

Sürekli Mıknatıs Destekli Senkron Relüktans Motorlarda Mıknatıs Yerleşiminin Performansa Etkisi

Effects of Magnet Positioning on Performance in Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Machines

Alper Tap , Liridon Xheladini , Taşdemir Aşan , Murat İmeryüz , Murat Yılmaz , Lale T. Ergene

Elektrik Mühendisliği Bölümü
İstanbul Teknik Üniversitesi

tap@itu.edu.tr, djeladini@itu.edu.tr, asan@itu.edu.tr, imeryuz@itu.edu.tr, myilmaz@itu.edu.tr, ergenel@itu.edu.tr

Özet

Senkron Relüktans Motorları (SynRM) ve Sürekli Mıknatıs Destekli Senkron Relüktans Motorları (PMSynRM) günümüzün en popüler motorlarından. Bu popülerliğin sebebi olarak artan verimlilik ve az bakım gerektirmesi gösterilebilir. SynRM ve PMSynRM'ler fırçasız yapıları, rotorlarında iletken bulunmayışı ve akı bariyerli boşluklu yapıdaki rotoru nedeniyle oluşan az bakım gereksinimi, düşük malzeme kullanımı, düşük maliyetleri ve üretim kolaylıkları sebebi ile tercih edilmektedirler. PMSynRM'lerin en büyük problemi olan moment titreşimini azaltmak için literatürde yapılan birçok çalışma vardır. Bunlar stator ve rotor tarafı olarak ikiye ayrılır. Fakat yoğunlukla rotor tasarımının performansa etkisi üzerinde durulmaktadır. Bu çalışmada Mıknatıs Destekli Senkron Relüktans Motorlarında rotorun akı bariyerleri içerisine yerleştirilen sürekli mıknatısların konumlarının ve hacimlerinin makinenin performansına etkisi incelenmiştir. Bu inceleme ortalama moment, moment titreşimi, güç faktörü ve verim temelinde yapılmıştır. İlk aşamada referans SynRM modellenmiş ve modelin test sonuçları ile tutarlılığı gösterilmiştir. Ardından farklı sürekli mıknatıs yerleşim ve hacim kombinasyonlarına sahip oluşturulan modeller geometrileri ve sonuçları ile birlikte karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur.

Anahtar kelimeler: Senkron Relüktans Motor, Sürekli Mıknatıs Destekli Senkron Relüktans Motor, Sürekli Mıknatıs, Sürekli Mıknatıs Demanyetizasyonu, Sonlu Elemanlar Yöntemi

Abstract

Synchronous Reluctance Motors and Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motors have gained a lot of attention in the recent years. This attention is due to their advantages compared to other motors such as induction motor. Lacking an exciter circuit, windings or a squirrel cage in the rotor means no rotor conductor losses and a cooler rotor. The flux barriers inside the rotor means there is less magnetic material is used for the same rotor diameter compared to an induction motor. Being a brushless design means there are less periodic maintenances. Also the control of the SynRMs and PMSynRMs are easier compared to induction motor and they have a wide speed range. Such

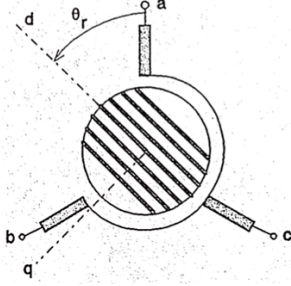
advantages made the researchers concentrate on the subject and a lot of progress is made for tackling the SynRMs and PMSynRMs biggest drawback: the torque ripple. A lot of design methods were proposed to reduce the torque ripple. These structural design concerns can be considered as stator side and rotor side methods. In this study, the placement of permanent magnets inside a PMSynRM rotor is investigated in terms of magnet position and magnet volume. First the reference SynRM is modelled and compared with the test results to validate the used method. Following that, models with different magnet positions and volumes are constructed and analyzed. The results are shown comparatively at the end.

Keywords: Synchronous Reluctance Motor, Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor, Permanent Magnet, Permanent Magnet Demagnetization, Finite Element Method

1. Giriş

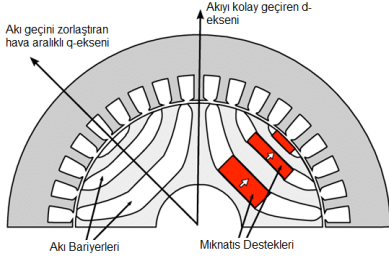
Senkron Relüktans ve Sürekli Mıknatıs Destekli Senkron Relüktans Motorları günümüzde yoğun ilgi ile karşılaşmakta ve popülerliği günden güne artmaktadır. Yüksek verim ve yüksek güç yoğunluklu tasarımların gündeme gelmesi ile SynRM ve özellikle PMSynRM'ler hala çok yaygın olarak kullanılan Asenkron Motor ve Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorlara karşı güçlü bir alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu sebeple literatürde SynRM ve PMSynRM'ler üzerine çalışmalara sıkça rastlanmaktadır. SynRM'ler ve PMSynRM'ler relüktans momenti ile yüklerini sürerler. Yapısal olarak diğer çok fazlı alternatif akım motorları ile hem benzerlikleri hem farklılıkları vardır. Stator yapısı herhangi bir AC motor ile aynıdır. Dağıtık sargılı veya konsantrik sargılı olabilirler. Rotor yapısı ise relüktans momentini en büyük yapacak biçimde özel bir süreç ile tasarlanmaktadır. Relüktans momenti manyetik olarak anizotropik bir yapının manyetik alan içerisinde bulunması ile oluşur. Bu moment, manyetik alan içerisindeki yapının farklı yollar üzerinde farklı relüktans değerlerine sahip olması ile, yani belirli bir akı yolunun daha düşük relüktansa sahip olması ve daha fazla mıknatıslanması ile indüklenir. İndüklenen moment manyetik alan ve düşük relüktans eksenindeki açı ile doğrudan ilintilidir. Buradaki manyetik anizotropiklik veya sık bilinen adı ile çıkıklık, rotor tarafındaki geometri ile

tasarım aşamasında sağlanır. Öncelikle relüktans momentini tanımlamak için gerekli olan düşük ve yüksek relüktansa sahip manyetik akının geçeceği yollara zahiri eksenler tanımlanır. Bu eksenler düşük relüktans yolunda d-ekseni, yüksek relüktans yolunda q-ekseni olarak adlandırılır. q-ekseninin relüktansını artırarak manyetik akının d-ekseni üzerinden geçmesi istenir. Bu durum d-ekseni relüktansını olabildiğince düşük tutarak sağlanabilir. Bu noktada q-ekseni üzerinde relüktansı yükseltmek için en sık uygulanan yöntem akı bariyeri yöntemidir. q-ekseni üzerinden akacak olan akıya karşı en fazla manyetik direnci oluşturabilmek amacı ile q-ekseni dik bir biçimde ve her bir kutup altında rotor boyunca uzanan hava aralıkları eklenir. Bu yapıya akı bariyeri adı verilir ve bu yapının kullanıldığı rotorlar akı bariyerli rotorlar olarak adlandırılır. Şekil 1’de akı bariyerli bir rotor yapısı görülebilir.



Şekil 1: İki kutuplu akı bariyerli bir SynRM [1].

Sürekli Mıknatıs Destekli Senkron Relüktans Motorlarda ise akı bariyerleri içerisine sürekli mıknatıslar yerleştirilir. Bu sürekli mıknatıslar, statorun gelen ve q-ekseni üzerinden geçen akıyı azaltacak şekilde akı yönlerine de dikkat ederek konumlandırılır. Şekil 2’de bir PMASynRM rotoru verilmiştir.



Şekil 2: Bir PMASynRM Rotoru [2].

Hem SynRM hem de PMASynRM’nin matematik modeli incelendiğinde Denklem 1.1’de verilen moment ifadesi görülecektir. Bu moment ifadesi incelendiğinde, d ve q eksenleri arasındaki indüktans farkı büyüdükçe indüklenen momentin büyüyeceği görülebilir. Dolayısı ile tasarım yapılırken en önemli nokta bu iki eksen endüktansları arasındaki farkı maksimize etmektir. Sürekli Mıknatıs desteğinin momente olan katkısı da ayrıca Denklem 1.1’de görülebilir. Mıknatısın sebep olduğu uyarma akısının d ve q eksenli bileşenleri kalın yazı ile vurgulanmıştır.

$$T_e = \frac{3}{2} p (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d + \lambda_{dm} i_q - \lambda_{qm} i_d) \quad (1.1)$$

Bir SynRM ve PMASynRM’nin en büyük problemi moment titreşimidir. Moment titreşimini azaltmak amacı ile tasarım aşamasında geometri ile ilgili birçok parametreyi göz önünde bulundurmak gerekir. Bu amaçla literatürde yapılan çok

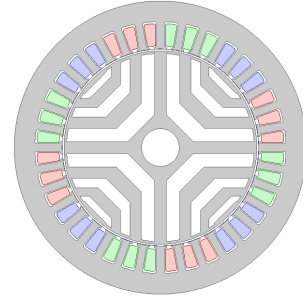
sayıda çalışma vardır. Literatür incelendiğinde, tasarım aşamasında rotordaki akı bariyeri sayısı ve stator oluk sayısını kombinasyonlarının doğru seçilmesi, doğru izolasyon oranı seçimi, stator oluk sayısını artırıp azaltmanın uzay harmoniklerine etkileri, rotor ve stator burma teknikleri, oluk şekli ve oluk açıklığının etkileri, statorun kullanılan sargı tiplerinin (dağıtık, konsantrik, tek katman, çift katman v.b.) etkileri ve mıknatıs yerleşimindeki konumlar ve hacimler gibi birçok faktörün hem ortalama momente hem de moment titreşimine ciddi etkileri olduğu görülmektedir [3-6]. Bu parametreler arasında tanımlanan izolasyon oranı Denklem 1.2’de görülmektedir. Hem d-ekseni hem de q-ekseni için toplam hava uzunluğunun toplam demir uzunluğuna oranı olarak tanımlanmıştır ve SynRM ve PMASynRM tasarımındaki en önemli kriterlerden biridir.

$$k_{d,q} = \frac{\sum \text{Hava Uzunluğu} (d, q)}{\sum \text{Demir Uzunluğu} (d, q)} \quad (1.2)$$

Bu bilgiler ışığında referans bir SynRM önce Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) kullanan bir paket program ile modellenmiş ve SEY sonuçları verilmiştir. Ardından bu referans motorun akı bariyerleri içerisine çeşitli kombinasyonlar ile mıknatıslar yerleştirilmiş ve motorun işletmede istenen momentini verdiği modeller kendi içlerinde mıknatıs hacimleri, mıknatıs konumları, güç faktörleri ve verimleri bakımından karşılaştırılmıştır. Çalışmada yerleştirilen mıknatısların yerleştirildikleri bariyerlerin ve yerleştirildikleri eksenin moment üretimine, moment titreşimine ve verime etkileri incelenecektir.

2. Referans SynRM

Çalışmada referans olarak alınan SynRM Şekil 3’de görülmektedir. Geometri SEY programında modellenmiştir ve sonuçları Tablo 1’de verilmiştir. Referans motor üç fazlı, 36 oluklu dağıtık stator sargısına sahiptir. Dört kutuplu olup rotorunda kutup başına üç akı bariyeri vardır. d ve q-eksenleri izolasyon oranları sırası ile 1 ve 0.9’dur.



Şekil 3: Referans motor geometrisi

Tablo 1: Referans SynRM değerleri

İşletme Akımı	1,62 A
İşletme Hızı	563 min ⁻¹
İşletme Momenti	0,565 Nm
Hava aralığı	0,8 mm
Stator çapı	120 mm
Paket boyu	35 mm
k _d	1
k _q	0,9

Tablo 2’de referans motorun anma çalışmasındaki SEY analizindeki hız, moment, moment titreşimi, akım, güç faktörü ve verimi verilmiştir.

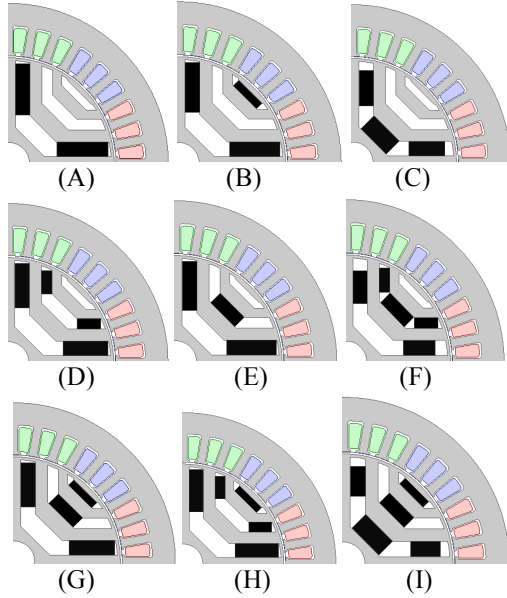
Tablo 2: Referans SynRM analiz sonuçları

Akım (rms, A)	1,62
Hız [min^{-1}]	563
Moment [Nm]	0,565
Mutlak Titreşim [Nm]	0,075
Moment Titreşimi [%]	13,27
Güç faktörü	0,696
Verim [%]	38,4

Referans motor geniş bir hız aralığında çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Motorun işletmedeki hızı 563 min^{-1} ’de 1.2 Nm moment üretmesi istenmektedir. Bunun için referans motorun akı bariyerlerinin içerisine çeşitli şekillerde mıknatıslar yerleştirilecek ve aynı akım değerinde istenilen çalışma koşuluna ulaşması sağlanacaktır.

3. Mıknatıs Yerleşim Kombinasyonları

Referans SynRM’nin akı bariyerleri içerisine sürekli mıknatıslar yerleştirilerek bir PMASynRM haline getirilmiştir. Mıknatıslar, manyetik alan yönü statorun q-ekseni azaltacak şekilde olmalıdır. Bu koşul gözetilerek hem d-ekseni boyunca, hem de q-ekseni üzerine farklı kombinasyonlar ile mıknatıslar yerleştirilerek birçok model oluşturulmuştur. Oluşturulan bu modellerden performans hedefleri olan 563 min^{-1} devir hızında, 1.2 Nm moment üreten modeller geometri ve analiz sonuçları ile birlikte aşağıda verilmiştir. Şekil 4’de bu modeller görülmektedir.



Şekil 4: Farklı mıknatıs kombinasyonlarına sahip modeller

Oluşturulan SEY modelleri anma akımında sinüsoidal bir akım kaynağı ile sürülerek mıknatıs yerleşimlerinin ve hacimlerinin ortalama momente, moment titreşimine, güç faktörüne ve verime etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar tablo halinde Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3: Farklı mıknatıs yerleşimlerine sahip modellerin SEY analizi moment ve moment titreşimi sonuçları

Model	Mıknatıs Hacmi [cm^3]	Moment [Nm]	Mutlak Titreşim [Nm]	Titreşim [%]
Ref.	0	0,565	0,075	13,27
A	25,64	1,21	0,103	8,51
B	28,71	1,2	0,125	10,42
C	29,79	1,22	0,127	10,41
D	31,01	1,22	0,113	9,26
E	32,32	1,22	0,1	8,20
F	32,39	1,23	0,137	11,14
G	34,37	1,2	0,11	9,17
H	35,14	1,22	0,12	9,84
I	37,72	1,21	0,112	9,26

Tablo 4: Farklı mıknatıs yerleşimlerine sahip modellerin SEY analizi güç faktörü ve verim sonuçları

Model	Güç Faktörü	Verim [%]
Ref.	0,696	38,4
A	0,895	57,2
B	0,895	57
C	0,902	57,43
D	0,897	57,36
E	0,896	57,5
F	0,899	57,56
G	0,89	56,8
H	0,899	57,52
I	0,894	57,18

Elde edilen modellerin SEY sonuçları incelendiğinde motorun istenilen moment değerine ulaştığı görülmektedir. Referans motor geniş bir hız aralığına sahiptir. Düşük hız işletme koşullarında mıknatıs yerleştirilmeden düşük verime sahip olduğu görülmektedir. Mıknatıs eklenmiş modellerde ise yaklaşık % 20’lik bir verim artışı sağlanmıştır. Hedeflenen 1.2 Nm’lik momente tüm modellerde ulaşılmıştır. Motorun işletme hızında (563 min^{-1}) tüm modellerin verimi ve güç faktörü birbirine çok yakındır, yaklaşık % 57 ve 0.9’dur. Motorun işletme hızı anma hızından farklıdır.

Motorun mıknatıslarının bariyerlere ve eksenlere göre dağılımı Tablo 5’de verilmiştir.

Tablo 5: Toplam mıknatıs hacminin bariyerlere göre dağılımı

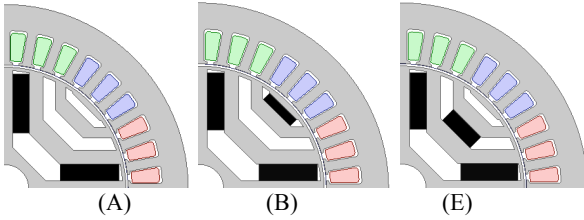
Bariyer Sayısı	1. Bariyer		2. Bariyer		3. Bariyer		
	d	q	d	q	d	q	
Eksen							
Mıknatıs hacimleri [cm^3]	A	25,64	0	0	0	0	
	B	24,58	0	0	0	4,13	
	C	18,18	11,62	0	0	0	0
	D	22,50	0	8,52	0	0	0
	E	24,58	0	0	7,74	0	0
	F	16,13	0	8,52	7,74	0	0
	G	22,50	0	0	7,74	0	4,13
	H	22,50	0	8,52	0	0	4,13
	I	14,23	11,62	0	7,74	0	4,13

Bununla beraber yüksek güç faktörü ve görece düşük verimin sebebi olarak, motorun dağıtık sargıları ve paket boyunun kısalığı nedeniyle sargı uçlarının oluşturduğu yüksek dirençten kaynaklı bakır kayıpları gösterilebilir.

Tablo 6: Toplam mıknatıs hacimlerinin eksnelere göre dağılımı

Toplam Mıknatıs Hacmi [cm ³]	Mıknatıs Hacmi [cm ³]	Mıknatıs Hacmi [cm ³]	
		d-ekseni	q-ekseni
25,64	A	25,64	0
28,71	B	24,58	4,13
29,79	C	18,18	1,62
31,01	D	31,01	0
32,32	E	24,58	7,74
32,39	F	24,65	7,74
34,37	G	22,50	11,87
35,14	H	31,01	4,13
37,72	I	14,23	23,49

Tablo 5 ve 6'daki sonuçlar kullanılarak mıknatıs yerleşimlerinin bariyerlere ve eksnelere göre performans etkileri incelenebilir. Öncelikle, yerleştirilen mıknatısların içten dışa doğru 1., 2. veya 3. bariyere yerleştirilmesinin ve q-ekseni veya d-ekseni üzerine yerleştirilmesinin motorun momentine, moment titreşimine ve verime etkileri incelenmiştir. Motor momentinin tüm modellerde yaklaşık 1,2 Nm olduğu dikkate alındığında işletme büyüklüklerindeki değişim, kullanılan sürekli mıknatıs hacimleri ve bu mıknatıs hacminin ne kadarının hangi bariyere yerleştirildiği veya ne kadarının hangi eksen üzerine yerleştirildiği ile ilintilidir. Elde edilen sonuçlardan mıknatıs yerleşimi ile ilgili modeller ikişerli olarak karşılaştırılarak, mıknatıs yerleşimi açısından en uygun noktalar yorumlanacaktır.



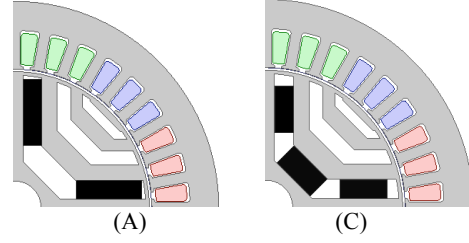
Şekil 5: Model A, B ve E

Tablo 7: Modeller A, B ve E'nin eksnelere göre mıknatıs hacmi dağılımı

Toplam Mıknatıs Hacmi [cm ³]	Mıknatıs Hacmi [cm ³]	Mıknatıs Hacmi [cm ³]	
		d-ekseni	q-ekseni
25,64	A	25,64	0
28,71	B	24,58	4,13
32,32	E	24,58	7,74

Şekil 5 ve Tablo 7'de görülen A, B ve E modelleri incelendiğinde d-ekseni boyunca yerleştirilen mıknatıs hacimlerinin B ve E modellerinde eşit olduğu, A modelinde ise B ve E modeline göre 1,06 cm³ daha fazla olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, B ve E modellerinde, q-ekseni üzerinde de mıknatıslar vardır. Bu üç modelin 1,62 A akım değerinde ve 563 min⁻¹ devir hızında ürettiği momentler yaklaşık olarak eşittir ve sırasıyla 1,21, 1,2 ve 1,22 Nm

değerindedir. Bu noktadan hareketle q-ekseni üzerine 2. ve 3. bariyerlere yerleştirilen mıknatısların moment üretimine katkısının çok az olduğu sonucuna varılmaktadır. Toplam mıknatıs hacmi B modelinde 3,07 cm³ ve E modelinde 6,68 cm³ daha fazladır. Bunun yanı sıra, q-eksenine yerleştirilen mıknatısların moment üretimine katkısının çok az olmasına karşın, moment titreşimine ve verime etkisinin olduğu söylenebilir.

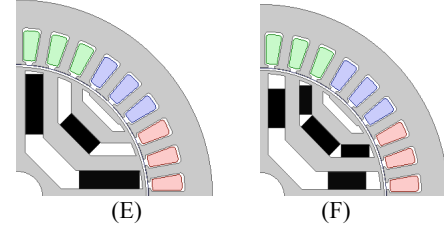


Şekil 6: Modeller A ve C

Tablo 8: A ve C modellerinin mıknatıs hacimlerinin eksnelere göre dağılımı

Toplam Mıknatıs Hacmi [cm ³]	Mıknatıs Hacmi [cm ³]	Mıknatıs Hacmi [cm ³]	
		d-ekseni	q-ekseni
25,64	A	25,64	0
29,79	C	18,18	11,62

Mıknatıs dizilimlerinde Şekil 6 ve Tablo 8'de verilen modeller A ve C incelendiğinde d-ekseni boyunca bulunan mıknatısların bir kısmının q-eksenine taşındığı ve toplam mıknatıs hacminin de arttığı görülmektedir. Toplam mıknatıs hacmi artmasına rağmen yine üretilen moment 1,2 Nm'dir Bunun yanı sıra moment titreşimi de %8,51'den %10,41'e çıkmıştır. Bu durum moment titreşimi açısından mıknatısların d-ekseni boyunca yerleştirilmesinin daha uygun olduğunu göstermektedir.



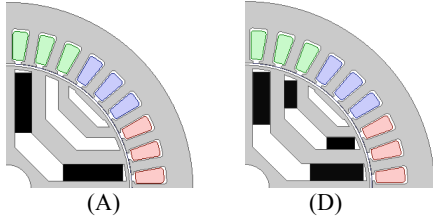
Şekil 7: Modeller E ve F

Tablo 9: E ve F modellerinin mıknatıs hacimlerinin eksnelere göre dağılımı

Toplam Mıknatıs Hacmi [cm ³]	Mıknatıs Hacmi [cm ³]	Mıknatıs Hacmi [cm ³]	
		d-ekseni	q-ekseni
32,32	E	24,58	7,74
32,39	F	24,65	7,74

Şekil 7 ve Tablo 9'da verilen modeller ve sonuçları incelendiğinde q-ekseni mıknatısları sabit kalmak üzere d-ekseni birinci bariyerdeki mıknatısların bir kısmının d-ekseni ikinci bariyerine aktarıldığı görülmektedir. Tablo 3'deki sonuçlara göre toplam mıknatıs hacmi yaklaşık 4 cm³ artmasına karşın, moment 1,2 Nm değerinde sabit kalmaktadır. Bu durumda, mıknatısların d-ekseninde dış

bariyere yerleştirilmesi durumunda, bariyer sayısında rotor dışına doğru gidildikçe mıknatısın momente olan etkisinin azaldığından söz edilebilir. Bu durum SynRM'lerde akının büyük bileşeninin d-ekseni üzerinden akmasının bir sonucudur. Dolayısı ile d-eksenine yakın mıknatıslar manyetik alan ile daha iyi etkileşime girmektedir. E ve F modelleri moment titreşimi açısından incelendiğinde, q-ekseni mıknatıs hacmi sabit tutularak, mıknatısların bir kısmının d-ekseninin birinci bariyerinden ikinci bariyerine aktarılmasının moment titreşimini artırdığı görülmüştür. Bu sonuç, mıknatısların d-ekseni boyunca ve olabildiğince d-eksenine yakın yerleştirilmesi gerektiği sonucunu desteklemektedir.

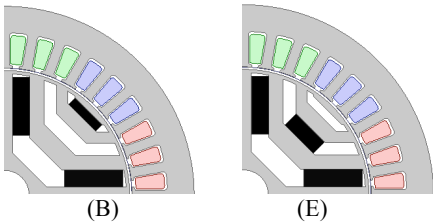


Şekil 8: Modeller A ve D

Tablo X: Modeller A ve D'nin eksenlere göre mıknatıs hacmi dağılımı

Toplam Mıknatıs Hacmi [cm ³]	Model	Mıknatıs Hacmi [cm ³]	
		d-ekseni	q-ekseni
25,64	A	25,64	0
31,01	D	31,01	0

Şekil 8, Tablo 6 ve Tablo 10 incelendiğinde A modelinin birinci bariyer d-ekseni yönünde yerleştirilen mıknatısın hacminin 3,14 cm³ azaltıldığı ve mıknatısın yine d-ekseni yönünde ikinci bariyerine 8,52 cm³ mıknatıs eklendiği görülmektedir. Toplam mıknatıs hacmi 5,37 cm³ artmasına rağmen moment yine 1,2 Nm değerinde sabit kalmıştır. Bununla birlikte d-ekseni 1. bariyerinde en iyi performansı veren mıknatıs hacminin azalması ile moment titreşiminin yaklaşık % 1 arttığı görülmektedir. Bu sonuç E ve F modellerinde moment titreşimi bakımından varılan sonucu desteklemektedir.

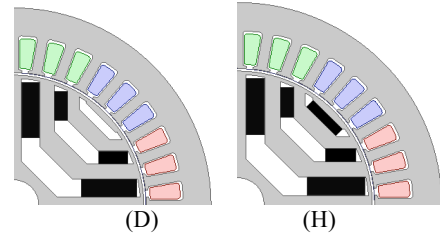


Şekil 9: Modeller B ve E

Tablo 11: Modeller B ve E'nin eksenlere göre mıknatıs hacmi dağılımı

Toplam Mıknatıs Hacmi [cm ³]	Model	Mıknatıs Hacmi [cm ³]	
		d-ekseni	q-ekseni
28,71	B	24,58	4,13
32,32	E	24,58	7,74

Şekil 9 ve Tablo 11'deki B ve E modelleri incelendiğinde E modelindeki toplam mıknatıs hacmi fazla olmasına karşın üretilen momentlerin 1,2 Nm olduğu görülmektedir. Bunun yanı sıra, q-eksenindeki mıknatıs hava aralığına yaklaştıkça moment titreşimi artmaktadır. Tablo 3 incelendiğinde, E modelindeki q-ekseni ikinci bariyer mıknatısının birinci bariyere taşınması, mıknatıs hacmini küçültmesine rağmen, moment titreşimini yaklaşık olarak % 2 oranında artırmıştır. B ve E modelleri karşılaştırmasından q-ekseni üzerine yerleştirilen mıknatısların, hava aralığına yakın bariyerlere gidildikçe moment titreşimini artırdığı sonucuna ulaşılmaktadır. Mıknatıs q-ekseninde mile doğru yaklaştıkça titreşim azalmaktadır.



Şekil 10: Modeller D ve H

Tablo 12: Modeller D ve H'nin eksenlere göre mıknatıs hacmi dağılımı

Toplam Mıknatıs Hacmi [cm ³]	Model	Mıknatıs Hacmi [cm ³]	
		d-ekseni	q-ekseni
31,01	D	31,01	0
35,14	H	31,01	4,13

Şekil 10, Tablo 3 ve Tablo 12 incelendiğinde modeller D ve H'nin d-eksenleri mıknatıs hacimleri aynı iken q-ekseni üçüncü bariyerine eklenen mıknatısın etkisi görülebilir. d-ekseni boyunca birinci ve ikinci bariyer mıknatısları sabit tutularak, q-ekseni üzerinde üçüncü bariyere 4,13 cm³ mıknatıs eklenmiştir. Bu durumda moment titreşimini % 0,6 artarken üretilen moment aynı değerde kalmıştır. Dolayısı ile q-ekseni üzerinde üçüncü bariyere eklenen mıknatısın en düşük etkiyi yaptığı söylenebilir.

4. Sonuçlar

Kurulan ve SEY ile analizleri yapılan PMSynRM'lerin sonuçları incelendiğinde, q-ekseni üzerine yerleştirilen mıknatısların moment üretimi katkıları, d-ekseni boyunca yerleştirilen mıknatıslara göre çok daha düşüktür. Dolayısı ile aynı hacimde mıknatıslar yerleştirilirken aynı hacimden maksimum performans elde edebilmek için mıknatıslar d-eksenine yerleştirilmelidir. Bununla beraber d-ekseni üzerine yerleştirilen mıknatısların hava aralığına yaklaşması moment titreşimini azaltmaktadır.

Diğer taraftan mıknatısların en iyi performansı verdiği akı bariyeri merkeze en yakın olan birinci akı bariyeridir. Milden yarıçapsal olarak dışa doğru gidildikçe bariyerlere eklenen mıknatısların etkileri giderek azalmaktadır. Ayrıca d-ekseni üzerine ikinci bariyere yerleştirilen mıknatıslar ve q-ekseni üzerinde yerleştirilen mıknatıslar hava aralığına yaklaştıkça moment titreşimini artırmaktadır.

5. Teşekkür

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'nun 115E416 no'lu projesi ve İTÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Biriminin ITU-BAP-39466 no'lu araştırma projesinin destekleri ile hazırlanmıştır.

6. Kaynaklar

- [1] I. Boldea, *Reluctance Synchronous Machines and Drives* (1996). Clerandon Press, Oxford.
- [2] Bianchi, N., Bolognani, S., Carraro, E., Castiello, M., Fornasiero, E. (2016) Electric Vehicle Traction Based on Synchronous Reluctance Motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52(6), 4762-4769.
- [3] Morimoto, S., Sanada, M., & Takeda Y. (2001). Performance of PM-assisted synchronous reluctance motor for high-efficiency and wide constant-power operation. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 37 (5), 1234-1240.
- [4] Vagati, A., Pastorelli, M., Francheschini, G., & Petrache, S. C. (1998). Design of low-torque-ripple synchronous reluctance motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 34(4), 758-765.
- [5] Wang, K., Zhu, Z. Q., Ombach, G., Koch, M., Zhang, S., & Xu, J. (2013, March). Optimal slot/pole and flux-barrier layer number combinations for synchronous reluctance machines. In the Proceeding of 2013 IEEE 8th International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER 2013) (pp. 1-8).
- [6] Dulanto, A. O. Design of a synchronous reluctance motor assisted with permanent magnets for pump applications. Yüksek Lisans Tezi, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 2015