

Reduced Order Extended Kalman Filter based Parameter Estimation for Induction Motor Drives

Rıdvan DEMİR^{1,*}, Murat BARUT²

¹Niğde Ömer Halisdemir University, Faculty of Engineering, Department of Mechatronics Engineering, 51245, Merkez/NİĞDE

²Niğde Ömer Halisdemir University, Faculty of Engineering, Department of Electrical Electronics Engineering, 51245, Merkez/NİĞDE

Graphical/Tabular Abstract

In this study, a speed-sensored reduced-order extended Kalman filter (RO-EKF) based estimator is designed for direct vector control system of induction motors (IMs). The rotor resistance, stator resistance, and magnetizing inductance are simultaneously estimated by the designed estimator. The proposed estimator is tested by simulations for a wide speed range. The proposed estimation algorithm is known as the first RO-EKF algorithm in the literature which estimates the stator resistance, rotor resistance, and magnetizing inductance simultaneously.

Article Info:

Received: 27/03/2019

Revision: 13/06/2019

Accepted: 06/08/2019

Highlights

- Direct vector control based IM drives.
- Estimation of rotor resistance, stator resistance, and magnetizing inductance with RO-EKF.

Keywords

Induction motors
RO-EKF
Parameter estimation
Vector Control

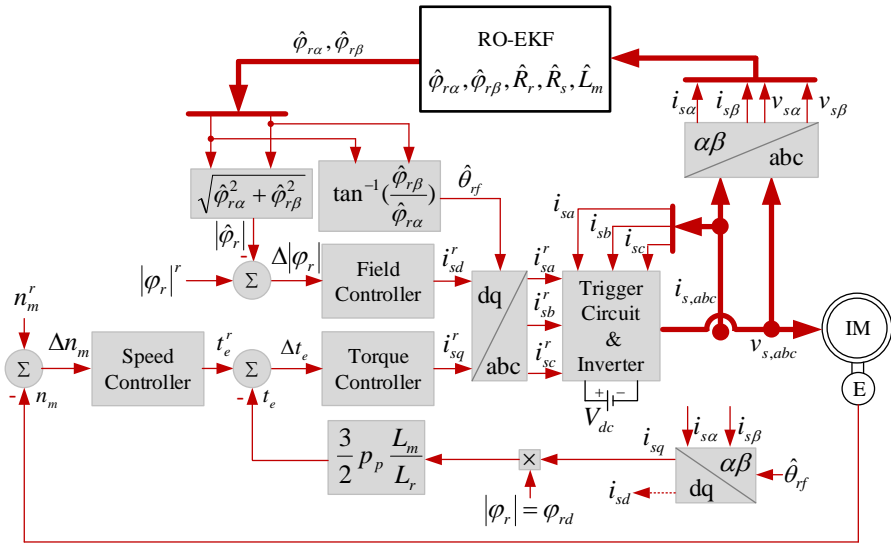


Figure A. Block schema of the direct vector controlled induction motor drive

Purpose: The aim of this study is to introduce a direct vector control based high-performance IM driver which uses RO-EKF algorithm for state and parameter estimation.

Theory and Methods: IMs have parameters which vary the operating conditions such as temperature, frequency, and voltage level. Thus variations of these parameters make control performances of IM difficult. To overcome these disadvantages, an RO-EKF estimating the stator resistance, rotor resistance, magnetizing inductance, and rotor flux in a wide speed range including very low/zero-speed and field-weakening zone is designed.

Results: Simulation results show that the proposed estimation algorithm and thus the speed-sensored direct vector control based induction motor drive utilizing the designed estimation algorithm are quite satisfactory.

Conclusion: In this study, a new state and parameter estimator is presented for the IM drives using the speed-sensored RO-EKF algorithm. The proposed estimation algorithm is tested with simulations in a wide speed range with step and ramp changes of rotor resistance, stator resistance, magnetization inductance, and load torque. The simulation results verify that the proposed estimation algorithm and the speed-sensored DVC system using the proposed estimation algorithm are quite satisfactory.



Asenkron Motor Sürücüleri için İndirgenmiş Dereceli Genişletilmiş Kalman Filtresi Tabanlı Parametre Kestirimi

Rıdvan DEMİR^{1,*} Murat BARUT²

¹ Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, 51245, Merkez/NİĞDE

² Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 51245, Merkez/NİĞDE

Öz

Bu çalışmada asenkron motorların doğrudan vektör kontrol sistemi için hız-algılayıcı indirgenmiş dereceli genişletilmiş Kalman filtresi (İD-GKF) tabanlı kestirici tasarlanmıştır. Tasarlanan kestirici ile rotor direnci, stator direnci ve mıknatıslama endüktansı eş-zamanlı olarak kestirilmektedir. Önerilen kestirici, sıfır hız ve alan zayıflama bölgesini de kapsayan geniş bir hız aralığında üretilen hız, rotor direnci, stator direnci, mıknatıslama endüktansı ve yük momentinin zorlayıcı değişimleri ile benzetim ortamında test edilmektedir. Önerilen kestirim algoritması ve bu algoritmayı kullanan hız-algılayıcı doğrudan vektör kontrol sisteminden elde edilen benzetim sonuçları oldukça yüksek başarıma sahiptir. Ayrıca önerilen kestirim algoritması stator direnci, rotor direnci ve mıknatıslama endüktansını eş-zamanlı olarak kestiren ilk İD-GKF algoritması olarak bilinmektedir.

Makale Bilgisi

Başvuru: 27/03/2019

Düzeltilme: 13/06/2019

Kabul: 06/08/2019

Anahtar Kelimeler

Asenkron motorlar

İD-GKF

Parametre kestirimi

Vektör kontrol

Reduced Order Extended Kalman Filter based Parameter Estimation for Induction Motor Drives

Abstract

In this study, a speed-sensored reduced-order extended Kalman filter (RO-EKF) based estimator is designed for direct vector control system of induction motors. The rotor resistance, stator resistance, and magnetizing inductance are simultaneously estimated by the designed estimator. The proposed estimator is tested by simulations for a wide speed range including very low/zero-speed and field-weakening zone, under the variations in rotor angular velocity, load torque, rotor resistance, stator resistance, and mutual inductance changes. Simulation results obtained from the proposed estimation algorithm and the speed-sensored direct vector control based induction motor drive utilizing the designed estimation algorithm are quite satisfactory. Also, the proposed estimation algorithm is known as the first RO-EKF algorithm in the literature which estimates the stator resistance, rotor resistance, and magnetizing inductance simultaneously.

Keywords

Induction motors

RO-EKF

Parameter estimation

Vector Control

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Asenkron motorlar (ASM'ler) değişken hız/moment kontrolüne gereksinim duyan endüstriyel tahrik sistemlerinde düşük maliyet, dayanıklılık ve güvenilirlik gibi karakteristik özelliklerinden dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır. ASM'lerin doğrusal olmayan matematiksel modele ve sıcaklık, frekans, gerilim seviyesi gibi çalışma koşullarına göre değişen parametrelere sahip olması kontrol başarımlarını zorlaştırmaktadır. Diğer taraftan ASM'lerin yüksek başarılı sürücü uygulamalarında etkin bir şekilde kullanılmaları vektör kontrol yöntemleri ile sağlanmaktadır [1]. Hız-algılayıcı doğrudan vektör kontrol (DVK) sistemi stator duran eksenindeki rotor akısı bileşenlerinin ($\varphi_{r\alpha}$ ve $\varphi_{r\beta}$ 'nin) kestirilmesine ihtiyaç duymaktadır. ASM sürücülerinin sıfır hız ile anma hız bölgesinin üzerindeki yüksek hız bölgesini de (alan zayıflama bölgesini de) içeren geniş bir hız aralığında yüksek kontrol başarımlarına sahip olmaları doğru akı bilgisini gerektirmektedir [2]. Doğru akı kestirimi için, değerleri çalışma koşulları ile değişen stator direnci (R_s), rotor direnci (R_r) ve mıknatıslama endüktansının (L_m 'nin) kestirilmesi ve kestirim algoritmasına

geniş bir hız aralığında güncellenmesi gerekmektedir. ASM'lerin değişen bu parametreler ile birlikte kontrolü için gerekli akı gibi durumların kestirimini gerçekleştirmek üzere literatürde yeni yöntemlerinin geliştirilmesi çalışmaları devam etmektedir.

ASM sürücülerinin performansı, kestirim yöntemlerinin başarımından doğrudan etkilendiği için modele uyarlamalı sistem (MUS) [3], yapay sinir ağları (YSA) [4], genişletilmiş Luenberger gözlemleyicisi [5] ve genişletilmiş Kalman filtresi (GKF) [6-8] gibi farklı kestirim yöntemleri önerilmiştir.

Son yıllarda R_r , R_s ve/veya L_m gibi ASM'ye ait parametrelerin kestirimine odaklanan çalışmalardan Comanescu (2017)'de [9] rotor zaman sabiti kestirimi MUS ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca anma değerinin %60, %80 ve %100'ü gibi farklı L_m değerleri için yapılan testler ile doğru L_m değerinin kestirim başarımı üzerinde oldukça etkili olduğu belirtilmiştir. Yang vd. (2017)'de [10] ise R_r ve L_m kestirimi rotor akılı MUS ile gerçekleştirilmiştir. Ancak kestirim sonuçları alan zayıflama bölgesine ilişkin başarımı içermemektedir. Arunachalam vd. (2016)'da [11] düşük hız bölgesinde YSA tabanlı MUS ile R_r kestirimi yapılmaktadır. Guo vd. (2018)'de [12] uyarlanabilir tam dereceli kayma kipli gözlemleyici kullanılarak R_r ve R_s kestirimi gerçekleştirilmiştir. Jo ve Choi (2018)'de [13] MUS ve özyinelemeli en küçük kareler (recursive least squarer-(RLS)) algoritmaları kullanılarak hem geçici hem de sürekli halde etkili R_r ve L_m kestirimi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, Liu vd. (2018)'de [14] rotor akılı MUS ve reaktif güç tabanlı kestirici ile L_m kestirimi gerçekleştirilmiştir.

Literatürdeki diğer yöntemlerden farklı olarak ASM modelindeki belirsizlikleri dikkate alarak durum ve parametre kestiriminde kullanılan GKF'ler, sistem ve ölçüm gürültülerinin sebep olduğu doğal uyarımı kullanabilmektedir [15]. GKF'ler, tam dereceli ve indirgenmiş dereceli olarak tasarlanabilmektedir. Geleneksel tam dereceli GKF'ye (TD-GKF'ye) kıyasla daha az işlem yükü gerektiren indirgenmiş dereceli GKF (İD-GKF) genellikle yüksek işlem yüküne sahip karmaşık kontrol sistemlerinde kullanılmaktadır [7].

ASM'lerin durum ve parametre kestirimi için GKF algoritmasını kullanan çalışmalar incelendiğinde, Demir vd. (2017a)'da [16] stator akısı tabanlı ASM modeli kullanan TD-GKF ile R_s ve R_r kestirimi, Demir vd. (2017b)'de [17] rotor akılı ASM modeli kullanan İD-GKF ile R_r ve L_m kestirimleri benzetim ortamında sunulmaktadır. Ayrıca, Ref. [17] ile verilen çalışmada kestirilen durum ve parametrelere ilişkin gerçek zamanlı sonuçlar [18]'de verilmiştir. İnan vd. 2018'de [19] ise çevrimiçi mıknaatıslama endüktansı kestiricisi ve TD-GKF algoritmasının eş-zamanlı çalıştırılması ile oluşturulan "karma kestirim algoritması" ile R_s , R_r ve L_m 'nin eş zamanlı kestirimi gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmanın temel katkısı durum ve parametre kestirimleri için İD-GKF algoritmasını kullanan DVK tabanlı yüksek kontrol başarımına sahip bir ASM sürücüsünü literatüre tanıtmaktır. Bu amaç doğrultusunda tasarlanan İD-GKF ile ölçülen akım, gerilim ve hız bilgileri kullanılarak $\varphi_{r\alpha}$, $\varphi_{r\beta}$, R_r , R_s ve L_m 'nin eş-zamanlı kestirimi sıfır/çok düşük hız bölgesi ile birlikte alan zayıflama bölgesini de içeren geniş hız aralığında gerçekleştirilmiştir. Farklı hız ve yük momenti değerleri için R_r , R_s ve L_m 'de meydana getirilen değişimler altında test edilen İD-GKF algoritması ve bu algoritmayı kullanan DVK'lı sürücü sisteminden elde edilen benzetim sonuçları, önerilen kestirim algoritmasına ait kontrol başarımının oldukça iyi olduğunu göstermektedir.

2. ASENKRON MOTORLARIN DİNAMİK MODELİ (DYNAMIC MODEL OF INDUCTION MOTORS)

Genel ifadesi Denklem 1 ve 2 ile verilen ASM'lere ait genişletilmiş dinamik model rotor ya da stator akılı olarak edilebilmektedir. Bu çalışmada $\varphi_{r\alpha}$, $\varphi_{r\beta}$, R_r , R_s ve L_m 'nin eş-zamanlı kestirimini gerçekleştirmek için tasarlanan İD-GKF algoritması rotor akılı ASM modelini kullanmaktadır.

$$\dot{\mathbf{x}}_g = \mathbf{f}_g(\mathbf{x}_g, \mathbf{u}_g) + \mathbf{w}_g$$

$$= \mathbf{A}_g(\mathbf{x}_g)\mathbf{x}_g + \mathbf{B}_g\mathbf{u}_g + \mathbf{w}_g$$

$$\begin{aligned} \mathbf{z}_g &= \mathbf{h}_g(\mathbf{x}_g) + \mathbf{v}_g \text{ (ölçme eşitliği)} \\ &= \mathbf{H}_g \mathbf{x}_g + \mathbf{v}_g \end{aligned} \quad 2$$

Denklem 1 ve 2 ile verilen ASM'ye ait genişletilmiş dinamik modeldeki matris ve vektörler aşağıdaki gibi tanımlanabilir;

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \dot{i}_{s\alpha} \\ \dot{i}_{s\beta} \\ \dot{\varphi}_{r\alpha} \\ \dot{\varphi}_{r\beta} \\ \dot{R}_r \\ \dot{R}_s \\ \dot{L}_m \end{bmatrix}}_{\dot{\mathbf{x}}_g} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{-L_m^2 R_r}{L_r^2 L_\sigma} - \frac{R_s}{L_\sigma} & 0 & \frac{L_m R_r}{L_r^2 L_\sigma} & \frac{L_m p_p \omega_m}{L_r L_\sigma} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-L_m^2 R_r}{L_r^2 L_\sigma} - \frac{R_s}{L_\sigma} & \frac{-L_m p_p \omega_m}{L_r L_\sigma} & \frac{L_m R_r}{L_r^2 L_\sigma} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{R_r}{L_r} L_m & 0 & \frac{-R_r}{L_r} & -p_p \omega_m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{R_r}{L_r} L_m & p_p \omega_m & \frac{-R_r}{L_r} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}_g} \underbrace{\begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ \varphi_{r\alpha} \\ \varphi_{r\beta} \\ R_s \\ R_r \\ L_m \end{bmatrix}}_{\mathbf{x}_g} + \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{1}{L_\sigma} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_\sigma} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{B}_g} \underbrace{\begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \end{bmatrix}}_{\mathbf{u}_g} + \mathbf{w}_g \quad 3$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix}}_{\mathbf{z}_g} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{H}_g} \mathbf{x}_g + \mathbf{v}_g \quad 4$$

Bu çalışmada, ASM'ye ait ölçülmeyen durum ($\varphi_{r\alpha}$ ve $\varphi_{r\beta}$) ve parametrelerin (R_r , R_s ve L_m 'nin) eş-zamanlı kestirimi genel ifadeleri Denklem 5 ve 6 ile verilen indirgenmiş dereceli rotor akılı ASM modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_i &= \mathbf{f}_i(\mathbf{x}_i, \mathbf{u}_i) + \mathbf{w}_i \\ &= \mathbf{A}_i(\mathbf{x}_i) \mathbf{x}_i + \mathbf{B}_i \mathbf{u}_i + \mathbf{w}_i \end{aligned} \quad 5$$

$$\begin{aligned} \mathbf{z}_i &= \mathbf{h}_i(\mathbf{x}_i) + \mathbf{v}_i \text{ (ölçme eşitliği)} \\ &= \mathbf{H}_i \mathbf{x}_i + \mathbf{v}_i \end{aligned} \quad 6$$

Denklem 5 ve 6 ile verilen indirgenmiş dereceli ASM modelindeki matris ve vektörler Denklem 7 ve 8'deki gibi tanımlanabilir;

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \dot{\varphi}_{r\alpha} \\ \dot{\varphi}_{r\beta} \\ \dot{R}_r \\ \dot{R}_s \\ \dot{L}_m \end{bmatrix}}_{\dot{\mathbf{x}}_i} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{-R_r}{L_r} & -p_p \omega_m & \frac{L_m i_{s\alpha}}{L_r} & 0 & 0 \\ p_p \omega_m & \frac{-R_r}{L_r} & \frac{L_m i_{s\beta}}{L_r} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}_i} \underbrace{\begin{bmatrix} \varphi_{r\alpha} \\ \varphi_{r\beta} \\ R_r \\ R_s \\ L_m \end{bmatrix}}_{\mathbf{x}_i} + \mathbf{w}_i \quad 7$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix}}_{\mathbf{z}_i} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{R_r L_m}{L_r^2 L_\sigma} & \frac{L_m p_p \omega_m}{L_\sigma L_r} & \frac{L_m^2 i_{s\alpha}}{L_r^2 L_\sigma} & \frac{-i_{s\alpha}}{L_\sigma} & 0 \\ -\frac{L_m p_p \omega_m}{L_\sigma L_r} & \frac{R_r L_m}{L_r^2 L_\sigma} & \frac{L_m^2 i_{s\beta}}{L_r^2 L_\sigma} & \frac{-i_{s\beta}}{L_\sigma} & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{H}_i} \mathbf{x}_i + \begin{bmatrix} \frac{v_{s\alpha}}{L_\sigma} \\ \frac{v_{s\beta}}{L_\sigma} \end{bmatrix} + \mathbf{v}_i \quad 8$$

Genişletilmiş ve indirgenmiş modele ait ifadelerde yer alan değişkenlerden \mathbf{x} , dinamik modellere ait durum vektörü; \mathbf{f} , durum ve girişlerin doğrusal olmayan fonksiyonu; \mathbf{u} , kontrol giriş vektörü; \mathbf{A} ve \mathbf{B} , sırası ile sistem ve giriş matrisi; \mathbf{w} , sistem gürültüsü; \mathbf{h} , çıkışların fonksiyonu; \mathbf{H} , ölçme matrisi ve son olarak \mathbf{v} , ölçme gürültüsüdür. Ayrıca, $v_{s\alpha}$, $v_{s\beta}$, $i_{s\alpha}$ ve $i_{s\beta}$, stator duran eksen takımındaki stator gerilim ve akımlarının bileşenlerini; R_r ve R_s rotor ve stator dirençlerini; L_r , L_s ve L_m ise rotor, stator ve mıknatıslama endüktanslarını; $L_\sigma = \sigma L_s = L_s - L_m^2/L_r$, stator geçici endüktansını; σ , kaçak faktörünü; p_p ise kutup çifti sayısını ifade etmektedir.

3. İD-GKF ALGORİTMASI (RO-EKF ALGORITHM)

Bu çalışma kapsamında önerilen DVK'lı ASM sürücüsü $\varphi_{r\alpha}$, $\varphi_{r\beta}$, R_r , R_s ve L_m 'nin eş-zamanlı kestirimi için genel ifadeleri Denklem 9-15 ile verilen İD-GKF algoritmasını kullanmaktadır.

- *Doğrusallaştırma adımı*

$$\mathbf{F}_{k+1|k} = \frac{\partial \mathbf{f}_i(\mathbf{x}_i, \mathbf{u}_i)}{\partial \mathbf{x}_i} \Big|_{\mathbf{x}_i = \hat{\mathbf{x}}_{i,k+1}} \quad 9$$

$$\mathbf{H}_{k+1|k} = \frac{\partial \mathbf{h}_i(\mathbf{x}_i, \mathbf{u}_i)}{\partial \mathbf{x}_i} \Big|_{\mathbf{x}_i = \hat{\mathbf{x}}_{i,k+1}} \quad 10$$

- *Zaman güncellemesi adımı*

$$\hat{\mathbf{x}}_{i,k+1} = \mathbf{f}_i(\hat{\mathbf{x}}_{i,k}, \mathbf{u}_{i,k+1}) \quad 11$$

$$\mathbf{P}_{k+1}^- = \mathbf{F}_{k+1} \mathbf{P}_k \mathbf{F}_{k+1}^T + \mathbf{Q} \quad 12$$

- *Ölçüm güncellemesi adımı*

$$\mathbf{K}_{k+1} = \mathbf{P}_{k+1}^- \mathbf{H}_{k+1}^T [\mathbf{H}_{k+1} \mathbf{P}_{k+1}^- \mathbf{H}_{k+1}^T + \mathbf{R}]^{-1} \quad 13$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{i,k+1} = \hat{\mathbf{x}}_{i,k+1}^- + \mathbf{K}_{k+1} (\mathbf{z}_{k+1} - \mathbf{H}_{k+1} \hat{\mathbf{x}}_{i,k+1}^-) \quad 14$$

$$\hat{\mathbf{P}}_{k+1} = \mathbf{P}_{k+1}^- - \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{H}_{k+1} \mathbf{P}_{k+1}^- \quad 15$$

Burada, \mathbf{F} ve \mathbf{H} doğrusal olmayan modeli ve ölçüm eşitliğini doğrusallaştırmak için kullanılan fonksiyonları; \mathbf{K} , Kalman kazancını; \mathbf{P} , kestirilen durum ve parametre hatalarının kovaryans matrisini; \mathbf{Q} ve \mathbf{R} ise sırası ile modelleme hatası olarak adlandırılan sistem gürültü matrisinin ve ölçüm hatası olarak adlandırılan çıkış gürültü matrisinin kovaryanslarını ifade etmektedir.

4. BENZETİM SONUÇLARI VE TARTIŞMALAR (SIMULATION RESULTS AND DISCUSSIONS)

Önerilen İD-GKF algoritmasının kestirim başarımı anma değerleri Tablo 1'de verilen ASM parametreleri ve Şekil 1'de verilen DVK tabanlı ASM sürücü sistemi kullanılarak geniş bir hız aralığında test edilmektedir. DVK tabanlı ASM sürücü sistemindeki kontrolörlerin tamamı geleneksel PI (oran + integral alıcı - (proportional + integral)) kontrolördür. θ_{rf} ise stator duran ekseninin α -bileşeni ile dönen eksenin d -bileşeni arasındaki alan açısıdır. Ayrıca, alan, hız ve moment kontrolörlerine ait alt bloklar ve PI katsayıları Şekil 2'de sunulmaktadır. Şekil 2a-c'de verilen PI katsayıları arzu edilen geçici ve sürekli hal başarımları dikkate alınarak deneme-yanılma yöntemi ile belirlenmiştir.

- Sıfır, anma hızı ve alan zayıflama bölgelerinde yük momenti ve parametre değişimlerine karşı İD-GKF'nin başarımı

Bu senaryolar ile test edilen ASM sürücüsünden yüksek kontrol başarımı elde etmek için durum ve parametre kestiriminde kullanılan İD-GKF tabanlı kestiricinin deneme-yanılma yöntemi ile belirlenen kovaryans matrisleri (\mathbf{Q} , \mathbf{R} , \mathbf{P}_0) aşağıda verilmiştir.

$$\mathbf{Q} = \text{diag}\{10^{-7} \ 10^{-7} \ 10^{-2} \ 10^{-2} \ 10^{-4}\}$$

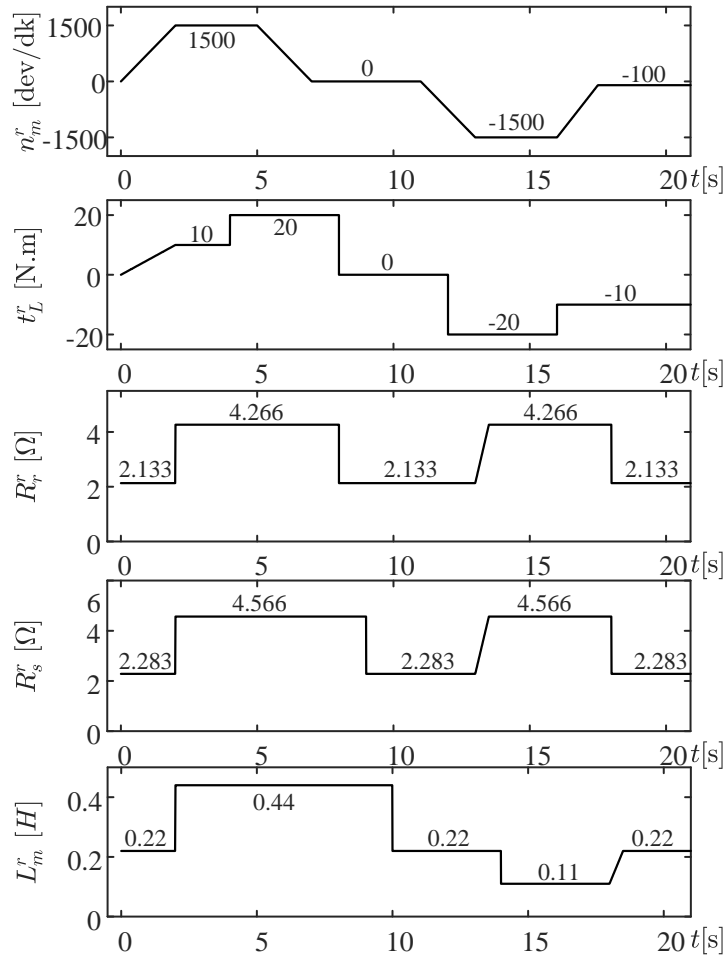
$$\mathbf{R} = \text{diag}\{10^{-8} \ 10^{-8}\}$$

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

İD-GKF tabanlı kestiriciye ait benzetim sonuçları $100\mu\text{s}$ örnekleme zamanı ile *Matlab Simulink* ortamında "ode1 (Euler)" çözüm metodu kullanılarak elde edilmiştir. Önerilen İD-GKF algoritması ile kestirilen $\varphi_{r\alpha}$, $\varphi_{r\beta}$, R_r , R_s ve L_m 'nin başlangıç değerleri sıfır olarak seçilmiştir.

4.1 Senaryo-I: Anma ve sıfır/çok düşük hız bölgelerinde yük momenti ve parametre değişimlerine karşı İD-GKF'nin başarımı (Scenario-I: Performance of RO-EKF against the load torque and parameter changes in rated, and zero / very low-speed regions)

Önerilen kestirim algoritması ve bu algoritmayı kullanan DVK'lı ASM sürücü sisteminin kontrol başarımı Şekil 3'te verilen n_m , t_L , R_r , R_s ve L_m referans değişimleri altında üretilen senaryo ile test edilmektedir.

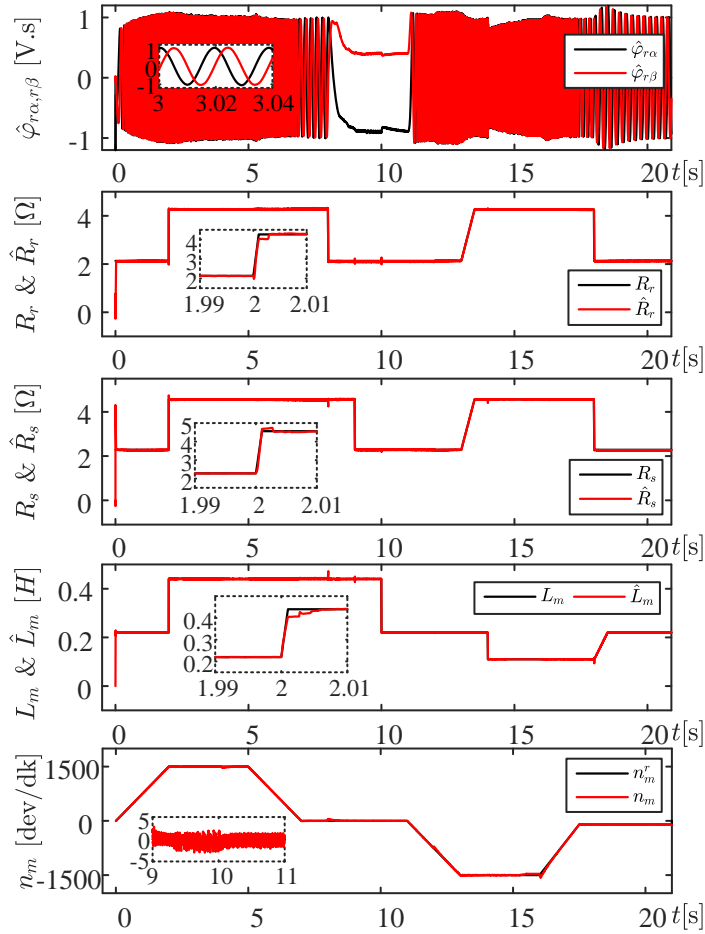


Şekil 3. İD-GKF temelli doğrudan vektör kontrollü ASM sürücü sistemini test etmek için üretilen referans değişimler (Senaryo-I)

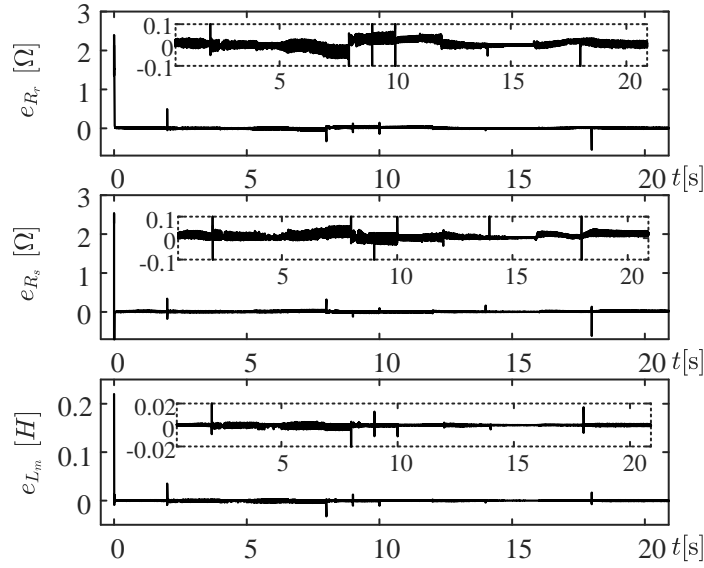
Bu senaryoda;

- ASM sürekli sıfır hız, çok düşük hız (anma hızın %6.67'si) ve anma hızını da içeren geniş bir hız aralığında sürülmektedir.
- ASM'ye geniş bir hız aralığında değeri 20 Nm ve -20 Nm arasında değiştirilen yük momentini uygulanmaktadır.
- Farklı hız ve yük moment değeri için R_r , R_s ve L_m doğrusal ve/veya basamak şeklinde değiştirilmektedir.

Başarımı, Şekil 3'te verilen referanslar ile test edilen İD-GKF ve bu algoritmayı kullanan DVK'lı ASM sürücüsünden elde edilen benzetim sonuçları Şekil 4 ve 5 ile verilmiştir. Şekil 4'te verilen benzetim sonuçlarında " $\hat{\cdot}$ " kestirilen durum ve parametreleri, Şekil 5'te verilen benzetim sonuçlarında ise $e(\cdot)$ gerçek değer ile kestirilen değer arasındaki hatayı ifade etmektedir.



Şekil 4. Doğrudan vektör kontrollü ASM sürücüsü ve İD-GKF tabanlı durum ve parametre kestiricisine ait benzetim sonuçları (Senaryo-1)



Şekil 5. Doğrudan vektör kontrollü ASM sürücüsü ve İD-GKF tabanlı durum ve parametre kestiricisine ait izleme ve kestirim hataları (Senaryo-I)

4.2 Senaryo-II: Sıfır, anma hızı ve alan zayıflama bölgelerinde yük momenti ve parametre değişimlerine karşı İD-GKF'nin başarımı (Scenario-II: Performance of RO-EKF against the load torque and parameter changes in zero speed, rated speed, and field weakening regions)

Alan zayıflama bölgesinde artan hız referansına (n_m^r 'ye) bağlı olarak gerilim sınırlamasından dolayı zayıflayan akı referansının ($|\varphi_r|^r$ 'nin) değişimine ait matematiksel ifade Denklem 16'da, akı referansının zayıflaması ile birlikte mıknatıslama endüktansının doğal olarak değişimi Denklem 17'de verilmiştir [2].

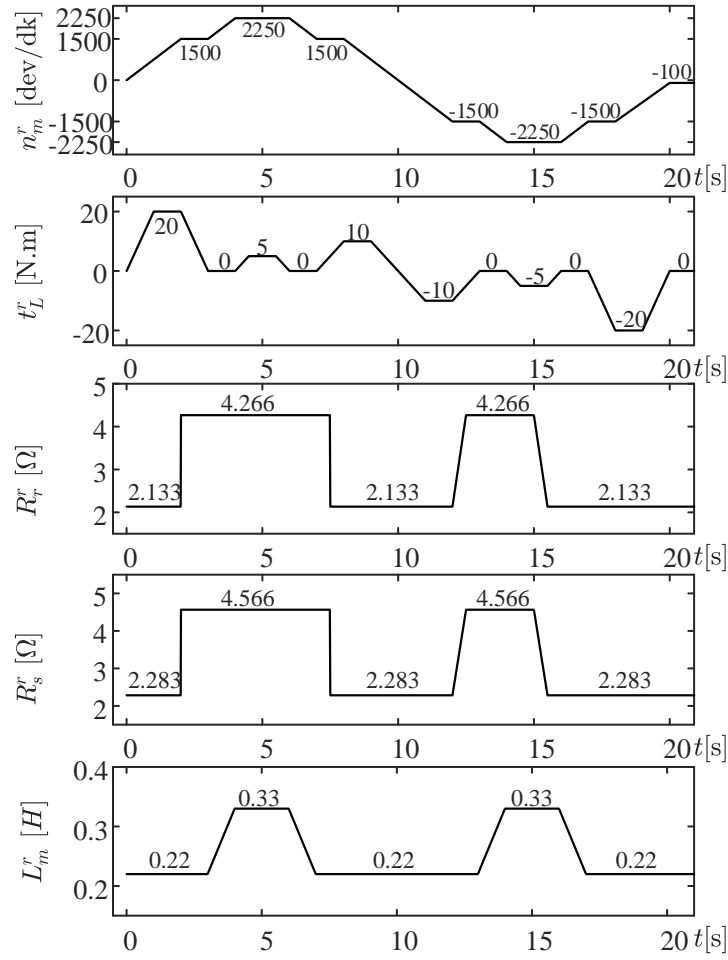
$$|\varphi_r|^r = \begin{cases} \frac{n_a}{n_m^r} |\varphi_r|^a & , \quad n_m^r > n_a \\ 1 & , \quad n_m^r \leq n_a \end{cases} \quad 16$$

$$L_m^r = \begin{cases} \frac{|\varphi_r|^a}{|\varphi_r|^r} L_{mn} & , \quad n_m^r > n_a \\ L_{mn} & , \quad n_m^r \leq n_a \end{cases} \quad 17$$

Burada n_a ASM'nin anma hızını, n_m^r DVK tabanlı ASM sürücüsüne uygulanan referans hızı, $|\varphi_r|^a$ akı referansının anma değerini, L_m^r alan zayıflama bölgesinde akı seviyesi ile doğal olarak değişen mıknatıslama endüktansını ifade etmektedir.

Önerilen kestirici Şekil 6'da verilen n_m , R_r , L_m ve t_L 'nin değişimleri ile test edilmektedir. n_m , R_r , L_m ve t_L 'nin değişimlerine ait Şekil 6'da verilen referanslar altında kestirim algoritmasını ve bu algoritmayı kullanan DVK'lı ASM sürücü sistemini test etmek için üretilen bu senaryoda ise,

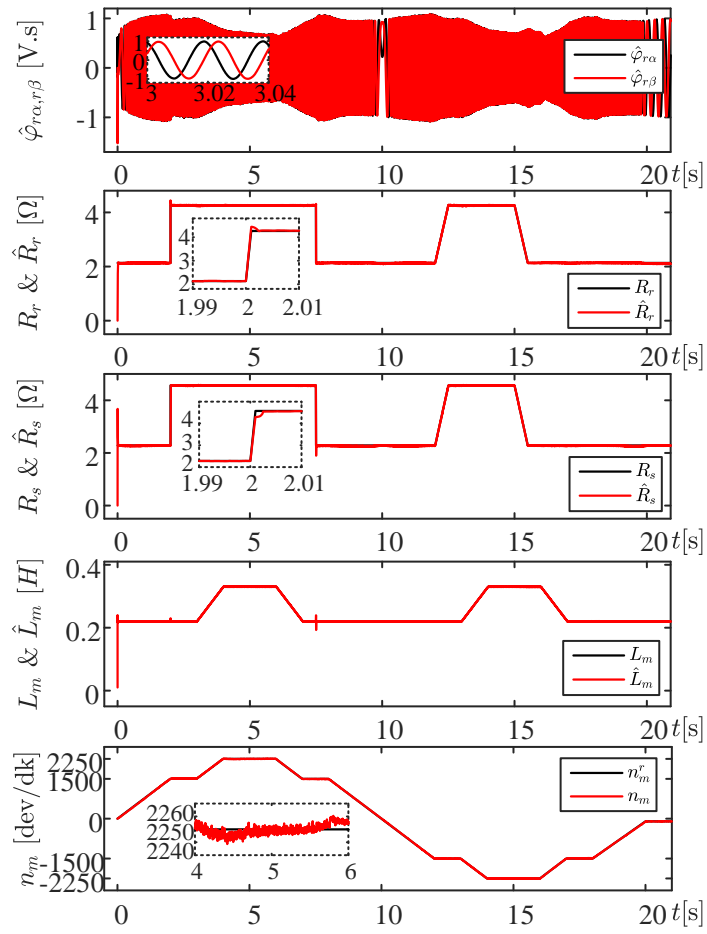
- ASM çok düşük hız ile birlikte alan zayıflama bölgesini (anma hızın %150'sini) de içeren geniş hız aralığında sürülmektedir.
- ASM'ye geniş bir hız aralığında değeri 20 Nm ve -20 Nm arasında değiştirilen yük momenti uygulanmaktadır.
- Farklı hız ve yük momenti değerleri altında R_r ve R_s doğrusal ve/veya basamak şeklinde anma değerleri ve iki katı arasında değiştirilmektedir.
- L_m değeri ise alan zayıflama bölgesinde rotor akısında meydana gelen azalma ile birlikte Denklem 17'ye göre doğal olarak artırılmaktadır.



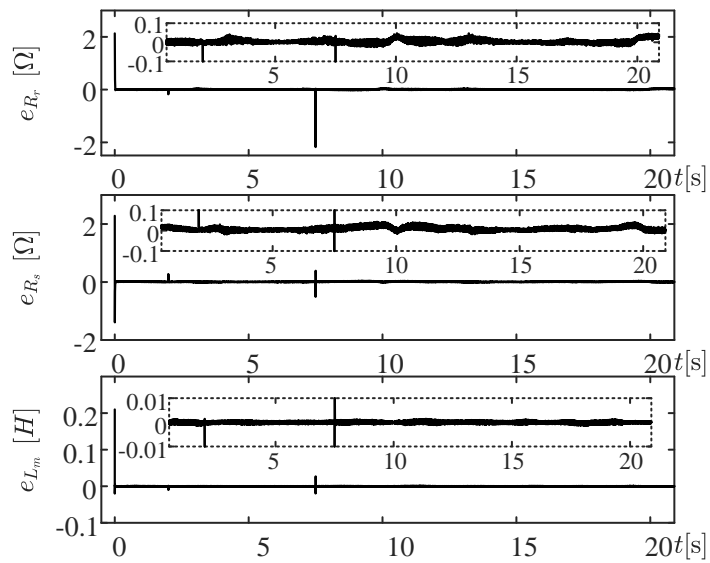
Şekil 6. İD-GKF temelli doğrudan vektör kontrollü ASM sürücü sistemini test etmek için üretilen referans değişimler (Senaryo-II)

Şekil 4-5 ve Şekil 7-8’de verilen benzetim sonuçları incelendiğinde aşağıdaki gözlemler yapılabilir:

- Başlangıç koşulları sıfır olarak seçilen kestirimlerin tamamı ($\varphi_{r\alpha}$, $\varphi_{r\beta}$, R_r , R_s ve L_m) referans değerine kısa süre içerisinde yakınsamaktadır.
- Şekil 4 ve 5’te ile verilen benzetim sonuçlarında, $t = 2.s$ ’de basamak şeklinde ve eş-zamanlı olarak R_r , R_s ve L_m anma değerlerinin iki katına çıkartılarak İD-GKF algoritmasının kestirim başarımı zorlanmıştır. Bu zorlayıcı değişime rağmen kestirimler çok kısa süre içerisinde referans değerine yakınsamaktadır.
- Şekil 4’te görülen $8s \leq t \leq 11s$ aralığında sıfır hız ve sıfır yük momenti çalışmasından dolayı ASM’lerin durum ve parametre kestirimi için en kötü senaryo olan doğru akım koşulu [20] oluşturulmuştur. Buna rağmen önerilen İD-GKF algoritması en zorlu bu senaryoda durum ve parametre kestirimlerini gerçekleştirmektedir.
- Şekil 7’de verilen benzetim sonuçlarında ise İD-GKF algoritmasının kestirim başarımını göstermek için hem anma hızında hem de alan zayıflama bölgesinde parametre ve yük momenti değişimleri oluşturulmuştur. Bu değişimlere karşı önerilen kestirim algoritması yüksek kestirim başarımı göstermektedir.
- İnan vd. 2018’de [19] sunulan çalışmada R_r , R_s TD-GKF ile kestirirken L_m ’nin kestirimi çevrimiçi kestirici ile kestirilmiştir. Bu çalışmada önerilen kestirici ise [19]’dan farklı olarak R_r , R_s ve L_m ’nin eş-zamanlı kestirimini tek bir İD-GKF algoritması kullanarak kestirmektedir.



Şekil 7. Doğrudan vektör kontrollü ASM sürücüsü ve İD-GKF tabanlı durum ve parametre kestiricisine ait benzetim sonuçları (Senaryo-II)



Şekil 8. Doğrudan vektör kontrollü ASM sürücüsü ve İD-GKF tabanlı durum ve parametre kestiricisine ait izleme ve kestirim hataları (Senaryo-II)

Özetle, önerilen kesirim algoritması ile hız-algılayıcılı DVK tabanlı ASM sürücüsü için gerekli olan $\varphi_{r\alpha}$ ve $\varphi_{r\beta}$ durumları ile birlikte R_r , R_s ve L_m parametreleri benzetim ortamında yüksek bir doğrulukla kestirilebilmektedir.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS) SONUÇLARI VE TARTIŞMALAR (SIMULATION RESULTS AND DISCUSSIONS)

Bu çalışmada, ASM sürücüleri için hız-algılayıcılı İD-GKF algoritması kullanılarak yeni bir durum ve parametre kestiricisi tasarlanmıştır. Tasarlanan kestirici hız-algılayıcılı DVK sistemleri için gerekli olan $\varphi_{r\alpha}$ ve $\varphi_{r\beta}$ ile birlikte ASM'nin çalışma koşulları (sıcaklık, frekans ve gerilim seviyesi) ile değerleri değişebilen R_r , R_s ve L_m 'nin eş-zamanlı kestirimini geniş bir hız aralığı için sadece İD-GKF algoritması kullanarak benzetim ortamında gerçekleştirmektedir. Önerilen kestirim algoritmasından ve önerilen kestirim algoritmasını kullanan hız-algılayıcılı DVK sisteminden elde edilen benzetim sonuçları oldukça yüksek başarıma sahiptir. Bu çalışma, sadece bir İD-GKF ve bir ASM modeli kullanılarak R_r , R_s ve L_m 'nin eş-zamanlı olarak kestirildiği literatürdeki ilk çalışma olarak bilinmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] P. Vas, Sensorless Vector and Direct Torque Control. Oxford University Press (1998).
- [2] R. Inan, M. Barut, Bi input-extended Kalman filter-based speed-sensorless control of an induction machine~capable of working in the field-weakening region. Turk. J. Electr. Eng. Comput. Sci. 22:3 (2014) 588-604.
- [3] R. Kumar, S. Das, P. Syam, A. K. Chattopadhyay, Review on model reference adaptive system for sensorless vector control of induction motor drives. IET Electr. Power Appl., 9:7 (2015) 496-511.
- [4] M. Wlas, Z. Krzeminski, H.A. Toliyat, Neural-Network-Based Parameter Estimations of Induction Motors. IEEE Trans. Ind. Electron., 55:4 (2008) 1783-1794.
- [5] B. L. G. Costa, B. A. Angélico, A. Goedtel, M. F. Castoldi, C. L. Graciola, Differential Evolution Applied to DTC Drive for Three-Phase Induction Motors Using an Adaptive State Observer. J. Control Autom. Electr. Syst., 26:4 (2015) 403-420.
- [6] F. Auger, M. Hilaret, J. M. Guerrero, E. Monmasson, T. Orłowska-Kowalska, S. Katsura, Industrial Applications of the Kalman Filter: A Review. IEEE Trans. Ind. Electron., 60:12 (2013) 5458-5471.
- [7] I. M. Alsofyani, N. R. N. Idris, 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 Trans. Power Electron., 31:4 (2016) 3027-3035.
- [8] E. Zerdali, Genişletilmiş Karmaşık Kalman Filtresi Tabanlı Hız-Algılayıcısız Asenkron Motor Sürücüsünün Tasarımı. GU J Sci, Part C, 6:4 (2018) 877-886.
- [9] M. Comanescu, 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, (2017) 270-275.
- [10] S. Yang, D. Ding, X. Li, Z. Xie, X. Zhang, L. Chang, A Novel Online Parameter Estimation Method for Indirect Field Oriented Induction Motor Drives. IEEE Trans. Energy Convers., 32:4 (2017) 1562-1573.

- [11] V.Arunachalam, H. Srinivasan, A. Muthuramalingam, A novel NN based rotor flux MRAS to overcome low speed problems for rotor resistance estimation in vector controlled IM drives. *Front. Energy*, 10:4 (2016) 382-392. [11] V.Arunachalam, H. Srinivasan, A. Muthuramalingam, A novel NN based rotor flux MRAS to overcome low speed problems for rotor resistance estimation in vector controlled IM drives. *Front. Energy*, 10:4 (2016) 382-392.
- [12] Y. Guo, Z. Li, B. Dai, X. Zhang, X. A full-order sliding mode flux observer with stator and rotor resistance adaptation for induction motor. 2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), San Antonio, TX, USA, (2018) 855-860.
- [13] G.J. Jo, J.W. Choi, A Novel Method for the Identification of the Rotor Resistance and Mutual Inductance of Induction Motors Based on MRAC and RLS Estimation. *J. Power Electron.*, 18:2 (2018) 492–501.
- [14] L. Liu, Y. Guo, J. Wang, Online Identification of Mutual Inductance of Induction Motor without Magnetizing Curve. 2018 Annual American Control Conference (ACC), Milwaukee, WI, USA, (2018), 3293–3297.
- [15] R. Demir, M. Barut, Novel hybrid estimator based on model reference adaptive system and extended Kalman filter for speed-sensorless induction motor control. *Trans. Inst. Meas. Control*, 40:13 (2018) 3884-3898.
- [16] R. Demir, M. Barut, R. Yildiz, R. Inan, E. Zerdali, 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, (2017) 376-381.
- [17] R. Demir, M. Barut, R. Yildiz, Asenkron Motorların Hız-Algılayıcı Doğrudan Vektör Kontrolü için İndirgenmiş Dereceli Genişletilmiş Kalman Fitresi Tabanlı Parametre Kestirimi. *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı (TOK2017)*, Istanbul, Turkey, (2017) 562- 567.
- [18] R. Demir, M. Barut, R. Yildiz, Reduced Order Extended Kalman Filter based Parameter Estimations for speed-sensored Induction Motor Drive. *Pamukkale Univ. J. Eng. Sci.*, 24:8 (2018) 464–1471.
- [19] R. İnan, R., Demir, M. Barut, ASENKRON MOTORUN KARMA KESTİRİCİ TABANLI HIZ-ALGILAYICILI DOĞRUDAN VEKTÖR KONTROLÜ. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendis. Bilim. Derg.*, 7:2 (2018) 612-623.
- [20] J. Holtz, Sensorless control of induction motors-performance and limitations. *Proceedings of the 2000 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE 2000*, Cholula, Puebla, Mexico, 1 (2000) PL12-PL20.