



Makale / Research Paper

Yüzey Mıknatıslı Eksenel Akılı Motorlarda Rotor Mıknatıslarına Adım Ve Kayma Uygulanarak Moment Dalgalanmasının Azaltılması

Emrah ÇETİN^{*1}, Ferhat DALDABAN²

Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 38039
Kayseri/TÜRKİYE

¹emrahcetin@erciyes.edu.tr, ²daldaban@erciyes.edu.tr

Received/Geliş: 20.10.2017

Revised/Düzeltilme: 11.01.2018

Accepted/Kabul: 19.01.2018

Özet: Eksenel akılı sürekli mıknatıslı motorlar avantajlı özellikleri bakımından literatürde öne çıkan motor türlerinden birisidir. Radyal akılı motorlara göre hacim veya ağırlık başına moment açısından önemli avantajlar ortaya koymaktadır. Bu makalede ise sinüs zıt EMK dalga şekli olan motorların daha az moment dalgalanmasına sahip olması nedeniyle, eksenel akılı sürekli mıknatıslı motora ait zıt EMK dalga şeklinin sinüse yaklaştırılması ve buna bağlı olarak moment dalgalanmasının azaltılması araştırılmıştır. Bunu gerçekleştirebilmek için eksenel akılı sürekli mıknatıslı motorun rotorunda bulunan mıknatıslara adım ve kayma açısı uygulanarak üç boyutlu analiz yapılmıştır. Ayrıca zıt EMK ve moment analizinden önce, en doğru sonucu elde edebilmek için, rotor konumunun en iyi pozisyonu belirlenmiştir. Analiz yapılırken çeşitli başlangıç değerlerine bağlı olarak ortaya çıkan en iyi moment değeri bulunmuştur. Bununla beraber de ortalama momentin başlangıç pozisyonuna bağlı olarak değişimi de grafiksel olarak gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: Eksenel akılı motorlar, zıt EMK dalga şekli, başlangıç pozisyonu, moment dalgalanması.

The Mitigation of The Torque Ripples By Applying Stepping And Shifting To The Rotor Magnets In Surface PM Axial Flux Motors

Abstract: Axial flux motors are one of the promising motor types in the literature due to the advantageous specifications. They provide crucial advantages against the radial flux motors in contrast to moving torque by the volume and the weight. Since the motors that have sinusoidal back emf have lower torque ripples, the adduction of back EMF waveform to the sinusoidal by applying the stepping and shifting on the rotor magnets and the mitigation of the torque ripples is researched in this paper. Shifting and stepping method is applied to the rotor magnet in the 3D analysis to realize that. Moreover, to get the best results, the optimum initial position is determined before the back emf and moving torque analysis. While analyzing, the optimum value of the moment is found in contrast to the different initial positions. In addition to that, mean torque values versus initial positions is illustrated as a rectangular plot.

Keywords: Axial flux motors, back EMF waveform, initial position, torque ripple.

1. Giriş

Mıknatıslı elektrik motorları yüksek verimleri nedeniyle ileri teknoloji uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak mıknatıslı elektrik motorlarını maksimum verimde sürebilmek için sürücülere ve çeşitli sensörlere ihtiyaç vardır. Sensörler vasıtasıyla rotor konumu, sıcaklık, akım

Bu makaleye atf yapmak için

Cetin, E., Daldaban F., "Yüzey mıknatıslı eksenel akılı motorlarda rotor mıknatıslarına adım ve kayma uygulanarak moment dalgalanmasının azaltılması" El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi 2018, 5(1); 56-64.

How to cite this article

Cetin, E., Daldaban F., "The mitigation of the torque ripples by applying stepping and shifting to the rotor magnets in surface PM axial flux motors" El-Cezerî Journal of Science and Engineering, 2018, 5(1); 56-64.

şiddeti gibi geribesleme bilgileri alınmaktadır. Bu bilgiler dahilinde sürülen motordan optimum düzeyde yararlanılabilmektedir.

Zıt EMK dalga şekli karakteristiklerine göre iki farklı tipte sürücü vardır. Bunlar trapezoidal ve sinüstür. Sinüs sürücüler, AC sürücülere birçok açıdan benzemektedir. Çünkü zıt EMK ve akımları sinüse ne kadar yakın olursa üretilecek moment o kadar düzgün olmaktadır. Sinüs zıt EMK elde edebilmek için, stator sargılarının hava aralığı etrafında sinüs şeklinde dağıtılmış olması ya da rotor mıknatıslarının hava aralığında sinüs şeklinde manyetik akı yoğunluğu üretmesi gerekmektedir. Ayrıca sinüs sürücüler de maksimum verimde motoru sürebilmek için bir akım sensörü ve bir rotor konum sensörü içermektedir. Akım ve zıt EMK dalga şekillerinden herhangi biri sinüsten uzaklaşırsa, moment dalgalanması ile sonuçlanmaktadır. O nedenle ne kadar sinüse yakın zıt EMK ve akım dalga şekli olursa, o kadar titreşimsiz motor ve sabit moment meydana gelmektedir. Trapezoidal sürücüler için ise motorun trapezoidal zıt EMK üretebilecek şekilde tasarlanması gerekmektedir. Sinüs sürücülerin aksine, konsantre sargılı stator ve yüzey mıknatıslı rotora ihtiyaç duymaktadır.

Bu makalede bir sürekli mıknatıslı motor türü olan yüzey mıknatıslı eksenel akılı motor türü üzerinde çalışılmıştır. Rotor mıknatıslarının iki adımda ve belirli bir kayma açısında yapılarak ilk durumda trapezoidal olan zıt EMK dalga şeklinin sinüse yaklaştırılması araştırılmıştır. Buna bağlı olarak da oluşan moment dalgalanmasının daha az olması hedeflenmiştir. Literatür incelendiğinde tasarimsal olarak eksenel akılı makinelerde adım ve kayma açısının daha önce uygulanmadığı görülmüştür. Simülasyonlar Ansys/Maxwell 3D programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Eksenel yapı gereği üç boyutlu analiz yapılmıştır.

Ayrıca, eksenel akılı makineler geleneksel makinelerle karşılaştırıldığında avantajları; daha geniş yarıçap/uzunluk oranı, düzlemsel ve ayarlanabilir hava aralığı, daha yüksek güç yoğunluğu, daha küçük hacim ve ağırlık, yüksek frekans ve düşük hızlara uygunluk şeklinde sıralanmaktadır. Gelişime açık yanları ise; stator üretiminin zorluğu, stator ve rotor arasındaki güçlü eksenel manyetik çekim kuvveti, makinenin montajı, hava aralığını sabit tutmadaki zorluklar ve üretim sürecinin daha uzun sürmesidir.

Literatürde S. Shah ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada mıknatıs kutuplarının şekli değiştirilerek radyal akılı bir mıknatıslı motorun zıt EMK dalga şeklinin sinüs olması sağlanmış ve sonuçta daha doğrusal bir moment oluşturulmuştur [1]. G. J. Li ve arkadaşları da, vuru momentini azaltmak için yaptıkları çalışmada oluk açıklıklarında kayma önermişlerdir. Bu öneri ile hava aralığındaki manyetik akının yolu değişmiş ve vuru momenti açısından faydalı olmuştur. Bununla beraber zıt EMK değişimine de çalışmalarında yer vermişlerdir [2]. S.Kumar ve arkadaşları havacılıkta enerji depolamak için geliştirdikleri eksenel akılı sürekli mıknatıslı volanlara yönelik çalışmalarında mıknatıs şeklini değiştirerek zıt EMK dalga şeklini sinüse yaklaştırmış ve bu sayede moment dalgalanması ile demir kayıplarını azaltmışlardır [3]. Rotor konum tespiti üzerine de literatürde çeşitli çalışmalar yapılmıştır. M. J. Corley ve R.D. Lorenz 1996 yılında yayınladığı makalede rotor pozisyonunu tahmin edebilmek için bir çalışma yapmışlardır. Geliştirilen yöntemde motorun rotor pozisyonunun, uygulanan yüksek frekanslı akım neticesinde oluşan hata sinyalinden sensörsüz olarak bulunabileceği gösterilmiştir [4]. P. Schmidt ve arkadaşlarına ait makalede de her bir faz sargısına uygulanan uygun genişlikteki gerilim ile stator akımlarının stator çeliğini kısmen doyuma götürmesi sağlanmıştır. Böylelikle geliştirdikleri algoritmanın yaklaşık rotor kutuplarının konumunu belirlemesini sağlamışlardır [5]. S. Nakashima ve arkadaşları yayınladıkları makalede sürekli ve yüzey mıknatıslı bir motora ait rotor pozisyonunu konum sensörü olmadan tahmin edebilmek için mıknatıs tarafından meydana getirilen stator çekirdeğinin doğrusal olmayan mıknatıslanma karakteristiklerini kullanmışlardır [6]. Yine yapılan bazı çalışmalarda da rotor konumunu belirleyebilmek için farklı yöntemler kullanılmıştır [4-7].

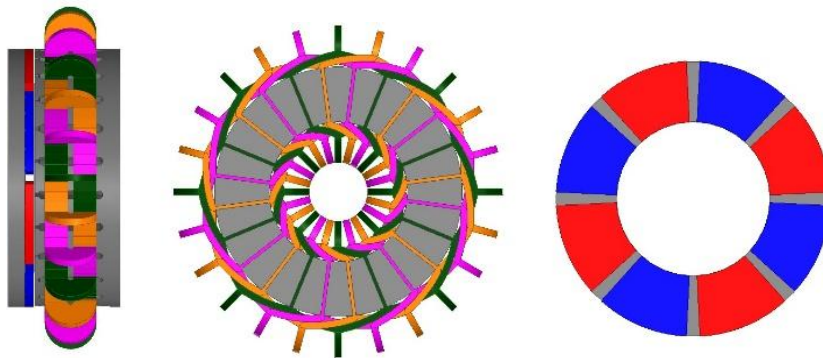
İkinci bölümde, üzerinde çalışılan motora ait parametreler ve motor yapısından bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde ise çalışılan motorda moment oluşumu anlatılmıştır. Dördüncü bölümde, motor farklı rotor konumlarında simüle edilerek analiz yapılmıştır. Bu analiz sonucunda oluşan en iyi moment değerine bağlı olarak da optimum başlangıç açısı belirlenmiştir. Beşinci bölümde ise sinüs zıt EMK dalga şekli elde edebilmek için önerilen rotor tasarımı gösterilmiş ve bu tasarım sonucunda elde edilen zıt EMK ve moment dalgalanması sonuçları verilmiştir.

2. Motor yapısı

Eksenel akılı motorlar uygulama yerine göre çeşitli avantajlar sağlamaktadır. Bu avantajlar literatürde birçok çalışmada dile getirilmiştir[11-13]. Motor performansı hemen hemen bütün uygulamalarda önceliklidir. Eksenel akılı motorlar profilleri gereği yüksek performansa sahiptir. Bu çalışmada da eksenel akılı sürekli mıknatıslı fırçasız DC motor modeli üzerinde durulmuştur. Yine bu motor türünün profili gereği moment dalgalanmalarına neden olmaktadır [11]. Bu dalgalanmayı azaltmanın yollarından birisi de zıt EMK' dalga şeklini sinüse yaklaştırmaktır [1-3]. Ayrıca fırçasız ve mıknatıslı motorların yüksek performans sağlayabilmeleri için gerekli parametrelerden birisi de rotor konum bilgisidir. Bu konum bilgisini alabilmek için enkoder, resolver gibi konum sensörleri geliştirilmiştir. Bunun dışında çeşitli konum tahmin etme metotları da bulunmaktadır [9-10]. Tablo 1' de bu makalede çalışılan eksenel akılı sürekli mıknatıslı motora ait bazı parametreler verilmiştir. Ayrıca bu motora ait üç boyutlu tasarım da Şekil 1' de gösterilmiştir.

Tablo 1. Çalışılan eksenel akılı sürekli mıknatıslı motora ait bazı parametreler

Parametre	Değer
İç yarıçap (r_i)	40 mm
Dış yarıçap (r_o)	75 mm
Stator kalınlığı	50 mm
Oluk sayısı	24
Kutup sayısı	8
Maksimum akım	175 A
Akım dalga şekli	Sinüs
Hız	2200 d/d
Mıknatıs dolum katsayısı	0.87
Mıknatıs yüksekliği	5 mm
Oluk açıklığı genişliği	2 mm
Hava aralığı	1 mm



Şekil 1. Çalışılan eksenel akılı makine topolojisi

Çalışılan motorda stator dağıtılmış sargı yapısına sahiptir. Sargılar 45°'lik açılarla stator oluklarına yerleştirilmiştir. Bu sargıların her bir fazı toplamda 40 sarımlı bobinlerden meydana gelmektedir. Her bir fazdan 175 A'lık sinüsoidal akım akmaktadır. Stator çeliği M250-35A çelik sınıfının karakteristik özelliklerine sahiptir.

50 mm yüksekliğe sahip çelik sac silindirik düzlemde sarılmıştır. Bu çelik sac üzerine de 24 adet 35 mm yüksekliğinde ve 5 mm genişliğindeki oluklar eşit aralıklarla yerleştirilmiştir. Rotor kısmında 8 mıknatıstan oluşan manyetik kutuplar bulunmaktadır. Bu mıknatıslar sırasıyla birbirine zıt kutuplu olarak ve yüzey mıknatıslı motor tipi gereği rotor çeliği üzerine yerleştirilmiştir. Mıknatıslar NdFeB (Neodyum Demir Bor) alaşımı ve N35 sınıfının karakteristik özelliklerine sahiptir ve eksen yönünde mıknatıslandırılmıştır. Rotor çeliği de aynı stator çeliği gibi silindirik düzlemde sarılan ve 10 mm yüksekliğe sahip çelik sacdan meydana gelmektedir. Stator ve rotor eksenel düzlemde yerleştirilmiş ve aralarında 1 mm hava aralığı bırakılmıştır.

3. Moment oluşumu

Elektrik makineleri tasarımında her bir geometrik yapının motor performansı üzerine etkileri vardır. Bu nedenle her bir parametre belirlenirken etkileşimde bulunacağı diğer parametreler dikkate alınmaktadır. Tablo 1' de çalışılan motora ait bazı parametreler verilmiştir. r_i iç yarıçapındaki elektromanyetik kuvvet denklemi (3), (1) nolu denklemle tanımlanan elektrik ve manyetik yükler (Q) ile (2) nolu denklemle tanımlanan mıknatısların aktif yüzey alanının (S) birleşiminden oluşmaktadır. Bu denklemler Şekil 2'de gösterilen iç yarıçaptan dış yarıçapa kadar her bir rdr yarıçapı için uygulanırsa, Şekil 1'deki çalışılan eksenel akılı sürekli mıknatıslı motora ait elektromanyetik moment oluşum denklemi (5)'deki gibi oluşmaktadır.

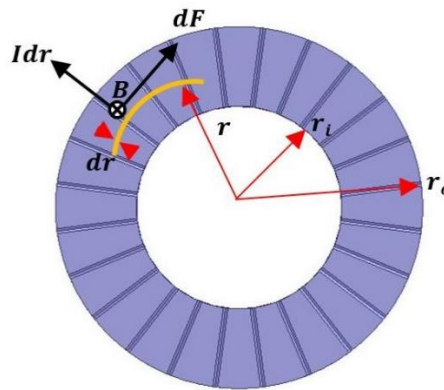
$$Q_{yük} = B_g J_{in} \quad (1)$$

$$S = \pi(r_o^2 - r_i^2) \quad (2)$$

$$F_{emf} = \pi B_g J_{in} (r_o^2 - r_i^2) \quad (3)$$

$$T_{emf} = F_{emf} r_i \quad (4)$$

$$T_{em} = \pi B_g J_{in} \int_{r_i}^{r_o} r_i r dr = \pi B_g J_{in} (r_o)^3 \alpha (1 - \alpha^2) \quad (5)$$



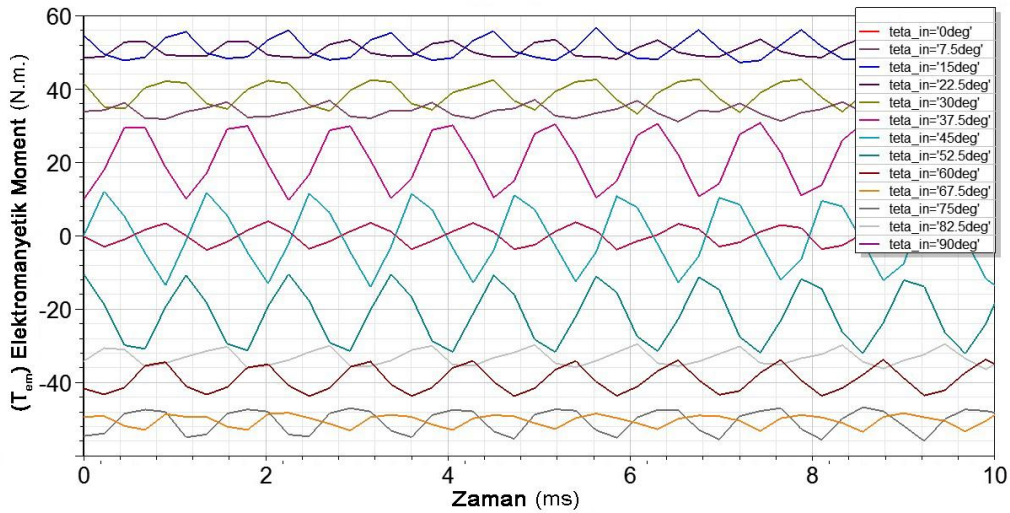
Şekil 2. Eksenel akılı sürekli mıknatıslı motorlarda moment oluşum prensibi

Burada J_{in} , r_i iç yarıçapındaki akım yoğunluğunu, B_g hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğunu, α ise r_i/r_o ile hesaplanan yarıçap oranını ifade etmektedir. Şekil 2’de moment oluşum prensibi görsel olarak anlatılmaktadır. Herhangi bir noktadaki manyetik akı yoğunluğu, yine aynı noktadan geçen akım sonucunda uygulanan itme kuvveti şeklindeki gibi oluşmaktadır. Buradaki moment oluşumu, manyetik akının yoğunluğuna, yarıçap uzunluklarına ve akım yoğunluğuna bağlıdır. Ancak momentin kalitesi de bu vektörel büyüklüklerin açısına bağlıdır. Manyetik akı yoğunluğunun Şekil 2’deki gibi tam dik olabilmesi önemlidir. Rotor konumu ve başlangıç açısının önemi de manyetik akının dikliğini sağladığı için kritik öneme sahiptir. Bu olgunun simülasyonu ve sonuçları da dördüncü bölümde anlatılmaktadır.

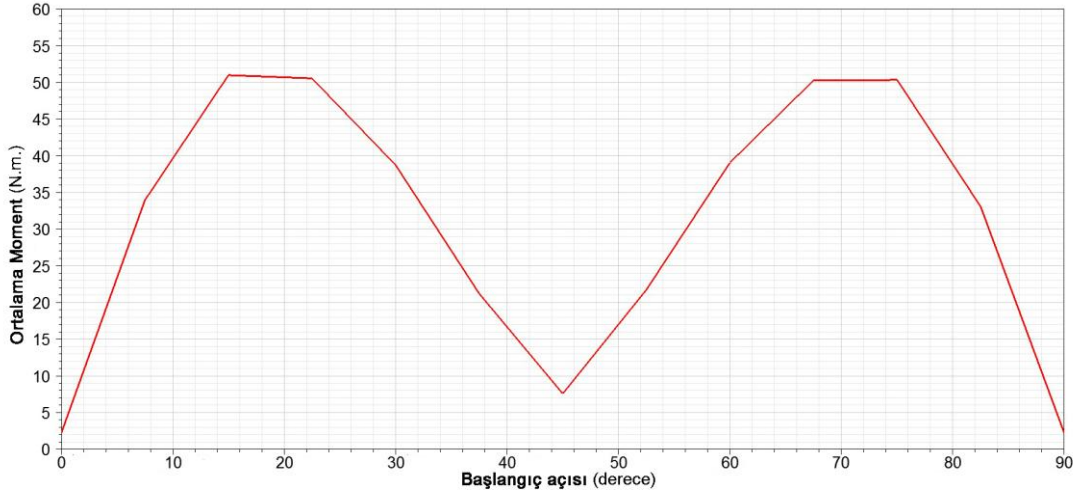
Ayrıca Şekil 2’de görülen stator çeliği ile rotor mıknatısları arasındaki hava aralığında oluşan manyetik akı değişimi (5) numaralı denklemden de anlaşılacağı üzere mıknatıslı motorlarda moment kalitesi için oldukça önemlidir.

4. Farklı başlangıç açılarının momente etkisi

En doğru şekilde manyetik analiz yapabilmek için, optimum başlangıç noktasının belirlenmesi gerekmektedir. Çünkü farklı başlangıç açılara göre oluşan moment Şekil 3’te görüldüğü gibi oldukça farklı olmaktadır. Başlangıç açısı rotor manyetik kutuplarının (N-S) hareketsiz durumda iken buldukları konumdur. Bu açı bir referans noktasına göre belirlenmektedir. Yapılan çalışmada rotorda bulunan bir kutup çiftinin orta noktası x eksenine denk gelecek şekilde (0° olacak şekilde) belirlenmiştir. 2200 d/d dönüş hızında toplamda bir turdan fazla dönüş yapacak şekilde simülasyon yapılmıştır. 10 milisaniye süren her bir çalışma süresince motora ait moment değerleri kaydedilmiştir. Başlangıç pozisyonu 0° ile 90° arasında ve 7.5° adım aralıklarıyla ayarlanmıştır. Her bir adım süresi boyunca moment değerleri ölçülmüştür. Ortaya çıkan sonuçlar Şekil 3’te gösterilmektedir. Ortaya çıkan değerlere göre 15° ve 22.5° de maksimum moment değerleri elde edilmiştir. Şekil 4’teki grafiğe bakıldığında her bir adımdaki eksenel akılı motora ait ortalama moment değerleri görülmektedir. Bu değerlere göre de ortalama moment değerlerinin her 45° aralığında bir periyot oluşturduğu görülmektedir.



Şekil 3. Farklı başlangıç pozisyonlarında çalışan motorun moment değerleri



Şekil 4. Farklı başlangıç pozisyonlarına karşılık ortalama momentin değişimi

5. Zıt emk dalga şeklinin sinüse yaklaştırılması

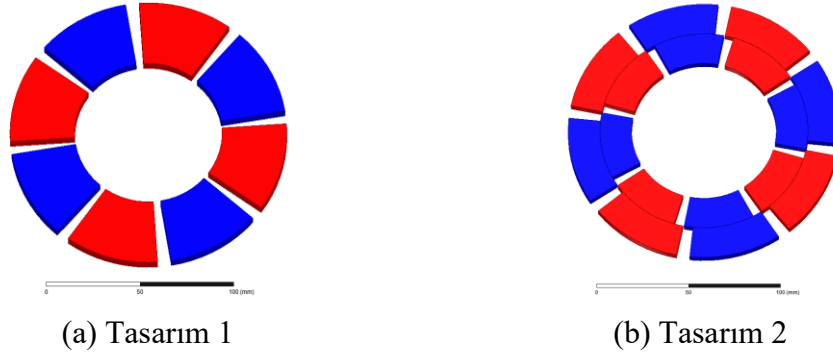
Zıt EMK dalga şekli motor herhangi bir kaynağa bağlanmadan, motorun başka bir motor ya da etken vasıtasıyla tahrik edilmesi ile ölçülmektedir. Esasında sonuçta oluşan dalga şekli stator sargılarında oluşan gerilimdir. Mıknatıslı motorlarda bu gerilimin dalga şekli önemlidir ve bu dalga şekli motorda yapılan fiziksel, tasarımsal değişikliklere bağlı olarak yeniden şekillenmektedir. Şekil 5'te zıt emk dalga şeklini sinüse yaklaştırmak için önerilen rotor mıknatısları tasarımı gösterilmektedir.

Sargılarda oluşan gerilim ise (6) numaralı denklemdeki gibi Faraday kanununa göre şekil almaktadır. Burada denklemin sol tarafındaki gerilim trafo gerilimi, sağ tarafındaki ise zıt EMK olarak da anılmaktadır. Stator sargılarında oluşan Zıt EMK gerilimi (6) numaralı denklemin sağ tarafındaki formülden hesaplanan hava aralığından geçen manyetik akı nedeniyle oluşmaktadır.

$$e_{emk} = L \frac{dI}{dt} + wI \frac{dL}{d\theta} \quad (6)$$

(6) numaralı denklemden anlaşılacağı üzere zıt EMK doğrudan mekanik hız ve endüktanstaki anlık değişime bağlıdır. Mıknatıslara adım ve kayma açısı verilmesi de endüktansı değiştirmektedir. Şekil 6, hem geleneksel hem de önerilen rotor mıknatıs tasarımlarının analizine ait elde edilen zıt EMK dalga şekillerini göstermektedir.

Şekil 6'daki zıt EMK dalga şekillerine bakılacak olursa tasarım bire ait dalga şekli trapezoidale yakınken, tasarım ikinin dalga şekli sinüs dalgaya daha yakındır. Zıt EMK dalga şeklinde sinüsten uzaklaştıkça moment dalgalanmasının arttığı bilindiğine göre [14], önerilen tasarımlar istenilen amaca göre başarılı sonuçlar vermektedir. Bu başarılı sonucun etkisi Şekil 7'deki moment grafiğine bakılarak da görülmektedir. Tablo 2'de verilen değerlere göre birinci tasarıma ait moment dalgalanması 5.744 N.m. iken, ikinci tasarıma ait moment dalgalanması 2.159 N.m. olmuştur.

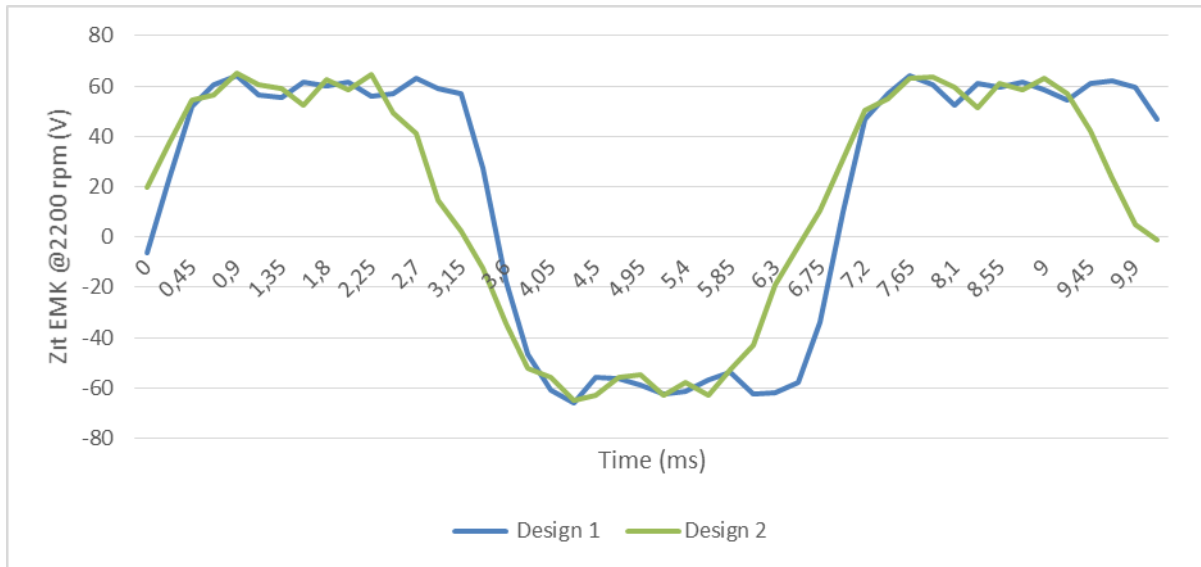


Şekil 5. Rotor mıknatısları tasarımları (a) Geleneksel rotor tasarımı (b) Önerilen rotor tasarımı

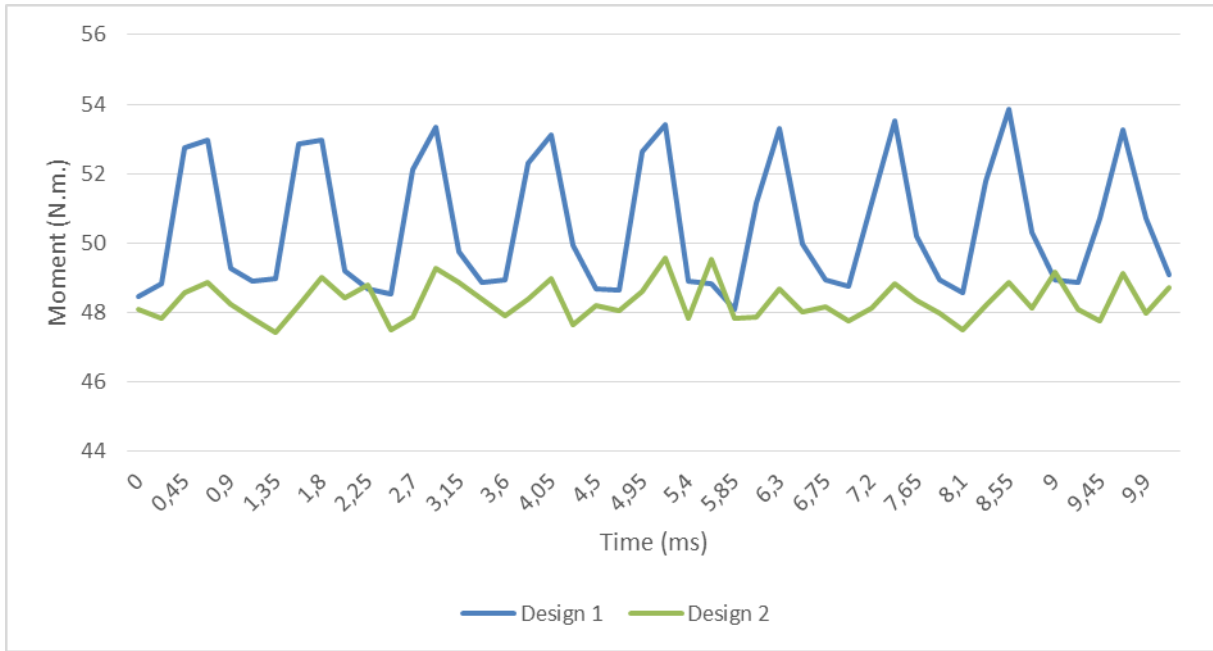
Sürücü kontrolü açısından daha avantajlı olan sinüs dalga şekli, moment dalgalanmasının azaltılması çalışmalarında ortalama momentteki azalma miktarı açısından da bir avantaja sahiptir. İkinci tasarımda %4.3'lük bir ortalama moment kaybı olurken, moment dalgalanmasında %62.4'lük bir azalma meydana gelmiştir. Moment dalga şeklinin düzlüğü birçok uygulama aranan bir özelliktir. Ayrıca, sinüs dalgalı zıt EMK'ya sahip motorlarda moment dalgalanması düşürülürken hem vuruntu momenti hem de moment dalgalanması azalmaktadır. Ancak kare dalgalı zıt EMK ya sahip motorlarda vuruntu momenti ile moment dalgalanması aynı anda düşürülememektedir [14].

Tablo 2. Her iki tasarım için ölçülen moment dalgalanması değerleri

	Tasarım I	Tasarım II
Ortalama Moment (N.m.)	50.521	48.32
Moment Dalgalanması (N.m.)	5.744	2.159



Şekil 6. Zıt EMK dalga şekillerinin karşılaştırması



Şekil 7. Moment dalgalanmasının karşılaştırılması

6. Değerlendirme ve sonuçlar

Bu çalışmada yüzey mıknatıslı aksenal akıllı motorlarda adım ve kayma uygulanarak zıt EMK dalga şeklinin sinüse yaklaştırılması ile moment dalgalanmasının azaltılması incelenmiştir. Sonuçta önerilen rotor mıknatıs tasarımı ile elde edilen zıt EMK dalga şekli sinüse daha yakındır ve gerçekleşen moment dalgalanması ise %62.4 oranında azaltılmıştır. Moment dalgalanmasındaki azalmaya karşın ortalama momentteki azalma %4.3 düzeyinde kalmıştır. Yapılan çalışma ile zıt EMK dalga şeklinin sinüse yaklaşmasının, moment dalgalanmasını azaltıcı yönde etki yaptığı görülmüştür.

Teşekkür

Bu makalede yapılan çalışmalar TÜBİTAK tarafından sağlanan 2214-A yurtdışı doktora sırası araştırma bursu kapsamında desteklenmiştir.

Kaynaklar

- [1] S. Shah, T. Lipo, and B. Kwon, "Modeling of novel permanent magnet pole shape SPM motor for reducing torque pulsation," *Magn. IEEE Trans.*, 2012, vol. 48, no. 11, pp. 4626-4629.
- [2] G. J. Li, B. Ren, Z. Q. Zhu, Y. X. Li, J. Ma, "Cogging torque mitigation of modular permanent magnet machines", *IEEE Trans. Mag.*, 2015, vol. 52, no. 1, pp. 1-10, Sep. 9.
- [3] S. Kumar, W. Zhao, Z. S. Du, T. A. Lipo, B.-I. Kwon, "Design of ultrahigh speed axial-flux permanent magnet machine with sinusoidal back EMF for energy storage application", *IEEE Trans Magn.*, 2015, vol. 51, no. 11, pp. 1-4, Nov.
- [4] M. J. Corley, R. D. Lorenz, "Rotor position and velocity estimation for a permanent magnet synchronous machine at standstill and high speeds", *Proc. Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting*, 1996, vol. 1, pp. 36-41.
- [5] P. Schmidt, M. Gasperi, C. Ray, A. Wijenayake, "Initial rotor angle detection of a nonsalient pole permanent magnet synchronous machine", *Conf. Rec. 32nd IEEE IAS Annu. Meeting*, 1997, vol. 1, pp. 459-463, Oct.

- [6] S. Nakashima, Y. Inagaki, and I. Miki, "Sensorless initial rotor position estimation of surface permanent-magnet synchronous motor," *IEEE Trans. Industry Applications*, 2000, vol. 36, no. 6, pp. 1598-1603.
- [7] Hasni, M., Touhami, O., Ibtouen, R., Fadel, M., Caux, S. "Estimation of synchronous machine parameters by standstill tests" *Mathematics and Computers in Simulation*, 2010, Vol. 81 , pp. 277-289.
- [8] D. Basic, F. Malrait, P. Rouchon, "Initial rotor position detection in PMSM based on low frequency harmonic current injection," in *Proc. of the 14 International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC)*, 2010, pp. T4-1-T4-7.
- [9] X. Wu, H. Wang, S. Huang, K. Huang and L. Wang., "Sensorless Speed Control with Initial Rotor Position Estimation for Surface Mounted Permanent Magnet Synchronous Motor Drive in Electric Vehicles" *Energies*, 2015, 8, 11030-11046.
- [10] C. Silva, G.M. Asher, M. Sumner & K.J. Bradley, "Sensorless Rotor Position Control in a Surface Mounted PM Machine Using HF Rotating Injection", *EPE Journal*, 2003, 13:3,12-18.
- [11] Gieras J. F., Kamper M. J., and Wang R.J., *Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines*. Springer, Dordrecht, NL: Kluwer, 2005.
- [12] Cetin E., Daldaban F. "Otomotiv Uygulamalarında Kullanılacak Aksenal Akıllı Sürekli Mıknatıslı BLDC Motor Tasarım Modeli", *OTEKON, 7. Otomotiv Teknolojileri Kongresi*, 2014, ss.24-27, BURSA, 26 – 27 Mayıs.
- [13] Cetin E., Daldaban F., "Prototyping of Axial Flux Permanent Magnet Motors", *ISITES 2015*, pp.21-25, Valencia, ISpanya.
- [14] T. M. Jahns, W. L. Soong, "Pulsating torque minimization techniques for permanent magnet ac drives - A review", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 1996, vol. 43, pp. 321-330, Apr.