

Doğrusal hareketli sürekli mıknatıslı senkron motorlarda h_{pm} parametresinin motorun denetim başarımına etkisi

*Özcan OTKUN¹ ve A. Sefa AKPINAR²

¹ Gümüşhane Üniversitesi, Bilgisayar Teknolojileri Bölümü

² Karadeniz Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü

ÖZET

Anahtar Kelimeler:
DHSMMSM,
Sürekli
mıknatıslı, Motor
denetim
başarımı, Vektör
kontrol,
Matlab/Simulink

Bu çalışma, Doğrusal Hareketli Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun (DHSMMSM) denetim başarımını arttırmak için gerçekleştirilmiştir. Matlab/Simulink yazılımında motor modeli benzetimi yapılmış ve bir parametrenin motor denetimine etkisi incelenmiştir. Motorun denetim başarımı için, sürekli mıknatıslı parametresi olan h_{pm} (Sürekli mıknatıslı kalınlığı) 7 farklı değerde test edilmiştir. Bu değerler için, motor denetiminden elde edilen sonuçlar (itme kuvveti, motor akımı ve hız grafikleri) verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, bu parametredeki değişimin motor denetim başarımını olumlu yönde etkilediği görülmüştür.

The effects of motor control performance of h_{pm} parameter in the linear permanent magnet synchronous motors

ABSTRACT

Key Words:
LPMSM,
Permanent
magnet, Motor
control
performance,
Vector control,
Matlab/Simulink

This study was carried out to improve the control performance of Linear Permanent Magnet Synchronous Motor (LPMSM). The motor model simulation was carried out in Matlab / Simulink software and the effect of one parameter on motor control were examined. For the motor control performance, The permanent magnet parameter h_{pm} (thickness of the permanent magnet) were tested in 7 different values. For these values, the results (thrust force, motor current and speed graphs) obtained from the motor control are given. According to the obtained results, changes in this parameter has a positive influence on motor control performance.

1. Giriş

Teknolojik gelişmelere bağlı olarak doğrusal hareket önemini giderek arttırmaktadır. Doğrusal Hareketli Motorların (DHM) tarihi 19. yy sonlarına kadar dayanmaktadır. Bu motorlar daha sonraki 30–40 yıl boyunca pratikte kullanılmamış ancak DHM konusunda çeşitli araştırmalar yapılmıştır [1], [2]. 1960'lı yıllardan sonra DHM'lerin uygulamaları hızla gelişmiş ve çok hızlı trenlerin sürülmesinden, manyetik yastıklara kadar pek çok sayıda uygulama alanı bulmuştur. Araştırmacıların bu alandaki çalışmalarına bakıldığında 1960-2000 yılları arasında genellikle tasarım çalışmalarının yapıldığı, 2000'li yıllardan sonra ise hem tasarım hem de denetim çalışmalarının arttığı görülmektedir [2], [3].

Taşıma ve otomasyon sistemlerinde, yüksek itme kuvveti ve yüksek güç yoğunluğuna sahip olan sürekli mıknatıslı senkron motorların (SMSM) tercih edildiği görülmektedir [4], [5]. SMSM'lerde akı kaybının olmaması ve motor tasarımında üreticilere esneklik sağlaması başlıca tercih nedenleri olarak görülmektedir [6]. Özellikle, çok kutuplu olarak düşünülen senkron motor tasarımları, sargılı tiplere göre daha küçük boyutlu ve yüksek verimli olarak tasarlanmışlardır. [7], [8].

Motor denetim başarımının önemli olduğu taşıma ve otomasyon sistemlerinde, yapısal tasarımın katkısı oldukça önemlidir. Motor tasarımında sürekli mıknatısların yerleşimi ve boyutları motorun itme kuvveti ve hız denetimi açısından büyük önem taşımaktadır [3]. DHSMSM'ler yapılan çalışmaya göre farklı yapılarla tasarlanırlar. Bu anlamda düşük hızlı uygulamalarda yüzeysel mıknatıslı tasarımlar, yüksek hızlı uygulamalarda gömülü mıknatıslı tasarımlar tercih edilmektedir [9], [10].

Bu çalışma, düşük hızlı uygulamalarda kullanılan DHSMSM'lerin denetim başarımını arttırmak için gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada motorda kullanılan sürekli mıknatıs parametrelerinden biri olan h_{pm} değeri değiştirilmiş ve bu durumun motor denetim başarımına etkisi incelenmiştir. Öncelikle DHSMSM hakkında bilinen matematiksel ifadeler yer verilmiş ve Matlab/Simulink ortamında motor modeli benzetimi yapılmıştır. Ardından sürekli mıknatıs parametresi h_{pm} ile ilgili çalışmanın yöntemi açıklanmıştır.

Bu çalışma, düşük hızlı uygulamalarda kullanılan DHSMSM'lerin denetim başarımını arttırmak için gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada motorda kullanılan sürekli mıknatıs parametrelerinden biri olan h_{pm} değeri değiştirilmiş ve bu durumun motor denetim başarımına etkisi incelenmiştir. Öncelikle DHSMSM hakkında bilinen matematiksel ifadeler yer verilmiş ve Matlab/Simulink ortamında motor modeli benzetimi yapılmıştır. Ardından sürekli mıknatıs parametresi h_{pm} ile ilgili çalışmanın yöntemi açıklanmıştır.

2. Materyal ve yöntem

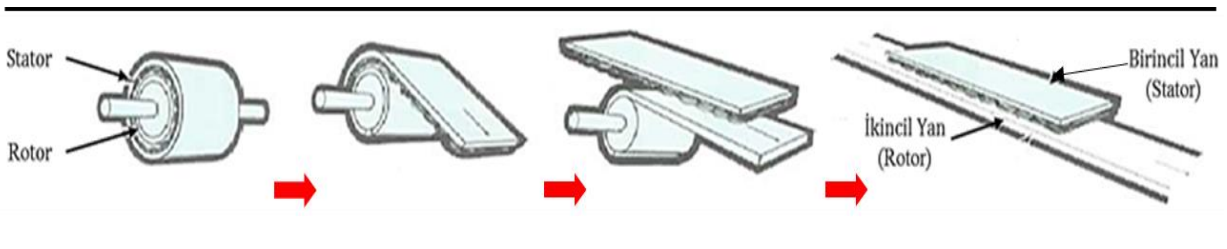
DHM'lerin yapısı klasik döner hareketli motor yapısının kesilip açılmasıyla oluşturulduğu düşünülebilir. Döner hareketli motoru oluşturan stator (dıştaki sabit kısım) ve rotor (içteki dönen kısım) dairesel şekilde iç içe oldukları için statordaki sargılar yardımıyla oluşturulan döner alan ile dönme hareketi gerçekleştirir. DHM'lerde ise statora karşılık gelen Birincil Yan, rotora karşılık gelen İkincil Yan, üst üste oldukları için Birincil Yanda bulunan sargılar tarafından meydana gelen yürüyen alan yardımıyla doğrusal bir hareket gerçekleşmiş olur [11].

Şekil 1 de DÖHM'den elde edilen DHM gösterilmektedir [12]. Burada verilen modelin birincil yanında üç fazlı sargılar, ikincil yanında sürekli mıknatıslar bulunmaktadır.

Motorun davranışını, geçici ve kararlı rejimde temsil eden matematiksel model, hesaplama kolaylığı açısından uzay vektörleri kullanılarak tanımlanmaktadır. Üç fazlı alternatif akım motorlarında yüksek başarım sürücü geliştirmek için faz düzlemleri arasında dönüşüm gerçekleştirilir. Faz dönüşümleri kullanılarak motorun dinamik eşitliklerinin çözümü daha hızlı ve kolay olmaktadır [13]. Faz dönüşüm işlemleri;

- $ABC \rightarrow Clark \rightarrow \alpha\beta \rightarrow Park \rightarrow dq$
- $dq \rightarrow TersPark \rightarrow \alpha\beta \rightarrow TersClark \rightarrow ABC$

şeklinde gerçekleştirilir. Bu duruma göre $ABC \rightarrow dq$ eksen sisteminin matematiksel ifadesi aşağıdaki denklemde görülmektedir.



Şekil 1. Doğrusal hareketli motorun yapısı

$$\begin{bmatrix} S_d \\ S_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin(\theta) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_A \\ S_B \\ S_C \end{bmatrix} \quad (1)$$

Aynı şekilde $dq \rightarrow ABC$ eksen sisteminin matematiksel ifadesi de aşağıdaki denklemde gösterilmektedir.

$$\begin{bmatrix} S_A \\ S_B \\ S_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_d \\ S_q \end{bmatrix} \quad (2)$$

Burada S vektörel olarak birincil yan akım, gerilim ve manyetik akı'yı ifade etmektedir. DHM'ler yapı olarak değilse bile, çalışma ilkesi olarak döner hareketli motorlara benzemektedir. Bu nedenle matematiksel ifadeleri ve kontrol yöntemleri benzer kabul edilmektedir. Üç fazlı senkron motorların kontrol algoritmaları oluşturulurken genellikle d - q eksen sistemi modeli kullanılır [14].

d - q eksen sisteminde gerilim denklemleri:

$$u_d = Ri_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega\psi_q \quad (3)$$

$$u_q = Ri_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega\psi_d \quad (4)$$

Burada, u_d ve u_q birincil yan gerilimlerini, i_d ve i_q birincil yan akımlarını, R birincil yan sargı direncini göstermektedir. ω açısal hızı göstermektedir.

$$\omega = 2\pi f = v \frac{\pi}{\tau} \quad (5)$$

Burada, τ kutup adımı, v doğrusal hızı göstermektedir. Doğrusal hız:

$$v = 2f\tau \quad (6)$$

d - q eksenlerindeki akı denklemleri:

$$\psi_d = L_d i_d + \psi_{SM} \quad (7)$$

$$\psi_q = L_q i_q \quad (8)$$

Burada, L_d ve L_q birincil yan sargı indüktanslarını ve ψ_{SM} sürekli mıknatıs akısını göstermektedir. Üç fazlı birincil yan sargılarının anlık güç girişi [15]:

$$P = u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C = \frac{3}{2} (u_d i_d + u_q i_q) \quad (9)$$

Motora ait üç fazlı elektromanyetik güç:

$$P_{el} = \frac{3}{2} \omega (\psi_d i_q - \psi_q i_d) = \frac{3}{2} \omega [\psi_{SM} + (L_d - L_q) i_d] i_q \quad (10)$$

(10)

Buradan denklem 17 de DHSMSM'nin elektromanyetik itme kuvveti elde edilir.

$$F_{itme} = \frac{3}{2} p \frac{\pi}{\tau} [\psi_{SM} + (L_d - L_q) i_d] i_q \quad (11)$$

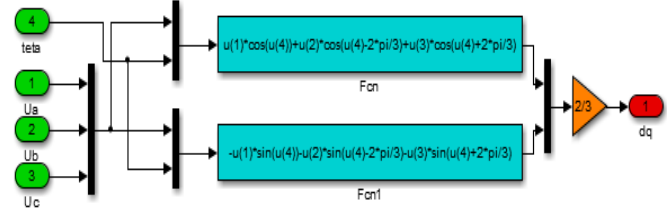
DHSMSM'nin mekanik itme denklemi:

$$F_{itme} = F_h + Bv + M \frac{dv}{dt} \quad (12)$$

Burada, F_h harici (dış) kuvvet, B sürtünme kuvveti, M motorun ağırlığıdır.

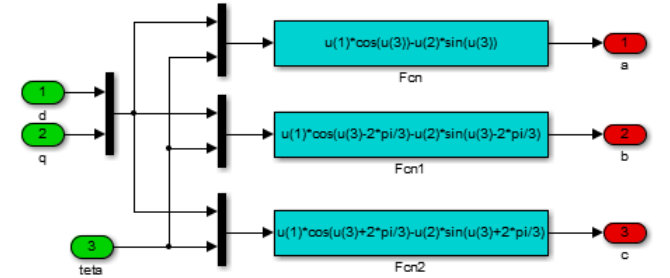
2.1. Yapılan simülasyon çalışmaları

Bu çalışmanın benzetim modeli Matlab/Simulink yazılımında gerçekleştirilmiştir. İlk olarak $ABC \rightarrow dq$ ve eksen dönüşüm sistemi modellenmiş ve Şekil 2 de gösterilmiştir.



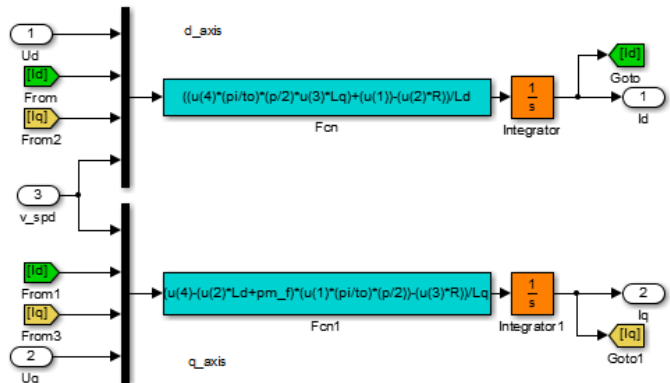
Şekil 2. ABC - dq benzetim modeli

Aynı şekilde $dq \rightarrow ABC$ eksen dönüşüm sistemi modellenmiş ve Şekil 3 de gösterilmiştir.



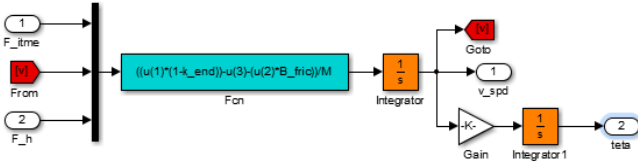
Şekil 3. dq - ABC benzetim modeli

d - q eksen sisteminde gerilim denklemleri kullanılarak motorun elektriksel devre modeli benzetimi yapılmıştır. Şekil 4 de bu model gösterilmektedir.



Şekil 4. Gerilim denklemlerinin benzetimi

Ayrıca motorun mekanik itme denklemi modeli benzetimi Şekil 5 deki gibi yapılmıştır.

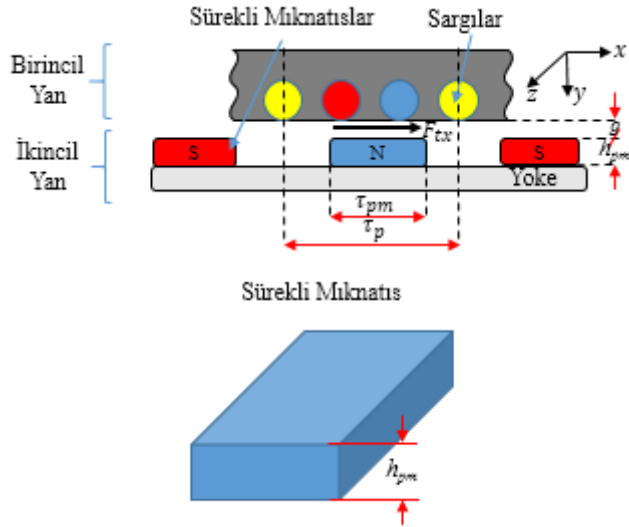


Şekil 5. Mekanik itme kuvveti denkleminin benzetimi

Dikkat edilirse verilen denklemlerden sadece motorun elektromanyetik itme denklem modeli benzetimi kalmıştır. Ancak burada denklem 11 kullanılırsa sürekli mıknats parametrelerinden h_{pm} nin motor denetim başarımını nasıl etkilediğini anlamak zor olacaktır. Dolayısıyla bu çalışmanın yöntemi olan ve h_{pm} nin etkilerini inceleyebileceğimiz başka bir denleme ihtiyaç duyulmaktadır. Aşağıda bu durum detaylı olarak belirtilmiştir.

2.2. İtme kuvveti denklemi ve h_{pm} parametresi

Birincil yanda sargılar yürüyen alan oluşturacak şekilde 120 derece faz farkı ile yerleştirilirler. Literatürde, bir faza ait sargılar arasındaki mesafeye kutup adımı denilmektedir. İkincil yan üzerinde sürekli mıknatslar bulunmaktadır. Burada, sürekli mıknatslar kutup adımının altında konumlandırılır. Şekil 6 da bu durum gösterilmiştir.



Şekil 6. Yüzeysel mıknatıslı DHSM modeli

Burada DHSM'sM'nin elektromanyetik itme kuvveti, alan dağılımı bazında doğrudan hesaplanabilir [16], [17]. Şekil 6 da tek yanlı DHSM'sM'nin, mıknatsları yüzeysel yerleştirilmiş iki boyutlu elektromanyetik alan analizi görülmektedir. Elektromanyetik itme kuvveti temel harmonik için Lorentz denklemi bazında bulunabilir [18].

$$F_{tx} = \frac{4}{\pi} p \tau_p L B_r A_m \sin\left(\frac{\alpha\pi}{2}\right) \frac{\tanh \beta h_{pm}}{\mu_{rec} \sinh \beta g + \tanh \beta h_{pm} \cosh \beta g} \quad (13)$$

Burada,

$$A_m = \frac{m\sqrt{2}Nk_w I_s}{p\pi} \quad (14)$$

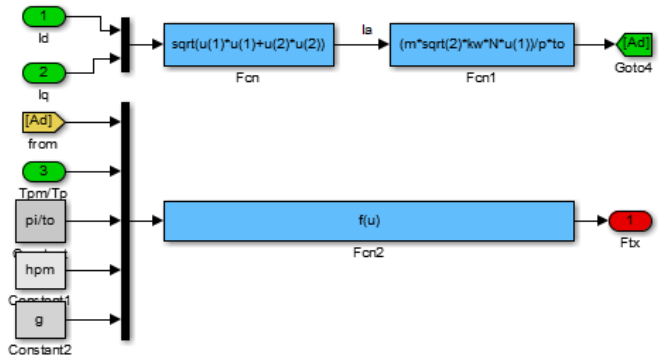
ve

$$\beta = \frac{\pi}{\tau_p} \quad (15)$$

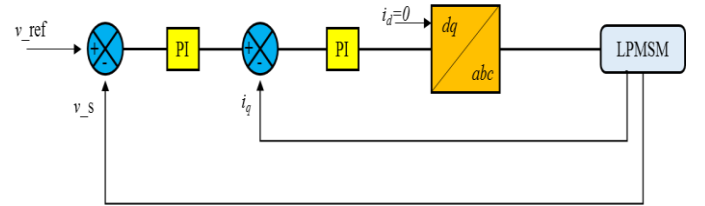
ve

$$\alpha = \frac{\tau_{pm}}{\tau_p} \quad (16)$$

Denklem 13 dikkate alınarak h_{pm} parametresindeki değişimin motor denetim başarımına etkisi incelenebilir. Bu denklemde h_{pm} parametresindeki değişim elektromanyetik itme kuvvetini etkileyecektir. Dolayısıyla motorun denetim başarımında incelenmiş olacaktır. Şekil 7 de 13 numaralı denklem modeli benzetimi yapılmıştır.

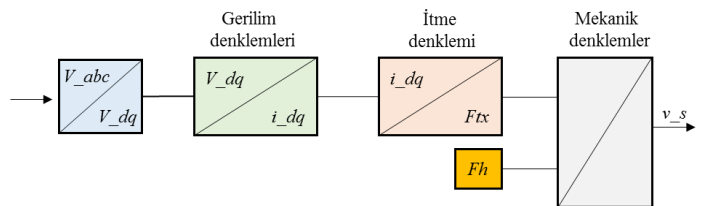
Şekil 7. 13 numaralı denklem modeli (F_{tx}) benzetimi

Bu motorlarda uyartım, ikincil yanda bulunan sürekli mıknatslar ile temin edilmektedir. İkincil yan manyetik alanını meydana getiren bileşen i_d 'ye ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu nedenle motor denetimi i_q 'ya bağlı vektör kontrol ile gerçekleştirilmiştir [13] [19]. Matlab' da gerçekleştirilen kontrol benzetim modeli blok şeması Şekil 8 de gösterilmiştir.



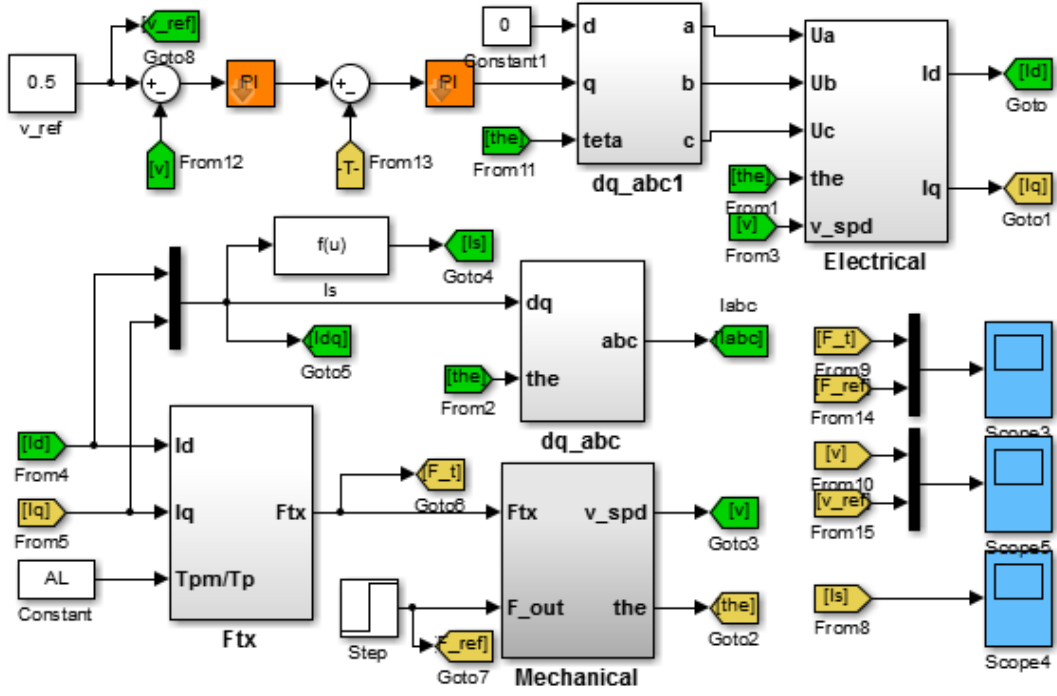
Şekil 8. Matlab' da gerçekleştirilen denetim modeli benzetimi blok şeması

DHSM'sM'ye ait benzetim modeli blok şeması Şekil 9 da verilmiştir.



Şekil 9. DHSM'sM'ye ait benzetim modeli blok şeması

Yapılan bu çalışmalardan sonra Matlab/Simulink yazılımında elde edilen motor modeli benzetimi Şekil 10 daki gibi oluşturulmuştur.



Şekil 10. Yapılan çalışmanın benzetimi

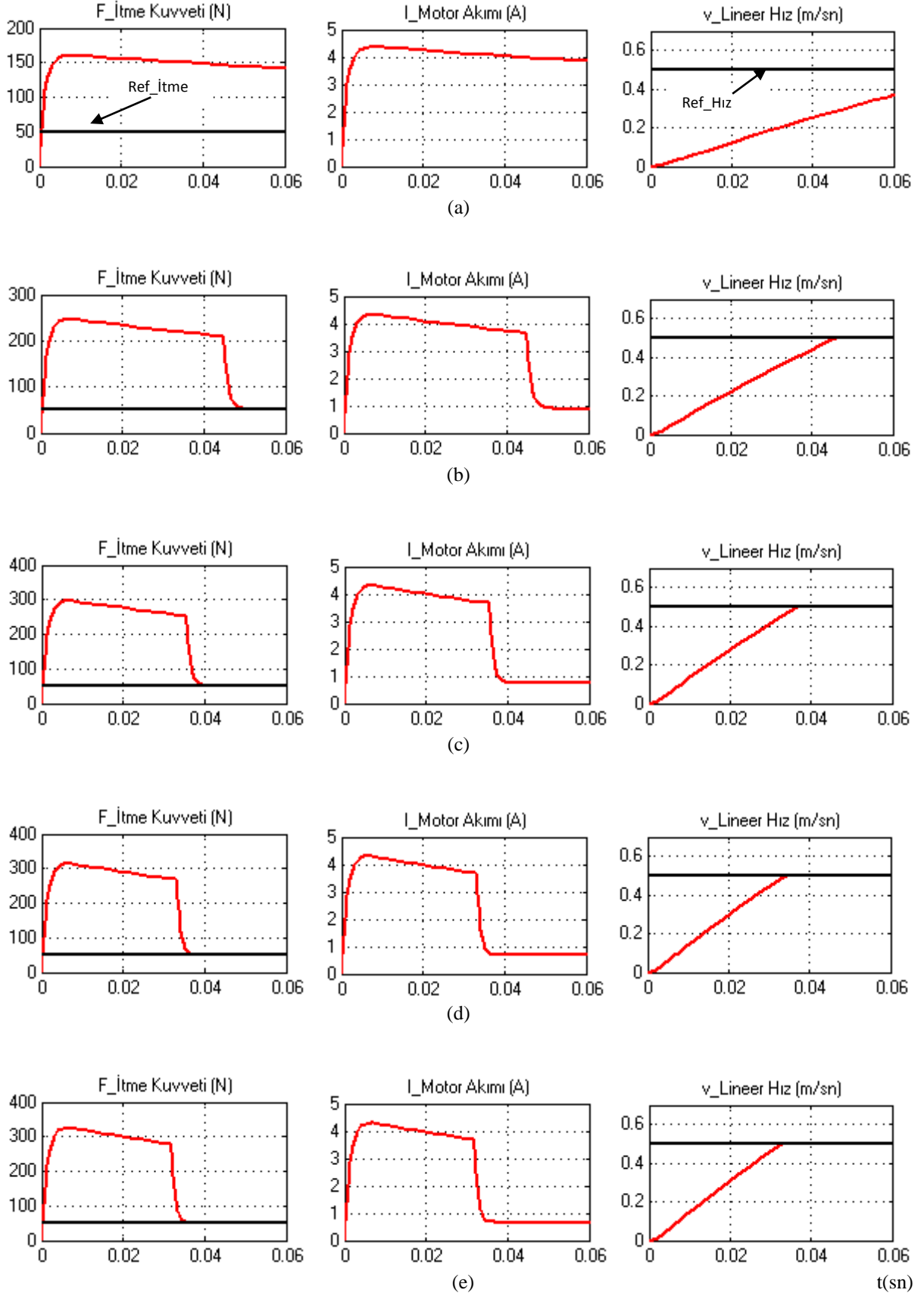
3. Simülasyon sonuçları

Motorun denetiminde elde edilen sonuçlar Tablo 1 de verilen değerlerden elde edilmiştir. Bu çalışmada h_{pm} için 7 farklı değer kullanılmıştır.

Benzetimden elde edilen sonuçlar test sırasına göre Şekil 11 ve Şekil 12 de verilmiştir. Her test için itme kuvveti, motor akımı ve hız grafikleri alt alta verilerek değişimdeki farklılıklar gösterilmeye çalışılmıştır.

Tablo 1. Benzetim testlerinde kullanılan h_{pm} değerleri

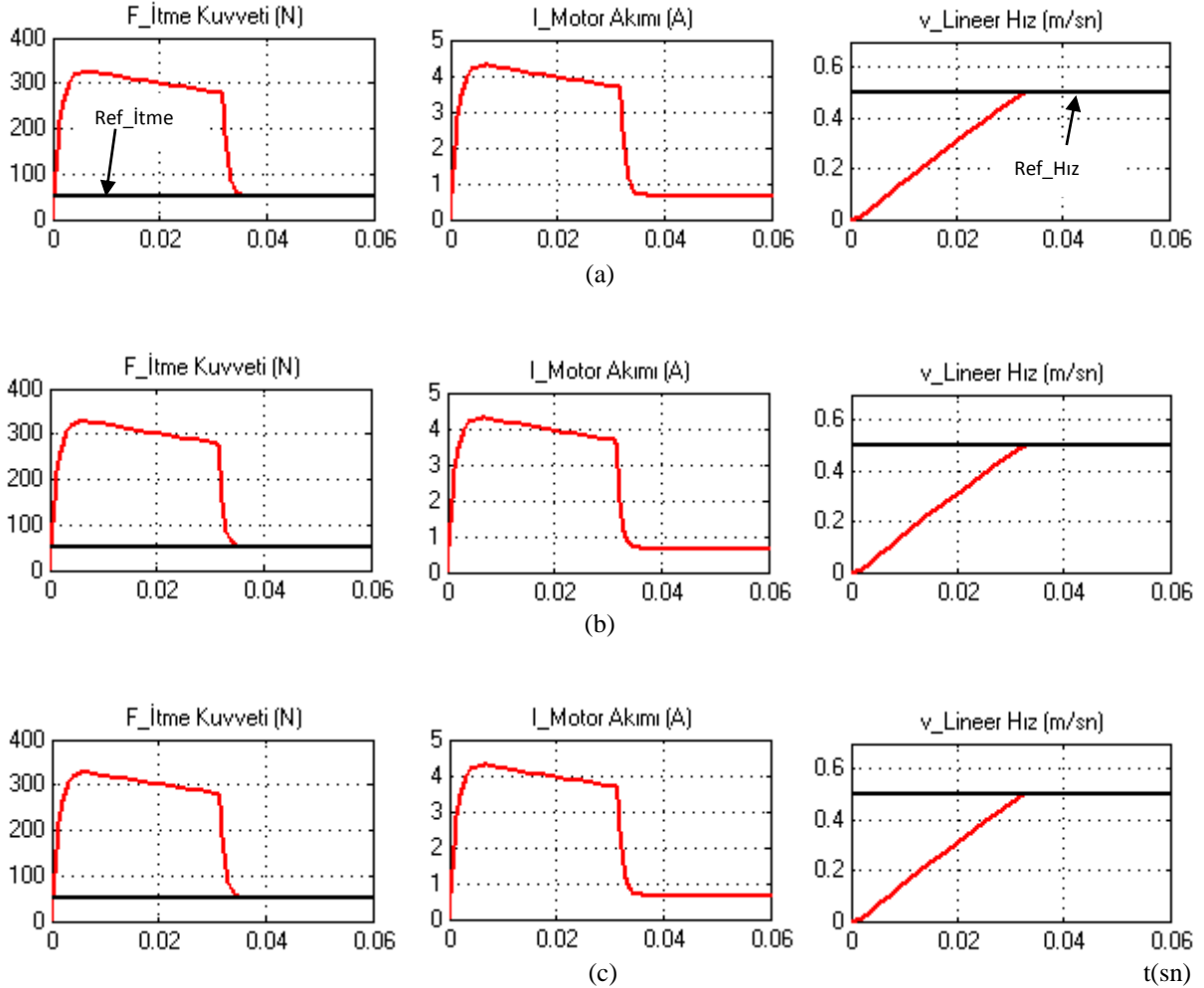
Testler	h_{pm} (mm)	τ_{pm} (mm)	τ_p (mm)
1. Test	2	40	42
2. Test	5	40	42
3. Test	10	40	42
4. Test	15	40	42
5. Test	25	40	42
6. Test	35	40	42
7. Test	70	40	42



Şekil 11. Benzetim sonuçları (a) Birinci test sonuçları, (b) İkinci test sonuçları, (c) Üçüncü test sonuçları, (d) Dördüncü test sonuçları, (e) Beşinci test sonuçları

Şekil 11 deki grafikler incelendiğinde h_{pm} değeri arttıkça motorun kalkış anındaki değerlerinin zamana göre azalmaya başladığı ve motorun denetim başarımının arttığı görülmektedir. Örneğin, Şekil 11 a ve e de bulunan hız denetim grafikleri incelendiğinde a da motor hızı 0.07 sn'de istenen hıza ulaşırken, e deki grafikte 0.03 sn'de istenen hıza ulaşmıştır. Böylece motor hız denetiminde 0.04 sn'lik bir kazanç sağlanmıştır.

Diğer bir ifadeyle motorun referans hıza ulaşmasında birinci teste göre ortalama %50 zaman kazancı sağlanmıştır. Motorun kalkış sırasında ortalama 4 A akım çektiği grafiklerden anlaşılmaktadır. Burada a ve e grafikleri arasında sürekli mıknatis kalınlığı arttıkça motorun bu akımı 0.03 sn kadar daha kısa zaman çektiği görülmektedir. Yani motor kalkış sırasındaki aşırı akıma daha kısa süre maruz kalmaktadır. Aynı zamanda motor itme kuvveti grafikleri incelendiğinde motorun referans itme kuvvetine daha kısa sürede ulaştığı da görülmektedir.



Şekil 12. Benzetim sonuçları (a) Beşinci test sonuçları, (b) Altıncı test sonuçları, (c) Yedinci test sonuçları

Şekil 12 deki grafikler incelendiğinde, h_{pm} parametresinin 25 mm den sonra motorun denetim başarımında kayda değer bir etki göstermediği anlaşılmaktadır. Yani motora ait itme kuvveti, motor akımı ve hız grafiklerinde önemli bir değişikliğin olmadığı görülmektedir.

4. Sonuç ve değerlendirme

Bu çalışmada, h_{pm} değerinin DHSMSM denetim başarımına etkisi incelenmiştir. İkincil yanda bulunan sürekli mıknatis parametresi h_{pm} test değerlerine dikkat edilerek seçildiğinde, motor denetim başarımını arttırdığı gözlenmiştir.

Bu durumun, motorun tasarım maliyetini az da olsa artıracığı düşünülse de, otomasyon sistemlerindeki denetim hassasiyeti düşünüldüğünde ihmal edilebilir olacaktır.

Matlab/Simulink de gerçekleştirilen bu çalışmanın denetim çalışmalarına katkıda bulunacağı söylenebilir. DHSMSM üzerine yapılan çalışmalar, halen birçok ülkede aktif araştırma konusu olduğundan yapılan çalışmanın literatüre katkıda bulunacağı düşünülmektedir. Yapılan çalışma otomasyon sistemleri ve pratik uygulamalar için önerilebilir. Böylece hem akademik hem de endüstriyel alanda önemli katkılar elde edilebilir.

Kaynaklar

- Gürdal, O., "Elektrik Makinalarının Tasarımı", İstanbul: Atlas Yayınları, 2001.
- Salman, M., "Analysis, Design and Control Aspects of Linear Machines Using Co-simulation", Master Thesis, Stockholm, Department of Electrical Energy Conversion, School of Electrical Engineering, Royal Institute of Technology (KTH), 2012, pp. 18-19.
- Li, W., Chau, K. T., "Design and analysis of a novel linear transverse flux permanent magnet motor using HTS magnetic shielding", IEEE Transactions On Applied Superconductivity, cilt 20, no. 3, pp. 1106-1109, 2010.
- Pellegrino, G., Vagati, A., Guglielmi, P. and Boazzo, B., "Performance comparison between surface-mounted and interior PM motor drives for electric vehicle application", IEEE Trans. Ind. Electron, cilt 59, no. 2, pp. 803-811, 2012.
- Dorrell, D. G., Hsieh, M. F., Popescu, M., Evans, L., Staton, D. A. and Grout, V., "A review of the design issues and techniques for radial-flux brushless surface and internal rare-earth permanent magnet motors", IEEE Trans. Ind. Electron, cilt 58, no. 9, pp. 3741-3757, 2011.
- Özçira, S., "Sürekli mıknatıslı senkron motorun kontrol yöntemleri ve endüstriyel uygulamaları", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007.
- Duru, H., Demiröz, R., "Asansör Makinalarında Mıknatıs Uyarmalı Senkron Motor ve Doğrudan Tahrik Sisteminin Kullanımı", 1. EVK Sempozyumu, Kocaeli, 2005.
- Hanselman, D., "Brushless permanent magnet motor design", USA: Magna Physics Pub., 2006.
- Minoru, K., "Application of permanent magnet synchronous motor to driving railway vehicles", RailwayTechnology, Avalanche, cilt 1, no. 1, p. 6, 2003.
- Krishna, D. S. and Rao, C. S., "Speed Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Direct Torque Control Method", International Journal of Advances in Science and Technology, cilt 3, no. 2, 2011.
- Özkop, E., "Doğrusal Hareketli Asenkron Motorun Bulanık Mantıkla Kontrolü", Yüksek Lisans Tezi, Trabzon, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ekim, 2006, pp. 1-2.
- <http://www.crbasic.info/high-tech-trains-automated-railways-metro-lines-light-railways.html>, Railring, 15 Haziran 2013. [Çevrimiçi]. [Erişildi: 10 10 2013].
- Haitham, A., Atif, I., Jaroslaw, G., "High Performance Control of AC Drives With Matlab/Simulink Models", Noida, India: Wiley, 2012.
- Ponomarev, P., "Control of Permanent Magnet Linear Synchronous Motor in Motion Control Applications", Lappeenranta : Department of Electrical Engineering, Faculty of Technology, Lappeenranta University of Technology, Master's thesis, 2009.
- Mosebach, H., "Direct Two-Dimensional Analytical Thrust Calculation of Permanent Magnet Excited Linear Synchronous Machines", 2nd Int. Symp. on Linear Drives for Ind. Applications LDIA '98 pp. 396-399., Tokyo, Japan, 1998.
- Mosebach, H. and Canders, W.R., "Average Thrust of Permanent Magnet Excited by Linear Synchronous Motors for Different Stator Current Waveforms", Int. Conf. on Electr. Machines ICEM'98, vol. 2, pp. 851-865, Istanbul, Turkey, 1998.
- Gireas, J. F., Piech, Z. J., "Linear Synchronous Motors: Transportation and Automation Systems", Boca Raton, London: CRC Press, 2001.
- Fernandes, T. R., "Short Primary Linear Drive Designed for Synchronous and Induction Operation Mode with On-Board Energy Storage", Darmstadt: Technischen Universität, 2012.

Ek

Bu çalışmada motor modeli benzetiminde kullanılan parametreler Tablo 2 de verilmiştir.

Tablo 2. Benzetim modelinde kullanılan parametreler

	Maddeler	Parametreler	Değer
Birincil yan	Kutup sayısı	p	4
	Faz sayısı	m	3
	Bir faza ait sarım sayısı	N	240
	Kutup adımı	τ	42 mm
	Birincil yan uzunluğu	L	42 cm
	Hareketli parçanın ağırlığı	M	15.8 kg
	d-ekseni indüktansı	L_d	29.5 mH
	q-ekseni indüktansı	L_q	29.5 mH
	Sargıların direnci	R	22.6 ohm
	Sargı faktörü	k_w	1
Motor	Sürekli mıknatıs akısı	Ψ_{pm}	0.237 Wb
	Sürtünme	B	0.000001
	Uç etkisi	K_{end}	0.01
	Hava aralığı	g	0.03 mm
	Bağlı geçirgenlik	μ_{rec}	1.05
	Kalıcı mıknatıs akı yoğunluğu	B_r	1.1