

MIKNATIS DESTEKLİ SENKRON RELÜKTANS MOTOR TASARIMI VE ANALİZİ

H.Tarık DURU

Sabri ÇAMUR

Biol ARİFOĞLU

Ersoy BEŞER

Esra KANDEMİR

Elektrik Mühendisliği Bölümü
Kocaeli Üniversitesi, 41100, İZMİT

e-posta:tduru@kou.edu.tr e-posta:scamur@kou.edu.tr e-posta:barif@kou.edu.tr
e-posta:ebeser@kou.edu.tr e-posta:esrakandemir@kou.edu.tr

Anahtar sözcükler: Senkron Relüktans Makinalar, Sürekli Miknatıslı Senkron Makinalar

Özet - Bu makalede miknatıs destekli senkron relüktans motorun tasarımına ilişkin yeni bir yaklaşım tanıtılmıştır. Tasarlanan motorun rotoru, istavroz şeklinde som çelik kutuplar ve bu kutupların eksenine çapraz olarak yerleştirilmiş NdFeB tipi miknatısların basit birleşiminden oluşmaktadır. Makalede ayrıca tasarlanan motorun modellenmesi ve simülasyonu üzerinde durulmuştur. Matematiksel model doğal faz değişkenleriyle ifade edilmiştir. Modelin manyetik alana bağlı parametreleri rotor konumuna bağlı olarak yapılan bir seri sonlu elemanlar analizi ile hesaplanmıştır. Bu parametreler bazı deneyler yapılarak ölçülmüş ve bu deneylerin sonuçlarına da yer verilmiştir. Ölçülen parametrelerle statik moment hesaplanmıştır. Hesap sonuçları ,yapılan ölçüm sonuçları ile karşılaştırıldığında benzer olduğu görülmüştür. Boşta ve yük altında çalışma durumunda motor performansı yapılan deneylerle incelenmiş ve sonuçlar tartışılmıştır. Elde edilen sonuçlar umut vericidir ve ileride yapılabilecek çalışmalar için yol gösterici niteliktedir.

1.GİRİŞ

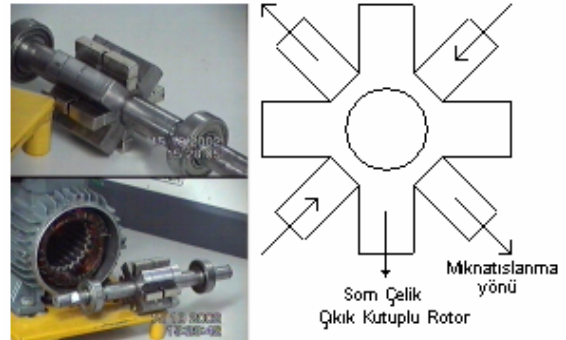
Miknatıs destekli senkron relüktans motorlar, (MDSRM) sadece miknatıs veya sadece relüktans prensibine dayalı moment üreten motorlardan bazı bakımlardan daha avantajlıdır. Senkron relüktans motorlar (SRM) üzerine son 10 yılda oldukça geniş boyutlu çalışmalar yapılmıştır.[1]-[4] Bu tip motorların performanslarını asenkron motorları ile kıyaslanabilecek seviyeye getirmek için karmaşık rotor konstrüksiyon teknikleri geliştirilmiştir.[1]-[4] Miknatıs uyarmalı senkron motorlarda (MUSM) ise sabit güç bölgesinde, zorlamalı alan zayıflatma

kontrol tekniği uygulanırken bazı güçlüklerle karşılaşmaktadır. Bu sebeplerden MUSM ve SRM motorların prensiplerinin birleşimi olan karma motorlar sabit güç bölgesinde kullanılan sürücüler için daha elverişlidir. Bu makalede sunulan yaklaşım karmaşık üretim tekniklerine ihtiyaç duymadan MUSM ve SRM 'larını basit bir şekilde birleştirmeye yöneliktir.

Bu çalışmada motora ait matematiksel model faz değişkenleri yardımıyla oluşturularak çözüm gerçekleştirilmiştir. Modelin manyetik alana bağlı parametreleri sonlu elemanlar analizi ile elde edilmiştir. Rotor konumunun değişimine karşılık oluşan statik moment hesaplanmış ve ölçülmüştür. Ayrıca yüksüz ve yüklü çalışma durumu için tasarlanan motor test edilerek test sonuçları yorumlanmış ve ileride yapılacak çalışmalar için öneriler getirilmiştir.

2.TASARIMA GENEL BAKIŞ

Şekil 1.'de yapılan tasarımın fotoğrafları ve rotor yapısı görülmektedir.



Şekil 1. Prototipin fotoğrafları ve tasarlanan rotorun prensip şeması

Prototipte,nominal değerleri 550W, 380V, 1.6A, 1390d/dk (Yıldız Bağlı) olan bir asenkron motorun statoru kullanılmıştır. Rotor ise som çelik malzemeden yapılmıştır. Rotor önce 4 çıkık kutup elde edilecek şekilde yekpare olarak şekillendirilmiştir. Endüktanslardaki değişim oranının (Ld/Lq) yüksek olması için kutup alanları alışlagelmiş çıkık kutuplu senkron makinaya göre daha küçük tutulmuştur. Kutuplar arasına oluklar açılarak NdFeB alaşımli mıknatıslar yerleştirilmiştir. Mıknatıs parçalarının her biri 10x10x25 mm ebatındadır. Tasarım yapısal olarak basit ve maliyeti de oldukça düşüktür.

3.MATEMATİKSEL MODEL VE PARAMETRELERİN HESAPLANMASI

MDSRM'nin modellenmesinde a,b,c faz değişkenleri kullanılmıştır. Matematiksel model aşağıdaki gibidir.

$$[V]_{a,b,c} = [I]_{a,b,c}[R]_{a,b,c} + \frac{\partial [L]_{a,b,c}}{\partial \theta_r} \frac{d\theta_r}{dt} [I]_{a,b,c} + [L]_{a,b,c} \frac{d[I]_{a,b,c}}{dt} \quad (1)$$

$$T_e = p \left\{ \frac{1}{2} [I]_{a,b,c} T \frac{\partial [L]_{a,b,c}}{\partial \theta_r} [I]_{a,b,c} + [I]_{a,b,c} T \frac{\partial [\lambda_m]_{a,b,c}}{\partial \theta_r} \right\} \quad (2)$$

Burada,

[V]:Faz-Nötr gerilimleri,

[I] :Faz akımları,

[R] :Direnc matrisi,

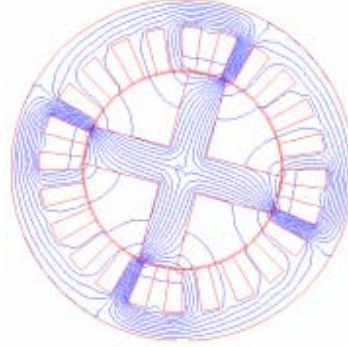
[L] :Endüktans matrisi,

[λ_m]:Mıknatısların etkisi ile stator sargılarında oluşan akı,

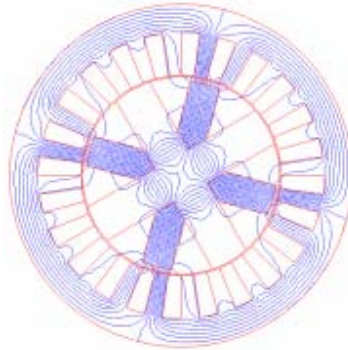
[P] :Çift kutup sayısı,

[Te]:Elektriksel momenttir.

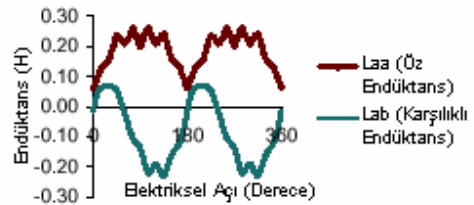
Yukarıdaki matematiksel modelin manyetik alanla ilgili büyüklükleri, rotor konumu belirli açılarla değiştirilerek iki boyutlu sonlu elemanlar analizi ile hesaplanmıştır. Rotor pozisyonu elektriksel olarak 7.5°'lik adımlarla değiştirilmiştir. Rotorun her konumu için önce sadece tek bir faz sargısının uyarılmış olduğu durum, daha sonra ise sadece sürekli mıknatısların olduğu durum düşünülerek iki ayrı çözüm yapılmıştır.(Şekil 2 – Şekil 3)



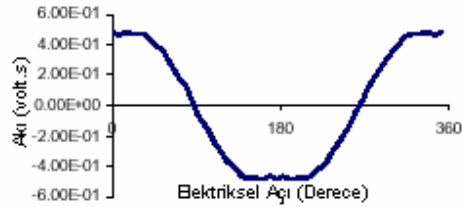
Şekil 2. A Fazı uyarılmış durumda $\theta_r=3.75^\circ$ iken Sonlu Elemanlar çözümü



Şekil 3. Sadece sürekli mıknatıslar olduğu durumda $\theta_r=3.75^\circ$ iken Sonlu Elemanlar çözümü



Şekil 4. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile elde edilen öz ve karşılıklı endüktans değişimleri



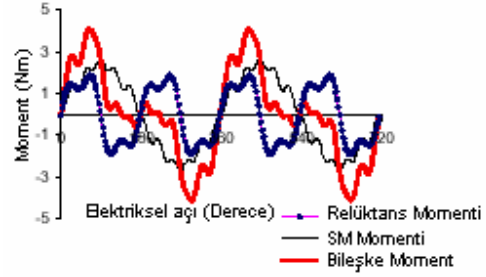
Şekil 5. Sürekli mıknatısların etkisi ile A fazında oluşan akının değişimi

Sonlu elemanlar analizi ile hesaplanan büyüklükleri doğrulamak amacı ile bazı deneyler yapılmıştır.Faz sargı direnci ve kaçak endüktansı bulmak için rotor sökülüştür ve stator direnci 17.25Ω ölçülmüş , 50

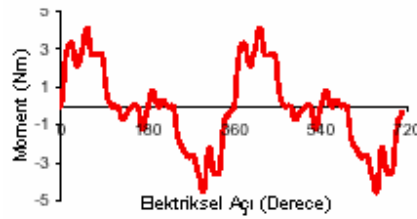
Hz'de kaçak endüktans değeri 17.25Ω olarak hesaplanmıştır. Daha sonra rotor monte edilerek bir faz sargısına 70V civarında alternatif gerilim uygulanmıştır. Rotor konumundaki küçük değişimlere göre gerilim, akım, aktif güç ve güç katsayısı ölçülmüştür. Toplam reaktif güçten kaçak reaktansın reaktif gücü çıkarılarak mıknatıslanma endüktansının reaktif gücü bulunmuştur. Faz sargısının mıknatıslanma endüktansı rotor konumunun fonksiyonu olarak hesaplanmıştır. Diğer faz sargısında endüklenen gerilim osiloskop yardımı ile gözlenmiş ve ölçülmüştür. Karşılıklı endüktanslar bilinen mıknatıslanma akımı ve sargılar arasındaki gerilimden hesaplanmıştır. Dalga formlarının yaklaşık aynı olmasına rağmen deneysel olarak belirlenen öz endüktans değeri, sonlu elemanlar analizi ile hesaplanan değerden büyük çıkmıştır. Bu fark, olukların ve diş şekillerinin gerçek makina ve sonlu elemanlar modeli ile aynı olmamasından kaynaklanabilir. Ortak endüktans ve toplam akı doğrulayıcı niteliktedir. Numerik Fourier Analizi kullanılarak yukarıda elde edilen değişimler (Şekil4 – Şekil5) periyodik fonksiyonlar haline dönüştürülmüştür. Öz endüktans, a ve b fazı arasındaki karşılıklı endüktans ve a fazı üzerinde sürekli mıknatısların oluşturduğu akımın aşağıda görüldüğü gibi Fourier serisi ile yaklaşık değerleri tespit edilmiştir.

$$\begin{aligned} L_{aa} &= (54+187) - 45\cos(2\theta) - 33\cos(4\theta) - 6.8\cos(6\theta) \text{ mH} \\ L_{ab} &= 93.5 - 138\cos(2\theta) + 45.5\cos(4\theta) + 8.5\cos(6\theta) \text{ mH} \\ \lambda_a &= 0.4\cos(\theta) - 0.06\cos(3\theta) + 0.044\cos(5\theta) \text{ Vs} \end{aligned} \quad (3)$$

Bu ifadelerdeki yüksek dereceli uzay harmonik bileşenleri ihmal edilebilir gibi görünse de, rotor konumuna göre türevleri alındığında dalga formları üzerindeki etkisinin önemli olduğu anlaşılmaktadır. Geliştirilen makina, d,q,0 modelinin bazı ön koşullarına uymamaktadır. Bunun sebebi, endüktans matrisinin rotor konumuna bağlı değişiminin ideal olarak öngörülen cosinus fonksiyonu şeklinde değişmemesi ve yüksek dereceden harmoniklerin ağırlığının büyük olmasıdır. Dolayısıyla d,q,0 dönüşümü uygulandığında, L_q ve L_d sabit olmayan terimler olarak ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle modelin a,b,c doğal faz değişkenleri cinsinden çözülmesi gerekmektedir. Bu belirlemeden sonra, rotor pozisyonuna bağlı moment değişimini görmek amacıyla statik moment hesabı yapılmıştır. Mıknatısların oluşturduğu moment ve relüktans momentini ayrı ayrı hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda karşılıklı ve öz endüktansın ölçülen değerleri kullanılmıştır. Moment değerleri, sabit faz akımları ($I_a = 2A$, $I_b = I_c = -1A$), değişken rotor pozisyonu için hesaplanmıştır. Hesap sonuçları şekil 6'de verilmiştir.



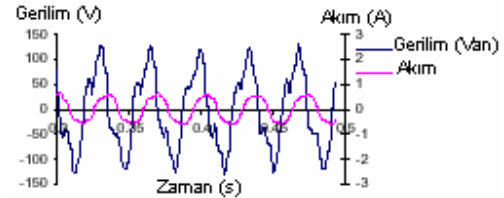
Şekil 6. Hesaplanan Momentin Akım ve θ_r 'ye göre değişimi



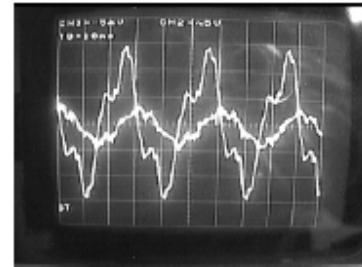
Şekil 7. Ölçülen Momentin Akım ve θ_r 'ye göre değişimi

Son olarak statik moment, farklı rotor pozisyonları için kilitli rotor testi yapılarak ölçülmüştür. Şekil 6 ve şekil 7 karşılaştırıldığında sonuçların oldukça benzer olduğu görülmektedir.

4.SİNÜSOİDAL ÇALIŞMA ANALİZİ



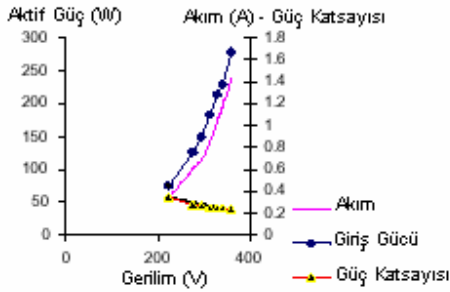
Şekil 8. Yüksüz çalışma için hesaplanan gerilim ve akım



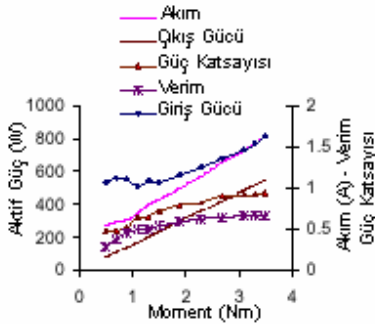
Şekil 9 Yüksüz çalışma için ölçülen gerilim ve akım (Time:10ms/div, Voltage:50V/div, Current:1A/div)

Şekil 8 ve şekil 9'da yüksüz çalışma durumu için simülasyon ve osiloskop sonuçları verilmiştir. Şekillerden sonuçların oldukça benzer olduğu

görülmektedir. Motorun yüklü durumdaki performansını incelemek için deneysel bir çalışma daha yapılmıştır. Bu deneyde, motora önce bir doğru akım motoru ile yol verilerek, senkron hıza çıkarılmıştır. Doğru akım motoru daha sonra generatör olarak çalıştırılmış ve motoru yüklemek için kullanılmıştır. Şekil 10' da yüksüz durumdaki sonuçlar gösterilmiştir. Yüksüz durumda yapılan teste göre; nominal gerilim uygulanınca (Faz-Faz 380 V veya her faz 220 V olduğu durumda) mıknatıslanma akımı asenkron motor çalışmadaki nominal değerini aşmaktadır. Mıknatıslanma akımının bu şekilde artmış olmasının nedeni, akımın küçük bir alan içinde odaklanması ve stator dişlerinin doymasıdır. Fakat faz-faz arası gerilim 315 V değerinde uygulandığında, yüksüz akım 1.1 A gibi uygun bir değere doğru azalmaktadır.



Şekil 10. Yüksüz Çalışma durumu için sonuçlar



Şekil 11. Yüklü Çalışma durumu için sonuçlar

Şekil 11'de yüklü durum sonuçları görülmektedir. Çalışma şekline bakıldığında, bu motor az yüklü durumda, bir relüktans motoru gibi, çok yüklü durumda ise bir mıknatıslı motor gibi davranmaktadır. Tam yüklü durumdaki güç katsayısı 1'e yakındır (0.95). Yüklü durumda uygulanan gerilimi 360 V değerine çıkartıldığında, güç faktörü küçülmüş ve akım değerini de çok az arttırmıştır. Akımın 1.6 A ile sınırlandığı durumda yük momentini, asenkron motorun ürettiği moment ile yaklaşık olarak aynıdır (3.6Nm) ve yüklü durumdaki verim de bu büyüklükteki bir motor için oldukça iyidir. (%67) Gerilimi nominal değerinde uygulayıp frekansını arttırarak motoru, hızın 1800 d/dk olduğu bir çalışma

noktasına getirdiğimizde, 3.5Nm'lik bir moment ve 660W değerinde bir güç elde edilmiştir. Bu değerler asenkron motor çalışma durumuna göre %20 daha fazladır. Bu hızın üzerindeki çalışma için, frekans daha da arttırıp sabit güç bölgesinde çalışma sağlanabilmekte ve çalışma alanı daha da genişletilebilmektedir. Yüksek akım değerlerinde çalışma durumunda da motor senkronizmanın dışına çıkmadan yüklenebilmektedir.

5.SONUÇLAR

Bu makalede bir MDSRM'nin tasarımına ilişkin genel özellikler tanıtılmıştır. Tasarlanan motorun tanıtımının yanısıra, a,b,c modeli ile yapılmış olan matematiksel model ve sonlu elemanlar analizi ve deneysel sonuçlarla belirlenen motor parametreleri de verilmiştir. Rotor konumuna bağlı olan öz ve ortak endüktansın ölçülen ve hesaplanan değerlerinin birbirlerine çok yakın olduğu görülür. Elde edilen değişimlerin analizinden motor modeli gerçekçi sonuçlar vermektedir. a,b,c faz değişkenleri ile oluşturulmuş matematiksel model dengersiz bir vedir. Bu dengersizlik endüktans matrislerinin simetrik olmamasından ileri gelir. Simülasyon sonuçları, önerilen yöntemin, faz gerilimleri ve akımları ile aynı dalga şekillerini üretebildiğini göstermektedir. Deneysel olarak yüklü ve yüksüz çalışmada motor oldukça iyi bir performans göstermektedir. Daha sonraki çalışmalarda rotoru lamine edilmiş çelikten oluşturmak ve daha güçlü bir asenkron motorunun statorunu kullanarak yapılan bir tasarım planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] 'Performance of PM-assisted synchronous reluctance motor for high-efficiency and wide constant-power operation' Morimoto,S. ; Sanada,M .Takeda, Y. Industry Applications, IEEE Transactions on , Volume: 37 Issue: 5 , Sept.-Oct. 2001 Page(s):1234-1240
- [2] 'Design of a Synchronous Reluctance Motor Drive' Miller,T.J,Hutton,A. Industry Applications, IEEE Transactions on , Volume: 27 Issue: 5 , July/August,Page(s):741-748
- [3] 'Synchronous Reluctance Motor operating pint dependent parameter determination' Wung,P.Y.P.;Puttgen,H.B.,Industry Applications, IEEE Transactions on , Volume: 28 Issue: 2 , Mar/Apr 1992 ,Page(s):358-363
- [4] 'Characerization of axially laminated anisotropic-rotor Synchronous Reluctance Motors' Isaac,F.N. ;El-Anably,A. ,IndustryApplications, IEEE Transactions on , Volume: 14 Issue: 3 , Sep 1999,Page(s):741-748 , Energy Conversion, IEEE Transactions on , Volume :14 Issue : 4 , Dec 1999,Page(s):1459:1464