

SABİT MIKNATISLI DEĞİŞKEN HAVA ARALIKLI MOTORLARDA YÜKSÜZ KOŞULLARDAKİ MOMENTİN AZALTILMASINA YÖNELİK ANALİZ

Hacer ÖZTURA¹

Hakan CANBAZ²

Elektronik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
Dokuz Eylül Üniversitesi, 35160, Kaynaklar, İzmir

¹e-posta: hacer.oztura@eee.deu.edu.tr

²e-posta: hakan.canbaz@eee.deu.edu.tr

Anahtar sözcükler: Sabit Mıknatıslı Motor, Yüksüz Koşullardaki Moment, Sonlu Elemanlar Yöntemi

ÖZET

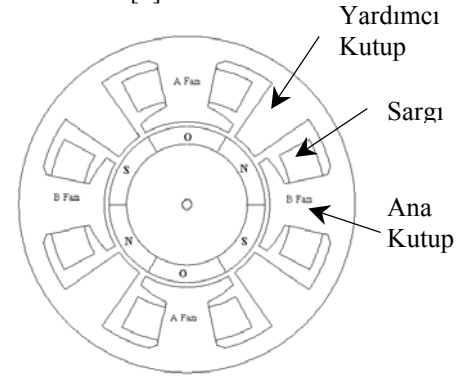
Sabit mıknatıslı motorlarda yüksüz koşullardaki moment (cogging torque), rotorun kendi etrafında dönüşü sırasında rotor mıknatıslarını çevreleyen manyetik iletkenliğin değişiminden kaynaklanan manyeto statik bir etkidir. Bu moment miktarını azaltmanın en bilenen yollarından birisi statorun burulmasıdır (skewing). Ancak bu hem stator yapısında fazladan bir karışıklığa, hem de çıkış momentinde kayıplara neden olur. Bu çalışmada stator burulmadan, statordaki ana kutup ve-veya yardımcı kutuplara oluklar açılması ile hava aralığındaki manyetik iletkenliğin kontrol edilmesi ve buna bağlı olarak ta yüksüz momentin değişimi incelenmiştir. Hava aralığında farklı manyetik iletkenlik fonksiyonlarına sahip dört motor ANSYS sonlu elemanlar paket programı kullanılarak analiz edildikten sonra yüksüz koşullarda ki moment grafikleri elde edilmiştir.

1. GİRİŞ

Sabit mıknatıslı motorlar geleneksel motorlara göre önemli avantajlara sahiptirler. Daha küçük ve hafif olmaları, daha yüksek verim ve güçte çalışabilmeleri bunlardan başlıcalarıdır. Enerji verimliliği yüksek yeni motorların tasarımının araştırılması, motorların ürettiği moment-zaman eğrilerindeki harmonik bileşenleri ve rotor hızındaki dalgalanmaları önemli bir kıstas olarak inceleme konusu yapmıştır. Yüksüz koşullardaki moment rotor hızında dalgalanmalara ve gürültüye neden olduğundan özellikle küçük yüklerde ve düşük hızlarda çalışılacak ise yüksüz koşullardaki momentin azaltılması başlıca dizayn amacıdır[1,2].

Yüksüz koşullardaki momentin azaltılması armatürdeki kutup şeklinin değiştirilmesi ile yapılabilir [3,4]. Bu çalışmada yardımcı oluğa sahip olmayan bir motorun yüksüz koşullardaki momentini elde edildikten sonra motor geometrisi aynı kalmak koşuluyla armatürdeki stator sargılarının sarıldığı ana ve-veya sargısız yardımcı kutuplara yardımcı oluklar açılarak elde edilen yüksüz momentler karşılaştırılmıştır.

Bildiride incelenen motor şekil-1'de görüldüğü gibi iki fazlı, dört ana ve dört sargısız yardımcı kutuplu, radyal yönde manyetize edilmiş NdFeB sabit mıknatıslarının rotora yerleştirildiği bir değişken hava aralıklı motordur. Şekildeki N ve S sabit mıknatısların kutuplarını, O ise mıknatıs kutupları arasındaki manyetik olmayan bir malzemeyi (örneğin hava) göstermektedir [5].



Şekil-1. Analizi yapılan sabit mıknatıslı motor

Bu bildirinin ikinci bölümünde incelenen makinelerin manyetik alan analizleri verilmiş, üçüncü bölümde bu çalışmada kullanılan moment hesaplama yöntemi irdelenmiş ve son bölüm sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen sonuçlara ve bunların harmonik analizlerine ayrılmıştır.

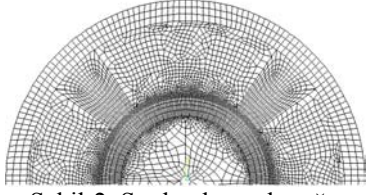
2. MANYETİK ALAN ANALİZİ

Motorun manyetik alan analizi, sonlu elemanlar paket programı [6] yardımıyla iki boyutta, 9542 düğüm ve 9110 elemana sahip olan sonlu elemanlar ağı kullanılarak yapılmıştır. Kullanılan ağ şekil 2'de görülmektedir. Analizde Maxwell denklemlerinin birleştirilmiş şekli denklem (1) kullanılmıştır.

$$\text{curl}(v\text{curl}(\bar{A})) = \bar{J}_s + \bar{J}_m \quad (1)$$

Bu denklemde \bar{A} manyetik vektör potansiyeli, \bar{J}_s sargılarına verilen akım yoğunluğunu ve $\bar{J}_m = \text{curl}(H_{coer})$ ise sabit mıknatısın coercive force' una karşı gelen eşdeğer akım

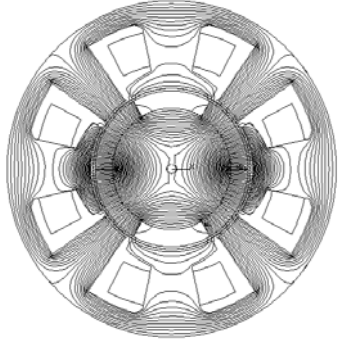
yoğunluğunu göstermektedir. Göreceli geçirgenliğin (relative permeability, μ) tersi ise v ile tanımlanmıştır[5-8].



Şekil-2. Sonlu elemanlar ağı.

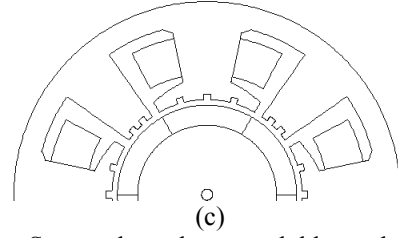
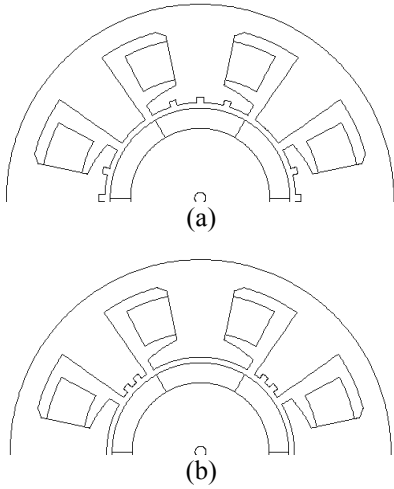
Manyetik alan analizi sırasında yer değiştirme akımları, Eddy akımları ve sargılardaki son etkilerinin ihmal edildiği ve manyetik vektör potansiyel A'nın sadece Z yönünde bileşene sahip olduğu kabul edilmiştir.

Stator sargılarına akım verilmeden yapılan manyetik alan analizinden elde edilen akı çizgilerinin motor içindeki dağılımı şekil 3'de görülmektedir.



Şekil-3. Yüksüz koşullardaki akı dağılımı.

Hava aralığının manyetik iletkenliğin fonksiyonu olarak yüksüz koşullar momentin değişimini incelemek üzere analizi yapılan diğer motor geometrileri şekil 4'de verilmiştir.



Şekil-4. Stator kutuplarına oluklar olan motor geometrileri; (a) ana, (b) yardımcı, (c) hem ana hem de yardımcı kutuplarda oluk olan yapı

Nümerik olarak moment hesaplama yöntemlerinin başlıcaları; *Maxwell Stress Tensor Metodu*, *Co-enerjinin Türevi Metodu* *Coulomb'un Zahiri İş (Virtual Work) Metodu*, *Arkkio'nun Metodu* ve *Mıknatıslama Akım (Akı-Akım) Metodu* olarak özetlenebilir [9, 10]. Bu çalışmada Maxwell Stress Tensor Metodu kullanılmıştır.

3. MAXWELL STRESS TENSOR YÖNTEMİ

Rotoru çevreleyen kapalı S yüzeyi üzerinde Maxwell Stress Tensor'ünün integrali kuvvet olarak tanımlanır. Yani stress birim uzunluk alana düşen kuvvettir.

$$\vec{F} = \int_S \tau \cdot ds \quad (2)$$

Elektromanyetik alandaki stress ise alan tensoru $\vec{\tau}$ ile verilebilir.

$$\vec{\tau} = \vec{n} \cdot \left[\vec{B} \cdot \vec{B} - \frac{1}{2} \vec{B}^2 \right] \cdot \frac{1}{\mu_0} \quad (3)$$

(3) nolu eşitlik (2) nolu eşitlikte yerine konursa kuvvet elde edilir.

$$\vec{F} = \frac{1}{\mu_0} \int_S \left[(\vec{B} \cdot \vec{n}) \cdot \vec{B} - \frac{1}{2} \vec{B}^2 \cdot \vec{n} \right] \cdot ds \quad (4)$$

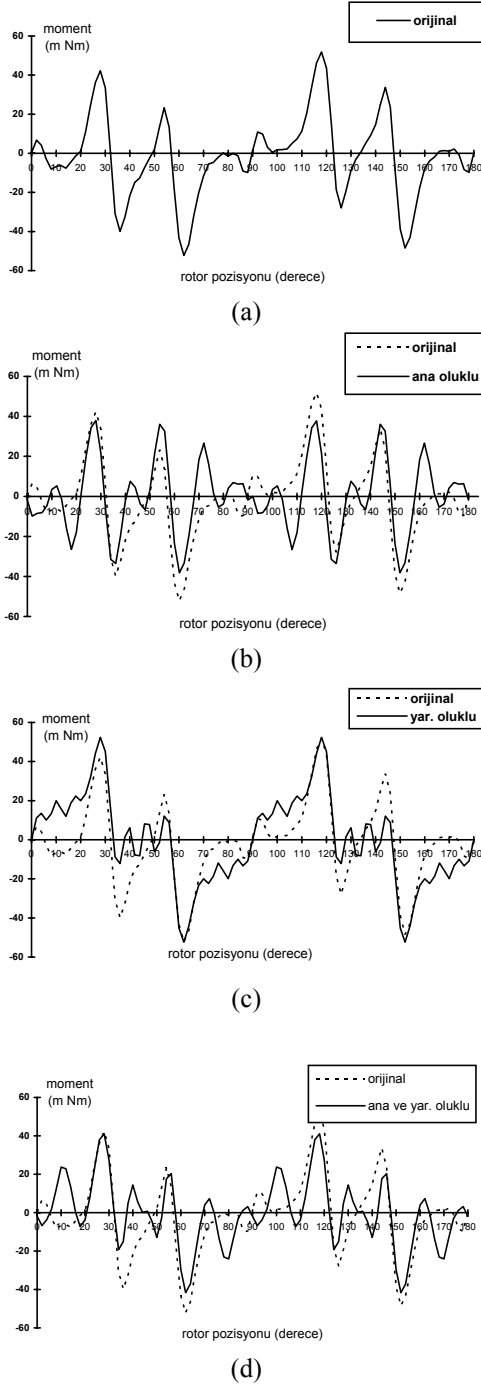
İntegral alınan yüzeyindeki radyal yönde yarıçap \vec{r} ise, kuvvet ile yarıçapın vektörel çarpımından (5) nolu eşitlikte olduğu gibi moment hesaplanabilir. Bu yöntemde kullanılan entegral yolu rotoru çevreleyen hava aralığından geçen kapalı bir çevrimdir[10-13].

$$\vec{T} = \vec{r} \times \vec{F} = \int_S \left[\mu_0 \left(\frac{\vec{B}}{\mu_0} \cdot \vec{n} \right) \left(\vec{r} \times \frac{\vec{B}}{\mu_0} \right) - \frac{\vec{B}^2}{2\mu_0} (\vec{r} \times \vec{n}) \right] ds \quad (5)$$

Yukarıda ayrıntılı olarak verilen elektromanyetik moment hesaplama yöntemi bu dört farklı makineye yüksüz koşullarda uygulanmıştır. Bu hesaplamalar için rotor 0° den 360° ye 2° lik adımlarla ilerletilmiştir. Hava aralığı ise 4 kata bölünüp bunlardan içteki iki tanesi rotora, dıştaki iki tanesi ise statora tutturulmuştur. Yani içteki iki sıra ağ her hesaplama için rotorla birlikte 2° lik adımlarla dönmektedir.

4. SONLU ELEMANLAR ANALİZ SONUÇLARI

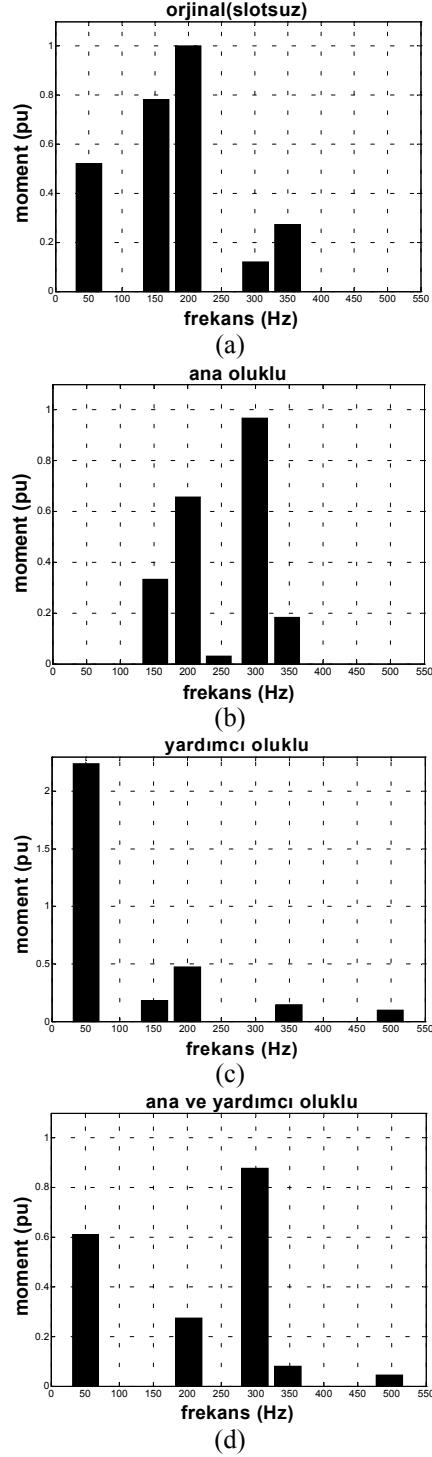
Şekil-5’de stator sargılarına herhangi bir akım verilmiyor iken, yardımcı oluğa sahip olan ve olmayan motor geometrilerinden elde edilen yüksüz moment eğrilerinin rotor pozisyonuna bağlı değerleri görülmektedir. 180°’lik bir periyotta bakıldığında bu momentlerin ortalaması sıfırdır.



Şekil-5. Yüksüz momentler: (a) oluksuz, (b) ana kutup oluklu, (c) yardımcı kutup oluklu, (d) ana ve yardımcı kutupların ikisi de oluklu motorda.

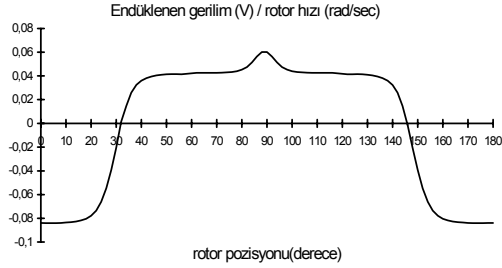
Elde edilen bu moment grafiklerinin harmonik analizleri yapılarak her bir motor geometrisi için elde edilen sonuçlar şekil 6’da görülmektedir.

Oluksuz motor geometrisinin en yüksek genlikli harmoniğine göre diğer harmoniklerin genlikleri normalize edilmiştir.



Şekil-6. Yüksüz momentlerin harmonik analizleri: (a) oluksuz, (b) ana kutup oluklu, (c) yardımcı kutup oluklu, (d) ana ve yardımcı kutupların ikisi de oluklu motorda.

Aynı zamanda yüksüz koşullarda stator sargılarında indüklenen gerilim (backemf) dört motor geometrisi içinde tek tek hesaplanmış ve yardımcı olukların eklenmesinin indüklenen gerilime bir etkisine rastlanmamıştır. Her dört motor geometrisi için de indüklenen gerilimin rotor açısız hızına oranının rotor pozisyonuna göre elde edilen grafiği şekil 7’de verilmiştir.



Şekil-7. Stator sargılarında indüklenen gerilim.

5. SONUÇ

Birçok yüksek performanslı sabit mıknatıslı motor uygulaması hız kontrolünde hassasiyet ve gürültünün daha aza indirilmesini gerektirdiğinden yüksüz koşullardaki momentin minimize edilmesini önemli bir dizayn parametresi haline getirmiştir. Bu çalışmada yüksüz koşullardaki momenti azaltabilmek için stator kutuplarının yüzeyinde yardımcı oluk kullanılması sonlu elemanlar yöntemini yardımıyla incelenmiştir.

Harmonik analizlerinden ise üç temel harmoğün tüm analizlerde bulunduğu, ancak sadece ana kutupta yardımcı oluk varken düşük frekanslı bileşenin bastırılırken, sadece yardımcı kutupta oluk varken yüksek frekanslardaki bileşenlerin bastırıldığı gözlenmiştir. Her iki stator kutbuna yardımcı oluk yerleştirildiğinde ise hem harmoniklerin dağılımı hem de genlik değerlerinin daha ortalama bir dağılıma sahip olduğu söylenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Hwang, S. M., Eom, J. B., Jung, D. W., & Kang, B. S., “Variation Design Techniques to Reduce Cogging Torque by Controlling Energy Variation in Permanent Magnet”, IEEE TRAN. MAGNETICS, Vol 37, Iss 4 pp.2806-2809, 2001.
- [2] Breton, C., Bartolome, J. A., Tassinario, G., Flotats, I., & Lu, C. W., “Influence of Machine Symmetry on Reduction of Cogging Torque in Permanent-Magnet Brushless Motors” IEEE TRAN. MAGNETICS, Vol 36, Iss 5 pp.3819-3823, 2000.
- [3] Koh, C. S., Kang, B. K., Ryu, J. S., & Seol, J. S., “The Effects of the Distribution of Residual Magnetization on the Cogging Torque and Switching Signals in Permanent Magnet (PM) Motors”, IEEE TRAN. MAGNETICS, Vol 38, Iss 2 pp.1217-1220, 2002.
- [4] Zhu, Z. Q. & Howe, D., “Influence of Design Parameters on Cogging Torque in Permanent Magnet Machines”, IEEE TRAN. ENERGY CONVERSION, Vol 15, Iss 4 pp. 407-412, 2000.
- [5] Rizzo, M., Savani, A., Trowski, J., & Wiak, S., “Optimization of Magnetic Circuits of DC Brushless Motors” *Nato ASI*, pp.91-97, Antalya February 1994.
- [6] Ansys Magnetic User’s Guide Vol:1 July 1993.
- [7] Craiu, O., Dan, N.& Badea, A., “Numerical analysis of Permanent Magnet DC Motor Performance”, IEEE TRAN. MAGNETICS, Vol 31, Iss 6 pp.3500-3502, 1995.
- [8] Chari, M. V. K., Bedrosian, G. & D’Angelo, J., “Finite Element Applications in Electrical Engineering”, IEEE TRAN. MAGNETICS, Vol 29, Iss 2, pp.1306-1314, 1993.
- [9] Sadowski, N., Lefevre, Y., Lajoie-Mazenc, M. & Cros, J., “Finite Element Torque Calculation in Electrical Machines While Considering the Movement”, IEEE TRAN. MAGNETICS, Vol 28, Iss 2, pp. 1410-1413, 1992.
- [10] Petkovska, L., Cundev, M. & Cvetkovski, G., “FEM Concept of Optimisation in a DC Permanent Magnet Motor”, *ACEMP 95*, Vol2, pp. 22-27, 5-7 May 1995 Kuşadası Turkey.
- [11] Rizk, J., Nagrial, M., “Computation of Cogging Torque in Permanent Magnet Machines”, *ICEM98*, pp. 1123-1127 September 1998 İstanbul Turkey.
- [12] Moallem, M., Ong, C. M., “Predicting the Torque of a Switched Reluctance Machine From Its Finite Element Field Solution”, IEEE TRAN. ENERGY CONVERSION, Vol 5, Iss 4, pp.733-739, 1990.
- [13] Clenet, S., Lefèvre, Y., Sadowski, N., Astier, S. & Lajoie-Mazenc, M., “Compensation of Permanent Magnet Motors Torque Ripple by Means of Current Supply Waveshapes Control Determined by Finite Element Method”, IEEE TRAN.ON MAGNETICS, Vol 29, Iss 2, pp. 2019-2023, 1993.