



T.C.

NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ASENKRON MOTORLARIN HIZ-ALGILAYICILI VE HIZ-ALGILAYICISIZ
KONTROLÜ İÇİN KESTİRİM ALGORİTMALARININ GELİŞTİRİLMESİ

YUNUS EMRE ALTINIŞIK

Aralık, 2021

T.C.
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ASENKRON MOTORLARIN HIZ-ALGILAYICILI VE HIZ-ALGILAYICISIZ
KONTROLÜ İÇİN KESTİRİM ALGORİTMALARININ GELİŞTİRİLMESİ

YUNUS EMRE ALTINIŞIK

Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Rıdvan DEMİR

Aralık, 2021

Yunus Emre ALTINIŞIK tarafından **Dr. Öğr. Üyesi Rıdvan DEMİR** danışmanlığında hazırlanan “**Asenkron Motorların Hız-Algılayıcı ve Hız-Algılayıcısız Kontrolü için Kestirim Algoritmalarının Geliştirilmesi**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Elektrik Elektronik Mühendisliği** AnaBilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Murat BARUT, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Üye : Doç. Dr. Emrah ZERDALI, Ege Üniversitesi

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Rıdvan DEMİR, Kayseri Üniversitesi

ONAY:

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından/...../20.... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu’nun/...../20.... tarih ve sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../20...

Prof. Dr. Murat BARUT

MÜDÜR

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Yunus Emre ALTINIŞIK

ÖZET

ASENKRON MOTORLARIN HIZ-ALGILAYICILI VE HIZ-ALGILAYICISIZ KONTROLÜ İÇİN KESTİRİM ALGORİTMALARININ GELİŞTİRİLMESİ

ALTINIŞIK, Yunus Emre
Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Rıdvan DEMİR

Aralık 2021, 47 sayfa

Bu tez çalışmasında, genişletilmiş Kalman filtresi (GKF) ve modele uyarlamalı sistem (MUS) tabanlı kestiriciler asenkron motorların (ASM'nin) hız-algılayıcılı ve hız-algılayıcısız yüksek başarılı kontrolünü gerçekleştirmek amacıyla tasarlanmıştır. Tasarlanan kestirim algoritmaları, alan yönlendirmeli kontrol/vektör kontrol (AYK/VK) ve/veya model öngörülü moment kontrol (MÖMK) tabanlı ASM sürücü sisteminde test edilmiştir. İlk olarak, önerilen anahtarlama-GKF (A-GKF) ile rotor akılarının stator duran eksen takımındaki bileşenleri ($\psi_{r\alpha}$, $\psi_{r\beta}$), rotor mekanik hızı (ω_m), yük momenti (τ_l), rotor direnci (R_r) ve stator direnci (R_s) kestirilmektedir. A-GKF algoritması AYK sisteminde doğrulanmıştır. Daha sonra $\psi_{r\alpha}$, $\psi_{r\beta}$, ω_m ve R_r 'nin eş zamanlı kestirimini gerçekleştiren GKF algoritması, MÖMK tabanlı ASM sürücüsü ile doğrulanmıştır. Ayrıca GKF tarafından kestirilen R_r , MÖMK sistemi içerisine güncellenerek parametre değişimlerinden kaynaklanan bozulmalar azaltılmıştır. Son olarak, $\psi_{r\alpha}$, $\psi_{r\beta}$, R_r ve R_s 'nin kestirimleri aktif-reaktif güç tabanlı MUS (ARG-MUS) ile gerçekleştirilmiş ve ARG-MUS algoritması AYK ile doğrulanmıştır. Önerilen sürücü sistemlerinden elde edilen benzetim sonuçları, kestirim algoritmalarının başarımını göstermektedir.

Anahtar Sözcükler: Asenkron motor, alan yönlendirmeli kontrol, GKF, model öngörülü kontrol

SUMMARY

DEVELOPMENTS OF ESTIMATION ALGORITHMS FOR SPEED-SENSORED AND SPEED-SENSORLESS CONTROL OF INDUCTION MOTORS

ALTINIŞIK, Yunus Emre

Niğde Ömer Halisdemir University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor :Assistant Professor Dr. Rıdvan DEMİR

December 2021, 47 pages

In this thesis study, extended Kalman filter (EKF) and model reference adaptive system (MRAS) based estimators are designed for the purpose of providing high performance control with speed-sensor and speed-sensorless of induction motors (IM). The designed estimation algorithms are tested in the field oriented control/vector control (FOC/VC) and/or model predictive torque control (MPTC) based IM drive system. Firstly, with the proposed switching-EKF (S-EKF), the components in the stator stationary axes of rotor fluxes ($\psi_{r\alpha}$, $\psi_{r\beta}$), rotor mechanical speed (ω_m), load torque (τ_l), rotor resistance (R_r) and stator resistance (R_s) are estimated. The S-EKF algorithm is confirmed in the FOC system. Then, the EKF algorithm which performs the simultaneous estimation of $\psi_{r\alpha}$, $\psi_{r\beta}$, ω_m , R_r is confirmed with the MPTC-based ASM drive. In addition, R_r estimated by EKF, by updating into the MPTC system, is reduced the distortions caused by parameter changes. Finally, the estimation of $\psi_{r\alpha}$, $\psi_{r\beta}$, R_r and R_s are realized by the speed-sensored active-reactive power based MRAS (PQ-MRAS) and the PQ-MRAS algorithm is approved with the FOC system. Simulation results from the proposed drive systems are reveal the performance of the estimation algorithms.

Keywords: Induction motor, field oriented control, EKF, model predictive control

ÖN SÖZ

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, ASM'lerin hız-algılayıcılı ve hız-algılayıcısız yüksek başarılı kontrolünü gerçekleştirmek için ilk olarak hız-algılayıcısız A-GKF gözlemleyicisi önerilmiştir. Önerilen A-GKF gözlemleyicisi ile AYK kontrolü için gerekli olan durumlara ek olarak yük momenti, stator direnci ve rotor direncinin eş zamanlı olarak kestirimi gerçekleştirilmiştir. Buna ek olarak geleneksel AYK sisteminin yük momentinden kaynaklanan geçici hallerdeki kontrol başarımını artırmak için yük momentinin ileri beslemeli kontrolünün kontrol sistemine dahil edildiği iyileştirilmiş AYK tabanlı sürücü tasarlanmıştır. Daha sonra, rotor direnci değişimlerine karşı başarımı iyileştirilmiş hız-algılayıcısız MÖMK tabanlı sürücü sistemi literatüre tanıtılmıştır. Bu amaçla hız-algılayıcısız MÖMK sistemi için gerekli olan akı ve hız bilgisine ek olarak rotor direncinin kestirimi GKF gözlemleyicisi ile gerçekleştirilmiştir. Son olarak, hız-algılayıcılı ARG-MUS ile rotor ve stator direncinin kestirimleri gerçekleştirilmiştir.

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca, çalışmalarımı yakından takip ederek yönlendiren, her türlü zorlukta yardımlarını esirgemeyen, bilgisi ve tecrübesi ile beni aydınlatan danışman hocam, Sayın Dr. Öğr. Üyesi Rıdvan DEMİR'e teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca yüksek lisans ders döneminde alanım ile ilgili anlatılan zengin içerikli dersler ile tez sürecine hazırlanmamda büyük katkılar sağlayan Sayın Prof. Dr. Murat BARUT, Sayın Doç. Dr. Emrah ZERDALİ hocalarıma ve yine yüksek lisans başlangıcından beri yardımlarına başvurduğum Sayın Dr. Öğr. Üyesi Remzi İNAN hocama değerli vaktini bana ayırdığı için teşekkür ederim. Eğitimim süresince tecrübelerine başvurduğum tüm bölüm hocalarıma ve başaracağıma kuşkusuz inanan değerli arkadaşlarıma müteşekkirdiğimi ifade etmek isterim.

Yüksek lisans hayatım boyunca bana olan güveni asla azalmayan, maddi ve manevi yardımlarını bir kez bile esirgemeyen, başarılarımla gurur duyan, fedakârlıklarının karşılığını asla ödeyemeyeceğim aileme teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iv
SUMMARY	v
ÖN SÖZ	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
SİMGE VE KISALTMALAR	xi
BÖLÜM I GİRİŞ.....	1
BÖLÜM II ASENKRON MOTORLARIN İYİLEŞTİRİLMİŞ A-GKF TABANLI VEKTÖR KONTROL YÖNTEMİ İLE PARAMETRE KESTİRİMLERİ.....	10
2.1 Giriş	10
2.2 ASM'nin Matematiksel Modeli	11
2.3 Anahtarlama GKF'nin Tasarımı	12
2.4 Geliştirilmiş Hız-Algılayıcısız AYK Tabanlı ASM Sürücüsü	15
2.5 Benzetim Çalışmaları.....	15
2.5.1 Senaryo I: Sıfır hız bölgesinde gerçekleştirilen stator direnci, rotor direnci ve yük momenti değişimleri altında sürücülerin başarımı.....	17
2.5.2 Senaryo II: Anma hız bölgesinde gerçekleştirilen stator direnci, rotor direnci ve yük momenti değişimleri altında sürücülerin başarımı.....	17
2.5.3 Senaryo III: Geniş bir hız aralığında önerilen AYK tabanlı sürücünün başarımı	20
2.6 Sonuç ve Değerlendirme.....	21
BÖLÜM III ASENKRON MOTORLARIN GKF TABANLI MODEL ÖNGÖRÜLÜ MOMENT KONTROLÜ	22
3.1 Giriş	22
3.2 2L-VSI	23
3.3 GKF Gözlemleyicisi	24
3.4 Hız-Algılayıcısız MÖMK Tabanlı ASM Sürücüsü	25
3.5 Benzetim Çalışmaları	26
3.5.1 Senaryo I	27

3.5.2 Senaryo II	28
3.6 Sonuç ve Değerlendirme	29
BÖLÜM IV AKTİF-REAKTİF GÜÇ DENKLEMLERİNİ KULLANAN MUS	
TABANLI STATOR VE ROTOR DİRENCİ KESTİRİMİ	30
4.1 Giriş	30
4.2 ARG-MUS'un Tasarımı	30
4.3 ARG-MUS Tabanlı AYK Sistemi	32
4.4 Benzetim Sonuçları.....	34
4.5 Sonuç ve Değerlendirme.....	36
BÖLÜM V SONUÇLAR.....	37
KAYNAKLAR	38
ÖZGEÇMİŞ	46
TEZ ÇALIŞMASI KAPSAMINDA ÜRETİLEN ESERLER	47

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. A-GKF için ASM'nin parametre ve anma değerleri (Barut vd., 2005)	16
Çizelge 2.2. Şekil 2.3 için ω_m 'in OKH'leri	17
Çizelge 3.1. Şekil 3.5 için ω_m 'in OKH'leri	27



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Önerilen iyileştirilmiş A-GKF algoritmasının blok şeması	14
Şekil 2.2. Hız-algılayıcısız AYK tabanlı ASM sürücüsü için önerilen blok şeması.....	15
Şekil 2.3. Sıfır hızdaki ASM sürücü kontrolü ve A-GKF kestirim performansı; İBK'sız AYK (a) ve İBK'lı AYK (b)	18
Şekil 2.4. Sıfır hızdaki ASM sürücüsü ve A-GKF için kestirim ve izleme hataları; İBK'sız AYK (a) ve İBK'lı AYK (b).....	18
Şekil 2.5. Anma hızında ASM sürücü kontrolü ve A-GKF için kestirim performansı; İBK'sız AYK (a) ve İBK'lı AYK (b).....	19
Şekil 2.6. Anma hızında ASM sürücü kontrolü ile A-GKF kestirim ve izleme hataları; İBK'sız AYK (a) ve İBK'lı AYK (b).....	19
Şekil 2.7. İBK'lı AYK tabanlı ASM sürücünün kontrol performansı; kontrol ve kestirim performansı (a) izleme ve kestirim hataları (b)	20
Şekil 3.2. İki seviyeli gerilim kaynaklı evirici (a) ve gerilim vektörleri (b)	24
Şekil 3.4. Hız-algılayıcısız MÖMK tabanlı ASM sürücü sistemi (Zerdali vd., 2020)	25
Şekil 3.5. Senaryo I için benzetim sonuçları; rotor direnci kestirimi olmadan (a) ve rotor direnci kestirimi ile (b)	28
Şekil 3.6. Senaryo II için benzetim sonuçları	29
Şekil 4.1. Geleneksel-MUS blok şeması.....	32
Şekil 4.2. ARG-MUS kestiricisinin blok diyagramı	33
Şekil 4.3. ARG-MUS kestirici tabanlı hız-algılayıcılı alan yönlendirmeli kontrol sistemi	33
Şekil 4.4. Geniş bir hız aralığı için ω_m^{ref} ve uygulanan τ_l , R_r ve R_s 'nin değişimi	34
Şekil 4.5. Geniş bir hız aralığı için ARG-MUS kestirici ve AYK sistemine ilişkin benzetim sonuçları	35
Şekil 4.6. Geniş bir hız aralığında kestirim ve izleme hataları için benzetim sonuçları ..	35

SİMGE VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
α, β	Duran eksen takımı bileşenleri
$i_{s\alpha}, i_{s\beta}$	Stator akımlarının α - ve β - bileşenleri
$v_{s\alpha}, v_{s\beta}$	Stator gerilimlerinin α - ve β - bileşenleri
$\psi_{r,\alpha\beta}, \psi_{s,\alpha\beta}$	Rotor ve stator akılarının α - ve β - bileşenleri
ω_m	Rotor mekanik açısal hızı
n_m	Dakikadaki devir sayısı
τ_l	Yük momenti
$\hat{\theta}_{rf}$	Stator duran eksenine göre rotor akısının açısal konumu
$\hat{\cdot}$	\cdot 'nin kestirilme ya da gözlemlenme işareti
$e_{(*)}$	Kestirilen durum ve parametreler ile referanslar arasındaki hata
R_s	Stator direnci
R_r	Rotor direnci
L_m	Mıknatıslanma endüktansı (karşılıklı endüktans)
L_r	Rotor endüktansı
L_s	Stator endüktansı
σ	Kaçak faktörü
L_σ	Stator geçici endüktansı
J_t	ASM ve yükün toplam eylemsizliği
B_t	Viskoz sürtünme terimi (toplam)
p_p	Kutup çifti sayısı
T	Örnekleme zamanı
I	Birim matris
t	Zaman
f	Durum ve girişlerin doğrusal olmayan fonksiyonu
u_k	Kontrol giriş vektörü
x_k	Durum vektörü

v_k	Ölçüm gürültüleri
w_k	Süreç gürültüleri
h	Çıkışların fonksiyonu
Q	Sistem gürültüsünün kovaryans matrisi
R	Çıkış gürültüsünün kovaryans matrisi
P_{k+1}^- ve P_{k+1}	Sırasıyla hata kovaryans matrisinin önceki ve sonraki değerleri
K_{k+1}	Kalman kazancı
e_{ω_m}	Referans ve kestirilen hız arasındaki hata
ω_m^{ref}	Referans rotor mekanik hızı

Kısaltmalar

Açıklama

ASM	Asenkron Motor
VK	Vektör Kontrol
VKY	Vektör Kontrol Yöntemi
AYK	Alan Yönlendirmeli Kontrol
DMK	Doğrudan Moment Kontrol
DVK	Doğrudan Vektör Kontrol
KF	Kalman Filtresi
GKF	Genişletilmiş Kalman Filtresi
İD-GKF	İndirgenmiş Dereceli Genişletilmiş Kalman Filtresi
A-GKF	Anahtarlamalı Genişletilmiş Kalman Filtresi
MUS	Model Uyarlamalı Sistem
AG-MUS	Aktif Güç Tabanlı Model Uyarlamalı Sistem
RG-MUS	Reaktif Güç Tabanlı Model Uyarlamalı Sistem
ARG-MUS	Aktif-Reaktif Güç Tabanlı Model Uyarlamalı Sistem
UG	Uyarlanabilir Gözlemleyiciler
UAG	Uyarlanabilir Akı Gözlemleyicisi
TDAG	Tam Dereceli Akı Gözlemleyicisi
TDG	Tam Dereceli Gözlemleyici
UTDG	Uyarlanabilir Tam Dereceli Gözlemleyici
İDG	İndirgenmiş Dereceli Gözlemleyici
UİDG	Uyarlanabilir İndirgenmiş Dereceli Gözlemleyici
GBK	Geri Besleme Kazancı/Kazançları

İBK	İleri Beslemeli Kontrol
EMK	Elektromotor Kuvvet
DA	Doğru Akım
AA	Alternatif Akım
PI	Proportional Integral (Oransal İntegral)
MPTC	Model Predictive Torque Control
MÖMK	Model Öngörülü Moment Kontrol
OKH	Ortalama Kareler Hatası



BÖLÜM I

GİRİŞ

Asenkron motorlar (ASM'ler) sağlam, güvenilir, verimli, az bakım gerektirmeleri, ekonomik ve uzun ömürlü olmalarından dolayı değişken hız/konum ve/veya moment kontrolüne ihtiyaç duyan uygulamalarda (endüstri, elektrikli ya da hibrit araçlar vb.) yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Günümüzde, ayarlanabilir hızlı sürücüler içerisinde önemli bir yer teşkil eden ASM sürücüleri, dönen stator alanına ek olarak rotor akısı veya rotor akımının doğrudan gözlemlenememesi nedeniyle oldukça karmaşık bir kontrol yapısına sahiptir (Vas, 1998).

ASM'ler, karmaşık yapıları, doğrusal olmayan matematiksel modelleri ve diğer çalışma şartlarına bağlı olarak değişen parametrelere sahip olmasından dolayı birçok kontrol problemine neden olurlar. Kestirim başarımları ve kontrol sistemlerinde parametrelerden kaynaklanan bozulmaların önlenmesi veya asgari düzeye indirilebilmesi, motor parametrelerinin iyi bilinmesine bağlıdır. Elektriksel parametreler doğru akım (d.a) testi, boştaki çalışma ve kilitli/tutulu rotor deneyleriyle doğrudan tespit edilebilir olsalar da değerleri frekans, sıcaklık ve akı seviyesi ile ilişkili olarak çalışma şartlarından etkilenmektedirler. Mekanik parametreler ise doğrudan ölçülemediği için tam olarak değerinin tespit edilebilmesi oldukça zaman alıcı bir süreci gerektirmektedir. Bu sebeplerden dolayı yüksek başarımlı kontrolün sağlanması, ilgili parametrelerin sorunsuzca kestirimine dayanmaktadır.

ASM'lerin hız-algılayıcı/algılayıcı kontrolü, rotor açısal hızı (ω_m) ve stator duran eksen takımındaki rotor akısı ($\psi_{r,\alpha\beta}$) ya da stator akısının ($\psi_{s,\alpha\beta}$ 'nin) kestirilmelerini gerektirmektedir. Bununla birlikte çalışma koşullarıyla (sıcaklık ve frekans gibi) değerleri değişebilen stator direnci (R_s) ve rotor direnci (R_r) ile birlikte bilinmeyen yük momenti (τ_l), bu kestirimlerde çeşitli bozulmalara neden olmaktadır. Bu nedenle, hız ve akıların kararlı şekilde kestirilmesi için bu parametrelerin geniş hız aralıklarında kestirilmesi ve kullanılan kestirim algoritmalarına da dahil edilmesi gerekmektedir. Fakat yine de bu durum ve parametrelerin kestirilmesi ile ilgili bazı zorluklar mevcuttur. Bu zorluklar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Hız kestiriminde yüksek doğruluk, geniş hız oranları, hız kontrol döngüsünün yüksek bant genişliği, yük moment karışıklıklarına karşı dayanıklılık gibi zorluklar genel olarak yüksek performanslı uygulamalarda ortaya çıkmaktadır. Akı kestiriminde oluşan hataların, makinenin ısınma/soğumasından dolayı onların gerçek değerleri ile gözlemleyicinin rotor ve stator dirençleri arasındaki uyumsuzluktan kaynaklandığı belirtilmektedir. Ayrıca sargı ısınmalarının yüke bağlı değişkenleri, modellenmiş dirençlerde %50'ye kadar hatalara neden olabilmektedir. Bu yüzden stator ve rotor dirençleri, çevrim-içi kestirilmeli ve sürücünün çalışması sırasında izlenmelidir (Cirrincione vd., 2007).
- Son yıllarda çok düşük hız ve sıfır hız bölgelerinde ASM'lerin algılayıcısız hız kestirimi için birçok yöntem önerilmiştir. Özellikle stator ve rotor direnci gibi elektriksel parametreler, yük momenti ve eylemsizlik gibi mekanik parametrelerin çalışma şartları ile değişmesi önerilen yöntemlerin başarımını düşürmektedir (Zaky vd., 2010).
- Tüm hız bölgeleri boyunca ASM'nin algılayıcısız kontrolünde yüksek bir kestirim performansı elde etmek için R_s ve R_r 'nin doğru belirlenmesi kritiktir. Bu durum, ASM'lerin algılayıcısız kontrolü üzerine çalışan araştırmacılar arasında iyi bilinen bir zorluktur. Aynı zamanda bu iki motor parametresinin eş zamanlı kestiriminin kararsızlığa neden olduğu söylenilir (Özsoy vd., 2010).
- Mekanik belirsizlikler özellikle sürtünme ve yük momentindeki değişimleri içermektedir (İnan ve Barut, 2014). Ayrıca alan zayıflama bölgesi olan anma hızının üzerindeki yüksek hız bölgelerinde akı ve/veya hız değerlerinin doğruluğu gerekmektedir. Akı seviyesine bağlı olarak değişim gösteren mıknatıslanma endüktansı L_m 'nin kestirilmesi de zorlayıcı problemlerdendir (İnan ve Barut, 2014).

Bu ve benzeri zorlukların üstesinden gelebilmek için literatürde çeşitli yöntem ve algoritmaların geliştirilmesi ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların başlıcaları aşağıda tanıtılmıştır.

ASM'lerin serbest uyarımalı DA motorları gibi kontrol edilebileceğini gösteren vektör kontrol ya da alan yönlendirmeli kontrolün 1969'da K. Hasse ve 1971'de F. Blaschke tarafından ortaya atılması ile, AA sürücülerinin yüksek başarımlı kontrolüne olanak sağlanmıştır. Ayrıca, vektör kontrolü (VK) ile AA sürücülerini, fırçasız DA sürücüsü gibi sorunsuzca kontrol edilebilir duruma getirmektedir. Buna ek olarak, daha yüksek geçici hal akımı, genişletilmiş hız aralığı ve daha düşük rotor eylemsizliği durumlarında başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Aynı zamanda, DA sürücülerini için ortaya atılan yüksek başarımlı uyarlanabilir ve optimal kontrol yöntemleri kolaylıkla vektör kontrollü AA sürücülerini kapsayacak şekilde genişletilebilmiştir (Bose, 1997; Mosskull, 2006).

Diğer taraftan, doğrudan moment kontrolü (DMK) olarak bilinen yüksek başarımlı yöntem, Takahashi ve Noguchi (1986) ve Depenbrock (1988) tarafından önerilmiştir. Vektör kontrol yöntemlerine kıyasla daha basit yapısı ve başarımlının da VK yöntemlerine yakınlığından dolayı endüstride uygulama alanları bulmuştur.

ASM'lerin yüksek başarımlı kontrolünü sağlayan VK ve DMK'nın uygulanabilmesi için, rotor açısal hızı ile birlikte rotor ya da stator akısının duran eksen takımına göre genlik ve konum bilgisine ihtiyaç duyulmaktadır. Geleneksel yaklaşımda, rotor hız bilgisi için artımsal kodlayıcılar kullanılırken, akı vektörü bilgisi ise araştırma bobinli veya manyetik etkili algılayıcılar kullanılarak elde edilmektedir. Bu algılayıcılar donanım maliyetini ve karmaşıklığını oldukça artırmakta, mekanik titreşimlerden ve sıcaklıktan olumsuz bir şekilde etkilenerek gürültü ve salınımlar meydana getirmektedir. Bu sebeplerden dolayı da algılayıcıların kontrol sistemlerinde kullanımları genelde arzulanmamaktadır.

VK ve DMK'ya alternatif olarak model öngörülü akım kontrol yöntemi ve model öngörülü moment kontrol yöntemi önerilmiştir. Bu yöntemlerle DA motorlu sürücülerdeki kadar iyi bir dinamik ASM'nin hem geçici hem de sürekli halde akı, moment ve hız kontrolleri gerçekleştirilebilmektedir.

Literatürdeki güncel çalışmalara bakıldığında, algılayıcı sorunlarına çözüm olarak bu değişkenleri ölçmek yerine kestirme ya da gözlemlenebilir yoluna gidilmektedir (Schauder, 1992; Holtz, 2006; Barut vd., 2012). Ayrıca, donanım karmaşıklığını ve maliyetini olabildiğince azaltması, sürücü boyutlarını küçültmesi, algılayıcı kablolarına gerek

duymaması, gürültü bağışıklığının daha iyi olması, sistem güvenilirliğini artırması ve daha az bakım gerektirmesi gibi üstünlükleri sayesinde araştırmacıların hız-algılayıcısız kontrole olan ilgisini artırmıştır (Holtz, 2006).

Diğer yandan, ASM'lerin parametre ve durum kestirimindeki elektriksel ve mekanik belirsizliklerden dolayı, onların hız-algılayıcısız kontrolü hala sorundur. Elektriksel belirsizliğin en önemli kısmını sıcaklık ve frekansa bağımlı olarak, stator ve rotor dirençlerinde meydana gelen değişimler ile literatürde alan zayıflama bölgesi olarak tanımlanan anma hızının üzerindeki yüksek hız bölgelerinde gerilim sınırlamasından dolayı mıknatıslanma endüktansında meydana gelen değişimler oluşturmaktadır. Aynı zamanda, mekanik belirsizlikler genellikle yük momenti ve sürtünmeden dolayı ortaya çıkmaktadır (Barut, 2005).

Literatürde hız-algılayıcılı veya hız-algılayıcısız kontrol için birçok kestirim yöntemi kullanılmaktadır. ASM sürücülerinin kontrolünde kullanılan temel kestirim yöntemleri (Vas, 1998; Barut vd., 2012; Wang vd., 2020) aşağıda sıralanmıştır:

- i. Ölçülen stator akım/gerilimini kullanan açık-çevrimli kestiriciler,
- ii. Modele uyarlamalı sistemler (MUS), (Wang vd., 2014; Xie vd., 2021),
- iii. Uyarlanabilir tam ve indirgenmiş dereceli gözlemleyici (UTDG-UİDG), (Nguyen vd., 2021; Yin vd., 2019),
- iv. Yapay zeka kullanan sistemler (yapay sinir ağıları, bulanık mantık sistemler vb.)
- v. Kapalı-çevrimli gözlemleyiciler (Kalman Filtresi (Demir & Barut, 2018; Zerdali & Demir, 2021), Luenbenger Gözlemleyicisi (Yan & Song, 2020), Kayma Kipli Kontrol tabanlı (Lu & Zhao, 2018; Zhao vd., 2019) gözlemleyiciler vb.),
- vi. ASM modelinin kullanılmadığı diğer yaklaşımlar.

MUS tabanlı sistemler ilk olarak Landau (1979)'da tanıtılmıştır. Bu çalışmada, MUS'un çalışma prensibi, tasarımında meydana gelebilecek olumsuzluklar ve çözüm yöntemleri sunulmuştur. ASM'de rotor hızının MUS yaklaşımı ile sabit bir parametre gibi kestirilebileceği ilk defa Schauder (1992)'de gösterilmiştir ve kestirilen hız, VK sisteminde geri besleme olarak kullanılmıştır. MUS, referans ve uyarlanabilir model olmak üzere iki modelden oluşur. Bu model çıkışlarının seğıimine bağılı olarak; rotor akısı, stator akısı, zıt EMK, aktif-reaktif güç tabanlı MUS gibi yaklaşımlar mevcuttur.

Son yıllarda MUS ile yapılan çalışmalar dikkate alındığında Vasic vd. (2003)'de duran eksen takımında gerçekleştirilen stator direnci ve rotor mekanik hızının eş zamanlı olarak kestirilmesine olanak sağlayan rotor akısı tabanlı MUS kestirici önerilmiştir. Önerilen kestirici, hem benzetim ortamında hem de gerçek zamanlı olarak düşük hız bölgelerinde test edilmiştir. Rashed ve Stronach (2004)'de düşük stator frekansında zıt EMK tabanlı MUS ile eş zamanlı olarak rotor hızı ve stator direnci kestirilmiştir.

Maiti ve Chakraborty (2010)'da sadece anlık/ani reaktif güç tabanlı MUS, algılayıcısız VK'lı ASM sürücünün hız kestirimi için sunulmuştur. Sistemde referans model, ölçülen akım vektörünü kullanırken diğer yandan uyarlanabilir model, kestirilen akımı kullanmaktadır. Ayrıca Ravi Teja vd. (2012)'de öne sürülen X-MUS ile hız ve stator direnci kestirimi, iki farklı uyarılma mekanizması (rotor ve stator hız kestirici) ile kestirilmiştir. Kumar vd. (2015)'te, ASM sürücülerinde kullanılan farklı MUS tabanlı kestiricilerin matematiksel eşitlikleri, benzetim ve deneysel sonuçları ile alakalı geniş bir inceleme gerçekleştirilmiştir. Bir diğer yöntem olan moment tabanlı MUS (M-MUS) ile, hız ve rotor akı kestirimi gerçekleştirilerek düşük ve sıfır hız bölgelerindeki sürücü başarımı artırılmıştır (Smith vd., 2016).

Yang vd. (2017)'de ise rotor akılı MUS ile hız-algılayıcılı olarak rotor direnci ve mıknatıslanma endüktansı kestirilmiştir. Bednarz ve Dybkowski (2019)'da aktif-reaktif güç tabanlı MUS ile hız-algılayıcılı olarak stator ve rotor direncinin eş zamanlı kestirimi gerçekleştirilmiştir. Zerdali ve Mengüç (2019)'da rotor hızı kestirimi için stator akım tabanlı karmaşık değerli MUS önerilmiştir.

Gözlemleyici algoritmaları, makine model eşitliklerini kullanmasının yanında ölçülen akım ve gerilim bilgilerini kullanarak rotor hızı veya akı kestirimlerinin gerçekleştirilmesini sağlamaktır. Kapalı-çevrimli gözlemleyicilerden kayma kipli (sliding mode) hız gözlemcisi, ASM'nin kestirilen ve ölçülen akımları arasındaki hatayı kullanarak rotor hızını kestiren bir gözlemleyicidir (Yan ve Utkin, 2002). Vieira vd. (2012)'de önerdikleri ayrık zamanlı kayma kipli kontrol ile rotor akısı bileşenlerini elimine ederek rotor hızı kestirimini gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca Zhao vd. (2014)'de ikinci derece kayma kipli gözlemleyici ile stator direnci ve hız kestirimini hem benzetim ortamında hem de gerçek zamanlı olarak kestirmiştir. Diğer taraftan, Zaky vd. (2018)'de

sıfır ve düşük frekanslarda stator akımı, rotor akısı ve rotor hızı uyarlanabilir kayma kipli gözlemleyici ile kestirilmiştir.

Adaptif/uyarlanabilir gözlemleyiciler (UG) de araştırmacılar tarafından ASM kontrolünde sıklıkla tercih edilmektedir. Kubota vd. (1993)'de ASM'lerin uyarlanabilir gözlemleyici tabanlı hız-algılayıcısız vektör kontrolü gerçekleştirilmiştir. Uyarlanabilir gözlemleyici ile rotor hızı ve rotor akısı kestirilmiştir. Kubota vd. (2002)'de ise UG kullanarak düşük hızlarda rejeneratif bölgede algılayıcısız ASM sürücüsü için hız kestirimi gerçekleştirilmiştir.

Uyarlanabilir tam dereceli gözlemleyicinin (UTDG) tasarım stratejilerine odaklanılan ve hız kestirim başarımının ele alındığı Suwankawin ve Sangwongwanich (2006)'da, eğer adaptasyon kazançları maksimum hızlanma ve yavaşlama sırasında tatmin edici bir izleme performansına erişmek için doğru belirlenebilirse, hız kestirim izleme hatasının tüm çalışma bölgelerinde kabul edilebilir olacağı belirtilmiştir. Montanari vd. (2007)'de önerilen hız-algılayıcısız kontrolcünün sabit parametreler ve bilinen varsayımlar altında tasarlandığı fakat yine de elektriksel parametrelerin motor çalışması sırasında değişebilir olduğu ve kontrolcünün geçiş ve kararlılık performansını etkilediği belirtilmektedir.

Ayrıca Etien vd. (2010)'da UTDG'nin kararlılığını geliştirmek amaçlı önerilen yöntemde, hız ve stator direncinin eş zamanlı kestirimi de gerçekleştirilmiştir. Uyarlanabilir akı gözlemleyicisinin(UAG) derinlemesine araştırıldığı Zaky (2012)'de algılayıcısız ASM sürücüleri için eş zamanlı olarak hız ve stator direnç kestirimleri yapılmıştır. Özellikle düşük hızlardaki rejeneratör modunda olmak üzere çalışmanın geniş hız aralıklarında iyi bir kararlılığa erişmek için gözlemleyici geri besleme kazançları (GBK) da sunulmuştur. Qu vd. (2014)'de hız-algılayıcısız ASM sürücüleri için bir UTDG ile birlikte stator direnç adaptasyonunun analiz ve tasarım çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Ayrıca indirgenmiş dereceli gözlemleyicinin (İDG), tam dereceli gözlemleyiciye (TDG) göre ayarlama ve uygulama bakımından daha basit olduğu fakat İDG'nin yüksek hızlarda gürültüye karşı daha hassas ve kırılğan olabildiği konusuna dikkat çekilmektedir (Qu vd., 2014).

Hız ve akı kestiricinin karakteristiklerini yöneten GBK'nın gözlemleyici tasarımındaki anahtar kısımlar olduğu belirtilen Chen vd. (2014)'de düşük hızlardaki rejeneratif çalışma bölgesi için kayda değer GBK'lar önerilmiştir. Chen vd. (2019)'da ise ASM'lerde hem motor hem de rejeneratör işlemleri sırasında stator ve rotor dirençlerinin kararlı kestirimini sağlayan bir UG sunulmuştur. Buna ek olarak, algılayıcısız ASM sürücülerde kullanılmak üzere sistem kararlılığını geliştirmek amaçlı önerilen Wang vd. (2020)'de geleneksel UTDG tasarımının aksine, yeni bir geri besleme kazanç seçim prensibi ile kararlılık ve dinamik performansı eş zamanlı şekilde gerçekleştirilmektedir.

GKF ile hız-algılayıcısız olarak gerçekleştirilen çalışmalara bakıldığında, Barut vd. (2005)'de hız-algılayıcısız doğrudan moment kontrol (DMK) sistemi kullanılarak GKF ile stator akımları, rotor akıları ve rotor hızına ilaveten eş zamanlı olarak rotor direnci ve yük momenti kestirilmiştir.

Barut vd. (2012)'de çift girişli GKF ile stator akımları, rotor akıları ve rotor hızına ilaveten eş zamanlı olarak rotor direnci, stator direnci ve yük momenti kestirilmiştir. Bu çalışmada, iki giriş arasındaki anahtarlama sistemi sayesinde tek bir GKF algoritması kullanılarak hafıza gerekliliği azaltılmış, tasarım süresinin kısaltılması sağlanmıştır.

Barut vd. (2012)'de kestirilen durum ve parametrelere ilaveten İnan ve Barut (2014)'te mıknatıslanma indüktansı, Zerdali ve Barut (2016)'da ise eylemsizlik kestirimi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, Demir ve Barut (2018)'de GKF ve aktif güç tabanlı MUS ile stator akımları, stator akıları ve rotor hızına ilaveten eş zamanlı olarak yük momenti, rotor direnci ve stator direnci kestirilmiştir. Ayrıca buradaki kestirimlerden sadece stator direnci aktif güç tabanlı MUS ile kestirilmiştir.

Hız-algılayıcılı çalışmalar incelendiğinde; Demir vd. (2017)'de ASM'nin doğrudan moment kontrolü için stator akım ve akılarına ek olarak rotor ve stator direncinin eş zamanlı olarak kestirimi GKF ile, Demir vd. (2018)'de rotor akısının duran eksen takımı bileşenlerine ilaveten rotor direnci ve mıknatıslanma indüktansının kestirimi indirgenmiş dereceli (İD)-GKF ile, Demir ve Barut (2019)'da ise rotor akısı, stator direnci, rotor direnci ve mıknatıslanma indüktansının eş zamanlı kestirimi İD-GKF ile gerçekleştirilmiştir. Son olarak Yıldız vd. (2020)'de önerilen GKF tabanlı kestirim

algoritması ile herhangi bir anahtarlama işlemi veya hibrit bir yapı gerektirmeksizin tek bir GKF algoritmasında eş zamanlı olarak, stator akımlarının ve rotor akımlarının duran eksen takımı bileşenleri, rotor açısal hızı, viskoz sürtünmeyi de içeren yük momenti, rotor direnci ve mıknatıslama endüktansı kestirimlerini gerçekleştirmiştir.

Bu tez çalışmasında, ASM'lerin hız-algılayıcı/algılayıcısız kontrolünde karşılaşılan güçlüklerin çözümü için, farklı parametre kestirim teknikleri geliştirilerek yüksek kontrol başarımının elde edilmesine yönelik yeni algoritmaların literatüre tanıtılması amaçlanmıştır. Bu amaçla ilk olarak stator akımları, rotor akıları, rotor hızı, yük momenti, rotor direnci ve stator direncinin eş zamanlı kestirimini gerçekleştiren A-GKF algoritması literatüre ilk defa tanıtılmıştır ve AYK sistemi içerisinde doğrulanmıştır. Daha sonra $\psi_{r\alpha}$, $\psi_{r\beta}$, ω_m ve R_r 'nin eş zamanlı kestirimini gerçekleştiren GKF algoritması, MÖMK tabanlı ASM sürücüsü ile test edilmiştir. Ayrıca GKF tarafından kestirilen R_r , MÖMK sistemi içerisine güncellenerek parametre değişimlerinden kaynaklanan bozulmalar azaltılmıştır. Son olarak, hız-algılayıcı aktif-reaktif güç tabanlı MUS ile $\psi_{r\alpha}$, $\psi_{r\beta}$, R_r ve R_s eş zamanlı olarak kestirilmiş ve kestirim algoritması AYK sistemi ile doğrulanmıştır. Önerilen algoritmaların başarımı zorlayıcı koşullar altında benzetimler ile test edilmiştir. Elde edilen benzetim sonuçları, kestirim algoritmalarının yüksek bir başarıma sahip olduğunu göstermektedir.

Bu tez çalışması beş bölümden oluşmaktadır. Bölüm II'de A-GKF'nin tanıtımı ve tasarım aşaması, geleneksel AYK'dan farklı olarak hız kontrol başarımını artırmak amacıyla önerilen iyileştirilmiş hız-algılayıcısız AYK'lı ASM sürücü modeli, benzetim çalışmaları kapsamında gerçekleştirilen senaryolar altındaki parametre kestirimleri, önerilen sistemin kontrol başarımı ve izleme hataları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Önerilen A-GKF tabanlı algoritma kullanılarak rotor akıları, rotor mekanik hızı, yük momenti, stator direnci ve rotor direnci eş zamanlı olarak kestirilmiştir. Bölüm III'te ise GKF algoritması ile kestirimi gerçekleştirilen MÖMK yöntemini kullanan ASM sürücüsü sunulmuştur. Bölüm kapsamında iki seviyeli gerilim kaynaklı evirici sistemi, önerilen GKF gözlemleyicisi, hız-algılayıcısız MÖMK tabanlı ASM sürücüsü tanıtılmıştır. $i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$, $\psi_{r\alpha}$, $\psi_{r\beta}$, ω_m ve R_r 'nin eş zamanlı kestirimi için kullanılan GKF gözlemleyicisi ve MÖMK tabanlı ASM sürücü başarımı benzetim sonuçları üzerinden gözlemlenebilmektedir. Bölüm IV'te ise ASM'lerin MUS kontrolü ile ilgili bir

çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında, literatüre son zamanlarda sunulmuş olan ARG-MUS algoritması kullanılarak özgün motor parametreleri ile algoritma doğruluğu teyit edilmiştir. Klasik MUS sisteminin yapısı ve çalışma prensibine ek olarak, ARG-MUS sisteminin tasarımı hem formülizasyon hem de blok şema üzerinde ilişkilendirilerek detaylı şekilde sunulmuştur. Ayrıca, herhangi bir hibrit ya da anahtarlamalı sistem olmaksızın sadece MUS tabanlı ARG-MUS algoritması kullanılarak duran eksen takımındaki rotor akı bileşenleri, rotor ve stator direnci eş zamanlı olarak kestirilmiştir. Bölüm V, tez kapsamında benzetim ortamında gerçekleştirilmiş algoritmaların katkısını, birbirlerine göre olumlu ve olumsuz yanlarını açık şekilde belirtmektedir. Ayrıca bu bölümde, hangi sistemde hangi parametrelerin sorunsuzca kestirildiği bilgisi de bir arada verilmiştir.

BÖLÜM II

ASENKRON MOTORLARIN İYİLEŞTİRİLMİŞ A-GKF TABANLI VEKTÖR KONTROL YÖNTEMİ İLE PARAMETRE KESTİRİMLERİ

2.1. Giriş

Bu bölümde, hız-algılayıcısız iyileştirilmiş AYK tabanlı ASM sürücüsü tanıtılmıştır ve Altınışik vd. (2021)'de sunulmuştur. ASM'nin yüksek başarılı kontrolünü sağlayabilmek için AYK, DMK ve MÖMK gibi yüksek başarılı kontrol yöntemleri literatüre sunulmuştur. Fakat ASM'lerin doğrusal olmayan matematiksel modeline ek olarak bilinmeyen yük girişleri ve çalışma koşullarıyla değişen parametreleri nedeniyle hız-algılayıcısız kontrolü zorlaşmaktadır. Hız-algılayıcısız vektör kontrol yöntemleri akı ile birlikte rotor hız bilgisine ihtiyaç duymaktadır. Fakat bilinmeyen yük momenti ile frekans ve sıcaklık gibi ASM'nin çalışma şartlarına bağlı olarak rotor ve stator dirençlerinde meydana gelen değişimler, VK için gerekli olan rotor akısı ve rotor hızı kestirimlerinde bozulmalara neden olmaktadır.

ASM'lerin hız-algılayıcısız kontrolü için durum ve parametre kestiriminde kullanılan GKF'ler, ölçme gürültülerini hesaba katarak parametre ve durum kestirim sorununa olası şekilde yaklaşmaktadır. ASM'lerin hız-algılayıcısız kontrollerinde hız kontrol döngüsü üzerinde, tanımlanmamış yük momenti girişlerinin bozucu bir etki oluşturduğu bilinmektedir. Böylesi bir bozucu etkiyi azaltmak için yük momentindeki değişimlerin bilinmesi gerekmektedir.

Bu bölümün ana katkısı, rotor ve stator dirençlerinde oluşan değişimler ile bilinmeyen yük girişlerinden kaynaklı bozulmayı azaltan, kontrol başarımı yüksek, hafıza gereksinimi ve tasarımı iyileştirilmiş, hız-algılayıcısız, AYK tabanlı ASM sürücüsünü literatüre kazandırmaktır. Bu amaçla önerilen A-GKF ile stator akımları, rotor akıları, rotor hızı, yük momenti, rotor direnci ve stator direnci kestirimleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca kestirilen yük momenti kontrol sisteminde hız çevrimine ileri beslenerek kontrol sisteminin başarımı iyileştirilmiştir (Altınışik vd., 2021).

2.2. ASM'nin Matematiksel Modeli

ASM'lerin matematiksel modeli Denklem (2.1a) ve (2.1b)'deki gibi gösterilebilir.

$$\dot{\mathbf{x}}_k = \mathbf{f}(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) + \mathbf{w}_k \quad (2.1a)$$

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{h}(\mathbf{x}_k) + \mathbf{v}_k \quad (2.1b)$$

(2.1a) ve (2.1b) denklemlerinde \mathbf{f} , girişlerin ve durumların doğrusal olmayan fonksiyonu; \mathbf{x}_k durum vektörü; \mathbf{v}_k ve \mathbf{w}_k ise sırası ile ölçüm ve süreç gürültüleri; \mathbf{h} çıkışların fonksiyonu; \mathbf{u}_k kontrol giriş vektörü olarak tanımlanır. Denklem (2.1)'de genel formu verilen ASM modeline ait vektörler aşağıda sıralanmıştır.

$$\mathbf{x}_k = [i_{s\alpha} \quad i_{s\beta} \quad \psi_{r\alpha} \quad \psi_{r\beta} \quad \omega_m]^T \quad (2.2a)$$

$$\mathbf{u}_k = [v_{s\alpha} \quad v_{s\beta}]^T \quad (2.2b)$$

$$\mathbf{h} = [i_{s\alpha} \quad i_{s\beta}]^T \quad (2.2c)$$

$$\mathbf{f} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{R_s}{L_\sigma} + \frac{R_r L_m^2}{L_\sigma L_r^2}\right) i_{s\alpha} + \frac{R_r L_m}{L_\sigma L_r^2} \psi_{r\alpha} + \frac{L_m p_p}{L_\sigma L_r} \omega_m \psi_{r\beta} + \frac{v_{s\alpha}}{L_\sigma} \\ -\left(\frac{R_s}{L_\sigma} + \frac{R_r L_m^2}{L_\sigma L_r^2}\right) i_{s\beta} + \frac{R_r L_m}{L_\sigma L_r^2} \psi_{r\beta} - \frac{L_m p_p}{L_\sigma L_r} \omega_m \psi_{r\alpha} + \frac{v_{s\beta}}{L_\sigma} \\ \frac{R_r L_m}{L_r} i_{s\alpha} - \frac{R_r}{L_r} \psi_{r\alpha} - p_p \omega_m \psi_{r\beta} \\ \frac{R_r L_m}{L_r} i_{s\beta} - \frac{R_r}{L_r} \psi_{r\beta} + p_p \omega_m \psi_{r\alpha} \\ \frac{3p_p L_m}{2J_t L_r} (\psi_{r\alpha} i_{s\beta} - \psi_{r\beta} i_{s\alpha}) - \frac{B_t}{J_t} \omega_m - \frac{\tau_l}{J_t} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Burada $v_{s\alpha}$, $v_{s\beta}$, $i_{s\alpha}$ ve $i_{s\beta}$ stator duran eksen takımındaki stator akım ve gerilimlerinin bileşenlerini; L_r , L_s ve L_m sırasıyla rotor, stator ve mıknatıslanma endüktanslarını; p_p kutup çifti sayısını; ω_m rotor mekanik açısal hızını; σ kaçak faktörünü; $L_\sigma = \sigma L_s = L_s - (L_m^2/L_r)$, stator geçici endüktansını; J_t ASM ve yükün toplamdaki eylemsizliği belirtirken B_t ise toplam viskoz sürtünmeyi ifade etmektedir.

2.3. Anahtarlamalı GKF'nin Tasarımı

GKF ile $i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$, $\psi_{r\alpha}$, $\psi_{r\beta}$, ω_m , τ_l , R_r ve R_s 'nin eş zamanlı olarak kestirimlerini gerçekleştirmek amacıyla gözlemleyicide kullanılan ASM modeli; Denklem (2.1)'de genel formu verilen ASM modeline τ_l ve R_r/R_s 'nin sabit parametre olarak eklenmesiyle oluşturulmuştur. Genişletilmiş ASM modeline ait, gözlemleyicide kullanılan vektörler aşağıda gösterilmiştir.

$$\mathbf{x}_{o,k} = [i_{s\alpha} \quad i_{s\beta} \quad \psi_{r\alpha} \quad \psi_{r\beta} \quad \omega_m \quad \tau_l \quad R_r/R_s]^T \quad (2.4a)$$

$$\mathbf{h}_o = [i_{s\alpha} \quad i_{s\beta}]^T \quad (2.4b)$$

$$\mathbf{u}_{o,k} = [v_{s\alpha} \quad v_{s\beta}]^T \quad (2.4c)$$

$$\mathbf{f}_o = \begin{bmatrix} -\left(\frac{R_s}{L_\sigma} + \frac{R_r L_m^2}{L_\sigma L_r^2}\right) i_{s\alpha} + \frac{R_r L_m}{L_\sigma L_r^2} \psi_{r\alpha} + \frac{L_m p_p}{L_\sigma L_r} \omega_m \psi_{r\beta} + \frac{v_{s\alpha}}{L_\sigma} \\ -\left(\frac{R_s}{L_\sigma} + \frac{R_r L_m^2}{L_\sigma L_r^2}\right) i_{s\beta} + \frac{R_r L_m}{L_\sigma L_r^2} \psi_{r\beta} - \frac{L_m p_p}{L_\sigma L_r} \omega_m \psi_{r\alpha} + \frac{v_{s\beta}}{L_\sigma} \\ \frac{R_r L_m}{L_r} i_{s\alpha} - \frac{R_r}{L_r} \psi_{r\alpha} - p_p \omega_m \psi_{r\beta} \\ \frac{R_r L_m}{L_r} i_{s\beta} - \frac{R_r}{L_r} \psi_{r\beta} + p_p \omega_m \psi_{r\alpha} \\ \frac{3p_p L_m}{2J_t L_r} (\psi_{r\alpha} i_{s\beta} - \psi_{r\beta} i_{s\alpha}) - \frac{\tau_l}{J_t} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Gözlemleyici tarafından kullanılan ayrık zamanlı ASM modeli, Denklem (2.6)'da verilmiş olan ileri Euler yönteminin uygulanması ile Denklem (2.7)'deki gibi ifade edilebilir:

$$\dot{\mathbf{x}}_k \approx \frac{x_{k+1} - x_k}{T} \quad (2.6)$$

$$\mathbf{x}_{o,k+1} = \mathbf{I}_{7 \times 7} \times \mathbf{x}_{o,k} + T \times \mathbf{f}_o \quad (2.7)$$

Burada \mathbf{I} birim matris ve T ise örnekleme zamanıdır.

$i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$, $\psi_{r\alpha}$, $\psi_{r\beta}$, ω_m , τ_l , R_r ve R_s 'yi eş zamanlı olarak kestirebilen GKF algoritmasına ait geleneksel denklemler aşağıdaki gibi verilebilir:

- Doğrusallaştırma adımı

$$\mathbf{F}_{k+1|k} = \frac{\partial f(x, u)}{\partial x} \Big|_{x=\hat{x}_{k+1}} \quad (2.8)$$

- Kestirim veya zaman güncelleme adımı

$$\hat{x}_{k+1}^- = f(\hat{x}_k, u_{k+1}) \quad (2.9)$$

$$\mathbf{P}_{k+1}^- = \mathbf{F}_{k+1} \mathbf{P}_k \mathbf{F}_{k+1}^T + \mathbf{Q} \quad (2.10)$$

- Ölçüm veya düzeltme güncelleme adımı

$$\mathbf{K}_{k+1} = \mathbf{P}_{k+1}^- \mathbf{H}_{k+1}^T [\mathbf{H}_{k+1} \mathbf{P}_{k+1}^- \mathbf{H}_{k+1}^T + \mathbf{R}]^{-1} \quad (2.11)$$

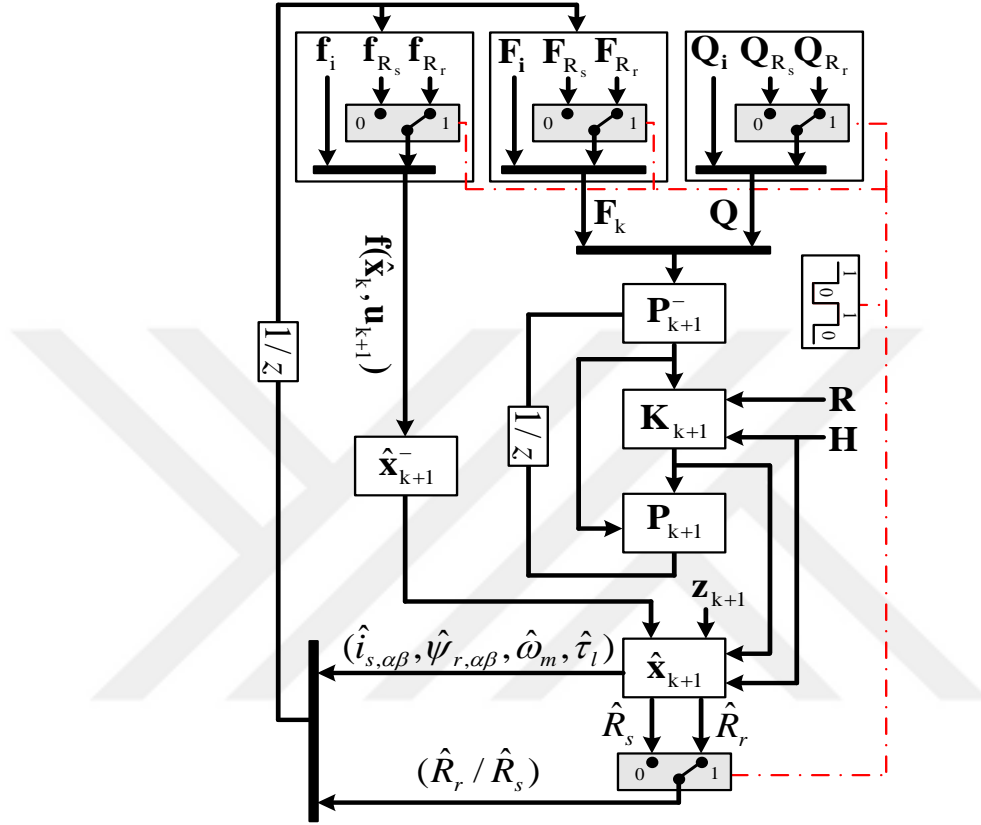
$$\hat{x}_{k+1} = \hat{x}_{k+1}^- + \mathbf{K}_{k+1} (z_{k+1} - \mathbf{H}_{k+1} \hat{x}_{k+1}^-) \quad (2.12)$$

$$\mathbf{P}_{k+1} = \mathbf{P}_{k+1}^- - \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{H}_{k+1} \mathbf{P}_{k+1}^- \quad (2.13)$$

Burada " $\mathbf{F}_{k+1|k}$ " lineer olmayan modeli doğrusallaştırmak için kullanılan fonksiyonu; " \mathbf{P}_{k+1}^- " ve " \mathbf{P}_{k+1} " hata kovaryans matrisinin sırasıyla önceki ve sonraki değerlerini; " \mathbf{Q} " sistem gürültüsünün kovaryans matrisini; " \mathbf{K}_{k+1} " Kalman kazancını; " \mathbf{R} " ise çıkış gürültüsünün kovaryans matrisini belirtmektedir.

Genel şeması Şekil 2.1.'de verilen, durum ve parametre kestiriminde kullanılan, tasarım aşaması ve hafıza gereksinimi iyileştirilmiş A-GKF algoritması, Denklem (2.8)-(2.13) ile verilen ifadeler göz önünde bulundurularak aşağıdaki yorumlar altında tasarlanmıştır:

- *Yorum I:* Denklem (2.9)-(2.13) A-GKF'nin kestirim ve düzeltme adımlarını oluşturur.
- *Yorum II:* Denklem (2.9)-(2.13)'te \mathbf{f} , \mathbf{F} ve \mathbf{Q} matrislerinde sadece R_r ve R_s 'ye bağlı olarak üretilen girişler anahtarlanmaktadır.



Şekil 2.1. Önerilen iyileştirilmiş A-GKF algoritmasının blok şeması

Şekil 2.1'deki A-GKF algoritması, $i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$, $\psi_{r\alpha}$, $\psi_{r\beta}$, ω_m , τ_l , R_r ve R_s 'nin eş zamanlı kestirimini tek bir ASM modelinde R_r ve R_s 'ye bağlı olarak türetilen girişlerin sıralı olarak anahtarlanması ile gerçekleştirmektedir. Önerilen A-GKF algoritmasında her bir anahtarlama periyodunda $i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$, $\psi_{r\alpha}$, $\psi_{r\beta}$, ω_m ve τ_l kestirilirken R_r ve R_s 'den yalnızca birisi kestirilmektedir. R_r veya R_s 'nin kestirilmiş değeri diğer direnç kestiriminin yapıldığı çalışma periyodunda A-GKF algoritmasının girişinde sabit parametre olarak kullanılmaktadır. Bu yönü ile önerilen A-GKF algoritması, aynı durum ve parametreleri iki GKF'nin anahtarlama çalıştırılmasıyla kestiren Barut vd. (2007) ve Barut vd. (2008) ile ve iki ASM modelini tek bir GKF'nin girişinde anahtarlama çalıştırarak kestiren Barut vd. (2012) ile karşılaştırıldığında daha az hafıza gereksinimine ve iyileştirilmiş tasarım sürecine sahiptir.

Çizelge 2.1. A-GKF için ASM'nin parametre ve anma değerleri (Barut vd., 2005)

P [kW]	3	p_p	2
f [Hz]	50	R_s [Ω]	2.283
V [V]	380	R_r [Ω]	2.133
I [A]	6.9	L_s [H]	0.2311
n_m [dev/dk]	1430	L_r [H]	0.2311
τ_l [N.m]	20	L_m [H]	0.22

Önerilen A-GKF algoritmasının başarımı hata kovaryans matrisi \mathbf{P}_0 'ın başlangıç değerleri ile gürültü kovaryans matrisleri \mathbf{Q} ve \mathbf{R} 'den etkilenmektedir. Bu matrislerin değerleri deneme yanılma yöntemi ile belirlenmiş ve aşağıda verilmiştir:

$$\mathbf{Q} = \text{diag}\{10^{-5} \ 10^{-5} \ 10^{-9} \ 10^{-9} \ 10^{-5} \ 10^{-2} \ 10^{-3}/10^{-3}\}$$

$$\mathbf{R} = \text{diag}\{10^{-6} \ 10^{-6}\}$$

$$\mathbf{P}_0 = \text{diag}\{10 \ 10 \ 10 \ 10 \ 10 \ 10 \ 10/10\}$$

Tasarlanan AYK tabanlı ASM sürücüsünün başarımı farklı hız bölgelerinde yük momenti, rotor ve stator dirençlerinde meydana getirilen değişimler ile test edilmiştir. Yük momentinin ileri beslemeli kontrolünün (İBK'nın) yapıldığı iyileştirilmiş sürücü sistemi ile İBK'nın yapılmadığı geleneksel sürücü sistemi karşılaştırılmıştır. Her iki sürücü sistemi için aşağıdaki senaryolar üretilmiştir.

- Sıfır hız bölgesinde gerçekleştirilen stator direnci, rotor direnci ve yük momenti değişimleri altında sürücülerin başarımı.
- Anma hız bölgesinde de sıfır hızdaki değişimler altında sürücülerin başarımı.
- Geniş bir hız aralığında önerilen AYK tabanlı sürücünün başarımı.

Geleneksel ve iyileştirilmiş ASM sürücülerinden sıfır hız ve anma hızı bölgeleri için elde edilen karşılaştırmalı benzetim sonuçları Şekil 2.3-2.6'da, geniş bir hız aralığında doğrulanan yük momentinin ileri beslemeli kontrolü ile iyileştirilmiş ASM sürücüsünden elde edilen sonuçlar ise Şekil 2.7'de verilmiştir. Şekil 2.3, 2.5 ve 2.7'de “ m ” ve “ ref ” üst indisleri sırasıyla ölçülen büyüklüğü ve referans değişimlerini, “ $\hat{\ast}$ ”

A-GKF tarafından kestirilen parametre ve durumları, Şekil 2.4, 2.6 ve 2.7’de ise “ $e_{(*)}$ ” kestirilen parametre ve durumlar ile referanslar arasındaki hatayı göstermektedir.

2.5.1. Senaryo I: Sıfır hız bölgesinde gerçekleştirilen stator direnci, rotor direnci ve yük momenti değişimleri altında sürücülerin başarımı

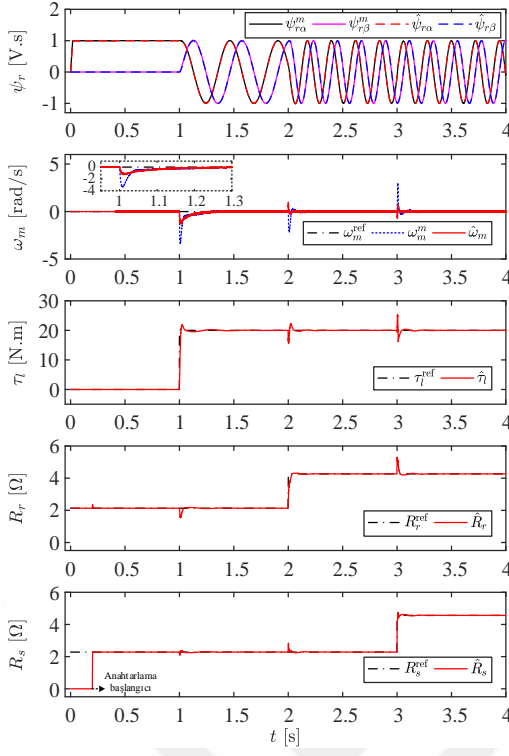
Bu senaryoda kestirilen yük momentinin hız çevrimine dahil edildiği önerilen ASM sürücüsünün başarımı, sıfır hızda stator direnci, rotor direnci ve yük momenti değişimleri ile doğrulanmıştır ve kestirilen yük momentinin hız döngüsüne dahil edilmediği geleneksel AYK tabanlı sürücü ile kıyaslanmıştır. Bu amaçla, ASM sıfır hızda yüksüz bir şekilde çalışırken yük momenti $t=1s$ ’de anma değerine, rotor ve stator dirençleri sırasıyla $t=2s$ ’de ve $t=3s$ ’de anma değerlerinin iki katına çıkarılmıştır. Her bir sürücü sisteminin benzetim sonuçları Şekil 2.3 ve 2.4’te gösterilmiştir. Sürücülerin her ikisi de stator direnci, rotor direnci ve yük momentinde oluşturulan değişimlerin üstesinden gelse de; önerilen sürücü sistemi için yük momentinde meydana getirilen basamak değişim ile oluşan ω_m ’deki geçici durum klasik AYK tabanlı sürücü sistemi ile karşılaştırıldığında %90 oranında daha kısadır. Çizelge 2.2’de ise Şekil 2.3 (a) ve (b)’ye ilişkin ω_m ’in ortalama kareler hatası (OKH) verilmiştir.

Çizelge 2.2. Şekil 2.3 için ω_m ’in OKH’leri

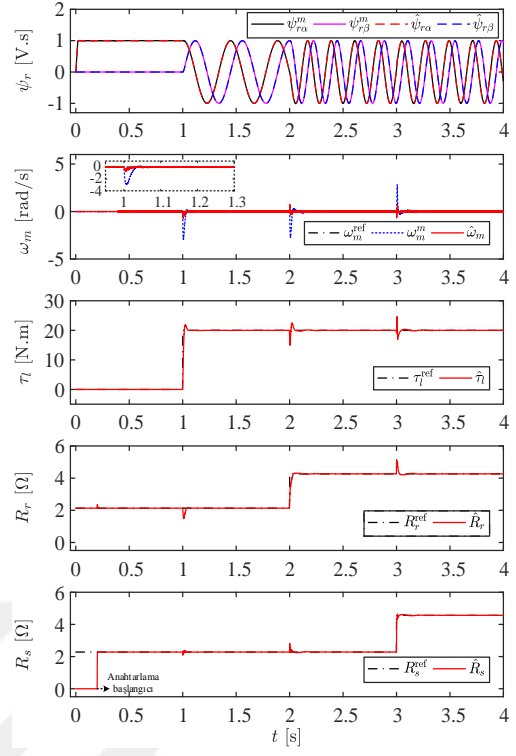
	e_{ω_m}
Şekil 2.3 (a)	0.0186
Şekil 2.3 (b)	0.0028

2.5.2. Senaryo II: Anma hız bölgesinde gerçekleştirilen stator direnci, rotor direnci ve yük momenti değişimleri altında sürücülerin başarımı

Bu senaryoda kestirilen yük momentinin hız çevrimine dahil edildiği önerilen ASM sürücüsünün başarımı, anma hızında stator direnci, rotor direnci ve yük momenti değişimleri ile doğrulanmıştır ve klasik AYK tabanlı sürücü ile kıyaslanmıştır. Her bir sürücü sisteminin benzetim sonuçları Şekil 2.5 ve 2.6’da gösterilmiştir. Senaryo I’e benzer şekilde önerilen ASM sürücüsünde yük momentinin değişimi ile oluşan geçici durum, klasik AYK tabanlı ASM sürücüsüne göre daha kısadır.

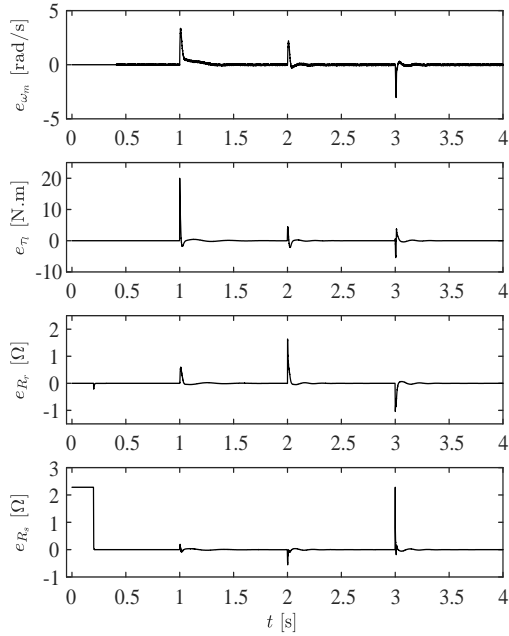


a

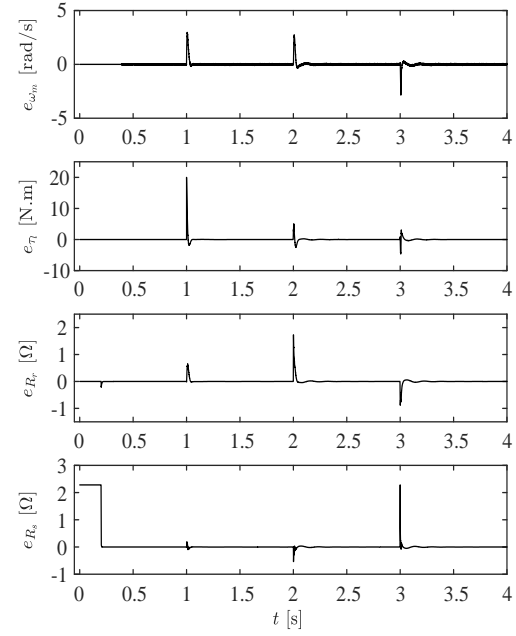


b

Şekil 2.3. Sıfır hızdaki ASM sürücü kontrolü ve A-GKF kestirim performansı; İBK'sız AYK (a) ve İBK'lı AYK (b)

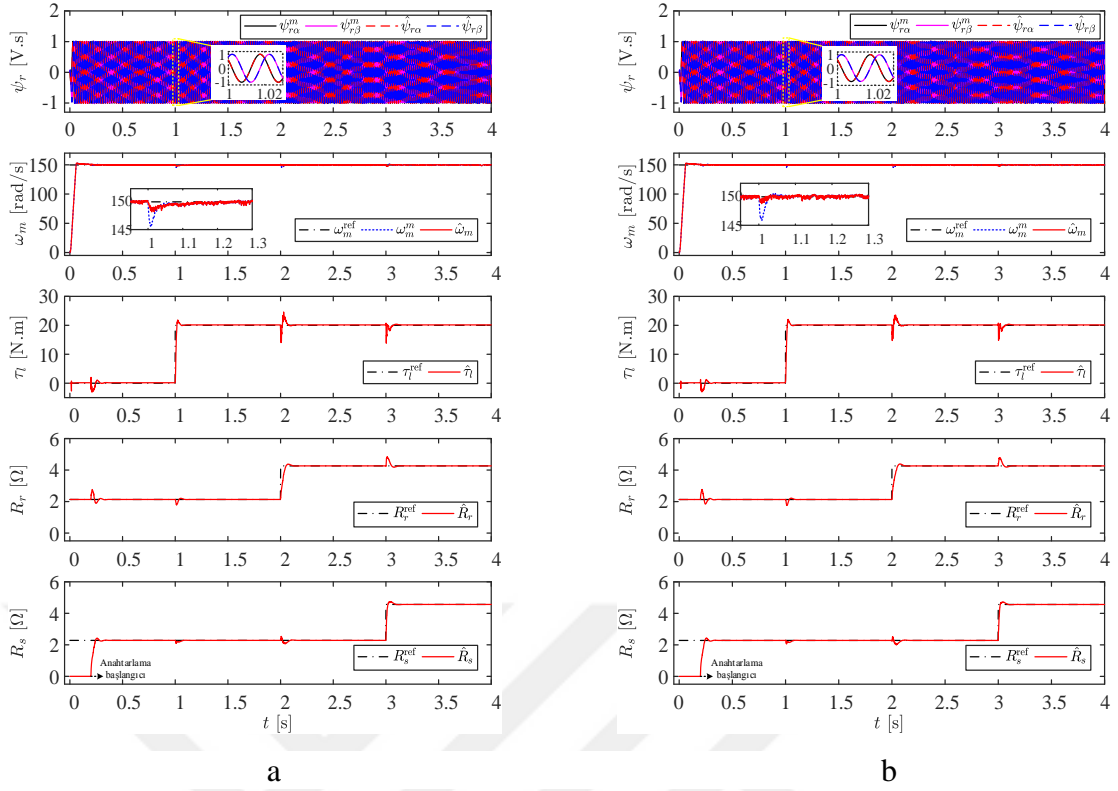


a

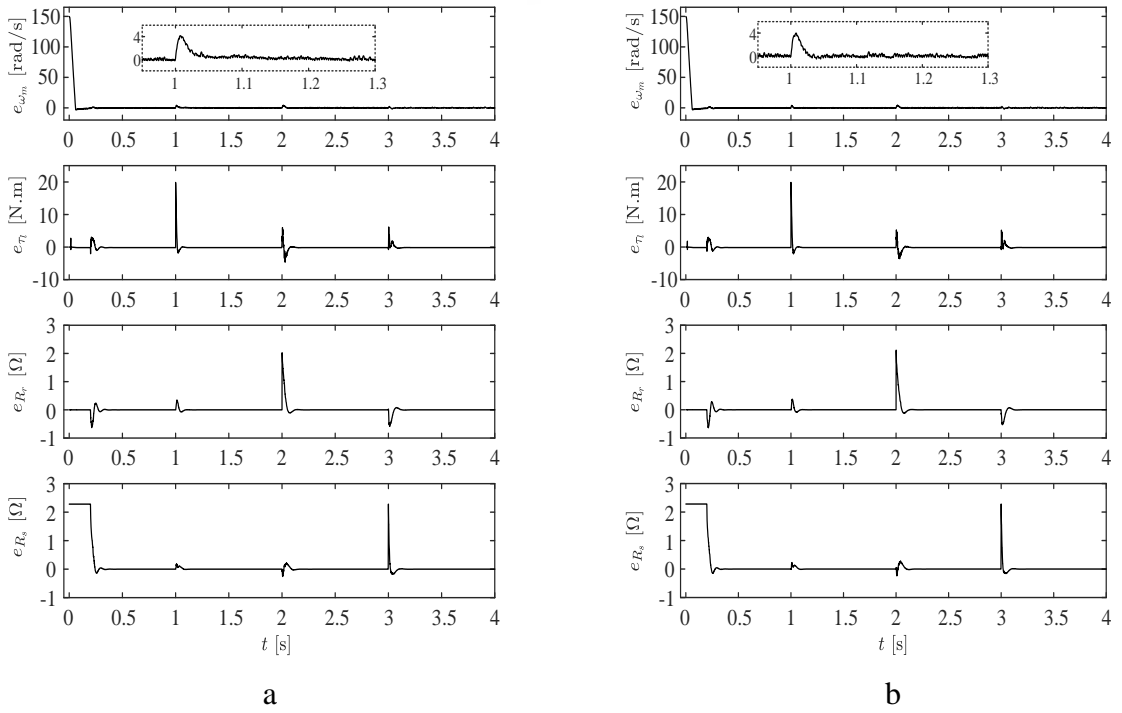


b

Şekil 2.4. Sıfır hızdaki ASM sürücüsü ve A-GKF için kestirim ve izleme hataları; İBK'sız AYK (a) ve İBK'lı AYK (b)



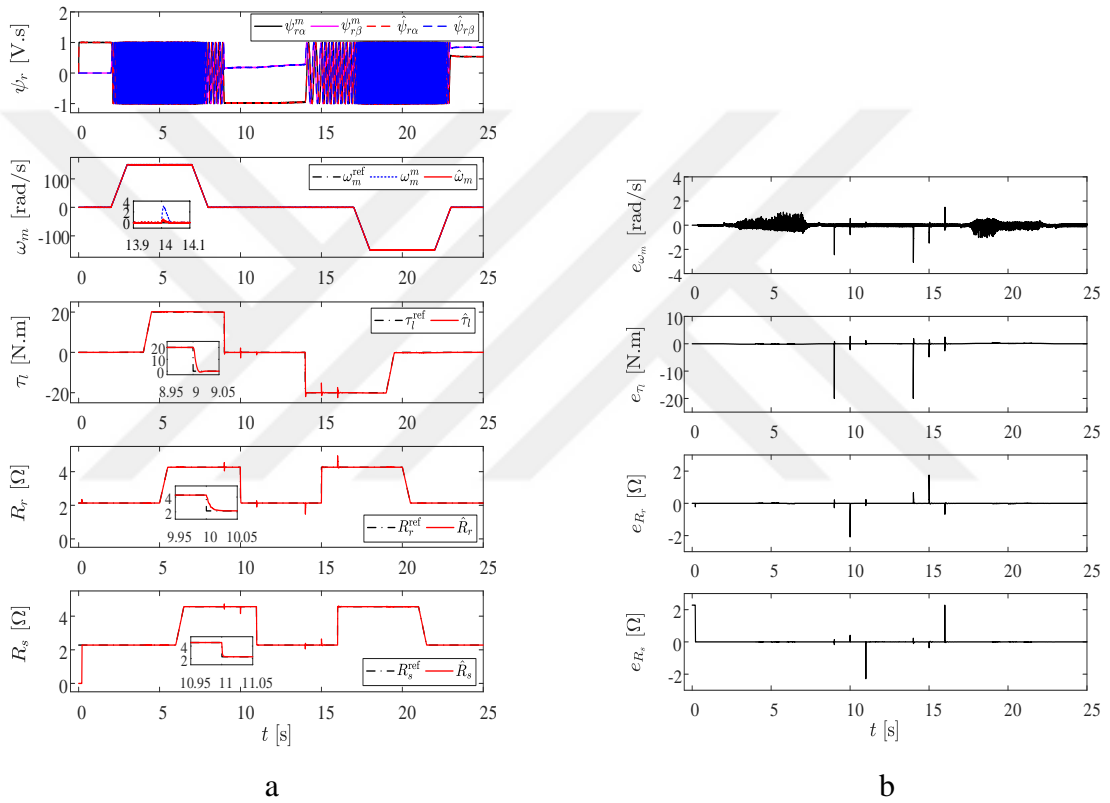
Şekil 2.5. Anma hızında ASM sürücü kontrolü ve A-GKF için kestirim performansı; İBK'sız AYK (a) ve İBK'lı AYK (b)



Şekil 2.6. Anma hızında ASM sürücü kontrolü ile A-GKF kestirim ve izleme hataları; İBK'sız AYK (a) ve İBK'lı AYK (b)

2.5.3. Senaryo III: Geniş bir hız aralığında önerilen AYK tabanlı sürücünün başarımı

Hız-algılayıcısız İBK'lı AYK tabanlı iyileştirilmiş ASM sürücüsünün başarımı, anma hızı, sıfır hız ve hız terslendirmelerini kapsayan geniş bir hız aralığında doğrusal ve/veya basamak biçiminde türetilen stator direnci, rotor direnci ve yük momenti değişimleri ile test edilmiştir. Bu senaryoya ilişkin benzetim sonuçları Şekil 2.7'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlar, İBK ile iyileştirilmiş ASM sürücüsünün yüksek başarılı olduğunu göstermektedir.



Şekil 2.7. İBK'lı AYK tabanlı ASM sürücüsünün kontrol performansı; kontrol ve kestirim performansı (a) ve izleme ve kestirim hataları (b)

Benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar (Şekil 2.3-2.7) bu çalışmada önerilen A-GKF gözlemleyicisinin ve τ_l 'nin hız çevrimine İBK'sı ile iyileştirilen ASM sürücüsünün başarımını onaylamaktadır. Ayrıca Şekil 2.7, ASM'ler için parametre ve durum kestiriminde en kötü senaryo olarak tanımlanan doğru akım (DA) koşulunu ($9s \leq t \leq 14s$) içermektedir. Bu en kötü senaryoya rağmen A-GKF algoritmasının kestirim başarımı ve bu algoritmayı kullanan iyileştirilmiş AYK tabanlı ASM sürücüsünün kontrol başarımı oldukça yüksektir.

2.6. Sonuç ve Değerlendirme

Bu bölümde tasarım süreci iyileştirilmiş ve hafıza gereksinimi azaltılmış A-GKF gözlemleyicisi ve bu gözlemleyiciyi kullanan İBK'lı AYK tabanlı ASM sürücüsü literatüre tanıtılmıştır. Ölçülen stator gerilim ve akımlarını kullanan A-GKF ile hız-algılayıcısız AYK için gerekli olan rotor hızı ve akılarıyla birlikte rotor direnci, stator direnci ve yük momenti kestirilmiştir. Kestirilen parametrelerden yük momenti AYK sisteminde hız çevrimine ileri beslenmiştir. Böylece kontrol sisteminde ve kestirim algoritmasında rotor ve stator direnç değişimleri ile bilinmeyen yük momentinden kaynaklanan bozulmalar azaltılmıştır. Önerilen hız-algılayıcısız ASM sürücüsü, zorlu koşulları içeren senaryolar ile benzetim ortamında test edilmiştir ve AYK tabanlı ASM sürücü sisteminin yüksek başarılı olduğu doğrulanmıştır.

BÖLÜM III

ASENKRON MOTORLARIN GKF TABANLI MODEL ÖNGÖRÜLÜ MOMENT KONTROLÜ

3.1. Giriş

Model öngörülü kontrol (MÖK), AYK ve DMK'ya kıyasla sunduğu üstünlükler nedeniyle elektrik motor sürücü sistemleri ve güç elektroniği konularında çalışan araştırmacılar tarafından ilgi görmektedir (Türker vd., 2018).

Model öngörülü moment kontrolü (MÖMK), MÖK'lerin bir türüdür. MÖMK'nin ana çıkış noktası evirici ve motorun belirgin modelinin kullanılması ile öngörülen elektromanyetik momenti ve stator akısını içeren maliyet fonksiyonunu eniyileyen gerilim vektörünün belirlenmesine dayanmaktadır. MÖMK uygulanmasının basit olması, kolay anlaşılması, kısıtlamaların dahil edilebilmesi ve çok değişkenli doğrusal olmayan sistemleri ele alabilmesi gibi üstünlüklere sahiptir. Bununla birlikte, fazla işlem yükü bu yöntemin olumsuz yönü olarak değerlendirilebilir. Ancak, günümüzde gelişen mikro işlemci mimarisi ile bu olumsuzluğun üstesinden gelinmiştir.

Hız-algılayıcısız MÖMK'de, ASM'nin rotor hızı ile birlikte stator/rotor akılarının kestirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak frekans ve sıcaklık gibi ASM'nin çalışma koşulları ile rotor ve stator dirençlerinde meydana gelen değişimler bu kestirimlerde bozulmalara neden olmaktadır.

Hız-algılayıcısız olarak gerçekleştirilen ASM sürücülerinde parametre ve durum kestirimi için GKF gözlemleyicilerin kullanıldığı çalışmalar incelendiğinde; kontrol sistemleri için gerekli olan hız ve akı bilgilerine ek olarak stator ve rotor direnci kestirimi (Altınışık vd., 2021)'de anahtarlamalı GKF gözlemleyicisi ile, (Demir & Barut, 2018)'de ise GKF ve MUS'un paralel çalıştırılmasıyla kestirilmiştir. MÖMK yönteminin zamanla değişen parametrelerden kaynaklı kontrol başarımında meydana gelen bozulmaları önlemek için gerçekleştirilen çalışmalar literatürde mevcuttur (Yan vd., 2019; Zerdali vd., 2020). Zerdali vd. (2020)'de yük girişi ve stator direnci değişimlerinden kaynaklanan bozulmalar uyarlamalı GKF gözlemleyicisi tarafından

kestirilen yük momentinin hız çevrimi içerisine, stator direncinin ise MÖMK sistemine güncellenmesi ile iyileştirilmiştir.

Bu çalışmanın temel katkısı rotor direnci değişimlerine karşı başarımı iyileştirilmiş hız- algılayıcısız MÖMK tabanlı sürücü sistemini literatüre tanıtmaktır. Bu amaçla hız- algılayıcısız MÖMK sistemi için gerekli olan akı ve hız bilgisine ek olarak rotor direncinin kestirimi eş zamanlı olarak GKF gözlemleyicisi ile gerçekleştirilmiştir. GKF gözlemleyicisinde kestirilen rotor hızı ve rotor direnci sabit parametre olarak göz önünde bulundurulmuştur. Kestirilen rotor direnci MÖMK tabanlı sürücü sistemi içerisine her bir örnekleme adımında güncellenmiş ve böylece sürücü sisteminin başarımı çalışma koşulları nedeniyle rotor direncinde meydana gelebilecek değişimlere karşı iyileştirilmiştir. MÖMK tabanlı sürücü sistemi rotor direnci ve yük momentinde meydana getirilen değişiklikler ile üretilen zorlayıcı senaryolar altında geniş bir hız aralığı için benzetim çalışmaları ile test edilmiş ve doğrulanmıştır. Benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar, MÖMK tabanlı sürücü sisteminin yüksek kontrol başarımına, GKF gözlemleyicisinin ise yüksek kestirim başarımına sahip olduğunu göstermektedir (Altınışık ve Demir, 2021).

3.2. 2L-VSI

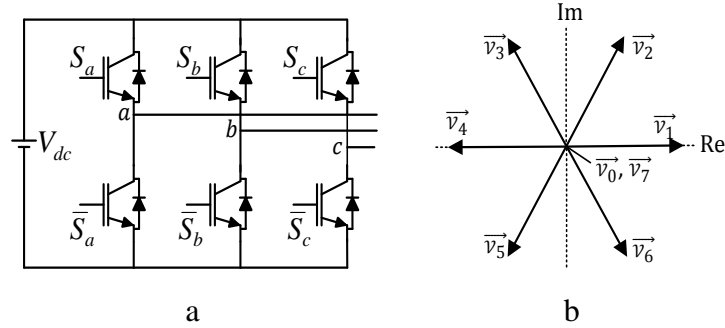
Modeli Denklem (2) ile verilen ASM, Şekil 3.2a'da gösterilen 2L-VSI tarafından beslenir ve 2L-VSI'nin anahtarlama durumu \vec{S} ise aşağıda sunulmuştur:

$$\vec{S} = \frac{2}{3}(S_a + \vec{a}S_b + \vec{a}^2S_c) \quad (3.1)$$

burada $\vec{a} \triangleq e^{j2\pi/3}$ ve $S_x \in \{S_a, S_b, S_c\}$ her bir koldaki anahtarların AÇIK/KAPALI durumlarını gösterir. İnverter çıkış gerilimi \vec{v}_s , anahtarlama durumu \vec{S} kullanılarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\vec{v}_s = V_{dc}\vec{S} \quad (3.2)$$

burada V_{dc} , dc-bağlantı gerilimidir. 2L-VSI dikkate alındığında, Denklem (3.2) sekiz anahtarlama durumu için sonlu kontrol kümeleri adı verilen yedi farklı gerilim vektörünü verir. Bu gerilim vektörleri Şekil 3.2b'de görülebilir:



Şekil 3.2. İki seviyeli gerilim kaynaklı evirici (a) ve gerilim vektörleri (b)

3.3. GKF Gözlemleyicisi

$i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$, $\psi_{r\alpha}$, $\psi_{r\beta}$, ω_m , ve R_r 'nin eş zamanlı kestirimi için GKF gözlemleyicisinde kullanılan motor modeli; Denklem (2)'de genel formu verilen ASM modelinin ω_m ve R_r ile genişletilmesi ile elde edilmiştir. Elde edilen gözlemleyici modelinde ω_m ve R_r kestirilecek sabit parametre olarak dikkate alınmıştır. Gözlemleyicide kullanılan genişletilmiş motor modelindeki vektörler aşağıda sunulmuştur:

$$\mathbf{x}_{o,t} = [i_{s\alpha} \quad i_{s\beta} \quad \psi_{r\alpha} \quad \psi_{r\beta} \quad \omega_m \quad R_r]^T \quad (3.3)$$

$$\mathbf{u}_{o,k} = [v_{s\alpha} \quad v_{s\beta}]^T, \quad \mathbf{h}_o = [i_{s\alpha} \quad i_{s\beta}]^T \quad (3.4)$$

$$\mathbf{f}_o = \begin{bmatrix} -\left(\frac{R_s}{L_\sigma} + \frac{R_r L_m^2}{L_\sigma L_r^2}\right) i_{s\alpha} + \frac{R_r L_m}{L_\sigma L_r^2} \psi_{r\alpha} + \frac{L_m p_p}{L_\sigma L_r} \omega_m \psi_{r\beta} + \frac{v_{s\alpha}}{L_\sigma} \\ -\left(\frac{R_s}{L_\sigma} + \frac{R_r L_m^2}{L_\sigma L_r^2}\right) i_{s\beta} + \frac{R_r L_m}{L_\sigma L_r^2} \psi_{r\beta} - \frac{L_m p_p}{L_\sigma L_r} \omega_m \psi_{r\alpha} + \frac{v_{s\beta}}{L_\sigma} \\ \frac{R_r L_m}{L_r} i_{s\alpha} - \frac{R_r}{L_r} \psi_{r\alpha} - p_p \omega_m \psi_{r\beta} \\ \frac{R_r L_m}{L_r} i_{s\beta} - \frac{R_r}{L_r} \psi_{r\beta} + p_p \omega_m \psi_{r\alpha} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$\vec{\psi}_{s,k+1}^p = \vec{\psi}_{s,k} + T\vec{v}_{s,k}^{(j)} + TR_s\vec{i}_{s,k} \quad (3.7)$$

$$\vec{i}_{s,k+1}^p = \left(1 - \frac{T}{\hat{T}_{\sigma,k}}\right)\vec{i}_{s,k} + \frac{T}{L_\sigma} \left(\left(\frac{k_r}{T_r} - k_r j \omega_{r,k} \right) \vec{\psi}_{r,k} + \vec{v}_{s,k}^{(j)} \right) \quad (3.8)$$

Burada $j \in \{0, 1, \dots, 7\}$, $\hat{T}_{\sigma,k} = L_\sigma / \hat{R}_{\sigma,k}$, $\hat{R}_{\sigma,k} = R_s + k_r^2 \hat{R}_{r,k}$ ve $k_r = L_m / L_r$ 'dir. Öngörülen $\vec{\psi}_{s,k+1}^p$ ve $\vec{i}_{s,k+1}^p$ kullanılarak elde edilen elektromanyetik moment aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\tau_{e,k+1}^p = \frac{3}{2} p_p \Im m \left\{ (\vec{i}_{s,k+1}^p) (\vec{\psi}_{s,k+1}^p)^* \right\} \quad (3.9)$$

Şekil 3.4'de verilen "maliyet fonksiyonunun eniyilenmesi" bloğunda en uygun evirici anahtarlama işaretlerinin seçilebilmesi için Denklem (3.10) ile verilen maliyet fonksiyonu kullanılmaktadır.

$$g = \sum_{h=1}^N \left\{ |\tau_e^* - \tau_{e,k+h}^p| + \lambda \left| |\vec{\psi}_s^*| - |\vec{\psi}_{s,k+h}^p| \right| + I_{m,k+h} \right\} \quad (3.10)$$

Burada N tahmin ufkudur ve $N=1$ olarak seçilmiştir. λ akı hatasının ağırlık faktörü, I_m aşırı akım koruma terimidir. I_m aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

$$I_{m,k+h} = \begin{cases} 0, & \text{eğer } |\vec{i}_{s,k+1}^p| \leq i_{s,max} \\ \infty, & \text{eğer } |\vec{i}_{s,k+1}^p| > i_{s,max} \end{cases} \quad (3.11)$$

Burada $i_{s,max}$ stator akımının maksimum genliğidir.

3.5. Benzetim Çalışmaları

Bu çalışmada önerilen MÖMK tabanlı sürücü sistemi MATLAB/Simulink'te tasarlanmış ve doğrulanmıştır. Benzetim çalışmalarında kullanılan ASM'ye ait anma değerleri ve parametreler Çizelge 2.1'de sunulmuştur. Benzetim çalışmalarında örnekleme zamanı (T), 25 μ s olarak belirlenmiştir. Ayrıca, GKF gözlemleyicisi tarafından kestirilen durum ve parametreler sıfır başlangıç değerine sahiptir. GKF

gözlemleyicisinin kestirim başarımını buna bağlı olarak MÖMK tabanlı sürücünün kontrol başarımını etkileyen hata kovaryans matrisinin (\mathbf{P}_0 'ın) başlangıç değerleri ve gürültü kovaryans matrisleri (\mathbf{Q} ve \mathbf{R}) deneme yanılma yöntemi ile aşağıdaki gibi belirlenmiştir:

$$\mathbf{Q} = \text{diag}\{10^{-5} \ 10^{-5} \ 10^{-9} \ 10^{-9} \ 10^{-5} \ 10^{-2} \}$$

$$\mathbf{R} = \text{diag}\{10^{-6} \ 10^{-6}\}$$

$$\mathbf{P}_0 = \text{diag}\{10 \ 10 \ 10 \ 10 \ 10 \ 10 \}$$

Önerilen GKF gözlemleyici tabanlı hız-algılayıcısız MÖMK'li ASM sürücü sistemi aşağıdaki senaryolar altında test edilmiş ve doğrulanmıştır:

- Rotor direnci değişimleri altında MÖMK tabanlı sürücünün başarımı.
- Geniş bir hız aralığında farklı yük momentleri altında MÖMK tabanlı sürücünün başarımı.

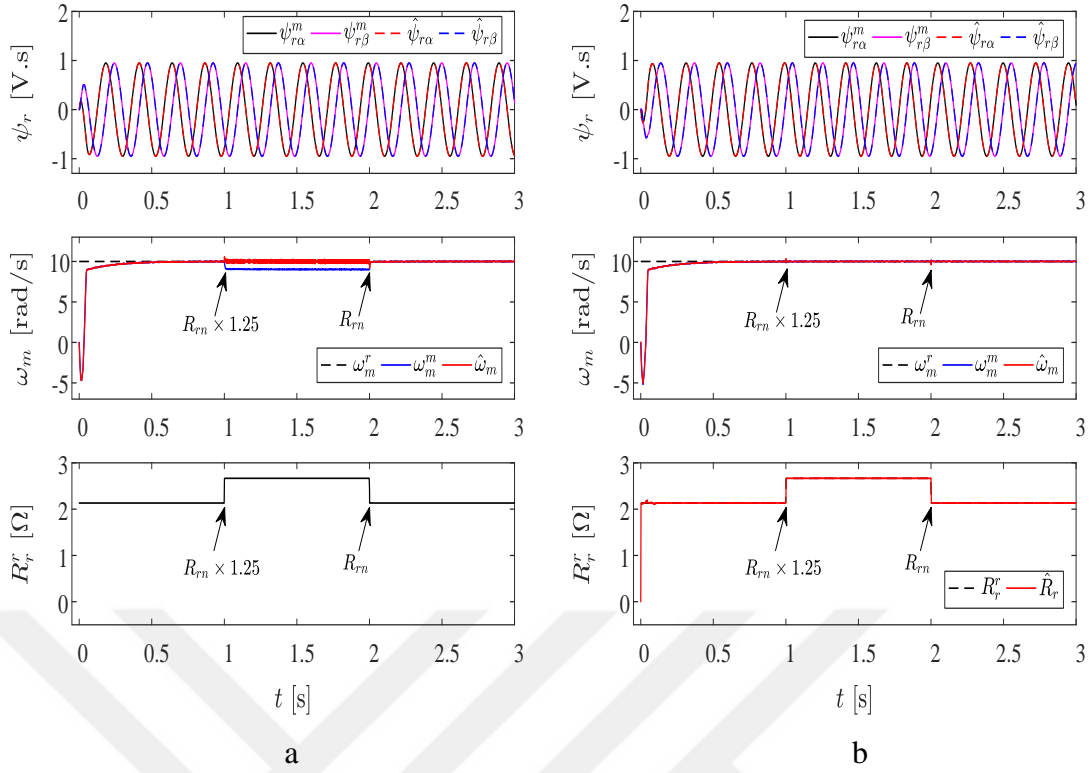
Benzetim çalışmalarında verilen bütün şekillerde $(\cdot)^r$ referans değişimleri, $(\cdot)^m$ ölçülen durumları ve $(\hat{\cdot})$ kestirilen durumları göstermektedir.

3.5.1. Senaryo I

Bu senaryoda, motor 10 rad/s 'lik hız ile 10 N.m 'lik yük altında dönerken rotor direnci $t = 1. \text{s}$ 'de anma değeri R_{rn} 'den, $R_{rn} \times 1.25$ değerine basamak şeklinde artırılmıştır. Daha sonra $t = 2. \text{s}$ 'de $R_{rn} \times 1.25$ değerinden anma değeri R_{rn} değerine azaltılmıştır. Bu çalışma şartları için rotor direncinin kestirildiği ve kestirilmediği iki farklı GKF gözlemleyicisi tabanlı MÖMK sürücüsünden elde edilen sonuçlar Şekil 3.5 (a) ve Şekil 3.5 (b)'de sunulmuştur. Çizelge 3.1'de ise Şekil 3.5 için ω_m 'in OKH'leri verilmiştir.

Çizelge 3.1. Şekil 3.5 için ω_m 'in OKH'leri

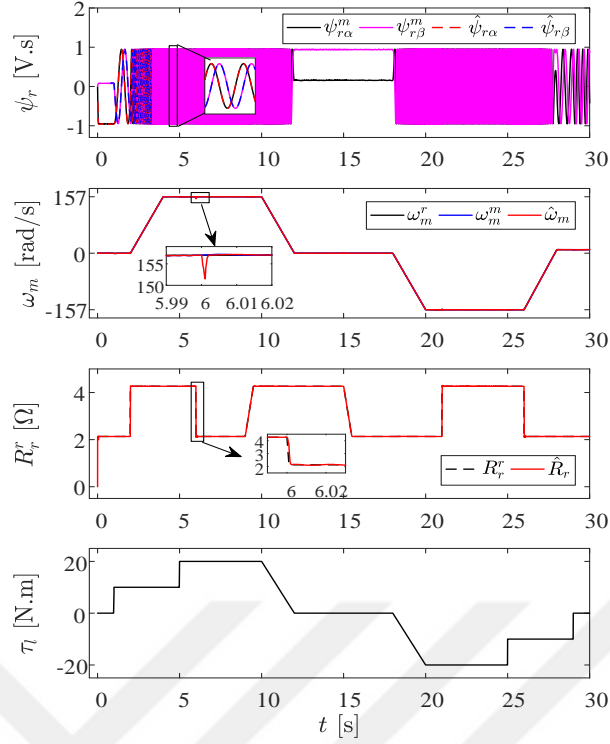
	e_{ω_m}
Şekil 3.5 (a)	2.4806
Şekil 3.5 (b)	2.2323



Şekil 3.5. Senaryo I için benzetim sonuçları; rotor direnci kestirimi olmadan (a) ve rotor direnci kestirimi ile (b)

3.5.2. Senaryo II

Bu senaryoda, MÖMK tabanlı ASM sürücüsü, farklı yük momenti değerleri ile basamak ve doğrusal bir şekilde değiştirilen rotor direnci değişimleri altında hız terslendirmelerini de içeren geniş bir hız bölgesinde (sıfır hız ile anma hızı aralığında) test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 3.6.'da sunulmuştur. Şekil 3.5 ve 3.6.'da sunulan sonuçlar önerilen MÖMK tabanlı sürücü sisteminin yüksek bir hız kontrol başarımına sahip olduğunu onaylamaktadır.



Şekil 3.6. Senaryo II için benzetim sonuçları

3.6. Sonuç ve Değerlendirme

Bu çalışmada rotor direncinin kestirimi ile kontrol başarımı iyileştirilmiş hız-algılayıcısız MÖMK tabanlı ASM sürücüsü sunulmuştur. MÖMK'nin yüksek başarımli kontrolü için gerekli olan hız ve akı bilgisine ek olarak rotor direnci GKF tarafından kestirilmiştir. Kestirilen rotor direnci MÖMK sistemi içerisinde her bir örnekleme adımında güncellenerek parametre değişimlerinden kaynaklanan bozulmalar azaltılmıştır. GKF algoritması ve bu algoritmayı kullanan MÖMK tabanlı ASM sürücüsü yük momentini ve rotor direncinde meydana getirilen değişimler ile oluşturulan zorlayıcı senaryolar altında geniş bir hız aralığında benzetim ortamında test edilmiş ve doğrulanmıştır. Elde edilen benzetim sonuçları, GKF algoritmasının yüksek kestirim başarımına, buna bağlı olarak hız-algılayıcısız MÖMK tabanlı ASM sürücüsünün ise yüksek kontrol başarımına sahip olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte MÖMK sisteminin başarımı ASM'nin stator direnci ve mıknatıslama endüktansı gibi diğer elektriksel parametrelerinde de meydana gelebilecek değişimlerden etkilenebilecektir. Bu yüzden daha yüksek kontrol başarımı için bu parametrelerin de kestirilip kontrol sistemine güncellenmesi gerekmektedir.

BÖLÜM IV

AKTİF-REAKTİF GÜÇ DENKLEMLERİNİ KULLANAN MUS TABANLI STATOR VE ROTOR DİRENCİ KESTİRİMİ

4.1. Giriş

Bu bölümde, aktif-reaktif güç denklemlerini kullanan MUS (ARG-MUS) tabanlı stator direnci, rotor direnci ve akı kestiricisi tanıtılmıştır. Geleneksel durumda uyarlama mekanizması oransal-integral (proportional-integral (PI)) kontrolörler kullanılarak tasarlanmıştır. ASM'nin farklı çalışma koşulları ve PI katsayılarının belirlenmesi için bazı iyileştirmelere ihtiyaç duyulmaktadır.

4.2. ARG-MUS'un Tasarımı

Geleneksel MUS yapıları referans model ve uyarlanabilir model olarak iki farklı modelden oluşmaktadır. Uyarlanabilir model kestirilen parametreye bağımlı iken referans model kestirilen modelden bağımsızdır. Bu bölümde tanıtımı yapılan ARG-MUS kestiricisi AG-MUS ve RG-MUS kestiricilerinin eş zamanlı ve paralel olarak çalıştırılması ile oluşturulmuştur. AG-MUS kestiricinin referans modeli Denklem (4.2)'de verilmiştir.

$$\bullet \quad AG^{ref} = \text{Re} \{ v_s \times i_s^* \} = v_{s\alpha} i_{s\alpha} + v_{s\beta} i_{s\beta} \quad (4.2)$$

Kestirilen stator gerilim vektörü:

$$\bullet \quad v_s^{kes} = R_s i_s + \frac{L_m}{L_r} \frac{d\psi_r^{kes}}{dt} + \sigma L_s \frac{di_s}{dt} \quad (4.3)$$

AG-MUS'un uyarlanabilir/ayarlanabilir modeli:

$$\bullet \quad AG^{uyr} = \text{Re} \{ v_s^{kes} \times i_s^* \} = R_s^{kes} (i_{s\alpha}^2 + i_{s\beta}^2) + \sigma L_s (i_{s\alpha} \frac{di_{s\alpha}}{dt} + i_{s\beta} \frac{di_{s\beta}}{dt}) + \frac{L_m}{L_r} (i_{s\alpha} \frac{d\psi_{r\alpha}^{kes}}{dt} + i_{s\beta} \frac{d\psi_{r\beta}^{kes}}{dt}) \quad (4.4)$$

AG-MUS kestiricinin uyarlanabilir model tarafından hesaplanan aktif gücün değeri,

doğrudan stator direncine bağımlıyken referans modelin çıkışı stator direncinden bağımsızdır. Referans ve uyarlanabilir model çıkışları arasındaki hata, Denklem (4.5)'de verilmiştir. Stator direnci kestiricisindeki uyarlama mekanizması, iki model arasındaki hatanın yok edilmesini sağlayacak şekilde Denklem (4.6)'da gösterildiği gibi seçilmiştir.

- $\mathcal{E}_{AG} = AG^{ref} - AG^{uyr}$ (4.5)

- $R_s^{kes} = K_{PR_s} \mathcal{E}_{AG} + K_{IR_s} \int \mathcal{E}_{AG} dt$ (4.6)

Burada, K_{PR_s} ve K_{KIR_s} sırasıyla, oransal ve integral terimlerin katsayılarıdır. AG-MUS tabanlı kestirici rotor akı bileşenlerine ihtiyaç duymaktadır ve bu bileşenler, Denklem (4.7)'e göre (4.8) ve (4.9)'daki gibi türetilebilir.

- $\psi_r^{kes} = \int \left(\frac{R_r^{kes}}{L_r} (L_m i_s - \psi_r^{kes}) + j P_p \omega_m \psi_r^{kes} \right) dt.$ (4.7)

- $\psi_{r\alpha}^{kes} = \int \left(\frac{R_r^{kes}}{L_r} (L_m i_{s\alpha} - \psi_{r\alpha}^{kes}) - P_p \omega_m \psi_{r\beta}^{kes} \right) dt.$ (4.8)

- $\psi_{r\beta}^{kes} = \int \left(\frac{R_r^{kes}}{L_r} (L_m i_{s\beta} - \psi_{r\beta}^{est}) + P_p \omega_m \psi_{r\alpha}^{est} \right) dt.$ (4.9)

- RG-MUS'un kestiriciye ait referans ve uyarlanabilir modelleri aşağıda verilmiştir:

- $RG^{ref} = \text{Im}\{v_s \times i_s^*\} = v_{s\beta} i_{s\alpha} - v_{s\alpha} i_{s\beta}$ (4.10)

- $RG^{uyr} = \text{Im}\{v_s^{kes} \times i_s^*\} = \sigma L_s \left(i_{s\alpha} \frac{di_{s\beta}}{dt} - i_{s\beta} \frac{di_{s\alpha}}{dt} \right) + \frac{L_m}{L_r} \left(i_{s\alpha} \frac{d\psi_{r\beta}^{kes}}{dt} - i_{s\beta} \frac{d\psi_{r\alpha}^{kes}}{dt} \right)$ (4.11)

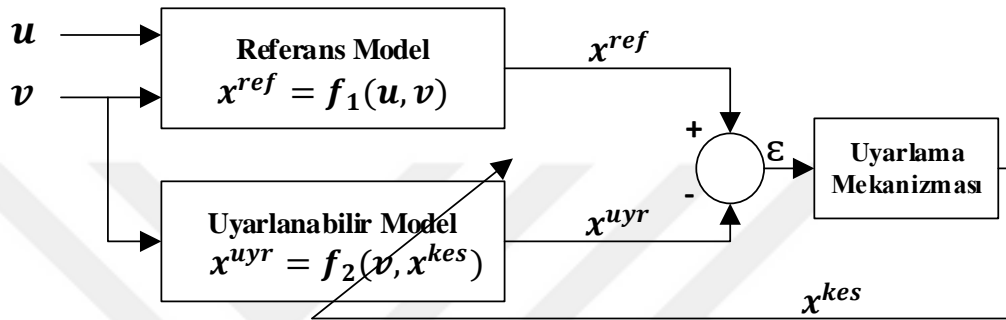
Rotor direnci uyarlama mekanizması, referans ve uyarlanabilir model arasındaki hatayı minimize edecek şekilde aşağıdaki gibi seçilmiştir:

- $\mathcal{E}_{RG} = RG^{ref} - RG^{uyr}$ (4.12)

- $R_r^{est} = K_{PR_r} \mathcal{E}_{RG} + K_{KIR} \int \mathcal{E}_{RG} dt$ (4.13)

Burada, K_{PR} ve K_{IR} sırasıyla, oransal ve integral terimlerin katsayılarıdır.

Geleneksel MUS tabanlı kestirici, Şekil 4.1’de de görüldüğü üzere iki modelden oluşmaktadır. Bunlardan birincisi, kestirilen parametrelerden bağımsız olarak işlemlerini gerçekleştiren referans modeldir. İkincisi ise, kestirilen parametreye bağımlı olan (genellikle doğrudan–nadiren dolaylı) ayarlanabilir/uyarlanabilir model olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 4.1. Geleneksel-MUS blok şeması

Şekil 4.2’de AG-MUS ile RG-MUS algoritmalarının eş zamanlı ve paralel olarak çalıştırılması ile oluşturulan ARG-MUS kestirim yöntemi sunulmuştur. Burada AG-MUS ile stator direnci kestirimi gerçekleştirilirken, RG-MUS ile rotor direnci kestirimi gerçekleştirilmiştir. ARG-MUS için gerekli olan akı bileşenleri, Denklem (4.8) ve (4.9)’a göre elde edilmiş ve uyarlanabilir modellerde kullanılmıştır. AG-MUS ve RG-MUS’un referans modellerine ait denklemlerde, kontrol sisteminden bağımsız olan akım, gerilim ve rotor mekanik hızı gibi sadece ölçülebilir büyüklükler kullanılmıştır.

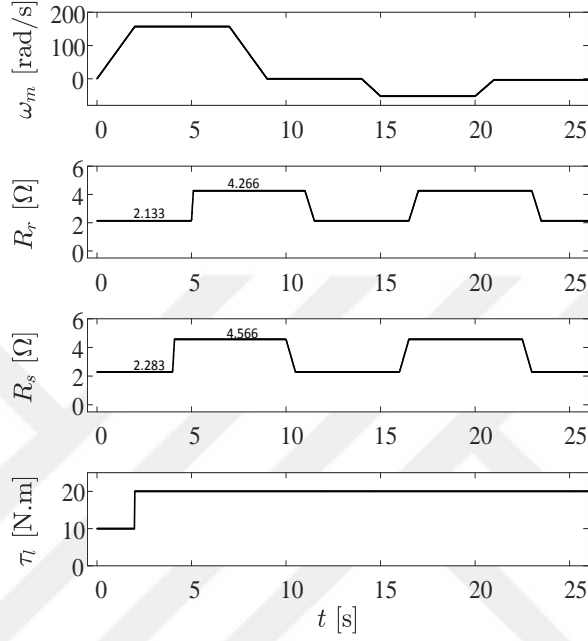
AG ve RG referans modellerine ait denklemlerde, kontrol yapısından bağımsız olan akım, gerilim ve rotor mekanik hızı gibi sadece ölçülebilir büyüklükler kullanılmıştır.

4.3. ARG-MUS Tabanlı AYK Sistemi

Şekil 4.3’te ARG-MUS kestiricisi tabanlı AYK verilmiştir. Sistem hız-algılayıcı olarak gerçekleştirilmiştir. AG-MUS ve RG-MUS kestiricilerinin birleşiminden oluşan ARG-MUS kestiricisi aracılığıyla rotor akısının duran eksen takımı bileşenleri, rotor ve stator dirençlerinin eş zamanlı kestirimi gerçekleştirilmektedir. Buradaki AYK

4.4. Benzetim Sonuçları

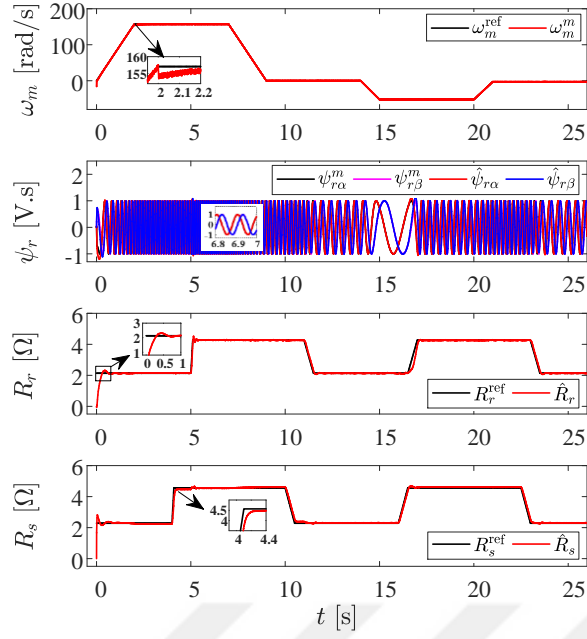
MATLAB/Simulink ortamında, AYK tabanlı ASM sürücüsünün tasarımı gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışmalarında kullanılan ASM'nin parametre ve anma değerleri Çizelge 2.1.'de sunulmuştur.



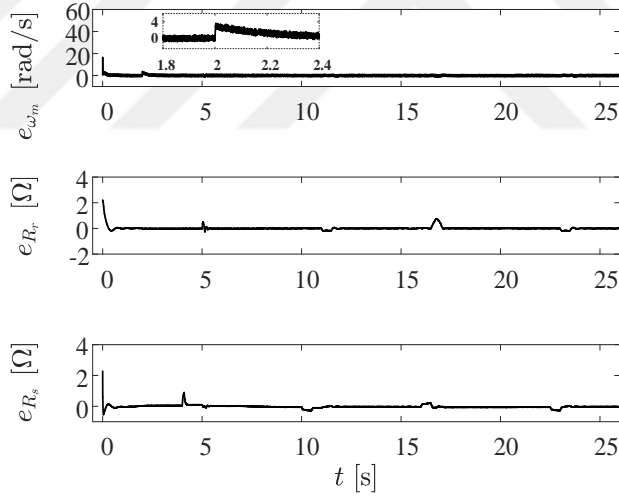
Şekil 4.4. Geniş bir hız aralığı için ω_m^{ref} ve uygulanan τ_l , R_r ve R_s 'nin değişimi

Bu bölümde ARG-MUS kestiricisinin başarımı, sıfır hız, anma hızı ve hız terslendirme durumlarını kapsayan geniş bir hız aralığında test edilmiştir. Benzetim çalışmaları stator ve rotor direnci, rotor açısız hız, ve yük momentinde meydana getirilen değişimler altında Şekil 4.4'te verilen senaryolar ile gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar Şekil 4.5'te, hatalar ise Şekil 4.6'da verilmiştir.

Şekil 4.5'te referans ve ölçülen rotor açısız hızları ile referans ve kestirilen; rotor akısının stator duran eksen takımı bileşenleri, rotor ve stator dirençleri detaylı şekilde sunulmuştur.



Şekil 4.5. Geniş bir hız aralığı için ARG-MUS kestirici ve AYK sistemine ilişkin benzetim sonuçları



Şekil 4.6. Geniş bir hız aralığında kestirim ve izleme hataları için benzetim sonuçları

Şekil 4.6'da ise rotor mekanik hızın referans ve ölçülen eğrileri arasındaki hata, referans ve kestirilen rotor direnci arasındaki hata ve son olarak stator direncinin referans ve kestirilen eğrileri arasındaki hatalar verilmiştir.

Şekil 4.5 ve 4.6'da verilen sonuçlar ARG-MUS algoritmasının kestirim başarımını, bu algoritmayı kullanan AYK tabanlı ASM sürücüsünün kontrol başarımını onaylamaktadır.

4.5. Sonuç ve Değerlendirme

Bu bölümde, aktif güç ve reaktif güç denklemleri kullanılarak ARG-MUS tabanlı stator ve rotor direnci kestiricisi Bednarz ve Dybkowski (2019)'a benzer şekilde tasarlanmıştır. Tasarlanan ARG-MUS tabanlı AYK sistemi benzetim ortamında doğrulanmıştır. Geniş bir hız aralığında test edilen ARG-MUS'tan elde edilen sonuçlar, rotor ve stator direncinin eş zamanlı kestiriminin tatmin edici seviyede olduğunu göstermektedir.



BÖLÜM V

SONUÇLAR

Bu tez kapsamında, ASM'nin hız-algılayıcılı ve hız-algılayıcısız yüksek başarılı kontrolünü iyileştirmek amacıyla eş zamanlı parametre kestirim problemini çözmeye yönelik olarak GKF ve ARG-MUS tabanlı algoritmaların tasarımı gerçekleştirilmiştir. İlk olarak anahtarlamalı-GKF (A-GKF) algoritması ile rotor akılarınin stator duran eksenindeki bileşenleri ($\psi_{r\alpha}$, $\psi_{r\beta}$), rotor mekanik hızı (ω_m), yük momenti (τ_l), rotor direnci (R_r) ve stator direnci (R_s) kestirimleri gerçekleştirilmiş ve önerilen kestiricinin başarımı AYK tabanlı ASM sürücüsü ile doğrulanmıştır. Ayrıca, kestirilen parametrelerden yük momenti AYK sisteminde hız çevrimine ileri beslenmiştir. Böylece kontrol sisteminde ve kestirim algoritmasında rotor ve stator direnç değişimleri ile bilinmeyen yük momentinden kaynaklanan bozulmalar azaltılmıştır. İkinci olarak, $\psi_{r\alpha}$, $\psi_{r\beta}$, ω_m ve R_r parametrelerini eş zamanlı olarak kestiren GKF algoritması, hız-algılayıcısız model öngörülü moment kontrol tabanlı sürücü ile test edilmiştir. Ek olarak, kestirilen rotor direnci MÖMK sistemi içerisine her bir örnekleme adımında güncellenerek parametre değişimlerinden kaynaklanan bozulmalar azaltılmıştır. Son olarak, $\psi_{r\alpha}$, $\psi_{r\beta}$, R_r ve R_s 'in kestirimi ARG-MUS ile gerçekleştirilmiştir. ARG-MUS kestiricisinin başarımı geleneksel AYK tabanlı ASM sürücüsü ile doğrulanmıştır. Üç çalışmaya da genel olarak bakıldığında, ARG-MUS kestirim algoritması tasarımının kolay olması ile öne çıkarken, GKF algoritmalarının durum ve parametrelerin kestirilmesinde yüksek hız ve doğruluğa sahip olduğu görülmekte olup; tez kapsamında geliştirilen kestiricilerin başarımları tatmin edici düzeydedir.

KAYNAKLAR

Altınışık, Y.E. ve Demir, R., “Asenkron motorların GKF tabanlı model öngörölü moment kontrolü”, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi* 32, 858-863, 2021.

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

Bao, D., Wang, H., Wang, X. and Zhang, C., "Sensorless speed control based on the improved Q-MRAS method for induction motor drives", *Energies* 11(1), 235-250, 2018.

Barut, M., Sincap kafesli asenkron motorların algılayıcısız yüksek başarımlı kontrolüne yönelik genişletilmiş Kalman filtresi tasarım ve uygulaması, Doktora Tezi, *İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 1-148, 2005.

Barut, M., Bogosyan, S. and Gokasan, M. “An EKF-based estimator for the speed sensorless vector control of induction motors”, *Electric Power Components and Systems* 33(7), 727–744, 2005.

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

Barut, M., Bogosyan, S. and Gokasan, M., "Experimental evaluation of braided EKF for sensorless control of induction motors", *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 55(2), 620-632, 2008.

Barut, M., Demir, R., Zerdali, E. and Inan, R., “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, 2012.

Basak, S., Ravi Teja, A.V., Chakraborty, C. and Hori, Y., "A new model reference adaptive formulation to estimate stator resistance in field oriented induction motor drive", *IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Vienna, Austria, 8470-8475, 2013.

Bednarz, S.A. and Dybkowski, M., "Estimation of the induction motor stator and rotor resistance using active and reactive power based model reference adaptive system estimator", *Applied Sciences* 9(23), 5145-5163, 2019.

Bose, B.K., "High performance control and estimation in AC drives", *IECON'97 23rd International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation*, New Orleans, LA, USA, 377–385, 1997.

Chen, B., Wang, T., Yao, W., Lee, K. and Lu, Z., "Speed convergence rate-based feedback gains design of adaptive full-order observer in sensorless induction motor drives", *IET Electric Power Applications* 8(1), 13-22, 2014.

Chen, J., Huang, J. and Sun, Y., "Resistances and speed estimation in sensorless induction motor drives using a model with known regressors", *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 66(4), 2659-2667, 2019.

Cirrincone, M., Pucci, M., Cirrincone, G. and Capolino, G-A., "Sensorless control of induction machines by a new neural algorithm: The TLS EXIN Neuron", *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 54(1), 127-149, 2007.

Dang, D.Q., Rifaq, M.S., Choi, H.H. and Jung, J-W., "Online parameter estimation technique for adaptive control applications of interior PM synchronous motor drives", *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 63(3), 1438-1449, 2016.

Demir, R., Barut, M., Yildiz, R., Inan, R. and Zerdali, E. "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, 376–381, 2017.

Demir, R. and Barut, M., "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, 2018.

Demir, R., Barut, M. ve Yıldız, R., "Hız-algılayıcılı asenkron motor sürücüsü için indirgenmiş dereceli genişletilmiş Kalman filtresi tabanlı parametre kestirimleri", *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 24(8), 1464-1471, 2018.

Demir, R. ve Barut, M., "Asenkron motor sürücüleri için indirgenmiş dereceli genişletilmiş Kalman filtresi tabanlı parametre kestirimi", *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji* 7(3), 591-603, 2019.

Depenbrock, M., "Direct self-control (DSC) of inverter-fed induction machine", *IEEE Transactions on Power Electronics* 3(4), 420-429, 1988.

Etien, E., Chaigne, C. and Bensiali, N., "On the stability of full adaptive observer for induction motor in regenerating mode", *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 57(5), 1599-1608, 2010.

Holtz, J., "Sensorless control of induction machines-with or without signal injection?", *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 53(1), 7-30, 2006.

Inan, R. and Barut, M., "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, 2014.

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

Kubota, H., Sato, I., Tamura, Y., Matsuse, K., Ohta, H. and Hori, Y., "Regenerating-mode low-speed operation of sensorless induction motor drive with adaptive observer", *IEEE Transactions on Industry Applications* 38(4), 1081-1086, 2002.

Kumar, R., Das. S., Syam. P. and Chattopadhyay, A.K., "Review on model reference adaptive system for sensorless vector control of induction motor drives", *IET Electric Power Applications* 9(7), 496-511, 2015.

Landau, Y. D., The Model Reference Approach, Adaptive Control, 102, Mendel J.M., Aström K.J., Athans M. and Luenberger D.G., *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, The University of Texas at Austin, Austin, 1980.

Lu, Y. and Zhao, J. A., "Sliding mode flux observer for predictive torque controlled induction motor drive", *2018 Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, 3280–3285, 2018.

Maiti, S. and Chakraborty, C., "A new instantaneous reactive power based MRAS for sensorless induction motor drive", *Simulation Modelling Practice and Theory* 18(9), 1314-1326, 2010.

Mapelli, F.L., Tarsitano, D. and Cheli, F., "A rotor resistance MRAS estimator for EV induction motor traction drive based on torque and reactive stator power: simulation and experimental results", *2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Berlin, Germany, 31-37, 2014.

Montanari, M., Peresada, S.M., Rossi, C. and Tilli, A., "Speed sensorless control of induction motors based on a reduced-order adaptive observer", *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 15(6), 1049-1064, 2007.

Mosskull, H., Robust Control of an Induction Motor Drive, *Automatic Control, School of Electrical Engineering, Royal Institute of Technology*, Stockholm, Sweden, 2006.

Nguyen, N.-D., Nam, N. N. N., Yoon, C. and Lee, Y. I., "Speed sensorless model predictive torque control of induction motors using a modified adaptive full-order observer", *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 1–1, 2021.

Özsoy, E.E., Gökaşan, M. and Bogosyan, S., "Simultaneous rotor and stator resistance estimation of squirrel cage induction machine with a single extended Kalman

filter", *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Science* 18(5), 853-863, 2010.

Perng, S-S., Lai, Y-S. and Liu, C-H., "Sensorless vector controller for induction motor drives with parameter identification", *IECON '98. Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (Cat. No.98CH36200)*, Aachen, Germany, 1008-1013, 1998.

Qu, Z., Hinkkanen, M. and Harnefors, L., "Gain scheduling of a full-order observer for sensorless induction motor drives", *IEEE Transactions on Industry Applications* 50(6), 3834-3845, 2014.

Rashed, M. and Stronach, A. F., "A stable back-EMF MRAS-based sensorless low-speed induction motor drive insensitive to stator resistance variation", *IEEE Proceedings—Electric Power Applications* 151(6), 685– 693, 2004.

Ravi Teja, A.V., Chakraborty, C., Maiti, S. and Hori, Y., "A new model reference adaptive controller for four quadrant vector controlled induction motor drives", *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 59(10), 3757–3767, 2012.

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

Smith, A.N., Gadoue, S.M. and Finch, J.W., "Improved rotor flux estimation at low speeds for torque MRAS-based sensorless induction motor drives", *IEEE Transactions on Energy Conversion* 31(1), 270-282, 2016.

Suwankawin, S. and Sangwongwanich, S., "Design strategy of an adaptive full-order observer for speed-sensorless induction-motor drives-tracking performance and stabilization", *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 53(1), 96-119, 2006.

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

Türker, Ç. G., Karamanakos, P. ve Kennel, R., "Asenkron makinaların değişken anahtarlama noktalı model öngörülü akım kontrolü", *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 30(3), 181–187, 2018.

Vas, P., *Sensorless Vector and Direct Torque Control*, New York: Oxford University Press, Oxford, United Kingdom, 1998.

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

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

Wang, F., Chen, Z., Stolze, P., Stumper, J.-F., Rodríguez, J., and Kennel, R., "Encoderless finite-state predictive torque control for induction machine with a compensated MRAS", *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 10(2), 1097–1106, 2014.

Wang, M., Wang, D., Dong, G., Wei, H., Liang, X. and Xu, Z., "Simplified rotor and stator resistance estimation method based on direct rotor flux identification", *Journal of Power Electronics* 19(3), 751-760, 2019.

Wang, B., Huo. Z., Yu. Y., Luo. C., Sun. W. and Xu. D., "Stability and dynamic performance improvement of speed adaptive full-order observer for sensorless induction motor ultralow speed operation", *IEEE Transactions on Power Electronics* 35(11), 12522-12532, 2020.

Xie, H., Wang, F., He, Y., Rodriguez, J., and Kennel, R., "Encoderless parallel predictive torque control for induction machine using a robust model reference adaptive system", *IEEE Transactions on Energy Conversion* 1–1., 2021.

Yan, Z. and Utkin, V., "Sliding mode observers for electric machines-an overview", *IEEE 2002 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society, IECON 02*, Seville, Spain, 1842-1847, 2002.

Yan, L., Dou, M., Hua, Z., Zhang, H., and Yang, J., "Robustness improvement of FCS-MPTC for induction machine drives using disturbance feedforward compensation technique", *IEEE Transactions on Power Electronics* 34(3), 2874–2886, 2019.

Yan, L., and Song, X., "Design and implementation of Luenberger model-based predictive torque control of induction machine for robustness improvement", *IEEE Transactions on Power Electronics* 35(3), 2257–2262, 2020.

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

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

Yin, S., Huang, Y., Xue, Y., Meng, D., Wang, C., Lv, Y., Diao, L., and Jatskevich, J., "Improved full-order adaptive observer for sensorless induction motor control in railway traction systems under low-switching frequency", *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics* 1–1, 2019.

Zaky, M.S., Khater, M., Yasin, H. and Shokralla, S.S., "Very low speed and zero speed estimations of sensorless induction motor drives", *Electric Power Systems Research* 80(2), 143-151, 2010.

Zaky, M.S., "Stability analysis of speed and stator resistance estimators for sensorless induction motor drives", *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 59(2), 858-870, 2012.

Zaky, M.S., Metwaly, M.K., Azazi, H.Z. and Deraz, S.A., "A new adaptive SMO for speed estimation of sensorless induction motor drives at zero and very low frequencies", *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 65(9), 6901-6911, 2018.

Zerdali, E. and Barut, M. "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, 2016.

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

Zerdali, E., Demir, R. and Barut, M., "Speed-sensorless FCS-PTC based induction motor drive capable of disturbance rejection", *2020 2nd Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM)*, 170–175, 2020.

Zerdali, E. and Demir, R., "Speed-sensorless predictive torque controlled induction motor drive with feed-forward control of load torque for electric vehicle applications", *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences* 29(1), 223–240, 2021.

Zhao, L., Huang, J., Liu, H., Li, B. and Kong, W., "Second-order sliding-mode observer with online parameter identification for sensorless induction motor drives", *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 61(10), 5280–5289, 2014.

Zhao, Z., Ruan, Z., Meng, D., Xue, Y. and Gu, C., "Sliding mode observer based sensorless model predictive current control for induction motor", *2019 IEEE 2nd International Conference on Power and Energy Applications (ICPEA)*, 84–88, 2019.

ÖZGEÇMİŞ

Yunus Emre Altınışik [] İlk, orta ve lise öğrenimini [] tamamladı. [] yılında başladığı [] mezun oldu. [] yılında kazandığı [] mezun oldu. Ardından [] yılında Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans eğitimine başladı. Ayrıca [] olarak görev yapmaktadır.

TEZ ÇALIŞMASI KAPSAMINDA ÜRETİLEN ESERLER

Bu tez çalışmasından iki adet ulusal makale ve bir adet uluslararası bildiri özeti üretilmiştir. Üretilen çalışmalar aşağıda sunulmuştur:

Altınışık, Y.E. ve Demir, R., “Asenkron motorların GKF tabanlı model öngörülü moment kontrolü”, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi* 32, 858-863, 2021.

Altınışık, Y.E. and Demir, R., “EKF based model predictive torque control of induction motors”, *International Conference on Design, Research and Development 2021*, Online, 206, 15-18 Aralık 2021.

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

