



## Genişletilmiş Karmaşık Kalman Filtresi Tabanlı Hız-Algılayıcısız Asenkron Motor Sürücüsünün Tasarımı

Emrah ZERDALI<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 51240, NİĞDE

### Öz

Bu çalışmada, stator akımlarının duran eksen takımı bileşenlerini, rotor akımlarının duran eksen takımı bileşenlerini, rotor mekanik hızını ve sürtünme terimini de içeren yük momenti kestirimlerini gerçekleştiren genişletilmiş karmaşık Kalman filtresi (GKKF) tabanlı hız-algılayıcısız vektör kontrollü asenkron motor sürücüsünün tasarımı gerçekleştirilmiştir. Geleneksel genişletilmiş Kalman filtresi (GGKF) yerine, karmaşık motor modelini kullanan GGKF algoritması kullanılarak GGKF algoritmasındaki işlem yükünün düşürülmesi amaçlanmıştır. Önerilen sürücü sisteminin başarımını doğrulamak amacıyla, sürücü sistemi hız terslemeleri ve sıfır hızı da içeren geniş bir hız aralığında rampa ve basamak şeklindeki yük momenti değişimleri altında test edilmiştir. Ayrıca, önerilen GKKF algoritmasının işlem yükü aynı durumları ve parametreleri kestiren GGKF algoritması ile karşılaştırılarak işlem yükünün azaltıldığı gösterilmiştir.

### Makale Bilgisi

Başvuru: 28/03/2018  
Düzeltilme: 10/08/2018  
Kabul: 07/08/2018

### Anahtar Kelimeler

Asenkron motor  
Genişletilmiş karmaşık  
Kalman filtresi  
Durum Kestirimi  
Parametre Kestirimi

### Keywords

Induction motor  
Extended complex Kalman  
filter  
State estimation  
Parameter estimation

## The Design of Extended Complex Kalman Filter Based Speed-Sensorless Induction Motor Drive

### Abstract

In this study, an extended complex Kalman filter (ECKF) based induction motor drive is performed which fulfills the estimations of the stator stationary axis components of stator currents, stator stationary axis components of rotor fluxes, rotor mechanical speed, and load torque including friction term. Instead of the conventional extended Kalman filter (CEKF), it is aimed to reduce the computational burden in the CEKF algorithm using the ECKF algorithm, which uses a complex motor model. In order to verify the performance of the proposed drive system, it is tested under ramp and step type load torque variations in a wide speed range including speed reversals and zero speed. Moreover, it is also shown that the computational load of the proposed ECKF algorithm is reduced compared to the CEKF algorithm, which estimates the same states and parameters.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Hız-algılayıcısız asenkron motorların (ASM'lerin) vektör kontrolü endüstride yüksek kontrol başarımı gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, durum ve/veya parametre kestirim yöntemleri, kontrol yapıları ve evirici devrelerindeki geliştirmeler hala devam etmektedir. Kestirim yöntemlerinin başarımı hız-algılayıcısız sürücü sistemlerinin başarımını doğrudan etkilemektedir. Diğer taraftan, ASM'lerin yüksek dereceden doğrusal olmayan bir modele sahip olması, parametrelerinin sıcaklık, frekans ve doyum etkilerinden dolayı zamana göre değişmesi ve bilinmeyen bozucu yük girişleri bu motorların durum ve parametre kestirimini zorlaştırmaktadır [1]. Bu olumsuzlukların üstesinden gelmek amacıyla, literatürde iki faz ASM modelinin kullanıldığı açık çevrim kestiriciler [2], modele uyarlamalı sistemler [3], tam dereceli gözlemleyiciler [4], genişletilmiş Luenberger gözlemleyicileri [5], genişletilmiş Kalman filtreleri (GKF'ler) [6], kayma-kipli gözlemleyiciler [7] vb. model tabanlı birbirinden farklı yöntemler önerilmiştir.

\*İletişim Yazarı, e-mail: ezerdali@ohu.edu.tr

Diğer model-tabanlı yöntemlerden farklı olarak, GKF'ler sistem ve ölçme gürültülerini de hesaba katarak durum/parametre kestirim problemlerine olasıl (stochastic) bir yaklaşım sunmaktadır. Literatürde ASM'lerin durum ve/veya parametre kestiriminde GKF algoritması kullanan çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalar iki ana kısımda toplanabilir: hızın elektriksel durumlara göre daha yavaş değiştiği kabulü ile sabit parametre olarak kestirildiği çalışmalar [8]–[11] ve hızın mekanik hareket eşitliği yardımıyla durum olarak kestirildiği çalışmalar [1], [12]–[14]. İlk grup çalışmalar incelendiğinde, [8]'de beşinci dereceden optimize edilmiş GKF algoritması ile, [9]'da çoklu model tabanlı GKF algoritması ile akı ve hız kestirimleri gerçekleştirilmiştir. Ref. [9]'da kullanılan çoklu model yönteminin işlem yükü bu yöntemin olumsuz yönünü oluşturmaktadır. Diğer taraftan, [10] ve [11]'de, geleneksel GKF (GGKF) yerine, genişletilmiş karmaşık Kalman filtresi (GKKF) kullanılarak akı ve hız kestirimleri gerçekleştirilmiştir. İlk grup çalışmaların özellikle hız-algılayıcı kontrol sisteminin geçici anlarında başarımın düşmesine neden olduğu literatürde belirtilmektedir [12]. İkinci grup çalışmalara bakıldığında, [6] ve [12]'de altıncı dereceden GGKF algoritması ile akı, hız ve yük momenti kestirimleri, [1]'de yedinci dereceden iki farklı modelin anahtarlanarak kullanıldığı anahtarlamalı GGKF ile [6] ve [12]'ye ek olarak sıcaklık ve frekansla değişen stator ve rotor direnci kestirimleri, [13]'te [1]'deki gibi anahtarlamalı GGKF yardımıyla [1]'e ek olarak şafta bağlı yük ile değişen eylemsizlik kestirimi, [14]'te [13]'tekinden farklı olarak eylemsizlik yerine akı ile değişen mıknatıslama endüktansı kestirimi gerçekleştirilmiştir. Anahtarlamalı GGKF yaklaşımının kullanıldığı çalışmalarda [1], [13], [14] işlem yükünün artması bu yöntemin olumsuz yönünü oluşturmaktadır.

Diğer taraftan, GKF algoritmasının işlem yükünün fazla olduğunu belirten çalışmalar olmasına rağmen, bu olumsuzluk günümüzdeki yüksek kapasiteli, hızlı ve ucuz mikroişlemci pazarının gelişmesine bağlı olarak sorun olmaktan çıkmıştır. Fakat GKF'lerin işlem yükünü azaltarak çevrim süresini düşürmeyi amaçlayan çalışmalar [10], [11] literatürde mevcuttur. Bu çalışmalar [10], [11] GGKF'den farklı olarak, gerçek değerli durumlar kullanmak yerine, ASM modelini karmaşık düzlemde ifade ederek model durumlarını beşten üçe düşürmüşlerdir. Böylece, GGKF'deki tüm matris boyutları düşürülerek matris çarpımlarından kaynaklanan hesap yükü azaltılmaktadır. Bu geliştirme sayesinde işlem yükünde %35'lik bir azalma olduğu [11]'de belirtilmiştir. Bu çalışmalarda hız sabit parametre olarak kabul edildiğinden ve ASM modeli sadece elektriksel eşitlikler yardımıyla ifade edildiğinden elektromekanik bir sistem olan ASM dinamiklerini tam olarak gösterememektedir.

Bu çalışmanın temel katkısı stator akımlarının duran eksen takımı bileşenlerini ( $i_{s\alpha}$  ve  $i_{s\beta}$ ), rotor akımlarının duran eksen takımı bileşenlerini ( $\varphi_{r\alpha}$  ve  $\varphi_{r\beta}$ ), rotor mekanik hızını ( $\omega_m$ ) ve sürtünme terimini de içeren yük momenti ( $\tau_l$ ) kestirimlerini gerçekleştiren GKKF algoritması tabanlı hız-algılayıcı vektör kontrollü sürücü tasarımını gerçekleştirmesidir. Literatürdeki çalışmalardan [6,12] farklı olarak, bu çalışmada hızın mekanik hareket eşitliği kullanılarak ASM modeline dahil edildiği altıncı dereceden model karmaşık biçimde ifade edilerek dördüncü dereceye düşürülmüş ve bu modelin kullanıldığı GKKF algoritması tasarlanmıştır. Daha sonra, GKKF algoritması ile kestirilen durumların kontrol döngüsünde kullanıldığı hız-algılayıcı vektör kontrollü ASM sürücüsünün tasarımı gerçekleştirilmiştir. Önerilen sürücünün başarımı hız terslemeleri ve sıfır hız bölgesini de içeren geniş bir hız aralığında uygulanan rampa ve basamak şeklindeki yük momenti değişimleri altında benzetim çalışmaları ile doğrulanmıştır. Ayrıca, önerilen GKKF algoritmasının işlem yükü aynı durum ve parametrelerin kestirildiği GGKF algoritması ile karşılaştırılarak işlem yükünün düşürüldüğü gösterilmiştir. İşlem yükündeki bu düşüş, aynı mikroişlemci kullanıldığı takdirde daha düşük bir çevrim süresi elde edilebileceğini, yani daha hızlı bir kontrol gerçekleştirilebileceğini göstermektedir.

Bu çalışma beş bölümden oluşmaktadır. Bölüm 1'de ASM'lerin hız-algılayıcı vektör kontrolü ile durum/parametre kestirim yöntemlerine ait mevcut literatür sunulmaktadır. Bölüm 2 ve 3 sırasıyla dördüncü dereceden genişletilmiş karmaşık ASM modelinin elde edilmesi ve bu modelin kullanıldığı GKKF algoritmasının tasarımı ile ilgili detayları içermektedir. Önerilen hız-algılayıcı ASM sürücünün doğrulanması amacıyla gerçekleştirilen benzetim çalışmaları Bölüm 4'te sunulmaktadır. Son olarak, sonuçlar ve yorumlar Bölüm 5'te verilmektedir.

## 2. GENİŞLETİLMİŞ ASENKRON MOTOR MODELİ (THE EXTENDED MODEL OF INDUCTION MOTOR)

ASM'lerin beşinci dereceden dinamik modeli Eşitlik 2.1 ve 2.2'deki genel biçimde verilebilir.

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

$$\mathbf{z}_e = \mathbf{h}_e(\mathbf{x}_e) + \mathbf{v} \quad 2.2$$

Burada,  $\mathbf{x}_e$  genişletilmiş durum vektörünü,  $\mathbf{f}_e$  giriş ve çıkışların doğrusal olmayan fonksiyonunu,  $\mathbf{A}_e$  sistem matrisini,  $\mathbf{B}_e$  giriş matrisini,  $\mathbf{u}_e$  giriş vektörünü,  $\mathbf{h}_e$  çıkışların fonksiyonunu,  $\mathbf{H}_e$  ölçme matrisini,  $\mathbf{w}$  ve  $\mathbf{v}$  sırasıyla sıfır ortalamalı sistem ve ölçme gürültüsünü ifade etmektedir. Sistem modeline ait detaylar ise Eşitlik 2.3'te ve sadece stator akımının duran eksen bileşenlerinin ölçüldüğü ölçüm eşitliği Eşitlik 2.4'te sunulmaktadır.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \dot{i}_{s\alpha} \\ \dot{i}_{s\beta} \\ \dot{\varphi}_{r\alpha} \\ \dot{\varphi}_{r\beta} \\ \dot{\omega}_m \end{bmatrix}}_{\mathbf{x}_e} = \underbrace{\begin{bmatrix} -a_{11}\dot{i}_{s\alpha} + a_{12}\varphi_{r\alpha} + a_{13}\omega_m\varphi_{r\beta} + b_1v_{s\alpha} \\ -a_{11}\dot{i}_{s\beta} + a_{13}\omega_m\varphi_{r\alpha} + a_{12}\varphi_{r\beta} + b_1v_{s\beta} \\ a_{21}\dot{i}_{s\alpha} - a_{22}\varphi_{r\alpha} - a_{23}\omega_m\varphi_{r\beta} \\ a_{21}\dot{i}_{s\beta} + a_{23}\omega_m\varphi_{r\alpha} - a_{22}\varphi_{r\beta} \\ a_{31}(\varphi_{r\alpha}\dot{i}_{s\beta} - \varphi_{r\beta}\dot{i}_{s\alpha}) - a_{32}\omega_m - a_{33}\tau_l \end{bmatrix}}_{\mathbf{f}_e(\mathbf{x}_e, \mathbf{u}_e)} + \mathbf{w} \quad 2.3$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \dot{i}_{s\alpha} \\ \dot{i}_{s\beta} \end{bmatrix}}_{\mathbf{z}} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{H}_e} \mathbf{x}_e + \mathbf{v} \quad 2.4$$

Kullanılan katsayılar ise aşağıdaki gibidir:

$$a_{11} = \frac{1}{L_\sigma} \left( R_s + \frac{L_m^2}{L_r T_r} \right), a_{12} = \frac{L_m}{L_\sigma L_r T_r}, a_{13} = \frac{L_m p_p}{L_\sigma L_r}, a_{21} = \frac{L_m}{T_r}, a_{22} = \frac{1}{T_r},$$

$$a_{23} = p_p T, a_{31} = \frac{3p_p L_m}{2J_t L_r}, a_{32} = \frac{B_t}{J_t}, a_{33} = \frac{1}{J_t}, b_1 = \frac{1}{L_\sigma}.$$

Burada,  $R_s$  stator direncini,  $R_r$  rotor direncini,  $L_r$  rotor endüktansını,  $L_m$  ortak endüktansını,  $L_\sigma = \sigma L_s = L_s - L_m^2/L_r$  rotor geçici endüktansını,  $\sigma = 1 - L_m^2/(L_r L_s)$  kaçak faktörünü,  $T_r = L_r/R_r$  rotor zaman sabitini,  $p_p$  kutup çifti sayısını,  $J_t$  ASM ve yükün toplam eylemsizliğini,  $B_t$  ASM ve yükün toplam viskoz sürtünme terimini ifade etmektedir.

İlk olarak, Eşitlik 2.3 ve 2.4 ile verilen ASM modeline ait durum sayısını azaltmak amacıyla bu model karmaşık biçimde ifade edilmiştir. Diğer taraftan, mekanik hareket eşitliğinin kullanıldığı beşinci durumda bozucu yük momenti bilgisine ihtiyaç vardır. Bu bilgi iki yolla elde edilebilir: moment algılayıcı vasıtasıyla ölçülerek veya sabit parametre olarak kestirilerek. İlk yol sürücü maliyetini arttıracığından dolayı, bu çalışmada da kestirme yoluna gidilmiştir. Bu amaçla,  $\dot{i}_{s\alpha}$ ,  $\dot{i}_{s\beta}$ ,  $\varphi_{r\alpha}$ ,  $\varphi_{r\beta}$ ,  $\omega_m$  ve  $\tau_l$  kestirimlerinin gerçekleştirilebilmesi için elde edilen rotor akısı tabanlı 4. dereceden karmaşık ASM modeli Eşitlik 2.5 ve 2.6'daki gibidir.

$$\mathbf{f}_{ec} = \begin{bmatrix} -a_{11}x_1 + (a_{12} - ja_{13}x_3)x_2 + b_1v \\ a_{21}x_1 + (a_{22} - ja_{23}x_3)x_2 \\ a_{31}\text{Im}(x_1x_2^*) - a_{33}x_4 \\ 0 \end{bmatrix} \quad 2.5$$

$$\mathbf{z}_{ec} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbf{H}_e} \mathbf{x}_{ec} = \mathbf{x}_1 \quad 2.6$$

Burada karmaşık genişletilmiş durum vektörü

$$\mathbf{x}_{ec} = [x_1, x_2, x_3, x_4]^T = [\dot{i}_{s\alpha} + j\dot{i}_{s\beta}, \varphi_{r\alpha} + j\varphi_{r\beta}, \omega_m, \tau_l]^T$$

ve karmaşık giriş vektörü

$$\mathbf{u}_{ec} = v = v_{s\alpha} + jv_{s\beta}$$

olarak tanımlanmıştır. Ayrıca,  $j$  sanal eksen bileşenlerini temsil etmektedir.  $B_t\omega_m$  olarak tanımlanan viskoz sürtünme terimi yük momenti  $\tau_l$  içerisine, yani  $x_4$  içerisine, dahil edilmiştir, böylece sürtünme teriminin de kestirimi sağlanmaktadır.



## 2. GENİŞLETİLMİŞ KARMAŞIK KALMAN FİLTRESİ (EXTENDED COMPLEX KALMAN FILTER)

Eşitlik 2.5 ve 2.6'daki dördüncü dereceden karmaşık ASM modelinin kullanıldığı ve  $i_{s\alpha}$ ,  $i_{s\beta}$ ,  $\varphi_{r\alpha}$ ,  $\varphi_{r\beta}$ ,  $\omega_m$  ve  $\tau_l$  kestirimlerinin gerçekleştirildiği GKKF algoritması üç ana kısma ayrılabilir.

1- Doğrusallaştırma:

$$\mathbf{F}_{k+1|k} = \left. \frac{\partial \mathbf{f}_e(\mathbf{x}, \mathbf{u}_k)}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}_k} \quad 3.1$$

2- Kestirim veya zaman güncellemesi:

$$\hat{\mathbf{x}}_k^- = \mathbf{f}_e(\hat{\mathbf{x}}_{k-1}, \mathbf{u}_k) \quad 3.2$$

$$\mathbf{P}_k^- = \mathbf{F}_{k|k-1} \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{F}_{k|k-1}^H + \mathbf{Q}_{k-1} \quad 3.3$$

3- Düzeltme veya ölçüm güncellemesi:

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T [\mathbf{H} \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T + \mathbf{R}_k]^{-1} \quad 3.4$$

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{K}_k (\mathbf{z}_k - \mathbf{H} \hat{\mathbf{x}}_k^-) \quad 3.5$$

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}) \mathbf{P}_k^- \quad 3.6$$

Burada,  $\mathbf{F}_{k+1|k}$   $\mathbf{x}_k$  durum vektörünü  $k$  anından  $k+1$  anına taşıyan geçiş matrisini,  $\mathbf{P}_k^-$  ve  $\mathbf{P}_k$  sırasıyla önceki ve sonraki kovaryans matrislerini,  $\mathbf{K}_k$  Kalman kazancını,  $\mathbf{Q}$  sistem gürültüsünün kovaryans matrisini (modelleme hatalarını),  $\mathbf{R}$  çıkış gürültüsünün kovaryans matrisini (ölçme hatalarını),  $\mathbf{I}$  birim matrisi ifade etmektedir. Ayrıca,  $\mathbf{H}$  üst indisi matrisin karmaşık eşlenik transpozunu belirtmektedir.

GGKF algoritmasıyla karşılaştırıldığında, önerilen GKKF algoritmasının hesap yükünü düşürdüğü kısımlar aşağıdaki gibi belirtilebilir [11]:

- Model derecesinin azaltılması gözlemleyici algoritmasındaki matrislerin boyutlarını azaltacaktır. Dolayısıyla, matris çarpımlarının yoğun olarak yapıldığı KF'de eleman bazındaki çarpım işlemleri de azalacaktır.
- KF'de en fazla işlem yüklerinden birini oluşturan matris tersi önerilen GKKF ile birlikte ortadan kalkmaktadır. Çünkü GGKF'de bir matris olan  $[\mathbf{H} \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T + \mathbf{R}_k]$  artık skalar ve gerçel bir değere dönüşmektedir. Böylece, GGKF'deki fazla işlem yükü gerektiren matris tersi işlemi önerilen GKKF ile çok az işlem yükü gerektiren gerçel bir sayının tersine dönüştürülmüştür.
- GKKF'de  $\mathbf{Q}$ ,  $\mathbf{R}$ ,  $\mathbf{P}_k^-$ ,  $\mathbf{P}_k$  ve  $\mathbf{K}_k$  matrisleri GKF algoritması karmaşık biçimde olmasına rağmen, gerçek değerli elemanlara sahiptir ve artık 6. derecede yerine 4. derecedendirler.

## 4. BENZETİM SONUÇLARI (SIMULATION RESULTS)

Önerilen GKKF tabanlı hız-algılayıcısız sürücü sisteminin başarımını gösterebilmek için blok şeması Şekil 1'de verilen vektör kontrollü sürücü sistemi kullanılmıştır. Ayrıca, benzetim çalışmalarında kullanılan ASM'nin anma değerleri ve parametreleri Tablo 1'de sunulmuştur.

GKKF algoritmasının başarımını etkileyen  $\mathbf{Q}$  ve  $\mathbf{R}$  matrisleri yeterli kestirim başarımı elde edilinceye kadar deneme-yanılma yöntemi ile belirlenmiştir. Belirleme işlemini basitleştirmek amacıyla  $\mathbf{Q}$  ve  $\mathbf{R}$  matrisleri köşegen biçimde seçilmiştir. Benzetim çalışmalarından kullanılan gürültü kovaryans matrisleri ile birlikte  $\mathbf{P}$  matrisinin başlangıç değerleri aşağıdaki gibidir:

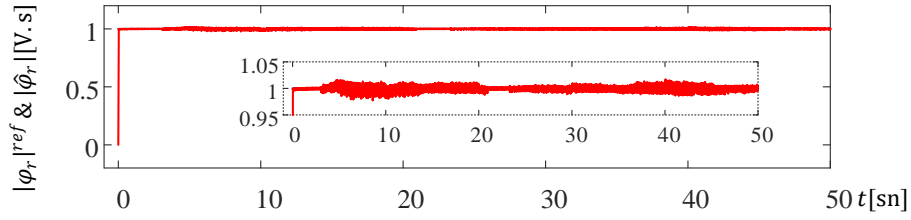
$$\mathbf{Q} = \text{diag}\{10^{-6}, 10^{-6}, 10^{-6}, 10^{-6}, 10^{-6}, 10^{-6}\},$$

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

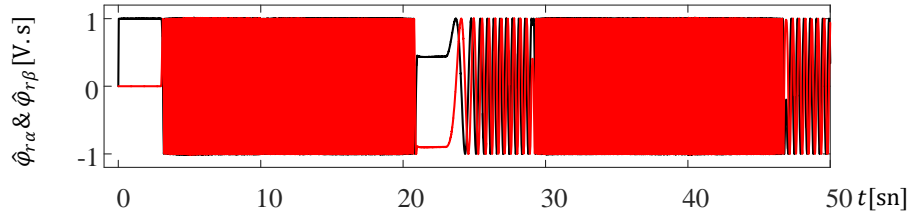
$$\mathbf{P}_0 = \text{diag}\{10, 10, 10, 10, 10, 10\}.$$

**Tablo 1.** Benzetim çalışmalarında kullanılan ASM'nin anma değerleri ve parametreleri.

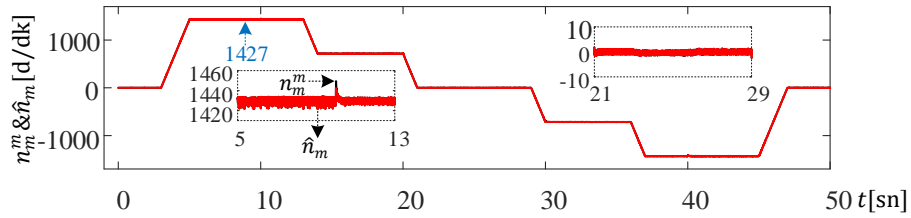
$P$ [kW]	$V$ [V]	$I$ [A]	$f$ [Hz]	$N_m$ [d/dk]	$\tau_l$ [Nm]	$p_p$
3	380	6.9	50	1430	20	2
$R_s$ [ $\Omega$ ]	$R_r$ [ $\Omega$ ]	$L_s$ [H]	$L_r$ [H]	$L_m$ [H]	$J_t$ [kg. m <sup>2</sup> ]	$B_t$ [Nm/(rad/s)]
2.283	2.133	0.2311	0.2311	0.22	0.0183	0.001



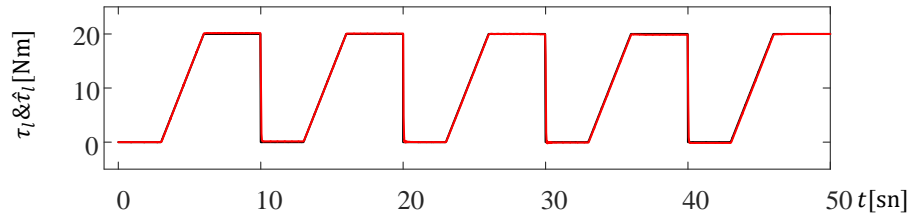
(a)



(b)



(c)



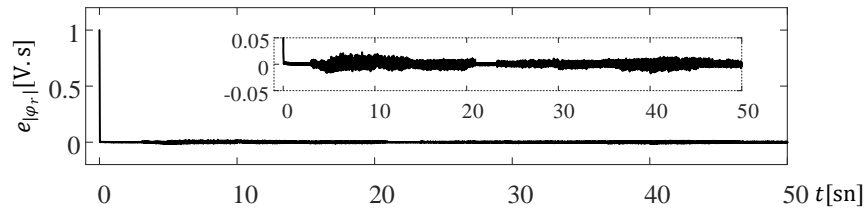
(d)

**Şekil 3.** GKKF tabanlı hız-algılayıcısız sürücü sisteminin kontrol ve kestirim sonuçları a) Referans ve kestirilen  $|\phi_r|$  değişimleri, b) Kestirilen  $\phi_r$ 'nin duran eksen takımı bileşenleri, c) Ölçülen ve kestirilen  $n_m$ , d) Uygulanan ve kestirilen  $\tau_l$ .

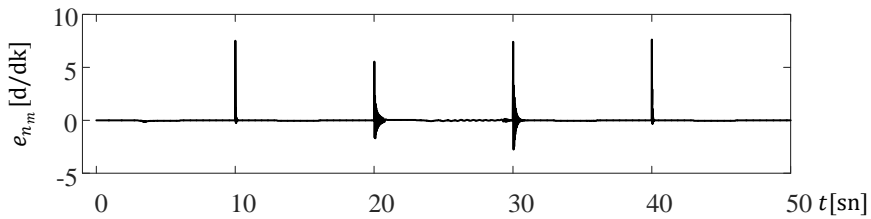
Benzetim çalışmaları Matlab Simulink yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Önerilen GKKF algoritmasında kestirilen tüm durum ve parametrelerin başlangıç değerleri sıfır ve örnekleme zamanı  $T=100 \mu\text{sn}$  olarak alınmıştır. Benzetim çalışmalarında sunulan şekillerdeki  $ref$  ve  $m$  üst indisleri sırasıyla referans değişimleri ve ölçülen değerleri,  $\hat{\ast}$  işareti kestirilen durumları veya parametreleri,  $e_{(\ast)}$  ise gerçek (referans veya ölçülen) değerler ve kestirilen değerler arasındaki fark olarak tanımlanan hataları göstermektedir.

Önerilen GKKF tabanlı hız-algılayıcısız ASM sürücüsünün etkisini göstermek amacıyla, hız terslemeleri ve sıfır hız bölgesini de içeren geniş bir hız aralığında rampa ve basamak şeklindeki yük momenti değişimlerinin gerçekleştirildiği zorlayıcı senaryo Şekil 2'deki sunulmuştur. Senaryo incelendiğinde;

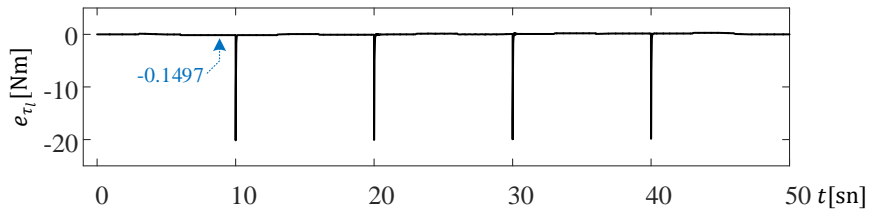
- ASM'lerin durum ve parametre kestiriminde en kötü koşul olan sıfır hız sıfır yük momenti  $0 < t < 3$  sn ve  $21 < t < 23$  sn aralıklarında meydana gelmektedir. Bu koşul altında rotor akısının duran eksen bileşenleri sıfır olmakta, yani statordan rotora indüksiyon gerçekleşmemektedir.
- $26 < t < 29$  sn aralığında ASM sıfır hızda ve anma yükünde test edilmektedir.
- ASM her iki yönde de anma hızında yüksüz ( $10 < t < 13$  sn ve  $40 < t < 43$  sn aralıkları) ve anma yükü ile yüklenmiş ( $6 < t < 10$  sn ve  $37 < t < 40$  sn aralıkları) biçimde çalıştırılarak, yüksek hız bölgesindeki kontrol ve kestirim başarımı test edilmektedir.
- Tüm bunlara ek olarak, her iki yönde orta hız bölgesindeki kontrol ve kestirim başarımının gösterilmesi amacıyla ASM hem yüklü ( $14 < t < 20$  sn) hem de yüksüz ( $30 < t < 33$  sn) olarak test edilmektedir.



(a)



(b)



(c)

**Şekil 4.** GKKF tabanlı hız-algılayıcısız sürücü sisteminin kontrol ve kestirim hataları a) Referans ve kestirilen akı arasındaki fark olarak tanımlanan hata;  $e_{|\varphi_r|} = |\varphi_r|^{ref} - |\hat{\varphi}_r|$ , b) Ölçülen ve kestirilen hız arasındaki fark olarak tanımlanan hata;  $e_{\hat{n}_m} = n_m^m - \hat{n}_m$ , c) Uygulanan ve kestirilen yük momenti arasındaki fark olarak tanımlanan hata;  $e_{\tau_l} = \tau_l - \hat{\tau}_l$ .

**Tablo 2.** Kontrol ve kestirim hatalarının ortalama karesel hataları (MSE).

$e_{ \hat{\varphi}_r }$ [V.s]	$e_{\hat{n}_m}$ [d/dk]	$e_{\hat{\tau}_l}$ [Nm]
$1.19 \times 10^{-4}$	0.0722	0.3299

Diğer taraftan, önerilen GKKF algoritmasının işlem yükü aynı durum ve parametrelerin kestirildiği GGKF algoritması ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmada her algoritma aynı koşullar altında 5sn'lik bir senaryo için 20 kere koşturulmuş ve elde edilen ortalama süreler Tablo 3'te verilmiştir.

**Tablo 3.** GGKF ve GKKF algoritmalarına ait ortalama çevrim süreleri.

GGKG [sn]	GKKF [sn]
14.42	12.18

Elde edilen kontrol ve kestirim başarımları Şekil 3'te ve bunlara karşılık gelen kontrol ve kestirim hataları ise Şekil 4'te sunulmaktadır. Ayrıca, Şekil 4'te gösterilen hataların ortalama karesel hataları (MSE) Tablo 2'de verilmektedir.

Elde edilen kontrol ve kestirim sonuçları değerlendirildiğinde, aşağıdaki çıkarımlar gerçekleştirilebilir:

- GKKF algoritmasındaki tüm durum ve parametrelerin başlangıç koşulları sıfır alınmasına rağmen, tüm değerler çok kısa zaman içerisinde gerçek değerlerine yakınsamaktadır. Bu durum kestirim hatalarının verildiği Şekil 4'te de açıkça görülmektedir.
- Şekil 4'te verilen kontrol ve kestirim hataları sürekli geçici anlarda artmakta, fakat çok kısa bir sürede sifira yakınsamaktadırlar. Ayrıca, sürekli hallerdeki kestirim hataları da oldukça küçüktür.
- Önerilen sürücü yüksek ve orta hız bölgesinde bilinmeyen bozucu yük girişlerine (yükli ve yüksüz) rağmen her iki yönde de çalışabilme yeteneğine sahiptir.
- Hız kestirim yöntemleri için en zor durum olan sıfır hız sıfır yük momentinde dahi sürücü oldukça kararlı davranarak yüksek başarımlı kontrol gerçekleştirmektedir. Ek olarak, sıfır hızda anma yük altında da yeterli kontrol ve kestirim başarımının sağlandığı görülmektedir.
- $e_{\tau_l}$ 'de sürekli halde yapılan kestirim hatası olarak görünen fark hata değil, viskoz sürtünme teriminin Denklem 2.5'teki gözlemleyici modelinde  $\tau_l$  içerisine dahil edilmesinden kaynaklanmaktadır. Diğer bir ifadeyle, viskoz sürtünme terimi  $\tau_l$  içerisinde kestirilmektedir. Detaylı olarak incelenirse, ASM'nin 9. sn'deki hızı ve bu andaki oluşan moment hatası sırasıyla Şekil 3c ve 4b üzerinde işaretlenmiştir. Bu değerler kullanılarak;

$$e_{\tau_l} \cong -B_t \omega_m(\infty)$$

$$-0.1497 \cong -0.001 \times \frac{1427 \times 2 \times \pi}{60}$$

$$-0.1497 \cong -0.1494$$

olarak bulunur.

- Son olarak, kontrol ve kestirim başarımının yanında işlem yükü de düşünüldüğünde, GGKF tabanlı yerine, önerilen GKKF tabanlı hız-algılayıcısız ASM sürücü sisteminin kullanılmasının daha uygun olduğu açıktır.

## 5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada,  $i_{sa}$ ,  $i_{s\beta}$ ,  $\varphi_{r\alpha}$ ,  $\varphi_{r\beta}$ ,  $\omega_m$  ve  $\tau_l$  kestirimlerinin gerçekleştirilebilmesi amacıyla, altıncı dereceden ASM modeli karmaşık biçimde ifade edilerek dördüncü dereceye düşürülmüş ve bu karmaşık modeli kullanan GKKF algoritmasının tasarımı gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, GKKF algoritması ile



kestirilen durumların kontrol döngüsünde kullanıldığı GKKF tabanlı hız-algılayısız vektör kontrollü ASM sürücüsünün tasarımı gerçekleştirilerek, tasarlanan sürücü benzetim çalışmaları ile doğrulanmıştır. Önerilen sürücü sisteminin başarımını göstermek amacıyla, sürücü hız terslemeleri ve sıfır hız bölgesini de içeren geniş bir hız aralığında rampa ve basamak şeklindeki  $\tau_l$  değişimleri altında test edilmiştir. Elde edilen yüksek başarılı kontrol ve kestirime ek olarak, önerilen GKKF algoritması GGKF algoritmasına göre düşürülmüş işlem yükü ile etkisini göstermektedir. Bununla birlikte, sıcaklıkla değişen  $R_s$  ve frekans bağımlı değişen  $R_r$  değişimleri algoritma başarımını olumsuz etkilemektedir. Bu değişimlerin GKKF algoritmasına güncellenmesi veya bu değişimlerin de modele dahil edilerek kestirilmesi gerekmektedir. Sonraki çalışmalar, değişen  $R_s$  ve  $R_r$  değerlerinin kestirilmesine yönelik olacaktır.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] M. Barut, R. Demir, E. Zerdali, R. Inan, Real-Time Implementation of Bi Input-Extended Kalman Filter-Based Estimator for Speed-Sensorless Control of Induction Motors. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 59: 11 (2012) 4197–4206.
- [2] S. Bolognani, L. Peretti, M. Zigliotto, Parameter Sensitivity Analysis of an Improved Open-Loop Speed Estimate for Induction Motor Drives. *IEEE Trans. Power Electron.*, 23: 4 (2008) 2127–2135.
- [3] R. Kumar, S. Das, P. Syam, and 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] B. Chen, W. Yao, F. Chen, Z. Lu, Parameter Sensitivity in Sensorless Induction Motor Drives with the Adaptive Full-Order Observer. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, PP: 99, (2015) 1–1.
- [5] M. Jouili, K. Jarray, Y. Koubaa, M. Boussak, Luenberger state observer for speed sensorless ISFOC induction motor drives. *Electr. Power Syst. Res.*, 89 (2012) 139–147.
- [6] E. Zerdali, M. Barut, The Comparisons of Optimized Extended Kalman Filters for Speed-Sensorless Control of Induction Motors. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 64: 6 (2017) 4340–4351.
- [7] Z. Yang, L. Wan, X. Sun, L. Chen, Z. Chen, Sliding Mode Control for Bearingless Induction Motor Based on a Novel Load Torque Observer. *J. Sens.*, 2016 (2016) 1–10.
- [8] K. L. Shi, T. F. Chan, Y. K. Wong, S. L. Ho, Speed estimation of an induction motor drive using an optimized extended Kalman filter. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 49: 1 (2002) 124–133.
- [9] Z. Yin, G. Li, Y. Zhang, J. Liu, X. Sun, Y. Zhong, A Speed and Flux Observer of Induction Motor Based on Extended Kalman Filter and Markov Chain. *IEEE Trans. Power Electron.*, 32: 9 (2017) 7096–7117.
- [10] Y. D. Pan, Y. W. Guo, H. D. Li, Research on Stator Flux and Rotor Speed Estimation for Induction Motor Based on Extended Complex Kalman Filter. *Appl. Mech. Mater.*, 644–650 (2014) 709–713.
- [11] F. Alonge, F. D'Ippolito, A. Fagiolini, A. Sferlazza, Extended complex Kalman filter for sensorless control of an induction motor. *Control Eng. Pract.*, 27 (2014) 1–10.
- [12] M. Barut, S. Bogosyan, M. Gokasan, Speed-Sensorless Estimation for Induction Motors Using Extended Kalman Filters. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 54: 1 (2007) 272–280.

- [13] E. Zerdali, M. Barut, 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. *Turk. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, 24: 5 (2016) 4525–4544.
- [14] 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.