

SENSÖRSÜZ DOĞRUDAN MOMENT KONTROLLÜ SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MOTOR SÜRÜCÜLERİ İÇİN BAŞLANGIÇ ROTOR KONUMUNUN YAPAY SİNİR AĞI YARDIMIYLA BELİRLENMESİ

M.Zeki BİLGİN¹

¹Elektrik Mühendisliği Bölümü
Mühendislik Fakültesi
Kocaeli Üniversitesi, Veziroğlu Yerleşkesi, 41300,Kocaeli

¹e-posta: bilgin@kou.edu.tr

Anahtar sözcükler: Sürekli Miknatıslı Senkron Motor, Sensörsüz Konum Algılama, Yapay Sinir Ağı

ABSTRACT:

This paper presents a method to determine the initial rotor position of Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) using Artificial Neural Network (ANN). The inductance variation is a function of the rotor position and stator current for PMSM. A high frequency and low magnitude voltage is applied to the stator windings and examining the effects the stator currents by using ANN for initial rotor position detection.

1. GİRİŞ

Sürekli Miknatıslı Senkron Motorlar (SMSM) yüksek performans isteyen servo uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek moment/atalet oranı, yüksek verimi ve yüksek moment/ağırlık oranı gibi özellikleri tercih sebebidir. SMSM sürücü sistemlerinde rotor akı açısı çoğunlukla gerçek rotor konumundan, optik encoder veya resolver konum algılayıcıları kullanılarak belirlenir. Bazı uygulamalarda ise bu algılayıcıların kullanılması istenmez. Çünkü; bu elemanların fazladan yer kaplamaları, toplam ağırlığı artırmaları, sürücü için birçok bağlantı içermeleri, gürültü sinyallerinden parazitten etkilenmeleri gibi olumsuz yanları vardır. Tüm bu olumsuzluklar sürücü verimini olumsuz etkiler.

SMSM' ler için son yıllarda geliştirilen Doğrudan Moment Kontrol (DMK) tekniğinde başlangıç anında yani rotor dururken rotor konumunun bilinmesi gereklidir [1]. Aksi durumda başlangıçta rotorun kısa sürede olsa yanlış yönde dönme ihtimali mevcuttur. Rotor konum algılayıcısı kullanılan sistemlerde bu kolayca hesaplanabilir. Fakat algılayıcı kullanılmadığı durumda rotor konumunu belirlemek için farklı yöntemler geliştirilmesi gerekmektedir. Literatürde şu ana kadar herhangi bir motorun başlangıç rotor konumunu algılamak için bazı algoritmalar önerilmiştir. Bunlar genelde; Kalman filtresi [2],

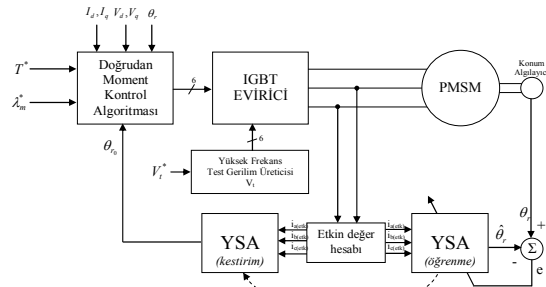
gözetleyici [3], endüklenen gerilim ölçümü(zıt emk), akım ve gerilim sinyallerini kullanarak [4-5], motor manyetik devresi kullanılarak [6] yapılır.

Endüklenen gerilim ölçümü yönteminde bir sonuç alınması endüklenen gerilimin varlığına bağlıdır. SMSM' de böyle bir gerilimin olması için rotor hareketinin olması gereklidir ve bu gereklilik az bir sürede olsa motorun ters yönde dönmesini gerektirir. Diğerlerinde ise akım kontrolörüne ihtiyaç vardır. Halbuki DMK' de akım kontrolörüne ihtiyaç yoktur.

Bu makalede SMSM' nin başlangıç anında rotor konumu rotor manyetik devresinden faydalanılarak belirlenmeye çalışılmıştır. Motora, rotoru hareket ettirmeyecek nitelikte gerilimler uygulanarak motor fazlarından akan akımlar ve o andaki rotor konumu kaydedilmiştir. Farklı rotor konumları için işlemler tekrarlanmış ve Yapay Sinir Ağı (YSA) için öğrenme seti oluşturulmuştur. YSA bu set kullanılarak eğitilmiştir. Çalışma modunda ise motor ilk olarak test gerilimleri ile beslenip ölçülen akımlar YSA' ya uygulanarak SMSM için anlık başlangıç rotor konumu belirlenmiştir.

2. SİSTEM TANIMI

Genel yapısı ile önerilen sistem Şekil-1' deki gibidir.



Şekil-1. Genel Sistem yapısı

Önerilen başlangıç rotor konumu belirleme yöntemi üç aşamadan oluşmaktadır. İlk olarak veri toplama, sonrasında verileri YSA 'ya öğretme ve son olarak ta öğrenmiş YSA' yı kullanma.

Sistem bir sürücü üzerinden beslenmektedir. Sürücü normal çalışma moduna geçmeden önce başlangıç rotor konumuna ihtiyaç duyulduğu an rotor konumu algılamakta kullanılan verileri üretmek için farklı bir modda çalıştırılır. Veri toplama işlemi bir kez yapılır. Bu işlemde ilk olarak rotor herhangi bir konuma getirilir ve bu konum kaydedilir. Sonrasında motora rotoru hareket ettirmeyecek büyüklükte gerilimler uygulanarak motor 3 faz akımları ölçülür ve kaydedilir. Rotor konumu değiştirilerek aynı işlemler tekrar edilir. Bu çalışmada rotor konumu için 5 derece aralıklarla 0-180 derece arasında 36 veri alınarak kullanılmıştır. Alınan bu veriler YSA' ya öğretilir. Normal işletme moduna geçmeden önce sürücü motora önceden belirlenen ve YSA' yı eğitmekte kullanılan gerilim sinyallerini uygular ve bu sinyallerin cevaplarını alır. Alınan bu cevaplar önceden eğitilmiş YSA 'ya uygulanır. YSA çıkışında o anki rotor konumu üretilir. Bu bilgi kullanılarak motor için başlangıç rotor konumu belirlenmiş olur.

3. SMSM' NİN DOĞRUDAN MOMENT KONTROLÜ

Doğrudan moment kontrolü, referans moment ve referans akıya göre stator gerilimlerinin hesabına dayanır. Diğer bazı tekniklerde olduğu gibi akım kontrolüne gerek yoktur. Yöntem daha az motor parametresine ihtiyaç duyar. Sadece stator direnci parametre olarak kullanılır [7]. Stator akı vektörü kestirimi yapılmalıdır. Stator akı eşitliğinden;

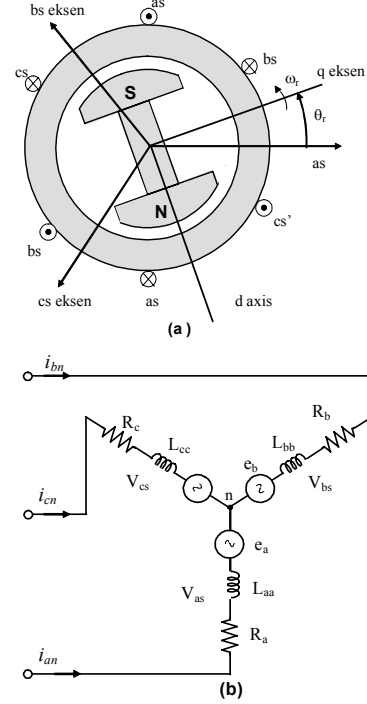
$$\frac{d\phi_s}{dt} = V_s - i_s r_s \quad (1)$$

$$\phi_s = v_s t - r_s \int i_s dt + \phi_s|_{t=0} \quad (2)$$

Denklem 1 ve 2 den de görüldüğü üzere stator akısını hesaplamak için başlangıç anında rotor konumunun bilinmesi gerekmektedir. DMK algoritması [1]' de ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Burada tekrar anlatılmayıp sadece $\phi_s|_{t=0}$ hesabının yapılabilmesi için önerilen yöntem anlatılacaktır.

4. SMSM' NİN MATEMATİKSEL MODELİ

Benzetim çalışması için SMSM' nin matematiksel modeli geliştirilmelidir. Geliştirilen modelde manyetik doyumun olmadığı, tüm parametrelerin sabit olmadığı ve çalışma şartlarına bağlı olduğu kabul edilmiştir. Evirici harmoniklerinin etkisi ve işletme sıcaklığı ihmal edilmiştir. Evirici anahtarlarının ideal olduğu kabul edilmiştir. SMSM eşdeğer devresi Şekil-2' de gösterilmiştir.



Şekil-2. a- İki kutuplu SMSM' nin yapısı, b- Stator Sargıları

SMSM 3 fazlı, yıldız bağlı, 4 kutuplu, 3 HP 5000 devir/dakika etiket değerlerine sahiptir. Stator sargıları eşit sinüzoidal dağıtılmış ve 120 derece fazlı yerleştirilmiştir. Şekil-2.b' de görülen eşdeğer devreden ;

$$V_{as} = r_s i_{as} + L_{ss} \frac{di_{as}}{dt} + \omega_r \lambda_m \cos(\theta_r) \quad (3)$$

$$V_{bs} = r_s i_{bs} + L_{ss} \frac{di_{bs}}{dt} + \omega_r \lambda_m \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (4)$$

$$V_{cs} = r_s i_{cs} + L_{ss} \frac{di_{cs}}{dt} + \omega_r \lambda_m \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (5)$$

Burada r_s , L_{ss} , θ_r , ω_r ve λ_m sırası ile stator direnci, stator self endüktansı, rotor pozisyonu, açısal hız ve mıknatıs akısını göstermektedir. Denklem (3-5)' te görülen gerilimler d-q eksen takımına dönüştürülürse;

$$V_{qs}^r = V_t \sin(\theta_h - \theta_r) = (r_s + pL_q) i_{qs}^r + \omega_r L_d i_{ds}^r + \omega_r \lambda_m \quad (4)$$

$$V_{ds}^r = V_t \cos(\theta_h - \theta_r) = (r_s + pL_q) i_{ds}^r - \omega_r L_q i_{qs}^r \quad (5)$$

$$\theta_r = \int_0^t \omega_r dt + \theta_{r0} \quad \theta_h = \int_0^t \omega_h dt + \theta_{h0} \quad (6)$$

bulunur. Motor moment denklemleri ise;

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) (\lambda_m i_{qs}^r + (L_d - L_q) i_{qs}^r i_{ds}^r) \quad (7)$$

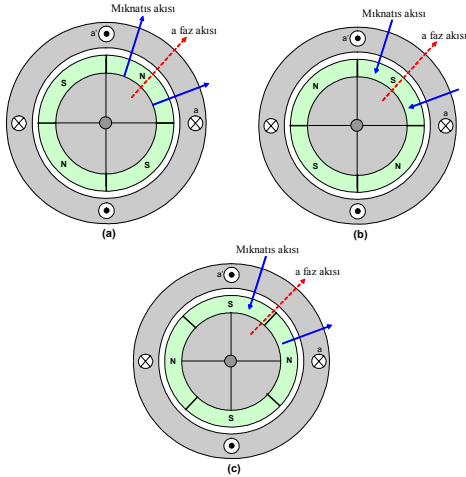
$$T_e = J \left(\frac{2}{P}\right) \cdot \dot{\omega}_r + B_m \left(\frac{2}{P}\right) \cdot \omega_r + T_L \quad (8)$$

dir. Burada J atalet momenti, T_L , yük momenti B_m sürtünme sabiti ve P kutup sayısıdır.

5. ÖNERİLEN YÖNTEM

Motor stator sargıları, düşük genlikli ve yüksek frekanslı bir gerilim ile beslendiğinde rotor hareket edemeyecektir. Oluşturulan modelde 45 Volt ve 300 Hz' lik bir gerilim uygulandığında rotorun $\pm 8.6e-3$ derecelik bir değişim yaptığı görülmüş ve bu değişim ihmal edilmiştir. Rotor konumunun sabit kaldığı düşünülürse motorun her fazının çektiği akım değişimi bu rotor konumuna bağlıdır.

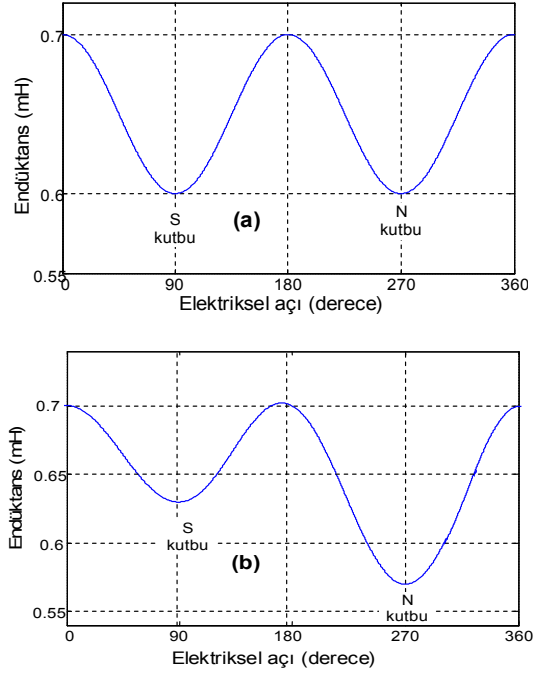
Örneğin 4 kutuplu yüzey mıknatıslı senkron motorun stator endüktansının değişimi muhtemel 3 rotor pozisyonu için incelenirse Şekil-3' deki temel yapılar oluşturulur. Şekiller sadece a fazı için çizilmiştir. Diğer fazlar için de benzer şekiller çizilebilir. Şekil-3.a' da N kutbu sargı eksenindedir ve sargı akışı ile mıknatıs akışı aynı yönlüdür. Şekil-3.b ' de rotor 90 derece döndürülerek S kutbu sargı eksenine getirilmiştir. Bu durumda mıknatıs akışı ile stator akışı zıt yönlüdür. Şekil-3.c' de ise sargı ekseninde N kutbu ve S kutbunun tam ortası bulunmaktadır. Noktalı çizgi ile gösterilen sargı akışı akımın yönüne göre ters yönlere de olabilmektedir.



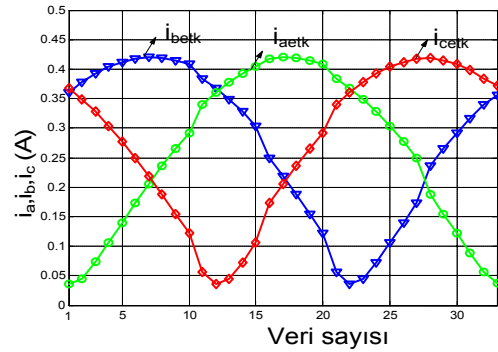
Şekil-3. Mıknatıs akışı ile stator sargı akışı arasındaki pozisyonlar

Şekil-4.a' da rotor mıknatıslarından dolayı oluşan stator endüktansı b' de ise hem stator akımı ve hem de rotor mıknatısları var iken oluşan toplam endüktans değişimi gösterilmiştir [8]. Stator sargıları doyuma gittiği sürece endüktans azalır. Her rotor konumu için faz sargılarında geçen akımlar farklı değerlerde

olacaktır. Bu akımlar yorumlanarak rotor konumu tahmin edilebilir.

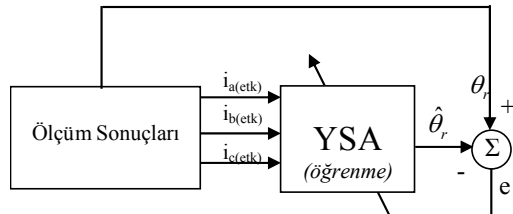


Şekil-4. Stator endüktansının ; a- rotor akısına bağlı, b- stator akımı ve rotor akısı birlikte varken değişimi



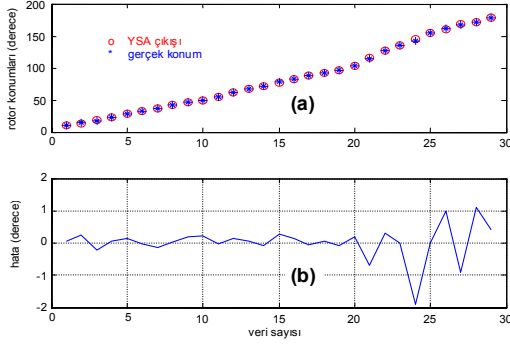
Şekil-5. Üç faz akımlarının etkin değerlerinin farklı rotor konumlarına göre değişimi

Kaydedilen değerler 3:10:1 yapılı İleri Beslemeli (İB) bir YSA ya $1e-6$ hata oranı ile öğretilmiştir. Ağ Levenberg-Marquardt algoritması ile eğitilmiştir. Her katmanda tanjant hiperbolik fonksiyonu kullanılmıştır. YSA öğrenme yapısı Şekil-6' daki gibidir.



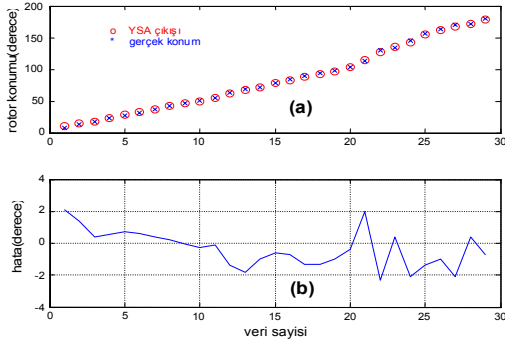
Şekil-6. YSA Öğrenme Yapısı

YSA yapısı ve ağırlıkları kaydedilir. Herhangi bir çalışma anında rotor konumuna ihtiyaç olursa motora 45 V , 300 Hz 'lik gerilim uygulanır. Faz akımları ölçülüp etkin değerleri hesaplanır. Hesaplanan değerler YSA ya uygulanır. YSA çıkışında rotor konumu türetilir. Şekil-7.a' da gerçek rotor konumu ile YSA' nın ürettiği rotor konumu Şekil-7.b' de ise her iki rotor konumu arasındaki fark gösterilmiştir. Testler 29 veri ile yapılmıştır.

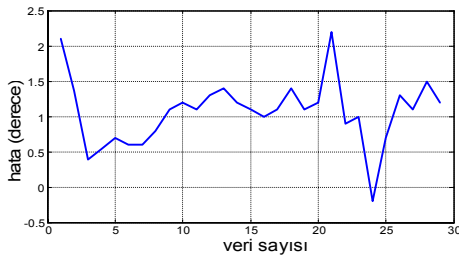


Şekil-7. Rotor konumu ve konum hatası

Buradan yapılan en büyük hatanın 1.9 derece olduğu görülmektedir. Şekil-8.a' da stator direnci %25 artırılarak YSA denendiğinde alınan sonuçlar görülmektedir. Bu durumda yapılan en büyük hata ise Şekil-8.b' den 2.3 derecedir. Şekil-9' da ise L_q endüktansı %25 azaltıldığı durumdaki konum hatası verilmiştir. Yine en büyük hata değeri 2.3 derece olarak belirlenmiştir.



Şekil-8. Stator direnci %25 artırılınca rotor konumu ve konum hatası



Şekil-9. L_q endüktansı %25 azaltılınca konum hatası

6. KUTUP YÖNÜNÜN BELİRLENMESİ

Şu ana kadar rotor açışının ne olduğu belirlenmeye çalışıldı. Fakat rotor kutuplarının yönünün de tayin edilmesi gereklidir. Bu sebeple Şekil-3' deki topolojiler incelenirse; faz sargılarına doğru gerilim uygulandığında rotor kutup yönüne bağlı olarak farklı genliklerde akımlar akacağı görülür. Stator uçlarına önce bir yönde düşük gerilimli bir kare-dalga darbe uygulanır ve akımın değeri ölçülür. Sonra uygulanan gerilimin yönü değiştirilir ve tekrar akım ölçülür. Ölçülen her iki akımın büyüklükleri karşılaştırılır ve kutup yönleri buradan türetilir. [9-10]

7. SONUÇ

Yapılan çalışmada DMK' lü bir SMSM sürücüsü için başlangıç rotor konumunun YSA kullanılarak hassas bir şekilde belirlenebileceği görülmüştür. Normal şartlarda en büyük konum hatası 1.9 derece , rotor direnci %25 artırıldığı ve L_q endüktansı %25 azaltıldığı durumlarda ise en büyük rotor konum hatasının 2.3 derece olduğu görülmüştür. DMK için bu hata değerleri rotorun yanlış yönde dönme riski oluşturmayacak değerdedir. Konum tahmini akımın etkin değeri ile yapılmaktadır. Etkin değer yerine farklı büyüklükler de kullanılarak benzer sonuçlar alınabilir. YSA motor parametrelerine ve uygulanan gerilim sinyallerine göre eğitildiği için farklı motor ve farklı gerilimler için yeniden eğitilmelidir.

KAYNAKLAR

- [1] Zhong L., Rahman M.F., Hu W.Y., Lim K.W., Analysis of Direct Torque Control in Permanent Magnet Synchronous Motor Drives, IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL.12, NO 3, MAY 1997.
- [2] Dhaouadi R., Mohan N., Norum L., Design and Implementation of Extended Kalman Filter for the state Estimation of a Permanent Synchronous Motor, IEEE TRAS. ON POWER ELECTRONICS, VOL.6,pp-491-497,1991.
- [3] Low T.S., Lee T.H., Chang K.T., A non-linear speed observer for Permanent Magnet Synchronous Motor, IEEE TRANSACTIONS ON IND. ELECTRONICS, VOL.40, pp-307-316, 1991.
- [4] Jansen P.L., Lorenz R.D., Transducerless Position and Velocity Estimation in Induction and salient AC machines, IEEE INDUSTRY APPLICATION, Vol.31, no 2, pp-240-247,1995.
- [5] Consili A., Scarcella G., Testa A., Sensorless Control of AC Motors at Zero Speed, IEEE ISIE, Bled , Slovenia, 1999.
- [6] Noguchi T., Yamada K., Kondo S., Takahashi I., Initial Rotor Position Estimation Method of Sensorless PM Motor with No Sensivity to Armature Resistance, IEEE TRANSACTIONS ON IND. ELECTRONICS, VOL.45, pp-118-125, 1998.
- [7] M.E. Haque, L. Zhong and M.F. Rahman , A Sensorless Initial Rotor Position Estimation Scheme for a Direct Torque Controlled Interior Permanent

Magnet Synchronous Motor Drive, IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, Volume: 18 , pp. 1376 - 1383, Nov. 2003.

[8] Schmidt P.B., Gasperi M.L., Ray G., Wijenayake A.H., Initial Rotor Angle Detection Of Non-Salient Pole Permanent Magnet Synchronous Machine, IEEE INDUSTRY APPLICATION SOCIETY ANNUAL MEETING, New Orleans, Louisiana, October 5-9, 1997

[9] M.E. Haque, L. Zhong and M.F. Rahman , Initial Rotor Position Estimation of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor without a Mechanical Sensor, JOURNAL OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING, Vol. 21, 2001,

[10] Parasiliti F., Petrella R., Tursini M., Initial Rotor Position Estimation Method for PM Motors, IAS 2000 ANNUAL MEETING AND WORLD CONFERENCE ON INDUSTRIAL APPLICATIONS OF ELECTRICAL ENERGY, Roma, 8-12 ,2000