



**NÜVESİZ BİR EKSENEL AKILI
SENKRON GENERATÖR TASARIMI
VE SİMÜLASYONU**

Mehmet Recep MİNAZ

Doktora Tezi

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Makineleri Bilim Dalı

Doç. Dr. Mehmet ÇELEBİ

2017

Herk hakkı saklıdır

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**NÜVESİZ BİR EKSENEL AKILI SENKRON GENERATÖR
TASARIMI ve SİMÜLASYONU**

Mehmet Recep MİNAZ

**ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Elektrik Makineleri Bilim Dalı**

**ERZURUM
2017**

Her hakkı saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü
TEZ ONAY FORMU



**NÜVESİZ BİR EKSENEL AKILI SENKRON GENERATÖR TASARIMI VE
SİMÜLASYONU**

Doç. Dr. Mehmet ÇELEBİ danışmanlığında, Mehmet Recep MİNAZ tarafından hazırlanan bu çalışma, 22/05/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik Makinaları Bilim Dalı'nda Doktora tezi olarak oy birliği (4 / 4) ile kabul edilmiştir.

Başkan: Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL

İmza :

Üye : Doç. Dr. Mehmet ÇELEBİ

İmza :

Üye : Prof. Dr. Kenan YAKUT

İmza :

Üye : Doç. Dr. Fevzi HANSU

İmza :

Üye : Doç. Dr. Halil İbrahim OKUMUŞ

(KATILMAZ)

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu'nun 08.06/2017 tarih ve 23./33. nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Cavit KAZAZ
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Doktora Tezi

NÜVESİZ BİR EKSENEL AKILI SENKRON GENERATÖR TASARIMI ve SİMÜLASYONU

Mehmet Recep MİNAZ

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Elektrik Makineleri Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Mehmet ÇELEBİ

Eksenel akılı sabit mıknatıslı senkron generatörler yüksek tork/kütle oranı ve buna karşın düşük devirlerde doğrudan tahrikli sistemlere uygunluğuyla ön plana çıkmaları nedeniyle, günümüzde rüzgâr türbini generatörlerine önemli bir alternatif teşkil etmektedirler. Bu tip generatörlerin statorları dairesel disk şekilli olduğundan dolayı yüksek güç yoğunluğuna sahip ve çok kutuplu olarak tasarlanabilirler. Bu üstünlüklerinden dolayı, rüzgâr hızının 2 m/s değerinin altındaki düşük hızlarda bile enerji üretilmesine olanak sağlamaları nedeniyle rüzgâr türbinleri gibi düşük devirli uygulamalarda önemli bir kullanım alanına sahiptirler.

Bu çalışmada, sabit mıknatıslı eksenel akılı çekirdeksiz bir senkron generatörün tasarımı ve simülasyonu yapılmıştır. İki stator ve üç rotorlu olarak tasarlanan bu generatörün yan rotorlarının tek tarafına; orta rotorun ise çift tarafına sabit mıknatıslar yerleştirilerek maksimum güç elde edilecek şekilde homojen bir akı dağılımı sağlanmıştır. Ayrıca, tasarlanan generatörün statorunda nüve kullanılmamıştır. Böylece, generatörün hem demir kayıpları azaltılmış, hem de kütlece daha hafif olması sağlanmıştır.

Tasarımı yapılan generatörün üç boyutlu elektromanyetik analizi için sonlu elemanlar yönteminden yararlanılarak generatörün çıkış parametreleri optimize edilmiştir. Yapılan analiz ve optimizasyon işlemleri neticesinde, tasarımı gerçekleştirilen generatörden, en verimli sonuçların 500 d/dk'da alındığı ve generatörün bu devir sayısındaki faz başına düşen etkin çıkış geriliminin 84,84 V, etkin çıkış gücünün 1,8 kW ve veriminin ise %93,28 değerlerinde olduğu sonucuna varılmıştır.

2017, 96 sayfa

Anahtar Kelimeler: Eksenel akılı generatör, sabit mıknatıslı generatör, senkron generatör, üç rotor, iki stator.

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

DESIGN AND SIMULATION OF A CORELESS AXIAL FLUX SYNCHRONOUS GENERATOR

Mehmet Recep MINAZ

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mehmet CELEBI

Axial steady permanent magnet synchronous generators are an important alternative to wind turbine generators today due to their high torque / mass ratio and the fact that they are suitable for direct drive systems at low speeds. Since the stators of such generators are in circular disc shaped, they can be designed as multi-pole with having high power density. Because of these superiority, they have an important area of low-speed applications such as wind turbines because they allow energy to be generated even at low speeds below 2 m/s of wind speed.

In this study, the design and simulation of a permanent magnet axial flux coreless synchronous generator were actualized. The generator was designed as two stators and three-rotors, and also by placing permanent magnets onto the single edge of the side-rotors and double edges of the middle-rotor to provide a homogeneous flux distribution and to obtain maximum power from the generator. Also, no core was used in the stator of designed generator. Thus, the generator was provided with both reduced iron losses and lighter weight.

For three-dimensional electromagnetic analysis of the designed generator, the output parameters of the generator were optimized by using the finite element method. As a result of the analysis and optimization processes of the designed generator, it was concluded that the most efficient results were obtained at 500 rpm; in this case the effective output voltage per phase of the generator is 84.84 V, the effective output power is 1.8 kW and the efficiency was calculated as 93,28 %.

2017, 96 pages

Keywords: Axial flux generatör, permanent magnet generatör, synchronous generator, three rotors double stator.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında, tavsiye ve yardımlarını eksik etmeyen saygıdeğer hocam Sayın Doç. Dr. Mehmet ÇELEBİ'ye teşekkürlerimi sunarım. Doktora öğrenciliğim boyunca yardım ve desteklerini esirgemeyen doktora tez izleme üyelerine, çalışma arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca çalışmalarım sırasında maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme teşekkürlerimi sunarım.

Mehmet Recep MİNAZ

Haziran, 2017

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Literatür Araştırması	4
1.2. Bu Tez Çalışmasının Kapsamı	9
1.3. Bu Çalışmanın Ana Hatları.....	10
2. KURAMSAL TEMELLER.....	12
2.1. Eksenel Akıllı Makineler ve Sınıflandırılmaları	12
2.1.1. Tek rotorlu ve tek statorlu eksenel akıllı sabit mıknatıslı senkron makineler.....	14
2.1.2. Çift rotorlu ve tek statorlu oluklu eksenel akıllı sabit mıknatıslı senkron makineler.....	15
2.1.3. Çift rotorlu ve tek statorlu oluksuz eksenel akıllı sabit mıknatıslı senkron makineler.....	16
2.1.4. Çift statorlu ve tek rotorlu oluksuz eksenel akıllı sabit mıknatıslı senkron makineler.....	17
2.2. Eksenel Akıllı Makinelerde Kullanılan Malzemeler	18
2.2.1. Domenler	21
2.2.2. Yumuşak malzemeden oluşan manyetik elemanlar	21
2.2.3. Sert malzemeden oluşan manyetik elemanlar	22
2.2.4. Ferrit mıknatıslar	23
2.2.5. Alnico mıknatıslar	23
2.2.6. Samaryum kobalt mıknatıslar.....	24
2.2.7. Neodyum demir bor mıknatıslar.....	25
2.3. Eksenel Akıllı Generatör İçin Matematiksel Hesaplamalar	26

2.3.1. Manyetik akı hesabı.....	27
2.3.2. Mekaniksel kayıplar	32
2.3.3. Harmonik analiz	33
2.4. Eksenel Akılı Sabit Mıknatıslı Senkron Makinenin Matematiksel Modellemesi	35
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	49
3.1. Sonlu Elemanlar Analizinin Teorisi	50
3.2. Ritz Yöntemi	51
3.3. Sınır Koşulları	53
3.3.1. Dirichlet sınır koşulu	53
3.3.2. Neumann sınır koşulu.....	53
3.3.3. Karışık sınır koşulu	53
3.4. Kaynak Fonksiyonlarının Girilmesi ve Çözüm.....	55
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	57
4.1. Eksenel Akılı Senkron Generatörün 3D Sonlu Eleman Yöntemiyle Manyetostatik Analizi	57
4.2. Eksenel Akılı Senkron Generatörün Simülasyon Sonuçları.....	61
4.2.1. Eksenel akılı senkron generatörün 500 d/dk'daki simülasyon sonuçları	62
4.2.2. Eksenel akılı senkron generatörün 1000 d/dk'daki simülasyon sonuçları	69
4.2.3. Eksenel akılı senkron generatörün 1500 d/dk'daki simülasyon sonuçları	71
4.3. Eksenel Akılı Senkron Generatörün 500 d/dk'daki Harmonik Analizi	76
4.4. Eksenel Akılı Senkron Generatörün Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması	78
5. SONUÇ ve TARTIŞMA.....	90
KAYNAKLAR	93
ÖZGEÇMİŞ	97

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

B_r	Mıknatısın Manyetik Akı Yoğunluğu
i_{s12}	Birinci ve İkinci Stator Reaktansı
d	Kullanılan Çeliğin Kalınlığı
k_{ex}	Aşırı Kayıp Katsayısı
σ_{cu}	Bakırın 20°C'deki Elektriksel İletkenliği
R_{s1}	Birinci Stator Direnci
L_{s1}	Birinci Stator Endüktansı
i_{s2}	İkinci Stator Akımı
R_{s2}	İkinci Stator Direnci
L_{s2}	İkinci Stator Endüktansı
V_{s2}	İkinci Stator Gerilimi
I_a	Stator Akımı
σ_{air}	Hava Yoğunluğu
δ	Hava Aralığı
k_b	1'den 3'e Kadar Değişen Bir Faktördür.
k_i	Akım Dalga Form Faktörü
I	Akım Değeri
J	Akım Yoğunluğu
S_{cu}	Bakır İletkenin Kesit Alanı
k_{cu}	Bakır Öz direncinin Sıcaklık Katsayısı ($k_{cu} = 3.8 \times 10^{-1} / C^0$)
λ_{1PM}	Bir ve İkinci (Yakın) Rotorların Manyetik Akısı
m_1	Birinci Faz
i_{s1}	Birinci Stator Akımı

V_{s1}	Birinci Stator Gerilimi
P_{output}	Çıkış Gücü
p	Çift Kutup Sayısı
λ_{PM}	Daimi Mıknatısların Manyetik Akı Matrisi
n	Devir Sayısı (d/dk)
r	Disk'in Yarıçapı (m)
k_p	Elektriksel Güç Dalga Form Faktörü
k_E	EMF Sabiti
L	Endüktans
I_{PH}	Faz Akımının rms Değeri
l_{cu}	Faz Sargısının Toplam Uzunluğu
m	Faz Sayısı
P_{input}	Giriş Gücü
B_g	Hava Aralığındaki Maksimum Akı Yoğunluğunu İfade Eder
k_{hys}	Histerezis Kayıp Katsayısı
k_d	İç Çapın Dış Çapa Oranı
S	İletken Kesiti
P_{str}	Kaçak Yük Kayıpları
k_{str}	Kaçak Yük Kayıpları Katsayısı
P_k	Kayıp Güç
G_r	Kg Olarak Rotorun Kütlesi
τ	Kutup Aralığı
b_p	Kutup Genişliği
σ_{Fe}	Laminasyon Materyalinin Elektriksel İletkenliği
H	Manyetik Alan Şiddeti
v	Manyetik Direnç
μ	Manyetik Geçirgenlik

B	Manyetik İndüksiyon
A	Manyetik Vektör Potansiyeli
M_2	Ortak Endüktans (Orta)
M_3	Ortak Endüktans (Uzak)
M_1	Ortak Endüktans (yakın)
a	Paralel Kol Sayısı
R_o	Rotor Dış Çapı
R_l	Rotor İç Çapı
R_{out}	Rotorun Dıştan Merkeze Olan Uzaklığı
R_{in}	Rotorun İçten Merkezden Olan Uzaklığı
l_m	Sabit Mıknatısın Genişliği
k_{w1}	Sagı Faktörü
T	Sargının °C Cinsinden Ortalama Sıcaklığı
N_1	Sipir Sayısı
k_f	Sürtünme Faktörü
ϕ_f	Takrik Manyetik Akı
k_{p1}	Temel Adım Faktörü
k_{d1}	Temel Dağıtım Faktörü
k_T	Tork Sabiti
λ_{2PM}	Üçüncü (Uzak) Rotoru Manyetik Akısı
α_i	Etkili Kutup Yay Katsayısı
F	Frekans
ω	Rotorun Döner Açısal Hızı

Kısaltmalar

EMF	Elektro Motor Kuvveti
IEEE	Uluslararası Elektrik-Elektronik Enstitüsü
STD	Standart
THD	Toplam Harmonik Bozulma



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Faraday'ın yaptığı deneyde iletkenin mıknatıs etrafında döndürülmesi.....	2
Şekil 1.2. Faraday diski.....	2
Şekil 1.3. Pixii'nin dönen makinesi	2
Şekil 1.4. Stöhrer'in magneto elektrik makinesi.....	2
Şekil 1.5. Türkiye'nin 50 m yükseklikte yıllık ortalama rüzgar hızı haritası	3
Şekil 2.1. Radyal akı makine gösterimi	12
Şekil 2.2. Eksenel akı makine gösterimi.....	13
Şekil 2.3. Eksenel akı makinenin akı yolu gösterimi	13
Şekil 2.4. Radyal akı makinenin akı yolu gösterimi.....	13
Şekil 2.5. Tek taraflı oluklu makine.....	15
Şekil 2.6. Çift taraflı oluklu makine.....	16
Şekil 2.7. Çift taraflı statoru içte olan nüvesiz makine	17
Şekil 2.8. Çift taraflı statoru ve rotoru içte olan nüvesiz makine	18
Şekil 2.9. Manyetik maddelerin sınıflandırılması.....	20
Şekil 2.10. Mıknatıslı maddeler	21
Şekil 2.11. Sert manyetik madde ve yumuşak manyetik maddenin B-H Eğrisi.....	22
Şekil 2.12. Azrak toprak mıknatıslarının demanyetikleşme eğrileri.....	26
Şekil 2.13. Harmonik sinyali ve temel bileşen	33
Şekil 2.14. Eksenel akı sabit mıknatıslı generatörün görünümü	40
Şekil 2.15. Elektrik dalga form tipleri	43
Şekil 2.16. Eksenel akı daimi mıknatıslı generatörün yan rotorların geometrisi	43
Şekil 2.17. Eksenel akı daimi mıknatıslı generatörün orta rotorların geometrisi	44
Şekil 2.18. Daimi mıknatısların dizilimi ve akı yollarının N-S-N-S-N-S olarak görünüm	44
Şekil 2.19. Eksenel akı daimi mıknatıslı generatörün sabit mıknatıs geometrisi.....	45
Şekil 2.20. Eksenel akı daimi mıknatıslı generatörün üç faz dış devre şeması	46
Şekil 2.21. M19 nüve malzemesinin B-H eğrisi	47
Şekil 4.1. Eksenel akı senkron generatörün manyetik akı yoğunluğu dağılımı.....	58
Şekil 4.2. Eksenel akı senkron generatörün manyetik akı yolunun görünüşü	59

Şekil 4.3. Eksenel akıllı senkron generatörün manyetik akı yolunun çelik ve mıknatıs olmadan elde edilen görüntüsü	59
Şekil 4.4. Eksenel akıllı senkron generatörün simülasyon programı tarafından oluşturulan örnek ağların (mesh) programdaki yapısının gösterimi.....	60
Şekil 4.5. Eksenel akıllı senkron generatörün manyetik akı yönlerinin ve örnek ağları (mesh) yapısının bir arada gösterimi	61
Şekil 4.6. Eksenel akıllı senkron generatörün A fazının 500 d/dk'daki faz-nötr gerilim değeri.....	62
Şekil 4.7. Eksenel akıllı senkron generatörün B fazının 500 d/dk'daki faz-nötr gerilim değeri.....	62
Şekil 4.8. Eksenel akıllı senkron generatörün C fazının 500 d/dk'daki faz-nötr gerilim değeri.....	63
Şekil 4.9. Eksenel akıllı senkron generatörün A-B-C fazının 500 d/dk'daki faz-faz gerilim değeri.....	63
Şekil 4.10. Eksenel akıllı senkron generatörün A fazının 500 d/dk'daki sargı akı değeri.....	64
Şekil 4.11. Eksenel akıllı senkron generatörün B fazının 500 d/dk'daki sargı akı değeri.....	65
Şekil 4.12. Eksenel akıllı senkron generatörün C fazının 500 d/dk'daki sargı akı değeri.....	65
Şekil 4.13. Eksenel akıllı senkron generatörün A-B-C fazının 500 d/dk'daki sargı akı değeri	66
Şekil 4.14. Eksenel akıllı senkron generatörün 500 d/dk'daki nüve kayıp değeri.....	66
Şekil 4.15. Eksenel akıllı senkron generatörün A fazının 500 d/dk'daki akım değeri	67
Şekil 4.16. Eksenel akıllı senkron generatörün B fazının 500 d/dk'daki akım değeri.....	67
Şekil 4.17. Eksenel akıllı senkron generatörün C fazının 500 d/dk'daki akım değeri.....	68
Şekil 4.18. Eksenel akıllı senkron generatörün 500 d/dk'daki A-B-C fazının akım değerleri.....	68
Şekil 4.19. Eksenel akıllı senkron generatörün A fazının 1000 d/dk'daki faz-nötr gerilim değeri	69
Şekil 4.20. Eksenel akıllı senkron generatörün B fazının 1000 d/dk'daki faz-nötr gerilim değeri	70

Şekil 4.21. Eksenel akıllı senkron generatörün C fazının 1000 d/dk'daki faz-nötr gerilim değeri	70
Şekil 4.22. Eksenel akıllı senkron generatörün A-B-C fazının 1000 d/dk'daki faz-faz gerilim değerleri	71
Şekil 4.23. Eksenel akıllı senkron generatörün A fazının 1500 d/dk'daki faz-nötr gerilim değeri	71
Şekil 4.24. Eksenel akıllı senkron generatörün B fazının 1500 d/dk'daki faz-nötr gerilim değeri	72
Şekil 4.25. Eksenel akıllı senkron generatörün C fazının 1500 d/dk faz-nötr gerilim değeri	72
Şekil 4.26. Eksenel akıllı senkron generatörün A-B-C fazının 1500 d/dk'daki faz-faz gerilim değerleri	73
Şekil 4.27. Eksenel akıllı senkron generatörün A fazının 1500 d/dk'daki akım değeri	74
Şekil 4.28. Eksenel akıllı senkron generatörün B fazının 1500 d/dk'daki akım değeri	74
Şekil 4.29. Eksenel akıllı senkron generatörün C fazının 1500 d/dk'daki akım değeri	75
Şekil 4.30. Eksenel akıllı senkron generatörün A-B-C fazının 1500 d/dk'daki akım değerleri	75
Şekil 4.31. Eksenel akıllı senkron generatörün A fazının 500 d/dk'da harmonik değeri	76
Şekil 4.32. Eksenel akıllı senkron generatörün B fazının 500 d/dk'da harmonik değeri	77
Şekil 4.33. Eksenel akıllı senkron generatörün C fazının 500 d/dk'da harmonik değeri	77
Şekil 4.34. Eksenel akıllı senkron generatörün gerilim-hız grafiği	78
Şekil 4.35. Eksenel akıllı senkron generatörün güç-hız grafiği	79
Şekil 4.36. Eksenel akıllı senkron generatörün 500 d/dk'daki gerilim-omik yük grafiği	79
Şekil 4.37. Eksenel akıllı senkron generatörün 500 d/dk'daki akım-omik yük grafiği	80

Şekil 4.38. Eksenel akıllı senkron generatörün 500 d/dk'daki bakır kaybı-omik yük grafiği	80
Şekil 4.39. Eksenel akıllı senkron generatörün 1000 d/dk'daki gerilim-omik yük grafiği	81
Şekil 4.40. Eksenel akıllı senkron generatörün 1000 d/dk'daki akım-omik yük grafiği	81
Şekil 4.41. Eksenel akıllı senkron generatörün 1000 d/dk'daki bakır kaybı-omik yük grafiği	82
Şekil 4.42. Eksenel akıllı senkron generatörün 1500 d/dk'daki gerilim-omik yük grafiği	82
Şekil 4.43. Eksenel akıllı senkron generatörün 1500 d/dk'daki akım-omik yük grafiği	83
Şekil 4.44. Eksenel akıllı senkron generatörün 1500 d/dk'daki bakır kaybı-omik yük grafiği	83
Şekil 4.45. Eksenel akıllı senkron generatörün farklı hızlarda gerilim-omik yük grafiği	84
Şekil 4.46. Eksenel akıllı senkron generatörün farklı hızlarda akım-omik yük grafiği	85
Şekil 4.47. Eksenel akıllı senkron generatörün farklı hızlarda bakır kaybı-omik yük grafiği	85
Şekil 4.48. Eksenel akıllı senkron generatörün 500 d/dk'da nüve ve bakır kayıpları grafiği	86
Şekil 4.49. Eksenel akıllı senkron generatörün 1000 d/dk'da nüve ve bakır kayıpları grafiği	86
Şekil 4.50. Eksenel akıllı senkron generatörün 1500 d/dk'da nüve ve bakır kayıpları grafiği	87
Şekil 4.51. Eksenel akıllı senkron generatörün bakır kaybı-hız grafiği.....	87
Şekil 4.52. Eksenel akıllı senkron generatörün verim-hız grafiği	88
Şekil 4.53. Eksenel akıllı senkron generatörün güç-verim grafiği.....	88

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Seramik mıknatısların özellikleri.....	23
Çizelge 2.2. Pres işlemi görmüş alnico özelliği.....	24
Çizelge 2.3. Döküm alnico özelliği)	24
Çizelge 2.4. 50 Hz frekans için temel bileşenlerin harmonik değerleri.....	34
Çizelge 2.5. Üç fazlı eksenel akıllı generatör için bobin ile kutup sayıları arasındaki kombinasyon.....	41
Çizelge 2.6. Üç fazlı eksenel akıllı senkron generatörün tasarım parametreleri.....	48
Çizelge 4.1. Üç fazlı eksenel akıllı senkron generatörün anma değerleri.....	89

1. GİRİŞ

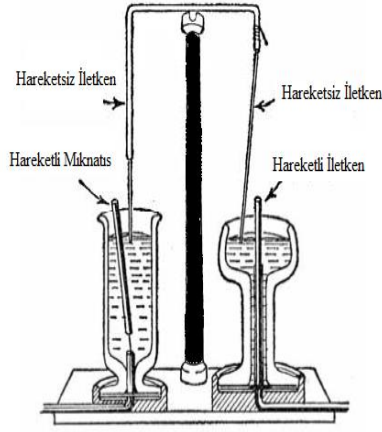
Elektrik makineleri 19. yy ortalarından itibaren ortaya çıkmış ve günümüze kadar önemini artırarak modern hayatın vazgeçilmez bir parçası olmuştur. Endüstriyel alanda, elektrik makinelerinin önemli türleri olan asenkron makineler ve senkron makineler yaygın olarak kullanılmaktadır. Dünya genelinde elektrik makinelerinin boyut ve tür açısından milyarlarca çeşidi mevcuttur ve bu makineler evlerde, araçlarda, iş yerlerinde ve endüstriyel alanlarda yaygın olarak kullanılarak çevremizi sarmıştır. Genellikle tek fazlı ve üç fazlı olarak üretilen bu makineler, günlük işlerde insan hayatına önemli kolaylıklar sağlamaktadır.

Elektrik ve manyetizma kavramı uzunca bir süredir bilinmektedir. Pusulanın tarihi M.Ö 2637 yılında Çin'e kadar dayanmaktadır. Mıknatıs taşları M.Ö 55 yılından beri bilinmektedir. Elektrik ilk olarak yıldırımla gözlemlenmiştir. Yıldırım ve manyetizma arasındaki ilişki denizcilerin yıldırım düşmesi esnasında pusulalarının ihtiyacı olan manyetizmayı yok etmesinden kaynaklanmıştır.

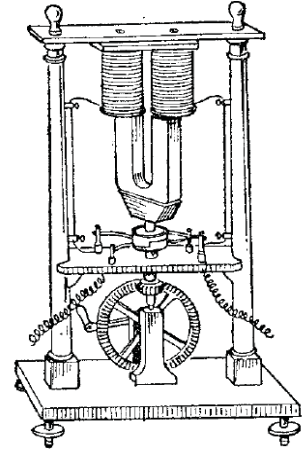
Romagnosi 1802 yılında bir teli bir elektrik piline bağladığında yakındaki bir pusula ibresini saptırdığını fark etmiştir. Faraday, manyetizma ve akımı kullanarak ilk yön belirleyen kişi olmuştur. 3 Eylül 1831'de Faraday bir dizi deneyler yaparak bir mıknatısın etrafında bir iletkeni döndürmüştür. Daha sonra Şekil 1.2'de gösterilen Faraday diski adında Argon diski versiyonunu yapmıştı. Böylece, dönebilen elektrik makinelerin ilk olarak M. Hypolite Pixii kullanmıştı. Şekil 1.3'te gösterilen nal tipi yumuşak demirden sabit mıknatıs kullanarak dikey şaftlı iki kutuplu eksenel akıllı makine yapmıştı.

Elektrik makinelerin verimliliğini ve kullanılabilirliğini artırmak için birçok çalışmalar yapılmıştır. Sabit mıknatıslar elektromıknatıslar yerine kullanılarak doğru akım elde edilmeye başlanmıştır (Moigno 1852). Şekil 1.4'te gösterilen birçok kutuplu versiyonları yapılmıştır. Bu makineler tek ve ayrı ayrı uyarımlar ile kullanılmaya başlanılmıştır. Tesla elektrik alanının yönünün belirlenmesi (1882) ve tesla makinenin

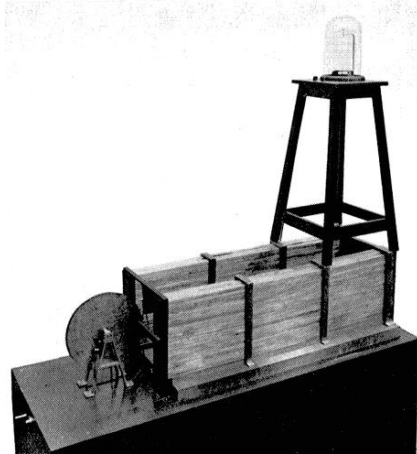
icadı Tesla (1889) iletim sistemi kullanılarak elektrik enerjisinin uzun mesafelere iletimi ve generator verimini mümkün kılan ikinci sanayi devrimi için bir seçenek olarak ortaya çıkmıştır (Tesla 1889; Wikipedia 2016).



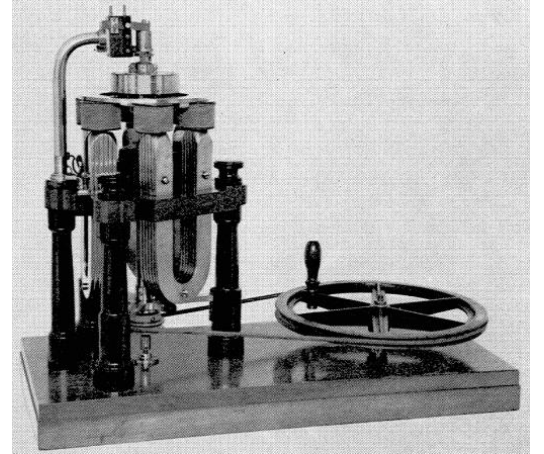
Şekil 1.1. Faraday'ın yaptığı deneyde iletkenin mıknatıs etrafında döndürülmesi (Dunsheath 1962).



Şekil 1.2. Faraday diski (Dunsheath 1962).



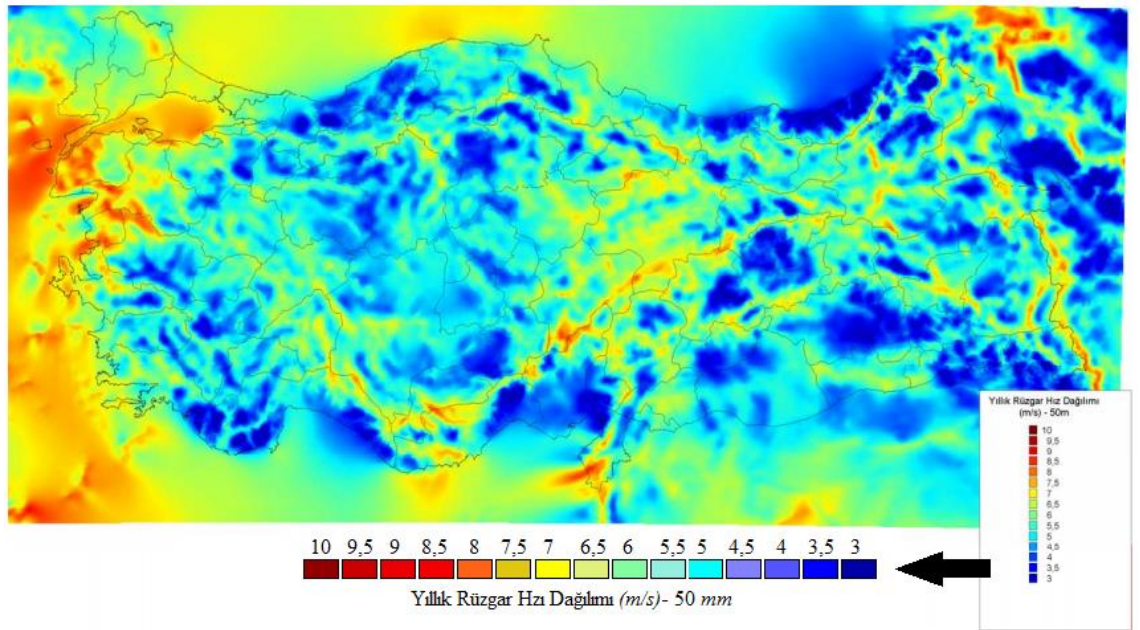
Şekil 1.3. Pixii'nin dönen makinesi



Şekil 1.4. Stöhrer'in magneto elektrik makinesi

Pixii ve Stöhrer tarafından dikey eksenel akılı makineler yapılmıştır. Tarihte en erken olarak görünen eksenel akılı makineler bunlardır. Bu makineler hakkında daha fazla bilgi için Dunsheat (1962) kitabından faydalanabilir (Dunsheath 1962).

21. yüzyılda en temel enerji olarak karşımıza çıkan elektrik enerjisidir. Elektrik enerjisinin temini için en çok kullanılan yakıtlar fosillerden elde edilmektedir. Bu yakıtların ülkede olmaması ve dışarıya bağımlı olunması sebebiyle ihracat için büyük maliyetler ödenmektedir. Bu kullanılan yakıtlar doğal dengeyi bozmak ile birlikte insan sağlığını da tehdit edecek seviyeye gelmiştir. Ülkemizin enerjiye olan ihtiyacını karşılamak için kendi kaynaklarından en üst düzeyde faydalanmasının sağlanması gerekmektedir. Şekil 1.5'te görüldüğü gibi Türkiye'nin rüzgâr haritası ve meteorolojik verileri incelendiğinde, rüzgâr enerjisiyle elektrik üretmenin vazgeçilmez bir avantaj olduğu anlaşılmaktadır. Bu avantajdan faydalanarak rüzgâr hızlarına uyumlu olan çeşitli tiplerde generatör tasarlaması önemli avantajlar sağlar.



Şekil 1.5. Türkiye'nin 50 m yükseklikte yıllık ortalama rüzgar hızı haritası (Solarakademi 2016)

Elektrik makineleri günümüzde hemen hemen her alanda kullanılmaya başlamıştır. Her geçen gün, literatürde yeni çalışmalar yerini almaktadır. Yapılan çalışmalarda yeni modeller geliştirilmektedir. Geliştirilen bu modellerde makinenin güç yoğunluğundaki artmalar, tasarım şeklinin değiştirilmesi, makine boyutlarındaki küçülmeler, ayrıca uyartım şekillerine göre yapılan çalışmalar giderek artmaya başlanmıştır. Farklı uyartım şekli olarak son zamanlarda eksenel akıllı sabit mıknatıslı makineler üzerinde çalışmalar

yoğunlaşmıştır. Ferromanyetik malzeme alanındaki araştırmalarda 1980'lerden bu yana önemli gelişmeler olmuştur. Bunlardan en önemlisi, son 20-25 yılda neodyum mıknatısların (NdFeB) gelişimiyle bu mıknatısların elektrik makinelerinde yaygın olarak kullanılmaya başlanmasıdır.

Sabit mıknatıslar doğada mıknatıs halde bulunan mıknatıs taşlarından oluşabildiği gibi, bazı maddelerin yapay olarak hazırlanmış alaşımlardan da oluşabilir. Neodyum mıknatıs yapay olarak hazırlanmış bir alaşım çeşididir. Bu mıknatıslar doğada hazır olarak bulunmazlar. Samaryum kobalt alaşımlı mıknatıslardan sonra, günümüz şartlarında ortaya çıkan ve bugüne kadar üretilmiş mıknatıs alaşımları içerisinde en yüksek enerjiye sahip olan neodyum mıknatıstır.

Bu mıknatısların belirgin özelliklerinden biride kalıcı bir indüksiyonun olmasıdır. Neodyum mıknatıslar küçük ebatlarda ve yüksek performansa sahiptirler. İstenilen ölçü, biçim ve ebatlarda üretilme imkânları vardır. Ayrıca bu mıknatısların doğru akım makinelerinde ve senkron makinelerde kullanımı oldukça uygundur. Bu yüzden birçok kullanım alanları vardır.

1.1. Literatür Araştırması

Tarihte ilk eksenel akılı makine, 3 Eylül 1831 Faraday tarafından yapılan bir takım deneyler sayesinde ortaya çıkmıştır. Ancak karmaşık yapılı olması nedeniyle pek kullanılmamıştır. Eksenel akılı senkron generaörler mevcut literatürdeki yapılmış olan çalışmalardan bazıları aşağıda verilmiştir.

Campbell tarafından 1974 yılında yapılan bir çalışmada eksenel akılı sabit mıknatısla tasarlanan makine ilk kez fan motoru olarak kullanılmıştır. Ayrıca, Faraday diskinin kullanılmadığı ifade edilmiştir (Campbell 1974).

Campbell ve arkadaşlarının başka bir çalışmasında ise maksimum güç elde etmek için bir yazılım gerçekleştirilmiştir. Eksenel akılı sabit mıknatıslı makineler için geniş içerikli yeni uygulamalar aktarılmıştır (Campbell 1981).

D'Angelo ve çalışma ekibinin yaptığı bir çalışmada, üç boyutlu sonlu elemanlar ile çözümlemesi yapmıştır. Çalışmada ayrıca sonlu elemanlar yöntemiyle ilgili ayrıntılı bilgiler verilmiştir (D'Angelo *et al.* 1983).

Spooner ve Chalmers torus ismiyle adlandırılan eksenel akılı bir makine tasarlanmıştır. Tasarımı gerçekleştirilen makine hem motor ve hem de generatör kullanımı için uygundur (Spooner and Chalmers 1992).

Caricchi ve arkadaşlarının yaptığı başka bir çalışmada ise su soğutmalı ve nüvesiz bir statora sahip olan sabit mıknatıslı eksenel akılı motor tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan bu motorun karşılıklı kutupları N ve S olarak konumlandırılmıştır (Caricchi *et al.* 1996).

Muljadi ve arkadaşlarının bir çalışmasında, rüzgâr türbinlerinin uygulamaları için kullanılan ve sargıları toroidal olan sabit mıknatıslı eksenel akılı generatör tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan generatör ise direk sürmeli olarak tasarlanmıştır (Muljadi *et al.* 1998).

Zhilichev yaptığı bir çalışmasında ise bu makineler için üç boyutlu çözümleme modeli geliştirilmiştir. Üç boyutlu ve iki boyutlu çözümleme modeli için karşılaştırmalar yapmıştır. Bu çözümlemeler neticesinde hassas sonuçlar ortaya çıkmıştır (Zhilichev 1998).

Eksenel akılı sabit mıknatıslı generatörlerin diğer uygulamalara göre yüksek verim elde edilmesi, kompakt boyutu ve makinenin hafif olması önemli bir üstünlüğü olarak görülmektedir. Bu tip makine tasarımıdaki asıl amaç maksimum çıkış gücü elde etmektir (Lombard and Kamper 1999).

Cavagnino ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada eksenel akılı ve geleneksel radyal akılı motorların karşılaştırılması yapılmıştır. Bu çalışmada elde edilen sonuç, elektromagnetik ve tork açısından bakıldığında; eksenel akılı makinelerin geleneksel radyal akılı makinelere göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür (Cavagnino *et al.* 2001).

Parviainen ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada ise, iç rotora sahip eksenel akılı sabit mıknatıslı bir senkron motor tasarımı ortaya konmuştur. Bu tasarımda mıknatısın şekli değiştirilerek daha iyi bir sinüsoidal elektromotor kuvvetinin elde edilmesi amaçlanmıştır (Parviainen *et al.* 2001).

Aydın ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada ise sabit mıknatıslı eksenel akılı motor yapısında iki adet rotor kullanılmış. Bu makinenin stator sargıları nüve üzerine sarılmış olmakla beraber statorun tam orta noktasında bir DC sargı yerleştirilmiştir. Bu sargı sayesinde bir manyetik alan daha üretilmekte ve demir malzemeye manyetik özellik kazandırmaktadır. Bu manyetik alanı hem toplam manyetik alanı artırmak için, hem de manyetik alanı azaltmak için kullanılabilir (Aydın *et al.* 2002).

2004 yılında Hori elektrikli araca dört adet teker motor monte ederek yön kontrol, viraj kontrol ve fren kontrol uygulamasını gerçekleştirmiştir. Gerçekleştirilen uygulamada elektrik motorlarının içten yanmalı motorlara göre 10-100 kat daha hızlı cevap verebildiği belirtilmiştir. Bu avantajı ve dört tekerleğin de birbirinden bağımsız olarak moment ve hız kontrolünün yapılabilmesinden dolayı viraj kontrol, yön kontrol ve fren kontrol uygulamalarının içten yanmalı motorlara göre çok daha hızlı ve kesin yapılabilirdiği belirtilmiştir (Hori 2004).

Statoru çekirdeksiz eksenel akılı sabit mıknatıslı generatör enerji üretim sistemleri için yüksek güç yoğunluğuna sahip makineler olarak kabul edilmektedirler (Caricchi *et al.* 1998; Lombard *et al.* 1999; Gireas *et al.* 2004).

Fujimoto ve arkadaşlarının yaptıkları bir çalışmada elektrikli araca iki adet tekel içi motor yerleştirilerek aracın kontrolü ve yaptıkları bir yol mesafesinin tahmini yapılmıştır. Ayrıca motorların her birinin hızlı moment cevabını verdiği vurgulanmıştır. Bu durumun kontrol açısından önemli bir adım olduğunu ifade etmişlerdir (Fujimoto *et al.* 2004).

Mendrela ve Jagiela çalışmalarında, tasarladıkları eksenel akılı çıkıntı kutuplu bir fazlı motorda ilk kalkış momentinin yüksek olmasını sağlamak için, mıknatısların dizilimini asimetrik bir şekilde yerleştirilmişlerdir. Momentinin yüksek olması, düşük maliyetli ve küçük ebatlı olması önemli bir avantaj olarak ortaya çıkmıştır (Mendrela and Jagiela 2004).

Lindh ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, elektrik şebekesine doğrudan bağlamıştır. Ayrıca sabit mıknatıslı generatör için tork ihtiyacının maksimum kalkış akımına göre yapılabileceğini göstermiştir (Lindh *et al.* 2007).

Aleksashkin ve Mikkola tarafından yapılan bir çalışmada, sabit mıknatıslı generatörlerin mekaniksel sorunlarının çözümleri için sonlu elemanlar yönteminin avantajlarını ortaya koymuşlardır (Aleksashkin and Mikkola 2008).

Seo ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, eksenel akılı makinelerden yüksek tork yoğunluğu elde edildiğini ve bu makinelerin az alan gerektiren yerlerde kullanılabildiğini ortaya koymuşlardır (Seo *et al.* 2010).

Lee ve Junk tarafından yapılan bir çalışmada, eksenel akılı sabit mıknatıslı generatörde yamuk mıknatıs kullanılarak generatörün yüksüz momentini azaltmak mümkün olmuştur (Lee and Junk 2013).

Pop ve arkadaşlarının yayınlanan bir çalışmasında mikro rüzgar türbini uygulaması gerçekleştirilmiştir. Çalışmada eksenel ve radyal akılı sabit mıknatıslı generatörü karşılaştırılıp en iyi sonucun eksenel akılı sabit mıknatıslı senkron generatörün verdiği

görülmüştür. Eksenel akılı generatörün maliyet açısından daha az maliyetli olduğunu ortaya çıkarmıştır (Pop *et al.* 2013).

Sabit mıknatıslı eksenel akılı makinelerin, verimlerinin yüksek olması, ekonomik olmaları, düşük maliyetlerde enerji üretebilmesi gibi nedenlerden dolayı incelenmeye değer bulmuşlardır. Eksenel akılı sabit mıknatıslı generatörlerin elektromanyetik yapı bakımından tasarımları ve teorideki değişimleri çok çeşitlilik arzeder (Chan 1987; Chau *et al.* 2008; Chen *et al.* 2014).

Yapılan literatür araştırmasında şu neticelere varılmıştır:

- Eksenel akılı generatör tasarımı için yapılmış olan herhangi bir matematiksel modele rastlanmamıştır. Yapılan bu tez çalışmasında iki statorlu ve üç rotorlu eksenel akılı senkron generatör tasarımı için yeni bir matematiksel model ortaya konmuştur.
- Literatürde genellikle nüveden oluşan generatör yapıları yer almaktadır. Nüveden oluşan generatör yapılarında nüve kayıpları meydana gelmektedir (Chan *et al.* 2009). Nüve materyalinin kullanılması, maliyeti de artırmaktadır. Ayrıca nüvenin üzerinde meydana gelen manyetik akıdan dolayı materyal ısınacaktır. Bu ısı stator sargılarda da fazla ısı oluşmasına sebebiyet verecektir. Nüvesiz generatör kullanımı ise stator nüvesiden oluşan kayıpları tamamen ortadan kaldıracaktır. Bununla birlikte stator nüve maliyeti de oluşmayacaktır. Ayrıca generatörün nüvesiz olması, sürekli çalışma koşullarında nüveden kaynaklı ısınmanın olmaması da önemli bir avantaj sağlamaktadır.
- Yapılan bir çalışmada iki rotorlu bir statorlu nüvesiz eksenel akılı senkron generatör tasarımı elde edilen maksimum gerilim değeri 100 V olarak hesaplanmıştır. Fakat bu çalışmada elde edilen güç, yaklaşık olarak 0,75 kW'tır (Minaz *et al.* 2016). Makine parametreleri değiştirilmeden üç rotorlu iki statorlu nüvesiz eksenel akılı senkron generatörden elde edilen maksimum çıkış gerilim değeri yaklaşık 120 V olarak hesaplanmıştır. Bu yeni tasarımda elde edilen güç ise yaklaşık 1,8 kW'tır. Neticede, yeni tasarlanan makinada ortalama %19,67 daha fazla güç elde edilmiştir ve mıknatıslardan elde edilen manyetik akının daha verimli kullanıldığı saptanmıştır.

- Eksenel akılı oluklu makinelere göre bu makinede oluşan harmonik değerleri, generatörlerin oluksuz yapısından dolayı harmonik üretimleri çok düşük değerlerde olacaktır.
- Literatürde bulunan bu tip eksenel akılı generatörlerde verimi düşük olmasına rağmen tasarlanan nüvesiz eksenel akılı sabit mıknatıslı senkron generatörün verimi yüksek olacaktır.
- Kullanılan mıknatısların geometrisi, rotor üzerine uygun yerleştirilmesi ve çok kutuplu olarak üretilmesinden dolayı, rüzgâr hızının 2 m/s değerinin altındaki düşük hızlarda bile enerji üretilmesine olanak sağlamaları nedeniyle rüzgâr türbinleri gibi düşük devirli uygulamalarda önemli bir kullanım alanına sahiptirler.
- Genel olarak eksenel akılı senkron makinaların en kötü yanı, bağımsız parça adedinin fazla olmasından dolayı ortaya çıkan seri üretim zorluğudur.
- Eksenel akılı sabit mıknatıslı senkron makineler fazla güç üretimine ihtiyaç duyulmayan alanlarda kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmasında, 500 d/dk rotor hızında maksimum verimle elektrik enerjisi üretebilen eksenel akılı sabit mıknatıslı, statoru nüvesiz olan bir generatörün tasarımı amaçlanmıştır. Üç fazlı olarak tasarlanan generatörün sonlu eleman yöntemiyle simülasyonu gerçekleştirilmiştir.

Rüzgâr enerji sistemlerinde doğrudan tahrikli generatörlerinin kullanımı, makinenin büyüklüğünün ve ağırlığının fazla olmasına, verimliliğinin ve güvenilirliğinin ise az olmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle nüve ağırlığının ve hacminin en az seviyeye indirilmesi de önemli bir husustur (Garrison *et al.* 2008).

1.2. Bu Tez Çalışmasının Kapsamı

Eksenel akılı sabit mıknatıslı nüvesiz senkron generatör olarak tasarlanan elektrik makinesinin kapsamı aşağıda verilmiştir:

- Eksenel akılı sabit mıknatıslı oluksuz senkron generatör makinesinin tasarımı ve analizi.
- Tasarlanan makinenin elektromanyetik analizi, transient analizi ve yük durumlarındaki analizleri.
- Çeşitli hızlarda ve yüklerde makinenin elektriksel analizleri.

1.3. Bu Çalışmasının Ana Hatları

Tezin ana hatları aşağıdaki gibidir.

Çalışmanın 1. bölümünde konu ile ilgili önceki çalışmalar sunulmuş ve bu alanda yapılmış birçok uluslararası makalenin yanı sıra ulusal tez ve çalışmalara da yer verilmiştir.

Çalışmanın 2. bölümünde eksenel akılı makineler konusunda genel bilgiler verilmiştir. Bu makinelerin çeşitleri, yapıları ve kullanım alanlarıyla ilgili bazı önemli noktalara değinilmiştir. Farklı tipteki makinelerin özellikleri de ortaya konulmuştur. Tasarım aşamasıyla ilgili temel bilgiler verilmiştir. Ayrıca eksenel akılı sabit mıknatıslı nüvesiz senkron generatör için matematiksel modeli ortaya koyulmuştur. Daha sonra makinenin geometrisi için bazı elektriksel ve mekaniksel kriterler dikkate alınarak çizimi yapılmıştır.

Çalışmanın 3. Bölümünde, makine tasarımında kullanılan temel yöntem sunulmuştur. Burada kullanılan bilgisayar paket programı ile ilgili bilgi verilmiştir. Bu makinenin tasarımı üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemiyle analizlerin gerçek değere önemli ölçüde yakın olduğu ortaya koyulmuştur.

Çalışmanın 4. bölümünde ise, tasarımı yapılan makinenin üç boyutlu sonlu eleman yöntemiyle analizi yapılmıştır. Ayrıca tasarımı yapılan eksenel akılı senkron generatörün

farklı hızlarda ve farklı yüklerde elektriksel analizleri verilmiş olup elde edilen bulgular ortaya koyulmuştur.

Çalışmanın son bölümünde ise elde edilen sonuçlar verilmiştir. Bu makine de öne çıkan özellikler verilmiştir. Bunun yanısıra, gelecekte yapılabilecek çalışmalar ile ilgili çeşitli öneriler sunulmuştur.



2. KURAMSAL TEMELLER

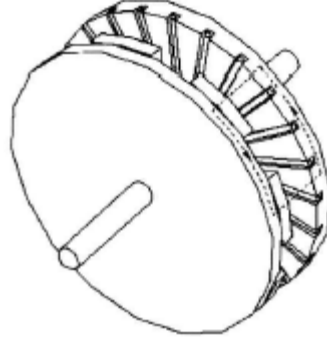
2.1. Eksenel Akılı Makineler ve Sınıflandırılmaları

Eksenel akılı sabit mıknatıslı senkron generatörler, dairesel yapıda tasarlanan diğer makine tiplerine göre disk şekilleri, kompakt yapıları ve güç yoğunluğundaki yükseklik gibi özellikleri sebebiyle oldukça ilgi çekici özelliklere sahiptirler. Eksenel akılı sabit mıknatıslı senkron makineler genel olarak fazla güç üretimine ihtiyaç duyulmayan alanlarda kullanılmaktadırlar. Bu makineler çok kutuplu olarak tasarlanabildiklerinden dolayı özellikle rüzgâr türbinleri gibi düşük devirli uygulamalarda sıkça kullanılmaktadırlar. Ayrıca düşük hızlarla dönebilen generatörler sayesinde rüzgâr hızının 2 m/s altındaki hızlarda bile enerji üretilmesi mümkün olmaktadır.

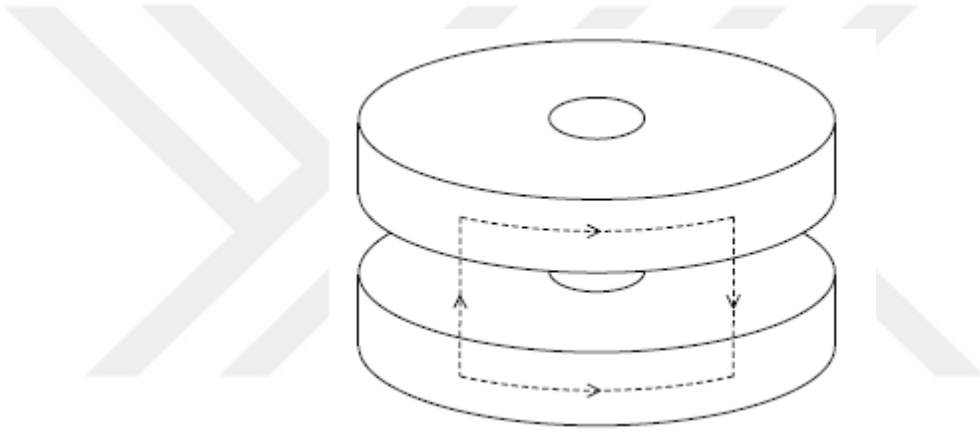
Eksenel akılı sabit mıknatıslı makineler, yapısal olarak eksenel akılı makineler ve radyal akılı makineler olmak üzere ikiye ayrılırlar. Manyetik akının makinenin yarıçap yönünde ilerlemesi suretiyle ortaya çıkan makineler radyal akılı makineler olarak isimlendirilir. Yarıçap yönüne dik olarak bulunan eksenleri boyunca akı geçişine izin veren makineler de eksenel akılı makineler olarak isimlendirilirler. Şekil 2.1’de eksenel akılı makine örneği gösterilmiştir. Şekil 2.2’de radyal akılı sabit mıknatıslı makine örneği gösterilmiştir. Şekil 2.3’te eksenel akılı makinenin akı yolu gösterilmiştir. Şekil 2.4’te radyal akılı makinenin akı yolu gösterilmiştir.



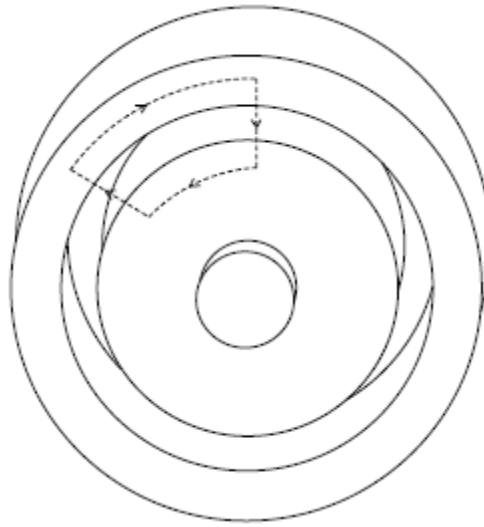
Şekil 2.1. Radyal akılı makine gösterimi (Gieras *et al.* 2008)



Şekil 2.2. Eksenel akılı makine gösterimi (Gieras *et al.* 2008)



Şekil 2.3. Eksenel akılı makinenin akı yolu gösterimi (Hewitt 2005)



Şekil 2.4. Radyal akılı makinenin akı yolu gösterimi (Hewitt 2005)

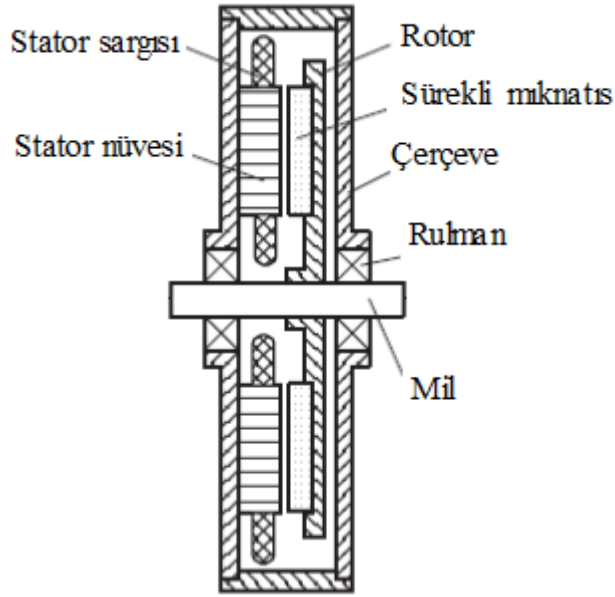
Eksenel akılı sabit mıknatıslı makineler bilindik modellerle karşılaştırıldığında belirgin olarak ortaya çıkan bazı üstün özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir (Chan 1987):

- Bu makinelerin verimlerinin yüksek olması
- Bu tip makineler çok kutuplu yapılabildikleri gibi kompakt olarak tasarlanabilmeleri
- Küçük üretim üniteleri için imalat kolaylığı
- Maliyetlerinin az olması
- Yüksek hızlarda daha az gürültü çıkarması
- Bakım ihtiyacının az olması ve güvenilir olması

Eksenel akılı sabit mıknatıslı makinelerin tasarımlarına bakıldığında tek taraflı ya da çift taraflı olarak imal edilebilirler. Bu makinelerin oluklu ve oluksuz tipleri mevcuttur. Rotorları ortada ya da yanda olan makineler olarak da ayrılabilirler. Bu eksenel akılı sabit mıknatıslı makinelerin mıknatısları rotor içerisine gömülü veya rotor üzerine yapıştırmalı olarak tek modüllü ya da çok modüllü olarak çok çeşitli yapılarda tasarlanmaları mümkündür.

2.1.1. Tek rotorlu ve tek statorlu eksenel akılı sabit mıknatıslı senkron makineler

Eksenel akılı olarak tasarlanan tek taraflı makineler, çift taraflı tasarlanan makinelere nazaran daha basittir. Bu tip makinelerin üretecekleri moment kapasiteleri daha düşüktür. Tipik olarak tek taraflı yüzey mıknatıslı olarak tasarlanan rotorlu makine, elektromekaniksel çelik şeritten laminasyon statorlu eksenel akılı sabit mıknatıslı senkron makineler görülmektedir. Bu makine Şekil 2.5'te gösterilmektedir (Gieras *et al.* 2004).

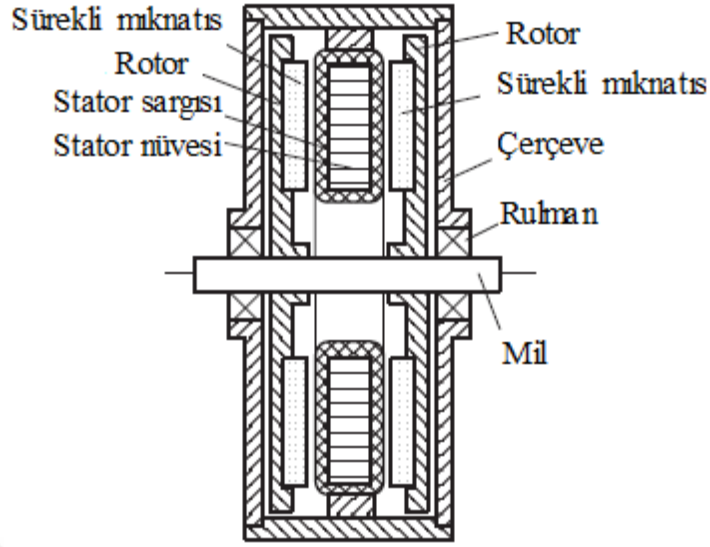


Şekil 2.5. Tek taraflı oluklu makine (Gieras *et al.* 2004)

2.1.2. Çift rotorlu ve tek statorlu oluklu eksenel akılı sabit mıknatıslı senkron makineler

Sabit mıknatıslı çift taraflı eksenel akılı senkron makinelerde stator sargıları stator çekirdeğine yerleştirilirler. Sabit mıknatıslı diskler ise stator etrafında dönerler. Sabit mıknatıslar rotora gömülür ya da rotor yüzeyine yapıştırılır. Manyetik olmayan hava aralığı çok büyüktür. Statorların sargıları birbirine paralel bağlı olarak bağlanır ve böylece makine sargılarından herhangi birisi kopsa bile makine çalışabilir.

Bu tip makineler çift rotorlu makinelerin en çok tercih edilen tipleridir. Bu tip makinelerin önemli avantajları harmonikleri ve elektromotor kuvvetleri daha hassastır. Bunun yanı sıra yüksek güvenilirlik, büyük güç yoğunluğu, yüksek moment yoğunluğu ve düşük moment dalgalanmasına sahiptirler. Rotor kısmında değişik mıknatıslar ve değişik kutup sayıları oluşturulabilir. Bu makine Şekil 2.6’te gösterilmektedir (Gieras *et al.* 2004).

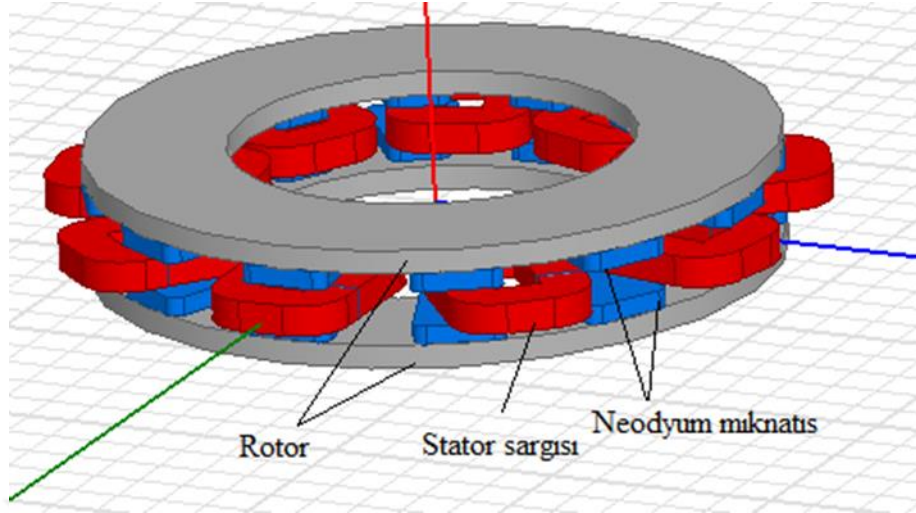


Şekil 2.6. Çift taraflı oluklu makine (Gieras *et al.* 2004)

2.1.3. Çift rotorlu ve tek statorlu oluksuz eksenel akılı sabit mıknatıslı senkron makineler

Statoru iç kısımda olan makineler ferromanyetik stator çekirdeğinde birden çok fazlı (üç fazlı) oluksuz stator sargılarını taşırlar. Bu eksenel akılı makine, dairesel biçimindeki stator yapısı ile çelik şeritlerin sarımından oluşan ya da çelik tozlarının bir kalıba tutturulup preslenmesi ile oluşturulabilir. Bu makinenin toplam kalınlığı, makinedeki hava aralığı ile stator sargıları ve yalıtkanıyla birlikte sargılarının kalınlığı, mekaniksel açıklık ve eksenel olarak mıknatıs kalınlıklarının toplamına eşittir. Çift taraflı makineler kısaca çift rotor olarak adlandırılırlar.

Havanın manyetik geçirgenliği nüvenin manyetik geçirgenliğinden daha düşüktür. Bu sebeple mıknatıs ile stator arasında mesafe ne kadar az ise sargılardaki manyetik akı değeri o kadar fazla olur. Eğer hava aralığı yüksek ise maksimum akı yoğunluğuda az olur. Akı yoğunluğunu istenilen değerlerde tutmak için büyük hacimlerde sabit mıknatısların kullanılmasına ihtiyaç vardır. Bu makine Şekil 2.7’de gösterilmektedir (Minaz *et al.* 2016).

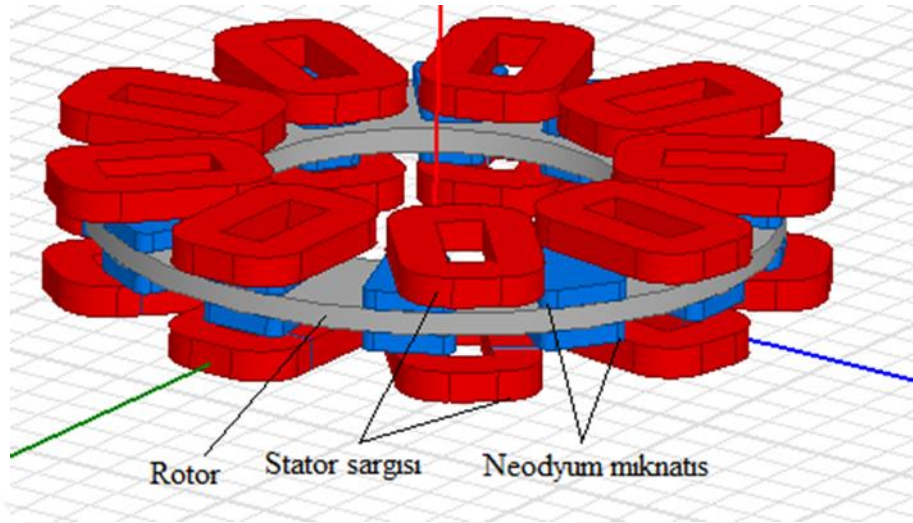


Şekil 2.7. Çift taraflı statoru içte olan nüvesiz makine (Minaz *et al.* 2016)

2.1.4. Çift statorlu ve tek rotorlu oluksuz eksenel akılı sabit mıknatıslı senkron makineler

Çift statorlu olan eksenel akılı generatör yapısında, bir taraflı yapıya göre yaklaşık iki kat daha fazla güç elde edilmektedir (Yicheng *et al.* 2004; So-Young *et al.* 2012). Çift statorlu olan eksenel akılı generatör yapısında, rotor iki taraflı olup, çift statorun arasına yerleştirilmiştir. Rotora sabit mıknatıslar, statorlara da sargılar yerleştirilir.

Çift taraflı eksenel akılı makine yapısı, tek taraflı eksenel akılı makine yapısına göre statorlar ile rotor arasında çekim kuvveti açısından daha kararlı bir yapı elde edilir. Hava aralığı tek makineye göre daha fazladır. Çift statorlu olan eksenel akılı generatörde stator sargıları paralel bağlandığından dolayı sargılardan biri arızalansa dahi makine çalışmaya devam edecektir. Şekil 2.8’de, rotoru içte olan çift taraflı ve statoru nüvesiz bir makine örneği verilmiştir.



Şekil 2.8. Çift taraflı statoru ve rotoru içte olan nüvesiz makine

2.2. Eksenel Akılı Makinelerde Kullanılan Malzemeler

Eksenel akılı senkron generatörlerde kullanılan manyetik malzemelerin niteliklerinin generatör performansı üzerinde etkisi büyük önem arz etmektedir. Bu nedenden dolayı manyetik malzemeler ile ilgili temel bilgilerin ifade edilmesi kaçınılmazdır.

Kullanılan manyetik malzemeler beşe ayrılır (Furlani 2001):

- Diamanyetik malzemeler
- Paramanyetik malzemeler
- Ferromanyetik malzemeler
- Antiferromanyetik malzemeler
- Ferrimanyetik malzemeler

Maddelerin özelliklerinin ortaya çıkmasının ana nedeni, yapılarında bulunan elektronlardır. Atomların yapısında elektronların yanı sıra protonlarda bulunmaktadır. Protonların etkileri çok az olduklarından dolayı bu etkiler ihmal edilir. Bu atomların durumlarına bakıldığında ise atomun bazı elektronlarını eşleşmiş ve bazılarının da

eşleşemediği görülür. Eşleşen elektronların yönlerine bakıldığında ise birbirlerine ters olduğu görülmektedir. Bu durumdan dolayı atomların oluşturdukları manyetik alanlar birbirlerini yok edecekler. Bu atomik yapıda bulunan maddelerin elektron konumlarının durumu o malzemenin manyetik özellikleri hakkında önemli bilgiler verir (Göllü 2016).

Diamanyetik maddenin yapısındaki atomların elektronları birbirleriyle eşleşmiştir. Bu eşleşmiş elektronlar birbirlerine göre ters hareket edeceklerinden dolayı manyetik alan oluşmayacaktır. Yukarıda ifade edilen durumlardan dolayı diamanyetik malzemeler manyetik alanlardan etkilenmezler.

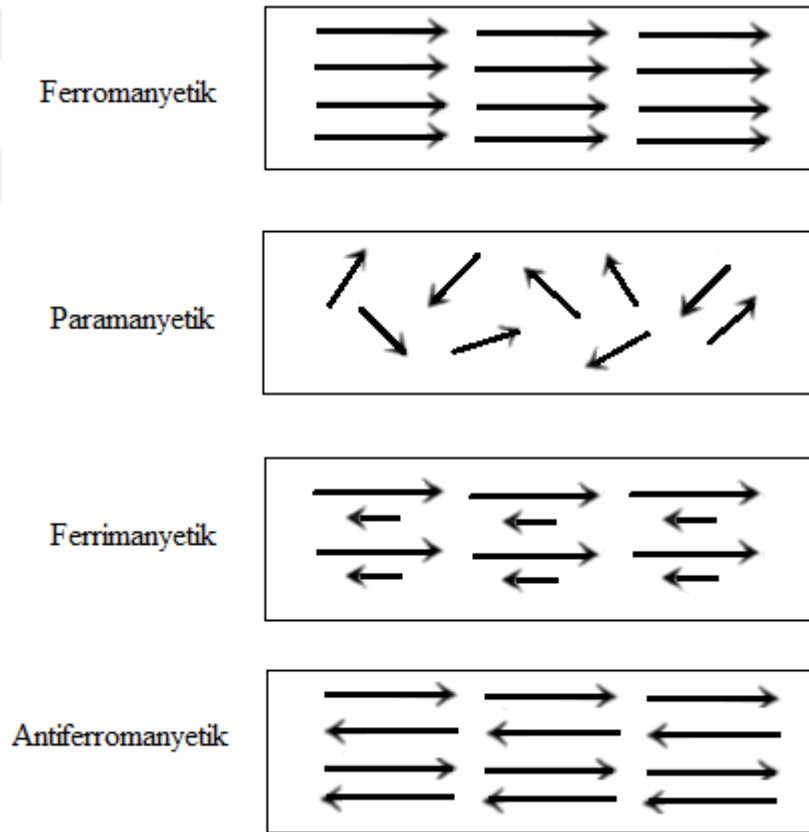
Paramanyetik maddelerlerin manyetizmasının atomik boyutlarda bir büyüklüğü vardır. Bu maddelerin özellikleri manyetik açıdan çok zayıftır. Bu tip bir maddeye manyetik alan uygulandığında bu alan ile elektronlar aynı doğrultuda dizilirler. Bunun sonucunda bir moment oluşur. Oluşan bu manyetik moment sıcaklık değişimlerinden etkilenir (Furlani 2001; Eryürek 2016).

Ferromanyetik maddeler ise çok düşük bir manyetik alan içerisinde bile eşleşen elektronlar birbirlerine paralel olarak yönlenmeye çalışırlar. Bu durumda manyetik alan ortadan kaldırılrsa bile bu malzemeler mıknatıslanmış olarak kalmaya devam edecektir. Bu tip malzemelere misal olarak Nikel, Demir, Dispozyum, Goddinyum ve Kobalt gösterilebilir. Bu tip malzemelerdeki komşu manyetik momentler arasındaki bağ kuvveti oldukça fazladır (Eryürek 2016).

Antiferromanyetik maddelerde ise komşu manyetik momentler birbirlerine ters yönde ve büyüklükleri eşittir. Burada bulunan manyetik alanın vektörel bileşkesi sıfır olmaktadır. Antiferromanyetik maddeler ise komşu manyetik moment büyüklükleri bakımından eşit değildir fakat birbirlerinin tersidirler. Bu özelliklerinden dolayı ortamda net bir manyetik alan bulunmamaktadır (Furlani 2001).

Ferritmanyetik malzemeler oksitler gibi iyonik bileşikler, daha karmaşık manyetik düzenlenme şekilleri kristal yapının sonucu olarak meydana gelebilir. Manyetik

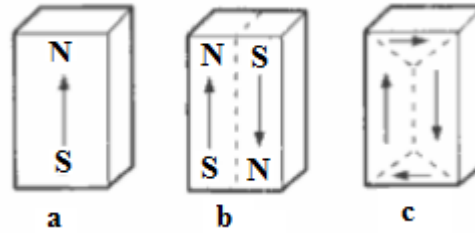
düzenleme türünden biri ferrimanyetizmdir. Manyetik yapı, oksijen tarafından ayrılmış A ve B denilen iki tane manyetik alt örgüden oluşur. Değişim etkileşimlerine oksijen anyonları aracılık eder. Bu durumda, bu etkileşimlere direk olmayan veya süper değişim etkileşimleri denir. En güçlü süper değişim etkileşimleri A ve B alt örgüleri arasındaki spinlerin antiparalel dizilmesine yol açarlar. Ferrimanyetlerde A ve B alt örgülerinin manyetik momentleri eşit değildir. Bu nedenle ferrimanyetizm, ferromanyetize benzer. Bu doğal manyetizasyon, Curie Sıcaklığı, Histerezis eğrisi ve artık mıknatıslanma gibi ferromanyetik davranışların tüm özelliklerini gösterir. Ancak, ferro ve ferrimanyetler çok farklı manyetik düzene sahiptirler. Mıknatıs, iyi bilinen bir ferrimanyetik malzemedir (Adanur 2017).



Şekil 2.9. Manyetik maddelerin sınıflandırılması (Furlani 2001)

2.2.1. Domenler

Ferromanyetik maddeler Curie Sıcaklığının altında manyetik moment çiftleri etkileşim durumuna geçmeye çalışırlar. Bu nedenden dolayı oda sıcaklıklarında bu maddelerin manyetik olarak doyuma gitmeleri gerekmektedir. Bu malzemelerin yapısındaki değişime bakıldığında ise atomik boyutta mıknatıslanma olmadığı görülmektedir. Burada oluşan durum manyetik domenler yardımıyla açıklanır. Domenler yaklaşık olarak 10^{12} - 10^{15} tane atomdan oluşur. Buradaki momentler birbirlerine paraleldir. Bir madde çok küçük boyutlarda ve değişik büyüklüklerde birçok domenden oluşur. Ayrıca bu domenlerin şekil ve yönleri de farklıdır. Bu maddelerde oluşan mıknatıslanma ise burda oluşan bütün domenlerin yapı ve yönsel olarak toplanmasından oluşmaktadır.. Aşağıda Şekil 2.10'da gösterilen bazı maddelerin enerji seviyesi hakkında bilgi vermektedir. Burada gösterilen magnetostatik enerji seviyesi en yüksek olandan en düşü olana doğru sıralanmıştır (Kurt 2006; Sakarya 2009).



Şekil 2.10. Mıknatıslı maddeler

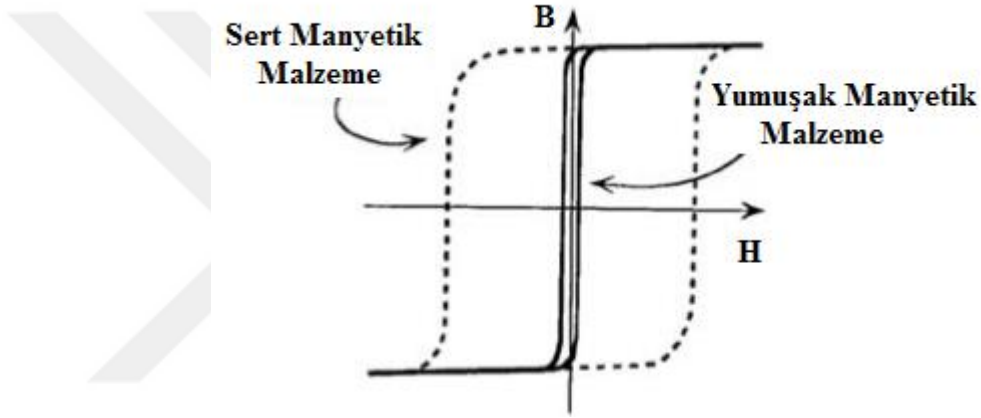
a) En Yüksek Enerji b) Orta Enerji c) En Düşük Enerji (Furlani 2001)

2.2.2. Yumuşak malzemeden oluşan manyetik elemanlar

Bazı maddelerin manyetizma açısından yumuşak ve sert olması, bu maddenin magnetize ya da demagnetize olabilme değerlerine bağlıdır. Burada ifade edilen yumuşak maddelerin özelliği, manyetik özelliği kazanma bakımından kolay ve manyetik özelliği kaybetme bakımından ise çok hassas bir özelliktedir. Ayrıca sert maddeleri özelliği ise yapı itibariyle daha serttirler ve bu maddenin manyetik özelliği

kazanma olayı daha güç olduğu gibi bu manyetik özelliği kaybetmesi de daha güçtür (Kurt 2006).

Yumuşak maddelerde, geçirgenlik yüksek ve ters mıknatıslanma değerleri düşüktür. Sert maddelerde, geçirgenlik düşük ve ters mıknatıslanma değerleri yüksektir. En fazla kullanılan yumuşak manyetik özelliğe sahip maddeler demir silikon alaşımlar, yumuşak ferritler, nikel demir ve yumuşak demirlerdir (Furlani 2001).



Şekil 2.11. Sert manyetik madde ve yumuşak manyetik maddenin B-H Eğrisi

2.2.3. Sert malzemedan oluşan manyetik elemanlar

Sert maddelerde ise geçirgenlik düşük ve ters mıknatıslanma değerleri yüksektir. Bu özelliklerinden dolayı hem zor manyetikleşirler hemde zor demanyetikleşirler. Mıknatıs seçilirken bakılması gereken ilk özellik, ortamda oluşacak alanın kararlılığı ve bu alanın genliğidir. Bu mıknatıslarda aranacak özellik ters mıknatıslanma, mıknatisiyet ve doyma mıknatıslanmasıdır. Sert manyetik maddeler olarak Alnico, Ferrit, Samaryum Cobalt ve Neodyum Demir Bor ($NdFeB$) sayılabilir (Furlani 2001).

2.2.4. Ferrit mıknatıslar

Strontium ve Baryum karıştırılarak sinterlenmesinden ferrit mıknatıslar oluşur. Bu tip karışımlar seramik olarak isimlendirilir. Bu sınıflandırmaya giren mıknatıslar düşük direnç ve demanyetikleşmelerine karşı, düşük fiyatlı olmaları nedeniyle kullanımları oldukça yaygındır. Bunların gelişimleri 1950 yıllarına kadar dayanır. Üretimleri toz yöntemlerine dayanır. Üretim oranlamalarında Demiroksite Stronyum, Kurşun ya da Baryumdan herhangi birinin karbonatının karışımıyla oluşturulur. Bu karşım 1000-1300°C arasında ısıtılır. Bu ısıtma sonucunda toz haline gelirler. Bu toz taneleri karbonat tanecikleri büyüklüğüne kadar küçültülür. Burada aynı yüklü mıknatıslardan oluşan bu tanecikler istenilen şekilde preslenip kurutulmaktadırlar. Bu maddeler tekrardan 1000-1300°C derecede ısıtılıp belirlenecek kütlelerde ve kalıplarda imal edilirler (Furlani 2001; Kurt 2006).

Çizelge 2.1. Seramik mıknatısların özellikleri (Kurt 2006)

	Br (KGs)	Hc (KOe)	Hci (KOe)	BHmax (MGOe)
Seramik 1	2,2	1,86	3,25	1,1
Seramik 5	3,8	2,4	2,5	1,1
Seramik 7	3,4	3,25	4,0	2,75
Seramik 8	3,85	2,95	3,2	3,5
Seramik10	4,2	2,95	3,05	4,2

2.2.5. Alnico mıknatıslar

Alnico mıknatıslar kobalt, demir ve nikel gibi ferromanyetik metaryellere bakır ve alüminyum gibi metallerin değişik oranlarda eklemesiyle oluşturulur. Alnico bu üç elementin birleşiminden oluşmuş ve ismini bunların sembollerinden almıştır. 1931 de ilk olarak Mishima tarafından Japonya da bulunmuştur. Bu buluşta yüzde %12 oranında Alüminyum, %30 oranında Nikel ve %58 oranında ise Demir bulunmaktadır. Daha sonralarda ise Bakır ve Kobalt eklemesiyle çeşitli Alnico mıknatıslar üretilmeye başlanmıştır. Burada üretilen mıknatıslar sıvı olarak ya da maddelerin preslenerek ısıtılmasından sonra oluşturulmuştur. İlk ortaya çıkarıldığı zaman çok kullanılan bu

mıknatıslar şimdilerde Azrak Toprak ve Ferrit mıknatısların bulunmasıyla birlikte çok az kullanılır duruma gelmiştir (Cullity and Graham 2009).

Alnico alaşımının en belirgin özelliği yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklıdır. Bu özelliğinden dolayı özel kullanım yerleri mevcuttur. Buna ilave olarak üretim maliyetleri oldukça önem arz etmektedir. Ayrıca ters mıknatıslanma kuvvetleri düşük, sert yapılı ve kırılğan olmaları nedeniyle mekanik sınırlamaları oluşmuştur (Cullity and Graham 2009).

Çizelge 2.2. Pres işlemi görmüş alnico özelliği (Furlani 2001)

Alnico (Sinterlenmiş)	2	5	6	8
Br (T)	0,71	1,05	0,94	0,76
H _c (kAm ⁻¹)	43,8	47,8	62,9	119
H _{ci} (kAm ⁻¹)	45,3	49,3	65,2	134
(BH) max (kJm ⁻³)	11,9	24	23	36
μ _r	6,4	4,0	4,5	2,1
Yoğunluk (kg/m ³)	6837	7000	6892	6975
Curie Sıcaklığı (C°)	810	900	860	860

Çizelge 2.3. Döküm alnico özelliği (Furlani 2001)

Döküm Alnico	2	5	6	8
Br (T)	0,75	1,24	1,5	0,82
H _c (kAm ⁻¹)	44,6	50,9	62,1	131,3
H _{ci} (kAm ⁻¹)	46,1	54,1	63,7	148
(BH) max (kJm ⁻³)	13,5	43,8	31,0	42,2
μ _r	6,4	4,3	5,3	2,0
Yoğunluk (kg/m ³)	7086	7308	7418	7252
Curie Sıcaklığı (°C)	810	900	860	860

2.2.6. Samaryum kobalt mıknatıslar

Bu tip mıknatıslar atom numaraları 58-71 arasında bulunan elementlerdir. Bu elementler Azrak Toprak mıknatısları olarak bilinmektedirler. 1960 yıllarından itibaren gelişimi

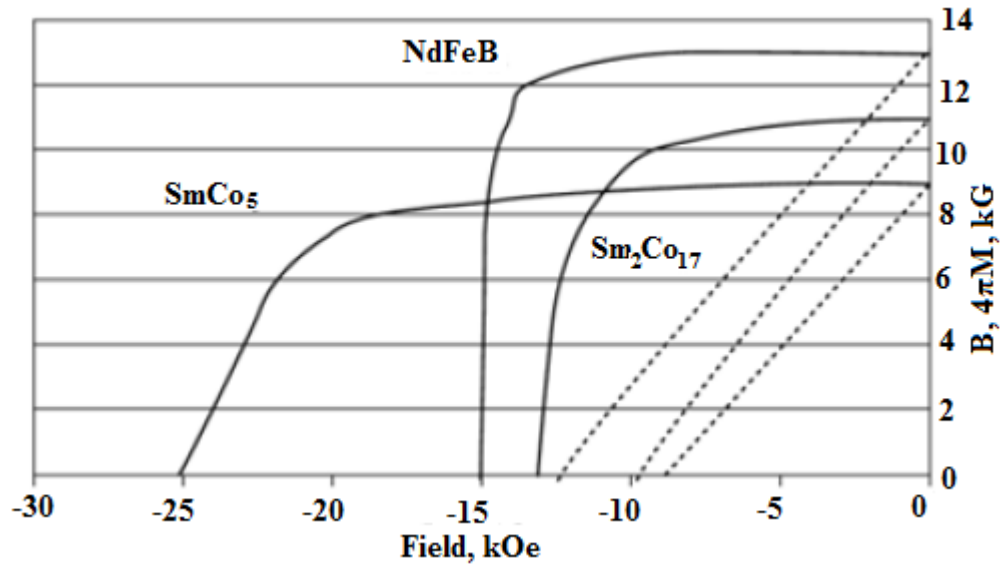
gözlemlenmiştir. Samaryum Kobalt 5 ve Samaryum Kobalt 17 olarak en çok imal edilen iki çeşidi vardır. Bu mıknatıslar maliyet açısından cazip değildirler. Samaryum Kobalt mıknatıslar 300°C sıcaklıklara kadar kullanılabilirlikleri ve ters mıknatıslanma özelliklerinin yüksek olması nedeniyle tercih edilmektedirler (Furlani 2001; Kurt 2006).

2.2.7. Neodyum demir bor mıknatıslar

Neodyum Demir Bor (NdFeB) mıknatısları Samaryum Kobalt Mıknatısları gibi Azrak Toprak elementleri mıknatısları grubuna girerler. Neodyum Demir Bor mıknatıslar 1980 yıllarının başlarında keşfedilmiştir. Bu mıknatısların düşük maliyetleri nedeniyle Samaryum Kobalt mıknatıslarına bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır. Bu maliyetlerinin az olmasının nedeni ise Samaryum Kobalt mıknatıslara göre doğada daha fazla bulunmasıdır. Neodyum Demir Bor (NdFeB) mıknatıslarının tozları bazı değişik yöntemlerle işlenmesiyle üretilmektedir. Bu mıknatısları üretim aşamasında basıncın yanısıra uygulanan manyetik alanlar mıknatısın performansını en yükseğe çıkarmaya yardımcı olacak şekilde uygulanır. Neodyum Demir Bor (NdFeB) mıknatıslarının yüzey kaplaması olarak çinko ve nikel gibi elementler kullanılmaktadır (Furlani 2001; Kurt 2006).

Neodyum Demir Bor (NdFeB) mıknatısların samaryum mıknatıslara göre bazı avantajları vardır. Bu avantajlar aşağıdaki gibi sıralanabilir (Mceproducts 2016).

- Doğada daha fazla bulunduğu için samaryuma göre maliyeti daha ucuzdur.
- Daha güçlü bir yapıya sahiptirler.
- Samaryum mıknatısına göre daha hafiftirler.
- Hafif olmasından dolayı hard disk, sensörler, motorlar, bilgisayarlar ve ses kayıt cihazları gibi birçok kullanım alanları mevcuttur.



Şekil 2.12. Azrak toprak mıknatıslarının demanyetikleşme eğrileri (Cullity and Graham 2009)

2.3. Eksenel Akılı Generatör İçin Matematiksel Hesaplamalar

Bu tez çalışmasında tasarlanan eksenel akılı sabit mıknatıslı generatör için bazı matematiksel hesaplamalar verilmiştir. Bu matematiksel hesaplamalarda manyetik akı hesabı da yapılmıştır. Manyetik hesap ile ilgili bazı ifadeler verilmiştir. Bu çalışmada tasarlanan, statoru çekirdeksiz eksenel akılı sabit mıknatıslı generatör iki stator ve üç rotordan oluşmaktadır. Tasarlanan eksenel akılı sabit mıknatıslı generatör Şekil 2.14'te verilmiştir.

Bu çalışmada tasarlanacak eksenel akılı sabit mıknatıslı generatörün temel prensipleri açıklanacaktır. Burada yapılan hesaplamalarda manyetik akı hesabı, elektromanyetik tork ve EMK hesabı, bakır kayıpları hesabı, demir kayıpları hesabı, verim hesabı ve harmonik hesabı yapılması için bazı eşitlikler verilecektir.

2.3.1. Manyetik akı hesabı

Manyetik akı yoğunluğu dağılımı sinüsoidal dalganın oluşturulması için sabit mıknatıslar tarafından uyarılmaktadır. Ortalama manyetik akı yoğunluğu denklem 2.1’de verilmiştir (Gieras *et al.* 2004).

$$\begin{aligned} B_{avg} &= \frac{1}{\pi/p} \int_0^{\pi/p} B_{mg} \sin(p\alpha) d\alpha = -\frac{p}{\pi} B_{mg} \left[\frac{1}{p} \cos(p\alpha) \right]_0^{\pi/p} \\ &= -\frac{1}{\pi} B_{mg} [\cos \pi - \cos 0] = \frac{2}{\pi} B_{mg} \end{aligned} \quad (2.1)$$

Manyetik akı hesabı ise aşağıdaki denklemde verilmiştir.

$$\phi_f = \int_{R_{in}}^{R_{out}} \alpha_i B_{mg} \frac{2\pi}{2p} r dr = \alpha_i B_{mg} \frac{\pi}{p} \left[\frac{r^2}{2} \right]_{R_{in}}^{R_{out}} = \alpha_i B_{mg} \frac{\pi}{2p} (R_{out}^2 - R_{in}^2) \quad (2.2)$$

Hava boşluğunda maksimum manyetik akı yoğunluğu denklem 2.3 gibi hesaplanır (Skaar *et al.* 2003).

$$B_{mg} = B_r \cdot \frac{l_m}{l_m + \delta} \quad (2.3)$$

Elektromanyetik tork ve emf

Eksenel akılı makinelerde tork üretimi boyutların, yarıçapın bir fonksiyonu olması nedeniyle elektromanyetik tork yarıçap boyunca süreklidir ve silindirik olanlardaki gibi sabit değildir. Eksenel akılı makinelerin kutup adımı ve kutup genişliği yarıçapın bir fonksiyonudur. Bunlar sırasıyla aşağıdaki eşitliklerle verilir.

Kutup adımı ve genişliği yarıçapın fonksiyonu iken α_i parametresi normalde yarıçaptan bağımsızdır.

$$\alpha_i = \frac{B_{avg}}{B_{mg}} \quad (2.4)$$

$$\tau(r) = \frac{2\pi r}{2p} = \frac{\pi r}{p} \quad (2.5)$$

$$b(r) = \alpha_i \tau(r) = \alpha_i \frac{\pi r}{p} \quad (2.6)$$

$$k_d = \frac{R_{in}}{R_{out}} \quad (2.7)$$

İletkende geçen akım yoğunluğunun değeri,

$$J = \frac{I}{S} \quad (2.8)$$

Disk üzerinde etki eden yüzeysel kuvvet Amper denklemi temelinde hesaplanabilir.

$$\vec{dF}_x = I_a (\vec{dr} \times \vec{B}_g) = A(r)(\vec{dS} \times \vec{B}_g) \quad (2.9)$$

Manyetik akıya göre ortalama elektromanyetik tork;

$$T_d = 2 \frac{p}{\pi} m_1 N_1 k_{w1} \phi_f I_a \quad (2.10)$$

Sinüsoidal akım ve sinüs manyetik akı yoğunluğu için etkin tork elde etmek için yukarıdaki eşitlik $\pi\sqrt{2}/4$ katsayı ile çarpılması gerekmektedir.

$$T_d = \frac{m_1}{\sqrt{2}} p N_1 k_{w1} \phi_f I_a = k_T I_a \quad (2.11)$$

$$k_T = \frac{m_1}{\sqrt{2}} p N_1 k_{w1} \phi_f \quad (2.12)$$

$$k_{w1} = k_{d1} \cdot k_{p1} \quad (2.13)$$

Sargı faktörü (k_{w1}) değeri 0,85-0,95 arasında olmalıdır (Saadat *et al.* 2004).

EMF için denklemler aşağıda verilmiştir:

Boş çalışmada emk, manyetik akı dalga biçiminin birinci harmoniğinin türevi alınarak bulunur.

$$e_f = N_1 k_{w1} \frac{d\phi_{f1}}{dt} = 2\pi f k_{w1} \phi_f \cos \omega t \quad (2.14)$$

$$E_f = \pi\sqrt{2} f N_1 k_{w1} \phi_f = \pi\sqrt{2} N_1 k_{w1} \phi_f n_s = k_E n_s \quad (2.15)$$

$$k_E = \pi\sqrt{2} N_1 k_{w1} \phi_f \quad (2.16)$$

Bunun yanısıra indüklenen emk aşağıda verilmiştir.

$$\vec{E}/l = \vec{v} \times \vec{B}_b \text{ ya da } dE = B_g v dr \quad (2.17)$$

$$v = v_x = 2\pi n \quad (2.18)$$

$$dE = B_g (2\pi n) dr \quad (2.19)$$

$$E = \int_{0.5R_{in}}^{0.5R_{out}} B_g (2\pi n) dr = \frac{\pi B_g}{4} (R_{out}^2 - R_{in}^2) \quad (2.20)$$

Bakır kayıplarının hesaplanması

Bir faz başına statör bakır direnci aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$R_{PH,DC} = \frac{l_{cu} (1 + k_{cu} (T - 20))}{\sigma_{cu} S_{cu} a} \quad (2.21)$$

Belirli bir kesite sahip yuvarlak iletkenler kullanılarak sarımı gerçekleştirilen devir sayıları az olan makineler hesaba katıldığında, faz sargılarının alternatif akımda direnci; doğru akımdaki faz direnci ile pratikte aynı kabul edilmektedir. Bundan dolayı, aşağıda kullanılan eşitliklerde faz direnci hesaplaması doğru olup hesaplama modellerinde kullanımı uygundur. Hesaplanan değerler üzerinden akım ve dirence bağlı kalınarak, bir stator sargısındaki bakır kayıpları aşağıdaki ifadelerden bulunabilir.

$$P_{cu} = m R_{PH} I_{PH}^2 \quad (2.22)$$

Demir kayıplarının hesaplanması

Demir kayıplarını üç bölüme sınıflandırmak mümkündür. Bu sınıflandırmalar aşağıdaki gibi verilebilir:

- Histerezis kayıpları

- Eddy kayıpları
- Aşırı kayıplar (düzensiz kayıplar)

Yukarda ifade edilen kayıplara göre, birim hacimde meydana gelen demir kayıpları aşağıdaki gibi hesaplanabilir (Deng 1999).

$$P_{Fe} = k_{hys} B^2 f + \pi^2 \frac{\sigma_{Fe} d^2}{6} (Bf)^2 + 8.67 k_{ex} (Bf)^{1.5} \quad (2.23)$$

Histerezis ve aşırı kayıp katsayıları farklı frekansların ölçümünde akı yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak kayıp eğrilerine bağlı olarak bulunur. Bu eğriler nüve üreten firma tarafından saklanılmaktadır.

Kaçak yük kayıpları; alternatif akım makinelerinin ferromanyetik nüve geçirgenliğine göre farklılık gösteren indüklenmiş yüksek frekanslı kayıplar ve diğer üretilen elektromanyetik kayıplar olarak ortaya çıkar. Bu kaçak yüklerin hesaplanması zordur (Gireas *et al.* 1997).

Kaçak yük kayıpları çıkış gücü göz önüne alınarak bulunur.

$$P_{str} = k_{str} P_{out} \quad (2.24)$$

Nüveli makinelere ek olarak, yüzey kayıpları (stray load loss) gücü 10 kW'a kadar olan makinelerde 0,03 ile 0,05 arasında alınmaktadır. Gücü 10 kW'an büyük olan makinelerde ise 0,005 ile 0,01 arasında alınmaktadır. Kaçak yük kayıpları için doğru bir ifade çıkartılmak için makine üzerinde bazı ölçümler yapılarak bu değer çıkış gücünün bir fonksiyonu olarak ortaya çıkarılabilmektedir (Chan *et al.* 2009). Daha uygun sonuçlara ulaşmak için de birçok makine üretilip test edilmesi daha doğru bir fonksiyon ortaya koyacaktır.

Bu çalışmamızda demir kayıplarını M19 çeliğinin üretici firma tarafından verilen değerleri referans alınmıştır.

2.3.2. Mekaniksel kayıplar

Mekanik kayıplar iki şekilde sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırma aşağıda verilmiştir:

- Sürtünme kaynaklı kayıplar
- Yataktan kaynaklı kayıplar

Sürtünmeden kaynaklı kayıplar makinenin dönen rotorunun hava ile temasından dolayı sürtünme olarak ortaya çıkmaktadır. Eksenel akılı olarak tasarlanan makinelerde sürtünmeden dolayı oluşan kayıplar dönen diskler için sürtünme kayıpları korelasyonları kullanılarak hesaplanabilir (Daily *et al.* 1960).

Hesaplanan sürtünme faktörüne bağlı olarak eksenel akılı makinelerde sürtünme momenti hesaplanabilir. Bu ifade aşağıda verilmiştir:

$$T_f = \frac{k_f \sigma_{air} \pi \omega^2 (r_{out}^5 - r_{in}^5)}{2} \quad (2.25)$$

Yatak kaynaklı kayıplar eksene ve radyal yüklere bağlıdır. Yatak kaynaklı kayıplar ise yatak üreticisi tarafından tedarik edilen veya analitik eşitlikler tarafından hesaplamalar kullanılarak yapılır (Gieras *et al.* 1997).

$$P_b = 3 \frac{k_b G_r \Omega}{100 \pi} \quad (2.26)$$

Verim hesabı

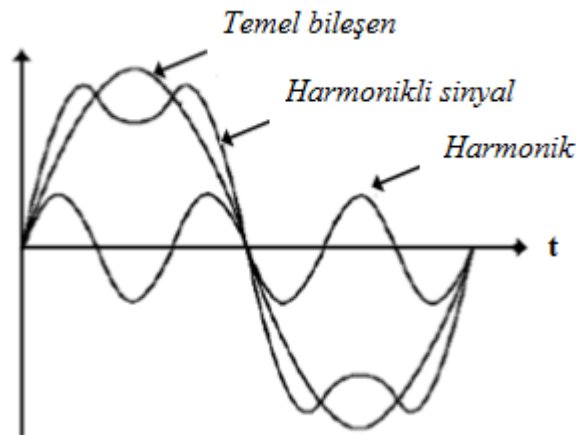
Eksenel akıllı makinenin verimini hesaplamak için makinenin çıkış gücü ve hesaplanan kayıplar kullanılarak yapılır.

$$\% \eta = \frac{P_{output}}{P_{input}} = \frac{P_{input}}{P_{output} + P_k} \times 100 \quad (2.27)$$

2.3.3. Harmonik analiz

Herhangi bir frekanstaki dalga genliği kendi frekanslarındaki dalgaların genliğinin toplamına eşittir. Bu toplam dalgayı oluşturan sinüs eğrilerinin her birine harmonik adı verilmektedir. Şekil 2.13'te temel dalga oluşan harmonik analiz eğrisi ve harmonik dalgasının toplamı olan sinyal eğri örneği gösterilmektedir. Farklı genlikteki karmaşık dalga formları ile temel frekansların belirli katlarında olan frekanslara sahip genliklerin toplamıdır.

Birinci harmonikte dalga'nın kendisidir. Bu dalga temel bileşen olarak adlandırılır. İkinci harmonikte ise birinci harmoniğe sahip dalga'nın iki katı frekansı olan formudur. Üçüncü harmonikte ise birinci harmoniğe sahip dalga'nın üç katı frekansı olan dalga formudur. Bu şekilde devam etmektedir. Bunun sonucu olarak n harmonik birinci harmoniğe sahip dalga'nın n katı frekansa sahip dalga formudur.



Şekil 2.13. Harmonik sinyali ve temel bileşen

Çizelge 2.4. 50 Hz frekans için temel bileşenlerin harmonik değerleri

1. Harmonik (Temel Bileşen)	50 Hz
3. Harmonik	150 Hz
5. Harmonik	250 Hz
7. Harmonik	350 Hz
9. Harmonik	450 Hz
.	.
.	.
.	.
n. Harmonik	nx50 Hz

Toplam harmonik bozulma (THD), oluşan harmonik bileşenlerin temel bileşenle karşılaştırılmasıdır (Emanuel 1990; Shmilovitz 2005). Toplam harmonik bozulma faktörü denklem 2.28’de gösterildiği gibi genellikle yüzde cinsinde ifade edilmektedir (Hoevenaars 2003). Burada kullanılan gerilim ya da akım değerleri etkin değerler olup, gerilim ve akım dalgası için toplam harmonik bozulma ifadesi aşağıda verilmiştir.

$$TDH = \sqrt{\frac{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots + V_n^2}{V_1^2}} \times 100\% \quad (2.28)$$

$$TDH = \sqrt{\frac{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots + I_n^2}{I_1^2}} \times 100\% \quad (2.29)$$

Harmonik bozulma elektriksel olarak bir kirlilik alametidir. Eğer harmoniklerdeki bozulmalar standartların üstünde ise birçok problemle karşılaşılır. Karşılaşılan bu problemler generatör, motor ve cihazlarda titreşim, gürültü ve ısınma gibi birçok olumsuz etkilere sebebiyet verir. Dünyaca kabul görülen uluslararası elektroteknik komisyonu tarafından hazırlanan IEC61000-4-30 ve IEC 61000-4-7, IEC61000-4-15 uluslararası standartlara göre gerilimde toplam harmonik bozulma oranının %8’i geçmemesi gerekmektedir.

2.4. Eksenel Akılı Sabit Mıknatıslı Senkron Makinenin Matematiksel Modellemesi

Tasarımı planlanan eksenel akılı sabit mıknatıslı makinenin matematiksel modeli çıkarılmıştır. Matematiksel modelli elde edilen eksenel akılı daimi mıknatıslı senkron generatörün üç fazlı birinci stator sargıları için gerilim denklemleri aşağıdaki şekilde verilmiştir:

$$V_{s1,abc} = R_{s1,abc} \cdot i_{s1,abc} + L_{s1,abc} \cdot \frac{d}{dt} i_{s12,abc} + \frac{d}{dt} \lambda_{PM} \quad (2.30)$$

Birinci stator için Gerilim Matrisi aşağıda verilmiştir:

$$V_{s1,abc} = [V_{a1} \quad V_{b1} \quad V_{c1}]^t \quad (2.31)$$

Birinci stator için Akım Matrisi aşağıda verilmiştir:

$$i_{s1,abc} = [i_{a1} \quad i_{b1} \quad i_{c1}]^t \quad (2.32)$$

Birinci ve ikinci stator için Akım Matrisi aşağıda verilmiştir:

$$i_{s12,abc} = [i_{a1} \quad i_{b1} \quad i_{c1} \quad i_{a2} \quad i_{b2} \quad i_{c2}]^t \quad (2.33)$$

Birinci stator için Sargı Direnci Matrisi aşağıda verilmiştir:

$$[R_{s1,abc}] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

Birinci stator için Sargı Endüktans Matrisi aşağıda verilmiştir:

$$[L_{s1,abc}] = \begin{bmatrix} L & M_1 & M_1 & M_2 & M_3 & M_3 \\ M_1 & L & M_1 & M_3 & M_2 & M_3 \\ M_1 & M_1 & L & M_3 & M_3 & M_2 \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

Daimi mıknatıslar için üç fazlı Manyetik Akı Matrisi aşağıda verilmiştir:

$$\lambda_{PM} = \begin{bmatrix} \lambda_{1PM} \cos(\theta) & \lambda_{1PM} \cos(\theta) & \lambda_{2PM} \cos(\theta) \\ \lambda_{1PM} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \lambda_{1PM} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \lambda_{2PM} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \lambda_{1PM} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \lambda_{1PM} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \lambda_{2PM} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

Denklem 2.31, 2.32, 2.33, 2.34, 2.35 ve 2.36 ifadeleri denklem 2.30'da yerine yazılır ise birinci stator için Gerilim Matrisi elde edilir. Birinci stator için Gerilim Matrisi aşağıda verilmiştir:

$$V_{s1,abc} = \begin{bmatrix} R_S & 0 & 0 \\ 0 & R_S & 0 \\ 0 & 0 & R_S \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_{a1} \\ i_{b1} \\ i_{c1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & M_1 & M_1 & M_2 & M_3 & M_3 \\ M_1 & L & M_1 & M_3 & M_2 & M_3 \\ M_1 & M_1 & L & M_3 & M_3 & M_2 \end{bmatrix} * \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{a1} \\ i_{b1} \\ i_{c1} \\ i_{a2} \\ i_{b2} \\ i_{c2} \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

$$+ \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_{1PM} \cos(\theta) & \lambda_{1PM} \cos(\theta) & \lambda_{2PM} \cos(\theta) \\ \lambda_{1PM} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \lambda_{1PM} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \lambda_{2PM} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \lambda_{1PM} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \lambda_{1PM} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \lambda_{2PM} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix}$$

Birinci statorda elde edilen A fazı için gerilim değeri aşağıda verilmiştir:

$$\begin{aligned}
V_{s1,a} = & i_{a1} * R_S + L \frac{d}{dt}(i_{a1}) + M_1 \frac{d}{dt}(i_{b1}) + M_1 \frac{d}{dt}(i_{c1}) + M_2 \frac{d}{dt}(i_{a2}) + M_3 \frac{d}{dt}(i_{b2}) + \\
& M_3 \frac{d}{dt}(i_{c2}) + 2 \frac{d}{dt}(\lambda_{1PM} \cos(\theta)) + \frac{d}{dt}(\lambda_{2PM} \cos(\theta))
\end{aligned} \tag{2.38}$$

Birinci statorda elde edilen B fazı için gerilim değeri aşağıda verilmiştir:

$$\begin{aligned}
V_{s1,b} = & i_{b1} * R_S + M_1 \frac{d}{dt}(i_{a1}) + L \frac{d}{dt}(i_{b1}) + M_1 \frac{d}{dt}(i_{c1}) + M_3 \frac{d}{dt}(i_{a2}) + M_2 \frac{d}{dt}(i_{b2}) + \\
& M_3 \frac{d}{dt}(i_{c2}) + 2 \frac{d}{dt}\left(\lambda_{1PM} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)\right) + \frac{d}{dt}\left(\lambda_{2PM} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)\right)
\end{aligned} \tag{2.39}$$

Birinci statorda elde edilen C fazı için gerilim değeri aşağıda verilmiştir:

$$\begin{aligned}
V_{s1,c} = & i_{c1} * R_S + M_1 \frac{d}{dt}(i_{a1}) + M_1 \frac{d}{dt}(i_{b1}) + L \frac{d}{dt}(i_{c1}) + M_3 \frac{d}{dt}(i_{a2}) + M_3 \frac{d}{dt}(i_{b2}) + \\
& M_2 \frac{d}{dt}(i_{c2}) + 2 \frac{d}{dt}\left(\lambda_{1PM} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)\right) + \frac{d}{dt}\left(\lambda_{2PM} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)\right)
\end{aligned} \tag{2.40}$$

Matematiksel modelli elde edilen eksenel akılı daimi mıknatıslı senkron generatörün üç fazlı ikinci stator sargıları için gerilim denklemleri aşağıdaki şekilde verilmiştir:

$$V_{s2,abc} = R_{s2,abc} \cdot i_{s1,abc} + L_{s2,abc} \cdot \frac{d}{dt} i_{s12,abc} + \frac{d}{dt} \lambda_{PM} \tag{2.41}$$

İkinci stator için Gerilim Matrisi aşağıda verilmiştir:

$$V_{s2,abc} = [V_{a2} \quad V_{b2} \quad V_{c2}] \tag{2.42}$$

İkinci stator için Akım Matrisi aşağıda verilmiştir:

$$i_{s2,abc} = [i_{a2} \quad i_{b2} \quad i_{c2}]^T \quad (2.43)$$

İkinci stator için Sargı Direnci Matrisi aşağıda verilmiştir:

$$[R_{s2,abc}] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

Birinci stator için Sargı Endüktans Matrisi aşağıda verilmiştir:

$$[L_{s2,abc}] = \begin{bmatrix} M_2 & M_3 & M_3 & L & M_1 & M_1 \\ M_3 & M_2 & M_3 & M_1 & L & M_1 \\ M_3 & M_3 & M_2 & M_1 & M_1 & L \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

Denklem 41, 42, 33, 44, 45 ve 36 ifadeleri denklem 2.44'de yerine yazılır ise ikinci stator için Gerilim Matrisi elde edilir. İkinci stator için Gerilim Matrisi aşağıda verilmiştir:

$$V_{s2,abc} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_{a2} \\ i_{b2} \\ i_{c2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_2 & M_3 & M_3 & L & M_1 & M_1 \\ M_3 & M_2 & M_3 & M_1 & L & M_1 \\ M_3 & M_3 & M_2 & M_1 & M_1 & L \end{bmatrix} * \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{a1} \\ i_{b1} \\ i_{c1} \\ i_{a2} \\ i_{b2} \\ i_{c2} \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

$$+ \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_{1PM} \cos(\theta) & \lambda_{1PM} \cos(\theta) & \lambda_{2PM} \cos(\theta) \\ \lambda_{1PM} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \lambda_{1PM} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \lambda_{2PM} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \lambda_{1PM} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \lambda_{1PM} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \lambda_{2PM} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix}$$

Birinci statorda elde edilen A fazı için, gerilim değeri aşağıda verilmiştir:

$$V_{s2,a} = i_{a2} * R_S + M_2 \frac{d}{dt}(i_{a1}) + M_3 \frac{d}{dt}(i_{b1}) + M_3 \frac{d}{dt}(i_{c1}) + L \frac{d}{dt}(i_{a2}) + M_1 \frac{d}{dt}(i_{b2}) + M_1 \frac{d}{dt}(i_{c2}) + 2 \frac{d}{dt}(\lambda_{1PM} \cos(\theta)) + \frac{d}{dt}(\lambda_{2PM} \cos(\theta)) \quad (2.47)$$

Birinci statorda elde edilen B fazı için gerilim değeri aşağıda verilmiştir:

$$V_{s2,b} = i_{b2} * R_S + M_3 \frac{d}{dt}(i_{a1}) + M_2 \frac{d}{dt}(i_{b1}) + M_3 \frac{d}{dt}(i_{c1}) + M_1 \frac{d}{dt}(i_{a2}) + L \frac{d}{dt}(i_{b2}) + M_1 \frac{d}{dt}(i_{c2}) + 2 \frac{d}{dt}\left(\lambda_{1PM} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)\right) + \frac{d}{dt}\left(\lambda_{2PM} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)\right) \quad (2.48)$$

Birinci statorda elde edilen C fazı için gerilim değeri aşağıda verilmiştir:

$$V_{s2,c} = i_{c2} * R_S + M_3 \frac{d}{dt}(i_{a1}) + M_3 \frac{d}{dt}(i_{b1}) + M_2 \frac{d}{dt}(i_{c1}) + M_2 \frac{d}{dt}(i_{a2}) + M_2 \frac{d}{dt}(i_{b2}) + L \frac{d}{dt}(i_{c2}) + 2 \frac{d}{dt}\left(\lambda_{1PM} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)\right) + \frac{d}{dt}\left(\lambda_{2PM} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)\right) \quad (2.49)$$

Denklem 30 ile denklem 49 arasındaki matematiksel ifadeleri çıkarılan eksenel akılı daimi mıknatıslı senkron generatör için gerilim değeri denklem 50’de, akım değeri ise denklem 51’de verilmiştir. Birinci stator ve ikinci statorlar birbirlerine paralel bağlandığından dolayı stator sargılarından indüklenecek gerilim değerleri birbirlerine eşit olacaktır.

Gerilim değerleri için ifadeler aşağıda gösterilmektedir:

$$[V_{s,abc}] = [V_{s1,abc}] = [V_{s2,abc}] = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.50)$$

Birinci stator ve ikinci statorlar birbirlerine paralel bağlandığından dolayı stator sargılarından akacak akım değerlerinin toplamı ana koldan akacak akıma eşit olacaktır.

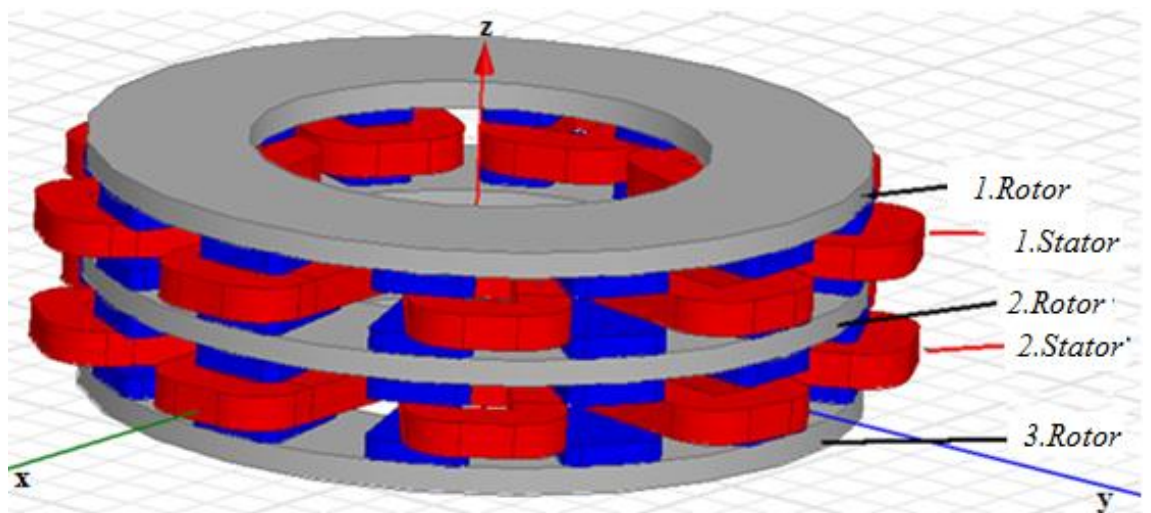
Akım değerleri için ifadeler aşağıda gösterilmektedir:

$$\begin{bmatrix} i_{s,abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{a1} + i_{a2} \\ i_{b1} + i_{b2} \\ i_{c1} + i_{c2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.51)$$

Eksenel Akılı Daimi Mıknatıslı Senkron Generatörün Tasarımı

Eksenel akılı daimi mıknatıslı tasarımında ana amaç, çıkış gücünün maksimum değerde elde etmektir. Tasarlanan makinenin çıkış gücünün tahmini değeri aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanabilir (Gieras *et al.* 2004).

$$P_{out} \cong \frac{\pi^2}{8} k_i k_p n (1 + k_d) (1 - k_d^2) B_g R_o^3 \quad (2.52)$$



Şekil 2.14. Eksenel akılı sabit mıknatıslı generatörün görünümü

Sabit mıknatıslar: Mavi görünümünde. Rotorlar: Gri renk görünümündedir. Stator sargıları: Kırmızı renk görünümündedir

Makinenin çıkış gücünün maksimuma ulaşması için rotor iç yarıçapının rotor dış yarıçapına oranı $k_d = 1/\sqrt{3}$ deki gibi olmalıdır (Gieras *et al.* 2004). Eksenel akılı sabit mıknatıslı senkron generatörde boyut ve güç arasındaki ilişki denklem 52’de verilmiştir (Gieras *et al.* 2004). Tasarlanan eksenel akılı oluksuz daimi mıknatıslı senkron generatör Şekil 2.14’te verilmiştir. Bu tasarımda oluksuz iki stator ve üç rotor bulunmaktadır. Buradaki k_p elektrik dalga form faktörüdür ve sinüzoidal tasarımlarda $k_p = 0,5$ alınır, k_i ise akım dalga formudur sinüzoidal dalga formları için $k_p = \sqrt{2}$ alınır. (Mahmoudi *et al.* 2013). Bu dalga form faktörleri Şekil 2.15’te verilmiştir.

Eksenel akılı daimi mıknatıslı generatörün fazlar arası 120^0 açı oluşabilmesi için, generatör de kullanılacak bobin adeti ve kutup sayısının aynı olmaması gerekir. Bu durumun aksi yapılırsa makinenin çıkışından üç faz elde etmek mümkün olmaz. Generatör farklı sayıda bobin ve kutup sayısı kullanılarak üç fazlı olarak tasarlanabilir. Bu durumda önemli olan kısım, generatördeki kutup sayısının bobin sayısına oranı 1.33 olarak elde edilmesidir. Üç fazlı generatör de kullanılan bobinler üç ya da üçün katı olmalıdır. Bobin sayısı üçün katı olduğunda bir faz başına düşen bobin sayıları eşit olacaktır (Bumby *et al.* 2004).

Çizelge 2.5’te üç fazlı olarak tasarlanacak eksenel akılı senkron generatörün bobin sayıları ile kutup sayıları arasındaki ilişki aşağıda verilmiştir.

Çizelge 2.5. Üç fazlı eksenel akılı generatör için bobin ile kutup sayıları arasındaki kombinasyon

Bobin sayısı	Kutup sayısı
6	8
9	12
12	16
15	20
18	24

Generatörde elektriksel olarak aralarında 120°'er derece faz farkı olan üç faz şu şekilde oluşturulmuştur:

- Rotor kutupları arasında $360^\circ/12=30^\circ$ mekanik olarak mesafe bulunmaktadır.
- Bobinler arasında ise $360^\circ/9=40^\circ$ mekanik olarak fark bulunmaktadır.

Yukarıda yazılan durumlardan dolayı elektriksel olarak meydana gelen bu fark, generatörden üç fazlı gerilim ve akım oluşmasını sağlayacaktır.

Eksenel akıllı daimi mıknatıslı generatörün tasarımında ana amaç maksimum çıkış gücü elde etmektir. Eksenel akıllı daimi mıknatıslı generatörün çıkış gücünün maksimuma ulaşması için boyutları arasındaki oran denklem 2.52 deki gibi olmalıdır (Gieras *et al.* 2004).

$$k_d = \frac{R_i}{R_0} = \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (2.52)$$

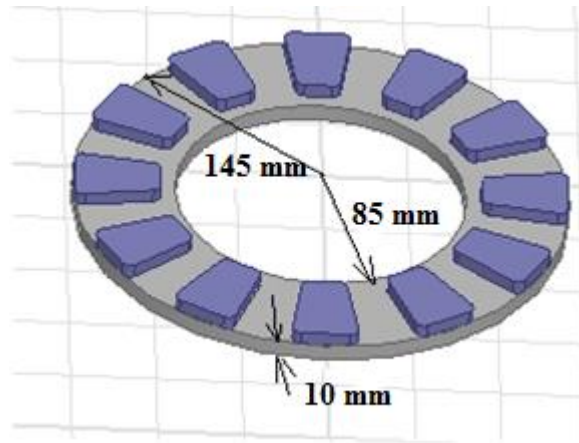
Eksenel akıllı daimi mıknatıslı senkron generatör de boyut ve güç arasındaki matematiksel ilişki aşağıda verilmiştir (Soderlund *et al.* 1997).

$$R_0 = \left[\frac{8}{\pi^2} \frac{p}{f} \frac{P_{out}}{k_i k_p \eta (1 + k_d) (1 - k_d^2) B_g} \right]^{1/3} \quad (2.53)$$

Model	$e(t)$	$i(t)$	K_i	K_p
Sinüsoidal			$\sqrt{2}$	$0.5\cos\varphi$
Sinüsoidal			$\sqrt{2}$	0.5
Dikdörtgen			1	1
Trapezoidal			1.134	0.777
Üçgen			$\sqrt{3}$	0.333

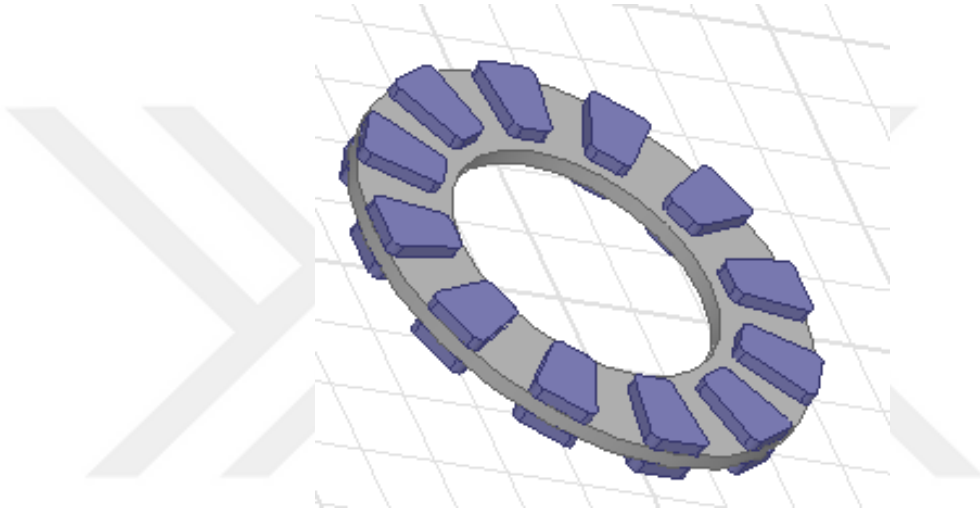
Şekil 2.15. Elektrik dalga form tipleri (Mahmoudi *et al.* 2013)

Şekil 2.14'te üç adet rotor disk bulunmaktadır. Alt ve üst rotor disklerinin bir tarafına 12 adet sabit mıknatıs yerleştirilmiştir. Orta rotor diskinin hem ön hem de arka tarafına 12 şer tane sabit mıknatıs yerleştirilmiştir. Stator sargıları iki rotor disk arasında birer adet yerleştirilmiştir. Her bir stator sargısı toplamda 9 bobinden oluşmaktadır. Sargılardaki her faz üç bobine denk gelmektedir.

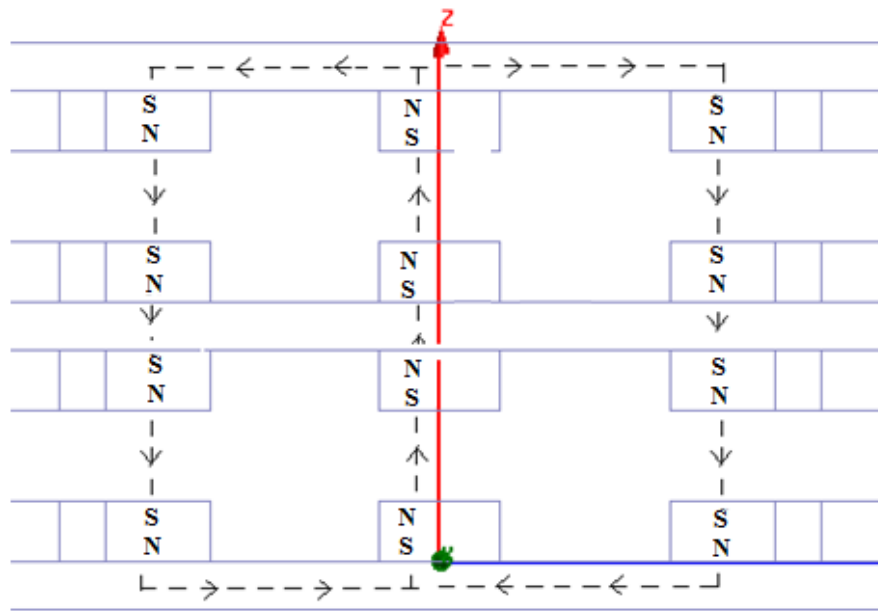


Şekil 2.16. Eksenel akı daimi mıknatıslı generatörün yan rotorların geometrisi

Eksenel akılı senkron generatör için kullanılan rotor çeliği M19'dan yapılmıştır. Şekil 2.16'da rotor çeliğinde 12 adet daimi mıknatıs yerleştirilmiştir. Rotorların üzerine yerleştirilen daimi mıknatıslar kendi aralarında 30° açılarla yerleştirilmiştir. R_o ve R_i değerleri 145 ve 85 mm'dir. Eksenel akılı senkron generatörün orta rotor geometrik yapısı Şekil 2.17'da verilmiştir. Rotorun her iki tarafına olmak üzere toplamda 24 adet sabit mıknatıs yerleştirilmiştir.

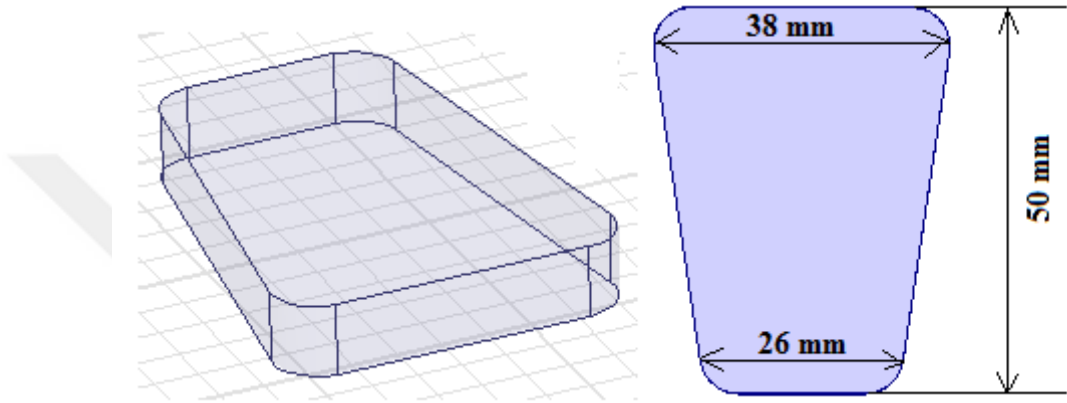


Şekil 2.17. Eksenel akılı daimi mıknatıslı generatörün orta rotorların geometrisi



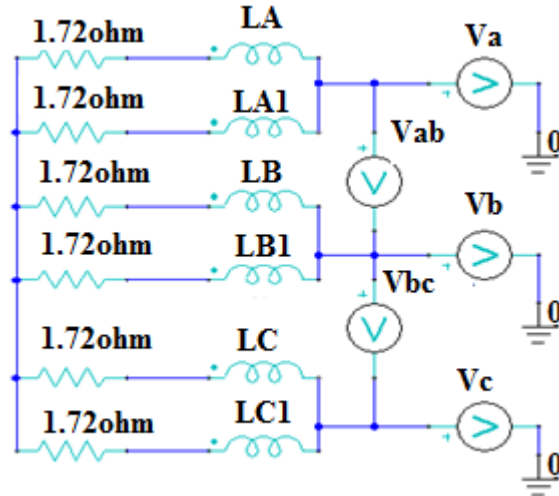
Şekil 2.18. Daimi mıknatısların dizilimi ve akı yollarının N-S-N-S-N-S olarak görünüm

Şekil 2.18’de daimi mıknatısların akı yollarının gösterimi verilmiştir. Burada daimi mıknatısların dizilişine bağlı olarak iki tip akı yolu oluşabilir. Orta rotorda kullanılan mıknatısların dizilişi değiştirilerek akının orta rotorda akması sağlanabilir. Bu şekilde dizilirse orta çeliğin et kalınlığının yaklaşık olarak iki katına çıkartılması gerekmektedir. Bunu önlemek için mıknatısların dizilişi ve akı yönleri Şekil 2.18’deki gibi olacaktır.



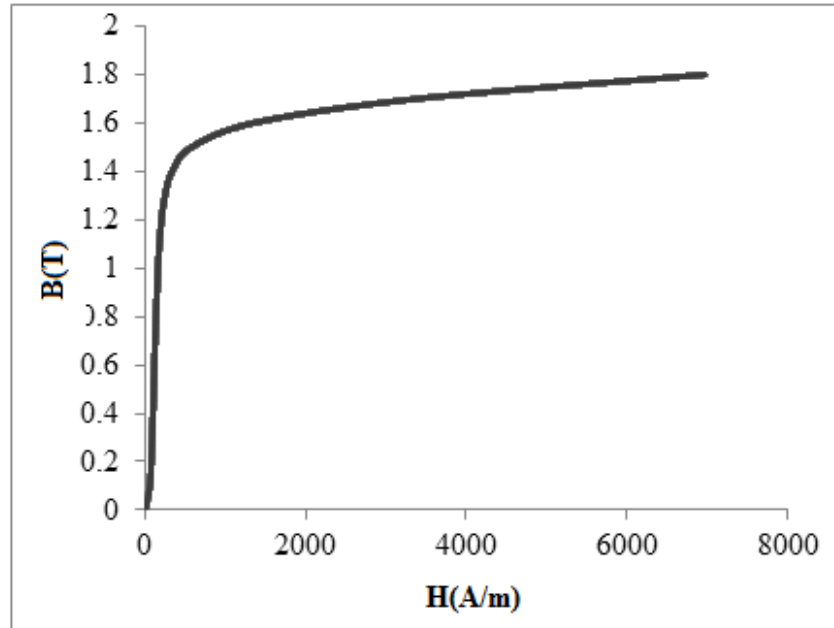
Şekil 2.19. Eksenel akılı daimi mıknatıslı generatörün sabit mıknatıs geometrisi

Mıknatısların geometrik yapısı Şekil 2.19’da gösterildiği gibidir. Bu şekilde tasarlanan mıknatıslar ısıyı önlemede daha avantajlı ve düzgün bir sinüsoidal dalganın elde edilmesi için daha uygundur. Eksenel akılı daimi mıknatıslı generatörlerde kullanılan daimi mıknatıs Neodyum (NdFeB)’dur. Neodyum mıknatısın uzunluğu 50 mm, kalınlığının da 8 mm’dir.



Şekil 2.20. Eksenel akılı daimi mıknatıslı generatörün üç faz dış devre şeması

Şekil 2.20’de her bir faza ait bobinler ve bunların birbirleri ile olan bağlantıları verilmiştir. Burada her bir direnç değeri $1.72 \, \Omega$ olan bobin grubu ifade edilmektedir. İki adet stator kullanılmış ve her statorde 9 adet bobin vardır. Her faz için üçer adet bobin kullanılmıştır. Bu üç bobin 120° açılarla yerleştirilip birbirlerine seri bağlanmıştır. Her statorun bir fazı için toplam direnç $1.72 \, \Omega$ olarak belirlenmiştir. Stator sargıları, Şekil 2.20’deki gibi bağlanmıştır. Trapezoidal şeklinde kullanılan daimi mıknatıslar Şekil 2.19’deki gösterilmiştir. Generatörde zamana bağlı olarak elde edilecek gerilimi ve akım dalga şekli sinüs formda olacaktır.



Şekil 2.21. M19 nüve malzemesinin B-H eğrisi

Bu çalışmada tasarlanan generatör, statoru nüvesiz bir yapıya sahiptir. Rotor nüvesi için, Amerikan ile Avrupa standartlarında M19 sınıfı ile M530–50A olarak adlandırılan M19 sınıfı olan ve elektrik makinelerinde sıkça kullanılan çelikten kullanılması hedeflenmiştir. Nüve için kullanılan çelik doğrusal bir malzeme değildir. Kullanılan analiz programı ile çözüm yaparken B-H eğrisi kullanılarak çözüm yapar. M19 çeliğin B-H eğrisi Şekil 2.21’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.6’da eksenel akılı sabit mıknatıslı senkron generatör için tasarım parametreleri verilmiştir.

Çizelge 2.6. Üç fazlı eksenel akılı senkron generatörün tasarım parametreleri

<i>Parametre</i>	<i>Değer</i>	<i>Birim</i>
Rotor dış yarıçap (R_o)	145	mm
Rotor iç yarıçap (R_i)	85	mm
Rotor et kalınlığı	10	mm
Stator dış katman mesafesi	73.48	mm
Stator iç katman mesafesi	163.48	mm
Mıknatıs üst uzunluk	38	mm
Mıknatıs alt uzunluk	26	mm
Mıknatıs kalınlığı	8	mm
Hava aralığı	1	mm
Bobin başına sarım sayısı	170	sipir
Faz başına bobin grubu	3	adet
Nüve malzemesi	M19	-
Nüve şekli	Eksenel	-
İletken çapı	1.15	mm
Mıknatıs şekli	Yamuk	-
Seri bobin sayısı	3	adet
Mıknatıs malzemesi	NdFeB	-
Kutup sayısı	12	-
Devir sayısı	500	d/dk
En yüksek gerilim	120	Volt
En yüksek akım değeri	10	Amper

Şekil 2.14'te gösterilen makinede toplamda 48 adet ikizkenar yamuk şeklinde sabit mıknatıs ve 18 adet nüvesiz bobin kullanılmıştır. İki rotorun tek tarafına 12'şer adet mıknatıs yerleştirilmiştir. Bir rotorun her iki tarafına da toplamda 24 adet mıknatıs yerleştirilmiştir. Stator ve rotor üzerine yerleştirilmiş mıknatısların arasında 1mm hava boşluğu vardır. Eksenel akılı daimi mıknatıslı senkron generatörün yapısal tasarımı tamamlandıktan sonra sonlu elemanlar yöntemleriyle analizlere geçirilmiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Tasarımı gerçekleştirilen makinede 48 adet sabit mıknatıs kullanılmıştır. Bu mıknatıslar ikizkenar yamuk şeklinde dizayn edilmiştir. Ayrıca 18 adet hava nüveli bobin kullanılmıştır. Belirtilen bu fiziki özellikler Şekil 2.14'te sunulmuştur. 12 şer adet mıknatıs iki rotorun tek tarafına yerleştirilmiştir. Bir rotorun her iki tarafına da toplamda 24 adet mıknatıs yerleştirilmiştir. Stator ve rotor üzerine monte edilmiş olan mıknatıslar arasında 1 mm hava boşluğu olacak şekilde tasarlanmıştır. Yapısal tasarımı tamamlanan eksenel akı daimi mıknatıslı senkron generatör, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir.

Manyetik alan analizinde, yeni tasarlanan bir elektrik makinesinin çalışma davranışlarının analizinde, tork ve moment analizleri gerçekleştirirken sonlu elemanlar yöntemini çok sık kullanılmaktadır. 1940 yılında önerilen bu analiz yöntemi, birçok mühendislik tasarımında, modelleme ve imalat süreç tespitinde de kullanılmıştır.

Sonlu elemanlar yöntemi elektrik mühendisliğinde ise ilk kez 1970'li yıllarda manyetik devrelere uygulanmaya başlamıştır. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan ilk çalışma, Silvester tarafından doyumlu manyetik alan problemlerinin analizidir. Chari ve Silvester tarafından, 1971 yılında doğrusal olmayan varyasyon formüllerinin çözümü ile elektrik makinelerinde elektromanyetik alan hesaplanmıştır. Bir elektrik makinesinin taslak aşamasındaki, hareketli ve durgun konumlarındaki analizleri Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilebilir. Bu yöntem özellikle bir elektrik makinesinin imalat aşamalarının dizayn edilmesinde kullanılmaktadır. Ayrıca bir motorun boşta veya yük şartları altında üretebileceği akı ve moment analizleri, tasarımı planlanan motorun fiziksel boyutları ve malzeme cinsi gibi özellikler üzerinde simülasyon şeklinde değişiklikler yaparak, mühendislik tasarımına en uygun davranış sergileyen motor ve generatör tipleri tespit edilebilmektedir. Bu yöntemin kullanılması, imalat öncesindeki model tasarım maliyetlerinin azalmasını sağlamaktadır. Ayrıca kontrol ve tasarım teknolojisinin kusursuz bir şekilde tasarlanmasını sağlamaktadır. Bu yöntem elektrik makinesi tasarımı ile ilgili literatür araştırmalarında geniş yer bulmaktadır.

Motor veya generatör iki şekilde tasarlanmaktadır. Birinci yöntem, bir eşdeğer devre oluşturmak için genel elektrik makine teorisi kullanmak, diğer yöntem ise sayısal incelemeler yapılmak suretiyle manyetik alan dağılımının tespit edilmesidir. Eşdeğer devreler veya analitik tasarımda motorda basitleştirme varsayımı kullanılmaktadır. Basitleştirilen varsayımlarda doğrusal eksenli manyetik malzemeler, dış-oluk rotor-stator geometrileri şeklinde, en uygun varsayılan bir geometri ve makine sargılarının kompozisyonudur. Sayısal analiz yöntemlerinden biri ve en önemlisi olan sonlu elemanlar yöntemi ile en uygun alan dağılımı, geometrik detaylar, manyetik elemanların doğrusal olmayan geçirgenlikleri hesaba katılarak en uygun tasarım yapılabilmektedir. Akademik çalışmalar neticesinde özellikle son zamanlarda sonlu elemanlar yöntemi verilerinin elektrik makinelerinde kullanılmaya başlaması ve olumlu sonuçların elektriksel analiz araştırmalarına yön verdiği bilinmektedir (Silvester *et al.* 1970; Salon *et al.* 1995).

3.1. Sonlu Elemanlar Analizinin Teorisi

Laplace ve Poisson tipi kısmi türevli denklemlerin çözümünde, sonlu elemanlar analizi en çok kullanılan yöntemlerin başında gelmektedir. Çözümleme kullanılan verilerin çok fazla olması sebebiyle bilgisayar programları kullanılmaktadır. Yöntemdeki en önemli nokta; denklemin doğrudan çözümü değildir. Çözümü ulaşmak için, sisteme ait enerji fonksiyonlarını minimize eden değerlerin bulunması şeklindedir. Yöntemde deneme fonksiyonları oluşturulur ve bu fonksiyonlarda Rayleigh-Ritz yöntemi kullanılmaktadır.

Laplace denklemi oluşturularak Statik alan problemi;

$$\Delta V = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \quad (3.1)$$

İkinci mertebeden bir homojen diferansiyel denklemin çözümünü gerektirir. Sonlu elemanlar yöntemi ile bu denklem;

$$W = z \iint \left\{ \frac{1}{2} \left[\varepsilon_x \left(\frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 + \varepsilon_y \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 \right] \right\} d_x d_y \quad (3.2)$$

Elektrik enerjinin denklemsel çözüm bölgesi kapsamındaki en küçük değer tespit edilerek çözümleme yapılmaktadır. Çünkü Laplace denklemindeki elde edilmek istenen çözüm budur. Elektriksel potansiyeller $V = V(x, y, z)$ şekilde ifade edilir. Çalışma kapsamındaki problemler eksenel bir simetriye sahip değildir. Belirtilen bu sebeplerden dolayı çözümlemede kartezyen koordinatlar kullanılmaktadır. Bu bölge sonlu elemanlara bölünür. Bu bölgedeki bölünmeye ayrıklaştırma denir. Problemi sonlu elemanlara ayırmada genelde üçgen elemanlar kullanılmaktadır. Çalışmanın devamında sınır koşulları ve malzemenin cinsi, özellikleri kullanılmak suretiyle her bir eleman için geçerli olduğu kabul edilen birinci dereceden polinomsal yaklaşım işlevleri ile eleman denklemleri ve problemin genel denklemi elde edilir. Elde edilen bu denklem; matraste bol sıfırlı büyük boyutlu bir doğrusal denklem takımıdır. Bu doğrusal denklem takımı peş peşe süregelen sayısal çözümlemeler yöntemi ile çözülerek üçgen elemanların uç düğüm noktalarının potansiyelleri tespit edilir. Tespit edilen bu potansiyel değerleri doğrultusunda elemanın potansiyel yaklaşım işlevleri ile herhangi bir noktadaki potansiyel ve elektrik alan verileri bulunabilmektedir (Çanakoğlu 2001).

3.2. Ritz Yöntemi

Ayrıklaştırma işlemi yapılmadan sınır değer problemlerine yaklaşık çözüm bulabilmek neredeyse mümkün değildir. Çözümü mümkün kılmak için sınır koşulları altında temel diferansiyel denklemi minimum yapan bir ifadeye ihtiyaç duyulur. Belirtilen bu açıklamalar Ritz yöntemi olarak ifade edilmektedir. Ritz yöntemi varsayımsal bir çalışmanın ürünüdür. Varsayımsal işlemlerde işlevseli minimum yapan işlem aranır. Bu işlev problemin çözümü olan işlevdir. Bu yöntemi uygulayabilmek için işlevsel öncelikle tespit edilmelidir. Aşağıdaki denklemde 3.3'de işlevsel formülü gösterilmektedir.

$$\sum_{j=1}^n k_j V_j = \{k\}^T \cdot \{V\} = \{V\}^T \cdot \{k\} = V \quad (3.3)$$

Burada V_j bütün bölgede tanımlanmış seçilen açılım işlevleri ve k_j 'ler de belirlenecek katsayılardır. Herhangi bir L diferansiyel denklemin işlevselliğini yazarsak,

$$\phi_{(V)} = \frac{1}{2} \{K\}^T \int_{\Omega} \{\zeta\} \Lambda \{\zeta\} \delta \Omega \{K\} - \{K\}_T \int_{\Omega} \{\zeta\} \phi \delta \Omega \quad (3.4)$$

Elde edilir. $\phi_{(V)}$ 'yi minimum yapmak için k_i 'lere göre minimum kısmi türevleri alınır.

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial k_i} &= \frac{1}{2} \int_{\Omega} V_i L \{V\}^T d\Omega \{k\} + \frac{1}{2} \{k\}^T \int_{\Omega} \{V\} L V_i d\Omega - \int_{\Omega} V_i f d\Omega = \\ \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n k_j \int_{\Omega} (V_i L V_j + V_j L V_i) d\Omega - \int_{\Omega} V_i f d\Omega &= 0 \end{aligned} \quad (3.5)$$

Bu bağlantı aşağıdaki gibi matrisel biçimde yazılabilir;

$$[K] \{V\} = \{B\} \quad (3.6)$$

Burada K Matrisi,

$$k_{ij} = \frac{1}{2} \int_{\Omega} (V_i L V_j + V_j L V_i) d\Omega \quad (3.7)$$

Ve $\{B\}$ matrisinin terimleri,

$$b_i = \int_{\Omega} V_i f d\Omega \quad (3.8)$$

Şeklinde verilir. $\{K\}$ matrisi simetrik bir matristir.

3.3. Sınır Koşulları

Bu koşullar üç ayrı şekilde sınıflandırılmıştır.

3.3.1. Dirichlet sınır koşulu

Belirli bir kısımda veya sınırın tamamında potansiyel fonksiyon $(\Phi_{(s)})$ belirli bir değerde olması gerekir. Sınır koşulunun sıfır olduğu durumlarda homojen Dirichlet sınır koşulu olarak isimlendirilir.

3.3.2. Neumann sınır koşulu

Akı yoğunluğu sınıra dik bir doğrultuda ise bu koşul Neumann sınır koşulu olarak isimlendirilir. Ortamın izotropik olduğu durumda ise sınıra dik doğrultuda gelen akı genel olarak denklem 3.9'da ifade edilir.

$$K_{(s)} = \frac{\partial \Phi}{\partial n} = H_{(s)} \quad (3.9)$$

Sınır dışına doğru birim vektör n ile ifade edilir. Bu ifade çözüm bölgesindeki alandan bağımsızdır. $H_{(s)} = 0$ olması haline ise homojen Neumann Sınır Koşulu denir.

3.3.3. Karışık sınır koşulu

Sınırdaki iletken malzemeler sınıra normal doğrultuda gelen akıyı etkilemektedir. Sınırdaki bu değişimler doğrusal değişimdir. Bu sınır koşulu genel olarak denklem 3.10 ile ifade edilir.

$$K_{(s)} = \frac{\partial \Phi}{\partial n} = \sigma(s)(\Phi_0(s) - \Phi(s)) \quad (3.10)$$

Burada $\sigma(s)$ sınırdaki elektriksel iletkenlik fonksiyonunu göstermektedir. Bu sınır koşulu yeniden düzenlenerek denklem 64 yazılsa, daha önceki koşulları da içeren bir bağlantı elde edilir.

$$K_{(s)} \frac{\partial \Phi}{\partial n} + \sigma(s)\Phi(s) = \sigma(s)\Phi_0(s), \quad K_{(s)} \frac{\partial \Phi}{\partial n} + \sigma(s)\Phi(s) = h(s) \quad (3.11)$$

Poisson Denklemlerinin Elde Edilmesi:

Manyetik alan problemlerinde Maxwell denklemleri kullanılır.

$$\nabla \times H = J \quad (3.12)$$

$$B = \mu.H \quad (3.13)$$

$$\nabla.B = 0 \quad (3.14)$$

$$v = \frac{1}{\mu} \quad (3.15)$$

$$B = \nabla \times A \quad (3.16)$$

A manyetik vektör potansiyelidir. Denklem 3.13'te H yerine denklem 3.14 konulduğunda denklem 3.17 elde edilir. Bu denklemde B yerine denklem 3.16 konulduğunda denklem 3.18 elde edilir. Bu denklem 3.19'de düzenlendiğinde Poisson denklemi elde edilir.

$$\nabla \times \frac{B}{\mu} = J \quad (3.17)$$

$$\nabla \times (\nu \nabla \cdot A) = -J \quad (3.18)$$

$$\nu \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \right) = J \quad (3.19)$$

İki boyutlu sonlu elemanlar ile incelemesi yapılırken denklem 3.19'deki J akım yoğunluğu z ekseninde olduğu için, manyetik vektör potansiyel $A = (x, y) = A_z(x, y)$ olur.

3.4. Kaynak Fonksiyonlarının Girilmesi ve Çözüm

Manyetik alan çözümlemelerinde sonlu elemanlar yöntemi ile araştırma yapılırken kaynak fonksiyonu olarak akım yoğunluğu kullanılır. Akım bakır bölgeye uygulandığından, bölme sırasında bakır bölgede bulunan elemanlar tespit edilmelidir. Bakır bölgede bulunan üçgenlerin her biri için denklem 3.20 yazılabilir.

$$\begin{pmatrix} S_{ii}^n & S_{ij}^n & S_{im}^n \\ S_{ji}^n & S_{jj}^n & S_{jm}^n \\ S_{mi}^n & S_{mj}^n & S_{mm}^n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_i \\ A_j \\ A_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/3 \\ 1/3 \\ 1/3 \end{pmatrix} \Delta_n \cdot J \quad (3.20)$$

Demir bölgede de girdap akımları aynı şekilde ifade edilir. Ayrıca sürekli mıknatıslar da bir elektromıknatıs olarak modellendiği için bir akım yoğunluğuna sahiptir. Bakır bölgede gecen akım kompleks olduğunda çözüm karmaşık sayılı bir denklemin çözümü olacaktır. Hava bölgesinde, bakır bölgesinde bulunan üçgenler hariç diğer üçgenler için denklem 3.20'nin sağ tarafı sıfır alınır. Bu durumda Poisson denklemi Laplace denklemi haline gelecektir. Elde edilen Poisson denkleminde magnetik geçirgenlik doymadan dolayı A vektör potansiyelin bir fonksiyonudur. Bu Poisson denkleminin doğrusal

olmamasına neden olur. Çözüm yapılırken A vektör potansiyel değerleri bulunduktan sonra B değerleri 3.20'te verilen ifadeler ile hesaplanır.

$$B(x, y) = \begin{pmatrix} i & j & k \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & 0 & A(x, y) \end{pmatrix}$$

$$B_x = \frac{\partial A_z(x, y)}{\partial y} B_x = \frac{1}{2\Delta} [(c_i A_i + c_j A_j + c_m A_m)]$$

$$B_y = \frac{\partial A_z(x, y)}{\partial x} B_y = \frac{1}{2\Delta} [(b_i A_i + b_j A_j + b_m A_m)] \quad (3.21)$$

Akı yoğunluğunun genliği ise denklem 3.22'teki gibi bulunur.

$$B(x, y) = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} \quad (3.22)$$

Bulunan B değerleri kullanılarak her bir sonlu eleman için tasarımda kullanılan ferro manyetik malzemenin B-H eğrisinin matematiksel modelinden manyetik geçirgenlik değerleri bulunur. Bulunan manyetik geçirgenliğe göre tekrar çözüm yapılır. Çözümde elde edilen B değerleri veya A değerleri bir önce hesaplanan değerlerle karşılaştırılır. Aralarında kabul edilebilir bir fark oluncaya kadar bu işleme devam edilir.

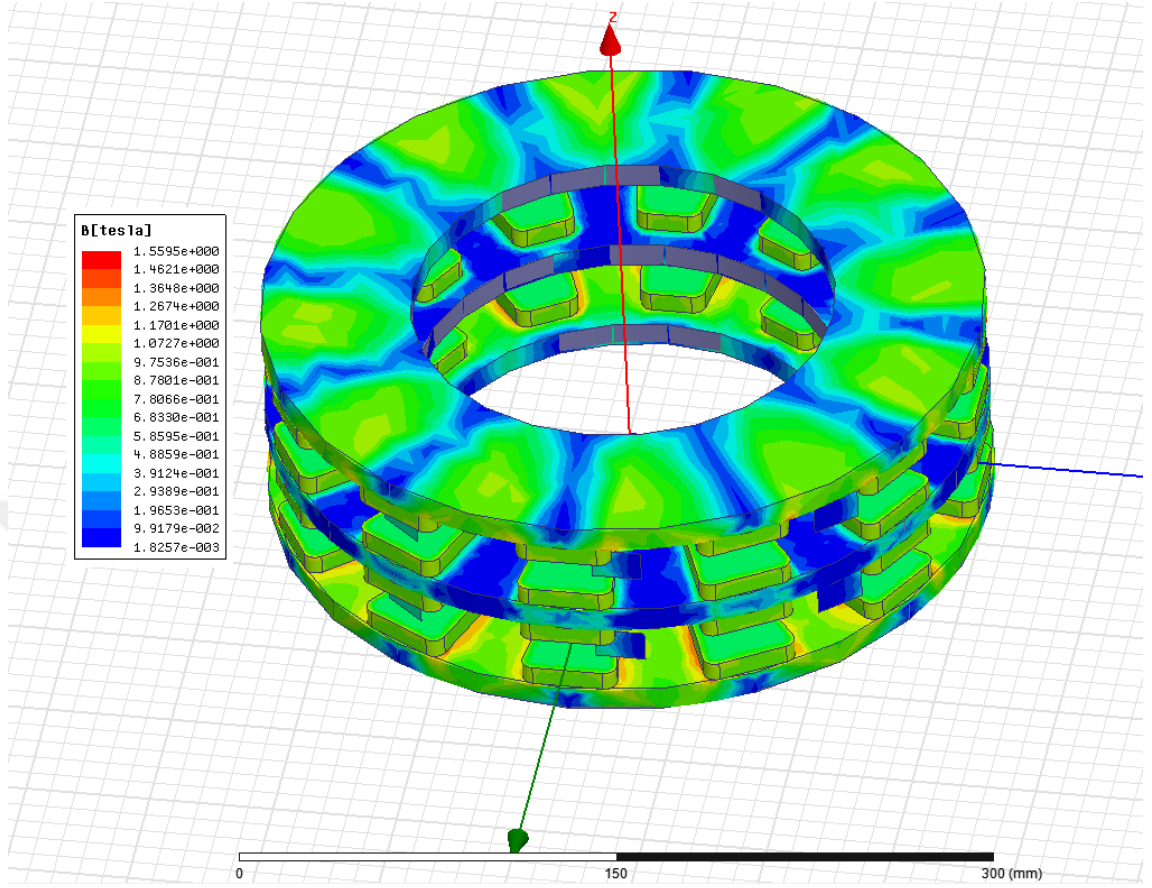
4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Eksenel Akılı Senkron Generatörün 3D Sonlu Eleman Yöntemiyle Manyetostatik Analizi

Bu bölümde tasarımı gerçekleştirilen boyut ve matematiksel modeli çıkarılan eksenel akılı senkron generatörün üç boyutlu sonlu eleman yöntemi ile manyetik analizi ve geçici durum analizi yapılacaktır. Bu analizler makinenin gerçek yapısıyla ilgili veriler verecektir. Makinenin üzerinde yapılan değişiklerin makinenin davranışının nasıl etkilendiği görülebilecektir. Bunun sonucu olarak tasarımlar için daha az vakit ve daha az maliyet harcanacaktır.

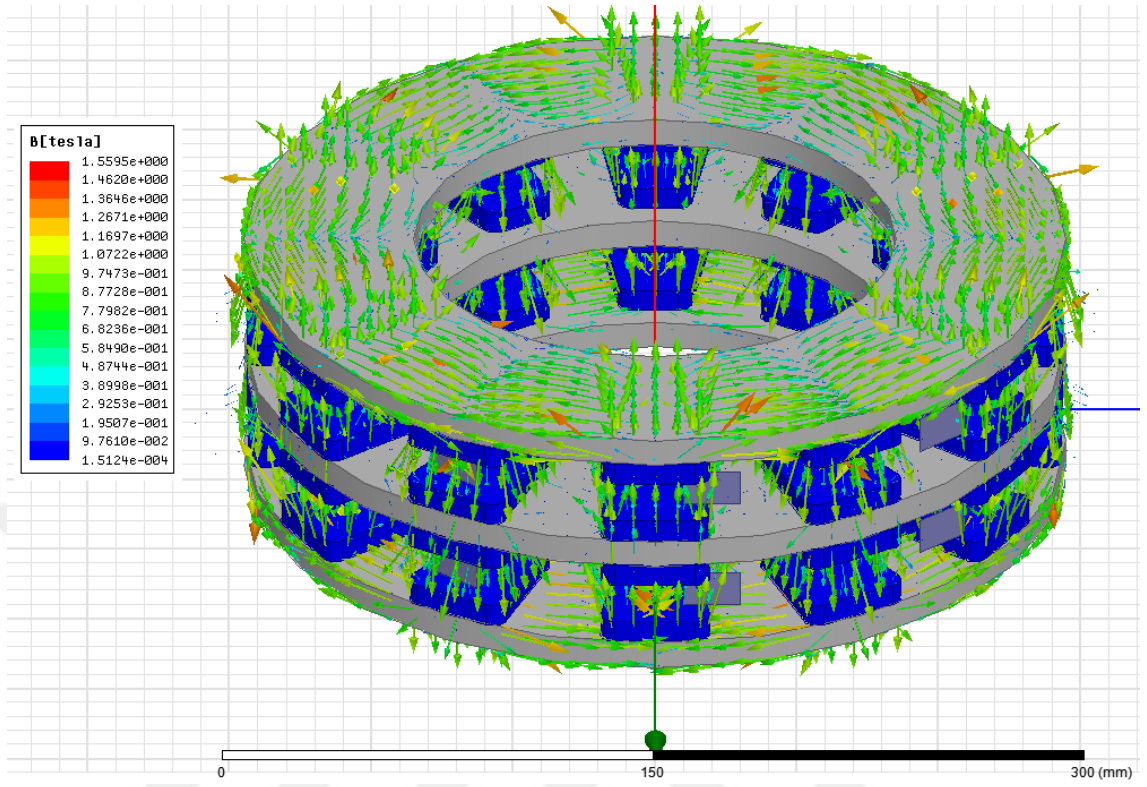
Şekil 4.1 ile Şekil 4.5 arasında verilen grafikler eksenel akılı makinenin manyetik analiz durumları verilmiştir. Bu bölümde yapılan manyetik analiz yönteminde makine hareketsiz durumda iken yapılır. Eksenel akılı makinenin manyetostatik analizinde rotor ve neodyum mıknatıslarda meydana gelen manyetik akı dağılımını Şekil 4.1 gösterilmiştir. Şekil 4.2’de ise eksenel akılı makineden oluşan manyetik akı yönleri verilmiştir.

Şekil 4.1’de verilen eksenel akılı generatör modeli için manyetik akı yoğunluğu dağılımı verilmiştir. Neodyum mıknatısın etrafında oluşan akı yoğunluğu değerleri verilmiştir. Bu makinede kullanılan neodyum mıknatıslarda manyetik akı değeri 1,4 Tesla’dır. Bu makinenin farklı rotor çaplarında yapılan manyetik analizler sonucunda en uygun rotor ebatları belirlenmiştir. İç rotor çapının dış rotor çapına oranı yaklaşık 0,587 olduğunda manyetik akının uygun bir şekilde dağıldığı görülmüştür. Eksenel akılı makinede oluşan manyetik akı yoğunluğu da yaklaşık olarak 0,9 Tesla olarak görülmüştür.

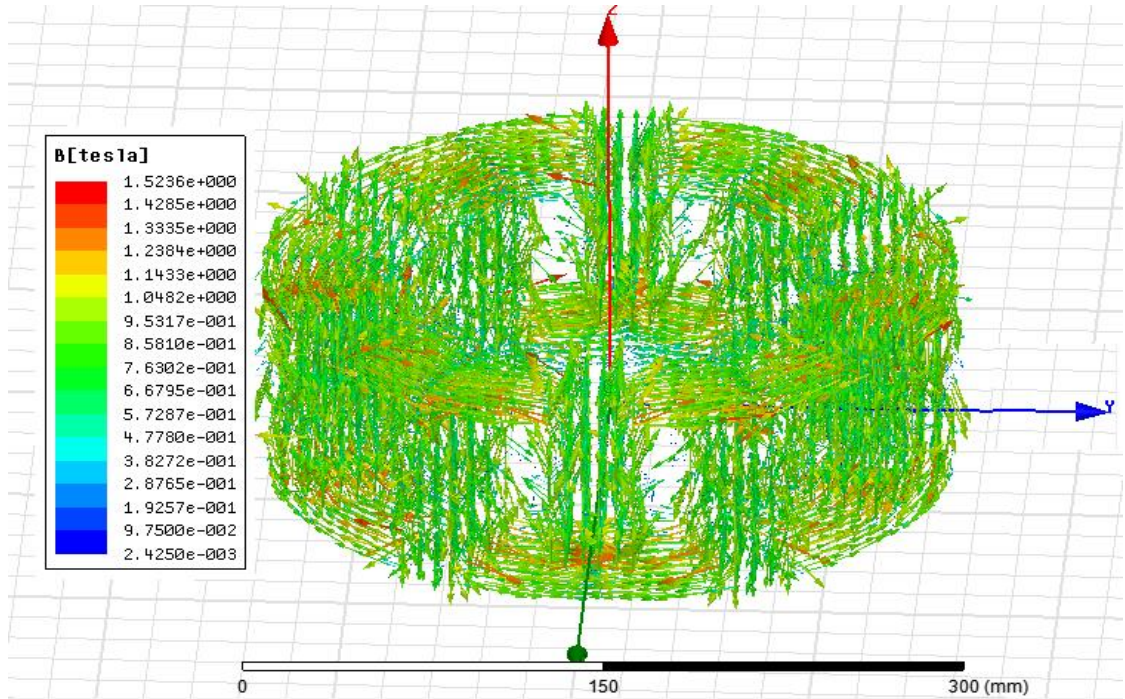


Şekil 4.1. Eksenel akılı senkron generatörün manyetik akı yoğunluğu dağılımı

Şekil 4.2’de mıknatısların dizilişindeki akı yolunun yönünü görülmektedir. Sabit mıknatısların diziliminde dikkat edilmesi gereken hususlardan birisi de manyetik akıların birbirini destekleyecek şekilde dizilimin yapılmasıdır. Eğer akı yönlerini yanlış seçilirse manyetik akılar birbirlerinin olumsuz yönde etkileyecektir. Bu durumda devrenin toplam manyetik alanının azalma meydana gelecektir. Bu azalma da makine verimini olumsuz yönde etkileyecektir. Bu sebeplerden dolayı sabit mıknatısların burada dizilişleri N-S-N-S ve S-N-S-N şeklinde yapılmıştır. Buna bağlı olarak z düzleminde dörtlü mıknatıs grubunun akı yönü çoğunlukla yukarı olurken, sağ ve solundaki sabit mıknatıs grubunun akı yolu tersi yönde olmaktadır. En alt ve en üst kısımlardaki mıknatısların akı yolları da N-S ve S-N şeklindedir.

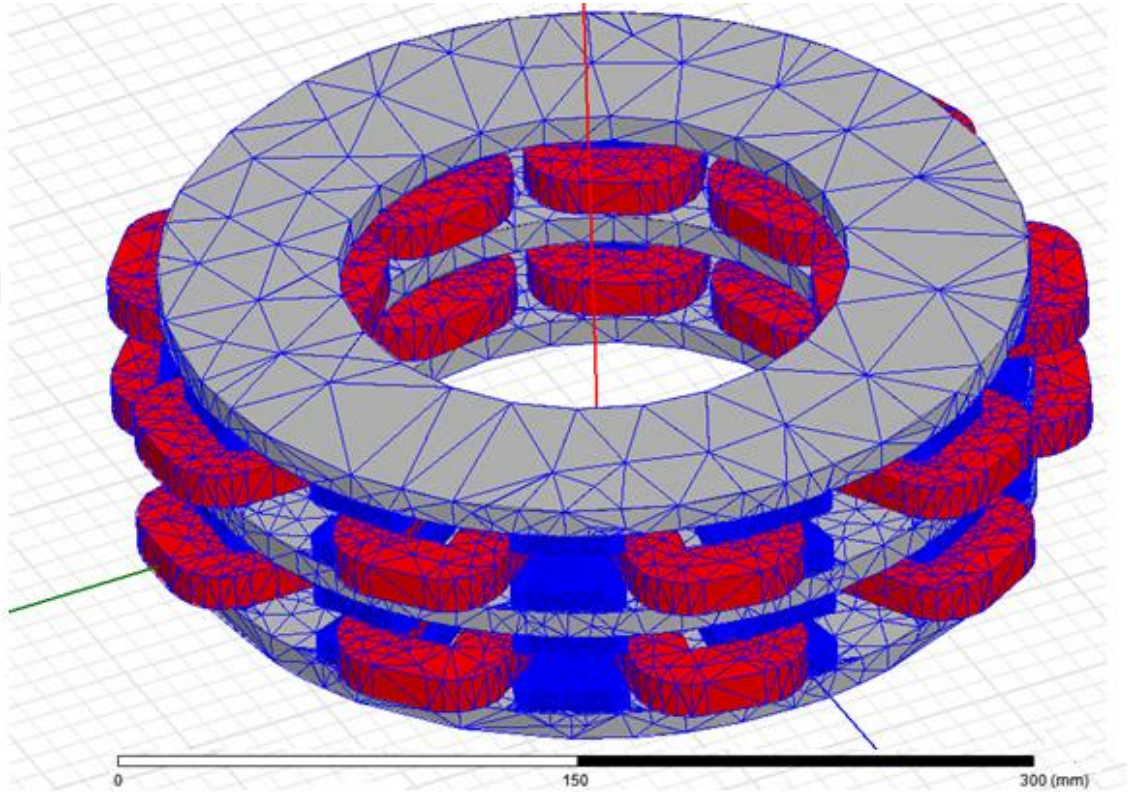


Şekil 4.2. Eksenel akılı senkron generatörün manyetik akı yolunun görünüşü



Şekil 4.3. Eksenel akılı senkron generatörün manyetik akı yolunun çelik ve mıknatıs olmadan elde edilen görüntüsü

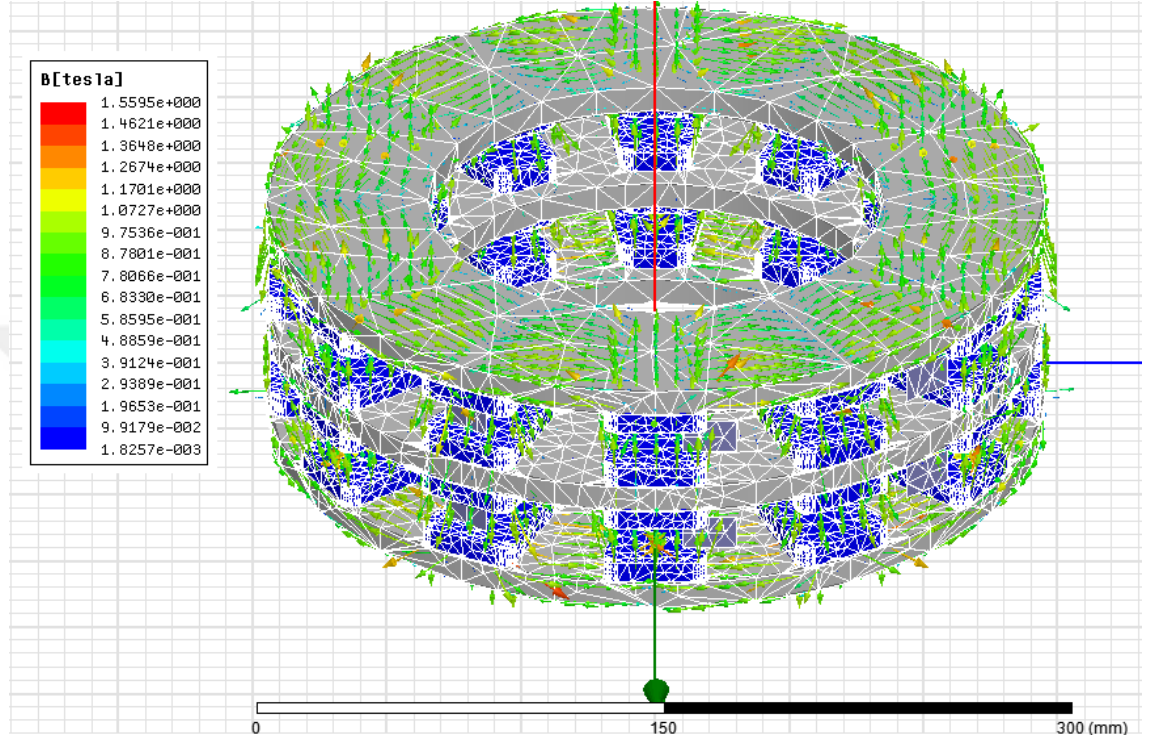
Akı yönünün daha belirgin bir şekilde görülebilmesi için çelik ve sabit mıknatıs olmadan akı yolları Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Burada akı yolları birbirlerini tamamlayacak şekilde yol almıştır.



Şekil 4.4. Eksenel akılı senkron generatörün simülasyon programı tarafından oluşturulan örnek ağların (mesh) programdaki yapısının gösterimi

Sonlu elemanlar yöntemi içinde analizleri yapılacak modellerin ağ yapıları tanımlanarak analizler yapılmıştır. Tasarımı gerçekleştirilen makinenin ölçümlerinin daha hassas olması için ağ yapıları (mesh) çok küçük boyutlarda ayarlanır. Ağ yapıları daha küçük boyutlara ayarlanırsa analiz süresi artar. Bu durumda analizlerin gerçekleşmesi için daha fazla zaman alır. Buradaki analiz süresi kullanılan bilgisayarın özelliklerine göre de değişmektedir. Özellikle bilgisayarlar ya da özellikli serverler kullanılarak bu sürenin ciddi bir şekilde azalması sağlanabilir. Bu özellikli bilgisayarlar sayesinde hem hızlı hem de daha doğru analizler elde edilir. Bu tez çalışmasında yapılan manyetostatik analizlerinde özellikleri iyi olan bir bilgisayarda çözümleme yapılmıştır. Eksenel akılı

senkron generatör için yapılan analizler yaklaşık olarak 48 saat sürmüştür. Bu analizlerin sonucunda ise bilgisayarda yaklaşık olarak 34 GB yer kaplamaktadır.



Şekil 4.5. Eksenel akılı senkron generatörün manyetik akı yönlerinin ve örnek ağları (mesh) yapısının bir arada gösterimi

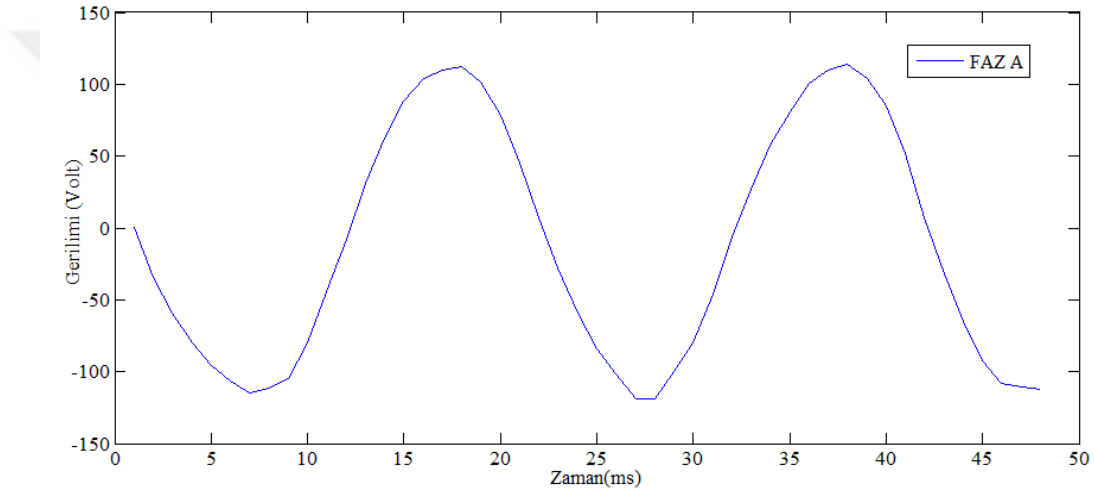
Yukarıdaki şekilde tasarımı yapılan eksenel akılı senkron generatörün manyetik akısı ve ağ yapıları (mesh) birlikte gösterilmektedir.

4.2. Eksenel Akılı Senkron Generatörün Simülasyon Sonuçları

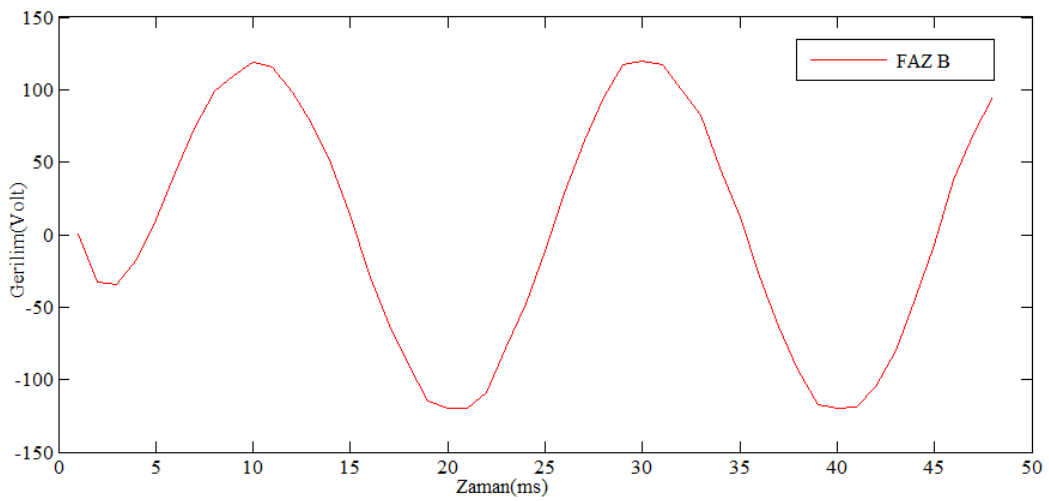
Yeni tasarlanan eksenel akılı sabit mıknatıslı senkron generatörün simülasyon sonuçlarında zamana göre Akım, Gerilim ve Akı değerleri grafikleri aşağıda verilmiştir. Tasarımı gerçekleştirilen makinenin 500, 1000 ve 1500 d/dk'daki açısal hıza bağlı olarak değişim eğrileri verilmiştir.

4.2.1. Eksenel akıllı senkron generatörün 500 d/dk'daki simülasyon sonuçları

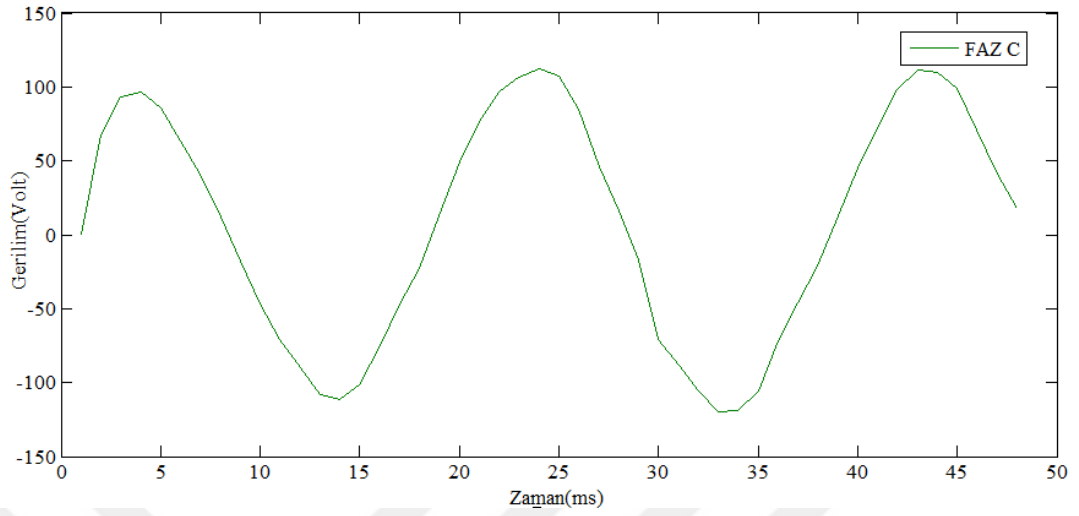
Şekil 4.6, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de gösterilen generatörün rotor hızının 500 d/dk olduğu durumda oluşan faz-nötr gerilim değerinin grafikleri gösterilmektedir. Burada oluşan gerilim düzgün sinüs eğrisi şeklinde olup elde edilen maksimum faz-nötr gerilimi yaklaşık olarak 120 V olmaktadır. Şekil 4.9 da ise generatörün faz-faz gerilim değeri verilmiştir. Bu üç faz gerilim değeri ise yaklaşık olarak 207 V olmaktadır.



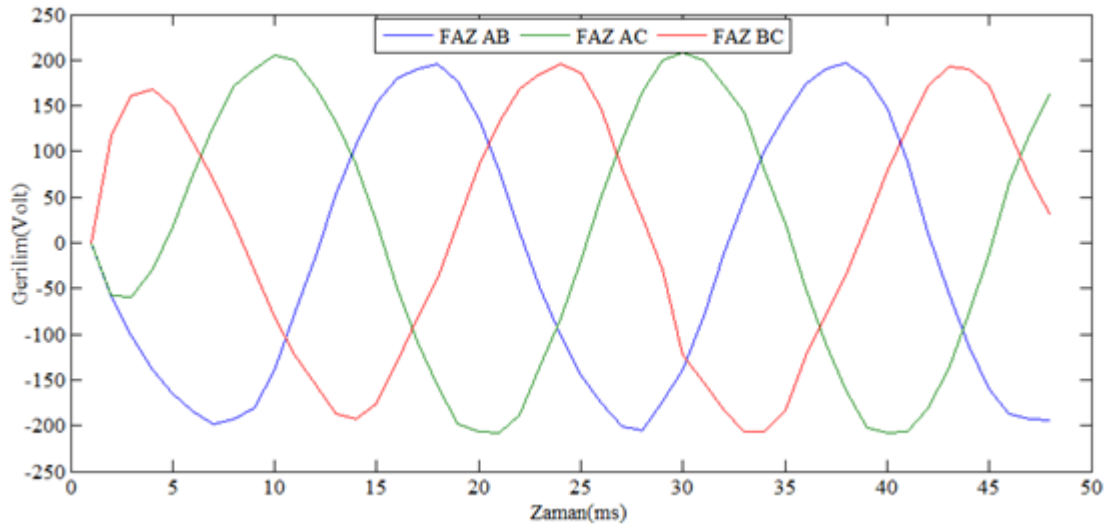
Şekil 4.6. Eksenel akıllı senkron generatörün A fazının 500 d/dk'daki faz-nötr gerilim değeri



Şekil 4.7. Eksenel akıllı senkron generatörün B fazının 500 d/dk'daki faz-nötr gerilim değeri



Şekil 4.8. Eksenel akılı senkron generatörün C fazının 500 d/dk'daki faz-nötr gerilim değeri

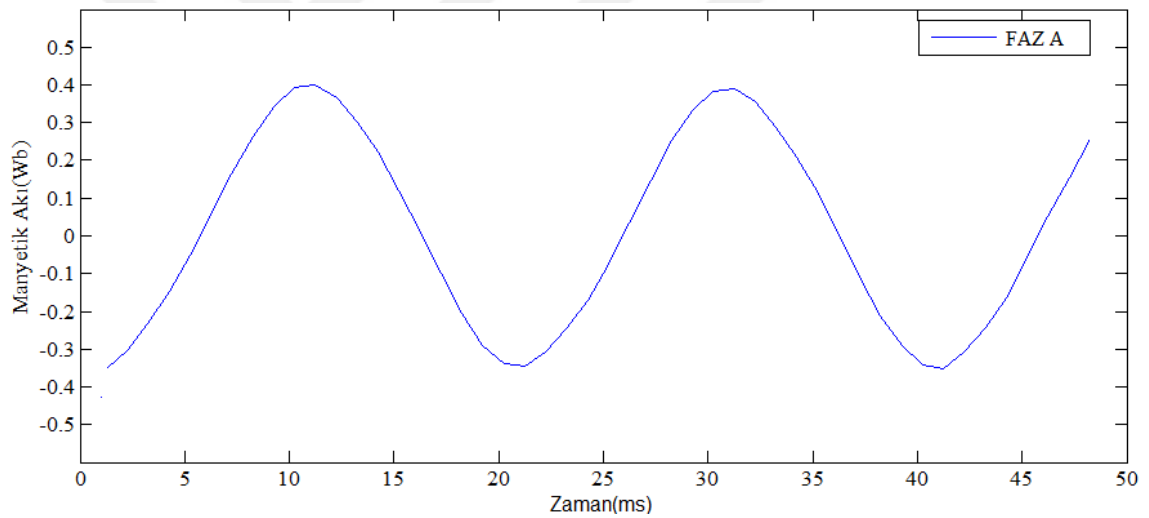


Şekil 4.9. Eksenel akılı senkron generatörün A-B-C fazının 500 d/dk'daki faz-faz gerilim değeri

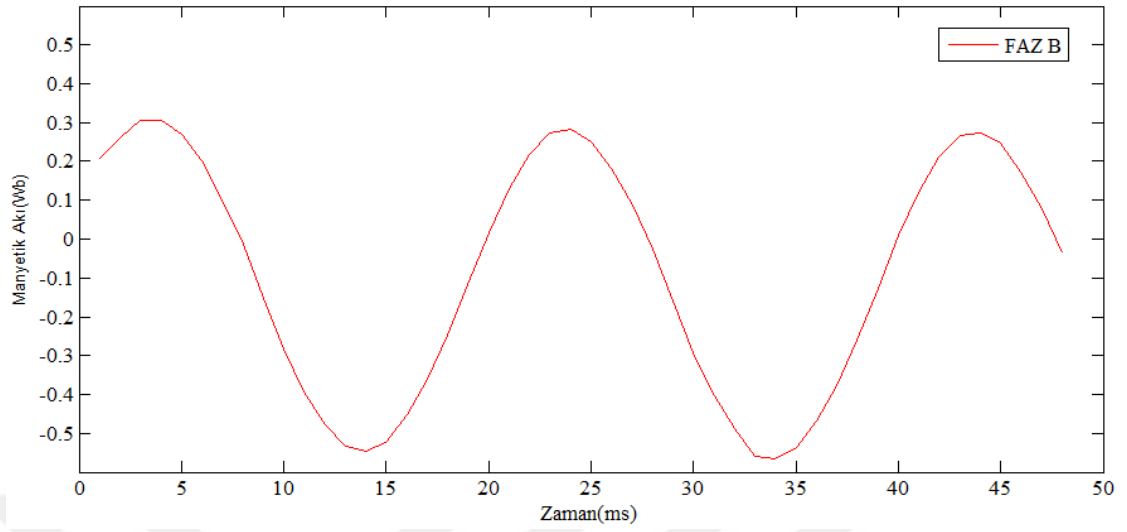
Şekil 4.10 gösterilen egride generatörün her bir sargısında oluşan manyetik akı değerini göstermektedir. Meydana gelen manyetik alanın maksimum değeri yaklaşık olarak 0,4 Wb olmaktadır. Burada oluşan manyetik akı değeri her bir fazda elde edilen bobin grubunda meydana gelen akıyı ifade eder. Manyetik akı değeri rotorun hız değerine bağlı olarak değişmektedir. Bu generatörde elde edilen manyetik akının kaynağı orta rotorun her iki tarafına yerleştirilen mıknatıslar ile üst rotor ve alt rotora yerleştirilen

mıknatıslardan elde edilmektedir. Rotorun hızı arttığında manyetik akının değişim hızı da artacaktır. Mıknatıslar rotorun yüzeyine belirli kurallara bağlı olarak yerleştirilmiştir. Rotorlar dairesel olarak hareket ettiklerinde manyetik akının değişimi ise sinüsoidal biçimde olacaktır.

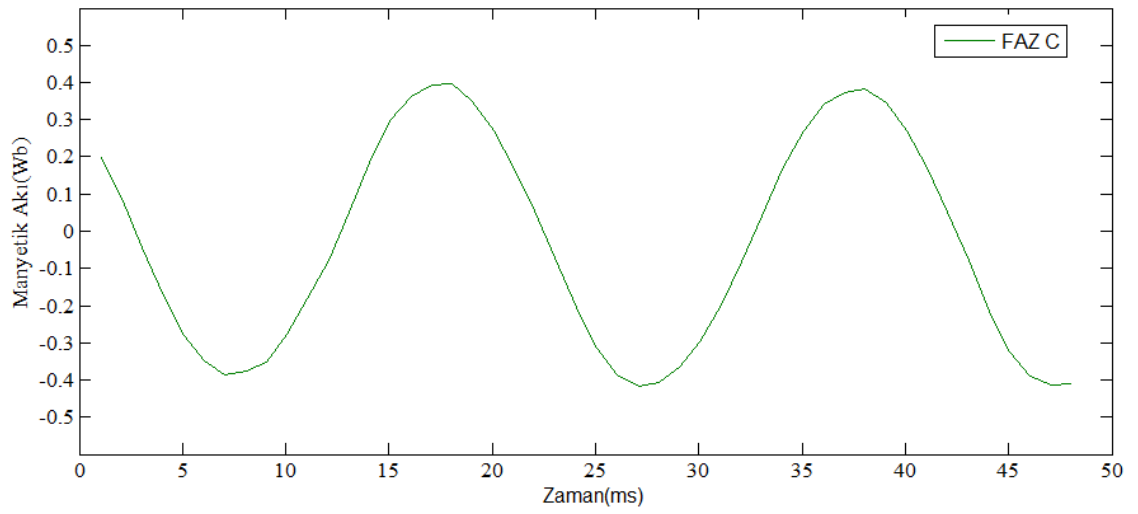
Generatör tasarımı üç faz elde etmek için hem geometrisi hem de elektriksel olarak üç faza uygun bir şekilde yapıldığında; oluşan manyetik akı da üç fazlı olacaktır. Ayrıca generatör tasarımında kullanılan mıknatısın torodial yapısından dolayı da sinüsoidal dalgalar elde edilmiştir. Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de diğer bobin grubuna ait sargı manyetik akı değerleri gösterilmiştir.



Şekil 4.10. Eksenel akılı senkron generatörün A fazının 500 d/dk'daki sargı akı değeri

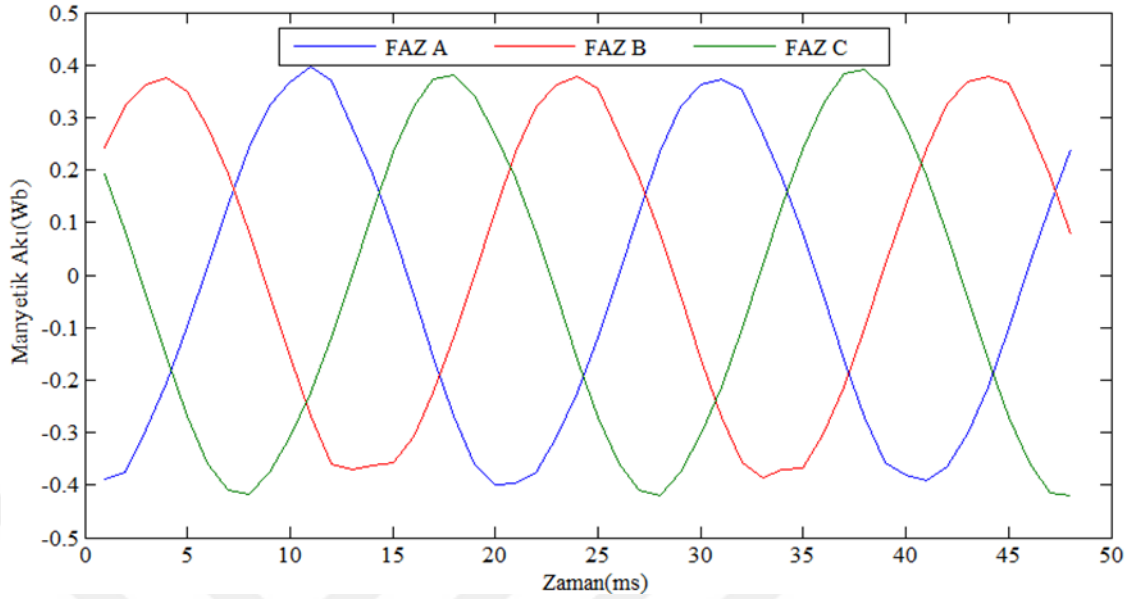


Şekil 4.11. Eksenel akılı senkron generatörün B fazının 500 d/dk'daki sargı akı değeri



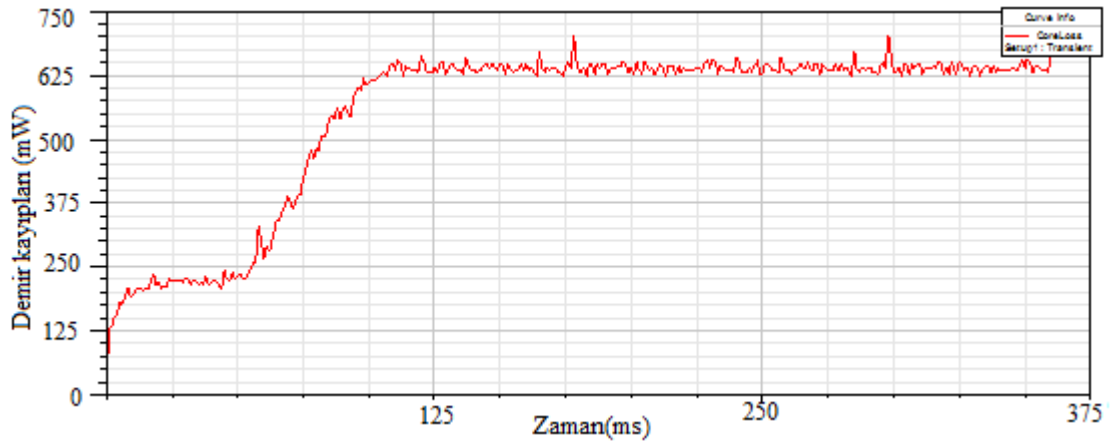
Şekil 4.12. Eksenel akılı senkron generatörün C fazının 500 d/dk'daki sargı akı değeri

Yukarıda verilen manyetik akı eğrilerinde üç fazlı generatörün 500 d/dk rotor hızı durumu için manyetik akısı gösterilmiştir. Oluşan manyetik akının tepe değeri yaklaşık 0,4 Wb olup her faz için ayrı akının değeri görülmektedir. Şekil 4.13'te ise üç faz akı değerleri bir grafikte verilmiştir. Bu değerler, bir nüvenin iki ucuna sarılmış her bir bobin halkasından geçen manyetik akının değerini ifade etmektedir.



Şekil 4.13. Eksenel akılı senkron generatörün A-B-C fazının 500 d/dk'daki sargı akı değeri

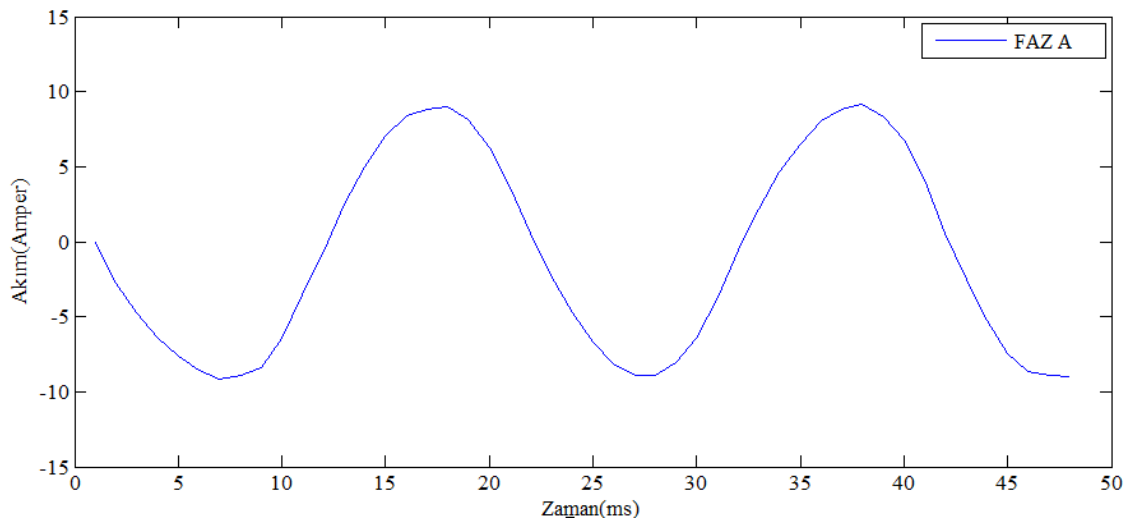
Aşağıda verilen Şekil 4.14'te ise eksenel akılı senkron generatörün 500 d/dk nüve kayıp grafiği verilmiştir. Burada oluşan nüve kaybı çok düşük değerde olup maksimum değeri 625 mW olarak görülmektedir.



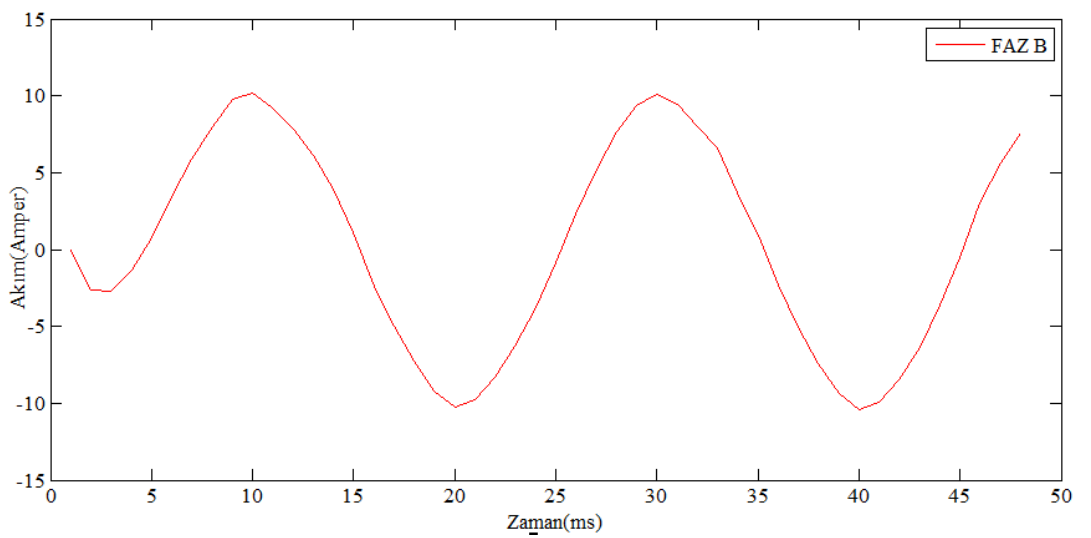
Şekil 4.14. Eksenel akılı senkron generatörün 500 d/dk'daki nüve kayıp değeri

Aşağıda verilen eğrilerde generatörün çıkış fazlarında oluşan akım grafikleri verilmiştir. Burada oluşan akım değerleri düzgün bir sinüsoidal dalga elde edilmiştir. Bu sinüsoidal dalgada oluşan maksimum akım değeri yaklaşık 10 A olarak gösterilmiştir. Şekil 4.15,

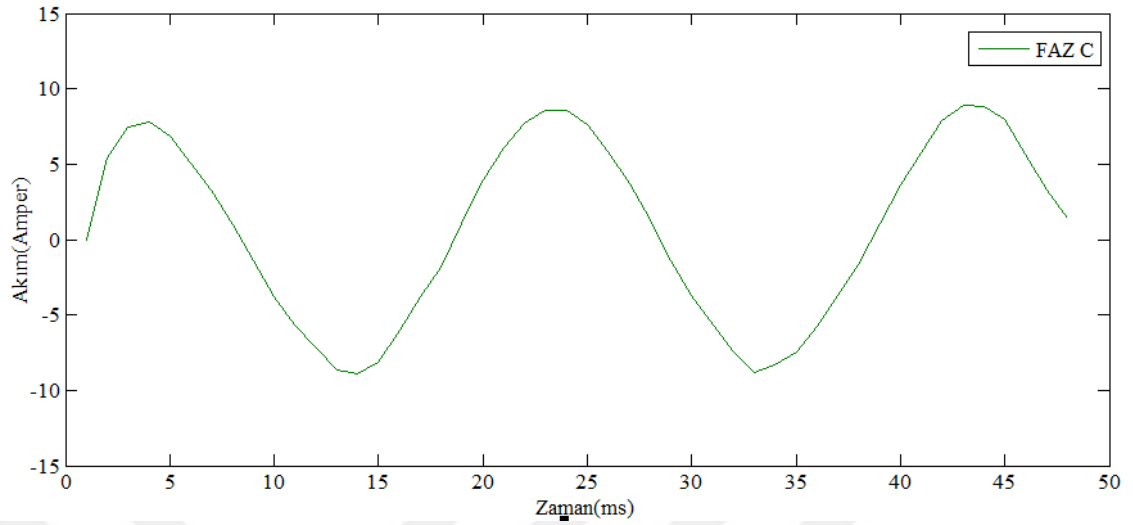
Şekil 4.16 ve Şekil 4.17 verilen akım dalgaları generatörün 500 rpm hızında elde edilen değerleridir. Burada tasarımı gerçekleştirilen makinenin sargı akım değerleri, sargının sürekli taşıyacağı sargı akım değerlerinin üst sınırını aşmaması gerekmektedir. Bundan dolayı akım değerlerinin bir maksimum üst sınırının olması gerekmektedir. Bu tasarımda ise kullanılan iletkenin sürekli taşıyacağı akım değeri yaklaşık olarak 15 A'dır.



Şekil 4.15. Eksenel akıllı senkron generatörün A fazının 500 d/dk'daki akım değeri

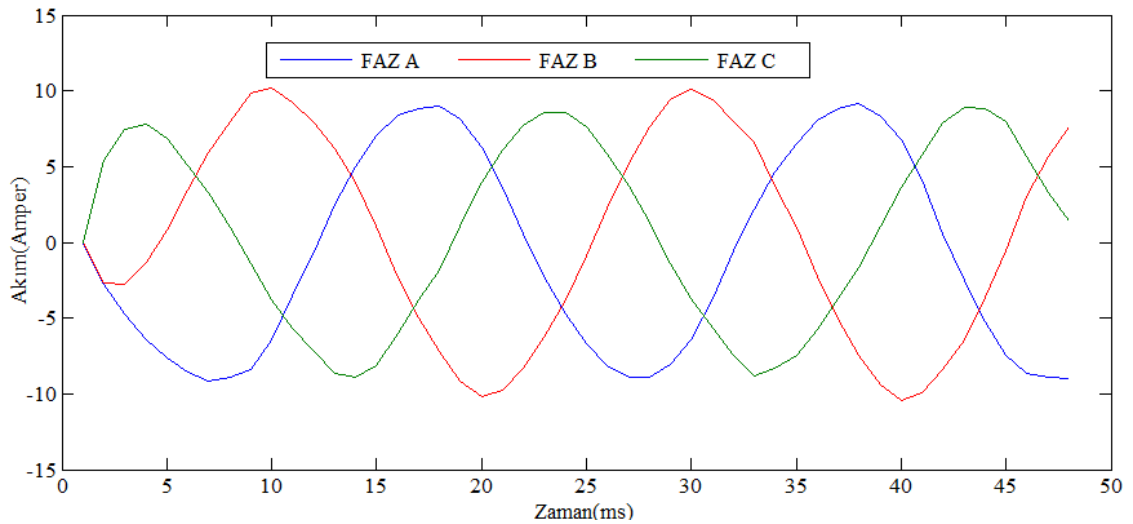


Şekil 4.16. Eksenel akıllı senkron generatörün B fazının 500 d/dk'daki akım değeri



Şekil 4.17. Eksenel akıllı senkron generatörün C fazının 500 d/dk'daki akım değeri

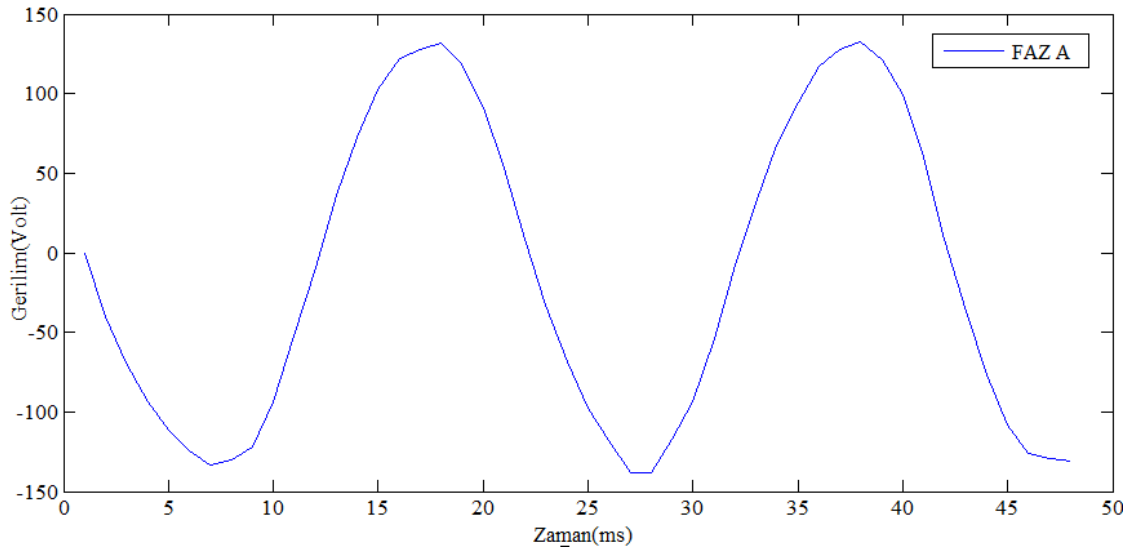
Şekil 4.18'de verilen akım dalga formlarında ise A-B-C fazlarından akan akım değerleri bir grafikte analiz edilmiştir. Bu grafik incelendiğinde akımların birbirlerine göre 120° 'lik açılarla elde edildiği görülmektedir.



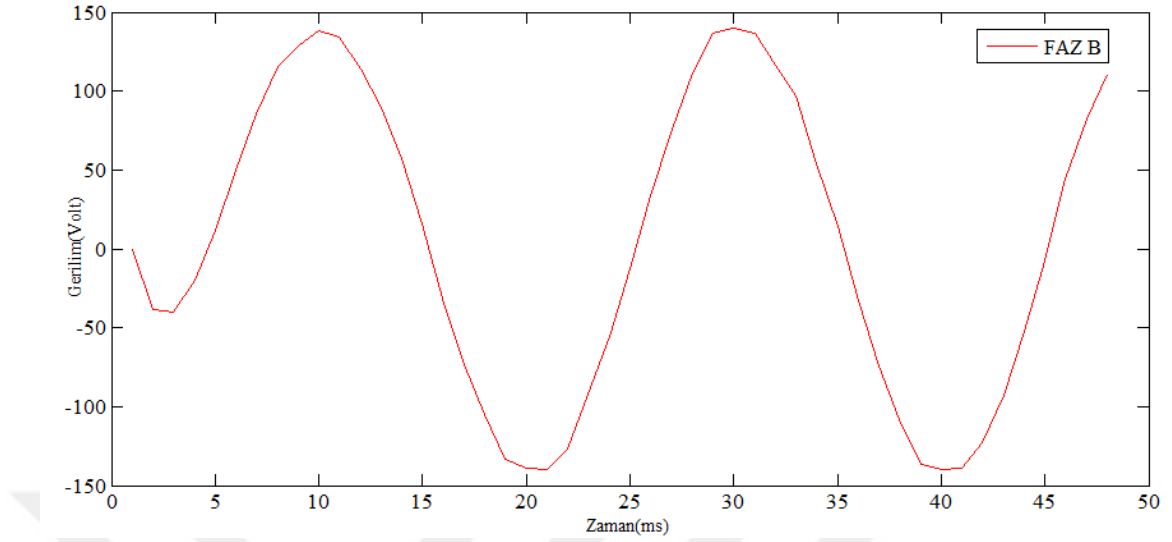
Şekil 4.18. Eksenel akıllı senkron generatörün 500 d/dk'daki A-B-C fazının akım değerleri

4.2.2. Eksenel akılı senkron generatörün 1000 d/dk'daki simülasyon sonuçları

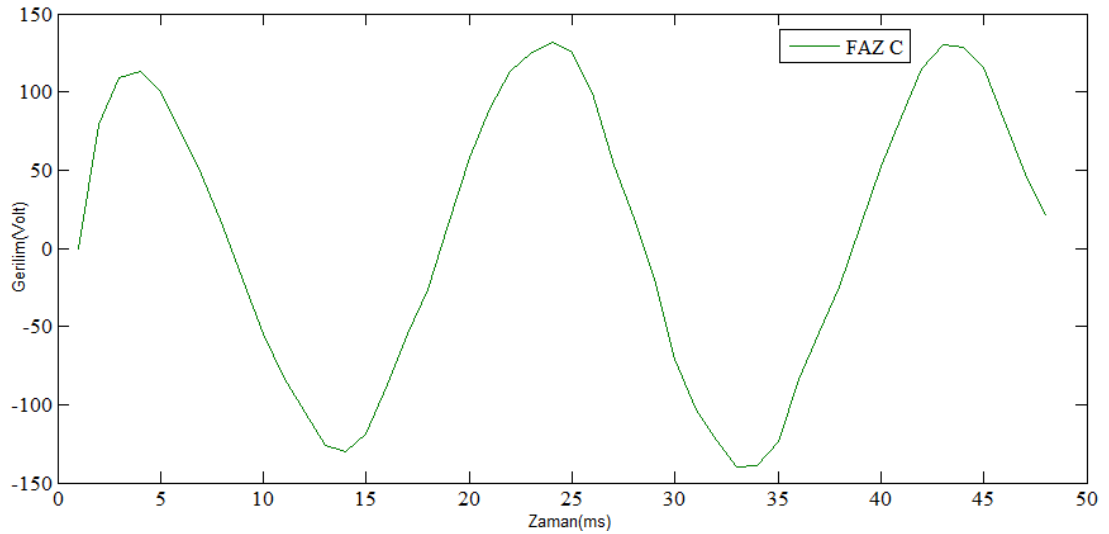
Şekil 4.19, Şekil 4.20 ve Şekil 4.21'de gösterilen generatörün rotor hızının 1000 d/dk olduğu durumda oluşan faz-nötr gerilim değerinin grafikleri gösterilmektedir. Burada oluşan gerilim düzgün sinüs eğrisi şeklinde olup elde edilen maksimum faz-nötr gerilimi yaklaşık olarak 140 V olmaktadır. Şekil 4.22'de ise generatörün faz-faz gerilim değeri verilmiştir. Bu üç faz gerilim değeri ise yaklaşık olarak 240 V değerinde olmaktadır.



Şekil 4.19. Eksenel akılı senkron generatörün A fazının 1000 d/dk'daki faz-nötr gerilim değeri

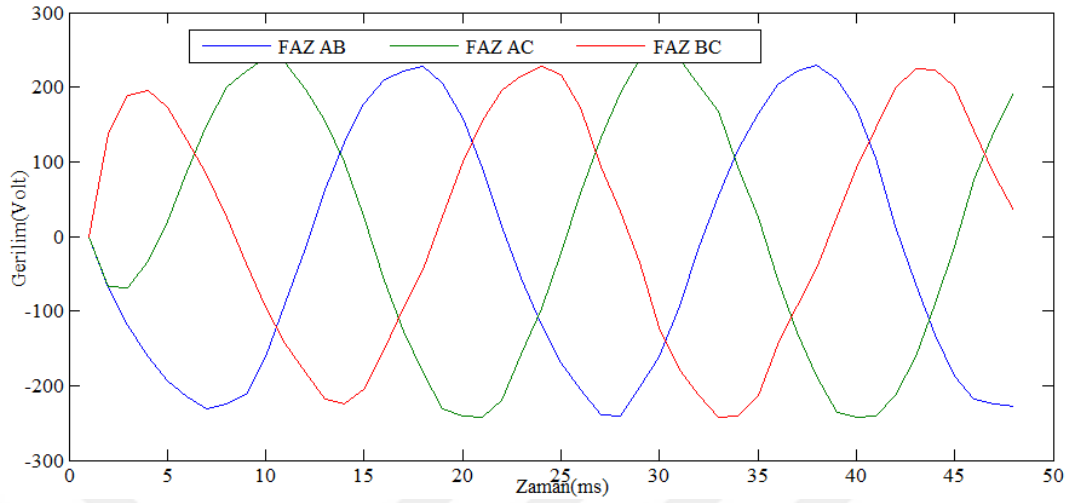


Şekil 4.20. Eksenel akılı senkron generatörün B fazının 1000 d/dk'daki faz-nötr gerilim değeri



Şekil 4.21. Eksenel akılı senkron generatörün C fazının 1000 d/dk'daki faz-nötr gerilim değeri

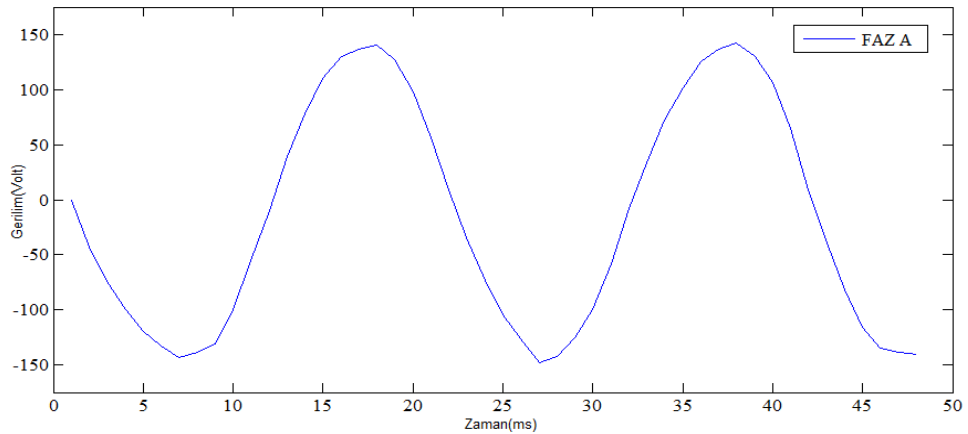
Şekil 4.22'te elde edilen grafikte A-B-C fazlarının birbirlerine göre 120° 'lik açılar oluşturmuştur. Burada elde edilen sinüsoidal dalganın düzgün olması hem seçilen mıknatıs tipinin geometrisi, hem de makinenin geometrik yapısının doğru seçildiği anlamına gelir.



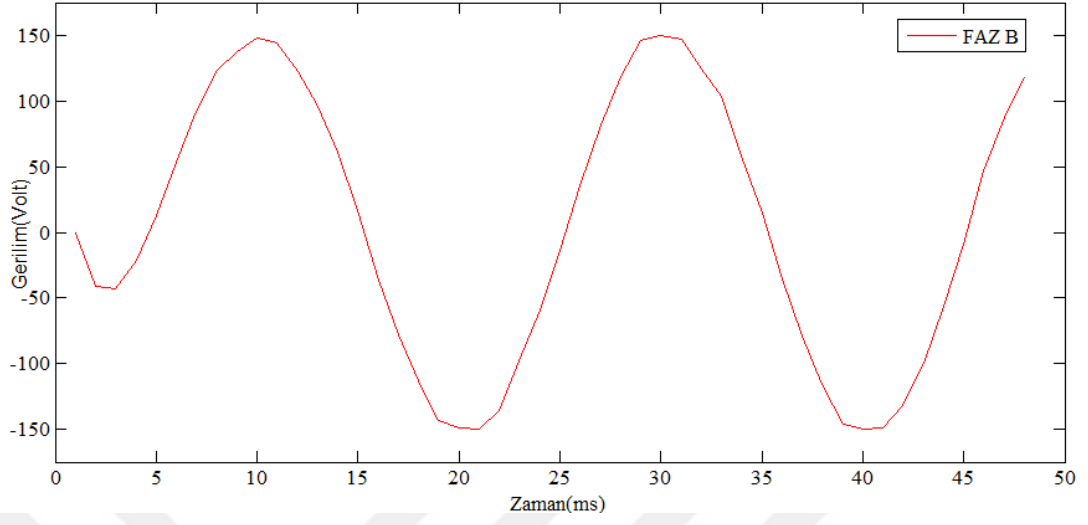
Şekil 4.22. Eksenel akılı senkron generatörün A-B-C fazının 1000 d/dk'daki faz-faz gerilim değerleri

4.2.3. Eksenel akılı senkron generatörün 1500 d/dk'daki simülasyon sonuçları

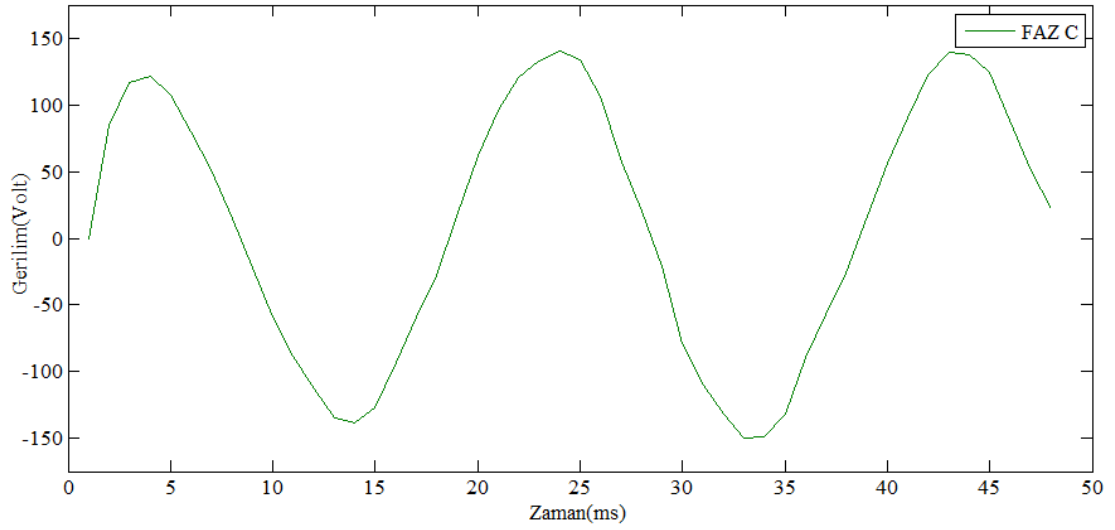
Şekil 4.23, Şekil 4.22 ve Şekil 4.25'te gösterilen generatörün rotor hızının 1500 d/dk olduğu durumda oluşan faz-nötr gerilim değerinin grafikleri gösterilmektedir. Burada oluşan gerilim düzgün sinüs eğrisi şeklinde olup elde edilen maksimum faz-nötr gerilimi yaklaşık olarak 147 V olmaktadır. Şekil 4.25'te ise generatörün faz-faz gerilim değeri verilmiştir. Bu üç faz gerilim değeri ise yaklaşık olarak 255 V değerinde olmaktadır.



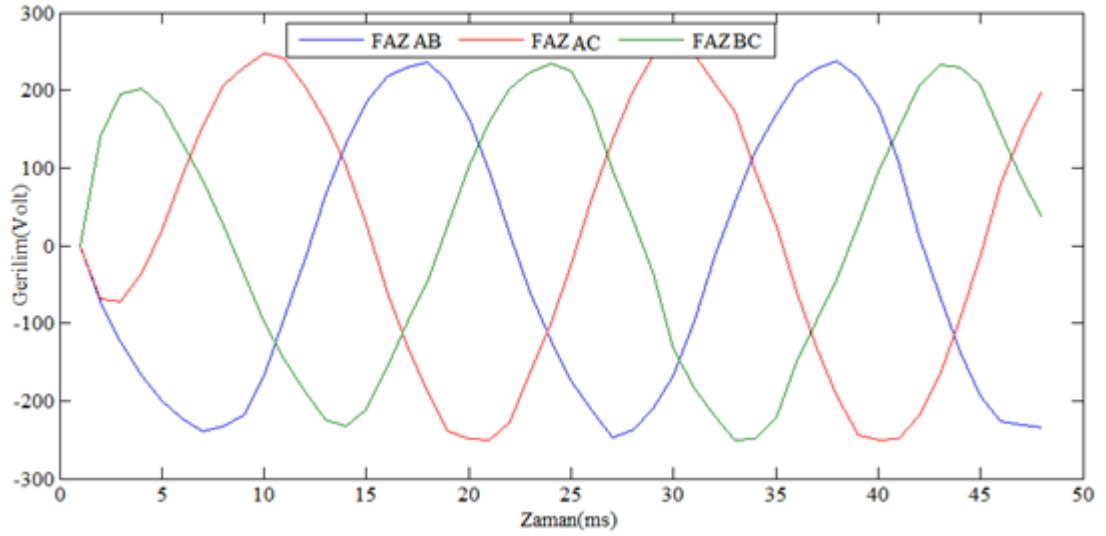
Şekil 4.23. Eksenel akılı senkron generatörün A fazının 1500 d/dk'daki faz-nötr gerilim değeri



Şekil 4.24. Eksenel akılı senkron generatörün *B* fazının 1500 d/dk'daki faz-nötr gerilim değeri

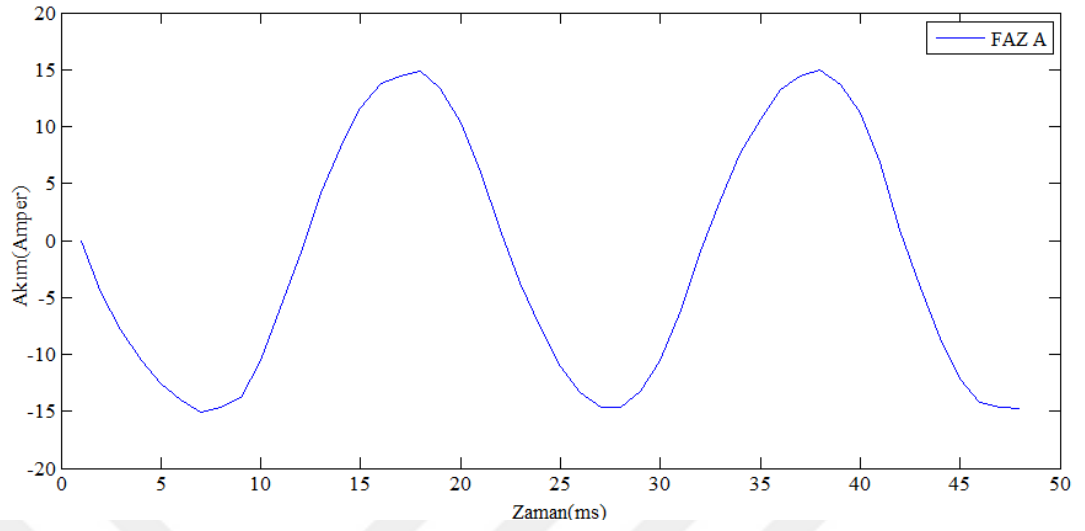


Şekil 4.25. Eksenel akılı senkron generatörün *C* fazının 1500 d/dk faz-nötr gerilim değeri

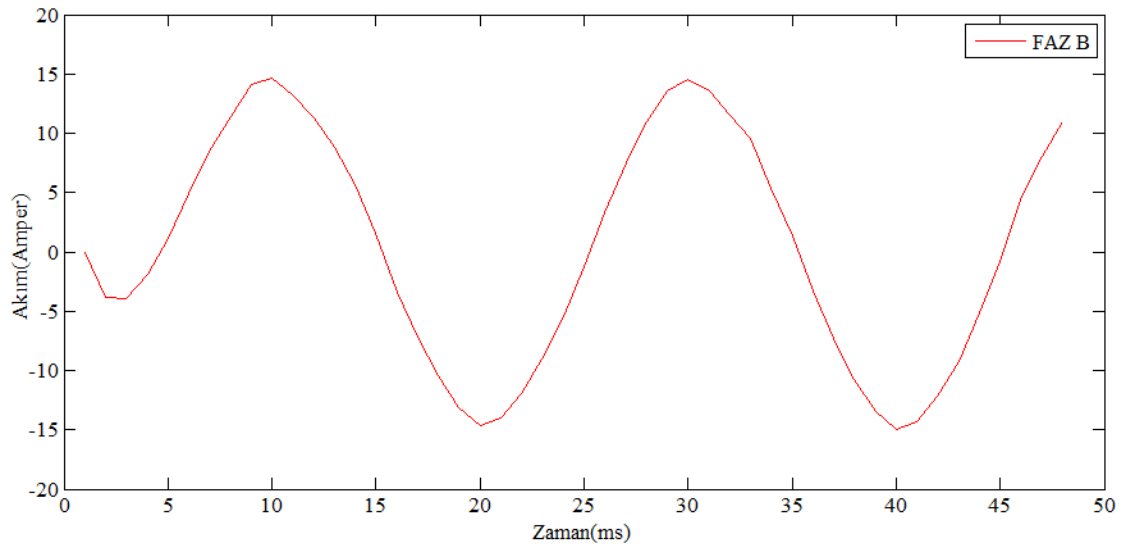


Şekil 4.26. Eksenel akılı senkron generatörün A-B-C fazının 1500 d/dk'daki faz-faz gerilim değerleri

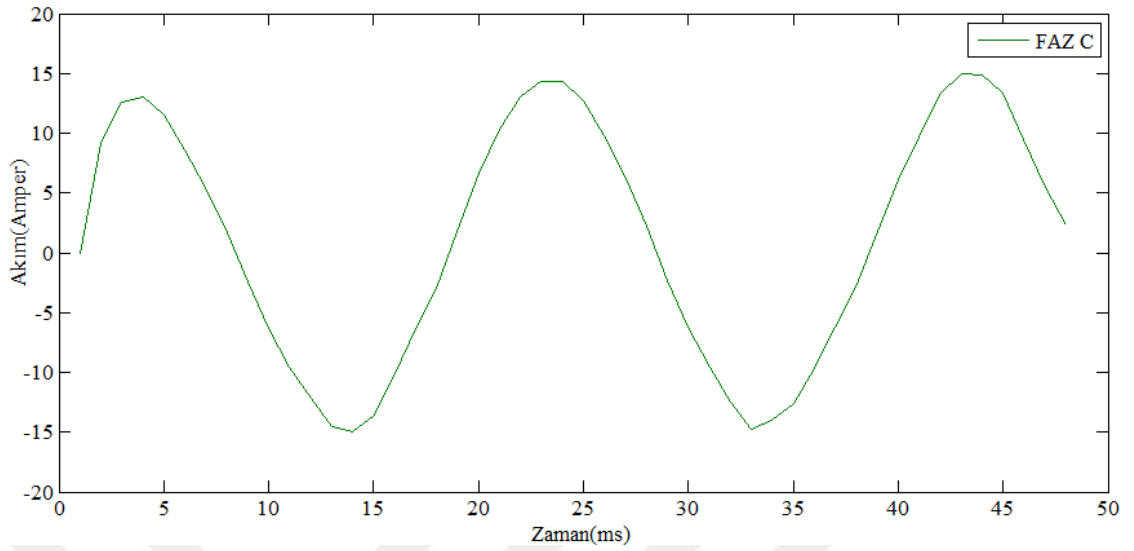
Aşağıda verilen eğrilerde generatörün çıkış fazlarında oluşan akım grafikleri verilmiştir. Burada oluşan akım değerleri düzgün bir sinüsoidal dalga elde edilmiştir. Bu sinüsoidal dalgada oluşan maksimum akım değeri yaklaşık 15 A olarak gösterilmiştir. Şekil 4.27, Şekil 4.28 ve Şekil 4.29 verilen akım dalgaları generatörün 1500 d/dk hızında elde edilen değerleri gösterilmiştir. Burada tasarımı gerçekleştirilen makinenin sargı akım değerleri, sargının sürekli taşıyacağı sargı akım değerlerinin üst sınırını aşmaması gerekmektedir. Bundan dolayı akım değerlerinin maksimum üst sınırının olması gerekmektedir. Bu tasarımda ise kullanılan iletkenin sürekli taşıyacağı akım değeri yaklaşık olarak 15 A dir. Makinenin bu akım değerlerinin üstüne çıkması durumunda ise sargılar zarar göreceğinden bu akım sınırının aşılmamalıdır.



Şekil 4.27. Eksenel akıllı senkron generatörün A fazının 1500 d/dk'daki akım değeri

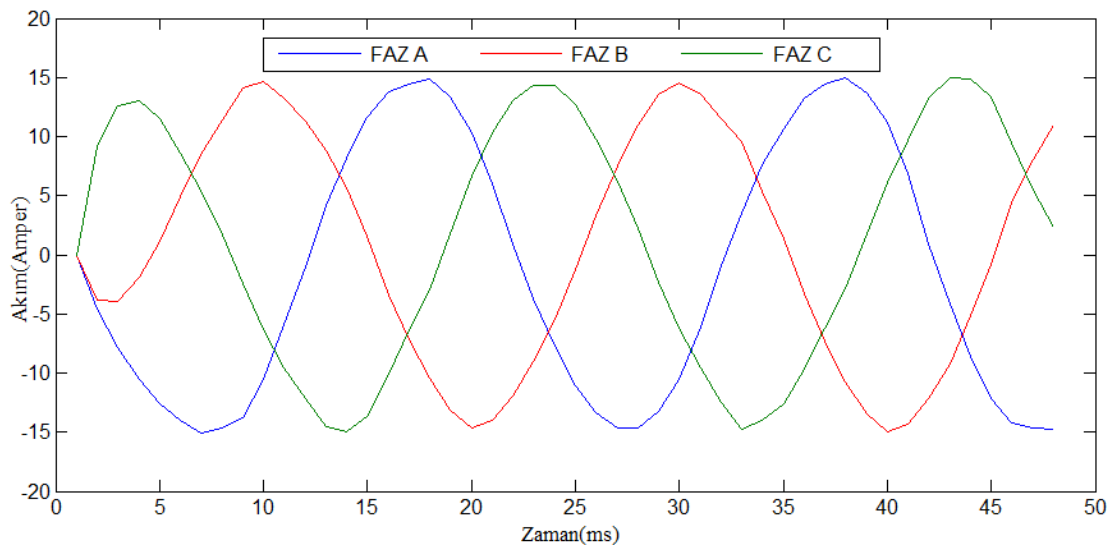


Şekil 4.28. Eksenel akıllı senkron generatörün B fazının 1500 d/dk'daki akım değeri



Şekil 4.29. Eksenel akılı senkron generatörün C fazının 1500 d/dk'daki akım değeri

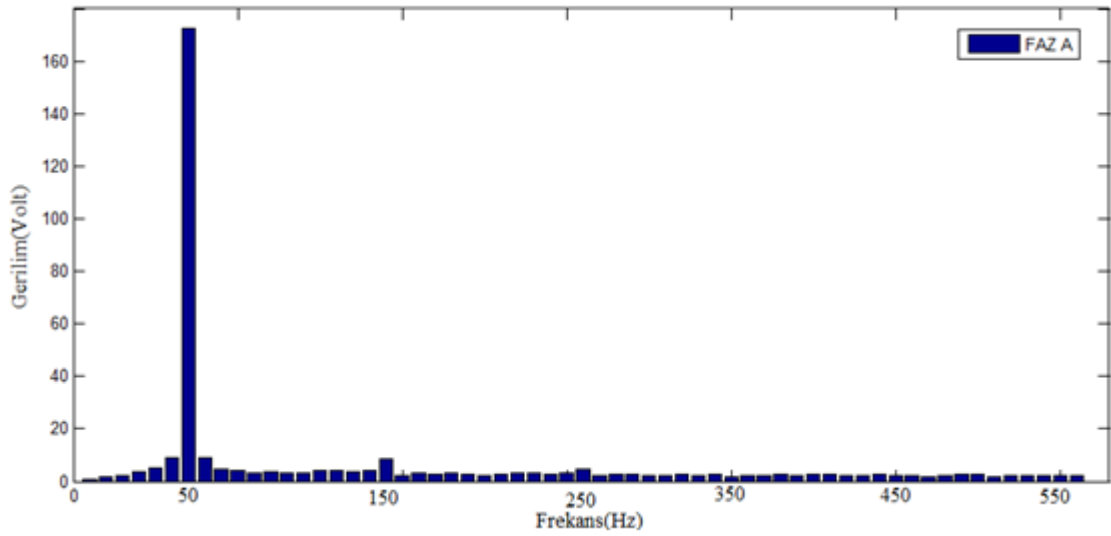
Şekil 4.30'da verilen akım dalga formlarında ise A-B-C fazlarındaki akım değerleri aşağıdaki grafikte analiz edilmiştir. Bu grafik incelendiğinde akımların birbirlerine göre 120° 'lik açılarla elde edildiği görülmektedir. Bu da makinenin tasarımında seçilen parametrelerin doğru seçildiğini göstermektedir.



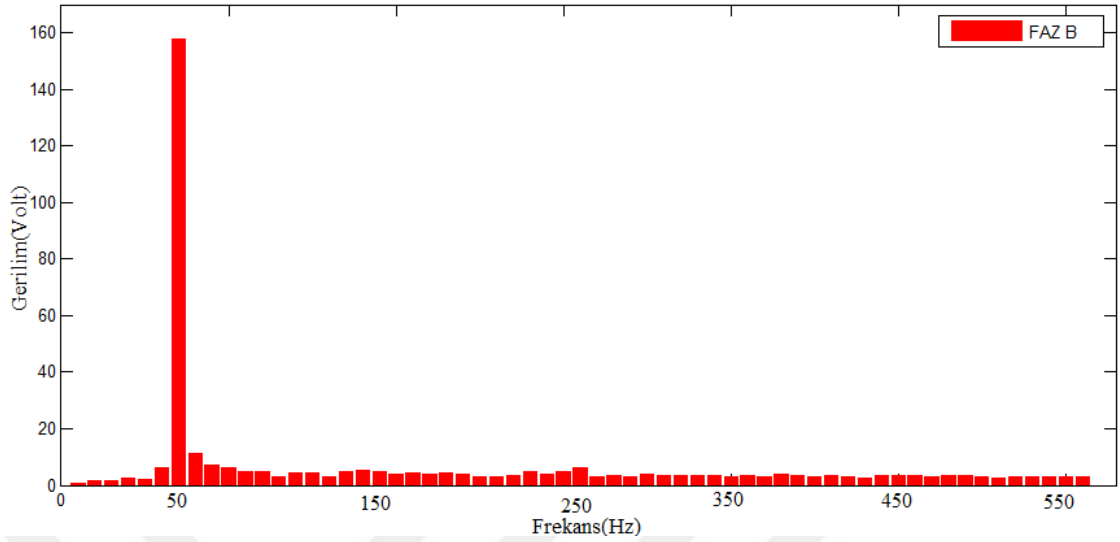
Şekil 4.30. Eksenel akılı senkron generatörün A-B-C fazının 1500 d/dk'daki akım değerleri

4.3. Eksenel Akılı Senkron Generatörün 500 d/dk'daki Harmonik Analizi

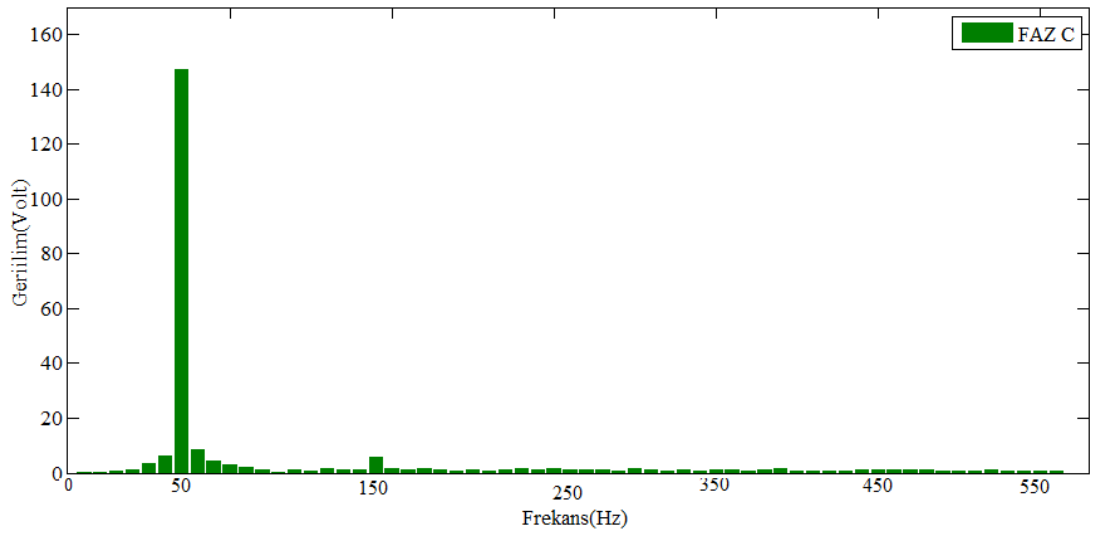
Toplam harmonik bozulma harmonik bileşenlerin temel bileşenle kıyaslanmasıdır. Toplam harmonik bozulma Denklem 2.27'de ifade edilmiştir. Bu harmonik bozulmalar genellikle % olarak ifade edilir. Burada kullanılan değerler etkin değerlerdir. Tasarımı gerçekleştirilen generatörün harmonik analizi hakkında bilgi sahibi olunması gereklidir. Makinede oluşabilecek muhtemel titreşimlerin, ısınmanın ve moment salınımları gibi birçok olumsuz durumlardan etkilenmemesi gerekir. Bu olumsuz durumların oluşmaması için harmonik analizinin uluslararası standartların müsaade ettiği değerlerin altında olması gerekmektedir. Eksenel akılı senkron generatörün sürekli 500 d/dk'daki gerilim harmonik analizi aşağıdaki grafiklerde verilmiştir.



Şekil 4.31. Eksenel akılı senkron generatörün A fazının 500 d/dk'da harmonik değeri



Şekil 4.32. Eksenel akıllı senkron generatörün B fazının 500 d/dk'da harmonik değeri

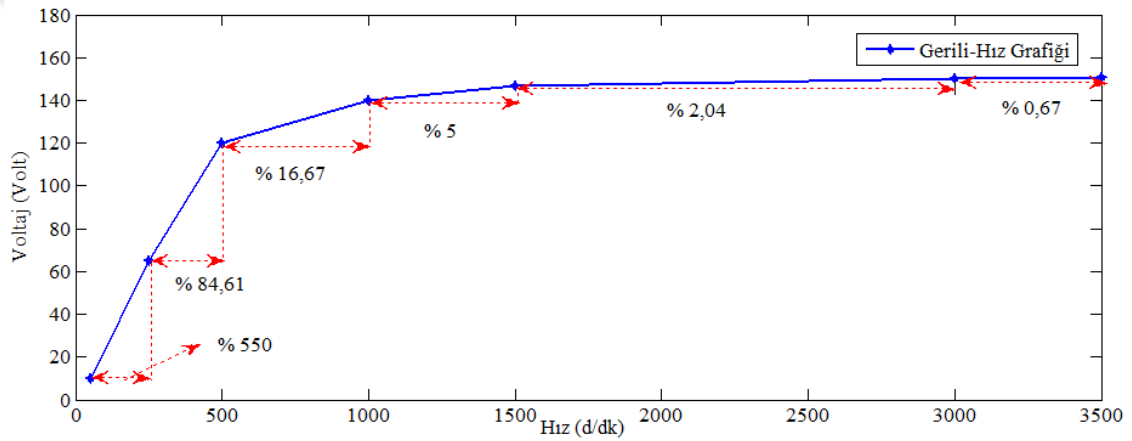


Şekil 4.33. Eksenel akıllı senkron generatörün C fazının 500 d/dk'da harmonik değeri

Yukarıdaki grafikler incelendiğinde toplam harmonik bozulmanın 1 kV altındaki referans voltajında IEEE STD-2014 standardına göre toplam harmonik bozulmanın %8'in altında olması gerekmektedir. Şekil 4.31, Şekil 4.32 ve Şekil 4.33'e göre toplam harmonik bozulmanın %1 altında olduğu görülmektedir. Bu da makinenin tasarımında harmonik salınımlarının bozucu etkilerine maruz kalmayacak anlamına gelir.

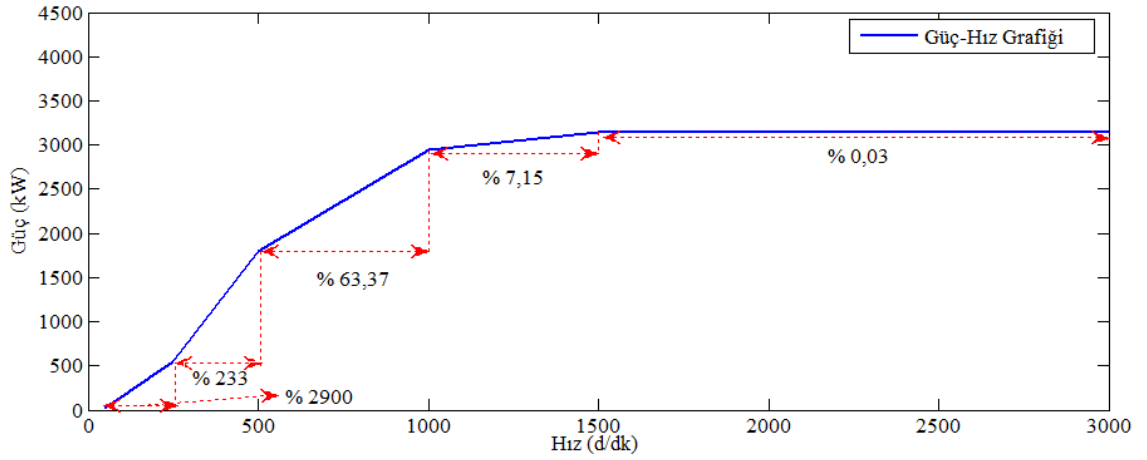
4.4. Eksenel Akılı Senkron Generatörün Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

Şekil 4.34'te, üç fazlı generatör için 50, 250, 500, 1000, 1500 ve 3000 d/dk'lık rotor hızlarında elde edilecek gerilim değerlerinin grafiği verilmiştir. Kullanılan neodyum mıknatıslar maksimum akı değerine ulaştığında gerilim seviyesi artmayıp sabit kalmaktadır. Devir sayısı yükseldikçe gerilim seviyesinin artış miktarı azalmaktadır. Ayrıca farklı hızlardaki frekans değişimlerini alternatif akım dönüştürücüleri kullanılarak sabitlenebilir.



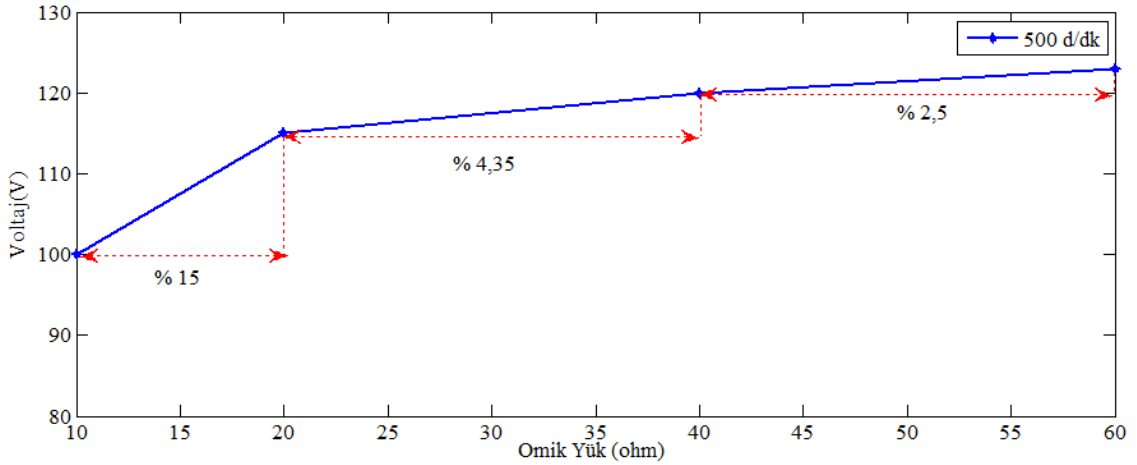
Şekil 4.34. Eksenel akılı senkron generatörün gerilim-hız grafiği

Şekil 4.35'te, üç fazlı generatör için 50, 250, 500, 1000, 1500 ve 3000 d/dk'lık rotor hızlarında elde edilecek aktif güç değerlerinin grafiği verilmiştir. Rotor hızı 1500 d/dk'dan sonra eksenel akılı generatör üreteceği maksimum güce yaklaşmıştır.



Şekil 4.35. Eksenel akılı senkron generatörün güç-hız grafiği

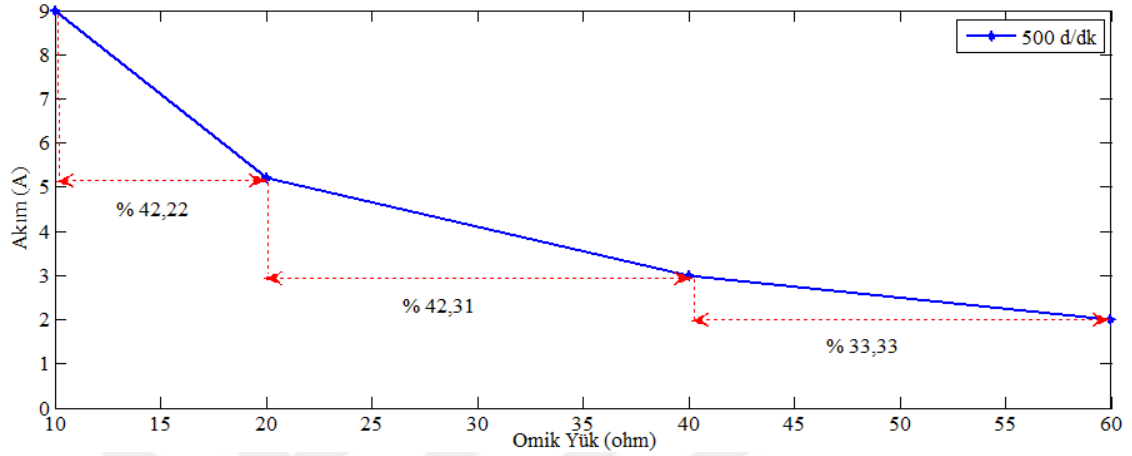
Şekil 4.36'da, üç fazlı eksenel akılı generatörün 500 d/dk'lık rotor hızında 10, 20, 40 ve 60 Ω 'luk yüklerle yüklenmiş durumunu göstermiştir. Omik yük-Gerilim grafiği aşağıda verilmiştir. Bu grafiğe göre eksenel akılı senkron generatörün yükü artırıldığında elde edilen gerilimde ise artış olduğu görülmüştür. Eksenel akılı senkron generatör elektriksel olarak yüklendiği zaman gerilim düşümü olacaktır.



Şekil 4.36. Eksenel akılı senkron generatörün 500 d/dk'daki gerilim-omik yük grafiği

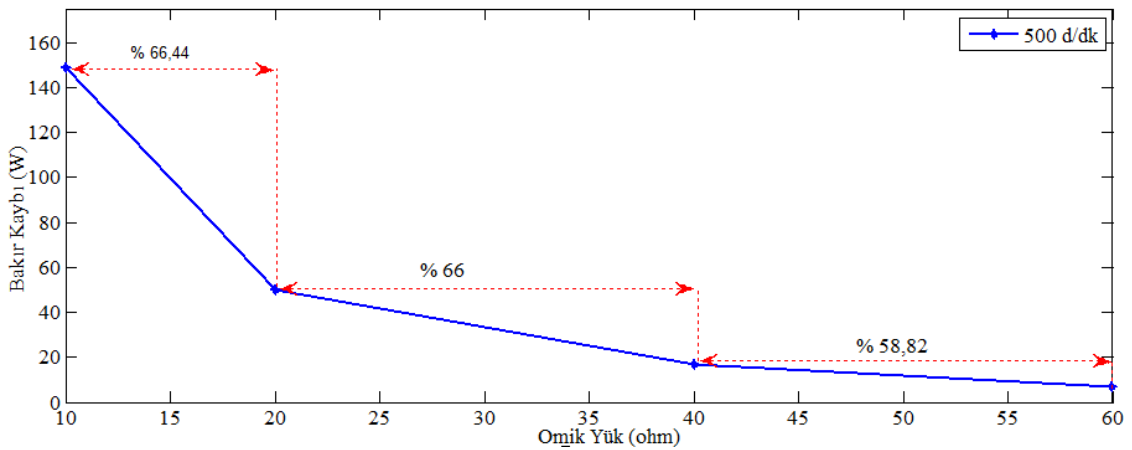
Şekil 4.37'de, üç fazlı generatörün 500 d/dk'lık rotor hızında 10, 20, 40 ve 60 Ω 'luk yüklerle ayrı ayrı yüklenmiş durumu gösterilmiştir. Bu grafiğe göre eksenel akılı senkron generatörün yükü artırıldığında elde edilen akımda ise azalma olduğu

görülmüştür. Eksenel akıllı senkron generatör elektriksel olarak yüklendiği zaman akım da artma olacaktır.



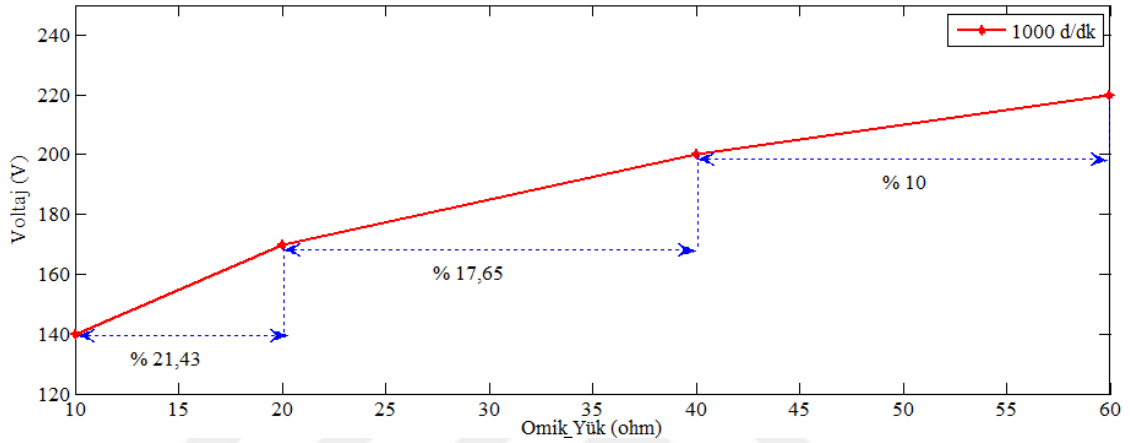
Şekil 4.37. Eksenel akıllı senkron generatörün 500 d/dk'daki akım-omik yük grafiği

Şekil 4.38'de, üç fazlı generatörün 500 d/dk'lık rotor hızında 10, 20, 40 ve 60 Ω 'luk yüklerle ayrı ayrı yüklenmiş durumu gösterilmiştir. Aşağıdaki grafikte bakır kaybı ile omik yük karşılaştırılması yapılmıştır. Bu grafiğe göre eksenel akıllı senkron generatörün yükü artırıldığında oluşacak bakır kayıplarında azalma görülmüştür.



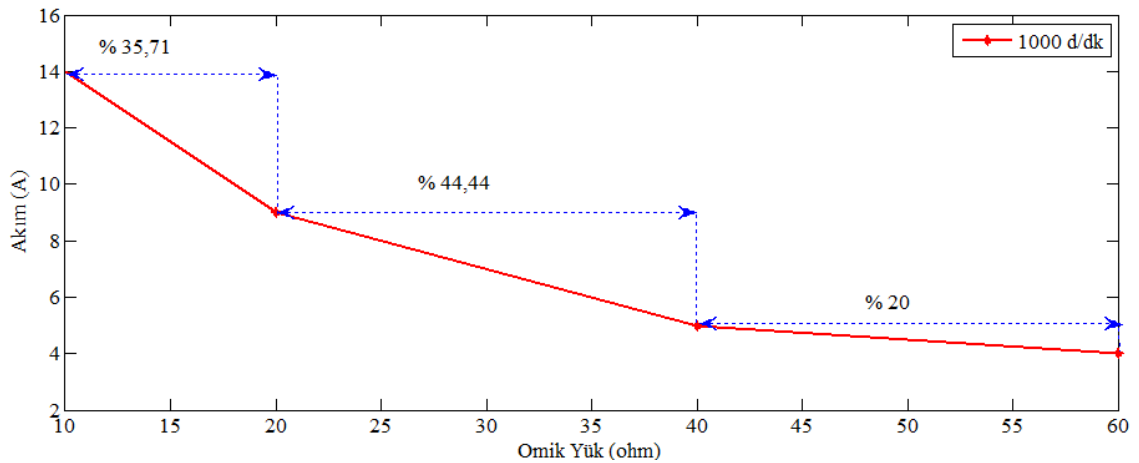
Şekil 4.38. Eksenel akıllı senkron generatörün 500 d/dk'daki bakır kaybı-omik yük grafiği

Şekil 4.39’da üç fazlı eksenel akılı generatörün 1000 d/dk’lık rotor hızında 10, 20, 40 ve 60 Ω ’luk yüklerle yüklenmiş durumu gösterilmiştir. Omik yük gerilim grafiği aşağıda verilmiştir. Bu grafiğe göre eksenel akılı senkron generatörün yükü artırıldığında elde edilen gerilimde ise artış olduğu görülmüştür.



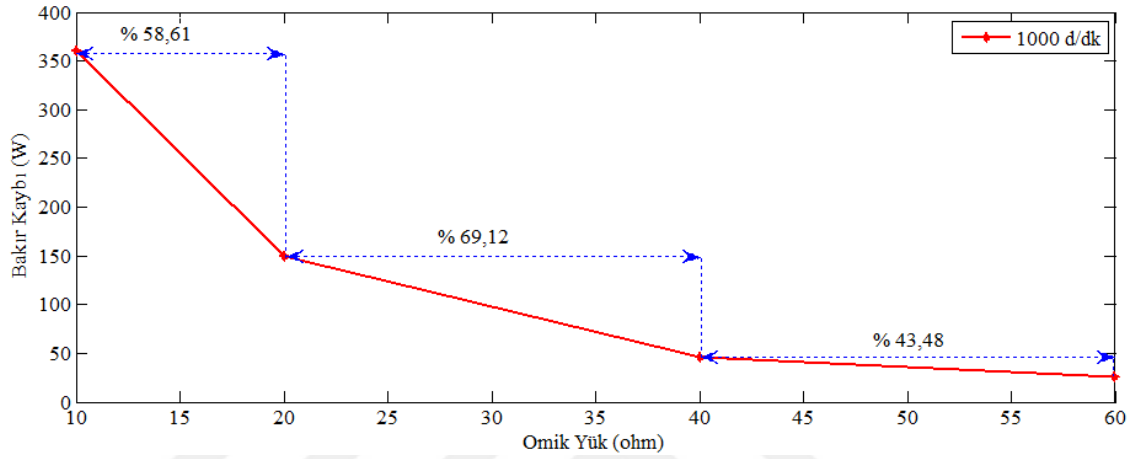
Şekil 4.39. Eksenel akılı senkron generatörün 1000 d/dk’daki gerilim-omik yük grafiği

Şekil 4.40’de, üç fazlı generatörün 1000 d/dk’lık rotor hızında 10, 20, 40 ve 60 Ω ’luk yüklerle yüklenmiş durumu gösterilmiştir. Bu grafiğe göre eksenel akılı senkron generatörün yükü artırıldığında elde edilen akımda ise azalma olduğu görülmüştür.



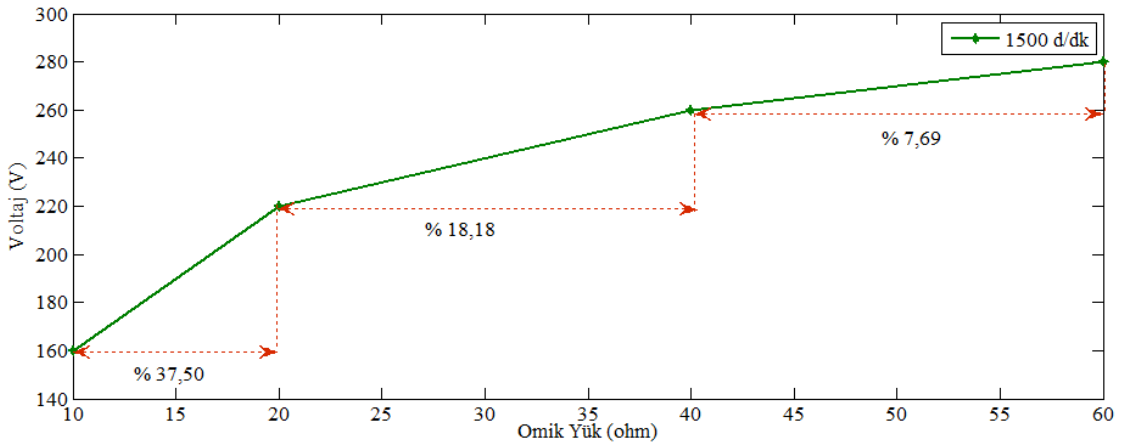
Şekil 4.40. Eksenel akılı senkron generatörün 1000 d/dk’daki akım-omik yük grafiği

Şekil 4.41’de, üç fazlı generatörün 1000 d/dk’lık rotor hızında 10, 20, 40 ve 60 Ω ’luk yüklerle yüklenmiş durumu gösterilmiştir. Aşağıdaki grafikte bakır kaybı ile omik yük karşılaştırılması yapılmıştır. Bu grafiğe göre eksenel akılı senkron generatörün yükü artırıldığında oluşacak bakır kayıplarından azalma görülmüştür.



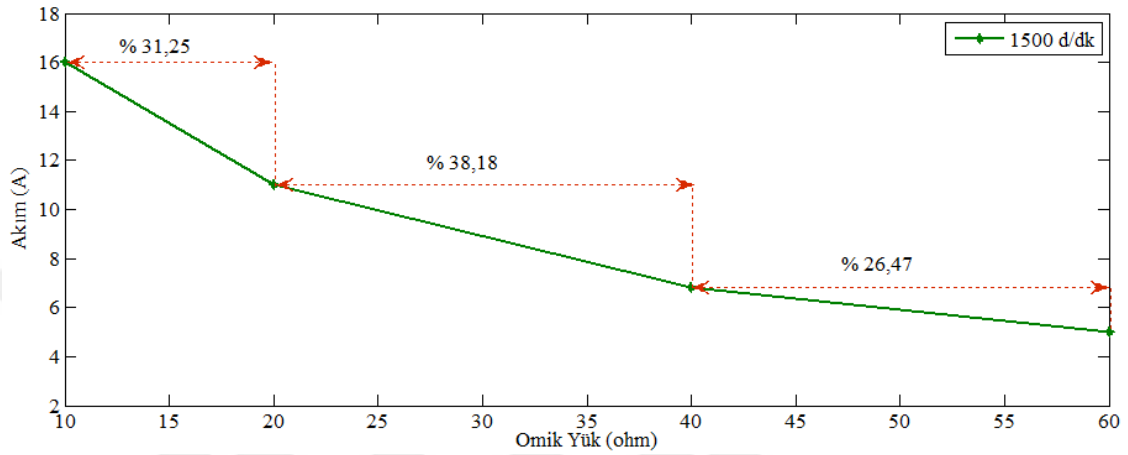
Şekil 4.41. Eksenel akılı senkron generatörün 1000 d/dk’daki bakır kaybı-omik yük grafiği

Şekil 4.42’de, üç fazlı eksenel akılı generatörün 1500 d/dk’lık rotor hızında 10, 20, 40 ve 60 Ω ’luk yüklerle yüklenmiş durumu gösterilmiştir. Omik yük gerilim grafiği aşağıda verilmiştir. Bu grafiğe göre eksenel akılı senkron generatörün yükü artırıldığında elde edilen gerilimde ise artma olduğu görülmüştür.



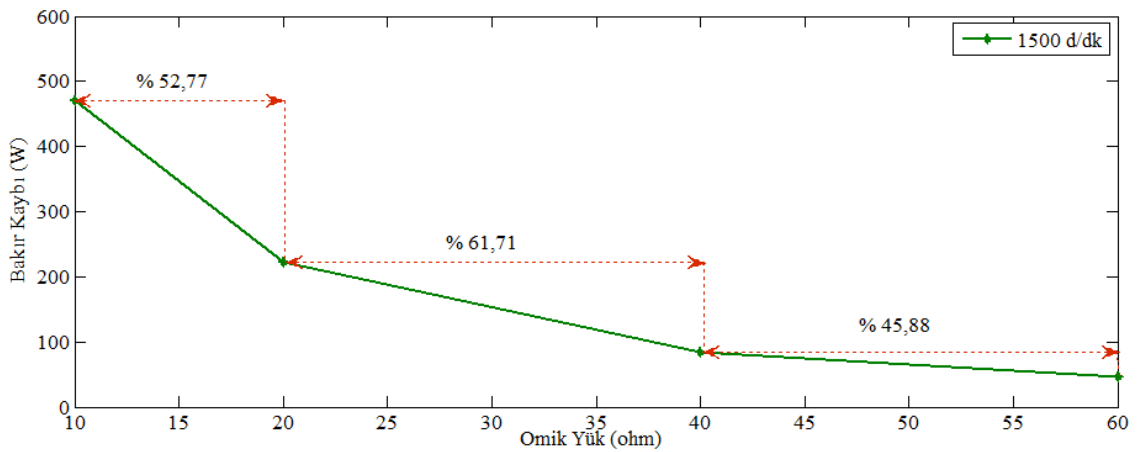
Şekil 4.42. Eksenel akılı senkron generatörün 1500 d/dk’daki gerilim-omik yük grafiği

Şekil 4.43’de, üç fazlı generatörün 1500 d/dk’lık rotor hızında 10, 20, 40 ve 60 Ω yüklenmiş durumunu göstermiştir. Bu grafiğe göre eksenel akıllı senkron generatörün yükü artırıldığında elde edilen akımda ise azalma olduğu görülmüştür.



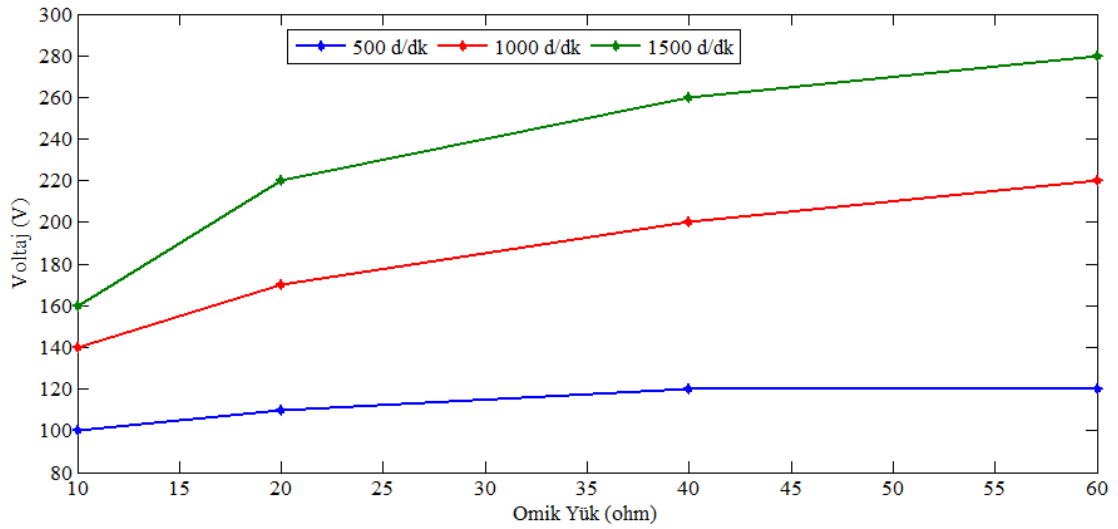
Şekil 4.43. Eksenel akıllı senkron generatörün 1500 d/dk’daki akım-omik yük grafiği

Şekil 4.44’te, üç fazlı generatörün 1500 d/dk’lık rotor hızında 10, 20, 40 ve 60 Ω ’luk yüklerle yüklenmiş durumu gösterilmiştir. Aşağıdaki grafikte bakır kaybı ile omik yük karşılaştırılması yapılmıştır. Bu grafiğe göre eksenel akıllı senkron generatörün yükü artırıldığında oluşacak bakır kayıplarında azama görülmüştür.



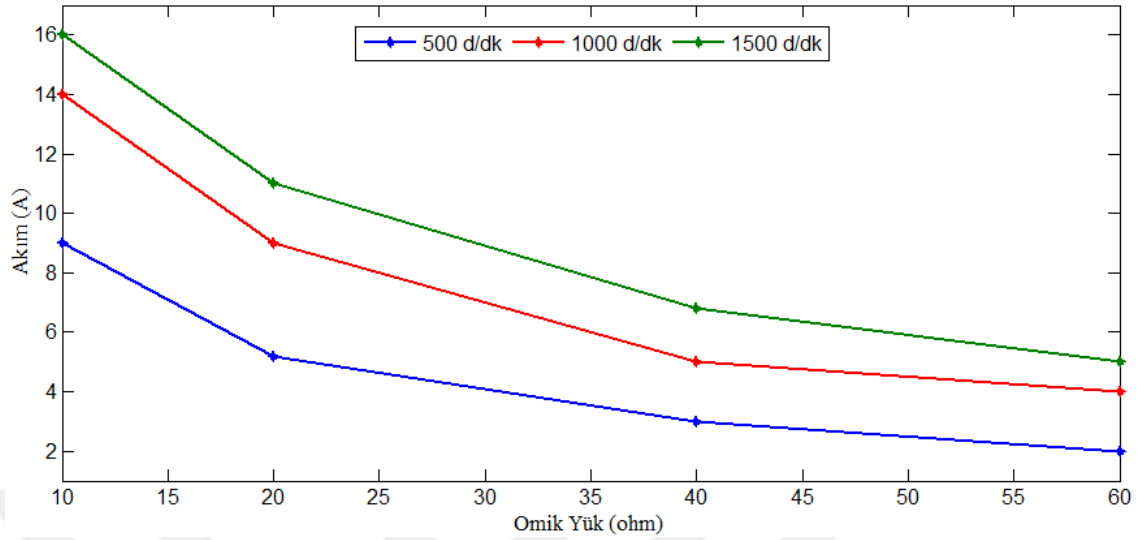
Şekil 4.44. Eksenel akıllı senkron generatörün 1500 d/dk’daki bakır kaybı-omik yük grafiği

Şekil 4.45'te, üç fazlı generatörün 500, 1000 ve 1500 d/dk'lık rotor hızında 10, 20, 40 ve 60 Ω 'luk yüklerle yüklenmiş durumu gösterilmiştir. Aşağıdaki grafikte gerilim ile omik yükün farklı hızlarda karşılaştırılması yapılmıştır. Bu grafiğe göre eksenel akılı senkron generatörün omik yükü artırıldığında oluşacak gerilim değerinin arttığı görülmüştür.



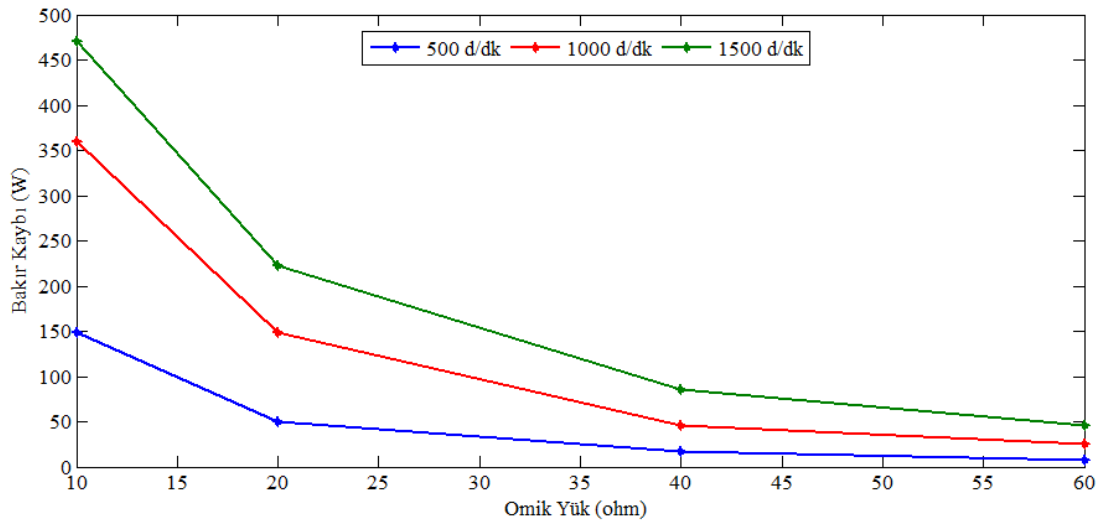
Şekil 4.45. Eksenel akılı senkron generatörün farklı hızlarda gerilim-omik yük grafiği

Şekil 4.46'da, üç fazlı generatörün 500, 1000 ve 1500 d/dk'lık rotor hızında 10, 20, 40 ve 60 Ω 'luk yüklerle yüklenmiş durumu gösterilmiştir. Aşağıdaki grafikte akım ile omik yükün farklı hızlarda karşılaştırılması yapılmıştır. Bu grafiğe göre eksenel akılı senkron generatörün omik yükü artırıldığında akım değerinin azaldığı görülmüştür.



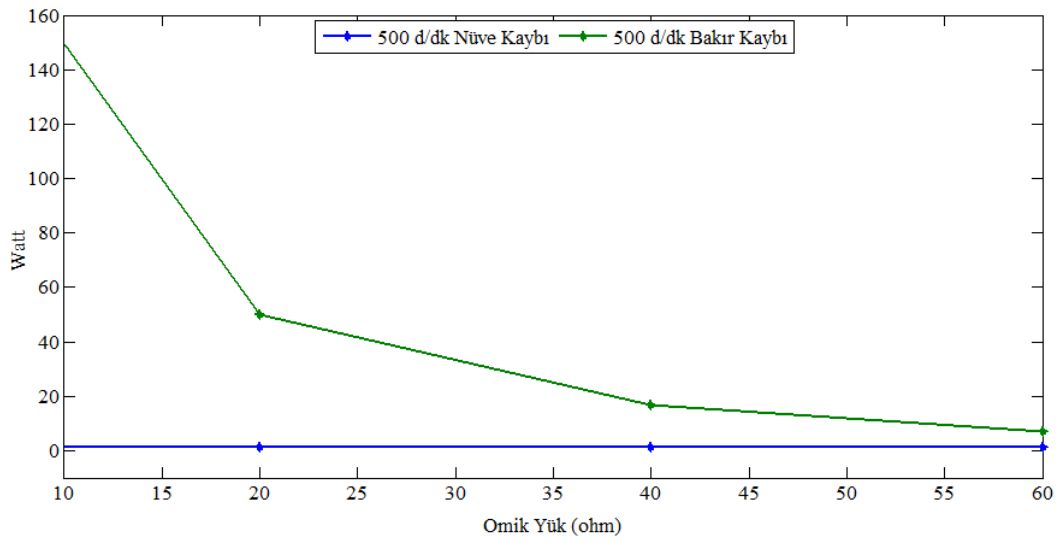
Şekil 4.46. Eksenel akıllı senkron generatörün farklı hızlarda akım-omik yük grafiği

Şekil 4.47’de, üç fazlı generatörün 500, 1000 ve 1500 d/dk’lık rotor hızında 10, 20, 40 ve 60 Ω ’luk yüklerle yüklenmiş durumu gösterilmiştir. Aşağıdaki grafikte bakır kaybı ile omik yükün farklı hızlarda karşılaştırılması yapılmıştır. Bu grafiğe göre eksenel akıllı senkron generatörün omik yükü artırıldığında bakır kaybında azalma görülmüştür.

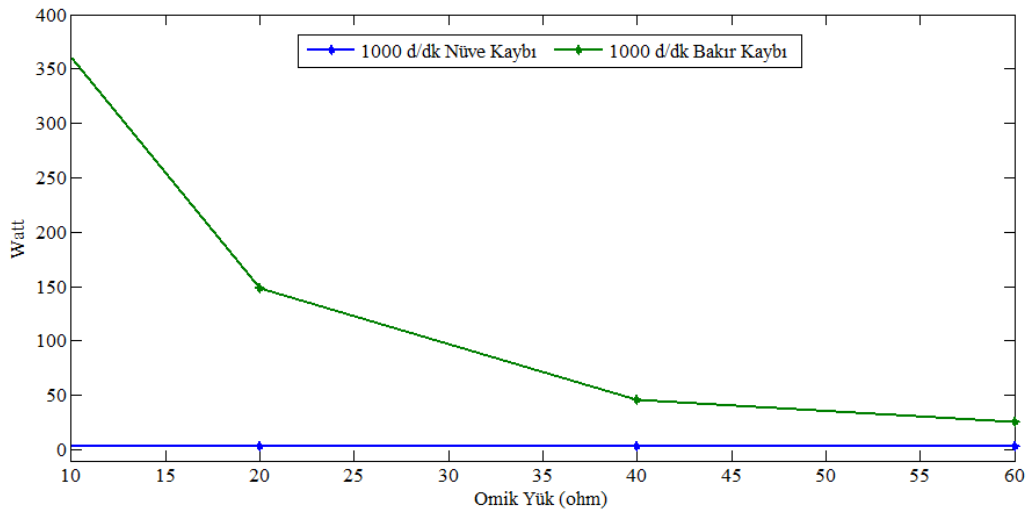


Şekil 4.47. Eksenel akıllı senkron generatörün farklı hızlarda bakır kaybı-omik yük grafiği

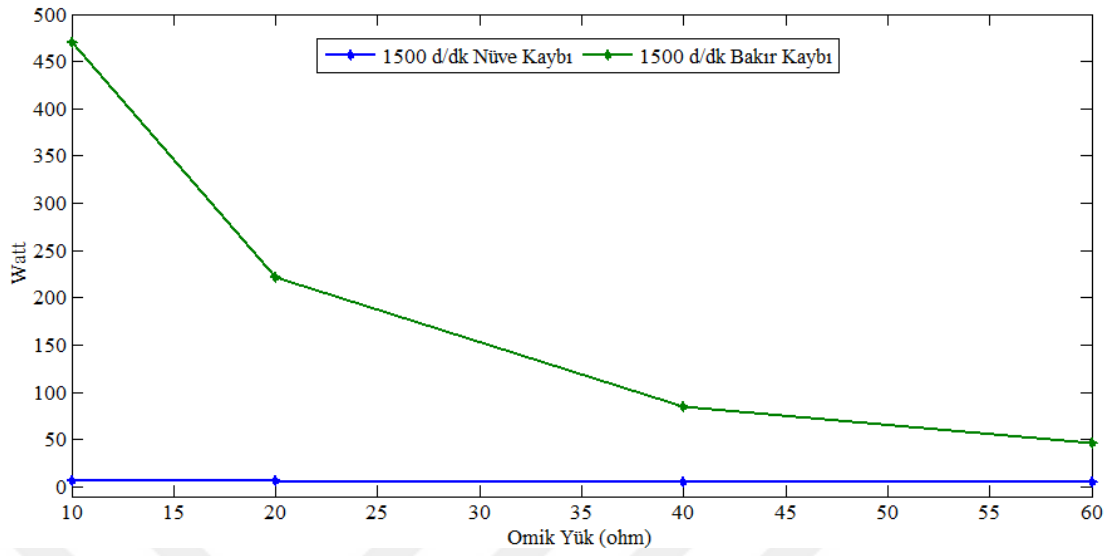
Şekil 4.48, Şekil 4.49 ve Şekil 4.50’de, üç fazlı generatörün 500, 1000 ve 1500 d/dk’lık rotor hızında 10, 20, 40 ve 60 Ω ’luk yüklerle yüklenmiş durumu gösterilmiştir. Aşağıda verilen grafiklerde bakır kaybı ile nüve kaybı farklı yük durumlarına göre karşılaştırılması yapılmıştır. Bu grafiğe göre eksenel akılı senkron generatörün omik yükü artırıldığında bakır kaybının azalmasına karşın nüve kaybında ise yüke bağlı bir değişimin olmadığı görülmüştür.



Şekil 4.48. Eksenel akılı senkron generatörün 500 d/dk’da nüve ve bakır kayıpları grafiği

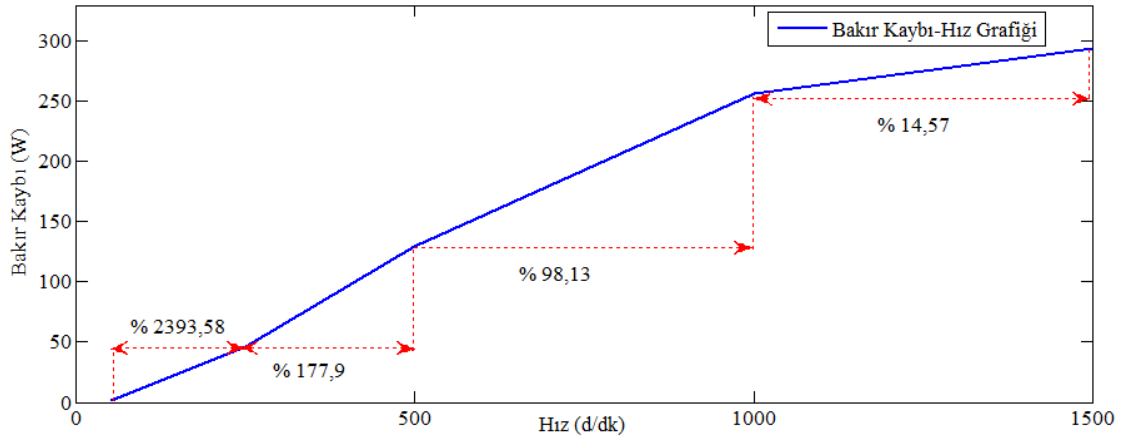


Şekil 4.49. Eksenel akılı senkron generatörün 1000 d/dk’da nüve ve bakır kayıpları grafiği



Şekil 4.50. Eksenel akılı senkron generatörün 1500 d/dk'da nüve ve bakır kayıpları grafiği

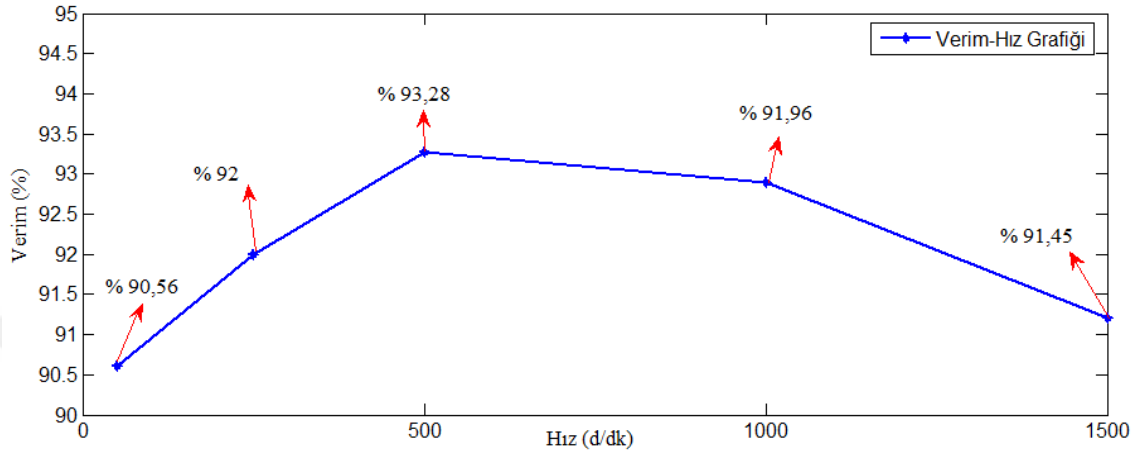
Şekil 4.51'de bakır kaybı-hız grafiği gösterilmiştir. Eksenel akılı makinenin devir sayısı artığında buna bağlı olarak bakır kayıpları da artacaktır. Bakır kayıpları eksenel akılı makinenin sargılarından geçen akımla orantılı olarak artmaktadır. Devir sayısı artışı zammın artış miktarında azalama olmaktadır.



Şekil 4.51. Eksenel akılı senkron generatörün bakır kaybı-hız grafiği

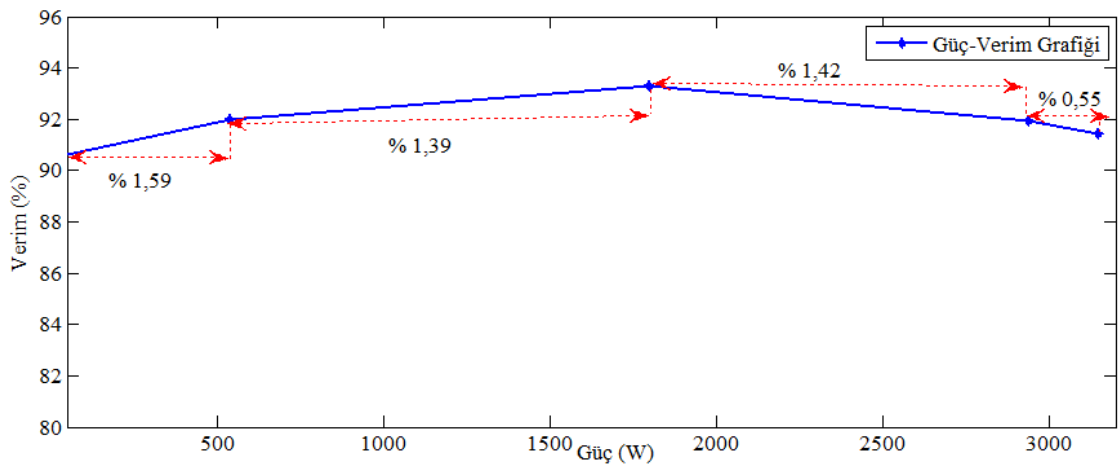
Şekil 4.52'de eksenel akılı makinenin verim-hız grafiği gösterilmiştir. Tasarımı yapılan makine de elde edilen maksimum verim 500 d/dk'da %93,28 olarak bulunmuştur. Devir

sayısı 500 d/dk'nın altına ve 500 d/dk'nın üstüne olduğu zaman makinenin veriminde düşme olacaktır. Eksenel akıllı makine maksimum verime 500 d/dk'da ulaşacaktır.



Şekil 4.52. Eksenel akıllı senkron generatörün verim-hız grafiği

Şekil 4.53'te eksenel akıllı sabit mıknatıslı senkron genertörün verim-güç grafiği gösterilmektedir. Bu makinenin 1,8 kW'ta kadar verimi artmaktadır. 1,8 kW'tan sonra eksenel akıllı senkron generatör veriminde düşme olmaktadır. Eksenel akıllı sabit mıknatıslı nüvesiz senkron generatör maksimum verime 1,8 kW'ta ulaşmıştır.



Şekil 4.53. Eksenel akıllı senkron generatörün güç-verim grafiği

Analizler sonucunda elde edilen verilere göre generatörün şebeke frekansındaki veriminin, çıkış gücün rotor hızının 500 d/dk olan değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir. Burada generatörün anma hızının 500 d/dk, anma gücünün 1,8 kW ve generatörün anma akımının ise 7.07 A olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.1. Üç fazlı eksenel akılı senkron generatörün anma değerleri

Generatörün anma gücü	1.8 kW
Generatörün anma akımı	7.07 A
Generatörün anma gerilimi	84.84 V
Generatörün anma hızı	500 d/dk
Generatörün verimi	%93.28

5. SONUÇ ve TARTIŞMA

Gelişmekte olan ülkelerin en temel sorunlarından biri enerjinin tedarikinde problemlerin ortaya çıkmasıdır. Enerji tedariklerine cevap verilebilmesi için ülke ekonomisine ve ülkenin şartlarına uygun çözümler üretilmesi gerekmektedir. Tüm dünyada ve ülkemizde kullanılan fosil yakıtlarının gelecekte tükeneceği göz ardı edilmemesi gerekmektedir. Bununla birlikte fosil yakıtının büyük kısmı ülke dışından temin edilmektedir. Elektrik üretimi için yakıtın ithal edilmesi büyük maliyetler oluşturmaktadır. Gelişmekte olan ülkelerde elektrik enerjisi gereksinimi sürekli artmaktadır. Bu ise ilgili ülkenin ekonomisini doğrudan etkilemektedir. Elektrik enerjisinin üretilmesinde uygulanabilir ve ekonomik yöntemler geliştirilerek üretim maliyeti azaltılmalıdır. Ayrıca tasarımı yapılan yeni makineler ile elektrik enerjisi üretimi için yeni seçenekler ortaya konulmalıdır. Bu tez çalışmasında yapılan literatür çalışmasında eksenel akılı generatör tasarımı literatürde hızla yerini almaktadır. Eksenel akılı makine tasarımı gün geçtikçe bilimsel çalışmaların ilgi odağı olmaktadır.

Eksenel akılı makineler için yapılan literatür çalışmasında etkili bir matematiksel modele rastlanılmamaktadır. Bu çalışmada tasarımı yapılan eksenel akılı makine için yeni bir matematiksel model önerilmiştir. Bundan sonra tasarlanabilecek makineler için de kullanılabilecektir.

Bu çalışmada, statoru oluksuz, eksenel akılı, sabit mıknatıslı, yeni bir senkron generatörün tasarımı yapıp, elektrik ve elektromanyetik analizleri yapılmıştır. Bu generatör yapısal olarak iki stator ve üç rotorlu olarak tasarlanmıştır. Bu tip makinelerde kullanılması gereken rotor sayısı dört olmasına rağmen üç adet rotor kullanılmıştır. Bu durum hem rotor nüvesinden kaynaklanan kayıpları, hem de eksenel akılı makinenin rotordan kaynaklanan mekaniki ağırlığı %25 oranında düşürmektedir.

Tasarımı gerçekleştirilen eksenel akılı makinenin statoru oluksuz olarak tasarlanmıştır. Bu durum stator nüve kayıplarını ortadan kaldırmıştır. Statorunda nüvenin olmaması

eksenel akılı makineyi daha hafif hale getirmiştir. Kullanılan mıknatıs boyutlarının küçük ve sayılarının az olmasına rağmen, yüksek manyetik akı yoğunluğu elde edilmiştir. Manyetik akı dağılımı, generatörün geometrik yapısına bağlı homojen olarak dağılmıştır. Bu homojen dağılım akı kayıplarını minimum değerlere indirmiştir. Mıknatıslar 30° açılarla yerleştirilmiştir. Her faz için 3 adet olmak üzere toplamda 9 bobin kullanılmıştır. Her bir bobin 40° açılarla yerleştirilmiştir. Eksenel akılı sabit mıknatıslı generatörün 500 d/dk'da 1,8 kW etkin güç elde edilmiştir. Eksenel akılı makinenin etkin verimi %93,28 olarak elde edilmiştir. Bu makine 1500 d/dk'da ise yaklaşık olarak 3,15 kW etkin güç elde edilmiştir.

Literatürde yapılan çalışmalarda statoru nüveli olan eksenel akılı generatörde elde edilen maksimum verim %92,5 iken; bu çalışmada tasarımı yapılan eksenel akılı senkron generatörden elde edilen etkin verim %93,28 olarak hesaplanmıştır.

Yapılan bir çalışmada, iki rotorlu tek statorlu nüvesiz eksenel akılı senkron generatör tasarımıdan elde edilen maksimum etkin gerilim değeri 70,07 V olarak hesaplanmıştır. Burada elde edilen etkin güç ise 0,75 kW'tır (Minaz *et al.* 2016). Bu çalışmada ise makine parametreleri değiştirilmeden üç rotorlu iki statorlu nüvesiz eksenel akılı senkron generatör tasarımından 500 d/dk'da elde edilen etkin gerilim değeri 84,84 V olarak hesaplanmıştır. Bu yeni tasarımda 500 d/dk'da elde edilecek etkin güç değeri ise 1,8 kW'tır. Yeni tasarlanan makineden %19,67 daha fazla güç elde edilmiştir. Buradaki tasarımda ise mıknatıslardan elde edilen manyetik akının daha verimli kullanılması sağlanmıştır.

Bu tasarlanan generatör hem rüzgâr türbinleri hem de küçük güçlü hidroelektrik santralleri için alternatif bir çözüm sunmaktadır. Bu tip generatörlerin statorları dairesel disk şekilli olduklarından dolayı yüksek güç yoğunluğuna sahip ve çok kutuplu olarak tasarlanabilirler. Eksenel akılı sabit mıknatıslı senkron makinenin bu üstünlüklerinden dolayı, rüzgâr hızının 2 m/s değerinin altında olan düşük hızlarda bile enerji üretmesine olanak sağlamaktadır. Bu nedenle rüzgâr türbinleri gibi düşük devirlerde çalışan uygulamalarda önemli kullanım alanına sahiptir.

Eksenel tasarıma sahip olan bu tip generatörler elektrikli araçların tekerlek mekanizmasının içine yerleştirilerek elektrikli araçlarda önemli bir kullanım avantajı sunmaktadır. Ayrıca, makinenin hızı ve oluk sayısının fonksiyonu olan harmonikler açısından değerlendirildiğinde, tasarımı yapılan bu tip senkron generatörler oluksuz yapılarından dolayı harmonik üretimleri çok düşük değerlerde olacaktır.



KAYNAKLAR

- Adanur, İ., 2017. Ferrimanyetizma. İstanbul, <http://fizikakademisi.com/2015/10/14/1302/>. (13.04.2017)
- Aleksashkin, A. and Mikkola A., 2008. Literature review on Permanent Magnet Generators Design and Dynamic Behavior. Research Report, Lappenranta University of Technology, Finland.
- Aydin M., 2007. Eksenel akıllı sürekli mıknatıslı elektrik motorlarında vuruntu moment minimizasyonu. 12. Elektrik, Elektronik, Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Ulusal Kongresi ve Fuarı, Eskişehir.
- Aydin, M., Huang, S. and Lipo T.S. 2002. A new axial flux surface mounted permanent magnet machine capable of field control. Industry Application Conference 37th IAS Annual Meeting, USA.
- Bumby, J.R., Martin, R., Mueller, M.A., Spooner, E., Brown, N.L. and Chalmers B.J., 2004. Electromagnetic design of axial-flux permanent magnet machines. IEE Proceedings - Electric Power Applications, 151(2), 151-160.
- Campbell P., 1974. Principles of permanent-magnet axial-field DC Machine. IEEE Proceedings of the Institution Of Electrical Engineers, 121, 1489-1494.
- Campbell, P., Rosenborg, D.J. and Stanton D.P., 1981. The computer design and optimization of axial-field permanent magnet motors. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 100, 1490-1495.
- Caricchi, F., Crescimbini, F., Honorati, O., Lo Bianco, G. and Santini E., 1998. Performance of coreless-winding axial-flux permanent-magnet generator with power output at 400 Hz, 3000 r/min. IEEE Transactions on Industry Applications, 34(6) , 1263–1269.
- Caricchi, F., Crescimbini, F., Mezzetti, F. and Santini E., 1996. Multistage axial- flux PM machine for wheel direct drive. IEEE Transactions On Industry Applications, 32, 882-889.
- Cavagnino, A., Lazzarim, M., Profumo, F., and Tenconi A. A., 2002. Comparison between the axial flux and the radial flux structures for PM synchronous motors. IEEE Transactions On Industry Applications, 38, 1517-1524.
- Chan C.C., 1987. Axial field electrical machines - design and applications. IEEE Transactions on Energy Conversion., 2, 294–300.
- Chan C.C., 1987. Axial-Field Electrical Machines-Design And Applications. IEEE Transaction On Energy Convers, 2(2), 294-300.
- Chan, T.F., Lai, L.L. and Shuming X., 2009. Field computation for an axial flux permanent-magnet synchronous generator. IEEE Transactions on Energy Conversion., 24(1), 1-11.
- Chau, K.T., Chan, C.C. and Liu C., 2008. Overview of permanent-magnet brushless drives for electric and hybrid electric vehicles. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 55, 2246-2257.
- Chen, H., Qu, R., Li, J. and Zhao B., 2014. Comparison of interior and surface permanent magnet machines with fractional slot concentrated windings for direct-driver wind generator. 17th International Conference on Electrical Machines and Systems, Hangzhou, China.

- Cullity, B.D. and Graham C.D., 2009. Introduction to Magnetic Materials. 568 p, Wiley, USA.
- Çanakoğlu A.İ., 2001. Sonlu elemanlar yönteminde yeni bir ağ inceltme yöntemi kullanılarak endüktans hesabı ve yapay sinir ağları destekli bir analitik yöntem ile karşılaştırılması, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- D'Angelo, J., Chari, M.V.K. and Campbell P., 1983. Three- dimensional finite element solution for a permanent magnet axial- field machine. IEEE Transaction on Power Application and System, 102, 83-90.
- Daily, J.W., and Nece R.E., 1960. Chamber dimension effects on induced flow and frictional resistance of enclosed rotating disks. Journal of Basic Engineering, 82, 217-232.
- Deng F., 1999. An improved iron loss estimation for permanent magnet brushless machines, IEEE Transactions on Energy Conversion, 14(4), 1391-1395.
- Dunsheath P., 1962. A History of Electrical Engineering. 368 p, Faber and Faber London, UK.
- Emanuel A. E., 1990. Power in nonsinusoidal situations-a review of definitions and physical meaning, IEEE Transactions on Power Delivery, 5(3), 1377-1389.
- Eryürek M., 2016. Ders notları, <http://fizik.beun.edu.tr/egitim-ogretim/ders-notlari/> (15.12.2016).
- Fujimoto, H., Saito, T., Tsumasaka, A. and Naguchi T., 2004. Motion Control and Road Condition Estimation of Electric Vehicles with Two In-Wheel Motors. IEEE International Conference on Control Applications, Taipei-Taiwan.
- Furlani E.P., 2001. Permanent Magnet and Electromechanical Devices. Academic Press Series in Electromagnetism, New York, USA.
- Garrison, F. P., Todd, D. B., Comanescu, M. and Muller B. A., 2008. Design and testing of a permanent magnet axial flux wind power generator, 2008 IAJC-IJME International Conference, Nashville.
- Gieras, J. F., Wang, R.J. and Kamper M. J., 2004. Axial flux permanent magnet brushless machines. Kluwer Academic Publishers, 341 p, New York, USA.
- Gieras, J.F. and Wing, M., 1997. Permanent magnet motor technology design and applications. Marcel Dekker Inc, 585 p, New York, USA.
- Gieras, J.F., Wang, R.J. and Kamper M.J., 2008. Axial flux permanent magnet brushless machines. Kluwer Academic Publishers, 353 p, New York, USA.
- Göllü, M., 2016. Para ve diamanyetik maddeler. İstanbul, <http://www.kimyasanal.com/konugoster.php?yazi=s2bw0r4lhl> (11.12.2016).
- Gör, H., 2014. Eksenel akıllı jeneratörlerin tasarımı ve uygulaması, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Hewitt, A.J., 2005. The Effects of Curvature on Axial Flux Machine Cores. PhD thesis, Faculty of Engineering & Surveying, The University of Southern Queensland.
- Hoevenaars, T., LeDoux, K. and Colosino M., 2003. Interpreting IEEE STD 519 and meeting its harmonic limits in VFD applications. IEEE Industry Applications Society 50th Annual Petroleum and Chemical Industry Conference, Houston, Texas.
- Hori Y., 2004. Future vehicle driven by electricity and control research on four wheel motored not electric march II. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 51(5), 954-962.

- Kurt, Ü., 2006. Eksenel akıllı sürekli mıknatıslı senkron makineler için yeni tasarım modeli geliştirme. Doktora Tezi, Samsun Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun, Türkiye.
- Lindh T., Salminen, P., Pyrhonen J., Niemela M., Kinnunen J. and Haataja J., 2007. Permanent Magnet Generator Designing Guidelines. International Conference on Power Engineering Energy and Electrical drives, Portugal.
- Lombard, N. F. and Kamper M. J., 1999. Analysis and performance of an ironless stator axial flux PM machine. IEEE Transactions On Energy Convers., 14(4), 1051–1056.
- Mahmoudi, A., Kahourzade, S., Rahim N.A. and Hew W.P., 2013. Design, analysis, and prototyping of an axial flux permanent magnet motor based on genetic algorithm and finite-element analysis. IEEE Transactions on Magnetics, 49(4), 1479-1492.
- Mceproducts, 2016. http://www.mceproducts.com/Knowledge_Base/Articles/Neodymium_vs_Samarium.htm (10.12.2016).
- Mendrela E. A. and Jagieła, M., 2004. Analysis of torque developed in axial flux, single-phase brushless dc motor with salient-pole stator. IEEE Transactions On Energy Conversion, 19, 271-277.
- Minaz M.R., and Çelebi M., 2016. Analysis and design of an axial-flux coreless permanent magnet synchronous generator with single stators and double rotors, 3rd International Conference on Advanced Technology & Sciences, Konya.
- Moigno A., 1852. Traité de télégraphie électrique, comprenson histoire, sa théorie. Avec atlas de vingt-deux planches gravées en taille-douce (alt) Légendes des planches du traité de télégraphie el., Text. Vol. 1, Franck.
- Muljadi, E., Butterfield C. P. and Wan Y., 1998. Axial-flux modular permanent-magnet generator with a troidal winding for Wind-Turbine Applications. IEEE Industry Applications Conference, St. Louis.
- Parviainen, A. Pyrhonen, J. and Niemela M., 2001. Axial flux Interior permanent magnet synchronous motor with sinusoidally shaped magnets. 10th International Symposium on Electromagnetic Fields in Electrical, Cracow, Poland.
- Pop, A.A., Jurca, F., Oprea, C., Chirca, M., Breban, S. and Radulescu M.M., 2013. Axial flux vs. radial-flux permanent-magnet synchronous generators for micro-wind turbine application. 15th European Conference Power Electronics and Applications, Lille.
- Saadat Hadi., 2004. Power Systems Analysis. McGraw Hill International Edition, 697 p, Dallas, USA.
- Sakarya H., 2009. Sürekli mıknatıslı senkron motorlar için alan yönlendirmeli sürücü düzeneği tasarımı ve uygulaması. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, Türkiye.
- Salon S.J., 1995. Finite element analysis of electrical machines. Kluwer Academic Publishers, Norwell, Massachusetts.
- Seo, J.M., Rhyu, S.H., Kim, J.H., Choi, J.H. and Jung I.S., 2010. Design of axial flux permanent magnet brushless DC Motor for Robot Joint Module, IEEE Power Electronics Conference , Sapporo, Japan.

- Shmilovitz D., 2005. On the definition of total harmonic distortion and its effect on measurement interpretation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 20(1), 526-528.
- Silvester, P. and Chari M.V.K., 1970. Finite element solution of saturable magnetic field problems. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 7, 1642 - 1651.
- Skaar, S.E., Krovel, O., Nilssen, R., and Erstad H., 2003. Slotless, toroidal wound, axially- magnetized permanent. Department of Electrical Power Engineering Norwegian University of Science and Technology, Norway.
- Soderlund, L., Koski, A., Vihriala, H., Eriksson, J.T. and Perala R., 1997. Design of an axial flux permanent magnet wind power generator. 1997 Eighth International Conference on Electrical Machines and Drives, Finland.
- Solaracademy, 2016. <http://www.solaracademy.com/menus/Turkish-Wind-Data.023202.pdf>
- So-Young, S., Jae-Hoon, J., Yu-Seop, P., Jang-Young C. and Seok-Myeong J., 2012. Improved analytical modeling of axial flux machine with a double-sided permanent magnet rotor and slotless stator based on an analytical method. *IEEE Transactions on Magnetics*, 48(11), 2945-2948.
- Spooner, E. and Chalmers B.J., 1992. TORUS a slotless, toroidal-stator, permanent magnet generator. *IEE Proceedings B - Electric Power Applications*, 139, 497-506.
- Tesla N., 1889. Electric Motor, Patent: 416194, USA.
- Wikipedia, 2016. Wikipedia - Electric Motor, http://en.wikipedia.org/wiki/Electric_motor. (06.01.2016).
- Yicheng C., Pillay, P. and Khan A., 2004. PM wind generator comparison of different topologies. Industry Applications Conference 39th IAS Annual Meeting, Seattle.
- Zhilichev Y., 1998. Three-dimensional analytic model of permanent magnet axial flux machine. *IEEE Transaction on Magnetic*, 34, 3897-3901.

ÖZGEÇMİŞ

1981 yılında Siirt'in Kurtalan ilçesinde doğdu. İlk ve orta öğretimini Kurtalan'da tamamladı. Lise eğitimini ise Kurtalan Çok Programlı Lisesi Elektrik Bölümünde tamamladı. Dicle Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi ve Dicle Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 2007 yılında askerlik hizmetini tamamladı. 2009 yılında Gaziosmanpaşa Üniversitesi'nde öğretim görevlisi olarak göreve başladı. 2011 yılında ise Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde Yüksek Lisans derecesini aldı. 2013 yılından itibaren Siirt Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu'nda Öğretim Görevlisi olarak çalışmaya başladı ve halen aynı yerde çalışmaktadır.