



Elektrikli araçlar için farklı hız profilleri altında model öngörülü akım kontrollü İSMSM sürücüsünün başarımı

Performance of model predictive current controlled IPMSM drive under different speed profiles for electric vehicles

Rıdvan Demir^{1,*} 

¹ Kayseri Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 38280, Kayseri, Türkiye

Öz

Elektrikli araçlar için, yük ve araç hızının şehir içi yol, kırsal yol, otoyol veya arazi yolları gibi gerçek trafik koşullarının tamamında nasıl değiştiğini kesin olarak modellemek kolay değildir. Bununla birlikte uluslararası geçerliliği olan bazı elektrikli araç sürüş döngüleri tipik trafik koşullarını modellemek için iyileştirilmiştir. Bu çalışmada, araçlar için iyileştirilen sürüş döngülerinden bazıları model öngörülü akım kontrol tabanlı elektrikli araç sürücüsüne hız referansı olarak uygulanmıştır. Ek olarak elektrikli aracın toplam çekiş kuvveti kullanılarak oluşturulan yük momenti elektrikli aracı tahrik eden iç yüzey sürekli mıknatıslı senkron motora uygulanmıştır. Farklı hız profilleri ve yük momenti şartları için model öngörülü akım kontrol tabanlı elektrikli araç sürücüsünün başarımı MATLAB Simulink ortamında test edilmiştir. Farklı yük momentleri altında ve sıfır hızı da içeren geniş bir hız aralığında elde edilen benzetim sonuçları elektrikli araçlar için model öngörülü akım kontrol tabanlı iç yüzey sürekli mıknatıslı senkron motor sürücüsünün başarımını onaylamaktadır.

Anahtar kelimeler: Elektrikli araçlar, Model öngörülü akım kontrol, İç yüzey sürekli mıknatıslı senkron motor, AC motor sürücüsü

1 Giriş

Son yıllarda, elektrikli araçlar (EA'lar), hibrit elektrikli araçlar (HEA'lar) ve yakıt hücresiyle çalışan araçlara olan ilgi giderek artmaktadır. EA ve HEA'ların gün geçtikçe daha rekabetçi bir pazara girmesi, bu araçları üreten firmaları daha düşük maliyetli ve daha verimli araçlar geliştirmeye zorlamaktadır. EA'lar için başarımların kriterleri; güvenilirlik, sağlamlık, güç yönetimi, bataryalarının şarj hızı ve özellikle motor sürücü sistemleri olarak sıralanabilir [1]. EA'ların en önemli kısımlarından birisi olan elektrik motor sürücüleri, hem üreticilerin hem de araştırmacıların oldukça ilgisini çekmektedir.

EA'ların tahriki için asenkron motorlar (ASM'ler) ve sürekli mıknatıslı senkron motorlar (SMSM'ler) yaygın olarak kullanılmaktadır [1,2]. Bu motorların avantajları; fırçasız olmaları, çoğu ortama uygunlukları, basit yapıları ve yüksek başlangıç momentine sahip olmaları olarak

Abstract

For electric vehicles, it is not easy to model exactly how the load and vehicle speed change in all real traffic conditions such as urban roads, rural roads, highways, or off-road. However, some internationally valid electric vehicle driving cycles have been improved to model typical traffic conditions. In this study, some of the enhanced driving cycles for vehicles are applied to the model predictive current control-based electric vehicle drive as the speed reference. In addition, the load torque generated by using the total traction force of the electric vehicle is applied to the interior permanent magnet synchronous motor driving the electric vehicle. The performance of the model predictive current control-based electric vehicle drive for different speed profiles and load torque conditions is tested in MATLAB Simulink environment. The simulation results obtained under different load torques and a wide speed range including zero speed confirm the performance of the model predictive current control based interior permanent magnet synchronous motor drive for electric vehicles.

Keywords: Electrical vehicles, Model predictive current control, Interior permanent magnet synchronous motors, AC motor drive

sıralanabilir [3]. Anahtarlamalı relüktans motorlar (ARM'ler), EA'lar için kullanılan diğer motorlardandır [4]. ARM'lerde kalıcı mıknatıslar yoktur ve zorlayıcı ortamlar için uygun, güçlü ve sağlamdırlar. Ancak, özel ve uzmanlaşmış bir güç eviricisine ihtiyaç duyma, daha düşük güç faktörü ve önemli akustik gürültü gibi dezavantajlara sahiptirler. Ek olarak, belirli bir moment sağlamak için daha fazla giriş akımı gerektirirler [3].

Yüksek başarımlı değişken hız ve moment kontrolü gerektiren EA uygulamaları için kullanılan iç yüzey SMSM'ler (İSMSM'ler) yüksek verime, yüksek güç yoğunluğuna ve yüksek güç faktörüne sahiptirler. Geniş bir hız-moment aralığında yüksek verimliliklerini koruyabilirler. Ayrıca, çalışma bölgesinin çoğunda sabit güçte çalışabilir ve daha düşük akustik gürültü ve titreşim üretirler [5,6]. Bununla birlikte İSMSM'lerin doğrusal olmayan modele ve çalışma koşulları ile değişen parametrelere sahip olmaları İSMSM sürücülerin kontrolünü

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ridvandemir@kayseri.edu.tr (R. Demir)
Geliş / Received: 26.08.2024 Kabul / Accepted: 19.09.2024 Yayımlanma / Published: 15.10.2024
doi: 10.28948/ngumuh.1538775

gerçekleştiren sürücü sistemleri için hala zorlayıcı olmaktadır [7].

Elektrik motorlarının yüksek başarılı kontrolünde kullanılan alan yönlendirmeli kontrol ve doğrudan moment kontrol yöntemlerine alternatif olarak önerilen model öngörülü kontrol (MÖK), hızlı dinamik başarımı, basit prensibi ve doğrusal olmayan kısıtlamaları hesaba katma yeteneğinden dolayı son yıllarda oldukça çok tercih edilmektedir [8]. MÖK kavramı, motora uygulanacak en iyi gerilim vektörünü elde etmek amacıyla stator akımı, stator/rotor akısı veya endüklenen moment gibi durumları kullanan motor modelinin gelecekteki davranışının öngörülmesine dayanmaktadır [9]. Elektrik motor sürücülerinde kullanılan MÖK tabanlı yöntemlerden birisi de model öngörülü akım kontrol (MÖAK) yöntemidir [10]. MÖAK yöntemi, öngörülen stator akımlarını kullanarak maliyet fonksiyonunu eniyileyen gerilim vektörünü belirleme temeline dayanmaktadır. Literatürde MÖAK tabanlı SMSM sürücüsü ile alakalı birçok çalışma bulunmaktadır [8,11-15]. Ref [8]'de MÖAK sisteminde motora uygulanacak en iyi gerilim vektörünün belirlenmesinde tüm gerilim vektörleri yerine yalnızca seçilen vektör için görev döngüsü hesaplanmış ve böylece hesaplama yükünü azaltmıştır. Ref [12], 'de MÖAK sisteminin parametre değişikliklerine karşı hassasiyeti incelenmiştir. Ref [15]'te ise hem hesaplama yükü azaltmış hem de parametre değişimlerine karşı MÖAK sisteminin dayanıklılığını analiz edilmiştir. Bu çalışmaların birçoğunda MÖAK sistemine kısa süreli rampa ve/veya basamak şeklinde oluşturulan hız referansları uygulanmıştır.

EA'lar için yük ve araç hızının gerçek trafik koşullarının tamamında nasıl değiştiğini kesin olarak modellemek kolay değildir. Bununla birlikte bazı araç sürüş döngüleri tipik trafik koşullarını modellemek için iyileştirilmiştir. Bunlar arasında; dünya çapında uyumlu hafif araçlar test prosedürü-3 (Worldwide Harmonised Light Vehicles Test Procedure 3-WLTP-3) [16], yeni Avrupa sürüş döngüsü (New European Driving Cycle-NEDC) [16], New York Şehir döngüsü (New York City Cycle-NYCC) [17], kentsel dinamometre sürüş programı (Urban Dynamometer Driving Schedule-UDDS) [9] ve karayolu yakıt ekonomisi testi (The Highway Fuel Economy Test-HWFET) [18] gibi sürüş döngüleri bulunmaktadır.

Bu çalışmada yukarıda ifade edilen sürüş döngülerinden bazıları (WLTP, UDDS, NEDC ve HWFET) MÖAK tabanlı EA sürücüsüne hız referansı olarak uygulanmış ve farklı hız profilleri için MÖAK tabanlı EA sürücüsünün başarımı test edilmiştir. Ayrıca EA'nın farklı sürüş döngüleriyle oluşan toplam çekiş kuvveti kullanılarak elde edilen yük momenti, İSMSM'ye uygulanmıştır. Sıfır hızı da içeren geniş bir hız aralığı için elde edilen benzetim sonuçları, EA'lar için MÖAK tabanlı İSMSM sürücüsünün başarımını onaylamaktadır.

Bu çalışma toplam altı bölümden oluşmaktadır. EA ve İSMSM'ler ile ilgili genel bir literatür Bölüm 1'de verilmiştir. Bölüm 2 ve 3'te sırasıyla EA modeli ve İSMSM modeli ile ilgili detaylar sunulmuştur. Model öngörülü akım kontrol sistemi Bölüm 4'te, farklı sürüş döngüleri altında İSMSM sürücüsünün kontrol başarımının gösterilmesi

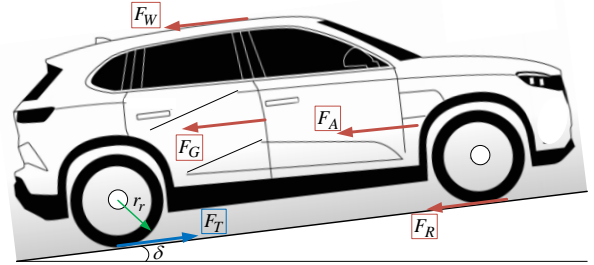
amacıyla yapılan benzetim çalışmaları Bölüm 5'te verilmektedir. Son olarak sonuçlar ve yorumlar Bölüm 6'da ifade edilmiştir.

2 Elektrikli Araç Dinamik Modeli

Hareket halindeki bir araç için araca etkiyen tipik kuvvetler; hava ve araç etkileşiminden kaynaklanan rüzgar kuvveti (F_W), lastik ve yol etkileşiminden kaynaklanan yuvarlanma kuvveti (F_R), yolun çeşitli eğimlerinden kaynaklanan yerçekimi kuvveti (F_G) ve araç kütlelerini hızlandırma ihtiyacından kaynaklanan ivme kuvveti (F_A) olarak sıralanabilir. Şekil 1'de gösterildiği gibi elektrikli araç için toplam çekiş kuvvetine (F_T 'ye) ait genel matematiksel ifade Denklem (1)'de verilmiştir [19,20].

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

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



Şekil 1. Elektrikli araç dinamik modeli

Denklem (1)'de K_R ortalama asfalt yol için yuvarlanma direnci katsayısı, K_W binek otomobiller için rüzgar direnci katsayısı, M_v aracın kütlesi, g yerçekimi katsayısı, A aracın ön yüzey alanı, a aracın ivmesi ve δ yolun eğimidir.

Çekiş kuvveti F_T hesaplandıktan sonra, elektrik motorunun rotor açılma hızı (ω_m) ve motora uygulanan yük momenti (τ_l) aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanır [20].

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

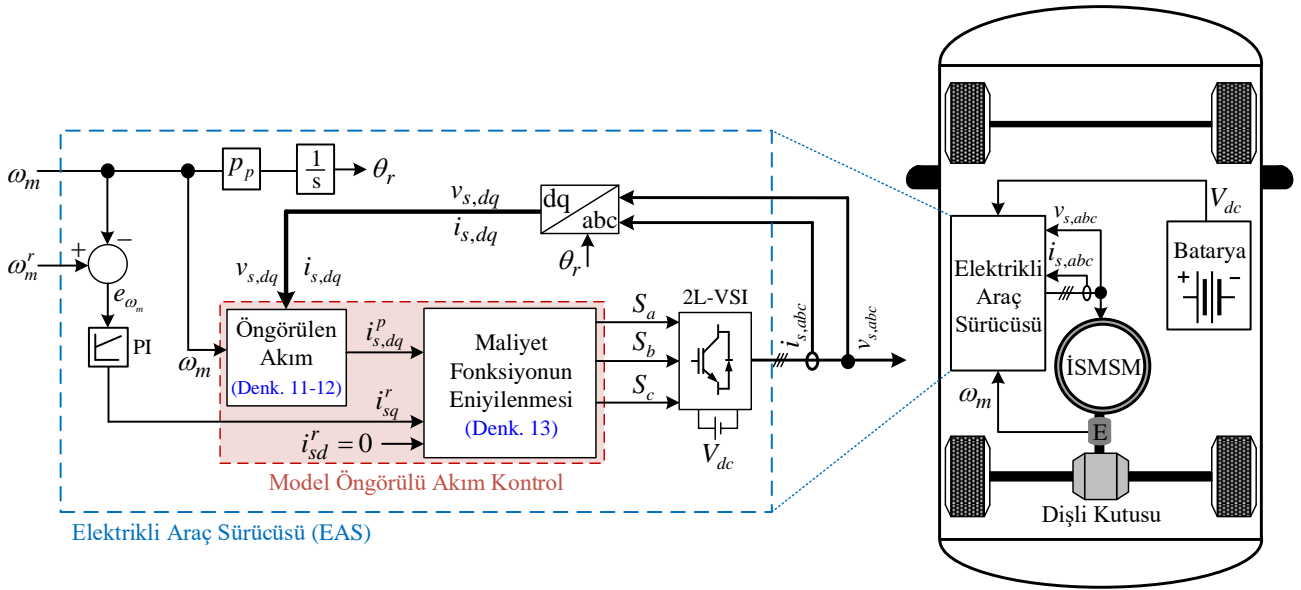
$$\tau_l = \frac{r_r}{r_f} F_T \quad (3)$$

burada r_f ve r_r sırasıyla dişli oranı ve tekerleğin yuvarlanma yarıçapıdır.

3 İSMSM'nin dinamik modeli

Dönen (dq -) eksen takımında tanımlanan İSMSM'nin matematiksel modeli Denklem (4)-(6)'da verilmiştir.

$$v_{sd} = R_s i_{sd} + L_d \frac{d}{dt} i_{sd} - L_q p_p \omega_m i_{sq} \quad (4)$$



Şekil 2. Elektrikli araç sürücü sisteminin (EASS) genel yapısı ve kontrol stratejisi

$$v_{sq} = R_s i_{sq} + L_q \frac{d}{dt} i_{sq} + L_d p_p \omega_m i_{sd} + p_p \omega_m \phi_{pm} \quad (5)$$

$$\tau_e = \frac{3}{2} p_p \left((L_d - L_q) i_{sd} i_{sq} + \phi_{pm} i_{sq} \right) \quad (6)$$

İSMSM'nin mekanik hareket eşitlikleri ise Denklem (7) ve (8)'de verilmiştir.

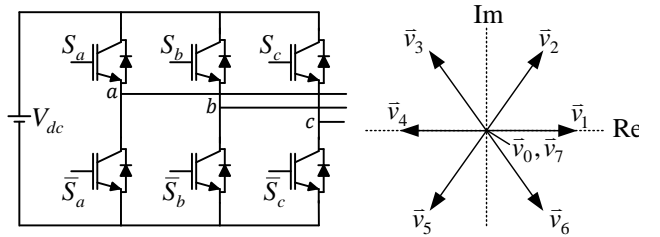
$$\frac{d}{dt} \omega_m = \frac{1}{J_T} (\tau_e - B_T \omega_m - \tau_l) \quad (7)$$

$$\frac{d}{dt} \theta_r = p_p \omega_m \quad (8)$$

Burada v_{sd} , v_{sq} ve i_{sd} , i_{sq} stator gerilim ve akımlarının d - q eksenindeki bileşenlerini; ω_m ve p_p sırasıyla rotor açılmal hızını ve kutup çifti sayısını; R_s , L_d ve L_q sırası ile stator direncini ve d - q eksenindeki endüktansları; τ_e endüklenen momenti; B_T ve J_T ise sırasıyla motor ve yükün toplam vizkoz sürtünme terimi ile eylemsizliğini temsil etmektedir.

4 Model öngörülü akım kontrol tabanlı elektrikli araç sürücüsü

MÖAK kavramı, motora uygulanacak en iyi gerilim vektörünü elde etmek amacıyla doğrusal olmayan stator akımının gelecekteki davranışının öngörülmesine dayanmaktadır. Elektrikli araçlar için MÖAK tabanlı İSMSM sürücüsünün kontrol şeması Şekil 2'de verilmiştir. Şekil 2'de verilen İPMSM sürücü sisteminde kullanılan iki seviyeli gerilim kaynaklı eviriciye (two level-voltage source inverter (2L-VSI)) ait detaylar Şekil 3'te sunulmuştur. Benzetim çalışmalarında kullanılan kontrolörün kazançları deneme yanılma yöntemi ile belirlenmiştir.



Şekil 3. 2L-VSI ve gerilim vektörleri

Şekil 2'de gösterilen 2L-VSI'nin anahtarlama durumu Denklem (9)'da gösterildiği gibi ifade edilebilir [21].

$$\vec{S} = \frac{2}{3} (S_a + \vec{a} S_b + \vec{a}^2 S_c) \quad (9)$$

burada $\vec{a} \triangleq e^{j2\pi/3}$ ve $S_x \in \{S_a, S_b, S_c\}$ 2L-VSI'nin kollarındaki anahtarların ON/OFF durumlarını gösterir. 2L-VSI'nin çıkış gerilimi \vec{v}_s , anahtarlama durumu \vec{S} kullanılarak Denklem (10)'daki gibi hesaplanır.

$$\vec{v}_s = V_{dc} \vec{S} \quad (10)$$

Burada V_{dc} dc bağlantı gerilimidir. İki seviyeli gerilim kaynaklı evirici için, Denklem (10) sekiz anahtarlama durumu için yedi farklı gerilim vektörü verir.

MÖAK tabanlı EASS'deki "öngörülen akım" bloğunda; $v_{s,dq}$, $i_{s,dq}$ ve ω_r kullanılarak dq - eksenindeki öngörülen stator akımları Denklem (11) ve (12) kullanılarak sekiz farklı anahtarlama durumu için tahmin edilebilir.

$$i_{sd,k+1}^p = \left(1 - \frac{TR_s}{L_d} \right) i_{sd,k} + \frac{L_q}{L_d} T p_p \omega_m i_{sq,k} + \frac{T}{L_d} v_{sd,k} \quad (11)$$

$$i_{sq,k+1}^p = \left(1 - \frac{TR_s}{L_q}\right) i_{sq,k} - \frac{TL_d}{L_q} p_p \omega_m i_{sd,k} + \frac{T}{L_q} v_{sq,k} - \frac{T \varphi_{pm}}{L_q} p_p \omega_m \quad (12)$$

Öngörülen stator akımları kullanılarak hız referansının takip edilmesini sağlayan en iyi (optimum) gerilim vektörünün seçimi aşağıdaki maliyet fonksiyonu ile gerçekleştirilir [21].

$$g = \sum_{h=1}^N \left\{ (i_{sd}^r - i_{sd,k+h}^p)^2 + (i_{sq}^r - i_{sq,k+h}^p)^2 + I_m \right\} \quad (13)$$

Denklem (13)'te N tahmin ufkunu ifade etmektedir ve bir olarak seçilmiştir. i_{sd}^r ve i_{sq}^r dq – eksenindeki stator akımlarının referanslarıdır ve i_{sd}^r sıfır olarak seçilmiştir. I_m İSMSM'yi aşırı akımlara karşı koruyan sınırlama terimidir. i_{sd}^p veya i_{sq}^p 'nin genlik değerleri I_m 'den büyük veya eşit ise akım sınırlama terimi etkinleştirilir. Akım sınırlama terimi aşağıdaki gibi tanımlanır. Burada $i_{s,max}$ stator akımının maksimum genliğidir.

$$I_m = \begin{cases} \infty, & |i_{sd,k+1}^p| \geq i_{s,max} \text{ veya } |i_{sq,k+1}^p| \geq i_{s,max} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (14)$$

5 Benzetim sonuçları

Şekil 2'de gösterilen MÖAK tabanlı EA sürücüsünün başarımını test etmek ve doğrulamak için yapılan benzetim çalışmaları *MATLAB Simulink* [22] ortamında gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışmalarında kullanılan İSMSM ve EA'ya ait parametrelerin değerleri Tablo 1 ve Tablo 2'de sunulmuştur. Benzetim çalışmalarında örneklem zamanı (T) $50\mu s$ olarak ayarlanmıştır. Ayrıca, MÖAK tabanlı sürücü sisteminden yüksek kontrol başarımı elde etmek için PI kontrolörün kazançları deneme yanılma yöntemi ile $K_p = 100$ ve $K_i = 400$ olarak seçilmiştir.

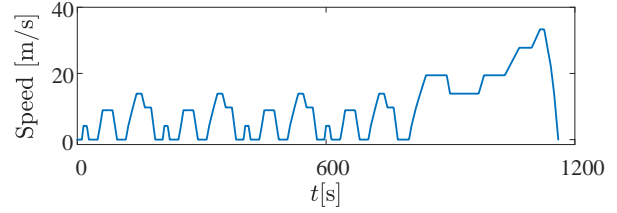
Tablo 1. Elektrikli araç parametreleri [19]

| Parametre | Değeri |
|---|---------------|
| Araçın Kütle (Kg) | $M_v = 1400$ |
| Araçın Ön Alanı (m^2) | $A = 2.35$ |
| Ortalama Asfalt Yol İçin Yuvarlanma Direnci Katsayısı | $K_R = 0.015$ |
| Binek Otomobiller İçin Rüzgar Direnci | $K_W = 0.3$ |
| Dişli Oranı | $r_f = 2$ |
| Tekerleğin Yuvarlanma Yarıçapı (m) | $r_r = 0.4$ |

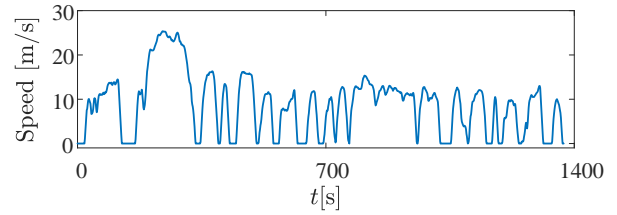
Tablo 2. İSMSM'nin parametreleri [23]

| Parametre | Değeri |
|-----------------------------|-------------------------|
| Kutup Çifti | $p_p = 5$ |
| Stator Direnci (Ω) | $R = 0.18$ |
| d – eksen endüktansı (mH) | $L_d = 0.174$ |
| q – eksen endüktansı (mH) | $L_q = 0.29$ |
| Kalıcı mıknatıs akısı (Wb) | $\varphi_{pm} = 0.0711$ |
| Eylemsizlik (kgm^2) | $J_T = 0.067$ |
| Anma hızı (dev/dk) | $n_m = 2000$ |
| Anma Gücü (kW) | $P_N = 60$ |

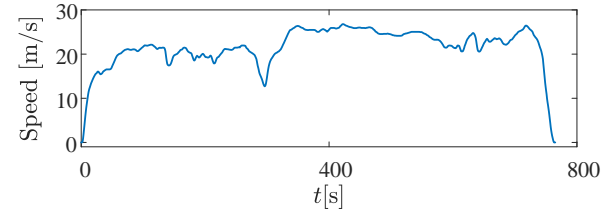
MÖAK tabanlı EA sürücüsünün etkinliği farklı sürüş döngüleri için test edilmiştir. Bu sürüş döngüleri NEDC, UDDS, HWFET ve WLTP-3 olarak sıralanabilir. Bu çalışmada kullanılan sürüş döngülerine ilişkin hız profilleri Şekil 4-7'de verilmiştir.



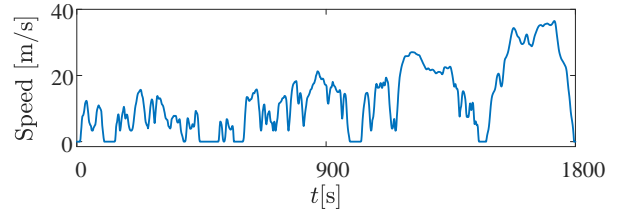
Şekil 4. NEDC sürüş döngüsü



Şekil 5. UDDS sürüş döngüsü



Şekil 6. HWFET sürüş döngüsü



Şekil 7. WLTP-3 sürüş döngüsü

Şekil 4-7 ile verilen sürüş döngüleri ile ilgili detaylar aşağıda sunulmuştur

NEDC: Sürüş döngüsünün başında dört kez tekrarlanan şehir içi sürüş döngüsü ve sonunda bir şehir dışı sürüş döngüsü içerir. Bu sürüş döngüsü, ortalama 9.17 m/s (33 km/h) hızla 1180 saniye sürmektedir.

UDDS: Sürüş döngüsü, yaklaşık 8.89 m/s (32 km/h) ortalama hız ve 25.56 m/s (92 km/h) maksimum hız ile 12 km uzunluğundaki şehir içi güzergahını kapsamaktadır. Bu sürüş döngüsü ise toplam 1370 saniye sürmektedir.

HWFET: Bu sürüş döngüsü de 20.83 m/s (78 km/h) ortalama hız ile 16.7 km uzunluğundaki bir güzergah için 765 saniye sürmektedir.

WLTP-3: Bu sürüş döngüsü her biri farklı bir maksimum hıza sahip dört farklı alt bölgeye ayrılmıştır. Birinci bölge

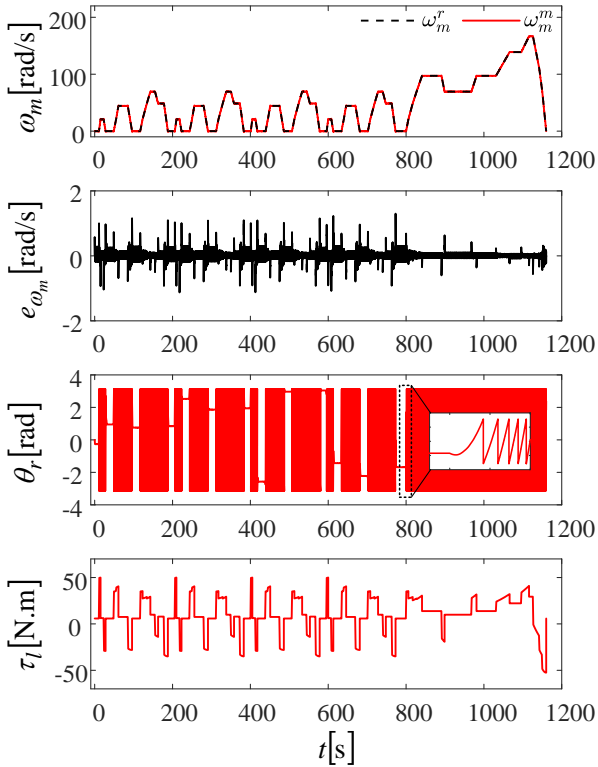
maksimum hızı 15.7 m/s'ye (56.5 km/h) kadar olan düşük hız bölgesidir. İkinci bölge maksimum hızı 21.28 m/s'ye (76,6 km/h) kadar olan orta hız bölgesidir. Üçüncü bölge maksimum hızı 27 m/s'ye (97.4km/h) kadar olan yüksek hız bölgesi ve son olarak dördüncü bölge ise maksimum hızı 36.47 m/s'ye (131.3 km/h) kadar olan çok yüksek hız bölgesidir. Bu sürüş bölgeleri toplam 1800 saniyelik şehir içi yol, mahalle arası, kırsal ve otoyol senaryolarını içermektedir.

Şekil 2'de verilen EA sürücüsüne hız referansı olarak uygulanan ω_m^r Şekil 4-7 ile verilen sürüş döngülerindeki EA hızları için Denklem (2) kullanılarak elde edilmiştir. Ayrıca Şekil 4-7 ile verilen hızlar ve EA parametreleri için Denklem (1b) kullanılarak EA'nın toplam çekiş kuvveti (F_T) hesaplanmıştır. Ek olarak, EA'yı tahrik eden İSMSM'ye uygulanan yük momenti Denklem (3) kullanılarak elde edilmiştir.

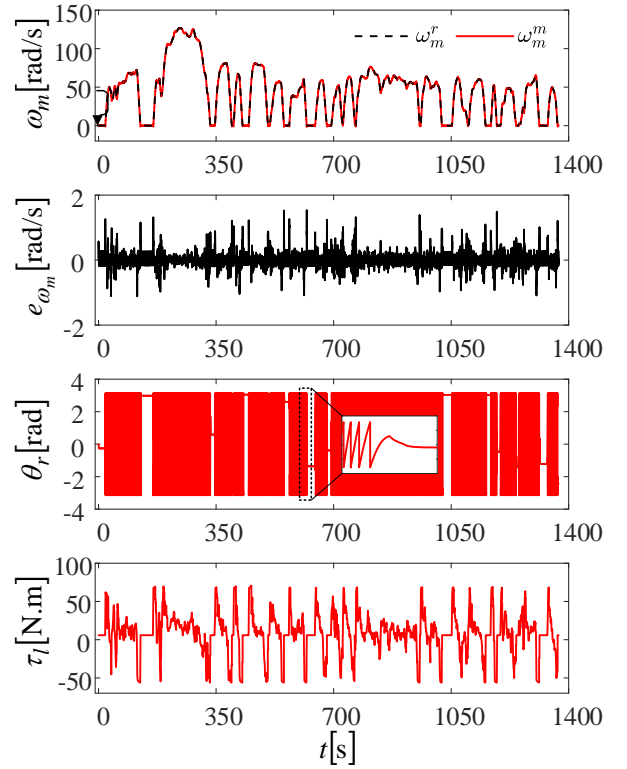
NEDC, UDDS, HWFET ve WLTP-3 sürüş döngüleri için MÖAK tabanlı EA sürücüsünden elde edilen benzetim sonuçları Şekil 8-11'de verilmiştir. Şekil 8-11 ile verilen benzetim sonuçları rotor açsal hızı (ω_m), rotor konumu (θ_r) ve hız hatası (e_{ω_m}) ile birlikte motora uygulanan yük momenti (τ_l) değişimlerini içermektedir.

Şekil 8-11'de verilen referans hız ve motor hız arasındaki ortalama karesel hata (the mean square error-MSE) aşağıdaki denklem ile hesaplanmış ve hata değerleri Tablo 3'te verilmiştir.

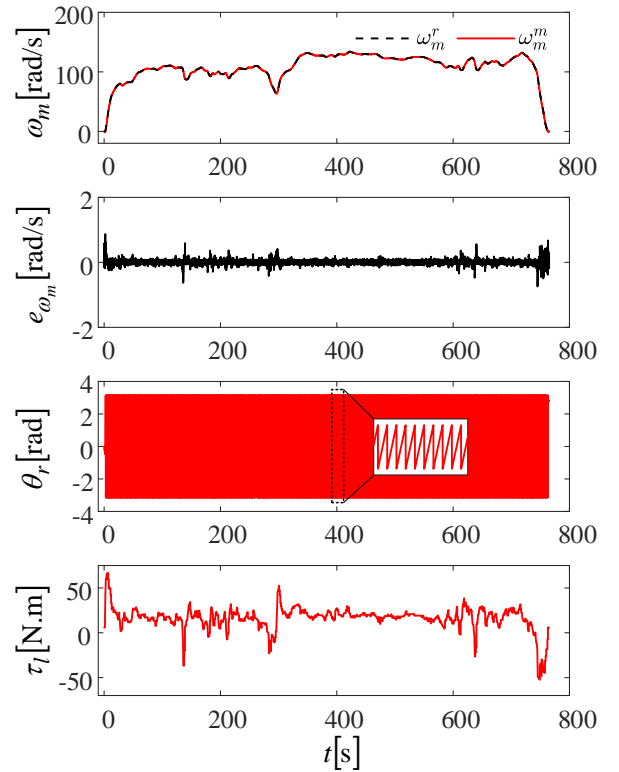
$$e_{\omega_m}^{MSE} = \frac{1}{N} \sum (\omega_m^r - \omega_m^m)^2 \quad (15)$$



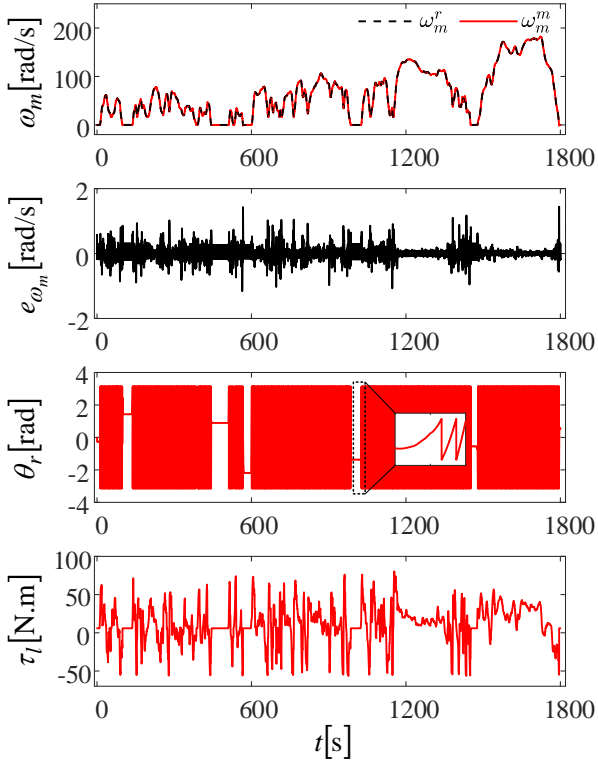
Şekil 8. NEDC sürüş döngüsü için MÖAK tabanlı EA sürücüsüne ait benzetim sonuçları



Şekil 9. UDDS sürüş döngüsü için MÖAK tabanlı EA sürücüsüne ait benzetim sonuçları



Şekil 10. HWFET sürüş döngüsü için MÖAK tabanlı EA sürücüsüne ait benzetim sonuçları



Şekil 11. WLTP-3 sürüş döngüsü için MÖAK tabanlı EA sürücüsüne ait benzetim sonuçları

Tablo 3. Şekil 8-11’de verilen hız değerleri için ortalama karesel hata ($e_{\omega_m}^{MSE} = 1/N \sum (\omega_m^r - \omega_m^m)^2$)

| Şekil Numarası | Hata Değeri |
|----------------|-------------|
| Şekil 8 | 0.0123 |
| Şekil 9 | 0.0176 |
| Şekil 10 | 0.0027 |
| Şekil 11 | 0.0130 |

Şekil 8-11 ve Tablo 3 incelendiğinde aşağıdaki çıkarımlar yapılabilir.

- Şehir içi yol, kırsal yol ve otoyol şartlarını içeren uluslararası geçerliliği olan farklı sürüş döngüleri kullanılarak oluşturulan benzetim çalışmaları İSMSM’nin açısız hız referansı için MÖAK tabanlı sürücünün kontrol başarımının yüksek olduğunu göstermektedir.

- Araca etkileyen toplam çekiş kuvveti kullanılarak elde edilen yük momenti değişimlerine karşı sürücü sisteminin başarımı tatmin edici seviyededir.

Özetle farklı sürüş ve yol şartları altında MÖAK tabanlı EA sürücüsünden elde edilen benzetim sonuçları MÖAK tabanlı EA sürücüsünün başarımının oldukça yüksek olduğunu onaylamaktadır.

6 Sonuçlar

EA için yük ve araç hızının gerçek trafik koşullarının tamamında nasıl değiştiğini kesin olarak modellemek kolay değildir. Bununla birlikte bazı araç sürüş döngüleri tipik trafik koşullarını modellemek için geliştirilmiştir. Bu çalışmada EA’lar için iyileştirilen sürüş döngülerinden NEDC, UDDS, HWFET ve WLTP-3’ten elde edilen hız

bilgileri, MÖAK tabanlı EA sürücüsüne referans hız olarak uygulanmıştır. Ayrıca EA’nın farklı sürüş döngüleriyle ortaya çıkan toplam çekiş kuvveti kullanılarak elde edilen yük momenti, İSMSM’ye uygulanmıştır. Farklı hız profilleri ve yük momenti değişimleri altında MÖAK tabanlı EA sürücüsünün başarımı test edilmiştir. Sıfır hızı da içeren çok geniş bir hız aralığı için elde edilen benzetim sonuçları, EA’lar için MÖAK tabanlı İSMSM sürücüsünün başarımını onaylamaktadır. Gelecek çalışmalar da uluslararası geçerliliği olan farklı sürüş döngüleri için İSMSM sürücüsünün gerçek zamanlı deneylerine odaklanılacaktır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate):%11

Kaynaklar

- [1] I. F. Bouguenna, A. Tahour, R. Kennel, and M. Abdelrahem, Multiple-Vector Model Predictive Control with Fuzzy Logic for PMSM Electric Drive Systems. *Energies*, 14(6), 1-23, 2021. <https://doi.org/10.3390/en14061722>.
- [2] M. Toren and H. Mollahasanoğlu, Gömülü kalıcı mıknatıslı-fırçasız doğru akım motorda (IPMBLDC) kullanılan farklı güç dereceli NdFeB mıknatısların motor performansına etkisinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 38(3), 1389-1402, 2023. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.988877>.
- [3] Z. Yang, F. Shang, I. P. Brown, and M. Krishnamurthy, Comparative Study of Interior Permanent Magnet, Induction, and Switched Reluctance Motor Drives for EV and HEV Applications. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 1(3), 245-254, 2015. <https://doi.org/10.1109/TTE.2015.2470092>.
- [4] K. Diao, X. Sun, G. Lei, G. Bramerdorfer, Y. Guo, and J. Zhu, System-Level Robust Design Optimization of a Switched Reluctance Motor Drive System Considering Multiple Driving Cycles. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 36(1), 348-357, 2021. <https://doi.org/10.1109/TEC.2020.3009408>.
- [5] L. Chen, H. Xu, and X. Sun, A Novel Strategy of Control Performance Improvement for Six-Phase Permanent Magnet Synchronous Hub Motor Drives of EVs Under New European Driving Cycle. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 70(6), 5628-5637, 2021. <https://doi.org/10.1109/TVT.2021.3079576>.
- [6] H. Chaoui, M. Khayamy, and O. Okoye, Adaptive RBF Network Based Direct Voltage Control for Interior PMSM Based Vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67 (7), 5740-5749, 2018. <https://doi.org/10.1109/TVT.2018.2813666>.
- [7] O. C. Kivanc and S. B. Ozturk, Sensorless PMSM Drive Based on Stator Feedforward Voltage Estimation Improved With MRAS Multiparameter Estimation. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 23(3), 1326-1337, 2018. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2018.2817246>.

- [8] S. Abareshi, S. Tohidi, M. B. Bannae Sharifian, and A. Younesi, Model predictive control by combining vectors for surface and interior permanent-magnet synchronous motor. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 31(8), e12959, 2021. <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12959>.
- [9] A. A. Ahmed, M. M. Akl, and E. E. M. Rashad, A comparative dynamic analysis between model predictive torque control and field-oriented torque control of IM drives for electric vehicles, *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 31 (11), e13089, 2021. <https://doi.org/10.1002/2050-7038.13089>.
- [10] O. Sandre-Hernandez, J. Rangel-Magdaleno, and R. Morales-Caporal, A Comparison on Finite-Set Model Predictive Torque Control Schemes for PMSMs. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 33(10), 8838–8847, 2018. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2777973>
- [11] Y. Zhang, D. Xu, J. Liu, S. Gao, and W. Xu, Performance Improvement of Model-Predictive Current Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Drives. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53(4), 3683–3695, 2017. <https://doi.org/10.1109/TIA.2017.2690998>.
- [12] X. Zhang, L. Zhang, and Y. Zhang, Model Predictive Current Control for PMSM Drives With Parameter Robustness Improvement. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(2), 1645–1657, 2019. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2835835>.
- [13] S. Fan and C. Tong, Model predictive current control method for PMSM drives based on an improved prediction model. *Journal of Power Electronics*, 20(6), 1456–1466, 2020. <https://doi.org/10.1007/s43236-020-00125-4>.
- [14] S. G. Petkar, K. Eshwar, and V. K. Thippiripati, A Modified Model Predictive Current Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Drive. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 68(2), 1025–1034, 2021. <https://doi.org/10.1109/TIE.2020.2970671>.
- [15] X. Jiang *et al.*, An Improved Implicit Model Predictive Current Control With Continuous Control Set for PMSM Drives. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 8(2), 2444–2455 2022. <https://doi.org/10.1109/TTE.2022.3144667>.
- [16] A. O. Kiyaklı and H. Solmaz, Modeling of an Electric Vehicle with MATLAB/Simulink. *International Journal of Automotive Science And Technology*, 2(4), 9–15, 2018. <https://doi.org/10.30939/ijastech.475477>.
- [17] V.P., Dhote, M.M. Lokhande, and S.C. Gupta., Test bench setup for emulating electric vehicle on-road conditions, *Energy Reports*, 9, 218–227, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.05.145>
- [18] C. P. Sahwal, S. Sengupta, and T. Q. Dinh, Advanced Equivalent Consumption Minimization Strategy for Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles. *Journal of Cleaner Production*, 437, 1-14, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140366>.
- [19] M. Alzayed and H. Chaoui, Efficient Simplified Current Sensorless Dynamic Direct Voltage MTPA of Interior PMSM for Electric Vehicles Operation. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 71(12) 12701–12710, 2022. <https://doi.org/10.1109/TVT.2022.3198095>.
- [20] C. T. Krasopoulos, M. E. Beniakar, and A. G. Kladas, Velocity and Torque Limit Profile Optimization of Electric Vehicle Including Limited Overload. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53(4), 3907–3916, 2017. <https://doi.org/10.1109/TIA.2017.2680405>
- [21] R. Demir, Speed-sensorless Predictive Current Controlled PMSM Drive With Adaptive Filtering-based MRAS Speed Estimators, *International Journal of Control, Automation and Systems*, 21(8), 2577–2586, 2023. <https://doi.org/10.1007/s12555-022-0698-z>.
- [22] MathWorks Inc., *MATLAB 2023a/Simulink. Simulation and Model Based Design*. MA, USA: Natick. (2023).
- [23] X. Sun, Y. Zhang, X. Tian, J. Cao, and J. Zhu, ‘Speed Sensorless Control for IPMSMs Using a Modified MRAS With Gray Wolf Optimization Algorithm’, *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 8(1),1326–1337, 2022. <https://doi.org/10.1109/TTE.2021.3093580>.

