

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

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

**YÜZEY YERLEŞİMLİ SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON  
GENERATÖRDE KARŞILAŞTIRMALI BAŞARIM ANALİZİ**

**Tuğberk ÖZMEN**

**Danışman  
Prof. Dr. Nevzat ONAT**



**MANİSA-2021**

**Tuğberk  
ÖZMEN**

**YÜZEY YERLEŞİMLİ SÜREKLİ MİKNATISLI SENKRON GENERATÖRDE  
KARŞILAŞTIRMALI BAŞARIM ANALİZİ**

**2021**

## **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.

**Tuğberk ÖZMEN**



## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	III
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VI
TABLO DİZİNİ .....	VIII
TEŞEKKÜR.....	IX
ÖZET.....	X
ABSTRACT.....	XI
1. GİRİŞ .....	1
1.1. Literatür Taraması .....	2
1.2. Tezin Amacı .....	10
2. SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MAKİNALAR .....	12
2.1. Sürekli Mıknatıslı Senkron Makina Yapısı ve Çalışma Prensibi.....	12
2.1.1. Stator.....	12
2.1.2. Rotor .....	13
2.1.3. Hava Aralığı.....	14
2.1.4. Mıknatıslar .....	14
2.1.5. Sargı Yapısı .....	15
2.1.6. Çalışma Prensibi .....	16
2.2. Sürekli Mıknatıslı Senkron Makinaların Sınıflandırılması .....	20
2.3. Sürekli Mıknatıslı Senkron Makinalarda Kullanılan Malzemeler ve Mıknatıslar.....	23
2.4. Sürekli Mıknatıslı Senkron Makinanın Manyetik Devre Modeli.....	26
2.5. Yüzey Yerleşimli Sürekli Mıknatıslı Senkron Makinanın Matematiksel Modeli .....	29
2.6. Sürekli Mıknatıslı Senkron Makinada Kayıplar ve Verim.....	31
2.6.1. Bakır Kayıpları .....	31
2.6.2. Nüve Kayıpları.....	32
2.6.3. Rüzgar Kayıpları.....	32
3. MATERYAL VE METOD .....	33
3.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi .....	33
3.2. Referans Makinanın ANSYS Electronics Desktop Yazılımının Maxwell Aracında Modellenmesi .....	35
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA .....	44
4.1. Referans SMSG'nin Rmxprt Analiz Sonuçları .....	44
4.2. Referans SMSG'nin Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları.....	48
4.3. Referans SMSG ile Yapılan Deneyler.....	55
4.3.1. Sargı Direnci Deneyi .....	58
4.3.2. Açık Devre (Boşta Çalışma) Deneyi .....	59
4.3.3. Kısa Devre Deneyi.....	59
4.3.4. Yüklü Çalışma Deneyi.....	60
4.3.5. Ani Yüklü Çalışma Deneyi.....	62
4.3.6. Bir İletken ve Bir Sarımda Endüklenen Gerilimlerin Ölçülmesi.....	63
4.4. Katalog, Yazılım ve Deney Sonuçlarının Kıyaslanması .....	64
4.5. Manyetik Devre Parametrelerinin SMSG Başarımına Etkileri .....	65
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	70
KAYNAKLAR .....	74
ÖZGEÇMİŞ .....	77

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<b>AC</b>	Alternatif akım
<b>A</b>	Manyetik malzeme kesit alanı [ $\text{mm}^2$ ]
<b>A<sub>m</sub></b>	Mıknatıs kesit alanı [ $\text{mm}^2$ ]
<b>A<sub>g</sub></b>	Hava aralığı kesit alanı [ $\text{mm}^2$ ]
<b>B</b>	Manyetik akı yoğunluğu [T]
<b>B<sub>r</sub></b>	Mıknatısın kalıcı mıknatıslık değeri [T]
<b>B<sub>m</sub></b>	Mıknatısın manyetik akı yoğunluğu [T]
<b>C</b>	Kutup-faz başına oluk sayısı [adet]
<b>ca</b>	Deri etkisi katsayısı
<b>D</b>	İletken çapı [ $\text{mm}^2$ ]
<b>DC</b>	Doğru akım
<b>d/dak</b>	Devir/dakika
<b>E</b>	Bir iletkende endüklenen gerilim [V]
<b>EMF</b>	Elektromotor kuvvet [V/m]
<b>f</b>	Frekans [Hz]
<b>f<sub>k</sub></b>	Kaçak katsayısı
<b>G<sub>k</sub></b>	Geçirgenlik katsayısı
<b>H</b>	Manyetik alan şiddeti [A/m]
<b>I</b>	Sargı akımları [A]
<b>I<sub>d</sub></b>	d-eksen akımı [A]
<b>I<sub>q</sub></b>	q-eksen akımı [A]
<b>J</b>	Elektriksel akım şiddeti
<b>J<sub>m</sub></b>	Mıknatıslar için akım yoğunluğu
<b>J<sub>z</sub></b>	Uyarma akımı yoğunluğu
<b>SMSG</b>	Sürekli mıknatıslı senkron generatör
<b>k<sub>a</sub></b>	İlave kayıplar katsayısı
<b>k<sub>e</sub></b>	Girdap akımı kayıp katsayısı
<b>k<sub>h</sub></b>	Histeresiz kayıp katsayısı
<b>k<sub>r</sub></b>	Hava aralığı relüktansı düzeltme faktörü
<b>L</b>	Makina uzunluğu [m]
<b>kVA</b>	kilovoltamper
<b>L<sub>d</sub></b>	d-eksen endüktansı [Henry]

<b>L<sub>q</sub></b>	q-eksen endüktansı [Henry]
<b>l<sub>m</sub></b>	Mıknatıs akı yolu uzunluğu [m]
<b>l<sub>g</sub></b>	Hava aralığında manyetik akının izlediği yol uzunluğu [m]
<b>m</b>	Faz sayısı [adet]
<b>MW</b>	Megawatt
<b>N</b>	Sarım sayısı
<b>NI</b>	National Instruments
<b>2p</b>	Kutup sayısı [adet]
<b>P<sub>bakır</sub></b>	Bakır kayıpları [W]
<b>P<sub>nüve</sub></b>	Nüve kayıpları [W]
<b>P<sub>e</sub></b>	Elektromekanik dönüşüm gücü [W]
<b>P<sub>ek</sub></b>	İlave kayıplar [W]
<b>P<sub>g</sub></b>	Girdap akımı kayıpları [W]
<b>P<sub>h</sub></b>	Histeresiz kayıpları [W]
<b>P<sub>rüzgar</sub></b>	Rüzgar kayıpları [W]
<b>R<sub>s</sub></b>	Stator sargı direnci [ohm]
<b>R<sub>s-AC</sub></b>	Stator sargıları AC direnci [ohm]
<b>R<sub>s-DC</sub></b>	Stator sargıları DC direnci [ohm]
<b>RMS</b>	Root mean square
<b>Rpm</b>	Revolutions per Minute
<b>ℜ<sub>g</sub></b>	Hava aralığı relüktansı [1/Henry]
<b>ℜ<sub>l</sub></b>	Kaçak akıyı temsil eden relüktansı [1/Henry]
<b>ℜ<sub>m</sub></b>	Mıknatıs relüktansı [1/Henry]
<b>ℜ<sub>s</sub></b>	Stator relüktansı [1/Henry]
<b>ℜ<sub>r</sub></b>	Rotor relüktansı [1/Henry]
<b>S</b>	İletken kesit alanı
<b>T<sub>e</sub></b>	Elektromanyetik moment [Nm]
<b>U<sub>f</sub></b>	Faz gerilimi [V]
<b>VA</b>	Voltamper
<b>t</b>	Renk dizisi tekrar sayısı [adet]
<b>Y<sub>x</sub></b>	Sargı adımı [oluk]
<b>w<sub>e</sub></b>	Elektriksel açısal hız [rad/sn]
<b>w<sub>m</sub></b>	Mekanik dönme hızı [rad/sn]

<b>X</b>	Oluk sayısı [adet]
<b>Z</b>	İletken sayısı [adet]
<b><math>\alpha</math></b>	Steinmetz katsayısı
<b><math>a_i</math></b>	Şekil fonksiyonu
<b><math>\emptyset</math></b>	Manyetik akı [Wb]
<b><math>\emptyset_r</math></b>	Mıknatısın ürettiği manyetik akı [Wb]
<b><math>\mu_0</math></b>	Hava aralığı manyetik geçirgenliği [Henry/m]
<b><math>\mu_r</math></b>	Malzemelerin bağıl manyetik geçirgenliği [Henry/m]
<b><math>v</math></b>	Malzemenin manyetik direnci [ohm]
<b><math>\rho_d</math></b>	Yoğunluk
<b><math>\lambda_{pm}</math></b>	Mıknatıs halkalanma akısı
<b><math>\lambda_s</math></b>	Stator halkalanma akısı

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Farklı oluk biçimleri .....	13
Şekil 2.2. Sürekli mıknatıslı bir elektrik makinasının 3 boyutlu görünüşü .....	14
Şekil 2.3. (a) Yüzeysel mıknatıs yerleşimli (b) Gömülü mıknatıs yerleşimli.....	15
Şekil 2.4. (a) Toplu sargı yapısı (b) Dağıtılmış sargı yapısı .....	16
Şekil 2.5. (a) Tek kat sargılı stator yapısı (b) Çift kat sargılı stator yapısı .....	16
Şekil 2.6. 3 fazlı fırçasız elektrik makinasına ilişkin örnek sürücü devre şeması .....	17
Şekil 2.7. Anahtarlama elemanlarının tetiklenme anları.....	18
Şekil 2.8. Stator faz akımları.....	18
Şekil 2.9. Endüklenen gerilim dalga şekli .....	19
Şekil 2.10. Üretilen moment grafiği .....	19
Şekil 2.12. (a) İç rotorlu mıknatıslı makina (b) Dış rotorlu mıknatıslı makina .....	20
Şekil 2.13. (a) Radyal akıllı makina (b) Eksenel akıllı makina [27].....	21
Şekil 2.14. Dış rotorlu eksenel akıllı makina örneği [26] .....	21
Şekil 2.15. (a) Yüzeysel mıknatıs yerleşimli (b) Gömülü mıknatıs yerleşimli.....	22
Şekil 2.16. Gömülü mıknatıslı makinada farklı mıknatıs yerleşimleri .....	23
Şekil 2.17. Histeresiz eğrisi .....	24
Şekil 2.18. Yumuşak ve sert manyetik malzemelerin örnek histeresiz eğrileri .....	24
Şekil 2.19. Farklı mıknatıs türlerine ilişkin histeresiz eğrilerinin ikinci bölgeleri ....	25
Şekil 2.20. Kalıcı mıknatıslık ve yok edici kuvvet değerlerinin sıcaklıkla ilişkisi....	26
Şekil 2.21. Manyetik akının izlediği yol.....	27
Şekil 2.22. Manyetik eşdeğer devre modeli .....	27
Şekil 2.23. Bir kutup çifti için eşdeğer relüktans.....	28
Şekil 2.24. Yüzey yerleşimli SMSG eksen takımları [29].....	29
Şekil 3.1. Referans makinanın (a) stator (b) rotor görselleri ve boyutları .....	37
Şekil 3.2. Referans makinada kullanılan oluk modeli .....	38
Şekil 3.3. Referans makinada kullanılan kutup modeli .....	38
Şekil 3.4. Referans generatörün oluşturulan Rmxprt modeli.....	38
Şekil 3.5. Kullanılan makinaya ilişkin sargı şeması .....	42
Şekil 4. 1 Hava aralığı akı yoğunluğunun elektriksel açıya bağlı dağılımı .....	45
Şekil 4. 2 Endüklenen faz ve hat gerilimleri.....	46
Şekil 4. 3 Bir sarımda endüklenen gerilim.....	46
Şekil 4. 4 Anma yükte faz akımları .....	47
Şekil 4. 5 Anma yükte faz-faz gerilimi .....	48
Şekil 4. 6 Referans generatöre ilişkin ağ yapısı.....	49
Şekil 4. 7 Tam yükte faz akımlarının grafiği .....	49
Şekil 4. 8 Tam yükte endüklenen faz gerilimleri grafiği .....	50
Şekil 4. 9 Tam yükte moment grafiği .....	50
Şekil 4. 10 Boş çalışma koşulunda manyetik akı yoğunluğu dağılımı .....	51
Şekil 4. 11 Tam yüklü çalışma koşulunda manyetik akı yoğunluğu dağılımı .....	52
Şekil 4. 12 Boş çalışma koşulunda manyetik akı çizgileri.....	52
Şekil 4. 13 Tam yüklü çalışma koşulunda manyetik akı çizgileri .....	53
Şekil 4. 14 ANSYS-Simplorer model.....	54
Şekil 4. 15 Bir faz açık devre arıza durumundaki faz akımları grafiği.....	54
Şekil 4. 16 Bir faz açık devre arıza durumundaki gerilim eğrileri .....	54
Şekil 4. 17 Fazlar arası kısa devre arızası durumundaki faz akımları grafiği.....	55
Şekil 4. 18 Fazlar arası kısa devre arızası durumundaki gerilim eğrileri.....	55
Şekil 4. 19 Bir iletkendeki ölçümler için yerleştirilen ek iletken .....	56



Şekil 4. 20 Bir sarımdaki ölçümler için yerleştirilen ek iletken .....	56
Şekil 4. 21 İletkenlerin makina dışına alınması .....	57
Şekil 4. 22 SMSG ve asenkron motor yerleşimi.....	57
Şekil 4. 23 Deney düzeneği .....	58
Şekil 4. 24 Deney bağlantı şeması .....	58
Şekil 4. 25 Referans SMSG'nin açık devre karakteristiği .....	59
Şekil 4. 26 Referans SMSG'nin kısa devre karakteristiği .....	60
Şekil 4. 27 Sabit hızda farklı yük kademeleri için V-I grafiği.....	60
Şekil 4. 28 Farklı ohmik yüklerde devir sayısına bağlı uç gerilimi grafiği .....	61
Şekil 4. 29 Farklı ohmik yüklerde devir sayısına bağlı akım grafiği.....	61
Şekil 4. 30 Ani yükleme deneyi bağlantı şeması .....	62
Şekil 4. 31 Ani yükleme deneyi düzeneği .....	62
Şekil 4. 32 Ani yükleme deneyi akım grafiği .....	63
Şekil 4. 33 Ani yükleme deneyi gerilim grafiği.....	63
Şekil 4. 34 Bir iletken ve sarımda endüklenen gerilim .....	64
Şekil 4. 35 İki faz iletkeni arasındaki uç gerilim .....	64
Şekil 4. 36 Kıyaslamalı boşa çalışma sonuçları.....	65
Şekil 4. 37 60 Hz için boşa çalışma uç gerilimlerin kıyaslaması .....	65
Şekil 4. 38 Kutup yay oranının vuru momentine etkileri .....	66
Şekil 4. 39 Kutup yay oranının hava aralığı akı yoğunluğuna etkileri .....	67
Şekil 4. 40 Mıknatıs kalınlığının vuru momentine etkileri.....	67
Şekil 4. 41 Mıknatıs kalınlığının hava aralığı akı yoğunluğuna etkileri.....	68
Şekil 4. 42 Mıknatıs malzeme türünün vuru momentine etkisi .....	68
Şekil 4. 43 Mıknatıs malzeme türünün hava aralığı akı yoğunluğuna etkisi.....	69

## TABLO DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
<b>Tablo 2.1.</b> Bazı mıknatıs türleri için Curie sıcaklıkları .....	26
<b>Tablo 3. 1.</b> ANSYS-Rmxprt aracındaki makina türleri.....	36
<b>Tablo 3. 2.</b> Referans generatöre ilişkin genel bilgiler .....	36
<b>Tablo 3. 3.</b> Referans generatöre ilişkin stator ve rotor parametreleri .....	37
<b>Tablo 3.4.</b> Renk dizisinin hesaplanması .....	40
<b>Tablo 4. 1</b> Yüksüz çalışma koşullarında çıkış parametreleri.....	44
<b>Tablo 4. 2</b> Yüklü çalışma koşullarında çıkış parametreleri .....	47



## TEŞEKKÜR

Çalıőmamın her aşamasında bana destek olan, bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Nevzat ONAT'a, kendisini tanımaktan büyük onur duyduğum sevgili hocam Sayın Prof. Dr. Sezai TAŐKIN'a, bana olan desteğini ve inancını her an hissettiğim Sayın Dr. Öğr. Üyesi Etem KÖSE'ye, tez çalışmam boyunca çok değerli vakitlerini ayırarak bana destek olan ve yardımlarını esirgemeyen Sayın Öğr. Gör. Osman GÜÇTEKİN'e, hem teknik olarak yardımlarını hem de manevi desteğini hiç esirgemeyen Sayın Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Onur GÜLBAHÇE'ye ve son olarak yaptığım bütün işlerde beni hep destekleyen ve her zaman arkamda olan sevgili eőim Ece ÖZMEN'e ve aileme yürekten teşekkür ederim.

Tuğberk ÖZMEN  
Manisa, 2021



# ÖZET

## Yüksek Lisans Tezi

### Yüzey Yerleşimli Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatörde Karşılaştırmalı Başarım Analizi

Tuğberk ÖZMEN

Manisa Celal Bayar Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Nevzat ONAT

Sürekli mıknatıslı senkron makinaların, yapılarındaki sabit mıknatıslardan dolayı klasik elektrik makinalarına göre bakır kayıpları daha az ve verimleri daha yüksektir. Küçük hacim, yüksek güç ve moment yoğunluğu, geniş hız bölgesinde kullanılabilme gibi üstünlüklerinden dolayı sürekli mıknatıslı senkron makinalar geniş bir kullanım alanına sahiptir. Otomotiv, bilgisayar ve uzay teknolojileri, tıp elektroniği, robotik gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Bu makina yapısının kullanıldığı bir diğer alan da rüzgar enerji santrallerinde kullanılan generatörlerdir. Bu tez çalışmasında, 1,5 kW gücünde, 450 d/dak anma hıza sahip bir sürekli mıknatıslı senkron generatör referans olarak kullanılmıştır.

Tezin giriş kısmında sürekli mıknatıslı senkron generatörlerle ilgili literatürde bulunan kaynaklar incelenmiş ve elde edilen bilgiler verilmiştir. İkinci kısımda sürekli mıknatıslı senkron makinaların yapısı, çalışma prensibi, sınıflandırılması, kullanılan malzeme ve mıknatıslar hakkında bilgiler verilmiştir. Sürekli mıknatıslı senkron makinaların manyetik devre ve matematiksel modeli verilerek bu makinalarda meydana gelen kayıplardan bahsedilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ve ANSYS Electronics Desktop yazılımında referans olarak kullanılan generatörün modellenmesiyle ilgili bilgilere materyal ve metod kısmında değinilmiştir. Tez çalışması kapsamında referans generatörün ANSYS Electronics Desktop yazılımı üzerinden analizleri ve laboratuvar ortamında deneyleri yapılmıştır.

Elde edilen deney sonuçları, analiz sonuçları ve referans generatörün katalog bilgileri kıyaslandığında, ANSYS Electronics Desktop yazılımı ile elde edilen sonuçların katalog verileri ile genel olarak uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır. Deney düzeneğinden ve generatör mıknatıslarındaki yıpranmadan kaynaklı olarak ortaya çıktığı düşünülen küçük farklar tespit edilmiştir. Bu makinalarda mıknatıs kutup yayının kutup adımına oranında, mıknatıs kalınlığında ve mıknatıs türünde değişiklik yapıldığında vuru mu momenti, hava aralığı akı yoğunluğu ve verim parametreleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Sürekli mıknatıslı senkron generatör, sonlu elemanlar yöntemi, ANSYS Electronics Desktop.

2021, 77 sayfa

## **ABSTRACT**

**M.Sc. Thesis**

### **Comparative Performance Analysis in Surface Mounted Permanent Magnet Synchronous Generators**

**Tuğberk ÖZMEN**

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

**Supervisor: Prof. Dr. Nevzat ONAT**

Permanent magnet synchronous machines have less copper losses and higher efficiency compared with conventional electrical machines due to the having magnets in their structure. Permanent magnet synchronous machines have a wide usage area due to their advantages such as being small volume, have high power and torque density and using in wide speed range. They are used in many fields such as automotive, computer and space technologies, medical electronics and robotics. Another area where this machine structure are used is the generators in wind power plants. In this thesis, a permanent magnet synchronous generator with a power of 1,5 kW and a nominal speed of 450 rpm is has been used as a reference.

In the introduction of the thesis, the sources in the literature about permanent magnet synchronous generators have been analzed and the information obtained has been given. In the second part, information about the structure, working principle, classification, used materials and magnets of permanent magnet synchronous machines have been given. Magnetic circuit and mathematical model of permanent magnet synchronous machines have been given and the losses occurring in these machines have been mentioned. The finite element method and the information about the modeling of the generator used as a reference in ANSYS Electronics Desktop software have been mentioned in the material and method section. In the thesis study, the analysis of the reference generator in ANSYS Electronics Desktop software and experiments in the laboratory environment have been carried out.

When the obtained experimental results, analysis results and catalog information of the reference generator have been compared, it was concluded that the results obtained with ANSYS Electronics Desktop software were generally compatible with the catalog data. It is thought that the differences are due to the experiment setup and the wear on the magnets of generator. In these types of machines, when changes are made in magnet pole arc to pole pitch ratio, magnet thickness and magnet type, the effects on the cogging torque, air gap flux density and efficiency parameters were investigated.

**Anahtar Kelimeler: Permanent magnet synchronous generator, finite elements method, ANSYS Electronics Desktop.**

**2021, 77 pages**

## 1. GİRİŞ

Elektrik enerjisi günlük hayatın her alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Su, güneş, rüzgar, ısı gibi farklı enerji türlerinin dönüştürülmesi ile üretilmektedir. Aynı şekilde, elektrik enerjisinin farklı enerji türlerine dönüştürülmesiyle de tüketimi gerçekleşmektedir. Hem elektrik enerjisi üretimi hem de tüketiminde elektrik makinaları yaygın olarak kullanılmaktadır. Elektrik enerjisi üretiminde elektrik makinaları generatör olarak çalışarak, tüketiminde ise motor çalışarak görev almaktadır.

Elektrik enerjisi üretim santralleri, tesiste kullanılan yakıtı göre isimlendirilebilmektedir. Örneğin, elektrik enerjisi üretmek için kömürün kullanıldığı santrallere termik santral, doğalgazın kullanıldığı santrallere doğalgaz santrali, suyun kullanıldığı santrallere hidroelektrik santraller denir. Santrallerde kullanılan yakıtlar farklı olduğu gibi bazı ekipmanlar da farklı olabilir. Mekanik enerjiden elektrik üretiminin gerçekleşeceği santrallerde ortak olan ekipmanlardan birisi generatörlerdir. Generatörler, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çeviren döner elektrik makinalarıdır. Santrallerin türüne ve gücüne göre farklı generatör türleri kullanılabilir.

Elektrik üretim santrallerinde kullanılan generatör türlerinden birisi olan senkron generatörler yuvarlak rotorlu ve çıkık kutuplu olarak ikiye ayrılır. Yuvarlak rotorlu senkron generatörün hava aralığı rotor boyunca sabit iken çıkık kutuplu senkron generatörde hava aralığı değişkendir. Senkron generatörler, manyetik alan üretmek için yapısında sargı veya mıknatıs olmasına göre iki çeşittir. Hem stator hem de rotorunda sargı bulunan, rotorundaki kutup sargıları üzerinden manyetik alanın üretildiği generatörlere alan sargılı senkron generatör denir. Manyetik alanı üretmek için kutup sargıları yerine mıknatısların kullanıldığı generatörlere de sürekli mıknatıslı senkron generatör (SMSG) denir.

Sürekli mıknatıslı senkron makinalar (SMSM) hem motor hem de generatör olarak çalışabilmektedir. Sürekli mıknatıslı senkron motorlar otomotiv, uzay teknolojileri, bilgisayar donanımı, tıp elektroniği, askeri uygulamalar, robotik ve ev ürünleri gibi alanlarda kullanılmaktadır. Diğer taraftan, örneğin rüzgar enerji santrallerinde kullanılan generatör türlerinden birisi de sürekli mıknatıslı senkron

generatörlerdir. Rüzgar türbinlerinin generatörün milini tahrik etmesiyle sürekli mıknatıslı senkron generatörde mekanik enerji elektrik enerjisine çevrilir.

Sürekli mıknatıslı senkron makinalar için rotor ve statorun birbirine göre konumlarına, mıknatısların bulunduğu konuma, mıknatısların şekline göre değişik sınıflandırmalar yapılabilir. Makinanın kullanılacağı uygulamanın gereksinimlerine bağlı olarak makina tasarımı gerçekleştirilmektedir. Bazı uygulamalarda güç gereksinimi bazılarında ise moment ihtiyacı ön plana çıkmaktadır. Stator oluk parametreleri, sargı yapısı, mıknatıs ve rotor tasarım parametreleri üzerinde değişiklikler yapılarak makinanın performansında iyileştirmelere gidilebilmektedir.

### **1.1. Literatür Taraması**

Chen ve Wang tarafından 2011 yılında yüzey yerleşimli sürekli mıknatıslı senkron generatörlerin sonlu elemanlar yöntemi ile analizi üzerine bir çalışma hazırlanmıştır. Çalışmada yüzey yerleşimli sürekli mıknatıslı senkron generatörün yüksüz çalışma durumu için, rotorunda hava olukları olmayan ve boy-genişlik açısından farklı durumlar için manyetik analizlerine yer verilmiştir. Hava oluk genişliğindeki artışın hava aralığı akı yoğunluğu üzerinde azaltıcı bir etkiye sahip olduğu ortaya konulmuştur. Yapılan sonlu elemanlar yöntemi analizlerine göre sargıların EMF eğrileri statordaki eğrilik ve yüklü-yüksüz çalışma koşulları için çizdirilmiştir. Çalışma, rotorda bulunacak hava oluklarının generatör gerilim ayarlaması için önemli bir parametre olduğunu ortaya koymuştur [1].

Khalf ve arkadaşları 2012 yılında küçük güçlü bir senkron generatörün performansının sonlu elemanlar yaklaşımı ile analizi için ANSYS Electronics Desktop yazılımını kullanarak bir çalışma yapmışlardır. Bu amaçla laboratuvar ortamında 120 VA gücünde, 4 kutuplu, 280 V ve 60 Hz etiket değerlerine sahip küçük bir senkron generatör kullanılmıştır. Geçici ve sürekli hal çalışma analizlerinin yapılması için gerekli olan matematiksel formüllerin verildiği çalışmada, generatörün ANSYS Electronics Desktop yazılımı üzerinden fiziksel modeli oluşturulmuştur. Geçici ve kararlı hal çalışma koşulları için açık devre ve kısa devre durumları simüle edilerek deney sonuçları ile analiz sonuçları kıyaslanmıştır. Çalışma sonucunda küçük güçlü bir senkron generatör üzerinden yapılan analizler ile sonlu elemanlar yaklaşımının başarımlı tahmini için kullanışlı bir yöntem olduğu ortaya konulmuştur [2].

İlhami Çolak ve arkadaşlarının yaptığı çalışma, rüzgar türbinlerinde kullanılan sürekli mıknatıslı senkron generatörlerin gerilim kontrolünün yapay sinir ağları modeli ile yapılması için LabVIEW™ modeli üzerinedir. Çolak ve arkadaşları, sürekli mıknatıslı senkron generatörün matematik modelini ortaya koyup, bu modelden hareketle LabVIEW™ blok diyagramlarını oluşturmuştur. Benzer şekilde rüzgar türbinleri için de matematik model ve LabVIEW™ programı üzerinden blok diyagramların verildiği çalışmada, 7,5 ve 13,5 aralığındaki rüzgar gücünün uygulanması durumları için benzetim yapılmıştır. Rüzgâr hızındaki artışa bağlı olarak, generatör hızı ve gücü için değişim eğrileri elde edilmiştir. Yapılan benzetim sonuçları üzerinden, yapay sinir ağları modelinin güç kontrolü yapmak için uygun bir model olduğu belirtilmiştir [3].

Mihail Popescu ve arkadaşlarının 2013 yılında hazırladıkları çalışma, doğrudan sürürlü düşük hızlı uygulamalarda kullanılabilecek sürekli mıknatıslı senkron generatörlerin sonlu elemanlar yöntemi ile analizlerini içermektedir. Analizi yapılacak olan generatöre ilişkin fiziksel ve elektriksel boyutları verilmiştir. Arka planında sonlu elemanlar yönteminin çalıştığı Flux 2D programı üzerinden çalışmada kullanılacak olan generatörün elektriksel ve manyetik modeli oluşturularak analizleri gerçekleştirilmiştir. Generatöre ilişkin vuru moment, hava aralığı manyetik alan ve harmonik dağılımı grafikleri verilmiştir. Benzer şekilde bir fazlı ve üç fazlı kısa devre koşulları için akım, gerilim grafiklerini elde edilmiştir [4].

Zhuihui ve arkadaşlarının 2014 yılında yaptığı çalışma rüzgar enerjisi dönüşüm sistemlerinde kullanılabilecek sürekli mıknatıslı senkron makinadan geliştirilen 2 MW gücünde 6 fazlı fırçasız doğru akım generatörüne ilişkindir. Çalışmada stator ve rotor yapısı genel olarak aynı olan hem sürekli mıknatıslı senkron generatör hem de fırçasız doğru akım generatörü için tasarım parametreleri verilmiş ve ANSYS Electronics Desktop yazılımının Maxwell aracı üzerinden benzetim yapılmıştır. Benzetim sonuçlarına göre her iki generatör için gerilim ve moment dalgalılıkları, kayıplar ve ağırlık ile maliyet kıyaslamaları yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar 6 fazlı fırçasız doğru akım generatörünün moment ve gerilim dalgalılıkları açısından daha üstün olduğunu göstermiştir. Ayrıca, fırçasız doğru akım generatörünün kayıplarının daha düşük, dolayısıyla veriminin daha yüksek olduğu, daha hafif ve ucuz olduğu ortaya konulmuştur [5].



Kostro ve arkadaşları 2017 yılında düşey eksenli sürekli mıknatıslı senkron generatör prototipinin tasarımı ve testleri üzerine bir çalışma yapmışlardır. 15 kVA gücündeki generatörün açısal hızı 93,75 d/dak'dir. Çalışmada elektrik makinalarının tasarımı sırasında dikkat edilmesi gereken adımlar verilmiştir. Tasarım hesapları yapılarak kullanılacak olan sürekli mıknatıslı senkron generatörün FEMM yazılımı üzerinden benzetimi yapılmıştır. Analize geometrik ve fiziksel modelin oluşturulmasıyla başlanmıştır. Generatörün sonlu elemanlar yöntemiyle çözümünün yapılması için geometri üzerinde ağ yapısı oluşturulmuştur. Ardından generatör analiz edilip, manyetik akı, manyetik akı yoğunluğu gibi parametrelerinin davranışları incelenmiştir. Ardından prototip generatör, laboratuvar ortamında test edilmiştir. Test sonuçları ile analiz sonuçları incelendiğinde, tasarım kriterlerinin uygunluğu ortaya çıkarılmıştır [6].

Ziad Noun ve arkadaşları 2018 yılında rüzgar türbinlerinde kullanılabilen sürekli mıknatıslı senkron ve asenkron generatörler arasında sonlu elemanları yöntemiyle kıyaslama çalışması yapmışlardır. Her iki generatör için de genel fiziksel parametreler aynı kabul edilerek, ANSYS Electronics Desktop yazılımının Maxwell aracı üzerinden analizler gerçekleştirilmiştir. Generatörlerin farklı kısımları için akı yoğunluğu eğrisi, endüklenen gerilimlere ve harmoniklere ilişkin eğriler, güç ve vuru mu momenti eğrileri elde edilmiştir. Bu çalışma ile makinanın ön tasarım aşamasında sonlu elemanlar analizlerinin elektromanyetik açıdan kestirim yapmak için elverişli olacağı sonucuna varılmıştır [7].

Wallace ve arkadaşları 2012 yılında sürekli mıknatıslı senkron generatörlerin analitik yöntemlerle tasarımının yapılmasına ilişkin bir çalışma yapmışlardır. Öncelikle güç faktörü, stator kaçak endüktansları, manyetik devre ve kayıplarla ilgili denklemler verilmiştir. Ardından çalışmada kullanılacak olan generatöre ilişkin örnek sayısal değerler verilerek sonuçlar hesaplanmıştır. Son kısımda, kayıpları en düşük seviyeye düşürmek için stator iç çapı, stator uzunluğu, oluk yüksekliği ve oluk genişliğinin dış genişliğine oranı üzerinden değişiklikler yapılarak en iyileştirme yapılmıştır. Yapılan bu çalışma, tasarımda analitik yöntemlerin kullanılmasının özellikle hava aralığı akı yoğunluğu ve iletkenlerdeki akım yoğunluğu parametrelerinin hesaplanması için önemli olduğunu göstermektedir [8].

Themistoklis Kefalas ve arkadaşları 2005 yılında, rotordaki kayıklığın (skewed) sürekli mıknatıslı senkron generatörün başarımı üzerindeki etkilerini 2 ve 3 boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile analiz yaparak incelemişlerdir. Sonlu elemanlar yöntemini kullanarak yaptıkları analizlerde makinanın yüklü ve yüksüz çalışma koşulları için manyetik akı dağılımları verilmiştir. Ayrıca hem yüklü hem de yüksüz çalışma şartlarında rotordaki kayıklığın faz gerilimi üzerindeki etkilerine ilişkin hem simülasyon hem de deney sonuçlarına ilişkin eğriler çizdirilmiştir. 2 ve 3 boyutlu sonlu elemanlar modeli ile elde edilen sonuçlar, bu yöntemin gerçek zamanlı test sonuçları ile yeteri kadar örtüştüğünü ortaya koymuştur. Ayrıca, bu çalışmada rotor kayıklığının stator akım harmoniklerini ve moment titreşimlerini azalttığı görülmüştür [8].

2016 yılında Theint Zar Htet ve arkadaşları rüzgar türbini uygulamalarında kullanılabilen doğrudan sürürlü sürekli mıknatıslı senkron generatörlerin tasarımının analizine yönelik bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada 1,5 MW gücündeki, 17,3 d/dak hızındaki ve kutup çifti sayısı 50 olan bir sürekli mıknatıslı senkron generatörün Maxwell 2D programı üzerinden analizi yapılmıştır. Generatöre ilişkin temel parametrelerin ve analiz sonuçlarının verildiği çalışmada, ayrıca generatöre ilişkin matematiksel model, eş değer devre ve yüklü-yüksüz çalışma koşulları için makina karakteristikleri verilmiştir. Program üzerinden yapılan analizlerden elde edilen hava aralığı gücü, hava aralığı akı yoğunluğu, yüklü durumdaki akım, sargılarda endüklenen gerilim ve vuruğu momenti eğrileri çizdirilmiştir. Çalışma sonuçları ANSYS Electronics Desktop yazılımının Maxwell aracının tasarım sürecini hızlandırdığı ve tasarımı geliştirmek için elverişli olduğunu göstermiştir [9].

Yusuf Yasa ve Erkan Meşe'nin 2014 yılında yaptıkları çalışma küçük güçlü rüzgar türbinlerinde kullanılabilen doğrudan sürürlü dış rotorlu generatör ve dönüştürücülerin tasarım ve analizi üzerinedir. Tasarım limitleri belirlenerek başlanan çalışmada 2,5 kW gücündeki sürekli mıknatıslı senkron generatör kullanılmıştır. Kullanılacak generatöre ilişkin matematiksel modelin verildiği çalışmada, generatör ANSYS Electronics Desktop yazılımının Maxwell aracında analiz edilmiştir. Makina geometrisindeki kayıklık oranı ile vuruğu momenti arasındaki ilişkiye ait elde edilen eğri verilmiştir. Çalışmanın devamında AC-DC güç dönüştürücüsüne ilişkin topolojilere ve kontrol yöntemine ilişkin bilgilere yer verilmiştir. Bu çalışmada,

generatörün başarımı üzerinde sadece tasarımın değil, seçilecek güç dönüştürücüsünün de etkisi olduğu ortaya konulmuştur [10].

Hayatullah Nory tarafından hazırlanan tez çalışmasında fırçasız doğru akım motorunun manyetik ve elektrik devre parametreleri ve makinada meydana gelen kayıplar analitik yollardan hesaplanmıştır. Genetik algoritma, sonlu elemanlar yöntemi, Maxwell programı ve fırçasız doğru akım motor denetimi hakkında bilgiler verilmiştir. Analitik olarak hesaplanan parametreler üzerinden makina tasarımı gerçekleştirilip, genetik algorithmadan faydalanılarak en iyileştirme yapılmıştır. Tasarlanan makina ANSYS Electronics Desktop yazılımının Maxwell aracı ile analiz edilmiştir. Ayrıca makinaya ilişkin MATLAB/Simulink modeli de oluşturularak benzetim işlemi uygulanmış ve tüm simülasyon sonuçları verilmiştir [11].

Burcu Durak Gedik'in hazırladığı tez çalışmasında verim sınıfı IE4 olan şebeke kalkışlı sürekli mıknatıslı senkron motor tasarlanmıştır. Çalışmada öncelikle sürekli mıknatıslı senkron motor türleri incelenmiş ve birbirleri ile kıyaslanmıştır. Tezde kullanılan şebeke kalkışlı senkron motorların matematiksel modeli ortaya konulmuştur. Flux 2D programı üzerinden ilgili motor için analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizlerin sonuçlarından hareketle prototip motor üretilmiştir ve deneyler yapılmıştır. Prototip motora farklı yükleme durumları için performans testi yapılmış ve moment-verim eğrileri çizdirilmiştir [12].

Serhat Güneri'nin hazırladığı yüksek lisans tezi kompresör uygulamalarında kullanılabilir sürekli mıknatıslı senkron motorun tasarlanması üzerinedir. Tasarım çalışmasına oluk/kutup kombinasyonunun belirlenmesi ile başlanmıştır. Ardından motorun geometrisi SPEED yazılımı ve ANSYS Electronics Desktop yazılımının Maxwell aracı üzerinden belirlenmiştir ve sargı şeması çizilmiştir. Tasarıma referans olması için buzdolabı kompresöründe kullanılan fırçasız doğru akım motorunun analizleri iki ve üç boyutlu olarak yapılmıştır. Tasarım parametrelerinin motor başarımı üzerindeki etkiler bu analizlerde ortaya konulmuştur. Yapılan iki ve üç boyutlu analizlerde vuru moment, manyetik akı dağılımı, zıt EMK, toplam harmonik dağılımı, kayıplar ve verim parametreleri incelenmiştir. Tasarlanan alternatif motor üzerinde gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra referans motora uygulanan analizler bir kez de alternatif motora yapılmıştır. Her iki analiz sonuçları kıyaslandığında, alternatif motora ait sonuçların referans motora göre üstün olduğu

ortaya konulmuştur. Son olarak alternatif motor analizlerinden yola çıkılarak prototip üretimi ve devamında deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda zıt EMK, moment ve güç/verim ölçümleri yapılmıştır [13].

Hosein Bakhtiarzadeh'ın hazırladığı tez çalışmasında asansör uygulamalarında kullanılabilecek bir sürekli mıknatıslı senkron motor tasarımı ele alınmıştır. Çalışmaya, asansörler ve asansör çeşitleri hakkında bilgiler verilerek başlanmıştır. Ardından sürekli mıknatıslı senkron motorlar, çeşitleri, yapısı, çalışma prensibi ve kullanılan mıknatıslar üzerinden tanıtılmıştır. Sürekli mıknatıslı senkron motorların analitik tasarımı yapılarak sargı yapısı ortaya konulmuştur. Referans bir motor seçilerek laboratuvar koşullarında farklı yükleme durumları için deneyler yapıp; verim, moment eğrileri çizdirilmiştir. Aynı referans motorun, mekanik ve elektriksel tasarım parametreleri Maxwell programına aktarılarak farklı yükleme koşulları için analiz edilmiştir. Deneylerde ve Maxwell programında yapılan analizlerde elde edilen sonuçlar kıyaslanıp, her iki durumdaki sonuçların birbirine çok yakın olduğu tespit edilmiştir. Çalışmanın son aşamasında başarımı yükseltmek için yeni bir motor tasarımı önerilmiştir [14].

Ahmet Hakan Oğuz tarafından hazırlanan tez çalışması elektrikli araçlarda kullanılabilecek gömülü tip sürekli mıknatıslı senkron makinanın en uygunlaştırılması (optimizasyonu) üzerinedir. Tez çalışmasında öncelikle sürekli mıknatıslı senkron makinalardan bahsedilip, motor tasarımında kullanılan analitik hesaplar verilmiştir. Makina parametreleri, öncelikle verilen analitik hesaplar ile belirlenmiştir. Hesaplanan parametrelerin moment bileşenlerine, moment dalgalılığına, moment/mıknatıs hacmi oranına etkileri incelenip en baskın değişkenlerin etkisi tespit edilmiştir. Buradan hareketle en uygunlaştırılmış tasarıma geçilip, bu tasarımın manyetik ve ısı analizleri gerçekleştirilmiştir [15].

Orhan Kütük tarafından 2011 yılında hazırlanan tez çalışmasında rüzgar türbinleri için doğrudan sürürlü bir sürekli mıknatıslı senkron generatörün tasarımı yapılmıştır. Tez çalışmasında rüzgar türbinleri bileşenleri, rüzgar enerjisinin Türkiye ve dünyadaki potansiyeli ve mevcut durumu hakkında bilgiler ile rüzgar türbinlerinde kullanılan generatörler hakkında bilgiler verilmiştir. Ardından tez çalışmasında ele alınan sürekli mıknatıslı senkron generatörlerin analitik ve manyetik tasarımları için gerekli olan formüller verilip, ANSYS Electronics Desktop yazılımının Maxwell aracı

ile generatör analizi gerçekleştirilmiştir. Generatörün boşa ve yüklü çalışma durumları için akı çizgileri ve akı yoğunluk dağılım grafikleri çizdirilmiştir. Aynı program ile kısa devre ve açık devre çalışma koşullarındaki şartlarındaki akım, gerilim ve moment gibi parametrelere ilişkin çeşitli eğriler çizdirilmiştir. Çalışmada generatörün ısı analizi de gerçekleştirilmiş olup bunun için Motor-CAD yazılımı kullanılmıştır. Generatörde sargı, mıknatıs gibi hassas kısımların sıcaklığının zaman içindeki değişim eğrisi çizdirilip, sıcaklık değerlerinin sargı izolasyonu ve mıknatıs manyetik alan kaybı için uygunluk durumu incelenmiştir [16].

Yücel Çetinceviz tarafından 2017 yılında hazırlanan doktora tezinde küçük boyutlu rüzgar ve nehir santrallerinde kullanılabilecek 4 kW'lık sürekli mıknatıslı senkron generatörün tasarlanıp gerçekleştirilmesi üzerinedir. Çalışmada rüzgar enerji dönüşüm sistemleri ve bu sistemlerde kullanılan generatör çeşitlerinden birisi olan sürekli mıknatıslı senkron generatör hakkında bilgiler verilmiştir. Sürekli mıknatıslı senkron generatör için tasarım yöntemlerinden ve temel kanunlardan, tasarım döngüsünden ve boyut hesaplamalarından bahsedilmiştir. Tasarımın bilgisayar ortamında yapımı ve en uygunlaştırma için yapılacak işlemler verilmiştir. Ayrıca, generatörün manyetik analizleri, arıza senaryolarındaki elektriksel analizleri ve ısı analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan boyutlandırma ve bu boyutlandırmaya ilişkin analizlerin neticesinde prototip üretimi gerçekleştirilerek, buna ilişkin başarımlar sonuçları simülasyon, analitik ve deneysel olarak sunulmuştur [17].

Erhan Nergiz'in 2018 yılında hazırlanan yüksek lisans tezi sürekli mıknatıslı senkron generatörlerin modellenmesi ve en uygunlaştırılması üzerinedir. Çalışmada öncelikle generatörler ve tezde incelenen sürekli mıknatıslı senkron generatörler hakkında bilgiler verilmiştir. Generatör modelinin oluşturulup en iyileştirmelerin yapılacağı ANSYS Electronics Desktop yazılımının Maxwell aracı ve en iyileştirme için kullanılabilecek algoritmalar tanıtılmıştır. Tez kapsamında 39 adet ayırık optimizasyon problemi çözülmüştür. Problemlerden elde edilen tasarım değişkenlerinin değerlerine göre Maxwell aracındaki analiz sonuçlarına ulaşılmıştır. Ortaya konulan problemlere bağlı olarak oluk doluluk oranı ve verim üzerinden incelemeler yapılmıştır. Her problem için oluk doluluk oranını ve verimi etkileyen parametreler üzerinde değişiklik yapılarak etkisi incelenmiş ve nihai olarak en uygun problemdeki parametreler referans alınarak Maxwell programında analizler

yapılmıştır. Tez çalışmasında beklenen verimin arttırılması ve vuruuntu momentinin en aza indirilmesi hedeflerine yapılan en uygunlaştırma çalışmaları ile ulaşılmıştır. Maxwell aracında yapılan analizlerde vuruuntu momentinin sıfır veya sıfıra çok yakın olduğu görülmüştür [18].

Hasan Basri Altıntaş'ın 2018 yılında hazırladığı yüksek lisans tezi rüzgar türbinlerinde kullanılabilecek sürekli mıknatıslı senkron generatörlerin karşılaştırmalı olarak tasarlanması ve analiz edilmesi üzerinedir. Sürekli mıknatıslı senkron generatörlerin tasarlanmasında dikkat edilecek noktaların belirtilerek başlanılan çalışmada, generatör tasarım parametrelerinin belirlenmesi için gerekli formüller verilmiştir. Tasalanan sürekli mıknatıslı senkron generatörün manyetik, elektriksel analizleri yapılmış; generatör kayıpları, maliyeti ve ağırlığıyla ilgili formüller verilmiştir. Yapılan karşılaştırmalı analizde 20 kW gücündeki sürekli mıknatıslı senkron generatörde; sargı tipinin ve oluk/kutup kombinasyonunun generatör verimi, vuruuntu momenti, indüklenen gerilim, kayıp, ağırlık ve harmonikler üzerindeki etkiler incelenmiştir [19].

Pia Salminen'in 2004 yılında doktora tezi olarak yaptığı çalışma, düşük güçlü uygulamalarda kullanılabilecek sürekli mıknatıslı kesir oluklu senkron motor üzerinedir. Kesir oluklu sargı yapısına ilişkin genel bilgilerin, hesaplamaların verildiği çalışmada farklı oluk kutup kombinasyonları için sonlu elemanlar yöntemleri kullanılarak analizler yapılmıştır. Farklı oluk kutup kombinasyonlarında farklı mıknatıs yerleşim durumları da incelenmiştir. Analitik yollardan ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak hesaplanan moment parametreleri için eğriler çizdirilmiştir. Ayrıca farklı oluk kutup kombinasyonları ve makina tasarım parametreleri kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen kayıp, moment, güç faktörü, sargı faktörü, verimlilik değerleri verilmiştir. Yapılan çalışmanın son aşamasında, 12 oluklu, 10 kutuplu, V tipi mıknatıs yerleşimli prototip motor üretilmiştir. Prototip motor üzerinden sıcaklık, titreşim ve vuruuntu momenti ölçümleri yapılmıştır [20].

2018'de Emrah Çetin tarafından hazırlanan doktora tezinde eksenel akılı sürekli mıknatıslı fırçasız doğru akım motorunun tasarımı, manyetik analizi ve prototip üretimi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, eksenel akılı sürekli mıknatıslı senkron motorlar hakkında genel bilgiler, boyutlandırma ve manyetik devre denklemleri ve moment denklemleri verilmiştir. Ardından çalışmada kullanılacak olan motorun

ANSYS Electronics Desktop yazılımının Maxwell aracı üzerinden 3 boyutlu tasarımı yapılmış ve analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlere bağlı olarak prototipi üretilen motorun laboratuvar ortamında testleri yapılmıştır. Motorun üretimi sırasında oluk açıklıklarındaki hatanın moment üzerindeki etkisi de yapılan testlerle incelenmiştir [21].

2018 yılında sürekli mıknatıslı hibrit rotor yapısı hakkında Oğuz Korman tarafından yüksek lisans tezi hazırlanmıştır. Çalışmada sürekli mıknatıslı makinalarıyla ilgili formüller verilmiş ve buna bağlı olarak ön tasarım çalışması yapılmıştır. Çalışmada 27 oluk 8 kutuplu motor öncelikle yüzey yerleşimli mıknatıslı olarak modellenmiştir. Bu modelin boşa ve yükte çalışma durumları için moment, gerilim, harmonik ve manyetik alan analizlerinin sonuçları verilmiştir. Aynı modelleme ve analiz işlemleri rotorunda V yerleşimli mıknatısların bulunduğu gömülü tip motor için tekrarlanmıştır. Tez çalışmasına konu olan hibrit rotor teknolojisi, mıknatısların yarısının yüzeye; yarısının da V şeklinde rotora gömülerek yerleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Bahsedilen analizler bilgisayar ortamında hibrit rotor teknolojili motor için de gerçekleştirilmiş ve V tipi mıknatıslar arasındaki açı ve mıknatıs yay uzunlukları üzerinden bir en uygunlaştırma çalışmasına gidilmiştir. Bu kapsamda bir prototip üretimi gerçekleştirilerek laboratuvar ortamında testler gerçekleştirilmiştir [22].

2016 yılında Prathamesh Mukund Dusane tarafından hazırlanan tez çalışması fırçasız doğru akım motorunun Maxwell 3D programı üzerinden simülasyonuna ilişkindir. Çalışmada öncelikle Maxwell aracı üzerinden bir elektrik makinasının modellenmesi için izlenecek adımlardan bahsedilmiştir. 1500 W gücündeki fırçasız elektrik makinasının analitik ve farklı oluk/kutup sayısı kombinasyonları için elektromanyetik tasarımları ve analizleri program üzerinden yapılmıştır. Belirlenen oluk/kutup sayısı kombinasyonları için 2 ve 3 boyutlu tasarımlar ve analizlerin de gerçekleştirildiği çalışmada elde edilen sonuçlar grafikler halinde verilmiştir [23].

## **1.2. Tezin Amacı**

Bu tez çalışmasının amacı düşey eksenli bir rüzgar türbininde kullanılan 1,5 kW gücündeki sürekli mıknatıslı senkron generatörün karşılaştırmalı başarım analizinin gerçekleştirilmesidir. Bu amaçla referans olarak kullanılan sürekli mıknatıslı senkron generatör ANSYS Electronics Desktop yazılımının Rmxprt aracı

üzerinden modellenerek yazılıma aktarılacaktır. Referans generatörün boyutlandırılması yapıldıktan sonra ANSYS-Maxwell 2D modeli oluşturulup, manyetik ve elektriksel analizleri yapılacaktır. ANSYS Electronics Desktop yazılımında yapılan analizlere ilave olarak, generatörün laboratuvar ortamında gerçek zamanlı olarak performans ölçümleri yapılacaktır. Bunun için sürekli mıknatıslı senkron generatör, bir asenkron motor üzerinden tahrik edilecek şekilde bir deney düzeneği kurulacaktır. Asenkron motor bir AC motor sürücü ile farklı hızlarda döndürülerek boşa ve yüklü şartlarda elektriksel ölçümler yapılacaktır. Generatörün ani yüklenme deneyi ölçümleri National Instrument (NI) firmasının veri toplama kartları ve LabVIEW™ yazılımı kullanılarak yapılacaktır. Generatörün bir sarımında ve bir faz sargısında endüklenen gerilim ölçülerek ANSYS Electronics Desktop yazılımında elde edilen değerler ile kıyaslanacaktır.

Tezin genel amacı yukarıdaki işlemler sonucunda sürekli mıknatıslı senkron generatörlerin karakteristiklerinin elde edilerek moment, hız, verim gibi temel bileşenlerine etki eden faktörleri analiz etmektir. Bu işlemler için kullanılan yazılımlar ve donanımlar üzerinde bilgi birikiminin arttırılması ve ileride yapılacak çalışmalar için deney sistemi altyapısının oluşturulması da tezin amaçları arasındadır.



## 2. SÜREKLİ MİKNATISLI SENKRON MAKİNALAR

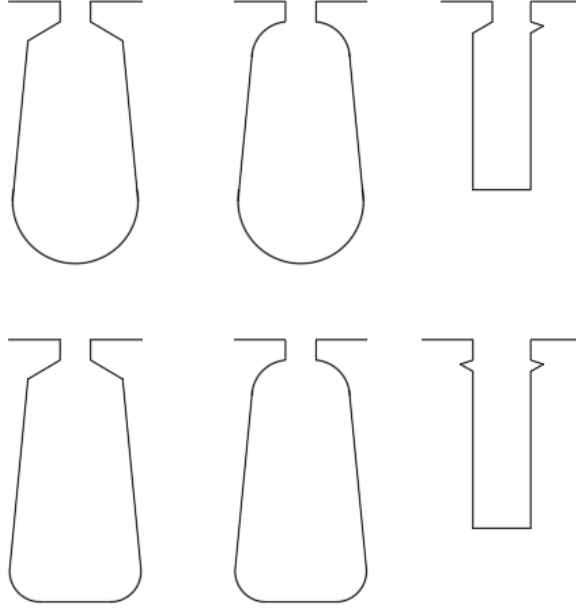
Sürekli mıknatıslı senkron makina rotorunda sargı yerine mıknatısların bulunduğu ve manyetik alanın bu mıknatıslar ile üretildiği makinalardır. Alan sargılı senkron generatörlerden farklı olarak yapısında fırça ve kolektör bulunmayan sürekli mıknatıslı senkron makinaların bakım gereksinimleri daha düşüktür. Rotorlarında sargıların olmaması, bu sargılarda meydana gelecek bakır kayıplarının bulunmamasını, dolayısıyla verim değerlerinin yüksek olmasını sağlamaktadır. Ayrıca sargısız rotor yapısı sayesinde motor hacmi sargılı senkron makinalara kıyasla daha küçük ve buna bağlı olarak aynı güç değeri için güç yoğunluğu sürekli mıknatıslı elektrik makinalarında daha yüksektir. Ancak bu tür makinalarda, harici bir sürücü devreye ihtiyaç duyulmakta ve kullanılan mıknatıslardan dolayı motor maliyeti yüksek olmaktadır [24].

### 2.1. Sürekli Mıknatıslı Senkron Makina Yapısı ve Çalışma Prensibi

Sürekli mıknatıslı senkron makinalar, diğer döner elektrik makinalarında olduğu gibi temel olarak stator ve rotor yapılarından oluşmaktadır. Diğer makinalardan farklı olarak sürekli mıknatıslı senkron makinaların rotorlarında farklı şekillere sahip ve farklı konumlara yerleştirilmiş mıknatıslar bulunmaktadır. Ayrıca statorda bulunan olukların içinde alternatif akım sargıları bulunmaktadır. Bu temel yapıya ek olarak bir sürücü devresi ve makinanın kontrol edilebilmesi için sensör yapısı bulunmaktadır.

#### 2.1.1. Stator

Stator, sürekli mıknatıslı senkron makinaların sargılarının bulunduğu, silisyum alaşımlı saçların bir araya getirilmesiyle oluşturulan kısımdır. Statorda, sargıların içinden geçtiği farklı biçim ve ölçülerde tasarlanabilen oluklar bulunmaktadır. Olukların biçimini toplam oluk sayısı ve sarım tipi belirlemektedir. Sargıların olukların içine yerleştirilebilmesine bağlı olarak bir oluk doluluk oranı belirlenmektedir. Bu oranın uygun seviyede olabilmesi için olukla ilgili oluk yüksekliği, oluk genişliği, oluk dış kalınlığı, oluk ağız genişliği, iletken kesitleri gibi parametrelerin belirlenmesi gerekmektedir. Elektrik makinalarında kullanılan farklı oluk biçimlerine ilişkin görsel Şekil 2.1’de verilmiştir.



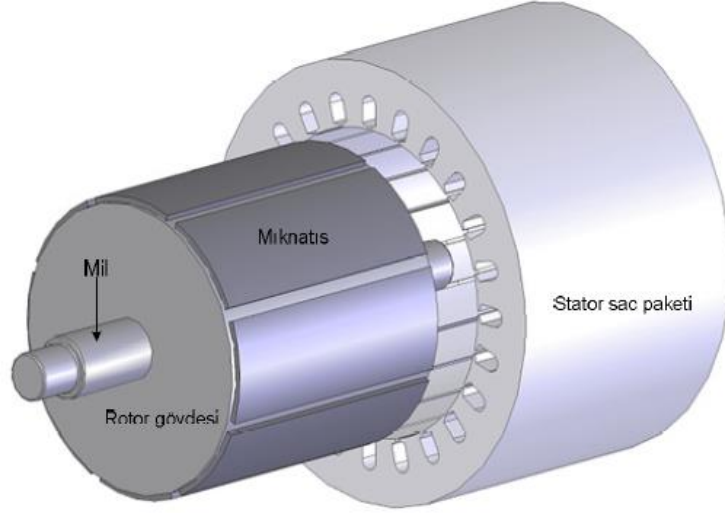
**Şekil 2.1.** Farklı oluk biçimleri

Stator oluk parametrelerinden birisi olan oluk açıklığı mesafesi belirlenirken stator dişleri arasında kaçak akıların meydana gelmemesine ve bu açıklıktan iletkenlerin geçebilmesine dikkat edilmelidir. Bunun için genellikle oluk açıklığı hava aralığı mesafesinden büyük seçilmektedir.

Statordaki oluk sayısı ve rotordaki kutup sayısı kombinasyonu tasarımın önemli parametrelerinden birisidir. Makinadan beklenen performans değerlerine bağlı olarak oluk ve kutup sayısı belirlenmektedir. Diğer taraftan oluk ağız açıklığının büyük olması vuru momentinin yüksek olmasına sebep olmaktadır. Vuru momenti, rotorun hareketi sırasında manyetik akının izlediği yoldaki sapmalardan meydana gelen bir moment bileşenidir.

### **2.1.2. Rotor**

Sürekli mıknatıslı senkron makinaların döner kısmı olan rotorda aynı zamanda mıknatıslar bulunur. Mıknatıslar, makinadan beklenen özelliklere ve kullanılacağı alana göre rotorun içine gömülü olarak veya rotorun yüzeyine yerleştirilmiş şekilde bulunur. Şekil 2.2’de sürekli mıknatıslı bir makinanın rotor, stator ve mıknatıs elemanları 3 boyutlu olarak verilmiştir.



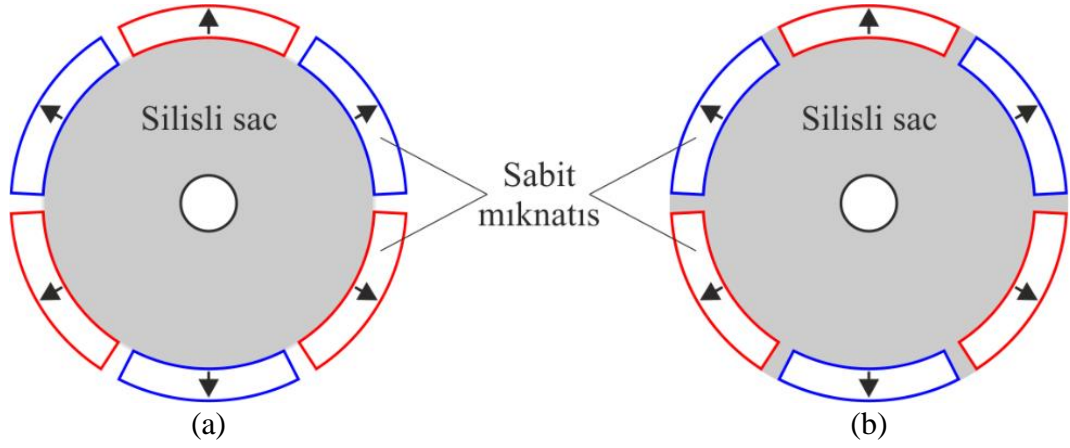
**Şekil 2.2.** Sürekli mıknatıslı bir elektrik makinasının 3 boyutlu görünüşü

### 2.1.3. Hava Aralığı

Diğer döner elektrik makinalarında olduğu gibi, sürekli mıknatıslı senkron makinalarda da rotor ile stator arasında bulunan kısım hava aralığı olarak isimlendirilmektedir. Hava aralığının boyutlandırılması önemli tasarım kriterlerinden birisidir. Hava aralığının büyük olması durumunda makinanın manyetik eşdeğer devresindeki toplam manyetik direnç artacağından, hava aralığındaki akı miktarı azalmaktadır. Bu nedenle makinada üretilen moment miktarı azalacağı için bu durum ancak kullanılan mıknatısın manyetik özellikleri artırılarak karşılanabilmektedir. Hava aralığının büyük olmasının avantajı ise meydana gelen rüzgar kayıplarının azalmasıdır. Diğer taraftan hava aralığı mesafesinin küçük olması durumunda makinanın montajı zorlaşmaktadır.

### 2.1.4. Mıknatıslar

Mıknatıslar, sürekli mıknatıslı senkron makinalardaki manyetik alanın oluşmasını sağlayan ve rotorda bulunan makina parçalarıdır. Mıknatıslar rotorun yüzeyine yerleştirilebilecekleri gibi, rotorun içinde gömülü olarak da bulunabilirler. Yüzeysel mıknatıs yerleşimli ve gömülü mıknatıs yerleşimli rotor yapısına ait bir görsel Şekil 2.3’de verilmiştir. Makinanın kullanılacağı uygulamaya ve makinadan beklenen performansa bağlı olarak uygun manyetik özelliklerdeki mıknatıslar seçilmelidir. Ayrıca mıknatısların şekli de önemli tasarım parametrelerinden birisidir.

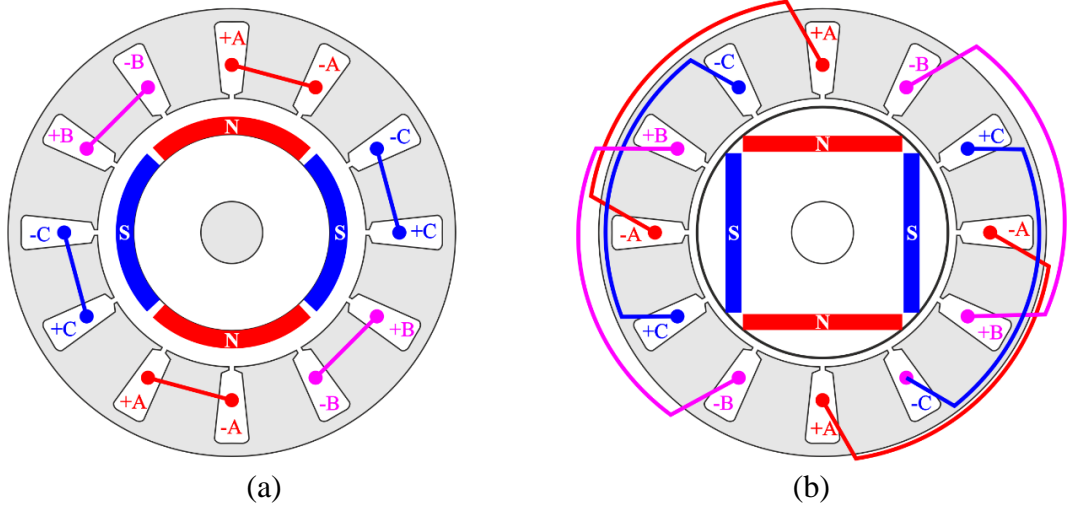


**Şekil 2.3.** (a) Yüzeysel mıknatıs yerleşimli (b) Gömülü mıknatıs yerleşimli

### 2.1.5. Sargı Yapısı

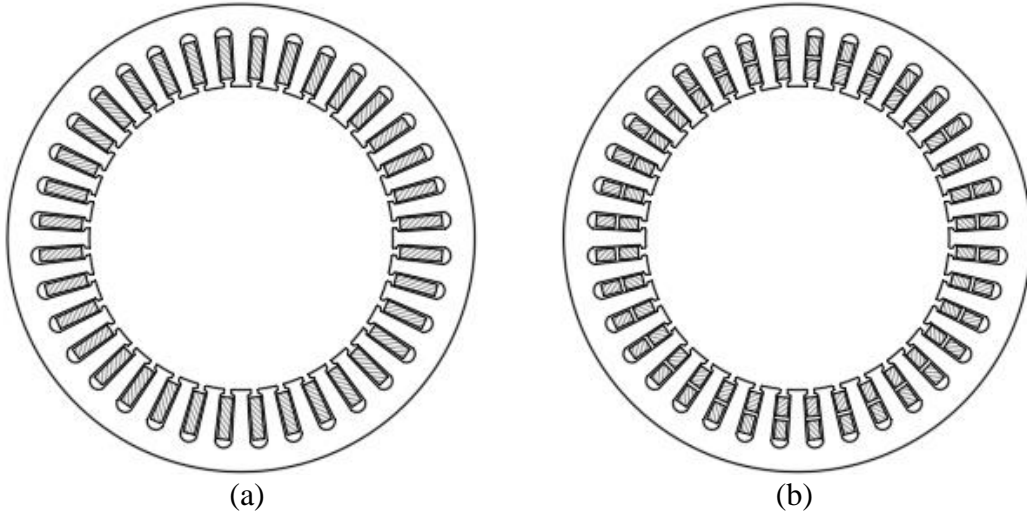
Sürekli mıknatıslı senkron makinalarda farklı sargı yapıları kullanılabilir. Sargıların temelini uygun kesitlerdeki iletkenler oluşturmaktadır. Bir iletkenin stator olukları arasında bir tur sarılması ile sarım meydana gelir. Belirli sayıda sarımdan bobin yapısı oluşur. Bobinlerin oluklar içinde kalan kısımlarına bobin yanı; oluklar dışındaki kısımlarına da cephe bağlantısı denir. Bobin adımı, kutup adımı ve oluk adımı sargı yapısıyla ilgili kavramlardan bazılarıdır. Bobin adımı, bir bobindeki iki bobin yanı arasındaki mesafe olarak tanımlanmaktadır. Sürekli mıknatıslı bir makinanın rotorundaki mıknatıslardan birinin başlangıç noktası ile ardışığındaki diğer mıknatısın başlangıç noktası arasındaki mesafeye kutup adımı; statordaki bir oluğun başlangıç noktası ile ardışığındaki oluğun başlangıç noktası arasındaki mesafeye de oluk adımı denir [25].

En çok tercih edilen sarım teknikleri dağıtılmış sargı ve toplu sargı yapılarıdır. Toplu sargı yapısında iletkenlerin yerleştirilmesi daha kolay yapılmaktadır. Toplu sargı yapısında sargıların cephe bağlantıları daha kısa, kaçak endüktansları daha düşük ve bakır kayıpları daha azdır. Diğer taraftan statordaki demir kayıpları toplu sargı yapısında daha yüksektir. Şekil 2.4'de toplu sargı ve dağıtılmış sargı yapısı gösterilmiştir.



**Şekil 2.4.** (a) Toplu sargı yapısı (b) Dağıtılmış sargı yapısı

Aynı stator oluşunun içine tek bir faz sargısının yerleştirildiği makinalar tek kat sargılı; iki faz sargısının yerleştirildiği makinalar ise çift kat sargılı makina olarak isimlendirilmektedir. Şekil 2.5’de tek kat sargılı ve çift kat sargılı makinanın stator yapısına ilişkin görseller verilmiştir. Faz ve kutup başına düşen oluk sayısının tam sayı olmadığı makinalara kesir oluklu makina denir.



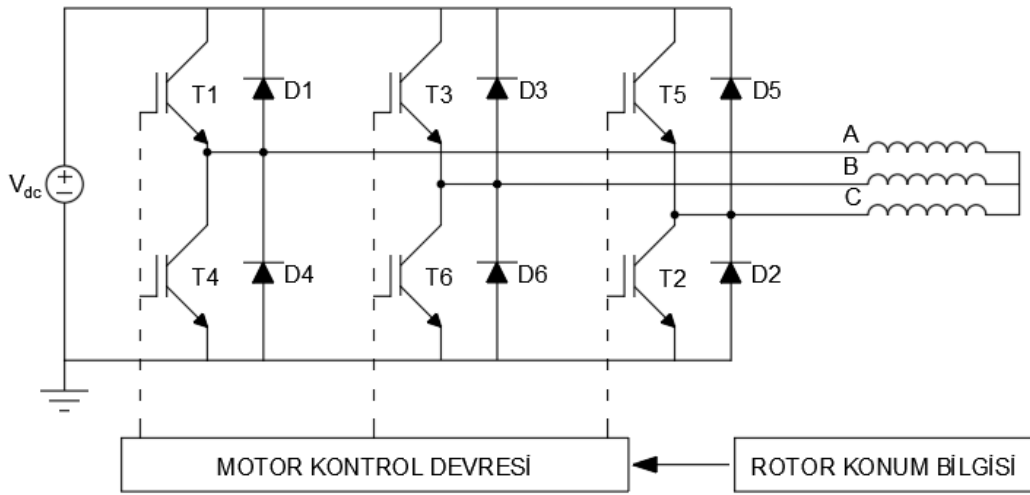
**Şekil 2.5.** (a) Tek kat sargılı stator yapısı (b) Çift kat sargılı stator yapısı

### 2.1.6. Çalışma Prensibi

Fırçasız elektrik makinalarında fırça-kolektör yapısının olmamasından dolayı komutasyon elektronik anahtarlama elemanlarının belirli bir sırayla devreye girip çıkması ile gerçekleştirilmektedir. Anahtarlama elemanlarının iletme ve kesime gireceği zamanlar rotorun konumuna bağlı olarak belirlenir. Fırçasız elektrik

makinalarında rotor konumunun belirlenmesinde farklı tür sensörlerin kullanıldığı algılayıcı kontrol yöntemleri veya rotorun hızının ve endüklenen akım ve gerilim dalga şekillerinin kullanıldığı algılayıcısız kontrol yöntemleri kullanılabilir.

Fırçasız elektrik makinalarında meydana gelen dönme hareketinin temelinde stator akımlarından dolayı oluşan manyetik akı ile mıknatıslardaki halkalanma akısı arasındaki etkileşim bulunmaktadır. Bu etkileşimden bir moment üretiminin gerçekleşebilmesi için stator faz akımlarının belirli bir sırayla ve belirli sürede iletme ve kesime girmesi gerekmektedir. Şekil 2.6'da 3 fazlı fırçasız elektrik makinasına ilişkin örnek bir sürücü devresi görülmektedir.



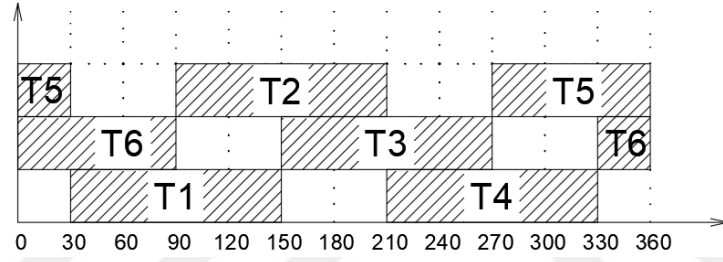
Şekil 2.6. 3 fazlı fırçasız elektrik makinasına ilişkin örnek sürücü devre şeması

Sürekli mıknatıslı elektrik makinalarının sargılarında endüklenen gerilim, sinüs veya trapezoidal biçimli olabilmektedir. Sargılarında endüklenen gerilim ve stator akımı sinüs biçimli olan mıknatıslı makinalar, sürekli mıknatıslı senkron makina (SMSM) olarak isimlendirilir. Diğer taraftan endüklenen sargı gerilimi trapezoidal, stator akımı kare biçimli olan makinalar fırçasız doğru akım makinasıdır (FDAM).

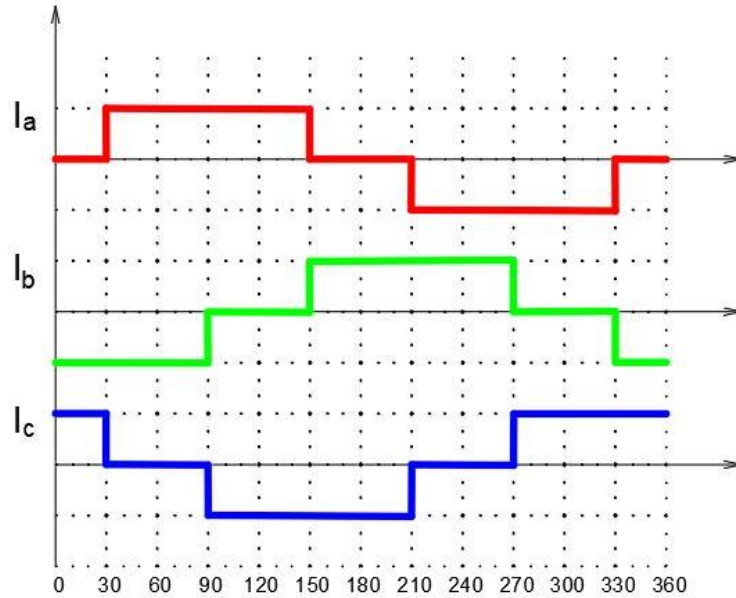
Rotorun konum bilgisine bağlı olarak anahtarlama elemanlarından uygun olanlar iletme sokularak aynı anda iki faz sargısından akım akması sağlanır. Şekil 2.7'de anahtarlama elemanlarının rotor konumuna bağlı olarak tetiklenerek iletme geçtikleri anlar gösterilmiştir. A fazına ilişkin T1 elemanı 120 derece iletimde kalıp ardından 60 derece kesimde kalmıştır. Ardından A fazına ilişkin T4 anahtarı iletme geçip 120 derece iletimde kalmıştır ve 60 derece kesimde kalarak A fazına ilişkin

enerjilendirme bu şekilde devam etmektedir. T1 anahtarı kesime girdiği anda B fazına ilişkin T3 anahtarı 120 derecelik iletme girmiş ve ardından 60 derece kesimde kalmıştır. T6 anahtarı T3 anahtarının 60 derecelik kesimde kalmasından sonra 120 derece iletme, 60 derece de kesime geçerek B fazına ilişkin enerjilendirme gerçekleştirilmiştir. C fazı için öncelikle T5 anahtarı 120 derece iletme, peşinden 60 derece kesime geçmiş ve devamında T2 anahtarı 120 derecelik iletim ve 60 derecelik kesime girmiştir.

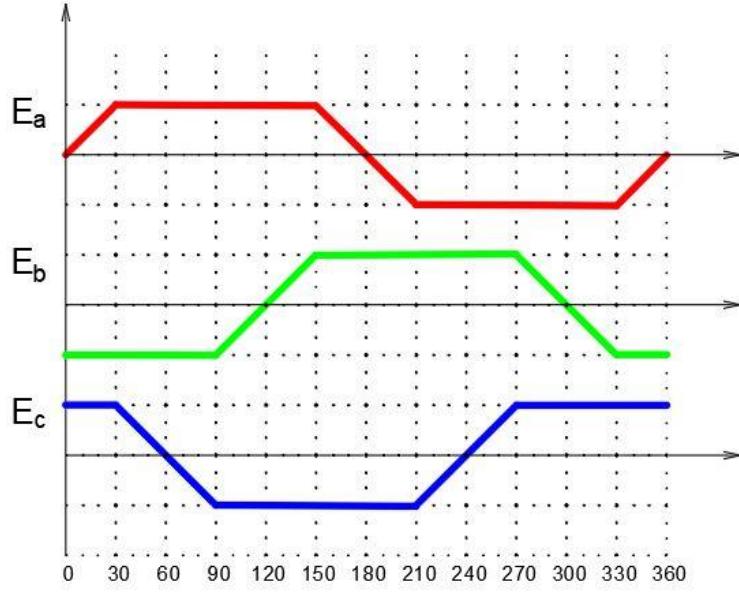
Şekil 2.8 fırçasız doğru akım makinalarının stator faz akımlarının grafiği verilmiştir. Akı değişimine bağlı olarak stator sargılarında endüklenen trapezoidal şeklindeki gerilim dalga şekilleri Şekil 2.9’da ve üretilen moment grafiği Şekil 2.10’da verilmiştir.



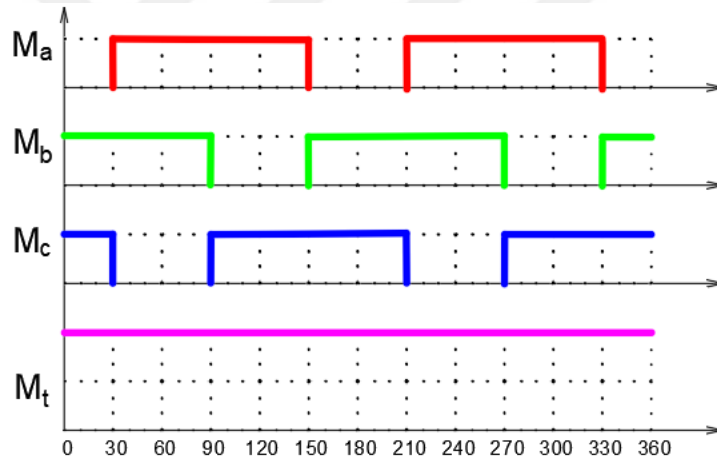
Şekil 2.7. Anahtarlama elemanlarının tetiklenme anları



Şekil 2.8. Stator faz akımları



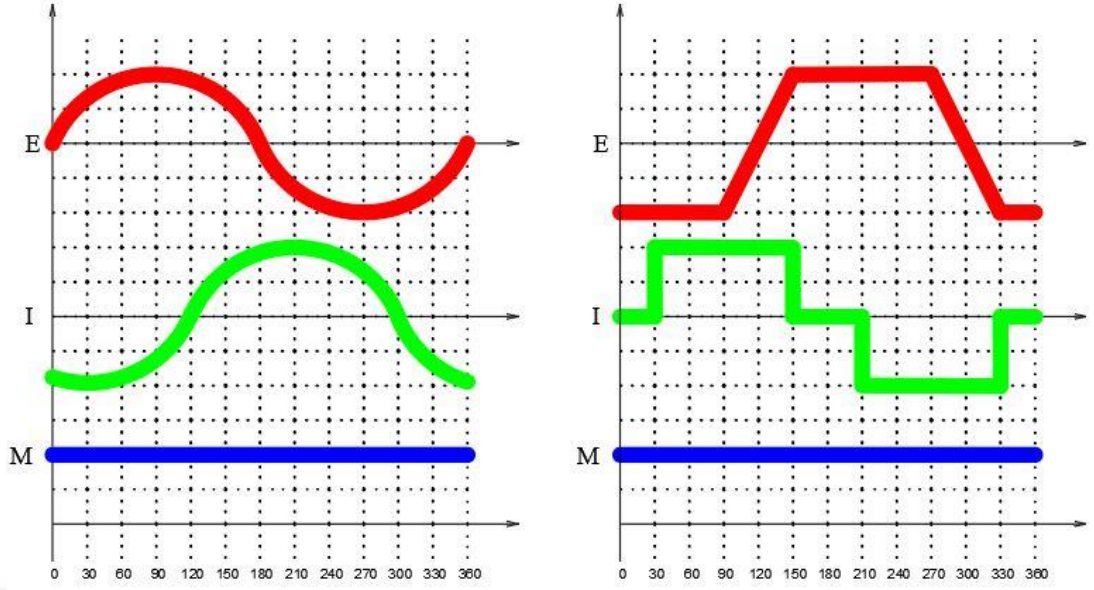
Şekil 2.9. Endüklenen gerilim dalga şekli



Şekil 2.10. Üretilen moment grafiği

Sürekli mıknatıslı senkron makinaların ve fırçasız doğru akım makinalarının stator sargılarında endüklenen gerilim, akım ve üretilen moment dalga şekilleri karşılaştırmalı olarak Şekil 2.11’de verilmiştir.



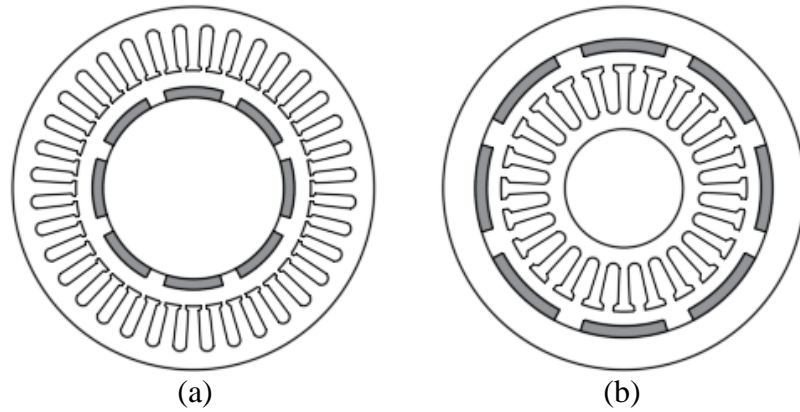


**Şekil 2.11.** SSM ve FDAM kıyaslaması

## 2.2. Sürekli Mıknatıslı Senkron Makinaların Sınıflandırılması

Sürekli mıknatıslı senkron makinalar değişik kriterlere göre sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırmalar, rotorun makina içinde bulunduğu yere göre, manyetik akının makinada izlediği yolun doğrultusuna göre, mıknatısların rotordaki konumuna ve şekline göre yapılmaktadır.

Sürekli mıknatıslı senkron makinalar, Şekil 2.12’de gösterildiği gibi rotorun bulunduğu konuma göre iç rotorlu ve dış rotorlu olarak ikiye ayrılır. İç rotorlu makinalarda, dış rotorlu makinalara kıyasla eylemsizlik daha küçüktür. Ayrıca, iç rotorlu makinalarda statorun makina dış çevresine yakın olmasından dolayı sargıların soğutulması daha kolay olmaktadır [26].

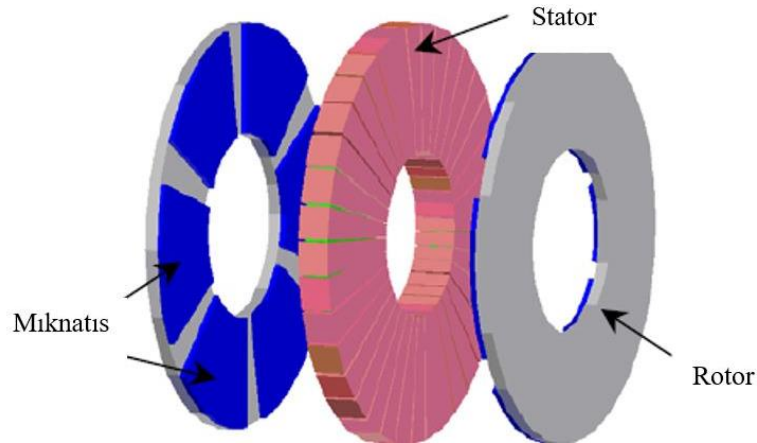


**Şekil 2.12.** (a) İç rotorlu mıknatıslı makina (b) Dış rotorlu mıknatıslı makina

Makinanın rotorunda bulunan mıknatısların ürettiği manyetik akının makina geometrisinde izlediği yolun doğrultusuna göre radyal akılı ve aksel akılı sürekli mıknatıslı senkron makina şeklinde bir sınıflandırma yapılmaktadır. Hava aralığındaki manyetik akının izlediği yolun doğrultusunun dönme eksenine dik olduğu makinalar radyal akılı; manyetik akının izlediği yolun doğrultusu ile dönme ekseninin aynı olduğu makinalar ise aksel akılı makina olarak isimlendirilmektedir. Aksel ve radyal akımı mıknatıslı makinalara ilişkin görsel Şekil 2.13’de verilmiştir. Aksel akılı makinalar iç rotorlu veya dış rotorlu olarak üretilebilmektedir. Şekil 2.14’de dış rotorlu aksel akılı bir makinaya ait görsel verilmiştir. Ayrıca aksel akılı makinaların stator tasarımları oluklu veya oluksuz olabilmektedir. Oluklu stator tasarımında, stator sargıları oluklar içinde yer aldığı için hava aralığı mesafesi daha kısadır ve kullanılan mıknatıs miktarı daha azdır. Oluksuz stator tasarımında ise hava aralığı mesafesi daha uzun; mıknatıs miktarı da daha fazladır [26].

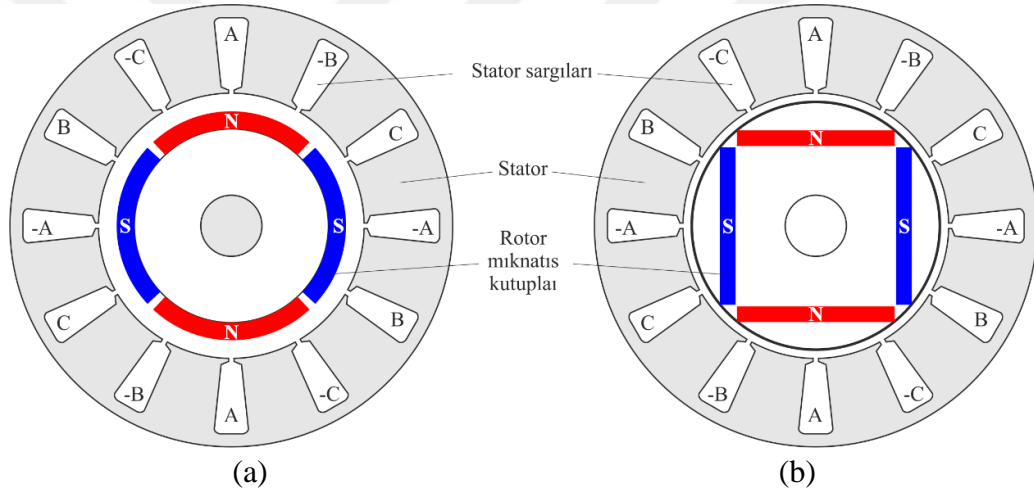


Şekil 2.13. (a) Radyal akılı makina (b) Aksel akılı makina [27]



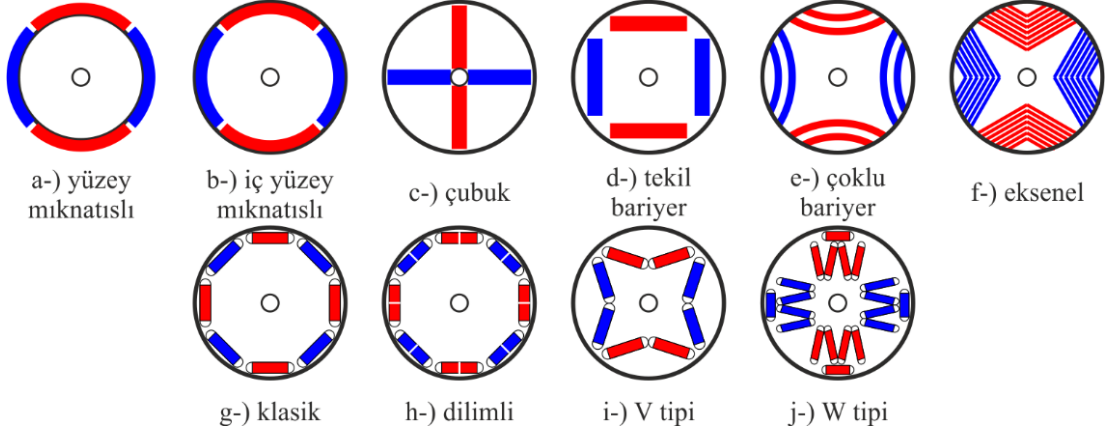
Şekil 2.14. Dış rotorlu aksel akılı makina örneği [26]

Sürekli mıknatıslı senkron makinalar için yapılan bir diğer sınıflandırma mıknatısların rotorda bulunduğu konuma göre yapılmaktadır. Şekil 2.15’de görüldüğü gibi mıknatısların rotorun üzerinde olduğu makinalar yüzeysel mıknatıs yerleşimli makina; mıknatısların rotorun içinde bulunduğu makinalar ise gömülü mıknatıs yerleşimli makina olarak isimlendirilir. Yüzey yerleşimli makinalarda, makinanın  $d$  ve  $q$  eksen endüktansları eşit olduğu için toplam moment içinde relüktans moment bileşeni yoktur. Gömülü mıknatıslı senkron makinalarda ise mıknatıs geometrisine bağlı olarak relüktans momenti de üretilmekte ve birim hacimdeki moment yoğunluğu daha yüksek olmaktadır. Diğer taraftan, yüzey yerleşimli mıknatıslı makinalarda makinanın hızına bağlı olarak mıknatısların yerinden çıkmaması için mıknatısların sağlam bir şekilde montajlanmasına dikkat edilmelidir [26].



**Şekil 2.15.** (a) Yüzeysel mıknatıs yerleşimli (b) Gömülü mıknatıs yerleşimli

Gömülü mıknatıs yerleşimli senkron makinalar mıknatısların şekillerine göre farklılık göstermektedir. Bu makinaların rotorlarında bulunan mıknatıslar Şekil 2.16’da gösterildiği gibi çubuk, tekil bariyer veya çoklu bariyer, parçalı, V ve W şeklinde bulunabilir. Makinadan beklenen özelliklere bağlı olarak bu mıknatıs türlerinden uygun olan seçilmektedir.

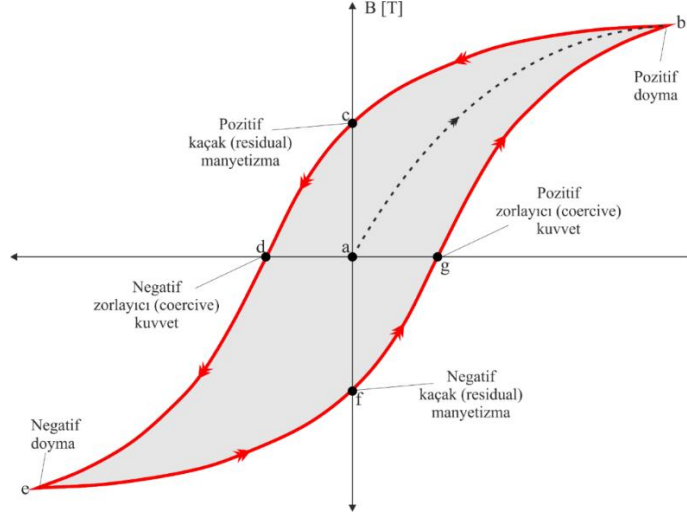


**Şekil 2.16.** Gömülü mıknatıslı makinada farklı mıknatıs yerleşimleri [26]

### 2.3. Sürekli Mıknatıslı Senkron Makinalarda Kullanılan Malzemeler ve Mıknatıslar

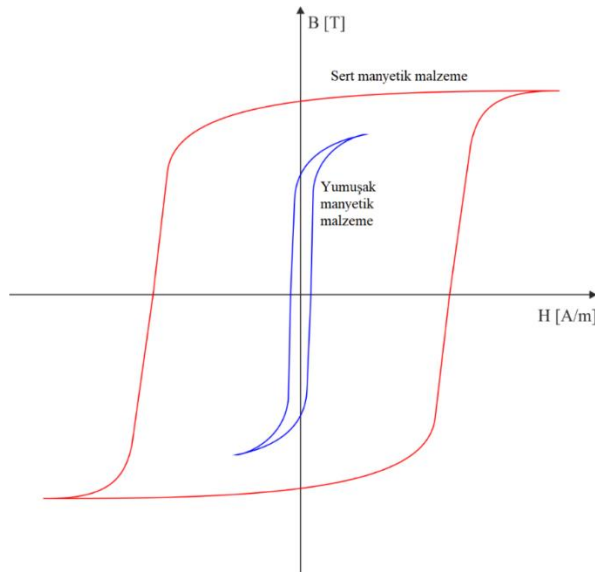
Elektrik makinalarında kullanılan malzemelerin manyetik alanda gösterdiği manyetik özellikler farklılık gösterebilmektedir. Birim yüzey alanı üzerinden geçebilen manyetik alan çizgilerinin yoğunluğuna göre malzemeler ferromanyetik, paramanyetik ve diyamanyetik olarak sınıflandırılır. Manyetik özellikleri en iyi olan malzemeler ferromanyetik malzemelerdir.

Manyetik alanın etkisi altındaki bir malzemenin davranışını incelemek için histeresiz eğrisinden faydalanılır. Histeresiz eğrisi, malzemenin içindeki manyetik kutupların manyetik alan içindeki yönelimine bağlı olarak meydana gelir. Malzemelerin manyetik kutupları, uygulanan alan doğrultusunda yönelir. Belirli bir noktada malzeme doymaya ulaşır. Eğer bu noktadan itibaren alan şiddeti azaltılırsa malzemenin akı yoğunluğu sıfırlanmayıp sürekli mıknatıslık denilen belirli bir değerde kalır. Bu kalıcı mıknatıslık değerini ortadan kaldırmak için ters yönlü olarak uygulanması gereken alan şiddetine giderici veya yok edici alan şiddeti denir. Döngü şeklinde devam eden bu süreç ile Şekil 2.17’de gösterildiği gibi bir histeresiz eğrisi meydana gelir.



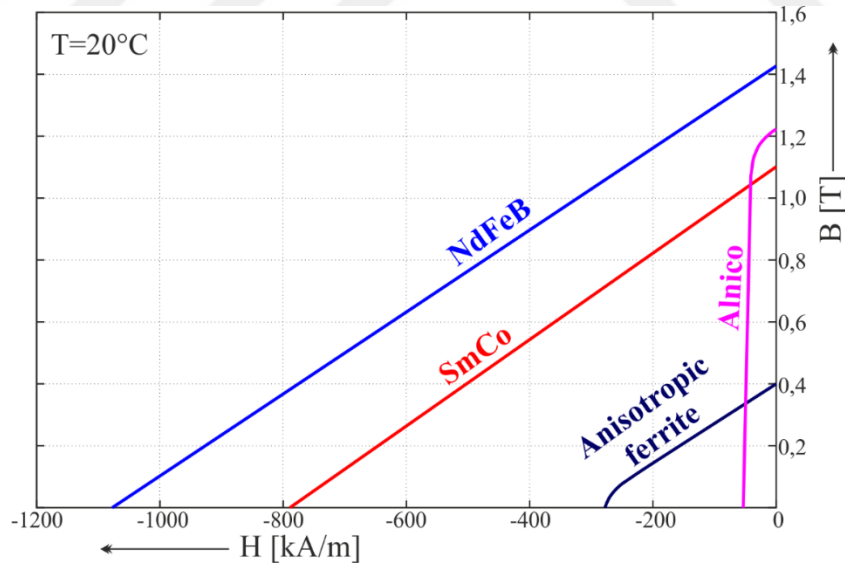
**Şekil 2.17.** Histeresiz eğrisi

Malzemelerin histeriz eğrilerine bakarak özellikleri hakkında yorum yapmak da mümkündür. Histeresiz eğrisinin içinde kalan alan mıknatıslanma kayıplarını verir. Histeresiz eğrisi dar ve küçük olan malzemelere yumuşak manyetik malzeme; histeresiz eğrisi geniş ve büyük olan malzemelere ise sert manyetik malzeme denir. Şekil 2.18’de yumuşak ve sert manyetik malzemelere ilişkin örnek histeresiz eğrileri verilmiştir. Genellikle, yumuşak manyetik malzemelerin sert manyetik malzemelere kıyasla; doyma noktaları daha düşük, kalıcı mıknatıslıkları daha az, yok edici kuvvetleri ise daha küçük değerde olmaktadır. Bir başka ifadeyle yumuşak manyetik malzemeler daha kolay manyetik özellik kazanırken, manyetikliklerini de hızlı kaybederler.



**Şekil 2.18.** Yumuşak ve sert manyetik malzemelerin örnek histeresiz eğrileri

Sürekli mıknatıslı makinaların, klasik elektrik makinalarından farkı rotor kısmında mıknatıs bulunmasıdır. Sürekli mıknatıslı makinalarda en çok Ferit, Alüminyum-Nikel-Kobalt (AlNiCo), Samaryum Kobalt (SmCo), Neodyum-Demir-Boron (NdFeB) tipi mıknatıslar kullanılmaktadır. 1980’li yıllarda NdFeB mıknatıs teknolojisinde ortaya çıkan gelişmelerle beraber sürekli mıknatıslı makinaların kullanım alanı daha genişlemiştir. Bu mıknatısları birbiriyle kıyaslayabilmek için kalıcı mıknatıslıklar ve bunu ortadan kaldıran yok edici kuvvet incelenmektedir. Ancak bu iki parametreyi birlikte inceleyebilmek için enerji çarpanı denilen, histerisiz eğrisinin ikinci bölgesindeki eğri altında kalan alan incelenmelidir. Şekil 2.19’da farklı mıknatıs türlerine ilişkin histerisiz eğrilerinin ikinci bölgeleri gösterilmiştir. Bu şekle göre NdFeB mıknatısın enerji çarpanı daha büyüktür. Sadece kalıcı mıknatıslık değerine göre değerlendirme yapılacak olursa AlNiCo ve NdFeB mıknatıslarının her ikisinin de değerleri yakındır, ancak AlNiCo mıknatısının yok edici kuvvetinin NdFeB’a kıyasla oldukça düşük olduğu görülmektedir. Elektrik makinasının, histerisiz eğrisinin ikinci bölgesindeki B ve H çarpımının maksimum olduğu noktada çalışması, hava aralığında ihtiyaç duyulan manyetik akıyı üretmek için gerekli olan malzeme hacminin en düşük seviyede seçilmesini sağlar.



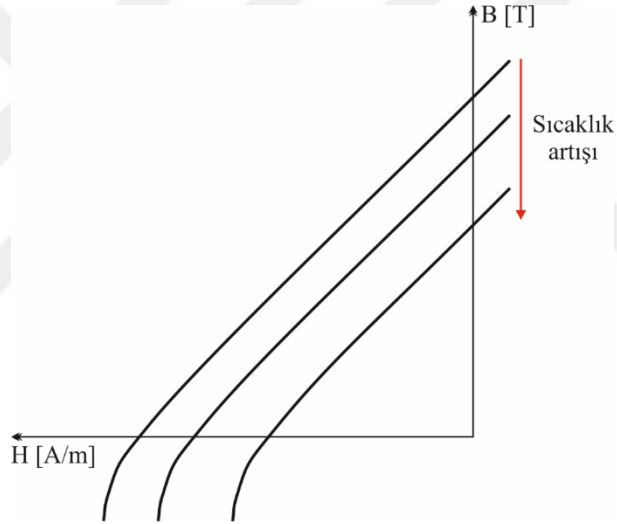
**Şekil 2.19.** Farklı mıknatıs türlerine ilişkin histerisiz eğrilerinin ikinci bölgeleri [26]

Sürekli mıknatıslı makinalarda kullanılan mıknatıslar için önemli olan parametrelerden birisi de Curie sıcaklığı olarak tanımlanan, mıknatısların manyetik özelliklerini kaybedecekleri sıcaklık değeridir. Her mıknatısın Curie sıcaklığı farklı olmakla birlikte bazı mıknatıslar için bu sıcaklık değerleri Tablo 2.1’de verilmiştir.

Sıcaklık artışı mıknatısın manyetik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Sıcaklık arttıkça kalıcı mıknatıslık değeri ve yok edici kuvvet değerleri Şekil 2.20’de görüldüğü gibi azalmaktadır. Bu nedenle makina tasarımında makinanın ısı analizlerinin de göz önünde bulundurulması önemlidir.

**Tablo 2.1.** Bazı mıknatıs türleri için Curie sıcaklıkları [26]

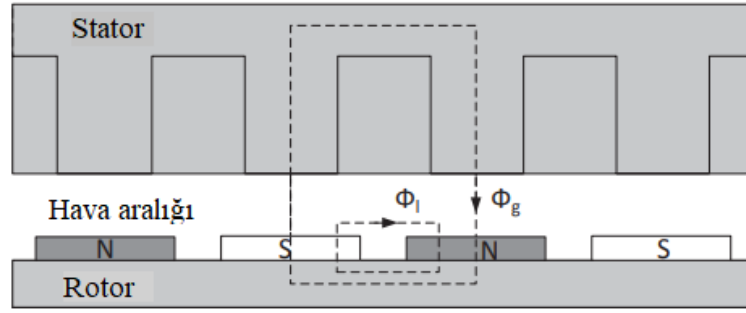
Mıknatıs	Curie Sıcaklığı (°C)
AlNiCo	880
Ferrit	469
SmCo	723
NdFeB	312



**Şekil 2.20.** Kalıcı mıknatıslık ve yok edici kuvvet değerlerinin sıcaklıkla ilişkisi

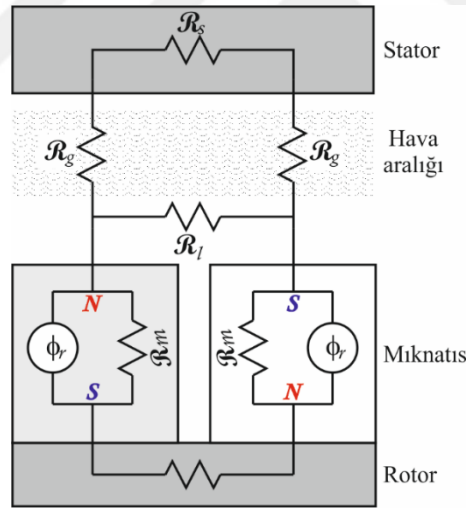
#### 2.4. Sürekli Mıknatıslı Senkron Makinanın Manyetik Devre Modeli

Sürekli mıknatıslı senkron makinanın hava aralığındaki manyetik akının hesaplanması için kullanılan yöntemlerden birisi manyetik devre modelidir. Manyetik devre modeli, mıknatısta üretilen manyetik akının stator, rotor, hava aralığı ve mıknatıs kısımları üzerinde izlediği yola bağlı olarak oluşturulur. Mıknatısların bir kutbundan çıkan akı, hava aralığından geçip, stator dişlerinden stator boyunduruklarına ulaşır. Burdan tekrar stator dişleri üzerinden hava aralığına gelip, diğer kutba ulaşarak yolunu tamamlar. Ancak bir kısım akı bu döngüyü tamamlayamayıp ve kaçak akı olarak değerlendirilir. Manyetik akının makinada izlediği yola ilişkin görsel Şekil 2.21’de verilmiştir.



Şekil 2.21. Manyetik akının izlediği yol

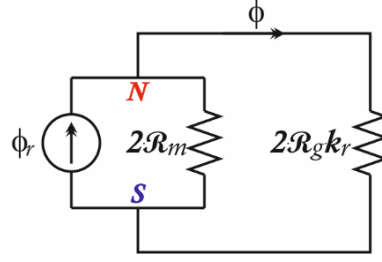
Manyetik devre modelinin oluşturulması için, manyetik akının izlediği yol boyunca geçtiği makina kısımlarına ilişkin relüktans denklemleri, makinanın fiziksel parametreleri kullanılarak yazılır. Manyetik devre modelinde mıknatıslar, bir manyetik iç direnç ve manyetik akı kaynağının Norton eşdeğeri ile temsil edilmektedir. Tüm makina için yazılan denklemler ile, makina geneli için eşdeğer manyetik devre elde edilip çözülerek, manyetik analiz gerçekleştirilir. Yüzey yerleşimli sürekli mıknatıslı senkron generatöre ilişkin manyetik eşdeğer devre görseli Şekil 2.22’de verilmiştir.



Şekil 2.22. Manyetik eşdeğer devre modeli

Şekil 2.22’de verilen eşdeğer devrede  $\mathcal{R}_s$  stator relüktansını,  $\mathcal{R}_g$  hava aralığı relüktansını,  $\mathcal{R}_l$  kaçak akıyı temsil eden relüktansı,  $\mathcal{R}_m$  mıknatıs relüktansını ve  $\mathcal{R}_r$  rotor relüktansını ifade etmektedir. Bir kutup çifti için elde edilecek eşdeğer relüktans ve manyetik akıya ilişkin görsel Şekil 2.23’de verilmiştir.





**Şekil 2.23.** Bir kutup çifti için eşdeğer relüktans

Stator ve rotorda kullanılan malzemelerin manyetik direnç değeri hava aralığına göre çok küçük olduğu için stator, rotor ve hava aralığı eşdeğer relüktansı, hava aralığı relüktansının  $k_r$  gibi bir düzeltme faktörüyle çarpılarak yazılabilir [28].

Relüktans denklemi manyetik akının izlediği yolun uzunluğu, akının geçtiği malzemenin manyetik geçirgenlik değeri ve akının izlediği yol doğrultusundaki yüzey alanı cinsinden Denklem (2.1)'de olduğu gibi yazılır.

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot A} \quad (2.1)$$

Mıknatısın üreteceği manyetik akı ( $\emptyset_r$ ) ile manyetik devre üzerinden akan akı ( $\emptyset$ ) arasındaki ilişki relüktanslar cinsinden Denklem (2.2)'de verildiği şekilde yazılmaktadır. Manyetik devrede akan akının bir kısmı hava aralığında kaçak akıya dönüştüğü için, hava aralığındaki manyetik akı Denklem (2.3)'te olduğu gibi bir katsayı ile çarpılarak hesaplanır.

$$\frac{\emptyset}{\emptyset_r} = \frac{2\mathfrak{R}_m}{2\mathfrak{R}_m + 2\mathfrak{R}_g \cdot k_r} \quad (2.2)$$

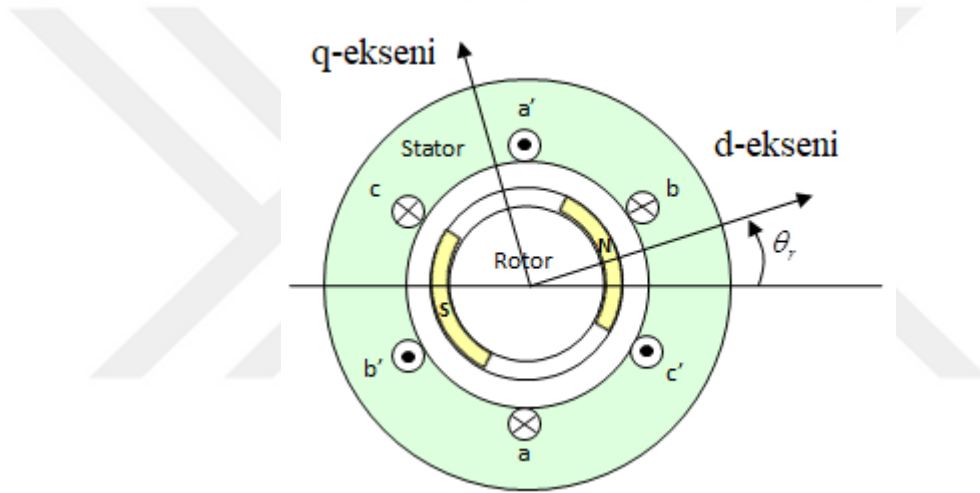
$$\emptyset_g = k_l \cdot \emptyset \quad (2.3)$$

Denklem (2.2) ve Denklem (2.3) bir araya getirilip düzenlendiğinde sürekli mıknatıslı senkron generatörün hava aralığındaki akının relüktans ve mıknatıs tarafından üretilen akı cinsinden ifadesi Denklem (2.4)'de olduğu gibi elde edilir.

$$\emptyset_g = \frac{k_l}{1 + \frac{\mathfrak{R}_g}{\mathfrak{R}_m} \cdot k_r} \cdot \emptyset_r \quad (2.4)$$

## 2.5. Yüzey Yerleşimli Sürekli Mıknatıslı Senkron Makinanın Matematiksel Modeli

Sürekli mıknatıslı senkron generatörlerin akım ve gerilim denklemleri diğer elektrik makinalarında olduğu gibi zamana bağlı olarak ifade edilmektedir. Analizleri daha karmaşık ve zor hale getiren bu duruma karşı bir takım dönüşümler uygulanmaktadır. Bu amaçla elektrik makinalarının analizini kolaylaştırmak için kullanılan yöntemlerden birisi Park dönüşümüdür. Park dönüşümü, 1929 yılında R.H. Park tarafından ilk defa kullanılmıştır ve kendi adıyla literatüre kazandırılmıştır. Park dönüşümünde, stator ve rotor ana eksenleri arasındaki açı temel alınarak zaman parametresinden bağımsız olarak generatör modellenip, analiz edilmektedir. SMSG'lerin eksen takımlarına ilişkin görsel Şekil 2.24'de verilmiştir.



Şekil 2.24. Yüzey yerleşimli SMSG eksen takımları [29]

Sürekli mıknatıslı senkron generatörün zamana bağlı stator sargı gerilimlerine ilişkin dinamik denklem, (2.5)'de verilmiştir. Stator sargı gerilimleri, her bir fazın stator direnci ile stator sargı akımlarının çarpımına stator manyetik akı bağının zamana bağlı türevinin eklenmesi şeklinde ifade edilmektedir.

$$V_{abc}(t) = -r_s \cdot i_{abc}(t) + \frac{d\lambda_{abc}(t)}{dt} \quad (2.5)$$

Denklem (2.5)'de verilen eşitliğe Park dönüşümü uygulanarak zamana bağlı olan abc eksen takımından dq referans eksenlerine geçiş yapılır. d ve q referans eksenlerine göre gerilim ifadeleri, dq eksen takımı akımları, halkalanma akıları, stator direnci ve elektriksel açısal hız cinsinden Denklem (2.6) ve Denklem (2.7)'de olduğu gibi yazılmaktadır.

$$V_d = -R_s \cdot i_d - \frac{d\lambda_d}{dt} + w_e \cdot \lambda_q \quad (2.6)$$

$$V_q = -R_s \cdot i_q - \frac{d\lambda_q}{dt} - w_e \cdot \lambda_d \quad (2.7)$$

D ve q eksen takımı halkalanma akılarına ilişkin denklemler, eksen takımı endüktansları, akımları ve mıknatıs halkalanma akısı cinsinden Denklem (2.8) ve Denklem (2.9)'da verilmiştir.

$$\lambda_d = -L_d \cdot i_d + \lambda_{pm} \quad (2.8)$$

$$\lambda_q = L_q \cdot i_q \quad (2.9)$$

Gerilim denklemleri, halkalanma akısı denklemlerine göre yeniden düzenlenirse Denklem (2.10) ve Denklem (2.11)'deki ifadeler elde edilir.

$$V_d = -R_s \cdot i_d - L_d \frac{di_d}{dt} + w_e \cdot L_q \cdot i_q \quad (2.10)$$

$$V_q = -R_s \cdot i_q - L_q \frac{di_q}{dt} - w_e \cdot L_d \cdot i_d + \lambda_{pm} \cdot w_e \quad (2.11)$$

Sürekli mıknatıslı senkron generatörün d ve q referans eksen takımına göre güç denklemi (2.12)'de verilmiştir. Bu denklemin (2.6) ve (2.7)'de elde edilen ifadelerle göre yeniden düzenlenmesiyle Denklem (2.13)'deki güç denklemi yazılmaktadır.

$$P = \frac{3}{2} \cdot (V_d \cdot i_d + V_q \cdot i_q) \quad (2.12)$$

$$P = -\frac{3}{2} \cdot (R_s \cdot i_d^2 + R_s \cdot i_q^2) - \frac{3}{2} \cdot \left( \frac{d}{dt} L_d \frac{i_d^2}{2} + \frac{d}{dt} L_q \frac{i_q^2}{2} \right) + \frac{3}{2} \cdot (w_e \cdot \lambda_d \cdot i_q + w_e \cdot \lambda_q \cdot i_d) \quad (2.13)$$

(2.13)'de elde edilen denklemdeki birinci kısım bakır kayıplarını, ikinci kısım manyetik depolanan enerjiyi ve üçüncü kısım da elektromekanik dönüşüm gücünü temsil etmektedir. Elektromekanik dönüşüm gücü Denklem (2.14)'de olduğu gibi mekanik dönme hızı ve ile elektromanyetik moment cinsinden ifade edilebilir. Mekanik dönme hızının kutup çifti sayısıyla çarpılmasıyla Denklem (2.15)'de olduğu gibi elektriksel dönme hızı bulunur.

$$P_e = w_m \cdot T_e \quad (2.14)$$

$$w_e = p \cdot w_m \quad (2.15)$$

(2.14) ve (2.15)'de verilen denklemler (2.13)'deki güç denkleminin elektromekanik güç bileşenine göre düzenlendiğinde elektromekanik moment ifadesi Denklem (2.16)'da olduğu gibi elde edilir.

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot p \cdot (\lambda_d \cdot i_q + \lambda_q \cdot i_d) \quad (2.16)$$

Elektromekanik moment denkleminde d ve q eksenlerinin endüktans ve mıknatıs halkalanma akısı ifadelerinin kullanılmasıyla Denklem (2.17) elde edilir.

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot p \cdot (\lambda_{pm} \cdot i_q + (L_q - L_d) \cdot i_d \cdot i_q) \quad (2.17)$$

## 2.6. Sürekli Mıknatıslı Senkron Makinada Kayıplar ve Verim

Elektrik makina tasarımında ve seçiminde göz önünde bulundurulacak parametrelerden birisi makinanın verim değeridir. Makinanın giriş ve çıkış güçleri arasındaki oran, o makinanın verimini ifade eder. Giriş ve çıkış gücü arasındaki fark, makinada meydana gelen kayıplardan dolayı oluşmaktadır. Sürekli mıknatıslı senkron makinaların statorunda bulunan sargılarda bakır kayıpları, manyetik devredeki malzemeler üzerinde nüve kayıpları ve dönmeden kaynaklı olarak rüzgar kayıpları meydana gelmektedir.

### 2.6.1. Bakır Kayıpları

Sürekli mıknatıslı makinalarda bakır kayıpları sadece statordaki sargılar üzerinde meydana gelir. Mıknatıslı olmayan makinalara kıyasla bakır kayıpları daha düşük olan sürekli mıknatıslı makinaların verim değerlerinin yüksek olmasını sağlayan önemli bir unsurdur. Ayrıca sargıların sıcaklıkları bakır kayıplarını etkilemektedir. Sargı sıcaklığındaki artışa bağlı olarak bakır kayıpları artmakta ve dolayısıyla verim düşmektedir [22].

Sürekli mıknatıslı makinalarda meydana gelen bakır kayıpları sargı akımlarının karesi ve stator sargı dirençlerinin çarpımına eşittir. Denklem (2.18)'de bakır kayıpları denklemleri verilmiştir.

$$P_{bakır} = 3 I^2 R_{stator} \quad (2.18)$$

### 2.6.2. Nüve Kayıpları

Nüve kayıpları makinanın rotorunda, stator dişlerinde ve stator boyunduruğunda meydana gelmektedir. Girdap akımı (eddy current), histeresiz ve ilave bileşenlerden oluşmaktadır [30]. Nüve kayıplarının hesabında kullanılan eşitlikler Denklem (2.19)'da ve Denklem (2.20)'de verilmiştir.

$$P_{nüve} = P_g + P_h + P_{ek} \quad (2.19)$$

$$P_{nüve} = k_h f(B)^\alpha + k_e (fB)^2 + k_a (fB)^{1.5} \quad (2.20)$$

### 2.6.3. Rüzgar Kayıpları

Rüzgar kayıpları döner elektrik makinalarında meydana gelen kayıplardan birisidir. Rüzgar kayıplarının hesaplanmasında kullanılan eşitlik Denklem (2.21)'de verilmiştir [31].

$$P_{rüzgar} = c_d \pi \rho_d w^3 R^4 L \quad (2.21)$$

### 3. MATERYAL VE METOD

Bu bölümde 1,5 kW gücündeki referans SMSG'nin analizinde kullanılacak programın arka planında çalıştırılan sonlu elemanlar yöntemine ilişkin bilgi verilmiştir. Referans makinanın analitik olarak çıkış parametrelerinin elde edileceği ANSYS Electronics Desktop yazılımının Rmxprt aracından bahsedilmiştir. Tez kapsamında kullanılan referans makinanın tasarım bilgileri verilip, sargı şeması çıkarılmıştır. Sargı yapısında kullanılan iletken sayısı ile faz sargılarındaki sarım sayıları hesaplanarak, referans makinada kullanılan değerler ile kıyaslanarak doğrulanmıştır.

#### 3.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi, büyük ve karmaşık bir geometrinin sonlu sayıda küçük parçalar üzerinden diferansiyel denklemlerin yazılarak çözüldüğü sayısal bir yöntemdir. Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan çözümlerde, geometri sonlu sayıda küçük parçalara ayrılır, kaynak ve sınır koşulları belirlenir, sonlu elemanlara ilişkin eşitlikler yazılır ve matris formunda çözümler yapılır.

Elektrik makinalarının analizinde kullanılan temel denklemler (3.1), (3.2) ve (3.3)'de verilmiştir.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (3.1)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3.2)$$

$$\nabla = F_x \cdot \frac{\partial}{\partial x} + F_y \cdot \frac{\partial}{\partial y} + F_z \cdot \frac{\partial}{\partial z} \quad (3.3)$$

Kararlı bir halde elektriksel akı yoğunluğunun zaman değişkenine bağlı türevi sıfır olacağı için Denklem (3.1) düzenlenerek Denklem (3.4) elde edilir.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \quad (3.4)$$

Manyetik malzemelerin manyetik akı yoğunluğu ve manyetik alan şiddeti arasındaki ilişkiler Denklem (3.5) ve Denklem (3.6)'da verilmiştir.

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad (3.5)$$

$$\vec{H} = v \cdot \vec{B} \quad (3.6)$$

Manyetik akı yoğunluğunun kartezyen koordinatlardaki ifadeleri Denklem (3.7)'de verilmiştir.

$$\begin{aligned} B_x &= \frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} \\ B_y &= \frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \\ B_z &= \frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \end{aligned} \quad (3.7)$$

Sürekli mıknatıslı makinalar için iki boyutlu analizlerde kullanılacak manyetik alan şiddeti ifadesi Denklem (3.3), (3.4), (3.6) ve (3.7) birlikte çözülerek Denklem (3.8)'de verildiği şekilde elde edilir.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( v \cdot \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( v \cdot \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) = J_m - J_z \quad (3.8)$$

Sonlu elamanlar yöntemiyle analizi yapılacak olan geometride ağ yapısı denilen bir bölümlendirme yapılmaktadır. Bu bölümlendirmelerde bir, iki veya üç boyutlu olarak üçgen, kare ve prizma gibi şekiller kullanılmaktadır. Oluşturulan ağ yapısındaki her bir düğüm noktası için denklemler elde edilmektedir. Bu nedenle ağ sayısının fazla olması işlem fazlalığına ve zaman gereksinimine sebep olmaktadır. Ayrıca bilgisayar üzerinden gerçekleştirilecek olan analizlerde bilgisayar bellek ihtiyacı doğacaktır. Bu durum için makina geometrisi üzerinde bazı kısımlarda yoğun, bazı kısımlarda ise daha seyrek bir ağ yapısı kullanılmalıdır. Elektrik makinalarının iki boyutlu manyetik analizinde en çok üçgen şeklindeki ağ yapısı kullanılmaktadır. Üçgen şeklindeki bu ağ yapısındaki her bir düğüm noktasının  $(x_i, y_i)$  koordinatları için manyetik vektör potansiyel denklemleri  $a + b \cdot x_i + c \cdot y_i = A_i$  formunda yazılır. Üç köşe noktası için yazılan denklemler (3.9)'da olduğu gibi matris formuna getirilir ve çözülerek a, b ve c katsayıları hesaplanır.

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_k & y_k \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} A_i \\ A_j \\ A_k \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Vektörel potansiyel fonksiyonu, Denklem (3.10)'da verildiği gibi şekil fonksiyonu olarak isimlendirilen bir fonksiyon üzerinden tanımlanabilmektedir. Bu şekil fonksiyonunun bileşenleri, üç köşe noktasının koordinatları ve ağ yapısını oluşturan üçgenin alanı üzerinden Denklem (3.11)'de verildiği gibi yazılabilmektedir.

$$A = \sum_{i=1}^m A_i \cdot a_i \cdot (x, y) \quad (3.10)$$

$$A = a_i(x, y) \cdot A_i + a_j(x, y) \cdot A_j + a_k(x, y) \cdot A_k$$

$$\begin{aligned} a_i &= \frac{1}{2 \cdot S} \{ (x_j y_k - x_k y_j) + (y_j - y_k)x + (x_k - x_j)y \} \\ a_j &= \frac{1}{2 \cdot S} \{ (x_k y_i - x_i y_k) + (y_k - y_i)x + (x_i - x_k)y \} \\ a_k &= \frac{1}{2 \cdot S} \{ (x_i y_j - x_j y_i) + (y_i - y_j)x + (x_j - x_i)y \} \end{aligned} \quad (3.11)$$

Yazılan denklemlerin çözümü için Dirichlet, Neumann ve Karma sınır koşulları denilen seçeneklerden uygun olan biri kullanılır. Eşitlikler uygun sınır koşulları altında doğrudan veya yinelemeli olarak çözümlenerek analizler gerçekleştirilmektedir.

### **3.2. Referans Makinanın ANSYS Electronics Desktop Yazılımının Maxwell Aracında Modellenmesi**

ANSYS Electronics Desktop yazılımı, elektrik makinalarının modellenmesi, tasarlanması ve en uygunlaştırılmasında yaygın olarak kullanılan yazılımlardan birisidir. Bu tez çalışması kapsamında düşey dönme eksenli küçük güçlü bir rüzgar türbininde kullanılan referans olarak seçilmiş yüzey mıknatıslı senkron generatör modellenmiştir. Programda elektrik makinaları 2 ve 3 boyutlu olarak çizilebildiği gibi Rmxprt kısmından ilgili makina tipi seçilerek de modellenmektedir. Rmxprt aracı altında Tablo 3.1'de verildiği gibi farklı makina seçenekleri bulunmaktadır.

Bu çalışmada referans alınan makinanın ön modellenmesi Rmxprt aracı üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bunun için öncelikle referans makinanın stator, rotor,



mıknatıs ve sargı kısımlarının ilgili parametreleri incelenmiş, ölçülmüş ve yazılıma tanıtılmıştır.

Makina özellikleri, Tablo 3.2’de verildiği gibi iç rotorlu, 16 kutuplu, sürtünme ve rüzgar kayıpları 15 W, senkron hız değeri 450 d/dak olacak şekilde Rmxprt aracına girilmiştir. Şekil 3.1’de referans makinaya ilişkin görseller verilmiştir.

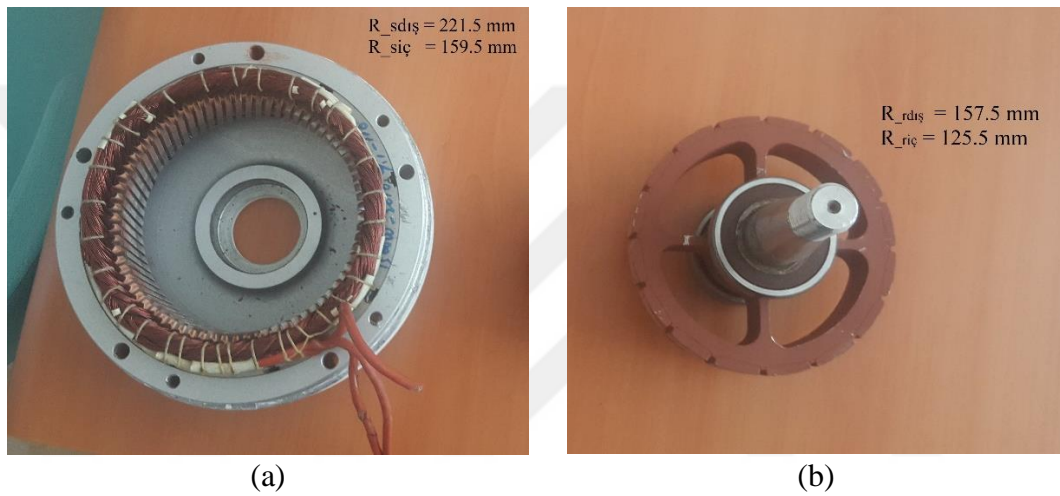
**Tablo 3. 1.** ANSYS-Rmxprt aracındaki makina türleri

<b>Makina türü</b>
Ayarlanabilir hızlı senkron makina
Fırçasız kalıcı mıknatıslı DC motor
Tırnaklı alternatör
DC makina
Genel döner makina
Şebeke kalkışlı kalıcı mıknatıslı senkron motor
Kalıcı mıknatıslı DC motor
Bir fazlı asenkron motor
Anahtarlama relüktans motor
Üç fazlı asenkron motor
Üç fazlı çıkıntısız senkron makina
Üç fazlı senkron makina
Üniversal motor

**Tablo 3. 2.** Referans generatöre ilişkin genel bilgiler

<b>İsim</b>	<b>Değer</b>
Makina türü	Ayarlanabilir hızlı senkron makina
Kutup sayısı	16
Rotor konumu	İç rotorlu
Sürtünme kaybı	15 W
Vantilasyon kaybı	0 W
Referans hız	450 d/dak
Kontrol türü	AC
Devre tipi	Y3

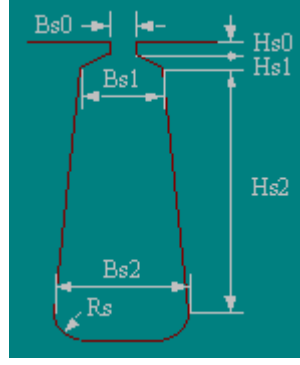
Makinanın stator ve rotor parametreleri olarak Tablo 3.3'deki değerler Rmxprt'a girilmiştir. Makina statorundaki olukların yapısıyla ilgili programdaki mevcut modellerden, referans makinada kullanılan oluk yapısı Şekil 3.2'de verilmiştir. Oluk ağzı genişliği 2,72 mm, oluk alt genişliği 3,45 mm, oluk ũst genişliği 4,51 mm, oluk ağzı yũkseklilięi 1 mm ve oluk yũkseklilięi de 14 mm olarak tanımlanmıştır. Referans alınan makina yũzey yerleşimli mıknatıslıdır ve Şekil 3.3'de verilen model kullanılmıştır. Mıknatısların yũzey genişliğinin kutupların rotorda kapladığı yũzey genişliğine oranı 0,847 olarak tanımlanmıştır. Kullanılan makinadaki mıknatısların kalınlığı 5,31 mm'dir.



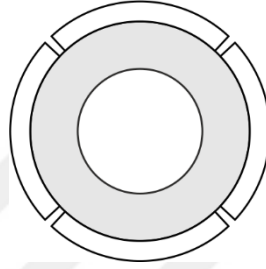
**Şekil 3.1.** Referans makinanın (a) stator (b) rotor görselleri ve boyutları

**Tablo 3. 3.** Referans generatöre ilişkin stator ve rotor parametreleri

İsim	Değer
Stator dış çapı	221.5 mm
Stator iç çapı	159.5 mm
Rotor dış çapı	157.5 mm
Rotor iç çapı	125.5 mm
Paket boyu	36.5 mm
Oluk sayısı	72
Kutup sayısı	16
Stator oluk türü	3
Rotor kutup türü	3
Mıknatıs kalınlığı	5.31 mm

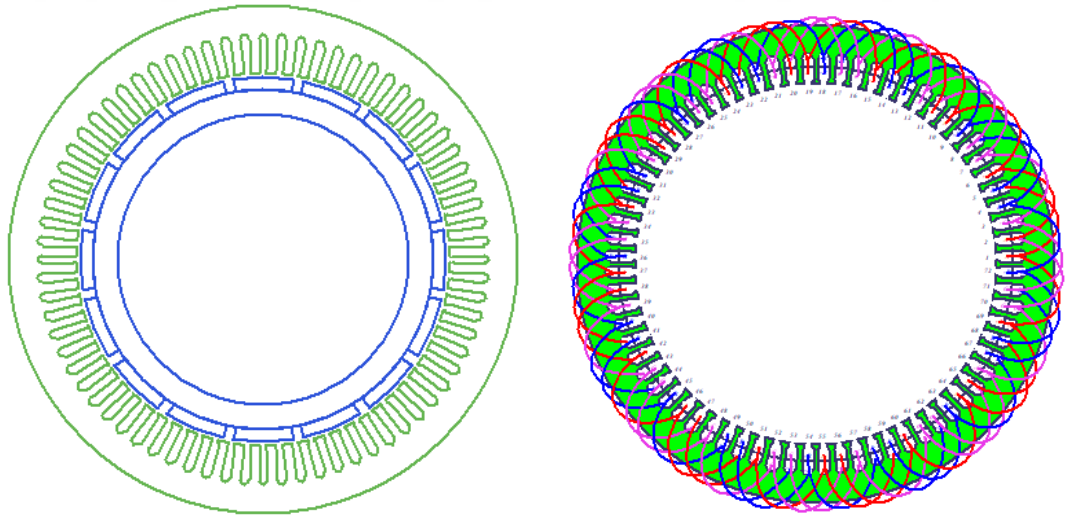


**Şekil 3.2.** Referans makinada kullanılan oluk modeli



**Şekil 3.3.** Referans makinada kullanılan kutup modeli

Kullanılan generatöre ilişkin Rmxprt'da oluşturulmuş kesit görüntüsü Şekil 3.4'de verilmiştir.



**Şekil 3.4.** Referans generatörün oluşturulan Rmxprt modeli

Elektrik makinalarının sargı şemalarını çıkarmak için öncelikle bir takım hesaplamalar yapılmalıdır. Makinanın oluk, kutup ve faz sayıları kullanılarak makina sargısının tam oluklu veya kesirli oluklu olduğu tespit edilir. Referans alınan makinanın oluk sayısı 72, kutup sayısı 16 ve faz sayısı da 3'tür. Denklem (3.12)'de

verilen kutup-faz başına oluk sayısı hesabına göre referans alınan makinanın kesirli oluklu olduğu görülmektedir.

$$C = \frac{X}{m \cdot 2p}$$

$$C = \frac{72}{3 \cdot 16} = \frac{3}{2} \quad (3.12)$$

Kesirli oluklu makinalar oluk sayısı ve faz sayısı arasındaki ilişkiye bağlı olarak dengeli ve dengesiz sarımlı şeklinde ikiye ayrılmaktadır. Oluk sayısı, faz sayısının tam katı olan kesir oluklu makinalar dengeli sarımlı; tam katı olmayan kesir oluklu makinalar dengesiz sarımlıdır. (3.13)'de verilen hesaplamalara göre referans alınan makina dengeli sarımlı kesir oluklu makinadır.

$$\frac{X}{m} = \frac{72}{3} = 24 \quad (3.13)$$

Dengeli kesir oluklu makinalarda iki tane denge şartı bulunmaktadır. Birinci denge şartı, kutup sayısının, kutup-faz başına oluk sayısının paydasına oranının tam sayı olmasıdır. İkinci denge şartı kutup-faz başına oluk sayısının paydasının faz sayısına oranının tam sayı olmamasıdır. Referans alınan makina (3.14)'de verildiği gibi her iki denge şartını da sağlamaktadır.

$$\frac{2p}{b} = \frac{16}{2} = 8 \quad \text{Tam sayıdır}$$

$$\frac{b}{m} = \frac{2}{3} \quad \text{Tam sayı değildir} \quad (3.14)$$

Sarım şemasının kolay bir şekilde çıkarılabilmesi için renklendirme sistemi kullanılmaktadır. Bu yöntem ile üç faz için üç ayrı renk kullanılarak renklendirme dizisi oluşturulur ve bu renk dizisi belirli sayıda tekrarlanarak tüm oluklar doldurulur. Renk dizisinin oluşturulmasında kutup-faz başına oluk sayısı değeri kullanılır. Bu sayı rasyonel olduğu için tam sayı oluncaya kadar sırasıyla 0, 1, 2, 3 gibi sayılarla çarpılır. Çarpım sonucunda rasyonel çıkan sayılar bir üst tam sayıya tamamlanır. Art arda gelen iki sayı arasındaki fark kullanılarak renk dizisi elde edilir. Tablo 3.4'de renk dizisinin bulunması için yapılan hesaplamalar verilmiştir.

**Tablo 3.4.** Renk dizisinin hesaplanması

Katsayılar	0	1	2
Çarpım	$\frac{3}{2} \times 0$	$\frac{3}{2} \times 1$	$\frac{3}{2} \times 2$
Sonuç	0	1,5	3
Tam sayıya yuvarlama	0	2	3
Renk dizisi	2		1

Tüm olukların renk dizisi ile doldurulabilmesi için renk dizisinin kaç defa tekrar edeceğinin hesaplanması gerekmektedir. Bunun için toplam oluk sayısı renk dizisindeki rakamların toplamına bölünür. (3.15)'de tekrar sayısı bulunmuştur.

$$t = \frac{72}{2 + 1} = 24 \quad (3.15)$$

Referans makinanın sargı yapısı çift tabakalıdır. Bunun için tüm oluklar daire şeklinde çizilip oluklar ikiye ayrılmıştır. Önce üst yarı daireler renk dizisi kuralına göre renklendirilmiştir. Tüm olukların üst yarıları renklendirildikten sonra alt yarı dairelere geçilmiştir. Alt yarı dairelerin renklendirilmesi için (3.16)'da verilen hesaba göre bulunan sargı adımı değeri kadar boşluk bırakılır. Bu boşluktan sonra aynı renk sırası ve tekrar dizisi kuralına göre renklendirmeye devam edilir.

$$Y_x = \frac{X}{2p} = \frac{72 - 8}{16} = 4 \quad (3.16)$$

Renklendirme işlemi tamamlandıktan sonra bağlantılar ve kutuplandırmalar yapılarak sargı şeması çizimi tamamlanmıştır. Referans makinarya ilişkin sargı şeması Şekil.3.5'de verilmiştir.

Bunun için öncelikle referans makinanın boşta çalışma koşullarında mıknatıslarında meydana gelen manyetik akı yoğunluğu ve buna bağlı olarak mıknatıslarında oluşan akı miktarı bulunur. Mıknatısların manyetik akı yoğunluğu mıknatıs malzemesinin kalıcı manyetiklik değerine, bağlı manyetik geçirgenliğine ve geçirgenlik katsayısına bağlıdır. Geçirgenlik katsayısı, kaçak katsayısı, hava aralığı mesafesi, mıknatıs kalınlığı, kutup başına düşen hava aralığı alanına ve mıknatısın yüzey alanına bağlı olarak (3.17)'de verilen eşitliğe göre hesaplanır.

$$GK = \frac{1}{f_k} \cdot \frac{l_m}{l_g} \cdot \frac{A_g}{A_m} \quad (3.17)$$

Kaçak katsayısı 0,85 olarak ve diğer parametreler referans makina ölçülerine göre hesaba katıldığında geçirgenlik katsayısı 1,06 olarak bulunmuştur. Mıknatısın manyetik akı yoğunluğu (3.18)'de verilen eşitlik ile bulunur.

$$B_m = \frac{GK}{GK + \mu_r} \cdot B_r \quad (3.18)$$

Kullanılan NdFeB mıknatısının kalıcı manyetik akı değeri 1,23 ve bağıl geçirgenlik katsayısı 1,1 alınarak yapılan hesaba göre referans makina için mıknatısın manyetik akı yoğunluğu 1,06 olarak bulunmuştur. (3.19)'da verilen eşitliğe göre mıknatısın manyetik akı yoğunluğu değeri ile yüzey alanının çarpımı, mıknatısta meydana gelecek olan akı miktarını belirler.

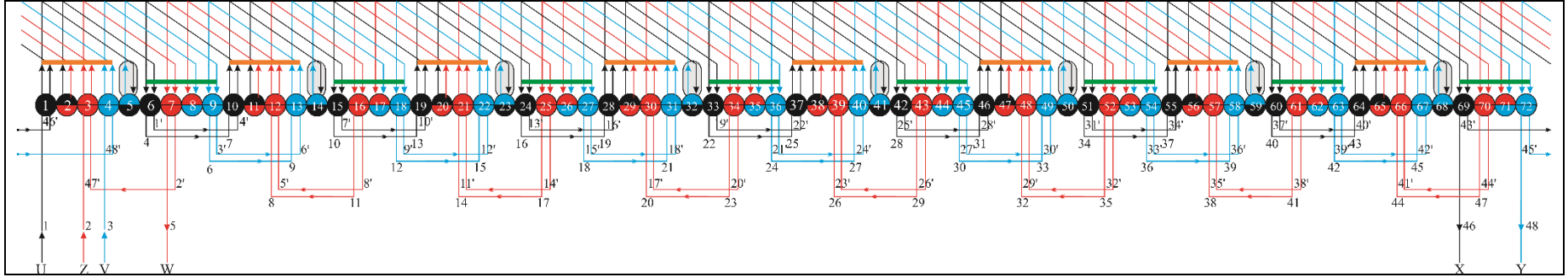
$$\Phi_m = B_m \cdot A_m \quad (3.19)$$

Faraday yasasına göre, bir iletkende endüklenecek gerilim (3.20)'de verilen eşitlik ile hesaplanmaktadır. Referans makina için yapılan hesaplama ile bir iletkende endüklenen gerilim değeri 0,27 V bulunmuştur.

$$E = 4,44 \cdot \Phi_m \cdot f \quad (3.20)$$

Referans makinanın kataloğundan yüksüz çalışma koşullarındaki faz gerilimi 34 V olarak belirlenmiştir. Bu gerilim değerinin sağlanabilmesi için gerekli olan sarım sayısını hesaplamak için (3.21)'de verilen eşitlik kullanılır. Yapılan hesaplama göre bir faz sargısı için sarım sayısı 8 olarak bulunmuştur. Bu değer ile referans makinadaki sarım sayıları doğrulanmış olmaktadır.

$$N = \frac{U_f}{E \cdot 2p} \quad (3.21)$$



Şekil 3.5. Kullanılan makinarya ilişkin sargı şeması

Sarımlarla ilgili belirlenmesi gereken bir diğlet parametre ise iletken kesitidir. İletken kesitinin hesaplanması için makinanın akım değerinin hesaplanması gerekmektedir. Referans makinadan çekilen akım değeri (3.22)'de verilen denkleme göre 14,7 A bulunmuştur.

$$I = \frac{P}{U_f \cdot m} \quad (3.22)$$

İletken kesitinin belirlenmesinde, iletkenin akım yoğunluğu değerin 5 A/mm<sup>2</sup>'yi geçmeyecek şekilde ısııl açıdan da değeriendirilmesi gerekmektedir. Bunun için bulunan akım değeri akım yoğunluğu değeriine bölünerek iletken için minimum kesit belirlenir. Referans makina için bu değeri 2,94 mm<sup>2</sup> bulunmuştur. Ancak referans makinada bir iletkenin kesiti yaklaşık 0,96 mm<sup>2</sup> olduğu için birden fazla iletken kullanılarak gerekli olan akım değeri sağlanmaktadır. Gerekli olan iletken sayısının hesaplanması için (3.23)'de verilen eşitlik kullanılmaktadır.

$$z = \frac{S}{\pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2} \quad (3.23)$$

(3.23)'e göre referans makina için yapılan hesaplamada 4 iletken kullanılması gerektiği bulunmuştur. Bu değeri, referans makinada kullanılmış olan iletken sayısını doğrulamaktadır.



#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde referans olarak kullanılan 1,5 kW gücünde 450 d/dak senkron hıza sahip olan yüzey yerleşimli sürekli mıknatıslı senkron generatörün ANSYS Electronics Desktop yazılımı üzerinden yapılan elektriksel ve manyetik analizlere ve kurulan deney düzeneği ile gerçekleştirilen deneylerdeki ölçüm sonuçlarına yer verilmiştir. Bir önceki bölümde yapılan hesaplamalar ve generatör kataloğundaki bilgiler kullanılarak, referans generatör modeli ANSYS Electronics Desktop yazılımının Rmxprt aracında oluşturulmuştur ve yapılan benzetim ile çıkış parametreleri elde edilmiştir. Ardından Rmxprt üzerinden referans generatörün 2 boyutlu modeli oluşturulup, bu modelin yüksüz ve yüklü çalışma koşullarındaki manyetik ve elektriksel analizleri yapılmıştır. Ayrıca, ANSYS Electronics Desktop yazılımının Simplorer aracı kullanılarak generatörün açık devre ve kısa devre arıza senaryolarındaki davranışı incelenmiştir. Son olarak referans generatörün yüksüz, yüklü, kısa devre ve ani yüklenme durumlarında yapılan deneylerde elde edilen sonuçlara ve iletken ve fazlara ait yapılan ölçümlere ilişkin osiloskop görüntülerine yer verilmiştir.

##### 4.1. Referans SMSG'nin Rmxprt Analiz Sonuçları

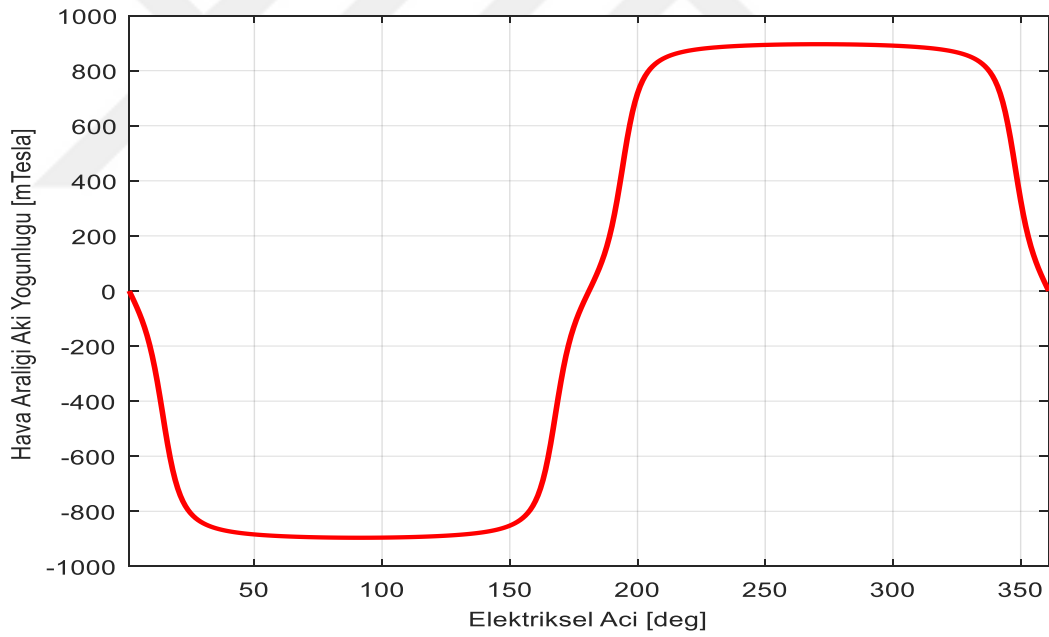
ANSYS Electronics Desktop yazılımının Rmxprt aracı üzerinden boyutları ve özellikleri tanımlanan referans generatör simüle edilerek yüksüz ve yüklü çalışma koşullarındaki çıkış parametreleri analitik olarak elde edilip sırasıyla Tablo 4.1 ve Tablo 4.2'de verilmiştir.

**Tablo 4. 1** Yüksüz çalışma koşullarında çıkış parametreleri

Parametre	Rmxprt
Stator dış akı yoğunluğu (T)	1,7
Stator boyunduruk akı yoğunluğu (T)	1,3
Rotor boyunduruk akı yoğunluğu (T)	1,2
Hava aralığı akı yoğunluğu (T)	0,89
Mıknatıs akı yoğunluğu (T)	0,95
Endüklenen temel hat gerilimi-RMS (V)	66,99
Endüklenen gerilim THD değeri (%)	0,21

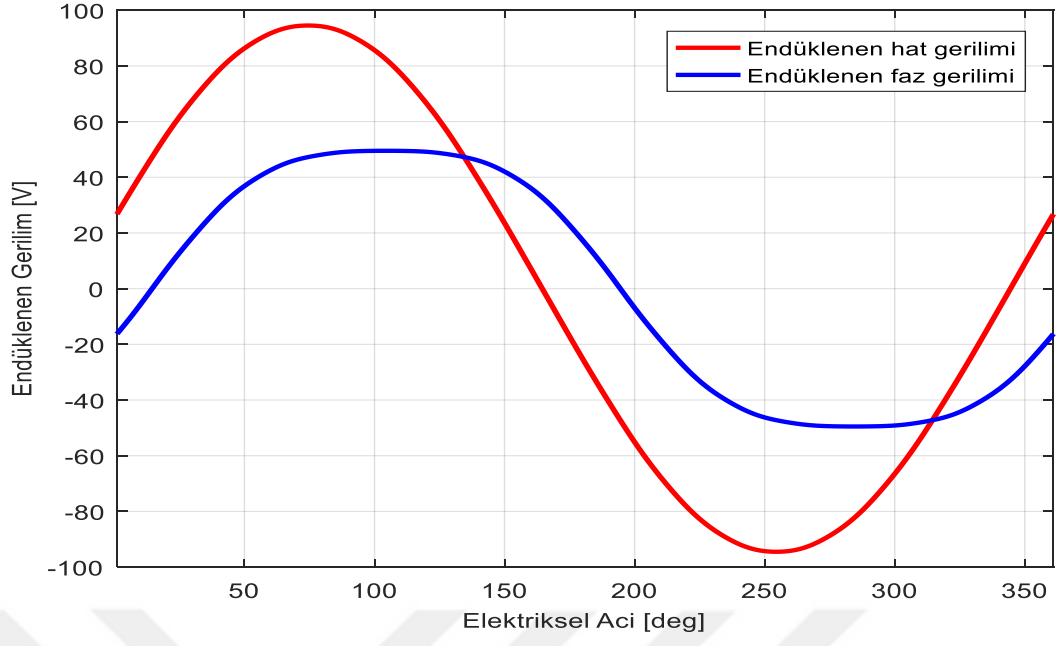
Tablo 4.1’de verilen sonuçlara göre endüklenen nominal faz-faz gerilimi 66,99 V olarak elde edilmiştir. Referans generatör hem konsantre sargılı hem de stator paketine kaykı uygulandığı için vurutu momenti değeri neredeyse sıfır olarak bulunmuştur. Rmxprt çıkış parametreleri incelendiğinde stator dış ve boyunduruk akı yoğunluğu değerleri sırasıyla 1,7 T ve 1,3 T civarında elde edilmiştir. Bu değerler ilerleyen kısımlarda yapılan manyetik analizlerde daha detaylı incelenmiştir.

SMSG’nin yüksüz çalışma koşulları altında Rmxprt aracından elde edilen hava aralığı akı yoğunluğu, endüklenen hat ve faz gerilimleri ile bir iletken ve bir sarımda endüklenen gerilim eğrileri Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3’te verilmiştir. Hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu 0,89 T değerinde elde edilmiştir. Hava aralığındaki akı yoğunluğu değeri, endüklenen gerilim, kayıp ve verim gibi bir çok parametreyi etkilediği için elektrik makinalarının tasarımında dikkat edilen bir parametredir.

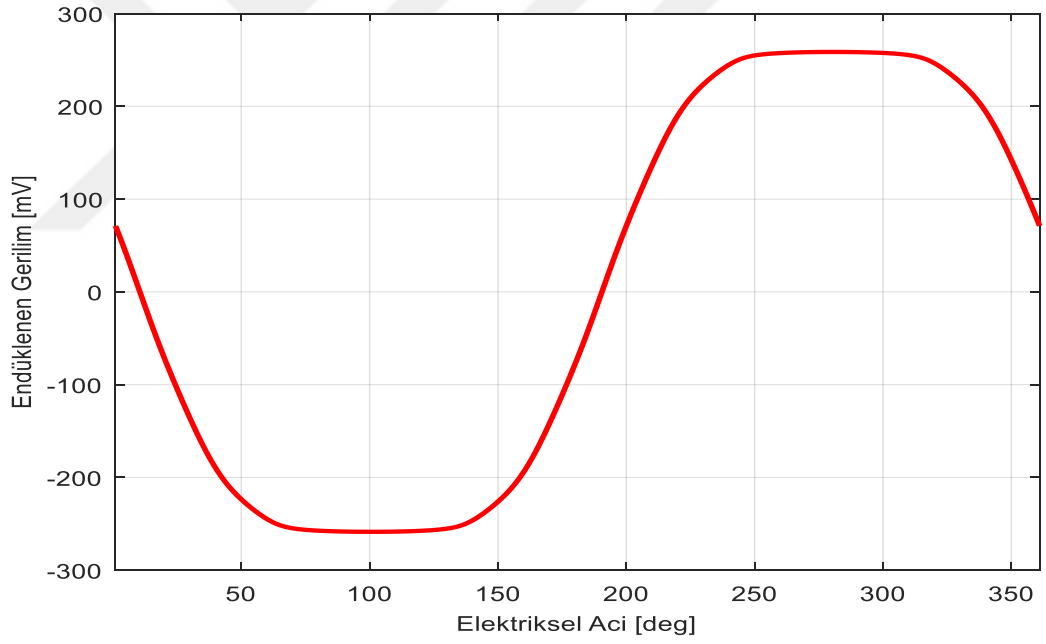


**Şekil 4. 1** Hava aralığı akı yoğunluğunun elektriksel açıya bağlı dağılımı

Rmxprt ile gerçekleştirilen analiz sonucunda stator sargılarında endüklenen faz-nötr gerilimi değeri 38,85 V ve faz-faz gerilimi değeri 66,99 V olarak bulunmuştur. Bu değerler, bir önceki bölümde ürün kataloğuna göre tespit edilen değeri sağladığı görülmektedir. Hesaplamalara 0,27 V değerinde dahil edilen bir faz sargısı gerilimi, Rmxprt aracında yaklaşık 0,21 V olarak bulunmuştur.



Şekil 4. 2 Endüklenen faz ve hat gerilimleri

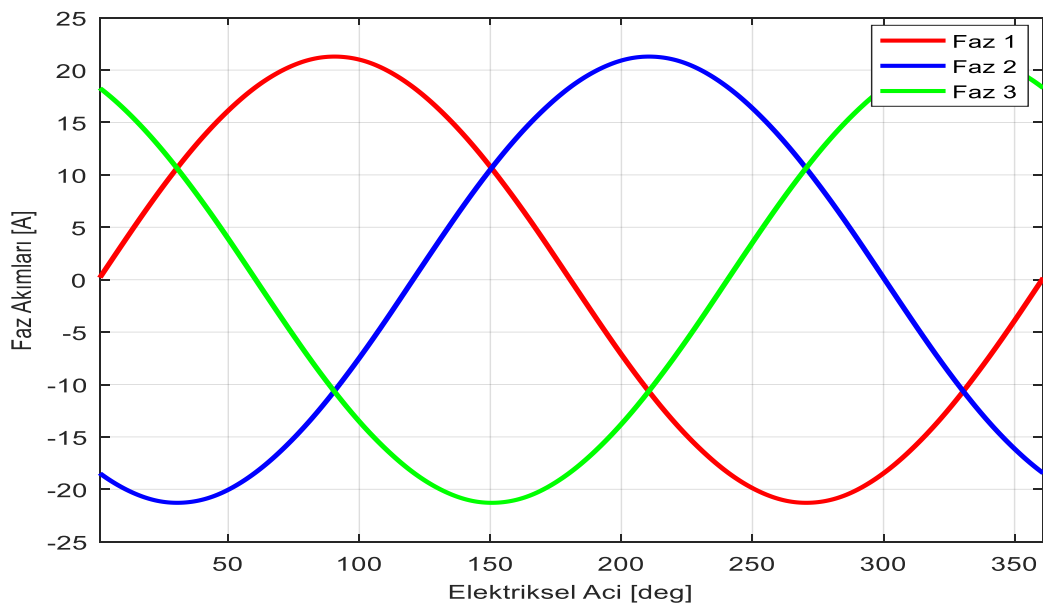


Şekil 4. 3 Bir sarımda endüklenen gerilim

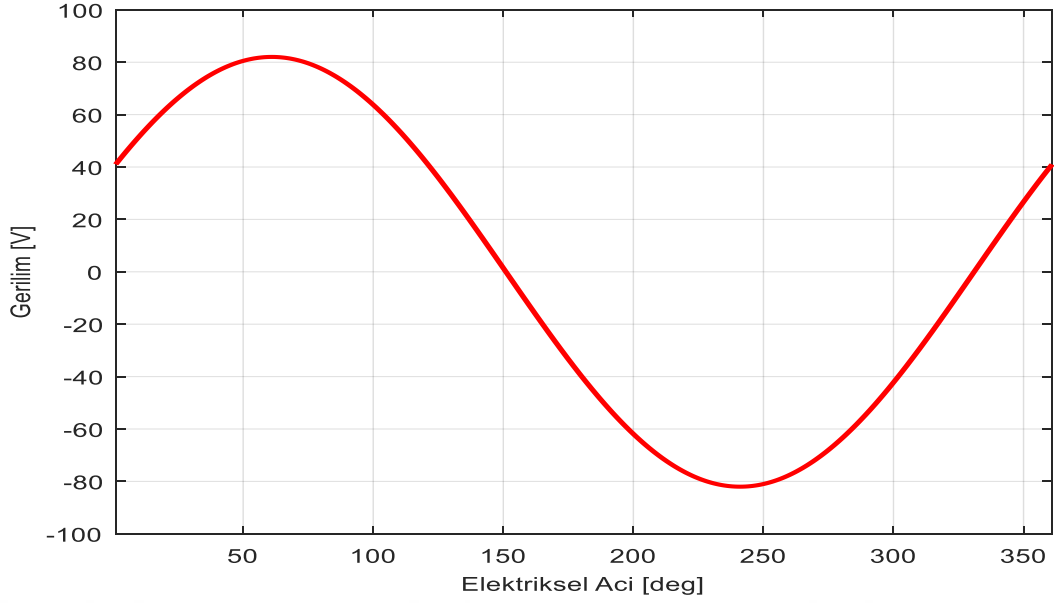
**Tablo 4. 2** Yüklü çalışma koşullarında çıkış parametreleri

Parametre	Rmıprt
Hat ve faz akımları-RMS (A)	15,02
Faz gerilimi-RMS (V)	33,68
Armatür akım yoğunluğu (A/mm <sup>2</sup> )	5,1
Elektriksel yükleme (A/mm)	3,45
Çıkış gücü (W)	1501,38
Giriş gücü (W)	1686,99
Verim (%)	88,99
Senkron hız (d/dak)	450
Nominal moment (Nm)	35,79

Referans SMSG'nin 450 d/dak hız ve 35,79 Nm moment koşullarında çalıştırılması durumunda generatörden 15,02 A değerinde akım çekilmekte ve faz gerilimi 33,68 V değerinde elde edilmektedir. Yüklü çalışma koşullarında elde edilen çıkış değerleri incelendiğinde SMSG'nin yüzeysel (lineer) akım yoğunluğu değeri 3,45 A/mm ve sargılardaki akım yoğunluğu 5,1 A/mm<sup>2</sup> olarak elde edilmiştir. Bu değerler döner elektrik makinaları için belirlenen sınır değerlerinin içindedir [32]. Anma yükteki faz akımlarına ilişkin akım eğrisi Şekil 4.4'te ve faz-faz gerilimine ilişkin eğri Şekil 4.5'te verilmiştir.



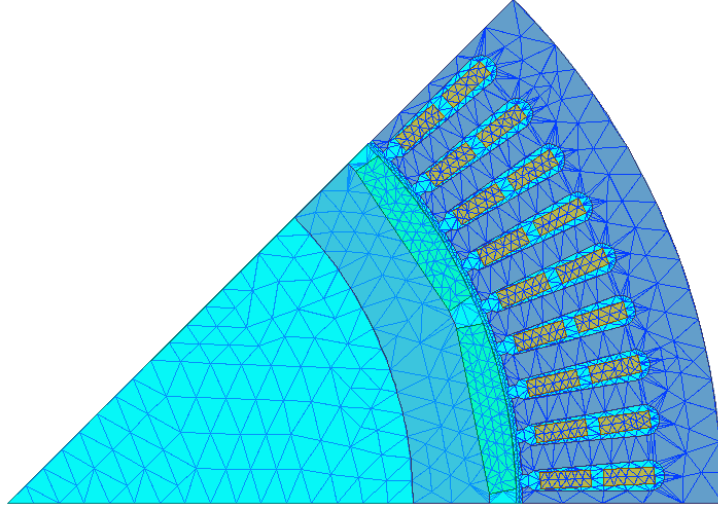
**Şekil 4. 4** Anma yükte faz akımları



**Şekil 4. 5** Anma yükte faz-faz gerilimi

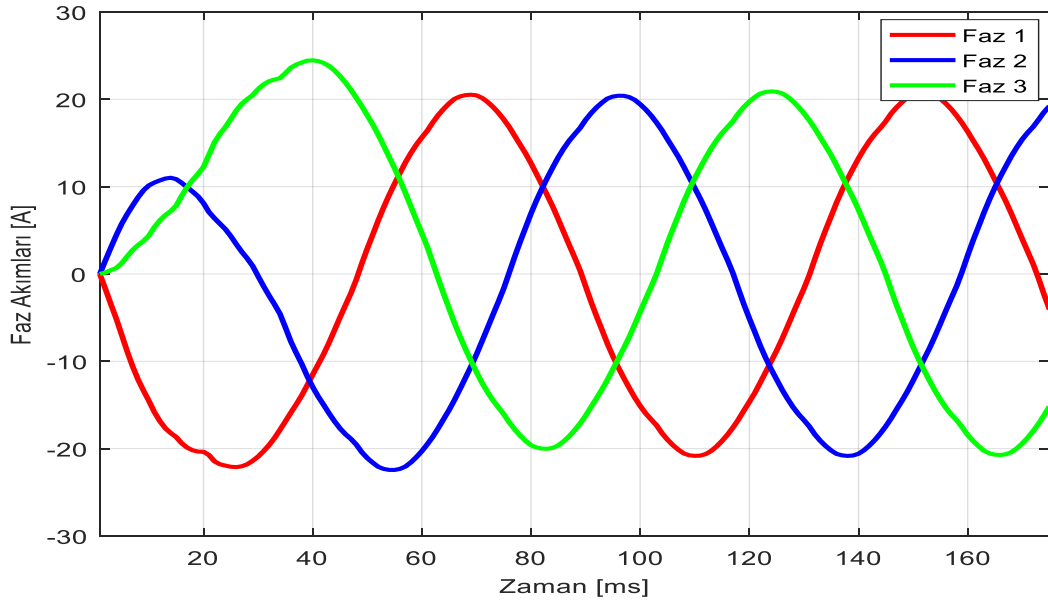
#### **4.2. Referans SMSG'nin Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları**

ANSYS Electronics Desktop yazılımının Rmxprt aracı ile analitik olarak hesaplanan makina çıkış parametreleri, bu bölümde ANSYS-Maxwell 2D yazılımı ile sonlu elemanlar yöntemi temel alınarak analiz edilmiştir. ANSYS Electronics Desktop yazılımının Maxwell aracında, analizi yapılacak olan elektrik makinasının dönme hızı tanımlanır. Analizin gerçekleştirilmesi istenilen zamanda, manyetik akı değerleri sonlu elemanlar yöntemine göre hesaplanarak makinanın gerilim, akım, moment gibi parametrelerinin değerleri bulunur. Bu hesaplamaların yapılabilmesi için makina geometrisi üçgen şeklindeki ağ parçalarına ayrılır. Makinanın hava aralığı gibi kritik noktaları daha sık parçalara ayrılırken, oluşturulan parça sayısı bir analiz süresini etkileyebilen unsur olmaktadır. Referans generatörün 2 boyutlu modelinde oluşturulan ağ yapısına ilişkin görsel Şekil 4.6'da verilmiştir.



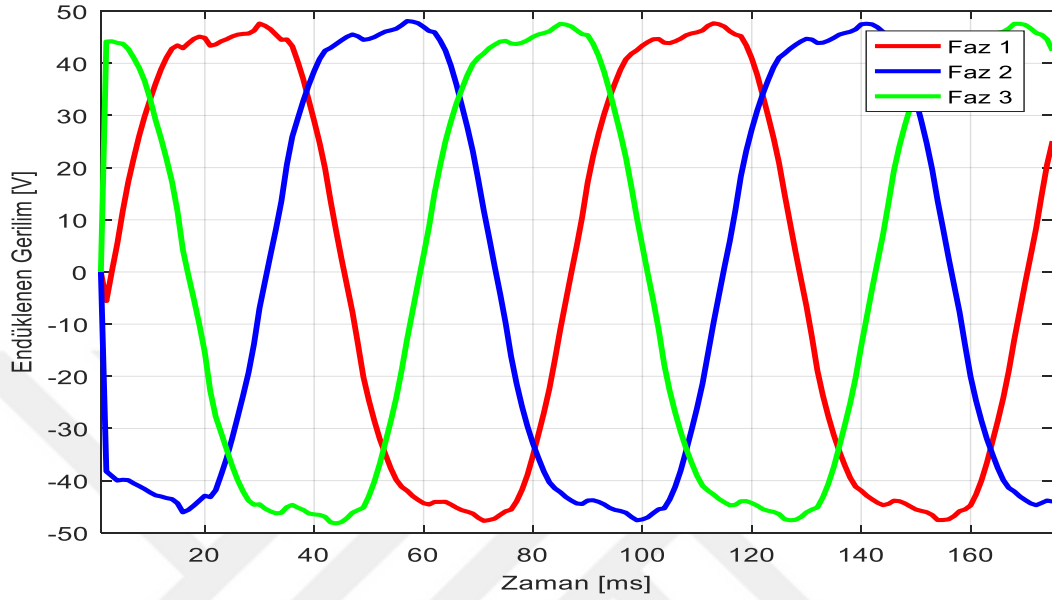
**Şekil 4. 6** Referans generatöre ilişkin ağ yapısı

ANSYS Electronics Desktop yazılımı, generatör modunda çalışan elektrik makinalarının analizinde sonsuz şebeke ve şebekeden bağımsız olmak üzere iki tip yük seçeneği sunmaktadır. Bu kısımda referans generatörün şebeke bağlantılı olarak çalışması durumundaki analizler yapılmıştır. SMSG'nin sonsuz şebeke yükündeki Maxwell yazılımı ile yapılan iki boyutlu analiz sonuçlarında elde edilen faz akımları grafiği Şekil 4.7'de verilmiştir. Analiz sonuçlarında generatör faz akımları tam yükte yaklaşık 14,5 A değerindedir. Bu değer, Rmxprt programında anma yüklü çalışma koşullarında alınan değerden %3,4 daha düşük bulunmuştur.



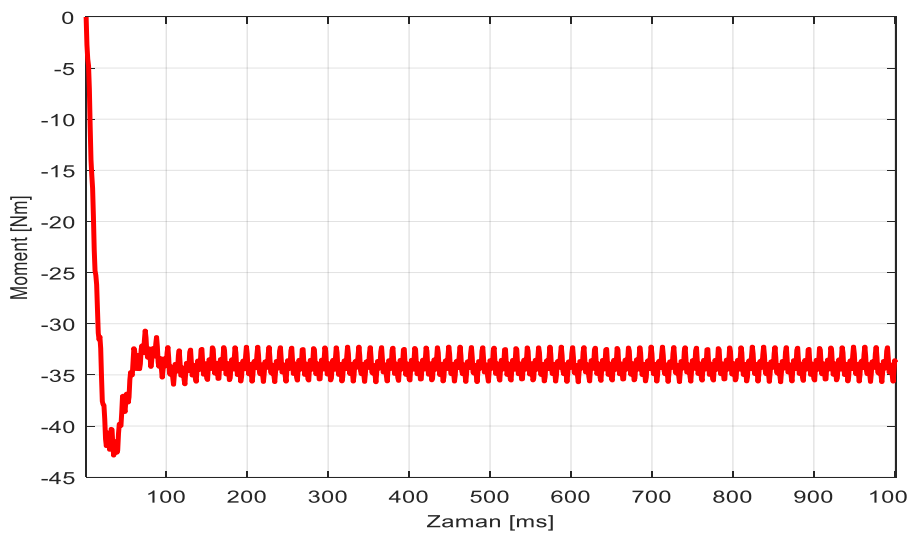
**Şekil 4. 7** Tam yükte faz akımlarının grafiği

Faz sargılarında tam yüklü çalışma şartlarında endüklenen gerilime ilişkin Maxwell 2D analiz sonuçları Şekil 4.8’de verilmiştir. Endüklenen faz gerilimi yaklaşık 37,7 V olarak elde edilmiştir. Bu değer ile Rmxprt’de yapılan analitik hesaplama ile bulunan değer arasında yaklaşık %10’luk bir fark vardır.



**Şekil 4. 8** Tam yükte endüklenen faz gerilimleri grafiği

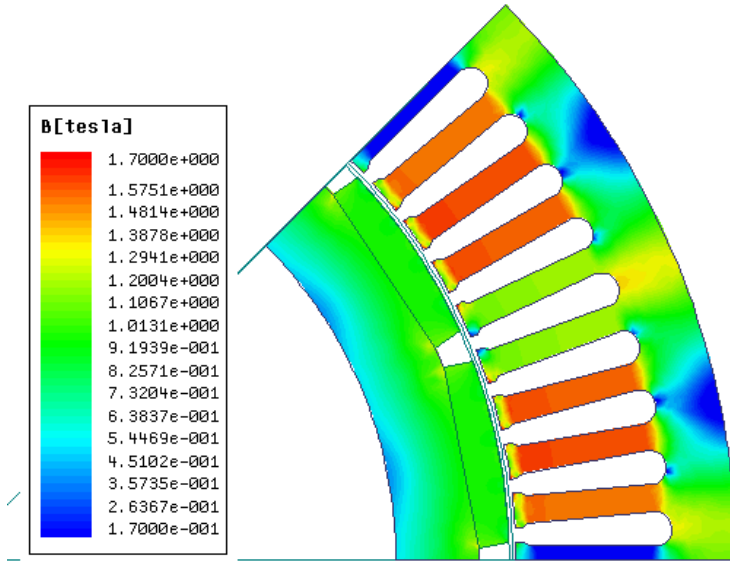
Tam yüklü işletme koşulları için moment grafiği Şekil 4.9’da verilmiştir. ANSYS-Maxwell 2D yazılımında bulunan moment değeri, Rmxprt’de elde edilen değerden yaklaşık %5’lik farkla 34,10 Nm değerinde bulunmuştur.



**Şekil 4. 9** Tam yükte moment grafiği

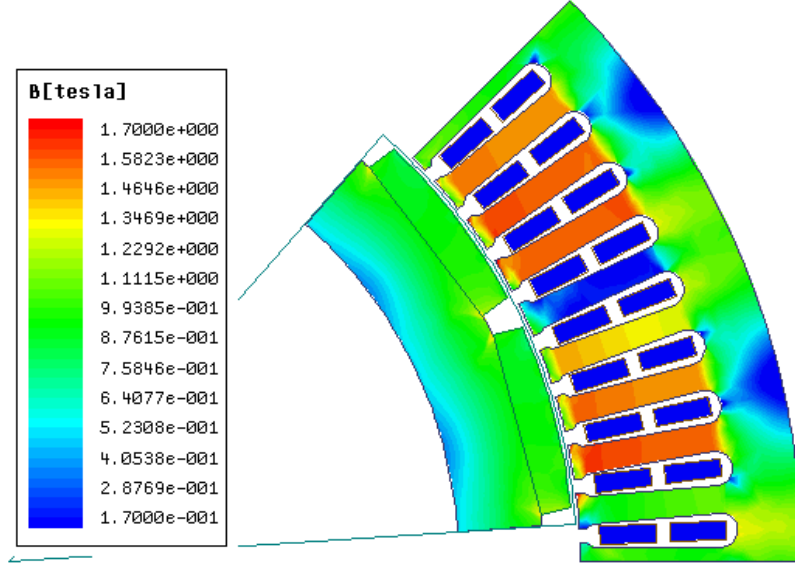
Makina tasarımı ve analizinde, makinanın hava aralığı, stator dişi, rotor ve stator boyunduruğu gibi kısımlardaki manyetik akı yoğunluğu ve manyetik akı çizgilerinin davranışı göz önünde bulundurulmalıdır. Makinanın farklı kısımlarında manyetik akı yoğunluğu değerlerinin belirli sınırlar içinde kalması ve manyetik akı çizgilerinin bir döngü şeklinde yolunu tamamlaması gerekmektedir. Sürekli mıknatıslı senkron makineler için deneysel çalışmalarla ortaya konulan manyetik akı yoğunluğu değerleri stator boyunduruğu için 1,5 T, stator dişleri için 2 T ve rotor boyunduruğu için 1,6 T'dır [19].

Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de referans generatörün sırasıyla yüksüz ve tam yükte çalışması durumundaki manyetik akı yoğunluğu dağılımı verilmiştir. Şekil 4.10'daki yüksüz çalışma koşulunda yapılan analiz sonucuna göre stator boyunduruğundaki manyetik akı yoğunluğu yaklaşık 1,2 T, stator dişlerinde 1,4 T ve rotor boyunduruğunda 0,7 T civarındadır. Şekil 4.11'deki yüklü çalışma koşulunda yapılan analiz sonucuna göre stator boyunduruğundaki manyetik akı yoğunluğu yaklaşık 1,25 T, stator dişlerinde 1,5 T ve rotor boyunduruğunda 1 T civarındadır. [19]'da verilen değerler ile kıyaslandığında referans generatörün hem boşta hem de yüklü çalışma koşullarında manyetik akı yoğunluğu sınır değerler dahilinde gerçekleşmektedir.



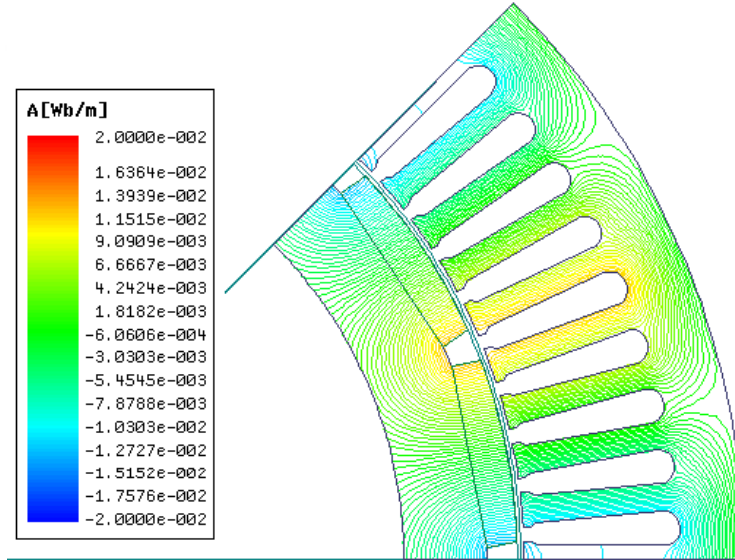
Şekil 4. 10 Boş çalışma koşulunda manyetik akı yoğunluğu dağılımı



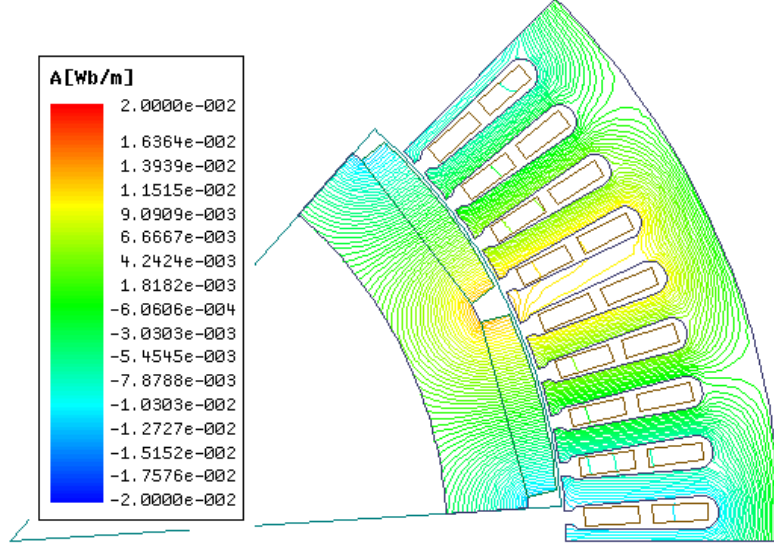


**Şekil 4. 11** Tam yüklü çalışma koşulunda manyetik akı yoğunluğu dağılımı

Şekil 4.12 ve Şekil 4.13’de sırasıyla boşa çalışma ve yüklü çalışma şartlarında referans generatörün manyetik akı çizgilerinin dağılımı verilmiştir. Bu şekillerde, akı çizgilerinin izlediği yol incelendiğinde bir kısım manyetik akının tam döngüsünü tamamlayamadığı ve kaçak akı olarak kendini gösterdiği belirlenmiştir.

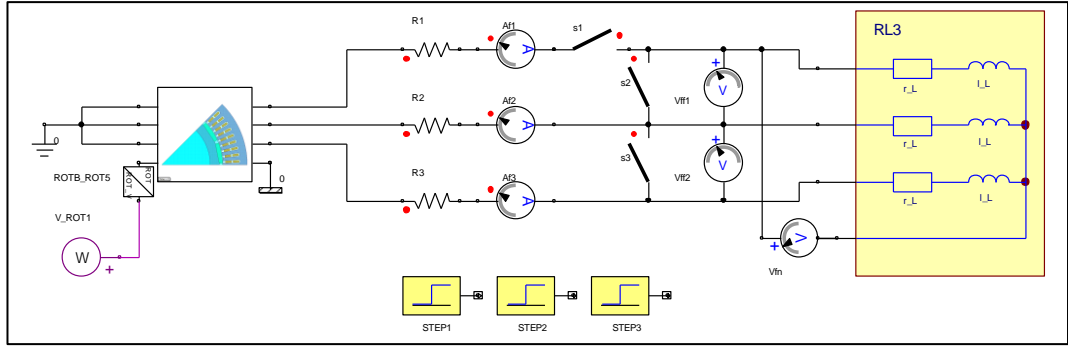


**Şekil 4. 12** Boş çalışma koşulunda manyetik akı çizgileri



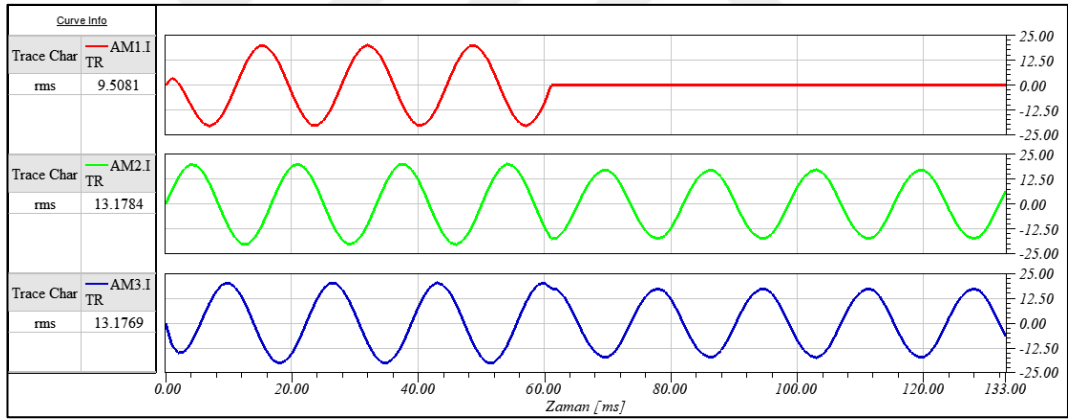
**Şekil 4. 13** Tam yüklü çalışma koşulunda manyetik akı çizgileri

ANSYS Electronics Desktop yazılımının Maxwell aracında gerçekleştirilen simülasyonlara ek olarak ANSYS Electronics Desktop yazılımının Simplorer aracı kullanılarak generatörün farklı yük koşulları altındaki ve arıza durumlarındaki davranışını incelemek mümkündür. Referans generatörün Maxwell 2D modeli temel alınarak oluşturulan Simplorer modelinin girişine dönme hızını tanımlayan ve VROT olarak modelde gösterilen mekanik dönme kuvveti, çıkışına da RL olarak modelde gösterilen yük grupları yerleştirilerek analizler gerçekleştirilebilmektedir. Generatör sargı dirençlerinin R ile temsil edilen modelde, akım ve gerilim ölçümleri için ampermetre ve voltmeter bulunmaktadır. Ayrıca, generatör için uygulanacak arıza senaryolarında kullanılmak üzere anahtarlar ve bu anahtarları tetikleyecek olan step (adım) fonksiyonları yer almaktadır. Bu tez çalışması kapsamında referans olarak kullanılan generatörün kısa devre ve açık devre arıza durumlarındaki davranışının incelenmesi için ANSYS Electronics Desktop yazılımının Simplorer aracı kullanılmıştır. ANSYS Electronics Desktop yazılımının Maxwell aracında oluşturulan model, Simplorer aracına aktarılarak bir faz açık devre ve fazlar arası kısa devre senaryoları incelenmiştir. Kullanılan Simplorer modeli Şekil 4.14’de verilmiştir.

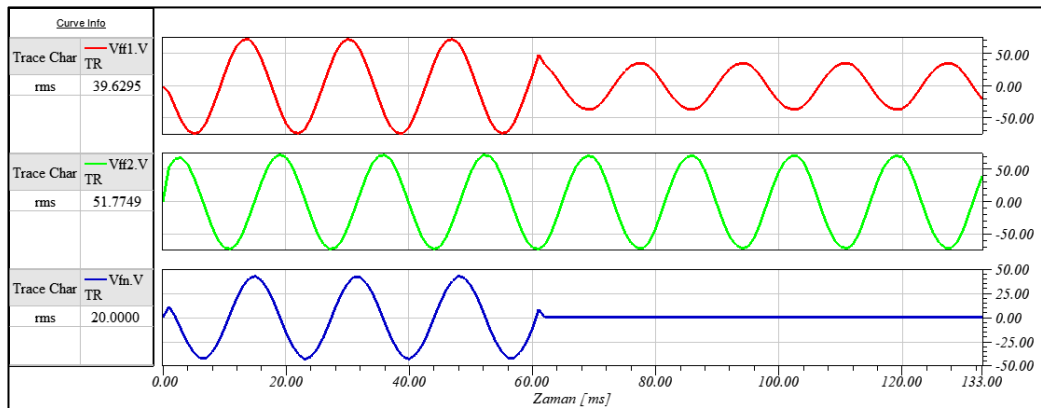


**Şekil 4. 14** ANSYS-Simplorer model

Açık devre arıza senaryosu, Şekil 4.14’de verilen modeldeki S2 ve S3 anahtarlarının analiz boyunca sürekli açık olması; S1 anahtarının ise 60. milisaniyede açılması sağlanarak gerçekleştirilmiştir. Anahtarların davranışı zamana bağlı olarak adım (step) blokları kullanılarak kontrol edilmiştir. Bir fazın açık devre olduğu arıza durumundaki faz akımlarına ait akım grafikleri Şekil 4.15’de; faz ve hat gerilimlerine ilişkin gerilim grafikleri Şekil 4.16’da verilmiştir.

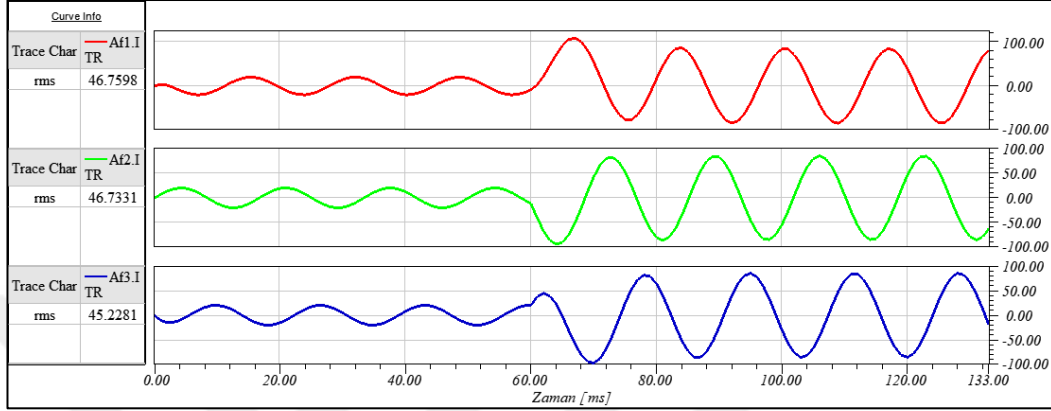


**Şekil 4. 15** Bir faz açık devre arıza durumundaki faz akımları grafiği

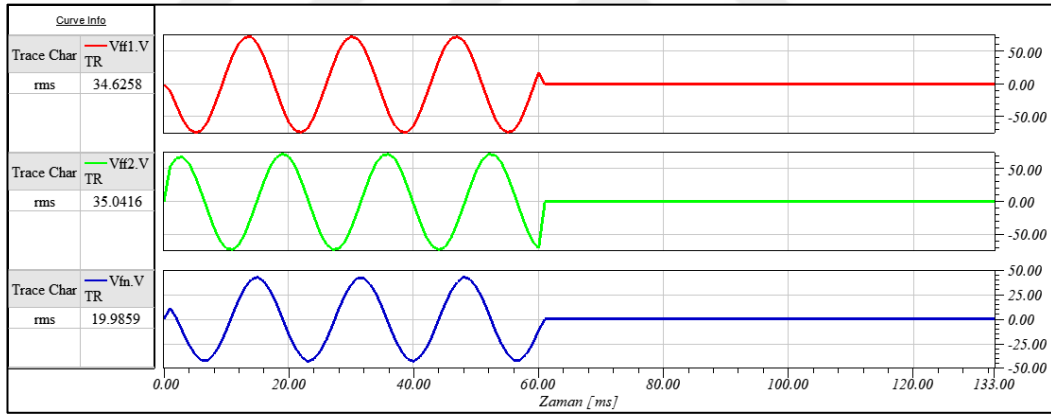


**Şekil 4. 16** Bir faz açık devre arıza durumundaki gerilim eğrileri

Kısa devre arıza senaryosu, Şekil 4.14’de verilen modeldeki S1 anahtarının analiz boyunca sürekli kapalı olması; açık olan S2 ve S3 anahtarlarının ise 60. milisaniyede kapanması sağlanarak gerçekleştirilmiştir. Fazlar arası kısa devre arızası olduğu durumdaki faz akımlarına ait akım grafikleri Şekil 4.17’de; faz ve hat gerilimlerine ilişkin gerilim grafikleri Şekil 4.18’de verilmiştir.



Şekil 4. 17 Fazlar arası kısa devre arızası durumdaki faz akımları grafiği



Şekil 4. 18 Fazlar arası kısa devre arızası durumdaki gerilim eğrileri

Yapılan kısa devre simülasyonuna ilişkin grafikler incelendiğinde, arızanın gerçekleştirildiği 60. ms anında faz akımları aniden yükselerek yaklaşık altı katına çıkarken, faz ve hat gerilimleri sıfıra düşmüştür. Bir fazın açık devre edildiği simülasyonun sonucunda, faza ait akım değeri ve faz gerilimi sıfırlanmıştır.

### 4.3. Referans SMSG ile Yapılan Deneyler

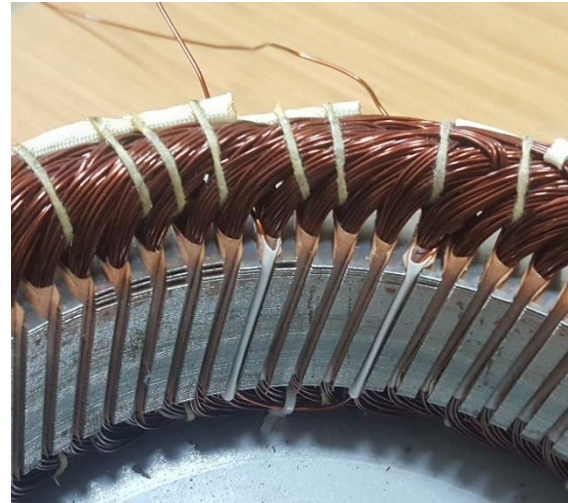
Referans olarak kullanılan SMSG ile Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesindeki Elektrik Makinaları laboratuvarında deney düzeneği

hazırlanarak çeşitli ölçümler yapılmıştır. Yapılan ölçümlerde makinanın yüklü ve yüksüz çalışma şartlarındaki karakteristiği incelenmiştir.

Yapılan deneylere ilave olarak SMSG'nin bir iletkeninde ve bir sarımında endüklenen gerilimleri inceleyebilmek için makinanın stator oluklarına ek iletkenler yerleştirilmiş ve uçları makinanın dışına taşınmıştır. Bir iletkende yapılacak ölçümler için eklenen iletkenle ilişkin görseller Şekil 4.19'da; bir sarımdaki ölçümler için yapılan iletken ilavesine ilişkin görseller de Şekil 4.20'de verilmiştir. Şekil 4.21'de, ilave iletkenlerin SMSG'nin faz sargılarıyla beraber makina dışına alınmasına ilişkin görsel yer almaktadır.



**Şekil 4. 19** Bir iletkendeki ölçümler için yerleştirilen ek iletken

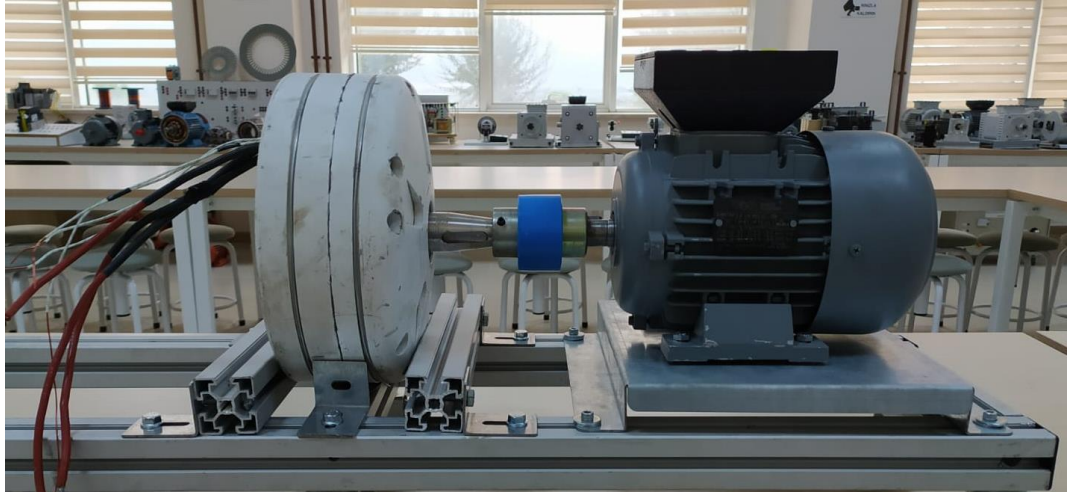


**Şekil 4. 20** Bir sarımdaki ölçümler için yerleştirilen ek iletken



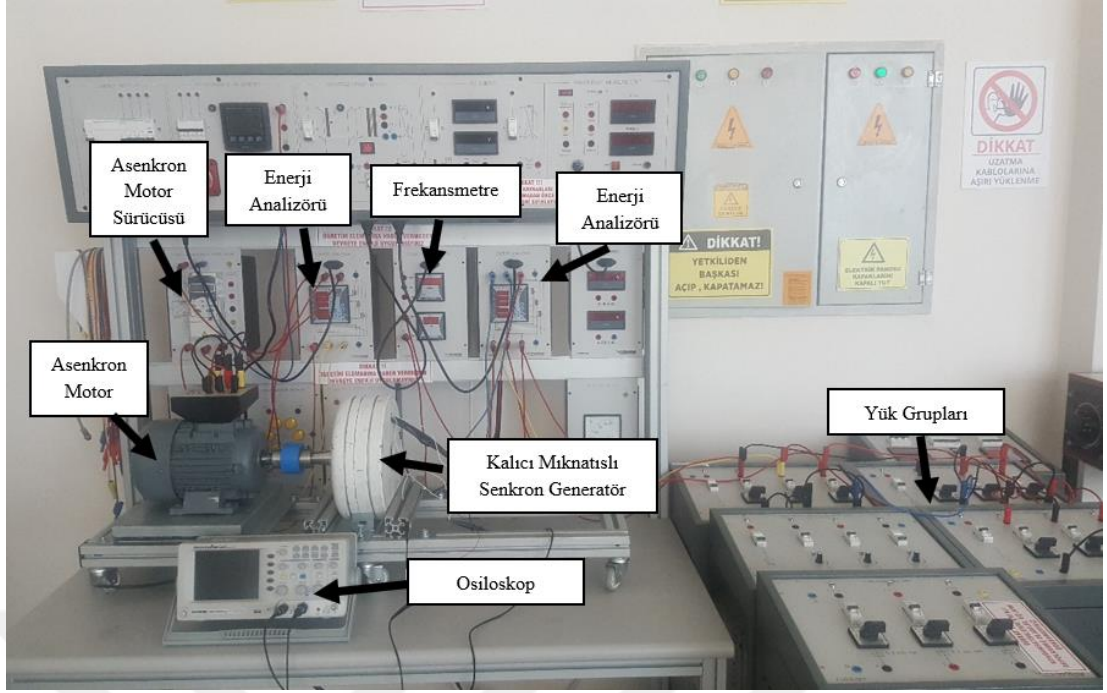
**Şekil 4. 21** İletkenlerin makina dışına alınması

Ek iletkenler yerleştirildikten sonra referans SMSG kapatılarak deney düzeneği hazırlanmıştır. Kurulan deney düzeneğinde SMSG'nin tahrik edilmesi için 4 kutuplu, 1,1 kW gücünde bir asenkron motor kullanılmıştır. Şekil 4.22'de verilen deney düzeneğinde görüldüğü gibi referans SMSG ve asenkron motor hizalanarak akuple bağlanmış ve titreşimlerden etkilenmemesi için SMSG etrafına yerleştirilen destekler ve profiller ile deney düzeneğine sabitlenmiştir.

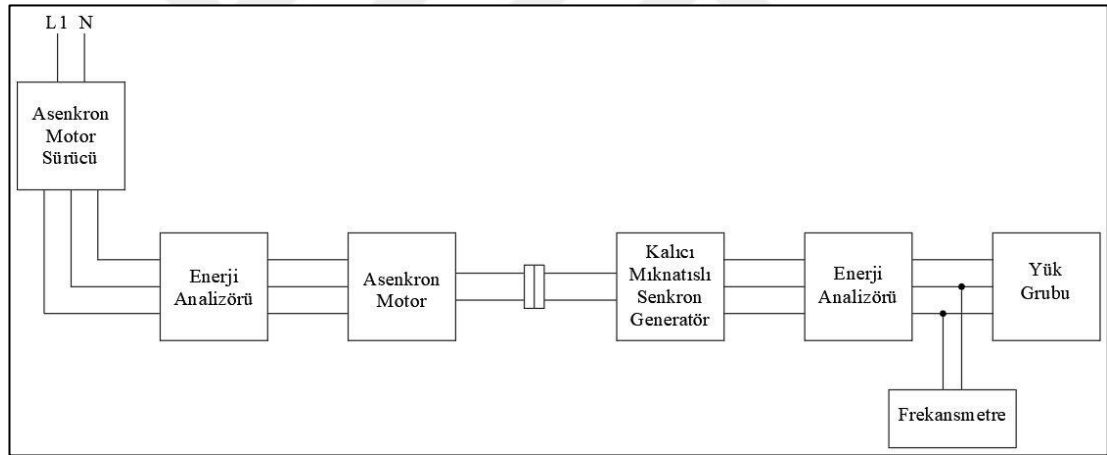


**Şekil 4. 22** SMSG ve asenkron motor yerleşimi

SMSG'nin tahrik edilmesinde kullanılacak olan asenkron motorun hızı AC motor sürücüsü üzerinden kontrol edilmiştir. Motor sürücüsü bir faz üzerinden beslenip üç faz olarak asenkron motora bağlantı sağlanmıştır. Elektriksel bağlantıları yapılan deney düzeneğine ilişkin görsel Şekil 4.23'de, deney bağlantı şeması ise Şekil 4.24'de verilmiştir. SMSG'nin farklı işletme koşulları için elde edilen değerler osiloskop üzerinden takip edilip kayıt edilmiştir.



Şekil 4. 23 Deney düzeneği



Şekil 4. 24 Deney bağlantı şeması

Hazırlanan test düzeneği ile referans generatörün stator sargı direnci ölçümü, açık devre (boşta çalışma), kısa devre, yüklü çalışma ve ani yüklü çalışma deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler ile sürekli mıknatıslı senkron generatörün karakteristiklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

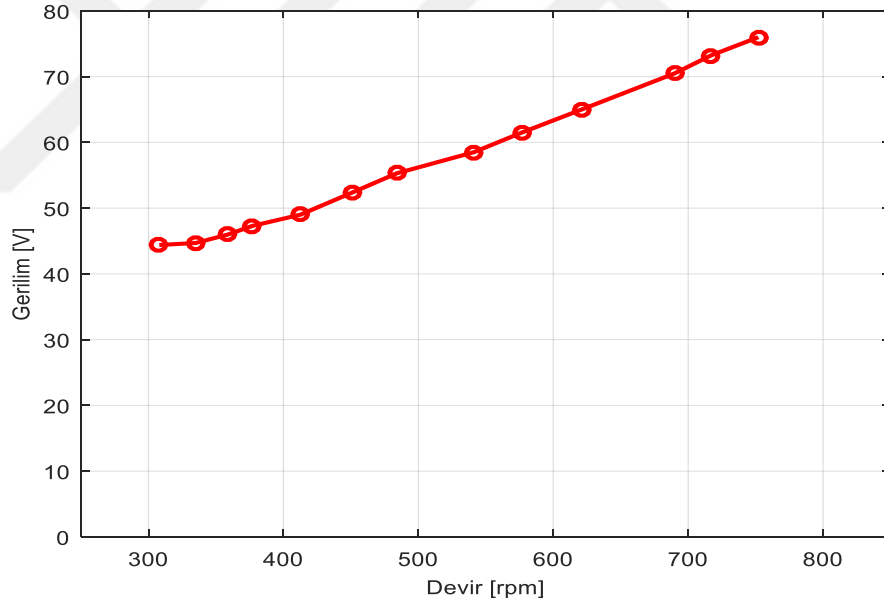
#### 4.3.1. Sargı Direnci Deneyi

Elektrik makinalarında meydana gelen elektriksel kayıpların hesaplanmasında ihtiyaç duyulan direnç değeri, yapılan sargı direnci deneyi ile bulunmaktadır. Sürekli mıknatıslı senkron generatörün sargı direnci deneyinde, iki stator sargısına kademeli

olarak gerilim uygulanıp, sargılar üzerinde akan akım kaydedilmiştir. Deney sonucunda 25°C'deki sargıların DC direnç değeri 0,42 ohm olarak bulunmuştur.

#### 4.3.2. Açık Devre (Boşta Çalışma) Deneyi

SMSG'nin yüksüz (boşta) çalışma şartlarındaki karakteristiğini çıkarmak için yapılan deneyde farklı hız koşullarında stator sargıları arasındaki uç gerilimleri bulunmuştur. SMSG'nin tahrik edilmesi için kullanılan asenkron motorun hızı AC motor sürücüsü üzerinden kontrol edilip, gerilim değerleri deney setindeki enerji analizörü üzerinden takip edilmiştir. SMSG'nin 300 d/dak ile 750 d/dak arasındaki devirlerde elde edilen gerilim değerlerine göre oluşturulan açık devre deneyi grafiği Şekil 4.25'de verilmiştir. Şekil incelendiğinde, SMSG'nin yüksüz işletme koşullarında hız ve gerilim parametreleri arasında lineer bir ilişki olduğu görülmektedir. Referans SMSG'nin açık devre deneyinde generatörün devir sayısına bağlı olarak gerilim değeri yaklaşık 45 V ile 75 V arasında değerler almıştır.

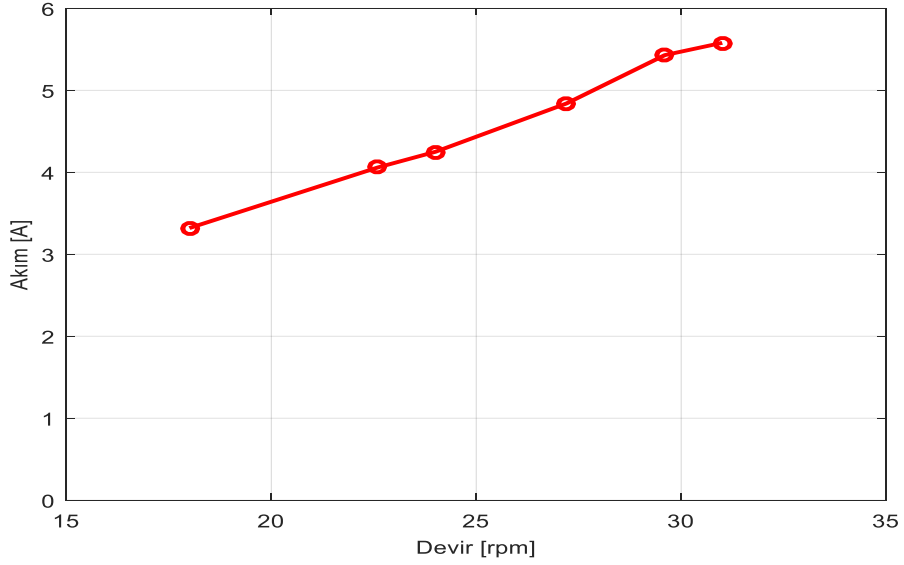


Şekil 4. 25 Referans SMSG'nin açık devre karakteristiği

#### 4.3.3. Kısa Devre Deneyi

Referans SMSG ile kısa devre deneyi yapılarak rotorun kilitli olduğu durumda generatör karakteristiğinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, stator sargıları deney düzeneği üzerinden kısa devre edilip, devir sayısına bağlı olarak devrede akan kısa devre akım değerleri ölçülmüştür. Yapılan deney sonucunda generatöre ilişkin elde edilen kısa devre deney sonucu Şekil 4.26'da verilmiştir.

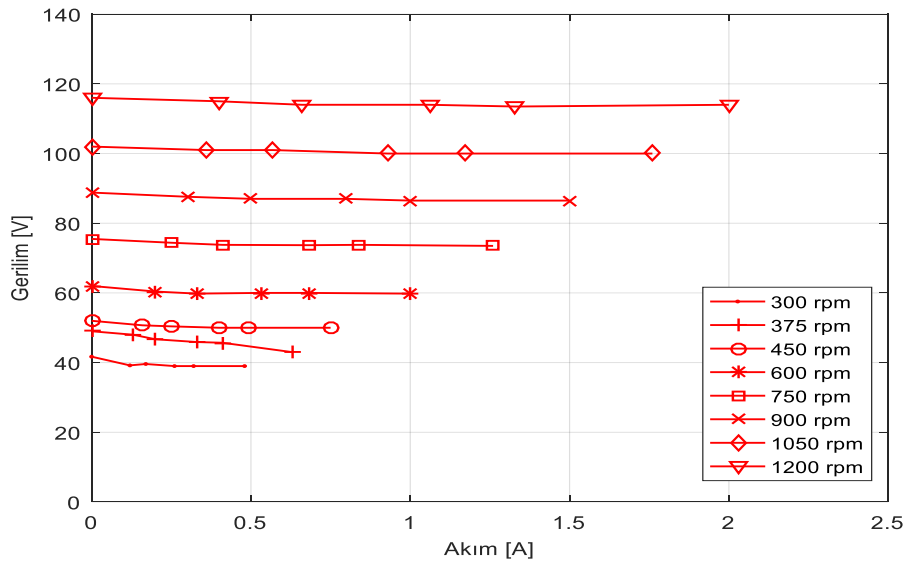




Şekil 4. 26 Referans SMSG'nin kısa devre karakteristiği

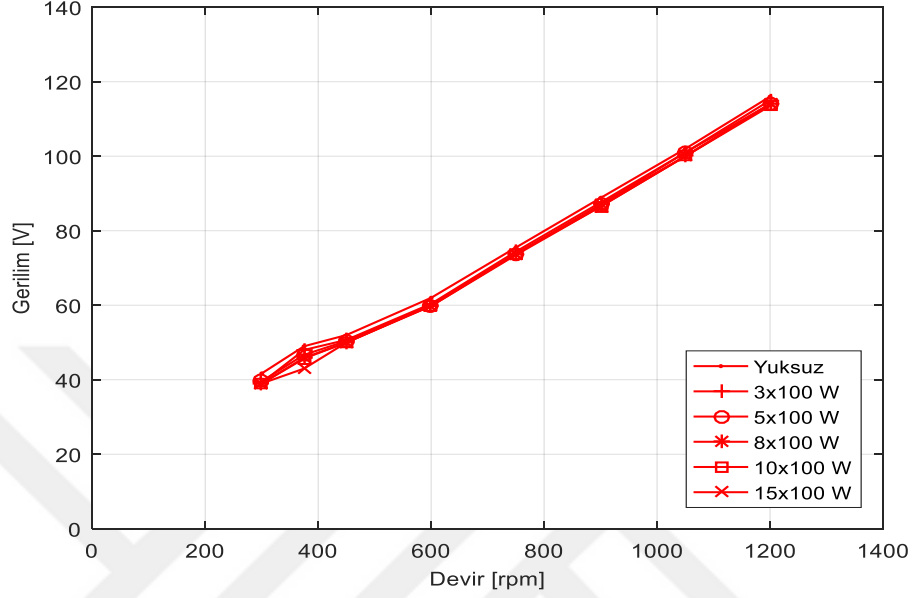
#### 4.3.4. Yüklü Çalışma Deneyi

Deney düzeneğinde bulunan yük gruplarının devreye alınmasıyla, referans SMSG'nin yüklü çalışma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylerde yük kademesine bağlı olarak akım, gerilim ve devir sayısı incelenmiştir. Yüklü çalışma deneylerinde alınan sonuçlara göre sabit devirde yük değişimine bağlı olarak elde edilen akım-gerilim grafiği Şekil 4.27'de verilmiştir. Aynı devir sayıları için eğriler incelendiğinde, deney düzeneğinden kaynaklı olarak generatörün yeteri kadar yüklenemediği için V-I karakteristiğinin sabit uç gerilimi şeklinde davrandığı görülmektedir.



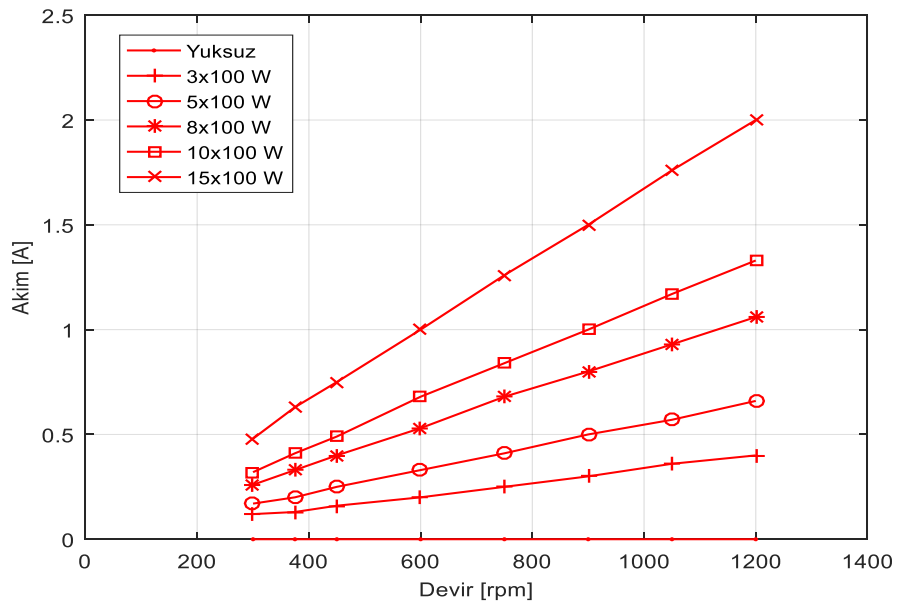
Şekil 4. 27 Sabit hızda farklı yük kademeleri için V-I grafiği

Farklı ohmik yüklerde devir sayısına bağlı uç gerilimi grafiği Şekil 4.28’de verilmiştir. Bu grafik ile aynı yük koşulu için uç geriliminin hıza bağlı olarak gösterdiği davranış incelenmiştir. Bu grafikte, aynı yük şartı için devir sayısı arttıkça endüklenen uç gerilimi değerinin arttığı görülmektedir.



**Şekil 4. 28** Farklı ohmik yüklerde devir sayısına bağlı uç gerilimi grafiği

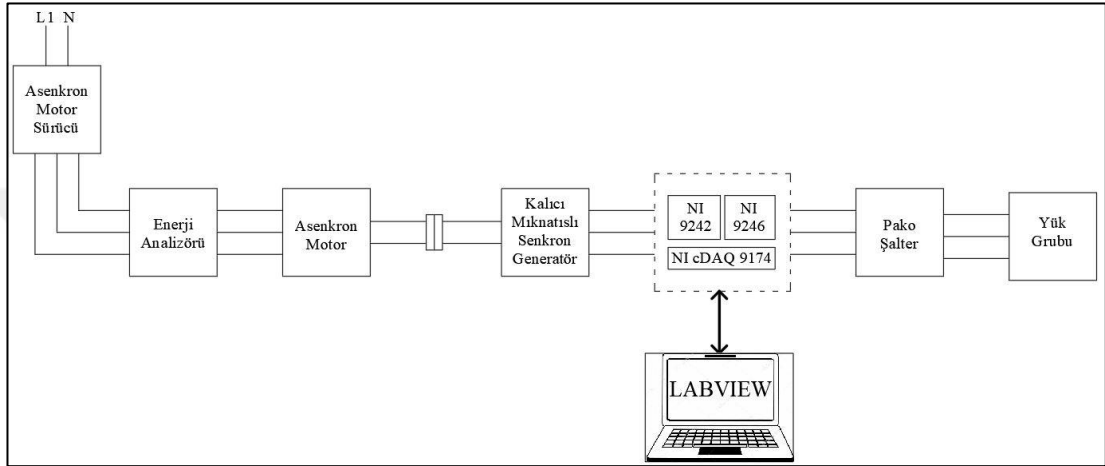
Yüklü çalışma koşullarında yapılan bir diğer deneyde sabit yük koşulunda akımın devir sayısına bağlı davranışı incelenmiştir. Yapılan deneyde elde edilen farklı ohmik yükler için devir sayısına bağlı akım grafiği Şekil 4.29’da verilmiştir.



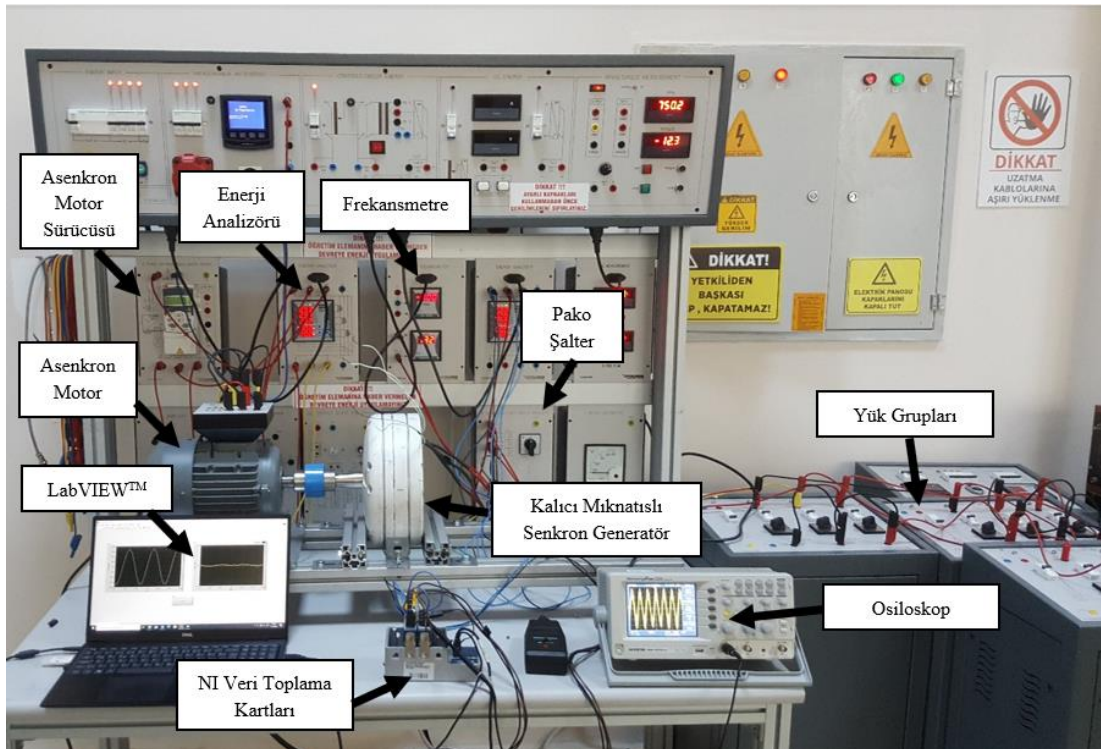
**Şekil 4. 29** Farklı ohmik yüklerde devir sayısına bağlı akım grafiği

### 4.3.5. Ani Yüklü Çalışma Deneyi

Kurulan deney düzeneği üzerinden son olarak ani yükleme deneyi yapılmıştır. Şekil 4.30'da bağlantı şeması ve Şekil 4.31'de deney düzeneği verilen ani yükleme deneyindeki ölçümlerde National Instruments (NI) firmasının veri toplama kartları kullanılmıştır. NI9242 modülü üzerinden gerilim, NI9246 modülü üzerinden de akım sinyalleri toplanarak, LabVIEW™ yazılımı kullanılarak bu sinyaller bilgisayar ortamına aktarılmıştır.

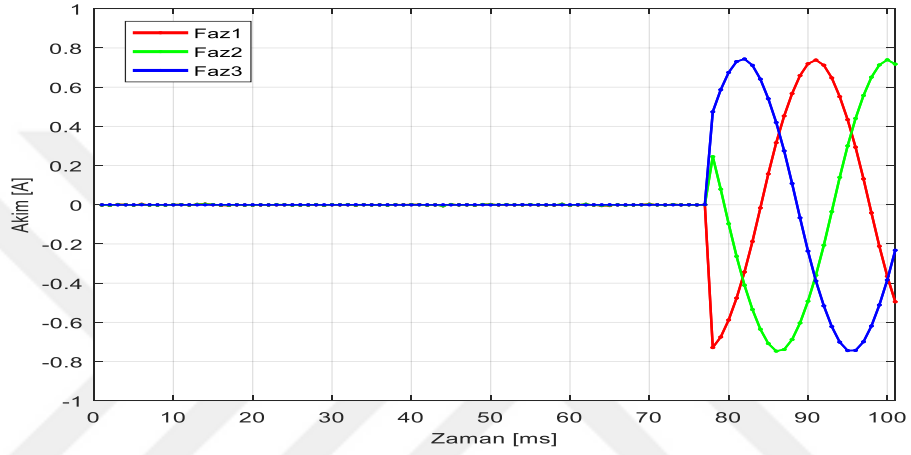


Şekil 4. 30 Ani yükleme deneyi bağlantı şeması

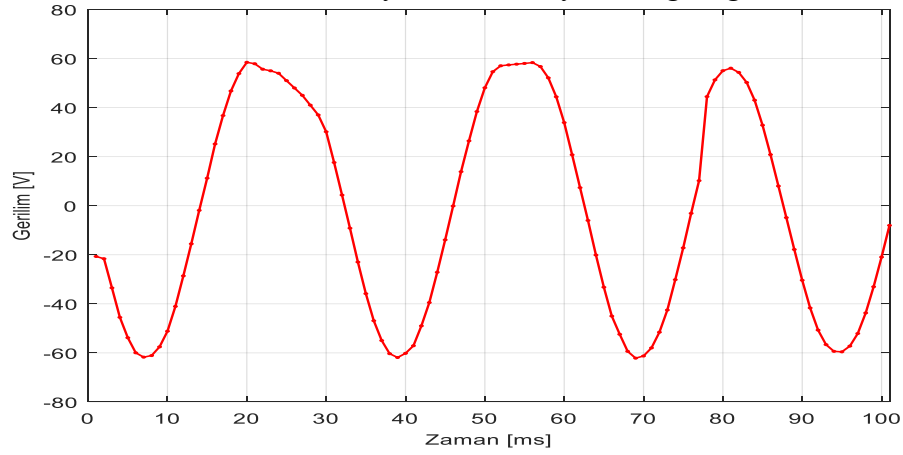


Şekil 4. 31 Ani yükleme deneyi düzeneği

Ani yükleme deneyinde, yükler bir pako şalter üzerinden generatöre bağlanmıştır ve farklı devir sayılarında yükler ani olarak devreye alınarak deney gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.32’de 450 d/dak hızda dönen referans SMSG ile gerçekleştirilen ani yükleme deneyine ilişkin akım sinyallerine; Şekil 4.33’de ise gerilim sinyallerine ilişkin eğriler verilmiştir. Akım grafiğinde deneyin 77. milisaniyesinde tüm yük gruplarının devreye alınmasıyla akım değerinin aniden yükseldiği; gerilim grafiğinde ise yüklerin devreye alındığı andan sonra gerilim değerinin azaldığı görülmektedir.



Şekil 4. 32 Ani yükleme deneyi akım grafiği

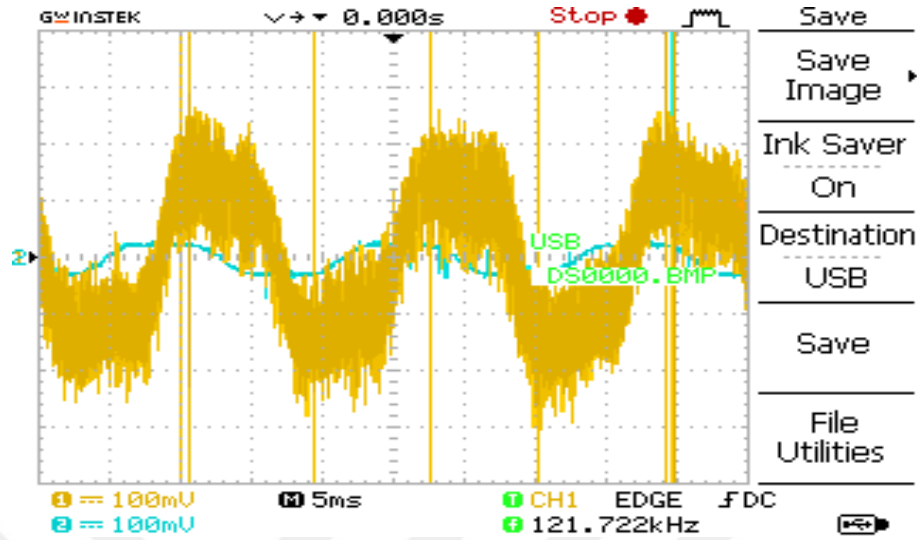


Şekil 4. 33 Ani yükleme deneyi gerilim grafiği

#### 4.3.6. Bir İletken ve Bir Sarımda Endüklenen Gerilimlerin Ölçülmesi

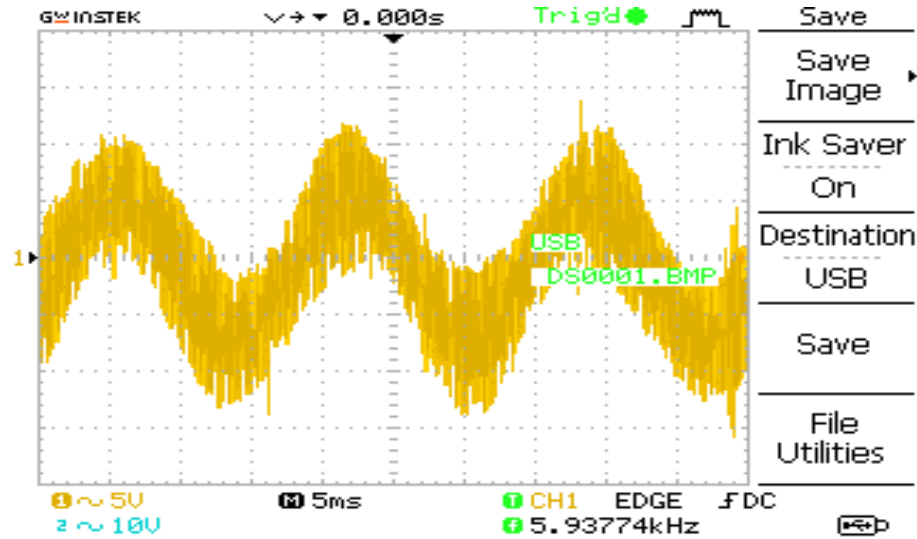
Kurulan deney düzeneği ile yapılan bir diğer çalışmada, stator sargılarına ilave edilen iletkenler üzerinden bir iletken ve bir sarımda endüklenen gerilim dalgaları incelenmiştir. Şekil 4.34’de osiloskobun 2. kanalından okunan bir iletkende

endüklenen gerilim mavi renkli; osiloskobun 1. kanalından okunan bir sarımda endüklenen gerilim de sarı renkli olarak gösterilmiştir.



Şekil 4. 34 Bir iletken ve sarımda endüklenen gerilim

Şekil 4.35’de yüksüz çalışma koşulunda statorun iki faz sargısı arasında ölçülen gerilim dalga şekli verilmiştir. Yapılan ölçüm esnasında osiloskop probu x10 ayarında olup, uç gerilimi rms değeri yaklaşık 60 V olarak ölçülmüştür. Bu değer, Rmxprt’de elde edilen değerden yaklaşık %9 daha azdır.

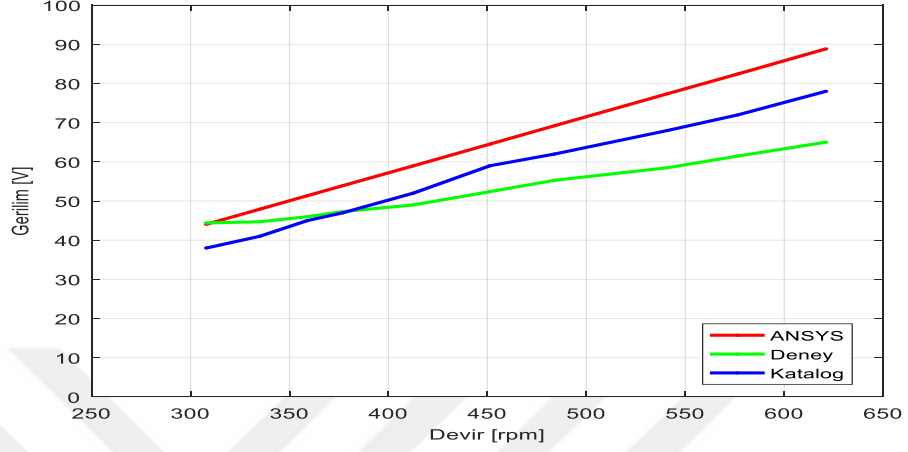


Şekil 4. 35 İki faz iletkeni arasındaki uç gerilim

#### 4.4. Katalog, Yazılım ve Deney Sonuçlarının Kıyaslanması

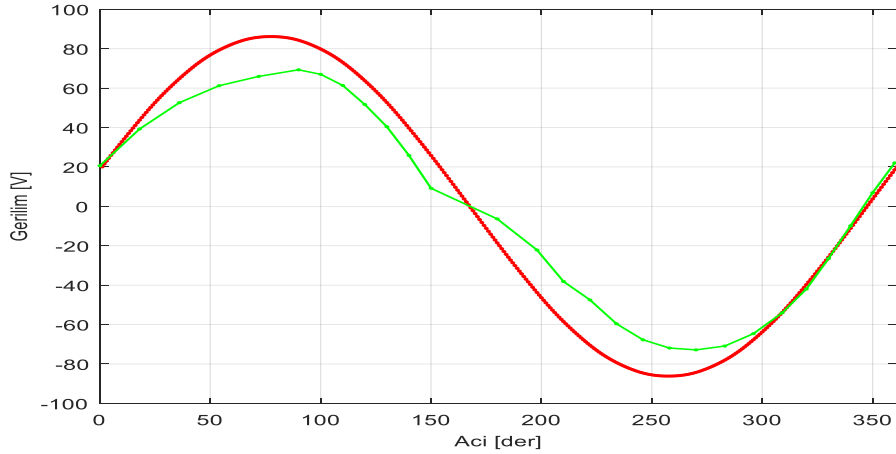
Referans olarak kullanılan generatörün üretici kataloğundaki açık devre değerlerinin, yapılan deneylerden ve ANSYS Electronics Desktop yazılımından elde

edilen sonuçlar ile kıyaslandığı grafik Şekil 4.36’da verilmiştir. Deney sonuçları ile katalog verileri ve ANSYS Electronics Desktop yazılımında elde edilen sonuçlar arasındaki farkın mıknatıs kuvvetinde zaman içinde oluşan farktan dolayı gerçekleşmiş olabileceği düşünülmektedir [33].



**Şekil 4. 36** Kıyaslamalı boşa çalışma sonuçları

Şekil 4.37’de 450 d/dak devirde döndürülen SMSG’nin yüksüz çalışma koşulunda alınan ölçümlerde elde edilen uç gerilim eğrisi ile ANSYS Electronics Desktop yazılımından elde edilen eğri kıyaslanmıştır. Bu şekilde görüleceği gibi deneysel ölçümlerle ANSYS verileri yaklaşık olarak örtüşmektedir.



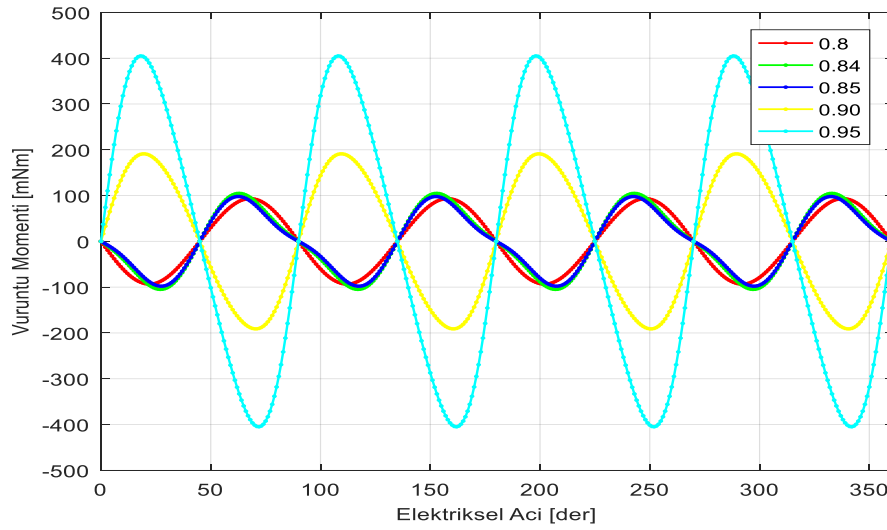
**Şekil 4. 37** 60 Hz için boşa çalışma uç gerilimlerin kıyaslaması

#### 4.5. Manyetik Devre Parametrelerinin SMSG Başarımına Etkileri

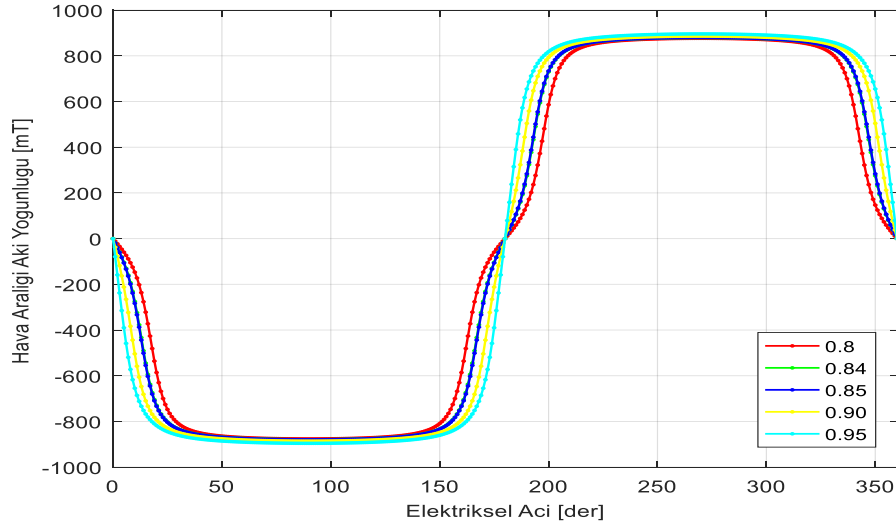
Bu bölümde, referans olarak kullanılan SMSG’nin manyetik devre parametrelerinde yapılacak değişimlerin makina başarım parametrelerinden olan vurutu momenti, hava aralığı akı yoğunluğu ve verim üzerindeki etkileri

incelenmiştir. Vuruntu momenti, SMSG'nin yüksüz çalışma koşulunda stator olukları ile mıknatıslar arasındaki etkileşimden dolayı ortaya çıkan moment bileşenidir. Vuruntu momenti, düşük hızlarda rotorun dönmesini engelleyebilen bir etki gösterdiği için makina tasarımı sırasında bazı yaklaşımlar uygulanarak etkisi azaltılmaya çalışılmaktadır. Diğer taraftan elektrik makinalarının hava aralığı akı yoğunluğu ve verim değeri tasarım ve analizlerde dikkat edilen parametrelerdendir. Manyetik devre parametrelerinden olan mıknatıs kutup yayının kutup adımına oranında, mıknatıs kalınlığında ve kullanılan mıknatıs türünde yapılacak değişikliklerin vuruntu momenti, hava aralığı akı yoğunluğu ve verim üzerindeki etkileri, ANSYS Electronics Desktop yazılımının Rmxprt aracı üzerinden incelenmiştir.

Mıknatıs kutup yayının kutup adımına oranının %80 ile %95 arasında değiştirilmesinin vuruntu momentine etkileri Şekil 4. 38'de verilmiştir. Kutup yayının kutup adımına oranındaki artışın vuruntu momentini genel olarak arttırdığı ve özellikle %90 ve %95 oranında vuruntu momentinin en yüksek değerlere ulaştığı görülmektedir. Diğer taraftan bu orandaki değişimin Şekil 4.39'da gösterilen hava aralığı akı yoğunluğu üzerindeki etkisi sınırları kalmış, kutup yay oranının artırılması verim değerini yaklaşık %2,5 azaltmıştır.

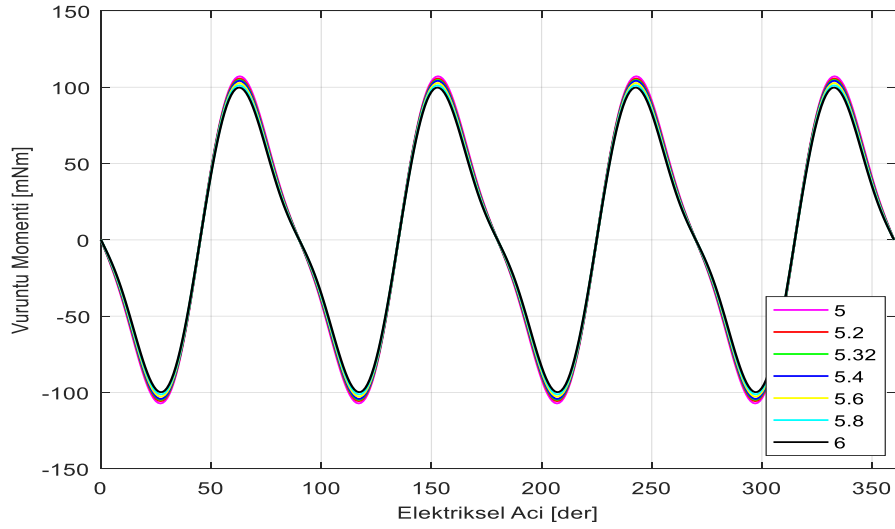


Şekil 4. 38 Kutup yay oranının vuruntu momentine etkileri



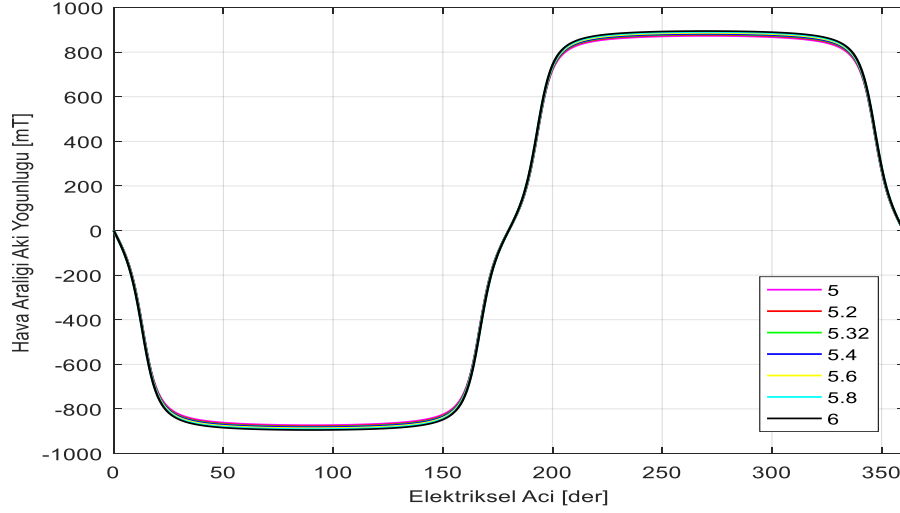
**Şekil 4.39** Kutup yay oranının hava aralığı akı yoğunluğuna etkileri

Bir diğer manyetik devre parametresi olan mıknatıs kalınlığı 5 mm ile 6 mm arasında değiştirilerek, vuruntu momenti grafiği Şekil 4.40'da verildiği gibi elde edilmiştir. Mıknatıs kalınlığı 5 mm'den 6 mm'ye çıkarılarak %20 arttırıldığında vuruntu momenti değeri yaklaşık %6,9 azalmıştır. Buna ek olarak, Şekil 4.41'de hava aralığı akı yoğunluğunun %2,5 arttığı görülmektedir. Mıknatıs kalınlığında yapılan artış SMSG'nin verim değerini yaklaşık %1,5 azaltmıştır.



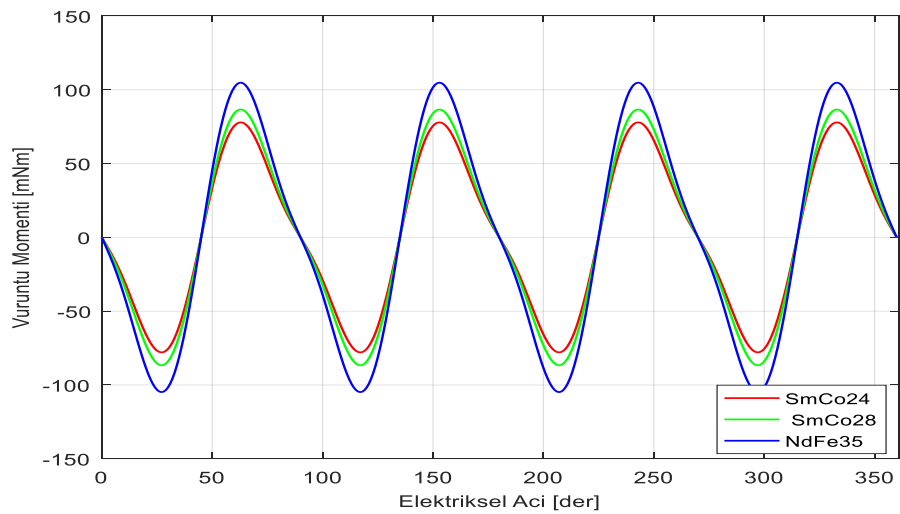
**Şekil 4.40** Mıknatıs kalınlığının vuruntu momentine etkileri



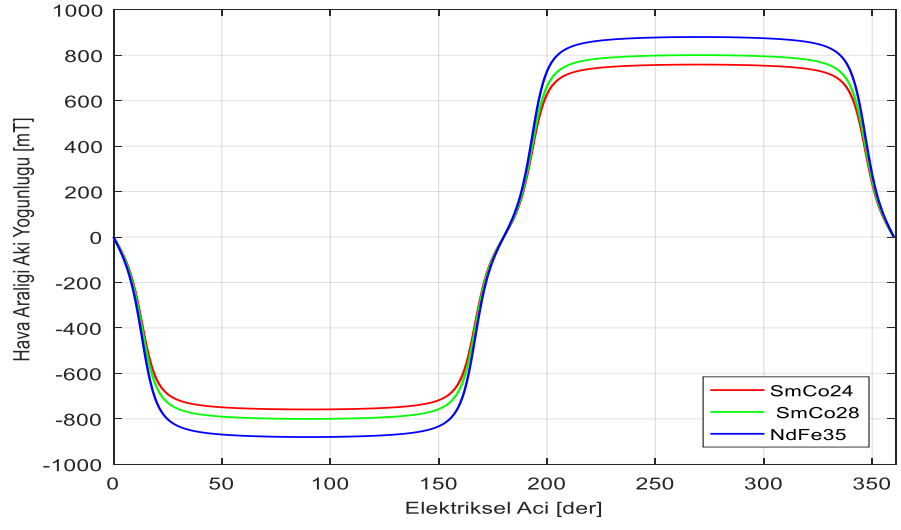


**Şekil 4. 41** Mıknatıs kalınlığının hava aralığı akı yoğunluğuna etkileri

Yapılan bir diğer incelemede mıknatıs olarak kullanılan malzeme türünün makina parametreleri üzerindeki etkileri ele alınmıştır. Diğer tüm tasarım parametrelerinin değerleri aynı kalmak şartıyla NdFe35, SmCo24 ve SmCo28 türü mıknatısların kullanılması durumunda elde edilen vuruğu momenti grafiği Şekil 4.42’de, hava aralığı akı yoğunluğu grafiği de Şekil 4.43’de verilmiştir. Aynı tasarım şartlarında en yüksek hava aralığı akısı NdFe35 mıknatısının kullanılması durumunda elde edilirken aynı zamanda bu mıknatıs türü en yüksek vuruğu momenti etkisine sebep olmaktadır. SmCo24 en düşük vuruğu momentine neden olsa da, sağladığı hava aralığı akısı da diğer mıknatıslara göre düşük kalmaktadır. Makinaların genel verim değerleri üzerindeki etki incelendiğinde NdFe35 mıknatıs kullanıldığında SmCo24 mıknatıs kullanılmasına kıyasla yaklaşık %3,5 yüksek bir değer elde edilmiştir.



**Şekil 4. 42** Mıknatıs malzeme türünün vuruğu momentine etkisi



Şekil 4. 43 Mıknatıs malzeme türünün hava aralığı akı yoğunluğuna etkisi

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Sürekli mıknatıslı makinalar, sahip oldukları küçük hacim, yüksek güç ve moment yoğunluğu, düşük kayıp ve yüksek verim değeri gibi üstünlüklerden dolayı her geçen gün daha geniş kullanım alanı bulmaktadır. Bu kullanım alanlarından biri de rüzgar enerjisi dönüşüm sistemlerindeki generatörlerdir. Küçük ve hafif kullanım gereksinimi duyulan rüzgar generatörlerinde özellikle sürekli mıknatıslı senkron generatörler tercih edilmektedir. Bu tez çalışmasında 1,5 kW gücündeki sürekli mıknatıslı senkron generatörün karşılaştırmalı başarımlı analizi gerçekleştirilmiştir. Tez çalışmasındaki temel fikir referans olarak kullanılan generatörün ANSYS Electronics Desktop yazılımı üzerinden sonlu elemanlar analizinin ve deney düzeneği üzerinden gerçek zamanlı ölçümlerinin yapılarak kıyaslanmasıdır.

Bu çalışma kapsamında sürekli mıknatıslı senkron generatörler, sonlu elemanlar yöntemine dayalı analiz yapan yazılım programları, manyetik ve elektriksel analizler, gerçek zamanlı ölçümler ve sürekli mıknatıslı makinaların tasarımı hakkında literatürdeki kaynaklar taranmıştır. Tez çalışması kapsamında sürekli mıknatıslı generatör kullanılacağı için bu tür makinaların yapısı, çalışma prensibi, sınıflandırılması, manyetik devre modeli ve matematiksel modeliyle ilgili temel bilgiler verilmiştir. Generatörün analiz ve testlerine geçilmeden önce makina açılarak makina kısımlarının ölçüleri ve sargı yapısı çıkarılmıştır. Bu aşamada, bir iletken ve bir sarımda endüklenen gerilim dalgalarını incelemek için statorun bir oluğuna ve bir sargı adımına denk gelecek ölçü bobini eklenmiştir.

Referans generatörün ölçüleri Rmxprt yazılımına girilerek analitik olarak çıkış parametreleri hesaplanmıştır. Rmxprt hesaplamalarına göre;

- Yüksüz çalışma koşulları için stator dişi akı yoğunluğu 1,7 T ve stator boyunduruk akı yoğunluğu 1,3 T ve rotor boyunduruk akı yoğunluğu 1,2 T bulunmuştur.
- Yüksüz çalışma koşulları için üretici kataloğunda tespit edilen endüklenen temel hat gerilimi 58 V iken Rmxprt hesaplamaları sonucunda 66,99 V olarak bulunmuştur. Yapılan deneylerde yüksüz çalışmadaki faz arası gerilim değeri 52 V olarak ölçülmüştür.

- Hesaplamalara 0,27 V değerinde dahil edilen bir sarım gerilimi, Rmxprt programında yaklaşık 0,21 V olarak bulunmuştur.
- Anma yükte faz akımı 15,02 A, faz gerilimi değeri ise 33,68 V olarak bulunmuştur. Akım yoğunluğu değeri 5,1 A/mm<sup>2</sup> olarak bulunmuş olup, bu değer elektrik makinalarının tasarımında kullanılan sınır değere yakındır.
- Referans makinanın nominal moment değeri Rmxprt yazılımında 35,79 Nm bulunmuştur. Üretici katalogundaki bu değer 35 Nm olarak verilmiştir.

Elektrik makinalarında kullanılan malzeme özellikleri ve çalışma prensibi gereği, sonlu elemanlar yöntemlerinin de kullanılarak analiz edilme ihtiyacı bulunmaktadır. Bu amaçla, referans olarak kullanılan SMSG'nin iki boyutlu modeli Rmxprt üzerinden oluşturulmuştur ve Maxwell 2D yazılımı ile sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analiz sonuçlarına göre;

- Anma yükte referans makinada elde edilen faz akımı değeri 14,5 A olarak bulunmuştur. Bulunan bu değer Rmxprt'de analitik hesaplamalar ile elde edilen akım değerinden %3,4 düşüktür.
- Anma yükte referans makinanın sargılarında endüklenen faz gerilim değeri 37,7 V olarak bulunmuştur. Bu değer ile Rmxprt'de yapılan analitik hesaplama sonucu bulunan değer arasında yaklaşık %10'luk bir fark vardır.
- ANSYS Maxwell 2D yazılımı üzerinden yapılan analizlerde moment değeri Rmxprt yazılımında elde edilen ve ürün katalogunda yer alan değere yakın bir değer olan 34,10 Nm bulunmuştur.
- ANSYS Maxwell 2D yazılımında yapılan manyetik analizlerde hem yüksüz hem de yüklü çalışma koşulları için makina kısımlarının manyetik akı yoğunluğu değerinin kabul edilir sınırlar içinde kaldığı görülmüştür. Makinanın stator diő kısmının uç bölgelerinde akı yoğunluğunun yüksek olduğu gözlenmiştir.

Referans olarak kullanılan SMSG, asenkron motor üzerinden döndürülerek deneysel ölçümleri yapılmıştır. Yapılan bu ölçümlere göre;

- Yüksüz çalışma deneyinde 300 d/dak ile 750 d/dak arasındaki bazı değerlerde yapılan ölçümlerde faz sargılarında endüklenen gerilim değerleri 45 V ve 75 V arasında ölçülmüştür.
- Yapılan kısa devre deneyinde kısa devre akımı yaklaşık 30 d/dak devir sayısında 5,5 A olarak elde edilmiştir.
- Yüklü çalışma deneyi yapılarak farklı yük koşulları için referans makinanın akım ve gerilim eğrisi elde edilmiştir. Ayrıca değişken hızlarda, farklı yükleme koşullarındaki akım ve gerilim eğrileri elde edilerek küçük güçlü rüzgar türbini generatörü olarak kullanılabilir olan referans generatörün farklı rüzgar hızlarındaki olası karakteristiği ön görülmüştür. Ancak kurulan deney düzeneği ile referans generatör kısıtlı düzeyde yüklenebilmiştir.
- Kurulan deney düzeneğinde yapılan ani yükleme deneyi ile anma hız için referans generatörün ani yükleme koşullarındaki akım ve gerilim karakteristiği çıkarılmıştır.
- SMSG'nin sargı yapısına yerleştirilen ölçü bobinlerinde endüklenen gerilim eğrileri osiloskop üzerinden takip edilmiştir.

Yapılan Rmxprt hesaplamaları, ANSYS Maxwell 2D analizleri ve deney çalışmalarında elde edilen bazı parametreler kıyaslandığında;

- Yüksüz çalışma koşullarında ANSYS Electronics Desktop yazılımında elde edilen değerlerin deney sonuçlarından ve katalog verilerinden yüksek olduğu; deney sonuçlarının da katalog verilerinden düşük çıktığı görülmüştür. Deney sonuçlarındaki farkın sebebi olarak referans makinanın mıknatıs yapısında oluşmuş olabilecek yıpranma tahmin edilmektedir. Ayrıca ANSYS Electronics Desktop yazılımında ortaya çıkan farkların sebebi olarak ürünün bazı malzeme özelliklerinin tam olarak belirlenememesi düşünülmektedir.
- Yüksüz çalışma koşulunda deneysel ölçüm sonuçları ve ANSYS 2D analiz sonuçları kıyaslandığında veriler arasında ufak farklar olsa da kabul edilebilir bir yaklaşıklık gözlenmiştir.

Referans SMSG'nin manyetik devre parametreleri üzerinde değişiklikler yapılarak makinanın bazı çıkış parametreleri üzerindeki etkiler incelenmiştir. Buna göre;

- SMSG'nin kutup yayının kutup adımına oranı %80'den %95'e çıkarıldığında vurutu momenti genel olarak artmış, hava aralığı akı yoğunluğu üzerindeki etkisi sınırlı kalmış ve verim değeri yaklaşık %2,5 azalmıştır.
- Mıknatıs kalınlığının 5 mm'den 6 mm'ye çıkarılması ile, SMSG'nin vurutu momenti yaklaşık %6,9 azalmıştır. Mıknatıs kalınlığındaki değişim hava aralığı akı yoğunluğunu %2,5 artmış; verim ise yaklaşık %1,5 azalmıştır.
- Tüm tasarım parametreleri aynı kalmak şartıyla mıknatıs olarak kullanılan malzeme cinsi değiştirildiğinde, en yüksek vurutu momentini ve hava aralığı akı yoğunluğunu NdFe35 mıknatıs sağlamıştır. Vurutu momentinin en düşük olduğu SmCo24 mıknatısın kullanıldığı durumda, aynı zamanda en düşük hava aralığı akı yoğunluğu olmuştur.

Bu alışma ile tasarımı veya analizi gerçekleştirilecek olan elektrik makinalarının boyutlandırılmasında ve incelenmesinde ANSYS Electronics Desktop yazılımının Maxwell aracında kurulan modelin geçerliliği ortaya konulmuştur. Ayrıca yazılım üzerinden elde edilen veriler deneysel olarak kıyaslanmaya çalışılmıştır. Bu çalışmanın devamında,

- SMSG'lerin veriminin arttırılması için yapılacak parametrik alışmalar ANSYS Electronics Desktop yazılımının Maxwell aracı üzerinden sürdürülebilir. Yüzey yerleşimli ve gömülü mıknatıslı literatürde yer alan ve patent çalışmalarına konu olan moment titreşimlerinin azaltılması, vurutu momentleri gibi parametrelerin analizleri ve karşılaştırması yapılabilir,
- Yeni makina tasarımları geliştirilerek test edilebilir,
- Manyetik devre parametreleri toplu olarak ele alınıp en uygun tasarıma ulaşılarak (optimizasyon) referans SMSG ile başarım kıyaslaması yapılabilir.

## KAYNAKLAR

- [1] Chen, Y., Wang, D. Finite Element Method Analysis of Surface-Inserted Permanent Magnets Synchronous Generator. 2011 International Conference on Electrical and Control Engineering, 16-18 September, 2011, Yichang, China (665-668).
- [2] Khalf, M. A., Wamkeue, R., Aguglia, D. Finite Element Approach for Performances Prediction of a Small Synchronous Generator Using ANSYS Software. 25th IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 29 April-2 May, 2012, Montreal-Quebec (1-4).
- [3] Colak, I., Bulbul, H. I., Sagioglu, S., Sahin, M. Modeling a Permanent Magnet Synchronous Generator Used in Wind Turbine and the Realization of Voltage Control on the Model with Artificial Neural Networks. International Conference on Renewable Energy Research and Applications 2012, 11-14 November, 2012, Nagasaki-Japan (1-6).
- [4] Popescu, M., Mituleț, A., Chihaiia, R., Nicolaie, S., Nedelcu, A., Oprina, G. Finite Element Analysis of a Low Speed Permanent Magnets Synchronous Generator with Direct Drive. 8th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering, 23-25 May, 2013, Bucharest-Romania (1-5).
- [5] Chen, Z., Chen, Z., Liu, X. A 2MW 6-Phase BLDC Generator Developed from a PM Synchronous Generator for Wind Energy Application. 2014 IEEE International Conference on Industrial Technology, 26 February-01 March, 2014, South Korea (110-114).
- [6] Kostro, G., Kutt, F., Michna, M., Ronkowski, M. Low Speed Permanent Magnet Synchronous Generator for Vertical Axis Wind Turbine. 2017 International Symposium on Electrical Machines, 18-21 June, 2017, Naleczow-Poland (1-5).
- [7] Noun, Z., Mrad, A., Arnaout, M. Finite Element Comparative Study Between Permanent Magnet Synchronous and Asynchronous Generators Used in Wind Turbines. 2018 4th International Conference on Renewable Energies for Developing Countries, 01-02 November, 2018, Beirut-Lebanon (1-5).
- [8] Wallace, R., Alexandrova, J., Vera, B., Tapia, J., Pyrhonen, J., Linhdh, P. PM Synchronous Generator Design Analytical Method. International Symposium on Power Electronics Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 19-22 June, 2012, Sorrento-Italy (625-631).
- [9] Htet, T. Z., Zhao, Z., Gu, Q. Design Analysis of Direct-Driven PMSG in Wind Turbine Application. 2016 International Conference on System Reliability and Science, 15-18 November, 2016, Paris-France (7-11).
- [10] Yasa, Y., Mese, E. Design and Analysis of Generator and Converters for Outer Rotor Direct Drive Gearless Small-Scale Wind Turbines. 3rd International

Conference on Renewable Energy Research and Applications, 19-22 October, 2014, Milwaukee, USA (689-694).

- [11] Nory, Hayatullah. Fırçasız Doğru Akım Motorunun Tasarımı ve Denetimi. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elazığ, 2018, 84. (Yüksek Lisans Tezi).
- [12] Gedik, B.D. IE4 Verim Sınıfı Şebeke Kalkışlı Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor Tasarımı. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 2018, 74. (Yüksek Lisans Tezi).
- [13] Güneri, S. Kompresör Uygulamaları için Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor Tasarımı. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 2015, 109. (Yüksek Lisans Tezi).
- [14] Bakhtiarzadeh, H. Design of Permanent Magnet Synchronous Motor for Elevator Application. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 2017, 94. (Yüksek Lisans Tezi).
- [15] Oğuz, A.H. Elektrikli Araçlar için Gömülü Sürekli Mıknatıslı Senkron Makine Tasarımının En Uygunlaştırılmasına Katkıları. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 2018, 71. (Yüksek Lisans Tezi).
- [16] Kütük, O. Rüzgar Türbinleri için Doğrudan Sürümlü Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatör Tasarımı. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 2011, 89. (Yüksek Lisans Tezi).
- [17] Çetinceviz, Y. Küçük Ölçekli Rüzgar ve Nehir Santralleri için 4 kW Gücünde Kalıcı Mıknatıslı Senkron Generatör Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi. Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Karabük, 2017, 174. (Doktora Tezi).
- [18] Nergiz, E. Sabit Mıknatıslı Senkron Generatörlerin Modellenmesi ve Optimizasyonu. İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir, 2018, 147. (Yüksek Lisans Tezi).
- [19] Altıntaş, H.B. Rüzgar Türbinleri için Karşılaştırmalı Kalıcı Mıknatıslı Senkron Generatör Tasarımı ve Analizi. Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya, 2018, 109. (Yüksek Lisans Tezi).
- [20] Salminen, P. Fractional Slot Permanent Magnet Synchronous Motors for Flow Speed Applications. Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta, 2004, 152. (Doktora Tezi).
- [21] Çetin, E. Eksenel Akımlı Sürekli Mıknatıslı Fırçasız Doğru Akım Motor Tasarımı, Manyetik Analizi ve Prototip Üretimi. Erciyes Üniversitesi, Fen



Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Kayseri, 2018, 147. (Doktora Tezi).

- [22] Korman, O. Hibrit Kalıcı Mıknatıslı Rotor Topolojisinin İncelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 2018, 107. (Yüksek Lisans Tezi).
- [23] Dusane, P.M. Simulation of a Brushless DC Motor in ANSYS – Maxwell 3D. Czech Technical University in Prague Faculty of Electrical Engineering, Department of Electrical Power Engineering, Prague, 2016, 109. (Yüksek Lisans Tezi).
- [24] Othman, M.N.B. Design and Evaluation of High Power Density Brushless DC Permanent Magnet Machines. The University of Nottingham, Department of Electrical and Electronic Engineering, 2012, 158. (Doktora Tezi).
- [25] Kocabaş, D.A. Elektrik Makinalarında Sargılar, Birsen Yayınevi, İstanbul, Türkiye, 2007.
- [26] Yılmaz, M. (2015) Fırçasız Elektrik Makinaları (Powerpoint sunum) Erişim adresi: <https://ninova.itu.edu.tr/tr/dersler/elektrik-elektronik-fakultesi/19147/elk-497/>
- [27] Bouaziz, O., Jaafar, I., Ammar, F.B. Performance analysis of radial and axial flux PMSM based on 3D FEM modeling. Turkish journal of electrical engineering and computer sciences. 2018, 26, 1587-1598.
- [28] Oner, Y., Şenol, I., Bekiroğlu, N., Aycicek, E. Magnetic equivalent circuit model of surface type fractional-slot permanent magnet synchronous generator. Journal of Vibroengineering. 2013, 15(1), 223-232.
- [29] PMSM Mathematical Model (Web Sayfası: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/ref/pmsm.html>) (Erişim Tarihi: Aralık, 2020).
- [30] Yongxiang, X., Qingbing, Y., Jibin, Z., Hao, W. Influence of Periodic Carrier Frequency Modulation on Stator Steel Core Loss and Rotor Eddy Current Loss of Permanent Magnet Synchronous Motor. 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 22-25 October, 2014, Hangzhou, China (2094-2100).
- [31] Vranrick J. E. Prediction of Windage Power Loss in Alternators. NASA-Langley Report No: TND-4849.
- [32] Pyrhonen, J., Jokinen, T., Hrabovcova, V. Design of rotating electrical machines. John Wiley & Sons, 2008.
- [33] Kilmartin, J. Effects of the Pole-Slot Combination on a Surface Permanent Magnet Generator for Wind Applications. Flinders University, Department of Science and Engineering, 2016, 187. (Yüksek Lisans Tezi).

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Tuğberk ÖZMEN

Doğum Yeri ve Yılı : Manisa, 1992

Medeni Hali : Evli

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : tugberk.ozmen@cbu.edu.tr

### Eğitim Durumu

Lise : Salihli Anadolu Öğretmen Lisesi, 2010

Lisans : İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, 2015

Yüksek Lisans : Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 2021

### Mesleki Deneyim

EKO Yenilenebilir Enerjiler A.Ş.	2015-2016
Sardes Enerji Ltd. Şti.	2016-2017
EKO Yenilenebilir Enerjiler A.Ş	2017-2018
Manisa Celal Bayar Üniversitesi	2018-..... (halen)

### Yayınları

Özmen, E., **Özmen, T.**, Yirmibeşoğlu, F., Solar Cities as a Model in the Utilization of Renewable Energy Sources: The Case of Manisa. 4th International Sustainable Buildings Symposium, Dallas, USA, 18-19 July, 2019, (405-416).

**Özmen, T.** ve Özmen, E, Farklı Nüfus Yoğunluklu Yapı Adalarında Çatı Tipi Güneş Enerji Santrali İncelemesi: Manisa Örneği, 10. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu ve Sergisi, Antalya, TÜRKİYE, 12-14 Aralık, 2019, (215-219). Yayın No: SK/2019/712, ISBN: 978-605-01-1316-7