KAYSERİ ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

HAFİF ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORLARININ KONTROLÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MEHMET ÜNAL

DANIŞMAN
DOÇ. DR. RIDVAN DEMİR



2025

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

HAFİF ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORLARININ KONTROLÜ

(Yüksek Lisans Tezi)

Hazırlayan
Mehmet ÜNAL

Danışman
Doç. Dr. Rıdvan DEMİR

Jüri Üyeleri
Prof. Dr. Engin Cemal MENGÜÇ
Doç. Dr. Rıdvan DEMİR
Dr. Öğr. Üyesi Salim ÇINAR

Ağustos 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.

Mehmet ÜNAL

T.C.
Kayseri Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürlüğü

Anabilim Dalı : Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Program Adı : Yüksek Lisans
Tez Başlığı : Hafif Elektrikli Araçlarda Kullanılan Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Kontrolü

Yukarıda bilgileri verilen tez çalışmasının a) Giriş, b) Ana bölümler ve c) Sonuç kısımlarından oluşan (Kapak, Önsöz, Özet, İçindekiler ve Kaynakça hariç) toplam 51 sayfalık kısmına ilişkin 30/07/2025 tarihinde ***Turnitin*** intihal programından aşağıda belirtilen filtreleme uygulanarak alınmış olan özgünlük raporuna göre tezin benzerlik oranı**: % 9'** dur.

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. 30/07/2025

Danışman
Doç. Dr. Rıdvan DEMİR

Öğrenci
Mehmet ÜNAL

KILAVUZA UYGUNLUK

“Hafif Elektrikli Araçlarda Kullanılan Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Kontrolü” başlıklı Yüksek Lisans tezi, Kayseri Üniversitesi Lisansüstü Tez Yazım Kılavuzuna uygun olarak hazırlanmıştır.

Tezi Hazırlayan	**Tez Danışmanı**
Mehmet ÜNAL	Doç. Dr. Rıdvan DEMİR

Elektrik-Elektronik Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. Engin Cemal MENGÜÇ

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Doç. Dr. Rıdvan DEMİR danışmanlığında Mehmet ÜNAL tarafından hazırlanan "Hafif Elektrikli Araçlarda Kullanılan Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Kontrolü" başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından Kayseri Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

15 /08 /2025

JÜRİ:

Danışman **: Doç. Dr. Rıdvan DEMİR**

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

Üye **: Dr. Öğr. Üyesi Salim ÇINAR**

ONAY:

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

……. /……../ ……

Doç. Dr. Ahmet TERZİ

Enstitü Müdürü

ÖN SÖZ / TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması, yüksek lisans eğitimim süresince edindiğim bilgi ve tecrübelerin bir ürünü olup, hafif elektrikli araçlarda kullanılan fırçasız doğru akım motorlarının kontrolü üzerine gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın her aşamasında, bilgi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren, değerli katkıları ve sabırlı desteği için danışmanım Doç. Dr. Rıdvan DEMİR'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak eğitim hayatımın başlangıcından bu yana maddi ve manevi olarak desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme sonsuz teşekkürü bir borç bilirim.

Mehmet ÜNAL, Kayseri, 2025

HAFİF ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORLARININ KONTROLÜ

Mehmet ÜNAL

Kayseri Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Ağustos 2025
Danışman: Doç. Dr. Rıdvan DEMİR

ÖZET

Bu tez çalışmasında, hafif elektrikli araçlar (HEA) için, düşük işlem yüküne sahip çevrimiçi sansürleme (online censoring - OC) ve en küçük ortalama kare (least mean square - LMS) temelli modele uyarlamalı sistem (MUS) kullanan hız-algılayıcısız doğrudan moment kontrollü (DMK) fırçasız doğru akım motoru (FDAM) sürücüsü geliştirilmiştir. Araştırma problemi, HEA uygulamalarında maliyeti ve karmaşıklığı artıran mekanik hız sensörlerine alternatif olarak, motor hız ve momentinin kestirim algoritmaları ile kontrol edilmesidir. Bu amaçla, hız sensörü kullanılmadan FDAM hızının doğru kestirilmesi ve anlık moment kontrolünün yüksek performansla gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Çalışmada öncelikle FDAM'nin matematiksel modeli oluşturulmuş, ardından doğrudan moment kontrolü yapısına OC-LMS tabanlı MUS kestiricisi entegre edilmiştir. Geliştirilen algoritmalar MATLAB/Simulink ortamında simüle edilmiş ve farklı yük ve hız referansı senaryolarında performans analizleri yapılmıştır. Sıfır hız durumlarını da içeren geniş hız aralığı için gerçekleştirilen benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar, hem OC-LMS temelli MUS kestiricisinin hem de bu kestiriciyi kullanan DMK tabanlı FDAM sürücüsünün başarımını doğrulamaktadır. Ek olarak, önerilen OC-LMS temelli MUS'un çalışma süreleri geleneksel LMS temelli MUS kestirici ile karşılaştırılmıştır. Önerilen kestirici %30 sansürleme oranı için %16.53 oranında, %85 için ise %36.89 oranında çalışma süresini düşürmüştür.

Anahtar Kelimeler: Hafif elektrikli araçlar, fırçasız doğru akım motoru, doğrudan moment kontrolü, hız-algılayıcısız kontrol, OC-LMS algoritması

CONTROL OF BRUSHLESS DIRECT CURRENT MOTORS USED IN LIGHT ELECTRIC VEHICLES

Mehmet ÜNAL

Kayseri University Institute of Graduate Education
Master Thesis, August 2025
Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Rıdvan DEMİR

ABSTRACT

In this thesis, a speed-sensorless direct torque controlled (DTC) brushless direct current motor (BLDC) driver is developed for light electric vehicle (LEV) applications, utilizing a low computational load online censoring (OC) and least mean square (LMS)-based model reference adaptive system (MRAS). The research problem addresses the elimination of mechanical speed sensors—which increase cost and complexity in LEV applications—by estimating motor speed and torque through sensorless algorithms. The objective is to accurately estimate the BLDC motor speed without using a speed sensor and to perform instantaneous torque control with high performance. First, the mathematical model of the BLDC motor is established, and the OC-LMS-based MRAS estimator is integrated into the DTC structure. The developed algorithms are simulated in the MATLAB/Simulink environment, and their performance is analyzed under various load and speed reference scenarios. Simulation results across a wide speed range, including zero-speed conditions, confirm the effectiveness of both the OC-LMS-based MRAS estimator and the DTC-based BLDCM driver using this estimator. Additionally, the execution times of the proposed OC-LMS-based MRAS estimator are compared with those of the conventional LMS-based MRAS. The proposed estimator reduces execution time by 16.53% for a 30% censoring rate and by 36.89% for an 85% censoring rate.

Keywords: Light electric vehicles, brushless DC motor, direct torque control, sensorless control, OC-LMS algorithm

İÇİNDEKİLER

HAFİF ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORLARININ KONTROLÜ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK.....i
TEZ İNTİHAL RAPORU TESLİM FORMU.....ii
KILAVUZA UYGUNLUK.....iii
KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....iv
ÖNSÖZ / TEŞEKKÜR.....v
ÖZET.....vi
ABSTRACT.....vii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....xi
TABLOLAR LİSTESİ.....xiii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....xiv
GİRİŞ.....1

BİRİNCİ BÖLÜM
ELEKTRİKLİ ARAÇLAR

1.1. Elektrikli Araçların Tarihi Gelişimi.....3
1.2. Elektrikli Araçların Türleri ve Bileşenleri.....4
1.3. Hafif Elektrikli Araçların Önemi ve Pazar Analizi.....8
1.4. Elektrikli Araçlarda Kullanılan Motorlar.....10
1.5. Motor Sürücü Kavramı ve Temel Görevleri.....11
1.6. Motor Sürücü Topolojileri.....14
1.6.1. Doğrudan Gerilim Kontrollü Motor Sürücüleri.....14
1.6.2. H-Köprü (H-Bridge) Topolojisi.....15
1.6.3. Yarım Köprü (Half-Bridge) Topolojisi.....15
1.6.4. Üç Fazlı Köprü Topolojisi.....15
1.7. Hafif Elektrikli Araçlarda Genellikle Kullanılan Topoloji.....17

İKİNCİ BÖLÜM

FDAM SÜRÜCÜ KONTROL YÖNTEMLERİ VE ALGORİTMALARI

2.1. FDAM Sürücü Kontrol Yöntemleri 18
2.2. Kontrol Yöntemleri 19
2.2.1. Açık Çevrim (open-loop) kontrol 20
2.2.2. Kapalı Çevrim (closed-loop) Kontrol 22
2.3. Temel Algoritmalar 23
2.3.1. PWM (Pulse Width Modulation) Tabanlı Kontrol 23
2.3.2. Alan Yönlendirmeli Kontrol (FOC - Field Oriented Control) 25
2.3.3. Doğrudan Moment Kontrolü (Direct Moment Control-DMC) 25
2.3.4. Trapezoidal Kontrol 26
2.3.5. Sinüzoidal Kontrol 27
2.4. Sensörlü ve Sensörsüz Kontrol Teknikleri 27
2.4.1. Sensörlü Kontrol Teknikleri 28
2.4.1.1. Hall Sensörlü Kontrol 28
2.4.1.2. Enkoder ve Resolver Tabanlı Kontrol 28
2.4.2. Sensörsüz Kontrol Teknikleri 29
2.4.2.1. Zıt-EMK (Zıt-Elektromotor Kuvveti) Tabanlı Yöntemler 29
2.4.2.2. Observer (Gözlemci) Tabanlı Yöntemler 29

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

OC-LMS TABANLI MUS KESTİRİCİSİ KULLANAN HIZ ALGILAYICISIZ DOĞRUDAN MOMENT KONTROLLÜ MOTOR SÜRÜCÜ TASARIMI

3.1. Elektrikli Araç Modeli 33
3.2. FDAM Modeli 34
3.3. OC-LMS Tabanlı Mus Hız Kestiricisi 35
3.4. OC-LMS Tabanlı MUS Kullanan DMK'lı FDAM Sürücüsü 37

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

BENZETİM ÇALIŞMALARI

4.1. Benzetim Çalışmaları.....39

BEŞİNCİ BÖLÜM

SONUÇ VE TARTIŞMALAR

KAYNAKÇA.....52

TEZ İNTİHAL RAPORU.....59

ÖZGEÇMİŞ.....63

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Simgeler

kHz : kilo-Hertz

Wh/kg : Watt-saat bölü kilogram (Enerji yoğunluğu)

Kısaltmalar

AA : Alternatif akım

ABD : Amerika Birleşik Devletleri

ADC : Analog digital converter (Analog dijital çevirici)

ARM : Anahtarlamalı relüktans motor

ASM : Asenkron motor

CAN-Bus : Controller area network-bus (Kontrolör alan ağı veri-yolu)

DA : Doğru akım

DMK : Doğrudan moment kontrolü

DSMSM : Dahili sabit mıknatıslı senkron motor

DSP : Digital signal processor (Dijital sinyal işlemci)

EA : Elektrikli araç

EKF : Extended Kalman filter (Genişletilmiş Kalman filtresi)

EMI : Electromagnetic interference (Elektromanyetik girişim)

EMK : Elektromotor kuvveti

FDAM : Fırçasız doğru akım motoru

FOC : Field oriented control (Alan yönlendirmeli kontrol)

HEA : Hafif elektrikli araç(lar)

IGBT : Insulated gate bipolar transistor (Yalıtılmış kapılı bipolar transistör)

İYM : İçten yanmalı motor

LMS : Least mean square (En küçük ortalama kare)

MCU : Microcontroller unit (Mikrodenetleyici birimi)

MOSFET : Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor (Metal oksit yarıiletken alan etkili transistör)

MRAS : Model reference adaptive system (Model referanslı uyarlamalı sistem)

MUS : Model uyarlamalı sistem

OC : Online censoring (Çevrimiçi sansürleme)

P : Proportinal (Oransal)

PI	: Proportinal-integral (Oransal-integral)
PID	: Proportinal-integral-derrivative (Oransal-integral-türev)
PWM	: Pulse width modulation (Darbe genişlik modülasyonu)
RMSE	: Root mean square error (Kök ortalama kare hatası)
SMO	: Sliding mode observer (Kayan kipli gözleyici)
SMSM	: Sürekli mıknatıslı senkron motoru
SVPWM	: Space vector pulse width modulation (Uzay vektör darbe genişlik modülasyonu)
UDDS	: Urban dynamometer driving schedule (Kentsel dinamometre sürüş programı)
VK	: Vektör kontrol
YSA	: Yapay sinir ağı
ZC	: Zero crossing (Sıfır geçişi)

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1.1. *Elektrikli araç tipleri ve özellikleri [14]* 5
Tablo 4.1. *EA parametreleri* 39
Tablo 4.2. *FDAM parametreleri* 39
Tablo 4.3. *Farklı sansürleme oranları için önerilen OC-LMS tabanlı MUS kestiricinin ortalama çalışma süreleri* 46
Tablo 4.4. *Farklı sansürleme oranları için önerilen OC-LMS tabanlı MUS kestiricinin RMSE değerleri* 46

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. *Geçmişten günümüze elektrikli araçlar [9]* 4
Şekil 1.2. *Elektrikli bir aracın blok diyagramı [13]* 5
Şekil 1.3. *Hafif elektrikli araçların pazar büyüklüğü ve öngörülen büyüme verileri [26]* 9
Şekil 1.4. *Fırçasız doğru akım motoruna ait çalışma prensibi [28]* 10
Şekil 1.5. *Voltaj kontrollü PMDC yapısı [32]* 14
Şekil 1.6. *DC motor H-köprü yapısı [33]* 15
Şekil 1.7. *DC motor yarım köprü yapısı [34]* 15
Şekil 1.8. *BLDC motor üç fazlı köprü yapısı [35]* 17
Şekil 2.1. *Trapezoidal kontrol algoritması şematik gösterimi [42]* 19
Şekil 2.2. *Temel sürücü devre yapısı [29]* 20
Şekil 2.3. *Örnek giriş değerleri için PWM çıkışı [44]* 24
Şekil 2.4. *FOC - Field Oriented Control örnek blok diyagramı [45]* 25
Şekil 2.5. *DMK algoritmasının temel kontrol yapısı [46]* 26
Şekil 2.6. *Kapalı devre voltaj faz açısı kontrolü kullanan bir kontrol diyagramı örneği [47]* 27
Şekil 3.1. *Elektrikli araç modeli* 33
Şekil 3.2. *FDAM üç faz eşdeğer devresi* 34
Şekil 3.3. *OC-LMS kullanan stator akım temelli MUS* 35
Şekil 3.4. *Hafif elektrikli aracın tahrik edilmesi için tasarlanan hız-algılayıcısız DMK tabanlı FDAM sürücüsü* 38
Şekil 4.1. *Sürücü sistemine verilen hız referansı ve motora uygulanan yük momenti değişimleri* 40
Şekil 4.2. *Geleneksel LMS temelli MUS'a ait benzetim sonuçları: (a) kestirim sonuçları, (b) hatalar* 41
Şekil 4.3. *%30 sansürleme oranı için önerilen OC-LMS temelli MUS'a ait benzetim sonuçları: (a) kestirim sonuçları,(b) hatalar* 42
Şekil 4.4. *%50 sansürleme oranı için önerilen OC-LMS temelli MUS'a ait benzetim sonuçları: (a) kestirim sonuçları,(b) hatalar* 43
Şekil 4.5. *%70 sansürleme oranı için önerilen OC-LMS temelli MUS'a ait benzetim sonuçları: (a) kestirim sonuçları,(b) hatalar* 44

Şekil 4.6. *%85 sansürleme oranı için önerilen OC-LMS temelli MUS'a ait benzetim sonuçları:(a) kestirim sonuçları,(b) hatalar* 45

GİRİŞ

Elektrikli araçlar uzun ve köklü bir geçmişe sahiptir. Çevresel sorunlar ve mevcut enerji kaynaklarına bağlı olarak yıllar içinde büyük ölçüde değişiklik göstermiştir. İlk elektrikli otomobiller, ilk elektrik makinelerinin geliştirilmesinin hemen ardından, 1830'lu yıllarda üretilmiştir. Sonraki dönemde çok sayıda elektrikli araç geliştirilmiş olsa da, ulaşım alanında kayda değer bir atılım gerçekleştirilememiştir [1].

1900'lü yılların başı, elektrikli araçların ilk altın çağı olarak kabul edilir. Birçok otomobil üreticisi, daha konforlu onlarca yeni model geliştirmiştir. 1900 yılında sadece ABD'de 1.575 elektrikli araç üretilirken, içten yanmalı motorlu (İYM) araç sayısı sadece 936 olmuştur. Elektrikli araç üretimi 1912 yılında zirveye ulaşmıştır. O dönemde, en önemli elektrikli araç üreticilerinden biri olan Oliver P. Fritchle Şirketi, yılda yaklaşık 200 araç üretmekteydi. Sonraki yıllarda ise, içten yanmalı motorlu araçların hızlı gelişimi nedeniyle elektrikli araçlar pazar paylarını kaybetmeye başlamıştır [1].

20. yüzyıl başlarında (1900-1912) elektrikli araçlar, şehir içi ulaşımda oldukça popüler hale gelmiştir. Örneğin 1900 yılında ABD'deki araçların %38'i elektrikli araçlardan oluşmaktaydı [2]. Bununla birlikte, petrol temelli içten yanmalı motor teknolojilerinin hızlı gelişimi ve fosil yakıt fiyatlarının düşük olması, elektrikli araçların pazar payını ciddi oranda azaltmıştır.

Son yıllarda, ulaşım ve taşıma nedeniyle ortaya çıkan karbondioksit emisyonları için artan farkındalık ve hassasiyet, elektrikli araçlara (EA'lara) olan ilgiyi artırmıştır. Elektrikli araç pazarında üreticilerin, rekabetin ve kullanıcı taleplerinin artması üretici firmaları daha düşük maliyetli, daha az bakım gerektiren, daha verimli ve daha kullanışlı araçların geliştirilmesi konusunda zorlamaktadır.

Ayrıca, batarya teknolojilerindeki gelişmeler (Lityum-iyon bataryalarda enerji yoğunluğunun 250-300 Wh/kg seviyelerine çıkması), enerji yönetim algoritmalarındaki ilerlemeler ve motor sürücü sistemlerinin performans artışı, EA'ların yaygınlaşmasını hızlandırmıştır [3].

EA'lardan beklenen performans kriterleri; sağlamlık, batarya şarj hızları, güçyönetimi, güvenilirlik ve motor sürücü sistemleri olarak sıralanabilir. EA'ları tahrik etmek için sürekli mıknatıslı senkron motorlar (SMSM), asenkron motorlar (ASM) ve fırçasız doğru akım motorları (FDAM) tercih edilmektedir. FDAM'ler yüksek verimleri, az bakım gereksinimleri, uzun ömürleri, sabit moment sağlamaları, sessiz çalışmaları gibi üstünlüklerinden dolayı birçok endüstriyel alanda ve elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılır hale gelmişlerdir. FDAM'lerin yüksek başarımlı kontrolü ile ilgiliaraştırmalar ve iyileştirmeler hem endüstride hemde literatürde devam etmektedir.

Bu çalışmanın temel katkısı, FDAM'nin hızkestirimi için önerilen geleneksel LMS temelli MUS'un işlem yükünü azaltan OC-LMS temelliMUS hız kestiricisinin tasarımın gerçekleştirilmesive benzetim temelli olarak test edilmesidir.

BİRİNCİ BÖLÜM

ELEKTRİKLİ ARAÇLAR

1.1. Elektrikli Araçların Tarihi Gelişimi

Elektrikli araçların geçmişi, sanılanın aksine oldukça eskiye, 1800'lü yılların ortalarına kadar uzanmaktadır. İlk elektrikli taşıt denemeleri, şarj edilemeyen pillerle gerçekleştirilmiş olup, bu prototipler sınırlı menzilleri ve düşük performansları nedeniyle günlük kullanıma uygun değillerdi. Ancak 19. yüzyılın sonlarında elektrik motorları ve batarya teknolojilerindeki önemli gelişmeler, bu alanda ciddi bir sıçrama yaratmış; 1889–1891 yılları arasında ilk başarılı elektrikli otomobiller üretilmiş ve kısa sürede ticari olarak piyasaya sunulmuştur [4].

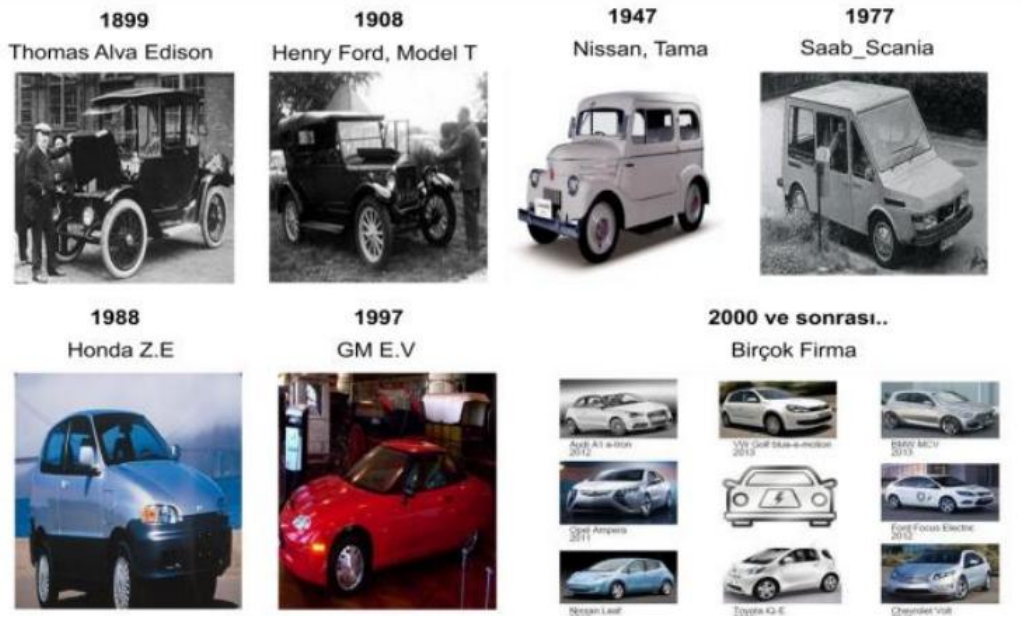
20. yüzyılın başlarında elektrikli araçlar, benzinli araçlara göre daha sessiz, daha az titreşimli ve kullanım açısından daha kolay olmalarıyla öne çıkmıştır. Özellikle şehir içi kullanımda tercih edilen bu araçlar, dönemin bazı zengin kesimleri tarafından benimsenip kullanıldığı bilinmektedir. Aynı dönemde içten yanmalı motor teknolojisinin hızla gelişmesi, petrolün ucuz ve bol bulunması ve Henry Ford'un 1908'de başlattığı seri üretim devrimi sayesinde benzinli araçların kullanım ve üretim maliyetlerinin hızla düşmesi, elektrikli araçların piyasadan büyük ölçüde silinmesine yol açmıştır [5].

Elektrikli araçlar yaklaşık 70 yıl boyunca otomotiv sektöründe arka planda kalmıştır. Bununla birlikte 20. yüzyılın sonlarına gelindiğinde, çevresel sorunların, özellikle küresel ısınmanın ve hava kirliliğinin artmasıyla elektrikli ulaşım/taşımacılık yeniden gündeme gelmeye başlamıştır. Aynı dönemde elektronik ve batarya teknolojilerinde yaşanan teknolojik gelişmeler de bu dönüşüme zemin hazırlamıştır. 1997 yılında Toyota, hibrit motor teknolojisine sahip ilk seri üretim aracı olan Prius'u Japonya'da piyasaya sürmüştür. Bu model, sadece ilk yılında 18.000 adetlik satış rakamına ulaşarak büyük bir başarı elde etmiştir [5].

2000'li yılların başından itibaren, çevresel sürdürülebilirlik politikaları ve karbon emisyonu sınırlamalarının etkisiyle elektrikli araçların yaygınlaşması hız kazanmıştır. Tesla, yüksek performans, uzun menzil ve yazılım tabanlı sürüş teknolojileriyle sektörde devrim yaratırken; Çinli üreticiler BYD ve CHERY, uygun fiyatlı modellerle pazarda önemli bir pay elde etmiştir. Bu gelişmeler, büyük otomotiv firmalarının içten yanmalı motor üretimini azaltma veya tamamen sonlandırma hedeflerini açıklamalarına yol açmıştır [6-8].

Elektrikli araçların geçmişten günümüze değişimi ve gelişimine ait bir görsel Şekil 1.1'de verilmiştir [9].

Şekil 1.1. *Geçmişten günümüze elektrikli araçlar [9]*



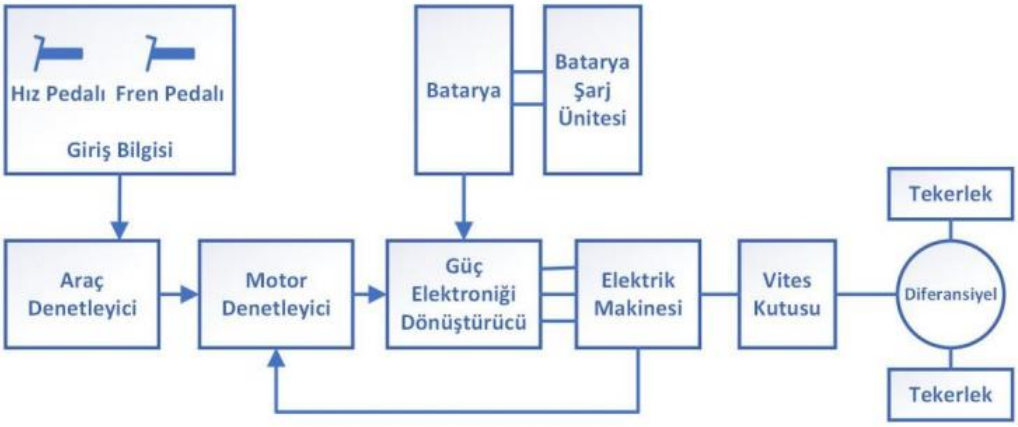
Günümüzde elektrikli araçlar, çevreci kimliklerinin yanı sıra gelişmiş batarya teknolojileri, hızlı şarj altyapıları, geliştirilmiş sürücü sistemleri ve entegre yazılım güncellemeleri sayesinde otomotiv sektörünün geleceğini şekillendiren temel bir unsur haline gelmiştir. Avrupa Birliği ve birçok ülke, 2030'lu yıllardan itibaren fosil yakıtlı araçların satışını yasaklamaya yönelik politika ve yasalar uygulamaya koymuş; böylece elektrikli araçlar alternatif olmaktan çıkıp yeni norm haline gelmiştir [10, 11].

1.2. Elektrikli Araçların Türleri ve Bileşenleri

Elektrikli araçları geleneksel içten yanmalı motorlu araçlardan ayıran temel fark, hareket enerjisinin kaynağıdır. Geleneksel araçlarda mekanik güç, yakıtın yanmasıyla elde edilirken; elektrikli araçlarda bu güç tamamen elektrik enerjisinden sağlanır. Bu elektrik

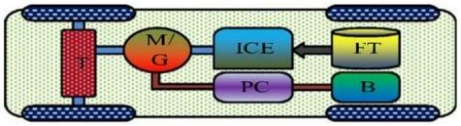
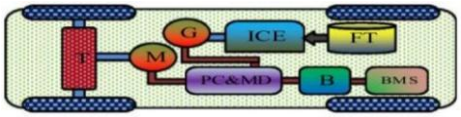
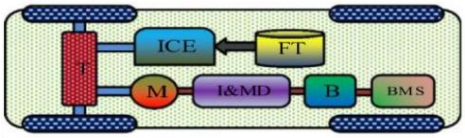
enerjisinin araç hareketine dönüşümü, bataryalar, elektrik motorları ve güç elektroniği birimleri gibi kritik alt sistemlerin koordineli çalışmasına bağlıdır [12]. Şekil 1.2'de bir elektrikli araca ait genel blok diyagramı verilmiştir.

Şekil 1.2. *Elektrikli bir aracın blok diyagramı [13]*

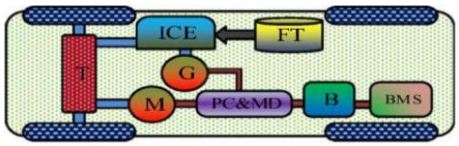
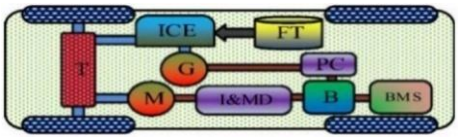
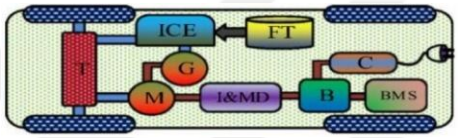
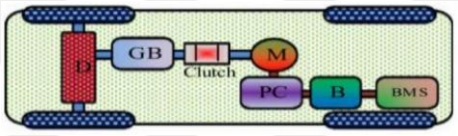
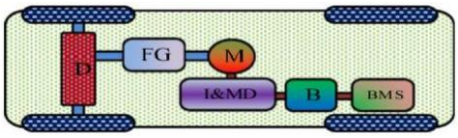
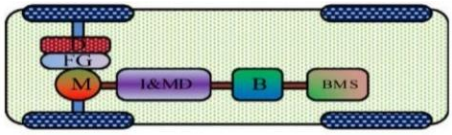
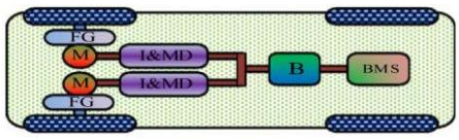
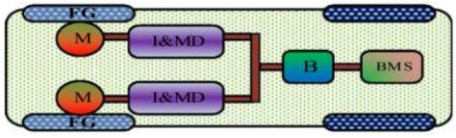
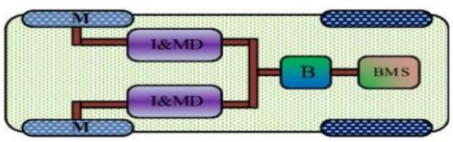


Elektrikli araç sistemleri, bu alt bileşenlerin farklı konfigürasyonlarla bir araya getirilmesiyle çeşitlilik kazanır. Farklı motor yerleşimleri, batarya konumlandırmaları ve güç aktarma sistemleriyle oluşturulmuş çok sayıda elektrikli araç topolojisi mevcuttur. Her bir topoloji, maliyet, performans, üretim kolaylığı ve kullanım amacı gibi etkenlere göre farklı avantajlar ve sınırlamalar sunar. Bu sistemlere dair karşılaştırmalı grafikler ve açıklamalar Tablo 1.1'de sunulmuştur.

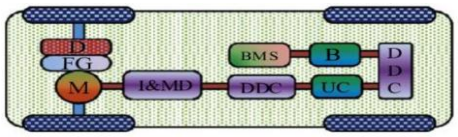
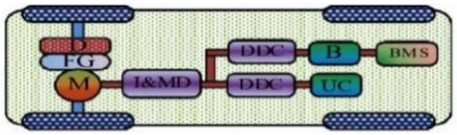
Tablo 1.1. *Elektrikli araç tipleri ve özellikleri [14]*

Elektrikli Araç Tipi	**EA Güç Aktarım Yapısı**	**Özellikler**
Hafif HEA		İçten yanmalı motor aracı ilerleten asıl güç kaynağıdır. Bunun yanında 12V 5kW'lık bir yardımcı elektrik motoru yer alır ve kalkış anında ana motoru destekler.
Seri HEA		Araç sadece elektrik motoru ile tahrik edilir. İçten yanmalı motor bataryayı şarj etmek için kullanılır. Bu yapı şehir içi kullanım için düşük verimlidir.
Paralel HEA		Bu yapıda şanzımana hem elektrik motoru hem de içten yanmalı motor bağlıdır ve araç iki motorla da tahrik edilir. Verim daha yüksektir ve hem şehir içi hem de otoyol kullanımına uygundur.

Tablo 1.1. *Elektrikli araç tipleri ve özellikleri devamı [14]*

Elektrikli Araç Tipi	EA Güç Aktarım Yapısı	Özellikler
Seri-Paralel HEA		Bu yapı seri hibrit ve paralel hibrit yapısının bir kombinasyonudur. Elektrik motoru aracı tahrik ederken içten yanmalı motor hem aracı tahrik eder hem de elektrik motoru için elektrik üretir.
Karmaşık HEA		Bu yapı seri-paralel yapısına benzer, farkı içten yanmalı motorun bataryayı şarj etmesi için bir güç dönüştürücüsü yer almasıdır
Seri-Paralel Plug-in HEA		Bu yapı her hibrit yapısının bir türevi olabilir. Bu yapılarda bataryayı şarj etmek için içten yanmalı motor yerine bir şarj cihazı kullanılır ve araç şebekeden şarj edilir.
Dişli kutulu ve Kavramalı EA		BEV'lerde içten yanmalı motor bulunmaz, tüm güç bataryadan ve elektrik motorundan karşılanır. Bu yapıda elektrik motorunun gücü dişli kutusu ile diferansiyele verilir. Bu yapının verimi azdır.
Sabit vitesli EA		Bu yapıda dişli kutusu yerine sabit dişli vardır. Elektrik motorunun gücü ve torku motor sürücü tarafından ayarlanır.Bu yapının verimi görece azdır.
Tüleşik sabit vitesli ve difarensiyelli EA		Bu yapıda elektrik motoru, sabit dişli ve diferansiyel tahrik milinde bir arada yer alır.
İki bağımsız sabit vitesli ve motorlu EA		Bu yapıda diferansiyel yerine iki tekerlekte elektrik motoru ve bu motorları kontrol eden motor sürücüler yer alır.
Tekerlek içi sabit vitesli EA		Bu yapı tekerlek içinde motor yer alan yapıdan önce gelişirilen yapıdır ve tekerlek içinde dişli bulunmaktadır.
Tekerlek içi motorlu EA		Bu yapıda elektrik motorları tekerleğe entegredir. Bu yapı şehir ve otoyol kullanımı için daha sade bir yapı sunar.

Tablo 1.1. *Elektrikli araç tipleri ve özellikleri devamı [14]*

Elektrikli Araç Tipi	EA Güç Aktarım Yapısı	Özellikler
Seri hibritleştirilmiş EA		Bu yapı herhangi bir BEV yapısının türevi olabilir. Sistemde birbirini tamamlayan iki elektrik depolama sistemi(ör: ultrakapasitör) seri olarak kullanılmaktadır.
Paralel hibritleştirilmiş EA		Bu yapı herhangi bir BEV yapısının türevi olabilir. Sistemde birbirini tamamlayan iki elektrik depolama sistemi(ör: ultrakapasitör) paralel olarak kullanılmaktadır.

Kısaltmalar: M: Elektrik motoru, G: Elektrik jeneratörü, T: Şanzıman, D: Diferansiyel, ICE: İçten yanmalı motor, GB: Dişli kutusu, FG: Sabit vites, FT: Yakıt deposu, B: Batarya, BMS: Batarya yönetim sistemi, UC: Ultrakapasitör, PC: Güç dönüştürücüsü, MD: Motor sürücü, I: Evirici, DDC: DC-DC dönüştürücü, C: Şarj cihazı

Her ne kadar sistemlerin detayları farklılık gösterse de, tüm elektrikli araçlarda batarya ve elektrik motorları, performansın belirleyici unsurlarıdır. Bu bileşenlerin teknik özellikleri; aracın hızlanma kabiliyeti, azami hız, menzil, şarj süresi, akustik gürültü düzeyi ve bakım-onarım maliyetleri gibi doğrudan kullanıcı deneyimini etkileyen parametrelerde başrol oynamaktadır [15].

Bu nedenle elektrikli araçlara yönelik araştırmalar ve ürün geliştirme çalışmaları büyük ölçüde bu iki ana bileşen üzerinde yoğunlaşmaktadır. Batarya teknolojilerinde karbon-temelli elektrotlar, nanoparçacık kompozitleri ve gelişmiş separator-elektrolit sistemlerinin enerji yoğunluğu, hücre ömrü ve hızlı şarj kapasitesi gibi parametreleri anlamlı biçimde artırdığı bilimsel literatürde belirtilmiştir [16]. Benzer şekilde elektrik motorlarının ağırlık-verim oranı optimize edilmekte, daha kompakt ve maliyet etkin motor tasarımları ile motor kontrol stratejilerinde gelişmeler kaydedilmektedir [17-18]. Aynı şekilde elektrik motorları tarafında da daha yüksek verimliliğe sahip, daha hafif, daha kompakt ve düşük maliyetli çözümler geliştirilmekte; farklı kontrol teknikleriyle sürüş deneyimi iyileştirilmektedir [19].

Özetle, elektrikli araçların teknolojik başarısının temelini batarya ve motor sistemlerinin verimli entegrasyonu oluşturmaktadır. Bu sebeple bu bileşenlerin performansını artırmak ve maliyetini düşürmek amacıyla yoğun bir şekilde çalışılmaktadır.

Elektrikli araçlar sınıfında yer alan HEA'lar, düşük ağırlıkları, sınırlı motor güçleri ve genellikle kısa/orta menzil gereksinimleri ile öne çıkan taşıtlardır. Bu araçlar; enerji

verimliliği, düşük işletme maliyetleri ve çevreci yapıları sayesinde hem bireysel hem de kısa mesafeli ticari taşımacılıkta giderek daha fazla tercih edilmektedir [20]. Hafif elektrikli araçları daha ayrıntılı şekilde sınıflandırmak gerekirse, bu sınıfa giren araçlar genel olarak mikro mobilite araçları, hafif dört tekerlekli araçlar (quadricycle), elektrikli scooter ve motosikletler, mini elektrikli otomobiller ve son kilometre teslimat (last mile delivery) araçları olarak gruplandırılabilir [21].

- Mikro mobilite araçları, özellikle şehir içi kısa mesafelerde kullanılan elektrikli bisiklet, scooter ve kaykay gibi küçük araçları kapsamaktadır. Düşük hız ve sade yapılarıyla trafik yoğunluğunu azaltmak ve park kolaylığı sağlamak gibi avantajları olan hafif elektrikli araçlardır.
- *Quadricycle* sınıfına giren elektrikli taşıtlar ise genellikle iki kişilik kapasiteye sahip olup düşük hız limitli ancak kapalı kabinli küçük otomobil benzeri araçları kapsamaktadır.
- Elektrikli scooter ve motosikletler, içten yanmalı muadillerine kıyasla sessiz çalışma, düşük bakım ihtiyacı ve enerji tasarrufu ile öne çıkan elektrikli araçlar olup Türkiye'de yoğun trafik olan bölgelerde aktif olarak kullanılmaktadır.
- Mini elektrikli otomobiller, özellikle kentsel alanlarda bireysel ulaşım amacıyla kullanılan, basit yapılı ve genellikle iki ila dört kişilik küçük araçları kapsamaktadır. Büyük araçlara kıyasla ebatlarının küçük olması şehirlerde trafik yoğunluklarının önüne geçmesinde aktif rol oynaması beklenen araçlardır.
- Son kilometre teslimat araçları ise kargo, yemek ve posta hizmetleri gibi şehir içi lojistikte kullanılan küçük elektrikli kamyonet veya üç tekerlekli araçları kapsamaktadır. Bu araçlar genellikle bölgesel teslimat amaçlı tonajlı yüklerin olmadığı kullanım alanlarında ihtiyaçları karşılamaktadır.

Her bir araç tipi, kendi kullanım alanlarına göre farklı performans, menzil, şarj süresi ve batarya kapasitesi gereksinimlerine sahiptir. Bu nedenle, hafif elektrikli araçların tasarımı ve mühendisliği yapılırken bu parametreler dikkate alınarak alt sistemlerin optimizasyonu büyük önem taşımaktadır.

1.3. Hafif Elektrikli Araçların Önemi ve Pazar Analizi

Günümüz şehirleşme sürecinde artan trafik yoğunluğu, çevre kirliliği ve yakıt maliyetleri, sürdürülebilir ulaşım çözümlerine olan ihtiyacı her geçen gün artırmaktadır. Bu bağlamda HEA'lar, düşük enerji tüketimleri, kompakt yapıları ve sıfır emisyon özellikleri sayesinde

çevre dostu ve ekonomik bir alternatif olarak öne çıktığı görülmektedir. Özellikle kısa mesafeli ulaşım ve şehir içi mobilite ihtiyaçlarında, hem bireysel kullanıcılar hem de kurumsal işletmeler için ideal çözümler sunduğu görülmektedir [22].

Küresel pazar verilerine bakıldığında [23], hafif elektrikli araçlara olan talebin son yıllarda büyük bir ivme kazandığı görülmektedir. Elektrikli bisiklet ve scooter pazarı, 2023 itibarıyla dünya genelinde 50 milyon adede yaklaşan satış hacmine ulaşmış ve bu sayı her yıl ortalama %8–10 oranında artış göstermektedir. Avrupa Birliği ülkelerinde ise mikro mobilite çözümleri için çeşitli teşvik mekanizmaları devreye alınmış; şehir içi elektrikli taşıtlara özel altyapılar, vergi muafiyetleri ve sübvansiyonlar ile pazar genişlemeye devam etmektedir. Günümüzde ülkemizde scooter kiralama uygulamaları gibi birçok mobilite çözümlerinin aktif olarak sunulduğu görülmektedir [24].

Hafif elektrikli araçların sürdürülebilir ulaşım politikaları içerisindeki stratejik rolü olduğu bilnmektedir. Örneğin, Zhu vd. (2023) [25], mikro mobilite araçlarının şehir içi karbondioksit salınımını azaltmada ve trafik akışını iyileştirmede etkili olduğunu belirtmiştir. Benzer şekilde BCG (2022) [26] tarafından hazırlanan bir raporda, mikro mobilitenin kent merkezlerinde trafik sıkışıklığını ve hava kirliliğini azaltmakta önemli bir araç haline geldiği vurgulanmıştır. İlgili raporda pazar büyüklüğü ve öngörülen büyüme Şekil 1.3'de gösterilmiştir.

Şekil 1.3. *Hafif elektrikli araçların pazar büyüklüğü ve öngörülen büyüme verileri [26]*



Ayrıca e-ticaret ve yemek siparişi sektörlerinin büyümesi, son kilometre teslimat (last-mile delivery) süreçlerinde düşük maliyetli, hızlı ve çevreci çözümler sunabilen

HEA'ların önemini artırmıştır. Lojistik firmaları, özellikle trafiğin yoğun olduğu büyük şehirlerde, kompakt elektrikli araçlarla operasyonel verimliliği artırmayı hedeflemektedir.

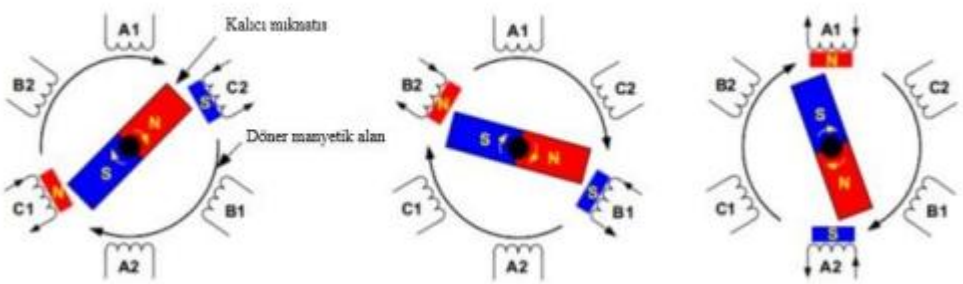
Küresel otomotiv üreticileri ve yeni nesil mobilite girişimleri, HEA alanına ciddi yatırımlar yapmakta; batarya teknolojileri, güç elektroniği sistemleri ve bağlantılı sürüş çözümleri bu araçlar üzerinde daha da geliştirilmektedir. Bu doğrultuda HEA'lar, yalnızca bireysel ulaşım değil, aynı zamanda sürdürülebilir şehir içi taşımacılık vizyonunun da merkezinde yer almaktadır.

1.4. Elektrikli Araçlarda Kullanılan Motorlar

Elektrikli araçlarda kullanılan motorlar, sistemin performansı, verimliliği ve sürüş karakteristiği üzerinde doğrudan etkili olan temel bileşenlerdendir. Doğru motor tipi seçimi; aracın menzili, tork üretimi, enerji tüketimi ve sürüş konforu gibi faktörleri büyük ölçüde belirler. Elektrikli araçlarda kullanılacak motorun tipi, genellikle aracın sınıfına, kullanım amacına ve maliyet beklentilerine göre belirlenir. Bu bağlamda elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılan motor tipleri; fırçalı doğru akım motorları, fırçasız doğru akım motorları, sürekli mıknatıslı senkron motorlar, asenkron motorları ve anahtarlamalı relüktans motorlar olarak sınıflandırılabilir [27].

Bu motor türleri arasında FDAM'ler, sahip oldukları yüksek verim, düşük bakım gereksinimi, uzun ömür, sabit moment üretimi ve sessiz çalışma gibi avantajlar sayesinde özellikle dikkat çekmektedir. Bu üstün özellikleri, FDAM'lerin hem endüstriyel uygulamalarda hem de elektrikli araçlarda yaygın biçimde kullanılmasını sağlamıştır. Fırçasız doğru akım motorları stator ve rotor olmak üzere iki ana bileşenden oluşmaktadır. Şekil 1.4'de FDAM'a ait çalışma prensibi görülmektedir. Elektrikli bisiklet, scooter ve şehir içi araçlar gibi uygulamalarda yaygın kullanıma sahiptir.

Şekil 1.4. *Fırçasız doğru akım motoruna ait çalışma prensibi [28]*



1.5. Motor Sürücü Kavramı ve Temel Görevleri

Motor sürücüleri, elektrik motorlarının kontrollü bir şekilde çalışmasını mümkün kılan elektronik sistemlerdir. Bu sistemler; elektrik enerjisini, motorların ihtiyaç duyduğu formata dönüştürerek hız, tork ve dönüş yönünü hassas şekilde kontrol eder [29]. Diğer bir ifadeyle, motor sürücüleri, mekanik sistemlerde "beyin" işlevi görür; doğru sinyalleri ileterek motorun istenen koşullarda çalışmasını sağlar. Günümüzde bu sürücüler, üretim hatlarında, otomasyon sistemlerinde, ev tipi makinelerde ve özellikle ulaşım araçlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Çevreci ve enerji verimli çözümlerin artan önemiyle elektrikli araç teknolojilerinin hızla yaygınlaşması, motor sürücülerini taşıt sistemlerinin vazgeçilmez bir bileşeni haline getirmiştir. Hafif elektrikli araçlarda bu sürücüler; düşük enerji tüketimi, sessiz çalışma ve sürdürülebilirlik avantajlarıyla beraber performans, güvenlik ve verimlilik açısından kritik bir rol oynar.

Hafif elektrikli araçlarda kullanılan motor tipleri çeşitlilik gösterebilmekle birlikte, bu araçların büyük çoğunluğunda doğru akım (DA) motorları tercih edilmektedir. DA motorları; kompakt yapıları, yüksek başlangıç torkları ve kolay kontrol edilebilirlikleri nedeniyle elektrikli bisiklet, scooter, motosiklet ve benzeri hafif araçlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu motorların verimli bir şekilde yönetilmesi için geliştirilen DA motor sürücüleri, sistemin genel verimini, sürüş konforunu ve güvenliğini doğrudan etkileyen temel bileşenlerden biridir. DA motor sürücüleri, motora iletilen gerilimi ve akımı PWM (Pulse Width Modulation – Darbe Genişlik Modülasyonu) tekniğiyle kontrol ederek motorun hızını hassas biçimde ayarlayabilir [29]. Ayrıca bu sürücüler, yön değiştirme, yumuşak kalkış, ani duruş, frenleme ve batarya koruma gibi kritik fonksiyonları da üstlenir. Dolayısıyla DA motor sürücüleri yalnızca bir hız kontrol ünitesi değil, aynı zamanda tüm güç aktarım sistemini yöneten bir merkezi kontrolcü görevi görür.

FDAM'lerde komütasyon işlemi elektronik olarak gerçekleştirilir ve bu da sürücü devresinin daha karmaşık olmasına karşın verimlilik ve güvenilirlik açısından önemli bir avantaj sağlar. FDAM'ler için kullanılan DA sürücüler, genellikle üç fazlı çıkışlara sahiptir ve rotor konumunu belirlemek için Hall etkili sensörlerden faydalanır. Bu yapı sayesinde sürücü, motorun anlık pozisyonunu doğru bir şekilde algılar ve ideal sürüş sinyallerini oluşturur [30].

Hafif elektrikli araçlarda motor sürücüsünün işlevi, yalnızca motorun dönmesini sağlamakla sınırlı değildir. Yokuş çıkışlarında yüksek tork gerektiren koşullar, ani

frenleme durumları veya enerji geri kazanımı (rejeneratif frenleme) gibi senaryolarda sürücünün doğru ve hızlı tepkiler vermesi hayati önem taşır. Modern DA motor sürücüleri, bu tür dinamik durumlarda hem kullanıcıya hem de batarya sistemine zarar vermeden motoru güvenli bir şekilde kontrol edebilecek kapasitededir [29]. Bunun yanı sıra sürücüler; aşırı ısınma, aşırı akım, kısa devre ve düşük voltaj gibi olumsuz durumlarda sistemi otomatik olarak devre dışı bırakarak güvenlik sağlar. Bu özellik, özellikle bataryayla çalışan sistemlerde yangın riski ve donanım arızalarının önlenmesi açısından kritik bir rol oynamaktadır.

Gelişen teknolojilerle birlikte DA motor sürücüleri, yalnızca temel kontrol görevlerini yerine getirmekle kalmaz, aynı zamanda sistemin genel zekâsına katkıda bulunan bir bileşen hâline gelmiştir. Günümüzde birçok motor sürücüsü, mikrodenetleyici veya dijital sinyal işlemci (DSP) tabanlı mimarilere sahiptir. Bu sayede motorun performansı analiz edilebilir, çalışma parametreleri esnek şekilde değiştirilebilir ve sistem, diğer bileşenlerle entegre edilebilir [29]. Örneğin, bir elektrikli scooter'da kullanılan DA motor sürücüsü, gaz kolundan gelen sinyalleri işler, batarya yönetim sistemiyle haberleşir ve fren sinyallerine göre rejeneratif enerjiyi geri kazanıma yönlendirir. Tüm bu işlemler gerçek zamanlı olarak yürütülür. Ayrıca, Bluetooth veya CAN-Bus gibi haberleşme protokolleri aracılığıyla sürücü verileri kullanıcı arayüzüne aktarılabilir ve yazılım güncellemeleri uzaktan yapılabilir [31].

Sonuç olarak, DA motor sürücüleri hem teknik hem de fonksiyonel açıdan elektrikli ulaşım sistemlerinin temel yapı taşlarından biridir. Özellikle hafif elektrikli araçların yaygınlaşmasıyla birlikte bu sürücülere olan ihtiyaç giderek artmakta; daha kompakt, daha akıllı ve daha güvenli çözümler geliştirilmektedir. Bu sürücüler yalnızca verimliliği artırmakla kalmaz; batarya ömrünü uzatır, sistem güvenliğini sağlar ve kullanıcı deneyimini iyileştirmektedir. Bu temel bilgiler ışığında, motor sürücülerinin kontrol ettiği motor tiplerinin çeşitliliğini ve özelliklerini anlamak, sistem tasarımı açısından büyük önem taşımaktadır.

Bir motor sürücüsünün başlıca görevleri şu şekilde sıralanabilir:

Hız Kontrolü; Motorun dönme hızını ayarlamak, motor sürücüsünün temel işlevlerinden biridir. Bu kontrol genellikle darbeli gerilim sinyalleri kullanılarak gerçekleştirilir. Sürücü, motora uygulanan gerilimin ortalama değerini değiştirerek motorun istenilen hızda çalışmasını sağlar. Böylece sistem hem enerji bakımında verimli çalışır hem de

kullanıcıdan gelen komutlara uygun şekilde yanıt verecek şekilde çalışır.

Tork Kontrolü; Motorun uyguladığı döndürme kuvveti, taşıt sistemlerinde büyük önem taşımaktadır. Özellikle yokuş çıkarken veya kalkış anında yüksek torka ihtiyaç duyulur. Motor sürücüleri, yük durumuna göre torku otomatik olarak ayarlayarak sistemin zarar görmeden çalışmasını sağlar.

Yön Kontrolü; Motorun dönüş yönü, sürücü tarafından değiştirilerek saat yönünde ya da ters yönde çalışması sağlanabilir. Bu özellik, ileri-geri hareket gerektiren sistemlerde oldukça önemlidir. Yön kontrolü, elektrik anahtarları ile akımın yönü değiştirilerek yapılmaktadır.

Yumuşak Kalkış ve Duruş; Motorun aniden çalıştırılması veya durdurulması mekanik zorlanmalara ve elektriksel aşırı yüklenmelere yol açabilmektedir. Bu nedenle sürücüler, motoru kademeli olarak çalıştırır ve durdurur. Bu işlem, hem konforlu bir kullanım sağlar hem de sistemin ömrünü uzatır.

Koruma Fonksiyonları; Aşırı akım, yüksek sıcaklık, düşük gerilim ya da kısa devre gibi durumlar motor sistemine zarar verebileceği için motor sürücüleri, bu tür durumları algılayarak sistemi otomatik olarak durdurur veya çalışma koşullarını sınırlandırarak güvenliği sağlamaktadır. Bu tür koruma fonksiyonları, özellikle bataryayla çalışan araçlarda yangın ve arıza riskini minimize etmektedir.

Enerji Verimliliği ve Geri Kazanım; Motor sürücüleri, motorun ihtiyacı kadar enerji kullanmasını sağlar. Böylece batarya daha uzun süre dayanır ve enerji israfı önlenmiş olur. Bazı gelişmiş sistemlerde frenleme sırasında ortaya çıkan enerji tekrar elektrik enerjisine dönüştürülerek bataryaya aktarılır. Bu yöntem, aracın menzilini artırır ve verimliliği yükseltmektedir.

Geri Besleme ve Durum İzleme; Motor sürücüleri, motorun anlık çalışma durumunu sürekli izleyerek sistemin denge içinde çalışmasını sağlamaktadır. Hız, akım, konum gibi veriler algılayıcılar aracılığıyla sürücüye iletilir. Sürücü bu bilgileri analiz ederek motorun davranışını gerçek zamanlı olarak ayarlabilmektedir. Bu özellik, sistemin daha hassas ve kararlı çalışmasını sağlamaktadır.

Haberleşme ve Entegre Çalışma; Yeni nesil motor sürücüleri, diğer kontrol birimleriyle iletişim kurabilen yapılara sahiptir. Bu sayede motor sürücüsü, batarya yönetim sistemleri, ana kontrol birimleri ve gösterge panelleri ile entegre çalışabilmektedir. Ayrıca

sürücü üzerinden sistem izlenebilir, arıza kaydı tutulabilir ve uzaktan yazılım güncellemeleri yapılabilmektedir.

Motor sürücüleri, bir elektrik motorunun yalnızca çalışmasını sağlamakla kalmaz; aynı zamanda sistemin güvenli, verimli ve uzun ömürlü olmasına da önemli katkılar sunar. Elektrikli taşıtlarda sürücülerin kalitesi ve işlevselliği, doğrudan araç performansına ve kullanıcı deneyimine yansımaktadır Bu nedenle sürücü sistemleri, elektrikli araç teknolojilerinin gelişiminde stratejik bir role sahiptir. Modern sürücüler, sadece motor kontrolüyle sınırlı kalmayıp enerji yönetimi, güvenlik fonksiyonları ve batarya koruma gibi ek işlevleri de entegre ederek sistemin bütünsel performansını artırmaktadır [29].

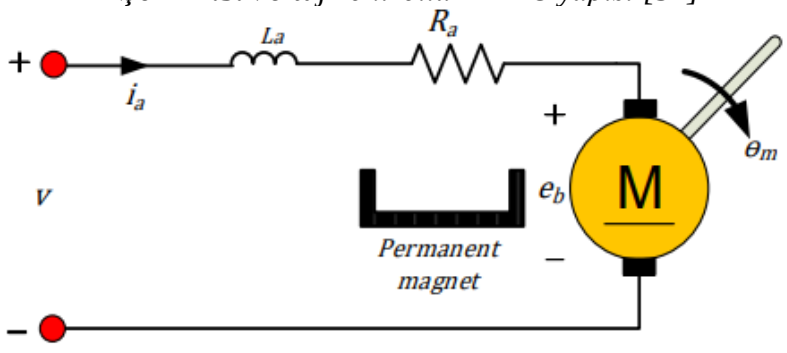
1.6. Motor Sürücü Topolojileri

Motor sürücüleri, elektrik motorlarının hız, tork ve yön kontrolünü sağlamak amacıyla kullanılan güç elektroniği devrelerinden oluşur. Bu devreler, girişten sağlanan elektrik enerjisinin motorun ihtiyaç duyduğu gerilim, akım ve frekans seviyelerine dönüştürülmesini sağlar. Güç elektroniği temel prensipleri çerçevesinde, motor sürücülerinde anahtar elemanların kontrollü anahtarlama davranışı ile enerji dönüştürme işlemi gerçekleştirilir. Motor sürücü topolojileri, motor tipine, uygulama gereksinimlerine ve kontrol stratejilerine göre farklı yapılar kullanır.

1.6.1. Doğrudan Gerilim Kontrollü Motor Sürücüleri

Anahtar elemanların (örneğin tristörler veya MOSFET'ler) anahtarlama oranı değiştirilerek (PWM yöntemiyle) motor armatürüne uygulanan gerilim ayarlanır. Böylece motor hızı kontrol edilir. Anahtarların anahtarlama frekansı yüksek tutulduğunda çıkışta filtrelenmiş gerilim, istenilen ortalama değere ulaşır.

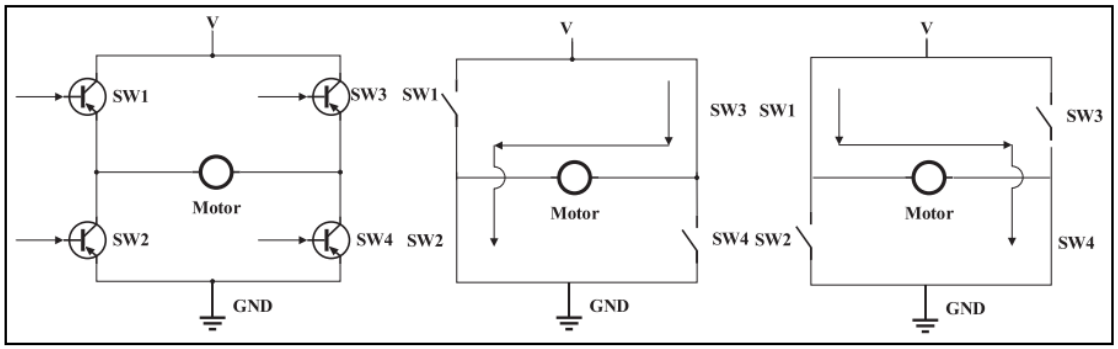
Şekil 1.5. *Voltaj kontrollü PMDC yapısı [32]*



1.6.2. H-Köprü (H-Bridge) Topolojisi

H-köprü topolojisi, fırçalı doğru akım motorlarının hem ileri hem de geri yönde döndürülmesine olanak tanır. Bu yapı dört adet anahtarlama elemanı (genellikle MOSFET veya IGBT) içerir ve bir "H" harfi şeklinde devre tasarımına sahiptir. Hız kontrolü PWM yöntemiyle yapılır. Bu yapı, elektrikli araçlarda, robotik sistemlerde ve hareket kontrolü gerektiren birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak anahtarlama hatalarında kısa devre riski bulunduğundan, doğru sürücü tasarımı büyük önem taşır.

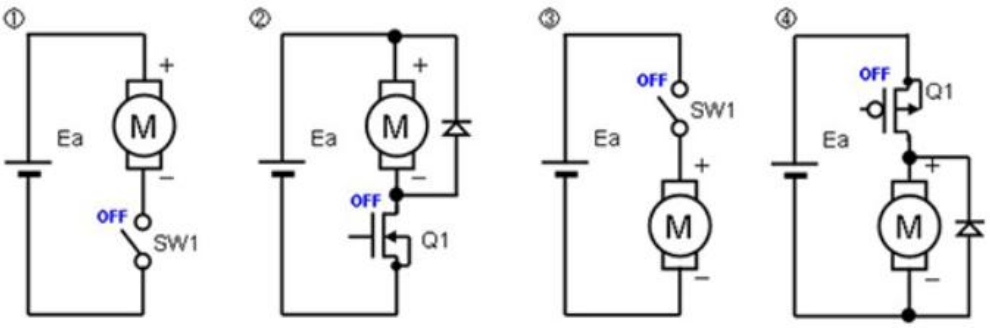
Şekil 1.6. *DC motor H-köprü yapısı [33]*



1.6.3. Yarım Köprü (Half-Bridge) Topolojisi

Yarım köprü topolojisi, iki adet anahtarlama elemanı ve bir motor fazı üzerinden çalışır. Bu yapı, tek yönlü motor kontrolü gerektiren basit uygulamalarda tercih edilir. Maliyeti düşüktür ve devre tasarımı kolaydır. Ancak yön kontrolü yapılamaz. Genellikle küçük güçlü motorların sürülmesinde ve düşük maliyetli sistemlerde kullanılır.

Şekil 1.7. *DC motor yarım köprü yapısı [34]*



1.6.4. Üç Fazlı Köprü Topolojisi

Üç fazlı tam köprü invertör, günümüzde fırçasız doğru akım motorları ve sürekli mıknatıslı senkron motorlar için en yaygın kullanılan güç devresi topolojisidir. Bu yapı,

doğru akımı üç fazlı alternatif akıma dönüştürerek motorun dönebilmesi için gerekli enerji akışını sağlar. Elektrikli araçlarda yüksek verimlilik, sessiz çalışma ve hassas hız-tork kontrolü gereklilikleri, bu topolojiyi standart haline getirmiştir.

Bu topolojide toplam altı adet yarı iletken anahtarlama elemanı bulunur. Genellikle bu elemanlar MOSFET veya IGBT olarak seçilir. Altı anahtar, üç kol halinde düzenlenmiştir; her kol, bir üst ve bir alt anahtardan oluşur ve bu kollar motorun üç fazına bağlanır. Her bir anahtarın açılıp kapanması, motor fazlarına doğru zamanda ve doğru polaritede enerji uygulanmasını sağlar. Bu yapı sayesinde rotor, belirlenen tork ve hız koşullarında döndürülür.

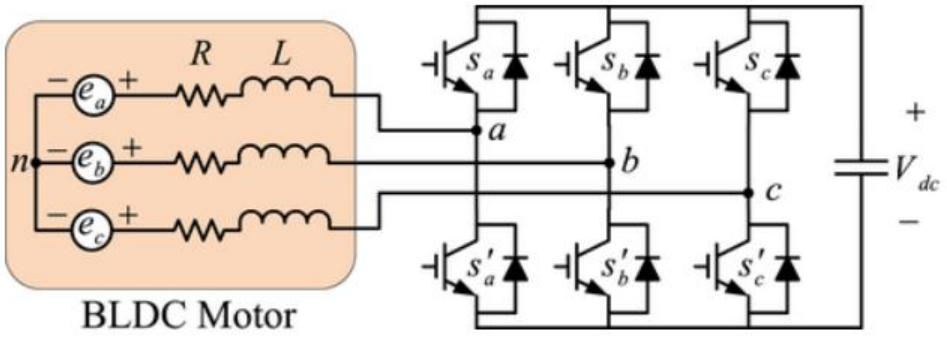
Üç fazlı tam köprü invertörün çalışma mantığı, belirli bir dizilimle anahtarların anahtarlanmasına dayanır. FDAM'larda bu süreç genellikle altı adımlı komütasyon olarak bilinir. Motorun rotor konumu, Hall sensörleri veya sensörsüz yöntemler ile algılanır ve bu bilgiye göre sürücü, hangi anahtarların açık olacağını belirler. Kontrolün temelinde, motorun manyetik alanı ile rotor konumu arasındaki açının sürekli olarak belirli sınırlar içinde tutulması vardır. Böylece motor maksimum verimle çalışır.

Bu yapı sadece sabit hız kontrolü için değil, aynı zamanda gelişmiş fonksiyonları desteklemek için de uygundur. Örneğin, PWM yöntemi ile motorun hız kontrolü yapılırken, akım kontrolü ile motorun tork üretimi hassas biçimde ayarlanabilir. Ayrıca modern üç fazlı invertör yapıları, rejeneratif frenleme yeteneğine de sahiptir. Bu sayede frenleme sırasında oluşan kinetik enerji, elektrik enerjisine dönüştürülerek bataryaya geri gönderilir. Bu özellik, özellikle menzil kısıtlı hafif elektrikli araçlarda enerji verimliliği açısından kritik öneme sahiptir.

Üç fazlı invertör yapısı, gelişmiş koruma özellikleri ile donatılmıştır. Aşırı akım, aşırı gerilim, kısa devre ve sıcaklık artışı gibi durumlarda koruma devreleri devreye girerek hem motoru hem de güç devresini korur. Bu güvenlik önlemleri, hem kullanıcı güvenliği hem de sistemin uzun ömürlü çalışması açısından zorunludur.

Günümüzde üç fazlı tam köprü invertör, yalnızca elektrikli bisikletler ve scooterlar gibi hafif elektrikli araçlarda değil; elektrikli otomobiller, hibrit araçlar, sanayi tipi robotlar ve otomasyon sistemlerinde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunun temel nedenleri arasında yüksek verimlilik, sessiz çalışma, geniş hız kontrol aralığı ve gelişmiş kontrol algoritmaları ile uyumluluk bulunmaktadır. Özellikle FDAM ve SMSM motorlar için bu topoloji standart olarak kabul edilmektedir.

Şekil 1.8. *BLDC motor üç fazlı köprü yapısı [35]*



1.7. Hafif Elektrikli Araçlarda Genellikle Kullanılan Topoloji

HEA'lar, enerji verimliliği, düşük maliyet ve kompakt yapı gereksinimleri nedeniyle genellikle üç fazlı tam köprü invertör topolojisini tercih eder. Bu araçlarda kullanılan motor tipleri arasında FDAM'lar öne çıkmaktadır. FDAM'lar, fırçasız yapıları sayesinde bakım gerektirmez, yüksek verimlilik sağlar ve kompakt tasarımları ile şehir içi kullanım için idealdir. Bu nedenle HEA'larda motor sürücü olarak kullanılan güç devresi neredeyse her zaman üç fazlı invertör yapısıdır.

Ancak bu donanımın üzerine uygulanacak kontrol algoritması, sistemin performansını doğrudan belirleyen kritik unsurdur. Aynı topoloji, farklı algoritmalarla çalıştırıldığında çok farklı sonuçlar verebilir. Geleneksel yöntemler olan altı adımlı komütasyon ve sinusoidal PWM gibi yöntemler basit yapıları nedeniyle yaygın olsa da, yüksek verimlilik, hassas moment kontrolü ve hız algılayıcısız çalışma gibi özellikler gerektiren uygulamalarda daha gelişmiş kontrol teknikleri tercih edilmektedir.

İKİNCİ BÖLÜM

FDAM SÜRÜCÜ KONTROL YÖNTEMLERİ VE ALGORİTMALARI

Bu bölümde, yüksek performanslı ve verimli sürücü kontrolü sağlamak amacıyla kullanılan farklı kontrol teknikleri ve algoritmaları incelenecektir. Bu yöntemler, FDAM sürücülerin dinamik davranışlarını optimize etmek, sistem kararlılığını artırmak ve enerji tüketimini minimize etmek için geliştirilmiş olup, modern elektronik motor sürücü uygulamalarında yaygın şekilde uygulanmaktadır.

2.1. FDAM Sürücü Kontrol Yöntemleri

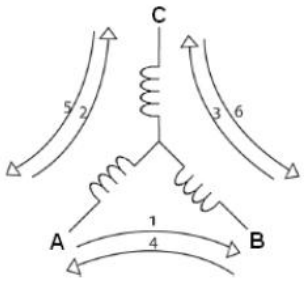
FDAM'lar, hafif elektrikli araçlar için en çok tercih edilen motor tiplerinden biridir. FDAM'lar, fırçasız yapısı sayesinde yüksek verimlilik, düşük bakım maliyeti, uzun ömür ve yüksek güç yoğunluğu gibi avantajlara sahiptir. Ancak bu motorların çalıştırılabilmesi için karmaşık bir sürücü devresi gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Çünkü rotor pozisyonunun doğru bir şekilde tespit edilip stator sargılarına sıralı olarak enerji verilmesi gerekmektedir.

Son yıllarda, FDAM'lerin yüksek performanslı ve hassas kontrolüne yönelik çalışmalar hem akademik araştırmalarda hem de endüstriyel uygulamalarda artarak devam etmektedir. Bu kapsamda geliştirilen yeni kontrol stratejileri, sistem verimliliğini artırma, enerji kayıplarını azaltma ve tahrik sistemlerinin güvenilirliğini artırma amacı taşımaktadır. FDAM sürücülerin yüksek başarımlı kontrolü için skaler kontrol yöntemi, vektör kontrol (VK) [36, 37], model öngörülü kontrol [38, 39] ve doğrudan moment kontrol (DMK) [40, 41] gibi yöntemler kullanılmaktadır.

FDAM sürücü algoritmaları temelde iki farklı strateji üzerine kuruludur;

Trapezoidal Kontrol Algoritması; En yaygın kullanılan yöntem olduğu bilinmektedir. Motorun üç fazlı sargıları, 120° elektriksel faz farkıyla altı farklı kombinasyonla anahtarlanmaktadır. Hall sensörlerinden alınan rotor pozisyon bilgisine göre ilgili MOSFET veya IGBT elemanları tetiklenir. Bu yöntem basit ve düşük maliyetlidir; ancak tork dalgalanmaları yüksek olduğundan düşük hızlarda çalıştığında titreşim problemi meydana gelebilir.

Şekil 2.1. *Trapezoidal kontrol algoritması şematik gösterimi [42]*



Sinüzoidal Kontrol Algoritması; Bu yöntemde, motorun üç fazı da aynı anda sinüzoidal voltajlarla enerjilendirilir. Bu, daha düzgün bir tork üretilmesini ve motorun daha hassas bir şekilde kontrol edilmesini sağlar. Hassas bir sinüzoidal dalga formu elde etmek için, konum bilgisinin bir derece veya daha iyi bir çözünürlüğü gereklidir [42]. Bu sayede motor daha yumuşak çalışma sayesinde titreşim ve gürültü azaltılmış olur. Ancak bu yöntemde kontrol daha karmaşık hale geldiğinden daha güçlü işlemcilere ihtiyaç duyulmaktadır.

FDAM sürücü algoritmalarında ayrıca hız kontrolü, tork kontrolü ve akım sınırlama fonksiyonları da entegre edilir. Bu sayede motorun farklı sürüş koşullarında güvenli ve verimli çalışması sağlanmaktadır.

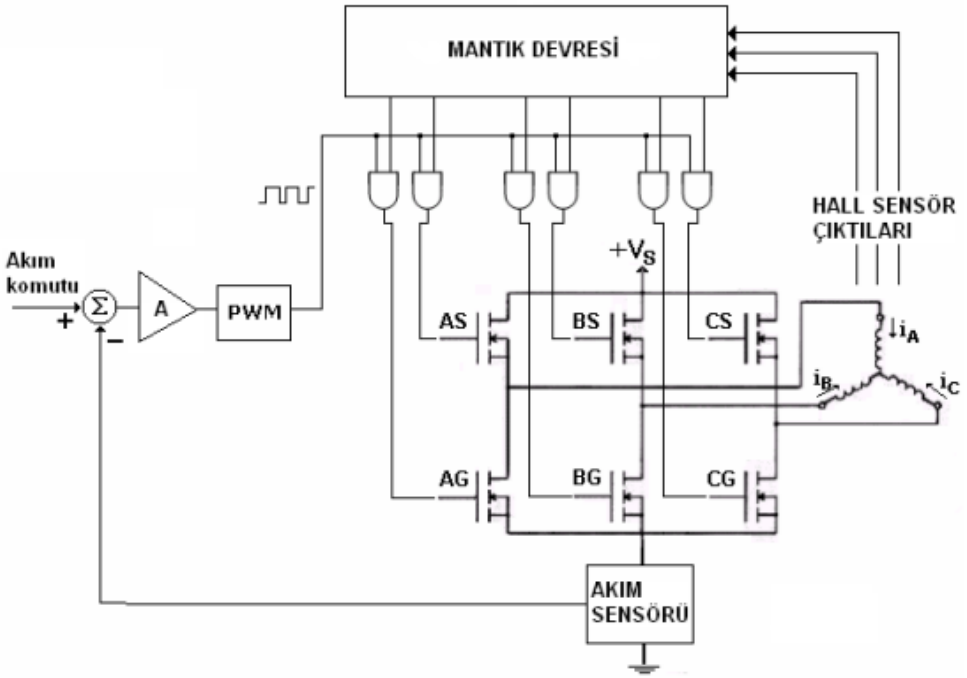
2.2. Kontrol Yöntemleri

FDAM'ların kontrol edilebilmesi için gelenekselden gelişmişe çok sayıda yaklaşım geliştirilmiştir. Bunlar arasında klasik P (Oransal-Proportional), PI (Oransal,Integral-Proportional-Integral) ve PID (Oransal,İntegral,Türev-Proportional,Integral,Derrivative) denetleyiciler, bulanık mantık tabanlı kontrol, yapay sinir ağları (YSA'ları) destekli uyarlamalı kontrol yapıları, model referans uyarlamalı sistem, uyarlanır/değişken yapılı kontrol, doğrusal olmayan kontrol teknikleri, ayrıca sistem modeline dayalı ileri beslemeli (feedforward) veya hesaplanmış moment/tork tabanlı denetim yöntemleri sayılabilir. FDAM'lar geniş hız aralığında çalışabilmeleri ve akı-tork ilişkisinin

elektronik olarak şekillendirilebilmesi sayesinde çok farklı kontrol stratejilerine uygundur; bununla birlikte pek çok endüstriyel uygulamada hâlâ basit P, PI veya PID tabanlı hız/akım regülatörleri tercih edilmektedir çünkü uygulanmaları görece kolaydır, gerçek zamanlı işlemci yükü düşüktür ve güvenilir performans sunarlar [43].

Bu kontrolörler, geri besleme topolojisine bağlı olarak iki temel kategori altında incelenir. Açık çevrim (geri beslemesiz) kontrol ve kapalı çevrim (geri beslemeli) kontrol. Açık çevrim yaklaşımında referans komutuna göre anahtarlama yapılırken motor çıkış değişkenleri izlenmez; kapalı çevrim yaklaşımında ise hız, akım veya tork gibi büyüklükler ölçülerek (veya tahmin edilerek) referansla karşılaştırılır, hata sinyori üzerinden denetim uygulanır. Hafif elektrikli araç uygulamalarında değişken yük, eğim ve hızlanma şartları nedeniyle kapalı çevrim kontrol stratejileri pratikte zorunlu hâle gelmektedir.

Şekil 2.2. *Temel sürücü devre yapısı [29]*



2.2.1. Açık Çevrim (open-loop) Kontrol

Açık çevrim kontrol yöntemi, elektrik motorlarının hız ve tork kontrolünde kullanılan en basit kontrol stratejisidir. Bu yöntemde motorun çıkış parametreleri olan hız, tork veya pozisyon ölçülmez ve kontrol sistemi, sadece giriş sinyali üzerinden motor davranışını yönlendirir. Başka bir ifadeyle, kontrolör tarafından üretilen komut sinyali doğrudan

motora uygulanır ve motorun bu komut sonucunda oluşturduğu çıktı geri beslenmez. Bu nedenle sistemde herhangi bir hata düzeltme mekanizması bulunmaz.

Açık çevrim kontrol yönteminin en yaygın uygulama alanlarından biri, fırçalı DA motorlarda PWM sinyali kullanılarak yapılan hız kontrolüdür. PWM sinyali ile motorun gerilimi, dolayısıyla akımı ve torku kontrol edilir. Ancak motor yükü değiştiğinde, örneğin elektrikli araç yokuş çıkarken ya da ani hızlanma istenildiğinde, motorun yüklenmesi artar. Açık çevrim kontrol yönteminde motorun çıkış parametreleri ölçülmediği için, yük artışı sonucu motorun dönme hızı düşer ve bu hız kaybı sistem tarafından algılanamaz. Bu durum, hız ve tork kontrol hassasiyetinin düşük olmasına yol açar.

Teorik olarak, açık çevrim kontrol yapısı;

$$U(s) = R(s) \tag{2.1}$$

şeklinde ifade edilir. Burada, U(s) çıkış sinyali, R(s) referans giriş sinyalidir. Sistemin transfer fonksiyonu ise kontrol döngüsünde etkili olmaz. Bu nedenle sistem dinamikleri, dış etkenlere ve yük değişimlerine karşı savunmasızdır.

Avantajları arasında, kontrol algoritmasının son derece basit olması, düşük işlemci kapasitesi gerektirmesi, kontrol devresinin karmaşık olmaması ve maliyetinin düşük olması yer almaktadır. Özellikle motorun yük değişimlerinin minimal olduğu sabit hız uygulamalarında, açık çevrim kontrol ekonomik bir çözüm sunar. Bununla birlikte, yük değişimlerine duyarsız olması, hız ve tork kararlılığının düşük olması, hız geri beslemesinin olmaması nedeniyle elektrikli araçlarda ana tahrik motoru kontrolü için uygun değildir. Elektrikli araçlarda gaz pedalının PWM duty cycle ayarı ile doğrudan motora gerilim uyguladığı basit scooter kontrol ünitelerinde açık çevrim kontrol görülse de, kalkış performansı, yokuş çıkış ve rejeneratif frenleme gibi fonksiyonlar için kapalı çevrim kontrol gereklidir.

Sonuç olarak, açık çevrim kontrol yöntemi, sistem hassasiyetinin ve dinamik yanıt gereksiniminin düşük olduğu uygulamalarda tercih edilmekte; modern HEA tahrik sistemlerinde ise kontrol kararlılığı ve güvenlik gereklilikleri nedeniyle yerini kapalı çevrim kontrol yöntemlerine bırakmaktadır.

2.2.2. Kapalı Çevrim (closed-loop) Kontrol

Kapalı çevrim kontrol, modern elektrik motor sürücü sistemlerinin temelini oluşturan, motorun hız, tork veya pozisyon gibi çıkış parametrelerinin sensörler yardımıyla ölçülerek kontrol algoritmasına geri beslenmesi prensibine dayanır. Bu yöntemde, ölçülen çıkış parametresi, referans değer ile karşılaştırılır ve oluşan hata sinyaline göre kontrolör tarafından uygun giriş sinyali üretilir. Böylece sistem, dış yük değişimleri veya besleme gerilimi dalgalanmalarından bağımsız olarak istenilen değeri hassas bir şekilde takip eder.

Kapalı çevrim kontrol sistemlerinde, genellikle PI veya PID kontrol algoritmaları kullanılmaktadır. Örneğin, motor hız kontrolünde PI kontrolörü, hız hatasını minimize etmek için motor akımını veya gerilimini düzenler. FDAM'larda, Hall sensörlerinden elde edilen rotor konumu bilgisi, kapalı çevrim hız kontrolü için temel veri kaynağıdır. SMSM ve DSMSM motorlarda ise enkoder veya sensörsüz rotor konum kestirim algoritmaları kullanılır.

Kapalı çevrim kontrolün matematiksel ifadesi şu şekildedir:

$$E(s) = R(s) - Y(s) \tag{2.2}$$

$$U(s) = G_C(s) \times E(s) \tag{2.3}$$

$$Y(s) = G_p(s) \times U(s) \tag{2.4}$$

Burada, E(s) hata sinyali, R(s) referans, Y(s) çıkış, G_c(s) kontrolör transfer fonksiyonu ve G_p(s) motor-sürücü sisteminin transfer fonksiyonudur. Bu yapı, hata sinyalini minimize ederek sistemin referans takibini sağlar.

Kapalı çevrim kontrol yöntemlerinin başlıca avantajları; yük değişimlerine karşı yüksek kararlılık, istenilen hız ve tork değerlerinin hassas takibi, rejeneratif frenleme fonksiyonlarının entegre edilebilmesi ve güvenli çalışma aralığının korunabilmesidir. Elektrikli araçlarda hız sabitleme, kalkış kontrolü, eğim algılama ve hız sınırlama gibi sürüş güvenliği fonksiyonlarının tamamı kapalı çevrim kontrol yöntemleri ile gerçekleştirilmektedir.

Dezavantajları ise kontrol algoritmasının karmaşıklığı, işlemci yükünün açık çevrim kontrol sistemlerine göre yüksek olması ve sensör maliyetlerinin toplam sistem

maliyetine etkisidir. Ancak modern DSP(Digital Signal Processor) ve MCU(Microcontroller Unit)'ların işlemci kapasitelerinin artması ve sensörsüz kontrol algoritmalarının gelişmesiyle, kapalı çevrim kontrol, HEA motor sürücülerinde standart hale gelmiştir.

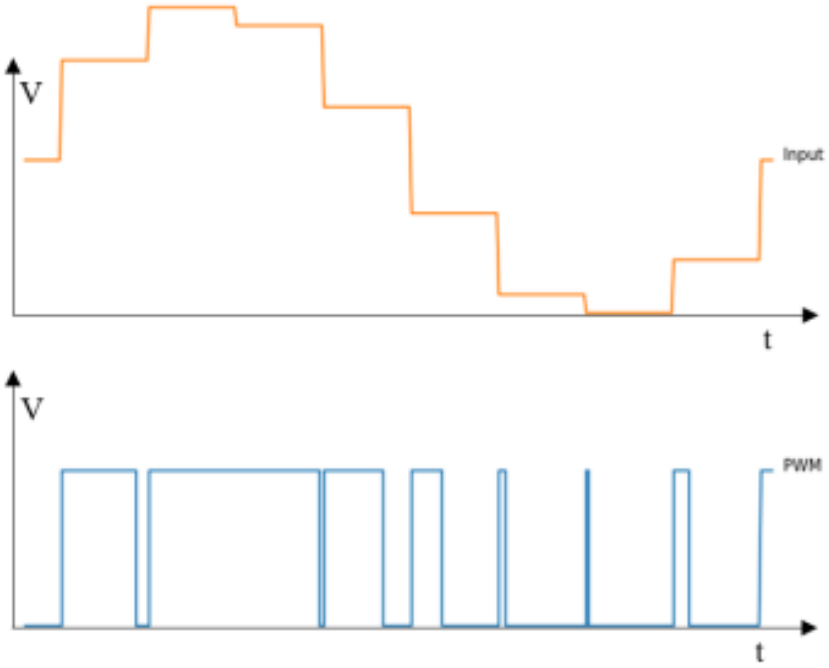
2.3. Temel Algoritmalar

Elektrikli araçlarda kullanılan motor kontrol algoritmaları, performans, enerji verimliliği ve kullanıcı konforu açısından kritik öneme sahiptir. Bu algoritmalar yalnızca hız ve torku kontrol etmekle kalmıyor, aynı zamanda batarya ömrünü de optimize edtmektedir. Isıl yönetim sağlayarak güvenlik fonksiyonlarıyla entegre çalışmaktadır. Hafif elektrikli araçlarda bu gereksinimler önemlidir, çünkü batarya kapasitesi sınırlı olduğundan bu durum sürüş konforunu etkilediği için doğrudan müşteri memnuniyetine de etki eder.

2.3.1. PWM (Pulse Width Modulation) Tabanlı Kontrol

PWM, motor sürücü sistemlerinde gerilim veya akım kontrolünü sağlamak için kullanılan temel anahtarlama yöntemidir. PWM algoritması, yarı iletken anahtarlama elemanlarının belirli bir taşıyıcı frekansta (genelde 10-20 kHz) açılıp kapatılması ve duty cycle oranının değiştirilmesi ile motor uçlarına uygulanan ortalama gerilimin kontrol edilmesi esasına dayanır. Duty cycle arttıkça motor uçlarındaki ortalama gerilim artar ve motor hızı yükselir; duty cycle azaldığında ise hız düşer. Şekil 2.3'de Örnek Giriş değerleri ne Karşılık PWM çıkış değerleri gözükmektedir.

Şekil 2.3. *Örnek giriş değerleri için PWM çıkışı [44]*



PWM kontrolü, sadece açık çevrim DA motor hız kontrolünde değil, FOC(Field Oriented Control) ve DMK gibi gelişmiş vektör kontrol algoritmalarında da inverter anahtarlama sinyallerinin oluşturulmasında temel yöntem olarak kullanılır. Ayrıca SVPWM (Space Vector PWM) gibi gelişmiş PWM teknikleri, switching kayıplarını minimize etmek ve DA bara voltajının daha verimli kullanılmasını sağlamak amacıyla geliştirilmiştir.

Matematiksel olarak PWM çıkış gerilimi şu şekilde ifade edilir:

$$V_{out} = D \times V_{in} \tag{2.5}$$

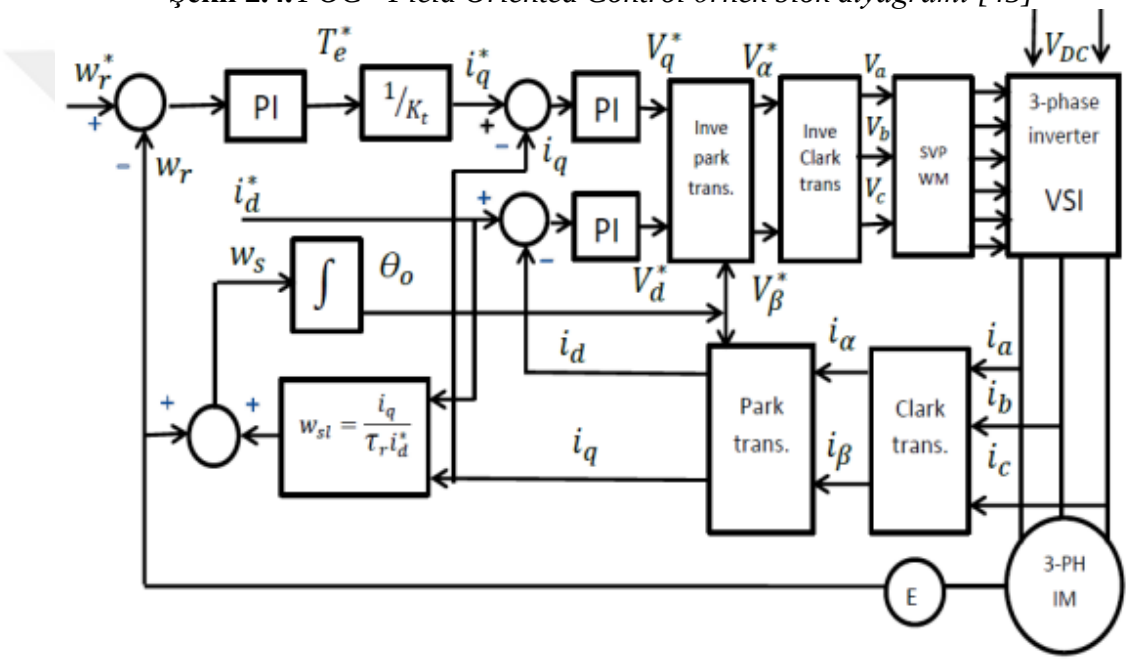
Burada, V_{out} çıkış gerilimi, V_{in} giriş DA gerilimi, D duty cycle oranıdır.

PWM tabanlı kontrolün avantajları; uygulama kolaylığı, düşük işlemci gereksinimi ve tüm motor kontrol algoritmaları için evrensel anahtarlama çözümü sunmasıdır. Dezavantajları ise switching kayıpları ve EMI (Electromagnetic Interference) problemleridir. Bu nedenle inverter tasarımında dead-time optimizasyonu, gate driver devrelerinin tasarımı ve uygun filtreleme yöntemleri kritik öneme sahiptir.

2.3.2. Alan Yönlendirmeli Kontrol (FOC - Field Oriented Control)

FOC, modern motor kontrol teknikleri arasında en verimli yöntemlerden biridir. FDAM ve SMSM'lerde rotor manyetik alanını d-q koordinat sistemine dönüştürerek tork (Iq) ve manyetik akı (Id) bileşenlerini bağımsız olarak kontrol eder. Genel olarak çalışma prensibi şekil 2.4'de de görüldüğü üzere Clarke ve Park dönüşümleri ile üç fazlı akım (abc), d-q eksenlerine projeksiyon yapılır. PI denetleyiciler kullanılarak Id ve Iq akımları kontrol edilir. Hedef: Id bileşeni sabit veya sıfır, Iq bileşeni ise tork referansına göre ayarlanır.

Şekil 2.4. *FOC - Field Oriented Control örnek blok diyagramı [45]*



Alan yönlendirmeli kontrolün avantajları şu şekildedir;

- Çok düşük tork dalgalanması - konforlu sürüş
- Geniş hız aralığında kararlı performans
- Enerji verimliliği → batarya ömrü uzar

Dezavantajları ise şu şekildedir;

- Güçlü işlemci ve hızlı ADC(Analog Digital Converter) gerektirir.
- Algoritma karmaşıktır , yazılım geliştirme maliyeti artar.

2.3.3. Doğrudan Moment Kontrolü (Direct Moment Control-DMC)

DMK, FOC gibi karmaşık dönüşümler yerine tork ve manyetik akıyı doğrudan kontrol eden bir yöntemdir. Tork ve akı gözlemlenerek histerezis kontrolcüsü ile referans

aralıklarında tutulur. Her kontrol döngüsünde inverterin anahtarlama durumu seçilir. Bu sistemin avantajları şu şekildedir;

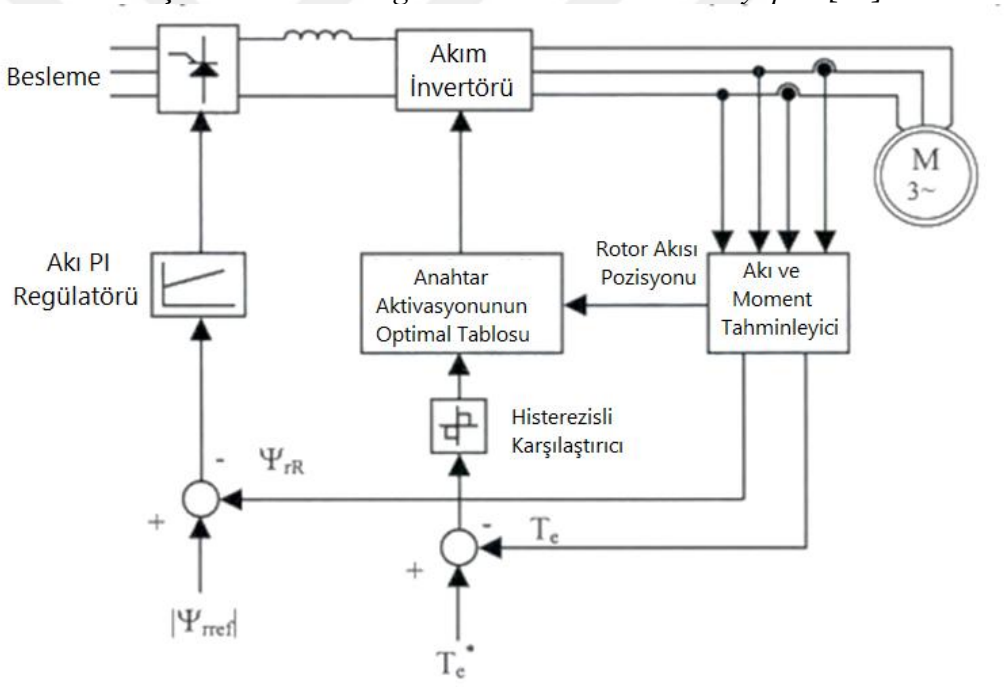
- Çok hızlı dinamik tepki (FOC'tan daha hızlı olabilir)
- Sensörsüz uygulamalarda kolay implementasyon

Dezavantajları ise şu şekildedir;

- Yüksek akım dalgalanması
- Akustik gürültü ve titreşim

Yüksek hızlanma gerektiren HEA'larda (ör. elektrikli motosiklet) tercih edilebilir bir yöntemdir. Şekil 2.5'de örnek bir DMK şeması verilmiştir.

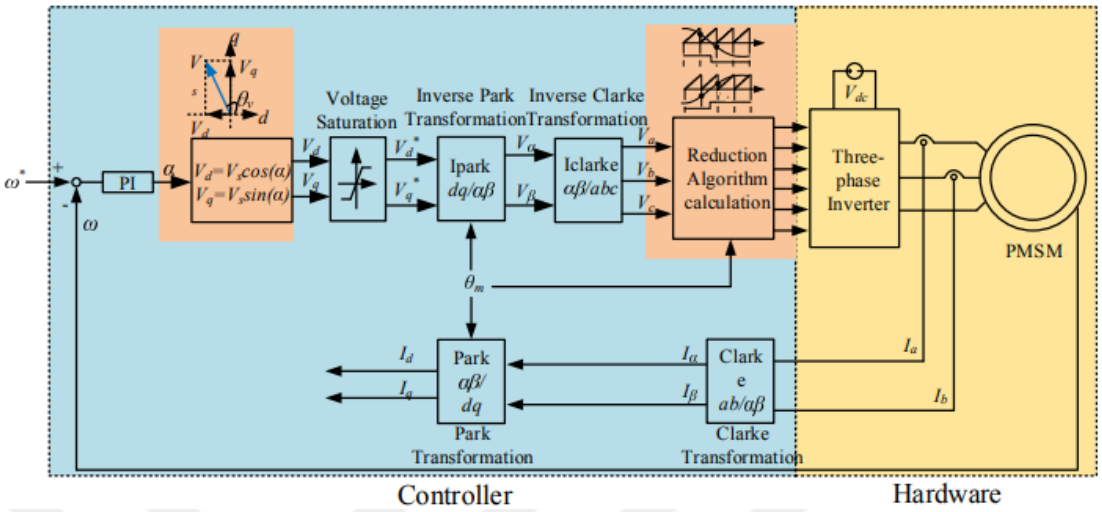
Şekil 2.5. *DMK algoritmasının temel kontrol yapısı [46]*



2.3.4. Trapezoidal Kontrol

FDAM'lara özgüdür ve six-step (altı adımlı) komütasyon olarak da bilinmektedir. Hall sensörlerinden alınan konum bilgisiyle fazlara sıralı olarak enerji verilen bir yöntemdir. Şekil 2.6'da örnek bir six-step blok diyagramı gösterilmiştir.

Şekil 2.6. *Kapalı devre voltaj faz açısı kontrolü kullanan bir kontrol diyagramı örneği [47]*



Basit ve düşük maliyetli sürücülerde genellikle yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sistemin dezavantajları şu şekildedir;

- Tork dalgalanması
- Gürültü ve titreşim
- Düşük hızda kötü performans

2.3.5. Sinüzoidal Kontrol

Sinüzoidal kontrol, motor fazlarına sinüzoidal akım uygulamasına dayanır. FOC algoritması bu yöntemin en gelişmiş uygulamasıdır. Sessiz çalışma, düşük tork ripple ve düşük harmonik kayıplar sağlarken; işlemci yükünün yüksek olması ve motor parametre hassasiyeti, DMK algoritmasına kıyasla HEA uygulamalarında maliyet-performans açısından dezavantaj oluşturmaktadır.

2.4. Sensörlü ve Sensörsüz Kontrol Teknikleri

Elektrikli araç tahrik sistemlerinde motorun hız, tork ve rotor konum bilgisinin doğru şekilde belirlenmesi, kontrol algoritmalarının başarısını doğrudan etkilemektedir. FDAM ve SMSM'lerde, komütasyon sıralamasının ve vektör kontrol yöntemlerinin uygulanabilmesi için rotor konum bilgisi kritik öneme sahiptir. Bu bilgi, sistemde sensörlü (sensored) veya sensörsüz (sensorless) kontrol yöntemleri ile elde edilmektedir. Her iki yaklaşım, maliyet, güvenilirlik, kontrol hassasiyeti ve işlemci kapasitesi gereksinimleri açısından farklı avantajlar ve sınırlamalar sunar.

2.4.1. Sensörlü Kontrol Teknikleri

Sensörlü kontrol yöntemlerinde motorun rotor konum bilgisi doğrudan fiziksel sensörler aracılığıyla ölçülür ve motor sürücüsüne geri beslenir. FDAM'larda genellikle Hall etkili sensörler tercih edilirken, SMSM ve DSMSM motorlarda enkoder veya resolver kullanılmaktadır. Hall sensörleri, rotor üzerindeki kalıcı mıknatısların kutup geçişlerini algılayarak 60° elektriksel aralıklarda dijital sinyal üretir. Bu sayede elektronik komütasyon sıralaması doğru şekilde uygulanır.

2.4.1.1. Hall Sensörlü Kontrol

FDAM'larda yaygın kullanılan yöntemdir. Üç adet Hall sensörü, motor fazlarına 120° elektriksel açıyla yerleştirilir. Sensörlerin ürettiği dijital sinyaller motor sürücüsüne iletilir ve inverter anahtarlama durumu, motorun elektriksel çevrimi boyunca altı komütasyon adımıyla belirlenir. Özellikle düşük güçlü e-bike, scooter ve küçük fan uygulamalarında tercih edilir.

Avantajları:

- Basit kontrol algoritması
- Düşük işlemci gereksinimi
- Kalkış ve düşük hızlarda güvenilir çalışma

Dezavantajları:

- Sensör arızası durumunda motor çalışmaz
- Sıcaklık ve titreşime duyarlılık
- Montaj karmaşıklığı ve kablolama maliyeti

2.4.1.2. Enkoder ve Resolver Tabanlı Kontrol

SMSM motorlarda, rotor konumu yüksek hassasiyetle ölçülmelidir. Enkoderler optik, manyetik veya kapasitif prensiple çalışan ve motor mili üzerine monte edilen sensörlerdir. Resolverlar ise elektromekanik transformatör prensibiyle çalışır ve zorlu çevresel koşullarda güvenilirlik avantajına sahiptir.

Avantajları:

- Yüksek çözünürlük (ör. 4096 CPR enkoder)
- FOC algoritmaları için ideal geri besleme
- Hız ve pozisyon kontrol hassasiyeti yüksek

Dezavantajları:

- Yüksek maliyet
- Kablo ve montaj karmaşıklığı
- Çevresel etkilerden kaynaklanan arıza riski

2.4.2. Sensörsüz Kontrol Teknikleri

Sensörsüz kontrol, rotor konum ve hız bilgisinin motor elektriksel parametrelerinden kestirilmesine dayanan yöntemdir. Bu yaklaşımda fiziksel sensör kullanılmaz; motor gerilim ve akım ölçümleri, motor matematiksel modeli ve kestirim algoritmaları aracılığıyla işlenerek rotor pozisyonu ve hızı tahmin edilir. Bu yöntemlerde donanım karmaşıklığı ve maliyet daha azdır. Buna karşın kestirim başarımı yüksektir.

2.4.2.1. Zıt-EMK (Zıt-Elektromotor Kuvveti) Tabanlı Yöntemler

FDAM'larda en yaygın sensörsüz yöntem, zıt-Elektromotor Kuvveti (zıt-EMK) sıfır geçiş (Zero Crossing-ZC) yöntemidir. Bu yöntemde sürülmeyen fazın Zıt-EMF gerilimi ölçülür ve sıfır geçiş noktaları rotor konum kestirimi için kullanılır. Özellikle orta-yüksek hızlarda başarılı sonuç verir; çünkü motor hızı arttıkça zıt-EMK'nın genliği artar. Ancak sıfır veya düşük hızlarda (özellikle ilk kalkışta) zıt-EMK çok düşük olduğundan kontrol zorluğu yaşanır.

2.4.2.2. Observer (Gözlemci) Tabanlı Yöntemler

SMSM ve FDAM'larda düşük hız sensörsüz kontrol için gelişmiş gözlemleyici/kestirici tabanlı algoritmalar kullanılır. Elektrik motorlarının hız kestiriminde kullanılan gözlemleyici ve kestirici algoritmaların bir kısmı aşağıda sıralanmıştır.

- Kayma kipli gözlemleyici (Sliding Mode Observer, SMO): Genel olarak kayma kipli gözlemleyici, ölçülen çıkış büyüklükleri ile kestirilen çıkış büyüklüklerinin farkının alınması ile elde edilen hatanın süreksiz fonksiyonunun gözlemleyicide giriş olarak kullanılması sonucu elde edilir. Hızlı kestirim sağlar ancak chattering problemi vardır.
- Genişletilmiş Kalman Filtresi (GKF): durum uzayı ile ifade edilen motor modelinin giriş çıkış bilgilerinin kullanılması ile sistemin durum ve parametrelerini kestiren bir gözlemleyici algoritasıdır. Ölçüm gürültülerine hesaba katma yeteneği sayesinde sıfır veya düşük hız bölgelerinde yüksek

performansla kestirim işlemini gerçekleştirir. Bununla birlikte matris çarpımları ve matris tersi içermesi nedeniyle yüksek işlem yüküne sahiptir.

- Modele uyarlamalı sistem (MUS): Referans ve uyarlanabilir olmak üzere iki modelden oluşan MUS, bu modellerin çıkışlarındaki hatayı bir uyarlama mekanizmasından geçirerek kestirim gerçekleştirir. MUS'ta referans model kestirilmek istenen durum veya parametre bilgisinden bağımsızdır. Buna karşın uyarlanabilir model kestirilmek istenen durum veya parametreye bağımlıdır. Geleneksel MUS yapılarında uyarlama mekanizması PI denetleyicidir.

Bu yöntemlerde motor parametreleri (endüktans, direnç, akı sabiti gibi.) sıcaklık ve frekans gibi çalışma koşullarıyla değiştiği için gözlemleyicilerin veya kestiricilerin performansını doğrudan etkilemektedir.

Bu tez çalışmasında FDAM'ni rotor hızı kestirimi için stator akım tabanlı MUS kestirici önerilmiştir. Stator akım tabanlı hız kestricide referans model olarak doğrudan ölçülen stator akımları kullanılırken uyarlanabilir model olarak FDAM'nin stator akım denklemleri kullanılmıştır. Geleneksel MUS'tan farklı olarak uyarlama mekanizmasında PI denetleyici yerine LMS algoritmasının ağırlık katsayılarının güncelleme denklemi kullanılmıştır. FDAM stator akımlarında elde edilen ağırlık katsayılarında rotor hızı güncellenen ağırlık katsayısı iken motor parametrelerinden oluşan diğer ağırlık katsayıları sabit kabul edilmiştir ve değerleri bilinmektedir. Böylece sadece ağırlık katsayılarından hıza bağlı olan katsayı güncellendiğinden dolayı hız kestirimi yüksek performansla gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte bu tür hız kestiricilerinde büyük miktarda artık/gereksiz veri işlenmek zorunda kalmaktadır. Bu da işlemcinin işlem yükünü artırmaktadır. Bu tez çalışmasında kullanılan stator akım tabanlı MUS hız kestiricisinin işlem yükünü azaltmak için aralık sansürleme yöntemi kullanan ve daha az bilgilendirici içeren verileri ayıklayan çevrimiçi sansürleme (online cencoring, OC) stratejisi kullanılmıştır.

Bu çalışmada önerilen OC tabanlı stator akım tabanlı MUS kentsel dinamometre sürüş programı(Urban Dynamometer Driving Schedule-UDDS) hız döngüsünün DMK tabanlı sürücüye referans hız bilgisi olarak verilen zorlayıcı senaryo ile farklı sansürleme oranları ile test edilmiştir. Ayrıca elektrikli araç modelinden elde edilen yük momenti değişimleride motora zorlayıcı senaryo olarak uygulanmıştır. Sıfır hız durumlarınıda içeren geniş bir hız aralığı için alınan benzetim sonuçları önerilen kestiricinin farklı

sansürleme oranları için yüksek başarıma sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca önerilen yaklaşımın çalışma süresini kestirimim başarımını çok fazla etkilemeden önemli ölçüde azalttığı gösterilmiştir.

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

OC-LMS TABANLI MUS KESTİRİCİSİ KULLANAN HIZ-ALGILAYICISIZ DOĞRUDAN MOMENT KONTROLLÜ FDAM SÜRÜCÜSÜNÜN TASARIMI

Yüksek başarımlı kontrol yöntemleri FDAM'nin konum ve hız bilgisini gerektirmektedir. Hız-algılayıcısız yöntemlerde bu bilgiler kestiriciler/gözlemleyiciler tarafından kontrol sistemine sağlanır. FDAM'lerin hız ve/veya konum bilgisi kestirimleri için kayma kipli gözlemleyici [40], yapay sinir ağları tabanlı kestirici [48], adaptif gözlemleyici [41], doğrusal olmayan Kalman filtresi [49, 51, 52] ve (MUS) tabanlı kestirici [53, 54] algoritmaları literatüre önerilmiştir.

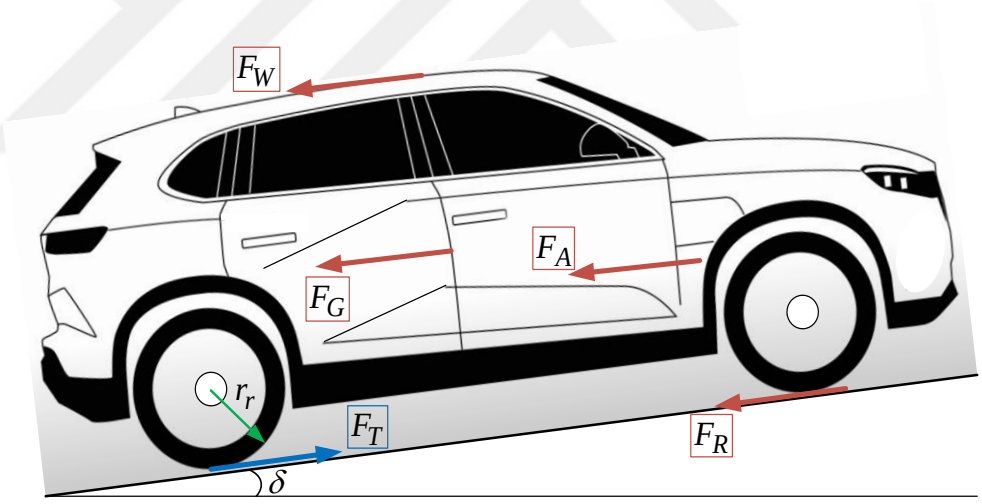
Elektrik motorlarının hız ve/veya konum kestirimi için adaptif filtre temelli MUS algoritmaları geliştirilmiştir [52-56]. Bu çalışmalardan [52]'de SMSM'lerin hız kestirimi için LMK ve LMS tabanlı MUS, [56, 57]'te ASM'ler için sırasıyla LMS ve LMK tabanlı MUS kestirici yapıları önerilmiştir. Bu çalışmalar adaptif filtre tabanlı MUS yapılarının geleneksel PI kontrolör kullanan MUS yapılarından daha iyi kestirim başarımına sahip olduklarını göstermiştir. Ek olarak [50]'de ise FDAM'lerin hız kestirimi için LMS, LMK ve en küçük ortalama dördüncü (Least mean fourth, LMF) temelli MUS yapıları önerilmiştir. Bununla birlikte bu tür hız kestiricileri büyük miktarda gereksiz bilgiyi işlemek zorunda kalmaktadır. Bu da DSP'lere ciddi bir işlem yükünü getirmektedir. İşlem yükünü azaltmak için aralık sansürleme yöntemi kullanan ve daha az bilgilendirici verileri ayıklayan çevrimiçi sansürleme (online censoring-OC) stratejisi Berberidis vd. tarafından 2016 yılında [55]'de yer alan çalışmada geliştirilmiştir. Bu strateji önemli verileri belirleyip artık/gereksiz verileri sansürleyerek, başarımı düşürmeden işlem yükünün azaltılmasını amaçlamaktadır.

Literatürde, OC stratejisini dahil eden adaptif filtre algoritmalarından OC tabanlı LMS (OC-LMS) algoritması [58-59] ile farklı sinyal işleme uygulamaları için yüksek başarımlı sonuçlar elde edilmiştir. OC stratejisinin sunduğu işlem verimliliğinden faydalanılarak, adaptif filtre tabanlı MUS algoritmalarının işlem yükünün azaltılması mümkün hale getirebilir. Böylelikle, düşük işlem yüküne sahip tasarlanan kestiriciler, elektrikli araçlar ve endüstriyel uygulamalarda hız kestirimi amacıyla kullanılabilir ve motor sürücü sistemlerinin genel verimliliğini artırmada etkili bir çözüm sunabilir.

3.1. Elektrikli Araç Modeli

Hareketli bir araca etkiyen kuvvetler rüzgar kuvveti (F_W), yuvarlanma kuvveti (F_R), yerçekimi kuvveti (F_G) ve aracı hızlandıran ivme kuvveti (F_A) olarak sırlanabilir. Şekil 3.1'de gösterildiği gibi bir araca etkiyen kuvvetlerin toplamı (F_T) toplam çekiş kuvveti olarak isimlendirilir ve aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir [60, 61].

Şekil 3.1. *Elektrikli araç modeli*



$$F_T = F_R + F_W + F_G + F_A \tag{3.1a}$$

$$F_T = K_R M_v g \cos\delta + K_W A V^2 + M_v g \sin\delta + M_v a \tag{3.1b}$$

Denklem (4.1b) ile verilen EA modelinde M_v aracın kütlesi, g yerçekimi katsayısı, K_R yuvarlanma direnci katsayısı, K_W rüzgar direnci katsayısı, a aracın ivmesi, A aracın ön yüzey alanı ve δ yolun eğimidir. EA'yı tahrik edecek elektrik motorunun hızı (ω_m) ve bu motora etkiyen yük momenti (τ_l) ifadeleri aşağıdaki denklemler ile hesaplanmaktadır [58]:

$$\omega_m = \frac{r_f}{r_r} V \tag{3.2}$$

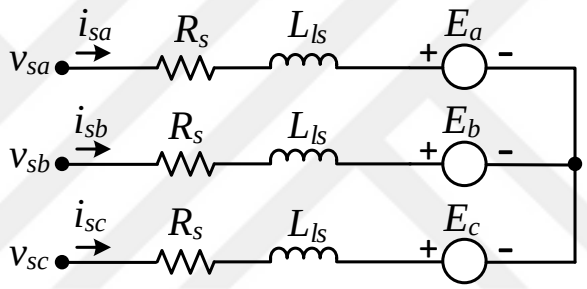
$$\tau_l = \frac{r_r}{r_f} F_T \tag{3.3}$$

burada r_r ve r_f sırasıyla tekerleğin yuvarlanma yarıçapı ve dişli oranıdır.

3.2. FDAM Modeli

Şekil 3.2'de verilen FDAM eşdeğer devresi kullanılarak elde edilen stator akım denklemleri ile indüklenen moment denklemi ve mekanik hareket denklemi aşağıdaki gibi verilebilir.

Şekil 3.2. *FDAM üç faz eşdeğer devresi*



$$\frac{di_{sa}}{dt} = -\frac{R_s}{L_{ls}} i_{sa} + \frac{1}{L_{ls}} v_{sa} - \frac{1}{L_{ls}} E_a \tag{3.4}$$

$$\frac{di_{sb}}{dt} = -\frac{R_s}{L_{ls}} i_{sb} + \frac{1}{L_{ls}} v_{sb} - \frac{1}{L_{ls}} E_b \tag{3.5}$$

$$\frac{di_{sc}}{dt} = -\frac{R_s}{L_{ls}} i_{sc} + \frac{1}{L_{ls}} v_{sc} - \frac{1}{L_{ls}} E_c \tag{3.6}$$

$$\tau_e = (\varphi_{ra} i_{sa} + \varphi_{rb} i_{sb} + \varphi_{rc} i_{sc}) p_p \tag{3.7}$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{\tau_e}{J_t} - \frac{B_t}{J_t} \omega_m - \frac{\tau_l}{J_t} \tag{3.8}$$

Burada; 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 3-faz stator zıt-EMK değerlerini, v_{sa}, v_{sb} ve v_{sc} 3-faz stator gerilimlerini, τ_e indüklenen momenti, φ_{ra}, φ_{rb} ve φ_{rc} rotor akılarını, B_t ve J_t eylemsizliği ve viskoz sürtünme terimini ve p_p kutup çifti sayısını temsil etmektedir. 3-faz stator zıt-EMK değerleri rotordaki manyetik akıya (λ_m'ye), rotor elektriksel konum bilgisine (θ_e'ye) ve motorun hızına bağlıdır. Üç-faz trapezoidal zıt-EMK'lar aşağıdaki

şekilde tanımlanabilir.

$$E_a = p_p \omega_m . \lambda_m . f(\theta_e) = p_p \omega_m \varphi_{ra} \tag{3.9}$$

$$E_b = p_p \omega_m . \lambda_m . f\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) = p_p \omega_m \varphi_{rb} \tag{3.10}$$

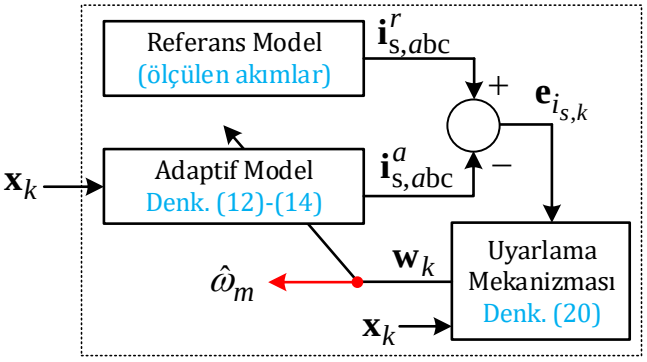
$$E_c = p_p \omega_m . \lambda_m . f\left(\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right) = p_p \omega_m \varphi_{rc} \tag{3.11}$$

$$f(\theta) = \begin{cases} 0 < \theta \leq \frac{\pi}{3}, & 1 \\ \frac{\pi}{3} < \theta \leq \frac{2\pi}{3}, & \frac{\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)6}{\pi} \\ \frac{2\pi}{3} < \theta \leq \frac{4\pi}{3}, & -1 \\ \frac{4\pi}{3} < \theta \leq \frac{5\pi}{3}, & \frac{(\theta - \frac{3\pi}{2})6}{\pi} \\ \frac{5\pi}{3} < \theta \leq 2\pi, & 1 \end{cases} \tag{3.12}$$

3.3. OC-LMS Tabanlı Mus Hız Kestiricisi

FDAM rotor hızını kestiren stator akım tabanlı OC-LMS temelli MUS sistemi Şekil 3.3'te gösterilmiştir. Şekil 3.3'te gösterilen kestirici yapısında, ölçülen stator akımları referans modelinin çıktıları iken, uyarlanabilir model çıktıları denklem (3.4)-(3.6)'nın ileri Euler yöntemi ile ayrıştırılmasıyla elde edilir ve aşağıdaki denklemler ile verilmiştir.

Şekil 3.3. *OC-LMS kullanan stator akım temelli MUS*



$$i^a_{sa,k+1} = \left(1 - \frac{TR_s}{L_{ls}}\right) i_{sa,k} - \omega_{m,k} \frac{p_p T \varphi_{ra,k}}{L_{ls}} + \frac{T v_{sa}}{L_{ls}} \tag{3.13}$$

$$i^a_{sb,k+1} = \left(1 - \frac{TR_s}{L_{ls}}\right) i_{sb,k} - \omega_{m,k} \frac{p_p T \varphi_{rb,k}}{L_{ls}} + \frac{T v_{sb}}{L_{ls}} \tag{3.14}$$

$$i_{sc,k+1}^{a} = \left(1 - \frac{TR_s}{L_{ls}}\right) i_{sc,k} - \omega_{m,k} \frac{p_p T \varphi_{rc,k}}{L_{ls}} + \frac{T v_{sc}}{L_{ls}} \tag{3.15}$$

Denklem (3.13), (3.14) ve (3.15), OC-LMS tabanlı MUS hız kestirici için kompakt formda aşağıdaki gibi yeniden yazılır:

$$\boldsymbol{i}_{s,k+1}^{a} = \boldsymbol{x}_k^T \boldsymbol{w}_k \tag{3.16}$$

burada $\mathbf{w}_k$ ve $\mathbf{x}_k$ sırasıyla uyarlanabilir modelin ağırlık vektörünü ve giriş matrisini temsil eder ve aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\boldsymbol{w}_k = \begin{bmatrix} 1 - \dfrac{TR_s}{L_s} \\ \omega_{m,k} \\ \dfrac{T}{L_s} \end{bmatrix} \tag{3.17}$$

$$\boldsymbol{x}_k = \begin{bmatrix} i_{sa,k} & i_{sb,k} & i_{sc,k} \\ \dfrac{-p_p T \varphi_{ra,k}}{L_s} & \dfrac{-p_p T \varphi_{rb,k}}{L_s} & \dfrac{-p_p T \varphi_{rc,k}}{L_s} \\ v_{sa,k} & v_{sb,k} & v_{sc,k} \end{bmatrix} \tag{3.18}$$

Böylece, referans ve uyarlanabilir model çıkışları arasındaki hata ifadesi ise aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\boldsymbol{e}_{\boldsymbol{i}_{s,k}} = \boldsymbol{i}_{s,k}^{r} - \boldsymbol{i}_{s,k}^{a} \tag{3.19}$$

Hata ifadesinin tanımının ardında, OC-LMS algoritmasını [55] türetmek için kesilmiş (truncated) maliyet fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$J_k = \begin{cases} \dfrac{1}{2} \boldsymbol{e}_{i_{s,k}}^{\mathbf{2}}, & eğer \left|max(\boldsymbol{e}_{\boldsymbol{i}_{s,k}})\right| \geq \tau\sigma \\ 0, & eğer \left|max(\boldsymbol{e}_{\boldsymbol{i}_{s,k}})\right| < \tau\sigma \end{cases} \tag{3.20}$$

burada σ hata işareti vektörü $\mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}}$'nın aldığı maksimum değerin standart sapmasını; τ ise eşik seviyesini temsil etmektedir. OC-LMS algoritmasına ait ağırlık vektörü güncelleme kuralı ise aşağıdaki gibi verilir:

$$\boldsymbol{w}_{k+1} = \begin{cases} \boldsymbol{w}_k + \mu \boldsymbol{X}_k \boldsymbol{e}_{\boldsymbol{i}_{s,k}}, eğer \left| max\left(\boldsymbol{e}_{\boldsymbol{i}_{s,k}}\right)\right| \geq \tau\sigma \\ \boldsymbol{w}_k, \qquad\qquad eğer \left| max\left(\boldsymbol{e}_{\boldsymbol{i}_{s,k}}\right)\right| < \tau\sigma \end{cases} \tag{3.21}$$

burada σ ifadesi gerçek-zamanlı uygulamalar için özyinelemeli bir şekilde aşağıdaki gibi hesaplanır [59]:

$$\sigma_{k+1} = \beta\sigma_k + (1-\beta)\left|max\left(\boldsymbol{e}_{\boldsymbol{i}_{s,k}}\right)\right|^2 \tag{3.22}$$

burada β unutma faktörünü temsil etmektedir ve değeri $0 < \beta < 1$ şeklindedir. Bunula birlikte, denklem (3.21)'de diğer bir kritik parametre τ'dur. Bu parametre $\mathbf{w}_k$'nın güncelleme oranıyla, bir başka ifade ile ne kadar artık verinin sansürleneceğiyle alakalıdır. Bu yüzden, OC-LMS koşturulurken τ'nun değeri aşağıda verilen denkleme göre anlık olarak kestirilmelidir [60]:

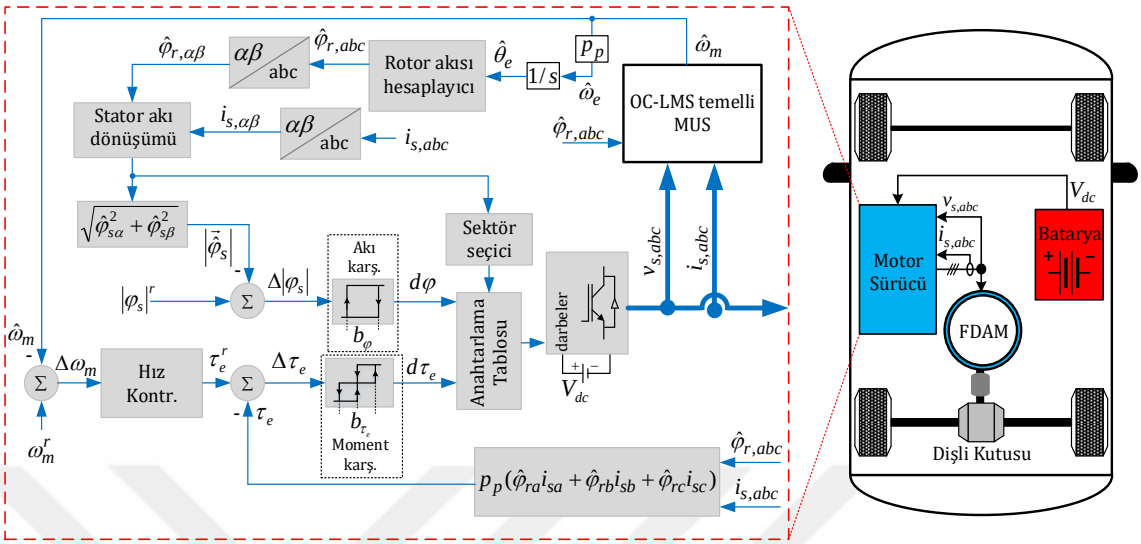
$$\tau_{k+1} = \begin{cases} \tau_k + \mu_\tau P_{ce}, \qquad eğer \left| max\left(\boldsymbol{e}_{\boldsymbol{i}_{s,k}}\right)\right| \geq \tau\sigma \\ \tau_k + \mu_\tau(1-P_{ce}), eğer \left| max\left(\boldsymbol{e}_{\boldsymbol{i}_{s,k}}\right)\right| < \tau\sigma \end{cases} \tag{3.23}$$

burada μ_τ adım büyüklüğü, $P_{ce} = \frac{K-p}{K}$ istenilen sansürleme oranı K toplam veri sayısı, p ise bilgilendirici veri sayısıdır.

3.4. OC-LMS Tabanlı MUS Kullanan DMK'lı FDAM Sürücüsü

Hafif elektrikli bir aracın tahrik edilmesi için modellenen OC-LMS temelli MUS kestiricisini kullanan hız-algılayıcısız DMK tabanlı FDAM motor sürücüsü Şekil 3.4'de verilmiştir. Şekil 3.4'de verilen sürücü MATLAB/Simulink ortamında oluşturulmuştur. DMK sisteminde τ_e^r referans değeri geleneksel PI tipi hız kontrolörü kullanılarak üretilmiştir. Ek olarak DMK'nın moment ve akı tepkisini belirlemek için sırasıyla üç ve iki seviyeli histerezis karşılaştırıcılar kullanılmıştır. Stator akısının $\alpha\beta -$ bileşenleri ($\varphi_{s\alpha}$ ve $\varphi_{s\beta}$), $\alpha\beta -$ eksenindeki stator akımı ve rotor akısı ile birlikte stator kaçak endüktans kullanılarak [49]'daki gibi hesaplanmıştır.

Şekil 3.4. *Hafif elektrikli aracın tahrik edilmesi için tasarlanan hız-algılayıcısız DMK tabanlı FDAM sürücüsü*



DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

BENZETİM ÇALIŞMALARI

4.1. Benzetim Çalışmaları

Benzetim çalışmalarında kullanılan EA ve FDAM'ye ait parametreler Tablo 4.1 ve Tablo 4.2'de verilmiştir. Benzetim çalışmaları $20\mu s$ örnekleme zamanı için gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, EA'yı tahrik eden DMK tabanlı sürücü sisteminden yüksek başarımlı kontrol sonucu almak için DMK'daki geleneksel PI kontrolörün katsayıları $K_p = 8$ ve $K_i = 10$ olarak seçilmiştir. Ek olarak, FDAM'nin rotor hızı kestirimi için önerilen OC-LMS temelli MUS'a ait parametreler $\mu = 0.9$, $\mu_\tau = 0.2$ ve $\beta = 0.9$ olarak ayarlanmıştır.

Tablo 4.1. *EA parametreleri*

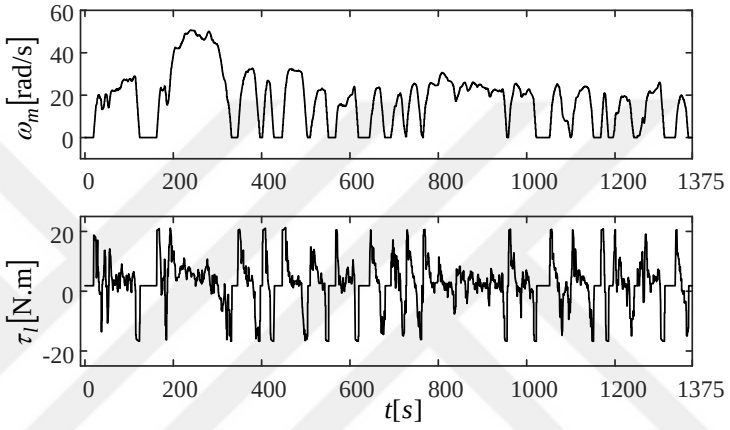
EA Parametreleri [61]	**Değeri**
Aracın Kütlesi (Kg)	$M_v = 678$
Aracın Ön Alanı (m^2)	$A = 2.09$
Yuvarlanma Direnci Katsayısı	$K_R = 0.015$
Binek Otomobiller İçin Rüzgar Direnci	$K_W = 0.3$
Dişli Oranı	$r_f = 2$
Tekerleğin Yuvarlanma Yarıçapı (m)	$r_r = 0.2$

Tablo 4.2. *FDAM parametreleri*

FDAM Parametreleri [49]	**Değeri**
Stator Gerilimi (*V*)	$V = 72$
Stator Direnci (Ω)	$R = 0.33$
Stator Kaçak Endüktansı (*mH*)	L_{ls}*=0.1345*
Kutup Çifti Sayısı	$p_p = 23$
Anma Hızı (*dev/dk*)	$n_m = 750$
Anma Momenti (*N.m*)	$\tau_l = 21$

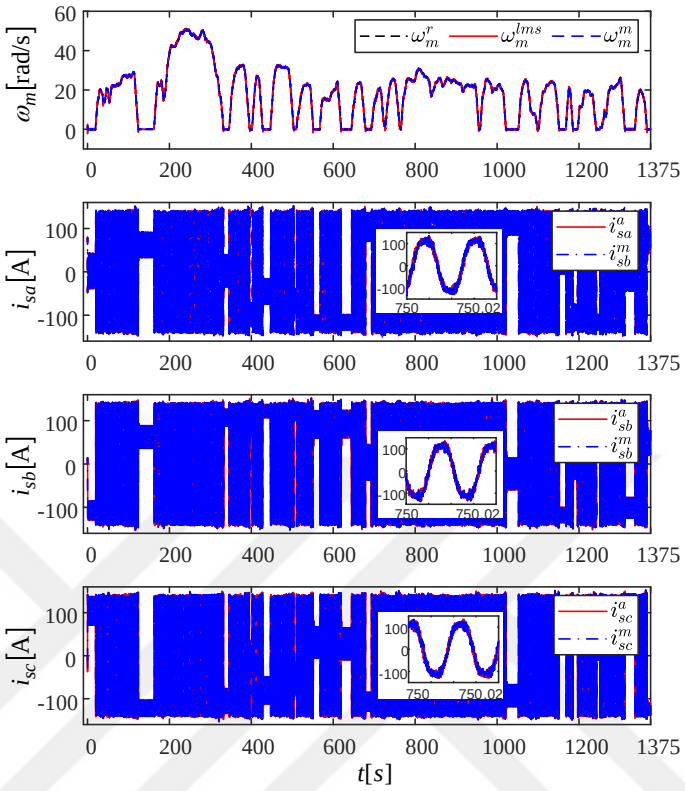
EA için DMK tabanlı FDAM sürücüsüne ait kontrol başarımı ve OC-LMS temelli MUS'un kestirim başarımı UDDS sürüş döngüsü ve Denklem (3.3) kullanılarak üretilen hız ve yük momenti değişimleri (Şekil 4.1) için test edilmiştir. UDDS sürüş profili ortalama 8.89 m/s'lik (32 km/h) hız ve maksimum 25.56 m/s'lik (92 km/h) hızı içeren toplam 12 km'lik bir uzunlukta şehir içi güzergahıdır. Bu sürüş profili yaklaşık 1370 s'lik bir senaryoyu içermektedir [62].

Şekil 4.1. *Sürücü sistemine verilen hız referansı ve motora uygulanan yük momenti değişimleri*

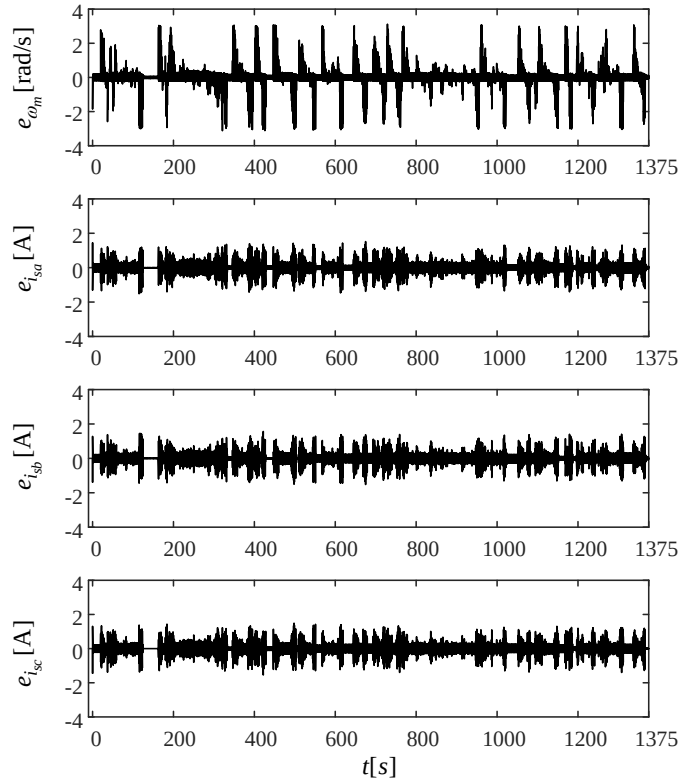


Modellenen OC-LMS tabanlı MUS kestiricide sansürleme oranı %30, %50, %70 ve %85 olarak seçilmiştir. Şekil 4.2'de verilen sıfır hız ile anma hız aralığında geçici ve sürekli hal durumlarını içeren hız referansı ve yük momenti değişimleri için benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.3'de geleneksel LMS temelli MUS'a ait benzetim sonuçları verilirken Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da OC-LMS temelli MUS'tan elde edilen kestirim sonuçları ve hatalar verilmiştir. Sonuçların veriliği bu şekillerde ω_m^r sürücü sitemine verilen hız referansını, $\widehat{\omega}_m$ kestirilen hızı, ω_m^m ölçülen hızı, $i_{(\cdot)}^m$ ölçülen stator akımlarını, $i_{(\cdot)}^a$ uyarlanabilir model çıkışlarını ve $e_{(\cdot)}$ ise hataları ifade etmektedir. Ek olarak Tablo 4.3 ve Tablo 4.2'te sırasıyla geleneksel LMS tabanlı MUS (sansürleme içermeyen) ile %30, %50, %70 ve %85 sansürleme oranı için OC-LMS temelli MUS'a ilişkin ortalama çalışma süreleri ve kök ortalama kare hata (root mean square error, RMSE) değerleri verilmiştir.

Şekil 4.2. *Geleneksel LMS temelli MUS'a ait benzetim sonuçları: (a) kestirim sonuçları, (b) hatalar*

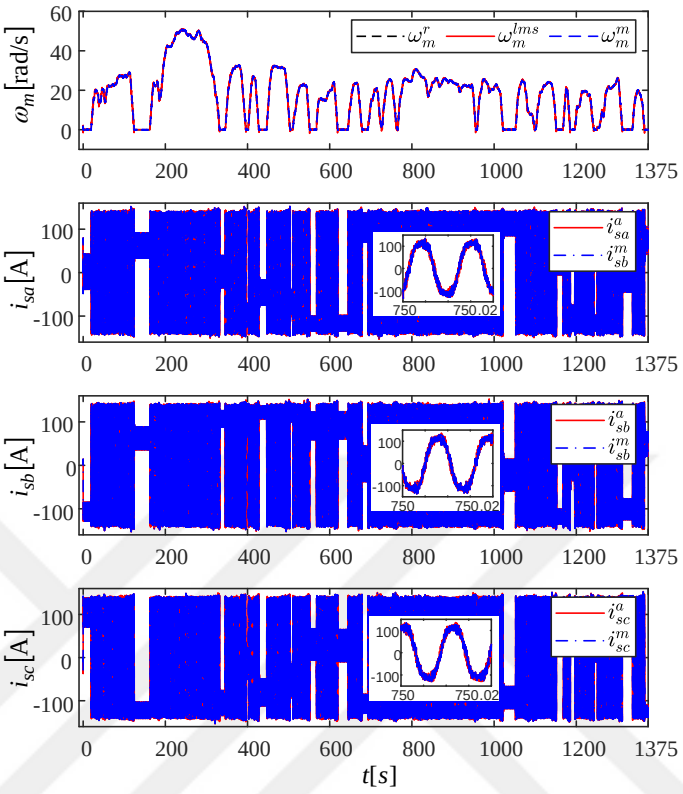


(a)

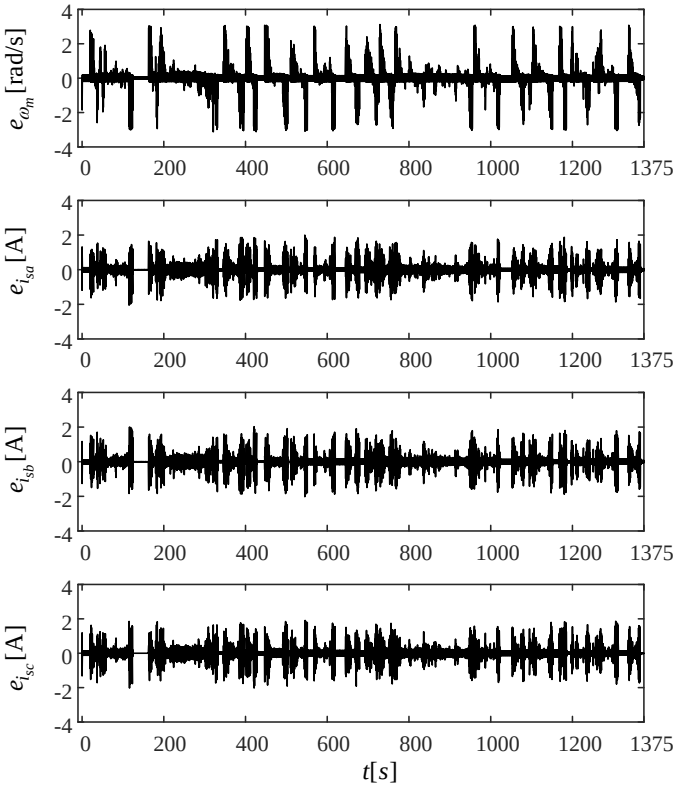


(b)

Şekil 4.3. *%30 sansürleme oranı için önerilen OC-LMS temelli MUS'a ait benzetim sonuçları: (a) kestirim sonuçları,(b) hatalar*

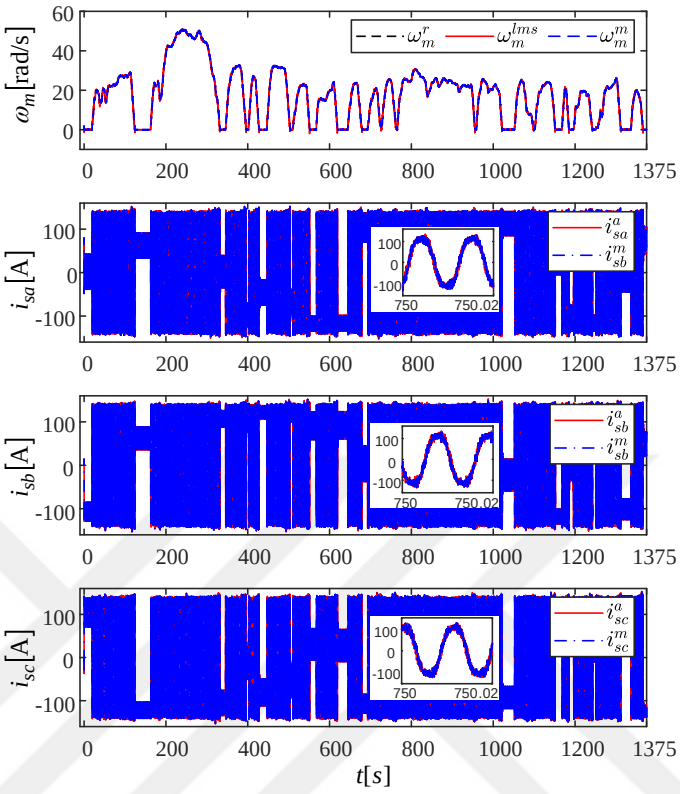


(a)

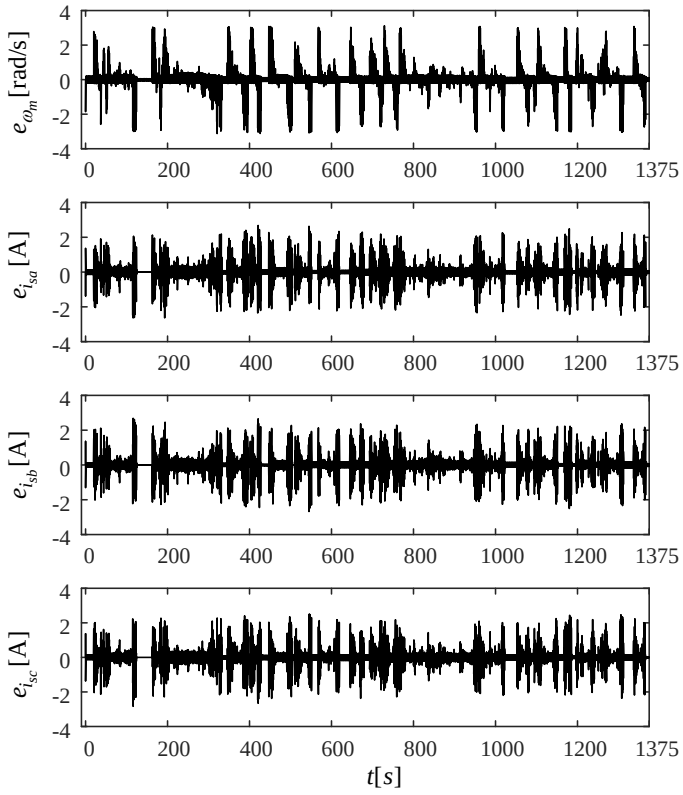


(b)

Şekil 4.4. *%50 sansürleme oranı için önerilen OC-LMS temelli MUS'a ait benzetim sonuçları: (a) kestirim sonuçları,(b) hatalar*

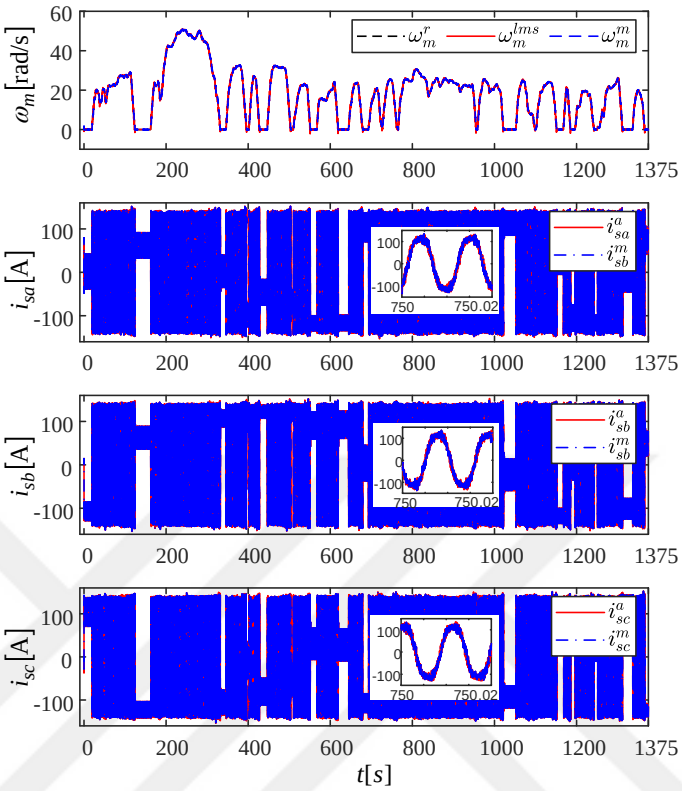


(a)

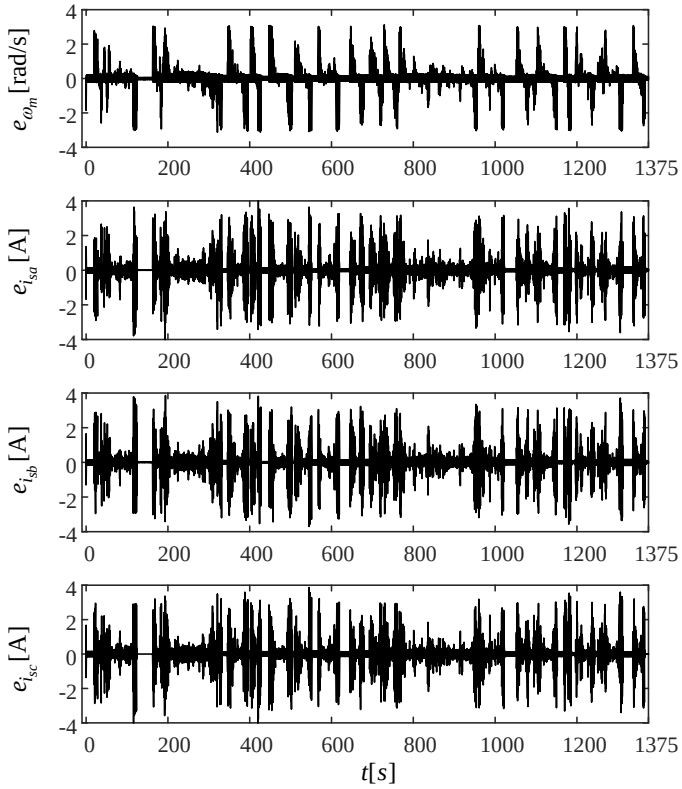


(b)

Şekil 4.5. *%70 sansürleme oranı için önerilen OC-LMS temelli MUS'a ait benzetim sonuçları: (a) kestirim sonuçları,(b) hatalar*

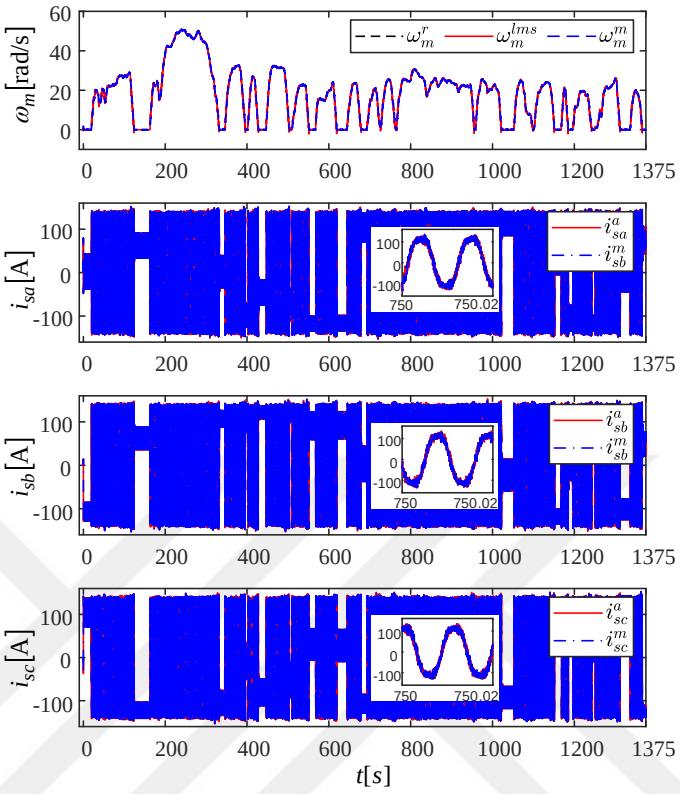


(a)

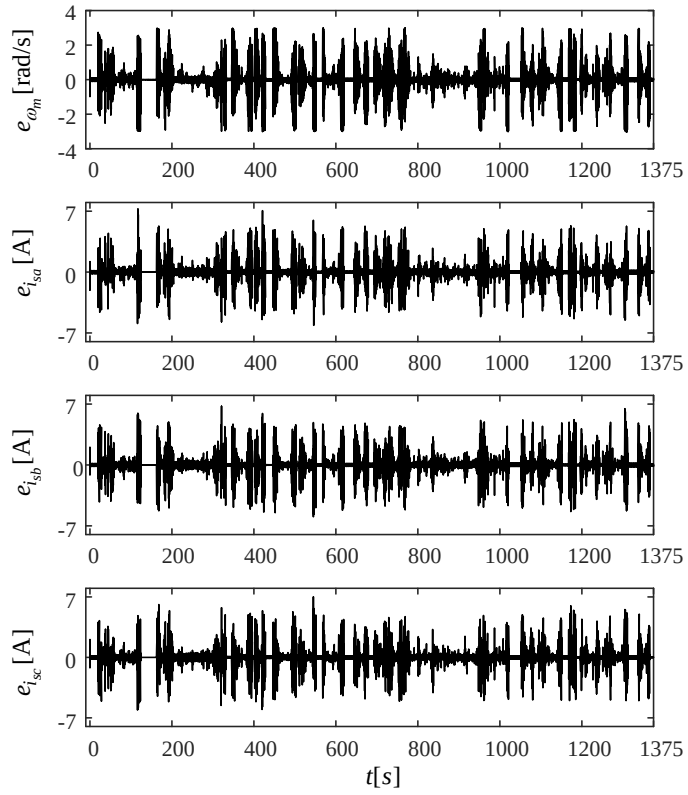


(b)

Şekil 4.6. *%85 sansürleme oranı için önerilen OC-LMS temelli MUS'a ait benzetim sonuçları:(a) kestirim sonuçları,(b) hatalar*



(a)



(b)

Tablo 4.3. *Farklı sansürleme oranları için önerilen OC-LMS tabanlı MUS kestiricinin ortalama çalışma süreleri*

MUS Kestiricileri	**Çalışma Süreleri [s]**
LMS temelli MUS ($P_{ce} = \%0$)	16.3834
OC-LMS temelli MUS ($P_{ce} = \%30$)	13.6748
OC-LMS temelli MUS ($P_{ce} = \%50$)	11.8541
OC-LMS temelli MUS ($P_{ce} = \%70$)	11.0924
OC-LMS temelli MUS ($P_{ce} = \%85$)	10.3382

Tablo 4.4. *Farklı sansürleme oranları için önerilen OC-LMS tabanlı MUS kestiricinin RMSE değerleri*

MUS Kestiricileri	$\boldsymbol{e_{\omega_m}^{RMSE}}$	$\boldsymbol{e_{i_{sa}}^{RMSE}}$	$\boldsymbol{e_{i_{sb}}^{RMSE}}$	$\boldsymbol{e_{i_{sc}}^{RMSE}}$
LMS temelli MUS ($P_{ce} = \%0$)	0.0723	0.0535	0.0537	0.0540
OC-LMS temelli MUS ($P_{ce} = \%30$)	0.0673	0.0590	0.0590	0.0591
OC-LMS temelli MUS ($P_{ce} = \%50$)	0.0635	0.0735	0.0737	0.0736
OC-LMS temelli MUS ($P_{ce} = \%70$)	0.0626	0.0728	0.0744	0.0745
OC-LMS temelli MUS ($P_{ce} = \%85$)	0.1186	0.1055	0.1059	0.1057

Şekil 4.3-Şekil 4.7 ve Tablo 4.3 ve Tablo 4.4'te sunulan sonuçlar incelendiğinde aşağıda verilen çıkarımlar yapılabilir;

- Şekil 4.2'de verilen sıfır hızı da içeren UDDS hız referansı ve elektrikli araca etkiyen toplam çekiş kuvveti kullanılarak üretilen yük momenti değişimleri için üretilen zorlayıcı senaryoya karşı önerilen kestiricinin başarımı tatmin edici seviyededir.
- EA'yı tahrik etmek için önerilen OC-LMS temelli MUS kestiriciyi kullanan DMK tabanlı FDAM sürücüsü yüksek kontrol başarımına sahiptir.
- Kestirim sonuçlarına ilişkin RMSE değerleri önerilen yöntemin etkinliğini göstermektedir. %30, %50 ve %70 sansürleme oranları için önerilen hız kestiricisine ait RMSE değerleri geleneksel LMS temelli MUS [50] ile karşılaştırıldığında, önerilen yöntemin başarımının kabul edilebilir seviyede olduğu açıktır.

- Beklenildiği üzere sansürleme oranının çok yüksek seçilmesi (Örneğin %85) önerilen yöntemin RMSE değerinde yüksek artışa sebep olmaktadır. Bununla birlikte DMK tabanlı sürücünün kontrol başarımı bu artıştan negatif yönde ciddi manada etkilenmemektedir.
- Farklı sansürleme oranları için hesaplanan çalışma süreleri, önerilen yaklaşımın çalışma süresini geleneksel LMS temelli MUS'a göre önemli ölçüde düşürdüğünü açıkça göstermektedir. Örneğin önerilen kestirici %30 sansürleme oranı için %16.53 oranında, %85 için ise %36.89 oranında çalışma süresini düşürmüştür.

Özetle Şekil 4.3-Şekil 4.7 ve Tablo 4.3 ve Tablo 4.4'te verilen sonuçlar önerilen OC-LMS temelli MUS rotor hızı kestiricisinin başarımını onaylamaktadır. Ayrıca OC-LMS MUS kestiricisini kullanan DMK tabanlı EA sürücüsünün kontrol başarımı da oldukça yüksektir.

BEŞİNCİ BÖLÜM

SONUÇ VE TARTIŞMALAR

Bu tez çalışmasında, elektrikli araç uygulamalarında yaygın olarak tercih edilen fırçasız doğru akım motorlarının rotor hız kestirimi için yeni bir sensörsüz kontrol algoritması geliştirilmiştir. Önerilen yöntem, düşük işlem yüküne sahip çevrimiçi sansürleme yaklaşımını, en küçük ortalama kare temelli modele uyarlamalı sistem ile birleştirerek, yüksek hassasiyetli ve düşük maliyetli bir hız kestirimi çözümü sunmaktadır.

Bu kapsamda geliştirilen OC-LMS temelli MUS hız kestiricisi, farklı sansürleme oranları altında hız algılayıcısız DMK tabanlı FDAM sürücüsü üzerinde kapsamlı şekilde test edilmiştir. Özellikle, UDDS sürüş profili kullanılarak yapılan simülasyon çalışmaları, önerilen algoritmanın şehir içi sürüş koşullarında karşılaşılabilecek düşük hız, yüksek hızlanma ve ani duruş gibi zorlu senaryolarda dahi kararlı ve doğru kestirim yapabildiğini göstermiştir.

- Yüksek kestirim doğruluğu: OC-LMS temelli MUS algoritması, üç faz stator akımlarını giriş olarak kullanarak rotor hızını başarılı şekilde kestirmiştir. Özellikle sıfır hıza yakın durumlarda bile algoritmanın kararlılığını koruduğu ve rotor pozisyon bilgisini güvenilir biçimde tahmin ettiği gözlemlenmiştir.
- İşlem yükü optimizasyonu: Önerilen yöntem, geleneksel LMS temelli MUS algoritmasına göre önemli ölçüde işlem süresi tasarrufu sağlamıştır. %30 sansürleme oranı kullanıldığında, çalışma süresinde %16.53; %85 sansürleme oranında ise %36.89 oranında azalma elde edilmiştir. Bu sonuç, algoritmanın gerçek zamanlı gömülü sistemlerde uygulanabilirliğini doğrudan desteklemektedir.
- Geniş hız aralığında geçerlilik: Geliştirilen kestirici, sıfır hızdan maksimum motor hızına kadar geniş bir çalışma aralığında test edilmiştir.

- Özellikle elektrikli araçlarda kalkış anında ve düşük hızlarda rotor pozisyon kestirimi kritik olduğundan, önerilen yöntemin bu hız bölgelerinde de kararlılığını koruması, literatürdeki birçok klasik sensörsüz yönteme göre önemli bir avantaj sağlamaktadır.
- Gerçekçi yük modellemesi: EA modelinden elde edilen toplam çekiş kuvvetleri, uygun matematiksel dönüşümlerle motor yük momentine çevrilmiş ve simülasyonlarda FDAM'ye uygulanmıştır. Bu yöntem sayesinde, sadece hız profili değil, aynı zamanda gerçek sürüş koşullarındaki yük değişimleri de benzetim ortamına yansıtılmış ve önerilen algoritmanın dinamik performansı doğrulanmıştır.

Literatürde sensörsüz hız kestirim algoritmaları sıklıkla zıt-EMK tabanlı klasik MUS veya Kalman filtresi gibi yaklaşımlara dayanmaktadır. Ancak bu yöntemler, düşük hızlarda zıt-EMK genliğinin azalması nedeniyle kestirim doğruluğunu yitirmekte veya yüksek işlem yükü nedeniyle gerçek zamanlı uygulamalarda sınırlı kalmaktadır. Bu çalışmada önerilen OC-LMS temelli MUS algoritması ise çevrimiçi sansürleme mekanizması sayesinde gereksiz verilerin işlenmesi durumunu ortadan kaldırarak işlem yükünü azaltmakta, aynı zamanda LMS'nin uyarlama hızını koruyarak geniş hız aralığında yüksek kestirim hassasiyeti sağlamaktadır. Bu yönüyle, hem teorik katkı hem de uygulama açısından literatüre önemli bir yenilik sunmaktadır.

Her ne kadar önerilen OC-LMS temelli MUS algoritması birçok avantaj sunsa da, bazı sınırlamaları bulunmaktadır:

- Sansürleme oranı optimizasyonu: Çok yüksek sansürleme oranlarında, işlem yükü azalsa dahi kestirim doğruluğu bir miktar düşebilmektedir. Bu nedenle sansürleme oranı parametresinin, uygulamaya ve motor karakteristiklerine göre dikkatli seçilmesi gerekmektedir.
- Gerçek zamanlı uygulama ihtiyaçları: Simülasyon ortamında işlem süresi azaltımı başarıyla gösterilmiş olsa da, gerçek zamanlı gömülü sistemlerde işlemci mimarisi, bellek erişim süreleri ve ADC örnekleme zamanları gibi etmenlerin de ayrıca analiz edilmesi gerekmektedir.

Bu tez kapsamında geliştirilen OC-LMS temelli MUS algoritması, MATLAB/Simulink ortamında simülasyon bazlı olarak test edilmiştir. Gelecek çalışmalarda aşağıdaki adımlar planlanmaktadır:

- Gerçek zamanlı uygulama: Algoritmanın dijital sinyal işleyici (DSP) veya yüksek hızlı mikrodenetleyici üzerinde gerçek zamanlı olarak uygulanması, deneysel test tezgahında motor sürücü sistemi ile entegre edilerek performansının doğrulanması.
- Farklı motor tiplerine adaptasyon: Önerilen yöntemin SMSM ve SRM motorlar gibi farklı elektrik makinesi tiplerine uyarlanması ve karşılaştırmalı performans analizlerinin yapılması.
- Sistematik sansürleme oranı optimizasyonu: Farklı hız ve yük senaryoları için en uygun sansürleme oranını belirleyen adaptif algoritmaların geliştirilmesi.

Sonuç olarak, bu tez çalışmasında geliştirilen OC-LMS temelli MUS hız kestirim algoritması, düşük işlem yükü ve yüksek kestirim doğruluğu avantajları ile sensörsüz motor kontrolünde önemli bir alternatif olarak öne çıkmıştır. Elektrikli araç tahrik sistemlerinde maliyet, güvenilirlik ve performans gereksinimlerini aynı anda karşılayabilmesi nedeniyle, önerilen yöntemin literatüre ve endüstriyel uygulamalara değerli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir.

Bu tez çalışmasının temel amacı, fırçasız doğru akım motorlarının sensörsüz hız kestirimi problemine yönelik olarak, geleneksel olarak kullanılan LMS temelli MUS algoritmasının işlem yükünü azaltmak amacıyla, OC stratejisi ile iyileştirilmiş OC-LMS temelli bir hız kestirici yapısının tasarlanması ve önerilen yapının benzetim (simülasyon) ortamında performansının değerlendirilmesidir. Bu çalışmada tasarlanan OC-LMS tabanlı MUS hız kestiricisi, farklı sansürleme oranları kullanılarak hız algılayıcısız DMK esaslı FDAM sürücüsü ile doğrulanmıştır. Önerilen kestirici, FDAM'nin ölçülen üç faz stator akımları ile uyarlanabilir model çıkışı arasındaki hata sinyalini kullanarak, referans model olarak tanımlanan motorun rotor hızını doğrudan tahmin etmektedir. Tasarlanan hız kestiricisinin performansı, kentsel dinamometre sürüş programı UDDS hız profili temel alınarak, zorlayıcı bir senaryo kapsamında DMK tabanlı sürücüye referans hız girdisi olarak verilmiştir. Ayrıca, UDDS hız profiline bağlı olarak elektrikli araç modelinden elde edilen toplam çekiş kuvveti kullanılarak hesaplanan yük momenti değişimleri, FDAM'ye yük olarak uygulanmıştır. Geniş bir hız aralığını ve sıfır hız durumlarını içeren benzetim sonuçları, hem OC-LMS temelli MUS hız kestiricisinin hem de bu kestiriciyi kullanan DMK tabanlı FDAM sürücüsünün yüksek performansını göstermiştir. Bunun yanında, önerilen OC-LMS tabanlı MUS algoritmasının çalışma

süresi, literatürde sunulan geleneksel LMS tabanlı MUS kestiricisi ile karşılaştırılmış ve OC-LMS algoritmasının işlem süresini anlamlı ölçüde azalttığı tespit edilmiştir. Örneğin, %30 sansürleme oranında işlem süresi yaklaşık %16.53, %85 sansürleme oranında ise %36.89 oranında azalma sağlanmıştır.

KAYNAKÇA

[1] Văscan, I., & Szabó, L. (2022). A brief history of electric vehicles. *Journal of Computer Science & Control Systems, 15(1),* 19-26.

[2] Ehsani, M., Gao, Y., & Emadi, A. (2009). *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: Fundamentals, theory, and design* (2nd ed.). CRC Press.

[3] Cano, Z. P., Banham, D., Ye, S., Hintennach, A., Lu, J., Fowler, M., & Chen, Z. (2018). Batteries and fuel cells for emerging electric vehicle markets. *Nature Energy*, *3*(4), 279–289. https://doi.org/10.1038/s41560-018-0108-1

[4] U.S. Department of Energy. (2014, September 15). *The history of the electric car.* https://www.energy.gov/articles/history-electric-car

[5] Yong, J. Y., Ramachandaramurthy, V. K., Tan, K. M., & Mithulananthan, N. (2015). A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 49*, 365–385. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.130

[6] The International Council on Clean Transportation.(2021, January). *Driving a green future: A retrospective review of China's electric vehicle development and outlook for the future*. https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/China-green-future-ev-jan2021.pdf

[7] Deng, Y., Ma, M., Zhou, N., Ma, Z., Yan, R., & Ma, X. (2024). China's plug-in hybrid electric vehicle transition: An operational carbon perspective. Energy Conversion and Management, 320, 119011. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.119011

[8] Graham, D. A., Yang, C., & Hinds, K. (2021, Winter). *How China beat the U.S. in electric vehicle manufacturing. Issues in Science and Technology. 37(2),* 72–79. https://issues.org/wp-content/uploads/2021/01/72%E2%80%9379-Graham-et-al.-How-China-Beat-the-US-in-EV-Manufacturing-Winter-2021.pdf

[9] Yılmaz, N. (2024). *Elektrikli araçlar için şarj sisteminin tasarımı / Design of charging system for electric vehicles* (Tez No. 865129) [Yüksek lisans tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi]. Yüksek Öğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi.

[10] European Commission. (2021). Fit for 55: *Delivering the EU's 2030 climate target* (COM(2021) 550 final). EUR-Lex. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52021DC0550

[11] International Energy Agency. (2023). Global EV outlook 2023: *Catching up with climate ambitions*. https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023

[12] Høyer, K. G. (2017). The history of alternative fuels in transportation: The history of alternative fuels in transportation. The case of electric and hybrid cars. *Utilities policy*, *16*(2), 63-71. https://doi.org/10.1016/j.jup.2007.11.001

[13] Esmer, S. (2023). *Elektrikli araçlar için senkron relüktans motor tasarımı* (Tez No. 776527) [Yüksek Lisans Tezi, Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi]. Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi

[14] Gül, H. S. (2018). *Elektrikli araçlar için batarya yönetim sistemi tasarımı / Battery management system design for electric vehicles* (Tez No. 531128) [Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi]. Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi.

[15] Macharia, V. M., Garg, V. K., & Kumar, D. (2022). A review of electric vehicle technology: Architectures, battery technology and its management system, relevant standards, application of artificial intelligence, cyber security, and interoperability challenges. *IET Electrical Systems Integration*, *13*(2), e12083. https://doi.org/10.1049/els2.12083

[16] Koech, A. K., Mwandila, G., & Mulolani, F. (2024). A review of improvements. on electric vehicle battery. *Heliyon*, *10*(15). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34806

[17] Szabó, L. (2018). Advancements in electrical machines design brought by the modular construction. In 2018 X International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS) (ss. 1-6). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICEPDS.2018.8571897

[18] Cai, W., Wu, X., Zhou, M., Liang, Y., & Wang, Y. (2021). Review and development of electric motor systems and electric powertrains for new energy vehicles. *Automotive Innovation*, 4(1), 3–22. https://doi.org/10.1007/s42154-021-00139-z

[19] Liu, F., Shafique, M., & Luo, X. (2024). Unveiling the determinants of battery electric vehicle performance: A systematic review and meta-analysis. *Communications in Transportation Research*, 4, *100148*. https://doi.org/10.1016/j.commtr.2024.100148

[20] Arvidsson, N., Weir IV, H. T., & Ørving, T. (2024). Operational performance of light electric freight vehicles in the last mile: Two Nordic case studies. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, *54*(2), 192–210. https://doi.org/10.1108/IJPDLM-02-2023-0079

[21] Gebhardt, L., Brost, M., & Seiffert, R. (2023). What potential do light electric vehicles have to reduce car trips? *Future Transportation*, 3(3), 918–930. https://doi.org/10.3390/futuretransp3030051

[22] Akhtar, M. F., Raihan, S. R. S., Rahim, N. A., Akhtar, M. N., & Abu Bakar, E. (2023). Recent developments in DC-DC converter topologies for light electric vehicle charging: a critical review. Applied Sciences, 13(3), 1676. https://doi.org/10.3390/app13031676

[23] Grand View Research. (2023). *Electric scooters market size & share analysis report, 2030*. Gradnviewresearch, Inc. 20.06.2025 tarihinde https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/electric-scooters-market adresinden erişildi.

[24] Micro-mobility for Europe. (2023). *Political priorities for Micro-Mobility 2024-2029*. 25.06.2025 tarihinde https://micromobilityforeurope.eu/po/ adresinden erişildi.

[25] Zhu, Y., Choma, E. F., Wang, K., & Wang, H. (2023). Electric vehicle adoption delivers public health and environmental benefits. *Eco-Environment and Health*, *2*(4), 193–194. https://doi.org/10.1016/j.eehl.2023.07.008

[26] Lang, N., Schellong, D., Hagenmaier, M., Herrmann, A., & Hohenreuther, M. (2022). Putting micromobility at the center of urban mobility. *Boston Consulting Group*.

[27] Mohammad, K. S., & Jaber, A. S. (2022). Comparison of electric motors used in electric vehicle propulsion system. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, *27*(1), 11–19

[28] Topal, M. (2019). *Fırçasız doğru akım motorunun üç farklı yöntemle hız kontrolü ve analizi* (Tez No. 545926) [Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi]. Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi.

[29] Bose, B. K. (2002, July). Power electronics and motor drives-recent technology advances. In Industrial Electronics, 2002. ISIE 2002. Proceedings of the 2002 IEEE International Symposium on (Vol. 1, ss. 22-25). IEEE.

[30] Miller, T. J. E., & Hendershot Jr, J. R. (2010). Design of brushless permanent-magnet machines. Design of brushless permanent magnet machines, 158-160.

[31] Erickson, R. W., & Maksimović, D. (2020). *Fundamentals of power electronics* (3rd ed.). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-43881-4

[32] Valluru, S. K., & Singh, M. (2020). Optimization strategy of bio-inspired metaheuristic algorithms tuned PID controller for PMBDC actuated robotic manipulator. *Procedia Computer Science*, *171*, 2040-2049. https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.04.219

[33] Ahmed, S., Amin, A. A., Wajid, Z., & Ahmad, F. (2021). Reliable speed control of a permanent magnet DC motor using fault-tolerant H-bridge. *Energies*, *14*(12), 3564. https://doi.org/10.1177/1687814020970311

[34] ROHM Semiconductor. (2022, August 24). *Single-switch circuit driving and half-bridge circuit driving*. ROHM Semiconductor. https://techweb.rohm.com/product/motor/motor-types/397/

[35] Moradpour, R., & Tavakoli, A. (2023). Smooth commutation of brushless DC motor by model-free predictive current control without back-EMF estimation. *IET Electric Power Applications, 17(5), 721–729.* https://doi.org/10.1049/elp2.12299

[36] Irimia, N. D., Lazar, F. I., & Luchian, M. (2019). Comparison between sinusoidal and space vector modulation techniques on the resulting electromagnetic torque ripple produced by a three-phase BLDC motor under field-oriented control. In *2019 6th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)* (ss. 640–645). IEEE.

[37] Kokundu, S., & Aydemir, M. T. (2020). UVDGM tabanlı AYK yöntemiyle fırçasız doğru akım motorunun konum kontrolü. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 8*(1), 1–14.

[38] Inan, R. (2025). An improved model predictive current control of BLDC motor with a novel adaptive extended Kalman filter–based back EMF estimator and a new commutation duration approach for electrical vehicle. *International Journal of Circuit Theory and Applications, 53*(2), 1135–1150.

[39] Ubare, P., Ingole, D., & Sonawane, D. N. (2021). Nonlinear model predictive control of BLDC motor with state estimation. *IFAC-PapersOnLine, 54*(6), 107–112.

[40] 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 *2024 4th International Conference on Emerging Smart Technologies and Applications (eSmarTA)* (ss. 1–8). IEEE.

[41] Saha, B., & Singh, B. (2025). Torque ripple mitigation in sensorless PMBLDC motor drive with adaptive observer for LEV. *IEEE Transactions on Power Electronics, 40*(1), 1739–1747.

[42] Muratkara, S. (2017). *Brushless DC motor control under varying load conditions* (Tez No. 501435) [Yüksek Lisans Tezi, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü]. Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi.

[43] Çeleğen, M. (2022). *ED laboratory deney seti kullanılarak DA motorların açık çevrim ve kapalı çevrimdeki davranışlarının simulasyon ve deneysel olarak incelenmesi* (Tez No. 719030) [Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi]. Yükseköğretin Kurulu Ulusal Tez Merkezi

[44] Watheqmohammedalsadoon, L. (2019). *A digital hybrid communication system using pulse position and width modulation* (Tez No. 610967) [Yüksek Lisans Tezi. Altınbaş Üniversitesi].Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi

[45] Hasantahaaldawoodi, H. (2023). *Field oriented control of induction motor by metaheuristic methods* (Tez No. 786110) [Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi]. Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi.

[46] Nikolić, A. (2009). *Direktna kontrola momenta asinhronog motora napajanog iz strujnog pretvarača učestanosti* (Publication No. 30948366) [Doctoral dissertation, University of Belgrade]. ProQuest Dissertations & Theses Global

[47] Ke, Z. (2015). *Low frequency oscillation reduction algorithm for six-step operation of three-phase inverters* [Master Thesis, Oregon State University]. https://ir.library.oregonstate.edu/concern/parent/ns064962m/file_sets/c247dw85n

[48] Gamazo-Real, J.-C., Martínez-Martínez, V., & Gomez-Gil, J. (2022). ANN-based position and speed sensorless estimation for BLDC motors. *Measurement, 188*, 110602. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110602

[49] İnan, 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.

[50] 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.

[51] Joshi, D., Deb, D., & Giri, A. K. (2024). MRAS disturbance observer-based sensorless field-oriented backstepping control of BLDC motor drive. *Electrical Engineering, 106*(5), 6681–6701.

[52] 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.

[53] 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. *Proceedings of the 5th International Turkic World Congress on Science and Engineering*, 80–92.

[54] Demir, R., Yıldız, R., & Barut, M. (2023). Speed-sensorless predictive torque control of the IM based on MRAS. *Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences, 12*(1), 126–133.

[55] Berberidis, D., Kekatos, V., & Giannakis, G. B. (2016). Online censoring for large-scale regressions with application to streaming big data. *IEEE Transactions on Signal Processing*, *64*(15), 3854–3867. https://doi.org/10.1109/TSP.2016.2546225

[56] Mengüç, E. C., Xiang, M., & Mandic, D. P. (2022). Online censoring based complex-valued adaptive filters. *Signal Processing*, *200*, 108638. https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2022.108638

[57] Alzayed, M., & Chaoui, H. (2022). Efficient simplified current sensorless dynamic direct voltage MTPA of interior PMSM for electric vehicles operation. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, *71*(12), 12701–12710. https://doi.org/10.1109/TVT.2022.3198095

[58] Krasopoulos, C. T., Beniakar, M. E., & Kladas, A. G. (2017). Velocity and torque limit profile optimization of electric vehicle including limited overload. *IEEE Transactions on Industry Applications*, *53*(4), 3907–3916. https://doi.org/10.1109/TIA.2017.2680405

[59] Mengüç, E. C., & Mandic, D. P. (2025). Online censoring-based learning algorithms for fully complex-valued neural networks. *Neurocomputing*, *623*, 129412. https://doi.org/10.1016/j.neucom.2025.129412

[60] Romero, D., Berberidis, D., & Giannakis, G. B. (2016). Quickest convergence of online algorithms via data selection. In *2016 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)* (ss. 6185–6189). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICASSP.2016.7472866

[61] Vidhya, D., & Balaji, M. (2019). Modelling, design and control of a light electric vehicle with hybrid energy storage system for Indian driving cycle. *Measurement and Control*, *52*(9–10), 1420–1433. https://doi.org/10.1177/0020294019858212

[62] Demir, R. (2024). Elektrikli araçlar için farklı hız profilleri altında model öngörülü akım kontrollü İSMSM sürücüsünün başarımı. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 13*(4), 1478–1484. https://doi.org/10.28948/ngumuh.1538775

TEZ İNTİHAL RAPORU

HAFİF ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORLARININ KONTROLÜ

Yazar Mehmet Ünal

Gönderim Tarihi: 30-Tem-2025 06:35ÖS (UTC+0300)
Gönderim Numarası: 2722850493
Dosya adı: Mehmet_NAL_Y_ksek_Lisans_Tezi_v1.docx (22.96M)
Kelime sayısı: 8977
Karakter sayısı: 63488

HAFİF ELEKTRİKLİ ARAÇLARDA KULLANILAN FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORLARININ KONTROLÜ

ORİJİNALLİK RAPORU

%9	%9	%4	%4
BENZERLİK ENDEKSİ	İNTERNET KAYNAKLARI	YAYINLAR	ÖĞRENCİ ÖDEVLERİ

BİRİNCİL KAYNAKLAR

1	acikbilim.yok.gov.tr İnternet Kaynağı	%4
2	tc.copernicus.org İnternet Kaynağı	%1
3	es.scribd.com İnternet Kaynağı	%1
4	Submitted to Corvinus University of Budapest Öğrenci Ödevi	<%1
5	id.scribd.com İnternet Kaynağı	<%1
6	Submitted to Universidad Cesar Vallejo Öğrenci Ödevi	<%1
7	Submitted to Pontificia Universidad Catolica del Peru Öğrenci Ödevi	<%1
8	www.westerneim.com İnternet Kaynağı	<%1
9	alamedaalliance.org İnternet Kaynağı	<%1
10	Tezel, Seray. "Alaşehir-Piyadeler (Manisa) Jeotermal Alanının Hidrojeolojisi ve Jeokimyası", Dokuz Eylul Universitesi (Turkey), 2024 Yayın	<%1
11	www.fijileaks.com İnternet Kaynağı	<%1
12	www.yumpu.com İnternet Kaynağı	<%1

13	doczz.biz.tr İnternet Kaynağı	<%1
14	fr.scribd.com İnternet Kaynağı	<%1
15	Submitted to Ataturk Universitesi Öğrenci Ödevi	<%1
16	www.researchgate.net İnternet Kaynağı	<%1
17	www.eksenreduktor.com.tr İnternet Kaynağı	<%1
18	Varshney, Nidhi, C. Janarthanan, P. Muthuvel, N. R. Ramesh, C. R. Deepak, and M. A. Atmanand. "Virtual modelling and navigation controls of underwater mining machine", 2013 Ocean Electronics (SYMPOL), 2013. Yayın	<%1
19	acikerisim.btu.edu.tr İnternet Kaynağı	<%1
20	silo.tips İnternet Kaynağı	<%1
21	thuvien.hce.edu.vn:8080 İnternet Kaynağı	<%1
22	www.puc.pa.gov İnternet Kaynağı	<%1
23	İmren, Bilal. "Fırçasız Doğru Akım Motoru Sürücüsünün Simülasyonu, Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi", Marmara Universitesi (Turkey), 2022 Yayın	<%1
24	akdenizsempozyumu.mersinakademi.com.tr İnternet Kaynağı	<%1
25	dergipark.org.tr İnternet Kaynağı	<%1
26	www.climateactionreserve.org İnternet Kaynağı	<%1

27	www.thurstoncountywa.gov İnternet Kaynağı	<%1
28	Yusuf Eren, Buket Colak Guvenc, Engin Cemal Menguc. "Online Censoring Based Acoustic Feedback Cancellation for Wearable Hearing Aids", 2022 30th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), 2022 Yayın	<%1
29	agenda.brevardschools.org İnternet Kaynağı	<%1
30	ajansbir.com İnternet Kaynağı	<%1
31	Submitted to costa rica tec Öğrenci Ödevi	<%1
32	pdffox.com İnternet Kaynağı	<%1
33	repository.ut.ac.id İnternet Kaynağı	<%1

Alıntıları çıkart üzerinde
Bibliyografyayı Çıkart üzerinde
Eşleşmeleri çıkar < 7 words

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı	**Mehmet ÜNAL**

EĞİTİM BİLGİLERİ

Derece	Kurum	Mezuniyet Yılı
Lisans	**Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği**	**2021**
Yüksek Lisans	**Kayseri Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği**	**2025**

EĞİTİM BİLGİLERİ

Dil	Derece
İngilizce	**B2**

İŞ DENEYİMLERİ

Derece	Kurum	Görev Süresi
Elektronik Tasarım Mühendisi	**Aspilsan Enerji Sanayi ve Ticaret A.Ş.**	**2022-Halen**

YAYINLAR

Ünal, M., Demir, R., Mengüç, E. C., & İnan, R. (2025). Hafif elektrikli araçlar için OC-LMS tabanlı MUS kestiricisi kullanan hız-algılayıcısız doğrudan moment kontrollü fırçasız doğru akım motor sürücüsü. Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, 13(3). https://doi.org/10.29109/gujsc.1687368

MEHMET ÜNAL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

2025

Uygulama ve Proje Odaklı, İş Dünyası ile Bütünleşen Üniversite