

KMÜ Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi

<https://dergipark.org.tr/pub/kmuajens>

4(1), 1-17, (2022) © KMUJENS

e-ISSN: 2687-5071

<https://doi.org/10.55213/kmuajens.1053212>



Elektrikli Araçlar için MTPA Kontrol Stratejisi ile Alan Yönlendirmeli Kontrol Tasarımı

Field Oriented Control with MTPA Control Strategy for Electric Vehicles

Mehmet Tuğser DEMİR¹, Sibel ZORLU PARTAL¹

¹Elektrik Mühendisliği Bölümü, Elektrik Elektronik Fakültesi, Yıldız Teknik
Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

(Alındı: 4 Ocak 2022; Kabul edildi: 19 Ocak 2022)

Özet. Sürekli mıknatıslı senkron motorlar (SMSM); yüksek güç yoğunluğu, yüksek verim, hızlı tepki süresi ve lineer moment karakteristiği gibi özellikleriyle yüksek performans gerektiren elektrikli araç uygulamalarında oldukça geniş yer bulmaktadır. Elektrikli araçlar uygulamalarında, sürüş menziline ve dolayısıyla enerji veriminin en kritik konu olması nedeniyle sistemdeki enerji veriminin artırılması büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada SMSM'nin Akım Başına Maksimum Moment (Maximum Torque Per Ampere, (MTPA)) stratejisi ile alan yönlendirme kontrolü gerçekleştirilmiştir. Bu kontrol yöntemiyle motorun, talep edilen elektromanyetik momenti minimum akımla üretmesi hedeflenmiş ve enerji verimine etkisi incelenmiştir. Daha sonra gerçekleştirilen MTPA kontrol stratejisi ile alan yönlendirme kontrolü, geleneksel alan yönlendirme kontrolü ile karşılaştırılmış ve elde edilen simülasyon sonuçları detaylı olarak verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Maksimum moment kontrolü, alan yönlendirme kontrolü, sürekli mıknatıslı senkron motor, elektrikli araçlar.

Abstract. Permanent magnet synchronous motors (PMSM); With its features such as high power density, high efficiency, fast response time and linear torque characteristics, it finds a wide place in electric vehicle applications that require high performance. In the application of electric vehicles, it is of great importance to increase the energy efficiency of the system, since the driving range and therefore energy efficiency is the most critical issue. In this study, field oriented control was performed with the maximum torque per ampere (MTPA) strategy of the SMSM. With this control method, it is aimed for the motor to produce the requested electromagnetic moment with minimum current and its effect on energy efficiency is shown. The implemented the field oriented control with MTPA control strategy are compared with the traditional field oriented control and the simulation results are presented.

Key words: Maximum torque per ampere control, field oriented control, permanent magnet synchronous motor, electric vehicles.

1. Giriş

Günümüzde artan araç sayısı ile orantılı olarak, tüketilen fosil yakıt miktarı da artmaktadır. Buna bağlı olarak havayı kirletici emisyonların yükselmesi ve bunun yanı sıra fosil yakıt kaynaklarının hızla tükenmekte olması, ulaşımda enerji verimliliğini öncelikli bir konu haline getirmektedir. Elektrikli araçlar, fosil yakıtlı araçlara göre çok daha yüksek verime sahip olmaları ve zehirli gaz emisyonu olmadığından, çevre dostu olmaları gibi avantajlarıyla son yıllarda hem otomotiv üreticileri hem de kullanıcıları arasında giderek artan ilgi odağı olmuşlardır. Bu nedenle elektrikli araçların yaygınlaştırılması konusunda dezavantajlarını azaltmaya yönelik yapılabilecek araştırma çalışmaları büyük önem taşımaktadırlar.

Elektrikli araçlarda tahrik sistemi çeşitli elektrik motorları ile gerçekleştirilmektedir. Elektrikli araçlarla ilgili yapılan ilk çalışmalarda, kontrol kolaylıklarından dolayı doğru akım motorları tercih edilirken, günümüz teknolojisi ve güç elektroniğinde yaşanan gelişmelerle birlikte, asenkron motorlar, anahtarlamalı relüktans motorlar ve sürekli mıknatıslı senkron motorlar (SMSM) elektrikli araçlarda sıklıkla tercih edilmektedirler. SMSM'lerde klasik senkron motordaki DC uyarım sargıları yoktur. Dolayısıyla uyarım

herhangi bir fırça ve kollektör yapısı tarafından sağlanmaz. Bunun yerine enerji yoğunluğu yüksek kalıcı mıknatıslar kullanılır. SMSM bu sayede yüksek verime ve yüksek güç yoğunluğuna sahiptir. Ayrıca bakım ihtiyacının olmaması, düşük atalet kuvvetinin olması gibi avantajlarıyla da elektrikli araç uygulamalarında oldukça geniş bir yer tutmaktadırlar [9] [11].

Üç fazlı koordinat sisteminde SMSM'nin matematiksel modeli oldukça karmaşıktır, bu nedenle analiz edilmesi ve kontrol edilmesi zordur. SMSM kontrol sistemini DC motor kontrol sistemine yaklaşık olarak eşdeğer hale getirmek için çeşitli kontrol stratejileri ortaya konulmuştur. Bu kontrol yöntemleri genel olarak Alan Yönlendirme Kontrolü (AYK), Doğrudan Moment Kontrolü (DMK), yapay zeka tabanlı motor kontrolü olarak sıralanabilir [8].

SMSM'nin verimli bir şekilde kontrol edilebilmesi için alan yönlendirme kontrolü ve doğrudan moment kontrolü odak noktası olmuştur. Literatürde her iki kontrol yöntemi kullanılarak, SMSM hız ve moment davranışlarını karşılaştırmak için çeşitli çalışma koşullarında simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçları, doğrudan moment kontrolünün çok yüksek moment dalgalanmalarına sahip olmasına rağmen, hızlı dinamik performans gösterdiğini ortaya koymuştur. Ancak daha az moment dalgalanması istendiği takdirde doğrudan moment kontrolünün daha iyi sonuç vereceği sonucuna varılmıştır [4].

Doğrudan moment kontrolü ve alan yönlendirme kontrolünün dışında yapay zeka tabanlı kontrol de araştırmacıların odak noktası olmuştur. Yapılan bir çalışmada alan yönlendirme kontrolü ile yapay sinir ağları tabanlı alan yönlendirme kontrolü karşılaştırması yapılmıştır. Önerilen bu çalışmada maksimum hız değerine, geleneksel alan yönlendirme kontrolüne göre %48 oranında bir artış sağlamıştır [1].

Alan yönlendirme kontrolünde, d eksenini sıfır akım kontrolü, yaygın olarak kullanılan alan yönlendirme kontrol yöntemlerindedir. Ancak bu yöntem motorun maksimum momente ulaşmasını sağlayamaz. Motorun en yüksek elektromanyetik momenti üretebilmesi için akım başına maksimum moment (Maximum Torque Per Ampere (MTPA)) kontrol yöntemi ile motor kontrolü gerçekleştirilmelidir [8].

Yapılan başka araştırmalara göre d eksen ve q eksen akımlarını enerji verimini arttıracak şekilde kontrol etmek mümkündür. SMSM kontrlnde enerji verimini arttırmak için literatürde Verimlilik Optimizasyon Kontrolü (Efficiency Optimization Control, EOC) sunulmuştur. Yapılan çalışmada bu yöntem MTPA stratejisi ile karşılaştırılmıştır. EOC yönteminde MTPA yöntemine göre daha yüksek bakır kayıpları gözlenirken, demir kayıpları MTPA yönteminden daha düşük kalmıştır. Yapılan bu çalışmada toplam kayıplara bakıldığında, EOC yöntemi ile daha az enerji kaybı sağlanmış ve verimde artış elde edildiği gözlemlenmiştir [10].

Elektrikli araç uygulamalarında motor kontrol sisteminden; geniş bir aralıktaki motor hız kontrolüne yanıt verebilmesi, moment dalgalanmalarını minimum seviyede tutması ve sistemin yüksek verimle çalışmasını sağlaması beklenmektedir. Ayrıca kontrol yapısının doğru bir şekilde tasarlanabilmesi için motor parametrelerinin doğru bir şekilde elde edilmesi gerekmektedir. Motor parametreleri deneysel sonuçlarla elde edilebileceği gibi sonlu elemanlar yöntemi tabanlı motor tasarım programları yardımıyla da elde edilebilmektedir. Bu çalışmada motor kontrolü için MTPA kontrol modeli kullanılmıştır. MTPA kontrolünün gerçekleştirilebilmesi için öncelikle motor modeli oluşturulmuştur. Motor modeli için, MTPA kontrol sistemini örnek bir elektrikli araç motor modeli üzerinde deneyebilmek adına, açık kaynaklardan bilgilerine ulaşılabilen Nissan Leaf aracının motoru seçilmiştir. Motor tasarımı, Motor-CAD programı kullanılarak yapılmıştır. Daha sonra tasarlanan bu motor modeli, Matlab Simulink'te oluşturulan geleneksel alan yönlendirme kontrol sistemi ve MTPA stratejisi ile alan yönlendirme kontrol sistemi yapılarında kullanılmış ve kontrol yapılarının benzetim sonuçları elde edilerek, sonuçlar karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

2. Sürekli Miknatışlı Senkron Motorun Matematiksel Modeli

Üç fazlı koordinat sistemi, SMSM'nin lineer olmayan parametrelere bağlı olmasından dolayı çok zorlaştıran bir sistemdir. Bu problemi çözmek için motorun matematiksel modeli, kontrolü daha kolay iki eksenli yapıya dönüştürülür. Alan yönlendirme kontrolü, SMSM'nin karmaşık matematiksel modelini koordinat dönüşümü yoluyla basit bir DC motor matematiksel modeline dönüştürmektir.

SMSM'nin d ve q döner eksen düzlemine göre matematiksel modelinin denklemleri şu şekildedir [8]: Gerilim denklemi:

$$\begin{pmatrix} u_d \\ u_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{pmatrix} + \omega_r \begin{pmatrix} -\psi_q \\ \psi_d \end{pmatrix} \quad (1)$$

Manyetik akı denklemi:

$$\begin{pmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \psi_f \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Moment denklemi:

$$T_e = \frac{3}{2}p[\psi_f i_q + (L_d - L_q)i_d i_q] \quad (3)$$

Hareket denklemi:

$$T_e = T_L + Bp\omega_r + J \frac{d\omega_r}{dt} \quad (4)$$

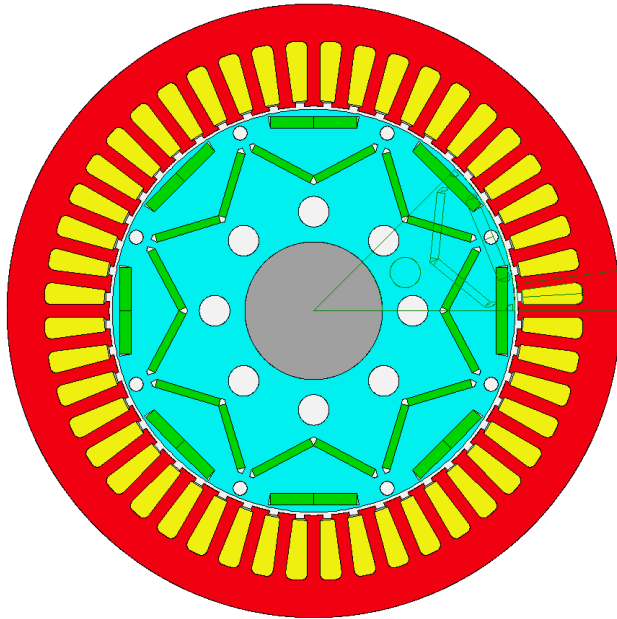
Yukarıda verilen denklemlerde kullanılan parametreler ve açıklamaları aşağıda verildiği gibidir:

u_d, u_q	d ve q eksenleri stator gerilimleri
i_d, i_q	d ve q eksenleri stator akımları
R_s	stator faz direnci
ψ_d, ψ_q	d ve q eksenleri stator akısı
ω_r	rotor açısal hızı
T_e, T_L	elektromanyetik moment ve yük momenti
L_d, L_q	d ve q eksenleri endüktans değeri
ψ_f	rotor manyetik akısı
p	motor kutup sayısı
B	sürtünme katsayısı
J	atalet momenti

3. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor Tasarımı

Bu çalışmada SMSM'nin daha verimli bir şekilde kontrol edilebilmesi için MTPA stratejisi ile alan yönlendirme kontrol sistemi geliştirilmiştir. Bu kontrol sistemini çalıştırmak ve modelin performansını görmek için, örnek motor modeli olarak Nissan Leaf elektrikli aracın tahrik motorunun Oakridge raporundaki parametreleri referans alınmış ve bu değerlere göre motor tasarımı yapılmıştır [6]. Motor tasarımı ve tasarımın sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analizleri, Motor-CAD programı kullanılarak yapılmıştır. Referans kaynaktan alınan motor parametrelerine ek olarak, sargı parametreleri ile stator ve rotorda kullanılan malzemelerin belirlenmesi için motor tasarım programı kullanılarak optimizasyon çalışması yapılmıştır. Ayrıca elektromanyetik analiz çalışması yapılarak rotorda doyum problemi olup olmadığı incelenmiş ve rotor geometrisine yapılan optimizasyon ile doyum problemi giderilmiştir.

Stator Parameters	Value	Rotor Parameters	Value
Slot Number	48	Pole Number	8
Stator Lam Dia	198	Notch Depth	0
Stator Bore	132	Magnet Layers	2
Tooth Width	4.15	L1 Magnet Thickness	3.862
Slot Depth	21	L1 Magnet Bar Width	13.9
Slot Corner Radius	2	L1 Bridge Thickness	0.6
Tooth Tip Depth	1.2	L1 Web Thickness	21
Slot Opening	2.814	L1 Web Length	0
Tooth Tip Angle	27	L1 Pole V Angle	180
Sleeve Thickness	0	L1 Pole Arc [ED]	150
		L1 Magnet Post	0
		L1 Magnet Separation	0
		L1 Magnet Segments	1
		L1 Mag Gap Inner	0
		L1 Mag Gap Outer	0
		L2 Magnet Thickness	2.6
		L2 Magnet Bar Width	21.33
		L2 Bridge Thickness	7.65
		L2 Web Thickness	2.5
		L2 Web Length	0
		L2 Pole V Angle	124
		L2 Pole Arc [ED]	159
		L2 Magnet Post	0
		L2 Magnet Separation	0
		L2 Magnet Segments	1
		L2 Mag Gap Inner	0
		L2 Mag Gap Outer	0
		Airgap	1
		Banding Thickness	0
		Shaft Dia	44.45
		Shaft Hole Diameter	0
		Rotor Duct Layers	2
		L1 RDuct Rad Dia	63.94
		L1 RDuct Channel	8
		L1 RDuct Dia	9.88
		L1 RDuct Angle	0
		L2 RDuct Rad Dia	124
		L2 RDuct Channel	8
		L2 RDuct Dia	4.5
		L2 RDuct Angle	22.5



Şekil 1. Motor-CAD SMSM modeli

Oluşturulan SMSM modelinde, kutup sayısı 8 ve stator oluk sayısı 48'dir. Rotora mıknatıslar V tipi mıknatıs şeklinde yerleştirilmiş ve mıknatıs olarak da N30UH mıknatısı kullanılmıştır. Modelde elektriksel sac olarak M250-35A seçilmiştir. Sargı şeması ise 3 faz olarak, 2 paralel kol ve 6 sarımdan oluşmaktadır. Motor-CAD programında oluşturulmuş SMSM modeli aşağıda Şekil 1'de ve motora ait parametreler ise Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. SMSM parametreleri

Kutup Sayısı	8
Nominal Hız	3000 d/d
Nominal DC Gerilim	375 V
Nominal Moment	280 Nm
Nominal Güç	80 kW
d eksen Endüktansı	0.1711 mH
q eksen Endüktansı	0.4245 mH
Stator Faz Direnci	0.011565 ohm

4. Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun MTPA Yöntemi İle Alan Yönlendirmeli Kontrolü

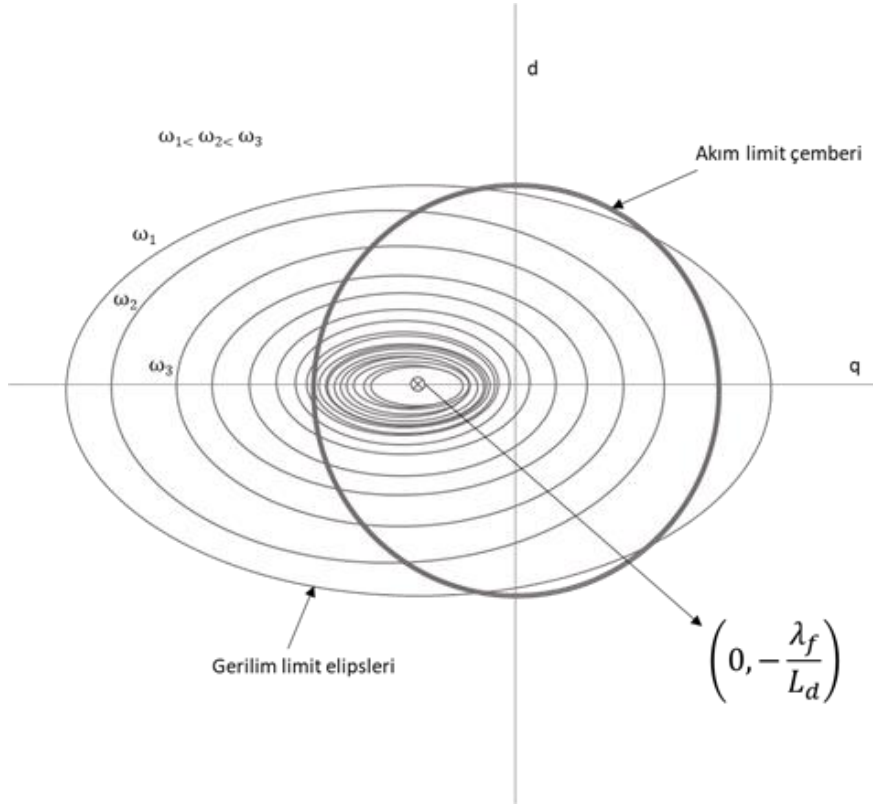
4.1. MTPA Kontrol Yöntemi

MTPA kontrol yönteminde, motorun ürettiği moment maksimum seviyede tutulurken, i_d ve i_q akımlarının vektörel toplamalarının en düşük değerde olması hedeflenir. Böylece bakır kayıpları azaltılırken, verim artışı sağlanabilmektedir [3]. Bu yöntemde her i_d ve i_q akım genliği için maksimum moment elde edecek şekilde taramalar gerçekleştirilerek, optimum MTPA noktaları tespit edilir. Bu noktaların tespitinde hassasiyeti yüksek moment verilerinin kullanılması, daha kararlı bir sistemin elde edilmesini sağlar. Bu deneysel veriler, verilen her akım genliği için maksimum moment noktası bulunana kadar hem motor, hem de generatör bölgesinde elde edilmelidir [3] [5] [7].

Motorun nominal hızın üzerinde çalışabilmesi için d eksen akımı zayıflatılmalı ya da negatif akım uygulanmalıdır. Statora verilen toplam akımın maksimum bir değeri olduğu için artan I_d akımına karşılık I_q akımı azalır. Bunun neticesinde de moment değeri azalır.

Şekil 2’de de görülebileceği gibi hızı nominal değerın üstünde arttırmak için I_d akımının mutlak değeri artmalıdır. Şekilde I_d akımının daha yüksek olduğu noktada olan ω_3 hızı, en yüksektir. Buna karşın en düşük moment değerine de ω_3 noktası sahiptir [2].

$$(\omega_1 < \omega_2 < \omega_3)$$



Şekil 2. Akım ve gerilim limitleri

MTPA noktaları elde edilirken bir diğer önemli nokta ise sınır koşullarının belirlenmesidir. Minimum stator akımı moment denkleminde şu şekilde elde edilir:

$$i_{smax}^2 = i_d^2 + i_q^2 \quad (5)$$

Denklem 3’de verilen moment denklemi i_d cinsinden yazıldığında

$$T_e = \frac{3}{2} p \left[\lambda_f \sqrt{i_{smax}^2 - i_d^2} + (L_d - L_q) i_d \sqrt{i_{smax}^2 - i_d^2} \right] \quad (6)$$

ifadesi elde edilir.

Minimum i_d akımını bulmak için denklem 6'nın i_d akımına göre türevi alınırsa

$$\frac{dT_e}{di_d} = \frac{3}{2} p \frac{-id\lambda_f + (L_d - L_q)(i_{smax}^2 - 2i_d^2)}{\sqrt{i_{smax}^2 - i_d^2}} \quad (7)$$

olarak yazılır. Buradan minimum i_d akımı,

$$i_d = \frac{-\lambda_f + \sqrt{\lambda_f^2 + 4(L_d - L_q)^2 i_{smax}^2}}{2(L_d - L_q)} \quad (8)$$

şeklinde bulunur.

Denklem 8 birim başına değer olarak ifade edilirse,

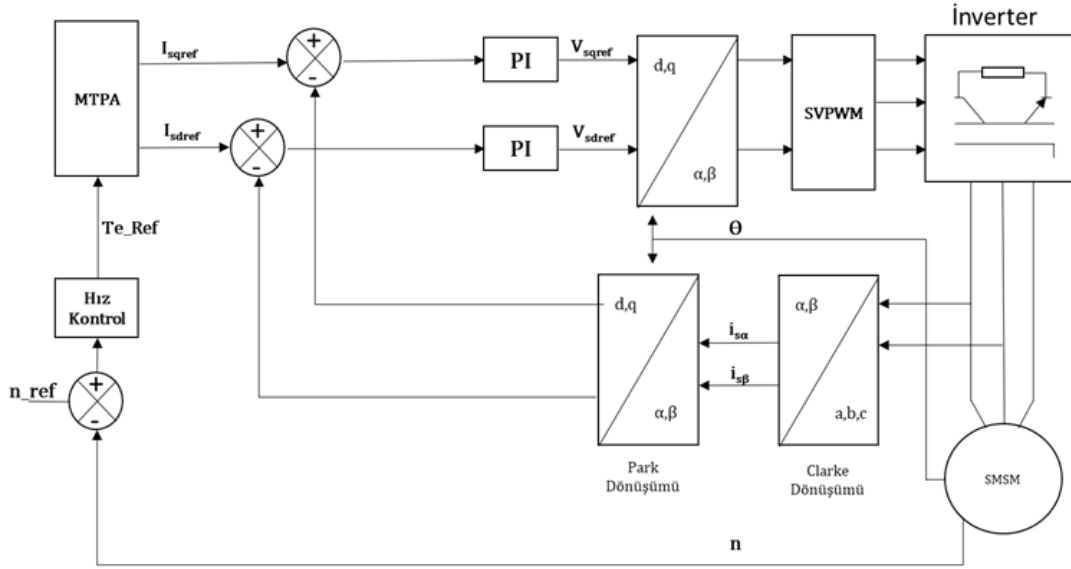
$$i_d^* = \frac{1 - \sqrt{1 + 4i_q^{*2}}}{2} \quad (9)$$

şeklinde yazılabilir.

Elektromanyetik moment i_d^* ve i_q^* akımları cinsinden şu şekilde yazılır:

$$\begin{cases} T_e^* = 1.5\sqrt{-i_d^*(1 - i_d^*)^3} \\ T_e^* = 0.75i_q^*[1 + \sqrt{1 + 4i_q^{*2}}] \end{cases} \quad (10)$$

SMSM'nin MTPA yöntemi ile kontrolüne ait kontrol blok diyagramı Şekil 3'te verilmiştir. Bu kontrol modelinin çalışması şu şekilde açıklanabilir: Verilen hız referans değeri (n_{ref}), hız kontrol bloğu tarafından moment referans (T_e_{Ref}) değerine ve daha sonra MTPA bloğunda stator d ve q akım bileşeni (i_{sdref} , i_{sqref}) değerine dönüştürülür. Stator faz akımları ile rotor konumu, gerilim ve pozisyon sensörlerinden elde edilir. Elde edilen pozisyon ve akım bilgisi ile Clarke ve Park matematiksel dönüşümleri gerçekleştirilir. i_A , i_B , i_C akımlarından yapılan dönüşümlerle dönen referans düzlemine bağlı d ve q eksen akımları elde edilir. i_d ve i_q bileşenleri i_{sdref} (akı referansı) ve i_{sqref} (moment referansı) akım değerleriyle karşılaştırılarak hata sinyalleri elde edilir.

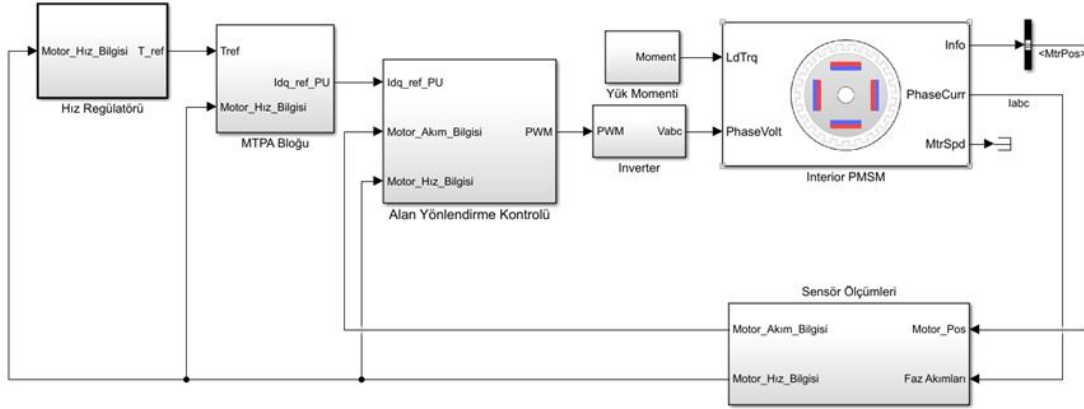


Şekil 3. MTPA stratejisi ile SMSM kontrol sistemi

PI denetleyicilerle hata düşürülecek şekilde V_{sqref} ve V_{sdref} değerleri üretilir. Ters Park veya Clarke Dönüşümleri kullanılarak elde edilen gerilim referansları ile gerilim vektör bloğunda uygun gerilim vektörleri oluşturulur. Oluşturulan gerilim vektörlerine uygun anahtarlama kombinasyonlarıyla, motorun stator sargılarına gerilim uygulanır.

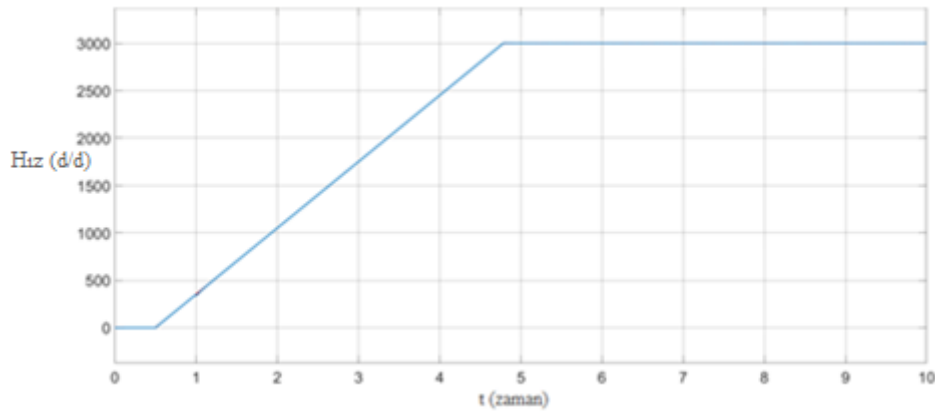
4.2. MTPA Stratejisi İle Alan Yönlendirme Kontrolü

Bu çalışmada SMSM'nin daha verimli kontrol edilebilmesi için, MTPA stratejisi ile alan yönlendirme kontrol modeli geliştirilmiş ve MATLAB Simulink ortamında bu modelin simülasyonu yapılmıştır. Oluşturulan Simulink modelinde bulunan motor bloğuna, Motor-CAD tasarım programından elde edilen parametreler girilmiş, bu değerler kullanılarak model çalıştırılmış ve sonuçlar elde edilmiştir. MTPA stratejisinde i_d ve i_q referans akımları, MTPA bloğundan elde edilerek alan yönlendirme kontrolü gerçekleştirilmiştir. MTPA yöntemi ile alan yönlendirme kontrol modeline ait simülasyon blok şeması Şekil 4'te verilmiştir.

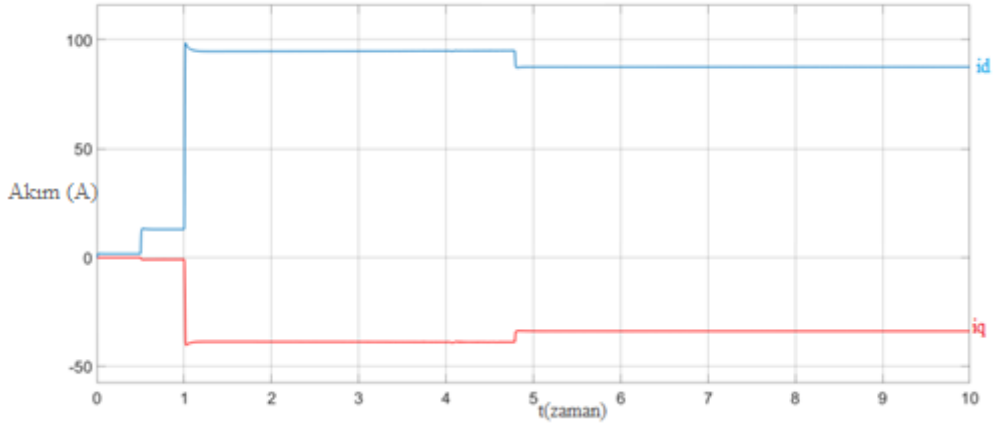


Şekil 4. MTPA yöntemi ile alan yönlendirme Matlab Simulink kontrol modeli

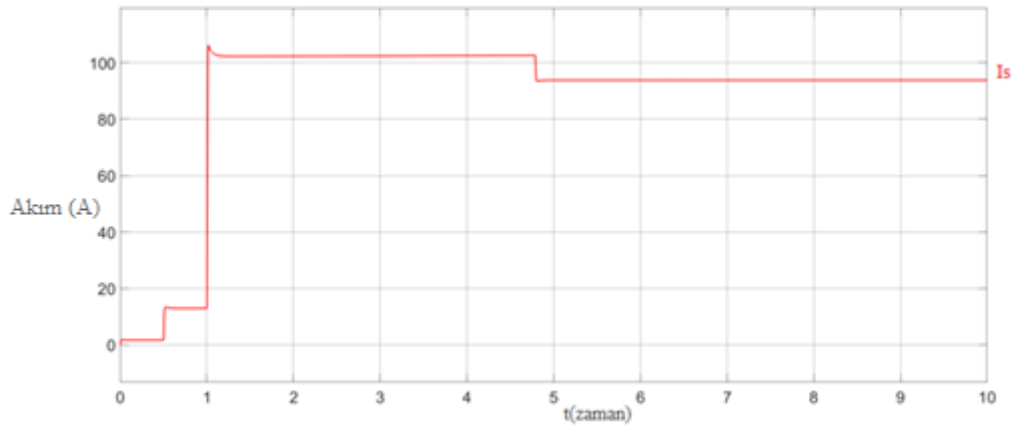
Moment yük değeri 60 Nm ve motor 3000 d/d referans hız değerinde MTPA kontrolünde çalıştırıldığında, motorun hız eğrisi Şekil 5’de verildiği gibi elde edilmiştir. Motorun stator akımları i_d ve i_q ise Şekil 6’da verilmiştir. Şekil 6’da görüldüğü gibi, relüktans momentinden de yararlanılabilmesi için sistem negatif i_d referans akımı üretmiştir. Aynı hız ve yük momentinde toplam akımın görülebilmesi için de Şekil 7’de verilen i_s toplam akımı değişimi elde edilmiştir. Kontrolün moment yüküne cevabı Şekil 8’de verilmiştir.



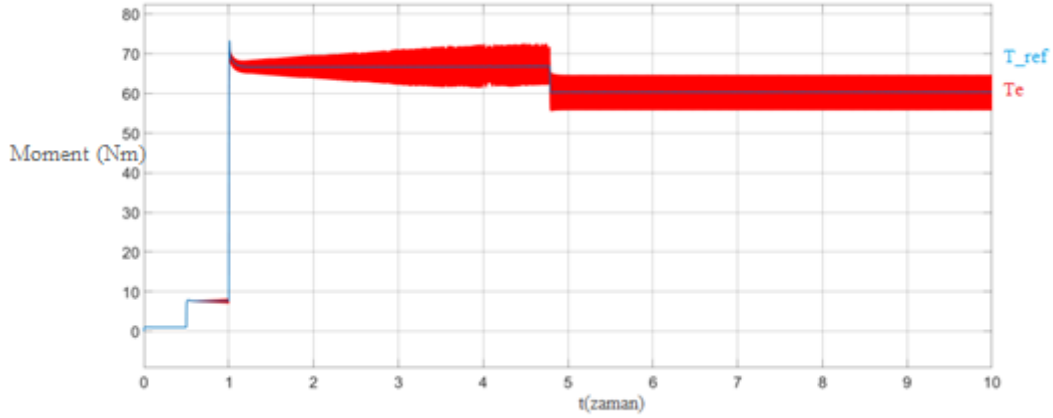
Şekil 5. MTPA stratejisi ile alan yönlendirme kontrolünde SMSM’nin hız değişimi



Şekil 6. MTPA stratejisi ile alan yönlendirme kontrolünde SMSM'nin d ve q eksen akımları



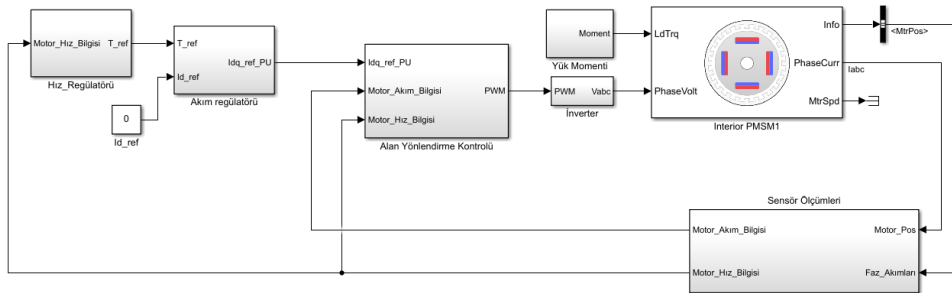
Şekil 7. MTPA stratejisi ile alan yönlendirme kontrolünde SMSM'nin toplam akımı



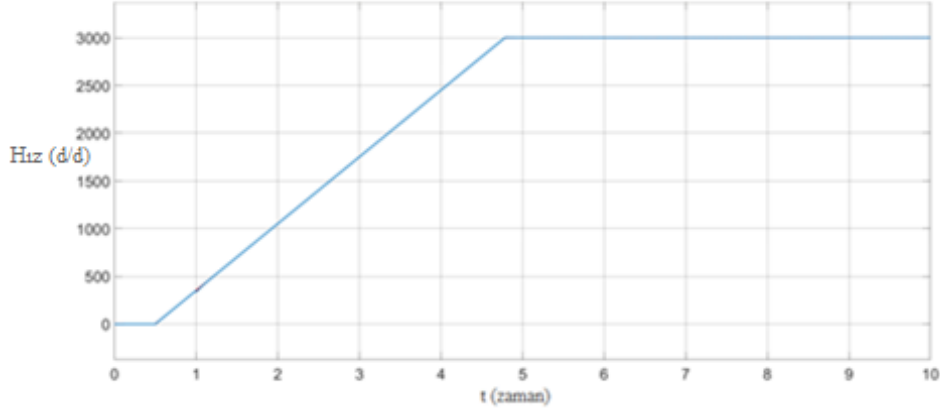
Şekil 8. MTPA stratejisi ile alan yönlendirme kontrolü SMSM'nin moment değişimi

4.3. Geleneksel Alan Yönlendirme Kontrolü

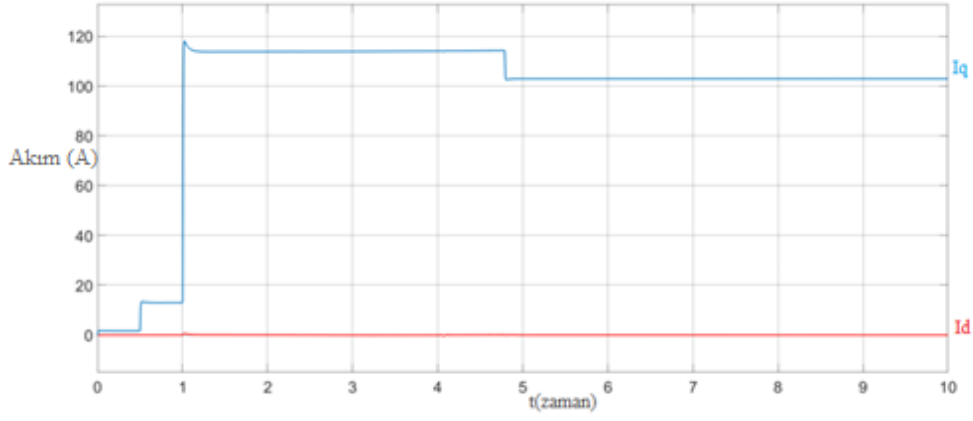
MTPA stratejisi ile alan yönlendirme kontrolünün sonuçlarının daha iyi değerlendirilebilmesi için, aynı motor modeli ve aynı şartlar için Şekil 9'da verilen geleneksel alan yönlendirme kontrol sistemi oluşturulmuş ve sonuçlar alınmıştır. Hız ve moment eğrileri için, Şekil 10-Şekil 13 arasında verilen grafiklerden de görüleceği gibi, MTPA stratejisi ile alan yönlendirme kontrolünün yapıldığı sistemden elde edilen sonuçlar ile, bu kontrol sisteminden elde edilen sonuçlar birbirine çok benzerdir. Ancak geleneksel alan yönlendirme kontrolünde, Şekil 11'den de görüleceği gibi, i_d referans akımı değerini 0 olarak kontrol gerçekleştirilmiş ve dolayısıyla i_q akımında artış gözlemlenmiştir. Şekil 12'de görüldüğü gibi, sistemde relüktans momentinden faydalanılmamış ve motorun aynı momenti sağlayabilmesi için çekilen toplam akım artmıştır.



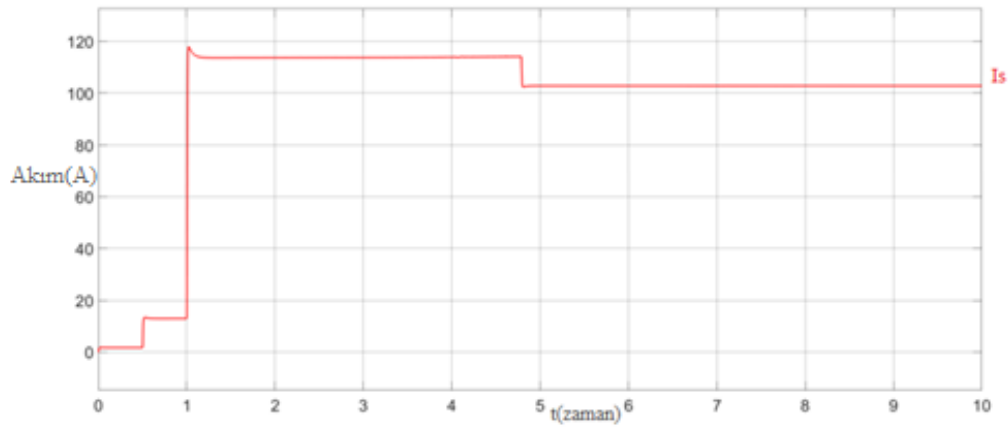
Şekil 9. Geleneksel alan yönlendirme Matlab Simulink kontrol modeli



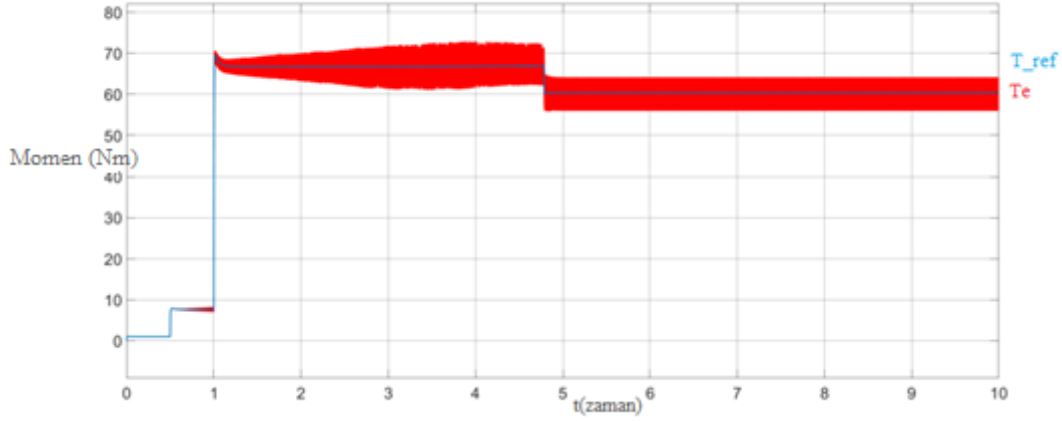
Şekil 10. Geleneksel alan yönlendirme kontrolünde SMSM'nin hız değişimi



Şekil 11. Geleneksel alan yönlendirme kontrolünde SMSM'nin d ve q eksen akımları



Şekil 12. Geleneksel alan yönlendirme kontrolünde SMSM'nin toplam akımı



Şekil 13. Geleneksel alan yönlendirme kontrolünde SMSM'nin moment değişimi

Yukarıda sonuçları verilen her iki kontrol yöntemi incelendiğinde, toplam stator akım değerlerinin birbirinden farklı olduğu görülmektedir. Aynı moment değeri için, MTPA kontrol yöntemi, geleneksel alan yönlendirme kontrolüne göre %8.7 daha az stator akımı çekmiştir.

$$n = \frac{P_{Çıktı\ş}}{P_{Giri\ş}} \quad (11)$$

$$P_{Çıktı\ş} = \omega_r \cdot T_e \quad (12)$$

$$P_{Giri\ş} = \frac{3}{2}(V_d \cdot I_d + V_q \cdot I_q) \quad (13)$$

Aynı moment ($T_e = 60Nm$) ve hız ($\omega_r = 315rad/sn$) referansında, bu iki kontrol yönteminin kararlı hal durumundaki akım ve gerilim değerlerine göre ayrı ayrı verim hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Simülasyon çalışmasından, geleneksel alan yönlendirme kontrolünde $V_q = 127.32V$, $I_q = 102.8A$, $I_d = 0A$; MTPA kontrolünde ise $V_q = 109.3V$, $I_q = 87.5A$, $V_d = 93.75V$, $I_d = 33.8A$ değerleri elde edilmiş, daha sonra bu değerler Denklem 11-13'te kullanılarak verim hesabı yapılmıştır. Hesaplamaların sonucunda verim, geleneksel alan yönlendirme kontrolünde %96.2, MTPA kontrol yönteminde de %98.9 olarak elde edilmiştir. Sonuçlardan da görüleceği gibi MTPA kontrol yöntemi ile verimde %2.8 artış elde edilmiştir.

5. Sonuçlar

Elektrikli araç uygulamalarında kontrol sisteminden, geniş bir aralıkta motor hız kontrolüne yanıt verebilmesi, moment dalgalanmalarını minimum seviyede tutması ve sistemin yüksek verimle çalışması beklenmektedir. SMSM'nin maksimum verimliliği, manyetik moment akımı ile relüktans moment akımı arasındaki akım vektörü oranının doğru seçilmesiyle elde edilebilir. Pozitif relüktans momenti elde etmek için i_d akımı negatif bir değer olmalıdır. Dolayısıyla $i_d=0$ olarak kontrol sağlanan geleneksel alan yönlendirme kontrolünde maksimum momente ulaşamaz. Bu çalışmada kontrol gereksinimlerinin sağlanabilmesi için MTPA stratejisi ile alan yönlendirme kontrolü tercih edilmiştir. Bu alışmada MTPA kontrol modeli kullanılarak motorun üretebileceği maksimum momentin, geleneksel alan yönlendirme kontrolünden fazla olduğu sonucu elde edilmiştir. Aynı momenti karşılayacak akım düştüğü için, kayıplar da azalmıştır. Yapılan çalışmayla elektrikli araçların enerji verimi %2.8 arttırılmış ve bunun sonucunda da menzil mesafesi de aynı şekilde %2.8 uzatılabilmektedir. MTPA kontrol yönteminin başarısı motor parametrelerinin doğru elde edilmesine bağlıdır. MTPA yöntemi ile uygulanacak referans akımları bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilmiştir. Anlık gerçekleştirilen hesaplamalar sonucunda ortaya çıkan referans akımları ile kontrol sağlanmıştır. İleriki çalışmalarda, maksimum moment noktalarındaki akım parametrelerinin hesaplama süresi eğrinin fonksiyonun elde edilmesi ile daha da kısaltılabilir.

Kaynaklar

- [1] Anh H.P.H., Kien C.V., Huan T.T., Khanh P.Q., Advanced Speed Control of PMSM Motor Using Neural FOC Method, In: 4th International Conference on Green Technology and Sustainable Development, 2018, Ho Chi Minh City.
- [2] Giri F., AC Electric Motors Control: Advanced Design Techniques and Applications, Wiley, (2013).
- [3] Jina N., Wangb X., Gaoc H., Liud J., Sliding Mode Based Speed Regulating of PMSM MTPA Control System for Electrical Vehicles, In: International Conference

- on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology, 2011, Harbin.
- [4] Korkmaz F., Topaloğlu İ., Çakır M.F., Gürbüz R., Comparative Performance Evaluation of FOC and DTC Controlled PMSM Drives, In: 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, 2013, İstanbul.
- [5] Li H., Qian Y., Asgarpoor S., Bradley J., PMSM Current Management with Overcurrent Regulation, In: IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2019, Anaheim.
- [6] Özpıneci B., Oak Ridge National Laboratory Annual Progress Report for the Electric Drive Technologies Program, Oak Ridge National Lab., Oak Ridge, (2015).
- [7] Rabiei A., Thiringer T., Alatalo M., Grunditz E.A., Improved Maximum-Torque-Per-Ampere Algorithm Accounting for Core Saturation, Cross-Coupling Effect, and Temperature for a PMSM Intended for Vehicular Applications, IEEE Transactions on Transportation Electrification, Vol. 2, No. 2, pp. 150-159, (2016).
- [8] Ren W., Wu Y., Du R., A Vector Control System of PMSM with the Assistance of Fuzzy PID Controller, In: Chinese Control Conference, 2020, Shenyang.
- [9] Torrent M., Perat J.I., Jiménez J.A., Permanent Magnet Synchronous Motor with Different Rotor Structures for Traction Motor in High Speed Trains, Energies, Vol. 11, No. 1549, pp. 1-17, (2018).
- [10] Yang S., Liu K., Hu Y., Chu L., Chen S., Efficiency Optimization Control of IPMSM Considering Varying Machine Parameters, In: IEEE Student Conference on Electric Machines and Systems, 2018, Huzhou.
- [11] Zhu Z.Q., Chan C.C., Electrical Machine Topologies and Technologies for Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles, In: IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008, Harbin.