

E-Skuterlerde kullanılan FDAM sürücülerinin genişletilmiş Kalman filtresi tabanlı hız-algılayıcısız model öngörülü akım kontrolü

Extended Kalman filter based speed-sensorless model predictive current control of BLDC motor drives used in e-scooters

Rıdvan Seyit Avcuoğlu¹ , Rıdvan Demir^{2,*} 

^{1,2}Kayseri Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 38280, Kayseri, Türkiye

¹Karluna Mühendislik, Ar-Ge Merkezi, Otomotiv Batarya Sistemleri Bölümü, 35170, İzmir, Türkiye

Öz

Bu çalışmada, elektrikli skuterlerde (e-skuter) kullanılan fırçasız doğru akım motorlarının (FDAM) hız-algılayıcısız model öngörülü akım kontrolü (MÖAK) için genişletilmiş Kalman filtresi (GKF) tabanlı bir gözlemleyici tasarlanmış ve benzetim ortamında test edilmiştir. Tasarlanan GKF gözlemleyicisi, FDAM'nin stator akımlarını, rotor hızını, elektriksel rotor konumunu ve yük momentini eşzamanlı olarak kestirmektedir. Sistemi gerçekçi çalışma koşulları altında test etmek amacıyla, kestirim ve kontrol başarımları standart sürüş profilleri kullanılarak doğrulanmıştır. Ek olarak, benzetim çalışmalarında FDAM modeline uygulanan yük momenti, sürüş profilleri ve e-skuter'e ait toplam çekiş kuvveti kullanılarak belirlenmiştir. Sıfır hız dahil geniş bir hız aralığında ve farklı yük koşulları altında gerçekleştirilen benzetim sonuçları, hem GKF gözlemleyicisinin yüksek kestirim doğruluğunu hem de MÖAK tabanlı FDAM sürücüsünün etkin kontrol başarımlarını ortaya koymaktadır.

Anahtar kelimeler: Fırçasız doğru akım motoru, Genişletilmiş Kalman filtresi, Model öngörülü akım kontrolü, E-skuter

1 Giriş

Günümüzde ulaşım sektörü, fosil yakıt bağımlılığını azaltmak ve karbon emisyonlarını minimize etmek amacıyla köklü bir dönüşüm sürecinden geçmektedir. Bu sürecin merkezinde yer alan elektrikli araçlar (EA'lar), kullanım amaçları, şasi yapıları ve enerji gereksinimlerine göre geniş bir yelpazede sınıflandırılmaktadır. EA'lar yetkinliklerine göre temel olarak ağır ticari ve büyük ölçekli EA'lar (elektrikli kamyonlar vb.), binek ve hafif ticari elektrikli araçlar ve hafif EA'lar olarak üç kategoriye ayrılabilir. Hafif EA'lar şehir içi ulaşım sorununa çözüm sunan düşük ağırlıklı ve yüksek manevra kabiliyetine sahip araçları kapsamaktadır. Özellikle elektrikli skuterler (e-skuter) ve elektrikli bisikletler (EB'ler) bu sınıfta yer almaktadır. Bu araçlar, genellikle kısa mesafeli bireysel ulaşım için optimize edilmiş, düşük batarya kapasitesine sahip ancak enerji verimliliği yüksek sistemlerdir. E-skuterler, mikromobilité ve "son kilometre" ulaşım çözümlerinde sunduğu pratiklik nedeniyle son yıllarda küresel ölçekte en hızlı yaygınlaşan

Abstract

This study presents the design and simulation-based validation of an extended Kalman filter (EKF) observer for the speed-sensorless model predictive current control (MPCC) of brushless direct current (BLDC) motors used in electric scooters (e-scooters). The designed EKF simultaneously estimates the stator currents, rotor speed, electrical rotor position, and load torque of the BLDC motor. To evaluate the system under realistic operating conditions, the estimation and control performances are validated using standard driving profiles. In addition, the external load torque applied to the motor model during simulations is dynamically derived from these driving profiles and the traction force of the e-scooter. Simulation results obtained over a wide speed range, including zero speed, and under varying load conditions demonstrate both the high estimation accuracy of the EKF observer and the effective control performance of the MPCC-based BLDC motor drive.

Keywords: Brushless direct current motor, Extended Kalman filter, Model predictive current control, E-scooter

ulaşımlar araçlarından biri haline gelmiştir. Bu platformlar; sık dur-kalk içeren yoğun şehir içi sürüş senaryoları, anlık eğim/yol engebeleri ve kullanıcı ağırlığındaki büyük değişimler nedeniyle son derece dinamik ve kestirilmesi zor değişken yük koşullarına sahiptir. Dahası, açık ve kompakt mekanik yapıları gereği dış çevre koşullarına (su, toz, aşırı titreşim vb.) doğrudan maruz kaldıklarından, motor kontrolünde fiziksel konum ve hız sensörlerinin kullanılması arıza riskini artırmakta ve sistem güvenilirliğini düşürmektedir. Bu durum, e-skuter platformlarında hem üretim maliyetlerini düşürmek hem de çevresel etkenlere karşı dayanıklılığı artırmak adına hız-algılayıcısız kontrol tekniklerinin araştırılmasını kritik bir akademik ve endüstriyel gereksinim haline getirmektedir. E-skuter ve EB gibi hafif EA'ları tahrik etmek için genellikle yüksek güç yoğunlukları ve verimlilikleri nedeniyle fırçasız doğru akım motorlar (FDAM'ler) kullanılmaktadırlar [1].

FDAM'lerin yüksek başarılı sürücü sistemleri için doğrudan moment kontrol [2-5], vektör kontrol [6, 7] ve

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ridvandemir@kayseri.edu.tr (R. Demir)

Geliş / Received: 12.05.2026 Kabul / Accepted: 29.06.2026 Yayınlanma / Published: 03.07.2026

doi:10.28948/ngumuh.1949569

model öngörülü kontrol [8-10] yöntemleri kullanılmaktadır. Yüksek başarımlı sürücüler, FDAM'nin hız ve konum bilgisine ihtiyaç duymaktadır. Hız-algılayıcısız sürücülerde hız ve konum bilgileri, gözlemleyici/kestirici algoritmaları tarafından üretilerek kontrol sistemine sağlanmaktadır. Hız ve konum bilgisinin elde edilmesi için literatüre modele uyarlamalı sistem temelli kestiriciler [3, 4, 11], yapay sinir ağları temelli kestiriciler [12], kayma kipli gözlemleyiciler [5, 13], adaptif gözlemleyiciler [14] ve doğrusal olmayan Kalman filtresi (KF) gözlemleyicileri [10, 15, 16] önerilmiştir.

Önerilen yöntemlerden KF gözlemleyicileri ile yapılan çalışmalar incelendiğinde; İnan ve Üzüm FDAM'nin stator akımları, rotor hızı, elektriksel konumu ve yük momenti kestirimini genişletilmiş KF (GKF) ile gerçekleştirmiştir [15]. Ubare vd. ise FDAM'nin stator akımları ve indüklenen moment kestirimlerini GKF ve kokusuz KF ile yapmıştır [9]. Kalamian vd. GKF ile FDAM'nin stator akımları, rotor hızı, elektriksel konum, stator faz direnci ve yük momentini kestirmiştir [16]. İnan [10] ve İnan vd. [2] ise FDAM'nin stator akımları ve zıt-EMK'larının kestirimini hız-algılayıcılı olarak gerçekleştirmiştir.

Bu çalışmanın temel katkısı, zorlu çevre şartlarında çalışan ve dinamik yük değişimlerine maruz kalan e-skuterler de kullanılan FDAM'nin stator akımları, rotor hızı, elektriksel konumu ve yük momenti kestirimi için GKF gözlemleyicisinin tasarımının gerçekleştirilmesi ve benzetim temelli olarak test edilmesidir. Bu çalışmada tasarlanan GKF gözlemleyicisinin başarımlı, hız-algılayıcısız model öngörülü akım kontrol (MÖAK) temelli FDAM sürücüsü ile doğrulanmıştır. GKF gözlemleyicisinin kestirim başarımlı ve hız-algılayıcısız MÖAK temelli sürücünün kontrol başarımlı kentsel dinamometre sürüş programı (Urban Dynamometer Driving Schedule-UDDS) sürüş profili ve dünya çapında uyumlu hafif araçlar test prosedürü-3 (Worldwide Harmonised Light Vehicles Test Procedure 3-WLTP-3) sürüş profili ile test edilmiştir. Bu sürüş profilleri MÖAK sistemine hız referansı olarak uygulanmıştır. Ek olarak FDAM'ye uygulanan yük momenti, UDDS ve WLTP-3 sürüş profilleri ve e-skutere ait toplam çekiş kuvveti kullanılarak elde edilmiştir. Böylelikle önerilen kontrol ve kestirim yönteminin başarımlı, sadece sabit bir yük altında değil, e-skuterin gerçekçi fiziksel dinamiklerini içeren zorlu sürüş koşullarında test edilmiştir. Sıfır hız dahil geniş bir hız aralığında gerçekleştirilen benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar hem GKF gözlemleyicisinin hem de MÖAK temelli FDAM sürücüsünün başarımlı doğrulamaktadır.

Bu çalışma toplam altı bölümden oluşmaktadır. Genel literatür Bölüm 1'de verilirken, FDAM ve e-skuter modeli Bölüm 2'de verilmiştir. GKF gözlemleyicisi ve MÖAK temelli FDAM sürücüsüne ait detaylar sırasıyla Bölüm 3 ve 4'te sunulmuştur. Benzetim çalışmaları ve sonuçlar ise sırasıyla Bölüm 5 ve 6'da verilmiştir.

2 FDAM ve e-skuter modeli

Bu bölümde FDAM ve e-skuter modelleri detaylı bir şekilde verilmiştir.

2.1 FDAM modeli

FDAM'ye ait 3-faz stator akım denklemleri ve mekanik hareket eşitliği Denklem (1)-(3)'te sunulmuştur.

$$\frac{di_{s,abc}}{dt} = -\frac{R_s}{L_s}i_{s,abc} + \frac{1}{L_s}v_{s,abc} - \frac{1}{L_s}e_{abc} \quad (1)$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{t_e}{J_t} - \frac{B_t}{J_t}\omega_m - \frac{t_L}{J_t} \quad (2)$$

$$t_e = \frac{e_a i_{sa} + e_b i_{sb} + e_c i_{sc}}{\omega_m} \quad (3)$$

burada; $i_{s,abc}$ ve $v_{s,abc}$ sırasıyla 3-faz stator akımlarını ve gerilimlerini; e_{abc} 3-faz stator zıt-elektromotor kuvvet (EMK) değerlerini; R_s ve L_s stator direncini ve indüktansını; ω_m rotor mekanik hızını; t_e ve t_L indüklenen moment ve yük momentini; B_t ve J_t motor ve yükün toplam eylemsizliğini ve viskoz sürtünme terimini temsil etmektedir. e_{abc} , rotorun mekanik açısal hızı ve elektriksel konumuna (θ_e) bağlı olarak Denklem (4)'teki gibi ifade edilebilir.

$$e_{abc} = K_e \omega_m \mathbf{F}(\theta_e) \quad (4)$$

burada K_e zıt-EMK sabitini olup, üç faz arasında 120 derece faz farkını içeren $\mathbf{F}(\theta_e)$ vektörü Denklem (5)'te verilmiştir.

$$\mathbf{F}(\theta_e) = \begin{bmatrix} f(\theta_e) \\ f(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) \\ f(\theta_e - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

Bir periyot boyunca ideal trapezoidal dalga formunu tanımlayan parçalı lineer fonksiyon $f(\theta_e)$ Denklem (6) ile ifade edilir.

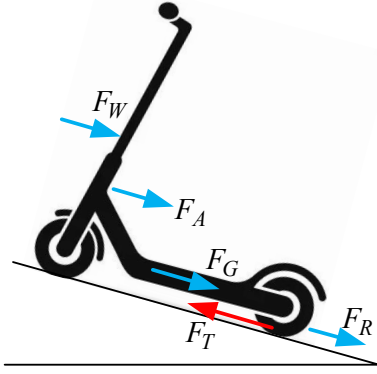
$$f(\theta_e) = \begin{cases} \frac{3}{\pi}\theta_e, & 0 \leq \theta_e < \frac{\pi}{3} \\ 1, & \frac{\pi}{3} \leq \theta_e < \frac{2\pi}{3} \\ 1 - \frac{3}{\pi}(\theta_e - \frac{2\pi}{3}), & \frac{2\pi}{3} \leq \theta_e < \pi \\ -\frac{3}{\pi}(\theta_e - \pi), & \pi \leq \theta_e < \frac{4\pi}{3} \\ -1, & \frac{4\pi}{3} \leq \theta_e < \frac{5\pi}{3} \\ -1 + \frac{3}{\pi}(\theta_e - \frac{5\pi}{3}), & \frac{5\pi}{3} \leq \theta_e < 2\pi \end{cases} \quad (6)$$

2.2 E-skuter modeli

Hareketli bir araca etkiyen kuvvetler; hava ve araç etkileşiminden kaynaklanan rüzgar kuvveti (F_w), aracı hızlandıran ivme kuvveti (F_a), yuvarlanma kuvveti (F_R) ve yolun eğiminin neden olduğu yerçekimi kuvveti (F_G) şeklinde sıralanabilir. Şekil 1'de gösterilen e-skuter için toplam çekiş kuvveti (F_T) Denklem (7) ile verilmiştir [17].

$$F_T = F_R + F_W + F_G + F_A \quad (7a)$$

$$F_T = K_R M_v g \cos \delta + \frac{1}{2} \rho A C_d V^2 + M_v g \sin \delta + M_v a \quad (7b)$$



Şekil 1. E-skuter dinamik modeli

Denklem (7)'de K_R yuvarlanma direnci katsayısını, C_d sürtünme katsayısını, M_v araç kütesini, A aracın ön yüzey alanını, g yerçekimi katsayısını, a aracın ivmesini, ρ hava yoğunluğunu ve δ yolun eğimini ifade etmektedir.

Elektrikli aracı tahrik eden FDAM'nin açısal hızı (ω_m) ve FDAM'ye uygulanan harici yük momenti (t_L) Denklem (8) ve (9) kullanılarak elde edilir [18].

$$\omega_m = \frac{V}{r} \quad (8)$$

$$t_L = r F_T \quad (9)$$

burada r tekerleğin yuvarlanma yarıçapıdır.

3 GKF gözlemleyicinin tasarımı

GKF gözlemleyicisinde kullanılacak olan FDAM'nin sürekli zamanlı matematiksel modeli Denklem (10)'da verilen genel formda ifade edilebilir.

$$\dot{\mathbf{x}}_{o,t} = \mathbf{f}_o(\mathbf{x}_{o,t}, \mathbf{u}_{o,t}) + \mathbf{w}_t \quad (10a)$$

$$\mathbf{z}_t = \mathbf{h}_o(\mathbf{x}_{o,t}) + \mathbf{v}_t \quad (10b)$$

burada, $\mathbf{f}_o$ durum ve girişlerin doğrusal olmayan fonksiyonu; $\mathbf{x}_{o,t}$ durum vektörü; $\mathbf{u}_{o,t}$ kontrol giriş vektörü; $\mathbf{h}_o$ çıkışların fonksiyonu; $\mathbf{w}_t$ ve $\mathbf{v}_t$ ise sırası ile süreç ve ölçüm gürültüleri olarak tanımlanabilir.

Genel formu Denklem (10)'da verilen ve i_{sa} , i_{sb} , i_{sc} , ω_m , θ_e ve t_L 'nin eş-zamanlı kestirimini gerçekleştirmek için tasarlanan gözlemleyicide kullanılan modele ait vektörler aşağıda verilmiştir.

$$\mathbf{x}_{o,t} = [i_{sa} \ i_{sb} \ i_{sc} \ \omega_m \ \theta_e \ t_L]^T,$$

$$\mathbf{u}_{o,t} = [v_{sa} \ v_{sb} \ v_{sc}]^T, \ \mathbf{h}_o = [i_{sa} \ i_{sb} \ i_{sc}]^T,$$

$$\mathbf{f}_o = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s} (v_{sa} - R_s i_{sa} - K_e \omega_m f(\theta_e)) \\ \frac{1}{L_s} (v_{sb} - R_s i_{sb} - K_e \omega_m f(\theta_e - \frac{2\pi}{3})) \\ \frac{1}{L_s} (v_{sc} - R_s i_{sc} - K_e \omega_m f(\theta_e - \frac{4\pi}{3})) \\ \frac{1}{J_t} (t_e - t_L + B_t \omega_m) \\ p_p \omega_m \\ 0 \end{bmatrix}$$

Denklem (11)'de verilen ileri Euler yaklaşımının kullanılması ile gözlemleyicide kullanılan ayrık zamanlı FDAM modeli Denklem (12)'deki gibi verilir.

$$\dot{\mathbf{x}}_t \approx \frac{\mathbf{x}_{k+1} - \mathbf{x}_k}{T} \quad (11)$$

$$\mathbf{x}_{o,k+1} = \mathbf{I}_{6 \times 6} \times \mathbf{x}_{o,k} + T_s \times \mathbf{f}_o \quad (12)$$

burada $\mathbf{I}$ birim matris ve T_s örnekleme zamanıdır. i_{sa} , i_{sb} , i_{sc} , ω_m , θ_e , ve t_L 'nin eş-zamanlı kestirimi için kullanılan GKF gözlemleyicisine ilişkin geleneksel ifadeler Denklem (13)-(18)'de verilmiştir.

$$\mathbf{F}_{k+1|k} = \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u})}{\partial \mathbf{x}} \bigg|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}_{k+1}} \quad (13)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1} = \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}_k, \mathbf{u}_{k+1}) \quad (14)$$

$$\mathbf{P}_{k+1}^- = \mathbf{F}_{k+1} \mathbf{P}_k \mathbf{F}_{k+1}^T + \mathbf{Q} \quad (15)$$

$$\mathbf{K}_{k+1} = \mathbf{P}_{k+1}^- \mathbf{H}_{k+1}^T [\mathbf{H}_{k+1} \mathbf{P}_{k+1}^- \mathbf{H}_{k+1}^T + \mathbf{R}]^{-1} \quad (16)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1} = \hat{\mathbf{x}}_{k+1}^- + \mathbf{K}_{k+1} (\mathbf{z}_{k+1} - \mathbf{H}_{k+1} \hat{\mathbf{x}}_{k+1}^-) \quad (17)$$

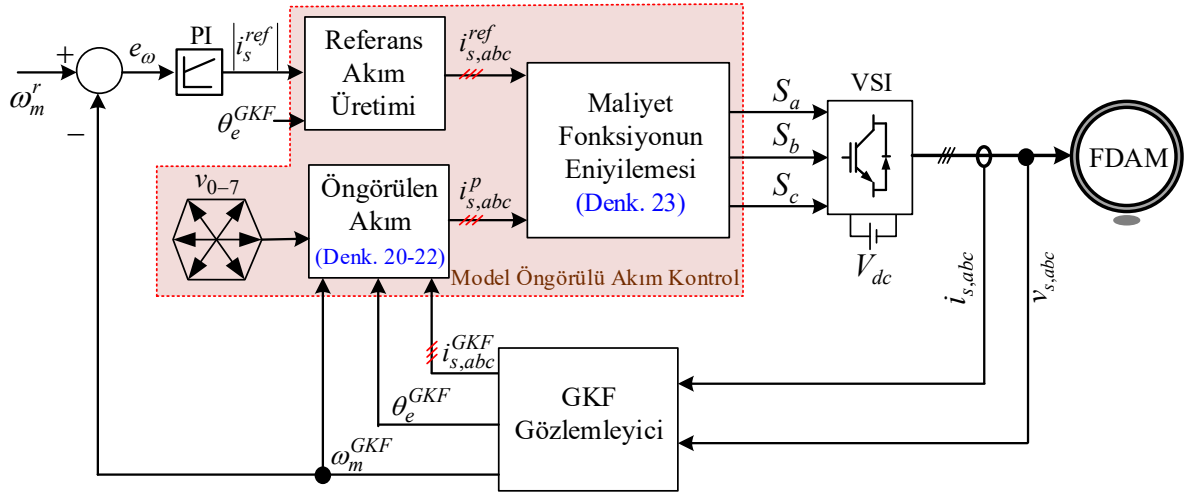
$$\hat{\mathbf{P}}_{k+1} = \mathbf{P}_{k+1}^- - \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{H}_{k+1} \mathbf{P}_{k+1}^- \quad (18)$$

burada $\mathbf{F}_{k+1|k}$ lineer olmayan modeli lineerleştirmek için kullanılan fonksiyondur. $\mathbf{K}_{k+1}$ Kalman kazancıdır. $\mathbf{P}_{k+1}^-$ ve $\hat{\mathbf{P}}_{k+1}$ sırasıyla hata kovaryans matrisinin önceki ve sonraki değerleridir. $\mathbf{Q}$ ve $\mathbf{R}$ ise sistem ve çıkış gürültüsünün kovaryans matrisleridir.

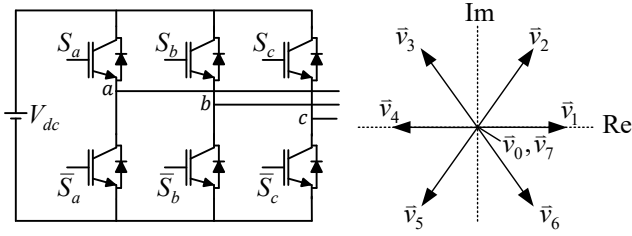
4 Hız algılayıcısız MÖAK temelli FDAM sürücüsü

FDAM'yi tahrik etmek için kullanılan MÖAK tabanlı motor sürücüsünün genel şeması Şekil 2'de verilmiştir. Şekil 2'de verilen genel şemada kullanılan kontrolör geleneksel PI kontrolördür. Bu kontrolör referans hız ile kestirilen hız arasındaki hatayı kullanarak akım referansı üretmektedir. MÖAK tabanlı FDAM sürücüsünde kullanılan gerilim kaynaklı eviriciye ait detaylar Şekil 3'te verilmiştir.

Eviricinin anahtarlama durumları, her bir faz için ikili mantıkla ifade edilen $S_{abc} = [S_a \ S_b \ S_c]^T$ vektörü ile tanımlanır. Üç fazlı bir sistemde toplam sekiz farklı anahtarlama durumu mevcuttur. Eviricinin DC bara gerilimi



Şekil 2. Hız algılayıcısız MÖAK temelli FDAM sürücüsü



Şekil 3. Gerilim kaynaklı evirici ve gerilim vektörleri

(V_{dc}) ile her bir anahtarlama durumuna karşılık gelen gerilimler arasındaki ilişki Denklem (19)'da verilmiştir

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (19)$$

Şekil 2'de gösterilen FDAM sürücü sisteminde “öngörülen akım” bloğu Denklem (20)-(22) kullanılarak sekiz farklı gerilim vektörü için öngörülen akım ifadelerini üretmektedir.

$$i_{sa,k+1}^{p(j)} = \left(1 - \frac{T_s R_s}{L_s}\right) i_{sa,k} - \frac{1}{L_s} e_a + \frac{T_s}{L_s} v_{sa,k}^{(j)} \quad (20)$$

$$i_{sb,k+1}^{p(j)} = \left(1 - \frac{T_s R_s}{L_s}\right) i_{sb,k} - \frac{1}{L_s} e_b + \frac{T_s}{L_s} v_{sb,k}^{(j)} \quad (21)$$

$$i_{sc,k+1}^{p(j)} = \left(1 - \frac{T_s R_s}{L_s}\right) i_{sc,k} - \frac{1}{L_s} e_c + \frac{T_s}{L_s} v_{sc,k}^{(j)} \quad (22)$$

Denklem (23) ile verilen “Maliyet fonksiyonunun eniyilemesi” bloğu, akım referansını ve öngörülen akımları kullanarak, kontrol sistemine uygulanan hız referansının takip edilmesini sağlayan en iyi (optimum) gerilim vektörünün seçimini gerçekleştirmektedir.

$$g = \sum_{h=1}^N \left\{ (i_{sa}^r - i_{sa,k+1}^{p(j)})^2 + (i_{sb}^r - i_{sb,k+1}^{p(j)})^2 + (i_{sc}^r - i_{sc,k+1}^{p(j)})^2 + I_{m,k} \right\} \quad (23)$$

burada I_m FDAM'yi aşırı akımlara karşı koruyan sınırlama terimi olup Denklem (24)'teki gibi tanımlanır.

$$I_{m,k} = \begin{cases} 0, & \text{if } |i_{s,k+1}^p| \leq i_{s,max} \\ \infty, & \text{if } |i_{s,k+1}^p| > i_{s,max} \end{cases} \quad (24)$$

5 Benzetim çalışmaları

Şekil 2 ile verilen MÖAK temelli FDAM sürücüsünün performansını doğrulamak için yapılan benzetim çalışmaları MATLAB Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışmalarında kullanılan e-skuter ve FDAM'ye ait parametreler Tablo 1 ve Tablo 2'de verilmiştir. Benzetim çalışmaları $50\mu s$ 'lik örnekleme zamanı (T_s) ile yapılmıştır. Benzetim çalışmalarında kullanılan hız kontrolörüne (PI'ya) ait kazançlar ($K_p = 20$ ve $K_i = 20$) ve GKF gözlemleyicisinde kullanılan kovaryans matrisleri ($\mathbf{Q}$, $\mathbf{R}$ ve $\mathbf{P}_0$) deneme-yanılma yöntemi ile seçilmiştir

$$\begin{aligned} \mathbf{Q} &= \text{diag}[10^{-4} \quad 10^{-4} \quad 10^{-4} \quad 10^{-8} \quad 10^{-5} \quad 10^{-3}] \\ \mathbf{R} &= \text{diag}[10^{-3} \quad 10^{-3} \quad 10^{-3}] \\ \mathbf{P}_0 &= \text{diag}[10^{-3} \quad 10^{-3} \quad 10^{-3} \quad 10^{-3} \quad 10^{-3} \quad 10^{-3}] \end{aligned}$$

GKF gözlemleyicisinin kestirdiği durum ve parametrelerin başlangıç değerleri ise sıfır olarak seçilmiştir.

Tablo 1. E-skuter parametreleri [17]

Parametre	Değeri
Kütlesi (Kg)	$M_v = 82.5$
Ön alanı (m^2)	$A = 0.35$
Hava yoğunluğu (Kg/m^3)	$\rho = 1.225$
Yuvarlanma direnci katsayısı	$K_R = 0.005$
Sürtünme katsayısı	$C_d = 0.85$
Tekerleğin yarıçapı (m)	$r = 0.127$
Yerçekimi ivmesi (m/s^2)	$g = 9.81$

Tablo 2. FDAM'nin parametreleri

Parametre	Değeri
Kutup çifti	$p_p = 4$
Stator direnci (Ω)	$R = 0.1$
Faz endüktansı (mH)	$L_s = 1$
Moment sabiti (N.m/A)	$K_t = 0.1$
Zıt-EMK sabiti (V.s/rad)	$K_e = 0.1$
Eylemsizlik (kgm^2)	$J_T = 0.012$
Anma gücü (kW)	$P_N = 1.2$
Anma gerilimi (V)	$V = 48$
Anma akımı (A)	$I = 26.5$
Anma hızı (dev/dk)	$n = 4300$
Anma momenti (N.m)	$t_N = 2.65$

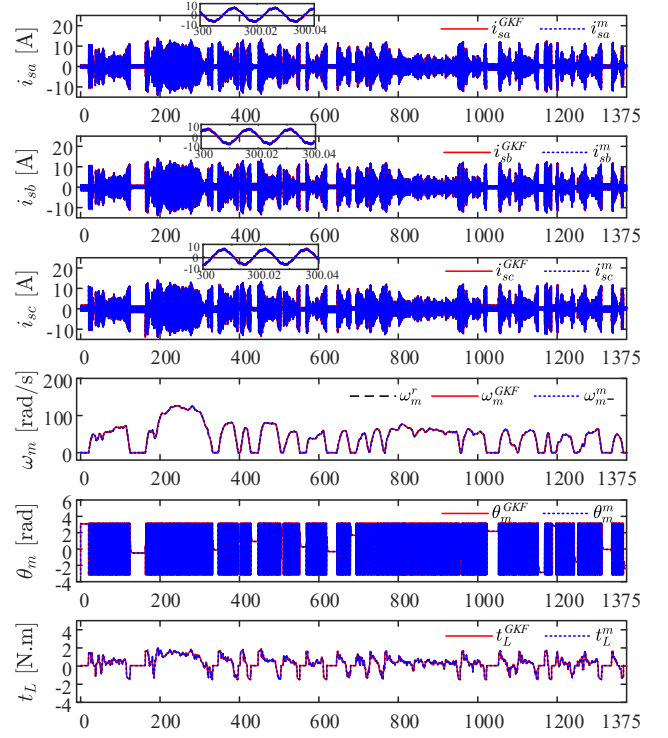
Tasarlanan hız-algılayıcısız MÖAK tabanlı FDAM sürücüsünün gerçekçi yol senaryolarındaki etkinliğini, kararlılığını ve geçici durum yanıtlarını test etmek amacıyla, elektrikli araç literatüründe standart olarak kabul gören UDDS ve WLTP-3 sürüş profilleri kullanılmıştır. UDDS sürüş döngüsü otomobillerin yakıt/enerji tüketimi ve egzoz emisyon testleri için geliştirilmiştir. Yoğun şehir içi trafiğini temsil eden bu sürüş döngüsü, yaklaşık 12 km'lik bir güzergahta, 8.89 m/s (~32 km/h) ortalama hız ve 25.5 m/s (~91.8 km/h) maksimum hız değerlerini içermektedir. Sık dur-kalk hareketleri ve dinamik ivmelenme/yavaşlama fazları sayesinde motor sürücüsünün dinamik yük değişimlerine verdiği tepkiyi ölçmek için kritik bir test ortamı sunmaktadır. WLTP-3 sürüş döngüsü ise toplam 1800 saniye süren ve yaklaşık 23.27 km uzunluğundaki karma bir test rotasını kapsar. Şehir içi (düşük hız), kırsal/banliyö (orta hız), şehirlerarası yol (yüksek hız) ve otoyol (çok yüksek hız) olmak üzere 4 farklı sürüş fazını içeren profil; 12.92 m/s (~46.5 km/h) ortalama hız ve otoyol fazında 36.5 m/s (~131.3 km/h) maksimum hız değerine sahiptir.

UDDS ve WLTP-3 standart profilleri orijinal halleriyle binek otomobiller için tasarlandığından ve içerdikleri yüksek hız limitlerinden dolayı e-skuterler için fiziksel olarak uygulanamaz durumdadır. Sürücü sistemini e-skuterin gerçek sınırlarında test edebilmek amacıyla, her iki sürüş döngüsünün zamansal yapısı korunarak hız büyüklükleri matematiksel olarak ölçeklenmiş ve e-skuter sınırlarına göre normalize edilmiştir. Normalizasyon sürecinde ani ivmelenme oranları da sürücü güvenliği ve mekanik sınırlar gözeticilerle sınırlandırılmıştır.

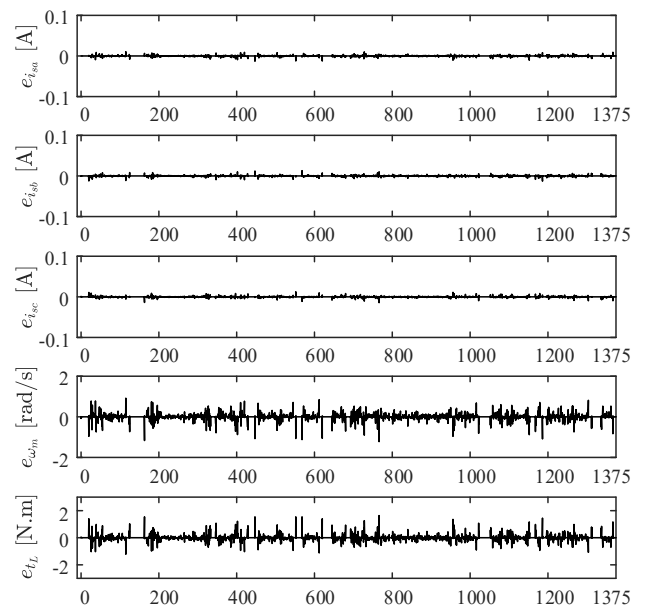
Şekil 2'de blok şeması verilen FDAM sürücüsünde, motor miline uygulanan mekanik hız referansı ω_m^r , e-skuterler için normalize edilmiş UDDS ve WLTP-3 sürüş profilleri için Denklem (8) kullanılarak aracın doğrusal hızından elde edilmiştir. Benzer şekilde FDAM'ye etkileyen yük momenti t_L ise aynı sürüş profilleri için Denklem (9) aracılığıyla hesaplanarak motor modeline uygulanmıştır. Böylece, her iki sürüş döngüsünün gerektirdiği hız ve moment koşulları doğrudan motor miline yansıtılmıştır. UDDS ve WLTP-3 sürüş profilleri altında hız-algılayıcısız MÖAK tabanlı FDAM sürücüsünden elde edilen benzetim sonuçları Şekil 4-7'de sunulmuştur. Ek olarak, benzetim sonuçlarına ilişkin kök ortalama kare hata (root mean square error, RMSE) değerleri Tablo 3'te verilmiştir. FDAM sürücüsüne uygulanan hız referansı, motor modeline uygulanan yük momenti ve ölçülen akımlar ile GKF

gözlemleyicisi tarafından kestirilen büyüklükler arasındaki RMSE değerlerinin hesaplanmasında Denklem (25) kullanılmıştır.

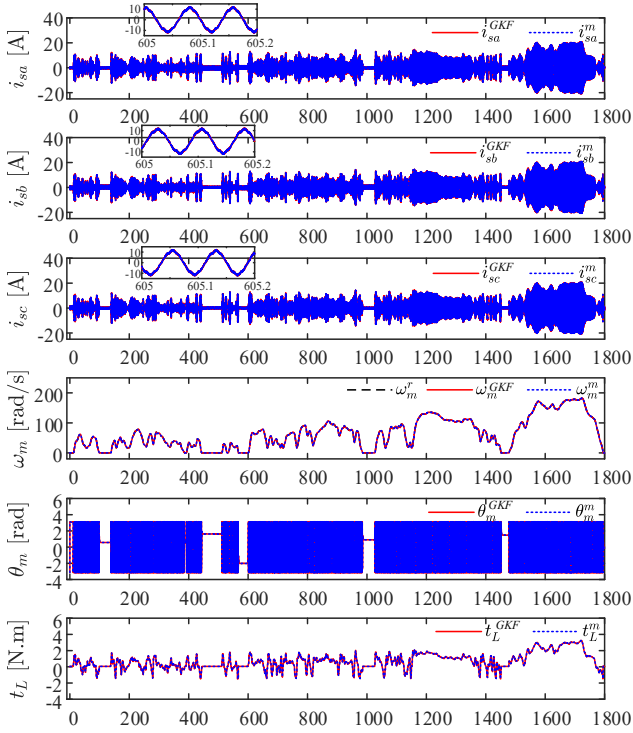
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{gerçek} - y^{GKF})^2} \quad (25)$$



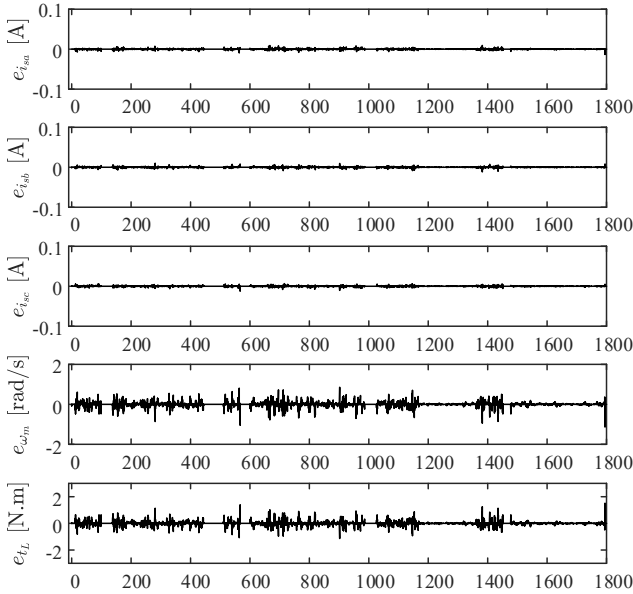
Şekil 4. UDDS sürüş profili için MÖAK temelli FDAM sürücüsüne ait kestirim ve kontrol sonuçları



Şekil 5. UDDS sürüş profili için MÖAK temelli FDAM sürücüsüne ait izleme ve kestirim hataları



Şekil 6. WLTP-3 sürüş profili için MÖAK temelli FDAM sürücüsüne ait kestirim ve kontrol sonuçları



Şekil 7. WLTP-3 sürüş profili için MÖAK temelli FDAM sürücüsüne ait izleme ve kestirim hataları

Tablo 3. Benzetim sonuçlarına ilişkin RMSE değerleri

	Şekil 4 (UDDS)	Şekil 6 (WLTP-3)
$e_{i_{sa}}$	1.5960×10^{-4}	1.2484×10^{-4}
$e_{i_{sb}}$	1.6324×10^{-4}	1.2367×10^{-4}
$e_{i_{sc}}$	1.6360×10^{-4}	1.2437×10^{-4}
e_{ω_m}	0.1076	0.0938
e_{t_L}	0.0020	0.0021
e_{θ_m}	0.0205	0.0162

Benzetim sonuçlarının verildiği Şekil 4-7 ve RMSE değerlerinin verildiği Tablo 3 incelendiğinde e-skuter için sıfır hız dahil geniş bir hız aralığındaki iki farklı sürüş profili (UDDS ve WLTP-3) ve farklı yük koşulları altında test edilen hız-algılayıcısız MÖAK tabanlı FDAM sürücüsünün kontrol performansının benzer şekilde GKF gözlemleyicisinin kestirim performansının oldukça yüksek olduğu görülmektedir.

6 Sonuçlar

Bu çalışmada, e-skuterlerde kullanılan FDAM sürücüler için GKF tabanlı hız-algılayıcısız MÖAK sistemi tasarlanmış ve benzetim ortamında kapsamlı bir şekilde test edilmiştir. Tasarlanan GKF gözlemleyicisi ile FDAM'nin stator akımları, rotor hızı, elektriksel rotor konumu ve yük momenti kestirilmiştir. Sistemin doğrulanmasında, gerçekçi sürüş koşullarını temsil eden UDDS ve WLTP-3 sürüş profilleri referans hız olarak kullanılmış; yük momenti ise bu profiller ve e-skutere ait toplam çekiş kuvveti temel alınarak oluşturulmuştur.

Benzetim sonuçları incelendiğinde aşağıdaki çıkarımlar elde edilmiştir:

- GKF gözlemleyicisi, sıfır hız dahil geniş bir çalışma aralığında stator akımları, rotor hızı, elektriksel konum ve yük momentini yüksek doğrulukla kestirmiştir.
- Hız-algılayıcısız MÖAK tabanlı FDAM sürücüsü, hem UDDS hem de WLTP-3 sürüş profilleri altında farklı yük koşullarında etkin bir kontrol başarımı sergilemiştir.
- Farklı sürüş senaryolarında (şehir içi, kırsal ve otoyol) elde edilen tutarlı sonuçlar, önerilen yöntemin e-skuter uygulamaları için uygunluğunu doğrulamaktadır.

Sonuç olarak, GKF tabanlı gözlemleyicinin MÖAK ile birleştirilmesiyle oluşturulan hız-algılayıcısız sürücü yapısının, e-skuterlerde kullanılan FDAM sürücülerin mekanik hız algılayıcısına gereksinim duymadan yüksek başarılı bir kontrol sağladığı gösterilmiştir. Bununla birlikte, çalışma koşullarına bağlı olarak FDAM parametrelerinin değerlerinde meydana gelebilecek değişimler, GKF gözlemleyicisinin kestirim başarımını ve dolaylı olarak MÖAK tabanlı sürücünün kontrol başarımını olumsuz etkileyebilecektir. Gelecek çalışmalar, çalışma koşullarıyla birlikte değerleri değişebilen FDAM parametrelerinin kestirimine yönelik olacaktır.

CRedit yazarlık katkı beyanı

Rıdvan Seyit Avcuoğlu: Araştırma, Yöntem, Yazılım, Doğrulama, Görselleştirme, Yazma-ilk taslak, Yazma-inceleme ve düzenleme; **Rıdvan Demir:** Kavramsallaştırma, Araştırma, Yöntem, Doğrulama, Yazma-inceleme ve düzeltme.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %13

Yazım sürecinde üretken yapay zekâ (YZ) ve YZ destekli teknolojilerin kullanımına ilişkin beyan

Yazarlar, bu çalışmanın hazırlanmasında herhangi bir yapay zekâ aracı kullanmamıştır.

Kaynaklar

- [1] C. Uyulan and E. Arslan, "Sliding mode-based traction control system design for electric scooter BLDCM through field-oriented vector control approach," *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 25 (74), 433–450, 2023. <https://doi.org/10.21205/deufmd.2023257414>
- [2] R. İnan, B. Aksoy, and O. K. M. Salman, "Estimation performance of the novel hybrid estimator based on machine learning and extended Kalman filter proposed for speed-sensorless direct torque control of brushless direct current motor," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 126, 107083, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.107083>
- [3] M. Ünal, R. Demir, E. C. Mengüç ve R. İnan, "Hafif elektrikli araçlar için OC-LMS tabanlı MUS kestiricisi kullanan hız-algılayıcısız doğrudan moment kontrollü fırçasız doğru akım motor sürücüsü," *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 13 (3), 991–1001 2025. <https://doi.org/10.29109/gujsc.1687368>
- [4] C. Tuzcu, E. C. Mengüç, R. Demir ve R. İnan, "Fırçasız doğru akım motorların adaptif filtre tabanlı MRAS ile hız algılayıcısız doğrudan moment kontrolü," *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 14 (2), 680–687, 2025. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1639562>
- [5] A. A. Kaf, X. Cheng, C. Zhang, A. Almadwami, A. Abdullah, and H. Almadwami, "Sensorless direct torque control in brushless DC motor using sliding mode observer," 4th International Conference on Emerging Smart Technologies and Applications (eSmarTA), pp. 1–8, Sana'a, Yemen, 06-07 August 2024. <https://doi.org/10.1109/eSmarTA62850.2024.10638846>
- [6] S. Kokundu ve M. T. Aydemir, "UVDGM tabanlı AYK yöntemiyle fırçasız doğru akım motorunun konum kontrolü," *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 8 (1), 1–14, 2020. <https://doi.org/10.29109/gujsc.565375>
- [7] N. D. Irimia, F. I. Lazar, and M. Luchian, "Comparison between sinusoidal and space vector modulation techniques on the resulting electromagnetic torque ripple produced by a three-phase BLDC motor under field-oriented control," 6th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), pp. 640–645, Paris, France, 23–26 April 2019. <https://doi.org/10.1109/CoDIT.2019.8820718>
- [8] Y. Zhou, C. Liu, Z. Li, and Y. Yu, "A model predictive control strategy with minimum model error Kalman filter observer for HMEV-AS," *Energies*, 18 (6), 2025. <https://doi.org/10.3390/en18061557>
- [9] P. Ubare, D. Ingole, and D. N. Sonawane, "Nonlinear model predictive control of BLDC motor with state estimation," *IFAC-PapersOnLine*, 54 (6), 107–112, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.08.531>
- [10] R. İnan, "An improved model predictive current control of BLDC motor with a novel adaptive extended Kalman filter-based back EMF estimator and a new commutation duration approach for electrical vehicle," *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 53 (2), 1135–1150, 2025. <https://doi.org/10.1002/cta.4407>
- [11] D. Joshi, D. Deb, and A. K. Giri, "MRAS disturbance observer-based sensorless field-oriented backstepping control of BLDC motor drive," *Electrical Engineering*, 106 (5), 6681–6701, 2024. <https://doi.org/10.1007/s00202-024-02378-9>
- [12] J. C. Gamazo-Real, V. Martínez-Martínez, and J. Gomez-Gil, "ANN-based position and speed sensorless estimation for BLDC motors," *Measurement*, 188, 110602, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110602>
- [13] K. Venkateswari, "A sensor less BLDC motor drive using sliding mode observer for electric vehicle," *Malaya Journal of Matematik*, S(2), 3544–3548, 2020.
- [14] B. Saha and B. Singh, "Torque ripple mitigation in sensorless PMBLDC motor drive with adaptive observer for LEV," *IEEE Transactions on Power Electronics*, 40 (1), 1739–1747, 2025. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2024.3457677>
- [15] R. İnan and O. M. Üzümlü, "Speed-sensorless DTC of BLDC motor with EKF-based estimator capable of load torque estimation for electric vehicle," *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (42), 6–13, 2022. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1190197>
- [16] N. Kalamian, M. Mahmoodi, N. Seraj, M. J. Koshkouei, and M. Faraji-Niri, "Controller design for sensorless brushless DC motors through a nonlinear model predictive tracker and augmented extended Kalman filter," *IEEE Power Electronics Magazine*, 12 (3), 48–64, 2025. <https://doi.org/10.1109/MPEL.2025.3575720>
- [17] B. Demirsoy and M. Soyaşlan, "Performance enhancement of an outer rotor brushless DC scooter motor through stator optimization," *Electronics*, 15 (7), 1478, 2026. <https://doi.org/10.3390/electronics15071478>
- [18] R. Demir, "Elektrikli araçlar için farklı hız profilleri altında model öngörülü akım kontrollü İSMSM sürücüsünün başarımı," *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13 (4), 1478–1484, 2024. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1538775>

