

**T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI**

**SENKRON RELÜKTANS MOTORLARDA KALICI MİKNATIS KULLANARAK
PERFORMANS ARTTIRILMASI**

Mustafa Ufukcan URCAN

Dr. Öğr. Üyesi Fadıl KUYUCUOĞLU



MANİSA-2022

**Mustafa
Ufukcan
URCAN**

**SENKRON RELÜKTANS MOTORLARDA KALICI MIKNATIS
KULLANARAK PERFORMANS ARTTIRILMASI**

2022

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Mustafa Ufukcan URCAN



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	I
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	III
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	V
TABLO DİZİNİ	VII
TEŞEKKÜR.....	VIII
ÖZET.....	IX
ABSTRACT.....	XI
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Taraması	3
2. GENEL BİLGİLER	8
2.1 Elektromekanik Enerji Dönüşümü	8
2.2 Elektrik Makinaları.....	10
2.2.1 DC Makineler	12
2.2.2 Fırçasız DC Makineler	14
2.2.3 Asenkron Makineler	15
2.2.4 Senkron Makinalar	17
2.2.5 Relüktans Motorlar	18
2.3 Elektrikli Araçlar	21
2.3.1 Elektrikli Araçlarda Kullanılan Motor Tipleri	24
2.4 Mıknatıs Destekli Senkron Relüktans Motor	27
2.4.1 Relüktans Motorlarda Moment	27
2.4.2 Mıknatıslı Senkron Motorlarda Moment	31
2.4.3 Mıknatıs Destekli Senkron Relüktans Motorlarda Moment	32
2.4.4 Güç Faktörü	33
2.4.5 Tork Dalgalanması.....	35
2.4.6 Rotor Tipleri	35
2.4.7 Enine ve Boyuna Laminasyon	39
3. MATERYAL ve YÖNTEM	41
3.1 SynRM Modellenmesi ve Modelin Doğrulanması.....	41
3.2 Tasarımın Mıknatısa Uygun Hale Getirilmesi	47
3.3 Mıknatısların Etkisi	50
3.3.1 1 Numaralı Tasarım: 2mm Mıknatıs.....	50
3.3.2 2 Numaralı Tasarım: 4mm Mıknatıs.....	52
3.3.3 3 Numaralı Tasarım: 6mm Mıknatıs.....	54
3.3.4 4 Numaralı Tasarım: 8mm Mıknatıs.....	55
3.3.5 5 Numaralı Tasarım: 10mm Mıknatıs.....	57
3.3.6 6 Numaralı Tasarım: 2-8 mm Mıknatıs	58
3.3.7 7 Numaralı Tasarım: 4-10 mm Mıknatıs	60
3.3.8 8 Numaralı Tasarım: 6-12 mm Mıknatıs	62
3.4 Oluk Sayısının Etkisi.....	65
3.5 Paket Boyunun Etkisi	66
3.6 Mıknatıs Sayısı	67
3.7 Akı Bariyerlerinin Kenarlarına Kavis Verilmesi.....	68
3.8 Sargıların Optimize Edilmesi	73
3.9 Motorun Termal, Mekanik ve Verimlilik Analizleri.....	74
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	78
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	87

KAYNAKLAR	88
ÖZGEÇMİŞ	91



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AC	Alternatif Akım
ALA	Boyuna Laminasyon
Ar-Ge	Araştırma-Geliştirme
A₀	Hava Aralığı Alanı [metre ²]
D	Sönümlenme Katsayısı
DC	Doğru Akım
e	İndüklenen Gerilim
EMK	Elektro Motor Kuvvet
f_s	Gerilimin Frekans Değeri
IE	Uluslararası Verimlilik
IPMSM	Gömülü Sabit Mıknatıslı Senkron Motor
K	Yay Sabiti
M	Kütle
MDSynRM	Mıknatıs Destekli Senkron Relüktans Motor
N	Tur Sayısı
n_r	Rotor Dönüş Hızı
n_s	Senkron Dönüş Hızı
p	Çift Kutup Sayısı
PM	Kalıcı Mıknatıs
PMSG	Sabit Mıknatıslı Senkron Generatör
PMSM	Sabit Mıknatıslı Senkron Motor
rpm	Devir/Dakika
S	Kayma
SRM	Anahtarlama Relüktans Motor
SynRM	Senkron Relüktans Motor
T	Tesla
TLA	Enine Laminasyon
W	Watt
λ	Halkalanan Akı
φ	Manyetik Akı [Wb]
w	Açısal Hız [rad/saniye]
R	Relüktans [1/Henry]

g_o	Hava Aralığı Mesafesi [metre]
μ	Manyetik Geçirgenlik [Henry/metre]
Ψ_m	Mıknatıs Halkalanma Akısı
ζ	Çıkıklık Oranı



ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Elektromekanik sistem blok diyagramı	8
Şekil 2.2. Manyetik kuplaj	8
Şekil 2.3. Enerji dengesi.....	9
Şekil 2.4. Manyetik alanlı elektromekanik sistem	9
Şekil 2.5. Elektrik makinaları tipleri	11
Şekil 2.6. Doğru akım motoru ve iç yapısı	12
Şekil 2.7. Tekerlek içi fırçasız doğru akım motoru.....	15
Şekil 2.8. Asenkron motora ait kesit görünümü.....	17
Şekil 2.9. Senkron generatör	18
Şekil 2.10. Temel relüktans hareket şeması	19
Şekil 2.11. Anahtarlama relüktans motor	20
Şekil 2.12. Senkron relüktans motor	21
Şekil 2.13. Farklı araç tiplerinde kullanılan rotor geometrileri.....	23
Şekil 2.14. Relüktans motorun yapısı	28
Şekil 2.15. Endüktansın rotor konumuna göre değişimi	29
Şekil 2.16. Çıkıklık oranının güç faktörüne etkisi	33
Şekil 2.17. SynRM fazör diyagramı.....	34
Şekil 2.18. MDSynRM fazör diyagramı	34
Şekil 2.19. Tork salınımları (a) kaykısız (b) kaykılı	35
Şekil 2.20. Dairesel rotor geometrisi.....	36
Şekil 2.21. Segmentli rotor geometrisi.....	36
Şekil 2.22. Farklı tasarımlardaki rotor geometrileri.....	37
Şekil 2.23. R ve J rotor geometrisi	38
Şekil 2.24. Machaon rotor tasarımı	39
Şekil 2.25. Farklı rotor tasarımları (a) çıkık kutuplu (b) boyuna laminasyonlu (c) enine laminasyonlu.....	40
Şekil 3.1. Volt AŞ asenkron elektrik motoru	41
Şekil 3.2. Örnek SynRM çizimi	42
Şekil 3.3. Referans motor akım pozisyon grafiği.....	45
Şekil 3.4. Referans motor gerilim pozisyon grafiği	45
Şekil 3.5. Referans motor tork pozisyon grafiği	46
Şekil 3.6. Referans motor tork zaman grafiği	46
Şekil 3.7. Kavisli mıknatıs	47
Şekil 3.8. Köşeli mıknatıs	48
Şekil 3.9. Oluşturulan rotor geometrisi	48
Şekil 3.10. Tasarlanan rotora ait tork pozisyon grafiği.....	50
Şekil 3.11. 1 numaralı tasarıma ait mıknatıslar ve polarizasyonları	51
Şekil 3.12. 1 numaralı tasarıma ait tork pozisyon grafiği	51
Şekil 3.13. 2 numaralı tasarıma ait tork pozisyon grafiği	53
Şekil 3.14. 3 numaralı tasarıma ait tork pozisyon grafiği	54
Şekil 3.15. 4 numaralı tasarıma ait tork pozisyon grafiği	56
Şekil 3.16. 5 numaralı tasarıma ait tork pozisyon grafiği	57
Şekil 3.17. 6 numaralı tasarıma ait mıknatıslar ve polarizasyonları	59
Şekil 3.18. 6 numaralı tasarıma ait tork pozisyon grafiği	59
Şekil 3.19. 7 numaralı tasarıma ait tork pozisyon grafiği	61
Şekil 3.20. 8 numaralı tasarıma ait tork pozisyon grafiği	62
Şekil 3.21. Düz tasarıma ait akı bariyeri	69

Şekil 3.22. Eğim verilmiş tasarıma ait akı bariyeri.....	69
Şekil 3.23. Kenarlara eğim verilmiş rotor geometrisi ve mıknatıslar	70
Şekil 3.24. Düz rotor geometrisi akı yoğunluğu	71
Şekil 3.25. Eğimli rotor geometrisi akı yoğunluğu	71
Şekil 3.26. En iyileştirilmiş sargı düzeni	73
Şekil 3.27. Verim hız grafiği.....	75
Şekil 3.28. Nominal termal analiz sonucu	75
Şekil 3.29. 3000 devir/dk mekanik analiz sonucu.....	76
Şekil 3.30. 6000 devir/dk mekanik analiz sonucu.....	77
Şekil 4.1. Üretilen rotorun çizimi.....	78
Şekil 4.2. Üretilen motorun tork pozisyon grafiği simülasyon sonucu.....	79
Şekil 4.3. Üretilen tasarımın sıcaklık simülasyon sonuçları	80
Şekil 4.4. Üretilen motora ait rotor laminasyonu	81
Şekil 4.5. Rotor pres işlemi	82
Şekil 4.6. Tornalama işlemi tamamlanmış rotor	83
Şekil 4.7. Gövdeye çakılmış stator.....	84
Şekil 4.8. Montajı tamamlanan motor.....	84
Şekil 4.9. Test düzeneği	85
Şekil 4.10. Motora ait zıt EMK değerleri.....	86

TABLO DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Elektrik motor türleri ve kullanılan araç modelleri	26
Tablo 3.1. Referans motora ait katalog verileri.....	42
Tablo 3.2. Benzetimi yapılan motor parametreleri	44
Tablo 3.3. Oluşturulan motora ait bilgiler.....	49
Tablo 3.4. Tasarım 1 için bilgiler.....	52
Tablo 3.5. Tasarım 2 için bilgiler.....	53
Tablo 3.6. tasarım 3 için bilgiler.....	55
Tablo 3.7. Tasarım 4 için bilgiler.....	56
Tablo 3.8. Tasarım 5 için bilgiler.....	58
Tablo 3.9. Tasarım 6 için bilgiler.....	60
Tablo 3.10. Tasarım 7 için bilgiler.....	61
Tablo 3.11. Tasarım 8 için bilgiler.....	63
Tablo 3.12. Tasarımların karşılaştırılması	64
Tablo 3.13. Farklı oluk sayılı tasarım sonuçları.....	65
Tablo 3.14. Paket boyunun etkisi.....	67
Tablo 3.15. Mıknatıs yapısının etkisi.....	68
Tablo 3.16. Düz ve eğimli tasarım karşılaştırması.....	72
Tablo 3.17. Düz ve eğimli tasarım karşılaştırması.....	74
Tablo 4.1. Üretilen motora ait simülasyon sonuçları	79

TEŞEKKÜR

Çalışmamın her aşamasında bana destek olan, bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Fadıl KUYUCUOĞLU'na, yüksek lisans eğitimim boyunca yardımlarını esirgemeyen bölüm hocalarıma ve asistan arkadaşlarıma, hayatımın her anında bana yol gösterip destek olan aileme teşekkür ederim.

Verdiği teknik destekler için Volt Elektrik Motor SAN. TİC. A.Ş. firmasına teşekkür ederim.

Mustafa Ufukcan URCAN
Manisa, 2022



ÖZET

Yüksek Lisans

Senkron Relüktans Motorlarda Kalıcı Mıknatıs Kullanarak Performans Arttırılması

Mustafa Ufukcan URCAN

Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Fadıl KUYUCUOĞLU

Elektrik motorları akıllı cihazlarımızdan nükleer santrallere kadar hayatın her alanında kendisine yer edinmiştir. Yüksek miktarda kullanımından dolayı teknolojik olarak gelişmiş olsalar da gelişmesi gereken ya da gelişebilecek farklı alanlar barındırmaktadır.

Dünyada üretilen elektriğin %65'i elektrik motorlarında harcanmaktadır. Bu oran ülkemizde %70 seviyelerine çıkmaktadır. Elektrik üretimi kısmında ise %93'lük bir kısım elektrik makinalarından sağlanmaktadır. Küresel olarak bu kadar yüksek oranda tüketim ve üretim yapılan bir alanda yapılacak iyileştirmeler ekonomik ve çevresel olarak çok büyük etki yapacaktır.

Hem teknolojinin ve ihtiyacın artması hem de elektrikli araçların çoğalması sonucu elektrik motorlarında harcanan enerji miktarı ciddi boyutlara ulaşacaktır. Günümüzde verimlilik ve uzun ömür her üründen beklediğimiz temel kriterlerden birisi haline gelmiştir. Bu durum elektrik motorları için de geçerlidir. Bu amaç için var olan motorlarda iyileştirme çalışmaları ve farklı kombinasyonları deneme çalışmaları sürmektedir.

Bu çalışmalardan olan Mıknatıs Destekli Senkron Relüktans Motorlar (MDSynRM) son zamanlarda dikkat çekmektedir. MDSynRM temeli Senkron Relüktans Motorlardan (SynRM) ve Gömülü Mıknatıslı Senkron Motorlardan gelmektedir. SynRM rotorunda sargı bulundurmaması, akı bariyerleri sayesinde ağırlık avantajının olması, bakım ve maliyet konularında avantajlı olması ve gelişen sürücü teknolojileri ile geleneksel motorlarla kıyaslanabilir ve uygulamaya göre tercih edilir motor tipi olarak günümüzde kendisine yer edinmektedir.

SynRM motorunun dezavantajlarından olan düşük güç faktörü ve düşük güç yoğunluğu sebebiyle küçük hacim ve yüksek performans gerektiren (örn. Elektrikli araçlar) ya da yüksek verim gerektiren konularında sabit mıknatıslı senkron motorları (PMSM) ilgili alanda lider yapmaktadır. SynRM motorların bu eksilerini gidermek için rotorunda bulunan akı bariyerlerine mıknatıs ekleyerek MDSynRM tipi motorlar elde edilebilmektedir.

SynRM ve MDSynRM tipi motorlar standart çok fazlı elektrik motoru ile aynı stator yapısını kullanmaktadır. Bu motorların temel farkı rotor kısmında meydana gelmektedir. Temel mantığı statorda oluşan manyetik alanın en az direnç ile karışılacağı yolu takip etmesine dayanmaktadır. Günümüz motorlarında bunu sağlamak için hava aralığı kullanılmaktadır. Bu hava aralıkları belirli bir düzen ile oluşturulup statorda oluşan manyetik alanın rotor üzerinde tork oluşturmalarını sağlar.

Endüktans matrislerin çözümü uzun ve karmaşık olduğu için rotor yapısını belirli dönüşüm yöntemleri ile d ve q eksenleri olarak tanımlamak mümkündür. d eksenini en düşük manyetik direnç (Relüktans) olan yönü tanımlarken q eksenini en yüksek manyetik direnç olan yolu tanımlamaktadır.

SynRM ya da MDSynRM tipi motorlar d ve q eksenleri endüktans oranına (Çıkıklık) göre çalışmaktadır. D eksenini endüktansı yüksek değerde iken q eksenini endüktansı küçük değerde olur. Bu oranın yüksek olması makinenin performansı açısından önemlidir. Oranı yüksek tutmak için akı bariyerleri farklı sayılarda, şekilde ve düzende tasarlanır. MDSynRM için rotorun q eksenine mıknatıslar eklenir. Bu sayede q eksenini endüktansı daha da küçük bir değere ulaşır. Bu düşüşün sonucu olarak q eksenini üzerinden geçen akı da azalacağı için d eksenini de bu durumdan etkilenir ve endüktansı bir miktar artar. Sonuç olarak daha yüksek çıkıklık oranı sayesinde performans üzerinde olumlu artış gerçekleşir.

Bu tezde var olan bir senkron relüktans motor referans olarak alınmıştır. Referans motorun boyutlarında ve gücünde MDSynRM tasarlanmıştır. Öncelikle referans motor paket programlar üzerinde modellenmiş ve katalog bilgileri ile simülasyon sonuçlarının tutarlılığı gözlemlenmiştir. Ardından bu ölçülerde rotor tasarımı için çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Akı bariyeri sayısı, genişlikleri, kenar boşlukları gibi parametreler üzerinde en iyileme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu işlemler sırasında daha yüksek performans veren tasarımlar olmasına rağmen üretilebilirlik, maliyet ve malzeme temini konuları da dikkate alınmıştır. Rotorun temel geometrisi hazırlandıktan sonra bariyerlere bütün kombinasyonlarda ve farklı uzunluklarda mıknatıslar yerleştirilerek simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Rotor tasarımı sonrası stator üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Burada da farklı oluk sayısı, dış genişliği, sargı tipi ve düzeni konusunda en iyileme çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmalar ile daha yüksek verim, daha yüksek güç faktörü ve daha düşük akım değeri ile çalışan, referans motor ile aynı güç değerinde olan motor tasarımı oluşturulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Relüktans motor, Mıknatıs, Yüksek verim

2022, 91 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

Improving Performance Using Permanent Magnets in Synchronous Reluctance Motors

Mustafa Ufukcan URCAN

**Manisa Celal Bayar University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Electrical and Electronics Engineering**

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Fadıl KUYUCUOĞLU

Electric motors have found a place in every aspect of life, from our smart devices to nuclear power plants. Although they are technologically advanced due to their high use, they contain different areas that need to be developed or that can be developed.

65% of the electricity produced in the world is consumed in electric motors. This rate rises to 70% in our country. In the electricity generation part, 93% is provided from electrical machines. Improvements to be made in an area with such high consumption and production globally will have a huge impact both economically and environmentally.

As a result of both the increase in technology and need and the proliferation of electric vehicles, the amount of energy consumed in electric motors will reach serious dimensions. Today, efficiency and longevity have become one of the basic criteria we expect from every product. This also applies to electric motors. For this purpose, improvement studies on existing engines and trial studies of different combinations are ongoing.

Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motors (MDSynRM), which is one of these studies, has attracted attention recently. The basis of MDSynRM comes from Synchronous Reluctance Motors (SynRM) and Embedded Magnet Synchronous Motors. SynRM rotor has no windings, has a weight advantage thanks to flux barriers, is advantageous in terms of maintenance and cost, and is comparable to conventional motors with developing drive technologies, and it has a place for itself as a preferred motor type according to the application.

Due to the low power factor and low power density, which are the disadvantages of the SynRM motor, it makes permanent magnet synchronous motors (PMSM) the leader in the relevant field in areas that require small volume and high performance (eg electric vehicles) or high efficiency. In order to eliminate these disadvantages of SynRM motors, MDSynRM type motors can be obtained by adding magnets to the flux barriers in the rotor.

SynRM and MDSynRM type motors use the same stator structure as a standard polyphase electric motor. The main difference of these motors occurs in the rotor

part. Its basic logic is based on following the path where the magnetic field formed in the stator will be mixed with the least resistance. Air gap is used in today's engines to provide this. These air gaps are created in a certain order and allow the magnetic field formed in the stator to create torque on the rotor.

Since the solution of inductance matrices is long and complex, it is possible to define the rotor structure as d and q axes with certain conversion methods. The d axis defines the direction with the lowest magnetic resistance (Reluctance), while the q axis defines the path with the highest magnetic resistance.

SynRM or MDSynRM type motors work according to the d and q axes inductance ratio (Dislocation). The d-axis inductance is high, while the q-axis inductance is small. The high rate of this ratio is important for the performance of the machine. To keep the ratio high, flux barriers are designed in different numbers, shapes and layouts. For MDSynRM, magnets are added to the q-axis of the rotor. In this way, the q-axis inductance reaches an even smaller value. As the flux passing over the q axis will decrease as a result of this decrease, the d axis will also be affected by this situation and its inductance will increase a little. As a result, there is a positive increase in performance thanks to the higher dislocation rate.

In this thesis, an existing synchronous reluctance motor is taken as reference. MDSynRM is designed with the dimensions and power of the reference engine. First of all, the reference engine was modeled on package programs and the consistency of the catalog information and simulation results was observed. Then, studies were carried out for rotor design in these dimensions. Optimization studies were carried out on parameters such as the number of flux barriers, their widths, and margins. Although there are designs that give higher performance during these processes, manufacturability, cost and material supply issues are also taken into consideration. After the basic geometry of the rotor was prepared, simulations were carried out by placing magnets in all combinations and different lengths on the barriers. After the rotor design, studies were carried out on the stator. Here, too, optimization studies were carried out on different number of grooves, tooth width, winding type and arrangement.

With these studies, a motor design that works with higher efficiency, higher power factor and lower current value and has the same power value as the reference motor has been created.

Keywords: Reluctance motor, Magnet, High efficiency

2022, 91 pages

1. GİRİŞ

Ülkemizde ve dünyada yüksek enerji verim sınıfı elektrik motoru kullanımı isteğe bağlı olmaktan çıkıp zorunluluk haline gelmektedir. Türkiye 11. Kalkınma Planında bu konu belirtilmektedir. Ayrıca 31468 Numaralı Resmî gazetede yayınlanan “Elektrik Motorlarının ve Değişken Hız Sürücülerinin Çevreye Duyarlı Tasarım Gerekliliklerine Dair Tebliğ” ülkemizde önümüzdeki yıllarda hangi tip verim seviyesinde motor kullanılabileceği ve kullanılamayacağı konusunu açıklamaktadır.

Bu tebliğ’e göre Temmuz 2021 tarihinden sonra kullanılabilecek en düşük verim seviyesi IE3 ve Temmuz 2023 tarihinden sonra IE4 olacaktır. Elektrik motor teknolojilerinin çıkabileceği verim seviyeleri tablosuna göre asenkron motorlar IE4 seviyesine senkron motor teknolojisine göre daha zor çıkmaktadır. Asenkron motorların rotorlarındaki kısa devre çubuklarından geçen akımdan dolayı oluşan kayıpları elimine etmek ve verim seviyesini yükseltmek için büyük güçte üretilmesi gerekmekte ve diğer kayıpları (sürtünme, bakır vb.) düşürmek için pahalı donanımlara ihtiyaç duymaktadır. Bunlar da maliyeti arttırmakta ve her uygulamada kullanımını kısıtlamaktadır. Diğer yandan senkron motor teknolojileri ise bu konuda daha avantajlıdır. Senkron motorlar temelde rotoru sargılı, rotoru mıknatıslı ve relüktans tipi olarak üç ana gruba ayrılabilir [1].

Senkron relüktans motorlar köken olarak Nikola Tesla’nın 1887 yaptığı keşfe kadar uzamaktadır [2] ancak modern olarak kökeni 1923 yılında ortaya atılmıştır [3]. İlk motorlar çıkık kutuplu ya da modifiye edilmiş indüksiyon motorları biçimindeydi. Gösterdikleri düşük performans, sürücülerin olmayışı ve gelişmemiş yarıiletken teknolojileri yüzünden 1960 ve 1970’li yıllara kadar bilinen ve kullanılan bir motor tipi olmamıştır.

1990’lı yıllara kadar kullanım olarak hala çok az olmasına karşın, o yıllarda ortaya çıkan yeni sürücü teknolojilerinin ortaya çıkması, tasarımsal anlamda yenilikçi çalışmaların hız kazanması ve güzel sonuçlar vermesi sonucu sektörde kendisine yer edinmeye başlamıştır [4].

Gelişen sürücü teknolojileri ve yarıiletken fiyatlarının düşmesi sonucu senkron relüktans motorların asenkron motorlara göre artıları dikkat çekmiş ve tercih edilen motorlar haline gelmiştir.

Senkron relüktans motorlar rotorlarındaki d ve q eksenlerinin endüktans oranına ve farkına bağlı olarak performans veren elektrik makineleridir. Çıkıklık oranı $\left(\frac{L_d}{L_q}\right)$ oranının yüksek olması için d eksen endüktansının yüksek ve q eksen endüktansının düşük olması istenmektedir. Bu durumu sağlayabilmek için günümüzde rotora akı bariyerleri açılmaktadır. Motordan daha fazla performans elde edebilmek için bu oran arttırılmak istenmektedir ancak burada termal ve mekanik limitler bulunmaktadır. Bu sorunun üzerinden gelmek için araştırmacılar Mıknatıs Destekli Senkron Relüktans Motor tasarımını geliştirmişlerdir.

MDSynRM SynRM'lere oranla daha yüksek verim seviyelerine çıkması, yüksek güç faktörü sağlaması, birim hacim başına daha yüksek tork üretmesi sayesinde yüksek performans istenen uygulamalarda kendisine yer edinmiştir.

Özellikle elektrikli araçlar gibi yüksek güç yoğunluğu, yüksek verim seviyesi, düşük maliyet ve küçük boyutlu tasarım istenen yerler için MDSynRM iyi bir alternatif haline gelmiştir.

Günümüzde elektrikli araçların büyük bir kısmı PMSM teknolojisini kullanmaktadır. Buradaki sorun bu motor tipinin yüksek miktarda mıknatıs kullanmasından kaynaklanmaktadır. Gerekli enerji yoğunluğunu elde etmek için güçlü mıknatıslar gerekmektedir ve bu mıknatıslar nadir toprak elementli mıknatıs olarak geçmektedir. Dünyada en büyük nadir toprak elementi üreticisi olan Çin'de fiyatlar ciddi oranda artmaktadır. Bu durumun önüne geçmek için üreticiler ve araştırmacılar daha az mıknatıs içeren ya da mıknatıs içermeyen çözümlere yönelmeye çalışmaktadır.

Asenkron motor teknolojisi çok az sayıda elektrikli araçta kullanılmıştır. Bunun temel sebebi ise asenkron motorların görece düşük güç yoğunluğuna sahip olmasıdır. SynRM ise düşük güç faktörü ve PMSM'lere göre düşük verim seviyesi yüzünden elektrikli araçlarda kullanılmamaktadır. Anahtarlamalı relüktans motorlar

ise yüksek tork dalgalanması yüzünden elektrikli araçlarda kendisine yer edinememiştir.

MDSynRM'ler SMSM'lere göre daha az mıknatıs içermesi, PMSM kadar yüksek güç faktörü elde etmesi ve yüksek verim seviyelerine çıkması sayesinde elektrikli araçların tahrik motoru olarak kullanılması konusunda kendisine yer edinmiştir.

Bu tezde halihazırda üretimi gerçekleştirilen bir SynRM alınıp aynı güçte ve boyutta MDSynRM motor tasarlanmıştır. Bu sayede üretim bandından çok küçük değişiklikler yapılarak daha yüksek verim seviyesinde, daha yüksek güç yoğunluğu verebilen, daha yüksek güç faktörü sağlayan ve daha az akım kullanması sonucunda daha küçük invertör ile kullanılabilecek bir motor elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan motor gücü düşük olması sebebiyle performans ve verim artış oranlarının etkisi büyük güçlü motorlara göre daha az olmuştur. Büyük güçlü motorlarda bu avantajlar daha bariz ve etkili olacaktır.

Bu çalışma baz alınarak daha yüksek güçte ve verimde elektrikli araçlar için motor tasarımı gerçekleştirilebileceği gösterilmek istenmiştir.

Bu kapsamda literatürde SynRM ve MDSynRM için yapılan araştırmalar ve çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

1.1. Literatür Taraması

Kotsko (1923), en eski motor tiplerinden olan, düşük güç ve düşük verimden dolayı diğer AC (alternatif akım) makineler ile rekabet edemeyen reaksiyon senkron motorları (rotoru sargısız çıkık kutuplu motorlar) temel alarak bir motor önermiştir. Önerdiği bu motorun rotor kısmına hava aralıkları ekleyerek d ve q manyetik alanlarını farkını arttırmayı planlamıştır. Bu öneri gelecekte gelişen senkron relüktans motorların temelini oluşturmuştur [3].

Lawrenson ve ark. (1964) yaptığı çalışmada, geleneksel radyal kutupları kullanmak yerine rotorda çevresel bölümler kullanarak tork ve güç faktörü konusunda geleneksel motora göre üstünlük sağlamıştır [5].

Cruickshank ve ark. (1971) eksenel lamine tasarımı motor geliştirmişlerdir. Geleneksel çıkık kutuplu yapılara göre daha üstün olduğunu ve geliştirilen diğer yeni tasarımlarla karşılaştırılabilir olduğunu öne sürmüşlerdir [6].

Rao (1978) eksenel laminasyonlu motor için patent almıştır. Bu patent ile motorun başlama torkunu, verimini ve güç faktörünü iyileştirmiştir. Senkron relüktans motorların tork değeri, d ve q eksenlerinin reaktans oranına bağlıdır. Bu oranı arttırmak için motoru sekmelere bölerek arttırmak istemiştir. Bu sayede q eksen relüktansı artmış bu da q eksen reaktansını düşürmüştür. Böylece d eksen reaktansının q eksen reaktansına oranı artmıştır [7].

Fratta ve ark. (1992) alan zayıflatma özelliğini koruyarak, vektör kontrollü asenkron motora eş ya da ondan daha yüksek dinamik performans veren farklı bir AC motor çözümü önermek istemiştir. Bunun için eksenel laminasyonlu motor önermişlerdir. Yaptığı çalışmalar sonucunda eksenel laminasyonlu relüktans motorun yüksek dinamik gerektiren uygulamalar için daha uygun olduğunu göstermiştir [8].

Kiriyama ve ark. (1998) güç elektroniği alanında gerçekleşen ilerlemeler sayesinde çıkıklık oranı %8.3 olan ve aynı sınıftaki bir asenkron motora göre %6 daha verimli yeni bir eksenel laminasyonlu senkron relüktans motor geliştirmişlerdir [9].

Morimoto ve ark. (2001) deneysel yöntemlerle ve analizlerle MDSynRM'nin performansını incelemişlerdir. Prototip motor SynRM'ye göre daha geniş sabit güç bölgesi (1:5), yüksek verim ve yüksek güç faktörü vermektedir. Ek olarak invertörün aniden durması sonucu kontrolsüz generatör moduna geçişinin az olduğunu göstermişlerdir. Bütün bu özellikler IPMSM (Gömülü Sabit Mıknatıslı Senkron Motor) üstün olduğu özellikler olmasına rağmen MDSynRM bunları karşılaştırmıştır. Üretim maliyeti olarak benzer olmalarına rağmen MDSynRM'in mıknatıs maliyeti çok daha düşük olmaktadır [10].

Sanada ve ark. (2011) sürekli mıknatıslı motorlar yüksek verim ve performans vermek için nadir toprak elementli mıknatıslara ihtiyaç duymaktadır. Ancak oluşan talep ve üretim arasındaki dengesizlik yüzünden mıknatıs fiyatları çok ciddi oranda artmakta ve buna alternatif olarak daha az nadir toprak elementli ya da

farklı tip mıknatıs kullanan makinalara yönelim gerçekleşmektedir. Nadir toprak elementli PMSM motor performansını yakalamak için ferrit tipi mıknatıslı MDSynRM yapısı önermişlerdir. Ferrit mıknatıslar diğer mıknatıs tiplerine göre daha kolay demanyetize olduğu için bu mıknatısların yerleşimi, miktarı ve rotor yapısı son derece önem arz etmektedir. Yazar demanyetize durumunu azaltmak için iki farklı rotor yapısı üzerinde mıknatısların demanyetize durumunu incelemiştir. Akı bariyerleri yapısında yaptığı değişiklikler sayesinde normalde demanyetize olacak ferrit mıknatısların demanyetize olmasını engellenebildiğini göstermiştir. Bu sayede hem uygun maliyetli hem de demanyetize durumun olmayan ferrit MDSynRM'lerin PMSM kadar performanslı çalışmasının mümkün olduğunu göstermiştir [11].

Bianchi ve ark. (2014) son yıllarda giderek popülaritesi artan senkron relüktans makinelerin olumsuz yönlerini iyileştirmek üzere çalışmada bulunmuşlardır. Senkron relüktans motorlar fiyatları artan nadir toprak elementli mıknatıslara ve asenkron motorlara alternatif olarak kullanılmaktadır. En büyük dezavantajlarından birisi ise düşük güç faktörüdür. Bu sorun makinenin rotor kısmına mıknatıs eklenerek üstesinden gelinebilir bir sorundur. Eklenen mıknatıs akı sonralarını doyumu götürerek güç faktörünü arttırmaktadır. Güç faktörü artışı ile daha düşük güçlü invertör kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Bu işlem için önemli olan ne kadar mıknatıs eklenmesi gerektiğidir. 0.8'den büyük güç faktörü elde etmek için mıknatısın halkalama akısı q eksenî nominal akısının üç katı olması gerektiğini öne sürmüşlerdir [12].

Talebi ve ark. (2007), makinaların modellemesinde kullanılan sonlu elemanlar gibi yöntemler sadece o tasarıma ait sonuçlar vermektedir. Bir tasarım yaparken başlangıç noktası olarak makinenin matematiksel modelinden yola çıkmak gerekmektedir. Bu yüzden yazar dört akı bariyerli MDSynRM için analitik model geliştirmiştir. Geliştirdikleri model ile akı yoğunluklarını, endüktansları, zıt EMK (Elektro Motor Kuvvet) ve tork değerlerini, mıknatısları akı bariyerinde istediği yere koyduğu zaman elde edebilmesini sağlamıştır. Simülasyon ve deneysel sonuçların birbirini doğruladığını göstermiştir [13].

Gamba ve ark. (2014), elektrik makinalarında temelde dağıtılmış ve konsantre sargı olmak üzere iki tip sargı bulunmaktadır. Konsantre sargı tiplerinden olan kesirli oluklu sargı tipi kalıcı mıknatıslı motorlarda yüksek verim ve yüksek tork yoğunluğu

sağlamaktadır. Geleneksel olarak kesirli oluklu konsantre sargı tipinin IPMSM'lerin relüktans torkunu azalttığı yönünde bir bilgi bulunmaktadır. Yazar 24 oluklu ve 10 kutuplu konsantre sargılı MDSynRM'nin 90 oluklu dağıtılmış konsantre sargılı motor ile benzer performans verdiğini göstermiştir. Konsantre sargının kolay üretim ve düşük maliyet avantajının ilerde daha çok incelenmesini önermiştir [14].

Mohanarajah ve ark. (2020), MDSynRM için yeni bir optimizasyon metodu geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri yöntemde motoru tek bir obje olarak ele almışlardır. Bu sayede mıknatıs boyutları akı bariyeri boyutları ile optimizasyon süresi boyunca değişmektedir. Sonuç olarak daha fazla sayıda optimizasyon parametresi ile optimizasyon gerçekleştirilebilmektedir [15].

Bianchi ve ark. (2016), MDSynRM maliyet olarak daha ucuz olan ferrit tipi mıknatıs kullanabilmektedir. Ferrit mıknatıs kullanıldığı zaman mıknatısların demanyetize olmasını engellemek ve gerekli manyetik alanı yaratması için gerekli mıknatıs miktarını ayarlamak önem arz etmektedir. Mıknatısların genişliği boştayken gerekli akı yoğunluğunu üretmede etkili iken kalınlığı ise tam yükte demanyetize olma durumunu etkilemektedir. Yazar sunduğu kolay analitik yöntem ile mıknatısların gerekli manyetik alanı ve demanyetize olmaması için gereken boyutlarını hesaplayabildiğini göstermiştir [16].

Pošković ve ark. (2019), MDSynRM performansını etkileyen faktörlerden birisi mıknatısların şeklidir. Sinterlenmiş mıknatıslar şekil olarak daha belirli simetride üretilebilirken enjeksiyon (bonded) ile üretilen mıknatıslar daha kompleks şekillerde üretilebilmektedir. İstenilen şekilde üretim yapılabilmesi için optimize edilmiş rotordaki akı bariyerleri tamamen mıknatıs ile doldurulabilir hale gelerek performans artışı sağlanabilmektedir. Referans SynRM ile ürettikleri enjeksiyon mıknatıslı MDSynRM arasında %50 tork farkı ve 0.7 güç faktöründen 0.96 güç faktörüne artış elde etmişlerdir bunun sonucunda ise tork dalgalanmasında artış gözlemlenmiştir. Tork ve güç faktöründeki bu artış, tork dalgalanmasındaki küçük artışı kabul edilebilir kılmaktadır. Son olarak enjeksiyonlu mıknatıs ile üretilen MDSynRM demanyetize olmadan aşırı yüklemeye dayanabildiğini söylemişlerdir [17].

Yan ve ark. (2018), enine laminasyonlu senkron relüktans makinelerde tork dalgalanmasını azaltmak için akı bariyerinde geliştirme önermişlerdir. Akı bariyer sayısı, uzunluğu ve izolasyon kalınlığı parametrelerini kullanarak düşük tork dalgalanması için bir formülasyon geliştirmişlerdir. Rotordaki akı bariyerleri açısı ile statordaki oluk sayısı ve kalınlıklarının etkisini açıklamışlardır [18].



2. GENEL BİLGİLER

2.1 Elektromekanik Enerji Dönüşümü

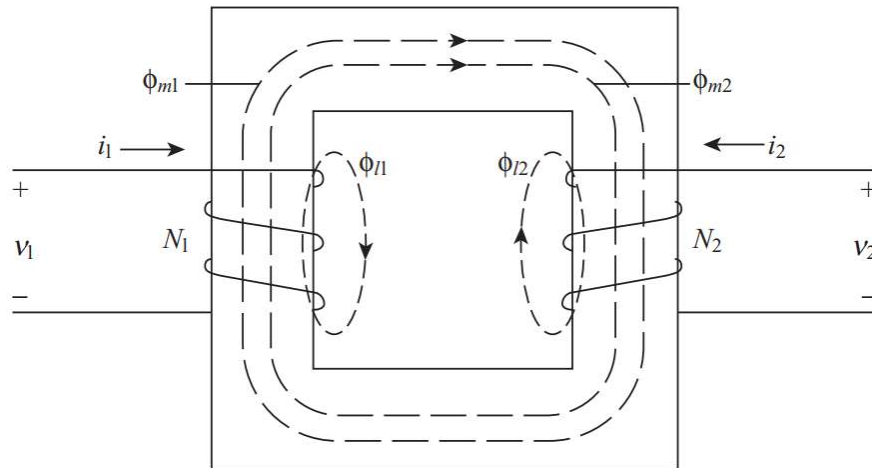
Elektrik makinaları elektriksel enerjiyi mekanik harekete ya da mekaniksel hareketi elektriksel harekete çeviren elektromekanik cihazlardır.

Elektriksel enerjiyi mekanik enerjiye çevirenlere motor, mekaniksel enerjiyi elektriksel enerjiye çevirenlere ise generatör denir. Elektriksel Sistem ve Mekanik Sistem arasındaki geçiş Şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1. Elektromekanik sistem blok diyagramı

Manyetik kuplaj elektrik makinalarının temel yapıtaşıdır. Manyetik kuplaj sayesinde elektriksel ve mekanik sistemleri arasında güç aktarımı sağlanabilmektedir. Bir nüve üzerindeki manyetik kuplaj oluşumu Şekil 2.2’de verilmiştir [19].



Şekil 2.2. Manyetik kuplaj

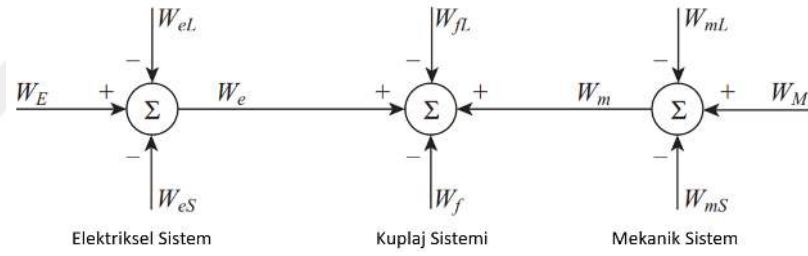
$$W_E = W_e + W_{eL} + W_{eS}$$

$$W_M = W_m + W_{mL} + W_{mS} \quad (2.1)$$

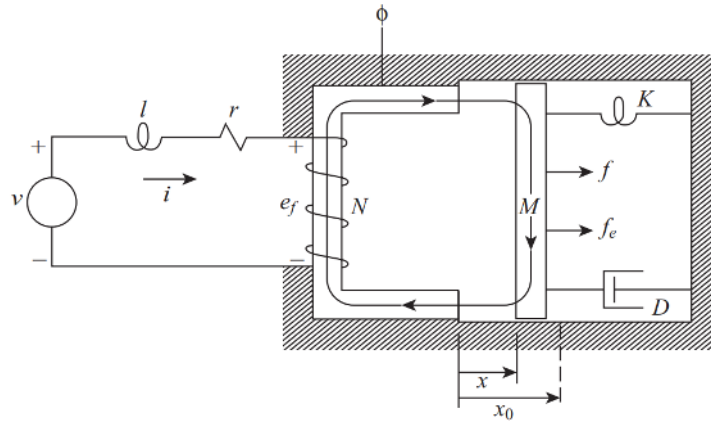
Denklem 2.1’de W_E elektriksel kaynağın sağladığı toplan enerjiyi, W_M mekanik kaynak tarafından sağlanan toplam enerjiyi, W_{eS} elektriksel sistemde depolanan ama mekanik sistemle kuplajlanmayan enerjiyi, W_{eL} ısı kaybını, W_e transfer edilen enerjiyi, W_{mS} hareketli elemanlarda depolanan enerjiyi, W_{mL} mekanik sistemdeki ısı kaybını, W_m kuplajlanan enerjiyi temsil etmektedir.

$$W_F = W_f + W_{fL} \quad (2.2)$$

Denklem 2.2’de W_F kuplaja aktarılan toplan enerjiyi, W_f kuplajda depolanan enerjiyi, W_{fL} kayıpları temsil etmektedir. Şematize edilmiş hali Şekil 2.3’te verilmiştir.



Şekil 2.3. Enerji dengesi



Şekil 2.4. Manyetik alanlı elektromekanik sistem

Şekil 2.4'te v elektrik kaynağındaki gerilimi, f harici mekanik gücü, f_e elektromanyetik gücü, r iletlen direncini, l endüktansı, M cismin kütlesini, K yay sabitini, D sönümleme katsayısını, e_f kuplajdaki gerilim düşümünü temsil etmektedir. Şekil 2.4'ün elektriksel karşılığı Denklem 2.3'te verilmiştir.

$$v = ri + l \frac{di}{dt} + ef \quad (2.3)$$

Elektrik kaynağından sağlanan toplam enerji Denklem 2.4'te verilmiştir.

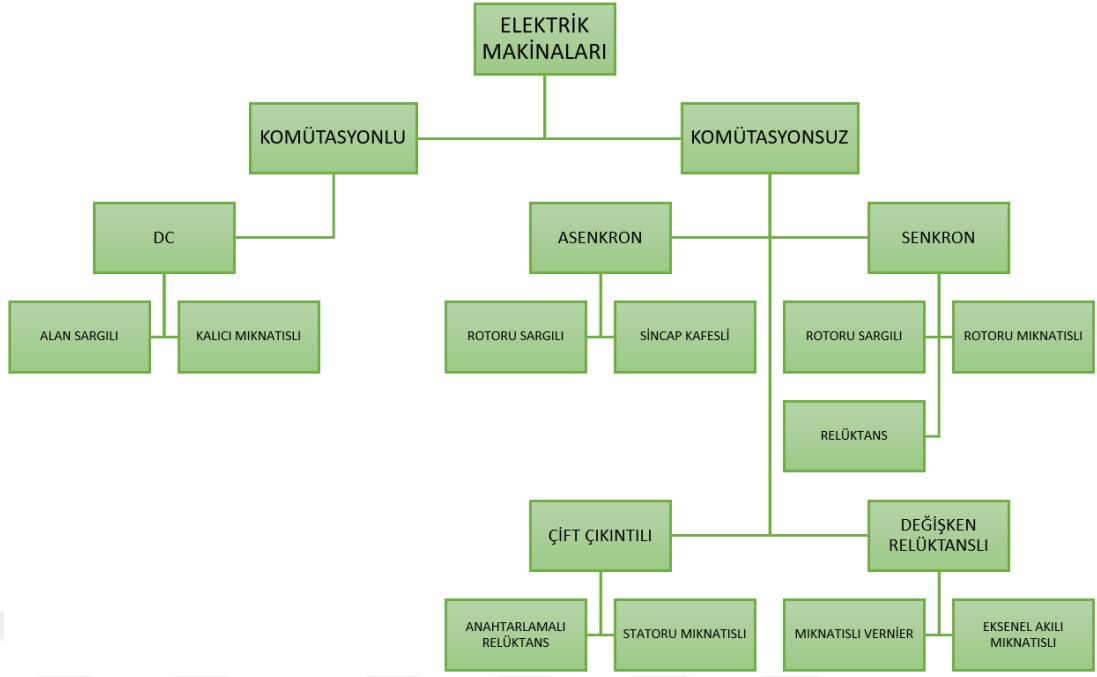
$$W_E = \int v idt \quad (2.4)$$

Enerji kayıplarını ve kuplajlanmayan enerjiyi çıkartınca, kuplaj sistemine aktarılan toplam elektrik enerjisi Denklem 2.5'te verilmiştir.

$$W_e = \int e_f idt \quad (2.5)$$

2.2 Elektrik Makinaları

Elektrik makinaları hareketli ve hareketsiz olmak üzere iki farklı yapıdadır. Motor ve generatörler hareketli iken transformatörler hareketsizdir. Elektrik makinalarına ait sınıflandırma Şekil 2.5'te verilmiştir.



Şekil 2.5. Elektrik makinaları tipleri [20]

Günümüzde gelişen sürücü teknolojileriyle beraber alternatif akımla çalışan makinaların oranı giderek artmaktadır. Bunun temel sebepleri:

- Alternatif akımın kullanımının yaygın olması
- Gelişen sürücü teknolojileri ile hassas konum kontrolünün kolaylaşması
- Yarıiletken teknoloji fiyatlarının düşmesi
- Yönetmeliklerde yüksek verimli motorların kullanımının zorunlu hale gelmesidir.

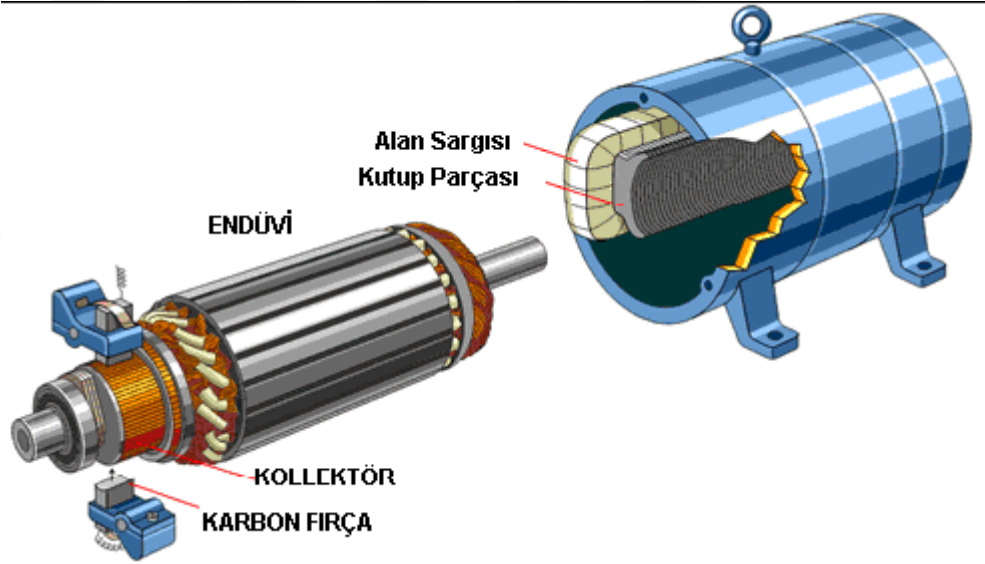
Geleneksel DC motorlarının fırça ve kollektör yapısı sürekli sürtünme halinde olduğu bu noktalarda oluşan aşınma sonucu periyodik bakım işlemleri ve oluşan kıvılcımlardan dolayı maden ocakları gibi yerlerde kullanılamaması DC motorların kullanım alanını daraltmaktadır.

2.2.1 DC Makineler

DC makinalar ilk elektrik makinalarıdır. İlk defa aydınlatma için kullanılan enerji kaynağı DC makinadır. En büyük avantajlarından birisi üzerinde değişiklik yapmadan hem motor hem de generatör olarak çalışabilmesidir. Doğru akım makinası ve parçaları Şekil 2.6’da verilmiştir.

Günümüzde kullanılan şebeke tipinin AC olması, DC generatörlerin popülerliğini yitirmiştir. DA motorlarının çalışma karakteristiği avantajları sayesinde endüstriyel uygulamalarda tercih edilebilirler.

Doğru akım makineleri kullanımı ve tasarımı kolay olmasına rağmen fırça ve kollektör yapısı yüzünden günümüzde giderek kullanım alanı azalan makine tipidir.



Şekil 2.6. Doğru akım motoru ve iç yapısı [21]

Makine içerisinde bulunan alan sargıları (Şekil 2.6) gerekli ana manyetik akıyı üretir. Makinanın dış gövdesine yerleştirilir. Sargı yerine kalıcı mıknatıs da kullanılabilir.

Endüvi ise hareketli parçadır. Akımı fırça-kollektör yapısı sayesinde üzerine alır. Her bir dilimdeki endüvi sargısı, alan sargısında bulunan manyetik alan ile

etkileşme girerek üzerinde bir kuvvet oluşturur. Bu kuvvet sayesinde makine dönmeye başlar. Dönüş sırasında sırayla bir sonraki endüvi sargısı enerjilenir ve bu sayede sürekli hareket sağlanır.

Rotor kısmı sabit devir ile döndürülür ise oluşan manyetik akı Denklem 2.6'da verilmiştir.

$$\lambda(t) = -N \phi \cos \omega t \quad (2.6)$$

Denklem 2.6'da N sargıların tur sayısını, ϕ bir kutbun akı değerini, ω açısal hızdır.

Faraday kanununa göre endüklenen gerilim

$$e(t) = \frac{d\lambda}{dt} = N\omega\phi \sin \omega t \quad (2.7)$$

olur. Endüklenen sinüzoidal gerilim kollektörler ile doğrultulduğunda

$$E_{av} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} e(t) d\omega t = \frac{2N\phi\omega}{\pi} \quad (2.8)$$

ortalama gerilim değeri (Denklem 2.8) elde edilir [22].

Bu hareket boyunca fırça ve kollektör sürekli sürtünme halindedir. Sürtünme ve ısı sonucu aşınma gerçekleşmektedir. Aşınmanın kollektörde olması makinanın ilerleyen zamanlarda sökülmesini ve rotor kısmının komple değişmesini gerektirir, bunu önlemek için aşınmanın fırçalarda gerçekleşmesi istenir. Fırçaların değiştirilmesi rotor kısmının değiştirilmesine göre çok daha kolaydır. Fırçaların yumuşak olması, kollektör dilimlerini dolduracağı için kısa devre sorununa sebep olabilmektedir. Bu yüzden karbon fırçalar ne çok yumuşak olup çabuk bitmeli ne de çok sert olup kollektör dilimlerine zarar vermemelidir.

Bu sürtünme sonucu aıĝa çıkan ısı ve kıvılcımlar doĝru akım makinelerinin maden ocakları gibi yanıcı gaz tehlikesi bulunan yerlerde kullanılmasını engellemektedir.

Fırçaların deĝişiminin bakım gerektirmesi, kıvılcım yüzünden yangın çıkarma tehlikesi bulunması DC makinaların kullanımını azaltan sebeplerin başında gelmektedir.

2.2.2 Fırçasız DC Makineler

Standart DC makinelerdeki fırça-kollektör yapısının dezavantajlarını ortadan kaldıran motorlara denir. Bunun yerine yarıiletken teknolojisi ve rotordaki konum sensörü kullanılır.

Fırçasız motorlar;

- Yüksek verim
- Doĝrusal moment/hız ilişkisi
- Yüksek moment/hacim oranı
- Daha az sargı kullanımı
- Daha az bakım

Avantajlarına sahiptir. Bunun yanında;

- Harici güç elektronik devresi ihtiyaı
- Rotor konum bilgisi
- Mıknatıs maliyeti

Dezavantajları bulundurmaktadırlar.

Sensörlü kontrolde konum bilgisi optik sensörler ya da Hall etkili sensörler ile toplanmaktadır. Sensörlerin maliyetleri ucuzlamış olsa bile bozulma ihtimalleri ve harici baĝlantıları deĝerlendirilmesi gereken konular içerisindedir.

Sensörsüz kontrolde ise sensörün dezavantajlarını ortadan kaldıran farklı teknikler kullanılmaktadır. Bu tekniklerin büyük kısmı zıt-emk bilgisini temel almaktadır.

Günümüzde özellikle tekerlek içi motor kullanımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Elektrikli bisiklet vb. uygulamalarda çokça tercih edilen tekerlek içi fırçasız motor Şekil 2.7’de görülmektedir.



Şekil 2.7. Tekerlek içi fırçasız doğru akım motoru [23]

2.2.3 Asenkron Makineler

Asenkron motorlar temel olarak stator ve rotor yapısından oluşurlar. Çok fazlı ve sincap kafesli motorlarda, stator kısmında meydana gelen döner manyetik alan rotorda bulunan ucu kısa devre yapılmış rotor çubuklarını keserek üzerlerinde gerilim endükler. Hareketli manyetik alan içerisinde kalan akım taşıyan iletkende kuvvet oluşur. Oluşan bu kuvvet ile makinenin çalışması sağlanır. Şekil 2.8’de asenkron motora ait kesit bulunmaktadır.

Senkron makinelerde rotorun dönme hızı sabittir ve etki eden manyetik alanla aynı hızdadır. Asenkron motorlarda ise rotorda gerilim endüklenmesi için rotorun dönüş hızının oluşan döner manyetik alandan az olması gerekmektedir. Hızları aynı olur ise üzerlerinde gerilim endüklenmeyeceği için dönme kuvveti oluşturamaz.

$$N_s = \frac{120 f_s}{p} \quad (2.9)$$

N_s senkron dönüş hızını, f_s gerilimin frekans değerini, p ise çift kutup sayısını ifade etmektedir.

Senkron dönüş hızı ile rotorun dönüş hızı arasındaki farka kayma denir.

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (2.10)$$

s kaymayı, n_r rotorun dönme hızını ifade eder.

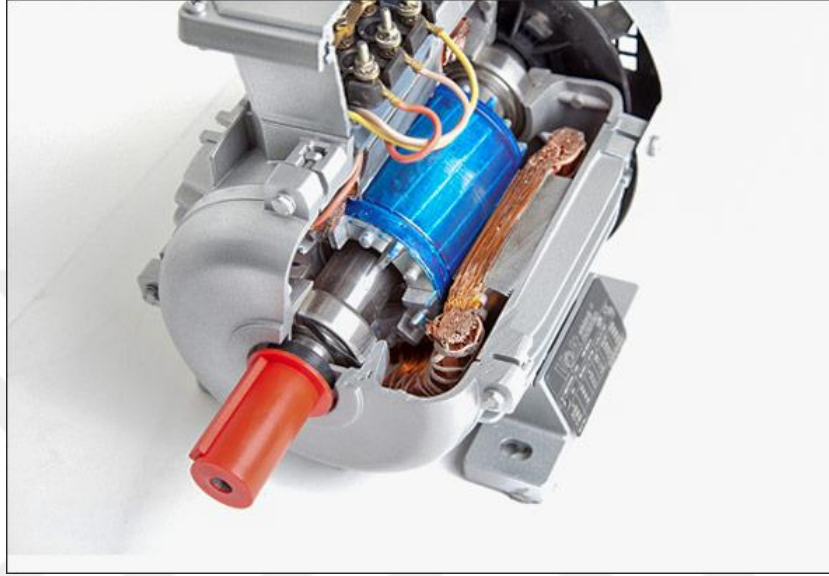
Asenkron motorlar direkt olarak şebekeden kalkışlı çalışabilen motorlar olması rağmen mildeki yüke göre değişen kayma yüzünden devir sayıları sabit olmamaktadır. Devir sayılarını sabitleyerek konum kontrolü yapılacak uygulamalar için diğer motorlar gibi sürücülere ihtiyaç duymaktadır.

Türkiye’de 2019 yılına ait elektrik tüketiminin %45’i (115.675.424 MWh) sanayide harcanmıştır [24]. Tüketicinin büyük bir kısmı elektrik motorlarında harcanmaktadır.

Türkiye’deki bütün elektrik tüketimi incelendiğinde ise elektrik motorlarının tüketimi %40 olmaktadır. Bunların %36’sı asenkron motorlara aittir [25]. Asenkron motorlar ülkemizde ve tüm dünyada kolay erişim, dayanıklılık, basitlik ve uluslararası uyumluluğu sayesinde kendisine yer edinmiştir.

Asenkron motorların tarihi eskiye uzandığı için yapısal ve teknolojik olarak ciddi ilerleme kaydetmiş motor tipidir. Verim seviyeleri görece yüksek olmasına karşın, ülkemizde ve dünyada giderek sıkılaştan enerji politikaları ve yönetmelikler ile gerekli verim sınıflarını sağlama konusunda senkron motor teknolojilerine göre dezavantajlı kalmaktadır.

Bunun temel sebebi, çalışma prensibi gereği rotor çubuklarında akım dolaşması gerekliliğidir. Bu akım kayıp olarak ortaya çıkmaktadır. Özellikle küçük güçlerde asenkron motorların yüksek verim seviyelerine çıkmaları teknolojik olarak mümkün olmasına karşın, ekonomik olarak diğer alternatiflere göre pahalı olmaktadır.



Şekil 2.8. Asenkron motora ait kesit görünümü [26]

2.2.4 Senkron Makinalar

Senkron makinalarda rotorun dönüş hızı ile manyetik alanın dönüş hızı aynı hızdadır ve bu hız Denklem 2.9’da verilmiştir. Standart bir senkron makinada stator sargıları AC ile beslenirken rotor sargıları DC kaynak ile beslenir.

Senkron makinalar kendi kendilerine çalışmaya başlayamazlar bu yüzden yol verme tekniklerine ihtiyaç duyarlar. Bu asenkron motora göre en büyük dezavantajlarından birisidir.

Senkron makinaların rotoru için DC kaynağa ihtiyaç duyması, kendi kendine başlayamaması ve fırça bilezik yapısı yüzünden motor olarak kullanımı tercih edilmemektedir. Ancak elektrik üretimi konusunda (Generatör) sinüzoidal yapıya çok yakın çıkış vermesi, çok büyük güçlerde üretilmesi, devir hızına göre çıkık

kutuplu ya da silindirik olarak yapılabilmesi gibi avantajları sayesinde açık ara lider konumdadırlar [27]. Şekil 2.9’da silindirik kutuplu senkron generatöre ait fotoğraf bulunmaktadır.

Çıkık kutuplular yüksek kutup sayısı sayesinde düşük devirlerde çalışmaktadır, çapları geniştir ve boyları kısadır. Genel kullanım alanları hidroelektrik santralleridir. Silindirik yapıda olanlar ise düşük kutup sayısı ile yüksek devirlerde çalışmaktadır. Çapları küçüktür ancak boyları uzundur. Genelde rüzgâr türbinleri ve termik santraller gibi gücü düşük ancak devir sayısı fazla olan uygulamalarda kullanılırlar. Çıkık kutuplularda rotorda bütün kutuplara sarım yapılırken, silindirik olanlarda büyük çoğunlukla $2/3$ oranında sarım yapılır. $1/3$ ’lük kısmı soğutma ve hava aralığı şeklinin düzenlenmesi için boş bırakılabilmektedir.

Günümüzde rüzgâr türbinlerinde alan sargısı yerine mıknatıs kullanan PMSG (Kalıcı Mıknatıslı Senkron Generatör) ve elektrikli araçlarda kullanılan PMSM tipleri yaygınlaşmaktadır.

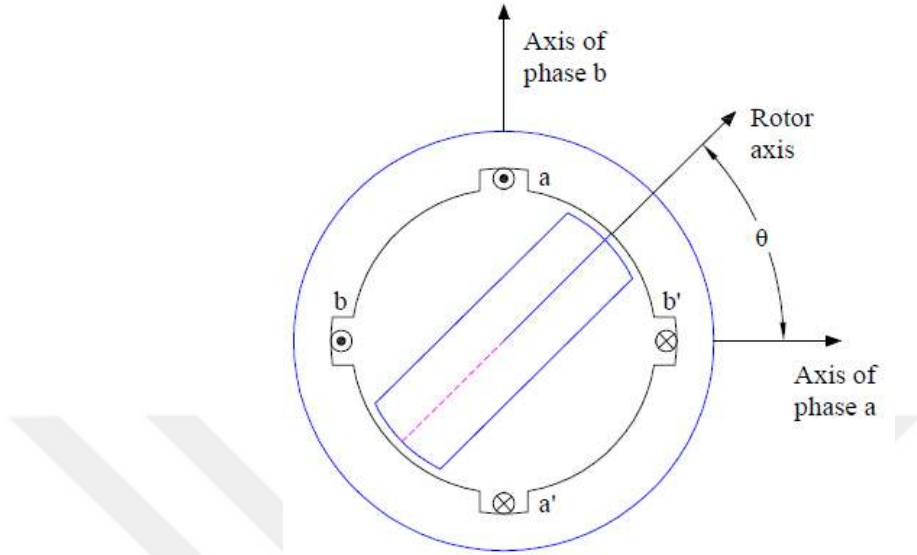


Şekil 2.9. Senkron generatör

2.2.5 Relüktans Motorlar

Relüktans motorlar çok basit yapıdadırlar. Saatler ve hassas hareketin önemli olduğu robotik ve disk konumlama için yüksek teknoloji uygulamalarında

kullanılmaktadır. Temel çalışma prensibi manyetik akının relüktansı en düşük yolu tercih etmesi üzerinedir.



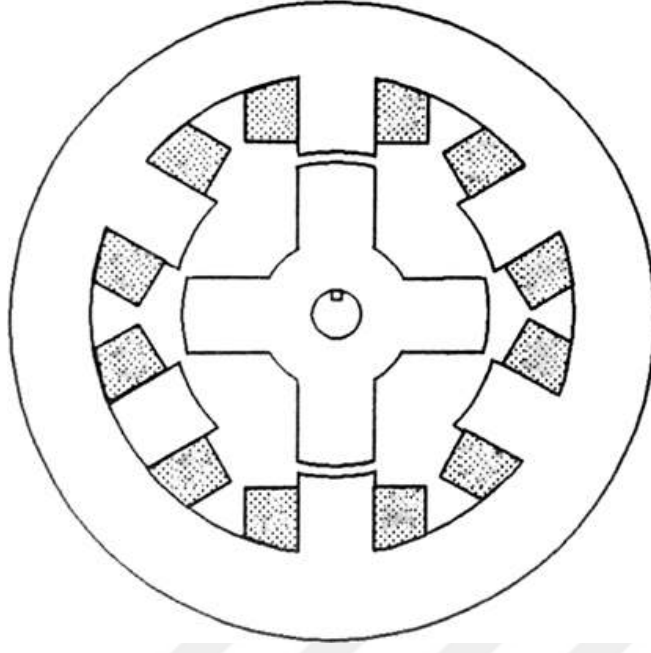
Şekil 2.10. Temel relüktans hareket şeması

Şekil 2.10'da sargılardan akım geçmezken rotor sabit konumdadır, a fazı enerjilendirildiğinde ortaya çıkan akı yolunu ek kısa yoldan tamamlamak için rotoru 90 derece dik konuma getirecektir [28].

Relüktans motorlar kendi içinde Anahtarlamalı Relüktans Motor (SRM) ve Senkron Relüktans Motor (SynRM) olmak üzere iki çeşittir.

SRM tasarımında genel olarak stator oluk sayısı rotor kutup sayısından fazla olur. Her bir adımda statordaki sargılardan karşılıklı olanlar ve sonraki adımda bir sonraki sargı enerjilendirilir. Bu çalışma mantığı Fırçasız DC motorlara benzemektedir.

SRM'ler çok yüksek hızlara çıkabilen motor tipleridir ancak her adım için yapılan anahtarlama işlemi hem çok yüksek frekanslarda çalışabilen yarıiletken teknolojileri ihtiyaç duymaktadır hem de motorda mekanik titreşim oluşturmaktadır.

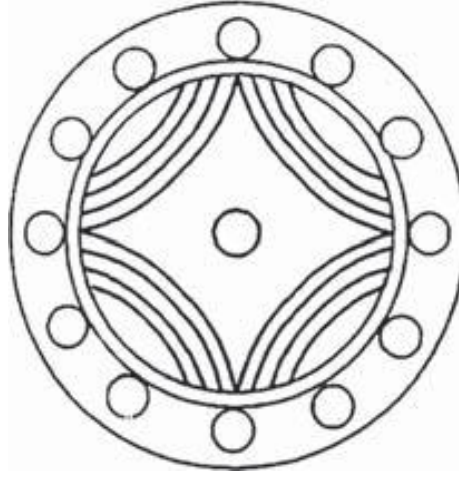


Şekil 2.11. Anahtarlamalı relüktans motor

Senkron relüktans motorlar ile statorlarında geleneksel dağıtılmış ya da konsantre sargı bulundurulur. Rotor yapıları birbirlerinden çok farklı olabilmektedir.

Çalışma mantığı olarak statorda oluşan döner manyetik alan, rotorda bulunan akı yollarından kendisi için en düşük relüktans olan yolu seçerek ilerlemek ister. Senkron makineler gibi rotor ve stator aynı devirde dönerler. SynRM'ler yüksek hızlara çıkabilen, verim seviyesi yüksek gelişen sürücü teknolojileri ile popüleritesi artan motor tipleridir.

Yapısı gereği yüksek çıkıklık oranına ihtiyaç duyar, bu sebepten dolayı güç faktörü değeri düşüktür ve tasarımı düzgün yapılmamış ise tork dalgalanması fazla olur [29].



Şekil 2.12. Senkron relüktans motor

Senkron relüktans motorların akı bariyerlerine mıknatıs ekleyerek güç faktörü değeri yükseltilebilmektedir. Eklenen mıknatısların verim üzerine de etkisi olmaktadır. Bu tip motorlara MDSynRM denmektedir.

2.3 Elektrikli Araçlar

Elektrikli araçlar;

- Batarya elektrikli araçlar
- Hibrit elektrikli araçlar
- Yakıt hücreli elektrikli araçlar

Olmak üzere 3 kategoriye ayrılabilir.

Batarya elektrikli araçlar içerlerinde içten yanmalı motor bulundurmazlar. Pillerde depolanan enerji elektrik motorlarına iletilerek hareket sağlanır. Menzil mesafeleri pil kapasitelerine bağlıdır. Motorlarda kullanılan nadir toprak elementlerinin fiyatı, pil maliyetinin yüksek olması ve şarj süresi önündeki engellerdendir.

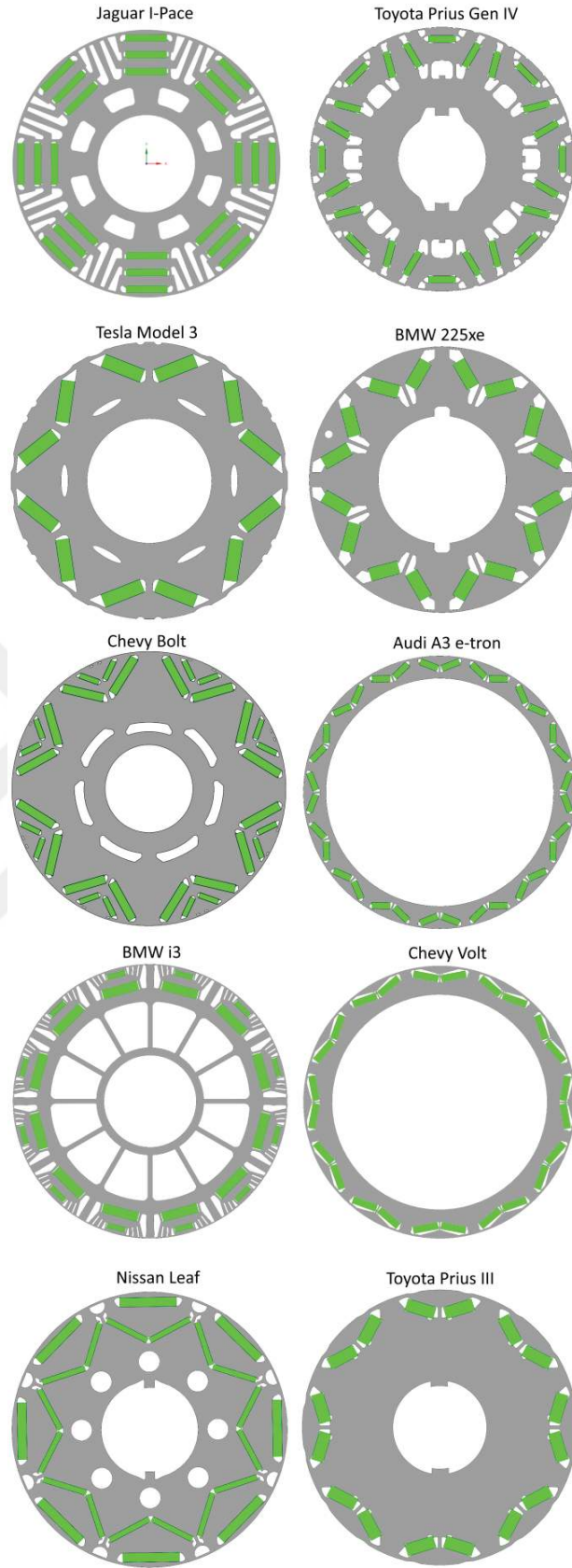
Hibrit elektrikli araçlar hem elektrikli motor hem de içten yanmalı motor barındırırlar. Farklı tipleri bulunmaktadır, sadece kalkışlarda motora tork desteği

sağlayandan elektrikli motor ile sürüş sistemine kadar farklı konfigürasyonlarda olabilmektedir. Günümüzde son derece yaygın olarak kullanılmaktadır, yakıt tüketiminde ve karbon salınımında ciddi iyileşme sağlamaktadır.

Yakıt hücreli elektrikli araçlar ise hidrojen yakıtının elektrik enerjisine dönüştürülüp elektrik motoru ile tahrik işleminin sağlanması prensibine dayanır. Günümüzde hidrojenin depolanması ve platin madeninin pahalı olması sebebi ile ticarileşmemiştir. Elektrikli araçlar göre en büyük avantajı ise dolum işleminin benzinli araçlar gibi birkaç dakikada gerçekleşmesidir [30].

2019 yılında yaklaşık 2,8 milyon adet olan elektrikli araç sayısının 2025 yılında marketin üçte biri değeri olan 25 milyona yükselmesi beklenmektedir. Ticari olarak elektrikli araçların market satışları incelendiğinde kullanılan motorların büyük bir çoğunluğu Şekil 2.13'te görülen IPMSM ya da MDSynREL motorlardır. Asenkron motor ve harici uyarımlı senkron motorlar ise daha spesifik uygulamalar ve spor araçlarda kullanılmaktadır ve market paylarında artış beklenmemektedir [31].

Günümüzde bile nadir toprak elementlerinin üretimi ve ithalatı gibi konularda sorun ve inanılmaz maliyet artışları olmaktadır. Gelecekte araç sayılarının kat be kat fazla olması sonucu bu sorun daha da ciddi hale gelecektir. Üreticiler bu yüzden nadir toprak elementsiz ya da bunlara daha az bağımlı motor teknolojileri geliştirmek istemektedirler.



Şekil 2.13. Farklı araç tiplerinde kullanılan rotor geometrileri [31]

2.3.1 Elektrikli Araçlarda Kullanılan Motor Tipleri

Elektrikli araçlarda ağırlık son derece önemlidir. Özellikle bataryalı elektrikli araçlarda sınırlı olan enerjinin son derece verimli kullanılması gerekmektedir. Bu yüzden elektrikli araçlarda kullanılan elektrik motorunun birim hacim başına ürettiği tork değerinin yüksek olması istenmektedir.

DC motorlar özel uygulamalarda kullanılsa bile, büyük hacimleri, verimlilik seviyesi ve fırça-kollektör yapısından dolayı güvenilirliklerinin az olması sebebi ile kendisine yer edinememiştir.

Fırçasız DC motorlar rotorlarında sargı içermediği için bakır kaybı yoktur bu özelliği ile asenkron motorlardan daha verimlidir. Alan zayıflatma yeteneği az olduğu için sabit güç bölgesi limitlidir. Devir sayısı arttıkça tork değeri düşer. Ek alan sargıları ile bu sorunların bir kısmı elimine edilse bile oluşan yapısal karmaşıklık ve yetersiz hız oranı yüzünden elektrikli araçlar için ana tahrik motoru olarak kullanımı tercih edilmemektedir. Bununla birlikte yapıları gereği küçük uygulamalar ve motorlarda kullanılmaktadır.

Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorlar sektörü domine eden motor tipidir. Düşük hızlarda bile yüksek tork verebilmesi, hız oranı yüksek olduğu için dişli kutusuna ihtiyaç duymaması ve verimlerinin yüksek olması bunun temel sebebidir.

Bu kadar güçlü olması için PMSM'ler nadir toprak elementli mıknatıs kullanılmaktadırlar (Örn NdFeB: Neodyum Demir Bor). Bu mıknatıslarında kullanılan madenlerin büyük bir kısmı Çin'de üretilip dünyaya satılmaktadır. Çin ihracat fiyatlarında ciddi artış yaptığı için PMSM kadar güçlü ve dışa bağımlılığı az olan motor arayışları başlamıştır [32].

Asenkron motorlar elektrikli araçların ilk modellerinde sıkça kullanılan motor tipidir. Vektör kontrolü ile elektrikli aracın ihtiyaç duyduğu performansı karşılayabilir konumdadır. Alan zayıflatma ile sabit güç bölgesinde hız oranı artırılabilir. Mıknatıs kullanmıyor oluşu ve teknolojik bilinirliğine rağmen birim hacim başına güç oranı konusunda PMSM'lere göre düşük kalması ve hıza bağlı

olarak performans karakteristiğinin değişmesi kullanım oranının artması konusunda önündeki engellerdir[30].

Anahtarlamaalı relüktans motorlar basit ve sağlam mekanik yapıda, düşük maliyet, yüksek hız, geniş sabit güç bölgesine ve yüksek tork değerine sahip olmasına rağmen yüksek akustik gürültüye sahip olması, verimlerinin düşük olması ve PMSM kadar yüksek güç yoğunluğuna sahip olmadığı için ticari olarak elektrikli araçlarda söz sahibi olmasına engel olmaktadır.

Senkron relüktans motorlar asenkron motorlar kadar güvenilirlerdir ve PM motorlar kadar yüksek verimlidir. Düşük güç faktörü yüzünden elektrikli araçlar için çok uygun değildir.

Mıknatıs destekli senkron relüktans motorlar senkron relüktans motorların güvenilirlik ve verim avantajlarını alıp bunun üzerine mıknatıslar sayesinde güç faktörünü de iyileştirmektedir. Bu sayede IPMSM'a benzemektedir ancak ona göre çok daha az kalıcı mıknatıs kullanmaktadır.

Motorların özellikleri ve kullanıldığı araçlara dair bilgileri Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1. Elektrik motor türleri ve kullanılan araç modelleri [30]

Motor Tipi	Avantajları	Dezavantajları	Kullanılan Araç Modelleri
Fırçalı DC Motor	*Düşük hızlarda maksimum tork	*Hacimli yapı *Düşük Verim *Fırçalarda ısı oluşumu	*Fiat Panda Elettra
Fırçasız Mıknatıslı DC Motor	*Rotor bakır kaybı yok *Asenkron motorlara göre daha verimli *Hafif ve küçük * Güzel ısı dağılımı *Yüksek tork kapasitesi	*Kısa sabit güç bölgesi *Hızla beraber azalan tork *Mıknatıslardan dolayı yüksek maliyet	*Toyota Prius 2005
Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motor	*Dişli kutusuz kullanım imkânı *Verimli *Kompakt yapıda *Düşük hızlarda bile yüksek tork değeri	*Teker içi uygulamalarda demir kaybı	*Toyota Prius *Nissan Leaf *Soul EV
Asenkron Motor	*En bilinen fırçasız motor sistemi *Harici uyarımlı DC motor gibi kontrol edilebilir	*Rotorda oluşan bakır kaybı	*Tesla Model S *Tesla Model X
Anahtarlama Relüktans Motor	*Basit yapı *Düşük maliyet * Yüksek Hız *Geniş sabit güç bölgesi	*Akustik gürültü *Düşük verim *Karmaşık tasarım ve kontrol	*Chloride Lucaz
Senkron Relüktans Motor	*Verimli *Küçük *Mekanik dayanım	*Üretim ve kontrol zorluğu *Düşük güç faktörü	
Mıknatıs Destekli Senkron Relüktans Motor	*SynRM'lere göre daha yüksek güç faktörü *Yüksek verim		*BMW i3

2.4 Mıknatıs Destekli Senkron Relüktans Motor

Mıknatıs destekli senkron relüktans motorlar senkron relüktans motorların ve kalıcı mıknatısların birleşiminden oluşmaktadır. Senkron relüktans motorların kullandığı relüktans momenti ile mıknatıslı motorların kullandığı hizalama momentinin birleşimini kullanmaktadır.

Senkron relüktans motorlar sadece relüktans momentinden yararlanabilirler. Performansları çıkıklık oranına bağlıdır ($L_d \gg L_q$).

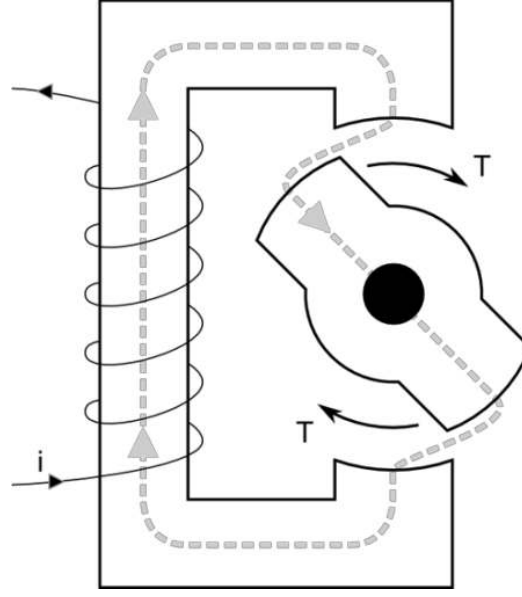
PMSM motorlar kendi içlerinde gömülü ve yüzeyde olmak üzere 2'ye ayrılmaktadır. Yüzeyi mıknatıslı tipler momenti sadece mıknatıslardan elde etmektedirler. Yapıları gereği çıkıklık oranı olmadığı ($L_d = L_q$) için yüzey mıknatıslı tipler sadece mıknatıs momentini kullanmaktadırlar.

IPMSM'de ise hem mıknatıs momenti hem de relüktans momenti oluşmaktadır. Burada baskın olan mıknatıs momentidir ancak tasarım gereği relüktans momentinden de yararlanırlar ($L_d > L_q$).

Mıknatıs destekli senkron relüktans motorlarda baskın tork kaynağı relüktans torkudur ancak mıknatıs momentinden de faydalanmaktadırlar ($L_d \gg L_q$).

2.4.1 Relüktans Motorlarda Moment

Şekil 2.14'te relüktans motorun temel yapısı görülmektedir. Relüktans motor sabit uyarımlı manyetik kutuplar arasında dönen rotordan oluşmaktadır.



Şekil 2.14. Relüktans motorun yapısı

Rotor dik pozisyonda olduğu zaman stator ve rotordaki manyetik akılar arasındaki açı 0° olmaktadır. Hava boşluğu minimum olduğu için devrenin relüktansı düşük geçirgenliği ise yüksek olur. Hava aralığının manyetik geçirgenliği demir nüveye göre çok daha düşük olduğu için nevir düvenin relüktansı ihmal edilebilir bu durumda, hava aralığı relüktansı denklem 2.11’de verilmiştir.

$$\mathcal{R}_o = \frac{2 * g_o}{\mu_0 * A_o} \quad (2.11)$$

Burada g_o hava aralığı mesafesini, A_o etkin hava aralığı alanını, μ_0 havanın manyetik geçirgenliğini göstermektedir.

Rotor dik konumda iken relüktans minimum, 90° döndüğünde ise relüktans maksimum değerde olur.

Relüktans ile ilişkili endüktans ise denklem 2.12’de verilmiştir.

$$L = \frac{N^2}{\mathcal{R}} \quad (2.12)$$

Burada N sarım sayısını temsil etmektedir.

Denklemlerden de görüldüğü endüktans rotorun açısına (θ) göre değişmektedir. Endüktans formülü;

$$L = a + b\cos 2\theta \quad (2.13)$$

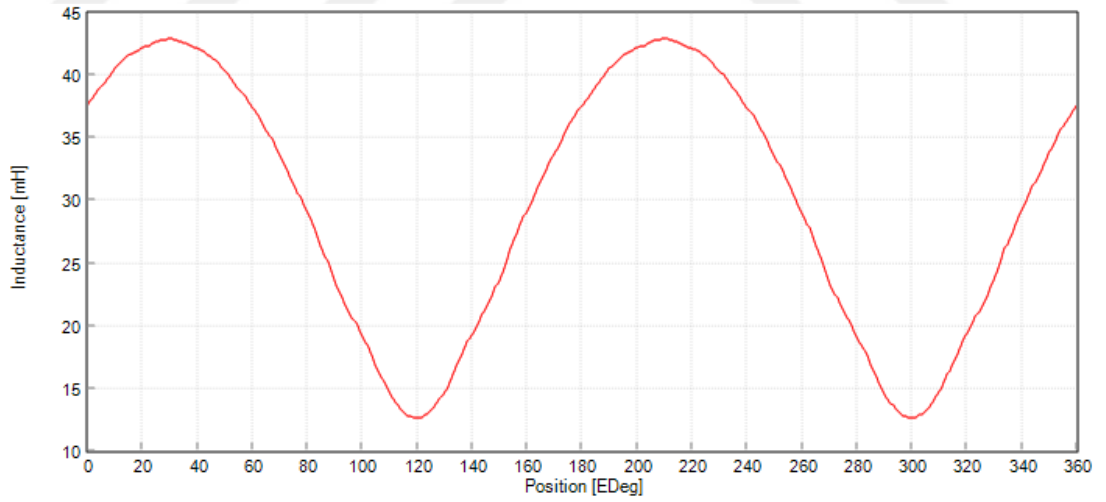
olarak değiştiği kabul edilebilir.

$$\theta = 0 \text{ için, } L = a + b\cos(2 * 0) = a + b = L_{max}$$

$$\theta = \frac{\pi}{2} \text{ için, } L = a + b\cos(2\pi/2) = a - b = L_{min}$$

$$L = \frac{1}{2}[(L_{max} + L_{min}) + (L_{max} - L_{min})\cos 2\theta] \quad (2.14)$$

Olarak tanımlanabilir.



Şekil 2.15. Endüktansın rotor konumuna göre değişimi

Şekil 2.15'te endüktansın rotor konumuna göre değişimi verilmiştir. 90° açı farkı ile maksimum ve minimum değerler arasında sinüsoiadal salınım yapmaktadır.

Sargılardaki koenerji Denklem 2.15 ile hesaplanmaktadır.

$$W_c = \frac{1}{2} Li^2 \quad (2.15)$$

Manyetik alan tarafından üretilen moment

$$T_e = \frac{\partial W_c}{\partial \theta}$$

$$T_e = i^2 \frac{1}{2} [(L_{min} - L_{max}) \sin 2\theta] \quad (2.16)$$

olarak tanımlanır. Endüktans farkı

$$\Delta L = (L_{min} - L_{max})$$

olarak tanımlanır ise, moment

$$T_e = -i^2 \frac{1}{2} \Delta L \sin 2\theta \quad (2.17)$$

olarak ifade edilir.

Rotor bir açısal hız ile hareket ediyor ise

$$\theta = w_r t + \theta_o$$

sinüzoidal bir akım ile üretilen elektromanyetik moment

$$T_e = -\frac{1}{2} \Delta L I_m^2 \cos 2w_s t \sin [2(w_r t + \theta_o)] \quad (2.18)$$

olur.

Ortalama momentin sıfır olmaması için $|w_s| = |w_r|$ olmalıdır.

Rotor açısından bağımsız (d ve q dönüşüm teorisi) senkron relüktans motorlarda moment

$$T = \left(\frac{3}{2}\right) p (L_d - L_q) i_d i_q \quad (2.19)$$

Denklem 2.19’da verilmiştir. p kutup çifti sayısını, i_d ve i_q akımları ifade etmektedir.

2.4.2 Mıknatıslı Senkron Motorlarda Moment

3 fazlı PMSM birbiri ile 120° faz farklı 3 akım kaynağından beslenir. Bu fazlar tarafından üretilen ani moment denklemleri

$$T_A = i_A K_T \sin \theta$$

$$T_B = i_B K_T \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$T_C = i_C K_T \sin \left(\theta - \frac{4\pi}{3} \right) \quad (2.20)$$

olmaktadır. i_A , i_B ve i_C ani faz akımlarını, K_T her bir sargı için momenti temsil etmektedir.

Faz akımları rotor konumu ile değiştiği için faz akımları

$$i_A = I_m \sin \theta$$

$$i_B = I_m \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$i_C = I_m \sin \left(\theta - \frac{4\pi}{3} \right) \quad (2.21)$$

olmaktadır. Denklem 2.20 ve 2.21 kullanılarak

$$\begin{aligned}
T_A &= I_m K_T \sin^2 \theta \\
T_B &= I_m K_T \sin^2 \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\
T_C &= I_m K_T \sin^2 \left(\theta - \frac{4\pi}{3} \right)
\end{aligned} \tag{2.22}$$

elde edilir. Üretilen toplam ani moment

$$\begin{aligned}
T &= T_A + T_B + T_C \\
T &= \frac{3}{2} K_T I_M
\end{aligned} \tag{2.23}$$

Denklem 2.23'te verilmiştir.

Referans düzlem teorisine göre mekanik tork

$$T_e = \frac{3p}{2} (\psi_m i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \tag{2.24}$$

olur. Burada p kutup çifti sayısını, ψ_m kalıcı mıknatıs akı halkalanmasını, L_d ve L_q eksen endüktanslarını, i_d ve i_q eksen akımlarını ifade etmektedir.

2.4.3 Mıknatıs Destekli Senkron Relüktans Motorlarda Moment

MDSynRM ise hem relüktans momentinden hem de mıknatısın oluşturduğu momentten yararlanan motor tipidir. Burada önemli nokta IPMSM'lerde baskın moment mıknatıs kaynaklı iken MDSynRM için baskın moment relüktans momenti olmasıdır.

Manyetik devre doyması ve tork dalgalanmasını ihmal edildiğinde ortalama tork

$$T_{em} = \frac{3}{2} p (L_d - L_q) i_d i_q + \frac{3}{2} p \psi_m i_d \tag{2.25}$$

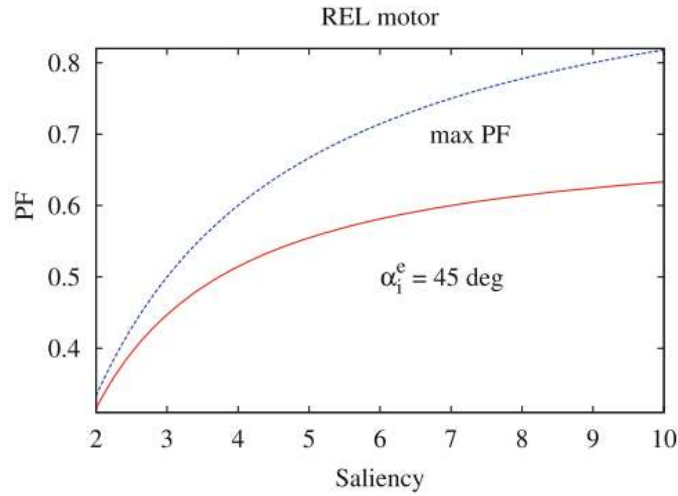
olmaktadır. ψ_m mıknatıs kaynaklı oluşan halkalanması akını temsil etmektedir [33].

Denklem 2.25'te ilk terim relüktans torkunu, ikinci terim ise PM torkunu ifade etmektedir.

2.4.4 Güç Faktörü

Senkron relüktans motorların dezavantajlarının başında düşük güç faktörü gelmektedir.

Güç faktörü motor çıkıklık oranı ile ilgilidir. Senkron relüktans motorlarda kullanılan invertörlerin Volt-Amper değeri motorun çıkış gücüne göre yaklaşık %20-30 daha büyük olmaktadır.

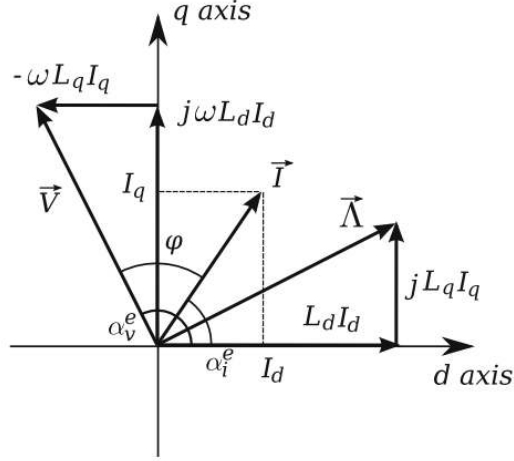


Şekil 2.16. Çıkıklık oranının güç faktörüne etkisi [33]

Şekil 2.16'da görüldüğü üzere, 45° akım açısı ile ($i_d = i_q$) kullanıldığında, çıkıklık oranı arttıkça güç faktörü de artmaktadır ancak oran belirli bir seviye geldikten sonra artış miktarı azalmaktadır. Maksimum güç faktörü elde etmek için

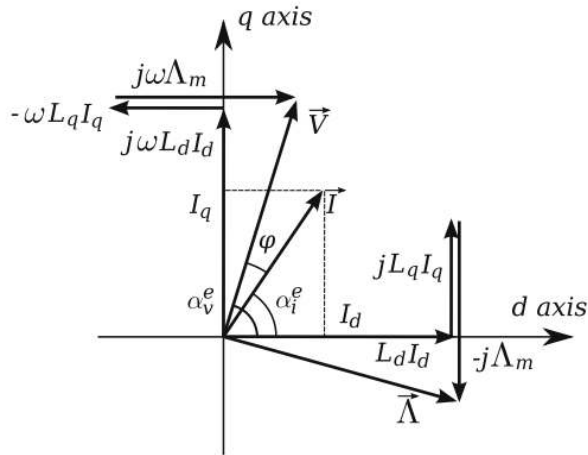
$$\tan \alpha_i = \sqrt{\zeta} \quad (2.26)$$

kullanılabilir. Burada α_i akım açısını, ζ ise çıkıklık oranını ifade etmektedir. Bu şartlar altında bile güç faktörü 0.8 seviyelerinde kalmıştır. Senkron relüktans motora ait fazör diyagramı Şekil 2.17’de görülmektedir.



Şekil 2.17. SynRM fazör diyagramı [33]

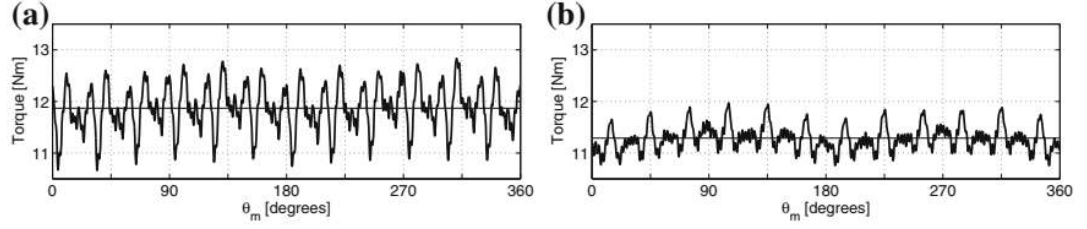
SynRM’lerin akı bariyerlerine mıknatıs ekleyerek rotordaki köprü noktasını doyuma götürür ve bu doyum L_q değerini düşürür. Negatif Q eksenine eklenen kalıcı mıknatıs negatif $L_q i_q$ akısını kompanze eder. Böylece gerilim vektörü akım vektörüne doğru hareket eder ve güç faktörü artmış olur. Şekil 2.18’de kalıcı mıknatısın etkisi görülmektedir.



Şekil 2.18. MDSynRM fazör diyagramı

2.4.5 Tork Dalgalanması

MDSynRM hem relüktans momentinden kaynaklı (Çıkıklık) hem de üzerindeki mıknatıslardan kaynaklı olarak tork dalgalanması ve vuruğu momentine sahiptir. Bu etkileri azaltmak için kutup ve oluk sayısı optimizasyonu, rotor ve stator tasarım optimizasyonu, kaykısı verilmesi, akı bariyerlerinin farklı şekillerde yapılması, mıknatısların boyut ve yerlerinin değıştirilmesi gibi işlemler gerçekleştirilebilir.

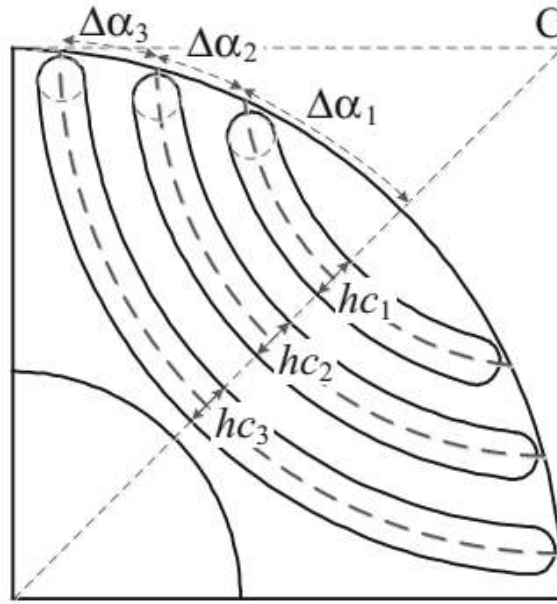


Şekil 2.19. Tork salınımları (a) kaykısız (b) kaykılı [33]

Şekil 2.19’da görüldüğü üzere motora kaykısı verilmesi tork dalgalanması üzerinde pozitif etkide bulunmaktadır ancak bu işlemin maksimum tork değeri düşürmesi ve tasarıma bağılı olarak mıknatıslarda demanyetize durumu oluşturması ihtimali de bulunmaktadır.

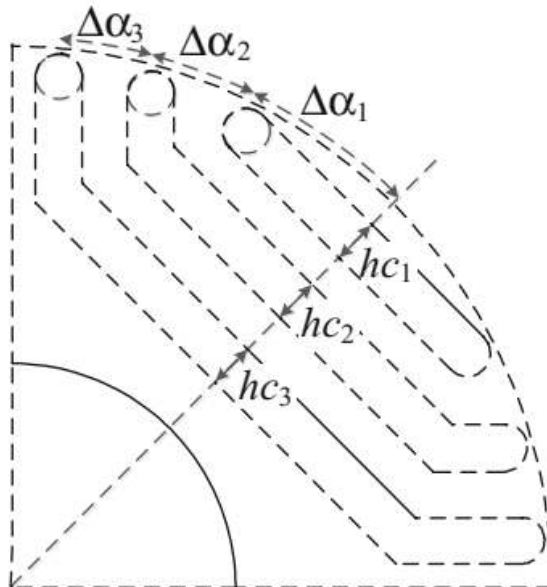
2.4.6 Rotor Tipleri

Senkron relüktans ve mıknatıs destekli senkron relüktans makinelerde en önemli etki rotor kısmında meydana gelmektedir. Bu yüzden uygulamaya ve istenen özelliklere göre farklı rotor geometrileri kullanılabilir.



Şekil 2.20. Dairesel rotor geometrisi

Şekil 2.20’de görülen ark şeklindeki yaylar ortak bir odak noktası kullanmaktadırlar. Her bir akı bariyerinin çember merkezine 90° açı ile yerleşmesine önem gösterilir.



Şekil 2.21. Segmentli rotor geometrisi

Şekil 2.21’de segmentlere ayrılmış rotor tasarımı görülmektedir. Genelde akı bariyer kalınlıkları eşit kullanılır. Dairesel geometri gibi akı bariyer sonları dik açı ile yerleşmiştir.

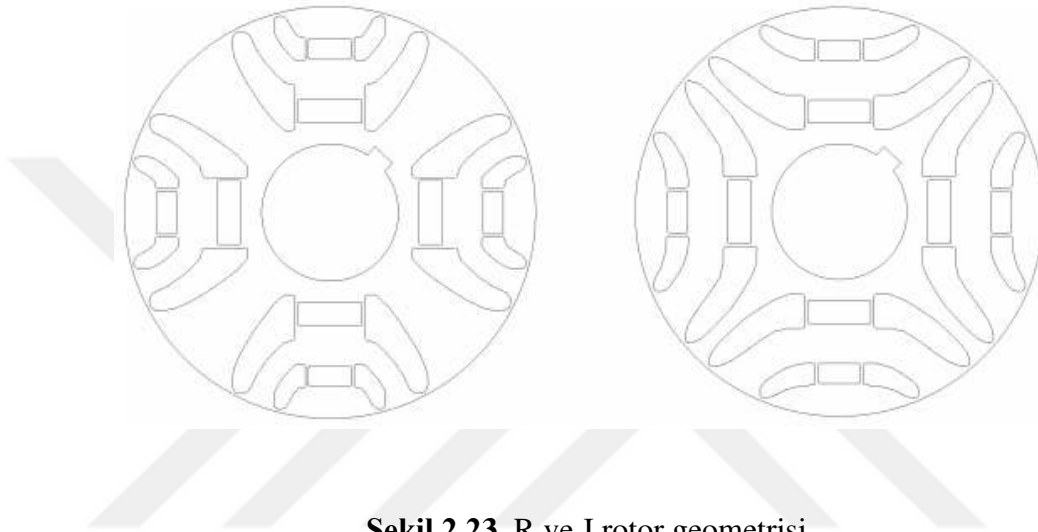
Yapısal olarak düz olduğu için mıknatısla kullanımı daha kolaydır. Maliyeti ucuz sinterlenmiş mıknatıslar kullanılabilir. Dairesel rotor geometrisinde mıknatısların açılı şekilde üretilmesi gerekmektedir. Sinterlenmiş mıknatıs için düşük adetlerde bunu üretmek zor olmaktadır bunun yerine enjeksiyon mıknatıs kullanılabilir bu da operasyonel ve performans anlamında bazı zorluklar oluşturmaktadır.

Temelde rotor tipleri Şekil 2.20 ve Şekil 2.21’de gösterilmiştir. Bunun dışında optimizasyon çalışmaları ile farklı tasarımlar da oluşturulabilmektedir ancak temel olarak bu 2 geometri referans alınmaktadır. Şekil 2.22’de farklı geometriler verilmiştir.



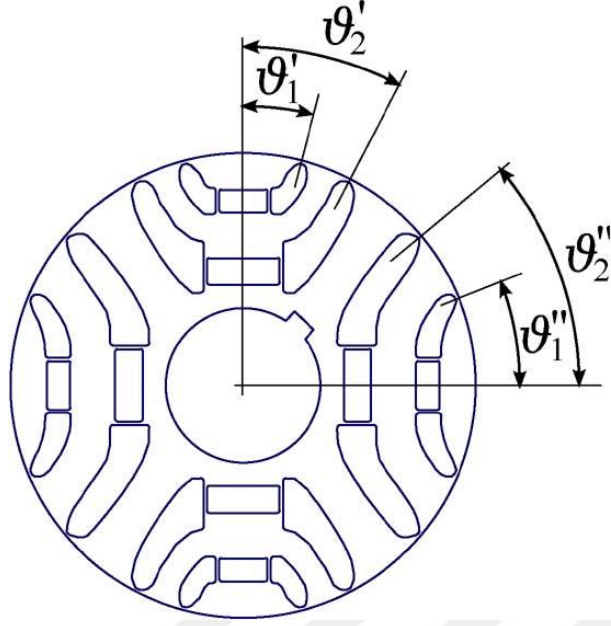
Şekil 2.22. Farklı tasarımlardaki rotor geometrileri

Motor performansında iyileştirme yapmak için farklı yöntemler kullanılabilmektedir. Bunlardan birincisi Romeo ve Juliet yöntemidir. Burada iki farklı laminasyon art arda yerleştirilerek tek bir rotor geometrisi elde edilmektedir. Temel fonksiyonu motora kaykı verilmiş gibi davranmasını sağlamaktır. Şekil 2.23'te gösterilen 2 farklı geometri kullanılarak elde edilen sistemde tork dalgalanmasında %35 oranda düşüş sağlamışlardır. Üretilen ortalama moment değeri ise %8 düşmüştür. Bu göz ardı edilemeyecek bir değerdir [34].



Şekil 2.23. R ve J rotor geometrisi

Bir diğer yöntem ise iki farklı rotor geometrisini tek laminasyonda birleştirmektir. Buna da Machaon tasarımı denmektedir, Şekil 2.24'te gösterilmiştir. Burada tork dalgalanmasında en az Romeo ve Juliet kadar düşüş olmasına rağmen ortalama tork değerinde azalma olmamaktadır [35].



Şekil 2.24. Machaon rotor tasarımı

2.4.7 Enine ve Boyuna Laminasyon

SynRM ve MDSynRM paketleri ve tasarımları yapılırken iki farklı metodoloji mevcuttur. Bunlardan birinci enine laminasyon (TLA) diğeri ise boyuna laminasyondur (ALA). Karşılaştırmaları Şekil 2.25’te verilmiştir.

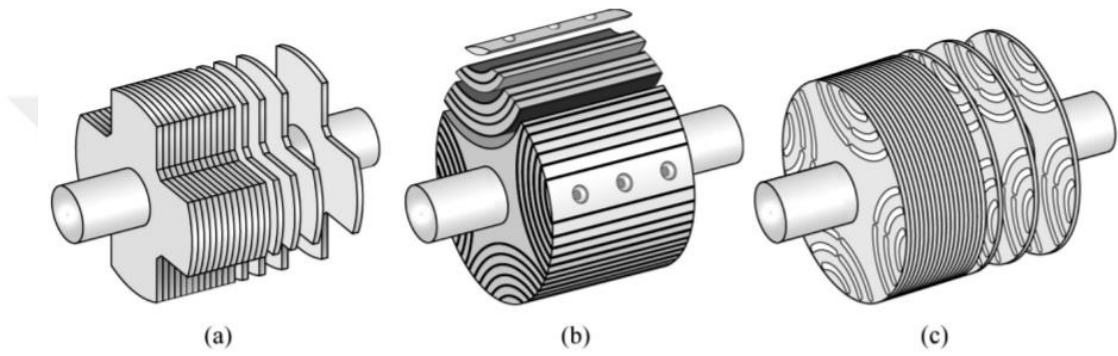
Enine laminasyon yapılırken her bir laminasyon paketi kesimi gerçekleştirilir ve bunlar üst üste dizilerek paket haline getirilir. Bu sayede yapıyı yekpare tutmak için vida vb. gerekmemektedir. MDSynRM için kullanımı daha kolaydır. Aktif olarak kullanılan yapıdır. Üretimi kolaydır. Tork dalgalanmasını azaltmak için kaykı yöntemi kullanılabilir ama bu işlem sargıları sararken zorluk çıkarabilmektedir.

Enine laminasyonda boyuna laminasyona göre daha az sayıda akı bariyeri oluşturulabilmektedir çünkü mekanik olarak kaburga ve izolasyon bölgesi mekanik strese maruz kalmaktadır.

Boyuna laminasyonda ise iç içe geçmiş saçlar yan yana konularak birleştirilir. Bu yapıyı bir arada tutmak için boylu boyunca vida ile sabitleme işlemi yapılır.

Boyuna laminasyonda çok daha fazla sayıya akı bariyeri yapılabilir bu sayede çıkıklık oranı artar ve performans anlamında iyileşme sağlar.

Boyuna laminasyonda bariyerleri tutmak için takılan vida elektromanyetik geçirgen olduğu için tasarım aşamasında performansa etki etmemesi için zorluk çıkarmaktadır. Ayrıca üretim süreci konusunda enine laminasyona göre hem teknolojik hem de malzeme anlamında zorluk çıkardığı için günümüzde aktif olarak kullanılmamaktadır.



Şekil 2.25. Farklı rotor tasarımları (a) çıkık kutuplu (b) boyuna laminasyonlu (c) enine laminasyonlu

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu bölümde öncelikle karşılaştırma yapabilmek için 1.1kW 3.5Nm gücündeki senkron relüktans motorun paket programlar üzerinde modellenmesi gerçekleştirilmiştir.

Gerçekleştirilen modelleme, katalog bilgileri ile karşılaştırılarak modellemenin doğruluğu sağlanmıştır.

Bu modellemenin temel boyutları değiştirilmeden Mıknatıs Destekli Senkron Relüktans Motor tasarımı gerçekleştirilmiştir.

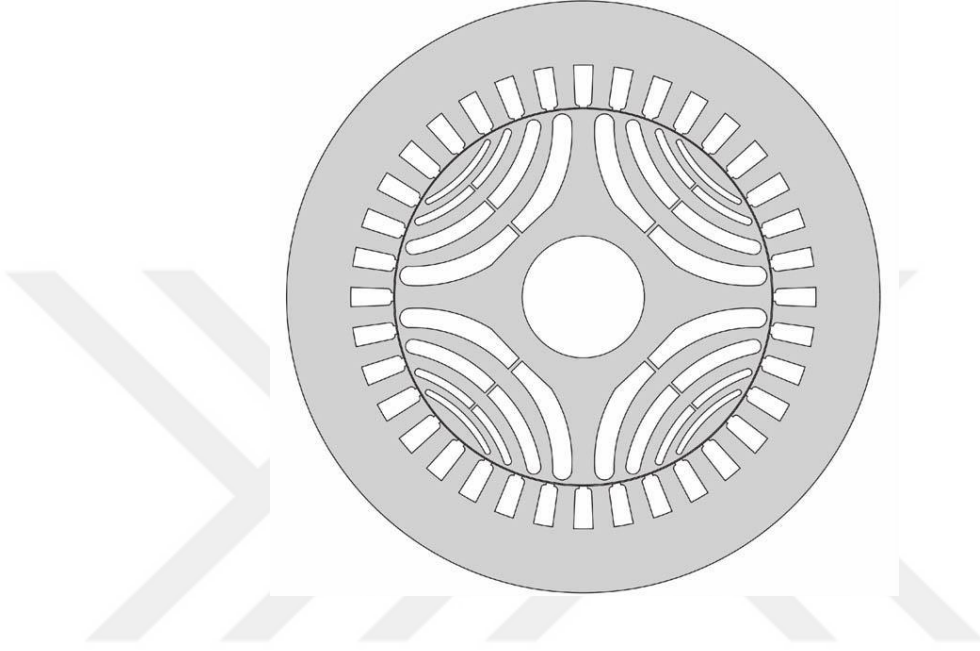
3.1 SynRM Modellenmesi ve Modelin Doğrulanması

SynRM modellenmesi için öncelikle motora ait bilgiler alınmıştır. Bu konuda Volt ELEKTRİK MOTORLARI SAN. TİC. A.Ş. firması destekte bulunmuştur. Onların verdiği ölçülerde modelleme gerçekleştirilip sonuçlar katalog bilgileri ile karşılaştırılmıştır. Şekil 3.1’de firmaya ait motorun dış tasarımı görünmektedir. Şekil 3.2’de örnek bir SynRM çizimi görünmektedir.



Şekil 3.1. Volt AŞ senkron elektrik motoru

İlk olarak firma tarafından verilen bilgiler ile AutoCAD çizimleri gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan çizimler sonlu elemanlar paket programlarına aktarılarak modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Modellemesi yapılan çizimlere sargı, akım, gerilim gibi değerleri girilmiş ve simülasyonlar yapılmıştır. Referans motora ait katalog bilgileri Tablo 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.2. Örnek SynRM Çizimi

Tablo 3.1. Referans motora ait katalog verileri

Bileşen	Değer
Stator dış çapı	125 mm
Motor gücü	1.1 kW
Çıkış torku	3.5 Nm
Devir sayısı	3000 rpm
Oluk sayısı	36
Kutup sayısı (2p)	4
Akım	3 A
Verim	%86,5

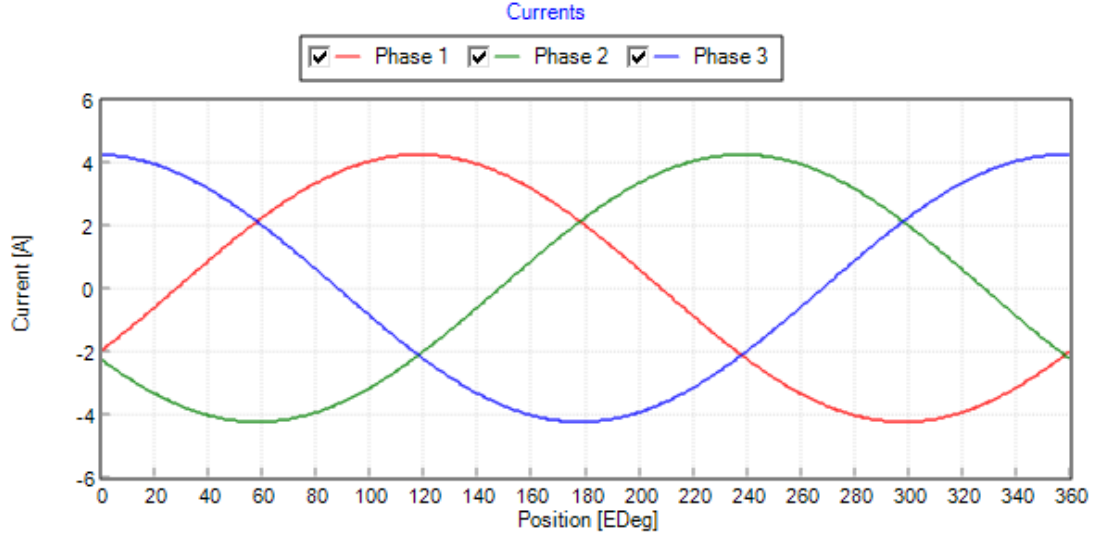
Benzetim alışmaları sonucu elde edilen motorun bilgileri Tablo 3.2’de, akım, gerilim ve tork grafikleri şekil 3.3-3.6’da verilmiştir.

Benzetimi yapılan motorun çıkış gücü ve tork değeri bilerek yüksek seçilmiştir. Yaklaşık %3 civarındaki bu fark rüzgâr kayıpları ve diğer kayıplardan dolayı gerçek değerlerde aşağı düşeceği içindir. Buradaki temel amaç, tasarımın modellemesinin katalog bilgileri ile örtüşüp örtüşmediğini gözlemlemektir. Sonuçlara göre, verilen ölçülerden yola çıkılarak yapılan modelleme ile üretilen ürünün deney sonuçlarının birbirlerini desteklediği görülmektedir.



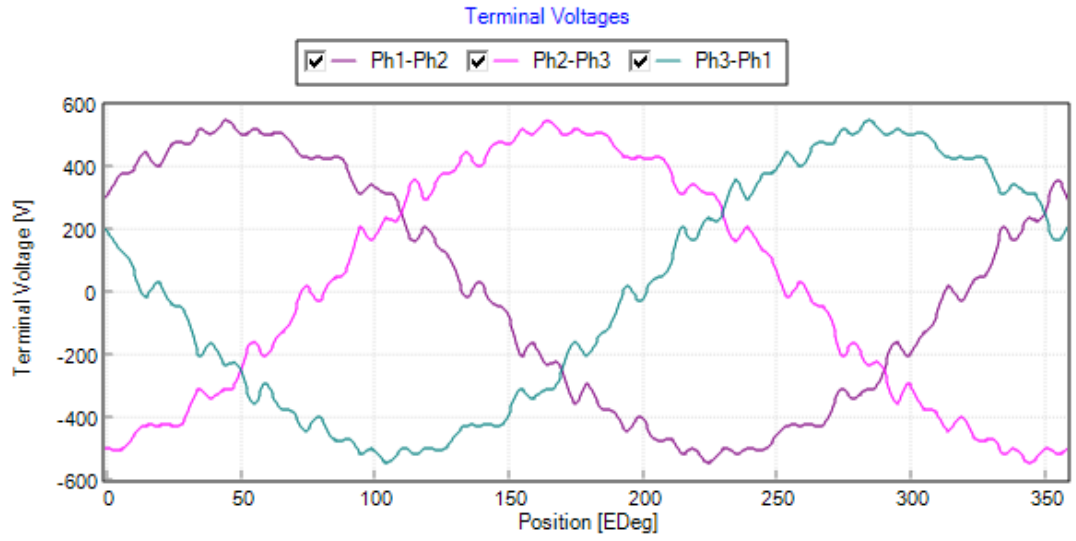
Tablo 3.2. Benzetimi yapılan motor parametreleri

Bileşen	Değer
Stator dış çapı	125 mm
Çıkış gücü	1,14 kW
Çıkış torku	3.65 Nm
Devir sayısı	3000 rpm
Oluk sayısı	36
Kutup sayısı (2p)	4
Akım	3 A
Verim	%86,85
Güç faktörü	0,77
Hava aralığı akı yoğunluğu (Ort)	0,34 T
Hava aralığı akı yoğunluğu maksimum	0,82 T
Stator dış akı yoğunluğu maksimum	1,16 T
Bakır kaybı	147,5 W
Toplam kayıp	173,7 W
İletken kalınlığı	0,177 mm ²
İletken uzunluğu	374,4 m
Faz direnci	5,28 Ohm
Sargı faktörü	0,8312
Sargı sonu sargı uzunluğu	174,4 mm
Sargı sıcaklığı	66,08° C
Tork dalgalanması	%11,32



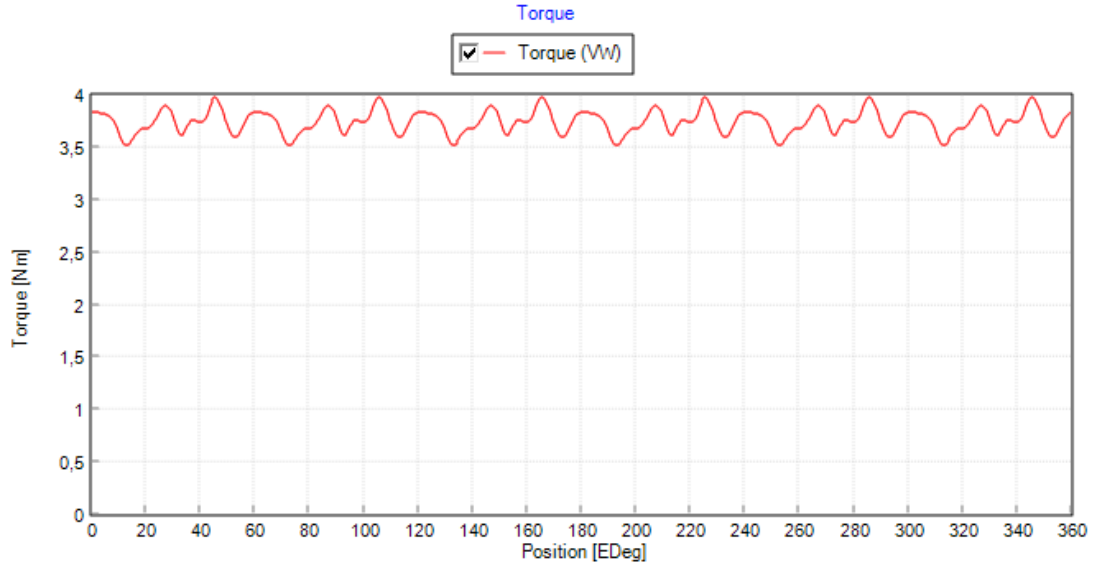
Şekil 3.3. Referans motor akım pozisyon grafiği

Makineye verilen 3 A akım rms değeridir. Şekil 3.1’de görüldüğü üzere maksimum ve minimum değerleri 4,24 A değerlerindedir.



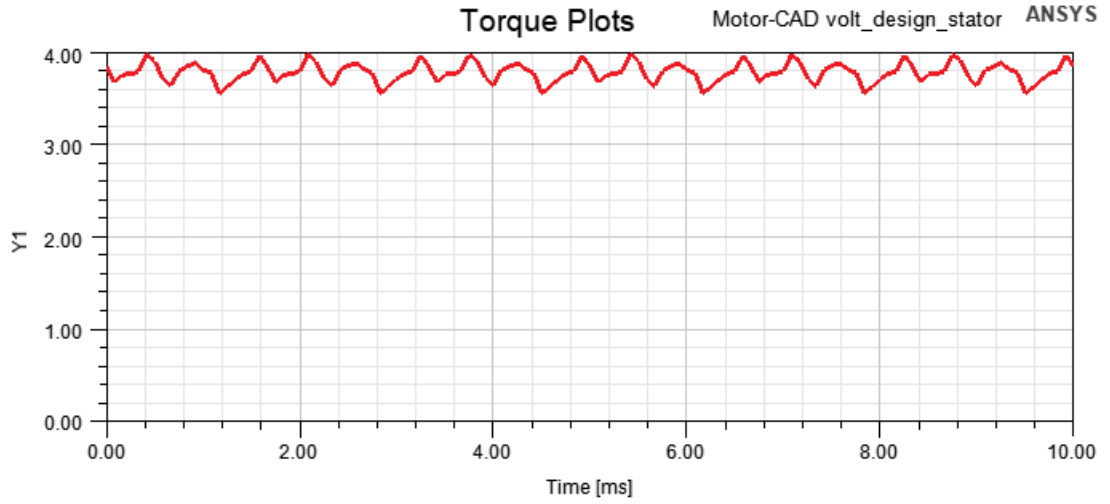
Şekil 3.4. Referans motor gerilim pozisyon grafiği

Faz-faz hat gerilimi 542 Volt seviyesindedir. Harmonik bozunum değeri %6,8 seviyesinde gerçekleşmiştir.



Şekil 3.5. Referans motor tork pozisyon grafiği

Çıkış torku 4 Nm ile 3,5 Nm arasında gerçekleşmiştir. Tork dalgalanması ise %11 seviyelerinde gerçekleşmiştir.



Şekil 3.6. Referans motor tork zaman grafiği

Şekil 3.3-3.5 MotorCAD üzerinden alınmıştır. Şekil 3.6 ise Ansys Maxwell üzerinden alınmıştır. Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da görünen Tork değerleri birbiri ile tutarlıdır. Böylece tasarımın farklı simülasyon programlarında da tutarlı olduğu görülmektedir.

3.2 Tasarımın Mıknatısa Uygun Hale Getirilmesi

Tasarlanan motor boyutu küçük ve bir adet olduğu için, daha yüksek performans ve optimizasyon imkânı olmasına rağmen Şekil 3.7’de verilen kavisli mıknatıs kullanılamamıştır. Bunun yerine Şekil 3.8’de verilen dikdörtgen prizması şeklinde mıknatıs kullanılmıştır.

Bu yüzden var olan referans motor modelinin rotor yapısı yeni mıknatıs uygun olacak şekilde optimize edilmiştir. Stator yapısında değişiklik yapılmamıştır. Buradaki temel amaç dikdörtgen şeklinde mıknatısların uyabileceği ve referans motora yakın değerler veren bir rotor oluşturmaktır. Optimize çalışmalarında parametrik çalışma kullanılmıştır.

Öncelikle sabit akı bariyer kalınlığı ile akı bariyer sayısı incelenmiştir. Sonuçlarda 4 akı bariyerinin en iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir.

Sonraki akımda akı bariyer kalınlıkları incelenmiştir. Her akı bariyeri aynı kalınlık ya da her biri farklı kalınlıkta olmak üzere simülasyonlar denenmiştir. Burada da hepsinin aynı kalınlıkta olduğu durumda en iyi performansı verdiği gözlemlenmiştir.

Köprü kalınlığı, gövde levhası kalınlığı, dış akı bariyeri açısı, dış ve iç akı bariyeri üzerinde çaprazlama simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.

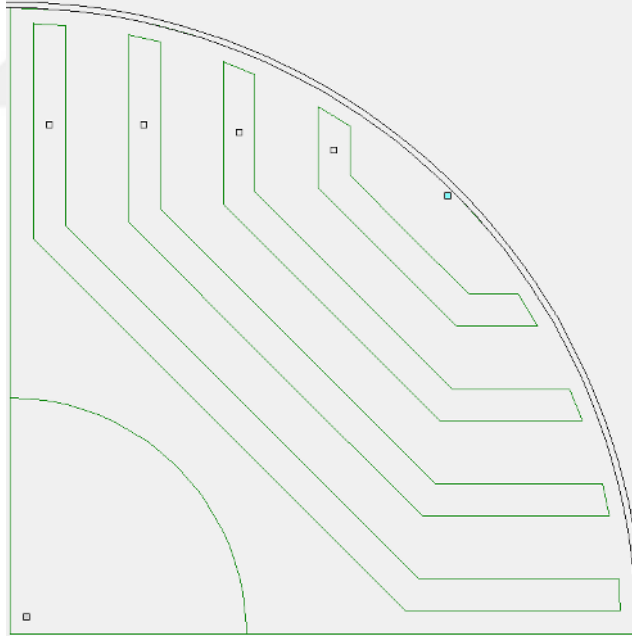


Şekil 3.7. Kavisli mıknatıs



Şekil 3.8. Köşeli mıknatıs

Bu işlemler sonucunda oluşturulan geometri Şekil 3.9’da ve bilgileri Tablo 3.3’te verilmiştir.

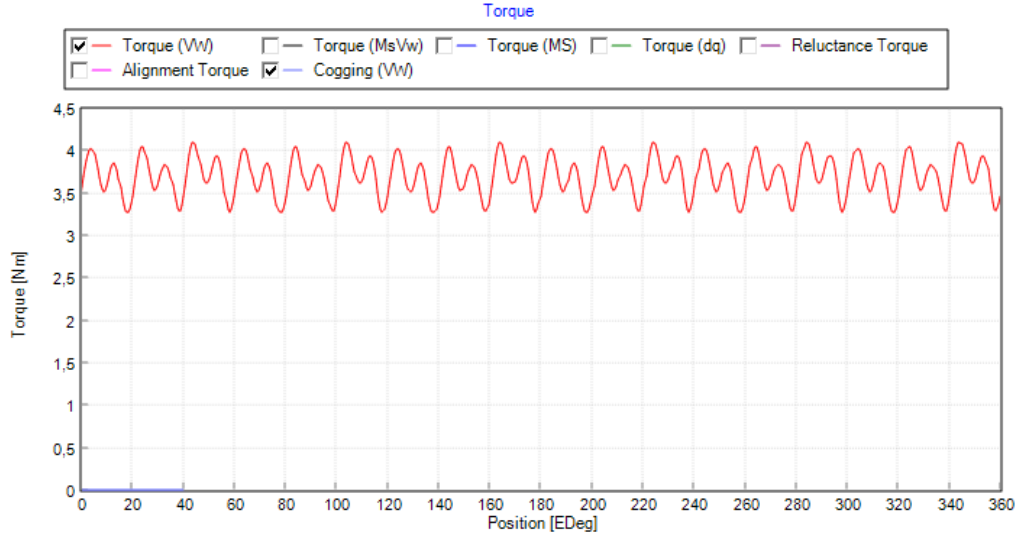


Şekil 3.9. Oluşturulan rotor geometrisi

Tablo 3.3. Oluşturulan motora ait bilgiler

Bileşen	Değer
Stator dış çapı	125 mm
Çıkış gücü	1,13 kW
Çıkış torku	3.60 Nm
Devir sayısı	3000 rpm
Oluk sayısı	36
Kutup sayısı (2p)	4
Akım	3 A
Verim	%87,568
Güç faktörü	0,70
Hava aralığı akı yoğunluğu (Ort)	0,35 T
Hava aralığı akı yoğunluğu maksimum	0,74 T
Stator dış akı yoğunluğu maksimum	1,20 T
Bakır kaybı	134,7 W
Toplam kayıp	160,9 W
İletken kalınlığı	0,1772 mm ²
İletken uzunluğu	374,4 m
Faz direnci	4,99 Ohm
Sargı faktörü	0,8312
Sargı sonu sargı uzunluğu	174,4 mm
Sargı sıcaklığı	68,85° C
Tork dalgalanması	%20,57

Referans motor ile oluşturulan motorda sadece rotor kısmında değişiklik yapılmıştır. Stator kısmı aynı şekilde kullanılmıştır. Tablo 3.2 ve Tablo 3.3'te görüldüğü üzere benzer çıkış güçleri elde edilmiştir. Oluşturulan motorun verim seviyesi referans motora göre daha yüksek olmasına rağmen tork dalgalanması da yüksektir. Tork grafiği Şekil 3.10'da verilmiştir.



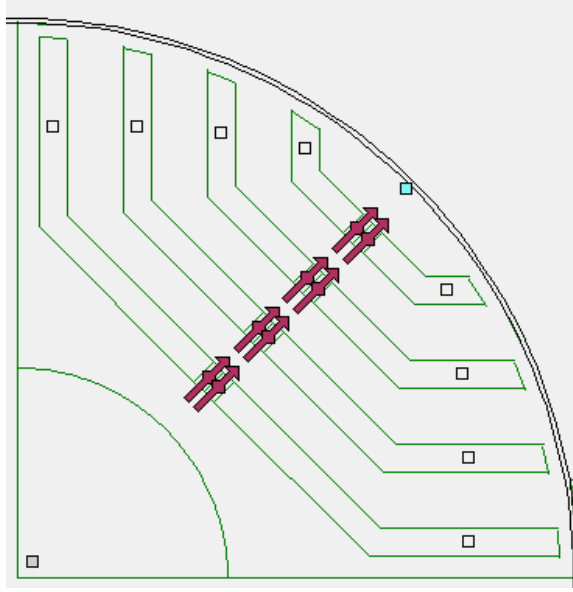
Şekil 3.10. Tasarlanan rotora ait tork pozisyon grafiği

3.3 Mıknatısların Etkisi

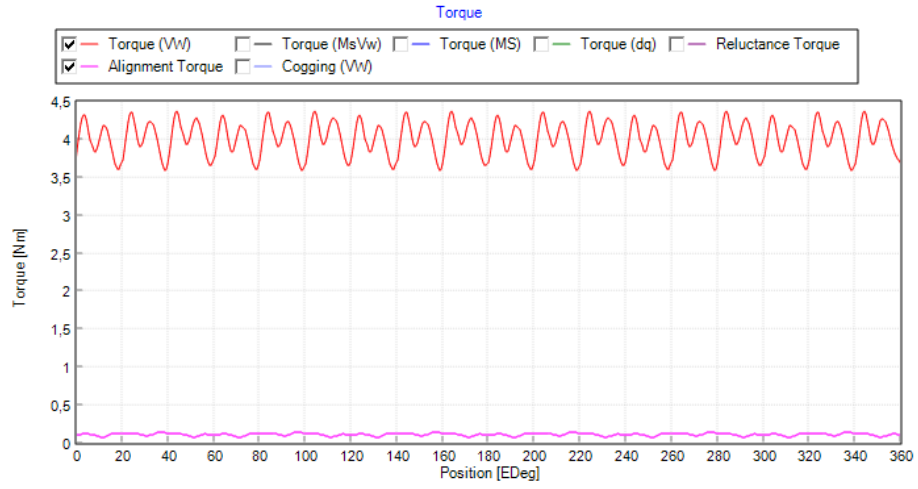
Mıknatısların etkisini incelemek için öncelikle bütün akı bariyerlerine aynı boyutta olmak üzere farklı genişliklerde, ardından akı bariyerlerine farklı boylarda mıknatıslar yerleştirilip sonuçlar gözlemlenmiştir.

3.3.1 1 Numaralı Tasarım: 2mm Mıknatıs

Her akı bariyerine 2mm uzunluğunda ve 2mm genişliğinde mıknatıs yerleştirilerek gerçekleştirilen tasarım görüntüsü Şekil 3.11’de simülasyon sonucu Şekil 3.12’de verilmiştir. Performans bilgileri ise Tablo 3.4’te verilmiştir.



Şekil 3.11. 1 Numaralı tasarıma ait mıknatıslar ve polarizasyonları



Şekil 3.12. 1 Numaralı tasarıma ait tork pozisyon grafiği

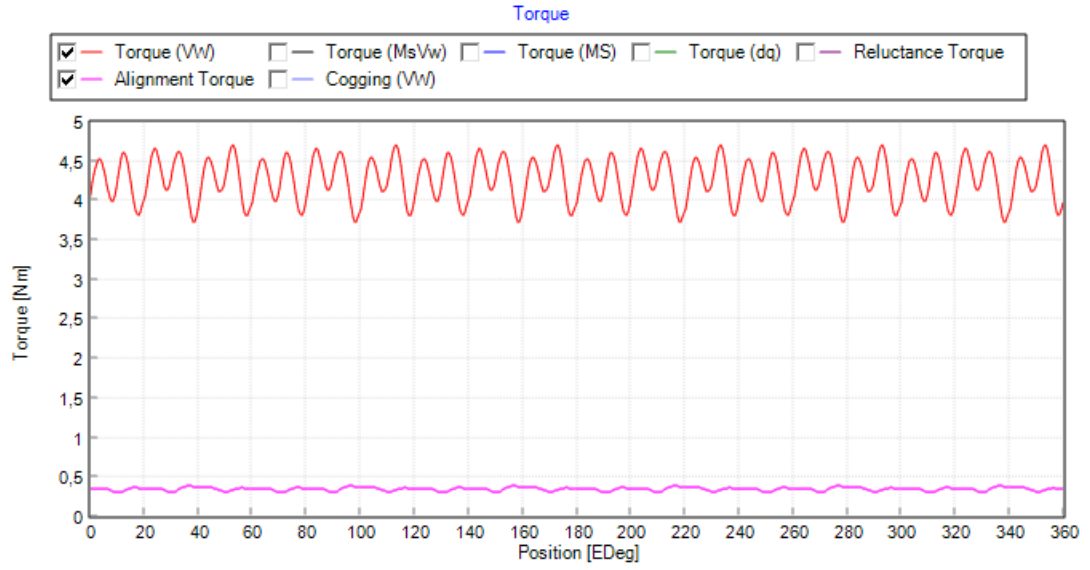
Tablo 3.4. Tasarım 1 için bilgiler

Bileşen	Değer	Değişim miktarı
Çıkış gücü	1,24 kW	0,11
Çıkış torku	3.89 Nm	0,29
Verim	%88,07	0,5
Güç faktörü	0,77	0,7
Hava aralığı akı yoğunluğu (Ort)	0,34 T	-0,01
Hava aralığı akı yoğunluğu maksimum	0,74 T	0
Stator dış akı yoğunluğu maksimum	1,193 T	-0,007
Bakır kaybı	140,9 W	6,2
Toplam kayıp	165,7 W	4,8
Sargı sıcaklığı	69,42° C	0,57
Tork dalgalanması	%21,49	0,92

2 mm kalınlığında mıknatıs eklenmesi çıkış gücü, çıkış torku ve verim üzerinde olumlu yönde etki yapmıştır. Ancak bu oran performansa çok katkı sağlamadığı için yeterli değildir.

3.3.2 2 Numaralı Tasarım: 4mm Mıknatıs

Her akı bariyerine 4mm uzunluğunda ve 2mm genişliğinde mıknatıs yerleştirilerek gerçekleştirilen simülasyon sonucu Şekil 3.13'te verilmiştir. Performans bilgileri ise Tablo 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.13. 2 Numaralı tasarıma ait tork pozisyon grafiği

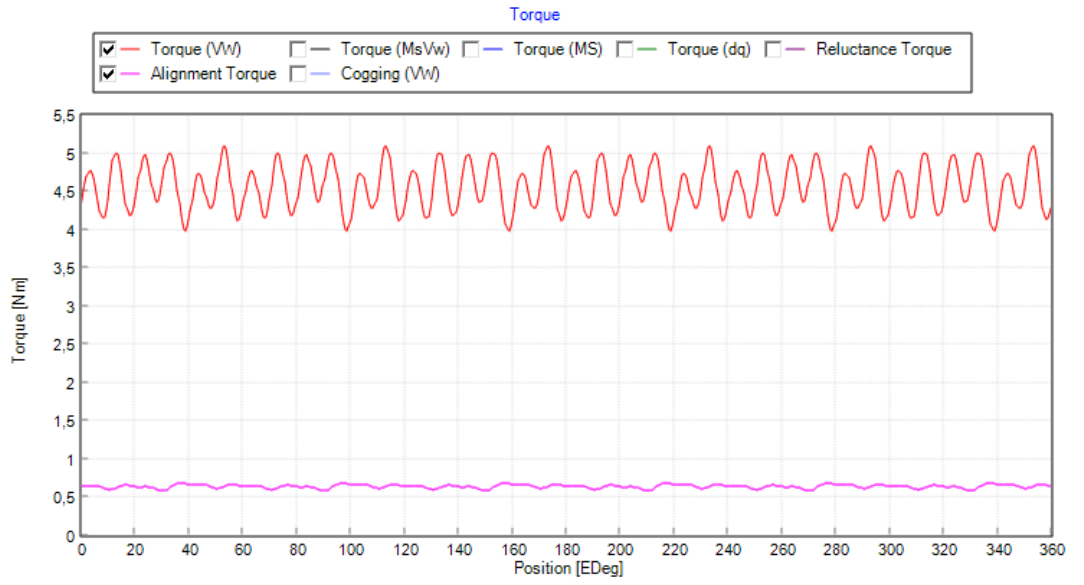
Tablo 3.5. Tasarım 2 için bilgiler

Bileşen	Değer	Değişim miktarı
Çıkış gücü	1314 kW	184
Çıkış torku	4,18 Nm	0,57
Verim	%88,84	1,272
Güç faktörü	0,84	0,14
Hava aralığı akı yoğunluğu (Ort)	0,32 T	-0,3
Hava aralığı akı yoğunluğu maksimum	0,74 T	0
Stator dış akı yoğunluğu maksimum	1,18 T	-0,02
Bakır kaybı	140,9 W	6,2
Toplam kayıp	165,1 W	4,2
Sargı sıcaklığı	69,54° C	0,69
Tork dalgalanması	%22,119	1,54

2 numaralı tasarım çıkış gücü ve torku olarak iyi sonuçlar vermektedir. Bununla beraber tork dalgalanması %1 oranında artmıştır. Mıknatıslardan gelen tork burada kendisini göstermeye başlamıştır.

3.3.3 3 Numaralı Tasarım: 6mm Mıknatıs

Her akı bariyerine 6mm uzunluğunda ve 2mm genişliğinde mıknatıs yerleştirilerek gerçekleştirilen simülasyon sonucu Şekil 3.14'te verilmiştir. Performans bilgileri ise Tablo 3.6'da verilmiştir.



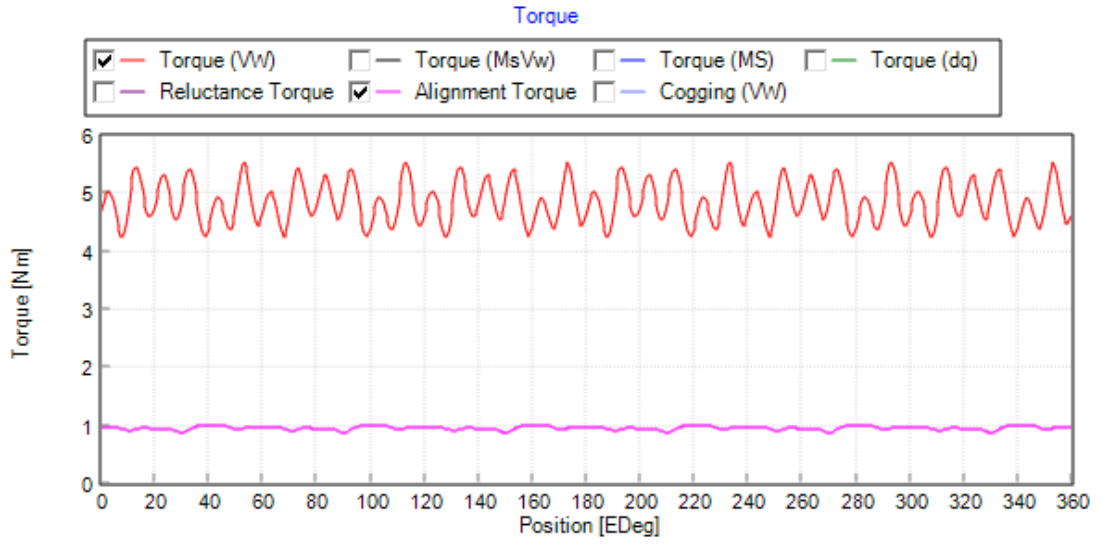
Şekil 3.14. 3 Numaralı tasarıma ait tork pozisyon grafiği

Tablo 3.6. Tasarım 3 için bilgiler

Bileşen	Değer	Değişim miktarı
Çıkış gücü	1,40 kW	0,27
Çıkış torku	4,46 Nm	0,86
Verim	%89,43	1,86
Güç faktörü	0,90	0,2
Hava aralığı akı yoğunluğu (Ort)	0,315 T	0,015
Hava aralığı akı yoğunluğu maksimum	0,74 T	0
Stator dış akı yoğunluğu maksimum	1,16 T	-0,04
Bakır kaybı	141 W	6,3
Toplam kayıp	165,8 W	4,9
Sargı sıcaklığı	69,64° C	0,79
Tork dalgalanması	%23,59	%20,57

3.3.4 4 Numaralı Tasarım: 8mm Mıknatıs

Her akı bariyerine 8mm uzunluğunda ve 2mm genişliğinde mıknatıs yerleştirilerek gerçekleştirilen simülasyon sonucu Şekil 3.15'te verilmiştir. Performans bilgileri ise Tablo 3.7'de verilmiştir.



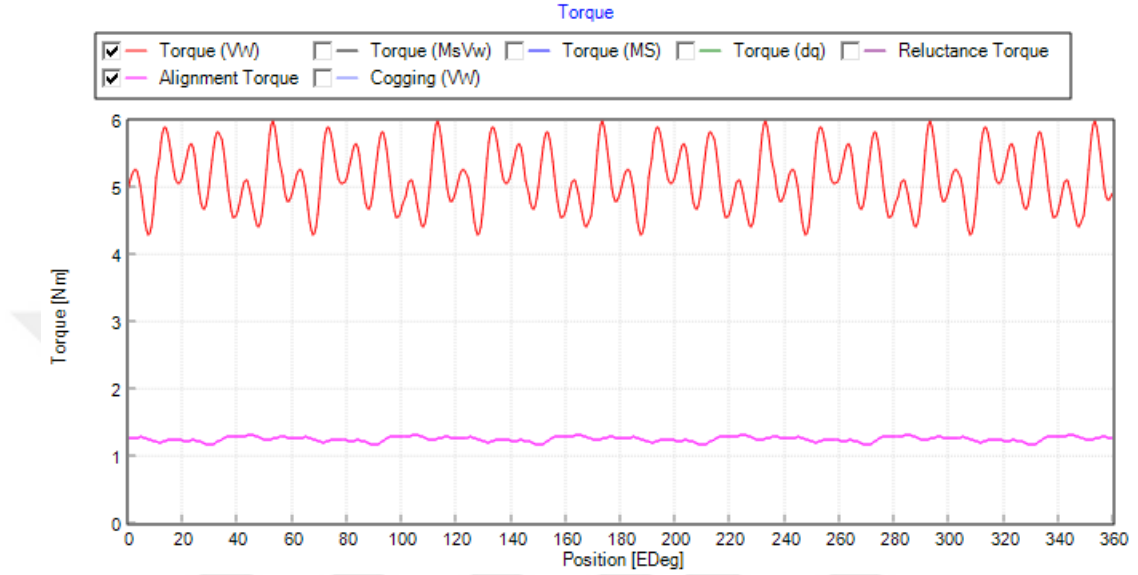
Şekil 3.15. 4 Numaralı tasarıma ait tork pozisyon grafiği

Tablo 3.7. Tasarım 4 için bilgiler

Bileşen	Değer	Değişim miktarı
Çıkış gücü	1,49 kW	0,36
Çıkış torku	4,74 Nm	1,14
Verim	%89,873	2,03
Güç faktörü	0,94	0,24
Hava aralığı akı yoğunluğu (Ort)	0,34 T	-0,1
Hava aralığı akı yoğunluğu maksimum	0,74 T	0
Stator dış akı yoğunluğu maksimum	1,15 T	-0,05
Bakır kaybı	141,2 W	6,5
Toplam kayıp	168,1 W	7,2
Sargı sıcaklığı	69,96° C	1,11
Tork dalgalanması	%24,9	4,33

3.3.5 5 Numaralı Tasarım: 10mm Mıknatıs

Her akı bariyerine 10mm uzunluğunda ve 2mm genişliğinde mıknatıs yerleştirilerek gerçekleştirilen simülasyon sonucu Şekil 3.16'da verilmiştir. Performans bilgileri ise Tablo 3.8'de verilmiştir.



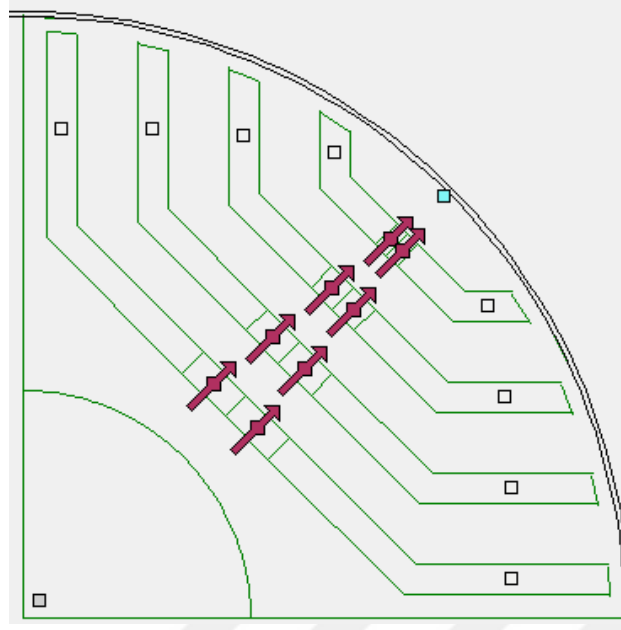
Şekil 3.16. 5 Numaralı tasarıma ait tork pozisyon grafiği

Tablo 3.8. Tasarım 5 için bilgiler

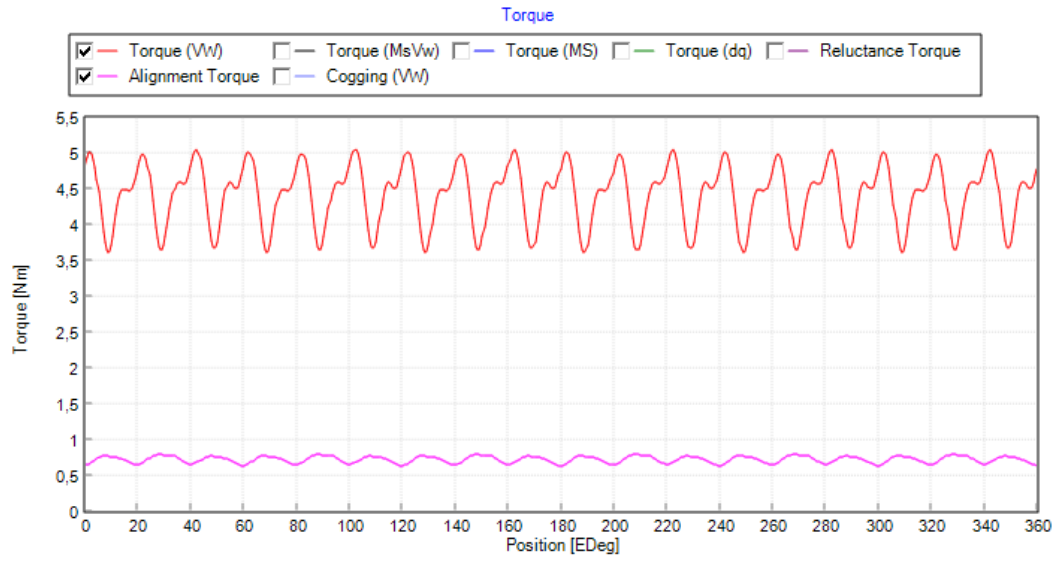
Bileşen	Değer	Değişim miktarı
Çıkış gücü	1,57 kW	0,44
Çıkış torku	5,01 Nm	1,41
Verim	%90,19	2,63
Güç faktörü	0,98	0,28
Hava aralığı akı yoğunluğu (Ort)	0,37 T	0,02
Hava aralığı akı yoğunluğu maksimum	0,75 T	0,01
Stator dış akı yoğunluğu maksimum	1,13 T	-0,07
Bakır kaybı	141,2 W	6,5
Toplam kayıp	171,4 W	10,5
Sargı sıcaklığı	70,44° C	1,59
Tork dalgalanması	%30	9,43

3.3.6 6 Numaralı Tasarım: 2-8 mm Mıknatıs

En dıştan en içe doğru her akı bariyerinde 2 mm uzunluk artacak şekilde mıknatıslar yerleştirilmiştir. En dıştaki akı bariyerinde 2mm en içteki akı bariyerinde 8 mm mıknatıs bulunan tasarım Şekil 3.17’de verilmiştir. Gerçekleştirilen simülasyon sonucu Şekil 3.18’de verilmiştir. Performans bilgileri ise Tablo 3.9’da verilmiştir.



Şekil 3.17. 6 Numaralı tasarıma ait mıknatıslar ve polarizasyonları



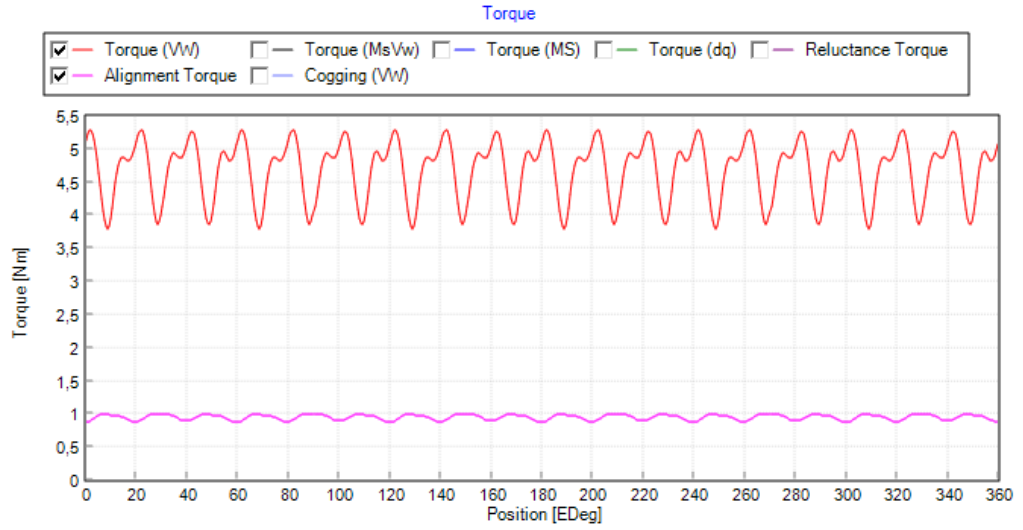
Şekil 3.18. 6 Numaralı tasarıma ait tork pozisyon grafiği

Tablo 3.9. Tasarım 6 için bilgiler

Bileşen	Değer	Değişim miktarı
Çıkış gücü	1,36 kW	0,23
Çıkış torku	4,32 Nm	0,72
Verim	%89,12	1,56
Güç faktörü	0,88	0,18
Hava aralığı akı yoğunluğu (Ort)	0,33 T	-0,02
Hava aralığı akı yoğunluğu maksimum	0,87 T	0,13
Stator dış akı yoğunluğu maksimum	0,98 T	-0,22
Bakır kaybı	141,4 W	6,7
Toplam kayıp	165,9 W	5
Sargı sıcaklığı	69,67° C	0,82° C
Tork dalgalanması	%31,35	10,78

3.3.7 7 Numaralı Tasarım: 4-10 mm Mıknatıs

En dıştan en içe doğru her akı bariyerinde 2 mm uzunluk artacak şekilde mıknatıslar yerleştirilmiştir. En dıştaki akı bariyerinde 4mm en içteki akı bariyerinde 10 mm mıknatıs bulunmaktadır. Gerçekleştirilen simülasyon sonucu Şekil 3.19’da verilmiştir. Performans bilgileri ise Tablo 3.10’da verilmiştir.



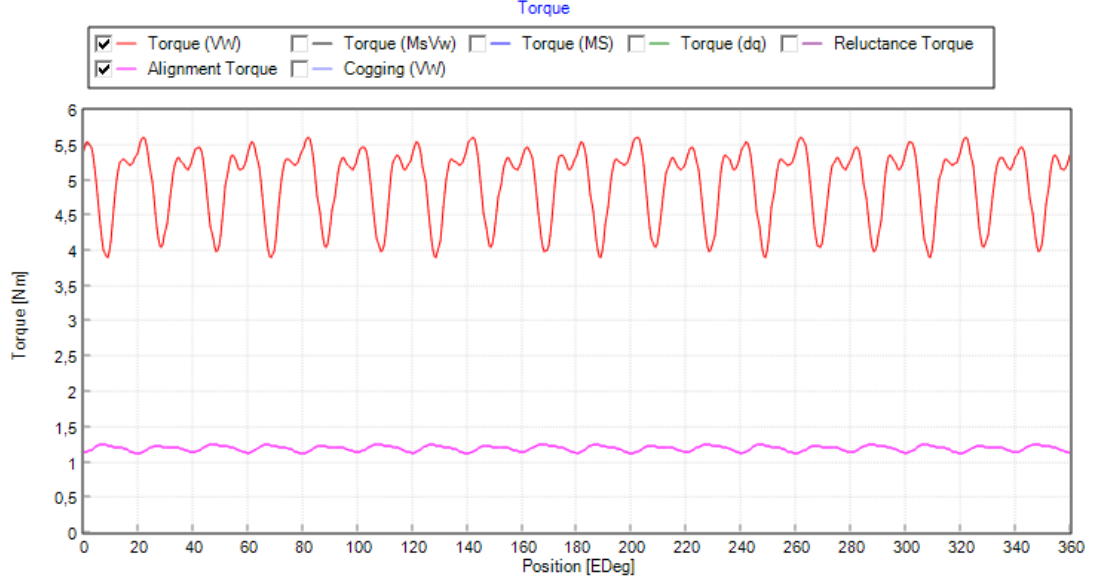
Şekil 3.19. 7 Numaralı tasarıma ait tork pozisyon grafiği

Tablo 3.10. Tasarım 7 için bilgiler

Bileşen	Değer	Değişim miktarı
Çıkış gücü	1,44 kW	0,31
Çıkış torku	4,6 Nm	1
Verim	%89,757	2,19
Güç faktörü	0,93	0,23
Hava aralığı akı yoğunluğu (Ort)	0,31 T	-0,04
Hava aralığı akı yoğunluğu maksimum	0,8789 T	0,13
Stator diş akı yoğunluğu maksimum	0,98 T	0,22
Bakır kaybı	141	6,3
Toplam kayıp	165	4,1
Sargı sıcaklığı	69,52° C	0,67
Tork dalgalanması	%30,67	10,1

3.3.8 8 Numaralı Tasarım: 6-12 mm Mıknatıs

En dıştan en içe doğru her akı bariyerinde 2 mm uzunluk artacak şekilde mıknatıslar yerleştirilmiştir. En dıştaki akı bariyerinde 6mm en içteki akı bariyerinde 12 mm mıknatıs bulunmaktadır. Gerçekleştirilen simülasyon sonucu Şekil 3.20’de verilmiştir. Performans bilgileri ise Tablo 3.11’de verilmiştir. Yapılan tüm çalışmaların sonuçları Tablo 3.12’de verilmiştir.



Şekil 3.20. 8 Numaralı tasarıma ait tork pozisyon grafiği

Tablo 3.11. Tasarım 8 için bilgiler

Bileşen	Değer	Değişim miktarı
Çıkış gücü	1,52 kW	0,39
Çıkış torku	4,86 Nm	1,26
Verim	%90,25	2,69
Güç faktörü	0,97	0,27
Hava aralığı akı yoğunluğu (Ort)	0,31 T	-0,04
Hava aralığı akı yoğunluğu maksimum	0,87 T	0,13
Stator dış akı yoğunluğu maksimum	0,99 T	0,21
Bakır kaybı	141 W	6,3
Toplam kayıp	165,1 W	4,2
Sargı sıcaklığı	69,53° C	0,68
Tork dalgalanması	%32,372	11,8

Tablo 3.12. Tasarımların karşılaştırılması

	Ref	1	2	3	4	5	6	7	8
Çıkış Gücü (kW)	1,13	1,24	1,314	1,40	1,49	1,57	1,36	1,44	1,52
Çıkış torku (Nm)	3,60	3,89	4,18	4,46	4,74	5,01	4,32	4,6	4,86
Verim (%)	87,568	88,07	88,84	89,43	89,87	90,19	89,12	89,75	90,25
Güç faktörü	0,70	0,77	0,84	0,90	0,94	0,98	0,88	0,93	0,97
Hava aralığı akı yoğ. (Ort) (T)	0,35	0,34	0,32	0,31	0,34	0,37	0,33	0,31	0,31
Hava aralığı akı yoğ. (Max) (T)	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,75	0,87	0,87	0,87
Stator dış akı yoğ. (Max) (T)	1,2	1,193	1,18	1,16	1,15	1,13	0,98	0,98	0,99
Bakır kaybı (W)	134,7	140,9	140,9	141	141,2	141,2	141,4	141	141
Toplam kayıp (W)	160,9	165,7	165,1	165,8	168,1	171,4	165,9	165	165,1
Sargı sıcaklığı (°C)	68,85	69,42	69,54	69,64	69,96	70,44	69,67	69,52	69,53
Tork dalgalanması (%)	20,57	21,49	22,11	23,59	24,9	30	31,35	30,67	32,37

Tablo 3.12 incelendiğinde:

- En yüksek verimi 8 numaraları tasarım vermektedir ancak bu model gereğinden fazla çıkış gücü ve en yüksek tork dalgalanmasına sahiptir.
- En düşük tork dalgalanması 1 numaraları tasarımda olmasına rağmen verim seviyesi düşük kalmaktadır.

- En yüksek hava aralığı akı yoğunluğu 7 numaralı tasarımdadır.
- 5 numaralı tasarım ikinci en yüksek verimi vermesine rağmen, diğer bütün tasarımlara göre en çok mıknatıs onda kullanılmıştır.

Diğer faktörlerde göz önüne alındığında yüksek verim veren, az mıknatıs kullanan ve yüksek maksimum hava aralığı akısı sağlayan 7 numaralı tasarım seçilmiştir.

3.4 Oluk Sayısının Etkisi

Oluk sayısının etkisini incelemek için seçilen 7 numaralı tasarım kullanılacaktır. Var olan 36 oluklu tasarım sonuçları 30 ve 24 oluk ile karşılaştırılacaktır. Tüm karşılaştırmalarda aynı stator yapısı kullanılmıştır.

Tablo 3.13. Farklı oluk sayılı tasarım sonuçları

	36 Oluk	30 Oluk	24 Oluk
Çıkış Gücü	1,44 kW	1,25 kW	0,96 kW
Çıkış torku	4,6 Nm	4,0 Nm	3,06 Nm
Verim	%89,757	%89,216	%87,619
Güç faktörü	0,93	0,93	0,94
Hava aralığı akı yoğunluğu (Ort)	0,31 T	0,29 T	0,26 T
Hava aralığı akı yoğunluğu maksimum	0,8789 T	0,95 T	0,71 T
Stator dış akı yoğunluğu maksimum	0,98 T	1,257 T	1,30 T
Bakır kaybı	141 W	127,4 W	135,9 W
Toplam kayıp	165 W	152,2 W	113,7 W
Sargı sıcaklığı	69,52° C	68,72° C	68,4° C
Tork dalgalanması	%30,67	%12,238	%21,997
Sargı akım yoğunluğu	8,46 A/mm ²	8,46 A/mm ²	8,46 A/mm ²
Faz direnci	5,22 Ohm	4,706 Ohm	4,204 Ohm

Yapılan karşılaştırma sonucu oluşturulan Tablo 3.13'te görüldüğü üzere stator oluk sayısını 30 yapmak tork dalgalanmasında yüzde 18,44'lük bir düşüş sağlamaktadır. Bunun sebebi ise, mıknatıs ve akı bariyerlerini gören yayın stator oluklarını gördüğü yay ile aynı hizaya yaklaşmasından kaynaklanmaktadır [18]. Bu işlem çıkış verimi konusunda %0,5 düşüşe sebep olsa da tork dalgalanmasındaki iyileşme sayesinde bu göz ardı edilebilir.

36 oluklu tasarımda bir kutbun altındaki bir faza ait oluk sayısı üç, 30 oluklu tasarımda 2,5 ve 24 oluklu tasarımda ise bu sayı iki olmaktadır. Kesirli sayıdaki bir kutbun altındaki bir faza ait oluk sayısı sayesinde mıknatısların vuruntu momentinin azalması sayesinde tork dalgalanmasında da düşüş gözlemlenmiştir.

24 oluklu tasarım sargı tur sayısı az olduğu için gerekli çıkış gücünü karşılayamamıştır.

Bu bilgiler ışığında işleme 7 numaralı tasarımın 30 oluklu yapısı ile devam edilmiştir.

3.5 Paket Boyunun Etkisi

Motorun stator ve rotorunun boyunun etkisini incelemek için seçilen 100 mm ile karşılaştırmak için 90 mm ve 80 mm incelemeleri gerçekleştirilmiştir.

100 mm olan tasarım, mıknatıs eklenmesi sonucu gücü arttığı için, gerekli olan gücün üzerinde çıkış vermektedir. Verdiği çıkış gücü zaten normal tasarımlara göre daha fazla olduğu için daha uzun paket boyunda simülasyonlar gerçekleştirilmemiştir. Simülasyon sonuçları Tablo 3.14'te verilmiştir.

90 ve 80 mm paket boylarında tork dalgalanmasında bir farklılık gözlemlenmemiştir. 90 ve 80 mm paket boylarında motor dış kaplaması aynı motor iç ölçüleri daha küçük olduğu için termal olarak daha iyi çalışmaktadır ancak bu fark sadece 1-2° C seviyesindedir.

Verim seviyesinde ve çıkış güçlerinde düşüş gözlemlenmiştir. Bu yüzden sonraki aşamalarda 100 mm olan motor kullanılmıştır.

Tablo 3.14. Paket boyunun etkisi

	100mm	90mm	80mm
Çıkış Gücü	1,25 kW	1,15 kW	1 kW
Çıkış torku	4,0 Nm	3,60 Nm	3,20 Nm
Verim	%89,216	%88,734	%88,175
Güç faktörü	0,93	0,93	0,94
Hava aralığı akı yoğunluğu (Ort)	0,29 T	0,29 T	0,298 T
Hava aralığı akı yoğunluğu maksimum	0,95 T	0,95 T	0,954 T
Stator dış akı yoğunluğu maksimum	1,257 T	1,25 T	1,25 T
Bakır kaybı	127,4 W	121,6 W	115,3 W
Toplam kayıp	152,2 W	143,8 W	135,4 W
Sargı sıcaklığı	68,72° C	68,4° C	68,13° C
Tork dalgalanması	%12,238	%12,23	%12,239
Sargı akım yoğunluğu	8,46 A/mm ²	8,46 A/mm ²	8,46 A/mm ²
Faz direnci	4,706 Ohm	4,963 Ohm	4,707 Ohm

3.6 Mıknatıs Sayısı

Kullanılan mıknatısların tek ya da çoklu parçalar halinde olması makinenin performansına ve karakteristiğine etki edebilmektedir. Özellikle büyük güçlerde mıknatısların tek parça halinde olması üzerlerinde Eddy akımı dolaştırmasına sebep olmaktadır. Bu da performansa negatif yönde etki etmektedir.

Mıknatısların temini ve yerleştirilmesi açısından çoklu mıknatıs kullanımı daha kolay olacağı için yapılan tasarımlarda kullanılan mıknatıslar hep çoklu mıknatıs olmuştur. Çoklu mıknatısın performansı etkisi ile tek mıknatısın performansa etkisinin karşılaştırılması Tablo 3.15'te verilmiştir.

Motorun küçük ve güç değerinin az olmasından dolayı mıknatısların parçalı ya da tek olmasının dikkate değer bir etkisi olmamıştır. Bu yüzden mıknatısların temini konusunda parçalı olanları bulmak daha kolay olduğu için Çoklu Mıknatıs tasarımıyla devam edilmiştir.

Tablo 3.15. Mıknatıs yapısının etkisi

	Çoklu Mıknatıs	Tek Mıknatıs
Çıkış Gücü	1,25 kW	1,25 kW
Çıkış torku	4,0 Nm	4,0 Nm
Verim	%89,216	%89,188
Güç faktörü	0,93	0,93
Hava aralığı akı yoğunluğu (Ort)	0,29 T	0,29 T
Hava aralığı akı yoğunluğu maksimum	0,95 T	0,95 T
Stator dış akı yoğunluğu maksimum	1,257 T	1,257 T
Bakır kaybı	127,4 W	127,9 W
Toplam kayıp	152,2 W	152,6 W
Sargı sıcaklığı	68,72° C	68,81° C
Tork dalgalanması	%12,238	%12,23
Sargı akım yoğunluğu	8,46 A/mm ²	8,46 A/mm ²
Faz direnci	4,706 Ohm	4,7 Ohm
Rotor mıknatıs kaybı toplam (Yükte)	0,936 W	9,936 W
Rotor mıknatıs kaybı (Boşta)	0,4401 W	0,43 W

3.7 Akı Bariyerlerinin Kenarlarına Kavis Verilmesi

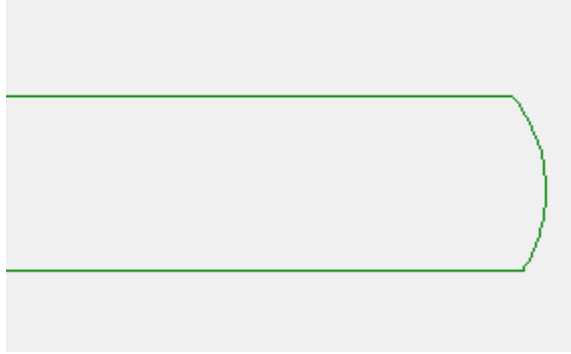
MDSynRM içerisinde hem relüktans hem mıknatıs momenti içerdiği için bu iki momente ait tork dalgalanmasını içermektedir. Akı bariyerlerinin sayısı, şekli ve kalınlığı bu dalgalanmaya etki etmektedir.

Tork dalgalanmasını azaltmanın yöntemlerinden birisi, rotordaki kaburga kısmında dolanan manyetik akının akışını düzenleyerek yapılabilir. Bunun için düz olan bölgelere eğim verilerek tork dalgalanması azaltılmaya çalışılmıştır. Referans tasarıma ait tasarım Şekil 3.21’de oluşturulan kavisli tasarım Şekil 3.22’de verilmiştir.

Akı bariyerlerinin kenarlarına kavis verilmesinin tork dalgalanmasında düşüşün yanında çıkış gücü ve torkunda da olumlu yönde etkisi olmuştur.



Şekil 3.21. Düz tasarıma ait akı bariyeri

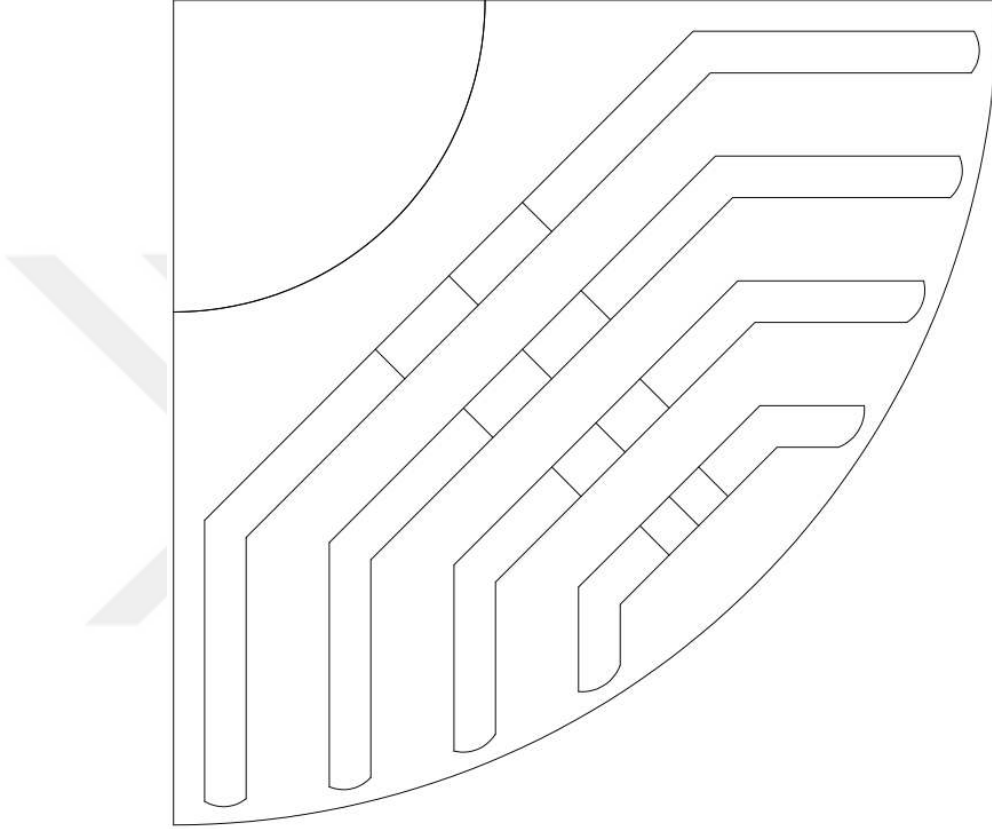


Şekil 3.22. Eğim verilmiş tasarıma ait akı bariyeri

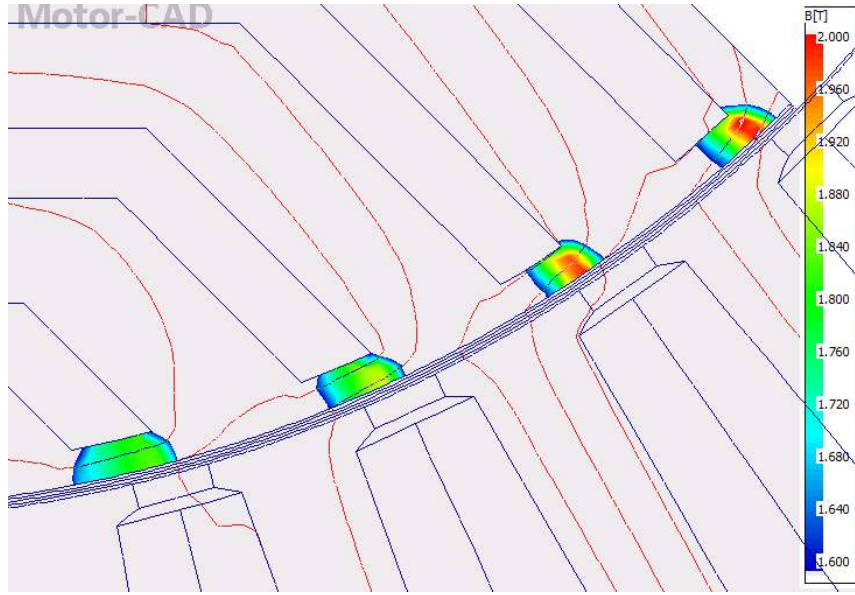
Rotor geometrisi simetrik olmadığı için her bir akı bariyerindeki yayın açısı değeri farklı oluşturulmuştur. En dıştakinden en içe doğru çapları sırasıyla; 1,74 mm,

1,77 mm, 1,83 mm ve 1,95 mm alınmıştır. Oluşturulan rotor geometrisi ve mıknatıslar Şekil 3.23'te verilmiştir.

Düz ve kavisli yapıya ait akı değişimleri Şekil 3.24 ve Şekil 3.25'te, performans bilgileri ise Tablo 3.16'da verilmiştir.



Şekil 3.23. Kenarlara eğim verilmiş rotor geometrisi ve mıknatıslar



Şekil 3.24. Düz rotor geometrisi akı yoğunluğu

Şekil 3.24'te görüldüğü üzere doyum noktaları daha küçük alanda maksimum seviyede olmaktadır.



Şekil 3.25. Eğimli rotor geometrisi akı yoğunluğu

Eğimli tasarımda doyum noktaları daha geniş alanda maksimum seviyede gerçekleşmektedir.

Tablo 3.16. Düz ve eğimli tasarım karşılaştırması

	Düz Tasarım	Eğimli Tasarım
Çıkış Gücü	1,25 kW	1,31 kW
Çıkış torku	4,0 Nm	4,19 Nm
Verim	%89,216	%89,542
Güç faktörü	0,93	0,94
Hava aralığı akı yoğunluğu (Ort)	0,29 T	0,31 T
Hava aralığı akı yoğunluğu maksimum	0,95 T	0,945 T
Stator dış akı yoğunluğu maksimum	1,257 T	1,299 T
Bakır kaybı	127,4 W	128,1 W
Toplam kayıp	152,2 W	153,7 W
Sargı sıcaklığı	68,72° C	68,98° C
Tork dalgalanması	%12,238	%11,08
Sargı akım yoğunluğu	8,46 A/mm ²	8,46 A/mm ²
Faz direnci	4,706 Ohm	4,7 Ohm

Kenarlara eğim verme çalışması tork dalgalanması üzerinde %1'den fazla etkide bulunmuştur. Benzer şekilde kaburga kalınlığını azaltmanın da performansa faydası bulunmaktadır. Ancak bu azaltma belirli mekanik dayanımlar içerisinde gerçekleştirilmelidir. Gereğinden fazla yapılan inceltme işlemi sonucu mekanik sorunlar oluşabilmektedir.

Bu çalışma prototip olarak gerçekleştirildiği için mekanik olarak olabildiği kadar güvenli bölgede kalınmaya çalışılmıştır. Seri üretim ya da var olan bir ürün üzerinde Ar-Ge (Araştırma-Geliştirme) çalışması yapılacak ise bu mekanik noktalarda güvenli bölgenin içinde güvenli bölgenin sınırına doğru genişlemeler gerçekleştirilebilir.

3.8 Sargıların Optimize Edilmesi

Statordaki oluklara yapılan sarımların tur sayısı, sargı teli kalınlığı, oluk doluluk oranı, izolasyon kalınlığı ve sarım tipi gibi etmenlerin makinenin performansına etkisi olmaktadır.

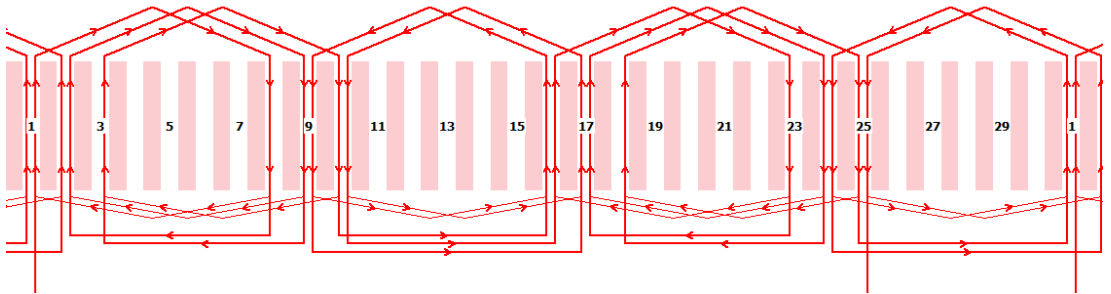
Eğer düzgün seçilmez ise harmonikler oluşup verimi düşürebilir, gereğinden kalın seçilir ise oluğa sığmayabilir. Çok ince seçilir ise yüksek akım geçirdiği için ısınıp deforme olabilir.

Yapılan parametrik çalışmalar sonucunda, yüksek verim seviyesine sahip, harmonik miktarı az olan, tork dalgalanmasına olumlu etki eden, düşük akım yoğunluğu geçirerek sıcaklığı düşüren sargı şeması Şekil 3.26’da verilmiştir.

Şimdiye kadar oluşturulan bütün motorlar referans motorun akım değeri olan 3A ile simüle edilmiştir.

Sargılarda gerçekleştirilen optimizasyon ile gereken güç miktarı 2.5 A seviyesine düşürülmüştür. Makinenin daha düşük akım değeri ile daha iyi performansta çalışması sağlanmıştır.

Ek olarak 80 mm paket boyu ile gereken gücü sağlayan ikinci en iyi tasarım da oluşturulmuştur.



Şekil 3.26. En iyileştirilmiş sargı düzeni

En iyileştirilmiş tasarım ile eski sargı tasarımının performans karşılaştırılması Tablo 3.17’de verilmiştir.

Tork dalgalanmasında %1,24 düşüş, verimde %3,39 artış gerçekleşmiştir. Verimdeki artışın temel sebeplerinden birisi daha kalın tel kullanılmasından kaynaklanmıştır.

Tablo 3.17. Düz ve eğimli tasarım karşılaştırması

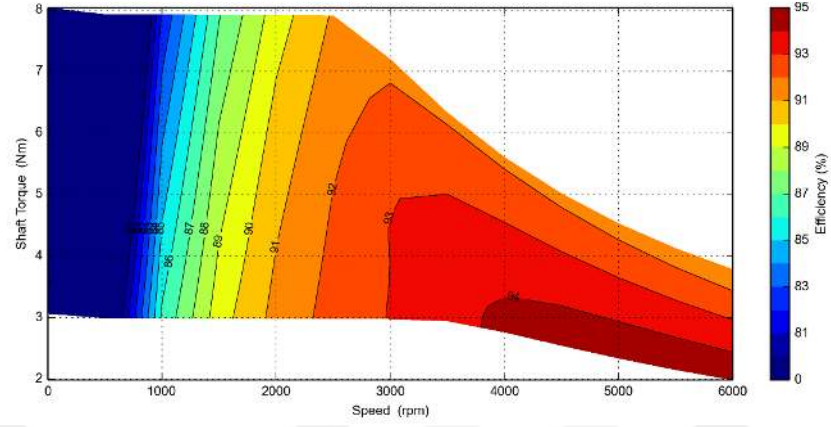
	Normal sargı	En iyileştirilmiş sargı
Çıkış Gücü	1,31 kW	1,176 kW
Çıkış torku	4,19 Nm	3,74 Nm
Verim	%89,542	%92,932
Güç faktörü	0,94	0,93
Hava aralığı akı yoğunluğu (Ort)	0,31 T	0,303
Hava aralığı akı yoğunluğu maksimum	0,945 T	0,8611 T
Stator dış akı yoğunluğu maksimum	1,299 T	1,181 T
Bakır kaybı	128,1 W	65,84 W
Toplam kayıp	153,7 W	89,48
Sargı sıcaklığı	68,98° C	56,07° C
Tork dalgalanması	%11,08	%9,8373
Sargı akım yoğunluğu	8,46 A/mm ²	4,97 A/mm ²
Faz direnci	4,7 Ohm	3,512 Ohm

3.9 Motorun Termal, Mekanik ve Verimlilik Analizleri

Elektrik motorlarında simülasyondaki tasarım sonuçlarını görmek ve incelemek son derece önemlidir. Bu sayede üretime geçmeden iyileştirme gereken yerler bulunup bu yerler hakkında çalışmalar gerçekleştirilebilir.

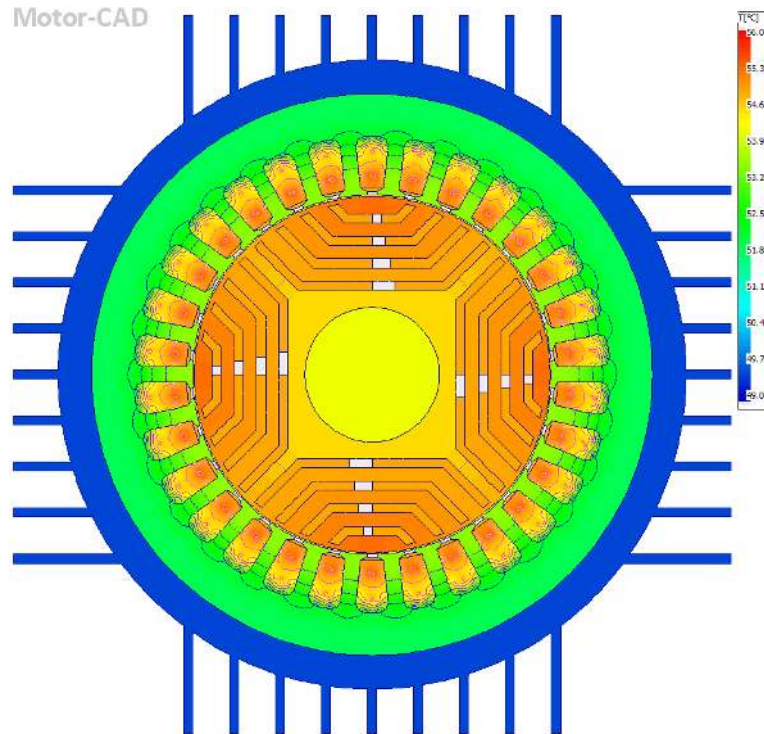
Şekil 3.27’de tasarlanan motora ait verim ve hız grafiği verilmiştir. Motor nominal hızında ve gücünde %93 verim seviyesine yakın çalışmaktadır.

Türkiye’de yürürlükte olan verim seviyesi IE4 için %87,2 olan değeri çok rahat bir şekilde aşmaktadır.



Şekil 3.27. Verim hız grafiği

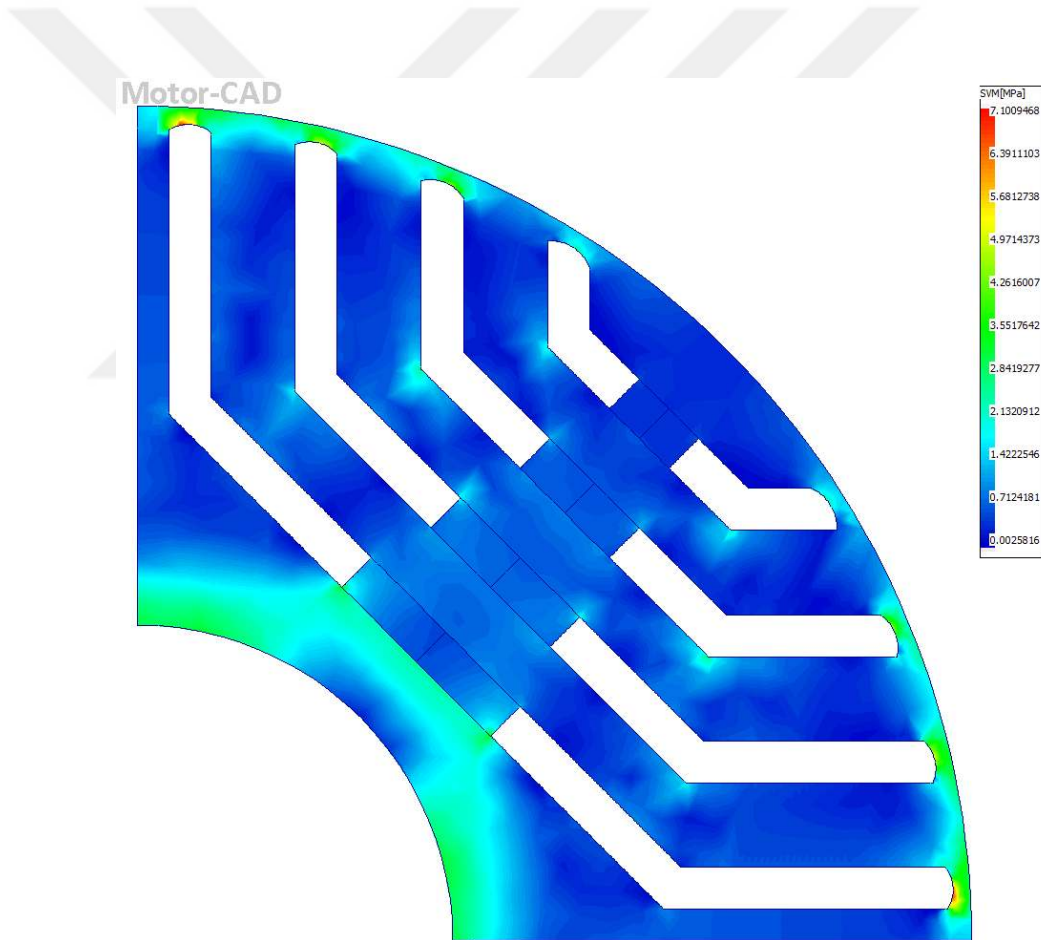
Motor hız düşümlerinde verim düşümü gerçekleşmektedir. Nominal hız değerinin yarısında %89 verim seviyesinde kalmaktadır. Bu değer referans alınan senkron relüktans motorun nominal devirdeki verim seviyesinden hala yüksektir.



Şekil 3.28. Nominal termal analiz sonucu

Elektrik makinalarında sıcaklık hem mekanik hem de sargıların zarar görmemesi için belirli limitlerde kalmalıdır. Özellikle içerisinde mıknatıs içeren makinelerde mıknatıslar sıcaklık ile demanyetize olabildikleri için bu durum daha da önem kazanmaktadır.

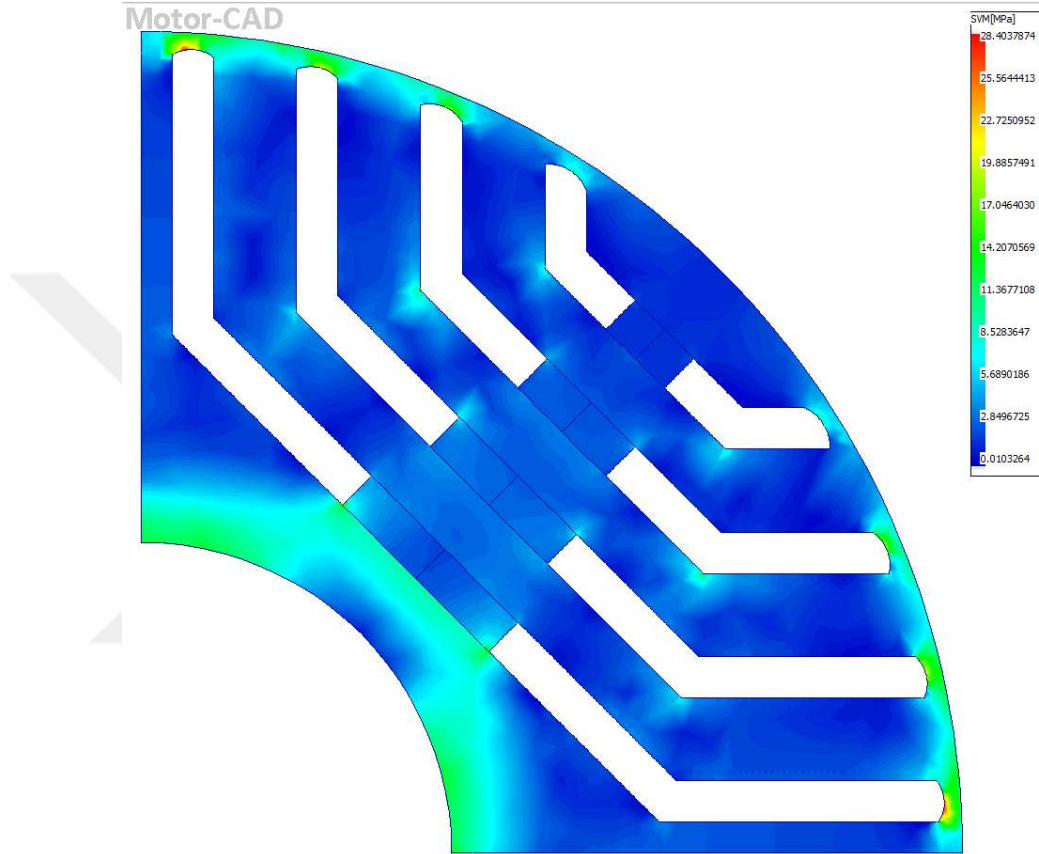
Yapılan tasarımda motorun arkasına yerleştirilen bir fan ile soğutma sağlanmaktadır. Motorlara uygun tasarlanan mıknatıslar genellikle $120^{\circ}C$ sıcaklıkta demanyetize olmaktadır. Farklı uygulamalarla bu sıcaklık değerleri daha düşük ya da yüksek olabilmektedir. Şekil 3.26'da makinanın termal değerleri verilmiştir. Yaklaşık $55 - 60^{\circ}C$ sıcaklıklar termal olarak zorlanma yaşanmayacağını göstermektedir.



Şekil 3.29. 3000 devir/dk mekanik analiz sonucu

Elektrik motorları 1500, 3000 ve 6000 gibi devirlerde döndükleri için bazı noktalarda mekanik strese maruz kalabilmektedir. MDSynRM'lerde temel stres

noktaları kaburga ve şaft kısmı olmaktadır. Kullanılan M270-50A sacı için mekanik olarak kritik noktasından aşağıda kalacak şekilde tasarım gerçekleştirilmiştir. 3000 devir/dakika için güvenlik faktörü ortalama olarak 64 olmaktadır ve Şekil 3.29’da simülasyon sonucu verilmiştir. 6000 devir/dakika için bu oran 16’ya düşmektedir ve Şekil 3.30’da simülasyon sonucu verilmiştir.



Şekil 3.30. 6000 devir/dk mekanik analiz sonucu

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bölüm 3'te tasarımı gerçekleştirilen motorun üretimi planlanmıştır ancak üretim işlemleri için firma taraflı değişiklikler gerçekleşmiştir. Üretimi gerçekleştirilen motorun stator ve rotor kısmında değişiklikler meydana gelmiştir.

Rotor kısmında mıknatısların yerleştirileceği yerlerde ve mıknatısların sağa sola kaymaması için akı bariyerlerinde değişiklik yapılmıştır. Yeni rotor Şekil 4.1 tasarımında üretilmiştir.



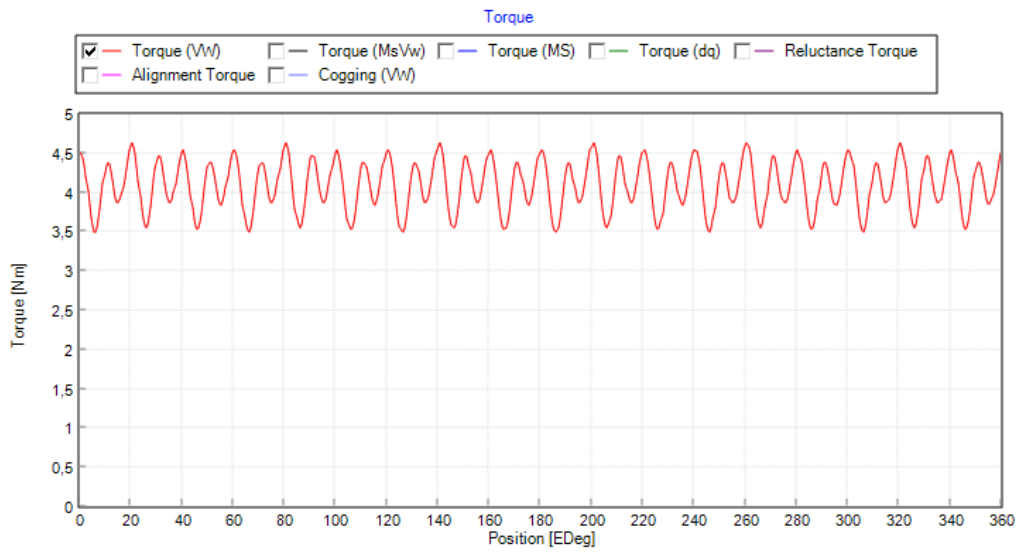
Şekil 4.1. Üretilen rotorun çizimi

Bölüm 3'te gerçekleştirilen simülasyon çalışmalarında tork dalgalanmasını azaltmak için 30 oluklu stator yapısı tercih edilmesine rağmen lazer kesim sonucu oluşan laminasyonların merkezlenememesi yüzünden hazırda kullanılmakta olan 36 oluklu stator yapısı kullanılmıştır. Yeni tasarıma ait performans bilgileri Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1. Üretilen motora ait simülasyon sonuçları

Bileşen	Değerler
Çıkış Gücü	1,28 kW
Çıkış torku	4,07 Nm
Verim	%92,6
Güç faktörü	0,79
Hava aralığı akı yoğunluğu (Ort)	0,39 T
Hava aralığı akı yoğunluğu maksimum	0,915 T
Stator dış akı yoğunluğu maksimum	1,249 T
Bakır kaybı	67,87 W
Toplam kayıp	99,78 W
Sargı sıcaklığı	57,07° C
Tork dalgalanması	%25,19
Sargı akım yoğunluğu	4,97 A/mm ²
Faz direnci	3,62 Ohm

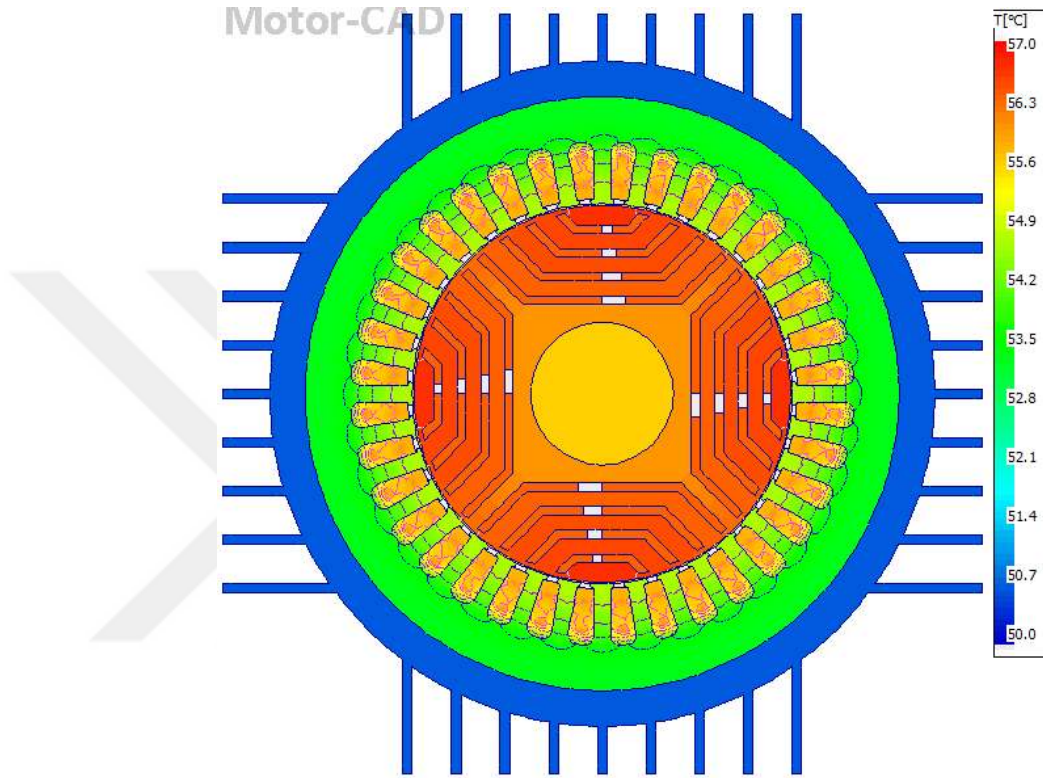
Üretimi gerçekleştirilen motorun tork pozisyon simülasyon sonucu Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2. Üretilen motorun tork pozisyon grafiği simülasyon sonucu

Verim değerleri ve g değerleri tasarlanan motora yakın olmaktadır ancak stator yapısından dolayı tork dalgalanması yüksek olmaktadır. ıkış tork değeri 4.5 ile 3.5 Nm arasındadır.

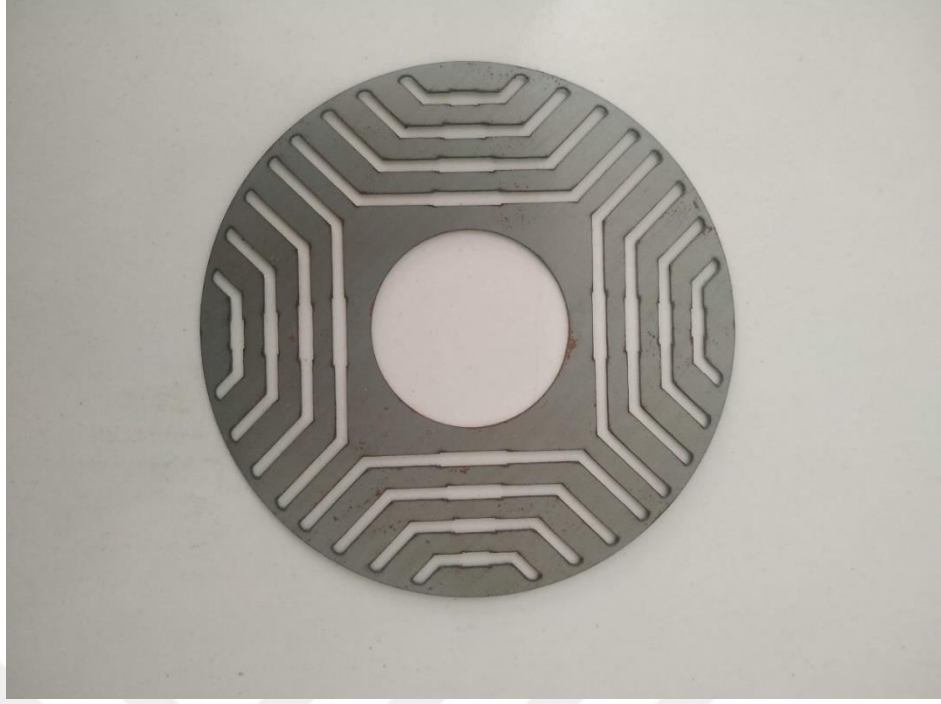
Üretilen tasarıma ait sıcaklık simülasyon sonuçları ekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.3. Üretilen tasarımın sıcaklık simülasyon sonuçları

retilmesi planlanan motor termal olarak motor tasarımına yakın olmaktadır. Oluk sayısı arttığı sadece için 1-2°C fark oluşmuştur. Bu fark sargılara ya da motorun diğer parametrelerine etki edecek kadar büyük değildir.

retimi gerçekleştirilen motora ait rotor laminasyonu ekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.4. Üretilen motora ait rotor laminasyonu

Şekil 4.4'te görüldüğü üzere mıknatıs yuvaları çok küçük olduğu için lazer kesim o noktalarda istenilen hassasiyette kesememiştir ve yanık noktalar oluşmuştur.

Rotorun hizalanması ve pres işlemi Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.5. Rotor pres işlemi

Laminasyonlar öncelikle özel bir aparat ile hizalanmış ardından pres makinesi ile baskı uygulanmıştır. Laminasyonların hizasının bozulmaması için üst ve alt taraflara kapak yerleştirilmiştir.

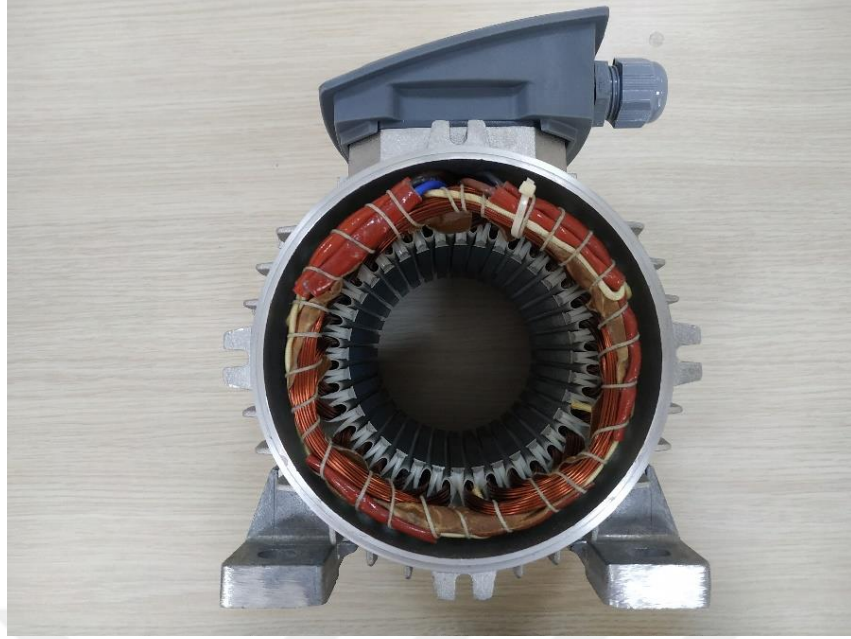
Presleme işleminden sonra hava aralığının eşit dağılması için tornalama işlemi gerçekleştirilmiştir. Tornalama işleminden çıkan rotor Şekil 4.6’da verilmiştir.



Şekil 4.6. Tornalama işlemi tamamlanmış rotor

Tornalama işlemi biten rotorun üst kapağı açılmış ve mıknatıslar yerleştirilmiştir. Mıknatıs yerleşiminden sonra kapak tekrar kapatılmıştır ve kaynak ile kapaklar sabitlenmiştir.

Statora sargılar sarıldıktan sonra motor gövdesine çakılmıştır. Çakım işlemi tamamlanan gövde Şekil 4.7’de verilmiştir.



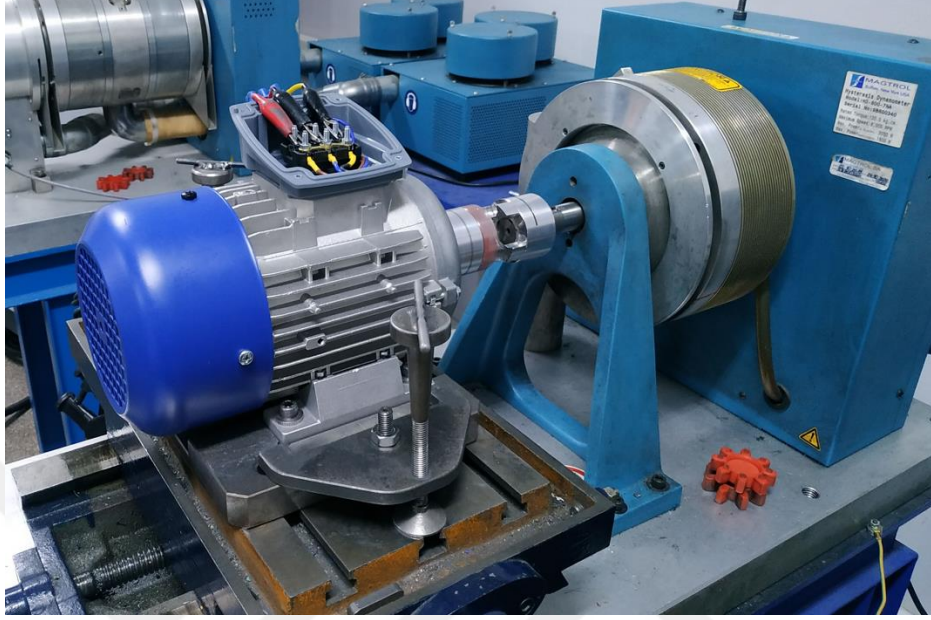
Şekil 4.7. Gövdeye çakılmış stator

Rotor ve kapaklar yerleştirildikten sonra montaj işlemi tamamlanmıştır. Üretilen motor Şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.8. Montajı tamamlanan motor

Üretim işlemleri tamamlandıktan sonra motor test edilmek üzere Volt ELEKTRİK MOTORLARI SAN. TİC. A.Ş. firmasında bulunan test düzeneğine yerleştirilmiştir. Test düzeneği Şekil 4.9’da verilmiştir.

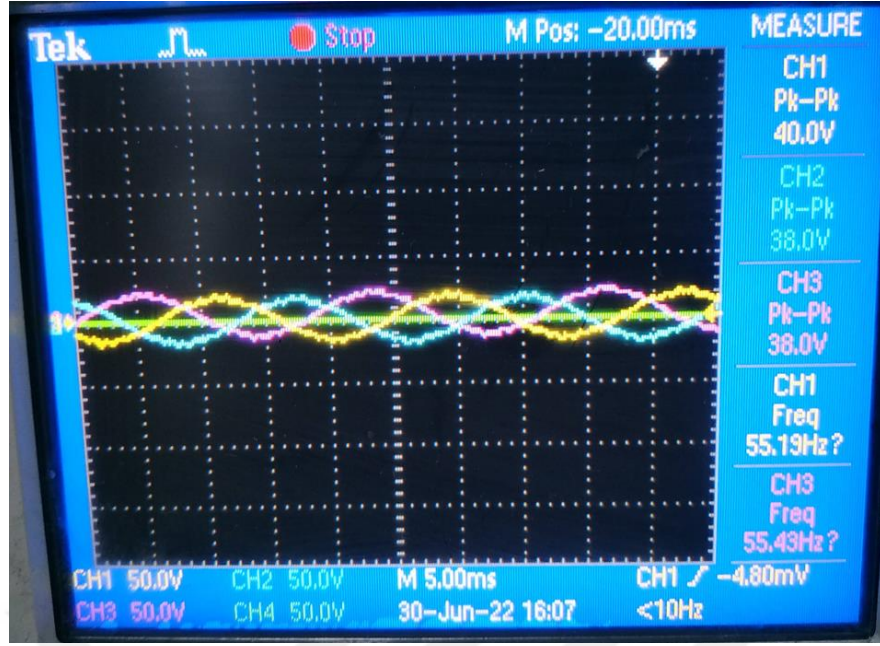


Şekil 4.9. Test düzeneği

Test aşamasında motor yüksek akım çekmeye çalıştığı için sürücü koruma durumuna geçip gücü kesmiştir. Bu yüzden testler gerçekleştirilememiştir.

Çalışmama sebebi olarak mıknatısların yerleştirilmesi ve kapakların kapatılması sırasında polarizasyonda bir hata olmuş olması ya da hizalamada bir sorun olduğu düşünülmektedir.

Motorun prensip olarak çalıştığını anlamak için harici bir kaynak ile rotor düşük devirde tahrik edilmiş ve zıt EMK grafiği elde edilmiştir. Zıt EMK grafiği Şekil 4.10’da verilmiştir.



Şekil 4.10. Motora ait zıt EMK değerleri

Şekil 4.10'da görüldüğü üzere düşük devirde rotor tahrik edildiğinde gerilim üretilmektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında tasarlanan motorun üretimi gerçekleştirilmiştir. Volt ELEKTRİK MOTORLARI SAN. TİC. A.Ş. firmasında testleri gerçekleştirilmiştir.

Üretim aşamasında gerçekleşmiş olması muhtemel sorunlardan dolayı motor çalıştırılamamıştır. Ancak düşük hızda tahrik edilerek zıt EMK değeri alınmıştır.

Ülkemizde elektrik elektronik mühendisliği alanında senkron relüktans motorlar üzerinde yapılan tez sayısı on tanedir. Kalıcı mıknatıs destekli senkron relüktans motorlar için yapılan tez sayısı ise sadece üç tanedir. Yapılan tezler daha çok sürücü ve özel amaçlar için gerçekleştirilen, verim seviyesi düşük motorlardır.

Yapılan bu tez çalışması hem genel amaçlı hem de elektrikli araçlarda kullanıma yönelik geliştirilmeye açık bir tasarımıdır. Tasarlanan motor diğer çalışmalara göre yüksek verim seviyesindedir.

Literatür incelendiğinde ise 30 kW ve üzeri motorlarda verim seviyesinde %96'lara yaklaşabilirken, 1-2 kW değerinde küçük güçler için verim seviyeleri %88-89 seviyelerinde kalmaktadır. Yapılan bu tez 1-2 kW gibi küçük güçlü motorlarda da verim seviyesinin arttırılabileceğini göstermiştir.

Geleceğe yönelik çalışmalar olarak:

- Prototipi üretilen motorun hatasız üretiminin gerçekleştirilmesi ve çalıştırılması
- Daha büyük güçlerdeki motorların tasarımı ve üretimi
- Farklı mıknatısların performansa ve dayanıklılığa etkileri
- Makinenin geçici hal davranışları

konuları incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Almeida, A. T., Ferreira F. J. T. E., Duarte A. Q. Technical and economical considerations on super high-efficiency three-phase motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2014, 50(2), 1274-1285
- [2] Donaghy-Spargo, C., Synchronous reluctance motor technology: industrial opportunities, challenges and future direction. Engineering & Technology Reference. 2016, 10.1049/etr.2015.0044
- [3] Kostko, J. K. Polyphase reaction synchronous motors. Journal of the American Institute of Electrical Engineers. 1923, 42(11), 1162-1168.
- [4] Tap, A. Sürekli mıknatıs destekli senkron relüktans motor tasarımı. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul, 2017, 143. (Yüksek Lisans Tezi)
- [5] Lawrenson, P. J., Agu, L. A. Theory and performance of polyphase reluctance machines. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers. 1964, 111(8), 1435-1445.
- [6] Cruickshank, A. J. O., Anderson, A. F., Menzies, R. W., Theory and performance of reluctance motors with axially laminated anisotropic rotors. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers. 1971, 118(7), 887-894.
- [7] Rao, S. C., US Patent No. US4110646A. 1976.
- [8] Fratta, A. Vagati, A., A reluctance motor drive for high dynamic performance application. IEEE Transactions on Industry Applications. 1992, 28(4), 873-879.
- [9] Kiriyama, H., Kawano S., Honda Y., Higaki, T., Morimoto, S., Takeda, Y. High performance synchronous reluctance motor with multi-flux barrier for the appliance industry. Conference Record of 1998 IEEE Industry Applications Conference, 12-15 Ekim, 1998, St. Louis, MO, USA.
- [10] Morimoto, S., Sanada, M., Takeda, Y. Performance of PM-assisted synchronous reluctance motor for high-efficiency and wide constant-power operation. IEEE Transactions on Industry Applications. 2001, 37(5), 1234-1240.
- [11] Sanada, M., Inoue, Y., Morimoto, S. PMASynRM with ferrite permanent magnet and its characteristics. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 17-22 Eylül, 2011, Phoenix, AZ. USA.
- [12] Bianchi, N., Fornasiero, E., Soong, W. Optimal selection of PM flux linkage in a PM assisted synchronous reluctance machine. International Conference on Electrical Machines, 2-5 Kasım, 2014, Berlin, Germany.
- [13] Talebi, S., Niazi, P., Toliyat, H. A. Design of Permanent Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Motors Made Easy. IEEE Industry Applications Annual Meeting, 23-27 Eylül, 2007, New Orleans, LA, USA.
- [14] Gamba, M., Pellegrino, G., Vagati, A. A new PM-assisted Synchronous Reluctance machine with a nonconventional fractional slot per pole combination. International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, 22-24 Mayıs, 2014, Bran, Romania.
- [15] Mohanarajah, T. Nagrial, M. A Novel Method to Optimize Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Machines. Electric Power Components and Systems. 2020, 48(9-10), 933-943.
- [16] Bianchi, N., Mahmoud, H. An Analytical Approach to Design the PM in PMAREL Motors Robust Toward the Demagnetization. IEEE Transactions on Energy Conversion. 2016, 31(2), 800-809.

- [17] Poskovic, E., Babetto, C., Bianchi, N. Bonded Magnets in PM-Assisted Synchronous Reluctance Machines: Performance Dependence on the Production Technology. IEEE International Electric Machines & Drives Conference, 12-15 Mayıs, 2019, San Diego, CA, USA.
- [18] Yan, D., Xia, C., Guo, L. Design and Analysis for Torque Ripple Reduction on Synchronous Reluctance Machine. IEEE Transaction on Magnetics. 2018, 54(11), 8203605
- [19] Krause, P. C., Wasynczuk, O. Analysis of Electric Machinery and Drive Systems. IEEE Press/WILEY, Piscataway, NJ, USA, 2013, 659.
- [20] Chau, K., Li, W. Challenges and Opportunities of Electric Machines for Renewable Energy. Progress In Electromagnetics Research B. 2012, 42, 45-74.
- [21] URL: http://www.megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Birlestirme_Elemanlari.pdf. [Erişim Tarihi 19-Temmuz-2022].
- [22] Bal, G. Elektrik Makinaları - 1. Seçkin Yayıncılık, Ankara, Türkiye, 2016, 400
- [23] URL: <https://volrad.com.tr/urun/hub-motorlar-12-kw/>. [Erişim Tarihi 19-Temmuz-2022].
- [24] URL: https://www.tedas.gov.tr/sx.web.docs/tedas/docs/Stratejikplan/2020_Yili_Turkiye_Elektrik_Dagitimi_Sektor_Raporu.pdf. [Erişim Tarihi 19-Temmuz-2022].
- [25] Zöhra, B., Akar, M. Türkiye'de verimli elektrik motorlarına geçiş süreci ve Şebeke Kalkışlı Sabit Mıknatıslı Senkron Motorlar. International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies. 2019, 3(2), 236-242.
- [26] URL: <https://voltmotor.com.tr/3-fazli-asen-kron-motorlar/>. [Erişim Tarihi 19-Temmuz-2022].
- [27] Çolak, İ. Elektrik Makinaları -2. Seçkin Yayıncılık, Ankara, Türkiye, 2017, 352.
- [28] Bal, G. Özel Elektrik Makinaları, Seçkin Yayıncılık, Ankara, Türkiye, 2011, 197.
- [29] Boldea, I., Tutelea, L. Reluctance Electric Machines Design and Control. CRC Press, Florida, USA, 2019, 415.
- [30] Un-Noor, F. Padmanaban, S. A Comprehensive Study of Key Electric Vehicle (EV) Components, Technologies, Challenges, Impacts and Future Direction of Development. Energies. 2017, 10(8).
- [31] Krings, A., Monissen, C. Review and Trends in Electric Traction Motors for Battery Electric and Hybrid Vehicles. International Conference on Electrical Machines, 23-26 Ağustos, 2020, Gothenburg, Sweden.
- [32] Luk, P. C., Abdulrahem, H. A. Low-cost high-performance ferrite permanent magnet machines in EV applications: A comprehensive review. eTransportation. 2020, 6, 100080.
- [33] Pellegrinei G., Jahns, T. M. The Rediscovery of Synchronous Reluctance and Ferrite Permanent Magnet Motors. Springer, AG, Switzerland, 2016, 136.
- [34] Bianchi, N., Bolognani, S. Torque Harmonic Compensation in a Synchronous Reluctance Motor. IEEE Transactions on Energy Conversion. 2008, 23(2), 466-473.
- [35] Bianchi, N., Bolognani, S. Rotor flux-barrier design for torque ripple reduction in synchronous reluctance motors. Conference Record of the 2006

IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting, 8-12
Kasım, 2006.



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Mustafa Ufukcan URCAN

Yabancı dili : İngilizce

Eğitim Durumu

Lise: : Lütfi Ege Anadolu Öğretmen Lisesi, 2014

Lisans : Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği (%100 İngilizce), 2019

Mesleki Deneyim

Kurum bilgisi : Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Araştırma Görevlisi, (2020 - Aktif)