

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**AĞIR ZIRHLI ARAÇLARA YÖNELİK 800 AMPER
FİRÇASIZ 3 FAZLI ALTERNATÖR ROTORUNUN
ÜRETİMİ VE İZOLASYON ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ceylan KARAKUŞ

Enstitü Anabilim Dalı : MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Metin VARAN

Şubat 2018

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AĞIR ZIRHLI ARAÇLARA YÖNELİK 800 AMPER
FIRÇASIZ 3 FAZLI ALTERNATÖR ROTORUNUN
ÜRETİMİ VE İZOLASYON ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ceylan KARAKUŞ

Enstitü Anabilim Dalı : MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 21.02.2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr.
Abdullah FERİKOĞLU
Jüri Başkanı

Yrd. Doç. Dr.
Mehmet ŞİMŞİR
Üye

Yrd. Doç. Dr.
Metin VARAN
Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Ceylan KARAKUŞ

. .2018

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Metin VARAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmanın gerçekleşmesi esnasında bilgi ve desteklerini esirgemeyen Sakarya Üniversitesi Yrd. Doç. Dr. Gökhan COŞKUN'a, Doç. Dr. Ergün NART'a, atölye çalışmalarında her türlü bilgi ve yardımı sağlayan Erel Makine Genel Müdürü Hasan ULUÇ'a, Emin GEZGİN'e, Süleyman BOSTANCI'ya, Şükriye SÜRMELE'ye ve diğer tüm çalışanlara çok teşekkür ederim.

Çalışma boyunca beni motive eden ve destekleyen Nazif Uğur AYDIN'a çok teşekkür ederim.

Ayrıca bu çalışmanın maddi açıdan desteklenmesine olanak sağlayan Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Komisyon Başkanlığı'na (Proje No: 2014-50-01-027) ve TÜBİTAK'a (Proje No: 112D027 (0983.STZ.2015)) teşekkür ederim.

Hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme sonsuz teşekkürler.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
TABLOLAR LİSTESİ	x
ÖZET	xi
SUMMARY	xii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
1.1. Tez Çalışmasının Amacı ve Katkıları	2
1.2. Tez Organizasyonu	3
BÖLÜM 2.	
KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
2.1. Alternatörler	4
2.2. Alternatör Çalışma Prensipleri ve Sınıflandırılması	4
2.3. İkaz Yöntemlerine Göre Sınıflandırma	6
2.3.1. Faz sayılarına göre sınıflandırma	6
2.3.2. Soğutma tiplerine göre sınıflandırma	7
2.3.3. Rotor tiplerine göre sınıflandırma	7
2.3.4. Senkron veya asenkron tipe göre sınıflandırma	8
2.4. Alternatörlerde Kullanılan Malzemeler	8
2.4.1. Yumuşak manyetik malzemeler	9
2.4.2. Elektriksel iletken malzemeler	15
2.4.3. Yalıtım malzemeleri	17

2.4.3.1. Alternatör parçalarının izolasyonu	17
2.4.4. Sabit veya sürekli mıknatıs	20
2.5. Çevre Testleri ve Balans	20
2.6. Taşıtlarda Alternatör Kullanımı	22
2.7. Ağır Araçlarda Alternatör Kullanımı	23
BÖLÜM 3.	
MATERYAL VE YÖNTEM	27
3.1. Materyal	27
3.2. Yöntem	27
3.2.1. Tersine mühendislik yoluyla rotor üretimi	27
3.2.2. İzolasyon direnci analizi ve yöntemleri	33
BÖLÜM 4.	
ROTOR PARÇALARININ BELİRLENMESİ VE MODELLENMESİ	40
4.1. Alternatörün Özellikleri	40
4.2. Rotor Parçalarının Belirlenmesi	41
4.3. Rotorun 3 Boyutlu Modellenmesi	46
4.4. Rotor modelinde ısı dağılımının yapılması	53
BÖLÜM 5.	
ROTORUN ÜRETİMİ	58
5.1. Rotor Parçalarının Üretilmesi	58
5.2. Rotor Parçalarının Montajı	61
5.3. Rotor Analizleri	66
5.3.1. İzolasyon analizleri	66
5.3.2. Çevre testleri ve balans testleri	69
5.4. Nihai Ürün	71
BÖLÜM 6.	
DEĞERLENDİRME	72

KAYNAKLAR	74
ÖZGEÇMİŞ	79

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

AC	: Alternative current
ATV	: MRAP All-Terrain
B	: Manyetik alan yoğunluğu
B _m	: Maksimum manyetik akı yoğunluğu
D	: Rotor çapı
DAR	: Dielektrik absorpsiyon oranı
DC	: Direct current
FSI	: Fluid Solid Interaction
G	: Grade, balans kalite derecesi
GCU	: Generator control unit
H	: Manyetik alan şiddeti
H _c	: Koersif kuvvet değeri
IR	: İzolasyon direnci
L	: Rotor uzunluğu
M	: Manyetizasyon
M _r	: Kalıcı mıknatıslanma
MRAP	: Mine Resistant Ambush Protected
M _s	: Maksimum manyetizasyon
MTVR	: Medium Tactical Vehicle Replacement Vehicle
MΩ	: Megohm
N	: Maksimum devir sayısı
n	: Steinmetz sabiti
NMN	: Nomex – Mylar polyester film – Nomex
p	: Kutup sayısı
P _h	: Histeresiz kaybı
U	: Artık dengesizlik
V	: Hacim

W	: Rotor ağırlığı
f	: Frekans
ρ	: Malzemenin öz direnci
τ	: Malzemenin kalınlığı
μ	: Mutlak geçirgenlik
η	: Histerezis katsayısıdır.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Taşıtlardaki en temel şarj sistemi	5
Şekil 2.2. (A) yıldız bağlantı tipi, (B) üçgen bağlantı tipi [1]	7
Şekil 2.3. Sırasıyla, rotoru silindirik ve rotoru çıkık makineler	8
Şekil 2.4. Tipik bir histerezis çevrimi [15]	10
Şekil 2.5. Eddy akımının izlediği yol [17]	11
Şekil 2.6. Laminasyonlu çekirdekte eddy akımları [17]	12
Şekil 2.7. Sargı izolasyonu [22]	18
Şekil 2.8. Yalıtım sınıfları şeması [23]	18
Şekil 2.9. Pençe tipi alternatör	22
Şekil 2.10. MRAP	23
Şekil 2.11. LEOPARD 2A4 içindeki alternatörün görevi	25
Şekil 2.12. Alternatörün bileşenleri	26
Şekil 3.1. Üretilecek rotor	27
Şekil 3.2. Tersine mühendislik ile güçlendirilmiş bir üretimin planlama ve analiz döngüsü	28
Şekil 3.3. Rotor imalat akış şeması	30
Şekil 3.4. Alternatör tasarım şeması	32
Şekil 3.5. Ansys maxwell analiz akışı	32
Şekil 3.6. Test akımı bileşenleri	33
Şekil 3.7. Sargı sıcaklığı-düzeltilme faktörü grafiği [36]	34
Şekil 3.8. Form verilmiş sargı örnekleri	38
Şekil 3.9. Biçimsiz sargı örnekleri	38
Şekil 4.1. Rotor	41
Şekil 4.2. İkaz rotoru (soldaki) ve rotor mili parçası, soğutma mili, ana rotor (sırasıyla)	41

Şekil 4.3. İkaz rotoru izolatör, ikaz göbeği, pompa tahrik mili , yağlama mili (sırasıyla)	41
Şekil 4.4. Rotor diski, disk presbantı ve bağlantı vidaları(soldaki), ve rotora ait vida, segman, pul ve burçlar (sağdaki)	42
Şekil 4.5. Ana rotor, sıkıştırma profilleri ve ana rotor sargısı(sırasıyla)	42
Şekil 4.6. Diyot tablası ve diyotlar	43
Şekil 4.7. Yarım dalga doğrultucu devresi	43
Şekil 4.8. İkaz rotoru gövdesi sac ve oyuk yapısı(mm)	50
Şekil 4.9. Ana rotor gövdesi sac ve yuva yapısı(mm)	50
Şekil 4.10. İkaz rotoru patlatma görüntüsü	50
Şekil 4.11. Montajlanmış ikaz rotorunun farklı açılardan 3 boyutlu modeli	51
Şekil 4.12. Ana rotor patlatma görüntüsü	51
Şekil 4.13. Ana rotorun montajlanmış 3 boyutlu modeli	52
Şekil 4.14. Rotorun katı modeli ve kesit görünümü	52
Şekil 4.15. FSI analiz kurgusunun Ansys Workbench yazılımdaki şematik gösterimi [56]	53
Şekil 4.16. Soğutucu yağın doldurduğu hacmin rotor içerisindeki görünümü [56]	55
Şekil 4.17. FSI analizi neticesinde rotor ana sargıları ve ikaz sargısındaki sıcaklık dağılımları	56
Şekil 4.18. Rotor devrine göre maksimum ana sargı ve ikaz sargısı sıcaklıkları ...	57
Şekil 5.1. Teknik çıktılar	58
Şekil 5.2. Taşlama öncesi rotor milleri ve yağ dolaşım mili	59
Şekil 5.3. Alan sargı rotor disk eksi tarafı delikler açılırken	59
Şekil 5.4. Ana rotor flanşı ve pompa tahrik mili	60
Şekil 5.5. İkaz sargı flanşları, ikaz sargı üstü kapatma, ikaz izolatörü (sırasıyla)	60
Şekil 5.6. Rotor alan sacları, rotor alan sargısı, izolatör(sırasıyla)	60
Şekil 5.7. Sıkıştırma profilleri ve sargı bağlantı pabuçla	60
Şekil 5.8. Kalıp sıkıştırma profilleri	61
Şekil 5.9. Diyot tablası ve bara	61
Şekil 5.10. Montajı yapılmış rotor mili	61
Şekil 5.11. Ana rotor silisli saçlarının paketlenmesi	62
Şekil 5.12. Bakır saçla paketlenen ana rotor silisli saçları	62

Şekil 5.13. Nüvenin fırınlanması ve rotor milinin montajı	63
Şekil 5.14. Ana rotor sargılarının sarılması	63
Şekil 5.15. Ana rotor montajı	64
Şekil 5.16. İkaz rotoru	65
Şekil 5.17. İkaz rotoru presbantlardan sonra izolasyon testi	65
Şekil 5.18. İkaz rotoru sargı uçlarının kontrolü	65
Şekil 5.19. Ana rotor izolasyon direncinin ölçülmesi	66
Şekil 5.20. Ana rotor zaman-direnç okuma testi grafiği	67
Şekil 5.21. İkaz rotorunun izolasyon direncinin ölçülmesi	68
Şekil 5.22. Rotorun balans ölçümü	69
Şekil 5.23. Rotorun iyi bir balansa sahip olması için fazlalıkların giderilmesi	70
Şekil 5.24. Rotor artık balanssızlık sonuçları	70
Şekil 5.25. Üretilen rotor	71

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. Elektrik izolasyon malzemelerinin sınıflandırılması [27-30]	19
Tablo 2.2. Balans tipleri	21
Tablo 3.1. Polarizasyon indeksi yorumlanması	37
Tablo 3.2. Dielektrik absorpsiyon yorumlanması	37
Tablo 3.3. İzolasyon direnci test geriliminin belirlenmesi	38
Tablo 3.4. Minimum izolasyon değerleri	38
Tablo 4.1. Rotora ait parçalar ve özellikleri	44
Tablo 4.2. Rotor parçalarının 3 boyutlu modelleri	46
Tablo 4.3. Rotora ait boyut bilgileri	49
Tablo 4.4. Devire göre ana sargı ve ikaz sargısında ortaya çıkan ısı ve ısı akısı miktarları [56]	54
Tablo 4.5. Rotorda kullanılan malzemelerin ısı iletim katsayısı değerleri [56]	54
Tablo 4.6. Soğutucu yağın fiziksel özellikleri [56]	55
Tablo 5.1. Rotor parçalarının üretim yöntemleri	59

ÖZET

Anahtar kelimeler: Alternatör, rotor, izolasyon direnci, yalıtım, tersine üretim

Bu çalışmada, ağır zırhlı araçlarda kullanılan, araç çalışma anındayken tüm elektrik ihtiyacını karşılayan akü grubunun şarj edilmesini sağlayan, 3 fazlı, 800 amper, fırçasız bir alternatör rotoru ele alınmıştır. Leopard 2A4 tanklarında kullanılan bu rotorlarda izolasyona bağlı arızaların meydana geldiği bilgisinden yola çıkılarak, rotorun yedek parça olarak kullanılabilir şekilde tersine üretim yöntemiyle üretimi sağlanmış, üzerinde izolasyon direnci analizleri yapılmıştır. Ürün yedek parça olarak kullanılacağı için boyut ve sargılarında herhangi bir değişiklik uygulanamamıştır.

Bir elektrik makinesinin ömrü, esasen yalıtımına bağlıdır. Rotor da bulunan sargıların ulaşabileceği maksimum sıcaklık simülasyon çalışmaları sonucunda 13000 d/dk'da 134,84 °C olarak belirlenmiştir. Rotor izolasyonunda bu değerden yola çıkılarak 180 °C'ye kadar dayanabilen H sınıfı elektriksel yalıtım malzemeleri kullanılmıştır. Ana ve ikaz rotoru olarak iki ana kısımdan oluşan rotora, izolasyon direnci analizlerinde spot okuma, zaman-direnç okuma ve adım gerilimi yöntemleri uygulanmıştır. Üç test de ana ve ikaz rotoruna ayrı ayrı uygulanmış ve rotor izolasyon analiz sonucu iyi olarak yorumlanmıştır. İzolasyon için delinme ve darbe dayanımının en kritik olduğu test olan adım gerilim testi sistematik olarak uygulanmıştır. Değişken adım gerilimlerinin tatbik edildiği bu test esnasında 5 saniye süre ile okunan ölçümlerde ana rotorda izolasyon direncinin 23 ile 392 Mohm seviyeleri arasında regülasyon gösterdiği görülmüştür.

Çalışma sonunda, üretilen rotorun izolasyon direncinin, IEEE STD 43-2013 standardının eşik değeri olan 5 Mohmdan büyük ve projede izolasyon direnci için hedeflenen 5-50 Mohm seviyesinde olma kriterinin sağlandığı görülmüştür. Ayrıca projede iyi olması hedeflenen rotor balansı, yaklaşık 0,489 g-cm balanssızlık miktarı sağlanarak elde edilmiştir. Bu balans değeri üzerinden üretilen rotor Kara Kuvvetleri Komutanlığı 1'inci Ana Bakım Merkezi Komutanlığı Tank Palet de test edilmiştir ve testi geçmiştir. Rotor yedek parça olarak kullanılmaya hazır hale getirilmiştir.

PRODUCTION AND INSULATION ANALYSIS OF 800 AMPERE, BRUSHLESS, 3 PHASE ALTERNATOR ROTOR FOR HEAVY ARMOR VEHICLES

SUMMARY

Keywords: Alternator, rotor, insulate resistance, isolation, reverse production

In this study, a 3 phase, 800-amp, brushless, oil cooled alternator rotor which is used for charging the battery pack in heavy-duty armored vehicles was handled. The rotor is used on the Leopard 2A4 tanks. Because the rotor has insulation failing, the tank doesn't work. Therefore, it was found necessary to reproduce with reverse manufacturing method for using as spare part, and insulation resistance analyzes carried out. No changes in size and windings of rotor have been applied for the product is to be used as the alternator spare part.

Life span of electric machine depends on mostly its isolation. As a result of simulation studies, maximum temperature was obtained 134.84 °C in windings of rotor at 13000 RPM. H class insulation electrical materials which can withstand up to 180 °C have been used in the rotor insulation due to this value. On the rotor which consists of two main parts as main and exciter rotor, spot, time-resistance and step voltage test methods were carried out in insulation resistance analysis. Three tests were applied separately to the main and exciter rotor and the rotor isolation analysis result was interpreted as good. The step voltage test, which is the most critical test for puncture and impact resistance on the rotor insulation, has been systematically applied. During this test, in which variable step voltages were applied, the readings measured for 5 seconds showed that insulation resistor was regulated between 23 and 392 megohm levels on the main rotor.

At the end of the study, it was found the insulation resistance of the produced rotor is greater than of 5 megohm which is the threshold value of the IEEE STD 43-2013 standard and targeted resistance level of 5-50 megohm is satisfied. Also the successful rotor balancing, which is another target in the project, is obtained by providing with unbalance amount of about 0,489 g-cm. The produced rotor has been tested and passed the test at the 1st Main Maintenance Center Command. The rotor is ready for use as spare part of the alternator.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Ülkelerin savunma sanayilerinin durumu; bağımsızlık durumlarının da göstergesidir. Savunma sanayisi bağımsız olmayan ülkenin siyasi ve ekonomik bağımsızlığından söz edilemez. Ülkelerin savunma sanayinde dışa bağımlı olması politik ilişkiler yüzünden tedarik edilemeyen, tedarik süresi uzatılan ürünler ve askeri prosedürler savaş gibi kritik durumlarda ülkeyi zora sokmaktadır. Bu ürünlerden biride aracın tüm elektronik gücünü karşılayan yüksek güçlü alternatörlerdir. Ağır araçların sürekli artan elektrik ihtiyaçlarına yönelik yüksek verim ve çıkış gücü için aşınmalara neden olan, bakım maliyetleri yüksek, ark yaparak sistemi tehlikeye atan ve elektromanyetik girişim miktarını artıran fırçalı tip yerine fırçasız tip, hava sürtünme kayıplarıyla verimi düşüren hava soğutma yerine yağ soğutmalı alternatörler kullanılmaktadır. Ülkemiz savunma sanayiindeki, özellikle muharebe tankları ve MRAP(mayına dayanıklı ve pusuya karşı etkin koruma sağlayan ABD yapımı zırhlı askeri arazi aracı)'lar gibi ağır zırhlı araçlarda 600, 800A alternatörlerin kullanımı oldukça yüksektir. Bu alternatörlerin kullanım sahalarından biri Kara Kuvvetlerinin belkemiği olan 15 ülkenin envanterinde bulunan ve ülkemizde de 354 adet envanter kaydı bulunan LEOPARD 2A4 tanklarıdır.

Silahlı kuvvetlerimizin yüksek güçlü alternatörlerin bütün veya yedek parça olarak yerli üretimine olan ihtiyacı her geçen gün daha stratejik bir önem kazanmaktadır. Milli Tank projesi bünyesinde üretilen ALTAY tankı için de yüksek güçlü alternatör ihtiyacının oluşumu bu duruma çok iyi bir örnektir. Yine bir diğer örnekte Almanya'dan kullanılmış olarak alınan LEOPARD 2A4 tanklarının şuana kadar %8 inde alternatör rotor arızası yaşamış olması ve rotorların kullanılmayacak duruma gelmesidir. LEOPARD 2A4 tanklarında kullanılan yüksek güçlü yağ soğutmalı fırçasız alternatörlerin bütün veya yedek parça olarak üretimi ülkemizde bulunmayıp hali hazırda tedariki dışarıdan alım yapılmasıyla karşılanmaktadır.

Bu tez çalışmasında da ülkemizde bir ihtiyaca dönüşen LEOPARD 2A4 tankına ait 28V 800A yağ soğutmalı 3 fazlı fırçasız tip alternatörün üretiminin sağlanmasında, ön ayak olan rotor kısmının, tersine mühendislik yönteminden yola çıkarak, rotorda kullanılan malzeme ve ekipmanların belirlenmesi, rotorun modelleme ve analizler sonucunda yerli üretim yapılarak, yüksek güçlü bir alternatör yedek parçasının bilgi kazanımlarının sağlanmasına yer verilmiştir. Çalışmada rotorun ömrünü azaltan izolasyon konusuna ağırlıklı olarak yer verilmiştir. Ayrıca SANTEZ programıyla desteklenen ve daha sonrasında TÜBİTAK' a devredilen 112D027(0983.STZ.2015) proje koduyla rotor üretimine maddi destek sağlanmıştır.

1.1. Tez Çalışmasının Amacı ve Katkıları

LEOPARD 2A4 tankları ikili anlaşmalar sonucu kullanılmış olarak ülkemize alınmıştır. Tanka ait bazı parçaların kullanım ömürlerinin dolması sonucu arızalar meydana gelmiştir. Bu parçalardan biride alternatörlerdir. Alternatör, tank çalışma anındayken tüm elektrik ve elektronik donanımlarının elektrik ihtiyacını karşılayan ve tank motoru çalışmıyorken yani tank silent watch (sessiz izleme) modda iken tankın elektrik ihtiyacını karşılayan akü gurubunun, şarj edilmesinde kullanılan makinedir. Bu tanklardaki alternatörlerin %8'sinde alternatör rotoru arızasından dolayı tanklar çalışamaz durumdadır. Bu yüzden yedek parça arayışı bulunmaktadır. Ancak rotorun yedek parça olarak alımı yapılamamakta, alternatörün tamamı olarak satın alınabilmektedir ve bu alternatörlerin fiyatı 60000 Euro civarındadır. Bu çalışma da bu alternatör rotoruna ilişkin bilgi kazanımını sağlanması ve tersine üretim yöntemi, rotor modelleme ve analiz çalışmalarıyla rotorun üretimi anlatılmış olup, K.K.K. 1. Ana Bakım Merkezi Komutanlığı Tank Palet den alınan bilgiye göre 354 adet tanktan 30 adedinin rotor arızalarının, sebeplerinde biri olan izolasyon direnci düşüklüğü probleminin giderilmesi üzerinde çalışılmıştır. Proje kapsamında 500 Volt da minimum 5 megohm ($M\Omega$) olması kabul gören izolasyon direncinin yaklaşık 50 $M\Omega$ seviyelerine çekilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca bir diğer önemli proje hedefi de rotor balanssızlık değerinin 1 g-cm'nin üzerine çıkmamasıdır.

1.2. Tez Organizasyonu

Çalışmanın ikinci bölümünde kaynak araştırması yapılarak alternatörlerin çeşitleri, kullanımları, içerdikleri malzemeler ve önemine dair bilgilerle birlikte, ağır zırhlı araçlardaki kullanımlarına ilişkin spesifik bilgilere yer verilmiştir. Üçüncü bölüm olan materyal ve yöntem bölümünde, tersine mühendislik yöntemi, neden bu yöntemin tercih edildiği ve rotor için uygulanacak adımlar ayrıntılı olarak incelenmiştir. Yine rotora uygulanacak izolasyon testlerine ait bilgiler ve prosedürler bu bölümde anlatılmıştır. Dördüncü bölümde tüm bu bilgi ve yöntemlerin uygulanmasıyla rotora ait ulaşılan tüm özelliklere ve üretim için elde edilen tüm bulgulara yer verilmiştir. Beşinci bölümde rotor üretimine ve izolasyon analizlerine ait sonuçlar sunulmuş, ortaya çıkan ürün ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Son bölüm olan değerlendirme kısmında ise çalışmanın sonuçları ve katkısı ile ilgili olarak genel bir değerlendirme yapılmıştır.

BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Alternatörler

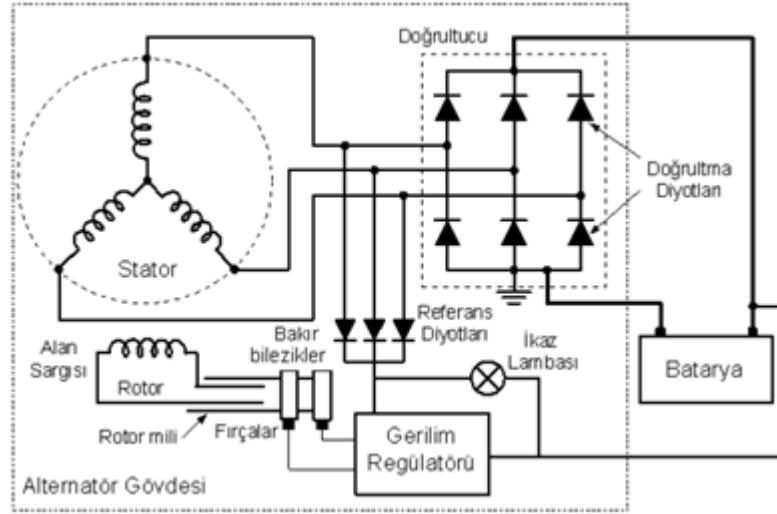
Elektrik jeneratörü, mekanik enerjiyi elektromanyetik indüksiyon ile elektrik enerjisine dönüştüren bir makinedir. Alternatif akım üreten jeneratörler AC jeneratör olarak adlandırılır ve bunlar için yaygın olarak alternatör kelimesi kullanılır [1]. Alternatörün amacı bir DC jeneratöre göre daha fazla güç üretmektir ve daha geniş bir hız aralığında çalışmaktır [2].

Modern araçların elektrik güç kaynağı sistemi, araçta bulunan çok sayıda elektrikli ve elektronik sistemlere elektrik enerjisi sağlamak için bulunur. Araçların her zaman kullanılabilir, son derece güvenli ve verimli enerji kaynağına ihtiyacı vardır. Motor çalışırken alternatör elektrik üretim tesisi haline gelir ve motor durduğunda araçtaki batarya enerji deposu olarak kullanılır. Sistemin tamamının güvenilir ve sorunsuz çalışabilmesi için, alternatörden çıkan elektrik gücü çok önemlidir [3,4].

2.2. Alternatör Çalışma Prensipleri ve Sınıflandırılması

Temel bir alternatör stator ve rotor olarak adlandırılan alanlardan oluşur. Stator bölümü akımın indüklendiği bölümdür [2]. Mekanik enerji motordan bir kasnak vasıtasıyla alınır ve rotor döndürülerek, stator sargılarında alternatif akım üretilir. Bu alternatif akım diyotlar ile doğru akıma çevrilerek bir bataryayı şarj etmesi sağlanır. Alternatif akım için gerekli olan manyetik alanın sağlanması için fırçasız alternatörlerde indüksiyon akımı, küçük makinelerde mıknatıs ve akım uygulanan fırçalar kullanılır. Rotoru uyararak için kullanılan akıma ikaz akımı denir. İkaz akımının değişmesiyle oluşan manyetik alan değişir. Manyetik alan değerinin büyüklüğü çıkış akımını etkilemektedir. Sabit mıknatıs kullanıldığında oluşan manyetik alan sabit olacağından çıkış akımı rotor devri ile değişecektir. Bu yüzden

sabit çıkış istenen durumlarda tek başlarına kullanılamazlar. Fırça ve indüksiyon akımı ile uyarılan alternatörlerde ise bataryayı doldurmak veya herhangi bir elektrikle beslenen cihazı beslemek için ikaz akımı kontrol edilir. İstenilen çıkış değerine göre ikaz akımını kontrol etmek için gerilim regülatörleri kullanılır. Şekil 2.1.'de taşıtlardaki en temel şarj sistemi gösterilmiştir [5].



Şekil 2.1. Taşıtlardaki en temel şarj sistemi

En temel jeneratör kontrol ünitesi (GCU) gerilim regülatörüdür. Her türlü regülatör birimlerinde, bir çıkış örneği alınır ve kontrollü bir referansla bu örneğin karşılaştırılması yapılır. İki arasında herhangi bir fark varsa gerekli terminal toleransları istenilen seviyede tutmak için jeneratör alan sargılarında ikaz ayarlamaları yapar [1].

Gerilim regülatörleri üzerine yapılan modern çalışmalarda elektromanyetik girişim bastırma, yumuşak kalkış koruması, ters polarite koruması ve yük boşaltma koruması yapılarak regülasyon başarımı artırılmaya çalışılmış, regülasyon bünyesine aşırı gerilimlerin etkileri için aşırı gerilim şalterleri konumlanmış ve regülatörün takibini CAN BUS gibi araç içi elektrikli ekipman haberleşme protokolü üzerinden yapabilecek çalışmalar yapılmıştır [6].

Alternatörler ikaz yöntemleri, faz sayıları, soğutma tipleri, uygulama alanları ve rotor tipleri gibi birçok şekilde sınıflandırılabilir.

2.3. İkaz Yöntemlerine Göre Sınıflandırma

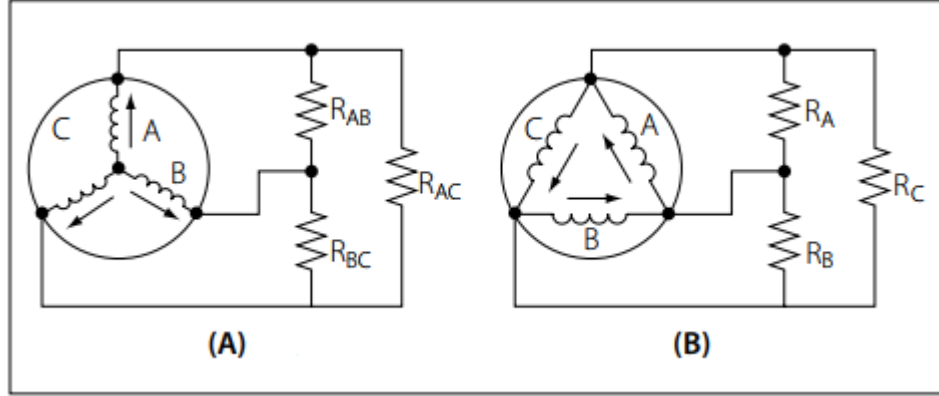
Direkt bağlı, doğru akım jeneratörü; DC jeneratör, AC jeneratöre aynı mil üzerinden bağlanmış olup, kendinden uyarımlı bu alternatörden sonra, uyarım için bataryalardan DC kullanan jeneratörün bir çeşididir. AC sistemden dönüştürme ve doğrultma; AC jeneratörden sağlanan doğrultulmuş gerilim, alan oluşturarak başlangıç AC geriliminin düzenlenmesini sağlar. Fırçasız tip ikaz; bu sistemde, bir alternatif akım jeneratörü ile aynı shaft üzerinde doğru akım üretici bulunur. Uyarma devresi fırça ve komütatör yerine silikon doğrultucular ile tamamlanır. Doğrultucular jeneratör mili üzerine monte edilmiştir ve bunların çıkışı alternatörün ana döner alanını besler [1].

2.3.1. Faz sayılarına göre sınıflandırma

Tek fazlı alternatörler gibi çok fazlı olarak iki, üç, altı veya daha yüksek sayıda faz içeren alternatörlerde kullanılmaktadır. Havacılıkta üç fazlı alternatörler tercih edilmektedir. 3 fazlı alternatörlerdeki sargılar, 120° faz farkıyla, birbirinden bağımsız olarak bağlanabileceği gibi yıldız ve üçgen bağlantı tipleriyle de aralarında bağlantı kurularak sarılabilmektedir.

Şekil 2.2.'de üçgen ve yıldız bağlantı şekilleri verilmektedir. Toplam altı uç olan üç fazlı alternatörün, her bir fazdaki kablolarının bir ucunun birbirine bağlanmasıyla oluşan yapı yıldız bağlantı olarak adlandırılır ve bu ortak uca nötr uç denir. Her yük üzerine seri bağlanmış iki faz karşılık gelmektedir. Toplam gerilim ya da herhangi iki faz arasında olan hat gerilimi bireysel faz gerilimlerinin vektörel toplamına eşittir. Dengeli koşullar için hat gerilimi, faz geriliminin $\sqrt{3}$ katına eşittir. Bağlanmış olan herhangi bir fazda ve hat akımında akım için yalnızca bir yol olduğu için hat akımı, faz akımına eşittir. Üçgen (delta) bağlantı ise faz uçlarının birbirine bağlanmasıyla elde edilir. Bu tip bağlantıda hat gerilimi faz gerilimine eşittir. Hat akımı ise faz

akımlarının vektörel toplamına eşittir yani hat akımı, faz akımının $\sqrt{3}$ katına eşittir [1].



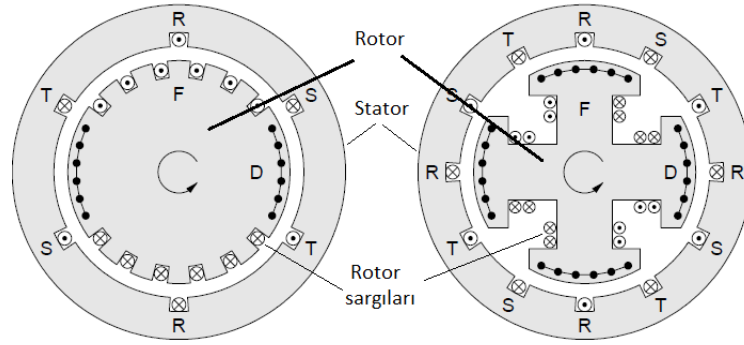
Şekil 2.2. (A) yıldız bağlantı tipi, (B) üçgen bağlantı tipi [1]

2.3.2. Soğutma tiplerine göre sınıflandırma

Su, hava ve yağ soğutmalı olarak üç tipi bulunur. Hava soğutmalı alternatörlerde, rotor ve stator tasarımı havanın geçişine izin verilecek şekilde olur. Bu stator ve rotor üzerinde kanallarla gerçekleştirilir. Ancak rotor yüzeyindeki pürüzlülük vantilasyon kayıplarını (hava sürtünme kaybı) artırır ve verimliliği etkiler. Hava partikülleri içindeki tozlar filtrelenmemesi sonucu alternatör içine parçacıklar alınarak bileşenler aşındırılmaktadır [2]. Yağ soğutmalı alternatörlerde yabancı madde girişini önlemek için tamamen kapalı olur. Soğutma yağı mili yağlamak için kullanılabilir. Vantilasyon kayıplarını azaltır, böylece alternatör verimliliği yüksek olur. Ancak yağın boşaltımı, taşınması, mühürler, kanallar, yardımcı eşanjörler, pompalar maliyeti artırır ve tasarımı daha karmaşık yapar [7].

2.3.3. Rotor tiplerine göre sınıflandırma

Rotoru çıkıntılı olan ve rotoru çıkıntılı olmayan olarak 2 tipi bulunur. Çıkıntılı olmayan rotora silindirik rotorda denilmektedir. Aşağıda Şekil 2.3.'de 2 tipi de bulunmaktadır [8].



Şekil 2.3. Sırasıyla, rotoru silindirik ve rotoru çıkık makineler

2.3.4. Senkron veya asenkron tipe göre sınıflandırma

Senkron makinelerde, üretilen gerilim dalga formu jeneratörün dönüşüyle senkronize edilir. Sinüzoidal dalga şeklindeki her zirve, rotorun fiziksel bir konuma karşılık gelir. Makinenin frekansı aşağıdaki denklem ile (Denklem 2.1) hesaplanır [9].

$$f = \text{RPM} \times \frac{P}{120} \quad (2.1)$$

f ; frekansı (Hz), RPM; rotor hızı (dakikada devir sayısı), p : stator sargıları tarafından oluşturulan kutup sayısını ifade eder. Asenkron jeneratörün çıkış frekansı bu hesaplanan frekanstan biraz daha düşüktür (genellikle % 2- 3). Devir sayısı sabitse, frekans, güç seviyesine göre değişir. Dalga formunun zirveleri, rotor konumu ile sabit bir ilişkiye sahip değildir.

2.4. Alternatörlerde Kullanılan Malzemeler

Alternatörde kullanılan malzemeler;

- Yumuşak manyetik malzemeler,
- Elektriksel iletken malzemeler,
- Yalıtkan malzemeler,
- Bazı durumlarda sabit veya sürekli mıknatıslar olarak sınıflandırılabilir [10].

2.4.1. Yumuşak manyetik malzemeler

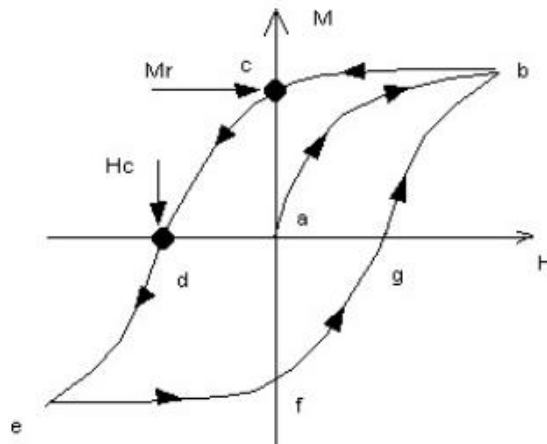
Yumuşak manyetik malzemeler çoğunlukla transformatörlerin, motorların, indüklerin ve AC, DC jeneratörlerin çekirdeklerinde kullanılmaktadırlar. Çekirdeklerdeki uygulamalar için yüksek geçirgenlik (permeabilite), düşük manyetik kayıplar ve düşük koersif kuvvet en önemli faktörlerdir. Büyük elektrik ekipmanlar için diğer önemli faktörler ise yüksek manyetik akı ve düşük maliyettir [11]. Manyetik alan, elektrik yüklerinin hareketi sonucu ortaya çıkan bir etkidir. Akım taşıyan bir bobinin ya da mıknatısın bulunduğu ortamda manyetik kuvvet olarak ortaya çıkan değişiktir. Yönü, doğrultusu ve şiddeti belirlenen vektörel bir büyüklüktür. Bir manyetik alan içinde birim yüzeyden geçen kuvvet çizgisi sayısı manyetik akı yoğunluğu olarak adlandırılır ve B simgesi ile gösterilen manyetik alan yoğunluğunu uluslararası birim sisteminde Wb/m^2 olarak gösterilen weber/metre² ile ölçülür. Manyetik akı ise belli bir yüzeyden geçen kuvvet çizgisi sayısıdır ve Φ simgesi ile tanımlanarak birimi Wb ' dir. Elektrik akımı taşıyan bir iletkenin bulunduğu ortamda meydana gelen manyetik alan ile bu akım arasındaki fiziksel ilişki, manyetik alan şiddeti olarak adlandırılan H ile belirlenir. Uluslararası birim sisteminde A/m simgesi ile gösterilen amper/metre ile ölçülür [12]. Geçirgenlik, bir malzemenin kendi içinde bir manyetik alan oluşumunu destekleme kabiliyetinin ölçüsüdür [13]. Mutlak manyetik geçirgenlik, μ , aşağıdaki eşitlik kullanılarak (Denklem 2.2) hesaplanır ve malzemenin akıyı iletme yeteneği anlamına gelmektedir. μ ' nün değeri ne kadar büyük ise belirli bir manyetik akı yoğunluğunun manyetikliğini elde etmek için uygulanması gereken manyetize edici kuvvet yani H o kadar küçük olabilir [14].

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (2.2)$$

Koersif kuvvet değeri, H_c , kalıcı manyetikliği yok etmek için ters yönde uygulanması gereken manyetize edici kuvvetin büyüklüğünü gösterir [14]. Yumuşak manyetik malzemelerde $H_c < 1000 \text{ A.m}^{-1}$ ' dir. Kolay manyetikleşirler ve kalıcı manyetiklikleri düşüktür.

Alternatif manyetik alanda çalışan manyetik malzemede meydana gelen demir kayıpları veya nüve kayıpları iki bileşene ayrılır: histerezis kaybı ve eddy akımı kaybı [10].

Histerezis çevrimi, tam bir mıknatıslanma periyodunda malzemenin H ile B ya da H ile M sembolüyle gösterilen manyetizasyon arasındaki ilişkiyi verir. Şekil 2.4.'de tipik bir histerezis çevrimi gösterilmektedir. Malzemeye H manyetik alan uygulandığında, bu manyetik alan M mıknatıslanmasına neden olur. Mıknatıslanma maksimuma eriştiğinde, ortamdaki H 'nin kaldırıldığını varsaydığımızda ferromanyetik malzeme üzerinde bir kısmı mıknatıslanma kalmaya devam edecektir. Yani H alanı ortadan kalksa bile M değeri sıfıra düşmeyecektir. İşte bu özelliğe geride kalmak anlamına gelen histerezis denir. Şekil 2.4.'de görüldüğü gibi ferromanyetik bir malzemeye H uygulandığında malzeme a yolunu takip eder ve malzeme manyetizasyonu artarak maksimuma ulaşır. Bu maksimum manyetizasyon doyum manyetizasyonudur (M_s). Bu noktada, b noktası, H alanı kaldırıldığında, c yolu izlenir, malzemenin manyetizasyonu sıfıra düşmez ancak bir değerde azalır. Bu değer remanans, artık ya da kalıcı mıknatıslanma (M_r) 'dır. Bundan sonraki nokta mıknatıslanmayı yani manyetizasyonu sıfıra indirmek için ters yönde bir manyetik alan uygulanmalıdır. İşte bu zorlayıcı kuvvet yukarıda bahsedilen H_c değeridir [15]. Malzemenin malzemeye bu çevrim değişikliği göstermektedir. Ancak alternatiflerde istenilen dar bir histerezis aralığı gerektirdiği için yumuşak manyetik malzemeler tercih edilir.



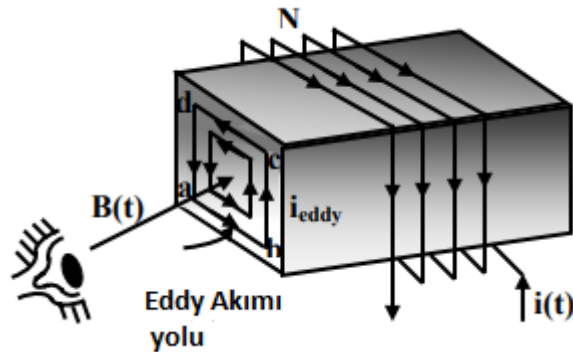
Şekil 2.4. Tipik bir histerezis çevrimi [15]

Steinmetz aşağıdaki eşitliği (Denklem 2.3) kullanarak histerezis kaybını ifade eden deneysel bir formül geliştirmiştir [10].

$$P_h = \eta B^n f \quad (2.3)$$

Formülde η değeri her malzeme için değişen histerezis katsayıdır. n değeri ise Steinmetz sabitidir ve 1,5 ile 2 arası değerde değişmektedir. f manyetizasyon frekansdır ve birimi Hz' dir. B maksimum manyetik akı yoğunluğudur. Bu değerler yerine konulduğunda m^3 ya da kg başına Watt ya da j/s olarak histerezis kaybı, P_h , bulunur [10-17].

Eddy ya da Foucult kayıpları olarak da adlandırılan girdap akım kayıpları, alternatif akım ya da zamanla değişen alanların söz konusu olduğu durumlarda malzemede ya da çekirdekte ortaya çıkan ısı (Joule) kayıplarıdır. Faraday yasasına göre zamanla değişken bir alan içinde bulunan iletkenlerde bir gerilim endüklenir. Endüklenen bu gerilimler sonucu oluşan akımlar moleküller arasında çevrimini tamamlamaya çalışır ve böylece ferromanyetik malzeme, birçok kısa devre olmuş sargılar gibi davranır. Meydana gelen eddy akımları, manyetik alan frekansında olacağından elektronların birbirine sürtünmeleri neticesinde moleküller ve moleküllerin teşkil ettiği kısımlar ısınır. Isı kaynağı teşkil eden bu kısımlardan cidarlara doğru bir ısı akışı meydana gelir ve cisim ısınır dolayısıyla ısı kayıpları ortaya çıkar [12]. Şekil 2.5.'de eddy akımının izlediği yol verilmektedir [17].



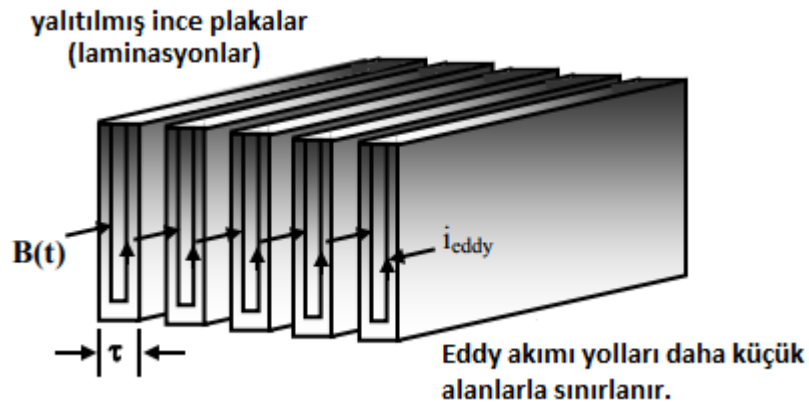
Şekil 2.5. Eddy akımının izlediği yol [17]

Meydana gelen eddy akımları, manyetik alanın frekansı yanında malzeme cinsi, yapısı ve boyutlarına bağlıdır. Eddy akımları, sadece malzemenin ısınmasına değil, aynı zamanda kendisini oluşturan alana ters yönde olacağından manyetik alanın da zayıflamasına neden olurlar [12]. Eddy akımı kayıpları, aşağıdaki denklemdeki (Denklem 2.4) gibi bulunur [12].

$$P_{\text{eddy}} = \frac{\pi^2 f^2 B_m^2 \tau^2 V}{6\rho} \quad (2.4)$$

B_m ; maksimum manyetik akı yoğunluğunu, Tesla (Wb/m^2), τ ; malzemenin kalınlığını (m), V ; malzemenin hacmini (m^3) ρ ; malzemenin öz direncini, (Ωm) ve f manyetik alanın frekansını ifade eder ve Watt olarak eddy akımı kayıpları bulunur.

Şekil 2.6.'da yalıtılmış ince plakalar halinde malzemenin kalınlığı düşürüldüğünde eddy akımının yolları gösterilmiştir [17].



Şekil 2.6. Laminasyonlu çekirdekte eddy akımları [17]

Eddy akım kayıplarını azaltmak için, levha kalınlığının, başka bir deyişle saç kalınlıkları mümkün olduğu kadar küçük olmalı, eddy akımlarının devreleri de birer elektriki devre olduğundan akımların bir levhadan diğerine geçmesi ile levhalar arasında büyük akım yollarının oluşmaması için levhalar birbirinden izole edilmelidir, ayrıca öz direnci artırmak için özel alaşımlar kullanılır. Saç levhaların kesilmesi ve işlenmesi esnasında levha kesim ve işleme yerlerinde sertleşme

meydana gelir. Bu yüzden eddy akım kayıpları artar. Diğer taraftan işlenen ve kesilen kısımlarda pürüzler meydana gelir. Bunun gibi levhalar arasında bulunan izole edici tabakanın muhtelif yerlerinde sürtünme ve hatalı baskı kuvveti ile neticesinde zedelenme ve delinme, levhaların girdap akımları için kısa devre teşkil etmesine neden olurlar. Tüm bu nedenlerden dolayı formüllerle hesaplanan kayıplardan daha büyük eddy akım kayıpları söz konusu olur [12].

Demir, silikon-demir ve alüminyum-demir alaşımları, yüksek güçlü makinelerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, bazı kritik uygulamalar için, permalloy, superalloy (süper alaşım), çeşitli tipte amorf ve nano yapıları alaşımlar gibi daha pahalı malzemeler daha uygundur [11].

Demir; en büyük miktarda kullanılan yumuşak manyetik malzemedir. Demirde büyük girdap akımları oluştuğundan çok ısınır, yüksek frekanslı uygulamalara elverişli değildir.

Demir-silikon alaşımları; demire ağırlıkça %3 silisyum katılarak demirin geçirgenliğinin ve elektrik direncinin arttığı ve koersivitesinin düştüğü görülür [14]. Elektriksel direnç artımı ve koersivitesinin düşmesi malzemedeki eddy akımlarını indirir. Ancak eddy akımları yüksek frekansta artacağı için bu karışım yüksek frekans içeren uygulamalarda tercih edilmemelidir. Ayrıca uygulamalarda yaygın olarak kullanılan bu karışım doyum manyetizasyonunu hafif miktarda düşmesine de neden olur [11]. İlâveten demire % 5'den daha fazla silikonun eklenmesi demiri kırılgan hale getirerek üzerinde çalışmayı aşırı derecede zorlaştırır. Bu ticari malzemedeki maksimum silikon içeriğini % 3,4 ile sınırlar (ve tanecik yönlendirmeli çelik için yaklaşık minimum % 2,2 olan bu değerin aşağısında düzgün bir yönlendirme başarısızdır). Silikonun pahalı olmayan bir element olması dikkati çekebilir fakat yumuşak demire göre silikonlu demir malzemeler, alaşımın mekanik ve ısıl işlem yapılmasından dolayı daha pahalıdır [10]. Dökme demir-silisyum alaşımlardaki tanelerin rastgele yönelimleri, manyetik doyma yalnızca koersiviteden oldukça yüksek manyetik alanlar uygulanarak elde edilebilir. Bu, yararlı maksimum manyetik akıyı yaklaşık 1 T ile sınırlar [11]. 0 ile % 3 arasında silikon içeren

yönlendirilmemiş elektrik çelikleri temelde izotropiktir. Bunlar 1,3 m'ye kadar genişliğinde ve 0,35 - 0,8 mm kalınlığında şeritler olarak üretilir. Yönlendirilmemiş laminasyonlar zımbalamaya ve nüve fabrikasyonuna hazır olarak tamamen tavllanmış (anneal) veya yarı işlenmiş durumda bulunabilir. Yarı işlenmiş durumda (kısmi dekarbürize edilmiş veya karbonu alınmış) malzeme yarı sertlikte olup takım ömrünü artıracak şekilde daha iyi zımbalama avantajı taşımaktadır. Bununla beraber yarı işlenmiş bir malzeme üzerinde son bir gerilme yumuşatma işleminin yapılması gerekir ve manyetik özelliklerini tamamen geliştirilmesi için (kimyasal kompozisyonuna bağlı olarak) 800 °C ve 840 °C arasında karbon giderici ısıtma işlemi yapılması zorunludur. Yönlendirilmemiş yarı işlenmiş laminasyonlar 1,5 T ve 50 Hz de 0,5 mm ve 0,65 mm standart kalınlıklarda bulunur ve bunların tipik özgül kayıp değerleri (W/kg) sırasıyla 4,55 – 5,5 ve 6,0 – 7,1 aralığında bulunmaktadır. Tam işlenmiş malzemenin standart kalınlıkları 0,35 mm, 0,50 mm ve 0,65 mm ve 1,5 T ve 50 Hz'de garanti edilen özgül kayıp değerleri (W/kg) sırasıyla 3,0 - 4,0 - 8,0 dir [10].

Demir-nikel alaşımları; bu alaşım sistemi % 5-30 arası Nikel içeren dönüşümlü (reversible) ve % 30-100 arası nikel içeren dönüşümsüz (irreversible) olmak üzere iki bölgeden oluşur. Dönüşümsüz alaşımlarda yüksek sıcaklıktan soğuma sırasında yüzey merkezli kübik yapıdan hacim merkezli kübiğe geçiş görülür. Bu olaydan dolayı çeşitli manyetik özellikler termal histerezis gösterirler ve bu sebepten dolayı dönüşümsüz alaşımlar olarak adlandırılırlar. Dönüşümsüz alaşımlarda tek faz yüzey merkezli kübik yapı görülür. %21.5 demir içeren Fe-Ni alaşımına permalloy denir. Bu yapıda 600°C 'den hızla soğutulmuş olarak yönlenme bastırılmış olur ve en yüksek geçirgenliğe ulaşılır. Az miktarda Mo (molibden), Cr (krom) veya Cu (bakır) eklenmesiyle de yönlenmenin önüne geçilebilir. % 5 Mo, %79 Ni-Fe alaşımına supermalloy denir [14].

Demir-kobalt alaşımları; kobalt demirin içerisinde %75'e kadar çözünebilir. Hacim merkezli kübik yapıdadır. %50 Co-Fe alaşımı ticari olarak Permendur ismiyle bilinmektedir [14]. Tipik olarak en yüksek doyma akı yoğunluğunu, 2,35 T sunmaktadır. Bunların elektrik makinasında kullanılmasına göre iki çeşidi tanımlanmıştır. 24 Permendur ve 49 Permendur. % 24 kobalt içeren 24 Permendur

alaşımı manyetik kutup başları gibi kompleks biçimlerin parçalarının biçimlendirilmesine izin verecek şekilde dökümü yapılabilir. % 49 kobalt ve % 2 V (vanadyum) ile 49 Permendur' un sıcak ve soğuk haddelenmesi mümkündür ve mekanik özellikleri geliştirilir. Böyle bir alaşım maliyetine rağmen yüksek akı yoğunluğunun hacim ve ağırlıkta azalma sağladığı uçak generatörleri ve bazı 400 Hz motorlarda önemli uygulamalar bulmaktadır. 24 Permendur alaşımı sadece % 24 kobalt içerdiğinden 49 Permendur'dan daha ucuzdur [10].

Amorf yapılı malzemeler; bu alaşımlar bir veya daha çok geçiş metali (Fe, Ni, Co gibi) ve bir veya birden çok metaloiden (B (bor), Si (silikon), C (Karbon) vb.) oluşmaktadır. Eriyik çok hızlı bir şekilde soğutulur, ince şerit şeklinde (~ 50 µm) sürekli dökümle üretilirler. Kalınlıkları kâğıttan daha incedir. Bileşim, yapı ve üretim yöntemlerine göre birçok metalik cam manyetik malzeme olarak kullanılamasa da bazı alaşımlar (ör; %79 Fe-%13 B-%8 Si) yüksek doyum akımı, düşük koersivite, yüksek geçirgenlik ve düşük çekirdek kaybı gibi yumuşak malzemelerin gerektirdiği bütün özelliklere sahiptirler. Düşük anizotropi ve tane sınırlarının eksikliğinden dolayı domenlerin çekirdekleşmeden kolayca dağılmalarına imkan sağlamaktadır. Bunun yanında, düşük süneklikleri, yüksek maliyetleri ve yaşlandırmadaki kararsızlıkları göz önünde bulundurulmalıdır [18].

2.4.2. Elektriksel iletken malzemeler

İletken malzemelerin olabilecek en yüksek iletkenlikte ve direnç sıcaklık katsayısının en düşük olması istenilir [10].

Bakır; saf (alaşımsız) bakırın kullanımının başlıca nedenleri yüksek elektriksel, ısı iletkenliğe ve korozyon direncine sahip olmasıdır. Oksijensiz bakırlar yüksek iletkenlik ve olağanüstü süneklik gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu özellikleri ile bakır; elektriksel iletkenliğinden dolayı kablo üretiminde, ısı iletkenliğinden dolayı da ısıtma/soğutma sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [19]. Bakır, gümüş dışında en yüksek ısı ve elektriksel iletkenliği haiz metal olup saf metal sünek ve haddelenebilir haldedir [20]. Tüm bu

özelliklerinde dolayı da elektrik makinelerinin sargılarında en yaygın olarak kullanılan elektriksel iletkenlerdir. Yalıtkan vernik ile kaplanmış yuvarlak bakır iletken teller, dünyanın her yerinde küçük elektrik makinalarının sargılarında kullanılır [10]. Pratikte bakır içerisinde oksijen genellikle %0,025 ile 0,05 arasında tutulur. En önemli bakır türü %99,9 saf yüksek iletkenlik bakır olup elektrik makinesi sargılarında kullanılan bu türdür. Bakırın çekme dayanımı alaşımlama ile artırılabilir ama her dayanım artışına karşılık iletkenlik azalması vaki olur; örneğin, %10 alüminyum ilâvesi, çekme dayanımını iki katına çıkarır ama iletkenliği de altıda bir indirir. % 0,8 civarında kadmiyum bakırla alaşımlandırıldığında iletkenlik, saf bakırınkinin onda dokuzu olur, buna karşılık soğuk işlenmiş (çekilmiş, haddelenmiş vb.) alaşımın çekme dayanımı çok artar [20].

Alüminyum; alüminyum 2,7 g/cm bir yoğunluğa sahiptir. Düşük yoğunluğa sahip olmasına rağmen çok iyi mukavemet özellikleri sergiler. %99,996 saflıktaki alüminyumun çekme mukavemeti yaklaşık 49 MPa iken alaşımlandırıldığında veya ısıtma işlem yöntemi uygulaması sonucu bu değer 220 MPa'a kadar çıkabilmektedir. Sünnek bir malzemedir. Kolaylıkla dövülebilir, makinede işlenebilir ve dökülebilir. Çok üstün korozyon özelliklerine sahip olması, üzerinde oluşan oksit tabakasının koruyucu olmasındandır [21]. Alüminyum hafif olmasından ve iyi elektrik iletkenliğinden dolayı elektrik iletim hatlarında, baralarda ve ısıtma/soğutma sistemlerinde kullanılır.

Makinenin bakır kaybı, aşağıdaki denklemde verildiği gibi (Denklem 2.5) iletkenlerinden geçen akım yoğunluğunun karesi ile orantılıdır.

$$P_b = I^2 \cdot R \quad (2.5)$$

P_b değeri sargılarda ortaya çıkan ısı (Joule) kayıplarını verir. Kullanılan iletken akım yoğunluğunun seçimi bu yüzden izin verilen sıcaklık artışı ile sınırlanır. Makinenin izin verilebilen maksimum sıcaklık yüklemesi kullanılan yalıtkan malzemelerin tipi ile belirlenir. Örneğin pamuk gibi A sınıfı organik malzemeler 105 °C'ye kadar

sıcaklığa dayanabilirken polyester filmleri gibi H sınıfı inorganik malzemeler daha yüksek sıcaklıklarda (180 °C civarında) çalışabilir [10].

2.4.3. Yalıtım malzemeleri

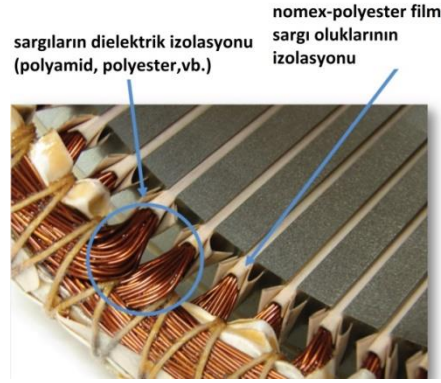
Alternatörlerde farklı gerilimlerde akım taşıyan muhtelif iletkenler arasında ısı akışını engellemeden içinde buldukları oyuklar arasında elektriksel yalıtımı sağlayan yalıtkan malzemeler, yüksek dielektrik dayanımı, yüksek öz dirençleri ve yüksek ısı iletkenlikleri ile karakterize edilir [10]. Yalıtım malzemeleri konusu, alternatör parçalarının izolasyonu ve izolasyon testleri başlıklarında ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

2.4.3.1. Alternatör parçalarının izolasyonu

Alternatörde kullanılan ekipmanlarda ısıya dönüşen kayıplarla ilgili bilgiler verilmiştir. Uzun süre yüksek sıcaklıklarda çalışma, elektriksel ve mekanik olarak olumsuz etkiler oluşturacağından dikkat edilmesi gereken bir konudur. İyi bir alternatör tasarımında malzemelerden tamamen yararlanılmış olması ancak yeterli yalıtım ve soğutma sistemleri sağlanmasıyla mümkündür. Bunlar alternatörün ömrü ile doğrudan ilgilidir.

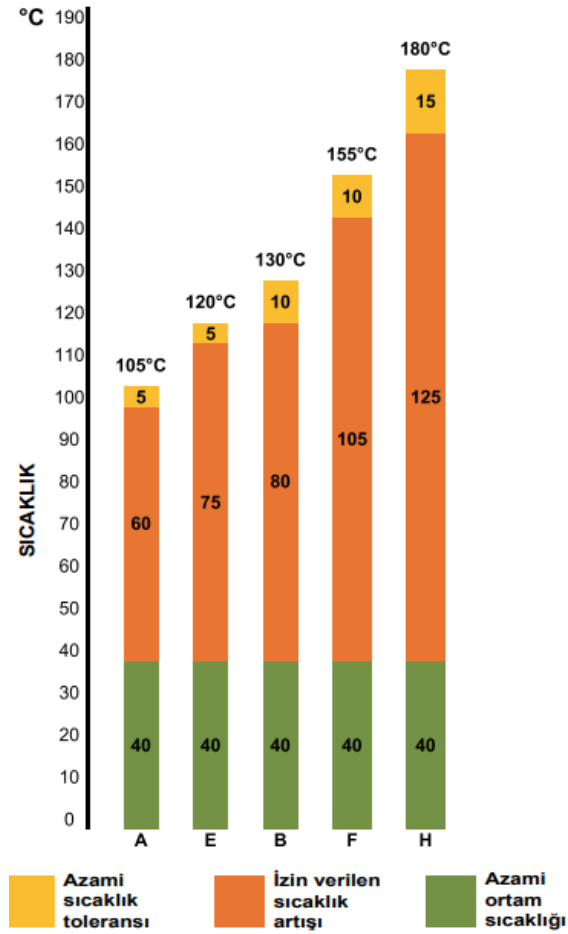
Alternatör tasarımı yapılırken kullanılan yalıtkan malzemelerinin bütün çalışma şartları altında beklenen sıcaklık artışına dayanabilmesi garantiye alınmalıdır. Ayrıca elektrik makineleri arızalarının çoğunlukla ısı streslerinden olmasından dolayı alternatörün yalıtım ve soğutma sistemi uygunluğuna dikkat edilmelidir [10].

Sargıların izolasyonuna ait tipik bir görsel Şekil 2.7.'de verilmiştir. İyi yalıtım malzemesinin temel şartları; yüksek dielektrik mukavemeti, yüksek yalıtkanlık direnci, düşük dielektrik kaybı, iyi mekanik mukavemet, iyi ısı iletkenliği, yüksek derecede termal kararlılık ve kitlesel üretim için iyi işlenebilirliktir [23]. Makinelerin elektriksel izolasyonları üzerine incelemeler, daha iyi elektriksel yalıtım ve bu yalıtkanlığı etkileyen zorlamalar üzerine çalışmalar yapılmaktadır [24,25].



Şekil 2.7. Sargı izolasyonu [22]

Elektrik makinelerin izolasyon malzemelerinin termal sınıflandırılmaları IEC- 60085 standardında verilmiştir. Bu sınıflandırma dayanılan sıcaklığa göre yapılmıştır. Şekil 2.8.'de bu sınıflandırmaya ilişkin şema yer almaktadır.



Şekil 2.8. Yalıtım sınıfları şeması [23]

Şekil 2.8.'de belirtilmemiş de olsa 90°C ye kadar sıcaklık sınırı bulunan Y sınıfı ve 180°C 'nin üzerine dayanabilen izolasyon malzemeleri C sınıfı olarak belirlenmiştir. F ve H sınıfı yaygın olarak yüksek güçlü elektrik makinelerde kullanılmaktadır. Yapılan sınıflandırmalara göre Tablo 2.1.'de çeşitli izolasyon malzemeleri kategorize edilerek gösterilmektedir [27-30]. İletkenlerin üzerinin kaplanması için yüksek güçlü elektrik makinelerinde polyester, polimid ve polyesterimid emaye olarak yaygın bir şekilde kullanılır. Sargıların izolasyonu için çok katmanlı ince nomex kraft gibi yalıtım kağıtları (presbantlar) kullanılmaktadır. Bu kağıtların katmanlarında C sınıfı kompozit malzemeler kullanılarak kağıtların yalıtım sınıfı artırılır [10]. NMN (Nomex – Mylar polyester film – Nomex) 3 katmanlı bir presbanttır.

Tablo 2.1. Elektrik izolasyon malzemelerinin sınıflandırılması [27-30]

İzolasyon sınıfı	Malzemeler
Y	Emdirilmemiş pamuk, ipek, kağıt.
A	Uygun şekilde emdirilmiş, kaplanmış veya dielektrik yağlara daldırılmış, pamuk, ipek, kağıt.
E	Sentetik reçine ve emaye tel reçineleri, selüloz, triasetat film, fenol reçineler, epoksi emaye tel reçineler, polivinil klorür (pvc).
B	Mika, cam elyaf, emdirme ve kaplama maddeleriyle yapıştırılmış asbest, gomalak(shellac), asfalt, bitüm(zift), sentetik reçineler, poliüretan reçineler, alkid reçineler.
F	Alkid, epoksi ile oluşturulan mika, fiberglas, asbest. Çapraz bağlı polyester. Silikon alkid reçineler, poliüretan.
H	Uygun yapıştırma ve emdirme materyalleri ile mika, cam elyaf gibi malzemelerin birleştirilmesi ve silikon elastomeri.
C	Cam ve cement gibi inorganik birleştiriciler ile mika, cam, porselen, kuvars, asbest. Silikon ve poliamit reçineler, politetrafloroetilen seramik.

Sıcaklıktaki oldukça küçük bir artış yalıtım malzemesinin servis ömrünü bariz ölçüde azaltır. Isıya bağlı sınıflandırılmış organik malzemelerin servis ömrü aşağıdaki eşitlikteki (Denklem 2.6) gibi ifade edilir [10];

$$t = Ke^{-\alpha\theta} \quad (2.6)$$

t; yıl olarak servis ömrü, θ ; °C olarak çalışma sıcaklığı, K ve α ; sabitlerdir. Tipik olarak K $7,15 \times 10^4$ yıl ve A sınıfı yalıtım malzemeleri için α 0,08 seçilebilir. Buna göre A kategorisinde olan bir malzeme 100 °C ve 105 °C arası sıcaklıklarda 16 - 24 yıl boyunca güvenilir fonksiyonda çalışabilirken, çalışma sıcaklığının 115 °C olması durumunda malzemenin ömrü 7 yıla düşecektir. Dolayısıyla alternatörün muhtelif parçalarının çalışma sıcaklığının doğru olarak tahmin edilmesi önemlidir.

2.4.4. Sabit veya sürekli mıknatıs

Uyartım alanı meydana getirmek için bazı elektrik makinelerinde sabit mıknatıslar elektromıknatısların yerine kullanılmakta olup bu sabit mıknatıslar temel kimyasal kompozisyonlarına göre alnico, seramik, ferrit ve nadir toprak mıknatısları olarak gruplandırılmaktadır [10]. Büyük B-H eğrilerine, yüksek kalıcı akı yoğunluğuna ve yüksek koersiviteye sahip olan bu mıknatıslar uyarma ihtiyacı olmadan manyetik alan üretirler.

2.5. Çevre Testleri ve Balans

Çevresel testler askeri ve sivil amaçlı kullanılan alt sistem ve sistemlerin ömür devirleri boyunca karşı karşıya kalabilecekleri doğal çevre şartlarına dirençlerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilmektedir. Bunun için birtakım standart testler bulunmaktadır.

MIL-STD-810G metot 501.5; bu test yüksek sıcaklık testidir. Yüksek Sıcaklık Testi, teste tabi olan numunenin yüksek sıcaklık şartlarında performansı, dayanımı, bütünlüğü ve güvenilirliğinin belirlenmesi için yapılır. Bu test için, yüksek sıcaklık ve

istendiğinde nem şartlarını sağlayacak ve izleyecek yardımcı ekipmanları da barındıran yalıtımlı özel bir iklimik oda veya kabinler kullanılır. MIL-STD-810G metot 502.5; düşük sıcaklık testidir. Teste tabi olan numunenin, çalışması, depolanması ve taşınması sırasında oluşabilecek düşük sıcaklık şartlarındaki performansı, dayanımı, bütünlüğü ve güvenilirliğinin belirlenmesi için yapılır. MIL-STD-810G metot 507.5; nem testidir. Numunenin veya malzemenin ılıman, sıcak ve yüksek nem ihtiva eden atmosferik şartlara dayanımının belirlenmesi için yapılır. Sıcaklıkla beraber nem kontrolü de yapabilecek kapasitede iklimik oda veya kabin gerekir. Basınç, sıcaklık ve nem sensörleri kullanılır [37].

Alternator rotoru bir mil üzerinde döneceği için balans önemli bir konudur. Bu konuyla ilgili olarak MIL-STD-167-1A ve ISO 1940 BALANCING standardı bulunmaktadır [38,39]. ISO 1940 standardında rotorun özelliğine göre balans kalite sınıfları ve değerleri mevcuttur. İzin verilen maksimum artık dengesizliği aşağıdaki eşitlikteki gibi hesaplanır (Denklem 2.7).

$$U = 9549GW/N \quad (2.7)$$

U; maksimum izin verilen artık dengesizliktir (g-mm), G; belirtilen toplam denge kalite derecesi (mm/sec), W; rotor ağırlığı (kg) ve N; maksimum rotor devrini (RPM) ifade etmektedir [38].

Tablo 2.2. Balans tipleri

Rotor karakteristiği	Hız (RPM)	Balans tipi
Kati, $L/D \leq 0.5$	0-1000	tek plane
	>1000	iki plane
Kati, $L/D \geq 0.5$	0-150	tek plane
	>150	iki plane
Esnek rotor	Tüm hızlarda	Çoklu plane

MIL-STD-167-1A standardın da yer alan ve Tablo 2.2.'de bulunan L; rotor uzunluğu, D; rotor çapı ve rotorun servis hızına göre balans dengeleme tipi belirlenir. Bu standardına göre ise $G \leq 2,5$ mm/sec olmalıdır ve 1000 devrin üzerindeki rotorlar

için $G \leq 1$ olmalıdır. Eğer rotorda iki düzlem dengeleme kullanılacaksa $1 \leq G \leq 2,5$ mm/sec arasında olmalıdır [38].

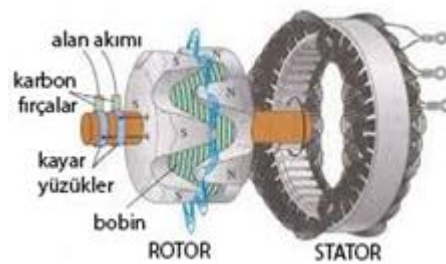
Grade değeri kullanılmadan MIL-STD-167-1A standardına göre kalıcı balanssızlık değerine ilişkin başka bir denklem aşağıda Denklem 2.8 de yer almaktadır [39]. U; birimi (oz-in), W; lbs ve N; RPM birimindedir. 1 oz-in 720 g-mm'ye eşittir.

$$U = 4W/N \quad (2.8)$$

2.6. Taşıtlarda Alternatör Kullanımı

Alternatör ve uygun bataryayı belirlemek için araç tipi, çalışacağı hava koşulları, sürüş koşulları, üzerindeki elektrik yük ihtiyacı gibi faktörler etkindir. Gerçek sürüşte hava ve sürüş şartlarına bağlı olarak alternatörün maksimum çıkış akımı motor devrine ve elektrik yük talebine göre değişir [43].

Otomobillerde en yaygın olarak Lundell (pençe) tip alternatör kullanılır. Lundell tip alternatörün avantajı; basit bir rotor yapısına sahip olması ve çıkış akım sargılarının sabit olmasıdır. Dezavantaj ise; hava direnci kayıplarının olması, kayar bilezik ve fırça kullanılmasıdır [2]. Şekil 2.9.'da tipik bir pençe tipi alternatöre ait stator, rotor ve ikaz ekipmanları gösterilmektedir.



Şekil 2.9. Pençe tipi alternatör

Uçaklarda genelde fırçasız 3 fazlı alternatörler [1], ağır zırhlı araçlarda ise yüksek çıkış akımı için fırçasız alternatörler kullanılmaktadır [6].

2.7. Ağır Araçlarda Alternatör Kullanımı

Çoğu askeri araçlar artık bir AC şarj sistemi ile donatılmıştır. DC generatörler rölantide çok az gerilim üretirken alternatörler rölantide yüksek gerilim üretebilmektedir [2].

Muharebe tankları, MRAP, MTRV ve MATV (orta boyutlu taktik askeri araçları) gibi ağır araçlarda elektrik ihtiyacı artan elektrikselsel bileşenler dolayısıyla tırmanma eğilimindedir. Bu tip araçların elektrik ve elektronik donanımlarına güç sağlayan alternatörlerin verimliliğini ve çıkış gücünü artırmak önemli bir gereksinimdir. 2011 yılında MRAP 'larda (Şekil 2.10.) 400A alternatör kullanılırken günümüzde bu değer 800A'e kadar çıkmıştır. Artan elektrik ihtiyacına göre bu değer 1000A'i bulacağı öngörülmektedir [44].



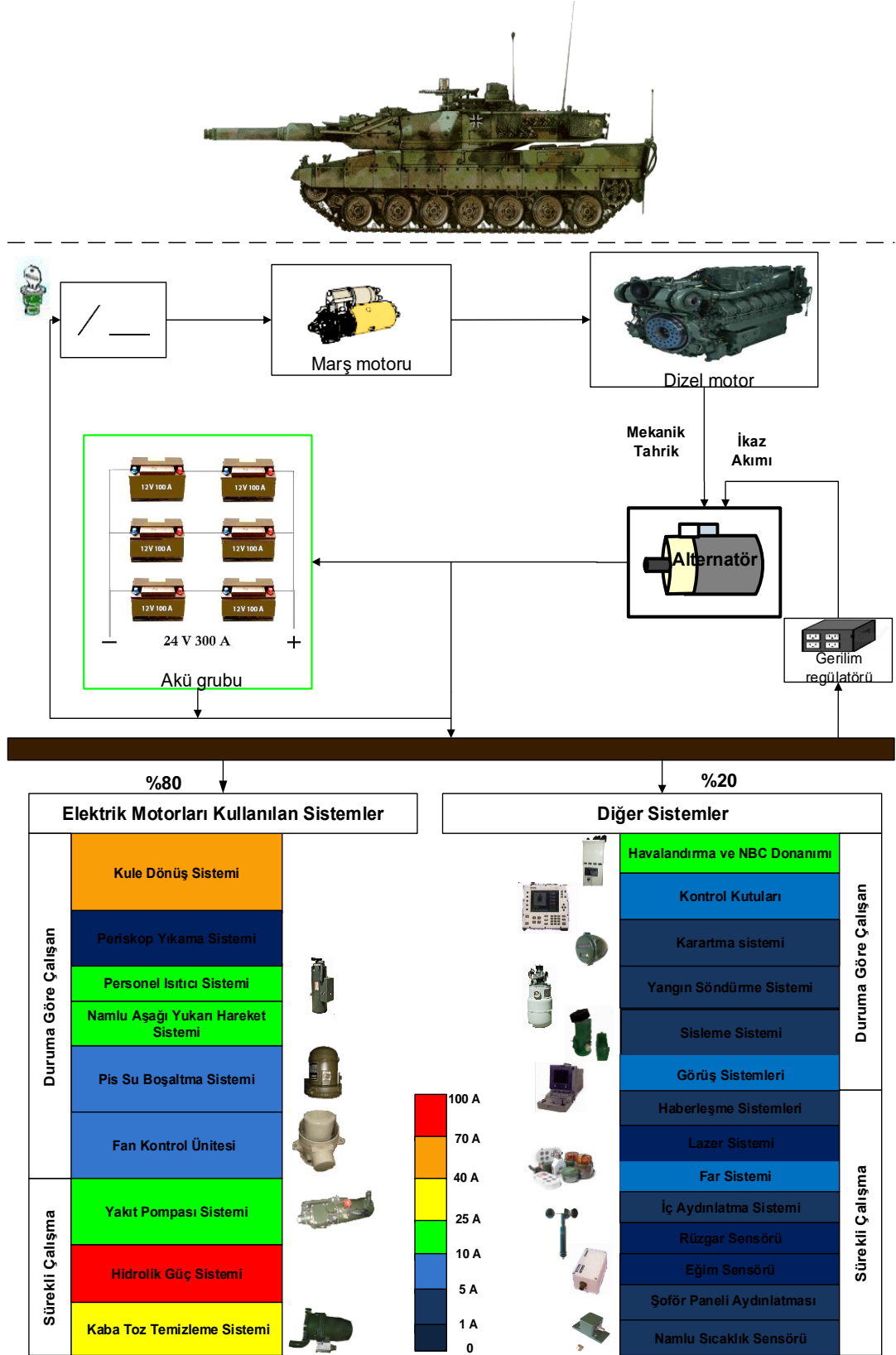
Şekil 2.10. MRAP

MRAP 'lar gibi elektrik ihtiyacı sürekli artan bir diğer ağır araç da ana görevi düşmana ateş gücü ile saldırmak olan tanklardır. Bir tankın işlevini tayin eden belirleyen üç ana özellik olup bunlar tankın ateş gücü, hareketliliği ve korunması olarak tarif edilebilir [45]. Tank donanımları bu üç parametreye göre oluşturulmakta olup teknolojik gelişmelerle bu donanımlara daha iyi hareketlilik, atış kontrol sistemleri ve koruma sistemleri sağlayacak ilaveler yapılmıştır. İlave edilen her bir donanım beraberinde daha fazla güç ihtiyacı getirmektedir.

Şekil 2.11.'de Leopard 2A4 tankların da bulunan alternatörün görevine ilişkin bir şema bulunmakta olup, bu şemada alternatörün beslediği sistemler çalışma

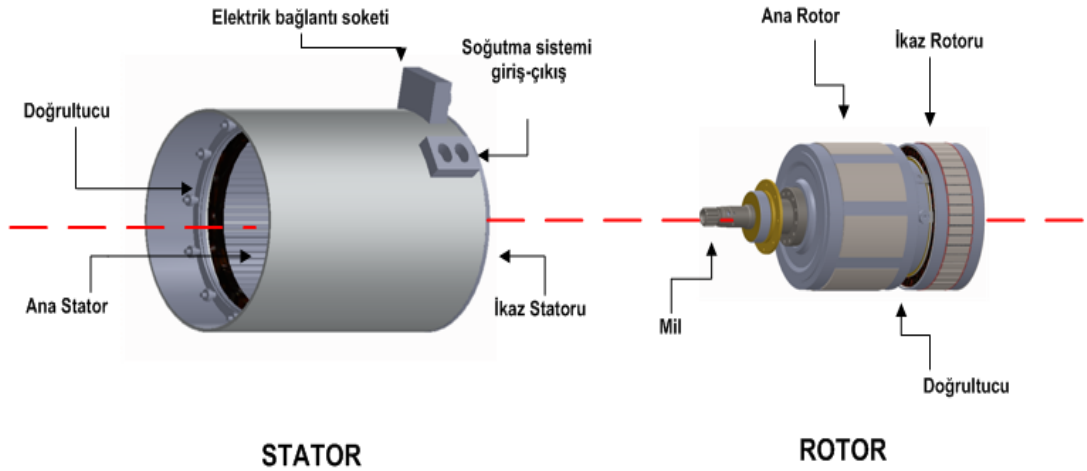
akımlarına göre sıcaklık haritası yordamıyla renklendirilmiştir. Leopard 2A4 tankları 1500 HP dizel motor ve 800A alternatör güç ünitelerine sahiptir. Tankın kontağı çalıştırıldığında marş motorunun çalışması için akü grubu üzerinden elektriksel ateşleme sağlanır. Tankın ilk hareketi için kalkışta marş motoru bu aküden 400 A 'e kadar akım çekebileceği için akünün dolu olması önemli bir güç gereksinimidir. Aküden enerjilenen marş motorunun dizel motoru çalıştırmasıyla, dizel motora bir mille bağlı olan alternatör mili dönmeye başlar. Regülatör devresi üzerinden alternatöre ikaz akımı gönderilerek alternatörden elektrik enerjisi üretilir ve 24 Voltluk akü 26.5 V- 28.5 V gerilim değerleri arasında 25 A ile şarj edilir. Akü dolduktan sonra elektriğe ihtiyacı olan bütün sistemler doğrudan alternatör çıkışından beslenir.

Ağır zırhlı araçlarda ihtiyaçlarının olduğu elektrik gücünü sağlamak için fırçasız alternatörler kullanılır [46,47]. Fırçasız alternatörün en iyi yanı döner alana güç iletmek için sabit alan bobini kullanması, fırça ve kayar yüzükleri elimine ederek aşınma ve bakım maliyetlerini minimize edebilmesidir. Aynı zamanda fırçanın kaldırılmasıyla ark ortadan kalkacak ve bu da elektromanyetik girişim miktarını önemli ölçüde azaltma işlevi görecektir [6]. Fırçasız alternatörlerin bir başka avantajı da iç elektronik parçaları soğutmak için ön ve arkadan çekilen havada tutulan tozun alternatörlere etkisinin azaltılarak makine ömrünü arttırılmasıdır [48].



Şekil 2.11. LEOPARD 2A4 içindeki alternatörün görevi

Fırçasız alternatör ana rotor, ikaz rotoru, ana stator ve ikaz statoru olmak üzere 4 temel kısımdan oluşmakta olup Şekil 2.12.'de alternatörün basit temsili gösterimi bulunmaktadır. Alternatör bu bileşenler üzerinden figüre edilmiştir. Milye uygulanan tahrik sonrası mil üzerinde bulunan rotor kısmı döner, stator üzerinde bulunan bağlantı soketi üzerinden ikaz statorunda bulunan alan sargılarına verilen 2-7A seviyesinde olan ikaz akımı ile manyetik alan oluşturularak 3 fazlı ikaz rotoru sargılarında alternatif akım meydana gelir. Oluşacak alternatif akım şekli hava boşluğundan, rotorun tipinden, sarım tipinden etkilenecektir. Bu alternatif akım ikaz statoru çıkışında bulunan yarım dalga doğrultucu devresi ile doğru akıma çevrilir. Ancak hedef çok yüksek akımlar olduğu için asıl işlem ana rotorda yapılır. Çevrilmiş doğru akım ana rotor sargılarına verilir ve oluşan manyetik alan sonucu ana stator sargılarında alternatif akım oluşur. Daha sonra oluşturulan bu alternatif akım statora sabitlenmiş doğrultucu devresi ile doğru akıma çevrilerek elektriksel bileşenlerin beslemesi sürekli tutulur.



Şekil 2.12. Alternatörün bileşenleri

BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

Ülkemizde ve 15 ülkede kullanılan LEOPARD 2A4 tanklarında fırçasız alternatör kullanılmakta olup K.K.K. 1. Ana Bakım Merkezi Komutanlığı Tank Palet Fabrikasından alınan bilgilere göre Almanya'dan kullanılmış olarak alınan 354 adet LEOPARD 2A4 tankının 30 adedinin rotoru arızalanmış ve kullanılmayacak duruma gelmiştir. Bu tanklarda 28V 800A yağ soğutmalı 3 fazlı fırçasız tip Jenoptik firmasına ait alternatör bulunmaktadır. Üretilmek üzere K.K.K. 1. Ana Bakım Merkezi Komutanlığı Tank Palet Fabrikasından alınan orijinal alternatör rotoru resmi Şekil 3.1.'de verilmiştir.



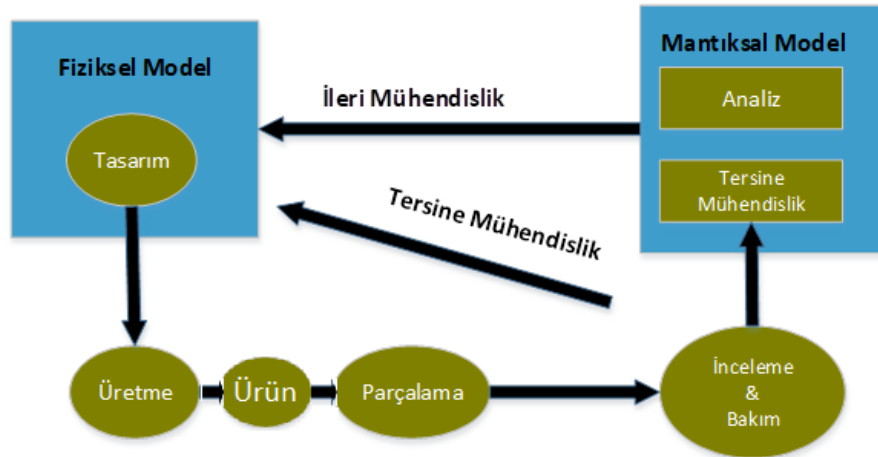
Şekil 3.1. Üretilcek rotor

3.2. Yöntem

3.2.1. Tersine mühendislik yoluyla rotor üretimi

Felsefi açıdan klasik mühendislik teklikten bütünselliğe ulaşmaktır, ama tersine mühendisliğin ilkesi bütünsellikten tekliğe ulaşma gayesi taşır. Tersine mühendislik mevcut bir aygıtın, objenin veya sistemin; yapısının, işlevinin veya çalışmasının,

çıkarımcı bir akıl yürütme analiziyle keşfedilmesi işlemidir. Makine veya mekanik alet, elektronik komponent, yazılım programı gibi parçalarına ayrılması ve çalışma prensiplerinin detaylı şekilde analizini içerir. Tüm bunların ileri mühendislik tasarımı yapılan bir nesnenin öngörülen iç ve dış etkiler altında nasıl davranacağını belirlemek için analiz tipine uygun sayısal yöntem ile 3B sayısal ağının oluşturulması ve çözümünün yapılması gereklidir. Şekil 3.2.'de tersine mühendislik ile güçlendirilmiş bir üretimin planlama ve analiz döngüsü gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Tersine mühendislik ile güçlendirilmiş bir üretimin planlama ve analiz döngüsü

Tersine mühendislik ile güçlendirilmiş bir üretim planlamasında hedeflenen ürünün uygun tasarım ve analiz döngüsünün kurulması neticesinde daha yüksek fayda sağlayabilecek bir üretim mümkündür. Böylesi bir üretim döngüsünde [49];

- Üretimden sonra sürprizler yoktur.
- Malzeme israfı yoktur.
- Fonksiyon eksikliği yoktur.
- Deneysel çalışmaya gerek yoktur veya bu ihtiyaç en aza indirgenmiştir.

Tersine mühendislik uygulamalarında, tarama teknikleri içeren çalışmalar literatürde yer almaktadır. 2016 yılında tersine mühendislik ile francis tipi türbinin tasarımına ilişkin bir çalışma gerçekleştirilmiştir [50]. Yine 2017'de yapılan bir çalışma yıpranmış ve aşınmış parçaların hızlı ve doğru bir şekilde boyutlarının tespit

edinilmesine yönelik 3D optik cihaz ile yüzey nokta bulut verilerinin ölçümü, 3D-CAD modelinin oluşturulması, nominal model yeniden oluşturulması için ekleme/çıkarma ile parça onarımı yapılması ve çeşitli algoritmalarla ürün modelinin yeniden yapılanması üzerine yaklaşımlar sunmuştur [51].

2016 yılında yapılan bir çalışma yeniden üreticilerin pazarda başarılı olabilmesi için, bir ürünün yeniden üretime uygunluğunu önceden temin edebilecek ve yeniden üretilmiş bir ürün yepyeni bir üründen daha fazla ekonomik ve çevresel değere sahip olması gerektiğini vurgulamıştır. Yeniden üretilen ürünlerin zamana göre değişen avantajlarının yani sürdürülebilirliklerinin önemi olduğunu belirtmiştir. Yeniden üretilmek istenen ürün için birim üretim maliyeti, net kar ve çevresel etkiler olmak üzere üç ana başlıkta değerlendirme uygulamıştır [52]. Bir başka çalışma, yeniden üretim çalışmalarında, yeni ürünün kullanım ömrü sonrasındaki geri kazanımının önemliliğini belirtmiş ve çevresel faktörlerinde dikkate alınmasıyla optimize edilmiş bir yeniden üretim modeli önermiştir [53].

Leopard 2A4 tankında bulunan 800 amperlik alternatör rotorunun, tersine mühendislik yöntemiyle, hem bilgi kazanımının sağlanması hem de yüksek bir izolasyon direncine sahip olarak üretilmesi hedeflenen bu çalışma, hem hali hazırda ihtiyacı karşılamaya yönelik ve satın alınmasına göre daha maliyetsiz çözüm hem de bu tanklarda kullanılan alternatörün yerli üretimi için, fikir oluşturması açısından yeniden üretime uygun bulunmuştur.

Hedeflenen bu prototip rotor için üretim akış şeması Şekil 3.3.'deki gibi sunulabilir.

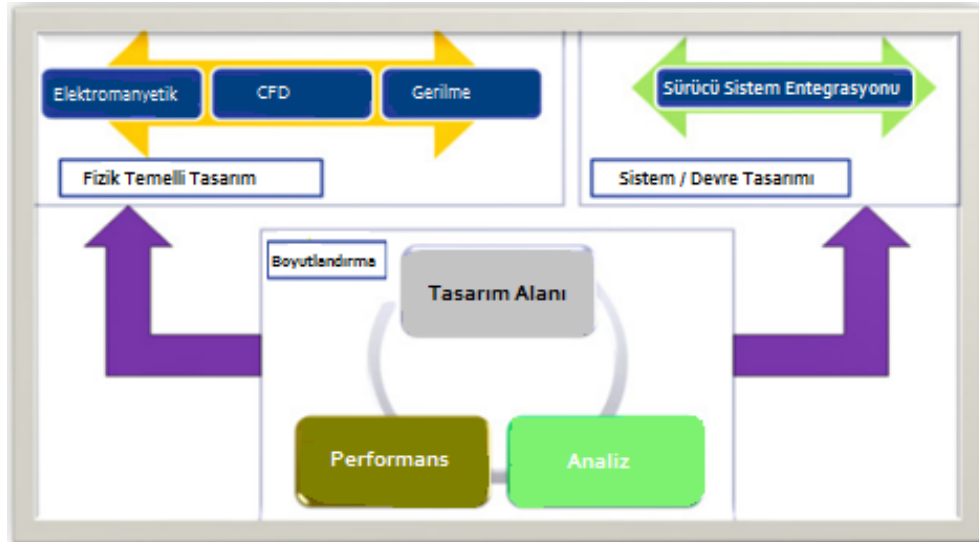


Şekil 3.3. Rotor imalat akış şeması

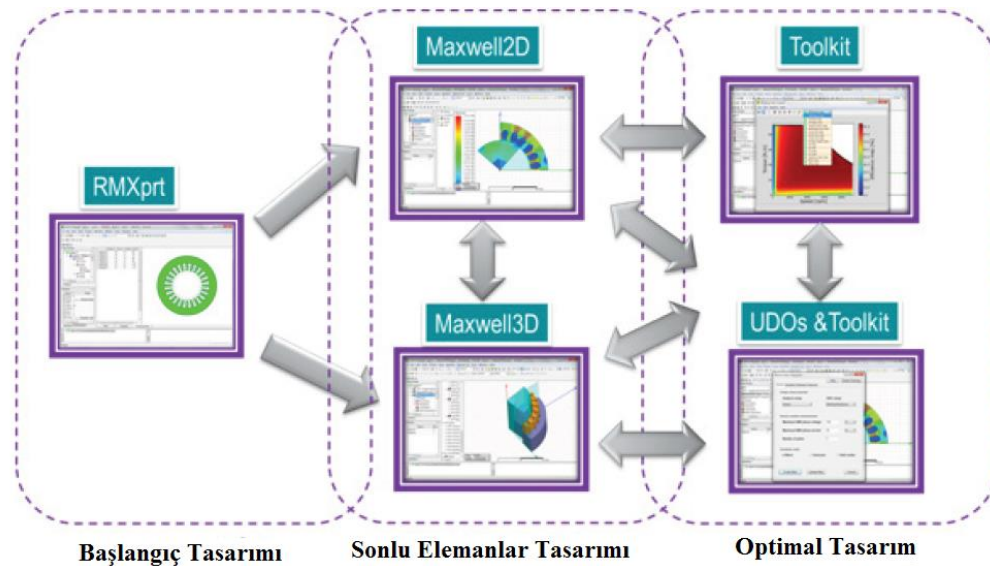
Akışın ilk bloğu olan tersine ölçüm; rotor kısmının tüm parçaların montaj bağlantılarından tek tek sökülmesi, üç boyutlu ölçüm cihazı, kumpas, mikrometre, komparatör, yükseklik mihengiri, dış masterları ve radyus tarakları ile boyutlarının çıkarılması, lehimli ve kaynaklı parçaların tespiti, gerektiğinde ürünlerin uygun kesim yöntemi kullanılarak bütün hatlarının belirlenmesi, rotor parçaları sökülürken montaj ilişkisine dikkat edilerek toleransların belirlenmesi, sökülen parçaların yüzey özelliklerini ve malzeme kalitelerini belirlemek için pürüzlülük, sertlik ölçüm cihazlarının kullanılması ve malzeme tespiti için gerektiğinde hizmet alımı yapılarak demir, alüminyum, bakır, pirinç gibi malzemelerin kimyasal analiz metodu ile tespit edilmesi, karbon-kükürt analizi ile demir ana metalinin içindeki C ve S değerinin

tespitinin malzemeden talaş kaldırma yöntemiyle alınan talaşın yakılması sonucu tespit edilmesi, kimyasal analiz sonucu değerlendirilerek malzeme kalitesinin (1040,4140,304 vb.) belirlenmesi, ikaz ve alan sargılarının sarımların incelenmesi, siper sayılarının belirlenmesi, sargı dirençlerinin ölçüm cihazı ile ölçülmesi ve kaplama olup olmaması dikkate alınarak parçaların tüm yüzey işlemleri için öncesi ve sonrası olarak rotorda kullanılan her bir parçaya ait malzemelerin cinsinin, kalitesinin ve toleranslarının belirlenmesini kapsamaktadır. Tespit edilen boyutlara ve malzeme özelliklerine göre sonraki adım olan bilgisayar destekli tasarım programlarıyla üç boyutlu modellerin oluşturulması ikinci blok olan üç boyutlu modelleme sürecidir.

Bir elektrik makinesi tasarlanırken, fizik temelli olarak elektromanyetik analiz, ısı analiz ve gerilme analizleri yapılarak ileride oluşabilecek problemlerin öngörülmesi ve elektrik makinesinin tüm çalışma koşulları altında istenilen değerleri sağlayacak en uygun ve verimli tasarıma ulaşmak için analizlerle irdelemesi yapılabilir. Sonlu fark ve sonlu eleman gibi yaklaşım şemaları ile bilgisayarların kullanımı, makine davranışının doğruca modellenebilmesine imkan tanır ve alternatif tasarımların çabucak değerlendirilmesi sağlanır [10]. Şekil 3.4.'de Ansys entegreli bir alternatör tasarımı akış şeması bulunmaktadır [54]. Tasarımı yapılan bir alternatörün kullanılan malzeme kaliteleri ve boyutları üzerinden elektromanyetik, ısı ve gerilme analizler yapılarak alternatörün performansı değerlendirilir ve ona göre tasarımda değişikliklere gidilerek optimum tasarıma ulaşılmaya çalışılabilir [10]. Şekil 3.5.'de Ansys Maxwell entegreli elektrik makineleri için optimum elektromanyetik tasarım akışı bulunmaktadır. Laminasyon saçlarının tasarımının kolayca yapılmasına imkan sağlayan Ansys RMXprt platformundan sonra Maxwell 2B ve 3B imkanlarıyla analizler yapılabilmektedir.



Şekil 3.4. Alternatör tasarım şeması



Şekil 3.5. Ansys maxwell analiz akışı

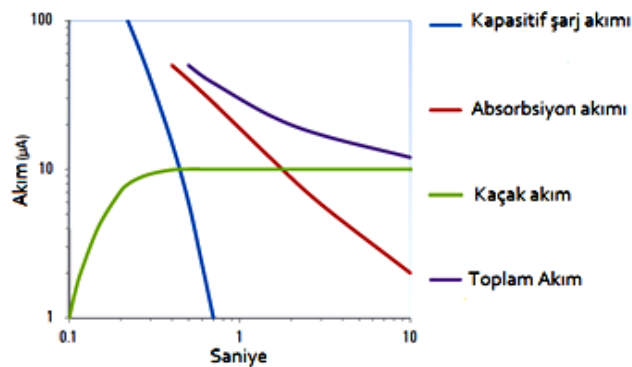
Alternatörlerin yapısal özelliklerinin incelendiği analizler literatürde bulunmaktadır. Kapashi ve arkadaşları [55] bir statorun yapısal analizini sonlu elemanlar yöntemini kullanarak modellemişlerdir. Çalışmalarında stator dış gövdesini oluşturan parçaların kaynak bölgelerindeki gerilmeleri incelemişler ve tasarım optimizasyonu gerçekleştirmişlerdir.

Simülasyonlarda Maxwell yazılımından elde edilen sonuçlar, Ansys Mechanical ve CFD modüllerine transfer edilerek, yapısal ve termal analizler yapılarak, elektrik makine tasarımı ile ilgili tüm analizler aynı ortamda tamamlanabilmektedir.

Faz üretim aşaması, malzemelerin tedarik edilmesi ve mekanik parçaların talaşlı (tornalama, frezeleme, matkapla delme, taşlama) ve talaşsız imalat yöntemleri (dövme, soğuk/sıcak çekme, ekstrüzyon, lazer, plazma, kalıp ve pres kesim) ile üretilmesini kapsamaktadır. Üretilen parçaların istenilen teknik çıktı değerlerine uygunluğunun kalite kontrol ölçüm cihazları ile ölçülmesi ve onaylanması kalite kontrol aşamasıdır ve kalite standartlarını yakalayamayan parçalar için üretim süreci tekrar yapılmalıdır. Daha sonraki blok olan montaj aşamasında ürün parçaları montajlanır. Bir diğer aşama olan izolasyon testleri, prosedüre uygun olarak izolasyon testlerinin yapılmasını içerir. İzolasyon testine ait izlenecek yöntemler, izolasyon direnci analizi ve yöntemleri başlığında ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Final test aşaması ise ürünün balans ve çevre testlerini içermekle birlikte herhangi bir testte sorun olması durumunda nihai ürün üzerinde sorunların tespit edilip, düzeltilmesiyle ilgilidir.

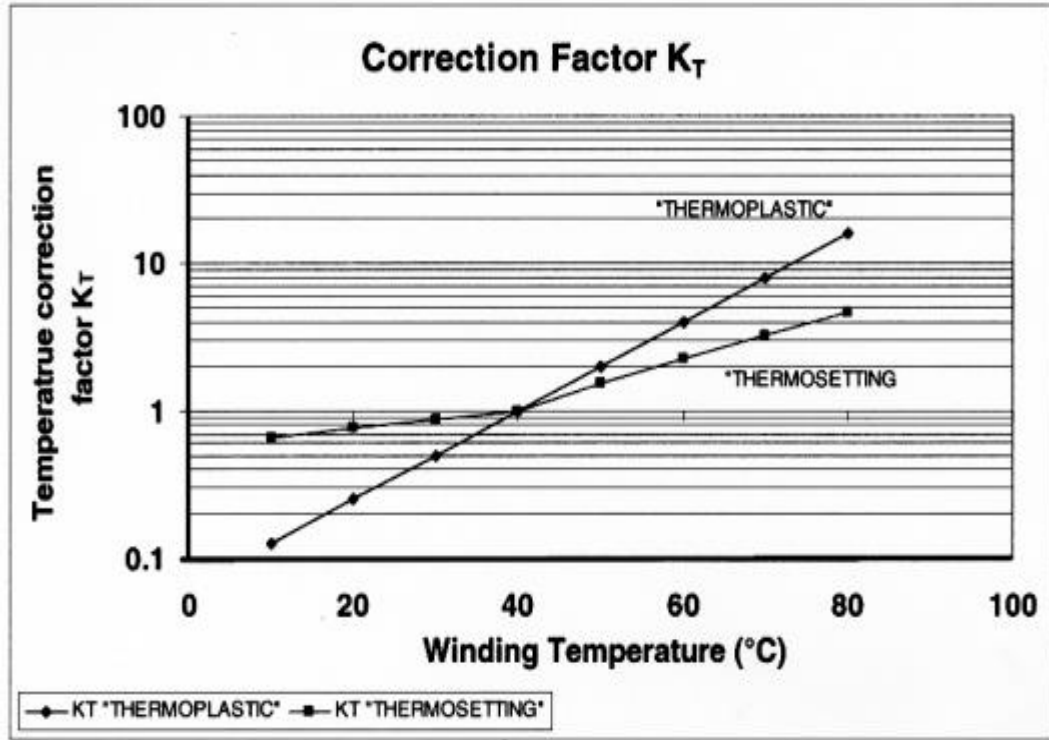
3.2.2. İzolasyon direnci analizi ve yöntemleri

Yüksek DC gerilim izolasyon yüzeyinde küçük akımlara neden olur. Toplam akım üç bileşenden oluşmaktadır, bunlar; emme (absorbsiyon) akımı, kapasitans şarj akımı ve kaçak akım olup Şekil 3.6.'da bulunan grafik ile akım eğrileri gösterilmektedir [31].



Şekil 3.6. Test akımı bileşenleri

İzolasyon direncini etkileyen faktörler [31]; yüzey durumu; ekipman yüzeyinde yağ ve karbon tozlarının olması izolasyon direnci değerini düşürebilir. Sıcaklık; sargıların sıcaklığı izolasyon direncini etkiler. Sıcaklık arttıkça izolasyon direnci azalır. IEEE 43'de verilen minimum izolasyon direnci değerleri sargı sıcaklığının 40 °C olduğundaki değerlerdir ve farklı sargı sıcaklıklarında ölçülen izolasyon direnci sıcaklık düzeltme faktörü ile düzeltilmelidir [32,33]. İzolasyon sistemlerinde iki farklı aile için sıcaklık düzeltme faktörü belirlenmiştir. Şekil 3.7.'de, kullanılan termoplastik ve termoset olmak üzere iki farklı yalıtım sistemi aileleri için sargı sıcaklıklarına göre düzeltme faktörü değerleri grafiksel olarak gösterilmiştir [36].



Şekil 3.7. Sargı sıcaklığı-düzeltilme faktörü grafiği [36]

1960'ların başında ve öncesinde örneğin asfalt gibi termoplastik ailesinden olan yalıtım malzemeleri kullanılıyordu. 1960'larda epoksi ve polyester tabanlı yeni yalıtım malzemeleri termosetler kullanılmaya başlandı. Bu iki aile için sıcaklık düzeltme faktörleri aşağıdaki eşitliklerle (Denklem 3.1, 3.2, 3.3) ifade edilir ve (Denklem 3.4) ile izolasyon direnci tespit edilir [36];

Termoplastik için;

$$K_T = (0.5)^{(40-T)/10} \quad (3.1)$$

K_T ; izolasyon değerini 40 °C dekine çevirmek için elde edilen katsayı, T; İzolasyon direncinin ölçüldüğü sıcaklıktır (°C) .

Termoset için; 10 °C < T < 40 °C aralığında, (Denklem 3.2) eşitliği kullanılır.

$$K_T = \exp \left[-1245 \left(\frac{1}{(T+273)} - \frac{1}{313} \right) \right] \quad (3.2)$$

Termoset için; 40 °C < T < 85 °C aralığında, (Denklem 3.3) eşitliği kullanılır.

$$K_T = \exp \left[-4230 \left(\frac{1}{(T+273)} - \frac{1}{313} \right) \right] \quad (3.3)$$

$$R_C = K_T R_T \quad (3.4)$$

R_C ; izolasyon direncini (IR) (megohm), R_T ; T sıcaklığındaki izolasyon direncini (megohm) ifade etmektedir.

Ekipman yüzeyi sıcaklığı ortam havasının çığ noktasında ya da altında olursa, oluşan nem izolasyon direnç değerini düşürücü etki yapar. Her izolasyon direnci testi için sargı sıcaklığı ve izolasyon direncinin yanı sıra nem okuma değerlerinin de kaydedilmesi önemli olup bilinen bu parametrelerle izolasyon direnç değeri okumaları nemin olası etkileri için değerlendirilebilir [33,34].

İzolasyon direnci ölçüm testleri arasında spot okuma, zaman-direnç okuma ve adım gerilimi olmak üzere üç yöntem uygulanmaktadır [31].

a) Spot Okuma

Alternatörler uygun aralıklarla servise alınarak izolasyon dirençleri kontrol edilir. IEEE Std 43'e göre, izolasyon direnç değeri 1 dakika boyunca sargıya sabit test gerilimi uygulanarak alınmalıdır. Bu kararlı bir kapasitif etkisi sağlar ve daha tutarlı bir okuma alınır. Alternatörün okuma geçmişine bağlı oluşturulan eğriye yeni değer işlenir. İzolasyon direncinde azalan bir eğri ortaya çıkarsa alternatör bakıma alınmalıdır [34].

b) Zaman-Direnç Okuma

Dielektrik absorpsiyon karakteristiğinin çıkarılması ve polarizasyon indeksinin hesaplanması alternatör sargılarındaki kirlilik ve rutubet derecesi hakkında bilgi vermektedir. Makine izolasyon direncinin tipik olarak 10 dakika boyunca 5 saniye gibi aralıklarla ölçülerek grafiğinin oluşturulması ile makinenin izolasyon direnci profili çıkartılır ve sürekli artan bir eğri sargıların temiz ve kuru olduğunu göstererek yalıtımın iyi olduğunu, beklendiği gibi artmayan çabuk düzleşen bir eğri ise sargıların rutubetli ve kirli olduğunu, sargı izolasyonu içerisinde fazlaca kaçak akım aktığını ve yalıtımının zayıf olduğunu göstermektedir [31, 35].

Polarizasyon indeksi (PI); izolasyon direncinin zamanla değişimidir ve aşağıdaki verilen eşitlikle (Denklem 3.5) ifade edilir [35,36].

$$PI = \frac{IRT_2}{IRT_1} \quad (3.5)$$

IRT_2 ve IRT_1 değerleri sırasıyla 1 ve 10 dakika anındaki izolasyon direnç değerini ifade etmektedir. PI sonucuna göre alternatörün izolasyon durumu Tablo 3.1.'deki gibi yorumlanır [34]. Ayrıca A sınıfı - ekipmanlar için 1,5 PI, B, F ve H sınıfı için ise minimum 2.0 PI önerilmektedir [31].

Tablo 3.1. Polarizasyon indeksi yorumlanması

İzolasyon durumu	Polarizasyon indeksi
Tehlikeli	< 1
Güvensiz-kuşkulu	1,0 – 2,0
İyi	2,0 – 4,0
Mükemmel	> 4

Dielektrik Absorbsiyon Oranı (DAR); bu oran 60 saniyedeki direnç değeri ile 30 saniyedeki direnç değerlerinin oranı ile ifade edilir. Absorbsiyon akımındaki hızlı düşüş izolasyonun alternatör için uygunluğunu gösterir [31]. Değerlerin yorumlanması Tablo 3.2.'de gösterilmiştir [34].

Tablo 3.2. Dielektrik absorbsiyon yorumlanması

İzolasyon durumu	Dielektrik absorbe oranı
Tehlikeli	< 1
Güvensiz-kuşkulu	1,0 – 1,4
İyi	1,4 – 1,6
Mükemmel	> 1,6

c) Adım - gerilim testi

Farklı gerilim seviyeleri için cihaza adım testleri uygulanır. Testin tavsiye edilen adım oranı oranı 1:5 dir. Her bir test adım aralığı eşit olup 60 saniye boyunca düşükten büyüğe doğru uygulanır. Bu test cihazın nominal gerilim seviyesinin altında uygulanan bir gerilim testidir. Test geriliminde hızlı değişiklikler meydana getirmek izolasyonda meydana getireceği ilave gerilmeler tespit edilerek izolasyonun zayıf noktaları ortaya çıkarılır. Bu test özellikle nominal gerilim değerinin izolasyon direnci test düzeneği tarafından uygulanan gerilimden düşük olması durumu için elverişlidir. Test gerilimlerinin sargı gerilimi uygunluk belirlenmesi aşağıdaki verilen Tablo 3.3. ve Tablo 3.4.'e göre yapılır [31].

Uygulanacak izolasyon direnci test gerilimi sargıda oluşacak maksimum gerilime göre belirlenmelidir. IEEE Std 43 e göre belirlenen izolasyon direnci test gerilimleri Tablo 3.3.'de gösterilmektedir [36].

Tablo 3.3. İzolasyon direnci test geriliminin belirlenmesi

Sargı Gerilimi	İzolasyon direnci test gerilimi
<1000	500
1000-2500	500-1000
2501-5000	1000-2500
5001-12000	2500-5000
>12000	5000-10000

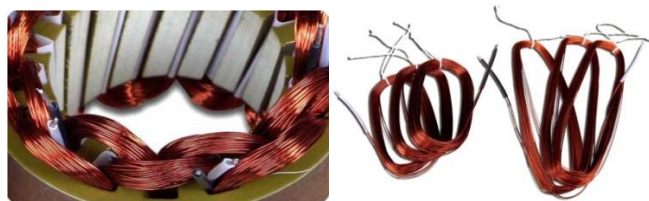
Uzun yıllar boyunca dönen elektrikli makinede minimum megohmları belirlemek için IEEE Std 43 “kV +1” kuralını kullandı. Günümüzde ise IEEE Std 43, biçimli yani açılı veya dikdörtgensel sarılmayan makinelerde minimum 5 megohm izolasyon direncini kabul etmektedir. Belirli bir formu olan sargılarda ise 100 megohm kabul edilmektedir. Tablo 3.4.’de ilgili değerler bulunmaktadır [33,34,36]. Şekil 3.8. ve Şekil 3.9.’da biçimli ve biçimsiz sargılarla ilgili örnekler yer almaktadır.

Tablo 3.4. Minimum izolasyon değerleri

Minimum izolasyon direnci	Test Örneği
kV + 1 MΩ	1970 ‘den önce yapılan tüm alan sargılarında
100 MΩ	1970’ den sonra AC sargılarda (biçimli sarılmış)
5 MΩ	1970’den sonra 1kV ‘nın altındaki rastgele sarılmış stator bobinleri ve DC armatürlerde



Şekil 3.8. Form verilmiş sargı örnekleri



Şekil 3.9. Biçimsiz sargı örnekleri

IEEE Std-43 de, 5000 M Ω 'un üzerinde bulunan izolasyon direnci değerlerinin çok fazla olduğunu ve yanılıcı olup, nem belirtisi olabileceğini, bu yüzden polarizasyon indeksi değerinin kontrol edilmesi gerektiği belirtilmiştir. Literatürde 2010 ve 2011 yıllarında yapılan, elektriksel izolasyon direnci üzerinde sıcaklık, nem, kirlilik gibi çevre şartlarının etkilerini görmek için laboratuvar ortamında oluşturulan farklı koşullar altında ve simülasyon ortamında 500 M Ω 'un üzerinde izolasyon direnci profilleri oluşturulan çalışmalar mevcuttur [40, 41]. Yine 2011 yılında yapılan bir çalışmada izolasyon direnci değerlerinin kullanılan yalıtım teknolojisine ve makinenin boyutuna bağlı olduğunu öne süren deneysel çalışmada mevcuttur [42].

BÖLÜM 4. ROTOR PARÇALARININ BELİRLENMESİ VE MODELLENMESİ

4.1. Alternatörün Özellikleri

Kullanılan alternatörün genel özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- 27.5 - 28.5V ve 690 - 710 A çıkış,
- Fırçasız tasarım,
- 3 fazlı,
- Doğrultucu grubu yerleşik,
- Yağ soğutmalı,
- Mil güdümlü,
- Çıkık kutuplu rotor,
- Rotor hızı maksimum 13000 d/dk da test edilmektedir,
- Rotor ağırlığı toplam 19,862 kg olup ikaz rotoru 4,476 kg, ana rotor ve miller 15,386 kg'dır.
- Rotor uzunluğu(mil hariç) = 230 mm,
- Ana rotor çapı = 149,2 mm,
- Rotor stator arası mesafe; ikaz rotorunda 2,10 mm, ana rotorda 0,8 mm'dir,
- Çalışma devri 4000 – 8000 devirdir.

Alternatör içerisinde soğutmayı sağlamak üzere yağ pompası bulunmaktadır. Yağ soğutması tamamen kapalı bir ortam içerisinde gerçekleşmektedir.

4.2. Rotor Parçalarının Belirlenmesi

Erel Makine firmasında sadece bu çalışmayla ilgili, bir çalışma ofisi hazırlanmıştır. Daha sonra iş akışına uygun olarak rotorun montaj bağlantıları tek tek sökülüştür ve rotor parçaları tespit edilmeye başlamıştır. Aşağıda bununla ilgili görseller Şekil 4.1., Şekil 4.2., Şekil 4.3. ve Şekil 4.4.'de verilmektedir.



Şekil 4.1. Rotor



Şekil 4.2. İkaz rotoru (soldaki) ve rotor mili parçası, soğutma mili, ana rotor(sırasıyla)



Şekil 4.3. İkaz rotoru izolatör, ikaz göbeği, pompa tahrik mili, yağlama mili (sırasıyla)



Şekil 4.4. Rotor disk, disk presbantı ve bağlantı vidaları(soldaki), ve rotora ait vida, segman, pul ve burçlar (sağdaki)

Rotor, ikaz rotoru ve ana rotor olmak üzere iki ana parçadan oluşmaktadır. Her iki parçada da bakır sargılar bulunmaktadır. Bu sargıları istenilen formda tutmak için sıkıştırma profilleri kullanılmıştır. Bu profillerde tek tek çıkarılmış, hangi parçanın hangi amaçla kullanıldığına ve montaj ilişkilerine dikkat edilmiştir. Bunlarla ilgili görseller Şekil 4.5.'de bulunmaktadır. Rotorun 13000 RPM'de test edileceği bilinmektedir. Bu aşamada sargıların rijitliğini sağlayacak ve onları istenilen formda tutmaya yardımcı olacak sıkıştırma profilleri çok önemlidir. Bu profillerin bazıları metal bazıları ise kompozit malzemedir. Metaller arasında da yalıtım malzemelerinin kullanıldığı görülmüştür.



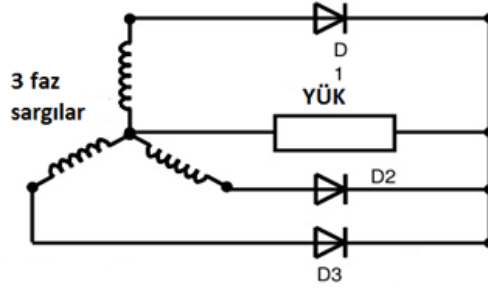
Şekil 4.5. Ana rotor, sıkıştırma profilleri ve ana rotor sargısı(sırasıyla)

Sökülen parçaların yüzey özelliklerini ve malzeme kalitelerini belirlemek için pürüzlülük, sertlik ölçüm cihazları kullanılmıştır. Ana rotor diskinin içinde diyot tablasının yerleştirildiği görülmüştür.



Şekil 4.6. Diyot tablası ve diyotlar

İkaz sargılarında oluşan 3 fazlı alternatif akımı 3 adet diyot ile yarım dalga doğrultucu devresi kullanılarak, doğru akımın alan sargılarına gönderilmesinde kullanılan diyotlar ve diyot bağlantıları Şekil 4.6.'da bulunmaktadır. Bu yarım doğrultucu devre Şekil 4.7.'deki gibidir.



Şekil 4.7. Yarım dalga doğrultucu devresi

Ana ve ikaz rotorunu oluşturan kapaklar açıldıktan sonra paket halde bulunan laminasyon saclarına ulaşılmıştır. 66 adet ikaz rotoru silisyumlu laminasyon sacı ile, 182 adet ana rotor silisli laminasyon sacı olduğu tespit edilmiştir. Paket haldeki sacların her iki taraflarına da izolasyon için vulkanize fiber malzemedeki izolatörler kapatılmıştır. Ayrıca bu saclar ile üzerlerine sarılan bakır sargıların hem ısı hem de elektriksel yalıtımını sağlamak için presbantlar kullanılmıştır. Bu presbantlar sacların yuvalarına uygun olarak, sargıları saracak şekilde kesime sahiptir.

İkaz ve alan sargılarının sarımları incelenmiş, sipir sayıları belirlenmiştir. Bu emaye kaplı bakır sargıların üzerinde presbantlar ve vernik olduğu tespit edilmiştir. Sargıların direnç değerleri tespit edilmiştir. İkaz rotoru sargıları için 0,8 mm bakır tel (emaye ile birlikte 1 mm) kullanılmıştır. A-B-C olarak 3 adet bulunan sargılar 5'er telden oluşmaktadır. Sırasıyla 92-107-104 miliohm (mohm) tespit edilen sargı

dirençleri ortalama 100 mohm kabul edilmiştir. Alan rotoru 8 kutuptan oluşmaktadır. Alan rotoru sargıları için de 8 adet bakır lama sargısı kullanılmıştır. Sargıların sırasıyla 32 sipir, 52 mohm ve 40 sipir, 65 mohm olarak sarıldığı tespit edilmiştir.

Bütün rotor parçaları söküldükten sonra malzeme özellikleri iş akışında belirttiği gibi ilgili cihazlar ve tekniklerle tespit edilmiştir. Tablo 4.1.'de rotora ait parçalar ve parçaların malzeme bilgileri yer almaktadır.

Tablo 4.1. Rotora ait parçalar ve özellikleri

N	Malzemeler	Özellikleri	N	Malzemeler	Özellikleri
1	Laminasyon sacı	Silisli saç (m700)	2	Cam elyafli fiber (2 Adet)	Vulkanize fiber
3	İkaz sargı göbeği piriç,	MS58 piriç	4	İkaz sargı flanş piriç	MS58 piriç
5	Paslanmaz (0.8mm) çelik flanş	Paslanmaz çelik saç (304 kalite)	6	Bakır 1 adet kesilmiş hali montaj	% 99.9 elektrolitik bakır, gümüş kaplı
7	Bakır (3 adet kesilmiş küçük çap)	%99.9 elektrolitik bakır, gümüş kaplı	8	İlave mil	Çelik 4140, ısıl işlem uygulanmış, 32 sertlikte
9	Mil	Çelik 4140, ısıl işlem uygulanmış, 32 sertlikte	10	Diyot tablası alüminyum	6080 alüminyum
11	Piriç bara (3 adet)	Piriç MS58	12	Piriç gümüş kaplı pul 3 adet	Piriç MS58
13	Piriç gümüş kaplı pul (1 adet)	Piriç MS58	14	Paslanmaz pul 4 adet	Paslanmaz çelik saç (303 kalite)
15	Paslanmaz pul (1 adet)	Paslanmaz çelik saç (303 kalite)	16	Fiber pul 3 adet	Fiber
17	Fiber pul (1 adet)	Fiber	18	Fiber pul 4 adet	Fiber
19	Alüminyum burç (3 adet)	6080 alüminyum	20	Teflon burç 3 adet	Teflon
21	Alan sargı rotor disk c1040	Çelik 1040, beyaz çinko kaplı	22	Alan sargı rotor disk eksi c1040	Çelik 1040, beyaz çinko kaplı
23	Rulman kapağı c1040	Çelik-1040, beyaz çinko kplı	24	Alan sargı rotor disk izolatör	Trivoltherm presbant,

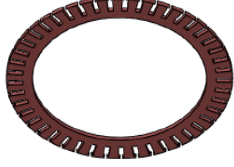
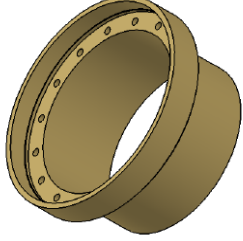
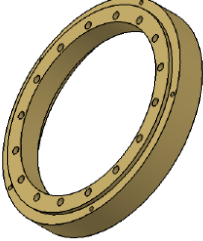
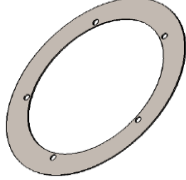
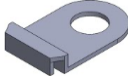

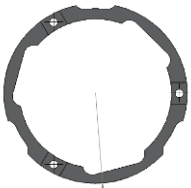
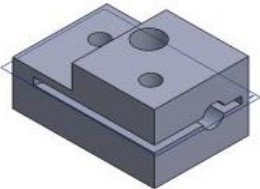
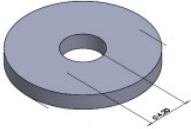
Tablo 4.1. (Devamı)

N	Malzemeler	Özellikleri	N	Malzemeler	Özellikleri
25	Alan sargı rotor disk izolatör	Trivoltherm presbant,	26	Kestamid	Sarı kestamid
27	Bakır uzun büyük çap	%99.9 elektrolitik bakır, gümüş kaplı	28	Bakır uzun küçük çap	%99.9 elektrolitik bakır, gümüş kaplı
29	Özel saplama alüminyum (3 adet)	6080 alüminyum	30	Özel saplama pirinç 2 adet	Pirinç MS58
31	Laminasyon sacı silisli saç 8 ankus	Silisli saç (m700)	32	Laminasyon sacı silisli 8 ankus sargı	%99.9 elektrolitik bakır lama, emayeli, vernikli, Toplam 8 alan sargısı var. 250 gram, 320 gram sırasıyla devam etmektedir.
33	Cam elyafı fiber özel profil,	Isıl sertlik 150 brinell Cam elyaf, 8 adet bulunuyor, toplam ağırlıkları 50 gram	34	Fiber beyaz sargı izolasyonu	Trivoltherm presbant
35	HRC Rulman pulu (2 adet)	Oring rulman pulu (4140)	36	Paslanmaz özel profil, 65 brinell	Paslanmaz 304 kalite
37	Alüminyum üçgen özel profil	6080 alüminyum	38	Alüminyum yağ tahliye mili	6080 alüminyum
39	Alüminyum 16 adet özel profil	6080, 98 brinell alüminyum	40	Pompa tahrik mili	Çelik (4140)
41	Yağlama çelik boru	Paslanmaz çelik 316 kalite	42	Sargı üstüne kapatma 2 adet	Yaylık paslanmaz sac, (301 kalite)
43	İkaz sargısı	%99.9 elektrolitik bakır tel, emayeli, vernikli	44	Beyaz dış presbant 0.4 mm	Trivoltherm presbant
45	Beyaz iç presbant 0.4mm	trivoltherm presbant	46	Beyaz iç presbant (0.4 mm)	Trivoltherm presbant

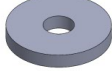



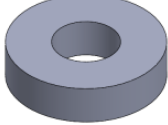
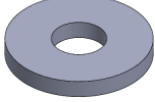


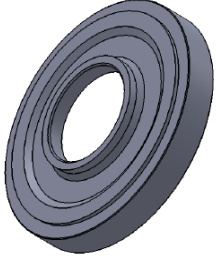
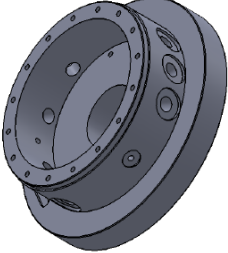


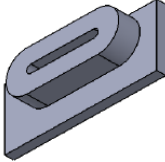
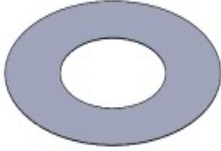




4.3. Rotorun 3 Boyutlu Modellenmesi

Solidworks programıyla rotora ait parçalar belirlenen ölçülere göre 3 boyutlu olarak modellenmiştir. Bu modellere ait teknik çıktılar oluşturulmuştur. Tablo 4.2.'de rotora ait parçaların 3 boyutlu modelleri bulunmaktadır.

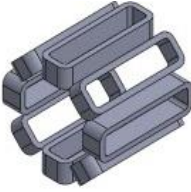
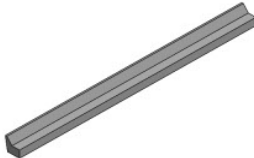
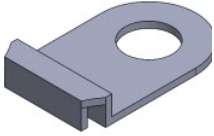

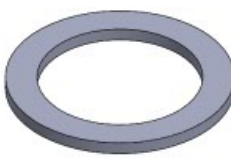
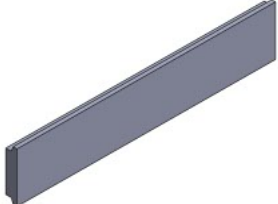
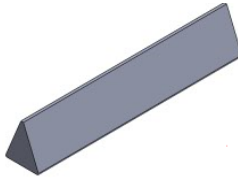
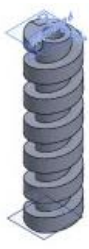

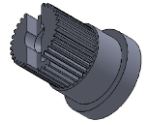





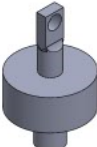

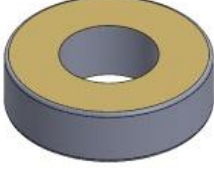
Tablo 4.2. Rotor parçalarının 3 boyutlu modelleri

N	Parça tasarımları	Parça tasarımları	Parça tasarımları
1	İkaz rotoru laminasyon sacı	2 Cam elyaflı fiber izolatör	3 İkaz sargı göbeği pirinç
			
4	İkaz sargı flanş pirinç	5 Paslanmaz çelik flanş	6 Bakır pabuç kesilmiş hali
			
7	Bakır pabuç (kesilmiş küçük çap)	8 Rotor ilave mil	9 Rotor mil
			
10	Diyot tablası alüminyum	11 Pirinç bara	12 Pirinç gümüş kaplı pul
			



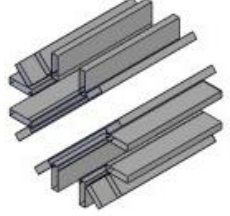
Tablo 4.2. (Devamı)

N	Parça tasarımları	N	Parça tasarımları	N	Parça tasarımları
13	Pirinç gümüş kaplı pul	14	Paslanmaz pul(4adet)	15	Paslanmaz pul (1 adet olan)
					
16	Fiber pul (3 adet)	17	Fiber pul (1 adet)	18	Fiber pul (4 adet)
					
19	Alüminyum burç	20	Teflon burç	21	Alan sargı rotor disk
					
22	Alan sargı rotor disk eksi	23	Rulman kapağı	24	Alan sargı rotor disk izolatör
					
25	Kestamid	26	Alan sargı rotor disk izolatör eksi	27	Bakır uzun büyük çaplı burç
					
28	Özel saplama alüminyum (3 adet)	29	Özel saplama pirinç 2 adet	30	Ana rotor laminasyon sacı
					

Tablo 4.2. (Devamı)

N	Parça tasarımları	N	Parça tasarımları	N	Parça tasarımları
31	Ana rotor sargı 	32	Cam elyaflı fiber özel profil 	33	Bakır uzun küçük çap 
34	Fiber beyaz sargı izolasyonu toplu 	35	HRC Rulman pulu 	36	Paslanmaz özel profil 
37	Alüminyum üçgen özel profil 	38	Alüminyum yağ tahliye mili 	39	Alüminyum özel profil 16 adet olan 
40	Pompa tahrik mili 	41	Yağlama çelik boru 	42	Sargı üstüne kapatma 
43	İkaz sargısı bütün 	44	Beyaz dış presbant 	45	Beyaz iç presbant 
46	Diyot 70 amper 	47	Rotor alan izolatör 	48	52-25-15 rulman 

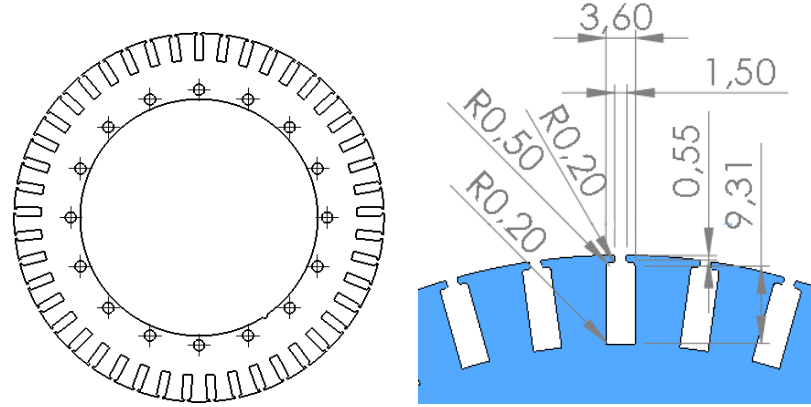
Tablo 4.2. (Devamı)

N	Parça tasarımları	N	Parça tasarımları	N	Parça tasarımları
49	Beyaz diğer iç presbant	50	8 ankus bakır sac	51	Ana rotor sargısı için presbant toplu
					

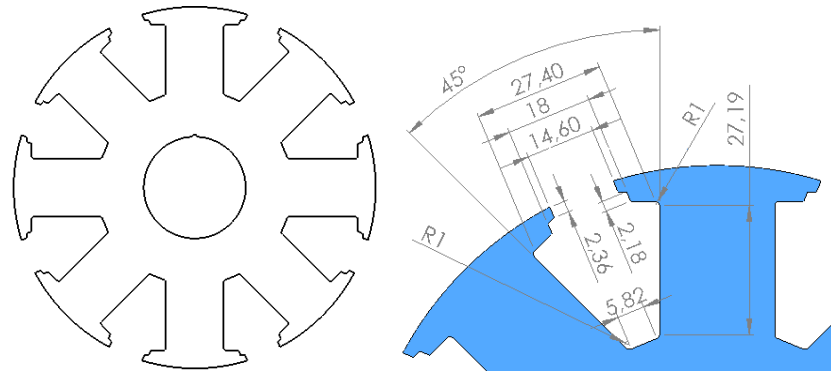
Tablo 4.3.'de rotora ait bazı boyutsal özellikler verilmiştir. Şekil 4.8. ve Şekil 4.9.'da ikaz ve ana rotora ait gövde yapıları ve oyuk yapıları yer almaktadır. Oyuk yapısı ölçüleri milimetre olarak verilmiştir. İkaz rotoru sarımında 3 faz yıldız bağlantı topolojisi kullanılmıştır.

Tablo 4.3. Rotora ait boyut bilgileri

Rotor özellik	Boyut
Rotor dış çap	149,2 mm(ana rotor), 148,5 mm(ikaz roturu)
Toplam Rotor uzunluk (mil hariç)	230 mm
Şaft çapı	25 mm(rulmanın oturduğu), 42 mm(ana rotor)
Oyuk sayısı	45 (ikaz),
Kutup sayısı	8 (ana rotor)
Yoke çapı	127 mm (ikaz), 80 mm(ana rotor)
Gövde uzunluk	91 mm(ana rotor), 33 mm(ikaz)
Hava boşluğu	0,8 mm (ana rotor), 2,10 mm(ikaz)
Sarım sayısı	4 kutup-32 sipir ve 4 kutup-40 sipir (ana rotor)

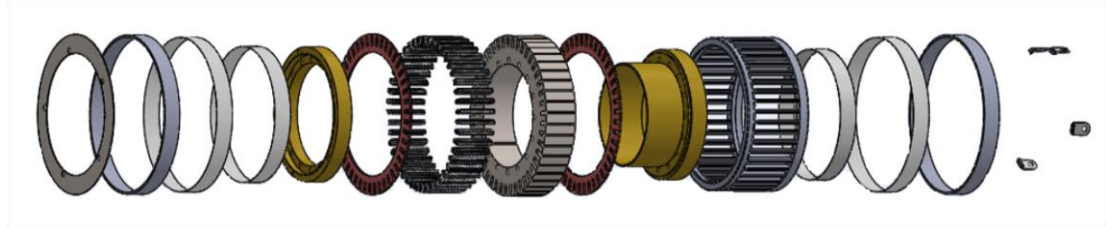


Şekil 4.8. İkaz rotoru gövdesi sac ve oyuk yapısı(mm)

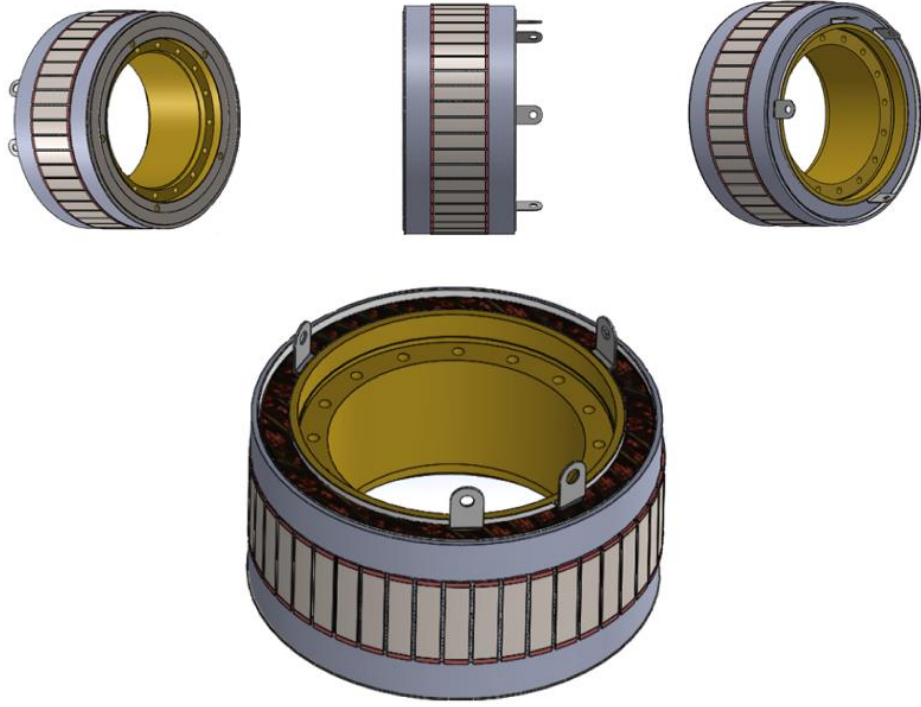


Şekil 4.9. Ana rotor gövdesi sac ve yuva yapısı(mm)

Parçaların tasarımı bittikten sonra montaja geçilmiştir. İkaz rotoru ayrı montaj edilmiş daha sonra yeni bir montaj dosyasında tüm modellerin montajı yapılmıştır, simülasyon çalışmasına hazır hale getirilmiştir. İkaz rotoruna ait patlama görüntüsü Şekil 4.10.'da ve farklı açılardan montaj modeli Şekil 4.11.'de verilmiştir (Şekil 4.11.'de verilen en son perspektif modelde sargılar için renklendirme bulunmaktadır).

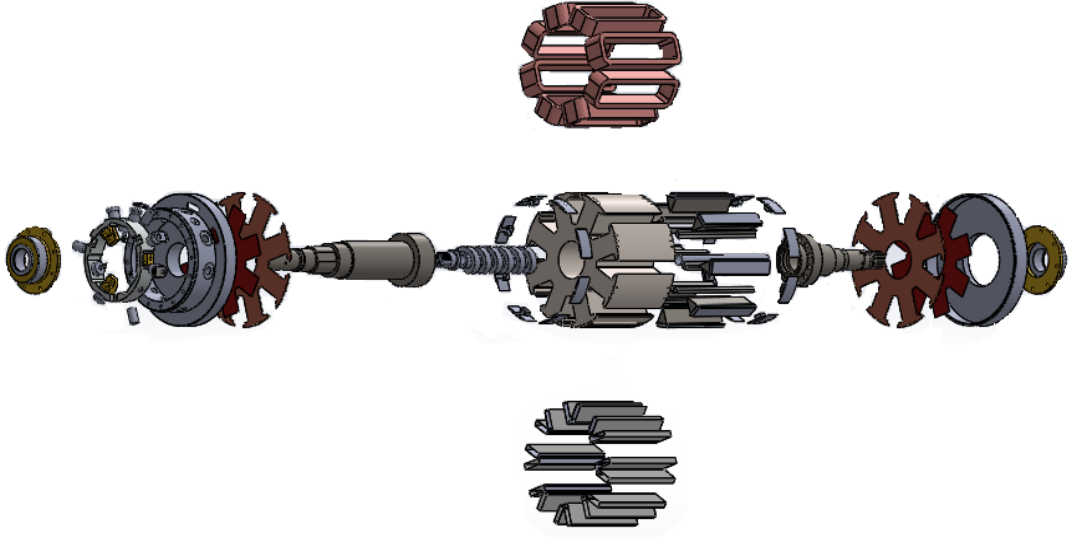


Şekil 4.10. İkaz rotoru patlatma görüntüsü



Şekil 4.11. Montajlanmış ikaz rotorunun farklı açılardan 3 boyutlu modeli

Ana rotor parçalarına ait patlatma görüntüsü Şekil 4.12.'de bulunmaktadır. Şekil 4.13.'de ise ana rotorun montajlanmış 3 boyutlu modeli verilmiştir.

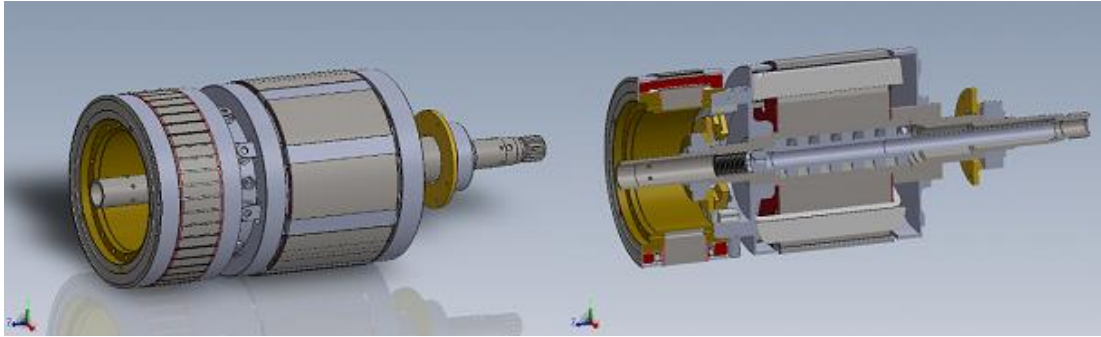


Şekil 4.12. Ana rotor patlatma görüntüsü



Şekil 4.13. Ana rotorun montajlanmış 3 boyutlu modeli

Rotorun tüm parçalarıyla oluşturulmuş montajlı katı modeli ve rotorun kesit görünümü Şekil 4.14.'de bulunmaktadır.

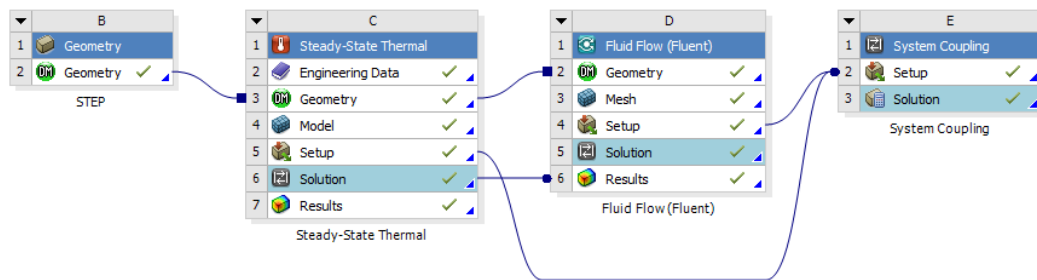


Şekil 4.14. Rotorun katı modeli ve kesit görünümü

Yağ ile soğutma özelliğinde olan alternatörde yağ pompası rotor miline bağlı olarak çalışmakla birlikte hem rotor mili içerisine hem de alternatör gövdesine depodan aldığı 5°C soğutma yağını iletir. Rotor mili içerisinde bulunan içi boş çelik mile pompadan yağ girişi olmaktadır. Rotor miline bağlı hareket eden pompanın ilettiği yağ debisi rotor mili devrine orantılı olarak değişmektedir. Aralarında 1:1 oran bulunmaktadır. Yağ önce çelik mil, devamında alüminyum mil içerisinden geçip, alüminyum milin kanallarında dolaşarak rotor milini ve mile oturan malzemeleri soğutmaktadır. Yüksek akım stator üzerindeki sargılarda oluşmaktadır. Rotor mili üzerinde bulunan deliklerden çıkan yağ, stator üzerinde bulunan kanallarda ve yüksek akımın geçmesiyle ısınan diyotlar üzerinde dolaşır. Daha sonra stator üzerinde bulunan yağ çıkış deliğinden tahliye edilir. Şekil 4.14.'de bulunan kesitte, rotorda yağın dolaştığı alüminyum milin kanalları gözükmemektedir.

4.4. Rotor modelinde ısı dağılımının yapılması

Rotor devrine göre ana ve ikaz sargılarında ısıl sıcaklıklar yani bakır kayıpları oluşmaktadır, aynı zamanda akımın geçtiği diyotlardan dolayı da ortama ısı çıkışı olmaktadır. Rotorun soğutulması için rotor içerisindeki mil içerisinden yağ akışı gerçekleşmektedir. Gerçekleştirilen “Investigation of heat distribution of an oil cooling brushless alternator rotor by using fluid solid interaction simulation strategy” adlı çalışmada alternatörün rotoru içindeki sıcaklık dağılımı izlenmiştir [56]. Çalışmaya göre analizler Ansys-Fluent (CFD) ve Ansys Steady-State Thermal (yapısal termal analiz) yazılımlarının birlikte kullanımıyla gerçekleştirilmiştir. Rotorun devrine göre ana ve ikaz sargılarında oluşan ısıl değerler Maxwell yazılımı ile yapılan analizlerden elde edilerek termal analizin girdisi olarak kullanılmıştır. Çalışmada Fluid Solid Interaction (FSI) yöntemi kullanılmıştır. FSI analizinin Ansys Workbench yazılımındaki şematik kurgusu ve veri aktarımı için yapılan bağlantılar Şekil 4.15.’de görülmektedir. Bu sayede rotor ana sargıları ve ikaz sargılarında elektrik üretimi esnasında direnç nedeniyle ortaya çıkan ısının rotoru oluşturan tüm parçalara iletim yolu ile dağılımı elde edilirken, rotor milinin içerisinde soğutma amaçlı dolaşan yağın akış ve ısı transferi simülasyonları yapılmıştır [56].



Şekil 4.15. FSI analiz kurgusunun Ansys Workbench yazılımındaki şematik gösterimi [56]

Üretimi tamamlanıp dayanıklılık testlerine tabi tutulacak rotorun, tanklarda kullanılabilmesi için zorlu çalışma koşullarında test edilmesi gerekmektedir. Daha öncede belirtildiği gibi rotorun 13000 d/dk ile test edilmesi gerekecektir.

Bahsedilen çalışmada 12 farklı devir için yapılan ana sargı ve ikaz sargısından kaynaklanan ısı değerler yapısal termal analize ısı akısı olarak hesaplanıp girilmiştir. Tablo 4.4.'de ısı değerler ısı güç (Watt) ve ısı akısı (W/m^2) değerlerini içerecek şekilde verilmiştir [56].

Tablo 4.4. Devire göre ana sargı ve ikaz sargısında ortaya çıkan ısı ve ısı akısı miktarları [56]

Devir [d/d]	Ana Sargı Toplam Isıl Güç [W]	İkaz Sargısı Toplam Isıl Güç [W]	Ana sargı ısı akısı [W/m^2]	İkaz sargısı ısı akısı [W/m^2]
2000	630	450	5230,47	6839,01
3000	665	510	5521,05	7750,88
4000	676	522	5612,38	7933,25
5000	730	567	6060,71	8617,15
6000	801	608	6650,17	9240,26
7000	843	637	6998,87	9681,00
8000	885	662	7347,57	10060,94
9000	908	671	7538,52	10197,72
10000	927	698	7696,27	10608,06
11000	984	712	8169,50	10820,83
12000	1001	741	8310,64	11261,57
13000	1093	778	9074,46	11823,89

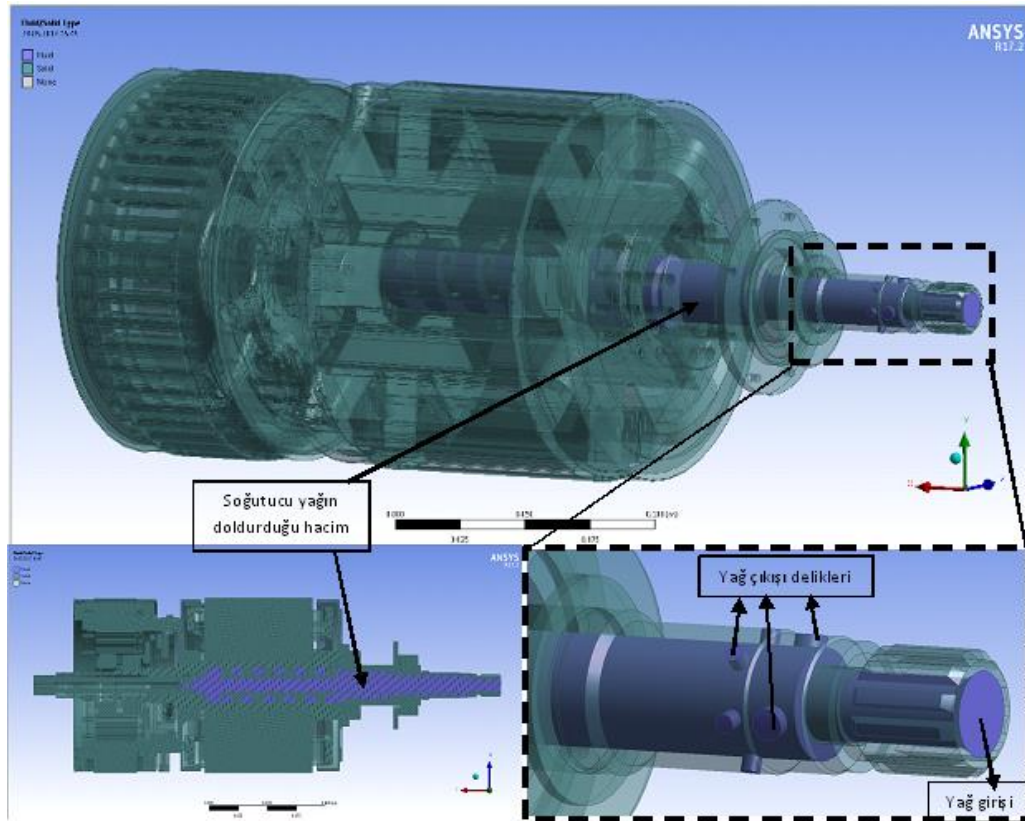
Zamandan bağımsız çözümlerin yapıldığı yapısal termal analizi için rotorda kullanılan malzemelerin ısı iletim katsayıları alternatörün ortalama çalışma sıcaklığına göre ayrı ayrı bulunup modele aktarılmıştır. Tablo 4.5.'de ısı iletim katsayısı değerleri görülmektedir [56].

Tablo 4.5. Rotorda kullanılan malzemelerin ısı iletim katsayısı değerleri [56]

Malzeme	Isı iletim katsayısı [W/m^2K]	Malzeme	Isı iletim katsayısı [W/m^2K]
6080 alüminyum	180	Silisi Sac	35
Elektrolitik bakır	380	Çelik 1040	50,7
Paslanmaz 304	17,2	Çelik 4140	42,6
Pirinc MS58	113	Vulkanize Fiber	0,044

Çalışmada, ana sargı ve ikaz sargısı üst kapağı ile stator arasında kalan havanın ısı transfer katsayısı değerleri belirlenmiş, bu bölgedeki hava sıcaklığı ise modele tahmini olarak 80 °C girilmiş ve her devirde aynı sıcaklık değeri kullanılmıştır. Şekil

4.16.'da katı modelin içerisine eklenen yağ geometrisi mavi renk ile gösterilmiştir. 12 adet devir için yağın giriş basıncı 4 bar ve giriş sıcaklığı 80 °C alınarak elde edilen değerler karşılaştırılmıştır [56].



Şekil 4.16. Soğutucu yağın doldurduğu hacmin rotor içerisindeki görünümü [56]

Tablo 4.6. Soğutucu yağın fiziksel özellikleri [56]

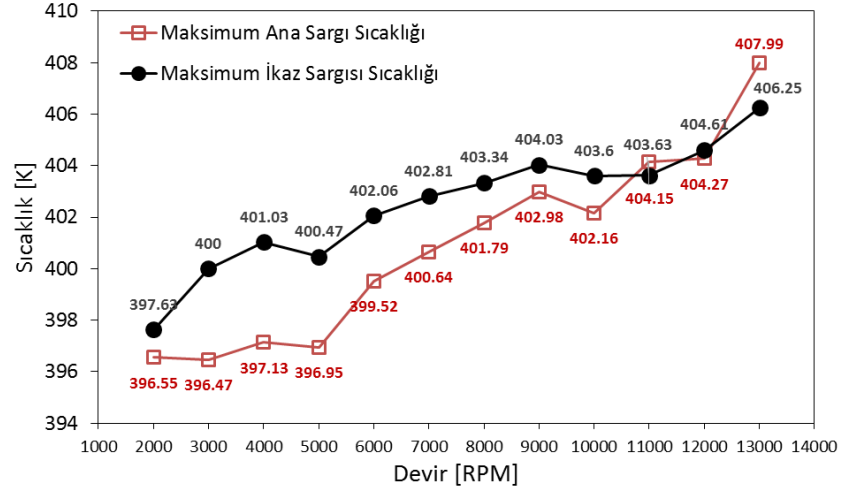
Yoğunluk (kg/m ³)	C _p , özgül ısı (kJ/kgK)	Isıl iletim katsayısı (W/mK)	Dinamik viskozite (kg/ms)
100 C'de	80 °C'de	80 °C'de	80 °C'de
841	2220	0,1367	0,01935

Şekil 4.17.'de rotor ana sargıları ve ikaz sargısındaki sıcaklık dağılımları daha net anlaşılması açısından ayrıca verilmiştir [56]. Buna göre rotor sargılarında 13000 RPM için ortaya çıkan en yüksek sıcaklık değeri olan 407 K (134,84°C) dir.

Devir [d/d]	Rotor Ana Sargıları ve İkaz Sargısı Sıcaklık Dağılımı	Devir [d/d]	Rotor Ana Sargıları ve İkaz Sargısı Sıcaklık Dağılımı
2000		8000	
3000		9000	
4000		10000	
5000		11000	
6000		12000	
7000		13000	

Şekil 4.17. FSI analizi neticesinde rotor ana sargıları ve ikaz sargısındaki sıcaklık dağılımları

Şekil 4.18.'de rotor devrine göre maksimum ana sargı ve ikaz sargısı sıcaklıkları grafik üzerinde verilmiştir. Düşük devirlerde ikaz sargısındaki sıcaklık değerlerinin ana sargıya göre yüksek olduğu görülmektedir. Fakat devir arttıkça ana sargılardaki sıcaklık değerleri daha fazla artmakta ve ikaz sargısı sıcaklık değerini geçtiği anlaşılmaktadır [56].



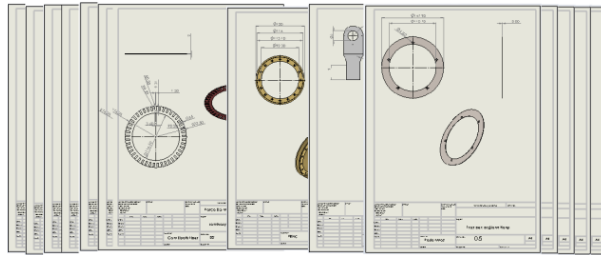
Şekil 4.18. Rotor devrine göre maksimum ana sargı ve ikaz sargısı sıcaklıkları

BÖLÜM 5. ROTORUN ÜRETİMİ

5.1. Rotor Parçalarının Üretilmesi

Rotor hızının 13000 RPM'e kadar yapılan simülasyonlar sonucunda çıkan değerler, seçilen malzemelerle rotorun üretimini mümkün kılmıştır. Sargıların maksimum sıcaklıkları göz önüne alındığında F sınıfı yalıtım malzemeleri yeterli görünse de, gerçekte olan kayıpların tam doğrulukla hesaplanması mümkün değildir ve hesaplanandan fazla ısı kayıpları olmaktadır. 13000 RPM gibi yüksek bir devre çıkabilen ve kritik bir tank ekipmanı olan rotor için H sınıfı yalıtım malzemelerinin kullanılması uygun bulunmuştur. Bu yalıtım sınıfı malzemelerin en yüksek çalışma sıcaklığının 453 K (180 °C) olduğu göz önüne alınırsa, 407 K'e ulaşan sargı sıcaklıklarından etkilenmeden rotor çalışmaya devam edebilecektir. Ayrıca metal sıkıştırma profilleri arasında da yalıtım malzemeleri bulunduğu için, yüksek devirlerde rotorda meydana gelen açılmalardan dolayı herhangi bir izolasyon direnci düşmesine sebep olacak etmenlerin de böylece azaltılacağı anlaşılmaktadır.

İlk olarak belirlenen malzemelere göre parçaların imalat için 2 boyutlu teknik çıktılar hazırlanmıştır (Şekil 5.1.). Parçaların üretiminde kullanılacak üretim yöntemleri Tablo 5.1.'deki gibi oluşturulmuştur. Daha sonra malzeme miktarları belirlenerek tedarik edilmiştir.



Şekil 5.1. Teknik çıktılar

Tablo 5.1. Rotor parçalarının üretim yöntemleri

Ürün Adı	Üretim Yöntemleri
laminasyon saçları	kalıp işlemleri, pres makinesi kesim işlemi
Sıkıştırma özel profilleri	kalıp işlemleri
Rotor milleri, ikaz sargı göbeği, sargı kapakları, burç, rulman kapağı, ikaz sargı flanşı, alan sargı rotor diskleri, yağ tahliye mili, pompa tahliye Mili	Üniversal Torna işlemleri, CNC Torna işlemleri
Diyot tablası, ikaz sargı göbeği, bara, rulman kapağı, ikaz sargı flanşı, alan sargı rotor eksi diski, kestamid parça, yağ tahliye mili pompa tahliye mili yağlama borusu, sıkıştırma profili	Üniversal Freze işlemleri, CNC Freze işlemleri
İkaz sargı flanş, çelik sac, bakır pabuçlar	Lazer kesim hizmeti
Rotor milleri, presbantlar, sargı kapatma lamaları, sıkıştırma profilleri, burçlar, alan sargı rotor diskleri Laminasyon paketleri	Delik açma, kesme işlemleri Fırınlama işlemleri
Miller, ikaz sargı göbeği, sargı kapakları, burç	Taşıma işlemleri
Rotor milleri	Isıl işlemler
Alan ve ikaz rotor sargıları	Sarım işlemleri
Alan ve ikaz rotor sargıları	Yalıtım işlemleri

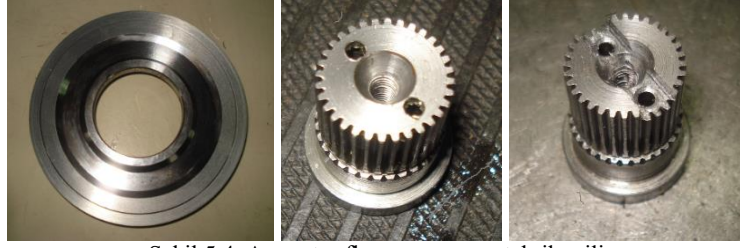
Belirtilen üretim yöntemlerine göre üretilen ürünlere ait bazı üretim resimleri aşağıdaki şekillerde yer almaktadır (Şekil 5.2.-5.9.).



Şekil 5.2. Taşıma öncesi rotor milleri ve yağ dolaşım mili



Şekil 5.3. Alan sargı rotor disk eksi tarafı delikler açılırken



Şekil 5.4. Ana rotor flanşı ve pompa tahrik mili



Şekil 5.5. İkaz sargı flanşları, ikaz sargı üstü kapatma, ikaz izolatörü (sırasıyla)



Şekil 5.6. Rotor alan sacları, rotor alan sargısı, izolatör(sırasıyla)



Şekil 5.7. Sıkıştırma profilleri ve sargı bağlantı pabuçla

Şekil 5.7.'de bulunan üçgen sıkıştırma profili kalıp olarak üretilmiştir. Diğeri ise lama saç şeklinde satın alınarak kenarları freze ile temizlenmiştir. Yine kapak altında kullanılan alüminyum sıkıştırma profili kalıp olarak üretilmiştir. Şekil 5.8.'de kalıp sıkıştırma profilleri bulunmaktadır.



Şekil 5.8. Kalıp sıkıştırma profilleri



Şekil 5.9. Diyot tablası ve bara

5.2. Rotor Parçalarının Montajı

Montajın ilk aşamasında rotor milleri birbirine vidalar ile montaj edilmiştir(Şekil 5.10.). Milin geçeceği ana rotor silisli saclar üst üste konularak paketlenmiştir(Şekil 5.11.).



Şekil 5.10. Montajı yapılmış rotor mili



Şekil 5.11. Ana rotor silisli saçlarının paketlenmesi

Silisli saçlar üst üste koyularak pakatlendikten sonra iki yüzeyine bakır sac konularak nüve haline getirilir (Şekil 5.12.). Paketleme, saçlarda bulunan deliklerden bakır çubuk geçirilerek iki yüzeyde de yer alan bakır saçlar ile iletim sağlanarak yapılmıştır ve bütün saçlar arasında elektriksel iletim sağlanmıştır.



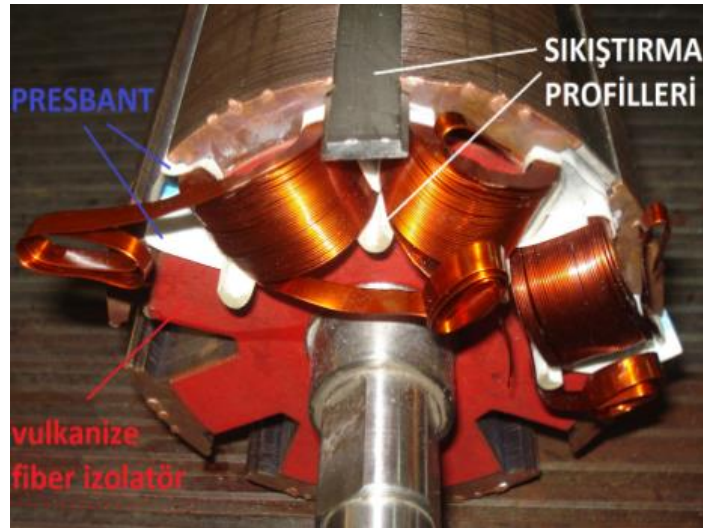
Şekil 5.12. Bakır saçla paketlenen ana rotor silisli saçları

Daha sonra milin nüveye montaj edilmesi aşamasına geçilmiştir. Aksenal çakma kuvveti uygulanmadan montajı gerçekleştirmek için ya kasnak ısıtılır ya da mil soğutulur. Isınan kasnak genişler ve montaj gerçekleşir. Daha sonra soğuyan kasnak eski boyutlarını almaya çalışırken mili sıkıştırır. Oluşan deformasyon ölçüsünde oturma yüzeylerinde basınç kuvvetleri oluşur. Isıtılma da çarpılma olmaması için ısıtmanın her tarafta eşit olmasına dikkat edilmelidir. Fırınla nüve ısıtılmış ve ısınan nüveye mil geçirilmiştir (Şekil 5.13.).



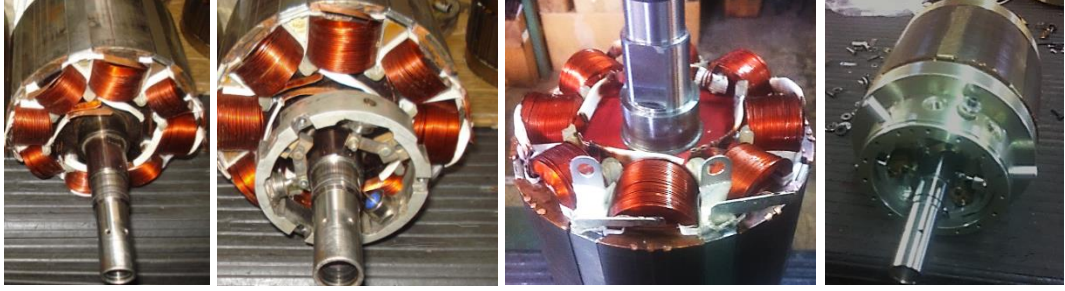
Şekil 5.13. Nüvenin fırınlanması ve rotor milinin montajı

Rotor mili montajı tamamlandıktan sonra alan sargıları sarılmaya başlanmıştır. Alan sargısının istenilen formu koruması ve hem elektriksel olarak hem de ısı yalıtımını sağlamak için presbantlar, fiber izolatörler ve diğer metal sıkıştırma profilleri montajı yapılmıştır. H sınıfı olan Nomex-polyamide-nomex şeklinde 3 katmandan oluşan Trivoltherm nkn presbantı kullanılmıştır.



Şekil 5.14. Ana rotor sargılarının sarılması

Ana rotor sargıları, tüm profiller ve pabuçların montajı tamamlandıktan sonra diyotların montajı yapılmıştır (Şekil 5.14.).



Şekil 5.15. Ana rotor montajı

Daha sonra ana rotorun kapakları takılırken alüminyum özel profiller kapakla birlikte sıkı geçme olacak şekilde yerleştirilmiştir. Alüminyum sıkıştırma profillerine eloksal kaplama yapılmıştır. Bu kaplama malzemenin aşınma ve korozyon direncini artırmak ayrıca elektriksel yalıtım sağlamak amacıyla yapılmıştır.

İkaz rotoru içinde aynı şekilde saclar paketlenmiş, vulkanize fiber izolatörlerin montajı yapılmış, ikaz göbeği çinko kaplandıktan sonra montajı yapılmış, uygun şekilde kesilen presbantlar nüvenin yuvalarına sokulmuştur. Çinko kaplama metallere uygulanarak metallerin aşınma direncini artırır ve korozyona karşı korur. İkaz rotoru sargısı gerçekleştirilmiş ve sargıların şeklini koruması ve yalıtım için sıkıştırma profilleri kullanılmıştır. Sargılardan sonra, yine sargı üstü kapatma yaylarından önce presbantların yerleştirilmesi yapılmıştır (Şekil 5.15.). Ayrıca rotor sargıları sarılmadan önce bakır sarımlara vernikleme yapılmıştır. Sargıların yalıtımını sağlamak amacıyla pe-872 vernik kullanılmıştır. Bu vernik polyester reçine esaslı izolaklar grubundadır. Verniği inceltmek için poliüretan izolak kullanılmıştır. Vernik işleminde ana rotor sargıları 50 °C’de 10 dakika boyunca ısıtılmış ve daldırma yöntemiyle sarımlara vernik uygulanmıştır. Daha sonra süzülen ana rotor sarımları fırına koyularak 150 °C’ de beklenilmiştir. Rotorlar üzerinde sarım bittikten sonra bu işlem yine bu şekilde tekrarlanmıştır. Yani vernikleme ve fırınlama işlemleri montaj tamamlandıktan sonra yine yapılmıştır.



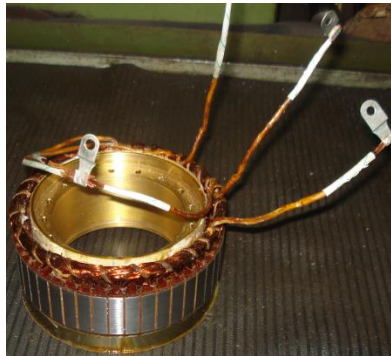
Şekil 5.16. İkaz rotoru

Montajı tamamlanan ikaz rotorunun sargı direnç değerleri ve izolasyon direnci kontrol edilmiştir (Şekil 5.16.).



Şekil 5.17. İkaz rotoru presbantlardan sonra izolasyon testi

Sargı direnç değerlerinin uygunsuzluğu ve izolasyon direncinin düşük çıktığı görülmüştür. Sargı uçlarına yapılan vernik pürmüz kullanılarak yumuşatılmış ve bağlantıları kontrol edilmiştir (Şekil 5.17.).



Şekil 5.18. İkaz rotoru sargı uçlarının kontrolü

Rotor sargıları kısa devre problemleri giderilerek tekrar montajlandıktan sonra rijitliği ve yalıtımını güçlendirmek, sargı tellerinin birbirine yapıştırarak bobinleri sertleştirmek için epoksi reçine ve sertleştirici kullanılmıştır. Karışım 3 de 2 reçine olarak uygulanmıştır.

5.3. Rotor Analizleri

5.3.1. İzolasyon analizleri

Ana rotor ve ikaz rotoruna ayrı ayrı izolasyon direnci testi uygulanmıştır. Bu testler materyal ve yöntem bölümünde anlatılan izolasyon test adımları baz alınarak yapılmıştır.

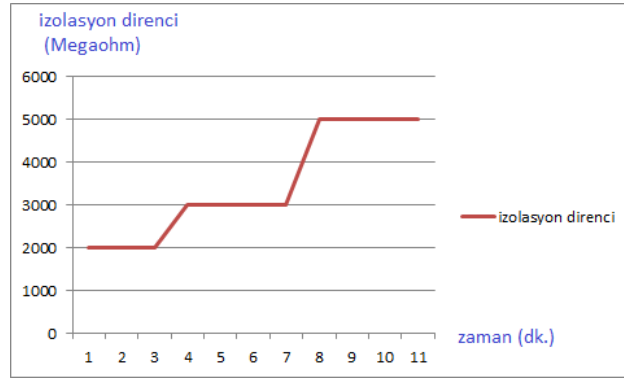
İkaz rotoru Şekil 5.19.'daki gibi megger cihazına bağlanarak 500V uygulanarak izolasyon direnci ölçümleri yapılmıştır. Ortam sıcaklığı 22 °C olarak ölçülmüştür. Daha sonra sırasıyla spot okuma, zaman-direnç okuma ve adım gerilim testleri uygulanmıştır. Ortam sıcaklığı 40 °C den farklı olduğu için izolasyon direnci sonuçları için düzeltme faktörleri bulunması gerekmektedir. Yalıtımda termoset malzemeler kullanıldığı ve ortam sıcaklığı 22 °C olarak ölçüldüğü için Denklem 3.2 kullanılması gerekmektedir. Bu denkleme göre düzeltme faktörü 0,7845 'dir. Bundan sonra bulunan izolasyon direnci değerleri Denklem 3.4 kullanılarak hesap edilmiştir. Yani düzeltme faktörüyle bulunan izolasyon değeri çarpılmıştır.



Şekil 5.19. Ana rotor izolasyon direncinin ölçülmesi

Ana rotor için spot okuma metodu sonucunda; sabit 1000 M Ω değeri okunmuştur. Yani izolasyon direnci değeri 784,5 M Ω 'dur. 1 dakika boyunca aynı değer okunmuştur.

Ana rotor için zaman-direnç okuma metodunda 5 saniye aralıklarla 10 dakika boyunca alınan değerler Şekil 5.20.'ye aktarılmıştır.



Şekil 5.20. Ana rotor zaman-direnç okuma testi grafiği

Şekil 5.20. incelendiğinde grafiğin gittikçe artan bir değer sergilediği görülmektedir. Değerlerde herhangi bir düşme olmaması PI ve DAR değerlerinin incelenmesine olanak sağlar.

PI değeri Denklem 3.5 deki gibi bulunmalıdır. Buna göre $PI = 5000/2000 = 2,5$ olarak bulunmuştur. Değerlendirmek için Tablo 3.1.'e bakılır ve 2,5 değeri ana rotor izolasyon direnci sonucu iyi olarak yorumlanmıştır.

DAR testi sonucu için 60 saniye boyunca 500V uygulanmıştır. 30. saniyede 6000 M Ω ve 60. Saniyede ise 9000 M Ω değerleri alınmıştır. Oran kullanıldığı için hem PI değeri hem de DAR değeri hesaplanırken sıcaklık düzeltme faktörü kullanılmasına gerek kalmamıştır. $DAR = 9000/6000 = 1,5$ olarak bulunmuştur. Bu değer Tablo 3.2.'ye bakıldığında iyi olarak yorumlanmıştır.

Üçüncü test olan adım gerilim testinde, mevcut test cihazının izin verdiği şekilde 3 kademedeki test yapılmıştır. Her farklı kademe 60 saniye boyunca uygulanmış ve

değer alınmıştır. Ayrıca test cihazımızın göstergesi, maksimum 10000 M Ω 'u gösterebilmektedir. Daha yüksek değerler için sonsuzu göstermektedir. 100 V'da sonsuz direnç, 250 V'da sonsuz direnç ve 500 V'da ise izolasyon direnci 8000 M Ω ve 5 saniye 30 M Ω ile 500 M Ω seviyeleri arasında regülasyon gösterdiği görülmüştür. Bu değer okunan minimum değerdir Sıcaklık düzeltme faktörü ile minimum değer 23,535 M Ω 'dur.

Testler ikaz rotoru için tekrarlanmıştır. Şekil 5.21.'de ikaz rotoru izolasyon direncinin ölçülmesine ait resim bulunmaktadır.

İkaz rotoru için spot okuma testi; sabit sonsuz değer okunmuştur. İzolasyon değeri 10000 M Ω 'un üzerindedir. Sıcaklık düzeltme faktörünü dikkate alırsak 7845 M Ω 'un üzerindedir.



Şekil 5.21. İkaz rotorunun izolasyon direncinin ölçülmesi

Zaman-direnç okuma testi ana rotordaki gibi ikaz rotoruna uygulanmıştır. 2. dakikada izolasyon direncinde küçük sapmalar olsa da 10 dakika boyunca sonsuz değer okunmuştur. PI değerleri oransal olduğu için hesaplanamamaktadır ancak 7845 M Ω dan büyük değerler olduğu için izolasyon iyi diye yorumlayabiliriz. Aynı şekilde DAR değeri de elde edilen sonsuz değerlerden dolayı hesaplanamamıştır ve iyi olarak yorumlanabilir.

Adım gerilim testinde 100 V, 250 V ve 500 V 60'şar saniye boyunca uygulanmıştır, Hepsinde sonsuz değeri okunmuştur. İkaz rotorunun izolasyon direnci iyidir.

5.3.2. Çevre testleri ve balans testleri

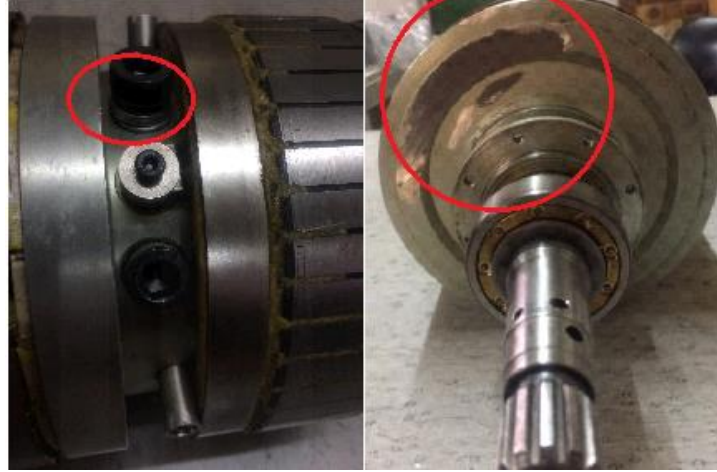
Denklem 2.7 kullanılarak rotor için artık dengesizliği hesaplanmıştır. $W = 19,862$ kg, balans kalite derecesi $G = 1$ mm/sec olarak alınmıştır. Maksimum servis devri, test devri olan $N = 13000$ RPM olarak alınmıştır. Değerler Denklem 2.7 de yerine yazıldığında ve çıkan sonuç g-cm 'ye çevrildiğinde $U = 1,459$ g-cm olarak bulunmuştur. Rotun balans değerinin bu değer altında olması gerekir. Denklem 2.8 kullanarak ve sonuç g-cm'ye çevrildiğinde yapılan hesaplamayla $U = 0,97$ g-cm artık dengesizlik değeri bulunmuştur. Bulunan iki değer standartlar arasında bir miktar farklılık olduğunu göstermektedir.

Epoksi işlemlerinden sonra salgısı alınan rotorun balans ölçümleri balans makinesine bağlanarak yapılmıştır.



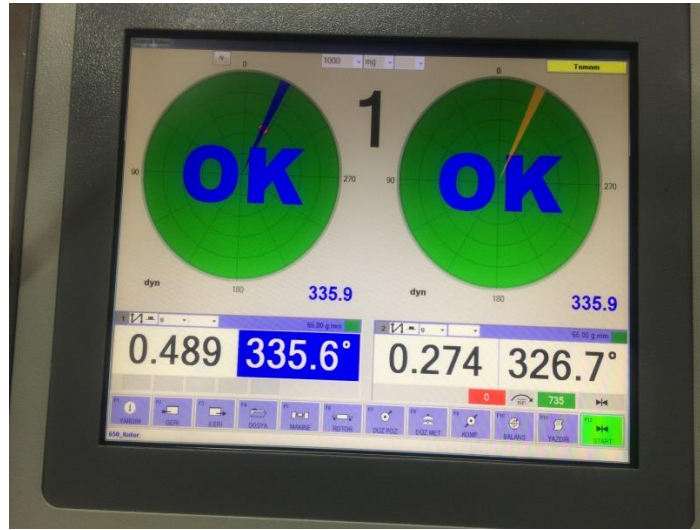
Şekil 5.22. Rotorun balans ölçümü

Şekil 5.22.'de görüldüğü gibi rotorun ikaz tarafında 3,46 g-cm, ana rotor tarafında ise 4,4 g-cm fazlalık bulunmuştur. Bu fazlalıklar ikaz rotoru üzerinde bulunan pullardan çıkarma yapılarak ve ana rotorun kapak kısmının işlenmesiyle atılmıştır (Şekil 5.23.).



Şekil 5.23. Rotorun iyi bir balansa sahip olması için fazlalıkların giderilmesi

Fazlalık giderme işlemlerinden sonra tekrar balansı kontrol edilen rotor, izin verilen artık balanssızlık değerlerinin altında bir değere sahip olmuştur (Şekil 5.24.).



Şekil 5.24. Rotor artık balanssızlık sonuçları

Nihai üründe artık balanssızlık miktarı değeri ikaz rotoru 0,274 g-cm ve ana rotorda 0,489 g-cm olarak sağlanmıştır. Rotorun MIL-STD-810G metot 502.5 düşük sıcaklık ve metot 501.5 yüksek sıcaklık testleri ürünün üretildiği Erel Makine bünyesinde gerçekleştirilmiştir.

5.4. Nihai Ürün

Şekil 5.25.'de üretilen rotora ait resim bulunmaktadır.



Şekil 5.25. Üretilen rotor

BÖLÜM 6. DEĞERLENDİRME

Çalışmada Leopard 2A4 tanklarda kullanılan 3 fazlı, 800A, fırçasız tip bir alternatör rotoruna ait bilgi kazanımı sağlanmıştır. Gerekli malzemeler tespit edilerek rotor modellemesi yapılmıştır. Gerçekleştirilen “Investigation of Heat Distribution of an Oil Cooling Brushless Alternator Rotor by using Fluid Solid Interaction Simulation Strategy” adlı çalışma ile elde edilen analizler sonucunda rotor sargılarında test devri olan 13000 d/dk’da oluşacak maksimum sıcaklık tespit 134,84 °C olarak elde edilmiş ve buna uygun malzeme seçimi ile rotor üretimi gerçekleştirilmiştir. H sınıfı yalıtım malzemeleri kullanılmıştır.

Üretilen rotorun izolasyon testlerinde spot okuma, zaman-direnç okuma ve adım gerilim yöntemleri kullanılmıştır. Giderek gerilimin artmasının izolasyon direnci testinde etkili olduğu görülmüştür. bu test esnasında 5 saniye süre ile okunan ölçümlerde ana rotorda izolasyon direncinin 23 ile 392 Mohm seviyeleri arasında regülasyon gösterdiği görülmüştür. Bu değer okunan minimum değerdir. Yine izolasyon direnci analizlerinde $PI = 2,5$ ve $DAR = 1,5$ bulunarak IEEE STD 43’e göre incelenmiş ve izolasyon direnci değerleri iyi seviyesinde olarak yorumlanmıştır.

Çalışma sonunda, üretilen rotorun izolasyon direncinin, IEEE STD 43-2013 standardının eşik değeri olan 5 megohm’dan büyük ve projede izolasyon direnci için hedeflenen 5-50 megohm seviyesinde olma kriterinin sağlandığı görülmüştür.

Projede önem verilen bir diğer nokta olan rotor balansı, yaklaşık 0,489 g-cm balanssızlık miktarı sağlanarak iyi balans hedefine ulaşılmıştır.

Çalışma sonunda üretilen rotor Kara Kuvvetleri Komutanlığı 1’inci Ana Bakım Merkezi Komutanlığı Tank Palet de stator içerisinde test edilmiştir ve testi geçmiştir. Böylece bilgi kazanımı ve üretimi gerçekleştirilmiş, izolasyon direnci ve balansı iyi

olan yerli üretim yüksek güçlü bir alternatör rotoru yedek parça olarak kullanılır hale getirilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aircraft/amt_handbook/media/FAA-8083-30_Ch10.pdf, Erişim Tarihi: 28.06.2017.
- [2] jeepdraw.com/images/US-Army-mechanic-course-Wheeled-Vehicle-Electrical-Systems-II-OD10031.pdf, Erişim Tarihi: 28.06.2017.
- [3] Williams, G.A. and Holt, M.J., The future of vehicle electrical power systems and their impact on system design. SAE Technical Paper 911653, 1991.
- [4] Meissner, E. and Richter, G., Vehicle electric power systems are under change! Implications for design, monitoring and management of automotive batteries. Journal of Power Sources 95 13-23, 2001.
- [5] Uçar, M., Alternatör arızalarının zeki denetim teknikleri ile gerçek zamanlı tespit edilmesi. Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2009.
- [6] www.army-technology.com/contractors/electrical/ce-niehoff/. Erişim Tarihi: 28.06.2017.
- [7] Headquarters Department of The Army, Principles of automotive vehicles. 13-29, 1985.
- [8] top10electrical.blogspot.com.tr/2015/02/synchronous-machine-rotor-types.html, Erişim Tarihi: 28.06.2017.
- [9] www.electway.net/news/difference_between_Asynchronous_and_synchronous_generator.html, Erişim Tarihi: 28.06.2017.
- [10] Gürdal, O., Elektrik Makinalarının Tasarımı, 2015.
- [11] Buschow, K.H.J., de Boer, F.R., Physics of Magnetism and Magnetic Materials, Kluwer Academic Publishers, 2003.
- [12] Tacer, E., Elektromekanik enerji dönüşümü (birinci ve ikinci bölümler) ders notları. İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Fakültesi, 2004-2005.

- [13] Kılınç, M.H., Dynamic properties of soft magnetic materials in the shape of thin films and ribbons, Boğaziçi University, Graduate Program in Physics, 2014.
- [14] Ünal, M.S., Doğal kaynaklardan ve atık malzemelerden stronsiyum ferrit miknatis üretimi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2011.
- [15] Ersoy, F.Ö., Magnetic and structural properties of fe-ni-al alloys. Istanbul Technical University, Institute Of Science And Technology, 2011.
- [16] Parthasaradhy, P., Ranganayakulu, S.V., Hysteresis and eddy current losses of magnetic material by Epstein frame method-novel approach. The International Journal Of Engineering And Science (IJES) ISSN (e): 2319 – 1813 ISSN (p): 2319 – 1805, 85-93, 2014.
- [17] Power Electronic., Eddy Current & Hysteresis Loss , Module 6 - Lesson 22, National programme on technology enhanced learning ,Version 2 EE IIT, Kharagpur.
- [18] Soshin, C., Physics of Ferromagnetism, Oxford Science Publication, pp:28, 2009.
- [19] Altuğ, G.S., Çökelti sertleştirilmiş bakir alaşımlarının mekanik ve elektriksel özelliklerinin değerlendirilmesi. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2014.
- [20] Oğuz, B., Malzeme Bilgisine Giriş, Oerlikon Yayını, 1989.
- [21] Çavuş, Z., Susuzlaştırılmış Boraksın Alüminyum Bakir Alaşımının Mikro Yapı Ve Mekanik Özelliklerine Etkisi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2010.
- [22] www.searchautoparts.com/motorage/electrical/toyota-prius-transaxle-group-casestudy, 2013. Erişim Tarihi: 28.06.2017.
- [23] www.voltmotor.com.tr/catalogue_tr.pdf. Voltelektrik motorları teknik katalog, Erişim Tarihi: 28.06.2017.
- [24] www.electricalquizzes.com/electric-machine-design/electric-machine-design, Erişim Tarihi: 28.06.2017.
- [25] Pattharasiriwong, P., Jubsilp, C., Mora, P., Rimdusit, S., Dielectric and thermal behaviors of fluorine-containing dianhydride-modified polybenzoxazine: A molecular design flexibility. Journal of Applied Polymer Science,45204. 2017.

- [26] İlhan, M. S., Katı yalıtkanlardaki elektriksel zorlanmalar ve ömür saptaması. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2005.
- [27] Chauhan, R.C., Singh, M., Singh, B., Rotating machine insulation materials and techniques, Indian Journal of Engineering & Materials Sciences Vol. 7, pp. 370-374, 2000.
- [28] www.promote.com.tr/documents/sunumlar/izolasyon%20vernikleri.pdf, Erişim Tarihi: 28.07.2017.
- [29] www.theaemt.com/technical-info/general-engineering/classification-of-insulation-systems, Erişim Tarihi: 28.07.2017.
- [30] www.slideshare.net/anju1232008/insulating-materials-electrial, Erişim Tarihi: 28.07.2017.
- [31] Keysight Technologies, Preventive maintenance test with insulation resistance test. 2014.
- [32] American National Standards Institute, IEEE STD 43-2000(R2006) (Revizyon IEEE Std 43-1974) 2006.
- [33] Tom Bishop, P.E., Insulation Resistance Testing: How Many Megohms Does it Take to Start a Motor?, Electrical Apparatus Service Association, Neta World, 2008.
- [34] www.motordoc.org/wp-content/uploads/2013/11/Insulation-Resistance-Testing-Article.pdf, Erişim Tarihi: 28.07.2017.
- [35] Sag, E., Döner elektrik makinaların kurutulması ve izolasyon direncinin ölçülmesi, Elektrik Mühendisliği 113., UDK : 620.178,621.313.
- [36] IEEE Std 43™-2013 (Revision of IEEE Std 43-2000). IEEE recommended practice for testing insulation resistance of electric machinery, 2013.
- [37] emtest.com.tr/yukse-sicaklik-testi-mil-std-810g-method-501-5/. Erişim Tarihi: 28.08.2017.
- [38] MIL-STD-167-1A, 2005.
- [39] The Practical Application of ISO 1940/1, 2009.
- [40] McKinnon, D. L., Insulation resistance profile (irp) and its use for assessing insulation systems, IEEE, PdMA Corporation, 2010.

- [41] McKinnon D. L., Simulating insulation systems under various environmental conditions in the laboratory, IEEE, PdMA Corporation, 2012.
- [42] Brown, A., Essalihi, M., David, E., İnsulation resistance measurements for machine insulation, Electrical Insulation Conference, Annapolis, Maryland, 2011.
- [43] Lee, W., Choi, D. and Sunwoo, M., Modelling and simulation of vehicle electric power system, Journal of Poer Sources 109, 58-66. 2002.
- [44] www.nationaldefensemagazine.org/archive/2011/August/Pages/ANewMissionforMilitaryTrucksPowerGeneration.aspx, Erişim Tarihi: 27.07.2015.
- [45] Songül, S., Tank namlusu stabilizasyon sisteminin arduino ile uygulaması ve deneysel düzeneğin hazırlanması, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2013.
- [46] <http://www.americanpowerinc.com>., Erişim Tarihi: 28.08.2017.
- [47] www.jenoptik.com/us-spray-oil-cooled-generator., Erişim Tarihi: 28.8.2017.
- [48] [delcoremy.com/Delco-Remy-Connect-Online-Newsletter/September-2011-\(1\)/Photos-and-Images/Delco-Remy-Connect---September-2011---Final.aspx](http://delcoremy.com/Delco-Remy-Connect-Online-Newsletter/September-2011-(1)/Photos-and-Images/Delco-Remy-Connect---September-2011---Final.aspx), Erişim Tarihi: 27.07.2015.
- [49] www.mesh.com.tr/ileri-muhendislik.html, Erişim Tarihi 10.07.2017.
- [50] Kaplan, A., Francis tipi türbin çarkının tersine mühendislik ile tasarımı ve rehabilitasyonu, Tobb Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2016.
- [51] Li, L., Li, C., Tang, Y., Du, Y., An integrated approach of reverse engineering aided remanufacturing process for worn components, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 48, 39-50, 2017.
- [52] Kwak, M., Kim, H., Modeling the time-varying advantages of a remanufactured product: is “reman” better than “brand new”? Journal of Mechanical Design, Vol. 138 / 051701-1, 2016.
- [53] Kwak, M., Planning demand- and legislation-driven remanufacturing for a product family: a model for maximizing economic and environmental potential, Industrial Engineering & Management Systems ,Vol 14, No 2, June 2015, pp.159-174, 2015.
- [54] www.ansys.com/resource-library/white-paper/electric-machine-design-methodology-a-revolutionary-approach, Erişim Tarihi: 27.07.2017.

- [55] Kapashi, G., Mulimani, P., Veeranna D. K., , Dodamani S. P., Finite element optimization of stator by casted and welded structures. International Journal of Research in Engineering and Technology., 432-442, 2014.
- [56] Coşkun, G., Karakuş, C., Varan, M., Nart, E., Investigation of heat distribution of an oil cooling brushless alternator rotor by using fluid solid interaction simulation strategy. 8th International Advanced Technologies Symposium (IATS'17), Elazığ, 19-21 October 2017.

ÖZGEÇMİŞ

Ceylan Karakuş, 27.03.1991'de Çorum ilinin Alaca ilçesine bağlı Mazıbaşı köyünde doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Çorum'da tamamlayarak, 2009 yılında Çorum Eti Lisesi'nden mezun oldu. 2010 yılında başladığı Karabük Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü'nü 2014 yılında bitirdi. 2014 yılında Sakarya Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans eğitimine başladı. 2016-2017 yılı güz döneminde Erasmus + programıyla Prag Çek Teknik Üniversitesi'nde bulunan Çek İformatik, Robotik ve Siberetik Enstitüsü'nde araştırmacı öğrenci olarak çalıştı. Şuan TÜBİTAK Projesi'nde bursiyer olarak çalışmaya devam etmektedir.