T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EKSENEL AKILI İNDÜKSİYON MOTOR TASARIM ARAYÜZÜ GELİŞTİRİLMESİ

Erkan ER

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ŞANLIURFA
2019

T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EKSENEL AKILI İNDÜKSİYON MOTOR TASARIM ARAYÜZÜ GELİŞTİRİLMESİ

Erkan ER

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ŞANLIURFA
2019

Doç. Dr. Mehmet Tahir GÜLLÜOĞLU danışmanlığında, Erkan ER'in hazırladığı **"Eksenel Akılı İndüksiyon Motor Tasarım Arayüzü Geliştirilmesi"** konulu bu çalışma 07/10/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

İmza

Danışman : Doç. Dr. Mehmet Tahir GÜLLÜOĞLU ..……

Üye : Prof. Dr. Abdullah YILDIZ ……..

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Serdal ARSLAN ……..

Bu Tezin Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yapıldığını ve Enstitümüz Kurallarına Göre Düzenlendiğini Onaylarım

Doç. Dr. İsmail HİLALİ
Enstitü Müdürü

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

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET i
ABSTRACT ii
TEŞEKKÜR iii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
ÇİZELGELER DİZİNİ v
SİMGELER DİZİNİ vi
1. GİRİŞ 1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR 3
3. MATERYAL ve YÖNTEM 10
3.1. Materyal 10
3.1.1. Asenkron motorun yapısı 10
3.1.1.1. Stator 10
3.1.1.2. Rotor 11
3.1.2. Asenkron motor çalışma prensibi 12
3.1.3. Asenkron motor eşdeğer devresi 13
3.1.4. Asenkron motor parametrelerinin belirlenmesi 15
3.1.4.1. Sargı direnci ölçüm deneyi 15
3.1.4.2. Boş (yüksüz) çalışma deneyi 16
3.1.4.3. Kilitli rotor (kısa devre) deneyi 19
3.1.5. Asenkron motorda güç, kayıplar ve verim 21
3.1.6. Eksenel akılı indüksiyon motorunun yapısı 23
3.1.6.1. Tek hava boşluklu (tek stator - tek rotorlu) motor 26
3.1.6.2. Çift hava boşluklu motor 26
3.1.7. Eksenel akılı indüksiyon motorunun çalışması 28
3.1.8. Eksenel akılı indüksiyon motoru uygulama alanları 28
3.2. Yöntem 31
3.2.1. Eksenel akılı indüksiyon motoru temel boyutlandırma denklemleri 31
3.2.2. Ansys maxwell ve matlab gui programları 35
3.2.3. Tasarlanan arayüz 37
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA 41
4.1. Ansys Maxwell analiz sonuçları 41
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER 51
KAYNAKLAR 53
ÖZGEÇMİŞ 57
EKLER 58
EK 1. Program Kodu 58
EK 2. Analiz verileri 79

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

EKSENEL AKILI İNDÜKSİYON MOTOR TASARIM ARAYÜZÜ GELİŞTİRİLMESİ

Erkan ER

Harran Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Mehmet Tahir GÜLLÜOĞLU
Yıl: 2019, Sayfa: 85

Asenkron motorlar ilk keşfinden bu yana endüstride yıllardır yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca bu motorların bazı özellikleri değiştirilerek kullanım alanları ve yapısında kullanılan malzemeler çeşitlenmiştir. Genel çalışma prensipleri değişmemesine rağmen geometrik bakımdan silindir, küre, konik ve hatta disk şeklinde yapılabilmektedir. Bu geometrilerden disk yapılı olan eksenel akılı makine topolojisi olarak bilinmektedir. Eksenel akılı makineler yüksek verimlilik, yüksek güç yoğunluğu, tıkız yapıları bakımından avantaj sunması bakımından dikkat çekicidir. Geleneksel asenkron motor gibi kullanılan malzeme ve yapı bakımından aynı özellikleri taşıyan eksenel akılı indüksiyon motorları halen araştırılma konusudur. Bu tez çalışmasında eksenel akılı indüksiyon motorun genişletilmiş literatür araştırması verilmiştir. Literatür bilgisi ışığında motorun boyutlandırma denklemleri verilmiştir. Bu denklemler MATLAB GUI yazılımı kullanılarak eksenel indüksiyon motor tasarım arayüzü oluşturulmuştur. Böylece farklı güçler için boyutlandırma verileri elde edilerek yazılım hazırlanmıştır. Ayrıca elde edilen boyutlandırma verileri sonlu elemanlar metodu kullanan bir yazılım vasıtası ile nümerik analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen tork, akım, verim verileri değerlendirilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Eksenel akılı motor, asenkron motor, eksenel motor, indüksiyon motoru

ABSTRACT

MSc Thesis

DESIGN INTERFACE DEVELOPMENT FOR AXIAL FLUX INDUCTION MOTOR

Erkan ER

Harran University

Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical-Electronics Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mehmet Tahir GÜLLÜOĞLU
Year: 2019, Page: 85

Asynchronous motors have been used extensively in the industry since the first exploration. In addition, some properties of these engines have been changed and the materials used in their use and structure have been diversified. Although the general working principles do not change, they can be made geometrically in the form of cylinders, spheres, cones and even discs. One of these geometries is known as axial flux machine topology which has a disc structure. Axial flux machines are remarkable in terms of their high efficiency, high power density and advantage in terms of compact structures. Axial flux induction motors, which have the same properties in terms of materials and structures used as conventional asynchronous motors, are still subject to research. In this thesis, extended literature search of axial flux induction motor is given. In the light of literature information, the sizing equations of the engine are given. By using MATLAB GUI software, axial induction motor design interface was created. Thus, sizing data for different powers were obtained and the software was prepared. In addition, numerical analysis of the obtained sizing data was performed by means of a software using the finite element method. The obtained torque, current and efficiency data were evaluated.

KEY WORDS: Axial flux motor, asynchronous motor, axial motor, induction motor

TEŞEKKÜR

Tez yazım aşamasında ilgi ve desteğini esirmeyen, bilgi ve tecrübesiyle bana her zaman yardımcı olan değerli hocam Doç. Dr. Mehmet Tahir GÜLLÜOĞLU'na, teknik konulardaki yardımlarından dolayı çalışma arkadaşım Arş. Gör. Mehmet Taner KARSLI'ya ve her zaman manevi desteği ile yanımda olan eşim Özlem ER'e ve oğlum Esat Emir ER'e sonsuz teşekkür ederim.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 3.1. Asenkron motor parçaları 10
Şekil 3.2. Asenkron motorun statora indirgenmiş bir faz eşdeğer devresi 15
Şekil 3.3. Asenkron motor sargı direnci ölçüm deney şeması 16
Şekil 3.4. Asenkron motor boş (yüksüz) çalışma deney şeması 17
Şekil 3.5. Asenkron motor boş (yüksüz) çalışma deneyi eşdeğer devresi 18
Şekil 3.6. Asenkron motor kilitli rotor çalışma deneyi eşdeğer devresi 20
Şekil 3.7. Asenkron motor güç ağacı 23
Şekil 3.8. Eksenel akılı ve radyal akılı motor çekirdek-sargı şekilleri 24
Şekil 3.9. Eksenel akılı ve radyal akılı motor manyetik alan şekilleri 24
Şekil 3.10. EAİM stator resmi a) boş hali b) sargılı hali 25
Şekil 3.11.EAİM disk tipi rotor şekli 25
Şekil 3.12.Tek sator – tek rotorlu EAİM şekli ve manyetik akı yolu 26
Şekil 3.13. Çift stator – tek rotorlu yapının şekli ve manyetik akı yolu 27
Şekil 3.14. Çift rotor – tek statorlu yapının şekli ve manyetik akı yolu 27
Şekil 3.15.EAİM topolojileri 28
Şekil 3.16. EAİM elektrikli araç uygulamaları şekli a) Tek rotor-tek statorlu iki motor b) Çift rotor-tek statorlu bir motor yapısı 29
Şekil 3.17. Elektrikli araç uygulamaları için örnek EAİM resmi 30
Şekil 3.18. Tavan vantilatörü için tek fazlı EAİM resmi 30
Şekil 3.19. 150 W Güç değerine sahip iki motorun şekli a) RAİM b) EAİM 31
Şekil 3.20. Stator kesiti ve alan dağılımı 32
Şekil 3.21. Arayüz analitik ve nümerik analiz süreci 38
Şekil 3.22. Arayüz görünümü 39
Şekil 3.23. Ansys Maxwell çözüm algoritması 40
Şekil 4.1. Model çözümü için modelin 1/4 hale getirilmesi 41
Şekil 4.2. Harici devre modeli 42
Şekil 4.3. Modelin mesh yapısı 42
Şekil 4.4. Uygulanan gerilim değişimi 43
Şekil 4.5. Faz akımları değişimi 43
Şekil 4.6. Faz sargılarında indüklenen gerilim değişimi 44
Şekil 4.7. Demir kaybı değişimi 44
Şekil 4.8. Demir kaybı yoğunluğu değişimi 45
Şekil 4.9. Bakır kaybı değişimi 45
Şekil 4.10. Giriş gücü değişimi 46
Şekil 4.11. Çıkış gücü değişimi 46
Şekil 4.12. Rotor ve stator manyetik akı yoğunluğu değişimi 47
Şekil 4.13. Stator akım yoğunluğu değişimi 47
Şekil 4.14. Rotor oluklarının düz ve eğik şekilleri 48
Şekil 4.15. Rotor çubuklarının eğimi ile elektromanyetik tork değişimi 48
Şekil 4.16. Demir kaybı değişimi 49

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 1.1. Literatürde araştırılan bazı eksenel akılı indüksiyon motorlarının boyutları…..……10
Çizelge 4.1 Eğiklik açısına göre elektromanyetik tork değişim değerleri…….50

SİMGELER DİZİNİ

D_i	İç çap
D_o	Dış çap
n_s	Senkron hız
f	Frekans
p	Kutup sayısı
w_s	Senkron açısal hız
S	Kayma
n_r	Rotor hızı
w_r	Rotorun açısal hızı
L_{sl}	Stator kaçak indüktansı
X_{sl}	Stator kaçak reaktansı
R_s	Stator devresi omik direnci
R_{fe}	Nüve kayıplarını temsil eden omik direnç
X_m	Mıknatıslanma reaktansı
I_o	Boş çalışma akımı
I_{fe}	Nüve kayıpları akımı
I_m	Mıknatıslanma akımı
E_s	Stator sargılarında indüklenen gerilim
I_s	Stator devresi akımı
V_s	Statora uygulanan gerilim
E_{kr}	Kilitli rotor gerilimi
$X_{rl\text{-}kr}$	Kilitli rotor reaktansı
R_r	Rotor devresi omik direnci
N_1	Stator sarım sayısı
N_2	Rotor sarım sayısı
a	Dönüştürme oranı
I'_r	Statora aktarılmış rotor devresi akımı
X'_{rl}	Statora aktarılmış rotor reaktansı
R'_r	Statora aktarılmış rotor omik direnci
V_{da}	Doğru akım deney gerilimi
I_{da}	Doğru akım deney akımı
R_{sda}	Stator sargısı DA direnci
V_{ab}	Fazlar arası gerilim
I_a, I_b, I_c	Faz akımları
P_o	Boş çalışma gücü
$P_{s\text{-}cu}$	Stator devresi bakır kaybı
P_{fe}	Toplam demir kaybı
P_{s+v}	Sürtünme ve vantilasyon kayıpları
Z_o	Boş çalışma empedansı
I_{kr}	Kilitli rotor akımı
$V_{ab\text{-}kr}$	Kilitli rotor fazlar arası gerilimi
P_{kr}	Kilitli rotor toplam gücü
Z_{kr}	Kilitli rotor empedansı
$Cos\varphi_{kr}$	Kilitli rotor güç katsayısı
P_g	Motor giriş aktif gücü
Q_g	Motor giriş reaktif gücü
S_g	Motor giriş görünür gücü
$V_{s\text{-}f}$	Motor bir faz gerilimi
$I_{s\text{-}f}$	Motor bir faz akımı
$Cos\varphi_s$	Motor güç katsayısı
$P_{r\text{-}cu}$	Rotor devresi bakır kaybı
$P_ç$	Motor çıkış aktif gücü
$\%\eta$	Yüzde verim
d	Nüve çapı
l	Nüve kalınlığı

k_d	EAİM çap oranı
l_e	Nüve yüzey uzunluğu
R_{out}	Dış yarıçap
R_{in}	İç yarıçap
R_{avg}	Ortalama yarıçap
S_r	Nüve faydalı yüzey alanı
B	Manyetik akı yoğunluğu
Ø	Manyetik akı miktarı
A	Nüve yüzey alanı
B_{ds}	Stator nüve akı yoğunluğu
τ_s	Stator olukları arası mesafe
b_s	Stator oluk genişliği
S_p	EAİM kutup başına nüve yüzey alanı
K_b	Sargı dağıtım katsayısı
K_p	Sargı adım katsayısı
K_w	Sargı faktörü
T	Tork (moment)
$F_{\sigma tan}$	Hava boşluğunda oluşan teğet kuvvet
j	İletken akım yoğunluğu
Z	İletken toplam iletken sayısı
B_{dr}	Rotor nüve akı yoğunluğu
τ_r	Rotor olukları arası mesafe
b_r	Rotor oluk genişliği
L_{ag}	Hava boşluğu uzunluğu

Kısaltmalar

EAİM	Eksenel Akılı İndüksiyon Motoru
RAİM	Radyal Akılı İndüksiyon Motoru
3D SEY	3 Boyutlu Sonlu Elemanlar Yöntemi
2D SEY	2 Boyutlu Sonlu Elemanlar Yöntemi
SEY	Sonlu Elemanlar Yöntemi
GUI	Graphical User Interfaces

1. GİRİŞ

Gerek sanayi gerekse modern yaşamımızda elektrik enerjisi gereksinimi giderek artmaktadır. Enerjinin büyük bir bölümünü endüstride motorlar harcamaktadır. Bu nedenle yüksek verim sınıflarında motorların tercih edilmesi elzemdir. Bu enerji ihtiyacı teknolojik gelişmelere paralel olarak çözülebilmesine karşın kayıpların azaltılması halen önemli bir problemdir.

Ulusal ve uluslararası standartlar neticesinde elektrik makineleri üreticileri rekabet gücünü ve karını arttırabilmek amacıyla düşük maliyetli, yüksek performanslı elektrik makinaları üretme eğilimindedir. Bilindiği gibi, bilgisayar yazılım teknolojisinin gelişmesiyle birlikte elektrik makinalarının tasarımı için sanal platformlar oluşturulmaktadır. Bu paket programlar iletasarlanan motor veya jenaratörün performansı tahmin edilebilmektedir. Böylece, üretici firmalar bu tasarım araçları ile piyasalardaki üstünlüğünü ve rekabet gücünü arttırabilmektedir (Tarımer, 2005).

Elektrik, manyetik ve mühendislik problemlerin çözümünde kullanılan ABAQUS, ANSYS (MAXWELL), COMSOL, FEMLAB, FLUX 2D/3D ve INFOLYTICA (MAGNET, ELECNET, vb.), gibi birçok paket yazılım bulunmaktadır. Bu yazılım programları sonlu elemanlar metodu kullanarak nümerik analizler gerçekleştirmektedir. Bu programların bazıları hazır tasarım arayüzleri bulundurmakta hatta ele alınan makine geometrisi için sayısal analiz yapabilmektedir. Örneğin Ansys Rmxprt, Speed, vb. olarak sıralanabilir.

Asenkron motorlar endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu motorların bazı tasarımsal özellikleri dikkate alınarak kullanım alanları artmıştır. Ancak verimleri sınırlı kalmıştır. Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü'nün verilerinde elektrik tüketiminin %36'sını asenkron motorlar oluşturmakta ve bu motorlardan 90-135 kW aralığındaki motorlar %17,2'lik en yüksek paya sahiptir. Ayrıca verilere göre sanayide kullanılan motorların %29'u pompa motorlarıdır. IEC 60034-30 standartları dalgıç

motorları kapsamamaktadır. Ülkemizde asenkron motorlar için 2017 yılında 1HP-500HP IE2 veya IE3 verim sınıfı istenmiştir. Bu nedenle yüksek verimli elektrik motorların tasarımı önemlidir. Asenkron motorun veriminin artırılmasına yönelik birçok yöntem vardır. Bu yöntemler; aktif madde miktarını artırmak, daha uzun paket boyu kullanmak, çift katmanlı sargılar kullanmak, yüksek kaliteli ve daha düşük kayıplı laminasyon malzemeleri kullanmak, rotor yüzeyi için daha kaliteli alüminyum malzeme veya bakır kullanmak, fan düzeneği verimini geliştirmek, rotor tasarımını iyileştirmek, stator ve rotor arasındaki hava aralığını uygun hale getirilmesi şeklinde sıralanabilir (Gök, 2015). Hava aralığının arttırılması mıknatıslanma akımını arttırdığı için demir kayıplarının artmasına güç faktörünün azalmasına yol açmaktadır (Çunkaş, 2012). Asenkron motorun bazı tasarım parametrelerinin veya nüve materyalinin değişimi RMxprt ve Maxwell kullanılarak inceleyen çalışmalar çoktur (Ping ve ark., 1999; Tarımer, 2005; Çunkaş, 2012; Deshmukh ve ark., 2014; Gök, 2015). Ancak ülkemizde motor tasarımı üzerine kullanıcı arayüz programları üzerine gerçekleştirilen çalışmaların sınırlı kalmasının yanı sıra zamanla azalmaktadır. Bunun temel nedeni mevcut ve yeni benzetim tabanlı elektromanyetik programlarının motor tasarımı yapabilecek arayüz bulundurması olarak gösterilebilinir. Bu programlar mevcut geometriler için tasarım ve analiz imkânı sunmasına karşın yeni makine geometrileri için yetersiz kalabilmektedir. Sonlu elemanlar metodu kullanarak nümerik analiz gerçekleştiren programların hepsi yurt dışı menşeilidir. Bu bakımdan yeni arayüz yazılımlarının gerçekleştirilerek yurt dışına aktarılacak harcamaların ülkemizde kalması sağlanabilir.

Ulusal alan yazında (Yök Tez ve Google Akademik) yer alan 520 çalışmanın büyük çoğunluğu üç fazlı asenkron motordur. Asenkron motor çalışma prensibi geleneksel radyal makina için uygulanmaktadır. Ayrıca doğrusal yapılı ve eksenel (disk yapılı) asenkron motor üzerine gerçekleştirilen çalışmalar sınırlıdır. Kısacası özel yapıdaki kütle rotorlu asenkron motora ait 4 çalışma, doğrusal hareketli asenkron motora ait 30 çalışma ve disk yapılı 1 çalışma bulunmaktadır. Bu nedenle eksenel makinalar üzerine çalışmaların arttırılması elzemdir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Asenkron motorlar yaklaşık yüzyılı aşkın süredir halen kullanılmaktadır. Bu motorlar; tek uyartımlı, basit yapılı, kabul edilebilir verimlerde ucuz maliyetli olarak üretilebilmeleri bakımından tercih edilmektedir. Asenkron motor geleneksel yapılı (radyal akılı) olarak yaygınlaşmasına rağmen disk tipi (eksenel akılı) olarak da tasarlanabilmektedir. Eksenel akılı indüksiyon motoru (EAİM) geleneksel yapıdaki asenkron motora çalışma prensibi ve yapısında kullanılan malzemeler bakımından çok benzemektedir. Bu açıdan ticari çalışmaların yanısıra özellikle akademik araştırmalar son yıllarda yaygınlaşmıştır.

Tarihçesine bakıldığında, elektromanyetik indüksiyon prensibine sahip eksenel akı sistemini kullanan ilk elektrikli makine, 1821 yılında Faraday tarafından tanıtılan ilkel disk makinesidir ve eksenel akı makinelerinin öncüsüdür. Fakat 1837 yılında Davenport radyal akılı modeli için ilk patenti aldığında bu ilk elektrik makinesi olarak kabul görmüştür. 1980'lerden bu yana eksenel akı makinelerinin düşük hız, doğrudan tahrik elektriksel uygulamaları üzerine çalışılmıştır. Eksenel akılı indüksiyon motoru (EAİM) ile ilgili gerçekleştirilen akademik çalışmalar incelendiğinde; temel motor karakteristiği, farklı stator-rotor kombinasyonlarının (çoklu stator veya çoklu rotor durumlarının) gerçekleştirilmesi, farklı uygulama alanlarında kullanılması üzerine araştırmalar aşağıdaki şekilde sıralanabilir.

EAİM üzerine genel literatür araştırma çalışması Nasiri-Gheidari ve Lesani (2012a) tarafından ayrıntılı olarak yapılmıştır. Eksenel akılı makine geometrilerine asenkron motor çalışma prensibi de geçerli olduğundan literatürde eksenel akılı makine geometrileri için asenkron motor tasarımları uygulanmıştır.

EAİM torus tip yapıdaki motor geleneksel asenkron motor ile karşılaştırması gerçekleştirilerek tork yoğunluğunun EAİM'un yaklaşık 2.62 kat daha fazla olduğu gösterilmiştir (Sakai ve ark., 2018). Bu çalışmada ayrıca EAİM'in geleneksel asenkron motorla aynı çap boyunda olmasına karşın EAİM'in daha tıkız yapıda olduğu ifade

edilmiştir. Yine Torus tip EAİM için eşdeğer devre parametre analiz sonucu ile iki-üç boyutlu sonlu elemanlar metodu ile elde edilen nümerik analiz sonucu karşılaştırılmıştır (Nobahari ve ark., 2017). Eşdeğer devre parametre sonuçlarında %3-%8 hatanın sargı son indüktans değerinin hesaplamaya dahil olmamasından kaynaklanmaktadır. Tek yanlı ve tek statorlu EAİM'in analitik analizi, tasarımı ve uygulaması elektrikli araçlar için yapılmıştır (Ashari ve ark., 2014). Bu çalışmada tork değişimi ve deneysel veriler ile elde edilen eşdeğer parametreleri verilmiştir. Literatürde dikkat çeken diğer bir çalışma küçük yapıdaki EAİM'de süper iletken malzeme kullanılmasının örneğidir (Gonzalez-Parada ve ark., 2012).

İndüksiyon motoru hakkında incelemeler ve üç fazlı inverter ile kontrol yöntemi gerçekleştirilmiştir (Fujii ve Fujitake, 1999; Fujii ve ark.,1999). EAİM'un farklı yapıları üzerine ABD'de alınan patentler mevcuttur (Varga, 1990; Kliman ve ark., 2002; Carl ve Stephens, 2004; Pyrhonen ve Piispanen. 2008). Nasiri-Gheidari ve Lesani (2012a) eksenel akılı indüksiyon motoru üzerine araştırma çalışması yapmıştır. Eksenel akılı indüksiyon motorunun eşdeğer devre kullanılarak sürekli durum çalışması modellenmiştir (Nobahari ve ark., 2017). Sincap kafesli bir indüksiyon motorunda manyetik akı yoğunluğunun radyal ve eksenel bileşenlerinin ve şaft akısının üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi (3D SEY) ile hesaplanmıştır (Bobon, 2012). Farklı motor uzunluklarına göre tork-kayma karakteristikleri incelenmiştir (Sakai ve ark., 2018). EAİM'in tasarımı için yapılan bir projede boyut, enerji tüketimi ve hız gibi kritik parametrelerin önemi ifade edilmiştir (Hincapié ve ark., 2002). Yüksek sıcaklık süper iletken şeritlerinin EAİM rotorunda kullanılması ile motor güç kapasitesine, motorun iç çapının dış çapına (Di/Do) oranına ve kutup sayısına etkisini ortaya koymuşlardır (Gonzales-Parada ve ark., 2012).

Disk yapılı motorun güç yoğunluğu bakımından avantajları nedeniyle eksenel akılı indüksiyon motoru da otomobil tahrik sisteminde kullanılabilir (Mushid ve Dorrell, 2017). Örneğin elektrikli araçlar için tek stator – tek rotorlu EAİM tasarımı ve uygulaması (Ashari ve ark., 2014), çift rotorlu EAİM'un elektrikli araçlarda diferansiyel olarak kullanılması (Neelima ve ark., 2014), elektrikli otomobiller için kullanılan EAİM için sürücü devreleri (Profumo ve ark., 1997), bir elektrikli taşıtın iki

tekerleğini sürmek için çift rotor tek statorlu EAİM'nda rotorların kompunt ve seri durumu için eksenel akı indüksiyon makinalarının tek fazlı benzetimi (Smith ve Platt, 1990) üzerine çalışmalar bulunmaktadır. Deneysel bir elektrikli araç için her motorun dönen kısmının tekerlek jantına takıldığı ve sabit kısmın aracın şasi yapısına monte edildiği iki EAİM için yeni bir motor sürücüsünün tasarımı ve performans analizi yapılmıştır (Benoudjit ve ark., 2000). Yükselme (havaya kaldırma) sistemi için üç oyuk - üç bobinli yeni bir EAİM önerilmiştir (Shuo ve ark., 2011).

Tek fazlı bir eksenel akılı indüksiyon motorunun elektriksel parametrelerini tahmin etmek için stator boşalma akımına dayanan yeni bir yöntem kullanılmıştır (Nasiri-Gheidari ve Lesani, 2012b). Doyum, anizotropi ve harmonikler dikkate alınarak ve emperyalist rekabet algoritması kullanılarak tek fazlı eksenel akılı indüksiyon motorlarında tork titreşimini en aza indirmek için hava boşluğu akısı yoğunluğunun toplam harmonik bozulmasını optimize edilmesi sağlanmıştır (Nasiri-Gheidari ve Lesani, 2012c). Tek fazlı kondansatörle çalışan bir kafesli EAİM'un tork-hız karakteristiği iki boyutlu sonlu elemanlar yöntemi (2D SEY) ve teorik yöntem kullanarak incelenmiştir (Nasiri-Gheidari ve Lesani, 2014). Diğer çalışmalarında ise 3D SEY ve dq matematiksel yöntemi kullanılarak eksenel indüksiyon motor tasarımını incelemişlerdir (Nasiri-Gheidari ve Lesani, 2013c). Doğrudan tahrikli çalışma için, ayarlanabilir hava boşluklu, iki hızlı, kondansatörle çalışan, tek fazlı eksenel akı indüksiyon motoru için yeni bir optimize yapı sunulmuştur (Nasiri-Ghedari ve Lesani, 2013b). Statik eksantriklik altında tek fazlı kondansatörle çalışan bir EAİM'nun çekirdek doygunluğu, besleme gerilimi ve eksantrikliğin etkisini dikkate alınması, geçici ve kalıcı durumdaki matematiksel modeli d-q ekseni teorisine dayanarak incelenmesiyle performans tahmini gerçekleştirilmiştir (Nasiri-Gheidari ve ark., 2014). Nasiri-Zarandi ve Mirsalim (2015) tarafından eksenel akılı bir histeresiz motorun analiz ve tork hesabının yapılması ele alınmıştır. Orta güçlü anizotropik rotorlu eksenel akı indüksiyon motorlarının tasarımı ve yapımı için yeni bir yaklaşım sunulmuştur (Wallace ve ark., 1991). Tasarımcıların kütle rotorlu eksenel hava boşluklu indüksiyon makinelerinin performanslarını daha kısa sürede ve yüksek hassasiyetle hesaplamasına ve değerlendirmesine yardımcı olacak üç boyutlu bir yöntem kullanarak analitik modellemesi yapılmıştır (Mirzaei ve ark., 2007). Stator ve

rotor çekirdeğinin geometrik özelliklerine ilişkin EAİM'nun dönen bir manyetik alan modeli geliştirilmiş, farklı tip indüksiyon motorlarının ana geometrik boyutları alan modeli formülleri kullanılarak karşılaştırılmıştır (Varga, 1986).

Eksenel akılı sargılı motorların klasik radyal akılı sargılı motorlar ile farklı yönlerden karşılaştırması üzerine de çalışma yapılmıştır. Yılmaz (2009) tarafından yapılan bir tez çalışmasında, kontrol momenti jiroskop tekerlek uygulamaları için farklı sayıda kutuplu eksenel akı ve radyal akı fırçasız dc motor topolojilerinin tork / kütle ve tork / hacim yönünden karşılaştırılması sunulmuştur.

Eksenel akılı kütle rotorlu asenkron motorun analizinde zaman harmonik üç boyutlu (3D) sonlu elemanlar analizi uygulamalarındaki deneyim tartışılmıştır (Valtonen ve ark., 2006). Stator ve rotor arasındaki hava aralığı uzunluğu motor performansını etkilediği bilinmektedir. Disk motordaki rotor ile stator arası hava boşluğu uzunluğunun motor performansına (kayıplar, kayma, verim, vb.) etkisini incelemişlerdir (Valtonen ve ark., 2008). Eksenel akılı kütle rotor çekirdekli indüksiyon motorunun rotor oluklarının sayısının motorun performans, elektromanyetik tork üretimi, tork dalgalanması, rotor kayıpları ve motorunun güç faktörü üzerindeki etkileri ortaya konulmuştur (Valtonen ve ark., 2007a). Bir başka çalışmalarında ise bir invertörün anahtarlama frekansının, bir eksenel akılı kütle rotor çekirdekli indüksiyon motorunun rotor kayıplarının performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir (Valtonen ve ark., 2007b).

Tapia ve ark. (2016; 2017) sincap kafesli EAİM ile ilgili yaptıkları iki çalışmanın ilkinde, bakırdan yapılmış sincap kafesli, yüksek verimli, tek statorlu tek rotorlu bir eksenel akı indüksiyon makinesi prototipinin deneysel bir test ve analitik çalışması yapılıp elde edilen sonuçlara ve analitik hesaplamalara dayanarak, manyetik akımın gerekliliğine dayanarak elektromanyetik tasarımın bir değerlendirmesini yapmışlar, diğer çalışmalarında ise farklı hava boşluğu uzunluklarında motor için gerekli olan mıknatıslama akımını tahmin etmek için Carter faktörü hesaplanarak tek statorlu, tek rotorlu bir eksenel akı indüksiyon prototipinin, bakırdan yapılmış sincap kafesiyle analitik ve sayısal olarak değerlendirilmesi yapılmıştır.

Bir eksenel akılı indüksiyon makinesinde elektrik ve manyetik devrelerin asimetrisi sonucu oluşan eksenel akının tanısal özellikleri incelenmiştir (Jarzyna, 1995). Sincap kafesli tek statorlu EAİM'nin mevcut tabaka teorisini, hava boşluğundaki akı yoğunluğunu, stator ve rotorun halkalama akılarını, elektromanyetik torku ve bir fazlı eşdeğer devrenin parametreleri gibi teorik temellerinin analitik açıklaması yapılıştır (Igelspacher ve Herzog, 2010). İki fazlı eksenel akılı disk rotorlu indüksiyon motorunun uygulamaları ile deneyimleri sunuluştur (Dwivedi ve ark., 2015).

Disk yapılı motorların çapları arttıkça güçleri artmaktadır. Ancak büyük güçlerde çapın artışı meydana gelebilecek kuvvetlerden dolayı çoklu rotor-stator kombinasyonlarına yöneltmektedir. Benzer şekilde eksenel akılı indüksiyon motorlarıda çoklu kombinasyonlar uygulanmıştır. Tek stator-tek rotorlu EAİM'da statik eksantrikliği incelenmiş ve normal çalışma durumu ile karşılaştırması yapılmıştır (Nasiri-Gheidari ve Lesani, 2013a). Çift rotorlu bir EAİM için tork dalgalanmasının azaltılması için rotor çubuklarında eğriltme yapılarak değişik tasarımlar denemişlerdir (Nobahari ve ark., 2018). Hong ve ark. (2019a), çift statorlu, oyuklu kütle rotora sahip EAİM performansını incelemiş ve oyuksuz kütle rotor performansı ile karşılaştırmasını yapmışlardır. Ayrıca volan enerji depolama sistemi için çift statorlu yapıda üç çalışma yapışlardır. Öncelikle kütle rotorlu EAİM'un eşdeğer devre hesaplamasını yarı tek boyutlu teori (Quasi 1D Theory), iki boyutlu sonlu elemanlar yöntemi (2D SEY) ve üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi (3D SEY) ile gerçekleştirmişler (Hong ve ark., 2018a), çok dilimli ve çok katmanlı bir yöntem kullanarak kendinden rulmanlı (yataklı), kütle rotorlu EAİM performansını incelemişler (Hong ve ark., 2019b) ve çok dilimli çok katmanlı yapıda kompozit rotorlu EAİM'un analizini yapmışlardır (Hong ve ark., 2018b). Çift statorlu kütle rotorlu EAİM kontrol simülasyonu ve prototipi geliştirmişlerdir (Hu ve ark., 2018).

Literatürde araştırılan bazı eksenel akılı indüksiyon motorlarının verileri Çizelge 1.1'de verilmektedir.

Çizelge 1.1. Literatürde araştırılan bazı eksenel akılı indüksiyon motorlarının boyutları

YAZAR ARAŞTIRMALARI	Stator İç Çap (mm)	Stator Dış Çap (mm)	Oran Iç / dış (mm)	Kutup Sayısı	Faz Sayısı	Tork (Nm)	Güç (W)
(Fujii ve Fujitake, 1999)	94	146	0,64	8			
(Fujii ve ark., 1999)	68	120	0,56	8			
(Nobahari ve ark., 2017)				6	3	100	10000
(Sakai ve ark., 2018)		100		4		0,686	
		100		4		1,266	
(Gonzales-Parada ve ark., 2012)	40	85	0,47	6			
(Ashari ve ark., 2014)		200		4	3	0,79	500
(Benoudjit ve ark., 2000)				4	3	93,81	7000
(Nasiri-Gheidari ve Lesani, 2012b)	87	170	0,51	6	1	2,01	559,5
(Nasiri-Gheidari ve Lesani, 2012c)	87	170	0,51	6	1	6,2	559,5
(Nasiri-Gheidari ve Lesani, 2014)	87	170	0,51	6	1		559,5
(Nasiri-Gheidari ve Lesani, 2013c)	87	170	0,51	18	1	1	186,5
(Nasiri-Ghedari ve Lesani, 2013b)	106,7	184,7	0,57	18	1	3,78	186,5
	106,7	184,7	0,57	12	1	5,18	559,5
(Nasiri-Gheidari ve ark., 2014)				6	1	2,01	559,5
(Nasiri-Zarandi ve Mirsalim, 2015)	38	57	0,67	2	3		

Çizelge 1.1. **(devam)**

YAZAR ARAŞTIRMALARI	Stator İç Çap (mm)	Stator Dış Çap (mm)	Oran Iç / dış (mm)	Kutup Sayısı	Faz Sayısı	Tork (Nm)	Güç (W)
(Mirzaei ve ark., 2007)	71	128	0,55	2	3		
(Valtonen ve ark., 2006)	124	194	0,64	4	3		11000
(Valtonen ve ark., 2008)	190	310	0,613	4	3		45000
(Valtonen ve ark., 2007b)	190				3		11000
(Tapia ve ark., 2016;2017)	170	282	0,60	8	3		
(Dwivedi ve ark., 2015)	76,1	152,3	0,50	4	3	50	2500
(Nasiri-Gheidari ve ark., 2013a)	87	170	0,51	6	2		560
(Nobahari ve ark., 2018)	79	136,2	0,58			90,7	10000
(Hong ve ark., 2018a; 2018b; 2019a; 2019b)	75	135	0,55	2			5000
(Hu ve ark., 2018)	75	135	0,56	2	3		5000

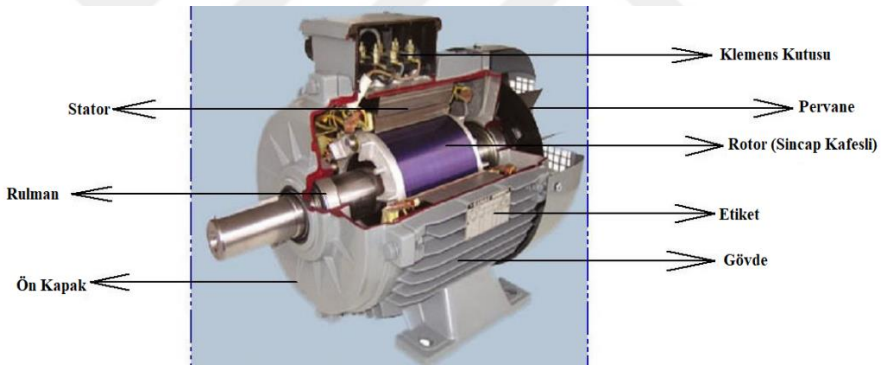
Literatüde yapılan araştırmalar neticesinde maalesef EAİM için tasarlanan veya önerilen tasarım arayüzü bulunmamaktadır. Tasarım arayüzü eksenel akılı indüksiyon motoru hesaplamalarını etkin şekilde sağmaktadır. Bu açıdan hem tasarım süreci hızlandırılmış hem de tasarımın doğruluğu arttırılmıştır. Bu bakımdan literatürdeki bu açığı kapatması beklenmektedir. Ayrıca tasarımın doğruluğunu test edilmesi adına tasarım arayüzünden elde edilen boyutlandırma verileri nümerik analizi gerçekleştirilerek tork ve verim değişimi incelenmiştir. Tez çalışması bu yönüyle de literatürde analitik ve nümerik analiz içeren bir çalışma örneği halindedir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Asenkron motorun yapısı

Asenkron motorlar temel yapı olarak iki kısımdan oluşmaktadır. Bunlar manyetik alanın meydana geldiği sabit kısım olan stator ve dönme hareketini oluşturup dışarıdaki mekaniksel birimlere aktaran rotordur. Bunların yanında kapaklar ve onlara monte edilmiş yataklama parçaları olan rulmanlar, rotor miline bağlanmış pervane, enerji bağlantısının yapıldığı klemens kutusu, gövde ve bağlantı ayakları (flanşlar) yer almaktadır. Asenkron motorun parçaları Şekil 3.1'de gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Asenkron motor parçaları

3.1.1.1. Stator

Asenkron motorda gövde içine monte edilmiş, sargıların yerleştirildiği oyukları bulunan sabit kısımdır. Motorun faz sayısına göre sargı tür ve sayıları değişiklik göstermektedir. Ayrıca statora yerleştirilen sargılar asenkron motorun kutup sayısını da belirler. Dış devreden uygulanan alternatif akımın etkisiyle stator sargılarında motorun çalışması için temel unsurlardan biri olan döner manyetik alan meydana gelir. Yapı itibariyle som haldeki malzemeden üretilmemiştir. Manyetik alanın etkisi ile demir kısımlarında meydana gelebilecek fuko ve histeresiz kayıplarını en aza indirmek

için manyetik özelliği iyi saclar kullanılmaktadır. Birer yüzeyleri elektriksel olarak yalıtılmış sacların paketlenmesi ve oyukların açılması sonucunda stator gövdesi oluşturulur. Oyuklara yerleştirilen sargılar da statorun tamamlanmasını sağlar.

3.1.1.2. Rotor

Asenkron motorun dönen parçasıdır. Kapaklarda bulunan rulmanlarla yataklanarak manyetik alanın etkisiyle stator içerisinde mil ekseninde sorunsuz dönmesi sağlanır. Yapı olarak rotor, kısa devre çubuklu (sincap kafesli) ve bilezikli (sargılı) olmak üzere iki farklı şekildedir. Kısa devre çubuklu rotorda rotor sargıları, rotor gövdesine açılmış oyukların içerisine alüminyum eritilerek dökülmesiyle oluşturulur. Bu çubuklar rotorun her iki ucundan alüminyum halkalar ile kısa devre edilerek rotor yapısı oluşturulur. Bilezikli rotor yapısındaki motorlara faz rotorlu asenkron motor da denilmektedir (Şerifoğlu, 2007). Bu tip motorlarda ise rotor oyuklarına sargılar yerleştirilir ve birer uçları içeride birbirine bağlanarak yıldız bağlantı oluşturulur. Sargıların diğer uçları rotor miline bağlı bileziklere bağlanır ve bileziklere basan karbon fırçalar yardımıyla klemens kutusuna çıkarılır. Burada sargı uçları kısa devre edilerek rotor devresi oluşturulur. Bilezikli rotor yapısına sahip asenkron motorlarda bilezikler ile bu bileziklere basan fırçalar arasında meydana gelen sürtünme, ark oluşumuna sebep olur. Bu sebepten yanıcı ve patlayıcı ortamlarda bu tipteki motorlar kullanılamazlar. Bu tip asenkron motorlar en çok fırça-bilezik tertibatında meydana gelen arızalardan dolayı çok bakım gerektirir. Ayrıca motorda meydana gelen torktaki vuruntuların ortadan kaldırılması için rotor sargıları rotor oluklarına birer oluk açısı kaydırılarak yerleştirilir (Çolak, 2008). Rotorun gövdesi de demir kayıplarından dolayı aynı statordaki gibi ince sacların preslenerek paketlenmesiyle oluşturularak üzerine oluklar açılmıştır. Bu oluklar stator oluklarından farklı olarak sincap kafesli rotorda kapalı tip ya da yarı açık tip iken bilezikli rotorlarda yarı açık tip olarak imal edilir. Rotor oluklarının sayısı için en iyi oran stator oluklarının 1,25 katından daha büyük olmamasıdır (Şerifoğlu, 2007). Her iki tipte de rotor, çelik mile sabitlenerek bütün bir yapı oluşturulur.

3.1.2. Asenkron motor çalışma prensibi

Asenkron motorların çalışması için bir AA kaynak gerilimine ihtiyaç vardır. Rotorun uyartılması için ikinci bir kaynağa gerek olmamaktadır. Bu sebepten asenkron motorlar tek uyartımlı motorlar olarak da sınıflandırılırlar (Çolak, 2008). Stator sargılarına uygulanan alternatif akımın etkisiyle sargılarda bir döner manyetik alan meydana gelmektedir. Bu manyetik alanın büyük bir kısmı stator çekirdeği, stator-rotor arası hava boşluğu ve rotor çekirdeği üzerinden devresini tamamlamaktadır. Faraday yasasına göre manyetik alanın değişim hızına bağlı olarak hem stator sargılarında hem de rotor sargılarında gerilim indüklenir. Rotor sargıları her iki rotor çeşidinde de kısa devre olduğundan, bu gerilimin etkisiyle akım akışı gerçekleşir. Rotor iletkenlerinde akımdan dolayı rotor döner manyetik alanı meydana gelir. Her iki manyetik alanın etkileşimi ile stator içerisinde yataklanmış rotor üzerinde bir dönme hareketi oluşur. İndüksiyon motoru olarak da isimlendirilen asenkron motorlarda elektrik enerjisinin mekanik enerjiye çevrilmesi yukarıda anlatıldığı gibidir.

Asenkron motorlarda statorda oluşan döner manyetik alanın hızı (senkron hız) motorun kutup sayısına ve stator sargılarına uygulanan gerilimin frekansına bağlıdır. Döner alan hız formülü Denklem (3.1)'de devir/dakika cinsinden, Denklem (3.2)'de ise radyan/saniye cinsinden açısal hız olarak verilmiştir.

$$n_s = \frac{120 \times f}{p} \tag{3.1}$$

$$\omega_s = \left(\frac{120 \times f}{p}\right)\left(\frac{2\pi}{60}\right) \tag{3.2}$$

Asenkron motorları senkron motorlardan ayıran özelliklerden biri rotor hızının döner alan hızından geride olmasıdır. Yani rotor senkron hızdan belli bir miktarda az devir sayısı ile döner. Bu devir sayısı farkına kayma adı verilmektedir ve Denklem (3.3) ile hesaplanır.

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \tag{3.3}$$

3.1.3. Asenkron motor eşdeğer devresi

Asenkron motorlar tıpkı transformatörler gibi birbiriyle manyetik bağa sahip ve elektriksel bağı olmayan iki yapıdan oluşmaktadır. Bu sebepten asenkron motorun eşdeğer devresi transformatör eşdeğer devresine çok benzemektedir. Transformatörün primer sargısı, asenkron motorun stator sargısı gibi düşünülürse, sekonder sargıya karşılık olarak rotor sargısı gelmektedir. Rotorun dönme hareketine bağlı olarak meydana gelen kayma, eşdeğer devreler arasındaki farkı ortaya çıkarmaktadır.

Stator eşdeğer devresinde sargıların iç direnci R_s olarak temsil edilir. Sargılarda meydana gelen değişken manyetik akının küçük bir kısmı devresini havadan kaçak olarak tamamlar. Geri kalan kısmı ise devresini stator ve rotor demir nüveleri ve aradaki hava boşluğundan tamamlar. Bu kaçak akılar stator devresinde bir kaçak endüktans L_{sl} oluşturur. Statora uygulanan gerilimin frekansının etkisiyle kaçak reaktansı X_{sl} oluşur. Denklem (3.4)'te kaçak reaktans eşitliği gösterilmiştir.

$$X_{sl} = 2\pi f L_{sl} \tag{3.4}$$

Stator eşdeğer devresinde R_s ve X_{sl} seri bağlı olarak gösterilir. Ayrıca eşdeğer devrede uyartım devresi olarak isimlendirilen nüve kayıplarını temsil eden saf omik R_{fe} direnci ile mıknatıslanma elemanını temsil eden saf indüktif X_m reaktansı paralel olarak gösterilir. Uyartım devresi akımı, asenkron motorun boş çalışması sırasında çektiği I_o akımıdır ve Denklem (3.5)'te gösterildiği gibi nüve kayıpları akımı I_{fe} ile mıknatıslanma akım bileşeni I_m'nin vektörel toplamı kadardır.

$$I_o = \sqrt{I_{fe} + I_m} \tag{3.5}$$

Stator sargılarında indüklenen gerilim E_s, vektörel olarak statora uygulanan gerilim ile stator akımı I_s'nin, R_s ve X_{sl} üzerinde düşüreceği gerilim arasındaki fark kadardır. Denklem (3.6) ile bu eşitlik belirtilmiştir.

$$E_s = V_s - I_s(R_s + jX_{sl}) \tag{3.6}$$

Rotor eşdeğer devresi oluşturulurken, rotor empedansının ve rotorda indüklenen gerilimin kaymaya bağlı olarak değişmesi asenkron motor ile transformatör eşdeğer devreleri arasındaki en önemli farktır. Kilitli rotor gerilimi olarak isimlendirilen E_{kr}, rotor dururken sargılarında indüklenen gerilimdir. Bu durumdaki rotor sargılarının kaçak reaktansı da $X_{rl\text{-}kr}$ olarak temsil edilir. Bu durumda eşdeğer devrede rotorun herhangi bir hızı için meydana gelecek kayma değerine bağlı olarak rotor gerilimi E_r ve rotor kaçak reaktansı X_{rl} sırasıyla Denklem (3.7) ve (3.8)'de gösterilmektedir.

$$E_r = SE_{kr} \tag{3.7}$$

$$X_{rl} = SX_{rl-kr} \tag{3.8}$$

Rotor sargılarının omik direnci R_r her durumda sabittir. Rotor milindeki mekanik gücü temsilen ayarlı bir direnç gösterilir. Yükün değişimi rotor devrini ve kaymayı değiştireceğinden bu ayarlı direnç de kaymaya bağlıdır ve $R_r(1\text{-}S)/S$ olarak temsil edilir. Rotor eşdeğer devresindeki toplam omik direnç değeri R_r/S olarak tek bir eleman ile gösterilmektedir.

Asenkron motorun bir faz eşdeğer devresi oluşturulurken birbirleri ile manyetik bağa sahip iki devrenin tek bir elektrik devresi gibi gösterilmesi için rotor elemanları stator devresine indirgenir. Bunun için transfomatörlerdeki sarım sayıları oranı olan dönüştürme oranı kullanılır. Stator sarım sayısının (N_1), rotor sarım sayısına (N_2) oranı sincap kafesli motorlarda 1 alınırken (Çolak, 2008), bilezikli motorlarda sarım sayılarına göre elde edilir. Dönüştürme oranı (a), rotor akımının statora aktarılmış eşdeğeri (I'_r), rotor kaçak reaktansının (X'_{rl}) ve rotor devresi toplam omik direncinin (R'_r/S) statora aktarılmış eşdeğerleri sırasıyla Denklem (3.9), (3.10), (3.11) ve (3.12)'de gösterilmiştir.

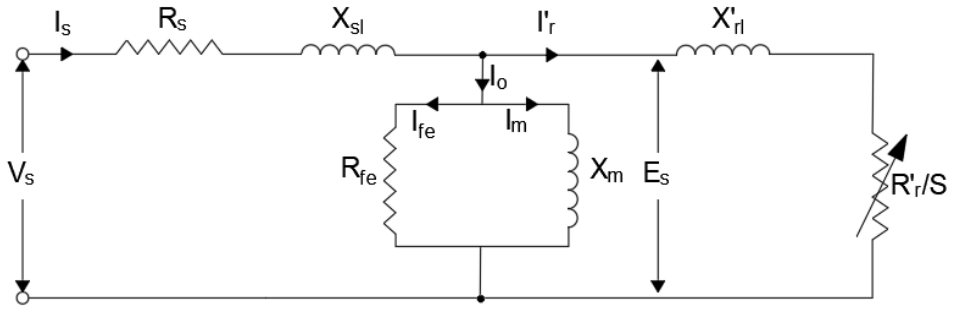
$$a = \frac{N_1}{N_2} \tag{3.9}$$

$$I'_r = \frac{I_r}{a} \tag{3.10}$$

$$X'_{rl} = a^2 X'_{rl} \tag{3.11}$$

$$R'_r/S = a^2 R_r/S \tag{3.12}$$

Asenkron motorun statora indirgenmiş bir faz eşdeğer devresi aşağıdaki Şekil 3.2'de gösteriliştir.



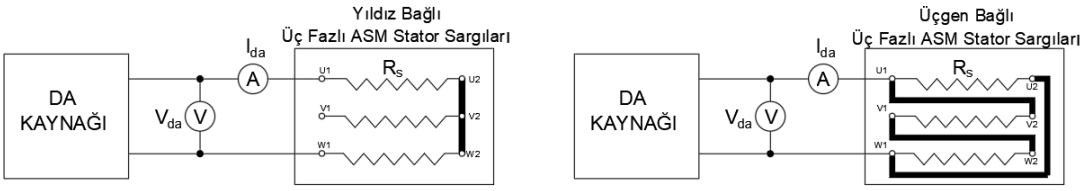
Şekil 3.2. Asenkron motorun statora indirgenmiş bir faz eşdeğer devresi

3.1.4. Asenkron motor parametrelerinin belirlenmesi

Asenkron motorların devre analizleri için eşdeğer devresini oluşturan parametrelerin belirlenmesi için üç tane deney yapılır. Bunlar, sargı direnci ölçüm deneyi, boş (yüksüz) çalışma deneyi ve kilitli rotor deneyidir.

3.1.4.1. Sargı direnci ölçüm deneyi

Asenkron motorun stator sargıları farklı yapılarda sarılıp stator oluklarına yerleştirilir. Sargılara yıldız (çıkış çıkışa) ya da üçgen (çıkış girişe) bağlantıdan birisi uygulanır. Bu bağlantılar motorun içerisinde yapılacağı gibi, klemens kutusunda bakır halkalar ile de gerçekleştirilebilir. Bu deney yapılmadan önce stator sargı sıcaklığının direnç üzerindeki etkisinin oluşturacağı hatayı en aza indirmek için motor tam yükünde anma sıcaklığına kadar çalıştırılmalıdır ve sargılar henüz sıcak iken ölçüm yapılmalıdır (Çolak, 2008; Şerifoğlu, 2007).



Şekil 3.3. Asenkron motor sargı direnci ölçüm deney şeması (yıldız-üçgen bağlantı)

Stator sargılarının bağlantıları sökülmeden klemens kutusundaki iki giriş ucu arasına ayarlı bir DA kaynağı ile gerilim uygulanır ve ampermetre-voltmetre düzeneği ile deney ölçümleri yapılır. Asenkron motorun bağlantı çeşidine göre tam yük akımı geçinceye kadar ayarlı kaynaktan gerilim uygulanır. Bu andaki gerilim (V_{da}) ve akım (I_{da}) değerleri ölçülür. Ohm kanunu uygulanarak bir direnç değeri ($R_{s\text{-}da}$) Denklem (3.13) ile hesaplanır.

$$R_{s-da} = \frac{V_{da}}{I_{da}} \tag{3.13}$$

Hesaplanan bu değer stator sargısının bağlantı şekline göre Denklem (3.14) ve Denklem (3.15)'deki gibi üçgen bağlantı ise 1,5, yıldız bağlantı ise 0,5 ile çarpılarak bir tek sargının DA direnci ($R_{s\text{-}da}$) bulunur.

$$R_{s-da} = 1{,}5R_{s-da} \qquad (\text{Üçgen Bağlantı}) \tag{3.14}$$

$$R_{s-da} = 0{,}5R_{s-da} \qquad (\text{Yıldız Bağlantı}) \tag{3.15}$$

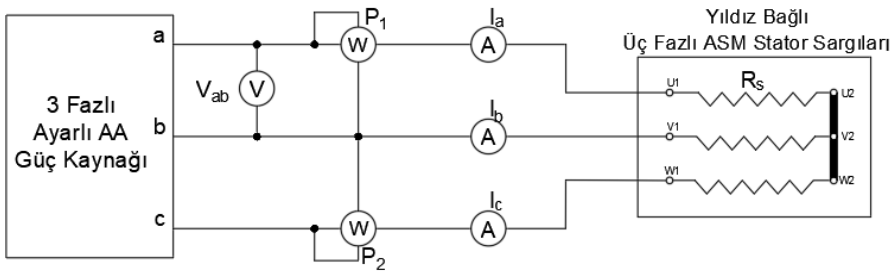
Asenkron motor AA ile çalıştığı için stator direncinin gerçek değeri, $R_{s\text{-}da}$'nın 1,11 katı alınarak hesaplanır. Denklem (3.16)'da bu eşitlik gösterilmiştir.

$$R_s = 1{,}11R_{s-da} \tag{3.16}$$

3.1.4.2. Boş (yüksüz) çalışma deneyi

Asenkron motorun stator sargıları yıldız ya da üçgen bağlı iken milinde hiçbir yük bulunmuyorken anma geriliminde çalıştırılır. Bu deneyde üç fazlı ayarlı bir AA

güç kaynağı kullanılır. Motorun boş çalışması sırasında fazlar arası gerilimi ölçen bir voltmetre, her fazın akımını ölçen üç ampermetre ve çekilen toplam gücü ölçmek için de iki watmetre ile aron bağlantı yapılarak kullanılır. Boş çalışma deney bağlantı şeması Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4. Asenkron motor boş (yüksüz) çalışma deney şeması

Deney bağlantı şemasında kullanılan her faza ait akımı ölçen ampermetrelerden okunan değerlerin ortalaması bir faza ait boş çalışma akım değerini bulmamızı sağlar. Denklem (3.17)'de bu eşitlik verilmiştir.

$$I_o = \frac{I_a+I_b+I_c}{3} \tag{3.17}$$

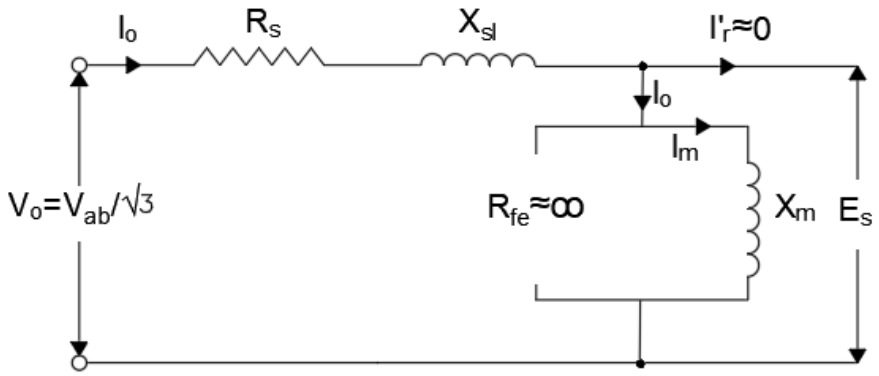
Asenkron motorun boş çalışması sırasında rotor devir sayısını sınırlayacak bir yük olmadığı için rotor, senkron devir sayısına yakın bir devir ile döner. Bu sebepten kayma değeri sıfıra yakın olur. Eşdeğer devrede mekanik gücü temsil eden R'r(1-S) /S elemanının değeri rotor devresi empedansından ($R'_r+jX'_{rl}$) çok büyük olacaktır. Dolayısıyla rotor devresi akımının boş çalışma akımı (I_o) içerisinde etkisi yok denecek kadar azdır. Bu sebepten rotor devresi akımını ve rotor devresi bakır kaybını ihmal etmek sonuçta kayda değer bir hataya sebep olmayacaktır. Boş çalışma deneyi hesaplamalarında rotor devresini açık devre olarak kabul ederiz. Deneyde aron watmetreden ölçülen toplam güç (P_o), stator devresi bakır kayıpları (P_{s-cu}), motorun toplam demir kayıpları (P_{fe}) ve mekanik kayıplar olarak adlandırılan sürtünme-vantilasyon kayıplarının (P_{s+v}) toplamıdır. Stator bakır kayıplarının ve sürtünme-

vantilasyon kayıpları ile toplam demir kayıplarının eşitlikleri sırasıyla Denklem (3.18) ve (3.19)'da verilmektedir.

$$P_{s-cu} = 3I_{s-cu}^2 R_s \tag{3.18}$$

$$P_o = P_{s-cu} + P_{fe} + P_{s+v} \tag{3.19}$$

Asenkron motorda stator ve rotor arasındaki hava boşluğunun relüktans değerinin büyük olması sebebiyle boş çalışmada kaynaktan yüksek akım çekilir. Motorun boştaki güç faktörünün de 0,1 civarında olması sebebiyle uyartım devresinde birbirine paralel olan X_m reaktansı R_{fe} elemanından çok küçük değerde olacaktır. Bu duruma göre boş çalışma deneyinde R_{fe} elemanı ihmal edilerek uyartım devresinde sadece X_m reaktansı gösterilir. Boş çalışma deneyi eşdeğer devresi Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Asenkron motor boş (yüksüz) çalışma deneyi eşdeğer devresi

Boş çalışma esnasındaki bir faz empedansı deneyde yıldız bağlı bir stator kullanıldığı için fazlar arası gerilimin bir faz değeri ve ortalama faz akım büyüklükleri ile Denklem (3.20) ile bulunur.

$$Z_o = \frac{\frac{V_{ab}}{\sqrt{3}}}{I_o} = R_s + j(X_{sl} + X_m) \tag{3.20}$$

Z_o empedans değeri stator iç direnci (R_s), stator kaçak reaktansı (X_{sl}) ve mıknatıslanma reaktansının (X_m) toplamı ise reaktanslar da Denklem (3.21) ile elde edilir.

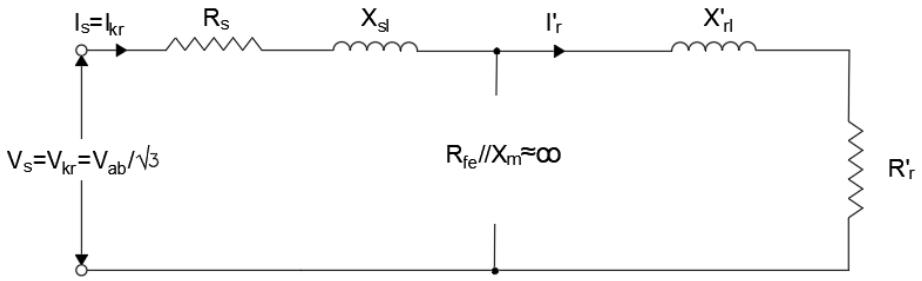
$$(X_{sl} + X_m) = \sqrt{{Z_o}^2 - {R_s}^2} \tag{3.21}$$

Kilitli rotor deneyinde Xsl değeri hesaplanır ve Denklem (3.21)'den Xm değeri bulunur.

3.1.4.3. Kilitli rotor (kısa devre) deneyi

Asenkron motorun eşdeğer devre parametrelerinin belirlenmesinde yapılan üçüncü deney kilitli rotor deneyidir. Mantığı transformatörlerdeki kısa devre deneyi ile aynı olduğundan asenkron motorlarda da bu deney kısa devre deneyi olarak isimlendirilebilir (Şerifoğlu, 2007). Deney şeması Şekil 3.4'te gösterilen boş (yüksüz) çalışma deneyi ile aynıdır. Bu deneyde stator enerjili iken rotor bir mekanizma ile sabit tutularak dönmesi engelleniyor. Ayarlı AA güç kaynağı ile motorun stator sargılarından anma akımı geçinceye kadar yavaş yavaş arttırılarak gerilim uygulanır. Her faza bağlı ampermetrelerden anma akımı okunduğu andaki değerlerin Denklem (3.17) ile hesaplanan ortalaması deney için bir faz kilitli rotor akımı (I_{kr}), o anki voltmetreden okunan fazlararası gerilim değeri kilitli rotor gerilimi ($V_{ab\text{-}kr}$) ve aron bağlı watmetrelerden okunan güç değeri de kilitli rotor gücü (P_{kr}) olarak kaydedilir.

Kilitli rotor deneyinde rotor dönmediği için kayma değeri S=1 olup eşdeğer devrede mekanik yükü temsil eden $R'_r(1\text{-}S)/S$ elemanının 0 olmasını ve eşdeğer devrede kısa devre olarak gösterilmesini sağlar. Motor transformatöre benzeyeceğinden her iki devrenin de frekansları birbirine eşit olur. Rotor devresi, statora indirgenmiş rotor direnci (R'_r) ile yine statora indirgenmiş rotor kaçak reaktansının (X'_{rl}) seri bağlantısı ile oluşturulur. Asenkron motor uyartım devresi elemanlarının (R_{fe} ve X_m) değeri rotor devresi empedansından çok büyük olacağından bu devre ihmal edilerek açık devre olarak gösterilebilir. Kilitli rotor deneyinin eşdeğer devresi Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Asenkron motor kilitli rotor çalışma deneyi eşdeğer devresi

Şekil 3.6'dan da görüleceği gibi paralel bir kol olmadığından hesaplanan ortalama akım değeri, hem stator akımı (Is) hem de stator devresinde indirgenmiş rotor akımı (I'r) ile aynıdır. Deneyde ölçülen toplam güç değeri uyartım devresini ihmal ettiğimiz için stator ve rotorun toplam bakır kayıplarıdır. Denklem (3.22)'de bu eşitlik görülmektedir. Bu güç aktif güç olduğu için omik karakterli R_s ve R'_r elemanları tarafından harcanmaktadır. Denklem (3.23) ile gücün direnç ve akım içeren eşitliği verilmiştir.

$$P_{kr} = P_{cu} = P_{s-cu} + P_{r-cu} \tag{3.22}$$

$$P_{kr} = 3{I_s}^2(R_s + R'_r) \tag{3.23}$$

R_s değerini ilk deneyde bulduğumuza göre ve I_s akımı ölçtüğümüz kilitli rotor akımı I_{kr} olduğu için güç denkleminden R'_r direnç değerini Denklem (3.24) ile hesaplayabiliriz.

$$R'_r = \frac{P_{kr}}{3{I_{kr}}^2} - R_s \tag{3.24}$$

Stator reaktansı (X_{sl}) ile rotor reaktansının statora indirgenmiş değerini (X'_{rl}) bulabilmek için ilk önce ölçtüğümüz faz gerilim ve akımını kullanarak kilitli rotor faz empedansını (Z_{kr}) Denklem (3.25) ile hesaplayabiliriz. Daha sonra ölçtüğümüz güç, akım ve gerilim değerleri ile kilitli rotor güç katsayısını ($\cos \varphi_{kr}$) Denklem (3.26) ile hesaplayıp, açı değerini elde ettikten sonra kilitli rotor empedansının imajiner bileşeni olan toplam reaktans değeri Denklem (3.27) kullanılarak bulunur.

$$Z_{kr} = (R_s + R'_r) + j(X_{sl} + X'_{rl}) = \frac{\frac{V_{ab}}{\sqrt{3}}}{I_{kr}} \quad (3.25)$$

$$Cos\ \varphi_{kr} = \frac{P_{kr}}{\sqrt{3}I_{kr}V_{kr}}\ ;\ \varphi_{kr} = \cos^{-1}(\frac{P_{kr}}{\sqrt{3}I_{kr}V_{kr}}) \quad (3.26)$$

$$(X_{sl} + X'_{rl}) = Z_{kr} \sin \varphi_{kr} \quad (3.27)$$

Bulmuş olduğumuz reaktans değeri her iki devrenin reaktansıdır. Normal başlatma torklu (A sınıfı), yüksek başlatma torklu ve yüksek kayma değerli (D sınıfı) ve bilezikli asenkron motorlarda bu toplam reaktans 2'ye bölünerek Xsl ve X'r değerleri eşit olarak bulunur (Çolak, 2008). Bu eşitlik Denklem (3.28) ile gösterilmektedir.

$$X_{sl} = X'_{rl} = \frac{(X_{sl}+X'_{rl})}{2} \quad (3.28)$$

3.1.5. Asenkron motorda güç, kayıplar ve verim

Asenkron motorlar girişine uygulanan elektrik enerjisini çıkışında mekanik enerjiye dönüştüren elektrik makineleridir. Bu sebepten kendisini besleyen elektrik kaynağından çektiği gücü elektriksel güç olarak tanımlayabiliriz. Milinden tahrik ettiği yüke aktardığı güç ise mekanik güçtür. Asenkron motorda güç ifadesi aktif güç, reaktif güç ve görünür güç olarak üç farklı çeşitte ifade edilir. Üç fazlı bir asenkron motorun kaynaktan çektiği aktif gücü (P_g), reaktif gücü (Q_g) ve görünür gücü (S_g); faz gerilimi ($V_{s\text{-}f}$), faz akımı ($I_{s\text{-}f}$) ve güç katsayısı ($Cos\ \varphi_s$) verilerini kullanarak sırasıyla Denklem (3.29), (3.30) ve (3.31)'de gösterebiliriz.

$$P_g = 3V_{s-f}I_{s-f} \cos \varphi_s \quad (3.29)$$

$$Q_g = 3V_{s-f}I_{s-f} \sin \varphi_s \quad (3.30)$$

$$S_g = 3V_{s-f}I_{s-f} \quad (3.31)$$

Tüm fiziksel sistemlerde olduğu gibi asenkron motorlarda da girişten çekilen güç çıkıştaki sisteme aktarılırken bir kısım kayıplar ortaya çıkmaktadır. Asenkron motorlarda bu kayıplar elektriksel kayıplar ve mekaniksel kayıplar olarak ikiye ayrılır.

Elektriksel kayıpların ilki stator ve rotor sargılarında, akımın etkisiyle ısı şeklinde açığa çıkan bakır kayıplarıdır. Bakır kayıpları motor milindeki yüke göre değişiklik gösterir. Üç fazın toplam stator bakır kayıpları ($P_{s\text{-}cu}$) ve rotor bakır kayıpları ($P_{r\text{-}cu}$) ilgili sargıdan geçen akımın karesiyle orantılı olarak değişir ve sırasıyla Denklem (3.32) ve (3.33)'te gösterilmiştir.

$$P_{s-cu} = 3{I_s}^2 R_s \tag{3.32}$$

$$P_{r-cu} = 3{I'_r}^2 R'_r \tag{3.33}$$

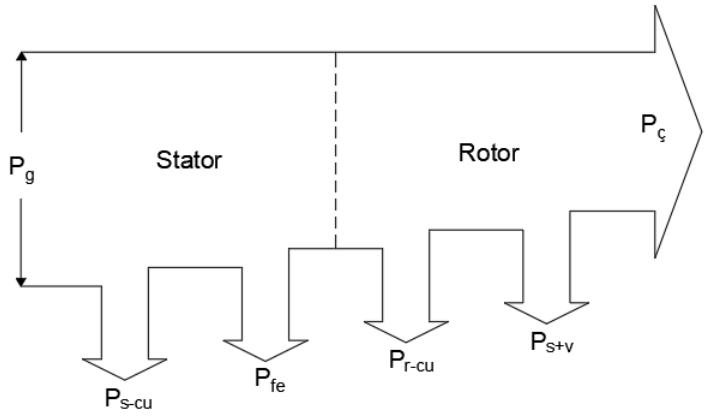
Bir diğer elektriksel kayıp da yine stator ve rotor nüvesinde manyetik alanın etkisiyle ısı şeklinde oluşan demir kayıplarıdır. Bunlar nüve gövdesinde indüklenen gerilimlerin sebep olduğu eddy (girdap) akımlarının oluşturduğu eddy kayıpları ve manyetik akı yoğunluğunun zamana göre değişim ile nüvenin manyetik domainlerindeki atomların yön değiştirmesi sonucu açığa çıkan histeresiz kayıplarıdır. Demir kayıpları da ısı şeklinde açığa çıkar. Rotor devresindeki demir kayıpları çok az miktarda olduğundan tüm demir kayıplarını stator demir kayıpları kısmında P_{fe} ifadesi ile gösterebiliriz.

Asenkron motorlardaki mekaniksel kayıplar da milin yataklarında sürtünme sonucu oluşan sürtünme kayıpları, milin dönüşü sırasında oluşan vantilasyon kayıplarıdır. Motor yüküne göre devir sayısı ile değişiklik gösteren sürtünme-vantilasyon kayıpları (P_{s+v}) şayet motor geniş bir hız aralığında çalışmıyorsa sabit olarak kabul edilir (Çolak, 2008).

Asenkron motorlarda giriş gücü (P_g) ile yüke aktarılan çıkış gücü ($P_ç$) arasındaki fark motorun toplam kayıp gücünü vermektedir. Giriş gücünden tüm kayıpların toplamı çıkarılarak çıkış gücü elde edilir. Çıkış gücünün eşitliği Denklem (3.34)'te verilmektedir.

$$P_ç = P_g - (P_{s-cu} + P_{r-cu} + P_{fe} + P_{s+v}) \tag{3.34}$$

Asenkron motorun giriş-çıkış güç ve kayıp güç ifadelerini görsel olarak Şekil 3.7'de güç ağacı ile göstermek mümkündür.



Şekil 3.7. Asenkron motor güç ağacı

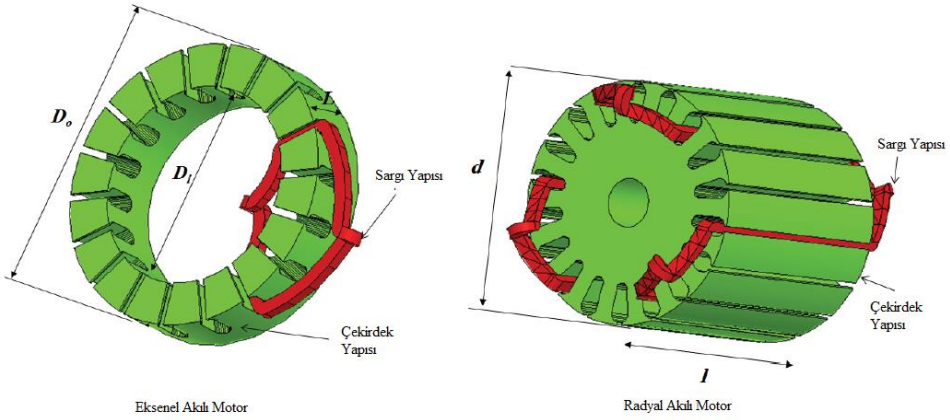
Asenkron motorlarda verim, girişte çekilen gücün ne oranda çıkışta yüke aktarıldığının bir göstergesidir. Bu sebepten kayıplar, verim için en önemli ölçüttür. Yüke göre değişiklik gösteren bakır kayıpları ile yükten bağımsız kabul edilen demir kayıpları ve sürtünme-vantilasyon kayıpları birbirine eşit olduğu andaki verim motor veriminin en büyük değeridir. Genel olarak gücü 1kW'tan fazla olan asenkron motorlarda anma yükü altında verimi %80-%95 aralığındadır (Şerifoğlu, 2007). Motorun verim formülü Denklem (3.35)'te gösterilmektedir.

$$\%\eta = \frac{P_ç}{P_g} x100 \tag{3.35}$$

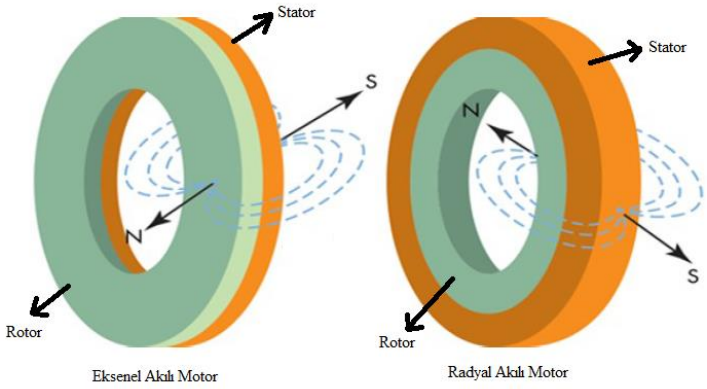
3.1.6. Eksenel akılı indüksiyon motorunun yapısı

Eksenel akılı indüksiyon motorları, manyetik alanı üreten sargıların radyal olarak konumlandığı, üretilen manyetik alanın motorun dönüş eksenine paralel meydana geldiği bir motor yapısıdır. Geleneksel yapıdaki indüksiyon motorları radyal motorlar olarak tanımlanır. Bu motorlarda sargılar motorun dönüş eksenine paralel yapıda yerleştirildiği, manyetik akının da radyal (çapsal) olarak oluştuğu motorlardır.

Eksenel ve radyal akılı motorların çekirdek-sargı şekli ve manyetik alan durumları sırasıyla Şekil 3.8 ve Şekil 3.9'da verilmektedir.



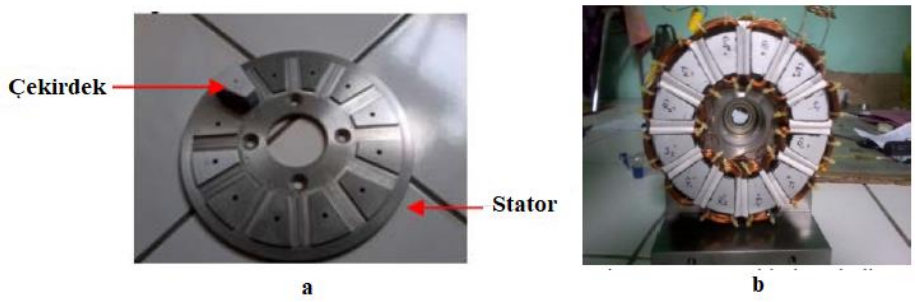
Şekil 3.8. Eksenel akılı ve radyal akılı motor çekirdek-sargı şekilleri (Nasiri-Ghedari ve Lesani, 2012a)



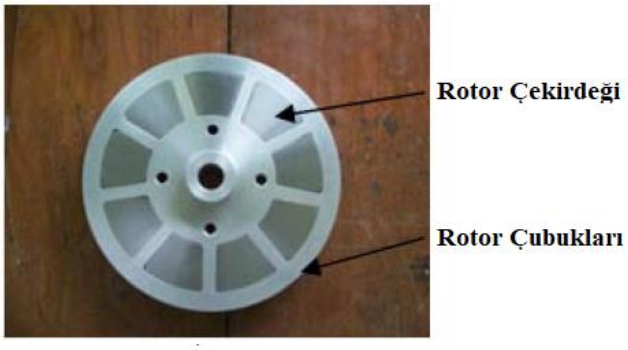
Şekil 3.9. Eksenel akılı ve radyal akılı motor manyetik alan şekilleri (Mushid ve Dorrell, 2017)

Eksenel akılı motorların stator bir halka yapısını sahip iken rotor çekirdekleri disk yapısındadır. Şekil 3.10'da statorun boş ve sargılı hali, Şekil 3.11'de ise disk yapısındaki rotor çubukları ile görülmektedir. Bu yapıları nedeniyle birçok küçük hacimli sistemde kullanım imkânı bulmuştur. Radyal akılı geleneksel motorlarda yapı

olarak ana boyutlar, çekirdek çapı ve uzunluğu iken, eksenel akılı motorlarda ana boyutlar çekirdeğin iç çap ve dış çap uzunluklarıdır.



Şekil 3.10. EAİM stator resmi a) boş hali b) sargılı hali (Ashari ve ark., 2014)



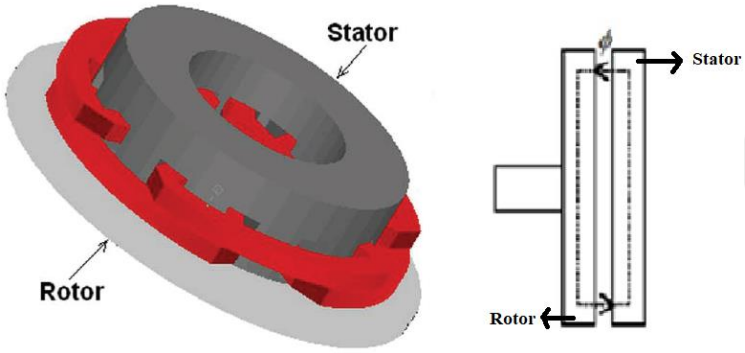
Şekil 3.11.EAİM disk tipi rotor şekli (Ashari ve ark., 2014)

Eksenel akılı makine daha büyük çap-uzunluk oranına sahip olduğundan ve iç çapı genellikle mil çapından daha büyük olacağından, klasik yapıdaki motorlara göre çok daha iyi havalandırma ve soğutma sağlanabilir. Daha yüksek spesifik elektrik yüklemesi ve daha yüksek spesifik manyetik yüklerin olası kullanımı, eksenel akılı makinelerinin boyutunu daha da azaltacaktır (Nasiri-Ghedari ve Lesani, 2012a). Aynı çap ve çekirdek uzunluğuna sahip radyal akılı motor ile eksenel akılı motor kıyaslandığında eksenel akılı motor, maksimum tork ve tork yoğunluğu açısından iki kat daha yüksek değerler aldığı tespit edilmiştir (Sakai ve ark., 2018)

EAİM'lerin yapılarında manyetik alanı üreten duran kısım stator ve dönen kısım rotorun farklı konfigürasyonları üç farklı tipte motor elde edilmesini sağlamıştır. Bunlar;

3.1.6.1. Tek hava boşluklu (tek stator - tek rotorlu) motor

Bu yapı, sadece bir stator ve bir rotordan oluştuğu için çift stator-tek rotor veya çift rotor tek statorlu yapılara göre boyut olarak daha küçüktür. Statorda oluşan manyetik akı buradan rotora doğru gider ve tekrar statora dönerek devresini tamamlar. EAİM'lerin en basit ve en eski yapısıdır ve tek taraflı motor olarak adlandırılır. Genel olarak, bu yapı düşük torklu makineler için en uygun seçimdir (Nasiri-Ghedari ve Lesani, 2012a). Şekil 3.12'de bu yapının resmi görülmektedir.

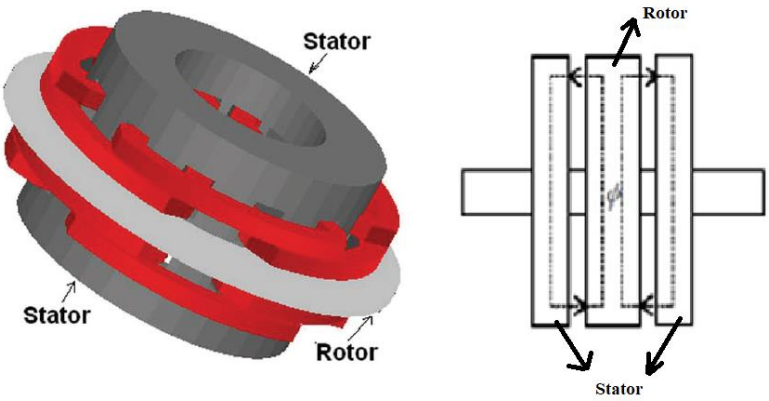


Şekil 3.12.Tek sator – tek rotorlu EAİM şekli ve manyetik akı yolu (Nasiri-Ghedari ve Lesani, 2012a)

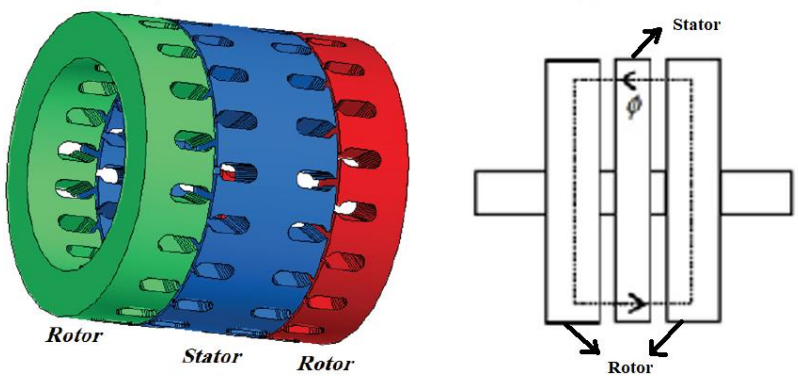
3.1.6.2. Çift hava boşluklu motor

Stator ve rotor arasında bulunan hava boşluğunun iki tane olduğu yapıdır. Bu konfigürasyonda iki stator arasında bir rotor yapısı (çift stator – tek rotorlu) ve iki rotor arasında bir stator (çift rotor – tek statorlu) yapıları vardır. Yüksek güç yoğunluğu ve verimlilik gerektiren uygulamalarda kullanılır. Ayrıca yüksek tork yoğunluğu ve dengeli eksenel kuvvet avantajlarına da sahip olması bu tip yapıların kullanım olanaklarını arttırmıştır (Nasiri-Ghedari ve Lesani, 2012a). Şekil 3.13'te çift stator –

tek rotorlu yapının, Şekil 3.14'te ise çift rotor – tek statorlu yapının şekli ve manyetik akı yolu gösterilmektedir.



Şekil 3.13. Çift stator – tek rotorlu yapının şekli ve manyetik akı yolu (Nasiri-Ghedari ve Lesani, 2012a)



Şekil 3.14. Çift rotor – tek statorlu yapının şekli ve manyetik akı yolu (Nasiri-Ghedari ve Lesani, 2012a)

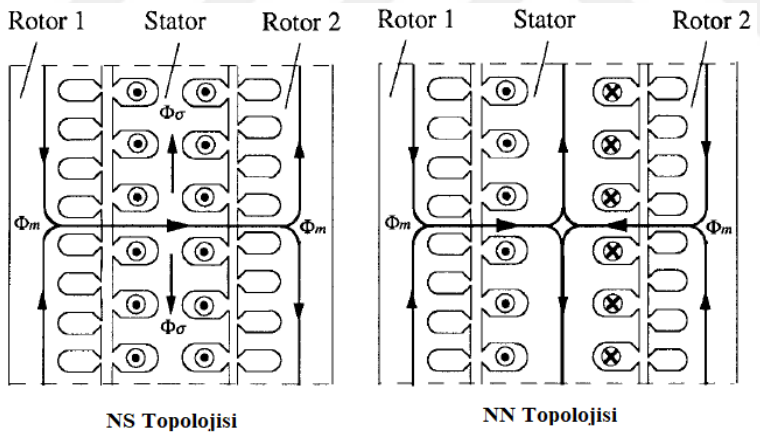
Çift rotor – tek statorlu EAİM'lar yüksek verimliliğe sahip olduklarından çok hava boşluklu yapıya sahip motorlar içerisinde en fazla tercih edilen yapıdır (Neelima ve ark., 2014)

EAİM'ların manyetik çekirdeği demir, toz kompozit veya amorf'tan yapılabilir. Süper iletkenler, EAİM oluşturmak için kullanılan diğer materyallerdir. Manyetik çekirdeğin kütle ya da katmanlı olabileceğini ve katmanlı hale getirilmiş çekirdeğin

genellikle yarıkları oluşturmak üzere işlenmiş bir şerit-sarılmış dairesel göbekten yapılmaktadır.

3.1.7. Eksenel akılı indüksiyon motorunun çalışması

Eksenel akılı indüksiyon motoru çalışması klasik indüksiyon motor çalışmaları ile aynı özelliktedir. Statora uygulanan bir ya da üç fazlı alternatif gerilimin etkisiyle oluşan stator çekirdeğindeki akı yönüne bağlı olarak çift rotor – tek statorlu yapıdan iki topoloji çıkarılabilir. İlki NN tipi topoloji, diğeri NS tipi topolojidir. Dahası bu topolojiler oluklu ve oluksuz olarak sınıflandırılabilir. Oluksuz tipi eksenel akı makinesi sadece NN tipi topolojiye sahiptir. Bu topolojide stator şerit sarılı demir çekirdeğe ve çekirdeğin etrafında arka arkaya bağlanan sarımlar vardır. Oluklu tipi eksenel akı makinesinde ise NN ve NS tipi topolojilerin ikisi de mevcuttur. Meydana gelen bu kutuplanmalar Şekil 3.15'te gösterilmektedir.



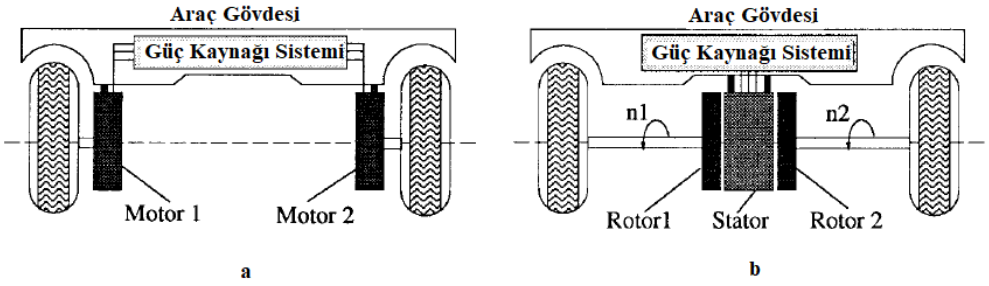
Şekil 3.15.EAİM topolojileri (Neelima ve ark., 2014)

3.1.8. Eksenel akılı indüksiyon motoru uygulama alanları

Düzlemsel ve ayarlanabilir hava boşluğu gibi eksenel akı makinelerinin özellikleri, özellikle çok sayıda kutup bulunan bir makinede (12'den fazla), ağırlığa göre daha iyi güç ve çap-uzunluk oranı, kompakt yapı ve daha iyi verimlilik, geleneksel makinelere göre, fanlar, arabalar, pompalar, ev uygulamaları ve elektrikli

araçlar gibi birçok uygulamada kullanışlı bir alternatiftir (Nasiri-Ghedari ve Lesani, 2012a).

Bir elektrikli araç tahrik motoru için, yüksek güç ve tork yoğunluğu, yüksek verimlilik ve güç faktörü, hafif yapısı, invertör boyutunu, pil ağırlığını ve sistem maliyetini en aza indirgemek için sistem voltajının en uygun seçimi ve geniş hız aralığı zorunlu gerekliliklerdir. Son yıllarda, eksenel-akı makineleri ve yeni disk topolojileri, esas olarak tekerlek-doğrudan kuplaj motorları olarak elektrikli taşıt tahrik sistemlerinde ana taşıyıcılar olarak kullanılmaktadır. Her tekerlek için ayrı motor yapısı ve çift rotor – tek statorlu yapının araç uygulamasının şekli, Şekil 3.16'da gösterilmiştir. EAİM'nun elektrikli araç uygulamalarında kullanımı üzerine çok sayıda çalışma mevcuttur (Mushid ve Dorrell, 2017; Ashari ve ark., 2014; Neelima ve ark., 2014; Profumo ve ark., 1997; Smith ve Platt, 1990; Benoudjit ve ark., 2000; Shuo ve ark., 2011).



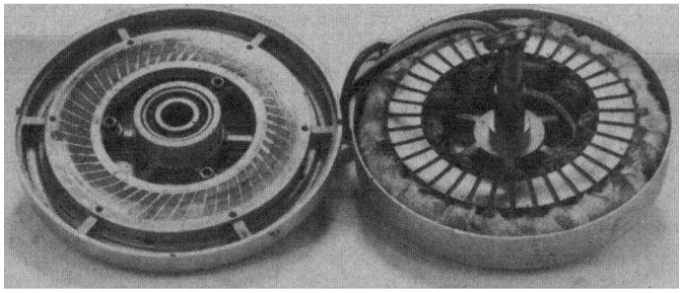
Şekil 3.16. EAİM elektrikli araç uygulamaları şekli a) Tek rotor-tek statorlu iki motor b) Çift rotor-tek statorlu bir motor yapısı (Profumo ve ark., 1997)

Elektrikli araç uygulamalarında Şekil 3.17'de gösterilen her biri bir fazla beslenen 3 sabit mıknatıslı konfigürasyondan oluşan CKN şirketinin, EVO ELEKTRIC motoru, tahrik yüzeyindeki akım yoğunluğundan dolayı çıkıştaki torku arttırmaktadır. Bu şirket, bu modellerden herhangi birini seçerken en önemli seçenek olarak maksimum hız (rpm), nominal tork (Nm), çap (mm), uzunluk (mm) ve ağırlık (kg) arasında seçim yapmamıza izin veren beşten fazla modele sahiptir (Hincapié ve ark., 2002).

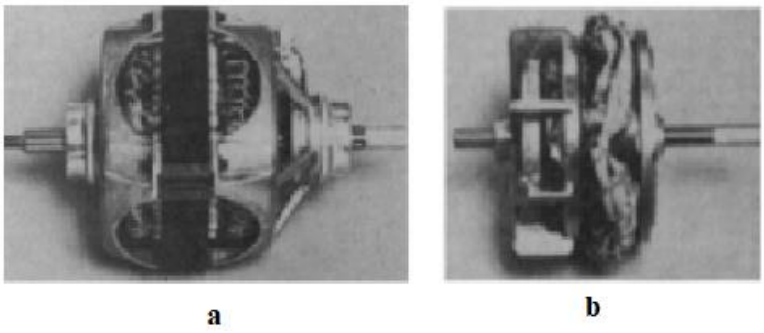


Şekil 3.17. Elektrikli araç uygulamaları için örnek EAİM resmi (Hincapié ve ark., 2002)

Fanlar, pompalar, gıda işleyicileri vb. gibi küçük güçteki ev tipi uygulamalar alanında, tek fazlı eksenel akılı indüksiyon motorları farklı avantajlara sahiptir. Öncelikle, EAİM'in sabit kısmı olan stator söz konusu uygulamalar için istenen şekildedir. İkincisi mekanik yükün dönen kısmı da olan rotor, örneğin fan kanatları, pompa pervanesi vb. ile entegre edilebilir. Stator ve rotor arasındaki eksenel kuvvet küçük güç aralığında o kadar ciddi değildir, bu nedenle itme yatağıyla veya rotorun karşı tarafında bulunan demirsiz rotor diski ve manyetik akı dönüş yolu kullanılarak dayanabilir. Tavan vantilatörü için kullanılan bir fazlı EAİM örneği Şekil 3.18'de, 150 W gücünde EAİM ile geleneksel yapıda bir asenkron motor karşılaştırma amacıyla Şekil 3.19'da sunulmuştur.



Şekil 3.18. Tavan vantilatörü için tek fazlı EAİM resmi (Nasiri-Ghedari ve Lesani, 2012a)



Şekil 3.19. 150 W Güç değerine sahip iki motorun şekli a) RAİM b) EAİM (Nasiri-Ghedari ve Lesani, 2012a)

EAİM'lar yüksek hız gerektiren uygulamalarda da kullanılmaktadır. Eksenel akılı indüksiyon motorlarıyla yüksek güçlü değişken hızlı elektrik sürücülerinin kullanımı, özellikle yüksek basınçlı pompalarda, yüksek hızlı gaz sıkıştırma sistemlerinde ve normalde şebeke frekansı vasıtasıyla ulaşılabileceğinden daha yüksek hız gerektiren küçük enerji dönüşüm birimlerinde giderek daha çok kullanım alanı oluşmaktadır.

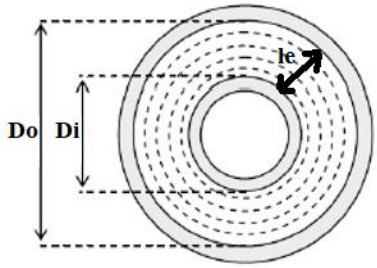
3.2. Yöntem

Tez çalışmamızda yöntem olarak, eksenel akılı indüksiyon motorunun boyutlandırma denklemleri çıkarılıp MATLAB GUI tabanlı bir arayüz elde edilmiştir. MATLAB GUI'de oluşturulan arayüz ile hesaplanan konstrüksiyon verileri ANSYS Maxwell ve ANSYS RMxprt programları ile entegre edilerek sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile nümerik analiz gerçekleştirilmiştir.

3.2.1. Eksenel akılı indüksiyon motoru temel boyutlandırma denklemleri

Eksenel akılı indüksiyon motorlarında motor gücü için en temel mekanik veri iç çap (D_i) ve dış çaptır (D_o). İç çapın dış çapa oranı k_d gibi bir ifade ile Denklem (3.36)'da verilmiştir. Ayrıca Şekil 3.20'de stator kesitinde çapların gösterimi sunulmuştur.

$$k_d = \frac{D_i}{D_o} \tag{3.36}$$



Şekil 3.20. Stator kesiti ve alan dağılımı (Ashari ve ark., 2014)

Motorun çekirdek uzunluğunun (l_e) hesaplanması için dış yarıçap (R_{out}) ve iç yarıçap (R_{in}) kullanılır. Dış yarıçap, iç yarıçap ve çekirdek uzunluğu sırasıyla Denklem (3.37), (3.38) ve (3.39)'da belirtilmiştir.

$$R_{out} = 0{,}5D_o \tag{3.37}$$

$$R_{in} = 0{,}5D_i \tag{3.38}$$

$$l_e = R_{out} - R_{in} \tag{3.39}$$

Motorun ortalama yarıçap değeri (R_{avg}) ve iç yarıçap ile dış yarıçapa bağlı olan güç ve tork üreten yüzey alanı (S_r) ifadeleri de sırasıyla Denklem (3.40) ve (3.41)'de gösterilmektedir.

$$R_{avg} = \sqrt{R_{out}R_{in}} \tag{3.40}$$

$$S_r = \pi({R_{out}}^2 - {R_{in}}^2) \tag{3.41}$$

Manyetik yük, dönme kuvveti üretmek için çekirdek tarafından üretilen maksimum akı yoğunluğudur (B). Akı yoğunluğu çekirdek tarafından üretilen manyetik akı miktarını etkiler. Basitçe söylemek gerekirse, akı miktarı, akı üreten alanla akı yoğunluğunun ürünüdür. Manyetik akı miktarı eşitliği Denklem (3.42)'de verilmiştir.

$$\emptyset = \oint BdA \tag{3.42}$$

Stator çekirdeğindeki akı yoğunluğunun (B_{ds}) hesaplanması için Şekil 3.20'de gösterildiği gibi çekirdek dairesel olarak 10 bölüme ayrılmıştır. Stator olukları arası mesafe (τ_s), oluk genişliği (b_s) kullanılarak ve hava boşluğundaki akı yoğunluğu (B_δ), 0,6 seçilerek her çap durumu için Denklem (3.43) kullanılarak akı yoğunluğu hesaplanır.

$$B_{ds(1\ldots n)} = \frac{B_\delta \tau_{s(1\ldots n)}}{\tau_{s(1\ldots n)} - b_s} \tag{3.43}$$

Stator oluk sayısı belirlenirken motorun faz sayısı ve kutup sayısı dikkate alınır. İkisinin çarpımı stator oluk sayısını bulmamızı sağlar. Motorun kutup sayısına (p) göre bir kutup başına düşen çekirdek yüzey alanı (S_p), Denklem (3.44) ile bulunur.

$$S_p = \frac{S_r}{p} \tag{3.44}$$

Stator sargılarının tasarımında ilk olarak sargı faktörlerini ifade edelim. İndüksiyon motorlarında sargılarda indüklenen gerilimlerde meydana gelebilecek harmoniklerin eliminasyonunu sağlamak amacıyla adım kısaltma ve sargı dağıtma yöntemleri uygulanır. Bu yöntemler sarım sayısı hesabında dağıtım katsayısı (Kb) ve adım katsayısı (Kp) olarak isimlendirilir. Eşitlikte bir tek sargı faktörü (Kw) gösterilir. Sargı faktörü, dağıtım katsayısı ve adım katsayısı eşitlikleri sırasıyla Denklem (3.45), (3.46) ve (3.47)'de verilmiştir.

$$K_w = K_b K_p \tag{3.45}$$

$$K_b = \frac{\sin(C\frac{\alpha}{2})}{C\sin(\frac{\alpha}{2})} \tag{3.46}$$

$$K_p = \cos(\frac{\beta}{2}) \tag{3.47}$$

Statora uygulanan faz geriliminin bir kısmı stator empedansında düşecektir. Geriye kalan gerilim sargılarda indüklenen gerilimdir (E_s) ve faz geriliminin %97'si

kadardır (Boldea ve Nasar, 2002). İndüksiyon motorlarının emk formülünden yola çıkarak stator sargısının sarım sayısı (N_s) Denklem (3.48) ile bulunur.

$$N_s = \frac{E_s}{4{,}44 f \emptyset K_w} \tag{3.48}$$

Sargılardan geçecek akım miktarını (I_s) üç faz genel güç denkleminden elde edebiliriz. Stator sargıları yıldız bağlı motorun milinden aldığımız çıkış gücü biliniyorsa Denklem (3.49) kullanılarak kaynaktan çekilen akım bulunabilir.

$$I_s = \frac{P_ç}{\sqrt{3} V \cos\varphi \eta} \tag{3.49}$$

Motorun güç ifadesi mekaniksel veriler ile torkun açısal rotor hızı ile çarpımıdır. Denklem (3.2) ile elde edilen senkron açısal hızdır (w_s). Tahmini olarak %6 kayma değeri için rotorun açısal hızı (w_r) Denklem (3.50)'de, güç ve açısal hıza göre tork ifadesi de Denklem (3.51)'de verilmektedir.

$$w_r = w_s - (S.w_s) \tag{3.50}$$

$$T = \frac{P}{w_r} \tag{3.51}$$

Tork ifadesi mil eksenine uzunluk ile orantılı döndürme kuvveti olduğundan tork, hava boşluğunda ortaya çıkan teğetsel kuvvet ($F_{\sigma tan}$), rotor ortalama yarıçapı (R_{avg}) ve yüzey alanının (S_r) çarpımıdır. Denklem (3.52) ile tork ifadesi yazılmıştır. Bu denklemden teğetsel kuvvet çekilerek Denklem (3.53) elde edilir.

$$T = S_r R_{avg} F_{\sigma tan} \tag{3.52}$$

$$F_{\sigma tan} = \frac{T}{S_r R_{avg}} \tag{3.53}$$

Teğetsel kuvvetin bir başka ifadesi manyetik akı yoğunluğu (B) ve iletkenlerin toplam akım yoğunluğu (j) verileri ile Denklem (3.54) eşitliği elde edilir.

$$F_{\sigma tan} = \frac{B.j}{2} \tag{3.54}$$

İletken toplam akım yoğunluğu ifadesini üç fazın toplam iletken sayısı (Z) ve ortalama stator çapı (D) değeri ile elde edebiliriz. Toplam iletken sayısı, ortalama çap ve toplam akım yoğunluğu ifadelerinin eşitlikleri sırasıyla Denklem (3.55), (3.56) ve (3.57)'de verilmektedir.

$$Z = 2.m.N \tag{3.55}$$

$$D = 2R_{avg} \tag{3.56}$$

$$A = \frac{I.Z}{\pi.D} \tag{3.57}$$

Rotor tasarımında çekirdekteki akı yoğunluğu ifadesi aynen statordaki gibi hesaplanır. Denklem (3.43) ile ifade edilen eşitlik rotor manyetik akısı için Denklem (3.58)'de gösterilir.

$$B_{dr(1\ldots n)} = \frac{B_\delta \tau_{r(1\ldots n)}}{\tau_{r(1\ldots n)} - b_r} \tag{3.58}$$

Rotor ile stator arasındaki hava boşluğunun (L_{ag}) mesafesi rotor performansında çok etkilidir. Deneysel olarak, optimum hava boşluğunun mesafesi Denklem (3.59)'da verilen eşitlik ile hesaplanabilir (Ashari ve ark., 2014).

$$L_{ag} = 3{,}06 - \frac{6560}{D+2280} \tag{3.59}$$

3.2.2. Ansys maxwell ve matlab gui programları

Eksenel akılı indüksiyon motoru tasarımı için arayüz oluşturmak için iki farklı programdan yararlanılmıştır. Bunlar MATLAB GUI ve ANSYS Maxwell programlarıdır.

MathWorks şirketinin oluşturduğu MATLAB programı, kullanıcısına, matris işlemleri, fonksiyon ve veri çizimi, algoritma geliştirilmesi, kullanıcı arayüzü oluşturulması ile birlikte C, C++ ve Java gibi diğer yazılım dilleriyle yazılmış programlarla birlikte çalışabilmektedir. Programı ilk kabul eden ve kullanalar kontrol mühendisliği alanında çalışan araştırmacılar ve geliştiricilerdir. Ayrıca eğitim alanında sıkça kullanılmaktadır. Bilhassa lineer cebir, sayısal analiz öğretimi ve görüntü işleme konularında bilim adamlarının tercih ettiği bir dildir. MATLAB ile C ya da Fortran'daki fonksiyonları çağırmak mümkündür, ayrıca alt programlar da yazılabilir. Bunlarla birlikte bu program ile istatistik, lineer cebir, optimizasyon, sayısal analiz, optimizasyon, fourier analizi gibi bir çok matematik hesaplamaları hızlı ve etkili şekilde yapılabilir. MATLAB programlama dili iki boyutlu ve üç boyutlu grafik çizimi de yapmak mümkündür. MATLAB ile karmaşık matematik hesaplamaları da kısa bir sürede sonuca ulaşır. Bu program ile temel matematik fonksiyonlarının iki ve üç boyutlu grafikleri çizilebilir. MATLAB ile parabol, polinom, sinüs ve cosinüs eğrileri öncelikli olmak üzere her türlü iki ve üç boyutlu matematiksel grafikler kolaylıkla çizebilir.

GUI (Graphical User Interfaces) grafiksel kullanıcı arayüzleri olarak bilinir, uygulamaların çalıştırılması için bir dil öğrenme veya komutları yazma gereksinimini ortadan kaldırarak yazılım uygulamalarının nokta ve tıklatma kontrolünü sağlar. İçeriğindeki nesneleri kullanarak kullanıcıyla etkileşim sağlayan ve bir işin veya bir programın çalıştırılmasını sağlayan grafiksel bir program arayüzüdür. MATLAB uygulamaları, bir görevi veya hesaplamayı otomatikleştiren GUI ön uçlarına (front end) sahip, bağımsız MATLAB programlarıdır. GUI tipik olarak menüler, araç çubukları, düğmeler ve kaydırıcılar gibi kontroller içerir. Ayrıca, başkalarının kullanması için karşılık gelen kullanıcı arayüzleri de dâhil olmak üzere kendi özel uygulamalarımızı da oluşturmamıza olanak sağlar.

ANSYS firması tarafından geliştirilen bir yazılımdır. ANSYS Maxwell, elektrik motorları, aktüatörler, sensörler, transformatörler ve diğer elektromanyetik ve elektromekanik cihazların tasarımı ve analizi için endüstri lideri elektromanyetik alan simülasyon yazılımıdır. Maxwell ile elektromekanik bileşenlerin doğrusal olmayan,

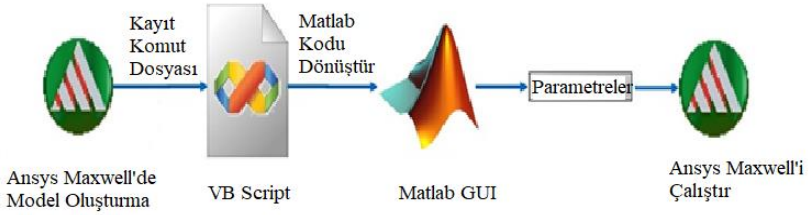
geçici hareketlerini ve bunların sürücü devresi ve kontrol sistemi tasarımı üzerindeki etkilerini tam olarak tanımlayabilirsiniz. Maxwell'in gelişmiş elektromanyetik alan çözücülerinden yararlanarak ve bunları entegre devre ve sistem simülasyon teknolojisine kusursuz bir şekilde bağlayarak, donanımda bir prototip oluşturmadan çok önce elektromekanik sistemlerin performansını anlayabilirsiniz. Bu sanal elektromanyetik laboratuvar, pazara daha hızlı girme, maliyetleri düşürme ve gelişmiş sistem performansı ile önemli bir rekabet avantajı sağlar. ANSYS Maxwell elektrik ve manyetik alan problemlerinin çözmünü sonlu elemanlar yöntemiyle (finite element analysis) yapan yüksek performanslı interaktif yazılım paketidir. Ansys Maxwell programı uzayın sınırlı bir bölgesindeki elektromanyetik alan problemlerini uygun sınır koşullarıyla ve kullanıcının belirlediği başlangıç şartlarına göre Maxwell denklemlerini kullanarak çözer. Programda yer alan çözücünün (solver) seçimine göre uygun terimler ve denklem setleri kullanılarak çözüm yapılır. Ansys Maxwell'de üç farklı tasarım tipi (design types) yer almaktadır. Bunlar; RMxprt, Maxwell 2D ve Maxwell 3D'dir. Rmxprt (Rotation Machinery Expert) elektrik makinalarının tasarım ve analizi için kullanılır. Maxwell 2D, XY ya da RZ düzlemlerinde; Maxwell 3D ise üçüncü boyutta elektromanyetik alan çözümlerini sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirir (Çoramık, 2018). Ansys-Maxwell; geniş çizim altyapısının olması, daha fazla çözüm araçları olması, çözüm için sonlu elemanlar yöntemini kullanması, bünyesinde, tasarlanan makine modelinin dinamik analizini sağlayabilecek programlar çalışabilmesi, Matlab'ta arayüz geliştirebilme ve çalışabilme yeteneğine sahip olması gibi avantajlarından dolayı yaygın olarak tercih edilmektedir.

3.2.3. Tasarlanan arayüz

Literatürde verilen diğer çalışmalardan farklı olarak Matlab-GUI'de tasarım arayüzü oluşturulmuştur. Ancak Ansys Maxwell döner makinaların analitik çözümü için Rmxprt adı altında modüle sahiptir. Bu modül döner makinaların analitik çözümlemelerini gerçekleştirmektedir. Bu araç içinde eksenel akılı motor çözücüsü modül olarak tanımlanmamıştır. Bu araçta bulunan modellerin boyutlandırmaları ilgili yerlere girilerek analitik çözümler elde edilebilmektedir. Bu sonuçlar nümerik analiz için doğrudan Maxwell 2D veya 3D geçici alan çözücüsüne aktarılabilmesine imkan

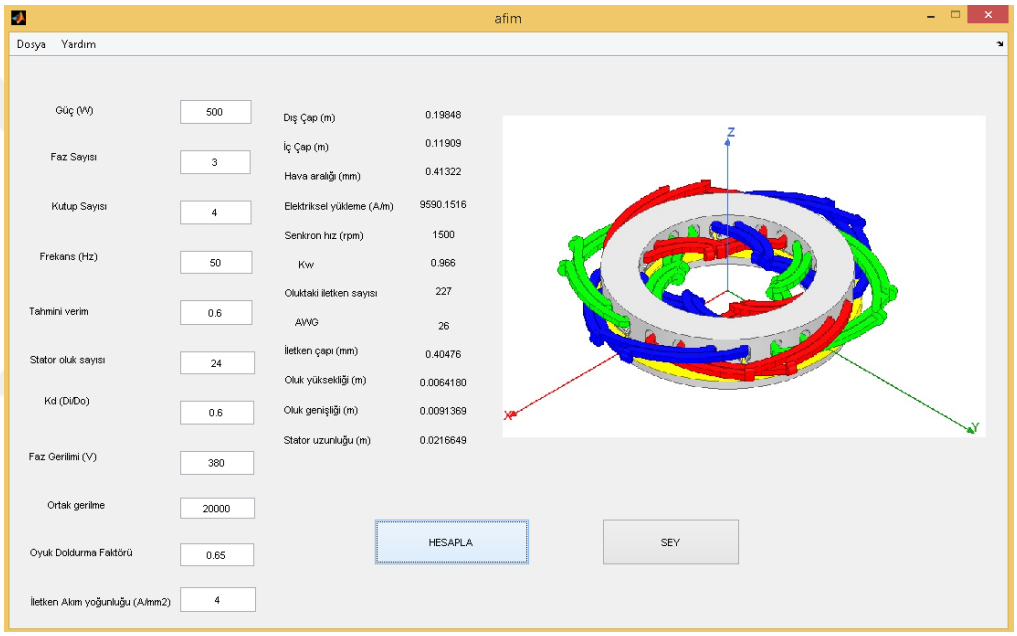
tanır. modülüne aktarılarak sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilebilmektedir. Ancak tasarım için analitik eşitliklerin değişkenler tanımlamaları için tanımlanması gerekmektedir. Bu nedenle analitik eşitlikler Matlab ile tanımlanarak nümerik analizlerin Ansys Maxwell'den alınacak hale getirilmiştir. Bilindiği gibi elektrik makinalarının tasarımı için kullanılan analitik eşitlikler ile hızlı sonuçlar elde edilebilmesine karşın makinanın çalışma durumunu tamamen incelemek için yetersiz kalmaktadır. Nümerik analizin sonlu elemanlar analizi ile gerçekleştirilmesi daha doğru sonuçlar vermesine karşın analiz süresi daha uzun sürmektedir. İki programın çalışabilmesi için bilgisayar özelliklerinin (Ram, Harddisk, Ekran Kartı, vb.) program ihtiyaçlarını karşılaması gerekmektedir.

Sonlu elemanlar yazılım programı olarak Visual Basic Script ve Phython dilleri ile dinamik olarak çalışabilen Ansys Maxwell seçilmiştir. Ansys Maxwell'de oluşturulan temel modelin Visual Basic kodu Matlab Gui içinde tanımlanmıştır. Ayrıca Matlab Gui'de tanımlanan analitik boyutlandırma eşitlikleri üzerinden makinanın temel geometri verileri elde edilir. Matlab Gui içerisine tanımlanan Ansys Maxwell farklı işlem araçları (Transient, Optimizasyon, vb.) üzerinden elde edilen boyutlandırma verilerine göre eksenel makinanın analizi gerçekleştirilebilir. Ansys Maxwell ve Matlab Gui haberleşmesi için kod dönüşümlerinin ve matematiksel formüllerin arayüz içinde tanımlanması gerekmektedir. Matlab koduna dönüşen model dinamik bir yapı da ve tasarımın boyutlandırma parametrelerinin değişimi, tasarım modeline optimizasyon uygulanmasına da imkan sağlamakadır. Böylece paket program üreticileri her makine topolojisi için hazır arayüzü oluşturmak yerine paket programlarını dinamik hale getirmektedir. Kısacası paket programların açık yazılımsal kodu kullanılarak farklı makinaların çözümü yapılabilmektedir. Bu çalışmada ele alınan kod dönüşümü akış şeması Şekil 3.21'de görülmektedir:



Şekil 3.21. Arayüz analitik ve nümerik analiz süreci

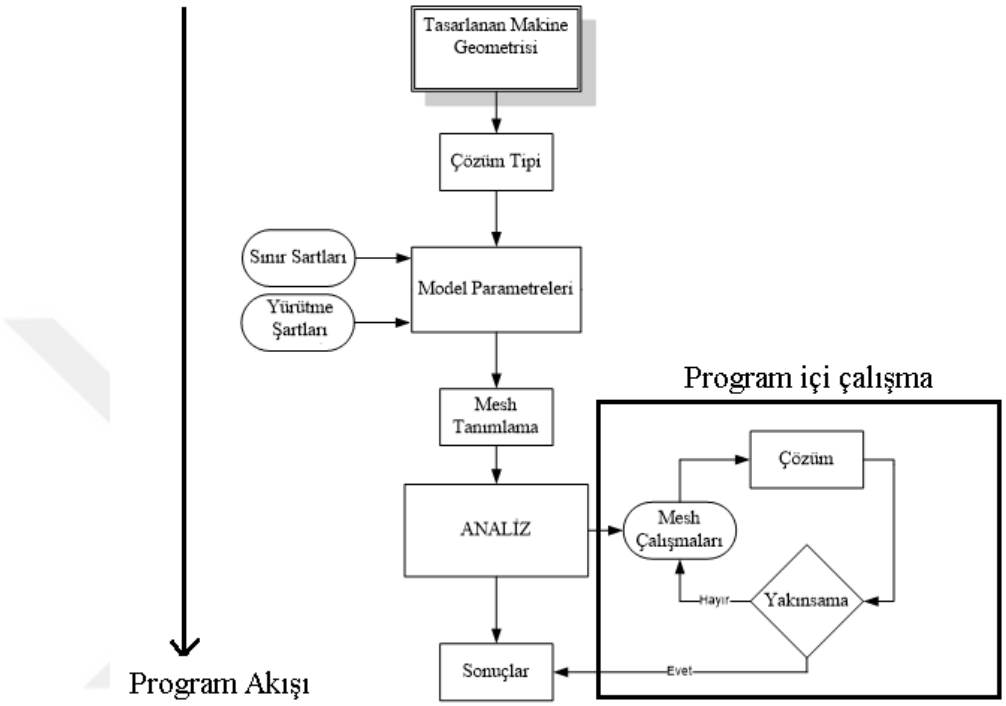
Ansys-Maxwell ayarlarda Matlab programının .exe dosyasının adresi gösterilerek iki programın haberleşme protokolü kurulur. Eksenel akılı model geometrisi Ansys-Maxwell'de Script dosyasına kaydedilir. Bu çalışmada .vbs olarak kayıt edilen kod Matlab koduna dönüştürülmüştür. Matlab Gui'de analitik hesaplamaların gerçekleştirilmesinde pushbuton ile sağlandığı için pushbuton altına kod girilir. Ele alınan tasarım probleminin çalışması gereken çözücü modül (transient, elektrostatik, eddy current, vb.)için ayrı ayrı tanımlama yapılmalıdır. Bu çalışmada sadece geçici hal (transient) durumu ele alınmıştır. Tasarımı gerçekleştirilen arayüz aşağıda yer alan Şekil 3.22'de gösterilmiştir:



Şekil 3.22. Arayüz görünümü

Modellemeye bakış açısından, makine temelde 3 boyutlu bir geometriye sahiptir. Üç boyutlu nümerik analizin elektrik makinelerinin tasarımına uygulanması halkalama akısı, akım yoğunluğu, sargı indüktansları ve üretilen elektromanyetik tork gibi önemli tasarım parametrelerinin yüksek doğrulukla belirlenmesine imkân tanımaktadır. Bu yöntemin kullanılması; makinenin analizi için hem maliyet hem de zamandan tasarruf sağlamaktadır. İlk olarak makine geometrisi için tasarlanacak boyut seçilir. Hesaplanan geometri verilerine göre makine geometrisi oluşturulur. Model parametreleri olarak; sınır şartları tanımlanır. Yürütme şartları olarak; sarım sayısı, motor olarak çalışması durumunda anma akımı veya anama gerilimi verilir. Tasarlanan

makinenin hesaplanan direnç parametreleri Şekil 3.22'de görülen model parametreleri kısmına girilir ve tasarlanan makine analize hazır hale getirilir. Ayrıca Ansys Maxwell programı için çözüm algoritması şekli Şekil 3.23'te gösterildiği şekildedir.

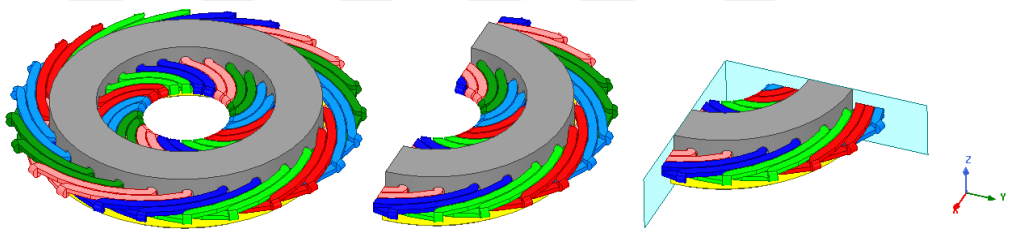


Şekil 3.23. Ansys Maxwell çözüm algoritması

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Ansys Maxwell analiz sonuçları

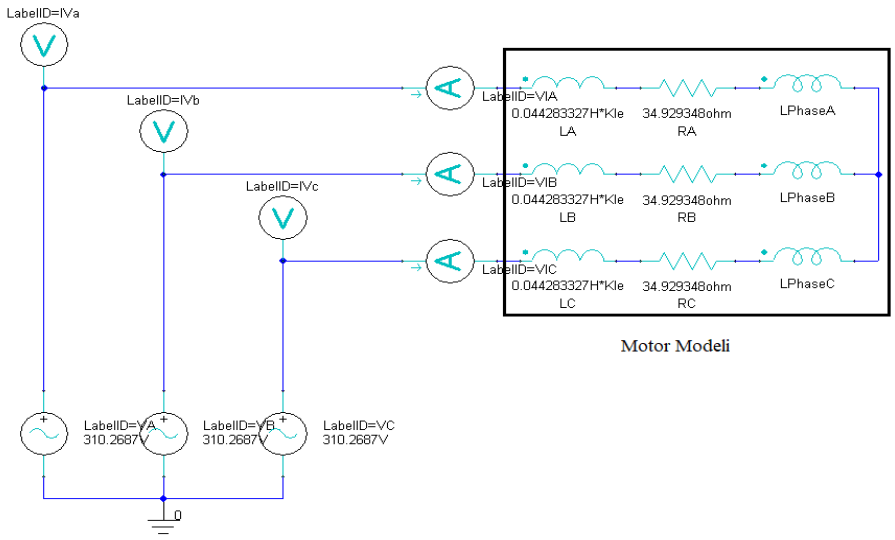
Asenkron motorun tasarımını incelenmesi için ANSYS RMXprt'de oluşturulan modelin ANSYS Maxwell 3D ortamında modellenerek tasarım ve analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir. ANSYS RMXprt modülünde tasarlanan model 2D transient analiz için bu modül eksenel geometriden dolayı dönüşüm sağlanamadığı için ANSYS Maxwell 3D modülü transient analiz modülü kullanılmıştır. Transient analizi gerçekleştirilen modeller için analiz süresi 0.1 sec ve analiz stepleri 0.2 msec seçilmiştir. Analizi yapılan modellere ait hızlanma ve tork değerinin değişimine ilişkin analizler gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.22 dikkate alınarak oluşturulan Ansys Maxwell 3D modeli Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Model çözümü için modelin 1/4 hale getirilmesi

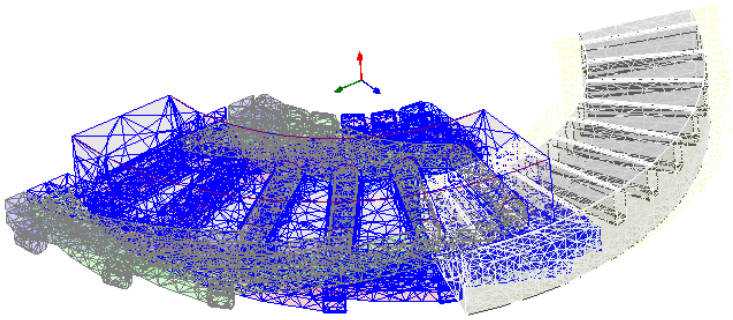
Burada modelin 3 boyutlu geometrisi için çözümün hızlanması açısından motor kutbundan dolayı 4 parçaya bölünmüştür. Benzer şekilde farklı kutup kombinasyonları için model 1/2, 1/4, 1/8 vb. parça kısmı olarak bölünebilir. Eksen simetrikleri farklı makine modelleri için uygulanabilir. Ansys Maxwell içerisinde Master, Slave tanımlamaları yapılarak model çözülecek hale getirilir. Önceden de belirtildiği üzere motor analizi için gerçekleştirilecek tanımlamalar uyartım, hesaplanması istenilen büyüklükler kuvvet, tork olarak belirlenebilir. Hareketli kısımda tam yük analizinin gerçekleştirilebilmesi için yük; if(speed<128.822, -0.0301295*speed, -500/speed)

olarak tanımlanmıştır. Motora uygulanan gerilim için harici devre modeli kullanılmıştır. Şekil 4.2 ile gösterilmiştir.

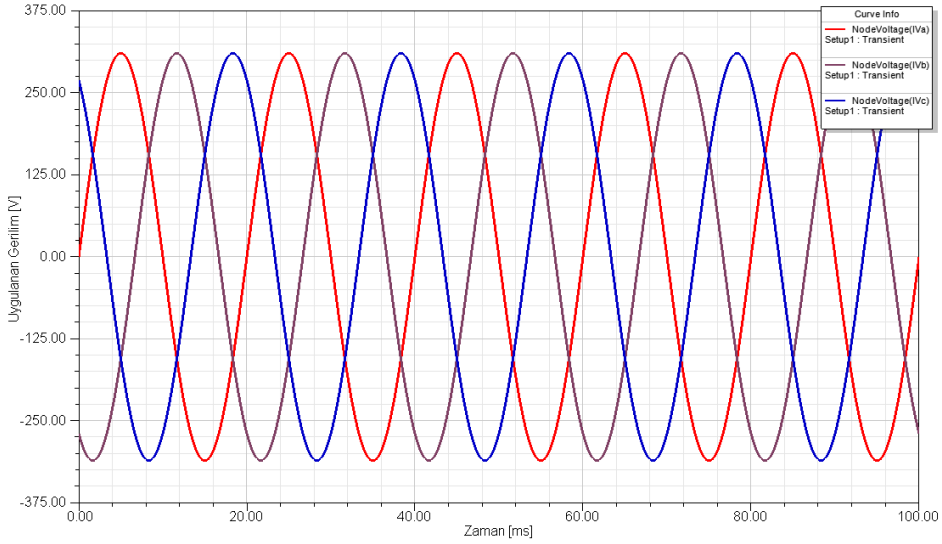


Şekil 4.2. Harici devre modeli

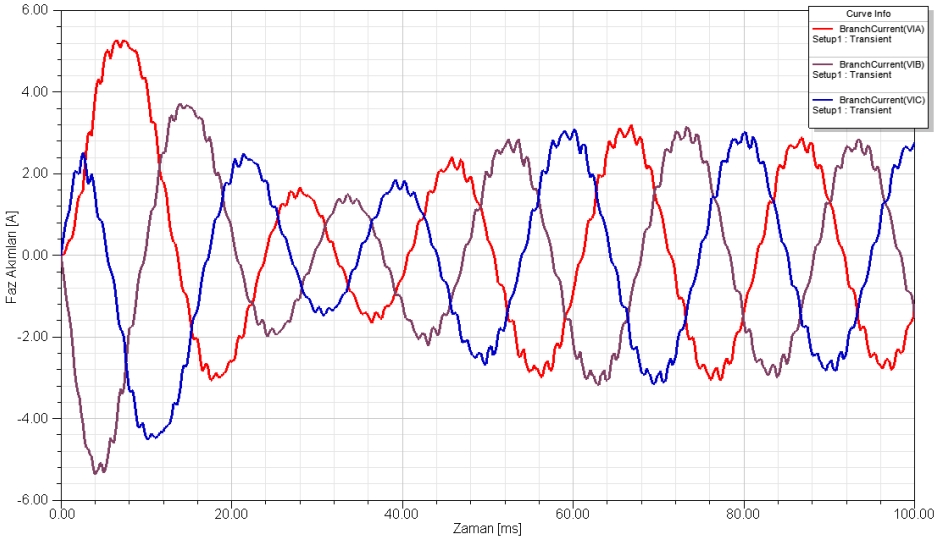
Burada motor faz sargıları yıldız bağlı ve uygulanan gerilim 120 derece faz farklı olarak, gerilim ve akım probları tanımlanarak analizler gerçekleştirilmiştir. Tam yük analizi i7-6700 3.4 GHz işlemcili ve 16 GB ram'e sahip bilgisayarda analizler gerçekleştirilmiştir. Geçici zaman analizi 30 saat 13 dk sürmüştür. Model için atanan mesh sayısı 69758'dir. Modelin mesh yapısı Şekil 4.3'te, uygulanan gerilimin dalga şekli Şekil 4.4'te, faz akımlarının dalga şekli Şekil 4.5'te ve faz sargılarında indüklenen gerilimin dalga şekli de Şekil 4.6'da gösterilmiştir:



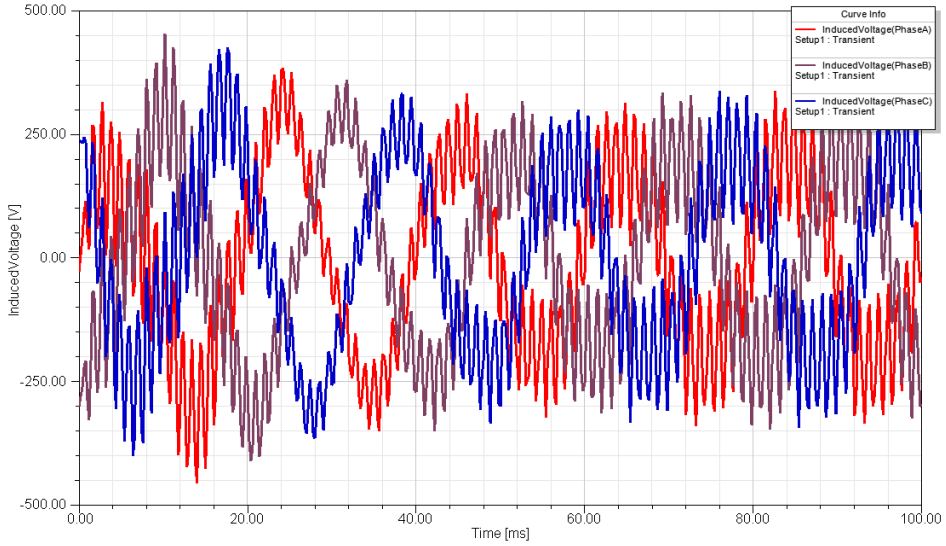
Şekil 4.3. Modelin mesh yapısı



Şekil 4.4. Uygulanan gerilim değişimi

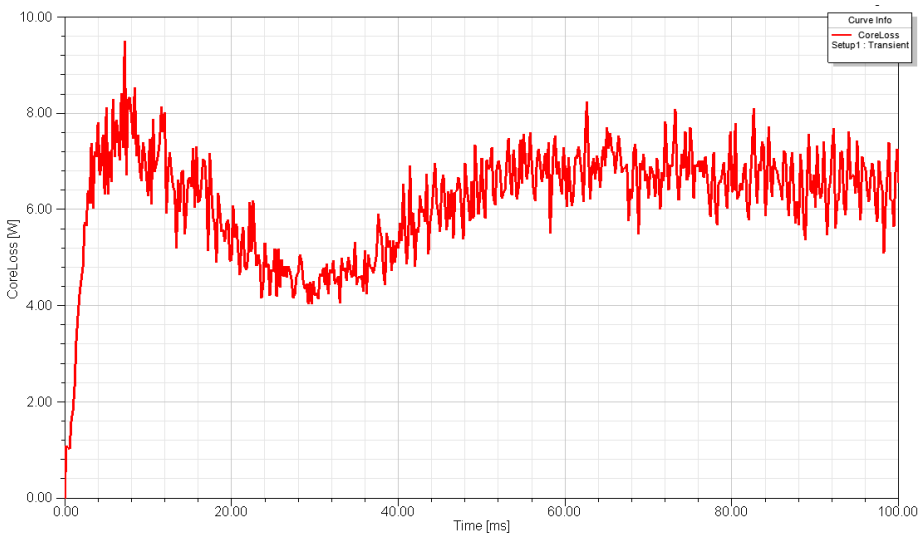


Şekil 4.5. Faz akımları değişimi



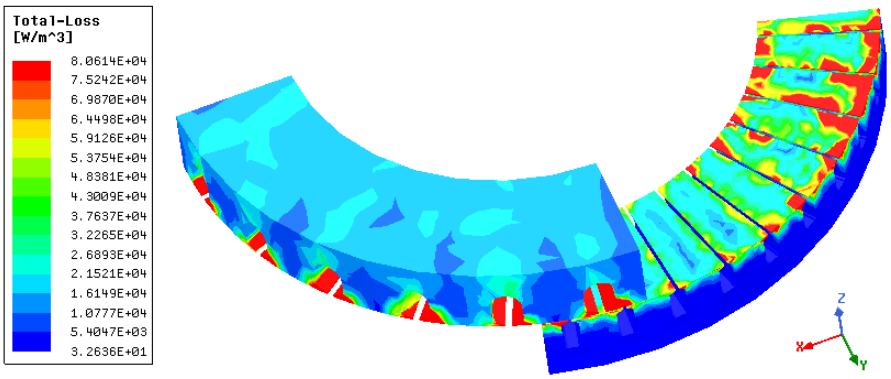
Şekil 4.6. Faz sargılarında indüklenen gerilim değişimi

Eğriler incelendiğinde sargılara uygulanan gerilim, tepe değeri 311 V olan 120° faz farklı üç fazlı gerilimdir. 60 ms'den sonra sürekli durumdaki çalışma değerleri okunmaktadır. Tepe değeri yaklaşık, 3 A değerinde faz akımları ve 300 V değerinde sargılarda indüklenen gerilim değeri okunmaktadır. Stator ve rotorda kullanılması düşünülen sac malzemesi olarak yönlendirilmemiş saclar içerisinde çok düşük kayıplara sahip olduğundan dolayı M19-29G olarak belirlenmiştir.

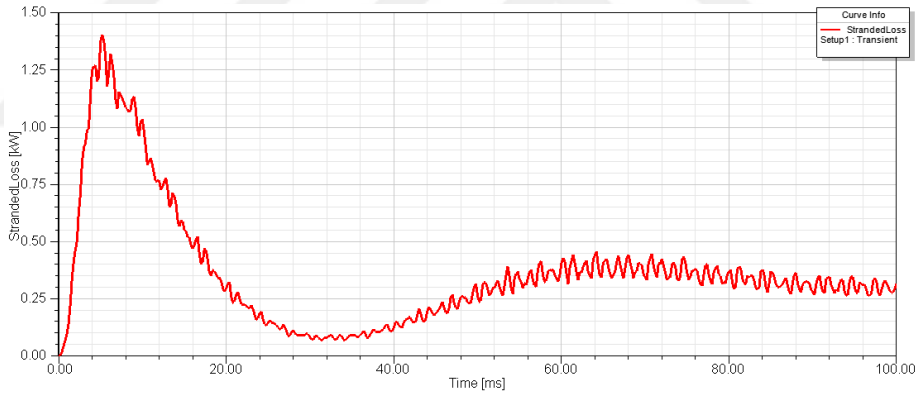


Şekil 4.7. Demir kaybı değişimi

Şekil 4.7 incelendiğinde stator ve rotorda meydana gelen toplam demir kaybı 6,6 W olarak bulunmuştur. Demir kayıplarının akı yoğunluğunun yükseldiği bölgelerde artış göstermiştir. Özellikle rotor ve stator dişlerinde bu değişim Şekil 4.8 ile gösterilmiştir.

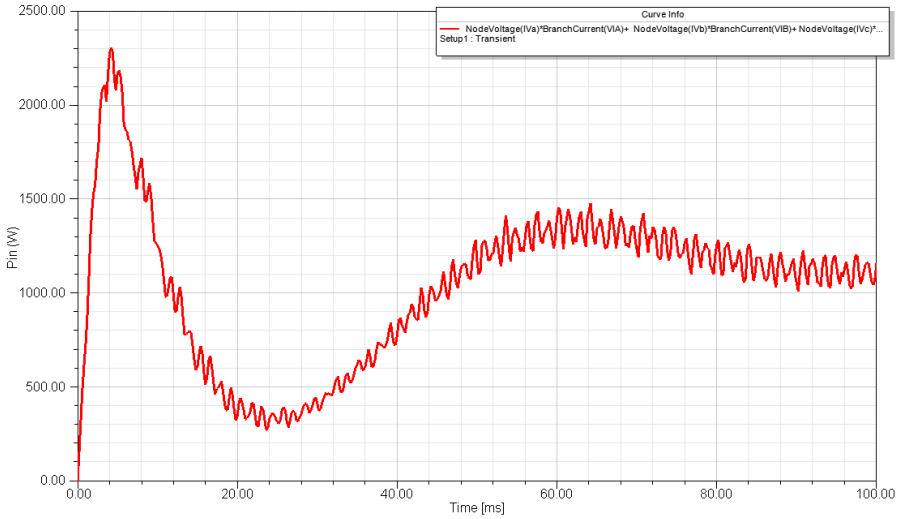


Şekil 4.8. Demir kaybı yoğunluğu değişimi

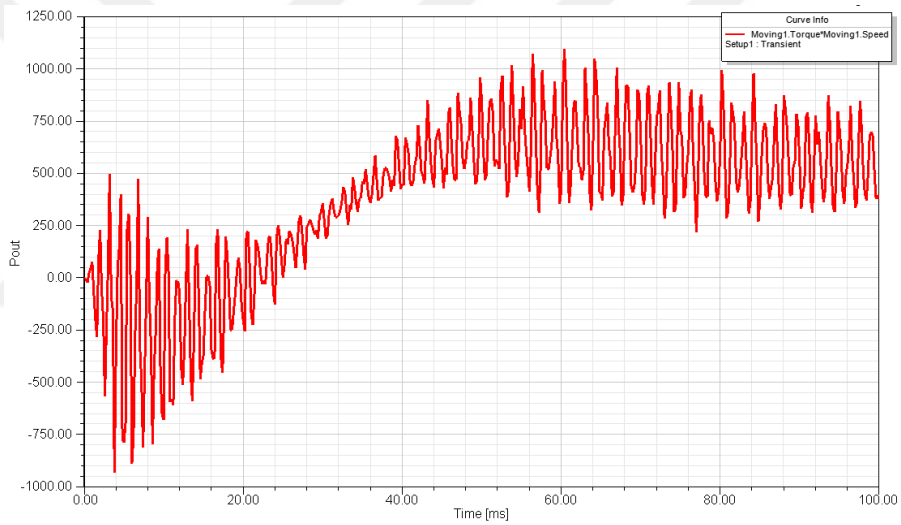


Şekil 4.9. Bakır kaybı değişimi

Şekil 4.9 incelendiğinde faz sargılarından geçen akım ilk anda yükselerek azalışı bakır kaybında benzer değişim oluşturmaktadır. Motorun giriş gücü ve çıkış gücü değişimi sırasıyla Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de gösterilmiştir.

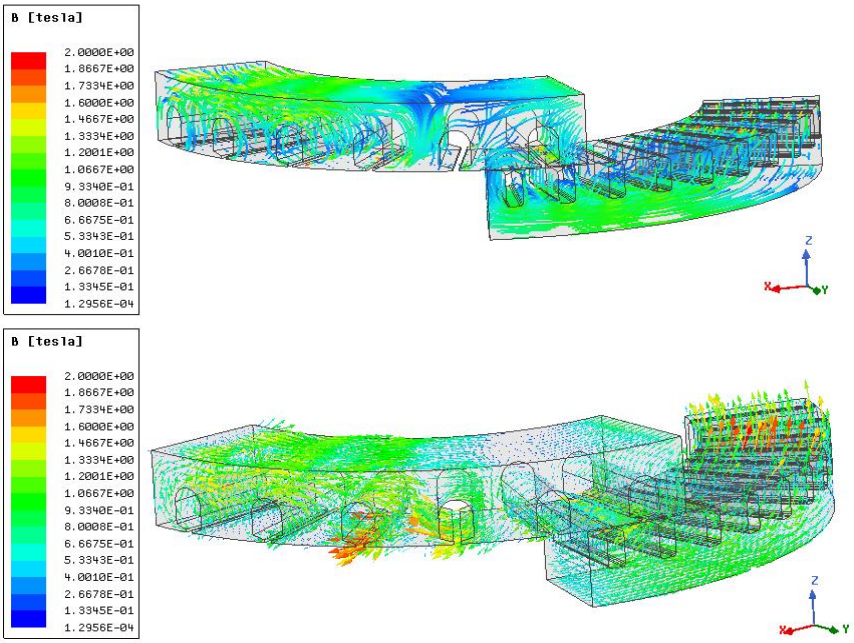


Şekil 4.10. Giriş gücü değişimi



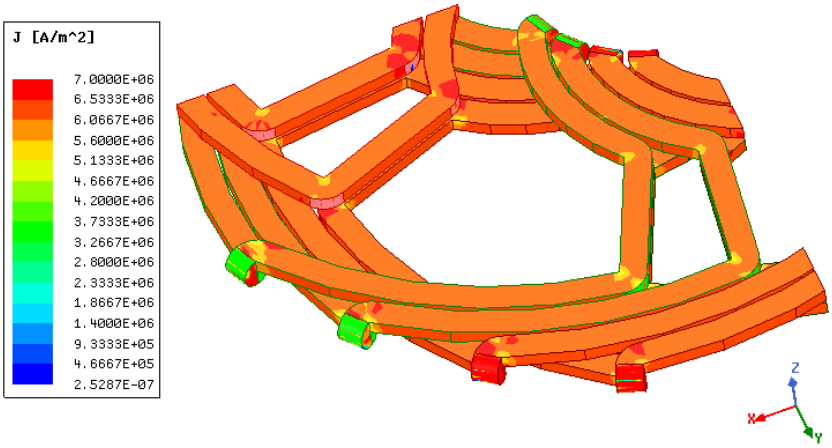
Şekil 4.11. Çıkış gücü değişimi

Eğriler incelendiğinde sürekli durumda giriş gücü 1116,27 W, çıkış gücü 592 W olarak hesaplanmıştır. 90 ms'deki rotor ve statordaki akı yoğunluğu değişimi Şekil 4.12'de gösterilmiştir.



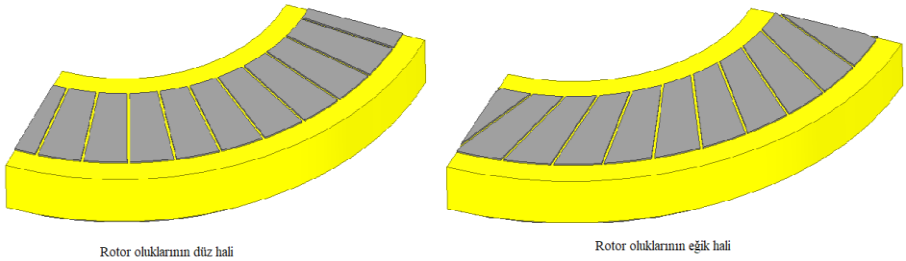
Şekil 4.12. Rotor ve stator manyetik akı yoğunluğu değişimi

Maksimum manyetik akı yoğunlukları sırasıyla stator boyunduruk 1,7 T, stator diş 2,1 T, rotor boyunduruk 1,7 T, rotor diş 2,2 T olarak sınırlandırılabilir (Lipo, 2004). Bu değerlere yakın bölgelerde çalışmak motor boyutlarını, motor ısısal değerlerini etkileyebilir. Burada rotor ve stator boyunduruğundaki akı yoğunluğu 2 T altında olduğundan dolayı sac malzemesinin doyuma ulaşması beklenmemektedir. Ayrıca stator boyunduruğundaki akı yoğunluğu maksimum 1,6 T, rotor boyunduruk akı yoğunluğu ise 1,3 T civarındadır. Şekil 4.13'te faz sargılarındaki akım yoğunluğu verilmiştir.

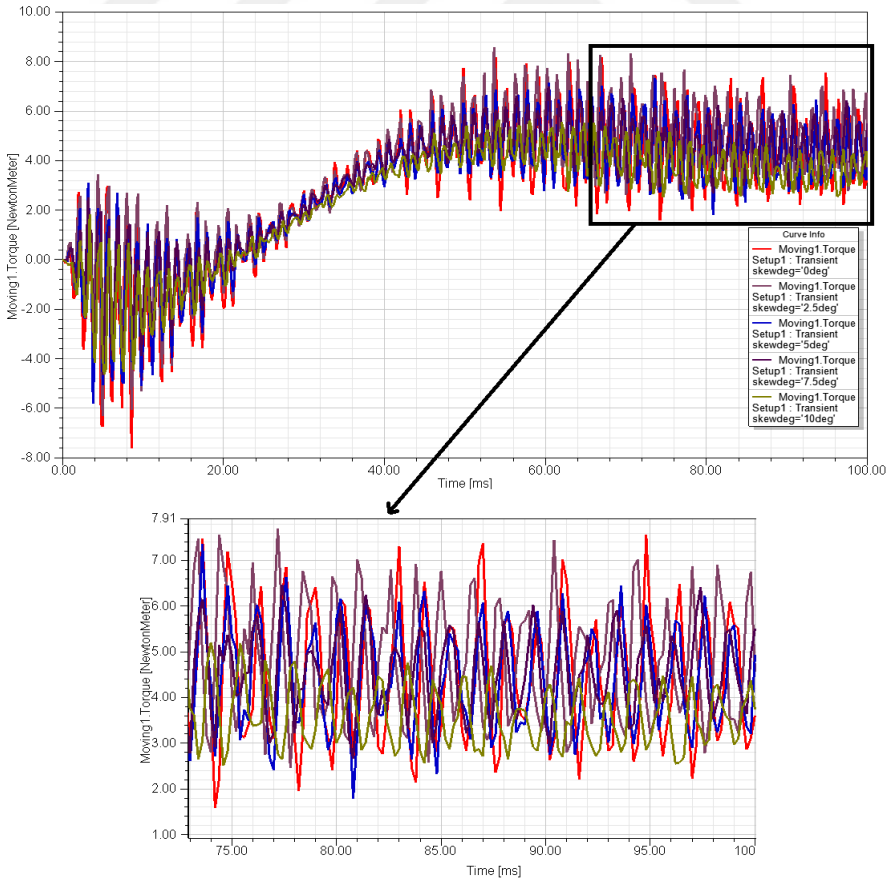


Şekil 4.13. Stator akım yoğunluğu değişimi

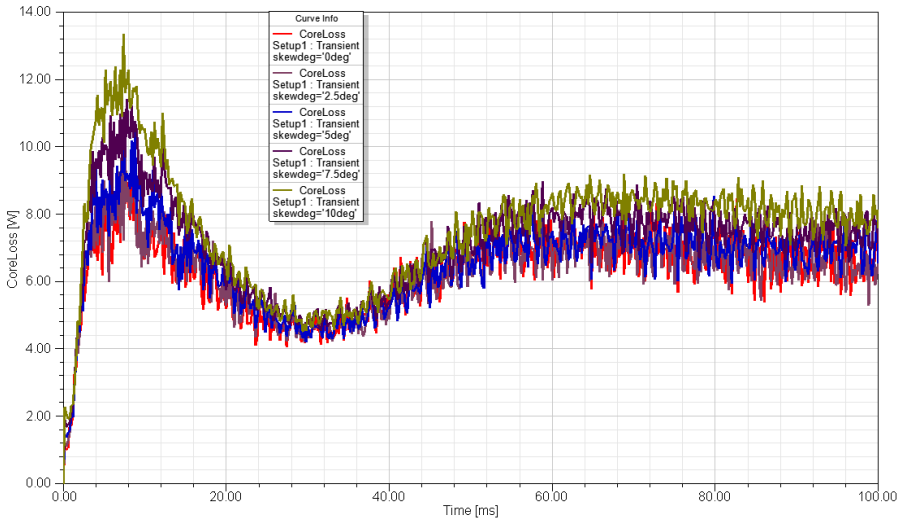
Burada akım yoğunluğu değişimi yaklaşık 5,5 A/mm^2 olarak görülmektedir. Yüklü durumdaki motorun rotor oluklarındaki eğikliğin elektromanyetik tork üzerindeki etkisi parametrik analiz ile incelenmiştir. 0 dereceden başlayarak 10 dereceye kadar 2,5 derece adım adım değiştirilerek elektromanyetik tork değişimi incelenmiştir. Rotor çubuklarının eğim şekli Şekil 4.14'te, elektromanyetik tork değişim sonucu Şekil 4.15'te, demir kaybı değişimi ise Şekil 4.16'da gösterilmektedir.



Şekil 4.14. Rotor oluklarının düz ve eğik şekilleri



Şekil 4.15. Rotor çubuklarının eğimi ile elektromanyetik tork değişimi



Şekil 4.16. Demir kaybı değişimi

Burada rotor çubuklarının eğimi artması ile elektromanyetik torkun tepeden tepeye değeri değişimi, demir kayıpları değişimi Çizelge 4.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Eğiklik açısına göre elektromanyetik tork değişim değerleri

Eğiklik Açısı (Derece)	Tepeden Tepeye Tork Değeri (Nm)	Tork (Nm)	Demir kaybı (W)
0	5.39	4.5	6.68
2.5	4.84	4.9	6.69
5	4.63	4.43	6.97
7.5	3.74	4.63	7.52
10	2.19	3.58	7.95

Çizelge 4.1'de verilen sonuçlara göre eğim arttıkça tork dalgalılığı düzelmesine karşın motorun üreteceği moment miktarı azalmaktadır. Ayrıca bakır kayıplarında herhangi bir değişim oluşmamıştır. Ancak demir kayıplarındaki değişim eğim arttıkça artmaktadır.

Eksenel akılı motorun üç boyutlu geçici hal analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen boyutlandırma verileri üzerine optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilerek prototip üretim gerçekleştirilebilir. 1/4 hale indirgenmiş modelin tek bir analizinin yaklaşık bir gün sürmesi göz önüne alındığında optimizasyon çalışmaları için süper bilgisayarda yada paralel bağlı bilgisayarlar kullanılarak hesaplamaların yapılması

zaman kaybının önüne geçmektedir. Ancak iki yöntemin kullanılması kullanıcıya maliyetli olabileceğine dikkat edilmelidir.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada; eksenel makinanın temel analitik boyutlandırma eşitlikleri doğrultusunda motor arayüzü geliştirilmiştir. Bu arayüz ile motor genel boyutlandırması yapılmakta ve sonlu elemanlar analizi ile motorun çalışma durumu incelenebilmektedir. Bu kapsamda gerçekleştirilen tez çalışması ile elde edilen kazanımlar:

- Eksenel akılı makinalar üzerine çalışan araştırmacılar için analitik ve sonlu elemanlar analizinin birlikte kullanımı bakımından örnek oluşturmaktadır.
- Özellikle elektrik makinalarının tasarımı üzerine eğitim uygulamaları için eğitim aracı olarak da kullanılabilir.
- Arayüz aracı analitik ve sayısal (SEY analiz) çözümleme ile yapabilmesinin yanısıra optimizasyon veya farklı çözüm araçları yapılabilir.
- Ansys programının mekanik analiz ve sıcaklık analizi araçları için model oluşturulmasına gerek duyulmaksızın analizi gerçekleştirilebilir.
- Asenkron motorlar günümüzde en yaygın kullanılan motor ve eksenel akılı motorların özellikle elektrikli araçlarda kullanılmaları düşünüldüğünde otomotiv sektöründe yurt dışına aktarılacak dövizin ülkemizde kalması sağlanabilir.

Bu alanda çalışacak olan tasarımcılara bazı öneriler verilmiştir:

- Ülkemizde eksenel indüksiyon motoru üzerine yapılan çalışma açısından bu çalışma ikinci çalışmadır. Bu nedenle eksenel indüksiyon motorun rotor ve stator imalat süreci için bilgi ve tecrübenin sınırlı olduğu dikkate alınarak imalat sürecini dikkate alınarak çalışmalar gerçekleştirilmelidir.
- Özel üretim maliyetleri ve motor verimi dikkate alınarak optimizasyon çalışmaları yapılarak nihai geometri elde edilmelidir.
- Literatürde yer alan çalışmalarda da hava aralığının ayarlanması eksenel makinalar için çok önemlidir. Bu nedenle radyal ve eksenel kuvvetlerin analizi yanı sıra mekanik gerilme analizleri sonuçları dikkate alınmalıdır.

Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen çalışma üzerine ileriye yönelik yapılabilecek çalışmalar verilmiştir:

- Eksenel indüksiyon motorunun elde edilen veriler ve farklı güçler için prototip üretimi gerçekleştirilebilir.
- Eksenel indüksiyon motorun ısısal, malzeme dayanımı ve mekaniksel gürültü büyüklüklerinin araştırılması mümkündür.

KAYNAKLAR

ASHARI, M., SURYOATMOJO, H., RIAWAN, D., MARDIYANTO, R., FAHMI, D., ADAM, K. B. and HIDAYAT, S., 2014. Design and Implementation of Axial Flux Induction Motor Single Stator - Single Rotor for Electric Vehicle Application. IPTEK Journal of Proceedings Series, 1: 497-502.

BENOUDJIT, A., GUETTAFI A. AND NAIT SAÏD, N., 2000. Axial Flux Induction Motor for On-Wheel Drive Propulsion System. Electric Machines & Power Systems, 28(12): 1107-1125

BOBON, A., 2012. 3D Finite Element Computation of Axial Flux in Induction Machine. Transactions on Electrical Engineering, 1(3): 72-75

BOLDEA, I. and NASAR, S.A., 2002. The Induction Machine Handbook. CRC Press LLC, USA, 946s.

CARL, J. R. and STEPHENS, S.M., 2004. Axial Flux Induction Motor. Patent Application Publication. USA.

ÇOLAK, İ., 2008. Asenkron Motorlar. Seçkin Yayıncılık, Ankara, 174s.

ÇORAMIK, M. 2018. Örnek Bir Analiz Üzerinden Ansys Maxwell Kullanımında Karşılaşılan Güçlüklere Detaylı Çözüm Önerileri. Uluslararası Necatibey Eğitim ve Sosyal Bilimler Araştırmaları Kongresi (UNESAK-2018), 26-28 Ekim, Balıkesir, 78-91.

ÇUNKAŞ, M., 2012. Dalgıç Motorlar Üzerine Bir İnceleme. S.Ü. Müh.-Mim. Fak. Dergisi, 27(4): 136-147.

DWIVEDI, A., GUPTA, S.K., SINGH S.K. and SRIVASTAVA, R.K., 2015. Experiences With Axial Flux Sheet Rotor Induction Motor. 2015 IEEE IAS Joint Industrial and Commercial Power Systems / Petroleum and Chemical Industry Conference (ICPSPCIC), 19-21 November, 115-118.

DESHMUKH, A., BHOLE, A. A., 2014. Optimized Design Of Submersible Induction Motor Using Maxwell 16.0 Rmxprt, IAEME, 5(9): 39-44.

FUJII, N. and FUJITAKE M., 1999. Two-Dimensional Drive Characteristics by Circular Shaped Motor. IEEE Transactıons on Industry Applıcatıons, 35(4): 803-809.

FUJII, N., FUJITAKE M. and HARA, K., 1999. Two-Dimensional Motion Motor with Circular Core and Plural Divided Windings Supplied Separately. IEEE Transactions on Magnetics, 35(5): 4010-4012.

GONZÁLEZ-PARADA, A., GUÍA, M., IBARRA, O. and GUZMÁN, R., 2012. Development of Axial Flux HTS Induction Motors. Elsevier Procedia Engineering, 35: 4-13.

GÖK, O., 2015. Yüksek Verimli Ve Standart Verimli Sincap Kafesli Asenkron Motorların Performans Analizi. Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kütahya. 90 s.

HINCAPIÉ, J. S. L., SANDOVAL, A. V. and PARRA J. Z., 2002. Axial Flux Electric Motor. Military University of New Granada. Mechatronics Engineering Desing Project, New Granada.

HONG, C., HUANG, W. and HU, Z., 2018a. Calculation Methods of Equivalent Circuit Parameters for A Dual Stator Solid Rotor Axial Flux Induction Motor. IET Renewable Power Generation, Vol. 12(16), pp. 1977-1983.

HONG, C., HUANG, W. and HU, Z., 2018b. Parameters and Performance Analysis of A Dual Stator Composite Rotor Axial Flux İnduction Motor by An Analytical Method. IET Electric Power Applications, 12(8): 1158-1165.

HONG, C., HUANG, W. and HU, Z., 2019a. Design and Analysis of a High-Speed Dual Stator Slotted Solid-Rotor Axial-Flux Induction Motor. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 5(1): 71-79.

HONG, C., HUANG, W. and HU, Z., 2019b. Performance Calculation of a Dual Stator Solid Rotor Axial Flux Induction Motor Using the Multi-Slice and Multi-Layer Method. IEEE Transactions on Magnetics, 55(2): 1-9.

HU, Z., HUANG, W., HONG C. and BU, F., 2018. Control Strategy of Self-Bearing Dual Stator Solid Rotor Axial Flux Induction Motor for Flywheel Energy Storage. 2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 07-10 October, Jeju, 1513-1517.

IGELSPACHER J. and HERZOG, H. G., 2010. Analytical Description of A Single-Stator Axial-Flux Induction Machine with Squirrel Cage. The XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010, 06-08 September, Rome, 1-6.

JARZYNA W., 1995. Diagnostic Characteristics of Axial Flux in An Induction Machine. 1995 Seventh International Conference on Electrical Machines and Drives (Conf. Publ. No. 412), 11-13 September, Durham, UK, 141-146.

KLIMAN, G. B., STEPHENS, C. M. and JANSEN, P. L., 2002. Axial Flux Machine and Method of Fabrication. Patent Application Publication. USA.

LIPO, T.A., 2004. Principles of Design Introduction to AC Machine Design, Ed: Sarnad, T., IEEE Press, Wiley, 227-280.

MIRZAEI, M., MIRSALIM M. and ABDOLLAHI, S.E., 2007. Analytical Modeling of Axial Air Gap Solid Rotor Induction Machines Using a Quasi-Three-Dimensional Method. IEEE Transactions on Magnetics, 43(7): 3237-3242.

MURTHY, K. M. V., 2008. Computer-Aided Design of Electrical Machines. BS Publications, Hyderabad, 335s.

MUSHID, F. C. and DORRELL, D. G., 2017. Review of Axial Flux Induction Motor for Automotive Applications. 2017 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD), 20-21 April, Nottingham, 146-151.

NASIRI-GHEIDARI, Z. and LESANI H., 2012a. A Survey on Axial Flux Induction Motors. Przeglad Elektrotechniczny, 88(2): 300-305.

NASIRI-GHEIDARI, Z. and LESANI H., 2012b. Using Stator Discharge Current for the Parameter Estimation of a Single-Phase Axial Flux Induction Motor. Scientia Iranica, 19(6): 1794–1801.

NASIRI-GHEIDARI, Z. and LESANI H., 2012c. Design Optimization of a Single-Phase Axial Flux Induction Motor with Low Torque Ripple. Przeglad Elektrotechniczny, 88(3b): 168-172.

NASIRI-GHEIDARI, Z. and LESANI H., 2013a. New Design Solution for Static Eccentricity in Single Stator–Single Rotor Axial Flux İnduction Motors. IET Electric Power Applications, 7(6): 523-534.

NASIRI-GHEIDARI, Z. and LESANI H., 2013b. Optimal Design of Adjustable Air-Gap, Two-Speed, Capacitor-Run, Single-Phase Axial Flux Induction Motors. IEEE Transactions on Energy Conversion, 28(3): 543-552.

NASIRI-GHEIDARI, Z. and LESANI H., 2013c. Investigation of Characteristics of a Single-Phase Axial Flux Induction Motor Using Three-Dimensional Finite Element Method and d−q Model. IET Electric Power Applications, 7(1): 47-57.

NASIRI-GHEIDARI, Z. and LESANI H., 2014. Theoretical Modeling of Axial Flux Squirrel Cage Induction Motor Considering Both Saturation and Anisotropy. International Transactions on Electrical Energy Systems, 24(3): 335-346.

NASIRI-GHEIDARI, Z., LESANI H. and TOOTOONCHIAN F., 2014. Performance Prediction of a Single-Phase Capacitor-Run Axial Flux Induction Motor Under Static Eccentricity. Australian Journal of Electrical and Electronics Engineering, 11(1): 93-104.

NASIRI-ZARANDI, R. and MIRSALIM, M., 2015. Analysis and Torque Calculation of an Axial Flux Hysteresis Motor Based on Hyperbolic Model of Hysteresis Loop in Cartesian Coordinates. IEEE Transactions on Magnetics, 51(7): 1-10.

NEELIMA, P., MANJEERA, C. and BABU, V. R., 2014. Modelling of Axial Flux Induction Machines and it Application as Differential in Electrical Vehicles. International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering (IJIRAE), 1(12): 1-10.

NOBAHARI, A., DARABI, A. and HASSANNIA, A., 2017. Axial Flux Induction Motor, Design and Evaluation of Steady State Modeling Using Equivalent Circuit. 8th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC 2017), 14-16 February, Mashhad, 353-358.

NOBAHARI, A., DARABI, A. and HASSANNIA, A., 2018. Various Skewing Arrangements and Relative Position of Dual Rotor of an Axial Flux İnduction Motor, Modelling and Performance Evaluation. IET Electric Power Applications, 12(4): 575-580.

PING, Z., SCOTT, S., ZOLTAN, J. C., 1999. Dynamic Modeling Of Three Phase And Single Phase Induction Motor. International Conference IEMD'99, Electric Machines and Drives, 09-12 May. Seattle, WA, USA, 556-558.

PROFUMO, F., ZHANG, Z. and TENCONI, A., 1997. Axial Flux Machines Drives: A New Viable Solution for Electric Cars. IEEE Transactions On Industrial Electronics, 44(1): 39-45.

PYRHONEN, J. and PIISPANEN, A., 2008. Axial Flux Induction Electric Machine. Patent Application Publication. USA.

SAKAI, R., YOSHIDA, Y. and TAJIMA, K., 2018. Study on Analysis of Torque-Slip Characteristics of Axial Gap Induction Motor. Transaction of the Magnetics Society of Japan Special Issues, 2(1): 43-47.

SHUO, L., YU, F., XI, Z. and WEI, Q., 2011. New Structure of Axial Flux Induction Motor and Characterization Analysis. 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems, 20-23 August, Beijing, 1-5.

SMITH, B. H. and PLATT, D., 1990. Compound, Series, Axial Flux İnduction Machines: Single Phase Analogy. IEE Proceedings B - Electric Power Applications, 137(4): 265-272.

ŞERİFOĞLU, A. N., 2007. Elektrik Makinaları Transformatörler ve Asenkron Motorlar Cilt-1. Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, 245s.

TAPIA, M. A., HOFFER A. E. and TAPIA, J. A., 2016. Analysis of the Magnetizing Current Requirement of an Axial Flux Induction Machine. 2016 IEEE International Conference on Automatica (ICA-ACCA), 19-21 October, Curico, 1-6.

TAPIA, M. A., HOFFER A. E., TAPIA, J. A. and WALLACE, R., 2017. Simulation and Analysis of an Axial Flux Induction Machine. IEEE Latin America Transactions, 15(7): 1263-1269.

TARIMER, İ., 2005. Bilgisayar Destekli Asenkron Motor Tasarımı. Politeknik Dergisi, 8(1): 19-24.

VALTONEN, M. S. M., PARVIAINEN, D. S. A. and PYRHÖNEN, J., 2006. Electromagnetic Field Analysis of 3D Structure of Axial-Flux Solid-Rotor Induction Motor. International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion SPEEDAM 2006, 23-26 May, 174-178.

VALTONEN, M. S. M., PARVIAINEN, D. S. A. and PYRHÖNEN, J., 2007a. The Effects of the Number of Rotor Slots on the Performance Characteristics of Axial-Flux Aluminium-Cage Solid-Rotor Core Induction Motor. 2007 IEEE International Electric Machines & Drives Conference, 03-05 May, Antalya, 668-672.

VALTONEN, M. S. M., PARVIAINEN, D. S. A. and PYRHÖNEN, J., 2007b. Inverter Switching Frequency Effects on the Rotor Losses of an Axial-Flux Solid-Rotor Core Induction Motor. 2007 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, 12-14 April, Setubal, Portugal, 476-480.

VALTONEN, M. S. M., PARVIAINEN, D. S. A. and PYRHÖNEN, J., 2008. Influence of the Air-Gap Length to the Performance of an Axial-Flux Induction Motor. 18th International Conference on Electrical Machines, 06-09 September, Vilamoura, 1-5.

VARGA, J. S., 1986. Magnetic and Dimensional Properties of Axial Induction Motors. IEEE Transactions on Energy Conversion, EC-1(2), 137-144.

VARGA, J. S., 1990. Dual Rotor Axial Air Gap Inductıon Motor. Patent Application Publication. USA.

WALLACE, R., MORAN, L., CEA G. and PEREZ, F., 1991. Design and Construction of Medium Power Axial Flux Induction Motors. 1991 Fifth International Conference on Electrical Machines and Drives (Conf. Publ. No. 341), 11-13 September, London, UK, 260-265.

YILMAZ, K., 2009. Comparison of Axial Flux and Radial Flux Brushless DC Motor Topologies for Control Moment Gyroscope Wheel Applications. Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Doğa ve Uygulamalı Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 213s.

ZHANG, C., TSENG K. J. and NGUYEN, T. D., 2010. Analysis and Comparison of Axial Flux PM Synchronous Motor and Induction Motor. 2010 Conference Proceedings IPEC, 27-29 October, Singapore, 572-577.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı **:** Erkan ER
Uyruğu **:** T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi **:** İzmir / 12.12.1981
Telefon **:** 0533 059 63 35
Faks **:** -
e-mail **:** erkan.er@harran.edu.tr / erkaner3563@gmail.com

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Çınarlı Teknik Lisesi, Konak / İZMİR	2000
Üniversite	: Ege Üniversitesi (Önlisans), Bornova / İZMİR	2002
Üniversite	: Fırat Üniversitesi (Lisans), Merkez / ELAZIĞ	2005

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2005-2007	Sembol Eğitim Merkezi	Teknik Öğretmen
2007-2010	Ar Endüstri Mak. San. Ltd. Şti.	Teknik Eleman
2010 -	Harran Üniversitesi	Öğretim Görevlisi

YABANCI DİLLER

İngilizce (Orta Düzey)

YAYINLAR

ER E., GÜLLÜOĞLU M. T., ARSLAN S. 2018. Asenkron Motor İle İlgili Araştırmaların İçerik Analizi İle İncelenmesi. V. Uluslararası Multidisipliner Çalısmaları Sempozyumu (ISMS). 16-17 Kasım, Ankara, 250-260.

EKLER

EK 1. Program kodu

```
iMaxwell=actxserver('Ansoft.ElectronicsDesktop');
Desktop = iMaxwell.GetAppDesktop();
Desktop=invoke(iMaxwell,'GetAppDesktop');
Desktop=iMaxwell.GetAppDesktop();
Desktop.NewProject
Project =Desktop.GetActiveProject();
invoke(Project,'InsertDesign','Maxwell 3D', 'Maxwell3DDesign1', 'Transient', '')
Design = Project.GetActiveDesign();
DefinitionManager=Project.GetDefinitionManager()
Desktop.CloseAllWindows()
Editor = Design.SetActiveEditor('3D Modeler');

%stator çelik

Design = Project.SetActiveDesign('Maxwell3DDesign1');

invoke(Design,'ChangeProperty',                                {'NAME:AllTabs',
{'NAME:LocalVariableTab',{'NAME:PropServers',  ...
  'LocalVariables'}, {'NAME:NewProps',  {'NAME:Do', 'PropType:=', 'VariableProp',
'UserDef:=',  ...
  true, 'Value:=', Do}}}})
invoke(Design,'ChangeProperty',                                {'NAME:AllTabs',
{'NAME:LocalVariableTab',{'NAME:PropServers',  ...
  'LocalVariables'}, {'NAME:NewProps', {'NAME:Di', 'PropType:=', 'VariableProp',
'UserDef:=',  ...
  true, 'Value:=', Di}}}})
invoke(Design,'ChangeProperty',                                {'NAME:AllTabs',
{'NAME:LocalVariableTab',{'NAME:PropServers',  ...
  'LocalVariables'},  {'NAME:NewProps',  {'NAME:j',  'PropType:=',  'VariableProp',
'UserDef:=',  ...
  true, 'Value:=', j}}}})
invoke(Design,'ChangeProperty',                                {'NAME:AllTabs',
{'NAME:LocalVariableTab',{'NAME:PropServers',  ...
  'LocalVariables'}, {'NAME:NewProps', {'NAME:Bs2', 'PropType:=', 'VariableProp',
'UserDef:=',  ...
  true, 'Value:=', Bs2}}}})
invoke(Design,'ChangeProperty',                                {'NAME:AllTabs',
{'NAME:LocalVariableTab',{'NAME:PropServers',  ...
  'LocalVariables'}, {'NAME:NewProps', {'NAME:kfill', 'PropType:=', 'VariableProp',
'UserDef:=',  ...
  true, 'Value:=', kfill}}}})
```

```
invoke(Design,'ChangeProperty',                                {'NAME:AllTabs',
{'NAME:LocalVariableTab',{'NAME:PropServers',  ...
  'LocalVariables'}, {'NAME:NewProps', {'NAME:kd', 'PropType:=', 'VariableProp',
'UserDef:=',  ...
  true, 'Value:=', kd}}}})
invoke(Design,'ChangeProperty',                                {'NAME:AllTabs',
{'NAME:LocalVariableTab',{'NAME:PropServers',  ...
  'LocalVariables'}, {'NAME:NewProps', {'NAME:Ls', 'PropType:=', 'VariableProp',
'UserDef:=',  ...
  true, 'Value:=', Ls }}}})
invoke(Design,'ChangeProperty',                                {'NAME:AllTabs',
{'NAME:LocalVariableTab',{'NAME:PropServers',  ...
  'LocalVariables'}, {'NAME:NewProps', {'NAME:Hs2', 'PropType:=', 'VariableProp',
'UserDef:=',  ...
  true, 'Value:=', Hs2}}}})
invoke(Design,'ChangeProperty',                                {'NAME:AllTabs',
{'NAME:LocalVariableTab',{'NAME:PropServers',  ...
  'LocalVariables'}, {'NAME:NewProps', {'NAME:Hs0', 'PropType:=', 'VariableProp',
'UserDef:=',  ...
  true, 'Value:=', Hs0}}}})
invoke(Design,'ChangeProperty',                                {'NAME:AllTabs',
{'NAME:LocalVariableTab',{'NAME:PropServers',  ...
  'LocalVariables'}, {'NAME:NewProps', {'NAME:Hs1', 'PropType:=', 'VariableProp',
'UserDef:=',  ...
  true, 'Value:=', Hs1}}}})
invoke(Design,'ChangeProperty',                                {'NAME:AllTabs',
{'NAME:LocalVariableTab',{'NAME:PropServers',  ...
  'LocalVariables'}, {'NAME:NewProps', {'NAME:free', 'PropType:=', 'VariableProp',
'UserDef:=',  ...
  true, 'Value:=', free}}}})
invoke(Design,'ChangeProperty',                                {'NAME:AllTabs',
{'NAME:LocalVariableTab',{'NAME:PropServers',  ...
  'LocalVariables'}, {'NAME:NewProps', {'NAME:VV', 'PropType:=', 'VariableProp',
'UserDef:=',  ...
  true, 'Value:=', VV}}}})
invoke(Design,'ChangeProperty',                                {'NAME:AllTabs',
{'NAME:LocalVariableTab',{'NAME:PropServers',  ...
  'LocalVariables'}, {'NAME:NewProps', {'NAME:mm', 'PropType:=', 'VariableProp',
'UserDef:=',  ...
  true, 'Value:=', mm}}}})
invoke(Design,'ChangeProperty',                                {'NAME:AllTabs',
{'NAME:LocalVariableTab',{'NAME:PropServers',  ...
  'LocalVariables'},     {'NAME:NewProps',     {'NAME:AcuWire',     'PropType:=',
'VariableProp', 'UserDef:=',  ...
  true, 'Value:=', AcuWire}}}})


global Bs0 SlotType Gaps Gapr phii
```

```
Bs0=0.0025;
SlotType=1;
Gaps=g*0.5*0.001; %m dönüştü
Gapr=-g*0.5*0.001;



invoke(Design,'ChangeProperty',
{'NAME:AllTabs',{'NAME:LocalVariableTab',{'NAME:PropServers',  ...
  'LocalVariables'}, {'NAME:NewProps', {'NAME:Bs0', 'PropType:=', 'VariableProp',
'UserDef:=',  ...
  true, 'Value:=', Bs0}}}})
invoke(Design,'ChangeProperty',
{'NAME:AllTabs',{'NAME:LocalVariableTab',{'NAME:PropServers',  ...
  'LocalVariables'}, {'NAME:NewProps', {'NAME:Bs1', 'PropType:=', 'VariableProp',
'UserDef:=',  ...
  true, 'Value:=', Bs2}}}})
invoke(Design,'ChangeProperty',
{'NAME:AllTabs',{'NAME:LocalVariableTab',{'NAME:PropServers',  ...
  'LocalVariables'},  {'NAME:NewProps',  {'NAME:SlotType',  'PropType:=',
'VariableProp', 'UserDef:=',  ...
  true, 'Value:=', SlotType}}})
invoke(Design,'ChangeProperty',
{'NAME:AllTabs',{'NAME:LocalVariableTab',{'NAME:PropServers',  ...
  'LocalVariables'},  {'NAME:NewProps',  {'NAME:Gaps',  'PropType:=',
'VariableProp', 'UserDef:=',  ...
  true, 'Value:=', Gaps}}})
invoke(Design,'ChangeProperty',
{'NAME:AllTabs',{'NAME:LocalVariableTab',{'NAME:PropServers',  ...
  'LocalVariables'},  {'NAME:NewProps',  {'NAME:Gapr',  'PropType:=',
'VariableProp', 'UserDef:=',  ...
  true, 'Value:=', Gapr}}})
invoke(Design,'ChangeProperty',
{'NAME:AllTabs',{'NAME:LocalVariableTab',{'NAME:PropServers',  ...
  'LocalVariables'}, {'NAME:NewProps', {'NAME:Np', 'PropType:=', 'VariableProp',
'UserDef:=',  ...
  true, 'Value:=', Np}}})
invoke(Design,'ChangeProperty',
{'NAME:AllTabs',{'NAME:LocalVariableTab',{'NAME:PropServers',  ...
  'LocalVariables'}, {'NAME:NewProps', {'NAME:Xs', 'PropType:=', 'VariableProp',
'UserDef:=',  ...
  true, 'Value:=', Xs}}})
invoke(Design,'ChangeProperty',
{'NAME:AllTabs',{'NAME:LocalVariableTab',{'NAME:PropServers',  ...
  'LocalVariables'}, {'NAME:NewProps', {'NAME:Bg', 'PropType:=', 'VariableProp',
'UserDef:=',  ...
  true, 'Value:=', Bg}}})
```

```
invoke(Design,'ChangeProperty', {'NAME:AllTabs',
{'NAME:LocalVariableTab',{'NAME:PropServers', ...
 'LocalVariables'}, {'NAME:NewProps', {'NAME:phii', 'PropType:=', 'VariableProp',
'UserDef:=', ...
 true, 'Value:=', (2/pi)*Bg*(pi/(4*Np))*(Do-Di)*(Do+Di)}}}})
invoke(Design,'ChangeProperty', {'NAME:AllTabs',
{'NAME:LocalVariableTab',{'NAME:PropServers', ...
 'LocalVariables'}, {'NAME:NewProps', {'NAME:Kw', 'PropType:=', 'VariableProp',
'UserDef:=', ...
 true, 'Value:=', Kw}}})

invoke(Editor,'CreateUserDefinedPart', {'NAME:UserDefinedPrimitiveParameters',
'DllName:=', 'RMxprt/DiskSlotCore.dll', 'Version:=', '12.1', 'NoOfParameters:=', 21,
'Library:=', ...
 'syslib', {'NAME:ParamVector', {'NAME:Pair', 'Name:=', 'DiaOuter', 'Value:=', ...
 'Do'}, {'NAME:Pair', 'Name:=', 'DiaInner', 'Value:=', 'Di'}, {'NAME:Pair', 'Name:=',
...
 'Thickness', 'Value:=', 'Ls'}, {'NAME:Pair', 'Name:=', 'Gap', 'Value:=', 'Gaps'},
{'NAME:Pair', 'Name:=', ...
 'Skew', 'Value:=', '0deg'}, {'NAME:Pair', 'Name:=', 'Slots', 'Value:=', 'Xs'},
{'NAME:Pair', 'Name:=', ...
 'SlotType', 'Value:=', 'SlotType'}, {'NAME:Pair', 'Name:=', 'Hs0', 'Value:=', 'Hs0'},
{'NAME:Pair', 'Name:=', ...
 'Hs01', 'Value:=', '0mm'}, {'NAME:Pair', 'Name:=', 'Hs1', 'Value:=', 'Hs1'},
{'NAME:Pair', 'Name:=', ...
 'Hs2', 'Value:=', 'Hs2'}, {'NAME:Pair', 'Name:=', 'Bs0', 'Value:=', 'Bs0'},
{'NAME:Pair', 'Name:=', ...
 'Bs1', 'Value:=', 'Bs1'}, {'NAME:Pair', 'Name:=', 'Bs2', 'Value:=', 'Bs1'},
{'NAME:Pair', 'Name:=', ...
 'Rs', 'Value:=', '0mm'}, {'NAME:Pair', 'Name:=', 'FilletType', 'Value:=', '0'},
{'NAME:Pair', 'Name:=', ...
 'HalfSlot', 'Value:=', '0'}, {'NAME:Pair', 'Name:=', 'RingLength', 'Value:=', ...
 'Ls/4'}, {'NAME:Pair', 'Name:=', 'RingHeight', 'Value:=', 'Ls/2'}, {'NAME:Pair',
'Name:=', ...
 'SegAngle', 'Value:=', '14.999999999999998deg'}, {'NAME:Pair', 'Name:=', ...
 'InfoCore', 'Value:=', '0'}}}, {'NAME:Attributes', 'Name:=', 'DiskSlotCore1',
'Flags:=', ...
 '', 'Color:=', '(143 175 143)', 'Transparency:=', 0, 'PartCoordinateSystem:=', ...
 'Global', 'UDMId:=', '', 'MaterialValue:=', '"vacuum"' , 'SurfaceMaterialValue:=', ...
'"vacuum"' , 'SolveInside:=', true, 'IsMaterialEditable:=', ...
 true, 'UseMaterialAppearance:=', false, 'IsLightweight:=', false})


Editor = Design.SetActiveEditor('3D Modeler');

invoke(Editor,'ChangeProperty' , {'NAME:AllTabs',
{'NAME:Geometry3DCmdTab',{'NAME:PropServers', ...
```

```
'DiskSlotCore1:CreateUserDefinedPart:1'},{'NAME:ChangedProps',{'NAME:DiaOu
ter', 'Value:=',  ...
  'Do'},{'NAME:DiaInner',  'Value:=',  'Di'},{'NAME:Thickness',  'Value:=',  'Ls'},
{'NAME:Slots', 'Value:=',  ...
  'Xs'},{'NAME:Hs2', 'Value:=', 'Hs2'},{'NAME:Bs0', 'Value:=', 'Bs0'},{'NAME:Bs1',
'Value:=',  ...
  'Bs1'},{'NAME:Bs2',  'Value:=',  'Bs1'},{'NAME:SlotType',  'Value:=',
'SlotType'},{'NAME:Gap', 'Value:=', 'Gaps'}}}})


Editor = Design.SetActiveEditor('3D Modeler');

invoke(Editor,'ChangeProperty'  ,  {'NAME:AllTabs',
{'NAME:Geometry3DAttributeTab', {'NAME:PropServers',  ...
  'DiskSlotCore1'}, {'NAME:ChangedProps', {'NAME:Name', 'Value:=', 'Stator'}}}})

invoke(Editor,'AssignMaterial',  {'NAME:Selections',
'AllowRegionDependentPartSelectionForPMLCreation:=',  ...
  true,  'AllowRegionSelectionForPMLCreation:=',  true,  'Selections:=',  'Stator'},
{'NAME:Attributes', 'MaterialValue:=',  ...
  '"M43_26G"', 'SolveInside:=', true, 'IsMaterialEditable:=',  ...
  true, 'UseMaterialAppearance:=', false, 'IsLightweight:=', false})


%rotor çelik


invoke(Design,'ChangeProperty',  {'NAME:AllTabs',  {'NAME:LocalVariableTab',
{'NAME:PropServers', ...
  'LocalVariables'},  {'NAME:NewProps',
{'NAME:RingLength','PropType:=','VariableProp','UserDef:=', ...
  true, 'Value:=','Ls/4'}}}})
invoke(Design,'ChangeProperty',  {'NAME:AllTabs',  {'NAME:LocalVariableTab',
{'NAME:PropServers', ...
  'LocalVariables'},  {'NAME:NewProps',
{'NAME:RingHeight','PropType:=','VariableProp','UserDef:=', ...
  true, 'Value:=','Ls/2'}}}})
invoke(Design,'ChangeProperty',  {'NAME:AllTabs',  {'NAME:LocalVariableTab',
{'NAME:PropServers', ...
  'LocalVariables'},  {'NAME:NewProps',
{'NAME:InfoCore','PropType:=','VariableProp','UserDef:=', ...
  true, 'Value:=','1'}}}})

Editor = Design.SetActiveEditor('3D Modeler');
```

```
invoke(Editor,'CreateUserDefinedPart', {'NAME:UserDefinedPrimitiveParameters',
'DllName:=', 'RMxprt/DiskSlotCore.dll', 'Version:=', '12.1', 'NoOfParameters:=', 21,
'Library:=', ...
 'syslib',{'NAME:ParamVector',{'NAME:Pair', 'Name:=', 'DiaOuter', 'Value:=', ...
 'Do'},{'NAME:Pair', 'Name:=', 'DiaInner', 'Value:=', 'Di'},{'NAME:Pair', 'Name:=',
...
 'Thickness', 'Value:=', '25mm'},{'NAME:Pair', 'Name:=', 'Gap', 'Value:=', ...
 '-0.5mm'},{'NAME:Pair', 'Name:=', 'Skew', 'Value:=', '0deg'},{'NAME:Pair',
'Name:=', ...
 'Slots', 'Value:=', '24'},{'NAME:Pair', 'Name:=', 'SlotType', 'Value:=',
'1'},{'NAME:Pair', 'Name:=', ...
 'Hs0', 'Value:=', '1mm'},{'NAME:Pair', 'Name:=', 'Hs01', 'Value:=',
'0mm'},{'NAME:Pair', 'Name:=', ...
 'Hs1', 'Value:=', '1mm'},{'NAME:Pair', 'Name:=', 'Hs2', 'Value:=',
'8mm'},{'NAME:Pair', 'Name:=', ...
 'Bs0', 'Value:=', '2.5mm'},{'NAME:Pair', 'Name:=', 'Bs1', 'Value:=',
'6mm'},{'NAME:Pair', 'Name:=', ...
 'Bs2', 'Value:=', '6mm'},{'NAME:Pair', 'Name:=', 'Rs', 'Value:=',
'0mm'},{'NAME:Pair', 'Name:=', ...
 'FilletType', 'Value:=', '0'},{'NAME:Pair', 'Name:=', 'HalfSlot', 'Value:=', ...
 '0'},{'NAME:Pair', 'Name:=', 'RingLength', 'Value:=', 'RingLength'},{'NAME:Pair',
'Name:=', ...
 'RingHeight', 'Value:=', 'RingHeight'},{'NAME:Pair', 'Name:=', 'SegAngle',
'Value:=', ...
 '14.999999999999998deg'},{'NAME:Pair', 'Name:=', 'InfoCore', 'Value:=',
'0'}}},{'NAME:Attributes', 'Name:=', ...
 'DiskSlotCore1', 'Flags:=', '', 'Color:=', '(143 175 143)', 'Transparency:=', ...
 0, 'PartCoordinateSystem:=', 'Global', 'UDMId:=', '', 'MaterialValue:=', ...
 '"vacuum"', 'SurfaceMaterialValue:=', '"vacuum"', 'SolveInside:=', ...
 true, 'IsMaterialEditable:=', true, 'UseMaterialAppearance:=', false,
'IsLightweight:=', ...
 false})

Design = Project.SetActiveDesign('Maxwell3DDesign1');

invoke(Design,'ChangeProperty', {'NAME:AllTabs', {'NAME:LocalVariableTab',
{'NAME:PropServers', ...
 'LocalVariables'}, {'NAME:NewProps',
{'NAME:Lr','PropType:=','VariableProp','UserDef:=', ...
 true, 'Value:=','25mm'}}}})
invoke(Design,'ChangeProperty', {'NAME:AllTabs', {'NAME:LocalVariableTab',
{'NAME:PropServers', ...
 'LocalVariables'}, {'NAME:NewProps',
{'NAME:Xr','PropType:=','VariableProp','UserDef:=', ...
 true, 'Value:=','24'}}}})
invoke(Design,'ChangeProperty', {'NAME:AllTabs', {'NAME:LocalVariableTab',
{'NAME:PropServers', ...
 'LocalVariables'}, {'NAME:NewProps', {'NAME:SlotTyper','PropType:=', ...
```

```
 'VariableProp','UserDef:=', true, 'Value:=','1'}}}})
invoke(Design,'ChangeProperty', {'NAME:AllTabs', {'NAME:LocalVariableTab',
{'NAME:PropServers', ...
 'LocalVariables'}, {'NAME:NewProps',
{'NAME:Hr2','PropType:=','VariableProp','UserDef:=', ...
 true, 'Value:=','8mm'}}}})
invoke(Design,'ChangeProperty', {'NAME:AllTabs', {'NAME:LocalVariableTab',
{'NAME:PropServers', ...
 'LocalVariables'}, {'NAME:NewProps',
{'NAME:Br0','PropType:=','VariableProp','UserDef:=', ...
 true, 'Value:=','2.5mm'}}}})
invoke(Design,'ChangeProperty', {'NAME:AllTabs', {'NAME:LocalVariableTab',
{'NAME:PropServers', ...
 'LocalVariables'}, {'NAME:NewProps',
{'NAME:Br1','PropType:=','VariableProp','UserDef:=', ...
 true, 'Value:=','6mm'}}}})
invoke(Design,'ChangeProperty', {'NAME:AllTabs', {'NAME:LocalVariableTab',
{'NAME:PropServers', ...
 'LocalVariables'}, {'NAME:NewProps',
{'NAME:Br2','PropType:=','VariableProp','UserDef:=', ...
 true, 'Value:=','6mm'}}}})

Editor = Design.SetActiveEditor('3D Modeler');

invoke(Editor,'ChangeProperty', {'NAME:AllTabs', {'NAME:Geometry3DCmdTab',
{'NAME:PropServers', ...
 'DiskSlotCore1:CreateUserDefinedPart:1'}, {'NAME:ChangedProps',
{'NAME:DiaOuter','Value:=', ...
 'Do'}, {'NAME:DiaInner','Value:=','Di'}, {'NAME:Thickness','Value:=','Lr'},
{'NAME:Gap','Value:=', ...
 'Gapr'}, {'NAME:Slots','Value:=','Xr'}, {'NAME:SlotType','Value:=', ...
 'SlotTyper'}, {'NAME:Hs2','Value:=','Hr2'}, {'NAME:Bs0','Value:=','Br0'},
{'NAME:Bs1','Value:=', ...
 'Br1'}, {'NAME:Bs2','Value:=','Br2'}}}})


Editor = Design.SetActiveEditor('3D Modeler');

invoke(Editor,'ChangeProperty', {'NAME:AllTabs',
{'NAME:Geometry3DCmdTab',{'NAME:PropServers', ...

'DiskSlotCore1:CreateUserDefinedPart:1'},{'NAME:ChangedProps',{'NAME:DiaOu
ter', 'Value:=', ...
 'Do'},{'NAME:DiaInner', 'Value:=', 'Di'},{'NAME:Thickness', 'Value:=', 'Lr'},
{'NAME:Slots', 'Value:=', ...
 'Xr'},{'NAME:Hs2', 'Value:=', 'Hr2'},{'NAME:Bs0', 'Value:=', 'Br0'},{'NAME:Bs1',
'Value:=', ...
```

```
 'Br1'},{'NAME:Bs2', 'Value:=', 'Br1'},{'NAME:SlotType', 'Value:=',
'SlotTyper'},{'NAME:Gap', 'Value:=', 'Gapr'}}}})

Editor = Design.SetActiveEditor('3D Modeler');

invoke(Editor,'ChangeProperty' , {'NAME:AllTabs',
{'NAME:Geometry3DAttributeTab', {'NAME:PropServers', ...
 'DiskSlotCore1'}, {'NAME:ChangedProps', {'NAME:Name', 'Value:=', 'Rotor'}}}})

invoke(Editor,'AssignMaterial', {'NAME:Selections',
'AllowRegionDependentPartSelectionForPMLCreation:=', ...
 true, 'AllowRegionSelectionForPMLCreation:=', true, 'Selections:=', 'Rotor'},
{'NAME:Attributes', 'MaterialValue:=', ...
 '"M43_26G"', 'SolveInside:=', true, 'IsMaterialEditable:=', ...
 true, 'UseMaterialAppearance:=', false, 'IsLightweight:=', false})

%rotor bar


Editor = Design.SetActiveEditor('3D Modeler');

invoke(Editor,'CreateUserDefinedPart', {'NAME:UserDefinedPrimitiveParameters',
'DllName:=', 'RMxprt/DiskSlotCore.dll', 'Version:=', '12.1', 'NoOfParameters:=', 21,
'Library:=', ...
 'syslib',{'NAME:ParamVector',{'NAME:Pair', 'Name:=', 'DiaOuter', 'Value:=', ...
 'Do'},{'NAME:Pair', 'Name:=', 'DiaInner', 'Value:=', 'Di'},{'NAME:Pair', 'Name:=',
...
 'Thickness', 'Value:=', 'Lr'},{'NAME:Pair', 'Name:=', 'Gap', 'Value:=', ...
 'Gapr'},{'NAME:Pair', 'Name:=', 'Skew', 'Value:=', '0deg'},{'NAME:Pair', 'Name:=',
...
 'Slots', 'Value:=', 'Xr'},{'NAME:Pair', 'Name:=', 'SlotType', 'Value:=',
'SlotTyper'},{'NAME:Pair', 'Name:=', ...
 'Hs0', 'Value:=', '1mm'},{'NAME:Pair', 'Name:=', 'Hs01', 'Value:=',
'0mm'},{'NAME:Pair', 'Name:=', ...
 'Hs1', 'Value:=', '1mm'},{'NAME:Pair', 'Name:=', 'Hs2', 'Value:=',
'Hr2'},{'NAME:Pair', 'Name:=', ...
 'Bs0', 'Value:=', 'Br0'},{'NAME:Pair', 'Name:=', 'Bs1', 'Value:=',
'Br1'},{'NAME:Pair', 'Name:=', ...
 'Bs2', 'Value:=', 'Br1'},{'NAME:Pair', 'Name:=', 'Rs', 'Value:=',
'0mm'},{'NAME:Pair', 'Name:=', ...
 'FilletType', 'Value:=', '0'},{'NAME:Pair', 'Name:=', 'HalfSlot', 'Value:=', ...
 '0'},{'NAME:Pair', 'Name:=', 'RingLength', 'Value:=', 'RingLength'},{'NAME:Pair',
'Name:=', ...
 'RingHeight', 'Value:=', 'RingHeight'},{'NAME:Pair', 'Name:=', 'SegAngle',
'Value:=', ...
 '14.999999999999998deg'},{'NAME:Pair', 'Name:=', 'InfoCore', 'Value:=',
'0'}}},{'NAME:Attributes', 'Name:=', ...
 'DiskSlotCore1', 'Flags:=', '', 'Color:=', '(143 175 143)', 'Transparency:=', ...
```

```
  0, 'PartCoordinateSystem:=', 'Global', 'UDMId:=', '', 'MaterialValue:=', ...
  '"vacuum"', 'SurfaceMaterialValue:=', '"vacuum"', 'SolveInside:=', ...
  true, 'IsMaterialEditable:=', true, 'UseMaterialAppearance:=', false,
'IsLightweight:=', ...
  false})



Editor = Design.SetActiveEditor('3D Modeler');

invoke(Editor,'ChangeProperty', {'NAME:AllTabs', {'NAME:Geometry3DCmdTab',
{'NAME:PropServers', ...
  'DiskSlotCore1:CreateUserDefinedPart:1'}, {'NAME:ChangedProps',
{'NAME:DiaOuter','Value:=', ...
  'Do'}, {'NAME:DiaInner','Value:=','Di'}, {'NAME:Thickness','Value:=','Lr'},
{'NAME:Gap','Value:=', ...
  'Gapr'}, {'NAME:Slots','Value:=','Xr'}, {'NAME:SlotType','Value:=', ...
  'SlotTyper'}, {'NAME:Hs2','Value:=','Hr2'}, {'NAME:Bs0','Value:=','Br0'},
{'NAME:Bs1','Value:=', ...
  'Br1'}, {'NAME:Bs2','Value:=','Br2'},
{'NAME:RingLength','Value:=','RingLength'},
{'NAME:RingHeight','Value:=','RingHeight'},
{'NAME:InfoCore','Value:=','InfoCore'}}}})


Editor = Design.SetActiveEditor('3D Modeler');

invoke(Editor,'ChangeProperty', {'NAME:AllTabs',
{'NAME:Geometry3DCmdTab',{'NAME:PropServers',  ...

'DiskSlotCore1:CreateUserDefinedPart:1'},{'NAME:ChangedProps',{'NAME:DiaOu
ter', 'Value:=',  ...
  'Do'},{'NAME:DiaInner',  'Value:=',  'Di'},{'NAME:Thickness',  'Value:=',  'Lr'},
{'NAME:Slots', 'Value:=',  ...
  'Xr'},{'NAME:Hs2', 'Value:=', 'Hr2'},{'NAME:Bs0', 'Value:=', 'Br0'},{'NAME:Bs1',
'Value:=',  ...
  'Br1'},{'NAME:Bs2',  'Value:=',  'Br1'},{'NAME:SlotType',  'Value:=',
'SlotTyper'},{'NAME:Gap', 'Value:=', 'Gapr'}}}})

Editor = Design.SetActiveEditor('3D Modeler');

invoke(Editor,'ChangeProperty' , {'NAME:AllTabs',
{'NAME:Geometry3DAttributeTab', {'NAME:PropServers',  ...
  'DiskSlotCore1'}, {'NAME:ChangedProps', {'NAME:Name', 'Value:=', 'Bar'}}}})

invoke(Editor,'AssignMaterial', {'NAME:Selections',
'AllowRegionDependentPartSelectionForPMLCreation:=',  ...
```

```
 true, 'AllowRegionSelectionForPMLCreation:=', true, 'Selections:=', 'Bar'},
{'NAME:Attributes', 'MaterialValue:=',  ...
  '"copper"', 'SolveInside:=', true, 'IsMaterialEditable:=',  ...
  true, 'UseMaterialAppearance:=', false, 'IsLightweight:=', false})

%band

invoke(Editor,'CreateUserDefinedPart',
{'NAME:UserDefinedPrimitiveParameters','DllName:=',  ...
  'RMxprt/Band.dll','Version:=','12.1','NoOfParameters:=', 7, 'Library:=',  ...
  'syslib', {'NAME:ParamVector', {'NAME:Pair','Name:=','DiaGap','Value:=',  ...
  'Di-2.2*RingLength'},
{'NAME:Pair','Name:=','DiaYoke','Value:=','Do+2.5*RingLength'},
{'NAME:Pair','Name:=',  ...
  'Length','Value:=','Lr*1.25'}, {'NAME:Pair','Name:=','SegAngle','Value:=',  ...
  '0'}, {'NAME:Pair','Name:=','Fractions','Value:=','1'}, {'NAME:Pair','Name:=',  ...
  'HalfAxial','Value:=','0'},  {'NAME:Pair','Name:=','InfoCore','Value:=','100'}}},
{'NAME:Attributes','Name:=',  ...
  'Band1','Flags:=','','Color:=','(143  175  143)','Transparency:=',  0,
'PartCoordinateSystem:=',  ...
  'Global','UDMId:=','','MaterialValue:=','"vacuum"','SurfaceMaterialValue:=',  ...
  '"vacuum"','SolveInside:=', true, 'IsMaterialEditable:=',  ...
  true, 'UseMaterialAppearance:=', false, 'IsLightweight:=', false})

invoke(Editor,'Move',  {'NAME:Selections',  'Selections:=',  'Band1',
'NewPartsModelFlag:=',  ...
  'Model'},  {'NAME:TranslateParameters',  'TranslateVectorX:=',  '0mm',
'TranslateVectorY:=',  ...
  '0mm', 'TranslateVectorZ:=', '-Lr*0.625'})



%region
invoke(Editor,'CreateRegion', {'NAME:RegionParameters', '+XPaddingType:=',  ...
  'Percentage Offset', '+XPadding:=', '0', '-XPaddingType:=', 'Percentage Offset', '-
XPadding:=',  ...
  '0', '+YPaddingType:=', 'Percentage Offset', '+YPadding:=', '0', '-YPaddingType:=',
...
  'Percentage  Offset',  '-YPadding:=',  '0',  '+ZPaddingType:=',  'Percentage  Offset',
'+ZPadding:=',  ...
  '0', '-ZPaddingType:=', 'Percentage Offset', '-ZPadding:=', '0'}, {'NAME:Attributes',
'Name:=',  ...
  'Region', 'Flags:=', 'Wireframe#', 'Color:=', '(143 175 143)', 'Transparency:=',  ...
  0, 'PartCoordinateSystem:=', 'Global', 'UDMId:=', '', 'MaterialValue:=',  ...
 '"vacuum"', 'SurfaceMaterialValue:=', '"vacuum"', 'SolveInside:=',  ...
  true,  'IsMaterialEditable:=',  true,  'UseMaterialAppearance:=',  false,
'IsLightweight:=',  ...
  false})
```

```
%stator region
invoke(Editor,'CreateUserDefinedPart',
{'NAME:UserDefinedPrimitiveParameters','DllName:=',  ...
  'RMxprt/Band.dll','Version:=','12.1','NoOfParameters:=', 7, 'Library:=',  ...
  'syslib', {'NAME:ParamVector', {'NAME:Pair','Name:=','DiaGap','Value:=',  ...
  'Di-2.2*RingLength'},
{'NAME:Pair','Name:=','DiaYoke','Value:=','1.41*Do+2.5*RingLength'},
{'NAME:Pair','Name:=',  ...
  'Length','Value:=','Ls'}, {'NAME:Pair','Name:=','SegAngle','Value:=',  ...
  '0'}, {'NAME:Pair','Name:=','Fractions','Value:=','1'}, {'NAME:Pair','Name:=',  ...
  'HalfAxial','Value:=','0'},        {'NAME:Pair','Name:=','InfoCore','Value:=','100'}}},
{'NAME:Attributes','Name:=',  ...
  'Band2','Flags:=','','Color:=','(143          175          143)','Transparency:=',          0,
'PartCoordinateSystem:=',  ...
  'Global','UDMId:=','','MaterialValue:=','"vacuum"','SurfaceMaterialValue:=',  ...
  '"vacuum"','SolveInside:=', true, 'IsMaterialEditable:=',  ...
  true, 'UseMaterialAppearance:=', false, 'IsLightweight:=', false})

invoke(Editor,'Move',        {'NAME:Selections',        'Selections:=',        'Band2',
'NewPartsModelFlag:=',  ...
  'Model'},        {'NAME:TranslateParameters',        'TranslateVectorX:=',        '0mm',
'TranslateVectorY:=',  ...
  '0mm', 'TranslateVectorZ:=', 'Ls*0.5+Gaps'})

invoke(Editor,'ChangeProperty'          ,          {'NAME:AllTabs',
{'NAME:Geometry3DAttributeTab', {'NAME:PropServers',  ...
  'Band2'}, {'NAME:ChangedProps', {'NAME:Name', 'Value:=', 'statorregion'}}}})

global Xs

if Xs==24 && Np==4

invoke(Editor,'CreateUserDefinedPart',  {'NAME:UserDefinedPrimitiveParameters',
'DllName:=',  ...
  'RMxprt/DiskCoil.dll', 'Version:=', '12.1', 'NoOfParameters:=', 21, 'Library:=',  ...
  'syslib', {'NAME:ParamVector', {'NAME:Pair', 'Name:=', 'DiaOuter', 'Value:=',  ...
  'Do'}, {'NAME:Pair', 'Name:=', 'DiaInner', 'Value:=', 'Di'}, {'NAME:Pair', 'Name:=',
...
  'Thickness',  'Value:=',  'Ls'},  {'NAME:Pair',  'Name:=',  'Gap',  'Value:=',  'Gaps'},
{'NAME:Pair', 'Name:=',  ...
  'Skew',  'Value:=',  '0deg'},  {'NAME:Pair',  'Name:=',  'Slots',  'Value:=',  'Xs'},
{'NAME:Pair', 'Name:=',  ...
  'SlotType',  'Value:=',  '1'},  {'NAME:Pair',  'Name:=',  'Hs0',  'Value:=',  '1mm'},
{'NAME:Pair', 'Name:=',  ...
  'Hs1',  'Value:=',  '1mm'},  {'NAME:Pair',  'Name:=',  'Hs2',  'Value:=',  'Hs2'},
{'NAME:Pair', 'Name:=',  ...
```

```
 'Bs0', 'Value:=', 'Bs0'}, {'NAME:Pair', 'Name:=', 'Bs1', 'Value:=', 'Bs1'},
{'NAME:Pair', 'Name:=',  ...
 'Bs2', 'Value:=', 'Bs1'}, {'NAME:Pair', 'Name:=', 'Rs', 'Value:=', '0mm'},
{'NAME:Pair', 'Name:=',  ...
 'FilletType', 'Value:=', '0'}, {'NAME:Pair', 'Name:=', 'Layers', 'Value:=', '1'},
{'NAME:Pair', 'Name:=',  ...
 'CoilPitch', 'Value:=', 'Xs/Np'}, {'NAME:Pair', 'Name:=', 'EndExt', 'Value:=',  ...
 '0mm'}, {'NAME:Pair', 'Name:=', 'EndClr', 'Value:=', '0.5mm'}, {'NAME:Pair',
'Name:=',  ...
 'SegAngle', 'Value:=', '10deg'}, {'NAME:Pair', 'Name:=', 'InfoCoil', 'Value:=',  ...
 '1'}}}, {'NAME:Attributes', 'Name:=', 'DiskCoil1', 'Flags:=', '', 'Color:=',  ...
 '(143 175 143)', 'Transparency:=', 0, 'PartCoordinateSystem:=', 'Global', 'UDMId:=',
...
 '', 'MaterialValue:=', '"vacuum"', 'SurfaceMaterialValue:=',  ...
 '"vacuum"', 'SolveInside:=', true, 'IsMaterialEditable:=',  ...
 true, 'UseMaterialAppearance:=', false, 'IsLightweight:=', false})

 invoke(Editor,'DuplicateAroundAxis', {'NAME:Selections', 'Selections:=',
'DiskCoil1', 'NewPartsModelFlag:=',...
 'Model'}, {'NAME:DuplicateAroundAxisParameters', 'CreateNewObjects:=', true,
'WhichAxis:=', ...
 'Z', 'AngleStr:=', '15deg', 'NumClones:=', '2'}, {'NAME:Options',
'DuplicateAssignments:=', ...
 false}, {'CreateGroupsForNewObjects:=', false})

 invoke(Editor,'DuplicateAroundAxis', {'NAME:Selections', 'Selections:=',  ...
 'DiskCoil1,DiskCoil1_1', 'NewPartsModelFlag:=', 'Model'},
{'NAME:DuplicateAroundAxisParameters', 'CreateNewObjects:=',  ...
 true, 'WhichAxis:=', 'Z', 'AngleStr:=', '60deg', 'NumClones:=', '6'},
{'NAME:Options', 'DuplicateAssignments:=',  ...
 false}, {'CreateGroupsForNewObjects:=', false})

global s k
s=2*(Np+1)-4;
%Bobinleri bakır yapma
k=cell(s,1);
 for i=1:1:s
   k{i}=strcat('DiskCoil1_',num2str(i));

    invoke(Editor,'AssignMaterial', {'NAME:Selections', 'Selections:=',k{i}},
{'NAME:Attributes', 'MaterialValue:=', ...
'"copper"', 'SolveInside:=',true})

 end

global s k
s=2*(Np+1)-5;
%Bobinleri bakır yapma
```

```
k=cell(s,1);
 for i=1:1:s
    k{i}=strcat('DiskCoil1_1_',num2str(i));

     invoke(Editor,'AssignMaterial',     {'NAME:Selections',     'Selections:=',k{i}},
{'NAME:Attributes', 'MaterialValue:=', ...
'"copper"', 'SolveInside:=',true})

 end

 invoke(Editor,'AssignMaterial',
{'NAME:Selections','AllowRegionDependentPartSelectionForPMLCreation:=', ...
  true, 'AllowRegionSelectionForPMLCreation:=', true, 'Selections:=', ...
  'DiskCoil1'}, {'NAME:Attributes','MaterialValue:=', ...
  '"copper"' ,'SolveInside:=', true, 'IsMaterialEditable:=', ...
  true, 'UseMaterialAppearance:=', false, 'IsLightweight:=', false})


%terminal belirleme
invoke(Editor,'CreateUserDefinedPart',   {'NAME:UserDefinedPrimitiveParameters',
'DllName:=',  ...
  'RMxprt/DiskCoil.dll', 'Version:=', '12.1', 'NoOfParameters:=', 21, 'Library:=',  ...
  'syslib', {'NAME:ParamVector', {'NAME:Pair', 'Name:=', 'DiaOuter', 'Value:=',  ...
  'Do'}, {'NAME:Pair', 'Name:=', 'DiaInner', 'Value:=', 'Di'}, {'NAME:Pair', 'Name:=',
...
  'Thickness',  'Value:=',  'Ls'},  {'NAME:Pair',  'Name:=',  'Gap',  'Value:=',  'Gaps'},
{'NAME:Pair', 'Name:=',  ...
  'Skew',  'Value:=',  '0deg'},  {'NAME:Pair',  'Name:=',  'Slots',  'Value:=',  'Xs'},
{'NAME:Pair', 'Name:=',  ...
  'SlotType',  'Value:=',  '1'},  {'NAME:Pair',  'Name:=',  'Hs0',  'Value:=',  '1mm'},
{'NAME:Pair', 'Name:=',  ...
  'Hs1',  'Value:=',  '1mm'},  {'NAME:Pair',  'Name:=',  'Hs2',  'Value:=',  'Hs2'},
{'NAME:Pair', 'Name:=',  ...
  'Bs0',  'Value:=',  'Bs0'},  {'NAME:Pair',  'Name:=',  'Bs1',  'Value:=',  'Bs1'},
{'NAME:Pair', 'Name:=',  ...
  'Bs2',  'Value:=',  'Bs1'},  {'NAME:Pair',  'Name:=',  'Rs',  'Value:=',  '0mm'},
{'NAME:Pair', 'Name:=',  ...
  'FilletType',  'Value:=',  '0'},  {'NAME:Pair',  'Name:=',  'Layers',  'Value:=',  '1'},
{'NAME:Pair', 'Name:=',  ...
  'CoilPitch', 'Value:=', 'Xs/Np'}, {'NAME:Pair', 'Name:=', 'EndExt', 'Value:=',  ...
  '0mm'},  {'NAME:Pair',  'Name:=',  'EndClr',  'Value:=',  '0.5mm'},  {'NAME:Pair',
'Name:=',  ...
  'SegAngle', 'Value:=', '10deg'}, {'NAME:Pair', 'Name:=', 'InfoCoil', 'Value:=',  ...
  '2'}}}, {'NAME:Attributes', 'Name:=', 'DiskCoil2', 'Flags:=', '', 'Color:=',  ...
  '(143 175 143)', 'Transparency:=', 0, 'PartCoordinateSystem:=', 'Global', 'UDMId:=',
...
  '', 'MaterialValue:=', '"vacuum"', 'SurfaceMaterialValue:=',  ...
  '"vacuum"', 'SolveInside:=', true, 'IsMaterialEditable:=',  ...
```

```
  true, 'UseMaterialAppearance:=', false, 'IsLightweight:=', false})

  invoke(Editor,'DuplicateAroundAxis', {'NAME:Selections', 'Selections:=',
'DiskCoil2', 'NewPartsModelFlag:=',...
  'Model'}, {'NAME:DuplicateAroundAxisParameters', 'CreateNewObjects:=', true,
'WhichAxis:=', ...
  'Z', 'AngleStr:=', '15deg', 'NumClones:=', '2'}, {'NAME:Options',
'DuplicateAssignments:=', ...
  false}, {'CreateGroupsForNewObjects:=', false})

  invoke(Editor,'DuplicateAroundAxis', {'NAME:Selections', 'Selections:=', ...
  'DiskCoil2,DiskCoil2_1', 'NewPartsModelFlag:=', 'Model'},
{'NAME:DuplicateAroundAxisParameters', 'CreateNewObjects:=', ...
  true, 'WhichAxis:=', 'Z', 'AngleStr:=', '60deg', 'NumClones:=', '6'},
{'NAME:Options', 'DuplicateAssignments:=', ...
  false}, {'CreateGroupsForNewObjects:=', false})


%sargı renklendirme
invoke(Editor,'ChangeProperty', {'NAME:AllTabs',
{'NAME:Geometry3DAttributeTab', {'NAME:PropServers', ...
  'DiskCoil1', 'DiskCoil1_1'}, {'NAME:ChangedProps', {'NAME:Color', 'R:=', 255,
'G:=', ...
  0, 'B:=', 0}}}})
invoke(Editor,'ChangeProperty', {'NAME:AllTabs',
{'NAME:Geometry3DAttributeTab', {'NAME:PropServers', ...
  'DiskCoil1_2', 'DiskCoil1_1_1'}, {'NAME:ChangedProps', {'NAME:Color', 'R:=', 0,
'G:=', ...
  255, 'B:=', 0}}}})
invoke(Editor,'ChangeProperty', {'NAME:AllTabs',
{'NAME:Geometry3DAttributeTab', {'NAME:PropServers', ...
  'DiskCoil1_3', 'DiskCoil1_1_2'}, {'NAME:ChangedProps', {'NAME:Color', 'R:=', 0,
'G:=', ...
  0, 'B:=', 255}}}})
invoke(Editor,'ChangeProperty', {'NAME:AllTabs',
{'NAME:Geometry3DAttributeTab', {'NAME:PropServers', ...
  'DiskCoil1_4', 'DiskCoil1_1_3'}, {'NAME:ChangedProps', {'NAME:Color', 'R:=', ...
  255, 'G:=', 0, 'B:=', 0}}}})
invoke(Editor,'ChangeProperty', {'NAME:AllTabs',
{'NAME:Geometry3DAttributeTab', {'NAME:PropServers', ...
  'DiskCoil1_5', 'DiskCoil1_1_4'}, {'NAME:ChangedProps', {'NAME:Color', 'R:=', 0,
'G:=', ...
  255, 'B:=', 0}}}})
invoke(Editor,'ChangeProperty', {'NAME:AllTabs',
{'NAME:Geometry3DAttributeTab', {'NAME:PropServers', ...
  'DiskCoil1_6', 'DiskCoil1_1_5'}, {'NAME:ChangedProps', {'NAME:Color', 'R:=', 0,
'G:=', ...
  0, 'B:=', 255}}}})
```

```
%core loss ekleme
Module = Design.GetModule('BoundarySetup')
invoke(Module,'SetCoreLoss', {'Rotor', 'Stator'}), false

%eddy ekleme
Module = Design.GetModule('BoundarySetup')
invoke(Module,'SetEddyEffect', {'NAME:Eddy Effect Setting',
{'NAME:EddyEffectVector', {'NAME:Data', 'Object Name:=', ...
 'Stator', 'Eddy Effect:=', false}, {'NAME:Data', 'Object Name:=', 'Rotor', 'Eddy
Effect:=', ...
 false}, {'NAME:Data', 'Object Name:=', 'Bar', 'Eddy Effect:=', true}, {'NAME:Data',
'Object Name:=', ...
 'DiskCoil1', 'Eddy Effect:=', false}, {'NAME:Data', 'Object Name:=', ...
 'DiskCoil1_1', 'Eddy Effect:=', false}, {'NAME:Data', 'Object Name:=', ...
 'DiskCoil1_2', 'Eddy Effect:=', false}, {'NAME:Data', 'Object Name:=', ...
 'DiskCoil1_3', 'Eddy Effect:=', false}, {'NAME:Data', 'Object Name:=', ...
 'DiskCoil1_4', 'Eddy Effect:=', false}, {'NAME:Data', 'Object Name:=', ...
 'DiskCoil1_5', 'Eddy Effect:=', false}, {'NAME:Data', 'Object Name:=', ...
 'DiskCoil1_6', 'Eddy Effect:=', false}, {'NAME:Data', 'Object Name:=', ...
 'DiskCoil1_1_1', 'Eddy Effect:=', false}, {'NAME:Data', 'Object Name:=', ...
 'DiskCoil1_1_2', 'Eddy Effect:=', false}, {'NAME:Data', 'Object Name:=', ...
 'DiskCoil1_1_3', 'Eddy Effect:=', false}, {'NAME:Data', 'Object Name:=', ...
 'DiskCoil1_1_4', 'Eddy Effect:=', false}, {'NAME:Data', 'Object Name:=', ...
 'DiskCoil1_1_5', 'Eddy Effect:=', false}}})

%faz sargi tanımlama

invoke(Editor,'ChangeProperty',{'NAME:AllTabs', {'NAME:LocalVariableTab',
{'NAME:PropServers', ...
 'LocalVariables'}, {'NAME:NewProps', {'NAME:Kvag', 'PropType:=',
'VariableProp', 'UserDef:=', ...
 true, 'Value:=', '0.97'}}}})

global Ncc Ncos

%A FAZI
Module = Design.GetModule('BoundarySetup')

invoke(Editor,'ChangeProperty',{'NAME:AllTabs', {'NAME:LocalVariableTab',
{'NAME:PropServers', ...
 'LocalVariables'}, {'NAME:NewProps', {'NAME:Ncc', 'PropType:=', 'VariableProp',
'UserDef:', ...
 true, 'Value:=', '(Kvag*VV)/(4.44*free*phii*Kw)'}, {'NAME:Ncos', 'PropType:=', ...
 'VariableProp', 'UserDef:=', true, 'Value:=', 'int(Ncc/(Xs/(2*mm)))'}}}})
```

```
invoke(Module,'AssignCoilTerminalGroup', {'CoilTerminal_1', 'CoilTerminal_2'},
{'NAME:CoilTerminal_1', 'Objects:=', {...
 'DiskCoil2', 'DiskCoil2_1'}, 'Conductor number:=', 'Ncos', 'Point out of terminal:=',
...
 false})
invoke(Module,'AssignCoilTerminalGroup', {'CoilTerminal_3', 'CoilTerminal_4'},
{'NAME:CoilTerminal_3', 'Objects:=', {...
 'DiskCoil2_1_3', 'DiskCoil2_4'}, 'Conductor number:=', 'Ncos', 'Point out of
terminal:=', ...
 false})

 invoke(Editor,'ChangeProperty',{'NAME:AllTabs', {'NAME:LocalVariableTab',
{'NAME:PropServers', ...
 'LocalVariables'}, {'NAME:NewProps', {'NAME:Rfaz', 'PropType:=',
'VariableProp', 'UserDef:=', ...
 true, 'Value:=', '(0.0178*Ncos*(Xs*0.5/mm)*(2*pi*sqrt(Di*Do)))/AcuWire'}}}})

invoke(Module,'AssignWindingGroup', {'NAME:Winding1', 'Type:=', 'Voltage',
'IsSolid:=', ...
 false, 'Current:=', '0mA', 'Resistance:=', 'Rfaz', 'Inductance:=', '0nH', 'Voltage:=', ...
 'VV*sqrt(2)*sin(2*pi*free*time)', 'ParallelBranchesNum:=', '1'})

invoke(Module,'AddTerminalstoWinding', {'NAME:AddTerminalsToWinding',
{'NAME:BoundaryList', {'NAME:CoilTerminal_1', 'Objects:=', {...
 'DiskCoil2'}, 'ParentBndID:=', 'Winding1', 'Conductor number:=', 'Ncos',
'Winding:=', ...
 'Winding1', 'Point out of terminal:=', false}, {'NAME:CoilTerminal_2', 'Objects:=',
{...
 'DiskCoil2_1'}, 'ParentBndID:=', 'Winding1', 'Conductor number:=', 'Ncos',
'Winding:=', ...
 'Winding1', 'Point out of terminal:=', false}, {'NAME:CoilTerminal_3', 'Objects:=',
{...
 'DiskCoil2_1_3'}, 'ParentBndID:=', 'Winding1', 'Conductor number:=', 'Ncos',
'Winding:=', ...
 'Winding1', 'Point out of terminal:=', false}, {'NAME:CoilTerminal_4', 'Objects:=',
{...
 'DiskCoil2_4'}, 'ParentBndID:=', 'Winding1', 'Conductor number:=', 'Ncos',
'Winding:=', ...
 'Winding1', 'Point out of terminal:=', false}}})

%B FAZI

invoke(Module,'AssignCoilTerminalGroup', {'CoilTerminal_5', 'CoilTerminal_6', ...
 'CoilTerminal_7', 'CoilTerminal_8'}, {'NAME:CoilTerminal_5', 'Objects:=', { ...
 'DiskCoil2_1_1', 'DiskCoil2_1_4', 'DiskCoil2_2', 'DiskCoil2_5'}, 'Conductor
number:=', ...
 'Ncos', 'Point out of terminal:=', false})
```

```
invoke(Module,'AssignWindingGroup', {'NAME:Winding2', 'Type:=', 'Voltage', 'IsSolid:=', ...
  false, 'Current:=', '0mA', 'Resistance:=', 'Rfaz', 'Inductance:=', '0nH', 'Voltage:=', ...
  'VV*sqrt(2)*sin(2*pi*free*time-2*pi/3)', 'ParallelBranchesNum:=', '1'})

invoke(Module,'AddTerminalstoWinding', {'NAME:AddTerminalsToWinding', {'NAME:BoundaryList', {'NAME:CoilTerminal_5', 'Objects:=', { ...
  'DiskCoil2_1_1'}, 'ParentBndID:=', 'Winding2', 'Conductor number:=', 'Ncos', 'Winding:=', ...
  'Winding2', 'Point out of terminal:=', false}, {'NAME:CoilTerminal_6', 'Objects:=', { ...
  'DiskCoil2_1_4'}, 'ParentBndID:=', 'Winding2', 'Conductor number:=', 'Ncos', 'Winding:=', ...
  'Winding2', 'Point out of terminal:=', false}, {'NAME:CoilTerminal_7', 'Objects:=', { ...
  'DiskCoil2_2'}, 'ParentBndID:=', 'Winding2', 'Conductor number:=', 'Ncos', 'Winding:=', ...
  'Winding2', 'Point out of terminal:=', false}, {'NAME:CoilTerminal_8', 'Objects:=', { ...
  'DiskCoil2_5'}, 'ParentBndID:=', 'Winding2', 'Conductor number:=', 'Ncos', 'Winding:=', ...
  'Winding2', 'Point out of terminal:=', false}}})

%C FAZI

invoke(Module,'AssignCoilTerminalGroup', {'CoilTerminal_9', 'CoilTerminal_10', ...
  'CoilTerminal_11', 'CoilTerminal_12'},{'NAME:CoilTerminal_9', 'Objects:=',{ ...
  'DiskCoil2_1_2', 'DiskCoil2_3', 'DiskCoil2_6', 'DiskCoil2_1_5'}, 'Conductor number:=', ...
  'Ncos', 'Point out of terminal:=', false})

invoke(Module,'AssignWindingGroup', {'NAME:Winding3', 'Type:=', 'Voltage', 'IsSolid:=', ...
  false, 'Current:=', '0mA', 'Resistance:=', 'Rfaz', 'Inductance:=', '0nH', 'Voltage:=', ...
  'VV*sqrt(2)*sin(2*pi*free*time-4*pi/3)', 'ParallelBranchesNum:=', '1'})

invoke(Module,'AddTerminalstoWinding',
{'NAME:AddTerminalsToWinding',{'NAME:BoundaryList',{'NAME:CoilTerminal
_9', 'Objects:=',{ ...
  'DiskCoil2_1_2'}, 'ParentBndID:=', 'Winding3', 'Conductor number:=', 'Ncos', 'Winding:=', ...
  'Winding3', 'Point out of terminal:=', false},{'NAME:CoilTerminal_10', 'Objects:=',{ ...
  'DiskCoil2_3'}, 'ParentBndID:=', 'Winding3', 'Conductor number:=', 'Ncos', 'Winding:=', ...
  'Winding3', 'Point out of terminal:=', false},{'NAME:CoilTerminal_11', 'Objects:=',{ ...
```

```
 'DiskCoil2_6'}, 'ParentBndID:=', 'Winding3', 'Conductor number:=', 'Ncos', 'Winding:=', ...
 'Winding3', 'Point out of terminal:=', false},{'NAME:CoilTerminal_12', 'Objects:=',{ ...
 'DiskCoil2_1_5'}, 'ParentBndID:=', 'Winding3', 'Conductor number:=', 'Ncos', 'Winding:=', ...
 'Winding3', 'Point out of terminal:=', false}}})
```

%mesh

```
Module = Design.GetModule('MeshSetup')
invoke(Module,'AssignLengthOp', {'NAME:CylindricalGap1', 'CloneMesh:=', false, 'Objects:=', { ...
 'Band1'}})

invoke(Module,'AssignSurfPriorityForTauOp', {'NAME:SurfPriority3', 'Objects:=', { ...
 'Bar'}, 'SurfaceRepPriority:=', 0})

invoke(Module,'AssignTrueSurfOp', {'NAME:SurfApprox1', 'Objects:=', {'Bar'}, 'CurvedSurfaceApproxChoice:=', ...
 'UseSlider', 'SliderMeshSettings:=', 5})

invoke(Module,'AssignTrueSurfOp', {'NAME:SurfApprox2', 'Objects:=', { ...
 'DiskCoil1', 'DiskCoil1_1', 'DiskCoil1_2', 'DiskCoil1_3', 'DiskCoil1_4', 'DiskCoil1_5',...
 'DiskCoil1_6', 'DiskCoil1_1_1', 'DiskCoil1_1_2', 'DiskCoil1_1_3', 'DiskCoil1_1_4', 'DiskCoil1_1_5'}, 'CurvedSurfaceApproxChoice:=', ...
 'UseSlider', 'SliderMeshSettings:=', 5})

invoke(Module,'AssignSkinDepthOp', {'NAME:SkinDepth1', 'Enabled:=', true, 'Objects:=', { ...
 'DiskCoil1', 'DiskCoil1_1', 'DiskCoil1_2', 'DiskCoil1_3', 'DiskCoil1_4', 'DiskCoil1_5',...
 'DiskCoil1_6', 'DiskCoil1_1_1', 'DiskCoil1_1_2', 'DiskCoil1_1_3', 'DiskCoil1_1_4', 'DiskCoil1_1_5'}, 'RestrictElem:=', ...
 true, 'NumMaxElem:=', '1000', 'SkinDepth:=', '9.3458999185223mm', 'SurfTriMaxLength:=', ...
 '30.6497129009285mm', 'NumLayers:=', '2'})

invoke(Module,'AssignLengthOp', {'NAME:Length1', 'RefineInside:=', true, 'Enabled:=', ...
 true, 'Objects:=', {'Rotor', 'Stator'}, 'RestrictElem:=', false, 'NumMaxElem:=', ...
 '1000', 'RestrictLength:=', true, 'MaxLength:=', 'Ls/4'})
```

```
%band moving

Module = Design.GetModule('ModelSetup')

invoke(Module,'AssignBand', {'NAME:Data', 'Move Type:=', 'Rotate', 'Coordinate System:=', ...
 'Global', 'Axis:=', 'Z', 'Is Positive:=', true, 'InitPos:=', '0deg', 'HasRotateLimit:=', ...
 false, 'NonCylindrical:=', false, 'Consider Mechanical Transient:=', false, 'Angular Velocity:=', ...
 '1450', 'Objects:=', {'Band1'}})

invoke(Module,'ReassignMoving', {'NAME:Data', 'Objects:=', {'Rotor', 'Bar', ...
 'InnerRegion'}})

%analiz

Module = Design.GetModule('AnalysisSetup')
invoke(Module,'InsertSetup', 'Transient', {'NAME:Setup1', 'Enabled:=', true, 'NonlinearSolverResidual:=', ...
 '0.005', 'ScalarPotential:=', 'Second Order', 'TimeIntegrationMethod:=', 0, 'StopTime:=', ...
 '0.1s', 'TimeStep:=', '0.0002s', 'OutputError:=', false, 'UseControlProgram:=', ...
 false, 'ControlProgramName:=', '', 'ControlProgramArg:=', '', 'CallCtrlProgAfterLastStep:=', ...
 false, 'FastReachSteadyState:=', false, 'AutoDetectSteadyState:=', false, 'IsGeneralTransient:=', ...
 true, 'HasSweepSetup:=', false})



invoke(Design,'Analyze', 'Setup1')
Module = Design.GetModule('ReportSetup')

invoke(Module,'CreateReport', 'Plot 1', 'Transient', 'Rectangular Plot', ...
 'Setup1 : Transient', {'Domain:=', 'Sweep'}, {'Time:=', {'All'}, 'Do:=', { ...
 'Nominal'}, 'Di:=', {'Nominal'}, 'j:=', {'Nominal'}, 'Bs2:=', { ...
 'Nominal'}, 'kfill:=', {'Nominal'}, 'kd:=', {'Nominal'}, 'Ls:=', { ...
 'Nominal'}, 'Hs2:=', {'Nominal'}, 'Hs0:=', {'Nominal'}, 'Hs1:=', { ...
 'Nominal'}, 'free:=', {'Nominal'}, 'VV:=', {'Nominal'}, 'mm:=', { ...
 'Nominal'}, 'AcuWire:=', {'Nominal'}, 'Bs0:=', {'Nominal'}, 'Bs1:=', { ...
 'Nominal'}, 'SlotType:=', {'Nominal'}, 'Gaps:=', {'Nominal'}, 'Gapr:=', { ...
 'Nominal'}, 'Np:=', {'Nominal'}, 'Xs:=', {'Nominal'}, 'Bg:=', { ...
 'Nominal'}, 'phii:=', {'Nominal'}, 'Kw:=', {'Nominal'}, 'InfoCore:=', { ...
 'Nominal'}, 'Lr:=', {'Nominal'}, 'Xr:=', {'Nominal'}, 'SlotTyper:=', { ...
 'Nominal'}, 'Hr2:=', {'Nominal'}, 'Br0:=', {'Nominal'}, 'Br1:=', { ...
 'Nominal'}, 'Br2:=', {'Nominal'}, 'Kvag:=', {'Nominal'}, {'X Component:=', ...
```

```
  'Time', 'Y Component:=', { ...
  'InputVoltage(Winding1)*Current(Winding1)                                    +
InputVoltage(Winding2)*Current(Wind' & ...
  'ing2) + InputVoltage(Winding3)*Current(Winding3)'}, {}}})

invoke(Module,'CreateReport', 'Plot 2', 'Transient', 'Rectangular Plot',  ...
  'Setup1 : Transient', {'Domain:=', 'Sweep'}, {'Time:=', {'All'}, 'Do:=', { ...
  'Nominal'}, 'Di:=', {'Nominal'}, 'j:=', {'Nominal'}, 'Bs2:=', { ...
  'Nominal'}, 'kfill:=', {'Nominal'}, 'kd:=', {'Nominal'}, 'Ls:=', { ...
  'Nominal'}, 'Hs2:=', {'Nominal'}, 'Hs0:=', {'Nominal'}, 'Hs1:=', { ...
  'Nominal'}, 'free:=', {'Nominal'}, 'VV:=', {'Nominal'}, 'mm:=', { ...
  'Nominal'}, 'AcuWire:=', {'Nominal'}, 'Bs0:=', {'Nominal'}, 'Bs1:=', { ...
  'Nominal'}, 'SlotType:=', {'Nominal'}, 'Gaps:=', {'Nominal'}, 'Gapr:=', { ...
  'Nominal'}, 'Np:=', {'Nominal'}, 'Xs:=', {'Nominal'}, 'Bg:=', { ...
  'Nominal'}, 'phii:=', {'Nominal'}, 'Kw:=', {'Nominal'}, 'InfoCore:=', { ...
  'Nominal'}, 'Lr:=', {'Nominal'}, 'Xr:=', {'Nominal'}, 'SlotTyper:=', { ...
  'Nominal'}, 'Hr2:=', {'Nominal'}, 'Br0:=', {'Nominal'}, 'Br1:=', { ...
  'Nominal'}, 'Br2:=', {'Nominal'}, 'Kvag:=', {'Nominal'}, {'X Component:=',  ...
  'Time', 'Y Component:=', {'Moving1.Speed*Moving1.Torque'}, {}}})

invoke(Module,'CreateReport', 'Winding Plot 1', 'Transient', 'Rectangular Plot',  ...
  'Setup1 : Transient', {'Domain:=', 'Sweep'}, {'Time:=', {'All'}, 'Do:=', { ...
  'Nominal'}, 'Di:=', {'Nominal'}, 'j:=', {'Nominal'}, 'Bs2:=', { ...
  'Nominal'}, 'kfill:=', {'Nominal'}, 'kd:=', {'Nominal'}, 'Ls:=', { ...
  'Nominal'}, 'Hs2:=', {'Nominal'}, 'Hs0:=', {'Nominal'}, 'Hs1:=', { ...
  'Nominal'}, 'free:=', {'Nominal'}, 'VV:=', {'Nominal'}, 'mm:=', { ...
  'Nominal'}, 'AcuWire:=', {'Nominal'}, 'Bs0:=', {'Nominal'}, 'Bs1:=', { ...
  'Nominal'}, 'SlotType:=', {'Nominal'}, 'Gaps:=', {'Nominal'}, 'Gapr:=', { ...
  'Nominal'}, 'Np:=', {'Nominal'}, 'Xs:=', {'Nominal'}, 'Bg:=', { ...
  'Nominal'}, 'phii:=', {'Nominal'}, 'Kw:=', {'Nominal'}, 'InfoCore:=', { ...
  'Nominal'}, 'Lr:=', {'Nominal'}, 'Xr:=', {'Nominal'}, 'SlotTyper:=', { ...
  'Nominal'}, 'Hr2:=', {'Nominal'}, 'Br0:=', {'Nominal'}, 'Br1:=', { ...
  'Nominal'}, 'Br2:=', {'Nominal'}, 'Kvag:=', {'Nominal'}, {'X Component:=',  ...
  'Time', 'Y Component:=', {'Current(Winding1)', 'Current(Winding2)',  ...
  'Current(Winding3)'}, {}}})

invoke(Module,'CreateReport', 'Winding Plot 2', 'Transient', 'Rectangular Plot',  ...
  'Setup1 : Transient', {'Domain:=', 'Sweep'}, {'Time:=', {'All'}, 'Do:=', { ...
  'Nominal'}, 'Di:=', {'Nominal'}, 'j:=', {'Nominal'}, 'Bs2:=', { ...
  'Nominal'}, 'kfill:=', {'Nominal'}, 'kd:=', {'Nominal'}, 'Ls:=', { ...
  'Nominal'}, 'Hs2:=', {'Nominal'}, 'Hs0:=', {'Nominal'}, 'Hs1:=', { ...
  'Nominal'}, 'free:=', {'Nominal'}, 'VV:=', {'Nominal'}, 'mm:=', { ...
  'Nominal'}, 'AcuWire:=', {'Nominal'}, 'Bs0:=', {'Nominal'}, 'Bs1:=', { ...
  'Nominal'}, 'SlotType:=', {'Nominal'}, 'Gaps:=', {'Nominal'}, 'Gapr:=', { ...
  'Nominal'}, 'Np:=', {'Nominal'}, 'Xs:=', {'Nominal'}, 'Bg:=', { ...
  'Nominal'}, 'phii:=', {'Nominal'}, 'Kw:=', {'Nominal'}, 'InfoCore:=', { ...
  'Nominal'}, 'Lr:=', {'Nominal'}, 'Xr:=', {'Nominal'}, 'SlotTyper:=', { ...
  'Nominal'}, 'Hr2:=', {'Nominal'}, 'Br0:=', {'Nominal'}, 'Br1:=', { ...
```

```
  'Nominal'}, 'Br2:=', {'Nominal'}, 'Kvag:=', {'Nominal'}, {'X Component:=',  ...
  'Time', 'Y Component:=', {'InducedVoltage(Winding1)',  ...
  'InducedVoltage(Winding2)', 'InducedVoltage(Winding3)'}, {}}})

invoke(Module,'CreateReport', 'Torque Plot 1', 'Transient', 'Rectangular Plot',  ...
  'Setup1 : Transient', {'Domain:=', 'Sweep'}, {'Time:=', {'All'}, 'Do:=', { ...
  'Nominal'}, 'Di:=', {'Nominal'}, 'j:=', {'Nominal'}, 'Bs2:=', { ...
  'Nominal'}, 'kfill:=', {'Nominal'}, 'kd:=', {'Nominal'}, 'Ls:=', { ...
  'Nominal'}, 'Hs2:=', {'Nominal'}, 'Hs0:=', {'Nominal'}, 'Hs1:=', { ...
  'Nominal'}, 'free:=', {'Nominal'}, 'VV:=', {'Nominal'}, 'mm:=', { ...
  'Nominal'}, 'AcuWire:=', {'Nominal'}, 'Bs0:=', {'Nominal'}, 'Bs1:=', { ...
  'Nominal'}, 'SlotType:=', {'Nominal'}, 'Gaps:=', {'Nominal'}, 'Gapr:=', { ...
  'Nominal'}, 'Np:=', {'Nominal'}, 'Xs:=', {'Nominal'}, 'Bg:=', { ...
  'Nominal'}, 'phii:=', {'Nominal'}, 'Kw:=', {'Nominal'}, 'InfoCore:=', { ...
  'Nominal'}, 'Lr:=', {'Nominal'}, 'Xr:=', {'Nominal'}, 'SlotTyper:=', { ...
  'Nominal'}, 'Hr2:=', {'Nominal'}, 'Br0:=', {'Nominal'}, 'Br1:=', { ...
  'Nominal'}, 'Br2:=', {'Nominal'}, 'Kvag:=', {'Nominal'}, {'X Component:=',  ...
  'Time', 'Y Component:=', {'Moving1.Torque'}, {}}})

Project.Save
invoke(Project,'SaveAs', 'C:\Users\w81\Desktop\eksenel\24oluk4kutup.aedt', true)

delete(iMaxwell)
end
```

EK 2. Analiz verileri

Operation Type: Motor

Source Type: AC

Rated Output Power (kW): 0.5

Rated Power Factor: 0.8

Capacitive Power Factor: No

Frequency (Hz): 50

Rated Voltage (V): 380

Load Type: Const Power

Rated Speed (rpm): 1450

Operating Temperature (C): 75

STATOR DATA

Stator Core Type: AXIAL_AC

Stator Position: Upper

Number of Poles: 4

Outer Diameter of Stator (mm): 199

Inner Diameter of Stator (mm): 130.9

Length of Stator Core (mm): 21.6

Stacking Factor of Stator Core: 0.92

Steel Type of Stator: M19_29G

Number of Stator Slots: 24

Type of Stator Slot: Edited

Symmetric Slot

Type Info (mm)

1 End Width: 2

Line Edge: 0

2 Height: 0.8

Parallel Slot Width: 0

2 Height: 1.05

End Width: 9.1

2 Height: 6.4

End Width: 9.1

4 End Width: 0

Equivalent Tooth Width (mm): 10.151

STATOR WINDING DATA

Number of Phases: 3

Winding Connection: Y3

Number of Parallel Branches: 1

Number of Layers: 2

Winding Type: Whole Coiled

Coil Pitch: 6

Winding Factor: 0.965926

Conductor Type of Stator: copper

Conductor Resistivity at 75C (ohm.mm^2/m): 0.020797

ROTOR DATA

Rotor Core Type: AXIAL_CAGE

Rotor Position: Lower

Number of Poles: 4

Outer Diameter of Rotor (mm): 199

Length of Rotor Core (mm): 21.6

Stacking Factor of Rotor Core: 0.92

Steel Type of Rotor: M19_29G

CAGE DATA

Type of Cage Slot: 3

Bar Conductor Type: copper

Bar Resistivity at 75C (ohm.mm^2/m): 0.0172414

Axial End Ring Width (mm): 8

Radial End Ring Height (mm): 15

End Ring Conductor Type: copper

End Ring Resistivity at 75C (ohm.mm^2/m): 0.0172414

SHAFT DATA

Magnetic Shaft: Yes

Friction Loss (W): 10

Windage Loss/Power (W): 10

Reference Speed (rpm): 1500

MATERIAL CONSUMPTION

Stator Wire Density (kg/m^3): 8933

Rotor Bar Density (kg/m^3): 8933

Rotor Ring Density (kg/m^3): 8933

Stator Core Steel Density (kg/m^3): 7650

Rotor Core Steel Density (kg/m^3): 7650

Stator Copper Weight (kg): 1.51104

Rotor Conductor Weight (kg): 1.5206

Stator Core Steel Weight (kg): 2.11768

Rotor Core Steel Weight (kg): 2.17367

Stator Net Weight (kg): 3.62872

Rotor Net Weight (kg): 3.69427

Stator Core Steel Consumption (kg): 2.68239

Rotor Core Steel Consumption (kg): 0

UNSATURATED PARAMETERS

Stator Resistance R1 (ohm): 34.9293

Stator Leakage Reactance X1 (ohm): 37.1311

Slot Leakage Reactance Xs1 (ohm): 6.38709

End Leakage Reactance Xe1 (ohm): 12.0014

Harmonic Leakage Reactance Xd1 (ohm): 18.7426

Magnetizing Reactance Xm (ohm): 842.982

Rotor Resistance R2 (ohm): 10.28

Top Bar Resistance (ohm): 7.77856

Bottom Bar Resistance (ohm): 3.33367

End Ring Resistance (ohm):7.94647

Rotor Leakage Reactance X2 (ohm):27.7988

Slot Open-Tip Leakage Reactance (ohm): 1.41749

Top Slot Leakage Reactance (ohm): 1.55372

Bottom Slot Leakage Reactance (ohm): 4.61992

Mutual Slot Leakage Reactance (ohm): 1.9287

End Ring Leakage Reactance Xe2 (ohm): 15.6998

Harmonic Leakage Reactance Xd2 (ohm): 7.46785

NO-LOAD OPERATION

Stator Phase Voltage (V): 219.387

Stator Phase Current (A): 0.86742

Magnetizing Current (A): 0.867186

Rotor Current Referred to Stator (A): 0.0179554

Total Loss (W): 485.557

Rotor Copper Loss (W): 0.00994272

Iron-Core Loss (W): 465.587

Mechanical Loss (W): 19.96

Rotor Speed (rpm): 1498.5

Stator Resistance R1 (ohm): 34.9293

Stator Leakage Reactance X1 (ohm): 37.0921

Magnetizing Reactance Xm (ohm): 212.852

Rotor Resistance R2 (ohm): 10.28

Rotor Leakage Reactance X2 (ohm): 27.7836

FULL-LOAD MAGNETIC DATA

Stator Tooth Flux Density (Tesla): 0.452476

Stator Yoke Flux Density (Tesla): 1.48838

Rotor Top-Tooth Flux Density (Tesla): 0.503013

Rotor Yoke Flux Density (Tesla): 1.28607

Air-Gap Flux Density (Tesla): 0.284402

FULL-LOAD OPERATION

Induced Voltage per Unit: 0.693566

Stator Phase Voltage (V): 219.387

Stator Phase Current (A): 1.3814

Ohmic Loss (W): 250.298

Stator Ohmic Loss (W): 199.963

Rotor Ohmic Loss (W): 50.3352

Iron-Core Loss (W): 277.257

Stator-Tooth Basic Core Loss (W): 0.412149

Stator-Yoke Basic Core Loss (W): 3.79824

Stator Surface Excess Loss (W): 121.995

Rotor Surface Excess Loss (W): 151.052

Stator-Tooth Pulsating Loss (W): 1.08397e-09

Rotor-Tooth Pulsating Loss (W): 1.05006e-08

Mechanical Loss (W): 16.6785

Friction Loss (W): 9.11228

Windage Loss (W): 7.56625

Total Loss (kW): 0.544234

Electrical Input Power (kW): 1.04423

Mechanical Output Power (kW): 0.5

Efficiency (%): 47.882

Shaft Torque (N.m): 3.4932

Rotor Speed (rpm): 1366.84

Rotor Slip: 0.0887725