KAYSERİ ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOĞRU AKIM MOTORLARI İÇİN ADAPTİF FİLTRE TABANLI HIZ KESTİRİCİLERİN TASARIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

CANBERK TUZCU

DANIŞMAN
PROF. DR. ENGİN CEMAL MENGÜÇ



2025

T.C.
KAYSERİ ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOĞRU AKIM MOTORLARI İÇİN ADAPTİF FİLTRE TABANLI HIZ KESTİRİCİLERİN TASARIMI

(Yüksek Lisans Tezi)

Hazırlayan
Canberk TUZCU

Danışman
Prof. Dr. Engin Cemal MENGÜÇ

Jüri Üyeleri
Prof. Dr. Engin Cemal MENGÜÇ
Doç. Dr. Rıdvan DEMİR
Dr. Öğr. Üyesi Alper EMLEK

Temmuz 2025
KAYSERİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu tezin kendi çalışmam olduğunu, planlanmasından yazımına kadar hiçbir aşamasında etik dışı davranışımın olmadığını, tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları kaynaklar listesine aldığımı, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

Canberk TUZCU

	TEZ İNTİHAL RAPORU TESLİM FORMU	Doküman No	FR-287
		İlk Yayın Tarihi	8/02/2022
		Revizyon Tarihi	-
		Revizyon No	0
		Sayfa No	1/1

T.C.
Kayseri Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürlüğü

Anabilim Dalı : Elektrik-Elektronik Mühendisliği ABD
Program Adı : Yüksek Lisans
Tez Başlığı : Doğru Akım Motorları İçin Adaptif Filtre Tabanlı Hız Kestiricilerin Tasarımı

Yukarıda bilgileri verilen tez çalışmasının a) Giriş, b) Ana bölümler ve c) Sonuç kısımlarından oluşan (Kapak, Önsöz, Özet, İçindekiler ve Kaynakça hariç) toplam 52 sayfalık kısmına ilişkin 26/06/2025 tarihinde ***Turnitin*** intihal programından aşağıda belirtilen filtreleme uygulanarak alınmış olan özgünlük raporuna göre tezin benzerlik oranı**: %3'**tür.

Uygulanan filtrelemeler:

1- Giriş dahil
2- Ana Bölümler dahil
3- Sonuç dahil
4- Alıntılar dahil
5- Kapak hariç
6- Önsöz ve Teşekkür hariç
7- İçindekiler hariç
8- Kaynakça hariç
9- Özet hariç
10- Yedi (7) kelimeden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Kayseri Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Önerisi Hazırlama, Tez Yazma ve Teslim Yönergesini inceledim ve bu yönergede belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini, aksinin tespit edileceği muhtemel durumlarda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini bilgilerinize arz ederim. 26/06/2025

Danışman
Prof. Dr. Engin Cemal MENGÜÇ

Öğrenci
Canberk TUZCU

KILAVUZA UYGUNLUK

"Doğru Akım Motorları İçin Adaptif Filtre Tabanlı Hız Kestiricilerin Tasarımı" başlıklı Yüksek Lisans tezi, Kayseri Üniversitesi Lisansüstü Tez Yazım Kılavuzuna uygun olarak hazırlanmıştır.

Tezi Hazırlayan	**Tez Danışmanı**
Canberk TUZCU	Prof. Dr. Engin Cemal MENGÜÇ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. Engin Cemal MENGÜÇ

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Prof. Dr. Engin Cemal MENGÜÇ danışmanlığında Canberk TUZCU tarafından hazırlanan "Doğru Akım Motorları İçin Adaptif Filtre Tabanlı Hız Kestiricilerin Tasarımı" başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından Kayseri Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

11/07/2025

JÜRİ:

Danışman **: Prof. Dr. Engin Cemal MENGÜÇ**

Üye **: Doç. Dr. Rıdvan DEMİR**

Üye **: Dr. Öğr. Üyesi Alper EMLEK**

ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun ……...…… tarih ve …… sayılı kararı ile onaylanmıştır.

……. /……../ ……

Doç. Dr. Ahmet TERZİ

Enstitü Müdürü

ÖN SÖZ / TEŞEKKÜR

Bu süreçte, bilgi ve tecrübesiyle yolumu aydınlatan, çalışmanın her aşamasında kıymetli katkılarını esirgemeyen, yapıcı eleştirileri ile değerli desteğini esirgemeyen danışmanım Prof. Dr. Engin Cemal MENGÜÇ'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, tez çalışmam sırasında teknik detaylar ve akademik yaklaşım konusunda değerli görüş ve destekleriyle katkıda bulunan Doç. Dr. Rıdvan DEMİR'e de teşekkür ederim.

Bugüne kadar her koşulda yanımda olan, beni koşulsuz destekleyen ve sabırla bu süreci yürütmemi sağlayan sevgili Aileme sonsuz teşekkür ederim.

Canberk TUZCU, Kayseri, 2025

DOĞRU AKIM MOTORLARI İÇİN ADAPTİF FİLTRE TABANLI HIZ KESTİRİCİLERİN TASARIMI

Canberk TUZCU

Kayseri Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Yüksek Lisans, Temmuz 2025
Danışman: Prof. Dr. Engin Cemal MENGÜÇ

ÖZET

Bu tez çalışması, sabit mıknatıslı fırçasız doğru akım motorları (SMFDAM) için geliştirilen model referanslı adaptif sistem (MRAS) tabanlı rotor hızı kestirim yöntemlerini ele almaktadır. Önerilen yöntemler, sırasıyla en küçük ortalama kare (Least mean square, LMS), en küçük ortalama kurtosis (Least mean kurtsosis, LMK) ve en küçük ortalama dördüncü (Least mean fourth, LMF) algoritmalarına dayanmaktadır. Bu yaklaşımlar, referans model olarak kullanılan ölçülmüş stator akımları ile adaptif model tarafından elde edilen stator akımları arasındaki farkı minimize ederek rotor hızını doğrudan tahmin etmektedir. Ayrıca, her bir örnekleme anında hızla ilişkili ağırlık vektörlerinin adaptif olarak güncellenmesi, geleneksel MRAS yapılarında yaygın olarak kullanılan sabit kazançlı PI kontrolcü ihtiyacını ortadan kaldırmaktadır. Geliştirilen kestirimcilerin performansı, doğrudan moment kontrolü (DMK, DTC) kullanan bir SMFDAM sürücüsü üzerinden, zorlu çalışma koşulları altında incelenmiştir. Yapılan benzetim çalışmaları, önerilen üç MRAS yapısının birbirine alternatif çözümler sunduğunu göstermiştir. Özellikle, hız kestiriminde LMF tabanlı yapı daha başarılı sonuçlar verirken; stator akımı tahmininde ise LMS ve LMK tabanlı yapılar daha iyi başarım göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Sabit mıknatıslı fırçasız doğru akım motoru, model referanslı adaptif sistem, sensörsüz kontrol, adaptif filtreler

DESIGN OF ADAPTIVE FILTER-BASED SPEED ESTIMATORS FOR DIRECT CURRENT MOTORS

Canberk TUZCU

Kayseri University Institute of Graduate Education
Master Thesis, July 2025
Thesis Advisor: Prof. Dr. Engin Cemal MENGÜÇ

ABSTRACT

This thesis study focuses on model reference adaptive system (MRAS)-based rotor speed estimation methods developed for permanent magnet brushless direct current motors (PMSM). The proposed estimators are based on the least mean square (LMS), least mean kurtosis (LMK), and least mean fourth (LMF) algorithms. These approaches estimate the rotor speed directly by minimizing the error between the measured stator currents used as the reference model and the stator currents produced by the adaptive model. Furthermore, the adaptive updating of the weight vectors, which are related to rotor speed, at each sampling instant eliminates the need for a fixed-gain proportional-integral (PI) controller typically used in conventional MRAS structures. The effectiveness of the proposed estimators was evaluated under demanding operational conditions using a direct torque control (DTC) based PMSM motor drive. Simulation results demonstrated that the three MRAS structures offer alternative solutions with varying strengths. Specifically, the LMF-based MRAS showed superior performance in rotor speed estimation, while the LMS and LMK-based estimators yielded better results in three-phase stator current estimation.

Keywords: Permenant magnent syncronous motor, model reference adaptive system, sensorless control, adaptive filters

İÇİNDEKİLER

DOĞRU AKIM MOTORLARI İÇİN ADAPTİF FİLTRE TABANLI HIZ KESTİRİCİLERİN TASARIMI

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK ..... **i**
TEZ İNTİHAL RAPORU TESLİM FORMU ..... **ii**
KILAVUZA UYGUNLUK ..... **iii**
KABUL VE ONAY TUTANAĞI ..... **iv**
ÖN SÖZ / TEŞEKKÜR……..**v**
ÖZET ..... **vi**
ABSTRACT ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **viii**
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ ..... **xi**
TABLOLAR LİSTESİ ..... **xii**
ŞEKİLLER LİSTESİ ..... **xiii**
GİRİŞ **1**

BİRİNCİ BÖLÜM

LİTERATÜR TARAMASI

1.1. Literatürün İncelenmesi……..……...3

İKİNCİ BÖLÜM

FDAM YAPISI VE KONTROL SİSTEMLERİ

2.1. Fırçasız Doğru Akım Motorları 15
2.1.1. Stator 16
2.1.2. Rotor 17
2.1.2.1. İç Rotorlu FDAM 17
2.1.2.2. Dış Rotorlu FDAM 17
2.1.2.3. Disk Tipi FDAM 18
2.1.3. Hava Aralığı 18
2.1.4. Pozisyon Bilgisi ve Sensörler 18
2.1.5. FDAM Tork-Hız Karakteristiği 20

2.1.6. Motor Kayıpları 21
2.1.6.1. Bakır Kayıpları 22
2.1.6.2. Demir Kayıpları 22
a. Histerezis Kayıpları 22
b. Eddy Akımı Kayıpları 22
2.1.6.3. Mekanik Kayıplar 23
a. Rulman Sürtünme Kayıpları 23
b. Hava Sürtünmesi 23
2.1.6.4. İletim Kayıpları 23
a. Anahtarlama Kayıpları 24
b. Hat Kayıpları 24
2.2. FDAM Motorların Zıt EMK Tipleri ve Farkları 24
2.3. SMFDAM Matematiksel Modeli 25
2.4. Genel FDAM Sürücü Devresi Yapısı 26
2.4.1. Sürücü Devre Mimarisi 27
2.4.2. Kontrol ve Geri Besleme 27
2.4.3. Sönümleme Devreleri 28
2.4.3.1. Pasif Sönümleme Devreleri 28
2.4.3.2. Sadece Kapasite İçeren Sönümleme Devreleri 29
2.4.3.3. RC Sönümleme Devreleri 29
2.4.3.4. RCD Sönümleme Devreleri 30
2.4.4. Kontrolcü 31
2.5. FDAM Sistemlerinde Temel Kontrol Türleri 32
2.5.1. Konum (Pozisyon) Kontrolü 32
2.5.2. Hız Kontrolü 34
2.5.3. DTC Yöntemi 34
2.6. FDAM Sistemleri İçin PI, PD ve PID Kontrolcülerin Analizi 35
2.6.1. FDAM Motorlarda PI, PD ve PID Kontrolcülerine Yönelik Literatür İncelemesi 36
2.6.2. PI (Proportional-Integral) Kontrolcü 37
2.6.3. PD (Proportional-Derivative) Kontrolcü 37
2.6.4. PID Kontrolcü 38
2.6.5. FDAM Motorlarda Referans Hıza Karşı Sistem Tepkisi 39

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM
ADAPTİF FİLTRE TASARIMLARI

3.1. Adaptif Filtre Tabanlı MRAS Hız Kestiricilerin Tasarımı 40

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM
BENZETİM

4.1. Benzetim Sonuçları 44

BEŞİNCİ BÖLÜM
SONUÇ-DEĞERLENDİRME

5.1. Sonuç.....51

KAYNAKÇA……..……..……..53

TEZİN İNTİHAL RAPORU……..……..……60

ÖZGEÇMİŞ……..……..……..64

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Kısaltmalar

AYK	: Alan yönlendirmeli kontrol
DMK	: Doğrudan moment kontrol
EMK	: Elektromotor kuvveti
FDAM	: Fırçasız doğru akım motoru
HEA	: Hafif elektrikli araç
LMS	: En küçük ortalama kare
MCU	: Mikrodenetleyici
MÖK	: Model öngörülü kontrol
MRAS	: Model referanslı adaptif sistem
PI	: Oransal – integral denetleyici
PID	: Oransal – integral-türev denetleyici
PWM	: Darbe genişlik modülasyonu
SMFDAM	: Sürekli mıknatıslı fırçasız doğru akım motoru
SVPWM	: Uzay vektör darbe genişlik modülasyonu

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 4.1. *Motor verileri*……45
Tablo 4.2. *Farklı algoritmaların sonuç tablosu*……49

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. *FDAM iç yapısı*……..15
Şekil 2.2. *FDAM ve SMFDAM zıt EMKları*…….....16
Şekil 2.3. *Hall sensörlerin motor içerinde örnek yerleşimi*……..…….....19
Şekil 2.4. *Eş zamanlı Hall sensör pozisyonları, faz akımlar ve zıt EMK'ların pozisyona göre durumları*…….……20
Şekil 2.5. *Tork hız eğrisi*…….…….....21
Şekil 2.6. *SMFDAM eş değer devresi*…….……..….....25
Şekil 2.7. *FDAM sürücü devresi*…….……..27
Şekil 2.8. *Sadece kapasite içeren sönümleme devreleri*……...…..……....29
Şekil 2.9. *RC sönümleme devreleri*……29
Şekil 2.10. *Sadece kapasite içeren sönümleme devresi sonrası oluşan voltaj*……..30
Şekil 2.11. *RC sönümleme devresi sonrası oluşan voltaj*…….....30
Şekil 2.12. *RCD sönümleme devresi sonrası oluşan voltaj*…...……...……31
Şekil 2.13. *P, PI ve PID çıkış karşılaştırması*…….....39
Şekil 3.1. *Adaptif filtre algoritması kullanan stator akım tabanlı MRAS kestiricisi*…...40
Şekil 4.1. *Hız-algılayıcısız DTC tabanlı FDAM sürücüsü blok diyagram*…....…...….44
Şekil 4.2. *Sürücü sistemine verilen hız referansı ve motora uygulanan yük momenti değişimleri*……...46
Şekil 4.3. *LMS tabanlı MRAS hız kestiricisini kullanan SMFDAM sürücüsüne ait benzetim sonuçları*…….…….....47
Şekil 4.4. *LMK tabanlı MRAS hız kestiricisini kullanan SMFDAM sürücüsüne ait benzetim sonuçları*…….…….....48
Şekil 4.5. *LMF tabanlı MRAS hız kestiricisini kullanan SMFDAM sürücüsüne ait benzetim sonuçları*…….……..49

GİRİŞ

Elektrikli araçlara olan ilginin artmasıyla birlikte, bu araçların kalbinde yer alan motor teknolojileri de büyük bir gelişim göstermektedir. Özellikle fırçasız doğru akım motorları (FDAM), yüksek verimlilikleri, düşük bakım gereksinimleri ve kompakt yapıları nedeniyle birçok uygulamada tercih edilmektedir. FDAM'ların verimli çalışabilmesi, büyük ölçüde doğru kontrol tekniklerinin uygulanmasına bağlıdır. Günümüzde hem klasik kontrol yöntemleri hem de kestirimci algoritmaların kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Ancak, bu yöntemlerin donanım ve benzetim ortamlarındaki davranışlarının karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesine yönelik literatürde önemli boşluklar bulunmaktadır. Bu çalışmanın temel amacı, FDAM'ların farklı kontrol yöntemleri ile sürülmesi durumunda elde edilen başarımları karşılaştırmaktır. Bu kapsamda, MATLAB/Simulink ortamında uygulanan Model Referans Adaptif Sistem (MRAS) tabanlı hız kestirim algoritmaları (LMS, LMF, LMK) karşılaştırılmıştır. Amaç, farklı algoritmaların doğruluk, uygulama kolaylığı, maliyet ve sürdürülebilirlik açısından avantaj ve dezavantajlarını ortaya koymaktır. Bu bağlamda araştırma "FDAM'ların kontrolü için hangi yöntem daha uygun sonuçlar sunmaktadır ve hangi koşullarda tercih edilmelidir?" sorularına yanıt aramaktadır.

Bu çalışmanın sonuçları, FDAM kullanan sistemlerde daha etkili ve düşük maliyetli kontrol stratejilerinin belirlenmesine katkı sağlayacaktır. Ayrıca MRAS tabanlı hız kestirimi gibi gelişmiş kontrol tekniklerinin avantajlarının ortaya konulması, elektrikli araçlar, endüstriyel otomasyon sistemleri ve robotik uygulamalarda daha akıllı sürücü tasarımlarının geliştirilmesine katkı sağlayabilir. Bu yönüyle tez hem akademik literatüre katkı sağlamakta hem de mühendislik uygulamaları açısından pratik faydalar sunmaktadır. Simülasyon ortamında gerçekleştirilen MRAS algoritmalarının çıktılarının gerçek sistem davranışlarını temsil ettiği varsayılmaktadır.

Kestirim algoritmaları MATLAB/Simulink ortamında detaylı bir şekilde modellenerek çeşitli çalışma koşulları altında analiz edilmiştir. Analiz sonucunda üç farklı kestirim algoritması kapsamlı testlere tabi tutulmuş olup elde edilen sonuçlar doğruluk, kararlılık ve hesaplama yükü gibi performans kriterleri ve başarım oranları gözetilerek karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

BİRİNCİ BÖLÜM

LİTERATÜR TARAMASI

1.1. Literatürün İncelenmesi

Son yıllarda iklim değişikliği, karbon salınımı ve fosil yakıt kaynaklarının tükenmesi gibi küresel sorunlar, ulaşım sektöründe daha çevreci ve sürdürülebilir çözümlerin benimsenmesini zorunlu kılmıştır. Bu bağlamda, elektrikli araçlar (Electric Vehicles, EVs), hafif elektrili araçlar (Light Electric Vehicle, LEVs), içten yanmalı motorlara alternatif olarak ön plana çıkmaktadır. Şehirlerde yaşam alanlarının genişlemesi ve ehliyet yaş sınırı altındaki insanların ulaşım ihtiyaçlarının artması ise hafif elektrikli araçlara talebi arttırmaktadır. Elektrikli araçların kalbinde yer alan elektrik motorları, sistemin verimliliği, tork tepkisi, enerji tüketimi ve sürüş konforu gibi birçok kritik başarım parametresini doğrudan etkilemektedir (Ren vd., 2023).

Elektrikli motor teknolojilerinde yaşanan gelişmeler, özellikle fırçasız doğru akım motorlarının (FDAM) endüstriyel ve taşınabilir sistemlerde yaygın olarak kullanılmasına olanak sağlamıştır. (Krishnan, 2010; Pillay & Krishnan, 1989). FDAM'lar; yüksek verimlilik, sessiz çalışma, düşük bakım gereksinimi, kompakt yapı ve uzun ömür gibi avantajlarıyla geleneksel motor teknolojilerine göre ciddi üstünlükler sunmaktadır. Bu motorların yüksek başarımla çalıştırılabilmesi ise doğrudan doğru kontrol stratejilerinin uygulanmasına bağlıdır.

Kontrol stratejileri açısından bakıldığında, motorun hız ve konum gibi büyüklüklerinin hassas şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Genel olarak bu tür bilgiler, Hall sensörleri ve enkoderler gibi sensörler üzerinden elde edilmektedir. Ancak bu algılayıcılar; maliyet, karmaşıklık, montaj zorluğu ve çevresel koşullara duyarlılık gibi dezavantajlar taşımaktadır. Ayrıca fiziksel sensörlerin arızalanması, tüm sistemin başarımını doğrudan olumsuz etkileyebilmektedir (Vas, 1998).

Günümüzde, artan enerji verimliliği, hassas hareket kontrolü ve sürdürülebilirlik hedefl eri için elektrik motor kontrol sistemleri hayati önem taşımaktadır. Sensörsüz yapılarda rotorun hız ve konum bilgileri, genellikle motorun uç gerilimi, faz akımı veya zıt elektromotor kuvveti (back-EMF) gibi elektriksel parametrelerden elde edilmeye çalışılmaktadır. Bu tür sistemler hem donanım maliyetini düşürmekte hem de sistemin dayanıklılığını artırmaktadır (Kim, & Sul, 1995).

Sensörsüz sistemlerde öne çıkan yapılardan biri Model Referanslı Adaptif Sistemler (Model Reference Adaptive System, MRAS) olmuştur. MRAS yapıları, referans bir model ile adaptif modelin çıktıları arasındaki hata sinyali üzerinden gerçek rotor hızını tahmin eder Bu sayede fiziksel sensöre duyulan ihtiyaç ortadan kalkar. MRAS'ın başarımı, kullanılan adaptif filtre algoritmasına doğrudan bağlıdır. Bu tez çalışmasında; en küçük ortalama kare (Least Mean Square, LMS), dördüncü moment (Least Mean Fourth, LMF) ve ortalama kurtosis (Least Mean Kurtosis, LMK) algoritmaları MRAS yapısına entegre edilerek karşılaştırmalı bir analiz gerçekleştirilmiştir (Demir, 2023).

Elektrik motoru kontrol sistemleri, enerji verimliliği, hassas hareket kontrolü ve sürdürülebilirlik hedeflerinin giderek artan öncelikleriyle uyumlu olarak günümüz dünyasında giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Özellikle ulaşım, havacılık, savunma sanayii, otomasyon sistemleri ve robotik uygulamalar gibi yüksek hassasiyet ve kararlılık gerektiren alanlarda, tahrik sistemlerinin güvenilirliği ve dinamik başarımı büyük önem taşımaktadır. Bu tür uygulamalarda tercih edilen motor teknolojileri, sistemin genel verimliliğini ve yanıt süresini doğrudan etkilemektedir (Krishnan, 2010)

Bu bağlamda, sürekli mıknatıslı fırçasız doğru akım motorları (SMFDAM), sahip oldukları yüksek tork yoğunluğu, bakım gerektirmeyen yapısı, düşük akustik gürültü seviyesi, uzun ömürlü çalışma özellikleri ve kompakt boyutları sayesinde öne çıkmaktadır. Fırça ve kollektör gibi mekanik temaslı parçaların bulunmaması, bu motorların mekanik aşınmaya karşı dayanıklı olmasını ve elektromanyetik girişim riskinin azalmasını sağlamaktadır. Bu özellikleriyle SMFDAM'ler; elektrikli araçlardan insansız hava araçlarına, endüstriyel robotlardan medikal cihazlara kadar pek çok modern sistemde tercih edilen bir motor tipi haline gelmiştir (Gujjar & Kumar, 2017).

Bu motorların yapısal özellikleri doğrultusunda doğrusal olmayan dinamikler barındırması ve yüksek başarı gereksinimleri, klasik kontrol yöntemleriyle istenen

sonuçların elde edilmesini zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, SMFDAM'lerin tüm potansiyelinden yararlanılabilmesi için gelişmiş, adaptif ve yüksek hassasiyetli kontrol stratejilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle motorun ani yük değişimlerine karşı hızlı tepki verebilmesi, moment ve akı salınımlarının minimize edilmesi ve kararlı bir çalışma sağlanması açısından kontrol algoritmasının önemi büyüktür.

Bu bağlamda, literatürde yüksek performanslı kontrol yöntemleri olarak Alan Yönlendirmeli Kontrol (AYK), Doğrudan Moment Kontrol (DMK, Direct Torque Control, DTC) ve Model Öngörülü Kontrol (MÖK) gibi stratejiler ön plana çıkmaktadır (Rekioua vd. 1990; Irimia vd. 2019; Inan 2024). AYK yapısı, senkron makinelerde manyetik alanın yönünü kontrol ederek yüksek tork verimliliği sunarken; DMK yöntemi, moment ve akıyı doğrudan kontrol ederek hızlı dinamik yanıtlar elde edilmesini sağlar. MÖK ise sistem modeline dayalı olarak gelecekteki kontrol girdilerini optimize ederek yüksek doğruluk ve kararlılık sunmaktadır. Bu yöntemlerin her biri, SMFDAM uygulamalarında farklı avantajlar sağlayarak sistemin genel başarımını önemli ölçüde artırmaktadır.

"Hafif elektrikli araçlar" terimi, zaman zaman belirsizlik yaratabilmekte ve farklı kategorilerdeki araçları kapsayabilmektedir. Bu bağlamda, Avrupa Birliği yönetmeliklerine göre HEA (Hafif Elektrikli Araç) kapsamında değerlendirilen araçlar genellikle M1 sınıfının altında konumlanan L2e (üç tekerlekli moped), L5e (üç tekerlekli motosiklet), L6e (hafif dört tekerlekli araç) ve L7e (dört tekerlekli motosiklet) sınıflarındaki araçları içermektedir. Ayrıca bu kapsama elektrikli bisikletler ve elektrikli scooterlar da dâhildir. HEA'lar, düşük hız kapasiteleri, sınırlı batarya güçleri ve kompakt yapıları nedeniyle özellikle kısa mesafeli şehir içi ulaşım çözümleri olarak öne çıkmaktadır (European Commission, 2013; De Gennaro vd., 2020). Hafif elektrikli araçlar, geleneksel M1 sınıfı ve üzeri araçların erişemediği dar sokaklara ve alanlara giriş imkânı sunmaları nedeniyle özellikle kent içi kullanımda avantaj sağlamaktadır. Bu araçların batarya ve motor gibi temel bileşenleri, klasik araçlara kıyasla daha küçük ve hafif olduğu için bakım, değişim ve üretim maliyetleri daha düşüktür. Ayrıca daha az yer kaplamaları ve düşük gürültü seviyeleri sayesinde çevre dostu ulaşım seçenekleri olarak kabul edilmektedirler, HEA'ların birçok modeli ehliyetsiz olarak ya da 16 yaş sınırıyla alınabilen sınırlı ehliyet türleriyle kullanılabilmektedir (UNECE, 2020; Ferloni, 2023).

HEA'lar genellikle şehir içi, kısa mesafe ulaşım için tasarlanmış bir, iki ya da daha fazla tekerlekli elektrikli taşıtları kapsamaktadır. Elektrikli araçlar, içten yanmalı motorlu araçlardan önce tarihsel olarak varlık göstermiş olsalar da 20. yüzyılın başlarında batarya teknolojilerinin yetersizliği, enerji yoğunluğunun düşüklüğü ve maliyetlerin yüksekliği sebebiyle yaygınlaşamamışlardır. Ancak günümüzde lityum-iyon batarya hücrelerinde yaşanan gelişmeler, enerji yoğunluğunun artması ve hücre maliyetlerinin düşmesi sayesinde elektrikli araçların kullanım oranı ciddi biçimde artış göstermiştir (IEA, 2023). Bu eğilim, enerji verimliliği yüksek motor teknolojilerine olan ihtiyacı beraberinde getirmiştir. Bu kapsamda, hafif araçlara özel optimize edilmiş FDAM'lar ve sabit mıknatıslı çözümler öne çıkmaktadır. Motor verimliliğinin artırılması ve sistem kayıplarının azaltılması, aynı enerji ile daha uzun menzil elde edilmesini sağlayarak sistem başarımını artırmaktadır (Pillay & Krishnan, 1989; Krishnan, 2010). SMFDAM kontrolünün temelinde, rotorun konum ve hız bilgilerine olan ihtiyaç yatmaktadır. Bu bilgiler çoğu zaman fiziksel sensörler aracılığıyla elde edilse de sensör kullanımı; maliyet, karmaşıklık, güvenilirlik ve boyut gibi açılardan çeşitli sınırlamalara sahiptir. Bu nedenle, algılayıcısız kontrol yaklaşımları son yıllarda önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Bu yaklaşımlar arasında en çok öne çıkan yöntemlerden biri MRAS'tır. MRAS yapıları, referans model (genellikle ölçülen stator akımları) ve adaptif model (kestirilmiş akımlar) arasındaki hata sinyali üzerinden parametre tahmini yapmaktadır. Klasik MRAS yapılarında bu hata, sabit kazançlı PI kontrolcülerle minimize edilir MRAS tabanlı sistemlerde hata sinyalinin istatistiksel özelliklerine göre ağırlık vektörlerini her örnekleme anında güncelleyerek sistemin adaptif davranmasını sağlanabilir. Bu sayede hem geçici rejim hem de kararlı durumda daha yüksek kestirim doğruluğu elde edilebilir.

SMFDAM'ları hassas ve verimli bir şekilde kontrol edilebilmesi, yüksek başarımlı kontrol stratejilerinin yanında güvenilir hız ve konum bilgisine olan gereksinimi de beraberinde getirmektedir. Geleneksel yöntemlerde bu bilgiler genellikle Hall sensörleri, optik enkoderler gibi fiziksel algılayıcılarla sağlanmaktadır. Ancak bu sensörler hem maliyeti artırmakta hem de çevresel koşullara karşı sistemin dayanıklılığını düşürmektedir. Bu nedenle, sensörsüz kontrol teknikleri günümüz literatüründe büyük bir ilgi odağı haline gelmiştir.

Sensörsüz kontrol sistemleri, motorun gerilim, akım ve elektromotor kuvvet (EMK) gibi elektriksel büyüklüklerinden yola çıkarak rotorun hızını ve konumunu kestirmeye çalışır.

Bu alanda sıklıkla kullanılan kestirim yöntemleri arasında genişletilmiş Kalman filtresi (Extended Kalman Filter, EKF) (Gamazo-Real vd. 2022), kayma modu gözlemleyici (KMG, Sliding Mode Observer, SMO) (Kaf vd. 2024)., yapay sinir ağı (Artificial Neural Network, ANN) tabanlı kestiriciler (Saha & Singh, 2025) ve adaptif gözlemleyici yapılar yer almaktadır. Bu yöntemler teorik olarak başarılı sonuçlar vermekle birlikte, karmaşık matematiksel yapıları ve işlem yüklerinin yüksek olması nedeniyle gömülü sistemlerde gerçek-zamanlı uygulanabilirlikleri sınırlı kalabilmektedir.

Bu bağlamda, MRAS, daha düşük hesaplama karmaşıklığı ve çevrimiçi adaptif yapısı ile ön plana çıkmaktadır. MRAS yapılarında referans model ve adaptif model arasındaki hata sinyali minimize edilerek rotor hızı tahmin edilmektedir. Klasik MRAS yapılarına genellikle sabit kazançlı PI denetleyici entegre edilir. Ancak bu yaklaşım, özellikle değişken yük ve hız koşullarında yetersiz kalabilmekte ve sistemin adaptifliğini sınırlamaktadır (Widrow & Hoff, 1960). Son yıllarda, bu sınırlamaların üstesinden gelmek amacıyla MRAS yapıları ile adaptif filtre algoritmalarının birleştirildiği yeni yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bu bağlamda, LMS, LMF ve LMK algoritmaları MRAS çerçevesine entegre edilerek daha kararlı ve yüksek doğruluklu kestirim yapıları oluşturulmuştur. Widrow ve Hoff tarafından geliştirilen LMS algoritması, hata sinyalinin ikinci dereceden istatistiksel özelliklerini temel alarak sade ve etkili bir kestirim sunmaktadır (Widrow & Hoff, 1960). Walach ve Widrow tarafından geliştirilen LMF algoritması, dördüncü dereceden hata büyüklüklerini baz alarak yüksek varyanslı koşullarda daha iyi bir performans sergilerken (Walach & Widrow, 1984); Tanrıkulu ve Constantinides tarafından önerilen LMK algoritması ise özellikle keskin geçişlerde daha kararlı kestirim başarımı sağlamaktadır (Tanrıkulu & Constantinides, 1994).

Demir tarafından gerçekleştirilen çalışmada, PMSM motorlar üzerinde LMS ve LMK tabanlı MRAS yapılarının hız kestirimi başarıyla gerçekleştirilmiş ve klasik PI tabanlı MRAS yapısına göre önemli başarım iyileştirmeleri elde edilmiştir (Demir, 2023). Aynı şekilde Zerdali ve Mengüç, kompleks-değerli sinyaller ile çalışan MRAS yapıları geliştirerek, stator akımlarından hız kestirimi yapılabileceğini göstermiştir (Zerdali & Mengüç, 2019). Bu çalışmaların yanı sıra, Yıldız vd., LMK algoritmasını asenkron motorlar üzerinde uygulamış ve kestirim doğruluğunu önemli ölçüde artırmıştır (Yıldız vd., 2023).

MRAS yapılarının kontrol algoritmaları ile entegrasyonu da literatürde önemli bir araştırma konusudur. Özellikle Doğrudan Moment Kontrolü yapısı ile MRAS hız kestiricilerinin kullanımı, hızlı tepki süresi ve düşük moment dalgalanması gibi avantajlar sunmaktadır. İnan tarafından gerçekleştirilen çalışmada, DTC yapısına entegre edilen gelişmiş EKF tabanlı EMK kestirici ile yüksek doğrulukta konum ve hız kestirimi elde edilmiş ve bu yapının elektrikli araçlar gibi değişken yük profiline sahip sistemlerde etkili olduğu gösterilmiştir (İnan, 2024).

Wang ve arkadaşları, klasik MRAS yapılarına ilişkin temel sınırlamaları ele alarak, özellikle düşük yanıt hızı, kararsız geçici rejim davranışı ve yetersiz rotor hızı izleme doğruluğu gibi performans eksikliklerine çözüm geliştirmeyi amaçlamışlardır. Bu kapsamda, sensörsüz hız kestiriminde karşılaşılan doğruluk ve kararlılık sorunlarını azaltmak amacıyla, çift kayma modlu bir adaptif gözlemci yapısı önermişlerdir. Geliştirilen bu gözlemci yapısı, hem adaptif kontrol mekanizmasının çevrimiçi öğrenme kapasitesini hem de kayma modlu gözlemleyicilerin yüksek kararlılık sağlayan yapısını bir araya getirerek, rotor hızının daha hızlı, güvenilir ve yüksek çözünürlükle tahmin edilmesine olanak sağlamıştır. Ayrıca bu hibrit yapı, özellikle düşük hız aralığında gözlemlenebilirliğin azaldığı durumlarda dahi tahmin performansını önemli ölçüde artırarak, sistemin dinamik yanıt karakteristiklerini iyileştirmiştir. Wang ve ekibinin çalışması, MRAS temelli yapılar için yeni bir kontrol yaklaşımı sunmakla kalmamış, aynı zamanda elektrikli tahrik sistemlerinde yüksek hassasiyetli hız kestirimi ihtiyacına cevap verebilecek uygulanabilir ve gerçek-zamanlı bir çözüm ortaya koymuştur. Bu nedenle söz konusu yapı hem akademik literatürde hem de pratik uygulamalarda dikkat çeken ve geliştirilmeye açık bir sensörsüz kontrol stratejisi olarak değerlendirilmektedir (Wang vd., 2024).

Halvaei Niasar, sinüzoidal olmayan geri besleme karakteristiğine sahip FDAM için sensörsüz bir kontrol yöntemi geliştirmiştir. Bu çalışmada, klasik sensörsüz yapıların karşılaştığı en temel sorunlardan biri olan düşük hız aralığında zayıf gözlemlenebilirlik ve tork dalgalanmaları problemini ele alarak, tam sıralı bir kayma modu gözlemcisi tabanlı yeni bir yapı önerilmiştir. Özellikle sinüzoidal olmayan EMK'ya sahip motorların dinamiklerini doğru şekilde modellemek ve izlemek amacıyla geliştirilen bu gözlemci yapısı, motorun parametre değişimlerine ve bozucu dış etkilere karşı dayanıklı olacak şekilde tasarlanmıştır. Çalışma kapsamında önerilen tam sıralı SMO yapısı, sistemin tüm

durum değişkenlerini yüksek doğrulukla kestirerek, fiziksel sensörlerin yerini alabilecek düzeyde güçlü bir alternatif sunmuştur. Gözlemci, rotorun zıt elektromotor kuvvetinden türetilen sinyalleri kullanarak kestirim yaparken, adaptif yapısı sayesinde motor parametrelerindeki belirsizliklere karşı da etkili bir dayanım sağlamaktadır. Bu sayede hem geçici hem de kararlı durum rejimlerinde düşük tork dalgalanması elde edilerek motorun daha kararlı ve sessiz bir şekilde çalışması mümkün olmuştur Halvaei Niasar'ın çalışması, sinüzoidal olmayan FDAM'ların sensörsüz kontrolünde yüksek doğruluk, kararlılık ve düşük harmonik içerik gibi başarı kriterlerini aynı anda sağlayabilmesi açısından literatürde dikkat çekici bir katkı olarak değerlendirilmektedir. Bu yapı, özellikle düşük hızda çalışma, ani yük değişimlerine karşı tepki süresi ve genel tahrik sistemi verimliliği gibi alanlarda önemli avantajlar sağlamış ve sensörsüz kontrol yöntemlerinin uygulanabilirliğini bir adım öteye taşımıştır (Halvaei, 2016).

Yapay sinir ağı (Artificial Neural Network, ANN) temelli MRAS yapıları, motor parametrelerindeki belirsizliklere karşı daha esnek ve öğrenebilir bir kestirim mekanizması sunmaktadır. Sinir ağı, adaptif modelin çıktılarını rotor hızıyla ilişkilendirerek, geleneksel hata tabanlı optimizasyonların ötesine geçmektedir. Bu yaklaşım, düşük hız aralıklarında klasik MRAS yapılarına kıyasla daha yüksek doğruluk ve kararlılık sağlamaktadır. Ancak eğitim sürecinin veri kalitesine duyarlılığı ve işlem yükü gibi sınırlamaları da göz önünde bulundurulmalıdır (Saha & Singh, 2025).

SMFDAM sürücüsünde hız kestirimi, stator direncindeki sapmalardan doğrudan etkilenmektedir. Badini ve Verma tarafından önerilen Y-MRAS yöntemi, rotor hızı ve stator direncini çevrim içi tahmin etmek üzere geliştirilmiştir. Y ham bileşeni, referans model ve adaptif model arasındaki hata sinyali ile elde edilmekte olup sistem, integratör ve diferansiyel terimlere ihtiyaç duymadan çalışmaktadır. Böylece düşük hızdaki sapmalar minimize edilmekte, sistem stabilitesi korunmakta ve Typhoon-HIL deneyleri ile simülasyon sonuçları arasında tutarlılık sağlanmaktadır (Badini & Verma, 2020).

Koteich ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, SMFDAM sürücülerde özellikle duruş ve düşük hız koşullarında gözlemlenebilirliğin sınırlı olduğunu vurgulamaktadır. Yazarlar, hem çıkıntılı kutuplu hem de çıkıntısız kutuplu makine yapılarını kapsayan evrensel bir analiz ortaya koyarak, düşük hızlarda sensörsüz kontrol performansını olumsuz etkileyebilen temel mekanizmayı yerel zayıf gözlemlenebilirlik kuramı çerçevesinde açıklamışlardır. Ayrıca, sistemin gözlemlenebilirliğini artırmak amacıyla

yüksek frekanslı sinyal enjeksiyonuna dayalı yöntemler önermişlerdir (Koteich vd., 2016).

Bosso, Tilli ve Conficoni tarafından sunulan yöntem ne mekanik modele ne de sabit hız varsayımına ihtiyaç duymaksızın; rotor hızı, rotor konumu, stator direnci ve rotor akısını aynı anda tahmin edebilen hibrit bir yapı ortaya koymaktadır. Enjeksiyonlu sinyallere dayanan uyarlamalı kontrol tasarımı, sistemin düşük hız aralıklarında dahi gözlemlenebilirliğini güvence altına almakta; zıt elektromotor kuvvet ile stator direnci arasında yapılan ve azalan gradyan yöntemi temelli paylaştırma sayesinde pozisyon kestirim hatasını en aza indirmektedir (Bosso vd., 2020).

Demir tarafından gerçekleştirilen çalışmada, PMSM motorlarının sensorless kontrolünde FCS-MPCC (Finite Control Set Model Predictive Current Control, Sonlu Kontrol Kümesine Dayalı Model Öngörülü Akım Kontrolü) yapısı, adaptif MRAS hız kestiricileriyle birleştirilmiştir. Bu yapıda klasik sabit kazançlı PI yerine LMS, LMK gibi istatistik temelli adaptif filtre algoritmaları entegre edilmiştir. Yapılan simülasyon sonuçları, özellikle geçici rejimde daha az tork dalgalanması, daha düşük hız kestirim hatası ve kararlı rejimde minimum sapma ile MRAS yapısının başarılı şekilde çalıştığını göstermiştir. Bu çalışma, gömülü sistemlerde gerçek zamanlı hız kestirimi gerektiren düşük güçlü sürücü uygulamaları için umut vaat etmektedir (Demir, 2022).

Ran tarafından yayımlanan bu derleme çalışması, pozisyon sensörsüz kontrol teknolojileri üzerine geniş bir literatür taraması sunmaktadır. MRAS, EKF, SMO ve yüksek frekanslı sinyal enjeksiyonu gibi yöntemlerin avantajları, zorlukları ve uygulama sınırları detaylı biçimde incelenmiştir. Çalışma aynı zamanda her yöntemin endüstriyel uygulamalardaki karşılıklarını değerlendirmekte ve gelecekteki yönelimlere dair kapsamlı bir yol haritası önermektedir. Sensörsüz sistemlerin özellikle maliyet ve güvenilirlik açısından sağladığı avantajlar vurgulanırken, MRAS yapılarının düşük hızda yaşadığı gözlemlenebilirlik sorununun alternatif yöntemlerle nasıl aşılabileceği tartışılmıştır (Ran vd., 2023).

Abo-Khalil ve Eltamaly, sabit mıknatıslı senkron motorlar için d-q referans çerçevesinde MRAS yapılandırması geliştirerek zıt-EMK tabanlı hız ve konum kestirimi gerçekleştirmiştir. Geliştirilen modelde, referans model olarak d-q ekseninde hesaplanan zıt elektromotor kuvveti kullanılmış, adaptif model ise tahmin edilen hızla güncellenmiştir. Bu sistem, düşük ve orta hız bölgelerinde sensörsüz kontrol sağlamada

başarı göstermiş, aynı zamanda toplam harmonik bozulma oranının azaldığı gözlemlenmiştir. Çalışma, MRAS yapısının kontrolcü performansını artırmak için uygun bir yapı olduğunu ve özellikle motor sensör arızalarının kritik olduğu uygulamalarda güvenilir alternatif sunduğunu kanıtlamaktadır (Abo-Khalil & Eltamaly, 2020).

Sonuç olarak, literatürde MRAS tabanlı sensörsüz kontrol sistemlerinin gelişimi iki temel yöne ayrılmaktadır: birincisi, hata sinyali analizinde daha yüksek mertebeden istatistiksel özellikleri kullanan adaptif filtre algoritmaları ile kestirim doğruluğunu artırmak, İkincisi, bu kestiricilerin DTC, alan yönlendirmeli kontrol (AYK) ve model öngörülü kontrol (MÖK) gibi yüksek performanslı kontrol stratejileri ile entegrasyonunu sağlamaktır. Ancak, SMFDAM gibi özel karakteristiklere sahip motorlar için adaptif filtre tabanlı MRAS yapılarına dair çalışmaların oldukça sınırlı olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum, önerilen çalışmanın literatürdeki boşluğu doldurması açısından önemli bir motivasyon oluşturmaktadır.

Yang ve arkadaşlarının 2024 yılında yayımladıkları çalışmada, içten mıknatıslı senkron motorların (Interior Permanent Magnet Synchronous Machine, IPMSM) sensörsüz kontrolü için FPS-MRAS (Finite Position Set MRAS) gözlemcisi ile MPCC (Model Predictive Current Control) yapısı birleştirilmiştir. FPS-MRAS yapısı, klasik MRAS gözlemcilerinden farklı olarak, rotor pozisyonunu sınırlı sayıda olasılık üzerinden değerlendirerek, referans model ile adaptif model arasındaki hata sinyalini bu olasılıklar içinde minimize etmeye çalışmaktadır. Bu yapı, özellikle düşük hız bölgelerinde MRAS yapılarında sıkça karşılaşılan gözlemlenebilirlik problemlerini büyük ölçüde azaltmaktadır. Önerilen sistem, klasik PI denetleyicilere ihtiyaç duymadan sensörsüz hız ve konum kestirimi gerçekleştirebilmekte ve MPCC ile birlikte çalışarak dinamik tork yanıtını da geliştirmektedir. Simülasyon sonuçlarına göre, önerilen FPS-MRAS gözlemcisi ile sistemin toplam harmonik bozulma oranı düşürülmüş, rotor pozisyon hatası yüzde 30 oranında azaltılmış ve kontrol sinyalleri daha kararlı hale getirilmiştir. Ayrıca, yüksek frekans enjeksiyonu gibi karmaşık yöntemlere gerek kalmaksızın düşük hızda kararlı konum kestirimi sağlanmıştır. Bu yapı, gerçek zamanlı gömülü sistemlerde hesaplama yükünün düşük olması nedeniyle endüstriyel uygulanabilirlik açısından da oldukça avantajlıdır. Bu çalışmanın FPS-MRAS yapısını MPCC ile birleştirerek sunduğu yüksek doğruluklu, düşük maliyetli ve uygulanabilir sensörsüz kontrol çözümü, özellikle

mobil tahrik sistemlerinde yeni nesil uygulamalar için umut vaat etmektedir (Yang vd., 2024).

Tian, Zhao ve Sun (2016) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, IPMSM için sensörsüz hız ve konum tahmini amacıyla özgün bir adaptif filtre yapısı geliştirilmiştir. Bu yöntemde, klasik MRAS yapılarının düşük hızlardaki yetersizliklerine çözüm olarak, frekans domain tabanlı bir adaptasyon mekanizması tasarlanmıştır. Adaptif filtre, geleneksel PI tabanlı kontrolcülerin yerini alarak, sistem parametrelerindeki belirsizliklere karşı dinamik uyum kabiliyeti sergilemektedir. Yazarlar, filtre yapısında band geçiş bölgesine özel odaklanarak, düşük frekanslı gürültülerin dışlanmasını ve rotorun sinyallerinden kaynaklanan titreşimli hataların minimize edilmesini sağlamışlardır. Bu sayede hem geçici rejim hem de kararlı rejimde rotor pozisyon hatası önemli ölçüde azaltılmış, sistemin genel stabilitesi artırılmıştır. Ayrıca, önerilen yapı, yüksek örnekleme frekansı gerektirmeksizin uygulanabildiği için gömülü sistemlerde gerçek zamanlı kontrol açısından da oldukça uygundur. Deneysel çalışmalar, önerilen sistemin 50 d/dk altında bile konum kestirimi yapabildiğini ve klasik yöntemlere göre daha az salınım ürettiğini göstermektedir. Bu bağlamda çalışma, özellikle düşük hızda çalışan motorlar için sensörsüz kontrol stratejilerine yeni bir yaklaşım sunmaktadır (Tian vd., 2016).

Cirrincione ve Pucci (2005) tarafından geliştirilen çalışmada, geleneksel MRAS yapılarının sınırlarını aşmak için ANN destekli bir MRAS modeli önerilmiştir. Bu modelde, klasik adaptif modelin yerini alacak şekilde eğitilmiş bir sinir ağı yapısı tasarlanmış ve bu yapı rotor hızını doğrudan tahmin edebilmiştir. MRAS çerçevesi, hata sinyalini sinir ağına giriş olarak vererek ağırlıkların çevrim içi güncellenmesini sağlamış, böylece sistemin adaptifliği önemli ölçüde artırılmıştır. Çalışmanın en dikkat çekici yönlerinden biri, sistem parametrelerinde meydana gelen değişimlere karşı öğrenme temelli yaklaşımın istikrarını koruması olmuştur. Özellikle klasik PI denetleyicilerin yetersiz kaldığı lineer olmayan koşullarda, sinir ağı tabanlı modelin daha yüksek doğrulukla hız kestirimi yaptığı ve toplam harmonik bozulma oranını azalttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, sinir ağı sayesinde düşük frekansta zayıf gözlemlenebilirlik sorunu belirli ölçüde giderilmiş, sistem daha kararlı bir geçici rejim yanıtı sergilemiştir. Simülasyon sonuçları, özellikle endüktif parametrelerde %10'luk değişime rağmen sistemin yaklaşık %5'lik kestirim hatası ile çalıştığını göstermiştir. Bu sonuçlar, sinir ağı

tabanlı yaklaşımların sensörsüz kontrol yapılarında kullanılabilirliğini ve MRAS modelleriyle entegrasyonunun başarıyla gerçekleştirilebileceğini ortaya koymaktadır (Cirrincione vd., 2025).

Gamazo-Real ve arkadaşları tarafından yayımlanan kapsamlı bir derleme çalışmasında, FDAM ve SMFDAM motorlar üzerinde kullanılan farklı sensörsüz kontrol yöntemleri karşılaştırılmıştır. Çalışma, MRAS, SMO EKF ve sinir ağı tabanlı tahmin sistemlerinin teorik altyapılarını, avantajlarını ve uygulama sınırlarını sistematik biçimde incelemektedir. Yazarlar, özellikle düşük hız bölgelerinde MRAS yapıların gözlemlenebilirlik sorunlarına dikkat çekmiş ve bu yapıların sinyal enjeksiyonu, bulanık mantık ve yapay sinir ağı gibi yapılarla desteklenerek daha stabil hale getirilebileceğini vurgulamışlardır. Derlemede ayrıca FPGA ve mikrodenetleyici tabanlı donanımlarda yapılan uygulamalar da yer almakta ve algoritmaların gerçek zamanlı uygulanabilirlikleri tartışılmaktadır. Özellikle enerji verimliliği yüksek sürücüler için düşük hesaplama yükü sağlayan MRAS ve SMO tabanlı sistemlerin yaygınlaştığı belirtilmiş, bu sistemlerin hibrit kombinasyonlarıyla elde edilen başarımlar örneklenmiştir. Çalışma, sadece akademik değil aynı zamanda endüstriyel bakış açısıyla hazırlanmış olması nedeniyle sensörsüz kontrol literatüründe önemli bir referans olarak değerlendirilmektedir (Gamazo vd.; 2024)

Govindharaj ve arkadaşları (2024) tarafından yapılan çalışmada, sensörsüz indüksiyon motoru kontrolünde MRAS yapısına bir Uyarlamalı Sinirsel-Bulanık Çıkarım Sistemi (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System, ANFIS) denetleyici entegre edilmiştir. Bu hibrit yapı, adaptif gözlemcinin hız kestirimindeki hata sinyalini ANFIS'e girdi olarak besleyerek sistem parametrelerinde ani değişimlerde bile hızlı adaptasyon sağlar. ANFIS denetleyicisi, hata ile rotor hızı arasındaki ilişkiyi çevrim içi öğrenme yoluyla ayarlayarak parametre sapmalarına karşı sistem kararlılığını korur. MATLAB/Simulink simülasyonları, MRAS-ANFIS yapısının özellikle sıfır ve çok düşük hızlarda klasik MRAS'a kıyasla daha düşük hata, daha az salınım ve daha hızlı kararlılığa ulaştığını göstermiştir. Ek olarak, yük değişimlerine ve sıcaklık kaynaklı direnç sapmalarına karşı sistemin dayanıklılık performansı da deneysel ortamda doğrulanmıştır. (Govindharaj vd., 2024)

Hassan, Adel, Farhan ve Saleh (2024) tarafından yayımlanan çalışmada, pervane tahrikli bir PMSG (sabit mıknatıslı senkron jeneratör, Permanent Magnet Synchronous

Generator, PMSG) sistemi için Sınırlı Hız Kümesine Dayalı Model Referanslı Uyarlamalı Sistem (FSS-MRAS) algoritması tanıtılmıştır. CPC (Current Predictive Control) yaklaşımıyla entegre edilen FSS-MRAS yapısı, sürekli motor hızı yerine sınırlı hız seti üzerinden olasılık hesaplanmasına dayanır. Böylece geleneksel enterpolasyon tabanlı MRAS hata sürdürme sorununa çözüm sunulur. Bu yöntem, tek adımlı optimizasyon tabanlı bir Hareketli Ufuk Kestirimi (Moving Horizon Estimation, MHE) yaklaşımına benzer şekilde çalışmakta, rotor hızını çevrim içi ve yüksek doğrulukla kestirmektedir. Simülasyon sonuçları FSS-MRAS'ın klasik MRAS'a kıyasla %40 daha düşük hız tahmin hatası sağladığını ortaya koymuştur. Ayrıca adaptif CPC entegrasyonu sayesinde sistem parametrelerinin değişiminden bağımsız olarak stabil performans korunmuştur. Bu yöntem, adaptif filtre ya da sabit kazanımlı MRAS yerine kuvvetli olasılık temelli bir adaptasyon sağlayarak farklı MRAS varyantlarını araştıranlar için alternatif sunabilir (Hassan vd., 2024)

Bu tez çalışmasında, hafif elektrikli araçlarda kullanılan FDAM'ların sensörsüz kontrolü için zıt EMK temelli bir MRAS yaklaşımı geliştirilmiş ve bu yapıda LMS, LMF ve LMK algoritmaları kullanılarak hız kestirimi gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen kontrol algoritmaları Simulink ortamında modellenmiş, ardından mikrodenetleyici tabanlı sistemlerde gerçek zamanlı olarak test edilerek sistem kararlılığı ve uygulanabilirliği değerlendirilmiştir.

İKİNCİ BÖLÜM

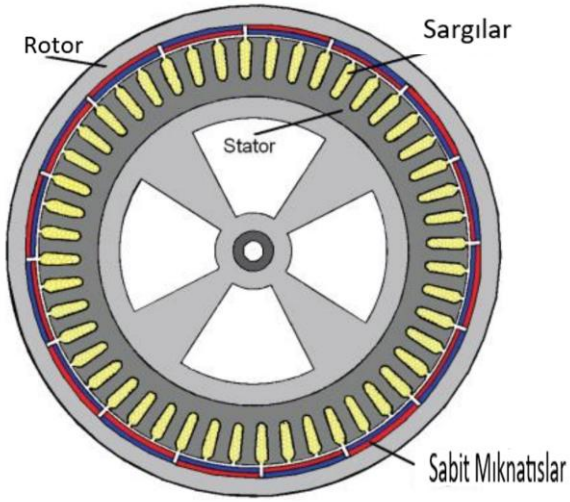
FDAM YAPISI VE KONTROL SİSTEMLERİ

2.1. Fırçasız Doğru Akım Motorları

FDAM'lar günümüzde elektromekanik sistemlerde ana tahrik elemanı olarak giderek daha fazla tercih edilmektedir. Bu yaygınlığın arkasında; üretim süreçlerinin görece düşük maliyetli oluşu ve geniş bir çalışma aralığında yüksek verimle tork ve hız elde edilebilmesi gibi faktörler yer almaktadır. Özellikle motor sürücü teknolojilerindeki hızlı gelişmeler ve elektrikli araç kullanım oranlarındaki artışlar ile FDAM'lar, geleneksel motor teknolojilerine kıyasla daha rekabetçi ve vazgeçilmez hale gelmiştir. (Krishnan, 2010).

Yapısal açıdan FDAM'lar esasen stator ve rotor olmak üzere iki ana bileşenden meydana gelmektedir. Bu iki ana parçanın yapının yanı sıra, rotor-stator arasındaki hava aralığı ve pozisyon geri beslemesi için kullanılan sensör yapıları da sistem başarımını doğrudan etkileyen diğer önemli unsurlardır (Vas, 1998).

Şekil 2.1. *FDAM iç yapısı (Nadolski, 2012)*

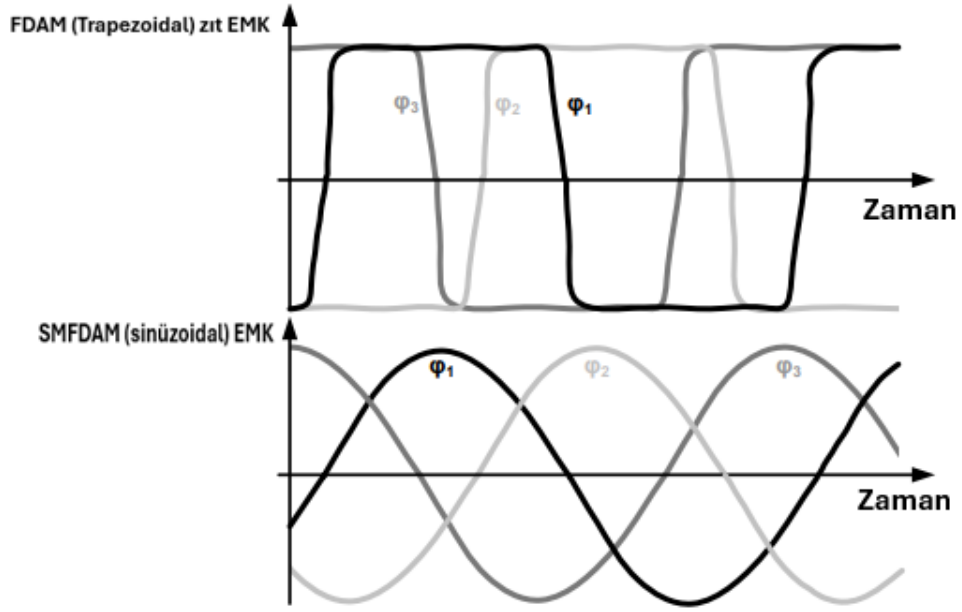


2.1.1. Stator

FDAM'ların stator yapısı, asenkron motorlara benzer yapıda olmasına rağmen sargı biçimleri farklıdır. Güncel tasarımlar, özellikle elektromekanik sistemlerin gereksinimlerini karşılamak amacıyla optimize edilmiştir. FDAM'ların statoru, genellikle lamine edilmiş çelik sacların preslenmesiyle meydana gelen bir nüveye sahiptir. Bu yapı, elektromanyetik kayıpları azaltarak motorun genel verimliliğini artırmaktadır. Stator içerisindeki oyuklara yerleştirilen sargılar, motorun faz sayısına ve rotor kutup sayısına bağlı olarak düzenlenir. Bu düzenleme, motorun tork üretimi ve hız kontrolü üzerinde doğrudan etkilidir (Ren & Chen, 2023).

Zıt EMK'si sinüzoidal ve trapezoidal olacak şekilde iki tiptir, bu dalga formu değişimi stator etrafına yapılan sargıların bobinlerinde yapılan değişiklikler ile gerçekleştirilmektedir. Konsantre sargı biçimi olarak adlandırılan sargı türlerinin uygulaması sonucu sinüzoidal zıt EMK oluşuyorken, dağıtık sargı biçimi ile yapılan sarımlar trapezoidal zıt EMK oluşturacaktır.

Şekil 2.2. *FDAM ve SMFDAM zıt EMK'ları (Kovanda vd., 2012)*



FDAM'lar bir periyotlarında 60°elektriksel açı boşluklu 120°lik kare dalgalar ile uyarım yapılarak beslenirler. Bu yapı SMFDAM'lara göre her bir açı değişimine karşılık dalga formu değişimi yerine toplamda 6 adet komütasyon bölgesinin olması ve buna göre kare dalga oluşturacak bir yapı ile sürülmesi sebebi ile daha basit algılayıcı devreler ve daha az işlem gücüne sahip denetleyiciler ile sistem gerçeklenebilirliği sunmaktadır. Buna

karşın, SMDFAM tipi motorlar daha yüksek tork, daha az dalgalanma sunmaları ve daha verimli olmaları gibi artı yönleri bulunmaktadır iki motor tipide ihtiyaç duyulan uygulamaya, geliştirme süresi ve maliyet gibi faktörler göz önüne alındığında kullanım tipine göre seçim yapmak gerekmektedir (Krishnan, 2010).

2.1.2. Rotor

FDAM'ların rotor yapısı, klasik doğru akım motorlarından farklı olarak fırçasız ve kolektörüzdür. Bu yapı sayesinde mekanik sürtünmeler ve bakım gereksinimi minimize edilmektedir. Rotor, genellikle yüksek manyetik geçirgenliğe sahip sabit mıknatıslardan oluşur ve bu mıknatıslar, rotor gövdesine yüzeysel ya da gömülü olarak yerleştirilir. Sabit mıknatısların yerleşim tipi, motorun moment üretimi, dinamik tepki süresi ve sıcaklık dayanımı üzerinde belirleyici rol oynar. Yüzeye monte mıknatıslar, daha yüksek verim ve daha düşük üretim maliyeti sağlarken gömülü mıknatıslar, yüksek hızlarda daha iyi mekanik sağlamlık ve geniş tork aralığı sunar. Rotorun dengesinin sağlanması için hassas dengeleme işlemleri uygulanır; bu sayede titreşimler azaltılır ve uzun ömürlü bir çalışma elde edilir. Rotorun mıknatıs dizilimi ve kutup sayısı, stator sargıları ile birlikte motorun tork üretimi, hız aralığı ve kontrol doğruluğu üzerinde doğrudan etkilidir. Ayrıca, rotorun atalet momenti, motorun dinamik başarımına ve kontrol algoritmalarının kararlılığına katkı sağlar. FDAM sistemlerinde kullanılan rotorlar, genellikle yüksek enerji yoğunluklu nadir toprak mıknatısları ile donatılarak, kompakt yapıda yüksek başarım elde edilmesi hedeflenir (Krishnan, 2017).

2.1.2.1. İç Rotorlu FDAM

İç rotorlu FDAM'lar, statorun motorun dış gövdesini meydana getirdiği ve rotorun iç kısımda bulunduğu motor çeşitleridir. Rotorun içeride olması hareketli parçanın dış yüzeye uzak olması sayesinde hareketli parçalar üstündeki yıpranmayı azalmaktadır sabit kısım olan statorun dışarıda olması ise motorun yerleştirilmesi işlemini kolaylaştırmaktadır. Uygulama alanı olarak yüksek güç ve moment gereken uygulamalarda öne çıkmaktadır. Yüksek hız gerektiren uygulamalarda sabitleme bileziği gibi ihtiyaçlardan ötürü maliyet artışlarına neden olmaktadır (Jha vd., 2019).

2.1.2.2. Dış Rotorlu FDAM

Dış rotorlı FDAM Statoru motorun iç kısmına rotoru ise dış kısmına yerleşecek şekilde tasarımlı motorlardır. Rotorlara yerleştirilen mıknatıslardan kaynaklı olarak dönüş

hareketi başladığında merkezkaç kuvveti etkisi ile yük değişimi durumlarında hız sabitliklerini koruyabilmektedirler bu özellikleri ile yüksek hız düşük tork gerektiren uygulamalar için uygun bir yapı olarak karşımıza çıkmaktadır (Naeini & Sadeghi, 2022).

2.1.2.3. Disk Tipi FDAM

Bir yüzeyine mıknatıslar yerleştirilmiş disk şeklinde rotora sahip olan stator sargıları ise bu yeni şekle uygun karşılıkta sargılara sahip olan motor türüdür. Bu sistemler yavaş hızlarda dahi sarsıntısız çalışmayı desteklemektedir. Motor yapısı gereği dışarıya ısı atımı zayıftır bu durum yüksek hız gerektiren uygulamalarda aşırı ısınmaya neden olacaktır. En uygun kullanım senaryosu düşük hız, düşük güç, yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalardır (Tabbache vd., 2010).

2.1.3. Hava Aralığı

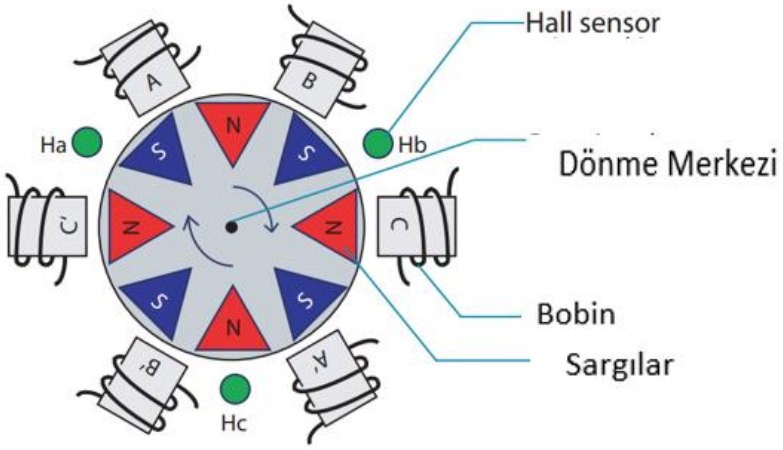
FDAM'ların hava aralığı, rotor ile stator arasındaki elektromanyetik etkileşimin gerçekleştiği kritik bölgedir. Aralığın mümkün olduğunca küçük tutulması, manyetik geçirgenliği artırarak tork yoğunluğunu yükseltir. Ancak çok dar bir aralık, üretim toleranslarını zorlaştırır ve mekanik riskleri artırabilir. Bu nedenle, elektromanyetik verimlilik ve mekanik güvenilirlik arasında denge kurulmalıdır (Hendershot & Miller, 2010).

2.1.4. Pozisyon Bilgisi ve Sensörler

FDAM sistemlerinde rotorun konum bilgisi, motorun doğru şekilde tork üretmesi, istenen hız ve pozisyonda devam etmesi için kritik öneme sahiptir. Rotor pozisyonunun doğru şekilde belirlenememesi, motorun verimsiz çalışmasına, dengesiz tork üretimine ve kontrol algoritmalarının kararsız davranmasına neden olabilir. Bu nedenle, konum bilgisi çeşitli yöntemlerle elde edilir. Bu yöntemler temel olarak sensörlü ve sensörsüz yaklaşımlar olarak iki ana gruba ayrılır. Sensörlü sistemler, genel olarak Hall sensörleri ve enkoder sensörlerden oluşurken, sensörsüz sistemler, fazlar üzerinden geçen akım ve fazlar üzerindeki zıt EMK'ların izlenmesine ve bu bilgilerle pozisyon kestirimine dayanmaktadır (Ehsani vd., 2009). Hall sensörleri, motorun içine yerleştirilen ve rotor üzerindeki mıknatısların oluşturduğu manyetik alan değişimlerine duyarlı olan sensörlerdir. Genellikle üç adet Hall sensörü kullanılarak rotorun 60°'lik elektriksel konum aralıklarında pozisyon bilgisi elde edilir. Bu yapı sayesinde temel konum bilgisi ve dönüş yönü algılanabilir. Düşük maliyetli ve yapısal olarak basit olmalarına rağmen,

çözünürlükleri sınırlıdır ve özellikle düşük hızda veya dur-kalk çalışan uygulamalarda tork salınımlarına neden olabilir.

Şekil 2.3. *Hall sensörlerin motor içerinde örnek yerleşimi (Charles & Emanuel, 2010)*



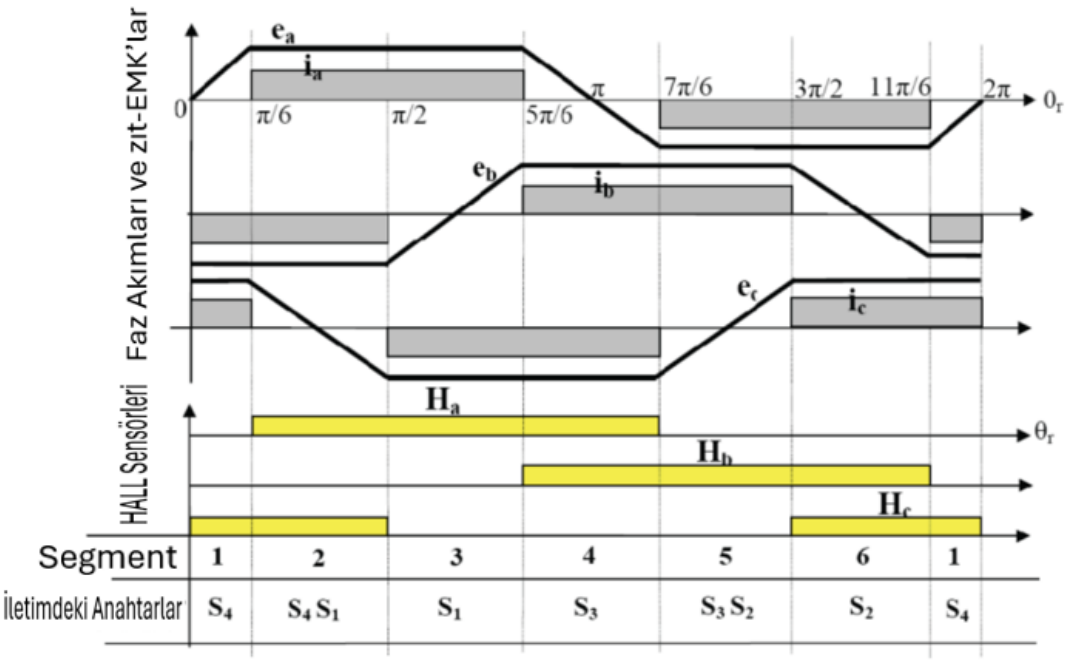
Enkoderler, rotor miline doğrudan bağlı olarak çalışan ve yüksek çözünürlüklü dijital veya analog sinyaller üreten sensörlerdir. Optik, manyetik veya kapasitif türleri bulunmaktadır. Yüksek hassasiyetli konum ve hız ölçümü sağladıkları için gelişmiş servo kontrol sistemlerinde yaygın olarak kullanılırlar. Ancak maliyetleri yüksektir ve çevresel faktörlerden kolayca etkilenebilirler. Ayrıca montaj hassasiyeti gerektirir ve mekanik karmaşıklığı artırır (Krishnan, 2017).

Öte yandan, zıt EMK tabanlı yöntemler, sensörsüz konum tahmini yaklaşımları içinde en yaygın olanıdır. Rotor döndükçe, stator sargılarında indüklenen gerilimler analiz edilerek rotorun anlık konumu tahmin edilir. Bu sinyaller, sıfır geçiş, faz farkı ya da genlik üzerinden işlenerek, dönüş yönü ve pozisyon bilgisi elde edilir. Zıt EMK sinyalleri yalnızca rotor dönmeye başladığında ortaya çıkar. Bu nedenle, kalkış anında ve düşük hızda yeterince belirgin değildir. Bu durum kontrol algoritmalarının kararsız hale gelmesine ve motorda tork kayıplarına yol açabilir. Bu yöntemin yüksek hızlarda güvenilirliği artar; bu nedenle bazı uygulamalarda yalnızca orta-yüksek hız bölgesinde aktif hale gelen hibrit yapıların bir parçası olarak kullanılır (Krishnan, 2017). Zıt EMK sinyalleri, özellikle orta ve yüksek hızlarda belirgin ve kararlı olduğundan, MRAS sisteminin adaptif mekanizması için daha hızlı ve güvenilir şekilde çalışır. Akıma dayalı sistemlerde, özellikle düşük hızlarda akı yönünün değişimi yavaş ve belirsiz olabileceğinden, adaptasyon süreci daha yavaş ve kararsız bir şekilde ilerleyebilir.

Akım tabanlı yöntemler, motorun matematiksel modeline dayanarak rotor pozisyonunu tahmin etmeyi amaçlar. Bu yöntemlerde stator akımları ve uygulanan gerilimler

kullanılarak, motorun akı yönü ve değişimi gözlemlenir. Özellikle düşük hızda ve dur-kalk çalışan sistemlerde zıt EMK sinyalleri yeterli olmadığından, bu yöntemler öne çıkar. Bu yaklaşımlar genellikle gözlemci tabanlı yapılarla birlikte kullanılır. MRAS, EKF, durum gözlemcileri gibi yöntemler, sistemin iç dinamiklerini izleyerek gerçek rotor konumunu tahmin eder. Bu yöntemlerin doğruluğu, motor parametrelerinin (endüktans, direnç, mıknatıs akısı vb.) doğru modellenmesine bağlıdır. Parametre sapmaları ya da sıcaklık etkileri algoritmanın başarımını olumsuz etkileyebilir (Holtz, 2002; Kim & Sul, 1995).

Şekil 2.4. *Eş zamanlı Hall sensör pozisyonları, faz akımlar ve zıt EMK'ların pozisyona göre durumları (Devendra vd. 2011)*

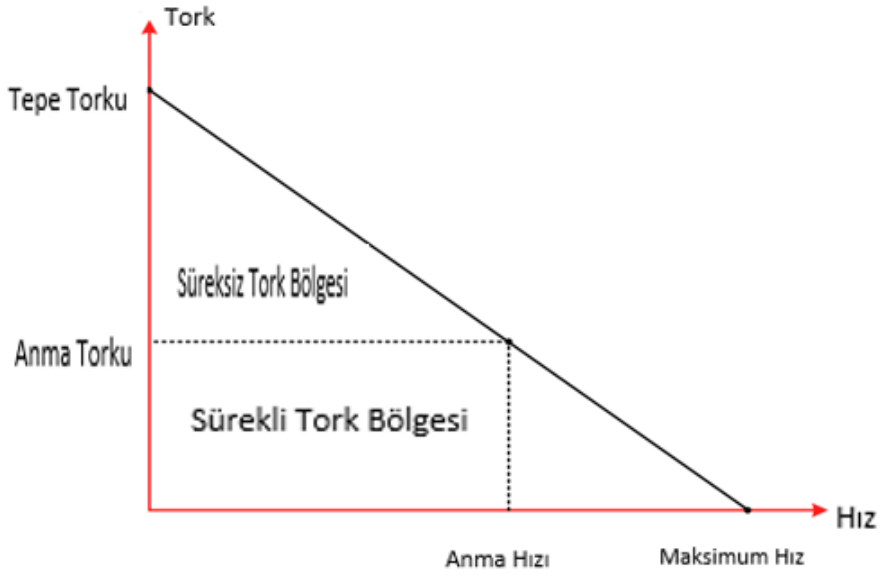


2.1.5. FDAM Tork-Hız Karakteristiği

FDAM'ların tork-hız karakteristiği, motorun farklı çalışma koşullarındaki başarımının anlaşılması açısından kritik öneme sahiptir. Bu karakteristik, motorun sabit tork ve sabit güç bölgelerinde nasıl davrandığını ortaya koyar. FDAM sistemlerinde nominal hıza kadar motor sabit tork üretir; bu hızın üzerine çıkıldığında ise sabit güç bölgesine geçilir ve tork, hızla ters orantılı olarak azalır. Bu yapı, özellikle elektrikli araçlar ve robotik uygulamalarda sıkça karşılaşılan bir kontrol gereksinimidir (Åström & Murray 2021). Tork-hız eğrisinin şekli; rotor mıknatıs konfigürasyonu, hava aralığı tasarımı ve stator sargılarının dağılımı gibi fiziksel parametrelerle yakından ilişkilidir. Örneğin, yüzey mıknatıslı rotorlarda ani tork değişimlerine daha hızlı yanıt verilirken, gömülü mıknatıs yapılar daha yüksek hızlarda tork stabilitesi sağlar (Chiasson, 2023). Ayrıca, düşük hızda

yüksek tork gerektiren uygulamalarda, zayıflatılmış alan kontrolü gibi ileri kontrol stratejileri ile motorun tork üretim kabiliyeti artırılabilir. Kontrol algoritmalarının bu karakteristik üzerindeki etkisi de büyüktür. Geleneksel trapezoidal kontrol yönteminde tork salınımları gözlenebilirken, sinüzoidal kontrol ve alan yönlendirmeli kontrol (AYK) yapıları daha düzgün bir tork-hız geçişi sunar. Ayrıca, sensörsüz kontrol yapılarında kullanılan hız kestirim algoritmalarının doğruluğu, tork üretiminde dalgalanmalara neden olabilir. Bu nedenle MRAS ve benzeri tahmin yapılarının kararlılığı, özellikle tork-hız karakteristiğini doğrudan etkilemektedir. Sonuç olarak, FDAM'ın tork-hız karakteristiği sadece motorun fiziksel tasarımına değil, aynı zamanda uygulanan kontrol stratejilerine de doğrudan bağlıdır. Bu nedenle hedef uygulamaya uygun kontrol algoritmasının seçimi, enerji verimliliği ve sistem kararlılığı açısından büyük önem taşır.

Şekil 2.5. *Tork hız eğrisi (Hamza vd., 2021)*



2.1.6. Motor Kayıpları

FDAM'lar yüksek verimlilik ve uzun ömür gibi avantajlar sunmalarına rağmen çalışma sırasında çeşitli enerji kayıplarına maruz kalmaktadır. Bu kayıplar, motorun başarımını doğrudan etkileyerek hem verim düşüşüne hem de ısınmaya sebep olmaktadır. FDAM'larda başlıca kayıplar; bakır kayıpları, demir kayıpları, mekanik kayıplar ve elektronik anahtarlama kayıpları olarak dört ana grupta ele alınmaktadır.

2.1.6.1. Bakır Kayıpları

Bakır kayıpları, stator sargılarından geçen elektrik akımının sargıların iç direnciyle etkileşimi sonucunda ısı şeklinde enerji kaybı meydana getirmesiyle oluşmaktadır. Bu kayıplar, Joule kanunu ile açıklanmakta olup, aşağıdaki gibi formüle edilir:

$$P_{cu} = \sum I_f R_f \tag{2.1}$$

burada I_f her bir fazdaki akımı, R_f ise stator sargılarının direnç değerini ifade etmektedir.

Bu kayıp, motorun yük altında çalışması sırasında ciddi boyutlara ulaşabilir. Özellikle yüksek akım çeken uygulamalarda akımın karesi ile doğru orantılı olarak oluşacak bakır kayıplar motor sıcaklığını artırarak ek soğutma ihtiyacı ortaya çıkartmaktadır (Obi vd., 2022).

2.1.6.2. Demir Kayıpları

Demir kayıpları, stator çekirdeğinde değişen manyetik alanların sebep olduğu iki ana kayıptan oluşur: histerezis kaybı ve eddy akımı kaybı (Ehsani vd., 2009).

a. Histerezis Kayıpları

Malzemenin manyetik alan değişimlerine karşı gösterdiği direnç sonucu oluşan enerji kaybıdır ve Denklem (2.2) ile ifade edilir:

$$P_{histerisis} = k_h \, f \, B_{max}^2 \tag{2.2}$$

burada k_h histerezis kaybı katsayısı, f manyetik alanın değişim frekansı, B_{max} maksimum manyetik akı yoğunluğudur (Chiasson vd., 2023).

b. Eddy Akımı Kayıpları

Çekirdek içinde indüklenen girdap akımları nedeniyle oluşan ısıl kayıplardır. Eddy akımı kaybı formülü şu şekildedir:

$$P_{eddy} = k_e \, f^2 \, B_{max}^2 \, t^2 \tag{2.3}$$

burada k_e eddy akımı kaybı katsayısı, t çekirdek lamina kalınlığıdır.

Bu kayıplar, çekirdek malzemesinin ince lamina katmanlara ayrılması ve yüksek geçirgenlikli alaşımlar kullanılmasıyla minimize edilmeye çalışılmaktadır (Plotnikov, 2021).

2.1.6.3. Mekanik Kayıplar

Mekanik kayıplar, motorun dönme hareketi sırasında oluşan sürtünme ve hava direnci gibi faktörlerden kaynaklanmaktadır.

a. Rulman Sürtünme Kayıpları

Rotorun rulmanlar üzerinde dönerken oluşan sürtünme kuvvetleri nedeniyle ortaya çıkan kayıplardır. Matematiksel olarak sürtünme kaybı aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$P_{rulman} = f_f \, v \tag{2.4}$$

burada f_f rulman sürtünme kuvveti, v rulman temas noktalarındaki çevresel hızdır (Hrček vd., 2023).

b. Hava Sürtünmesi

Rotor ve fan gibi döner bileşenlerin havayı sürüklemesi sonucu oluşan kayıplardır. Hava sürtünme kaybı matematiksel olarak şu şekilde ifade edilir:

$$P_{hava} = \frac{1}{2} C_d \, p \, A \, v^3 \tag{2.5}$$

burada C_d sürükleme katsayısı, p havanın yoğunluğu, A rotorun projeksiyon alanı, v rotorun çevresel hızıdır. Ayrıca Belirtmek gerekir ki yüksek hızlı uygulamalarda hava sürtünmesi kayıpları göz ardı edilemeyecek seviyelere ulaşabilir (NASA Glenn Research Center, 2025).

2.1.6.4. İletim Kayıpları

Yarı iletken anahtar açıkken, akımın direnç üzerinden akması ile iletim kayıpları oluşur:

$$P_{iletim} = I_{rms}^2 \, R_{Ds(on)} \tag{2.6}$$

burada sistem anahtarlama elemanı olarak MOSFET kullanıldığı varsayılmış olup $R_{Ds(on)}$ MOSFET'in açık durumdaki direnç değerini temsil etmektedir. Sistemde akımın

taşındığı kablolar ve bakır yollar üzerinde ise hat empedansına bağlı olarak kayıp olacaktır.

a. Anahtarlama Kayıpları
MOSFET, IGBT vb. kullanılan anahtarların açılıp kapanması esnasında, voltaj ve akımın aynı anda değişmesi nedeniyle geçici enerji kaybı oluşur:

$$P_{anahtarlama} = \frac{1}{2} V_{Ds(on)} I_D \left(t_{rise} t_{fall}\right) f_{switch} \tag{2.7}$$

burada $V_{Ds(on)}$ drain-souce gerilimi, I_DMOSFET drain akımı, t_{rise}ve t_{fall} anahtarın açılma ve kapanma süreleri, f_{switch} anahtarlama frekansı. Anahtarlama kayıpları, yüksek frekanslı sürücülerde belirgin bir şekilde artmaktadır (Christen & Biela, 2018)**.**

b. Hat Kayıpları
Güç elektroniği sistemlerinde anahtarlama elemanlarının dışında, akımın geçtiği kablolar, devre yolları ve bağlantı elemanları üzerinde de enerji kayıpları meydana gelir. Bu kayıplar genellikle iletim hatlarının dirençlerinden kaynaklanır. (Christen & Biela, 2018; Rashid, 2014).

2.2. FDAM Motorların Zıt EMK Tipleri ve Farkları

FDAM'larda rotorun hareketi sonucu stator sargılarında indüklenen zıt EMK, motorun manyetik yapısına ve sargı topolojisine bağlı olarak sinüzoidal ya da trapezoidal şekil alabilir. Bu farkın kaynağında, motorun elektromanyetik yapısı ve stator sargılarının yerleşim düzeni yatmaktadır (Krause vd., 2013).

Sinüzoidal zıt EMK, genellikle dağıtılmış sargı yapısına sahip motorlarda görülür. Dağıtılmış sargılar, stator yuvalarına daha geniş bir açıyla yayılmış olup, rotor mıknatıslarının stator fazlarına uyguladığı manyetik akı daha düzgün ve sürekli bir şekilde değişir. Bu sayede sargı uçlarında oluşan zıt EMK, zamana bağlı olarak sinüzoidal form alır. Sinüzoidal zıt EMK, düşük tork dalgalanması ve sessiz çalışma avantajları nedeniyle özellikle hassas uygulamalarda tercih edilir (Krishnan, 2017).

Öte yandan, trapezoidal zıt EMK, daha çok konsantre (yoğun) sargı yapısına sahip motorlarda ortaya çıkar. Konsantre sargılar, stator yuvalarının daha sınırlı bir bölgesine sarılır ve rotor mıknatısları bu sargılara kısa sürede maksimum manyetik akı uygular. Bunun sonucunda zıt EMK sinyalleri, hızlı yükselen ve sabit kalan bir formda, yani

trapezoidal şekilde oluşur. Bu yapı, üretim kolaylığı, düşük maliyet ve kompakt yapı gibi avantajlar sunar (Hendershot & Miller, 2010).

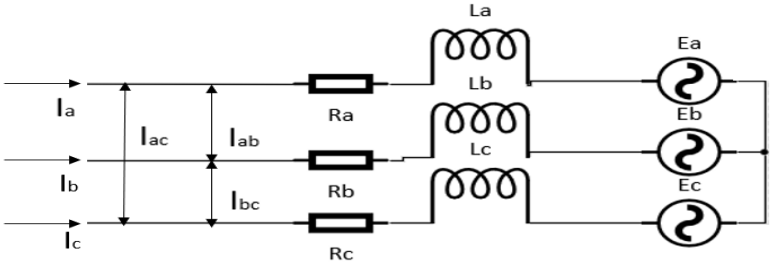
Her iki zıt EMK tipi de farklı kontrol stratejilerine uygunluk gösterir. Sinüzoidal zıt EMK, AYK ile daha verimli çalışırken; trapezoidal zıt EMK ise trapezoidal komütasyon ile daha basit ve hızlı kontrol imkânı sunar. Bu durum motorun uygulama alanına göre kontrol yönteminin seçimini doğrudan etkilemektedir (Vukosavic, 2007).

Sonuç olarak, motorun tasarımında kullanılan sargı topolojisi, rotor mıknatıs dizilimi ve manyetik malzeme özellikleri, zıt EMK'nin şekillenmesinde belirleyici faktörlerdir. Bu farklar, kontrol algoritmasının tasarımını ve motorun genel başarım karakteristiğini doğrudan etkileyerek, sistemin verimliliğini, tork üretimini ve ses seviyesini belirlemektedir.

2.3. SMFDAM Matematiksel Modeli

SMFDAM için basit modelleme yapmak gerekirse Şekil 2.6.'daki gibi gösterilebilir.

Şekil 2.6. *SMFDAM eş değer devresi (Zhang vd.2022)*



Genel olarak üç fazlı olan motorların her bir sargısı üzerinden geçecek akım, fazlar üzerinde indüklenecek gerilim ve sargı indüktansları olarak tasvir edilmektedir.

SMFDAM'nin üç-faz stator akım eşitlikleri ve mekanik hareket eşitliği aşağıdaki gibi verilebilir (Tuzcu vd., 2025):

$$\frac{di_{sa}}{dt} = -\frac{R_s}{L_{ls}} i_{sa} + \frac{1}{L_{ls}} v_{sa} - \frac{1}{L_{ls}} E_a \tag{2.8}$$

$$\frac{di_{sb}}{dt} = -\frac{R_s}{L_{ls}} i_{sb} + \frac{1}{L_{ls}} v_{sb} - \frac{1}{L_{ls}} E_b \tag{2.9}$$

$$\frac{di_{sc}}{dt} = -\frac{R_s}{L_{ls}} i_{sc} + \frac{1}{L_{ls}} v_{sc} - \frac{1}{L_{ls}} E_c \tag{2.10}$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{\tau_e}{J_t} - \frac{B_t}{J_t}\omega_m - \frac{\tau_l}{J_t} \tag{2.11}$$

$$\tau_e = (\varphi_{ra} i_{sa} + \varphi_{rb} i_{sb} + \varphi_{rc} i_{sc}) p_p \tag{2.12}$$

burada v_{sa}, v_{sb} ve v_{sc} 3-faz stator gerilimlerini, i_{sa}, i_{sb} ve i_{sc} 3-faz stator akımlarını, R_s ve L_{ls} stator direncini ve stator kaçak indüktansını, E_a, E_b ve E_c üç-faz stator zıt-EMK değerlerini, ω_m rotorun mekanik hızını, τ_e ve τ_l sırasıyla indüklenen moment ile yük momentini, B_t ve J_t ise motor ve yükün toplam eylemsizliğini ve viskoz sürtünme terimini temsil etmektedir. Ayrıca, p_p kutup 1.çifti sayısını, φ_{ra}, φ_{rb}, ve φ_{rc}, ise rotor akılarını ifade etmektedir (Mouliswararao vd.,2019).

Motorun hızına, rotorun elektriksel konum bilgisine (θ_e) ve rotordaki manyetik akıya (λ_m) bağlı olarak, üç fazlı stator zıt EMK değerleri ortaya çıkmaktadır (Tuzcu vd., 2025). Üç-faz stator zıt EMK'ları motor tipine bağlı olarak sinüzoidal veya trapezoidal olabilirler. Eğer zıt EMK'lar trapezoidal ise üç-faz zıt EMK değerleri aşağıdaki gibi tanımlanabilir (Hussain, 2015):

$$E_a = p_p \omega_m \lambda_m f(\theta_e) = p_p \omega_m \varphi_{ra} \tag{2.13}$$

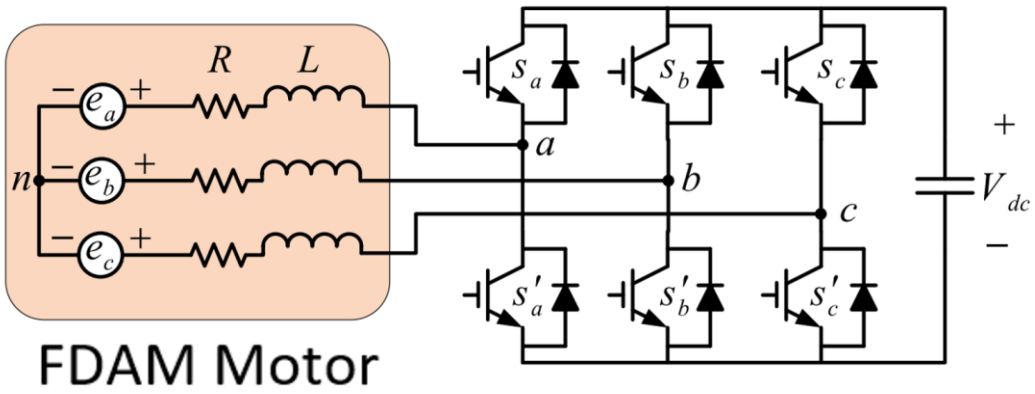
$$E_b = p_p \omega_m \lambda_m f\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) = p_p \omega_m \varphi_{rb} \tag{2.14}$$

$$E_c = p_p \omega_m \lambda_m f\left(\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right) = p_p \omega_m \varphi_{rc} \tag{2.15}$$

2.4. Genel FDAM Sürücü Devresi Yapısı

FDAM'lar yüksek verimlilik, sessiz çalışma ve düşük bakım gereksinimi gibi avantajları sayesinde elektrikli araçlardan endüstriyel otomasyona kadar birçok alanda yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu motorların güvenilir ve hassas bir şekilde kontrol edilebilmesi, doğrudan sürücü devresinin tasarımı ve başarımına bağlıdır. FDAM sürücü devresi, güç elektroniği, kontrol sistemleri, algılayıcılar ve koruma devrelerinden oluşan çok disiplinli bir yapıdır.

Şekil 2.7. *FDAM sürücü devresi (Moradpour vd., 2023)*



2.4.1. Sürücü Devresi Mimarisi

Genel bir FDAM sürücü sistemi temel olarak iki ana bloktan oluşur: güç katı ve kontrol katı. Güç katı, motor fazlarına enerji sağlayan yüksek akım taşıyan bileşenleri ve bu devrelerin filtre bileşenlerini içerirken; kontrol katı, motorun hızı, yönü ve torkunu belirleyen düşük güçlü dijital birimlerden oluşur.

Motor fazlarına enerji vermek için genellikle üç fazlı motorlarda üç fazlı tam köprü konfigürasyonu tercih edilir. Bu yapı, altı adet anahtarlama elemanından (MOSFET, IGBT vb.) oluşur ve her faz için bir üst ve bir alt anahtar içerir. Her bir anahtar çifti, motor fazlarının uygun komütasyonu için sıralı biçimde anahtarlanır. Bu sayede motorun elektromekanik alanı döndürülerek hareket sağlanır (Bose, 2006).

Anahtarlayıcılar, mikrodenetleyici veya dijital sinyal işlemcisi (Digital Signal Processor, DSP) tarafından üretilen darbe genliği modülasyonu (Pulse Width Modulation, PWM) sinyalleri ile çalıştırılır. PWM kontrolü, motor fazlarına uygulanan ortalama gerilimi ayarlayarak hem hız hem de tork kontrolü sağlar. Trapezoidal veya sinüzoidal PWM teknikleri, uygulama gereksinimlerine göre tercih edilir. Trapezoidal PWM yapısı daha basit ve hızlıdır; sinüzoidal PWM ise düşük tork dalgalanması sunar (Krishnan, 2017).

2.4.2. Kontrol ve Geri Besleme Sistemleri

Kontrol katı, FDAM'ın hedeflenen hız ve yön bilgisine göre PWM sinyalleri üretir. Bu süreçte, kapalı çevrim kontrol sistemleri kullanılarak hassas hız ve tork kontrolü sağlanır. En yaygın kontrolör yapısı PI kontrolörüdür. PI kontrolörleri, ölçülen değer ile hedeflenen değer arasındaki hata sinyaline göre sistemin tepkisini ayarlamaktadır. Rotor pozisyon bilgisi ise ya Hall etkili sensörler, enkoderler gibi fiziksel algılayıcılarla ya da sensörsüz yöntemlerle elde edilir. Sensörsüz yapılarda, faz akımı ve gerilim

ölçümlerinden türetilen verilerden rotor pozisyonu tahmin edilir (Zerdali & Mengüç, 2022). Bu bilgi, kontrol katına iletilerek PWM üretimi için temel oluşturur.

2.4.3. Sönümleme Devreleri

Yarı iletken anahtarlar yüksek hızlı anahtarlamalar sırasında dv/dt (gerilim değişim hızı) kaynaklı geçici rejimlerde zarar görebilir. Bu durumu engellemek amacıyla sönümleme devreleri (RC, RCD ya da sadece C tipi) kullanılır. Bu devreler, anahtarlama anında oluşan ani gerilim yükselmelerini absorbe ederek yarı iletken elemanların zarar görmesini engeller (Rashid, 2014).

Ayrıca, sürücü sistemlerinde genel olarak aşağıdaki koruma ve güvenlik devreleri yer almalıdır: Aşırı akım koruma, yüksek voltaj koruma. Düşük voltaj koruma, sıcaklık koruma bu tür koruma devreleri, sistemin hem kullanıcı güvenliği hem de donanım bütünlüğü açısından uzun ömürlü ve güvenilir çalışmasını sağlar.

Yarı iletken anahtarlama elemanlarının kapanışlarında serbest geçiş diyotlarında $\frac{dv}{dt}$ kaynaklı oluşacak yüksek gerilimlere karşı korunması, motor geri gelecek olan anlık akımlar için dayanımın arttırılması, iletime geçiş anlarında ise akımın ani yükselmesi ile di/dt değerini anahtarlama elemanın di/dt değerine uygun değerlere çekmektedir. Bu etkiler hat üzerinde bulunan yollar kablolar lehim noktaları vb. noktaların toplam hat endüktansında yaşattığı artış ile meydana gelmektedir hat endüktansında yaşanan artışlar ani anahtarlama durumlarında $\frac{dv}{dt}$ ve $\frac{di}{dt}$ gibi yüksek akım ve voltaj oynamalarına sebep olmaktadır. Anahtarlama elemanlarının paralelinde bir sönümleme devresi de genel olarak uygulanmaktadır.

Sönümleme devreleri direnç, kondansatör ve diyot elamanları ile tasarlanmaktadır, bu tarz pasif malzemeler ile tasarlanan sönümleme devrelerine pasif sönümleme devreleri devrenin kontrolü adına yarı iletken bir anahtar ile tetikleniyorsa ise aktif sönümleme olarak adlandırılmaktadır (Holterman & de Vires, 2001). Bu sönümleme devrelerinden bazılarını inceleyecek olursak 4 alt başlıkta toplayabiliriz.

2.4.3.1. Pasif Sönümleme Devreleri

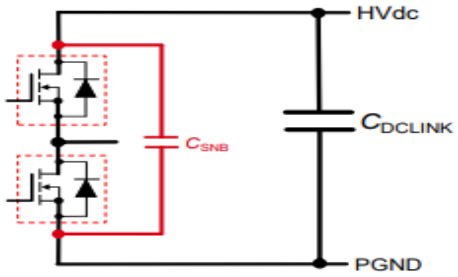
Güç elektroniği sistemlerinde, özellikle yüksek frekanslı ve hızlı anahtarlama elemanları olan MOSFET, IGBT gibi bileşenlerin kullanımı, sistemin verimliliğinde önemli artışlar sağlamaktadır. Ancak bu avantajlara rağmen, yüksek dv/dt ve di/dt değerlerinin neden

olduğu gerilim ve akım salınımları, cihaz güvenilirliğini tehdit eden önemli bir problem oluşturmaktadır. Bu salınımların temel kaynaklarından biri, çevresel devre elemanları ve paket yapısında yer alan saçılma endüktanslarıdır. Bu bağlamda, pasif sönümleme devreleri, bu tür zararlı geçici rejim olaylarını bastırmak amacıyla yaygın biçimde kullanılan etkili çözümler sunmaktadır (Holterman & de Vires, 2001).

2.4.3.2. Sadece Kapasite İçeren Sönümleme Devreleri

Uygulanabilirliği yüksek en basit sistem olarak öne çıkmaktadır genel olarak anlık voltaj değişimlerinin yüksek olduğu anlardaki tepe voltaj değerini aşağı çekmek için kullanılmaktadır eksi durum olarak, tepeden tepeye voltaj değişimlerinde koruma sağlamasının yanında salınım frekansını arttırmasından kaynaklı elektro manyetik uyumluluk testleri için problem oluşturabilmektedir, hat dahilindeki indüktif yükün büyüklüğüne bağlı olarak kapasitör boyutu büyütülerek tepeden tepeye voltaj değerinde düşüm sağlamaktadır (Derkacz vd., 2020).

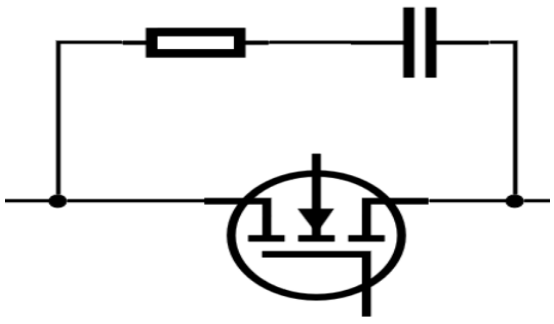
Şekil 2.8. *Sadece kapasite içeren sönümleme devreleri*



2.4.3.3. RC Sönümleme Devreleri

Seri bağlı bir direnç ve kapasiteden meydana gelmektedirler. Kapasitede depolanan enerjinin direnç üzerinden termal enerji olarak dışarı atılması prensibine dayanır bu noktada eklenen direnç toplam biriken enerjinin yok edilmesine katkı sunması ile oluşacak dalgalanmanın azalmasına sebep olacaktır (Derkacz vd., 2020).

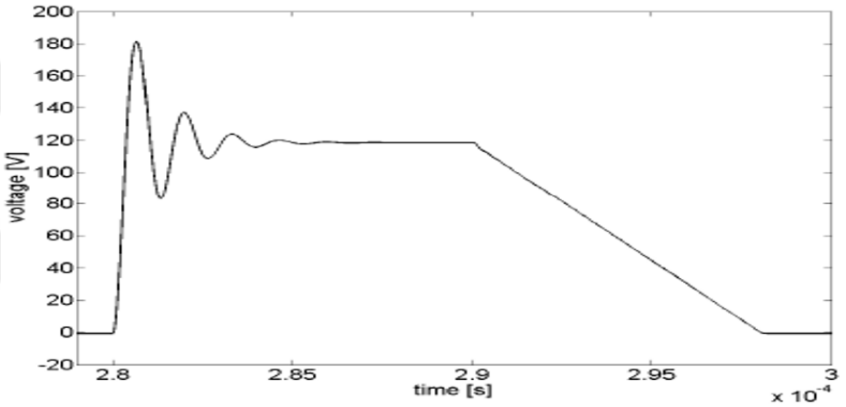
Şekil 2.9. *RC sönümleme devresi*



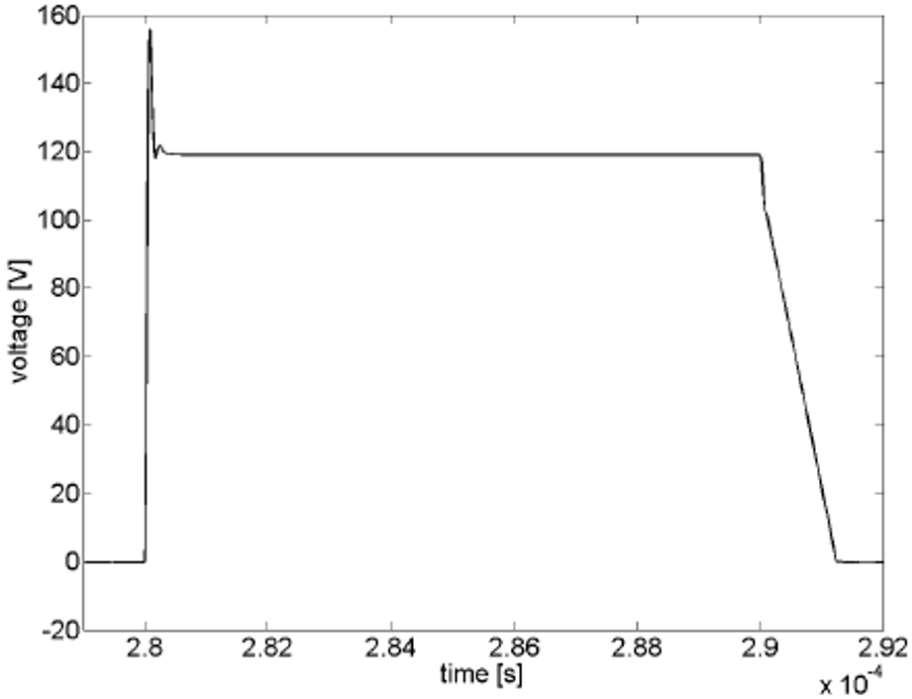
2.4.3.4. RCD Sönümleme Devreleri

RC sönümleme devrelerin yanına bir adet seri diyotun eklenmesi ile oluşacak dalgalanma durumları polarize edilmiş olur. Bu özelliğin yanında oluşacak olan voltajın diyotun ileri akımını geçmesi halinde diyotlar devreye girerek akımı bağlı olduğu anahtarın body diyotuna yönlendirerek serbest döngü halinde (freee whelling) yükün dolaşımını sağlayarak voltaj tepe değerleri oluşunun süresini arttırmaktadır. Fakat sürenin uzaması ile daha küçük RC devreler ile daha fazla enerji sönümlenmesi sağlanabilmektedir. Bu RC sönümleme devrelerinde oluşan devre boyutunu büyütmeden sönümlenmek istenen tepe değer kıyımlarını sağlamaktadır (Parvari vd., 2018).

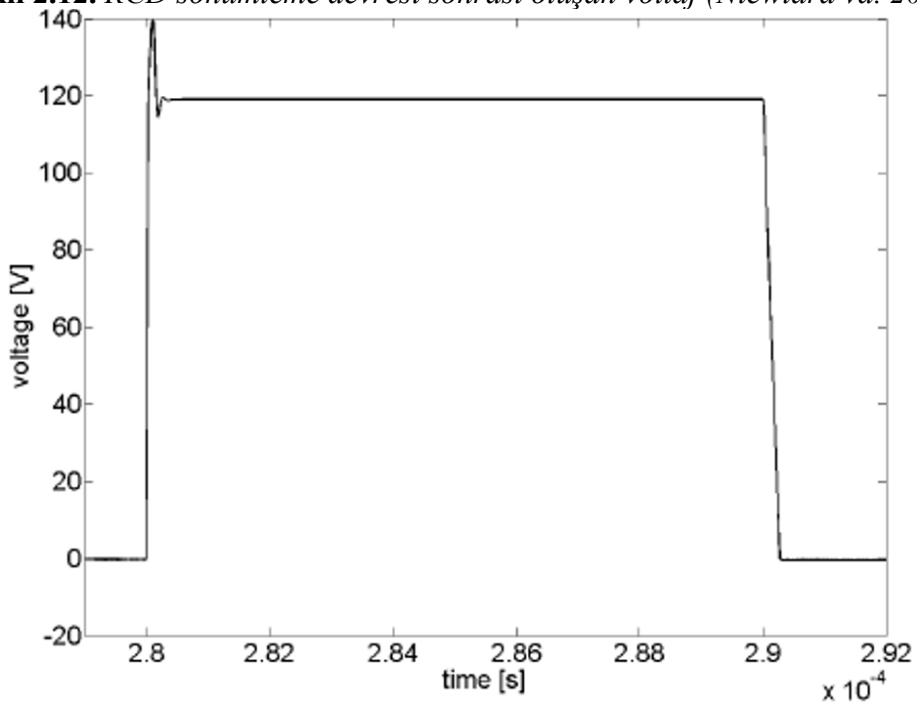
Şekil 2.10. *Sadece kapasite içeren sönümleme devresi sonrası oluşan voltaj (Niewiara vd. 2015)*



Şekil 2.11. *RC sönümleme devresi sonrası oluşan voltaj (Niewiara vd. 2015)*



Şekil 2.12. *RCD sönümleme devresi sonrası oluşan voltaj (Niewiara vd. 2015)*



2.4.4. Kontrolcü

Motorun pozisyon bilgisinin ölçülmesi/üretilmesi bu bilgiler ekseninde anahtarlama grubunun istenen pozisyon ve torka uygun şekilde anahtarlamasının sağlanması amacı ile bir adet kontrolcü ihtiyacı bulunmaktadır.

Kontrolcüler genel olarak mikrodenetleyici, mikroişlemci, işlemci veya programlanabilir lojik devreler (programmable locig circuit, PLC) olarak öne çıkmaktadır. Seçilecek olan kontrolcü sistem performansı kullanım alanı ve maliyeti gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak seçilmektedir, genel olarak uygulamalarda mikrodenetleyiciler gerçek zamanlı sistemlerde gösterdikleri yüksek başarımları düşük maliyetleri, düşük güç tüketimleri ve zorlu koşullar altında performanslarını koruyabilmeleri gibi özellikleri ile öne çıkmaktadırlar.

Seçilecek kontrolcü sistemin anahtarlama frekansının her bir darbesinde işlemleri yapabilecek işlem kapasitesi öncelikli gözetilerek seçilmelidir. Motor sürücü devresinde motor üzerinde oluşan ve anahtarlama kayıpları ile ortaya çıkan ısı ortamında çalışabilecek olması da bir faktör olarak öne çıkmaktadır.

Motor kontrol algoritmaları genel olarak matematiksel olarak işlem yüklerine uygun mikrodenetleyicileri talep etmektedir bu bağlamda seçilen denetleyicide Kayar Nokta Ünitesi bulunması işlem sürelerini önemli ölçüde azaltacaktır.

2.5. FDAM Sistemlerinde Temel Kontrol Türleri

FDAM kontrolü, yalnızca komütasyon işlemleriyle sınırlı olmayıp; aynı zamanda motorun konum, hız ve elektromanyetik moment gibi temel dinamik parametrelerinin yüksek hassasiyetle izlenmesini ve yönetilmesini de içermektedir. Bu kapsamda, motor performansını doğrudan etkileyen çok çeşitli kontrol stratejileri geliştirilmiş olup, söz konusu yöntemler farklı uygulama alanlarının gereksinimlerine göre özelleştirilerek yaygın biçimde adapte edilmiştir. Bu bölümde, FDAM'ların kontrolünde kullanılan temel yöntemler detaylı olarak ele alınmakta ve ilgili literatür uygulamalarıyla birlikte tartışılmaktadır (Parastvand vd., 2015).

2.5.1. Konum (Pozisyon) Kontrolü

Pozisyon (veya konum) kontrolü, elektrikli motorların uygulamalı kontrol sistemlerinde sıklıkla karşılaşılan temel kontrol türlerinden biridir. Bu kontrol stratejisi, motor milinin açısal konumunun belirli bir referans değere, yani hedef pozisyona, doğru ve hassas bir şekilde getirilmesini amaçlar. Hedef konuma ulaşıldığında, motorun açısal pozisyonunun sabit tutulması sağlanır. Bu tür bir kontrol, özellikle robotik sistemlerde, CNC makinelerinde, servo tahrikli makinalarda ve hassas hareket kontrolü gerektiren diğer birçok endüstriyel uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır.

Pozisyon kontrolünün başarısı, motorun hızlı ve hassas bir şekilde hareket etmesini, pozisyona ulaşmasını ve bu pozisyonu sürekli olarak tutmasını sağlamak için kritik öneme sahiptir. Bununla birlikte, konum kontrolü genellikle çok katmanlı bir yapıya sahiptir. Bu yapı, birincil hedefin motorun açısal konumunu istenilen değere getirmek olduğu bir dizi alt kontrol döngüsünü içerir. En dış döngüde pozisyon kontrolü yapılırken, bu döngüye bağlı olarak çalışan hız ve akım kontrol döngüleri de motorun doğru çalışmasını sağlayan ikinci dereceden katmanları oluşturur.

Pozisyon kontrol sistemi, tipik olarak bir dizi aşamadan geçer. İlk aşama, motorun hedef pozisyonuna ulaşmasını sağlayacak olan konum referansını belirlemek ve bu değeri sisteme iletmektir. Bu referans değeri, motor milinin istenen açısal pozisyonunu belirtir ve genellikle bir kontrol algoritması tarafından hesaplanır. Bu referans, hız kontrol algoritmalarına iletilir. Hız kontrol algoritması, motorun hedef hızını belirler, böylece motorun referans pozisyonuna ulaşması hızla sağlanır. Bu hız referansı, akım kontrol algoritmasına aktarılır ve son olarak, motorun doğru tork üretmesi için gerekli olan q-ekseni akımı belirlenir.

AYK stratejisi kapsamında kullanılan çok katmanlı kontrol mimarisi, motorun açısal konumunun hedeflenen referans değere ulaşmasını sağlamak amacıyla; konum, hız ve akım gibi temel parametrelerin her birini ayrı ayrı ancak birbirleriyle koordineli şekilde kontrol altına almayı amaçlamaktadır. Bu yapı içerisinde pozisyon kontrolü genellikle PI kontrolörler aracılığıyla gerçekleştirilir. PI kontrolörler, sistem hatasını minimize etme ve kapalı çevrim kararlılığını artırma özellikleri sayesinde konum regülasyonu uygulamalarında yaygın biçimde tercih edilmektedir. Benzer şekilde, hız kontrolü de PI kontrol yapısıyla sağlanmakta olup; istenen hız profilinin korunması ve ani hız değişimlerine karşı sistemin dengeli tepkiler vermesi amacıyla kullanılmaktadır. Akım kontrol katmanı ise elektromanyetik momentin düzenlenmesinden sorumlu olup, motorun tork üretimini optimize ederek tüm kontrol döngüsünün senkron ve kararlı biçimde işlemesine katkı sağlamaktadır.

Literatürde, pozisyon kontrolü performansının belirleyici unsurlarından biri olarak sistemin konum geri besleme doğruluğu öne çıkmaktadır. Bu doğruluk ise büyük ölçüde motor hareketinin hassas biçimde izlenebilmesine bağlıdır. Bu bağlamda, yüksek çözünürlüklü enkoderler motor milinin açısal konumunun doğrudan ve yüksek hassasiyetle ölçülmesine olanak tanımakta, böylece sistemin konum-hata oranı azaltılmakta ve genel kontrol doğruluğu artırılmaktadır. Enkoderler, motorun mil hareketlerini elektriksel sinyallere dönüştürerek kontrol sistemine anlık veri sağlamaktadır. Bu veri akışı, özellikle hassas pozisyonlama gerektiren uygulamalarda kritik öneme sahiptir.

Buna karşın, sensörsüz kontrol sistemlerinde pozisyon bilgisi doğrudan ölçülemediğinden, konum kestirimine dayalı algoritmalar kullanılmak zorundadır. Bu tür sistemlerde, motorun terminal gerilimleri ve faz akımları üzerinden rotor pozisyonunun yazılımsal olarak tahmin edilmesi hedeflenmektedir. Ancak bu tahmin yöntemleri, doğrudan ölçüm yapan yüksek çözünürlüklü enkoderlerle kıyaslandığında daha düşük doğruluk seviyeleri sunmakta ve sistem kararlılığını olumsuz etkileyebilmektedir. Bu nedenle, sensörsüz pozisyon kestiriminde daha karmaşık filtreleme ve gözlemci temelli algoritmalara başvurulmakta, hata oranlarının azaltılması ve kontrol performansının artırılması hedeflenmektedir (Vas, 1998).

2.5.2. Hız Kontrolü

Hız kontrolü, elektrik motorlarının çalışma performansını düzenleyen ve motorun açısal hızının (veya dakikadaki devir sayısının, RPM) belirlenen referans değer etrafında kararlı biçimde sürdürülmesini amaçlayan temel bir kontrol stratejisidir. Bu yöntem, motorun enerji verimliliğini artırmak ve sistem kararlılığını sağlamak açısından kritik öneme sahiptir. Hız kontrolü, taşıma sistemleri, fanlar, elektrikli araçlar ve pompa uygulamaları gibi çok çeşitli alanlarda yaygın biçimde kullanılmaktadır. Doğru uygulanmış bir hız kontrolü, hız dalgalanmalarını minimize ederek motorun istenen hızda kararlı çalışmasını mümkün kılar.

Hız kontrolü, endüstriyel sistemlerde temel öneme sahip bir kontrol problemidir ve bu alanda gerçekleştirilen birçok akademik çalışmada, geleneksel PI kontrolörlerin yanı sıra daha gelişmiş kontrol stratejilerinin de başarıyla uygulandığı rapor edilmiştir. Özellikle motor hız kontrolü uygulamalarında, bulanık mantık ve adaptif kontrol yaklaşımları gibi esnek ve adaptif yöntemlerin etkili performans sergilediği kanıtlanmıştır. Bu gelişmiş kontrol yapıları, sistemdeki yapısal belirsizlikler, modelleme hataları ve zamanla değişen parametreler karşısında klasik yöntemlere kıyasla daha yüksek uyum kabiliyeti sunmakta ve dinamik değişimlere daha hızlı tepki verebilmektedir.

Bulanık mantık tabanlı kontrol sistemleri, doğrusal olmayan sistem davranışlarını daha etkin şekilde modelleyebilmekte ve özellikle sistem giriş-çıkış ilişkilerinin kesin matematiksel olarak tanımlanmasının zor olduğu durumlarda avantaj sağlamaktadır. Bu yöntemler, değişken yük koşullarında motorun hızını referans değerde hassas bir biçimde koruyarak, sistem kararlılığı ve doğruluk düzeyini artırmaktadır.

2.5.3. DTC Yöntemi

Doğrudan Moment Kontrolü (Direct Torque Control, DTC), alternatif akım motorlarının torkunu ve stator manyetik akısını doğrudan kontrol eden bir yöntem olarak, 1980'li yılların ortalarında Takahashi ve Noguchi tarafından geliştirilmiştir (Takahashi & Noguchi, 1986). DTC yönteminin temel amacı, motorun tork ve akı büyüklüklerini ayrı ayrı kontrol etmeksizin, doğrudan bu büyüklüklerin istenen değerler etrafında sınırlandırılmasını sağlamaktır. Bu yapı sayesinde kontrol algoritması hem yüksek dinamik başarım hem de yapısal basitleşmiştir

DTC çalışma prensibi Motorun terminal gerilimleri ile stator faz akımları anlık olarak ölçülerek, bu ölçümler ile motorun çalışma koşullarını yansıtan stator akısı ve

elektromanyetik tork büyüklükleri yaklaşık olarak tahmin edilir. Bu tahmin süreci, motorun elektromanyetik yapısını temsil eden diferansiyel denklemlere ve fiziksel modellere dayanır. Kestirim işlemi, aşağıda verilen temel eşitlikler yardımıyla gerçekleştirilir.

$$\psi_s(\mathrm{t}) = \int (V_s - R_s * i_s) dt \tag{2.16}$$

$$T_e = \frac{3}{2} P_p (\psi_s * \ i_s) \tag{2.17}$$

burada ψ_s manyetik akısını, V_s gerilimini, $i_s$stator akımını, R_s direncini T_e tork değerini ve P_p kutup çifti sayısını temsil eder. Tahmin edilen tork ve akı değerleri, referans değerlerle karşılaştırılır ve oluşan hata sinyalleri kullanılarak uygun anahtarlama vektörü seçilir. Bu seçim, önceden tanımlanmış bir anahtarlama tablosu aracılığıyla gerçekleştirilir (Vas, 1998).

DTC yönteminin en önemli avantajlarından biri, yüksek dinamik yanıt kabiliyetidir. Tork ve akı bileşenlerinin ayrı ayrı kontrol edilmesine gerek duyulmadan doğrudan kontrol edilmesi sayesinde, sistem hızlı tepki süresi göstermektedir. Ayrıca, koordinat dönüşümleri, PWM üretimi ya da PI denetleyiciler gibi karmaşık kontrol yapılarının bulunmaması, DTC'nin yapısal olarak oldukça sade olmasını sağlamaktadır. Bu basit mimari, uygulama sürecini kolaylaştırmakta ve işlem yükünü azaltmaktadır. Diğer yandan, rotor akı yönlendirmesine dayalı yöntemlerle kıyaslandığında, DTC motor parametre değişimlerine daha az duyarlıdır ve bu yönüyle parametreye bağımlılığı düşüktür (El Quanjili vd., 2017). Bununla birlikte, DTC yönteminin bazı sınırlamaları da bulunmaktadır. Özellikle düşük hız rejimlerinde, anahtarlama işlemleri esnasında oluşan tork ve akı dalgalanmaları sistem başarımını olumsuz etkileyebilmektedir. Ayrıca, sabit anahtarlama frekansına sahip olmaması nedeniyle inverter devresinde anahtarlama kayıpları artmakta ve bu da verimliliği düşürebilmektedir. Düşük hızlarda sistemin kararlılığı da bir diğer sorundur; çünkü akı tahmini için yapılan entegrasyon işlemi, bu rejimde DC sapma oluşturarak doğru kestirimi zorlaştırmaktadır (Wang vd., 2024).

2.6. FDAM Sistemleri İçin PI, PD ve PID Kontrolcülerin Analizi

Klasik kontrol tekniklerinden olan PI, (proportional derivative) PD ve (proportional derivative integral) PID kontrolcüler, FDAM sistemlerinde hız, akım ve pozisyon kontrolü için sıklıkla tercih edilmektedir. Her bir kontrol yapısı, sistem dinamiklerine

farklı şekillerde etki etmekte; kararlılık, geçici rejim davranışı ve izleme doğruluğu açısından çeşitli avantajlar ve sınırlılıklar sunmaktadır. Bu başlıkta, söz konusu kontrol yöntemlerinin FDAM sistemlerindeki rolünü incelemek üzere olacaktır (Kabir vd., 2019; Al-Bargothi vd., 2019)

2.6.1. FDAM Motorlarda PI, PD ve PID Kontrolcülerine Yönelik Literatür İncelemesi

Astrom'un 2008 yılında yayımladığı klasik çalışmasında, PI kontrolcülerin hız ve akım döngülerinde endüstriyel uygulamalar için yeterli performans sağladığı, özellikle sabit hızlı ve düşük tork salınımı gerektiren uygulamalarda güvenilir sonuçlar verdiği vurgulanmaktadır. Bu bağlamda, FDAM motorların statik hız aralıklarında PI kontrolün tercih edilmesi, düşük hesaplama gereksinimi ve yüksek kararlılık sunması nedeniyle yaygındır (Åström & Hägglund 2008).

Seborg ve arkadaşlarının 2010 tarihli çalışmasında, dijital kontrol sistemlerinin yaygınlaşmasıyla birlikte PD terimin performansa etkisi incelenmiş; türevsel terimin, FDAM motor gibi hızlı dinamik tepkilere sahip sistemlerde ani yük değişimlerine karşı sistemi daha tepkisel hâle getirdiği belirtilmiştir. Ancak aynı çalışmada, PD kontrolcülerin kalıcı hatayı sıfırlayamadığı ve bu sebeple özellikle düşük hız uygulamalarında yeterince tercih edilmediği ifade edilmiştir (Seborg vd., 2010).

Ogata'nın ayrık zamanlı kontrol sistemlerine dair çalışmasında ise PID kontrolcülerin, FDAM motorlarda sadece belirli durumlarda tercih edildiği vurgulanmıştır. Türevsel bileşenin sistem gürültüsüne duyarlı olması nedeniyle, yüksek frekansta çalışan FDAM uygulamalarında PID kontrol yapılarının yazılımsal filtreleme ile desteklenmesi gerektiği ifade edilmiştir. Bu durum, özellikle düşük güçlü mikrodenetleyicilerde sistem kararlılığına olumsuz etki yapabilmektedir (Ogata, 1995).

IEEE'de yayımlanan L. Xie'nin 2016 tarihli çalışmasında, güçlü kontrol stratejileri ile birlikte adaptif PID yapıların FDAM sistemlerine uygulanabilirliği tartışılmıştır. Bu çalışmada, FDAM sürücülerinde geleneksel PID yerine, yük durumunun değişimine göre parametre ayarlaması yapan yöntemlerin daha iyi performans sunduğu belirtilmiştir (Xie, 2016).

Sonuç olarak, literatürde FDAM motorların kontrolü için PI kontrolcülerin hem hesaplama maliyeti hem de kararlılık açısından daha fazla tercih edildiği; PD ve PID kontrolcülerin ise daha çok geçici rejim iyileştirme amacıyla kullanıldığı görülmektedir.

2.6.2. PI (Proportional-Integral) Kontrolcü

PI kontrolcü, oransal (K_p) ve integral (K_i) bileşenlerden oluşur. Bu yapı, kararlı durumda kalıcı hatanın ortadan kaldırılmasını sağlarken, sistemin genel kararlılığını korur. PI kontrolörün genel formu aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$u(t) = \mathrm{K}_p e(t) + \mathrm{K}_i \int_0^t \mathrm{e}(\tau)\mathrm{d}\tau \tag{2.18}$$

burada e(t) = r(t) - y(t), referans ile sistem çıkışı arasındaki hatadır. PI kontrol, integral bileşeni sayesinde kalıcı hatayı sıfırlayabilirken, oransal terim sistemin geçici tepkisine yön verir. FDAM sistemlerinde, özellikle hız ve akım döngülerinde PI kontrol yapısı yaygın olarak tercih edilir.

Mikrodenetleyici Üzerindeki Performansı açısından inceleyecek olursak PI kontrolörlerin hesaplama yükü nispeten düşüktür. Sabit zaman aralığında çalışan dijital sistemlerde integral terim, toplam hatanın zamana göre ayrık integrasyonu ile elde edilir:

$$u(t) = \mathrm{K}_p e(t) + \mathrm{K}_i \int_0^t \mathrm{e}(\tau)\mathrm{d}\tau \tag{2.18}$$

$$u(k) = \mathrm{K}_p e(k) + \mathrm{K}_i \mathrm{T}_s \sum_{i=0}^{k} \mathrm{e[i]} \tag{2.19}$$

buradaki T_s, örnekleme periyodudur. Bu yapı, düşük ve orta seviye mikrodenetleyicilerde bile başarılı bir şekilde uygulanabilir

FDAM motor sürücülerde PI kontrolör, d-q ekseninde elde edilen akım bileşenlerinin sabitlenmesini sağlar. Özellikle düşük hızlarda, moment dalgalanmasını azaltarak daha düzgün hız profili elde edilmesini sağlar (Al-Bargothi vd., 2019; Segovia vd., 2014).

2.6.3. PD (Proportional-Derivative) Kontrolcü

PD kontrolcüler, oransal ve türevsel terimlerden oluşur. Türevsel terim, sistemin değişim hızına tepki vererek ani değişikliklere karşı sistemi sönümlemeye yardımcı olur. Denklemi:

$$u(t) = \mathrm{K}_p e(t) + \mathrm{K}_d * (de(t)/dt) \tag{2.20}$$

Mikrodenetleyici üzerindeki performansı için incelenirse türevsel terim sayısal olarak genellikle aşağıdaki fark yöntemiyle hesaplanır:

$$de(t)/dt) = (e(k) - e(k-1))\ /\mathrm{T}_s \tag{2.21}$$

bu yapı, geri besleme sinyalinde yüksek frekanslı gürültü varsa istenmeyen salınımlara neden olabilir. Bu yüzden PD kontrol, yüksek çözünürlüklü ve filtrelenmiş sinyal girişleri gerektirir. Mikrodenetleyici sistemlerde ek filtreleme devreleri veya yazılımda türev terimi bastıran düşük geçiren filtreler kullanılması zorunludur.

FDAM kontrolü altında çalışan motorlarda PD kontrolcü, geçici rejim performansını iyileştirebilir. Ancak kalıcı hatayı ortadan kaldıramadığı için referans hızın sabitlenmesi uzun sürebilir. Tork talebindeki ani değişimlerde ise PD kontrol yapısı moment salınımını bastırmada avantaj sağlar (Kabir vd., 2019).

2.6.4. PID Kontrolcü

PID kontrolcü, sistemin kararlılığı, doğruluğu ve hızına eş zamanlı olarak müdahale etme kabiliyetine sahiptir. Genel denklemi şu şekildedir:

$$u(t) = \mathrm{K}_p e(t)\ +\ \mathrm{K}_i \int_0^t \mathrm{e}(\tau)\mathrm{d}\tau\ +\ \mathrm{K}_d * de(t)/dt \tag{2.22}$$

PID kontrol, oransal terimle sistemin genel tepki hızını, integral terimle kalıcı hatayı, türevsel terimle ise aşımı ve salınımı kontrol eder.

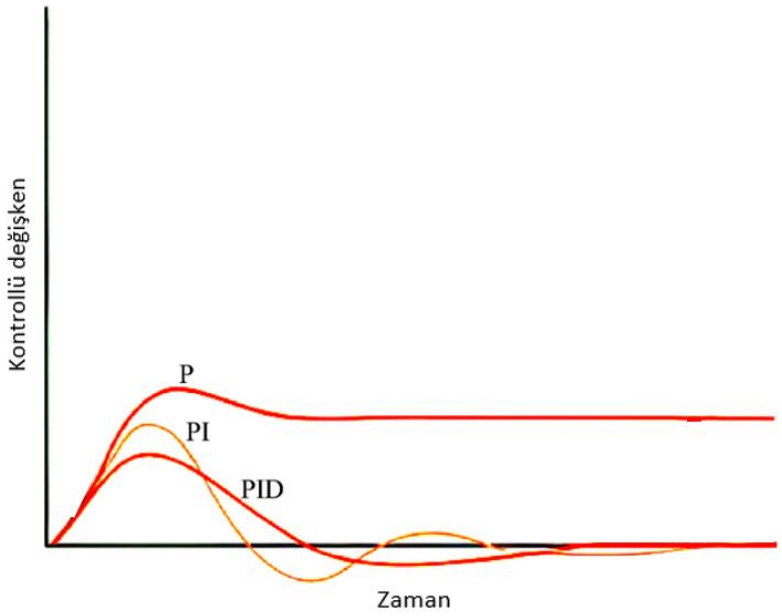
PID kontrolün dijital versiyonu hem bellek hem de işlem yükü açısından en karmaşık yapıdır. Özellikle düşük seviye mikrodenetleyicilerde PID uygulanabilir; fakat türevsel bileşenin getirdiği gürültü hassasiyeti nedeniyle yazılımsal filtreleme şarttır:

$$u(k) = \mathrm{K}_p e(k)\ +\ \mathrm{K}_i \mathrm{T}_s \sum \mathrm{e[i]} +\ (\mathrm{K}_d(e(k) - e(k-1)/\ \mathrm{T}_s\ ) \tag{2.23}$$

PID kontrol algoritmalarının hesaplanmasında sabit noktalı işlemciler yerine kayan noktalı işlemciler tercih edildiğinde doğruluk artmaktadır.

PID kontrol yapısı, FDAM sistemlerinde daha karmaşık kontrol döngülerinde avantaj sağlayabilir. Ancak integral ve türev terimlerin birlikte kullanılması, sistemin aşırı kompanzasyon göstermesine ve osilasyonlara neden olabilir. Bu yüzden FDAM sistemlerinde genellikle sadece PI kontrol tercih edilmektedir (Segovia vd., 2014).

Şekil 2.13. *P, PI ve PID çıkış karşılaştırması (Dashtdar vd. 2022)*



2.6.5. FDAM Motorlarda Referans Hıza Karşı Sistem Tepkisi

FDAM motor sistemleri, referans hız sinyaline verilen tepkiyle değerlendirilir. Bu tepkide kontrolcünün yapısı kritik rol oynar:

PI kontrol: Hızlı referans geçişlerinde kararlı ve aşırı salınımsız yanıt verir. Tork üretimi sabit kalır, kalıcı hata oluşmaz (Al-Bargothi vd., 2019; Segovia vd., 2014).

PD kontrol: Geçici rejimde hızlı cevap verir; ancak kararlı duruma geçişte salınım ve kalıcı hata oluşabilir (Kabir vd., 2019).

PID kontrol: Teorik olarak ideal yapı sunar fakat gerçek sistemlerde PID kontrol sıklıkla salınım ve yüksek işlem yükü oluşturur (Segovia vd., 2014).

FDAM sistemlerinde motorun tork üretimi d-q eksenindeki akım referanslarının izlenmesine bağlıdır. Bu nedenle, yüksek doğrulukta hız kontrolü sağlayan PI veya sadeleştirilmiş PID yapılar tercih edilmektedir.

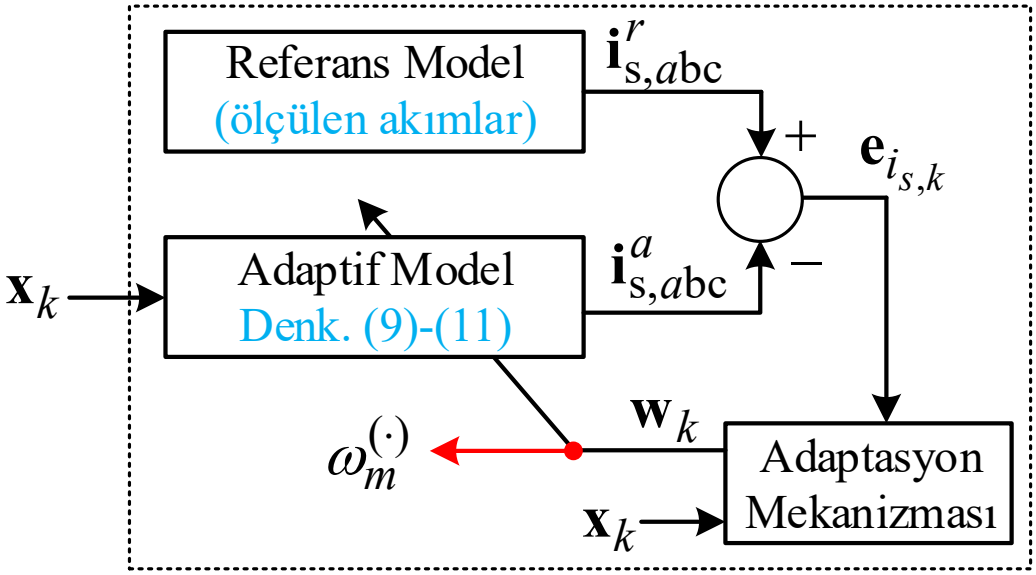
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

ADAPTİF FİLTRE TASARIMLARI

3.1. Adaptif Filtre Tabanlı MRAS Hız Kestiricilerin Tasarımı

Bu bölümde, LMS, LMF ve LMK adaptif filtre tabanlı MRAS kestiricileri tasarımı gerçekleştirilecektir. Bilindiği üzere, stator akımına dayalı MRAS kestirici, doğrudan ölçülen stator akımları, yani referans model çıktıları ile stator akımı modelinden elde edilen kestirilmiş akımlar, yani adaptif model çıktıları arasındaki karşılaştırmaya dayanan bir sistemdir (Tuzcu vd., 2025). Stator akımı tabanlı MRAS kestiricisinin blok şeması Şekil 3.1'de gösterilmiştir. İlgili kestiricinin gerçek-zamanlı olarak bir DSP ortamında çalıştırılabilmesi için adaptif model olarak ifade edilen stator akım denklemleri (2.8)-(2.10)'un sürekli-zamanlıdan ayrık-zamanlı hale getirilmesi gerekir. Bu kapsamda, Denklem (2.8)-(2.10) ilk olarak ileri Euler yaklaşımıyla aşağıdaki gibi ayrıklaştırılır:

Şekil 3.1. *Adaptif filtre algoritması kullanan stator akım tabanlı MRAS kestiricisi*



$$i_{sa,k+1}^{a} = \left(1 - \frac{TR_s}{L_{ls}}\right) i_{sa,k} - \omega_{m,k} \frac{p_p T \varphi_{ra,k}}{L_{ls}} + \frac{TV_{sa}}{L_{ls}} \tag{3.1}$$

$$i_{sb,k+1}^{a} = \left(1 - \frac{TR_s}{L_{ls}}\right) i_{sb,k} - \omega_{m,k} \frac{p_p T \varphi_{rb,k}}{L_{ls}} + \frac{TV_{sb}}{L_{ls}} \tag{3.2}$$

$$i_{sc,k+1}^{a} = \left(1 - \frac{TR_s}{L_{ls}}\right) i_{sc,k} - \omega_{m,k} \frac{p_p T \varphi_{rc,k}}{L_{ls}} + \frac{TV_{sc}}{L_{ls}} \tag{3.3}$$

Ardından, Denklem (3.1)-(3.3), adaptif modelin çıkışı olarak aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\mathbf{i}_{s,k+1}^{a} = \mathbf{x}_k^T \mathbf{w}_k \tag{3.4}$$

burada $\mathbf{x}_k$ ve $\mathbf{w}_k$ sırasıyla giriş matrisini ve adaptif modelin ağırlık vektörünü temsil eder ve bu iki nicelik şu şekilde tanımlanır:

$$\mathbf{x}_k = \begin{bmatrix} i_{sa,k} & i_{sb,k} & i_{sc,k} \\ \dfrac{-p_p T \varphi_{ra,k}}{L_s} & \dfrac{-p_p T \varphi_{rb,k}}{L_s} & \dfrac{-p_p T \varphi_{rc,k}}{L_s} \\ v_{sa,k} & v_{sb,k} & v_{sc,k} \end{bmatrix} \tag{3.5}$$

$$\mathbf{w}_k = \begin{bmatrix} 1 - \dfrac{TR_s}{L_s} \\ \omega_{m,k} \\ \dfrac{T}{L_s} \end{bmatrix} \tag{3.6}$$

böylece, referans ve adaptif model çıkışları arasındaki farkı ölçen hata sinyali aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$\mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}} = \mathbf{i}_{s,k}^{r} - \mathbf{i}_{s,k}^{a} \tag{3.7}$$

Ardından, Denklem 3.7 kullanılarak, bu çalışma kapsamında üç farklı maliyet fonksiyonu sırasıyla LMS, LMF ve LMK algoritmalarını türetmek için aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$J_k^{LMS} = \frac{1}{2} E\{\mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}}^T \mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}}\} \tag{3.8}$$

$$J_k^{LMF} = E\{\mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}}^T \mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}} \mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}}^T \mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}}\} \tag{3.9}$$

$$J_k^{LMK} = 3E^2\left\{\mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}}^T \mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}}\right\} - E\left\{\mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}}^T \mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}} \mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}}^T \mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}}\right\} \tag{3.10}$$

burada $E\{.\}$ ifadesi beklenen değeri temsil etmektedir.

Denklem (3.8), (3.9) ve (3.10), adaptif modelin ağırlık vektörü $\mathbf{w}_k$'ya göre minimize edilirse, sırasıyla LMS, LMF ve LMK (Widrow & Stearns, 1985; Tanrikulu & Constantinides, 1994; Walach & Widrow, 1984) algoritmalarına ait güncelleme kuralları aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\mathbf{w}_{k+1} = \mathbf{w}_k + \mu_{LMS}\mathbf{x}_k \mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}} \tag{3.11}$$

$$\mathbf{w}_{k+1} = \mathbf{w}_k + \mu_{LMF}\mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}}^T \mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}} \mathbf{x}_k \mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}} \tag{3.12}$$

$$\mathbf{w}_{k+1} = \mathbf{w}_k + \mu_{LMK}(3\sigma_{e_k}^2 - \mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}}^T \mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}})\mathbf{x}_k \mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}} \tag{3.13}$$

burada μ_{LMS}, μ_{LMF} ve μ_{LMK} ifadeleri sırasıyla LMS, LMF ve LMK algoritmalarının adım büyüklüklerini temsil ederken, $\sigma_{e_k}^2 = E\left\{\mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}}^T \mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}}\right\}$ ifadesi hata sinyalinin varyansını temsil eder ve aşağıdaki özyinelemeli denklem vasıtasıyla hesaplanır (Tanrikulu & Constantinides, 1994):

$$\sigma_{e_k}^2 = \lambda\sigma_{e_{k-1}}^2 + \boldsymbol{e}_{\boldsymbol{i}_{s,k}}^T \boldsymbol{e}_{\boldsymbol{i}_{s,k}} \tag{3.14}$$

burada $\lambda \in [0,1)$ unutma faktörüdür.

Ayrıca, LMS, LMF ve LMK algoritmalarının kararlı bir şekilde çalıştırılabilmesi için adım büyüklüğü parametreleri μ_{LMS}, μ_{LMF} ve μ_{LMK}'nın sırasıyla aşağıda verilen sınırlar içerisinde seçilmesi gerekir (Widrow & Stearns, 1985; Tanrikulu & Constantinides, 1994; Walach & Widrow, 1984):

$$0 < \mu_{LMS} < \frac{2}{\lambda_{\max}(\mathbf{R})} \tag{3.15}$$

$$0 < \mu_{LMF} < \frac{2}{6\sigma^2\lambda_{\max}(\mathbf{R})} \tag{3.16}$$

$$0 < \mu_{LMK} < \frac{1}{4.5\sigma^2 \lambda_{\max}(\mathbf{R}) \left(\frac{\lambda^3 + \lambda^2 - 4\lambda + 8}{-\lambda^3 - 2\lambda^2 + \lambda + 2} \right)} \tag{3.17}$$

burada $\lambda_{\max}(\cdot)$ ve σ^2 ifadeleri sırasıyla otokorelasyon matrisi $\mathbf{R} = \mathrm{E}\{\mathbf{x}_k \mathbf{x}_k^{\mathrm{T}}\}$'nin maksimum özdeğerini ve ölçüm gürültüsünün varyansını temsil etmektedir.

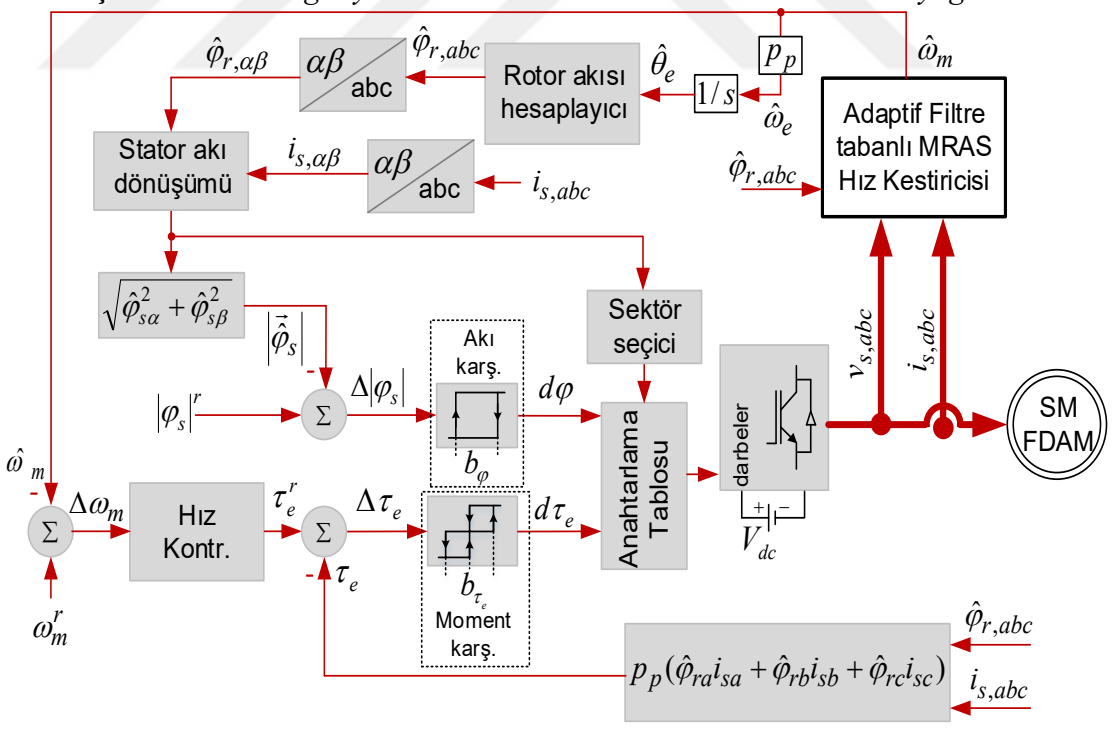
DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

BENZETİM

4.1. Benzetim Sonuçları

Şekil 3.1'de gösterilen adaptif filtre tabanlı MRAS hız kestiricilerinin kestirim başarımı ile bu kestirim algoritmalarını kullanan ve blok şeması Şekil 4.1'de verilen hız-algılayıcısız SMFDAM sürücüsünün kontrol başarımı MATLAB/Simulink'te oluşturulan benzetim çalışmaları ile test edilmiş ve doğrulanmıştır. Benzetim çalışmalarında kullanılan SMFDAM'a ait parametreler Tablo 4.1'de verilmiştir

Şekil 4.1. *Hız-algılayıcısız DTC tabanlı FDAM sürücüsü blok diyagram*



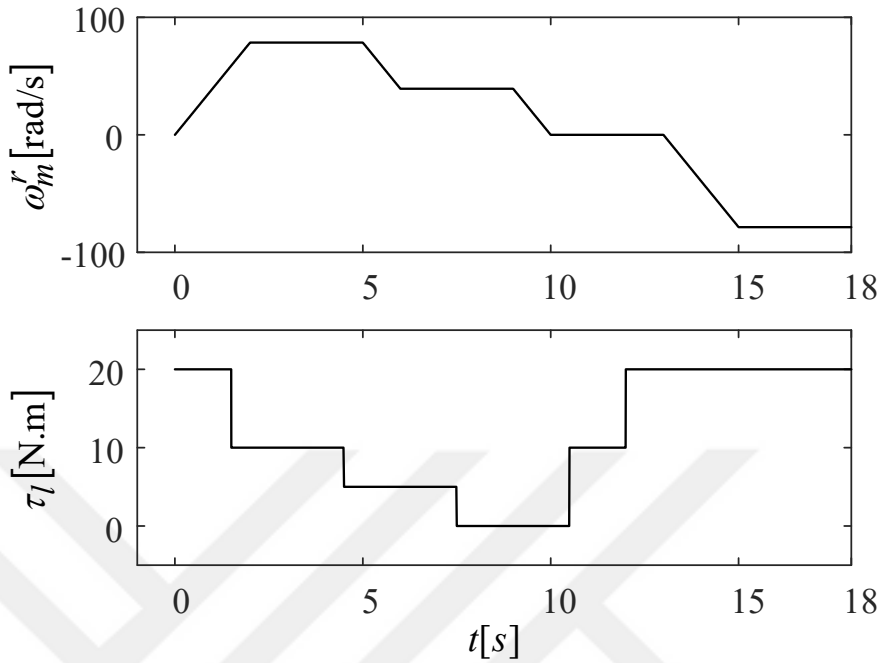
Şekil 4.1'de Verilen hız-algılayıcısız DTC sisteminde referans değerini üretmek için geleneksel pi tipi hız kontrolörü, sürücü sisteminin akı ve moment tepkisini belirlemek için ise iki ve üç seviyeli histerezis karşılaştırıcılar kullanılmıştır. Üç fazlı rotor akıları ve stator akımları clarke dönüşümü ile stator duran eksenine dönüştürülür. Akı sektörü, rotor akısı ve stator akımının bileşenleri kullanılarak 3 boyutlu arama tablosuyla belirlenir. Bu prosedür sırasında stator akısının bileşenleri ve stator kaçak endüktans, rotor akısı ve stator akımının akısının bileşenleri kullanılarak (İnan vd., 2023) çalışmasındaki gibi hesaplanır

DTC tabanlı SMFDAM sürücüsünün kontrol başarımı ve önerilen hız kestiricilerinin kestirim başarımı Şekil 4.2'te verilen hız referansı ve yük momenti değişimlerini içeren senaryo altında gerçekleştirilen benzetim çalışmalarıyla test edilmiştir. Şekil 4.2 ile verilen senaryoda SMFDAM'a ait hız referansı ileri ve geri yönde sıfır hız ile anma hızını içeren geniş bir aralıkta uygulanmıştır. Böylelikle önerilen sürücü sisteminin hem sürekli-hal hem de geçici-hallerdeki hız ve moment başarımı gözlemlenebilmiştir. Motora uygulanan yük momenti ise SMFDAM'ın farklı hız değerlerinde çalışması esnasında 0 N.m ile 20 N.m arasında basamak şeklinde değiştirilmiştir. Böylelikle de SMFDAM sürücüsünün farklı yük koşullarında indüklenen moment kontörlündeki başarımı ve kararlılığı test edilmiştir.

Tablo 4.1. *Motor verileri*

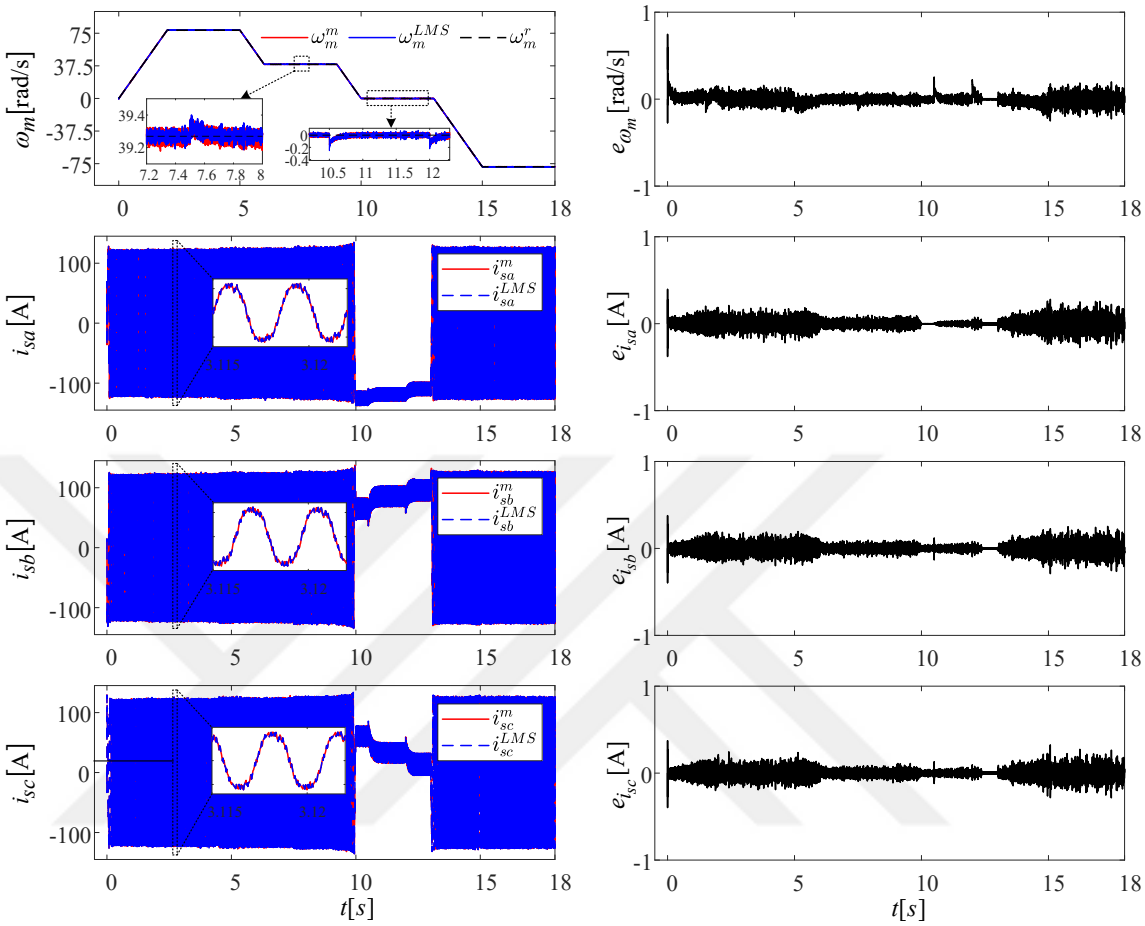
Parametre Adı	**Birim**	**Değer**
Doğru Akım Güç Kaynağı	V	72
Nominal Hızı	rpm	750
Nominal Torku	$N.m$	21
Nominal Gücü	kW	1.5
Eylemsizlik Momenti	$kg.m^2$	0.0073
Faz Ters-EMK Katsayısı	$V_{peak}/krpm$	96
Stator Direnci	Ω	0.033
Stator Direnci	mH	0.16
Mıknatıslama Endüktansı	mH	0.0255
Kutup Çifti Sayısı		23

Şekil 4.2. *Sürücü sistemine verilen hız referansı ve motora uygulanan yük momenti değişimleri*

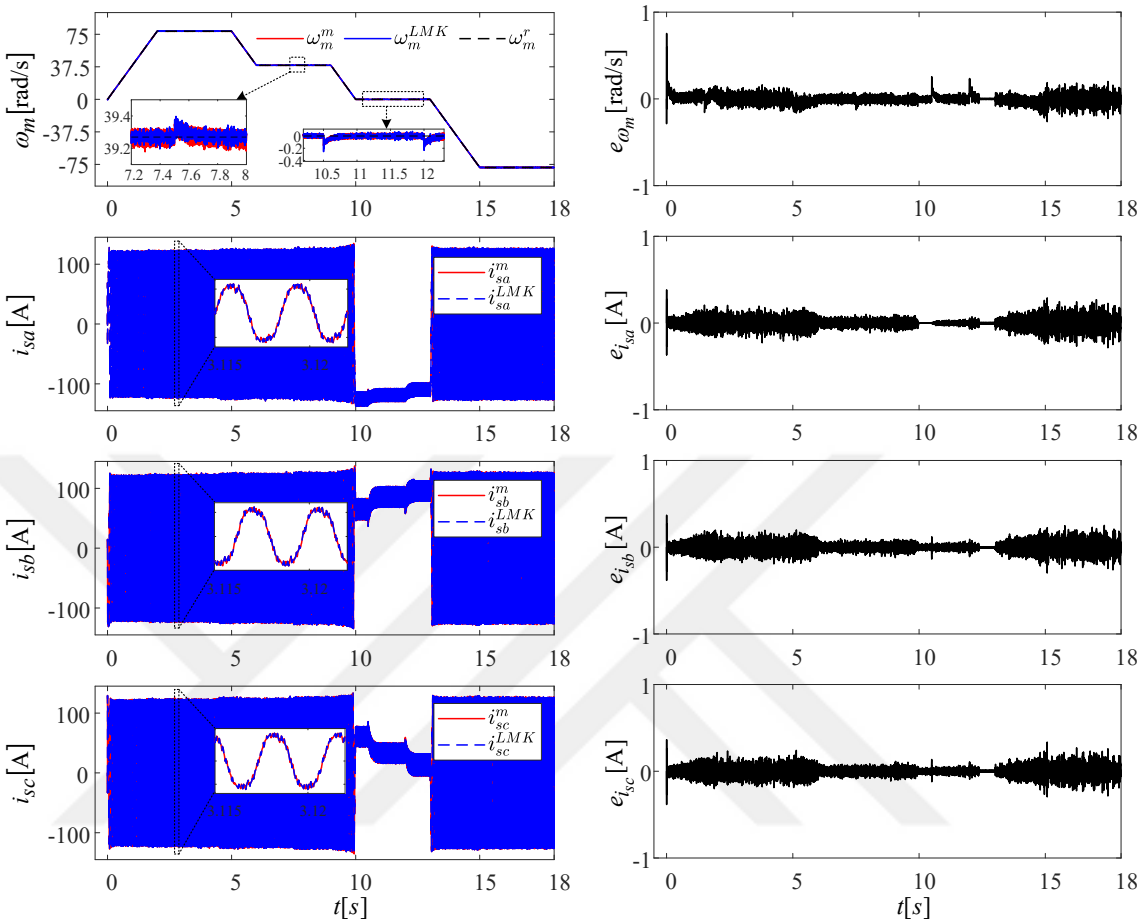


Şekil 4.2'te sunulan hız referansı ve yük momenti değişimleri ile oluşturulan senaryo ile SMFDAM'nin hız kestirimi için önerilen LMS, LMK ve LMF tabanlı MRAS kestiricilerinin de kestirim başarımları DTC'li SMFDAM sürücüsü üzerinde test edilmiş ve hız kestirimindeki yüksek başarımın DTC üzerindeki etkisi de gözlemlenebilmiştir. SMFDAM'ın hız-algılayıcısız DTC'si için önerilen sürücü sistemine ait benzetim sonuçları Şekil 4.3-4.5'te sunulmuştur. Kontrol ve kestirim sonuçları ile birlikte kestirim hataları da belirtilen şekillerde sunulmuştur. Ayrıca önerilen kestiricilere ait ortalama kare hata (Mean square error, MSE) değerleri Tablo 4.2'de verilmiştir. Tablo 4.2 kestirilen hız hataları ile birlikte stator akımlarına ait hata değerlerini içermektedir.

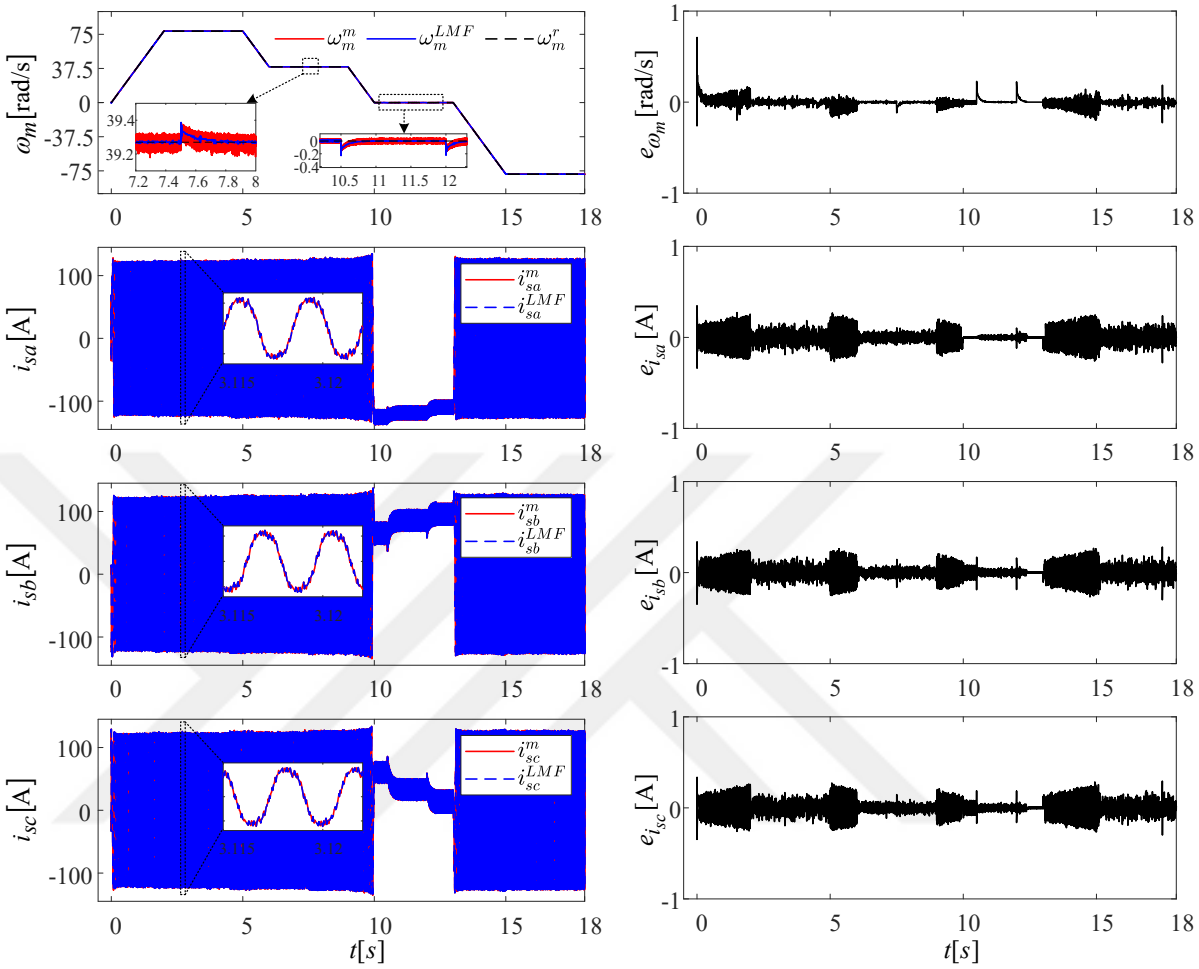
Şekil 4.3. *LMS tabanlı MRAS hız kestiricisini kullanan SMFDAM sürücüsüne ait benzetim sonuçlar*



Şekil 4.4. *LMK tabanlı MRAS hız kestiricisini kullanan SMFDAM sürücüsüne ait benzetim sonuçları*



Şekil 4.5. *LMF tabanlı MRAS hız kestiricisini kullanan SMFDAM sürücüsüne ait benzetim sonuçları*



Tablo 4.2. *LMS, LMK ve LMF algoritmalarının hız ve faz akımları kestirimleri sonucu hata oranı tablosu*

Algoritma	MSE_{ω_m}	$MSE_{i_{sa}}$	$MSE_{i_{sb}}$	$MSE_{i_{sc}}$
LMS	0.0017	0.0020	0.0021	0.0021
LMK	0.0017	0.0021	0.0021	0.0021
LMF	0.0016	0.0047	0.0048	0.0048

SMFDAM'ın üç farklı hız kestiricisi ile oluşturulan hız-algılayıcısız DTC'sinin kontrol başarımının önerilen hız kestiricilerinin kestirim başarımından doğrudan etkileneceği muhakkaktır. Şekil 4.3-4.5 ve Tablo 4.2 incelendiğinde aşağıdaki çıkarımlar yapılabilir;

- Hem ileri yönde hem de hızın terslendirildiği bölgelerde yüksek hız ve düşük hızda çalışmayı kapsayan geniş bir hız aralığında önerilen kestirici yapıları yüksek başarımla hız kestirimini gerçekleştirmiştir.

- Kestirilen hız bilgisinin ve 3-faz stator akım bilgilerinin kullanıldığı hız-algılayıcısız DTC tabanlı SMFDAM sürücüsü için yüksek kontrol başarımına sahiptir.
- Önerilen kestiricilere ait MSE değerleri kestiricilerin birbirlerine alternatif olduğunu göstermektedir.

BEŞİNCİ BÖLÜM

SONUÇ-DEĞERLENDİRME

5.1. Sonuç

Bu çalışmada, hız algılayıcısız senkron makine tabanlı fırçasız doğru akım motoru (SMFDAM) sürücüsünde ihtiyaç duyulan rotor hız bilgisinin kestirimi, adaptif MRAS yapıları temel alınarak gerçekleştirilmiştir. Önerilen sistemde, üç farklı adaptif algoritma olan LMS, LMK ve LMF tabanlı MRAS kestirici yapıları kullanılmıştır. Bu yapılar, rotor konum bilgisi sağlayan fiziksel bir sensöre olan bağımlılığı ortadan kaldırarak, sistemin toplam maliyetini düşürmekte ve güvenilirliğini artırmaktadır.

Önerilen MRAS yapılarının temel prensibi, referans model olarak ölçülen stator akımlarını, adaptif model olarak ise tahmin edilen stator akımlarını kullanmak ve bu iki model arasındaki hata sinyalinden faydalanarak rotor hız bilgisini elde etmektir. Diğer bir ifadeyle, kestirim işlemi, referans modelden elde edilen stator akımı ile adaptif modelin çıktısı olan stator akımı arasındaki farkın minimize edilmesine dayanır. Bu fark, adaptif mekanizma aracılığıyla işlenerek rotor hızını içeren ağırlık vektörlerinin güncellenmesinde kullanılır.

LMS, LMK ve LMF algoritmalarının her biri, kendine özgü hata azaltma stratejileri ile çalışmaktadır. LMS algoritması, hata sinyalinin karelerinin ortalamasını minimize ederek ağırlık vektörlerini güncellerken; LMK algoritması, kararlılığı artırmak amacıyla daha gelişmiş bir filtreleme tekniği uygular. LMF algoritması ise hata sinyalinin ortalama enerjisini azaltmayı hedefler. Tüm bu algoritmalar, rotor hızını içeren ağırlık vektörlerini her bir örnekleme anında gerçek zamanlı olarak adaptif şekilde güncellemektedir. Bu sayede, klasik MRAS yapılarında yaygın olarak kullanılan ve sistem parametrelerine hassasiyet gösteren sabit kazançlı PI denetleyici kullanımına gerek kalmamaktadır. Böylece sistem, parametre değişimlerine ve dışsal bozucu etkilere karşı daha esnek ve kararlı bir yapı sergilemektedir.

Gerçekleştirilen benzetim çalışmaları kapsamında önerilen üç farklı MRAS yapısı, farklı çalışma koşulları altında SMFDAM sürücüsü ile entegre edilerek test edilmiştir. Özellikle ani yük değişimleri, düşük hız rejimleri ve referans hızdaki ani artış-azalış gibi zorlayıcı senaryolar dikkate alınarak sistemin dinamik başarımı değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, önerilen kestirici yapıların her birinin yüksek doğrulukla rotor hızını tahmin edebildiğini ve sistemin genel kararlılığı üzerinde olumlu etkiler yarattığını ortaya koymuştur. Böylelikle, önerilen MRAS tabanlı kestirici yapılar, sensörsüz kontrol sistemlerinin geliştirilmesinde etkili ve güvenilir bir alternatif olarak değerlendirilmektedir.

KAYNAKÇA

Abo-Khalil, A. G., & Eltamaly, A. M. (2020). Sensorless control for PMSM using model reference adaptive system. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, e12733.

Åström, K. J., & Murray, R. M. (2021). *Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers.* Princeton University Press.

Bosso, A., Tilli, A. & Conficoni, C. (2020). A robust sensorless controller-observer strategy for PMSMs with unknown resistance and mechanical model. *IFAC-PapersOnLine, 53(2), 1536-1542.*

Badini, S. S. & Verma, V. (2020). MRAS-based speed and parameter estimation for a vector-controlled PMSM drive. *Electrica, 20*(1), 28–40.

Böse, B. K. (2006). *Power electronics and motor drives: Advances and trends.* Academic Press.

Chiasson, J. (2023). *Modeling and high-performance control of electric machines.* Wiley-IEEE Press.

Christen, D., & Biela, J. (2018). Analytical switching loss modeling for a half-bridge configuration based on datasheet parameters. *IEEE Transactions on Power Electronics,* 33(6), 5262–5273.

Cirrincione, M., & Pucci, M. (2005). An MRAS-based sensorless high-performance induction motor drive with a predictive adaptive model. *IEEE Transactions on Industrial Electronics, 52*(2), 532–551.

Dashtdar, M., Flah, A., Hosseibinoghadam, S. M. S., & El-Fergany, A. (2022). Frequency control of the islanded microgrid including energy storage using soft computing. *Scientific Reports,* 12, 20409.

De Gennaro, M., Paffumi, E., Martini, G., & Giallonardo, L. (2020). Analysis and assessment of the EU legislation on Light Electric Vehicles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment,* 78, 102188.

Demir, R. (2023). Speed-sensorless Predictive Current Controlled PMSM Drive With Adaptive Filtering-based MRAS Speed Estimators. *International Journal of Control, Automation and Systems,* 21(8), 2577–2586.

Derkacz, P. B., Musznicki, P., & Chrzan, P. J. (2020). EMI attenuation in a DC–DC buck converter using GaN HEMT. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics,* 9(4), 4146–4152.

Devendra, P., Vinodkumar, K., Alicemary, K., & Sai Babu, Ch. (2014). Speed control of four-switch BLDC motor drive. *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences,* 19(1), 1–6.

El Ouanjli, N., Derouich, A., El Ghzizal, A., Chebabhi, A., & Taoussi, M. (2017). A comparative study between FOC and DTC controls of the doubly fed induction motor (DFIM). *Proceedings of the IEEE International Conference on Electrical and Information Technologies (ICEIT)*, 1–6. IEEE

European Commission. (2013). *Regulation (EU) No 168/2013 of the European Parliament and of the Council.* https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32013R0168

Ferloni, A. (2023). *The role of cities in the transition to the Electric Vehicle: a coevolutionary approach.* [Doktora tezi, University of Lausanne].

Gamazo-Real, J.-C., Martínez-Martínez, V., & Gomez-Gil, J. (2022). ANN-based position and speed sensorless estimation for BLDC motors. *Measurement,* 188, 110602.

Gamazo-Real, J. C., Vázquez-Sánchez, E., & Gómez-Gil, J. (2010). Position and Speed Control of Brushless DC Motors Using Sensorless Techniques and Application Trends. Sensors, 10(7), 6901-6947.

Govindharaj, V., Vázquez-Sánchez, E., & Gómez-Gil, J. (2024). Integration of ANFIS with MRAS for sensorless vector-controlled induction motor drives. *Sensors*.

Gujjar, M. N., & Kumar, P. (2017). Comparative analysis of field-oriented control of BLDC motor using SPWM and SVPWM techniques. In *2017 2nd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT)* (ss. 924-929). IEEE.

Halvaei Niasar, H. (2016). Full-order sliding mode observer for sensorless control of non-sinusoidal BLDC motors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics,* 63(9), 5556–5564.

Hassan, M. A., Adel, M. M., Farhan, A., & Saleh, A. A. (2024). Finite speed-set MRAS based on current predictive control for sensorless PMSG in wind turbines. *Electronics*, 13(13), 2444.

Hendershot, J. R., & Miller, T. J. E. (2010). Design of Brushless Permanent-Magnet Motors. *Magna Physics Publishing and Motor Design Books* LLC.

Holterman, J., & de Vries, T. J. A. (2001, June). Active and passive damping based on piezoelectric elements: controllability issues. *In Proceedings of 3rd Workshop on European Scientific and Industrial Collaboration (WESIC 2001)* (ss. 179–188). University of Twente.

Holtz, J. (2002). Sensorless control of induction motor drives. *Proceedings of the IEEE,* 90(8), 1359–1394.

Hrček, S., Homišin, J., & Madaj, R. (2023). Algorithm to calculate frictional power loss between bodies during rotation under contact stress. In *Proceedings of the 17th International Conference on Machine Design (203–214).* Atlantis Press.

Hussain, T. (2015). Analysis of Brushless DC Motor with Trapezoidal Back EMF with Matlab. *Tikrit Journal of Engineering Sciences,* 22(1), 45–51.

International Energy Agency. (2023). Global EV outlook 2023: Catching up with climate ambitions. *International Energy Agency.*

Inan, R., Aksoy, B., & Salman, O. K. M. (2023). Estimation performance of the novel hybrid estimator based on machine learning and extended Kalman filter proposed for speed-sensorless direct torque control of brushless direct current motor. *Engineering Applications of Artificial Intelligence,* 126, 107083.

Inan, R. (2024). An improved model predictive current control of BLDC motor. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 53(2), 1135–1150.

Kaf, A. A., Cheng, X., Zhang, C., Almadwami, A., Abdullah, A., & Almadwami, H. (2024). Sensorless direct torque control in brushless DC motor using sliding mode

observer. In *Proceedings of the 2024 4th International Conference on Emerging Smart Technologies and Applications (eSmarTA),* 1–8. IEEE

Kim, J.-S., & Sul, S.-K. (1995, Ekim). High performance PMSM drives without rotational position sensors using reduced order observer. In *Conference Record of the 1995 IEEE Industry Applications Conference: Thirtieth IAS Annual Meeting (IAS '95)*, Orlando, FL (*Cilt* 1, *ss.* 75–82). IEEE.

Kim, T., Park, B.-G., Lee, D.-M., Ryu, J.-S., & Hyun, D.-S. (2008). A new approach to sensorless control method for brushless DC motors. *International Journal of Control, Automation and Systems,* 6(4), 477–487.

Koteich, M., Maloum, A., Duc, G., & Sandou, G. (2015). Permanent magnet synchronous drives observability analysis for motion-sensorless control. In *2015 IEEE symposium on sensorless control for electrical drives (SLED)* (ss. 1-8). IEEE.

Kovanda, Jan, & Kobrle, P. (2012). Selected Problems of Electric Vehicle Dynamics. *Transactions on Transport Sciences*, 5.

Krause, P., Wasynczuk, O., Sudhoff, S., & Pekarek, S. (2013). *Analysis of electric machinery and drive systems (3rd ed.).* Wiley-IEEE Press.

Krishnan, R. (2010). *Permanent magnet synchronous and brushless DC motor drives.* CRC Press.

Krishnan, R. (2017). *Switched reluctance motor drives: Modeling, simulation, analysis, design, and applications*. CRC Press.

Mouliswararao, R., Bhaskararao, K., & Prasad, Ch. (2019). Mathematical modeling of brushless DC motor and its speed control using PI controller. *International journal of engineering research anh technology (IJERT),* 8(5), 882–886.

Nadolski, Roman, Ludwinek, Krzysztof, Staszak, Jan, & Jaśkiewicz, Marek. (2012). Utilization of BLDC motor in electrical vehicles. *Przeglad Elektrotechniczny,* 88(6), 182-185.

Naeini, V., & Sadeghi, N. (2022). Optimum design of the outer rotor brushless DC permanent magnet motor with minimum torque ripples. *Journal of Operation and Automation in Power Engineering (JOAPE),* 10(4), 1–10.

NASA Glenn Research Center. (2025, 10 Ağustos) *Drag equation*. NASA https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/drag-equation/

Niewiara, Ł., Skiwski, M., Tarczewski, T., & Grzesiak, L. M. (2015). Computer aided design of snubber circuit for DC/DC converter with SiC power MOSFET devices. *Microelectronics Reliability, 55*(9–10), 1343–1349.

Obi, P. I., Diyoke, G. C., & Onwuka, I. K. (2022). Determining efficiency of brushless permanent magnet DC motor using magnetic circuit simulation. *NIPES Journal of Science and Technology Research,* 4(1), 200-211.

Parastvand, H., Khosrowjerdi, M. J., & M'Sirdi, N. K. (2015). Position control of motor drive systems: A data driven approach. *Renewable Energy and Sustainable Development,* 1(1), 44–53.

Pillay, P., & Krishnan, R. (1989). Modeling, simulation, and analysis of permanent-magnet motor drives. Part 2: The brushless DC motor drive. *IEEE Transactions on Industry Applications,* 25(2), 274–279.

Plotnikov, S. M. (2021). Determination of eddy-current and hysteresis losses in the magnetic circuits of electrical machines. *Measurement Techniques,* 63(11), 904–909.

Ran, Y., Qiao, M., Sun, L., & Xia, Y. (2023). Review of position sensorless control technology for permanent magnet synchronous motors. *Energies, 18*(9), 2302.

Rashid, M. H. (2014). *Power Electronics: Circuits, Devices & Applications (4th ed.).* Pearson Education.

Rekioua, T., Meibody-Tabar, F., & Le Doeuff, R. (1990). A new approach for the field-oriented control of brushless, synchronous, permanent magnet machines. *In 1990 Fourth International Conference on Power Electronics and Variable-Speed Drives (Conf. Publ. No. 324) (ss. 46-50). IET.*

Ren, K., & Chen, H. (2023). Design and analysis of a permanent magnet brushless DC motor in an automotive cooling system. *World Electric Vehicle Journal,* 14(8), 228.

Romero Segovia, V., Hägglund, T., & Åström, K. J. (2014). Measurement noise filters for common PID tuning rules. *Control Engineering Practice,* 32, 43–63.

Saha, B., & Singh, B. (2025). Torque Ripple Mitigation in Sensorless PMBLDC Motor Drive With Adaptive Observer for LEV. *IEEE Transaction on Power Electronics,* 40(1).

Tabbache, B., Kheloui, A., & Benbouzid, M. E. H. (2010, September). Design and control of the induction motor propulsion of an electric vehicle. In *2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)* (ss. 1–6). *IEEE*.

Takahashi, I., & Noguchi, T. (1986). A new quick-response and high-efficiency control strategy of an induction motor. *IEEE Transactions on Industry Applications,* 22(5), 820–827.

Tanrikulu, O., & Constantinides, A. G. (1994). Least-mean kurtosis: A novel higher-order statistics based adaptive filtering algorithm. *Electronics Letters,* 30(3), 189–190.

Tian, L., Zhao, J., & Sun, J. (2016). Sensorless control of interior permanent magnet synchronous motor in low-speed region using novel adaptive filter. *Energies,* 9(12), 1084.

United Nations Economic Commission for Europe. (2020). Vehicle regulations and classification. *United Nations Economic Commission for Europe.*

Vas, P. (1998). *Sensorless vector and direct torque control* (Monographs in Electrical and Electronic Engineering, no. 42). Oxford University Press.

Yang, Y., Sun, X., Feng, F., & Cai, C. (2024). Speed sensorless control of IPMSM with model predictive current control plus finite position set MRAS observer. *IEEE Transactions on Transportation Electrification.*

Yıldız, R., Demir, R., Zerdali, E., & Barut, M. (2023). Least mean Kurtosis algorithm-based MRAS estimator for speed-sensorless model predictive control of induction motor. *V. International Turkic World Congress on Science and Engineering,* 80–92.

Zerdali, E., & Mengüç, E. C. (2019). Novel complex-valued stator current-based mras estimators with different adaptation mechanisms. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,* 68(10), 3793–3795.

Zerdali, E., & Mengüç, E. C. (2022). Metaheuristic optimization of predictive torque control for induction motor control. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi,* 11(1), 55–61.

Zhang, M., Zhuang, K., Zhao, T., Chen, X., Xue, J., Qiao, Z., Cui, S., & Gao, Y. (2022). Bus voltage control of photovoltaic grid connected ınverter based on adaptive linear active disturbance rejection. *Energies. 15*(15), 5556.

Vukosavic, S. (2007). *Digital control of electrical drives (1. baskı).* Springer.

Walach, E., & Widrow, B. (1984). The least mean fourth (LMF) adaptive algorithm and its family. *IEEE Transactions on Information Theory,* 30(2), 275–283.

Wang, B., Li, Y., Li, Z., & Zhu, J. (2024). Research on sensorless control of PMSM based on novel double-sliding mode MRAS. *IEICE Electronics Express,* 21(15), 20230483.

Widrow, B., & Hoff, M. E. (1960). Adaptive switching circuits. I*RE WESCON Convention Record,* 96–104.

Widrow, B., & Stearns, S. D. (1985). *Adaptive signal processing*. Prentice-Hall.

TEZ İNTİHAL RAPORU

Hafif Elektrikli Araç Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Mikrodenetleyici Tabanlı Algoritmalar İle Kontrolü

ORİJİNALLİK RAPORU

%7	%6	%3	%3
BENZERLİK ENDEKSİ	İNTERNET KAYNAKLARI	YAYINLAR	ÖĞRENCİ ÖDEVLERİ

BİRİNCİL KAYNAKLAR

1	Submitted to The Scientific & Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) Öğrenci Ödevi	%2
2	dergipark.org.tr İnternet Kaynağı	%2
3	abis-files.kayseri.edu.tr İnternet Kaynağı	%1
4	enstitu.kayseri.edu.tr İnternet Kaynağı	<%1
5	Submitted to Erciyes Ãniversitesi Öğrenci Ödevi	<%1
6	Elektrische Antriebe - Regelung von Antriebssystemen, 2015. Yayın	<%1
7	acikerisim.pau.edu.tr:8080 İnternet Kaynağı	<%1
8	acikerisim.karatay.edu.tr:8080 İnternet Kaynağı	<%1

9	hdl.handle.net İnternet Kaynağı	<%1
10	acikerisim.akdeniz.edu.tr İnternet Kaynağı	<%1
11	link.springer.com İnternet Kaynağı	<%1
12	schematicsforfree.com İnternet Kaynağı	<%1
13	Bozkurt, Armagan. "Elektrikli AraClar iCin dis Rotorlu Sabit Miknatisli Senkron Reluktans Motor (SMSynRM) Tasarimi, Analizi ve Uygulamasi", Marmara Universitesi (Turkey), 2022 Yayın	<%1
14	Erdal, Hasan. "Bir Iklimlendirme Odasinin Bulanik Mantik Yontemi Ile Kontrolu.", Marmara Universitesi (Turkey), 2021 Yayın	<%1
15	Mohamed Abbas Hamdi, Fadhel A. Jumaa. "Previous study of brushless permanent-magnet DC motors", AIP Publishing, 2024 Yayın	<%1
16	acikbilim.yok.gov.tr İnternet Kaynağı	<%1
17	acikerisim.btu.edu.tr İnternet Kaynağı	<%1

18	acikerisim.firat.edu.tr İnternet Kaynağı	<%1
19	acikerisim.nigde.edu.tr İnternet Kaynağı	<%1
20	acikerisim.nigde.edu.tr:8080 İnternet Kaynağı	<%1
21	avesis.kayseri.edu.tr İnternet Kaynağı	<%1
22	nuir.lib.nu.ac.th İnternet Kaynağı	<%1
23	www.jove.com İnternet Kaynağı	<%1
24	www.mdpi.com İnternet Kaynağı	<%1
25	www.researchgate.net İnternet Kaynağı	<%1
26	www.slideshare.net İnternet Kaynağı	<%1
27	www.tu-plovdiv.bg İnternet Kaynağı	<%1
28	Aytekin, Ayse. "Mevcut Bir binanin Leed sertifikasi acisindan Incelenmesi: Kredi olusturabilecek firsat Ve onerilerin	<%1

sunulmasi", Marmara Universitesi (Turkey), 2020
Yayın

29 Ilten, Erdem. "Asenkron motor Icin adaptif kesirli Kayan kipli gözlemci tasarimi.", Balikesir University (Turkey), 2024 <%1
Yayın

Alıntıları çıkart Kapat
Eşleşmeleri çıkar Kapat
Bibliyografyayı Çıkart üzerinde

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı	**Canberk TUZCU**

EĞİTİM BİLGİLERİ

Derece	Kurum	Mezuniyet Yılı
Lise	**Teğmen Ali Rıza Akıncı Anadolu Lisesi-Sayısal**	**2016**
Lisans	**Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği**	**2021**
Yüksek Lisans	**Kayseri Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı**	**2025**

İŞ DENEYİMLERİ

Derece	Kurum	Görev Süresi
Gömülü Sistem Mühendisi	**Aspilsan Enerji A.Ş**	**2021-2023**
Gömülü Sistem Mühendisi	**Karluna Mühendislik**	**2023-2024**
Gömülü Yazılım Mühendisi	**Vestel Mobilite**	**2024-Halen**

YAYINLAR

Tuzcu, C., Mengüç, E. C., Demir, R., & İnan, R. (2025). Fırçasız doğru akım motorların adaptif filtre tabanlı MRAS ile hız algılayıcısız doğrudan moment kontrolü. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, *14(2), 680-687.*

CANBERK TUZCU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

2025

Uygulama ve Proje Odaklı, İş Dünyası ile Bütünleşen Üniversite