

## Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Sayısal İşaret İşlemcisi ile Histerezis Akım Denetleyicili Alan Yönlendirme Kontrolünün Gerçekleştirilmesi

\*Sencer ÜNAL<sup>1</sup>, Mehmet ÖZDEMİR<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Elazığ  
\*sencerunal@firat.edu.tr

(Geliş/Received:25.11.2014; Kabul/Accepted:03.03.2015)

### Özet

Bu makalede, sürekli mıknatıslı senkron motor (SMSM)' un histerezis akım denetleyicili stator akısı alan yönlendirme kontrol yöntemi incelenmiştir. SMSM' un alan yönlendirme kontrolüne ilişkin MATLAB/Simulink benzetim modeli ve deneysel uygulama düzeneği gerçekleştirilmiştir. Uygulama devresi dSPACE 1103 denetleyici kart kullanılarak gerçek zamanlı olarak çalıştırılmıştır. SMSM benzetim modeli ve uygulama devresi değişik hız ve yük koşullarında çalıştırılarak gösterdiği performans incelenmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Sürekli mıknatıslı senkron motor, Alan yönlendirme kontrol, Hız kontrol, DSP kontrolör.

## Implementation of Field Oriented Control with Hysteresis Current Controlled for Permanent Magnet Synchronous Motor by Using Digital Signal Processor

### Abstract

In this paper, stator flux field oriented control controller of permanent magnet synchronous motor (PMSM), where current controller is used as hysteresis current controller is presented.. The Field Oriented Control (FOC) of the permanent magnet synchronous motor has been simulated by using MATLAB/Simulink package program and implementation of the circuit has been realized. dSPACE 1103 card is used to FOC of the PMSM for real time applications. PMSM has been modelled and simulated. Simulation results have been taken for various both speed and load conditions. The performance of control systems and all results have been given comparatively.

**Keywords:** Permanent magnet synchronous motor, field oriented control, speed control, DSP controller.

### 1. Giriş

Gelişen teknoloji ile birlikte endüstriyel tahrik sistemlerinde, dayanıklı, yüksek verimli, kolay denetlenebilen ve bakım gereksinimi az olan düşük maliyetli elektrik makinalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu gereksinimler sürekli mıknatıslar ile uyarılmış yeni tip makinaların geliştirilmesine neden olmuştur. Ayrıca yarı iletken teknolojisi ve paralel olarak güç elektroniğinde ve mikroişlemcilerdeki gelişmeler ve yeni kontrol yöntemlerinin getirdiği imkanlar ile sürekli mıknatıslı makinaların tahrik sistemlerine uygulanabilirliği artmıştır [1-2]. SMSM' ların gelişmelerine paralel olarak bu alandaki literatürde büyük bir hareketlilik

gözlenmektedir. Literatür incelemesinde gözlenen araştırmalar üç ana grupta incelenebilir. Bunlar, yeni tasarımlar geliştirmeye yönelik çalışmalar, analiz ve modelleme yöntemlerini geliştirmeye yönelik çalışmalar ve mevcut sistemlerin niteliklerini arttırmaya yönelik, özellikle denetim ağırlıklı çalışmalar olarak sıralanabilir [1-3].

Tasarım ve analiz ile ilgili çalışmalarda, motorun üretebileceği moment ve akı dağılımları, motorun fiziksel boyutları ve kullanılacak malzemenin özellikleri göz önünde bulundurularak en ekonomik ve en iyi performansı sağlayan motor tipi belirlenmektedir. Böylelikle zamandan ve imalat

öncesi yapılan harcamalardan tasarruf çalışmaların daha yaygın olarak yapıldığı gözlenmektedir. Denetim çalışmaları, alan esaslı kontrol, akı zayıflatma yöntemi ve doğrudan moment kontrolünü içeren alan yönlendirmeli kontrol ağırlıklıdır.

Alan yönlendirmeli kontrolde amaç, gerçek zamanda moment değişimlerini, rotorun mekanik hızını ve geçici rejimlerde faz akımlarında meydana gelen sıçramaları kontrol edebilmektir. Bu kontrolün yapılabilmesi için, üç fazlı sabit referans çatıdaki elektriksel eşitliklerin iki fazlı dönen referans çatı düzlemine dönüştürülmesi gerekir. Böylelikle elektriksel eşitliklerdeki zaman ile konum arasındaki bağılılığı kaldırdığı için denklemler daha basit hale geleceğinden; hem karmaşık yapı ortadan kalkar, hem de hesaplama süresi azalır.

Bu çalışmada SMSM' un dinamik denklemlerinden faydalanarak histerezis alan yönlendirmeli denetimi yapılmış ve gerçek zamanlı olarak konum denetimi gerçekleştirilmiştir. Bu duruma ilişkin ilk olarak MATLAB/SIMULINK programı ile benzetim modelleri oluşturulmuştur. Daha sonra üç fazlı SMSM' nin deneysel uygulama düzeneği gerçekleştirilerek uygulama devresi dSPACE 1103 denetleyici kartı kullanılarak gerçek zamanlı olarak çalıştırılmıştır. Benzetim modeli ve uygulama devresinden elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

## 2. SMSM'un Histerezis Akım Denetleyicileri ile Stator Akısı Alan Yönlendirmeli Kontrolü

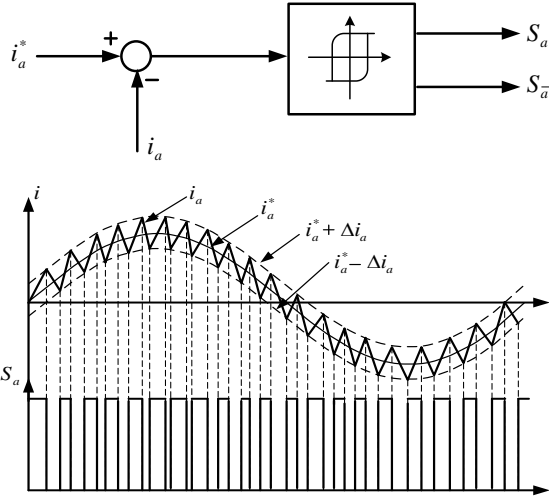
Stator akısı alan yönlendirme, SMSM' larda kullanılan en yaygın kontrol yöntemidir. Alan yönlendirmenin yapılabilmesi için rotor referans çatı modeline ihtiyaç vardır. Dolayısıyla bu kontrol yönteminde rotor pozisyonunun bilinmesi gerekir. Bu yöntemde, stator enine eksen akımı (d eksen akımı) sıfırda tutulur. Moment q eksen akımının bir fonksiyonudur. Bu alan yönlendirme yönteminde aynı d.a. motorlarındaki gibi tam olarak ayrıştırılmış bir yapı elde edilir. Bu yöntem en basit alan yönlendirme yöntemi olup, moment doğrusaldır. Ancak güç faktörü kontrolüne uygun bir yöntem

edilmektedir. Literatürde denetim ile ilgili olan değildir. Çünkü yük arttıkça giriş güç faktörü düşmektedir [3].

Alan yönlendirmeli kontrol kullanılan motor sürücülerinde, akım kontrollü gerilim kaynaklı eviriciler tercih edilmektedir. Akım kontrolünde moment akımıyla referans akım karşılaştırılarak anahtarlama sinyalleri elde edilir. Burada akım referansları, motor akımlarını kendisini gecikmesiz olarak izlemeye zorlar. Gerilim kaynaklı eviricilerde en çok kullanılan yöntem, akım kontrolü histerezis kontroldür.

Histerezis akım denetleyiciler, referans akım ile motor sargılarından ölçülen akımı karşılaştırmak suretiyle elde edilen hata sinyalini belirli bir aralıkta tutmak için eviricideki güç anahtarlarını uygun sıra ile anahtarlar. Histerezis kontrol edicide amaç, stator akımları kendi referanslarını bir histerezis bant genişliği ile izlemeye zorlamaktır. Bang-bang kontrol olarak da isimlendirilen bu yöntemin, alan yönlendirmeli motor kontrolünde uygulanması kolaydır. Şekil 1' de histerezis akım denetleyicinin yapısı gösterilmiştir. Burada  $i_a^*$  a-fazı referans akımını,  $i_a$  motordan ölçülen a-faz akımını,  $\Delta i_a$  histerezis bant genişliğini,  $S_a$  ve  $S_{\bar{a}}$  ise sırasıyla a ve  $\bar{a}$  anahtarlama sinyallerini göstermektedir. Burada akım referansları, ölçülen stator akımları ile karşılaştırılır. Bu karşılaştırma sonucunda elde edilen hata histerezis kontrol ediciye girilir.

Histerezis akım denetleyicilerde, anahtarlama frekansının değeri bant genişliğine bağlıdır. Histerezis bant genişliğinin azaltılması gerçek akımın referans akıma daha yakın olmasını sağlar. Ancak evirici devresinde kullanılan yarı iletken anahtarlarının anahtarlama frekansını aşmamak gerekir. Ayrıca anahtarlama frekansı, referans sinyalin büyüklüğüne ve frekansına bağlı olarak değişiklik gösterir. Akım referanslı kontrolde  $i_a$  ve  $i_a^*$  akımları arasında iyi bir takip için yüksek anahtarlama frekanslarına ihtiyaç vardır. Anahtarlama frekansı çok yüksek değerlere çıkabileceğinden anahtara bir sınırlama konulmalıdır. Yapısının basit olması ve doğruluk oranının yüksek olması gibi avantajlarının yanında anahtarlama frekansının değişken olması ve anahtarlama kayıplarının yüksek olması gibi dezavantajları vardır [4-9].



Şekil 1. Histeresis akım denetleyici

### 3. SMSM' un Matematiksel Modeli

Sinüzoidal akım beslemeli SMSM' ların matematiksel olarak modellenmesinde rotor referans çatı dönüşümü kullanılmıştır. Rotor referans çatı dönüşümünde, stator değişkenleri rotora sabitlenmiş referans bir çatıya dönüştürülür ve referans çatı açısal hız  $\omega_e'$  de döner. SMSM' un rotor referans çatıdaki gerilim denklemleri Denklem (1) ile ifade edilebilir.

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} \lambda_d \\ \lambda_q \end{bmatrix} - \omega_e \begin{bmatrix} \lambda_q \\ \lambda_d \end{bmatrix} \quad (1)$$

Bu eşitlikte  $V_d$ ,  $V_q$ ,  $i_d$  ve  $i_q$  sırasıyla d ve q eksenlerindeki gerilimleri ve akımları belirtir.  $R_s$  stator direncini ve  $\omega_e$  elektriksel hızı ifade etmektedir.

Manyetik akı bileşenleri Denklem (2) ile ifade edilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \lambda_d \\ \lambda_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{3}{2}} \lambda_m \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

d-q eksen takımındaki devre eşitlikleri genel olarak şu şekilde ifade edilebilir.

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_e L_q \\ \omega_e L_d & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \sqrt{\frac{3}{2}} \lambda_m \omega_e \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Rotor referans çatıda moment ifadesi Denklem (4)' le ifade edildiği gibidir.

$$T_e = \frac{P}{2} \left\{ \begin{bmatrix} i_d & i_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & -\frac{3}{2} L_\theta \\ -\frac{3}{2} L_\theta & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \sqrt{\frac{3}{2}} \lambda_m \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \right\} \quad (4)$$

Denklem (4)' in ilk terimi relüktans momenti, ikinci terimi ise mıknatıs tarafından üretilen momenti gösterir. Yuvarlak rotorlu makinalarda  $L_\theta$  sıfır olduğundan relüktans momenti mevcut değildir. Mıknatısları gömülü makinalarda relüktans moment terimi,  $i_d$  akımı negatif olduğu zaman toplam momente pozitif olarak katkıda bulunmaktadır. Böylelikle çıkık rotorlu makinada momenti artırmak relüktans terimi ile gerçekleştirilebilir.

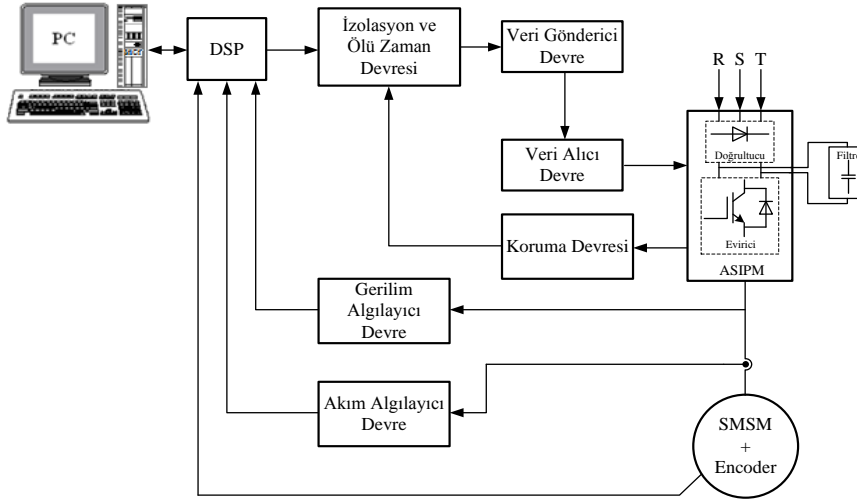
Enerji dönüşümü ile elde edilen moment, mekanik yükün karşılanmasında kullanılır. Motor dinamik eşitlikleri cinsinden elektromanyetik moment

$$T_e = j_m p(\omega_m) + B_m(\omega_m) + T_y \quad (5)$$

ile ifade edilir. Burada motor tarafından üretilen moment  $T_e$  olup,  $T_y$  yük momentini,  $B_m$  sürtünme katsayısını,  $\omega_m$  rotorun mekanik hızı ve  $j_m$  ise sistemin dönüş ataletini gösterir.

### 4. SMSM Sürücüsünün Uygulama Devresi

SMSM' un alan yönlendirmeli kontrolü için gerçekleştirilen sürücü devre düzeni blok diyagramı Şekil 2' de verilmiştir. Devrede motoru sürmek için Mitsubishi firmasının ürettiği Application Specific Intelligent Power Module (AS-IPM) ve denetleyici olarak da dSPACE firmasının ürettiği DS1103 Ace Kit kullanılmıştır.



Şekil 2. SMSG' un deneysel uygulama düzeneğinin blok diyagramı

Deneysel düzeneği; eviricinin güç devresi, ölçüm devreleri, ölü-zaman ayarı ve koruma devrelerinden oluşmaktadır. Uygulamada evirici olarak 600V 20A AS-IPM PS11035 modül kullanılmıştır. AS-IPM modülün içinde 3 faz doğrultucu devresi, 6 adet IGBT anahtar ve bu anahtarlar için sürme ve koruma devreleri bulunmaktadır.

Eviricinin beslemesi için gerekli olan d.a. gerilim, modül içindeki doğrultucu devresi tarafından sağlanmaktadır. Eviricinin güç devresi ile denetleyici kart ve bu kart ile beraber kullanılan diğer devreler arasında elektriksel izolasyonu ICPL-2631 optik-izolatör entegreleri sağlamaktadır.

Eviricinin aynı kolu üzerindeki anahtarlar için ölü-zaman ayarı ise, IXYS firmasının tek-fazlı ve üç-fazlı sayısal kontrollü güç dönüşüm devrelerini gerçekleştirmek için tasarladığı IXDP630PI sayısal ölü-zaman entegresi kullanılarak yapılmaktadır.

Denetleyici kartın I/O çıkışlarından alınan anahtarlama sinyalleri bu izolatör ve ölü zaman devrelerinden geçirilerek evirici anahtarlarının sürme devresine uygulanmaktadır.

Gerçek-zamandaki akım ve gerilim bilgilerini ölçüp, bilgisayar ortamına aktarmak için ise, LEM firmasının LA25-NP akım algılayıcısı ve LV25-P gerilim algılayıcısı kullanılmıştır.

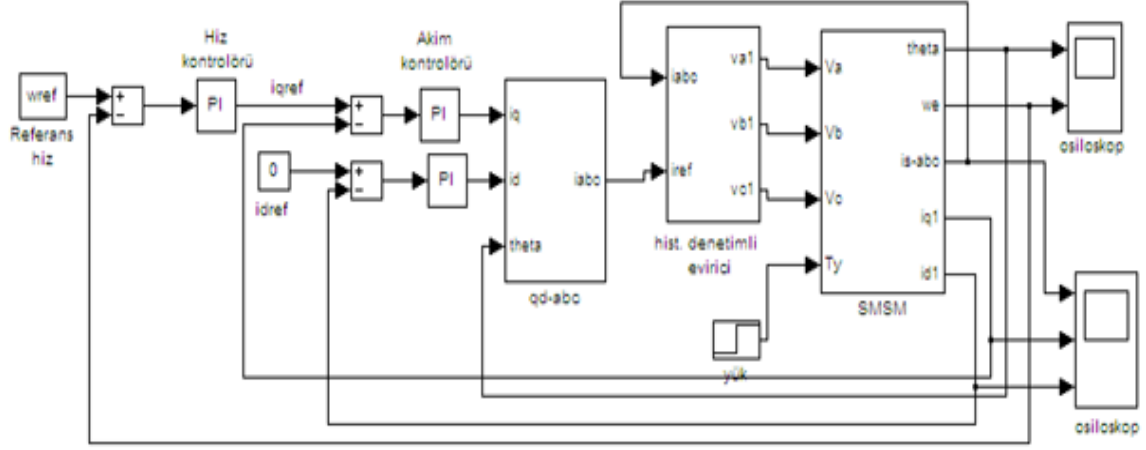
Deneysel sonuçların bilgisayar ortamına alınıp incelenmesi ve kaydedilmesi için dSPACE'in ControlDesk yazılımı kullanılmıştır. Burada oluşturulan bir platform üzerinde değişkenler istenilen zaman aralıkları ile alınıp bir \*.MAT dosyası olarak kaydedilebilmektedir.

## 5. Benzetim Modeli ve Deneysel Sonuçlar

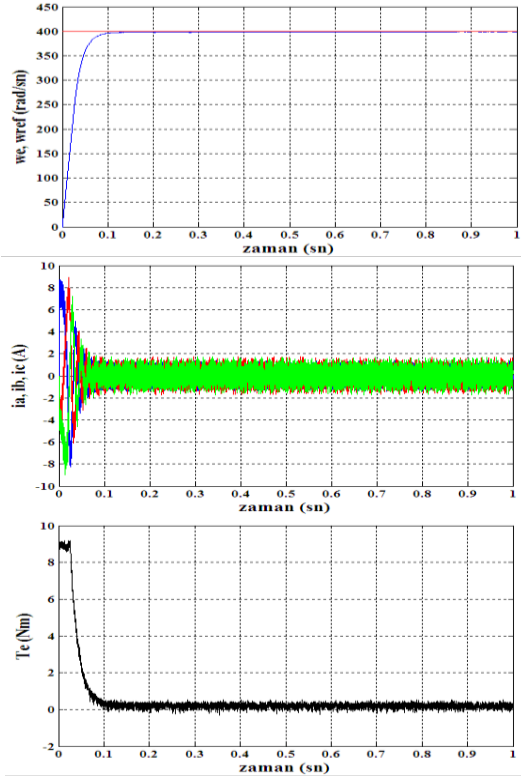
Sayısal benzetim, SMSG' un histerezis denetimli alan yönlendirmeli kontrol yapısına uygun olarak tasarlanmış olup, oluşturulan benzetim modeli Şekil 3' de gösterilmiştir. Benzetim modeli, PI kontrolörler, histerezis denetimli evirici, SMSG ve eksen dönüşüm bloklarından oluşmaktadır. Oluşturulan modelde referans olarak girilen rotor hız değerine ve yük momentinin değişimine bağlı olarak SMSG' un dinamik davranışı incelenebilmektedir.

Benzetim ve deneysel çalışmalar için oluşturulan modellerde sabit adım aralıklı Euler integral çözüm metodu kullanılmış ve örnekleme zamanı  $5e-5$  olarak alınmıştır. Histerezis denetimi ile alan yönlendirmeli kontrolü yapılan SMSG' un farklı ivmelenme, hız değişimi ve yük değerleri için benzetim ve deneysel sonuçları karşılaştırmalı olarak alınmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4-9' da verilmiştir.

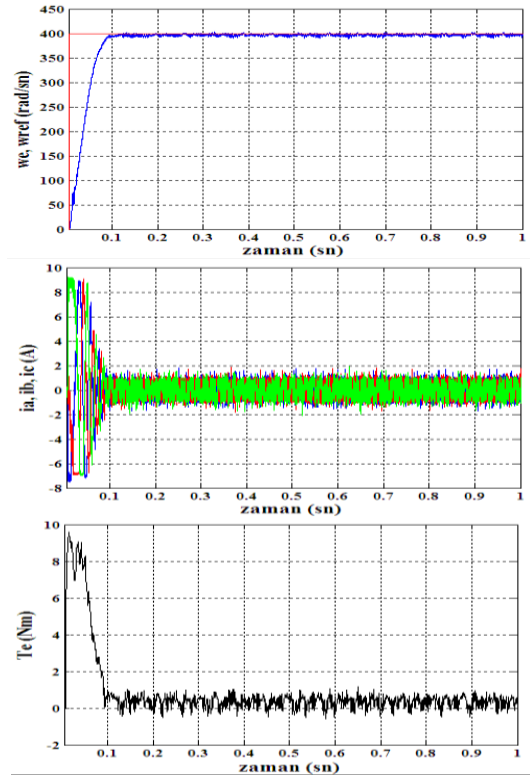
Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Sayısal İşaret İşlemcisi ile Histeresis Akım Denetleyicili Alan Yönlendirme Kontrolünün Gerçekleştirilmesi



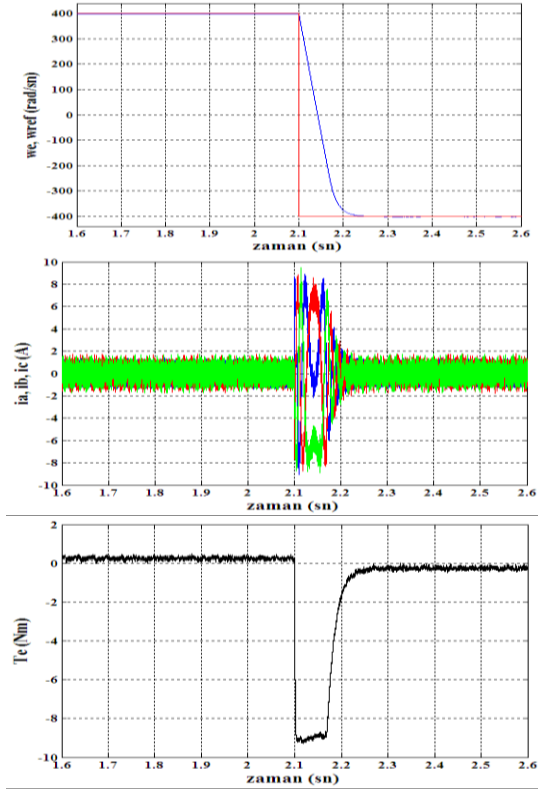
Şekil 3. SMSM' un histeresis denetimli alan yönlendirmeli kontrolünün Matlab/Simulink benzetim modeli



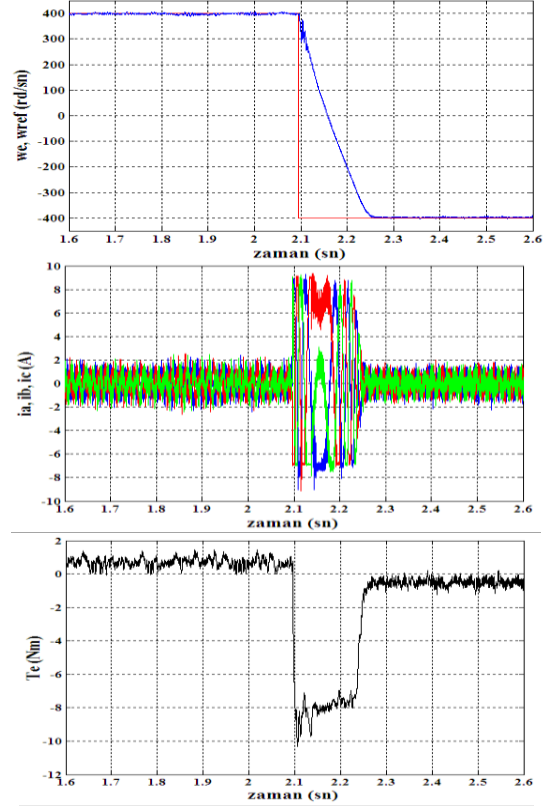
Şekil 4. 0-400rad/s yol alma anındaki hız, faz akımları ve moment değişimlerine ait benzetim sonuçları



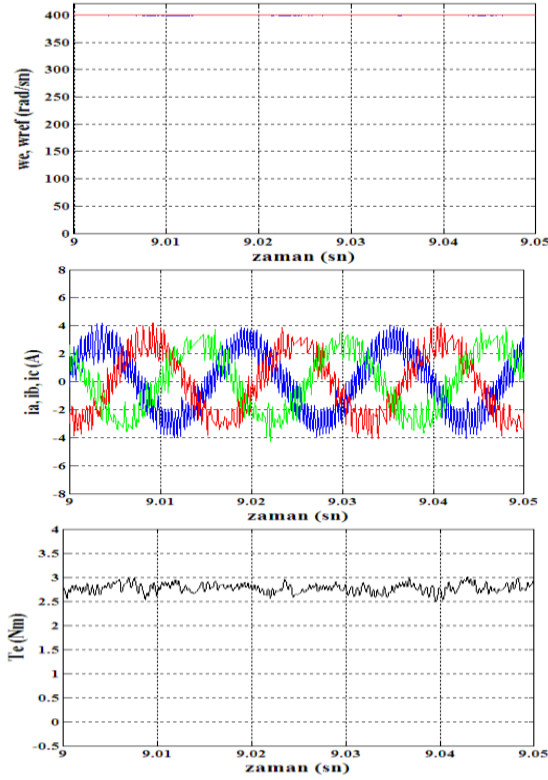
Şekil 5. 0-400rad/s yol alma anındaki hız, faz akımları ve moment değişimlerine ait deneysel sonuçlar



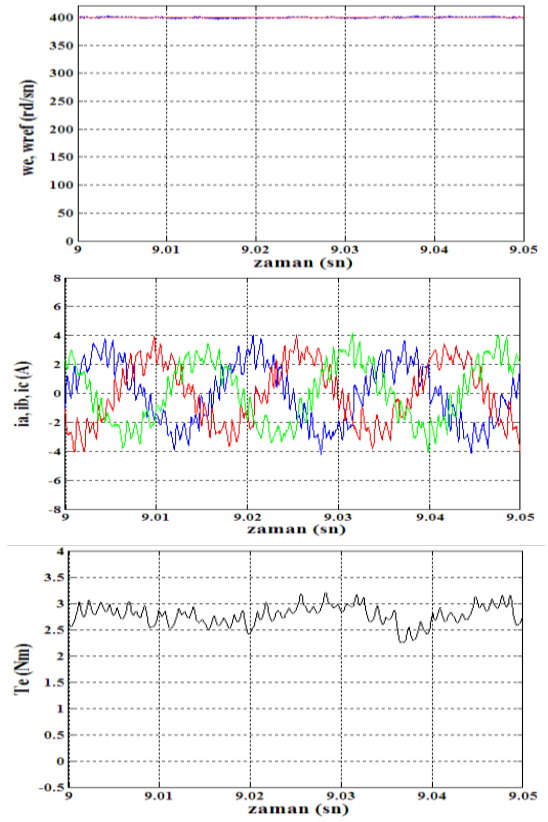
Şekil 6. Hızın 400rad/s' den -400rad/s'ye gitmesi durumunda hız, faz akımları ve moment değişimlerine ait benzetim sonuçları



Şekil 7. Hızın 400rad/s' den -400rad/s'ye gitmesi durumunda hız, faz akımları ve moment değişimlerine ait deneysel sonuçlar



Şekil 8. 400rad/s' de 2.75 Nm' lik yük varken sürekli durumda hız, faz akımları ve moment değişimlerine ait benzetim sonuçları



Şekil 9. 400rad/s' de 2.75 Nm' lik yük varken sürekli durumda hız, faz akımları ve moment değişimlerine ait deneysel sonuçlar

SMSM' un histeresis denetimli algılayıcı alan yönlendirme kontrolü için oluşturulan Matlab/Simulink benzetim modeli, deneysel modelle daha doğru bir kıyaslama yapılabilmesi açısından deneysel modelin çalışma şartlarına göre çalıştırılarak benzetim sonuçları alınmıştır.

Sonuçlar incelendiğinde, genel anlamda deneysel sonuçlar ile benzetim modelinden alınan sonuçlar benzerlik göstermektedir. Alınan sonuçlardan yol alma, değişken referans hız bilgisi ve yük koşullarında motorun hız cevabının referans hız değişimini doğru bir şekilde takip ettiği görülmektedir. Deneysel çalışmada özellikle sürekli durumda hız ve momentte oluşan dalgalanmalar benzetim modelinden alınan sonuçlara göre daha fazladır. Sürekli durumda verilen benzetim ve deneysel sonuçlarından, yüklü durumda motor hızının referans hızı takip ettiği görülmektedir. Ayrıca motor yüklendiğinde sürekli durumdaki momentin değeri yük ile orantılı bir değeri takip ettiği görülmektedir. Yük değeri arttıkça faz

akımlarının anlık değerlerinin de arttığı gözlenmiştir.

## 6. Sonuçlar

Bu çalışmada, SMSM' un stator akısı alan yönlendirme kontrol yöntemi gerçekleştirilmiştir. Alan yönlendirmenin yapılabilmesi için rotor referans çatı modeline ihtiyaç olduğundan, kontrol sisteminin modeli için rotor referans çatıdaki matematiksel denklemleri kullanılmıştır. SMSM' un algılayıcı alan yönlendirme kontrolüne ilişkin MATLAB/Simulink' te benzetim modeli oluşturulmuştur. Elde edilen benzetim modeli sonuçlarının doğruluğunun test edilebilmesi için deneysel uygulama düzeneği gerçekleştirilmiş ve alınan sonuçlara göre sistemin doğru çalıştığı görülmüştür. Kullanılan kontrol yöntemi ile motorun referans hızı kısa sürede ulaştığı ve sürekli durumda referans hızı yüksek doğrulukla takip ettiği görülmüştür. Ani hız ve yük

değişimlerinde sistemin hızlı cevap verdiği ve hata oranının oldukça az olduğu gözlenmiştir.

## 7. Kaynaklar

1. Jons, T.M., Kliman, G.B. and Neumann, T.W., 1986, Interior Permanent Magnet Synchronous Motors for Adjustable-Speed Drives, IEEE Trans. Ind. Appl. , Vol. 22, No.4, 738-747.
2. Batzel, T.D. and Lee, K.Y., 2000, A Diagonally Recurrent Neural Network Approach to Sensorless Operation of The Permanent Magnet Synchronous Motor, Power Engineering Society Summer Meeting, IEEE, 2441-2445.
3. Gümüş, B., 2004, Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Bulanık Mantık Gözlemleyicisi Kullanarak Vektör Kontrolü, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
4. Demirbaş, Ş., 2001, Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Konum Algılayıcısız Denetimi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
5. Uddin, M.N., 2000, Intelligent Control of an Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Drive, PhD Thesis, Faculty of Engineering and Applied Science Memorial University of Newfoundland.
6. Parsa, L., 2005, Performance Improvement of Permanent Magnet AC Motors, PhD Thesis, Electric Engineering, Texas A&M University, 129p.
7. Jons, T.M., Kliman, G.B. and Neumann, T.W., 1986, Interior Permanent Magnet Synchronous Motors for Adjustable-Speed Drives, IEEE Trans. Ind. Appl. , Vol. 22, No.4, 738-747.
8. Gutt, H.J., Bosch, V. and Reismayr, D., 1999, Sensorless Direct Control of Brushless Inverter Fed Permanent Magnet Excited AC Motor Drive System, in proc. 30th Annu. IEEE Power Electronics Specialists Conf., 838-841.
9. Yu, Z., Mohammed, A. and Panahi, I., 1997, A Review of Three PWM Techniques, Proceeding of The American Control Conference, 257-261.