


Maxwell Gerilme Tensör Yöntemini Kullanarak Anahtarlamalı Relüktans Motorun Hava Aralığı Uzunluğunun Radyal ve Teğetsel Kuvvetler Üzerindeki Etkisinin Belirlenmesi

Asım Gökhan YETGİN 

Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 15030, Burdur

Geliş Tarihi (Received): 03.09.2021, Kabul Tarihi (Accepted): 10.12.2021

✉ Sorumlu Yazar (Corresponding author*): agyetgin@mehmetakif.edu.tr

☎ +90 248 2132778 📠 +90 248 2132704

ÖZ

Anahtarlamalı Relüktans Motorlar (ARM) son yıllarda endüstriyel uygulamalarda sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle elektrikli araçlar ve evsel uygulamalar da karşımıza çıkmaktadır. ARM' un bu kadar yaygın bir şekilde kullanılmaya başlamasına rağmen en büyük dezavantajlarından birisi de meydana gelen moment salınımlarıdır. Moment salınımlarını azaltmak için hem motorun tasarımı sırasında hem de motorun kontrol kısımlarında iyileştirmeler yapılarak azaltılmaya çalışılmaktadır. Momentin oluşmasında ise teğetsel kuvvet etkili olmaktadır. Bu sebeple bu yöndeki kuvvetin belirlenmesi ve analizi motorlar için büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmada anahtarlamalı relüktans motorun hava aralığı uzunluk değerinin radyal ve teğetsel yöndeki kuvvet değerleri üzerine etkisi maxwell gerilme tensör yöntemi ile analiz edilmiştir. Optimal hava aralığı uzunluğu belirlenmeye çalışılmıştır. 550 W, 8/6 kutup sayılarında anahtarlamalı relüktans motor kullanılmıştır. Her bir motor modeline ait radyal ve teğetsel manyetik akı yoğunluğu değerleri ve kuvvet değerleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre hava aralığı uzunluğunun artması ile hem radyal hem de teğetsel kuvvet değerlerinde azalma meydana geldiği tespit edilmiştir.

Keywords: Anahtarlamalı relüktans motor, maxwell gerilme tensör yöntemi, radyal kuvvet, teğetsel kuvvet

Determination of the Effect of the Air Gap Length of a Switched Reluctance Motor on Radial and Tangential Forces by using Maxwell Stress Tensor Method

ABSTRACT

Switched Reluctance Motors (SRMs) have been used frequently in industrial applications in recent years. Especially electric vehicles and domestic applications are also encountered. Although SRM is being used so widely, one of the biggest disadvantages is the torque ripple that occur. In order to reduce the torque ripple, it is tried to be reduced by making improvements both during the design of the motor and in the control parts of the motor. Tangential force is effective in the formation of the torque. For this reason, determination and analysis of the force in this direction is of great importance for motors. In this study, the effect of the air gap length value of the switched reluctance motor on the radial and tangential force values was analysed using the maxwell stress tensor method. The optimal air gap length has been tried to be determined. Switched reluctance motor with 550 W, 8/6 pole numbers are used. Radial and tangential magnetic flux density values and force values of each motor model were obtained. According to the results, it was determined that with the increase of the air gap length, both radial and tangential force values decreased.

Keywords: Switched reluctance motor, maxwell stress tensor method, radial force, tangential force

GİRİŞ

Anahtarlamalı Relüktans Motor (ARM), özel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır ve basit yapısı, ucuz olması (Dursun ve Özden, 2008), kalıcı mıknatıs kullanılmaması, rotorda sargı olmaması, yüksek hızda çalışma ve yüksek sıcaklıkta işleme yeteneği gibi avantajları nedeniyle geleneksel motorlara göre daha uygun bir alternatif motor haline gelmiştir (Marcsa ve Kuczmann, 2017). ARM yüksek hız ve çift yönlü çalışmanın gerekli olduğu çamaşır makinesi ve elektrikli araç gibi uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır. ARM' un elektromanyetik tasarımında, manyetik akı yoğunluğu dağılımının hesaplanması önemli bir analiz adımıdır, çünkü kuvvet yoğunluğu, moment, zıt EMK ve endüktans gibi bilgiler akı yoğunluğu dağılımından elde edilebilmektedir (Gu ve ark., 2016).

Elektromıknatıs prensibine göre stator kutbundaki sargılardan akım akmaya başladığında, stator kutbu rotor kutbunu kendine doğru çekmeye başlar. Rotor kutupları arasındaki boşluk, motor dönerken stator ile rotor arasında değişken hava aralığının meydana gelmesine sebep olur. Bu nedenle rotor döndüğünde rotor kutbuna etki eden radyal ve teğetsel kuvvetler sürekli değişir. Radyal yöndeki değişimler motorda gürültü meydana gelmesine ve yataklarda titreşime neden olur (Polat ve ark., 2013). Teğetsel kuvvet ise, çıkış momentine katkıda bulunur ve varyasyonu moment dalgalanmasına neden olur (Gan ve ark., 2018).

Anahtarlamalı relüktans motorlarda hava aralığı uzunluğu, motorun performans karakteristikleri üzerinde önemli etkiye sahip olan parametredir. Hava aralığı uzunluğunun değişimi ile hava aralığı relüktans değeri de doğru orantılı olarak değişmektedir. Ayrıca endüktansda meydana gelecek değişim moment değerinin de değişmesine yol açmaktadır. Buradan hareketle hava aralığı uzunluğunun değişimi, ARM' un en önemli çalışma karakteristiklerinden moment değerini değiştirmektedir. Hava aralığı değerinin küçük olması elde dilediği momentin maksimum değerinin artmasına ve kullanılan sürücü devresindeki akım ve gerilim değerlerinin minimum seviyede almasına yardımcı olacaktır. Ayrıca, faz akımının dengede kalabilmesi ve akustik gürültünün minimum seviyede tutulabilmesi için düzgün bir hava aralığına gereksinim duyulmaktadır (Ayaz

ve Yılmaz, 2008). Takemoto ve ark. (2004) çalışmalarında ARM' larda, stator-rotor hava aralığı uzunluğunun genellikle verimli moment üretimini sağlamak için küçük olarak tasarlanması gerektiğini ifade etmişlerdir.

Anahtarlamalı relüktans motorlarda kuvvet ve moment hesabında birçok geometrik parametrenin birlikte düşünülmesi gerekmektedir. Hava aralığı uzunluğu da bu parametrelerden birisidir. Küçük hava aralıklarının mekanik olarak tasarımında zorluklar bulunmaktadır, büyük hava aralıklarında ise relüktans değerinin artması ve buna bağlı olarak endüktans değerinde azalma meydana gelmektedir. Bu sebeple hava aralığı uzunluğunun optimum değerinin belirlenmesi motor performansı açısından büyük önem arz etmektedir. Ayrıca hava aralığı uzunluğunun değişimi kuvvetler üzerinde de önemli bir etkiye sahip olmasından dolayı radyal ve teğetsel kuvvet hesapları da önem kazanmaktadır.

Fu ve ark. (2017) çalışmalarında radyal elektromanyetik kuvvetin, anahtarlamalı relüktans motorlarda titreşimin ve gürültünün ana sebeplerinden birisi olduğunu ifade etmişlerdir. Stator kutuplarının sayısını artırarak yeni bir anahtarlamalı relüktans motor modeli önermişlerdir. Sonlu elemanlar yöntemini kullanarak analiz edilen yeni motor modelinin referans motora göre titreşim değerlerinin daha iyi olduğunu göstermişlerdir.

Abid ve Thakur (2019) çalışmalarında anahtarlamalı relüktans motorda titreşimi ve akustik gürültüyü azaltmak için yeni bir yöntem önermişlerdir. Önerilen yöntemde stator ve rotor kutuplarında dikdörtgen ve elmas şeklinde deliklerin yerleştirilmesi ile yeni bir tasarım elde edilmiştir. Önerilen tasarım ile titreşim ve akustik gürültünün azaltılabileceği gösterilmiştir.

Bu çalışmada anahtarlamalı relüktans motorun stator ve rotor kutupları arasındaki hava aralığı uzunluğu 0.25 mm, 0.5 mm, 0.75 mm ve 1 mm olacak şekilde dört motor modeli oluşturulmuştur. Motor modellerine ait manyetik vektör potansiyel değişimleri, radyal ve teğetsel manyetik akı yoğunluğu değişimleri ile kuvvet yoğunluğu değişimleri Maxwell Gerilme Tensör (MGT) yöntemi ile elde edilmiştir. Ayrıca motor modellerine ait manyetik akı yoğunluğu dağılımları verilmiştir.

MATERYAL VE YÖNTEM

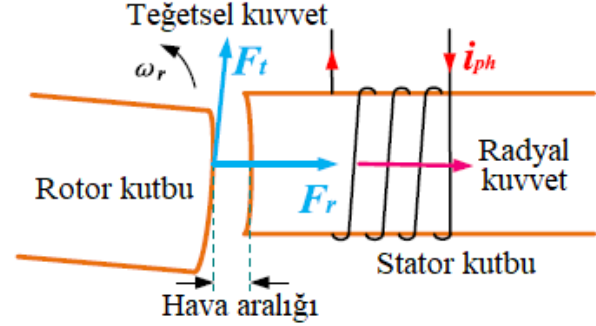
Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak kuvvet veya moment hesaplanması, bazı elektromekanik cihazların tasarımında önemli bir adımdır ve bu tür cihazların başarılı bir şekilde simülasyonu, doğru ve güvenilir bir kuvvet veya moment hesaplama yöntemi gerektirmektedir. Elektromanyetik kuvvetleri veya momentleri elde edebilmek için dört farklı yöntem kullanılmaktadır. Bunlar (Benhama ve ark., 1997):

- (1) Lorentz veya JxB yöntemi
- (2) Maxwell gerilme tensör (MGT) yöntemi
- (3) Klasik sanal çalışma yöntemi
- (4) Coulomb sanal çalışma (CSÇ) yöntemi

Maxwell gerilme tensör yöntemi, sayısal modelleme (örneğin sonlu elemanlar yöntemi) kullanıldığında elektromanyetik cihazlar için kuvvetlerin ve/veya momentin hesaplanmasında yaygın olarak kullanılmaktadır (Popescu, 2006).

Maxwell Gerilme Tensör (MGT) Yöntemi, hareketli bölümlerdeki manyetik kuvvetlerin veya momentin hesaplanmasında kullanılan yöntemlerden biridir. Hesaplamalar için modelde kapalı bir çizgi tanımlanmalıdır. Kapalı çizginin seçimi, sonuçların doğruluğunu oldukça fazla etkilemektedir. Tanımlanan kapalı çizgi, hava aralığı bölgesi içinde olmalıdır. Maxwell gerilme yöntemindeki yerel gerilme, tüm sınır noktalarında hesaplanır ve toplam normal ve teğetsel kuvvet bileşenlerini bulmak için yüzey integrali uygulanır. Manyetik alan çözümü gereksinimi nedeniyle sonlu elemanlar yönteminde manyetik kuvvet bileşenlerinin ve moment hesaplanmasında Maxwell gerilme yöntemi tercih edilmektedir. Maxwell gerilme yöntemi ile iki boyutlu problemlerde, akı yoğunluğu değerlerinin normal ve teğetsel bileşenleri kapalı çizgi boyunca tüm noktalarda bilinmelidir (Polat ve ark., 2013). Maxwell gerilme yöntemi, malzeme özelliklerinden bağımsız olarak uygulanabilmektedir. Yani hem doğrusal malzeme özellikleri ve hem de doğrusal olmayan malzeme özellikleri için kullanılabilirken, entegrasyon yolunun doğru olması için dikkatlice seçilmesi gerekir. Entegrasyon yolu herhangi bir manyetik malzeme içermemeli ve manyetik malzemeden olabildiğince uzağa yerleştirilmelidir (Yoo, 2002).

Anahtarlama relüktans motorda meydana gelen radyal ve teğetsel kuvvetler Şekil 1’de gösterilmiştir (Gan ve ark., 2018).



Şekil 1. Stator ve rotor kutupları tarafından üretilen kuvvetler

Stator sargısından bir akım aktığında, rotor üzerinde teğetsel kuvvet ve radyal kuvvet olarak ikiye ayrılan bir çekim kuvveti üretilir. Teğetsel kuvvet momente dönüşürken, radyal kuvvet stator çerçevesi üzerinde titreşim olarak karşımıza çıkmaktadır. Radyal kuvvetin neden olduğu akustik gürültü, ARM’larda doğal bir özelliktir. Faz değiştirme sırasında elektromanyetik kuvvetin hızlı değişmesi nedeniyle, statorun radyal titreşimi, akustik gürültünün önemli bir kaynağıdır. Bu nedenle, düşük gürültülü bir ARM elde etmek için, radyal kuvvet ve titreşim, uygun stratejiler kullanılarak azaltılabilir (Gan ve ark., 2018).

Hava aralığındaki teğetsel kuvvet yoğunluğu (f_t) ve radyal kuvvet yoğunluğu (f_r) Eşitlik 1 ve 2’de verilmiştir (Zhu ve ark., 2007).

$$f_t = \frac{1}{\mu_0} B_r B_t \quad (1)$$

$$f_r = \frac{1}{2\mu_0} (B_r^2 - B_t^2) \quad (2)$$

μ_0 , boşluğun göreceli geçirgenliğidir, B_t ve B_r , sırasıyla teğet ve radyal yönlerden teğetsel ve radyal manyetik akı yoğunluklarıdır. Bir integral yüzeydeki teğetsel kuvvet (F_t) ve radyal kuvvet (F_r), Eşitlik (1) ve (2) kullanılarak elde edilebilir ve sırasıyla Eşitlik (3) ve (4)’de verilmiştir (Elamin, 2017).

Maxwell Gerilme Tensör Yöntemini Kullanarak Anahtarlama Relüktans Motorun Hava Aralığı Uzunluğunun Radyal ve Teğetsel Kuvvetler Üzerindeki Etkisinin Belirlenmesi

$$F_t = \frac{1}{\mu_0} \iint B_r B_t ds \quad (3)$$

$$F_r = \frac{1}{2\mu_0} \iint (B_r^2 - B_t^2) ds \quad (4)$$

Rotor kutbuna etki eden moment Eşitlik (5) ile elde edilebilir (Gan ve ark., 2018).

$$T_t = F_t \frac{D_{r0}}{2} = \frac{D_{r0}}{2} \int_s f_t ds = \frac{D_{r0}}{2\mu_0} \int B_r B_t ds \quad (5)$$

İfadede T_t momenti ve D_{r0} rotor dış çapını ifade etmektedir.

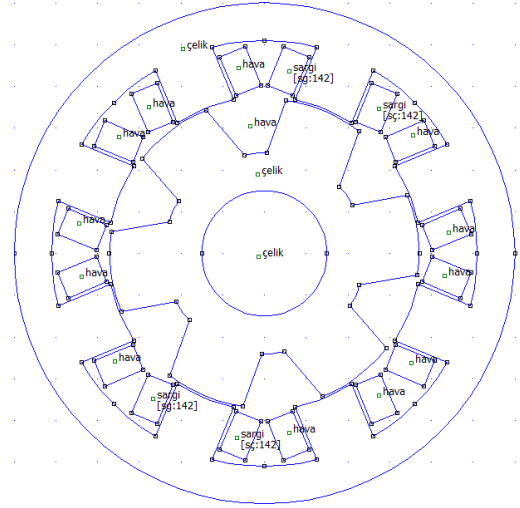
Hava aralığının radyal ve teğetsel kuvvet üzerindeki etkilerinin analiz edilebilmesi için Finite Element Method Magnetics (FEMM) (URL-1, 2021) programı kullanılmıştır. FEMM programında modellemesi yapılacak motorun etiket bilgileri, geometrik boyutlandırması, sargı bilgileri ve sınır değerlerinin girilmesi ile analizler yapılmaktadır.

Modellemelerde kullanılan anahtarlama relüktans motor 550 W gücünde, 4 fazlı, 300 V gerilimli, 1500 d/d gibi özelliklere sahiptir. Modellemelerde kullanılan referans motorun geometrik özellikleri Tablo 1' de verilmiştir (AP07-0105, 2021).

Referans motorun 2 boyutlu kesit görüntüsü ve oluşturulan FEMM modeli Şekil 2' de verilmiştir. Kesit görüntüsü verilen motorun sadece A fazı enerjilendirilmiştir. Şekil 2' de verilen modelde çelik ifadesi, stator, rotor ve mil kısmında kullanılan çelik malzemeyi, sg ve sç ifadeleri sırasıyla sargıların giriş ve çıkışlarını ifade etmektedir.

Tablo 1. Referans motorun geometrik özellikleri

Parametreler	Değer
Stator/rotor kutup sayısı	8/6
Stator dış çapı (mm)	120
Rotor dış çapı (mm)	74
Mil çapı (mm)	30
Hava aralığı uzunluğu (mm)	0.5
Paket boyu (mm)	65
Bir kutuptaki sarım sayısı	142
Stator/rotor malzemesi	1010 Çeliği
Stator/rotor açıklık değeri	0.5
Stator/rotor boyunduruk uzunluğu (mm)	9



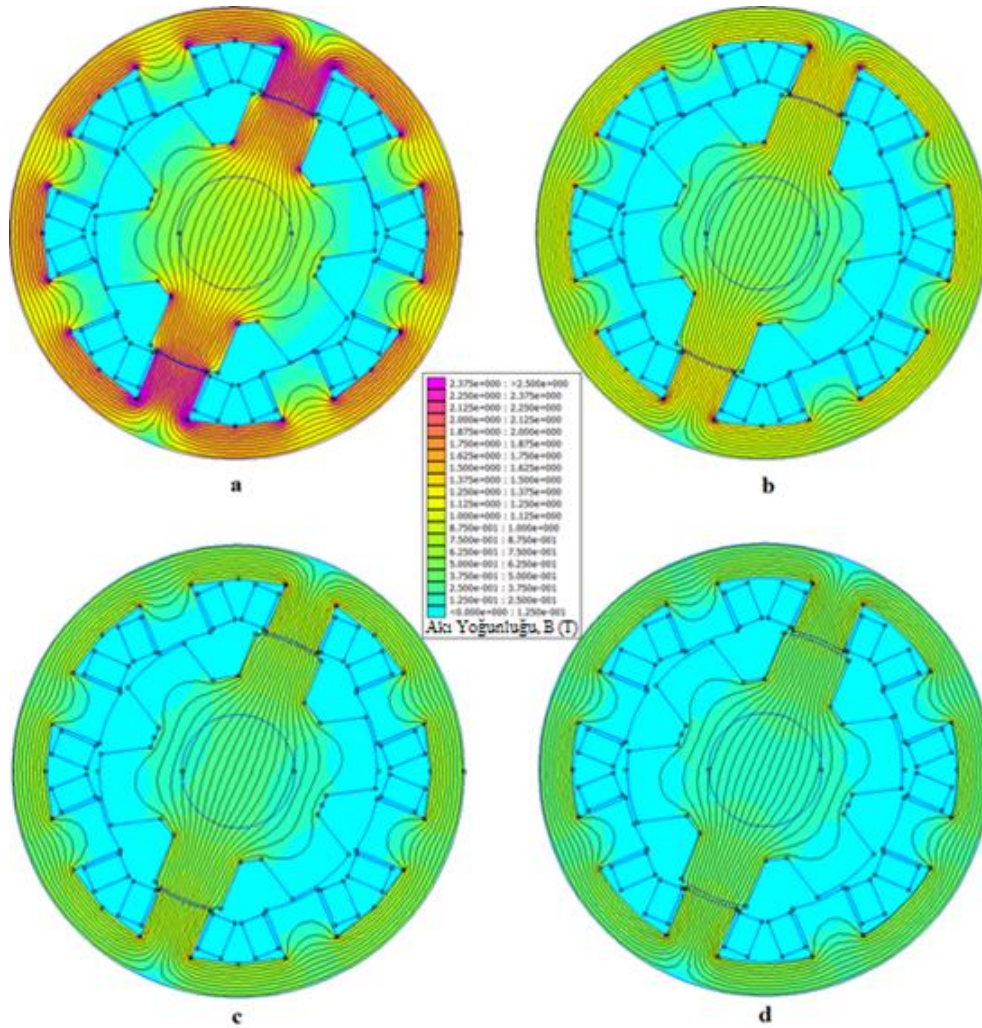
Şekil 2. ARM' un iki boyutlu görüntüsü ve FEMM modeli

BULGULAR VE TARTIŞMA

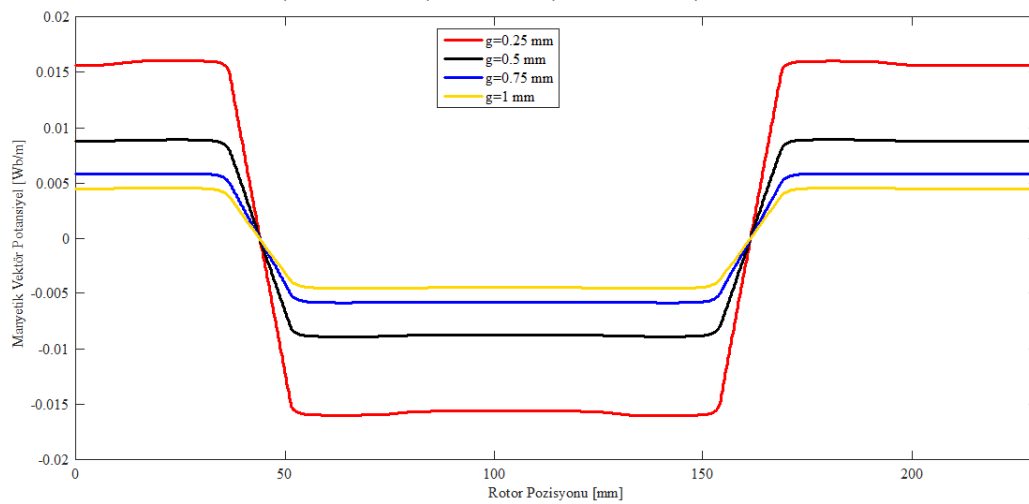
Hava aralığı uzunluğunun anahtarlama relüktans motorlardaki radyal ve teğetsel kuvvetler üzerindeki etkileri incelenmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Şekil 3' de her bir motor modeline ait manyetik akı yoğunluğu dağılımı verilmiştir. Hava aralığının etkisinin görülebilmesi amacıyla skalanın minimum ve maksimum değerleri aynı alınmıştır. Şekil incelendiğinde hava aralığının artması ile birlikte motorlardaki manyetik akı yoğunluğu değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Küçük hava aralıklarında nüve ve kutup kısımlarında daha fazla doyma meydana geldiği görülmektedir.

Maxwell Gerilme Tensor Yöntemini Kullanarak Anahtarlama Relüktans Motorun Hava Aralığı Uzunluğunun Radyal ve Teğetsel Kuvvetler Üzerindeki Etkisinin Belirlenmesi



Şekil 3. Farklı hava aralığı uzunlukları için manyetik akı yoğunluğu değişimleri
a) 0.25 mm b) 0.5 mm c) 0.75 mm d) 1 mm

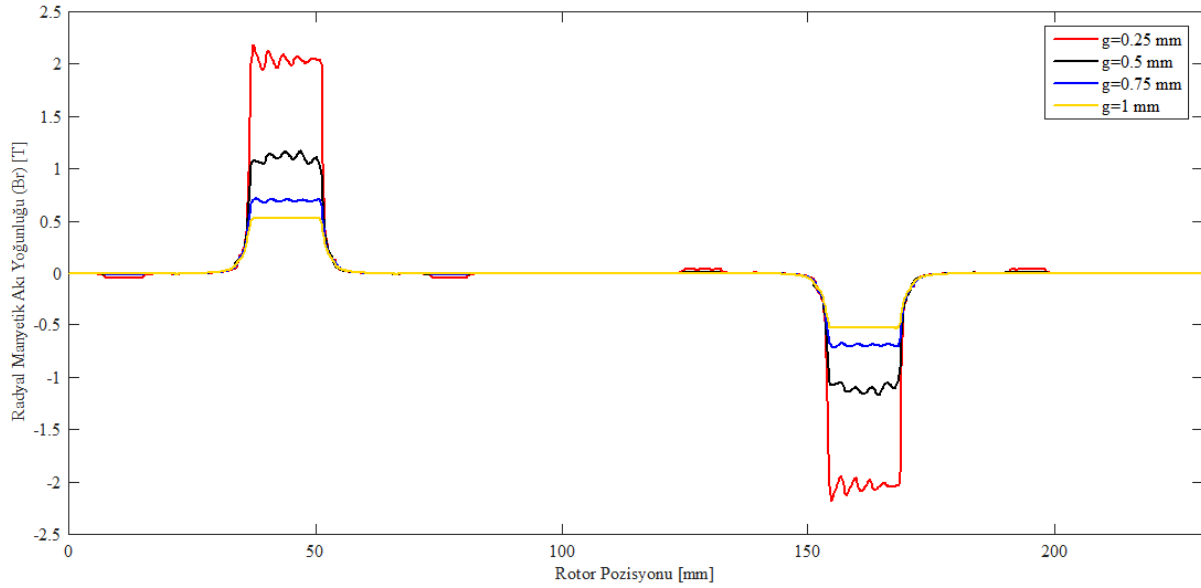


Şekil 4. Manyetik vektör potansiyel değişimi

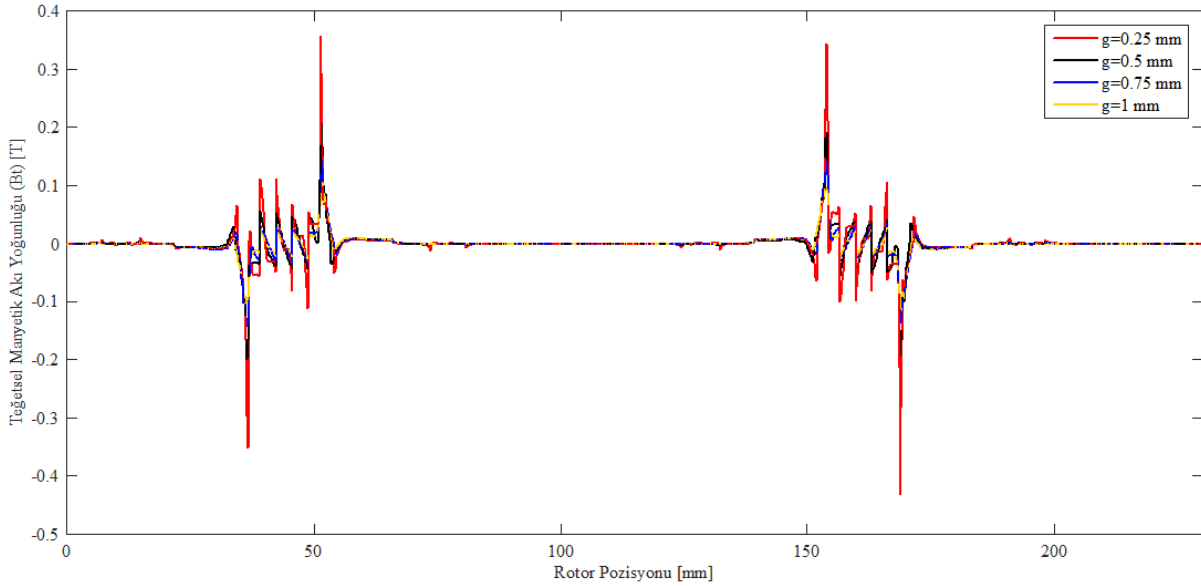
Maxwell Gerilme Tensör Yöntemini Kullanarak Anahtarlama Relüktans Motorun Hava Aralığı Uzunluğunun Radyal ve Teğetsel Kuvvetler Üzerindeki Etkisinin Belirlenmesi

Şekil 4' de her bir motor modeline ait manyetik vektör potansiyel değişimleri verilmiştir. Elde edilen grafik incelendiğinde hava aralığı değerinin artması ile birlikte vektör potansiyel değerinde bir azalma meydana geldiği görülmektedir. Hava aralığının artması ile birlikte relüktans değerinin de artmasına bağlı olarak manyetik vektör potansiyel değerlerinde bir azalma oluşmuştur.

Şekil 5' de motor modellerine ait radyal manyetik akı yoğunluğu değişimleri verilmiştir. Grafik incelendiğinde radyal yöndeki akı yoğunluğunun hava aralığı uzunluğunun azalması ile arttığı görülmektedir. Ayrıca grafiklerin tepe değerlerinin hava aralığı uzunluğunun artması ile salınımın azaldığı ve daha düz hale geldiği görülmektedir. Elde edilen değişimlerin manyetik akı yoğunluğu değişimleri ile örtüştüğünü de göstermektedir.



Şekil 5. Radyal yöndeki akı yoğunluğu değişimi

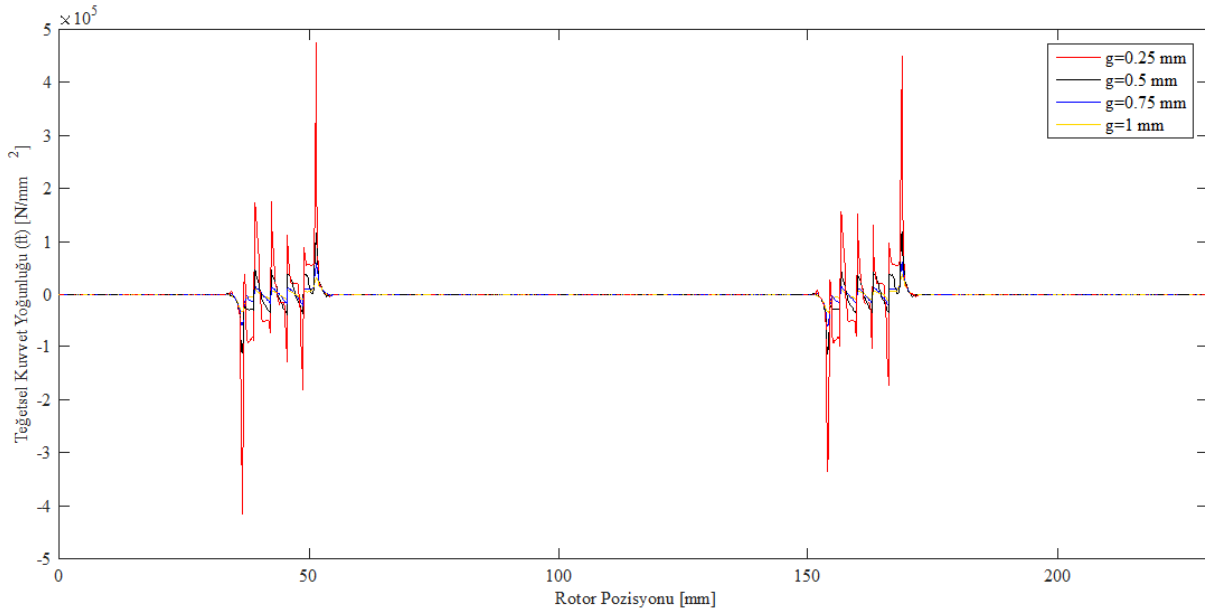


Şekil 6. Teğetsel yöndeki akı yoğunluğu değişimi

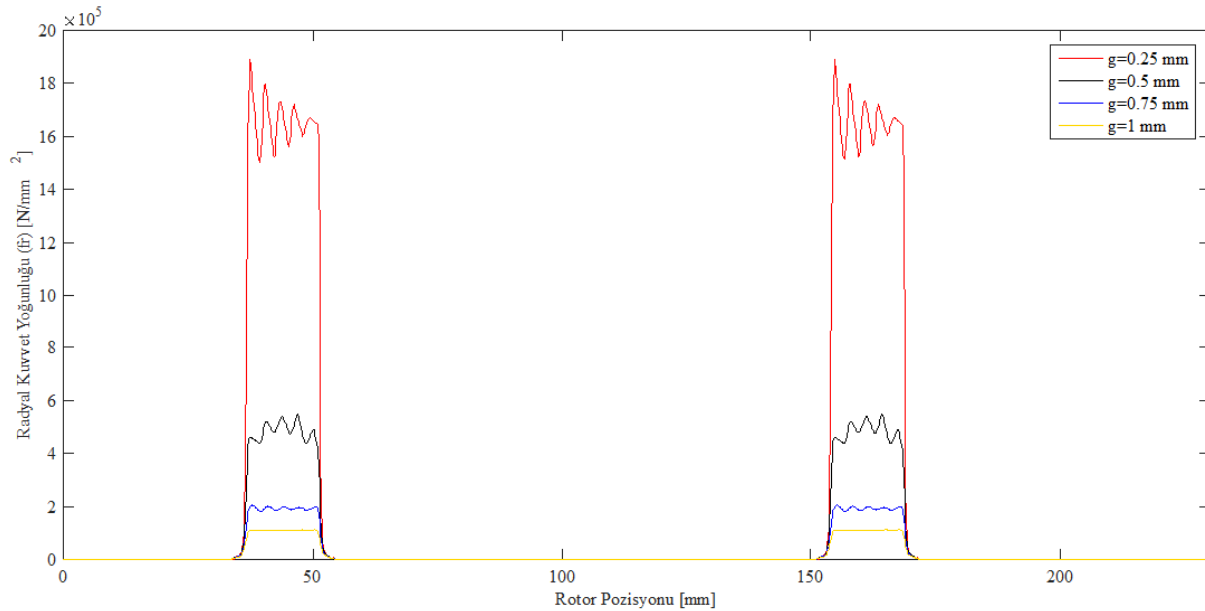
Maxwell Gerilme Tensör Yöntemini Kullanarak Anahtarlamalı Relüktans Motorun Hava Aralığı Uzunluğunun Radyal ve Teğetsel Kuvvetler Üzerin-deki Etkisinin Belirlenmesi

Şekil 6' da ise teğetsel yöndeki manyetik akı yoğunluğu değişimleri verilmiştir. Şekil 6 incelendiğinde hava aralığı uzunluğunun artması ile elde edilen teğetsel yöndeki akı yoğunluğu değerlerinin azaldığı görülmektedir. En küçük hava aralığında en yüksek pik değerine ulaştığı görülmektedir. Şekil 7' de manyetik akı yoğunluklarının kullanılması ile elde edilen teğetsel yöndeki kuvvet yoğunluğu değişimleri farklı hava aralığı uzunlukları için verilmiştir. Şekil 7 incelendiğinde 0.25 mm

hava aralığında en büyük teğetsel kuvvet meydana gelmişken, en az teğetsel kuvvet değeri en yüksek hava aralığı uzunluğundan elde edilmiştir. Bu durum göstermektedir ki hava aralığının daha küçük seçilmesi moment değerinin de daha yüksek elde edilmesinde katkı sağlamaktadır.



Şekil 7. Teğetsel kuvvet yoğunluğunun değişimi



Şekil 8. Radyal kuvvet yoğunluğunun değişimi

Maxwell Gerilme Tensör Yöntemini Kullanarak Anahtarlamalı Relüktans Motorun Hava Aralığı Uzunluğunun Radyal ve Teğetsel Kuvvetler Üzerindeki Etkisinin Belirlenmesi

Şekil 8' de elde edilen manyetik akı yoğunluklarının kullanılması ile elde edilen radyal yöndeki kuvvet yoğunluğu değişimleri farklı hava aralığı uzunlukları için verilmiştir. Şekil 8 incelendiğinde hava aralığının artması ile radyal kuvvet yoğunluklarının azaldığı görülmektedir. Bu durum ise motorda meydana gelen gürültü ve titreşimin azalmasında önemli bir rol oynamaktadır.

SONUÇ

Bu çalışmada anahtarlamalı relüktans motorun farklı hava aralığı uzunluğu değerlerinin motorun radyal ve teğetsel kuvvet üzerindeki etkileri maxwell gerilme tensör yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre hava aralığı değerinin artması ile kutup ve nüve kısımlarındaki manyetik akı yoğunluğu değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Elde edilen bu sonucun manyetik vektör potansiyel değişimi ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Radyal ve teğetsel manyetik akı yoğunluğu değerleri incelendiğinde, hava aralığı uzunluğunun artması ile bu yönlerdeki akı yoğunluğu değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Bu duruma bağlı olarak da radyal ve teğetsel kuvvet yoğunluğu değerlerinde de azalmalar tespit edilmiştir.

Özellikle radyal kuvvet yoğunluğu grafiklerinde elde edilen değerlerin daha az salınım yaptığı ve bunun sonucunda motordan daha az titreşim ve akustik gürültü elde edilebileceği gösterilmiştir. Teğetsel kuvvet yoğunluğu grafiklerinde ise hava aralığı uzunluğunun azalması ile kuvvet yoğunluğu değerlerinde bir artış meydana gelmiştir. Bu durum motorun moment değerinin iyileştirilmesinde önemli bir katkı sağlayacaktır.

Genel bir değerlendirme yapılırsa, hava aralığı uzunluğunun artması radyal kuvvet yoğunluğu değerinin azalmasına, bu durum ise gürültünün azalmasına katkı sağlamaktadır. Hava aralığının artması teğetsel kuvvet değerinin azalmasına, bu durum ise momentin azalmasına neden olmaktadır. Elde edilen sonuçlar göstermektedir ki, hava aralığı uzunluğunun hem gürültü hem de moment için en optimum değeri verecek şekilde seçilmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- Abid, N., Thakur, A. (2019). Numerical investigation and optimization of switched reluctance machine with geometrical parameters using ansys. *International Journal of Advance Research and Innovative Ideas in Education*, 5(6): 1249-1259.
- AP07-0105. (2021). A switched reluctance motor problem, Application Note, 1-28.
- Ayaz, M., Yılmaz, K. (2008). The effects of geometric parameters on performance of conventional and mutually coupled switched reluctance motors. *Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu (ELECO)*, Nisan 03-07, 2008, Bursa, Turkey, Book of Proceedings, 1-6.
- Benhama, A., Williamson, A. C., Reece, A. B. J. (1997). SRM torque computation from 3D finite element field solutions. *Emd97 Proceedings 8th International Conference on Electrical Machines and Drives*, September 1-3, 1997, Cambridge, UK, Book of Proceedings, 59-63.
- Dursun, M., Özden, S. (2008). Değişken hızlı sürücülü ve bulanık mantık denetimli bir anahtarlamalı relüktans motorun asansör tahrikinde benzetimi ve uygulanması. *Journal of Polytechnic*, 11(2): 129-137.
- Elamin, M. (2017). Acoustic noise mitigation of switched reluctance machines through skewing methods. The Graduate Faculty of the University of Akron, Master of Science, 76.
- Fu, Z., Wang, X., Cao, C., Liu, M., Wang, K. (2017). Research on electromagnetic force distribution and vibration performance of a novel 10/4 switched reluctance motor. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 207: 1-9.
- Gan, C., Wu, J., Sun, Q., Kong, W., Li, H., Hu, Y. (2018). A review on machine topologies and control techniques for low-noise switched reluctance motors in electric vehicle applications, *IEEE Access*, 6: 31430–31443.
- Gu, L., Bostanci, E., Moallem, M., Wang, S., Devendra, P. (2016). Analytical calculation of the electromagnetic field in SRM using conformal mapping method. *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, June 27-29, 2016, Dearborn, MI, USA, Book of Proceedings, 1-6.
- Marcasa, D., Kuczmann, M. (2017). Design and control for torque ripple reduction of a 3-phase switched reluctance motor. *Computers and Mathematics with Applications*, 74(1): 89-95.
- Polat, M., Oksuztepe, E., Omac Z., Yıldırım, M., Kurum, H. (2013). Examination of radial force with finite element method in switched reluctance motor. *8th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, November 28-30, 2013, Bursa, Turkey, Book of Proceedings, 576-580.
- Popescu, M. (2006). Prediction of the electromagnetic torque in synchronous machines through maxwell stress harmonic filter (HFT) method. *Electrical Engineering*, 89: 117–125.

Maxwell Gerilme Tensör Yöntemini Kullanarak Anahtarlamaalı Relüktans Motorun Hava Aralığı Uzunluğunun Radyal ve Teğetsel Kuvvetler Üzerin-deki Etkisinin Belirlenmesi

Takemoto, M., Chiba, A., Akagi, H., Fukao, T. (2004). Torque and suspension force in a bearingless switched reluctance motor. *Electrical Engineering in Japan*, 157(2): 72-82.

URL-1 (2021.) <https://www.femm.info/wiki/HomePage> (Erişim Tarihi: 02.03.2021).

Yoo, J. (2002). Reduction of vibration caused by magnetic force in a switched reluctance motor by topology optimization. *Transactions of the ASME*, 69: 380-387.

Zhu, W., Pekarek, S., Fahimi, B., Deken, B. (2007). Investigation of force generation in a permanent magnet synchronous machine. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 22(3): 557-565.
