

# Sabit Mıknatıslı Senkron Motorun Alan Yönlendirmeli Kontrolü ve Simülasyonu

## Field Oriented Control and Simulation of Permanent Magnet Synchronous Motor

Fatih Alpaslan KAZAN<sup>1</sup>, Osman BİLGİN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Elektrik Programı  
İlgin Meslek Yüksekokulu  
Selçuk Üniversitesi, İlgin, KONYA  
akazan@selcuk.edu.tr

<sup>2</sup>Elektrik- Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Mühendislik-Mimarlık Fakültesi  
Selçuk Üniversitesi, KONYA  
obilgin@selcuk.edu.tr

### Özet

Bu çalışmada Matlab/Simulink paket programı kullanılarak sabit mıknatıslı senkron motor (SMSM)'un alan yönlendirmeli vektör kontrol yöntemine dayalı simülasyonu yapılmıştır. Simülasyon sonuçları Lenze firmasına ait MCS 06C41 ürün koduyla üretilen 0,25 kW'lık SMSM, EVS9322-ESV004 kodlu motor sürücüsü ve Global Drive Control arayüz programı kullanılarak test edilmiştir. Simülasyondan elde edilen değerler deneysel çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Sürücünün alan yönlendirmeli vektör kontrol yöntemine göre tasarlanmış olması nedeniyle simülasyonda da alan yönlendirmeli kontrol yöntemi tercih edilmiştir. Yapılan bu çalışma ile farklı güçlerdeki SMSM'lerin, farklı yüklerle vereceği akım, hız ve moment tepkilerini deneysel çalışma yapmadan incelemek ve böylelikle ARGE çalışmalarına katkıda bulunmak hedeflenmiştir.

### Abstract

In this study, a simulation of permanent magnet synchronous motor (PMSM) based on field oriented vector control was held by using Matlab/ Simulink packet program. The results were tested via MCS 06C41 coded 0,25 kW PMSM, and EVS9322-ESV004 coded motor driver both of which were produced by Lenze Company. Additionally, Global Drive Control interface program was also used in order to test the results. After simulation, the acquired data was compared with experimental studies. As the driver was designed according to the process of field oriented control, field oriented control was also preferred during the simulation. Via this research, it was aimed to examine different powered PMSMs' speed, torque and current response under different load conditions without depending on experimental studies, and subsequently providing contributions for research and development studies.

### 1. Giriş

Senkron motorlar kaynağın frekansına ve motorun kutup sayısına bağlı olarak her zaman senkron hızda dönen çift

uyartımlı makinelerdir. Bu motorların statorları alternatif akım (AA), rotorları ise doğru akım (DA) ile beslenmektedir. Ancak senkron motorlarda rotor manyetik alanı, rotora yerleştirilen sabit mıknatıslarla sağlandığında ikinci kaynağa olan ihtiyaç ortadan kalkmakta ve böylece SMSM'ler elde edilmektedir. SMSM'lerde fırça ve kollektör düzeneği yerine komütasyonu sağlamak için elektronik sürücüler ve bu sürücülerin uygun sargıları anahtarlamasını sağlayan konum algılayıcıları kullanılmaktadır. Motorun rotorunda herhangi bir akım olmadığından rotor bakır kayıpları söz konusu değildir. Ayrıca stator akımının bileşeni olan mıknatıslama akımının ortadan kalkması motorun güç katsayısını yükseltmektedir [1]. Dolayısıyla bu motorları diğer motorlara göre aynı güçte ama daha küçük boyutlarda ve yüksek verimle tasarlamak mümkündür. Bu ise, yüksek güç/ağırlık oranı istenen robot ve uçak teknolojisi için aranan bir özelliktir.

### 2. SMSM'nin Gerilim ve Moment Denklemleri

SMSM'nin statoruna uygulanan gerilimin ani değer denklemi (1) numaralı denklemde görüldüğü gibi matris formunda ifade edilebilir. Denklemde  $v_a$ ,  $v_b$  ve  $v_c$  stator sargılarına uygulanan faz gerilimlerinin ani değerlerini;  $R_a$ ,  $R_b$  ve  $R_c$  faz sargılarının omik dirençlerini;  $i_a$ ,  $i_b$  ve  $i_c$  stator faz akımlarının ani değerlerini;  $L_{aa}$ ,  $L_{bb}$  ve  $L_{cc}$  faz sargılarının toplam endüktanslarını;  $L_{ab}$ ,  $L_{ba}$ ,  $L_{bc}$ ,  $L_{cb}$ ,  $L_{ca}$  ve  $L_{ac}$  faz sargıları arasındaki karşılıklı endüktansı;  $e_a$ ,  $e_b$  ve  $e_c$  sabit mıknatıslı rotor tarafından stator sargılarında indüklenen zıt emk'yı temsil etmektedir. Buna göre:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$R_a$ ,  $R_b$  ve  $R_c$  dirençleri eşit olduğundan bu dirençler  $R$  ile gösterilebilir. Denklemdeki zıt emk ve endüktans ifadeleri manyetik akı türünden yazıldığında aşağıdaki eşitlik elde edilir. Denklemdeki  $\psi_a$ ,  $\psi_b$  ve  $\psi_c$  faz sargılarının akılarını ifade etmektedir.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

(2) eşitliği ile ifade edilen gerilim denklemi, çift-eksen teorisi kullanılarak rotor referans düzleminde Eşitlik (3)'teki gibi yazılabilir. Eşitlik (3)'teki  $v_d$  ve  $v_q$  ifadeleri giriş geriliminin d-q bileşenlerini,  $i_d$  ve  $i_q$  faz akımlarının d-q bileşenlerini,  $R$  stator sargılarının omik direncini,  $L_d$  ve  $L_q$  d-q eksenli endüktanslarını,  $\omega_r$  rotorun açısal hızını,  $\psi_d$  ve  $\psi_q$  ise d-q eksenli manyetik akılarını simgelemektedir.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega_r \begin{bmatrix} -\psi_q \\ \psi_d \end{bmatrix} \quad (3)$$

Motorun d-q eksenli manyetik akıları Eşitlik (4)'de verilmiştir. Eşitlik (4)'teki  $\psi_m$  ifadesi sabit mıknatıstan dolayı meydana gelen manyetik akıdır.

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \psi_m \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

(3) nolu denklem durum uzay formunda yazılırsa:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \left\{ \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega_r \begin{bmatrix} 0 & L_q \\ -L_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} - \omega_r \begin{bmatrix} 0 \\ \psi_m \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 1/L_d & 0 \\ 0 & 1/L_q \end{bmatrix} \quad (5)$$

eşitliği elde edilir [2]. Bu denklem incelendiğinde motor kontrolünün d-q eksen akımlarıyla sağlanabileceği görülmektedir. Motorun ürettiği elektromanyetik moment ise aşağıdaki (6) numaralı eşitlik ile verilmiştir. Moment denklemindeki  $P$  ifadesi motorun çift kutup sayısını temsil etmektedir.

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot P \cdot [\psi_m \cdot i_q + (L_d - L_q) \cdot i_q \cdot i_d] \quad (6)$$

Denkleme bakıldığında motorun üreteceği momentin d-q eksen akımlarına bağlı olduğu görülmektedir. Bu denklem, yüzey mıknatıslı olan SMSM'lerde d-q eksen endüktanslarının eşit olduğu [3] göz önünde bulundurularak tekrar yazılırsa:

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot P \cdot \psi_m \cdot i_q \quad (7)$$

eşitliği elde edilir. Denklem incelendiğinde motordaki moment kontrolünün q eksen akımına bağlı olduğu görülmektedir. Rotorun açısal hız ( $\omega_r$ ) ve konum ( $\theta_r$ ) ifadesi ise sırasıyla (8) ve (9) numaralı eşitliklerle verilmiştir.

$$\frac{d}{dt} \omega_r = \frac{T_e - T_l - B \cdot \omega_r}{J} \quad (8)$$

$$\frac{d}{dt} \theta_r = \omega_r \quad (9)$$

### 3. SMSM'nin Kontrolü

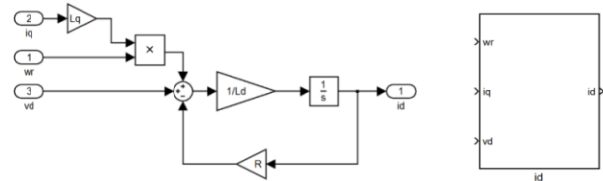
SMSM'nin vektör kontrol yöntemleri; alan yönlendirmeli kontrol yöntemi, akı zayıflatma yöntemi ve doğrudan moment kontrol yöntemi olarak sıralanabilir. Alan yönlendirmeli kontrol, stator akımlarının dönen d-q eksen takımına dönüştürülmesiyle yapılır. Bu akımlardan q bileşeni momentle doğrudan orantılıdır. Dolayısıyla bu bileşenin kontrolüyle moment de kontrol edilmiş olur. d eksen akımının sıfırda tutulduğu bu yöntem, özellikle SMSM'lerin yüzey mıknatıslı olanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada

kullanılan motorun yüzeysel mıknatıslı SMSM olması ve sürücüsünün de alan yönlendirmeli kontrol yöntemine göre tasarlanmış olması nedeniyle simülasyonda vektör kontrol yöntemi olarak alan yönlendirmeli kontrol tercih edilmiştir.

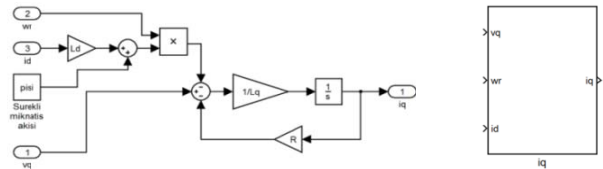
### 4. SMSM'nin Simülasyonu

SMSM'nin simülasyonu, yukarıda verilen (3), (5), (6), (8) ve (9) numaralı denklemler kullanılarak Matlab/Simulink paket programı ile gerçekleştirilmiştir. Simülasyona başlamadan önce birtakım kabullenimler yapılmıştır. Bunlar; parametre değişimine neden olmasına rağmen doymanın ihmal edilmesi; indüklenen emk'nın tam olarak sinüzoidal olduğu; girdap akımları ve histerezis kayıplarının ihmal edilmesi gibi kabullenimlerdir [4].

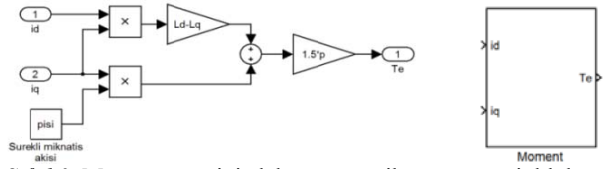
Simülasyon için oluşturulan blokların her biri aşağıda görülmektedir. Modelin anlaşılmasını ve geliştirilmesini sağlamak için bloklar alt sistemler halinde oluşturulmuştur.



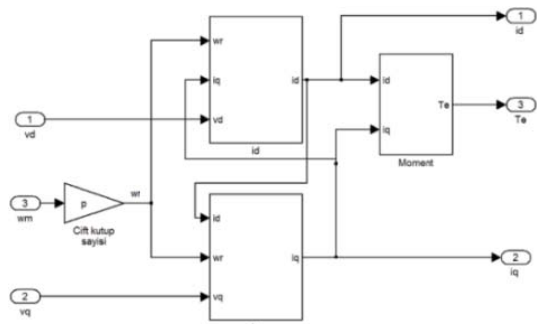
Şekil 1:  $i_d$  akımı bloğu ve alt sistemi.



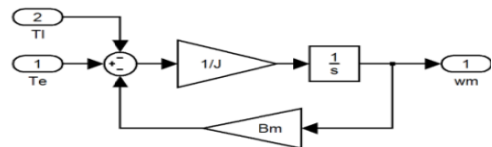
Şekil 2:  $i_q$  akımı bloğu ve alt sistemi.



Şekil 3: Motorun ürettiği elektromanyetik momente ait blok ve alt sistemi.



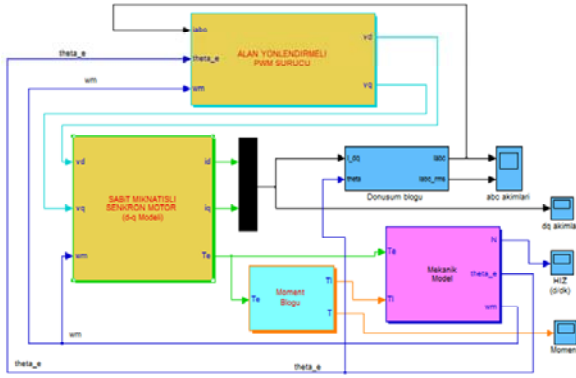
Şekil 4: SMSM'nin d-q eksenli modeli.



Şekil 5: SMSM'nin elektromekanik hız modeli.

Sürücü simülasyonunda histerisiz akım kontrolü kullanılmıştır. Simülasyonda mekanik hız geri beslemesi ile referans hız karşılaştırılarak bir hata sinyali elde edilmiştir. Bu sinyal PI denetleyiciden geçirilerek  $i_q$  akımı için referans değer elde edilmiştir. Referans akım değerinin motora ait maksimum akım değerini geçmesini engellemek için akım sınırlayıcı blok kullanılmıştır. Kullanılan vektör kontrol yöntemi alan yönlendirmeli olduğundan d eksen akımı için referans değer sıfırda tutulmuştur. Rotor referans düzlemindeki d-q akım referansları üç fazlı sisteme dönüştürülerek üç faz için referans akım değerleri elde edilmiştir. Bu değerler, gerçek üç faz akım değerleri ile karşılaştırılarak üç faz için hata sinyali üretilmiştir. Elde edilen bu hata sinyalleri, PWM bloğunda belirlenen histerisiz aralığın dışına çıkılıp çıkılmadığına bakılarak histerisiz bandın dışına çıkılması durumunda ilgili faz sargısına gerilim uygulanmıştır. Üç fazlı sistemde gerçekleşen bu işlemler rotor referans düzlemine (d-q) aktarılarak motorun istenen momenti üretmesi sağlanmıştır.

SMSM'nin alan yönlendirmeli vektör kontrolüne ilişkin Simulink şeması Şekil 6'da görülmektedir.



Şekil 6: SMSM'nin alan yönlendirmeli vektör kontrolüne ilişkin Simulink şeması.

## 5. Simülasyonda Kullanılan Arayüzler

Simülasyonda kullanılan motor parametreleri bir noktada toplanarak verilerin girilmesi ve farklı değerler için yeniden tekrarlanması kolaylaştırılmıştır. Sargı sıcaklığındaki değişimin sargı direnci üzerindeki ve dolayısıyla akım ve diğer veriler üzerindeki etkisini görebilmek ve simülasyonun daha gerçekçi olmasını sağlamak amacıyla motor sıcaklığı da hesaplamaya dâhil edilmiştir. Motor parametrelerinin girişine ilişkin oluşturulan bu arayüz Şekil 7'de görülmektedir.

Aynı şekilde alan yönlendirmeli PWM sürücü ile moment bloğuna ilişkin ara yüzler de oluşturulmuştur. Ancak sayfa sınırlaması nedeniyle burada onlara yer verilememiştir.

Oluşturulan sürücü arayüzü sayesinde motorun farklı hız, anahtarlama frekansı, PI değerleri ve histerisiz bandı için vereceği yanıtları görmek daha kolay hale getirilmiştir. Motorun farklı değerlerde yüklenmesine olanak sağlayan moment bloğu için oluşturulan arayüz sayesinde, motor miline uygulanan yükün değerini istenilen zamanda değiştirmek mümkündür.

Oluşturulan bu arayüzler sayesinde simülasyonu farklı güçlerdeki SMSM'ler ve sürücüler için tekrarlamak kolaylaştırılmıştır.

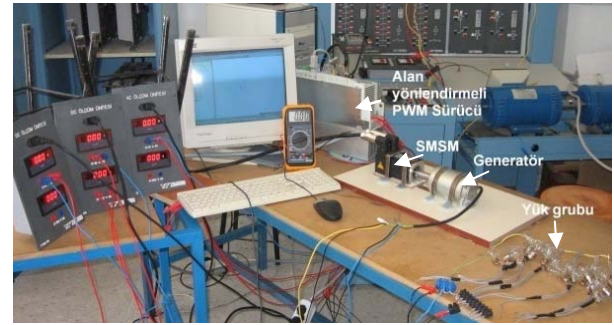
Şekil 7: SMSM'nin simülasyon parametreleri

## 6. Deneysel Ve Simülasyon Sonuçları

Deneysel çalışmada kullanılan 8 kutuplu SMSM'nin etiket bilgileri Resim 1'de görülmektedir. Resim 2'de ise deneysel çalışmanın yapıldığı deney düzeneği bulunmaktadır.

<b>Lenze</b>		Hans-Lenze-Strasse 1 D-31855 Aerzen http://www.Lenze.com		UL File No E210321 C	UL US CE	Made in Germany
3-MOT	Typ	MCS 06C41-RS080-A11N-ST500N-R0SU				
225 V-	0.25 kW	0.6 Nm	270 Hz	4050 1/min		
1.3 A	0.34 HP	Mo 0.8 Nm	U <sub>in</sub> 170 V	C86: 1310		
max 5.4 A	IP 54	I.C.L. F	Ta 40°C	KTY		
Geber Feedback RS	C416.82902498	Id.Nr.	15034946			
Bremse Brake	V- A Nm					
SN	1503494610428743					

Resim 1: Deneysel çalışmada kullanılan SMSM'nin etiketi.



Resim 2: Deneysel çalışma düzeneği.

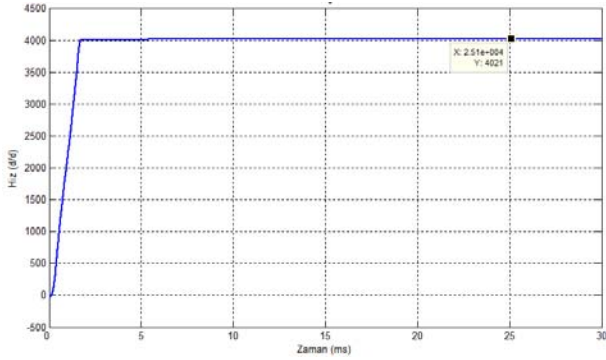
Resim 2'den de görüleceği gibi SMSM'yi yükleyebilmek için motor miline 12 V 190 W'lık DA generatörü akuple edilmiştir. Generatör 12 V 20 W gücündeki lamba grupları kullanılarak yüklenmiştir.

Yapılan deneylerde SMSM miline generatör yüksüz olarak bağlıyken SMSM mil gücünün 16 W olduğu hesaplanmıştır. Ardından 12 V'luk 20 W gücündeki 20 adet lamba kullanılarak SMSM'nin tam yükte yüklenmesi sağlanmıştır. Aynı deney yük sayısı kademeli olarak azaltılarak tekrarlanmıştır. Bu durumda endüvi sargı direnci 0.3 Ω olan generatörün lambalara sağladığı güç ile SMSM'nin vermiş olduğu mil gücü Tablo 1'de detaylı olarak verilmiştir.

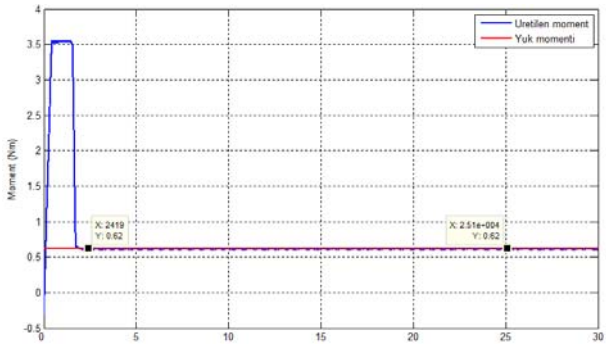
Oluşturulan arayüzlere deney sonucunda hesaplanan moment ile deney sırasında motorun ulaştığı sıcaklık değerleri

girilerek simülasyon başlatılmıştır. Deneyler anma devrinde yapıldığı gibi simülasyonlar da anma devrinde yapılmıştır. Referans hız olarak 4050 d/d'nın girildiği simülasyonlardan elde edilen hız, akım ve moment değerleri de deney sonuçları ile birlikte Tablo 1'de sunulmuştur. Yapılan deneylerde motorun devri 4020 ile 4050 d/d arasında salınım yaptığından tabloda ortalama değer olarak 4035 d/d verilmiştir.

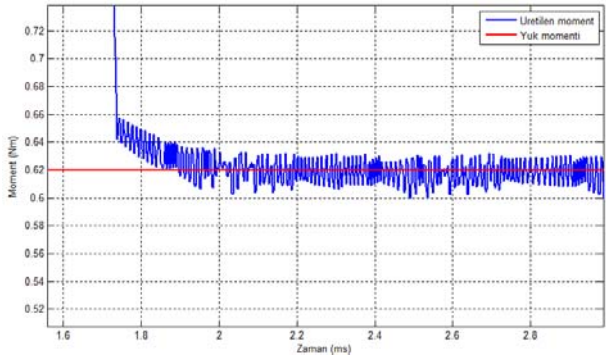
Boşta çalışma da dâhil olmak üzere toplam 10 adet deney ve simülasyon sonucu elde edilmiştir. Ancak sayfa sınırlaması nedeniyle burada yalnızca 0,62 Nm için elde edilen simülasyon eğrileri verilecektir. Diğer yük momentlerine ilişkin simülasyon sonuçları Tablo 1'de sayısal olarak sunulmuştur. 0,62 Nm için elde edilen hız, moment, moment eğrisinin büyütülmüş hâli, faz akımları, faz akımlarının etkin değeri, faz akımlarının etkin değer eğrisinin büyütülmüş hâli ve d-q eksenli akımlarına ilişkin eğriler sırasıyla Şekil 8, 9, 10, 11, 12, 13 ve 14'de görülmektedir.



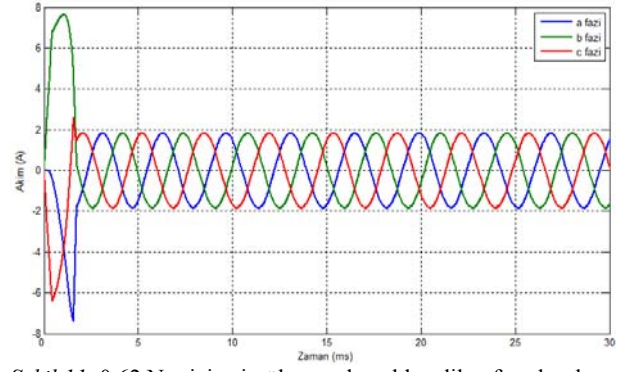
Şekil 8: 0,62 Nm için simülasyondan elde edilen hız eğrisi.



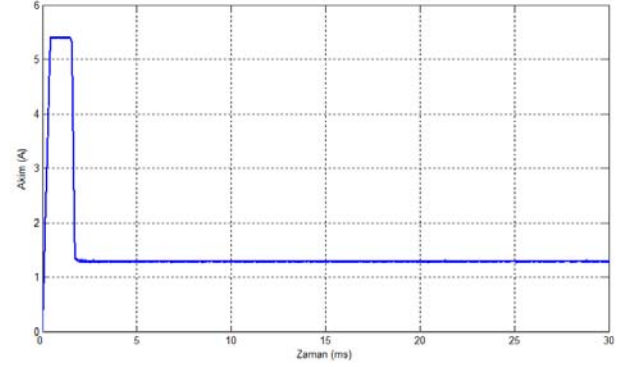
Şekil 9: 0,62 Nm için simülasyondan elde edilen moment eğrisi.



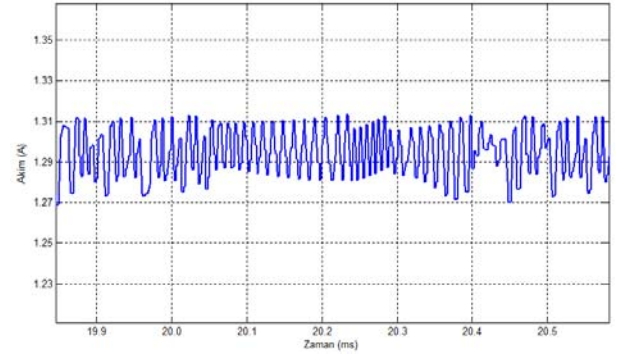
Şekil 10: 0,62 Nm için simülasyondan elde edilen moment eğrisinin büyütülmüş hâli.



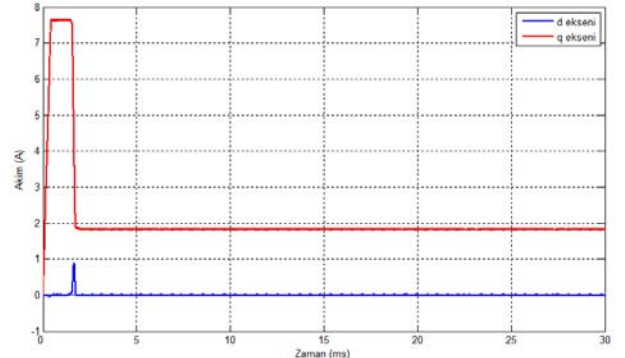
Şekil 11: 0,62 Nm için simülasyondan elde edilen faz akımları eğrisi.



Şekil 12: 0,62 Nm için simülasyondan elde edilen faz akımlarına ait etkin değer eğrisi.



Şekil 13: 0,62 Nm için elde edilen faz akımlarına ait etkin değer eğrisinin büyütülmüş hâli.



Şekil 14: 0,62 Nm için simülasyondan elde edilen d-q eksenli akımları eğrisi.

Tablo 1'deki akım ve moment hatası ölçüm ve hesaplama sonuçlarından simülasyon sonuçlarının çıkartılmasıyla elde edilmiştir. Simülasyondan elde edilen boşa çalışma dışındaki diğer tüm yüklü çalışma durumlarına ait hız değerleri, deneyde elde edilen hız aralığının içinde yer aldığından hız hatası için ayrı bir sütun oluşturulmamıştır.

Tablo 1'deki deney ve simülasyon sonuçları moment, akım ve hız için ayrı ayrı değerlendirilecek olursa:

- Simülasyon, üretilmesi istenilen moment değerini sürücünün histerisiz bandına uygun olarak  $\pm$  % 3,3'lük ( $\pm$  0,02 Nm'lik) sınırlar içerisinde salınım yaparak üretmektedir. Bu nedenle Tablo 1'deki momente ait simülasyon sonuçları, eğrilerin üst ve alt limitlerinin ortalaması olarak algılanmalıdır.
- Simülasyondan elde edilen hız sonuçları, deneyde elde edilen 4020 d/d ile 4050 d/d arasındaki hız aralığının içinde yer almaktadır. Tek farklılık motorun boşa çalışması durumundaki 10 d/d'lık farktır. Bu da % 0,2'lik bir hata olup ihmal edilebilir düzeydedir.
- Akım sonuçları karşılaştırıldığında motorun anma gücü ve buna yakın olan bölgelerinde sonuçların birbirine çok yakın seyrettiği görülmektedir. Örneğin 0,62 Nm'lik moment değerine ilişkin benzetim sonuçları incelendiğinde motor faz akımının deneyde 1,30 A simülasyonda ise 1,29 A olarak elde edildiği görülmektedir. Aradaki 0,01 A'lik fark % 0,7'lik bir hata olup simülasyonun yapılması sırasında varsayılan ve yukarıda sözü edilen bazı kabullenimlerden kaynaklanmaktadır. Boş çalışmaya yakın bölgelerde ise sonuçlar arasında 0,13 A'lik farklılıklar oluşmaktadır. Bu farklılıklar ise ölçü aletinden kaynaklanmaktadır. Çünkü ölçülen değerler ölçü aletinin ölçüm kademesindeki maksimum ölçüm değerine çok uzaktır. Ölçüm zorunlu olarak 10 A kademesinde yapılmış olup bir alt ölçüm kademesi 0,2 A'dir. Dolayısıyla düşük değerlerde hassas ölçümlerin sonuçları hataya daha açıktır. Motor etiketinde belirtilen 5,4 A'lik maksimum akım değerinin simülasyonlar sırasında tüm yük seçeneklerinde aşılmamış olması da ayrıca önemlidir.

## 7. Sonuç

Bu çalışmada SMSM'nin alan yönlendirmeli vektör kontrol yöntemine dayalı incelemesi yapılmıştır. Yapılan deneysel

çalışma ve simülasyonlardan elde edilen akım sonuçlarının, motorun anma gücüne yakın olan bölgelerinde ihmal edilebilir bir hata yüzdesi ile örtüştüğü görülmektedir. Yapılan simülasyonda istenilen momentin  $\pm$  0,02 Nm'lik sınırlar içerisinde üretildiği, hız yanıtının da deneyde ölçülen sınırlar içerisinde kaldığı, sadece motorun boşa çalışması durumunda % 0,2'lik kabul edilebilir bir hız hatası olduğu görülmüştür. Dolayısıyla başta hedeflenen farklı güçlerdeki SMSM'lerin, farklı yüklerle vereceği akım, hız ve moment tepkilerini deneysel çalışma yapmadan inceleme ve böylelikle ARGE çalışmalarına katkıda bulunma hedefine ulaşılmıştır.

Bu çalışma, sargı sıcaklığının simülasyona dâhil edilmesi ve akımın etkin değerine ilişkin eğrilerin çizdirilmesi bakımından ayrı bir önem taşımaktadır.

Motor sıcaklığının sabit mknatis üzerindeki olumsuz etkisinin dikkate alınması daha doğru sonuçlara ulaşılması bakımından büyük önem taşımaktadır. Buna yönelik çalışmalarımız devam etmektedir.

## 8. Kaynaklar

- [1] Pillay, P. and Krishnan, R., "Modeling, Simulation, and Analysis of Permanent-Magnet Motor Drives, Part I: The Permanent-Magnet Synchronous Motor Drive", *IEEE Transaction on Industry Applications*, Vol. 25, No 2, 1989.
- [2] Bal, G., Özgenel, M. C. ve Demirbaş, Ş., "Vektör Denetimli Kalıcı Mknatislı Senkron Motorun Uzay Vektör Darbe Genişliği Modülasyonu ile Performans Analizi", *Politeknik Dergisi*, Cilt: 10, Sayı: 1, Sayfa: 7-13 2007
- [3] Juming, S., Ming, Z. and Yanmin, S., "Study of Optimal Efficient Control of Permanent Synchronous Motor", *Electrical Machines and Systems*, 2003, Vol. 1, On page(s): 41- 44
- [4] Muni, B. P., Pillai, S. K. And Saxena, S. N., "Digital Simulation of Internal Power Factor Angle Controlled Surface Mounted Permanent Magnet Synchronous Motors", *Power Electronics, Drives and Energy Systems for Industrial Growth*, 1996., Vol. 2, On page(s): 900-906.

Tablo 1: Deney ve simülasyon sonuçları.

Yük sayısı (Adet)	Ölçüm Sonuçları			Hesaplama Sonuçları		Simülasyon sonuçları			Hata	
	Sıcaklık (°C)	Hız (d/d)	Akım (A)	Mil Gücü (W)	Moment (Nm)	Moment (N.m.)	Akım (A)	Hız (d/d)	Akım (A)	Moment (N.m.)
20	41	4035	1,30	261,1	0,62	0,62	1,29	4021	0,01	0
18	45	4035	1,25	240	0,57	0,57	1,22	4024	0,03	0
16	49	4035	1,16	226,7	0,54	0,54	1,18	4026	-0,02	0
14	51	4035	1,12	216,8	0,51	0,51	1,14	4028	-0,02	0
12	52	4035	1,01	194,7	0,46	0,46	1,07	4031	-0,06	0
10	54	4035	0,97	185,4	0,44	0,44	1,04	4033	-0,07	0
8	54	4035	0,83	158,5	0,38	0,38	0,96	4037	-0,13	0
6	54	4035	0,74	134,3	0,32	0,32	0,87	4041	-0,13	0
4	54	4035	0,61	104,1	0,25	0,25	0,78	4046	-0,17	0
0	45	4035	0,36	16	0,04	0,04	0,48	4060	-0,12	0