

Sabit Mıknatıslı Disk Motorlarda Mıknatıs Kaykısı Etkisi

Metin AYDIN

Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi,
Kocaeli Üniversitesi, Eski İstanbul Yolu 10. km
41380, İzmit/Kocaeli

e-posta: metin.aydin@kocaeli.edu.tr

Anahtar sözcükler: Elektrik Motorları, Sabit mıknatıslı motorlar, Vuruntu momenti, Mıknatıs kaykısı

Özet

Bu çalışmada, vuruğu momenti minimizasyon yöntemlerinden biri olan mıknatıs kaykısı eksenel akıllı sürekli mıknatıslı (EASM) disk motorlar için detaylı bir şekilde incelenmiştir. Farklı mıknatıs kaykısı teknikleri ve motor performansına etkisi 3D sonlu elemanlar analizi kullanarak test edilmiştir. Sonuçlar bir referans EASM motor ile karşılaştırılmış ve vuruğu momenti bileşenindeki iyileştirmeler gösterilmiştir.

Abstract

In this paper, one of the main cogging torque minimization methods, magnet skew, is examined in detail for Axial Flux Permanent Magnet (AFPM) disc motor. Various magnet skewing methods, types, and effects on the machine performance are also investigated using 3D Finite Element Analysis. The results are compared with a reference AFPM motor, and the improvements on cogging torque component are demonstrated.

1. Giriş

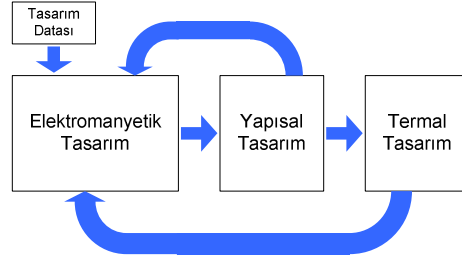
80li yılların başında yüksek enerjili NdFeB mıknatısların bulunuşunun ardından sabit mıknatıslı (SM) motorlar bir çok uygulamada asenkron, DC ve senkron motorlara alternatif oluşturmuş ve özellikle günümüzde bir çok uygulamada sıkça kullanılmaya başlanmıştır. Bunun temel nedenleri arasında bu tip motorların moment ve güç yoğunluklarının asenkron ve DC motorlara göre daha fazla olması, verimlerinin yüksek olması, hacimlerinin ve ağırlıklarının az olması ilk sıralarda yer almaktadır.

Sabit mıknatıslı motorların performansı çıkış momentinin kalitesi ile doğrudan orantılıdır ve motorun tasarımı sırasında moment kalitesine özen gösterilmelidir. Sistem eylemsizliğinin büyük olduğu uygulamalarda bu ciddi bir sorun oluşturmayabilir ancak diğer uygulamalarda moment dalgalanmasının etkisi motor performansına direkt olarak yansır.

SM motorlarında moment dalgalanmalarının [1-3] bir çok kaynağı mevcuttur. Bunlar arasında vuruğu momenti, PWM harmonikleri, ideal olmayan zıt EMK dalga şekli, faz komütasyonu ve DC baradaki dalgalanmalar ilk sıralarda yer alır. Yüksek hızlarda moment dalgalanmaları sistemin eylemsizliği sayesinde süzülebilir. Ancak, düşük hızlarda moment dalgalanmaları kabul edilemez boyutlarda hız değişimlerine, titreşime ve akustik gürültüye neden olur. Bu nedenle, motorun tasarım aşamasında vuruğu momentinin en aza indirgenmesi özen gösterilmesi gereken bir noktadır.

Sabit mıknatıslı motorların tasarımı süreci günümüzde artık sadece elektromanyetik tasarımdan ibaret değildir. Motor tasarımı Şekil 1 den de görüldüğü gibi

elektromanyetik, yapısal ve termal tasarım aşamalarını geçtikten sonra sonlandırılmalıdır. Elektromanyetik tasarımı geçmiş bir motor yapısal tasarım yada analiz aşamasını geçemez ise elektromanyetik tasarım aşamasına geri dönmeli ve rotor yapısı uygulamanın hızına göre değiştirilmelidir. Benzer şekilde elektromanyetik ve yapısal tasarım aşamalarını geçen bir motor termal tasarım aşamasında sorun yaratması demek elektromanyetik tasarım aşamasına geri dönmesi demektir. Düşük hızlı uygulamalarda yapısal tasarıma ihtiyaç duyulmayabilir, veya akım yoğunluğu düşük uygulamalarda termal tasarıma gerek kalmayabilir. Ancak, özel bir uygulama için tasarlanan sabit mıknatıslı bir motor, tüm tasarım aşamalarını geçtikten sonra prototip veya üretime aşamasına geçilmelidir.



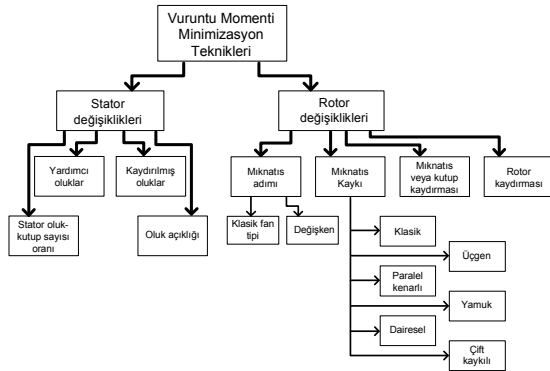
Şekil 1: Sabit mıknatıslı motorların tasarım aşamaları

Vuruğu momenti bu tasarım aşamaları arasında elektromanyetik tasarım sürecinde hesaba katılmalıdır. Bu moment bileşenini azaltmak için ya analitik modeller yada zaman alıcı sonlu elemanlar metodu kullanılmalıdır. Bu moment bileşenini azaltıcı analitik modeller standart radyel akıllı SM (RASM) motorlar için oluşturulmuştur. EASM disk motorlar için bu modeller henüz oluşturulamamış, bu nedenle vuruğu momentinin elektromanyetik tasarım aşamasında sonlu elemanlar analizi kullanılarak en aza indirgenmesi gerekir.

Vuruğu momenti sürekli mıknatıslardan kaynaklanan EMF harmonikleri ile statordaki oluklardan kaynaklanan manyetik iletkenlik harmoniklerinin etkileşiminden ortaya çıkar ve bir önlem alınmazsa motor performansını olumsuz yönde etkileyebilir. RASM motorlarda vuruğu momentini azaltmak için bir çok metot mevcuttur. Stator oluklarına ya da mıknatıslara eğim verilmesi (kaykısı), mıknatıslara özel şekiller verilmesi ve kaydırılması, yardımcı olukların ya da dişlerin kullanılması, mıknatıs kutbunun optimizasyonu, kesirli sargıların kullanılması gibi birçok teknik bunlar arasında sayılabilir [4-22]. Bu tekniklerin bazıları direkt olarak EASM disk motorlara uygulanabilir [23-29]. Fakat, bu tekniklerin EASM motorlara maliyet yönünden etkisi büyük olabilir. EASM motorlarda en önemli maliyet stator yapısından gelmektedir. Pahalı, üretimi zor ve karmaşık bu yapıyı

vuruntu momentini azaltıcı teknikler kullanarak dahada karmaşık ve pahalı hale getirmek tercih edilmez. Bu nedenle düşük maliyet gerektiren, EASM motorlara uygun vuruntu momentini azaltacak teknikler tercih edilmelidir.

Vuruntu momentini minimizasyon teknikleri SM motorlarda stator ve rotor tarafından yapılan değişiklikler olmak üzere iki ana grupta özetlenebilir. Daha önce bahsedildiği gibi statorda yapılabilecek değişiklikler EASM motorlarda tercih edilmez. Rotor tarafından yapılabilecek değişiklikler ise 4 ana başlıkta toplanabilir. Bu sınıflandırma Şekil 2 de gösterilmiştir.



Şekil 2: EASM disk motorlarda vuruntu momentini minimizasyon teknikleri

Bu çalışmada da EASM motorlarda bu amaca uygun vuruntu momentinin minimizasyon teknikleri kısaca özetlenmiş, disk motorlarda vuruntu momentini azaltıcı en etkin ve ucuz teknik olan mıknatıs kaykısı tekniği incelenmiştir. 3 boyutlu sonlu elemanlar analizi (3D SEA) kullanılarak bu kaykısı tekniklerinin etkinliği araştırılmış ve bir referans EASM motor ile karşılaştırılmıştır.

2. Vuruntu Momentinin Kaynağı ve Hesaplanması

Vuruntu momentini en basit haliyle, yüksüz durumda rotor dış bir kaynaktan tahrik edilerek elde edilen mıknatıs kaynaklı moment olarak tanımlanabilir. Bu moment bileşeni, SM motorlarda ortaya çıkan doğal bir özelliktir ve rotor yüzeyine yada içine monte edilen mıknatıslarla stator olukları arasındaki etkileşimin ortaya çıkardığı bir bileşendir. Bu nedenle oluksuz motorlarda yada olukları kapalı motorlarda vuruntu momentini bileşeni ortaya çıkmaz. Daha ayrıntılı bir şekilde açıklamak gerekirse, vuruntu momentini rotordaki mıknatısların hareketinden kaynaklanan manyetik alandaki değişim nedeniyle ortaya çıkar.

Vuruntu momentini ister analitik ister sonlu elemanlar yöntemi ile belirlensin, Fourier serisi ile tanımlanabilir [8]:

$$T_{cog}(\theta_m) = \sum_{k=1}^{\infty} T_k \sin(kN_c \theta_m + \varphi_k) \quad (1)$$

Burada θ_m rotorun pozisyonu, T_k k inci harmoniğin genliği ve φ_k k inci harmoniğin faz açısı, N_c rotor kutup sayısı ile stator oluk sayısının (N_s) en küçük ortak katını göstermektedir. Eğer kutup başına düşen oluk sayısı bir tamsayı ise $N_c = N_s$ olur.

Vuruntu momentini Maxwell Gerilme Tensörü ya da Sanal İş Tekniği metotları kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanabilir [30-34]. Maxwell gerilme tensörü yönteminin

avantajı, vuruntu momentini hesabının tek bir alan hesabı gerektirmesidir. Ancak, hassasiyet eleman yoğunluğuna ve integralin derecesine bağlıdır. Sanal İş Tekniğinin ise uygulaması daha kolaydır. Ancak, iki farklı rotor konumu için alan hesabı gerektirir ve nümerik hatadan dolayı hassasiyetten taviz vermek gerekebilir. Bu çalışmada kullanılan yazılımda sanal iş tekniği metodu kullanılmıştır. 3 Boyutlu SEA yazılımları çok zaman alıcı olması nedeniyle analitik tekniklerin mümkün olduğu kadar SEA ile birleştirilerek kullanılması yaygın bir yaklaşımdır. Bu yaklaşımın etkinliği daha önceki yayınlarda gösterilmiştir [27][28]. Örnek vermek gerekirse, tek stator çift rotorlu bir SM motorda rotordan biri diğerine göre Δ kadar döndürülürse, elde edilen vuruntu momentini analitik olarak aşağıdaki gibi ifade edilir;

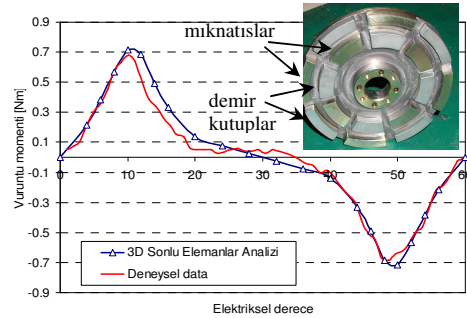
$$T_{cog}(\theta_m) = \sum_{k=1}^{\infty} T_k \sin(kN_c \theta_m + \varphi_k) + \sum_{k=1}^{\infty} T_k \sin[kN_c (\theta_m + \Delta) + \varphi_k] \\ = \sum_{k=1}^{\infty} 2T_k \cos\left(kN_c \frac{\Delta}{2}\right) \sin\left[kN_c \left(\theta_m + \frac{\Delta}{2}\right) + \varphi_k\right] \quad (2)$$

Burada T_k , tek rotordan kaynaklanan vuruntu momentinin k 'inci harmoniğinin tepe değeridir. Bu nedenle, vuruntu momentini döndürülürmemiş yada ötelenmemiş rotora göre azalır. Bu azalma her bir harmonik bileşeni için

$$\cos\left(kN_c \frac{\Delta}{2}\right) \quad (3)$$

faktörü ile açıklanabilir.

Vuruntu momentinin değişimi 2D yada 3D SEA kullanılarak elde edilebilir. Motor sargıları enerji-sizken rotor döndürülerek elde edilen moment değerleri vuruntu momentini verecektir. Şekil 3'de, 2-rotor-1-statorlu özel bir SM disk motorun vuruntu momentinin 3D SEA kullanılarak değişimi gösterilmiş ve bu çalışma deneysel olarak doğrulanmıştır [11]. Bu karşılaştırma günümüzde kullanılan SEA yazılımlarına güveni göstermektedir.



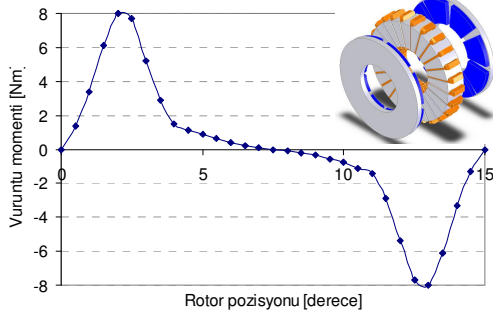
Şekil 3: 3D SEA ile hesaplanan ve laboratuvar ortamında test edilen 2-rotor-1-stator lu özel bir SM disk motorun vuruntu momentlerinin karşılaştırılması

3. Mıknatıs Kaykısı Yöntemi ile Vuruntu Momentinin Minimasyonu

Bu çalışmada yapılan analizlerde 24- oluklu, 8-kutuplu 2-rotor-1-statorlu aksel akılı sürekli mıknatıslı disk motor referans motor olarak kullanılmıştır. Bu tip bir EASM motorun statoru spiral bir tarzda sarılmış silisli lamineli bir stator, rotoru ise bir disk ve yüzeye yerleştirilmiş fan tipi mıknatıslardan oluşur. Ayrıca statorda Gramme tip 3 fazlı sargılar karşılıklı oluklara yerleştirilmiştir. Temel akı yönü şu

şekildedir: Akı her iki rotorun kuzey kutbundan önce statora, statorun dairesel olarak bir kutup boyunca ilerleyip tekrar hava aralıklarını geçerek rotor disklerin güney kutbuna geçip rotor diskleri üzerinden devresini tamamlar [23-25].

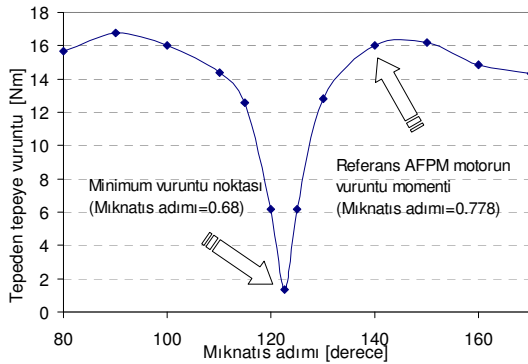
Bu motor tasarlandıktan sonra SEA yapılarak motor performansı kontrol edilmiş, ancak vuruğu momentini azaltmak için hiç bir yöntemle başvurulmamıştır. Böylece çalışmada kullanılan vuruğu momentini minimizasyon tekniklerinin referans disk motor ile karşılaştırılmasına imkan verilmiştir. Şekil 4 'de yapılan SEA den elde edilen vuruğu momentinin değişimi gösterilmiştir. Vuruğu momentinin periyodu 24 oluklu bir motor için 15 derece, tepe değerinin ise 8Nm olduğu yapılan analizden açıkça görülmektedir.



Şekil 4: 2-Rotor-1-stator'lu eksenel akı sabit mıknatıslı referans motorun vuruğu moment profili

3.1. Fan Tipi (Kayksız) Mıknatıs

EASM motorlarda vuruğu momentini azaltmanın en etkin yollarından biri mıknatıs adımının kutup adımına oranını uygun bir değerde seçmektir. Bilindiği gibi, vuruğu momentini, mıknatıs kutuplarının kenarları ile stator olukları arasındaki etkileşimden oluşur. Bu nedenle, gerek vuruğu momentini dalga şekli, gerekse tepe değeri mıknatıs adımına bağlıdır. Mıknatıs adımı azaltılarak mıknatıs kaçak akısı da azaltılabilir, fakat mıknatıs akısı dolayısıyla ortalama moment de azalmış olur. Bu nedenle uygun seçilecek bir mıknatıs adımı vuruğu momentini istenen seviyelere düşüreceği gibi ortalama momentte de ciddi bir düşüşe neden olmaz.



Şekil 5: Farklı mıknatıs adımları için vuruğu momentinin tepeden tepeye değişimi

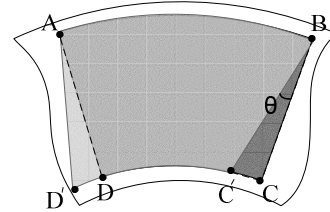
Daha sonra yapılacak analizlerle karşılaştırma yapabilmek için farklı mıknatıs adımları için vuruğu momentlerinin değişimi SEA kullanılarak hesaplanmış ve Şekil 5 gösterildiği gibi vuruğu momentinin tepeden tepeye değerinin mıknatıs

adımına göre değişimi çizdirilmiştir. Mıknatıs adımı elektriksel 140° ($\alpha_p=0.778$) iken vuruğu momentinin tepe değeri anma momentinin yaklaşık %51'i, 122.5° ($\alpha_p=0.678$) iken ise yaklaşık %5'i olarak bulunmuştur.

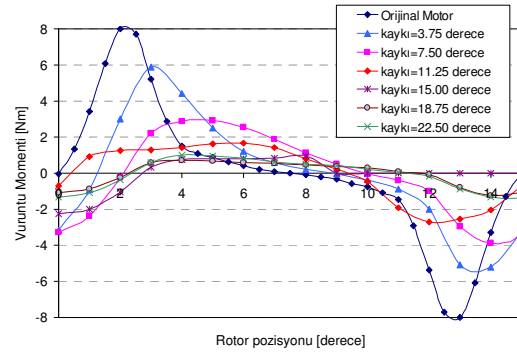
EASM motorlar için farklı kayk teknikleri mevcuttur [22-22]. Bu teknikler kayksız mıknatıs, klasik kaykılı mıknatıs, üçgen kayk, paralel kenarlı mıknatıs, yamuk şekilli mıknatıs, kare mıknatıs, dairesel mıknatıs ve çift kaykılı mıknatıstır. Bu teknikler SM disk motorlar için maliyeti az rotor tarafına uygulanabilecek tekniklerdendir. Bu kısımda 3D SEA simülasyonları ile bu tekniklerin etkinlikleri test edilecek ve referans motor ile karşılaştırılacaktır.

3.2. Klasik Kayk

Klasik kayk SM motorlarda sıkça kullanılan, basit ve çok etkili vuruğu momentini azaltma yöntemlerinden biridir. Mıknatıs kayksı kademeli olarak rotorun mıknatıslarla birlikte kademeli olarak döndürülmesi olarak da karşımıza çıkabilir. SM motorlarda kayk, stator olukları ya da rotor mıknatısları olmak üzere iki şekilde gerçekleştirilir. Standart radyel akılı sabit mıknatıslı motorlarda bu işlem stator oluklarına kayk verilmesi ile gerçekleştirilir çünkü rotor yüzeyindeki mıknatıslara kayk verilmesi güç ve masraflıdır. Şayet, mıknatıslara kayk verilmesi isteniyorsa, bu işlem rotorun parçalarına ayrılıp her bir parçanın değerine göre döndürülmesi şeklinde gerçekleştirilir. Oysa, EASM motorlarda RASM motorların tam tersi bir durum söz konusudur. Rotor mıknatıslarına kayk vermek düzlemsel mıknatıs yüzeyinden dolayı stator oluklarına göre çok daha basit ve ucuz bir yöntemdir. Bu nedenle rotor mıknatıslarına kayk vermek EASM motorlarda sıkça kullanılabilen bir tekniktir. Şekil 6 kayksız (ABCD) ve kaykılı (ABC'D') bir EASM motorun rotorunu göstermektedir. Bu tekniğin dezavantajları arasında ortalama momentte bir düşüşe neden olması, fan tipi mıknatısa göre karmaşık mıknatıs yapısı ve kaçak enduktanstaki artış sayılabilir.

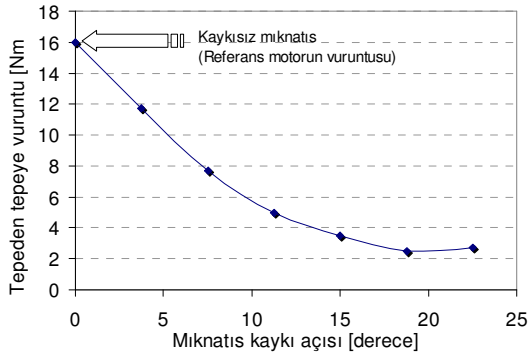


Şekil 6: EASM motorlarda kullanılan klasik kaykılı düzlemsel mıknatıs



Şekil 7: Vuruğu momentin kayk açısı ile değişimi

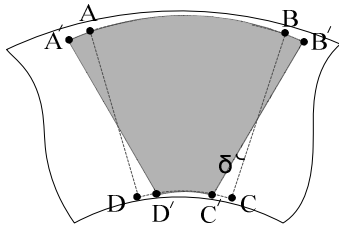
RASM motorlarda optimum kaykđ açısı mekanik açının rotor kutup sayısı ile stator oluk sayısının (N_s) en küçük ortak katına oranı ile elde edilir. Oysa, EASM motorlarda optimum kaykđ açısı, rotor iç ve dış çaplarının yarattığı manyetik kaçak akıdan dolayı bu değerden farklıdır. Bu nedenle kaykđ kullanarak vurutu momenti EASM motorlarda sıfır olmaz. Ancak bu tip motorlarda vurutu momentini minimum yapan kaykđ açısı optimum açı olarak kabul edilir. Bu tip bir çalışma Şekil 7 ve Şekil 8 de gösterilmiştir. Kaykđ açısı oluk adımının $\frac{1}{4}$ 'ünden itibaren oluk adımının 1.5 katına kadar artırılmış ve vurutu momentinin değışimi ve tepe değeri kontrol edilmiştir. SEA simülasyonlarından da görüldüğü gibi vurutu momenti 18.75 derecede bu motor için minimuma ulaşır. Bu değeri motor kutup sayısına bağı olduğu gibi eksenel akıli motor türüne göre de değışiklik gösterir.



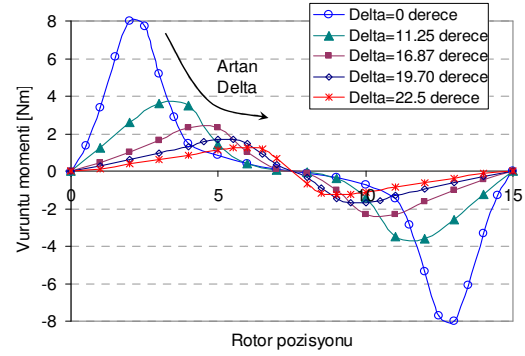
Şekil 8: Vurutu momentinin tepe değeri kaykđ açısı ile değışimi

3.3. Üçgen Şekilli Kaykđ

Şekil 9 de görüldüğü gibi üçgen şekilli kaykđ rotorun dış çapındaki mıknatis kenarlarının birleştirilmesi ve rotorun iç çapındaki mıknatis kenarlarının birbirinden uzaklaştırılması ile elde edilir. Vurutu moment dalga şekli bu tip mıknatisli rotorlarda farklı durumlar için elde edilmiştir. Bu yöntem sayesinde kaykđ açısını (δ) ayarlayarak vurutu momentinde önemli bir düşüş elde edilebilir. Şekil 10'den de görüldüğü gibi δ açısı 0'dan 22.5 dereceye kadar artırıldığında vurutu momentinde referans motora göre %84.3'lük bir düşüş görülür. Bu çalışma mıknatis alan oranının kutup alanına oranı 0.778 olduğu durum için yapılmıştır. Farklı mıknatis-kutup oranları için de benzer çalışmalar yapılarak bu tip bir kaykđ için optimum kaykđ açısı ve optimum mıknatis-kutup oranı belirlenebilir.



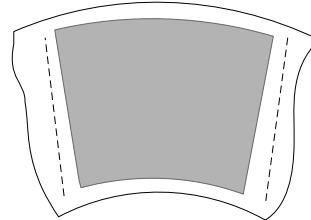
Şekil 9: Üçgen şekilli kaykđ



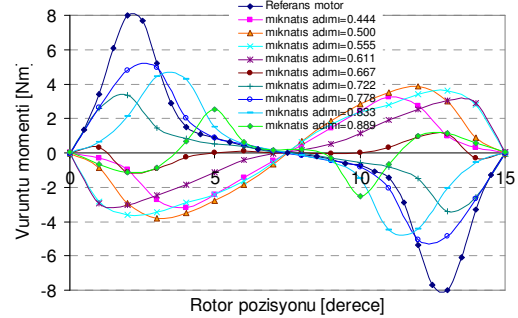
Şekil 10: Artan kaykđ δ açısı ile vurutu momentinin değışimi

3.4. Paralel Kenarlı Kaykđ

Paralel kenarlı mıknatisli rotor yapısı EASM motorlarda vurutu momentinin azaltılması için kullanılan başka bir yöntemdir (Şekil 11). Bu metotta, çok kutuplu paralel kenarlı mıknatisli eksenel akıli disk motorlarının vurutu momentinin azaltılması az kutuplu eksenel akıli disk motorlara göre daha fazla etkilidir. Şekil 11'ten de görüldüğü gibi 8 kutuplu bir motor için vurutu momentinin tepe değeri referans motora göre yaklaşık %37'lik bir azalma söz konusudur. Mıknatis-kutup oranı 0.72 olan paralel kenarlı kaykđ için ise bu azalma yaklaşık %47'yi, 0.67 olan kaykđ için ise %63.5'dir. Ayrıca, kutup sayısının artması vurutu momentindeki azalmayı da yüzde olarak düşürür.



Şekil 11: Paralel kenarlı (A'B'C'D') EASM motor ile radyel kenarlı (ABCD) (standart) EASM motorun rotor yapısı

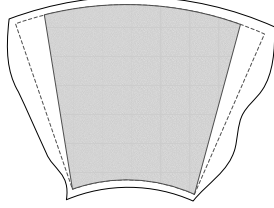


Şekil 12: Paralel kenarlı mıknatisli EASM motor vurutu moment değışiminin referans motorun vurutu momentinin değışimi ile karşılaştırılması

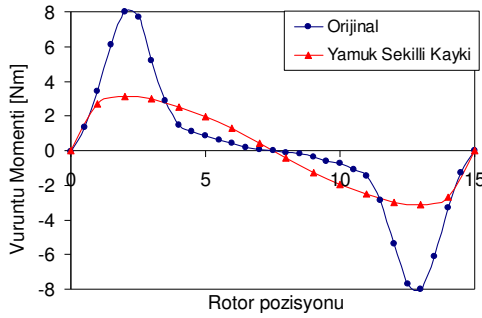
3.5. Yamuk Biçimli Kaykđ

EASM motorlarda vurutu momentini azaltmanın başka bir yolu da mıknatislerde yamuk biçimli kaykđ kullanmaktır (Şekil 13). Bu çeşit kaykđ metodunda mıknatislerin iç çapı dış

çapına göre daha fazla yakınlaşarak yamuk şekilli bir mıknatıs oluşturur. Bu metod sonlu elemanlar analizi ile mıknatıs-kutup oranı 140 derece olacak şekilde modellendiğinde vurutu momentinde referans motora göre yaklaşık %62'lik bir azalma olduğu görülür. Bu yöntemin en büyük dezavantajı, rotor iç çevresinde mıknatıs kenarlarının birbirine yakın olmasından kaynaklanan kaçak akı fazlalığıdır.



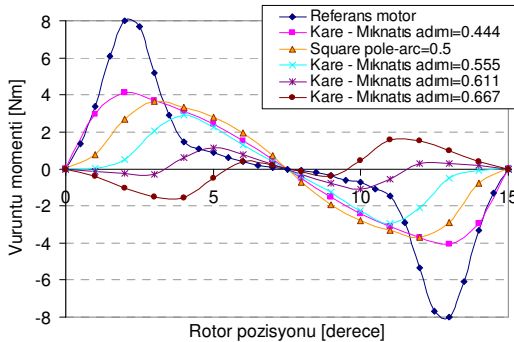
Şekil 13: Yamuk kayıklı EASM motorun rotor yapısı



Şekil 14: Yamuk kayıklı EASM motor ile referans motorun vurutu momentlerinin karşılaştırılması

3.6. Kare Mıknatıs (Kayık)

Yamuk şekilli kayık metodunun üst limiti kare şekilli mıknatıstır. SEA ile kare mıknatıslar 80, 90, 100, 110 ve 120 elektriksel derecelik farklı mıknatıs adımları (yada mıknatıs alanı/kutup alanı) için modellendiğinde Şekil 15 de gösterildiği gibi vurutu da ciddi düşüş gözlenir. Bu vurutu momentlerindeki değişim Şekil 5 de verilen fan tipi kayıksız mıknatıslı eşdeğerleri ile karşılaştırılırsa vurutu momentinde ciddi düşüşler gözlenir. Örnek vermek gerekirse, mıknatıs alanı-kutup alanı oranının 0.5 olduğu durumda kare mıknatısın fan tipi mıknatısa göre yaklaşık %49 daha az vurutuya sebep olduğu, 0.555 için bu değerin %64, 0.611

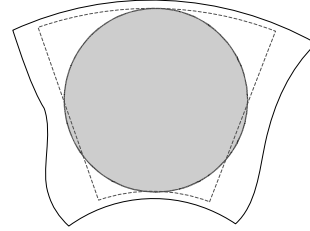


Şekil 15: Kare mıknatıslı EASM nin farklı kutup adımları için vurutu momentinin değişimi

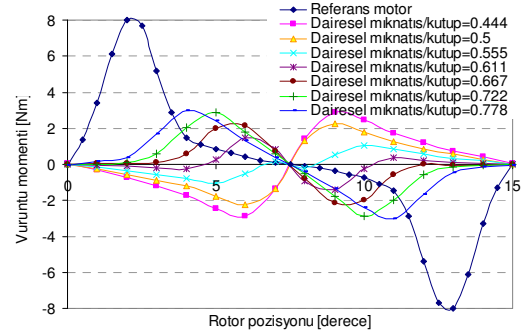
için ise vurutu momentinde %78 lik bir düşüş olduğu görülmüştür. Ayrıca, bu tasarım için mıknatıs alanı/kutup alanı oranı 0.667 nin üzerine kutup sayısı ve yetersiz alan sınırlamalarından dolayı çıkılmamıştır.

3.7. Dairesel Mıknatıslar

Dairesel mıknatıslar, EASM motorlarda vurutu momentini düşürmenin başka bir etkili yoludur ve pratikte mıknatıs yapısının getirdiği avantajlar nedeni ile sıkça kullanılır. Bu metodun etkinliğini göstermek için farklı dairesele mıknatıslı 3D SEA modelleri oluşturulmuş ve vurutu moment simülasyonları üç farklı mıknatıs adımı / kutup adımı için (0.77, 0.72, 0.67, 0.61, 0.55, 0.50 ve 0.44) çalıştırılmıştır. Bu vurutu moment değerimleri yukarıda verilen mıknatıs adımı / kutup adımı değerleri için klasik fan tipi mıknatıslı vurutu momentleri değerleri ile karşılaştırılmıştır ve SEA simülasyonları sonuçları Şekil 17'de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi vurutu momentinde referans motorunun değerlerine göre %93 oranında bir düşüşe neden olduğu anlaşılmıştır.



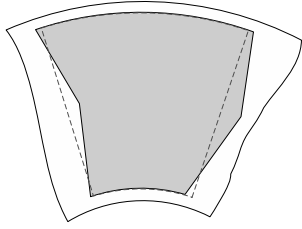
Şekil 16: Dairesel mıknatıslı EASM motorun rotor yapısı



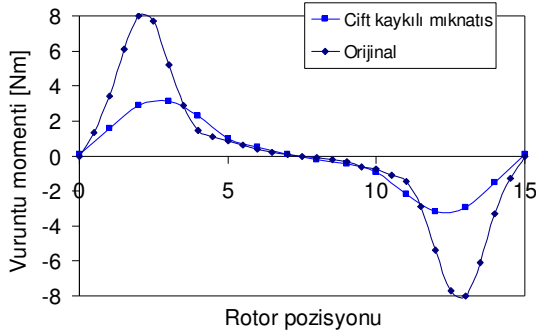
Şekil 17: Dairesel mıknatıslı yapının referans motor ile vurutu moment karşılaştırılması

3.8. Çift Kayıklı Mıknatıslar

Çift kayıklı mıknatıslar radyal akılı sürekli mıknatıslı motorlara başarı ile uygulanmış ve aksel kuvvetleri ortadan kaldırarak vurutu momentini çok düşük seviyelere indirilebileceği gösterilmiştir [29]. Bu yöntem EASM motorlarda kolaylıkla uygulanabilir (Şekil 18). Ancak, bu yöntemin muhtemel dezavantajlarından en önemlisi, mıknatısların karmaşık yapısı ve maliyetidir. Çift kayıklı mıknatısların alanı ile referans motorda kullanılan mıknatısların alanı aynı olacak şekilde SEA modelleri oluşturulup vurutu simülasyonları çalıştırıldığında Şekil 19'den de görüldüğü gibi oluk adımının yarısı kadar bir kayık vurutu momentinde %57.5'lik bir düşüşe neden olur. Ayrıca vurutu momentini en aza indirecek kayık açısını detaylı bir optimizasyon ile elde etmek mümkündür.



Şekil 18: Çift kayıklı mıknatıslı EASM motorun rotor yapısı

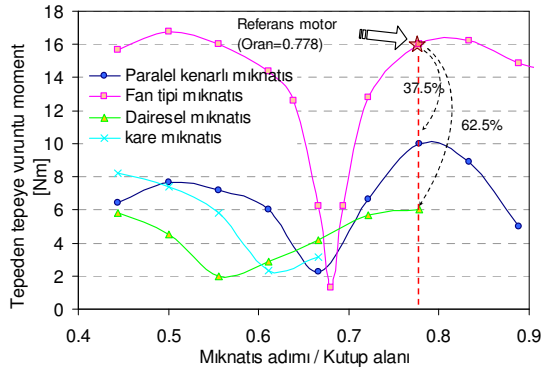


Şekil 19: Orijinal vurutu moment değışimi ile çift kayıklı mıknatıslı yapının vurutu moment değışiminin karşılaştırılması

4. Sonuçlar

Bu çalışmada EASM motorlarda vurutu momenti azaltma yöntemleri mıknatıs kayığı tekniğine odaklanılarak tartışılmıştır. Çift-rotor-tek-statorlu EASM bir motor referans motor olarak kullanılmış ve çeşitli kayığı teknikleri 3D sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilerek yöntemlerin etkinliği test edilmiştir.

Bu çalışmadan da görüldüğü gibi kayığı, vurutu momentinin tepe değerinin düşürülmesinde çok etkin bir yöntem olmakla birlikte, farklı kayığı metotları EASM motorlara değışik şekillerde uygulanabilir. Her bir mıknatıs kayığı yönteminin farklı kutup adımları için vurutu momentine etkisi tartışılmış, birbirlerine göre avantaj ve dezavantajlarına değinilmiştir. Sonuçlar kayığı fan tipi mıknatıslı referans yapı ile karşılaştırılarak ortaya atılan yöntemlerin etkinliği kanıtlanmıştır. Şekil 20, yapılan çalışmalarda etkin kayığı metotlarını farklı kutup adımlara



Şekil 20: Vurutu momentinin tepeden tepe değeri için farklı kutup adımları ve kayığı metotları için karşılaştırılması

sahip EASM motor ile göstermektedir. Örnek vermek gerekirse; kutup adımı 0.778 olan fan tipi mıknatıslara göre paralel kenarlı mıknatıslı yapıda %37.5, yuvarlak mıknatıslı yapıda ise %62.5 lik bir düşüş gözlenmiştir.

Teşekkür

Yazar, sağlanan destekten dolayı Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu TÜBİTAK'a teşekkür eder. (TÜBİTAK Proje No: 108E051)

Kaynaklar

- [1] J. D. L. Ree, and N. Boules, "Torque production in permanent-magnet synchronous motors," *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. 25, no. 1, pp. 107-112, 1989.
- [2] T. M. Jahns, and W. L. Soong, "Pulsating torque minimisation techniques for permanent magnet ac motor drives: a review," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 43, no.2, pp.321-330, 1996.
- [3] C. Studer, A. Keyhani, T. Sebastian, and S. K. Murthy, "Study in cogging torque in permanent magnet machines," *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 1997, New Orleans, pp.42-49.
- [4] D. C. Hanselman, "Effect of skew, pole count and slot count on brushless motor radial force, cogging torque and back emf," *IEE Proc. Electric Power Applications*, vol. 144, no.5, pp. 325-330, 1997.
- [5] M. S. Islam, S. Mir, and T. Sebastian, "Issues in reducing the cogging torque of mass-produced permanent-magnet brushless DC motor," *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. 40, no. 3, pp 813-820, 2004.
- [6] J. A. Wagner, "Numerical analysis of cogging torque in a brushless DC machine", *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 1975, pp.669-673.
- [7] T.Li, and G. Slemon, "Reduction of cogging torque in PM motors," *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 24, no. 6, pp 2901-2903, 1988.
- [8] Z.Q. Zhu, and D. Howe, "Influence of design parameters on cogging torque in permanent magnet machines," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol.15, no.4, pp.407-412, 2000.
- [9] N. Bianchi, and S. Bolognani "Design techniques for reducing the cogging torque in surface-mounted PM motors," *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. 38, no. 2, pp. 1259-1265, 2002.
- [10] K. H. Kim, D. J. Sim, and J. S. Won, "Analysis of skew effects on cogging torque and BEMF for BLDCM," *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 1991, pp. 191-197.
- [11] R. P. Deodhar, D. A. Staton, T. M. Jahns, and T. J. E. Miller, "Prediction of cogging torque using the flux-MMF diagram technique," *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. 32, no.3, pp. 569-576, 1996.
- [12] Z. Q. Zhu, and D. Howe, "Analytical prediction of the cogging torque in radial-field permanent magnet brushless motors," *IEEE Trans. Magnetics*, vol.28, no.2, pp. 1080-1083, Mar. 1992.
- [13] T. Ishikawa, and G. Slemon "A method of reducing ripple torque in permanent magnet motors without skewing," *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 29, no. 2, pp. 2028-2031, 1993.
- [14] S.K. Chang, S.Y. Hee, W.N. Ki, and S.C. Hong, "Magnetic pole shape optimization of permanent magnet

- motor for reduction of cogging torque," *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 33, no. 2, pp. 1822-1827, 1997.
- [15] C. S. Koh, H. Yoon, K. Namn and H. Choi, "Magnetic pole shape optimization of permanent magnet machine for reduction of cogging torque", *IEEE Trans. Magnetics*, vol.33, no.2, March 1997.
- [16] M. Goto, and K. Kobayashi, "An analysis of the cogging torque of a DC motor and a new technique of reducing the cogging torque," *Electrical Engineering in Japan*, vol.103, no.5, pp.113-120, 1983.
- [17] Y. D. Yao, D. R. Huang, J. C. Wang, S. H. Liou, S. J. Wang, T. F. Ying and D. Y. Chiang, "Simulation study of the reduction of cogging torque in permanent magnet machines," *IEEE Trans. Magnetics*, vol.33, no.5, pp.4095-4097, 1997.
- [18] Z.Q. Zhu, S. Ruangsinchaiwanich, D. Ishak, and D. Howe, "Analysis of cogging torque in brushless machines having non-uniformly distributed stator slots and stepped rotor magnets," *IEEE Trans. Magnetics*, vol.41, no.10, pp. 3910-3912, 2005.
- [19] Z. Q. Zhu, S. Ruangsinchaiwanich, and D. Howe, "Synthesis of cogging torque from a single stator slot in permanent magnet machines," *IEEE Trans. Industry Applications*, vol.42, no.3, pp.650-657, 2006.
- [20] G. Bakarar, T. El-Meslouhi, and B.Dakyo, "Analysis of the cogging torque behavior of a two-phase axial-flux permanent magnet synchronous machine," *IEEE Trans. Magnetics*, vol.37, no.4, pp.2803-2805, 2001.
- [21] F. Caricchi, F. Giulii Capponi, F. Crescimbin, and L. Solero, "Experimental study on reducing cogging torque and core power loss in axial-flux permanent-magnet machines with slotted winding," *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 2002, pp.1295-1302.
- [22] E. Muljadi, and J. Green, "Cogging torque reduction in a permanent magnet wind turbine generator," *21th American Society of Mechanical Engineers Wind Energy Symposium*, Reno NV, 2002.
- [23] M. Aydin, R. Qu, and T. A. Lipo, "Cogging torque minimization technique for multiple-rotor, axial-flux, surface-mounted-PM machines: alternating magnet pole-arcs in facing rotors," *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 2003, pp.555-561.
- [24] A. Letelier, J. A. Tapia, R. Wallace, and A. Valenzuela, "Cogging torque reduction in an axial-flux PM machine with extended speed range," *IEEE International Electrical Machines and Drive Conference*, 2005, pp.1261-1267.
- [25] M. Aydin, "Axial-flux surface mounted permanent magnet disc machines for smooth torque traction drive applications," *PhD Thesis*, University of Wisconsin-Madison, 2004.
- [26] P.J. Hor, Z.Q. Zhu, and D. Howe, "Minimization of cogging force in a novel slotted linear brushless permanent magnet machine," *Trans. IEEE Magnetics*, vol.34, no.5, pp.3544-3547, 1998.
- [27] Z.Q. Zhu, Z.P. Xia, D. Howe, and P.H. Mellor, "Reduction of cogging force in linear permanent magnet machines," *Proc. IEE-Electric Power Applications*, vol.144, no.4, pp.277-282, 1997.
- [28] Z. Q. Zhu, S. Ruangsinchaiwanich, Y. Chen, and D. Howe, "Evaluation of superimposition technique for calculating cogging torque in permanent magnet brushless machines," *IEEE Trans. Magnetics*, vol.42, no.3, pp.1597-1603, 2006.
- [29] Frank Jurisch, "Shell-shaped magnet", *United States Patent*, Patent Number: US24028945A1, 2004.