



Mıknatıs Korozyonunun 36-Oluk/12-Kutuplu Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Performansına Etkisi

Influence of Magnet Corrosion on Performance of 36-slot/12-Pole Permanent Magnet Synchronous Motor

Y. Demir¹, B. T. Ertuğrul², E. Sincar², A. Turhan³, S. Yılmaz³, M. Aydın^{1,4}

¹Ar-Ge Departmanı
MDS Motor Tasarım Ltd.
yucel@mdsmotor.com

²Ar-Ge Departmanı
ASELSAN A.Ş.
bertugrul@aselsan.com.tr, esincar@aselsan.com.tr

³Ar-Ge Departmanı
İnci Akü A.Ş.
syilmaz@inciaku.com, aturhan@inciaku.com

⁴Mekatronik Müh. Böl.
Kocaeli Üniversitesi
metin.aydin@kocaeli.edu.tr

Özet

Sürekli mıknatıslı (SM) senkron motorlar, yüksek moment-ağırlık oranına, güç ve verime sahip olmaları gibi avantajları sayesinde son yıllarda çok çeşitli uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Ancak, SM motorlarda karşılaşılan en büyük problem mıknatısların korozyona uğrama olasılığıdır. Bu çalışmada, mıknatıslardaki korozyonun yüzeyden mıknatıslı SM motor performansına etkisi incelenmiştir. Korozyonlu ve korozyonsuz mıknatıslı rotora sahip motorlar için hem sonlu elemanlar analizi (SEA) ile hem de deneysel olarak gerilim ve moment sabitleri elde edilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, yüksek kaliteli NdFeB mıknatıslar kullanıldığında, mıknatıslar yoğun korozyona maruz kalmasına rağmen motor performansında ihmal edilebilir bir azalma gözlenmiştir.

Abstract

Permanent magnet (SM) synchronous motors are often used in various applications over the last decades thanks to their high torque to weight ratio, power and efficiency. However, the major problem occurred in PM motors is the magnet corrosion. In this study, the influence of magnet corrosion on the performance of the surface permanent magnet motor is examined. Voltage and torque constants of the motors for uncorroded and corroded magnets are obtained by both finite element analysis (FEA) and experimentally, and the results are compared. It has been observed that there is no significant reduction on motor performance even the magnets undergo intensive corrosion tests when high quality NdFeB magnets are used.

1. Giriş

Radyal akılı sürekli mıknatıslı motorlar, özellikle 80'li yıllarda yüksek enerjili NdFeB mıknatıs alanındaki gelişmelerden sonra, çeşitli uygulamalarda sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır [1]-[5]. SM motorlar, asenkron ve fırçalı DC motorlar ile karşılaştırıldığında birçok avantaja sahip olduğu görülmektedir. Fırçasız SM motorlarda alan uyartım sargılarının olmaması sayesinde rotor kayıpları düşüktür ve bu yüzden verimleri diğer motor yapılarına göre daha yüksektir. Ayrıca, SM motorların boyutları ve ağırlıkları benzer moment-hız karakteristiği için daha küçük olduğu görülmektedir. Bu da aynı moment değeri için motorun toplam ağırlığının azalması anlamı taşımaktadır. Bu motorların bir diğer avantajı da moment yoğunlukları ve moment-ağırlık oranlarının bilinen diğer motor konfigürasyonlarına göre daha yüksek olmasıdır. Bunun yanında, tasarlanan motorun optimizasyonu doğru bir şekilde gerçekleştirilirse, motorun vuruğu momenti ve moment dalgalanması minimize edilebilmekte ve moment kalitesi artırılabilir. Stator sargıları sinüzoidal magneto motor kuvveti (MMK) ve düzgün bir moment çıkışı elde etmek için tasarlanabilir ve nispeten sessiz bir çalışma koşulu sağlanabilir. Böylece, SM motorlar düşük hızlarda hassas hız ve pozisyon kontrolü gerektiren uygulamalarda kolaylıkla kullanılabilir.

NdFeB mıknatısların gelişiminin başlarında mıknatıs korozyonu ile ilgili ciddi problemler olduğu kabul edilmekteydi. Diğer mıknatıs türlerine göre, koruyucu kaplaması olmayan NdFeB mıknatıslar, çevresel etkiler

sonucunda daha kolay kimyasal etkileşime girip, ortaya istenmeyen sonuçlar çıkarabileceği bir gerçektir. Bu yüzden, SM motorların çoğunda üretim esnasında mıknatıs yüzeyine nikel kaplama yapılmakta veya özel epoksi gibi koruyucu malzemeler kullanılarak yada mıknatıs yüzeyi pasife edilerek mıknatıs korozyonuna karşı önlem alınmaktadır.

NdFeB mıknatısların korozyon problemini fiziksel açıdan inceleyen birçok çalışma literatürde mevcuttur [6]-[8]. Fakat, korozyonlu mıknatısların sürekli mıknatıslı senkron motor performansına etkisini inceleyen detaylı bir çalışma henüz yapılmamıştır [9], [10].

Bu çalışmada, mıknatıs korozyonunun sürekli mıknatıslı senkron motorların performansına etkisi incelenmiştir. 1.5kW anma gücüne ve 2000rpm anma hızına sahip olan bir SM senkron motor bu amaç için kullanılmıştır. Motorun stator yapısı aynı tutularak, rotorundaki mıknatısların korozyonsuz ve korozyonlu olduğu durumlar detaylı olarak incelenmiştir. Motorun sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilerek mıknatıs yüzeyindeki korozyon seviyesinin motor performansına etkisi incelenmiştir. Korozyon testlerini içeren bilgiler de çalışmada detaylı olarak verilmiştir. Ayrıca, korozyon olduğu ve olmadığı durumdaki motor performansları test edilerek sonuçlar karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.

2. İncelenen SM Senkron Motor

Bu çalışmada 21V DC bara gerilimine sahip ve 2000rpm anma hızında 1.5kW çıkış gücü verebilen sürekli mıknatıslı AC senkron motor kullanılmıştır. Oluk/kutup/faz (q) oranı 1 olan bir yapı kullanılmış ve motorun rotor yapısı çok segmentli bir yapıda oluşturulmuştur. Ayrıca, rotorda kaplamasız mıknatıslar kullanılmıştır. Kullanılan motor Şekil 1’de gösterilmiştir. Bunun yanında, motora ait özellikler ve bazı parametreler Çizelge 1’de verilmiştir. Burada altı çizilmesi gereken nokta şudur; rotor yapısında kullanılan yüksek enerjili NdFeB türüne sahip mıknatıslarda hiçbir koruyucu kaplama malzemesi kullanılmamıştır.

3. Prototip Motor Yapısı ve Korozyon Testlerinin Uygulanması

Mıknatıs korozyonunun etkisini incelemek için iki temel test yapılmaktadır: nem testi ve tuz sisi testi [11], [12]. Nem testinde sıcaklık ve nemin malzeme üzerindeki etkileri incelenmektedir. Tuz sisi testi ise malzemeler üzerindeki koruyucu kaplamanın ve yüzey etkinliğinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Bu test yöntemi genellikle doğal çevre koşullarından daha zor koşulları sağlamak için yapılmaktadır. Ayrıca, bu test ile tuzlu ortam için aşındırıcı bir etki ortaya çıkmakta, bununla birlikte asidik ortam ve sülfür dioksit çevrenin etkilerini göstermemektedir.

Bu çalışmada temel olarak neodmiyum mıknatıslardaki korozyon etkileri incelenmiştir. Tuz sisi testi yaygın olarak kullanılan MIL-STD-810G (Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests, Method 509.5, Salt Fog) askeri standartlarına göre rotora uygulanmıştır. Yapılan teste ilk olarak korozyonsuz rotor yapısı kullanılarak motor performansı yüksüz ve yüklü durumda test edilmiştir ve motorun çıkış momenti, moment dalgalanması, zıt elektromotor kuvveti (EMK) gerilimi, moment sabiti gibi

temel performans verileri elde edilmiştir. Daha sonra, motorun rotoru demonte edilmiş ve standartlarda verilen yöntemler izlenerek tüm rotor yoğun bir korozyona maruz bırakılmıştır. Sonrasında, korozyona uğramış SM rotorun motora montajı yapılmış ve daha önce uygulanan performans testleri tekrarlanmıştır. Şekil 2’de SM senkron motorun korozyonsuz ve testler sonrası korozyona uğramış rotor resimleri gösterilmiştir. Şekil 2 (b)’den görüldüğü gibi kaplamasız NdFeB mıknatısların üzerinde ciddi bir korozyon tabakası testler sonucunda oluşmuştur.



Şekil 1: İncelenen SM senkron motor

Çizelge 1: SM motorun özellikleri

DC Bara Gerilimi	21 Vdc
Anma Akımı	56 A
Bağlantı Şekli	Yıldız
Anma Gücü	1.5 kW
Anma Hızı	2000 rpm
L_d	24.7uH
L_q	24.8uH



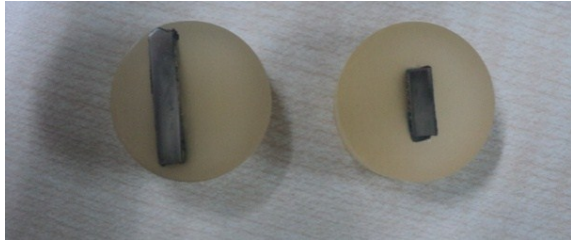
(a)



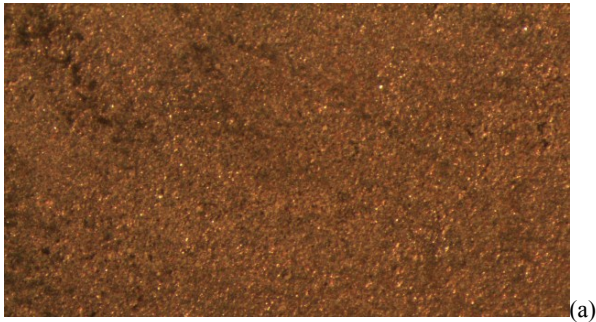
(b)

Şekil 2: İncelenen SM senkron motorun (a) korozyonsuz ve (b) korozyonlu rotor resimleri

Mıknatısların korozyon seviyesini belirlemek için korozyonsuz ve korozyonlu mıknatıs numunelerinin kesitleri akrilik reçine olan bir bloğun içerisine yerleştirilmiştir. Şekil 3’de bu numuneler gösterilmiştir. Daha sonra, numuneler optik ve stereo mikroskop yardımıyla incelenmiştir ve sonuçlar Şekil 4 ve Şekil 5’te gösterilmiştir. Şekil 4’de korozyonlu ve korozyonsuz numunelerin yüzey görüntüleri verilmiştir. Temizlenmesine rağmen korozyon tabakası net bir biçimde gözlenmektedir. Şekil 5 (a)’da ise mıknatısla akrilik reçine arasında korozyon gözlenmezken, Şekil 5 (b)’de ince bir tabakanın oluştuğu görülmektedir. Mıknatıs yüzeyinde oluşan bu tabakanın kalınlığı yaklaşık 0.028mm olarak ölçülmüştür. Elde edilen bu verilerden, mıknatıslarda neredeyse hiçbir korozyon tabakasının oluşmadığı söylenebilir. Mıknatısların alındığı firmalarda her ne kadar kaplamasız olarak satıldığı belirtilse de, NdFeB mıknatısların içerisine paslanmaya karşı etkili olan element ve bileşenlerin eklenmiş olduğu düşünülmektedir. Bu nedenle, oluşan tabakanın çok ince olduğu söylenebilir.



Şekil 3: Akrilik kalıba alınmış sırasıyla korozyona uğramış ve uğramamış numuneler

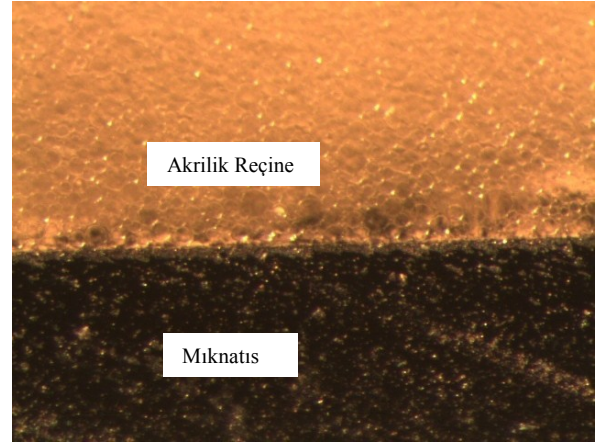


(a)

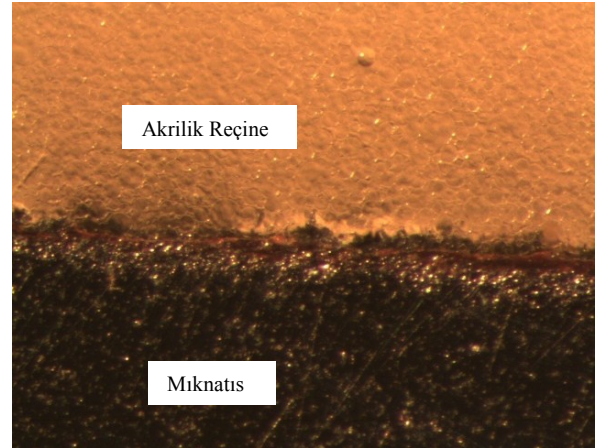


(b)

Şekil 4: (a) Korozyonsuz ve (b) korozyonlu mıknatısların yüzey görüntüleri



(a)

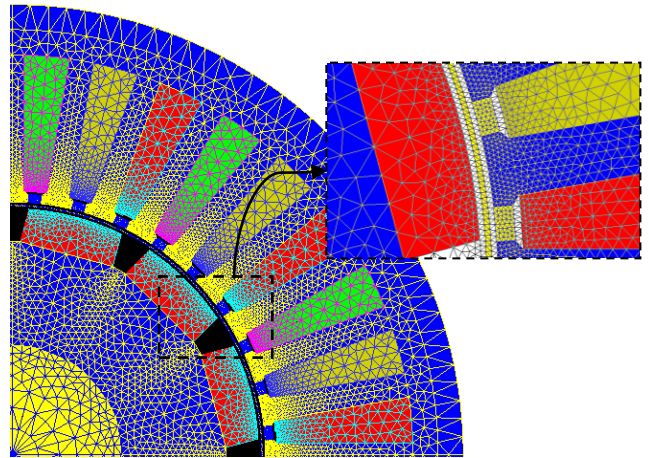


(b)

Şekil 5: (a) Korozyonsuz ve (b) korozyonlu mıknatısların enine kesitlerinin stereo mikroskop yardımıyla 100 kat büyütülmüş görüntüleri

4. Korozyonlu ve Korozyonsuz SM Senkron Motorun SEA

Bilindiği gibi sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile sürekli mıknatıslı motorların analizi doğru ve hassas bir şekilde yapı-



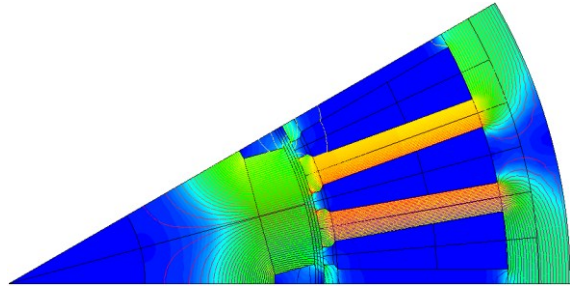
Şekil 6: Motorun SEA modeli ve ağ yapısı

labilmektedir. Böylece, motor tasarımı ile ilgilenenler akı, gerilim, moment, endüktans gibi bir tasarımcı için önemli parametreleri analitik yöntemlerle hesaplamak yerine hızlı, kolay ve güvenilir bir yöntem olan SEY ile hesaplayabilirler. Ayrıca, vuru mu momenti ve moment dalgalanması gibi kritik moment bileşenleri de SEA programları ile doğru ve hassas bir şekilde hesaplanabilmektedir.

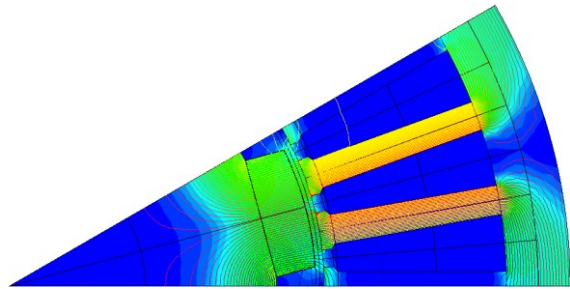
Tasarlanan 12-kutuplu SM senkron motor Flux 2D/Skew SEA programı kullanılarak modellenmiştir ve Şekil 6'da gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere enerji dönüşümünün gerçekleştiği hava aralığında ağ yapısının yoğun olmasına dikkat edilmiştir. Ayrıca, rotor segmentli yapıda tasarlanmıştır ve rotora kaykısı verilmiştir. Kayıklı motor modeli bu özellikler dikkate alınarak SEA programı ile oluşturulmuştur. Modelin çözüm hızı için de 2B SEA modelleri ile karşılaştırıldığında oldukça hızlı ve doğru bir çözüm sunduğu söylenebilir.

Bir önceki bölümde korozyonlu mıknatis resimleri ve korozyon seviyesinin ne boyutta olduğu resimler ile detaylı olarak verilmiştir. Mıknatis üzerinde oluşan 0.028mm kalınlığındaki korozyon tabakasının etkisini incelemek için SEA programı ile bu kalınlıkta bir obje oluşturulmuş ve korozyon etkisi bu şekilde incelenmiştir. Daha sonra, motorun hem yüksüz hem de yüklü durumdaki performans verileri elde edilmiştir.

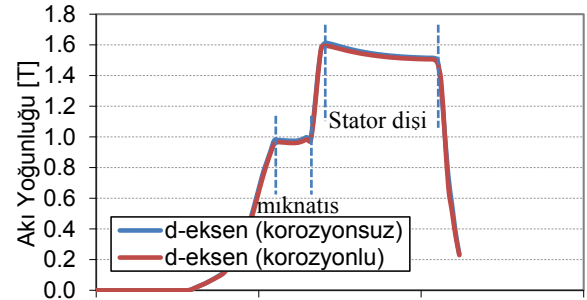
İlk olarak, korozyonsuz ve korozyonlu rotor yapısına sahip motorların yüksüz durum analizleri gerçekleştirilmiştir ve bu durumda elde edilen akı yoğunluğu ve akı çizgileri sırasıyla Şekil 7 ve Şekil 8'da gösterilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi önemli bir akı kaçağı yada akı yoğunluğu seviyesi gözlenmemiştir. Bunun yanında, her iki motorun yine yüksüz durumdaki d-eksen boyunca oluşan akı yoğunluğu değişimleri Şekil 9'de verilmiştir.



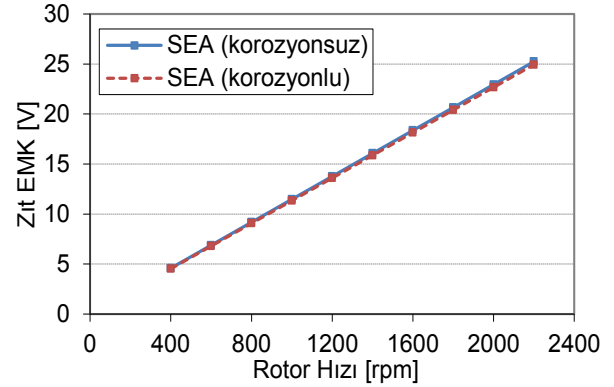
Şekil 7: Korozyonsuz mıknatıslı motorun yüksüz durumdaki akı yoğunluğu ve akı çizgilerinin dağılımı



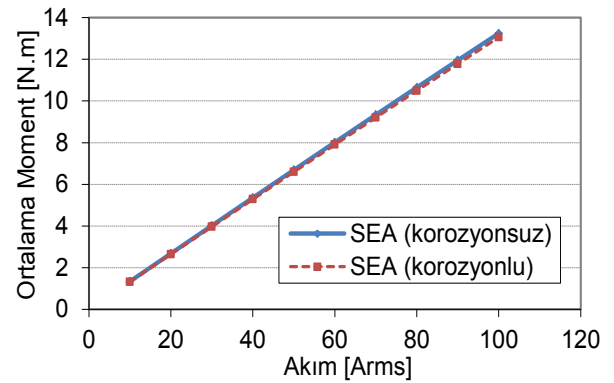
Şekil 8: Korozyonlu mıknatıslı motorun yüksüz durumdaki akı yoğunluğu ve akı çizgilerinin dağılımı



Şekil 9: Her iki motorun d-eksen boyunca yüksüz durum akı yoğunluğu değişimi



Şekil 10: Her iki motorun SEA sonucu elde edilen zıt-EMK gerilimi tepe değeri-hız eğrisi



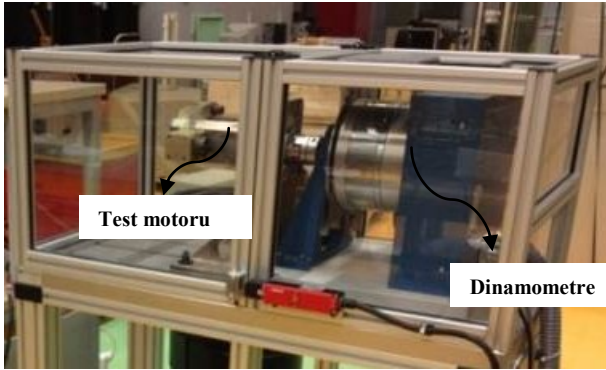
Şekil 11: Korozyonsuz ve korozyonlu mıknatıslı motorların SEA sonucu elde edilen moment-akım eğrisi

Motorların yüksüz durum analizlerinden görüldüğü gibi korozyonsuz ve korozyonlu mıknatıslı yapıların akı yoğunlukları arasında ciddi bir fark görülmemektedir. Bununla birlikte, Şekil 9'den görüldüğü gibi korozyonlu mıknatısa sahip motorun ortalama akı yoğunluğunda %1.2'lik bir azalma söz konusudur. Her iki durumdaki motorun zıt-EMK gerilimi-hız ve moment-akım grafikleri sırasıyla Şekil 10 ve Şekil 11'de verilmiştir. Her iki şekilden de görüldüğü gibi korozyonlu mıknatıslara sahip rotorda korozyonsuz olana göre özellikle yüksek hız ve akım değerlerinde bir azalma görülmektedir. Özetle düşük hızlarda ve akım değerlerinde çok hissedilmeyen korozyonlu ve korozyonsuz mıknatıslar arasındaki fark, yüksek akım ve yüksek hızlarda ortaya net bir şekilde çıkmaktadır.

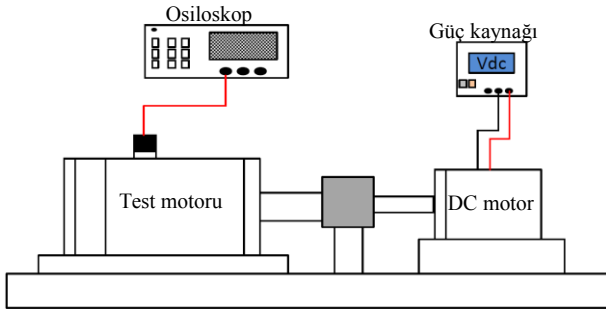
5. Korozyonlu ve Korozyonsuz SM Senkron Motorun Deneysel Sonuçları ve Sonuçların Karşılaştırması

Korozyonsuz ve korozyonlu rotor yapısına sahip her iki yapının motor performansını elde etmek için yüksüz ve yüklü durum testleri gerçekleştirilmiştir. Her iki yapıda da aynı stator kullanılmıştır. İlk olarak korozyonsuz durumdaki mıknatıslı rotor test edilmiş, daha sonra rotor çıkarılarak paslandırılmış ve rotor motora tekrar monte edilerek performans testleri tekrarlanmıştır. Şekil 12’de dinamometre test düzeneği gösterilmiştir. Şekil 13’de ise zıt-EMK geriliminin ölçüldüğü test düzeneği gösterilmiştir. Görüldüğü gibi motor bir DC motor yardımı ile test motoru farklı hızlarda döndürülerek gerilim değişimleri bir osiloskop yardımıyla elde edilmektedir.

Korozyonsuz SM motorun vuruğu momentinin SEA ile deneysel olarak karşılaştırması Şekil 14’de verilmiştir. Korozyonlu mıknatıslı kullanıldığı durumda da oldukça yakın bir değişim elde edilmiştir. Sonlu elemanlar analizi sonucu elde edilen değişimin deneysel sonuçlar ile uyum içerisinde olduğu görülmektedir. FEA sonucu elde edilen değişimin tepe



Şekil 12: Dinamometre test düzeneği



Şekil 13: Zıt-EMK gerilimi test düzeneği

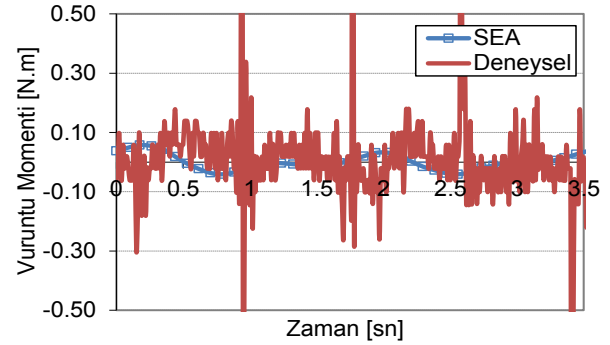
Çizelge 2: Korozyonsuz mıknatıslı rotorun gerilim ve moment sabitleri

	SEA	Deneysel	%Hata
K_e [V/(rpm)]	0.0115	0.0113	1.7
K_t [Nm/Arms]	0.1320	0.1270	3.5

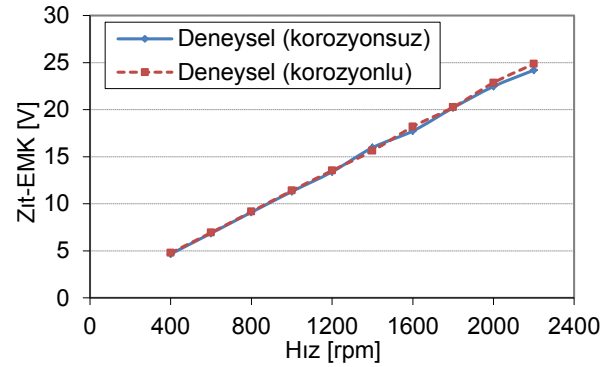
Çizelge 3: Korozyonlu mıknatıslı rotorun gerilim ve moment sabitleri

	SEA	Deneysel	%Hata
K_e [V/(rpm)]	0.0113	0.0114	0.9
K_t [Nm/Arms]	0.1310	0.1260	3.8

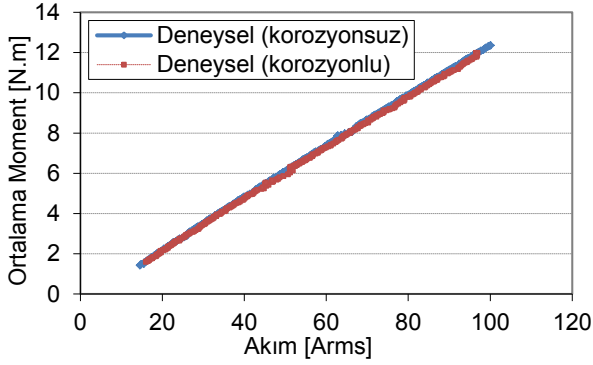
değeri 0.057Nm iken, deneysel olarak 0.1Nm tepe değerine sahip bir değişim elde edilmiştir. Tork metrenin en düşük 0.1Nm ölçüm hassasiyetine sahip olduğu göz önünde bulundurulursa, deneysel olarak elde edilen değişimde mekanik kaynaklı gürültülerin var olduğu söylenebilir. Bu nedenle de tepe değeri deneysel veriye oranla bir miktar daha fazla olan bir değişim elde edilmiştir. Ayrıca, şekilde de görüldüğü gibi, motorda vuruğu momenti verilen kaykısı sayesinde ortadan kaldırılmıştır ve düşük bir tepe değerine sahip değişim elde edilmiştir. Korozyonsuz ve korozyonlu rotor yapısına sahip motorların zıt-EMK gerilimleri deney düzeneği yardımıyla farklı rotor hızlarında elde edilmiştir ve Şekil 15’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Ayrıca, her iki rotor yapısına sahip motorun moment-akım ilişkisi incelenmiş ve Şekil 16’de gösterilmiştir. Her iki şekilde de görüldüğü gibi sonuçlar birbirine oldukça yakın bir değişim göstermektedir. Hem gerilim-hız hem de moment-akım eğrilerinden her iki rotor yapısına sahip motor için gerilim ve moment sabiti katsayıları elde edilmiştir ve bu değerler Çizelge 2 ve Çizelge 3’de özetlenmiştir. Şekil 15 ve Şekil 16’deki grafikler ve yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen verilerden de görüldüğü gibi korozyonsuz ve korozyonlu mıknatıslı rotorlu motorların performans verileri



Şekil 14: SM Motorun vuruğu momentinin karşılaştırılması (korozyonsuz mıknatıslı rotor için elde edilmiştir)



Şekil 15: Her iki motorun deneysel olarak elde edilen zıt-EMK gerilimi tepe değeri-hız eğrisi



Şekil 16: Korozyonsuz ve korozyonlu mıknatıslı motorların deneysel olarak elde edilen moment-akım eğrisi

arasında düşük hız ve düşük akım değerlerinde ciddi bir fark görülmemektedir. Ancak akım değeri arttıkça ve yüksek hızlar çıktıkça fark ortaya çıkmaktadır.

6. Sonuçlar

Bu çalışmada düşük gerilimli yüzeyden sürekli mıknatıslı bir AC senkron motorun performansına NdFeB mıknatısların korozyon etkisi incelenmiştir. Ayrıca, korozyonlu ve korozyonsuz mıknatıslı yapılar SEA ile incelenerek gerilim, moment çıkışı, akı, yüksüz durum akı yoğunlukları gibi motor performans verileri elde edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Rotor yoğun bir tuz sisi testine maruz bırakılmış ve mıknatısların yüzeyleri askeri standartlarda korozyona uğratılmıştır. Hem korozyonsuz hem de korozyonlu rotor yapıları test düzeneği ile hem yüksüz hem de yüklü durumda test edilerek motorun gerilim sabiti ve moment sabiti elde edilmiş, sonuçlar SEA ile karşılaştırılmıştır. Prototip motorlarda, mıknatısların yüzeyinde korozyonu önleyici olarak kullanılan kaplama malzemeleri olmamasına rağmen, mıknatısların içerisinde paslanmaya karşı etkili element ve bileşenlerin kullanıldığı varsayıldığında, korozyonlu ve korozyonsuz mıknatısların kullanıldığı motorların elde edilen performans sonuçları arasında küçük bir fark gözlenmiştir. Yüksek akım değerlerinde ve yüksek hızlarda bu fark daha net bir şekilde ortaya çıkmaktadır.

7. Teşekkür

Yazarlar, desteklerinden dolayı Aselsan A.Ş., İnci Akü A.Ş., MDS Motor Ltd. ve Kocaeli Üniversitesi'ne teşekkür eder.

8. Kaynaklar

- [1] T. Sebastian, G. R. Slemon and M. A. Rahman, "Design considerations for variable speed permanent magnet motors", *Proceedings of International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, pp.1099-1102, 1986.
- [2] D. G. Dorrell, M. Hsieh, M. Popescu, L. Evans, D. A. Staton and V. Grout, "A Review of the Design Issues and Techniques for Radial-Flux Brushless Surface and Internal Rare-Earth Permanent-Magnet Motors", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol.58, no.9, pp.3741-3757, Sept. 2011.
- [3] J. A. Guemes, A. M. Iraolagoitia, J. I. Del Hoyo and P. Fernandez, "Torque Analysis in Permanent-Magnet Synchronous Motors: A Comparative Study", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, pp. vol. 26, no. 1, March 2011.
- [4] R. Islam, I. Husain, A. Fardoun and K. McLaughlin, "Permanent Magnet Synchronous Motor Magnet Designs with Skewing for Torque Ripple and Cogging Torque Reduction", *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, vol. 45, issue 1, pp. 152-160, 2009.
- [5] M. S. Islam, S. Mir, T. Sebastian and S. Underwood, "Design Considerations of Design Considerations of Sinusoidally Excited Permanent-Magnet Machines for Low-Torque-Ripple Applications" *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 41, no. 4, pp. 955-962, 2005.
- [6] T. Minowa, M. Yoshikawa, M. Honshima, "Improvement of the corrosion resistance on Nd-Fe-B magnet with nickel plating", *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 25, no. 5, pp. 3776 - 3778, Sep 1989.
- [7] A.S. Kim, F. E. Camp, E. Dulis, "Effect of oxygen, carbon, and nitrogen contents on the corrosion resistance of Nd-Fe-B magnets", *IEEE Trans. Magnetics*, vol.26, no.5, pp.1936 - 1938, Sep 1990.
- [8] H. Bala, S. Szymura, J.J. Wyslocki, "Corrosion characteristics of Nd₂Fe₁₄-xNi_xB permanent magnets", *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 26, no. 5, pp. 2646 - 2648, Sep 1990.
- [9] A.S. Kim, F. E. Camp, "A high performance Nd-Fe-B magnet with improved corrosion resistance", *Digests of InterMag 1992, International Conference on Magnetics*, pp. 24 - 24, 13-16 Apr. 1992.
- [10] S. R. Trout, Y. Zhilichev, "Effective use of neodymium iron boron magnets, case studies", *Electrical Insulation Conf. and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conf.*, pp. 437 - 440, 1999.
- [11] MIL-STD-810 G: Department Of Defense Test Method Standard: Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests, OCT 31, 2008.
- [12] MIL-STD-202 G: Department Of Defense Test Method Standard: Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests, SEP 8, 2012.