Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, 21(2), 52-58, 2015

Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

Pamukkale University Journal of Engineering Sciences

ÇİFT YANLI DOĞRUSAL HAREKETLİ SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTORUN PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

DETERMINATION OF PARAMETERS FOR DOUBLE-SIDE LINEAR PERMANENT MAGNETS SYNCHRONOUS MOTOR

Özcan OTKUN[1], Adem Sefa AKPINAR[2]*

[1]Bilgisayar Programcılığı Bölümü, Gümüşhane Meslek Yüksek Okulu, Gümüşhane Üniversitesi, Gümüşhane, Türkiye.
ozcanotkun@gumushane.edu.tr

[2]Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye.
akpinar@ktu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 15.11.2013, Kabul Tarihi/Accepted: 27.12.2013 doi: 10.5505/pajes.2014.74745
* Yazışılan yazar/Corresponding author
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışmada, bir Çift Yanlı Doğrusal Hareketli Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun tasarımı yapılarak parametreleri belirlenmiş ve belirlenen parametreler ile test sonuçları karşılaştırılmıştır. İlk olarak motorun tasarım detayları verilmiş ardından motor parametrelerinin elde edilmesinde kullanılan yöntemler aktarılmıştır. Parametrelerin bulunmasında üç farklı yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemlerden birincisi klasik yöntem olan deneysel yöntemdir. İkinci olarak hassas bir dijital LCR metreden elde edilen sonuçlardır. Üçüncü olarak ürün kodu LG-SV022İG5A-4 olan motor sürücüsünden elde edilen sonuçlardır. Bu sonuçlarla hazırlanan bilgisayar programı yardımı ile motor test edilmiştir. Test sonuçlarından elde edilen akım, frekans, itme kuvveti ve hız grafikleri verilmiş ve bu sonuçlar değerlendirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Doğrusal hareketli motor, Doğrusal hareketli senkron motor, DHM, DHSM, Motor parametrelerin belirlenmesi, Motor kontrol

Abstract

In this study, the test results were compared with the parameters specified and determination of parameters of the design Double-Side Linear Permanent Magnet Synchronous Motor. Firstly given the design details of the motor and then transferred to the methods used to obtain the parameters of the motor. Three different methods were used in finding the parameters. The first of these methods, the classical method, the experimental method. The second is a digital LCR meter sensitive results obtained. The third one the motor drive LG-SV022İG5A-4 results obtained from the product code. With these results, the motor was tested with the help of computer software is prepared. From the results of the test current, frequency, and the results were evaluated given pushing force and speed graphics.

Keywords: Linear motor, Linear Synchronous motor, LM, LSM, Determination of parameters motor, Motor control

1 Giriş

Teknoloji alanındaki gelişmelere bağlı olarak doğrusal hareket günümüzde önemini bir kat daha artırmıştır. Doğrusal hareketi döner tip motorlardan ziyade Doğrusal Hareketli Motor (DHM) ile elde etme hem verimlilik hem de maliyet bakımından tercih edilmektedir. Doğrusal elektrik motorları ile doğrusal hareket yapması gereken bir yük, ara elemanlar olmadan sürülebilmektedir [1],[2]. Bu sebeple doğrusal hareketi ara düzeneklere ihtiyaç duymadan meydana getiren basit yapılı, düşük gürültülü, kolay bakımlı DHM'ler günümüzde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır [3]-[7].

Araştırmacıların çalışmalarını DHM'ler üzerinde yoğunlaştırmasını sağlayan iki ana neden bulunmaktadır. Bunlardan birincisi manyetik temelli malzemelerin daha kolay işlenebilmesi ve maliyetlerinin eskiye göre çok daha makul durumda olmasıdır. İkincisi de sayısal kontrol ve güç elektroniği teknolojisindeki gelişmelerin, yüksek performanslı cihazların yüksek hassasiyetlerde ölçülebilir ve kontrol edilebilir hale gelmesini sağlamasıdır [8].

DHM'lerin tasarımında ve denetim sistemlerinde makine modelinin ve parametrelerinin kesin olarak bilinmesi, makineden yüksek verim ve düşük maliyet elde edilmesini sağlar. Bu parametrelerin belirlenmesinde genellikle boşta ve yükte kilitli ya da tutulu rotor deneyleri yapılmaktadır [9],[10].

DHM'ler pratikte Doğru Akım (DA) ve 3 fazlı Alternatif Akım(AA) motorları olmak üzere iki yapıda bulunmaktadır. Bunlardan AA olanlar, Doğrusal Hareketli Asenkron Motorlar ve Doğrusal Hareketli Senkron Motorlar olmak üzere iki çeşittir [1]. Güç yoğunluğu, çıkış verimliliği, hassas pozisyonlama, manevra kabiliyeti, güvenilirlik ve bakım maliyeti gibi hususlar göz önüne alındığında, sürekli mıknatıslı senkron motorlar endüstriyel alanda tercih edilmektedir [11],[12].

DHM'ler yapı olarak değilse bile çalışma prensibi olarak döner hareketli motorlarla birbirine benzemektedir. Bu nedenle Döner Hareketli Motorlarda (DÖHM) kullanılan kontrol yöntemleri DHM'lerde de kullanılabilir [13].

Bu yöntemlerden biri olan V/f kontrol yöntemi (Skaler yöntem), uygulanmasının kolay olması ve maliyetinin düşük olması nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır [14],[15]. İncelen Motor test edilirken bu yöntem kullanılmıştır.

Bu çalışma da tasarımı gerçekleştirilen Çift Yanlı Doğrusal Hareketli Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun (ÇYDHSMSM) parametrelerinin bulunmasını ve bu parametrelerin kullanılarak motorun test edilmesini amaçlanmıştır.

2 Materyal ve Yöntem

Yapısal olarak farklılıkları bulunan bu motorların örneği gerçekleştirilirken ve parametreleri bulunurken DÖHM'lerin ilkelerinden yararlanılabilir [16].

2.1 Eksen Sistemi Dönüşümü

Eksen sistemi dönüşümü, Doğrusal Hareketli Senkron Motorun(DHSM) dinamik davranışını incelemek için gerekli olan matematiksel ifadelerini basitleştirmektedir.

DHSM'nin matematiksel ifadeleri DÖHSM'nin iki eksenli $d-q$ modeline benzer olarak tarif edilebilir. Aşağıda bu dönüşümler ele alınmıştır [16].

Clark Dönüşümü: $a-b-c$ eksen sisteminin $\alpha-\beta$ eksen sistemine dönüşümü:

$$\begin{bmatrix} S_\alpha \\ S_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

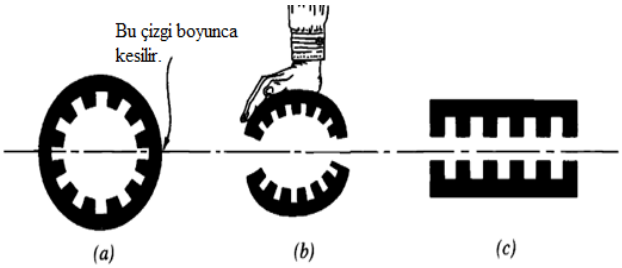
Park Dönüşümü: $\alpha-\beta$ eksen sisteminin $d-q$ eksen sistemine dönüşümü:

$$\begin{bmatrix} S_d \\ S_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} cos\theta & sin\theta \\ -sin\theta & cos\theta \end{bmatrix}\begin{bmatrix} S_\alpha \\ S_\beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

Burada, S vektörel olarak akım, gerilim ve manyetik akıyı temsil etmektedir.

2.2 ÇYDHSMSM'nin Yapısı ve Matematiksel İfadesi

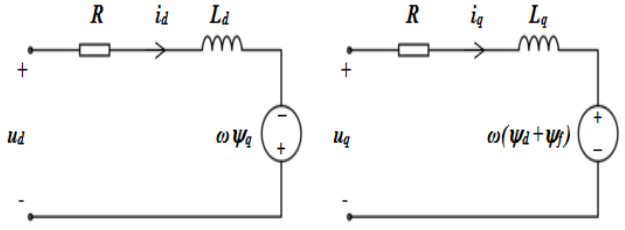
DHSM'yi Şekil 1'de gösterildiği gibi açılmış bir DÖHSM olarak düşünebiliriz. DÖHSM'yi oluşturan stator (dıştaki sabit kısım) ve rotor (içteki dönen kısım) dairesel şekilde iç içe oldukları için statordaki sargılar tarafından oluşan döner alan dönme hareketi gerçekleştirir [17].



Şekil 1: DÖHSM'den DHSM'nin elde edilişi [17].

DHSM'lerde ise **Birinci Yan** (Enerji verilen hareketli kısım) sargılarında meydana gelen yürüyen alan ile **İkinci Yan** (Sürekli mıknatısların bulunduğu sabit kısım), üst üste olduğu için doğrusal bir hareket gerçekleştirir [17].

DHSM'nin matematiksel ifadeleri oluşturulurken, manyetik devresinin doğrusal olduğu varsayılmıştır[18]. Bu anlamda Şekil 2'de verilen DÖHSM'nin iki eksen takımlı $(d-q)$ eşdeğer devresi ile matematiksel ifadeleri benzer kabul edilerek yaygın olarak kullanılan bu denklemler aşağıda verilmiştir [19].



Şekil 2: DHSM'nin $d-q$ ekseni eşdeğer devresi.

$d-q$ eksenlerindeki birinci yan gerilim denklemleri:

$$u_d = Ri_d + L_d\frac{di_d}{dt} - \frac{\pi}{\tau}vL_qi_q \quad (3)$$

$$u_q = Ri_q + L_q\frac{di_q}{dt} + \left(L_di_d + \Psi_f\right)\frac{\pi}{\tau}v \quad (4)$$

$d-q$ eksenlerindeki akı denklemleri:

$$\Psi_d = L_di_d + \Psi_f \quad (5)$$

$$\Psi_q = L_qi_q \quad (6)$$

Elektromanyetik itme kuvveti denklemi:

$$F_i = \frac{3}{2}\frac{\pi}{\tau}\left[\Psi_f + (L_d - L_q)\,i_d\right]i_q \quad (7)$$

Motor kontrolünde $i_d = 0$ olarak alınırsa, elektromanyetik itme kuvveti;

$$F_i = \frac{3}{2}\frac{\pi}{\tau}\Psi_f i_q \quad (8)$$

Böylece, DHSM'nin kontrolünde kullanılacak formüller elde edilmiş olur. Mekanik yük göz önüne alındığında elektromanyetik itme kuvveti ise;

$$F_i = F_d + Bv + M\frac{dv}{dt} \quad (9)$$

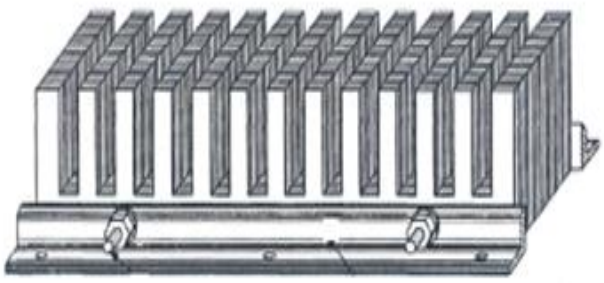
Hız denklemi ise:

$$v = 2.f.\tau \quad (10)$$

Bu ifadelerde $\psi_f, F_d, B, M, v, f, \tau$ sırasıyla, Sürekli Mıknatıs Akısı, Harici (dış) Kuvvet, Sürtünme Katsayısı, Hareketli Parçanın Ağırlığı, Hareketli Parçanın Hızı, Faz Sargılarının Direnci, Frekans, Kutup Adımıdır.

2.3 İncelenen ÇYDHSMSM'nin Tasarımı

DHSM'lerde çekirdeği oluşturan saclar, trafolarda kullanılan saclar gibidir. Birinci yan için 0.3 mm kalınlığında saclar paket haline getirilmiş ve Şekil 3'teki gibi kesim işlemi yapılmıştır. Birinci yan sargıları, sacların paketlenmesiyle ortaya çıkan oluklara yerleştirilir.



Şekil 3: Sacların paketlenmiş hali (çekirdek) [2].

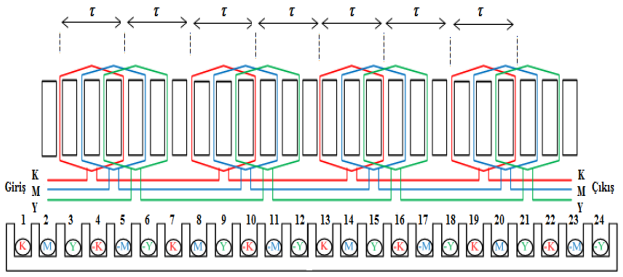
Çift taraflı olarak hazırlanan birinci yan tarafında kullanılacak olan kesim ölçüleri Tablo 1'de verilmiştir. Kesim işlemi bittikten sonra her iki parça birleştirilerek sarım aşamasına geçilmiştir.

Hatırlanacağı gibi döner alan elde etmek için en az iki fazlı sargıya ihtiyaç vardır. Benzer şekilde yürüyen alan elde etmek için ise en az üç fazlı sargıya gerek duyulmaktadır. Üç fazlı özdeş sargıların yürüyen alan oluşturabilmesi için sargı akı

eksenleri arasında 2τ/3'lük yer farkı ve sargı akımları arasında 120°'lik faz farkı olmalıdır. DHSM'ler için çok sayıda sarım şekilleri önerilmiştir [20]. Burada pratikte ilgi gören ve sıkça kullanılan sarım şekli kullanılmış ve Şekil 4'te sarımın nasıl yapıldığı gösterilmektedir.

Tablo 1: Paket halindeki sacların kesim ölçüleri.

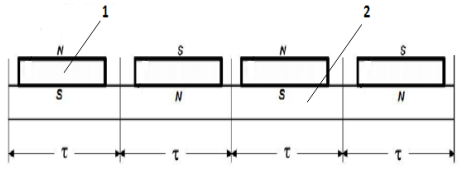
Birimler	Ölçüler
Sac paket boyu	340 mm
Sac paketin eni	40 mm
Sac paket kalınlığı	46 mm
Oluk derinliği	15 mm
Oluk eni	7 mm
Diş eni	7 mm
Baş kısımlardaki diş eni	5.5 mm



Şekil 4: Kullanılan tam adımlı, tek tabakalı sargı düzeni.

Birinci yan sargıları oluşturulurken, motorun 3 fazlı 8 kutuplu olması düşünülmüş, 0.35 mm çapında bakır tel kullanılmış ve her olukta 220 sipir olacak şekilde sargı işlemi gerçekleştirilmiştir.

İkinci Yan, Şekil 5'teki gibi yumuşak demir levha üzerine mıknatıslar yüzeyde olacak şekilde yerleştirilmiştir. Bu çalışmada kullanılan mıknatıs türü, manyetik akı yoğunluğu diğer çeşitlerine göre daha fazla olan Neodyum (Nd-Fe-B) mıknatıslardır [2].



Şekil 5: İkinci yanda sürekli mıknatıslar yüzeyde.
(1): Sürekli mıknatıs, (2): Sabit kısım.

Kullanılan Neodyum mıknatıslara ait ölçüler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2: Neodyum mıknatıs ölçüleri.

Birimler	Ölçüler
Neodyum mıknatıs boyu	40 mm
Neodyum mıknatıs eni	20 mm
Neodyum mıknatıs kalınlığı	10 mm

2.4 Kullanılan LG-SV022İG5A-4 Sürücüsü

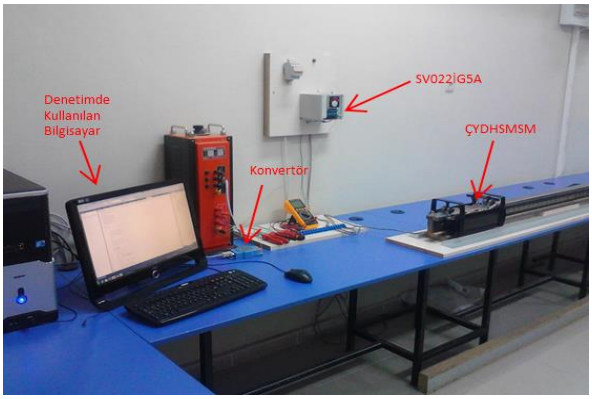
İncelenen ÇYDHSMSM'nin denetimini sağlamak için ürün kodu LG-SV022İG5A-4 sürücü cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz 2.2 kw'lık trifaze bir sürücüdür. Kullanılan bu sürücü V/f ve sensörsüz vektör kontrol yapabilmekte, 0 Hz'den maksimum 400 Hz'e kadar frekans çıkışı sağlayabilmektedir. Dışarıdan programlanabilir giriş çıkış terminaline ve dâhili RS485 seri porta sahiptir.

Bilgisayar çıkışlarımız genellikle RS232 (RS232 ve RS485 bilgisayarlar ve diğer elektronik cihazlarda kullanılan seri haberleşme metotlarıdır) olduğundan, RS232'yi RS485'e dönüştüren konvertör kullanılarak LG-SV022İG5A-4 sürücüsü ile haberleşme sağlanmıştır. Ayrıca, bu sürücüye ait parametre grupları kullanılarak incelemek istediğimiz motorun parametreleri elde edilebilmektedir. Şekil 6'da bu sürücü gösterilmiştir.



Şekil 6: LG-SV022İG5A-4 sürücü.

Yukarıda belirtilen ölçülerde ve standartlarda yapılan ÇYDHSMSM modeli ve çalışma alanı Şekil 7'de gösterildiği gibidir.



Şekil 7: Çalışma alanı.

3 ÇYDHSMSM'nin Parametrelerinin Belirlenmesi

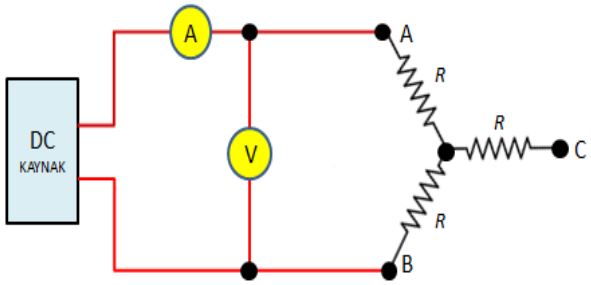
İncelenen motorun parametrelerinin (R ve X_L değerlerinin) bulunabilmesi için üç farklı yöntem kullanılmıştır. Birinci yöntem deneysel yöntemdir ve sonraki bölümde detaylı olarak açıklanmaktadır. İkinci yöntemde ise bu değerler hassas bir LCR metre ile ölçülmektedir. Son yöntemde ürün kodu LG-SV022İG5A-4 olan motor sürücüsüne parametre bulma deneyi yaptırılmıştır.

3.1 Birinci Yan Direncinin Belirlenmesi

3.1.1 Deneysel Yöntem

DC deneyi için temel devre şeması Şekil 8'de gösterildiği gibidir. Bu şekil, birinci yanı çift yanlı ve sargıları yıldız bağlı

senkron motorun giriş uçlarından ikisine bağlanan bir DC güç kaynağını göstermektedir. Bağlanan ölçü aletlerinden okunan değerler ile birincil yan direnci elde edilmektedir.



Şekil 8: DC deneyi bağlantı şeması.

Güç kaynağından uygulanan, ayarlanabilir DC ile ölçü aletlerinden okunan değerler 11 numaralı bağıntıda kullanılarak birinci yan direnci elde edilmiştir.

$$R = \frac{V_{DC}}{2.I_{DC}} \tag{11}$$

Uygulanan gerilim değerleri ile elde edilen akım değerlerine karşılık gelen direnç değerleri Tablo 3'te verilmiştir. Bu tablodaki verilere dayanarak ortalama birinci yan R değeri 11.58 Ω olarak hesaplanmıştır.

Tablo 3: DC deneyinden elde edilen sonuçlar.

V_{AB}	I_{AB}	R_{AB}
19 V	0.81 A	11.73 Ω
22 V	0.95 A	11.58 Ω
26 V	1.12 A	11.61 Ω
V_{AC}	I_{AC}	R_{AC}
19 V	0.81 A	11.73 Ω
22 V	0.96 A	11.46 Ω
26 V	1.13 A	11.51 Ω
V_{BC}	I_{BC}	R_{BC}
19 V	0.82 A	11.56 Ω
22 V	0.96 A	11.46 Ω
26 V	1.12 A	11.61 Ω

3.1.2 Hassas LCR Metre ile Yapılan Ölçüm

Hassas bir LCR metre ile yapılan ölçmede, $R_{AB} = 23.5\ \Omega$, $R_{AC} = 23.3\ \Omega$, $R_{BC} = 23.7\ \Omega$ olarak bulunmuştur. Bu ölçme sonuçlarından hareketle R değeri 11.75 Ω olarak hesaplanmaktadır.

3.1.3 SV022İG5A Sürücüsü ile Yapılan Parametre Bulma Deneyi

LG-SV022İG5A-4 sürücüsüne parametre bulma deneyi yaptırılabildiği üretici firma tarafından belirtilmektedir. Bu parametre H42 adresinden okunmaktadır.

LG-SV022İG5A-4 sürücüsüne birinci yan direncini bulma deneyi yaptırılarak R değeri 12.78 Ω bulunmuştur.

3.2 Birinci Yan İndüktansının Belirlenmesi

3.2.1 Deneysel Olarak Yapılan Ölçüm

Bu parametrenin belirlenebilmesi için 5 Hz ve 10 Hz frekanslarında kilitli ya da tutulu birinci yan deneyi yapılmıştır[9],[10]. Bu deneylerde elde edilen I_K (Kilitli birinci yan akımı) ve V_K (Kilitli birinci yan gerilimi) değerlerinden, incelenen motora ait Z_K (Birinci yan empedansı) ve X_L hesaplanmıştır. Yapılan bu işlemlerde elde edilen sonuçlar Tablo 4'te gösterilmektedir.

Tablo 4: Kilitli birincil yan deneyi sonuçları.

f_K	V_K	I_K	Z_K	X_L
5 Hz	78.8 V	1.6 A	28.43 Ω	25.97 Ω
10 Hz	160.3 V	3.3 A	28.05 Ω	25.55 Ω

Yüzeysel mıknatıslı senkron motorlarda relüktans moment sıfır olduğu için d ve q eksenlerindeki indüktans değerleri birbirlerine eşit ve hesaplanan L değerinin 2/3'ü kadar olduğu bilinmektedir [21]. Bu verilerden yola çıkılarak L değeri 41.99 mH olarak tespit edilmiştir.

3.2.2 LCR Metre ile Yapılan Ölçüm

Hassas bir LCR metre ile yapılan ölçmede, $L_{AB} = 91.1\ mH$, $L_{AC} = 80.2\ mH$, $L_{BC} = 79.8\ mH$ olarak bulunmuştur. Bu ölçme sonuçlarından hareketle L değeri 41.81 mH hesaplanmıştır.

3.2.3 SV022İG5A Sürücüsü ile Yapılan Ölçüm

Sürücü parametrelerinden biri olan H44 adresinden okunan değerin birinci yan indüktansına ait olduğu üretici firma tarafından belirtilmektedir. Sürücüye birinci yan indüktansını bulma deneyi yaptırılarak L değeri 43.48 mH olarak bulunmuştur. Yapılan bu deneylerin ölçüm sonuçları Tablo 5'te gösterilmektedir.

Tablo 5: Birinci yan direnç ve indüktans değerleri.

Parametreler	DC/Kilitli	LCR metre	SV022İG5A
Direnç	11.58 Ω	11.75 Ω	12.78 Ω
İndüktans	41.99 mH	41.81 mH	43.48 mH

3.3 Sürekli Mıknatısın Manyetik Akısının Belirlenmesi

Sürekli mıknatısın manyetik akı değerinin hesaplanmasında 12 numaralı denklem kullanılmıştır[2]. Bu denklem ile yapılan hesapla, $\Psi_f = 0.189$ Wb olarak elde edilmiştir.

$$\Psi_f = \frac{2}{\pi}.\tau.\ N.B_f\ .l_1.k_{w1} \tag{12}$$

Burada, N bir faza ait bir oluktaki sarım sayısını, l_1 birinci yan sac paket yığınının boyunu, $B_f = 0.7T$ manyetik akı yoğunluğunu, $k_{w1} = 1$ sargı faktörünü göstermektedir. Burada, B_f değeri manyetik malzemelerin 0-400 Hz' deki B-H histerisiz eğrisinden düşük frekanslar için tercih edilen değeri alınmıştır [2].

Bu çalışmada ÇYDHSMSM'nin tasarım aşamalarından bahsedilmiş ve parametrelerinin bulunması için de üç farklı yöntem kullanılmıştır. Burada deneysel yol ile bulunan parametreler denetim yöntemleri için kullanılacaktır. Tablo 6'da motora ait parametreler topluca verilmiştir.

4 Test Sonuçları

Bilgisayar ile haberleşmesi (Sürücüye ait Modbus-RTU haberleşme protokolü) sağlanan SV022İG5A sürücüsü C programlama dilinde hazırlanan program ile test edilmiştir. Hazırlanan programın arayüzüne motor parametreleri girilebilmektedir. Test sonuçları için kullanılan blok devre şeması Şekil 9'da verilmiştir.

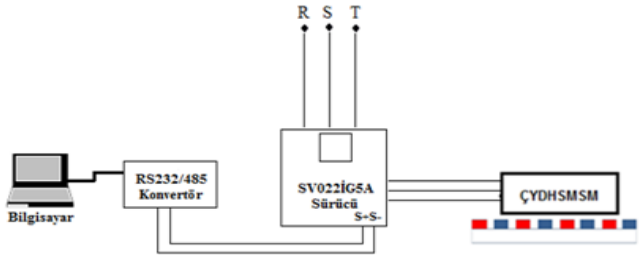
ÇYDHSMSM'nin matematiksel ifadeleri yardımı ile elde edilen test sonuçları Şekil 10 ve 11'deki grafiklerde verilmiştir.

Burada Şekil 10 a'daki grafik 1 ve 2 numaralı denklemler yardımıyla elde edilmiştir. Sürücüden alınan giriş akım ve

gerilim değerleri sırasıyla 1.02 A ve 56.57 V'dur. Bu değerlere ait $d-q$ eksen sistemindeki akımlar şekil 10 a'daki gibidir.

Tablo 6: İncelenen ÇYDHSMSM parametreleri

Birimler	Simgeler	Değerler
Kutup sayısı	p	8
Birincil yan direnci	R	11.58 Ω
Mıknatısın akısı	ψ_f	0.189 Wb
d ekseni indüktansı	L_d	28 mH
q ekseni indüktansı	L_q	28 mH
Faz voltajı	V	160.3 V
Faz akımı	I	2.9 A
Kutup adımı	τ	0.035 m
Motor ağırlığı	M	15.1 kg
Frekans	f	15 Hz



Şekil 9: Blok devre şeması.

Aynı zamanda motorun birinci ve ikinci yan arasındaki hava aralığının azaltılması $d-q$ eksenlerindeki akımı olumlu yönde azaltacağı bilinmektedir [2], (Mevcut hava aralığı 5 mm).

Şekil 10 b'deki grafik 8 numaralı denklem ile elde edilmiştir. Burada frekansa bağlı olarak itme kuvvetinde artma ve azalma olduğu görülmektedir.

Şekil 11 a'daki grafik ise girişte ayarlanan referans frekansın çıkışta elde edildiği göstermektedir. Hazırlanan test programı ara yüzünde frekans 5 Hz olarak ayarlanmış ve motorun mekanik itme denkleminden çıkışta 5 Hz olduğu görülmektedir.

Şekil 11 b'deki grafik 10 numaralı denklem ile elde edilen grafiktir. Şekilde 5 Hz'lik sabit frekansta elde edilen hız grafiği görülmektedir. Bu denklemde, değişken frekans olduğundan frekansın artması hızın artmasını sağlamaktadır.

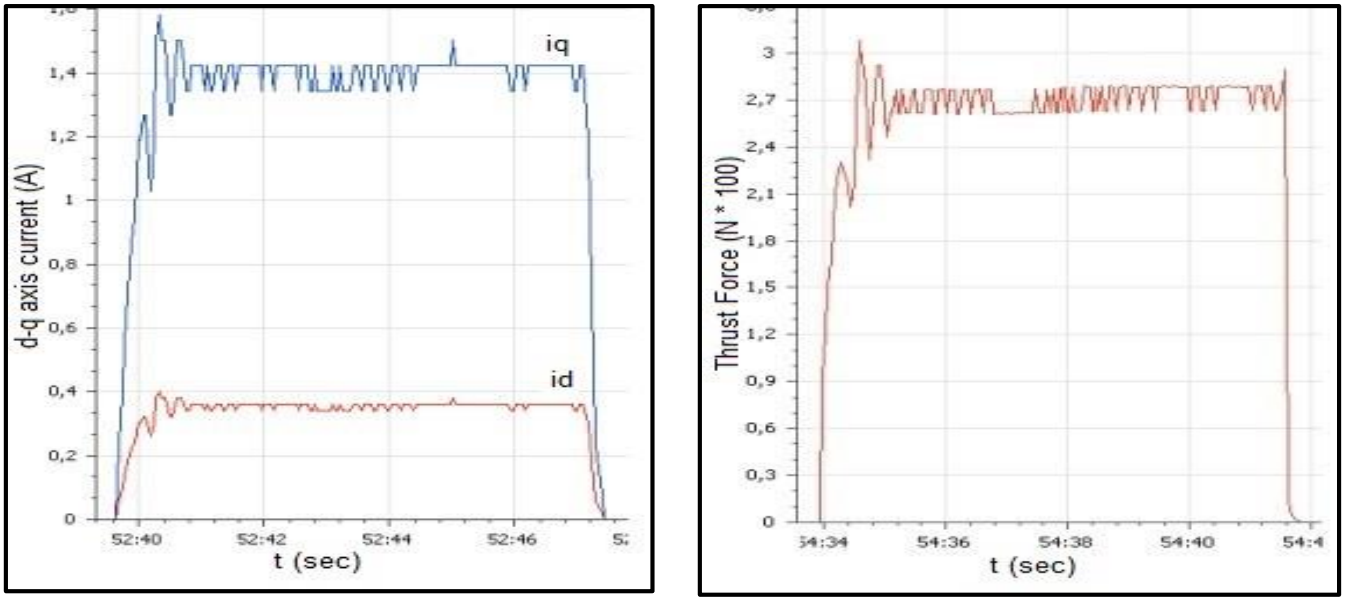
5 Değerlendirme

Yapılan bu çalışmada incelenen motorun parametreleri üç farklı yöntemle bulunmuştur. Bu yöntemlerden elde edilen sonuçlar arasındaki küçük farklılıkların kullanılan ölçü aletlerinin hassasiyetlerinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Deney düzeneği yaklaşık 500 cm olduğundan motor test edilirken maksimum 15 Hz' e kadar çıkarılabilmiştir. Burada test sonuçları elde edilirken 5 Hz' de motor çalıştırılmıştır. Dolayısıyla 5 Hz için maksimum hız 35 cm/s'dir. Test edilen bu motor için sürücünün 100 Hz çıkış frekansı verdiği ve uygun bir hareket mesafesi düşünüldüğünde saatte 25.2 km yol alabilmektedir.

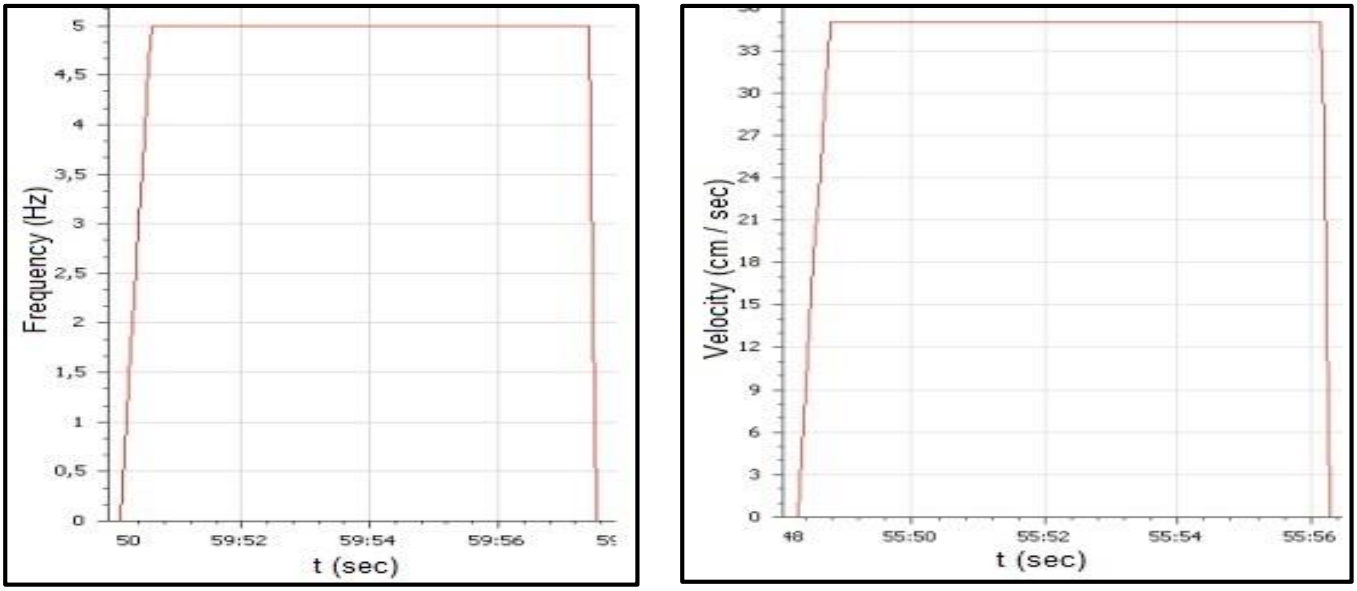
10 numaralı denklem göz önüne alındığında, bu tür motorların hız değişiminde iki parametrenin etkili olduğu görülmektedir. Bunlar **Frekans** ve **Kutup adımı**'dır. Burada frekansın veya kutup adımının artması motor hızının artması anlamına gelmektedir.

Bu sonuçlara göre, yapılan çalışmanın sabit hız gerektiren taşıma ve otomasyon sistemlerinde kullanılabileceği düşünülmektedir. Bu alandaki ihtiyaç düşünüldüğünde daha pek çok çalışma da yapılabilir.



(a) (b)

Şekil 10: Hız denetiminde elde edilen grafikler. (a): $d-q$ eksenlerinde akım grafiği; (b): Elde edilen itme kuvveti.



(a) (b)

Şekil 11: Hız denetiminde elde edilen grafikler. (a): Çıkış frekansı; (b): Motorun çıkış hızı.

6 Teşekkür

Bu çalışma sırasında zamanını ve emeğini esirgemeyen Prof. Dr. A. Sefa AKPINAR hocama teşekkür ederim.

7 Kaynaklar

[1] Hellinger R, Mnich P. "Linear Motor-Powered Transportation: History, Present Status, and Future Outlook". *Proceedings of the IEEE*, 97(11), 1892-1900, 2009.

[2] Boldea I. *Linear Electric Machines, Drives and MAGLEVs, CRC Press*, 1st ed. Boca Raton, Florida, USA, CRC Press Taylor & Francis Group, 2013.

[3] Karaçar E. "Hidrolik ve Pnömatik'e Alternatif Çözüm; Dogrusal Motorlar". *II. Hidrolik Pnömatik Kongresi ve Sergisi*, İzmir, Türkiye, 8-11 Kasım 2001.

[4] Takahashi N, Yamada T, Miyagi D. "Basic Study of Optimal Design of Linear Motor for Rope-less Elevator". *IET 7th International Conference on Computation in Electromagnetics*, Brighton, UK, 7-10 April 2008.

[5] Torii S, Izuno N, Watada M, Ebihara D. "Optimum Control Sheme for the Maximum Eficiency Drive of Linear Synchronous Motor Used for Rope-less Elevator". *Electrical Engineering in Japan*, 155(3), 70-78, 2006.

[6] Geuk-Sub An, Houng-Joong Kim, Jin-Woo Ahn, Takafumi Koseki. "Design and Operating Characteristics of Cylindrical Linear Motor for Long Stroke Precision Stage". *Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, 60(1), 63-70, 2011.

[7] Mou X, Xu Y, Jiang F. "Heat Analysis of a Flat Permanent-magnet Linear Synchronous Motor". *Advanced Materials Research*, 328-330, 974-978, 2011.

[8] Küçükali M, Akyazı Ö, Akpınar AS. Doğrusal Hareketli Asenkron Motor Sürücülü Mekanik Osilatör ve Evirici ile Kontrolü. Yüksek Lisans Tezi. Karadeniz Teknik Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Türkiye, 2008.

[9] Erdal H, Doğan B, Taşkın S. "DC Motor Parametrelerinin Bilgisayar Tabanlı Belirlenmesi, Simülasyonu ve Parametre İyileştirilmesi". *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)*, Karabük, Türkiye, 13-15 Mayıs 2009.

[10] Plantic Ž, Štumberger G. "Determining Parameters of a Three-Phase Permanent Magnet Synchronous Machine Using Controlled Single-Phase Voltage Source". *Przeglad Electrotechniczny*, 87(3), 137-140. 2011.

[11] Chau KT, Chan CC, Liu C. "Overview of Permanent-Magnet Brushless Drives for Electric and Hybrid Electric Vehicles" *IEEE Transactions on Industrial Electronics,* 55(6), 2246–2257, 2008.

[12] Emadi A, Lee YJ, Rajashekara K. "Power Electronics and Motor Drives in Electric, Hybrid Electric and Plug-In Hybrid Electric Vehicles". *IEEE Transactions Industrial Electronics,* 55(6), 2237-2245, 2008.

[13] Özçıra S. Sabit Mıknatıslı Senkron Motorun Kontrol Yöntemleri ve Endüstriyel Uygulamaları. Yüksek Lisans Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2007.

[14] Sen PC. "Electric Motor Drives and Control Past Present, and Future". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 37(6), 562-576, 1990.

[15] Bose KB. *Modern Power Electronics and AC Drivers, Prentice Hall*, New Jersey, USA, Prentice Hall PTR, 2002.

[16] Jin J, Zhao H, Xin, Y, Sun Y. "Simulation and Analysis of a PMLSM Control System Based on SVPWM". *IEEE Proceedings of the 29th Chinese Control Conference*, Beijing, China, July 29-31, 2010.

[17] Özkop E, Akpınar AS. Doğrusal Hareketli Asenkron Motorun Bulanık Mantıkla Kontrolü. Yüksek Lisans Tezi. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. Trabzon, Türkiye, 2006.

[18] Rahman MF. Haque M. "Dynamic Model and Parameter Measurement of Interior Permanent Synchronous Motor". in *Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC 2006)*, Presented at Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC 2006), Melbourne, 10-13 December 2006.

[19] Akyazı Ö, Küçükali M, Akpınar AS. "Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Hız Denetiminin Farklı Bulanık Üyelik Fonksiyonları Kullanılarak Gerçekleştirilmesi". *Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu (FEEB)*, Elazığ, Türkiye, 7 Ekim 2011.

[20] Zheng LH, Jin JX. "Investigation of HTS Bulk Magnet linear Synchronous Motors". *Proceedings of* 2009 *IEEE International Conferenece on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices*, Chengdu, China, 25-27 September 2009.

[21] Demir K. "Doğrusal Hareketli Asenkron Motor Tasarımı ve Uygulaması. Seminer Notları". Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Türkiye, Mayıs 2012.

[22] Haque ME, Zhong L, Rahman MF. "A Sensorless Initial Rotor Position Estimation Scheme for A Direct Torque Controlled Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Drive". *IEEE Transaction on Power Electronics*, 18(6), 1376-1383, 2003.