasız DC hız motoru kontrolü için analiz edilmiştir. Orantılı kontrolör, motorun hızını kontrol etmek için kullanılmıştır. Sugeno, dokuz rol ile bulanık mantık denetleyicisinde kullanılmıştır. Bulanıklığın girdisi hata ve hatanın türevidir.

2. FIRÇASIZ DC MOTOR

2.1 Arka Plan

Fırçasız motor kontrolü için bir başka popüler kontrol şeması, uygulamaya özel mikro denetleyicilere dayanmaktadır. Motor kontrolü için özelleştirilmiş mikro denetleyiciler, PWM kanalları, geri besleme akımı kanalları ve konum geri besleme giriş kanalları açısından sınırlı kapasiteye sahiptir. Sınırlı kaynaklar nedeniyle; bu yapıda sınırlı sayıda motor kontrol edilebilir. Mikro denetleyicilerin çip boyutunu küçültmek için çip tasarımcıları, mikro denetleyiciye akım geri beslemesini okumak için kullanılan bir veya iki çoklanmış analogdan dijitale dönüştürücü bloklar koymuştur. Fırçasız DC motor, DC makinenin çalışma prensibine aykırı bir şekilde temellendirilmemiştir ancak sabit mıknatıslar tarafından uyarılan üç fazlı senkron bir makine olarak tasarlanmıştır. (Genellikle üç telli) üç fazlı sargı, sabit mıknatıslı rotor boyunca çekilen ve dönen bir manyetik alan oluşturur. Uygun bir kontrol devresi aracılığıyla, bir DC makinesinin davranışına karşılık gelen bir kontrol yanıtı elde edilir. Bu amaçla, ara devrenin doğrudan değişken bir DC gerilimine beslenebildiği ve böylece motorun hızını kontrol ettiği blok komütasyonlu basitleştirilmiş bir AC sürücü kullanılır (Fujii vd., 2018).

Doğrusal motorların takım tezgahlarında kullanımı yükseliştir. Birçok takım tezgâhı üreticisi halihazırda doğrusal tahrikli makineler sunmaktadır. Doğrusal motorlar özellikle yüksek hassasiyetli, yüksek hızlı, yüksek güvenilirliğe sahip takım tezgahlarındaki ilerlemeli sürücüler için uygundur (Samahy ve Shamseldin, 2018).

Doğrusal motor sürücülerini kullanmanın bilinen birçok avantajı vardır. Birincisi, çok yüksek konumlandırma döngüsü bant genişliklerinin elde edilebilmesidir. Bunun nedeni, hareketli gövdenin dinamiklerinin çok basit olmasıdır. Aslında, doğrudan lineer bir motorla tahrik edilen makaralı kılavuzlar üzerindeki bir takım tezgâhı tablası, bir kuvvete maruz kalan sönümlenmiş bir kütleden başka bir şey değildir. Geleneksel döner servo motor sürücülerdeki kılavuz vidalı aktarımlardan gelen ve konumlandırma bant genişliğini sınırlayan düşük frekanslı yapısal rezonanslar, doğrusal sürücülerde tamamıyla yoktur. Kalan artık modlar, ör. pozisyon sensörü bağlantılarından gelen,

çok yüksek frekanslarda meydana gelir ve bant genişliği üzerinde hiçbir zararlı etkisi yoktur. Ancak bu daha yüksek kontrol bant genişlikleri, daha yüksek bir kodlayıcı bant genişliği ve servo örnekleme frekansı gerektirir (Linder, 2019).

İkinci bir avantaj, aktarım mekanizmalarında (dişli kutuları, harmonik sürücüler, kremayer sistemleri vb.) sürtünme ve boşluk olmamasıdır, böylece toplam sistem sürtünmesi kılavuz yollarındaki (düşük) sürtünmeye indirgenir. Bu, yüksek hassasiyetli makineler için avantajlı bir özelliktir. Bu durum, ultra hassas makinelerin çoğunlukla doğrudan tahrik sistemleriyle (ve sürtünmeyi tamamen ortadan kaldıran aerostatik kılavuzlarla) donatıldığını kısmi olarak açıklar.

Doğrusal motorlarla ilgili birkaç önemli dezavantaj da vardır. Ana dezavantaj, takım tezgahlarındaki kesme kuvvetleri veya kılavuz yollarındaki sürtünme kuvvetleri gibi rahatsızlıkların doğrudan motor tarafından hissedilmesidir. Hareket yönündeki sürücü sertliği tamamen servo kontrolör sertliği tarafından belirlenir (Emadi, 2018).

İkinci bir olumsuz özellik, motordan yüke optimal güç aktarımı açısından, doğrudan tahrikin genellikle uygun olmamasıdır. (Optimal güç aktarım teoreminin doğrudan lineer sürücülere uygulanması, yük ataletinin ve kaydırıcı ataletinin eşit olmasını gerektirecektir; bu, pratik uygulamalarda hiçbir zaman geçerli değildir.) Sonuç, lineer sürücülerde yük atalet varyasyonlarının, sürücünün davranışı üzerinde önemli ölçüde etkisi olmasıdır (Thomas ve Hariharan, 2019).

Bazı doğrusal motor türleriyle, özellikle de demir çekirdekli fırçasız servo motorlarla ilişkili üçüncü bir dezavantaj, yüksek düzeyde ısı üretimi ve sürgü ile palet arasındaki yüksek çekim kuvvetleridir. Demirsiz motorlarda bu sorunlar yoktur, ancak itme kuvveti yoğunlukları belirgin şekilde daha düşüktür. Yüksek çekim kuvvetleri ve ısı giderme problemi, motorların makine yapısına nasıl dahil edileceğine dair özel tasarım hususları gerektirir.

Makine tasarımcılarının özel dikkatini gerektiren son bir konu, doğrusal motor paletlerindeki mıknatısların çektiği (çelik) çiplerin yönetimidir.

2.2 Servo Kontrol İçin Doğrusal Motorlar

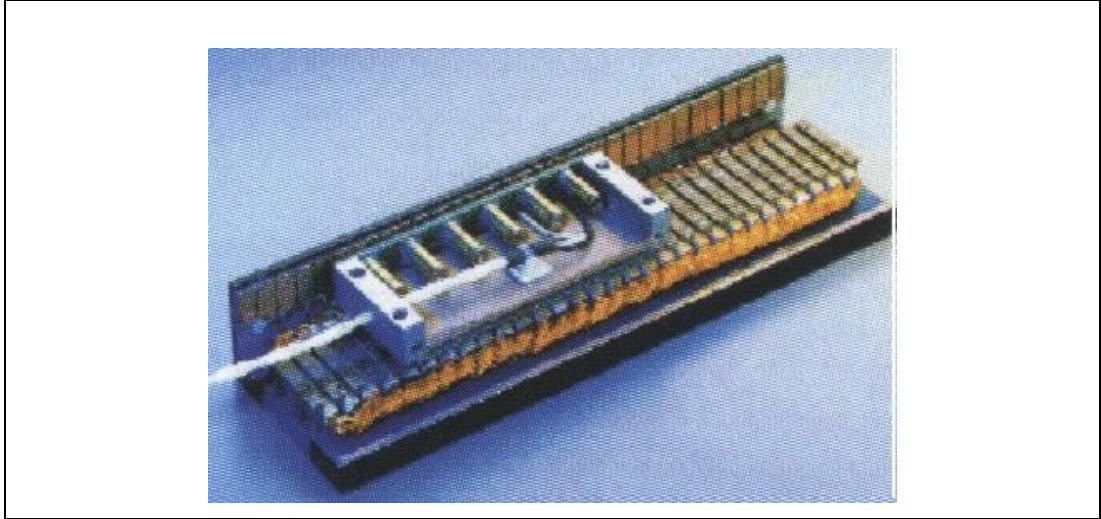
Doğrusalda olduğu gibi aynı tipler döner elektrik motorlarında da mevcuttur. Takım tezgahlarında servo uygulamaları için kullanılan ana döner motor tipleri şunlardır:

- i. Kalıcı mıknatıslı DC motor,
- ii. Fırçasız DC (veya istenirse AC), trapezoid veya sinüzoidal uyarımlı motor,
- iii. İndüksiyon veya asenkron motor
- iv. Değişken dirençli veya hibrit adımlama motoru

Bu türlerin her birinin doğrusal versiyonları mevcuttur; karşılık gelen döner motorun 'dönmeyen' versiyonu olarak düşünülebilirler (Bhatt vd., 2018).

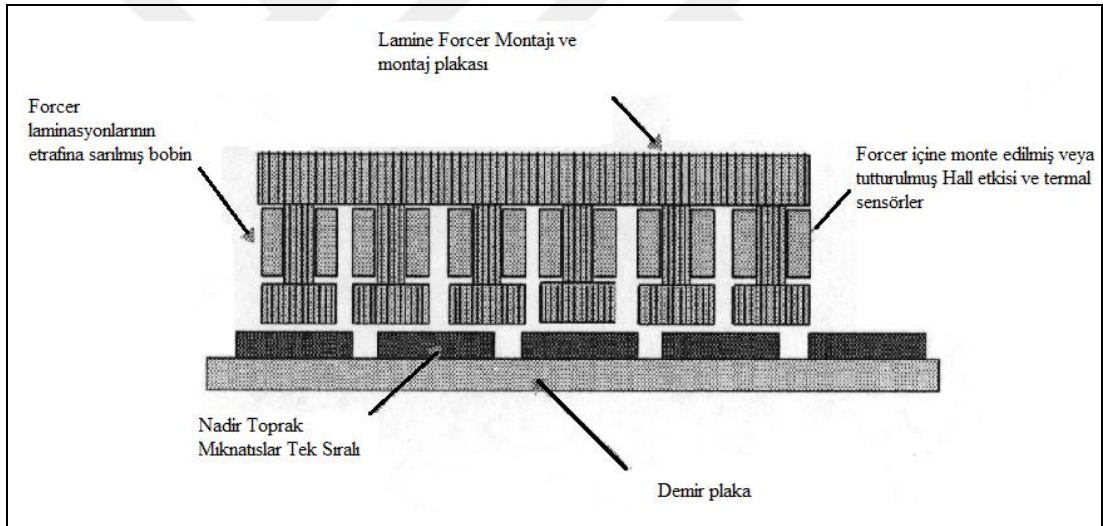
Bunun bir istisnası, yalnızca lineer versiyonunda bulunan ses bobini veya Lorentz motorudur. Lorentz motorunun bir örneği hoparlördür. Ses bobini motorları (VCM), mükemmel kontrol edilebilirlikleri ve yüksek bant genişlikleri nedeniyle yüksek hassasiyetli mekatronik konumlandırma sistemlerinde giderek daha fazla kullanılmaktadır. Solenoidlerin aksine, tam vuruş boyunca sabit kuvvet sağlarlar. Bilgisayar ekipmanlarında (disk sürücülerinde) kullanımları yaygındır (Lin vd., 2018).

DC fırçalı lineer servo motorlar (Şekil 2.1), döner DC servo motorlarda olduğu gibi, aşınmaya meyilli fırçaların düzenli olarak değiştirilmesi gerekliliği nedeniyle yaygın değildir. Bununla birlikte bir avantajı, komutasyonun motorun kendisinde yapılması nedeniyle, PWM amplifikatörlerinin basit lineerinin kullanılabilmesidir.



Şekil 2.1 Fırçalı doğrusal DC servo motor (Nagaoka ve Fujita, 2018)

Demir çekirdekli lineer fırçasız servo motor Şekil 2.2'de gösterilmektedir.



Şekil 2.2 Demir çekirdekli doğrusal fırçasız servo motor (Nagaoka ve Fujita, 2018)

Fırçasız lineer servo motorlar, fırçasız DC (BLDC) servo motorların lineer eşdeğerleridir. Ana manyetik alanı üretmek için bir arka demir plaka üzerinde alternatif polarite ile düzenlenmiş mıknatıs basamağı ile sabit bir manyetik rotadan oluşurlar. Kaydırıcı olarak adlandırılan hareketli parça, itme kuvvetini üreten akımları taşımak için çelik bir laminasyona sarılmış (demir çekirdekli motor) veya reçine/epoksi ile sabitlenmiş (demirsiz motor) (3 fazlı) bobinlerden oluşur. Demir çekirdekli motor genellikle Şekil 2.2'deki gibi ve uygun kılavuzlar ile korunacak yaklaşık 0,5 mm'lik bir hava boşluğu bulunacak şekilde yerleştirilir. Bunlar aynı zamanda palet ve kaydırıcı arasındaki yüksek çekim kuvvetlerine de dayanmalıdır. Bu

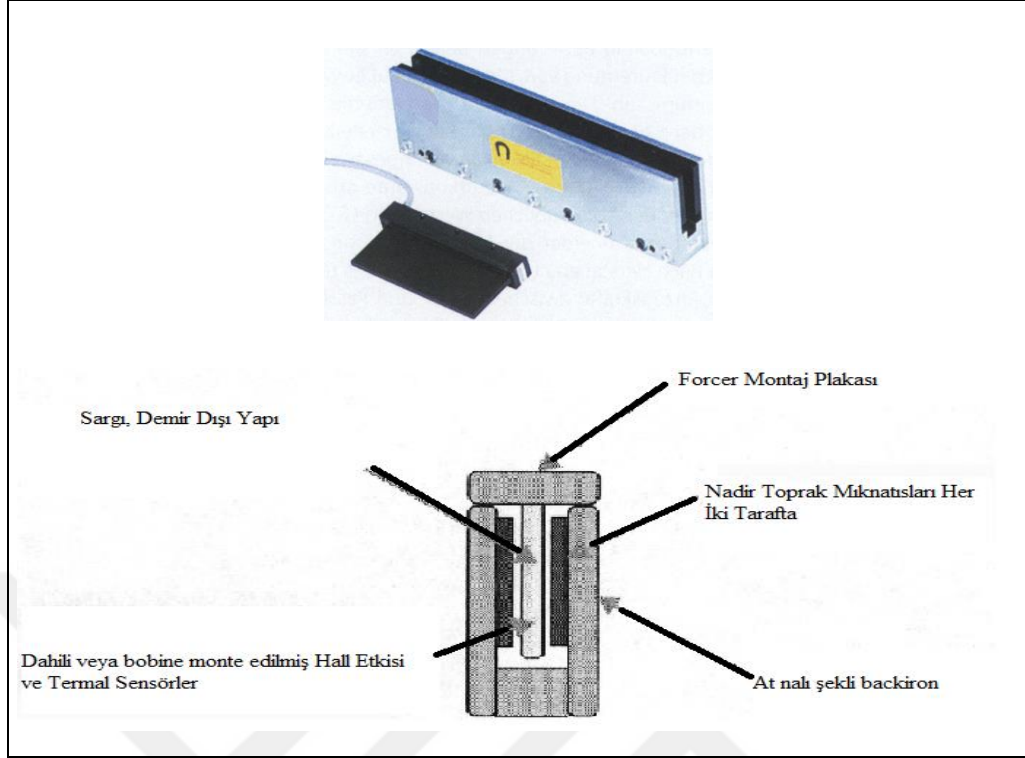
motorlar, rotadaki mıknatısların yerleşimi nedeniyle ve yarık-dış etkileşimi sırasındaki etkileri sona erdirmek için "dışlı geçirme" denilen bir etki sergiler. Kapatılmış bir motorun kaydırıcısını hareket ettirirken bu etki hissedilebilir (Kuvvet dalgalanması benzer bir etkidir ancak köken olarak farklıdır. Manyetik alanın mükemmel olmayan sinüs dağılımı nedeniyle konumla kuvvet sabitindeki değişikliklerden kaynaklanır.).

Demirsiz bobinler, motorun simetrik bir şekilde yerleştirilmesine izin verir ve kaydırıcı, Şekil 2.3'te gösterildiği gibi U şeklinde bir manyetik yolda hareket eder. Bu konfigürasyon, dış dünyaya iletilen hiçbir manyetik çekim kuvveti olmamasını ve dışlı çekmenin minimum olmasını veya hiç olmamasını sağlar. Bununla birlikte, itme kuvvetleri demir çekirdekli bir motordakinden belirgin şekilde daha küçüktür (Chen vd., 2018).

Komütasyon, fazlar arası geçişi tetiklemek için uygun yerlerde kaydırıcı bobinlerin içine yerleştirilmiş Hall sensörleri vasıtasıyla elektronik olarak sağlanır. İki komütasyon şeması kullanılır: trapezoidal ve sinüzoidal. Trapezoidal düzende motor bir adımlı motor gibi, sinüzoidal durumda bir AC senkron motoru gibi davranır. Sinüzoid olarak değiştirilmiş bir doğrusal motor, trapezoid olarak değiştirilmiş bir doğrusal motordan daha düzgün çalışır ve daha az ısı üretir.

Doğrusal endüksiyon motoru öncelikli olarak, çelik laminasyonlardan ve faz sargılarından oluşan hareketli bir bobin düzeneğinden, ikincil olarak, bir döner endüksiyon motorunun sincap kafesine karşılık gelen sabit bir reaksiyon plakasından oluşur. Reaksiyon plakası, bir çelik arkalığa bağlanmış alüminyum veya bakır plakadan yapılabilir. Değişken frekans inverterleri, hız kontrolü ve hareket kontrol uygulamaları için vektör kontrol şemalarında kullanılır (Lin vd., 2019).

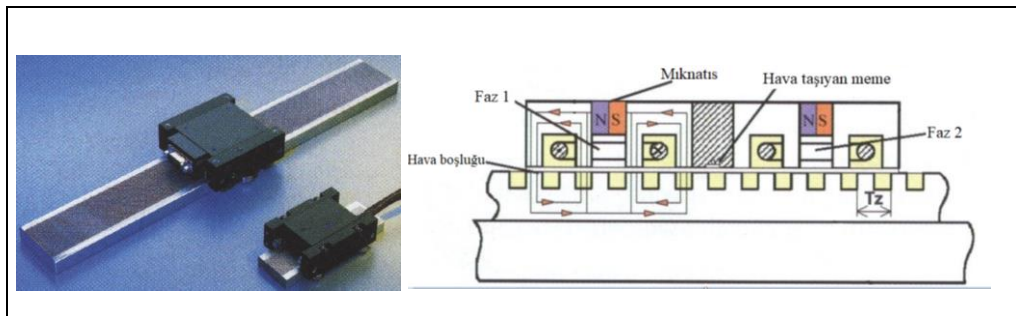
Doğrusal adım motor çoğunlukla değişken relüktans veya hibrit tiptedir. Epoksi ile doldurulmuş (fotokimyasal olarak aşındırılmış) dişlere sahip sabit bir merdaneden (çubuk veya tüp) oluşur ve daha sonra düz bir şekilde temellendirilir. Hibrit tipte bir step motorun sürgüsü veya kuvvetlendiricisi, merdane gibi dişlerle yuvalanmış çok sayıda lamine çelik çekirdekten yapılmıştır. Mıknatıslanma, bobinler ve sabit mıknatıslarla elde edilir. Şekil 2.3, çalışma prensibini göstermektedir.



Şekil 2.3 Simetrik olarak düzenlenmiş, demirsiz çekirdekli, doğrusal fırçasız servo motor

Bir çift eksenli veya düzlemsel adım motoru, merdanenin bir ızgara deseninde oyulmuş dişlerin bir dama tahtası düzenlemesi yapılmasıyla oluşturulabilir. Kuvvetlendirici, birbirine dik olarak düzenlenmiş iki tek eksenli zorlayıcıdan oluşur. Bir hava yatağı, kaydırıcıyı ve merdaneyi ayırır.

Kademeli motorlar çoğunlukla açık döngüde çalışır ve bu, kullanımlarını kolaylaştırır. Bir konum sensörü eklemek güvenilirliği artırabilir. Micro adımlama, konumlandırma doğruluğunu artırır. Doğrusal hibrit adım motoru, Şekil 2.4'te gösterilmektedir.



Şekil 2.4 Doğrusal hibrit adımlama motoru (Chen vd., 2018)

Tablo 2.1' de farklı lineer motor tiplerinin göze çarpan özelliklerini özetlemektedir.

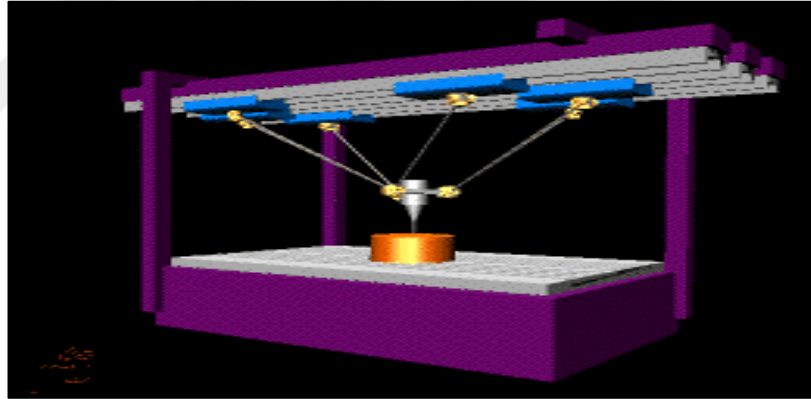
Tablo 2.1 Sık kullanılan doğrusal motor tiplerinin göze çarpan özellikleri

Özellik	Demir çekirdekli BLDC	Demirsiz BLDC	İndüksiyon (Eş zamansız)	Adımlı
Nom. İtme kuvveti F	Yüksek	Düşük	Çok yüksek	Çok düşük
Tepe itme kuvveti	300%	300%	500%	100%
Kuvvet yoğunluğu (N/cm ²)	2,5	1,5	1,0	1,5
Çekici Güç	5-10F	Yok	Yok	5-10F
Dişli Geçişi	Evet	Hayır	Hayır	Evet
İvme (typ.)	10g	10g	1g	1g
Maksimum hız (typ.)	5m/s	5m/s	>5m/s	2m/s
Isı üretimi	Yüksek	Çok düşük	Düşük	Düşük
Soğutma sistemi	Su	Hava (basınçlı veya konveksiyon)	Hava veya su	Hava
Hava boşluğu (mm)	0,1-1,0	10	>1mm	<0,05

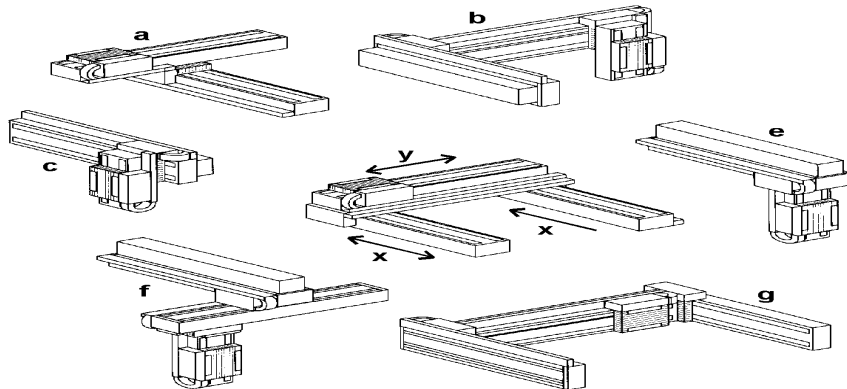
2.3 Doğrusal Sürücülerle İsabetli Konum Kontrolü

Yukarıda belirtildiği gibi, olumlu özelliklerinden dolayı doğrusal motorlar, takım tezgahlarındaki hareketli elemanları sürmek için giderek daha fazla kullanılmaktadır. Bu hareketli elemanlar, geleneksel takım tezgahlarındaki tablolar veya paralel kinematik makinelerdeki desteklerdir (Şekil 2.5). Devamındaki hususlar, geleneksel takım tezgâhı tablolarıyla sınırlıdır. Bir doğrusal motor, hareket yönünde etki eden tüm bozulmalara doğrudan maruz kaldığı için, sağlamlığı sağlamak adına alternatif hareket kontrolörlerine ihtiyaç vardır. Takım tezgahlarında arızalar (Yamanaka ve Nomura, 2018):

- i. İşlemden kaynaklanan harici arızalar, örn. işleme merkezlerinde kesme kuvvetleri,
- ii. Kılavuz yollarındaki sürtünme gibi dahili arızalar,
- iii. Farklı nedenlere bağlı yük değişiklikleri: iş parçasının değişen kütlesi, makine yapılandırmasındaki değişiklikler nedeniyle değişken yük ataleti ve
- iv. Modüler tasarıma yönelik eğilimden kaynaklanan varyasyonlar (Şekil 2.6). Bu tasarım yaklaşımını kullanarak, tüm sürücü elektroniklerini (kontrol bilgisayarı, güç amplifikatörü, konum sensörü, teşhis sensörleri) içeren otonom, doğrusal tek eksenli yapı blokları, çeşitli makine konfigürasyonlarında birleştirilir ve dağıtılmış bir kontrol şemasıyla kontrol edilir (bkz. Bölüm 8). Bir modülün üretimi sırasında modülün eylemsizlik yükü bilinmediğinden, hareket denetleyicisinin yük değişikliklerine karşı sağlam hale getirilmesi gerekir.



Şekil 2.5 Doğrusal motorlu paralel kinematik makine



Şekil 2.6 Modüler makine tasarımı

2.4 Takım Tezgâhı Sürücülerinin Performans Ölçümleri

Takım tezgâhı sürücülerinin performansı, işlenen parçanın kalitesi üzerinde doğrudan etkisi olan üç önemli parametre ile ifade edilir. Bu parametreler (i) izleme hatası, (ii) hareket yönündeki sertlik ve (iii) konumlandırma bant genişliğidir (Yamanaka ve Nomura, 2018).

Bir besleme sürücüsünü karakterize eden en önemli özellik, hız kazancı olarak da adlandırılan konum döngü kazancı k_v 'dir. Besleme hızı v ile ortaya çıkan izleme hatası arasındaki ilişkiyi ifade eder e_t : $e_t = v/k_v$. Bu, $k_v = 100 \text{ s}^{-1}$ olan bir sürücüde 100 mm/s ilerleme hızıyla frezeleme yaparken 1 mm 'lik bir izleme hatası olduğu anlamına gelir. Konturlama hızı v_c 'de bir R yarıçapı ile dairesel konturlama, radyal bir hata $e_r = v_c^2/2Rk_v$ ile sonuçlanır.

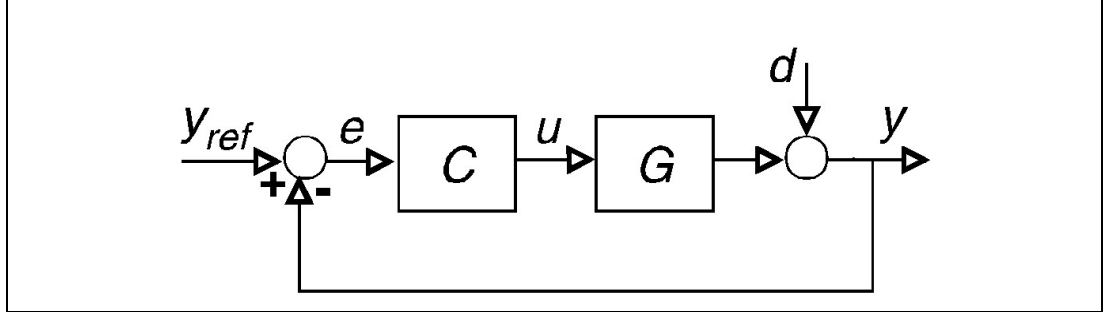
Yüksek bir k_v , düşük bir izleme hatası için faydalıdır, ancak aynı zamanda yüksek bir sertlik ve yüksek bir bant genişliği için de faydalıdır.

Döner motor/bilyalı vida besleme tahriklerinde, elde edilebilir konumlandırma bant genişliği, makine ve sürücü yapısındaki düşük frekanslı mekanik rezonanslarla sınırlıdır. Bu rezonanslar doğrusal sürücülerde bulunmadığından, erişilebilir bant genişliği doğrusal sürücülerde çok daha yüksektir. Bu, yüksek k_v değerlerinin ve dolayısıyla yüksek sürücü sertliğinin ve düşük izleme hatalarının benimsenmesine izin verir (Gieras vd., 2018).

2.5 Doğrusal Motorlu Dirençli Hareket Kontrolörleri

Geleneksel PI- ve kutup yerleştirme kontrolörleri (Şekil 2.7'deki blok C), sabit bir atalet yükü olan doğrusal sürücülerini kontrol etmek için sıklıkla kullanılır. Bununla birlikte, yük farklılıkları ortaya çıktığında, ör. farklı kütleli parçalar takım tezgâhı masasına monte edildiğinde, konumlandırma performansı, kontrolörün kendisi için tasarlandığından farklı kitleler için kötüleşir. Bir dahili hız geri besleme halkası ve etrafındaki bir konum geri bildirim halkasından oluşan kademeli kontrolörlerin, doğrusal takometrelerin mevcut olmaması nedeniyle uygulanması zordur. Ferraris

sensörünün kullanımı son zamanlarda bir takometre olarak popüler hale gelmiştir. Bir Ferraris sensörü bağıl ivmeyi ölçer; çıktısının entegrasyonu bir hız sinyali verir.

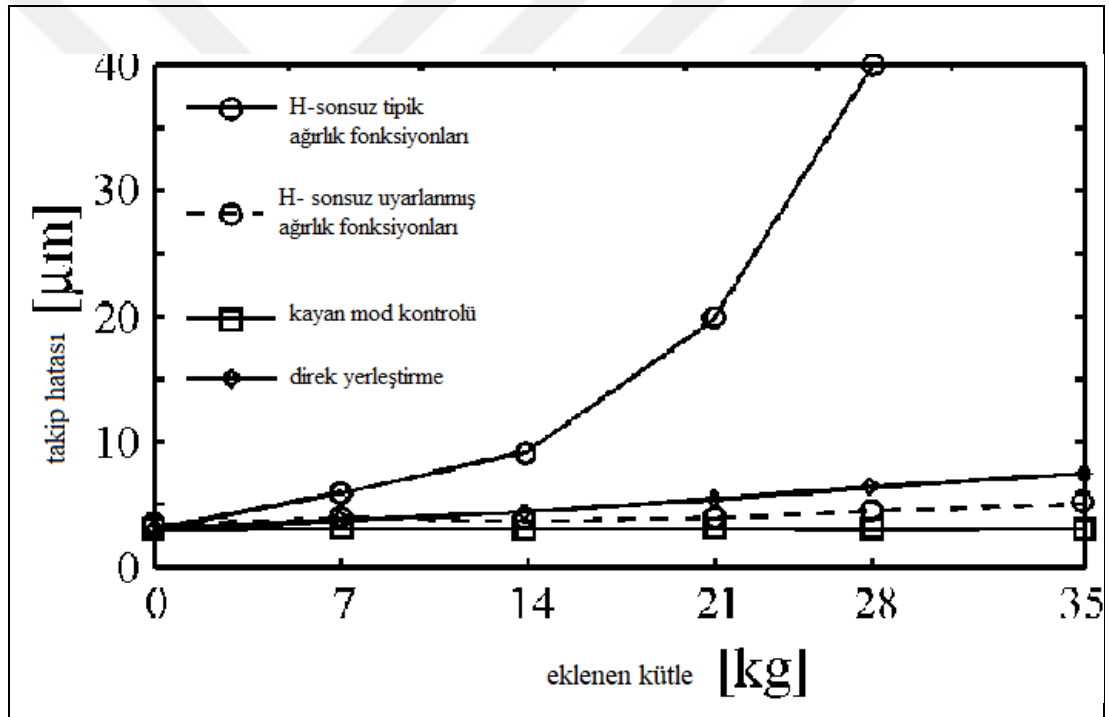


Şekil 2.7 Genel hareket kontrol şeması: C denetleyiciyi temsil eder; G, kontrol edilecek sürücüyü ve yükü temsil eder; d harici müdahaledir (kesme kuvveti, sürtünme, vb.) V_{ref} referans yörüngedir ve y sonuçta ortaya çıkan yörüngedir.

Sürücünün performansını yukarıda açıklanan bozulmalardan bağımsız kılmak için sağlam denetleyiciler gereklidir. Bu gereksinimleri karşılayan kontrolör yapıları yakın zamanda geliştirilmiştir. Bunlardan ikisi daha ayrıntılı tartışılacaktır: H_∞ -denetleyici ve sözde "kayar mod" denetleyicisi. H_∞ , optimum kontrolörlerin, sistem belirsizliklerinin (bozulmaların), bozulmaların etkisini azaltacak şekilde seçilen frekansa bağlı duyarlılık fonksiyonlarının tanımlanmasıyla hesaplanan bir optimizasyon süreci ile tasarlandığı bir yöntemdir. Bu duyarlılık işlevlerinin seçimi oldukça hassastır ve yöntemin ve bozulma frekansı özelliklerinin iyi anlaşılmasını gerektirir. Kayar mod denetleyicisi, sistem durumunun sözde bir anahtarlama hattına (yüzey) ulaşmaya çalıştığı ve ardından son sistem durumuna ulaşmak için bu hat boyunca kaydığı (aslında gıcırdadığı) doğrusal olmayan bir denetleyicidir. Bu kontrol modunun sonucu, kayma sırasında kontrol davranışının sistem dinamiklerinden ve dolayısıyla sisteme etki eden bozulmalardan tamamen bağımsız hale gelmesidir. Bu, kayan mod kontrolünün doğal sağlamlığını açıklar. Doğrusal motorlarla besleme sürücülerini kontrol etmek için her iki yöntemin uygulanmasına ilişkin daha fazla ayrıntı, referanslarda bulunabilir (Brussel ve Braembussche, 1998).

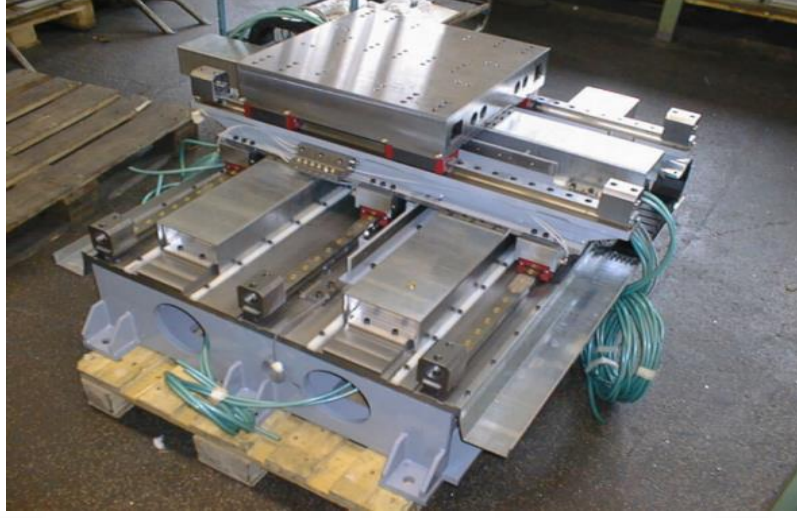
Doğrusal sürücülerin dirençli kontrolünün karşılaştırmalı bir çalışması, doğrusal bir BLDC motor üzerinde gerçekleştirildi (Brussel ve Braembussche, 1998). Kaydırıcının kütlesi 12 kg'dı ve 1 mikrometre çözünürlüğe sahip birleşik bir manyetik konum kodlayıcı içeren iki makaralı kızakla desteklendi. H_∞ - ve kayar mod kontrol

cihazlarının yük kütlesi değişikliklerine karşı dayanıklılığı test edildi ve standart bir kutup yerleştirme kontrolörü ile karşılaştırıldı. Arabaya ağırlıklar eklenerek yük kütlesi 7 kg'lık adımlarla 12'den 35 kg'a çıkarıldı. Dört denetleyici test edildi: referans olarak alınan bir kutup yerleştirme denetleyicisi, geleneksel olarak tasarlanmış bir H_{∞} -denetleyicisi, değiştirilmiş bir hassasiyet işlevine dayalı bir H_{∞} -denetleyicisi ve bir kayar mod denetleyicisi. Şekil 2.8'den görülebileceği gibi, en kötü performans gösteren kontrolör kutup yerleştirme kontrolörü, en iyisi kayar mod kontrolörü oldu. Orijinal olarak tasarlanmış H_{∞} -denetleyici çok kötü performans gösterdi. Hassasiyet işlevinde yapılan küçük değişiklikler, neredeyse kayar mod denetleyicisi kadar iyi olan sağlam bir kontrolör ile sonuçlandı (Şekil 2.8).

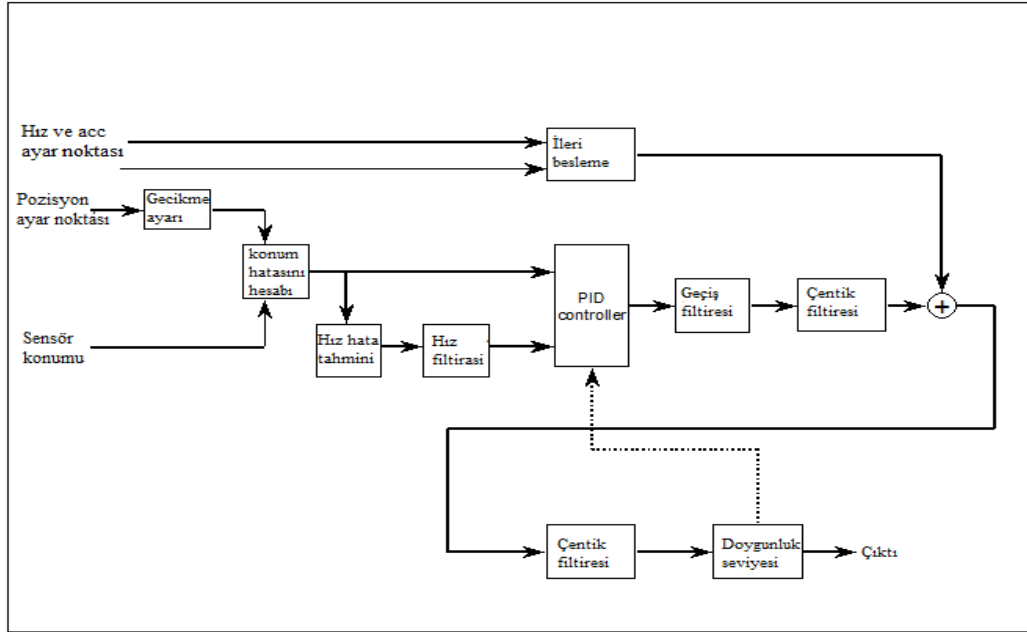


Şekil 2.8 Yük kütlesini değiştirmek için farklı hareket kontrolörlerinin direnç davranışı

AB-projesi MOTION (Koninckx vd., 2001) çerçevesinde, Şekil 2.9'da gösterildiği gibi lineer sürücülere sahip modüler bir XY tablosu inşa edilmiştir. Bazı ilginç şekillendirme deneylerinin sonuçları aşağıda tartışılacaktır. Kontrolör yapısı şekil 2.10'da gösterilmektedir. Şekillendirme performansını artırmak için hız ve ileri ivmelenme eklenmiştir. Yüksek frekans modlarının etkisini ortadan kaldırarak konumlandırma bant genişliğini artırmak için çentik filtreleri eklenmiştir. Yaklaşık 80 Hz'lik açık döngü bant genişlikleri elde edilmiştir.



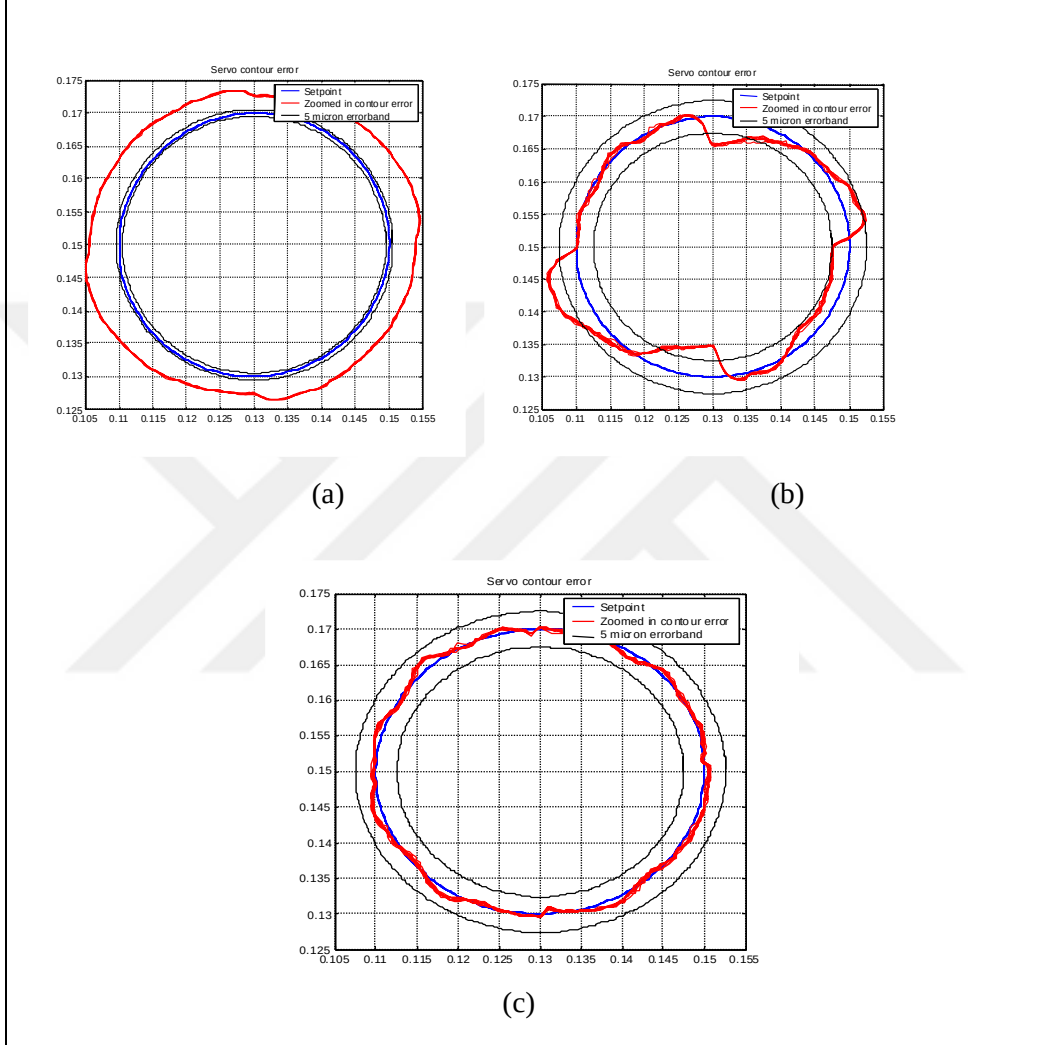
Şekil 2.9 Doğrusal sürücülere sahip modüler XY tablosu



Şekil 2.10 XY tablosu deneyleri için kontrolör yapısı

Şekil 2.11, bazı şekillendirme sonuçlarını gösterir. 20 mm yarıçaplı bir dairesel kontur, 0,2 m/s'lik bir çevresel besleme hızı ile kaplandı. Bu, 2 m/s^2 'lik bir maksimum eksen ivmesi anlamına gelir. Şekil 2.11 (a), saf geri besleme ile sonucu gösterir. Maksimum kontur hatası yaklaşık 50 mikrondur. Bu büyük hata, ileri besleme olmadığında, geri besleme döngüsünün, yüksek izleme ve kontur hataları anlamına gelen ivmelenme kuvvetinin oluşumundan tamamen sorumlu olması gerçeğinden kaynaklanmaktadır.

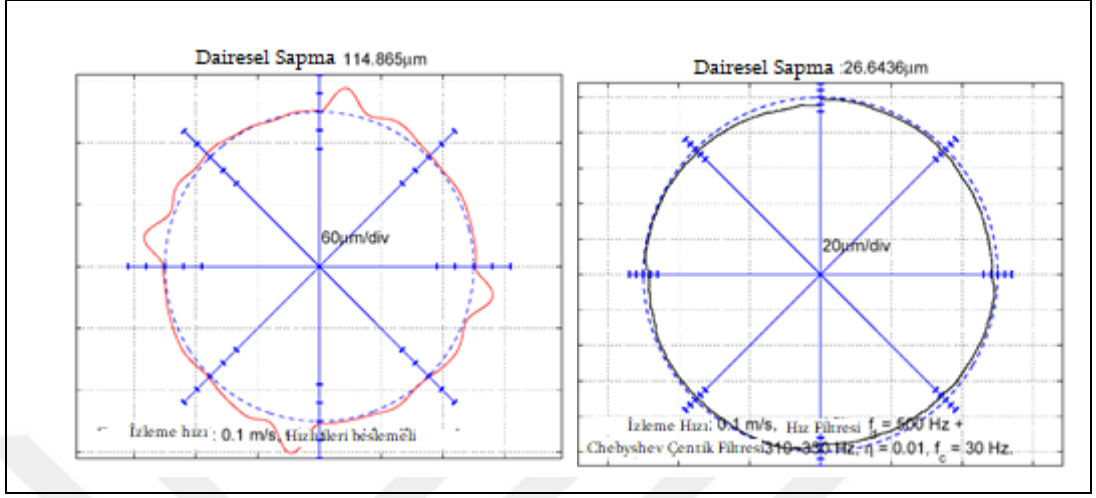
İleriye doğru ivme beslemesi eklemek, maksimum izleme hatasını önemli ölçüde 10 mikrona düşürür (Şekil 2.11 (b)). İleriye doğru ivme beslemesi eklemek, kontur hatasını 2 mikrona düşürür (Şekil 2.11 (c)). Kalan kontur hatası, lineer motorlardaki kavrama kuvvetlerinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 2.11 Kontur hataları. (a) Saf geri besleme, (b) Geri besleme + ileri hızlanma beslemesi, (c) Geri besleme + hızlanma + ileri hız beslemesi

Kayar mod kontrol cihazlarının kılavuz yollarındaki sürtünme kuvvetlerine karşı sağlamlığı, Şekil 2.9'daki XY tablosunda ikna edici bir şekilde gösterilmiştir. Kılavuz yollarındaki ön haddeleme sürtünmesi nedeniyle eksenlerin hareket terslemesi etrafında oluşan kadrans hataları, geleneksel bir kademeli denetleyici (konum ve tako geri bildirimi) ile 115 mikrondan kayar mod denetleyicisi ile 27 mikrona düşürülmüştür (Şekil 2.12). Ön haddeleme sürtünme modeli ile ileri besleme, kademeli

denetleyicideki sorunu hafifletebilir, ancak kayar mod denetleyicisi o kadar sağlamdır ki hiçbir modele ihtiyaç yoktur (Jian, 2004).



Şekil 2.12 Konturlama sırasında çeyrek aksaklık, sol: kademeli denetleyici ile, sağ: kayar mod denetleyici ile

Kayar mod kontrol şeması, kademeli denetleyicilerden (birkaç on N/mikron) büyüklük anlamında daha iyi sürücü sertliği (birkaç yüz N/mikron) verir.

Doğrusal sürücülerin performansını gösteren bir başka ilginç durum, Şekil 2.13'te gösterilmektedir. Yersiz tornalama için doğrusal bir takım tutucu modülüyle ilgilidir.

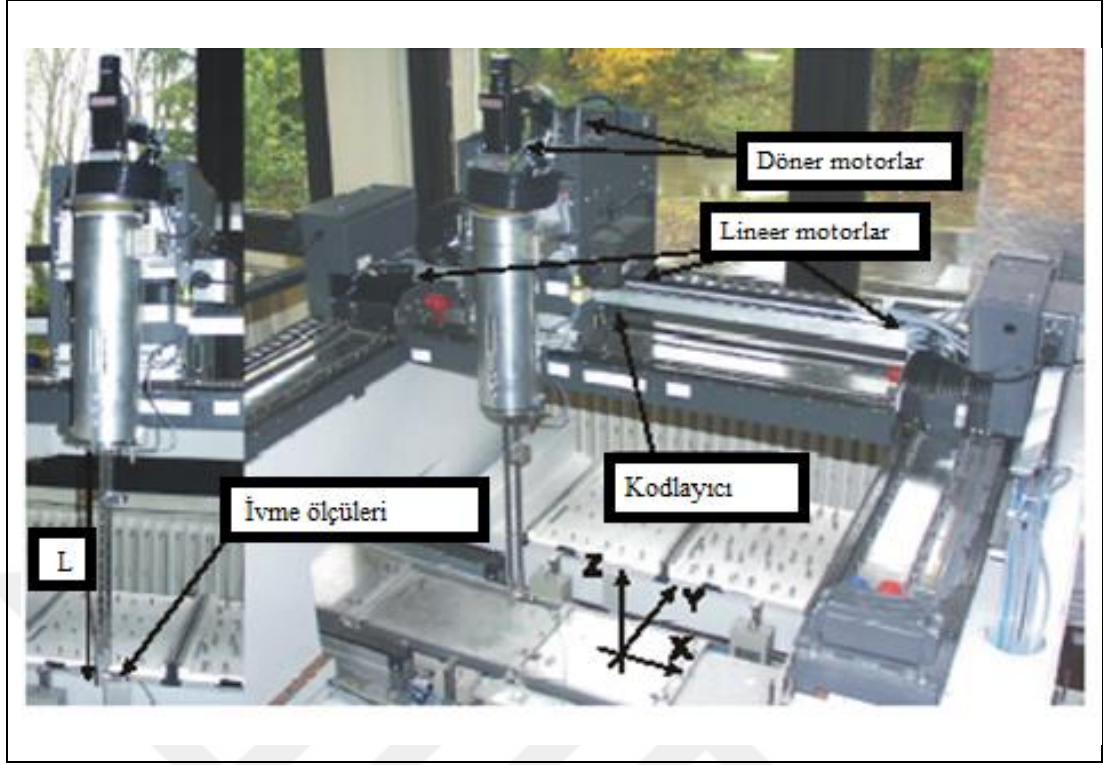
Hava soğutmalı demirsiz lineer motor, toplam kütlesi 25 kg olan bir uç tutucuyu tahrik eder. 10 g'a kadar hızlanmalara izin veren 100 Hz'lik bir pozisyon döngü bant genişliği elde edilir. Doğrusal motor, bir CAN veriyolu üzerinden iş mili motoruyla senkronize edilir (daha fazlası ileride), bu da yüksek performanslı bir elektronik kam işlevselliği ile sonuçlanır. Petrol endüstrisindeki uygulama için vida dişleri aralığı 550 rpm'ye varan hızlarda işlenmiştir. Bu sistem, geleneksel mekanik çözüme kıyasla üretkenliğin iki katına çıkmasına izin vermiştir (Jian, 2004).



Şekil 2.13 Tornalama için hızlı doğrusal tahrikli eklentili uç tutucu

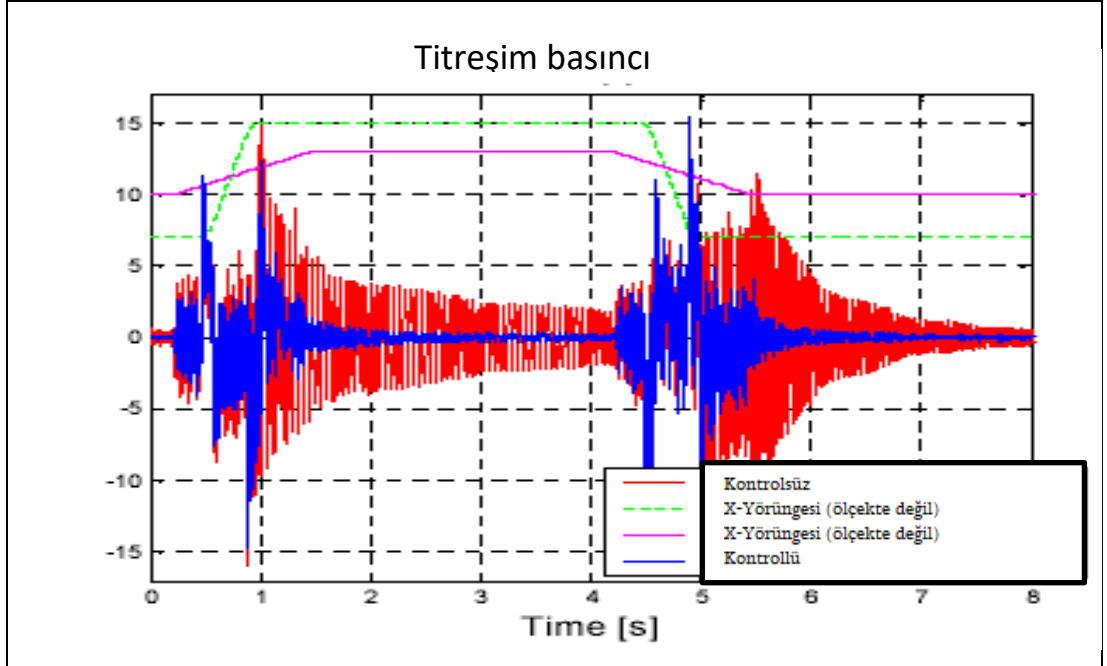
2.6 Değişken Dinamikli Sistemlerin Hareket ve Titreşim Kontrolü

Modern yüksek hızlı takım tezgahlarında meydana gelen yüksek ivmeler, makine yapısını yüksek frekanslara kadar harekete geçirir. Doğru konumlandırma ve yörünge izleme elde edilecekse, ortaya çıkan yapısal titreşimlerin sönümlenmesi gerekir. Ek bir sorun, takım tezgahının dinamik davranışının, işleme sırasında değişen makine konfigürasyonunun bir sonucu olarak takımın konumuna bağlı olmasıdır. Bu tür zamanla değişen davranış, klasik doğrusal kontrol yöntemleriyle kontrol edilemez, çünkü bu yöntemler, sistemin doğrusal bir zamanla değişmeyen (LTI) modelini gerektirir. Bu soruna bir çözüm, tüm konfigürasyonlar için iyi performans gösteren sağlam kontrolörler tasarlamaktır. Diğer bir yöntem, konfigürasyon değiştikçe yerel olarak optimize edilmiş farklı kontrolörler arasında geçiş yapmaktır. Doğrusal hibrit adım motoru, Şekil 2.14'te gösterilmektedir.



Şekil 2.14 Doğrusal sürücülere sahip kızaklı al ve yerleştir makinesi

Değişken konfigürasyonlar için dirençli hareket ve titreşim kontrolü Şekil 2.15'te gösterilmektedir.



Şekil 2.15 Değişken düzenlenimliler için dirençli hareket ve titreşim kontrolü

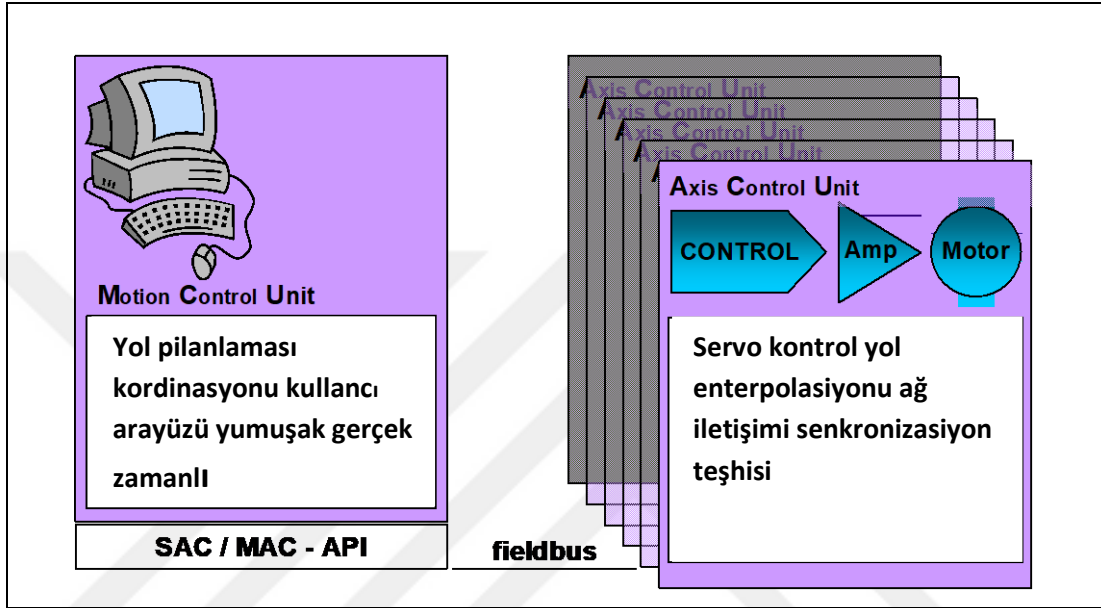
4 eksenli bir al ve yerleştir montaj makinesinin X ekseninin kontrolüne bir örnek (şekil 2.14), aynı anda konumu sağlam bir şekilde kontrol etmenin ve Z eksenı boyunca bobinin farklı konumları için aletin titreşimlerini sönümlemenin mümkün olduğunu göstermektedir. Makine, Y-hareketini kontrol eden iki lineer motor tarafından tahrik edilen bir kızaktan oluşur. Taşıyıcının kızak üzerindeki X hareketi de doğrusal bir motorla tahrik edilir. Dikey Z hareketi, geleneksel bir döner motordur. Aleti tutan bobin, yukarı ve aşağı hareket ederek değişken doğal frekanslara neden olabilir.

şekil 2.15, X eksenı boyunca hızlanma ve yavaşlamadan kaynaklanan takım tutucunun titreşimlerini eşzamanlı olarak sönümlerken, X yönünde belirli bir yörüngeyi kontrol eden bir kazanç programlama H_{∞} -kontrolörünün sonuçlarını göstermektedir (Symens, 2004).

2.7 Modüler Hareket Kontrol Sistemleri

Kütle özelleştirme, modüler makine tasarımına yönelik eğilimi tetikledi. Her modülün bağımsız olması gerekiyordu, ancak küresel bir sistem hedefine ulaşmak için eşleriyle iletişim kurabiliyor da olması gerekiyordu. Doğrusal motorlar, tek eksenli hareket kontrol modüllerinde yapı taşı olarak son derece uygundur. Her bir eksen modülünde, mümkün olan her uygulamada iyi performans gösteren sağlam bir kontrolör bulunur. Bu tür modüllerin kombinasyonu, modüllerin birbirleriyle uygun bir şekilde iletişim kurabilmeleri koşuluyla, yeniden yapılandırılabilen ve genişletilebilen çok eksenli makinelerle sonuçlanır. Bu iletişim sorunu için bir çözüml, AB-MOTION projesi çerçevesinde geliştirilmiştir. şekil 2.16 genel fikri göstermektedir. PC tabanlı bir hareket kontrolörü yörüngeyi planlar ve bu yörüngeyi hareket eksenleri üzerinde "yansıtır". Bu bilgiler bir endüstriyel aę sistemi (örneğin CAN-Open) aracılığıyla farklı eksen kontrol modüllerine gönderilir. Her eksen denetleyicisinin, çıkması eksen denetleyicisine girdi olarak hizmet eden kendi interpolatörü vardır. Endüstriyel aę sisteminin yalnızca "hafif" gerçek zamanlı yeteneklere sahip olması gerekirken, "sert" gerçek zamanlı enterpolasyon hesaplamaları yerel eksen işlemcilerinde yapılır. Bununla birlikte, böyle bir merkezi olmayan şema, farklı eksen interpolatörlerini birbirine bağlayan bir senkronizasyon mekanizmasına ihtiyaç duymuştur. MOTION projesinde (Koninckx, 2003) geliştirilen şema maksimum birkaç mikrosaniye

senkronizasyon hatasına sahiptir. Bu, 1 m/s'ye kadar besleme hızlarında gerçek zamanlı enterpolasyona izin vermiştir. Şekil 2.11'de gösterilen sonuçlar bu sistemle elde edilmiştir. Konseptin ölçeklenebilirliğini göstermek için, eksen modülleri eklenerek aynı merkezi olmayan denetleyici yapısı ile 10 serbestlik dereceli bir yürüme robotu kontrol edilmiştir.



Şekil 2.16 Yüksek performanslı merkezi olmayan hareket kontrol sistemi

3. BULANIK MANTIK

3.1 Temel Bilgi

Fırçasız DC motor, DC makinenin çalışma prensibine aykırı olarak değil, sabit mıknatıslar tarafından uyarılan üç fazlı senkron bir makine olarak tasarlanmıştır. (Genellikle üç telli) üç fazlı sargı, sabit mıknatıslı rotor boyunca çeken dönen bir manyetik alan oluşturur. Uygun bir kontrol devresi aracılığıyla, büyük ölçüde bir DC makinesinin davranışına karşılık gelen bir kontrol yanıtı elde edilir. Bu amaçla, ara devrenin doğrudan değişken bir DC gerilimine beslenebildiği ve böylece motorun hızını kontrol ettiği blok komutasyonlu basitleştirilmiş bir AC sürücü kullanılır. DC motorların uygulama alanları; küçük fanlar, disk sürücülerindeki sürücüler, kompresörler, video kaydediciler ve model uçaklar, torna tezgâhları gibi takım tezgahlarındaki sürücü sistemleri için servo motorlar şeklinde park tesisleridir (Bist ve Singh, 2014).

3.2 Uygulama

Genellikle, DC motorlarda sabit mıknatıslı rotor gerçekleştirilir; sabit stator, sabit mıknatıslı rotor üzerinde bir torka neden olan üretilen bir dönme alanına izin vermek için bir elektronik devre tarafından farklı zamanlarda tahrik edilen bobinleri içerir. DC motorların büyük çoğunluğu (daha büyük üç fazlı motorlar olarak) üç fazlı tasarlanmıştır. Fan gibi düşük DC beklentisine sahip daha küçük motorlar için, sabit mıknatıslar tarafından üretilen dişli torkunun ikinci fazın yerini aldığı iki fazlı sistemler ve tek fazlı sistemler de vardır. Açığa bağlı tork dalgalanmalarını en aza indirmek için, uygulama için zaman zaman daha yüksek faz sayıları gerekir. Böylece, üç fazlı sistemlere göre dikdörtgen bir AC voltajı ile çalıştırıldığında çalışma özellikleri iyileştirilir (Fang vd., 2014).

3.3 Komutasyon

DC motorun komutasyonu, rotorun pozisyonu, hızı ve tork yükünden bağımsızsa prensipte hala sadece geleneksel bir senkron motor veya step motorun bir formudur.

DC motorlar için, rotor konumunun, rotor hızının ve torkunun elektronik olarak değiştirilip onları bağımlı hale getirme olasılığı önemli bir farktır. Bu, frekansın ve bazı sistemlerde rotorun pozisyonu ve hızının fonksiyonundaki genliğin değiştirilebildiği bir doğrudan geri besleme biçimini temsil eder. Elektronik komütasyon bu nedenle bir kontrolör içindir ve dönen alanın oluşum türü, esasen DC motorun karakteristiğini belirler.

3.4 Sensör Kontrollü Komutasyon

Bu durumda rotorun manyetik akısını tespit etmek için Hall sensörleri veya stator alanında optik sensörler gibi sensörler bulunmaktadır. Bu konum bilgisine göre, sargılar, rotorda bir tork oluşturan kontrol elektroniklerinin uygun güç sürücüleri aracılığıyla sürülür. Bunun avantajı, sensör kontrollü komutasyonun çok düşük hızlarda veya dururken bile çalışmasıdır. Bu komutasyonda genellikle tüm fazlara aynı anda enerji verilmez. Üç fazlı motorda sırasıyla bir fazın enerjisi normal olarak herhangi bir zamanda kesilir (Schneider, 2018).

3.5 Sensörsüz Komutasyon

Sensörsüz komütasyonda, elektronik kontrol devresi tarafından değerlendirilen stator arka gerilim bobinlerinde indüklenen rotor konumunun tespiti gerçekleştirilir. Ancak, karşı gerilimin değerlendirilmesi için belirli bir minimum hız gereklidir. Sensörsüz EC motorları, bu nedenle, senkron motorlar veya kademeli motorlar olarak minimum hıza ulaşmak için kör olarak anahtarlanmalıdır.

Bu sırada, ancak, bir EC motorunun bu minimum hızın altında olduğu, kör kontrol edilmeyen yöntemler vardır. Bu kısa akım darbeleri, motoru hareket ettirmeden dururken gönderilir, ancak rotorun manyetik alanından etkilenir. Manyetik alan akım akışını azaltır veya artırır ve böylece bir akım darbesinin bir eşiği aşması için gereken süreyi değiştirir. Bu süreler ölçülür ve böylelikle halihazırda hareketsiz durumdaki rotor konumu belirlenebilir.

Motorun, geri gerilimin hesaplanabileceği bir hıza başlaması artık özel bir işlem kullanılarak kontrol edilebilir. Bu, motorun yıldız veya üçgen bağlantısını kullanır, tam olarak altı farklı akımda akabilir. Sırasıyla küçük bir akımdan 60° el.'e kadar

tahrik eden bir akım kullanılır. Önceki ve sonraki tahrik akımı rotor mıknatıslarından etkilenir. Böylece, 60° el. ileri yöne gidip gelme, manyetik eksen, sürüş akımının eksenleriyle çakıştığı zaman gerçekleşir ($^\circ$ el. Uzak vektörü gösteriminin açısını belirtir. Kutup çifti sayısına bölünen rotorun mekanik açısal konumuna benzer). Bu, iki küçük ölçüm akımı arasında maksimum fark olduğu için ölçülebilir.

3.6 Diğer Fırçasız Makineler

Elektronik komutasyonlu DC motora ek olarak, asenkron (kafes rotor), senkron makine (iç kutuplu fırçasız uyarma veya kalıcı uyarma ile) veya kaskad makinesi gibi bir dizi fırçasız makine vardır. Bu makineler, motor veya jeneratör olarak çalıştırılabilir ve çok fazlı AC gerilim ile çalıştırılabilir.

3.7 Bulanık Mantık ve Karar Verme

Karar vericiler hangi koşullarda ve hangi boyutta karar verirlerse versin, bu işlevleri belirsizlik ortamında da yerine getirmelidirler. Verilen kararların doğruluğu, bu belirsizliğin riske dönüştürülebileceği ölçüde sağlanacaktır. Ancak, karar vericiler klasik bilimsel yaklaşımı ve karar verme sürecine dahil olan yöntemleri kullanıyorsa, ortaya çıkan kararlar iyi - kötü, güzel - çirkin, doğru - yanlış, evet - hayır, siyah - beyaz veya 0 – 1 olacaktır. Ancak, gerçek hayat mutlak ayrıma dayalı değildir. Başka bir deyişle, mutlak siyah ve mutlak beyazda binlerce gri tonun varlığı unutulmamalıdır (Khateb vd., 2014).

Bu noktada genel olarak belirsizliğin nasıl öngörülebileceği ve nasıl karar alma süreçlerinin bir parçası haline getirilebileceği üzerine çalışmalar yapılmış ve bu çalışmaların sonunda alternatif bilimsel yaklaşım fikri ortaya konmuştur. Bulanık mantık kavramı ilk olarak Zadeh (1965) tarafından belirsiz ifadelerin matematiksel ifadesiyle ortaya atılmıştır.

Klasik mantık ile bulanık mantık arasındaki temel farklar Tablo 3.1'de gösterilmektedir.

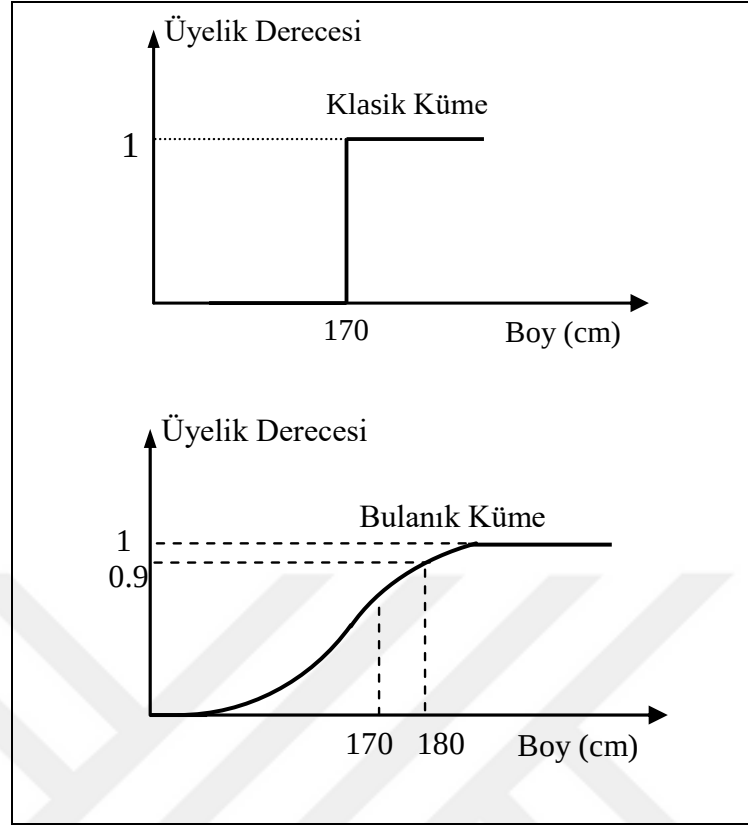
Tablo 3.1 Klasik Mantık ile Bulanık Mantık arasındaki Temel Farklar

Klasik Mantık	Bulanık Mantık
A veya A değil	A veya A değil
Kesin	Kısmi
Hepsi veya Hiçbiri	Bir dereceye kadar
0 veya 1	0 ile 1 arasındaki süreklilik
İkili birimler	Karışık birimler

Zadeh (1965)'e göre bulanık mantık çok değişkenlidir. Klasik mantığın 0-1 önermelerine karşı bulanık mantık, üç veya daha fazla önermeden oluşur (Güneş, 1997).

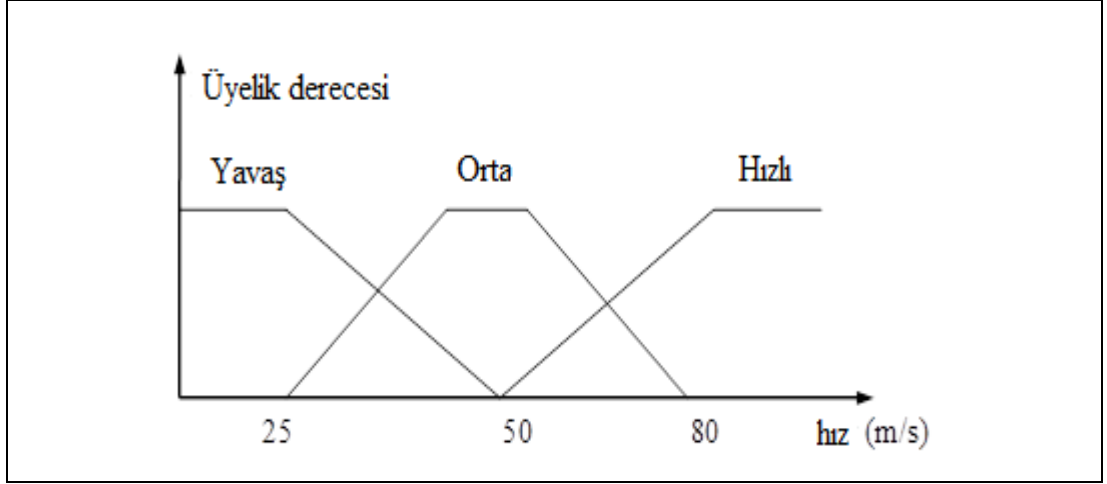
Mantıksal mantık teorisi, problemi ayırmak yerine, problemi kümeleme veya sınıflandırma olarak değerlendirir. Bulanık teori yaklaşımı sayesinde problemle ilgili bilgiler doğal bir problem olarak ifade edilebilir ve birçok mühendislik probleminde ve karar verme problemlerinde önemli kolaylıklar sağlar. Bulanık Küme Teorisi; Veri setleri, sınırları açıkça ayırmadan bir grup veya küme olarak tanımlanır. Klasik bir küme, ayırık veya sürekli öğelerin bir koleksiyonudur. Klasik bir evrensel kümede, öğeler "üye kimliği" veya "üye kimliği değildir" olarak tanımlanır. Klasik küme teorisinde sınırlar kesin olarak çizilir ve öğe bu iki koşuldan herhangi biri tarafından tanımlanır. Ancak bulanık küme teorisinde eleman, elemanın "üye olması" veya "üye olmaması" olarak belirlenir.

Üyelik fonksiyonu; Bulanık bir kümedeki bir üyenin derecesi üyelik fonksiyonu ile gösterilir (Vaidyanathan ve Azar, 2016). Üyelik fonksiyonunu ve derecesini örnek olarak gösterirsek, bulanık küme teorisine göre kısa ve uzun kavramlarının üyelik düzeylerini belirleyebiliriz (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 Klasik Bulanık Küme (Fırat, 2007)

Üyelik fonksiyonları ile verilen bir sette, elemanların dereceleri belirlenerek gerçekleştirilen, bulanıklaştırma adı verilen işlem görülmektedir. Yani problemin kesin verileri bu üyelik fonksiyonları yardımıyla bulanık değerlere dönüştürülür ve bu süreç bulanık mantıkla modellemenin ilk adımıdır. Literatürde modelleme için farklı üyelik fonksiyonları kullanılmaktadır. Bunlar; üçgen, trapezoidal ve gauss üyelik fonksiyonlarıdır. Bulanık mantık yönteminin diğer klasik yöntemlere göre en büyük avantajlarından biri kavramsal ifadeleri kullanabilmeleridir. Bu kavramsal ifadeler, evrensel kümedeki öğelerin gruplandırılmasını sağlar. Örneğin hız, günlük yaşamda "yavaş", "hızlı" ve "çok hızlı" gibi ifadeler kullanılarak gruplandırılır (Logic, 2014). Bu kavramsal değişkenler kullanılarak bulanık modellemenin ikinci adımı olan bulanık kurallar oluşturulur (Şekil 3.2).

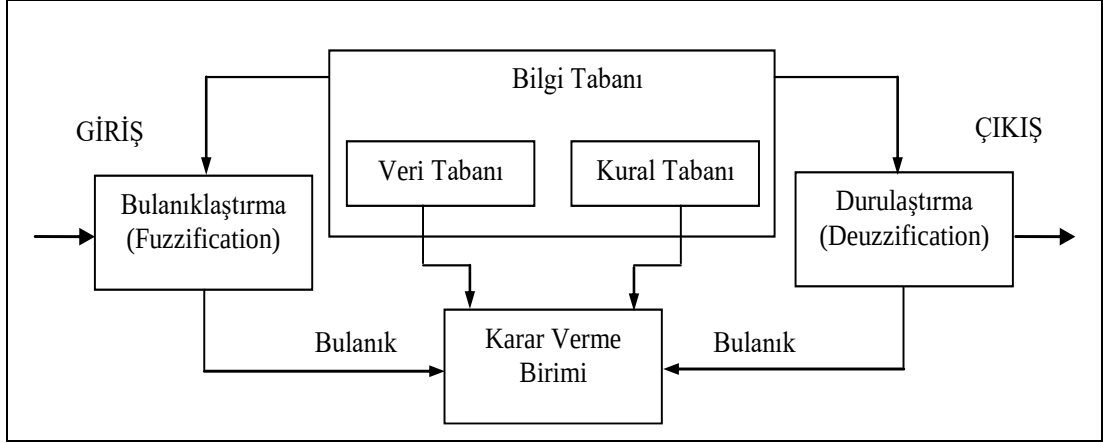


Şekil 3.2 Bulanık mantık üyelik işlevi

Bulanık mantık ile modelleme yaparken ikinci adım bulanık kurallar oluşturmaktır. Bulanık kurallar, giriş ve çıkış değişkenleri arasındaki bağlantı olarak tanımlanır.

Bulanık akıl yürütme ve bulanık kurala dayalı ve temelde üç kavramsal bileşenden oluşan kural tabanlı sistem, Bulanık Çıkarım Sistemi olarak tanımlanır. Bu kavramsal bileşenler; Bulanık EĞER-O HALDE kurallarının toplamından oluşan kural tabanı, üyelik derecelerinin tanımlanmasında kullanılan veri tabanı ve sistem girdi ve çıktılarından kuralların toplanmasına ve uygun sonuçların üretilmesine hizmet eden çıkarım mekanizmasıdır (Şekil 3.3).

Literatürde birkaç bulanık çıkarım sistemi önerilmiştir. En yaygın olarak kullanılanlar Mamdani Bulanık Çıkarım Sistemi ve Sugeno-Tagaki Bulanık Çıkarım Sistemidir (ANFIS). Bu iki çıkarım sistemini birbirinden ayıran en önemli özellik çıktı değişkenini tanımlamaktır. Bu çalışmada ANFIS yöntemi kullanılmıştır.



Şekil 3.3 Bulanık Mantık Çıkarım Sisteminin Genel Yapısı

3.8 Bulanık Kümeler ve Üyelik İşlevleri

Bulanık geçmişi, Sayılar Komşuluğu felsefesine dayanmaktadır. Karar sürecinde bir durum bir sayı ile ifade edilirse o sayının gerçekleşmesinde durumun kabul edilebilirliği sağlanır. Ancak söz konusu sayıya yakın rakamlar karar sürecinin bir parçası olarak algılanmayacaktır. Bununla birlikte, bu sayıların belirli bir güven katsayısında farklı popülasyonların üyeleri olduğunu ileri sürmek istatistiksel olarak yanlış olacaktır. Örneğin, bir makinede işlenen bir parçanın sıcaklığı 39°C 'ye ulaştığında makine bakım sürecini başlatırsa, belki de sıcaklığın 36°C 'ye ulaşması, aynı bakım sürecini başlatmak için bir ön koşul olarak kabul edilebilir. Bu durumda aynı temel amaca hizmet eden komşu sayılardan söz etmek mümkündür (Ali vd., 2015).

3.9 Bulanık Mantığın Avantajları ve Dezavantajları

Bulanık denetleyicilerin bulanık mantık, zayıf noktalar ve eleştirilere dayanan temel avantajları aşağıda açıklanmıştır.

3.9.1 Avantajlar

- Günlük hayatta olduğu gibi, zamanla değişen, karmaşık, iyi tanımlanmış sistemlerin kontrolüne basit çözümler sağlar.

- Bir sistem basit bir matematiksel modelle tanımlanabildiğinde, geleneksel bir kontrol yeterli olacaktır. Ancak karmaşık bir sisteme geleneksel bir mantığı uygulamak hem çok zor hem de maliyetlidir. Öte yandan, bulanık mantık kontrolü sistemi geleneksel mantıktan daha iyi analiz edebilir ve aynı zamanda ekonomiktir.
- Bulanık mantık, geniş bir alana yayılan az sayıdaki işaretlerin ön işlemine tabi tutulur ve değerlerinin daha küçük bir yazı ile daha hızlı ve daha iyi sonuç veren bulanık üyelik işlevine indirgenmesini sağlar.
- Az sayıdaki değere uygulanacak kural sayısı az olduğu için sonuca ulaşmak daha hızlı olacaktır.
- Geleneksel bilgisayar ortamında durum bu şekildedir. Özel olarak geliştirilmiş bir donanım ile sonuca daha da hızlı ulaşmak mümkündür. Örneğin, Sanyo-Fisher'dan mühendisler, video kaydedicide kullanacaklarını düşündükleri mikro bilgisayarın yetersizliği nedeniyle bulanık kontrol kullanmaya karar verdiler. Bulanık kontrol, yazılım boyutlarının daha küçük olmasına izin verdiğinden, harici bellek kullanmak gerekli değildir.

3.9.2 Dezavantajlar

Bulanık kontrolde kullanılan kurallar büyük ölçüde deneyime bağlıdır. Üyelik işlevlerinin seçiminde belirli bir yöntem yoktur. Bu oldukça uzun sürebilir. Denetlenen sistemin kararlılık analizi yapılamaz ve sistemin nasıl tepki vereceği tahmin edilemez. Yapılması gereken tek şey simülasyon çalışmasıdır.

3.10 Bulanık Mantığın Kullanım Alanları

Hemen hemen her alanda kullanılabilen bulanık mantık, endüstri alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Japon bulanık mantığı, özellikle bulaşık makineleri, çamaşır makineleri, elektrikli süpürgeler video kameralara uygulanmıştır.

Bulanık mantık uygulamaları ilk olarak çimento sektöründe kullanılmıştır. Bu seçici aynı zamanda kireçtaşı ve kilde 1000-1400 derecede tepki verir. Fırındaki sıcaklık ve

oksijen içeriği, çimentonun kalitesini doğrudan etkiler. Sadece bu alanda uzmanlaşmış operatörler istenilen limitler dahilinde ürünü temin edebilmektedir. Ancak bu fabrikada vardiya sistemi ile çalışan birçok operatör vardır ve her operatörün farklı bir uzmanlığı olduğu için ürün farklı kalite ve verimlilikte elde edilmektedir. İstenilen kalitede ürün ancak bu işte yıllardır çalışan uzmanlar tarafından temin edilebilir. Çimento üretimi bulanık bir yapıya sahip olduğundan proses kontrolü ve geçersiz bulanık kurallar sağlar. Örneğin, sıcaklığı 10 derece veya 5 derece artırmak gibi katı kurallar yoktur. Biraz azalma, biraz artış gibi belirsiz terimlerle ifade edilen kurallarla kontrol edilir. Danimarkalı bir şirket, bu işlemi kontrol etmek için uzman operatörler tarafından kullanılan 50-60 pratik kurala dayalı bir mikro denetleyici geliştirmiştir ve bu da sürekli ürün kalitesi ve yakıttan önemli ölçüde tasarruf sağlamıştır (Nayak ve Devulapalli, 2015).

Daha sonralarda bulanık mantık, insansız hava araçlarının kontrolünde, tren fren sistemi, ABS (otomatik fren sistemi) ve ASC (otomatik vites kontrolü) kontrolünde de kullanılmıştır. Tablo 3.2, pratikte bazı bulanık mantık uygulamaları örneklerini göstermektedir.

Tablo 3.2 Bulanık kontrol uygulamaları

Ürün	Şirket	Bulanık mantığın işlevi
Sayı tespiti	Fujitec –Toshiba Mitsubishi Hitachi	Yolcu trafiğini değerlendirir. Bekleme süresini azaltır.
Fotoğraf makinesi	Sanyo - fisher Canon Minolta	En iyi odaklanma ve aydınlatmayı belirleme durumunda ekranda birkaç nesne bulunur.
Video Kaydedici	Panasonic	Elde tutulan cihaz sayesinde çekim sırasında sarsıntılar ortadan kalkar.
Çamaşır makinesi	Matsushita	Çamaşırların kirliliğini, ağırlığını, kumaş cinsini algılar, buna göre yıkama programını seçer.
Elektrik süpürgesi	Matsushita	Yerin durumu ve kirliliği ve buna göre motor gücünü ayarlar.
Su ısıtıcı	Matsushita	Isınma için kullanılan su miktarını algılar ve sıcaklığı buna göre ayarlar.

Tablo 3.2 devamı

Klima	Mitsubishi	Ortam koşullarını değerlendirerek en iyi çalışma koşulunu tespit eder, odaya birisi girerse soğutmayı artırır.
Abs fren sistemi	Nissan	Kilitli olmayan tekerleğin frenlemesini sağlar.
Çelik endüstrisi	Nippon steel	G, geleneksel kontrolörlerin yerini alır.
Sendai metro sistemi	Hitachi	Hızlanma ve yavaşlamanın ayarlanması rahat bir yolculuk sağlayarak durma konumunu çok iyi ayarlar, güç tasarrufu sağlar.
Çimento endüstrisi	Mitsubishi Chem	Değirmen kontrolünde ısı ve oksijen oranını ayarlar.
Televizyon	Sony	Görüntünün kontrastını, parlaklığını ve rengini ayarlar.
El bilgisayarı	Sony	Veri ve komut girişi ile el yazısı sağlar.

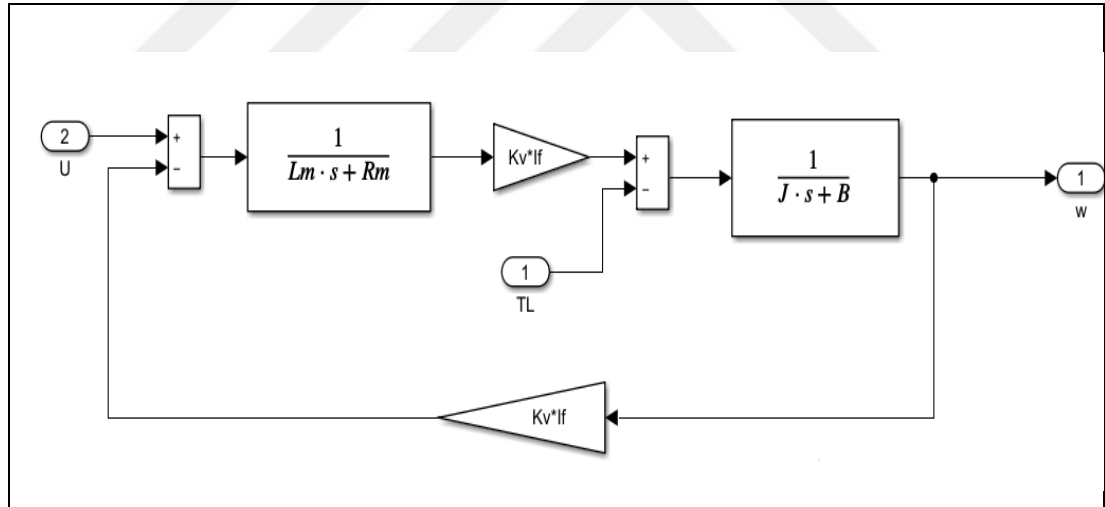
4. BENZETİM SONUÇLARI

4.1 Model Referansı Tabanlı Bulanık Denetleyiciyi Kullanarak DC Motor Kontrolü

Bu tezde, model referans tabanlı bulanık denetleyici kullanarak BLDC motor kontrolünü gerçekleştiriyoruz. Bu sistemin uygulanması üç aşamalıdır. İlk adım, referans modelin tasarlanmasıdır. İkinci adım ise Santral Modelidir. Santral modeli için BLDC motor kullanıyoruz. Son adım, bulanık denetleyiciyi tasarlamaktır.

4.1.1 Referans Model

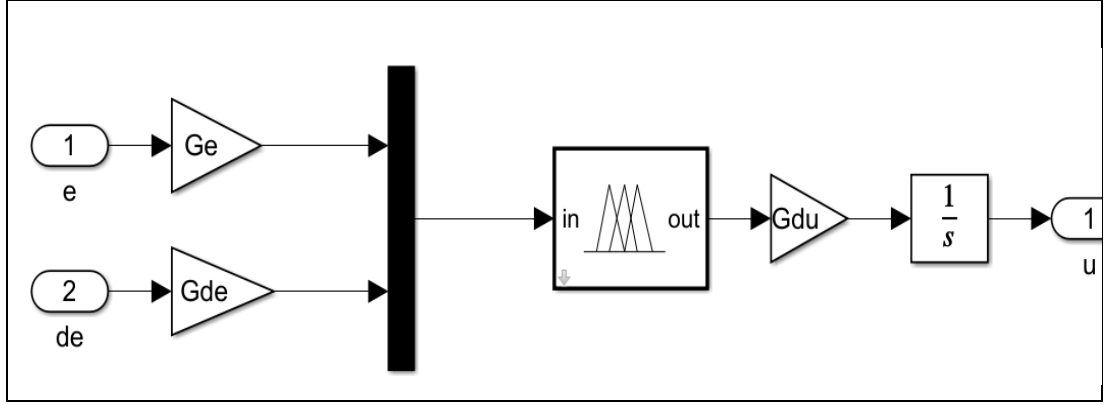
Denetleyicinin bu bölümü, kapalı döngü sisteminin tercih edilen işleyişini modeller. Bu tezde, referans model için bir transfer fonksiyonu kullanıyoruz.



Şekil 4.1 Referans model

4.1.2 Bulanık Denetleyici

Bu kontrolör, kapalı döngü kontrol sistemimizin ileri yolundaki amplifikatörün yerini alır. Bulanık denetleyicinin bir örneği Şekil 4.1'de gösterilmektedir.



Şekil 4.2 Bulanık denetleyici

"Santral" sadece çıkışı kontrol edilen ekipman anlamına gelir.

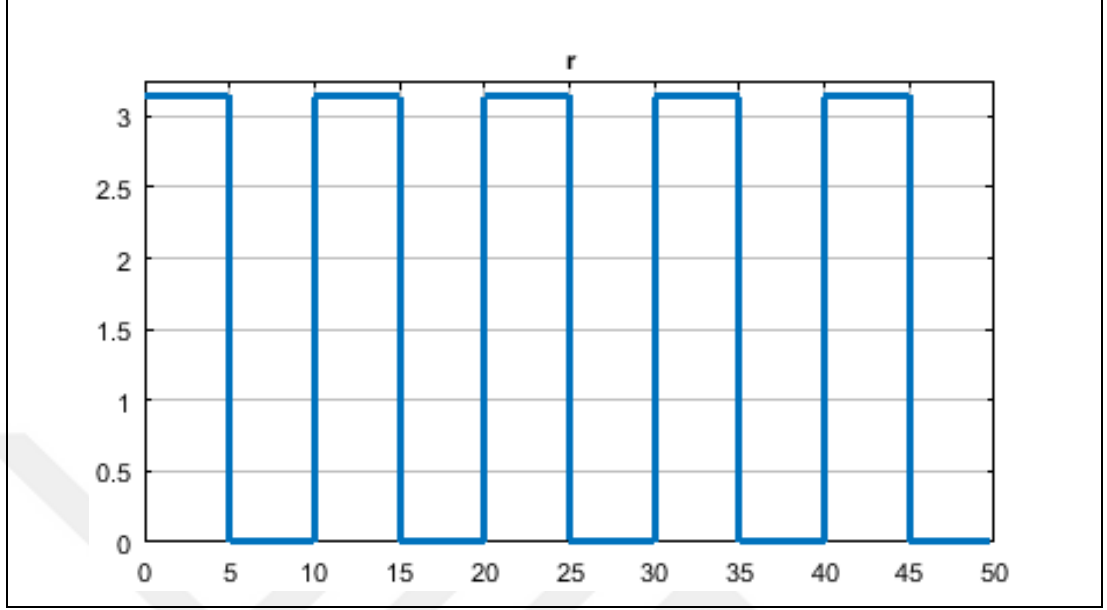
4.1.3 Sistemin Blok Diyagram Modelini Oluşturma

Sistemin blok diyagram modelini oluşturmak için,

1. Sistem girişi olarak bir basamak fonksiyonu kullanın ($e(k)$).
2. Bu çalışmada daha önce tartışılan yöntemi kullanarak entegratör denklemini oluşturun.
3. y_i entegrasyonunun çıktısını aşağıda tanımlanan sınırlar dahilinde olacak şekilde sınırlayın.
4. y_i için 0 başlangıç koşulunu tanımlayın (bu, Birim Gecikme bloğunda bir başlangıç koşulu ayarlanarak yapılabilir).
5. Aynı kapsamda hem girişi hem de çıkışı görüntüleyin.
6. Blok parametrelerini tanımlamak için değişken adlarını kullanın.
7. Sinyalleri etiketleyin ve diyagrama açıklama ekleyin.

Bu tezde, BLDC motorun kontrolü için Bulanık mantık denetleyicisi ve akıllı bir sistem kullanacağız. Kaynakta 3 volt genlikli ve 100 saniyelik periyotlu puls üretici

kullanacağız. Bu jeneratörün darbe genişliği 50'dir. Üretilen giriş sinyali Şekil 4.2'de gösterilmektedir.



Şekil 4.3 Jeneratör darbe fonksiyonu

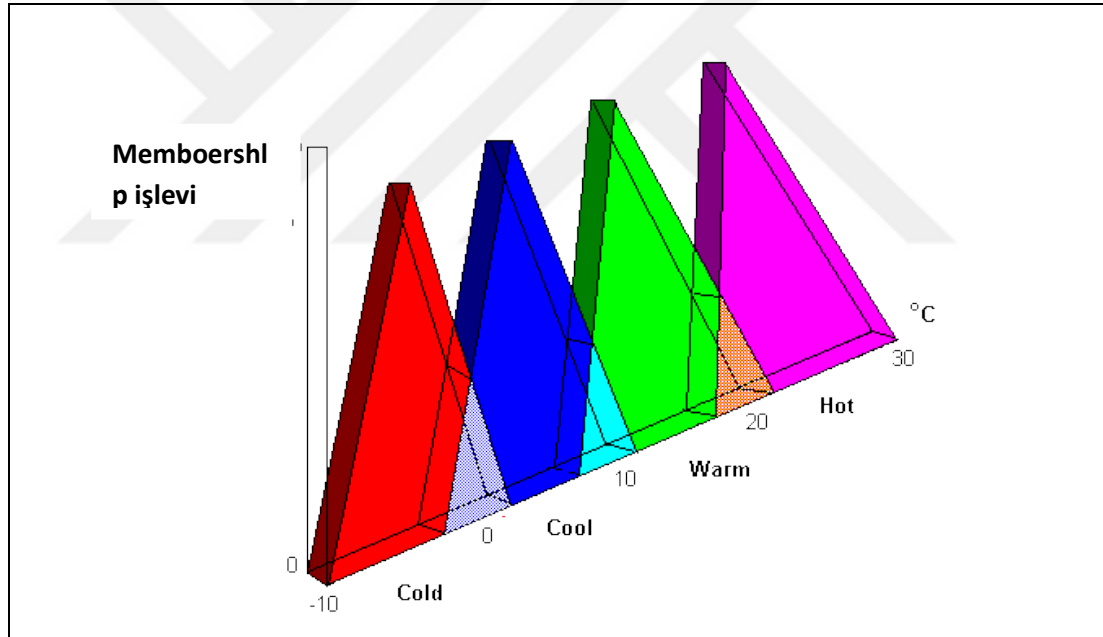
4.1.4 Model Referans Uyarlamalı Kontrol Sistemi

Model referans uyarlamalı kontrol sistemi, önemli bir uyarlamalı kontrolördür. İstenen performansın bir giriş sinyaline istenen yanıtı veren bir referans modeli cinsinden ifade edildiği, uyarlanabilir bir servo sistemi olarak kabul edilebilir. Bu, bir servo sorunu için teknik özellikler vermenin uygun bir yoludur.

Sistem, süreç ve denetleyiciden oluşan sıradan bir geri bildirim döngüsüne ve denetleyici parametrelerini değiştiren geri bildirim döngüsüne sahiptir. Parametreler, $y(t)$ sisteminin çıktısı ile referans model $y_m(t)$ çıktısı arasındaki fark olan hata $e_m(t)$ geri bildirimine göre değiştirilir. Sıradan geri besleme döngüsü, iç döngü olarak adlandırılır ve parametre ayarlama döngüsü, dış döngü olarak adlandırılır. Bir model referans uyarlamalı kontrol sisteminde parametrelerin ayarlanması için mekanizma iki yolla elde edilebilir: gradyan yöntemi kullanarak veya Lyapunov kararlılık teorisini uygulayarak.

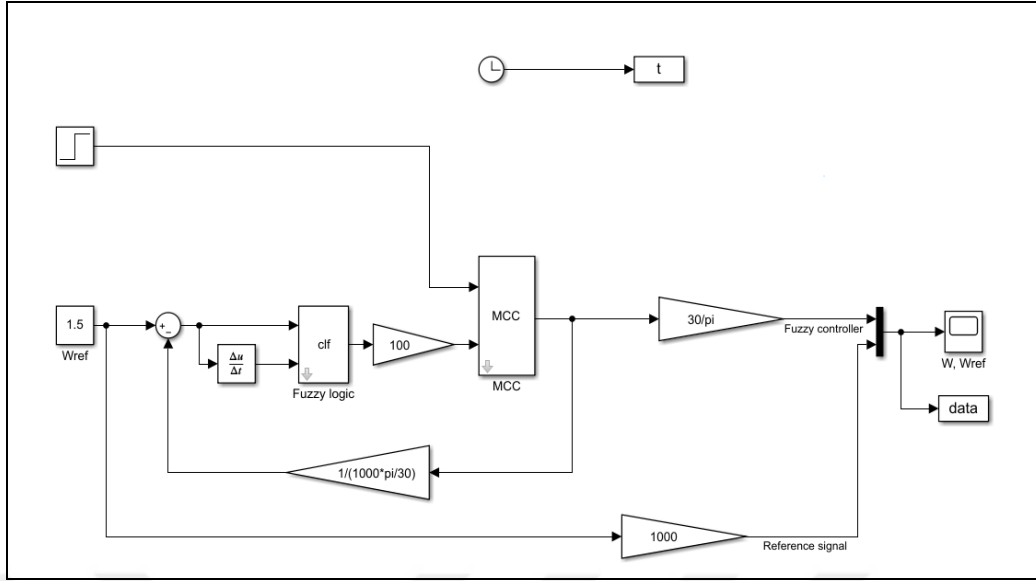
4.2 Bulanık Mantık

Bulanık mantık, özellikle tanımların belirsizliği ve belirsizliğinin modellenmesi için geliştirilmiş günlük dilde söylenen bir teoridir. İki değerlikli Boole mantığının bir genellemesidir. Örneğin, "çok" bilgi bulanıklığı, matematiksel modellerde "biraz", "birçok", "güçlü" olarak yansıtılır. Bulanık mantık, bulanık kümeler ve bulanık kümelerdeki nesneleri temsil eden sözde üyelik işlevlerin, bu nicelikler üzerindeki eşleşen mantık işlemlerine ve bunların çıkarımlarına dayanır. Teknik uygulamalar için ayrıca bulanıklaştırma ve bulanıklaştırmama yöntemleri de dikkate alınmalıdır, bunlar bulanık mantıkta bilgi ve ilişkilerin dönüştürülmesi için yöntemler, örneğin sonuç olarak bir ısıtıcı için bir kontrol değeri, olarak dikkate alınmalıdır. Şekil 4.3'te bulanık sistem hava durumu için gösterilmiştir.



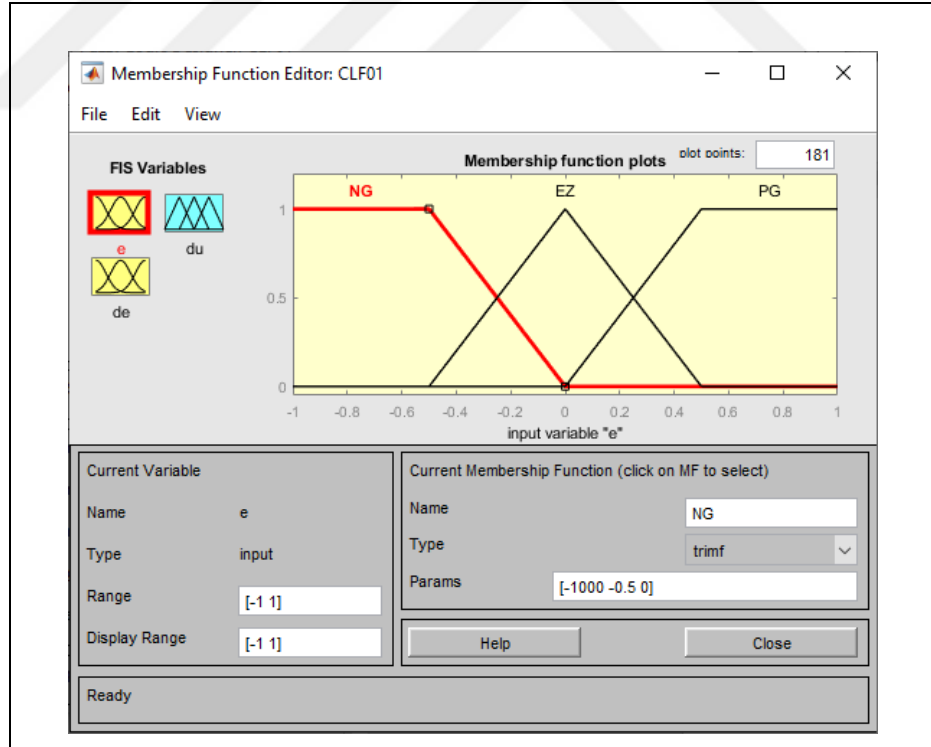
Şekil 4.4 Oda sıcaklığı için bulanık mantık

Bu şekil yalnızca üç durumu gösterir. SIMULINK şemasındaki bulanık mantık denetleyicisi Şekil 4.4'te gösterilmektedir.

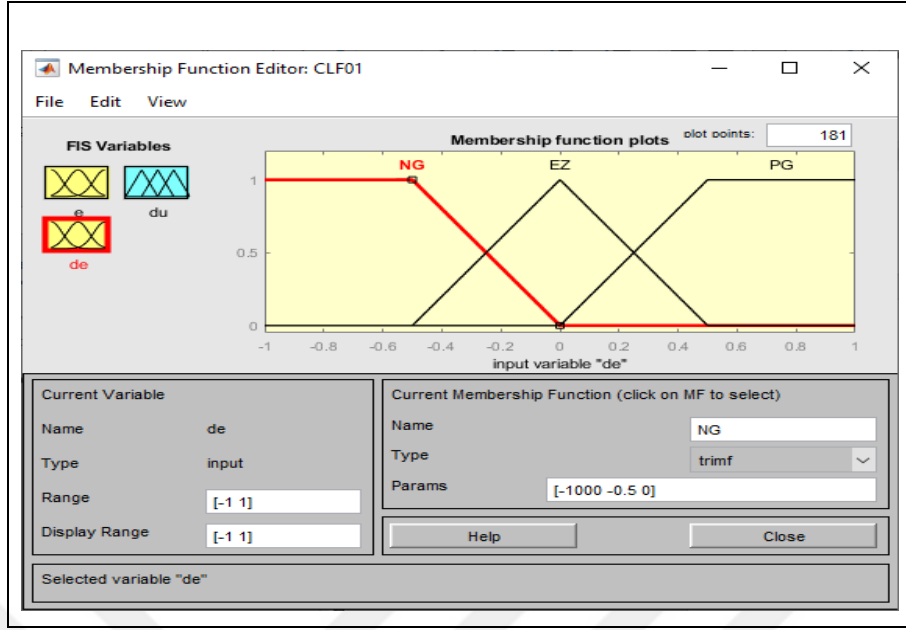


Şekil 4.5 SIMULINK'te bulanık denetleyici

Giriş e , K_p , K_i ve K_d 'nin bulanık alt küme dağılımı Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da gösterilmektedir.

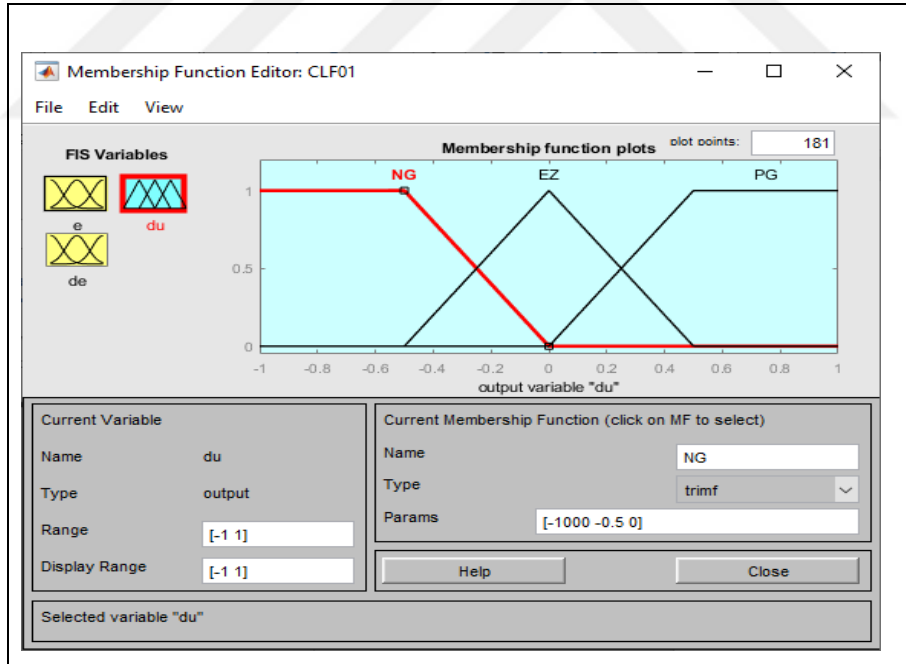


Şekil 4.6 Giriş e 'nin Bulanık Alt Küme Dağılımı



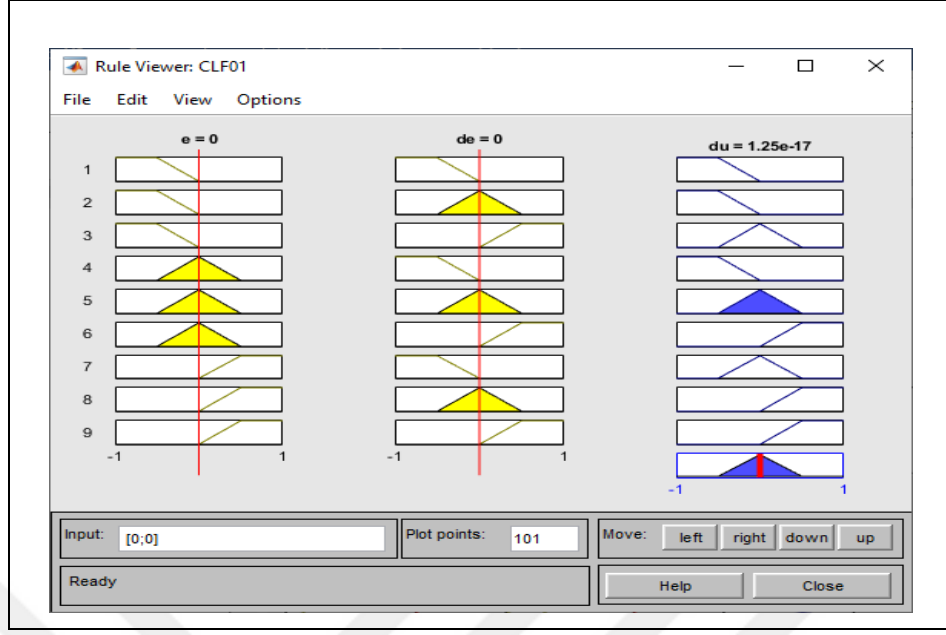
Şekil 4.7 Bulanık alt küme dağılımı

FIS değişkeni “du”nun bulanık alt küme dağılımı Şekil 4.7'de gösterilmektedir.



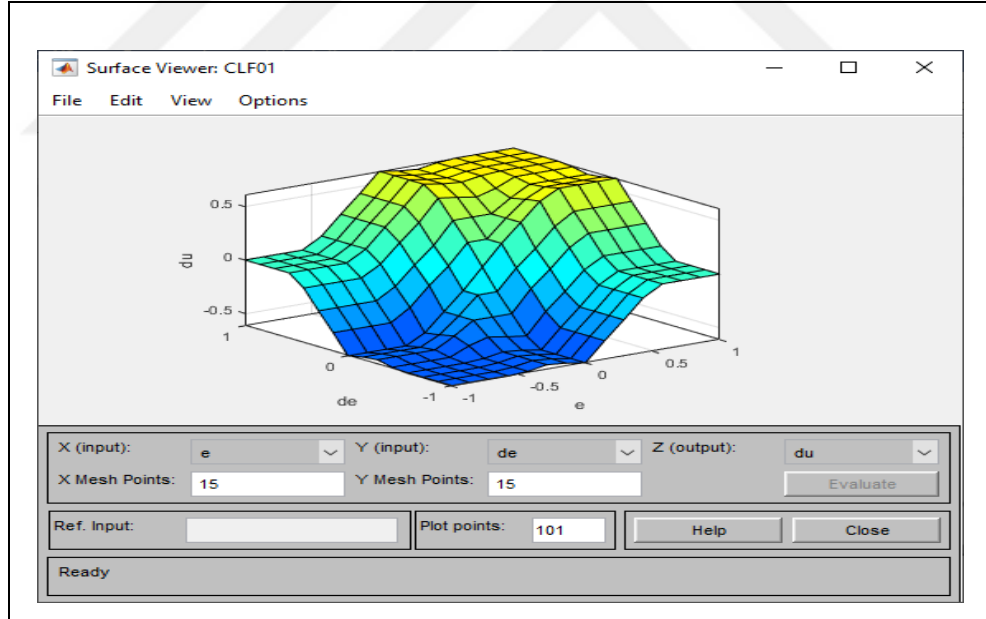
Şekil 4.8 Du'nun Bulanık Alt Küme Dağılımı

Kural görünümü Şekil 4.8'de gösterilmektedir.



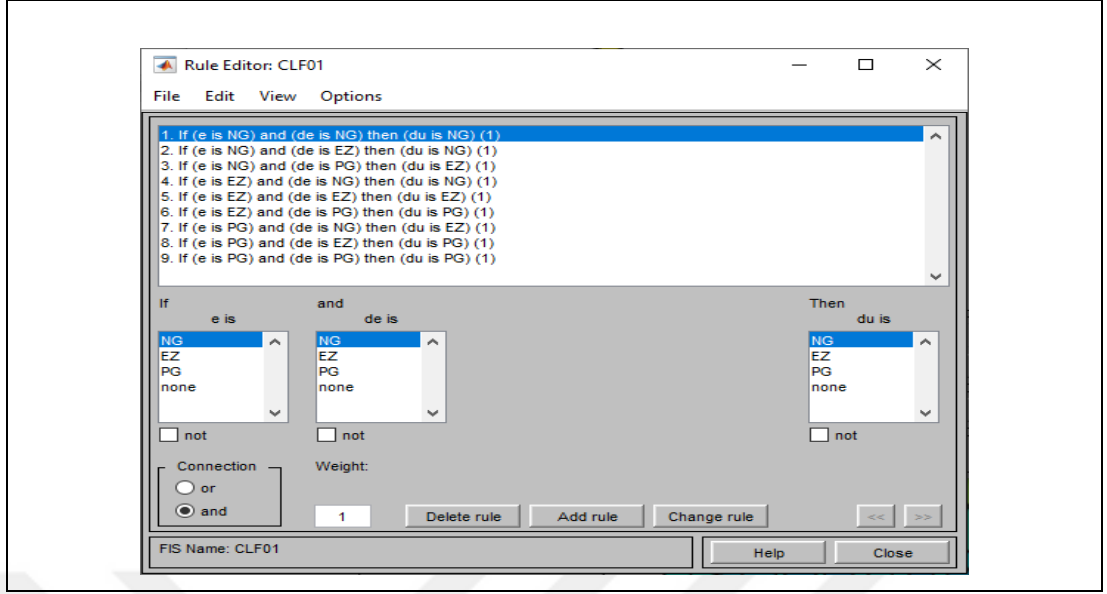
Şekil 4.9 Kural görünümü

e , de ve du 'nun yüzeyi Şekil 4.9'da gösterilmektedir.



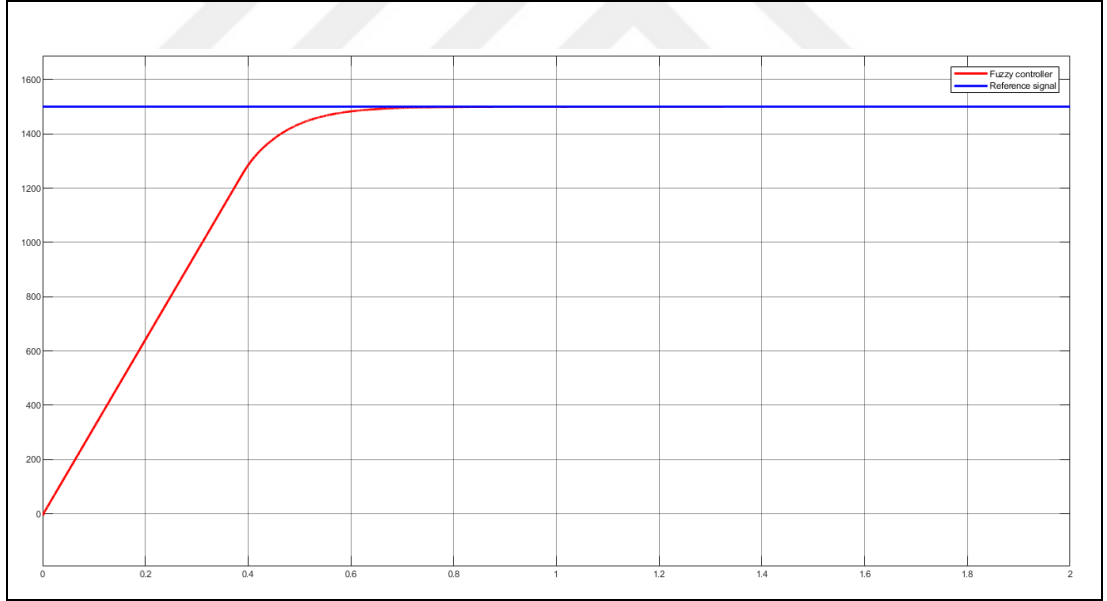
Şekil 4.10 e , de ve du 'nun yüzeyi

Bulanıkta kullanılan kurallar Şekil 4.10'da gösterilmektedir.



Şekil 4.11 Bulanıkta kullanılan kurallar

Simülasyon sonucu Şekil 4.11'de gösterilmektedir.



Şekil 4.12 Önerilen yöntemin benzetim sonucu

5. SONUÇ VE TARTIŞMALAR

Bu tezde, BLDC motor hız kontrolü, pozisyon kontrolü ve tork kontrolü, bulanık veya yapay sinir ağına dayalı olarak tasarlanacak ve uygulanacaktır. Bulanık kümeler, sinir ağları ve genetik algoritmalar gibi akıllı frekans ayarlama teknikleriyle karşılaştırma ve analiz için bulanık mantık denetleyici tasarım yöntemi, merdiven gibi çağrı özelliklerini iyileştirmek için yumuşak hesaplama teknikleri, daha verimli durumlar (yükselme süresi, aşma süresi ve DC kontrol motorunun konumlandırılmasında maksimum kalma süresi vb.) için hataları azaltmıştır. DC motorlar, otomatik sistemin ana bileşenlerinden biridir. Sistem, sistemin gerçekten işlevini yerine getirmesini sağlayan bir modülü otomatik olarak tetiklemelidir. Bunu yapmak için kullanılan en yaygın uyarıcı DC motordur. Tarihsel olarak, DC motorlar aynı zamanda birçok cihaz ve sistemin geliştirilmesinde hayati bir rol oynamaktadır. Hayatımızda onsuz yaşayamayacağımız önemli bir unsurdur. Önemleri nedeniyle, bu sistemler için kontrolör tasarımı dünyanın her yerinden araştırmacılar için bir ilgi alanı olmuştur.

Bir DC makinesi ve doğru akım motoru, bir komütatör motoru veya komütatör, üretilen doğru akım veya doğru akımla çalıştırılan dönen bir elektrik makinesidir. DC motor (bir elektrik motorunda, mekanik enerji elektrik gücünden sağlanır) ile DC jeneratör (bir elektrik jeneratöründe, elektrik enerjisi mekanik enerjiden elde edilir), güç akışının yönüne bağlı olarak ayırt edilir. DC makineler yük altında başlayabilir ve hızının değiştirilmesi kolaydır. Klasik DC makinelerin özelliğine komütatör veya devirli mekanik invertör denir. Rotorda, motorun çalışmasına yardımcı olan hıza bağlı bir alternatif akım üretilir. Jeneratör modunda, rotor AC voltajı tarafından sağlanan gücü darbeleri bir DC voltajına dönüştürür. Aynı DC makinesinin geçici olarak bir motor ve bir jeneratör olarak kullanıldığı uygulamalar da vardır. Özel bir form homopolar jeneratördür, DC ile bir komütatör kullanılmadan üretilir.

KAYNAKLAR

- Al-Ayasrah, O., Alukaidey, T., & Pissanidis, G. (2006). Dsp based n-motor speed control of brushless dc motors using external fpga design. 2006 IEEE International Conference on Industrial Technology, 627–631. IEEE.
- Ali, O. A. M., Ali, A. Y., & Sumait, B. S. (2015). Comparison between the effects of different types of membership functions on fuzzy logic controller performance. *International Journal*, 76, 76–83.
- Bhatt, J., Sladek, B., Gouda, B., & Dunham, J. (2018, May 1). Multi-mover linear motor controller providing shared coordination subsystem. Google Patents.
- Bist, V., & Singh, B. (2014). PFC Cuk converter-fed BLDC motor drive. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(2), 871–887.
- Chen, H., Cai, F., & Chen, X. (2018). Research on Adaptive Robust Servo Control System of PMSM Under the Uncertain Factors. 2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2785–2790. IEEE.
- Chen, S.-Y., Chen, C.-S., & Yang, Z.-W. (2018). Self-tuning cross-coupled two degree-of-freedom PID control for position synchronization of dual linear motors. *Applied Mathematical Modelling*, 64, 214–234.
- El-Samahy, A. A., & Shamseldin, M. A. (2018). Brushless DC motor tracking control using self-tuning fuzzy PID control and model reference adaptive control. *Ain Shams Engineering Journal*, 9(3), 341–352.
- El Khateb, A., Rahim, N. A., Selvaraj, J., & Uddin, M. N. (2014). Fuzzy-logic-controller-based SEPIC converter for maximum power point tracking. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 50(4), 2349–2358.
- Emadi, A. (2018). Brushless DC Motor Drives. In *Energy-Efficient Electric Motors, Revised and Expanded* (pp. 289–310). CRC Press.
- Fang, J., Li, W., Li, H., & Xu, X. (2014). Online inverter fault diagnosis of buck-converter BLDC motor combinations. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(5), 2674–2688.
- Fujii, K., Matsumoto, T., & Murao, S. (2018, December 18). Brushless DC motor and ventilation device having same mounted therein. Google Patents.
- Gieras, J. F., Piech, Z. J., & Tomczuk, B. (2018). *Linear synchronous motors: transportation and automation systems*. CRC press.
- Jian, W. (2004). Robust Tracking Controller Design With Application To The Motion Control Of An Xy Feed Table For High-Speed Machining.

- Koninckx, B. (2003). Modular, distributed motion planning, interpolation and execution.
- Koninckx, B., Van Brussel, H., Van Eijk, J., & Meijerman, N. (2001). Modular technologies for intelligent motion unit with linear motor and axis control. *Proceedings of the Transactions of the North American Manufacturing Research Institution of SME*, 493–499.
- Kos, D., Curkovic, M., & Jezernik, K. (2006). FPGA Based BLDC Motor Current Control with Spectral Analysis. 2006 12th International Power Electronics and Motion Control Conference, 1217–1222. IEEE.
- Lin, J., Wan, Q., Wang, M., Lei, Z., & Jia-cai, H. (2018). Predictive Functional Control Based on Sliding Mode Observer for Linear Motor Speed System. 2018 5th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE), 895–899. IEEE.
- Lin, J., Xie, G., & Shi, X. (2019). Improved Double-Vector Model Predictive Current Control of Permanent Magnet Synchronous Linear Motor. *Proceedings of the 2019 3rd International Conference on Innovation in Artificial Intelligence*, 150–156. ACM.
- Linder, J. (2019). Brushless DC motor with control electronics motor assembly. Google Patents.
- Logic, F. (2014). Foundations of fuzzy logic and semantic web languages.
- Muniraj, M., & Arulmozhiyal, R. (2015). Modeling and simulation of control actuation system with fuzzy-PID logic controlled brushless motor drives for missiles glider applications. *The Scientific World Journal*, 2015.
- Nagaoka, K., & Fujita, T. (2018). Servo control device. Google Patents.
- Nayak, P., & Devulapalli, A. (2015). A fuzzy logic-based clustering algorithm for WSN to extend the network lifetime. *IEEE Sensors Journal*, 16(1), 137–144.
- Rodriguez, F., & Emadi, A. (2007). A novel digital control technique for brushless DC motor drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 54(5), 2365–2373.
- Schneider, F. (2018). SENSORLESS COMMUTATION METHOD. US Patent App. 15/551,328.
- Shao, X., & Sun, D. (2006). An FPGA based motion control IC and its application to robotic manipulators. 2006 9th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, 1–6. IEEE.
- Symens, W. (2004). Motion and vibration control of mechatronic systems with variable configuration and local non-linear friction.

- Thomas, A., & Hariharan, S. (2019). Performance Analysis of Slotted and Slotless Brushless DC Motor for Biomedical Applications. *Trends in Electrical Engineering*, 8(3), 60–65.
- Tzou, Y.-Y., & Kuo, T.-S. (1997). Design and implementation of all FPGA-based motor control IC for permanent magnet AC servo motors. *Proceedings of the IECON'97 23rd International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation* (Cat. No. 97CH36066), 2, 943–947. IEEE.
- Vaidyanathan, S., & Azar, A. T. (2016). Takagi-Sugeno fuzzy logic controller for Liu-Chen four-scroll chaotic system. *International Journal of Intelligent Engineering Informatics*, 4(2), 135–150.
- Van Brussel, H., & Van den Braembussche, P. (1998). Robust control of feed drives with linear motors. *CIRP Annals*, 47(1), 325–328.
- Wang, D., Yu, K., & Guo, H. (2008). Functional design of FPGA in a brushless DC motor system based on FPGA and DSP. *2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 1–4. IEEE.
- Yamanaka, S., & Nomura, Y. (2018). Linear motor device and control method. Google Patents.