

Sürekli Mıknatıslı Akı Anahtarlama Motorunda Mıknatıs, Stator ve Rotor Geometrilerinin Tork ve Tork Dalgalanmasına Etkisinin İncelenmesi

SümeYYe ÇARKIT^{1*}  Nurettin ÜSTKOYUNCU²  Taner ÇARKIT³ 

¹Kırklareli Üniversitesi, Gıda Arzı Güvenliği ve Dijitalleşme Ortak Uygulama ve Araştırma Merkezi, Kırklareli

²Erciyes Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kayseri

³Kırklareli Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kırklareli

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 11/12/2023
Düzeltilme: 08/01/2024
Kabul: 24/01/2024

Anahtar Kelimeler

Sürekli mıknatıslı akı anahtarlama motor
Sonlu elemanlar yöntemi
Ortalama tork
Tork dalgalanması

Articel Info

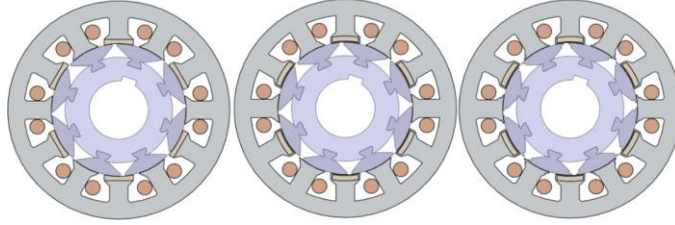
Research article
Received: 11/12/2023
Revision: 08/01/2024
Accepted: 24/01/2024

Keywords

Permanent magnet flux
switched motor
Finite element method
Average torque
Torque ripple

Grafik Özeti (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada, referans motor üzerinde tasarımsal değişiklikler yapılarak uygun tork değeri, düşük tork dalgalanması, üretim kolaylığı ve geniş hız aralığında çalışma yeterliliği elde edilmeye çalışılmıştır. / In this study, it has been tried to obtain appropriate torque value, low torque fluctuation, ease of production, and operating capability in a wide speed range by making design changes on the reference engine.



Şekil A: Motor yapılarının kesit görünüşleri, sırasıyla: Referans motor, Motor-1, Motor-2 / **Figure A:** Cross-sectional appearances of motor structures, respectively: Reference motor, Motor-1, Motor-2

Önemli Noktalar (Highlights)

- Literatürdeki motorun yapısal değişiklikleri ile yeni motorların tasarlanması / Designing new motors with structural changes of the motor in the literature
- Motorun kutuplarına uygulanan değişikliklerle optimum tasarımın elde edilmesi / Achieving optimum design by changes applied to the poles of the motor
- Literatürdeki motor ile tasarlanan motorların tork ve tork dalgalanması açısından karşılaştırılması / Comparison of the motor in the literature and the designed motors in terms of torque and torque ripple

Amaç (Aim): Motor-1 ve Motor-2 olarak adlandırılan iki motor yapısı, düşük tork dalgalanma oranı ve daha kolay imalat süreci sağlamak amacıyla sunulmuştur. / Two motor structures called Motor-1 and Motor-2 are presented to provide a low torque ripple rate and an easier process of manufacturing.

Özgünlük (Originality): Referans motorun mıknatıs geometrisinde ve konumuna, stator ve rotor çıkıntılarında değişiklikler yapılarak tork dalgalanmasında ciddi düşüişlere ulaşılmıştır. / Significant reductions in torque ripple have been achieved by making changes to the magnet geometry and position of the reference motor, as well as the stator and rotor protrusions.

Bulgular (Results): Önerilen her iki motor yapısında da referans motora göre ortalama tork değerinde yaklaşık %5 oranında bir azalma olduğu görülmektedir. Öte yandan tasarlanan ikinci motorun yapısı sayesinde tork dalgalanmasında ortalama %40 oranında azalma elde edilmektedir. / It is observed that there is a decrease of approximately 5% in the average torque value in both two proposed motor structures when compared with that of the reference motor. On the other hand, thanks to the second designed motor structure, an average of 40% reduction in the torque ripple is obtained.

Sonuç (Conclusion):

Literatürdeki referans motora göre daha kolay üretim sağlamak ve minimum tork dalgalanması elde etmek için iki yeni motor yapısı önerilmiştir. Elde edilen sonuçlar göstermektedirki, tasarlanan motorlar birçok uygulamadaki avantajlarıyla diğer elektrik motorlarına oldukça çekici bir alternatif oluşturmaktadır. / Two new motor structures have been proposed to ensure easier production and to achieve minimum torque fluctuation compared to the reference engine in the literature. The results obtained show that the designed motors are a very attractive alternative to other electric motors with their advantages in many applications.



Sürekli Mıknatıslı Akı Anahtarlama Motorunda Mıknatıs, Stator ve Rotor Geometrilerinin Tork ve Tork Dalgalanmasına Etkisinin İncelenmesi

SümeYYe ÇARKIT^{1*} Nurettin ÜSTKOYUNCU² Taner ÇARKIT³

¹Kırklareli Üniversitesi, Gıda Arzı Güvenliği ve Dijitalleşme Ortak Uygulama ve Araştırma Merkezi, Kırklareli

²Erciyes Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kayseri

³Kırklareli Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kırklareli

Makale Bilgisi

Research article
Received: 11/12/2023
Revision: 08/01/2024
Accepted: 24/01/2024

Anahtar kelimeler

Sürekli mıknatıslı akı anahtarlama motor
Sonlu elemanlar yöntemi
Ortalama tork
Tork dalgalanması

Öz

Bu çalışmada, referans alınan bir sürekli mıknatıslı akı anahtarlama motora (SMAAM) ait mıknatıs geometrisi ve konumu ile stator ve rotor çıkıntılarında değişiklikler yapılarak yeni tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Referans tasarım olarak daha önce literatüre sunulmuş olan üç fazlı bir SMAAM temel alınmış ve tüm motor yapılarına ait benzetim çalışmaları yapılmıştır. Adil bir kıyaslama yapılabilmesi için benzetim çalışmalarında tüm SMAAM tasarımlarında temel parametre ve kullanılan malzemeler korunmuştur. Yapılan tasarımsal değişiklikler ile kabul edilebilir tork değeri beraberinde düşük tork dalgalanması, üretim kolaylığı ve geniş hız aralığında çalışma yeterliliği elde edilmeye çalışılmıştır. Analiz çalışmaları, elektrik makinelerinin analizinde yaygın bir şekilde kullanılmakta olan ve oldukça doğru sonuçlar verebilen sonlu elemanlar yöntemi (SEY) temel alınarak gerçekleştirilmiştir. Referans alınmış olan ve tasarlanan yeni SMAAM yapılarına ait elde edilen sonuçlar kapsamlı bir şekilde karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar sonunda tork değerinde kabul edilebilir azalmalar görülürken tork dalgalanmasında ciddi düşüşler olduğu sonucuna varılmıştır.

Investigation of the Effects of Magnet, Stator and Rotor Geometries on Torque and Torque Ripple in Permanent Magnet Flux Switching Motor

Article Info

Araştırma makalesi
Başvuru: 11/12/2023
Düzelme: 08/01/2024
Kabul: 24/01/2024

Keywords

Permanent magnet flux
switched motor
Finite element method
Average torque
Torque ripple

Abstract

In this study, new designs have been realized by changing the magnet geometry and position, stator and rotor protrusions of a reference permanent magnet flux switching motor (PMFSM). As a reference design, a three-phase PMFSM which was previously presented in the literature, was taken as a basis and simulation studies of all motor structures were carried out. In order to make a fair comparison, the basic parameters and materials in all PMFSM designs are preserved in the simulation studies. With the design changes, it has been tried to achieve acceptable torque value, low torque ripple, ease of production and working sufficiency in a wide speed range. Analysis studies were carried out on the basis of the finite element method (FEM), which is widely used in the analysis of electrical machines and can give very accurate results. The results obtained for the referenced and designed new PMFSM structures were extensively compared. These comparisons are concluded that while acceptable decreases have been observed in the torque value, there are serious decreases in the torque ripple.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Sürekli mıknatıslı akı anahtarlama motorlar (SMAAM) yakın bir geçmişe sahip yeni bir elektrik motor çeşidi olup sürekli mıknatıslı senkron motorlar (SMSM) ile anahtarlama relüktans motorların (ARM) bir kombinasyonu olarak kabul edilmektedir [1]. Bu nedenle SMAAM'ler, hem

SMSM'lerin hem de ARM'lerin sahip olduğu yüksek güç yoğunluğu, düşük bakım maliyeti, kolay kontrol edilebilirlik ve yüksek çalışma hızı gibi avantajlara sahiptir [2-4].

SMAAM'lerin sahip olduğu diğer bir avantaj ise hem statoru hem de rotoru çıkıntılı yapıya sahip olup rotorunda sargı ya da sürekli mıknatıs

bulunmamasıdır. SMAAM'lerin sadece statorundaki çıkıntılı kutuplarda sürekli mıknatıs ve armatür sargıları bulunmaktadır [5, 6]. SMAAM'lerin sahip olduğu çift çıkıntılı yapı ve beraberinde meydana gelen akı saçılmaları nedeniyle ortaya çıkan tork dalgalanması önemli bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır [7]. Tork dalgalanması akustik gürültüye, hızda dalgalanmaya, titreşime neden olmakta ve motor ömrünü kısaltmaktadır [8]. Dolayısıyla düşük bir tork dalgalanması beraberinde yüksek tork elde edilmesi literatürde yapılmakta olan çalışmaların temelini teşkil etmektedir. Literatürde motor tasarımı ve kontrol yöntemleri göz önünde bulundurularak tork dalgalanmasının azaltılabilmesi için yapılmış çok sayıda çalışma bulunmaktadır [8-10]. Sürekli mıknatıs (SM) geometrisinin tasarımsal optimizasyonu, geleneksel SM motorlarının tork karakteristiklerinin iyileştirilebilmesi için tercih edilen tipik bir yöntemdir [11]. Bununla birlikte, SMAAM'lerde SM'ler, stator kutuplarına yerleştirildiği için SM geometrisinin optimize edilmesi yerine rotor yapısının optimize edilmesi daha uygun bir yöntem olarak görülmektedir [7].

Bu çalışmada, Zulu vd.'nin [2], 2012 yılında geliştirdikleri SMAAM yapısı temel alınarak kolay üretilebilir özelliklerine sahip ve daha düşük tork dalgalanması sağlayabilecek yeni yapıların tasarlanması amaçlanmıştır. İlerleyen kısımlarda ortaya konan yapılardan ilki "Motor-1" ve ikincisi ise "Motor-2" olarak adlandırılmıştır. İlk tasarlanan Motor-1 yapısında, statordaki SM'lerin konumu ve geometrisi değiştirilmiş, sunulan Motor-2 yapısında ise, Motor-1 yapısına ek olarak stator ve rotor kutup başlarına çentik yapısı eklenmiştir. Referans alınan ve tasarlanan motor yapıları, adil bir karşılaştırma yapılabilmesi için aynı tasarım parametreleri ve malzemeler kullanılarak analiz edilmiştir. Tüm motor yapılarının analizleri, sonlu elemanlar yöntemi (SEY) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

2. SÜREKLİ MIKNATISLI AKI ANAHTARLAMALI MOTORLAR (PERMANENT MAGNET FLUX SWITCHING MOTORS)

Akı anahtarlamalı motorların (AAM) hem stator hem de rotor kutupları çıkıntılı yapıya sahip olup statorunda mıknatıs bulunan akı anahtarlamalı motorlar, sürekli mıknatıslı akı anahtarlamalı motor olarak isimlendirilmektedir. SMAAM'lerin statorunda hem sürekli mıknatıslar hem de armatür sargıları bulunmaktadır. Rotorlarında ise herhangi bir sargı ya da mıknatıs bulunmamaktadır [12]. İlerleyen kısımlarda referans alınan ve önerilen SMAAM yapıları hakkında detaylar verilmiştir.

2.1. Referans Tasarım (Reference Design)

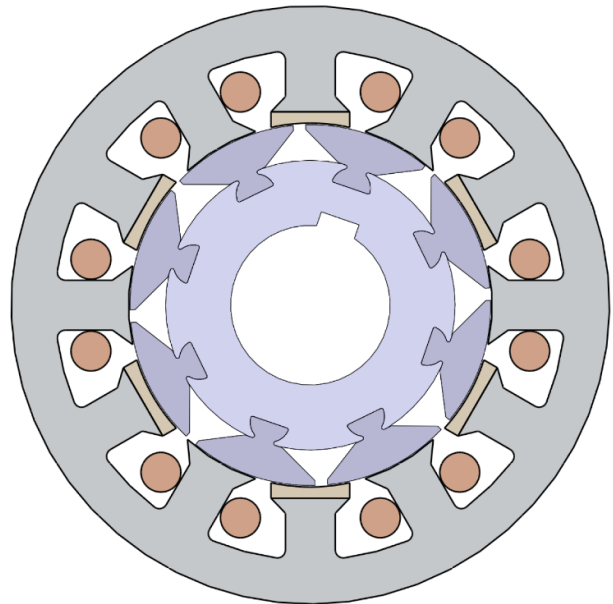
Zulu vd.'nin gerçekleştirdiği 12 stator kutbuna ve 8 segmentli rotor kutbuna sahip üç fazlı referans SMAAM yapısı Şekil 1'de gösterilmiş ve referans tasarıma ait tasarım parametreleri Tablo 1'de verilmiştir [2]. Referans alınmış olan SMAAM'nin iki boyutlu SEY ile gerçekleştirilen analizleri sonucunda elde edilen statik tork grafiği ise Şekil 2'de gösterilmiştir. Referans olarak alınan çalışmada, SEY ile elde edilen sonuçlar prototip testlerinde elde edilen sonuçlarla doğrulanmıştır [12]. Şekil 2'de gösterilen statik tork grafiğinde armatür akımı değeri sıfır iken sürekli mıknatıslar sebebiyle bir vuruş torkunun oluştuğu görülmektedir. Vuruş torku, SM içeren makinelerde stator kutuplarına yerleştirilen mıknatıslar ile rotor kutupları arasındaki manyetik etkileşim sonucu ortaya çıkmaktadır [13]. Referans motorun 500 dev/dak hızda çalışırken sahip olduğu tork grafiği ise Şekil 3'te gösterilmektedir. Armatür sargılarına uygulanan akım değerleri ise Eş. 1'de verilmiştir.

$$I_A = I_{max} \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

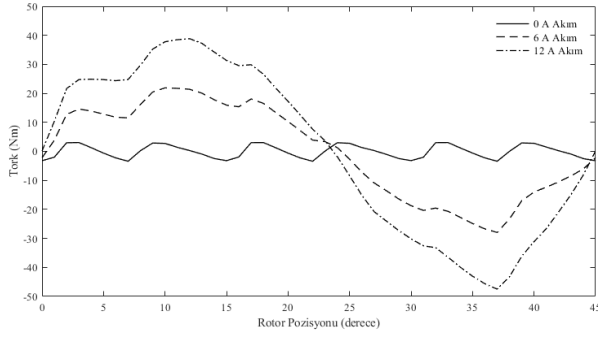
$$I_B = I_{max} \cdot \sin(\omega \cdot t - 120^\circ) \quad (1)$$

$$I_C = I_{max} \cdot \sin(\omega \cdot t - 240^\circ)$$

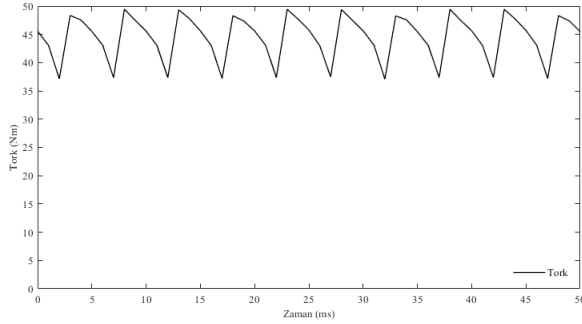
Eş. 1'deki I_A , I_B ve I_C değerleri sırasıyla A, B ve C armatür sargılarına uygulanan akım değerlerini, I_{max} maksimum akım değerini, ω açısal hızı, t ise zamanı ifade etmektedir. Eş. 2'de I_{max} değeri tanımlanırken, Eş. 3'de frekans bilgisi verilmiştir.



Şekil 1. Referans alınan SMAAM yapısı (Referenced PMFSM structure)



Şekil 2. Referans motor tasarımına ait statik tork karakteristiği (Static torque characteristic of the reference motor design)



Şekil 3. I_{max} değeri için referans motor tasarımına ait tork karakteristiği (Torque characteristic of the reference motor design for I_{max} value)

Tablo 1. Referans alınan SMAAM'ye ait tasarım parametreleri (Design parameters of the referenced PMFSM)

Eksenel uzunluk (mm)	150
Stator dış yarıçapı (mm)	75
Stator iç yarıçapı (mm)	45.6
Stator et kalınlığı (mm)	11
Stator kutup genişliği (mm)	12.5
Stator kutup açısı (°)	25
Stator kutup açıklığı açısı (°)	5
Hava aralığı (mm)	0.35
Armatür sarım sayısı (tur)	100
İletken tel çapı (mm)	1.25
İletken toplam alanı (mm ²)	491
Rotor dış yarıçapı (mm)	45.25
Rotor iç yarıçapı (mm)	30
Rotor kutup açısı (°)	41
Rotor kutup açıklığının açısı (°)	4
Mıknatıs yüzey alanı (mm ²)	62.92

Eş. 2'deki I akımı, Eş. 3'teki f frekansı, n motorun hızını, P ise rotor kutup sayısını ifade etmektedir. Eş. 4'de τ_{max} , τ_{min} ve τ_{ort} sırasıyla maksimum tork,

minimum tork ve ortalama tork değerlerini ifade etmektedir. Referans motorun 500 dev/dak hızda üretmiş olduğu ortalama tork değeri 44.5 Nm ve bu esnada ortaya çıkan tork dalgalanma değeri %27.8 olmaktadır. Tork dalgalanma değeri, Eş. 4'deki matematiksel ifade ile hesaplanmaktadır [7].

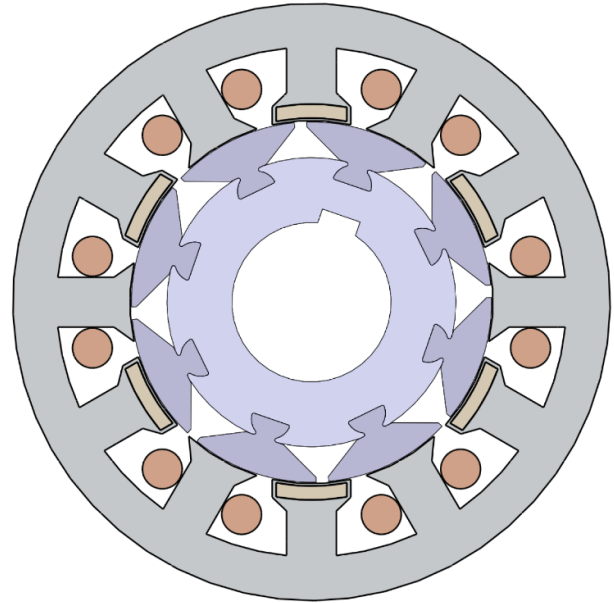
$$I_{max} = \sqrt{2} \cdot I \quad (2)$$

$$f = \frac{n \cdot P}{120} \quad (3)$$

$$\% \text{ Dalgalanma} = \frac{\tau_{max} - \tau_{min}}{\tau_{ort}} \quad (4)$$

2.2. Motor-1'in Tasarımı (Design of the Motor-1)

Referans motorda yapılan revizyon sonucunda Şekil 4'te gösterilen Motor-1 isimli ilk motor elde edilmiştir. Tasarımda daha kolay bir üretimin sağlanabilmesi adına sürekli mıknatıslar stator kutbuna gömülmüştür. Bununla birlikte adil bir karşılaştırma yapılabilmesi için referans tasarıma ait tasarım parametreleri korunmuş ve sürekli mıknatısların birim hacminin aynı kalmasına özellikle özen gösterilmiştir.



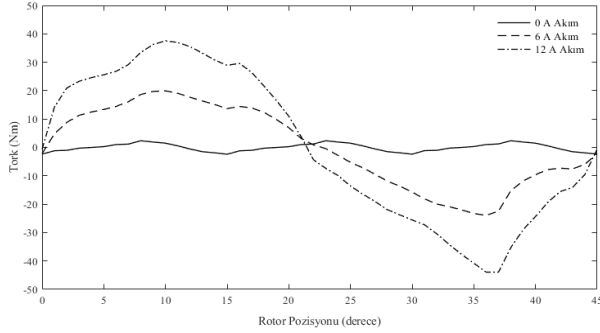
Şekil 4. Motor-1'in yapısı (Structure of Motor-1)

Motor-1 tasarımında, motora ait üretim sürecinin kolaylaştırılması hedeflenmiş olup bunun yanında motor tarafından üretilecek tork değerinin de kabul edilebilir sınırlar içerisinde kalmasına dikkat edilmiştir. Motor-1'in SEY ile analizleri sonucunda elde edilen statik tork karakteristiği Şekil 5'te gösterilmiştir.

2.3. Motor-2'nin Tasarımı (Design of the Motor-2)

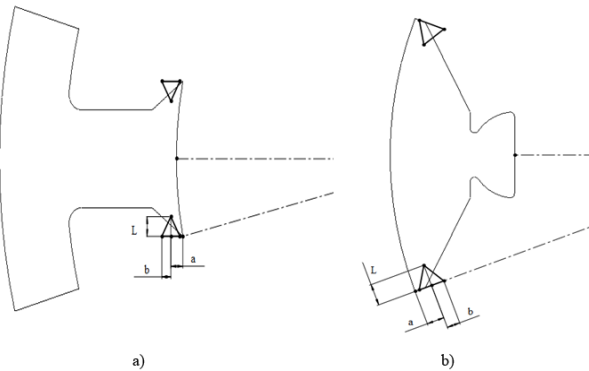
Literatürde gömülü sürekli mıknatıslarda tork dalgalanmasının azaltılabilmesi için rotora ilave

deliklerin açılması, rotor yüzeyine çentik açılması, mıknatıslar için özel cepler açılması, kademeli ve eliptik rotor kullanımı gibi farklı uygulamalar ve çalışmalar yapılmıştır [7, 14, 15]. Bunlardan birisi olan çentik açılması dikkate alınarak Motor-2 tasarımı gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5. Motor-1 tasarımına ait statik tork karakteristiği (Static torque characteristic of Motor-1 design)

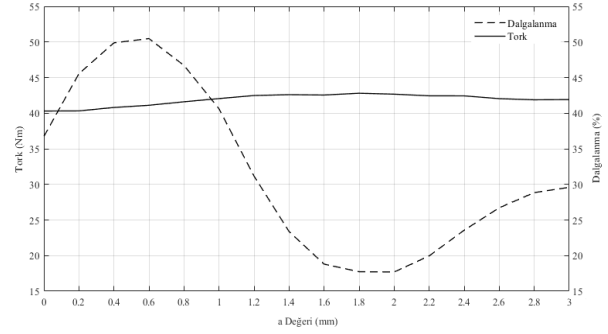
Motor-2 tasarımında, Motor-1 tasarımına ek olarak stator ve rotor kutup başlarında çentik yapısı oluşturulmuştur. Şekil 6'da çentik yapısını belirleyen a , b ve L parametreleri gösterilmiştir. Daha iyi tork karakteristiklerinin elde edilebilmesi için çentiğin geometrisi ve konumu değiştirilerek revizyonlar yapılmıştır. Burada a çentiğin en uç noktaya olan mesafesini, b çentik genişliğini, L ise çentik derinliğini ifade etmekte olup ilgili parametreler için yapılan çalışmalar sonucunda tasarımsal uygunluk göz önüne alınarak belirli referans aralıklar belirlenmiştir.



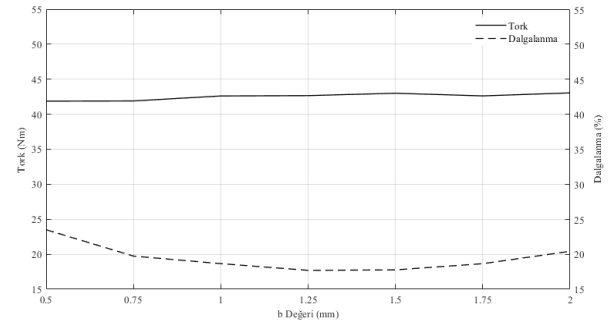
Şekil 6. Motor-2 tasarımına ait çentik geometri parametreleri a) Stator kutbu b) Rotor kutbu (Notch geometry parameters of Motor-2 design a) Stator pole b) Rotor pole)

Vuruntu torku üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğundan, çentiğin konumu kutup başlarından çok uzakta olmamalıdır, bu nedenle a parametresinin değeri 0 mm ile 3 mm aralığında seçilmiştir. Ayrıca çentiklerin kutupların yanlarında bulunması beraberinde çentik derinliği ve çentik genişliği manyetik relüktansı doğrudan etkilediğinden daha yüksek ortalama tork elde

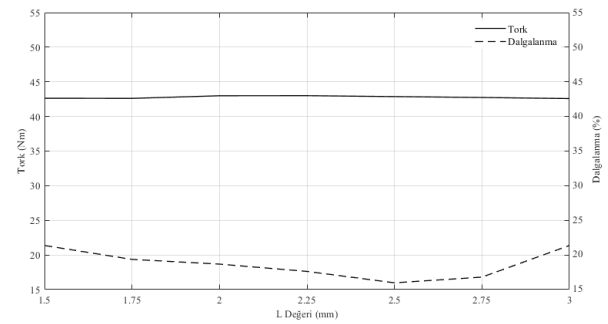
edilebilmesi için çentik derinliği ve çentik genişliği küçük olmalıdır [16]. Bu çalışmada L değeri 1.5 mm ile 3 mm aralığında, b ise 0.5 mm ile 2 mm aralığında seçilmiştir.



Şekil 7. a parametresinin farklı değerleri için elde edilen tork ve dalgalanma karakteristiği (Torque and ripple characteristics obtained for different values of parameter a)



Şekil 8. b parametresinin farklı değerleri için elde edilen tork ve dalgalanma karakteristiği (Torque and ripple characteristics obtained for different values of the b parameter)



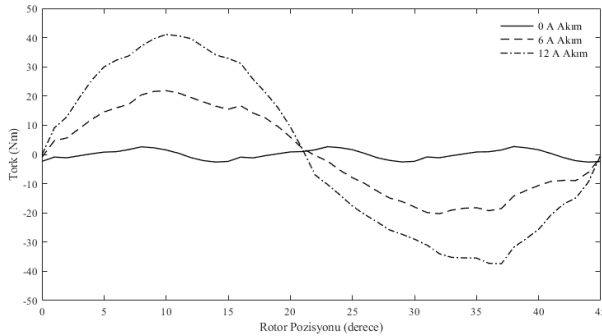
Şekil 9. L parametresinin farklı değerleri için elde edilen tork ve dalgalanma karakteristiği (Torque and ripple characteristics obtained for different values of the L parameter)

İlk olarak en düşük tork dalgalanmasının sağlanabilmesi amacıyla a parametresinin en uygun değerinin belirlenebilmesi için $b=1.25$ mm ve $L=2.2$ mm değerleri dikkate alınmıştır. 0 mm ile 3 mm arasında a değerinin 0.2 mm aralıklarla değiştirilmesi suretiyle uygulanan 2B SEY analizleri sonucunda elde edilen tork ve tork dalgalanması karakteristikleri Şekil 7'de gösterilmiştir. Şekil 7'den görülebileceği üzere $a=2$ mm değerinde yalnızca %4.3 oranında azalan

ortalama tork karşılık tork dalgalanması minimum değerine sahip olmaktadır.

Benzer şekilde, b parametresinin en uygun değerinin belirlenebilmesi için; $a=2$ mm ve $L=2.2$ mm değerleri sabit tutulmuştur. 0.5-2 mm arasında olan b parametresinin değeri 0.25 mm aralıklarla değiştirilerek yapılan 2B SEY analizleri sonunda elde edilen tork ve tork dalgalanma karakteristiği Şekil 8'de gösterilmiştir. Tork dalgalanmasının minimum değeri b parametresi 1.5 mm iken elde edilmiştir. Son olarak, $a=2$ mm ve $b=1.5$ mm değerleri sabit tutularak L parametresine ait değerler 0.25 mm aralıklarla 1.5 mm'den 3 mm'ye kadar değiştirilerek 2B SEY analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler neticesinde, Şekil 9'daki tork ve tork dalgalanma karakteristiğinden $L=2.5$ mm değerinde tork dalgalanmasının minimum olduğu sonucu elde edilmiştir.

Gerçekleştirilen çalışmalarda, tork dalgalanması hususunda optimum sonuçları veren parametre değerlerinin elde edilmesine çalışılmış olup a , b ve L parametrelerine ait bu değerler sırasıyla 2.0 mm, 1.5 mm ve 2.5 mm olarak tespit edilmiştir. İlgili çentik parametre değerleri ile tasarlanan Motor-2 yapısına ait statik tork karakteristikleri Şekil 10'da gösterilmiştir.



Şekil 10. Motor-2 tasarımına ait statik tork karakteristiği (Static torque characteristic of the Motor-2 design)

3. BENZETİM SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ (EVALUATION OF SIMULATION RESULTS)

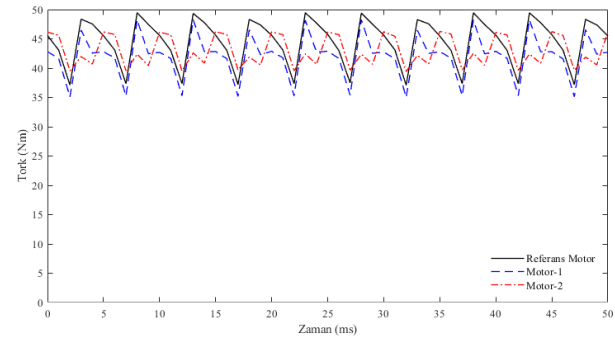
Tablo 2'de özetlendiği üzere, referans alınan motor ile kıyaslandığında; tasarlanan iki motor yapısında da ortalama tork değerinde düşüş olduğu gözlenmiştir. Tablo 2'den de açıkça görülebileceği üzere motor üretiminin kolay bir şekilde yapılabilmesi adına gerçekleştirilen ilk tasarımda ortalama tork ve tork dalgalanması ile ilgili olumsuzluklar meydana gelmiştir. Yapılan ilk tasarımın bu dezavantajlarını ortadan kaldırmak için yapılan ikinci tasarımda ise ilk tasarıma göre bir miktar ortalama tork değerinde iyileşme sağlanmış

olsa dahi referans tasarımdan daha düşük bir ortalama tork değeri elde edilmiştir. Buna karşın tork dalgalanması ile ilgili her iki motora göre çok ciddi avantajlar sağlanmıştır.

Tablo 2. Motorların analiz sonuçlarının karşılaştırması (Comparison of engine analysis results)

SMAAM Çeşidi	Ortalama Tork (Nm)	Değişim (%)	Tork Dalgalanması (%)	Değişim (%)
Referans	44.5	0.0	27.8	0.0
Motor-1	42.0	-5.6	31.5	13.3
Motor-2	42.6	-4.3	16.7	-39.9

Motorlar, 500 dev/dak nominal hızda çalışırken elde edilen tork karakteristikleri Şekil 11'de karşılaştırılmıştır.



Şekil 11. I_{max} değeri için referans tasarım ve gerçekleştirilen tasarımların tork grafiği (Torque graph of reference design and realized designs for I_{max} value)

Gerek Tablo 2'de verilen değerler gerekse de Şekil 11'de gösterilen grafikler incelendiğinde Motor-2 tasarımın tork dalgalanmasında çok önemli bir iyileşme sağladığı görülmektedir. Özellikle segmental yapıda olan tasarımlarda tork dalgalanmasının çok ciddi bir problem olduğu düşünüldüğünde Motor-2 tasarımının sunduğu bu avantaj ile önemli bir alternatif sağladığı görülmektedir. Literatürde yapılan örnek bir çentik uygulamasında tork dalgalanma değerinde %37.2'lik bir azalma tespit edilmişken [7], bu çalışmadaki çentik uygulamasında da %39.9'luk bir azalma elde edilmiştir. Literatürde aynı amaçla yapılan farklı çalışmalarla karşılaştırıldığında bu çalışmadaki elde edilen sonuçların kabul edilebilir olduğu görülmektedir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, klasik SMAAM'lerden farklı olan radyal eksenli mıknatısa sahip 12 stator kutuplu ve

8 rotor kutuplu daha önceden literatüre sunulmuş olan bir SMAAM referans alınarak tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Referans alınan SMAAM üzerinde üretimin daha kolay olarak gerçekleştirilebilmesi için mıknatıs geometrisi ile konumu değiştirilmiştir. Tork dalgalanmasının azaltılabilmesi için ise kutup başlarına çentik uygulaması yapılmış ve iki yeni motor tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarımlar, sonlu eleman analizleri neticesinde elde edilen ortalama tork ve tork dalgalanması değerleri dikkate alınarak karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, ortalama tork açısından değerlendirildiğinde referans tasarımın gerisinde kaldığı görülen yeni tasarımlarda özellikle çentik uygulamasının tork dalgalanmasını ciddi oranda düşürdüğü sonucuna ulaşılmıştır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Çalışma herhangi bir araştırma kurumundan veya fonundan destek almamıştır.

The study received no support from any research institution or fund.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Sümeyye ÇARKIT: Analizleri yapmış, sonuçları değerlendirmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

She conducted the analysis, evaluated the results, and performed the writing process.

Nurettin ÜSTKOYUNCU: Sonuçları analiz etmiş, makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiş ve akademik danışmanlığını yapmıştır.

He analyzed the results, wrote the article, and served as its academic advisor.

Taner ÇARKIT: Sonuçları analiz etmiş, makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiş ve yazım kurallarını kontrol etmiştir.

He analyzed the results, wrote the article, and checked the writing rules.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] İlhan E, Paulides JJH, Lomonova EA. Fast torque estimation of in-wheel parallel flux switching machines for hybrid trucks. *COMPEL International Journal of Computations and Mathematics in Electrical*. 2011; 31(1): 40-53.
- [2] Zulu A, Mecrow BC, Armstrong M. Permanent-magnet flux-switching synchronous motor employing a segmental rotor. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2012; 48(6): 2259-2267.
- [3] Somesan L, Padurariu E, Viorel I, A, Szabo L. Design of a permanent magnet flux-switching machine. 9th International Conference Elektro. 2012; 256-259.
- [4] Eduku S, Chen Q, Xu G, Liu G, Liao J, Zhang X. A new fault-tolerant rotor permanent magnet flux-switching motor. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2022; 8(3): 3606-3617.
- [5] Kamil KR, Kamil JI, Wang QC. Optimization of flux switching permanent magnet motor to enhance the traction of an electric vehicle. 12th International Renewable Energy Congress. 2021; 1-6.
- [6] Üstkoyuncu N, Eroğul O. Anahtarlamalı relüktans motor tabanlı medikal santrifüj sistemi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C*. 2018; 6(1): 536-543.
- [7] Zhao J, Yan Y, Li B, Liu X, Chen Z. Influence of different rotor teeth shapes on the performance of flux switching permanent magnet machines used for electric vehicles. *Energies*. 2014; 7(12): 8056-8075.
- [8] Khan B, Khan F, Ullah W, Ullah B, Hussam S. Torque ripples reduction and performance analysis of electrically excited flux switching motor. *IEEE Access*. 2022; 10: 4307-4317.
- [9] Fei W, Luk PCK, Shen J. Torque analysis of permanent-magnet flux switching machines with rotor step skewing. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2012; 48: 2664-2673.
- [10] Wang Y, Geng L, Hao W, Xiao W. Improved control strategy for fault-tolerant flux-switching permanent-magnet machine under short-circuit condition. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2019; 34(5): 4536-4557.

- [11] Zhao W, Lipo TA, Kwon B. Material-efficient permanent-magnet shape for torque pulsation minimization in SPM motors for automotive applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2014; 61: 5779-5787.
- [12] Zulu A. Flux switching machines using segmental rotors. PhD Thesis, Newcastle University, United Kingdom. 2010; 250.
- [13] Saygın A, Aksöz A. Aynı fiziksel ve elektromanyetik parametreler altında EASMSM ve ORSMSM'un vuruuntu torkuna göre karşılaştırılması. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*. 2018; 6(3): 659-667.
- [14] Kioumarsı A, Moallem M, Fahimi B. Mitigation of torque ripple in interior permanent magnet motors by optimal shape design. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2006; 42(11): 3706-3711.
- [15] Yamazaki K, Kumaga M, Ikemi T, Ohki S. A novel rotor design of interior permanent-magnet synchronous motors to cope with both maximum torque and iron-loss reduction. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2013; 49(6): 2478-2486.
- [16] Çarkıt S. Elektrikli araç tahrik sistemleri için akı anahtarlama motor tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri. 2020; 84.