

GÖMÜLÜ MIKNATISLI SENKRON MOTORLARIN GEOMETRİ TABANLI AKI BARIYERİ OPTİMİZASYONU*

GEOMETRY BASED FLUX BARRIER OPTIMIZATION OF INTERIOR PM MOTORS

Cemil OCAK

Gazi Üniversitesi

E-mail: cemilocak@gazi.edu.tr

Adem DALCALI

Bandırma Onyediy Eylül Üniversitesi

E-mail: adalcali@bandirma.edu.tr

MAKALE BİLGİSİ	ÖZET
<p>Anahtar Kelimeler: elektrikli araç, sonlu elemanlar yöntemi, akı bariyeri, senkron motor.</p>	<p>Son yıllarda, sahip oldukları üstün özellikleri nedeniyle gömülü mıknatıslı senkron motorlar elektrikli araçlar gibi çekiş (cer) uygulamalarında sıklıkla tercih edilmektedirler. Bu motorlara ait rotor geometrisi diğer bir ifadeyle mıknatıs ve akı bariyeri geometrileri senkron motor performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Gömülü mıknatıslı senkron motorların verimi, tork dalgalanması ve akım başına üretilen maksimum tork değeri (ABMT) gibi önemli elektromanyetik performans parametrelerinin iyileştirilebilmesi için rotor ve buna bağlı akı bariyeri geometrisinin optimize edilmesi gerekmektedir. Manyetik doyum ile sınırlandırılan bu karmaşık geometrinin optimizasyonu ile birlikte motorun performansı artırılabilenkte, bazı uygulamalarda ise mıknatıs kullanımını azaltılarak motorun toplam maliyeti düşürülebilmektedir. İfade edilen sebepler dikkate alındığında bu çalışma, rotor geometrisini oluşturan ve motor performansı üzerinde önemli etkilere sahip olan geometrik büyüklüklerin parametrik olarak değiştirilerek akı bariyerlerine ait geometrinin optimizasyonu amaçlamaktadır. Geometrik değişimlere bağlı olarak motor performansı ve elektromanyetik parametreler, 2 boyutlu (2B) sonlu eleman analizleri (SEA) gerçekleştirilerek bilgisayar destekli olarak doğrulanmıştır. Başlangıç tasarımı ve optimize edilen tasarım için kullanılan büyüklüklerinin karşılaştırmalı olarak sunulduğu bu çalışmada tasarlanan motorlar 4 kutuplu, 48V, 500W ve 3000d/d anma değerlerine sahiptir.</p>
<p>DOI: 10.26809/joa.2018548633</p>	

ARTICLE INFO	ABSTRACT
<p>Keywords: electric vehicles, finite element method, flux barrier, synchronous motor.</p>	<p>In recent years, due to their superior features, interior permanent magnet (IPM) motors are often preferred in traction applications such as electric vehicles. The rotor geometry of an IPM motor significantly affects motor performance. To improve the electromagnetic performance of the IPM motor such as maximum torque per ampere (MTPA), efficiency, and the torque pulsations, rotor and its</p>

*Bu çalışma, 6-7 Eylül 2018 tarihlerinde Lviv /UKRAYNA' da gerçekleşen 3. Uluslararası Rating Academy Kongresi: "Uygulamalı Bilimler" konulu kongrede sunulmuş aynı isimli bildirinin gözden geçirilmiş halidir.

DOI:

10.26809/joa.2018548633

flux barriers geometry have to be optimized due to the difficult modeling dominated by magnetic saturation. Thus, this study is focused on the optimization of flux barriers by varying the rotor geometric parameters which have significant influences. Performance and the electromagnetic parameters of the motor are verified by using 3D-Finite Element Method. The proposed motor has the following parameters; 4-pole, 48V, 500W and 3000rpm.

1. GİRİŞ

Gömülü miknatıslı senkron motorlar (GMSM) sahip oldukları üstün özelliklerinden dolayı otomotiv endüstrisinden servo uygulamalarına kadar çok geniş bir alanda sıklıkla kullanılmaktadırlar. Basit yapıları, yüksek verim, yüksek tork yoğunluğu ve geniş bir hız aralığında çalışma yeteneği bu özelliklerin başında gelmektedir. Diğer taraftan sağladıkları tork profillerindeki dalgalanma, bu motorların istenmeyen özellikleri olarak öne çıkararak mekanik rezonans, vibrasyon ve akustik gürültülere yol açabilmektedir (Fang ve Hong, 2009; Monjezi ve diğ., 2016). Gömülü miknatıslara sahip geometrik tasarım pek çok karmaşık tasarım kriterine dayanmaktadır ve tasarım safhasında mekanik olarak da her parçanın sağlamlığının dikkate alınması gerekmektedir.

Literatürde özellikle elektrikli araçlar için farklı topolojilere sahip sürekli miknatıslı senkron motorlar (SMSM) karşılaştırılmış olup (Zhang ve diğ., 2016; Liu ve diğ., 2015; Joss ve diğ., 2013; Seo ve Choi, 2014; Pellegrino ve diğ., 2012), elde edilen sonuçlar doğrultusunda, GMSM'ların yüzey yerleştirmeli senkron motorlara (YYSM) kıyasla daha güvenilir ve daha yüksek aşırı yüklenme kabiliyetlerine sahip oldukları ifade edilmiştir. Daha iyi bir performans elde etmek adına akı bariyeri tasarımını değiştirmek için uzman bilgisine ihtiyaç duyulmaktadır. SEA ihtiyaç duyulan optimal akı bariyeri tasarımı için gerekli sonuçları sunmakla birlikte bu durum, elektrik makineleri tasarımcılarının izleyeceği yöntemlerin geometrik optimizasyon üzerine yapılan bilimsel çalışmalarla uyumlu hale getirmelerine ve böylece istenen makine performansına ulaşmalarına olanak tanır (Bilyi ve diğ., 2016).

GMSM motorların tork karakteristiklerinin dolayısı ile vuruş torkları ile tork dalgalanmasının iyileştirilebilmesi için akı bariyeri tasarımları önemle irdelenmelidir. Bu irdelenmeler kapsamında elde edilen iyileştirmelerden bilinen bazıları literatürde farklı tekniklerle sunulmuştur. Rotor ilave delikler açmak (Kioumarsı ve diğ., 2006; Jang ve diğ., 2010; Kiyoumarsı ve Moallem, 2005), rotor yüzeyine çentikler açmak (Huang ve diğ., 2011, Kang ve diğ., 2009) ve miknatıslar için özel cepler oluşturmak (Yamazaki ve diğ., 2013) bu çalışmalara örnek olarak verilebilir. Ayrıca azalan kaçak akılardan dolayı ilave akı bariyerleri oluşturularak ortalama tork artırılabilir. Diğer taraftan rotor üzerinde meydana getirilen bu değişiklikler zıt-emk dalga formunu değiştirip demir kayıplarında azalmaya da yol açabilirler (Hombitzer ve diğ., 2014). Genel olarak, $L_d > L_q$ gibi tipik karakteristiklerin gerçekleştirilmesi için ana yaklaşım d-ekseni akı yolundaki manyetik direnci azaltmak ve bu arada q-ekseni akı yolundaki manyetik direnci arttırmaktır. Burada dikkat edilmesi gerek önemli bir nokta ise, q-eksenindeki akı bariyerlerinin aşırı arttırılması d-ekseni akı yolunda doyuma sebep olacaktır (Zhu ve diğ., 2018). D ve q eksenlerindeki akı yolları birbirleri üzerinde karmaşık bir bağa sahip olup miknatısların yerleşimi ile doğrudan bağıntılıdır. Bu sebeple rotor üzerinde bulunan akı bariyerlerinin oldukça hassas bir biçimde konumlandırılması gerekmektedir.

SMSM'ların ürettikleri tork temel olarak iki bileşene ayrılır ve bunlar miknatıslı torku ve relüktans tork olarak ifade edilirler. Miknatıslı torku stator ve rotor manyetik alanları arasındaki etkileşimden meydana gelirken, relüktans torku ise d ve q eksenlerindeki relüktans farkından meydana gelmektedir. Yüzey yerleştirmeli sürekli miknatıslı senkron motorların (YYSMSM) her iki eksenindeki relüktans değerleri aynı olduğundan bu motorlar sadece miknatıslı torku üretirler. GMSM'lar YYSMSM'lara kıyasla daha düşük senkron tork değeri sunmalarına karşın bu durum sağladıkları relüktans torkları ile telafi edilmektedir. Diğer taraftan yüksek güç

yoğunluğu için yüksek hızlarda çalışan motor tasarımları oldukça popüler hale gelmiştir (Putri ve diğ., 2017). Bu sebeple sabit güç bölgesinde, iyi alan zayıflatma yetenekleri ile birlikte geniş bir hız aralığında çalışabilen GMSM'lar YYSMSM'lara kıyasla daha cazip görünmektedir. Bahsi geçen önemli üstünlüklerin sağlanabilmesi veya arttırılabilmesi için rotor geometrisini oluşturan tasarım parametrelerinin optimize edilmesi gerekmektedir.

Çevresel sorunların farkındalığının artmasına paralel olarak, daha düşük maliyetle yüksek performanslı manyetik malzemenin geliştirilmesi SMSM'un uygulama alanını genişletmiştir. Örneğin bir elektrikli araç için motor seçimi gerekiyorsa bu motor yüksek verime, kısa aktif uzunluğa, yüksek güç/ağırlık oranına, geniş bir sabit güç-hız aralığında yüksek alan zayıflatma yeteneğine, yüksek hızlardaki mekanik kararlılığa, düşük vibrasyon ve gürültü seviyelerine ve düşük maliyete sahip olması gibi ihtiyaçlara cevap verebilmelidir. SMSM'lar diğer tüm motor tipleri içerisinde en yüksek verime ve güç yoğunluğuna sahiptir. GMSM'lar, yüzey yerleştirmeli mıknatıs konfigürasyonlarına kıyasla daha iyi alan zayıflatma yeteneğine sahip olmakla birlikte, yüksek hızlarda çalışmak için manyetik olmayan bandajlara gereksinim duymazlar ve hava aralığı mesafesi kısaltılabilir. Ayrıca GMSM'lar mıknatısların rotor üzerinde genel olarak derine yerleştirilmelerinden dolayı mıknatıs kayıpları daha azdır (Bilyi ve Gerling, 2016). Fakat ifade edilen üstünlüklerinin yanında, GMSM'lar yüksek hız bölgesinde yüksek girdap akımları kayıplarına sebep olan yüksek harmonik bileşenleri gibi bir takım sakıncalara da sahiptirler. Bu harmonikler özellikle düşük hava aralığına sahip makinalarda nüve kayıplarını arttırmakla beraber tork dalgalılığını arttırıp gürültü ve titreşime sebep olabilmektedirler (Rahman ve diğ., 2012).

Sonlu elemanlar yöntemi (SEY) elektrik makinalarının analizinde günümüzün en popüler araçlarından birisidir. SEY kullanılarak farklı geometrik rotor konfigürasyonlarının analizleri uzun çözüm sürelerine rağmen hassas biçimde gerçekleştirilebilmektedir. GMSM'ların temelde üç popüler rotor konfigürasyonu bulunmaktadır. Bunlar; tek katlı rotor, V formulu rotor ve çift katlı rotorlar olarak sıralanabilir. Tek katlı rotor yapısının üretimi kolay olmakla birlikte düşük relüktans torkuna sahip olduğu için daha çok düşük hız (<6000rpm) ve yüksek tork uygulamalarında tercih edilmektedirler. V formulu rotora sahip olan tasarımlar ise tek katlı rotor tasarımlarına kıyasla daha fazla relüktans torku sağlamaktadır. Fakat bu tasarımda sunulan mıknatıs torku değeri daha azdır ve geniş doyum bölgelerinden kaynaklı olarak toplam tork değerini ciddi oranda düşürmektedir. Üçüncü rotor yapısı olan çift katlı rotor yapısında ise doyum ve akı yolu boyunca faz başına akı değeri kısmen kontrol edilebildiğinden daha verimli bir konfigürasyon olduğu söylenebilir (Park ve diğ., 2015). Bu çalışmada ise, 3000 d/d hız ve genel amaçlı kullanım dikkate alındığından tek katlı rotor konfigürasyonu dikkate alınarak tasarım ve optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

2. TASARIM VE OPTİMİZASYON

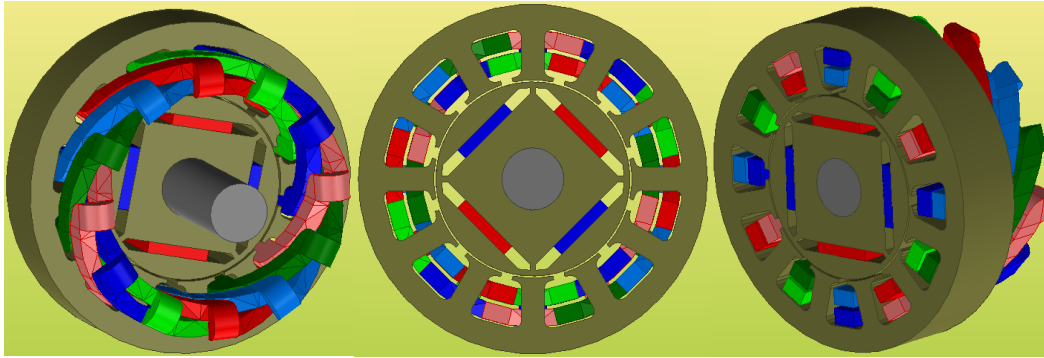
Tasarımı gerçekleştirilen GMSM'a ait özellikler ve performans çıktıları Tablo 1'de verilmiştir. (*) ile verilen değerler başlangıç motor tasarımı için boyutlandırma hesaplamaları sonucunda belirlenen değerlerdir. Diğer değerler ise çalışma içerisinde kullanılan tüm tasarımlar için ortak olarak belirlenmiş olup sabittir. Çalışma içerisinde başlangıç tasarımı bundan sonra TASARIM.A olarak ifade edilecek olup, en yüksek verimlilik değerinin elde edildiği model TASARIM.B, en düşük verimlilik değerinin elde edildiği tasarım ise TASARIM.C olarak ifade edilecektir. Çalışma içerisinde temel olarak üç farklı tasarım modeli karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bu tasarım modellerinin nasıl elde edildiği ve aralarındaki geometrik farklılıkların neler olduğu ilerleyen bölümlerde detaylı olarak sunulmuştur.

Tablo 1'de verilen ölçüler doğrultusunda elde edilen GMSM'un başlangıç tasarımının (TASARIM.A) 3 boyutlu görünümü Şekil 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Tasarlanan GMSM'a ait özellikler

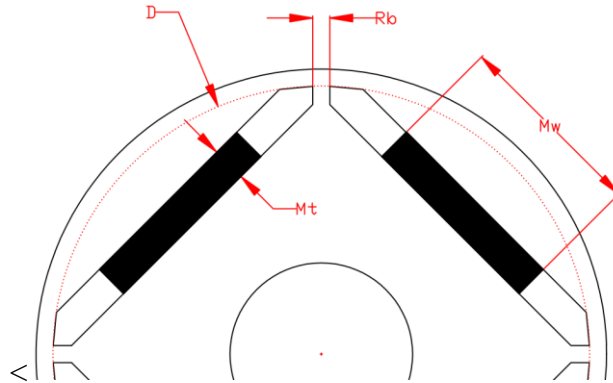
Parametre	Değer	Parametre	Değer
Anma Gücü	500 W	Stator Dış Çapı	90 mm
Kutup Sayısı	4	Stator İç Çapı	51 mm
Anma Hızı	3000 d/d	Rotor Dış Çapı	49 mm
Anma Torku	1,59 Nm	Rotor İç çapı	16 mm
DC Bara Gerilimi	48 V	Paket Uzunluğu	40 mm
Oluk Sayısı	12	Hava Aralığı	0,5 mm
Nüve Malzemesi	M400- 50A	Oluk Kesit Alanı	114 mm ²
Mıknatıs Tipi	N40UH	Mıknatıs Kalınlığı (M_t)*	3 mm
Mıknatıs Ağırlığı*	0,062 Kg	Mıknatıs Genişliği (M_w)*	17 mm
Toplam Aktif Ağırlık*	1,728 Kg	Mıknatıs Oturma Çapı (D)*	47 mm
Verim*	87,38 %	Bariyerler Arası Mesafe (R_b)*	1,5 mm

Şekil 1. TASARIM.A'ya ait katı model görünümleri



GMSM'un akı dağılımını ve rotorda bulunan akı bariyeri geometrisini etkileyen geometrik büyüklükler Şekil 2'de verilmiştir. Fiziksel ve mekanik sınırlamalar dâhilinde bu geometriyi oluşturan parametreler değiştirilerek motorun verim başta olmak üzere önemli performans çıktıları değiştirilebilir.

Şekil 2. Akı bariyeri geometrisini oluşturan geometrik değişkenler



Bu parametreler çalışmada sırasıyla bariyerlerin rotor dış çapından olan uzaklığını ifade eden mıknatıs oturma çapı (D), bariyerler arasındaki mesafeyi ifade eden (R_b), mıknatıs kalınlığı (M_t) ve mıknatıs genişliği (M_w) olarak verilmiştir. D ve R_b büyüklüklerinin akı dağılımı ve doyum noktaları üzerinde önemli etkiye sahip olmasının yanı sıra, bu büyüklükler aynı

zamanda rotorun mekanik olarak bir arada durmasını sağlamaktadırlar. Örneğin R_b değerinin sıfır olması halinde miknatısların hava aralığına bakan kısmındaki nüve alt kısımdan ayrılmış olacaktır. Benzer şekilde D değeri de rotor dış çapı ile aynı değerde veya çok yakın değerlerde tanımlanamaz. Özellikle yüksek hızlarda meydana gelen ciddi merkezkaç kuvvetleri rotorun belirli kısımlarının kopmasına veya ayrılmasına sebep olacağından yukarıda ifade edilen bu iki değerin mekanik dayanım sınırları dikkate alınarak belirlenmesi gerekir. Diğer taraftan mevcut rotor geometrisi için M_t ve M_w değerlerinin üst limitleri için de fiziksel sınırlamalar bulunmaktadır. Mevcut tasarımın optimizasyonu süresince bu dört büyüklüğün belirli değerler arasında tanımlanıp, mümkün olan en yüksek performans çıktılarının sağlanabildiği tasarım elde edilmelidir. Tablo 2’de yukarıda ifade edilen dört değişkenin bahsi geçen mekanik ve fiziksel sınırlamalar dikkate alınarak belirlenen alt ve üst sınırları ve çözüm adımı verilmiştir.

Tablo 2. Değişkenlere ait alt ve üst sınırlar ve çözüm adımları

Değişken	Alt Sınır	Üst Sınır	Çözüm Adım
D	46 mm	49 mm	0,5 mm
R_b	0,5 mm	2 mm	0,1 mm
M_t	2 mm	3mm	0,2 mm
M_w	16 mm	24 mm	0,5 mm

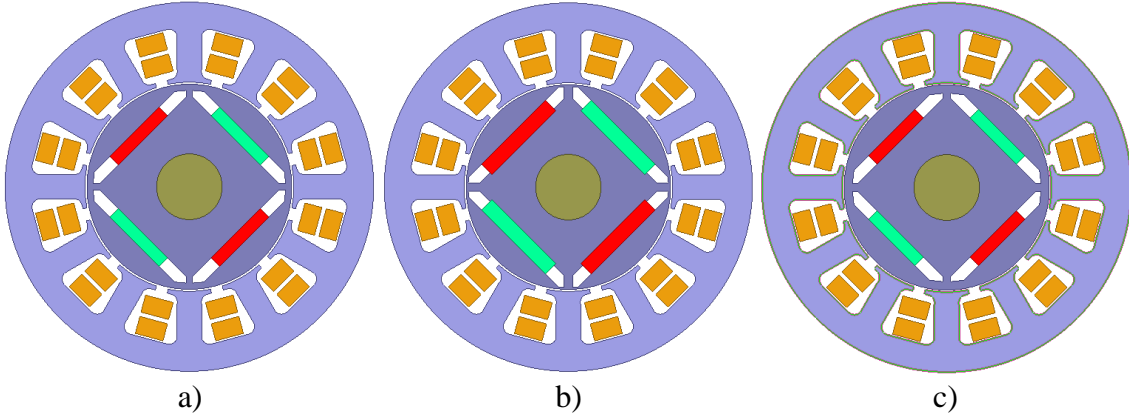
Tablo 2’de verilen değerler doğrultusunda elde edilen varyasyonlar için toplam 11086 farklı çözüm gerçekleştirilmiştir. Bu çözümler içerisinde başlangıç tasarımı ile maksimum ve minimum motor verimlerinin sağlandığı akı bariyeri geometrileri için elde edilen geometrik parametreler Tablo 3’de sunulmuştur. Yukarıda verilen geometrik değişkenler ve tanımlanan adımlar dikkate alınarak 11086 çözüm içerisinde maksimum ve minimum motor verimlerinin elde edildiği tasarımlar belirlenmiştir. Böylelikle, maksimum ve minimum verim değerlerini sağlayan geometrik değişkenlere ait sayısal değerler elde edilmiştir. Sonuç olarak toplamda üç farklı tasarım ortaya çıkarılarak performansları karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda, akı bariyeri geometrisini sağlayan başlangıç tasarımı TASARIM.A, maksimum verimin elde edildiği akı bariyeri geometrisi TASARIM.B ve minimum verim değerinin elde edildiği tasarım TASARIM.C olarak ifade edilmiş ve bu tasarımlara ait akı bariyeri geometrisini oluşturan sayısal değerler Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3. A, B ve C tasarımlarına ait akı bariyeri geometrisini oluşturan parametreler

	D	M_t	M_w	R_b	Verim
TASARIM.A	47 mm	3 mm	17mm	1,5 mm	% 87,38
TASARIM.B	49 mm	3,6 mm	22 mm	2 mm	% 90,49
TASARIM.C	46 mm	3 mm	16 mm	1.9 mm	% 83,79

Çalışmada akı bariyeri optimizasyonu için birincil hedef motor verimliliği olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte, motorun çıkış torkundaki dalgalanma, üretilen miknatıs torku ve relüktans torku, d-q eksenlerine ait endüktanslar gibi motorun diğer performans çıktılarının iyileştirilmesine yönelik farklı hedef fonksiyonları da belirlenebilir. Tablo 3’de verilen parametreler doğrultusunda elde edilen tasarımlara ait görünüm Şekil 3’de verilmiştir. Daha önce de ifade edildiği üzere, tasarımlar arasındaki farklılıklar rotor geometrisini oluşturan parametrelerdir. Bu bağlamda aşağıda verilen her bir tasarım modeli için sadece rotor akı bariyeri geometrisini oluşturan parametreler arasında Tablo 3’de verilen farklılıklar bulunmaktadır.

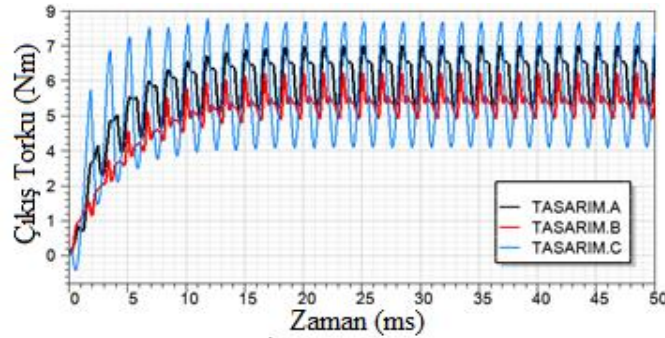
Şekil 3. Tasarımlara ait görünüm. a) TASARIM.A, b) TASARIM.B c) TASARIM.C



3. ANALİZ SONUÇLARI VE KARŞILAŞTIRMA

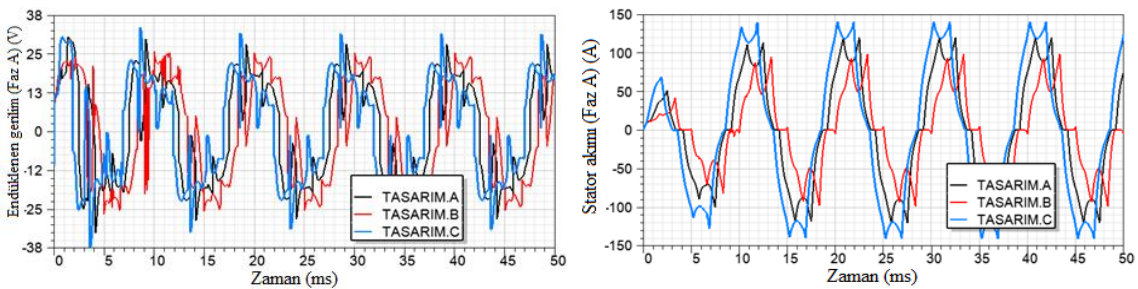
Şekil 4’de tasarımlara ait çıkış torku değerlerinin değişimi verilmiştir. Çıkış torkunda meydana gelen dalgalanmaların TASARIM.C’de en fazla, TASARIM.B’de ise en az olduğu görülmektedir. Miknatıslar rotor yüzeyinden derinlere gömüldükçe dalgalanma artmakta birlikte kazanılan relüktans torkundan dolayı maksimum çıkış torku değeri yükselmektedir.

Şekil 4. Tasarımlara ait çıkış torku değerlerinin değişimi (0-50ms)

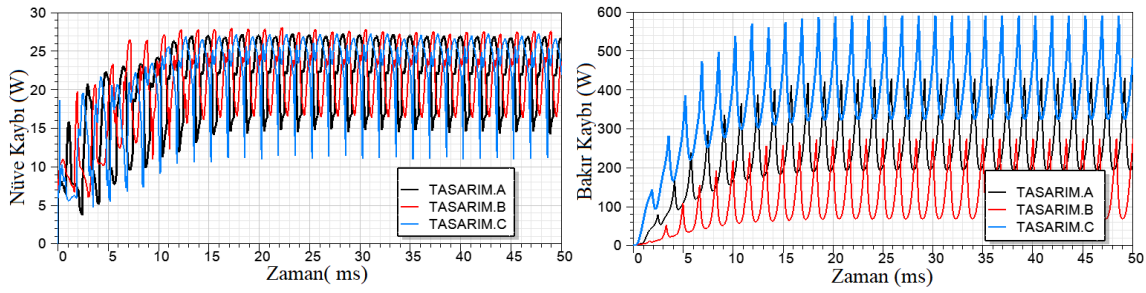


Şekil 5’de A fazına ait indüklenen gerilimler ve sargı akımlarının değişimi verilmiştir. Benzer şekilde Şekil 6’da ise nüve kayıpları ve sargı kayıplarının değişimi verilmiştir. Verim değerleri ile uyumlu olarak tasarımlar arasında TASARIM.B sargı kayıpları bakımından diğer tasarımlara kıyasla daha düşük değerler sunmaktadır. Nüve kayıpları açısından TASARIM.C en düşük nüve kayıplarına sahiptir.

Şekil 5. A fazına ait indüklenen gerilimler(solda) ve sargı akımları(sağda)

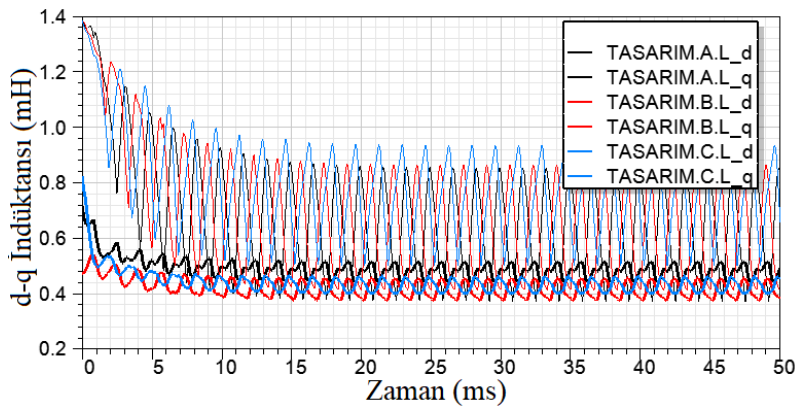


Şekil 6. Nüve kayıplarının(solda) ve sargı kayıplarının(sağda) değişimi



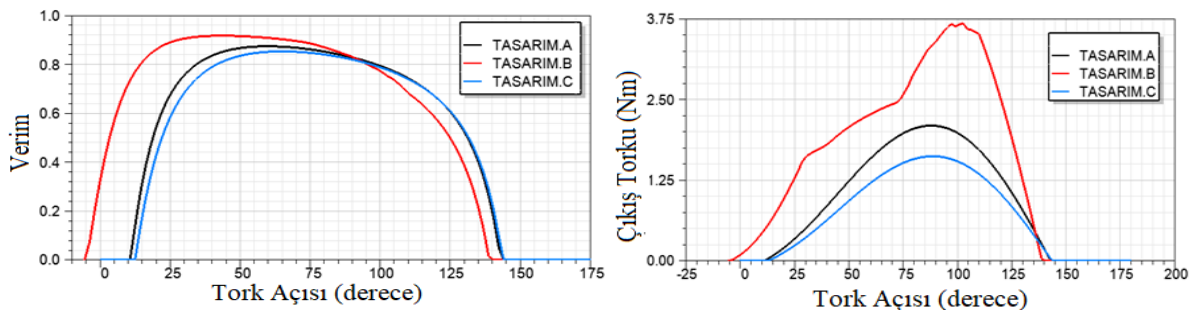
Şekil 7’de tasarımlara ait d - q endüktanslarının değişimi verilmiştir. Genel olarak L_d ve L_q endüktansları arasındaki farkın büyüklüğü elde edilecek relüktans torku ile ilişkilendirilmektedir. Bu bağlamda tüm tasarımlar benzer tek katlı gömülü miknatıslı geometrisine sahip olduklarından tasarımlar arasında L_d ve L_q endüktanslarına ait farklar benzer çıkmaktadır. Bu farkın artırılması için V formülü ya da çift katlı rotor geometrilerinin kullanımı daha uygun olacaktır.

Şekil 7. Tasarımlara ait d - q endüktanslarının değişimi



Şekil 8’de ise tork açısına bağlı olarak analitik olarak hesaplanan verim ve çıkış torku değerlerinin değişimi verilmiştir. Daha düşük tork açılarında TASARIM.B daha verimli iken yaklaşık 90° üzerindeki açılarda diğer tasarımla kıyasla daha düşük verim sunmaktadır. TASARIM.B, hemen hemen tüm tork açıları için diğer tasarımlardan daha üstün bir çıkış torku profiline sahiptir.

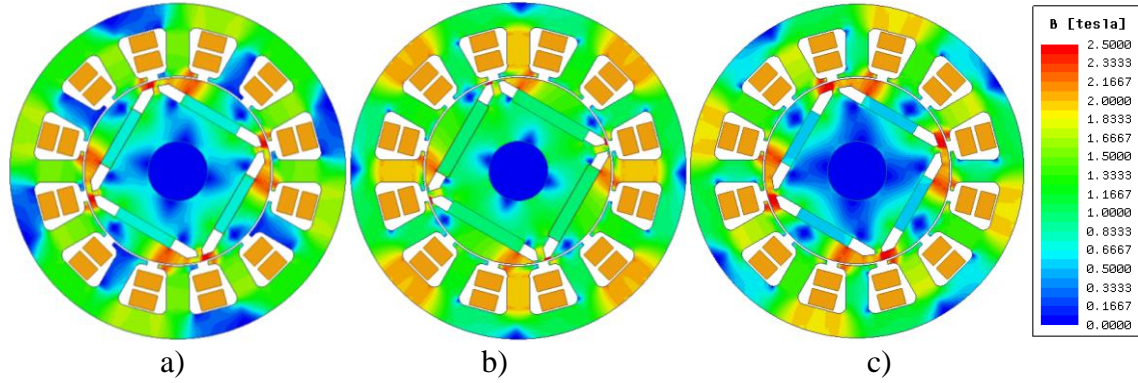
Şekil 8. Tork açısına bağlı olarak verim(solda) ve çıkış torkunun(sağda) değişimi



Şekil 9’da verilen akı dağılımları dikkatlice irdelendiğinde TASARIM. C diğer tasarımlara kıyasla hem rotor hem de stator bölgesinde daha düşük akı yoğunluğu değerine sahiptir ve buna akı bariyeri bölgesinde meydana gelen yüksek miktardaki kaçak akılar sebep

olmaktadır. Diğer taraftan mıknatıslara ait oturma çapının azalması yüksek kaçak akılara sebep olarak akı bariyeri bölgesinde doyumla sonuçlanan akı yoğunlukları gözlemlenmektedir.

Şekil 9. Akı yoğunluğu dağılımları. a) TASARIM.A, b) TASARIM.B c) TASARIM.C)



4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, tek katlı rotor yapısına sahip olan GSM’lerin rotor akı bariyeri geometrisini oluşturan dört adet geometrik parametre, fiziksel ve mekanik sınırlamalar dâhilinde çeşitli varyasyonlar elde edilebilecek şekilde değiştirilerek yaklaşık 11086 farklı tasarım modeli elde edilerek çözdürülmüştür. Bu varyasyonlar içerisinde en yüksek ve en düşük verim ile sonuçlanan tasarımlar başlangıç tasarımı ile birlikte ayrılarak çeşitli karşılaştırmalara tabii tutulmuşlardır. Bu karşılaştırmalar ve analizler sonucunda görülmektedir ki akı bariyeri geometrisi verim ve diğer önemli çıkış değerleri üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Mıknatıslara ait oturma çapı küçüldükçe kaçak akılar artmakta, hava aralığı akı yoğunluğu düşmekte ve rotor üzerinde kısmi doyum noktaları meydana gelmektedir. Mekanik kopma limitleri dikkate alınarak bu değer tek katlı rotor yapısı için en büyük değeri alabilecek şekilde tanımlanmalıdır. Diğer taraftan akı bariyerleri arasındaki mesafenin artması d-q eksenlerindeki relüktans farkının artmasına böylelikle üretilen relüktans torku değerinin artmasına sebep olmaktadır. Diğer bir önemli konu ise toplam mıknatıs tüketimi olarak ifade edilebilir. Uygun bir akı dağılımı profilinin yakalanması ve minimum mıknatıs tüketiminin sağlanması için mıknatıs genişliği ve kalınlığı önemle takip edilmelidir.

KAYNAKLAR

- Bilyi, V. and Gerling, D., 2016, Design of high-efficiency interior permanent magnet synchronous machine with stator flux barriers and single-layer concentrated windings, *IEEE International Electric Machines & Drives Conference*, 10-13 May 2015, Coeur d'Alene, 1177-1183.
- Bilyi, V., Gerling, D. and Bilyi, D., 2016, Flux barrier design method for torque ripple reduction in synchronous reluctance machines, *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo*, Asia-Pacific, 1-4 June 2016, Busan, 034-039.
- Fang, L. and Hong, J.P., 2009, Flux-barrier design technique for improving torque performance of interior permanent magnet synchronous motor for driving compressor in HEV, *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 7-10 Sept. 2009, Dearborn, 1486-1490.
- Hombitzer, M., Elfgen, D., Franck, D. and Hameyer, K., 2014, Performance improvement of a high-speed permanent magnet excited synchronous machine by flux-barrier design, *International Conference on Electrical Machines*, 2-5 Sept. 2014, Berlin, 1376-1382.
- Huang, S., Liu, J., Gao, J. and Xiao, L., 2011, Optimal design of the rotor structure for interior permanent magnet synchronous motor, *International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, 11-13 May 2011, Malaga, 1-5.
- Jang, J., Kim, H., Song, J., Lee, Y. and Kim, B., 2010, Design of flux barriers in a rotor of an interior PM synchronous motor for reducing harmonics losses, *14th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation*, 9-12 May 2010, Chicago.
- Joss, J., Popescuc, M. and Staton, D., 2013, A Comparison of an interior permanent magnet and copper rotor induction motor in a hybrid electric vehicle application, *International Electric Machines & Drives Conference*, 12-15 May 2013, 220-225.
- Kang, G.H., Son, Y.D., Kim, G.T. and Hur, J., 2009, A Novel Cogging Torque Reduction Method for Interior-Type Permanent-Magnet Motor, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 45(1), 161-167.
- Kiyomarsi, A. and Moallem, M., 2005, Optimal Shape Design of Interior Permanent-Magnet Synchronous Motor, *International Conference on Electric Machines and Drives*, 15 May 2005, San Antonio, 642-648.
- Kiyomarsi, A., Moallem, M. and Fahimi, B., 2006, Mitigation of Torque Ripple in Interior Permanent Magnet Motors by Optimal Shape Design, *IEEE Transactions on Magnetics*, 42(11), 3706-3711.
- Liu, X., Zhu, Z.Q. and Wu, D., 2015, Evaluation of efficiency optimized variable flux reluctance machine for EVs/ HEVs by comparing with interior PM Machine, *17th International Conference on Electrical Machines and Systems*, 22-25 Oct. 2014, Hangzhou, 2648-2654.
- Monjezi, S.R., Kiyomarsi, A., Dehkordi, B.M., Sabahi, M.F. and Vafaie, M.H., 2016, Shape Design Optimization of Interior Permanent-Magnet Synchronous Motor with Machaon Flux Barriers for Reduction of Torque Pulsation, *Electric Power Components and Systems*, 44(19), 2212-2223.
- Park, J.B., Johnson, M. And Toliyat, A.M., 2015, Interior PMSM double layer rotor core parametric design study, *40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 29 Oct.-1 Nov. 2014, Dallas, 695-701.

- Putri, A.K., Hombitzer, M., Franck, D. and Hameyer, K., 2017, Comparison of the Characteristics of Cost-Oriented Designed High-Speed Low-Power Interior PMSM, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53(6), 5262-5271.
- Pellegrino, G., Vagati, A., Boazzo, B. and Guglielmi, P., 2012, Comparison of induction and PM synchronous motor drives for EV application including design examples, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 48(6), 2322–2332.
- Rahman, S.A., Vaseghi, B. and Knight, A.M., 2012, Influence of rotor magnet variations in concentrated winding IPMSM, *XXth International Conference on Electrical Machines*, 2-5 Sept. 2012, Marseille, 315-320.
- Seo, J.H. and Choi, H.S., 2014, Cogging torque calculation for IPM having single layer based on magnet ic circuit model, *IEEE Transactions on Magnetics*, 50(10).
- Yamazaki, K., Kumagai, M., Ikemi, T. and Ohki, S., 2013, 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*, 49(6), 2478-2486.
- Zhang, Y., Cao, W., McLoone, S. and Morrow, J., 2016, Design and Flux-Weakening Control of an Interior Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Vehicles, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 26(7),
- Zhu, X., Wu, W., Yang, S., Xiang, Z. and Quan, L., 2018, Comparative Design and Analysis of new type of Flux-intensifying Interior Permanent Magnet Motors with Different q-axis Rotor Flux Barriers, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, (Early Access).