

Speed-Sensorless Direct Torque Controlled Brushless Direct Current Motor Drive Using OC-LMS Based MRAS Estimator for Light Electric Vehicles

Mehmet ÜNAL^{1,2} Rıdvan DEMİR^{1*} Engin Cemal MENGÜÇ¹ Remzi İNAN³

¹Kayseri University, Faculty of Engineering Architecture and Design, Department of Electrical and Electronics Engineering, 38280, Kayseri/TÜRKİYE

²*Aspilsan Enerji Sanayi ve Ticaret A.Ş., Mimarsinan OSB Mahallesi 1. Cadde No:43, 38165, Kayseri/TÜRKİYE*

³*Isparta University of Applied Sciences, Faculty of Technology, Department of Electrical and Electronics Engineering, 32260, Isparta/TÜRKİYE*

Article Info

Research article

Received: 30/04/2025

Revision: 17/06/2025

Accepted: 29/06/2025

Keywords

BLDC Motor

Light Electric Vehicles

Direct Torque Control

OC-LMS Algorithm

Model Reference Adaptive

System

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi

Başvuru: 30/04/202

Düzeltilme: 17/06/2025

Kabul: 29/06/2025

Anahtar Kelimeler

FDAM

Hafif Elektrikli Araçlar

Doğrudan Moment

Dogru
Kontrol

OC-LMS Algoritması

Modelle Uyarlamalı Sistem

Graphical/Tabular Abstract (Grafik Özet)

In this study, a low-computational-burden least mean square-based MRAS with an online censoring strategy for speed estimation of brushless direct current motor is proposed. / Bu çalışmada, fırçasız doğru akım motorların hız kestirimi için düşük işlem yüküne sahip çevrimiçi sansürlemeli en küçük ortalama kare temelli MUS önerilmiştir.

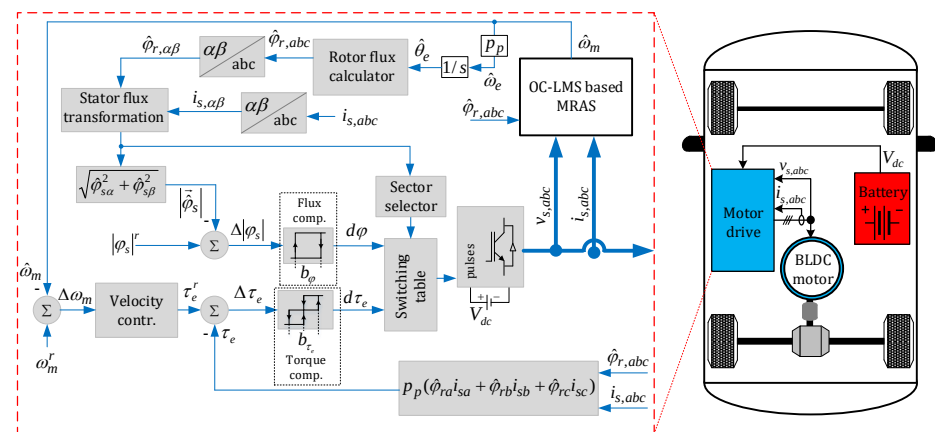


Figure A: Speed-sensorless DTC-based BLDC motor drive /**Şekil A:** Hız-algılayıcısız DMK tabanlı FDAM sürücüsü

Highlights (Önemli noktalar)

- Direct torque control based BLDC motor drives. / Doğrudan moment kontrol tabanlı FDAM sürücüsü.
- OC-LMS based MRAS speed estimator. / OC-LMS tabanlı MUS hız kestiricisi.
- Reduced execution time. / Azaltılmış işlem süresi.

Aim (Amaç): This study aims to design an OC-LMS-based MRAS speed estimator that reduces the computation burden of the traditional LMS-based MRAS used for speed estimation in BLDC motors. / Bu çalışma, FDAM'lerin hız kestirimi için kullanılan geleneksel LMS tabanlı MUS'un işlem yükünü azaltan, OC-LMS tabanlı bir MRAS hız kestiricisi tasarlamayı amaçlamaktadır.

Originality (Özgünlük): The originality of this study is that the OC-LMS-based MUS speed estimator, which reduces the computational load compared to the traditional LMS-based MUS, is presented for the first time to the literature. / Bu çalışmanın özgünlüğü, geleneksel LMS tabanlı MUS'a kıyasla hesaplama yükünü azaltan OC-LMS tabanlı MUS hız kestiricisinin literatüre ilk kez sunulmasıdır.

Results (Bulgular): The proposed estimator reduces the execution time by 16.53% for a 30% censoring rate and by 36.89% for an 85% / Önerilen kestirici %30 sansürleme oranı için %16.53 oranında, %85 için ise %36.89 oranında çalışma süresini düşürmüştür.

Conclusion (Sonuç): The results obtained from the simulation studies, including the performance tests realized in a wide speed range, including zero speed cases, verify the performance of both the OC-LMS-based MRAS estimator and the DTC-based BLDC motor drive. / Sıfır hız durumlarını da içeren geniş hız aralığı için gerçekleştirilen benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar, hem OC-LMS temelli MÜS kestiricisinin hem de bu kestiriciyi kullanan DMK tabanlı FDAM sürücüsünün başarımını doğrulamaktadır.



Hafif Elektrikli Araçlar için OC-LMS Tabanlı MUS Kestiricisi Kullanan Hız-Algılayıcısız Doğrudan Moment Kontrollü Fırçasız Doğru Akım Motor Sürücüsü

Mehmet ÜNAL^{1,2} Rıdvan DEMİR^{1*} Engin Cemal MENGÜÇ¹ Remzi İNAN³

¹Kayseri Üniversitesi, Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, 38280, Kayseri/TÜRKİYE

²Aspilsan Enerji Sanayi ve Ticaret A.Ş., Mimarşinan OSB Mahallesi 1. Cadde No:43, 38165, Kayseri/TÜRKİYE

³Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, 32260, Isparta/TÜRKİYE

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 30/04/2025
Düzeltilme: 17/06/2025
Kabul: 29/06/2025

Anahtar Kelimeler

FDAM
Hafif Elektrikli Araçlar
Doğrudan Moment
Kontrol
OC-LMS Algoritması
Modele Uyarlamalı Sistem

Öz

Bu çalışmada, fırçasız doğru akım motorların (FDAM'lerin) hız kestirimi için düşük işlem yüküne sahip çevrimiçi sansürlemeli (online censoring-OC) en küçük ortalama kare (least mean square-LMS) temelli modele uyarlamalı sistem (MUS) önerilmiştir. Önerilen OC-LMS temelli MUS hız kestiricisi farklı sansürleme oranları için hız-algılayıcısız doğrudan moment kontrol (DMK) tabanlı FDAM sürücüsü ile doğrulanmıştır. Tasarlanan yeni kestiricinin başarımı kentsel dinamometre sürüş programı (Urban Dynamometer Driving Schedule-UDDS) sürüş profilinin DMK tabanlı sürücüye referans hız bilgisi olarak verildiği zorlayıcı senaryo ile test edilmiştir. Ek olarak, elektrikli araç (EA) modelinden elde edilen toplam çekiş kuvvetinin dönüştürülmesi ile elde edilen yük momenti değişimleri FDAM'ye yük olarak uygulanmıştır. Sıfır hız durumlarını da içeren geniş hız aralığı için gerçekleştirilen benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar, hem OC-LMS temelli MUS kestiricisinin hem de bu kestiriciyi kullanan DMK tabanlı FDAM sürücüsünün başarımını doğrulamaktadır. Ek olarak, önerilen OC-LMS temelli MUS'un çalışma süreleri geleneksel LMS temelli MUS kestirici ile karşılaştırılmıştır. Önerilen kestirici %30 sansürleme oranı için %16.53 oranında, %85 için ise %36.89 oranında çalışma süresini düşürmüştür.

Speed-Sensorless Direct Torque Controlled Brushless Direct Current Motor Drive Using OC-LMS Based MRAS Estimator for Light Electric Vehicles

Article Info

Research article
Received: 30/04/2025
Revision: 17/06/2025
Accepted: 29/06/2025

Keywords

BLDC Motor
Light Electric Vehicles
Direct Torque Control
OC-LMS Algorithm
Model Reference Adaptive System

Abstract

In this study, a low-computational-burden least mean square (LMS)- based model reference adaptive system (MRAS) with an online censoring (OC) strategy for speed estimation of brushless direct current (BLDC) motor is proposed. The proposed OC-LMS-based MRAS speed estimator is validated on a speed-sensorless direct torque controlled (DTC) BLDC motor drive for different censoring ratios. The performance of the designed estimator is tested with a challenging scenario, in which the Urban Dynamometer Driving Schedule (UDDS) driving profile is applied to the DTC-based driver as reference speed information. Additionally, the load moment changes obtained by converting the total traction force obtained from the electric vehicle (EV) model are applied as a mechanical load to the BLDC motor. The results obtained from the simulation studies, including the performance tests realized in a wide speed range, including zero speed cases, verify the performance of both the OC-LMS-based MRAS estimator and the DTC-based BLDC motor drive. Additionally, the execution times of the proposed OC-LMS-based MRAS are compared with the traditional LMS-based MRAS estimator. The proposed estimator reduces the execution time by 16.53% for a 30% censoring rate and by 36.89% for an 85% censoring rate.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son yıllarda, ulaşım ve taşıma nedeniyle ortaya çıkan karbondioksit emisyonları için artan

farkındalık ve hassasiyet, elektrikli araçlara (EA'lara) olan ilgiyi artırmıştır. Elektrikli araç pazarında üreticilerin, rekabetin ve kullanıcı taleplerinin artması üretici firmaları daha düşük

maliyetli, daha az bakım gerektiren, daha verimli ve daha kullanışlı araçların geliştirilmesi konusunda zorlamaktadır. EA'lardan beklenen performans kriterleri; sağlamlık, batarya şarj hızları, güç yönetimi, güvenilirlik ve motor sürücü sistemleri olarak sıralanabilir [1]. EA'ları tahrik etmek için sürekli mıknatıslı senkron motorlar (SMSM), asenkron motorlar (ASM) ve fırçasız doğru akım motorları (FDAM) tercih edilmektedir.

FDAM'ler yüksek verimleri, az bakım gereksinimleri, uzun ömürleri, sabit moment sağlamaları, sessiz çalışmaları gibi üstünlüklerinden dolayı birçok endüstriyel alanda ve elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılır hale gelmişlerdir. FDAM'lerin yüksek başarılı kontrolü ile ilgili araştırmalar ve iyileştirmeler hem endüstride hem de literatürde devam etmektedir. FDAM sürücülerin yüksek başarılı kontrolü için vektör kontrol [2,3], model öngörülü kontrol [4,5] ve doğrudan moment kontrol (DMK) [6-9] gibi yöntemler kullanılmaktadır. Bu kontrol yöntemleri FDAM'nin konum ve hız bilgisini gerektirmektedir. Hız-algılayıcısız yöntemlerde bu bilgiler kestiriciler/gözlemleyiciler tarafından kontrol sistemine sağlanır. FDAM'lerin hız ve/veya konum bilgisi kestirimleri için kayma kipli gözlemleyici [6], yapay sinir ağları tabanlı kestirici [10], adaptif gözlemleyici [9], doğrusal olmayan Kalman filtresi [5,7] ve modele uyarlamalı sistem (MUS) tabanlı kestirici [8,11] algoritmaları literatüre önerilmiştir.

Elektrik motorlarının hız ve/veya konum kestirimi için adaptif filtre temelli MUS algoritmaları geliştirilmiştir [8,12-14]. Bu çalışmalardan [12]'de SMSM'lerin hız kestirimi için en küçük ortalama kurtosis (Least mean kurtosis, LMK) ve en küçük ortalama kare (least mean square, LMS) tabanlı MUS, [13,14]'te ASM'ler için sırasıyla LMS ve LMK tabanlı MUS kestirici yapıları önerilmiştir. Bu çalışmalar adaptif filtre tabanlı MUS yapılarının geleneksel PI kontrolör kullanan MUS yapılarından daha iyi kestirim başarımına sahip olduklarını göstermiştir. Ek olarak [8]'de ise FDAM'lerin hız kestirimi için LMS, LMK ve en küçük ortalama dördüncü (Least mean fourth, LMF) temelli MUS yapıları önerilmiştir. Bununla birlikte bu tür hız kestiricileri büyük miktarda gereksiz bilgiyi işlemek zorunda kalmaktadır. Bu da DSP'lere ciddi bir işlem yükünü getirmektedir. İşlem yükünü azaltmak için aralık sansürleme yöntemi kullanan ve daha az bilgilendirici verileri ayıklayan çevrimiçi sansürleme (online censoring-OC) stratejisi Berberidis vd. tarafından 2016 yılında [15]'de yer alan çalışmada geliştirilmiştir. Bu strateji önemli verileri belirleyip artık/gereksiz verileri sansürleyerek, başarıyı düşürmeden işlem yükünün

azaltılmasını amaçlamaktadır. Literatürde, OC stratejisini dahil eden adaptif filtre algoritmalarından OC tabanlı LMS (OC-LMS) algoritması [15-17] ile farklı sinyal işleme uygulamaları için yüksek başarılı sonuçlar elde edilmiştir. OC stratejisinin sunduğu işlem verimliliğinden faydalanılarak, adaptif filtre tabanlı MUS algoritmalarının işlem yükünün azaltılması mümkün hale getirebilir. Böylelikle, düşük işlem yüküne sahip tasarlanan kestiriciler, elektrikli araçlar ve endüstriyel uygulamalarda hız kestirimi amacıyla kullanılabilir ve motor sürücü sistemlerinin genel verimliliğini artırmada etkili bir çözüm sunabilir.

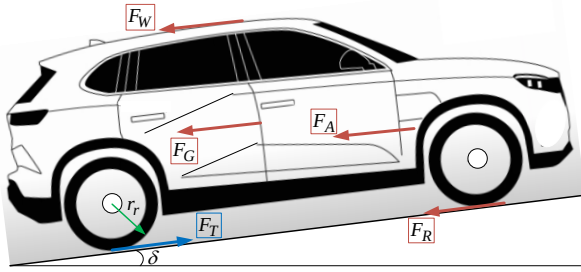
Bu çalışmanın temel katkısı, FDAM'nin hız kestirimi için önerilen geleneksel LMS temelli MUS'un işlem yükünü azaltan OC-LMS temelli MUS hız kestiricisinin tasarımın gerçekleştirilmesi ve benzetim temelli olarak test edilmesidir. Bu çalışmada tasarlanan OC-LMS temelli MUS hız kestiricisi farklı sansürleme oranları için hız-algılayıcısız DMK tabanlı FDAM sürücüsü ile doğrulanmıştır. Yeni tasarlanan OC-LMS temelli MUS kestiricisi, referans model olarak da isimlendirilen FADM'nin ölçülen üç faz stator akımları ile uyarlanabilir model çıkışı arasındaki hatayı kullanarak FADM'nin rotor hızını doğrudan kestirmektedir. Tasarlanan yeni kestiricinin başarımlı kentsel dinamometre sürüş programı (Urban Dynamometer Driving Schedule-UDDS) hız döngüsünün DMK tabanlı sürücüye referans hız bilgisi olarak verilen zorlayıcı senaryo ile test edilmiştir. Ek olarak, EA'nın UDDS hız profili ile doğal olarak oluşan ve EA modelinden elde edilen toplam çekiş kuvvetinin dönüştürülmesi ile elde edilen yük momenti değişimleri FDAM'ye yük olarak uygulanmıştır. Sıfır hız durumlarını da içeren geniş hız aralığı için gerçekleştirilen benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar hem OC-LMS temelli MUS kestiricisinin hem de bu kestiriciyi kullanan DMK tabanlı FDAM sürücüsünün başarımlı doğrulamaktadır. Ayrıca önerilen OC-LMS temelli MUS'un çalışma süreleri [8]'de sunulan geleneksel LMS temelli MUS kestirici ile karşılaştırılmış ve önerilen yaklaşımın çalışma süresini önemli ölçüde düşürdüğü gösterilmiştir. Örneğin önerilen kestirici %30 sansürleme oranı için %16.53 oranında, %85 için ise %36.89 oranında çalışma süresini düşürmüştür.

Bu çalışma toplamda dört bölümden oluşmaktadır. FDAM sürücüler, EA'lar, hız/konum kestirici algoritmalar ve OC-LMS algoritmaları ile ilgili genel bir literatür Bölüm 1'de verilmiştir. Bölüm 2'de EA ve FDAM modellerini ve OC-LMS tabanlı MUS kestiricinin tasarımını içeren materyal ve

metot sunulmuştur. EA'ların başarımlı testlerinde de kullanılan uluslararası geçerliliği olan UDDS hız profili için FDAM sürücüsünün kontrol başarımı ve önerilen kestiricinin kestirim başarımının gösterilmesi amacıyla yapılan benzetim çalışmaları Bölüm 3'te verilmiştir. Son olarak Bölüm 4'te ise Tartışma ve Sonuçlar ifade edilmiştir.

2. ELEKTRİKLİ ARAÇ MODELİ (ELECTRIC VEHICLE MODEL)

Hareketli bir araca etkiyen kuvvetler rüzgar kuvveti (F_W), yuvarlanma kuvveti (F_R), yerçekimi kuvveti (F_G) ve aracı hızlandıran ivme kuvveti (F_A) olarak sınıflandırılabilir. Şekil 1'de gösterildiği gibi bir araca etkiyen kuvvetlerin toplamı (F_T) toplam çekiş kuvveti olarak isimlendirilir ve aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir [18-19].



Şekil 1. Elektrikli araç modeli (Electric vehicle model)

$$F_T = F_R + F_W + F_G + F_A \quad (1a)$$

$$F_T = K_R M_v g \cos \delta + K_W A V^2 + M_v g \sin \delta + M_v a \quad (1b)$$

Denklem (1b) ile verilen EA modelinde M_v aracın kütlesi, g yerçekimi katsayısı, K_R yuvarlanma direnci katsayısı, K_W rüzgar direnci katsayısı, a aracın ivmesi, A aracın ön yüzey alanı ve δ yolun eğimidir. EA'yı tahrik edecek elektrik motorunun hızı (ω_m) ve bu motora etkiyen yük momenti (τ_l) ifadeleri aşağıdaki denklemler ile hesaplanmaktadır [19]:

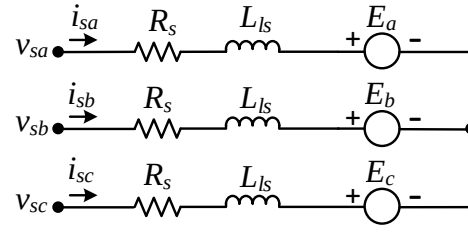
$$\omega_m = \frac{r_f}{r_r} V \quad (2)$$

$$\tau_l = \frac{r_r}{r_f} F_T \quad (3)$$

burada r_r ve r_f sırasıyla tekerleğin yuvarlanma yarıçapı ve dişli oranıdır.

3. FDAM MODEL (BLDC MOTOR MODEL)

Şekil 2'de verilen FDAM eşdeğer devresi kullanılarak elde edilen stator akım denklemleri ile indüklenen moment denklemi ve mekanik hareket denklemi aşağıdaki gibi verilebilir.



Şekil 2. FDAM üç faz eşdeğer devresi (BLDC motor three phase equivalent circuit)

$$\frac{di_{sa}}{dt} = -\frac{R_s}{L_{ls}} i_{sa} + \frac{1}{L_{ls}} v_{sa} - \frac{1}{L_{ls}} E_a \quad (4)$$

$$\frac{di_{sb}}{dt} = -\frac{R_s}{L_{ls}} i_{sb} + \frac{1}{L_{ls}} v_{sb} - \frac{1}{L_{ls}} E_b \quad (5)$$

$$\frac{di_{sc}}{dt} = -\frac{R_s}{L_{ls}} i_{sc} + \frac{1}{L_{ls}} v_{sc} - \frac{1}{L_{ls}} E_c \quad (6)$$

$$\tau_e = (\varphi_{ra} i_{sa} + \varphi_{rb} i_{sb} + \varphi_{rc} i_{sc}) p_p \quad (7)$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{\tau_e}{J_t} - \frac{B_t}{J_t} \omega_m - \frac{\tau_l}{J_t} \quad (8)$$

burada; i_{sa} , i_{sb} ve i_{sc} 3-faz stator akımlarını, R_s ve L_{ls} stator direncini ve stator kaçak indüktansını, E_a , E_b ve E_c 3-faz stator zıt-elektromotor kuvvet (EMK) değerlerini, v_{sa} , v_{sb} ve v_{sc} 3-faz stator gerilimlerini, τ_e indüklenen momenti, φ_{ra} , φ_{rb} ve φ_{rc} rotor akımlarını, B_t ve J_t eylemsizliği ve viskoz sürtünme terimini ve p_p kutup çifti sayısını temsil etmektedir. 3-faz stator zıt-EMK değerleri rotordaki manyetik akıya (λ_m 'ye), rotor elektriksel konum bilgisine (θ_e 'ye) ve motorun hızına bağlıdır. Üç-faz trapezoidal zıt-EMK'lar aşağıdaki şekilde tanımlanabilir.

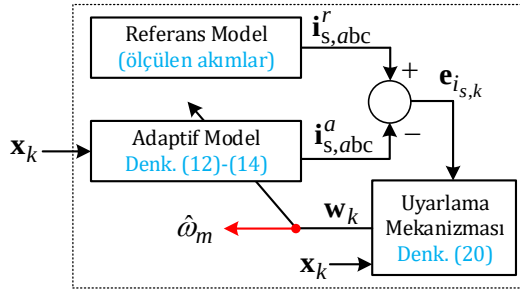
$$E_a = p_p \omega_m \lambda_m f(\theta_e) = p_p \omega_m \varphi_{ra} \quad (9)$$

$$E_b = p_p \omega_m \lambda_m f\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) = p_p \omega_m \varphi_{rb} \quad (10)$$

$$E_c = p_p \omega_m \lambda_m f\left(\theta_e + \frac{2\pi}{3}\right) = p_p \omega_m \varphi_{rc} \quad (11)$$

4. OC-LMS TABANLI MUS HIZ KESTİRİCİSİ (OC-LMS based MRAS SPEED ESTIMATOR)

FDAM rotor hızını kestiren stator akım tabanlı OC-LMS temelli MUS sistemi Şekil 3'te gösterilmiştir. Şekil 3'te gösterilen kestirici yapısında, ölçülen stator akımları referans modelinin çıktıları iken, uyarlanabilir model çıktıları denklem (4)-(6)'nın ileri Euler yöntemi ile ayrıştırılmasıyla elde edilir ve aşağıdaki denklemler ile verilmiştir.



Şekil 3. OC-LMS kullanan stator akım temelli MUS (Stator current based MRAS using OC-LMS)

$$i_{sa,k+1}^a = \left(1 - \frac{TR_s}{L_{ls}}\right) i_{sa,k} - \omega_{m,k} \frac{p_p T \varphi_{ra,k}}{L_{ls}} + \frac{T v_{sa}}{L_{ls}} \quad (12)$$

$$i_{sb,k+1}^a = \left(1 - \frac{TR_s}{L_{ls}}\right) i_{sb,k} - \omega_{m,k} \frac{p_p T \varphi_{rb,k}}{L_{ls}} + \frac{T v_{sb}}{L_{ls}} \quad (13)$$

$$i_{sc,k+1}^a = \left(1 - \frac{TR_s}{L_{ls}}\right) i_{sc,k} - \omega_{m,k} \frac{p_p T \varphi_{rc,k}}{L_{ls}} + \frac{T v_{sc}}{L_{ls}} \quad (14)$$

Denklem (12), (13) ve (14), OC-LMS tabanlı MUS hız kestirici için kompakt formda aşağıdaki gibi yeniden yazılır:

$$\mathbf{i}_{s,k+1}^a = \mathbf{x}_k^T \mathbf{w}_k \quad (15)$$

burada $\mathbf{w}_k$ ve $\mathbf{x}_k$ sırasıyla uyarlanabilir modelin ağırlık vektörünü ve giriş matrisini temsil eder ve aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\mathbf{w}_k = \begin{bmatrix} 1 - \frac{TR_s}{L_{ls}} \\ \omega_{m,k} \frac{T}{L_{ls}} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\mathbf{x}_k = \begin{bmatrix} i_{sa,k} & i_{sb,k} & i_{sc,k} \\ -\frac{p_p T \varphi_{ra,k}}{L_{ls}} & -\frac{p_p T \varphi_{rb,k}}{L_{ls}} & -\frac{p_p T \varphi_{rc,k}}{L_{ls}} \\ v_{sa,k} & v_{sb,k} & v_{sc,k} \end{bmatrix} \quad (17)$$

Böylece, referans ve uyarlanabilir model çıkışları arasındaki hata ifadesi ise aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\mathbf{e}_{i_s,k} = \mathbf{i}_{s,k}^r - \mathbf{i}_{s,k}^a \quad (18)$$

Hata ifadesinin tanımının ardında, OC-LMS algoritmasını [15] türetmek için kesilmiş (truncated) maliyet fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$J_k = \begin{cases} \frac{1}{2} \mathbf{e}_{i_s,k}^2, & \text{eğer } |\max(\mathbf{e}_{i_s,k})| \geq \tau\sigma \\ 0, & \text{eğer } |\max(\mathbf{e}_{i_s,k})| < \tau\sigma \end{cases} \quad (19)$$

burada σ hata işareti vektörü $\mathbf{e}_{i_s,k}$ 'nin aldığı maksimum değerin standart sapmasını; τ ise eşik seviyesini temsil etmektedir. OC-LMS algoritmasına ait ağırlık vektörü güncelleme kuralı ise aşağıdaki gibi verilir:

$$\mathbf{w}_{k+1} = \begin{cases} \mathbf{w}_k + \mu \mathbf{X}_k \mathbf{e}_{i_s,k}, & \text{eğer } |\max(\mathbf{e}_{i_s,k})| \geq \tau\sigma \\ \mathbf{w}_k, & \text{eğer } |\max(\mathbf{e}_{i_s,k})| < \tau\sigma \end{cases} \quad (20)$$

burada σ ifadesi gerçek-zamanlı uygulamalar için özyinelemeli bir şekilde aşağıdaki gibi hesaplanır [20]:

$$\sigma_{k+1} = \beta \sigma_k + (1 - \beta) |\max(\mathbf{e}_{i_s,k})|^2 \quad (21)$$

burada β unutma faktörünü temsil etmektedir ve değeri $0 < \beta < 1$ şeklindedir. Bununla birlikte, denklem (20)'de diğer bir kritik parametre τ 'dur. Bu parametre $\mathbf{w}_k$ 'nin güncelleme oranıyla, bir başka ifade ile ne kadar artık verinin sansürleneceğiyle alakalıdır. Bu yüzden, OC-LMS koşturulurken τ 'nın değeri aşağıda verilen denkleme göre anlık olarak kestirilmelidir [21]:

$$\tau_{k+1} = \begin{cases} \tau_k + \mu_\tau P_{ce}, & \text{eğer } |\max(\mathbf{e}_{i_s,k})| \geq \tau\sigma \\ \tau_k + \mu_\tau (1 - P_{ce}), & \text{eğer } |\max(\mathbf{e}_{i_s,k})| < \tau\sigma \end{cases} \quad (22)$$

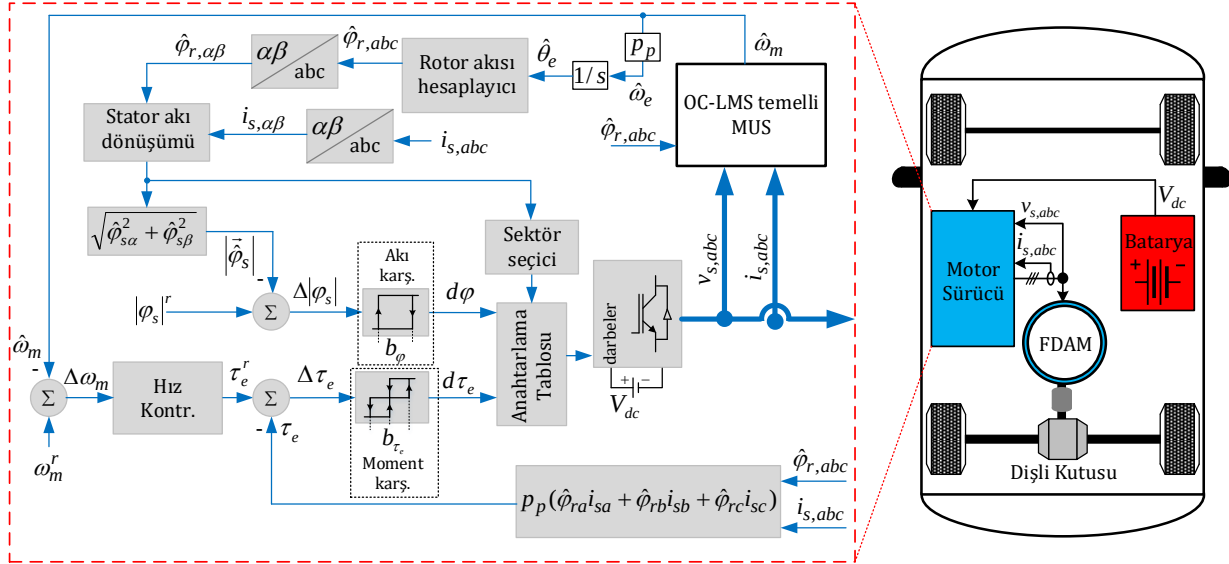
burada μ_τ adım büyüklüğü, $P_{ce} = \frac{K-p}{K}$ istenilen sansürleme oranı K toplam veri sayısı, p ise bilgilendirici veri sayısıdır.

4. BENZETİM SONUÇLARI (SIMULATION RESULTS)

Hafif elektrikli bir aracın tahrik edilmesi için önerilen OC-LMS temelli MUS kestiricisini kullanan hız-algılayıcısız DMK tabanlı FDAM motor sürücüsü Şekil 4'te verilmiştir. Şekil 4'te verilen sürücü MATLAB/Simulink ortamında oluşturulmuştur. DMK sisteminde τ_e^r referans değeri geleneksel PI tipi hız kontrolörü kullanılarak üretilmiştir. Ek olarak DMK'nın moment ve akı tepkisini belirlemek için sırasıyla üç ve iki seviyeli histerezis karşılaştırmalar kullanılmıştır. Stator akısının $\alpha\beta$ - bileşenleri ($\varphi_{s\alpha}$ ve $\varphi_{s\beta}$), $\alpha\beta$ - eksenindeki stator akımı ve rotor akısı ile birlikte stator kaçak endüktans kullanılarak [7]'deki gibi hesaplanmıştır.

Benzetim çalışmalarında kullanılan EA ve FDAM'ye ait parametreler Tablo 1'de verilmiştir. Benzetim çalışmaları 20 μ s örnekleme zamanı için gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, EA'yı tahrik eden DMK tabanlı sürücü sisteminden yüksek başarılı kontrol sonucu almak için DMK'daki geleneksel PI

kontrolörün katsayıları $K_p = 8$ ve $K_i = 10$ olarak seçilmiştir. Ek olarak, FDAM'nin rotor hızı kestirimi için önerilen OC-LMS temelli MUS'a ait parametreler $\mu = 0.9$, $\mu_\tau = 0.2$ ve $\beta = 0.9$ olarak ayarlanmıştır.

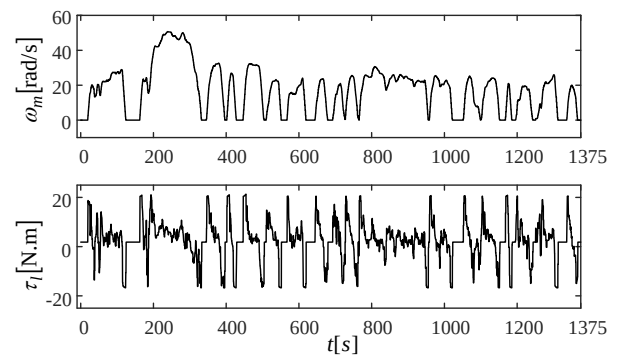


Şekil 4. Hafif elektrikli aracın tahrik edilmesi için tasarlanan hız-algılayıcısız DMK tabanlı FDAM sürücüsü (Speed-sensorless DTC-based BLDC motor drive designed for the propulsion of the light electric vehicle)

Tablo 1. EA ve FDAM parametreleri

EA Parametreleri [22]	Değeri	FDAM Parametreleri [7]	Değeri
Aracın Kütlesi (Kg)	$M_v = 678$	Stator Gerilimi (V)	$V = 72$
Aracın Ön Alanı (m^2)	$A = 2.09$	Stator Direnci (Ω)	$R = 0.33$
Yuvarlanma Direnci Katsayısı	$K_R = 0.015$	Stator Kaçak Endüktansı (mH)	$L_{ls}=0.1345$
Binek Otomobiller İçin Rüzgar Direnci	$K_W = 0.3$	Kutup Çifti Sayısı	$p_p = 23$
Dişli Oranı	$r_f = 2$	Anma Hızı (dev/dk)	$n_m = 750$
Tekerleğin Yuvarlanma Yarıçapı (m)	$r_r = 0.2$	Anma Momenti (N.m)	$\tau_l = 21$

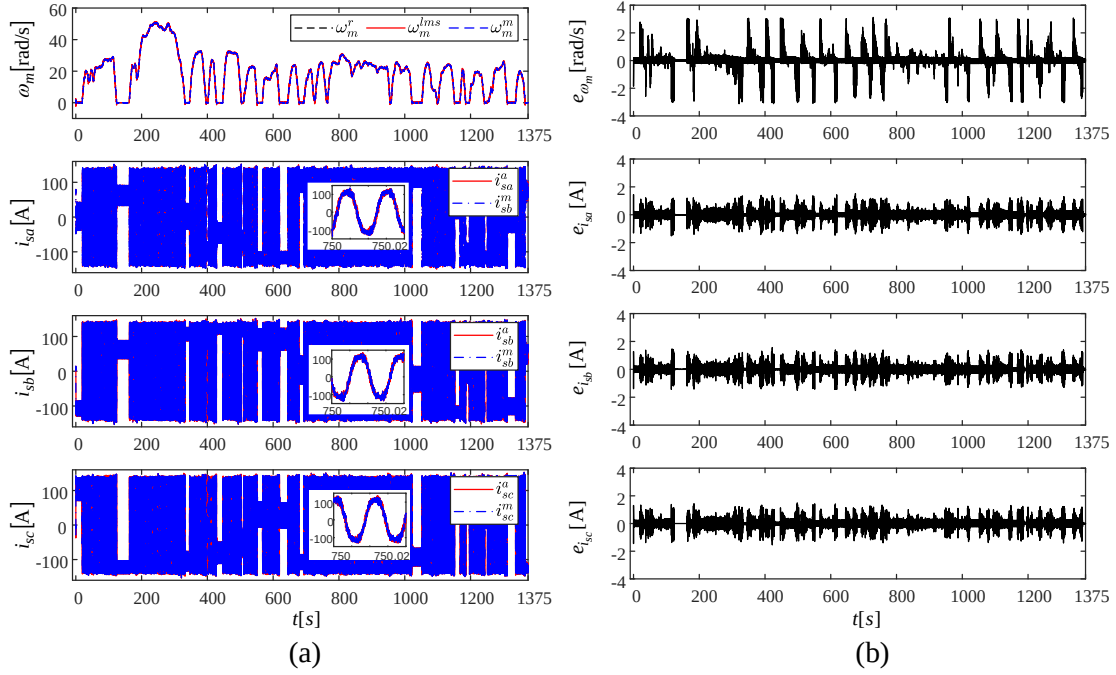
EA için DMK tabanlı FDAM sürücüsüne ait kontrol başarımı ve OC-LMS temelli MUS'un kestirim başarımı UDDS sürüş döngüsü ve Denklem (3) kullanılarak üretilen hız ve yük momenti değişimleri (Şekil 5) için test edilmiştir. UDDS sürüş profili ortalama 8.89 m/s 'lik (32 km/h) hız ve maksimum 25.56 m/s 'lik (92 km/h) hızı içeren toplam 12 km 'lik bir uzunlukta şehir içi güzergahıdır. Bu sürüş profili yaklaşık 1370 s 'lik bir senaryoyu içermektedir [23].



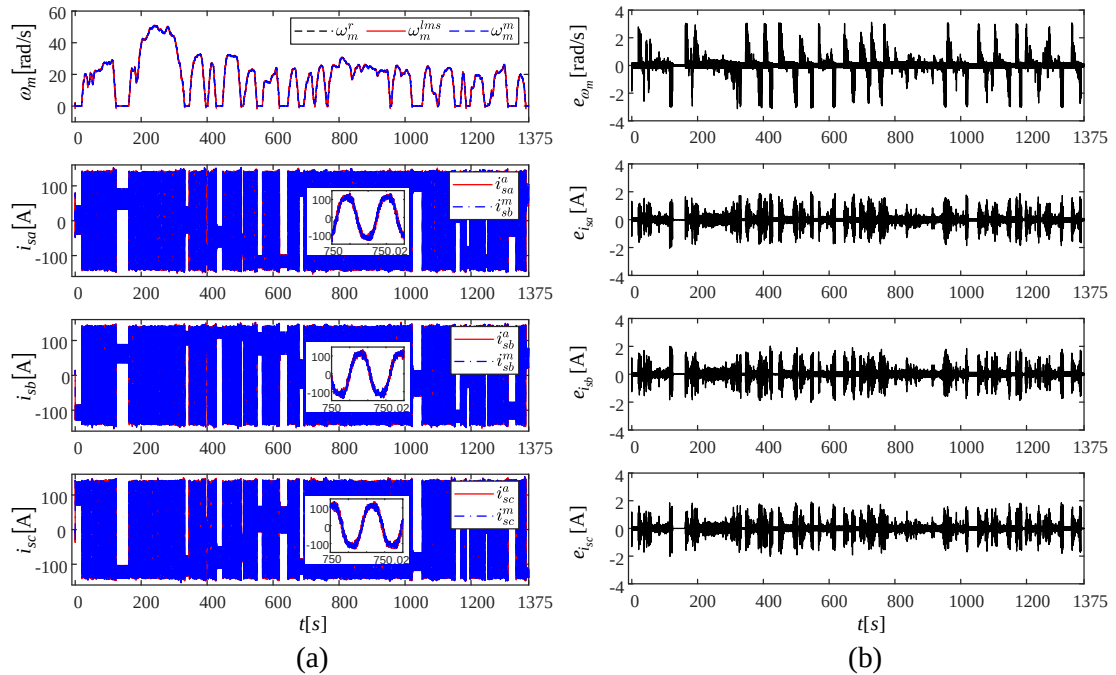
Şekil 5. Sürücü sistemine verilen hız referansı ve motora uygulanan yük momenti değişimleri (Speed reference given to the drive system, and load torque variations applied to the motor)

Önerilen OC-LMS tabanlı MUS kestiricide sansürleme oranı %30, %50, %70 ve %85 olarak seçilmiştir. Şekil 5'te verilen sıfır hız ile anma hız aralığında geçici ve sürekli hal durumlarını içeren hız referansı ve yük momenti değişimleri için benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Şekil 6'da geleneksel LMS temelli MUS'a ait benzetim sonuçları verilirken Şekil 7, Şekil 8 ve Şekil 9'da OC-LMS temelli MUS'tan elde edilen kestirim sonuçları ve hatalar verilmiştir. Sonuçların verililiği

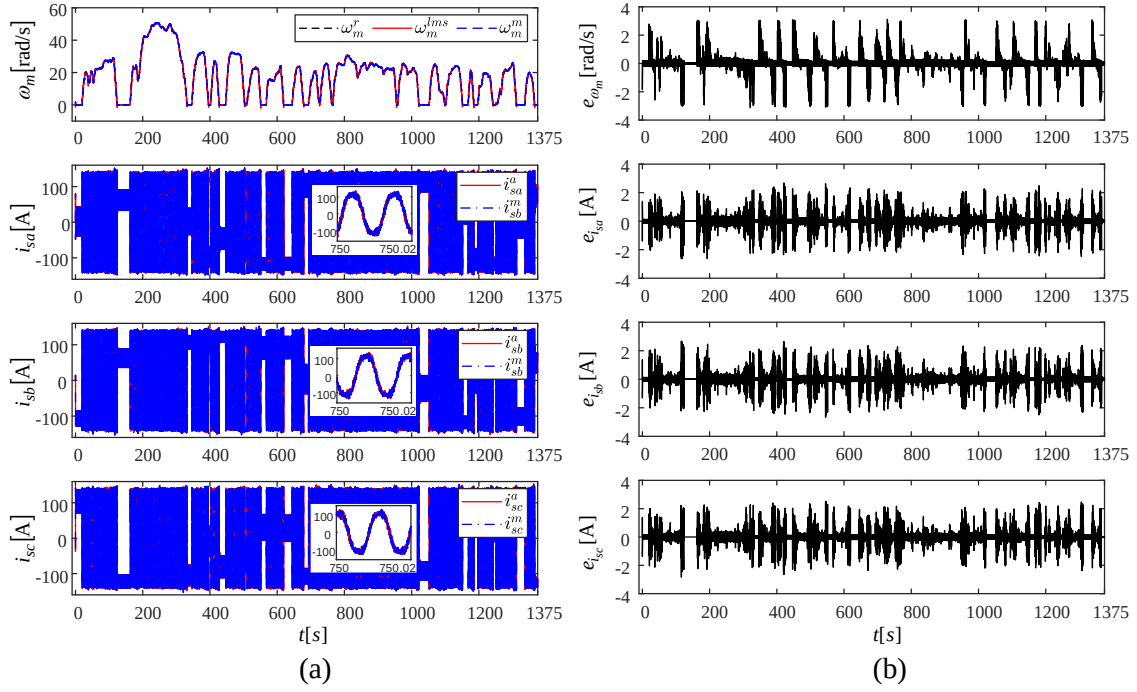
bu şekillerde ω_m^r sürücü sitemine verilen hız referansını, $\hat{\omega}_m$ kestirilen hızı, ω_m^m ölçülen hızı, $i_{(\cdot)}^a$ ölçülen statör akımlarını, $i_{(\cdot)}^m$ uyarlanabilir model çıkışlarını ve $e_{(\cdot)}$ ise hataları ifade etmektedir. Ek olarak Tablo 2'de geleneksel LMS tabanlı MUS (sansürleme içermeyen) ile %30, %50, %70 ve %85 sansürleme oranı için OC-LMS temelli MUS'a ilişkin ortalama çalışma süreleri ve kök ortalama kare hata (root mean square error, RMSE) değerleri verilmiştir.



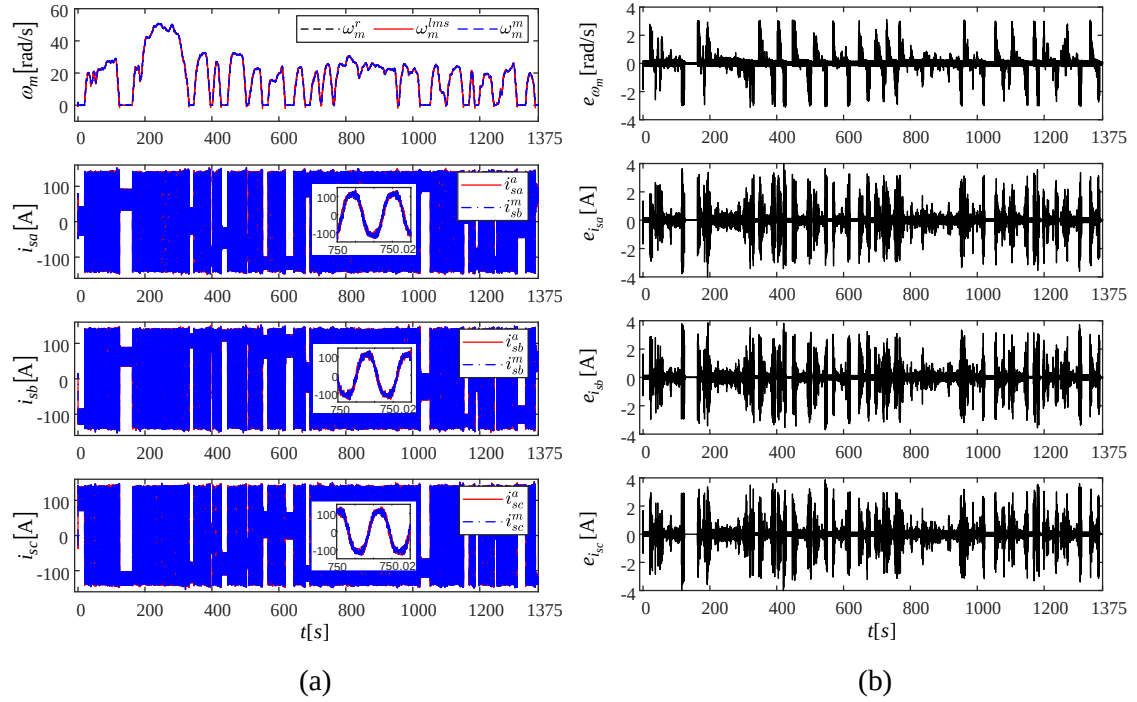
Şekil 6. Geleneksel LMS temelli MUS'a ait benzetim sonuçları (a) Kestirim sonuçları (b) Hatalar (Simulation results of traditional LMS-based MRAS (a) Estimation results (b) Errors)



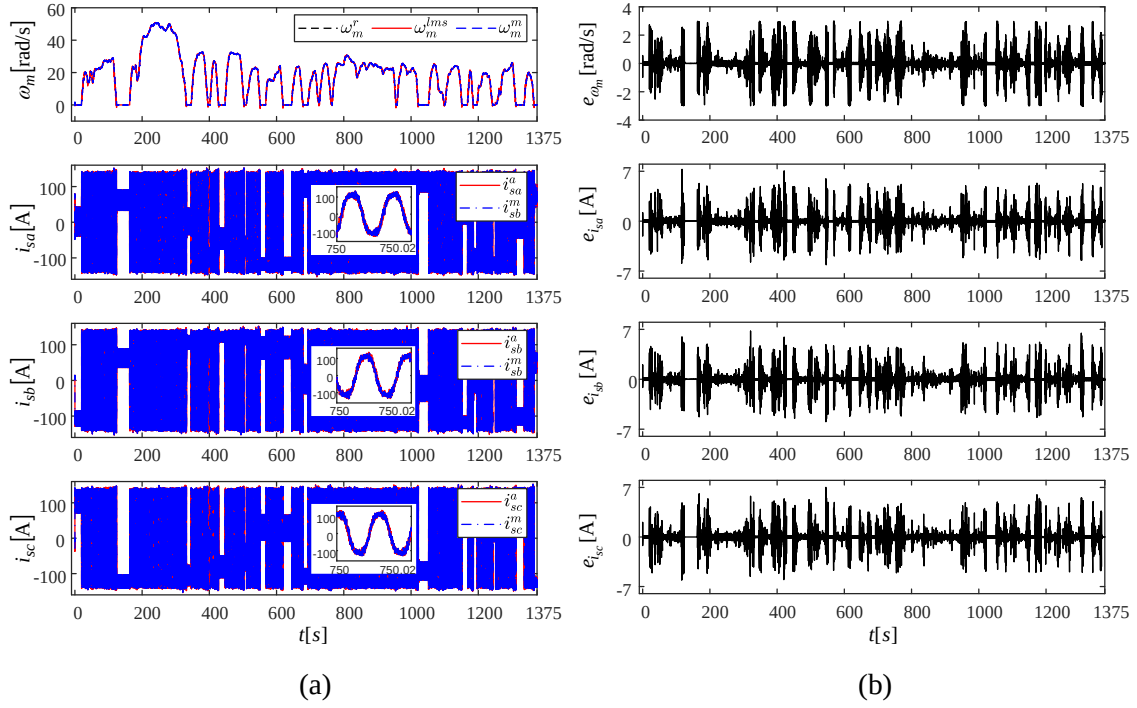
Şekil 7. %30 sansürleme oranı için önerilen OC-LMS temelli MUS'a ait benzetim sonuçları (a) Kestirim sonuçları (b) Hatalar (Simulation results of the proposed OC-LMS based MRAS for 30% censoring rate (a) Estimation results (b) Errors)



Şekil 8. %50 sansürleme oranı için önerilen OC-LMS temelli MUS'a ait benzetim sonuçları (a) Kestirim sonuçları (b) Hatalar (Simulation results of the proposed OC-LMS based MRAS for 50% censoring rate (a) Estimation results (b) Errors)



Şekil 9. %70 sansürleme oranı için önerilen OC-LMS temelli MUS'a ait benzetim sonuçları (a) Kestirim sonuçları (b) Hatalar (Simulation results of the proposed OC-LMS based MRAS for 70% censoring rate (a) Estimation results (b) Errors)



Şekil 10. %85 sansürleme oranı için önerilen OC-LMS temelli MUS'a ait benzetim sonuçları (a) Kestirim sonuçları (b) Hatalar (Simulation results of the proposed OC-LMS based MRAS for 85% censoring rate (a) Estimation results (b) Errors)

Tablo 2. Farklı sansürleme oranları için önerilen OC-LMS tabanlı MUS kestiricinin ortalama çalışma süreleri ve RMSE değerleri (Average running times and RMSE values of the proposed OC-LMS-based MRAS estimator for different censoring rates)

MUS kestiricileri	Çalışma süreleri [s]	$e_{\omega_m}^{RMSE}$	$e_{i_{sa}}^{RMSE}$	$e_{i_{sb}}^{RMSE}$	$e_{i_{sc}}^{RMSE}$
LMS temelli MUS ($P_{ce} = \%0$)	16.3834	0.0723	0.0535	0.0537	0.0540
OC-LMS temelli MUS ($P_{ce} = \%30$)	13.6748	0.0673	0.0590	0.0590	0.0591
OC-LMS temelli MUS ($P_{ce} = \%50$)	11.8541	0.0635	0.0735	0.0737	0.0736
OC-LMS temelli MUS ($P_{ce} = \%70$)	11.0924	0.0626	0.0728	0.0744	0.0745
OC-LMS temelli MUS ($P_{ce} = \%85$)	10.3382	0.1186	0.1055	0.1059	0.1057

Şekil 6-Şekil 10 ve Tablo 2’de sunulan sonuçlar incelendiğinde aşağıda verilen çıkarımlar yapılabilir;

- Şekil 5’te verilen sıfır hızı da içeren UDDS hız referansı ve elektrikli araca etkiyen toplam çekiş kuvveti kullanılarak üretilen yük momenti değişimleri için üretilen zorlayıcı senaryoya karşı önerilen kestiricinin başarımı tatmin edici seviyededir.
- EA’yı tahrik etmek için önerilen OC-LMS temelli MUS kestiriciyi kullanan DMK

tabanlı FDAM sürücüsü yüksek kontrol başarımına sahiptir.

- Kestirim sonuçlarına ilişkin RMSE değerleri önerilen yöntemin etkinliğini göstermektedir. %30, %50 ve %70 sansürleme oranları için önerilen hız kestiricisine ait RMSE değerleri geleneksel LMS temelli MUS [8] ile karşılaştırıldığında, önerilen yöntemin başarımının kabul edilebilir seviyede olduğu açıktır.
- Beklenildiği üzere sansürleme oranının çok yüksek seçilmesi (Örneğin %85) önerilen

yöntemin RMSE değerinde yüksek artışa sebep olmaktadır. Bununla birlikte DMK tabanlı sürücünün kontrol başarımı bu artıştan negatif yönde ciddi manada etkilenmemektedir.

- Farklı sansürleme oranları için hesaplanan çalışma süreleri, önerilen yaklaşımın çalışma süresini geleneksel LMS temelli MUS'a göre önemli ölçüde düşürdüğünü açıkça göstermektedir. Örneğin önerilen kestirici %30 sansürleme oranı için %16.53 oranında, %85 için ise %36.89 oranında çalışma süresini düşürmüştür.

Özetle Şekil 6-Şekil 10 ve Tablo 2'de verilen sonuçlar önerilen OC-LMS temelli MUS rotor hızı kestiricisinin başarımını onaylamaktadır. Ayrıca OC-LMS MUS kestiricisini kullanan DMK tabanlı EA sürücüsünün kontrol başarımı da oldukça yüksektir.

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, FDAM'lerin rotor hız kestirimi için düşük işlem yüküne sahip üç faz stator akımlarını kullanan OC-LMS temelli MUS önerilmiştir. Önerilen OC-LMS temelli MUS hız kestiricisi farklı sansürleme oranları için hız-algılayıcısız DMK tabanlı FDAM sürücüsü ile doğrulanmıştır. Tasarlanan yeni kestiricinin başarımı UDDS sürüş profilinin DMK tabanlı sürücüye referans hız bilgisi olarak verildiği zorlayıcı senaryo ile test edilmiştir. Ek olarak, EA modelinden elde edilen toplam çekiş kuvvetinin dönüştürülmesi ile elde edilen yük momenti değişimleri FDAM'ye yük olarak uygulanmıştır. Sıfır hız durumlarını da içeren geniş hız aralığı için gerçekleştirilen benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar, hem OC-LMS temelli MUS kestiricisinin hem de bu kestiriciyi kullanan DMK tabanlı FDAM sürücüsünün başarımını onaylamaktadır. Ek olarak, önerilen OC-LMS temelli MUS'un çalışma süreleri geleneksel LMS temelli MUS kestirici ile karşılaştırılmıştır. Önerilen kestirici çalışma süresini %30 sansürleme oranı için %16.53 oranında düşürürken, %85 sansürleme oranı için %36.89 oranında düşürmüştür. Gelecek çalışmalarda önerilen OC-LMS temelli MUS algoritmasının gerçek zamanlı olarak test edilmesine odaklanılacaktır.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Mehmet ÜNAL: Önerilen kestiriciyi tasarlamış, sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He designed the proposed estimator, analyzed the results, and performed the writing process of the article.

Rıdvan DEMİR: Kestirim algoritmasının fikrini ortaya atmış, güncel literatürü incelemiş, önerilen kestiriciyi tasarlamış, sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir. 6

He proposed the idea of the estimation algorithm, reviewed the current literature, designed the proposed estimator, analyzed the results, and performed the writing process of the article.

Engin Cemal MENGÜÇ: Güncel literatürü incelemiş, sonuçları analiz etmiş ve makalenin yazım sürecini gerçekleştirmiştir.

He reviewed the current literature, analyzed the results, and performed the writing process of the article.

Remzi İNAN: Güncel literatürü incelemiş, sonuçları analiz etmiş ve makalenin yazım sürecini gerçekleştirmiştir.

He reviewed the current literature, analyzed the results, and performed the writing process of the article.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Bouguenna IF, Tahour A, Kennel R, Abdelrahem M. Multiple-Vector Model Predictive Control with Fuzzy Logic for PMSM Electric Drive Systems. *Energies*. 2021; 14: 1-23.
- [2] Irimia ND, Lazar FI, Luchian M. 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. 2019 6th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT). 2019; 640-645.

- [3] Kokundu S, Aydemir MT. UVDGM Tabanlı AYK Yöntemiyle Fırçasız Doğru Akım Motorunun Konum Kontrolü. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji. 2020; 8:1, 1-14.
- [4] İnan R. 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. 2025; 53: 2, 1135–1150.
- [5] Ubare P, Ingole D, Sonawane DN. Nonlinear Model Predictive Control of BLDC Motor with State Estimation. IFAC-PapersOnLine. 2021; 54:6, 107–112.
- [6] Kaf AA, Cheng X, Zhang C, Almadwami A, Abdullah A, Almadwami H. Sensorless Direct Torque Control in Brushless DC Motor Using Sliding Mode Observer. 2024 4th International Conference on Emerging Smart Technologies and Applications (eSmarTA), 2024; 1–8.
- [7] İnan, R, Aksoy B, Salman OKM. 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. 2023; 126: 1-13.
- [8] Tuzcu C, Mengüç EC, Demir R. İnan R, Fırçasız doğru akım motorların adaptif filtre tabanlı MRAS ile hız algılayıcısız doğrudan moment kontrolü. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi. 2025; 14: 2, 680-687.
- [9] Saha B, Singh B. Torque Ripple Mitigation in Sensorless PMSM Motor Drive With Adaptive Observer for LEV. IEEE Transactions on Power Electronics. 2020; 35: 1, 1739–1747.
- [10] Gamazo-Real JC. Martínez-Martínez V, Gomez-Gil J. ANN-based position and speed sensorless estimation for BLDC motors. Measurement. 2022; 188:110602.
- [11] Joshi D, Deb D, Giri AK. MRAS disturbance observer-based sensorless field-oriented backstepping control of BLDC motor drive. Electrical Engineering. 2024; 106: 5, 6681–6701.
- [12] Demir R. Speed-sensorless Predictive Current Controlled PMSM Drive With Adaptive Filtering-based MRAS Speed Estimators. International Journal of Control, Automation and Systems. 2023; 21: 8, 2577–2586.
- [13] Demir R, Yıldız R, Barut M, Speed-sensorless predictive torque control of the IM based on MRAS. Nigde Omer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences. 2023; 12:1, 126–133.
- [14] Yıldız R, Demir R, Zerdali E, Barut M. Least mean Kurtosis algorithm-based MRAS estimator for speed-sensorless model predictive control of induction motor. V. International Turkic World Congress on Science and Engineering, Bishkek, Kırgızistan. 2023; 80–92.
- [15] Berberidis D, Kekatos V, Giannakis GB. Online Censoring for Large-Scale Regressions with Application to Streaming Big Data. IEEE Transactions on Signal Processing 2016; 64:15, 3854–3867.
- [16] Mengüç EC, Acır N, Mandic DP. A Class of Online Censoring Based Quaternion-Valued Least Mean Square Algorithms. IEEE Signal Processing Letters. 2023; 30: 244–248.
- [17] Mengüç EC, Xiang M, Mandic DP. Online censoring based complex-valued adaptive filters. Signal Processing. 2022; 200: 108638.
- [18] Alzayed M, Chaoui H. Efficient Simplified Current Sensorless Dynamic Direct Voltage MTPA of Interior PMSM for Electric Vehicles Operation. IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2022; 71:12, 12701–12710.
- [19] Krasopoulos CT, Beniakar ME, Kladas AG. Velocity and Torque Limit Profile Optimization of Electric Vehicle Including Limited Overload. IEEE Transactions on Industry Applications. 2017; 53:4, 3907–3916.
- [20] Mengüç EC, Mandic DP. Online censoring-based learning algorithms for fully complex-valued neural networks. Neurocomputing. 2025; 623: p129412.
- [21] Romero D, Berberidis D, Giannakis GB. Quickest convergence of online algorithms via data selection. 2016 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). 2016; 6185–6189.

- [22] Vidhya SD, Balaji M. Modelling, design and control of a light electric vehicle with hybrid energy storage system for Indian driving cycle. *Measurement and Control*. 2019; 52: 1420–1433.
- [23] Demir R. Elektrikli araçlar için farklı hız profilleri altında model öngörülü akım kontrollü İSMSM sürücüsünün başarımı. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi. 2024; 13:4, 1478-1484.