



Speed-Sensorless model predictive current control of permanent magnet synchronous motors

Rıdvan Demir* , Duygu Gümüşçü

Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Engineering Architecture and Design, Kayseri University, 30280, Kayseri, Türkiye.

Highlights:

- Design of the ECKF for speed/position estimation of PMSMs
- Model predictive current controlled PMSM drive
- Reduced computational burden

Keywords:

- Permanent magnet synchronous motors
- Extended complex Kalman filter
- Model predictive current control
- Speed estimation

Article Info:

Research Article
Received: 26.07.2022
Accepted: 06.04.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1148954

Acknowledgement:

This study was partially supported by Kayseri University Scientific Research Projects Coordination Unit within the scope of project number FKB-2022-1082.

Correspondence:

Author: Rıdvan Demir
e-mail: ridvandemir@kayseri.edu.tr
phone: +90 352 504 3838 / 21344

Graphical/Tabular Abstract

In this study, an extended complex Kalman filter (ECKF) based observer is proposed for simultaneous estimation of the load torque with the stator stationary axis components of stator currents and rotor angular velocity/position required for speed-sensorless model predictive current control (MPCC) of permanent magnet synchronous motors (PMSMs). The proposed ECKF observer and the model predictive current control system demonstrated in Figure A have been tested and validated with challenging scenarios under different load torques in a wide speed range including zero speed and speed reversals.

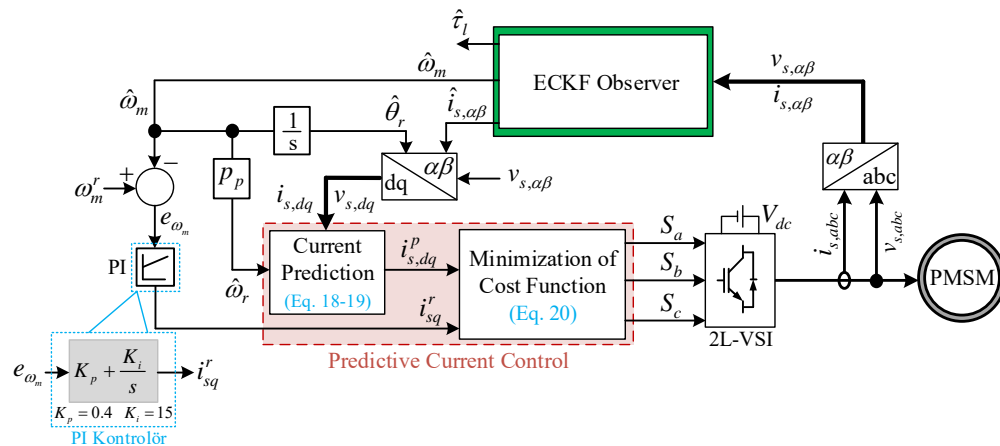


Figure A. Model predictive current controlled PMSM drive

Purpose:

The main purpose of this study is to design the ECKF observer for simultaneous estimation of stator current components in the stationary axes and the rotor angular velocity/position required for the speed-sensorless model predictive current control (MPCC) of PMSMs.

Theory and Methods:

Electrical drives used in high-performance control of PMSMs require speed and position information. Rotor speed or position sensors cause disadvantages such as cost increase and temperature sensitivity. The elimination of speed or position sensors in a.c drive systems is called speed or position sensorless control. Thus, while increasing the credibility of the high-performance electrical drive system, maintenance, cost, and hardware complexity requirements are reduced. Therefore, in this study, the ECKF observer which estimated the stator currents, the rotor angular velocity/position, and load torque for the speed-sensorless MPCC-based PMSM drive is proposed.

Results:

The simulation results confirm that the proposed ECKF observer and the speed-sensorless model predictive current control system using this observer have very high performance.

Conclusion:

The proposed ECKF observer and the model predictive current control system have been tested and validated with challenging scenarios under different load torques in a wide speed range including zero speed and speed reversals. In addition, the computational load of the ECKF observer is compared with the traditional extended Kalman filter, which estimates the predicted states and parameters in this study, and it was shown that the computational burden is reduced by about 19.5%.



Sürekli mıknatıslı senkron motorların hız-algılayıcısız model öngörülü akım kontrolü

Rıdvan Demir*^{ID}, Duygu Gümüştü^{ID}

Kayseri Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 38280, Talas, Kayseri, Türkiye

ÖNEÇIKANLAR

- Sürekli mıknatıslı senkron motorların hız/konum kestirimi
- Model öngörülü akım kontrollü sürekli mıknatıslı senkron motor sürücüsü
- Azaltılmış hesaplama yükü

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 26.07.2022
Kabul: 06.04.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1148954

Anahtar Kelimeler:

Sürekli mıknatıslı senkron motorlar,
genişletilmiş karmaşık Kalman Filtresi,
model öngörülü akım kontrol, hız kestirimi

ÖZ

Sürekli mıknatıslı senkron motorlar (SMSM'ler) yüksek verimleri, basit yapıları ve geniş hız aralıklarında kullanılabilir olmaları nedeniyle yüksek başarılı değişken moment veya hız kontrolü gerektiren endüstriyel uygulamalarda ve elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, SMSM'lerin hız-algılayıcısız model öngörülü akım kontrolü için gerekli olan duran eksen takımındaki stator akım bileşenleri ve rotor açısız hızı/konumu ile birlikte yük momentinin eşzamanlı kestirimi için genişletilmiş karmaşık Kalman filtresi (GKKF) tabanlı gözlemleyici tasarlanmıştır. Tasarlanan GKKF gözlemleyicisi ve model öngörülü akım kontrol sistemi sıfır hız ve hız terslendirmelerinde içeren geniş hız aralığında farklı yük momentleri altında zorlayıcı senaryolar ile test edilmiş ve doğrulanmıştır. Ayrıca hem GKKF'nin hem de model öngörülü akım kontrol sisteminin SMSM parametre değişimlerine karşı başarımı analiz edilmiştir. Benzetim sonuçları GKKF gözlemleyicisi ve bu gözlemleyiciyi kullanan hız-algılayıcısız model öngörülü akım kontrol sisteminin oldukça yüksek başarıma sahip olduğunu onaylamaktadır. Ek olarak GKKF gözlemleyicisinin işlem yükü bu çalışmada kestirilen durum ve parametreleri kestiren geleneksel genişletilmiş Kalman filtresi ile karşılaştırılmış ve işlem yükünün düştüğü gösterilmiştir.

Speed-Sensorless model predictive current control of permanent magnet synchronous motors

HIGHLIGHTS

- Speed/position estimation of the permanent magnet synchronous motors
- Model predictive current controlled permanent magnet synchronous motor drive
- Reduced computational burden

Article Info

Research Article
Received: 26.07.2022
Accepted: 06.04.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1148954

Keywords:

Permanent magnet synchronous motors,
extended complex Kalman filter,
model predictive current control, speed estimation

ABSTRACT

Permanent magnet synchronous motors (PMSMs) are widely used in industrial applications and electric vehicles which require high-performance variable torque and speed due to their high efficiency, simple structure, and wide speed range. In this study, an extended complex Kalman filter (ECKF) based observer is designed for simultaneous estimation of the load torque with the stator stationary axis components of stator currents and rotor angular velocity/position required for speed-sensorless model predictive current control of PMSMs. The designed ECKF observer and model predictive current control system has been tested and validated with challenging scenarios under different load torques in a wide speed range including zero speed and speed reversals. In addition, the performance of both the ECKF and the model predictive current control system is analyzed against parameter changes PMSM. The simulation results confirm that the ECKF observer and the speed-sensorless model predictive current control system using this observer have very high performance. In addition, the computational burden of the ECKF observer was compared with the conventional extended Kalman filter, which estimates the states and parameters estimated in this study, and it was shown that the processing computational burden decreased.

1. Giriş (Introduction)

Son yıllarda ulaşımdan kaynaklanan karbondioksit emisyonlarına karşı artan hassasiyet ve farkındalık elektrikli araçlara olan ilgiyi artırmıştır. Elektrikli ve hibrit araçların giderek daha rekabetçi bir pazara girmesi, üreticileri daha verimli ve daha düşük maliyetli araçlar geliştirmeye zorlamaktadır. Elektrikli araçlar için performans kriterleri; sağlamlık, güvenilirlik, bataryalarının şarj hızı, güç yönetimi ve özellikle motor sürücü sistemleri olarak sıralanabilir [1]. Elektrikli araçların en kritik parçalarından birisi olan motor sürücü sistemleri, üreticilerin ve araştırmacıların ilgi odağı haline gelmiştir. Elektrikli araçların tahrik edilmesini sağlamak için doğru akım motorları, asenkron motorlar ve sürekli mıknatıslı senkron motorlar gibi elektrik motorları kullanılmaktadır [1, 2].

Sürekli mıknatıslı senkron motorlar (SMSM'ler) yüksek verimleri ve güç faktörleri, yüksek güç/moment yoğunluğu oranı, basit yapıları ve geniş hız aralıklarında kullanılabilir olmaları nedeniyle [3, 4] yüksek başarılı değişken hız ve moment gerektiren endüstriyel uygulamalarda ve elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [5]. Bununla birlikte SMSM'lerin doğrusal olmayan modele ve çalışma şartları ile değişen parametrelere sahip olmalarından dolayı hız-algılayıcısız SMSM sürücülerin kontrolü hala zorluklar içermektedir [6].

Elektrik motorlarının yüksek başarılı kontrolünde kullanılan doğrudan moment kontrol ve alan yönlendirmeli kontrol yöntemlerine alternatif olarak önerilen model öngörülü kontrol (MÖK), basit prensibi, hızlı dinamik performansı ve doğrusal olmayan kısıtlamaları hesaba katma yeteneğinden dolayı son zamanlarda tercih edilmektedir [7]. Model öngörülü akım kontrol (MÖAK) yöntemi elektrik motor sürücülerinde kullanılan MÖK yöntemlerinden birisidir [8]. MÖAK yöntemi, öngörülen stator akımlarını içeren maliyet fonksiyonunu eniyileyen gerilim vektörünü belirleme temeline dayanmaktadır.

SMSM'nin yüksek başarılı kontrolü için kullanılan elektrik sürücüler, SMSM'nin hız ve konum bilgisine ihtiyaç duymaktadır. Bu bilgi ya algılayıcılar tarafından ölçülür ya da kestirici veya gözlemleyiciler tarafından elde edilir. Rotor hız veya konum algılayıcıları, maliyet artışı, donanım karmaşıklığı ve sıcaklık hassasiyeti gibi dezavantajlara sahiptir. Bu yüzden algılayıcı yerine gözlemleyici kullanmak yüksek başarılı motor sürücü sisteminin güvenilirliğini artırırken bakım gereksinimini, maliyeti ve donanım karmaşıklığını azaltır [9]. SMSM'nin hız ve konum bilgisini elde etmek için literatüre model tabanlı birçok kestirici veya gözlemleyici önerilmiştir. Bu yöntemler tam dereceli gözlemleyiciler [10], kayma kipli gözlemleyiciler [11], genişletilmiş Luenberger gözlemleyicisi [12, 13], kokusuz Kalman Filtresi [14], genişletilmiş Kalman filtresi [15, 16] ve modele uyarlamalı referans sistem tabanlı kestirici [17] olarak sınıflandırılabilir.

SMSM'lerin durum ve parametre kestiriminde genişletilmiş Kalman filtresi (GKF) kullanılan çalışmalar incelendiğinde; Xinyue vd. 'de [18] geleneksel GKF (GGKF) ile dönen eksen takımındaki stator akımları, stator direnci, kalıcı mıknatıs akısının kestirimleri gerçekleştirilmiştir. Tondpoor vd.'de [19] GGKF ile SMSM'nin hız ve stator akımlarının kestirimini gerçekleştirilirken, Nordin vd. 'de [20] hız, konum ve stator akımları kestirilmiştir. Zerdali ve Wheeler [15] stator akımları, rotor hız, rotor konumu, yük momentini ve kalıcı mıknatıs akısının eş-zamanlı kestirimlerini GGKF ile gerçekleştirmiştir.

Bu çalışmanın temel katkısı SMSM'lerin hız-algılayıcısız MÖAK'isi için gerekli olan duran eksen takımındaki stator akım bileşenleri ve rotor açısız hızı/konumu ile birlikte yük momentinin eşzamanlı

kestirimi için önceki çalışmalardan farklı olarak genişletilmiş karmaşık Kalman filtresi (GKKF) tabanlı gözlemleyici tasarımının gerçekleştirilmesidir. Önerilen GKKF gözlemleyicisinin kestirim başarımı ve MÖAK sisteminin kontrol başarımı sıfır hız ve hız terslendirmelerinde içeren geniş hız aralıklarında farklı yük momentleri altında zorlayıcı senaryolar ile test edilmiş ve doğrulanmıştır. Benzetim sonuçları önerilen GKKF gözlemleyicisi ve bu gözlemleyiciyi kullanan hız-algılayıcısız MÖAK sisteminin oldukça yüksek başarıma sahip olduğunu onaylamaktadır. Ayrıca GKKF gözlemleyicisinin işlem yükü bu çalışmada kestirilen durum ve parametreleri kestiren GGKF ile karşılaştırılmış ve işlem yükünün düştüğü gösterilmiştir.

Bu makale toplam altı bölümden oluşmaktadır. SMSM'lerin hız-algılayıcısız model tabanlı kestirim ve kontrol yöntemlerine ait mevcut literatür Bölüm 1'de verilmiştir. Bölüm 2 ve 3'te sırasıyla genişletilmiş SMSM modeli ve bu modeli kullanan GKKF gözlemleyicisinin tasarımı ile ilgili detaylar sunulmaktadır. Hız-algılayıcısız model öngörülü akım kontrol sistemi Bölüm 4'te, GKKF'nin kestirim başarımının ve SMSM sürücüsünün kontrol başarımının gösterilmesi amacıyla yapılan benzetim çalışmaları Bölüm 5'te verilmektedir. Sonuçlar ve gelecek çalışmalar Bölüm 6'da ifade edilmiştir.

2. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorların Dinamik Modeli (Dynamic Model of Permanent Magnet Synchronous Motors)

SMSM'nin dönen ($d-q$) eksen takımındaki [21] ve duran ($\alpha-\beta$) eksen takımındaki [22,23] stator akımları ile mekanik hareket eşitlikleri Eş. 1-4'te verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \frac{di_{sd}}{dt} \\ \frac{di_{sq}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & p_p \omega_m \\ -p_p \omega_m & -\frac{R_s}{L_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{v_{sd}}{L_s} \\ \frac{v_{sq}}{L_s} - \frac{p_p \omega_m}{L_s} \varphi_{pm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{3}{2} \frac{p_p}{J_r} \varphi_{pm} i_{sq} - \frac{B_r}{J_r} \omega_m - \frac{p_p}{J_r} \tau_l \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{di_{s\alpha}}{dt} \\ \frac{di_{s\beta}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & 0 \\ 0 & -\frac{R_s}{L_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{v_{s\alpha}}{L_s} + \frac{p_p \omega_m}{L_s} \varphi_{pm} \sin \theta_r \\ \frac{v_{s\beta}}{L_s} - \frac{p_p \omega_m}{L_s} \varphi_{pm} \cos \theta_r \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{3}{2} \frac{p_p}{J_r} \varphi_{pm} (i_{s\beta} \cos \theta_r - i_{s\alpha} \sin \theta_r) - \frac{B_r}{J_r} \omega_m - \frac{\tau_l}{J_r} \quad (4)$$

Burada i_{sd} , i_{sq} ve v_{sd} , v_{sq} stator akım ve gerilimlerinin $d-q$ eksenindeki bileşenleri; $i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$ ve $v_{s\alpha}$, $v_{s\beta}$ stator akım ve gerilimlerinin $\alpha-\beta$ eksenindeki bileşenleri; ω_m ve p_p sırasıyla rotor açısız hızını ve kutup çifti sayısını; R_s ve L_s sırası ile stator direncini ve endüktansını; τ_l yük momentini; J_r ve B_r ise sırasıyla motor ve yükün toplam eylemsizliği ile vizkoz sürtünme terimini temsil etmektedir.

Eş. 3 ve 4 kullanılarak GKKF ile SMSM'nin durum ve parametre ($i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$, ω_m ve τ_l) kestiriminde kullanılacak doğrusal olmayan genişletilmiş motor modeli aşağıda verilen genel formdaki gibi oluşturulabilir [24].

$$\dot{\mathbf{x}}_t = \mathbf{f}(\mathbf{x}_t, \mathbf{u}_t) + \mathbf{w}_t \quad (5)$$

$$\mathbf{z}_t = \mathbf{h}(\mathbf{x}_t) + \mathbf{v}_t \quad (6)$$

Burada genişletilmiş karmaşık durum vektörü $\mathbf{x}_t = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T = [i_{s\alpha} + j i_{s\beta} \ \omega_m \ \tau_l]^T$, karmaşık giriş vektörü $\mathbf{u}_t = \mathbf{v} = [v_{s\alpha} + j v_{s\beta}]$

ve çıkışların fonksiyonu $\mathbf{h} = [1 \ 0 \ 0]$ 'dir. Sistem fonksiyonu \mathbf{f} ise Eş. 7'de sunulmuştur.

$$\mathbf{f} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} x_1 - j \frac{p_p \omega_m}{L_s} \varphi_{pm} (\cos \theta_r + j \sin \theta_r) + \frac{1}{L_s} v \\ \frac{3}{2} \frac{p_p}{J_r} \varphi_{pm} \text{Im}\{x_1 (\cos \theta_r - j \sin \theta_r)\} - \frac{B_T}{J_r} x_2 - \frac{x_3}{J_r} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Eş. 5 ile verilen karmaşık genişletilmiş SMSM modeli Eş. 8'de verilen ileri Euler yaklaşımı [25] ile GKKF gözlemleyicinde kullanılacak ayrık zamanlı motor modeline Eş. 9'da gösterildiği gibi dönüştürülür.

$$\hat{\mathbf{x}}_t \approx \frac{\mathbf{x}_{k+1} - \mathbf{x}_k}{T} \quad (8)$$

$$\mathbf{x}_{o,k+1} = \mathbf{I}_{3 \times 3} \times \mathbf{x}_{o,k} + T \times \mathbf{f}_o \quad (9)$$

Burada T örnekleme zamanını, \mathbf{I} ise birim matrisi ifade etmektedir.

3. GKKF Gözlemleyicisinin Tasarımı (Desing of ECKF Obsever)

$i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$, ω_m ve τ_l 'nin kestirimi için Eş. 5 ve 6'da verilen karmaşık motor modelini kullanılan GKKF gözlemleyicisinin genel eşitlikleri aşağıda verilmiştir [26].

Doğrusallaştırma eşitliği

$$\mathbf{F}_{k+1|k} = \left. \frac{\partial f(\mathbf{x}, \mathbf{u})}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}_{k+1}} \quad (10)$$

Zaman güncelleme eşitlikleri

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1}^- = f(\hat{\mathbf{x}}_k, \mathbf{u}_{k+1}) \quad (11)$$

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

Ölçüm güncelleme eşitlikleri

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

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

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

Burada $\mathbf{F}_{k+1|k}$ doğrusallaştırma fonksiyonu; \mathbf{P}_{k+1}^- ve \mathbf{P}_{k+1} önceki ve sonraki kovaryans matrisleri, \mathbf{K}_{k+1} kalman kazancı, \mathbf{Q} ve \mathbf{R} sırası ile modelleme ve ölçme hataları olarak ifade edilir. Ayrıca Eş. 12'de \mathbf{H} üst indisi karmaşık eşlenik traspozü temsil etmektedir.

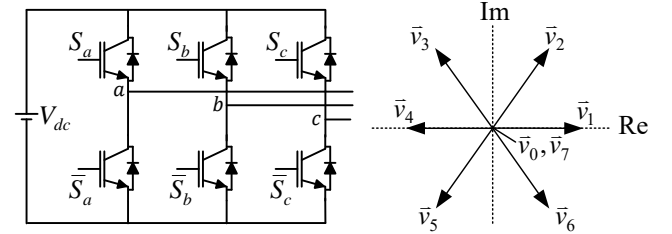
Geleneksel GKF'ye kıyasla önerilen GKKF gözlemleyicinin işlem yükünü azaltan kısımları aşağıdaki gibi ifade edilebilir [26]:

- Model derecesinin azaltılması GKF gözlemleyicisindeki matris boyutlarını azaltacaktır. Bundan dolayı yoğun matris çarpımları içeren GKF'de eleman bazlı çarpma işlemleri azalacaktır.
- GKF'deki en yüksek işlem yüklerinden birisi olan matris tersi önerilen GKKF ile ortadan kaldırılmaktadır. Eş. 13'te verilen $[\mathbf{H}_{k+1} \mathbf{P}_{k+1}^- \mathbf{H}_{k+1}^T + \mathbf{R}]$ matrisi karmaşık modelden dolayı skalar ve gerçel değere dönüşmektedir. Bundan dolayı geleneksel GKF'deki matris tersi, önerilen GKKF ile gerçel bir sayının tersine dönüştürülmekte ve buda matris tersi ile kıyaslandığında çok az işlem yükü gerektirmektedir.

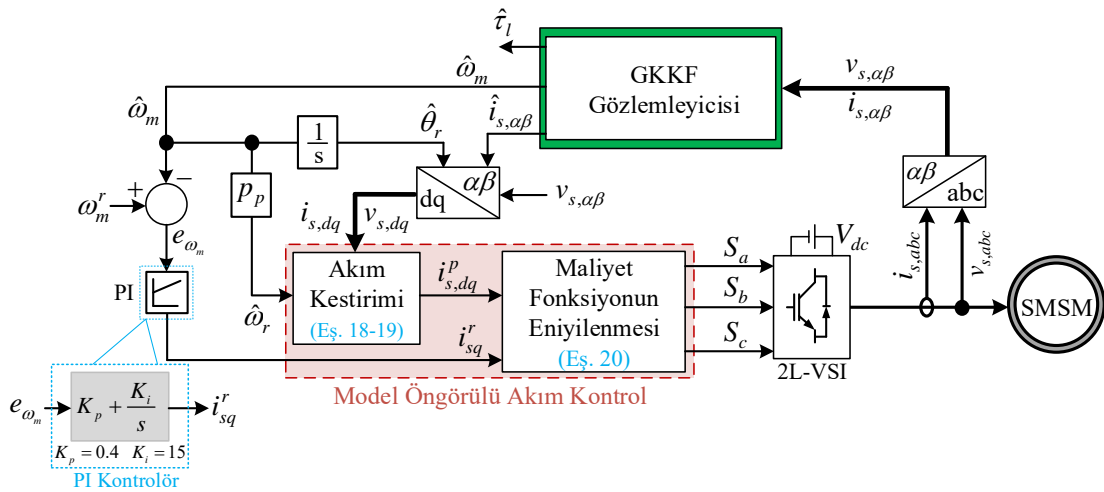
4. Model Öngörülü Akım Kontrol Sistemi (Model Predictive Current Control System)

Önerilen GKKF gözlemleyicisinin başarımını göstermek için tasarlanan hız-algılayıcısız MÖAK tabanlı SMSM sürücüsünün blok şeması Şekil 1'de verilmiştir. Hız-algılayıcısız MÖAK sistemi için gerekli olan rotor açısal hız bilgisi GKKF tarafından kestirilmiştir. Burada, hız kontrolörü olarak geleneksel PI kontrolör kullanılmıştır. Benzetim çalışmalarında kontrolör katsayıları $K_p = 0,4$ ve $K_i = 15$ olarak seçilmiştir.

Şekil 1'de gösterilen sürücü sisteminde bulunan iki seviyeli gerilim kaynaklı eviricinin (two level-voltage source inverter (2L-VSI)) detayları Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. İki seviyeli gerilim kaynaklı evirici ve gerilim vektörleri (Two-level voltage source inverter and voltage vectors.)



Şekil 1. Model öngörülü akım kontrollü SMSM sürücüsü (Model predictive current controlled PMSM drive)

Şekil 2’de verilen 2L-VSI’in anahtarlama durumu Eş. 16’da gösterildiği gibi verilebilir [27].

$$\vec{S} = \frac{2}{3}(S_a + \vec{a}S_b + \vec{a}^2S_c) \quad (16)$$

Burada $\vec{a} \triangleq e^{j2\pi/3}$ ve $S_x \in \{S_a, S_b, S_c\}$ eviricinin kollarındaki anahtarların ON/OFF durumlarını gösterir. Anahtarlama durumu \vec{S} kullanılarak eviricinin çıkış gerilimi \vec{v}_s aşağıdaki gibi verilir.

$$\vec{v}_s = V_{dc}\vec{S} \quad (17)$$

Burada V_{dc} dc bağlantı gerilimidir. İki seviyeli gerilim kaynaklı evirici için, Eş. 17 sekiz anahtarlama durumu için yedi farklı gerilim vektörü verir.

MÖAK tabanlı SMSM sürücü sistemindeki “akım kestirici” bloğunda $i_{s,d,q}$, $v_{s,d,q}$ ve ω_r kullanılarak d - q eksenindeki öngörülen stator akımları sekiz farklı anahtarlama durumu için aşağıdaki gibi tahmin edilebilir [27].

$$i_{sd,k+1}^p = \left(1 - \frac{TR_s}{L_s}\right) i_{sd,k} + T\hat{\omega}_{r,k}i_{sq,k} + \frac{T}{L_s}v_{sd,k} \quad (18)$$

$$i_{sq,k+1}^p = \left(1 - \frac{TR_s}{L_s}\right) i_{sq,k} - T\hat{\omega}_{r,k}i_{sd,k} + \frac{T}{L_s}v_{sq,k} - \frac{T\varphi_{pm}}{L_s}\hat{\omega}_{r,k} \quad (19)$$

Dolaylı olarak hız referansının takip edilmesini sağlayan en iyi (optimum) gerilim vektörünün seçimi için kullanılan öngörülen stator akımlarına dayalı maliyet fonksiyonu aşağıdaki gibidir [27]:

$$g = \sum_{h=1}^N \left\{ (i_{sd}^r - i_{sd,k+h}^p)^2 + (i_{sq}^r - i_{sq,k+h}^p)^2 + I_m \right\} \quad (20)$$

Burada i_{sd}^r ve i_{sq}^r stator akımlarının d - q eksenindeki referanslarıdır ve i_{sd}^r sıfır olarak seçilmiştir. Ayrıca N tahmin ufkunu göstermektedir ve bir olarak seçilmiştir. I_m ise SMSM’yi aşırı akımlardan koruyan sınırlama terimidir. Öngörülen stator akımlarının genlik değeri, I_m değerinden büyük olduğunda akım sınırlandırma terimi etkinleştirilir. Akım sınırlama terimi aşağıdaki tanımlanır. Burada $i_{s,max}$ stator akımının maksimum genliğidir.

$$I_m = \begin{cases} \infty, & \text{eğer } |i_{sd,k+1}^p| \geq i_{s,max} \text{ veya } |i_{sq,k+1}^p| \geq i_{s,max} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (21)$$

5. Benzetim Sonuçları (Simulation Results)

Şekil 3’te gösterildiği gibi MÖAK tabanlı SMSM sürücüsünün ve önerilen GKKF gözlemleyicisinin başarımlarını doğrulamak için yapılan benzetim çalışmaları *MATLAB Simulink* [28] ortamında gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışmalarında kullanılan SMSM’ye ait parametreler ve anma değerleri Tablo 1’de verilmiştir. Benzetim çalışmaları $25\mu s$ ’lik örnekleme zamanı ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca GKKF gözlemleyicisi ile kestirimi yapılan durum ve parametrelerin başlangıç değerleri sıfır olarak seçilmiştir.

Tablo 1. SMSM’nin parametreleri (Parameters of the PMSM) [15].

Parametre	Anma Değeri
n_m [dev/dk]	2300
τ_l [N.m]	10
J_T [kg.m ²]	0,001469
B_T [N.m.s]	0,0003035
R_s [Ω]	0,4578
L_s [mH]	3,34
φ_{pm} [V.s]	0,171
p_p	4

MÖAK tabanlı SMSM sürücüsünün kontrol başarımına doğrudan etki eden GKKF gözlemleyicisinden yüksek kestirim başarımı elde etmek için deneme yanılma yöntemi ile belirlenen hata kovaryans matrisine (P_0 ’a) ait başlangıç değerleri ve gürültü kovaryans matrisleri (R ve Q) aşağıda verilmiştir.

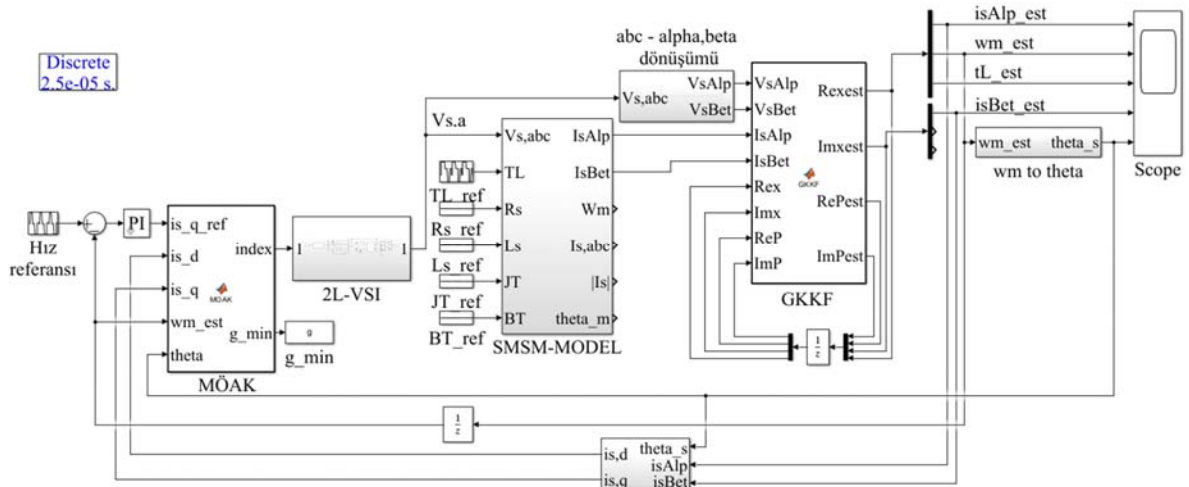
$$P_0 = \text{diag}\{1 \quad 1 \quad 1\}$$

$$R = [10^{-12}]$$

$$Q = \text{diag}\{10^{-11} \quad 10^{-5} \quad 10^{-2}\}$$

MÖAK tabanlı SMSM sürücüsünün etkinliği ve önerilen GKKF gözlemleyicisinin kestirim başarımı farklı çalışma koşulları altında zorlayıcı senaryolarla test edilmiştir. Bu senaryolara aşağıda verilmiştir.

- *Senaryo 1:* Sıfır hız ile anma hızı arasında doğrusal hız geçişleri ve basamak şeklinde oluşturulan yük momentı değişimleri altında GKKF’nin kestirim, MÖAK tabanlı SMSM sürücüsünün kontrol başarımı



Şekil 3. MATLAB Simulink ortamında tasarlanan MÖAK tabanlı SMSM sürücüsü (MPCC based SMSM drive designed in MATLAB Simulink environment.)

- *Senaryo II*: Sıfır hız ile hız terslendirmelerinde içeren geniş hız aralığında GKKF'nin kestirim, MÖAK tabanlı SMSM sürücüsünün kontrol başarımı
- *Senaryo III*: R_s , L_s ve φ_{pm} değişimlerine karşı GKKF'nin kestirim, MÖAK tabanlı SMSM sürücüsünün kontrol başarımı

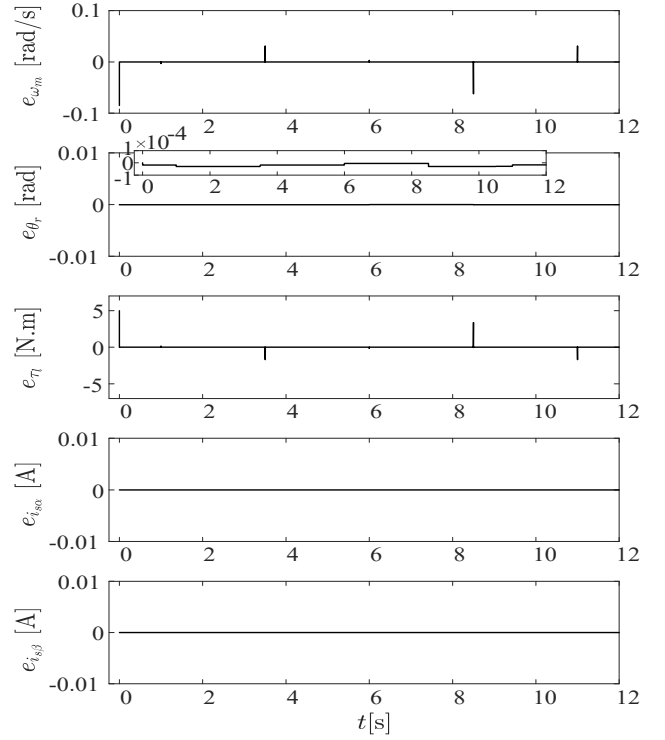
Benzetim çalışmalarında sunulan tüm şekillerde $(\cdot)^r$ referansları, $(\cdot)^m$ ölçülen büyüklükleri ve $(\hat{\cdot})$ kestirilen durumları göstermektedir.

5.1. Senaryo I (Scenario I)

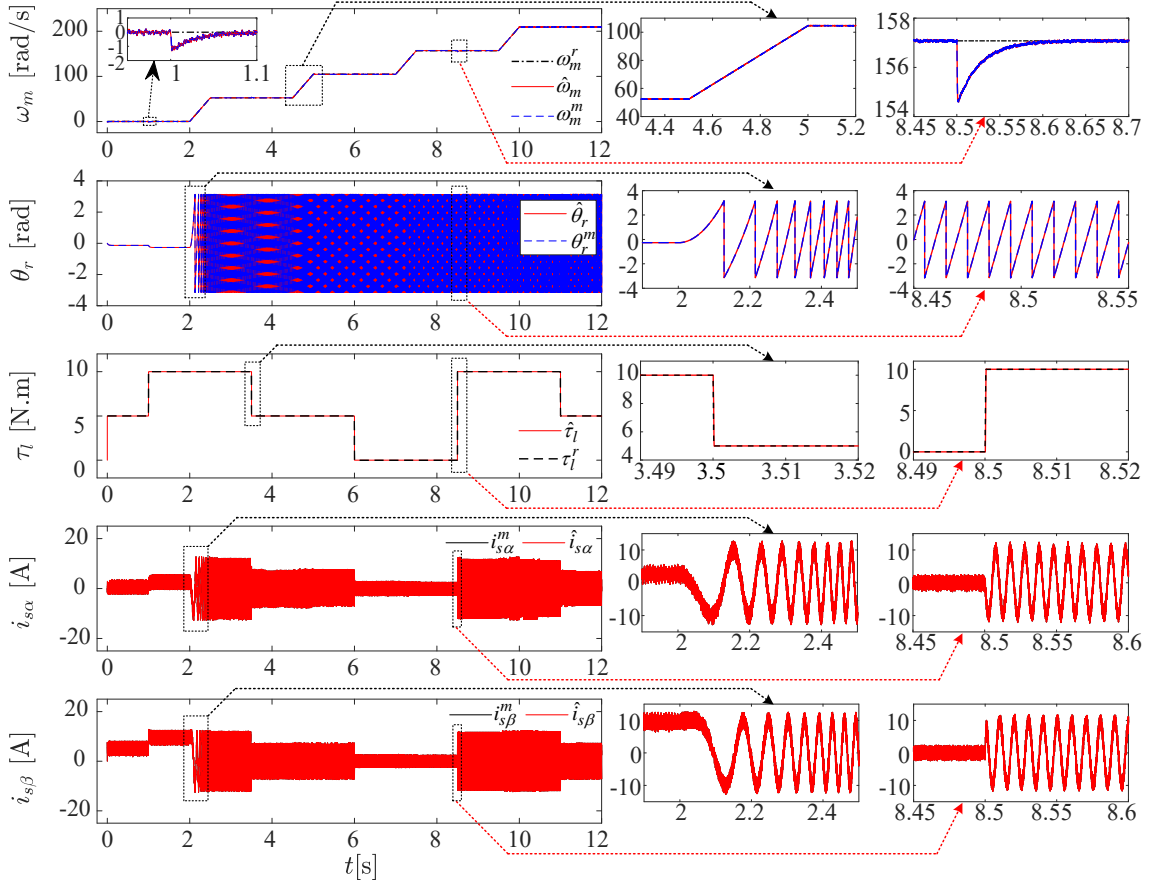
Basamak şeklinde oluşturulan yük momentini değişimleri altında, sıfır hız ile anma hızı arasında doğrusal hız geçişlerini içeren bu senaryoda GKKF'nin kestirim başarımı, MÖAK tabanlı SMSM sürücüsünün ise kontrol başarımı test edilmiştir. Bu amaç doğrultusunda SMSM sıfır hızdan anma hızına kademeli olarak doğrusal şekildeki değişimler ile hızlandırılmıştır. Yük momentini ise hızın sabit kaldığı bölgelerde basamak şeklinde artırılmış veya azaltılmıştır. Bu zorlayıcı senaryoya rağmen hem önerilen GKKF gözlemleyicisinin hem de bu gözlemleyiciyi kullanan MÖAK tabanlı SMSM sürücüsünün çok yüksek başarıma sahip olduğu onaylanmıştır. Bu senaryoya ilişkin benzetim sonuçları Şekil 4 ve Şekil 5'te verilmiştir. Ek olarak Şekil 4, basamak şeklinde oluşturulan geçici durumların bazıları için büyütülmüş sonuçları da içermektedir.

5.2. Senaryo II (Scenario II)

Bu senaryoda ise sıfır hız ile hız terslendirmelerinde içeren geniş hız aralığı için GKKF'nin kestirim başarımı ve MÖAK tabanlı SMSM sürücüsünün kontrol başarımı test edilmiştir. Bu amaç doğrultusunda;



Şekil 5. Senaryo I için GKKF'nin kestirim hataları (Estimation errors of the ECKF for Scenario I)



Şekil 4. Senaryo I için GKKF'nin kestirim sonuçları (Estimation results of the ECKF for Scenario I)

- SMSM sıfır hız, anma hız, düşük hız ve hız terslendirmeleri için içeren geniş hız aralığında oluşturulan hız referansı ile sürülmüştür.
- SMSM'ye yük momenti -5 N.m ile 10 N.m (anma yük momenti) arasında basamak ve/veya doğrusal bir şekilde değiştirilerek uygulanmıştır.

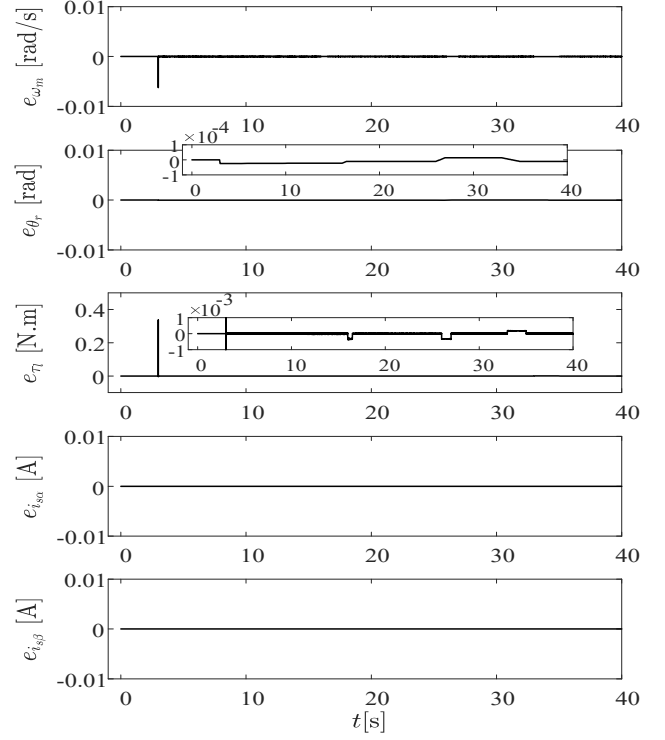
Bu zorlayıcı senaryoya rağmen geniş bir hız aralığı için hem GKKF gözlemleyicisinin hem de bu gözlemleyiciyi kullanan MÖAK tabanlı SMSM sürücüsünün çok yüksek başarıma sahip olduğu benzetim sonuçları ile gösterilmiştir. Bu senaryoya ait benzetim sonuçları Şekil 6 ve Şekil 7'de verilmiştir. Ek olarak Şekil 6, geniş bir hız aralığında oluşturulan bu senaryo için geçici durumların bazıları için büyütülmüş sonuçları da içermektedir. Ayrıca, bu çalışmadaki aynı durum ve parametreleri kestiren geleneksel GKF ve GKKF gözlemleyicilerin işlem yükleri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma Şekil 6'da verilen senaryo için aynı koşullar altında her bir gözlemleyici 50 defa çalıştırılarak yapılmıştır. Karşılaştırma sonucu elde edilen ortalama süreler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Önerilen GKKF ve geleneksel GKF'nin hesaplama süreleri (The computational times of the proposed ECKF and conventional EKF)

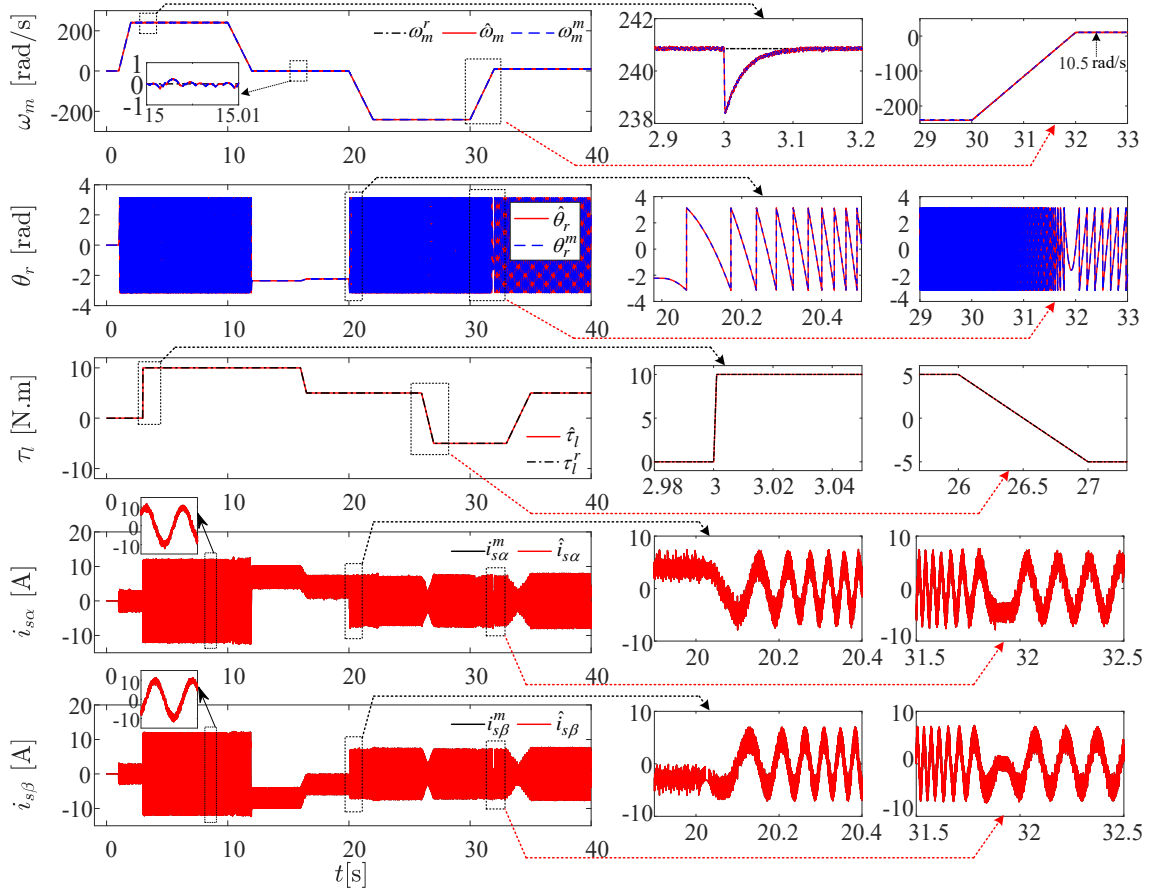
Geleneksel GKF	Önerilen GKKF
26,5267s	22,1981s

5.3. Senaryo III (Scenario III)

Bu senaryoda -5 N.m'lik yük altında SMSM'nin R_s , L_s ve φ_{pm} parametrelerinde meydana getirilen değişimlere karşı GKKF'nin kestirim, MÖAK tabanlı SMSM sürücüsünün ise kontrol başarımına ilişkin sağlamlık testi gerçekleştirilmiştir. Bu amaç doğrultusunda;



Şekil 7. Senaryo II için GKKF'nin kestirim hataları (Estimation errors of the ECKF for Scenario II)



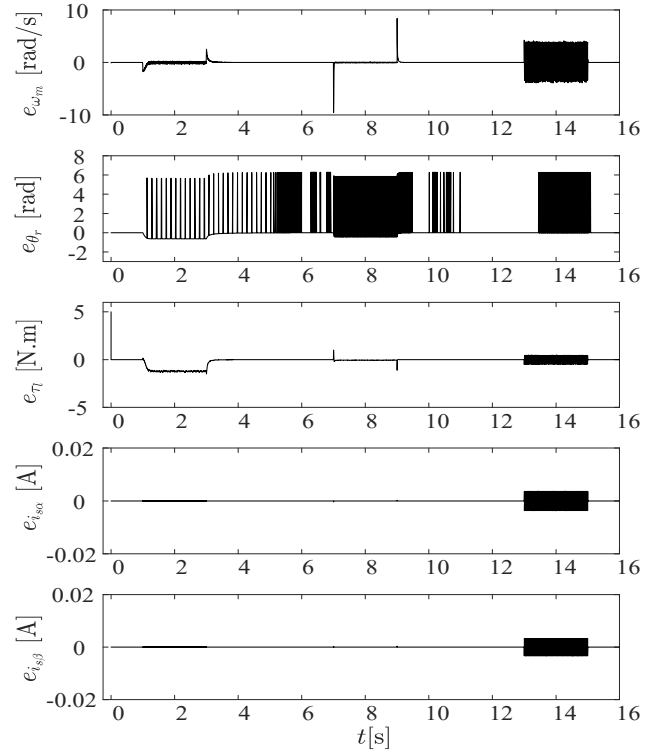
Şekil 6. Senaryo II için GKKF'nin kestirim sonuçları (Estimation results of the ECKF for Scenario II)

- İlk olarak, SMSM yaklaşık 10,46 rad/s'lik hız ile sürülürken stator direnci R_s ; 1. s'de anma değerinden (R_{sn} 'den) anma değerinin 1,5 katına ($R_{sn} \times 1,5$ 'e) yükseltilmiş daha sonra 3. s'de $R_{sn} \times 1,5$ 'den R_{sn} 'ye azaltılmıştır.
- İkinci olarak SMSM yaklaşık 104,6 rad/s'lik hız ile sürülürken stator endüktansı L_s ; 7. s'de L_{sn} 'den $L_{sn} \times 1,1$ 'e yükseltilmiş daha sonra 9. s'de $L_{sn} \times 1,1$ 'den L_{sn} 'ye düşürülmüştür.
- Üçüncü olarak SMSM yaklaşık 210 rad/s'lik hız ile döndürülürken φ_{pm} ; 13. s'de φ_{pmn} 'den $\varphi_{pmn} \times 1,1$ 'e artırılmış daha sonra 15. s'de $\varphi_{pmn} \times 1,1$ 'den φ_{pmn} 'ye azaltılmıştır.

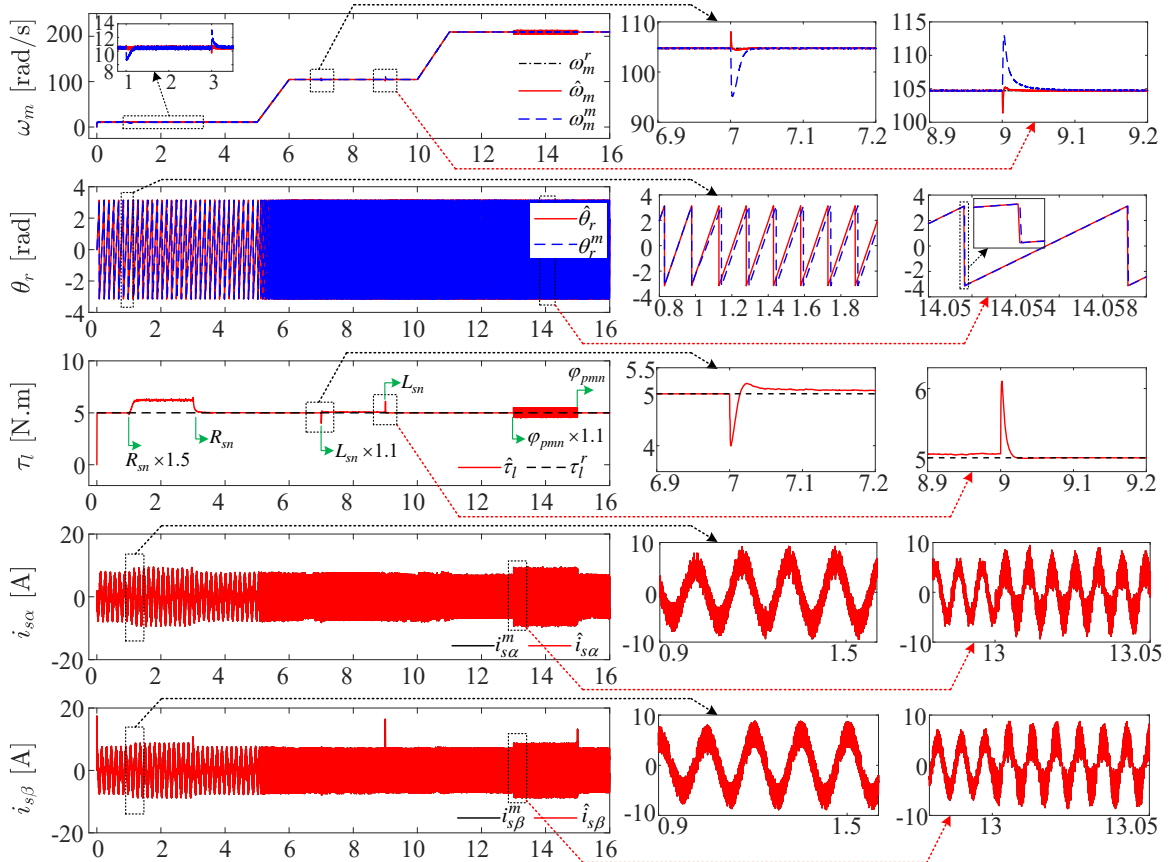
Bu senaryoya ait benzetim sonuçları Şekil 8 ve Şekil 9'da verilmiştir. Benzetim sonuçları dikkate alındığında hem GKKF gözlemleyicisinin hem de bu gözlemleyiciyi kullanan MÖAK tabanlı SMSM sürücüsünün başarımları parametre değışikliklerinden etkilenmektedir. Bununla birlikte hem GKKF gözlemleyicisinden elde edilen kestirimlerde, hem de MÖAK tabanlı motor sürücüsünün hız kontrol başarımında meydana gelen bozulmalar kabul edilebilir seviyededir. Başarımı iyileştirmek için parametre değışikliklerin hem gözlemciye hem de MÖAK tabanlı sürücüye güncellenmesi gerekmektedir.

Şekil 4-Şekil 9 ve Tablo 2 incelendiğinde aşağıdaki çıkarımlar yapılabilir.

- $i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$, ω_m ve τ_l 'nin eş-zamanlı kestirimi için zorlayıcı senaryolar altında test edilen GKKF gözlemleyicisinin kestirim başarımları tatmin edici seviyedir.
- Önerilen GKKF gözlemleyicisi kestirilen durum ve parametreler için sıfır başlangıç değeri ile çalıştırılmasına rağmen kestirilen değeler gerçek değelerine kısa sürede yakınsamaktadır.



Şekil 9. Senaryo III için GKKF'nın kestirim hataları (Estimation errors of the ECKF for Scenario III)



Şekil 8. Senaryo III için GKKF'nın kestirim sonuçları (Estimation results of the ECKF for Scenario III)

- GKKF gözlemleyicisinin işlem yükü bu çalışmada kestirilen durum ve parametreleri kestiren geleneksel genişletilmiş Kalman filtresi ile karşılaştırılmış ve işlem yükünün yaklaşık %19,5 oranında düştüğü gösterilmiştir.
- Hem GKKF gözlemleyicisinin hem de bu gözlemleyiciyi kullanan MÖAK tabanlı SMSM sürücüsünün parametre değişimlerinden etkilendiği görülmektedir.

Özetle, benzetim sonuçları GKKF gözlemleyicisi ve bu gözlemleyiciyi kullanan hız-algılayıcısız MÖAK sisteminin oldukça yüksek başarıma sahip olduğunu onaylamaktadır. Ek olarak, parametre değişimlerine karşı başarıma daha da iyileştirmek için çalışma koşulları ile SMSM parametrelerinde meydana gelen değişikliklerin hem gözlemciye hem de MÖAK tabanlı sürücüye güncellenmesi gerekmektedir.

6. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, SMSM'lerin hız-algılayıcısız model öngörölü akım kontrolü için gerekli olan duran eksen takımındaki stator akım bileşenleri ve rotor açılmal hızı/konumu ile birlikte yük momentinin eşzamanlı kestirimi için GKKF tabanlı gözlemleyici önerilmiştir. GKKF gözlemleyicisi ve MÖAK tabanlı SMSM sürücüsü sıfır hız ve hız terslendirmelerini içeren geniş bir hız aralığında farklı yük momentleri altında zorlayıcı senaryolar ile benzetim temelli test edilmiş ve doğrulanmıştır. Benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar hem GKKF gözlemleyicisi hem de bu gözlemleyiciyi kullanan hız-algılayıcısız MÖAK sisteminin oldukça yüksek başarıma sahip olduğunu onaylamaktadır. Ek olarak GKKF gözlemleyicisinin işlem yükü bu çalışma ile aynı durum ve parametreleri kestiren geleneksel genişletilmiş Kalman filtresi ile karşılaştırılmış ve işlem yükünün yaklaşık %19,5 oranında düştüğü gösterilmiştir. Bununla birlikte GKKF algoritmasının kestirim başarıma ve MÖAK tabanlı SMSM sürücüsü çalışma koşulları değerleri değişebilen parametrelerden etkilenmektedir. Değeri çalışma koşulları ile değişen bu parametrelerin kestirilerek hem GKKF gözlemleyicisine hem de MÖAK tabanlı SMSM sürücüsüne güncellenmesi önerilen sürücü sisteminin başarıma daha da artıracaktır. Gelecekteki çalışmalarda bu parametrelerin kestirimine odaklanacaktır.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma Kayseri Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FKB-2022-1082 numaralı proje kapsamında kısmen desteklenmiştir.

Kaynaklar (References)

1. Bouguenna, I.F., Tahour, A., Kennel, R., Abdelrahman, M. Multiple-Vector Model Predictive Control with Fuzzy Logic for PMSM Electric Drive Systems, *Energies*, 14, 1-23, 2021.
2. Tören M., Mollahasanoęlu, H. Investigation of the effect of different power degree NdFeB magnets used in interior permanent magnet brushless direct current motor (IPMBLDC) on motor performance, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 38 (3), 1389-1402, 2023.
3. Kurnaz Araz, H., Yılmaz, M., Design procedure and implementation of a high-efficiency PMSM with reduced magnetmass and torque-ripple for electric vehicles, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 35 (2), 1089-1109, 2020.
4. Boldea, I., Control issues in adjustable speed drives, *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2 (3), 32-50, 2008.
5. Guo, Q., Pan, T., Liu, J., Chen, S., Explicit model predictive control of permanent magnet synchronous motors based on multi-point linearization, *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 43 (12), 2872-2881, 2021.
6. Kivanc, O.C., Ozturk, S.B., Sensorless PMSM Drive Based on Stator Feedforward Voltage Estimation Improved with MRAS Multiparameter

- Estimation, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 23 (3), 1326-1337, 2018.
7. Abareshi, S., Tohidi, S., Bannae Sharifian, M.B., Younesi, A., Model predictive control by combining vectors for surface and interior permanent-magnet synchronous motor, *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 31 (8), 1-16, 2021.
8. Sandre-Hernandez, O., Rangel-Magdaleno, J., Morales-Caporal, R., A Comparison on Finite-Set Model Predictive Torque Control Schemes for PMSMs, *IEEE Trans. Power Electron.*, 33 (10), 8838-8847, 2018.
9. Zerdali, E., 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 and Computer Sciences*, 29 (1), 223-240, 2020.
10. Xu, Y., Wang, L., Yuan, W., Yin, Z., Disturbance rejection speed sensorless control of PMSMs based on full order adaptive observer, *J. Power Electron.*, 21 (5), 804-814, 2021.
11. Bıçak A., Gelen, A., Sensorless direct torque control based on seven-level torque hysteresis controller for five-phase IPMSM using a sliding-mode observer, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 24 (5), 1134-1143, 2021.
12. Bernard, P., Praly, L., Estimation of Position and Resistance of a Sensorless PMSM: A Nonlinear Luenberger Approach for a Nonobservable System, *IEEE Trans. Autom. Control*, 66 (2), 481-496, 2021.
13. Zhu, Y., Tao, B., Xiao, M., Yang, G., Zhang, X., Lu, K., Luenberger Position Observer Based on Deadbeat-Current Predictive Control for Sensorless PMSM, *Electronics*, 9 (8), 1-17, 2020.
14. Urbanski, K., Janiszewski, D., Sensorless Control of the Permanent Magnet Synchronous Motor, *Sensors*, 19 (16): 3546, 1-25, 2019.
15. Zerdali, E., Wheeler, P., Speed-Sensorless Finite Control Set Model Predictive Control of PMSM with Permanent Magnet Flux Linkage Estimation, 2020 2nd Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM), Izmir, Turkey, 114-119 20-23 October 2020,
16. Raja, R., Sebastian, T., Wang, M., Online Stator Inductance Estimation for Permanent Magnet Motors Using PWM Excitation, *IEEE Trans. Transp. Electrification*, 5 (1) 107-117, 2019.
17. Abo-Khalil, A.G., Eltamaly, A.M., Alsaud, M.S., Sayed, K., Alghamdi, A.S., Sensorless control for PMSM using model reference adaptive system, *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 31 (e12733), 1-11, 2021.
18. Li X., Kennel, R., General Formulation of Kalman-Filter-Based Online Parameter Identification Methods for VSI-Fed PMSM, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 68 (4), 2856-2864, 2021.
19. Tondpoor, K., Saghaianezhad, S.M., Rashidi, A., Sensorless Control of PMSM Using Simplified Model Based on Extended Kalman Filter, 11th Power Electronics, Drive Systems, and Technologies Conference (PEDSTC), Tehran, Iran, 1-5, 04-06 February 2020.
20. Nordin, M.I., Lazi, J.M., Talib, M.H.N., Ibrahim, Z., Speed Sensorless Control for PMSM Drives Using Extended Kalman Filter, *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)*, 84 (1), 77-83, 2022.
21. Li, X., Yang, Q., Tian, W., Karamanakos, P., Kennel, R., A Dual Reference Frame Multistep Direct Model Predictive Current Control with a Disturbance Observer for SPMSM Drives, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 37 (3), 2857-2869, 2022.
22. Bolognani, S., Oboe, R., Zigliotto, M., Sensorless full-digital PMSM drive with EKF estimation of speed and rotor position, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 46 (1), 184-191, 1999.
23. Vas, P., *Sensorless Vector and Direct Torque Control*, Oxford University Press, 1998.
24. Demir, R., Robust stator flux and load torque estimations for induction motor drives with EKF-based observer, *Electrical Engineering*, 105 (1), 551-562, 2023.
25. Habibullah M. and Lu, D. D. C., A Speed-Sensorless FS-PTC of Induction Motors Using Extended Kalman Filters', *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 62 (11), 6765-6778, 2015.
26. Alonge, F., D'Ippolito, F., Fagiolini, A., Sferlazza, A., Extended complex Kalman filter for sensorless control of an induction motor, *Control Engineering Practice*, 27, 1-10, 2014.
27. Demir, R., Speed-sensorless Predictive Current Controlled PMSM Drive with Adaptive Filtering-based MRAS Speed Estimators, *International Journal of Control, Automation and Systems*, 21 (8), 2577-86, 2023.
28. MathWorks Inc., Simulink. Simulation and Model- Based Design. MA, USA: Natick, 2023.

