KAYSERİ ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ASENKRON MOTOR SÜRÜCÜLERİ İÇİN ÇEVRİMİÇİ SANSÜRLEMELİ MODELE UYARLAMALI SİSTEM TABANLI HIZ KESTİRİCİSİNİN TASARIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ALİ YASİN BÜLBÜL

DANIŞMAN
DOÇ. DR. RIDVAN DEMİR



2025

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

ASENKRON MOTOR SÜRÜCÜLERİ İÇİN ÇEVRİMİÇİ SANSÜRLEMELİ MODELE UYARLAMALI SİSTEM TABANLI HIZ KESTİRİCİSİNİN TASARIMI

(Yüksek Lisans Tezi)

Hazırlayan
Ali Yasin BÜLBÜL

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.

Ali Yasin BÜLBÜL

T.C.
Kayseri Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürlüğü

Anabilim Dalı : Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Program Adı : Yüksek Lisans
Tez Başlığı : Asenkron Motor Sürücüleri İçin Çevrimiçi Sansürlemeli Modele Uyarlamalı Sistem Tabanlı Hız Kestiricisinin Tasarımı

Yukarıda bilgileri verilen tez çalışmasının a) Giriş, b) Ana bölümler ve c) Sonuç kısımlarından oluşan (Kapak, Önsöz, Özet, İçindekiler ve Kaynakça hariç) toplam 50 sayfalık kısmına ilişkin 09/10/2025 tarihinde ***Turnitin*** intihal programından aşağıda belirtilen filtreleme uygulanarak alınmış olan özgünlük raporuna göre tezin benzerlik oranı**: % 11'** dir.

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. 10/10/2025

Danışman — Öğrenci

Doç. Dr. Rıdvan DEMİR — Ali Yasin BÜLBÜL

KILAVUZA UYGUNLUK

"Asenkron Motor Sürücüleri İçin Çevrimiçi Sansürlemeli Modele Uyarlamalı Sistem Tabanlı Hız Kestiricisinin Tasarımı" başlıklı Yüksek Lisans tezi, Kayseri Üniversitesi Lisansüstü Tez Yazım Kılavuzuna uygun olarak hazırlanmıştır.

Tezi Hazırlayan	**Tez Danışmanı**
Ali Yasin BÜLBÜL	Doç. Dr. Rıdvan DEMİR

Elektrik-Elektronik Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. Engin Cemal MENGÜÇ

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Doç. Dr. Rıdvan DEMİR danışmanlığında Ali Yasin BÜLBÜL tarafından hazırlanan "Asenkron Motor Sürücüleri İçin Çevrimiçi Sansürlemeli Modele Uyarlamalı Sistem Tabanlı Hız Kestiricisinin Tasarımı" 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 edinmiş olduğum bilgi ve tecrübelerin bir ürünü olup, Asenkron Motor Sürücüleri İçin Çevrimiçi Sansürlemeli Modele Uyarlamalı Sistem Tabanlı Hız Kestiricisinin Tasarımı üzerine yapılan akademik bir araştırmayı kapsamaktadır. Tez süreci boyunca karşılaştığım teorik ve pratik zorlukları aşmamda büyük katkıları olan birçok değerli insanın desteğini görmek benim için oldukça kıymetli olmuştur.

Tez danışmanım Sayın Doç Dr. Rıdvan DEMİR'e, çalışmam boyunca yönlendirmeleri, bilimsel katkıları ve sabrı için en içten teşekkürlerimi sunarım. Akademik bilgi birikimi ve yol göstericiliği, tezimin şekillenmesinde büyük rol oynamıştır.

Ayrıca, eğitim hayatım boyunca beni daima destekleyen ve her zaman yanımda olan aileme, arkadaşlarıma ve bu süreçte katkısı olan tüm hocalarıma teşekkür ederim.

Bu çalışmanın, ilgili alanda yapılacak gelecekteki çalışmalara katkı sağlamasını ve faydalı bir kaynak oluşturmasını temenni ederim.

Ali Yasin BÜLBÜL, Kayseri, 2025

ASENKRON MOTOR SÜRÜCÜLERİ İÇİN ÇEVRİMİÇİ SANSÜRLEMELİ MODELE UYARLAMALI SİSTEM TABANLI HIZ KESTİRİCİSİNİN TASARIMI

Ali Yasin BÜLBÜL

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

ÖZET

Bu çalışmada, en küçük ortalama kare (least mean square, LMS) tabanlı modele uyarlamalı sistem (MUS) algoritmasının hesaplama yükünü azaltmak için önerilen çevrimiçi sansürlemeli LMS (online censoring LMS, OC-LMS) tabanlı MUS hız kestiricisini kullanan hız-algılayıcısız asenkron motor (ASM) sürücüsünün tasarımı gerçekleştirilmiş ve benzetim temelli doğrulanmıştır. Önerilen kestiricinin başarımı kentsel dinamometre sürüş programı (Urban Dynamometer Driving Schedule-UDDS) ve dünya çapında uyumlu hafif araçlar test prosedürü-3 (Worldwide Harmonised Light Vehicles Test Procedure 3-WLTP-3) hız profillerinin sürücü sistemine hız referansı olarak verildiği zorlayıcı senaryolar ile test edilmiştir. Önerilen OC-LMS tabanlı MUS algoritmasından elde edilen benzetim sonuçları önerilen kestiricinin başarımını onaylamaktadır. Ek olarak farklı sansürleme oranları için önerilen kestiricinin çalışma süreleri geleneksel LMS tabanlı MUS ile karşılaştırılmıştır. Önerilen kestirici %30, %50 ve %70 sansürleme oranları için çalışma süresini sırasıyla %9.11, %11.83 ve %15 düşürmüştür.

Anahtar kelimeler: Asenkron motor sürücüsü, LMS algoritması, hız kestirimi, MUS, alan yönlendirmeli kontrol

DESIGN OF AN ONLINE CENSORING MODEL REFERENCE ADAPTIVE SYSTEM BASED SPEED ESTIMATOR FOR INDUCTION MOTOR DRIVES

Ali Yasin BÜLBÜL

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

ABSTRACT

In this study, to reduce the computational burden of the least mean square (LMS) based model references adaptive system (MRAS) algorithm, the design of a speed-sensorless induction motor (IM) drive used the online censoring LMS (OC-LMS) based MRAS speed estimator is implemented and validated with simulations. The performance of the proposed estimator is tested with the challenging scenarios which the speed profiles of the Urban Dynamometer Driving Schedule (UDDS) and Worldwide Harmonised Light Vehicles Test Procedure 3 (WLTP-3) are given as the speed reference to the drive system. The simulation results obtained from the proposed OC-LMS based MRAS algorithm confirm the performance of the proposed estimator. In addition, the running times of the proposed estimator for different censoring ratios are compared with the traditional LMS based MRAS. The proposed estimator is reduced the running time by 9.11%, 11.83% and 15% for 30%, 50% and 70% censoring ratios, respectively.

Keywords: Induction motor, LMS algorithm, speed estimation, MRAS, field oriented control

İÇİNDEKİLER

ASENKRON MOTOR SÜRÜCÜLERİ İÇİN ÇEVRİMİÇİ SANSÜRLEMELİ MODELE UYARLAMALISİSTEM TABANLI HIZ KESTİRİCİSİNİN TASARIMI

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

BİRİNCİ BÖLÜM

TEMEL TANIMLAR

1.1. Asenkron Motor Yapısı ve Çalışma Şekli 3
1.2. Stator 4
1.3. Rotor 5
1.4. Endüstride Asenkron Motor 6
1.5. Elektrikli Otomobil Tahrikinde Asenkron Motor 6
1.6. Süreç Kontrolünde Asenkron Motor 7
1.7. CNC Tezgâhların Tahrikinde Asenkron Motor 7
1.8. Tezgâhların Kontrollü Sürülmesinde Asenkron Motor 8

İKİNCİ BÖLÜM

ASM MOTOR MODELİ VE OC-LMS TABANLI MUS'UN TASARIMI

2.1. ASM Modeli 27
2.2. Geleneksel MUS 28
2.3. Önerilen MUS Yapısı 29

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

BENZETİM ÇALIŞMALARI

3.1. Önerilen MUS Kestiricisini Kullanan AYK Tabanlı ASM Sürücüsü 33
3.2. Benzetim Çalışmaları 34

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

SONUÇ

KAYNAKÇA 51
TEZ İNTİHAL RAPORU 64
ÖZGEÇMİŞ 67

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Kısaltmalar

AC	: Alternatif akım
ASM	: Asenkron motor
DTC	: Doğrudan tork kontrolü
EKF	: Genişletilmiş kalman filtresi
FOC	: Alan yönlendirmeli kontrol
IGBT	: İzole geçitli bipolar transistör
IM	: İndüksiyon motoru
LMS	: En küçük ortalama kareler
MRAS	: Model referans adaptif sistemi
OC-LMS	: Çevrimiçi sansürlemeli LMS
OMYH	: Ortalama mutlak yüzde hatası
PWM	: Darbe genişlik modülasyonu
RMS	: Karekök ortalama değer
SMO	: Kayma modlu gözlemleyici
THD	: Toplam harmonik bozulma
V/f	: Gerilim-frekans oranı
VSI	: Gerilim kaynaklı invertör
YSA	: Yapay sinir ağı

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1.1. *Yöntemlerin karşılaştırması* 23
Tablo 3.1. *ASM parametreleri* 37
Tablo 3.2. *UDSS sürüş döngüsü için ortalama kare hata değerleri* 42
Tablo 3.3. *Farklı sansürleme oranları için UDSS sürüş döngüsüne ait önerilen OC-LMS tabanlı MUS kestiricinin ortalama çalışma süreleri* 42
Tablo 3.4. *WLTP-3 sürüş döngüsü için ortalama kare hata değerleri* 47
Tablo 3.5. *Farklı sansürleme oranları için WLTP-3 sürüş döngüsüne ait önerilen OC-LMS tabanlı MUS kestiricinin ortalama çalışma süreleri* 47

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. *Tipik bir asenkron motor (Birbaş, 2009)* 3
Şekil 1.2. *Stator yapısı (Birbaş, 2009)* 4
Şekil 1.3. *Sincap kafes tipi rotorun içi boş (çekirde iz) hali (Birbaş, 2009)* 5
Şekil 1.4. *Doğrudan vektör kontrol sistemi (Barut, 2005)* 10
Şekil 1.5. *Dolaylı vektör kontrol sistemi (Barut, 2005)* 10
Şekil 1.6. *Doğrudan moment kontrol sistemi (Barut, 2005)* 11
Şekil 1.7. *Model öngörülü kontrol sistemi (Altınışık ve Demir, 2021)* 12
Şekil 1.8. *Geleneksel MUS'un blok şeması (Schauder, 1992)* 20
Şekil 2.1. *Geleneksel MUS yapısı (Demir vd., 2023)* 29
Şekil 2.2. *OC-LMS tabanlı MUS hız kestiricisi* 30
Şekil 3.1. *Önerilen MUS kestiricisini kullanan AYK tabanlı ASM sürücüsü* 33
Şekil 3.2. *MATLAB/Simulink ortamı* 35
Şekil 3.3. *AYK sistemi için hız referansı ve ASM'ye uygulanan yük momenti değişimleri* 37
Şekil 3.4. *Geleneksel LMS tabanlı MUS'a ait kestirim sonuçları* 38
Şekil 3.5. *Geleneksel LMS tabanlı MUS kestirici için hatalar* 38
Şekil 3.6. *%30 sansürleme oranı için önerilen OC-LMS tabanlı MUS'a ait kestirim sonuçları* 39
Şekil 3.7. *%30 sansürleme oranı için önerilen OC-LMS tabanlı MUS kestirici için hatalar* 39
Şekil 3.8. *%50 sansürleme oranı için önerilen OC-LMS tabanlı MUS'a ait kestirim sonuçları* 40
Şekil 3.9. *%50 sansürleme oranı için önerilen OC-LMS tabanlı MUS kestirici için hatalar* 40
Şekil 3.10. *%70 sansürleme oranı için önerilen OC-LMS tabanlı MUS'a ait kestirim sonuçları* 41
Şekil 3.11. *%70 sansürleme oranı için önerilen OC-LMS tabanlı MUS kestirici için hatalar* 41
Şekil 3.12. *AYK sistemi için hız referansı ve ASM'ye uygulanan yük momenti değişimleri (WLTP)* 42
Şekil 3.13. *Geleneksel LMS tabanlı MUS'a ait kestirim sonuçları (WLTP)* 43

Şekil 3.14. *OC-LMS tabanlı MUS kestirici için hatalar (WLTP)*.....43
Şekil 3.15. *%30 Sansürleme oranı için Geleneksel LMS tabanlı MUS'a ait kestirim sonuçları (WLTP)*.....44
Şekil 3.16. *%30 sansürleme oranı için önerilen OC-LMS tabanlı MUS kestirici için hatalar (WLTP)*.....44
Şekil 3.17. *%50 Sansürleme oranı için Geleneksel LMS tabanlı MUS'a ait kestirim sonuçları (WLTP)*.....45
Şekil 3.18. *%50 sansürleme oranı için önerilen OC-LMS tabanlı MUS kestirici için hatalar (WLTP)*.....45
Şekil 3.19. *%70 Sansürleme oranı için Geleneksel LMS tabanlı MUS'a ait kestirim sonuçları (WLTP)*.....46
Şekil 3.20. *%70 sansürleme oranı için önerilen OC-LMS tabanlı MUS kestirici için hatalar (WLTP)*.....46

GİRİŞ

Asenkron motorlar (ASM'ler) endüstriyel uygulamalarda ve elektrikli araçlarda (EA'da) kullanılan motorlardandır. Düşük bakım gereksinimi, zorlu ortamlarda çalışabilme kabiliyeti, basit yapısı ve düşük maliyeti gibi üstünlükler ASM'lerin tercih edilmesindeki önemli etkenlerdendir. ASM'lerin yüksek başarımlı kontrol (YBK) uygulamaları göz önüne alındığında, ASM sürücüleri için alan yönlendirmeli kontrol (AYK) (Altınışık vd., 2021), doğrudan moment kontrol (DMK) (Goktas ve Arkan, 2018) ve model öngörülü kontrol (MÖK) (Çavuş ve Aktaş, 2023; Zhang vd., 2025) gibi farklı kontrol yöntemleri literatüre önerilmiştir. Bununla birlikte doğrusal olmayan dinamik modeli ve çalışma koşulları ile değişen parametreleri, ASM'lerin YBK'sını güçleştirmektedir. Ayrıca YBK uygulamalarında kullanılan kontrol sistemleri, ASM'nin durumlarından rotor hızı ile rotor/stator akı bilgilerine ihtiyaç duymaktadır. Kontrol sisteminin ihtiyaç duyduğu bu bilgilerin algılayıcılar aracılığı ile elde edilmesi maliyeti artırdığından dolayı, hız ve akı bilgisini elde etmek için kestiriciler ve/veya gözlemleyiciler kullanılmaktadır.

ASM'lerin durum ve parametre kestirimi için model tabanlı adaptif akı gözlemleyicisi (Mir vd., 2021), genişletilmiş Luenberger gözlemleyicisi (Bahloul vd., 2018), doğrusal olmayan Kalman filtresi gözlemleyicileri (Yildiz vd., 2020), yapay sinir ağları temelli kestirici (Aktas, 2010), uzun kısa süreli bellek temelli kestirici (Kosten vd., 2023) ve modele uyarlamalı sistem (MUS) tabanlı kestiriciler (Demir vd., 2023; Ganjewar ve Pahariya, 2022) gibi birçok kestirim algoritması literatüre önerilmiştir.

Literatüre daha önce önerilen kestirim algoritmaları ile karşılaştırıldığında MUS algoritması, basit yapısı, uygulanabilirliğinin kolay olması ve daha az hesaplama süresi gerektirmesi nedeniyle ASM'nin rotor hızı ve parametre kestirimi için kullanılan en yaygın yöntemlerden biridir. Son yıllarda elektrik motorlarının hız ve/veya parametre kestirimi için adaptif filtre (AF) tabanlı MUS kestiricileri literatüre tanıtılmıştır (Demir ve Barut, 2018; Zerdali ve Mengüç, 2019; Demir, 2023b; Demir vd., 2023;

Yıldız vd., 2023). Bu çalışmalarda adaptif filtre tabanlı MUS hız kestiricilerinin, geleneksel PI denetleyici kullanan MUS hız kestiricilerine kıyasla daha yüksek doğruluğa sahip olduğu gösterilmiştir. Fakat bu tür hız kestiriciler, büyük miktarda gereksiz bilgiyi işlemek zorunda kalmaktadır. Bu da gerçek-zamanlı uygulamalarda DSP'ler açısından ciddi bir işlem maliyetini birlikte getirmektedir. Ortaya çıkan bu araştırma boşluğu, söz konusu alanda yeni çalışmaların gerekliliğini açıkça göstermekte olup, bu çalışmanın yapılmasına zemin hazırlamıştır.

Bu tez çalışmasının temel katkısı, işlem yükü azaltılmış adaptif filtre tabanlı MUS hız kestiricilerini kullanan hız-algılayıcısız AYK tabanlı ASM sürücüsünün tasarımı ve benzetim temelli doğrulanması olarak ifade edilebilir. Önerilen MUS kestiricisi, referans model olarak adlandırılan ASM'nin ölçülen stator akımları ile uyarlanabilir modelin çıkışındaki stator akımları arasındaki hatayı kullanarak ASM'nin rotor açısal hızını doğrudan kestirmiştir. MUS hız kestiricisinin perfromansı kentsel dinamometre sürüş programı (Urban Dynamometer Driving Schedule-UDDS) ve dünya çapında uyumlu hafif araçlar test prosedürü-3 (Worldwide Harmonised Light Vehicles Test Procedure 3-WLTP-3) hız profillerinin AYK sistemine hız referansı olarak verildiği zorlayıcı senaryolar ile test edilmiştir.

Bu çalışma toplamda dört bölümden oluşmaktadır. ASM ile temel tanımlamalar, ASM sürücüleri ve OC-LMS algoritmaları ile ilgili genel bir literatür Bölüm 1'de verilmiştir. Bölüm 2'de ASM modeli ve OC-LMS tabanlı MUS kestiricinin tasarımı ile ilgili detaylar sunulmuştur. Bölüm 3'te UDDS ve WLTP-3 hız profilleri için ASM sürücüsünün kontrol başarımı ve önerilen kestiricinin kestirim performansının gösterilmesi amacıyla yapılan benzetim çalışmaları sunulmuştur. Sonuçlar ve yorumlar Bölüm 4'te ifade edilmiştir.

BİRİNCİ BÖLÜM

TEMEL TANIMLAR

1.1. Asenkron Motor Yapısı ve Çalışma Şekli

Asenkron motorlar, yalnızca endüstriyel hareket kontrol sistemlerinde değil, aynı zamanda şebekeden beslenen ev tipi cihazlarda da en yaygın kullanılan motor türlerindendir. Basit ve dayanıklı yapıları, düşük maliyetleri, az bakım gerektirmeleri ve şebekeye doğrudan bağlanabilmeleri başlıca avantajları arasında yer almaktadır. Tipik bir asenkron motor Şekil 1.1'de gösterilmektedir (Birbaş, 2009).

Şekil 1.1. *Tipik bir asenkron motor (Birbaş, 2009)*



Piyasada farklı uygulamalara uygun çeşitli tiplerde asenkron motorlar bulunmaktadır. Her motor tipi belirli bir kullanım alanı için geliştirilmiştir. Asenkron motorların tasarımı, doğru akım (DC) motorlarının tasarımına kıyasla daha kolay olsa da, hız ve tork kontrolü açısından daha derin bir tasarım anlayışı ve karakteristik bilgi gerektirir. Asenkron motorlar da pek çok elektrik motorunda olduğu gibi, stator adı verilen sabit dış kısım ile rotor adı verilen döner iç parçadan oluşur. Bu iki parça arasında, mühendislik açısından hassas şekilde belirlenmiş bir hava aralığı yer alır. Neredeyse tüm elektrik motorları, rotorlarını döndürmek için manyetik alan etkileşiminden faydalanır. Üç fazlı asenkron motorlarda döner manyetik alan, stator sargıları aracılığıyla kendiliğinden (doğal olarak) oluşur. Oysa DC motorlarda bu döner alan mekanik ya da elektronik komütasyon

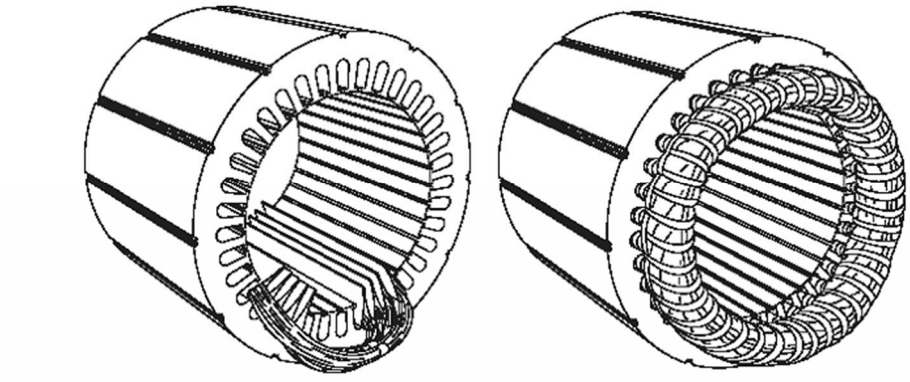
yardımıyla elde edilirken, tek fazlı asenkron motorlarda bu amaçla ek elektriksel bileşenler kullanılır (Birbaş, 2009).

Genel olarak her elektrik motorunda iki ayrı elektromıknatıs meydana gelir. Asenkron motorlarda stator sargıları doğrudan alternatif gerilim kaynağına bağlı olduğundan, statorda bir elektromıknatıs oluşur. Alternatif gerilim etkisiyle, Lenz Kanunu'na uygun şekilde rotorda elektromanyetik bir kuvvet indüklenir ve böylece rotorda da ikinci bir elektromıknatıs meydana gelir. Bu iki elektromıknatısın oluşturduğu manyetik alanların etkileşimi, dönme kuvveti yani tork üretir. Sonuç olarak, asenkron motor bu bileşke tork yönünde dönmeye başlar (Parekh, 2003).

1.2. Stator

Stator, genellikle alüminyum veya dökme demirden üretilmiş ince sac tabakaların bir araya getirilmesiyle oluşturulur. Bu tabakalar, belirli bir geometrik düzene göre delinerek birleştirilir ve iç yüzeyinde oluklar bulunan içi boş bir silindirik yapı, yani stator çekirdeği meydana getirilir (Şekil 1.2). Yalıtılmış bobin telleri, bu oluklara yerleştirilir. Alternatif akım (AC) kaynağı ile beslendiklerinde, her bir bobin grubu, çevrelediği çekirdek ile birlikte bir elektromıknatıs yani bir kutup çifti oluşturur. Asenkron motorun kutup sayısı, stator sargılarının iç bağlantı şekline bağlı olarak değişiklik gösterir. Stator sargıları doğrudan güç kaynağına bağlanır ve alternatif akım kaynağı ile beslendiklerinde, döner manyetik alan oluşturacak biçimde düzenlenmişlerdir (Birbaş, 2009).

Şekil 1.2. *Stator yapısı (Birbaş, 2009)*



1.3. Rotor

Rotor, yüzeyinde eşit aralıklarla yerleştirilmiş alüminyum veya bakır çubuklara sahip ince çelik tabakalardan üretilir. En yaygın rotor tipi olan kafes tipi yapıda, bu çubuklar

her iki uçta halkalar ile mekanik ve elektriksel olarak birbirine bağlanır. Asenkron motorların yaklaşık %90'ı kafes tipi rotora sahiptir; çünkü bu yapı hem basit hem de sağlamdır. Rotor, iletkenleri taşıyabilmesi için eksenel yönde açılmış paralel oluklara sahip silindirik, tabakalı bir çekirdekten oluşur. Her bir olukta bakır, alüminyum ya da alaşımlı metalden bir çubuk bulunur. Bu rotor çubukları, Şekil 3.3'te gösterildiği gibi her iki uçta halkalarla kalıcı olarak kısa devre edilmiştir. Sincap kafesine benzediğinden dolayı bu yapı "sincap kafesli rotor" olarak adlandırılır (Birbaş, 2009). Rotor olukları, motor miline tam paralel değildir; bunlara belirli bir çarpıklık verilmiştir. Bunun iki temel nedeni vardır: Birincisi, manyetik uğultuyu azaltarak motorun daha sessiz çalışmasını sağlamak ve oluk harmoniklerini en aza indirmektir. İkincisi ise rotorun kilitlenme eğilimini azaltmaktır. Doğrudan manyetik çekim nedeniyle, rotor dişleri stator dişlerinin altına gelerek kilitlenmeye eğilimlidir. Bu durum, rotor ve stator diş sayılarının eşit olması hâlinde daha belirgin şekilde ortaya çıkar (Birbaş, 2009). Rotor, motor miline her iki ucundaki rulmanlar yardımıyla monte edilir. Milin yük tarafındaki ucu genellikle daha uzun bırakılır. Bazı motor tiplerinde, sensör montajına imkân vermek amacıyla milin diğer ucu da uzun bırakılabilir. Stator ve rotor arasında, enerjinin indüksiyon yoluyla statordan rotora aktarıldığı bir hava boşluğu bulunur. Üretilen tork, rotorun ve bağlı olduğu yükün dönmesini sağlar. Kullanılan rotor tipi ne olursa olsun, dönme prensibi aynıdır (Birbaş, 2009).

Şekil 1.3. *Sincap kafes tipi rotorun içi boş (çekirde iz) hali (Birbaş, 2009)*



1.4. Endüstride Asenkron Motor

Günümüzde asenkron motorlar, en yaygın kullanılan motor tipleri arasında yer almaktadır. Ancak zamanla kullanım oranlarında bir azalma gözlemlenmektedir. Bu durumun temel nedeni, asenkron motorların yeni uygulama alanlarına uyum

sağlayabilmesi için gerekli olan kontrol sistemlerinin bazı teknik zorlukları henüz aşamamış olmasıdır (Stefanović, 1995).

Bu zorluklara geçmeden önce, gelecekte asenkron motorların potansiyel olarak kullanılabileceği yeni uygulama alanlarını incelemek faydalı olacaktır. Bu alanların her biri, asenkron motor teknolojisine önemli katkılar sağlayabilecek niteliktedir. Literatürde öne çıkan başlıca kullanım alanları şu şekilde sıralanmaktadır (Aydeniz, 2005).

1. Elektrikli veya hibrit araçların tahrik sistemleri,
2. Süreç kontrolünde, oransal sıvı akış kontrol valflerinin yerine hız kontrollü motorların kullanımı,
3. CNC tezgâhlarının tahrik sistemleri,
4. Tekstil makineleri, eksantrik presler gibi özel makinelerin kontrollü sürülmesi.

Bu alanlara yönelik bazı endüstriyel ürünler geliştirilmiş ve üzerinde çalışmalar sürdürülmektedir. Ancak, bu uygulamaların yaygın şekilde benimsenebilmesi ve güvenilir bir biçimde kullanılabilmesi için bazı teknik sorunların çözülmesi zorunludur. Bu sorunlar, uygulama alanına göre çeşitlilik göstermektedir (Aydeniz, 2005).

1.5. Elektrikli Otomobil Tahrikinde Asenkron Motor

Elektrikli araç tahrik sistemleri genel olarak dört ana başlık altında incelenebilir:

- Yüksek verim sağlayan ve dört bölgede kontrolün güvenli bir şekilde gerçekleştirilebildiği bir evirici yapısının kullanılması (Aydeniz, 2005),
- Kalkış ve duruş anlarında, düşük hız ancak yüksek ivmenin söz konusu olduğu çalışma bölgelerinde kararlı ve dalgalanmasız moment kontrolünün sağlanması (Aydeniz, 2005),
- Geniş parametre değişimlerine karşı sistemin bağımlılığını ortadan kaldıracak şekilde, dış bozuculara ve parametre belirsizliklerine karşı dayanıklı bir kontrol yapısının geliştirilmesi (Aydeniz, 2005),
- Çok düşük hız bölgelerinden, nominal hızın üç katına kadar olan aralıklarda verimli ve kararlı kontrol performansının elde edilmesidir (Aydeniz, 2005).

1.6. Süreç Kontrolünde Asenkron Motor

Süreç kontrolü, üç temel başlık altında değerlendirilebilir (Aydeniz, 2005):

- Oransal valflerle rekabet edebilecek düzeyde maliyet etkin çözümlerin sunulması (Aydeniz, 2005),
- Mekanik hız algılayıcısı kullanılmaksızın değişken hız kontrolünün gerçekleştirilmesi (hız algılayıcısız sürücü) (Aydeniz, 2005),
- Endüstriyel dış ortam koşullarında, özellikle yüksek sıcaklık, nem ve kimyasal gaz yoğunluğu değişimi gibi etkenler altında çalışabilen, parametre duyarlılığı düşük kontrol yapılarına sahip sistemlerin geliştirilmesidir (Aydeniz, 2005).

1.7. CNC Tezgâhların Tahrikinde Asenkron Motor

CNC tezgâhlarının tahrik sistemleri, iki ana başlık altında incelenebilir (Aydeniz, 2005):

Torna, freze gibi kuvvet altında çalışan tezgâhlar

- Motor milinde hız algılayıcısı bulunmaksızın kararlı kontrolün sağlanması,
- Yüksek hassasiyette konum kontrolünün gerçekleştirilmesi,
- Düşük hız ve yüksek moment koşullarında dalgalanmasız ve kararlı moment kontrolünün sağlanması (Aydeniz, 2005),
- Modellenemeyen moment bileşenleri ve parametre değişimlerine karşı yüksek başarımlı kontrol stratejilerinin uygulanması,
- Ana işlem kafası (spindle) motorunda yüksek ve sabit hızda çalışma koşullarının sağlanması.

Yükleme-boşaltma, montaj, taşıma, boyama gibi endüstriyel robot sistemleri

- Yüksek ivmelenme ve ani duruş gereksinimlerinin karşılanması (Aydeniz, 2005),
- Yüksek ivmeli ve değişken hızlı yörüngelerin yüksek hassasiyetle izlenebilmesi,
- Sıfır hızda kararlı kontrol performansının elde edilmesi,
- Motor milinde hız algılayıcısı olmaksızın dalgalanmasız ve kararlı kontrolün sağlanması (Aydeniz, 2005).

1.8. Tezgâhların Kontrollü Sürülmesinde Asenkron Motor

Tezgâhların kontrollü olarak sürülmesi üç temel başlık altında incelenebilir:

- Yüksek hızlarda çalışırken yön değiştirme işlemlerinin sürekli ve kararlı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi,

- Ani duruş yeteneğinin sağlanması,
- Düşük hızlarda yüksek moment üretiminin mümkün olması.

Günümüzde endüstride yaygın olarak kullanılan asenkron motor sürücülerinin büyük çoğunluğu, "statik evirici" olarak adlandırılan ve sabit gerilim/frekans oranına dayalı çalışan sürücülerdir. Ancak bu tür sürücüler, yukarıda belirtilen uygulama alanlarının hiçbirinde yeterli performansı sağlayamamaktadır (Aydeniz, 2005).

Son yıllarda, alan yönlendirmeli kontrol (Field Oriented Control) yöntemlerini kullanan ve hız algılayıcısı (sensorless) olmaksızın çalışabilen sürücülerin endüstriyel uygulamalarda kullanımı artmaya başlamıştır. Bu sürücüler, statik eviricilere kıyasla oldukça yüksek performans sergilemekte ve yukarıda sıralanan uygulama alanlarında başarıyla kullanılabilmektedir. Ancak, bu sürücülerin yaygın biçimde benimsenmesi için hâlâ geliştirilmesi gereken bazı yönler bulunmaktadır (Demirtaş, 2002).

Bu iyileştirilmesi gereken başlıca noktalar şu şekilde özetlenebilir:

- Özellikle hız algılayıcısız kontrol uygulamalarında, sistemin motor parametrelerine olan bağımlılığı henüz istenilen düzeyde giderilememiştir.
- Geniş çalışma aralıklarında ve dinamik çalışma koşullarında elde edilen performans, hâlen servo motorların gerisindedir.
- Düşük hız aralığında (nominal hızın %10'unun altında) moment dalgalanmaları belirgin şekilde yüksektir.
- Algılayıcısız kontrol altında, düşük hız bölgelerinde kararlı kontrol yeterince sağlanamamaktadır.

Bu tez çalışmasında, yukarıda belirtilen sınırlılıkların giderilmesi amacıyla yeni bir yöntem önerilmiş ve söz konusu problemlerin çözümüne yönelik uygulamalar sunulmuştur (Aydeniz, 2005).

Asenkron motorların sabit gerilim/frekans oranı (V/f) modunda çalıştırılması uzun yıllardır bilinen bir yöntem olup, temel prensipleri literatürde iyi şekilde tanımlanmıştır. Katı hâl inverter teknolojilerinin gelişimiyle birlikte bu kontrol yöntemi yaygınlaşmış ve günümüzde kullanılan değişken hızlı tahrik sistemlerinin büyük bir kısmı bu yapıya dayanmaktadır. Ancak, vektör kontrol teorisinin geliştirilmesiyle birlikte araştırmaların büyük bölümü bu yeni yönteme yönelmiş ve sabit V/f kontrolüne dair çalışmalara

literatürde daha az yer verilmiştir. Sabit V/f kontrolünün düşük frekanslardaki uygulamaları hâlen bazı zorluklar barındırmaktadır. Özellikle stator direncinin etkisi ile moment üretimi için gerekli rotor kayması, sistem performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Buna ek olarak, modern darbe genişlik modülasyonlu gerilim kaynağı inverterlerinin düşük gerilim seviyelerindeki doğrusal olmayan davranışları, sabit V/f kontrol yönteminin 3 Hz'in altındaki frekanslarda sağlıklı bir şekilde uygulanmasını zorlaştırmaktadır (Munoz-Garcia vd., 1998).

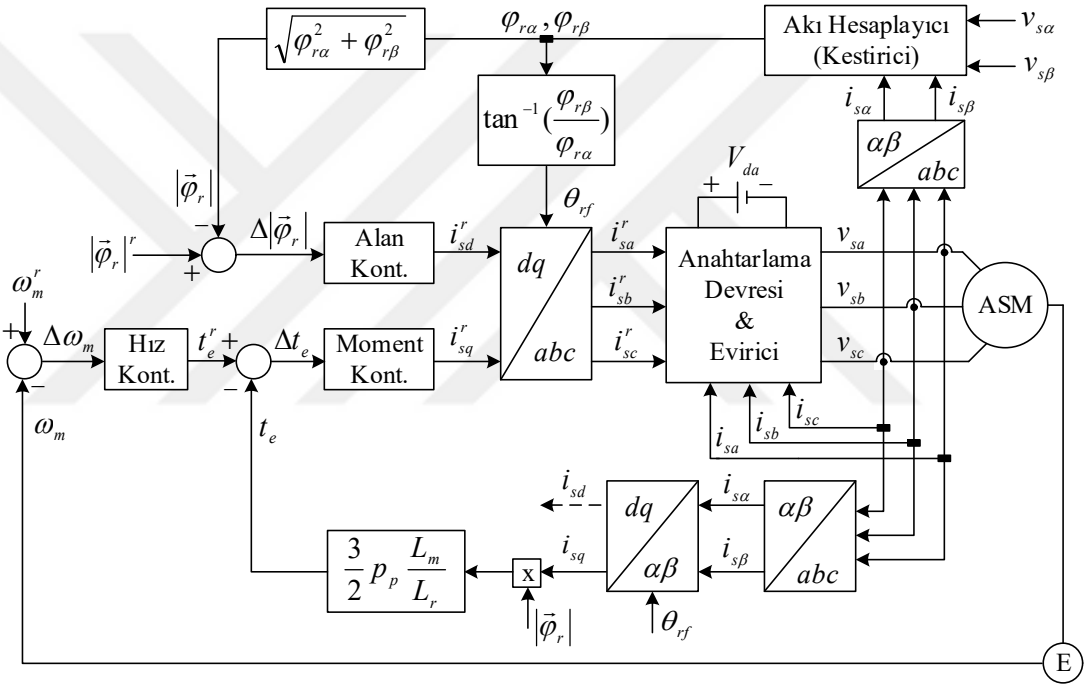
Günümüzde şebeke oluşturan (grid-forming) inverter tabanlı sistemlerin güvenli ve kararlı çalışması, özellikle ani yük değişimlerine ve kısa devrelere karşı dayanıklı bir kontrol stratejisi gerektirmektedir. Bu kapsamda, doğrudan gerilim kontrolü (DVK), inverter çıkış gerilim genliği ve frekansının doğrudan regülasyonu sayesinde, klasik akı tabanlı kontrol yöntemlerine kıyasla daha hızlı bir dinamik tepki sağlamaktadır. Literatürde Lin vd. (2023), yüksek bant genişliğine sahip voltaj regülasyonu ve içsel akım sınırlaması özelliklerini bir araya getirerek, tamamen şebeke oluşturan yapıya sahip bir DVK algoritması geliştirmiştir. Önerilen yapı, hem sabit durum kararlılığını hem de geçici rejim yanıtını iyileştirerek, sistemin aşırı akım koşullarına karşı dayanıklılığını artırmakta ve kontrolörün fiziksel sınırlar dâhilinde çalışmasını garanti etmektedir. Bu çalışma, DVK tabanlı inverter kontrolünde hızlı ve güvenli gerilim regülasyonu için dikkate değer bir yaklaşım sunmaktadır.

Asenkron motorlar, değişken hız ve moment gereksinimi olan uygulamalarda yaygın biçimde kullanılmakta olup, bu motorların kontrolünde hem açık hem de kapalı çevrimli skalar kontrol yöntemleri (Bose, 1997) ile alan yönlendirmeli kontrol stratejileri tercih edilmektedir. Bununla birlikte, kararlı durumlarda sinüsoidal çalışma koşullarını esas alan skalar kontrol teknikleri (Lehtla vd., 2000), geçici rejimlerde ASM'lerin dinamik tepkilerini yeterli düzeyde kontrol edememektedir (Bose, 2002; Holtz, 2002). Bu sınırlamaların aşılması amacıyla, 1969 yılında K. Hasse ve 1971'de F. Blaschke tarafından önerilen AYK yöntemi ile 1984 yılında Takahashi ve Noguchi tarafından geliştirilen DMK yaklaşımı (Takahashi ve Noguchi, 1986) sayesinde, ASM'lerin hem geçici hem de sürekli çalışma durumlarında serbest uyarmalı doğru akım motorları gibi yüksek doğrulukla kontrol edilebildiği gösterilmiştir.

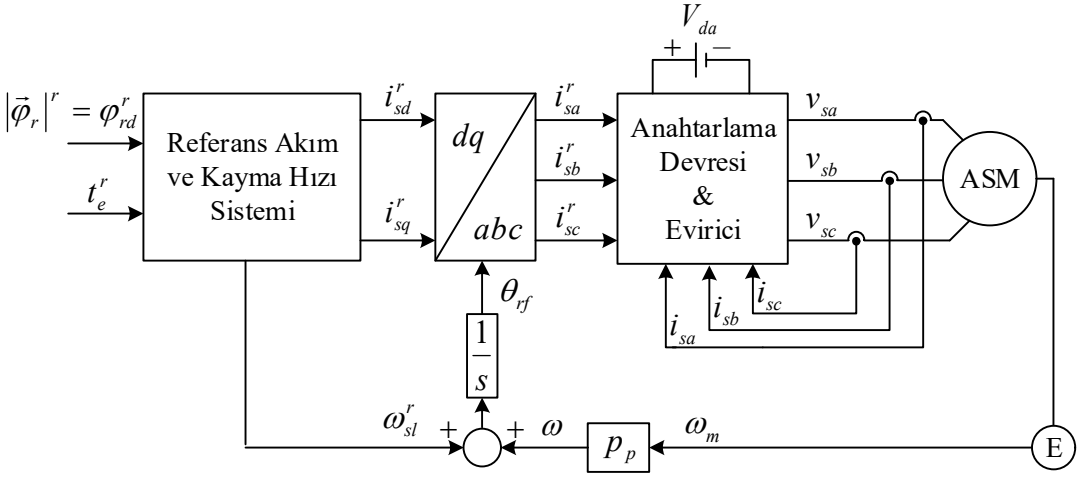
AYK yöntemleri, uygulanış biçimlerine göre doğrudan (ileri beslemeli) ve dolaylı (geri beslemeli) olmak üzere iki temel kategoriye ayrılmaktadır. Bu iki kontrol yapısı sırasıyla

Şekil 1.1 ve Şekil 1.2'de gösterilmektedir. Her iki yöntemde de, kontrolün etkin bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için yönlendirilen (referans alınan) akı vektörünün genlik ve konum bilgilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu noktada, doğrudan ve dolaylı AYK yaklaşımları arasındaki temel fark; yönlendirilen akıya ilişkin bu bilgilerin elde edilme yöntemlerinden kaynaklanmaktadır. Doğrudan AYK sistemlerinde, akı genliği ve konumu ya doğrudan ölçüm yoluyla ya da bir akı kestiricisi aracılığıyla belirlenirken; dolaylı AYK yöntemlerinde bu bilgiler, motorun kayma hızı ve sistem parametreleri kullanılarak hesaplanmaktadır.

Şekil 1.4. *Doğrudan vektör kontrol sistemi (Barut, 2005)*

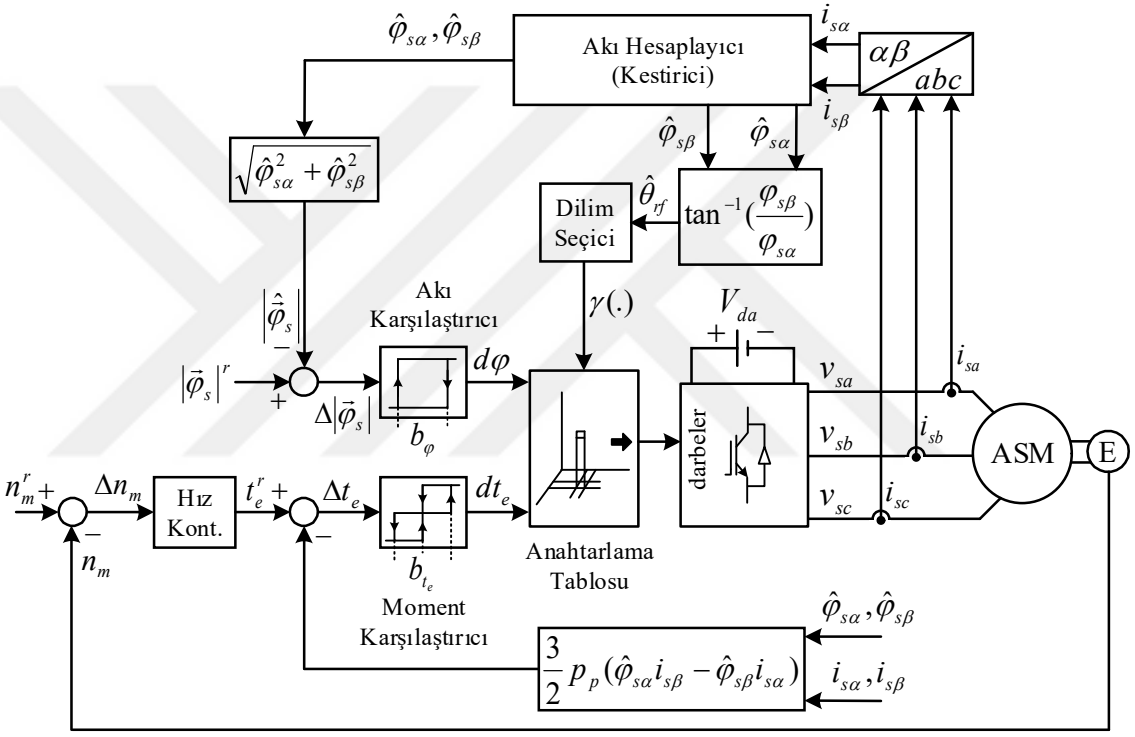


Şekil 1.5. *Dolaylı vektör kontrol sistemi (Barut, 2005)*



DMK yöntemi, basit yapısı ve doğrudan ve dolaylı AYK sistemleriyle kıyaslanabilir performansı sayesinde endüstride geniş uygulama alanı bulmuştur. Geleneksel DMK yapısı Şekil 1.3'te sunulmuştur. DMK sisteminin, darbe genişlik modülasyonuna (PWM) dayalı tetikleme devresine ve koordinat dönüşümlerine ihtiyaç duymaması, bu yöntemin AYK sistemlerine göre daha düşük maliyetle uygulanabilmesini sağlamaktadır. Bunun yanı sıra, PI denetleyicili akım kontrol çevrimlerinin bulunmaması, DMK'nın daha hızlı ve tepkisel bir dinamik moment yanıtı sunmasına olanak tanımaktadır.

Şekil 1.6. *Doğrudan moment kontrol sistemi (Barut, 2005)*

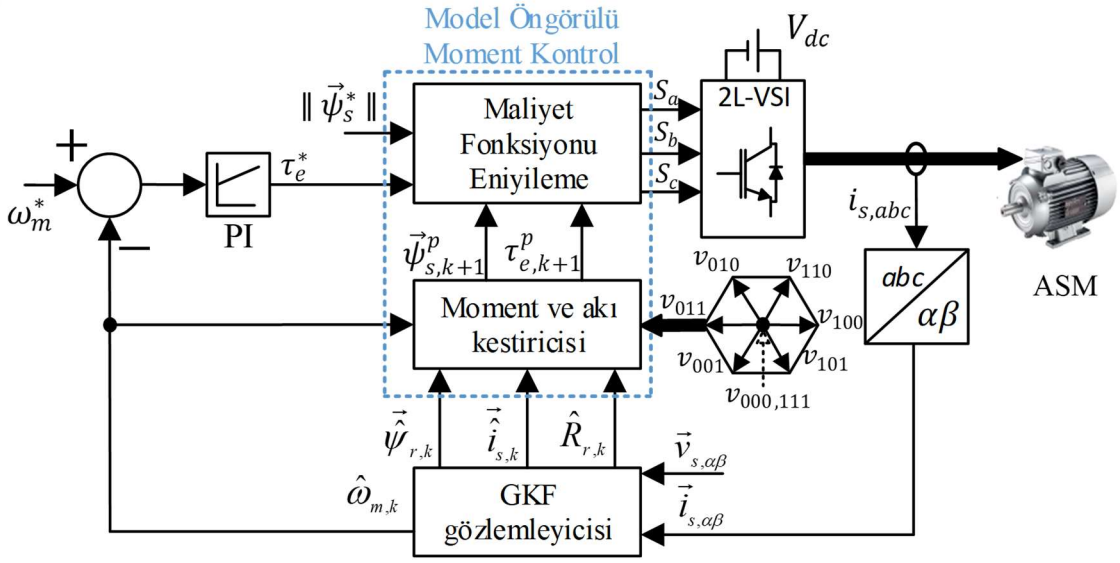


AYK ve DMK yöntemleri, ASM'lerin hem sürekli hem de geçici çalışma koşullarında hız, moment ve konum kontrolünün etkin bir şekilde gerçekleştirilmesine olanak tanımaktadır. Bununla birlikte, her iki kontrol stratejisi de yüksek verimli performans elde edebilmek için, stator referans eksenine (kartezyen koordinat sistemine) göre tanımlanan akı vektörünün genlik ve konum bilgilerine ihtiyaç duymaktadır. Ayrıca, hız kontrollü uygulamalarda rotorun açısal (mekanik) hız bilgisinin elde edilmesi de sistemin doğru ve kararlı çalışması açısından kritik öneme sahiptir. Öte yandan, DMK yönteminin bazı sınırlamaları da mevcuttur. Özellikle moment dalgalanmalarının varlığı ve düşük hız aralığında akı kestirimine karşı duyarlılık, yöntemin performansını olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Govindharaj vd. (2024) tarafından yapılan kapsamlı bir çalışmada, sensörsüz kontrol stratejilerinin uygulanabilirliği, DMK ve AYK yöntemleri bağlamında

değerlendirilmiştir. İlgili çalışmada, özellikle düşük hızlarda DMK sisteminde ortaya çıkan moment dalgalanmaları ve rotor konum kestiriminin dikkatlice incelenmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Son yıllarda AYK ve DMK yöntemlerine alternatif olarak model öngörülü kontrol (MÖK) olarak adlandırılan ve dinamik tepki, kolay uygulama imkanı ve doğrusal olmayan sistemlerin kontrolünde kısıtların yönetilmesi gibi avantajları bir araya getiren çok umut vadeden bir kontrol yöntemi bulunmaktadır (Wang vd., 2018; Abbasi vd., 2018). Elektrik motor sürücüleri için önerilen MÖK sisteminin genel yapısı Şekil 1.4'te verilmiştir.

Şekil 1.7. *Model öngörülü kontrol sistemi (Altınışık ve Demir, 2021)*



Elektrik motor sürücü sistemlerinde en çok tercih edilen MÖK stratejilerinden biri, sonlu kontrol seti öngörülü tork kontrolü (SKS-ÖTK) yöntemidir. SKS-ÖTK, inverterin sınırlı sayıda anahtarlama kombinasyonu ve sistemin ayrıklaştırılmış matematiksel modeli kullanılarak, önceden tanımlanmış bir maliyet fonksiyonunu minimize eden bir sonraki anahtarlama durumunu seçmektedir. Bu kontrol stratejisinin temelini oluşturan tek bir maliyet fonksiyonu, çeşitli kontrol hedeflerini, kısıtları ve doğrusal olmayan özellikleri birleştirebilmektedir (Perez-Guzman vd., 2020). Ancak, Rodríguez vd., (2012) bu stratejinin parametre duyarlılığı, maliyet fonksiyonundaki ağırlık faktörünün ayarlanması, anahtarlama frekansının sınırlandırılması ve hesaplama optimizasyonu konularında araştırma çalışmalarının artırılması gerektiğini belirtmektedir. Bu amaç doğrultusunda, ağırlık faktörünün belirlenmesi veya ortadan kaldırılması (Wang vd., 2020; V Praveen Kumar ve Kumar, 2019; Guazzelli vd., 2019), anahtarlama frekansının

azaltılması veya sabitlenmesi (V Praveen Kumar ve Kumar, 2019; Guazzelli vd., 2019; Zhang vd., 2019; Habibullah vd., 2017), tork ve akım harmoniklerinin azaltılması (V Praveen Kumar ve Kumar, 2019; Zhang vd., 2019; Habibullah vd., 2017), aşırı akım koruması (Wang vd., 2020; Zhang vd., 2019; Habibullah vd., 2017), elektriksel güç kayıplarının minimize edilmesi Eftekhari vd. (2020), parametre değişimlerine karşı dayanıklılık (Zhang vd., 2019; Habibullah vd., 2017), ölü zaman telafisi (Wang vd., 2020; Zhang vd., 2019; Habibullah vd., 2017, Wang vd. 2017) ve hesaplama karmaşıklığının optimize edilmesi (V Praveen Kumar ve Kumar, 2019; Zhang vd., 2019; Eftekhari vd., 2020) üzerine çeşitli çalışmalar yapılmıştır.

ASM sürücülerinde yüksek doğrulukta hız ve moment kontrolü sağlamak amacıyla geliştirilen kontrol stratejileri arasında doğrudan gerilim kontrolü (DGK), DMK ve MÖK yöntemleri öne çıkmaktadır. DGK yöntemi, sistem gerilimini doğrudan kontrol ederek özellikle düşük hızlı ve zayıf akı alanlarında hızlı ve kararlı bir yanıt elde etmeyi hedefler. Gerilim sınırlaması, aşırı akım durumlarında sistem koruması açısından avantaj sağlarken, yapı itibariyle gerilim kaynaklı kayıpların önüne geçilmesini de mümkün kılar. Buna karşın, DMK yöntemi, moment ve manyetik akı büyüklüklerini doğrudan regüle ederek daha hızlı geçici yanıtlar sunabilmekte; ancak sabit anahtarlama frekansı elde edilememesi ve moment dalgalanmalarının yüksek olması gibi yapısal zorluklar barındırmaktadır. MÖK ise sistemin matematiksel modelini kullanarak belirli bir öngörü ufku dahilinde kontrol girdilerini optimize eden ileri düzey bir strateji olup, sistem dinamiklerine ve fiziksel sınırlara doğrudan uyum sağlayabilmektedir. MÖK, DGK'ye kıyasla daha yüksek hesaplama yüküne sahip olmasına rağmen, çok değişkenli yapılar ve sınırlı çalışma koşulları altında en uygun performans kriterlerini sağlamaktadır. Özellikle Geyer vd. (2009) tarafından geliştirilen model öngörülü doğrudan moment kontrol (MÖDMK) gibi yapılar, DMK'nın hızlı tepki avantajını korurken moment dalgalanmasını sınırlı tutmakta ve sistem verimliliğini artırmaktadır. Sonuç olarak, DGK düşük frekans kararlılığı ve gerilim sınırlama açısından uygunken, DMK hızlı moment kontrolü; MÖK ise hem sistematik optimizasyon hem de yüksek hassasiyetli kontrol yeteneği ile öne çıkmaktadır.

Geleneksel kontrol yaklaşımlarında, rotorun açısal hızı ve konumu ile akı vektörünün ölçüm cihazları aracılığıyla sağlanması, sistemde donanım karmaşıklığını ve maliyetleri artırmaktadır. Ayrıca, bu ölçüm cihazları çalışma koşullarından kaynaklanan sıcaklık

değişimleri ve mekanik titreşimler gibi etkenlerden olumsuz etkilenmektedir. Bu nedenle, hız ve akı bilgilerinin kestiriciler veya gözlemleyiciler yardımıyla tahmin edilmesi (Holtz, 2002; Schauder, 1992; Vas, 1998; Barut, 2005) daha pratik ve işlevsel bir yöntem olarak tercih edilmektedir. Hız algılayıcısız kontrol teknikleri, ek donanım gerektirmemesi, sürücülerin boyutlarının küçülmesi, maliyetlerin düşmesi, gürültüye karşı dirençli olması ve sistem güvenilirliğinin artması gibi avantajları nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır (Holtz, 2006).

AYK, DMK ve MÖK yöntemlerinin ihtiyaç duyduğu hız, konum, akı ve akım bilgilerinin gözlemleyiciler veya kestiriciler tarafından elde edilmesi amacıyla literatüre birçok algoritma önerilmiştir. Bu kestirim algoritmaları aşağıdaki gibi sınıflandırılabir:

- Olasıl (stochastic) tabanlı Genişletilmiş Kalman filtresi (GKF) algoritması (Alonge vd., 2015; Alsofyani ve Idris, 2016; Auger vd., 2013).
- Sıfır hız dahil çok düşük hızlarda ASM'ye darbe genişlik modülasyonlu (DGM) anahtarlama sinyalleri veya yüksek frekanslı sinüzoidal sinyaller uygulayan modelden bağımsız algoritmalar (Caruana vd., 2005).
- Belirgin (deterministic) model tabanlı algoritmalar:
    - genişletilmiş Luenberger gözlemleyicisi (GLG) (Costa vd., 2015),
    - yapay sinir ağları (YSA) tabanlı gözlemleyiciler (Wlas vd., 2008),
    - uyarlamalı akı gözlemleyicisi (UAG) (Salmasi vd., 2010),
    - kayma kipli kontrol (KKK) tabanlı gözlemleyiciler (Kassem, 2016),
    - modele uyarlamalı sistem (MUS) (Kumar vd., 2015),
    - diğer lineer olmayan tasarım teknikleri kullanan algoritmalar (Marino vd., 2005)

GKF durum ve parametre kestiriminde etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Hesaplama açısından karmaşıklık içerse de, GKF herhangi bir harici uyarı sinyali gerektirmeksizin, sistem ve ölçüm gürültülerinden kaynaklanan sürekli etkileri doğrudan dikkate alarak çevrimiçi kestirim gerçekleştirebilmektedir. Ayrıca, model tabanlı tekniklerin aksine, GKF donanım karmaşıklığını artırmadan hem düşük hem de yüksek hızlarda çalışan tüm asenkron motorlarda uygulanabilirlik sağlamaktadır. Son yıllarda, GKF'nin bu avantajlarından yararlanmak amacıyla, hız-algılayıcılı ve hız-algılayıcısız kontrol problemlerinin çözümünde GKF tabanlı kestiriciler literatürde sıkça yer almaktadır (Alsofyani ve Idris, 2016; Barut, 2010; Demir vd., 2017; Zerdali ve Barut,

2016). Bununla birlikte deterministik tabanlı yöntemlere kıyasla daha fazla hesaplama yükü gerektirir (Yildiz vd., 2020a).

GKF kullanılarak ASM'lerin durum ve parametre kestirimleri üzerine yapılan araştırmalar incelendiğinde çeşitli başarılı uygulamalar görülmektedir. Salvatore vd. (1993) rotor akısı bileşenleri ile rotor zaman sabitini hız algılayıcılı yöntemlerle kestirirken, Atkinson vd. (1996) rotor akımları ve rotor direncini indirgenmiş dereceli GKF (İD-GKF) aracılığıyla tahmin etmiştir. Lin (1996) ile Wade vd. (1997) ise stator ve rotor akımlarıyla birlikte rotor direncinin kestirimini gerçekleştirmiştir. Hız algılayıcısız İDGKF yöntemi ile rotor akıları, rotor direnci ve rotor hızı Garcia Soto vd. (1999) tarafından tahmin edilirken, Barut vd. (2005) hız algılayıcısız DMK sisteminde GKF kullanarak rotor hızı, stator akımları, rotor akıları ve rotor direncine ek olarak yük momenti kestirimi yapmışlardır. Bu çalışmalar, rotor direnci ve yük momentindeki değişimlerin kestirim ve kontrol performansı üzerindeki olumsuz etkilerini ortadan kaldırmıştır. Ayrıca, Barut vd. (2007) hız algılayıcısız olarak iki GKF algoritmasını anahtarlamalı bir şekilde çalıştırarak stator ve rotor akımları, rotor hızı, yük momenti ile birlikte rotor direnci ve stator direnci kestirimini gerçekleştirmiştir. Bogosyan vd. (2007) ise önerdikleri örgülü GKF yöntemiyle benzer parametre kestirimlerini yapmıştır. Barut (2010), literatüre ilk kez çift girişli GKF (ÇG-GKF) algoritmasını sunmuş ve bu yöntemle stator akımları, rotor akıları, rotor hızı, yük momenti ile rotor direnci ve stator direnci kestirimini benzetim ortamında, Barut vd. (2012) ise gerçek zamanlı deneylerle doğrulamışlardır. Bu yöntemde, örgülü veya anahtarlamalı GKF'den farklı olarak, iki GKF algoritması yerine tek bir GKF yapısı kullanılmış ve iki farklı genişletilmiş ASM modeli için girişler anahtarlamalı ya da örgülü biçimde sunulmuştur. Barut ve Demir (2010), ÇG-GKF algoritmasını DMK sistemi üzerinde uygulamış ve rotor hızı, stator ve rotor akıları, yük momenti ile rotor ve stator direnci kestirimlerini simulasyonlarla göstermiştir. Böylece ÇG-GKF algoritmasının hem rotor akısı yönlendirmeli doğrudan vektör kontrol sistemlerinde hem de stator akısı yönlendirmeli DMK sistemlerinde kullanılabilirliği kanıtlanmıştır. Barut'un (2010) çalışmasına ek olarak, Inan ve Barut (2014) alan zayıflama bölgesinde mıknatıslama endüktansı kestirimini, Zerdali ve Barut (2016) ise anma hız ve altındaki hız bölgelerinde eylemsizlik kestirimini hem simulasyon hem de gerçek zamanlı deneylerle gerçekleştirmiştir. Yin vd. (2013) İD-GKF yerine gürbüz indirgenmiş dereceli GKF (GİD-GKF) kullanarak dış bozuculara ve kestirim hatalarına karşı dayanıklı gerçek zamanlı akı ve hız kestirimi yaparken, Yin vd. (2014)

arayüz çoklu model GKF (AÇM-GKF) yöntemiyle akı ve hız kestirimini gerçekleştirmiştir. Bu yaklaşımlar geleneksel GKF'ye kıyasla daha dayanıklı olmakla beraber, hesaplama yükü artmaktadır. Alonge vd. (2015), stator ve rotor akımları, rotor açısal hızı ve yük momentini kestiren altıncı dereceden bir GKF algoritmasının yakınsama ve gözlemlenebilirlik analizini sunmuştur. Alsofyani ve Idris (2016), geleneksel DMK sisteminde üç seviyeli histeresis moment karşılaştırıcı yerine sabit anahtarlama frekanslı kontrolör kullanarak düşük ve sıfır hızlarda yüksek performanslı hız, moment ve akı kestirimi gerçekleştirmiştir. Krim ve ekibi (2016) ise bulanık mantık tabanlı DMK sistemiyle hız, moment ve akı kestirimini FPGA platformunda uygulamıştır. Yin vd. (2017), sönümleme faktörü ve filtre kazancını çevrimiçi olarak ayarlayan güçlü izlemeli GKF (Gİ-GKF) kullanarak uyarlamalı hız ve akı kestirimi yapmıştır. Bu yöntemde sönümleme faktörü, en küçük kareler algoritmasıyla dinamik olarak optimize edilmektedir. Son yıllarda GKF algoritmasının ölçüm eşitliğine akım bilgilerine ilaveten hız bilgisini ekleyen çalışmalar bulunmaktadır (Yıldız vd., 2020b, 2023a, 2024). Bu çalışmalarda ölçüm eşitliğinin genişletilmesi ile birlikte durum ve parametre kestirim sayısının ve başarımın artırılması hedeflenmiştir. Yıldız vd. (2020b)'de ASM'nin stator akımları, rotor akıları, rotor hızı, yük momenti, rotor direnci ve mıktaslama indüktansı kestirimleri sekizinci dereceden GKF ile gerçekleştirilmiştir. Yıldız vd. (2023a)'da ise Yıldız vd. (2020b)'de gerçekleştirilen kestirimlere ek olarak motor ve yükün toplam eylemsiliğinin tersi dokuzuncu dereceden GKF ile kestirilmiştir. Yıldız vd. (2024)'te ise ASM'nin stator akımları, rotor akıları, rotor hızı, yük momenti, rotor direnci, stator direnci ve motor ve yükün toplam eylemsiliğinin tersinin kestirilmesi için yine dokuzuncu dereceden GKF kullanılmıştır. Önerilen yaklaşımlarda eleman bazlı matris çarpımlarının artması ve ölçüm eşitliğin genişletilmesi nedeniyle matris tersinin alındığı Kalman filtresi ifadelerinde meydana gelen derece artımı işlem yükünüde artırmaktadır. Bununla birlikte Demir (2023a)'da ise işlem yükünün azaltılması ve kestirimlerin ve buna bağlı olarak kontrol başarımının parametre değişimlerinden etkilenmemesi veya daha az etkilenmesi amacıyla dördüncü dereceden GKF kestiricisi önerilmiştir. Önerilen GKF algoritmasında ölçüm eşitliği yukarıdaki çalışmaların aksine boyut olarak düşürülmüştür. Ölçüm eşitliğinde sadece hız bilgisi kullanan kestirici rotor hız, stator akıları ve yük momentinin kestirimini gerçekleştirmiştir. Ayrıca ilgili çalışmada akım ifadeleri durum olarak kullanılmadığından dolayı GKF'de kullanılan motor modelinin derecesi düşürülmüş ve motor modeli parametrelerinin birçoğundan

bağımsız hale getirilmiştir. Demir (2023a) parametre değişimlerine karşı kestiricinin ve kontrol sisteminin başarımını incelemiş ve daha düşük işlem yükü ile daha gürbüz kestirim ve kontrol başarımı sunmuştur.

Öte yandan, GKF'nin yüksek doğrulukta kestirim yapabilmesi için sistem ve ölçüm gürültüsüne ait kovaryans matrislerinin doğru belirlenmesi kritik önem taşımaktadır. Literatürde bu matrislerin çoğunlukla deneme-yanılma yöntemi ile seçildiği görülmektedir. Ancak bu yöntem, hem zaman açısından maliyetli olmakta hem de optimum parametrelerin tam olarak bulunamamasına yol açmaktadır; bu da GKF algoritmalarının başlıca dezavantajlarından biridir. Son yıllarda, bu soruna çözüm olarak gürültü kovaryans matrislerinin optimizasyonu için farklı algoritmalar geliştirilmiştir. Örneğin, Salvatore vd. (2010), diferansiyel gelişim algoritması (DGA) kullanarak GKF'nin sistem ve ölçüm gürültüsü kovaryans matrislerini optimize etmişlerdir. Laamari vd. (2015) parçacık sürü optimizasyonu (PSO) algoritması ile çevrimdışı olarak bu matrisleri belirlemiş ve GKF algoritmasına uygulayarak hız ve akı kestirimini gerçekleştirmiştir. Benzer şekilde, Zerdali ve Barut (2017), diferansiyel gelişim algoritması ve çok amaçlı DGA teknikleriyle GKF'ye ait gürültü kovaryans matrislerinin çevrimdışı optimizasyonunu yapmışlardır.

Genişletilmiş Luenberger gözlemleyici, gözlemlenebilir sistemlerde bilinmeyen durumları tahmin etmek amacıyla kullanılan bir yöntemdir. Asenkron motor sürücülerinde, özellikle hız algılayıcısız (sensorless) kontrol uygulamalarında, rotor akısı ve rotor hızının doğru kestirimi için sıklıkla tercih edilmektedir. GLG'nun temel avantajı, rotor akısı ve rotor hızını eşzamanlı olarak kestirebilmesidir. Bu özellik, ardışık kestirim yapan adaptif gözlemleyicilerde karşılaşılan hata büyütme problemlerini azaltmaktadır (Song vd., 2000). GLG yöntemi ile Du vd. (1995), ASM'lerin rotor hızı ile birlikte rotor zaman sabiti veya rotor direnci kestirimini gerçekleştirmiştir. Wade vd. (1997)'de rotor direnci kestirimindeki başarımı artırmak amacıyla stator duran eksen (αβ-ekseni) yerine dönen eksen (dq-ekseni) koordinat sistemini kullanılmıştır. Yongchang ve Zhengming (2008) ise rotor hızı ile birlikte yük momenti kestirilirken, Costa vd. (2015) diferansiyel gelişim algoritması ile eğitilmiş GLG yaklaşımı kullanarak hem rotor hızı hem de stator akısı kestirimini gerçekleştirmiştir. Jouili vd. (2012)'de ise hız algılayıcısız, GLG tabanlı dolaylı stator akısı yönlendirmeli kontrol yapısını içeren bir asenkron motor sürücüsü geliştirilmiştir. Önerilen bu hız algılayıcısız sürücüde, GLG kazanç matrisi, elektriksel

hız ve oransal sabitin fonksiyonları olarak analitik ilişkiler yardımıyla belirlenmiş ve böylece işlem karmaşıklığının azaltıldığı ifade edilmiştir. Geleneksel GLG yapısının gözlemleyici derecesi (order) oldukça yüksektir ve bu durum hesaplama karmaşıklığını artırarak gerçek zamanlı uygulamalarda zorluk çıkarabilir. Bu nedenle indirgenmiş dereceli genişletilmiş Luenberger gözlemleyici (İD-GLG) yapıları geliştirilmiştir. İD-GLG'nun amacı, bilinen durumların sistem modelinden elimine edilmesiyle gözlemleyicinin boyutunu düşürerek daha hızlı ve verimli kestirim gerçekleştirmektir. İD-GLG yöntemleri iki farklı yaklaşıma dayanmaktadır:

- Matris dönüşümüne dayalı İD-GLG yöntemi: Gözlemleyici kutuplarının serbestçe yerleştirilmesine olanak tanır fakat Lyapunov denkleminin çözümü gibi hesaplama açısından yoğundur.
- Bilinen durumların iptaline dayalı İD-GLG yöntemi: Daha sade hesaplama yapısına sahiptir, ancak gözlemleyici kutuplarının serbestçe yerleştirilmesi sınırlıdır.

Bilinen durumların iptaline dayalı İD-GLG yöntemi, düşük ve yüksek hız koşullarında rotor hızının ve akısının tatmin edici düzeyde kestirilebildiğini göstermiştir. Ayrıca, Bilinen durumların iptaline dayalı İD-GLG yönteminin, matris dönüşümüne dayalı İD-GLG yöntemine kıyasla daha kararlı ve düşük hızlarda daha hassas sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Son yıllarda, biyolojik sinir ağlarından esinlenilerek geliştirilen yapay sinir ağları (YSA), birçok alanda yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle desen tanıma, kestirim, optimizasyon, ilişkilendirilmiş bellek ve kontrol uygulamalarında önemli başarılar elde edilmiştir. YSA'lar, öğrenme ve genelleme kabiliyetleri sayesinde klasik yöntemlerin baş edemediği doğrusal olmayan, karmaşık problemlerin çözümünde etkili bir alternatif sunmaktadır. Ayrıca, giriş–çıkış verileri üzerinden öğrenme yetenekleri, bu yapıları parametre değişimlerine karşı dayanıklı ve adaptif hale getirmektedir. Bu yönüyle YSA'lar, özellikle kontrol sistemlerinde esneklik ve yüksek doğruluk sunmaları açısından avantajlıdır.

Kubota vd. (1993) tarafından sabit bir parametre olarak tahmin edilen rotor hızına ek olarak akı kestirimi UAG ile gerçekleşitirlmiştir. Kubota ile Matsuse (1994) ise, hız kestirimindeki hataya neden olduğu bildirilen rotor hızını, eş zamanlı olarak UAG

yöntemiyle birlikte kestirmişlerdir. Ayrıca, Salmasi ve Najafabadi (2011) tarafından yapılan çalışmada, hız algılayıcısı kullanılarak kestirilen akıya ilave olarak rotor direnci ve stator direnci parametrelerinin de eş zamanlı tahminleri UAG ile gerçekleştirilmiştir.

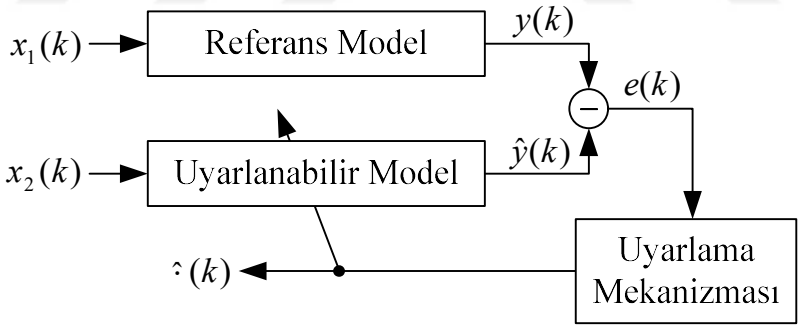
Kayma kipli gözlemleyicileri (KKG) ASM'lerin algılayıcısız kontrol uygulamalarında yüksek dayanıklılık ve düşük hızlarda kararlı performans sunabilmeleri sayesinde önemli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Bu yöntemde, motorun stator akımı ve gerilimi kullanılarak stator akı vektörü kestirilir ve akı kontrolü kaymalı yüzey üzerinde gerçekleştirilir. Kaymalı yüzey, sistemin belirli bir kontrol manifolduna ulaşmasını sağlar ve bu sayede sistem, parametre değişimlerine karşı daha az hassas hale gelir. Ayrıca KKG yapısı, klasik gözlemleyici yöntemlerine kıyasla parametre sapmalarına karşı daha dirençli olup, düşük hız aralığında çalışabilirliği artırır (Sutnar vd., 2008). Asenkron motorun (ASM) gerilim denklemleri temel alınarak, kayma kipli (sliding mode) hız gözlemcisi aracılığıyla rotor akısı ve stator akımları tahmin edilmektedir. Tursini vd. (2000), ölçülen ile tahmin edilen stator akımları arasındaki fark ve rotor akısı bileşenlerini kullanarak, rotor hızını durum değişkeni olarak tanımlamış ve bu hızın kestirimini gerçekleştirmiştir. Rotor akısı ve hız kestirimlerine ek olarak, rotor zaman sabiti tahmini Derdiyok vd. (2001) tarafından, stator direnci tahmini ise Lascu vd. (2004) tarafından yapılmıştır. Bu yaklaşımlara ilaveten, Vieira vd. (2012), rotor akısı bileşenlerinden bağımsız şekilde rotor hızını ayrık zamanlı kayma kipli kontrol (KKK) yöntemi ile tahmin etmiştir. Daha sonra Vieira vd. (2014), mıknatıslama akısı kestirimi ile birlikte sürekli zamanlı kayma kipli gözlemleyici kullanarak rotor hızını tahmin etmişlerdir. Terras vd. (2013) ise hız algılayıcısı ile birlikte rotor akılarına ilave olarak rotor direnci tahminini KKG kullanarak gerçekleştirmiştir. Ayrıca, Huang vd. (2014) ikinci derece kayma kipli gözlemleyici kullanarak hem stator direncini hem de rotor hızını tahmin etmiştir.

Elektrikli araçlarda (EV) kullanılan asenkron motor sürücülerine yönelik olarak geliştirilen yeni nesil kestirim yöntemlerinden biri de uzun kısa süreli bellek (Long Short-Term Memory- LSTM) tabanlı ağlardır. Bu yöntemler, özellikle rotorun mekanik hızı ve yük momentinin sensörsüz kestirimi için etkin bir çözüm sunmaktadır. LSTM ağı, stator gerilim ve akımlarının dönen eksen bileşenlerini girdi olarak kullanırken, rotor hızı ve yük momentini çıktı olarak vermektedir. En uygun ve maliyet-etkin ağ mimarisinin belirlenebilmesi adına farklı katman sayıları ve gizli katman boyutları değerlendirilmiş;

elde edilen sonuçlar, tahmin doğruluğu açısından karşılaştırılmıştır. Bu yaklaşımı özgün kılan bir diğer yön ise, hem dönüş yönlerinin değiştiği hem de zorlu yük momenti değişimlerinin bulunduğu çalışma koşullarını içeren verilerle eğitilmiş olmasıdır. Böylece motorun her iki yöndeki dinamik davranışı da göz önünde bulundurulmuştur. Bu yönüyle önerilen yöntem, literatürdeki benzer çalışmalardan ayrılmaktadır (Kosten vd., 2023).

Literatüre rotor hız ve parametre kestirimi için önerilen yöntemlerden birisi olan MUS ile ilk defa rotor hızının sabit bir parametre olarak kestirimi Schauder (1992)'de gerçekleştirilmiştir. Şekil 1.5'te geleneksel MUS kestiriciye ait blok diyagram verilmiştir. Burada $x_1(k)$ ve $x_2(k)$ sırasıyla referans model ile uyarlanabilir modelin giriş sinyallerini temsil etmektedir. Benzer şekilde $y(k)$ ve $\hat{y}(k)$, referans modelin ve uyarlanabilir modelin çıkış sinyallerini ifade etmektedir. Bu iki çıkış arasındaki fark, $e(k)$, sistemdeki hata sinyali olarak tanımlanmakta olup, uyarlama mekanizmasının temel girdisini oluşturmaktadır. Ayrıca, $\hat{}(k)$ sembolü, uyarlama mekanizması tarafından kestirilmesi hedeflenen parametreyi göstermektedir.

Şekil 1.8. *Geleneksel MUS'un blok şeması (Schauder, 1992)*



MUS temel olarak referans model ve uyarlanabilir model olmak üzere iki ayrı yapıdan oluşmaktadır. Bu iki modelin çıkışları esas alınarak farklı türde MUS yapılandırmaları geliştirilmiştir. Literatürde, rotor akısı temelli (Chacko vd., 2016), zıt elektromotor kuvvet (zıt-EMK) temelli (Zheng vd., 2016), reaktif güç (Madadi Kojabadi vd., 2013) ve aktif güç (Madadi Kojabadi vd., 2013) temelli MUS uygulamaları bu doğrultuda sınıflandırılmıştır.

MUS temelli çalışmalarda, rotor hızıyla birlikte çeşitli motor parametrelerinin tahmini üzerine birçok yöntem önerilmiştir. Örneğin, Zhen ve Xu (1998) ile Vasic vd. (2003)'te rotor akısı tabanlı MUS (RA-MUS) ile rotor hızı ve stator direnci birlikte kestirilmiştir. Benzer şekilde, Rashed ve Stronach (2004) zıt elektromotor kuvvet temelli bir yapıyla,

Madadi Kojabadi vd. (2013) ise aktif güç sinyali kullanarak benzer parametreleri tahmin etmiştir. Öte yandan, Orłowska-Kowalska ve Dybkowski (2010), düşük hız bölgelerinde stator akımı temelli bir MUS yaklaşımıyla rotor hızı tahminini gerçekleştirmiştir. Sıcaklık ve frekans gibi değişken koşullara duyarlı rotor direnci ve zaman sabiti kestirimi ise sırasıyla Lin ve Su (1997) ile Madadi Kojabadi (2009) tarafından alan yönlendirmeli kontrol bağlamında ele alınmıştır. Yapay zeka tabanlı uygulamalarda, uyarlanabilir modelin yapay sinir ağları (YSA) ile modellendiği MUS yapısı Cirrincione vd. (2004) tarafından, referans modelin YSA ile tanımlandığı yaklaşım ise Gadoue vd. (2009) tarafından önerilmiştir. Ayrıca, klasik PI kontrolöre alternatif olarak bulanık mantık ya da kayma kipli denetleyicilerle uyarlama yapısı geliştirilen sistemlerde, geçici hallerde rotor hızı kestirim performansı önemli ölçüde artırılmıştır (Gadoue vd., 2010; Zerdali ve Barut, 2013). X-MUS yapısı altında hız ve stator direnci ayrı ayrı kestirilmiştir (Ravi Teja vd., 2012); Verma vd. (2013). Bunun yanında, Chacko vd. (2016), bulanık mantık kontrolüyle RA-MUS yapısı altında rotor direnci kestirimini yapmış, kontrol yapısının optimizasyonu için genetik algoritma (GA) ve PSO kullanmış; PSO'nun üstün başarım sunduğu sonucuna varmıştır. Daha özgün bir yaklaşım olarak Benlaloui vd. (2015), rotor akısı ve elektromanyetik moment farklarına dayalı iki ayrı uyarlama mekanizması ile çok düşük ve sıfır hızlarda parametre değişimlerine karşı gürbüz kestirim elde etmişlerdir. Zıt-EMK tabanlı MUS ile stator ve rotor dirençleri ve hız tahmini yapan Zheng vd. (2016), sıfır hız sonuçlarını sunmamıştır. Düşük hız koşullarında moment tabanlı kestiricinin avantajlarını ortaya koyan Smith vd. (2016), önerilen yapıyı yük altında RA-MUS ile karşılaştırmıştır. Ek olarak, Zbede vd. (2016), klasik uyarlama mekanizmasına ihtiyaç duymadan, MÖK tabanlı MUS yaklaşımı ile hız tahmini gerçekleştirmiştir. Zorgani vd. (2016), LG ile yük momenti tahmini yaparak geçici durumlarda eylemsizliğin kestirim performansına etkisini değerlendirmiştir. Benzer biçimde Mapelli vd. (2017), reaktif güç ve motor momentine dayalı MUS yaklaşımı ile rotor direncini kestirmiştir. Comanescu (2017) ise MUS temelli kayma kipli gözlemleyici ile rotor zaman sabiti tahmini yapmış, mıknatıslama endüktansı üzerindeki etkilerini test etmiştir. Yang vd. (2017), RA-MUS tabanlı yapıyla rotor direnci ve mıknatıslama endüktansını kestirmiş; ancak alan zayıflama bölgesine ilişkin analizlere yer vermemiştir. Zerdali (2020)'de MÖK temelli ASM sürücüleri için stator akım tabanlı MUS (SA-MUS) ile rotor hızı kestirilmiştir. Benzer şekilde Kakodia ve Dyanamina (2022)'de SA-MUS ile ASM'nin rotor hız kestirimi gerçekleştirilmiştir. İlgili çalışmada uyarlama mekanizmasında

geleneksel PI denetleyici yerine tip-2 bulanık mantık denetleyici (type 2 fuzzy logic controller-T2FLC) kullanılmıştır. Sonuçlar farklı yük momenti değişimleri altında geleneksel PI denetleyicili kestirici ile karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur. Benlaloui (2021)'de RA-MUS ile hız kestirimini gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada da uyarlama mekanizmasında geleneksel PI yerine T2FLC kullanılmıştır. Önerilen kestiricinin sonuçları hem PI denetleyicili MUS hemde tip-1 bulanık mantık denetleyicili MUS ile karşılaştırmalı olarak verilmiş ve T2FLC'li MUS sonuçlarının daha yüksek performansa sahip olduğu gösterilmiştir. Özdemir (2020)'de rotor hızı kestirimi için uyarlama mekanizmasında geleneksel PI denetleyici kullanan stator gerilim hatası tabanlı MUS önerilmiştir. Benzetim çalışmaları ve deneysel çalışmalardan elde edilen kestirim sonuçları önerilen kestiricinin başarımını doğrulamaktadır. Ganjewar ve Pahariya (2022)'de modifiye edilmiş reaktif güç temelli MUS (RG-MUS) ile rotor hızı kestirimi yapılmıştır. Önerilen kestiricide uyarlama mekanizmasında adaptif PID denetleyici kullanılmıştır. Benzetim sonuçları geleneksel RG-MUS ile karşılaştırmalı olarak sunulmuş ve modifiye edilmiş RG-MUS'un daha yüksek başarıma sahip olduğu gösterilmiştir. Tir vd. (2024)'te adaptif yüksek kazançlı gözlemleyici tabanlı MUS ile rotor hızı kestirilmiştir. İlgili çalışmada önerilen MUS çok düşük hız, hız terslendirmesi ve parametre değişimi gibi zorlayıcı senaryolar ile test edilmiştir. Jat vd. (2025)'te LSTM temelli MUS ile rotor hızı kestirimi sunulmuştur. Zaky ve Metwaly (2025)'te bulanık mantık denetleyici tabanlı SA-MUS ile rotor hızı kestirimi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada önerilen MUS çok düşük/sıfır hız dahil geniş bir hız aralıkları için, ani yük değişimleri için ve stator direnci değişimleri için test edilmiştir. Benzetim çalışmaları ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar önerilen kestiricinin başarımını doğrulamaktadır. Ayrıca farklı modelleri kullanan MUS algoritmaları ile ASM'ye ait elektriksel parametrelerin kestirildiği birçok çalışma bulunmaktadır. Bunlardan Cao vd. (2018)'de RG-MUS ile rotor zaman sabiti kestirimi gerçekleştirilmiştir. Dybkowski ve Bednarz (2019)'da aktif ve reaktif güç temelli MUS (ARG-MUS) ile eş-zamanlı olarak ASM'nin parametrelerinden rotor direnci ve stator direnci kestirimi gerçekleştirilmiştir. Omari vd. (2019)'da ise rotor zaman sabitinin tersi F-MUS ile kestirilmiştir. F-MUS, ASM'nin aktif güç denklemindeki ifadelerin farklı şekilde kullanılması ile türetilen referans ve uyarlanabilir modelden oluşmaktadır. Uyarlama mekanizmasında geleneksel PI kullanılmıştır. Zhang vd. (2019)'da rotor zaman sabiti kestirimi için iyileştirilmiş MUS algoritması önerilmiştir.

Tablo 1.1'de durum ve parametre kestirimi yapan bu yöntemlerin temel özellikleri, avantajları ve dezavantajları özetlenmiştir.

Tablo 1.1. *Yöntemlerin karşılaştırması*

Yöntem	Kestirim tipi	Avantajlar	Dezavantajlar	Gerçek zamanlı uygunluk
ELO	Durum ve parametre kestirimi	Hızlı ve kararlı kestirim, indirgenmiş model uygulanabilirliği	Model duyarlılığı yüksek, tasarımı karmaşık olabilir	Yüksek
EKF	Durum ve parametre kestirimi	Belirsizliklere karşı güçlü, dinamik durum tahmini	Yüksek hesaplama yükü, gürültü kovaryans ayarı hassas	Orta-Yüksek
SMO	Durum ve parametre kestirimi	Gürültülere dayanıklı, yüksek doğruluk	Rezonansa açık, sınır katman sorunu olabilir	Yüksek
LSTM	Veri temelli hız ve tork kestirimi	Genelleme yeteneği yüksek, iki yönlü çalışmaya uygun	Eğitim verisine bağımlı, gerçek zamanlılık zayıf olabilir	Orta
YSA	Veri temelli genel kestirim	Karmaşık sistemleri modelleme kabiliyeti yüksek	Eğitim süreci ve veri gereksinimi fazla	Düşük-Orta
MUS	Model referanslı hız ve parametre kestirimi	Basit yapı, gerçek zamanlı uygulama için uygun	Parametre duyarlılığı yüksek, uyumluluk problemleri olabilir	Yüksek

Son yıllarda elektrik motorlarının hız ve/veya parametre kestirimi için adaptif filtre (AF) tabanlı MUS kestiricileri literatüre tanıtılmıştır (Demir ve Barut, 2018; Zerdali ve Mengüç, 2019; Demir, 2023b; Demir vd., 2023; Yıldız vd., 2023b). Bu çalışmalardan Demir (2023) sürekli mıknatıslı senkron motorların hız kestirimi için en küçük ortalama kare (least mean square, LMS) ve en küçük ortalama kurtosis (Least mean kurtosis, LMK) tabanlı MUS'u önermiştir. Ayrıca Tuzcu vd. (2025)'te fırçasız doğru akım motorların hız kestirimi için LMS, LMK ve en küçük ortalama dördüncü (least mean fourth, LMF) temelli MUS algoritmaları önerilmiştir. ASM'lerin rotor hızı kestirimi, Zerdali ve Mengüç (2019)'te karmaşık-değerli LMS ve LMK tabanlı MUS ile, Demir vd. (2023b)'de LMS tabanlı MUS ile, Yıldız vd. (2023b)'de ise LMK tabanlı MUS ile gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar sıfır dahil geniş bir hız aralığında ve yük momenti değişimleri altında test edilmiştir. Benzetim çalışmalarından elde edilen kestirim sonuçları önerilen kestiricilen yüksek performansa sahip olduğunu onaylamaktadır. Ayrıca Demir ve Barut (2018)'de ASM'nin aktif güç denklemlerini kullanan LMS temelli MUS ile stator direnci kestirilmiştir. Demir ve Barut (2018)'de LMS temelli MUS'un farklı örnekleme zamanlarındaki başarımı gerçek zamanlı olarak test edilmiştir. Örnek zamanı artıkça geleneksel PI temelli MUS'a kıyasla LMS temelli MUS'un daha yüksek başarım gösterdiği sonuçlar açıkça gösterilmiştir. Bu çalışmalarda adaptif filtre tabanlı MUS hız kestiricilerinin, geleneksel PI denetleyici kullanan MUS hız kestiricilerine kıyasla daha yüksek doğruluğa sahip olduğu gösterilmiştir. Fakat bu tür hız kestiriciler, büyük miktarda gereksiz bilgiyi işlemek zorunda kalmaktadır. Bu da gerçek-zamanlı uygulamalarda DSP'ler açısından ciddi bir işlem maliyetini birlikte getirmektedir. Bu türlü bir sorunu ele almanın bir yolu veri artıklığını (Data redundancy) incelemekten geçmektedir (Berberidis vd., 2016). Aslında artıklık, büyük-ölçekli veri kümelerinin doğasında bulunan bir özelliktir ve bu, büyük veri setlerinin içerdiği anlamlı/bilgilendirici bilgi miktarının toplam veri hacmine kıyasla çok daha az olduğu anlamına gelmektedir (Berberidis vd., 2016). Bu yüzden, artıklığın bilinçli bir şekilde yönetilmesi, veri işleme maliyetlerini önemli ölçüde azaltmaktadır (Berberidis vd., 2016). Bu doğrultuda, aralık sansürleme yöntemi kullanılarak, daha az bilgilendirici veriler ayıklanabilmekte ve böylece işlem maliyetinden kaçınılabilmektedir. Berberidis vd. (2016)'nde yer alan çalışmada, birinci- ve ikinci-dereceden stokastik yaklaşımlar için çevrimiçi sansürleme (OC) stratejisini ilk kez geliştirilmiştir. OC stratejisi (Berberidis vd., 2016), önemli verileri belirleyip gereksiz olanları sansürleyerek, performansı düşürmeden veri işleme

maliyetlerini azaltmayı amaçlamaktadır. Büyük veri işleme (Berberidis vd., 2016; Romero vd., 2016; Shen vd., 2017; Zhu vd., 2018; Ferreira vd., 2021), adaptif filtreleme (Berberidis ve Giannakis, 2017; Mendonça vd., 2019; Mengüç vd., 2021; Çolak Güvenç ve Mengüç, 2024), geniş ölçekli ağlar (Wang vd., 2018), kablosuz sensör ağları (Yang vd., 2019), sinir ağları (Ferreira vd., 2021; Sarp vd., 2022; Mengüç ve Mandic, 2025), ve biyomedikal sinyal işleme (Eren vd., 2024) gibi alanlarda bu strateji başarıyla uygulanmaktadır. Literatürde, OC stratejisinin entegre edildiği AF algoritmalarından OC tabanlı LMS (OC-LMS) (Berberidis vd., 2016; Mengüç vd., 2021) literatürde geniş çapta ele alınmış ve farklı sinyal işleme uygulama alanlarında başarılı sonuçlar üretmiştir. Ancak, bu tür algoritmaların MUS hız kestiricileri ile entegrasyonu konusunda kapsamlı bir araştırma bulunmamaktadır. Ortaya çıkan bu araştırma boşluğu, söz konusu alanda yeni çalışmaların gerekliliğini açıkça göstermekte olup, bu çalışmanın yapılmasına zemin hazırlamıştır.

Bu çalışmanın temel katkısı, OC-LMS tabanlı MUS hız kestiricilerini kullanan hız-algılayıcısız AYK tabanlı ASM sürücüsünün tasarımı ve benzetim temelli doğrulanması olarak ifade edilebilir. Bu çalışmada ASM sürücüsü için gerekli olan hız bilgisinin kestirimi için OC-LMS tabanlı MUS kestiricisi önerilmiştir. Önerilen MUS kestiricisi, referans model olarak adlandırılan ASM'nin ölçülen stator akımları ile uyarlanabilir modelin çıkışındaki stator akımları arasındaki hatayı kullanarak ASM'nin rotor açısal hızını doğrudan kestirmiştir. Önerilen kestiricinin doğruluğu yük momentinde meydana getirilen basamak şekindeki değişimler altında UDDS ve WLTP-3 hız profillerinin AYK sistemine hız referansı olarak verildiği zorlayıcı senaryo ile test edilmiştir. Demir, vd. (2023)'nde sunulan LMS tabanlı MUS algoritmasının hesaplama yükünü azaltmak için önerilen OC-LMS tabanlı MUS algoritmasından elde edilen benzetim sonuçları önerilen kestiricinin başarı düzeyini onaylamaktadır. Ayrıca, önerilen hız kestiricisinden farklı sansürleme oranları altında elde edilen ortalama kare hataları geleneksel LMS tabanlı MUS (Demir vd., 2023) ile rekabet edecek seviyede olduğunu göstermektedir.

Özetle bu tez çalışmasında, hız algılayıcısız bir asenkron motor sürücüsünde kullanılmak üzere, çevrimiçi sansürlemeli LMS tabanlı bir MUS algoritması tasarlanmış ve benzetim ortamında doğrulanmıştır. Önerilen yaklaşım ile:

- Geleneksel MUS yapılarındaki kestirim hatalarının azaltılması,
- LMS algoritmasının işlem yükünün düşürülmesi,

- Gömülü sistem uygulamalarında gerçek zamanlı uygulanabilirliğin artırılması amaçlanmaktadır.

Bu bağlamda çalışma, mevcut literatürde yer alan yaklaşımlardan farklı olarak hem doğruluk hem de verimlilik açısından yeni bir katkı sunmaktadır.

İKİNCİ BÖLÜM

ASM MOTOR MODELİ VE OC-LMS TABANLI MUS'UN TASARIMI

Bu bölümde, asenkron motorun (ASM) dinamik modeli detaylı olarak ele alınmakta ve vektör kontrol (alan yönlendirmeli kontrol) temelli sürücü yapısının matematiksel temelleri açıklanmaktadır. Ayrıca, çevrimiçi sansürlemeli en küçük ortalama kareler (OC-LMS) algoritması kullanılarak geliştirilen motorun uzaktan sürülmesi (MUS) yapısının tasarımına ilişkin teorik yaklaşım sunulmaktadır. Bu kapsamda hem motor modeli hem de kontrol algoritması simulasyon ortamında test edilmek üzere ayrıntılı olarak yapılandırılmıştır.

2.1. ASM Modeli

ASM'lerin dinamik motor modelleri rotor ya da stator akı tabanlı olarak elde edilebilir. Bu tez çalışmasında ASM'lerin rotor akısı tabanlı dinamik modeli kullanılmıştır. Aşağıda ASM'lerin rotor akılı dinamik modeline ilişkin verilen diferansiyel denklemler verilmiştir (Kousalya vd., 2022).

$$\frac{di_{s\alpha}}{dt} = -\left(\frac{R_s}{L_\sigma} + \frac{R_r L_m^2}{L_r^2 L_\sigma}\right) i_{s\alpha} + \frac{L_m R_r}{L_r^2 L_\sigma} \varphi_{r\alpha} + \frac{L_m p_p \omega_m}{L_\sigma L_r} \varphi_{r\beta} + \frac{1}{L_\sigma} v_{s\alpha} \tag{2.1}$$

$$\frac{di_{s\beta}}{dt} = -\left(\frac{R_s}{L_\sigma} + \frac{R_r L_m^2}{L_r^2 L_\sigma}\right) i_{s\beta} - \frac{L_m p_p \omega_m}{L_\sigma L_r} \varphi_{r\alpha} + \frac{L_m R_r}{L_r^2 L_\sigma} \varphi_{r\beta} + \frac{1}{L_\sigma} v_{s\beta} \tag{2.2}$$

$$\frac{d\varphi_{r\alpha}}{dt} = \frac{R_r L_m}{L_r} i_{s\alpha} - \frac{R_r}{L_r} \varphi_{r\alpha} - p_p \omega_m \varphi_{r\beta} \tag{2.3}$$

$$\frac{d\varphi_{r\beta}}{dt} = \frac{R_r L_m}{L_r} i_{s\beta} + p_p \omega_m \varphi_{r\alpha} - \frac{R_r}{L_r} \varphi_{r\beta} \tag{2.4}$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{3}{2}\frac{p_p}{J_T}\frac{L_m}{L_r}\left(\varphi_{r\alpha} i_{s\beta} - \varphi_{r\beta} i_{s\alpha}\right) - \frac{B_T}{J_T}\omega_m - \frac{t_L}{J_T} \tag{2.5}$$

Denklem (2.1)–(2.5)'te, $\alpha\beta -$ düzlemi statorun duran referans eksenini temsil etmektedir. $v_{s\alpha}$, $v_{s\beta}$, $i_{s\alpha}$, ve $i_{s\beta}$ $\alpha\beta -$ eksenindeki stator gerilim ve akımlarıdır. $\varphi_{r\alpha}$ ve $\varphi_{r\beta}$ ise aynı eksende tanımlı rotor akılarıdır. ω_m , rotorun mekanik açısal hızını; R_r ve R_s , sırasıyla rotor ve stator dirençlerini ifade etmektedir. L_r ve L_s , rotor ve stator kaçak endüktansları; L_m, mıknatıslama endüktansı; $L_\sigma = \sigma L_s = L_s - L_m^2/L_r$ ise stator geçici endüktansı olarak tanımlanır. p_p, motorun kutup çifti sayısını göstermektedir.

2.2. Geleneksel MUS

MUS yapıları, hız sensörü içermeyen motor kontrol sistemlerinde rotor hızı veya akısı gibi doğrudan ölçülemeyen büyüklüklerin tahmin edilmesi amacıyla sıklıkla kullanılmaktadır. MUS algoritmaları, kestirilen durum veya parametreden bağımsız bir referans model ve kestirilen durum veya parametreye bağımlı bir uyarlanabilir model olmak üzere iki paralel modelden oluşur. Bu modellerin çıktıları karşılaştırılarak oluşan hata işareti, bir uyarlama mekanizması aracılığıyla kontrol parametresinin (çoğunlukla rotor açısal hızı) gerçek değerine yakınsamasını sağlar.

Geleneksel MUS yapılarında, genellikle rotor akısı tahminine dayalı referans ve uyarlanabilir modeller kullanılarak rotor hızı kestirimi gerçekleştirilir. Bununla birlikte SA-MUS algoritmalarıda motor hızı ve/veya stator direnci gibi parametre kestiriminde sıklıkla kullanılmaktadır. Diğer MUS yaklaşımları ile karşılaştırıldığında SA-MUS'un integratör kaynaklı kayma probleminin olmaması, referans modelinin (doğrudan ölçülen stator akımları olduğu için) parametre değişimlerinden etkilenmemesi, büyük parametre değişimlerinde (± %50) dahi kararlı olması gibi avantajlara sahiptir (Zerdali, 2020).

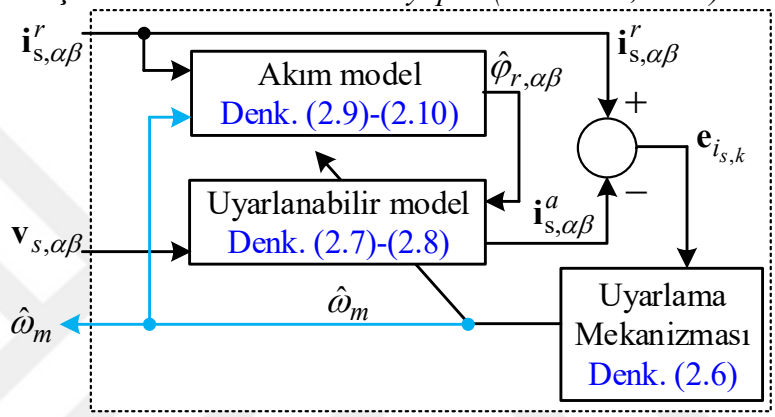
Şekil 2.1, hız kestirimi için kullanılan geleneksel SA-MUS yapısını göstermektedir. Bu yapı, referans model ile uyarlanabilir modelin çıktılarından elde edilen bir hata işaretine dayanmaktadır. Referans modelin çıktıları doğrudan ölçülen stator akımları iken, uyarlanabilir modelin çıktıları Denklem (2.1) ve Denklem (2.2)'nin ayrıklaştırılması yoluyla elde edilen stator akım ifadeleridir. Rotor hızı kestirimi amacıyla, referans ve uyarlanabilir model çıktıları kullanılarak, geleneksel SA-MUS yapısının uyarlama mekanizması Denklem (2.6)'da verildiği şekilde ifade edilmektedir (Demir vd., 2023). Denklem (2.6) ile verilen uyarlama mekanizması ile ASM'nin hız kestiriminin

gerçekleştirilmesi için Lyapunov kararlılık koşulu kullanılarak elde edilmiştir. Şekil 2.1'de verilen uyarlama mekanizması geleneksel PI kontrolördür.

$$\omega_m^{\mathrm{PI}} = \left(k_p + \frac{k_i}{s}\right)\left((i_{s\alpha}^r - i_{s\alpha}^a)\varphi_{r\beta} - (i_{s\beta}^r - i_{s\beta}^a)\varphi_{r\alpha}\right) \tag{2.6}$$

Burada, k_p ve $k_i$terimleri, geleneksel SA-MUS kestiricisinde kullanılan uyarlama mekanizmasına ait PI denetleyicisinin katsayılarını ifade etmektedir (Demir vd., 2023).

Şekil 2.1. *Geleneksel MUS yapısı (Demir vd., 2023)*



2.3. Önerilen MUS Yapısı

Bu çalışmada, $\omega_m$büyüklüğünün kestirimi amacıyla Denklem (2.1)–(2.4)'te verilen stator akımı ve rotor akısı dinamikleri, ileri Euler yaklaşımı kullanılarak ayrıştırılmış; bu yaklaşımla elde edilen Denklem (2.7)–(2.10), önerilen OC-LMS tabanlı MUS algoritmasında kullanılmıştır. OC-LMS tabanlı SA-MUS hız kestiricisine ait blok diyagram Şekil 2.2'de sunulmaktadır. Şekil 2.2'de yer alan SA-MUS kestiricisi yapısında, referans modelin çıktıları doğrudan ölçülen $i_{s\alpha}$ ve $i_{s\beta}$ değerlerinden elde edilirken; uyarlanabilir model çıktıları Denklem (2.7) ve (2.8) kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu denklemlerde gerekli olan $\varphi_{r\alpha}$ ve $\varphi_{r\beta}$, büyüklükleri, Denklem (2.9) ve (2.10) yardımıyla elde edilmektedir (Demir vd., 2023).

Referans model ile uyarlanabilir modelin çıkışları arasındaki hata işareti kullanılarak, Şekil 2.2'de gösterilen uyarlama mekanizması aracılığıyla ASM'nin rotor açısal hız kestirimi gerçekleştirilmektedir.

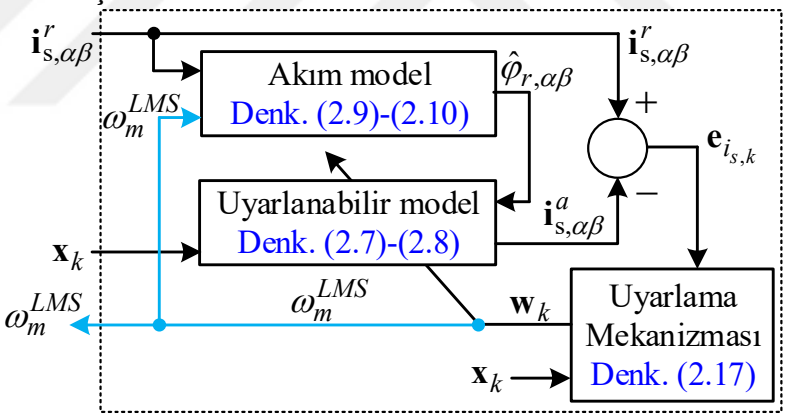
$$i^a_{s\alpha,k+1} = \left(1 - T\left(\frac{R_s}{L_\sigma} + \frac{R_r L_m^2}{L_r^2 L_\sigma}\right)\right) i^a_{s\alpha,k} + \frac{T}{L_\sigma} v_{s\alpha,k} + \frac{L_m R_r T}{L_r^2 L_\sigma} \hat{\varphi}_{r\alpha,k} + \frac{L_m p_p \omega_{m,k} T}{L_\sigma L_r} \hat{\varphi}_{r\beta,k} \tag{2.7}$$

$$i^a_{s\beta,k+1} = \left(1 - T\left(\frac{R_s}{L_\sigma} + \frac{R_r L_m^2}{L_r^2 L_\sigma}\right)\right) i^a_{s\beta,k} + \frac{T}{L_\sigma} v_{s\beta,k} - \frac{L_m p_p \omega_{m,k} T}{L_\sigma L_r} \hat{\varphi}_{r\alpha,k} + \frac{L_m R_r T}{L_r^2 L_\sigma} \hat{\varphi}_{r\beta,k} \tag{2.8}$$

$$\hat{\varphi}_{r\alpha,k+1} = \frac{R_r L_m T}{L_r} i_{s\alpha,k} + \left(1 - \frac{R_r T}{L_r}\right) \hat{\varphi}_{r\alpha,k} - T p_p \omega_{m,k} \hat{\varphi}_{r\beta,k} \tag{2.9}$$

$$\hat{\varphi}_{r\beta,k+1} = \frac{R_r L_m T}{L_r} i_{s\beta,k} + T p_p \omega_{m,k} \hat{\varphi}_{r\alpha,k} + \left(1 - \frac{R_r T}{L_r}\right) \hat{\varphi}_{r\beta,k} \tag{2.10}$$

Şekil 2.2. *OC-LMS tabanlı MUS hız kestiricisi*



Şekil 2.2'de sunulan OC-LMS tabanlı MUS kestirici yapısı kapsamında, Denklem (2.7) ve (2.8) ile tanımlanan uyarlanabilir modelin ağırlık vektörü $\mathbf{w}_k$ ve giriş matrisi $\mathbf{w}_k$ aşağıda verildiği şekilde tanımlanmaktadır (Demir vd., 2023).

$$\mathbf{w}_k = \begin{bmatrix} 1 - T\left(\frac{R_s}{L_\sigma} + \frac{R_r L_m^2}{L_r^2 L_\sigma}\right) \\ \frac{L_m R_r T}{L_r^2 L_\sigma} \\ \frac{T L_m p_p \omega_{m,k}}{L_\sigma L_r} \\ \frac{T}{L_\sigma} \end{bmatrix} \tag{2.11}$$

$$\mathbf{X}_k = \begin{bmatrix} i^a_{s\alpha,k} & i^a_{s\beta,k} \\ \hat{\varphi}_{r\alpha,k} & \hat{\varphi}_{r\beta,k} \\ \hat{\varphi}_{r\beta,k} & \hat{\varphi}_{r\alpha,k} \\ v_{s\alpha,k} & v_{s\alpha,k} \end{bmatrix} \tag{2.12}$$

Denklem (2.11)'de, ω_m ifadesini içeren ağırlık katsayısı dışındaki tüm ağırlık katsayıları sabit olarak kabul edilmiştir. Denklem (2.11) ve Denklem (2.12) birlikte kullanılarak, uyarlanabilir modelin çıktıları aşağıda gösterildiği şekilde yeniden ifade edilebilmektedir.

$$\mathbf{i}^a_{s,k+1} = \mathbf{X}^T_k \mathbf{w}_k \tag{2.13}$$

Referans modelin (ölçülen stator akımları) çıktıları ile uyarlanabilir modelin çıktıları arasındaki hata işareti, Denklem (2.14) ile tanımlanmaktadır.

$$\mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}} = \mathbf{i}^r_{s,k} - \mathbf{i}^a_{s,k} \tag{2.14}$$

Bu doğrultuda, OC-LMS algoritmasının türetilmesinde kullanılan kesilmiş (truncated) maliyet fonksiyonu, (Berberidis vd., 2016) tarafından önerildiği şekilde aşağıda tanımlanmaktadır:

$$J_k = \begin{cases} \frac{1}{2}\mathbf{e}^{\mathbf{2}}_{\mathbf{i}_{s,k}}, \text{eğer } \left|\max(\mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}})\right| \geq \tau\sigma \\ 0, \quad \text{eğer } \left|\max(\mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}})\right| < \tau\sigma \end{cases} \tag{2.15}$$

Bu bağlamda, τ ifadesi eşik seviyesini temsil ederken, σ ifadesi ise hata işareti vektörü $\mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}}$'nın maksimum değerine ilişkin standart sapmayı ifade etmektedir. Devamında, Denklem (2.15)'te tanımlanan maliyet fonksiyonunun minimize edilmesi amacıyla kullanılan stokastik yaklaşım kuralı, (Mengüç ve Mandic, 2025) tarafından önerildiği şekilde aşağıda modifiye edilmiş biçimiyle sunulmaktadır.

$$\mathbf{w}_{k+1} = \begin{cases} \mathbf{w}_k - \mu\nabla_{\mathbf{w}_k} J_k \ , \text{eğer } \left|\max\left(\mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}}\right)\right| \geq \tau\sigma \\ \mathbf{w}_k, \qquad\qquad \text{eğer } \left|\max\left(\mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}}\right)\right| < \tau\sigma \end{cases} \tag{2.16}$$

burada μ adım büyüklüğünü temsil etmektedir. Denklem (2.16)'da gradyen $\nabla_{\mathbf{w}_k} J_k$ ifadesi hesaplanıp yerine yazıldığında, OC-LMS algoritmasına ait ağırlık vektörü güncelleme kuralı aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\mathbf{w}_{k+1} = \begin{cases} \mathbf{w}_k + \mu \mathbf{X}_k \mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}} & , \text{eğer } \left|\max\left(\mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}}\right)\right| \geq \tau\sigma \\ \mathbf{w}_k, & \text{eğer } \left|\max\left(\mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}}\right)\right| < \tau\sigma \end{cases} \tag{2.17}$$

Gerçek zamanlı uygulamalar dikkate alındığında, Denklem (2.17)'te yer alan σ ifadesi, özyinelemeli (recursive) bir biçimde aşağıda verilen denkleme göre hesaplanmaktadır (Mengüç ve Mandic, 2025).

$$\sigma_{k+1} = \beta\sigma_k + (1-\beta)\left|\max\left(\mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}}\right)\right|^2 \tag{2.18}$$

burada $0 < \beta < 1$ unutma faktörünü temsil etmektedir. Ayrıca, Denklem (15)'te yer alan diğer bir kritik parametre τ'dur. Bu parametre ağırlık vektörünün güncelleme oranıyla, yani ne kadar fazla verinin sansürleneceğiyle ilgilidir. Bu yüzden, OC-LMS algoritması koşturulurken τ'nun anlık olarak kestirilmesi gerekir. İlgili kestirim aşağıdaki denklem yardımıyla gerçekleştirilir (Romero vd., 2016):

$$\tau_{k+1} = \begin{cases} \tau_k + \mu_\tau P_{ce} & , \quad \text{eğer } \left|\max\left(\mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}}\right)\right| \geq \tau\sigma \\ \tau_k + \mu_\tau(1 - P_{ce}) & , \text{eğer } \left|\max\left(\mathbf{e}_{\mathbf{i}_{s,k}}\right)\right| < \tau\sigma \end{cases} \tag{2.19}$$

Burada, $P_{ce} = \frac{K-p}{K}$ ifadesi istenilen sansürleme oranını, μ_τ ise adım büyüklüğünü temsil etmektedir. Ayrıca, Denklem (2.19)'da K toplam veri sayısını, p ise bilgilendirici veri sayısını ifade etmektedir

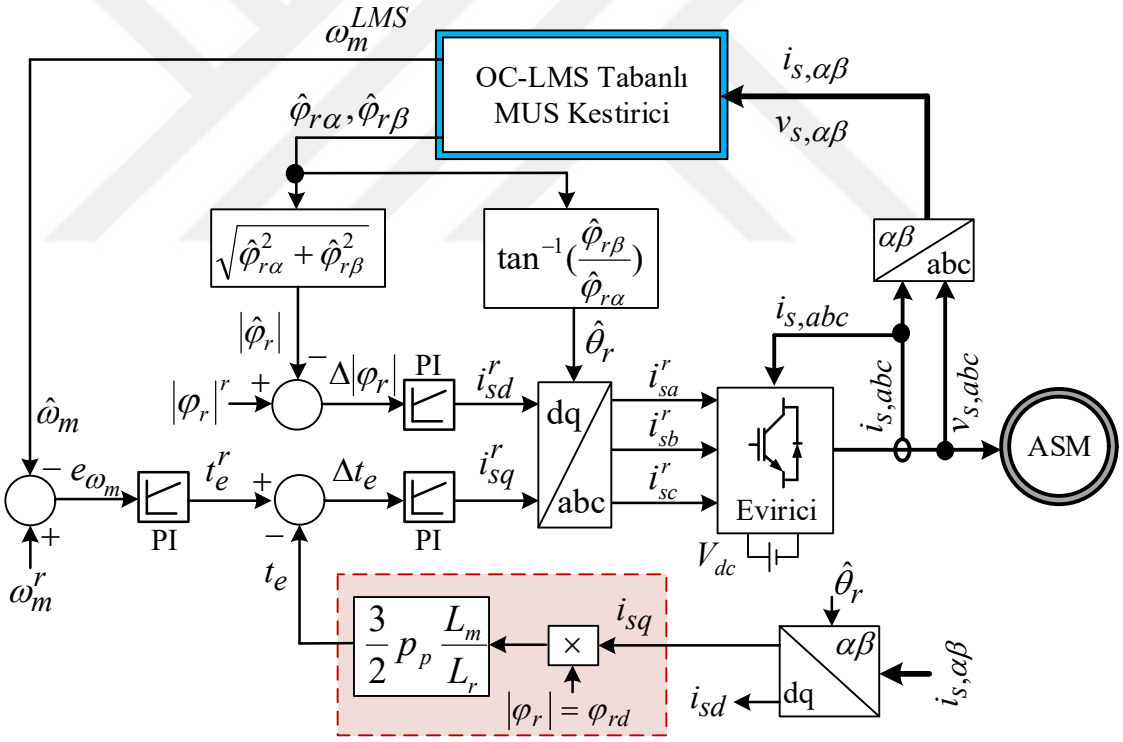
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

BENZETİM ÇALIŞMALARI

3.1. Önerilen MUS Kestiricisini Kullanan AYK Tabanlı ASM Sürücüsü

Şekil 3.1'de, önerilen MUS kestiricisini içeren AYK tabanlı ASM sürücü sistemi sunulmaktadır.

Şekil 3.1. *Önerilen MUS kestiricisini kullanan AYK tabanlı ASM sürücüsü*



Bu sistem, MATLAB/Simulink ortamında modellenmiş ve simulasyon yoluyla doğrulanmıştır. Şekil 3.1'de yer alan $\hat{\theta}_r$ ifadesi, yönlendirilen rotor akı vektörünün statorun duran referans eksenine göre açısal konumunu ifade etmektedir. AYK yapısının ihtiyaç duyduğu rotor açısal hız bilgisi, bu çalışmada önerilen OC-LMS tabanlı MUS kestirici tarafından sağlanmaktadır. Bu yaklaşım, klasik hız sensörlerinin yerini alarak, sistemin sensörsüz kontrolünü mümkün kılmaktadır. Sürücü sisteminde kullanılan hız, moment ve akı denetleyicileri, klasik oransal-integral (PI) yapıda olup, kazanç

parametreleri deneme-yanılma yöntemiyle elde edilmiştir.

Şekil 3.1'de verilen $\hat{\theta}_r$ ifadesi stator duran eksenindeki rotor akı bileşenleri kullanılarak aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\hat{\theta}_r = \tan^{-1}\left(\hat{\varphi}_{r\beta}/\hat{\varphi}_{r\alpha}\right) \tag{3.1}$$

AYK algoritmasında kullanılan rotor akı bilgisinin genliği Denklem (3.2)'de gösterildiği gibi indüklenen moment ifadesi (t_e) ise Denklem (3.3)'te gösterildiği gibi hesaplanır.

$$|\hat{\varphi}_r| = \sqrt{\widehat{\varphi_{r\alpha}^2} + \widehat{\varphi_{r\beta}^2}} \tag{3.2}$$

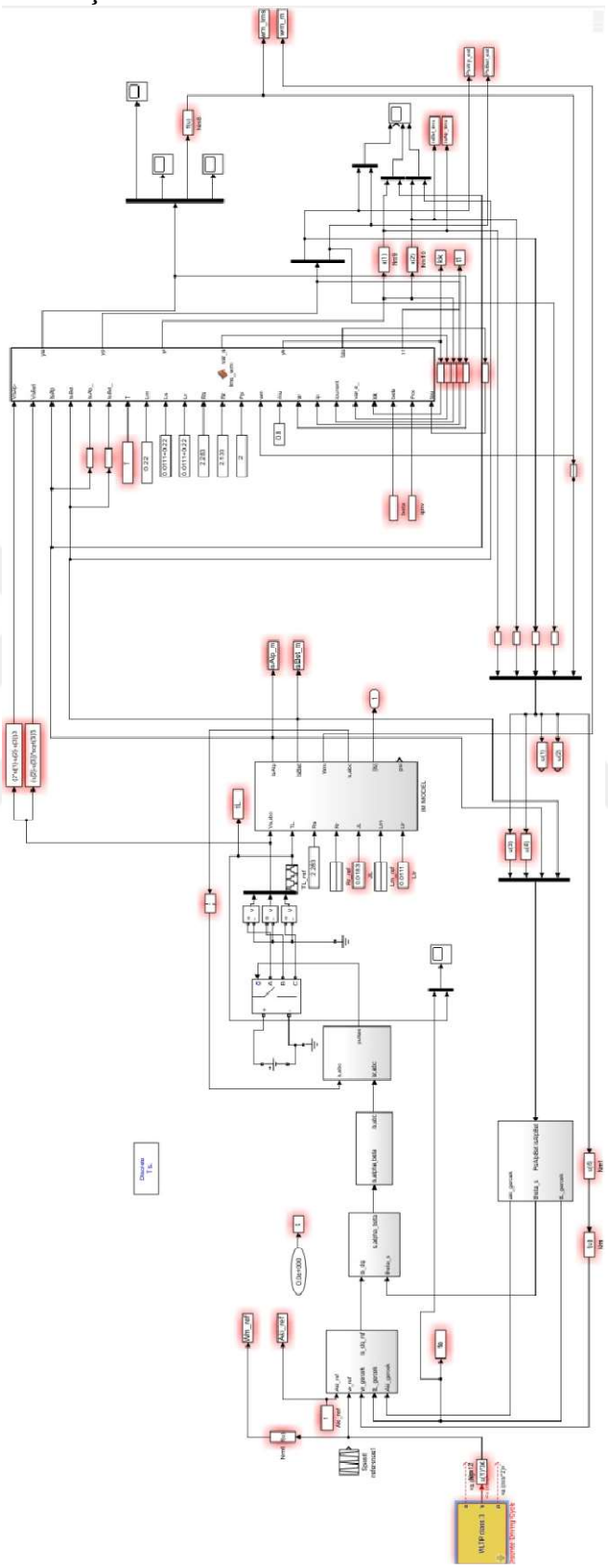
$$t_e = \frac{3}{2} p_p \frac{L_m}{L_r} |\varphi_r| \cdot i_{sq} \tag{3.3}$$

Burada p_p kutup çifti sayısı, L_m mıknatıslama endüktansı, i_{sq}, q-eksenindeki stator akımı $|\varphi_r|$, rotor akısının genliğidir.

3.2. Benzetim Çalışmaları

Önerilen OC-LMS tabanlı MUS kestiricisinin kestirim doğruluğu ile bu kestiriciyi kullanan AYK tabanlı ASM sürücü sisteminin kontrol başarımı, sürekli basamak şeklinde değişen yük momenti altında kentsel dinamometre sürüş programı (Urban Dynamometer Driving Schedule-UDDS) hız profili ve dünya çapında uyumlu hafif araçlar test prosedürü-3 (Worldwide Harmonised Light Vehicles Test Procedure 3-WLTP-3) hız profili kullanılarak test edilmiştir. Benzetim çalışmaları Şekil 3.2'de gösterilen MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir.

Şekil 3.2. *MATLAB/Simulink ortamı*



Benzetim çalışmaları aşağıdaki zorlayıcı iki farklı senaryo için gerçekleştirilmiştir.

- Senaryo I: Farklı yük momentleri altında UDSS hız profili için önerilen OC-LMS tabanlı MUS ve bu kestiriciyi kullanan AYK sisteminin başarımı.
- Senaryo II: Farklı yük momentleri altında WLTP-3 hız profili için önerilen OC-LMS tabanlı MUS ve bu kestiriciyi kullanan AYK sisteminin başarımı.

UDDS hız profili aşağıdaki bilgileri içermektedir.

- Sürüş döngüsü 12 km uzunluğundaki şehiriçi yol güzargahını kapsamaktadır.
- Ortalama 32 km/h hız ve 92 km/h maksimum hız verisine sahiptir.
- Toplam 1370 sn'lik bir döngüye sahiptir.
- Sürüş döngüsü sıfır hız bilgisini içermektedir.

WLTP-3 hız profili her biri farklı hızlara sahip dört alt bölgeden oluşan ise aşağıdaki hız bilgileri içermektedir.

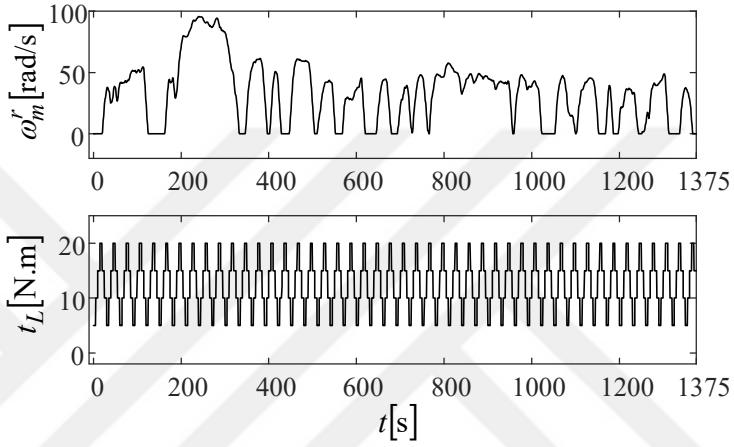
- Birinci bölge düşük hız bölgesi olarak adlandırılmış ve azami hızı 56.5 km/h'ye kadardır.
- İkinci bölge orta hız bölgesidir ve azami hızı 76.6 km/h'dir.
- Üçüncü bölge yüksek hız bölgesi olarak tanımlanmıştır ve bu bölgede azami hız 97.4 km/h'ye kadardır.
- Dördüncü bölge ise çok yüksek hız bölgesidir ve azami hız 131.3 km/h'ye kadar çıkmaktadır.
- Bütün hız bölgeleri sıfır hız bilgisini içermektedir.
- Bu hız profili toplam 1800 sn'lik döngüyü kapsamaktadır.

Benzetim çalışmalarında kullanılan asenkron motora ait anma değerleri ve fiziksel parametreler Tablo 3.1'de verilmiştir. Bu parametreler doğrultusunda, önerilen OC-LMS algoritması aşağıdaki şekilde yapılandırılmıştır: Adım büyüklüğü $\mu = 0.8$, sansürleme parametresi adım katsayısı: $\mu_\tau = 0.5$, sansürleme eşik zayıflatma katsayısı $\beta = 0.9$. Bu parametre seçimleri, sistemin hızlı ve kararlı adaptasyon sağlaması için deneme yanılma ile bulunmuştur.

Tablo 3.1. *ASM parametreleri*

$\boldsymbol{P}$ $[\boldsymbol{kW}]$	$\boldsymbol{V}$ $[\boldsymbol{V}]$	$\boldsymbol{I}$ $[\boldsymbol{A}]$	$\boldsymbol{f}$ $[\boldsymbol{Hz}]$
3	380	6,9	50
n_{mn} $[r/min]$	t_L $[N.m]$	p_p	R_s $[\Omega]$
1430	20	2	2,283
R_r $[\Omega]$	L_s $[H]$	L_r $[H]$	L_m $[H]$
2,133	0,2311	0,2311	0,22

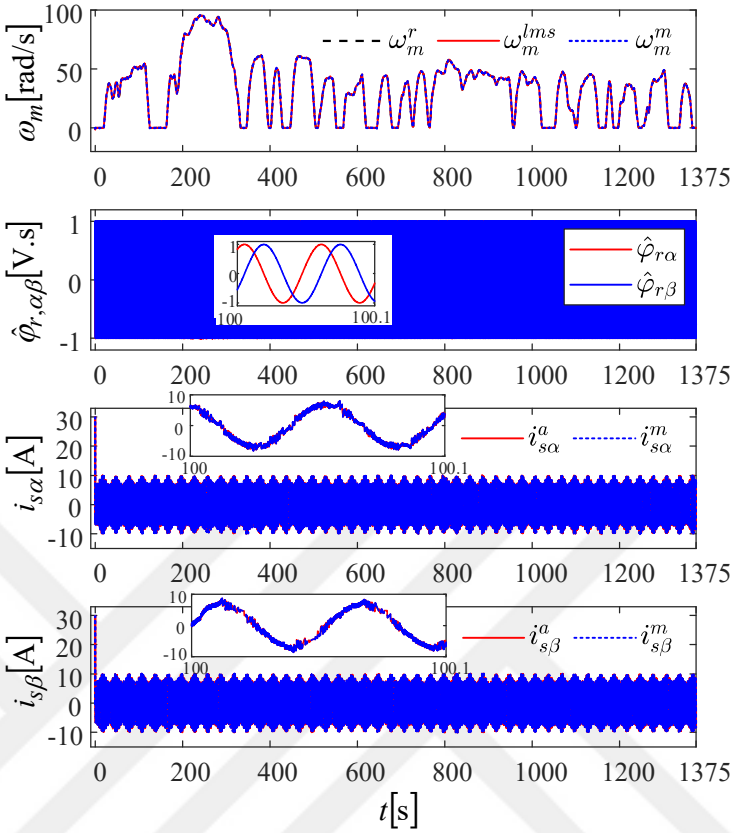
Şekil 3.3. *AYK sistemi için hız referansı ve ASM'ye uygulanan yük momenti değişimleri*



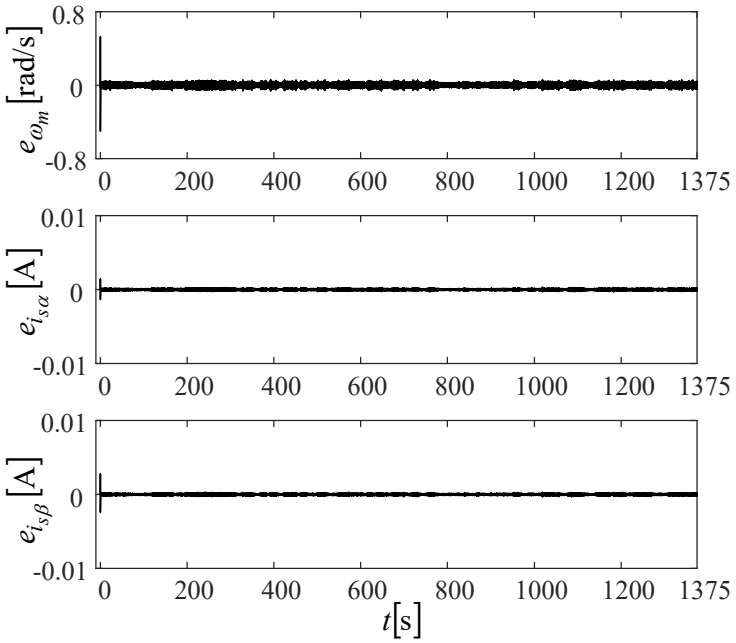
Önerilen OC-LMS tabanlı MUS algoritmasının kestirim performansı, farklı sansürleme oranları altında değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, sansürleme oranları sırasıyla %30, %50 ve %70 olarak belirlenmiş ve her oran için sistem davranışı ayrı ayrı analiz edilmiştir.

İlk olarak Senaryo I için gerçekleştirilen bu benzetim çalışmaları, Şekil 3.3'te sunulan UDDS hız profili ve aynı anda uygulanan yük momenti değişimleri altında yürütülmüştür. Bu test senaryosu altında, geleneksel LMS tabanlı MUS yapısı (yani sansürleme mekanizması içermeyen yapı) ile önerilen OC-LMS tabanlı MUS yapısından elde edilen rotor hızı kestirim sonuçları Şekil 3.4 ile Şekil 3.11 arasında detaylı olarak verilmiştir. Bu grafiklerde, gerçek rotor hız eğrileri ile kestirilen hız eğrilerinin karşılaştırmaları sunulmuş ve zamana bağlı hata büyüklükleri görselleştirilmiştir. Ayrıca referans (ölçülen akım) ve uyarlanabilir model çıkışları, rotor akılarının sonuçlarıda benzetim sonuçlarında verilmiştir.

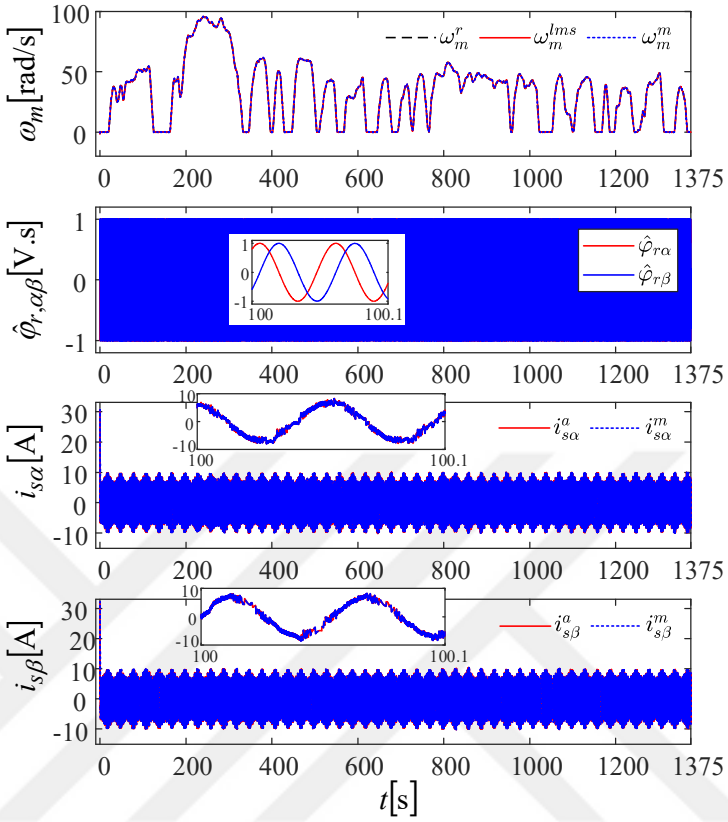
Şekil 3.4. *Geleneksel LMS tabanlı MUS'a ait kestirim sonuçları*



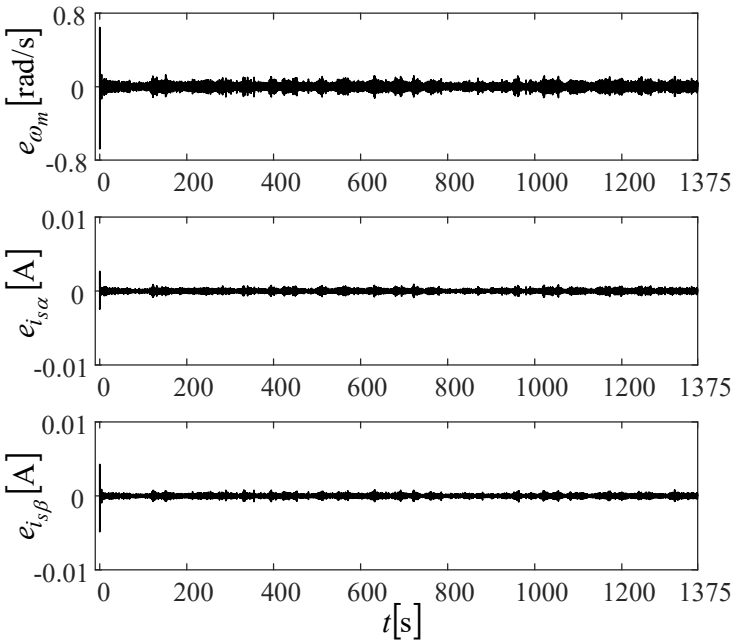
Şekil 3.5. *Geleneksel LMS tabanlı MUS kestirici için hatalar*



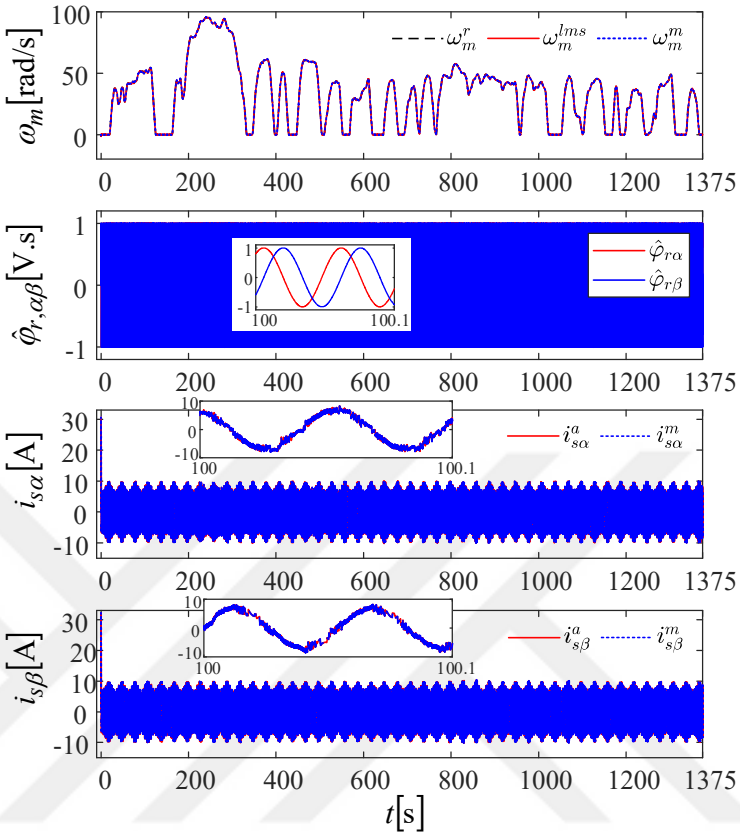
Şekil 3.6. *%30 sansürleme oranı için önerilen OC-LMS tabanlı MUS'a ait kestirim sonuçları*



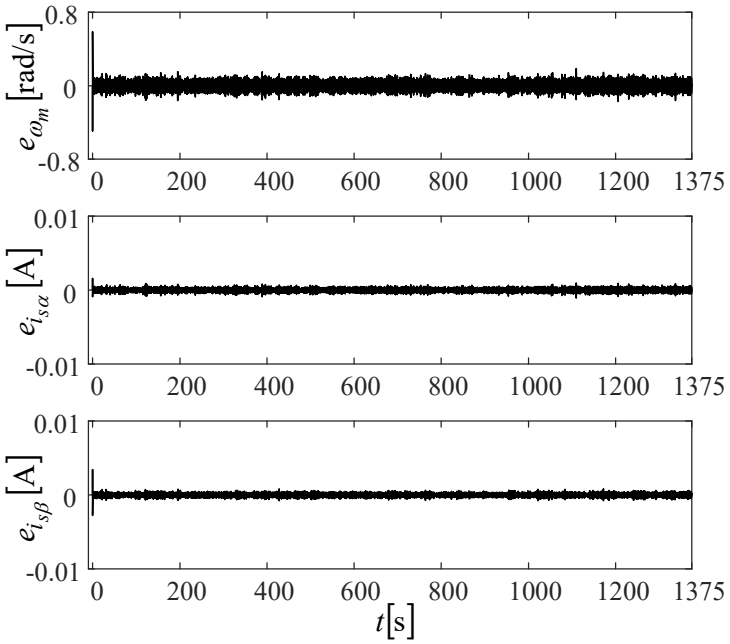
Şekil 3.7. *%30 sansürleme oranı için önerilen OC-LMS tabanlı MUS kestirici için hatalar*



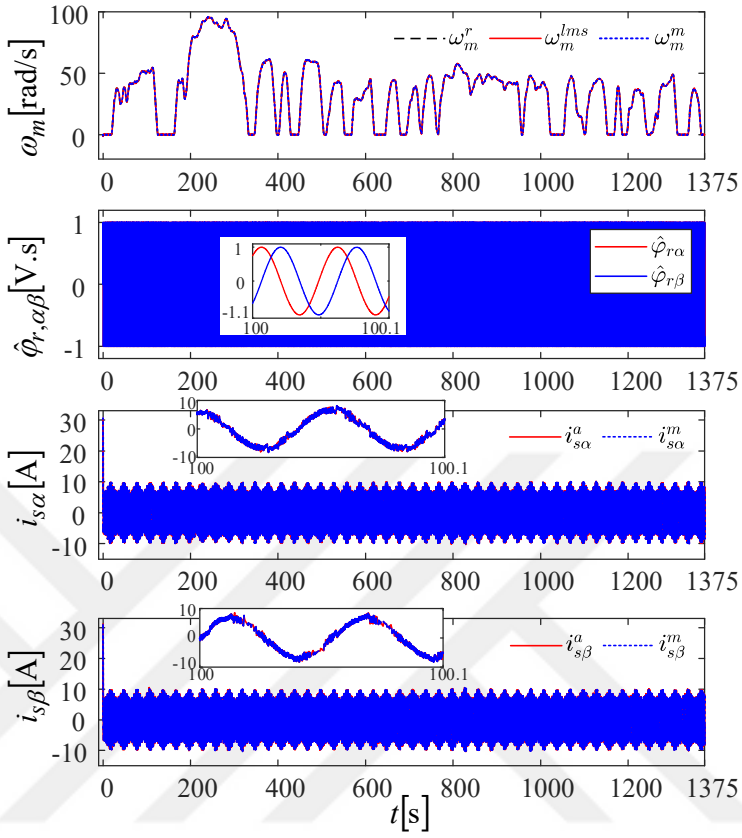
Şekil 3.8. *%50 sansürleme oranı için önerilen OC-LMS tabanlı MUS'a ait kestirim sonuçları*



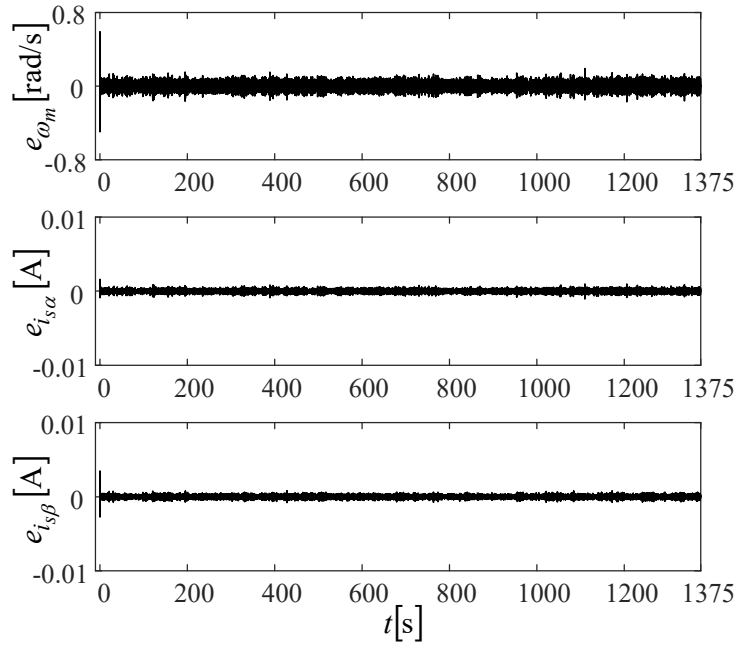
Şekil 3.9. *%50 sansürleme oranı için önerilen OC-LMS tabanlı MUS kestirici için hatalar*



Şekil 3.10. *%70 sansürleme oranı için önerilen OC-LMS tabanlı MUS'a ait kestirim sonuçları*



Şekil 3.11. *%70 sansürleme oranı için önerilen OC-LMS tabanlı MUS kestirici için hatalar*



Şekil 3.4 ile Şekil 3.11 arasında verilen benzetim sonuçları için ortalama kare hata değerleri Tablo 3.2'de verilmiştir. Aynı benzetim sonuçlarına ilişkin OC-LMS tabanlı MUS hız kestiricinin çalışma süreleri ise Tablo 3.3'te sunulmuştur.

Tablo 3.2. *UDSS sürüş döngüsü için ortalama kare hata değerleri*

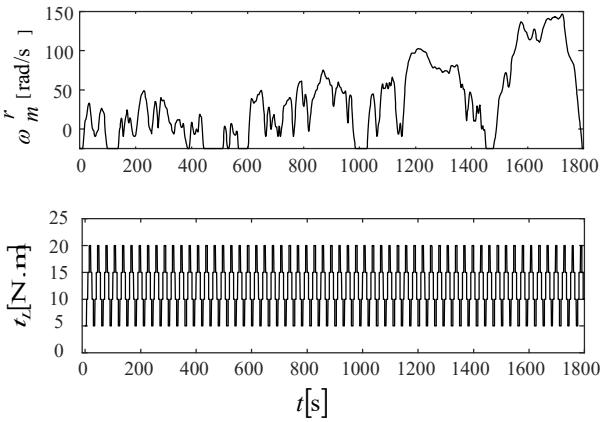
	$e_{i_{s\alpha}}$	$e_{i_{s\beta}}$	e_{ω_m}
LMS tabanlı MUS ($P_{ce} = \%0$) (Şekil 3.5) (Demir vd., 2023)	1,0190e-09	1,0081e-09	7,4235e-05
OC-LMS tabanlı MUS ($P_{ce} = \%30$) (Şekil 3.7)	1,2165e-09	1,2021e-09	8,3547e-05
OC-LMS tabanlı MUS ($P_{ce} = \%50$) (Şekil 3.9)	1,3407e-09	1,3135e-09	9,2439e-05
OC-LMS tabanlı MUS ($P_{ce} = \%70$) (Şekil 3.11)	2,8629e-09	2,6969e-09	11,712e-05

Tablo 3.3. *Farklı sansürleme oranları için UDSS sürüş döngüsüne ait önerilen OC-LMS tabanlı MUS kestiricinin ortalama çalışma süreleri*

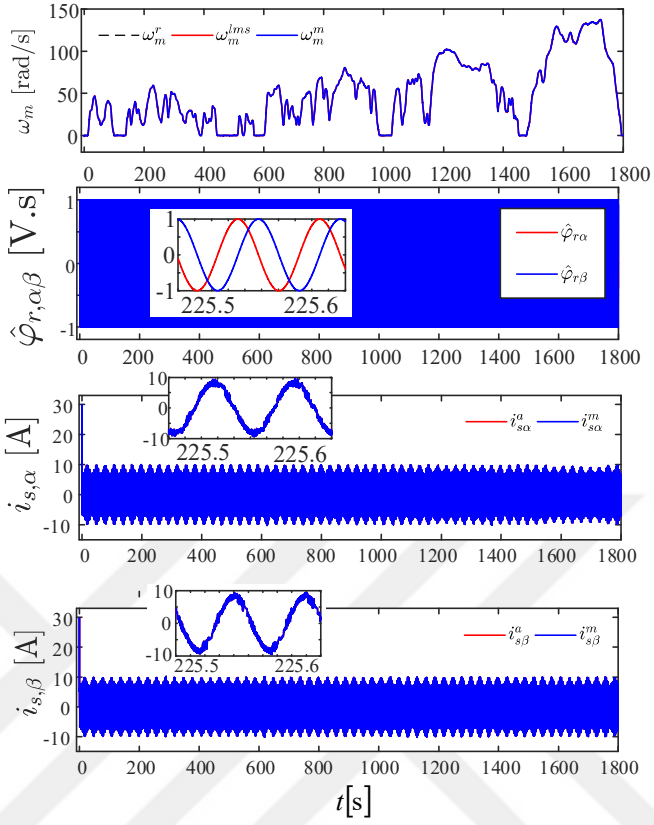
MUS kestiricileri	**Çalışma süreleri [s]**
LMS tabanlı MUS ($P_{ce} = \%0$) (Demir vd., 2023)	4,9675
OC-LMS tabanlı MUS ($P_{ce} = \%30$)	4,5149
OC-LMS tabanlı MUS ($P_{ce} = \%50$)	4,3798
OC-LMS tabanlı MUS ($P_{ce} = \%70$)	4,2226

İkinci olarak Senaryo II için gerçekleştirilen benzetim çalışmaları, Şekil 3.12'de sunulan WLTP-3 hız profili ve aynı anda uygulanan yük momenti değişimleri altında yürütülmüştür. Bu test senaryosu altında, geleneksel LMS tabanlı MUS yapısı (yani sansürleme mekanizması içermeyen yapı) ile önerilen OC-LMS tabanlı MUS yapısından elde edilen rotor hızı kestirim sonuçları Şekil 3.13 ile Şekil 3.20 arasında detaylı olarak verilmiştir. Bu grafiklerde, gerçek rotor hız eğrileri ile kestirilen hız eğrilerinin karşılaştırmaları sunulmuş ve zamana bağlı hata büyüklükleri görselleştirilmiştir.

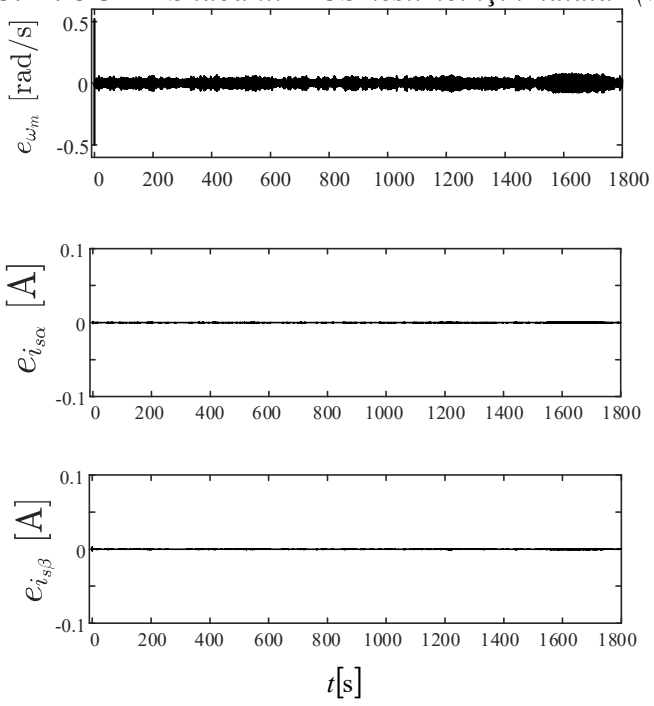
Şekil 3.12. *AYK sistemi için hız referansı ve ASM'ye uygulanan yük momenti değişimleri (WLTP)*



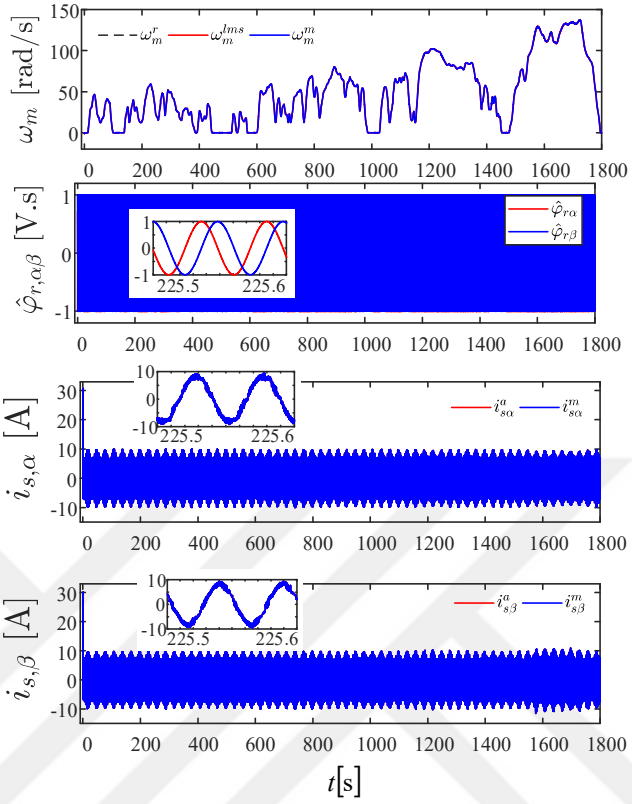
Şekil 3.13. *Geleneksel LMS tabanlı MUS'a ait kestirim sonuçları (WLTP)*



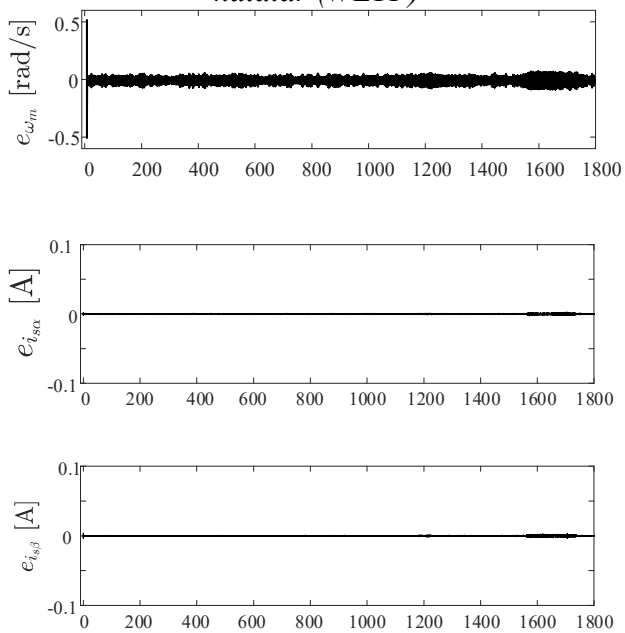
Şekil 3.14. *OC-LMS tabanlı MUS kestirici için hatalar (WLTP)*



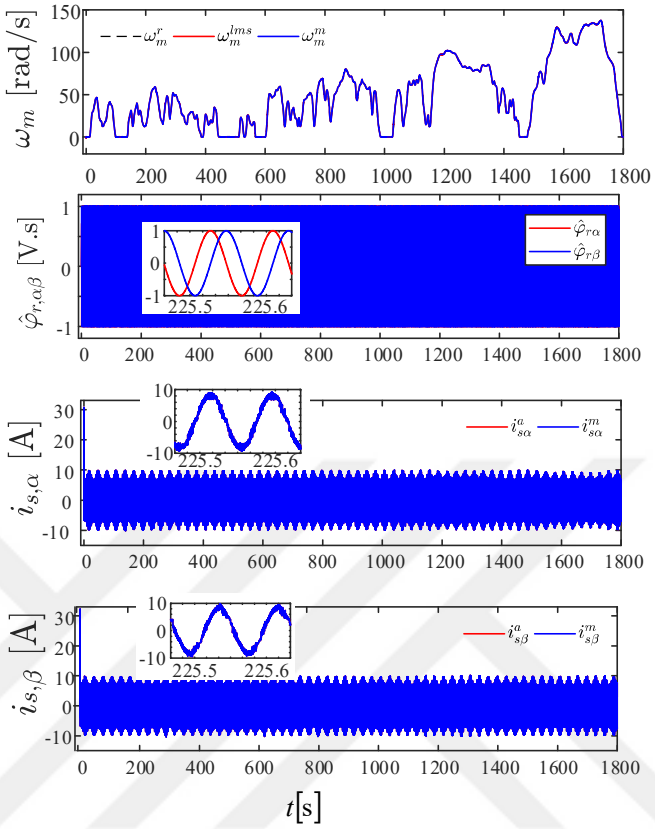
Şekil 3.15. *%30 sansürleme oranı için geleneksel LMS tabanlı MUS'a ait kestirim sonuçları (WLTP)*



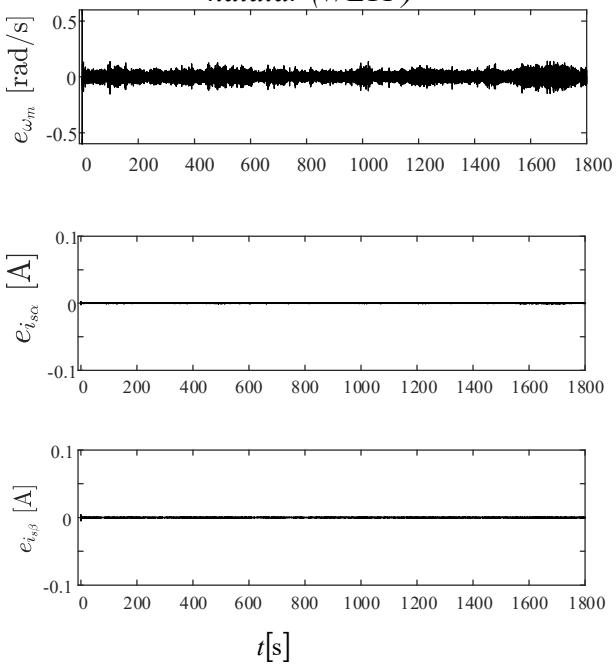
Şekil 3.16. *%30 sansürleme oranı için önerilen OC-LMS tabanlı MUS kestirici için hatalar (WLTP)*



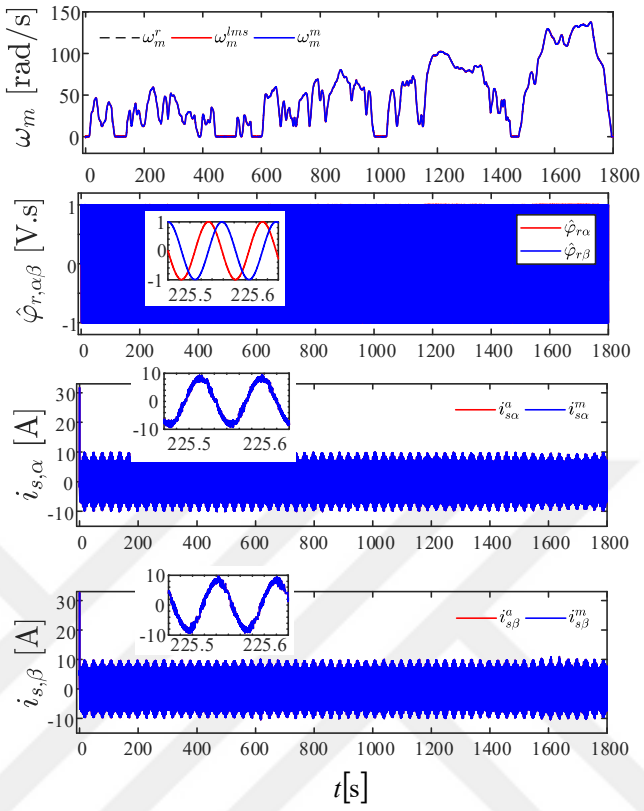
Şekil 3.17. *%50 sansürleme oranı için geleneksel LMS tabanlı MUS'a ait kestirim sonuçları (WLTP)*



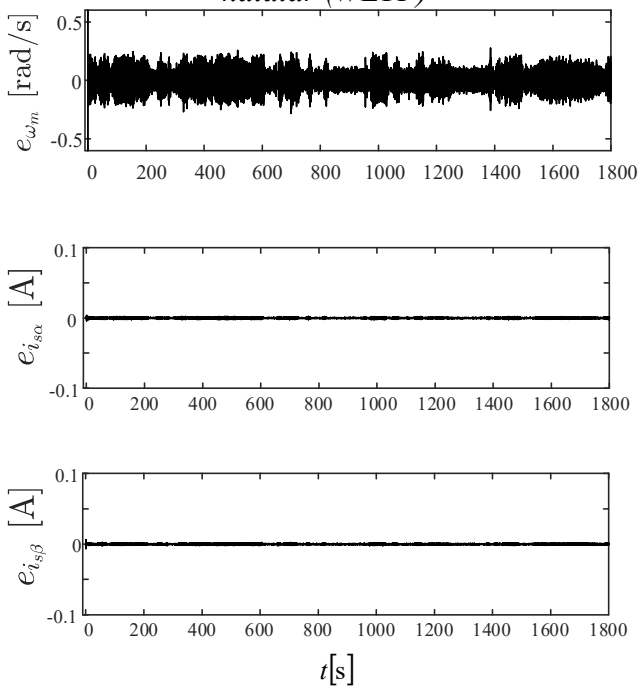
Şekil 3.18. *%50 sansürleme oranı için önerilen OC-LMS tabanlı MUS kestirici için hatalar (WLTP)*



Şekil 3.19. *%70 sansürleme oranı için geleneksel LMS tabanlı MUS'a ait kestirim sonuçları (WLTP)*



Şekil 3.20. *%70 sansürleme oranı için önerilen OC-LMS tabanlı MUS kestirici için hatalar (WLTP)*



Şekil 3.13 ile Şekil 3.20 arasında verilen benzetim sonuçları için ortalama kare hata değerleri Tablo 3.4'te verilmiştir. Aynı benzetim sonuçlarına ilişkin OC-LMS tabanlı MUS hız kestiricinin çalışma süreleri ise Tablo 3.5'te sunulmuştur.

Tablo 3.4. *WLTP-3 sürüş döngüsü için ortalama kare hata değerleri*

	$e_{i_{s\alpha}}$	$e_{i_{s\beta}}$	e_{ω_m}
LMS tabanlı MUS ($P_{ce} = \%0$) (Şekil 3.14) (Demir vd., 2023)	1,0513e-09	1,0499e-09	8,1527e-05
OC-LMS tabanlı MUS ($P_{ce} = \%30$) (Şekil 3.16)	1, 2624e-09	1,2684e-09	9,5126e-05
OC-LMS tabanlı MUS ($P_{ce} = \%50$) (Şekil 3.18)	1,4126e-09	1,4265e-09	10,4314e-05
OC-LMS tabanlı MUS ($P_{ce} = \%70$) (Şekil 3.20)	3,1265e-09	3,1264e-09	13,3431e-05

Tablo 3.5. *Farklı sansürleme oranları için WLTP-3 sürüş döngüsüne ait önerilen OC-LMS tabanlı MUS kestiricinin ortalama çalışma süreleri*

MUS kestiricileri	**Çalışma süreleri [s]**
LMS tabanlı MUS ($P_{ce} = \%0$) (Demir vd., 2023)	6,6241
OC-LMS tabanlı MUS ($P_{ce} = \%30$)	5,9213
OC-LMS tabanlı MUS ($P_{ce} = \%50$)	5,6342
OC-LMS tabanlı MUS ($P_{ce} = \%70$)	5,2231

Şekil 3.4–3.20 ve Tablo 3.2–3.5 birlikte incelendiğinde, önerilen OC-LMS tabanlı MUS kestiricisine ilişkin aşağıdaki çıkarımlar yapılabilmektedir:

- UDDS hız profili ve WTTP-3 hız profili sıfır hız bölgesi de dâhil olmak üzere geniş bir çalışma aralığını temsil etmektedir. Bu hız profilleri altında uygulanan basamak şeklindeki yük momenti değişimlerine rağmen, önerilen OC-LMS tabanlı MUS kestiricinin performansı tatmin edici düzeydedir ve sistem dinamiklerine hızlı ve kararlı şekilde uyum sağlamaktadır.
- Farklı sansürleme oranları (%30, %50, %70) için elde edilen ortalama kare hata (MSE) değerleri incelendiğinde, önerilen OC-LMS tabanlı MUS yapısının, geleneksel LMS tabanlı MUS algoritmasıyla (Demir vd., 2023) rekabet edebilecek doğruluk düzeyine sahip olduğu görülmektedir Özellikle düşük hız bölgelerinde bile hata oranlarının sınırlı kalması, OC-LMS tabanlı MUS kestiricinin güvenilirliğini ortaya koymaktadır.
- Tablo 3.3 ve 3.5'te sunulan ortalama çalışma süreleri karşılaştırıldığında ise, sansürleme mekanizması sayesinde önerilen OC-LMS tabanlı MUS

algoritmasının, işlem yükünü belirli oranlarda azalttığı açıkça görülmektedir. Sansürleme oranı arttıkça, gereksiz verilerin işlem dışı bırakılması sayesinde hesaplama süresi anlamlı düzeyde azalmaktadır.

Genel olarak, klasik LMS tabanlı MUS algoritmasının hesaplama yükünü azaltmak amacıyla önerilen OC-LMS tabanlı yaklaşım, yalnızca işlem yükünü düşürmekle kalmamış, aynı zamanda benzetim sonuçlarıyla doğruluğunu ve kararlılığını da kanıtlamıştır. Bu yönüyle, önerilen algoritma hem akademik hem de endüstriyel düzeyde sensörsüz hız kestirim sistemleri için uygulanabilir bir çözüm sunmaktadır.

Özetle benzetim çalışmaları sistemin dinamik koşullar altında gösterdiği performansın değerlendirilmesine olanak sağlamıştır. Gerçekleştirilen analizlerde, önerilen OC-LMS algoritması ile elde edilen rotor hızı kestirimlerinin yüksek kararlılığa sahip olduğu ve ölçüm gürültüsüne karşı geleneksel LMS algoritmasına kıyasla daha az duyarlılık gösterdiği gözlemlenmiştir.

Ayrıca, önerilen OC-LMS tabanlı yapı, geleneksel LMS tabanlı MUS yapısı (sansürleme mekanizması içermeyen) (Demir vd., 2023) ile karşılaştırılmış ve sansürleme oranı arttıkça hatanın bir nebze yükseldiği, buna karşın işlem sürelerininde düştüğü gözlemlenmiştir.

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

SONUÇ

Bu tez çalışmasında, LMS tabanlı MUS algoritmasının hesaplama yükünü hesaplama yükünü azaltmak amacıyla OC-LMS temelli yeni bir yaklaşım geliştirilmiş ve bu yöntem, hız-algılayıcısız AYK tabanlı ASM sürücüsünde hız kestiricisi olarak uygulanmıştır. Gerçekleştirilen benzetim çalışmalarıyla önerilen algoritmanın performansı değerlendirilmiş ve geleneksel yöntemlerle karşılaştırılmıştır.

Önerilen hız kestiricisinin başarımı, farklı test senaryoları altında kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Bu kapsamda, sisteme basamak şeklinde yük momenti değişimleri uygulanmış; ayrıca, otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan UDDS (Urban Dynamometer Driving Schedule) ve WLTP-3 (Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure – Faz 3) hız profilleri, sistemin referans hız girdisi olarak kullanılmıştır. Böylece kestiricinin, farklı çalışma koşulları altındaki kararlılığı ve dinamik yanıt kabiliyeti değerlendirilmiştir. Yapılan analizler ve elde edilen benzetim sonuçları doğrultusunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Önerilen OC-LMS tabanlı MUS algoritmasına sahip hız kestiricisi, hız tahmini konusunda yüksek doğruluk ve kararlılık sergilemiştir. Benzetim sonuçları, önerilen yöntemin dinamik değişimlere hızlı yanıt verdiğini ve sistem performansını bozmadığını göstermektedir.
- Geliştirilen yöntem, geleneksel LMS tabanlı MUS algoritması (Demir vd., 2023) ile kıyaslandığında, işlem süresi açısından önemli kazanımlar sağlamaktadır. Özellikle sansürleme (veri azaltımı) oranı arttıkça hesaplama yükündeki azalma daha belirgin hale gelmiştir.
- %30, %50 ve %70 sansürleme oranları için yapılan karşılaştırmalar sonucunda, önerilen kestirici sırasıyla %9,11, %11,83 ve %15 oranlarında daha

- kısa çalışma süresi elde etmiştir. Bu iyileştirme, kestirici performansında belirgin bir bozulma yaratmadan başarılmıştır.

Bu sonuçlar, OC-LMS tabanlı MUS algoritmasının, özellikle gömülü sistemler ve gerçek zamanlı uygulamalar için oldukça uygun bir alternatif sunduğunu göstermektedir. Hız-algılayıcısız kontrol sistemlerinde kullanılan bu algoritmanın, hem performans hem de hesaplama verimliliği açısından avantaj sağladığı görülmüştür.

Gelecek çalışmalarda, önerilen algoritmanın FPGA, DSP gibi donanımlar üzerinde gerçek zamanlı olarak uygulanması ve deneysel doğrulamanın yapılması, yöntemin pratikteki geçerliliğini değerlendirmek açısından önemli olacaktır. Ayrıca, benzer yaklaşımın farklı motor tipleri ve kontrol stratejilerine entegre edilerek genelleştirilebilirliği de araştırılabilir.

KAYNAKÇA

Abbasi, M.A. & Husain A.R.B. (2018). Model predictive control of a dual induction motor drive fed by a single voltage source inverter. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 26(3), 1623-1637.

Altınışık, Y. E., Demir, R., & Barut, M. (2021). Asenkron motorların iyileştirilmiş anahtarlamalı-GKF tabanlı alan yönlendirmeli kontrolü. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10(2), 545–552.

Altınışık, Y. E., & Demir, R. (2021). Asenkron Motorların GKF Tabanlı Model Öngörülü Moment Kontrolü. *Avrupa Bilim Ve Teknoloji Dergisi,* (32), 858-863.

Aktas, M. (2010). Stator resistance estimation using ANN in DTC IM drives. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 18(2), 197–210.

Alonge, F., Cangemi, T., D'Ippolito, F., Fagiolini, A. & Sferlazza, A. (2015). Convergence analysis of extended Kalman filter for sensorless control of induction motor. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(4), 2341–2352.

Alsofyani, I. M. & Idris, N. R. N. (2016). Simple flux regulation for improving state estimation at very low and zero speed of a speed sensorless direct torque Control of an induction motor. *IEEE Transactions on Power Electronics* 31(4), 3027–3035,

Atkinson, D. J., Finch, J. W. & Acarnley, P. P. (1996). Estimation of rotor resistance in induction motors. *IEE Proceedings-Electric Power Applications,* 143(1), 87–94.

Aydeniz, M. G. (2005). *Asenkron motorların hız algılayıcısız kontrolünde yeni bir algoritmanın geliştirilmesi ve uygulaması.* [Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi.

Bahloul, M., Chrifi-Alaoui, L., Drid, S., Souissi, M., & Chaabane, M. (2018). Robust sensorless vector control of an induction machine using multiobjective adaptive fuzzy Luenberger observer. *ISA Transactions*, 74, 144–154.

Barut, M., (2005). *Sincap kafesli asenkron motorların algılayıcısız yüksek başarımlı kontrolüne yönelik genişletilmiş Kalman filtresi tasarım ve uygulaması*. [Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi.

Barut, M., Bogosyan, S. & Gokasan, M., (2007). Switching EKF technique for rotor and stator resistance estimation in speed sensorless control of IMs. *Energy Conversion and Management,* 48(12), 3120–3134.

Barut, M., (2010). Bi Input-extended Kalman filter based estimation technique for speed-sensorless control of induction motors. *Energy Conversion and Management,* 51(10), 2032–2040.

Barut, M. & Demir, R. (2010). Bi input-extended Kalman filter based speed-sensorless direct torque control of IMs. *2010 XIX International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Rome, Italy, s. 1–5.

Barut, M., Demir, R., Zerdali, E. & Inan, R. (2012). Real-Time Implementation of Bi Input-Extended Kalman Filter-Based Estimator for Speed-Sensorless Control of Induction Motors, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 59(11), 4197–4206.

Barut, M., Bogosyan, S. ve Gokasan, M. (2005). Speed sensorless direct torque control of IMs with rotor resistance estimation. *Energy Conversion and Management,* 46(3), 335–349.

Barut, M., Yıldız, R., & Zerdali, E. (2018). Hız-algılayıcısız asenkron motor kontrolü için dağılımlı Kalman filtresi ile gerçek-zamanlı yük momenti ve rotor direnci kestirimi. *ÖHÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(1), 120–128.

Benlaloui, I., Drid, S., Chrifi-Alaoui, L., & Ouriagli, M. (2015). Implementation of a new MRAS speed sensorless vector control of induction machine. *IEEE Transactions on Energy conversion*, 30(2), 588-595.

Benlaloui, I., Chrifi-Alaoui, L., Ouriagli, M., Khemis, A., Khamari, D., & Drid, S. (2021). Improvement of the induction motor sensorless control based on the type-2 fuzzy logic. *Electrical Engineering*, 103(3), 1473–1482.

Berberidis, D., & Giannakis, G. B. (2017). Data sketching for large-scale Kalman filtering. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 65(14), 3688–3701.

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.

Birbaş, Ş. (2009). *Kapalı çevrimli gözlemleyiciler ile asenkron motorlarda durum değişkenlerinin kestirimi.* [Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi.

Bogosyan, S., Barut, M. & Gokasan, M. (2007). Braided extended Kalman filters for sensorless estimation in induction motors at high-low/zero speed. *IET Control Theory Applications,* 1(4), 987–998.

Bose, B. K. (1997). High performance control and estimation in AC drives. In Proceedings of the IECON'97 23rd International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, 2, 377-385.

Bose, B. K., (2002). Modern Power Electronics and AC Drives. *PTR Prentice Hall*.

Cao, P., Zhang, X., Yang, S., Xie, Z., & Zhang, Y. (2018). Reactive-power-based MRAS for online rotor time constant estimation in induction motor drives. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 33(12), 10835–10845.

Comanescu, M. (2017). Design of a pseudo-MRAS sliding mode observer with double feedback for estimation of the rotor time constant of the induction motor, *2017 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, Toronto, ON, Canada, ss. 270–275.

Costa, B. L. G., Angélico, B. A., Goedtel, A., Castoldi, M. F. & Graciola, C. L. (2015). Differential evolution applied to DTC drive for three-phase induction motors using an adaptive state observer. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems,* 26(4), 403–420.

Çavuş, B., & Aktaş, M. (2023). MPC-Based Flux Weakening Control for Induction Motor Drive With DTC for Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 38(4), 4430–4439.

Çolak Güvenç, B., & Mengüç, E. C. (2024). A novel family of online censoring based complex-valued least mean Kurtosis algorithms. *Signal Processing*, 216, 109302.

Demir, R. (2023a). Robust stator flux and load torque estimations for induction motor drives with EKF-based observer. *Electrical Engineering*, 105(1), 551–562.

Demir, R. (2023b). 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.

Demir, R., & Barut, M. (2018). Novel hybrid estimator based on model reference adaptive system and extended Kalman filter for speed-sensorless induction motor control. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 40(13), 3884–3898.

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.

Demir, R., Barut, M., Yildiz, R., Inan, R. & Zerdali, E. (2017). EKF Based rotor and stator resistance estimations for direct torque control of induction motors. *2017 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) & 2017 Intl Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP)*, Brasov, Romania, ss. 376–381.

Demirtaş, M. (2002). *Alan Yönlendirmeli Asenkron Motorun Bulanık-Kayan Kip ve Genetik-Kayan Kip Konum Kontrolü*. [Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi.

Derdiyok, A., Yan, Z., Guven, M., & Utkin, V. (2001). A sliding mode speed and rotor time constant observer for induction machines. In *IECON'01. 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2, ss. 1400-1405. IEEE.

Du, T., Vas, P. & Stronach, F. (1995). Design and application of extended observers for joint state and parameter estimation in high-performance AC drives. *IEE Proceedings- Electric Power Applications,* 142(2), 71–78.

Dybkowski, M., & Bednarz, S. A. (2019). Simultaneous Estimation of the Stator and Rotor Resistances in an Induction Motor Drive using Novel Active and Reactive Power Based Model Reference Adaptive System. *2019 International Conference on Electrical Drives Power Electronics (EDPE)*, The High Tatras, Slovakia, ss. 149–154.

Eftekhari, S. R., Davari, S. A., Naderi, P., Garcia, C., & Rodriguez, J. (2020). Robust loss minimization for predictive direct torque and flux control of an induction motor with electrical circuit model. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35, 5417–5426.

Eren, Y., Güvenç, B. Ç., & Mengüç, E. C. (2024). Cost-effective acoustic feedback cancellers for digital hearing aids. *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 32, 2367–2377.

Ferreira, J. O., Mendonça, M. O. K., & Diniz, P. S. R. (2021). Data selection in neural networks. *IEEE Open Journal of Signal Processing*, 2, 522-534.

Ganjewar, S. P., & Pahariya, Y. (2022). Modified MRAS approach for sensorless speed control of induction motor for reliability improvement. *International Journal of Information Technology*, 14(3), 1595–1602.

Garcia Soto, G., Mendes, E., & Razek, A. (1999). Reduced-order observers for rotor flux, rotor resistance and speed estimation for vector controlled induction motor drives using the extended Kalman filter technique. *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, 146(3), 282-288.

Geyer, T., Papafotiou, G., & Morari, M. (2009). Model Predictive Direct Torque Control—Part I: Concept, Algorithm, and Analysis. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(6), 1894–1905.

Goktas, T., & Arkan, M. (2018). Discerning broken rotor bar failure from low-frequency load torque oscillation in DTC induction motor drives. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 40(1), 279–286.

Govindharaj, I., Kumar, D., Balamurugan, S., Yazhinian, S., Anandh, R., Rampriya, R., Karthick, G., & Michael, G. (2024). Sensorless vector-controlled induction motor drives: Boosting performance with adaptive neuro-fuzzy inference system integrated augmented model reference adaptive system. *MethodsX*, 13, 102992.

Guazzelli PR., Andrade Pereira WC., Oliveira CMR., Castro AG., de Aguiar ML. (2019). Weighting factors optimization of predictive torque control of induction motor by multiobjective genetic algorithm. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(7), 6628-6638.

Habibullah, M. D., Lu, D. D.-C., & Rahman, M. F. (2017). Finite-state predictive torque control of induction motor supplied from a three-level NPC voltage source inverter. *IEEE Transactions on Power Electronics, 32*(1)*,* 479–489.

Habibullah, M. D., Lu, D. D.-C., Xiao, D., Fletcher, J. E., & Rahman, M. F. (2017). Predictive torque control of induction motor sensorless drive fed by a 3L-NPC inverter. *IEEE Transactions on Industrial Informatics, 13*(1)*,* 60–70.

Huang, J., Liu, H., Li, B. ve Kong, W. (2014). Second-Order Sliding-Mode Observer With Online Parameter Identification for Sensorless Induction Motor Drives, *IEEE Transactions on Industrial Electronics,* 61(10), 5280–5289.

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

Holtz, J. (2006). Sensorless control of induction machines—With or without signal injection?. *IEEE transactions on industrial electronics, 53*(1), 7-30.

Jat, G. L., Kumar, J., & Narayan, S. (2025). Speed Estimation in Induction Motor Drive Using Long Short-Term Memory-Sensorless Model Reference Adaptive System (LSTM-SMRAS) Control. *IEEE Access*, 13, 170017–170034.

Jouili, M., Jarray, K., Koubaa, Y. & Boussak, M., (2012). Luenberger state observer for speed sensorless ISFOC induction motor drives, *Electric Power Systems Research,* 89, 139–147.

Inan, R. & Barut, M. (2014). Bi input-extended Kalman filter-based speed-sensorless control of an induction machine~capable of working in the field-weakening region, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences,* 22(3), 588–604.

Kakodia, S. K., & Dyanamina, G. (2022). Type-2 Fuzzy Logic controller-based stator current Model reference adaptive system speed observer for a hybrid electric vehicle to improve transient response during limp home mode. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 50(10), 3426–3442.

Kosten, M. M., Emlek, A., Yıldız, R., & Barut, M. (2023). Rotor speed and load torque estimations of induction motors via LSTM network. *Power Electronics and Drives*, 8(1), 310–324.

Krim, S., Gdaim, S., Mtibaa, A. & Mimouni, M. F. (2019). Contribution of the FPGAs for complex control algorithms: Sensorless DTFC with an EKF of an induction motor. *International Journal of Automation and Computing,* 16(2), 226-237.

Kubota, K., Matsuse, K. & Nakano, T. (1993). DSP-based speed adaptive flux observer of induction motor. *IEEE Transactions on Industry Applications,* 29(2), 344–348.

Kubota, H., & Matsuse, K. (1994). Speed sensorless field-oriented control of induction motor with rotor resistance adaptation. *IEEE Transactions on Industry Applications, 30(*5), 1219-1224.

Kousalya, V., Rai, R., Singh, B. (2022). Sliding Model-Based Predictive Torque Control of Induction Motor for Electric Vehicle. *IEEE Transactions on Industry Application*s, 58(1), 742–752.

Laamari, Y., Chafaa, K. & Athamena, B. (2015). Particle swarm optimization of an extended Kalman filter for speed and rotor flux estimation of an induction motor drive. *Electrical Engineering,* 97(2), 129–138.

Lehtla, T., Joller, J., Lehtla, M., & Laugis, J. (2000). Parameter identification and comparison of an induction motor models. In *8th International Conference on Power Electronics and Variable Speed Drives* (ss. 201-205). London UK: IEE.

Lin, F. J. (1996). Robust speed-controlled induction-motor drive using EKF and RLS estimators. *IEE Proceedings-Electric Power Applications,* 143(3), 186–192.

Mapelli, F. L., Tarsitano, D., & Cheli, F. (2017). MRAS rotor resistance estimators for EV vector controlled induction motor traction drive: Analysis and experimental results, *Electric Power Systems Research,* 146, 298–307.

Mengüç, E. C., Acır, N., & Mandic, D. P. (2023). A class of online censoring based quaternion-valued least mean square algorithms. *IEEE Signal Processing Letters*, 30, 244–248.

Mengüç, E. C., & Mandic, D. P. (2025). Online censoring-based learning algorithms for fully complex-valued neural networks. *Neurocomputing*, 623, 129412.

Mengüç, E. C., Çınar, S., Xiang, M., & Mandic, D. P. (2021). Online censoring based weighted-frequency Fourier linear combiner for estimation of pathological hand tremors. *IEEE Signal Processing Letters*, 28, 1460–1464.

Mir, T. N., Singh, B., & Bhat, A. H. (2021). Speed-sensorless DTC of a matrix converter fed induction motor using an adaptive flux observer. *IETE Journal of Research*, 67(3), 414–424.

Munoz-Garcia, A., Lipo, T. A., & Novotny, D. W. (1998). A new induction motor V/f control method capable of high-performance regulation at low speeds. *IEEE transactions on Industry Applications, 34*(4), 813-821.

Omari, A., Ismail Khalil, B., Hazzab, A., Bouchiba, B., & Benmohamed, F. E. (2019). Real-time implementation of MRAS rotor time constant estimation for induction motor vector control based on a new adaptation signal. *COMPEL - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, *38*(1), 287–303.

Özdemir, S. (2020). A new stator voltage error-based MRAS model for field-oriented controlled induction motor speed estimation without using voltage transducers. *Electrical Engineering*, 102(4), 2465–2479.

Parekh, R. (2003). AC induction motor Fundamentals. *Application Note AN887, Microchip Technology Inc,* ss. 1–24.

Perez-Guzman, R. E., Rivera, M., & Wheeler, P. W. (2020). Recent advances of predictive control in power converters. *In 2020 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT),* (ss. 1100–1105). *IEEE*.

Rodríguez, J., Kennel, R. M., Espinoza, J. R., Trincado, M., Silva, C. A., & Rojas, C. A. (2012). High-performance control strategies for electrical drives: An experimental assessment. *IEEE transactions on industrial electronics, 59*(2), 812-820.

Sutnar, Z., Rodi, M. & Peroutka, Z. (2008). Sliding mode flux observer of induction motor. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 7(1), 195–197.

Romero, D., Berberidis, D. & Giannakis, G. B. (2016). Quickest convergence of online algorithms via data selection. *2016 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 6185–6189.

Salmasi, F. R. & Najafabadi, T. (2011). An Adaptive observer with online rotor and stator resistance estimation for induction motors with one phase current sensor. *IEEE Transactions on Energy Conversion,* 26(3), 959–966.

Salmasi, F. R., Najafabadi, T. A., & Maralani, P. J. (2010). An adaptive flux observer with online estimation of DC-link voltage and rotor resistance for VSI-based induction motors. *IEEE transactions on power electronics*, 25(5), 1310-1319.

Salvatore, L., Stasi, S. & Tarchioni, L. (1993). A new EKF-based algorithm for flux estimation in induction machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics,* 40(5), 496–504.

Salvatore, N., Caponio, A., Neri, F., Stasi, S., & Cascella, G. L. (2010). Optimization of delayed-state Kalman-filter-based algorithm via differential evolution for sensorless control of induction motors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(1), 385-394.

Sarp, A. O., Mengüç, E. C., Peker, M. & Güvenç, B. Ç. (2022). Data-adaptive censoring for short-term wind speed predictors based on MLP, RNN, and SVM. *IEEE Systems Journal*, 16(3), 3625–3634.

Schauder, C. (1992). Adaptive speed identification for vector control of induction motors without rotational transducers. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 28(5), 1054–1061.

Shen, Y., Mardani, M., & Giannakis, G. B. (2017). Online categorical subspace learning for sketching big data with misses. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 65(15), 4004–4018.

Song, J., Lee, K.-B., Song, J.-H., Choy, I., & Kim, K.-B. (2000). Sensorless vector control of induction motor using a novel reduced-order extended Luenberger observer. In *Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Fifth IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy (Cat. No. 00CH37129),* 3, ss. 1828-1834, IEEE.

Takahashi, I. & Noguchi, T. (1986). A New Quick-Response and High-Efficiency Control Strategy of an Induction Motor. *IEEE Transactions on Industry Applications* IA-22(5), 820–827.

Terras, T., Hadjeri, S., Mezouar, A. & Chikouche, T. (2013). Robust speed control with rotor resistance estimation. *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, 36(2), 43–51.

Tir, Z., Orlowska-Kowalska, T., Ahmed, H., & Houari, A. (2024). Adaptive High Gain Observer Based MRAS for Sensorless Induction Motor Drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 71(1), 271–281.

Tursini, M., Petrella, R. ve Parasiliti, F. (2000). Adaptive sliding-mode observer for

speed-sensorless control of induction motors. *IEEE Transactions on Industry Applications,* 36(5), 1380–1387.

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.

V, K., Rai, R., & Singh, B. (2022). Sliding Model-Based Predictive Torque Control of Induction Motor for Electric Vehicle. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 58(1), 742–752.

V Praveen Kumar K., Kumar TV. (2019). Enhanced direct torque control and predictive torque control strategies of an open-End winding induction motor drive to eliminate common-mode voltage and weighting factors. *IET Power Electronics*, 12(8), 1986-1997.

Vas, P. (1998). Sensorless vector and direct torque control. *Oxford University Press*.

Vasic, V., Vukosavic, S. N., & Levi, E. (2003). A stator resistance estimation scheme for speed sensorless rotor flux oriented induction motor drives. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 18(4), 476–483.

Vieira, R. P., Gastaldini, C. C., Azzolin, R. Z. & Gründling, H. (2012). Discrete-time sliding mode speed observer for sensorless control of induction motor drives. *IET Electric Power Applications,* 6(9), 681–688.

Vieira, R. P., Gastaldini, C. C., Azzolin, R. Z. & Gründling, H. A. (2014). Sensorless Sliding-Mode Rotor Speed Observer of Induction Machines Based on Magnetizing Current Estimation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics,* 61(9), 4573–4582.

Wade, S., Dunnigan, M. W & Williams, B. W. (1997). Improving the accuracy of the rotor resistance estimate for vector-controlled induction machines", *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, 144(5), 285–294.

Wang, Z., Yu, Z., Ling, Q., Berberidis, D., & Giannakis, G. B. (2018). Decentralized RLS with data-adaptive censoring for regressions over large-scale networks. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 66(6), 1634–1648.

Wang F, Zhang Z, Mei X, Rodríguez J, Kennel R. (2018). Advanced control strategies of induction machine: Field oriented control, direct torque control and model predictive control. *Energies*, 11(1), 120.

Wang, F., Xie, H., Chen, Q., Davari, S. A., Rodríguez, J., & Kennel, R. (2020). Parallel predictive torque control for induction machines without weighting factors. *IEEE Transactions on Power Electronics, 35*(2), 1779-1788.

Wang, J., Wang, F., Zhang, Z., Li, S., & Rodriguez, J. (2017). Design and implementation of disturbance compensation-based enhanced robust finite control set predictive torque control for induction motor systems. *IEEE Transactions on Industrial Informatics, 13*(5)*,* 2645–2656.

Yang, S., Ding, D., Li, X., Xie, Z., Zhang, X., & Chang, L. (2017). A novel online parameter estimation method for indirect field oriented induction motor drives. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 32(4), 1562-1573.

Yang, L., Zhu, H., Wang, H., Kang, K., & Qian, H. (2019). Data censoring with network lifetime constraint in wireless sensor networks. *Digital Signal Processing*, 92, 73–81.

Yıldız, R., Demir, R., Zerdali, E., & Barut, M. (2023b). Least mean Kurtosis algorithm-based MRAS estimator for speed-sensorless model predictive control of induction motor. *V. International Turkic World Congress on Science and Engineering*, 80–92, 15–17 September 2023, Bishkek, Kyrgyzstan.

Yıldız, R., Barut, M., & Demir, R. (2024). Online stator and rotor resistance estimations of IM by using EKF. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 30(6), 771–778.

Yildiz, R., Barut, M., & Zerdali, E. (2020a). A comprehensive comparison of extended and unscented Kalman filters for speed-sensorless control applications of induction motors. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 16(10), 6423–6432.

Yildiz, R., Barut, M., & Demir, R. (2020b). Extended Kalman filter based estimations for improving speed-sensored control performance of induction motors. *IET Electric Power Applications*, 14(12), 2471–2479.

Yildiz, R., Demir, R., & Barut, M. (2023a). Online estimations for electrical and mechanical parameters of the induction motor by extended Kalman filter. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 45(14), 2725–2738.

Yin, Z, Zhao, C., Liu, J. and Zhong, Y. (2013). Research on anti-error performance of speed and flux estimator for induction motor using robust reduced-order EKF. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 9(2), 1037–1046.

Yin, Z., Zhao, C., Zhong, Y. R., ve Liu, J. (2014). Research on Robust Performance of Speed-Sensorless Vector Control for the Induction Motor Using an Interfacing Multiple-Model Extended Kalman Filter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29(6), 3011–3019.

Yin, Z., Li, G., Zhang, Y., Liu, J., Sun, X. ve Zhong, Y. (2017). A Speed and flux observer of induction motor based on extended kalman filter and markov chain", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 32(9), 7096–7117.

Zaky, M. S., & Metwaly, M. K. (2025). Improved MRAS observer with rotor flux correction terms and FLC-based adaptive law for sensorless induction motor drives. *Scientific Reports*, 15(1), 14769.

Zerdali, E. & Barut, M. (2016). Novel version of bi input-extended Kalman filter for speed-sensorless control of induction motors with estimations of rotor and stator resistances, load torque, and inertia. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences,* 24(5), 4525–4544.

Zerdali, E. & Barut, M. (2017). The comparisons of optimized extended kalman filters for speed-sensorless control of induction motors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics,* 64(6), 4340–4351.

Zerdali, E. (2020). Modele uyarlamalı sistem temelli model öngörülü moment kontrollü sürücü sisteminin tasarımı. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(1), 146–153.

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

Zhang, Y., Yuning, B., Yang, H., & Zhang, B. (2019). Low switching frequency model predictive control of three-level inverter-fed IM drives with speed-sensorless and field-weakening operations. *IEEE Transactions on Industrial Electronics, 66*(6), 4262–4272.

Zhang, Y., Shao, L., Yin, Z., Bai, C., & Liu, J. (2025). Ultralocal Model Based Model Predictive Torque Control of Induction Motor Drives With Model Free Speed Controller. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*.

Zhang, X., Zhang, Y., Yang, S., Xie, Z., & Cao, P. (2019). An Improved MRAS for Rotor Time Constant Updating in Induction Motor Drives Utilizing Dot Product of Stator Current and Rotor Flux. *IEEE Transactions on Power Electronics*, *34*(9), 8905–8915.

Zhu, H., Qian, H., Luo, X., & Yang, Y. (2018). Adaptive queuing censoring for big data processing. *IEEE Signal Processing Letters*, 25(5), 610–614.

TEZ İNTİHAL RAPORU

Asenkron Motor Sürücüleri İçin Çevrimiçi Sansürlemeli Modele Uyarlamalı Sistem Tabanlı Hız Kestiricisinin Tasarımı

Yazar Ali Yasin Bülbül

Gönderim Tarihi: 09-Eki-2025 04:03ÖS (UTC+0300)
Gönderim Numarası: 2775a70103
Dosya adı: TEZ_24.09.2025_V3.4_AYB.pdf (3.66M)
Kelime sayısı: 11737
Karakter sayısı: 69240

Asenkron Motor Sürücüleri İçin Çevrimiçi Sansürlemeli Modele Uyarlamalı Sistem Tabanlı Hız Kestiricisinin Tasarımı

ORİJİNALLİK RAPORU

%11	%10	%2	%
BENZERLİK ENDEKSİ	İNTERNET KAYNAKLARI	YAYINLAR	ÖĞRENCİ ÖDEVLERİ

BİRİNCİL KAYNAKLAR

1	acikbilim.yok.gov.tr İnternet Kaynağı	%7
2	acikerisim.sakarya.edu.tr İnternet Kaynağı	%2
3	dergipark.org.tr İnternet Kaynağı	%1
4	acikerisim.nigde.edu.tr İnternet Kaynağı	<%1
5	Birbaş, Şansal. "Kapalı Çevrimli Gözlemleyiciler İle Asenkron Motorlarda Durum Değişkenlerinin Kestirimi", Sakarya Universitesi (Turkey), 2022 Yayın	<%1
6	www.researchgate.net İnternet Kaynağı	<%1
7	www.halksagligiokulu.org İnternet Kaynağı	<%1

Alıntıları çıkart üzerinde
Bibliyografyayı Çıkart Kapat
Eşleşmeleri çıkar < 7 words

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı	**Ali Yasin BÜLBÜL**

EĞİTİM BİLGİLERİ

Derece	Kurum	Mezuniyet Yılı
Lise	**Kocasinan Anadolu Lisesi**	**2015**
Lisans	**Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi**	**2021**
Yüksek Lisans	**Kayseri Üniversitesi**	**2025**

EĞİTİM BİLGİLERİ

Dil	Derece
İngilizce	**C1**

İŞ DENEYİMLERİ

Derece	Kurum	Görev Süresi
Baş Mühendis	**Pusmak Makina A.Ş.**	**2022-2023**
Üretim Şefi	**İpek Mobilya A.Ş. (IM Enerji)**	**2023-Halen**

YAYINLAR

Bülbül, A. Y., Demir, R., & Mengüç, E. C. (Baskıda). Hız Algılayıcısız Asenkron Motor Sürücüsü için Çevrimiçi Sansürlemeli LMS tabanlı MUS. *Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*.



Uygulama ve Proje Odaklı, İş Dünyası ile Bütünleşen Üniversite

ALİ YASİN BÜLBÜL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

2025