

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**HAVACILIK UYGULAMALARI İÇİN EMNİYET KRİTİK DAİMİ
MİKNATISLI ALTERNATÖR TASARIMI VE ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hüseyin ERSÖZ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2022

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**HAVACILIK UYGULAMALARI İÇİN EMNİYET KRİTİK DAİMİ
MİKNATISLI ALTERNATÖR TASARIMI VE ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Hüseyin ERSÖZ
(504191024)**

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Derya Ahmet KOCABAŞ

HAZİRAN 2022

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 504191024 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Hüseyin ERSÖZ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "HAVACILIK UYGULAMALARI İÇİN EMNİYET KRİTİK DAİMİ MIKNATISLI ALTERNATÖR TASARIMI VE ANALİZİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Derya Ahmet KOCABAŞ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Dr. Öğr. Üyesi Duygu Bayram KARA**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. İbrahim ŞENOL
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **03 Haziran 2022**
Savunma Tarihi : **28 Temmuz 2022**





Değerli Aileme,



ÖNSÖZ

Lisansüstü eğitimim boyunca tez danışmanım olarak bana yol gösteren, vakit ayıran, bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen değerli hocam Doç. Dr. Derya Ahmet KOCABAŞ'a öncelikli saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam boyunca bana her türlü desteği sağlayan TUSAŞ Motor Sanayii'ne ve kıymetli çalışma arkadaşlarıma,

Hayatımın her alanında yanımda olan, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen çok değerli babam Şakir ERSÖZ'e, annem Yasemin ERSÖZ'e kardeşim Duru ERSÖZ'e, ablam, yol göstericim ve meslektaşım Elk. Müh. Büşra ERSÖZ'e sonsuz sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 2022

Hüseyin ERSÖZ
Elektrik Mühendisi



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı	2
1.2 Literatür Araştırması	3
2. HAVA ARAÇLARINDA ELEKTRİKSEL GÜÇ ÜRETİM SİSTEMİ.....	7
2.1 SMA'ların Hata Modları	9
2.1.1 Birincil hatalar.....	9
2.1.1.1 Açık devre hataları	9
2.1.1.2 Kısa devre hataları.....	10
2.1.2 İkincil hatalar	11
2.1.2.1 Sürekli mıknatıslar	11
3. ELEKTRİKSEL GÜÇ ÜRETİM SİSTEMİ ALTERNATÖRLERİ.....	15
3.1 Klasik Alternatör Tasarımı	15
3.2 Daimi Mıknatıslı Alternatör	17
3.2.1 Mıknatıs destekli senkron relüktans makineler.....	21
3.2.1.1 MD-SnRM rotor tasarım parametreleri.....	23
3.2.1.2 Kutup sayısı.....	23
3.2.1.3 Bariyer sayısı.....	24
3.2.1.4 Bariyer şekilleri.....	24
3.2.1.5 Bariyer köprüsü kalınlığı.....	25
3.2.1.6 Akı köprüsü kalınlığı.....	25
3.2.2 Gömülü mıknatıslı senkron alternatörler	26
3.2.2.1 Endüklenen gerilim (zıt-emk) ve moment	29
3.2.3 Yüzeysel mıknatıslı senkron alternatörler	30
4. EGÜS ALTERNATÖRÜ TASARIMLARI.....	33
4.1 Gömülü Mıknatıslı Makine	34
4.2 Mıknatıs Destekli Senkron Relüktans Makine.....	40
4.3 Yüzeysel Mıknatıslı Makine	45
4.4 Karşılaştırma	50
5. HATA TOLERANSINI ARTIRMAK İÇİN TASARIM ÇÖZÜMLERİ.....	51
5.1 Faz Sayısı	51
5.2 Dış Ucu Kalınlığı ve Oluk Açıklığı.....	54
5.3 Rotor Kılıfı ve Mıknatıs Miktarı	57

5.4 Manyetik Oluk Kaması.....	60
5.5 En İyileştirilmiş Tasarım	64
5.6 Sonuçların Yorumlanması	68
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	71
ÖZGEÇMİŞ.....	77



KISALTMALAR

SMA	: Sürekli Mıknatıslı Alternatör
AA	: Alternatif Akım
DA	: Doğru Akım
YMM	: Yüzey Mıknatıslı Makine
GMM	: Gömülü Mıknatıslı Makine
SnRM	: Senkron Relüktans Makine
SEY	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
mmk	: Manyeto Motor Kuvveti
EGÜS	: Elektriksel Güç Üretim Sistemi



SEMBOLLER

F	: Manyeto Motor Kuvveti
H	: Manyetik Alan Şiddeti
e	: Elektro Motor Kuvveti
X	: Kaçak Reaktans
L_d, L_q	: Eksen Endüktansları
I_k	: Kısa Devre Akımı
η	: Verim



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1 : Uygulama isterleri	33
Çizelge 4.2 : SmCo ₅ manyetik büyüklükler.	35
Çizelge 4.3 : Soğutma tipine göre akım yoğunluğu.	40
Çizelge 4.4 : Topoloji karşılaştırması.	50
Çizelge 5.1 : Hs0 optimizasyon sonuçları.	55
Çizelge 5.2 : Bs0 optimizasyon sonuçları.	56
Çizelge 5.3 : Mıknatıs miktarını azaltmaya yönelik yapılan değişiklikler.	59
Çizelge 5.4 : Manyetik büyüklükler.	59
Çizelge 5.5 : Kayıplar ve verim.	67
Çizelge 5.6 : İlk tasarım ile iyileştirilmiş tasarım karşılaştırması.	69



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Emniyet kritik alternatör için hedef motorlar	2
Şekil 2.1 : Elektrik enerjisi ihtiyacının gelişimi [11].....	7
Şekil 2.2 : Güç sistemi mimarisi.....	8
Şekil 2.3 : 3 Fazlı, dengeli ve simetrik sistemin akım ve gerilimi.....	9
Şekil 2.4 : Açık devre hatası durumunun akım ve gerilim üzerine etkisi.....	10
Şekil 2.5 : Normal çalışan bir sistemin kısa devre sonrasında akım ve gerilim dalga şekilleri.	10
Şekil 2.6 : Sürekli mıknatıslı rotorlar	11
Şekil 2.7 : Mıknatıslanma eğrisi	12
Şekil 2.8 : NdFeB ve SmCo mıknatıs enerjilerinin sıcaklığa bağlı değişimi	13
Şekil 3.1 : Sürekli mıknatıslı alternatörün normal çalışmada, rezistif ve indüktif yük altındaki fazör diyagramı[1].....	18
Şekil 3.2 : Sürekli mıknatıslı alternatörün sürekli hal kısa devre durumunda fazör diyagramı[1].	20
Şekil 3.3 : Geleneksel laminasyonlu MD-SnRM rotoru.....	22
Şekil 3.4 : Eksenel laminasyonlu MD-SnRM rotoru.....	23
Şekil 3.5 : Rotor akı bariyeri sayısı (a): bir, (b): iki, (c): üç, (d): dört.....	24
Şekil 3.6 : Rotor bariyer şekilleri (a): yuvarlak, (b): köşeli, (c): hibrit, (d): kesik uç.....	25
Şekil 3.7 : Mekanik dayanımı yüksek akı bariyeri geometrisi	26
Şekil 3.8 : GMM için 4 farklı rotor yapısı.	27
Şekil 3.9 : Gömülü mıknatıslı alternatörün d-q eksen takımı ve normal çalışma durumunda fazör diyagramı (stator direnci ihmal edilmiştir.) [16].	28
Şekil 3.10 : YMM rotor yapıları.	31
Şekil 4.1 : GMM 2B görünüm.	34
Şekil 4.2 : SmCo ₅ BH eğrisi [17].....	35
Şekil 4.3 : M235-35A BH eğrisi.....	36
Şekil 4.4 : GMM endüklenen maksimum gerilim ve harmonik dağılımı.....	36
Şekil 4.5 : GMM akı yolları ve akı yoğunluğu dağılımı.....	37
Şekil 4.6 : GMM vuru momentleri.	38
Şekil 4.7 : GMM endüklenen minimum gerilim.	38
Şekil 4.8 : GMM rölanti devir, maksimum güç.....	39
Şekil 4.9 : GMM kısa devre akımı.....	39
Şekil 4.10 : SnRM 2B görünüm.	40
Şekil 4.11 : Dummy slot yapısı.	41
Şekil 4.12 : SnRM endüklenen maksimum gerilim ve harmonik dağılımı.	42
Şekil 4.13 : SnRM akı yolları ve akı yoğunluğu dağılımı.	42
Şekil 4.14 : SnRM vuru momentleri.....	43
Şekil 4.15 : SnRM endüklenen minimum gerilim.	44
Şekil 4.16 : SnRM rölanti devir, maksimum güç.	44
Şekil 4.17 : SnRM kısa devre akımı.	45
Şekil 4.18 : YMM 2B görünüm.....	46

Şekil 4.19 : YMM endüklenen maksimum gerilim ve harmonik dağılımı.....	47
Şekil 4.20 : YMM akı yolları ve akı yoğunluğu dağılımı.....	47
Şekil 4.21 : YMM vuru mu momenti.	48
Şekil 4.22 : YMM minimum gerilim.	48
Şekil 4.23 : YMM rölanti devir, maksimum güç.....	49
Şekil 4.24 : YMM kısa devre akımı.....	49
Şekil 5.1 : 2 adet 3 faz çıkışlı alternator şeması.....	52
Şekil 5.2 : Tekil hata durumu devre şeması.....	53
Şekil 5.3 : Boşta çalışmada fazlarda endüklenen maksimum gerilim.	53
Şekil 5.4 : 2 adet 3 fazlı sargıda oluşan kısa devre akımı.....	54
Şekil 5.5 : Oluk geometrisi.	54
Şekil 5.6 : Hs0 optimizasyonu sonrası oluşan kısa devre akımı.....	55
Şekil 5.7 : Bs0 optimizasyonu sonucu oluşan kısa devre akımı.....	57
Şekil 5.8 : Rotor kılıfı.	58
Şekil 5.9 : BH eğrisi [17].	59
Şekil 5.10 : Mıknatıs miktarını azaltmaya yönelik yapılan değişikliklerden sonra oluşan kısa devre akımı.....	60
Şekil 5.11 : Somaloy 700 HR3P BH eğrisi[22].	61
Şekil 5.12 : Manyetik oluk kaması kullanıldığında oluşan oluk kaçak endüktansı... ..	62
Şekil 5.13 : Oluk kaması eklenmiş model.	63
Şekil 5.14 : Manyetik oluk kaması sonrası oluşan kısa devre akımı.....	63
Şekil 5.15 : En iyileştirilmiş tasarım 3B görünüm.....	64
Şekil 5.16 : Endüklenen en yüksek gerilim.	64
Şekil 5.17 : Manyetik alan yoğunluğu dağılımı.....	65
Şekil 5.18 : Endüklenen en düşük gerilim.	65
Şekil 5.19 : (a) Rölanti devir yük akımı; (b) Rölanti devir güç; (c) En yüksek devir yük akımı; (d) En yüksek devir güç.....	66
Şekil 5.20 : Toplam kayıplar (a) Rölanti devir; (b) En yüksek devir.....	67
Şekil 5.21 : Kısa devre anında mıknatıs demanyetizasyonu.....	68

HAVACILIK UYGULAMALARI İÇİN EMNİYET KRİTİK DAİMİ MIKNATISLI ALTERNATÖR TASARIMI VE ANALİZİ

ÖZET

Havacılık motorları, hava araçlarına itki veren temel bileşen olmanın yanında barındırdıkları elektriksel güç üretim sistemleri ile platformun ihtiyaç duyduğu elektrik enerjisinin üretilmesini sağlar. Hava araçlarında güç üretim ihtiyacı, içten yanmalı motorun başlatılması için bir elektrik motoru olan marş motorlarının kullanılması ile başlamıştır. Zaman içerisinde ilerleyen teknoloji ile birlikte hava araçlarına iç aydınlatma, ısıtma ve haberleşme gibi elektikle çalışan sistemler eklenmeye başlanmıştır. Bunun yanında motor ve platformda hidrolik, mekanik ve pnomatik sistemler yerine daha yüksek verimli olan elektrikli sistemler kullanılmaya başlanmıştır. Hava araçlarının ihtiyaç duyduğu elektrik enerjisi gelişen teknoloji ile beraber günden güne artmakta ve elektriksel güç üretim sistemlerinin güç yoğunluğu giderek artmaktadır. Yüksek güç yoğunluğunu sağlamak adına elektriksel güç üretim sistemlerinde sürekli mıknatıslı alternatörler tercih edilir.

Bir hava aracının havada kalabilmesi için elektrik enerjisi gereklidir ve bu enerjiyi sağlayan güç üretim sisteminin en zorlu koşullarda bile aktif olması ve hata durumlarında platforma zarar vermemesi kritik bir öneme sahiptir. Bu sebeple yüksek güç yoğunluğunun yanında elektriksel güç üretim sistemlerinin hata toleransının yüksek olması gereklidir. Böylece olası bir hata durumunda içten yanmalı motor çalışmasına devam etmeli ve platform görev süresini tamamlamalıdır. Ayrıca hata anında ve sonrasında motorda ve platformda oluşacak tahribat en düşük seviyede tutulmalıdır.

Bu çalışma kapsamında hata toleransı en yüksek olan sürekli mıknatıslı alternatör topolojisini belirlemek adına aynı tepe seviyede isterlere sahip gömülü mıknatıslı generatör, mıknatıs destekli senron relüktans makine ve yüzey mıknatıslı generatör tasarımları gerçekleştirilmiş olup, emniyet kritiklik, ağırlık ve üretilebilirlik bakımından karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda hava aracı güç sistemlerinde kullanılması en uygun olan topoloji belirlenmiş ve hata toleransını artırmaya yönelik tasarım çözümleri bu topolojiye uygulanmıştır.

Alternatör analitik tasarım ve elektromanyetik analizleri sonlu elemanlar paket programları olan JMAG ve ANSYS MAXWELL ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın son bölümünde en iyileştirilmiş tasarımın rölanti ve maksimum devirdeki performansı elde edilmiştir. Ayrıca 3 boyutlu analiz ile demir ve bakır kayıpları çıkarılıp verim hesabı yapılmıştır. Ek olarak tasarımı yapılan hata toleransı yüksek, emniyet kritik alternatörü geliştirmeye yönelik öneriler sunulmuştur.



DESIGN AND ANALYSIS OF SAFETY CRITICAL PERMANENT MANGET ALTERNATOR FOR AVIATION APPLICATIONS

SUMMARY

In addition to being the main component that propels aircraft, aviation engines provide the electrical energy needed by the platform with the electrical power generation systems they contain. The need for power generation in aircraft started with the use of starter motor, which is an electric motor to start the internal combustion engine. With the advancing technology over time, electrical systems such as interior lighting, heating and communication have been added to aircraft. In addition, more efficient electrical systems have been used instead of hydraulic, mechanical and pneumatic systems in the engine and platform. The electrical energy required by aircraft is increasing day by day with the developing technology and the power density of electrical power generation systems is increasing. In order to provide high power density, permanent magnet alternators are preferred in electrical power generation systems.

Electrical energy is required for an aircraft to stay in the air, and it is critical that the power generation system that provides this energy is active even in the most challenging conditions and does not damage the platform in case of any failures. For this reason, besides high power density, fault tolerance of electrical power generation systems must be high. Thus, in case of a possible fault, the internal combustion engine should continue to operate and the platform should complete its duty period. In addition, the damage to the engine and platform during and after the fault should be kept at the lowest level.

In order to realize the alternator design with high fault tolerance, which is the aim of the study, the alternator fault modes were examined first. Open-circuit faults and short-circuit faults can have great effects on the engine and platform. For this reason, it is evaluated within the scope of critical errors and classified as primary errors. Magnet errors, on the other hand, depend on operating and ambient conditions. Since only insulation measures can reduce the effects on the engine and platform, they are considered as non-critical faults and classified as secondary faults.

In this study, general operating principles, characteristics and design solutions to increase fault tolerance of electrical power generation system alternators used in aircraft are presented. Detailed information is given about permanenet magnet assisted synchronous reluctance machines, interior permanent magnet machines and surface mounted permanent magnet machines. In permanent magnet assisted synchronous reluctance machines and interior permanent magnet machines, permanent magnets are resistant to centrifugal forces at high speeds as they are inside the rotor core, and they produce reluctance torque due to the magnetic reluctance difference between q and d axis, but the harmonic amplitudes that distort the emf waveform are relatively higher. For this reason, the optimization of ferrous core materials between magnets and between magnets and air gap should be done meticulously, and additional design

measures are required to make the emf waveform approach sinusoidal form. In surface mounted permanent magnet machines, resistance to centrifugal forces at high speeds is provided by the rotor sleeve. The emf waveform is quite smooth. In addition, since the rotor core is thin, it is very advantageous in terms of weight.

In this study, in order to determine the permanent magnet alternator topology with the highest fault tolerance, interior permanent magnet generator, permanent magnet assisted synchronous reluctance generator and surface mounted permanent magnet generator designs with the same requirements were carried out and compared in terms of safety criticality, weight and manufacturability. As a result of the comparison, the most suitable topology to be used in aircraft power systems was determined and design solutions to increase fault tolerance were applied to this topology. For example, by increasing the number of phases, the power outputs are backed up as 2, 3 phases with the same characteristics, the outputs are electrically and magnetically isolated from each other, the amount of magnets used and the air gap have been optimized, the winding structure has been changed, the stator tooth geometry (tooth tip thickness and slot opening) has been optimized and a magnetic slot wedge is added to the slot openings and its thickness is optimized. Working conditions were analyzed for the optimized design that emerged after the applied design solutions. In addition, loss and demagnetization analyzes were carried out.

Analytical design and electromagnetic analysis of the alternator were carried out with finite element package programs JMAG and ANSYS MAXWELL. In the last part of the study, the performance of the optimized design at idle and maximum speed was obtained. In addition, iron and copper losses were calculated by 3D analysis and yield calculations were made. In addition, suggestions are presented for the development of the designed safety critical alternator with high fault tolerance.

1. GİRİŞ

Havacılık endüstrisindeki teknolojik gelişmeler ile birlikte hava araçlarında kullanılan sistemleri iyileştirilerek daha verimli platformlar oluşturmak hedeflenmektedir. Bunun için elektrikli sistemlerin yoğunlukta olduğu hava araçları geliştirilmeye başlanmıştır. Daha verimli güç kaynağı sistemleri, hidrolik ve pinomatik eyleyiciler yerine daha yaygın elektrikli eyleyici kullanımı gibi iyileştirmeler hava araçlarında boyut ve ağırlıkların azalmasına, bunun yanında daha verimli ve güvenilir sistemlerin ortaya çıkmasına olanak sağlamaktadır. Güç üretim sistemlerinde kullanılan eski tip pençe kutuplu, uyarması fırça ve bilezik grubu ile sağlanan elektrik makinalarındaki düşük verim ve güvensiz sistemler yerine uyarması sürekli mıknatıslar ile sağlanan görece daha yüksek güç yoğunluğuna sahip yüksek hızlı elektrik makinalarının kullanımı tercih değil zorunluluk haline gelmiştir.

Hava araçlarındaki katı emniyet isterleri ile birlikte hata toleransı yüksek, emniyet kritik alternatörler üzerindeki çalışmalar yoğunlaşmıştır. Sürekli mıknatıslı makineler için emniyet önemli bir parametredir, bunun ana sebebi sürekli mıknatıslar ile sağlanan uyarmanın herhangi bir hata durumunda kesilememesidir, çünkü alternatör mili doğrudan veya dişli kutusu, kayış kasnak sistemi gibi bir ara bağlantı yapısı ile içten yanmalı motor miline bağlıdır. Alternatörde meydana gelen olası bir hatada, havadaki platformun motoru çalışmaya devam ettiği için alternatör de gerilim üretmeye devam eder ve bu durum motor ve platformun geri kalanı için büyük tehdit oluşturmaktadır. Alternatörün hata durumunda sistemden ayrılması ile de platform enerjisi kesilmiş olur ve motor kontrol sistemi (FADEC) platform bataryasından beslenmeye başlar. Yani motor batarya bitene kadar çalışır ve batarya bittikten sonra susar.

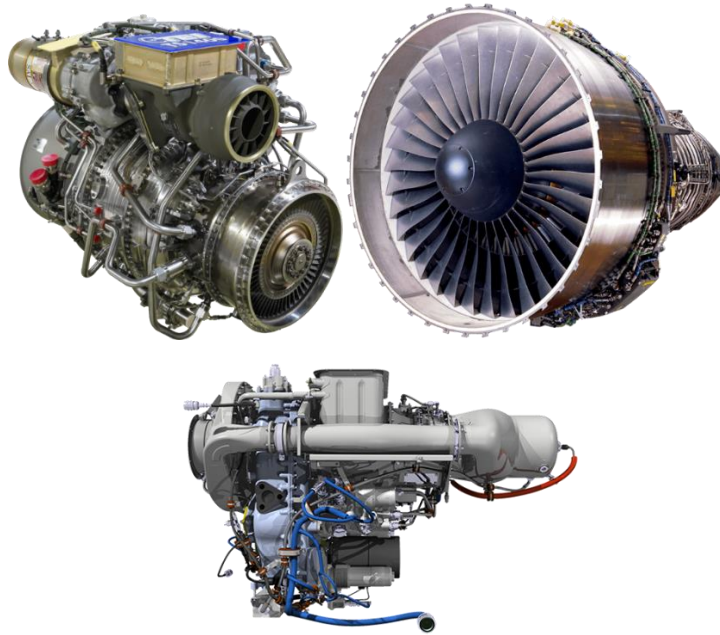
Emniyet kritik alternatörler hata durumunda bile güç vermeye yani sürekli halde çalışmaya devam ederler. Bu hedefe ulaşmak için emniyet kritik alternatör tasarımları yapılırken aşağıdaki hususlar üzerinde durulmalıdır:

- Fazlar arasındaki elektriksel izolasyon
- Fazlar arasındaki manyetik izolasyon

- Kısa devre akımının limitlenmesi
- Fazların fiziksel olarak ayrılması
- Fazlar arasında etkili termal yalıtım
- Faz sayısı

1.1 Tezin Amacı

Bu çalışmada özellikle yerli uygulamalarda kullanılması hedeflenen ve uçuş güvenliği açısından emniyet kritik olarak tabir edilen güvenlik seviyesinde olması beklenen daimi mıknatıslı alternatörler için güç yoğunluğu ve hata toleransı açısından geliştirme sağlamak ve buy olla bu alternatörlerin tasarımına katkı yapılması, elde edilen topolojinin en uygunlaştırılması hedeflenmiştir. Bu çalışmada tasarımı gerçekleştirilen emniyet kritik alternatör için hedef motorlar TEI-TS1400, PW4000-100 ve RR-M250 TURBOSHAFT motorlarıdır. Çalışmada öncelikli olarak, belirlenen bir havacılık motoruna ait isterler çerçevesinde uygun yapının belirlenmesi amacıyla farklı topolojilerin analitik tasarımları ve sonlu elemanlar yöntemi (SEY) tabanlı analiz programları olan Maxwell ve JMAG yardımı ile modellenmesi gerçekleştirilmiştir. İkinci adımda ise analiz sonuçları karşılaştırılarak en uygun topoloji belirlenmiştir. Son olarak belirlenen topolojinin emniyet kritiklik kapsamında modifikasyonu ve en iyileştirme çalışması gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1.1 : Emniyet kritik alternatör için hedef motorlar.

1.2 Literatür Araştırması

Shitao Wu, Qingguang, Qing Li, Xiangsheng Liu, Hailin Zhang ve Li Lin tarafından yapılan “Design of Aviation High Impedance Permanent Magnet Synchronous Generator” isimli çalışmada uygun bir stator yapısıyla farklı rotor konfigürasyonlarının kısa devre akımına olan etkileri incelenmiştir. Yüzey mıknatıslı, gömülü mıknatıslı ve çubuk mıknatıslı rotorların karşılaştırıldığı çalışmada yüzey mıknatıslı rotorun optimum sonucu verdiği görülmüştür. Ayrıca, aksel uzunluk, stator iç çapı, hava aralığı kutup örtme faktörü ve oluk açıklığı gibi stator geometrik ölçülerinin ve sarım sayısı gibi sargı özelliklerinin kısa devre akımına olan etkileri incelenmiş olup oluk açıklığı ve stator iç çapının kısa devre akımına en çok etki eden parametreler olduğu yapılan analizlerle gösterilmiştir. Kısa devre durumunda oluşan yüksek akımların mıknatısların ürettiği manyetik alana ters bir manyetik alan oluşturduğunu vurgulayan çalışmada kısa devre durumunda mıknatısların demagnetizasyona uğramaması gerektiği belirtilmiştir. Çalışmanın sonunda tasarlanan optimum generatorün prototipi üretilmiştir. Yapılan testlerde kısa devre akımının nominal akıma oranı yaklaşık 2.03 olarak elde edilmiştir [1].

Nick J. Baker, Daniel J. B. Smith, Mehmet C. Kulları ve Simon Turvey tarafından yapılan “Design and Performance of a Segmented Stator Permanent Magnet Alternator for Aerospace” isimli çalışmada oluk kamalarına sahip sürekli mıknatıslı bir alternatör havacılığa uygun olarak daha az titreşimli ve daha az demir kayıplarına sahip olacak şekilde yeniden tasarlanmıştır. Üretim kolaylığı açısından stator dişleri segmentler halinde üretildikten sonra her dişe sargı yerleştirilmiştir. Daha sonra birleştirilen segmentler statoru oluşturmuştur. Bu sayede oluk doluluk oranının artırılması hedeflenmiştir. Oluk kamalarına sahip olan örnek alternatörde stator saclarını birleştirmek için kullanılan diş çakma yönteminin manyetik malzeme üzerinde olumsuz etki yarattığı tespit edilmiştir. Yapılan yeni tasarımda stator sacları yapışkan epoksi benzeri polimer bir malzeme ile birleştirilmiştir. Bu sayede malzemeden en yüksek seviyede faydalanılmış olup oluk kamalarına gerek kalmadığı aktarılmıştır [2].

M. C. Kulan, N. J. Baker ve S. Turvey tarafından yapılan “Design and Analysis of a Fault Tolerant Permanent Magnet Alternator for Aerospace” isimli çalışmada endüktansı artırmak amacıyla oluk kaması denenmiş ve kısa devre akımı önemli

ölçüde azaltılmıştır. Güç çıkışlarını fiziksel olarak yalıtım için dengesiz sargı tasarımı yapılan çalışmada ilk tasarımda doğrultulmuş gerilimde yüksek dalgalılık gözlenmiştir. Oluk kaması optimizasyonu ile bu dalgalılık 12% oranında azaltılmıştır. Yapılan analizlerde nominal hız ve boşa çalışma koşulunda 28 oluk 18 kutuplu tasarımın 24 oluk 20 kutuplu tasarımdan demir kayıpları bakımından daha iyi sonuçlar verdiği gösterilmiştir [3].

Puvan Arumugam tarafından yapılan “Design Optimization on Conductor Placement in the Slot of Permanent Magnet Machines to Restrict Turn-Turn Short-Circuit Fault Current” isimli çalışmada sürekli mıknatıslı alternatörde (SMA) oluşabilecek sarımlar arası kısa devre akımını en aza indirmek için hem analitik hem de sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan hesaplamalar içeren bir algoritma ile iletkenlerin oluk içerisindeki yerleri optimize edilmiştir. Oluklardaki kaçak akıları paylaşacak şekilde düzenlenen oluk içi iletken yerleşimi ile sarımlar arası oluşan kısa devrenin önemli ölçüde azaldığı gösterilmiş ve testlerle doğrulanmıştır. Oluklardaki kaçak akıları paylaşmak üzerine yapılan oluk içi iletken yerleşiminin aynı zamanda alternatif akım (AA) kayıplarını da azalttığı belirtilmiştir. Ancak, sarımlar arası kapasitansı artırdığı, dolayısıyla da rezonans frekansının düştüğü aktarılmıştır, rezonans frekansı SMA çalışma frekans aralığının dışında kaldığı için ihmal edilebilecek bir etki olarak belirtilmiştir [4].

Ayman M. EL-Rafaie, Manoj R. Shah ve Kum-Kang Huh tarafından yapılan “High-Power-Density Fault-Tolerant PM Generator for Safety-Critical Applications” isimli çalışmada emniyet kritik kavramından ve hata toleransı yüksek alternatörlerin özelliklerinden bahsedilmiştir. Emniyet kritik bir sistemin ister seti belirlenip buna uygun hata toleransı yüksek bir generator tasarımı yapılmıştır. Farklı oluk-kutup kombinasyonlarının ve topolojilerin denendiği çalışmada 24 oluk 20 kutuplu iç rotorlu bir generator tercih edilmiştir. Generatörün elektromanyetik tasarımında, doğrultucu ve regülasyon devresinde (güç elektroniğinde) ve mekanik tasarımında uygulanan belirli stratejilerle generatörün hata toleransı yüksek hale getirildiğinden bahsedilmiştir. Termal analizi yapılan generatörün prototipi üretilerek test edilmiş ve yapılan testlerde uygulanan strateji ile hata toleransı bakımından istenilen seviyede bir generatör yapıldığı görülmüştür [5].

Nicola Bianchi, Michele Dai Pre, Giorgio Grezzani ve Silverio Bolognani tarafından yapılan “Design considerations on fractional-slot fault-tolerant synchronous motors” isimli çalışmada kesirli oluklu sargı yapısının emniyet kritik alternatörlere

uygulanmasından bahsedilmiştir. Kesirli oluklu sargının oluk ve kutuplar arasındaki periyodikliği yok ettiğinden ötürü daha dalgasız bir moment oluşturduğu ve makinenin hata durumlarında bile çalışabilecek seviyede hata toleransını yükselttiği aktarılmıştır. Oluk kutup oranının, rotor yapısının ve sargı tipinin harmonikler üzerindeki etkilerinin karşılaştırmalı olarak incelendiği çalışmada tek katmanlı sargının çift katmanlı sargıya göre yüzey mıknatıslı makinelerde (YMM) 37%, gömülü mıknatıslı makinelerde (GMM) 87% oranında daha fazla moment dalgalılığı oluşturduğu yapılan analizlerde gösterilmiştir. Ayrıca hava aralığı boyutunun makinedeki harmonic bileşenler üzerinde doğrudan etkisi olduğu belirtilmiştir. Çalışmada sonlu elemanlar yöntemi (SEY) simülasyonları ve deneysel test sonuçları ile kesirli oluklu sargının daha yüksek oluk kaçak endüktansı yaratarak makinenin hata toleransını artırdığı ve fazlar arası ortak endüktansı düşürerek harmonic bileşenlerin genliklerini düşürdüğü sonucuna varılmıştır [6].

Wenxiang Zhao, Liang Xu ve Guohai Liu tarafından yapılan “Overview of Permanent-Magnet Fault-Tolerant Machines: Topology and Design” isimli çalışmada emniyet kritik elektrik makinaları hakkında geniş çaplı bir literatür araştırması sunulmuştur. Anahtarlamalı relüktans makinelerinin (ARM) hata toleranslarının yüksek olduğundan dolayı havacılıkta yaygınlıkla kullanıldığından bahseden yazarlar, bu tip makinelerin düşük güç yoğunlukları sebebi ile mıknatıslı makinelerin hata toleransını artırmaya yönelik tasarımların önemine vurgu yapmışlardır. Yapılan tasarımlar modüler tasarım, kısa devre akımını limitlemeye yönelik tasarım, lüzumsuz tasarım, termal dağılımı kolaylaştırmaya yönelik tasarım ve moment dalga şeklini düzeltmeye yönelik tasarım teknikleri olmak üzere 5 ana başlıkta incelenmiştir [7].

Luca Papini, Tsarafidy Raminosa, David Gereda ve Chris Gereda tarafından yapılan “A High-Speed Permanent-Magnet Machine for Fault-Tolerant Drivetrains” isimli çalışmada emniyet kritik hava araçları için yeni kapalı oluklu YMM önerilmiştir. Kapalı oluklu yapının oluk endüktansını önemli ölçüde artırdığı, bu sayede kısa devre durumunda oluşan akımı limitlediği ve rotordaki iletken kısımlar üzerinde oluşan girdap akımı kayıplarını azalttığı aktarılmıştır. Bununla birlikte, kapalı oluklu tasarım nedeniyle dış uçlarındaki yüksek manyetik doygunluğun önemli bir sorun olduğuna dikkat çekilmiştir [8].

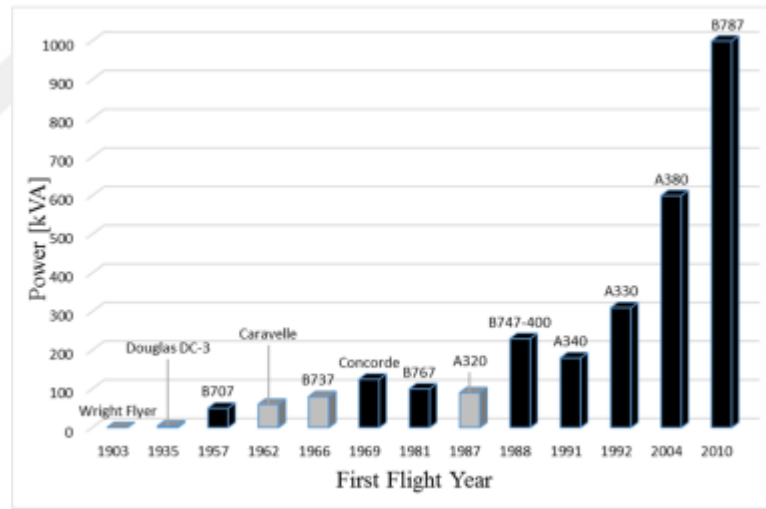
Tsarafidy Raminosa, Chris Gereda ve Michael Galea tarafından yapılan “Design Considerations for a Fault-Tolerant Flux-Switching Permanent-Magnet Machine”

isimli çalışmada sargı endüktansını artırmak ve kısa devre akımını limitlemek için yarı kapalı oluklu stator yapısı önerilmiştir. Fazlar arasındaki ortak endüktansı azaltmak için klasik dış üstü sargı yapısı ile beraber ferromanyetik izolasyon dişleri kullanılmıştır. Bu sayede fazlar hem manyetik hem fiziksel olarak birbirinden yalıtılarak önerilen makinenin hata toleransının artırıldığı aktarılmıştır. Ayrıca, yarı kapalı oluklu stator yapısı ile oluk açıklıklarının azaltılması sayesinde, makinenin kısa devre akımını limitlemek için yüksek bir endüktans değerinin daha kolay elde edildiği aktarılmıştır. Bununla birlikte, yarı kapalı oluklu stator yapısının kaçak akıyı artırdığı ve çıkış momentini azalttığı vurgulanmıştır [9].

Massimo Barcaro, Nicola Bianchi ve Freddy Magnussen tarafından yapılan “Six-Phase Supply Feasibility Using a PM Fractional-Slot Dual Winding Machine” isimli çalışmada hata toleransını artırmak ve yedeklilik sağlamak amacıyla tek katmanlı kesirlik oluklu 2 adet 3 fazlı sargı yapısı uygulanmıştır. Makinenin çok fazlı sürücüler yerine 2 adet 3 fazlı klasik sürücü ile kontrol edilebileceği ve herhangi bir sargıda yaşanacak olası bir hata durumunda ilgili sürücü katı devre dışı bırakılarak diğer sargı ile makinenin çalışmaya devam edebileceği, bu sayede hata toleransının artırıldığı aktarılmıştır. Ayrıca 2 adet 3 fazlı kesirli oluklu sargılı SMM'nin hem açık devre hem de kısa devre arızaları altında moment davranışı, aşırı yük kapasitesi ve termal davranışı gibi performans kriterleri değerlendirilmiş ve doğrulama için deneysel testler yapılmıştır [10].

2. HAVA ARAÇLARINDA ELEKTRİKSEL GÜÇ ÜRETİM SİSTEMİ

Elektriksel güç üretim sistemi, uçak içerisinde güç ihtiyacı bulunan bütün birimler için gerekli gücün üretildiği sistemdir. Hava araçlarında güç üretim ihtiyacı, içten yanmalı motorun başlatılması için bir elektrik motoru olan marş motorlarının kullanılması ile başlamıştır. Zaman içerisinde ilerleyen teknoloji ile birlikte hava araçlarına iç aydınlatma, ısıtma ve haberleşme gibi elektikle çalışan sistemler eklenmeye başlanmıştır. Bunun yanında motor ve platformda hidrolik, mekanik ve pinomatik sistemler yerine daha yüksek verimli olan elektrikli sistemler kullanılmaya başlanmıştır. Güç ihtiyacı günden güne artmıştır. Şekil 2.1’de uçakların zaman içinde ihtiyaç duyduğu elektrik enerjisinin değişimi gösterilmiştir.

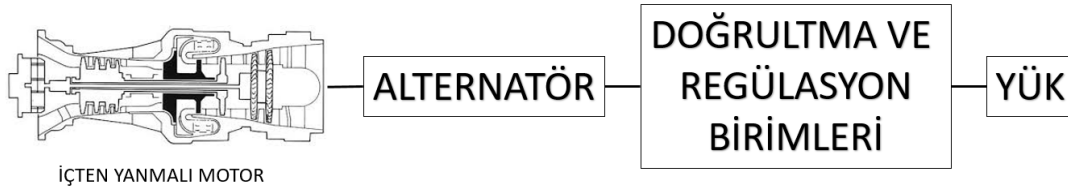


Şekil 2.1 : Elektrik enerjisi ihtiyacının gelişimi [11].

Hava araçlarındaki güç sistemleri asıl güç kaynağı, yedek güç kaynağı, doğrultma ve regülasyon birimleri, güç dağıtım ünitesi ve aviyonik kablajdan oluşur. Şekil 2.2’de güç sistemi mimarisi verilmiştir.

Asıl güç kaynağı, platforma güç veren içten yanmalı motorun miline doğrudan veya ara bağlantı elemanları vasıtası ile bağlı olan ve tahriğini motordan alan alternatörlerdir. Asıl güç kaynağı olarak rotoru sargılı ve uyarması fırça bilezik grubu ile sağlanan pençe kutuplu alternatörler veya rotor manyetik alanı mıknatıslar ile

sağlanan sürekli mıknatıslı alternatörler kullanılabilir. Yedek güç kaynağı ise batarya sistemi ve bağımsız tahrikli harici güç ünitelerinden oluşur.



Şekil 2.2 : Güç sistemi mimarisi.

Platformdaki elektriksel sistemler hem AA hem DA olmak üzere farklı gerilim seviyelerinde çalışır. Genellikle 115 V AA (400 Hz) ve 28 V DA kullanılır. Güç sistemlerindeki doğrultma ve regülasyon birimleri alternatörler tarafından üretilen gerilimi yükün karakteristiğine uygun hale getirir.

Güç dağıtım ünitesi röle, sigorta, kontaktör gibi devre kesici elemanlardan oluşur. Güç üretim sistemlerinde yaşanacak olası bir hatadan platformun kalanının etkilenmemesi için güç üretim sistemini platformdan ayırma görevi görür. Burada kullanılan elemanların kararlı ve güvenilir olması gereklidir.

Aviyonik kablaj üretilen gücün platformdaki yüklere aktarılmasını sağlar. Kablo, konnektör, terminal ve bara gibi elemanlardan oluşan aviyonik kablaj, hava araçlarında elektriksel sistemlerin kullanımının artmasıyla güç sistemlerinin önemli bir parçası haline gelmiştir.

Bu çalışma kapsamında SMA tarafından üretilen ve genliği hıza bağlı olarak değişen 3 fazlı gerilim, kontrolsüz doğrultucu ile doğrultulup, DA/DA çevirici ile 28 V değerinde tutulacak şekilde bir mimari kurgulanmıştır.

Hava araçlarının güç üretim sistemleri için alternatör seçilirken yüksek güç yoğunluğunu sağlamak adına SMA topolojileri tercih edilir. Ancak sürekli mıknatıslar tarafından sağlanan enerji kesilemediğinden dolayı herhangi bir hata durumunda alternatör güç üretmeye devam eder. Havacılık gibi emniyetin kritik olduğu uygulamalarda SMA tasarımı yapılırken belirli hata modları için özel tasarımsal önlemler alınması gereklidir.

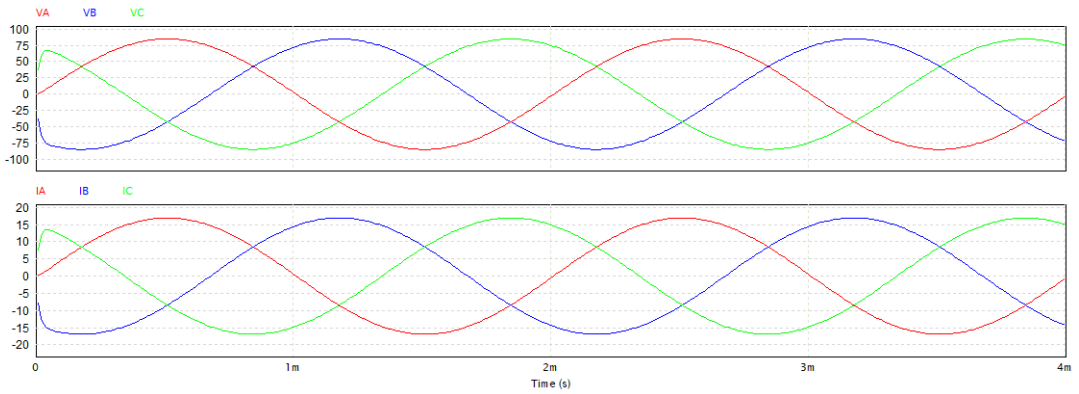
2.1 SMA'ların Hata Modları

SMA tasarımı yapılırken hata toleransını artırmaya yönelik hangi önlemlerin alınacağı önemli bir parametredir ve olası alternatör hataları değerlendirilmeden belirlenemez. SMA arızaları kritik ve kritik olmayan arızalar olarak sınıflandırılabilir. Kritik arızalar için tasarımda yapılacak değişikliklerle özel önlemler alınması bir gereklilik iken kritik olmayan arızalar için SMA'yı özel tasarım çözümleri uygulamadan da kullanmaya devam etmek mümkündür. Bu kapsamda alternatörlerde meydana gelen hatalar, birincil ve ikincil hatalar olarak sınıflandırılabilir [12].

2.1.1 Birincil hatalar

2.1.1.1 Açık devre hataları

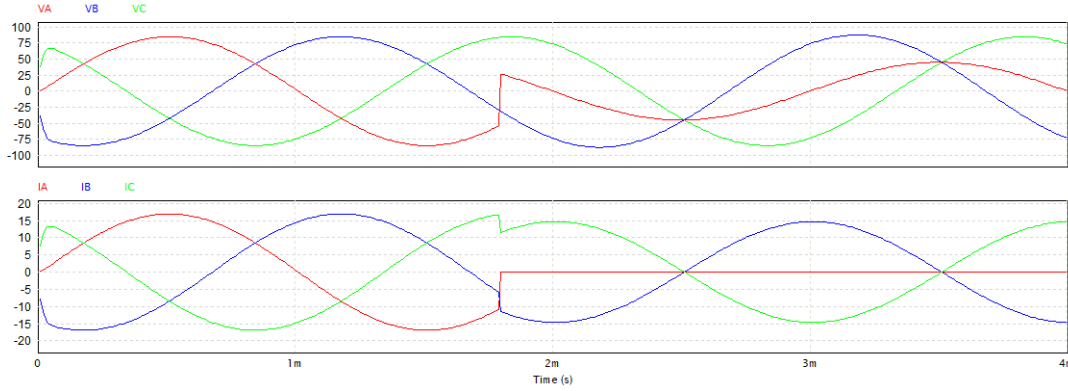
Açık devre hatası alternatör veya güç elektroniği devresinin fazlarının birinde meydana gelebilir. Doğrultucu katında tek bir anahtarın açık devre olması durumunda DA baranın sürekliliği bozulur. Bir fazdaki iki anahtarın da açık devre olması durumunda artık o faz DC baraya katkı yapmayı bırakır. Alternatörün iç yapısında, stator sargılarını oluşturan iletkenlerin kopması durumunda yine açık devre hatası meydana gelir. Bu durumda kopan, yani açık devre olan iletkenin ait olduğu faz devre dışı kalmış olur. Şekil 2.3'de herhangi bir hatanın görülmediği ideal 3 fazlı akım ve gerilim dalga şekilleri gösterilmiştir ve 3 fazlı dengeli ve simetrik sistem olarak adlandırılır.



Şekil 2.3 : 3 Fazlı, dengeli ve simetrik sistemin akım ve gerilimi.

Her çeşit açık devre hatası durumunda ilgili fazda yaşanan kayıp makinede endüklenen toplam momenti azaltır, moment dalgalılığını artırır ve simetrik olmayan dengesiz bir çalışmaya neden olur. Hatalı fazın akım ve gerilim genlikleri düşer (Şekil 2.4).

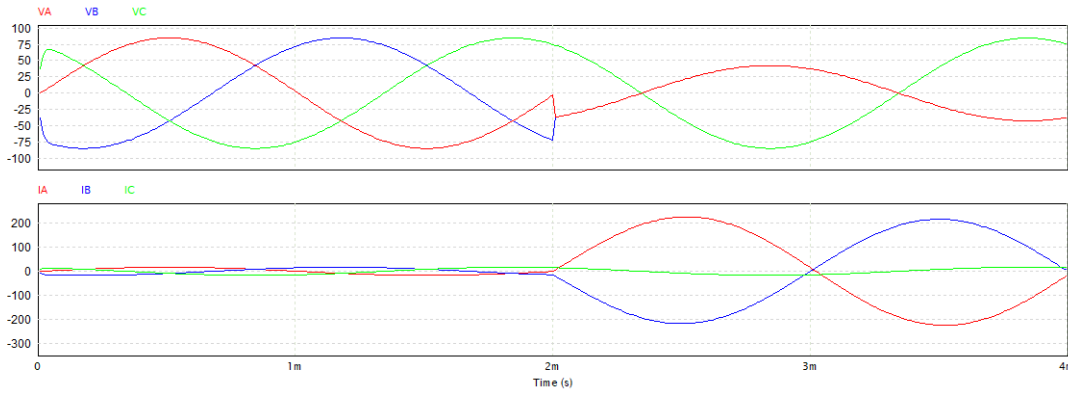
Bununla birlikte, sağlıklı kalan fazlarda akımı uygun şekilde artırarak yaşanan güç kaybı tolere edilebilir, ancak bu durumda sargı bakır kayıpları artacak ve potansiyel sargı hatalarına neden olacaktır.



Şekil 2.4 : Açık devre hatası durumunun akım ve gerilim üzerine etkisi.

2.1.1.2 Kısa devre hataları

Kısa devre hatası faz sargılarının kendi içinde, faz sargıları arasında ya da doğrultucu katında meydana gelebilir ve sonucunda alternatör sargılara, güç elektroniği devre elemanlarına, motora ve hatta platforma zarar verebilecek olan yüksek faz akımları oluşur (Şekil 2.5). Kısa devre hatası, simetrik olmayan akım-gerilim dalga şekilleri ve moment dalgalılığı gibi açık devre hatasıyla benzer sonuçlar doğurur fakat yüksek akımlara sebebiyet verdiği için çok daha tehlikelidir.



Şekil 2.5 : Normal çalışan bir sistemin kısa devre sonrasında akım ve gerilim dalga şekilleri.

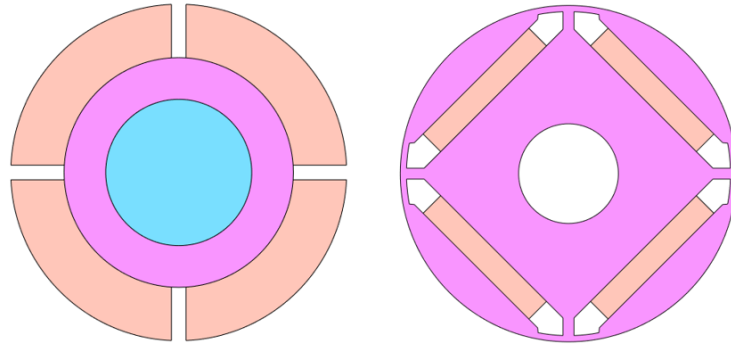
SMSM tasarımı yapılırken karar verilmesi gereken önemli parametrelerden bir tanesi mıknatıs kalınlığıdır, kullanılan mıknatıs miktarını artırılarak düşük endüktans ve yüksek güç faktörü ile güç yoğunluğu yüksek makineler tasarlamak hedeflenir, fakat düşük endüktans aynı zamanda yüksek kısa devre akımları oluşmasına sebebiyet verir.

Kısa devre akımları sargı izolasyonuna zarar vererek veya mıknatısların demagnetize olmasına neden olarak kademeli arızalara neden olabilir. Şekilde örnek bir kısa devre anındaki akım ve gerilim karakteristikleri gösterilmiştir.

2.1.2 İkincil hatalar

2.1.2.1 Sürekli mıknatıslar

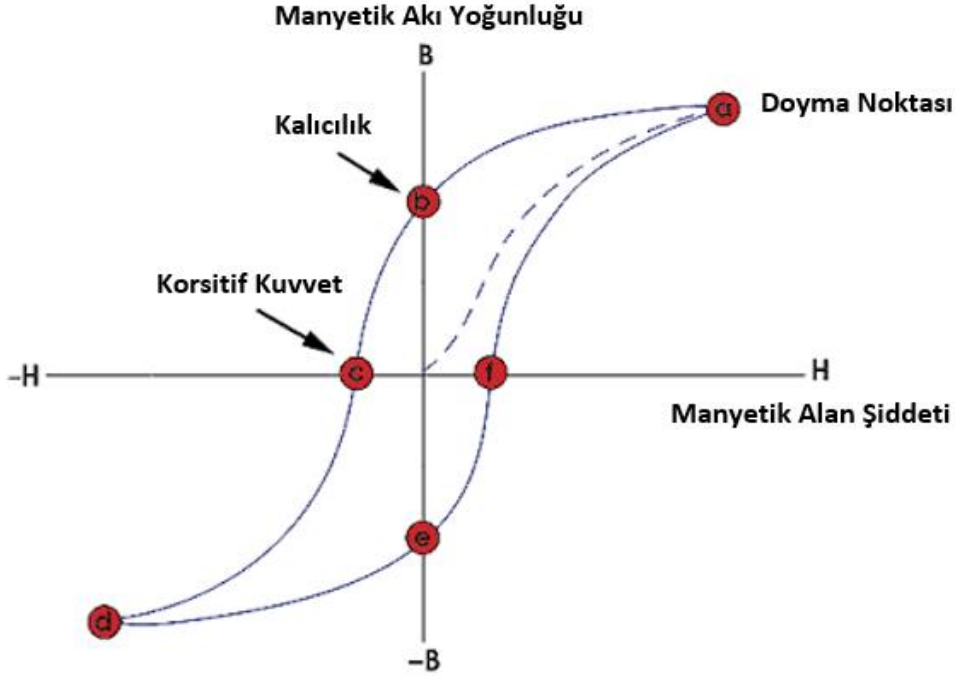
Sürekli mıknatıslı makineler, rotor manyetik alanının rotor üzerindeki mıknatıslar ile sağlandığı makinelerdir. Şekilde gösterildiği gibi mıknatıslar rotor yüzeyinde ya da manyetik çekirdek içine gömülü şekilde bulunabilir (Şekil 2.6). Mıknatısların oluşturduğu manyetik alan idealde sabittir fakat sıcaklık, ters manyetik alan gibi çevresel etkenler mıknatısın manyetik enerjisini değiştirebilir. Çevresel etkenlerin mıknatıs üzerindeki etkilerini tam olarak anlamak için mıknatısın malzeme özelliklerinin ve elektrik makinalarında ne amaçla kullanıldığının iyi anlaşılması gerekir.



Şekil 2.6 : Sürekli mıknatıslı rotorlar.

Mıknatıslanma eğrisi

Manyetik malzemelerin en önemli iki parametresi manyetik akı yoğunluğu B [Tesla] ve manyetik alan şiddeti H 'dir [amper/m]. Ferromanyetik malzemelerin mıknatıslanma süreçleri mıknatıslanma (histerezis) eğrisi ile karakterize edilir, manyetik alana maruz kalan manyetik malzemenin manyetik akı yoğunluğu ve manyetik alan şiddeti arasındaki değişimi gösteren bir eğridir (Şekil 2.7). Değişken manyetik alanda malzemenin manyetik özellik kazanması ve manyetik alanın yönünü tanımlamak için kullanılır.



Şekil 2.7 : Mıknatıslanma eğrisi.

Daha önceden manyetik alana maruz kalmamış malzemenin manyetik akı yoğunluğu sıfırdır. Malzeme sıfır noktasından itibaren manyetik alan şiddetine maruz bırakılırsa, manyetik akı yoğunluğu doyma noktasına (a) kadar artar, malzemenin mıknatıslık özelliği en yüksek seviyeye ulaşır. A noktasından sonra manyetik alan şiddeti artsa bile manyetik akı yoğunluğu ve mıknatıslık derecesi ihmal edilebilecek kadar az artar.

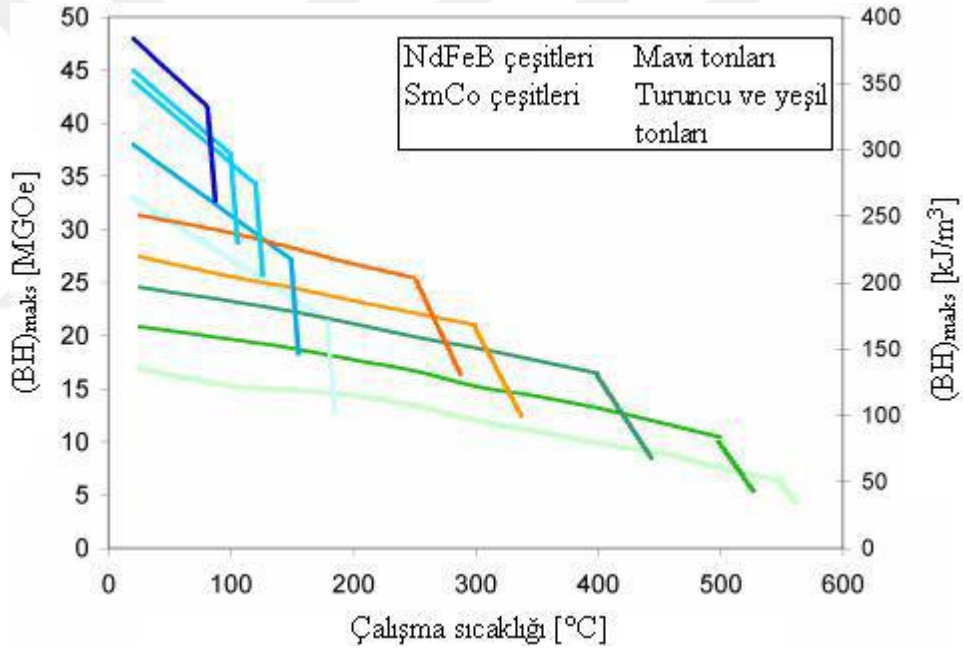
Doyma noktasındaki malzeme üzerine uygulanan manyetik alan şiddeti kesilirse yani sıfıra indirilirse malzemenin manyetik akı yoğunluğu b noktasına kadar düşer, bu noktada malzeme kalıcı mıknatıslık özelliği kazanmıştır.

Ferromanyetik malzeme üzerindeki kalıcı mıknatıslık kaldırılmak isteniyorsa malzemeye ters yönlü bir manyetik alan şiddeti uygulanır. Mıknatıslığın geçmesi için uygulanan ters manyetik alan şiddetine “gideren manyetik alan şiddeti”, veya “korsitif kuvvet” denir.

Ters yönde manyetik alan şiddeti uygulanmaya devam ederse malzeme ters yönde mıknatıslık özelliği kazanır.

Manyetikliği etkileyen faktörler

Sıcaklık → Mıknatıslık özelliğine sahip manyetik malzemelerde sıcaklık arttıkça malzemenin sahip olduğu manyetik enerji azalır. Kritik sıcaklığa ulaşıncaya mıknatıslık özelliği tamamen kaybolur olur. Bu sıcaklık “curie sıcaklığı” olarak adlandırılır. Çalışma ortam sıcaklığının üzerine ek olarak alternatör üzerindeki kayıplar ile açığa çıkan ısı enerjisi de eklenir ve toplam sıcaklık, mıknatısların maruz kaldığı sıcaklıktır. Alternatörde kullanılan mıknatısların özelliklerini kaybetmemesi için curie sıcaklığının mıknatısların maruz kaldığı sıcaklıktan yüksek olması gereklidir. Havacılık uygulamalarında yüksek sıcaklıklarda daha az kayıpla çalışabildikleri ve curie sıcaklıklarının daha yüksek olması nedeniyle genelde NdFeB ve SmCo mıknatıslar tercih edilir. Şekil 2.8’de NdFeB ve SmCo mıknatısların en yüksek enerji seviyelerinin sıcaklığa bağlı değişimi gösterilmiştir.



Şekil 2.8 : NdFeB ve SmCo mıknatısların enerji seviyelerinin sıcaklığa bağlı değişimi.

Mekanik Faktörler → Manyetik özelliği bulunan bir malzemenin kutup çiftleri belirli bir düzende hizalıdır. Herhangi şiddetli bir darbe sonucunda bu kutup çiftlerinin düzenli yapısı bozulur ve rastgele dağılırlar, sonuç olarak malzeme manyetik özelliğinin tamamını veya bir kısmını kaybedebilir.

İç Yapısal Faktörler → Yapı, özellik ve işlemdeki değişimler malzemenin manyetik özelliklerinde etkilere yol açmaktadır.

Ters Manyetik Alan → Manyetik malzemeler, ters yönlü bir manyetik alana maruz kaldıklarında manyetik enerjileri azalır. Stator sargılarından akan akımın yarattığı manyetik alan mıknatısların oluşturduğu manyetik alana ters yönlüdür ve bileşke manyetik alana olan etkisi endüvi reaksiyonu olarak adlandırılır. Emniyet kritik alternatör tasarımı yapılırken kısa devre durumunda sargıların ürettiği amper sarımın mıknatısların ürettiği amper sarım değerini aşmamasına dikkat edilmelidir. Aksi takdirde mıknatıslarda bölgesel demagnetizasyonlar görülür ve alternatör istenilen gücü sağlayamaz duruma gelir.



3. ELEKTRİKSEL GÜÇ ÜRETİM SİSTEMİ ALTERNATÖRLERİ

Elektriksel güç üretim sistemlerinde (EGÜS) klasik rotoru sargılı, harici uyarımalı pence kutuplu alternatörler ya da daimi mıknatıslı alternatörler kullanılabilir. Sargılı alternatörlerde uyarma akımı ayarlanarak istenilen devirde istenilen gerilim elde edilebilir, control üniteleri basit ve hafiftir, ancak rotor sargıları fırça bilezik grubu yardımıyla uyarıldığı için hata toleransı düşük ve bakım aralıkları sıktır. Mıknatıslı alternatörlerde ise uyarma daimi mıknatıslar ile sağlandığı için sabittir, istenilen devirde istenilen gücü elde etmek için DC/DC çevirici modüller kullanılır. Fırça bilezik grubu içermediklerinden hata toleransları yüksektir ve bakım aralıkları oldukça uzundur. Bu bölümde klasik alternatör ve daimi mıknatıslı alternatör tasarımları anlatılıp, daimi mıknatıslı alternatör sürümleri incelenmiştir.

3.1 Klasik Alternatör Tasarımı

Havacılık motorlarının elektriksel güç sistemleri için emniyet kritik alternatör tasarımı yapılırken alternatör çalışma prensibi, manyetik devre kavramı ve parametreleri ve çıkış büyüklüklerini etkileyen faktörlerin iyi anlaşılması gereklidir. Dolayısıyla bu kavramlar kısaca açıklanmıştır.

Manyetik akı belirli bir kapalı yüzeyden geçen manyetik alan çizgilerinin sayısı olarak tanımlanır ve manyetik direnç R_{toplam} cinsinden denklem 3.1'deki gibi ifade edilir.

$$\phi = \frac{F}{\mathfrak{R}_{toplam}} \quad (3.1)$$

Bir manyetik devreye doğru hareket eden mmk ve bu devredeki manyetik alan şiddeti arasındaki ilişki, yani manyetik devrede oluşan toplam amper sarım denklem 3.2' deki gibi ifade edilir.

$$\sum F = Ni = \sum Hl \quad (3.2)$$

Burada F manyeto motor kuvvetini (mmk), H manyetik alan şiddetini ve l akı çizgilerinin kat ettiği yolu ifade etmektedir.

Alternatörler elektromanyetik indüksiyon prensibi ile güç üretirler. Faraday'ın ortaya koyduğu indüksiyon yasasına göre manyetik alana maruz kalan bir iletkenin uzayda yarattığı düzlemden, bu düzleme dik açı yaparak geçen akı miktarının zamana göre değişmesi ile iletkenin uçlarında konumu ve genliği zamana göre değişen bir gerilim indüklenir. Yani alternatörlerde gerilim indüklenmesi için stator sargı düzleminden geçen manyetik akı miktarının zamana göre değişmesi gereklidir (3.3).

$$e = N \frac{d\phi}{dt} = \frac{d\lambda}{dt} \quad (3.3)$$

Burada e elektromotor kuvvetini (emk) ifade eder ve zamanla değişen akı tarafından üretilen gerilimi temsil eder, λ sargının toplam akısıdır ve denklem 3.4'deki gibi tanımlanır.

$$\lambda = N\phi \quad (3.4)$$

Burada N adet sargının toplam akısı verilmiştir. Toplam akı için SI birim sisteminde weber (veya weber-sarım) birimi kullanılır. ϕ sembolü zamanla değişen akının anlık değerini ifade eder.

İndüklenen gerilim e nin yönü gerilim indüklenen tele etki eden manyetik alan yönünün tersi yönündedir. Öyle ki eğer sargı uçları kısa devre edilmişse toplam akının değişimine zıt yönde bir akım akar.

Eğer manyetik malzemenin manyetik geçirgenlikleri sabit kabul edilirse bu malzemenin oluşan manyetik devre için ϕ ve i arasındaki ilişki

$$L = \frac{\lambda}{i} \quad (3.5)$$

Denklem 3.1 ve 3.2 denklem 3.5'de yerine yazılırsa

$$L = \frac{N^2}{\mathfrak{R}_{toplam}} \quad (3.6)$$

Denklem 3.6'dan, bir manyetik devrenin endüktansının sarım sayısının karesi ile doğru orantılı ve bu sargının yerleştirildiği manyetik devrenin manyetik direnci ile de ters orantılı olduğunu görürüz. Endüktansın birimi SI birim sisteminde *Henry* (H)

olarak belirlenmiştir. Endüktans kavramı manyetik akı ve mmk arasında doğrusal bir ilişki gerektirir. Bundan dolayı, manyetik malzemelerin mıknatıslanma karakteristikleri doğrusal olmadığı için, sistem verimi bu denklemler ile hassas olarak hesaplanamaz. Bununla beraber pratikte birçok sistemde manyetik direnci lineer kabul edilen hava aralığı baskındır ve bu sayede manyetik malzemelerin doğrusal olmayan etkileri yok sayılabilir. Ek olarak demir çekirdek malzemesi için manyetik geçirgenliği, dolayısıyla endüktansı ortalama bir değer olarak hesaplamalara katmak oldukça iyi sonuç verir. Literatürdeki birçok çalışmada olduğu gibi bu çalışmada da analitik hesaplar yapılırken bu varsayımlar yapılacak ve kabul edilebilir düzeyde kesin sonuçlar elde edilecektir.

3.2 Daimi Mıknatıslı Alternatör

Havacılık uygulamalarındaki zorlayıcı hacim ve ağırlık isterlerinden dolayı yüksek güç yoğunluğunu sağlamak adına genellikle sürekli mıknatıslı alternatörler tercih edilir. Sürekli mıknatıslar tarafından üretilen sabit manyetik alan, rotorun dönme hareketi ile birlikte stator sargı düzlemini farklı açılarda keser ve stator sargılarında gerilim indüklenir. EGÜS' de sürekli mıknatıslı alternatör kullanmanın birçok avantajı vardır;

- Hata toleransları çok düşük olan ve çalışma esnasında büyük emniyetriskleri taşıyan uyarma sargısı ve fırça-bilezik grubunun yerine sürekli mıknatısların kullanılması kayıpları azaltır, verimi artırır ve hata toleransı artırılarak daha emniyetli bir çalışma sağlanır.
- Sürekli mıknatısların kullanımı hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğunu artırır, bunun yanında alternatör boyutlarını oldukça düşürür ve güç yoğunluğunu artırır. Havacılık motorlarının EGÜS'lerinde kullanılan alternatörlerde oldukça katı ve zorlayıcı ağırlık ve hacim isterleri mevcuttur. Sürekli mıknatısların yüksek güç yoğunlukları SMM'lerin havacılık uygulamalarında kullanılmasına olanak sağlar.
- Küçük manyetik geçirgenlikleri sayesinde sürekli mıknatıslar uyarma sargısına sahip harici uyarmalı alternatörlerden çok daha küçük endüvi reaksiyonunun d-ekseni reaktansına sahiptir. Bu nedenle endüvi reaksiyonuna bağlı gerilim

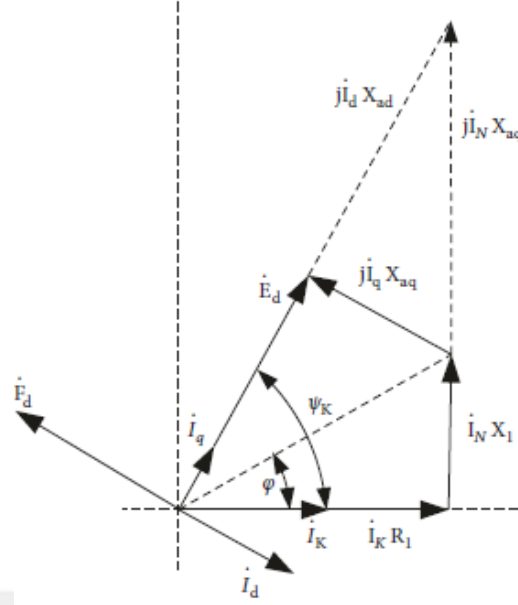
alternatör ömrü boyunca güvenli çalışmayı sağlamak adına çok önemli bir parametredir. Empedansın büyüklüğü kısa devre akımı I_k 'nin katları ile ölçülür. Şekil 3.2'de 3 fazlı sürekli mıknatıslı alternatörün sürekli hal kısa devre durumundaki fazör diyagramı verilmiştir ve I_k bu koşul altındaki faz akımı ifade eder. Literatürde [13] kısa devre akımının analitik ifadesi denklem 3.8'deki gibidir.

$$I_k^* = \frac{4.44(\lambda_n - \lambda_\sigma) f N K_{dp} K_\Phi B_r A_m \times 10^{-4}}{4.44(1 + \lambda_\sigma) \lambda_n f N K_{dp} K_\Phi B_r A_m \times 10^{-4} + (1 + \lambda_\sigma) I_N \sqrt{R_1^2 + X_1^2 - X_{aq}^2} \cos^2 \psi_k} \quad (3.8)$$

$$\psi_k = \arctan \frac{X_{aq} + X_1}{R_1} \quad (3.9)$$

Burada λ_n ve λ_σ harici manyetik devrenin (endüvi manyetik devresi) toplam akısı ve kaçak akısını, f çalışma frekansını, N faz başına düşen sarım sayısını, K_{dp} temel harmoniğin sargı faktörünü, K_Φ hava aralığı akısı dalga şekli faktörünü, B_r ve A_m sürekli mıknatısın kalıcı mıknatısiyet değeri ve kutup başına manyetik akı sağlayan malzemenin kesit alanine, f' kutup manyetik devresinin her bir çiftindeki endüvi manyetomotor kuvvetini, X_{aq} endüvi reaksiyonunun q eksenli reaktansını ve ψ_k kısa devre durumundaki güç faktörünün açısını ifade eder.

$X_{aq} + X_1 \gg R_1$, $\psi_k \approx 90^\circ$, $I_q \approx 0$ ve $I_d \approx I_K$ kabulleri ile açıkça görülüyor ki endüvi manyetik alanı kısa devre durumunda neredeyse d-eksenli akısını sınırlayıcı bir rol oynamaktadır, yani sürekli mıknatıslar tarafından üretilen manyetik alan, ters yönlü endüvi manyetik alanı ile neredeyse dengelenmektedir. Bu noktada hava aralığındaki bileşke manyetik akı oldukça zayıflar ve alternatör lineer (süresiz) olarak çalışır. Bu sebeple mıknatısların demagnetize olmasını engellemek için endüvi reaksiyonu akımı olan faz akımının oluşturduğu manyetik alanın büyüklüğü sürekli mıknatıslar tarafından oluşturulan manyetik alanın büyüklüğünü geçmemelidir.



Şekil 3.2 : Sürekli mıknatıslı alternatörün sürekli hal kısa devre durumunda fazör diyagramı[1].

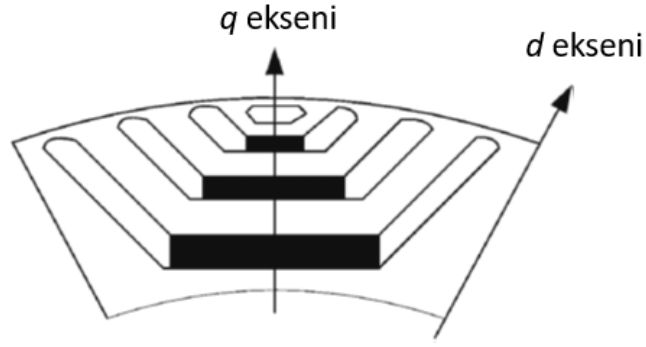
Denklem 3.8’de görüldüğü üzere kısa devre akımı I_k' yı etkileyen çeşitli faktörler vardır. Elektromanyetik etkenler ve kısa devre akımı arasındaki ilişki karmaşıktır ve daha sonraki bölümlerde detaylıca açıklanacaktır. Temel olarak aşağıdaki gibi açıklanabilir.

- Harici manyetik devrenin toplam akısı (λ_n), ana manyetik devrenin (mıknatıslar tarafından oluşturulan) akısını (λ_δ) ve kaçak akıların toplamını (λ_σ) içerir ve büyüklüğü alternatörün her bir bileşenin fiziksel boyutuna bağlıdır. Sargı öz endüktansı, kaçak endüktans ve kaçak katsayısı gibi parametreler üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.
- Öz endüktans, ortak endüktans ve kaçak endüktans gibi faz sargısının endüktans parametreleri faz başına seri sarım sayısı N 'in karesiyle doğru orantılıdır. Faz sargısının endüktansı ne kadar büyük olursa stator sargı empedansı o kadar büyük ve kısa devre akımı da o kadar küçük olur.
- Hava aralığının uzunluğu, sürekli mıknatıslar tarafından üretilen manyetik alan ve endüvi reaksiyonunun manyetik alanının sentezlenmesi ile oluşan bileşke manyetik alan üzerinde dolayısıyla alternatörün doyumluk durumu üzerinde önemli bir etkisi vardır. Hava aralığı ne kadar büyük olursa relüktans o kadar büyük, dolayısıyla sürekli mıknatıslı alternatörün senkron reaktansı da o kadar küçük olur.

EGÜS alternatörleri yüzey mıknatıslı senkron alternatör, gömülü mıknatıslı senkron alternatör veya mıknatıs destekli senkron relüktans makineler gibi farklı topolojilerde olabilir. Seçilen topolojiye ve uygulama isterlerine göre dağıtılmış veya konsantrik sargılı, iç rotorlu veya dış rotorlu, yüzey veya gömülü mıknatıslı olabilir. Alternatör çıkış gerilimi genliği ve frekansı tahrik hızı ile değişir. İçten yanmalı tahrik motorunun tipine göre EGÜS alternatörü düşük veya yüksek hızlarda çalışabilir. Örneğin pistonlu motorlarda mil tahrik hızı 2000 – 10000 rpm seviyelerinde iken gaz türbinli motorlarda 20000-50000 rpm seviyelerindedir. Özellikle gaz türbinli motorlar için alternatör belirlenirken seçilecek topolojinin yüksek hızlarda çalışmaya uygun bir topoloji olmasına dikkat edilmelidir.

3.2.1 Mıknatıs destekli senkron relüktans makineler

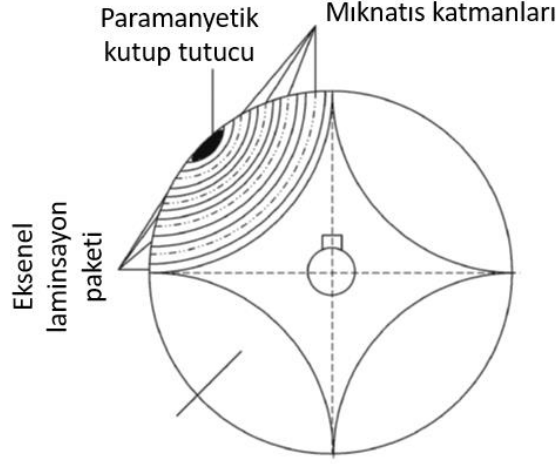
Mıknatıs destekli senkron relüktans makinelerin (MD-SnRM) statorları asenkron makine statorları ile aynıdır, rotorları ise çok katmanlı akı bariyerli yapıya sahiptir ve bu akı bariyerlerinin içinde rotor manyetik alanını ve kutupları oluşturmak için sürekli mıknatıslar bulunur. Bir nevi gömülü mıknatıslı yapıya sahiptirler fakat gömülü mıknatıslı yapıda her kutup için tek akı bariyeri bulunur. MD-SnRM'ler genellikle starter-generatör uygulamalarında kullanılır çünkü rotordaki çoklu akı bariyerleri eksenler arasındaki manyetik relüktans farkını artırır ve relüktans momenti bileşeninin yüksek olmasını sağlar, bu sayede en yüksek moment ihtiyacının bulunduğu düşük hızlarda oldukça iyi performans gösterirler. Generatör çalışmada ise akı bariyerlerinin sayısını ve şeklini optimize ederek daha düzgün formda gerilim elde etmek mümkündür.



Şekil 3.3 : Geleneksel laminasyonlu MD-SnRM rotoru.

Sürekli mıknatısları akı bariyerlerinin orta kısımlarına yerleştirmek (Şekil 3.3) kısa devre durumunda yüksek akımlarda mıknatısların demagnetizasyona karşı daha bağımsız olmasını sağlar. Ne yazık ki bu durum mıknatıs kaçak akı miktarının artmasına sebep olur, güç yoğunluğu düşer ve aynı gücü sağlamak için daha fazla mıknatıs kullanılmasını gerektirir. Mıknatıslar akı bariyerlerinin yan kısımlarına yerleştirildiğinde ise tam tersi durumlar söz konusu olur. Uygulamaya ve isterlere göre bir tercih yapılır ve mıknatıslar her iki şekilde de yerleştirilebilir.

MD-SnRM'lerde genelde dağıtılmış sargı yapısı tercih edilir ve seçilen oluk-kutup oranına göre oluk adımı belirlenir. Özel uygulamalarda dış üstü (konsantrik) sargı yapısı da tercih edilebilir fakat düşük güç yoğunluğu ve bozuk emk dalga şeklinden dolayı bu durum çok nadirdir. Rotor çekirdekleri ise geleneksel (enine) laminasyonlu, her kutup için içerisinde sürekli mıknatıslar olan akı bariyerleri bulunan bir yapıda (Şekil 3.3) ya da her kutupta çoklu mıknatıs katmanının bulunduğu aksenal laminasyonlu şekilde olabilir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4 : Eksenel laminasyonlu MD-SnRM rotoru.

Eninne laminasyonlu rotor yapısında, gaz türbinli motorlarda kullanılan alternatörler yüksek hızlarda çalıştıkları için sac paketinin tek parça halinde kalması gereklidir. Akı bariyerleri tasarlanırken buna dikkat edilmelidir.

3.2.1.1 MD-SnRM rotor tasarım parametreleri

MD-SnRM ile ilgili genel bilgilerin verildiği kısımda alternatörün tasarım felsefesinin, rotorda yer alan akı bariyerlerinin özel tasarımına dayandığı, endüklenen gerilimin dalga şeklinin ve moment dalgalılığı gibi önemli çıktılarının akı bariyeri tasarımına dayandığı ifade edilmiştir. Senkron relüktans motorun temel rotor tasarım parametreleri aşağıda liste halinde özetlenmiştir.

- Kutup Sayısı
- Bariyer Sayısı
- Bariyer Şekilleri
- Bariyer Köprüsü Kalınlığı
- Akı Köprüsü Kalınlığı

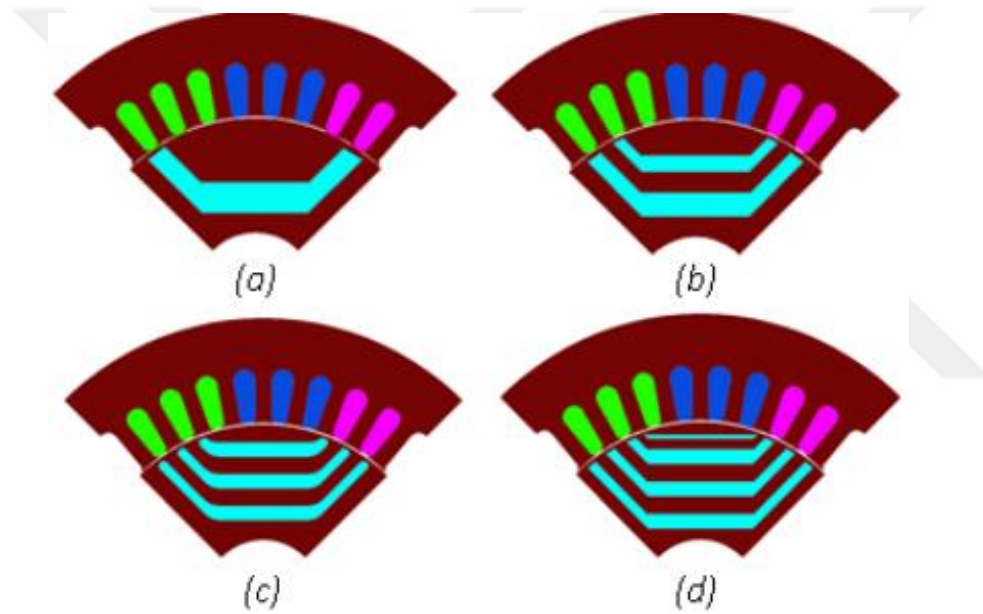
3.2.1.2 Kutup sayısı

MD-SnRM’lerde kutup sayısını asenkron makinelerin aksine stator değil, rotor yapısı belirler. Kutup sayısı rotor radial ekseninde 360°’lik yay boyunca görülen akı bariyeri

grubu sayısına eşittir. Literatürde yapılan çalışmalarda 2, 4, ve 6 kutuplu senkron relüktans makine tasarımları yoğunlukta olmakla beraber bu yapılar arasında en çok 4 kutuplu tasarımların tercih edildiği gözlenmiştir.

3.2.1.3 Bariyer sayısı

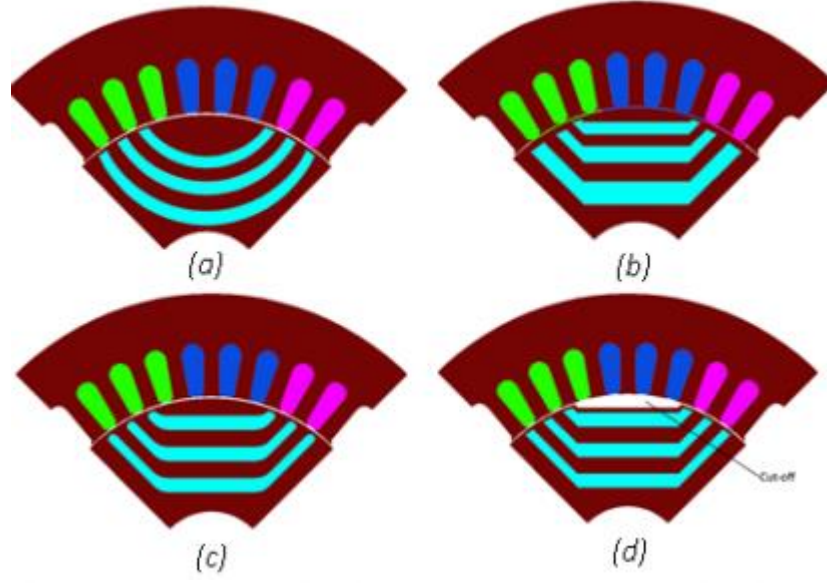
Motorun genel çalışma ve moment üretme prensibi rotor çıkıklık oranına bağlı olduğundan, akı bariyerlerinin sayısı ve demir/hava oranı makinenin en kritik tasarım parametresi arasındadır. Rotordaki akı bariyerlerinin sayısı moment ve EMK üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. Ayrıca EMK dalga formu ve moment dalgalılığı değerlerini doğrudan etkiler. Şekil 3.5’de sırasıyla bir, iki, üç ve dört bariyerli rotor yapıları gösterilmiştir.



Şekil 3.5 : Rotor akı bariyeri sayısı (a): bir, (b): iki, (c): üç, (d): dört.

3.2.1.4 Bariyer şekilleri

Senkron relüktans makinelerde çıkış büyüklükleri üzerinde rotor akı bariyerleri sayısı kadar bariyer şekillerinin de doğrudan etkisi vardır. Özellikle EMK dalgalılığı ve moment dalgalılığı bileşenleri üzerinde bariyer şekillerinin etkisi büyüktür. Dalgalılık, köşeli akı bariyerlerinde yuvarlak akı bariyerlerine oranla daha fazladır. Şekil 3.6’da rotor akı bariyeri şekilleri gösterilmiştir.



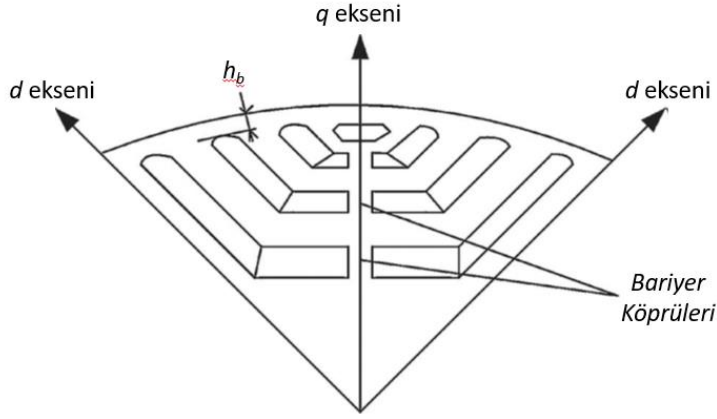
Şekil 3.6 : Rotor bariyer şekilleri (a): yuvarlak, (b): köşeli, (c): hibrit, (d): kesik uç.

3.2.1.5 Bariyer köprüsü kalınlığı

Yüksek hızlarda merkezkaç kuvvetlerinden kaynaklanan mekanik sınırlamalar dolayısıyla mıknatıslar arasında boşluk bırakılarak demir stator nüvesiyle doldurulur, bu kısımlar bariyer köprüleri olarak adlandırılır. Mıknatısların merkezkaç kuvvetinden daha az etkilenmesini sağlar. Demir bölgelerini birleştirerek sağladığı mekanik avantajın yanısıra çıkış momentinin ortalama değerini düşürmektedir.

3.2.1.6 Akı köprüsü kalınlığı

Akı bariyerlerinin hava aralığına yakın olan uç kısımları ile hava aralığı arasında kalan kısımlara akı köprüleri denir (h_b). Akı köprü kalınlığı çıkış momenti büyüklüğünde doğrudan etkilidir, düşük akı köprü kalınlığı demir malzemenin bölgesel doyuma gitmesine neden olur ve çıkış momenti üzerinde olumlu etki yaratır, güç yoğunluğunu artırır. Bunun yanında akı köprü kalınlığı belirlenirken güncel kesme ve imalat yöntemleri de göz ardı edilmemelidir ve kalınlık, kesme teli kalınlığından büyük olmalıdır. Akı köprü kalınlıkları aynı zamanda mekanik dayanım için çok önemlidir, yapısal analizler ile mekanik gerilmelere dayanımları desteklenmelidir. Literatürde akı köprüsü kalınlığının 0.6 ile 1.2 mm arasında değişebildiği görülmüştür. (Şekil 3.7) [14].



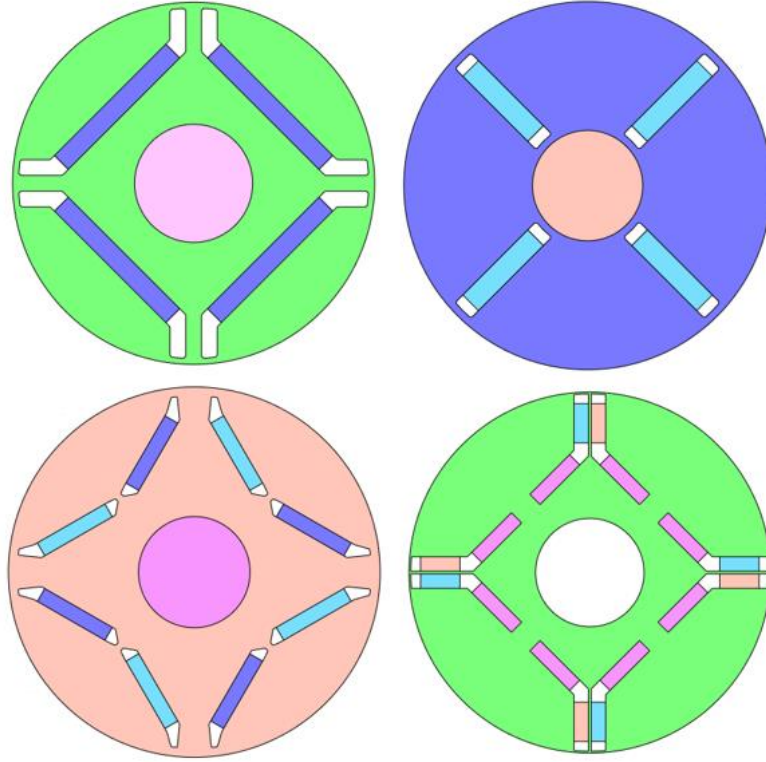
Şekil 3.7 : Mekanik dayanımı yüksek akı bariyeri geometrisi.

Kısa akı köprüleri aynı zamanda d ve q eksenlerinin manyetik geçirgenliğini artırır ve bu emniyet kritik alternatörler için arzulanan bir durumdur. Motor çalışma için q eksenini doğrultusundaki manyetik geçirgenliğin artması istenilen bir durum iken d eksenini doğrultusundaki manyetik geçirgenliğin artması değildir, ancak L_{dm} ve L_{dq} arasındaki fark istenilen seviyede tutulursa kısa akı köprüleri motor çalışma için sorun yaratmayacaktır (L_{dm} ve L_{dq} eksenler doğrultusundaki mıknatıslanma endüktanslarıdır).

3.2.2 Gömülü mıknatıslı senkron alternatörler

Gömülü mıknatıslı senkron alternatörler rotorun içerisine yerleştirilen mıknatıslar sayesinde mekanik yapıları güçlüdür ve çıkık rotora sahiptir. Eksen endüktansları birbirinden farklı olduğu için relüktans momenti üretme kabiliyetine sahiptir, endüvi akımı ve mıknatısın moment bileşeni sayesinde birim hacimde yüzey mıknatıslı makinelerle oranla daha fazla moment üretir. Relüktans momenti ve endüklenen gerilim mıknatıslar arasındaki hava boşlukları, mıknatısların kalınlığı ve rotorda konumlandırıldıkları yer ile kontrol edilir. Bu tip makinelerin havacılık uygulamalarında kullanılmasının sebebi yüksek verimlilik, düşük hacim ve ağırlık, starter uygulamaları için relüktans momenti ve çok iyi alan zayıflatma yeteneği gibi bir çok özelliğe sahip olmalarıdır.

Gömülü mıknatıslı yapıyı elde etmenin bir çok farklı yolu vardır. Mıknatıslar radial veya çevresel yönde manyetize edilebilir. Mıknatıslar arasında kalan demir bölgelerin tasarımı doyuma gitmemesi için özenle yapılmalıdır. Şekil 3.8’de 4 farklı gömülü mıknatıslı rotor yapısı gösterilmiştir.



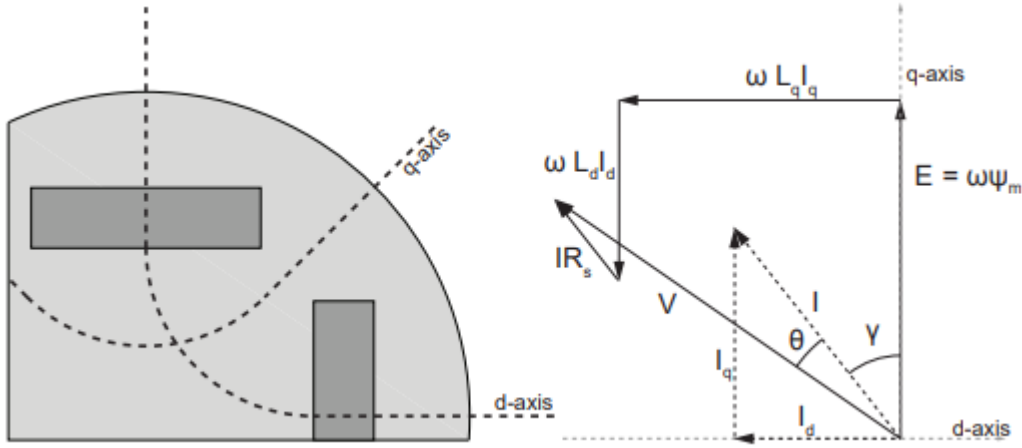
Şekil 3.8 : GMM için 4 farklı rotor yapısı.

Gömlü mıknatıslı yapının emniyet kritiklik kapsamında en önemli avantajlarından birisi yüksek kısa devre akımlarında manyetik koruma sağlanarak mıknatısların demanyetize olması önlenir [15]. Kısa devre durumundaki yüksek akımlar mıknatıslar arasındaki demir köprüler doyuma giderek ters yönlü yüksek manyetik alanine mıknatıslara ulaşmasını engeller. Ayrıca GMM, rotorları yüksek hızlarda oluşan yüksek merkezkaç kuvvetlerine iyi mukavemet gösterdiği için gaz türbinli motorlarda alternatör olarak kullanılır.

Mıknatısları rotor çekirdeği içerisine gömmek üretim açısından zorlayıcıdır. Ayrıca paramanyetik mil kullanımı zorunludur, çünkü mıknatıslar mile yakın konumlanır ve milin ferromanyetik olması durumunda manyetik akının bir kısmı mil üzerinden akar, hava aralığında kullanılamaz ve mil üzerinde istenmeyen akımlar akmasına neden olur. GMM’lerde kaçak akı miktarı fazladır, bu da güç faktörünü ve verimi düşürür.

Kutup sayısı ne kadar artarsa demir malzemede görülen bölgesel doymalar da o kadar artacaktır. Kutup sayısı arttıkça mıknatıslar birbirlerine yaklaşır ve dolayısıyla iki mıknatıs arasındaki demir miktarı azalır. Demir miktarının az olduğu bölgelerde bölgesel doymalar meydana gelir, bu durum endüklenen gerilim dalga şeklinin bir miktar bozulmasına neden olacaktır.

Gömülü mıknatıslı senkron alternatörlerde rotor çekirdeğinin içerisine yerleştirilmiş olan sürekli mıknatıslardan dolayı, manyetik akının izlediği yol yüzey mıknatıslı alternatörlere nazaran daha karmaşıktır. Gömülü mıknatıslı alternatörün karakteristiği d-q model üzerinden bu kısımda incelenecektir.



Şekil 3.9 : Gömülü mıknatıslı alternatörün d-q eksen takımı ve normal çalışma durumunda fazör diyagramı (stator direnci ihmal edilmiştir.) [16].

Gömülü mıknatıslı alternatörün d-q modeli şekil 3.9’da gösterildiği gibi akının rotor referans düzleminde d eksenini ve q eksenini olarak adlandırılan iki ortogonal eksen üzerinden akışını tanımlar. q eksenini akışı genellikle demir içerikli malzeme olan tek bir yüzeyden akarken d eksenini akışı içerisinde sürekli mıknatısların da olduğu yoldan akar. Halkalama akışı Ψ_m , pozitif d eksenini üzerinde yer alır, dolayısıyla indüklenen gerilim, $E = \omega_e \Psi_m$ pozitif q eksenini üzerinde bulunur.

d-q modele ait d ve q eksenini gerilimlerinin (V_d ve V_q) sürekli hal faz denklemleri şekil 3.8’deki fazör diyagramından faydalanılarak denklem 3.10 ve 3.11’deki gibi yazılır.

$$V_q = R_s I_q + \omega_e L_d I_d + \omega \Psi_m \quad (3.10)$$

$$V_d = R_s I_d - \omega_e L_q I_q \quad (3.11)$$

$$T = \frac{3}{2} p (\Psi_m I_q - (L_q - L_d) I_d I_q) \quad (3.12)$$

Burada p kutup çifti sayısını, L_d ve L_q d ve q eksenini endüktanslarını ifade eder. Denklem 3.12’de çıkış momenti denklemi verilmiştir. Yüzey mıknatısları alternatörlerden farklı olarak gömülü mıknatıslı alternatörlerde d ve q eksenini

endüktansları farklıdır. Sürekli mıknatısların manyetik geçirgenlikleri hava ile aynı kabul edildiği için d eksenindeki efektif hava aralığı q ekseninkinden fazladır. Sonuç olarak q eksenini endüktansı L_q , d eksenini endüktansı L_d 'den daha büyüktür.

Q eksenini endüktansı ve d eksenini endüktansı arasındaki oran çıkıklık oranı olarak tanımlanır ve denklem 3.13'deki gibi ifade edilir. Alan zayıflatma performansı ve moment karakteristiği için oldukça önemli bir parametredir.

$$\xi = \frac{L_q}{L_d} \quad (3.13)$$

Rotordaki çıkıklık, senkron relüktans makinelerde olduğu gibi relüktans momentine neden olur ve $(L_q - L_d)$ ile doğru orantılıdır. Relüktans momenti, mıknatısların oluşturduğu moment ile aynı yönlüdür ve birlikte gömülü mıknatıslı makinelerdeki çıkış momentini oluştururlar (denklem 3.12).

3.2.2.1 Endüklenen gerilim (zıt-emk) ve moment

Generatör modda çalıştırılan gömülü mıknatıslı makinelerin en büyük dezavantajlarından birisi endüklenen gerilim dalga şeklinin sinüsten yüzey mıknatıslı makinelere göre daha uzak olması ve ve bozucu harmonic bileşenlerin genliklerinin daha yüksek olmasıdır. Endüklenen gerilim daha önce açıklandığı gibi doğrudan rotor devrine ve mıknatıslar tarafından sağlanan manyetik alan ile doğru orantılıdır. Zıt emk denklem 3.14'deki gibi formülize edilir.

$$E_b = K_e w_m \quad (3.14)$$

Burada w_m mekanik açısal hızı ve K_e zıt-emk sabitini ifade eder. K_e denklem 3.15'deki gibi tanımlanır.

$$K_e = 2N_c B_g l R_{ro} \quad (3.15)$$

Burada R_{ro} hava aralığı yarıçapını ve l makinenin aksenal uzunlupunu ifade eder. Denklem 3.14 ve 3.15 kullanılarak moment ifadesi elde edilebilir.

$$T = \frac{E_b i}{w_m} = K_e i \quad (3.16)$$

Denklem 3.16 ayrıca denklem 3.17'yi doğrular niteliktedir.

$$T = K_e D^2 l \quad (3.17)$$

Burada D rotor çapını ifade eder. Zıt emk sabiti ve moment sabiti sarım sayısı N ile orantılıdır ve $N.i$ çarpımı sabit bir sayı olduğu için bu sabitler makine performansını belirlemek için en doğru sabitler değildir. Makine performansı hakkında daha doğru yorum yapılabilmesini sağlayan bir başka sabit vardır ve motor sabiti olarak adlandırılır, denklem 3.18'deki gibi ifade edilir.

$$K_m = \frac{B_g R_{ro}}{\sqrt{\rho(T)}} \sqrt{V_{wb}} \quad (3.18)$$

Burada V_{wb} bir bobindeki çıplak bakır iletkenlerin toplam hacmini ve $\rho(T)$ T sıcaklığındaki bakırın öz direncini ifade eder. Motor sabiti makinenin yük altında oluşan kayıpları ile birlikte ortaya çıkan moment verimliliğini tanımlar. Bu yüzden motor sabiti sadece istenen çıkış değerlerine bağlı değildir, ayrıca çıkışta istenen değerleri sağlamak için ortaya çıkan maliyet ile de ters orantılıdır. Denklem 3.19'da tanımlanan birim hacimden alınabilecek moment ifadesi, toplam motor hacminden alınabilecek toplam momentin elde edilmesini sağlar. Makinelerin karşılaştırılması ve istenilen uygulama için makinenin başlangıç boyutlarını belirlemek için kullanılan oldukça yaygın bir ifadedir.

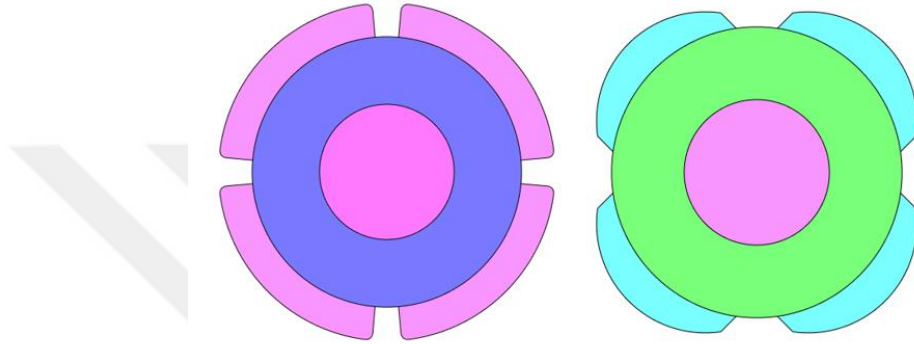
$$T_v = \frac{2N_m B_g N_i}{\pi R_{ro}} \quad (3.19)$$

Motor çalışmanın bir çıktısı olan moment için verilen bu sabitler generator çalışma için de kıymetlidir. Çıkış büyüklükleri ve makine hacmi arasındaki bağlantıyı anlamlandırmada yardımcı olur.

3.2.3 Yüzey mıknatıslı senkron alternatörler

Sürekli mıknatısların rotor yüzeyine yerleştirildiği, generatör uygulamalarında en yaygın kullanılan mıknatıslı makine topolojisidir. Merkezkaç kuvvetine dayanması için mıknatıslar rotor yüzeyine yapıştırıcıyla sabitlenir veya paramanyetik bir malzeme ile, örn. karbon fiber sarılır. Yüksek hızlara çıkıldıkça merkezkaç kuvveti artacağından dolayı daha güvenilir yöntemler tercih edilir, bu bölümün devamında detaylıca açıklanacaktır. Mıknatıslar genellikle radial yönlü manyetiklenir ve düzgün bir akı dağılımı için manyetik alan çizgilerinin mıknatıs yüzeyine paralel şekilde olması

istenir, nadiren özel uygulamalarda mıknatıslar çevresel yönde manyetiklenir. Eksenler arasında relüktans farkı olmadığı için d ve q eksenli endüktansları neredeyse eşittir, bu yüzden SMM'lerde d-q eksen modeli söz konusu değildir. Eksenler arasındaki relüktans farkından dolayı ortaya çıkan moment bileşeni relüktans momenti, yüzey mıknatıslı makinelerde oluşmaz. Basit rotor geometrisi ile yüzey mıknatıslı makine rotorları gömülü mıknatıslı makine rotorlarına göre konstrüksiyon daha kolay üretilebilir. Şekil 3.10'da yüzey mıknatıslı makine rotor yapıları gösterilmiştir.



Şekil 3.10 : YMM rotor yapıları.

Mıknatısların şekli ve aralarındaki mesafe optimize edilerek hava aralığındaki akı dağılımını düzenlemek ve endüklenen gerilim dalga şeklini sinüse yaklaştırmak mümkündür.

YMM'ler küçük rotor çapına ve düşük eylemsizlik momentine sahiptir, gaz türbinli motorların yüksek hızlarda çalıştığını göz önünde bulundurduğumuzda bu durum avantaj sağlamaktadır, rotor mile, dolayısıyla dişli kutusuna daha düşük bir eylemsizlik aktaracak ve motorun daha düşük titreşimde çalışmasını sağlayacaktır. Mıknatısların manyetik geçirgenlikleri düşük ve neredeyse hava ile aynı olduğu için makinenin etkin hava aralığı mıknatıs kalınlığı ve gerçek hava aralığının toplamı kadardır. Kısa devre durumunda ortaya çıkan yüksek akımların neden olduğu endüvi reaksiyonu, mıknatısların kolay demanyetize olmasına neden olur, bu durum göz önüne alınarak mıknatısların demanyetize olmasını engellemek adına tasarımda özel çözümler uygulanmalıdır.



4. EGÜS ALTERNATÖRÜ TASARIMLARI

Hedef motor TEI-TS1400 için aynı isterler çerçevesinde 3 farklı topolojide mıknatıslı alternatör tasarımı gerçekleştirildi. Alternatör 3 faz AA çıkış gerilimi tam dalga kontrolsüz doğrultucu ile doğrultulduktan sonra yük için istenilen seviyeye, bu çalışma için 28.5 V, getirilmek adına DC/DC çevirici modüller kullanılır. Bu çalışma kapsamında giriş gerilim aralığı 120-420 VDA, gücü 375 W olan bir DC/DC çevirici modülü tercih edilmiştir. İsterler kapsamında olan 1 kW gücü sağlamak adına modülden 3 adet paralel şekilde kullanılması planlanmaktadır. Çizelge 4.1’de alternatör tasarımı için uygulama isterleri verilmiştir.

Çizelge 4.1 : Uygulama isterleri

Parametre	Değer	Birim
Stator dış çapı	≤ 85	mm
Eksenel uzunluk	≤ 25	mm
Güç	≥ 700	W
Devir aralığı	15.000, 30.000	dev/dk
Ağırlık	1.000	g
Sıcaklık aralığı	-40, +150	°C

Analitik hesaplamalar ile belirlenen ana boyutlar, bu çalışmada ister olarak mevcut olduğundan tasarıma bu değerler hesaplanmaksızın ve ister sınırları içerisinde kalacak şekilde başlanmıştır. İsterler doğrultusunda mıknatıs destekli senkron relüktans makine, gömülü mıknatıslı makine ve yüzey mıknatıslı makine tasarımları gerçekleştirilmiştir. Yapılan SEY tabanlı manyetik analizler sonucunda performans değerlendirmeleri olan zıt – emk, vuru moment, manyetik akı dağılımı ve kısa devre akımı gibi kriterler elde edilmiştir.

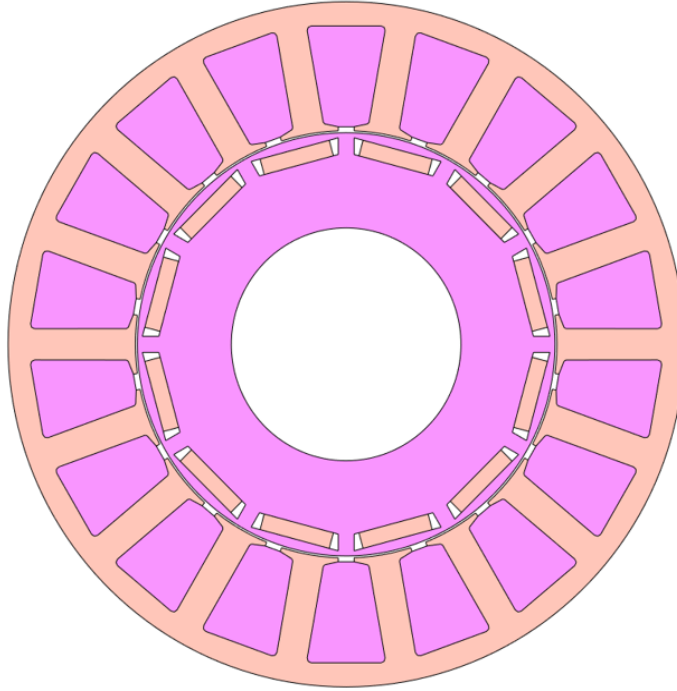
Mıknatısların çalışma sıcaklığı manyetik enerjisini oldukça etkilediğinden dolayı çıkış gerilimi de sıcaklıkla değişmektedir. Sıcaklık arttıkça manyetik enerji azalır ve endüklenen gerilimin genliği düşer. En yüksek devirde endüklenen gerilimin üst sınırını belirlemek için yapılan analizler boşa ve mıknatıs sıcaklığı -40 °C’de, rölanti devirde endüklenen gerilimin alt sınırını belirlemek için yapılan analizler ise yükte ve 200 °C’de gerçekleştirilmiştir.

Tasarımı yapılan makinelerin analizleri 2B olarak gerçekleştirilmiştir, izin verilen boyut ve gerilim sınırları içerisinde hata toleransı en yüksek ve emniyet kritik uygulamaya en yatkın olan tasarım, analiz sonuçları değerlendirilerek belirlenecektir.

4.1 Gömülü Mıknatıslı Makine

Gömülü mıknatıslı makinede (GMM) rotor yapısından ötürü bölgesel doyumlar gerçekleştiği için tasarım yapılırken mıknatısların konumları optimize edilerek sinus formuna yakın bir endüklenen gerilim dalga şekli elde edilmiştir. Bu topolojide genelde dağıtılmış sargı tercih edilmesine karşın dış üstü (konsantrik) sargının hata toleransı daha yüksek olduğu için dış üstü sargı tercih edilmiştir.

Şekil 4.1’de tasarımı yapılan gömülü mıknatıslı makine gösterilmiştir.

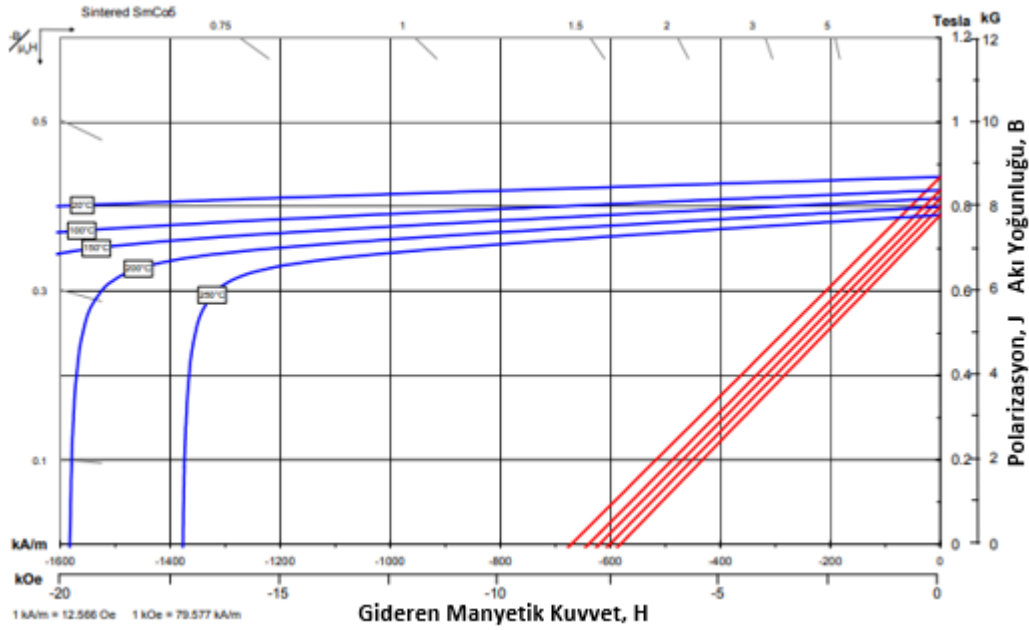


Şekil 4.1 : GMM 2B görünüm.

Bölgesel doyumlar göz önünde bulundurularak mıknatıslar hava aralığına mümkün olduğunca yakın konumlandırılmıştır, bu sayede mıknatıslardan mümkün olan en yüksek verim alınmış, akının maruz kaldığı relüktans düşük tutulmuş ve güç yoğunluğunun yüksek olması sağlanmıştır.

Stator çekirdeği, bakır sargılar, rotor çekirdeği ve mıknatısların toplam ağırlığına alternatörün kuru ağırlığı denir ve tasarımı yapılan GMM'nin kuru ağırlığı 0.8724 kg'dır.

Mıknatıs olarak SmCo₅ kullanılmıştır, BH eğrisi şekil 4.2'de, manyetik büyüklükleri çizelge 4.2'de gösterilmiştir.

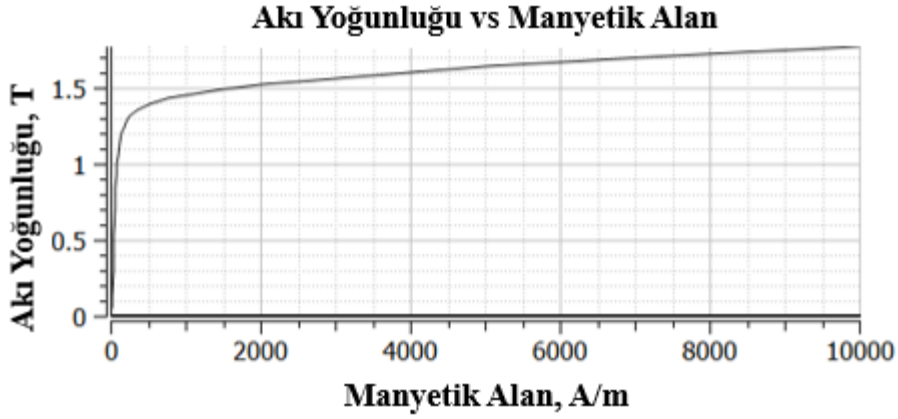


Şekil 4.2 : SmCo₅ BH eğrisi [17].

Çizelge 4.2 : SmCo₅ manyetik büyüklükler.

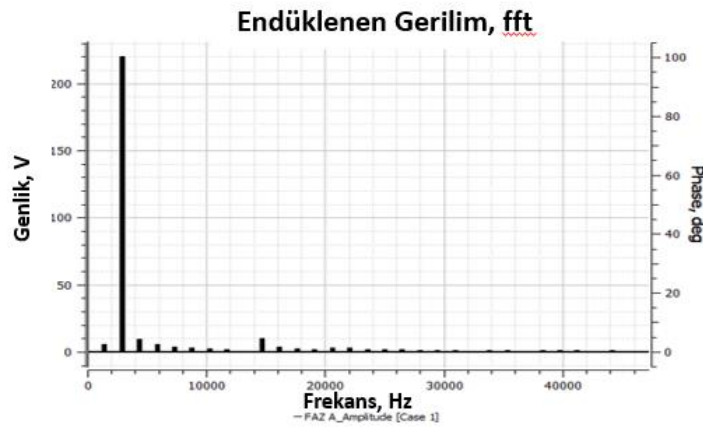
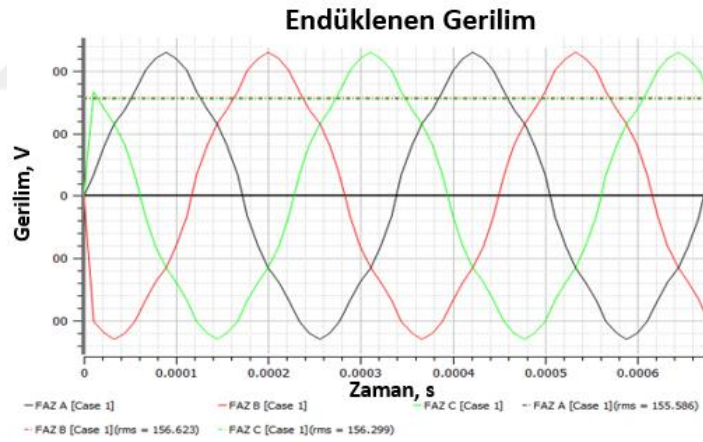
Parametre	Değer	Birim
B _r , Remenanas Mıknatısiyet	0.87	Tesla
H _{cB} , Koersivite	650	kA/m
H _{cJ} , Esas Koersivite	2,400	kA/m
BH _{max} , maksimum enerji çarpanı	143	kJ/m ³
Maksimum çalışma sıcaklığı	250	°C

Stator nüvesinde kullanılan manyetik sac malzemesi hem verim hem de güç yoğunluğu için önemlidir. Demir kayıpları frekansın karesiyle orantılı olarak artar, bu yüzden özellikle yüksek frekanslı uygulamalarda demir kayıplarının az olması için kullanılan sac malzemenin mümkün olduğu kadar düşük kayıplı seçilmesi gereklidir. Yüksek güç yoğunluğu için ise manyetik doyma noktası yüksek olan bir sac seçilmesi gerekmektedir. Stator için kesilen sac malzemenin artanıyla da rotor sac paketi oluşturulur, bu sayede ham malzeme temini kolaylaşır ve maliyet azalır. Bu çalışmada sac malzeme olarak M235-35A seçilmiştir ve BH eğrisi şekil 4.3'de gösterilmiştir.



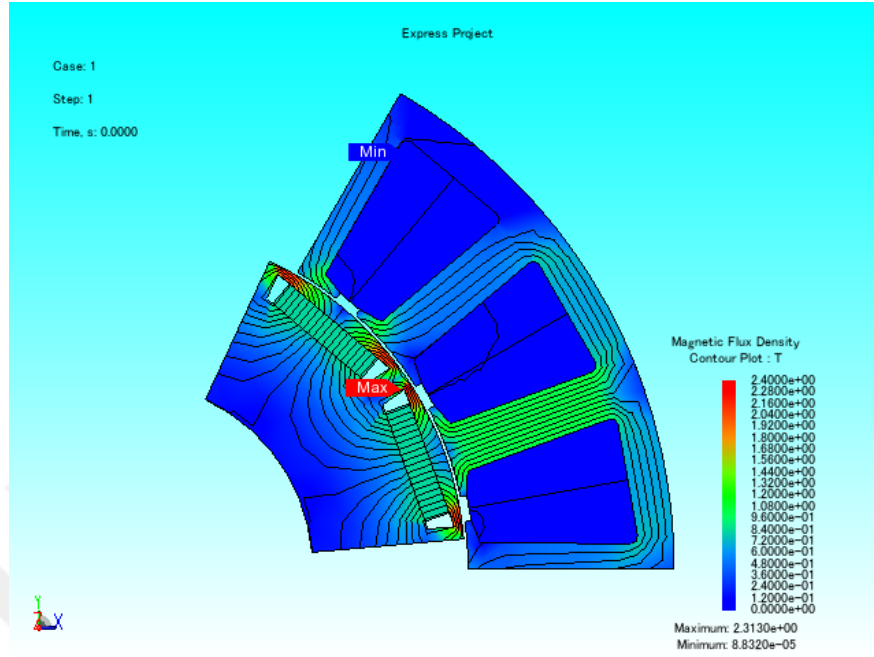
Şekil 4.3 : M235-35A BH eğrisi.

Analitik tasarımı yapılan gömülü mıknatıslı senkron makinenin SEY tabanlı analiz programı JMAG ile manyetik analizleri gerçekleştirilmiştir. Kurulan 2B model ile yapılan -40 °C mıknatıs sıcaklığı, maksimum devir (30.000 rpm) ve boştta çalışma durumundaki endüklenen gerilim makinenin endüklediği maksimum gerilimdir ve manyetik analiz sonucunda elde edilen zamana bağlı grafiği ve harmonik dağılımı şekil 4.4’de verilmiştir.



Şekil 4.4 : GMM endüklenen maksimum gerilim ve harmonik dağılımı.

Bileşke akının maksimum olduğu aynı koşullar altında makine eksenel düzlemindeki akı yolları ve manyetik akı yoğunluğu dağılımı şekil 4.5’de gösterilmiştir.

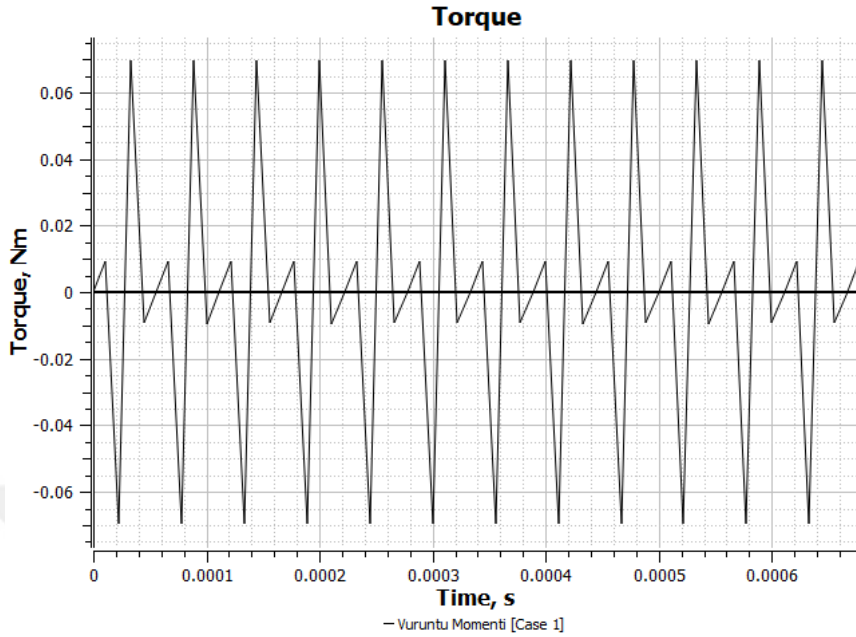


Şekil 4.5 : GMM akı yolları ve akı yoğunluğu dağılımı.

Şekil 4.5’de görüldüğü ve daha önce açıklandığı gibi rotorda mıknatısların uç kısmındaki demir malzemede bölgesel doyumlar meydana gelmiştir. Stator dişlerinde 1.5 T, boyundurukta 1.4 T olan manyetik akı yoğunluğu ile statordan maksimum seviyede faydalanılmıştır. Yine de bölgesel doyumların görüldüğü kısımlarda 2.3 Teslalara kadar çıkan akı yoğunlu endüklenen gerilim dalga şeklinde bozulmalara, bozucu harmoniklerin genliklerinin artmasına neden olmuştur.

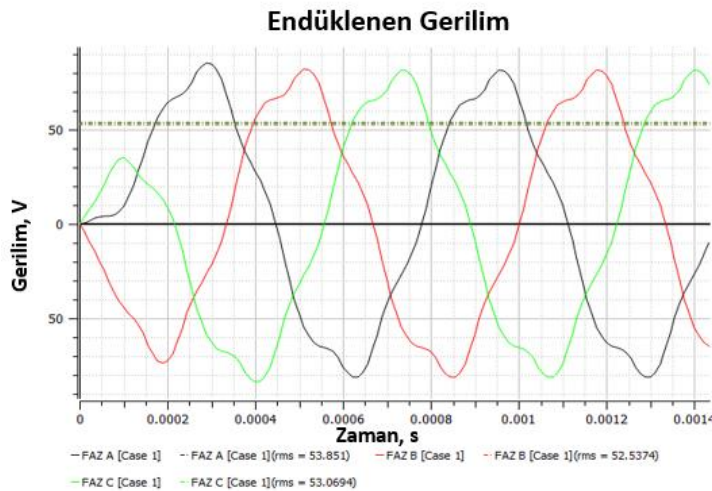
Alternatörlerde oluşan vuruuntu momenti aynı zamanda boşta çalışmada görülen momenttir ve genliğinin nominal mommetin 5%’ ini geçmemesi istenir. Vuruuntu momenti ne kadar yüksek olursa akternatör dişli kutusuna o kadar salınım aktarır ve motor titreşimine sebep olur, bu sebeple vuruuntu momentinin en düşük seviyede

tutulması gereklidir. Tasarımı yapılan GMM vuruntu momenti şekil 4.6'da gösterilmiştir, tepeden tepeye değeri 0.14 Nm'dir.

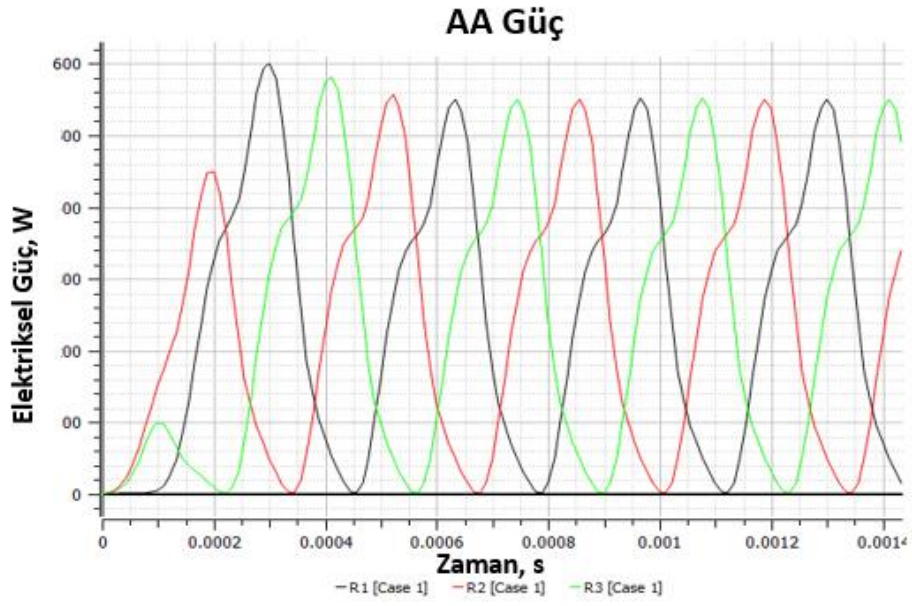


Şekil 4.6 : GMM vuruntu momenti.

Makinede endüklenen minimum gerilim 200 °C mıknatıs sıcaklığı, rölanti devir (15.000 rpm) ve tam yükte (700 W) çalışma durumunda endüklenir. Bu koşullar altında endüklenen gerilimin zamana bağlı grafiği ve AA güç grafiği şekil 4.7 ve 4.8' de gösterilmiştir. Her fazın eşit miktarda yüklenmesi ile alternatif gerilim doğrultulmadan AA olarak alternatörün gücü tayin edilebilir. Toplam güç her faz için ortaya çıkan sinus dalga formlu akım-gerilim çarpımlarının ortalama değerlerinin toplamına eşittir.

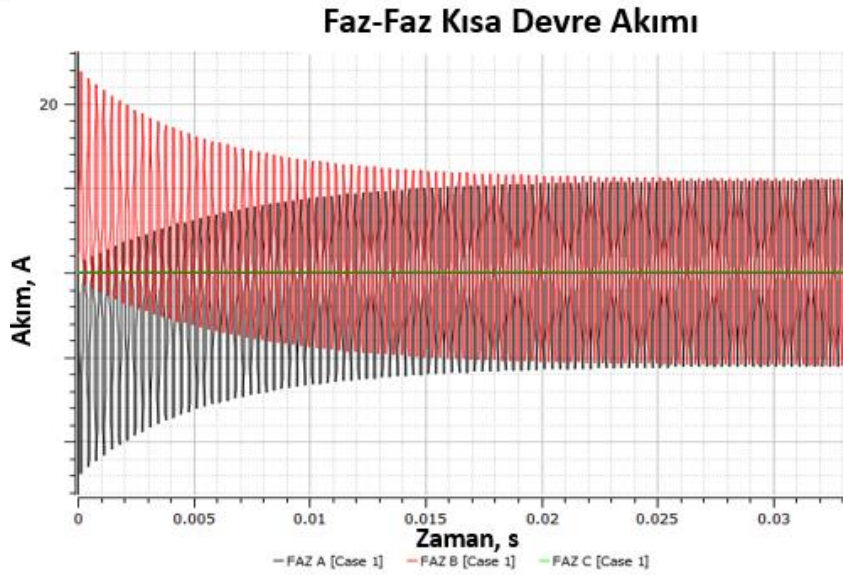


Şekil 4.7 : GMM endüklenen minimum gerilim.



Şekil 4.8 : GMM rölanti devir, maksimum güç.

Tasarımı yapılan GMM'nin hata toleransını değerlendirmek için faz-faz kısa devre durumu analiz edilmiş ve hata durumunda oluşan kısa devre akımları şekil 4.9'da gösterilmiştir. Yapılan analizler sonucu kısa devre akımının tepe değerinin 11 A olduğu görülmüştür.



Şekil 4.9 : GMM kısa devre akımı.

Kısa devre anında sargılarda oluşan akım yoğunluğu denklem 4.1' e göre 8.55 A/mm² olarak bulunmuştur.

$$q_{cu} = \frac{I_f}{n_i \times A} \quad (4.1)$$

Burada q_{cu} akım yoğunluğunu, n_i her bir sarımdaki iletken sayısını ve A her bir iletkenin kesit alanını ifade etmektedir.

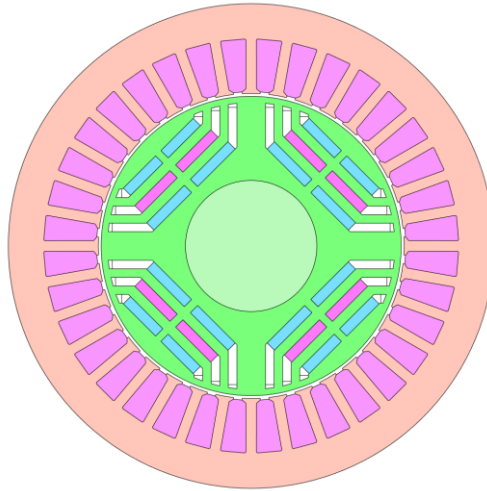
Tablo 4.1' e göre tamamı kapalı alternatör tasarımı için kısa devre anı normal çalışma koşulu olarak kabul edilebilir düzeydedir ve alternatör kısa devre durumunda görev süresini tamamlayabilir.

Çizelge 4.3 : Soğutma tipine göre akım yoğunluğu.

Soğutma Tipi	A/mm ²
Tamamı kapalı	1.5 - 5
Hava ya da fan soğutmalı	5 - 10
Sıvı soğutmalı	10 - 30

4.2 Mıknatıs Destekli Senkron Relüktans Makine

Mıknatıs destekli senkron relüktans makinelerde rotor yapısından ötürü akı bariyerleri arasında bölgesel doyumlar gerçekleştiği için tasarım yapılırken mıknatısların konumları optimize edilerek bölgesel doyumlar en aza indirilmiş ve sinus formuna yakın bir endüklenen gerilim dalga şekli elde edilmiştir. Bu topolojide dağıtılmış sargı yapısı tercih edilmiştir. Oluk – kutup oranı dağıtılmış sargı yapısına uygun olarak belirlenmiştir.



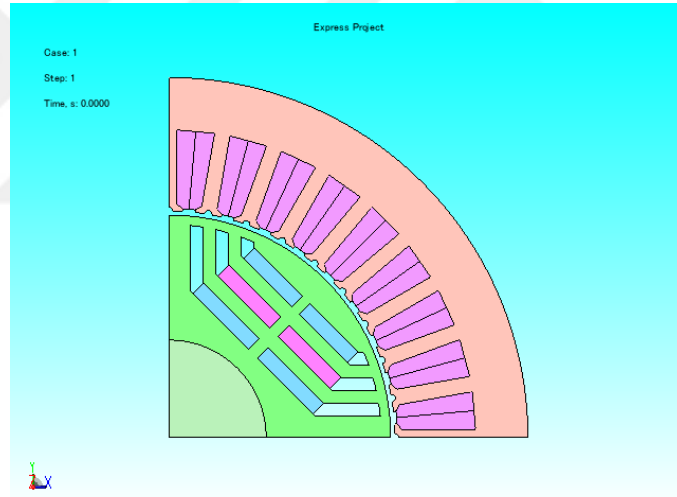
Şekil 4.10 : SnRM 2B görünüm.

Şekil 4.10’da tasarımı yapılan mıknatıs destekli senkron relüktans makine gösterilmiştir.

Yüksek hızlarda artan merkezkaç kuvvetine karşı dayanımı artırmak için akı köprüsü kalınlığı 1 mm olarak seçilmiştir, ayrıca yine aynı sebepten ötürü bariyer köprüleri oluşturulup kalınlıkları 1.4 mm olarak belirlenmiştir.

Alternatörün kuru ağırlığı 0.9572 kg’dır.

Emk dalga şeklinin sinüse yaklaşması için üç bariyerli yapı kurulmuştur, akı bariyer kalınlıkları, mıknatıs uzunlukları ve mıknatısların yanındaki hava kanallarının tasarımı aynı amaca yönelik yapılmıştır. SnRM’lerde akı yolları GMM ve YMM’lere göre daha karmaşık olduğu için emk dalga formunu düzeltmek için ek tasarım önlemleri gerekmektedir, bu kapsamda stator dış uçlarında hava aralığından statora giren akıyı yönlendirmek amacıyla boşluklar bırakılmıştır. Literatürde *dummy slot* [18] olarak geçen tasarım çözümünün uygulandığı makine görseli şekil 4.11’de gösterilmiştir.



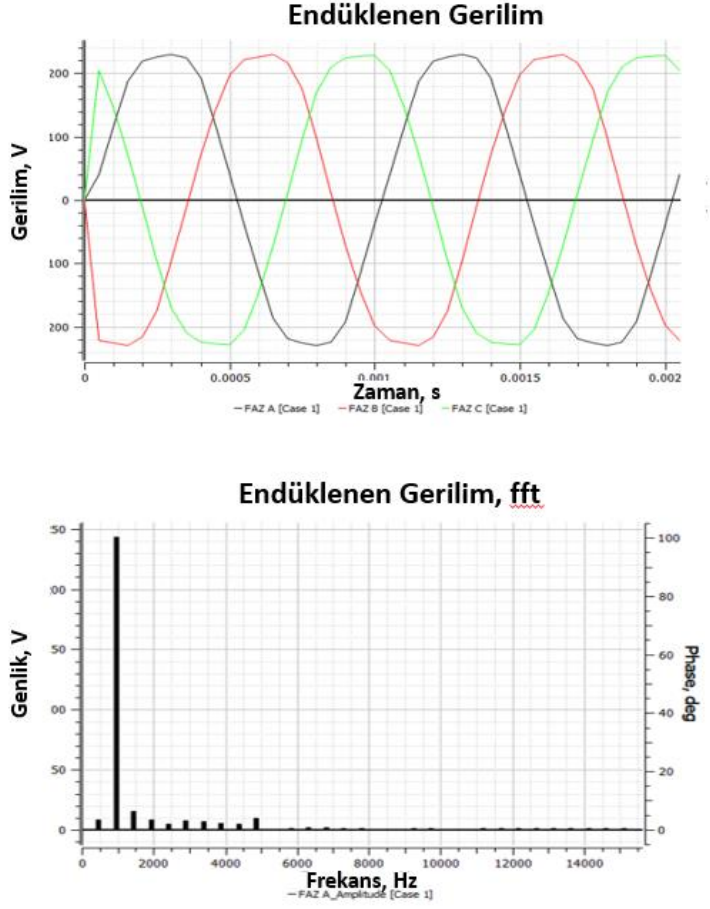
Şekil 4.11 : Dummy slot yapısı.

Mıknatıs olarak SmCo₅ kullanılmıştır, BH eğrisi şekil 4.2’de, manyetik büyüklükleri çizelge 4.2’de gösterilmiştir.

Bu topoloji için sac malzeme olarak M235-35A seçilmiştir ve BH eğrisi şekil 4.3’de gösterilmiştir.

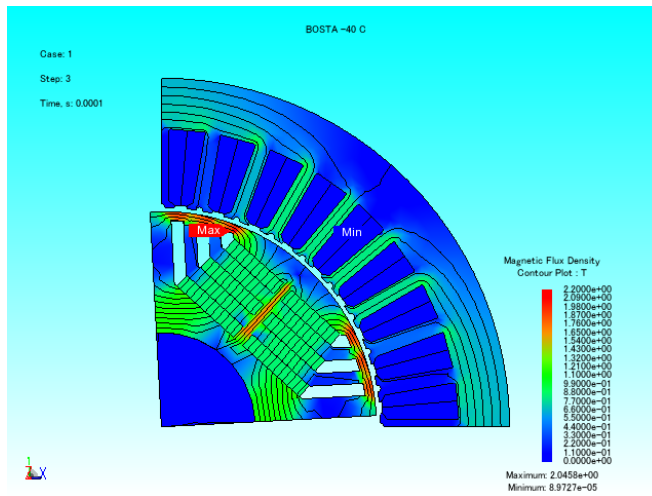
Analitik tasarımı yapılan gömülü mıknatıslı senkron makinenin SEY tabanlı analiz programı JMAG ile manyetik analizleri gerçekleştirilmiştir. Kurulan 2B model ile yapılan -40 °C mıknatıs sıcaklığı, maksimum devir (30.000 rpm) ve boşta çalışma durumundaki endüklenen gerilim makinenin endüklediği maksimum gerilimdir ve

manyetik analiz sonucunda elde edilen zamana bağılı grafiği ve harmonik dağılımı şekil 4.11’de verilmiştir.



Şekil 4.12 : SnRM endüklenen maksimum gerilim ve harmonik dağılımı.

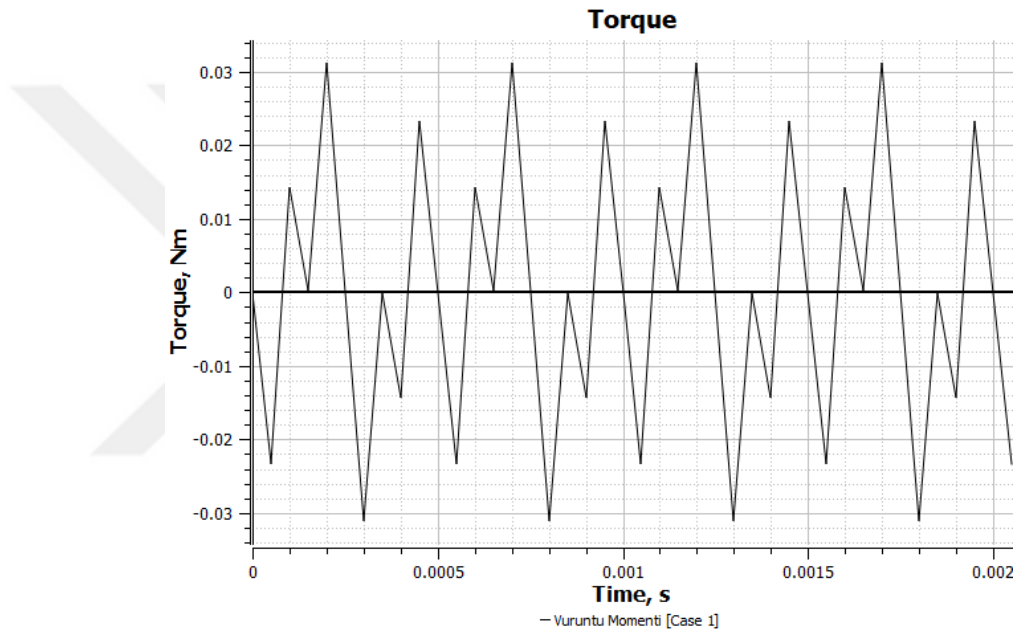
Bileşke akının maksimum olduğu aynı koşullar altında makine aksel düzlemindeki akı yolları ve manyetik akı yoğunluğu dağılımı şekil 4.12’de gösterilmiştir.



Şekil 4.13 : SnRM akı yolları ve akı yoğunluğu dağılımı.

Şekil 4.12’de görüldüğü ve daha önce açıklandığı gibi rotorda akı köprüleri ve bariyer köprülerinde demir malzemede bölgesel doyumlar meydana gelmiştir. Stator dişlerinde 1.2 T, boyundurukta 1 T olan manyetik akı yoğunluğu ile statordan maksimum seviyede faydalanılmıştır. Yine de bölgesel doyumların görüldüğü kısımlarda 2 Teslalara kadar çıkan akı yoğunlu endüklenen gerilim dalga şeklinde bozulmalara, bozucu harmoniklerin genliklerinin artmasına neden olmuştur. Bu bozukluk uygulanan *dummy slot* yöntemi ile bir miktar giderilmiştir.

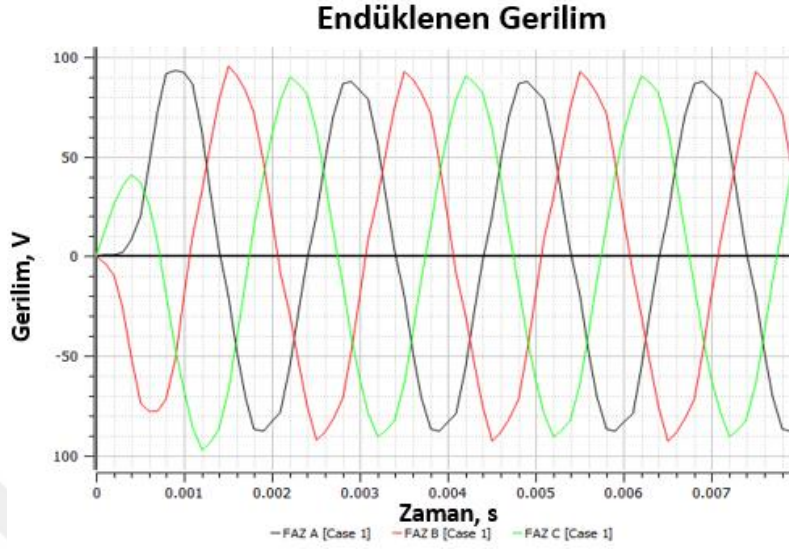
Tasarımı yapılan GMM vuruğu momenti şekil 4.13’de gösterilmiştir, tepeden tepeye değeri 0.06 Nm’dir.



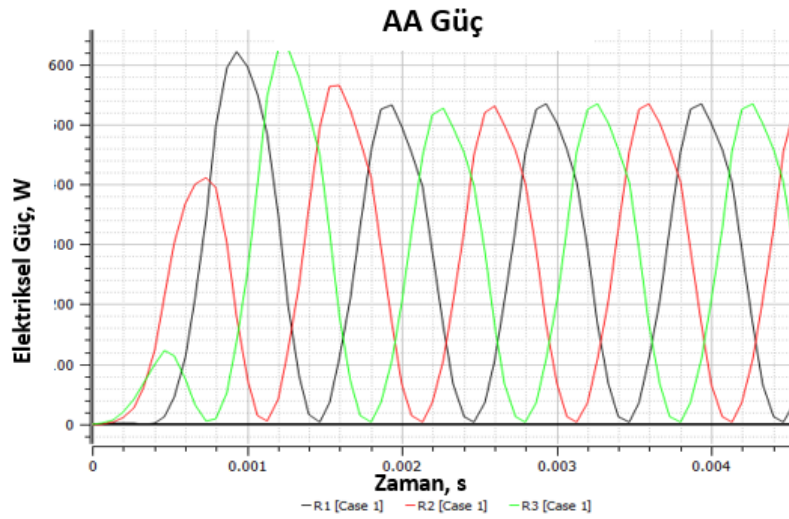
Şekil 4.14 : SnRM vuruğu momenti.

Makinede endüklenen minimum gerilim 200 °C mıknatıs sıcaklığı, rölanti devir (15.000 rpm) ve tam yükte (700 W) çalışma durumunda endüklenir. Bu koşullar

altında endüklenen gerilimin zamana bağlı grafiği ve AA güç grafiği şekil 4.14 ve 4.15’ de gösterilmiştir.

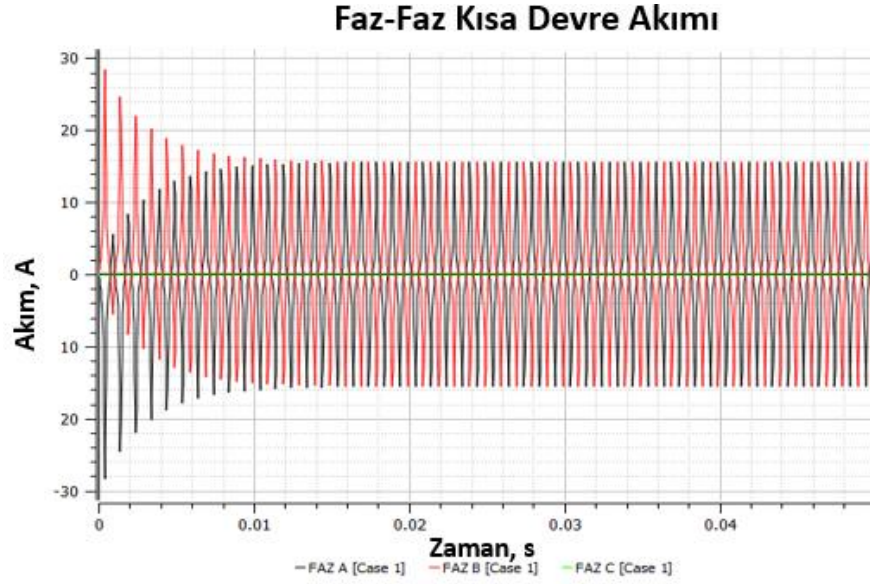


Şekil 4.15 : SnRM endüklenen minimum gerilim.



Şekil 4.16 : SnRM rölanı devir, maksimum güç.

Tasarımı yapılan SnRM' nin hata toleransını değerlendirmek için faz-faz kısa devre durumu analiz edilmiş ve hata durumunda oluşan kısa devre akımları şekil 4.16'da gösterilmiştir. Yapılan analizler sonucu kısa devre akımının tepe değerinin 15 A olduğu görülmüştür.



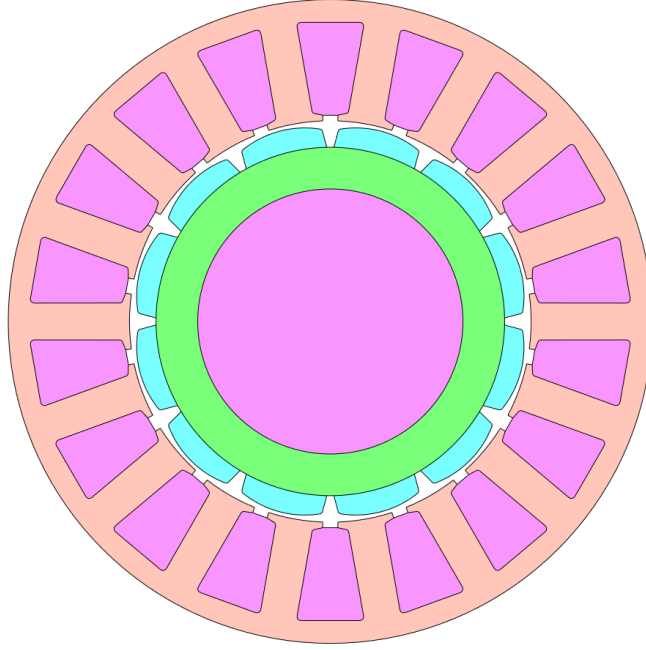
Şekil 4.17 : SnRM kısa devre akımı.

Kısa devre anında sargılarda oluşan akım yoğunluğu denklem 4.1' e göre 21 A/mm^2 olarak bulunmuştur.

Tablo 4.1' e göre sıvı soğutmalı alternatör tasarımı için kısa devre anı normal çalışma koşulu olarak kabul edilebilir düzeydedir ve alternatör kısa devre durumunda görev süresini tamamlayabilir. Ancak sıvı soğutma sistemi ağırlık, hacim ve kompleksite bakımından önemli handikaplar olduğu için bu çalışmada SnRM'lerin havacılık motorlarında emniyet kritik alternatör olarak kullanılamayacağı değerlendirilmiştir.

4.3 Yüzey Mıknatıslı Makine

Yüzey mıknatıslı makinelerde mıknatıslar rotor çekirdeğinin yüzeyine yapışık halde yani mekanik hava aralığında bulunur ve mıknatıs geometrisi istenildiği gibi şekillendirilebilir. Emk dalga formunun sinüse en yakın ve bozucu harmonik genliklerinin düşük olması için yarı dairesel mıknatıs yapısı tercih edilmiştir. Bu sayede stator dişlerine giren akı miktarı mıknatısların orta kısımlarında fazla iken kenarlara gidildikçe azalmaktadır. Şekil 4.18'de tasarımı yapılan yüzey mıknatıslı makinenin 2B görüntüsü verilmiştir.



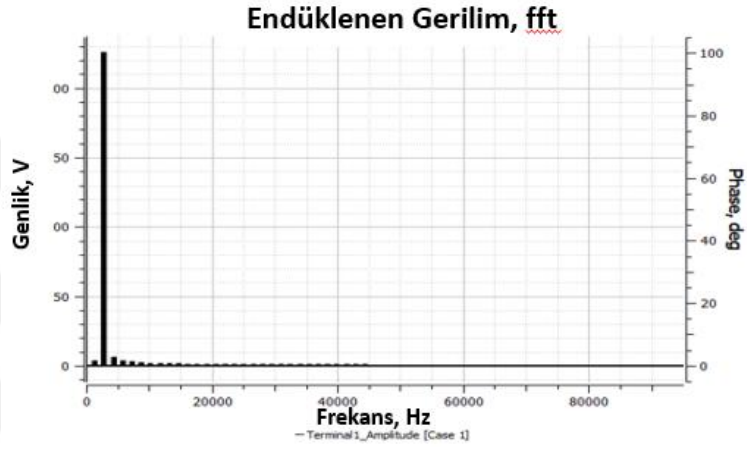
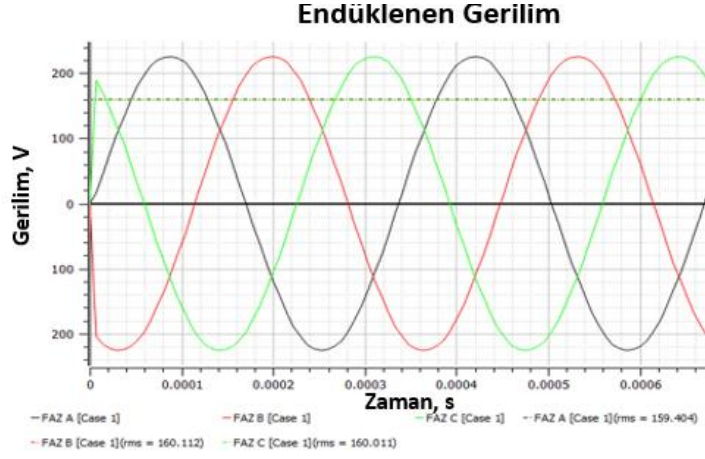
Şekil 4.18 : YMM 2B görünüm.

Diş üstü sargının kullanıldığı tasarımda sargı sonları düşük tutularak hata toleransı yüksek ve hafif bir tasarım hedeflenmiştir. Ayrıca mıknatısların oturduğu yüzey olan rotor çekirdeği akı yolları gözetilerek ince tutulmuş ve rotorun diğer topolojilere göre daha hafif olması sağlanmıştır. Alternatörün kuru ağırlığı 0.4664 kg'dır.

Mıknatıs olarak SmCo_5 kullanılmıştır, BH eğrisi şekil 4.2'de, manyetik büyüklükleri çizelge 4.2'de gösterilmiştir.

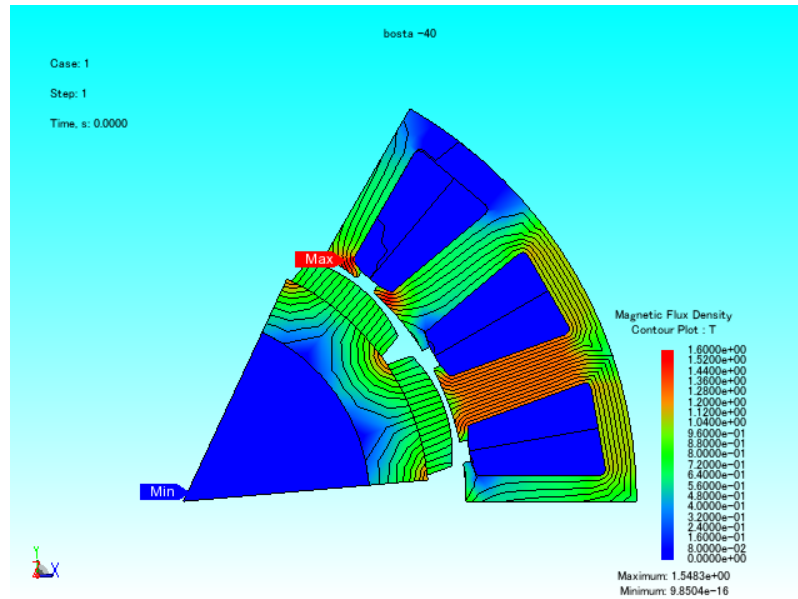
Bu topoloji için sac malzeme olarak M235-35A seçilmiştir ve BH eğrisi şekil 4.3'de gösterilmiştir.

Analitik tasarımı yapılan gömülü mıknatıslı senkron makinenin SEY tabanlı analiz programı JMAG ile manyetik analizleri gerçekleştirilmiştir. Kurulan 2B model ile yapılan $-40\text{ }^\circ\text{C}$ mıknatıs sıcaklığı, maksimum devir (30.000 rpm) ve boşta çalışma durumundaki endüklenen gerilim makinenin endüklediği maksimum gerilimdir ve manyetik analiz sonucunda elde edilen zamana bağlı grafiği ve harmonik dağılımı şekil 4.19'da verilmiştir.



Şekil 4.19 : YMM endüklenen maksimum gerilim ve harmonik dağılımı.

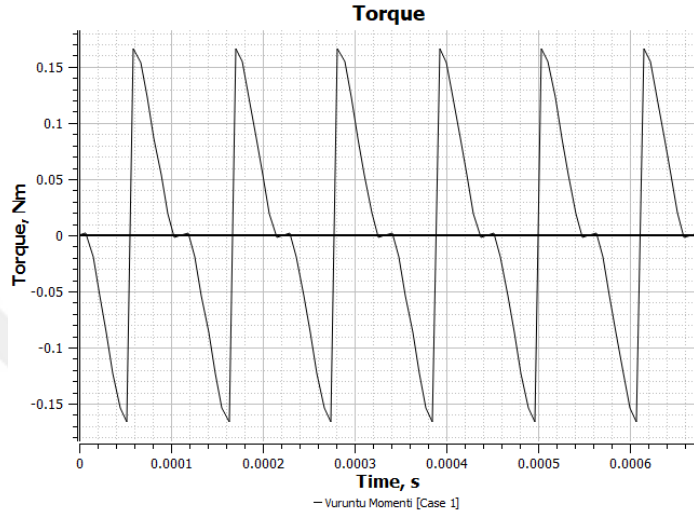
Bileşke akının maksimum olduğu aynı koşullar altında makine eksenel düzlemindeki akı yolları ve manyetik akı yoğunluğu dağılımı şekil 4.20’de gösterilmiştir.



Şekil 4.20 : YMM akı yolları ve akı yoğunluğu dağılımı.

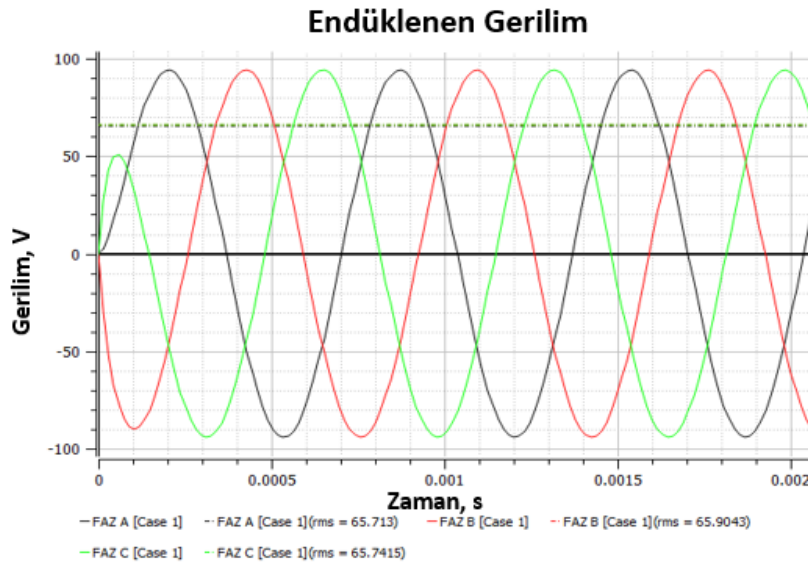
Şekil 4.20’de görüldüğü gibi stator ve rotorda herhangi bir doyma gerçekleşmemiştir. Akı yoğunluğu dişlerde 1.5 T, boyundurukta 1.2 T seviyelerindedir. Yüzey mıknatıslı yapının avantajlarından biri olarak da rotor çekirdeğinde akı yoğunluğu ve dolayısıyla demir kaybı çok düşük seviyelerdedir.

Tasarımı yapılan YMM vuruğu momenti Şekil 4.13’de gösterilmiştir, tepeden tepeye değeri 0.3 Nm’dir.

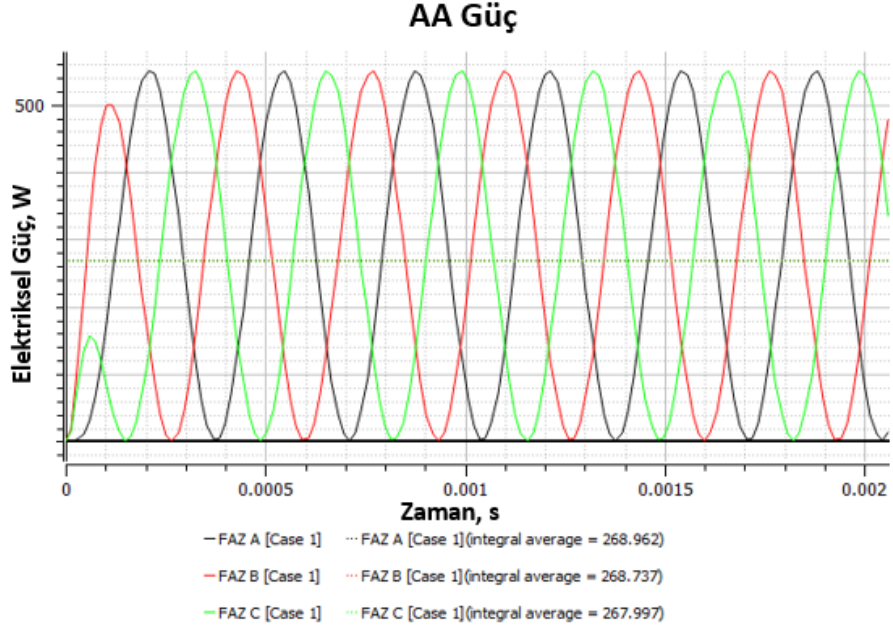


Şekil 4.21 : YMM vuruğu momenti.

Makinede endüklenen minimum gerilim 200 °C mıknatıs sıcaklığı, rölanti devir (15.000 rpm) ve tam yükte (700 W) çalışma durumunda endüklenir. Bu koşullar altında endüklenen gerilimin zamana bağılı grafiğı ve AA güç grafiğı Şekil 4.22 ve 4.23’ de gösterilmiştir.

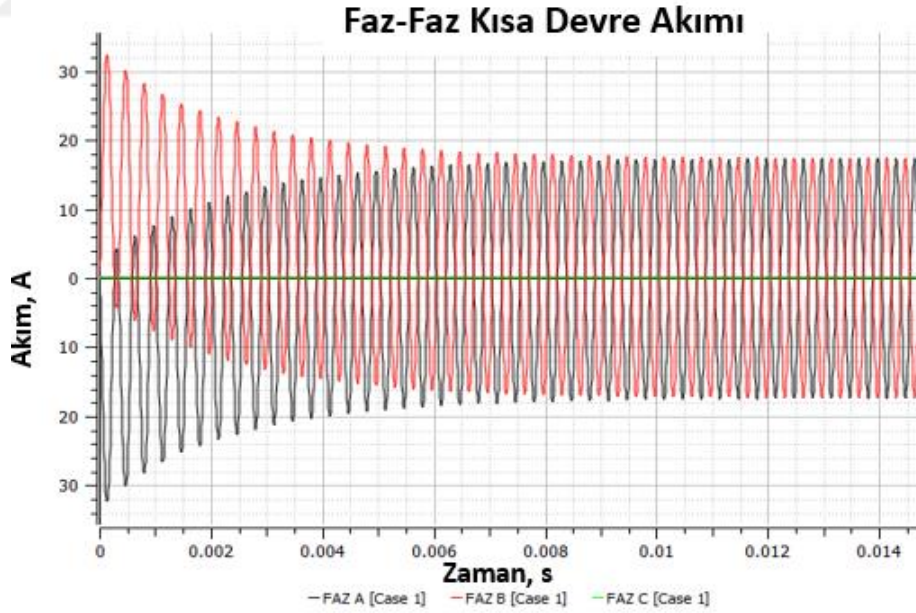


Şekil 4.22 : YMM minimum gerilim.



Şekil 4.23 : YMM rölanı devir, maksimum güç.

Tasarımı yapılan GMM'nin hata toleransını değerlendirmek için faz-faz kısa devre durumu analiz edilmiş ve hata durumunda oluşan kısa devre akımları şekil 4.24' de gösterilmiştir. Yapılan analizler sonucu kısa devre akımının tepe değerinin 17 A olduğu görülmüştür.



Şekil 4.24 : YMM kısa devre akımı.

Kısa devre anında sargılarda oluşan akım yoğunluğu denklem 4.1' e göre 18 A/mm^2 olarak bulunmuştur.

Tablo 4.1' e göre hava soğutmalı alternatör tasarımı için kısa devre anı normal çalışma koşulu olarak kabul edilebilir düzeydedir ve alternatör kısa devre durumunda görev süresini tamamlayabilir. Yüzey mıknatıslı alternatör yapısı itibari ile tasarım iyileştirmelerine oldukça açık bir topolojidir, bu sayede akım yoğunluğu daha da azaltılıp alternatör tam kapalı şekilde çalıştırılabilir.

4.4 Karşılaştırma

Emniyet kritik alternatör kapsamında tasarıma yapılan topolojilerde aşağıdaki parametreler aynı tutulmuştur:

- Dış çap
- Maksimum gerilim ve güç
- Kullanılan aktif kısım malzemeleri

Farklı topolojiler farklı güç yoğunluklarına ve güç faktörlerine sahip olduğu için aksenel uzunluk ve sarım sayısı değerleri topolojiler arasında farklılık göstermiştir. Yapılan tasarımlar sırasında sarım sayısının kısa devre akımını etkileyen en önemli parametrelerden biri olduğu görülmüştür ve her bir alternatör tasarımı yapılırken yüksek sarım sayısı tercih edilmiştir.

Çizelge 4.4 : Topoloji karşılaştırması.

Topoloji	Ağırlık [kg]	Kısa Devre Akımı [A]	Kısa Devre Akım Yoğunluğu [A/mm^2]	Üretim Kolaylığı
GMM	0.8724	7.77	8.55	Orta
MD SnRM	0.9572	10.6	21	Zor
YMM	0.4664	12	18	Kolay

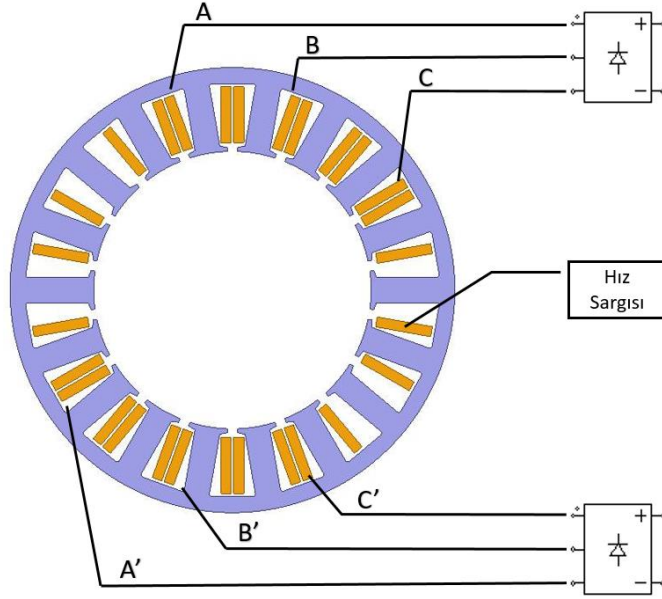
Çizelge 4.4'de görüldüğü gibi en düşük kısa devre akımı ve akım yoğunluğu GMM'de görülmüştür. Buna karşın YMM diğer topolojilerden oldukça hafiftir, özellikle ağırlık ve hacim isterlerinin çok sıkı olduğu havacılık uygulamalarında YMM bu sebeple öne çıkmaktadır. Kolay üretimi ile ön plana çıkan YMM, hata toleransını artırmaya yönelik yapılacak tasarım iyileştirmelerine de en yatkın topoloji olduğu için çalışmanın sonraki kısmında tasarımı yapılan YMM'yi geliştirmek ve hata toleransını artırmak için çeşitli tasarım çözümleri uygulanarak en iyileştirme çalışması yapılacaktır.

5. HATA TOLERANSINI ARTIRMAK İÇİN TASARIM ÇÖZÜMLERİ

Tasarımı yapılan farklı topolojideki alternatörler arasında havacılıkta kullanılmaya en uygun olan topolojinin yüzey mıknatıslı senkron alternatör olduğu önceki bölümlerde açıklanmıştır. Bu bölümde ise seçilen topolojiye hata toleransını artırmaya yönelik tasarım çözümleri uygulanmış ve en iyileştirme çalışması yapılmıştır.

5.1 Faz Sayısı

Geleneksel alternatörlerde platformun ihtiyaç duyduğu gücün tamamı aynı fazlardan sağlanır. Bu durumda alternatörde veya güç elektroniği katında meydana gelecek olası bir hata sonucu platforma sağlanan güç kesilir ve sonuçları platform kaybına kadar gidebilir. Öte yandan stator sargıları ikiye bölünerek 3 fazlı 2 adet bire bir aynı karakteristiğe sahip güç çıkışı sağlanabilir ve her çıkış ayrı güç elektroniği ünitesi tarafından yükün ihtiyacına göre çevrilir. Platform yükleri kritik (motor kontrol ünitesi, sensor ve eyleyiciler vb.) ve kritik olmayan yükler (platform iç aydınlatması, ısıtma vb.) olarak kategorize edilirse alternatörün bir güç çıkışı kritik yükleri diğeri ise kritik olmayan yükleri besler. Kritik yükleri besleyen güç çıkışında bir hata meydana gelmesi durumunda bu yükler diğeri tarafından beslenerek platformun güvenli bir şekilde görev süresini tamamlaması sağlanır. Bu çözüm yedeklilik ve dayanıklılık açısından 2 ayrı alternatör ve güç elektroniği ünitesi kullanılmasından çok daha ucuzdur ve daha az yer kaplar. 2 adet 3 faz çıkışlı alternatör şekil 5.1’de gösterilmiştir.



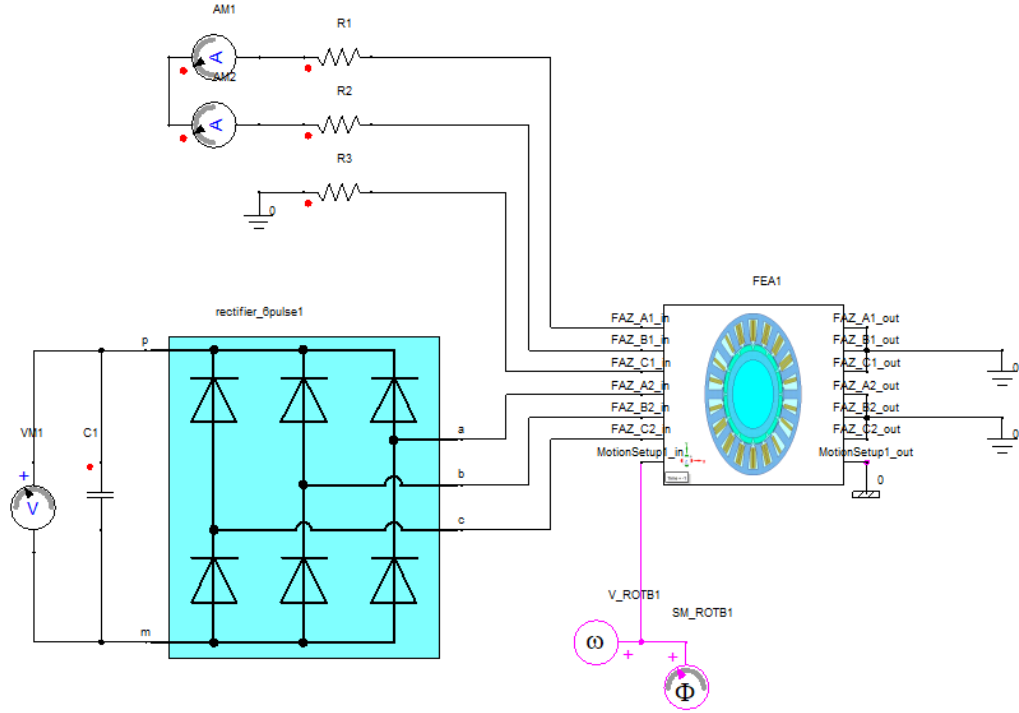
Şekil 5.1 : 2 adet 3 faz çıkışlı alternator şeması.

Alternatör hızı hız sargılarında oluşam zıt emk yardımıyla okunabilir. Statorda bulunan 18 dişten 12 tanesi alternator faz çıkışları için kullanılmıştır. 2 tanesi hız bilgisinin alınması için 4 tanesi ise faz çıkışları arasındaki fiziksel izolasyonu sağlamak için kullanılmıştır. Bu sayede çıkışlardan birinde meydana gelecek olası bir hatadan diğer çıkışın etkilenmemesi sağlanmıştır.

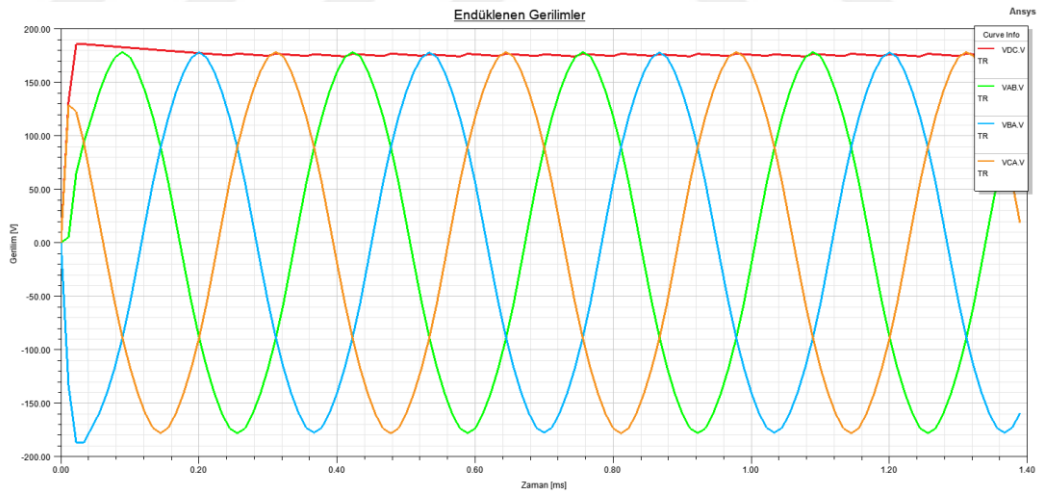
700 W olan güç isteri her 3 fazlı çıkış başına 350 W olarak güncellenmiştir. Faz başına düşen bobin sayısı 6'dan 3'e düştüğü için endüklenen gerilimde de düşüş gözlenmiştir. Bu sebeple kullanılacak olan DA/DA çeviricinin giriş gerilimlerinin de güncellenmesi gerekmektedir, giriş gerilim aralığı 50 – 200 V_{DA} olan bir çevirici tercih edilmiştir.

Güncellenen sargı yapısıyla beraber mankine modeli Ansys Electronics Desktop'ta kurulmuş ve tekil hata durumu yani 2 adet 3 faz sargısından 1 tanesi boşa çalıştırılırken diğerinde faz-faz hata durumu simule edilmiştir (Şekil 5.2).

-40 °C mıknatis sıcaklığı, maksimum devir (30.000 rpm) ve boşa çalıştırılan fazlarda oluşan gerilim şekil 5.3'de gösterilmiştir.

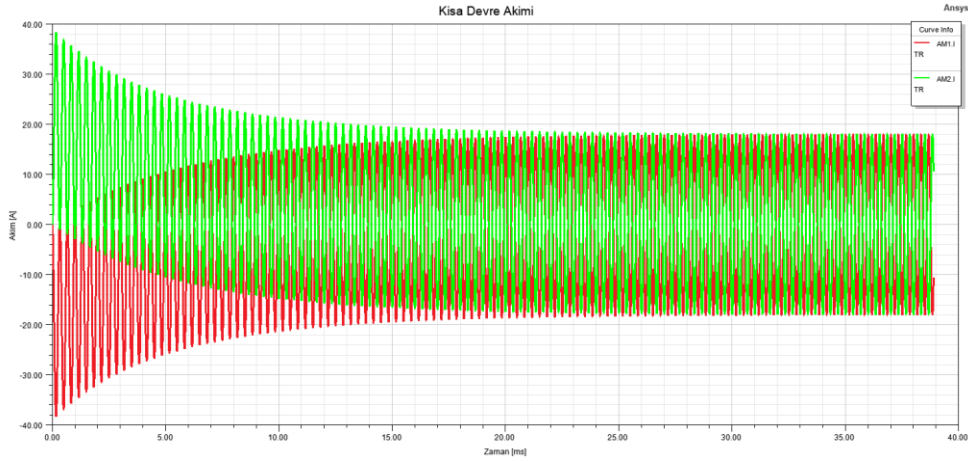


Şekil 5.2 : Tekil hata durumu devre şeması.



Şekil 5.3 : Boşta çalışmada fazlarda endüklenen maksimum gerilim.

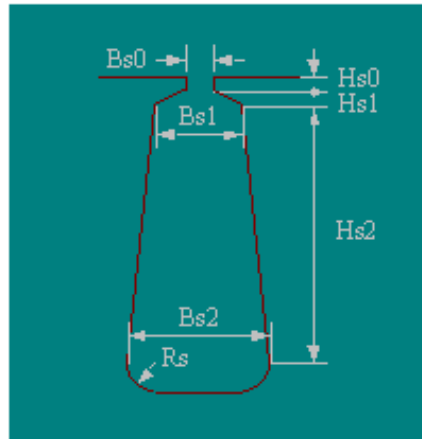
Oluşan kısa devre akımı şekil 5.4’de gösterilmiş olup akım yoğunluğu denklem 4.1’e göre 18.4 A/mm^2 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.4 : 2 adet 3 fazlı sargıda oluşan kısa devre akımı.

5.2 Diş Ucu Kalınlığı ve Oluk Açıklığı

Kısa devre akımının limitlenmesinde oluk ve diş geometrisinin önemi yüksektir. Örnek bir oluk geometrisi şekil 5.5’de gösterilmiştir. Diş ucu kalınlığı (H_{s0}) arttıkça ve oluk açıklığı (B_{s0}) azaldıkça stator oluklarında oluşan kaçak reaktans artar ve bu da kısa devre akımının azalmasına neden olur. Kaçak reaktansın artması güç yoğunluğunu düşüreceği için büyüklüklerin optimum seviyede tutulması gerekmektedir. Oluk büyüklükleri optimize edilirken zıt emk’nın aynı kalması gerekmektedir.



Şekil 5.5 : Oluk geometrisi.

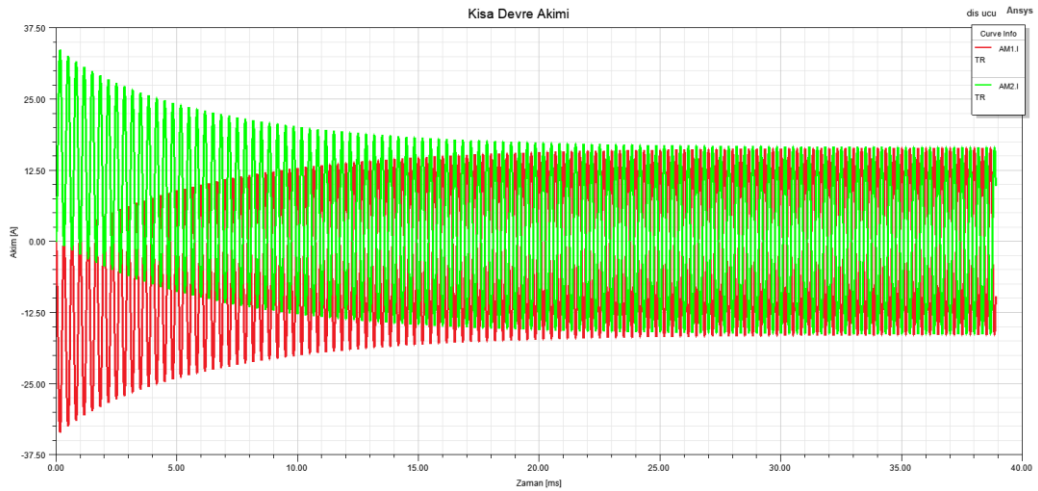
Elektriksel me mekanik olarak mümkün olan en iyi tasarımın yapılması için H_{s0} ve B_{s0} büyüklüklerinin optimizasyonunun yapılması gerekmektedir. H_{s0} optimizasyonu yapıldıktan sonra çıkan en iyi sonuç tasarıma uygulanarak B_{s0} da optimize edilmiştir.

Çizelge 5.1’de Hs0 optimizasyon büyüklükleri ve sonucunda oluşan kısa devre akım değerleri verilmiştir.

Çizelge 5.1 : Hs0 optimizasyon sonuçları.

Hs0 [mm]	Kısa Devre Akımı [A]
0.7	13.01
0.75	12.87
0.8	12.72
0.85	12.58
0.9	12.45
0.95	12.31
1	12.18
1.05	12.06
1.1	11.93
1.15	11.81
1.2	11.69

Hs0, dış uzunluğu (Hs2) sabit tutularak optimize edilmiştir, bu sayede oluk alanı azalmadan dış kalınlığını artırmak mümkün olmuştur. Ancak dış kalınlığı arttıkça boyunduruk kalınlığı azalmaktadır. Azalan kalınlık ile boyunduruk bölgesindeki manyetik akı yoğunluğu artmaktadır. Bu yüzden boyunduruğun doyuma gitmemesi ve demir kayıplarının daha fazla artmaması için optimum Hs0 1.2 mm olarak belirlenmiştir. Dış ucu kalınlığı optimizasyonu sonrasında oluşan kısa devre akımının tepe değeri yaklaşık 1.4 A düşürülmüştür ve şekil 5.6’da gösterilmiştir.



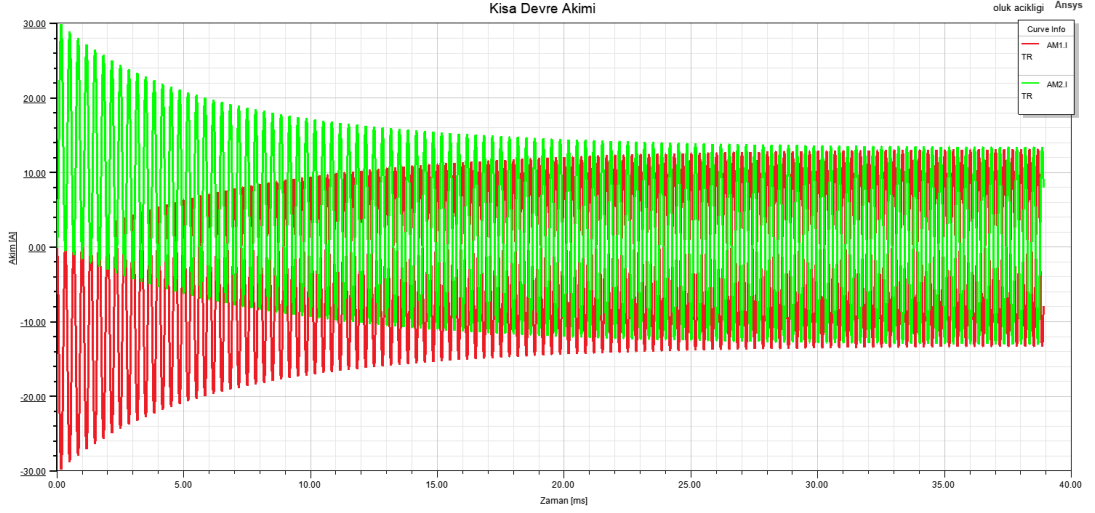
Şekil 5.6 : Hs0 optimizasyonu sonrası oluşan kısa devre akımı.

Optimum diş ucu kalınlığı değeri tasarıma uygulanarak oluk açıklığı optimize edilmiştir. Optimizasyon değerleri ve oluşan kısa devre akımları izelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5:2 : Bs0 optimizasyon sonuçları.

Hs0 [mm]	Kısa Devre Akımı [A]
1.2	9.82
1.25	9.97
1.3	10.1
1.35	10.25
1.4	10.38
1.45	10.51
1.5	10.64
1.55	10.76
1.6	10.87
1.65	10.99
1.7	11.1
1.75	11.2
1.8	11.3
1.85	11.41
1.9	11.5
1.95	11.6
2	11.69
2.05	11.78
2.1	11.87
2.15	11.95
2.2	12.04

Oluk açıklığı belirlenirken iletken çapı göz önünde bulundurulmalıdır. Oluk açıklığı iletken çapına ne kadar yaklaşırsa sarım işlemi o kadar zorlaşır. Bu sebeple optimizasyon 1.2 mm’den başlatılmış ve en iyi sonuç bu değerde elde edilmiştir. Bs0 optimizasyonu sonucunda oluşan kısa devre akımının tepe değeri yaklaşık 2.5 A dşrlmştir ve şekil 5.7’de gösterilmiştir.



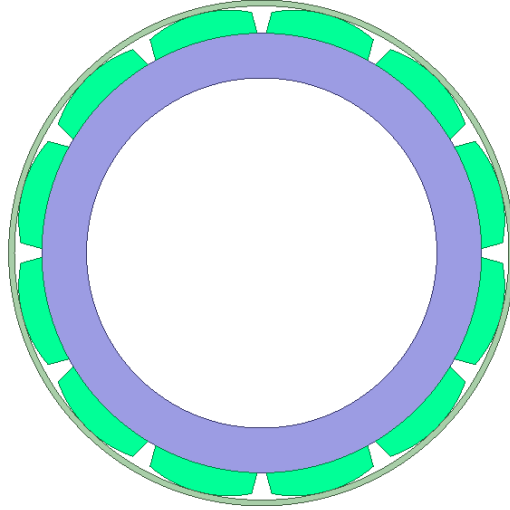
Şekil 5.7 : Bs0 optimizasyonu sonucu oluşan kısa devre akımı.

5.3 Rotor Kılıfı ve Mıknatıs Miktarı

Yüksek hızlı yüzey mıknatıslı senkron alternatör uygulamalarında rotordaki mıknatısları yüksek hızlarda oluşan yüksek merkezkaç kuvvetlerine karşı koruyan bir yapı bulunmamaktadır. Bu sebeple bu tarz uygulamalarda rotor kılıfı kullanmak bir zorunluluktur. Kılıf sayesinde yüksek hızlarda bile mıknatıslar rotor yüzeyinde kalacak ve alternatör güvenli bir şekilde çalışmasını sürdürecektir.

Kılıf malzemesinin manyetik devreye katılmaması gerekir, bu sebeple paramanyetik malzemedен seçilmelidir. Yüksek hızlarda çalışabilmesi için gerilme dayanımı yüksek olmalıdır. Eddy kayıplarını azaltmak adına elektrik iletkenliği düşük olmalıdır. Ayrıca kütle yoğunluğunun düşük ve termal iletkenliğinin yüksek olması gereklidir.

Kılıf malzemesi olarak genellikle Inconel 718, titanyum alaşımlar, paslanmaz çelik, karbon grafit, karbon fiber ve güçlendirilmiş plastikler kullanılır [19]. Bu çalışmada elektriksel iletkenliği 0.8×10^{-6} olan Inconel 718 kullanılmıştır. Rotor kılıfı entegre edilmiş rotor şekil 5.8’de gösterilmiştir.



Şekil 5.8 : Rotor kılıfı.

Rotor kılıfı kalınlığı uygulama hızı ile doğru orantılıdır, daha yüksek hızlı uygulamalarda merkezkaç kuvvetinin etkisine dayanabilmesi için daha kalın kılıf kullanılmalıdır. Hava aralığında kılıf için yer açmak için rotor dış çapının küçültülmesi gereklidir, rotor çapının küçülmesi, manyetik hava aralığının büyümesine dolayısıyla manyetik relüktansın artmasına neden olur ve manyetik devredeki akı miktarının azalması anlamına gelir. Hava aralığı büyüdükçe artan reaktans endüvi reaksiyonu empedansın artmasına neden olur, bu sayede sürekli mıknatıslı generatörün yüksek empedans karakteristiği artar ve kısa devre akımı düşer.

Endüklenen gerilimin azalmaması için manyetik devreye katılan akı miktarının aynı kalması gerekmektedir, mıknatıs malzemesi, kutup örtme faktörü ve mıknatıs kalınlığı bu minvalde optimize edilecektir.

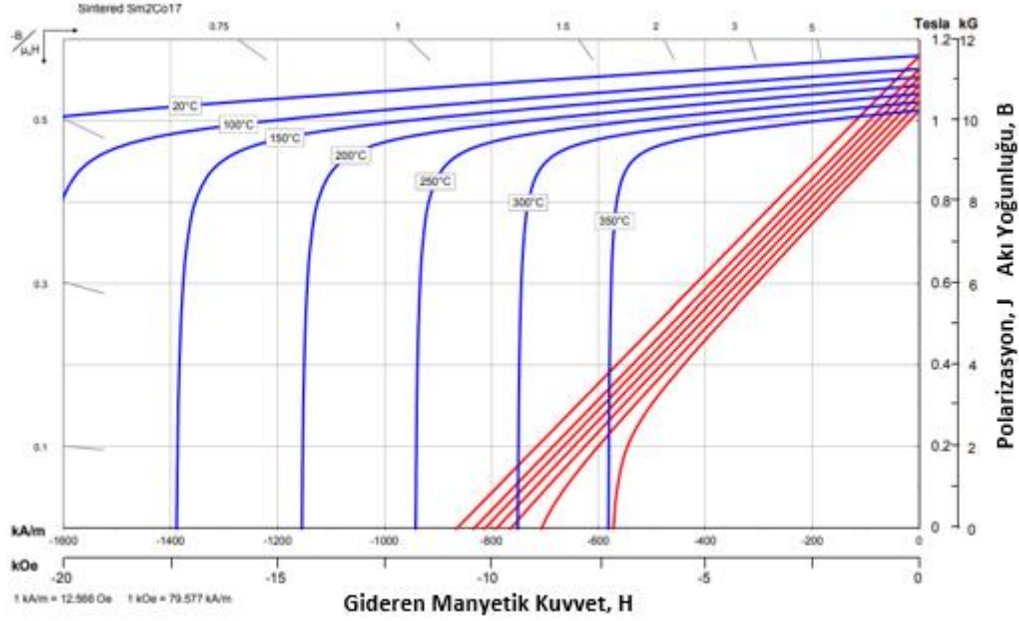
Kutup örtme faktörü ve mıknatıs kalınlığı arttıkça kullanılan mıknatıs miktarı ve sağlanan manyetik enerji artar ve yüksek kısa devre akımına neden olur. Bu nedenle mıknatısın çalışma noktasının değişmemesi koşulu ile kullanılan mıknatıs miktarı azaltılıp mıknatıs seviyesi yükseltilerek kısa devre akımının bir miktar daha düşürülmesi mümkündür.

Rotor dış çapı, kutup örtme faktörü ve mıknatıs kalınlığında yapılan değişiklikler çizelge 5.3'de verilmiştir.

Çizelge 5.3 : Mıknatıs miktarını azaltmaya yönelik yapılan değişiklikler.

Parametre	Eski Değer	Yeni Değer
Mıknatıs çeşidi	SmCo5	Sm ₂ Co ₇
Kutup örtme faktörü	0.855	0.84
Mıknatıs kalınlığı	3 [mm]	2.8 [mm]

Sm₂Co₇ BH eğrisi şekil 5.9’da, manyetik büyüklükleri çizelge 5.4’de gösterilmiştir.

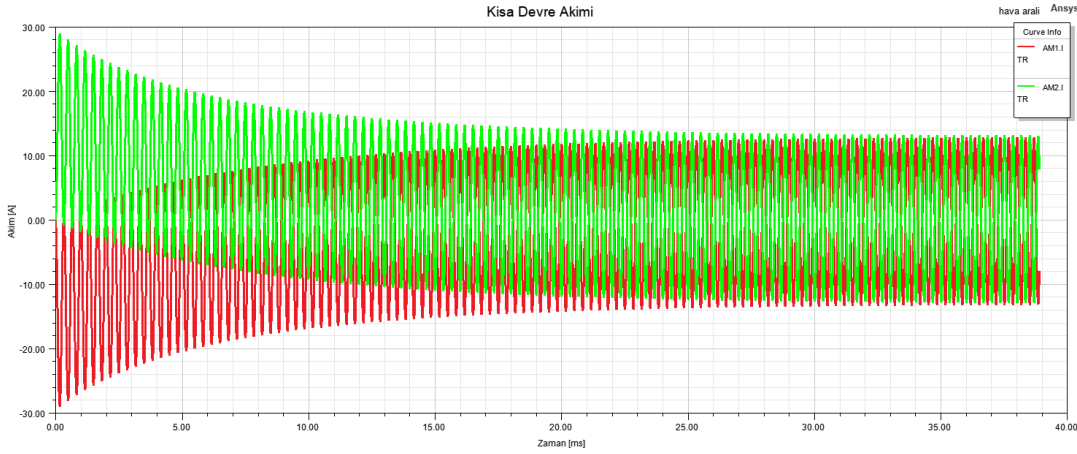


Şekil 5.9 : BH eğrisi [17].

Çizelge 5.4 : Manyetik büyüklükler.

Parametre	Değer	Birim
B _r , Remenans Mıknatısiyet	1.16	Tesla
H _{cB} , Koersivite	850	kA/m
H _{cJ} , Esas Koersivite	2,100	kA/m
BHmax, maksimum enerji çarpanı	251	kJ/m ³
Maksimum çalışma sıcaklığı	350	°C

Mıknatıs malzemesi, kutup örtme faktörü ve mıknatıs kalınlığında yapılan değişiklikler ile kısa devre akımının tepe değeri yaklaşık 0.5 A düşürülmüştür (Şekil 5.10).

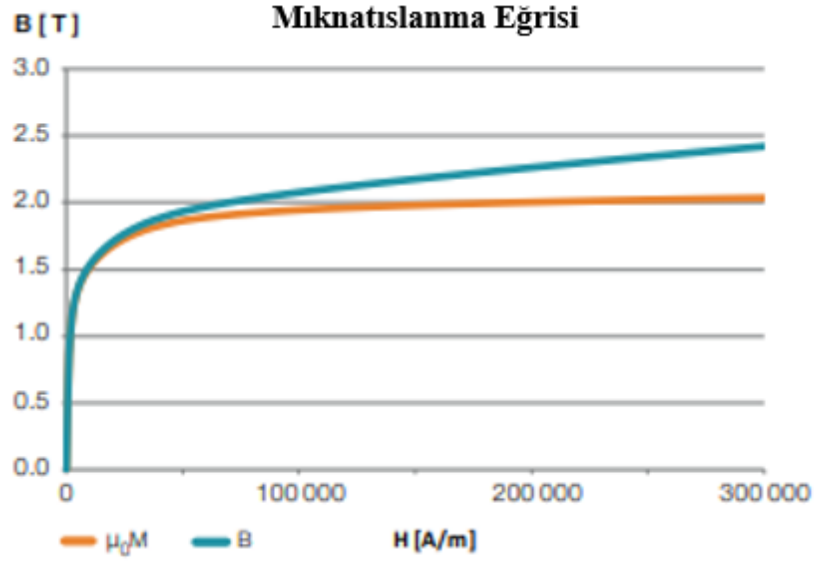


Şekil 5.10 : Mıknatıs miktarını azaltmaya yönelik yapılan değişikliklerden sonra oluşan kısa devre akımı.

5.4 Manyetik Oluk Kaması

Oluk kaması elektrik makinelerinde oluk ağızlarını kapatmak için kullanılır ve akı yollarına etki etmemesi adına paramanyetik malzeme tercih edilir. Bu tasarımda oluk kaması kısa devre akımını azaltmak için kullanılmış ve yalıtkan kaplamaya sahip demir tozu içeren yumuşak manyetik kompozit malzeme tercih edilmiştir. Bu sayede 3 boyutlu akı yolları yaratılarak oluk endüktansı artırılmış ve kısa devre akımı azaltılmıştır [20]. Aynı zamanda oluk kaması, motorun diğer bileşenlerinden alternatör gövdesi içerisine sızacak olası bir sıvı ile sargıların temas etmesini önler. Ek olarak yumuşak manyetik kompozit malzemeler geleneksel silisli saclara kıyasla genellikle daha düşük bir manyetik geçirgenliğe sahip olmasına rağmen, makine parçalarını manyetik olarak birleştirmek için çok uygundur, nispeten kolay imalat sağlar [21] ve geometrik şekil açısından oluk ağızı şekline göre oluşturulabilir.

Oluk kaması için yumuşak manyetik kompozit malzeme olarak Somaloy 700HR3P tercih edilmiştir. Seçilen malzeme yüksek mekanik dayanıma sahiptir ve (Young modülü = 170 GPa) yüksek görelî manyetik geçirgenliğe sahiptir ($\mu_{\max} = 770$).

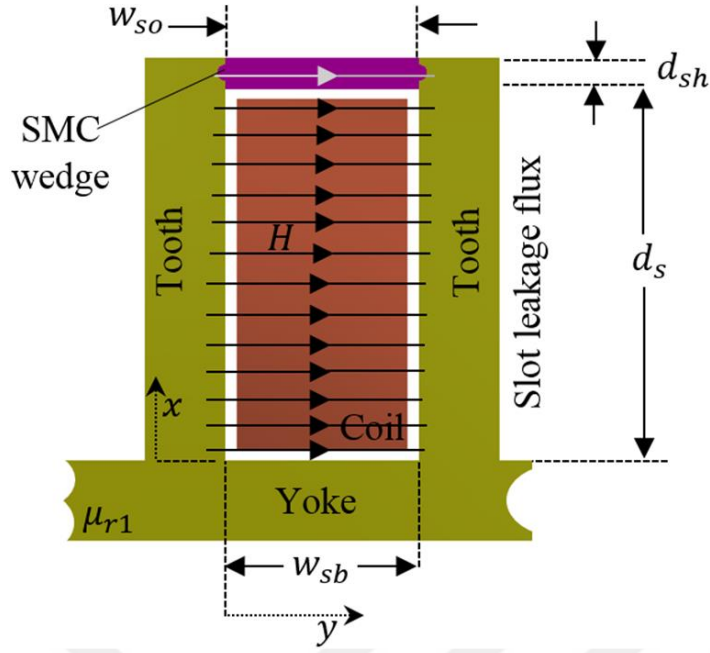


Şekil 5.11 : Somaloy 700 HR3P BH eğrisi[22].

Şekil 5.11’de görüldüğü gibi oluk kaması malzemesi rotor ve stator malzemelerine göre daha düşük manyetik alanda (≈ 1.2 T) doyuma gitmektedir. Yumuşak manyetik kompozit malzeme oluk kaması olarak silisli saclardan daha az manyetik geçirgenliğe sahip olmalıdır, yine de oluk endüktansını artırmak için havadan daha yüksek manyetik geçirgenliği olmalıdır. Oluk kaması ile birlikte artan oluk kaçak endüktansı güç yoğunluğunu düşürmektedir, fakat hata toleransı yüksek emniyet kritik alternatör tasarımında kısa devre akımını önemli ölçüde azalttığı düşünülürse bu tolere edilebilir.

Manyetik oluk kaması ayrıca oluk açıklığının sebep olduğu hava aralığında oluşan uzay harmoniklerini ve vuru momentini de azaltıcı etkiye sahiptir [23].

SMA’nın yüksüz koşulda da düzgün çalışmasını sağlamak adına önerilen manyetik oluk kaması ile uygun bir oluk kaçak endüktansı, dolayısı ile de faz endüktansı tasarımı yapılmalıdır, kama boyutları bu koşula göre belirlenmelidir.



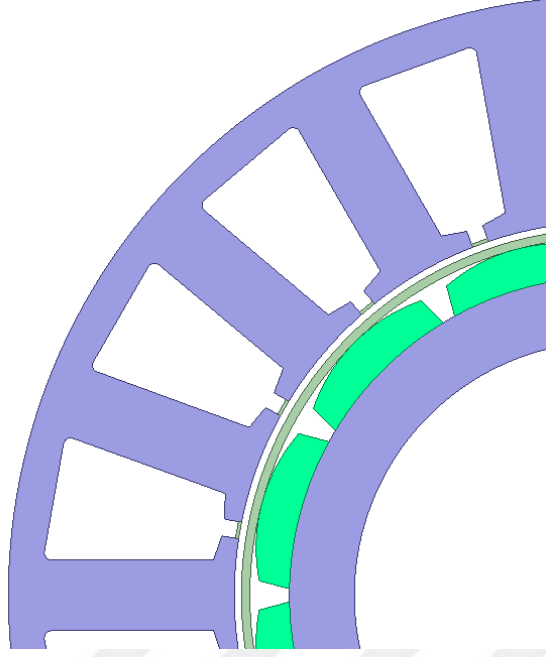
Şekil 5.12 : Manyetik oluk kaması kullanıldığında oluşan oluk kaçak endüktansı.

Şekil 5.12’ de oluk kaması üzerinden y ekseninde geçen akı oluk kaçak akısıdır ve faz endüktansını artırır. Enerji ve endüktans ilişkisinden yararlanarak oluk başına oluşan endüktans ifadesi denklem 5.1’deki gibidir.

$$L_{soluk} = N^2 \left[\frac{\mu_0 d_s L_{st}}{3w_{sb}} + \frac{\mu_0 \mu_{rYKM} d_{sh} L_{st}}{w_{s0}} \right] \quad (5.1)$$

Fiziksel büyüklükler şekil 5.12’de gösterilmiştir, μ_{rYKM} oluk kaması olarak kullanılan yumuşak kompozit malzeme Somaloy 700HR3P’nin görelî manyetik geçirgenliğidir. Denklem 5.1’dek birinci terim, bobinin etkin geçirgenliğinin, sarımdan dolayı oluğun normal geçirgenliğinin üçte biri olduğunu ifade eder. İkinci terim manyetik kama geçirgenliğini de hesaba katar. Oluk kaması tasarımı ile w_{s0} ve d_{sh} büyüklükleri optimize edilerek istenilen faz endüktansı elde edilerek hata toleransı artırılabilir.

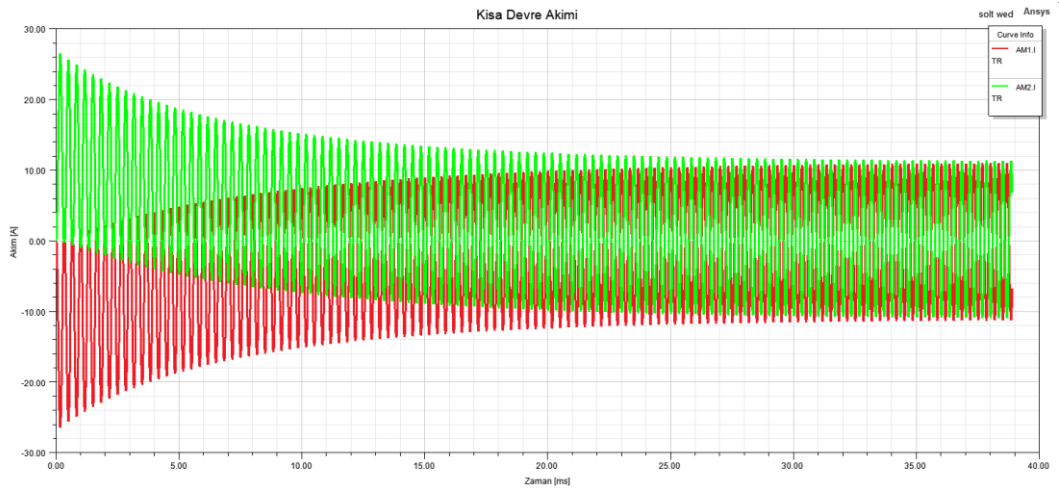
Şekil 5.13’de manyetik oluk kamasının tasarıma uygulandığı stator görseli verilmiştir.



Şekil 5.13 : Oluk kaması eklenmiş model.

Manyetik oluk kaması oluk ağzına epoksi bazlı yapıştırıcılar ile ya da stator dişlerinde dişi yuva açılarak sabitlenebilir.

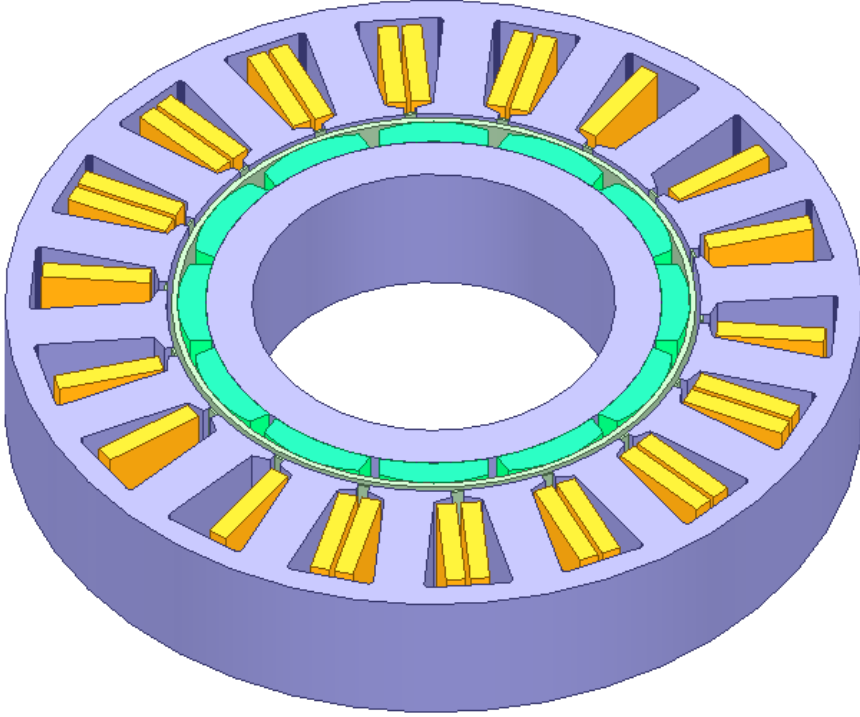
Tasarıma manyetik oluk kaması eklenerek kısa devre akımının tepe değeri yaklaşık 2 A düşürülmüş ve şekil 5.14’de gösterilmiştir. Son durumda kısa devre akım yoğunluğu denklem 4.1’e göre 12 A/mm^2 olarak hesaplanmış ve labaratuvar ortamında yapılan testlerde H sınıfı iletkenin soğutma olmaksızın söz konusu akım yoğunluğuna dayandığı görülmüştür.



Şekil 5.14 : Manyetik oluk kaması sonrası oluşan kısa devre akımı.

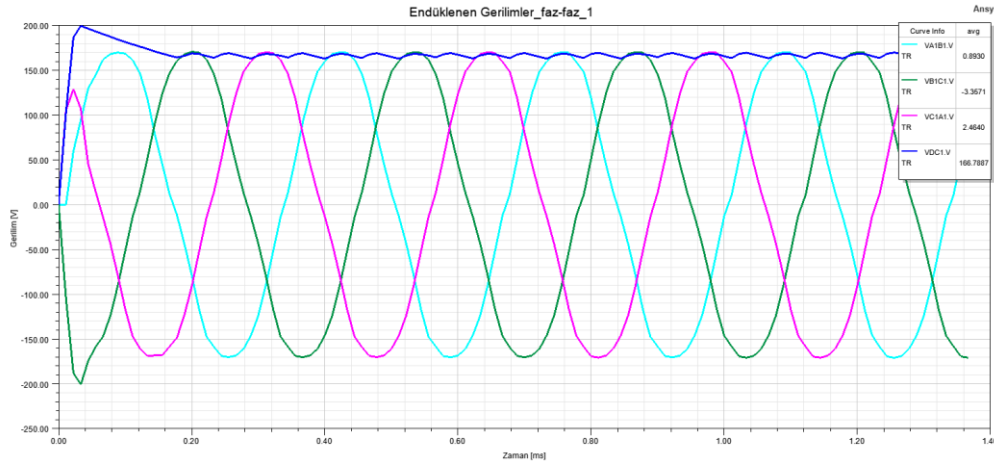
5.5 En İyileştirilmiş Tasarım

Hata toleransını artırmaya yönelik uygulanan tasarım çözümlerinin ardından emniyet kritiklik kapsamında en iyileştirilmiş tasarım elde edilmiştir (Şekil 5.15).



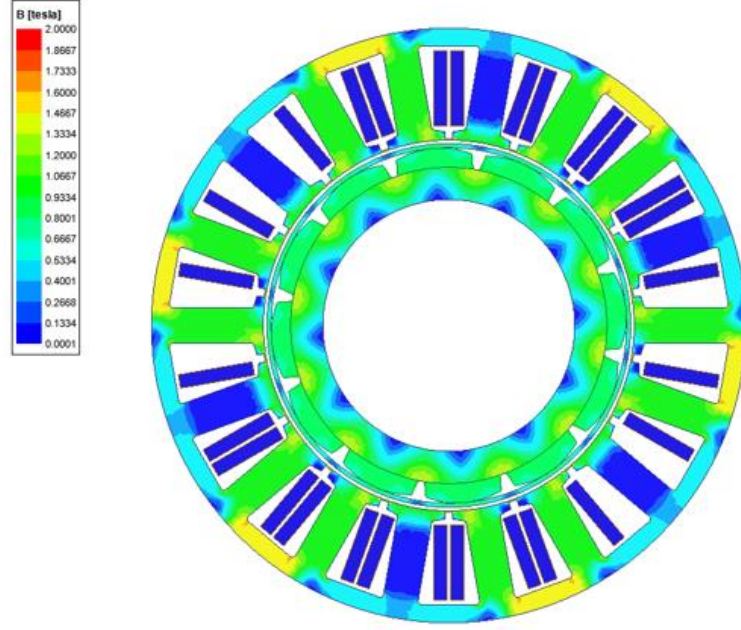
Şekil 5.15 : En iyileştirilmiş tasarım 3B görünüm.

Seçilen çevirici modülü göz önüne alınarak alternatör çıkış geriliminin 200 VDC değerinin altında olması gerekir. Alternatör tarafından endüklenen en yüksek gerilim $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta en yüksek devirde ve yüksüz durumda yapılan analiz sonucu şekil 5.16'daki gibi elde edilmiştir.



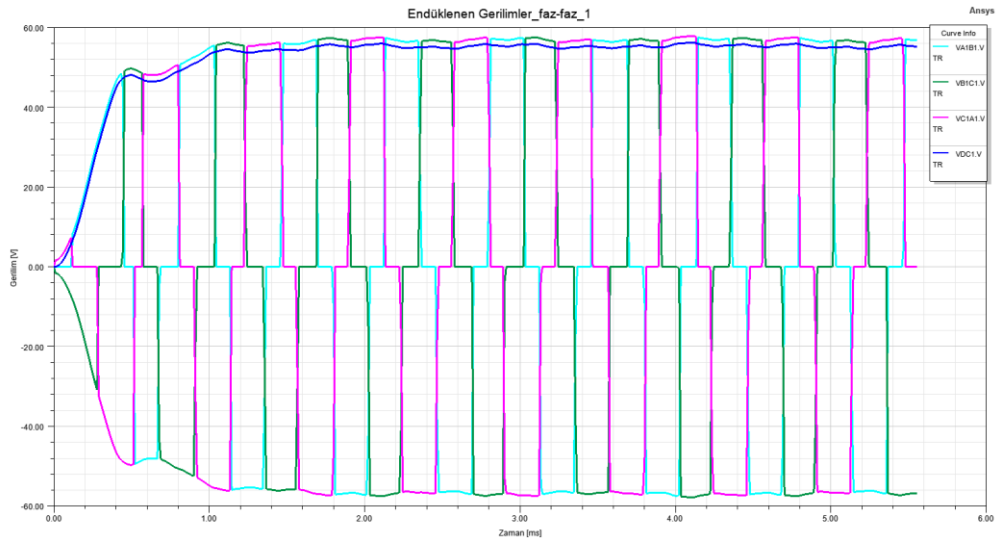
Şekil 5.16 : Endüklenen en yüksek gerilim.

Aynı zamanda endüvi reaksiyonunun etkisi gözlenmediği için yüksüz durumda alternatör manyetik devresindeki akı miktarı en üst seviyededir ve kullanılan malzemelerin manyetik alan yoğunlukları bu durumda kontrol edilmiştir (Şekil 5.17).



Şekil 5.17 : Manyetik alan yoğunluğu dağılımı.

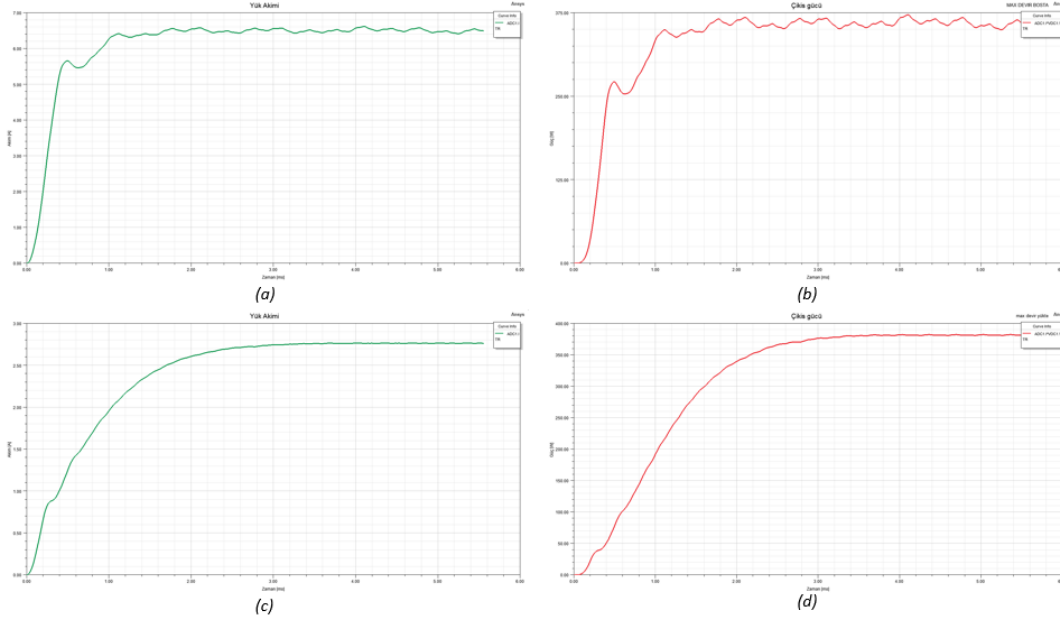
Alternatör tarafından endüklenen en düşük gerilim ise -200 °C sıcaklıkta, rölanti devirde ve tam yüklü durumda yapılan analiz sonucu şekil 5.18'deki gibi elde edilmiştir.



Şekil 5.18 : Endüklenen en düşük gerilim.

Şekil 5.16 ve 5.18’de görüldüğü üzere alternatör çıkış gerilimi yani doğrultucu modülü giriş gerilimi 50-200 VDC aralığındadır.

Rölanti ve en yüksek devirlerdeki tam yüklü durumlarda oluşan yük akımları ve güçler şekil 5.19’da gösterilmiştir.



Şekil 5.19 : (a) Rölanti devir yük akımı; (b) Rölanti devir güç; (c) En yüksek devir yük akımı; (d) En yüksek devir güç.

Alternatörde kayıplar demir kayıpları, bakır kayıpları ve ilave kayıplar olarak sınıflandırılır. Demir kayıpları histeresiz ve eddy kayıpları olarak ikiye ayrılır. Histeresiz kayıpları demir malzemenin mıknatıslanması için harcanan enerjiyi, eddy kayıpları ise demir malzemenin elektriksel direnci üzerinde harcanan enerjiyi ifade eder. Eddy kayıplarını limitlemek için stator ve rotor saclardan oluşturularak akımın yolu kısıtlanır. Bakır kayıpları stator iletkenlerinin öz direncinden doğan kayıplardır. İlave kayıplar ise sürtünme vantilasyon ve mekanik kayıplar olarak ifade edilir.

Alternatör verimi çıkıştaki elektriksel gücün tahriktaki mekanik güce oranıdır, bir başka şekilde denklem 5.1’deki gibi ifade edilebilir.

$$\eta = \frac{W_{\zeta}}{W_{\zeta} + W_{tk}} \quad (5.2)$$

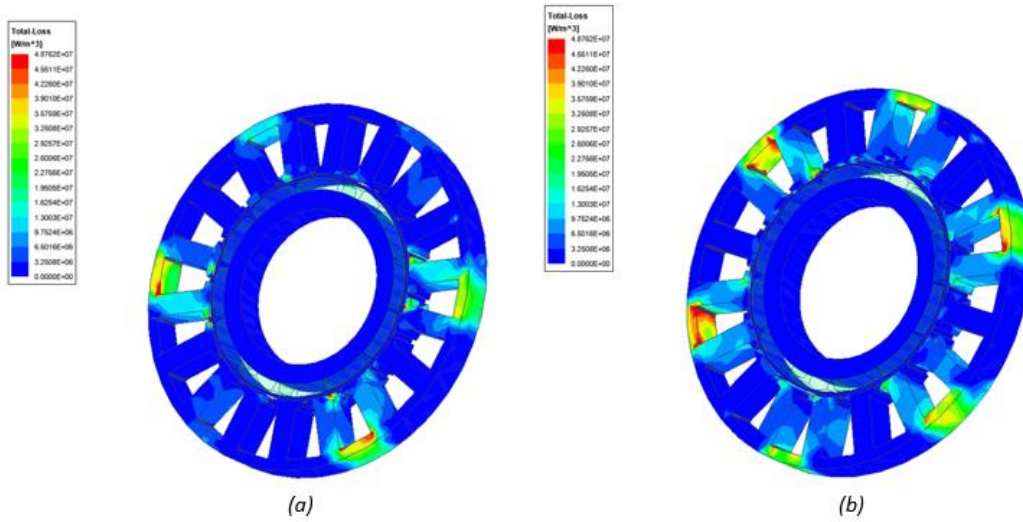
Burada η verimi, W_{ζ} çıkış gücünü ve W_{tk} toplam kaybı ifade eder.

Rölanti ve en yüksek devirlerdeki tam yüklü durumda meydana gelen toplam kayıplar ve denklem 5.2’ye göre hesaplanan alternatör verimleri çizelge 5.5’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.5 : Kayıplar ve verim.

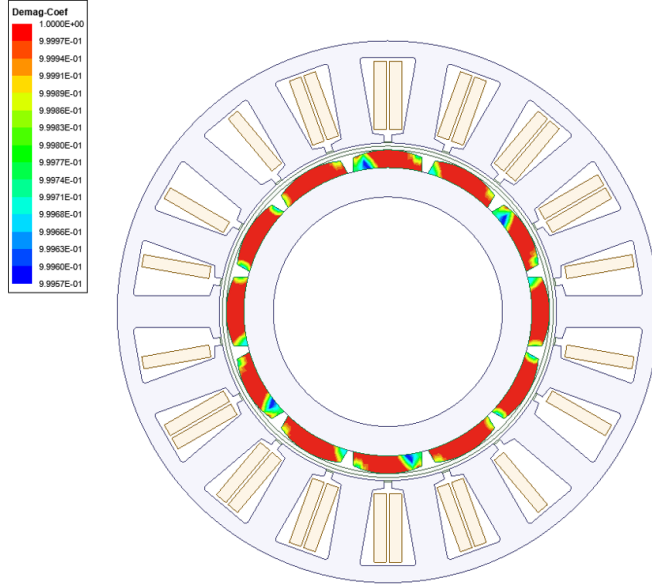
	Rölanti Devir (15,000 rpm)	En Yüksek Devir (30,000 rpm)
Eddy Kayıpları [W]	50	110
Histeresiz Kayıpları [W]	12.5	20
Bakır Kayıpları [W]	13.25	2.375
İlave Kayıplar [W]	25	46
Verim [%]	87.2	80

Şekil 5.20’de Stator ve rotor çekirdeklerinde oluşan toplam kayıpların bazı bölgelerdeki anlık tepe değerleri gösterilmiştir. Beklenildiği üzere yüksek devirlerdeki yüksek frekanslar, yüksek demir kayıplarına neden olmaktadır.



Şekil 5.20 : Toplam kayıplar (a) Rölanti devir; (b) En yüksek devir.

En yüksek devir kısa devre durumunda alternatör sargılarında oluşan kısa devre akımı, oluşabilecek en yüksek akım değeridir. Bu akımın yarattığı manyetik alan, mıknatıslar tarafından sağlanan manyetik alana ters yönlüdür ve şiddetinin artması mıknatısların demanyetize olma riskini ortaya çıkarır. En yüksek devir kısa devre durumunda mıknatısların demanyetizasyon analizi gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.21). Demanyetizasyon katsayısının 1 olması mıknatısta herhangi bir demanyetizasyonun olmadığı; 0 olması ise mıknatısın tamamen demanyetize olduğu anlamına gelir.



Şekil 5.21 : Kısa devre anında mıknatıs demanyetizasyonu.

Şekil 5.21’de görüldüğü gibi mıknatıslarda bölgesel ve çok düşük seviyelerde demanyetizasyon meydana gelmektedir ve bu durum alternatör performansını olumsuz yönde etkilememektedir.

5.6 Sonuçların Yorumlanması

YMM topolojisinde faz sayısı artırılarak güç çıkışları yedeklenmiş aynı zamanda güç sargıları birbirinden fiziksel ve elektriksel olarak yalıtılarak güvenlik artırılmıştır. Dış ucu kalınlığı ve oluk açıklığı optimize edilerek oluk endüktansı artırılmış ve oluşan kısa devre akımı azaltılmıştır. Oluk ağızlarına yerleştirilen manyetik kamalar ile yine oluk endüktansı artırılıp kısa devre akımı azaltılmıştır. Yapılan tasarım çözümleri ile iyileştirilen YMM topolojisindeki alternatör havacılık motorlarında kullanılmak için uygun, hata toleransı yüksek, olası bir hata durumunda görev süresini tamamlayabilecek bir alternatör haline getirilmiştir.

Çizelge 5.6’da tasarım iyileştirmelerinde önce ve sonraki geometrik büyüklükler ve performans verileri verilmiştir.

Çizelge 5.6 : İlk tasarım ile iyileştirilmiş tasarım karşılaştırması.

Parametre	İlk Tasarım	İyileştirilmiş Tasarım
Faz Sayısı	3	2*3
Diş Ucu Kalınlığı [mm]	0.75	1.2
Oluk Açıklığı [mm]	2	1.2
Kutup Örtme Faktörü [%]	85.5	84
Mıknatıs Çeşidi	SmCo5	Sm ₂ Co ₇
Mıknatıs Kalınlığı [mm]	3	2.8
Rotor Kılıfı	Yok	Var
Manyetik Hava Aralığı [mm]	0.5	1.1
Manyetik Oluk Kaması	Yok	Var
Kısa Devre Akımı [A]	12.7	8.4
Kısa Devre Akım Yoğunluğu [A/mm ²]	18.4	12



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada havacılık uygulamalarında kullanılmak üzere verilen tasarım isterlerine uygun gömülü mıknatıslı makine, mıknatıs destekli senkron relüktans makine ve yüzey mıknatıslı makine tasarımları yapılmıştır.

Gömülü mıknatıslı makinede bozucu harmonik genliklerinin en düşük seviyede kalması için mıknatıs kenarlarındaki hava boşlukları optimize edilmiştir. Hata toleransını artırmak için gömülü mıknatıslı makinelerde kullanılan geleneksel dağıtılmış sargının aksine dış üstü sargı yapısı tercih edilmiştir. Güç yoğunluğunu artırmak için, rotor nüvesinin doyuma gitmemesi ve yapısal dayanım gibi faktörler de gözeticilerle mıknatıslar hava aralığına en yakın yerde olacak şekilde konumlandırılmıştır. Mıknatıs destekli senkron relüktans makinede rotor mıknatıslarının konumları ve akı bariyerleri optimize edilerek bölgesel doyumlar en aza indirilmiş ve sinus formuna yakın bir endüklenen gerilim dalga şekli elde edilmiştir. Akı ve bariyer köprüleri yüksek hızlardaki merkezkaç kuvvetleri göz önünde bulundurularak oluşturulmuştur. Yine dalga formunu düzeltmek için stator dış uçlarında hava aralığından statora giren akıyı yönlendirmek amacıyla boşluklar bırakılmıştır (dummy slot yapısı). Yüzey mıknatıslı makinede emk dalga formunun sinüse en yakın ve bozucu harmonik genliklerinin düşük olması için yarı dairesel mıknatıs yapısı tercih edilmiştir. Bu sayede stator dışlarına giren akı miktarı mıknatısların orta kısımlarında fazla iken kenarlara gidildikçe azalmaktadır.

Yapılan tasarımlar emniyet kritiklik kapsamında kısa devre akımı, ağırlık ve üretim kolaylığı baz alınarak karşılaştırılmıştır. En düşük kısa devre akımı, yüksek faz endüktansı sebebiyle gömülü mıknatıslı makinede elde edilse de hafifliği ve geliştirmeye açık yapısı ile yüzey mıknatıslı makine ön plana çıkmıştır ve en iyileştirme çalışması yüzey mıknatıslı generatöre uygulanmıştır.

Hata toleransını artırmaya yönelik faz sayısı ve sargı yerleşimi, dış ucu kalınlığı ve oluk açıklığı optimizasyonu, rotor kılıfı ve mıknatıs miktarı optimizasyonu, manyetik oluk kaması gibi tasarım çözümleri uygulanmıştır. Faz sayısı artırılarak 2 adet 3 fazlı çıkış elde edilmiş ve yedeklilik sağlanmıştır. Aynı zamanda dış üstü sargının da

getirdiği avantaj ile güç çıkışları birbirinden fiziksel ve manyetik olarak yalıtılmıştır. Gücün ikiye bölünmesi ile doğrultucu çıkışındaki DC/DC çevirici modülü değiştirilmiş olup çıkış gerilim isteri güncellenmiştir. Diş ucu kalınlığı ve oluk açıklığı optimizasyonu yapılarak oluk endüktansı artırılmış ve kısa devre akımının genliği azaltılmıştır. Yüksek devirlerde mıknatısların fırlamaması ve rotorun yapısal bütünlüğünü korumak için karbon fiber malzemedan rotor kılıfı kullanılmıştır, hava aralığına eklenen rotor kılıfı manyetik hava aralığını artırmıştır. Endüklenen gerilimin sabit kalması için mıknatıs sınıfı ve miktarı optimize edilmiştir. Manyetik oluk kaması ile oluk açıklığı kapatılmış ve dişlerin uzun olmasından dolayı ortaya çıkan gürültü ve titreşim ortadan kaldırılmıştır, aynı zamanda diş ucundaki kaşak akı artırılmış ve kısa devre akımının genliği azaltılmıştır. Endüklenen gerilimin genliğin ve dalga şeklinin bozulmaması için kama boyut ve konum optimizasyonu yapılmıştır. Uygulanan tasarım çözümleri ile endüklenen gerilim aynı tutularak kısa devre akımının tepe değeri 18.4 A'den 11 A'ye kadar düşürülmüştür. Tepe değeri 11 A olan bir test akımı ile örnek bir bobin laboratuvar ortamında test edilmiş ve güvenilir sonuçlar elde edilmiştir.

Sonuç olarak bu çalışmada aşağıdaki koşullar sağlanarak havacılık uygulamalarında kullanılmaya uygun hata toleransı yüksek, emniyet kritik bir daimi mıknatıslı alternatör tasarımı gerçekleştirilmiştir.

- 2 ayrı 3 faz çıkışı
- Fazlar arasındaki elektriksel izolasyon
- Fazlar arasındaki manyetik izolasyon
- Kısa devre akımının limitlenmesi
- Faz çıkışlarının fiziksel olarak ayrılması
- Yüksek hızlarda iyi mekanik dayanım

Boyut ve hacim limitlerinin ve yüksek frekansın neden olduğu yüksek demir kayıpları, stator ve rotor manyetik malzemesi değiştirilerek düşürülebilir. Doyum noktası geleneksel saclar ile benzer fakat yüksek frekanslarda görece daha düşük demir kayıpları yaratan daha ince daha verimli fakat daha maliyetli olan NO10, NO20 gibi özel manyetik saclar kullanılarak verim artırılabilir fakat bu durumda maliyet artacaktır. Kısa devre akımını azaltmaya yönelik yapılan iyileştirmeler sarım işlemini

zorlaştırmaktadır, kısa devre akım değerinin bir miktar artmasına izin verilerek sarım işlemi kolaylaştırılabilir fakat bu durumda alternatör omr düşecektir. Stator sargıları epoksi veya plastik enjeksiyon ile kapatılarak makine hem termal açıdan iyileştirilebilir hem de gürültü ve titreşimler azaltılabilir.





KAYNAKLAR

- [1] **Wu, S. Chen, Q. Li, Q. Liu, X. Zhang, H. ve Lin, L.** (2021) Design of Aviation High Impedance Permanent Magnet Synchronous Generator. *Hindawi Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2021.
- [2] **Baker, N. J. Smith, D. J. B. Kulan, M. C. ve Turvey, S.** (2018) Design and Performance of a Segmented Stator Permanent Magnet Alternator for Aerospace. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 33, no. 1, pp. 40–48.
- [3] **Kulan, M. C. Baker, N. J. ve Turvey, S.** (2018) Design and Analysis of a Fault Tolerant Permanent Magnet Alternator for Aerospace. *IEEE*, pp. 622–628.
- [4] **Arumugam, P.** (2016) Design Optimization on Conductor Placement in the Slot of Permanent Magnet Machines to Restrict Turn – Turn Short Circuit Fault Current. *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 52, no. 5.
- [5] **El-refaie, A. M. Shah, M. R. ve Huh, K.** (2014) High-Power-Density Fault-Tolerant PM Generator for Safety-Critical Applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, no. 3, pp. 1717–1728.
- [6] **Bianchi, N. Pre, M. D. Grezzani, G. ve Bolognani, S.** (2015) Design considerations on fractional-slot fault-tolerant synchronous motors. *IEEE*, pp. 902–909.
- [7] **Zhao, W. Xu, L. ve Liu, G.** (2018) Overview of Permanent-Magnet Fault-Tolerant Machines: Topology and Design. *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, vol. 2, no. 1.
- [8] **Papini, L. Raminosoa, T. Gerada, D. ve Gerada, C.** (2014) A High-Speed Permanent-Magnet Machine for Fault-Tolerant Drivetrains. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 6, pp. 3071–3080.
- [9] **Raminosoa, T. Gerada, C. ve Galea, M.** (2011) Design Considerations for a Fault-Tolerant Flux-Switching Permanent-Magnet Machine. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 7, pp. 2818–2825.
- [10] **Barcaro, M. Bianchi, N. ve Magnussen, F.** (2011) Six-Phase Supply Feasibility Using a PM Fractional-Slot Dual Winding Machine. *IEEE Transactions on Industrial Applications*, vol. 47, no. 5, pp. 2042–2050.

- [11] **Madonna, V. Giangrande, P. ve Galea, M.** (2018) Electrical Power Generation in Aircraft : Review, Challenges, and Opportunities. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 4, no. 3, pp. 646–659.
- [12] **Neely, J.** (2005) Fault Types and Reliability Estimates in Permanent Magnet AC Motors. *MS Thesis by Submitted to Michigan State University Department of Electrical and Computer Engineering.*
- [13] **Tang, R.** (2017) Modern Permanent Magnet Machines Theory and Design. *Beijing, China: China Machine Press.*
- [14] **Lovelace, E. C. Jahns, T. M. Keim, T. A. ve Lang, J. H.** (2004) Mechanical Design Considerations for Conventionally Machine Rotors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 40, no. 3, pp. 806–812.
- [15] **Madani, N.** (2011) Design of a Permanent Magnet Synchronous Generator for a Vertical Axis Wind Turbine. *MS Thesis by Submitted to Royal Institute of Technology Department of Electrical Machines and Power Electronics.*
- [16] **Liaw, C.** (2013) A High Power Interior Permanent Magnet Alternator. *MS Thesis by Submitted to University of Adelaine.*
- [17] **Url-1** <<https://www.arnoldmagnetics.com>>, erişim tarihi 12.03.2022.
- [18] **Joe, L. E. ve Nur, T.** (2020) Study the Effect of Dummy Slot in Stator and Rotor on the Cogging Torque Reduction in Permanent Magnet Machine. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 807 012025.
- [19] **Gieras, J. F.** (2014) Design of Permanent Magnet Brushless Motors for High Speed Applications. *Invited Keynote Speech No 2, ICEMS'14, Hangzhou, China, 2014.*
- [20] **Gieras, J. F.** (2008) Advancements in Electric Machines. *Springer Science & Business Media.*
- [21] **Reinap, A. Alaküla, M.** (2012) Impact of Soft Magnetic Material on Construction of Radial Flux Electrical Machines. *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 48, no. 4, pp. 1613–1616.
- [22] **Url-2** <<https://www.hoganas.com>>, erişim tarihi 20.04.2022.
- [23] **Rao, J. Qu, R.** (2015) Magnetic Slot Wedge Design for High Power Permanent Magnet Traction Motors. *Huazhong University of Science and Technology, Wuhan.*

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Hüseyin ERSÖZ

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2019, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2019 yılından beri TUSAŞ Motor Sanayii A.Ş.'de çalışmaktadır.