

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK HIZLI HAVA ARAÇLARI İÇİN YÜKSEK GÜÇ
YOĞUNLUKLU SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON
GENERATÖR TASARIMI**

Rüştü Önder KALAYCIOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Makinaları ve Güç Elektronik Programı

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Engin AYÇİÇEK

Haziran, 2022

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK HIZLI HAVA ARAÇLARI İÇİN YÜKSEK GÜÇ
YOĞUNLUKLU SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON
GENERATÖR TASARIMI

Rüştü Önder KALAYCIOĞLU tarafından hazırlanan tez çalışması 23.06.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik Makinaları ve Güç Elektronik Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Engin AYÇİÇEK
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Engin AYÇİÇEK, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Kamuran Nur BEKİROĞLU
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Ahmet Derya KOCABAŞ
İstanbul Teknik Üniversitesi

Danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Engin AYÇİÇEK sorumluluğunda tarafımda hazırlanan Yüksek Hızlı Hava Araçları İçin Yüksek Güç Yoğunluklu Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatör Tasarımı başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Rüştü Önder KALAYCIOĞLU

İmza

Babamın anısına...

TEŐEKKÜR

Bu tez çalıŐması sűresince, bana her zaman yol gűsteren, sabır ve ilgiyle bana vaktini ayırarak beni motive eden ve cesaretlendiren deęerli danıŐmanım Dr. Őęr. Őyesi Engin AYÇİÇEK'e teŐekkűrlerimi sunarım.

Yűksek lisans çalıŐmaları için beni teŐvik eden Őirketim TUSAŐ Motor Sanayi'ye teŐekkűrlerimi sunarım.

Ayrıca baŐta babam olmak űzere tűm eęitim hayatım boyunca beni destekleyen ve daha iyisini yapmaya teŐvik eden canım aileme minnet ve teŐekkűrlerimi sunarım.

Son olarak en zorlandığım ve çıkmaza girdiğim zamanlarda ıŐıđım olarak űnűmű gűrmemi saęlayan, bir an olsun bana olan inancımı yitirmeyen kıymetli hayat arkadaŐım İrem BAYRAKTAR'a tűm kalbimle Őűkranlarımı sunarım.

RűŐtű Őnder KALAYCIOęLU

İÇİNDEKİLER

ŞEKİL LİSTESİ.....	x
TABLO LİSTESİ.....	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT.....	xv
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	2
1.2 Tezin Amacı.....	5
1.3 Hipotez	5
2 SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MAKİNELER.....	7
2.1 Manyetik Malzemeler ve Karakteristikleri	7
2.1.1 Mıknatıs Malzemelerin Karşılaştırılması	9
2.2 Sürekli Mıknatıslı Senkron Makinelerin Sınıflandırılması.....	10
3 HAVA ARAÇLARINDA ELEKTRİKSEL GÜÇ ÜRETİM SİSTEMİ.....	13
3.1 Hava Araçlarında Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatör Kullanımı.....	13
3.2 Hava Araçlarında Kullanılan Sürekli Mıknatıslı Senkron Makineler’de Hata Modları.....	17
4 YÜKSEK HIZLI VE YÜKSEK GÜÇ YOĞUNLUKLU SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON GENERATÖR TASARIMI.....	21
4.1 Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatör’ün Tasarımı.....	22
4.1.1 Stator	22
4.1.2 Rotor.....	27
4.2 Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatör’ün Analizi	32
4.2.1 Boşta Minimum ve Maksimum Devirlerde İndüklenen Gerilimler	33
4.2.2 Akı Yoğunluğu Analizi	35
4.2.3 Yükte Maksimum ve Minimum Devirlerde İndüklenen Gerilimler	35

5 SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON GENERATÖR TASARIMININ OPTİMİZASYONU.....	49
5.1 İkinci Tasarım	49
5.1.1 Stator Optimizasyonu	49
5.1.2 Rotor Optimizasyonu	50
5.2 İkinci Tasarım Analiz Sonuçları	52
5.2.1 Boşta Minimum ve Maksimum Devirlerde İndüklenen Gerilimler	52
5.2.2 Akı Yoğunluğu Analizi	53
5.2.3 İkinci Tasarım Yükte Maksimum ve Minimum Devirlerde Çekilen Akımlar ve Akım Yoğunlukları.....	54
5.2.4 İkinci Tasarım Kısa Devre Akımı Analiz Sonuçları	55
5.2.5 Kayıp Analizleri ve Verim	56
5.3 İki Tasarım Sonuçlarının Karşılaştırılması	56
6 SONUÇ VE ÖNERİLER.....	58
KAYNAKÇA.....	61
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR.....	64

SİMGE LİSTESİ

I	Akım
J	Akım Yoğunluğu
μ	Bağıl Geçirgenlik
A_B	Bobin Alanı
L	Bobin Endüktansı
l_B	Bobin Ortalama Uzunluğu
P_e	Elektriksel Güç
X_d	Endüktif Reaktans
C	Faydalanma Katsayısı
B_g	Hava Aralığı Akı Yoğunluğu
I_{sc}	Kısa Devre Akımı
L_p	Makinenin Eksenal Uzunluğu
BH_{maks}	Maksimum Manyetik Alan Kuvveti
H_c	Manyetik Alan Kuvveti
U_N	Nominal Gerilim
B_r	Remenans Akı Yoğunluğu
D_r	Rotor Dış Çap
k_w	Sargı Faktörü
N_s	Sarım Sayısı
n_s	Senkron Devir
$L_{d,q}$	Stator Endüktansı d,q Bileşenleri
A_t	Tel Kesiti
T	Tesla
V	Volt

KISALTMA LİSTESİ

AC	Alternatif Akım
AlNiCo	Alüminyum Nikel Kobalt
Dev/Dk	Devir/Dakika
DC	Doğru Akım
EGÜS	Elektriksel Güç Üretim Sistemi
EMK	Elektromotor Kuvveti
MMK	Manyetomotor Kuvveti
NdFeBr	Neodyum Demir Boron
SmCo	Samaryum Kobalt
SM	Sürekli Mıknatıs
SMSG	Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatör
SMSM	Sürekli Mıknatıslı Senkron Makine

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Sürekli mıknatısların histeresiz döngüsü.....	9
Şekil 2.2	a) Eksenal akılı makinede mıknatısların rotora yerleşimi, b) Eksenal akılı makinelere stator, c) Tek stator tek rotor eksenal akılı makine örneği, d) Çift stator tek rotor eksenal akılı makine örneği [12]	11
Şekil 2.3	Radyal akılı iç rotorlu makinelere rotor topolojileri [2].....	12
Şekil 3.1	Pençe kutuplu senkron makinenin a)Rotorunun yapısı b) Diyot paketi [16].	14
Şekil 3.2	Hava aracı motoru aracılığıyla sürülen bir smsg'ün güç akışı [17]	16
Şekil 4.1	Farklı yüksek performanslı elektrik saclarının akma dayanımı ve demir kaybının karşılaştırılması [21].....	23
Şekil 4.2	Rotorda kırlangıç kuyruğu yapısı	28
Şekil 4.3	Recoma 30HE B-H eğrisi [25]	29
Şekil 4.4	a) Kılıf modellemesi, b)Rotor yüzeyinde karbon fiber kılıf örneği [27].....	32
Şekil 4.5	Tasarlanan SMSG'nin 2D modeli	33
Şekil 4.6	38000Dev/dk, 200 C°, Boşta indüklenen gerilimler	34
Şekil 4.7	50000Dev/dk, -40 C°, Boşta indüklenen gerilimler	34
Şekil 4.8	Akı yoğunlukları.....	35
Şekil 4.9	2kW yük, 38000Dev/dk, İndüklenen gerilimler.....	36
Şekil 4.10	2kW yük, 50000Dev/dk, İndüklenen gerilimler.....	36
Şekil 4.11	2kW yük, 38000Dev/dk, Faz akımları	37
Şekil 4.12	2kW yük, 50000Dev/dk, Faz akımları	37
Şekil 4.13	Simülasyon devresi.....	39
Şekil 4.14	38000Dev/dk, Yüksüz durumda DC çıkış gerilimi	39
Şekil 4.15	50000Dev/dk, Yüksüz durumda DC çıkış gerilimi	40
Şekil 4.16	Yüklü koşulda simulasyon modeli	41
Şekil 4.17	38000Dev/dk yüklü koşulda DC çıkış gerilimi.....	41
Şekil 4.18	38000Dev/dk Yüklü koşulda DC çıkış akımı.....	42
Şekil 4.19	50000Dev/dk Yüklü koşulda DC çıkış gerilimi	42
Şekil 4.20	50000Dev/dk Yüklü koşulda DC çıkış akımı.....	43
Şekil 4.21	50000Dev/dk, Yüklü koşulda fazlararası gerilim.....	43
Şekil 4.22	Faz-Faz kısa devre akımı simülasyonu	45
Şekil 4.23	50000dev/dk'de faz-faz kısa devre akımı	45

Şekil 4.24 SMSG'ün 3 boyutlu görünümü	46
Şekil 5.1 İlk tasarım ve ikinci tasarım stator oluk geometrileri.....	50
Şekil 5.2 İlk tasarım akı çizgileri	51
Şekil 5.3 Ağırlık azaltılmış ikinci tasarım rotor	51
Şekil 5.4 İkinci tasarım 38000Dev/dk, 200 C°, boşta indüklenen gerilimler.....	52
Şekil 5.5 İkinci tasarım 50000Dev/dk, -40 C°, boşta indüklenen gerilimler.....	52
Şekil 5.6 İkinci tasarım akı yoğunlukları.....	53
Şekil 5.7 2kW yük, 38000Dev/dk, faz akımları	54
Şekil 5.8 Şekil 4.5.9 2kW yük, 50000Dev/dk, faz akımları	54
Şekil 5.9 50000dev/dk'de Faz-Faz kısa devre akımı.....	55

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Sert ve yumuşak manyetik malzemelerin karakteristiklerinin karşılaştırılması[11].....	8
Tablo 2.2 NdFeB ve SmCo mıknatısların başlıca özelliklerinin karşılaştırılması [2]	9
Tablo 2.3 NdFeB ve SmCo mıknatısların başlıca özelliklerinin karşılaştırılması [2] (devamı)	10
Tablo 3.1 Sürekli mıknatıslı senkron makine ile fırçalı senkron makinenin avantaj ve dezavantajlarının karşılaştırılması.....	15
Tablo 3.2 Sürekli mıknatıslı senkron makine ile fırçalı senkron makinenin avantaj ve dezavantajlarının karşılaştırılması (devamı)	16
Tablo 3.3 Hava araçlarında kullanılan smsm'lerde birincil arızalar [18]	18
Tablo 3.4 Hava araçlarında kullanılan SMSM'lerde birincil arızalar [18] (devamı).....	19
Tablo 4.1 Tasarım kriterleri	21
Tablo 4.2 M235-35A elektrik sacının temel özellikleri [22]	24
Tablo 4.3 Sargı çeşitlerinin kıyaslanması [24].....	26
Tablo 4.4 Çalışma koşullarına göre akım yoğunluğu tablosu [19]	27
Tablo 4.5 Recoma 30HE mıknatıs özellikleri [25]	30
Tablo 4.6 Literatürdeki yüzey mıknatıslı yüksek hızlı makinelerin özellikleri [26].....	31
Tablo 4.7 Boşta minimum ve maksimum devirde indüklenen gerilimler.....	34
Tablo 4.8 Yükte minimum ve maksimum devirde indüklenen gerilimler	36
Tablo 4.9 Yükte minimum ve maksimum devirde faz akımları	38
Tablo 4.10 Yükte minimum ve maksimum devirde akım yoğunlukları	38
Tablo 4.11 Boşta minimum ve maksimum devirde DC çıkış gerilimleri	40
Tablo 4.12 Yükte minimum ve maksimum devirde DC çıkış gerilimleri ve akımları ..	44
Tablo 4.13 Yükte minimum ve maksimum devirde kayıplar ve verim	47
Tablo 4.14 Malzeme ağırlıkları.....	47
Tablo 5.1 Boşta minimum ve maksimum devirde indüklenen gerilimler.....	53
Tablo 5.2 İkinci tasarım yükte minimum ve maksimum devirde faz akımları	55
Tablo 5.3 Yükte minimum ve maksimum devirde akım yoğunlukları	55
Tablo 5.4 İkinci tasarım yükte minimum ve maksimum devirde kayıplar ve verim	56
Tablo 5.5 İki tasarım optimizasyon parametreleri karşılaştırılması.....	57
Tablo 5.6 İki tasarım performans parametrelerinin karşılaştırılması	57

Yüksek Hızlı Hava Araçları İçin Yüksek Güç Yoğunluklu Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatör Tasarımı

Rüştü Önder KALAYCIOĞLU

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Engin AYÇİÇEK

Hava araçları generatör ve batarya olmak üzere iki adet birincil elektrik enerjisi kaynağına sahiptir. Generatör ana elektrik enerjisi kaynağıyken batarya yardımcı enerji kaynağıdır. Havacılıkta kullanılan sistemler genellikle 115V-400Hz alternatif akımla veya 28V doğru akımla beslenmektedir. Bu kapsamda sabit 28V doğru akım güç çıkışı sağlayabilmelerinden dolayı tıpkı otomotiv sektöründe olduğu gibi havacılık sektöründe de pençe kutuplu senkron generatörler (alternatörler) yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak verimliliklerinin düşük olması, boyutlarının büyük olması, ağırlıklarının fazla olması, fırçalı yapıda oldukları için ömürlerinin kısa olması, emniyetli ve kararlı olmaması gibi sebeplerden dolayı havacılık sektörü bu elektrik makinelerinin yerine bir arayış içine girmiştir. Bu arayışın sonucu olarak son yıllarda pençe kutuplu senkron generatörler yerlerini sürekli mıknatıslı senkron generatörlere bırakmaya başlamıştır.

Sürekli mıknatıslı senkron makineler yıllar içinde makine tasarım araçlarının ve mıknatıs teknolojisinin gelişmesi ile birlikte kendine birçok alanda yer bulmaya başlamıştır. Havacılıkta, yapılarındaki sürekli mıknatıslar sayesinde harici bir uyartıma ihtiyaç duymamaları, uzun ömürlü olmaları, zorlu ortam koşullarında çalışabilmeleri, güç yoğunluklarının geleneksel senkron makinelere göre yüksek olması, güvenli ve kararlı olmaları gibi sebeplerden dolayı tercih sebebi olmaktadır. Havacılıkta sürekli mıknatıslı senkron generatörler farklı devirlerde sabit çıkış gerilimi veremediğinden dolayı güç

Design of High Power Density Permanent Magnet Synchronous Generator for High Speed Aircraft

Rüştü Önder KALAYCIOĞLU

Department of Electrical Engineering

Master of Science Thesis

Advisor: Assist. Prof. Dr. Engin AYÇİÇEK

Aircraft have two primary electrical energy sources, a generator and a battery. While the generator is the main source of electrical energy, the battery is the auxiliary energy source. In aviation, most of the systems uses 115V-400Hz alternating current or 28V direct current. In this context, claw-pole synchronous generators (alternators) are widely used in the aviation industry as well as in the automotive industry, as they can provide a constant 28V direct current power output. However, the aviation industry has started a search for these electrical machines due to reasons such as their low efficiency, large size, high weight, short lifetime due to their brushed structure, and not being safe and stable. As a result of this search, in recent years, claw-pole synchronous generators have started to give way to permanent magnet synchronous generators.

Permanent magnet synchronous machines have started to find a place for themselves in many areas with the development of machine design tools and magnet technology over the years. In aviation, they are preferred because they do not need external voltage supply thanks to the permanent magnets in their structure, they have a long lifetime, they can work in harsh environmental conditions, their power density is higher than traditional synchronous machines, they are safe and stable. In aviation, permanent magnet synchronous generators are used together with power electronics converters because they

can not provide constant output voltage at different speeds. This system is called electrical power generation system.

In this thesis, designed a high power density permanent magnet synchronous generator for high speed aircraft. The first design of the machine was made according to the dimensions calculated by analytical methods, then the design was analyzed with an electromagnetic analysis program and the design optimization was carried out. In order to comply with aviation standards, it has been ensured that the machine is in a safety-critical structure in the design and material selection.

Keywords: Permanent magnet synchronous generator, aircraft generators, high power density at electric machines, safety critical generator applications, generator design and analyzes

Elektrik makineleri 150 yıldan fazla süredir birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Makine tasarımları bu süre zarfında teknolojik gelişmelere ve ilerlemelere bağlı olarak birçok kez değişmiştir. Bununla birlikte makinelerin analiz edilme ve tasarlanma yöntemlerindeki değişiklikler çok daha büyüktür. Başlangıçta ampirik yöntemler ile yapılan tasarımlar daha sonraları matematiksel yöntemler ve teknolojinin gelişmesiyle birlikte bilgi işlem gücüyle yapılmaya başlanmıştır. Aynı zamanda hammadde, enerji ve işçilik maliyetleri de zaman içinde değişmiştir. Teknolojinin ve maliyetlerin zaman içinde değişmesi elektrik makinesi modelleme yeteneklerini kullanarak daha ucuza daha yüksek verimliliğe ve daha yüksek kararlılığa elektrik makinesi tasarlanması sonucunu doğurmuştur.

Bu gelişmeler yüksek performanslı elektrik makineleri uygulamaları için tasarım isterlerini daha özelleştirilmiş tasarımlara yöneltmiştir. Bu tarz özelleştirilmiş tasarım isterlerini;

- 1- Yüksek performanslı sistemler için elektrik makineler sistem arayüzleri ile daha düşük toleranslar ve daha yüksek isterler ile entegre edilmesi beklenmektedir. Bu isterlere ağırlık, boyut, çalışma aralıkları, endüktans ve verim gibi isterler örnek olarak verilebilir.
- 2- Zaman içinde elektrik makinelerinde daha yüksek frekanslarda çalışmaya doğru bir eğilim gerçekleşmiştir. Mevcutta çoğu ülkelerde kullanılan şebeke frekansları olan 50Hz ve 60Hz makineler de düşük frekanslarda çalışmaktan kaynaklı oluşan verimlilik ve hacim gibi problemler, daha yüksek hızlarda ve daha yüksek frekanslarda tasarlanan elektrik makineleriyle aşılmaya çalışılmaktadır.
- 3- Daha esnek ve daha kısa makine üretim süreci ihtiyacından dolayı standart uygulamalar için tasarlanan elektrik makinelerinin tasarımında üretim kabiliyetine bağlı olarak çok daha detaylı analizler yapılması ihtiyacı doğmuştur. Bu analizler sonucunda üretim kabiliyeti ve makine performansı açısından en optimum tasarımın ortaya çıkması hedeflenmektedir.
- 4- Havacılık ve otomotiv başta olmak üzere birçok alanda makinelerin hata toleransları ve emniyet durumları üzerine birçok isterler belirlenmiştir. Bu tarz

sadece mal değil can kaybına da sebep olabilecek uygulamalar için elektrik makinelerinde istenen emniyet kriterleri standartlar ile belirtilmiş ve makine tasarımları için önemli bir kıstas olarak yerini almıştır.

- 5- Gerek makine tasarımında kullanılan malzemeler için gerekse üretimde kullanılan iş gücü açısından maliyet günümüzde makine tasarımlarında ki en önemli hususlardan biridir. Maliyet kritik çalışmalarda elektrik makinesinin malzeme seçimi ve geometrik tasarımı gibi konular makine tasarımını kısıtlamaktadır.

şeklinde sıralayabiliriz.

Bu gereksinimleri göz önünde bulundurduğumuzda bir elektrik makinesi tasarlamak için yalnızca elektrik makinesi tasarımını değil bir bütün olarak elektriksel veya mekaniksel güç üretim sistemini ele almak gerekmektedir.

Yukarıda listelenen gereksinimleri karşılayabilmek için mıknatıs teknolojisnin ve tasarım araçlarının gelişmesiyle birlikte son yıllarda sürekli mıknatıslı elektrik makineleri üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Havacılık sektörü de elektrik makinelerinde yaşanan bu gelişmelere kayıtsız kalmamış, sürekli mıknatıs teknolojisini havacılıkta kullanılan elektrik makinelerine uygulamaya başlamıştır. Elektrik makinesinin kullanım amacına, çalışma koşullarına, güvenlik isterlerine ve ömür isterlerine göre farklı topolojilerde sürekli mıknatıslı elektrik makinesi tasarımları havacılıkta kullanılmaktadır.

1.1 Literatür Özeti

Sürekli mıknatıslı senkron makinelerin tarihi 1830'lu yıllardaki Faraday'ın çalışmalarına dayanmaktadır. Ancak o yıllarda manyetik malzemelerin kalitesizliğinden dolayı kullanımı yaygınlaşmamıştır. 1930'lu yılların başında AlNiCo'nun, 1950'li yıllarda Baryum Ferrit'in ve 1980'li yıllarda Neodyum Demir Boron malzemelerinin bulunması elektrik makinelerinde sürekli mıknatısın kullanımını tekrardan canlandırmıştır. Mıknatıslı ilk elektrik makinesi 1900 yılında Thomas Alva Edison tarafından üretilmiş olup mıknatıs içeren ilk senkron generatör tasarımları AlNiCo mıknatısların ortaya çıkmasıyla gerçekleştirilmiştir [1].

Elektrik makinelerinde mıknatıs kullanımına ilişkin bir diğer önemli adımda 1960'larda nadir toprak bileşiklerinin ortaya çıkması ile atılmıştır. O dönemde en önemli malzemeler SmCo5 ve Sm2Co17 idi. Daha sonra bu mıknatısların daha iyi ve daha komplike varyasyonları ortaya çıkmıştır. 1969' da keşfedilen SmCo(1:5) mıknatıslarının

maksimum enerji yoğunluğu 175 kJ/m^3 iken 1980'lerde keşfedilen $\text{SmCo}(2:17)$ mıknatıslarının maksimum enerji yoğunluğu 255 kJ/m^3 'dür. Samaryum kobalt mıknatısların ardından günümüzde en yüksek enerjiyi sağlayan mıknatıs tipi olan Neodyum Demir Boron mıknatısların keşfi gelmiştir. 1983 yılında Sumimoto ve General Motors tarafından geliştirilen bir toz metalurjisi yöntemi ile ortaya çıkan bu mıknatısların en büyük avantajlarından biri nadir element olan samarium ve kobaltın yerine daha yaygın olan neodyumun almasıdır [2].

Gelişen mıknatıs teknolojisi ve yarı iletken teknolojisi ile birlikte sürekli mıknatıslı senkron generatörler havacılık alanında da kullanılmaya başlanmıştır. Daha önceleri havacılıkta elektriksel sistemleri beslemek amacıyla Pençe Kutuplu Generatörler kullanılmaktadır. İlk olarak Lundell tarafından geliştirilen Pençe Kutuplu Senkron Generatörler 1970'li yıllarda yaygınlaşmış ve özellikle tüm arabalarda ve kara araçlarında kullanılmaya başlanmıştır [3]. Ancak hem mıknatıslı makinelerin yaygınlaşması ve kontrolünün kolaylaşması hemde Pençe Kutuplu Alternatörlerin fırçalı yapısının dezavantajlarından dolayı son yıllarda özellikle güvenliğin kritik olduğu havacılık alanında sürekli mıknatıslı senkron makinelerin kullanımı artmıştır.

1983 yılında NASA bünyesinde çalışmalarını sürdüren Echolds "Hava Araçları için Sürekli Mıknatıslı Motor ve Generatörler" isimli çalışmasında 3 ana başlık altında sürekli mıknatıslı makinelerin hava araçlarında kullanımına değinmiştir. Çalışmasında hava araçları için daha geniş akı alanlarına sahip bir elektrik makinesi tasarımı yapmak amacıyla yola çıktığından bahseden Echolds çalışmasında makine tasarımında çeşitli konfigürasyonlar ve malzemeler, generatörlerin kullanım alanları, donanımsal olarak mıknatıslı makinelerin kontrolü çerçevesinde çalışmasını gerçekleştirir [4].

Acarney 1988 yılında yaptığı çalışmasında hava araçlarında kullanılması amacıyla çift statorlu tek rotorlu sürekli mıknatıslı bir aksenal akılı generatör tasarımı gerçekleştirmiştir. Çalışmasında AlNiCo ve SmCo mıknatısların özelliklerini de karşılaştıran Acarnley mıknatısların makine performansına etkisinden bahsetmiştir. Pençe kutuplu generatörlerin mıknatıslı generatörlere oranla daha ekonomik olduğu ancak güç yoğunluğu açısından mıknatıslı topolojinin daha iyi performans gösterdiği sonucuna varmıştır [5].

Rolls Royce bünyesinde çalışan Mitcham ve Cullen 2002 yılında yaptıkları çalışmada hava araçları için yüksek güçlü sürekli mıknatıslı generatör kullanımının avantajlarından bahsetmişlerdir. Uçak motorunun şaftına direkt olarak akuple edilecek olan bir sürekli mıknatıslı generatörün aynı zamanda marş generatörü olarak da kullanılabilmesine değinen Mitcham ve Cullen SM makinenin geleneksel alan sargılı DC generatörlere göre çok daha emniyetli olduğundan bahsetmişlerdir. Ancak SM makinede çıkış gerilimini regüle etmek için gerekli olan DC-DC dönüştürücünün de ekstra bir emniyet gereksinimi olduğuna değinmişlerdir [6].

Puvan Arumugam ve arkadaşları hava araçları için sürekli mıknatıslı senkron marş generatörü çalışmasında farklı oluk-kutup kombinasyonları deneyerek daha yüksek güç yoğunluklu bir elektrik makinesi elde etmeyi amaçlamışlardır. Yüzey mıknatıslı topoloji kullandıkları makinelerinde sleeve malzemesini de inceleyerek minimum rotor kaybını hedeflemişlerdir [7].

Martin V. D. Geest 2015 yılında yaptığı yüksek performanslı sürekli mıknatıslı makinelerin tasarımı ve modellemesi çalışmasında helikopter uygulamalarında kullanılmak üzere fırçasız bir marş generatörü geliştirmeyi hedeflemiştir. Tasarım ve optimizasyon kısmını geniş bir şekilde ele alan Geest, topoloji seçimi ve optimizasyonu, makinenin kayıpları, kısa devre arızalarının modellenmesi ve karşılaştırılması, prototip makinenin üretimi ve sürekli mıknatıslı makinelerde güç yoğunluğu limitlerini çalışmasında ele almıştır. Çalışmada 5kW, nominal hızı 24000 dev/dk, başlangıçta 20 saniye boyunca motor modda çalışacak ve 20Nm tork üretecek bir sürekli mıknatıslı marş generatörü tasarlanmış olup sürekli mıknatıslı yapının marş generatörlerinde kullanımı detaylı olarak gösterilmiştir [8].

Flur R. Ismagilov ve arkadaşları turbojet motorlarında kullanılmak üzere yüksek hızlarda çalışmaya uygun yüksek güç yoğunluklu bir generatör tasarlamışlardır. Çalışmalarında dış üstü sargı ve amorf alaşım malzemeler kullanmışlardır. Çalışma kapsamında stator boyunduruğu olan ve olmayan iki farklı makine üretilip bunların testlerini yaparak karşılaştırmalı olarak yayınlarında bahsetmişlerdir [9].

Shitao Wu ve arkadaşları yaptıkları çalışmalarda hava araçları için yüksek empedanslı bir SMSG tasarımı üzerine yoğunlaşmışlardır. Bu çalışmada farklı rotor topolojileri ile

empedansı arttırarak makinenin düşük kısa devre akımı ile çalışmasını ve daha güvenli hale gelmesini amaçlamışlardır [10].

1.2 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında amaç; hava araçlarında kullanılan yüksek hızlı hava aracı motorları ile birlikte çalışacak ve motor kontrol ünitesini besleyecek yüksek güç yoğunluğuna sahip olan bir SMSG (Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatör) tasarımı gerçekleştirmektir. Tasarlanacak olan generatör hava aracı motoruna şaft üzerinden direkt sürülecek olup arada herhangi bir dişli kutusu olmayacağından dolayı hava aracı motoru ile aynı hızlarda dönmeye uygun olacaktır.

Yüksek hızlı ve yüksek güç yoğunluğuna sahip bir elektrik makinesinin tasarımında dikkat edilmesi gereken hususlar, kullanılacak malzemelerin seçimi, elektrik makinelerinde sargı tasarımı ve mıknatıslı makinelerde vurutu torkunu azaltmaya yönelik yapılabilecek optimizasyon çalışmalarından tez çalışması içinde geçmiş çalışmalar ve analiz sonuçları ile desteklenecektir. Elektromanyetik analizler sonlu elemanlar yöntemi ile elektrik makinelerinde performans analizi yapılabilen ANSYS Maxwell programında yapılacaktır. Kısa devre akımı analizleri ve sistem analizleri Maxwell program ile birlikte çalışabilen ANSYS TwinBuilder aracılığı ile yapılacaktır.

Hava araçlarının motorlarında kullanılan elektrik makineleri ve motor kontrol ünitelerini besleyen sistemler hakkında bilgi verilecektir.

Çalışma içerisinde hava araçlarında önemli olan emniyet kritik kavramından bahsedilecek ve tasarlanan generatörün emniyet ve hata durumu analizleri yapılacaktır. Tasarım kriterlerinde belirlenen kısa devre akımı sınırları “fazlararası kısa devre” arızaları için analiz edilecek ve sınırları aşmaması hedeflenecektir.

Çalışma sonucunda havacılıkta kullanılabilen emniyetli ve kararlı çalışabilecek bir SMSG tasarlanacak olup tasarım isterlerinde belirtilen performans ve emniyet isterlerine belirlenen boyut ve ağırlık isterleri içinde ulaşıp ulaşamadığı analiz sonuçları ile gösterilecektir.

1.3 Hipotez

Hava araçlarında elektriksel sistemlerin fonksiyonu elektrik enerjisini üretmek, düzenlemek ve dağıtmaktır. Hava aracındaki sistemler hem alternatif akım (AC) hem

doğru akım (DC) ile çalışabilmektedir. Bir hava aracının elektriksel sistemi komponentlerin ihtiyacı olan g ve gerilim isterlerine göre oluşturulur. Havacılıkta çoğu sistem 115V AC 400Hz veya 28V DC beslemesi ile çalışır.

Hava araçlarında kullanılan generatörler mekanik enerjiyi hava aracının motorundan almaktadır. Bu hareket enerjisi bir dişli kutusu ile hız düşürülerek veya direkt generatör şaftını hava aracı motorunun şaftı ile akuple ederek alınabilmektedir. Generatrun şaft hızı ve çıkış frekansı sistem tasarımına göre sabit yada değişken olabilmektedir. Hava araçlarında kullanılan generatörler 3 grupta incelenebilir. Bunlar;

- 1- Sabit Hız Sabit Frekanslı Generatörler
- 2- Değişken Hız Sabit Frekanslı Generatörler
- 3- Değişken Hız Değişken Frekanslı Generatörler

şeklinde sıralanmaktadır.

Bu tez çalışması yüksek hızlarda çalışan bir hava aracı motorunun şaftına direkt olarak bağlı olan değişken hızlı sabit frekanslı bir SMSG tasarlayarak günümüzde havacılıkta yaygın olarak kullanılan pençe kutuplu senkron generatörlerin yerine daha emniyetli, daha kararlı, daha verimli, daha yüksek güç yoğunluğuna sahip ve daha uzun ömürlü generatör tasarımı hipotezine dayanmaktadır.

SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MAKİNELER

Elektrik makineleri, elektrik enerjisini mekanik enerjiye çeviren makineler (elektrik motorları), mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çeviren makineler (generatörler) ve belirli bir seviyedeki elektriksel gerilimi başka bir seviyeye çeviren makineler (transformatörler) olmak üzere 3 ana başlıkta listelenebilir. Bu makinelerden motor ve generatörler döner elektrik makineleri olarak adlandırılmaktadır. Döner elektrik makineleri, endüstriyel uygulamalara ek olarak birçok özel uygulamada da kullanılmaktadır. Özel uygulamalarda kullanılan döner elektrik makineleri uygulamanın kullanım yeri ve ortam şartlarına göre farklılık göstermektedir.

SMSM'lerin özel uygulamalarda kullanımı sert manyetik malzeme teknolojisinde ve sürücü teknolojisinde son yıllarda yaşanan gelişmeler neticesinde oldukça yaygınlaşmıştır. Geleneksel senkron ve asenkron makinelere oranla daha yüksek güç yoğunluklarının olması, daha verimli olmaları, geniş çalışma aralıklarında çalışabilmeleri SMSM'lerin başlıca avantajları olarak sıralanmaktadır.

SMSM'ler stator ve rotor olmak üzere iki ana kısımdan oluşmaktadır. Stator üzerinde faz sargılarını bulduran sabit kısımdır, rotor ise üzerinde mıknatısları bulduran hareketli kısımdır. Geleneksel senkron makinelerin rotorunda makinenin uyarımını sağlamak amacıyla alan sargıları yer almaktadır, SMSM'de ise rotor uyarımını mıknatıslar yardımı ile sağlanmaktadır.

Sürekli mıknatıslı makinede kullanılacak olan mıknatısın özellikleri makinenin performansı ile doğrudan ilişkilidir. Sürekli mıknatıslar dışardan bir uyarıma gerek olmaksızın manyetik alan üretebilen malzemelerdir. Sürekli mıknatıslar aynı zamanda sert manyetik malzemeler olarak da adlandırılırlar [11]

2.1 Manyetik Malzemeler ve Karakteristikleri

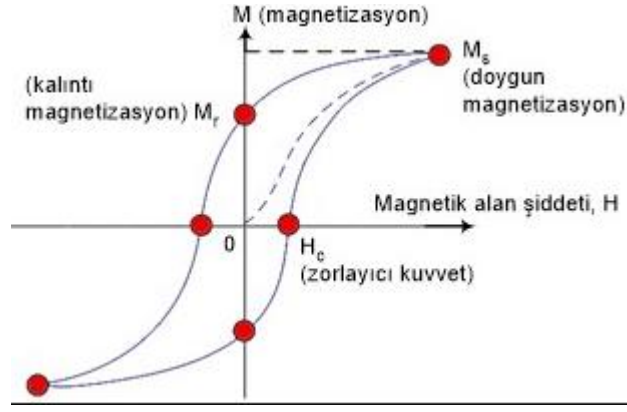
Manyetik malzemeler, sert manyetik malzemeler ve yumuşak malzemeler olarak ikiye ayrılmaktadır. Sert manyetik malzemeler ve yumuşak manyetik malzemelerin temel özelliklerinin karşılaştırılması aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 2.1 Sert ve yumuşak manyetik malzemelerin karakteristiklerinin karşılaştırılması[11]

Malzeme	H_c [A/m]	J_s [T]	B_r [T]	μ_r [-]
Yumuşak Manyetik Malzeme	0.3 - 400	0.9 – 2.4	Uygulamaya bağlı	< 500,000
Sert Manyetik Malzeme	5x10 ³ - 2x10 ⁶	0.45 – 1.4	0.4 – 1.4	1.1 - 5

Tablo 2.1’de de gorolduğuzere yumuşak manyetik malzemeler sert manyetik malzemelere göre daha duşuk koersif kuvvete sahiptir. Duşuk manyetik alan kuvveti ve dar histeresiz donguileri nedeniyle uygulamalarda yumuşak malzemeler mıknatis malzemesi olarak kullanılmamaktadır, ancak yüksek induksiyonları ve duşuk histeresiz kayıpları nedeniyle manyetik akı iletkeni olarak kullanılmaktadırlar.

Sert manyetik malzemeler yüksek koersif kuvvetleri, yüksek manyetik alan kuvveti gibi nedenlerle sürekli mıknatis olarak da adlandırılırlar. Sürekli mıknatis malzemelerin çalışma aralığı histeresiz eğrisi olarak adlandırılan eğrinin ikinci kısmında (demanyetizasyon eğrisi) bulunur [12]. Histeresiz eğrisi sürekli mıknatisın manyetik devre içinde nasıl davranacağını gösteren eğridir. Histeresiz eğrisi sert manyetik malzemelerde yumuşak malzemelere göre daha geniş bir Alana yayılmaktadır. Demanyetizasyon eğrisi sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Sürekli mıknatisın üzerindeki sıcaklık miktarı arttıkça sağlayabileceği remenans akı yoğunluğu değişmektedir. Üreticiler farklı sıcaklık değerleri için mıknatis tipine bağlı olarak değişim miktarlarını katalog ve datasheetlerinde vermektedir.



Şekil 2.1 Sürekli mıknatısların histeresiz döngüsü

2.1.1 Mıknatıs Malzemelerin Karşılaştırılması

Elektrik makinalarında kullanılan mıknatıslar tarih boyunca sürekli olarak iyileştirilmiştir. Alnico mıknatıslar, Ferrit mıknatıslar ve nadir toprak elementi olarak adlandırılan NdFeB ve SmCo mıknatısların kullanımı uygulamaya göre değişmektedir. Bu mıknatıslar kullanacağı uygulamaya göre seçilmektedir. AlNiCo ve Ferrit mıknatısların birim hacimde verdikleri enerji miktarları NdFeB ve SmCo mıknatıslara göre çok daha düşük olduğundan bu mıknatıslar günümüzde uygulamalarda pek tercih edilmemektedir. Geçmişte özellikle yüksek sıcaklıklarda çalışacak elektrik makinalarında AlNiCo mıknatıslar kullanılmıştır ancak SmCo mıknatısların geliştirilmesiyle birlikte yüksek sıcaklıklarda da tercih edilmemeye başlamıştır. NdFeB ve SmCo mıknatıslar gerek makine boyutlarını düşürerek ağırlık, hacim ve maliyet etkin çözümler olması, gerekse uygulamaya göre zorlu koşullarda yüksek enerjilerini korumalarıyla uygulamalarda en çok kullanılan mıknatıslardır. Genel olarak elektrik makinalarında kullanılan NdFeB ve SmCo mıknatısların karşılaştırılması aşağıda Tablo 2.2’de verilmiştir.

Tablo 2.2 NdFeB ve SmCo mıknatısların başlıca özelliklerinin karşılaştırılması [2]

Mıknatıs Tipi/ Özellikleri	NdFeB	SmCo
BH maks. (kJ/m ³)	199-310	255
Br (T)	1.03-1.3	0.82-1.16
HcJ (kA/m)	875	493

Tablo 2.3 NdFeB ve SmCo mıknatısların başlıca özelliklerinin karşılaştırılması [2]
(devamı)

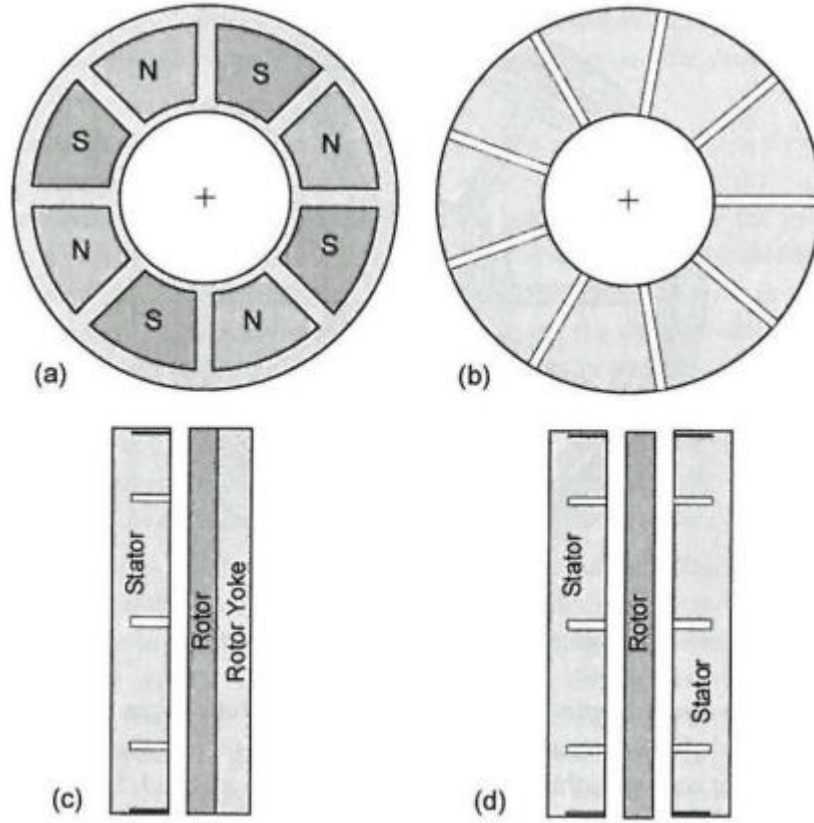
Bağıl Geçirgenlik	1.05	1.05
Curie Sıcaklığı (C°)	320	800

Tablo 2.2’de de görüldüğü gibi remanans akı yoğunluğu ve maksimum manyetik alan enerjisi açısından NdFeB mıknatıslar SmCo mıknatıslara oranla daha iyi bir performansa sahiptir. Ancak Curie Sıcaklığının yüksek olması ve sıcaklığa bağlı remanans akı yoğunluğu değişiminin daha az olması sebebiyle SmCo mıknatıslar yüksek sıcaklık gerektiren uygulamalarda daha çok tercih edilmektedir. Curie Sıcaklığı, mıknatısın demanyetize olacağı ve sürekli mıknatıs özelliğini tamamen yitireceği sıcaklık noktasıdır.

2.2 Sürekli Mıknatıslı Senkron Makinelerin Sınıflandırılması

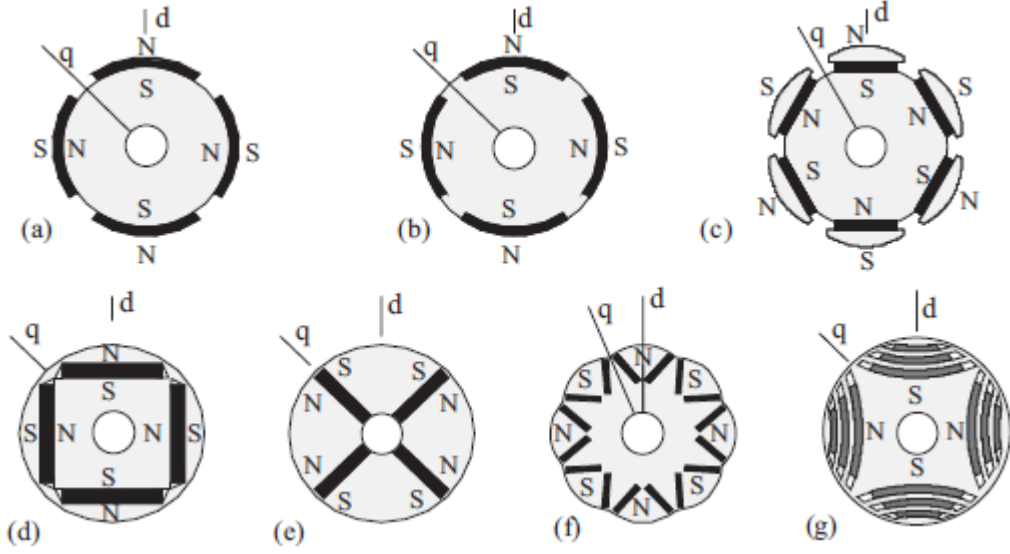
SMSM’ler akı yönlerine göre eksenal akılı ve radyal akılı olarak iki ana grupta sınıflandırılmaktadır. Radyal akılı makineler mıknatısın rotora yerleşimine göre yüzey mıknatıslı rotor ve gömülü mıknatıslı rotor olarak ikiye ayrılır. Tıpkı mıknatısların tercihinde olduğu gibi rotor topolojisinin seçiminde de uygulama yeri ve koşulları oldukça önemlidir. Makinenin motor modda mı çalışacağı, generatör modda mı çalışacağı, maksimum geometrik ölçüler, izin verilen maksimum vuruş torku veya faz dalgası harmonikleri gibi hususlar rotor topolojisinin seçiminde önem taşır.

Eksenal akılı makinelerde akı çizgileri eksenal yönde ve sargılar radyal yönde yönlendirilir [12].Yapılarından dolayı “pankek makine” olarak da anılan eksenal akılı sürekli mıknatıslı makineler, tek stator tek rotor, tek stator çift rotor, çift stator tek rotor gibi farklı konfigürasyonlarda üretilebilmektedir. Radyal akılı makinelere oranla daha yüksek güç yoğunluğuna sahip olmasına harmoniklerin yüksek olması, üretiminin radyal akılı makineye oranla zor olması ve ısınma problemlerinin giderilmesi için genellikle sıvı soğutmaya ihtiyaç duyması gibi sebeplerden ötürü özel uygulamalarda kullanılmaktadır.



Şekil 2.2 a) Eksenal akılı makinede mıknatısların rotora yerleşimi, b) Eksenal akılı makinelerde stator, c) Tek stator tek rotor eksenal akılı makine örneği, d) Çift stator tek rotor eksenal akılı makine örneği [12]

Radyal akılı makinelerde akı çizgileri radyal yöndedir. Stator sargıları eksenal yönde sarılır. Radyal akılı makineler uygulamaya göre iç rotorlu ve dış rotorlu olarak tasarlanabilmektedir. Makinenin kullanılacağı yere göre uygun makine topolojisi seçilmektedir. Dış rotorlu olarak tasarlanan makinelerde tek bir topoloji varken iç rotorlu makinelerde başlıca yüzey mıknatıslı ve gömülü mıknatıslı olmak üzere birçok farklı rotor topolojisi mevcuttur. Güç yoğunluğu eksenal akılı makinelere göre daha düşük olmasına karşın harmoniklerin düşük olması, üretiminin daha kolay olması, soğutmanın daha kolay olması gibi sebeplerden dolayı radyal akılı makineler uygulamalarda daha çok tercih edilir.



Şekil 2.3 Radyal akılı iç rotorlu makinelerde rotor topolojileri [2]

Yüzey mıknatıslı senkron makinelerin ana avantajı yapısının basitliği ve bu basitlikten kaynaklı maliyet etkin çalışmalarda kullanılmasıdır. Bununla birlikte yüzey mıknatıslı makinelerde $L_d=L_q$ olduğundan dolayı relüktans momentinden faydalanılamamaktadır, ancak mıknatısların manyetik geçirgenliği havanınkine benzer olduğundan ve bir armatür reaksiyonu göstermediğinden dolayı basit bir konum algılayıcı sensor ile rotor konumu algılanarak kontrolü oldukça kolaylaştırılır [13]. Kontrolü gömülü mıknatıslı konfigürasyonlara göre çok daha kolaydır.

Gömülü mıknatıslı senkron makinelerin yapısı yüzey mıknatıslı makinelerden tamamen farklıdır. Mıknatıslar rotorun içine yerleştirilmiştir ve mıknatıslanma yönüne göre birçok farklı şekilde rotorun içinde bulunabilirler. Gömülü mıknatıslı makinelerde $L_d \neq L_q$ olduğundan dolayı relüktans momentini vardır ve toplam moment mıknatıs momenti ve relüktans momentinin toplamı kadardır. Ayrıca yüksek bir hava aralığı akı yoğunluğu elde edebilirler. Demanyetizasyona karşı korunmak için teğetsel olarak manyetize edilirler [14]. Mıknatıslar rotorun içine gömülü olduğundan dolayı mekanik streslere karşı da oldukça dayanıklıdırlar. Ancak yüzey mıknatıslı makinelere göre yapıları ve üretimi çok daha karmaşıktır. Dolayısıyla maliyetleri de daha yüksektir.

HAVA ARAÇLARINDA ELEKTRİKSEL GÜÇ ÜRETİM SİSTEMİ

Hava araçlarında elektriksel güç üretim sistemi (EGÜS) üzerinde generatör(alternatör) ve güç kontrol ünitesini bulundurarak uçak içerisinde güç ihtiyacı bulunan bütün birimler için elektriksel güç üreten sistemdir. Hava araçlarında iki elektriksel güç kaynağı vardır. Bunlardan birincisi generatör, ikincisi ise bataryadır. Generatör, mekanik enerjiyi elektriksel enerjisine çevirerek elektrik enerjisi üretir ve hava aracındaki birincil güç kaynağı olarak kullanılır. Batarya ise kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine çevirir ve hava aracındaki yedek güç kaynağı olarak görev alır [15].

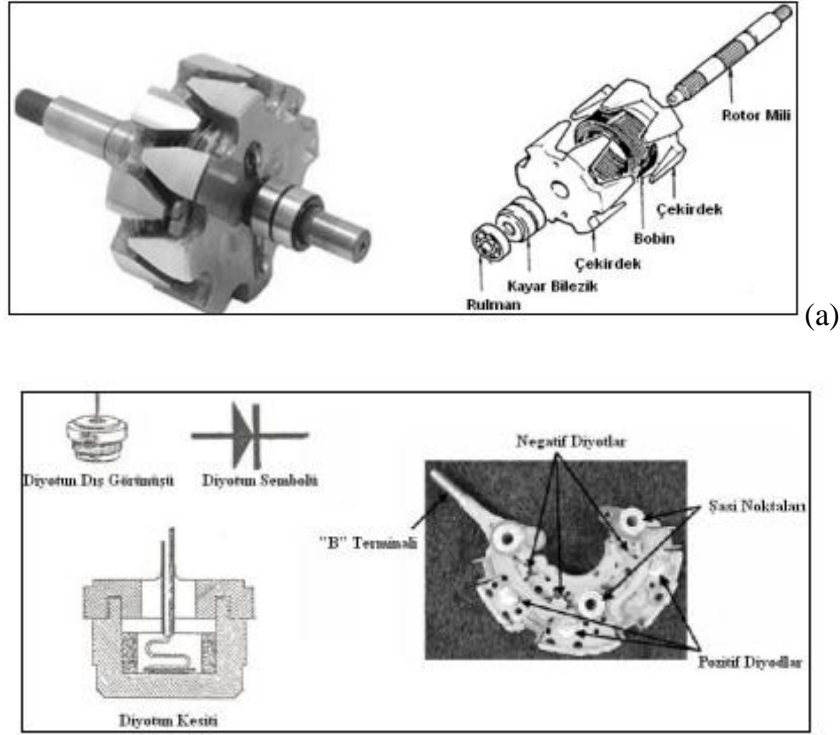
Havacılıkta çoğu sistem 115V AC 400Hz veya 28V DC kullanmaktadır. EGÜS' ün temel fonksiyonu sistemlerin ihtiyacına göre elektriksel gücü üretmek, regüle etmek ve dağıtmaktır. Hemen hemen tüm havacılık motorlarında generatörler ana enerji kaynağı olarak kullanılır. Bataryalar yalnızca uçak motorunun hareket etmediği yer operasyonlarında, motorun ilk çalıştırma anında marş motorunu enerjilendirmek için veya generatörlerin arıza yaptığı durumlarda elektriksel gücü sağlamak için kullanılır.

Havacılık motorlarında kullanılan generatörleri sürmek için iki farklı yöntem vardır. Pistonlu motorlarda kullanılan generatörler bir kayış sistemi aracılığı ile hareket enerjisini alır. Turbofan, turboşaft, turbojet gibi diğer motor tiplerinde ise generatör uçak motorunun şaftıyla direkt bağlıdır veya uçak motoru ile generatör arasına yerleştirilen ve uçak motorunun devrini belirli bir oranda dönüştüren dişli kutusu aracılığıyla hareket enerjisini alır.

3.1 Hava Araçlarında Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatör Kullanımı

Hava araçlarında tıpkı otomotiv sektöründe olduğu gibi geçmişten günümüze kadar genellikle fırçalı senkron makineler elektriksel güç üretimi için kullanılmaktaydı. Ancak son yıllarda mıknatıs alanında ve güç elektroniği alanında yaşanan ilerlemeler ve fırçalı yapının getirdiği dezavantajlar sebebiyle sektörler fırçalı senkron makine yerine mıknatıslı senkron makinelere yönelmektedir.

Hava araçlarında EGÜS'ün bir parçası olarak genellikle Pençe Kutuplu Senkron Generatörler kullanılmaktaydı. Pençe kutuplu senkron generatörler yapısında sargılı bir rotor, sargılı bir stator, diyot paketi, bilezik ve karbon fırçalar bulundurmaktadır. Özellikle sağlam yapıda olmaları, ucuz olmaları, diğer fırçalı senkron generatörlere oranla daha yüksek güç yoğunluğuna sahip olmaları, düşük ağırlıklarda imal edilebilmeleri ve harici bir gerilim regülasyon birimine ihtiyaç duymamaları sebebiyle pençe kutuplu senkron generatörler yıllar boyu otomotiv ve havacılıkta elektriksel güç üretim makinesi olarak kullanılmıştır. Ancak fırçalı yapıdan kaynaklanan belli başlı problemler ve dezavantajlardan dolayı bu makinelerin gelecekte kullanılmayacağı öngörülmektedir.



Şekil 3.1 Pençe kutuplu senkron makinenin a) Rotorunun yapısı b) Diyot paketi [16]

Pençe kutuplu generatörlerde manyetik alan uyarma akımının fırça ve bilezik aracılığıyla rotor bobinin üzerinden geçmesiyle birlikte pençe kutupların birinin S diğerinin N kutbu olmasıyla oluşmaktadır. Oluşan bu rotor döner alanı stator fazlarında gerilim endüklenmesini sağlamaktadır. Stator sargılarında endüklenen gerilim Şekil 3.1'de gösterilen diyot paketi aracılığıyla doğrultularak elektriksel güç çıkışı sağlanır [16]. Pençe kutuplu bir senkron makine ile sürekli mıknatıslı bir senkron makinenin avantaj ve dezavantajlarının karşılaştırılması Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1 Sürekli mıknatıslı senkron makine ile fırçalı senkron makinenin avantaj ve dezavantajlarının karşılaştırılması

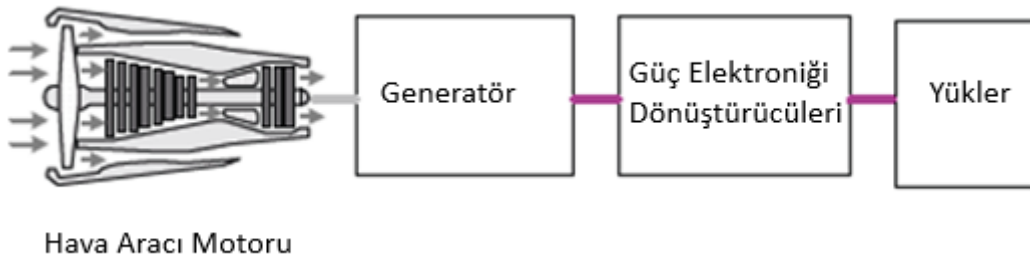
	SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON MAKİNE	FIRÇALI SENKRON MAKİNE
AVANTAJLARI	Yapısında herhangi bir fırça ve bilezik bulundurmadığı için ömrü uzundur.	Yapısındaki fırça ve bileziklerden dolayı ömrü ve bakım aralığı kısadır.
	Rotorunda herhangi bir sargı bulundurmadığı için rotor kayıpları çok düşüktür verim yüksektir.	Rotorunda bulunan sargılardan dolayı rotor kayıpları yüksek dolayısıyla verim düşüktür.
	Çevresel etkilerden kolay etkilenmez, kararlı ve geniş bir çalışma aralığı vardır.	Çevresel etkilerden kolay etkilenir, kararlı çalışma aralığı düşüktür.
	Hassas kontrol uygulamaları için uygundur.	Pozisyon kontrolü yapmak mümkün değildir.
	Yüksek hızlarda kararlı bir şekilde çalışabilir.	Yüksek hızlarda çalışma kararlılığı bozulmaktadır.
	Güç yoğunluğu yüksektir.	Güç yoğunluğu düşüktür.
	Herhangi bir uyarma akımı gerektirmez.	Rotor üzerinden bir uyarma akımı ile uyarılır ve çıkış gerilimi ayarlanır.
	Yapısında fırça olmadığı için çok daha emniyetlidir.	Fırçalı yapıdan dolayı kıvılcım oluşturma ihtimali vardır, emniyetli değildir.

Tablo 3.2 Sürekli mıknatıslı senkron makine ile fırçalı senkron makinenin avantaj ve dezavantajlarının karşılaştırılması (devamı)

DEZAVANTAJLARI	Sabit gerilim uygulamaları için harici bir dönüştürücü ihtiyacı vardır.	Çıkışında herhangi bir dönüştürücü ihtiyacı yoktur.
	Mıknatıs maliyetinden dolayı maliyetleri yükselmektedir.	Maliyet düşüktür.
	Kontrolörü karmaşıktır.	Kontrolörü basit yapıdadır.
	Kullanılan mıknatıslar nadir toprak elementi olduğu için gelecek yıllarda arzı problem çıkarabilir.	Yapısında herhangi bir nadir toprak elementi bulundurmadığı için arzı sıkıntı değildir.

Tablo 3.1’de verilen avantajlarından dolayı SMSG’lerin kullanımı yaygınlaşmaktadır. SMSG’lerin elektriksel güç üretimi pence kutuplu senkron generatörlerden farklıdır.

Hava araçlarında kullanılan SMSG’ler uçak motorundan aldığı hareket enerjisi aracılığıyla elektriksel güç üretir. Makinenin rotorunda bulunan mıknatıslar hareket enerjisiyle birlikte bir rotor döner alanı meydana getirir. Meydana gelen rotor döner alanine etkisiyle stator sargılarında gerilim indüklenir. Stator sargılarında indüklenen gerilim pence kutuplu makineden farklı olarak değişken hızlarda değişken frekanslı ve değişken gerilimlidir. Herhangi bir uyarma akımı olmadığı için çıkış gerilimi regülasyonu için harici bir dönüştürücü kullanılması gerekmektedir. Şekil 3.2’de hava aracı motoruyla sürülen bir SMSG’nin güç akışı verilmiştir.



Şekil 3.2 Hava aracı motoru aracılığıyla sürülen bir smsg’ün güç akışı [17]

Şekil 3.2’de de görüldüğü üzere SMSG’den elde edilen gerilimin regüle edilmesi gerekmektedir. Bu regülasyon işlemi iki aşamadan oluşur. Makinenin üzerinde bulunan diyot köprüsü aracılığıyla alternatif gerilim doğru gerilime çevrilir. Daha sonra hıza bağlı olarak değişkenlik gösteren bu doğrultulmuş gerilim bir DC-DC dönüştürücü aracılığıyla sabit gerilimli bir çıkış elde edilir. Burada DC-DC dönüştürücü seçimi önemli rol oynamaktadır. DC-DC dönüştürücü ve makineden gelecek olan doğrultulmuş gerilim aralığı birlikte seçilmelidir. Makine rölanti ve maksimum devir aralığında DC-DC dönüştürücünün giriş gerilim aralığına uygun çalışmalıdır, aksi takdirde gerilim regüle edilemeyecek ve elektriksel güç çıkışı sistemin talep ettiği şekilde elde edilemeyecektir.

3.2 Hava Araçlarında Kullanılan Sürekli Mıknatıslı Senkron Makineler’de Hata Modları

Hava araçlarında kullanılan elektriksel komponentlerde güvenlik ön plandadır. Güvenlik kritik olarak geçen bu komponentlerin tasarımında ve uygulamalarında dikkat edilmesi gereken hususlar makinenin hizmet ettiği hava aracının kullanılacağı Alana göre değişmektedir. Sivil havacılık ve askeri uygulamalarda kullanılacak olan komponentlerin güvenilirliği standartlar ile belirlenmiştir. Kullanılacak olan elektrik makinelerinin de sertifikalandırılması bu standartlara göre yapılmaktadır.

Hava araçlarında kullanılan SMSG’lerin tasarım aşamasında hata toleransı önemli bir noktadır ve olası arızalar değerlendirilmeden tasarıma başlanamaz. Olası arızalar kritik arızalar ve kritik olmayan arızalar olarak ikiye ayrılmaktadır. Kritik arızalarda özel önlemler alınmadan ilerlenememektedir, kritik olmayan arızalarda ise özel önlemler alınmadan ilerlenebilir. Sürekli mıknatıslı makinelerde birincil arızalar aşağıda Tablo 3.2’de gösterilmiştir [18].

Tablo 3.3 Hava araçlarında kullanılan smsm'lerde birincil arızalar [18]

Arıza Tipi	Arızanın Nedenleri	Operasyona Etkisi	Arıza Giderme Yöntemi
Bir fazın veya bir kanalın arıza yapması	Lokal aşırı ısınmalar, yıpranmaya bağlı izolasyon problemleri	Zarar görüp kopan fazlardan enerji alınamaması	Çok fazlı veya çift faz çıkışlı sistem
SMSM'nin fazlarında kısa devre	Lokal aşırı ısınmalar, yıpranmaya bağlı izolasyon problemleri, rotora bağlı mekanik etkiler	Zarar görüp kopan fazlardan enerji alınamaması	Çok fazlı veya çift faz çıkışlı sistem, düşük kısa devre akımı
Sürekli mıknatıslarda lokal demanyetizasyonlar	Termal Demanyetizasyon, şok akımlar altında demanyetizasyon	Enerji karakteristiğinde düşüş, indüklenen gerilim ve akım formlarında bozulmalar, rotor pozisyonu sinyallerinde bozulma	Sürekli mıknatısların izlenebilirliğini sağlamak, bakım esnasında rotor değişimi
Rulman Arızaları	Düşük ve yüksek frekans rulman akımları, mekanik problemler, rotorda kayıklık	Gürültü ve titreşim, rotor sıkışması	Rulamnların sağlamlığının kontrolü ve izlenebilmesi, bakım esnasında rulman değişimi, manyetik rulman kullanılması

Tablo 3.4 Hava araçlarında kullanılan SMSM’lerde birincil arızalar [18] (devamı)

Rotor Pozisyonunun belirlendiği kanalda oluşan arızalar	Rotor pozisyonunu belirleyen sensörün arızalanması	Doğru hız okunamadığı için regülasyonun yapılamaması	Sensörün kanallarını çiftlemek veya sensörlü ve sensörsüz sistemi bir arada kullanmak
Soğutma sistemi arızaları	Pompa arızaları, soğutma kanallarında tıkanma	Mıknatıs ve izolasyon sisteminin aşırı ısınması, kısa devre arızaları, makinenin arıza yapması	Basınç ve akışın kontrol edilmesi, sıcaklık kontrolü

Tablo 3.2’ de birincil olarak elektriksel ve mekaniksel olarak oluşabilecek arıza tipleri, arızanın nedenleri, operasyona etkisi ve arıza giderme yöntemleri sıralanmıştır. SMSM’in elektriksel tasarımı ve analizleri yapılırken tabloda belirtilen kısa devre durumları gözetilmelidir. Uygulamanın kritikliğine bağlı olarak 2*3 faz çıkışlı bir tasarım veya düşük kısa devre akımına sahip, sürekli kısa devre çalışma durumunda operasyona zarar vermeyecek bir tasarım yapılması gerekmektedir.

Elektrik makinelerinde kısa devre akımının azaltılmasına yönelik başlıca yöntem makinenin endüktif reaktansının artırılmasıdır. Aşağıdaki formülden de görüldüğü üzere kısa devre akımı seviyesi endüktif reaktans ile ters orantılıdır.

$$I_{sc} = \frac{U_N}{X_d} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (3.1)$$

Çıkış gerilimini sabit tutarak endüktif reaktansı arttırdığımızda kısa devre akımı azalmaktadır. Endüktif reaktansı arttırmanın en kolay yöntemi makinenin sarım sayısını arttırmaktır. Bir bobinde indüklenen gerilim şu formül ile ifade edilir.

$$L = \frac{N^2 * \mu r * A}{l} \quad (3.2)$$

L=Bobin indüktansı (Henry)

N=Sarım sayısı

μr =Sarım yapılan malzemenin bağıl geçirgenliği

A=Bobinin alanı

l =Bobinin ortalama uzunluğu

Yukarıdaki 2 formülden hareketle, kısa devre akımını azaltma yöntemleri ile ilgili şu çıkarımlar yapılabilir.

-Kısa devre akımı makinenin endüktif reaktansıyla, endüktif reaktans da makinenin sarım sayısı ile doğrudan ilişkili olduğu için, kısa devre akımını azaltılmasında makinenin sarım sayısının arttırılması yöntemi uygulanabilir.

-Bobinin ortalama uzunluğu arttıkça indüktans azaldığından dolayı makine tasarımı yapılırken minimum paket boyunda istenilen tasarım hedeflerine ulaşması amaçlanmalıdır.

4

YÜKSEK HIZLI VE YÜKSEK GÜÇ YOĞUNLUKLU SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON GENERATÖR TASARIMI

Tüm uygulamalarda elektrik makinesi tasarımına başlamadan önce ilk olarak tasarım isterleri belirlenmelidir. Bu uygulama özelinde tasarlanacak olan elektrik makinesi yüksek hızlarda çalışacak olan bir hava aracı motoruna doğrudan bağlı olacağı ve boyut kriteri olduğu için, yüksek hızlı ve yüksek güç yoğunluğu olması bir tasarım kriteridir. Makinenin tasarımına girdi yapacak olan başlangıç tasarım kriterleri tablosu aşağıda verilmiştir.

Tablo 4.1 Tasarım kriterleri

TASARIM KRİTERLERİ	
Çıkış Gücü	2kW
Rölanti Devri	38000dev/dk
Maksimum Devir	50000dev/dk
Maksimum Dış Çap	88mm
Maksimum Paket Boyu (Sargı sonları dahil)	30mm
Minimum DC Çıkış Gerilimi (DC-DC Dönüştürücü için)	155V
Maksimum DC Çıkış Gerilimi (DC-DC Dönüştürücü için)	425V
Maksimum Ağırlık	0.5kg

Tasarım kriterlerinde verilen güç ve ağırlık değerlerine bakıldığında hedeflenen güç yoğunluğunun 4kW/kg olduğu görülmektedir. Makinenin tasarımı yapılırken yalnızca verilen tasarım kriterlerine değil havacılıkta kullanılacak olan elektrik makinelerinde dikkat edilmesi gereken hususlara da dikkat edilmelidir. Gerek güvenlik ve emniyet, gerekse talep edilen yüksek hızlarda daha stabil çalışma ve yüksek güç yoğunluğuna sahip

olması gibi özelliklerinden dolayı, bu uygulama için fırçasız bir makine olan Sürekli Miknatıslı Senkron Generatör tasarımında karar kılınmıştır.

4.1 Sürekli Miknatıslı Senkron Generatör'ün Tasarımı

4.1.1 Stator

Elektrik makinelerinin temel boyutlarının belirlenmesinde öncelikle motor güç eşitliğinden faydalanılır.

$$P_e = \frac{\pi^2}{\sqrt{2} \cdot 60} \cdot k_w \cdot A_\zeta \cdot B_g \cdot L \cdot n_s \cdot D^2 \quad (4.1)$$

Yukarıdaki eşitlikte verilen “ $\frac{\pi^2}{\sqrt{2} \cdot 60} \cdot k_w \cdot A_\zeta \cdot B_g$ ” kısmına denklemi sadeleştirmek adına “C” dersek motor güç eşitliği aşağıdaki şeklini alır [19].

$$P_e = C \cdot L \cdot n_s \cdot D^2 \quad (4.2)$$

Faydalanma katsayısı olarak adlandırılan C değerini belirlemek için A_ζ ve B_g değerleri tasarım kitaplarından alınabilir.

‘ A_ζ ’ değeri 10000-30000 A/m arasında seçilebilir, ‘ B_g ’ değeri ise kullanılan manyetik malzemeye bağlıdır, 0.5-0.8 T arasında olur. Tasarım yaparken ‘ B_g ’ değerinin sıcaklık ile değiştiği göz önünde bulundurulmuştur. Bu değerlerin yüksek seçilmesi makinenin boyutlarını küçültür ve aşırı yük kapasitesini artırır. Ancak diğer bir yandan makinenin sıcaklığını arttırarak daha düşük verimli olmasına sebep olur. Bu uygulama özelinde boyutlar bir tasarım girdisiyken verim bir tasarım girdisi olmadığı için bu değerler olabildiğince yüksek seçilecektir.

Faydalanma katsayısının belirlenmesi için gereken diğer çarpan olan “ k_w ” sargı faktörünü ifade eder. Sargı faktörü oluk kutup oranına ve sargı yapısına bağlıdır. Makinenin oluk kutup oranı seçimi yapılırken sargı faktörünün yüksek olması göz önünde bulundurulacaktır.

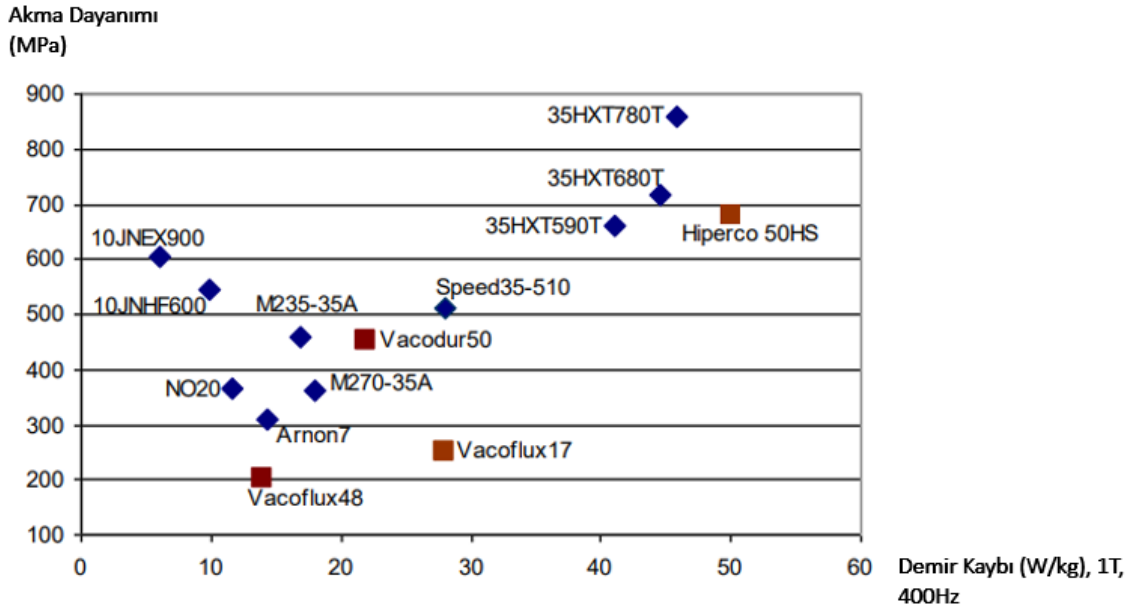
Güç eşitliğinde makinenin en zorlu koşullardaki çalışma durumu göz önüne alınarak ilgili parametreler yerine yazılarak “ $D^2 \cdot L$ ” elde edilir.

Yapılan hesaplar sonucunda makinenin rotor dış çapı 48mm, paket boyu 20mm olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu değerler tasarım kriterlerinin içindedir, ancak yapılacak olan elektromanyetik analizler sonucunda boyutlandırmada küçük değişiklikler olabilir.

4.1.1.1 Stator Malzemesinin Belirlenmesi

Tasarlanacak olan makinenin tasarım isterlerinde herhangi bir verim kriteri bulunmamasına karşın demir kayıplarının makinenin sıcaklığını arttıracak göz önünde bulundurularak olabildiğince verimli bir makine yapılması hedeflenmektedir. Bu bağlamda kilogram başına demir kaybı düşük, ince lamine saclardan oluşan bir yumuşak manyetik malzeme seçimi yapılmalıdır.

Hava araçlarında kullanılacak olan elektrik makinelerinde boyut ve ağırlık kriterlerinden dolayı “Permendur” adı verilen demir-kobalt alaşımli elektrik sacları kullanılabilir [20]. Tipik olarak 2,3 T akı seviyelerine kadar doyuma gitmeyen bu sac tiplerinin üretimi ve tedarigi piyasada kullanılan silisyum-demir bazli elektrik saclarına kıyasla daha zor olduğundan mecbur kalınmadıkça tercih edilmemektedir.



Şekil 4.1 Farklı yüksek performanslı elektrik saclarının akma dayanımı ve demir kaybının karşılaştırılması [21]

Şekil 4.1’de yüksek frekanslarda yüksek performans veren elektrik saclarının akma dayanımı ve demir kaybı karşılaştırılması olarak verilmiştir. Bu şekilde mavi işaretle gösterilen elektrik sacları silisyum-demir alaşımli, kırmızı ile gösterilenler ise demir-kobalt alaşımli elektrik saclarını temsil etmektedir. Şekilden hareketle malzeme

alaşımından bağımsız olarak farklı alaşım türlerinde yüksek frekanslarda farklı kayıplar olduğu yorumu yapılabilir. M235-35A, Arnon7, NO20, 10JNHF600, 10JNEX900 gibi malzemeler girdap akımı kayıplarını düşürerek makinenin toplam demir kaybının azalmasını ve daha yüksek verimde çalışmasını sağlar.

Bu çalışmada kilogram başına demir kaybı düşük ve piyasada kolaylıkla bulunabilecek bir elektrik sacı kullanımına karar verilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda M235-35A sacının kullanımı uygun bulunmuştur. M235-35A sacının isimlendirilmesindeki “M235” kısmı 50Hz ve 1.5T altında kilogram başına demir kaybını, “35A” kısmı ise tek bir sacın 0.35mm olduğunu tanımlar. Sacın inceliği girdap akımı kayıplarını doğrudan etkilemektedir. Kullanılan elektrik sacı incelidikçe girdap akımı kayıpları azalmaktadır. Kullanılacak olan sacın elektriksel özellikleri Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2 M235-35A elektrik sacının temel özellikleri [22]

Karakteristiği	Birimi	Nom.
Spesifik Demir Kaybı (1.5T,50Hz)	W/kg	2.35
Manyetik Polarizasyon (100000 A/m)	T	1.74
Bağıl Geçirgenlik (1.5T)	μ_r	600
Yoğunluk (ρ)	g/cm^3	7.6

4.1.1.2 Oluk-Kutup Sayısının Belirlenmesi

Sürekli mıknatıslı makinelerde kutup sayısını rotorda bulunan mıknatıslar belirler. Bununla birlikte stator üzerinde bulunan oluk sayısı ve kutup sayısı arasında bir bağlantı olmalıdır. Oluk sayısı makinenin sargı faktörüne direkt etki ettiği, oluk sayısı da makinenin karakteristiğini belirlediği için bu iki parametrenin seçimi oldukça önemlidir. Kutup sayısının seçilmesinde birçok faktör bulunmaktadır, bunlardan bazıları:

- Elektrik makinesinin frekansı
- Mıknatıs malzemesi ve türü
- Rotorun yapısı

- Mıknatısların yerleştirilmesi
- Atalet gereksinimleri

Kutup sayısının artması frekansı artırır bu da demir kayıpları ve anahtarlama kayıplarının artmasına neden olur, Kutup sayısı arttıkça moment dalgalılığı azalır, Kutup sayısının artması ihtiyaç duyulan rotor boyunduruğunu inceltir, kutup sayısının artmasıyla, ters orantılı olarak ihtiyaç duyulan amper-sarım azalır, güç yoğunluğu artar ve makinenin çapı düşer.

Literatürde oluk-kutup oranının makinenin performansına ve kısa devre akımlarına etkisi üzerine birçok çalışma mevcuttur. Bu bağlamda Bo Wang ve diğerleri yaptıkları “Optimization and Analysis of a High Power Density and Fault Tolerant Starter–Generator for Aircraft Application” çalışmasında 13 farklı oluk kutup oranını verim, kısa devre akımı ve güç yoğunluğu parametrelerine göre kıyaslamış, bu 13 farklı oluk kutup oranından en iyi performansı 18q/12p kombinasyonundan elde etmiştir. Mevcut çalışmada da hava aracında kullanılacak olan bu elektrik makinesinin 18 oluk ve 12 kutuplu olarak tasarlanması uygun bulunmuştur. Oluk ve kutupların seçiminde literatür çalışmalarının yanı sıra üretilebilirlik de esas alınmıştır [23].

4.1.1.3 Sargı Tipi ve Oluk Büyüklüklerinin Belirlenmesi

Elektrikli makinelerde kullanılan sargı çeşitleri başlıca iki kategoriye ayrılır. Bunlar;

- Dağıtılmış Sargı
- Konsantre Sargı

Uygulamada kullanılacak olan makinenin kriterlerine göre bu iki sargı tipinden bir tanesi seçilerek tasarıma devam edilir. Bu sargı tiplerinin karşılaştırılması şu şekildedir.

Tablo 4.3 Sargı çeşitlerinin kıyaslanması [24]

	Konsantre Sargı	Dağıtılmış Sargı
Konsantre Sargının Avantajları	<ul style="list-style-type: none">• Sargı sonları kısadır, sargı sonundaki bakır hacmi düşüktür.	<ul style="list-style-type: none">• Sargı sonları uzundur, sargı sonlarındaki bakır hacmi daha yüksektir.
	<ul style="list-style-type: none">• Sargı sonu ısı kayıpları daha azdır	<ul style="list-style-type: none">• Sargı sonu ısı kayıpları daha çoktur.
	<ul style="list-style-type: none">• Maliyeti daha düşüktür.	<ul style="list-style-type: none">• Maliyet daha yüksektir.
	<ul style="list-style-type: none">• %50-60 doluluk oranına kadar izin verir.	<ul style="list-style-type: none">• %40-45 doluluk oranına izin verir.
	<ul style="list-style-type: none">• Daha yüksek endüktansa sahiptir.	<ul style="list-style-type: none">• Daha düşük endüktansa sahiptir.
Dağıtılmış Sargının Avantajları	<ul style="list-style-type: none">• MMK formu sinüs formundan uzaktır.	<ul style="list-style-type: none">• MMK formu sinüs formuna daha yakındır.
	<ul style="list-style-type: none">• Moment dalgalanmaları daha fazla olur.	<ul style="list-style-type: none">• Moment dalgalanmaları daha yüksek olur.
	<ul style="list-style-type: none">• Motor çalışmada daha yüksek titreşim ve gürültüye sebep olur.	<ul style="list-style-type: none">• Daha düşük titreşim ve gürültü vardır.

Bu maddeler ışığında makinedeki boyut kısıtını ve kısa devre akımının daha düşük olabilmesi için endüktansın daha yüksek olması gerekliliğinden dolayı konsantre sargı tipi seçilmiştir.

Makinenin oluk büyüklükleri belirlenirken 2 önemli faktör göz önünde bulundurulmuştur. Bunlar analizler sonucunda ortaya çıkacak olan makinenin akım yoğunluğu ve stator oluk dişleri ve boyunduruğu bölgesinde oluşacak olan akı yoğunluklarıdır. Akı yoğunlukları seçilecek olan elektrik sacının doyum noktasını aşmaması gerekmektedir. Akım yoğunluğu ise aşağıda verilen tabloya uygun olmalıdır.

Tablo 4.4 Çalışma koşullarına göre akım yoğunluğu tablosu [19]

Çalışma Koşulu	Akım Yoğunluğu (A/mm²)
Tam Kapalı	1,5-5
Hava Soğutmalı	5-10
Sıvı Soğutmalı	10-30

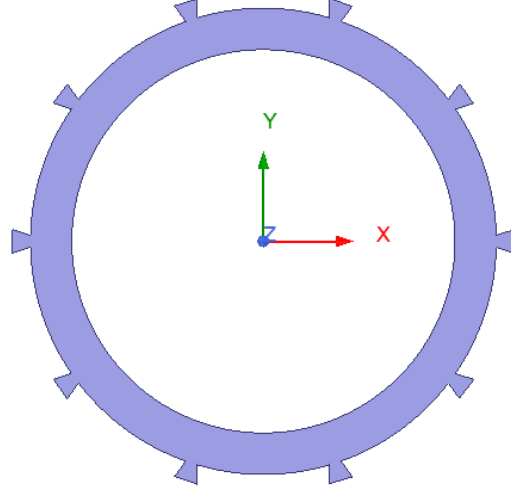
Tasarım hava soğutmalı bir elektrik makinesi olacağından dolayı analizler sonrası akım yoğunluğu değerinin 10 A/mm² değerini geçip geçmediği incelenmelidir.

4.1.2 Rotor

Yüksek hızlı elektrik makinelerinin rotor tasarımlarında dikkat edilmesi gereken en önemli husus mıknatısların tasarımı ve yerleşimidir. Mıknatısın rotor üzerindeki yerleşimi makinenin topolojisini belirler. Gömülü mıknatıslı yapılar yüzey mıknatıslı yapıya oranla daha güvenli olsa da, üretiminin zorluğu ve oluşturduğu yüksek harmoniklerden dolayı bu çalışmada yüzey mıknatıslı yapı kullanılmaktadır.

Yüzey mıknatıslı rotor topolijisi yüksek hızlı bir makinede kullanılıyorsa başlıca önlem alınması gereken konu mıknatısların mekanik olarak dayanımı olmalıdır. Rotor yüzeyine yerleştirilen mıknatısların yüksek hızlarda atalet ile fırlamaması için özel önlemler alınmalıdır. Bu önlemlerin başında “kılıf” gelmektedir. Rotor kılıfı, rotor dışını çepeçevre sararak mıknatısların fırlamasını önlemek amacıyla rotora montajlanmaktadır. Manyetiklenmeyen malzeme olması önemli olan bu kılıf genellikle karbon fiber, inkonel veya paslanmaz çelik olarak üretilerek rotora yerleştirilmektedir.

Rotorda yapılabilecek bir diğer modifikasyon ise rotora yapıştırılan mıknatısın yapışma yüzeyini artırmak amacıyla rotorda “kırlangıç kuyruğu” yapısı kullanmaktır. Kırlangıç kuyruğu yapısı sayesinde rotor üzerindeki mıknatısların yan duvarlarında rotor sacı ile temas edebilmekte ve yapışma yüzeyi arttırılmaktadır. Aşağıdaki şekilde kırlangıç kuyruğu yapısına örnek verilmiştir.



Şekil 4.2 Rotorda kırılmaç kuyruğu yapısı

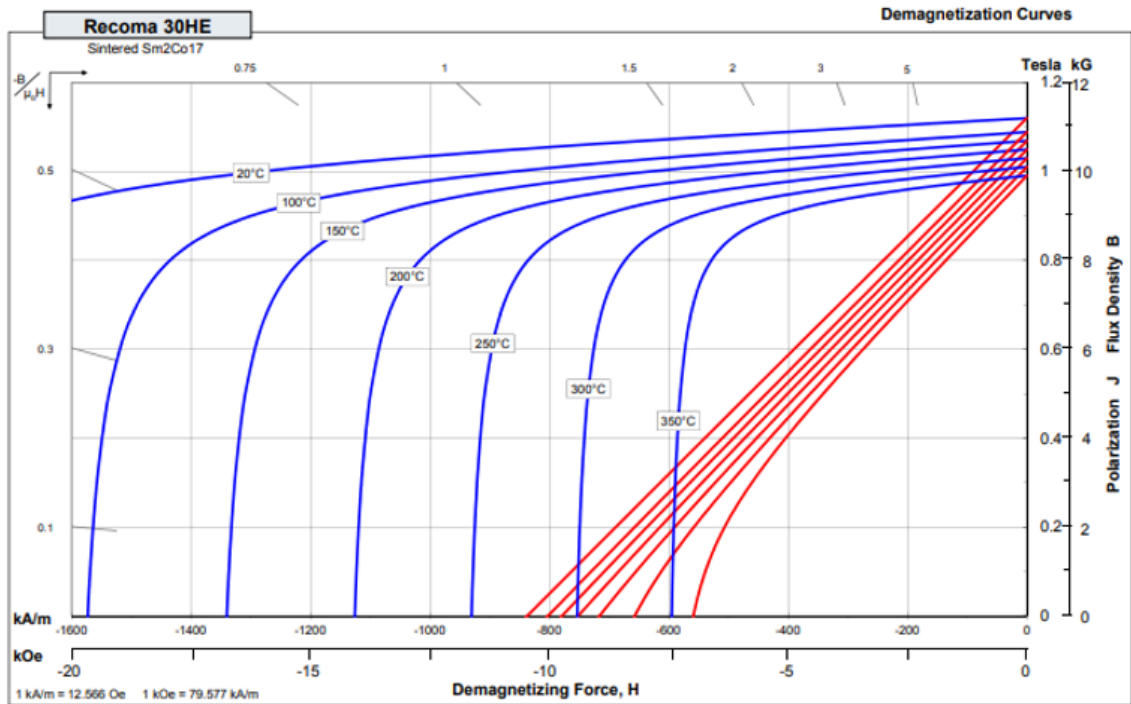
Rotor da kırılmaç kuyruğu yapısı kullanılırken dikkat edilmesi gereken en önemli husus kırılmaç kuyruğunun mıknatısların üstüne gelmemesidir. Kırılmaç kuyruğu yapısının mıknatısın üstüne gelmesi durumunda manyetik yolunu stator sacı üzerinden değil, rotordaki kırılmaç kuyruğu yapısı üzerinden tamamlar ve makineden elde edilen güçte büyük bir düşüş gerçekleşir. Ayrıca o bölgedeki rotor sacı doyuma giderek sacın özelliğini yitirmesine sebep olabilir.

4.1.2.1 Mıknatıs

Sürekli mıknatıslı elektrik makinelerinin performansını etkileyen ana etken mıknatıstır. Seçilen mıknatısın koersif kuvveti ve remenansı yüksek olmalıdır, yüksek remenans sayesinde manyetik eşdeğer devre yöntemine göre hava aralığı akı yoğunluğu ve akı artar. Yüksek koersif kuvvet ise mıknatısın daha ince yapıda olmasını sağlar [24].

Hava araçlarında görev alacak olan elektrik makinelerinde kullanılan mıknatıslar yüksek sıcaklık ve basınç gibi zor koşullara dayanım göstermelidir. Uçak motorundan gelen ısıyla birlikte sistemin görebileceği sıcaklık 200 °C seviyelerine çıkabilmektedir. Mıknatıs seçimi yapılırken, mıknatısın bu yüksek sıcaklık seviyelerinde demanyetize olmamasına dikkat edilmelidir. Ayrıca farklı sıcaklıklarda remenansın fazla değişmesi durumunda makinenin ortam koşullarına göre performansı fazla değişeceğinden seçilecek olan mıknatısın tersinir sıcaklık katsayısı düşük olmalıdır. Mıknatıs veri sayfalarında verilen tersinir sıcaklık katsayısı, sıcaklığa bağlı olarak mıknatıs performansının ne kadar değiştiğini gösteren katsayıdır.

Tüm bu bilgiler ışığında makinenin tasarımında SmCo bir mıknatıs kullanılmasına karar verilmiştir. Mıknatısın seçimi yapılırken performans kriterlerinin yanı sıra piyasada kolaylıkla bulunabilir olmasına da dikkat edilmesi gerekmektedir. Bununla birlikte makinenin boyutlarının küçük olması için olabildiğince yüksek sınıflı bir SmCo mıknatıs seçilmelidir. Yapılan yaklaşımlar sonucunda “Arnold Magnetics” firmasının “Recoma 30HE” mıknatısının makine tasarımında kullanılmasına karar verilmiştir. Makine tasarımında kullanılacak olan mıknatısın özellikleri ve B-H grafiği Tablo 4.5’te ve Şekil 4.3’te verilmiştir.



Şekil 4.3 Recoma 30HE B-H eğrisi [25]

Tablo 4.5 Recoma 30HE mıknatıs özellikleri [25]

Karakteristiği	Birimi	Minimum	Nominal
Br, Mıknatıs Remenansı	Tesla	1,09	1,12
H_{CB} , Koersif Kuvvet	kA/m	795	830
BHmax, Sağlayabileceği Maksimum Enerji	kJ/m^3	215	230
Tersinir Sıcaklık Katsayısı	$\%^\circ\text{C}$	-	-0.035
Tavsiye Edilen Maksimum Çalışma Sıcaklığı		-	350°C
T_c , Curie Sıcaklığı		-	825°C

Tablo 4.5'ten anlaşılacağı üzere seçilen mıknatıs yüksek sıcaklıklarda çalışmaya uygundur. Tersinir sıcaklık katsayısının düşük olması, tavsiye edilen maksimum sıcaklık değerinin yüksek olması gibi SmCo mıknatısların tercih sebebi olmasını sağlayan özellikleri proje isterlerine uygun şekildedir. Bunların yanı sıra Curie Sıcaklığı değeri de mıknatısın en zorlu koşullarda ve hata durumlarında dahi 825°C 'ye kadar manyetik özelliklerini kaybetmeyeceğini garanti altına almaktadır. Curie sıcaklığı, ferromanyetik bir maddenin yüksek sıcaklık altında manyetiklik özelliklerini yitirip paramanyetik hale geçtiği eşik noktasını ifade eden sıcaklık değeridir.

4.1.2.2 Kılıf

Yüzey mıknatıslı makinelerde rotor yüzeyinde bulunan mıknatısların fırlamasını önlemek amacıyla kılıf yapısı kullanılmaktadır. Kılıfların manyetiklenmeyen malzemelerden üretilmesi gerekmektedir. Yüksek hızlarda mıknatısların savrulmasını önlemek amacıyla rotoru çepre çevre sararak mekanik dayanımı arttırmaya yarayan kılıflar genellikle şu 4 malzemeden üretilmektedir.

- İnkonel Kılıf
- Karbon Fiber Kılıf
- Paslanmaz Çelik Kılıf

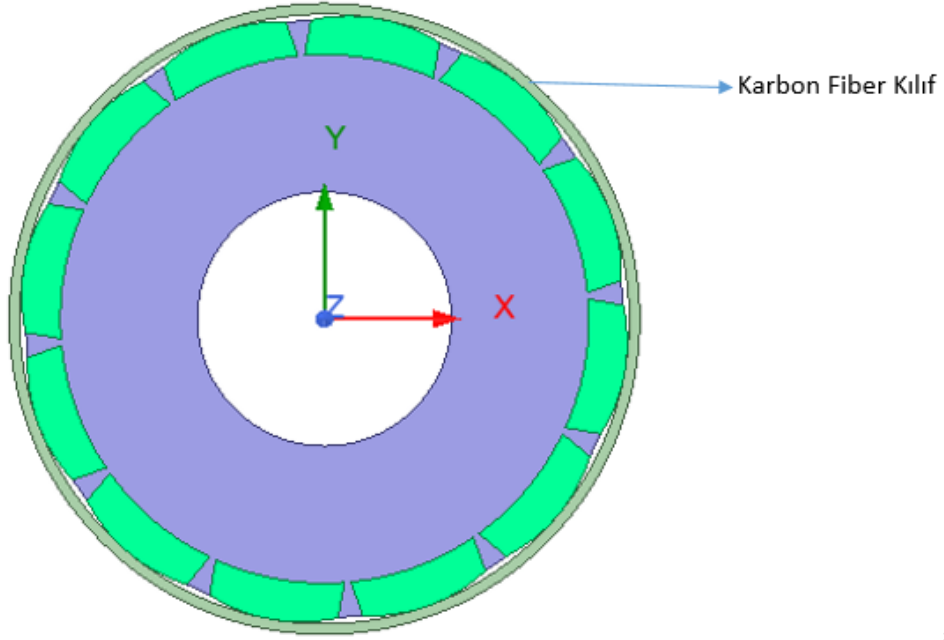
- Titanyum

Yapılan geçmiş çalışmalarda bu 4 malzemedeki rotor üzerinde en az kayıp vererek en az ısı açığa çıkaran malzemenin inkonel olduğu, ardından da sırasıyla karbon fiber ve paslanmaz çelik kılıfların geldiği ortaya çıkarılmıştır. Yüksek hızlı elektrik makinelerinde kullanılan kılıf malzemeleri ve makinelerin özellikleri Tablo 4.6’da verilmiştir.

Tablo 4.6 Literatürdeki yüzey miktatsız yüksek hızlı makinelerin özellikleri [26]

Kılıf Tipi	Makinenin Maksimum Hızı (devir/dk)	Güç (kW)	Rotor Dış Çapı (mm)	Kılıf Kalınlığı	Hava Aralığı (mm)	Stator Dış Çapı (mm)	Stator Eksenal Uzunluğu (mm)
Titanyum	200,000	2	22	-	0.8	35	21
Titanyum	200,000	2.19	16.48	2	1.36	-	30
Titanyum	500,000	1	10	0.5	-	25	30
Inconel 718	400,000	0.5	11.6	-	0.35	30	50
Inconel 718	120,000	15	34	4.5	1	120	50
Inconel	240,000	5	20	2	0.5	74	40
Paslanmaz Çelik	80,000	0.05	5.5	0.25	0.7	22	29
Karbon Fiber	60,000	0.5	29.2	1	1.4	60	30
Karbon Fiber	220,000	2	25	5	5	110	29

Bu çalışma kapsamında geçmiş çalışmalara bakılarak makinenin devir, güç, geometrik ölçü kısıtları incelenerek inkonel malzemeleri işlemenin zorluğundan dolayı karbon fiber kılıf kullanılması uygun bulunmuştur. Örnek bir karbon fiber kılıf modellemesi Şekil 4.4'te görülebilir.

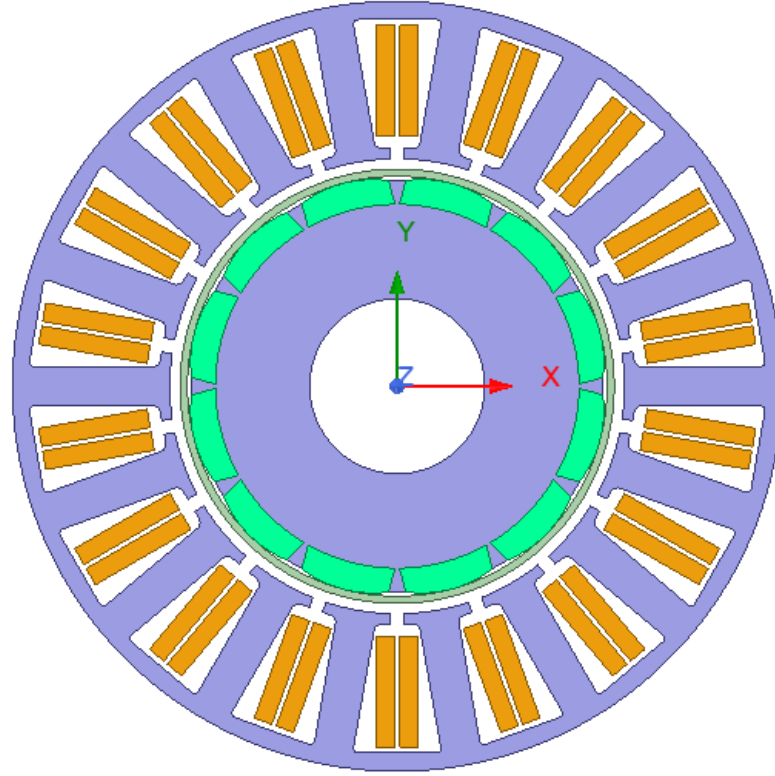


Şekil 4.4 a) Kılıf modellemesi, b)Rotor yüzeyinde karbon fiber kılıf örneği [27]

4.2 Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatör'ün Analizi

Tasarlanan makinenin analizinde sonlu elemanlar yöntemini kullanarak analiz yapan elektromanyetik analiz programları kullanılacaktır. Makinenin geometrik tasarımı ve analizleri “ANSoft” firmasının “ANSYS Maxwell 2D” ve “ANSYS Twin Builder” isimli

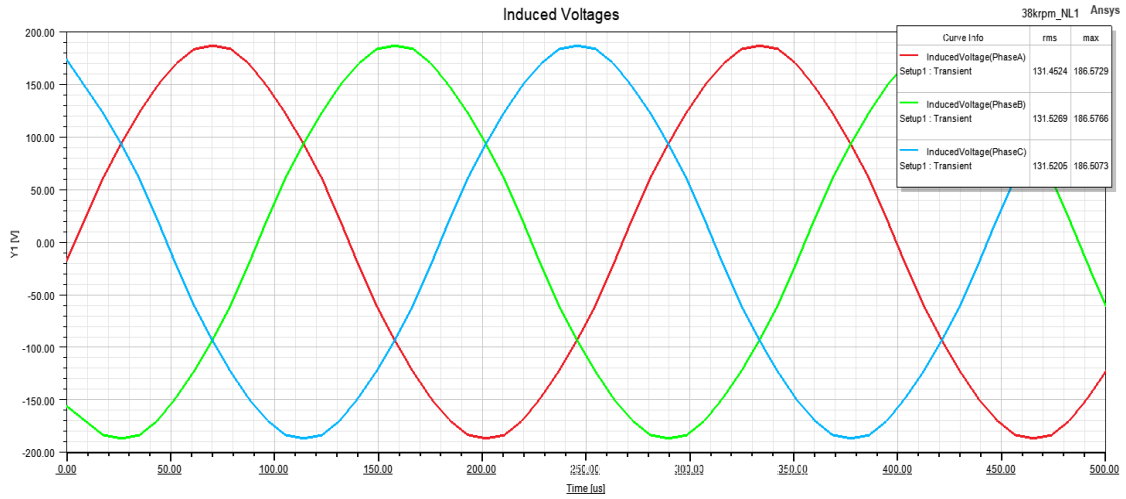
elektromanyetik analiz ve devre tasarımı programları aracılığıyla yapılacaktır. Tasarlanan makinenin elektromanyetik analizleri yapıldıktan sonra “Twin Builder” programı ile birlikte simule edilerek DC çıkış gerilimleri gözlemlenecektir. Tasarım isterlerine ulaşıldığı takdirde makinenin 3D analizleri “ANSYS Maxwell 3D” ile gerçekleştirilecektir. Analiz edilecek olan makinenin 2D modeli şekil 4.5’te gösterilmiştir.



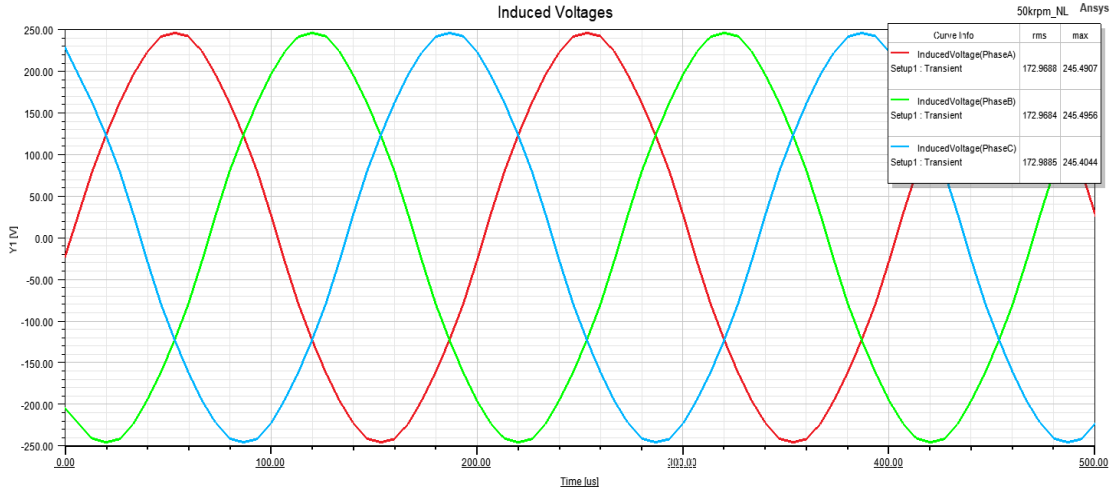
Şekil 4.5 Tasarlanan SMSG'nin 2D modeli

4.2.1 Boşta Minimum ve Maksimum Devirlerde İndüklenen Gerilimler

3 Fazlı sürekli mıknatıslı olarak tasarlanan generatörün fazlarında indüklenen gerilimler motor şaftından gelen devire göre değişmektedir. Analizler maksimum ve minimum devirlerde en zorlayıcı koşullarda yapılmıştır. Minimum devirde indüklenen gerilimlere ulaşmak için makinenin çalışma sıcaklığı sınırlarından en yüksek sıcaklık olan 200 °C’de maksimum indüklenen gerilimler ise maksimum devirde en zorlayıcı koşul olan -40 °C’de ki analizler sonucunda ulaşılmıştır.



Şekil 4.6 38000Dev/dk, 200 C°, Boşta indüklenen gerilimler



Şekil 4.7 50000Dev/dk, -40 C°, Boşta indüklenen gerilimler

Boşta yapılan analizler sonucu indüklenen gerilim değerleri Tablo 4.7’de verilmiştir.

Tablo 4.7 Boşta minimum ve maksimum devirde indüklenen gerilimler

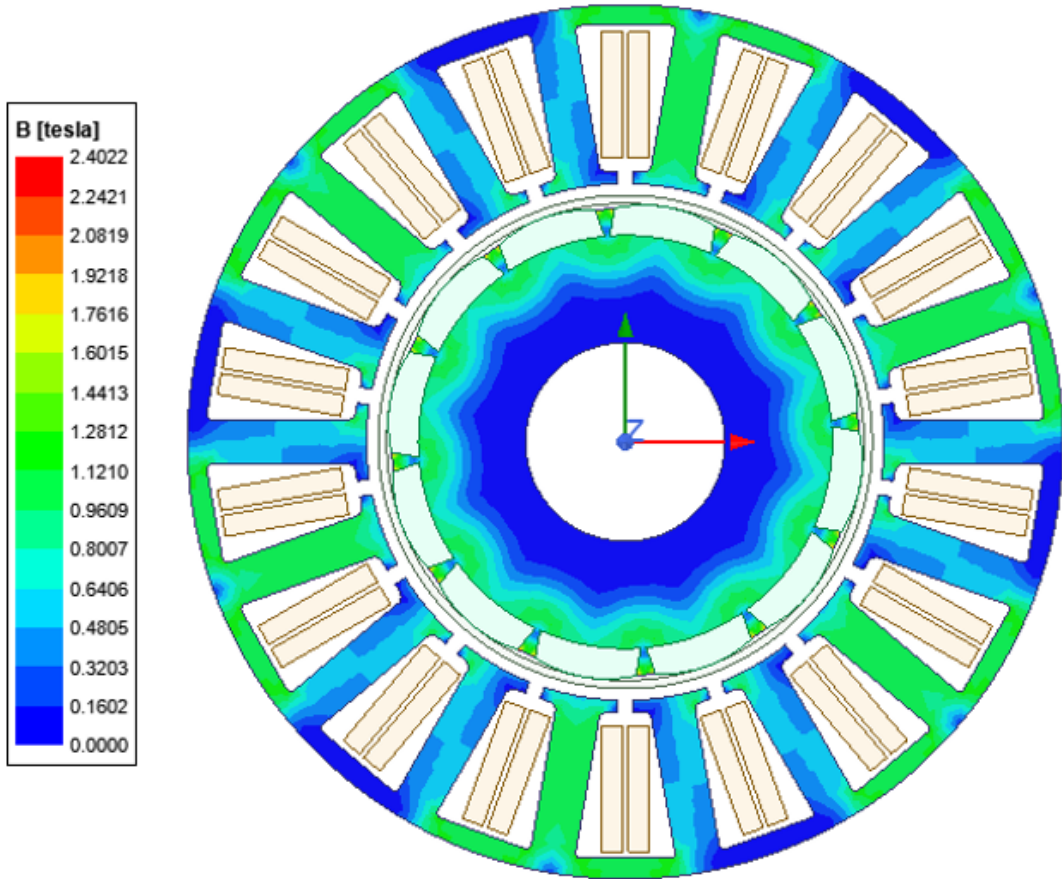
Devir	Boşta İndüklenen Gerilim (rms)
38000Dev/dk	131.5V
50000Dev/dk	172.9V

Yüksüz analizlerde maksimum devirde makinenin akı yoğunlukları en yüksek seviyede olur. Ayrıca makine tasarımından kaynaklanan yüksek harmonikler mevcutsa çıkış geriliminin saf sinus formundan uzaklaştığı görülür. Yüksüz analizler sonucunda

indüklenen gerilim seviyeleri ve dalga formları incelendiğinde, sinus formu ve gerilim seviyeleri uygundur.

4.2.2 Akı Yoğunluğu Analizi

Akı yoğunluğu analizleri yüksüz durumda, maksimum devirde ve $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de yapılmıştır. İlgili koşul makinede maksimum akı yoğunluğunun olacağı koşuldur.



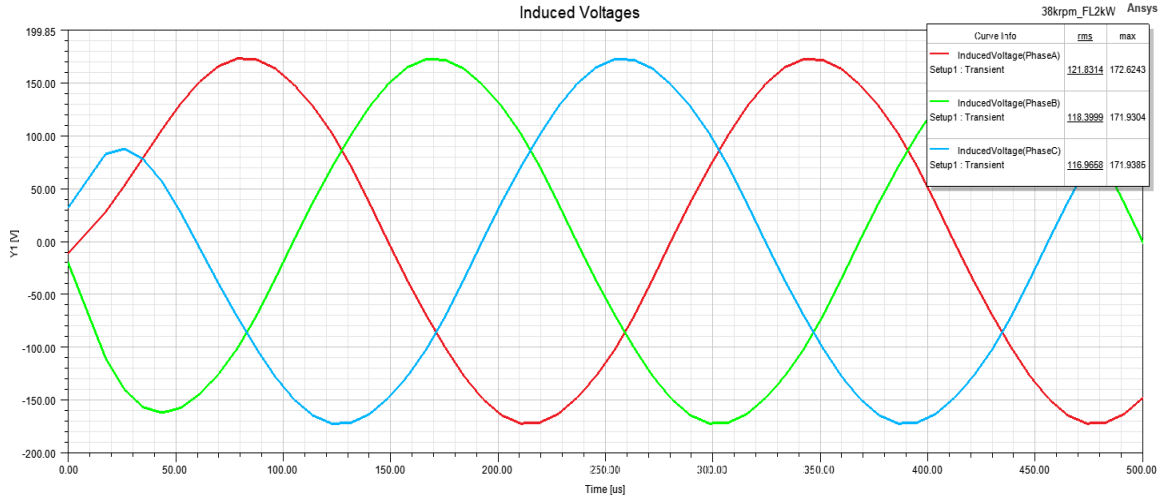
Şekil 4.8 Akı yoğunlukları

Analiz sonucunda makinenin stator diş ortasında maksimum akı yoğunluğunun 1.0 Tesla, stator boyunduruk bölgesinde ise 1.1 Tesla civarında olduğu görüldü. Dirsek bölgesi 1.7 T-1.8 T civarında olan M270-35A elektrik sacının doyumuna gitmediği analizler ile doğrulanmıştır.

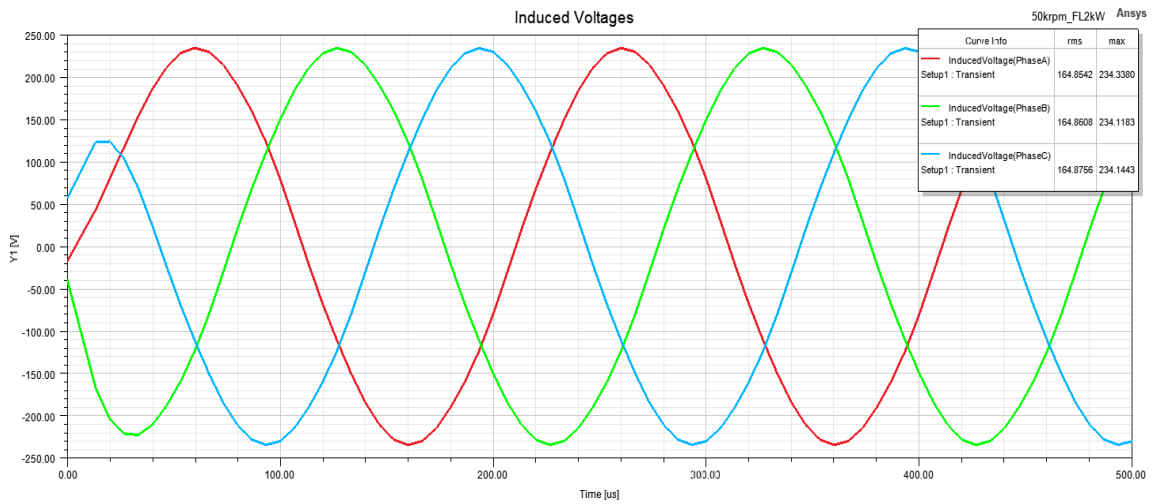
4.2.3 Yükte Maksimum ve Minimum Devirlerde İndüklenen Gerilimler

Boşta elde edilen gerilim seviyeleri ve akı yoğunlukları uygun bulunduktan sonra makinenin yük altında performansı analiz edilmiştir. Bu kapsamda analiz programında

makineye 2kW yük çekecek şekilde rezistif bir yük bağlanarak analizler yapılmış ve gerilim, akım, akım yoğunluğu seviyeleri ve dalga formları incelenmiştir.



Şekil 4.9 2kW yük, 38000Dev/dk, İndüklenen gerilimler



Şekil 4.10 2kW yük, 50000Dev/dk, İndüklenen gerilimler

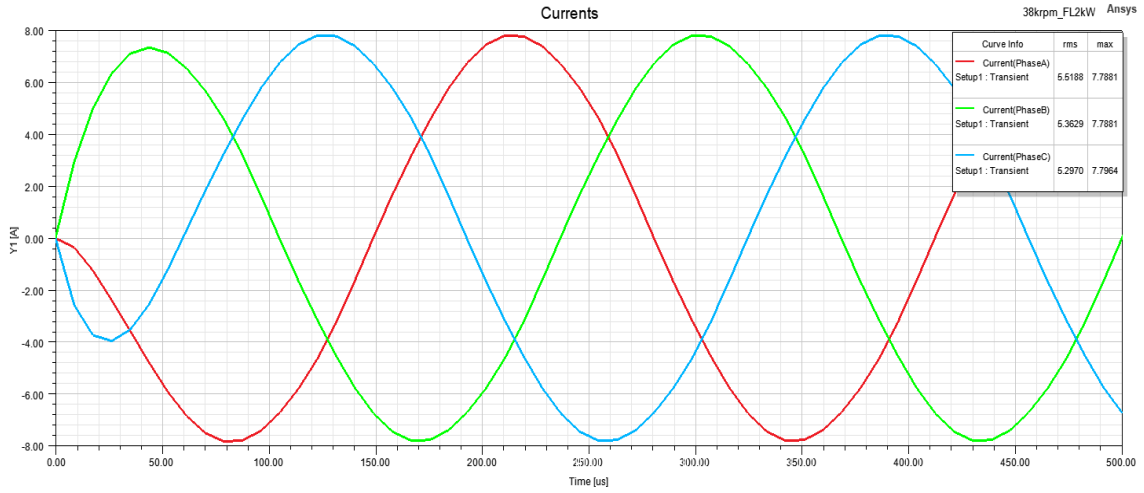
Yükte yapılan analizler sonucu indüklenen gerilim değerleri Tablo 4.8’de verilmiştir.

Tablo 4.8 Yükte minimum ve maksimum devirde indüklenen gerilimler

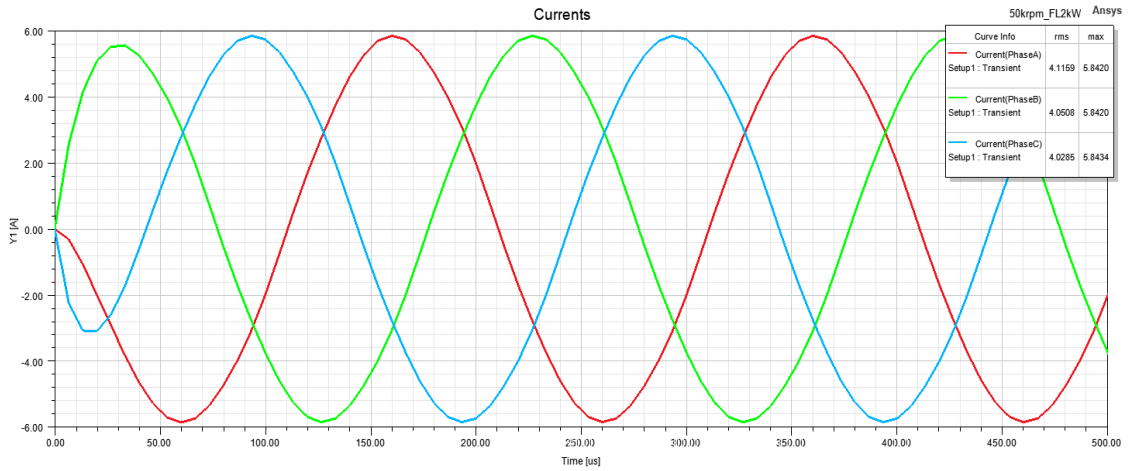
Devir	Boşta İndüklenen Gerilim (rms)
38000Dev/dk	121.6V
50000Dev/dk	134.8V

4.2.4 Yükte Maksimum ve Minimum Devirlerde Çekilen Akımlar ve Akım Yoğunlukları

Yük altında makinenin maksimum ve minimum devirlerinde çekilen akımların dalga formları ve akım yoğunlukları Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de verilmiştir.



Şekil 4.11 2kW yük, 38000Dev/dk, Faz akımları



Şekil 4.12 2kW yük, 50000Dev/dk, Faz akımları

Yükte yapılan analizler sonucu çekilen faz akımları değerleri Tablo 4.9’da verilmiştir.

Tablo 4.9 Yükte minimum ve maksimum devirde faz akımları

Devir	Faz Akımları (rms)
38000Dev/dk	5.5A
50000Dev/dk	4.1A

Makinenin faz akımlarının dalga formu incelendiğinde, harmoniklerin oluşmadığı ve saf sinus formunun tutturulduğu gözlemlenmiştir, dalga formu uygundur. Çekilen faz akımlarına göre akım yoğunluğu hesabı

$$J = \frac{I(rms)}{A_t(mm^2)} \quad (3.1)$$

Denkleme göre yapılmıştır. Buna göre en zorlu koşullarda akım yoğunlukları Tablo 4.10’da verilmiştir.

Tablo 4.10 Yükte minimum ve maksimum devirde akım yoğunlukları

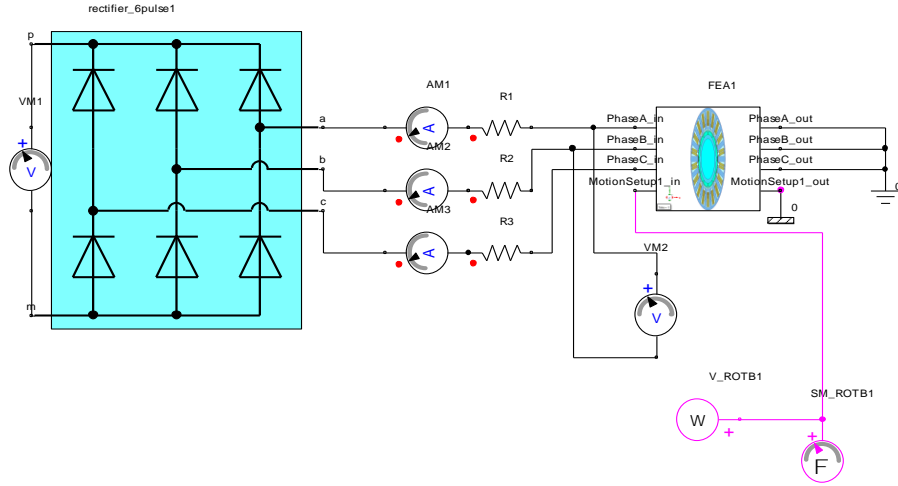
Devir	Akım Yoğunluğu
38000Dev/dk	3.5 A/mm ²
50000Dev/dk	2.6 A/mm ²

Maksimum ve minimum devirlerdeki akım yoğunlukları sınır değerlerin oldukça altındadır ve nominal yük altında çalışmada makinenin sargılarının güvenli bölgede ve kararlı bir şekilde çalışacağını göstermektedir.

4.2.5 DC Analiz Sonuçları

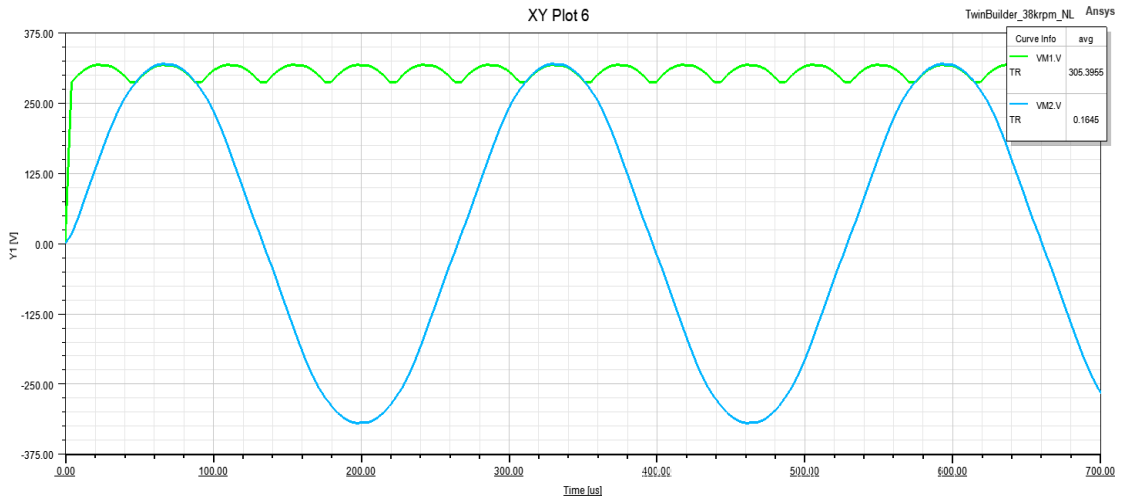
SMSG’ün çıkışında herhangi bir doğrultma birimi olmadan boşa ve yükte yapılan analizlerden elde edilen verilerin uygun bulunmasının ardından makinenin faz çıkışlarına bir diyot köprüsü koyularak doğrultma işlemi gerçekleştirilmiştir. Burada amaç DC-DC dönüştürücünün giriş gerilimi aralığı olan gerilimlere uygun çıkış gerilimi sağlanıp sağlanmadığını görmektir.

Analizlerde ANSYS Maxwell ve ANSYS Twin Builder programları birlikte çalıştırılarak DC akım ve gerilimler farklı koşullar altında elde edilmiştir. Twin Builder programı üzerinde oluşturulan makine modeli ve doğrultma birimi Şekil 4.13'te verilmiştir.

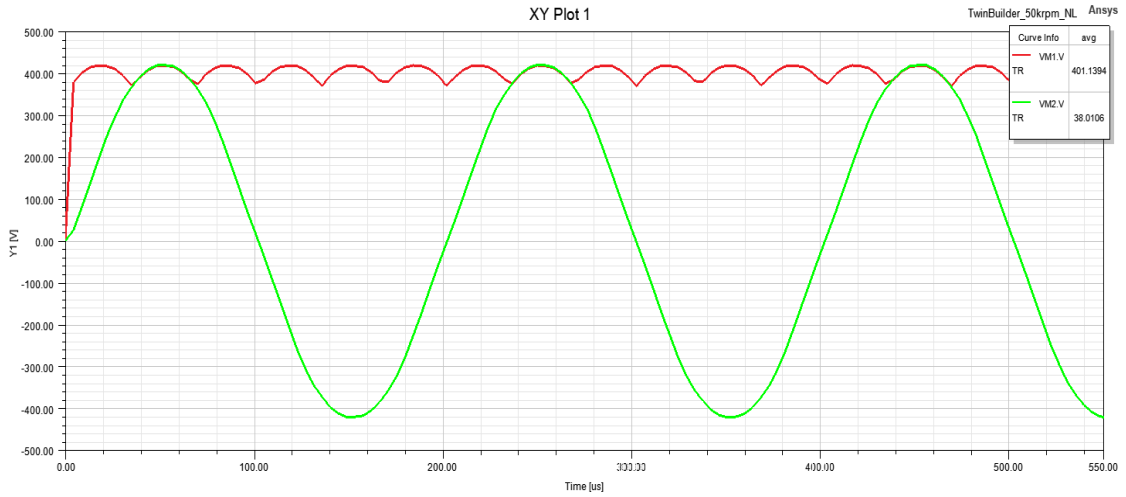


Şekil 4.13 Simülasyon devresi

Şekil 4.13'te verilen simülasyon devresi ile boşa analizler yapılmıştır. Analiz sonucunda indüklenen gerilimler Şekil 4.14'te ve Şekil 4.15'te verilmiştir.



Şekil 4.14 38000Dev/dk, Yüksüz durumda DC çıkış gerilimi



Şekil 4.15 50000Dev/dk, Yüksüz durumda DC çıkış gerilimi

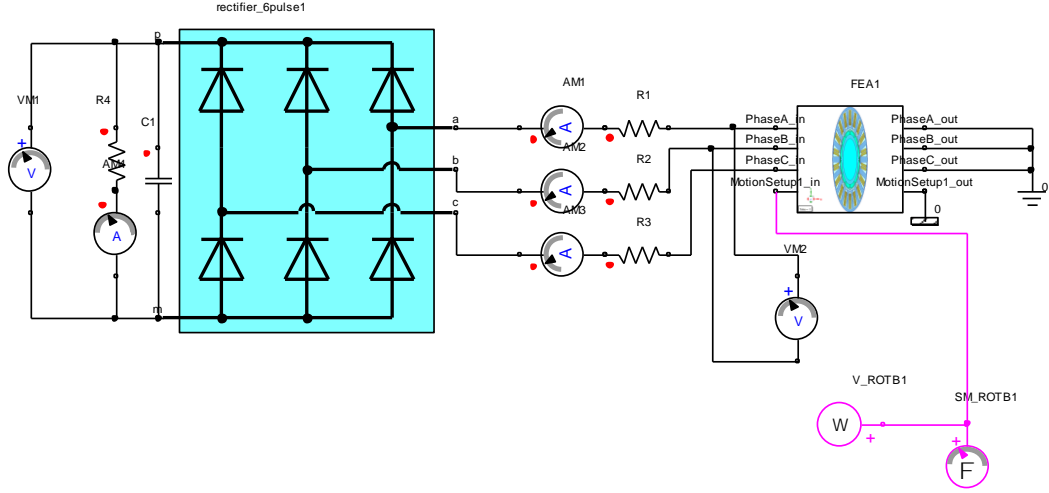
Boşta yapılan analizler sonucu maksimum ve minimum devirlerde elde edilen DC gerilimler Tablo 4.11’de verilmiştir.

Tablo 4.11 Boşta minimum ve maksimum devirde DC çıkış gerilimleri

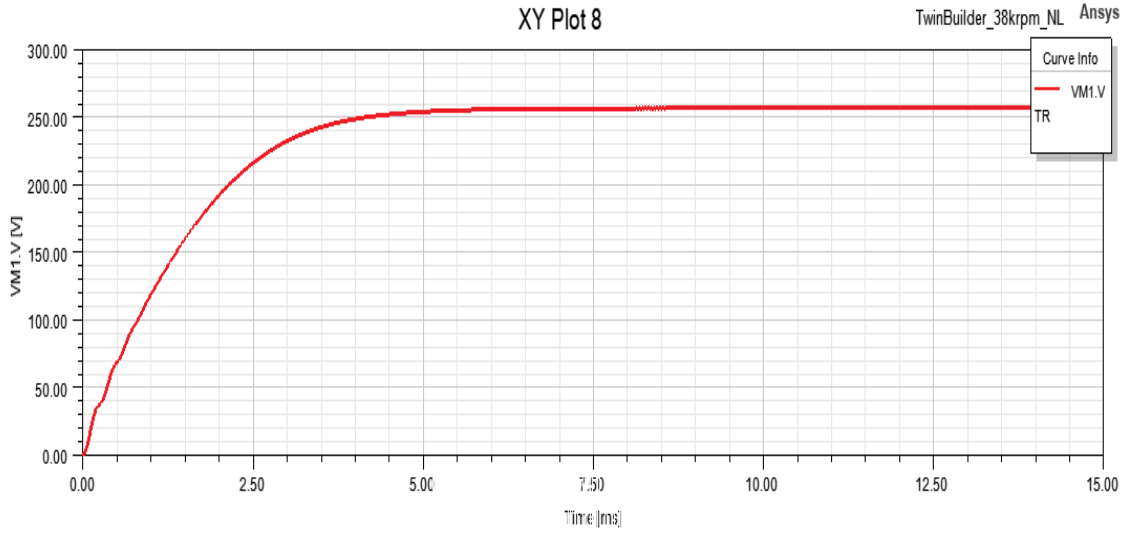
Devir	Çıkış Gerilimi DC
38000Dev/dk	305 V
50000Dev/dk	401 V

DC çıkış geriliminin yüksüz durumda maksimum devirde en yüksek değerde olur. Yapılan analizler sonucunda çıkış geriliminin maksimum 401V olduğu görülmüştür. Tasarım isteri olan 155 V-425 V aralığında çıkış gerilimi isterinin sağlandığı analizler ile doğrulanmıştır.

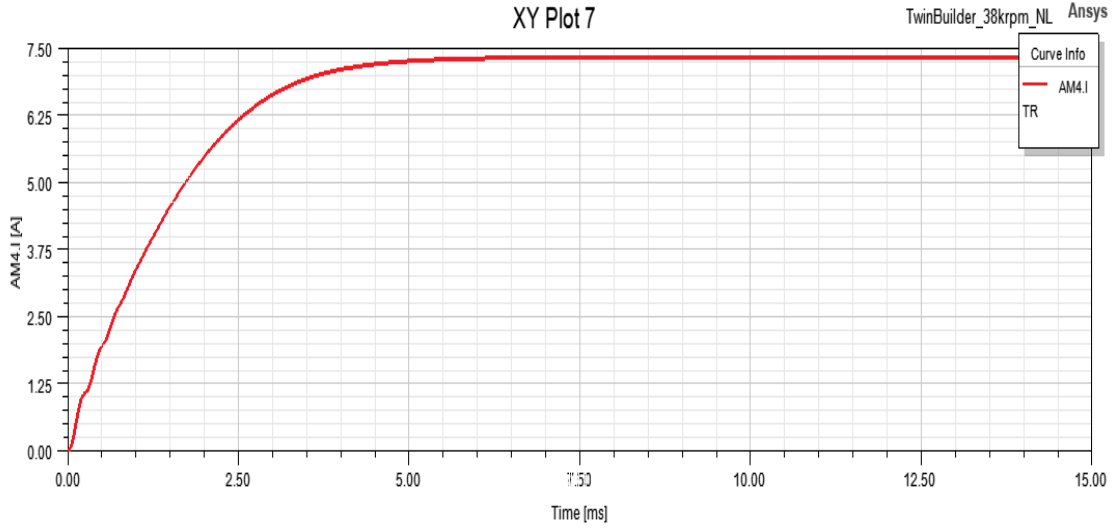
Yüksüz durumdaki analizlerin ardından diyot köprüsü çıkışına rezistif bir yük bağlanarak makinenin 2kW yük çekmesi sağlanmıştır. Yüklü koşulda meydana gelen dalgalanmaları sönümleyebilmek adına 200uF kondansatör diyot köprüsü çıkışına paralel olarak bağlanmıştır. Yüklü koşulda yapılan analizin simülasyon modeli Şekil 4.16’da verilmiştir. 2kW yüklü durumdayken makinenin çektiği akım ve gerilim değerleri Şekil 4.17, Şekil 4.18, Şekil 4.19 ve Şekil 4.20’de verilmiştir.



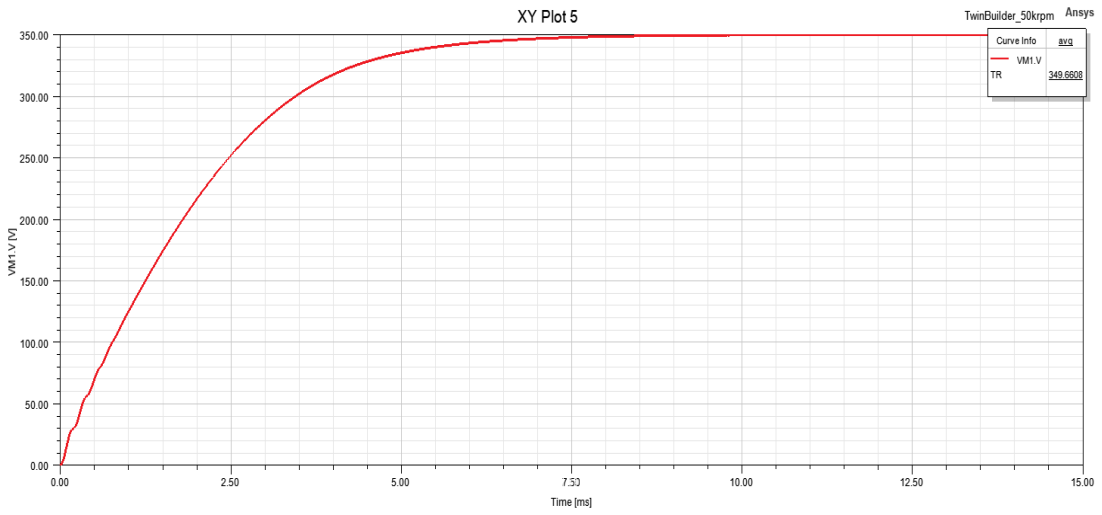
Şekil 4.16 Yüklü koşulda simülasyon modeli



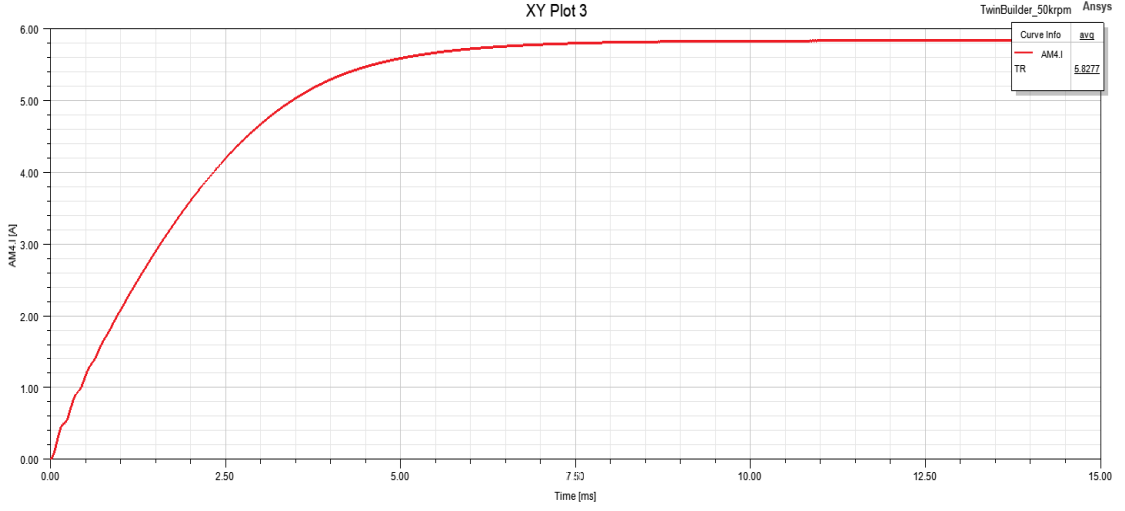
Şekil 4.17 38000Dev/dk yüklü koşulda DC çıkış gerilimi



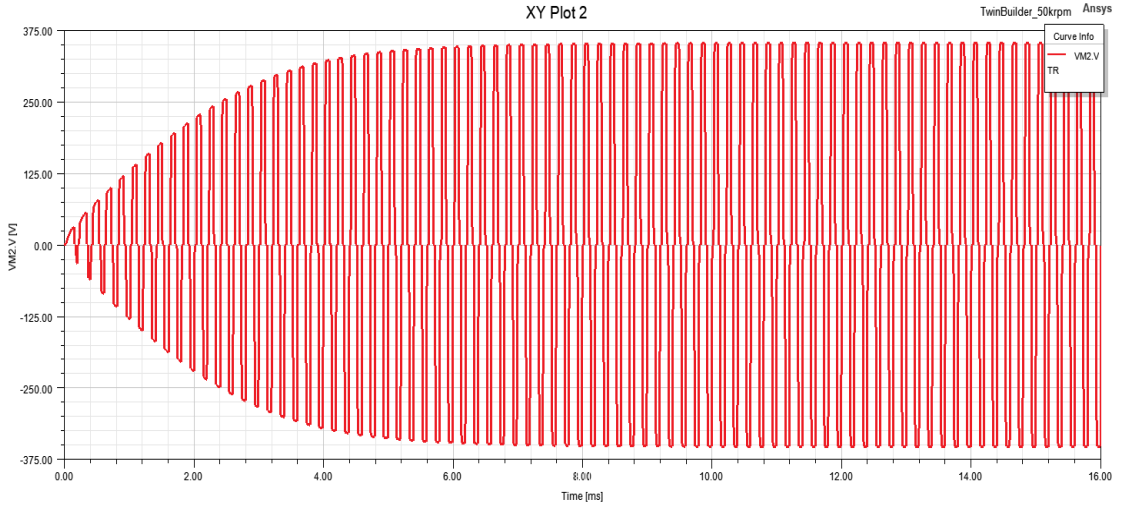
Şekil 4.18 38000Dev/dk Yüklü koşulda DC çıkış akımı



Şekil 4.19 50000Dev/dk Yüklü koşulda DC çıkış gerilimi



Şekil 4.20 50000Dev/dk Yüklü koşulda DC çıkış akımı



Şekil 4.21 50000Dev/dk, Yüklü koşulda fazlararası gerilim

Yükte yapılan analizler sonucu maksimum ve minimum devirlerde elde edilen DC gerilim ve akımlar Tablo 4.12’de verilmiştir.

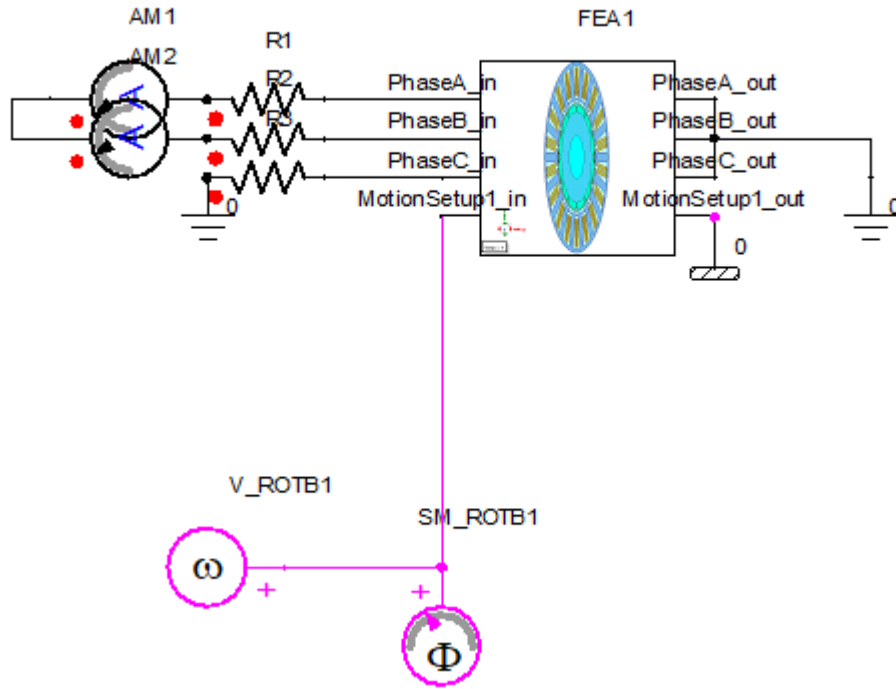
Tablo 4.12 Yükte minimum ve maksimum devirde DC çıkış gerilimleri ve akımları

Devir	Çıkış Gerilimi	Çıkış Akımı	Elektriksel Güç
38000 Dev/dk	258V	7.48A	1929W
50000 Dev/dk	350V	5.8A	2030W

Yapılan analizler sonucunda tasarlanan makinenin tasarım isteri olan gücü, tasarım isteri olan DC gerilim aralığında üretebildiği görülmüştür. Çıkış gerilimleri, çıkış gücü, çıkış akımı, akım yoğunluğu ve akı yoğunluğu parametreleri incelenmiştir.

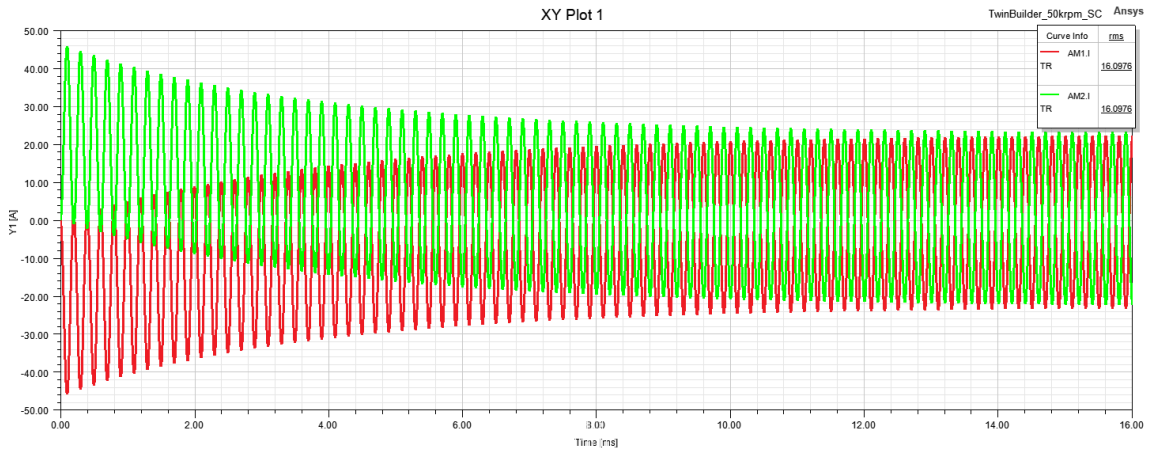
4.2.6 Kısa Devre Akımı Analiz Sonuçları

Hava aracında kullanılacak olan SMSG'ün fazlararası kısa devre olması koşulunda da sürekli olarak çalışması istenmektedir. Makine tasarımı yapılırken endüktansın mümkün oldukça artırılarak kısa devre akımını sınırlamak hedeflenmiştir. Kısa devre akımı analizinde maksimum kısa devre akımı çekilen koşul olan fazlararası kısa devre akımı incelenmiştir. Kısa devre akımı analizinin simülasyon modeli Şekil 4.22'de verilmiştir.



Şekil 4.22 Faz-Faz kısa devre akımı simülasyonu

Yapılan simülasyon sonucunda çıkan kısa devre akımı şekil 4.23'te verilmiştir.

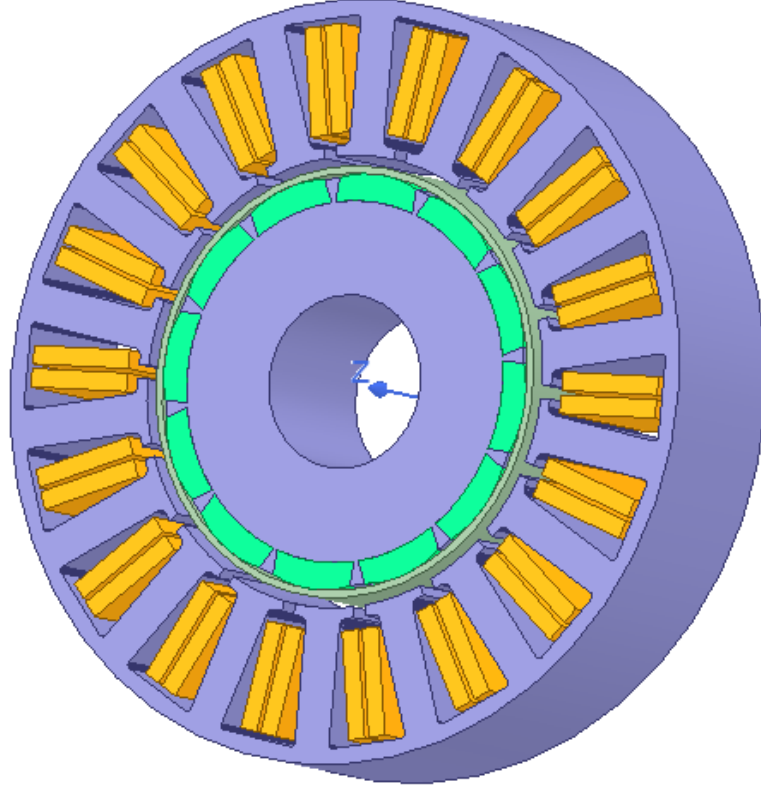


Şekil 4.23 50000dev/dk'de faz-faz kısa devre akımı

Kısa devre akımının en yüksek olduğu koşul olan maksimum devirde faz-faz kısa devre durumunda yapılan analizler sonucunda kısa devre akımının 16.09A olduğu gözlemlenmiştir. Kısa devre analizleri sonucunda çıkan akım yoğunluğu 10.2 A/mm^2 olarak hesaplanmıştır.

4.2.7 Kayıp Analizleri ve Verim

2D analizler sonucunda tasarım isteri sınırları içerisinde kaldığı görülen SMSG'ün veriminin hesaplanabilmesi amacıyla kayıp analizleri yapılmıştır. 3D analizler sonucunda sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilen kayıp analizleri sonucunda verim bilgisi kayıpların toplanması methodu ile elde edilmiştir. Analiz edilen 3D makine modeli Şekil 4.24'te verilmiştir.



Şekil 4.24 SMSG'ün 3 boyutlu görünümü

Rölanti devir ve maksimum devir için tam yükte yapılan analizler sonucunda oluşan kayıplar ve verim bilgisi tablo 4.13'te verilmiştir.

Tablo 4.13 Yükte minimum ve maksimum devirde kayıplar ve verim

Devir	Çıkış Gücü	Demir Kaybı	Bakır Kaybı	Mıknatıs Kaybı	Kılıf Kaybı	Toplam Kayıp	Verim
38000 Dev/dk	2.1kW	170W	6.5W	6W	2W	184.5W	%91.9
50000 Dev/dk	2.1kW	310W	3.7W	5.2W	3.2W	322.1W	%86.6

Tasarım isterlerinde herhangi bir verim isteri belirtilmemesine karşın (havacılık sektöründe genellikle makinenin güvenilirlik ve kararlılık durumu verimlilikten önde tutulmaktadır) mümkün olduğunca yüksek verimli olması ve kayıpların az olması makinenin ısıl performansını etkileyeceğinden dolayı, maksimum ve minimum devirlerde, tam yükte makinenin kayıpları analiz programı ile hesaplanmıştır. Maksimum devir akı yoğunluğunun ve frekansının artmasının etkisiyle yükselen demir kayıpları sonucunda makinenin en verimsiz çalışma durumunu oluşturmaktadır. En kötü koşulda makinenin verimi %86.5 olarak hesaplanmıştır.

4.2.8 Güç Yoğunluğu

Tasarlanan SMSG'ün temel elektriksel parçalarının ağırlıkları Tablo 4.14'te verilmiştir.

Tablo 4.14 Malzeme ağırlıkları

Malzeme	Ağırlık
Elektrik Sacı	429gr
Bakır	275gr
Mıknatıs	62gr
Kılıf	10gr

Toplam makine ağırlığı 776gr olarak hesaplanmıştır. 2kW sürekli güç istenen SMSG için tasarım isteri olan 4kW/kg hedefine ulaşamadığı görülmektedir. Tasarlanan ilk makinenin güç yoğunluğu 2.57kW/kg olarak hesaplanmıştır.

SÜREKLİ MIKNATISLI SENKRON GENERATÖR TASARIMININ OPTİMİZASYONU

Yapılan ilk tasarım sonucunda hedeflenen güç yoğunluğuna ulaşamadığı gözlemlenmiştir. Tasarım çıktılarından elde edilen bilgiler doğrultusunda SMSG'nin tasarımında iyileştirmeler yapılarak hedeflenen güç yoğunluğuna ulaşılmaya çalışılacaktır. Ayrıca optimizasyon sonucunda kısa devre akımı da azaltılarak kısa devre akım yoğunluğunun 10 A/mm^2 değerinin altında kalması hedeflenmektedir.

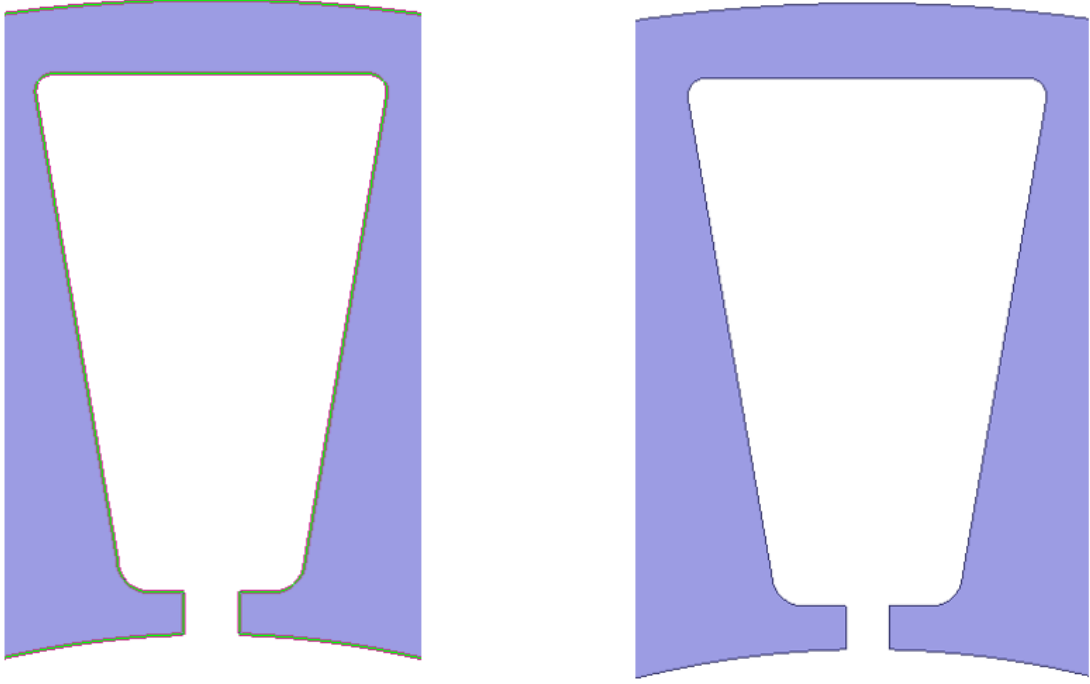
5.1 İkinci Tasarım

5.1.1 Stator Optimizasyonu

İlk tasarım sonucunda tam yük altında maksimum ve minimum devirlerde akım yoğunlukları 3.5 A/mm^2 ve 2.6 A/mm^2 olarak hesaplanmıştı. Yapılacak olan ikinci tasarımda bu akım yoğunluklarının bir miktar daha yükseltilebileceği görülmektedir. Buna istinaden makinenin stator ve rotor paket boyu değeri 20 mm 'den 15 mm 'ye indirilmiştir. 15 mm paket boyunda makine aynı gücü elde edebilmek adına aynı gerilimi indükleyebilmesi için daha fazla sarım sayısına ihtiyaç duyacaktır. Artan sarım sayısı sebebiyle azalacak olan tel kesiti makinenin aynı akımları çektiği senaryoda daha yüksek akım yoğunluğuna sebebiyet verecektir. Bu durum makine verimini düşürmesine karşın endüktansı arttıracığından dolayı daha düşük bir kısa devre akımı elde edilmesi öngörülmektedir.

İkinci bir stator optimizasyonu ise stator dişlerinde yapılacaktır. Yapılan parametrik analizler ile stator diş dibi genişliğinin kısa devre akımı üzerinde etkili olduğu gözlemlenmiştir. Diş dibi genişliği de kısa devre akımını azaltıcı yönde optimize edilmiştir.

İlk tasarımdaki stator oluk geometrisi ve ikinci tasarımdaki stator oluk geometrisi Şekil 5.1'de gösterilmiştir.



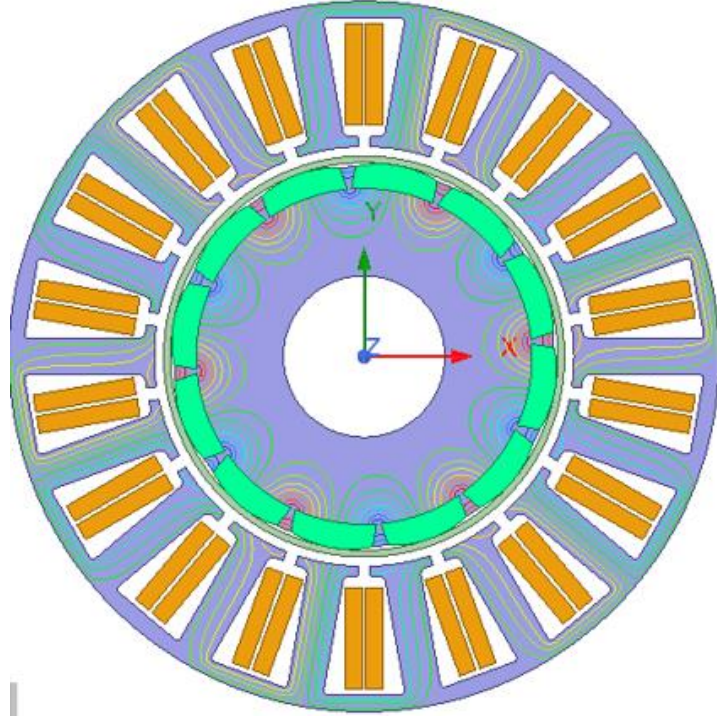
Şekil 5.1 İlk tasarım ve ikinci tasarım stator oluk geometrileri

Şekil 5.1’de de görüleceği üzere optimizasyon parametresi olarak statorda yalnızca dış dibi geometrisi değiştirilmiştir. Stator oluk alanı aynı bırakılmıştır

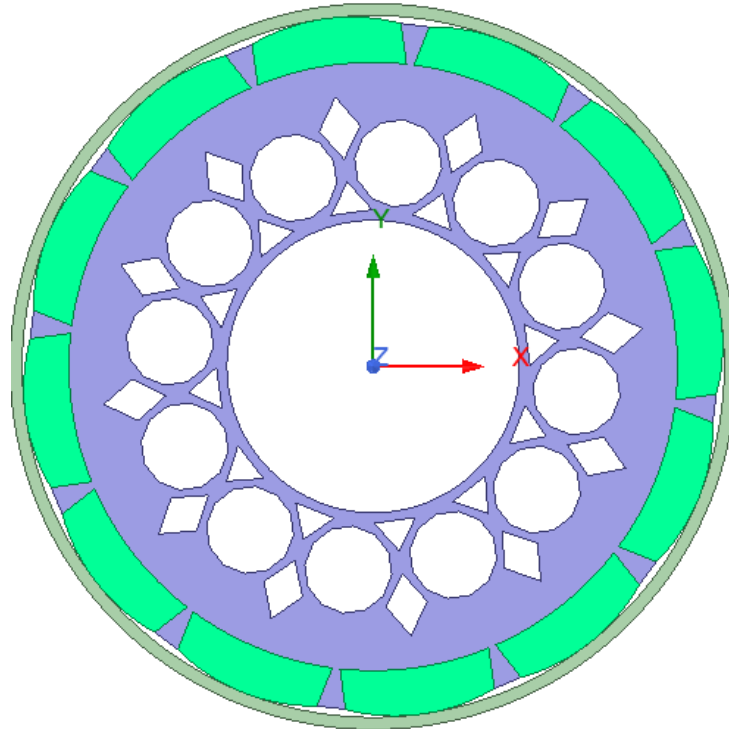
5.1.2 Rotor Optimizasyonu

İlk tasarım üzerinde yapılan analizler sonucunda rotor akı yoğunluğunun bazı bölgelerde oldukça düşük olduğu gözlemlenmiştir. Analiz programı üzerinden akı yolları çizdirilip incelendiğinde rotor geometrisinin bazı bölgelerinden akı çizgilerinin geçmediği gözlemlenmektedir. Şekil 5.2’de ilk tasarım SMSG rotor ve statorundan geçen akı çizgileri gösterilmektedir.

Şekil 4.8’de gösterilen rotor akı yoğunluğu ve Şekil 5.2’de gösterilen akı çizgileri görsellerinden faydalanarak makinenin rotorunda ağırlık azaltma çalışması yapılmıştır. Akı çizgilerinin geçmediği noktalardan mekanik mukavemet sınırları da gözetilerek ağırlık azaltarak makinenin güç yoğunluğunun artırılması hedeflenmektedir. Ağırlık azaltılmış ikinci tasarım rotor Şekil 5.3’de verilmiştir.



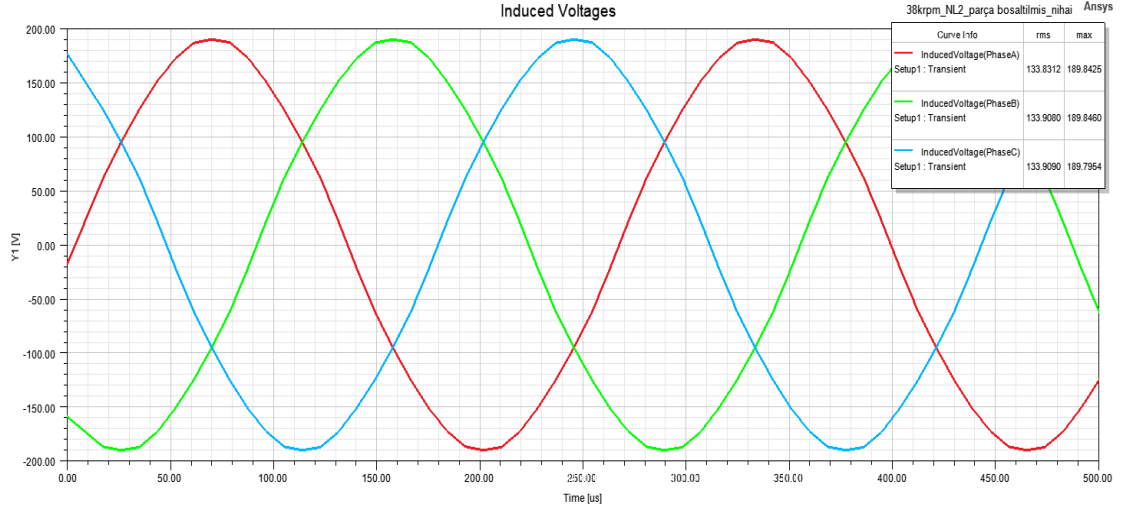
Şekil 5.2 İlk tasarım akı çizgileri



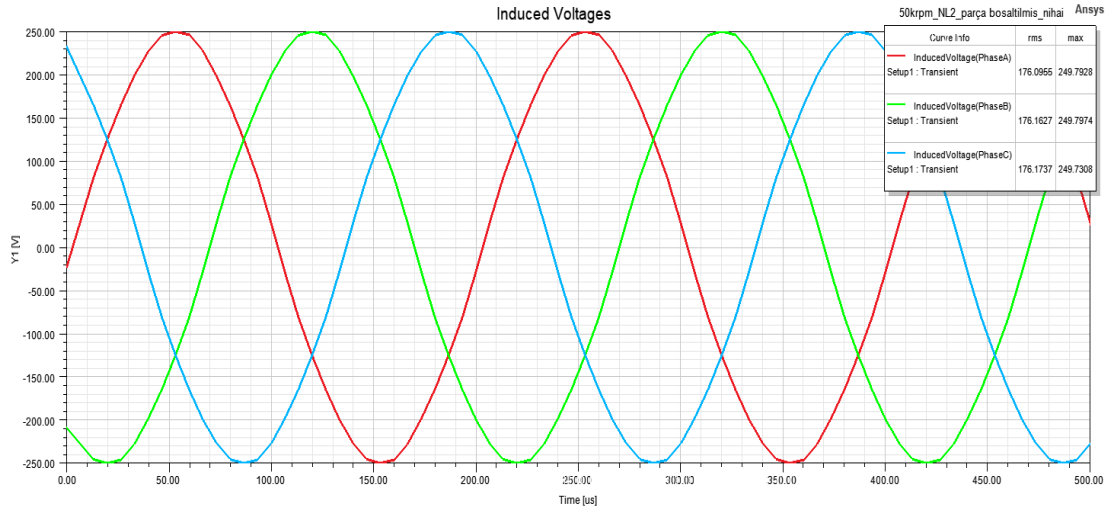
Şekil 5.3 Ağırlık azaltılmış ikinci tasarım rotor

5.2 İkinci Tasarım Analiz Sonuçları

5.2.1 Boşta Minimum ve Maksimum Devirlerde İndüklenen Gerilimler



Şekil 5.4 İkinci tasarım 38000Dev/dk, 200 C°, boşta indüklenen gerilimler



Şekil 5.5 İkinci tasarım 50000Dev/dk, -40 C°, boşta indüklenen gerilimler

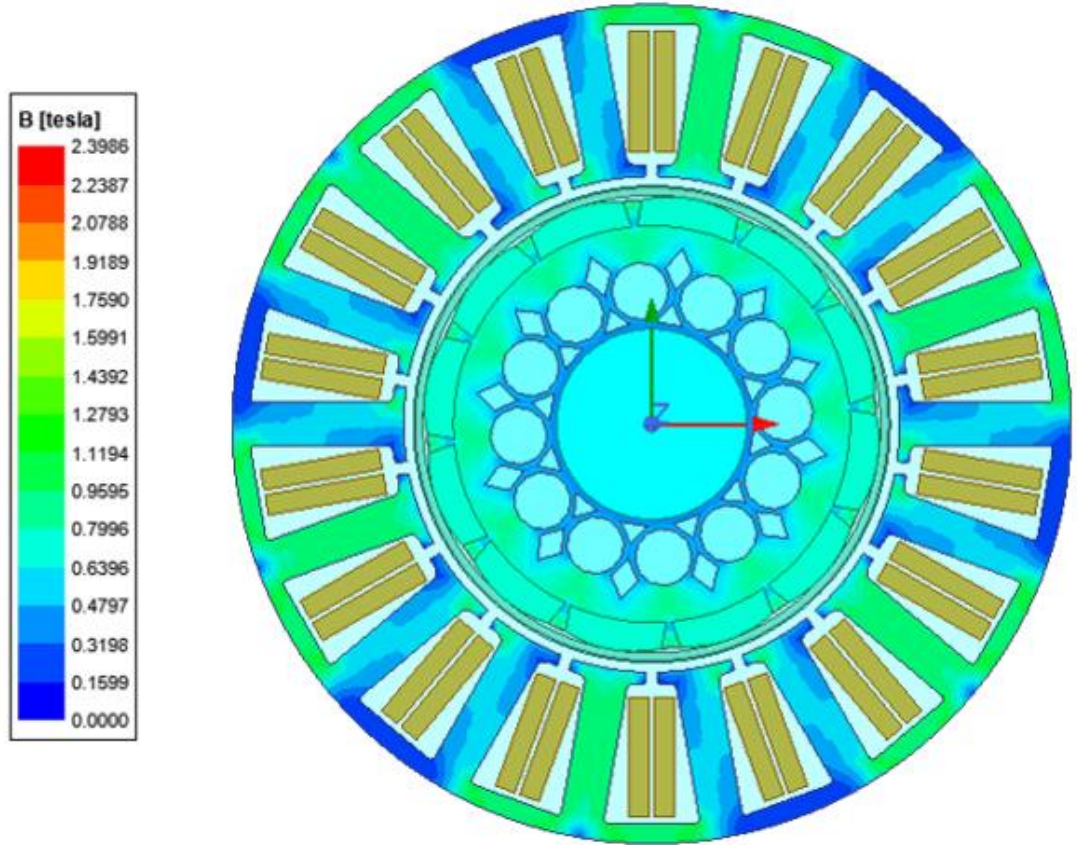
Boşta yapılan analizler sonucu indüklenen gerilim değerleri Tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.1 Boşta minimum ve maksimum devirde indüklenen gerilimler

Devir	Boşta İndüklenen Gerilim (rms)
38000Dev/dk	133.8V
50000Dev/dk	176.1V

5.2.2 Akı Yoğunluğu Analizi

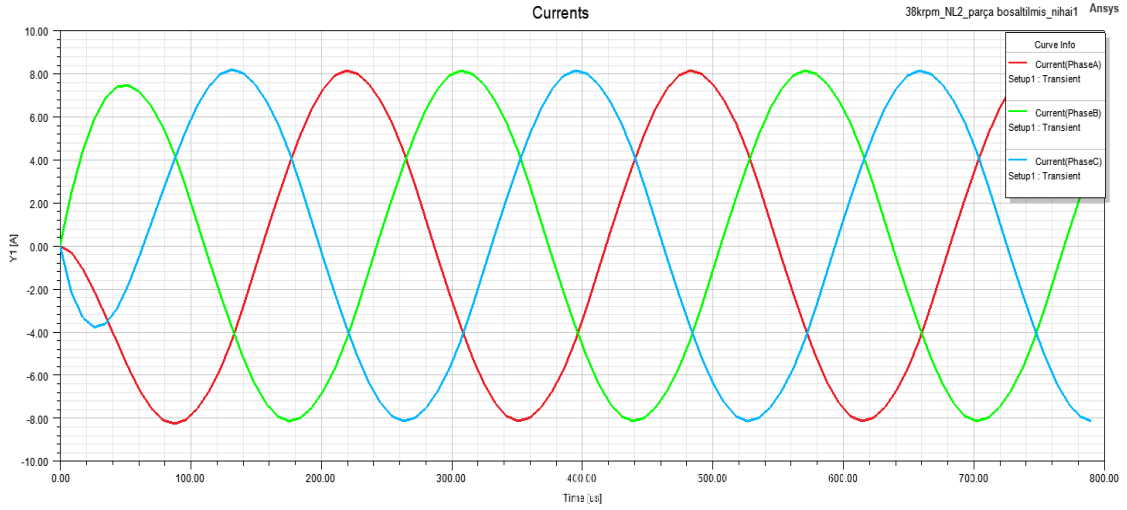
İkinci tasarımın akı yoğunluğu analizleri de ilk tasarım ile aynı koşullar olan yüksüz durumda, maksimum devirde ve -40 °C’de yapılmıştır.



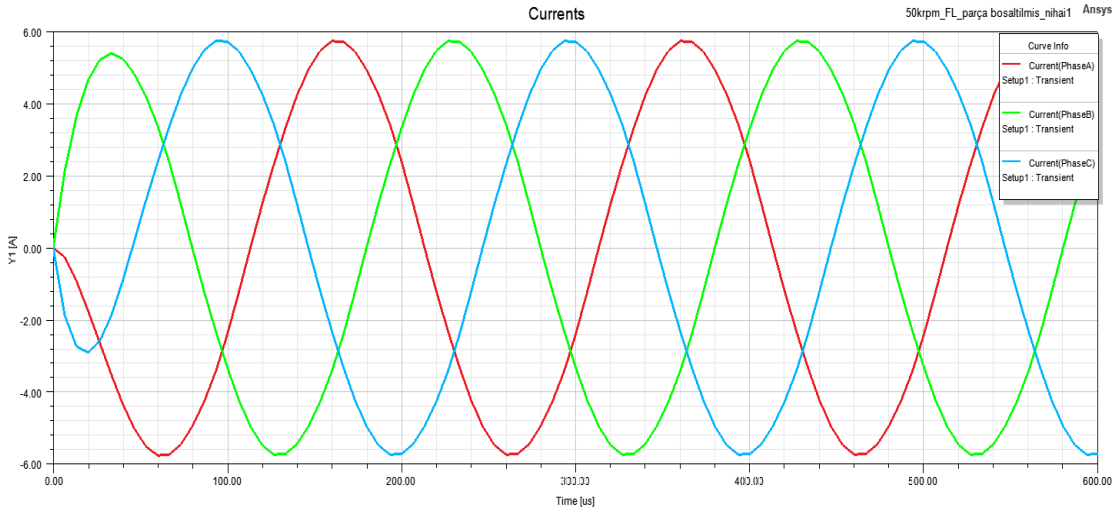
Şekil 5.6 İkinci tasarım akı yoğunlukları

5.2.3 İkinci Tasarım Yükte Maksimum ve Minimum Devirlerde Çekilen Akımlar ve Akım Yoğunlukları

Yük altında makinenin maksimum ve minimum devirlerinde çekilen akımların dalga formları ve akım yoğunlukları Şekil 5.7 ve Şekil 5.8’de verilmiştir.



Şekil 5.7 2kW yük, 38000Dev/dk, faz akımları



Şekil 5.8 Şekil 4.5.9 2kW yük, 50000Dev/dk, faz akımları

Yükte yapılan analizler sonucu çekilen faz akımları değerleri Tablo 5.2’de verilmiştir.

Tablo 5.2 İkinci tasarım yükte minimum ve maksimum devirde faz akımları

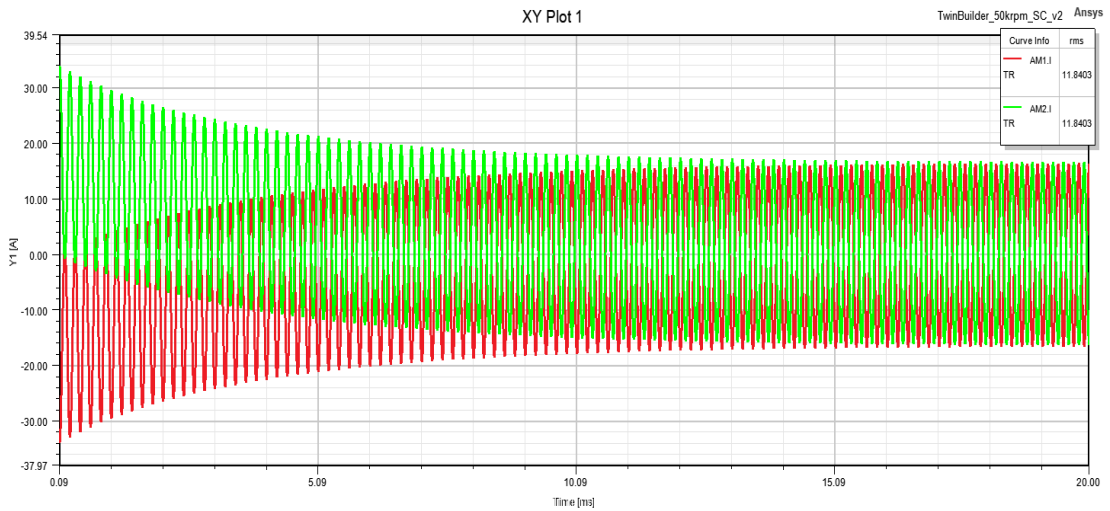
Devir	Faz Akımları (rms)
38000Dev/dk	5.7A
50000Dev/dk	4.1A

En zorlu koşullarda akım yoğunlukları Tablo 5.3’te verilmiştir.

Tablo 5.3 Yükte minimum ve maksimum devirde akım yoğunlukları

Devir	Akım Yoğunluğu
38000Dev/dk	4.5 A/mm ²
50000Dev/dk	3.2 A/mm ²

5.2.4 İkinci Tasarım Kısa Devre Akımı Analiz Sonuçları



Şekil 5.9 50000dev/dk’de Faz-Faz kısa devre akımı

İlk tasarım ile aynı koşullarda yapılan analizler sonucunda kısa devre akımının 11.8A olduğu gözlemlenmiştir. Kısa devre analizleri sonucunda çıkan akım yoğunluğu 9.3 A/mm² olarak hesaplanmıştır.

5.2.5 Kayıp Analizleri ve Verim

İkinci tasarımın sınır koşullarında yapılan kayıp analizleri ve verim değerleri Tablo 5.4'te verilmiştir.

Tablo 5.4 İkinci tasarım yükte minimum ve maksimum devirde kayıplar ve verim

Devir	Çıkış Gücü	Demir Kaybı	Bakır Kaybı	Mıknatıs Kaybı	Kılıf Kaybı	Toplam Kayıp	Verim
38000 Dev/dk	2.1kW	165W	8.8W	4.5W	1.9W	180.2 W	%92.0
50000 Dev/dk	2.1kW	300W	4.2W	4.1W	3.0W	311.3W	%87.1

5.3 İki Tasarım Sonuçlarının Karşılaştırılması

Her iki tasarımda da SMSG'nin elektriksel performans kriteri olarak; çıkış gücü, boşa ve yükte indüklenen gerilimler, yükte çekilen akımları, geometrik ölçüler olarak ise stator dış ve iç çapı, rotor dış çap ve iç çapı, sargı sonu uzunlukları, oluk alanları, kılıf kalınlığı, mıknatıs kalınlığı, malzeme olarak; sarım malzemesi, sac malzemesi ve mıknatıs malzemesi parametreleri sabit tutulmuştur. Makinenin aksenal uzunluğu, dış dibi geometrisi, rotor geometrisi ve sarım bilgisi değiştirilerek güç yoğunluğunun artırılması ve kısa devre akımının azaltılması amaçlanmıştır. Yapılan ilk tasarım ve bu parametrelerde yapılan değişikliklerle ortaya çıkan optimizasyon çalışması sonucunda elde edilmiş olan ikinci tasarımın karşılaştırması Tablo 5.5 ve Tablo 5.6'da verilmiştir.

Tablo 5.5 İki tasarım optimizasyon parametreleri karşılaştırılması

Parametre	Tasarım 1	Tasarım 2
Eksenal Uzunluk	20mm	15mm
Oluk Ağız Genişliği	1.6mm	1.4mm
Sarım Sayısı	x	x + 4
Tel Kesiti	1.57mm ²	1.27mm ²
Elektrik Sacı Ağırlığı	429gr	254.7gr
Bakır Ağırlığı	275gr	190.9gr
Mıknatıs Ağırlığı	62gr	47.1gr
Kılıf Ağırlığı	10gr	7.5gr
Toplam Ağırlık	776gr	500.2gr

Tablo 5.6 İki tasarım performans parametrelerinin karşılaştırılması

Parametre	Tasarım 1	Tasarım 2
Güç Yoğunluğu	2.57kW/kg	4kW/kg
Minimum ve Maksimum Devirde Akım Yoğunluğu	3.5 A/mm ² - 2.6 A/mm ²	4.5 A/mm ² -2.7 A/mm ²
Kısa Devre Akımı	16.09 A	11.8A
Kısa Devre Akım Yoğunluğu	10.2 A/mm ²	9.3 A/mm ²
Ortalama Verim	%89.20	%89.45

Elektrik makineleri tasarımında ve mıknatıs teknolojisinde yaşanan gelişmelere paralel olarak elektriksel güç üretim sistemleri de daha verimli ve güvenli hale gelmektedir. Hava araçlarının sivil ve askeri alanlarda kullanılmaya başlamasından itibaren hava araçlarında elektriksel güç üretimi mühendisliğin temel araştırma geliştirme alanlarından biri olmuştur. Endüstriyel uygulamalar ve elektrikli araç uygulamalarına oranla çok daha zorlayıcı bir alan olan hava araçları elektrik elektroniği makine performansının yanı sıra kararlılık ve güvenilirlik gibi kavramları da tasarımlarda en temel parametre olarak belirlemektedir. Bu bağlamda özellikle sürekli mıknatıslı elektrik makineleri fırçalı makinelerin yerini almaktadır. SMSM'lerin üretim teknolojilerinin gelişmesi, mıknatısların üretiminin kolaylaşması ve maliyetlerinin ucuzlaması bu teknolojik dönüşümün başlıca sebebidir.

Bu tez çalışmasında öncelikle literatürde hava araçlarında kullanılan elektrik makineleri hakkında yapılan araştırmalardan ve uygulamalardan bahsedilmiştir. Ardından sürekli mıknatıslı senkron makinelerin özellikleri ve sınıflandırılmasında ile hava araçlarında elektriksel güç üretim sistemleri hakkında bilgi verilmiştir. Son olarak da Hava Araçları için Yüksek Hızlı ve Yüksek Güç Yoğunluklu Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatör Tasarımı ve bu tasarımın optimizasyonu gerçekleştirilmiştir.

Tasarım aşamasında ilk olarak SMSG'in kullanılacağı hava aracında SMSG için ayrılmış olan geometrik ölçüler, tasarım isteri olarak istenen güç yoğunluğu, makinenin çalışacağı devir aralığı, makinenin çıkışından DC-DC dönüştürücüye girdi olacak olan çıkış gerilimleri ve talep edilen çıkış gücü bilgisi verilmiştir. Bu bilgiler ışığında öncelikle makinenin analitik tasarımı yapılmıştır. Analitik tasarım yapılırken makinenin tasarım isterlerine ek olarak hava araçlarında kullanılan elektrik makinelerinde dikkat edilmesi gereken diğer hususlarda göz önünde bulundurulmuştur. Dikkat edilen diğer hususlar başlıca;

- Yüksek devirlerde kararlı ve güvenli olarak çalışabilecek bir rotor tasarımı,
- Makinenin çıkış gerilimleri dalga formlarının harmoniksiz saf bir sinüs olması,
- Faz-Faz kısa devre koşulunda makinenin kararlı bir şekilde çalışmaya devam edebilmesi,

- Makinenin kolay üretilebilirliği,
 - Kullanılan elektrik sacı ve mıknatıs gibi malzemelerin kolay tedarik edilebilirliği ve işlenebilirliği,
- şeklinde sıralanabilir.

Tasarlanan ilk makinenin 2 boyutlu ve 3 boyutlu analizleri ile makine performansı incelenmiştir. Yapılan analizler sonucunda makinenin rölanti ve maksimum devirlerde tasarım isterleri olan çıkış gerilimleri ve çıkış gücünü sağlayabildiği gözlemlenmiştir. Tasarlanan ilk makinenin çıkışına bir kontrolsüz AC-DC dönüştürücü entegre edilerek makine ve simülasyon devresi birlikte simüle edilmiş ve makinenin DC performansı incelenmiştir.

İlk tasarım sonuçları incelendiğinde makinenin istenilen güç yoğunluğuna ulaşamadığı gözlemlenmiş ve elde edilen ilk veriler ışığında optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu optimizasyon çalışmasının girdileri şu şekildedir;

- İlk tasarım sürekli çalışma anında akım yoğunluklarının düşük olduğu ve makine veriminin yüksek olmasından dolayı makinenin aksenal uzunluğunun kısaltılabileceği,
- Rotor akı yoğunluğunun bölgesel olarak oldukça düşük olduğu noktalarda parça boşaltma işlemi yapılması,
- Stator oluk alanlarının sabit bırakılması,
- Stator oluk ağzı optimizasyonu ile kısa devre akımının azaltılması,

Optimizasyon çalışması sonucunda yapılan analizler ile makinenin tasarım isteri olan 4kW/kg güç yoğunluğu değerine ulaştığı gözlemlenmiştir. Ayrıca makinenin kısa devre akım yoğunluğu kritik değer olan 10 A/mm² değerinin altına düşürülerek makinenin kısa devre koşulunda da kararlı ve güvenli bir şekilde çalışmaya devam edebilmesi sağlanmıştır. Rotor da yapılan parça boşaltma işleminin rotor sacını doyuma götürmediği ve çıkış gerilimlerinin sinüs formunu bozmadığı analizler ile desteklenmiştir.

Bunlara ek olarak SMSG tasarımlarında tasarım optimizasyonu yapılması ve minimum boyutlarda kalınmasının kısa devre akımı üzerine etkileri gözlemlenmiştir. Yapılan aksenal uzunluk kısaltma çalışması sonucunda makinenin ilk tasarım ile aynı gerilimlerde aynı gücü verebilmesi adına sarım sayısının artırılması ve stator oluk ağzı optimizasyonu ile endüktansın artırılması sonucu kısa devre akımı düşürülmüştür.

Bu çalışma ile yüksek hızlı hava araçları motoruna direkt bağlanabilecek yüksek güç yoğunluğuna sahip bir generatör tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tüm tasarım isterlerine ilk tasarım optimizasyonu sonucunda ulaşılmıştır. Elektrik makinelerinde güç yoğunluğunu arttırmaya yönelik çalışmalarda dikkat edilecek hususlar ve optimize edilebilecek tasarım parametrelerini belirleme konusunda çalışma elektrik makinesi tasarımcıları için bir kılavuz oluşturmuştur. Ayrıca ülkemizde yeni bir araştırma geliştirme alanı olan hava araçları için elektrikli güç üretim sistemleri çalışmaları için de, hava araçlarında kullanılacak olan elektrik makinelerinin tasarımında dikkat edilmesi gereken hususlar hakkında da içerdiği bilgilerle referans bir kaynak olma niteliği taşımaktadır.

Gelecek çalışmalarda makine veriminin artırılması, makine boyutlarının küçültülmesi ve dolayısıyla güç yoğunluğunun arttırılabilmesi adına farklı malzemeler ile tasarım daha da olgunlaştırılabilir. Piyasada bulunabilirlik, tedarik edilebilirlik, kayıplarının düşük olması ve doyma noktasının yeterli seviyede olması açısından tercih edilen elektrik sacı yerine yüksek frekanslarda daha düşük kayıplar veren elektrik sacları veya doyum noktası daha yüksek olan elektrik sacları tercih edilerek makinenin performansında ve boyutlarında bir miktar daha iyileştirmeler yapılabilir. Mıknatıs malzemesinin daha yüksek remenans akı değeri olan SmCo mıknatıslar kullanılarak makine güç yoğunluğu arttırılabilir. Makinenin aksenal uzunluğunda yapılabilecek bu iyileştirmelerin kısa devre akımını da daha düşük seviyelerde limitlenmesine yardımcı olacaktır.

- [1] K. Yaman, "Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor Tasarımı ve Analizi", Kocaeli Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Elektrik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 1999.
- [2] J. Pyrhönen, T. Jokinen ve V. Hrabovcova, "Design of Rotating Electrical Machines", WILEY, 2014.
- [3] I. Boldea ve L. Tutelea, Reluctance Electrical Machines, CRC Press, 2019.
- [4] E. F. Echolds, «Permanent-Magnet Motors and Generatörs for Aircraft,» %1 içinde NASA. Lewis Research Center Aircraft Elect. Secondary Power, California, 1983.
- [5] P. Acarnley, «Permanent Magnet Generatörs for Aerospace Applications,» %1 içinde IEE Colloquium on Permanent Magnet Machines, London, 1988.
- [6] A. J. Mitcham ve J. J. Cullen, «Permanent magnet generatör options for the More Electric Aircraft,» International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, Sante Fe, 2002.
- [7] P. Arumugam, S. Bozhko, H. Zhang ve C. Gerada, «Permanent Magnet Starter-Generatör for Aircraft Application,» SAE 2014 Aerospace Systems and Technology Conference, United States, 2014.
- [8] M. Van Der Geest, Design and Modeling of High Performance Permanent Magnet Synchronous Machines, Nederland: Technische Universiteit Delft, 2015.
- [9] F. . R. Ismagilov, V. Vavilov, A. H. Miniyarov, A. M. Veselov ve V. V. Ayguzina, «"Design, Optimization and Initial Testing of a High-Speed 5-kW Permanent Magnet Generatör for Aerospace Application",» Materials Science, no. Vol. 79, pp. 225-240, 2017.

- [10] S. Wu, Q. Chen, Q. Li, X. Liu, H. Zhang ve L. Lin, «Design of Aviation High Impedance Permanent Magnet Synchronous Generatör,» *Mathematical Problems in Engineering*, cilt vol. 2021, p. 10, 2021.
- [11] F. Magnussen, "On Design and Analysis of Synchronous Permanent Magnet Machines For Field Weakening Operations in Hybrid Electric Vehicles", Sweden: Electrical Machines and Power Electronics Department of Electrical Engineering Royal Institute of Technology, 2004.
- [12] D. Hanselman, *Brushless Permanent Magnet Motor Design*, 1994.
- [13] «Surface-Mounted Permanent-Magnet Synchronous Motor,» [Çevrimiçi]. Available: https://www.oreilly.com/library/view/direct-eigen-control/9781118460634/9781118460634_c02.xhtml. [Erişildi: 25 02 2022].
- [14] D. MARTÍNEZ, "Design of a Permanent-Magnet Synchronous Machine with NonOverlapping Concentrated Windings", Stockholm: Royal Institute of Technology School of Electrical Engineering Electrical Energy Conversion, 2012.
- [15] T. T. Win, «Generatör Control System Used in Aircraft Power,» *International Journal of Scientific and Research Publications*, cilt 8, no. 8, pp. 516-520, 2018.
- [16] M. Kaynaklı, Pençe tipi alternatör ile sabit mıknatıslı alternatör performanslarının karşılaştırılması, Karabük: Karabük Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Makine Ana Bilim Dalı, 2010.
- [17] J. F. Gieras, *Advancements in Electric Machines*, Springer, 2008.
- [18] I. Bolvashenkov, H.-G. Herzog, F. Ismagilov, V. Vavilov, L. Khvatskin, I. Frenkel ve A. Lisnianski, «Fault Tolerant Multi-phase Permanent Magnet Synchronous Motor for the More Electric Aircraft,» *Fault-Tolerant Traction Electric Drives Reliability, Topologies and Components Design*, Springer, 2020, pp. 73-92.
- [19] O. Kütük, «Elektrik Motor Tasarımı,» TÜBİTAK Efficiency Challenge, 2020.

- [20] O. Gürdal, Elektrik Makinalarının Tasarımı, Bursa Orhangazi Üniversitesi Yayınları, 2015.
- [21] D. Gerada, A. Mebarki, N. L. Brown, C. Gerada, A. Cavagnino ve A. Boglietti, «High-Speed Electrical Machines: Technologies, Trends, and Developments,» IEEE Transactions on Industrial Electronics, cilt 61, no. 6, pp. 2946-2959, 2014.
- [22] TataSteel, «Typical data for SURA® M270-35A,» [Çevrimiçi]. Available: https://www.tatasteeleurope.com/sites/default/files/m270-35a_1.pdf. [Erişildi: 3 3 2022].
- [23] B. Wang , G. Vakıl, Y. Liu , T. Yang, Z. Zhang ve C. Gerada, «Optimization and Analysis of a High Power Density and Fault Tolerant Starter–Generatör for Aircraft Application,» Electrical Machine Design for Emerging Technologies, cilt 14, no. 1, p. 113, 2021.
- [24] Y. Öner, Rüzgar türbinleri için; düşük hızlı, sürekli mıknatıslı, yumuşak manyetik kompozit malzemeli, senkron generatör tasarımı, optimizasyonu ve üretimi, Yıldız Teknik Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 2013.
- [25] A. Magnetics, «Recoma,» [Çevrimiçi]. Available: <https://www.arnoldmagnetics.com/wp-content/uploads/2017/10/Recoma-Combined-160301.pdf>. [Erişildi: 15 9 2021].
- [26] O. Jing, Improving high-speed electrical machines by amorphous metals, Karlsruhe Institut für Technologie, 2019.
- [27] A. Magnetics, «High Speed Efficiency Rotor Assemblies,» Arnold Magnetics, [Çevrimiçi]. Available: <https://www.arnoldmagnetics.com/products/high-speed-high-efficiency-rotor-assemblies/>. [Erişildi: 5 1 2022].

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Kalaycıoğlu Ö. Ayçiçek E., (2021). “Design of High Speed and High Power Density Synchronous Generator for Turbojet Aircraft Applications”, 8. Uluslararası Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Kongresi, 06-07 Aralık 2021.