

ASENKRON MOTORUN İNDİRGENMİŞ-DERECELİ UYARLAMALI GENİŞLETİLMİŞ KALMAN FİLTRESİ İLE DURUM VE PARAMETRE KESTİRİMİ

Emrah ZERDALI¹ (ORCID: 0000-0003-1755-0327)*
Remzi İNAN¹ (ORCID: 0000-0003-1717-3875)

¹Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Niğde, Türkiye

Geliş / Received: 14.02.2019

Kabul / Accepted: 02.07.2019

ÖZ

Bu çalışmada, asenkron motorların (ASM'lerin) hız-algılayıcısız kontrolü için indirgenmiş-dereceli uyarlamalı genişletilmiş Kalman filtresinin (GKF'nin) tasarımı gerçekleştirilmiş ve bu gözlemleyici hız-algılayıcısız doğrudan vektör kontrollü sürücü sisteminde kullanılarak başarımlı benzetim çalışmaları altında test edilmiştir. Önerilen gözlemleyici ASM'lerin vektör kontrolü için gerekli olan rotor akılarının duran eksen takımı bileşenleri ve rotor mekanik hızına ek olarak bozucu yük momenti değişimlerini de kestirmektedir. Diğer taraftan, GKF'lerin kestirim başarımlı sistem (**Q**) ve ölçme (**R**) hatası kovaryans matrislerinin doğru bilinmesine bağlıdır. Bu matrisler literatürde genellikle sabit kabul edilmekte ve deneme-yanılma yöntemi ile belirlenmektedir. Fakat bu matrisler ASM'nin çalışma koşullarından etkilenmekte ve daha yüksek başarımlı kestirimler elde edebilmek için çalışma koşullarına göre güncellenmelidirler. Hem **Q** hem de **R**'nin eşzamanlı değiştirilmesi ıraksama veya takip sorunlarına neden olabileceğinden, önerilen çalışmada sadece **Q** çalışma koşullarını göz önünde bulundurularak unutma faktörüne sahip uyarlamalı GKF (UGKF) algoritması ile güncellenmiştir. Ayrıca, gerçek-zamanlı uygulamalar için işlem yükünü azaltmak amacıyla UGKF indirgenmiş-dereceli olarak tasarlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Asenkron motor, hız-algılayıcısız kontrol, indirgenmiş-dereceli uyarlamalı genişletilmiş Kalman filtresi

STATE AND PARAMETER ESTIMATIONS OF INDUCTION MOTOR WITH REDUCED-ORDER ADAPTIVE EXTENDED KALMAN FILTER

ABSTRACT

In this study, the design of reduced-order adaptive extended Kalman filter (EKF) for speed-sensorless control of induction motors (IMs) is performed, and its performance is tested using it in a speed-sensorless direct vector controlled drive system under simulations. The proposed observer estimates the stator stationary axis components of rotor fluxes and rotor mechanical speed required for vector control in addition to disturbance load torque. On the other hand, estimation performance of EKFs depends on the correct selection of system (**Q**) and measurement (**R**) error covariance matrices. In the literature, these matrices are generally assumed as constant and determined by the trial-and-error method. However, those matrices are affected by operating conditions of IM and should be updated according to operating conditions in order to obtain higher performance estimations. Since the simultaneously update of both **Q** and **R** may lead to divergence or tracking problems, only **Q** is updated considering operating conditions by adaptive EKF (AEKF) algorithm having a forgetting factor. In addition, AEKF has been designed as reduced-order with the aim of reduction of its computational burden for real-time applications.

Keywords: Induction motor, speed-sensorless control, reduced-order adaptive extended Kalman filter

*Corresponding author / Sorumlu yazar. Tel.: +90 388 225 2286 ; e-mail / e-posta: ezerdali@ohu.edu.tr

1. GİRİŞ

Asenkron motorlar (ASM'ler) kolay üretilibilmeleri, az bakım gerektirmeleri ve zorlu çalışma koşulları altında çalışabilme kabiliyetlerinden dolayı endüstride yaygın olarak kullanılmaktadırlar. ASM'lerin yüksek başarılı kontrolü rotor akısının genliği ve konumu ile birlikte rotor mekanik hızının bilinmesini gerektirmektedir. Bu değişkenleri ölçmek sürücü sisteminin karmaşıklığını ve maliyetini arttırmaktadır. Diğer taraftan, hız-algılayıcısız kontrol sürücü sistemlerinin karmaşıklığını ve maliyetini düşürmesi, dayanıklılığını arttırması gibi üstünlüklere sahiptir. Literatürde, hem ASM'lerin hem de hız-algılayıcısız kontrolün üstünlüklerini bir araya getiren çalışmalar mevcuttur. Bu amaçla, ASM'lerin durum ve/veya parametre kestirimi için modele uyarmalı sistemler [1], tam-dereceli gözlemleyiciler [2], genişletilmiş Luenberger gözlemleyicileri [3], genişletilmiş Kalman filtreleri (GKF'ler) [4], kayma-kipli gözlemleyiciler [5] gibi model tabanlı kestirim yöntemleri önerilmiştir.

Diğer yöntemlerin aksine, GKF'ler sistem ve ölçme gürültülerini de hesaba katarak durum ve/veya parametre kestirimine olasılıksal (stochastic) bir yaklaşım sunmaktadır. Bununla birlikte, GKF'lerin kestirim başarımı sistem ($\mathbf{Q}$) ve ölçme ($\mathbf{R}$) gürültü kovaryans matrislerinin doğru seçilmesine bağlıdır. Bu matrisler literatürde genellikle sabit olarak kabul edilmekte [4], [6]–[8] ve deneme-yanılma yöntemi [4], [6], [8] veya küresel eniyileme (global optimization) algoritmaları yardımıyla [7] belirlenmektedir. Bu yöntemlerin zaman alıcı olması ve bu matrislerin ASM'nin çalışma koşullarından etkilenmesi diğer olumsuzlukları oluşturmaktadır. Daha yüksek kestirim başarımının elde edilebilmesi için bu matrisler çalışma koşulları göz önünde bulundurularak güncellenmelidirler. Hem $\mathbf{Q}$ hem de $\mathbf{R}$ 'nin eşzamanlı olarak değiştirilmesi iraksama veya takip sorunlarına neden olabileceğinden, literatürde bu matrislerden sadece birinin güncellenmesi önerilmiştir [9]. Bu matrisleri bulanık mantık [10], [11] veya uyarlamalı (adaptive) yapıları [12]–[14] kullanarak çalışma koşullarına göre güncelleyen uyarlamalı GKF (UGKF) yapıları önerilmiştir. Bulanık mantık tabanlı UGKF algoritmalarının tasarımı uzmanlık gerektirmesinden dolayı sorunludur. Bu nedenle, uyarlamalı yapıları kullanan UGKF'lerin tasarım kolaylığı ve az işlem yükü gerektirmesi bu algoritmaları ön plana çıkarmaktadır.

Ayrıca, gerçek-zamanlı durum ve/veya parametre kestiriminde işlem yükü düşünülmesi gereken diğer önemli bir unsuru oluşturmaktadır. Bu amaçla, literatürde kod eniyilemesinin yanı sıra GKF algoritmalarının indirgenmiş dereceli sürümleri [15]–[17] de önerilmiştir.

Bu çalışmanın genel katkısı rotor akılarının duran eksen takımı bileşenlerini (φ_{ra} ve φ_{rb}), rotor mekanik hızını (ω_m) ve yük momentini (t_L) kestiren indirgenmiş-dereceli UGKF (İD-UGKF) algoritmasının tasarımını ve benzetim çalışmaları ile doğrulanmasını gerçekleştirmektir. Önerilen algoritmanın başarımı farklı çalışma bölgelerinde yük momenti ve hız terslemeleri altında test edilmektedir.

Bu çalışma dört bölüm olarak düzenlenmiştir. Bölüm 1'de ASM'lerin hız-algılayıcısız kontrolü ile ilgili güncel literatür ve bu çalışmanın genel katkısı sunulmaktadır. Bölüm 2'de dinamik ASM modelinin elde edilişi ve İD-UGKF algoritmasının tasarım detayları verilmektedir. Bölüm 3'te önerilen İD-UGKF algoritmasının kullanıldığı hız-algılayıcısız vektör kontrollü sürücünün benzetim çalışmaları altında doğrulanması gerçekleştirilmektedir. Son olarak, Bölüm 4'te elde edilen gözlemler ve sonuçlar sunulmaktadır.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. ASM'nin Genişletilmiş Matematiksel Modeli

ASM'nin stator duran eksen takımındaki rotor akısı tabanlı genişletilmiş altıncı dereceden modeli (1) ve (2)'deki genel biçimde verilebilir.

$$\begin{aligned}\mathbf{x}_{k+1} &= \mathbf{f}_e(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) + \mathbf{w}_k \\ &= \mathbf{A}(\mathbf{x}_k)\mathbf{x}_k + \mathbf{B}\mathbf{u}_k + \mathbf{w}_k\end{aligned}\quad (1)$$

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

Burada, $\mathbf{x}_k$ ayırık durum vektörünü, $\mathbf{f}_e$ durum ve girişlerin doğrusal olmayan fonksiyonunu, $\mathbf{A}$ sistem matrisini, $\mathbf{B}$ giriş matrisini, $\mathbf{u}_k$ giriş vektörünü, $\mathbf{h}$ çıkış fonksiyonunu, $\mathbf{H}$ ölçüm matrisini, $\mathbf{w}_k$ ve $\mathbf{v}_k$ sırasıyla sistem ve ölçme gürültüsünü ifade etmektedir.

(1) ve (2)'deki genel ifade ile gösterilen ASM modeline ait detaylar (3) ve (4)'te verilmiştir.

ASENKRON MOTORUN İNDİRGENMİŞ-DERECELİ UYARLAMALI GENİŞLETİLMİŞ KALMAN FİLTRESİ İLE DURUM VE PARAMETRE KESTİRİMİ

A matrisinde kullanılan katsayılar $a_1 = (\frac{R_s}{L_\sigma} + \frac{R'_r L_m^2}{L_r'^2 L_\sigma})T$, $a_2 = \frac{R'_r L_m}{L_r'^2 L_\sigma}T$, $a_3 = \frac{L_m p_p}{L_\sigma L_r}T$, $a_4 = \frac{R'_r L_m}{L_r'}T$, $a_5 = \frac{R'_r}{L_r'}T$, $a_6 = p_p T$, $a_7 = \frac{3p_p L_m}{2J_L L_r'}T$, $a_8 = \frac{B_t}{J_t}T$, $a_9 = \frac{T}{J_t}b_1 = \frac{T}{L_\sigma}$ 'dir. Ayrıca R_s ve L_s sırasıyla stator direncini ve endüktansını, R'_r ve L_r' sırasıyla stator tarafına indirgenmiş rotor direncini ve endüktansını, L_m mıknatıslanma endüktansını, $L_\sigma = L_s - L_m^2/L_r'$ stator geçici endüktansını, p_p kutup çiftini, B_t ASM'nin ve yükün toplam viskoz sürtünme terimini, J_t ASM'nin ve yükün toplam eylemsizliğini, T örnekleme zamanını, $v_{s\alpha}$ ve $v_{s\beta}$ motora uygulanan stator gerilimlerinin duran eksen takımı bileşenlerini ifade etmektedir.

$$\begin{bmatrix} i_{s\alpha,k+1} \\ i_{s\beta,k+1} \\ \varphi_{r\alpha,k+1} \\ \varphi_{r\beta,k+1} \\ \omega_{m,k+1} \\ t_{L,k+1} \end{bmatrix}_{\mathbf{x}_{k+1}} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1-a_1 & 0 & a_2 & a_3\omega_{m,k} & 0 & 0 \\ 0 & 1-a_1 & -a_3\omega_{m,k} & a_2 & 0 & 0 \\ a_4 & 0 & 1-a_5 & -a_6\omega_{m,k} & 0 & 0 \\ 0 & a_4 & a_6\omega_{m,k} & 1-a_5 & 0 & 0 \\ -a_7\varphi_{r\beta,k} & a_7\varphi_{r\alpha,k} & 0 & 0 & 1-a_8 & -a_9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}(\mathbf{x}_k)} \begin{bmatrix} i_{s\alpha,k} \\ i_{s\beta,k} \\ \varphi_{r\alpha,k} \\ \varphi_{r\beta,k} \\ \omega_{m,k} \\ t_{L,k} \end{bmatrix}_{\mathbf{x}_k} + \underbrace{\begin{bmatrix} b_1 & 0 \\ 0 & b_1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{B}} \begin{bmatrix} v_{s\alpha,k} \\ v_{s\beta,k} \end{bmatrix}_{\mathbf{u}_k} + \mathbf{w}_k \quad (3)$$

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

2.2. İD-UGKF Algoritmasının Tasarımı

UGKF algoritmasının gerçek-zamanlı uygulamalardaki kullanılabilirliğini arttırmak amacıyla (3) ve (4)'te verilen tam-dereceli model sadece ölçülemeyen durumların ve parametrelerin kestirilmesi amacıyla indirgenmiş-dereceli olarak tekrar düzenlenmiştir. İndirgenmiş-dereceli ASM modeline ait detaylar (5) ve (6)'da sunulmaktadır.

$$\begin{bmatrix} \varphi_{r\alpha,k+1} \\ \varphi_{r\beta,k+1} \\ \omega_{m,k+1} \\ t_{L,k+1} \end{bmatrix}_{\mathbf{x}_{k+1}} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1-a_5 & -a_6\omega_{m,k} & 0 & 0 \\ a_6\omega_{m,k} & 1-a_5 & 0 & 0 \\ a_7i_{s\beta,k} & -a_7i_{s\alpha,k} & 1 & -a_9 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}(\mathbf{x}_k)} \begin{bmatrix} \varphi_{r\alpha,k} \\ \varphi_{r\beta,k} \\ \omega_{m,k} \\ t_{L,k} \end{bmatrix}_{\mathbf{x}_k} + \underbrace{\begin{bmatrix} a_4 & 0 \\ 0 & a_4 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{B}} \begin{bmatrix} i_{s\alpha,k} \\ i_{s\beta,k} \end{bmatrix}_{\mathbf{u}_k} + \mathbf{w}_k \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} i_{s\alpha,k+1} - (1-a_1)i_{s\alpha,k} - b_1v_{s\alpha,k} \\ i_{s\beta,k+1} - (1-a_1)i_{s\beta,k} - b_1v_{s\beta,k} \end{bmatrix}_{\mathbf{z}_k} = \underbrace{\begin{bmatrix} a_2 & a_3\omega_{m,k} & 0 & 0 \\ -a_3\omega_{m,k} & a_2 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{H}_k} \begin{bmatrix} \varphi_{r\alpha,k} \\ \varphi_{r\beta,k} \\ \omega_{m,k} \\ t_{L,k} \end{bmatrix}_{\mathbf{x}_k} + \mathbf{v}_k \quad (6)$$

Bu çalışmada, ASM'nin hız-algılayıcısız doğrudan vektör kontrolü (DVK'sı) için gerekli $\varphi_{r\alpha}$, $\varphi_{r\beta}$, ω_m ve t_L kestirimlerinin sağlanması amacı ile (5) ve (6)'da verilen modeli kullanan İD-UGKF gözlemleyicisi önerilmiştir. Önerilen İD-UGKF yönteminin geleneksel İD-GKF yöntemi ile arasındaki farkın anlaşılması amacı ile öncelikle İD-GKF yöntemine ilişkin eşitlikler ve algoritma akış süreci aşağıdaki gibi verilmiştir [18].

- Doğrusallaştırma adımı

$$\mathbf{F}_{k+1|k} = \frac{\partial \mathbf{f}_e(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k)}{\partial \mathbf{x}_k} \Big|_{\mathbf{x}_k = \hat{\mathbf{x}}_k} \quad (7)$$

$$\mathbf{H}_{k+1|k} = \frac{\partial \mathbf{h}(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k)}{\partial \mathbf{x}_k} \Big|_{\mathbf{x}_k = \hat{\mathbf{x}}_k} \quad (8)$$

- Zaman güncellemesi adımı

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1}^- = \mathbf{f}_e(\hat{\mathbf{x}}_k, \mathbf{u}_{k+1}) \quad (9)$$

$$\mathbf{P}_{k+1}^- = \mathbf{F}_{k+1|k} \mathbf{P}_k \mathbf{F}_{k+1|k}^T + \mathbf{Q}_k \quad (10)$$

- Ölçüm güncellemesi adımı

$$\mathbf{K}_{k+1} = \mathbf{P}_{k+1}^- \mathbf{H}_{k+1|k}^T [\mathbf{H}_{k+1|k} \mathbf{P}_{k+1}^- \mathbf{H}_{k+1|k}^T + \mathbf{R}_k]^{-1} \quad (11)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1} = \hat{\mathbf{x}}_{k+1}^- + \mathbf{K}_{k+1} (\mathbf{z}_{k+1} - \mathbf{H}_{k+1|k} \hat{\mathbf{x}}_{k+1}^-) \quad (12)$$

$$\mathbf{P}_{k+1} = \mathbf{P}_{k+1}^- - \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{H}_{k+1|k} \mathbf{P}_{k+1}^- \quad (13)$$

Burada, $\mathbf{F}_k$, durum ve girişlerin doğrusal fonksiyonudur. $\hat{\mathbf{x}}_k$, durum vektörüdür. $\mathbf{H}_k$, ölçüm eşitliğinin doğrusal fonksiyonudur. $\mathbf{P}_k^-$ ve $\mathbf{P}_k$, sırasıyla önceki ve sonraki durum ve parametre kestirim hatasının kovaryans matrisleridir. $\mathbf{K}_k$, Kalman kazancıdır. $\mathbf{z}_k$, ölçüm vektörüdür.

İD-UGKF yönteminin geleneksel İD-GKF yöntemi ile arasındaki fark, İD-UGKF yönteminde kestirilen durum vektörünün varyansının artırılması amacı ile durum ve parametre kestirim hatası kovaryans matrisine ölçekleme faktörü λ_k 'nin uygulanmasıdır [13]. İD-UGKF yöntemine ait eşitlikler aşağıdaki gibi verilmiştir [14].

$$\mathbf{P}_{k+1}^- = \lambda_{k+1} \mathbf{F}_{k+1|k} \mathbf{P}_k \mathbf{F}_{k+1|k}^T + \mathbf{Q}_k \quad (14)$$

En iyi (optimum) sönümleme faktörü aşağıdaki gibidir:

$$\lambda_{k+1} = \max \left\{ 1, \frac{\text{tr}[\mathbf{N}_{k+1}]}{\text{tr}[\mathbf{M}_{k+1}]} \right\} \quad (15)$$

$$\mathbf{M}_{k+1} = \mathbf{H}_{k+1} \mathbf{F}_{k+1|k} \mathbf{P}_k \mathbf{F}_{k+1|k}^T \mathbf{H}_{k+1|k}^T \quad (16)$$

$$\mathbf{N}_{k+1} = \mathbf{C}_0 - \mathbf{R}_k - \mathbf{H}_{k+1|k} \mathbf{Q}_k \mathbf{H}_{k+1|k}^T \quad (17)$$

Burada $\text{tr}[*]$ matrisin iz düşümünü ifade etmekte olup, $\mathbf{M}_{k+1}$ ve $\mathbf{N}_{k+1}$ 'e ait eşitlikler sırasıyla (16) ve (17)'de verilmiştir. $\mathbf{C}_0$ ise aşağıdaki gibidir:

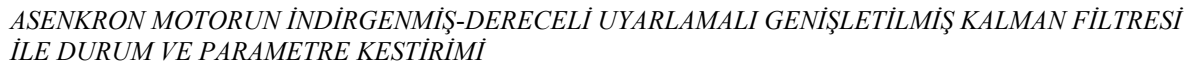
$$\mathbf{C}_0 = \begin{cases} \frac{\mathbf{v}_0 \mathbf{v}_0^T}{2}, & k = 0 \\ \frac{\lambda_{k+1} \mathbf{v}_{k+1} \mathbf{v}_{k+1}^T}{1 + \lambda_{k+1}}, & k \geq 1 \end{cases} \quad (18)$$

$$\mathbf{v}_{k+1} = \mathbf{z}_{k+1} - \mathbf{H}_{k+1|k} \hat{\mathbf{x}}_{k+1}^- \quad (19)$$

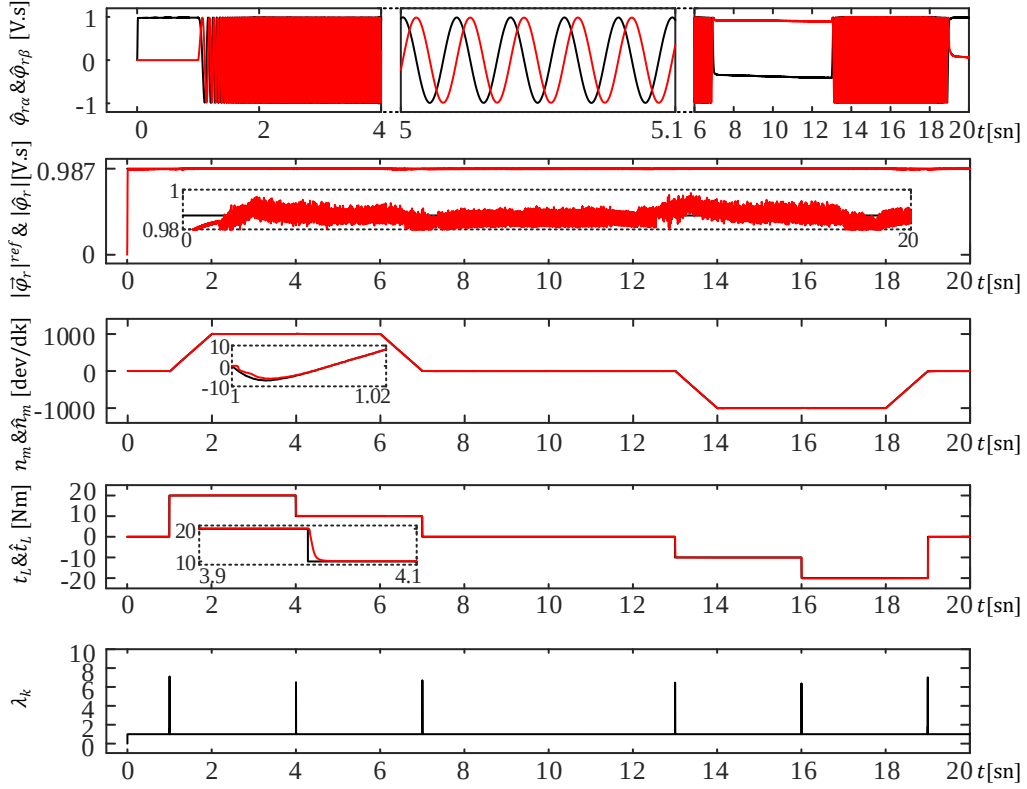
$\lambda_{k+1} \leq 1$ durumu filtreleme işleminin sürekli-halde olduğunu, $\lambda_{k+1} > 1$ ise filtreleme işleminin geçici halde olduğu ve kararsız olma eğiliminde olabileceği anlamına gelmektedir. (15)'deki ifade incelendiğinde, $\lambda_{k+1} > 1$ durumunda İD-UGKF algoritmasının kestirim başarımının artırıldığı, $\lambda_{k+1} = 1$ olması halinde ise İD-UGKF algoritmasının İD-GKF algoritması gibi çalıştığı anlaşılmaktadır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

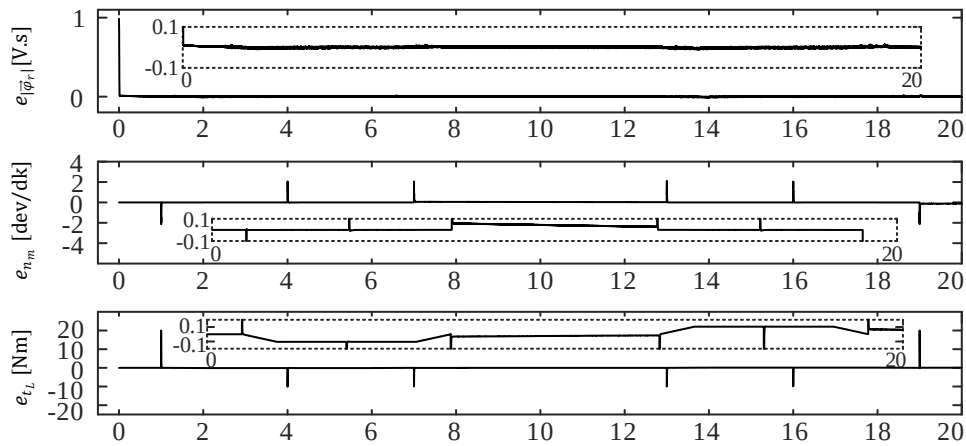
Bu çalışmada, $\varphi_{r\alpha}$, $\varphi_{r\beta}$, ω_m ve t_L kestirimleri için tasarlanan İD-UGKF algoritmasının kestirim başarımı Şekil 1'deki Matlab Simulink ortamında hazırlanan hız-algılayıcısız DVK sistemi yardımıyla benzetim ortamında test edilmiştir. Benzetim çalışmalarında kullanılan ASM modeline ait motor parametreleri Tablo 1'de sunulmuştur [19]. Hız-algılayıcısız DVK sistemindeki tüm denetçiler geleneksel oransal-integral (PI) yapısındadırlar. Anahtarlama devresi, alan denetçisi ve moment denetçisi yardımıyla elde edilen referans akımlar ile birlikte



Şekil 1'deki İD-UGKF tabanlı hız-algılayıcısız DVK sisteminin başarımı Şekil 2'de sunulan zorlu referans değişimleri altında test edilmiştir. Referans değişimleri düşük ve yüksek hız bölgelerini de içeren geniş bir hız aralığında yük momenti değişimleri altındaki başarımı test etmeye odaklanmaktadır. Elde edilen kontrol ve kestirim başarımları Şekil 3'te ve meydana gelen kontrol ve kestirim hataları da Şekil 4'te sunulmaktadır. Benzetim sonuçları değerlendirildiğinde aşağıdaki yorumlar yapılabilir:



Şekil 3. İD-UGKF tabanlı hız-algılayıcısız DVK sistemine ait kontrol ve kestirim başarımları



Şekil 4. İD-UGKF tabanlı hız-algılayıcısız DVK sistemine ait kontrol ve kestirim hataları

- İD-UGKF algoritması tarafından kestirilen tüm durum ve parametrelerin başlangıç koşulları sıfır alınmasına rağmen, algoritmanın çok kısa bir zaman zarfında gerçek değerlerine yakınsadığı Şekil 3'te görülmektedir. Ayrıca Şekil 4'teki kontrol ve kestirim hataları da hızla sıfıra yakınsamaktadır.

ASENKRON MOTORUN İNDİRGENMİŞ-DERECELİ UYARLAMALI GENİŞLETİLMİŞ KALMAN FİLTRESİ İLE DURUM VE PARAMETRE KESTİRİMİ

- $0 < t < 1$, $7 < t < 13$ ve $19 < t < 20$ aralılarında ASM'nin model tabanlı durum ve parametre kestirimi için en zorlu koşul olan doğru akım (da) koşulu, yani sıfır hız sıfır yük momenti, test edilmektedir. Bu durumda statordan rotora indüksiyon gerçekleşmemekte ve akılar sadece da bileşenlere sahip olmaktadır. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, önerilen sistem bu zorluğun üstesinden gelebilmektedir.
- Önerilen sürücü düşük ve yüksek hız bölgelerinde bilinmeyen bozucu yük girişlerine karşın her iki yönde de çalışabilme yeteneğine sahip olduğu Şekil 3'te sunulan sonuçlarda görülmektedir.
- Yük momenti değişimlerinin yapıldığı anlarda filtreleme işlemi geçici-hale girmekte ve bu durumda İD-UGKF algoritması $\lambda_k > 1$ olacak şekilde güncelleyerek ıraksama sorununun üstesinden gelmektedir. Bu durum hem algoritmanın hem de hız-algılayıcısız kontrol sisteminin kararlılığını arttırmakta ve geçici hal davranışını hızlandırmaktadır.
- Son olarak, kontrol ve kestirim başarımı göz önüne alındığında, geleneksel GKF tabanlı hız-algılayıcısız DVK sistemi yerine, önerilen İD-UGKF tabanlı sürücü sisteminin kullanılması azaltılmış işlem yükü ve iyileştirilmiş takip başarımı sağlamaktadır.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, φ_{ra} , φ_{rb} , ω_m ve t_L kestirimlerini gerçekleştiren azaltılmış işlem yüküne ve iyileştirilmiş takip başarımına sahip İD-UGKF algoritmasının tasarımı gerçekleştirilmiş ve bu algoritma hız-algılayıcısız DVK sistemine dahil edilerek kestirim başarımı zorlu koşullar altında test edilmiştir. Elde edilen benzetim sonuçları değerlendirildiğinde, İD-UGKF algoritmasının geleneksel GKF algoritmasına göre en iyi seçeneklerden birini oluşturduğu görülmektedir. Ayrıca, İD-UGKF'nin hız-algılayıcısız sürücü sisteminin başarımına da olumlu katkı yaptığı benzetim çalışmaları ile kanıtlanmıştır. Diğer taraftan, önerilen yöntem R_s ve R_r 'deki sıcaklık ve frekans bağımlı değişimlere ve L_m 'deki akı bağımlı değişimlere karşı duyarlıdır. Daha yüksek kestirim ve kontrol başarımı elde edebilmek için, bu değişimlerin İD-UGKF algoritmasında güncellenmesi veya bu değişimlerin durum olarak modele dahil edilip İD-UGKF ile kestirilmesi gerekmektedir. Sonraki çalışmalar değişen bu parametrelerin kestirilmesine yönelik olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] KUMAR, R., DAS, S., SYAM, P., CHATTOPADHYAY, A. K., "Review on Model Reference Adaptive System for Sensorless Vector Control of Induction Motor Drives", IET Electric Power Applications, 9, 496–511, 2015.
- [2] QU, Z., HINKKANEN, M., HARNEFORS, L., "Gain Scheduling of a Full-Order Observer for Sensorless Induction Motor Drives", IEEE Transactions on Industry Applications, 50, 3834–3845, 2014.
- [3] JOULI, M., JARRAY, K., KOUBAA, Y., BOUSSAK, M., "Luenberger State Observer for Speed Sensorless ISFOC Induction Motor Drives", Electric Power Systems Research, 89, 139–147, 2012.
- [4] BARUT, M., DEMIR, R., ZERDALI, E., 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, 4197–4206, 2012.
- [5] ZAKY, M. S., KAMEL METWALLY, M., AZAZI, H., DERAZ, S., "A New Adaptive SMO for Speed Estimation of Sensorless Induction Motor Drives at Zero and Very Low Frequencies", IEEE Transactions on Industrial Electronics, 65, 6901–6911, 2018.
- [6] ALONGE, F., CANGEMI, T., D'IPPOLITO, F., FAGIOLINI, A., SFERLAZZA, A., "Convergence Analysis of Extended Kalman Filter for Sensorless Control of Induction Motor", IEEE Transactions on Industrial Electronics, 62, 2341–2352, 2015.
- [7] ZERDALI, E., BARUT, M., "The Comparisons of Optimized Extended Kalman Filters for Speed-Sensorless Control of Induction Motors", IEEE Transactions on Industrial Electronics, 64, 4340–4351, 2017.
- [8] DEMIR, R., 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, 3884–3898, 2018.
- [9] ALMAGBILE, A., WANG, J., DING, W., "Evaluating the Performances of Adaptive Kalman Filter Methods in GPS/INS Integration", The Journal of Global Positioning Systems, 9, 33–40, 2010.

- [10] AYDIN, M., GOKASAN, M., BOGOSYAN, S., “Fuzzy Based Parameter Tuning of EKF Observers for Sensorless Control of Induction Motors”, International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), 1174–1179. Ischia, Italy, 2014.
- [11] DROZDZ, K., “Estimation of the Mechanical State Variables of the Two-Mass System Using Fuzzy Adaptive Kalman Filter - Experimental Study”, IEEE 2nd International Conference on Cybernetics (CYBCONF), 455–459. Gdynia, Poland, 2015.
- [12] ZERDALI, E., “Adaptive Extended Kalman Filter for Speed-Sensorless Control of Induction Motors”, IEEE Transactions on Energy Conversion, 34, 789–800, 2019.
- [13] JWO, D.-J., CHUNG, F.-C., WENG, T.-P., Adaptive Kalman Filter for Navigation Sensor Fusion. In C. THOMAS (Editor), Sensor Fusion and its Applications (pp. 65–90), IntechOpen Limited, London, UK, 2010.
- [14] ZERDALI, E., YILDIZ, R., İNAN, R., DEMİR, R., BARUT, M., “Adaptive Fading Extended Kalman Filter Based Speed-Sensorless Induction Motor Drive”, XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM), 1367–1373. Alexandroupoli, Greece, 2018.
- [15] LEE, K.-B., BLAABJERG, F., “Reduced-Order Extended Luenberger Observer Based Sensorless Vector Control Driven by Matrix Converter with Nonlinearity Compensation”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 53, 66–75, 2005.
- [16] HARNEFORS, L., HINKKANEN, M., “Complete Stability of Reduced-Order and Full-Order Observers for Sensorless IM Drives”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 55, 1319–1329, 2008.
- [17] DAVARI, S. A., KHABURI, D. A., WANG, F., KENNEL, R. M., “Using Full Order and Reduced Order Observers for Robust Sensorless Predictive Torque Control of Induction Motors”, IEEE Transactions on Power Electronics, 27, 3424–3433, 2012.
- [18] DEMİR, R., BARUT, M., YILDIZ, R., “Reduced-Order Extended Kalman Filter Based Parameter Estimations for Speed-Sensored Induction Motor Drive”, Pamukkale University Journal of Engineering Sciences, 24, 1464–1471, 2018.
- [19] İNAN, R., DEMİR, R., BARUT, M., “Asenkron Motorun Karma Kestirici Tabanlı Hız-Algılayıcı Doğrudan Vektör Kontrolü”, Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 7, 612–623, 2018.