

T.C.
BANDIRMA ONYEDİ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DÜŞÜK UZAY HARMONİĞİNE SAHİP
FERİT MIKNATISLI SENKRON GENERATÖR
TASARIMI VE OPTİMİZASYONU

Mehmet Semih ÖZDEMİR

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Elektronik Mühendisliği Programı

AĞUSTOS 2022

T.C.
BANDIRMA ONYEDİEYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DÜŞÜK UZAY HARMONİĞİNE SAHİP
FERİT MIKNATISLI SENKRON GENERATÖR
TASARIMI VE OPTİMİZASYONU

Mehmet Semih ÖZDEMİR

DANIŞMAN

Doç. Dr. Adem DALCALI

II. DANIŞMAN

Dr. Öğr. Üyesi Cemil OCAK

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Elektronik Mühendisliği Programı

AĞUSTOS 2022

ONAY

Mehmet Semih ÖZDEMİR tarafından hazırlanan “**Düşük Uzak Harmoniğine Sahip Ferit Mıknatıslı Senkron Generatör Tasarımı ve Optimizasyonu**” adlı tez çalışması 31/08/2022 tarihinde yapılan sınavla aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile Bandırma Onyedil Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Doç.Dr. Adem DALCALI

(Danışman)

Doç.Dr. Orhan KAPLAN

(Üye)

Doç.Dr. Harun ÖZBAY

(Üye)

İmza

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun .../.../...gün ve .../... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Doç. Dr. Abdullah YEŞİL

Enstitü Müdürü

BANDIRMA ONYEDİ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI
ETİK BEYANI

Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre hazırlamış olduğum “**Düşük Uzay Harmoniğine Sahip Ferit Mıknatıslı Senkron Generatör Tasarımı ve Optimizasyonu**”adlı tezimin özgün bir çalışma olduğunu, tez hazırlanırken tüm aşamalarda bilimsel etik ilkelerine uygun davrandığımı, tez kapsamında sunulan tüm verileri bilimsel etik ilkelerine uygun elde ettiğimi, tezde faydalandığım tüm eserlere atıf yaptığımı ve kaynaklar kısmında bu eserleri gösterdiğimi beyan ederim. 31/08/2022

Mehmet Semih ÖZDEMİR
İmza

ÖNSÖZ

Nüfus miktarının dünya genelinde sürekli artışı, nüfus artışına oranla artan ihtiyaçlar, ihtiyaçların getirdiği enerji kullanımları, enerji üretim kaynaklarına olan ihtiyaçları daha fazlalaştırmaktadır. Fosil kaynaklı enerji üretim maddelerinin; birincil enerji kaynaklarının tükenebilir olması, bu kaynakların doğaya verdiği tahribatlar globalleşen dünyada artık yenilenebilir enerji kaynaklarının daha da önemli olduğu sonucunu doğurmaktadır. Sürdürülebilir kaynaklardan elektrik enerjisi üretimi konusu, gerek ülkemiz için gerekse dünya genelinde enerji çeşitliliği ve arz güvenliği sağlanması hususunda enerji ithalatını azaltmakta, bir anlamda ise ülkelerin dışa bağımlılığını düşürmektedir. Ülkemizin sahip olduğu sürdürülebilir enerji kaynakları potansiyeli son zamanlarda elektrik enerjisi üretimi konusunda daha verimli olmakla birlikte, elektrik enerjisi üretim sistemlerinde kullanılan ekipmanların da geliştirilebilir olması hususları enerji üretiminin yanında kalitesini de iyileştirme yönünde önem arz etmektedir.

Enerji üretim sistemlerinde, yenilenebilir kaynaklardan enerji üretimlerinde kullanılan ekipmanlardan biri olan sabit mıknatıslı senkron generatörler, yüksek güç yoğunluğuna, verimine sahip elektrik makineleridir. Kalıcı mıknatısların kullanıldığı generatörlerde, enerji kalitesi artmakta, diğer elektrik makinelerine, generatörlerine nazaran enerji kayıpları ise belli oranda azalmaktadır.

Sabit mıknatıslı senkron generatörlerde verime konu etkilerden biri sistem tasarımıdır. Generatör geometrisinde, rotor - stator kısmında yapılabilecek iyileştirmelerin enerji kalitesine, verimine etkisi büyük olmakla birlikte, mümkün mertebedeki revizyonlar uzay harmoniklerini kabul edilebilir düzeyde elimine etmektedir. Elektrik makinelerinde, generatörlerde kullanılan nadir toprak elementlerinden üretilen mıknatısların ithalata dayalı olması ve sürekli artan fiyatları, yerli olarak da üretimi yapılan ve generatör sistemlerinde kullanılan ferit (seramik) mıknatısları günümüzde önemli kılmaktadır. Generatör geometrisinin ferit özellikli mıknatısların manyetik etki durumlarını düşünerek yapılacak tasarım iyileştirmeleri, güç konusunda verim ve kaliteyi daha üst düzeye taşımaktadır.

Yüksek lisans öğrenimim süresince ve tez çalışması sırasında; tez konusunun belirlenmesinden, son aşamaya dek benden yardımlarını esirgemeyen danışmanım Sayın Doç.

Dr. Adem DALCALI'ya ve ikinci danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Cemil OCAK'a şükranlarımı sunarım.

Bu günlere gelmemde büyük emekleri olan canım annem Şenay'a ve babam Vedat'a, yoğun çalışma temposunda benden desteğini esirgemeyen kardeşim Ufuk Çağlar'a, varlıkları ile birer motivasyon kaynağım olan eşim Dilek'e, çocuklarım İlber Mete'ye ve Mehmet Batu'ya teşekkürü borç bilirim.



ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DÜŞÜK UZAY HARMONİĞİNE SAHİP FERİT MIKNATISLI SENKRON GENERATÖR TASARIMI VE OPTİMİZASYONU

Mehmet Semih ÖZDEMİR

Bandırma Onyedli Eylül Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Doç. Dr. Adem DALCALI

İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Cemil OCAK

Ağustos 2022, 55 sayfa

Sabit mıknatıslı senkron generatörlerde genelde nadir toprak elementlerinden oluşan ithal ve yüksek fiyatlı mıknatıs tercihi, yerini son zamanlarda ferit (seramik) tipi uygun fiyatlı mıknatıslara bırakmaktadır. Ferit mıknatısların, dünya genelinde ve ülkemizde rahatlıkla üretilip temin ediliyor olması, bu mıknatısların kullanımları yönünde büyük avantaj haline gelmiştir. Elektrik enerji üretimlerinde kullanılan sabit mıknatıslı senkron generatörler ve generatörlerin verimleri, maliyeti önem arz etmektedir.

Yapılan tez çalışmasında, elektrik enerjisi üretimlerinde kullanılan generatör türlerinden biri olan sabit mıknatıslı senkron generatör tasarımı, generatör optimizasyonu ve çeşitli analizler, ölçümler; simülasyon teknolojisinin de yer aldığı paket bir yazılım aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Genelde, yüzey yerleştirmeli şeklinde imal edilen ve nadir toprak element mıknatısları kullanılan generatör yerine, çalışmada spoke tipi tasarım tercih edilerek kullanılan ferit mıknatısların verimli halde sisteme uyarlanması hedeflenmiştir. Rotor yapısına uygulanan

revizyonlarla uzay harmoniklerinin minimize edilmeye çalışılmış, verimli enerji kullanımı öncelik olmuştur.

Gerçekleştirilen çalışmayla, rotoru spoke tipinde ferit mıknatıslı senkron generatör simülasyonu tamamlanmış, uzay harmonikleri simülasyon ortamında minimize edilerek, kabul edilebilir düzeye indirgenmiş ve uygulamanın gerek endüstriyel sanayide gerekse literatürde yer alacağı konusu, elde edilen sonuçlar açısından öneriler sunması, faydalı olması hedeflenmiştir.

Anahtar kelimeler: Ferit Mıknatıs, Spoke Tipi, Senkron Generetör, Uzay Harmonikleri.



ABSTRACT

M. Sc. THESIS

DESIGN AND OPTIMIZATION OF FERRITE MAGNET SYNCHRONOUS GENERATOR WITH LOW SPACE HARMONIC

Mehmet Semih ÖZDEMİR

**Bandırma Onyedi Eylül University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical and Electronics Engineering**

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Adem DALCALI

Co-Supervisor: Asst. Prof. Dr. Cemil OCAK

August 2022, 55 pages

In permanent magnet synchronous generators, the preference of imported and high-priced magnets consisting of rare earth elements has recently been replaced by ferrite (ceramic) type affordable magnets. The fact that ferrite magnets are easily produced and supplied around the world and in our country has become a great advantage for the use of these magnets. Permanent magnet synchronous generators used in electrical energy production and the efficiency and cost of generators are important.

In the thesis study, permanent magnet synchronous generator design, generator optimization and various analyzes and measurements, which is one of the generator types used in electrical energy production; The simulation technology was also implemented through a packaged software. In general, instead of the generator, which is produced as surface mounted and rare earth element magnets are used, spoke type design is preferred in the study and it is aimed to adapt the ferrite magnets used to the system in an efficient manner. With the revisions applied to the rotor structure, the space harmonics were tried to be minimized, and efficient energy use became a priority.

With the work carried out, the simulation of the rotor spoke type ferrite magnet synchronous generator has been completed, the space harmonics have been minimized in the simulation environment and reduced to an acceptable level, and it is aimed that the application will take place both in the industrial industry and in the literature, to offer suggestions in terms of the results obtained and to be useful.

Keywords: Ferrite Magnet, Spoke Type, Synchronous Generator, Space Harmonics.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	I
ABSTRACT	III
İÇİNDEKİLER	V
ŞEKİL LİSTESİ.....	VII
TABLO LİSTESİ.....	VIII
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ	IX
1. GİRİŞ.....	1
1.1 TEZİN ÖZGÜNLÜĞÜ	10
2. RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE KULLANILAN GENERATÖRLER.....	11
2.1 SABİT MIKNATISLI SENKRON GENERATÖRLER	13
2.1.1 SMSG’lerde Mıknatıs Kullanımı	15
3. ELEKTRİK MAKİNALARINDA HARMONİKLER	21
3.1 ZAMAN HARMONİKLERİ.....	21
3.2 UZAY HARMONİKLERİ.....	22
4. SABİT MIKNATISLI SENKRON GENERATÖR TASARIMI.....	24
4.1 RMXPR T ANALİZİ.....	28
5. SABİT MIKNATISLI SENKRON GENERATÖRÜN SONLU ELEMANLAR METODU İLE ANALİZİ	33
5.1 SONLU ELEMANLAR METODU	33
5.2 İKİ BOYUTLU ANALİZ (2B)	35
5.3 OPTİMİZASYON ÇALIŞMALARI	36
5.3.1 Ofset Analizi.....	41
5.3.2 Kutup Yayısı Oranı Analizi	42
5.3.3 Kaybı Analizi	42
6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER	45

7. KAYNAKLAR.....	47
-------------------	----

ÖZGEÇMİŞ	55
----------------	----



ŞEKİL LİSTESİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 1-1: Farklı generatör tasarım konfigürasyonları.....	6
Şekil 1-2: Farklı generatör tasarım akı dağılımları.....	7
Şekil 1-3: Çift statorlu spoke tipi sabit mıknatıslı senkron generatör tasarımı.....	8
Şekil 1-4: Hibrit model sabit mıknatıslı senkron generatör tasarımı	9
Şekil 2-1: Farklı rüzgar türbin konfigürasyonları.....	12
Şekil 2-2: Sabit mıknatıslı senkron generatör ve şebekeye enerji aktarılma şeması.....	13
Şekil 2-3: Mıknatısların manyetik enerji ($B \times H$) eğrileri	15
Şekil 4-1: Senkron generatörlerde mıknatısların rotor üzerinde konumlandırılmaları (a) yüzey yerleştirmeli, (b) spoke tipi.....	27
Şekil 4-2: Tasarımı gerçekleştirilen yüzey yerleştirmeli sabit mıknatıslı senkron generatör	29
Şekil 4-3: Tasarımı gerçekleştirilen spoke tipi sabit mıknatıslı senkron generatör	31
Şekil 5-1: Generatör modeli (a) Tasarım A, (b) Tasarım B.....	35
Şekil 5-2: Manyetik akı dağılımı ve akı çizgileri (a) Tasarım A, (b) Tasarım B.....	37
Şekil 5-3: M400 çeliğinin BH eğrisi	38
Şekil 5-4: Kontor boyunca akı değişimi ve harmonik yüzdeleri (a)Tasarım A, (b)Tasarım B	39
Şekil 5-5: Endüklenen gerilim dalga formları	41
Şekil 5-6: Stator oluklarında kaykış	43

TABLO LİSTESİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
Tablo 1-1: Türkiye’de sürdürülebilir kaynaklı elektrik enerjisi tesislerinin kurulu güçleri .3	
Tablo 2-1: Rüzgar generatör konseptleri.....13	
Tablo 2-2: Mıknatıs çeşitlerinin BHmax değeri ve 2018 yılı ortalama fiyatları 16	
Tablo 2-3: Neodyum ve ferit mıknatıs yıllık ortalama fiyatları (2018-2021) 17	
Tablo 4-1: Mıknatıs manyetik ve ısı özellikleri.....19	
Tablo 4-1: Tasarımı yapılan yüzey yerleştirmeli sabit mıknatıslı senkron generatörün teknik özellikleri.....28	
Tablo 4-2: Yüzey yerleştirmeli sabit mıknatıslı senkron generatörün parametreleri 30	
Tablo 4-3: Tasarımı yapılan spoke tipi sabit mıknatıslı senkron generatörün teknik özellikleri. 30	
Tablo 4-4: Spoke tipi sabit mıknatıslı senkron generatörün parametreleri. 31	
Tablo 5-1: Tasarımı yapılan senkron generatörün özellikleri.....35	

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
%	: Yüzde
\$	: Dolar
θ	: Teta
$^{\circ}$	: Derece

Kısaltmalar	Açıklama
DA	: Doğru akım
MMK	: Manyeto motor kuvvet
SMSG	: Sabit mıknatıslı senkron generatör
HZ	: Hertz (Frekans Birimi)

1. GİRİŞ

Elektrik enerji sistemlerinde, tesislerinde ve kullanılan ekipmanlarda, elektrik güç sistemlerinde tüketilen enerjilerde akım ve gerilimler lineer, stabil genliklerde olmalıdır. Enerji kalitesi önemli ve sağlanmalıdır. Genliği ve frekansı sürekli değişen gerilimler sisteme zarar vermektedir. Doğru akımlı sistemler yerine alternatif akımla çalışan güç sistemlerinde akım ve gerilim formlarının sinüs dalga karakteristiğine yakın olması sistemin güç kalitesi açısından ne kadar sağlıklı olduğunu gösterir. Bozunmalar, sinüs formundan uzaklaşmayla başlar. Harmonik, kaynaktan ya da şebekeden gönderilen düzgün şekilli dalgaların kaynak üzerinde ya da diğer güç sistemi ekipmanları üzerindeki bozulmaları, gerilim ve akım şeklinin mevcuttan uzaklaşması anlamına gelmektedir. Sinüs ya da diğer dalga şeklinde mevcut akım ya da gerilim dalgaları sistemdeki lineer olmayan yüklerden kaynaklı olarak sinüs formundan uzaklaşır [1].

Günümüzde elektronik cihazların kullanım oranının yüksek oluşu, küçük güçlerde dahi olsa karakterize olmamış ekipmanların meydana getirdiği bozunmalar toplam bozulmanın ileri boyutta olmasına sebep olur. Güç faktöründeki iyileşmeleri gerçekleştirmek, kullanılan enerji kalitesini yükseltmek için harmonikleri minimize etmek ya da filtrelemek şarttır. Doğrusal karakterde olmayan yükler çeşitli frekanstaki akım ve gerilimlerde bozunmalara, dolayısıyla rezonansa sebebiyet verirler. Rezonans durumu ise, şebekelere, işletmelere ve dahi tüm güç sistemlerine kalıcı kusurlar bırakabilir [2].

Generatörlerin ve elektrikli diğer ekipmanların yaşamımızın birer parçası haline gelmesi, bu alanda sürekli gelişme ve iyileşmeyi de beraberinde getirmektedir. Generatörler çeşitlerinden biri olan senkron generatörler, güç kaynağının frekansına ve kutup sayılarına oranla senkron çalışan, düzenli, lineer sistemlerdir. Sabit hızda hareket ederler. Diğer generatörlerde uyarım sargıları var iken burada kalıcı mıknatıslar bulunur. Bu mıknatıslar rotor çekirdeği etrafında konumlandırılır. Sürekli olarak kalıcı mıknatıslara sahip senkron generatörlerin güç katsayısı ve verimi yüksek, gücü önemli derecede tatmin edici, salınımı az, yol alma momenti iyi, hava aralığı akı yoğunluğu dengelidir. Generatör üzerinde bilezik, fırça gibi aksesuarlar bulunmadığı için bakım gerektirmez. Sanayi sektöründe oldukça iyi yer edinmiş olan sabit mıknatıslı senkron generatörler uyarım akımları kayıpları olmadığı için tercih sebebidir [3-4].

Senkron generatörlerde ve makinelerde sürekli mıknatısların kullanımı, sektörde geniş bir çalışma alanı oluşturmuştur. Sabit mıknatıslı senkron generatörlerin verimlerinin yüksek olması en büyük seçilme sebeplerindendir. Mıknatıs cinsi olarak; ferit mıknatıslar kullanıldı gibi, nadir elementlerden olan NdFeB tipi mıknatıslar, AlNiCo mıknatıslar da senkron sistemlerde

kullanılmaktadır [5]. Ferit mıknatısların giderek senkron motor ve generatörlerde tercihinin artıyor olması, bu sistemlerin tasarımları konusunu da geliştirmektedir. Ferit mıknatısların mıknatıslanma özelliklerinin nadir toprak element mıknatıslarına nazaran daha düşük olması önceleri tercih edilmeme sebepleri arasındaydı. Günümüzde farklı tasarımlar ile tekrar sektör içerisinde kullanım alanı genişleyen ferit mıknatıslar birçok güç seviyesinde kullanılmaktadır. Nadir toprak elementlerinden olan NdFeB tipi mıknatısların ithalatının zor oluşu, sürekli artan fiyatları ve yer yüzünde zor bulunur oluşu gibi negatif sebepler, tasarımcıları dünyanın her yerinde kolayca bulunabilir olan ferit mıknatıs konusunda yeni çalışmalar yapılmasına ve de senkron generatör tasarımlarının gün geçtikçe geliştirilmesine olanak sağlamıştır. Rotor eksenine spoke tipi olarak yerleştirilerek daha verimli olarak kullanılan ferit mıknatısların hibrit ve elektrikli araç uygulamalarında dahi kullanılması düşünülmektedir [6].

Dünya genelinde son çeyrek asırda yenilenebilir kaynaklarından enerji üretimi konusu önemli hale gelmiştir. Gelişen ve gelişmekte olan ülkeler, enerji ithalatını sınırlandırmak ve yerel kaynaklardan enerji üretebilmek için söz konusu olan sürdürülebilir kaynaklardan enerji üretimini ülke politikaları haline getirmektedir. Ülkemizde, sürdürülebilir kaynaklardan elektrik enerjisi üretimi her geçen gün artmakta ve böylece fosil yakıtlara olan bağımlılık azalmaktadır. Fosil yakıtlı kaynakların tükenme eğiliminde olması, insanlık ve doğa için tahribatlarının ağır olması ve artan çevresel endişeler, ülkeleri temiz enerji kaynaklarından elektrik enerjisi üretmek için zaruri noktalara taşımaktadır.

Artan dünya nüfusu ile birlikte teknolojinin kullanımının da artması elektrik enerjisinde arz-talep dengesinin sağlanmasının önemini arttırmıştır. Enerji tedariği, ülkelerin gerçek anlamda var olabilmesinin önemli unsurlarından birini oluşturur. Yenilenebilir enerji; ucuz, yerel ve çevre dostu olan bir enerji türü olarak enerji arz güvenliğinin ve enerji çeşitliliğinin sağlanması için önemli bir kaynaktır. Yenilenebilir enerji yeryüzünde sürekli halde devam eden atmosferik olaylardan ve bu olaylara etkisi olan diğer etmenlerden elde edilen bir enerji çeşididir. Çoğu ülke, dünya üzerinde kendi coğrafyasında farklı atmosferik olayların ağır bastığı kaynaklardan olan rüzgar, jeotermal, gelgit, biyokütle, güneş ya da hidrolik kaynaklar bakımından yeterli oranda enerji ihtiyacını karşılayabilir [7].

Ülkeler dünya üzerinde farklı coğrafyalarda yer aldıkları için yenilenebilir enerji kaynaklarından farklı oranlarda yararlanabilirler. Türkiye, ılıman ve subtropikal kuşak arasındadır. Ülkemizin doğusu hariç geri kalanının denizlerle çevrili olması, dağların uzanışı ve yeryüzü şekillerinin çeşitlilik göstermesi gibi etkenler farklı iklimlerin olmasını sağlamıştır. Güneyde ve deniz etkilerinin görüldüğü bölgelerde ılıman iklimler olduğu gibi iç kesimlerde

daha karasal iklim ve bitki örtüleri mevcuttur. Böylece farklı iklim tipleri, sıcaklıklar, sıcaklıklara bağlı rüzgarlar, ılımanlığa ve karasallığa bağlı sıcak / soğuk iklimler meydana gelir [8].

Ülkemizin orta ılıman kuşakta yer alması ve çeşitli iklimlere sahip olması, yenilenebilir enerji kaynakları bakımından zenginliğini göstermektedir. Ülkemizin Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığınca belirlenen enerji politikaları; “Maliyet, zaman ve miktar yönünden enerjinin tüketiciler için erişilebilir olması, serbest piyasa uygulamaları içinde kamu ve özel kesim imkânlarının harekete geçirilmesi, dışa bağımlılığın azaltılması, enerji alanında ülkemizin bölgesel ve küresel etkinliğinin artırılması, kaynak, güzergâh ve teknoloji çeşitliliğinin sağlanması, yenilenebilir kaynakların azami oranda kullanılmasının sağlanması, enerji verimliliğinin artırılması, enerji ve tabii kaynakların üretiminde ve kullanımında çevre üzerindeki olumsuz etkilerin en aza indirilmesi şeklinde özetlenebilir. Ülkemizin yenilenebilir kaynaklardan enerji üretimine, kullanımına yönelik politikaları 2005 yılında yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerji üretimi amaçlı kullanımının yaygınlaştırılması, kaynakların; güvenilir, ekonomik ve kaliteli biçimde ekonomiye kazandırılması, kaynak çeşitliliğinin artırılması, çevrenin korunması ve imalat sektörünün geliştirilmesini amaçlayan 5346 sayılı “Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun” ile gerçekleştirilmeye başlanmıştır [9].

Türkiye, yenilenebilir enerji kaynakları bakımından zengin bir ülkedir. 2020 yılının son çeyreği itibariyle Türkiye’de yenilenebilir kaynaklardan üretilen elektrik enerjisine sahip tesislerin kurulu güçleri ve toplam kurulu güce göre yüzde (%) olarak ifadeleri Tablo 1-1’de verilmiştir [10].

Tablo 1-1: Türkiye’de sürdürülebilir kaynaklı elektrik enerjisi tesislerinin kurulu güçleri.

Yenilenebilir Enerji Kaynağı	Santrallerin Toplam Kurulu Gücü (MW)	Türkiye’nin Elektrik Üretimine Katkısı (%)
Hidrolik Kaynaklar	29916	31
Rüzgar	8330	8,8
Güneş	6454	6,8
Diğer Kaynaklar	2602	2,7

Tablo 1-1'e göre, ülkemizde hidrolik kaynaklı elektrik enerjisi üretimi ilk sırada iken rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi üretimi ise ikinci sırada yerini almaktadır. Su kaynaklarının fazlalığı, hidroelektrik santral sayısı ile doğru orantılı olduğu gibi, ülkemizde dağların doğu batı yönlerinde uzanıyor olmaları ve güneşin etkileri, dağların denize göre konumları da rüzgar varlığını doğru orantılı olarak etkilemektedir.

Ülkemiz, rüzgar enerjisi potansiyeline büyük oranda sahip olduğu için rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi konusu önem arz etmektedir. Sanayi, sanayi ürünleri ve ekipman ithalatları, yerli üretimler gibi pek çok konu ve sektör de bu enerjinin varlığından etkilenmektedir. Rüzgardan elektrik enerjisi üretiminde, türbinler rüzgar dalgasının bir kısmını yakalar ve bu rüzgar; türbinleri hareket ettirerek rotorda mekanik hıza dönüştürür. Elde edilen mekanik hız, dişli kutusu vasıtasıyla yüksek bir hıza çıkartılarak veya doğrudan tahrik edilerek generatöre aktarılır. Generatörde elektromekanik enerji dönüşümü prensipleri sayesinde elektrik üretimi gerçekleştirilir [11].

Rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi üretimini gerçekleştiren generatörler literatürde farklı tiplerde ve yapıdadırlar. Kimi zaman çevresel koşullar, kimi zaman ekonomik sebepler, tasarım farklılıkları, özgünlük arayışları, teknolojinin getirdiği imkanlar gibi pek çok neden generatörlerin yapılarını, boyutlarını etkilemektedir.

Rüzgar türbinlerinde kullanılan generatörlerde kalıcı mıknatıslı generatörlerin kullanımı yaygınlaşmıştır. Yüksek güç yoğunluğuna sahip olan neodyum mıknatıslı senkron generatörler dünya genelinde hali hazırda yaygın kullanılmaktadır. Sabit mıknatıslı generatörlerin tasarımında farklı malzeme ve geometrik yapıda rotorlar ve mıknatıslar kullanılarak performans iyileştirilmektedir [12].

Kalıcı mıknatıslı generatörlerde rotor tipleri; çıkış güçleri, zık emk dalga şekilleri yönünden incelenmekte ve kullanılan mıknatıs malzemeleri bu gibi değerler üzerinde etkili olmaktadır. Rotorda bulunan manyetik malzemelerin türü, geometrisi ve rotora yerleştirme biçimleri çıkış güçlerini etkilemektedir. Bununla birlikte mıknatıslar vuruntu torkunu, ısıl dayanıklılığı, kayıpları ve uzay harmoniklerini de etkilemektedir [13]. NdFeB tipi mıknatısların Çin'den tedariği, ihracat kısıtlamaları, maliyetlerinin yüksek oluşu ve istikrarsız fiyat politikası nedeniyle bu mıknatısların kullanıldığı rüzgar türbinlerine yapılan yatırımları kısıtlamaktadır. NdFeB mıknatısların belirtilen sorunları generatörlerde tercih edilmesini sınırlandırmıştır [13]. Bu olumsuzluklar tasarımcıları ve üreticileri alternatif mıknatıs kullanımına yönlendirmiştir. Ferit mıknatısların, kolay ulaşılabilir ve ucuz olması bu mıknatısların kullanımını gündeme getirmiştir. Seramik tipi (ferit) mıknatısların enerjilerinin NdFeB mıknatıslara göre düşük

olmasından dolayı rotor tasarımları ve akı yoğunlaştırması gibi yeni oluşumlar keşfedilmiş ve literatüre kazandırılmıştır [14].

Generatörlerde ferit ve neodyum tipi mıknatısların generatör maliyet ve performansına etkisi, neodimyum tipi mıknatıslara sahip generatörlere alternatif olabilecek düşük maliyetli ferit mıknatısları ön plana çıkarmaktadır. Düşük enerji yoğunluklu ferit mıknatıslara sahip generatörlerin kullanımına imkan sağlayan tasarımlar ve bu tasarımların performans ve maliyetleri üzerine değerlendirmeler tez çalışmasında görülmektedir.

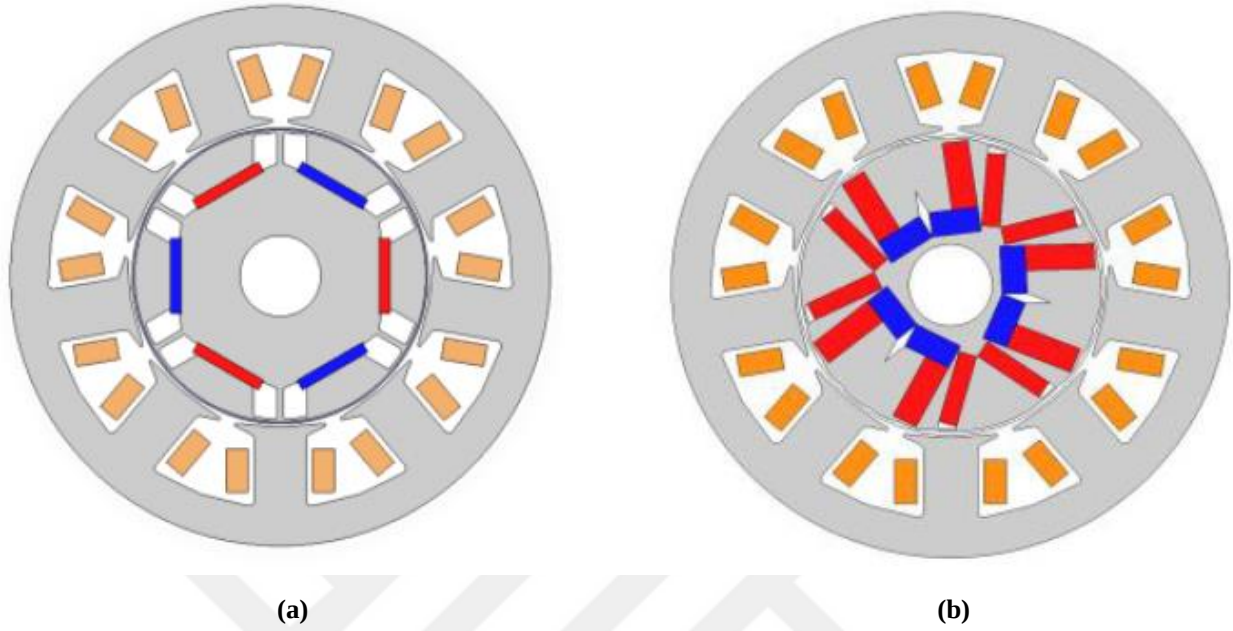
Enerji sistemlerinde kullanılan ekipmanlarda, elektrik makinelerinde, transformatörlerde, generatörlerde, türbin generatörlerde genel tasarımından kaynaklı olarak, tasarımın doğal bir sonucu olarak uzay harmonikleri oluşur. Bu harmonikler; generatör tasarımı, geometrisi, rotor, stator ve oluk tasarımıyla alakalıdır. Sistem, sinüs formulu akım-gerilimle beslendiğinde manyeto motor kuvvette farklı frekansta bileşenler belirir. Uzay harmonikleri olarak adlandırılan kısım tam da buna işaret eder. Bu tip bozunmalar, generatörlerde kalkışta zorlanmanın yanı sıra titreşime, sese, vuruş torkuna sebebiyet verir [15-16].

Literatürde spoke tipi olarak adlandırılan olgu aslında dik konumlandırma anlamına gelmektedir. Spoke, kelime anlamı itibarıyla dik yerleşim manasındadır. Yapılan çalışmalarda spoke tipi tasarım; manyetik malzemelerin, rotora dik yerleştirilmesi hususu için derlenmiştir. Ferit nüvelerin kullanımı ülkemizde henüz yaygınlaşmasa da yurt dışında daha makul düzeyde olup, genel manada kabul görmektedir.

Spoke tipi tasarım çalışmasının yer aldığı yüksek lisans tezi, hazırlanma aşamasında yabancı yayınlar ileri düzeyde irdelenmiş olup, ferit nüve ve spoke tipi tasarımlar üzerine okumalar gerçekleştirilmiştir. Ferit nüvelerin generatörlerde kullanılmak istenmesinin genel kanısı maliyet odaklı olup, yapılacak akı yoğunlaştırmaları ve generatör tasarımları bir anlamda geleceğe de ışık tutmaktadır.

Hazırlanan ve yayınlanan makalelerden birinde; neden ferit nüve kullanıldığı ve spoke tipi çalışma yapıldığı da uygun bir dille, neodyum mıknatısların kullanıldığı generatörlere nazaran ferit mıknatısların tercih edilişi çok daha uygun, ucuz olarak nitelendirilmiştir. Fakat ferit mıknatısların manyetik özelliklerinin neodyum mıknatıslara göre daha düşük seyretmesi, yüksek verim elde etmek ve üretim maliyetini en aza indirmek için generatör tasarımının spoke tipi ve ek itme tipi kombinasyonu şeklinde Halbach manyetizasyonu konseptinden yapılmasını öngörmüştür [17]. Halbach manyetize dizileri, döner sistemlerin, generatörlerin tasarımı için etkin bir şekilde kullanılabilecek birçok özellik sunmaktadır ve dizinin önemli bir özelliği; dizinin bir tarafındaki akıyı iptal edebilmesi ve diğer tarafındaki akıyı güçlendirmesidir [18].

Dahili kalıcı mıknatıs tipi olan klasik yüzey yerleştirmeli modelin ve yazılan makalede Halbach dizilerine göre önerilen kanat şekli spoke tipi modelin görünümü Şekil 1-1'de gösterilmektedir.

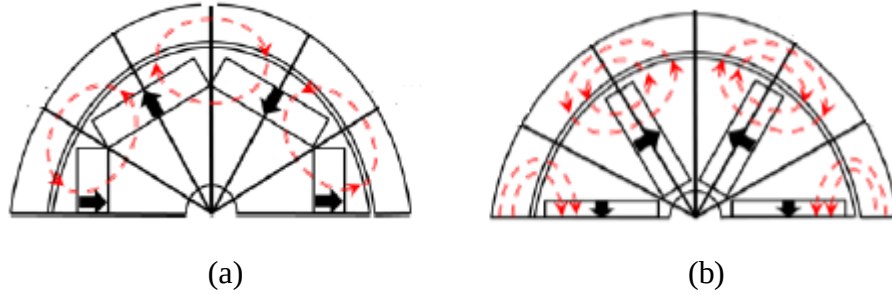


Şekil 1-1: Farklı generatör tasarım konfigürasyonları.

Şekil 1-1'de (a) olarak belirtilmiş kısımda yüzey yerleştirmeli neodyum mıknatısların yer aldığı bir tasarım tercih edilmiş olup, (b)'de ise ferit mıknatısların kullanıldığı ve Halbach dizisine uygun tasarlanmış, spoke tipi diğer bir deyiş ile mıknatısların dik olarak rotorda konumlandırıldığı generatör tasarımı gerçekleştirilmiştir. Şekil dikkatli incelendiğinde ferit mıknatısların manyetik eğrilerinin düşük seyretmesinden kaynaklı olarak hacimsel olarak neodyum mıknatıslara nazaran daha büyük yapıda mıknatıslar tercih edilmiştir. Ferit mıknatısların hacim olarak büyük olması tek başına bir anlam ifade etmez, bununla birlikte akı yoğunlaştırması da sağlanarak gerçek manada verim elde edilir. Normalde, generatörün hava aralığı akı yoğunluğu neodyum mıknatısın kullanıldığı tasarımda yaklaşık 0,7T – 1,0T ve ferit nüveli tasarımlarda ise 0,3T – 0,4T'dir. Fakat, Halbach dizinleri uygulanarak ferit tasarımda akı yoğunluğu 0,53T'ye kadar optimize edilebilir [19].

Sabit mıknatısların kullanıldığı genetatörlerde akı dağılımları Şekil 1-2'de gösterilmektedir. İlk tasarım (a), yüzey yerleştirmeli tipe aittir, (b) tasarımı ise manyetik malzemelerin dik olarak konumlandırıldığı tasarımdır. Tasarımlar incelendiğinde ana akı yolları görülmektedir. Yüzey yerleştirmeli tasarımda, ana akı iki mıknatıstan geçen bir yola sahiptir. Fakat diğer tasarımda ana akı sadece bir mıknatıstan geçen bir yola sahip olduğundan, bu

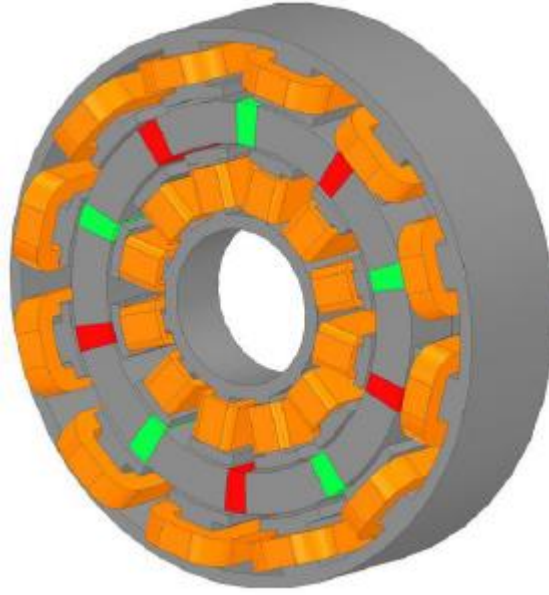
tasarımda çok daha fazla akı kullanılır. Sonuç olarak, spoke tipi tasarımın akı yoğunluğu, yüzey yerleştirmeli tasarımdan daha yüksektir [17].



Şekil 1-2: Farklı generatör tasarım akı dağılımları.

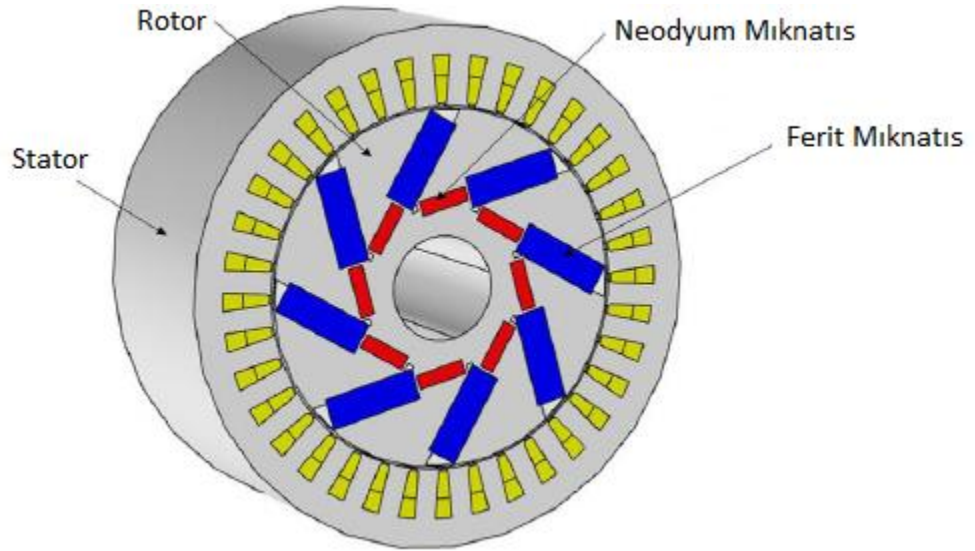
Spoke tipi yerleşim ve Halbach dizinleri birlikte düşünüldüğünde ise; spoke tipi modelde, itme kuvveti pekiştirmesi için farklı açılarda ana mıknatıslara yardımcı mıknatıslar eklenir. Generatöre dik olarak yerleştirilen mıknatıslara yardımcı olarak itme kuvvetini artıran bu mıknatıslarla birlikte çıkış karakteristiği düzenlenir, hava boşluğunda akı yoğunluğu maksimize edilir.

Literatürde akı yoğunlaştırmasının dışında, akı iyileştirmesi için gerçekleştirilecek farklı yollara ait çalışmalar da bulunmaktadır. Bunlardan biri de çift statorlu spoke tipi senkron tasarımlardır. Bu tasarımda manyetik nüvenin iç ve dış kısmına sargıların yer aldığı statorlar yerleştirilir. Çift statorlu spoke tipi tasarımlarda verim artarken, kaçak akı kaybı azalmaktadır. Fakat düşük güçlerin yer aldığı uygulamalarda generatör maliyetleri yükseldiği için bu tip tasarımlı generatörlerin tercih edilebilirliği azalmaktadır. Çift statorlu sabit mıknatıslı spoke tipi senkron generatöre ait tasarım Şekil 1-3'te görülmektedir [20].



Şekil 1-3: Çift statorlu spoke tipi sabit mıknatıslı senkron generatör tasarımı.

Nadir toprak elementlerinden oluşan mıknatısların kullanımını azaltmak, aynı zamanda sabit mıknatıslı senkron generatörlerin verimini yüksek tutmak adına hem ferit mıknatısların kullanıldığı hem de neodyum tipi mıknatısların kullanıldığı hibrit tasarım modelleri de mevcuttur. Böylelikle nadir toprak elementlerinden oluşan mıknatısların akı yoğunluğu, ayrıca ferit mıknatısların spoke tasarım sayesindeki akı iyileştirmesi hususları birleşerek verimli bir model sağlanmaktadır. Hibrit nüveli spoke tipi generatör tasarımlarında verim spoke tipi ferit nüvelere göre artarken, nadir toprak elementlerinden yapılan mıknatısların kullanılmaya devam ediyor olması ne yazık ki ferit nüve özgülüğüne tam olarak erişilemediğini ve nadir toprak elementlerinden oluşan mıknatıslara bağımlılığın devam ettiğini göstermektedir. Şekil 1-4'te hibrit modele ait şekil gösterilmektedir [21].



Şekil 1-4: Hibrit model sabit mıknatıslı senkron generatör tasarımı.

Yapılan çalışmalar genel olarak generatör maliyetlerini mümkün olduğunca indirmek ve akı yoğunluğunu sağlamak için gerçekleştirilmektedir. Yazımını gerçekleştirdiğim yüksek lisans tez çalışmasında ferit mıknatısların kullanıldığı, rotor yüzeyine dik konumlandırılmış spoke tipi senkron generatör tasarımı ve optimizasyonu üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan yüksek lisans tez çalışması ile spoke tipi rotor yapısına sahip generatörlerde uzay harmoniklerini minimize edecek değişken hava aralıklı rotor laminasyonu önerilmektedir. Sabit uzunlukta hava aralığına sahip referans bir tasarım gerçekleştirilerek A tasarımı olarak adlandırılmıştır. Yüzey yerleştirmeli mıknatıslara sahip rotorlarda mıknatıs geometrisi özel olarak tasarlanarak değişken hava aralığı elde edilebilmektedir. Spoke tipi rotor yapısında ise, doğası gereği düşük maliyetli ferit mıknatısların kullanımı esastır. Bu geometride mıknatıslar doğrudan hava aralığında konumlandırılmadığından, mıknatıs geometrisi yerine mıknatıslar arasında kalan ve hava aralığına açılan laminasyon geometrisinin modifikasyonu dikkate alınmıştır.

1.1 TEZİN ÖZGÜNLÜĞÜ

Hazırlanan tez çalışması kapsamında genelin dışında bir tasarım yöntemi ile sabit mıknatıslı senkron generatör tasarımı tercih edilmiştir. Bu tasarım klasik olarak adlandırılabilen mıknatısları yüzey yerleştirmeli olan senkron generatörlerin dışında bir tasarım olan mıknatısların rotor yüzeyine dik olarak konumlandırıldığı spoke tipi tasarımıdır.

Sabit mıknatıslı senkron generatörlerin yeni yüzyılda dünya genelinde geniş kullanım alanı bulması mıknatıslar tüketiminde artışlara sebebiyet vermiştir. Yüzey yerleştirmeli senkron generatörlerde güçlü manyetik maddelerin kullanılması gibi sebeplere bağlı olarak neodyum tipi mıknatısların pazar fiyatları inanılmaz düzeylere ulaşmıştır. Rotorlarında yüzey yerleştirmeli mıknatısların yer aldığı generatörlerin verim yönünden güçlü manyetik etki gösteren nadir elementlere sahip mıknatısların kullanıldığı durumlarda etkin olduğu anlaşılmıştır.

Manyetik güçlerin elde edildiği mıknatıslardan neodyum tipi mıknatısların fiyatlarının kayda değer maddede artış göstermesi, araştırmaları diğer mıknatıslar ile ilgili farklı generatör tasarımlarına yönlendirmiştir. Böylece spoke tipi tasarım bir seçenek olarak görülmüş, neodyum tipi mıknatıslar dışında hammadde fiyatları daha istikrarlı olan ferit mıknatıslar üzerinde çalışmalar yoğunlaşmıştır. Spoke tipi tasarım sayesinde ferit mıknatısların kullanıldığı generatörlerde akı yoğunlaştırılması sağlanarak fiyat performans açısından yüksek fayda sağlanmak hedeflenmiştir.

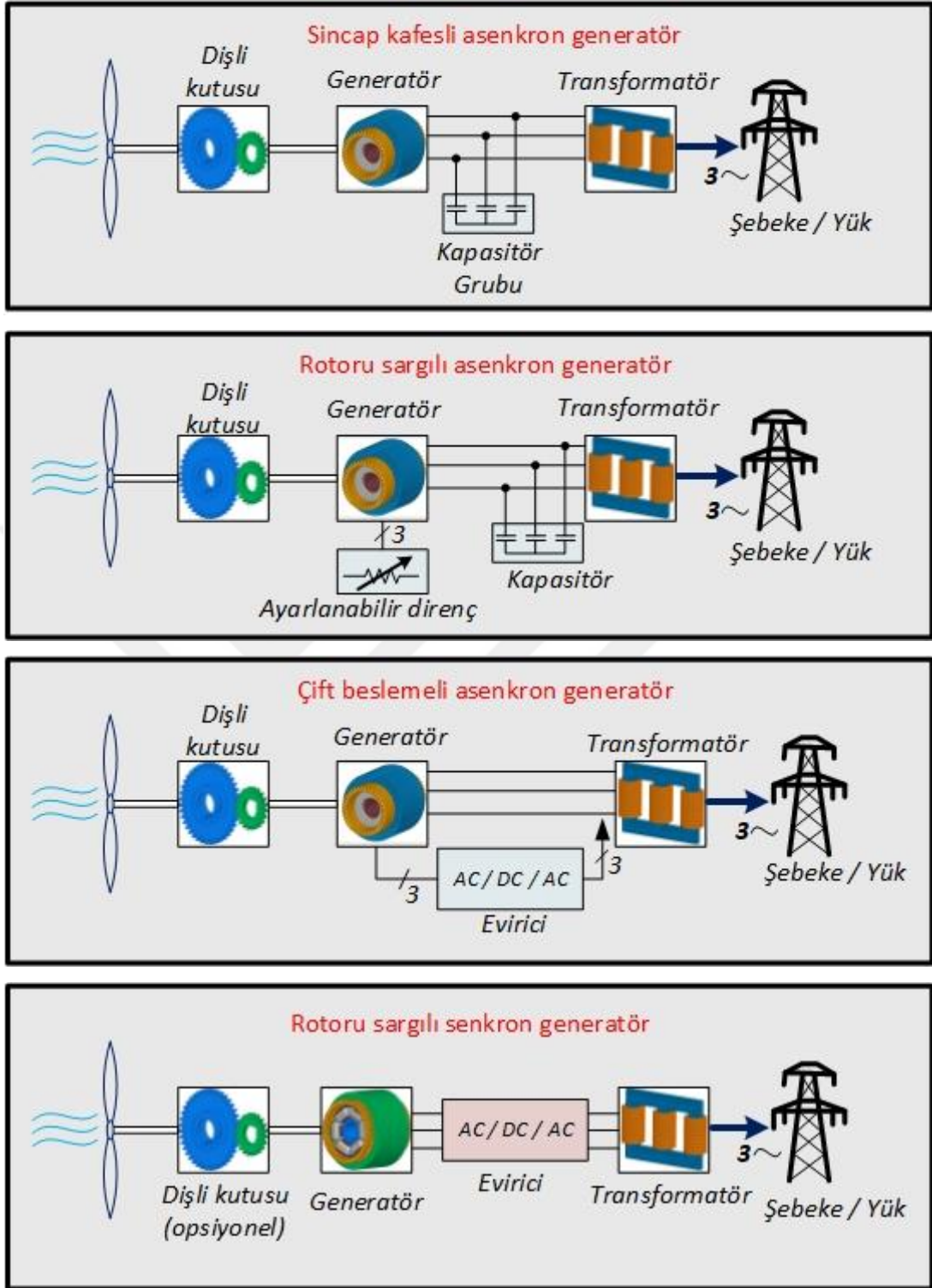
Bu tez çalışmasında iki adet spoke tipi senkron generatör tasarlanmıştır. İlki tamamen bahsi geçen ferit mıknatısların kullanıldığı klasik yöntem senkron generatördür. Bir diğeri ise tezin yenilikçi yönünü meydana getirir. Şöyle ki; tasarlanan spoke tipi sabit mıknatıslı senkron generatör üzerinde kaykırı analizi, ofset analizi gibi bir takım optimizasyonlar yapılarak generatör tasarımından kaynaklı uzay harmonikleri elimine edilmeye çalışılmış ve başarıya ulaşılan bu çalışma yöntemi sayesinde literatüre katkı sağlanmıştır. Optimizasyon çalışmaları sırasında ferit mıknatıslı klasik tasarım ile optimizasyon yapılan tasarım arasındaki farklılıklar yansıtılmış, zihinlerde kalıcı olması açısından örnekler artırılmıştır. Çalışmalar simülasyon teknolojisi sayesinde paket yazılım programları aracılığıyla gerçekleştirilmiştir.

2. RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE KULLANILAN GENERATÖRLER

Generatörler genel manasıyla elektrik üretimini gerçekleştiren elektrik makineleridir. Rüzgar türbinlerinde kullanılan generatörler rüzgarın oluşturduğu elektrik enerjisine dönüştüren ekipmanlardır. Rüzgar sürekliliği, hızı, kapasite faktörü gibi etkenler generatörler açısından olası farklı kullanımların oluşmasına neden olmaktadır. Farklı doğa olayları ve yöresel uygunluğa göre veya tercih sebebine bağlı olarak rüzgar türbinlerinde doğru akım, asenkron, senkron olmak üzere üç farklı tipte generatör seçimi söz konusudur [22].

Günümüzde bazı kaynaklarda hala doğru akım generatörlerine sahip rüzgar türbinlerinin genellikle küçük güçlü türbinlerde ve bağımsız şebekeli sistemlerde kullanıldığı ifade edilse de, düşük verimlilikleri ve sık bakım gereksinimleri sebebiyle kullanımı oldukça sınırlıdır. Gelişen teknolojiyle birlikte generatörlere daha verimli olması için yeni tasarımlar sağlanmış ve sabit mıknatıslı olarak tasarlanmaya başlansa da fırça ve kollektör mekanizmalarının kullanımı zorunluluğu devam etmektedir. Asenkron generatörler, basit, sağlam ve düşük maliyete sahip oldukları için tercih edilirler. Asenkron generatörler yüksek kutup sayılarında düşen verimlilikleri sebebiyle dişli kutusu kullanımı gerektirir ve genellikle yüksek kutup sayılarında imal edilmezler. Asenkron generatörler, genellikle rotoru sargılı ve sincap kafesli olmak üzere iki tipte imal edilirler. Senkron generatörler, üç fazlı sargıların oluşturduğu stator ve manyetik alanı oluşturan rotordan meydana gelir. Rotor tarafından sağlanan manyetik alan, sürekli kalıcı mıknatıslar veya sargılar sayesinde oluşur, sistemin çalışmasıyla akım üretilir. Senkron generatörler, sabit hızda verimli çalışır, sabit frekansta maksimum verim alırlar, çoğunlukla alan sargılı ve sabit mıknatıslı olarak üretilir [23-24].

Sabit mıknatıslı senkron generatörler fırçasız tipte olup oldukça uzun bakım periyotları sunar. Şekil 2-1’de rüzgar güç sistemlerinde yaygın olarak kullanılan sistem konfigürasyonları verilmiştir [25-26].



Şekil 2-1: Farklı rüzgar türbin konfigürasyonları

Tablo 2-1’de rüzgar türbinlerinde kullanılan generatörlerin detaylı performans karşılaştırılması verilmiştir. Maliyet, bakım giderleri, tork yoğunluğu, verim gibi kısmı özellikleri verilen tabloda asenkron rüzgar generatörlerinin bakım masrafları diğer generatörlere nazaran daha az iken, DA generatörlerinin bakım masraflarının ise daha yüksek olduğu

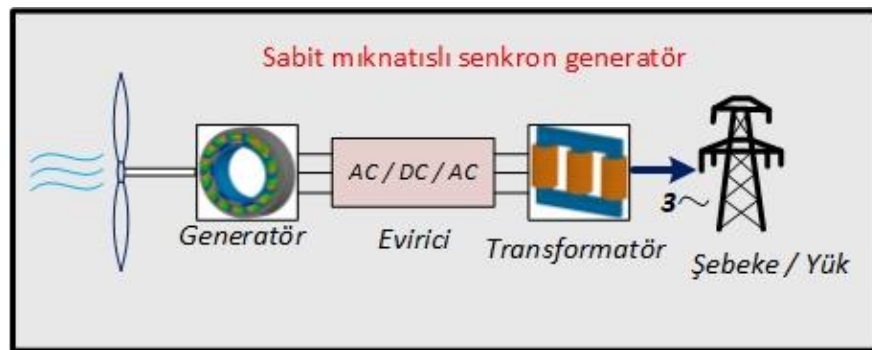
görülmektedir. Sabit mıknatıslı senkron generatörlerde ise sistem maliyeti yüksek iken bu generatörlerin çalıştırılması durumunda bakımlarının az ve uygun olduğu da tabloda belirtilmektedir [27-28].

Tablo 2-1:Rüzgar generatör konseptleri.

Generatör Tipi	Uyarım	Bakım Maliyeti	Üretim Maliyeti	Elde Edilen Tork	Verim
Asenkron	Gerekmez	Düşük	Ucuz	Düşük	Orta
Senkron	Gerekir	Düşük	Pahalı	Orta	Orta
Sabit Mıknatıslı Senkron	Gerekmez	Orta	Pahalı	Yüksek	Yüksek
Doğru Akım	Gerekir	Yüksek	Pahalı	Düşük	Orta
Anahtarlamalı Relüktans	Gerekmez	Düşük	Ucuz	Düşük	Orta

2.1 SABİT MIKNATISLI SENKRON GENERATÖRLER

Rüzgar türbinlerinde kullanılan generatörlerden biri olan sabit mıknatıslı senkron generatörler (SMSG), küçük ya da büyük güçlerde bir çok uygulamada kullanılmaktadır. Rotor manyetik alanı sabit mıknatıslar tarafından sağlandığından herhangi bir hızda güç üretebilmektedirler. Rotor kısmında sargı olmaması bu tip generatörlerin verimlerinin yüksek olmasına öncelik sağlamaktadır. SMSG’lerde fırça ve kaskat sistemine ihtiyaç bulunmadığından bakım maliyetleri düşüktür. SMSG’lerin hızı herhangi dişli kutusuna gerek kalmadan kontrol edilebilir. Rüzgar türbin sistemlerinde yaygın olarak; radyal ve eksenel akılı olarak tasarlanabilirler [29]. Şekil 2-2’de SMSG’in güç üretim ve aktarım konsepti verilmiştir [30].



Şekil 2-2: Sabit mıknatıslı senkron generatör ve şebekeye enerji aktarılma şeması.

Sürekli mıknatısların yer aldığı bu generatörlerde mıknatısların maliyeti sistem içerisinde en önemli etkidir. Akım genliğini artırmak için kullanılan güç sistemleri elemanlarının fiyatlarının yüksek oluşu, kurulum maliyetlerini artırmaktadır [14-31]. Fakat bir çıkarım yapmak gerekirse, kurulum maliyeti yüksek olan sürekli mıknatıslı generatörlerde vuru momentini ve uzay harmoniklerinin elimine edilmesiyle, geniş bir hız aralığında sürekli güç üretiminde kolaylaşma olacak ve üretilen enerji miktarı arttırılabilecektir. SMSG'lerde üretilen elektrik enerjisi, güç elektroniği elemanları sayesinde regüle edilerek sisteme aktarılır. Kalıcı mıknatıslar bulunan rotora sahip senkron generatörler, generatörün statoruna yerleştirilen sargıların oluşturduğu elektrik alanına eş değerde manyetik alan oluşturmaktadır [32]. Rotorda mıknatısların kullanımı, konvansiyonel senkron generatöre göre dinamik performansı arttırmıştır, ayrıca farklı hızlarda çalışma imkanı sağlamıştır. Konvansiyonel senkron generatörlerde rotor bakır kayıpları söz konusu iken sürekli mıknatıslı senkron generatörde rotor bakır kayıpları yoktur. Generatör üzerindeki rulman ömrü, generatörün ömrü, dayanıklılığı yüksektir. Yapısal açıdan bakıldığında yüzey yerleştirmeli, içe gömülü olarak imal edilirler [33]. Bunların dışında ise spoke tipi yerleştirme olarak lanse edilen rüzgar türbinleri de tasarım edilmekte ve günümüzde kullanılmaktadır.

Elektrik motorlarında ve generatörlerde manyetik alanı sağlamakta sürekli mıknatıs tercih edilmektedir. Sabit mıknatıslı senkron generatörlerde elektromanyetik dalga şekline uygun olarak sinüs şeklinde dalga üretebilir. Sabit mıknatıslı senkron generatörler dönmekte olan rotor ve ayrıca statordan meydana gelir. Stator hareketsiz kısımdır ve rotor dönen aksam olarak makine doğasında bulunur. Sabit mıknatıslı senkron generatörler ve motorlar fırça bulundurmazlar. Kalıcı mıknatıslı rotor ve sargılara sahip statorlardan oluşurlar. Ayrıca, generatörlerin ve motorların hava boşluklarında sinüs şekilli akı yoğunluğu oluşturmak adına sağlanmış manyetik sargılı statoru asenkron makineye benzer yöndedir. Stator gövde ve sarımlı çekirdek nüveden meydana gelir. Stator dizaynı ile sürekli mıknatıslı senkron makine ve generatör sargıları dağıtılmış ya da dağıtılmamış olabilir. Stator çekirdeğinde üç fazlı sargılar yer alır. Üç faza ait sargılar 120° faz farklı olarak yerleştirilmiştir. Üç fazda alternatif akımlar sarımlardan ilerlediğinde manyetik ortam oluşur, böylece rotorda yer alan mıknatıslar harekete başlar. Mıknatıslar rotora farklı şekillerde yerleştirilebilir. Genel olarak rotor üzerine yani yüzeye montaj edilir. Ya da rotorda delikler açılarak hazırlanmış yuvalara yerleştirilir, dahili sürekli olarak rotorda yerini alır. Spoke tipi dahili yerleştirmeler manyetik gücü artırmak için tercih edilir. Rotor dışına yerleştirmeli ve içeri gömmeli sabit mıknatıslı generatörlerde mıknatıslar

epoksi yardımı ile sabitlenir ya da silindirik rotora yarı gömülü şekilde iliştilir. İçe gömmek kolay işlem olmasa da yüksek hızlı mıknatıslarda girdap akımını düşürür ve sisteme fayda sağlar.

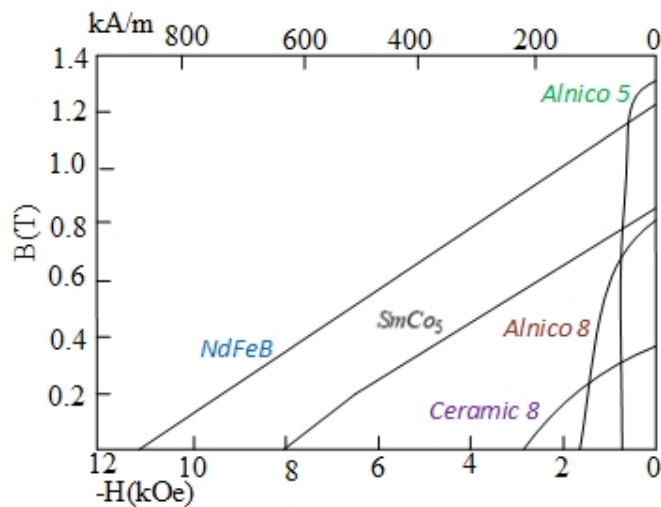
Generatörlerde sabit mıknatıs kullanımı, manyetik uyarı dahilinde yüksek moment ve çıkış gücü sağlar. Sistemde akı yoğunluğu üst seviyeye çıkar, generatörlerde yüksek güçler sağlanarak maliyet, performans ve verim dengesi sağlanır. Sabit mıknatıslı senkron generatörler başlangıçta dahi moment üretebilir, yüksek verimle çalışırlar. Rotor uyarımı kolaydır ve rotorda iletken kaybı ya da sıcaklık artışı gibi sorunlar baş göstermez [34].

2.1.1 SMSG’lerde Mıknatıs Kullanımı

Sabit mıknatıslı senkron generatörlerde, rotorunda yapısal ve akı dağılımı dizaynları göz önüne alınarak farklı mıknatıs çeşitleri kullanılmaktadır. Genellikle rüzgar türbinlerinde AlNiCo (Alüminyum-Nikel – Kobalt alaşımı), polimer mıknatıslar, piyasada geniş anlamda yer bulan ve kolay bulunur ferit (Seramik) mıknatıslar ve nadir toprak elementlerinden oluşan kobalta dayalı SmCo mıknatıslarla ve demire dayalı toprak mıknatısı olan NdFeB tipi mıknatıslar kullanılır [33].

SMSG’lerde genel olarak NdFeB ve SmCo tipi nadir toprak elementlerinden oluşan mıknatıslar kullanıldığı gibi diğer çeşitlerdeki mıknatıslar ve özellikle temini kolay ve hemen her ülkede üretilen seramik tipi (ferit) mıknatıslar da kullanılmaktadır [35].

Ferit ve neodyum tipi mıknatıslar generatörlerde kullanılırken, BHmax değerleri ve curie sıcaklıkları gibi kriterlerin dikkate alınması gerekmektedir. Şekil 2-3’te mıknatıslara ait (BH), enerji çarpımı değerleri görülmektedir [36].



Şekil 2-3: Mıknatısların manyetik enerji ($B \times H$) eğrileri.

Verilen şekil dikkatle incelendiğinde NdFeB mıknatısların seramik mıknatıslara nazaran manyetik özellikleri ve BHmax büyüklüğünün değer olarak yüksekliği göze çarpar [36]. BH çarpımı, histerezis karakteristiği olup kalıcı mıknatıslanmada önemlidir. BH değeri büyüdükçe mıknatısın demanyetize edilmesi zor hale gelir. Yukarıdaki eğri kontrol edildiğinde NdFeB tipi mıknatıslarda BH değerinin ferit mıknatıslara nazaran oldukça yüksek olduğu anlaşılmaktadır [37].

Tablo 2-2:Mıknatıs çeşitlerinin BHmax değeri ve 2018 yılı ortalama fiyatları.

Mıknatıs Cinsi	BHmax (MGOe)	Fiyat (\$ / Kg)
Ferit Mıknatıs	3,8	7,1
NdFeB Mıknatıs	40	75

2018 yılındaki Uluslararası Manyetik Ürün Teknolojileri ve Malzemeleri Forumunda yayınlanan mıknatıslara ait çeşitli özellikler ve kilogram başına ortalama döviz cinsinden değeri Tablo 2-2’de görülmektedir. Manyetiklenme özelliği yüksek olan NdFeB tipi mıknatısların ortalama fiyatı tabloya göre incelendiğinde seramik tipi mıknatıslara göre yaklaşık 10 katı bir değerde olduğu anlaşılmaktadır [38]. Ayrıca NdFeB tipi mıknatısların içerdiği nadir elementlerin yüksek fiyatı ve fiyat istikrarsızlığı, üreticileri bu mıknatıslara alternatif olabilecek ferit tipi mıknatısların kullanıma imkan sağlayan tasarımlar üzerinde çalışmaya zorlamaktadır.

Sabit mıknatıslı senkron sistemler, generatörler dışında ayrıca elektrik makine uygulamaları olarak da elektrikli araçlar üzerinde de denenmiş ve kullanılmıştır. Tercih edilen sabit mıknatıslı senkron sistemlerde alan uyarımı mıknatıslar vasıtasıyla karşılanır, sinüs formulu ters elektromanyetik dalgaya sahip AC senkron elektrik makinesidir. Senkron motorun hava boşluğunda sinüs formulu akı üretmek kaydıyla oluşturulmuş sargılı statora sahiptir. Rotor üzerinde metal kayıpları olarak varsayılan bakır kaybının yok varsayılması soğutma yönünden sabit mıknatıslı makinelerle avantaj oluşturur. Fakat özellikle nadir elementlerden neodyum tipindeki NdFeB tipi mıknatıslarda yüksek ısı meydana gelmesi ve maliyetlerinin yüksek oluşu gibi sebepler dezavantaj olarak yansımaktadır [39].

Elektrikli araç motorlarında sabit mıknatıslı motorların kullanımı son dönemlerde popüler hale gelmiştir. Yüksek verimli motorlar için tercih edilen sabit mıknatısların yer aldığı motorlarda genel olarak nadir elementlerin yer aldığı mıknatıslar ile sağlanmaktadır [40]. Akı yoğunluklarının bu tür mıknatıslarda yüksek olması, torkun büyüklüğü gibi detaylar nadir

elementli mıknatısları tercih konusunda bir adım öne çıkarmaktadır [41]. Fakat nadir elementli Nd ya da Dy tipi mıknatısların fiyatlarındaki istikrarsızlık, sürekli yükseliyor oluşları, araştırmacıları farklı arayışlara itmiştir [42]. Tablo 2-3'te 2018 -2021 yılları arasındaki ortalama neodyum ve ferit tipi mıknatısların kilogram bazında fiyatları yer almaktadır [43-44-45].

Tablo 2-3:Neodyum ve ferit mıknatıs yıllık ortalama fiyatları (2018-2021).

Yıl	Ferit Mıknatıs Fiyat (\$/kg)	NdFeB Mıknatıs Fiyat (\$/kg)
2018	7,1	75
2019	4,99	77
2020	5	80
2021	5,2	135

Nadir elementlerin yer aldığı mıknatısların kullanımını azaltmak amacıyla araştırmalar yapılmakta ve alternatifler üzerine çalışılmaktadır [46].Yapılan araştırmalar neticesinde ferit tipi mıknatısların neodyum tipi mıknatıslara alternatif olacağı düşünülmektedir. Bunun sebebi ise fiyatlarının uzun yıllardır aynı seviyelerde seyretmesi, bir anlamda ucuz olmaları, ayrıca dünya genelinde çok noktadan temin edilebilir olmasıdır [47]. Fakat ferit mıknatısların manyetik akılarının zayıflığı söz konusu olduğundan, bu konuyu aşmak adına farklı bir tasarım yoluna yani spoke tipi tasarım ve uygulamalarına gidilmiştir, böylelikle akı yoğunluğu artırılarak tork üzerinde iyileşme sağlanmıştır [48]. Demanyetize daha geç olan, yüksek ısılarda da diğer mıknatıslara göre verimli çalışan, fiyat istikrarı sağlayan ferit mıknatıslar, otomobillerde, cam asansörleri, silecek motorları gibi DC uygulamalı sistemlerde hali hazırda kullanılmakta olup, rotorlarındaki optimizasyon çalışmaları sayesinde gelecekte de tercih edilebilirliklerini koruyacaklardır.

Sabit mıknatıslı senkron generatörlerde genel olarak ferit ve NdFeB tipi mıknatıslar tercih edilmektedir. Tez çalışmasında ferit mıknatıslı senkron generatör tasarımı yapılmış olup, ayrıca NdFeB tipi mıknatıs ile ferit mıknatıs karşılaştırmalı analizi de sunulmuştur.

Seramik tipi (ferit) mıknatıslar, rüzgar türbinlerinde kullanılan diğer mıknatıslara nazaran maliyet açısından ucuzlardır [49]. Mıknatıslık özelliğini uzun süre muhafaza edebilirler. Demir oksit tozlar kullanılarak üretilirler ve kristal kafes yapısını geliştirmek için Baryum (Ba) ya da Stronsiyum (Sr)'dan eklenir. Sert ve kırılğan olmalarına rağmen korozyona karşı büyük direnç gösterirler. Seramik mıknatıslar olarak da anılan bu mıknatısların manyetik akı yoğunluğu,

koersif kuvveti ve mıknatıslığının giderilmesine karşı gösterdiği direnç oldukça yüksektir. Akı yoğunluğu diğer mıknatıslara göre daha azdır. Zayıf yapısal karakteristiklerine rağmen yaygın mıknatıslar içinde en hafif olan mıknatıstır. Bu mıknatısların enerji üretimi diğer mıknatıslarla kıyaslandığında daha düşüktür [50].

Ferit mıknatısların kolay üretilebilir olmaları, maliyetlerinin düşük olmaları elektrik elektronik sistemlerinde kullanılabilir, tercih edilebilir olmasını sağlar. Mıknatısıyetini uzun süre koruyabilirler. Sert ve kırılğan olmalarına rağmen korozyona karşı büyük direnç gösterirler. Fuko kayıpları olmaması, düşük vuruntu torkuna öncülük etmeleri gibi olumlu yanları sayesinde pek çok sistem uygulamasında tercih edilirler [51]. Akı yoğunluğu düşük olduğu için mıknatıslanma eğrileri zayıftır. Mıknatıslanma eğrileri zayıf olan bu mıknatıslar yüzey yerleştirmeli olarak türbin generatörlerde kullanıldığında gerçek anlamda büyük ağırlıkta ve boyutlarda kullanılmaları gerekmektedir. Bu durum, küçük güçlerdeki rüzgar generatörlerinde sorun teşkil etmese de büyük güçlerdeki rüzgar generatörlerinde kullanımlarını zorlaştırır. Fakat akı yoğunlaştırması yapıldığı takdirde orta ve büyük güçlerde de seramik mıknatıslar kullanılabilir.

SmCo, kobalta dayalı iken NdFeB ise demire dayalı neodyum tipi mıknatıstır. Bu mıknatıslar yüksek artık manyetik akıya, yüksek koersif kuvvete, lineer demanyetizasyon eğrisine, düşük sıcaklık katsayısına ve yüksek enerji üretimine sahiptir. Yüksek akı yoğunluğuna sahip oldukları için elektrikselsel güç üretimi yüksek olan generatörlerde tercih edilir. Mıknatıslanma eğrileri ve özellikleri gerçek anlamda mükemmel olan neodyum tipi mıknatıslar, yüksek güç gerektiren uygulamalarda, verimin maliyetten önemli olduğu özellikte projelerde tercih önceliğidir. NdFeB tipi mıknatısların üretimi için nadir toprak metalleri olan neodyum ve disprosiyuma ihtiyaç bulunmaktadır. Belirtilen metaller NdFeB mıknatısların %33'lük kısmını oluştururlar. Dolayısıyla bu metallerin kullanılması demek sürekli olarak bu metallere bağımlılık demektir. Tedarik etme sürecindeki zorluk ve fiyat istikrarsızlığı NdFeB mıknatısların en büyük problemleridir. Sadece 2009 ve 2011 yılları arasında bu mıknatısa ait ortalama tedarik fiyatları %1000'in üzerinde artmış olup, bu istikrarsız fiyatlar günümüzde de devam etmektedir. Çin, bu tür mıknatısların tedariki konusunda neredeyse tek ülke konumundadır, piyasanın yaklaşık %97'sini oluşturmaktadır [52].

Neodyum mıknatısların sürekli artan ve değişen fiyatları, ferit mıknatıslara göre aşırı pahalılığı, zor bulunur olması gibi pek çok sebep generatör tasarımlarında ve üretimlerinde çok daha ucuz ve kolay bulunabilen ferit mıknatısları günümüzde büyük avantaj ile alternatif haline getirmektedir.

Rüzgar türbinlerinde, generatörlerde kalıcı mıknatısların olduğu tasarımlar diğer generatör tiplerine göre pek çok açıdan avantajlıdır ve tercih edilir. Bunlardan bazıları, düşük titreşim ve gürültü, yüksek elektriksel verim, akı kayıplarının azlığı gibi nedenlerdir. Sabit mıknatıslı generatörler de genelde NdFeB ya da ferit tipi mıknatıslar tercih edilir [53]. NdFeB mıknatıs ile ferit mıknatısların özellikleri arasında karşılaştırma yapıldığında NdFeB mıknatıs yerine ferit mıknatıs kullanıldığında toplamda mıknatısiyet değeri olan Br'nin yaklaşık olarak 1,4 T'den 0,4 T'ye düştüğü (%71 oranında azaldığı) bilinmektedir. Ayrıca, giderici manyetik alan şiddeti 1050 kA/m'den yaklaşık olarak 250 kA/m'ye düşer ve böylece toplam moment %54 oranında azalır [54]. Fakat diğer bir yandan bakıldığında, maliyet ve tedarik açısından NdFeB tipi mıknatıslar seramik tipi mıknatıslara göre ikinci planda kalmaktadır. Ferit ve NdFeB tipi mıknatısların manyetik, ısıl özellikleri tabloda verilmiştir [55].

Tablo 2-4:Mıknatıs manyetik ve ısıl özellikleri.

Mıknatıs Tipi	BHmax (kJ/m ³)	Br (T)	Hc (kA/m)	Curie Sıcaklığı (C)
NdFeB	200-290	1,20	870	310
SmCo	130-190	0,97	750	720
Seramik (Ferit)	27-35	0,4	240	450

Yukarıdaki tablo incelendiğinde, NdFeB tipi mıknatısların yüksek oranda BHmax çarpımına sahip olduğu görülür. Seramik mıknatıslar, NdFeB ve SmCo tipi neodyum mıknatıslara göre sert ve kırılgandır. SmCo tipi mıknatıslar NdFeB mıknatıslara göre düşük BHmax çarpımına sahip olsa da Curie sıcaklığının yüksekliği neodyum tipi mıknatıslar içerisinde onları daha avantajlı hale getirmektedir. NdFeB mıknatıslar, SmCo mıknatıslardan daha yüksek bir maksimum enerji üretme yeteneğine sahiptirler fakat sıcaklık kararlılığı SmCo mıknatıslar kadar iyi değildir [56].

NdFeB tipi mıknatıslar seramik mıknatıslara nazaran hacimsel olarak daha düşük boyuttaki mıknatıslarla gereksinimleri karşılarlar. Seramik mıknatıslar düşük mıknatıslanma eğrilerine sahiptirler. Bu dezavantajlarından dolayı özellikle rüzgar türbinlerindeki generatörlerde akı yoğunlaştırması yapılarak kullanılmaları daha uygun olmaktadır [57]. Düşük güçteki uygulamalarda tercih sebebi iken yüksek güç üretimi yapılacak projelerde akı yoğunlaştırmalı rotor tasarımlarıyla daha kullanılabilir olurlar. Tedariki ve üretiminin kolay olması ve düşük maliyetli olması seramik mıknatısların NdFeB tipi mıknatıslara göre en büyük avantajlarıdır [58]. Ayrıca seramik tipi mıknatıslar, toprak elementli mıknatıslar gibi metal

alaşımlı olmadıkları için elektriği olarak yalıtkandır böylece elektrik makinalarında, generatörlerde, manyetik alan değişiminin hızlı olması istenilen uygulamalarda avantaj meydana getirmektedirler.



3. ELEKTRİK MAKİNALARINDA HARMONİKLER

Güç sistemlerindeki frekansların tam katları olan sinüs şekilli akım ve gerilimler harmoniklerdir. Harmonikler, gerilimde ve yük akımlarında dejenereler meydana getirir. Akımda ya da gerilimde, alternatif akımlı sistemlerde dalga şekli sinüs formu talep edilir. Sistemlerdeki ekipmanlar, dönüştürücüler, ark ekipmanları, iletken, yarı iletken, güç elektroniği elemanları benzeri non lineer yüklerin karakteristikleri, akım veya gerilim şeklini nonsinüoidal yapar [59].

Generatörlerde harmonik kavramı iki başlık altında incelenebilir. Birincisi kaynağın sinüs dalga formundan uzak olmasından kaynaklanan zaman harmoniğidir. İkincisi ise generatör ve makine geometrisinin neden olduğu uzay harmoniğidir. Generatör ve makineler saf sinüs bir dalga formuyla beslense bile manyetomotor kuvvette farklı frekans bileşenleri gözlemlenebilir [60].

Enerji kalitesinin ilk konusu, çalışan generatörlerin doğru ve uygun kalitede görevini yerine getirmesidir. Sistem dahilindeki birinci dalga haricindeki ve birincil frekansın esas katlarındaki frekanslardaki sinüs şekilli harmonikler, çalışan ekipmanlarda güç kayıplarına, ısınmalara, yalıtımlarının zorlanmasına, generatör deformasyonlarına sebebiyet verir [61]. Enerji sistemlerinin düzgün işlemesi açısından sistemin oluşturacağı bütün harmonik derecelerinin düzgün bilinmesi önemlidir verileri yöntem harmonik tespitleri ile gerçekleştirilebilir [62].

Elektrik güç sistemlerinde, generatörlerde verim ve performans açısından sistem tasarım sürecinde uzay ve zaman harmonikleri etkileşimleri önemlidir [63].

3.1 ZAMAN HARMONİKLERİ

Zaman harmonikleri elektrik sistem ekipman kaynaklarına bağlı olarak gelişmektedir. Sabit olmayan frekansa sahip sürücüler enerji sistemleri içerisinde harmonik üretirler. Zaman harmoniklerinin, güç sistemleri, ekipmanlar dolayındaki etkileri göz önüne alındığında generatörler üzerinde ısınmayı artırmaktadır, sistem çalışma kalitesini düşürmektedir. Bu tip bozunmalar, harmonikler sistem genelinde ve elektrik makinelerinde ses, gürültü yapmasıyla birlikte, makine millerinde aşırı sarsıntıya meydan vermektedir [64].

Generatör ve elektrik makinelerine temel sinüs şeklinde akım ve gerilim sağlandığında da hava aralığında basamak fonksiyonunda manyeto motor kuvvette endüklenen gerilimde bozunmalar görülebilir. Amper sarımdan kaynaklanan bozunmalar temel basamak dışındaki basamaklarda daha rahat fark edilebilir. Harmonik dağılımı, konuma ve zamana bağlı bir şekil

alır. Bahsedilen harmonik basamakları fourier serilerine uyarlandığında zaman harmonikleri bilinebilir. Güç sistemlerinde zaman harmoniği ve uzay harmoniği birlikte düşünülebilir. Farklı nonsinüsoidal kaynaklar mevcutsa, generatör üzerinde uzay ve zaman harmoniğinin etkisi artar, bu durumda zaman harmonikleri uzay harmoniğini doğurur [65].

3.2 UZAY HARMONİKLERİ

Uzay harmonikleri, generatör ve elektrik makine geometrisi gereği mevcut olan harmoniklerdir. Sistemlerde, güç kaynağından temin edilen sinüs şekilli gerilimde manyetomotor kuvvette değişik frekanslar meydana gelir, meydana gelen oluşumlara uzay harmonikleri denir. Generatörler, makine geometrisinin sebebiyet verdiği uzay harmoniklerinden ötürü çalışma, kalkış sırasında zorlanır, bu durum generatör üzerinde titreşime ve aşırı sese neden olur. Stabil akımda düzenlenecek amper-sarım dağılımında makinedeki yerine göre değişen basamak fonksiyonu elde edilir, bu fonksiyon fourier serisine uygun olarak açıldığında, bu noktada uzay harmonikleri belirmeye başlar. Uzay harmonikleri generatörlerde ve elektrik makinelerinde pozitif ve negatif moment bileşenlerinin oluşumuna neden olur. Generatörün doğası gereği oluşan uzay harmonikleri titreşime, vuruntulu çalışmaya ve tork dalgalanmalarına neden olabilirler. Bu harmonikler verim ve tork gibi performans parametrelerini olumsuz yönde etkilediği için analizlerinin yapılarak sonuçların gözlemlenmesi gerekmektedir [66]. Uzay harmoniği hava aralığındaki akı dalga formunun bir fonksiyonu olduğundan hava aralığı reliktansının değişimi harmoniklerin optimize edilmesi açısından etkili olacaktır. Dolayısıyla hava aralığı dalga şeklini etkileyebilecek oluk sayısı ve geometrisi, mıknatıs yapısı, stator-rotor oluk sayısı kombinasyonu ve sargı özellikleri uzay harmoniğini etkileyen değişkenlerdir [67-68].

Periyodik sinyaller, farklı frekanstaki sinüs bileşenlerinin toplamı şeklinde tanımlanabilir. Bu sinüslü ifadelerin her biri Fourier bileşenlerdir. Oluşan seri ise Fourier serisi olarak adlandırılır. Generatörün hava aralığında elde edilen akı yoğunluğu dalga formu matematiksel olarak Fourier serisi ile ifade edilebilir.

$$B(\theta) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos n\theta + B_n \sin n\theta) \quad (3.1)$$

Verilen denklemde θ elektriksel açı, A_0 akı yoğunluğunun ortalama değeri, A_n ve B_n Fourier katsayıları ve n harmonik derecesini ifade etmektedir. Fourier katsayıları Denklem 2 ve 3 ile ifade edilir[69,70].

$$A_n = \frac{2}{m} \sum_{k=1}^{\infty} (y_k \cos(n\theta_k)) \quad (3.2)$$

ve

$$B_n = \frac{2}{m} \sum_{k=1}^{\infty} (y_k \sin(n\theta_k)) \quad (3.3)$$

Uzay harmonikleri; generatörlerin ve elektrik makinelerinin yapı ve aksamlarında, sargılarda, oluklarda ve çok yerde meydana geldiğinden düzeltme yapısal revizyonlarla sağlanır. Amper – sarım revizeleri akıma ve gerilime katkı sağlar.

Uzay harmonikleri hava aralığında meydana geldiklerinde, bu harmonikleri optimize ederken döner alanların oluşmasının engellenmemesi doğru kabul edilir. Döner alan oluşmasında, generatörde 3 fazda gerilim endüklenmesi, gerilim sargılarının 120 derece açı ile oluklara yerleştirilmesi önemlidir. Fazlardan birine ait basamaklı yapıdaki alan şekillerinin, oluklar arası mesafelerin, sargı sarım sayılarının değiştirilmesi, uzay harmoniklerini mümkün mertebe aşağı indirger. Çeyrek dalga simetrisinde, çift dereceli harmoniklerin de yok edilme hususu söz konudur, oluklardaki iletkenlerden 180 derece sonra eşit miktarda fakat ters işaretli olan iletkenler, bobinlerde kırışleme olmaksızın fayda sağlar. Bir kutup çiftte 2q, generatör ve makinede ise toplamda 6q oluk bulunmasına karşın bazı oluklar için çözümler hesaplanır, iyileşme sonuçları diğer oluklarda da kabul edilir [71]. Bobin adımı kısaltma işlemi ile stator oluk tasarımı uzay harmoniklerini elemine edebilir. Bobinlerdeki çift tabakalı sargılarda ve adım kısaltması statorlarda oluk açısıyla katları kadar uygulanır. İki tabakalı sargı tipi kısaltmaya daha uygundur, sargı uç bağlantıları tüm kutup sayılarında oklandırma yöntemiyle devir elde etmede müsaittir, çok devirli sargılar iki tabakalı düşünülür, tam kalıp sargı da denir [72].

Statorunda, rotor civarında çalışma süresince meydana gelen uzay harmoniklerini azaltmak kaçak akıları azaltma metodu ile de gerçekleştirilir. Nüve tasarımındaki farklılıklar, değişiklikler kaçak akıları minimize eder [73]. Kaçak akılar devrelerini nüveyle birlikte havadan tamamlayarak sistem çalışma yapısında aksaklıklara sebep olur, titreme ve ısınma gerçeğini gün yüzüne çıkarır. Generatör boştaki çalışma durumunda stator akımı küçük ve rotor akımı da güç çekilmezken yok kabul edilirse, akılar hava aralığı boyunca ilerler ve rotor dişlileri üzerinden devreyi tamamlar. Güç çekildiği durumda, rotor akımı hava aralığında zıt yönde mmk oluşturur, statorun ürettiği hava aralığı akısını azaltacak yönde hareket eder, endüklenen gerilim düşer. Gereksizce yüksek akım çekilir, rotor akımıyla birlikte ters yönlü stator yük akımı, oluk ve dış başlarını dışında kaçak akı oluşturur, radyal akılar sapar, generatörün dönmesi zorlaşır, rotor yüklenir ve stator akısı devreyi rotor yerine hava aralığından bitirir [74].

4. SABİT MİKNATISLI SENKRON GENERATÖR TASARIMI

Tez çalışmasının bu kısmında, tez konusu sabit mıknatıslı senkron generatörün tasarım ve analiz yöntemlerindeki temel kavramlar, alan hesaplamaları ve diğer hesaplamalarda tercih edilen sayısal yöntemlerden bahsedilmiştir. Sabit mıknatıslı senkron generatör dizaynında tercih edilen yöntemler temelde iki tanedir. İlki, sonlu elemanlar yöntemi kullanarak yapılan alan hesaplamaları ile sayısal çözümlemedir ve yazılımlardaki dijital yollardır. Diğer, analitik hesaplamalar ile deneysel sonuç yöntemleriyle varılan değerlerin karşılaştırılmasıdır.

Hazırlanan tez çalışmasında ilk düşünce, rüzgar hızlarına uyumlu olacak şekilde bir generatör tasarımı olmuştur. Literatürde gerekli araştırmalar yapılmış ve daha sonrasında düşük rüzgar hızlarına uygun olacak şekilde bir generatör tasarımı uygun görülmüştür. Rüzgar türbinleri, nominal güçlerine göre; 5 kW'a kadar küçük güçlü, 5 kW'ın üstünde ise büyük güçlü rüzgar türbinleri olarak sınıflandırılırlar; bu doğrultuda düşük güce sahip 2 kW bir generatör tasarımı, rüzgar güç ve moment hesaplarına dikkat edilerek gerçekleştirilmiştir [75].

Senkron hız belirlenmesinde kutup sayısı, frekans fonksiyonları önemli rol oynar. Dakikadaki devir sayısı (rpm) olarak belirlenen senkron hız; 'n' dakikadaki devir sayısı olmak üzere $n = (60 \cdot f) / p$ formülü ile bulunur. 'f' frekans, 'p' ise çift kutup sayısı sembolüdür. Formül 50 Hz ve 60 Hz için dakikadaki devir sayısı, rüzgar hızları grafiği incelenerek düşük hızlı bir değer ortalama 300-350 rpm olarak belirlenmiştir [75]. Dakikadaki devir sayısı formülü kutup sayısı için uygulandığında ortalama kutup sayısı 20 çıkmaktadır [76]. Böylece tasarımı gerçekleştirilecek sabit mıknatıslı senkron generatöre ait kutup sayısı belirlenmiş olur. Generatörlerde kutup sayısı arttıkça dakikadaki devir sayısı düşmektedir çünkü kutup sayısı elektrik generatör ve sistem hızlarını belirlemek için kullanılmaktadır. Formül incelendiğinde kutup sayısı arttıkça dakikadaki devrin düştüğü açıkça görülmekte olup, tez çalışmasında gerçekleştirilecek optimal tasarım için bu uygulama yeterli olacaktır.

Generatör tasarımı sırasında oluşturulan alan hesaplama yöntemlerinde Maxwell eşitlikleri, integral eşitlikleri, kuvvet ve tork gibi değerler incelenerek tasarım sırasında gerekli matematiksel çözümler tamamlanır.

Elektromanyetik alanlar akım, yük kaynaklarından esinlenir. Maxwell eşitlikleri yoluyla oluşturulur. Fark biçimindeki alan eşitlikleri;

$$\nabla \times \vec{H} = J + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (4.1)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (4.2)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (4.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (4.4)$$

Yukarıda verilen formüllerde serbest akım yoğunluğu $J(A/m^2)$, serbest yük yoğunluğu ρ (C/m^3) kaynak terimleri olup H , B , E , D vektörel büyüklük olarak alanlardır. Bahsedilen alan büyüklükleri üçer bileşene sahiptir. Alan eşitliklerinin komple teorisi yapısal ilişkiler yönünden düşünülür alt sırada verilen ilave bağımsız eşitliklerle genişletilmek zorundadır [77].

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \quad (4.5)$$

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (4.6)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (4.7)$$

Serbest akım yoğunluğu ile adlandırılan J , serbest yüklerin hareketi doğrultusunda meydana gelir. İletken ürünlerden geçen elektronların hareketi iletim akımı, yarı iletkenler üzerindeki elektron veya boşlukların hareketi iletim akımı, sıvılardaki pozitif ya da negatif iyonların yer değiştirmesi elektrolitik akım, vakum içindeki iyon veya elektronların hareketi yayınma akımı olarak belirtilir.

Alan eşitlikleri integral eşitlikleri ile de ifade edilebilir. Yüksek derece geometrik simetrisinin var olduğu uygulamalarda daha uygundur.

$$\oint_c \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\oint_s \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{s} \quad (4.8)$$

$$\oint_c \vec{H} \cdot d\vec{l} = \oint_s \left(\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \cdot d\vec{s} \quad (4.9)$$

$$\oint_s \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0 \quad (4.10)$$

$$\oint_s \vec{D} \cdot d\vec{s} = \oint_v \rho \cdot d\vec{v} \quad (4.11)$$

4.9 formülü Amper'in devre teorisinin klasikleşmiş halidir, kapalı yollar çevresinde manyetik alan şiddetinin gezinimi yüzeydeki serbest akıma denktir. 4.7 formülü ise Faraday'ın elektromanyetik indüksiyon yasasını anlatır. Sabit kapalı devrede indüklenen elektromotor kuvveti devreyi çevreleyen manyetik akıların artış oranının negatif değerine denktir. Bu teori bir E alanının manyetik akının zaman içerisindeki değişimiyle üretildiğini gösterir. Faraday kanunu transformatörler, generatörler gibi elektromekanik ekipmanların davranışları için altyapı nihayetindedir.

Elektromekanik denklemlerde, sürekli akımla ilgili kuvvet ve torkun bilinmesi önemlidir. Sonuca varabilmek için bölgedeki q yüklerinin u hızıyla hareket etmesindeki davranışları gözlemlemek doğrudur. Hareketli yükler değeri Lorentz kuvvetlerini meydana getirir.

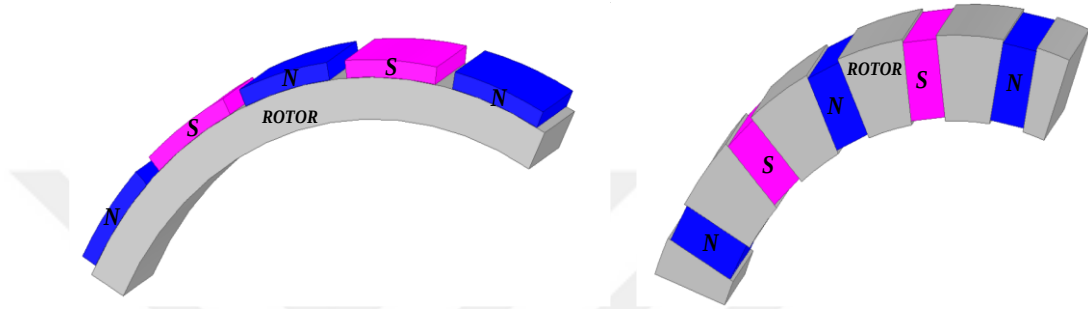
$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{u} \times \vec{B}) \quad (4.12)$$

$$\vec{F} = \int_v \vec{J} \times \vec{B} \cdot d\vec{v} \quad (4.13)$$

$$\vec{T} = \int_v \vec{r} \times (\vec{J} \times \vec{B}) d\vec{v} \quad (4.14)$$

B alanı vasıtasıyla meydana getirilen sürekli akımın sebep verdiği tork, kuvvet konumuz dahilindedir. J akım yoğunluğunda Lorentz kuvveti ve tork sırasıyla; V, J akım yoğunluğunun meydana getirdiği hacim r ise torkun bulunduğu noktaya olan vektörse, kuvvet ve tork yukarıdaki formüller vasıtasıyla bulunabilir.

Manyetik alan formüllerini ve yukarıda bahsedilen eşitlikleri kullanarak rotor ve stator üzerinde akı yoğunlaştırması sağlamak için farklı rotor tasarımları geliştirilebilir. Bunlardan biri spoke tipi tasarımlardır. Spoke tipi mıknatıs yerleşimleri, yüzey yerleştirmeli tipten farklı olarak rotor eksenine ve dönüşüne dikey olarak yerleştirilir. Mıknatıslar içeri gömülü şekilde yerleştirilirken belli bir açıda olmasına dikkat edilir. Bu açı sayesinde akı yoğunlaşır, manyetik alan oluşumunun en verimli olarak kullanılması sağlanır. Spoke tipinde çeşitli tasarımlar mevcuttur [78].



Şekil 4-1: Senkron generatörlerde mıknatısların rotor üzerinde konumlandırılmaları (a) yüzey yerleştirmeli, (b) spoke tipi

Şekil 4-1’de rotor yüzeyinde mıknatısların konumlandırma biçimleri gösterilmektedir. Genel tasarımlardan biri olan yüzey yerleştirmeler seramik tipi mıknatıslar için akı yoğunluğu düşük olacağı ve düşük güç yoğunluğu sunacağı için tercih edilmez. Fakat akı yoğunluğunu artırmak için kullanılan spoke tipi sayesinde ortalama hava aralığı akı yoğunluğu arttırılacak generatörün güç yoğunluğu arttırılabilir. Rotora yerleştirilen mıknatıslar çelik tabakaların arasında belli açı yapacak şekilde konumlandırılır. Böylelikle manyetik akı yoğunluğu arttırılarak verimlilik arttırılabilir. Ayrıca seramik mıknatıs kullanımı sayesinde harmonik bozunmalar azaltılabilir [78]. NdFeB tipi mıknatısların kullanıldığı rotorlarda yüzey yerleştirmeli rotor üretimi yerinde bir tercih olabilir, bunun sebebi neodyum tipi mıknatısların mıknatıslanma eğrilerinin yüksekliğidir. Fakat ferit mıknatısların BHmax değerleri diğer mıknatıslara nazaran daha düşük olduğundan dolayı ferit mıknatıs kullanılacak rotorlarda hava aralığı akı yoğunluğu arttırılmalıdır. Bu problem, spoke tipi konfigürasyon tercih edilerek giderilebilir. Bununla birlikte yüzey yerleştirmeli neodyum tipi mıknatısların kullanıldığı generatörlere kıyasla daha yüksek generatör hacmi söz konusudur.

4.1 RMXprt ANALİZİ

Rmxprt, elektrik generatör tasarımının, diğer birçok ekipmanın analitik olarak analizlerinin gerçekleştirildiği bilgisayar destekli bir yazılım programıdır. Elektrik generatör tasarımları yapılırken generatör performansının en kısa sürede elde edilmesi istenmektedir. Bu doğrultuda yapılan generatör tasarımları, yazılımlar aracılığıyla sanal ortamda gerçekleştirilmekte, simülasyonu sağlanmakta, dizaynı gerçekleştirilen ekipmanların gerçek performansları tahmin edilebilmektedir. Simülasyon programları ile seri üretime geçmeden generatörün performansının tespiti ve generatörün revize edilmesi hem maliyet hem de zaman açısından katkı sağlamaktadır [79].

Analitik analizi Rmxprt tarafından elektrik generatörünün 2B / 3B sonlu eleman metodu çözümünde dizayn parametreleri ve geçici zaman analizi ANSYS Maxwell 2D / 3D arayüzüne yönlendirilir. Yönlendirilen noktada basit ve geçerli değişiklikler (nüve kaybı gibi) tamamlanıp çözüme kavuşulur. Ayrıca tasarım edilecek ekipmanın eddy akımları ya da elektrostatik çözümleri sağlanmak isteniyorsa, program üzerindeki tercihler üzerinden tasarım düzeltilip tamamlanır [80].

Tez çalışmasının bu bölümünde öncelikli olarak yüzey yerleştirmeli sabit mıknatıslı senkron generatör tasarımı yapılmıştır. Neodyum tipi mıknatıslar kullanılmış olup gerçekleştirilen tasarım Ansys paket yazılım programında tamamlanıp, generatörün Rmxprt analizleri gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan generatöre ait parametreler Tablo 4-1’de verilmiştir.

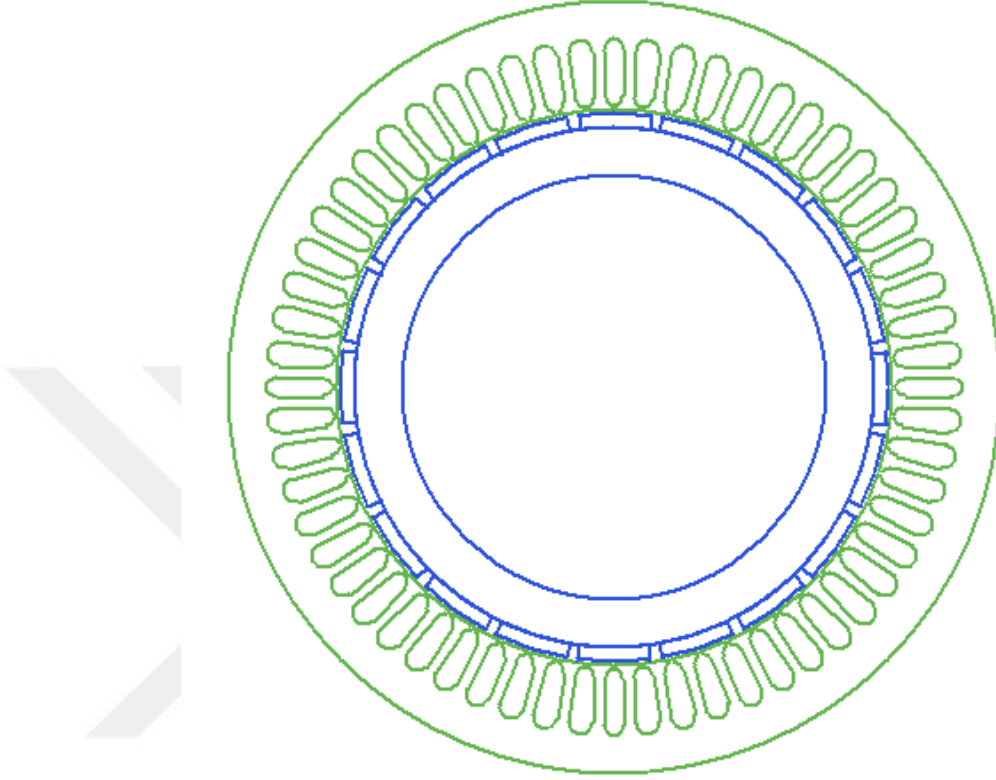
Tablo 4-1:Tasarımı yapılan yüzey yerleştirmeli sabit mıknatıslı senkron generatörün teknik özellikleri.

Özellik	Değer	Özellik	Değer
Anma Gücü (W)	2000	Stator Paket Uzunluğu (mm)	45
Kutup Sayısı	20	Kayk	0,2
Oluk Sayısı	60	Stator Malzemesi	Çelik_1010
Stator Dış Çapı (mm)	400	Rotor Dış Çapı (mm)	285,6
Stator İç Çapı (mm)	288	Rotor Malzemesi	Çelik_1010
Mıknatıs Kalınlığı (mm)	8	Mıknatıs Malzemesi	N39
Ofset (mm)	20	Kutup Yay	0,9

Yüzey yerleştirmeli tip sabit mıknatıslı senkron generatöre ait verilerin yer aldığı Tablo 4-1’de generatörün anma gücü, kutup sayısı, stator ve rotor malzemesi, mıknatıs malzemesi gibi

özellikler, ayrıca ofset, kutup yayı / adımı oranı gibi değerler de yer almaktadır. Yüzey yerleştirmeli olarak tasarlanmış senkron generatörde neodyum tipi mıknatıs tercih edilmiştir.

Teknik özellikleri tabloda belirtilmiş olan, tasarımı gerçekleştirilmiş yüzey yerleştirmeli içten rotorlu sabit mıknatıslı generatörün yapısı Şekil 4-2’de verilmiştir.



Şekil 4-2:Tasarımı gerçekleştirilen yüzey yerleştirmeli sabit mıknatıslı senkron generatör.

Tasarlanan yüzey yerleştirmeli senkron generatörün çeşitli analizleri sistem tasarımı tamamlandıktan sonra yine yazılım yardımıyla tamamlanmış olup, generatörün performans parametreleri ile ilgili değerler Tablo 4-2’de sunulmuştur.

Tablo 4-2: Yüzey yerleştirmeli sabit mıknatıslı senkron generatörün parametreleri.

Özellik	Değer
Verim (%)	87,59
Güç Faktörü	0,96
Anma Torku (Nm)	70,81
Stator Bakır Kaybı (W)	126
Vuruntu Torku (mNm)	3300
THD (%)	10,3
Oluk Doluluk Oranı (%)	30

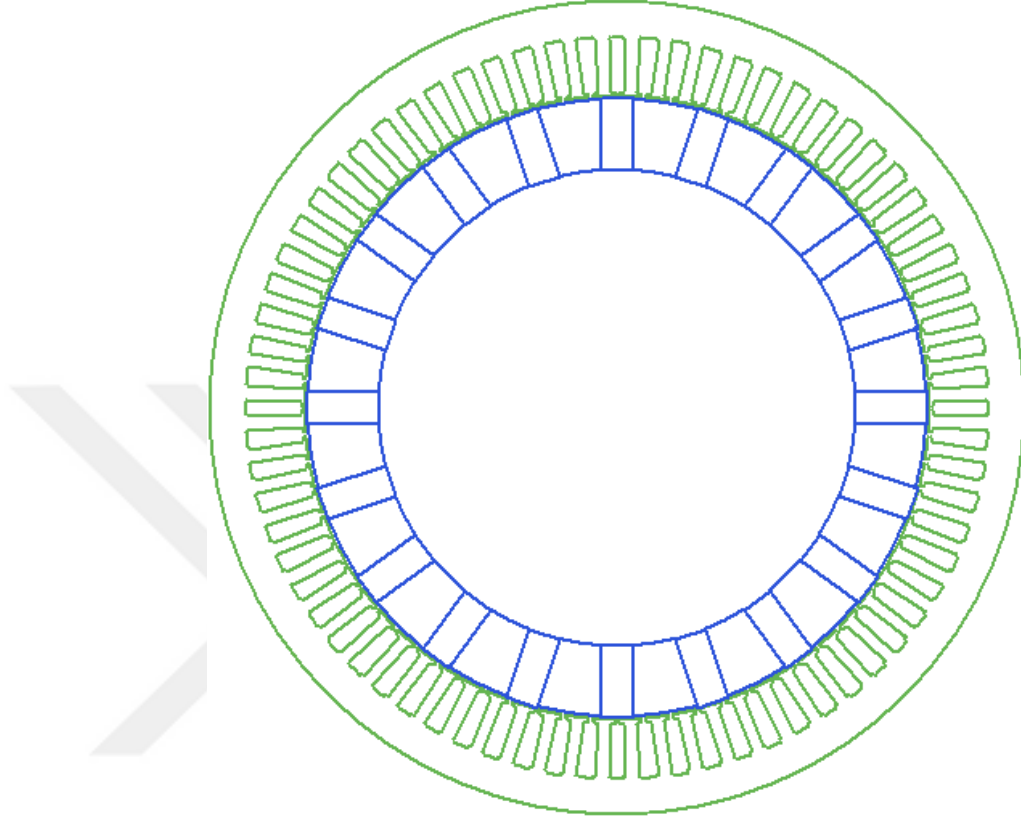
Tablo 4-2 incelendiğinde veriminin orta düzeyde olduğu, vuruntu torku ve THD değerlerinin yüksek olduğu görülmektedir.

Yüzey yerleştirmeli tip generatörlerde kullanılan mıknatısların artık kayda değer anlamdaki maliyetleri, ferit mıknatısların belli noktalardaki avantajları ve özellikle spoke tipi uygulamalardaki verimleri ferit mıknatıslı spoke tipi senkron generatör tasarımı hususunu ön plana çıkarmıştır. Tez çalışmasında spoke tipi ferit mıknatıslı iki tasarım gerçekleştirilmiş olup, klasik ve optimize tasarım olarak düşünülüp ileriki bölümlerde Tasarım A ve Tasarım B diye adlandırılmış ve iki boyutlu analizleri gerçekleştirilmiştir. Tezin bu kısmında tasarımı gerçekleştirilen iki adet spoke tipi senkron generatörün ortak teknik özellikleri Tablo 4-3'te gösterilmiştir.

Tablo 4-3:Tasarımı yapılan spoke tipi sabit mıknatıslı senkron generatörün teknik özellikleri.

Özellik	Değer	Özellik	Değer
Anma Gücü (W)	2000	Stator Paket Uzunluğu (mm)	70
Kutup Sayısı	20	Kayk (Skew)	0
Oluk Sayısı	72	Stator Malzemesi	M400
Stator Dış Çapı (mm)	375	Rotor Dış Çapı (mm)	285,6
Stator İç Çapı (mm)	288	Rotor Malzemesi	M400
Mıknatıs Kalınlığı (mm)	15	Mıknatıs Malzemesi	NMF-6D

Tablo 4-3'e bakıldığında yüzey yerleştirmeli 2 kW neodyum mıknatıslı generatöre benzer şekilde anma gücü aynı olan fakat kutup ve oluk sayıları farklı bir generatör tasarlanmıştır. Tasarımı gerçekleştirilen spoke tipi senkron generatör Şekil 4-3'te gösterilmektedir.



Şekil 4-3:Tasarımı gerçekleştirilen spoke tipi sabit mıknatıslı senkron generatör.

Şekil 4-3'te dizayn edilmiş spoke tipi ferit mıknatıslı senkron generatör için Rmxprt analizleri gerçekleştirilmiş ve Tablo 4-4'de yüklü çalışma durumundaki parametreler gösterilmiştir.

Tablo 4-4: Spoke tipi sabit mıknatıslı senkron generatörün parametreleri.

Özellik	Değer
Verim (%)	90,36
Güç Faktörü	0,99
Anma Torku (Nm)	70,77
Stator Bakır Kaybı (W)	192
Vuruntu Torku (mNm)	195,42
Oluk Doluluk Oranı (%)	55,4

Tasarlanan klasik spoke tipi ferit mıknatıslı senkron generatör paket yazılım programında çalıştırılmış, parametreler tabloda gösterilmiştir.

Yüzey yerleştirmeli neodyum tipi mıknatıslara sahip senkron generatör verimi %87,59 iken spoke tipi ferit mıknatıslı senkron generatörün verimi yaklaşık %90,36 olarak ölçülmüştür. Yine güç faktörü yüzey yerleştirmeli generatörde 0,96 iken spoke tipi generatörde 0,99 olarak ölçülmüştür. Ayrıca vuruş torku incelendiğinde seramik tipi mıknatısların bu hususta daha başarılı oldukları yine tablolar üzerinde görülmektedir.



5. SABİT MİKNATISLI SENKRON GENERATÖRÜN SONLU ELEMANLAR METODU İLE ANALİZİ

Sabit mıknatıslı generatör tasarımları mıknatıs cinslerine göre çeşitlendirilmektedir. Genel ve klasik tasarım olarak kabul edilen ve rotor yüzeyine sıralı halde yerleştirilen mıknatıslarla çalışan generatör sistemleri dünya genelinde mevcuttur. Diğer tür mıknatıslar yüzey yerleştirmeli olarak rotor etrafına konumlandırıldıklarında generatör verimliliği düşmektedir. Seramik tipi (Ferit) mıknatısların generatörlerde kullanımı söz konusu olduğunda rotor yüzeyine yerleştirme yerine spoke tipi tasarım daha optimum olmaktadır. Sabit mıknatıslı generatörler için tasarlanan gelenekselin dışında kabul edilen spoke tipi tasarım akı yoğunlaştırmasını sağlamada önem arz etmektedir [81].

Enerji verimliliği dünya genelinde büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle sıradan, geleneksel indüksiyonlu sistemlere nazaran farklı tasarımlar içeren motorlar ve generatörler ön plana çıkmaktadır. Son yıllarda ferit mıknatıslar içeren elektrik makineleri ve generatörler, günümüzde yüksek oranda tercih edilmektedir. Bu makinelerin, generatörlerin daha verimli olmaları adına yapılan sistem tasarımlarında rotor yüzeyine dik olarak yerleştirilen mıknatıslar spoke tipi dizaynı olarak adlandırılır. Spoke tipi tasarımda manyetik tork diğer tasarımlara göre daha verimli olmaktadır. Buna ek olarak, manyetik akı yoğunluğu spoke tipi ile birlikte artmakta, artan akı yoğunluğunun tersine uzay harmonikleri azalmakta ve dünya genelinde kolayca temin edilen ferit mıknatıslar sayesinde generatör maliyetleri düşmektedir [82].

5.1 SONLU ELEMANLAR METODU

Sonlu elemanlar metodu genellikle çözümü karmaşık olan problemleri sayısal olarak basite indirgeme yöntemidir. Sonlu elemanlar analizi ile çözümde ele alınan bir cismin sonsuz olmayacak kadar çok sayıda parçaya ayrıldığı doğru sayılır ve çözüme kavuşturulmak istenen ekipman n kadar boyutta ve n kadar sonlu elemana ayrılır. Metot ile doğrulama yaparken n sayıya bölünen cisim, problem ya da ekipman kısımları temsil edilen her parça, matris yöntemi kullanılarak tüm esasın meydana çıkarılması sağlanır ve sonrasında tümel kuvvet vektörü de eklenerek düğüm yer değiştirmeleri belirlenir, böylece düğüm yer değiştirmeleri hesaplanarak zorlanmalar ve gerilmeler açığa kavuşturulur. Sonlu elemanlar metodu, ebatları ve tiplerinin çeşitliliği sebebiyle bir ekipmanı anlatabilir, zor şekilleri tasvir edebilir. Fazla nokta bağlantıları olan ekipmanlar; köşe ya da orta nokta fark etmeksizin incelenebilir [83].

Sonlu elemanlar analizi çözümlerinde, zor yaklaşımlı ve çözülmesi güç uygulamalarda, yapısal kargaşaları temele indirgeyerek sonuç elde edilir. Genel sorunlar temele, kolayla indirgenerek sonuçlara ulaşılır. Metot sayesinde, çözüme ulaşılan kısım, birden fazla miktarda, temel, minimal, düğümlü, sonlu eleman adı verilen kısımlara ayrılır. Metottaki farklı fikir; devamlı fonksiyonları kısmi devamlı fonksiyonlarla anlatmaktır. Eleman dahilinde bilinmesi arz edilen büyüklüğün hesabı o elemanın nodlarındaki sayılar, tutarlar dahilinde interpolasyonla çözümdür. Böylece sonlu eleman metodunda meçhul ve bilinmesi istenen değerler nodlardaki değerlerdir. Sürekli denklemlerle büyüklük alanının nodlardaki değerlerine denklem kurulur [84].

Sonlu elemanlar metodu kullanılarak çözümler üretebilen değişik paket yazılımlar tercih edilse de bu yöntemin temel uygulamaları benzerdir. Yöntemler temelde üç şekilde gerçekleşir. Bahsedilen yöntemler; ön işlemci, çözüm ve son işlemci aşamalarıdır. Ön işlemci adımı; sorunun geometrik tipinin (çizgiler, alanlar ve hacimlerden oluşan model) ve yapının sonlu eleman metodu kurularak analize tamam şekle hazırlanmasındaki detaylardır. Ön işlemcide modelleme yaparken, sorunun geometrisi çıkarılır, yapı dizayn programında yapılabilir, ayrıca yazılım destekli model programları tarafından meydana getirilip doğru şekilde analiz programına dahil edilebilir. Aşama sırasında ağ örgüsü oluşturma (meshing) tamamlanırken, geometrik halin evvelde tepkisi sağlanmış mühim adete paylaşılması gerçekleştirilip, adımda elemanın büyüklüğü geometriye bağlı olarak paket yazılımlarca otomatik ya da büyüklüklerin dizayn edence girişi ile sağlanır. Çözümleme adımı, yükler ve sonsuz olmayan modelin sonlu adetteki parçaları arasında kurulan problemlerin açıklanması, ayrıca sonuçlara ulaşılmasıdır. Tercih edilen yazılımlarda, çoğunlukla sonlu eleman çözümleyiciler ön çözücü, matematik motoru ve son çözümleyici olarak düşünülür. Ön çözümde şekil, ekipman irdelenir ve şekli matematik denklemlerine ayırıştırır. İlk aşamada açıklanan denklemler ön çözücüde kontrol edilir, sorun belirirse matematik motorunun çalışmaz. Model tamam ve uygunsa, çözücü işleme başlayarak eleman rijitlik matrisini meydana getirir, yer değiştirme, sıcaklık benzeri sonuçları sağlayan matematik motorunu devreye alır. Son evrede ise çözümleme sonundaki değerlerin düğüm noktalarında ikincil değer kontrol edilir. Düğümlerden yer değiştirmelerden gerilmeler açığa çıkarılır [85].

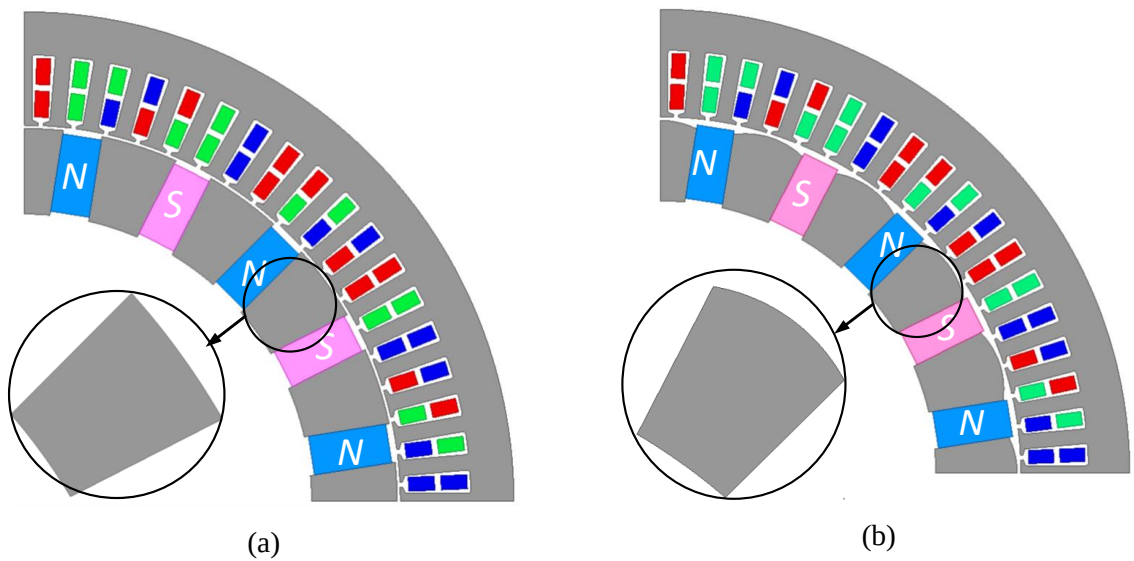
5.2 İKİ BOYUTLU ANALİZ (2B)

Düşük uzay harmoniğine sahip ferit mıknatıslı senkron generatör tasarımı ve optimizasyonu konulu tez çalışmasında rüzgar türbinleri için içten rotorlu spoke tipi sabit mıknatıslı bir senkron generatör tasarlanarak analizleri gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan generatörün özellikleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 5-1:Tasarımı yapılan senkron generatörün özellikleri.

Özellik	Değer	Özellik	Değer
Kutup sayısı	20	Oluk sayısı	72
Nominal güç (W)	2000	Rotor dış çapı (mm)	285.6
Stator dış çapı (mm)	375	Mıknatıs cinsi	NMF-6D
Paket uzunluk (mm)	70	Stator-Rotor malzemesi	M400

Tez çalışmasında iki farklı rotor yapısına sahip generatör analiz edilmiştir. İki farklı model analizi ile karşılaştırmalar sağlanarak akı iyileşmeleri gözlemlenmiştir. İlk model de (Tasarım A) rotor klasik yapıda tasarlanmıştır. İkinci model de (Tasarım B) ise rotorun statora bakan kısmında eşit hava aralığına sahip bir geometrik yapı tasarlanmıştır. Rotorun geometrik yapısının hava aralığı akı yoğunluğu dalga şekli, endüklenen faz gerilimi, toplam harmonik bozulma değerleri incelenmiştir. Tasarımı gerçekleştirilen generatörlerin 2B modeli aşağıdaki şekilde verilmiştir.



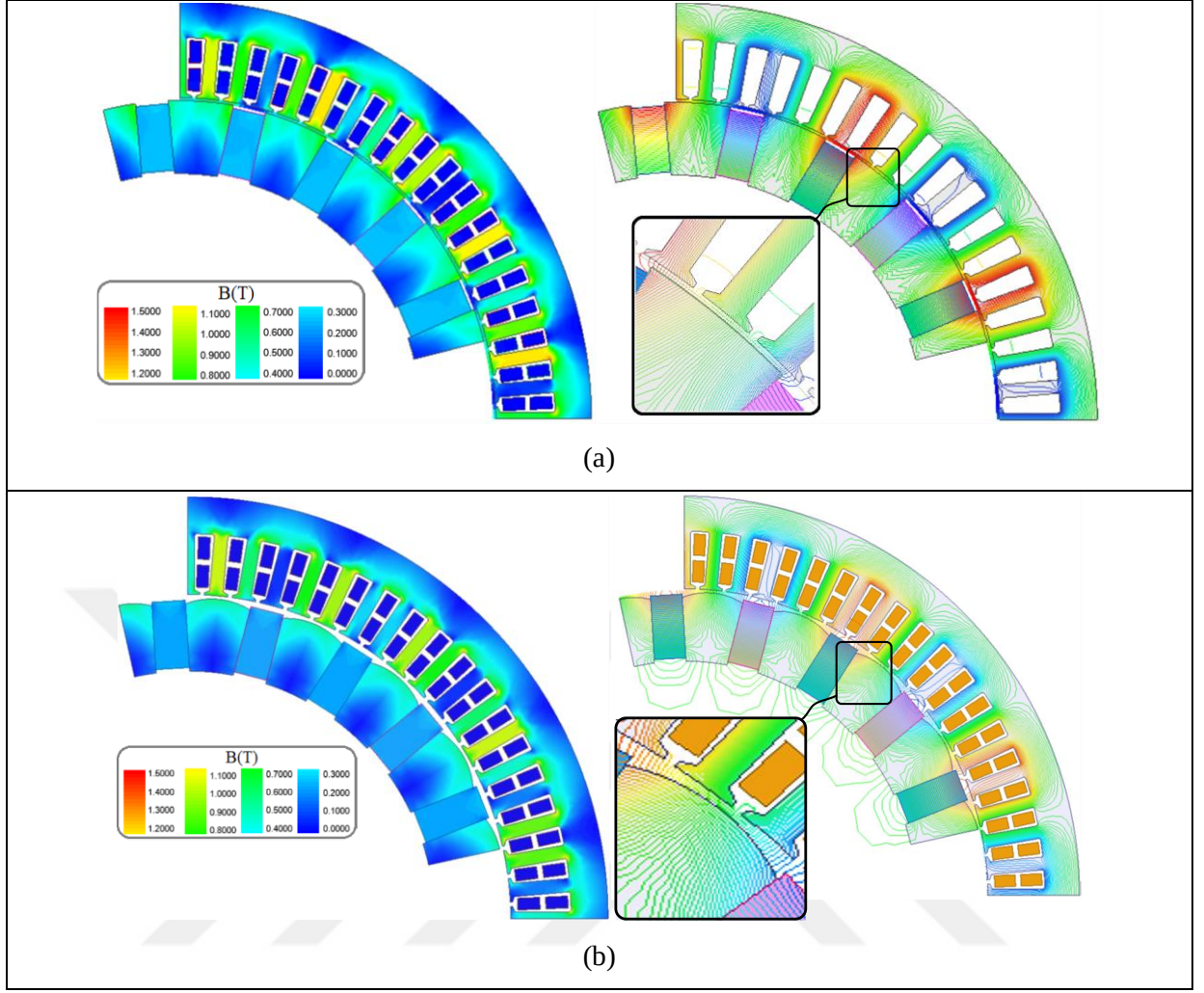
Şekil 5-1: Generatör modeli (a) Tasarım A, (b) Tasarım B

5.3 OPTİMİZASYON ÇALIŞMALARI

2B tasarımı yapılan ferit mıknatıslı senkron generatör için optimizasyon çalışmaları ofset, kutup yayı ve kaykısı analizi yapılarak gerçekleştirilmiştir.

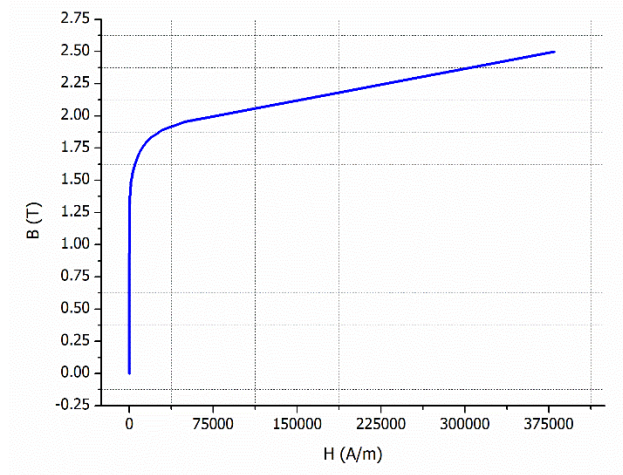
Generatörlerin tasarımı birçok kriterin birlikte dikkate alınması gerektiği zorlu bir süreçtir. Dolayısıyla arzu edilen tasarımın elde edilmesi birbiri ile ilişkili birçok problemin çözülmesine bağlıdır. Bu tür karmaşık problemlerin çözümü için matematiksel tabanlı araçlar geliştirilmiştir. Bunlar arasında en verimli olanlardan biri de Sonlu Elemanlar Metodudur (SEM). Bu metod, sürekli olduğu bölge üzerindeki değişimleri kısmi diferansiyel denklemler ile gösterilebilen değişkenlerin çözümlerini elde etmek amacıyla kullanılan bir metottur[86-87].

Sonlu elemanlar metodu kullanılarak yapılan analizlerin uzun zaman alması nedeniyle master-slave sınır şartları dikkate alınarak tam modelin 1/4 üzerinden analizler gerçekleştirilmiştir. Parça kesit modellerde gerçekleştirilen transient analizlerde elde edilen manyetik akı dağılımı ve akı çizgileri Şekil 5-2’de gösterilmiştir.



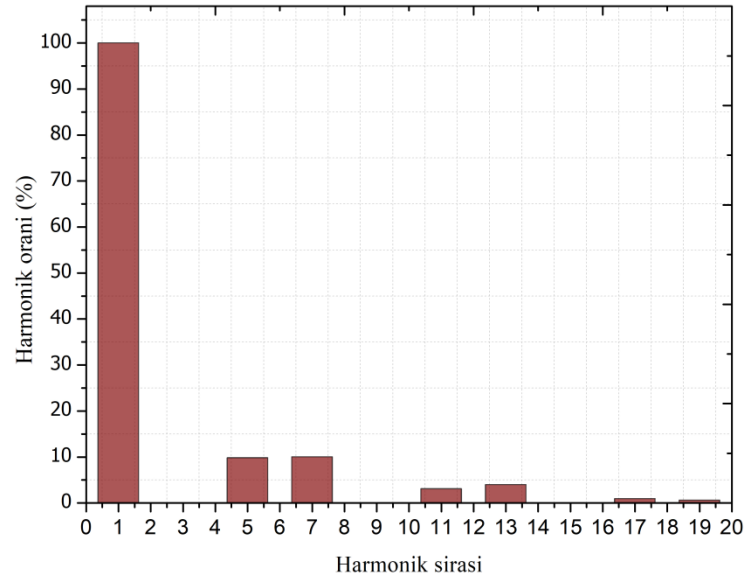
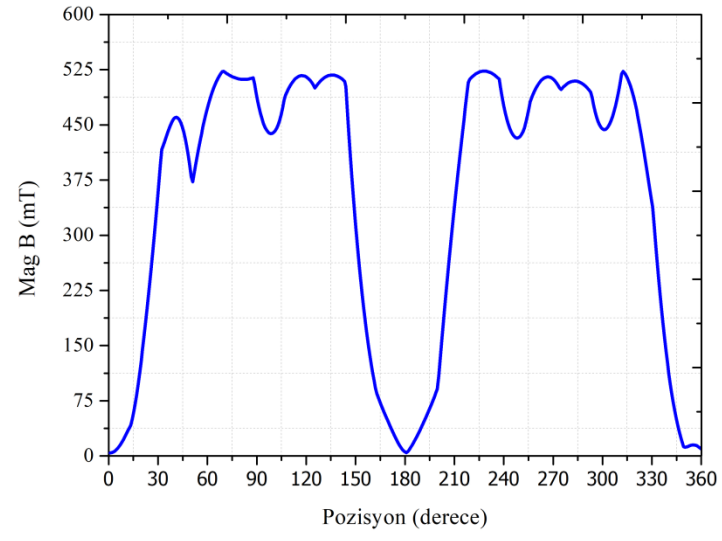
Şekil 5-2: Manyetik akı dağılımı ve akı çizgileri (a) Tasarım A, (b) Tasarım B

Tasarımlarda kullanılan M400 nüve malzemesinin BH karakteristiği Şekil 5-3'te verilmiştir. BH eğrisi ve akı dağılımları birlikte değerlendirilirse nüve akı dağılımının uygun ve sınırlar içerisinde kaldığı görülmektedir.

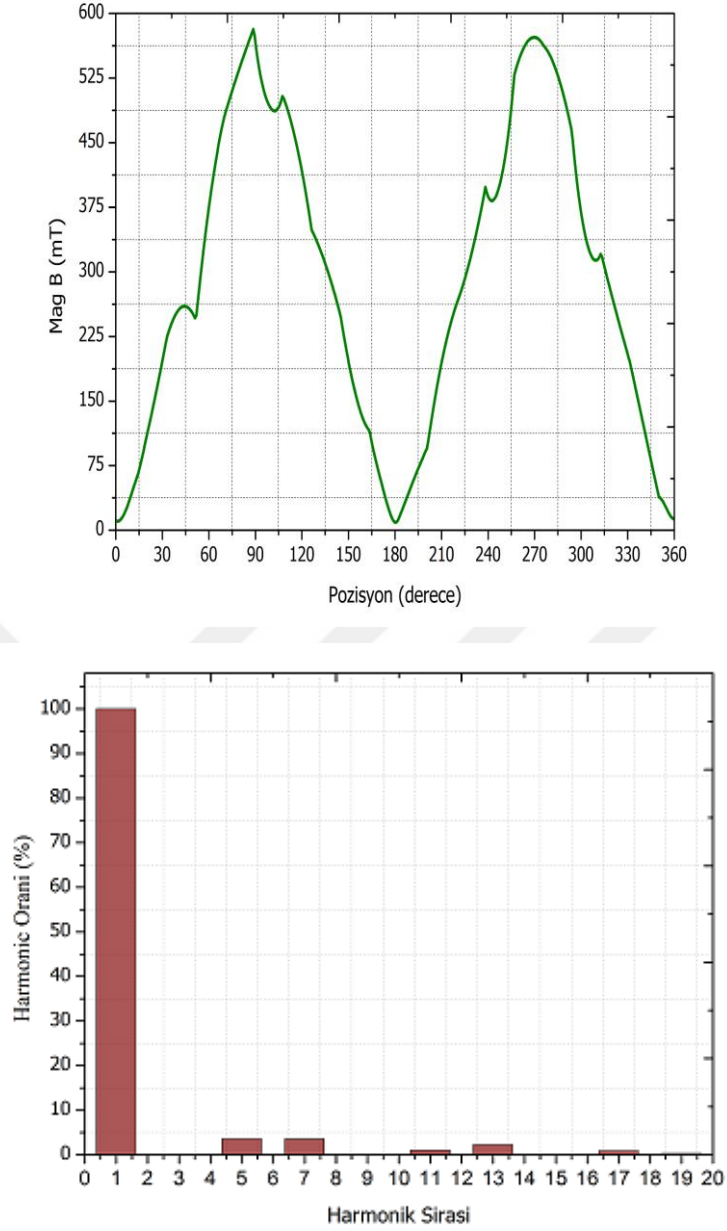


Şekil 5-3: M400 çeliğinin BH eğrisi

Uzay harmoniklerinin tespiti için belirlenen modelin hava aralığına çizilen kontor üzerinde elde edilen hava aralığı akı yoğunluğunun dalga şekli her iki model için Şekil 5-4'te verilmiştir. Bu dalgaların harmonik analizleri yapılarak şekillerde belirtilmiş ve yapılan analizlerde Tasarım A için özellikle 5. ve 7. harmoniğin baskın olduğu ve sırasıyla 9,83 ve 10,01'lik yüzde harmonik oranına sahip olduğu görülmüştür. Hava aralığı dalga formu sinüse daha yakın olan Tasarım B'de ise yüzde harmonik oranı 5. ve 7. harmonikler için sırasıyla 3,55 ve 3,52 değerinde kalmıştır. 23. harmonik hariç benzer şekilde diğer tüm harmoniklerde de tasarım B için daha düşük harmonik oranı tespit edilmiştir. Uzay harmonikleri açısından değerlendirildiğinde Tasarım B'nin daha düşük harmonik oranına sahip olduğu belirlenmiştir.



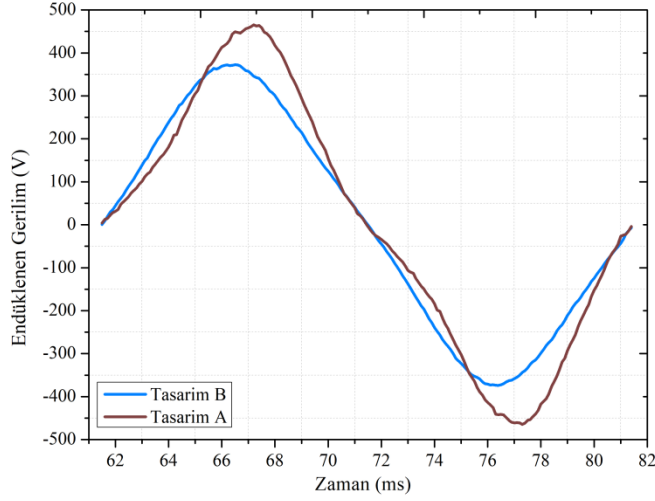
(a)



(b)

Şekil 5-4: . Kontor boyunca akı değişimi ve harmonik yüzdeleri (a) Tasarım A, (b) Tasarım B

Sargılarda endüklenen gerilimin dalga şekli hava aralığı manyetik akı yoğunluğu dalga şeklinin bir fonksiyonudur [88]. Dolayısıyla hava aralığında elde edilen bozuk akı dağılımı kötü uç gerilimlerine neden olacaktır. Tasarlanan generatörlerin anma hızında faz gerilimleri Şekil 5-5'te verilmiştir. Elde edilen harmonik dağılımları dikkate alınırsa beklendiği üzere Tasarım B'nin gerilim dalga şeklinin sinüse daha yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 5-5: . Endüklene gerilim dalga formları.

5.3.1 Ofset Analizi

Ansys Maxwell yazılım paket programı ile tasarımı gerçekleştirilen sabit mıknatıslı senkron generatörün kutup yayı ofset analizinde ilk değer 0 mm tercih edilerek analizler başlatılmıştır. Referans değer olan 0 mm yay ofseti belli aralıklarla artırılarak ölçümler genişletilmiştir. Kazanımların sağlandığı ölçümlerde kutup yay farklılıklarına bakarak mıknatıs kütlelerinin, hava aralığı akı yoğunluğunun, vuruşu torkunun ve değişikliklerin sisteme etkisi kontrol edilmiştir.

Sabit mıknatıslı senkron generatör üzerinde yapılan tasarım değişikliklerinde ofset referans biriminin yükselmesi ile mıknatıs uçlarındaki basıklık belirgin derecede değişmiştir. Bu değişim basıqlığın yükselmesi olarak adlandırılıp sistemde kullanılan mıknatıs miktarında düşme anlamına gelmektedir.

Yapılan ofset analizinde, referans olarak seçilen 0 mm değeri ve diğer değerlerdeki ofset noktasının farklılaşması vuruşu torkunu da etkilemektedir. Ofset analizi sırasında seçilen noktaya göre vuruşu torkunun arttığı ya da azaldığı anlar çalışmada belirtilmiştir. Negatif bir büyüklük olan vuruşu torkunda ofset seçimi önemli olarak düşünülmelidir.

Ofset değişimi söz konusu olduğunda akı yoğunluğu ilişkisi de farklı boyuttadır çünkü ofset değerinin artışına bağlı olarak akı yoğunluğu da pozitif yönde kazanım sağlamaktadır. Ayrıca ofset değeri ve değişiminde ilk değer ile son değer göz önüne alındığında ofset artması verimin de artışına iyi yönde katkı oluşturmaktadır.

5.3.2 Kutup Yayı Oranı Analizi

Kutup yayı oranı analizi generatör tasarımlarında önemli bir kriterdir. Önemli olmasının sebebi ise kutup yayı açısına bağlı olarak generatör akı yoğunluğunun, vurutu torkunun, verimin değişmesi ve bu değişimlerden etkilenmesidir.

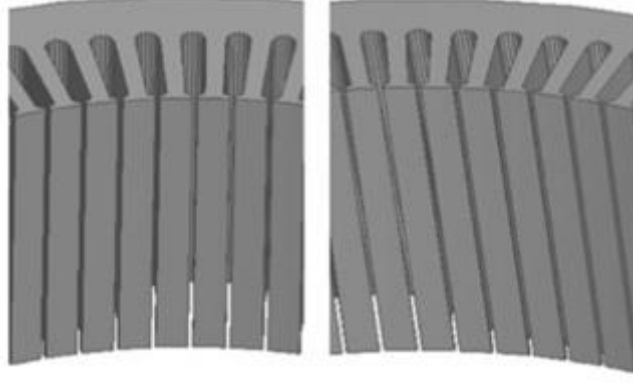
Kalıcı mıknatıslı senkron generatör tasarımında, kutup yayı analizi gerçekleştirilirken ilk durum ve son durumlar üzerinden karşılaştırmalar tamamlanır.

Birinci durumda kalıcı mıknatısın seçilen ve ölçüm için işaretlenen kısmı rotorun yüzünde yay uzunluğuna denk olan rotor referans açısı α_1 belirlensin, diğer durumdaysa açı α_2 olarak belirtilsin. Böylece rotor ait kutup yayı, α_2 açısının α_1 açısına oranı olarak karşımıza çıkmaktadır. Tez çalışmasında tasarımı yapılan kalıcı mıknatıslı senkron generatörün kutup sayısı 20'dir. 20 kutuplu senkron generatörde; α_1 açısı: $\alpha_1 = 360/20 = 18^\circ$ olur. İkinci durum açısı; $\alpha_2 = 9^\circ$ ise kutup yayı oranı burada 0,5 olur.

Kutup yayı analizi ve oranı belirlenirken genel de ilk değer 0 olarak seçilir. Daha sonra düşük aralıklarla 1 değeri elde edilene dek analiz devam eder. İşlem devam ederken her durum değişiminde kutup yayı oranı değişimine denk olan hava aralığı akı yoğunluğu, verim ve vurutu torku incelenir, incelenirken değerlerin artışları, artışların azalması ve rutin hale gelişleri, optimum seviyeleri belirlenir.

5.3.3 Kaykı Analizi

Kaykı sabit mıknatıslı generatörlerde genelde tercih edilen, vurutu torkunu minimize eden yollardandır. Mıknatıs kaykısı basamaklı biçimde rotorun mıknatıslarla kademeli çevrilmesi gibi de görülebilir. Kalıcı mıknatıslı generatörlerde genellikle stator oluklarına kaykı verilmesi ile analiz işlemi yapılır, rotordaki mıknatıslara kaykı verilmesi zor ve pahalıdır. Eğer ki mıknatıslara kaykı işlemi sağlanacaksa, rotorun demontaj edilir, tüm parçalar ötekilere nazaran döndürülerek kaykı sağlanır. Eksenel akılı kalıcı mıknatıslı senkron generatörlerde, radyal akılı sistemlere göre zıt durum vardır, rotor mıknatıslarına kaykı sağlamak düzlemsel mıknatıs yüzeyinden ötürü statora nazaran basit, ucuzdur. İşte bu sebepten ötürü rotora kaykı sağlamak eksenel akılı kalıcı mıknatıslı generatörlerde genel bir yöntemdir. Şekil 5-6'da kaykısız ve kaykılı eksenel akılı senkron generatör rotoru yer almaktadır. Yöntem incelendiğinde kaykı artışı yükseldikçe ortalama momentte düşüş gerçekleşebilir [89].



Şekil 5-6: Stator oluklarında kaykısı.

Sabit mıknatıslı senkron generatör üzerinde yapılacak kaykısı analizi, generatörün mıknatıslarının yer aldığı rotor kısmında ya da olukların bulunduğu stator üzerinde gerçekleştirilmektedir. Genelde radyal akı tercihinin olduğu generatörlerde kaykısı analizi statorunda bulunan oluklarda yapılmaktadır. Sabit mıknatıslı senkron generatörlerde kaykısı analizi yapılırken kaykısının minimum ve maksimum olduğu değerler incelenmektedir. Analiz için kaykısının 0 (sıfır) ölçüldüğü noktada sabit mıknatıslı senkron generatörün statoru saçların düz olarak yerleştirilmesi ile meydana getirilir. Daha sonraki ölçümler yapılırken dikkat edilecek husus ise kaykısının 1 (bir) olduğu durumdur. Kaykısı, 1 iken statoru meydana getiren saçlardan yukarıda bulunan ile aşağıda bulunan arası mesafe bir oluk olarak kabul görür. Bir diğer deyiş ile sistemde bir oluk kaydırma işlemi gerçekleştirilmiş olur.

Kaykısı analizinin gerçekleştirildiği generatörün statorundaki oluklardaki kaykısı ilk etapta 0 (sıfır) tercih edilerek düşük aralıklarda artırılır ve 1 (bir) olana dek devam ettirilir. Yapılan işlemlerdeki ölçümler kaydedilir ve incelenir. Kaykısı analizinin gerçekleştirilmesiyle değişim sırasındaki vuru torku miktarı belirlenir. Analizde, başlangıçtan bitişe doğru kaykısının artması ile vuru torku en düşük seviyesine gelir. En büyük değerin yer aldığı kaykısı durumunda ise vuru torku yok edilmiş olur.

Tasarımı gerçekleştirilen generatör üzerinde ölçümler yapılırken kaykısı analizinde kaykısının maksimum, minimum olduğu anlardaki generatör verimi farklılıklar göstermektedir. Bilindiği üzere vuru torku sistemde arzu edilmeyen, tercih edilmeyen bir olgudur. Kaykısı analizi sırasında kaykısının 1 (bir) olduğu durum vuru torkunu minimize ederken verim cephesinde farklı bir olgu karşımıza çıkmaktadır. Çünkü kaykısının artması verim yönünde negatiflik meydana getirmektedir. Böylece tasarım sırasında sistemin optimum çalışması için tercihler değişmekte ve farklılaşmaktadır. Kaykısı artarken vuru torku düşmekte, buna karşı ise

verim azalmaktadır. Generatör tasarımının önemi bu noktada ön plana çıkar çünkü optimum düzeyde kayk, optimum düzeyde vurunu torkunu, verimi sağlar.



6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER

Sonlu elemanlar metodu, sorunların açıklığa kavuşturulmasında gerekli yol olarak baş göstermekte, ayrıca sonlu elemanlar metodunun çalışma bölümünde kazandırdığı rahatlıklar, karmaşık geometri, ekipman detaylarına göre kullanılabilirliği, cevap aşamasındaki değerler veya yazılım teknolojisinin ilerlemesiyle faydalandırdığı aktif ilerleme gibi pozitif yönlerinden ötürü sayısal analiz yöntemleri dahilinde şahsına doğru, detaylı yer kazandırmaktadır. Analitik yollarla elde edilecek ve açığa kavuşturulacak mühendislik sorunlarının az miktardaki mevcudiyeti, uygulamacıların ve çözüm sunucuların sayısal metotlara başvurmalarını, yollardan en idealini tercih etmelerini zorunlu eylemiştir. Mühendislikte genel zorunluluklardan olan optimizasyon, sonlu elemanlar metodunun da genelini meydana getirmekte, bu yol karmaşık mühendislik sorunlarını temele indirgeyerek, açıklığa kavuşturmak için analizi tamamlanması beklenen çoğu sorunda da sistemi en ideal duruma getirmektedir. Karmaşık mühendislik sorunlarının çözümlendirilmesi, teknolojiye gereksinimi meydana getirmektedir. Mühendislik sorunlarını açığa kavuşturup, geliştirilen yönelimler gibi sorunu tez zamanda çözmek de önemlidir. Doğruya kavuşmak için sağlanan mantıklı gerekler bütün olarak düşünülmelidir. Tez çalışması, sabit mıknatıslı (ferit) senkron generatördeki iyileştirmelerin, optimizasyonların sonlu elemanlar analiziyle doğru, hızlı metotlarla nasıl sağlanacağı örneği olup, ayrıca sonlu elemanlar metodunu uygulayan yazılımların çalışmasının güzel bir örneğidir.

Generatörlerin performansı kullanılan malzeme ve tasarım kriterleri dikkate alınarak değiştirilebilir. Tasarımcı, yüksek verimli, minimum maliyetli veya dengeli tasarım tercihinde bulunarak generatörün parametrelerini ayarlayabilir. Çalışmada düşük rüzgar hızlarına uygun 20 kutuplu, 2kW anma gücünde spoke tipi bir generatör tasarlanmıştır. Rotor fiziksel yapısı değiştirilerek hava aralığı dalga formunun sinüzoidal bir forma sahip olması sağlanmıştır. Yapılan Fourier analizleri sonucunda ilk tasarımda 5. ve 7. harmoniğin baskın olduğu ve sırasıyla 9,83 ve 10,01'lik yüzde harmonik oranına sahip olduğu görülmüştür. Hava aralığı dalga formu sinüse daha yakın olan Tasarım B'de ise yüzde harmonik oranı 5. ve 7. harmonikler için sırasıyla 3,55 ve 3,52 değerinde kalmıştır.

Yüksek lisans tezinin amacı itibariyle, tasarımı gerçekleştirilen spoke tipi sabit mıknatıslı senkron generatörün tamamlanan optimizasyon çalışmaları ile uzay harmoniklerinde kayda değer oranda iyileşme gerçekleştirilmiş ve generatörün verimi artırılmıştır.

Çalışmanın hazırlanması sırasında pek çok yerli ve yabancı kaynak irdelenmiş olup, incelenen ve de alıntılar yapılan kaynaklar derlenerek sentez edilmiş ve tüm veriler

yorumlanarak yüksek lisans tezi çalışması tamamlanmıştır. Tez yazımı aşamasında kullanılan paket yazılım programının ne yazık ki ülkemizde çok fazla tercih edilmemesi, yerli kullanıcı kitabı gibi eksiklerin olması, ayrıca ferit nüve ile ilgili uygulamaların yine ülkemizde yok denecek az olması, generatör tasarımı anlamında ülkemizde literatürel olarak dış dünyaya karşı daha zayıf kaldığının kanıtıdır. Hazırlanan yüksek lisans tezinin, ülkemizde bundan sonraki çalışmalara örnek olması açısından faydalı olacağını ümit ederek, spoke tipi olarak adlandırılan rotora dik olarak konumlandırılmış mıknatıslardan oluşan sistemlerde; uzay harmoniği iyileştirmelerine daha fazla katkıda bulunacak çalışmaların gerçekleştirilmesi hususu temenni edilmektedir. Ayrıca; çift statorlu sistemler veya hibrit olarak adlandırılan farklı mıknatıs çeşitlerinin yer aldığı spoke tipi tasarımlarda gerçekleştirilecek tasarım ve optimizasyonların, harmonik azaltımlarının gerçekleştirilerek geleceğe ışık tutması açısından faydalı olacağı konusu önem arz etmektedir.

7. KAYNAKLAR

- [1] Şenyurt, Ö., Elektrik Tesislerinde Hızlı Fourier Dönüşümü ile Harmonik Analizinin Yapılması, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, 2006.
- [2] Başman, F., Elektrik Enerji Sistemlerinde Harmonik ve Filtreleme, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, 2006.
- [3] Buzcu, İ.E., Daimi Mıknatıslı Senkron Motorun Rotor Alan Yönlendirmeli Kontrolü ve Pasif Filtre ile Harmoniklerin Azaltılması, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, 2005.
- [4] Ozdemir, M.S., Dalcalı, A. and Ocak, C., Run of river Hydroelectric Power Plants and Turbine-Generators Used In These Power Plants, Journal of Engineering Sciences and Researches, vol. 2, no. 2, pp. 69-75, Oct. 2020.
- [5] Eriksson, S., Permanent Magnet Synchronous Machines, Energies 2019, Department of Engineering Sciences, Uppsala University, 2019.
- [6] Rahman, M.M., Kim, K.T., Hur, J., Design and Analysis of a Spoke Type Motor with Segmented Pushing Permanent Magnet for Concentrating Air-Gap Flux Density, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 49, No. 5, May 2013.
- [7] Jackson, A.L.R, Renewable energy vs. biodiversity: Policy conflicts and the future of nature conservation, Global Environmental Change, vol. 21, no. 4, pp. 1195-1208, October, 2011.
- [8] Sensoy, S., Demircan, M., Ulupınar, Y. ve Balta, İ., Türkiye İklimi, Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2008.
- [9] Seker, A., Yenilenebilir Enerji, Türkiye’de Yenilenebilir Enerji Potansiteli ve Yeşil Pazarlama ve Yenilenebilir Enerjinin Pazarlanması, Uluslararası Sosyal Araştırmalar Dergisi, Cilt: 9 Sayı: 46, Ekim 2016.
- [10] TEİAŞ, Yük Tevzi Dairesi Başkanlığı, Kurulu Güç Raporu, Ekim, 2020.
- [11] Terzioğlu, H., Arslan, M. Ve Demirok, H.D., Rüzgar Enerjisi İle Elektrik Üretimi, Mühendislik Alanında Araştırma Makaleleri (syf.219 - 241) Yayımcı: Gece Akademi, 2019.
- [12] Türkmenoğlu, V., Arslan, S., Yusufoglu, A., Fenercioğlu, A. ve Atasorkun, M., Neodyum Mıknatıslı Senkron Generatörlerde Tasarım Parametre Değişikliklerinin Generatör Verimine Etkisi , Journal of Advanced Technology Sciences, Cilt:5 Sayı:2 ISSN:2147-3455, pp.101-111, 2016.

- [13] Nagorny, A.S., Dravid, N.V., Jansen R. H. and Kenny, B.H., Design Aspects Of A High Speed Permanent Magnet Synchronous Motor/Generator For Flywheel Applications, In Proc. IEEE Int. Conf. Elect. Mach. Drives, Pp. 635–641, May 2010.
- [14] Bhuiyan, N.A., McDonald, A., Assessment of the Suitability of Ferrite Magnet Excited Synchronous Generators for Offshore Wind Turbines, EWEA Offshore 2015, Copenhagen, Denmark, 2015.
- [15] De Gennaro, M. and others, Designing, prototyping and testing of a ferrite permanent magnet assisted synchronous reluctance machine for hybrid and electric vehicles applications, Sustainable Energy Technologies and Assessments 31, pp. 86–101, 2019.
- [16] Ozdemir, M.S., Ocak, C. and Dalcı, A., Permanent Magnet Wind Generators: Neodymium vs. Ferrite Magnets, 2021 3rd International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA), 2021, pp. 1-6.
- [17] Rahman, M.M, Hur, J., Design and Optimization of Neodymium Free Spoke-Type Motor with Segmented Wing Shape Pm, IEEE Transactions on Magnetics, 2013.
- [18] Mallinson, J.C., One-sided fluxes - a magnetic curiosity, IEEE Trans. Magn., vol. 9, no.4, pp. 678-682, Dec. 1973.
- [19] Zhu, Z.Q. and Howe, D., Instantaneous magnetic field distribution in brushless permanent magnet DC Motors, part 3: effect of stator slotting, IEEE Trans. Magn., vol. 29, no.1, pp.143-151, Jan. 1993.
- [20] Zhu, M., Zeng, P. and others, Analytical model of a dual-stator spoke-type permanent magnet synchronous machines accounting for tooth-tips, Electric Power Applications, 2022.
- [21] Seok, C., Choi, H. and Seo, J., Design and analysis of a novel spoke-type motor to reduce the use of rare-earth magnet materials, Electric Power Applications, 2021.
- [22] Li, H., Chen, Z., Overview of different wind generator systems and their comparisons, IET Renewable Power Generation, Vol.2. Issue.2, pp.123-138, June 2008.
- [23] Patel, M.R., Wind and Solar Power Systems, CRC Press, New York, 1999.
- [24] Di Tommaso, A.O., Miceli, R., Galluzzo, G.R., Trapanese, M., Efficiency Maximization of Permanent Magnet Synchronous Generators Coupled to Wind Turbines, IEEE Power Electronics Specialists Conference, Orlando, FL, USA, June 2007.
- [25] Hossain, M.M., Ali, M.H., Future research directions for the wind turbine generator system, Renewable Sustainable Energy Rev. 49 (2015) 481–489, 2015.

- [26] Camm, E.H. et al., "Characteristics of wind turbine generators for wind power plants," 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting, pp. 1-5, Calgary, AB, Canada, 2009.
- [27] Polinder, H., Ferreirara, J.A., Jensen, B.B., Abrahamsen, A.B., Atallah, K, and McMahon, R.A., "Trends in Wind Turbine Generator Systems", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol.1, No. 3, pp. 174-185, 2003.
- [28] Goudarzi, N., Zhu, W.D., A Review of the Development of Wind Turbine Generators Across the World, International Mechanical Engineering Congress & Exposition, pp. 1-9, Houston, USA, November 9-15, 2012.
- [29] Tınığ, N.S., Aksoy, İ. ve Sahin, Y., Rüzgâr Türbinlerinde Kullanılan Sabit Mıknatıslı Senkron Generatörün Güç Kontrolünde Uzay Vektörü PWM ve Histerezis Akım Kontrolü Tekniklerinin Karşılaştırılması, Eleco 2014 Elektrik – Elektronik – Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu, syf. 56 – 61, Bursa, Kasım 2014.
- [30] Ozdemir, M.S., Ocak, C., Dalcali, A., Permanent Magnet Wind Generators: Neodymiumvs. Ferrite Magnets, 2021 3rd International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA), 2021.
- [31] Uyar, M.,Gençoğlu, M.T. ve Yıldırım, S., Değişken Hızlı Rüzgar Türbinleri İçin Generatör Sistemleri, Fırat Üniversitesi.
- [32] Furlani, E. P.,Permanent Magnet And Electromechanical Devices, Academic press.:513, (1996).
- [33] Öner, Y., Sürekli Mıknatıslı DC Motor ile Tahrik Edilen Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatörün Çıkış Geriliminin Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, 2009.
- [34] Ross, C., Aspects of Permanent Magnet Machine Design, Illinois University, 2011.
- [35] Afinowi, I.A.A.,Zhu, Z.Q., Guan, Y., Mipo, J.C. and Farah, P., "Performance analysis of switched-flux machines with hybrid NdFeB and ferrite magnets" 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Hangzhou - China, 22-25 Oct. 2014.
- [36] Strnat, K. J.,Modern Permanent Magnets for Applications in Electro-Technology, IEEE, Volume 78, Number 6, pp. 923, June 1990.

- [37] Vural, L., Sert Ferit ve NdFeB Tipi Mıknatısların Karakterizasyonu ve Tersinir Olmayan Kayıpların Yapı Üzerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2010.
- [38] Ormerod, J., Permanent Magnet Material Options: Why \$/kg And (BH)_{max} Are Misleading Metrics, Senior Technology Advisor Magnet Applications, Inc. , Magnetics 2018, The International Forum on Magnetic Applications, Technologies&Materials, Orlando, USA, February, 2018.
(<https://www.magnetapplications.com/content/upload/files/Presentation%20-%20Magnetics%202018.pdf>) (Erişim Tarihi: 18.11.2021).
- [39] Porselvi, T., Srihariharan , M. K, Ashok.J, Ajith Kumar. S, Selection of Power Rating of an Electric Motor for Electric Vehicles. Proceedings of the IJESC, 2017, Volume 7 Issue No.4.
- [40] De Santiago, J. et al., Electrical motor drivelines in commercial all electric vehicles: A review, IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 61, no. 2, pp. 475–484, Feb. 2012.
- [41] Pellegrino, G., Vagati, A., Guglielmi, P., and Boazzo, B., Performance comparison between surface mounted and interior PM motor drives for electric vehicle application, IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 59, no. 2, pp. 803–811, Feb. 2012.
- [42] Chu, S., Critical materials strategy, U.S. Dept. Energy (DOE), Washington, DC, USA, Dec. 2011.
- [43] <https://tradingeconomics.com/commodity/neodymium> (Erişim Tarihi: 08.06.2022).
- [44] <https://www.bunting-berkhamsted.com/ferrite-magnet-price-concerns/> (Erişim Tarihi: 08.06.2022).
- [45] <https://www.indexbox.io/> (Erişim Tarihi: 08.06.2022).
- [46] Dorrel, D., Parsa, L., and Boldea, I., Automotive electric motors, generators, and actuator drive systems with reduced or no permanent magnets and innovative design concepts, IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 61, no. 10, pp. 5693–5695, Oct. 2014.
- [47] Morimoto, S., Ooi, S., Inoue, Y., and Sanada, M., Experimental evaluation of a rare-earth-free PMASynRM with ferrite magnets for automotive applications, IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 61, no. 10, pp. 5749–5756, Oct. 2014.
- [48] Cai, H., Guan, B., and Xu, L., Low-cost ferrite PM-assisted synchronous reluctance machine for electric vehicles, IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 61, no. 10, pp. 5741–5748, Oct. 2014.

- [49] Liu, C., Lei, G., Ma, B., Wang, Y., Guo, Y., Zhu, J., Development of a New Low-Cost 3-D Flux Transverse Flux FSPMM With Soft Magnetic Composite Cores and Ferrite Magnets, IEEE Transactions on Magnetics, Volume: 53, Issue: 11, Nov. 2017.
- [50] Kazan, F.A., Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorun Kontrolü, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Konya, 2009.
- [51] Özçira, S., Sabit Mıknatıslı Senkron Motorun Kontrol Yöntemleri ve Endüstriyel Uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, Yıldız Teknik Üniversitesi, 2007.
- [52] Eriksson, S., Bernhoff, H., Rotor design for PM generators reflecting the unstable neodymium price, International Conference on Electrical Machines, pp. 1419-1423, 2012.
- [53] Petrov, I., Niemelä, M., Ponomarev, P., Pyrhönen, J., Rotor Surface Ferrite Permanent Magnets in Electrical Machines: Advantages and Limitations, IEEE Transactions on Industrial Electronics, volume:64, Issue:7, 2017.
- [54] Araz Kurnaz, H., Yılmaz, M., Elektrikli araçlar için mıknatıs oranı ve moment titreşimi azaltılmış yüksek verimli sürekli mıknatıslı senkron motor tasarım süreci ve gerçekleşmesi, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 35:2, 1089-1109, 2020.
- [55] Dalcalı, A., Çelik, E., Ocak, C., Investigation of the Effects of Permanent Magnet Materials Used in Spherical Actuator Rotor on the Machine Torque Characteristic And Magnetic Flux Density, European Workshop on Renewable Energy Systems, Antalya, 2012.
- [56] Glynn-Jones, P., Tudor, M.J., Beeby, S.P., White, N.M., An electromagnetic, vibration-powered generator for intelligent sensor systems, Sensors and Actuators A: Physical Volume 110, Issues 1–3, Pages 344-349, 1 February 2004.
- [57] Ashkezari, J.D., Khajerooshanaee, H., Niasati, M., Mojibian, M. J., Optimum design and operation analysis of permanent magnet-assisted synchronous reluctance motor, Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, Turk J Elec Eng & Comp Sci (2017) 25: 1894 – 1907, 2017.
- [58] Dalcalı, A., Ocak, C., Farklı Mıknatıs Malzemelerin Yüzey Mıknatıslı Doğrudan Tahrikli Sabit Mıknatıslı Senkron Motor Performansına Etkisi, Rating Acedemy – Journal of Awareness, 3:Özel, 217-224, 2018.

- [59] Şahin, M., Oğuz, Y. ve Tuğcu, H.Z., Güç Sistemlerinde Enerji Kalitesini Etkileyen Harmoniklerin İncelenmesi, 2014.
- [60] Vernet, F., Heliodore, F., Thomas J.L. and Poullain, S., Space Harmonics in Electrical Machines: Extended State-Space Model and Kalman Filter, Alstom T&D, PERT Department, 2003.
- [61] Arrillaga, J. ve Watson N.R., Power System Harmonics, Wiley, New York, A.B.D., 2003.
- [62] Grady, W.M. ve Santoso, S., Understanding Power System Harmonics, IEEE Power Engineering Review, Cilt 21, No 11, 8–11, 2001.
- [63] Stinicescu, R.B., Viarouge, P., Cros, J., Kamwa, I., A General Approach of Space and Time Harmonics Interactions in Induction Motors, IEEE Conference Paper · June 1999, 366-368.
- [64] Yacamini, R., Chang, S.C., Noise and Vibration from Induction Machines Fed from Harmonic Sources, IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 10, No. 2, pp 286- 292, 1995.
- [65] Cordier, J.A., Modelling space harmonics in induction machines for real-time applications, Munich Technical University, 2019.
- [66] Toliyat, H.A. and Sargolzaei, N., Comprehensive Method for Transient Modeling of Single-Phase Induction Motors Including the Space Harmonics, Electric Machines & Power Systems, 26(3), pp. 221-234, 1998.
- [67] Bayram, D., Mergen, A.F., Asenkron Makinada Zaman Harmoniğinin Kayıplara Etkisinin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile İncelenmesi, EMO, 2009.
- [68] Kindl, V., Hruska, K., Pechanek, R., Sobra, J., Skala, B., The Effect of Space Harmonic Components in the Air Gap Magnetic Flux Density on Torque Characteristic of a Squirrel-Cage Induction Machine, 17th European Conference on Power Electronics and Applications, Switzerland, 2015.
- [69] Valenzuela J. and Pontt J., Real-time interharmonics detection and measurement based on FFT algorithm, IEEE International Conference on Applied Electronics, Pilsen, Czech Republic, 2009.
- [70] Efe, S.B. and Kocaman B., Harmonic analysis of a wind energy conversion system with small-scale wind turbine, International Journal of Energy Applications and Technologies, 5(4), pp. 168–173, 2018.

- [71] Kocabaş D. ve Mergen, F., Asenkron Makinalarda Uzak Harmoniklerini Azaltmaya Yönelik Katkıları, 2006.
- [72] Çanakoğlu, A.İ. ve Özel, U., Asenkron Motorlarda Uzak Harmoniklerinin Yok Edilmesi İçin Yeni Bir Stator Oluk Tasarımı, 2018.
- [73] Yetgin, A.G., Turan, M., Çanakoğlu, A.İ., Asenkron Motorda Kaçak Akıları Azaltacak Yarıklı Dişli Yeni Bir Nüve Tasarımı, 2012.
- [74] İkizli, O., Elektrik Makinalarında Dağılıma, Kayıplar ve Isınmanın Hesapları, İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, 1962.
- [75] Ülgen, K., Özdamar, A., Büyüktuna, V. ve Özgener, Ö., "Rüzgar Güllerinin Güç ve Moment Faktörlerinin Hesabı", VI. Türk-Alman Enerji Sempozyumu Kitapçığı, s.451-462, İzmir, 21-24 Haziran 2001.
- [76] https://www.emo.org.tr/ekler/2095bad7034daef_ek.pdf (Erişim tarihi: 24.09.2022)
- [77] Kurt, Ü. Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Senkron Makinalar İçin Yeni Tasarım Modeli Geliştirme, Doktora Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, FBE, (2006).
- [78] Eklund, P., Design of a Ferrite Permanent Magnet Rotor for a Wind Power Generator, Uppsala Universitet, 2013.
- [79] Tarımer, İ., Bilgisayar Destekli Asenkron Motor Tasarımı, Politeknik Dergisi, 2005.
- [80] Arslan, S., Dalgıç Motorun Analitik, Sayısal, Performans Sonuçlarının Karşılaştırılması, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, syf. 403-415, 2016.
- [81] Firdaus, R., Norhisam, M., Sulaiman, F., Nirei M. and Wakiwaka H., Performance Comparison of Spoke and Hollow-Rotor Permanent Magnet Generator for Small Energy Harvesting Application, Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics Vol.23, No.3, 2015.
- [82] Jang, H., Cho, S., Lee, K.S., Oh, Y.J. and Lee, J., Design of Power Density Improvement by Applying Novel Shape of Slit and Notch to Outer Rib of Rotor of Spoke-type Permanent Magnet Synchronous Motor, The Open Electrical & Electronic Engineering Journal, pp. 75-85, 2018.
- [83] Nath, B., Fundamentals of Finite Elements for Engineers, 1974.
- [84] Arıkan, M., Sahir, A., Sonlu Elemanlar Metodunun Mühendislikteki Uygulamaları, Makine Mühendisleri Odası Arşivi, 2011.

- [85] Kayımoğlu, G., Sonlu Elemanlar Metodu ile Evolvent Düz Disli Çarkların Dis Kökü Gerilmelerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2010.
- [86] Ho, S.L. and Fu, W.N., Review and future application of finite element methods in induction motors, *Electric Machines & Power Systems*, 26(2) (1998) pp. 111–125, 1998.
- [87] Ocak, C., Design and performance comparison of four-pole brushless dc motors with different pole/slot combination, *The International Journal of Energy and Engineering Sciences*, 3(3), pp. 69-78, 2018.
- [88] Dalcalı, A., Akbaba, M., Optimum pole arc offset in permanent magnet synchronous generators for obtaining least voltage harmonics, *Scientia Iranica*, 24(6), pp. 3223-3230.
- [89] Dalcalı, A., Cogging torque analysis in permanent magnet synchronous generators using finite elements analysis, *Research Article*, 2020.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler		
Adı Soyadı	Mehmet Semih ÖZDEMİR	
Doğum Yeri		
Doğum Tarihi		
Uyruğu		
Telefon		
E-Posta Adresi		
Web Adresi		

	Eğitim Bilgileri
	Lisans
Üniversite	Yıldız Teknik Üniversitesi
Fakülte	Elektrik – Elektronik
Bölümü	Elektrik Mühendisliği
Mezuniyet Yılı	2013

	Yüksek Lisans
Üniversite	Bandırma Onyediy Eylül Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri
Anabilim Dalı	Elektrik – Elektronik Mühendisliği
Programı	Elektrik – Elektronik Mühendisliği

Makale ve Bildiriler