



Radyal Akılı Sabit Mıknatıslı Senkron Motorlarda Vuruntu Momentinin Azaltılması

Reduction of Cogging Torque in Radial Flux Permanent Magnet Synchronous Motors

Kadir Yılmaz¹, Taner Dindar²

¹Kocaeli Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, 41380 İzmit/Kocaeli, TÜRKİYE

²Ankara Üniversitesi Nallıhan Meslek Yüksekokulu Elektrik ve Otomasyon Bölümü, 06920 Ankara,, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 15/01/2023

Kabul / Accepted: 13/04/2023

Çevrimiçi Basım / Published Online: 06/06/2023

Son Versiyon/Final Version: xx/xx/xxxx

Öz

Sabit mıknatıslı senkron motorlar (SMSM) özellikleri bakımından incelendiğinde diğer motorlara göre avantajlı yanlarının olduğu bilinmektedir. Sabit mıknatıslı senkron motorun rotorunda bulunan yüksek güç yoğunluğundaki mıknatıslar, bu motoru diğer fırçasız motorlara göre daha kullanışlı hale getirmektedir. Sabit mıknatıslı senkron motorlar son zamanlarda hafif elektrikli araç sistemlerinde tahrik edici olarak da kullanılmaktadır. Ancak, bu motorlar karakteristik yapısından dolayı oluşan ve motorun çıkış momentini olumsuz etkileyen vuruntu momentine sahip oldukları da bilinmektedir. Radyal akılı sürekli sabit mıknatıslı motorlarda (RASM) vuruntu momentindeki bu olumsuz durumların azaltılması için bazı yöntemler kullanılmaktadır. Bu çalışmada, vuruntu momentini azaltmaya yönelik stator ve rotor tarafında kullanılabilecek yöntemler üzerinde durulmuştur. Referans bir motorun Ansoft Maxwell yazılımında 2 boyutlu modelinin sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile analizleri yapılarak, stator ve rotor tarafındaki değişikliklerin vuruntu momentine etkileri karşılaştırılmıştır. Stator tarafında oluk açıklığının azaltılması ile vuruntu momentinde %36,84, rotor tarafında mıknatıs kalınlığının azaltılması ile %42,1 lik bir azalma görülmüştür. Bununla birlikte ortalama momentte düşüş olduğu da görülmüştür. Sayısal analiz sonuçları ile vuruntu momentinin azaltıldığı ve en iyi iyileştirme sonucunda hedeflenen tasarım kriterlerini sağlayan tasarım elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler

“Sabit mıknatıslı senkron motorlar, Radyal akılı sabit mıknatıslı motor, Sonlu elemanlar yöntemi, Vuruntu momenti”

Abstract

Permanent magnet synchronous motors (SMSM) are known to have some advantages compared to other motors. The high power density sections in the Permanent magnet synchronous chamber rotor make this motor more useful than other non-split motors. Permanent magnet synchronous motors have also been used recently as a light electric vehicle starter. However, it is also known that they have cogging torque that occur due to the structure of these engine structures and negatively affect the exit moment. Some purposes are used in order to reduce these negative situations in the cogging torque in radial permanent synchronous motors (RASM). To eliminate this effect, the use of stator and rotor interfaces for using the cogging torque is emphasized. The effects of the 2D model on the fly cogging torque on the stator and rotor sides, which were analyzed with the finite element method (FEM) in a reference frame Ansoft Maxwell software, were compared. By reducing the slot opening of the stator tips, it provides a reduction of 36.84% in the cogging torque and a reduction of 42.1% with the height of the layers of the rotor edges. However, there was also an average instantaneous decrease. With the numerical analysis results, the design in which the cogging torque is reduced and the best editing result meets the targeted design criteria has been obtained.

Key Words

“Permanent magnet synchronous motors, Radial flux permanent magnet motor, Finite element method, Cogging torque”

1. Giriş

Sabit Mıknatıslı Senkron Motorlar (SMSM) günümüzde evimizde bulunan küçük ev aletlerinden endüstriyel alana kadar sıklıkla karşılaşılan ve elektrik motorları arasında en yüksek güç yoğunluğuna sahip motorlardır. Senkron motorların rotorunda bulunan mıknatısların yapısı gereği küçüktür, böylelikle bakım maliyetleri de azalmaktadır. Bu motorların avantajlarından bazıları şunlardır; Yüksek momentli, dinamik kontrol gerektiren uygulamalarda kullanılması, çıkış momentine bakıldığında dalgalanmaların daha az olmasıdır. Bu avantajlar yüksek performanslı hareket kontrol uygulamalarında önemli bir gerekliliktir (Adam, 2007).

Sabit Mıknatıslı Senkron Motorlar (SMSM) motorlarda moment dalgalanmaları bulunmaktadır, vuruğu momenti, sinyal genişlik modülasyonundaki (PWM) akım harmonikleri, ideal olmayan zıt elektro motor kuvveti dalga şekilleri, faz komütasyonu ve DC baradaki dalgalanmalar bunlardan bazılarıdır. Düşük hızlarda moment dalgalanmaları istenmeyen durumdur, boyutlarda hız değişimlerine, titreşime ve akustik gürültü gibi durumlara neden olmaktadır. Yüksek hızlarda moment dalgalanmaları düşük hızlardaki dalgalanmaları nazaran istenmeyen durumlar meydana getirmez, nedeni olarak sistemin eylemsizliği sayesinde süzülebilmesidir (Aydn, 2003).

Radyal akılı sabit mıknatıslı motorlarda (RASM) vuruğu momentinin çıkış momenti üzerinde büyük bir etkisi olduğundan, bu çalışmada vuruğu momentinin azaltılması üzerinde durulmuştur. RASM motorlarda vuruğu momentini azaltabilmek için birden fazla yöntem bulunmaktadır. Makine ve kontrol tabanlı olarak iki kısma ayrılmaktadır. Bunların arasında başlıca azaltma yöntemi olarak olup/kutup oranı, stator oluk açıklığı, stator dişlerine eğim verilmesi, mıknatısların kalınlığı, dişlerin kullanılması, kesirli sargıların kullanılması ve mıknatıs kutbunun optimizasyonun yapılmasıdır (Dai, 2011; Zhu, 2018).

Makinelerde stator ve rotor mıknatısları olarak iki kısımda incelenir. Yapılan çalışmalarda rotor tarafında değişiklikler yapılarak beş farklı PM makinesinin yapısı incelenmiştir. Yarım adımlı sargılı motorun vuruğu momentinin düşük olduğu görülmüştür fakat ortalama tork azalmıştır (Güemes, 2011). Stator yuvaları üzerinde üç farklı geometrik kısımlar eklenmiş ve optimizasyon yapılmıştır. Yapılan sonlu elemanlar çalışmalarında vuruğu torkunun düşürülmesi sağlanmıştır (Herlina, 2017). Sabit mıknatıslı motorlarda vuruğu momentinin optimizasyonu sonlu elemanlar kullanılarak ve Taquchi yöntemi ile %89 azaltıldığı görülmektedir (Tseng, 2016).

RASM motorlarda uygulanan tekniklerin bir kısmı direk olarak aksel akılı sürekli mıknatıslı motorlara (EASM) uygulanabilirliği den, Metin Aydın'ın 2003 ve 2008'de yaptığı çalışmalarda EASM motorlarda vuruğu momentini azaltılması için RASM motorlarda uygulanan yöntemler ve yeni yöntemler üzerinden çalışmalar yapmıştır. Analizlerinden aldığı sonuçlar doğrultusunda vuruğu momentinden azalmalar sağlamıştır (Aydın, 2003; Aydın, 2008). Rüzgar türbinleri için sürekli mıknatıslı generatör tasarım çalışmasında tasarım aşamasında vuruğu momentini arttıran tasarım hatalarına çalışmasında yer vermiştir (Kütük, 2011). Emrah Çetin 2017'de yaptıkları çalışmada EASM oluk yapısındaki bozukluklarının momenti üzerindeki etkileri gözlemlemiştir (Çetin ve diğ., 2017). Yine Emrah Çetin'in 2018 yılında EASM motorlarda vuruğu momenti azaltmak için yaptıkları çalışmalarda motorun farklı mıknatıs adımı ve rotor mıknatıslarına kaykı uygulayarak vuruğu momentinde azalmalar sağlamışlardır (Çetin ve diğ., 2018). Aksel akılı generatör tasarımı çalışmasında rotor mıknatıslarına eğim vererek vuruğu momentinin optimizasyonu üzerinde çalışmışlardır (Can, 2017; Ayçiçek, 2012). Elektrikli araçlar için yapılan çalışmalarda yapılan parametrik analizlerle vuruğu momentini azaltarak motorun moment titreşimi ve ısı analizleri yapılmıştır (Yılmaz, 2020; Meşe, 2013). 2,5 kW 14 kutuplu, 84 oluklu sabit mıknatıslı senkron motorun analitik tasarımı, analizi ve optimizasyonu yapılmıştır. Çalışmada verim, vuruğu torku ve manyetik akı 3D olarak incelenmiştir (Dalcalı, 2020). Radyal akılı PMSM'ler de dahil olmak üzere kalıcı mıknatıslı makinelerde vuruğu torkunu azaltmak için önerilen tekniklere kapsamlı bir genel bakış sağlanmıştır. Aksel akılı kalıcı mıknatıslı makinalarda yapılan çalışmada, Ansoft Maxwell'de Sonlu Eleman Analizi (FEA) ile analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre referans modelin vuruğu torkunun makine torkunun %6,53'ü olduğu görülmüştür. İkinci olarak, vuruğu torkunu düşürmek için daha iyi stator ve rotor yüksekliği bulmak için parametrik bir analiz gerçekleştirilmiş olup, AFPMM'nin tasarım parametreleri, MATLAB'de sabit çıkış torku altında minimum vuruğu torku için yapay zeka yöntemleriyle tahmin edilmiştir. Son olarak, tüm yöntemler karşılaştırılır ve tartışılır (Saygın ve diğ., 2017). Aksel akılı sabit mıknatıslı makinalarda (AFPM) vuruğu torkunu incelemek için alternatif tekniklerin var olduğunu gösterilmiştir. Bunun nedeni sonlu elemanlar yöntemi ile analiz yapılırken zaman açısından sıkıntı yaşanmasıdır (Tiegna ve diğ., 2014). Bu çalışmada, AFPM motorlarındaki vuruğu bileşeninin mıknatıs asimetrisi kullanılarak pratik olarak ortadan kaldırılabilceği ve tamsayı slot/kutup/faz motorları için iyi derecede sinüzoidal ters EMF elde edilebileceği gösterilmiştir (Güleç ve diğ., 2014). Bu çalışmada bir model tasarlanmıştır, statik eksantrikliklerden kaynaklanan benzer olmayan hava aralığı geçirgenliğinin akım harmonikleri ve tork üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Statik eksantriklik varlığında iki vuruğu torku minimizasyon tekniğinin incelenmiş bir karşılaştırma yapılmıştır. Statik eksantriklik, tek taraflı topolojide harmoniklerde önemli artışlara neden olmuştur (Ogidi ve diğ., 2017). Bu çalışmada, vuruğu torku üç parametre üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Bu analize dayanarak, aksel akılı sabit mıknatıslı (AFPM) makinelerin vuruğu torkunu en aza indirmek için iki teknik önerilmiş ve tartışılmıştır, bir prototip oluşturulmuştur, sonlu eleman analizi sonuçlarını doğrulamak için deney yapılmıştır (Xiao ve diğ., 2017).

Bu çalışmada RASM motorlarda üretim ve maliyet açısından ergonomik teknikler araştırılıp, incelenmiştir. Ansoft maxwell elektromanyetik analiz programında referans bir motorun 2 boyutlu modeli oluşturularak Sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile referans motor üzerinde amaca uygun vuruğu momentini azaltıcı tekniklerin analizi yapılmıştır. Stator ve rotor tarafındaki değişikliklerin vuruğu momentine etkisi, ortalama momente etkileri araştırılmıştır. Deney aşamasına geçmeden önce en verimli optimizasyon seçilmesi için çalışmalar yapılmıştır.

2. Vuruntu Momentinin Kaynağı ve Hesaplanması

Sabit mıknatıslı senkron motorlarda vuruntu momenti önemli olduğu bilinmektedir, ortalama moment üzerinde olumsuz etkisi olan bir bileşendir, vuruntu momenti rotordaki mıknatısların hareketinden kaynaklanmaktadır ve manyetik alandaki değişim nedeniyle görülmektedir.

Vuruntu momenti Fourier serisi olarak tanımlanabilir, analitik veya sonlu elemanlar yöntemi ile çözümlenmektedir. Tork dönme kuvvetinin bir ölçüsüdür, motor tarafından üretilen tork tespit edilmesi önemlidir. Mekanik bir sistemde enerjiyi yapılan iş olarak gösterebiliriz. Mekaniksel enerjinin differansiyel miktarı şu şekilde yazılabilir (Adam, 2007).;

$$dWm = Fdx \quad (1)$$

Burada dWm mekanik enerji, F kuvvet ve dx ise x yönündeki diferansiyel uzaklıktır. Güç, birim zamanda yapılan iş miktarıdır. Mekanik enerjiyi de yazabiliriz;

$$Pm = Fv = dWm / dt = F (dx / dt) \quad (2)$$

Formülde v hareket hızını göstermektedir. Fakat dönme hızının bilgisinin yanında tork daha önemlidir. Mekaniksel güç hesaplamak gerekir aşağıda verilen formülle bulunur.

$$Pm = Tw = T / dt = T (d\theta / dt) \quad (3)$$

Sabit mıknatıslı makinalarda rotor yüzeyine yerleştirilen mıknatıslar ve stator arasındaki manyetik etkileşimden dolayı vuruntu torku meydana gelmektedir. Bu etki, sabit mıknatıslı makinalarda gürültü ve titreşime neden olduğu için istenmeyen bir durumdur. Vuruntu torkunun değeri aşağıda gösterilmiştir.

$$T_{cog} = (1 / 2) \cdot \Phi_2 / d\theta \quad (4)$$

Burada Φg hava aralığı akı değeri, dR hava aralığının relüktansı ve $d\theta$ motor dönme açısını ifade etmektedir. Hava aralığının relüktansının periyodik olarak değişimi vuruntu torkuna da etkisi olmaktadır. Yani vuruntu torku da değişmektedir. Bu periyodik değişim olduğu için vuruntu torkunu fourier serisi ile hesaplanabilir.

Vuruntu momenti hesabının yapılması için ilk aşamada ideal olumsuz yapı için hava aralığındaki akı dağılımı, ikinci aşama da hava aralığı manyetik iletkenliği hesaba katılarak değiştirilmiş hava aralığı akı yoğunluğu hesaplanır. Son aşamada hava aralığı akı yoğunluğu hesaplandıktan sonra vuruntu momenti değeri belirlenir. Bu aşamalardan sonra ideal olumsuz makinenin stator yüzeyindeki akı yoğunluğu B_{r1} ,

$$B_{r1}(\theta) = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} 2 \frac{\mu_0 M_n}{\mu_r} \frac{np}{(np)^2 - 1} \left[\frac{R_m}{R_s} \right]^{np+1} \cdot \left[\frac{(np-1)+2 \left[\frac{R_m}{R_s} \right]^{np+1} - (np+1) \left[\frac{R_m}{R_s} \right]^{2np}}{\frac{\mu_r+1}{\mu_r} \left[1 - \left[\frac{R_r}{R_s} \right]^{2np} \right] - \frac{\mu_r-1}{\mu_r} \left[\left[\frac{R_m}{R_s} \right]^{2np} - \left[\frac{R_r}{R_s} \right]^{2np} \right]} \right] \cos(np\theta) \quad (5)$$

şeklinde hesaplanmaktadır(Adam, 2007). Burada M_n , manyetik alanı, R_m mıknatıs yarıçapını, R_s stator dış yarıçapını, R_r rotor yarıçapını, P çift kutup sayısını temsil etmektedir. M_n manyetik alan ise,

$$M_n = 2 \left[\frac{B_r}{\mu_0} \right] \alpha_p \frac{\sin\left(\frac{n\pi\alpha_p}{2}\right)}{\frac{n\pi\alpha_p}{2}} \quad (6)$$

şeklinde gösterilmektedir. Burada α_p ise kutup adımını ifade etmektedir. Oluk etkisi deneysel bulguları etkilemektedir. Dolayısıyla permanans hesaplanması gerekmektedir. Söz konusu değer,

$$\lambda_{rel} = \frac{g + \frac{l_m}{\mu_r}}{g + \frac{\pi}{2} w_1 + \frac{l_m}{\mu_r}} \quad (7)$$

olarak formülize edilmektedir. Son olarak vuruntu momenti,

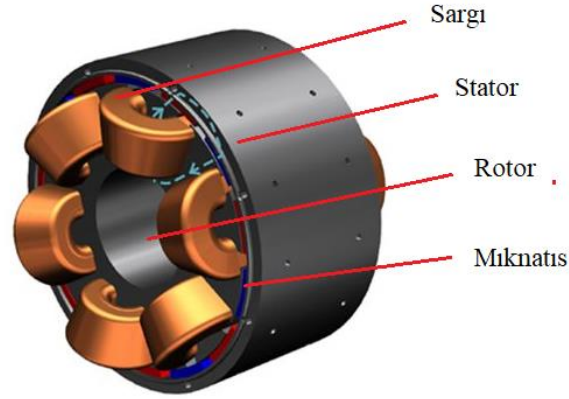
$$T_{cog}(\theta_1) = \frac{L}{2\mu_0} \sum_{m=1}^{N_s} \left[\int_0^{\frac{w_s}{2}} B_{PM}^2(w_1)(R_s + w_1)dw_1 - \int_0^{\frac{w_s}{2}} B_{PM}^2(w_2)(R_s + w_2)dw_2 \right] \quad (8)$$

gibi ifade edilmektedir. Eşitlik 4'te bulunan integral çözüldüğünde,

$$T_{cog}(\theta_1) = \frac{\pi L R_s}{2\mu_0 N} \sum_{m=1}^N \left[B_{PM}^2 \left(\frac{2\pi}{N} m + \theta_1 \right) (R_s + g_a) ssg \right] \text{ değeri bulunmaktadır.} \quad (9)$$

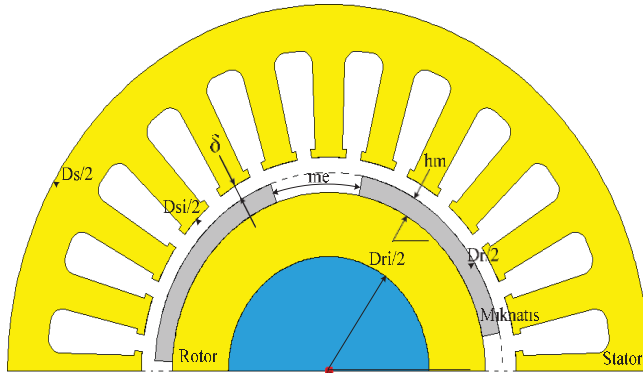
3. Referans Radyal Akılı Sabit Mıknatıslı Motor Yapısı

Radyal akılı motorlarda manyetik akı bir dişten statora, ardından da bir sonraki dişe ve ardından mıknatıslara hareket eder. Radyal akılı sabit mıknatıslı motorlar eksenel akılı motorlar ile karşılaştırıldığında daha az kalıcı mıknatıs hacmine sahiptir bu nedenle de daha avantajlıdır. Kullanım alanları bakımından daha kapsamlıdır, daha ucuzdurlar. Genel verimliliği artırmak için literatürde bir çok çalışma yapılmış ve devam etmektedir.

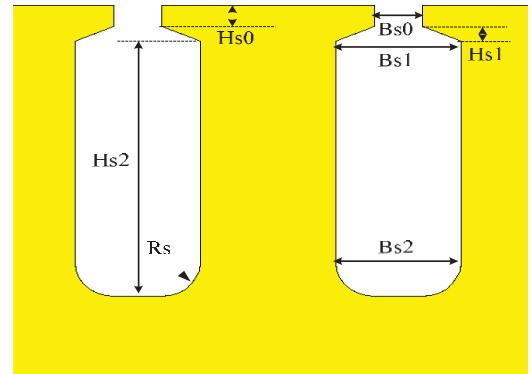


Şekil 1. Radyal akılı sabit mıknatıslı motorun yapısı ve görseli

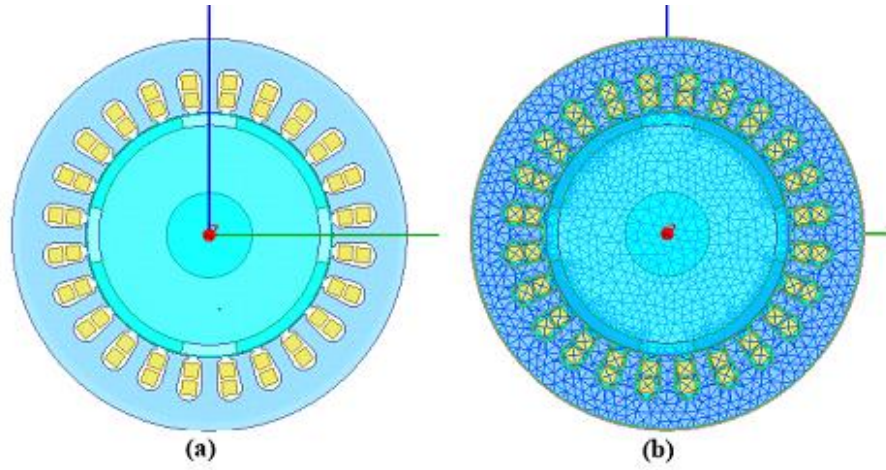
Öncelikle analizleri gerçekleştirmeden önce yapılması gereken modellerin çizilmesidir. Modeller çizilirken Şekil 2’de sabit mıknatıslı makinaya ait temel boyutlar ve stator oluk dış geometrik parametreleri verilmiştir. Şekil 3’de 2D ve SEY modelleri verilmiştir. Modeller çizildikten sonraki aşamada modellerin malzemeleri seçilir. Vuruntu momenti hesabında parametrelerin doğru seçilmesi analizin gerçeğe yakın çıkmasına önemli derecede katkı sağlamaktadır.



Şekil 2. (a) Sabit mıknatıslı makinaya ait temel boyutlar



(b) Stator oluk-dış geometrik parametreleri

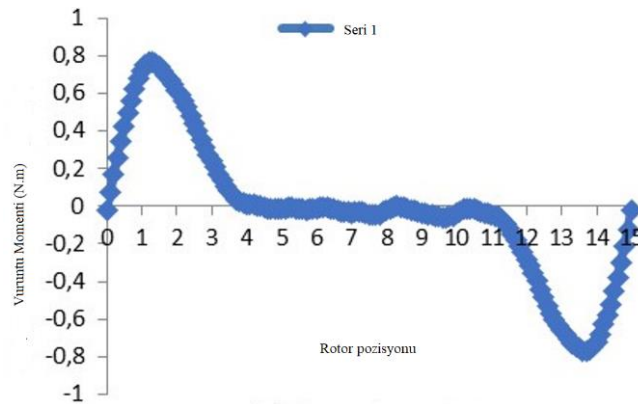


Şekil 3. (a) Referans motorun 2D modeli Ansys_Maxwell (b) Referans motorun SEY modeli Ansys_Maxwell

Tablo 1. RASM referans motorun parametreleri

Çıkış gücü	1200W	Stator iç yarıçapı	75mm
Anma Hızı	1500 rpm	Stator uzunluğu	65mm
Çalışma gerilimi(DC)	220V	Stator çelik tipi	M19_24G
Frekansı(Hz)	50	Rotor dış yarıçapı	74
Faz sayısı	3	Rotor iç yarıçapı	26
Kutup sayısı	4	Rotor uzunluğu	65mm
Oluk sayısı	24	Rotor çelik tipi	M19_24G
Oluk / kutup / faz	2	Mıknatıs oranı	0.7
Oluk açıklığı	2.5mm	Mıknatıs kalınlığı	3.5mm
Stator dış yarıçapı	120mm	Mıknatıs Tipi	XG196/96

Tablo 1’de referans motorun parametre değerleri Ansys Maxwell programında kullanılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile 24 oluk için değil de bir oluk adımı için analiz yapıldığında alınan sonuçlar doğrultusunda vuruğu momentinin tepe değerinin 0.7 N.m olduğu gözlemlenmiştir. Maxwell 2D analizinden alınan vuruğu momenti değişim profili Şekil 4’de gösterilmiştir. Seçilen modelde oluk sayısı 24’tür. Bir tam tur dönmesi için 360 dereceye tamamlanması gerekmektedir. Rotor pozisyonu 15 derece seçilmiştir.



Şekil 4. Referans motor vuruğu momenti değişim profili

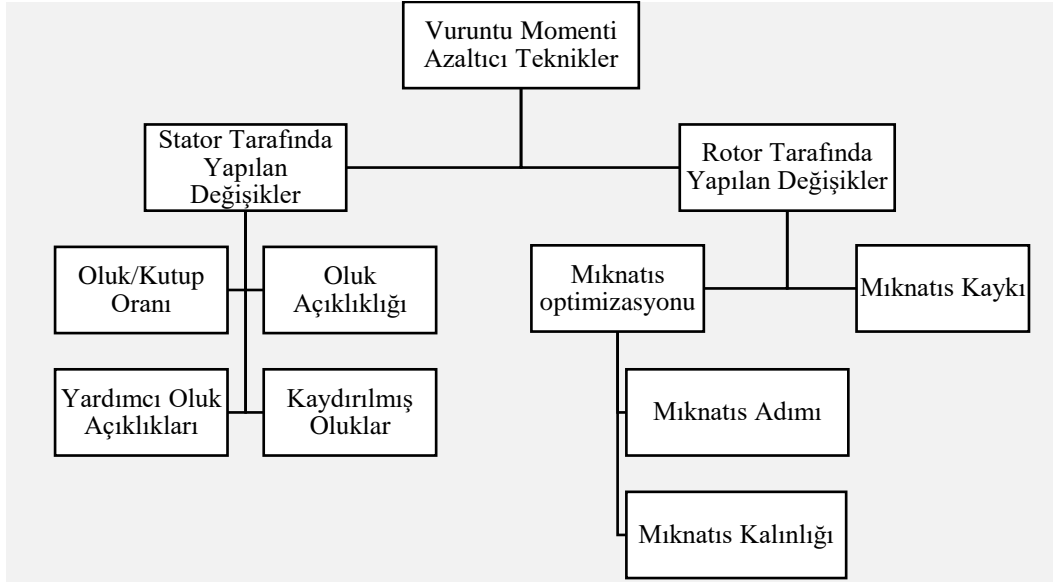
Tablo 2’de sabit mıknatıslı motorlarda vuruğu torkunu belirleyen değişkenler ve sabitler ifade edilmiştir.

Tablo 2. Vuruntu torkunu belirleyen deęişken ve sabitler

Deęişken ve sabitler	Açıklaması
W_m	Mekanik enerji
F	Kuvvet
dx	x yönündeki diferansiyel uzaklık
P_m	Mekanik güç
v	Hareket hızı
T	Tork
$\emptyset g$	Hava aralığı akısı
dR	Hava aralığının relüktansı değişimi
$d\theta$	Motor dönme açısı değişimi
T_{cog}	Vuruntu torku
θ_m	Rotor pozisyonu
ϕ_k	k inci harmoniğin genlięi
N_c	k inci harmoniğin faz açısı
T_k	Rotor kutup sayısı ile stator oluk sayısının en küçük ortak katı
R_m	Mıknatısın dış yarıçapı
R_s	Stator dış yarıçapı
R_r	Rotor yarıçapı
α_p	Çift kutup sayısı
p	Kutup adımı
B_{s0}	Oluk açıklığı
B_{s1}	Oluk üst genişlięi
B_{s2}	Oluk alt genişlięi
D_r	Rotor dış çapı
D_{s0}	Stator dış çapı
D_{s1}	Stator iç çapı
h_o	Oluk yüksekliği
H_{s0}	Oluk dış yüksekliği
H_{s1}	Oluk dış eğim yüksekliği
H_{s2}	Oluk iç yüksekliği
h_{yoke}	Stator boyunduruk yüksekliği
R_s	Oluk köşe açısı
δ	Hava aralığı

4. Radyal Akılı Sabit Mıknatıslı Motorlarda Vuruntu Momentini Azaltmak İçin Kullanılan Yöntemler

Literatür çalışmaları incelendiğinde vuruntu momenti azaltma teknikleri RASM motorlarda iki ana başlık altında incelenmektedir. Söz konusu işlemler stator ve rotor tarafında yapılacak değişikler olarak ayrılırlar. Şekil 5 incelendiğinde RASM motorlarda vuruntu momentini azaltıcı yöntemleri göstermektedir.



Şekil 5. RASM motorlarda vuruğu momenti azaltıcı teknikler (Aydın, 2008).

4.1. Stator Tarafında Uygulanan Teknikler

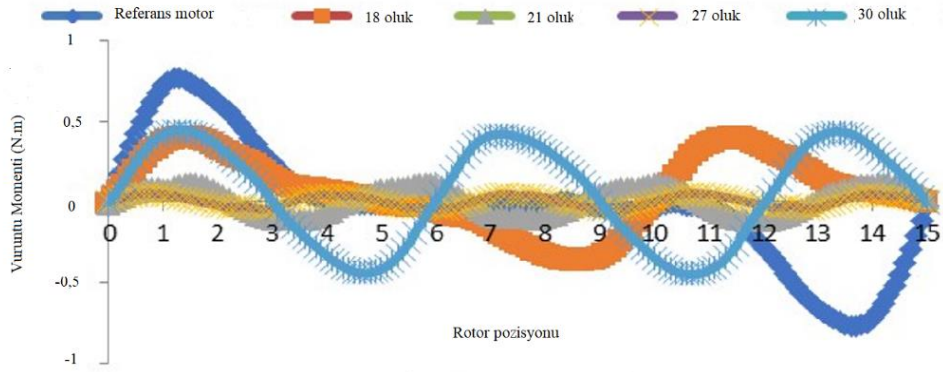
Bu çalışma vuruğu momentini azaltmak için stator tarafında; oluk açıklığı ve oluk sayısı değişimlerinin etkileri üzerine değinilmiştir. Oluk sayısı seçiminde çizelge 2’de verilen (Kütük, 2011), 3 fazlı ve 4 kutuplu olup/kutup kombinasyonu değeri referans motora yakın oluk sayıları seçilmiştir. Oluk açıklığında ise referans motorun oluk açıklığının ± 1 mm ve 0.5 mm adımlar ile değiştirilerek vuruğu momenti değışimleri gözlemlenmiştir. Yapılan değışikliklerin SEY analizinden edilen sonuçlar referans motor ile karşılaştırılarak, vuruğu momenti değışimleri şekil 6 ve şekil 7’de gösterilmiştir.

4.1.1. Farklı oluk sayısı

Vuruğu momenti, RASM motorlarda kutup ve oluk seçimindeki etkenlerinin birisidir. Dikkat edilmediği durumlarda oluk/kutup oranı çift olarak hesaplanırsa bütün kutup kenarları ile oluk kenarları çakışır bu da vuruğu momentinin artmasına neden olur (Kütük, 2011). Oluk/kutup oranındaki bu husus dikkate alınarak ve referans motorun oluk/kutup oranına yakın değeri verecek oluk sayısı seçilmiştir. SEY analizinden elde edilen sonuçların ile referans motor vuruğu momenti değışimi ile karşılaştırıldığında başarılı sonuçlar elde edildiği gözlemlenmiştir. En iyi sonucun 27 oluk seçimi ile alındığı görülmüştür. Vuruğu momentinin tepe değeri 0.048 Nm değeri düşüğü ve referans motora göre %93.7’lik bir ciddi düşüş gözlemlenmiştir. Referans motor üzerinde oluk sayısı değışiminin çıkış performansı kontrol edildiğinde çıkış değerlerinde büyük bir değışime neden olmadığı gözlemlenmiştir.

Tablo 3. Üç fazlı motorlar için olup/kutup kombinasyonları

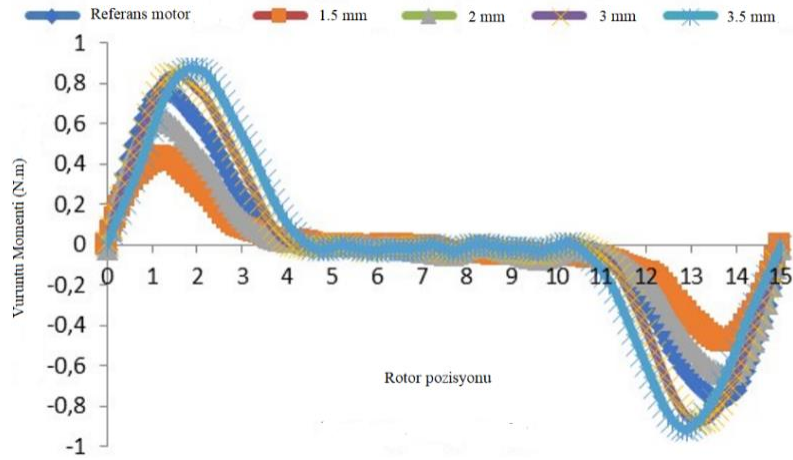
Oluk	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48
Kutup	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
			6	8	10	6	8	8	6	8	8	6	8	8	6	8
			8	10		8	14	10	8	10	10	8	10	10	8	10
			12	18		12	16	16	10	20	14	10	14	14	10	14
						14		20	12	22	20	12	16	16	12	16
						16			18	26	22	14	26	26	14	20
									20		26	16	28	28	16	32
									22		28	22	32	32	20	34
									24			24	34	34	28	38
												26			30	40
												28			32	
												30			34	
												32			38	
															40	



Şekil 6. Oluk sayısı ile vuruğu momenti değışimi

4.1.2. Oluk açıklığının değıştirilmesi

RASM motorlarda vuruğu momentini azaltması beklenen yöntemlerden biri olarak, oluk açıklığının azaltılması ele alınmaktadır. Böylelikle vuruğu momentinin tepe değeri azalması sağlanmaktadır (Aydın, 2003). Oluk açıklığında referans motorun oluk açıklığına göre yapılan ± 1 mm ve 0.5 mm adımlar ile yapılan değışimlerin vuruğu momenti üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir. Oluk açıklığında yapılan değışimlerin analiz sonuçları Şekil 6'de verilmiştir. Oluk açıklığındaki değışimlerin Şekil 6'deki grafiksel sonuçlarına bakıldığında oluk açıklığının artmasının vuruğu momentinin tepe değeri yükselmelere neden olduğu görülmüştür. Şekil 7 incelendiğinde rotor pozisyonu derecesi 15 derece olduğunda azalmanın açıkça anlaşıldığı görülmektedir. 1.5 mm oluk açıklığında referans motora göre vuruğu momentinde % 36.84'lük bir azalma sağladığı analiz sonuçlarından gözlemlenmiştir.



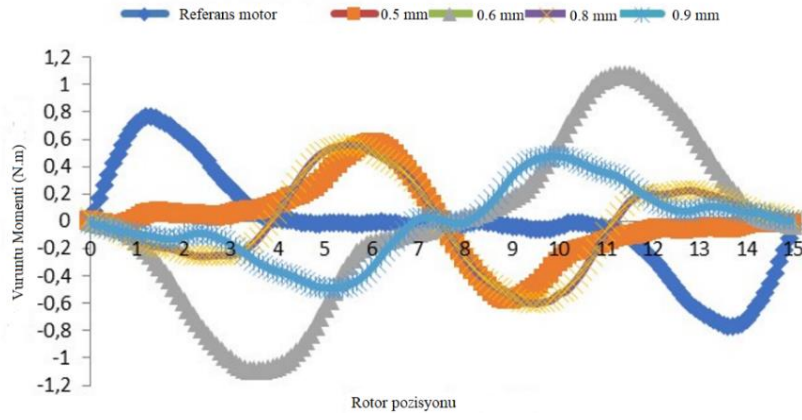
Şekil 7. Oluk açıklıkları ile vuruğu momenti değışimi

4.2. Rotor Tarafında Uygulanan Teknikler

RASM motorlarda vuruğu momentini azaltmak için stator tarafında birçok teknik bulunmasıyla beraber, rotor tarafında uygulanabilecek amaca uygun birçok teknik bulunmaktadır. Bu çalışmada ilk olarak rotor tarafında farklı mıknatıs adımının vuruğu momenti üzerindeki etkisi araştırılmıştır ve sonrasında farklı mıknatıs kalınlıklarının vuruğu momenti üzerindeki etkisinde çalışılmıştır. Vuruğu momentindeki değışimleri Şekil 8 ve Şekil 9'de verilmiştir.

4.2.1. Mıknatıs oranının değıştirilmesi

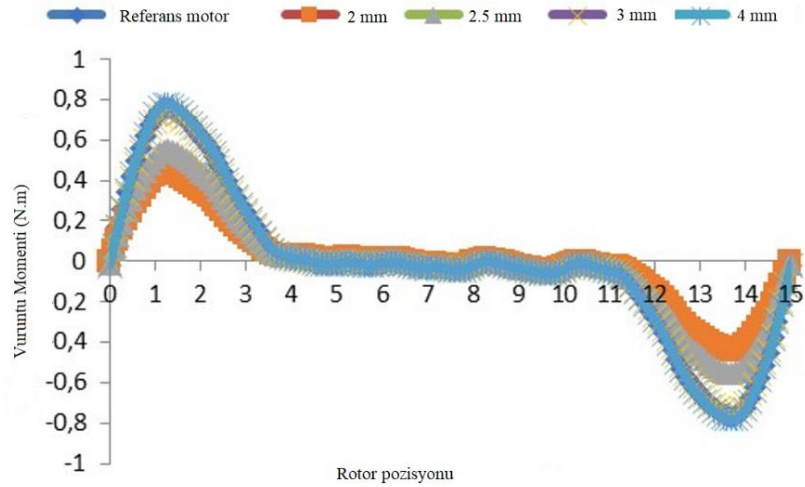
RASM motorlarda, vuruğu momentini azaltılabilir, rotor tarafında mıknatıs ölçülerinde yapılacak değışimler ile bu yapılabilmektedir ve yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biridir. Mıknatıs kutuplarının kenarları ile stator olukları arasındaki etkileşim vuruğu momentini oluşturmaktadır. Optimum mıknatıs oranı vuruğu momentinin dalga şeklini ve tepe değeri etkilemektedir. Mıknatıs oranındaki değışimin etkilediği kısımlardan birisi de mıknatıs kaçak akıdır ve bu sayede azaltılması sağlanabilir. Fakat mıknatıs akısı dolayısıyla ortalama moment de değışime söz konusu olacaktır (Meşe, 2013). Bunların yapılması ortalama momentte önemli ölçüde düşüşe sebep olabilir ama bununla birlikte vuruğu momentinde kayda değer düşüş sağlamaktadır. Mıknatıs oranında yapılan değışimlerin SEY analizlerinden alınan sonuçların doğrultusunda en iyi sonucun mıknatıs oranını 0.9 olarak seçilmesi ile vuruğu momentinin tepe değeri 0.49 Nm düşürülmüştür ve referans motora göre vuruğu momentinde %35.5'lük bir düşüş sağlanmıştır.



Şekil 8. Mıknatis oranları ile vuruğu momenti değışimi

4.2.2. Farklı mıknatis kalınlığı

Mıknatis kalınlığının değıştirilmesi hava aralığı akı yoğunluğunun genlik değeriğine neden olacaktır. Mıknatis kalınlığı arttıkça vuruğu momenti de artmaktadır (Meşe, 2013). Hava aralığındaki akının değışimi aynı zamanda ortalama çıkış momentinde de değışimlere neden olacağından, mıknatis kalınlığında yapılacak değışimlerde ortalama çıkış momentini göz önüne alınarak değışim yapılmalıdır. Aksi durumda çıkış momentinde ciddi değışimler söz konusu olur. Vuruğu momenti tepe değeriğini mıknatis kalınlığının artırılması ile arttığı şekil 9'deki analiz sonuçlarından gözlemlenmiştir. Mıknatis kalınlığının 2 mm olarak değıştirilmesi ile vuruğu momentinde % 42,1'lik bir düşüş sağlanmıştır. Mıknatis kalınlığı 2mm olarak değıştirilmesi ile çıkış performansında ciddi değışimlere neden olmadığı görülmüştür.



Şekil 9. Mıknatis kalınlıkları ile vuruğu momenti değışimi

5. Sonuç

Bu çalışmada RASM motorlarda vuruğu momentini azaltmak amacıyla stator ve rotor tarafında yapılabilecek değışikliklere detaylı olarak yer verilmiştir. Çalışmada 24 oluk, 4 kutup değerlerine sahip bir RASM motorunun Ansoft maxwell yazılımında 2 boyutlu modelinin sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile analizleri yapılarak referans motorun stator ve rotor tarafındaki değışikliklerin vuruğu momentine etkileri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmaların diğeri çalışmalardan farkı oluk sayısı ve kutup sayılarının farklı kombinasyonlarının programda girildikten sonra gerçek uygulamaya geçilmeden önce avantaj sağlanması istenmektedir. Stator tarafında oluk açıklığının azaltılması ile vuruğu momentinde %36,84, rotor tarafında mıknatis kalınlığının azaltılması ile %42,1 lik bir azalma görülmüştür. Rotor tarafında mıknatis adınının azaltılması ile vuruğu momentinin azalmasına rağmen ortalama momentte düşüş olduğu görülmüştür. Yapılan analizler sonucunda RASM motorlarda stator tarafında oluk sayısı ve kutup sayısı kombinasyonunun vuruğu momentini etkileyen en önemli unsurlardan biri olduğu açıkça görülmüştür. Prototip tasarım yapılmadan önce sonlu elemanlar yöntemi ile maliyet ve zaman tasarrufu sağlanması amaçlanmıştır.

Referanslar

Adam, «Sabit Mıknatıslı Senkron Motorda Moment Dalgalanması ve Gürültünün Azaltılması Doktora Tezi,» Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, pp. 1-10, 2007.

A. Saygin, A. Aksöz, «Design optimization for minimizing cogging torque in Axial Flux Permanent Magnet machines, » International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) Intl Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP), Brasov, pp. 324-329, 2017.

Can ve E. Yıldırım, «Yeni bir 3 Fazlı Disk Tipi Enine Akılı Generatörün Tasarımı ve Vuruntu Momentinin Optimizasyonu,» Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, pp. 2-7, 2019.

Dalcalı A., Kurt E., Çelik E. And Öztürk N., «Cogging torque minimization using skewed and separated magnet geometries, » Politeknik Dergisi, 23(1): 223-230, 2020.

Dai J.C., Hu Y.P., Liu D.S. and Wei J., «Modelling and analysis of direct-driven permanent magnet synchronous generator wind turbine based on wind-rotor neural network model, » Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 226: 62-72, 2011.

E. Ayçiçek, N. Bekiroğlu ve İ. Şenol, «Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Motorlarda Açık Oluk Yapısı Kullanarak Minimum Vuruntu Momenti İçin Rotor Yapısının Optimizasyonu,» Journal of Engineering and Natural Sciences Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi , pp. 1-5, 2012.

E. Meşe, «Hibrit Araç Uygulaması İçin Kuplajsız Çift Sargılı Elektrik Makinası Tasarımı ve Denetimi,» TÜBİTAK Projesi, 2013.

Güemes J.A., Iraolagoitia A.M., Del Hoyo J.I and Fernandez P., «Torque analysis in permanent-magnet synchronous motors: a comparative study, » IEEE Transaction on Energy Conversion, 26: 55- 63, 2011.

H. Tiegna, Y. Amara, G. Barakat, U. Havre, L. Havre, «Study of Cogging Torque in Axial Flux Permanent Magnet Machines Using an Analytical Model» vol. 50, no. 2, 2014.

Herlina, Setiabudy R. and Rahardjo A., «Cogging torque reduction by modifying stator teeth and permanent magnet shape on a surface mounted PMSG, » International Seminar on Intelligent Technology and Its Application, Indonesia, 227-232, 2017.

L. Xiao, J. Li, R. Qu, Y. Lu, R. Zhang, D. Li, «Cogging Torque Analysis and Minimization of Axial Flux PM Machines With Combined Rectangle-Shaped Magnet», in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 53, no. 2, pp. 1018-1027, March-April 2017.

M. Aydın, «Magnet Skew in Cogging Torque Minimization of Axial Gap Permanent Magnet Motors, » 2008 18th International Conference on Electrical Machines, pp. 1-6, 2008.

M. Aydın, «Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Elektrik Motorlarında Vuruntu Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Elektrik Motorlarında Vuruntu,» Elektrik Mühendisleri Odası, pp. 1-7, 2003.

M. Aydın, «Sabit Mıknatıslı Disk Motorlarda Mıknatis Kaykısı Etkisi,» Semantic Scholar, pp. 2-5, 2008.

M. Gulec, M. Aydın, «Magnet asymmetry in reduction of cogging torque for integer slot axial flux permanent magnet motors», in IET Electric Power Applications, vol. 8, no. 5, pp. 189-198, May 2014

M. Yılmaz ve H. K. Araz, «Elektrikli araçlar için mıknatis oranı ve moment titreşimi azaltılmış yüksek verimli sürekli mıknatıslı senkron motor tasarım süreci ve gerçekleşmesi,» Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, pp. 2-6, 2020.

O. Kütük, «Rüzgar Türbinlerinde Doğrudan Sürürlü Sürekli Miknatsız Senkron Generatör Tasarımı Yüksek Lisans Tezi,» İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, pp. 27-60, 2011.

O. O. Ogidi, P. S. Barendse, M. A. Khan, «Influence of Rotor Topologies and Cogging Torque Minimization Techniques in the Detection of Static Eccentricities in Axial-Flux Permanent-Magnet Machine», in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 53, no. 1, pp. 161-170, Jan.-Feb. 2017.

Tseng W.T. and Chen W.S., «Design parameters optimization of a permanent magnet synchronous wind generator, » 19th International Conference on Electrical Machines and Systems, Japan, 2016.

Zhu X., Hua W., Wu Z., Huang W., Zhang H. and Cheng M., «Analytical approach for cogging torque reduction in flux-switching permanent magnet machines based on magnetomotive force-permeance model, » IEEE Transactions on Industrial Electronics, 65: 1965-1979, 2018.