MARMARA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN DIŞ ROTORLU SABİT MIKNATISLI SENKRON RELÜKTANS MOTOR(SMSynRM) TASARIMI, ANALİZİ VE UYGULAMASI

ARMAĞAN BOZKURT

DOKTORA TEZİ

Bilgisayar – Kontrol
Eğitimi Anabilim Dalı

DANIŞMAN

Prof. Dr. A. Fevzi BABA

İKİNCİ DANIŞMAN

Prof. Dr. Yusuf ÖNER

İSTANBUL, 2021

MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN DIŞ ROTORLU SABİT MIKNATISLI SENKRON RELÜKTANS MOTOR(SMSynRM) TASARIMI, ANALİZİ VE UYGULAMASI

ARMAĞAN BOZKURT
(141722120089001)

DOKTORA TEZİ
Bilgisayar – Kontrol
Eğitimi Anabilim Dalı

DANIŞMAN
Prof. Dr. A. Fevzi BABA

İKİNCİ DANIŞMAN
Prof. Dr. Yusuf ÖNER

İSTANBUL, 2021

MARMARA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Öğrencisi Armağan BOZKURT'un "**Elektrikli Araçlar için Dış Rotorlu Sabit Mıknatıslı Senkron Relüktans Motor (SMSynRM) Tasarımı, Analizi ve Uygulaması**" başlıklı tez çalışması, 20 Ağustos 2021 tarihinde savunulmuş ve jüri üyeleri tarafından başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri

Prof.Dr. Ahmet Fevzi BABA (Danışman)
Marmara Üniversitesi ..... (İMZA).....

Prof.Dr. Hasan ERDAL (Üye)
Marmara Üniversitesi ..... (İMZA).....

Prof.Dr. Yaşar BİRBİR (Üye)
Marmara Üniversitesi ..... (İMZA).....

Prof.Dr. Ali Yılmaz ÇAMURCU (Üye)
Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi ..... (İMZA).....

Doç.Dr. Selim KÖROĞLU (Üye)
Pamukkale Üniversitesi ..... (İMZA).....

ONAY

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun …../……/2021 tarih ve …….. sayılı kararı ile Armağan BOZKURT'un Bilgisayar Kontrol Eğitimi Programında Doktora derecesi alması onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü
Prof. Dr. Bülent EKİCİ

ÖNSÖZ

Doktora çalışmaların süresince ilgilerini, yardımlarını, bilgilerini ve desteklerini esirgemeyen, sürekli motive ederek çalışma performansımı arttıran, sabırla yolumu aydınlatan değerli danışman hocalarım Sayın Prof. Dr. Ahmet Fevzi BABA ve Sayın Prof. Dr. Yusuf ÖNER'e,

Öğrenim hayatım boyunca üzerimde büyük emekleri olan tüm hocalarıma,

Tüm tasarım sürecinde yardımlarını, desteklerini esirgemeyen ve kardeşim olarak nitelendirebileceğim Metin ERSÖZ'e,

Tez çalışmalarım süresince varlığı ile bana moral kaynağı olan sevgili büyüğüm İnşaat Mühendisi Adem KIVANÇ'a,

Her zaman yanımda olan, destekleriyle bu çalışmanın itici gücü olan, meslektaşım, kader arkadaşım ve can yoldaşım Öğr. Gör. Dr. Adile AKPUNAR'a,

Son olarak benden sevgilerini esirgemeyen, hayatım boyunca gösterdikleri anlayış ve destekleri için annem Leman BOZKURT ve babam Eyüp BOZKURT'a,

Teşekkürü bir borç bilirim.

Ağustos, 2021 Armağan BOZKURT

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ..... **i**

İÇİNDEKİLER ..... **ii**

ÖZET ..... **iv**

YENİLİK BEYANI ..... **vi**

SEMBOLLER ..... **vii**

KISALTMALAR ..... **x**

ŞEKİL LİSTESİ ..... **xi**

TABLO LİSTESİ ..... **xiii**

1. GİRİŞ **1**

1.1. Tezin Amacı ve Önemi **2**

1.2. Literatür Araştırması **3**

1.3. Elektrikli ve Hibrit Elektrikli Araçlarda Kullanılan Elektrik Motorları **5**

1.4. Tezin Kapsamı **9**

2. MATERYAL VE YÖNTEM **11**

2.1. SynRM ve SMSynRM **11**

2.1.1. SynRM ile SMSynRM karşılaştırılması 12

2.2. SynRM'nin Eşdeğer Devresi ve Matematiksel Denklemleri **13**

2.3. Stator Yapısı **19**

2.4. Rotor Yapısı **20**

2.5. SMSynRM'nin Tasarımı **23**

2.6. Bilgisayar Destekli Tasarım **24**

2.7. Motorun Başlangıç Geometrisinin Belirlenmesi **25**

2.8. Relüktans Hesabı **29**

2.9. Malzeme Seçiminin Yapılması **30**

2.9.1. Manyetik malzemeler 31

2.10. Stator ve Rotor Boyutlarının Hesaplanması **33**

2.10.1. Stator 33
2.10.2. Rotor 37
2.10.2.1. Rotor bariyer yalıtım oranı 39
2.10.2.2. Rotor parametrelerinin belirlenmesi 40
2.10.2.3. Rotor bariyer sayısına göre karşılaştırma yapılması 44
2.11. Kayıplar ve Verim 46
2.12. Zıt EMK 46
2.13. Tasarımın 3-Boyutlu Görünümü 47
3. BULGULAR VE TARTIŞMA 48
3.1. Benzetim Sonuçları 48
3.2. Manyetik Analiz 51
3.3. Sabit Güçte Farklı Hız Testleri 52
3.4. Farklı Yüklerdeki Benzetim Sonuçları 53
3.5. Dış Rotorlu SMSynRM'nin İmalatı 53
3.5.1. Statorun imalatı 53
3.5.2. Rotorun imalatı 56
3.6. Motor Parçaların Birleştirilmesi 57
3.7. Dış rotorlu SMSynRM'nin Test Edilmesi 59
3.8. Deneysel Sonuçlar 59
4. SONUÇLAR 63
KAYNAKLAR 65
ÖZGEÇMİŞ .....

ÖZET

ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN DIŞ ROTORLU SABİT MIKNATISLI SENKRON RELÜKTANS MOTOR (SMSynRM) TASARIMI, ANALİZİ VE UYGULAMASI

Günümüz otomotiv endüstrisi benzinli araçlardan çok elektrikli araçlar (EA) ya da hibrit elektrikli araçlar (HEA) üzerine çalışmalarını yoğunlaşmıştır. Hem EA'larda hem de HEA'larda kullanılmak üzere yüksek verimli, yüksek tork yoğunluklu ve yüksek güç faktörüne sahip elektrik motorlarına daha çok yatırım yapılmaktadır.

Bu çalışmada, bir EA'da kullanılmak üzere yeni bir rotor topolojisine sahip dış rotorlu sabit mıknatıslı senkron relüktans motor (SMSynRM) tasarlanmıştır. Tasarım enine laminasyon (Transversally-Laminated Anisotropic-TLA) rotor yapıdadır. Ayrıca rotor topolojisinde Neodymium-Iron-Boron (NdFeB) mıknatıslar kullanılmıştır. Stator olukları dağıtılmış sargı şeklinde tasarlanmıştır, böylece tork dalgalanmaları minimuma indirilmiştir. Aynı zamanda maksimum elektromanyetik tork elde edilmiştir. Tasarlanan motorun analizi sonlu elemanlar analizi (SEA) ile gerçekleştirilmiştir. Tasarımda maksimum tork ve minimum tork dalgalanması elde etmek için üç fazlı SMSynRM'nin rotor geometrisinde optimizasyon gerçekleştirilerek motor parametrelerinin optimum değerleri elde edilmiştir. Motor 48/8 oluk/kutup kombinasyonunda, 750 d/d hızda ve 1 kW gücündedir. Benzetim ve imalat sonrası gerçekleştirilen performans testlerinin sonuçlarıyla dış rotorlu SMSynRM ile maksimum güç, minimum tork dalgalanması ve yüksek güç faktörü elde edildiği gösterilmiştir.

ABSTRACT

DESIGN, ANALYSIS AND APPLICATION OF OUTER ROTOR PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS RELUCTANCE MOTOR (PMSynRM) FOR ELECTRIC VEHICLES

Today's automotive industry has focused its studies on electric vehicles (EVs) or hybrid electric vehicles (HEVs) rather than gasoline-powered vehicles. For this reason, more investments are made in electric motors with high efficiency, high torque density and high-power factor to be used in both EVs and HEVs.

In this study, an outer rotor permanent magnet synchronous reluctance motor (PMSynRM) with a new rotor topology is designed for use in an EV. The design has a Transversally Laminated Anisotropic (TLA) rotor structure. In addition, Neodymium-Iron-Boron (NdFeB) magnets are used in rotor topology. The stator slots are designed as distributed windings, so torque ripples are minimized. At the same time, the maximum electromagnetic torque has been achieved. The analysis of the designed motor is carried out using the finite element method (FEM). Optimal values of motor parameters are obtained by optimizing the rotor geometry of the three-phase PMSynRM in order to obtain maximum torque and minimum torque ripple in the design. The motor is in a 48/8 slot / pole combination, a speed of 750 rpm and a power of 1 kW. With the simulation and post-production performance tests results, it has been shown that the outer rotor PMSynRM achieves maximum power, minimum torque ripples, and high power factor.

YENİLİK BEYANI

ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN DIŞ ROTORLU SABİT MIKNATISLI SENKRON RELÜKTANS MOTOR (SMSynRM) TASARIMI, ANALİZİ VE UYGULAMASI

Bu tez çalışmasında elektrikli araçlarda teker içine monte edilebilecek yeni bir rotor topolojisine sahip dış rotorlu sabit mıknatıslı senkron relüktans motor (SMSynRM) tasarlanmıştır. Tasarlanan motor üç fazlı, 48/8 oluk kutup kombinasyonlu, 750 d/d hızında, 12.8717 Nm torklu ve 1 kW gücündedir. Ayrıca statorunda çift katmanlı sargılar bulunmaktadır. Rotor bariyerlerine arc tipi N35H NdFeB tipi mıknatıslar gömülmüştür. Boyutları monte edileceği aracın tekerine monte edilecek şekilde belirlenmiştir.

Motorun tasarımı sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak ANSYS Maxwell programında gerçekleştirilmiştir. Başlangıç özellikleri ve sınır koşulları kapsamında belirtilen tork ve minimum tork dalgalanması değerlerini uygun anma akımı değerleri ile elde edilmesi için farklı bariyer geometrileri, bariyer sayıları ve mıknatıs şekillerinin kullanıldığı birçok rotor topolojileri tasarlanmıştır. Bu bağlamda tasarımı yapılan motor sahip olduğu özellikler göz önüne alındığında özgündür.

Benzetim ortamında geliştirilen rotor tasarımlarına özel olarak belirlenen parametreler kullanılarak birçok parametrik analizler ve eniyileme işlemleri gerçekleştirilerek nihai motor tasarım özelliklerine ulaşılmıştır. Ardından tasarımı yapılan dış rotorlu SMSynRM'nin imalatı gerçekleştirilmiştir. Motorun EA'larda kullanılan motorlar için önemli parametrelerden olan sabit güçte farklı hızlarda ve ayrıca tam yükte, %50 ve %100 fazla yük şeklindeki farklı yüklerde nasıl davranacağının test edilebilmesi amacıyla laboratuvar ortamında bir test düzeneği kullanılarak performans testleri yapılmıştır. Ardından benzetim ortamında yapılan test sonuçları ile laboratuvar ortamında yapılan performans testlerinin sonuçları karşılaştırılmıştır. Benzetim sonuçları ile performans testlerinin sonuçlarının birebir örtüştüğü görülmüştür.

Sonuç olarak tasarımı ve imalatı yapılan dış rotorlu SMSynRM'nin bir hafif EA'nın tekerleğine monte edilerek kullanılabilecek özelliklerde bir motor olduğu gösterilmiştir.

Ağustos, 2021 Prof. Dr. A. Fevzi BABA Armağan BOZKURT

SEMBOLLER

$\mathfrak{R}$: Relüktans

λ_{ds}, λ_{qs} : stator akılarının d-eksen ve q-eksen bileşenleri

ω_e : Mekaniksel hız

ε_L : Stator sargısı üzerindeki gerilim düşümü

ω_r : Rotor açısal hızı

ϕ_t : Manyetik akı yoğunluğu

$\hat{B}_g$: Hava aralığındaki tepe akı yoğunluğu

$\hat{B}_y$: Boyunduruk maksimum izin verilen manyetik akı yoğunluğu

μ : Manyetik geçirgenlik

μ_0 : Boşluk geçirgenliği

a_p : Kutup yay uzunluğu

B : Akı yoğunluğu

B_{t1} : İzin verilen maksimum manyetik akı yoğunluğu

B_δ : Çevre akım yoğunluğu

D_i : Stator iç çapı

D_{is} : Stator iç çapı

E : Zıt EMK

g : Hava aralığı

H : Elektromanyetik alan şiddeti

h_s : Oluk yüksekliği

I_1 : Faz akımı

I_{KW} : Reaktif akımı

i_{ds}, i_{qs} : stator akımının d-eksen ve q-eksen bileşenleri

J : Akım yoğunluğu (A/m^2)

K_c : Carter katsayısı

K_{Nm} : Hava aralığı manyetik form faktörü

k_{sf} : İstifleme faktörü

K_w : Yalıtım/demir oranı

l : Akı yönündeki uzunluk

L_d : d ekseni indüktansı (H)

l_{eff} : Makinenin etkin uzunluğu

l_i : stator nüve uzunluğu

L_{ls} : Stator kaçak indüktansı

L_{md}, L_{mq} : d-eksen ve q-eksen mıknatıslanma indüktansları

L_q : q-ekseni indüktansı (H)

m : Faz sayısı

M : Mıknatıslanma

n : devir sayısı (d/d)

N_{ph} : Faz başına sipir sayısı

n_r : Kutup başına rotor bariyer oluk sayısı

N_s : Faz başına sipir sayısı

n_s : Kutup başına stator oluk sayısı

p : Kutup sayısı

P_{cu} : Bakır kayıpları (W)

$P_{çıkış}$: Çıkış gücü (W)

PF : Güç Faktörü

P_{Fe} : Demir kayıpları (W)

$P_{kayıp}$: Kayıp güçler (W)

P_{mek} : Mekanik kayıplar (W)

P_N : Nominal güç (W)

P_{SM} : Sabit mıknatıs kayıpları (W)

P_{sn} : Görünür güç (VA)

P_{St} : Kaçak kayıplar (W)

Q_s : Oluk sayısı

R_{ir}, R_{or} : İç ve dış rotor yarıçapları (mm)

R_{is}, R_{os} : İç ve dış stator yarıçapları (mm)

Rs : Stator sargı direnci (Ohm)

S : Akı yönünde normal yüzey

s : Oluk açıklığı/g oranı

T_{avg} : Ortalama tork (Nm)

T_{cog} : Vuruntu torku (Nm)

T_e : Üretilen tork (Nm)

T_{mag} : Mıknatıs torku (Nm)

T_{max} : Maksimum tork (Nm)

T_{min} : Minimum tork (Nm)

T_{rel} : Relüktans torku (Nm)

T_{rip} : Tork dalgalanma yüzdesi

v_{ds}, v_{qs} **:** stator geriliminin d-eksen ve q-eksen bileşenleri

W_{demir} : Demir bölümlerin toplam genişliği

W_{top} : Yalıtım oranı

$W_{yalıtım}$: Tüm akı bariyerlerinin toplam genişliği

Z_1 : Stator oluk sayısı

z_q : Oluktaki iletken sayısı

α_i : Akı yoğunluğunun aritmetik ortalamasını elde etmek için katsayı

δ : Rotor konumu

λ : Oluk adımı/g oranı

ξ : Çıkıntı oranı

τ_p : Kutup adımı

τ_s : Oluk adımı

KISALTMALAR

AA **:** Alternatif Akım

ALA **:** Eksenel Laminasyonlu Rotor (Axially Laminated Anisotropic)

ARM **:** Anahtarlamalı Relüktans Motor

BEA **:** Bataryalı Elektrikli Araç

DA **:** Doğru Akım

EA **:** Elektrikli Araç

EMK **:** Elektromotor Kuvvet

FDAM **:** Fırçasız Doğru Akım Motoru

HEA **:** Hibrit Elektrikli Araç

HRFDSynRM: Harici Rotorlu Ferit destekli Senkron Relüktans Motor

İSMSM : İç Sabit Mıknatıslı Senkron Motor

RM **:** Relüktans Motor

SEA **:** Sonlu Eleman Analizi

SEY **:** Sonlu Elemanlar Yöntemi

SG **:** Sera Gazı

SM **:** Sabit Mıknatıs

SMSM **:** Sabit Mıknatıslı Senkron Motor

SMSynRM **:** Sabit Mıknatıslı Senkron Relüktans Motor

SynRM **:** Senkron Relüktans Motor

TLA **:** Enine Laminasyonlu Rotor (Transversally Laminated Anisotropic)

YHEA **:** Yakıt Hücreli Elektrikli Araç

YMSMSM **:** Yüzey Montajlı Sabit Mıknatıslı Senkron Motor

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1. Modern bir EA sisteminin genel şekli 6
Şekil 1.2. Değişken hızlı elektrik motorların karakteristik eğrisi 7
Şekil 1.3. EA ve HEV uygulamalar için elektrik motorların sınıflandırılması 7
Şekil 2.1. SynRM eşdeğer devresi 13
Şekil 2.2. SynRM'nin vektör diyagramı (Moghaddam, 2007-5, Huynh ve ark., 2018) 16
Şekil 2.3. SMSynRM'nin vektör diyagramı 16
Şekil 2.4. Entegre yuvalı dağıtılmış sargılar kullanan 3 fazlı 4 kutuplu yüzey SM stator ve sargılar (Pellegrino ve ark., 2016) 20
Şekil 2.5. SynRM'nin farklı rotor yapıları: a) klasik çıkıntılı kutup b) parçalı rotor tasarımı c) çift bariyerli d) enine laminasyon (TLA) e) eksenel laminasyon (ALA) 21
Şekil 2.6. SynRM'nin farklı rotor tasarımları a) basit çıkıntılı rotor b) TLA rotor, c) ALA rotor (Yammine, 2015). 22
Şekil 2.7. Temel tasarım stratejisi 25
Şekil 2.8. Temel rotor geometrisi 26
Şekil 2.9. Sert manyetik malzeme histerezis döngüsü 31
Şekil 2.10. Tasarımda kullanılan N35H mıknatıs 33
Şekil 2.11. Stator oluk şekli 34
Şekil 2.12. SMSynRM statoru ve sarım şekli 37
Şekil 2.13. SMSynRM'nin çeyrek kesiti 38
Şekil 2.14. Yalıtım oranı parametreleri 39
Şekil 2.15. $\pi/8$ bir kutup durumundaki iki katmanlı akı bariyerleri 40
Şekil 2.16. Rotor tasarım optimizasyon algoritması 41
Şekil 2.17. α parametresinin tork ve tork dalgalanmasına etkisi 42
Şekil 2.18. B_0 parametresinin tork ve tork dalgalanmasına etkisi 42
Şekil 2.19. R_b parametresinin tork ve tork dalgalanmasına etkisi 43
Şekil 2.20. Y_0 parametresinin tork ve tork dalgalanmasına etkisi 43
Şekil 2.21. H parametresinin tork ve tork dalgalanmasına etkisi 44
Şekil 2.22. Rotor topolojileri a) tek bariyerli b) 2 bariyerli c) 3 bariyerli d) 4 bariyerli 45
Şekil 2.23. SMSynRM'nin 3B görünüşleri 47
Şekil 3.1. Tork-zaman grafiği 48

Şekil 3.2. Tork dalgalanması 48
Şekil 3.3. Hız-zaman grafiği 49
Şekil 3.4. Üç faz akım-zaman grafiği 49
Şekil 3.5. Vuruntu torku 50
Şekil 3.6. Zıt EMK 50
Şekil 3.7. Kayıplar 51
Şekil 3.8. SMSynRM'nin akı dağılımı 51
Şekil 3.9. Manyetik akı yoğunluğu 52
Şekil 3.10. Stator sac tabakası 54
Şekil 3.11. Stator sac tabakalarının paketlenmesi 54
Şekil 3.12. Stator sargı sarımı 55
Şekil 3.13. Sarımı tamamlanmış stator 55
Şekil 3.14. Rotor sac tabakası 56
Şekil 3.15. Paketlenmiş rotor 56
Şekil 3.16. N35H arc mıknatıslar 57
Şekil 3.17. Mıknatısların rotor bariyerlerine yerleşimi 57
Şekil 3.18. Motor parçalarının birleştirilmesi 57
Şekil 3.19. Parçaların birleştirilmesi a) Rotoun gövdeyle birleştirilmesi b) Rotor ve statorun birleştirilmesi c) İmalatı tamamlanan motor prototipi 58
Şekil 3.20. Test düzeneği 59
Şekil 3.21. 13 Nm yükte elde edilen akım ve gerilim değerleri 60
Şekil 3.22. 20 Nm yükte elde edilen akım ve gerilim değerleri 60
Şekil 3.23. 26 Nm yükte elde edilen akım ve gerilim değerleri 61
Şekil 3.24. Farklı yüklerde tork, güç ve hız 62

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1. EA'lardaki motorlar (Colla, 215; Luthra, 2017) 9
Tablo 2.1. Sınır koşulları ve başlangıç özellikleri 24
Tablo 2.2. Faydalanma katsayıları (CA)..... 27
Tablo 2.3. Farklı SM'lerin karşılaştırması..... 32
Tablo 2.4. Stator oluk parametreleri 36
Tablo 2.5. Rotor parametrelerinin alt ve üst sınırları..... 41
Tablo 2.6. Bariyer sayılarına göre çıkış torku ve tork dalgalanma değerleri..... 45
Tablo 3.1. Tasarlanan motorun sabit güçte ve farklı hızlarda temel karakteristikleri. .. 52
Tablo 3.2. Benzetim ortamında farklı yüklerde çalışma test sonuçları..... 53
Tablo 3.3. Benzetim ve Deneysel testlerdeki farklı yüklerde çalışma test sonuçları 61

1. GİRİŞ

Geç Bakır Çağı'nın (M.Ö.3600/3500-3000/2800) en önemli buluşu tekerleğin ve tekerlekli araçların icadı idi (Bondar, 2018). Bu çağlardan beri gerek yüklerin gerek insanların çok uzaklara taşınması ihtiyacı hep bir gereksinim olmuştur. Tekerleğin icadından sonra arabanın gelişiminin gerçekleştiğini söylemek doğru olur. Araştırmalara baktığımızda; otomobil fikri Amerika'da değil Avrupa'da ortaya çıkıyor. 18.yy'da çeşitli mucitler, otomobilleri buharla seyahat eden motorlarla test etmeye başladı. Buharlı motorlarla yapılan testler aslında Fransız Nicolas Cugnot'un buhar motoruyla çalışan bir traktör tasarladığı, inşa ettiği ve çalıştırdığı 1769 yılına kadar uzanıyor (Nyamwange ve Nyamwange, 2014). Daha sonra da otomatikleşen süreçlerin gelişimine öncülük edildiği görülmektedir. Her dönemde otomobil üzerindeki yeniliklerin yapıldığı ve çalışıldığı süreçler görülebilir. En son kentleşme süreçlerine gelindiğinde otomobilin artık hem insanlara hem de mallara hizmet eden bir ulaşım ihtiyacı olduğu söylenebilir. Toplu taşımalardan günümüzde her evin hatta evdeki tüm bireylerin kişisel araçları olmaya başlamıştır. Günümüzde mevcut olan bu araçlar yakıt olarak hala fosil yakıtlarla çalışmaktadır. Piyasada otomobillerin artması, fosil yakıtların da kullanımını arttırmıştır ve bu da ciddi bir hava kirliliği yaratmaktadır. Hava kirliliği oluşturmasının yanında fosil yakıtlar hızla tükenmektedir. Bu nedenle kullanımları pek sürdürülebilir değildir.

Son zamanlarda, birçok sebeplerden dolayı elektrikli araçların (EA) popülerliği arttı. Bu sebeplerden birisi de sera gazı (SG) emisyonlarını azaltmaya yönelik olmasıdır (Fuad ve ark., 2017). Ozon tabakası üzerindeki etkisi nedeniyle de gaz emisyonunun önemli ölçüde azaltılması zorunlu hale gelmiştir (Tahir ve ark., 2019). Aynı zamanda fosil yakıtların azalmasıyla birlikte yeni alternatif enerji kaynakları arayışına gidilmiştir. Fosil yakıtlarını kullanan sektörlerden birisi de otomotiv sektörüdür (Tümbek ve Kesler, 2019). Enerji kıtlığı ve çevre kirliliğinin oluşmasıyla, yeni EA'ların araştırılması hem hükümetlerden hem imalatçılardan giderek daha fazla ilgi görmektedir (Cai ve ark., 2011).

Otomotiv sektöründe benzinli araçlardan çok EA'lar ya da hibrit elektrikli araçlar (HEA) üzerine çalışmalar yoğunlaşmıştır. Elektrik makinalarında yüksek performansın elde edilmesi aynı zamanda maliyetlerin düşmesiyle birlikte, otomotiv endüstrisinde EA'lar üzerinde çalışmalar artmıştır (CheshmehBeigi ve Behroozi, 2020).

Bir EA'da kullanılacak olan elektrikli bir motorda aranan özellikler; kalkış anında veya yokuşa tırmanma anında düşük hızlarda yüksek tork elde edilmesi, aynı zamanda seyir anında yüksek hızlarda yüksek güç elde edilmesidir. Bununla beraber EA'da iyi bir sürüş gerçekleştirmek için tork dalgalanması ve akustik gürültünün minimum olmasıdır (Guan ve ark., 2016).

EA'larda kullanılan motorlar iç rotorlu ve dış rotorlu olarak tasarlanmıştır. İç rotorlu motorda mekaniksel diferansiyeller ve dişli sistemleri kullanılırken, dış rotorlu motor direkt teker içine monte edilmiştir (Tümbek ve Kesler, 2019).

1.1. Tezin Amacı ve Önemi

Son yıllarda gerek otomobil sektöründeki araştırmalar gerekse akademik ortamdaki araştırmalar incelendiğinde EA'lar ve HEA'lar üzerine çalışmalar yapıldığı görülmektedir. Özellikle otomobilin itme gücünü sağlayan elektrik motorları ve sürücüleri üzerine çalışılmaktadır. Bu otomobillerde bulunan elektrik motorları incelendiğinde doğru akım (DA) motoru ve alternatif akım (AA) motorlarının kullanıldığı görülmektedir. Bu motorlarda aranan ortak özellikler yüksek tork, yüksek güç yoğunluğu ve yüksek verimdir. Bunun yanında tork dalgalanmasının minimum olmasını sağlamaktır. Üretici tarafından bakıldığında ise; hafif olması, maliyetinin düşük olması ve kapladığı yerin az olmasıdır. Bu özelliklere sahip elektrik motorlarından birisi de özellikle son zamanlarda üzerinde çalışılan senkron relüktans motor (SynRM) çeşididir.

Bu tezin amacı SynRM'nin dezavantajlarını ele alıp rotor topolojisi üzerine sabit mıknatısları yerleştirerek bu dezavantajların iyileştirilmesini sağlamaktır. Aynı zamanda uygun bir optimizasyon işlemi gerçekleştirilip SynRM'lerde oluşan tork dalgalanmasını minimuma indirip bir EA için uygun üç fazlı dış rotorlu sabit mıknatıslı senkron relüktans motor (SMSynRM) tasarlamaktır. Tasarım işlemi için 2-boyutlu sonlu eleman yöntemi (SEY) kullanılmıştır. Elektrik motorlarının tasarımı karmaşık bir yapıda olduğu için uygun tasarım programları kullanılmaktadır. Çalışmada ANSYS Maxwell programı kullanılmıştır. Tasarım işleminde belli bir algoritma çıkarılıp sırasıyla bu işlemler gerçekleştirilmiştir. Öncelikle EA tekerleği içinde hub motor olarak kullanılacak üç fazlı dış rotorlu SMSynRM tekerlek boyutuna göre rotor çapı, stator çapı ve paket boyu belirlenmiştir. Daha sonraki aşamada uygun oluk/kutup kombinasyonu belirlenmiştir. Tasarımda optimum 48 oluk / 8 kutup kombinasyonu seçilmiştir. Daha sonraki işlemde

sargı yapısı seçilmiştir. Tork dalgalanması etkisini başta düşürmek için sarım tipi olarak çift katlı dağıtılmış sargı kullanılmıştır. Sonraki aşamada en önemli olan kısım rotor topolojisidir. Bu topolojide bariyer sayısı ve bariyerlere yerleştirilecek sabit mıknatıs (SM) yapısı ve boyutlandırılması işlemi gerçekleştirilmiştir. Burada mıknatıslar tarafından üretilen manyetik akı tarafından elde edilen elektromanyetik tork incelenmiş ve başta belirlediğimiz 12.73 Nm tork elde edilemeye çalışılmıştır. Bu tork değerini etkileyen tasarlanan motordaki L_d ve L_q, d-eksen ve q-eksen indüktans değerleridir. Tork üretiminde indüktans değerlerinin farkı etki edeceği için L_d indüktans değeri büyük, L_q değeri de küçük olmalıdır. L_d indüktans değerinin büyük olmasını sağlayan rotor topolojisinde uygun bariyerlerin seçimidir. Tasarımda üç bariyerli yapı seçilmiştir. İstenilen tork elde edildikten sonra tork dalgalanma değerini minimum değere düşürmektir. Bunu da rotor topolojisinde belirlediğimiz beş parametreye bağlı olarak uygun optimizasyon işlemi gerçekleştirerek tork dalgalanma değeri optimum %6.96 değerine düşürülmüştür. Daha sonra verim incelendiğinde rotor yapısında sargı olmayışı aynı zamanda sargı yerine manyetik akıyı sağlayan mıknatısların olması bu motorun verimini %91.30'a çıkarmıştır. Gerekli tasarım işlemi bittikten sonra tasarımı manyetik akı çizgileri ve manyetik alan dağılımı şekilsel olarak incelenmiştir. Şekillerden de düzgün dağılımı elde edildiği görülmüştür. Sonraki aşama 2-boyutlu tasarım ve analiz gerçekleştirdikten sonra motorun imalatı gerçekleştirilmiş ve gerekli performans testleri yapılmıştır. Tasarlanan üç fazlı dış rotorlu SMSynRM motorun bir EA'da kullanılabileceği gerek tasarım analizinde ve gerekse test sonuçlarından görülmektedir.

1.2.Literatür Araştırması

(Pellegrino ve ark., 2012b), EA'ların yüksek tork yoğunlukları ve verimlilikleri için sabit mıknatıslı senkron motorları (SMSM) kullanmışlar, SMSM, iç sabit mıknatıslı senkron motor (İSMSM) ve yüzey montajlı sabit mıknatıslı senkron motor (YMSMSM) arasında dönüştürücü değerlerinde performans açısından bir karşılaştırma yapmışlardır. (Pellegrino ve ark., 2012a), EA'lar için, aynı paket boyu ve invertör boyutlarında olan asenkron motor, YMSMSM ve İSMSM'yi çıkış gücü ve verimlilik açısından karşılaştırmışlardır. (Smaka ve ark., 2010), HEA'lar için yeni 14 rotor kutbu ve 8 stator kutbu olan anahtarlamalı relüktans motor (ARM) tasarlamışlar. Bu tasarımın akı bağı ve

statik tork karakteristiklerinin 2-boyutlu sonlu eleman analizi (SEA) kullanarak rotor pozisyonu ve stator akımlarını hesaplamışlardır.

(Rahim ve ark., 2006), bir EA'yı doğrudan sürmek için tekerlek içi eksenel akılı fırçasız DA motoru tasarlamışlardır. Tasarlanan motor eksenel akılı iç statorlu-oluksuz yapıdır. Ayrıca yüksek tork yoğunluğu elde etmek ve düşük hızda dönüşü sabitlemek için 16 rotor kutbu seçmişlerdir. Ansoft Maxwell 3D'de elektromanyetik benzetim SEY kullanarak simüle etmişler ve daha sonra bu motoru imal edip test etmişlerdir.

(Malan ve ark., 1998), HEA'lar için küçük, kompakt SynRM sürücünün kullanımını tanımlamışlardır. 28 kW gücünde relüktans makinayı 4.5:1 diferansiyel dişli oranında seri HEA olan bir Sedanın ön tekerleğini sürmek için kullanmışlar.

SynRM tasarımında rotor topolojisinde kutup başına birkaç akı bariyeri yerleştirilirse rotorun yapısı basit ve sağlam olur aynı zamanda düşük kayıplarda ve yüksek sıcaklıklarda düzgün çalışabilir. Fakat SynRM yüksek tork dalgalanması ve düşük güç faktöründen dolayı dezavantaja sahiptir (Ibrahim ve ark., 2017). Bu SynRM'nin dezavantajını oluşturan düşük güç faktörünü iyileştirmek ve düşük tork yoğunluğunu artırmak ve aynı zamanda verimini artırmak için rotor topolojisindeki akı bariyerlerine SM yerleştirilerek SMSynRM elde edilir (Morimoto ve ark., 2014). SM'ler SynRM'nin rotor akı bariyerlerine kısmi olarak yerleştirildiğinden dolayı, maliyet SMSM'lerde kullanılan SM maliyetinden daha düşük olacaktır.

SMSynRM, son yıllarda araştırmacılardan büyük ilgi gördü. (Wu, ve ark., 2018) Ferrit SMSynRM'ye daha az miktarda nadir toprak SM ekleyerek, ferrit malzemenin düşük maliyetli avantajının korunduğu yeni bir tür hibrit SM destekli SynRM önermişlerdir. (Liu ve ark., 2017), bir SynRM'nin rotorunun içine ferrit mıknatıslar yerleştirerek 3 Hp, 4 kutuplu bir SMSynRM laboratuvar prototipi tasarlamışlar ve çeşitli yükleme koşulları altında deneysel ölçümler gerçekleştirmişlerdir. (Aghazadeh ve ark., 2019), q-ekseni boyunca yalıtım oranı olarak adlandırılan ve manyetik relüktans konseptine dayanan makroskopik bir tasarım parametresi kullanılarak, SynRM'nin basit ve hızlı bir tasarım prosedürü tanıtmışlar, daha sonra kalıcı mıknatısları rotor gövdesine yerleştirilerek makinenin performans artışını araştırmışlardır. (Mohammadi ve Mirimani, 2020), SM'lerin manyetik akısının kullanımını artırmak ve ayrıca SMSynRM'de tork

bileşenlerinin (relüktans ve manyetik) tam kullanımını artırmak amacıyla SMSynRM için yeni bir topoloji sunmuşlardır.

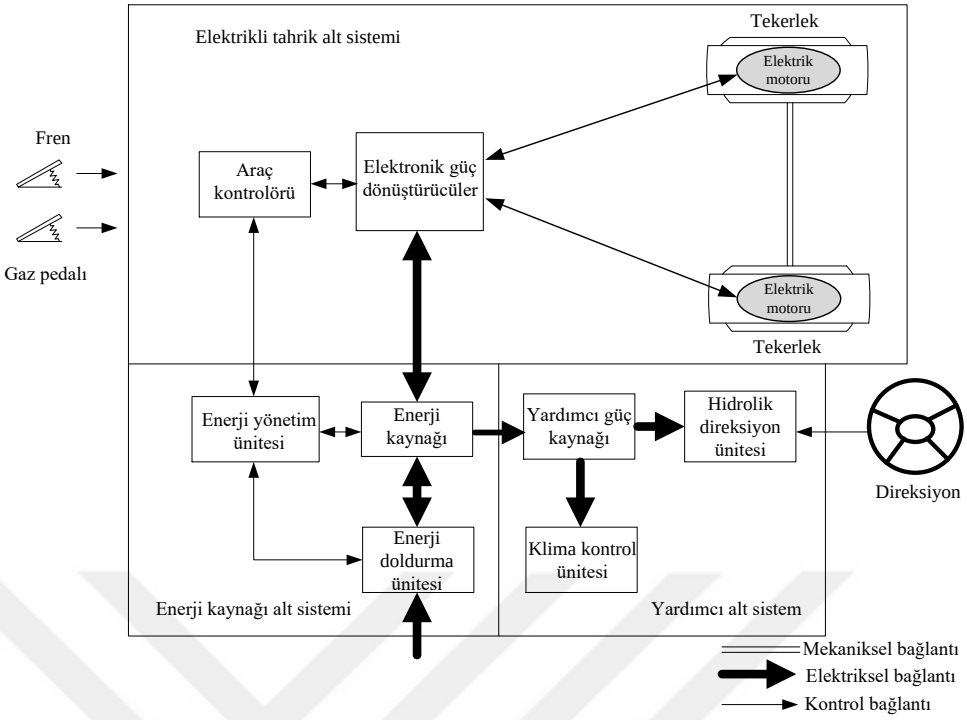
(Bonthu ve ark., 2017), EA'lar ve HEA'lar gibi çekiş uygulamaları için iç rotorlu ARM ve iç sabit mıknatıslı motorları için bir alternatif olarak optimum beş fazlı nadir topraksız harici rotorlu ferrit destekli senkron relüktans motoru (HRFDSynRM) önermişlerdir.

(Bianchi ve ark., 2016), EA'daki çekiş uygulamaları için, SM'li veya SM'siz bir SynRM analizi yapmışlardır. Rotor tasarımının SynRM performansı üzerindeki etkisini deneysel test sonuçlarıyla göstermişlerdir.

(Islam ve ark., 2021), yüksek çıkıntı oranına sahip yeni bir beş fazlı harici rotorlu ferrit kalıcı mıknatıs destekli senkron relüktans motoru (Fe-PMaSynRM) tasarlamışlardır.

1.3. Elektrikli ve Hibrit Elektrikli Araçlarda Kullanılan Elektrik Motorları

EA, elektrikli itiş gücü içeren bir karayolu aracıdır. Bu geniş tanım dikkate alındığında, EA'lar bataryalı elektrikli araçları (BEA'lar), HEA'ları ve yakıt hücreli elektrikli araçları (YHEA'lar) içerebilir. EA, geniş ve karmaşık yönleri kapsayan çok disiplinli bir konudur. Bununla birlikte, şasi ve gövde teknolojisi, tahrik teknolojisi ve enerji kaynağı teknolojisi gibi temel teknolojilere sahiptir (Chan, 2002). Bir aracın sürüş performansı genellikle hızlanma süresi, maksimum hızı ve tırmanma kabiliyeti ile değerlendirilir. EA aktarma organı tasarımında, uygun motor gücü oranı ve aktarım parametreleri performans özelliklerini karşılamak için temel hususlardır (Ehsani ve ark., 2005). Şekil 1.1'de modern bir elektrikli aktarma sistemi gösterilmiştir. Aktarma sistemi üç ana alt sistemden oluşur: Elektrikli tahrik alt sistemi, enerji kaynağı alt sistemi ve yardımcı alt sistem. Elektrikli tahrik alt sistemi; bir elektrik motoru, bir güç elektroniği dönüştürücü ve bir denetleyiciden oluşur (Taghavi, 2015; Chan, 2002).



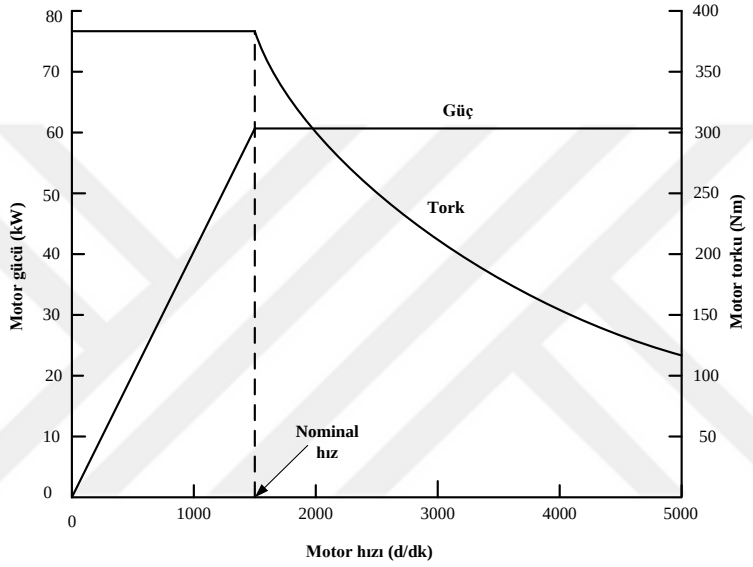
Şekil 1.1. Modern bir EA sisteminin genel şekli

Genelde EA ve HEA sistemlerinde kullanılan elektrik motorlarında olması gereken özellikler (Zeraoulia ve ark., 2006; Rahman ve ark., 2000):

- Yüksek anlık güç ve yüksek güç yoğunluğu
- Düşük hızda yüksek tork ve yüksek hızda yüksek güç
- Düşük tork dalgalanması
- Geniş hız aralığı
- Hızlı dinamik yanıt
- Tam hız aralığında yüksek verimlilik
- Rejeneratif kesme modunda yüksek verimlilik
- Farklı çalışma modlarında güvenilirlik ve sağlamlık
- Uygun maliyet
- Dönüştürücü boyutu
- Termal soğutma

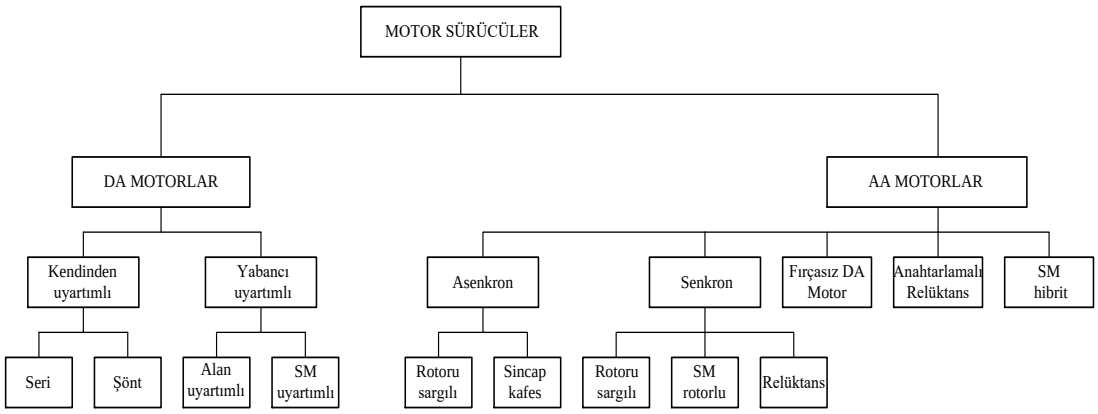
Diğer taraftan, EA'lar için elektrik motor sürücülerinin seçimi genellikle üreticiler tarafından üç baskın faktöre göre belirlenir: maliyet, ağırlık ve boyut. Bu nedenle, uygun maliyetli, verimli ve güçlü bir elektrik makinesi, EA'lar için güçlü bir alternatif olarak kabul edilebilir (Taghavi, 2015).

Değişken hızlı elektrik motoru sürücüleri genellikle Şekil 1.2'de gösterilen özelliklere sahiptir. Düşük hız bölgesinde (nominal hızdan daha az) motorun sabit bir torku vardır. Yüksek hız bölgesinde (nominal hızdan daha yüksek) motorun sabit bir gücü vardır. Düşük hızlı çalışmalarda, akı sabit tutulurken elektronik dönüştürücü üzerinden hızın artmasıyla motora uygulanan gerilim artar. Nominal hız noktasında, motor gerilimi kaynak gerilime ulaşır. Nominal hızdan sonra, motor gerilimi sabit tutulur ve artan hız ile hiperbolik olarak düşen akı zayıflatılır. Bu nedenle, torku da artan hızda hiperbolik olarak düşer (Ehsani ve ark., 2005).



Şekil 1.2. Değişken hızlı elektrik motorların karakteristik eğrisi

Şekil 1.3'te EA ve HEA uygulamalar için kullanılan elektrik motorlarının sınıflandırılması verilmiştir.



Şekil 1.3. EA ve HEV uygulamalar için elektrik motorların sınıflandırılması

Elektrik motorları genel olarak DA ve AA motorları olarak sınıflandırılır. DA motoru, bir DA kaynağından beslendiğinde elektromanyetik tork üretir ve AA motor, bir AA kaynağından beslendiğinde elektromanyetik tork üretir. Yapım ve çalışma prensiplerinde benzerlikler olsa da performans özellikleri farklıdır. Genel olarak DA motoru, nominal hızın hem üstünde hem de altında geniş bir aralıkta daha yüksek başlangıç torku ve hız kontrolü üretme avantajına sahiptir. Öte yandan, AA motoru genellikle düşük üretim maliyeti ve düşük bakım sunar, ayarlanabilir hızlı sürücüler için daha uygundur ve çok geniş bir hız aralığı için tasarlanabilir (Islam, M.Z., 2019).

Tarihsel olarak, bir DA motor sürücüsü, basit hız kontrolü ve ideal tork-hız gereksinimleri sağladığından, EA'larda belirgin bir şekilde kullanılmıştır (Luthra, 2017).

DA motor sürücülerinde komütasyonu sağlayan fırçaların varlığından dolayı, bu motorlar düşük verime ve düşük güvenilirliğe sahiptir. Ayrıca bakım gerektirmektedir, bu da maliyeti arttırmaktadır. Güç elektroniği ve dijital mikroişlemci kontrol teknolojisinin varlığıyla diğer gelişmiş motor sürücüleri DA motorunun yerini almıştır. Bunlar; FDAM, asenkron motor, ARM ve SynRM'dir (Ehsani, ve ark, 2007).

Hem EA'larda hem de HEA'larda tekerlek içine yerleştirilen motor olarak asenkron motor, FDAM, YMSMSM, İSMSM ve ARM tasarlanmıştır (Bonthu ve ark., 2017).

SMSM'lerde kullanılan SM'ler yüksek enerji yoğunluğundan dolayı tercih edilmiştir, fakat SM'lerin maliyeti bir dezavantaj oluşturmuştur (Wu ve ark., 2018). Asenkron motorlar, güvenilir, sağlam ve bakımlarının az olmasından dolayı çekişli araçlarda kullanımı uygundur. Fakat verimlerinin ve güç katsayılarının küçük olması, dönüştürücü kullanım oranının az olması (Zeraouila ve ark., 2005), aynı zamanda, başlangıç akımlarının yüksek olmasından dolayı batarya süresi için dezavantaj oluşturmuştur (Huynh ve Hsieh, 2018). ARM, yüksek verimli, düşük maliyetli, basit ve sağlam yapıya sahiptir, kontrolü basittir ve sabit bir güç aralığında çalışabilirler. Fakat, yüksek gürültü, titreşim ve tork dalgalanmasına sahiptir (Anekunu ve ark., 2013). FDAM'ler yüksek verim ve yüksek güç yoğunluğuna sahiptirler. Fakat sabit güç bölgesinde çalıştıkları için genişletilmiş hız aralıklarını sınırlamaktadır (Zeraouila ve ark., 2005).

Tablo 1.1'de farklı EA modelleri ve kullanılan elektrik motor çeşitleri verilmiştir.

Tablo 1.1. EA'lardaki motorlar (Colla, 215; Luthra, 2017)

Elektrikli Araç (EA) modelleri	Elektrikli Araç Motorları
Fiat Panda Elettra	Seri DA motor
Mazda Bongo	Şönt DA motor
Conceptor G-Van	Yabancı uyartımlı DA motor
Suzuki Senior Tricycle	SMDA motor
Fiat Seicento Elettra	Asenkron motor
Ford Think City	Asenkron motor
GM EV1	Asenkron motor
Honda EA Plus	SMSM
Nissan Altra	SMSM
Toyota RAV4	SMSM
Nissan Leaf	SMSM
Chloride Lucas	SynRM
Toyota Prius (2005)	FDAM
Honda Civic	FDAM

Son yıllarda yapılan çalışmalarda HEA'lar ve EA'lar için SynRM ve SMSynRM rotor tasarımı üzerinde durulmuştur (Goncalves ve ark., 2014). Günümüzde, güç elektroniği dönüştürücülerindeki son gelişmeler ve modern teknolojiler sayesinde elektrikli sürücüler, SynRM ve özellikle SMSynRM, İSMSM için de önemli bir alternatif olarak sunulmuştur (Aghazadeh ve ark., 2019). Bu motorlarda aranan özelliklerde; hızlı tork cevabı ve güç yoğunluğu, geniş hız aralığı, yüksek verimlilik, yüksek güvenirlilik ve düşük maliyetli olmasıdır (Huynh ve Hsieh, 2018).

Son zamanlarda, dış rotorlu SMSynRM, yüksek tork yoğunluğu, düşük tork dalgalanması ve düşük harmonikli zıt elektromotor kuvvet (EMK) gibi durumlar da dahil olmak üzere popülerlik kazanmıştır (Bonthu ve ark., 2015).

1.4. Tezin Kapsamı

Tezin çalışma organizasyonu şu şekilde yapılmıştır: ikinci bölüm olan materyal ve yöntem kısmında SynRM ve SMSynRM hakkında bilgiler verilmiştir. Ayrıca dış rotorlu

SMSynRM'nin bilgisayar destekli tasarım aşamaları, 2-boyutlu sonlu eleman analizi kullanılarak ANSYS Maxwell programında belirlenen algoritma doğrultusunda tasarım ve eniyileme işlemler, açıklanmıştır. Üçüncü bölümde tasarlanan motorun benzetim ortamında analizleri, imalat aşaması ve imalatı gerçekleştirilen dış rotorlu SMSynRM'nin performans testleri anlatılmış ve test sonuçları değerlendirilmiştir. Dördüncü bölüm olan sonuç kısmında ise hem benzetim ortamında yapılan analizlerden hem de performans test aşamasında elde edilen değerler değerlendirilerek yorumlanmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde SynRM ve SMSynRM tanıtılmış, aynı zamanda SynRM ile SMSynRM arasında karşılaştırma yapılmıştır. Ayrıca SynRM'nin eşdeğer devresi çıkartılıp, matematiksel ifadeleri verilmiştir. Daha sonra bu motorların tasarımında kullanılan stator ve rotor yapıları ile bunların çeşitleri üzerinde durulmuştur. Ayrıca SMSynRM'nin ANSYS Maxwell ortamında tasarımı ve belirlenen algoritmaya göre nihai modeli elde edebilmek için gerçekleştirilen analizlerle ilgili bilgiler verilmiştir.

2.1. SynRM ve SMSynRM

Tork üretmek için relüktansların farklılıklarını kullanma ilkesi 160 yılı aşkın süredir bilinmektedir. Dönen manyetik alanın 1887'de Tesla tarafından keşfedilmesinden önce, ilk relüktans motor, günümüzde ARM olarak bilinen çift çıkıntılı SynRM'ye benziyordu (Niazi, 2004). SynRM, tork üretmek için relüktans kavramını kullanan bir makinadır. Bu kavram 1830'lara kadar izlenebilir. Ancak, Kostko'nun 1923'teki makalesi ile SynRM'nin temelleri tanıtıldı. Makinenin arkasındaki ana fikir, belirginlik yaratmak için anizotropik bir rotor sunmaktır. Statora güç verildiğinde, statordaki sargı bir elektromanyetik alan oluşturur ve anizotropik rotorun minimum relüktans ekseni bir alan distorsiyonu oluşturarak stator alanıyla hizalanma eğilimine sahip olacaktır (Yammine, 2015).

SynRM, bir AA makinesidir. Asenkron makineye benzer yapıda ve sağlamdır (Betz, 1993). SynRM'nin statoru, asenkron motorun statoruna benzerdir ve geniş ölçüde farklı manyetik relüktansa sahip iki eksen sağlamak üzere oluşturulmuş bir rotora sahiptir (Cruickshank ve ark., 1966). Yapı olarak basittir ve diğer AA makine türlerine kıyasla üretimi daha ucuzdur. Özellikle, invertör beslemeli SynRM'ler, rotor sargılarının olmaması nedeniyle oldukça basit kontrolörler gerektirir. Bununla birlikte, yüksek çıkıntı oranları (L_d/L_q) ve yüksek L_d-L_q değerlerine ulaşılmadığı sürece, tork yoğunluğu, güç faktörü ve verimlilik düşüktür (Boldea ve ark., 1994). SynRM sürücülerde geniş sabit bir güç çalışması ve yüksek güç faktörü elde etmek için, büyük bir çıkıntı oranı (L_d/L_q) gereklidir. Ancak bu tür bir tasarım zordur. SynRM'nin çalışma performansını iyileştirmenin bir yolu, rotora uygun miktarda SM eklemektir (Kim ve ark., 2009). Rotor

akı bariyerlerine yerleştirilen SM'lerin hacmi yüksüz akı bağını etkilerken, akı bariyerlerin sayısı anizotropiyi etkiler.

SMSynRM, bir SynRM ve SMSM arasında hibrit bir motordur. Bu nedenle, SM destekli SynRM'nin ürettiği tork iki farklı kaynaktan gelir. Torkun bir kısmı, bu makinenin asimetrisinden, bir kısmı da mıknatıslardan gelen alan ile statorun üç fazlı akım sistemi tarafından oluşturulan alanın etkileşiminden üretilir (Dulanto, 2015).

SMSynRM'nin topolojisi SynRM'nin akı bariyerlerine sabit mıknatısların yerleştirilmesiyle elde edilir ve böylece bu makinenin indüktansları arasındaki farkı dolaylı olarak artırır (Ashkezari ve ark., 2017). SMSynRM'nin rotorunun geometrik tasarımında maksimum L_d ve minimum L_q elde edildiğinde SMSynRM de maksimum performans elde edilir. Yani, daha yüksek çıkıntı oranı ve daha yüksek tork elde edilecektir (CheshmehBeigi ve Behroozi, 2020). SMSynRM hem manyetik tork hem de relüktans tork üretir. Bu torklar, rotor topolojisindeki akı bariyer şekillerine bağlıdır. Akı bariyer şekilleri yay şeklinde ya da dikdörtgen şekilde olabilir (Ashkezari ve ark., 2017).

SynRM gibi SMSynRM de diğer SM'li makinelere kıyasla daha düşük maliyetli ve sağlam bir yapıya sahiptir ve geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılabilir. Yüksek performanslı SMSynRM çeşitli uygulamalar için mıknatıs boyutunun ve rotor geometrisinin optimizasyonu ile elde edilir (Vartanian, 2014).

2.1.1. SynRM ile SMSynRM karşılaştırılması

SynRM ve SMSynRM arasında karşılaştırma yapılırsa (Islam, 2019);

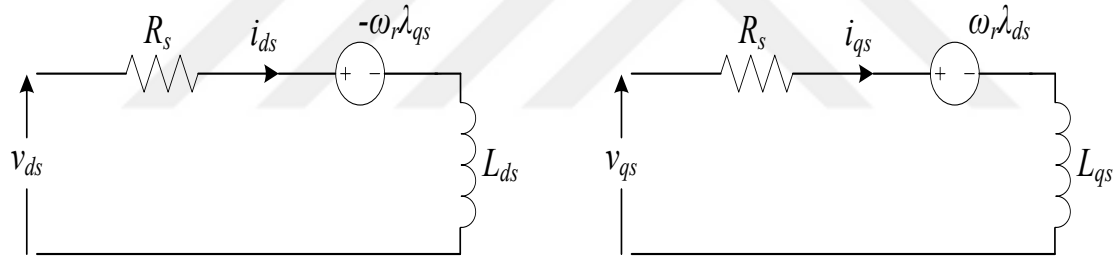
a) SMSynRM 'de kullanılan kalıcı mıknatısın maliyeti düşüktür, SynRM 'de sabit mıknatıs kullanılmaz.
b) SMSynRM 'nin güç yoğunluğu SynRM'den yüksektir. SMSynRM 'nin sabit güç hız aralığı da SynRM'den yüksektir. Bu özellikler, araç uygulamaları için çok önemlidir.
c) SMSynRM'de SM'lerin gömülü olması, SynRM'ye kıyasla tork dalgalanmasını en aza indirmeyi sağlar.
d) SynRM ve SMSynRM tork üretimi için rotor topolojisini kullanır. SMSynRM ise bunun yanında nadir toprak sabit mıknatıs kullanarak güç yoğunluğu da sağlar.

e) SMSynRM'nin geometrik yapısı SynRM'den daha karmaşıktır. Karmaşık tasarımlar SMSynRM'nin tasarım ve optimizasyon sürecinde daha yüksek derecede avantaj sağlar.
f) SMSynRM tasarımları, SynRM'ye kıyasla daha yüksek güç faktörü elde etmek için optimize edilebilir.

2.2. SynRM'nin Eşdeğer Devresi ve Matematiksel Denklemleri

SynRM'nin stator sargısı sinüzoidal dağılımlı olduğu için, hava aralığı akı harmonikleri ihmal edilebilir. Böylece, SynRM'nin davranışını tanımlayan eşitlikler geleneksel alan sargılı senkron makinayı tanımlayan geleneksel eşdeğer devrelerden türetilebilir. Bu nedenle, alan uyartım ortadan kaldırılarak, SynRM'nin d-q eksen dönüşümü kolayca modellenebilir.

Şekil.2.1'de SynRM'nin eşdeğer devresi verilmiştir. Bu eşdeğer devrede, doyum ve demir kayıpları ihmal edilmiştir.



Şekil 2.1. SynRM eşdeğer devresi

SynRM'nin d ve q ekseninde gerilim ifadeleri Denklem (2.1) ve (2.2)'de verilmiştir.

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} - \omega_r \lambda_{qs} \tag{2.1}$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} + \omega_r \lambda_{ds} \tag{2.2}$$

v_{ds} ve v_{qs} stator geriliminin d-eksen ve q-eksen bileşenleridir. i_{ds} ve i_{qs} stator akımın d-eksen ve q-eksen bileşenleridir. λ_{ds} ve λ_{qs} stator akılarının d-eksen ve q-eksen bileşenleridir. R_s stator sargı direncidir. ω_r rotor açısal hızdır.

Stator d ve q akı bileşenleri Denklem (2.3)'te ve (2.4)'te verilmiştir.

$$\lambda_{ds} = (L_{md} + L_{ls})i_{ds} = L_{ds}i_{ds} \tag{2.3}$$

$$\lambda_{qs} = (L_{mq} + L_{ls})i_{qs} = L_{qs}i_{qs} \tag{2.4}$$

Burada, L_{md} ve L_{mq} d-eksen ve q-eksen mıknatıslanma indüktanslarıdır. L_{ls} stator kaçak indüktansıdır.

Çıkıntı oranı Denklem (2.5)'de verilmiştir.

$$\xi = \frac{L_d}{L_q} \tag{2.5}$$

SynRM'yi tasarlamak ve performansını değerlendirmek için, en önemli parametrelerini ve özelliklerini doğrulamak oldukça önemlidir. Esas olarak tasarım sürecinde hedeflenen bu parametreler ve özellikler aşağıda gibi özetlenebilir (Taghavi, 2015).

- Elektromanyetik tork
- Güç Faktörü
- Verim
- kVA başına tork
- Tork dalgalanması
- Hız aralığı (alan zayıflatma aralığı)
- Demir kayıpları

SynRM'de elektromanyetik tork, hava boşluğu akısı ile karşılık gelen mıknatıslanma akımı arasındaki etkileşimle üretilir. Bir SMSynRM'de, SM akısı oldukça düşüktür. Sonuç olarak, torkun çoğu SMSynRM'nin yüksek anizotropi rotor yapısından gelir (Dulanto, 2015). Üretilen elektromanyetik tork Denklem (2.6)'da verilmiştir.

$$T_e = \frac{3}{2}p(L_{ds} - L_{qs})i_{ds}i_{qs} \tag{2.6}$$

Burada, p kutup sayısıdır. d-eksen ve q-eksen indüktans ifadeleri Denklem (2.7) ve (2.8)'de verilmiştir.

$$L_{ds} = L_{ld} + L_{md} \tag{2.7}$$

$$L_{qs} = L_{lq} + L_{mq} \tag{2.8}$$

Çıkıntı oranı (ξ) ne kadar büyükse üretilen tork o kadar yüksek olur (Chau, 2015). Segmental rotorlar için L_d/L_q oranının yaklaşık 6-7 olması gerekir. Eksenel lamine edilmiş rotorlar (ALA) 9-12 olması gerekir (Boldea ve ark, 1994).

Ayrıca bir elektrik makinesindeki çıkış torku Denklem (2.9)'daki gibi tanımlanabilir:

$$T_{çıkış}(i_s, \theta_r, \lambda_{pm}) = T_{rel}(i_s, \theta_r) + T_{mag}(\theta_r, \lambda_{pm}) + T_{cog}(i_s, \theta_r, \lambda_{pm}) \tag{2.9}$$

Burada; T_{rel}, stator sargı uyartımıyla üretilen stator alanıyla hizalanma eğiliminde olan rotor alan çıkıntısından kaynaklanan relüktans torktur. T_{mag}, rotor mıknatıslarının stator alanıyla hizalanma eğiliminden kaynaklanan mıknatıs torkudur. T_{cog}, stator dişlileri ile rotor mıknatısı arasındaki etkileşimden kaynaklanan vuruntu torkudur (cogging torque).

Vuruntu torku,

$$T_{cog}(i_s, \theta_r, \lambda_{pm}) = -\frac{1}{2}\lambda_{pm}^2 \frac{dR}{d\theta_r} \tag{2.10}$$

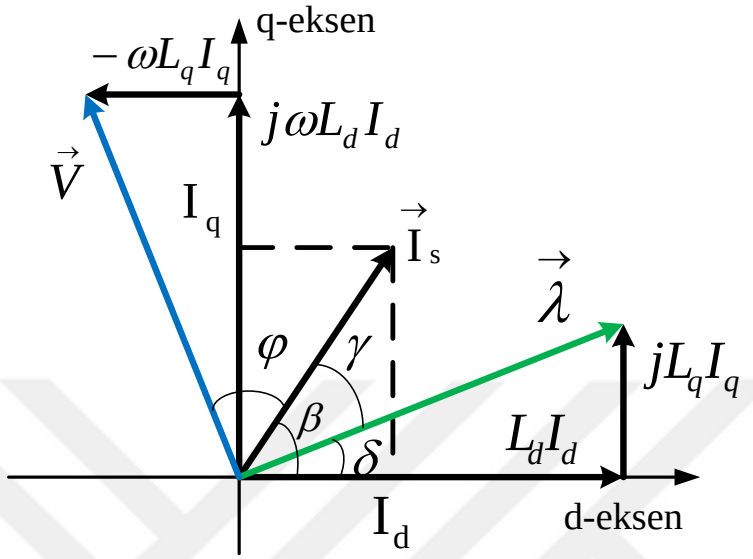
olarak ifade edilebilir.

Bu nedenle, bir elektrik makinesinin tork performansının iyileştirilmesi süreci şu adımları içerebilir (Miller ve ark., 1991, Matsuo ve Lipo, 1994, Vartanian, 2014).

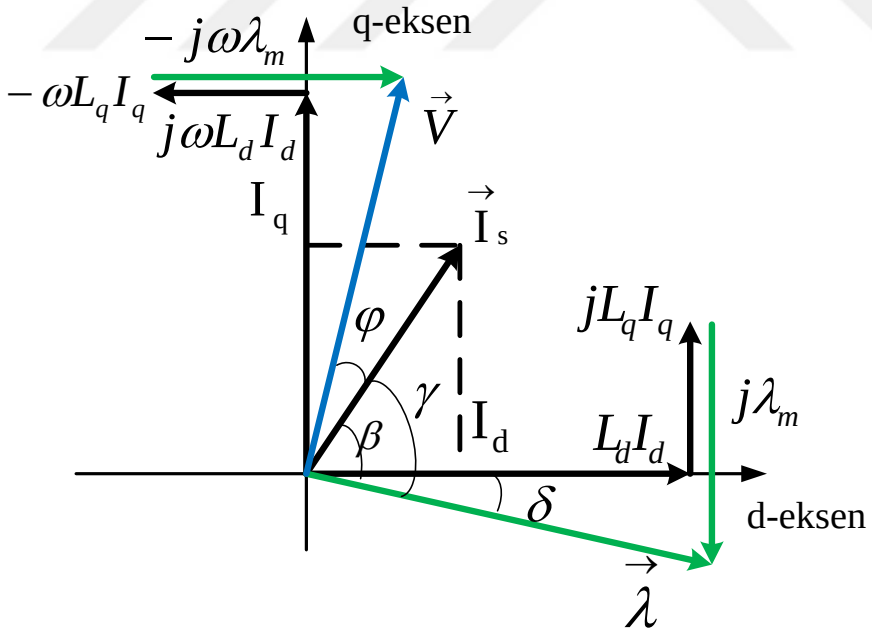
- Amper akım başına tepe torkunu maksimize etmek.
- Vuruntu torkunun en aza indirilmesi
- Tork dalgalanmasının en aza indirilmesi
- Ortalama torkun maksimize edilmesi

d-eksen ve q-eksen akım bileşenleri hemen hemen eşit olsa bile, d-eksen akı bağlantısı, q-eksen akı bağlantısından daha yüksek sonuç verir. Motor genel olarak akım

kontrollüdür. Akım, verilen akım başına maksimum torku elde edecek şekilde sağlanır (Bianchi, 2013). Şekil 2.2'de SynRM'nin vektör diyagramı, Şekil 2.3'te ise SMSynRM'nin vektör diyagramı verilmiştir.



Şekil 2.2. SynRM'nin vektör diyagramı (Moghaddam, 2007-5, Huynh ve ark., 2018)



Şekil 2.3. SMSynRM'nin vektör diyagramı

Şekil 2.2'de, gerilim fazörü, akımı geniş bir φ açısı ile yönlendirir, dolayısıyla SynRM motorlarında düşük bir güç faktörü elde edilir. Düşük güç faktörü, motorun nominal

gücüne kıyasla sürücünün volt-amper oranlarını %30 ile %40 oranında artırır. SynRM'nin düşük güç faktörünü iyileştirmek için rotor akı bariyerlerine sabit mıknatıslar yerleştirilir.

Negatif q-eksenine eklenen SM'ler tarafından oluşturulan akı bağı, akıyı L_qI_q telafi eder. Gerilim fazörü akım fazöre doğru döndürülerek aralarındaki açı φ azalır ve makinenin güç faktörünü artırır. Ayrıca SynRM'ye SM'ler eklemek, güç faktörü ve ortalama torku arttırmaktan daha fazla avantaja sahiptir. Mıknatıslar tarafından oluşturulan akının bir kısmı, q-eksenindeki L_q indüktansını azaltma etkisine yardımcı olur. L_q'daki bu azalma, torkta daha fazla artış ve L_qI_q terimi azaldığından ve L_d/L_q oranı arttığından güç faktöründe fazla artış anlamına gelir (Bianchi, 2013; Dulanto,2015).

Denklem (2.11)'da güç faktörü verilmiştir.

$$PF = \cos(\varphi) = \frac{\left[\frac{L_d}{L_q} - 1\right]}{\left[\frac{L_d}{L_q} + 1\right]} \tag{2.11}$$

Denklem (2.12)'da maksimum güç faktöründe çıkış gücü verilmiştir.

$$P_{pf(max)} = \frac{mV_s^2}{2}\left[\frac{1}{X_{qs}} - \frac{1}{X_{ds}}\right] = \frac{mV_s^2}{2}\left[\frac{1}{L_{qs}2\pi f_s} - \frac{1}{L_{ds}2\pi f_s}\right] \tag{2.12}$$

Denklem (2.13)'de maksimum çıkış torku verilmiştir.

$$T_{max} = \frac{P_{pf(max)}}{\omega} = \frac{P_{pf(max)}}{2\pi n}60 \tag{2.13}$$

Verimlilik, özellikle EA uygulamalarında SynRM tasarımının en önemli özelliklerinden biridir. Demir kayıpları, düşük hızda bakır kayıplarına kıyasla önemsiz olduğundan, verimlilik yaklaşık olarak Denklem (2.14) ve (2.15) ile ifade edilebilir (Kamper ve ark., 1996).

$$\eta \approx \frac{\omega T_e}{\omega T_e + 3R_s{I_s}^2} \tag{2.14}$$

$$\eta \approx \left(1 + \frac{1}{\frac{\omega}{3R_s}\left(\frac{T}{{I_s}^2}\right)} \right)^{-1} \tag{2.15}$$

Tork dalgalanması mekanik titreşime, akustik gürültüye ve ek demir kayıplarına neden olur. Hava boşluğundaki farklı rotor yuvası bariyerlerinin tork harmonikleri birbirini ortadan kaldırırsa, tork harmonik genliği, stator sargısına saf bir sinüzoidal akım uygulandığında akı harmonikleri ile doğru orantılıdır. Stator kanalizasyonundan kaynaklanan tork dalgalanmasının ilk harmoniği dikkate alındığında, Denklem (2.6)'daki tork denklemi Denklem (2.16)'daki gibi değiştirilebilir.

$$T_e(\vartheta) \cong \frac{3}{2}\frac{P}{2}\left(\lambda_d i_q - \lambda_q i_d\right) + \frac{1}{2}\left(i_d \frac{\partial \lambda_d}{\partial \delta} + i_q \frac{\partial \lambda_q}{\partial \delta}\right) \tag{2.16}$$

Burada d-q ekseni indüktanslarının rotor konumuna (δ) bağlı olduğunu gösterilmektedir. Bu nedenle, tork titreşimlerini temsil eden tork denklemine ek bir terim eklenir. Ancak bu terimin ortalama değeri sıfırdır. Denklem (2.17) indüktansların rotor konumuna nasıl bağlı olduğunu gösterir.

$$\begin{bmatrix}\lambda_d \\ \lambda_q\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}L_d(\delta) & L_{dq}(\delta) \\ L_{dq}(\delta) & L_q(\delta)\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_d \\ i_q\end{bmatrix} \tag{2.17}$$

Denklem (2.16) tekrar düzenlenirse Denklem (2.18) elde edilir.

$$\begin{aligned} T_e(\vartheta) \cong \frac{3}{2}\frac{P}{2}\left(\frac{3q}{\pi}\sin\frac{\pi}{3q}\right)\left(\left(L_d - L_q\right)i_d i_q + \left(\Delta L_d + \Delta L_q\right)i_d i_q \cos(3pq\delta)\right. \\ \left. - \Delta L_{dq}({i_d}^2 - {i_q}^2)\sin(3pq\delta)\right) \end{aligned} \tag{2.18}$$

Burada tork dalgalanmasının iki bileşeni olduğunu görülmektedir. Carter faktörünün ve akı bileşeninin (L_{dq}) salınımının neden olduğu ortalama torkla ($i_d i_q$) orantılı olan ilk bileşendir. Bu iki salınım, sırasıyla d-q indüktanslarının (ΔL_d, ΔL_q) önemli bir varyasyonunu oluşturur. Ancak bunlar rotorun dağıtılmış anizotropik yapısı ile ortadan

kaldırılabilir. İkinci bileşen, ΔL_{dq} sunabilen ve sonuç olarak tork dalgalanması üreten stator yuvaları etkisinden kaynaklanmaktadır.

Diğer senkronize AA sürücülere benzer şekilde, SynRM'de demir kayıpları,

1- Histerezis kayıpları,

2- Girdap akımı kayıpları (Joule kayıpları) ve

3- Yüksek frekans histerezis kayıpları olarak ayrılabilen farklı bileşenlerden oluşur.

Sabit akı yoğunluğuna sahip bir alan için, ağırlık başına toplam demir kayıpları (W / kg) her akı harmoniği için Denklem (2.19) 'de olduğu gibi hesaplanabilir.

$$\frac{P_{tot}}{kg} = K_h B_{om}^2 f_0 + \frac{\pi^2}{6} d^2 \sigma (B_m^h(h_{f1}))^2 + K_e (B_m^h(h_{f1}))^{3/2} \quad (2.19)$$

Genel olarak demir kayıplarını yeterince azaltmak için düşük kayıplı manyetik malzeme kullanmak, laminasyon kalınlığını azaltmak, stator yuvaları açıklığını (kama alanı) yarı manyetik malzeme ile doldurmak gibi çözümler kullanılmaktadır.

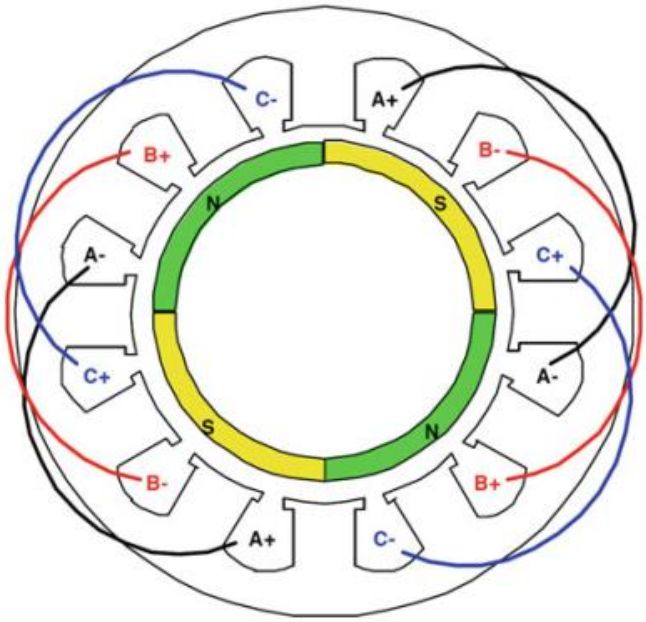
Endüstriyel uygulamalardan farklı olarak, EA'larda ve HEA'larda kullanılan motorlar genellikle çok geniş bir hız aralığı gerektirir; burada güç aktarım mekanizmasının istenen performans özellikleri tam hız aralıklarında sabit çıkış gücü sağlamaktır.

Denklem (2.6) ile (2.19) aralığındaki formüllerden L_d/L_q oranının makinenin performansı üzerindeki etkisini vurgulamaktadır ve bu da bu parametrenin makine tasarımında anahtar olarak kabul edilebileceğini göstermektedir. Belirginlik oranı, rotor yapısının anizotropik doğası ile doğrudan ilişkili olduğundan, rotor geometrisinin tanımlanması ve analizi, bu çalışmanın oldukça gerekli bir yönüdür (Boldeo ve Tutelea, 2019, Taghavi, 2015).

2.3. Stator Yapısı

1990'ların sonlarında ve 2000'lerden sonra artan araştırmalar, SM ve SynRM rotorlarından statorlarına ve sarım konfigürasyonlarına kaydı. Bu zamana kadar, araştırmacıların çoğu, asenkron motorlar da dahil olmak üzere tüm AA makineleri için yaygın olarak benimsenen dağıtılmış, üst üste yerleştirilen sargılar kullanan statora sahip makine tasarımlarına odaklandı.

Bu statorlar tipik olarak, her bir rotor kutbu, her an bitişik stator yuvalarıyla aynı fiziksel konum ilişkisine sahip olacak şekilde, kutup başına faz başına olukların (değişken q olarak belirtilir) entegre olmuş şekli ile tasarlanır. Bu tip entegre yuvalı dağıtılmış sargılı stator Şekil 2.4'te basitleştirilmiş bir şekilde gösterilmektedir.

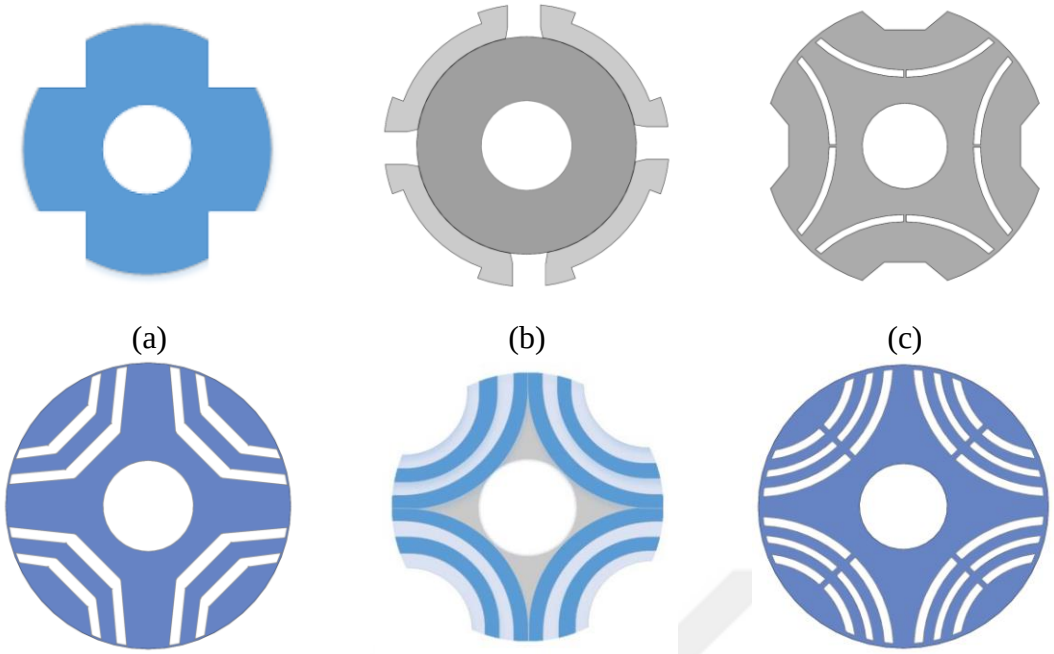


Şekil 2.4. Entegre yuvalı dağıtılmış sargılar kullanan 3 fazlı 4 kutuplu yüzey SM stator ve sargılar (Pellegrino ve ark., 2016)

2.4. Rotor Yapısı

En basit rotor tipi çıkık kutuplu tasarımdır. Bu çıkık kutuplu tasarım diğer SynRM rotor topolojilerinin oluşmasına bir başlangıç noktası olmuştur (Ersöz, 2015). Prensip olarak SynRM, geleneksel çıkıntılı kutuplu senkron motora benzer, ancak rotorunda bir uyarma sargısına sahip değildir. Bu durumda sadece rotor çıkıntılı kutuplarla yapılmıştır. Stator iç yüzeyi silindiriktir ve tipik olarak değişken relüktans motorlarının pek çok faydasını korur ve aynı zamanda çeşitli dezavantajlarını ortadan kaldırır (Niazi, 2005).

SynRM'nin tasarım sırasında, farklı rotor çekirdek yapıları sunulmuştur. Modellerden bazıları, "İzole Segmental", "Enine Lamine" ve "Eksenel Lamine" rotorlar gibi daha yüksek bir çıkıntı oranı sunar (Vartanian, 2014). Şekil 2.5'te SynRM'nin farklı rotor yapıları gösterilmiştir.



Şekil 2.5. SynRM'nin farklı rotor yapıları: a) klasik çıkıntılı kutup b) parçalı rotor tasarımı c) çift bariyerli d) enine laminasyon (TLA) e) eksenel laminasyon (ALA) f) modern TLA (Vartanian, 2014)

Şekil 2.5 (a)'da basit çıkıntılı rotor, makinede kutup çıkıntısına yol açan düzgün olmayan bir hava boşluğu oluşturur. Tek parça rotor tasarımında yumuşak çelik malzeme kullanılır. Bu yüzden demir kayıpları yüksektir. Kutup sayısı arttıkça imalatı karmaşıklaşır ve maliyeti artar. Ayrıca L_d/L_q oranı da düşüktür.

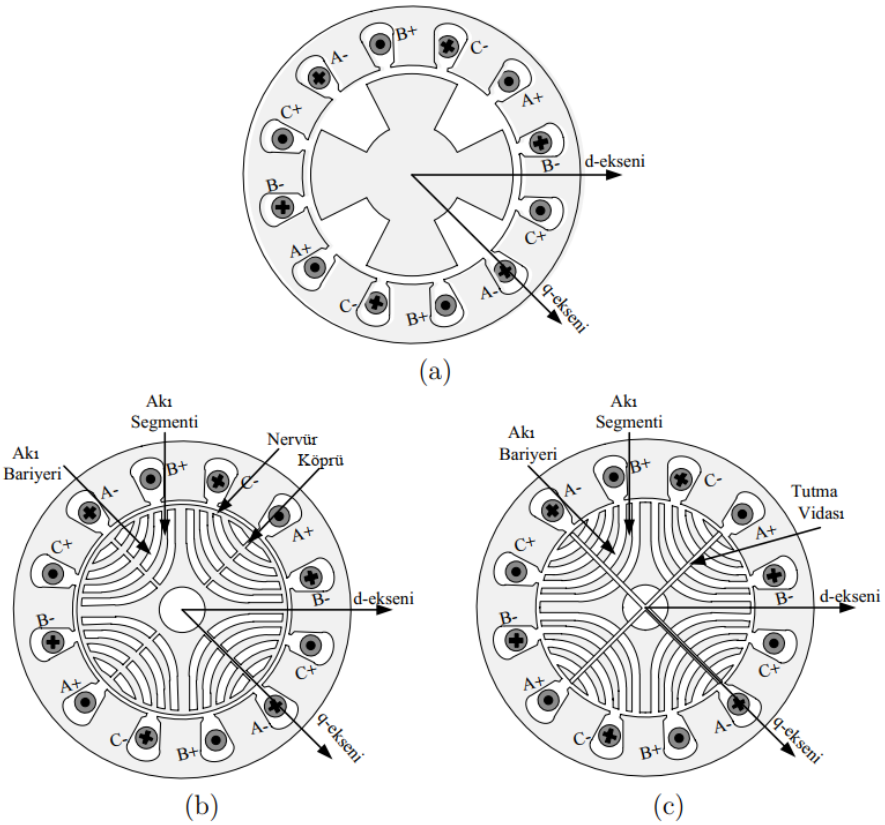
Şekil 2.5 (b)'de, parçalı rotorda, manyetik olmayan malzeme rotor mili boyunca yerleştirilmiştir. Bu yüzden malzemenin rotor miline monte edilmesi zordur. Fakat bu tasarımda L_d indüktansı sabit kalırken L_q indüktansı azalmaktadır. Böylece L_d/L_q oranı yüksektir dolayısıyla bu motorun güç katsayısı ve verimi de yüksektir.

Şekil 2.5 (c)'de bu tasarım şeklinde doyumdan dolayı L_d/L_q oranı düşüktür bu da büyük sorun oluşturur. Hava aralığında yüksek harmonikli akılar vardır. Bu yüzden kayıplar oluşur. Ayrıca gürültülü çalışmaktadır (Ersöz, 2015).

Şekil 2.5 (d), (e) ve (f)'de TLA ve ALA rotor şekilleri, akı bariyerlerini ve akı segmentlerini devreye sokarak akıyı kanalize eder. Akı bariyerleri manyetik olarak izole edici malzemedir, akı segmentleri ise ferromanyetik çelikten yapılmıştır. Basit çıkıntılı motorun avantajı katı bir bloğu temsil eder. Malzemeyi birbirine bağlamak için köprülere

gerek yoktur. Bu nedenle mekanik olarak en sağlam şeklidir. Ayrıca, basit çıkıntılı rotor, yapımı en basit olanıdır. Ancak, bu şekil TLA ve ALA makinelerine göre zayıf elektromanyetik performanslar verir çünkü akı kanalizasyonu yoktur ve daha fazla sızıntı akısı mevcuttur. ALA tasarımı, laminasyonsuz masif bloklar olan akı segmentlerini bir arada tutmak için bir vida kullanır. TLA tasarımı, mekanik fizibilitesi için köprüler ve nervürler kullanır.

Makine yığını, ALA yapısına göre rotor çekirdeğindeki girdap akımı etkilerinin azalmasına yol açan lamine çelikten yapılmıştır. Bununla birlikte, köprüler ve nervürler, akının q ekseninden geçmesine izin verdikleri için manyetik kısa devre görevi görürler. Bu nedenle, TLA rotoruna göre bir ALA rotorundaki tork yoğunluğu açısından küçük bir performans avantajı görülebilir. Bununla birlikte, üretim açısından, ALA rotoru daha karmaşık bir işlem gerektirir, çünkü bölümler arasındaki boşluğu sabit tutmak için manyetik olmayan katı bir malzeme gereklidir. TLA rotor, SynRM'lerin tasarımında en çok kullanılan topolojidir (Yammine, 2015). Şekil 2.6'da son zamanlarda SynRM tasarımında kullanılan rotor topoloji yapıları gösterilmiştir.



Şekil 2.6. SynRM'nin farklı rotor tasarımları a) basit çıkıntılı rotor b) TLA rotor, c) ALA rotor (Yammine, 2015).

2.5. SMSynRM'nin Tasarımı

Bir tasarım, bir dizi tasarım parametreleri olarak tanımlanır. Tasarım parametreleri, sac tabakalarının tüm boyutlandırmasını, sargıları, mıknatısları, sarımdaki tur sayılarını, sarımların yerleşimi ve katmanı ile birçok detayı birlikte içerir. Elektronik sürücülerle çalışan motorlar için tasarım, komütasyon açıları ve kontrollü gerilimlerin veya akımların ayar noktası değerleri gibi kontrol parametrelerinin ayrıntılarını içerebilir.

Tasarım süreci, bir dizi belirlenmiş performans gereksinimlerinden tasarımın belirlenmesi ile ilgilidir. Tasarımın performans gereksinimlerini karşıladığından emin olmak için performans hesaplamalarını da içerir. Bu performans gereksinimlerini karşılamak ve bir tasarımı sentezlemek için genel bir prosedür olmadığından, çoğu tasarımcı, performans hesaplamaları tasarımın performans gereksinimlerini karşılayacağını gösterene kadar parametrelerin yinelemeli olarak ayarlandığı yinelemeli veya özyinelemeli bir sürece güvenir. Nihai sonuçlar, tüm tasarım parametrelerini ve grafik verileri de dahil olmak üzere performansın birçok yönünü özetleyen bir tasarım sayfasında yer almaktadır.

Elektrik makinalarının bilgisayar destekli tasarımı sırasında sonlu eleman ve sonlu fark yaklaşımlarıyla analiz ve sentez yapılabilir. Ancak daha doğru hesaplama için sonlu eleman bilgisayar programları gereklidir.

Manyetik devre yönteminin temel sınırlaması, manyetik akı yollarının varsayılmasını gerektirmesidir. Tüm yolların uzunlukları ve kesit alanları bilinmelidir. Genellikle yolların, bir dereceye kadar hatalı olan düz çizgilerden oluştuğu varsayılır. Akı saçaklanması, doygunluk ve sızıntı akısının etkilerini hesaplamak için genellikle ampirik düzeltme faktörleri kullanılır. Bir motor veya başka bir manyetik cihaz, yıllardır esasen aynı tip tasarıma sahipse, ampirik faktörler oldukça iyi bilinmektedir (Niazi,2005).

Tasarımcı, tasarımın boyut değerlerini, kullanılan malzemelerin detay bilgilerini ve yapılış şeklini analiz işleminde programa veri olarak giriş yapar. Tasarım programı tasarımın performans karakteristiklerini hesaplar ve arzu edilen değerler elde edilinceye kadar tasarımın iyileştirilmesine devam edilir (Öner, 2004).

SEY kullanan paket programlar tasarımın farklı geometri ve çalışma şartlarını analiz eden güçlü uygulamalardır. Tasarım sürecinde karmaşık geometrilerle karşılaşılması ve farklı

malzemelerin uygulanmasında tasarımcıya tasarım hakkında doğru ve güvenilir bilgiler sağlar (Gürdal, 2001). Bu tez çalışmasında ANSYS Maxwell ve RMxprt paket programları ile tasarım ve analizler yapılmıştır. Şekil 2.7'de ANSYS Maxwell programının tasarım sürecindeki ekran görüntüsü verilmiştir.

2.6. Bilgisayar Destekli Tasarım

Bu çalışmada bir EA'da kullanılmak üzere üç fazlı dış rotorlu bir SMSynRM tasarlanmıştır. Tasarlanan motorun boyutlandırılması kullanılacak olan EA'nın tekerleğine yerleştirilecek şekilde uygun olarak seçilmiştir. Motorun tasarım ve analiz için ANSYS Maxwell yazılımı kullanılmıştır. Tasarlanacak motorun sınır koşulları ve tüm başlangıç özellikleri Tablo 2.1'de verilmiştir.

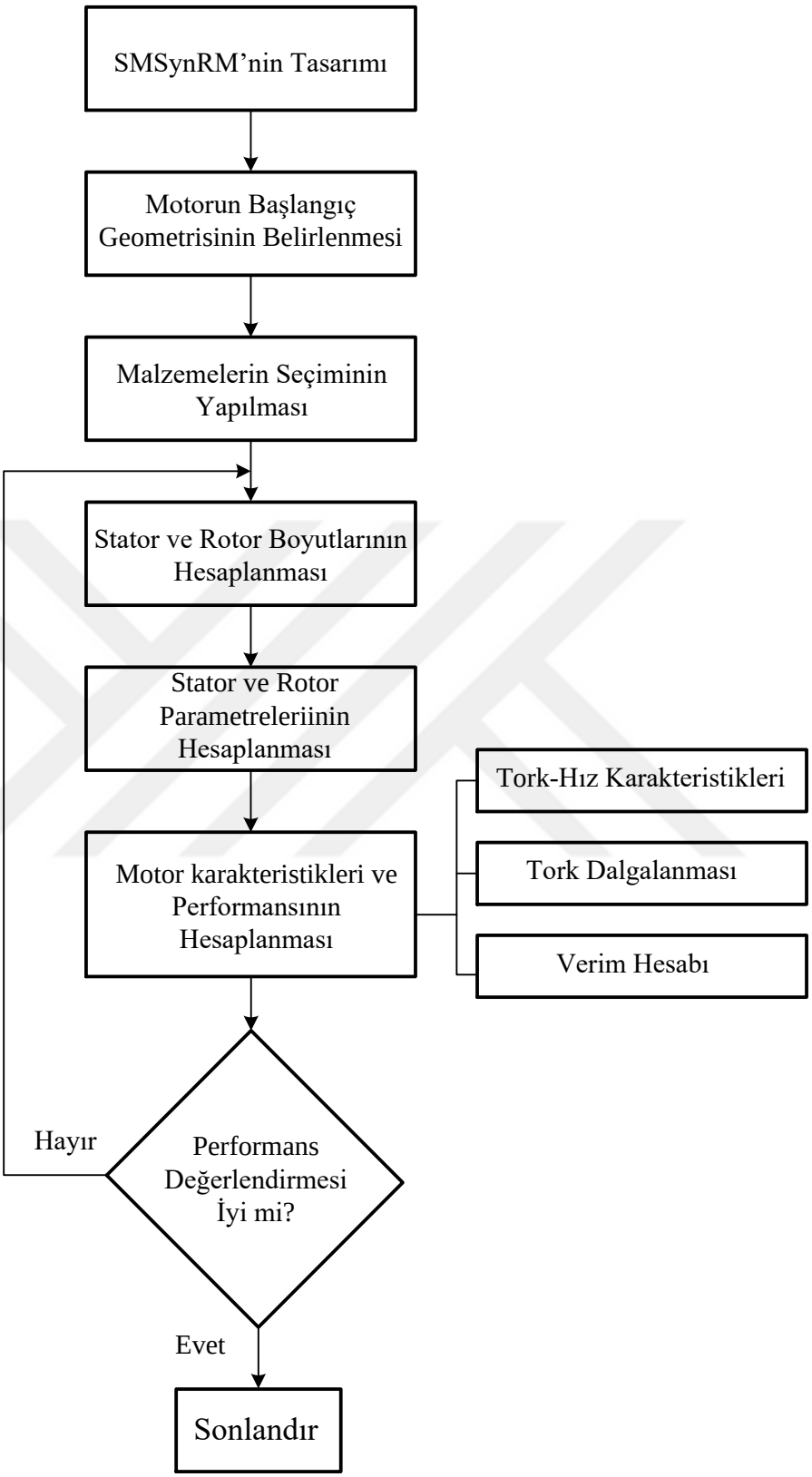
Tablo 2.1. Sınır koşulları ve başlangıç özellikleri

Parametre	Değer
Faz sayısı	3
Anma gücü (W)	1000
Anma torku (Nm)	12.73
Anma hızı (d/d)	750
Anma akımı (rms) (A)	<13
Frekans (Hz)	50
Faz gerilimi (V)	36
Rotor dış çapı (mm)	265
Stator dış çapı (mm)	193
Verim	> %90

Bu çalışmada yapılan analizler;

- Temel elektrik ve mekanik tasarım,
- Optimizasyon
- Elektromanyetik analizdir.

Yapılan analizleri tanımlayan temel tasarım strateji algoritması Şekil 2.7'de verilmiştir.

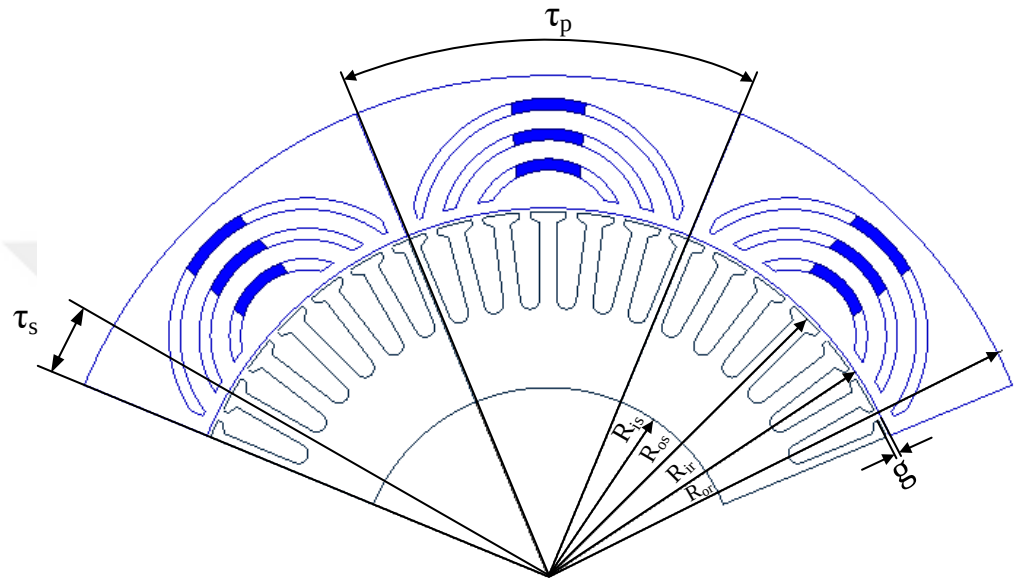


Şekil 2.7. Temel tasarım stratejisi

2.7. Motorun Başlangıç Geometrisinin Belirlenmesi

Motor geometrisini hesaplamanın ilk adımı, motorun ana boyutlarının belirlenmesidir. Bu parametreler rotorun dış ve iç çapı, statorun dış ve iç çapı ve paket boyudur.

Şekil 2.8'de, iç ve dış rotor yarıçapı (R_{ir} ve R_{or}), iç ve dış stator yarıçapı (R_{is} ve R_{os}), hava aralığı uzunluğu (g), oluk adımı (τs) ve kutup adım (τp) gibi çeşitli motor parametreleri gösterilmiştir (López-Torres ve ark, 2019).



Şekil 2.8. Temel rotor geometrisi

Tasarıma motorun başlangıç geometrisinin belirlenmesiyle başlanır. Motorun ana boyutunun denklemi aşağıdaki denklem ile verilir.

$$D_i^2 I_{ef} = \frac{6.1}{a_p K_{Nm} K_w} \frac{1}{HB_\delta} \frac{P_{sn}}{n} = C_A \frac{P_{sn}}{n} \qquad (2.20)$$

Burada, D_i stator iç çapıdır, l_{ef} stator saç paketin etkin uzunluğunu verir. B_δ çevre akım yoğunluğu ve hava aralığı indüksiyon değerinin birinci harmoniğidir. K_w sargı faktörüdür, uygulanan gerilimin etkin değerinin ortalama değerine oranıdır ve hava aralığı manyetik alan sinüzoidal dalga olduğu için K_{Nm}=1.1 alınabilir. n, d/d olarak devir sayısıdır. H elektromanyetik alan şiddetidir. K_{Nm} hava aralığı manyetik form faktörü, a_p ise kutup yay uzunluğudur. Sinüzoidal akı dağılımlı motor nüvenin doyum noktası dikkate alındığında kutup yay uzunluğu 0.66 ile 0.71 aralığında seçilebilir.

C_A faydalanma katsayısı diğer bir ifade ile Esson sabitidir. Motorun birim hacminden dakikada alınabilecek enerjiyi verir. Aynı zamanda malzemeden ne derecede faydalanıldığının ölçüsüdür. Birimi kVA.dk/m^3'tür.

Tablo 2.2'de güç ve kutup sayısına göre faydalanma katsayıları verilmiştir.

Tablo 2.2. Faydalanma katsayıları (CA)

kW	2p=2	2p=4	2p=6	2p=8	2p=10	2p=12
0,1	0,90	1,00	1,03	1,05	1,08	1,10
0,2	0,93	1,03	1,05	1,08	1,10	1,13
0,3	0,95	1,05	1,08	1,10	1,13	1,15
0,4	0,98	1,08	1,10	1,13	1,15	1,18
0,5	1,00	1,10	1,13	1,15	1,18	1,20
0,6	1,06	1,14	1,17	1,20	1,23	1,26
0,7	1,12	1,18	1,22	1,25	1,29	1,32
0,8	1,18	1,22	1,26	1,30	1,34	1,38
0,9	1,24	1,26	1,31	1,35	1,40	1,44
1,0	1,30	1,30	1,35	**1,40**	1,45	1,50
2,0	1,33	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80
3,0	1,36	1,50	1,63	1,75	1,88	2,00
4,0	1,40	1,70	1,85	2,00	2,15	2,30
5,0	1,46	1,90	2,03	2,16	2,28	2,41
6,0	1,53	1,98	2,12	2,25	2,39	2,53
7,0	1,59	2,06	2,20	2,35	2,49	2,64
8,0	1,65	2,14	2,29	2,45	2,60	2,75
9,0	1,71	2,22	2,38	2,54	2,70	2,86
10,0	1,78	2,30	2,47	2,64	2,81	2,98

Motorun görünür gücü Denklem (2.21)'de verilmiştir.

$$P_{sn} = m\, E_1\, I_1 \tag{2.21}$$

Faz akımı Denklem (2.22)'deki gibi ifade edilebilir.

$$I_1 = \frac{I_{KW}}{\eta \cos \varphi} \tag{2.22}$$

Denklem (2.23)'de aktif akım gösterilmiştir.

$$I_{KW} = \frac{P_N}{m\, U_{N\phi}} \tag{2.23}$$

Denklem (2.24) ile nominal güç değeri hesaplanabilir.

$$P_N = m\, U_{N\phi}\, I_1\, \eta \cos \varphi \tag{2.24}$$

Denklem (2.21) ile Denklem (2.24) karşılaştırıldığında Denklem (2.25) elde edilir.

$$P_n = \frac{U_{N\phi}}{E_1}\, P_{sn}\, \eta \cos\varphi \tag{2.25}$$

Burada, $K_B = \frac{E_1}{U_{N\phi}}$ olarak tanımlanırsa K_B motorun zıt EMK değerinin faz gerilimine oranı şeklinde yazılırsa

$$K_B = \frac{E_1}{U_{N\phi}} = 1 - \varepsilon_L \tag{2.26}$$

şeklinde ifade edilebilir. ε_L statorun bir sargısı üzerindeki gerilim düşümü olarak tanımlanır.

Denklem (2.25) tekrar yazılırsa Denklem (2.27) elde edilir (Ersöz, 2015).

$$P_{sn} = K_B\, \frac{1}{\eta \cos \varphi}\, P_N \tag{2.27}$$

Bir makinenin hava aralığı uzunluğu, bir elektrikli makinenin özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Mıknatıslanma akımının besleme şebekesinden alındığı makinelerde,

hava boşluğunun uzunluğu minimum bir mıknatıslanma akımı ve diğer yandan optimum bir verimlilik sağlayacak şekilde boyutlandırılır.

Senkron relüktans makinelerinin yüksek bir endüktans oranına sahip olması gerekir, bu da küçük bir d-ekseni hava boşluğunun seçilmesini önerir. Bununla birlikte, hava boşluğu çok küçük yapılırsa, yüksek kaliteli rotor sac tabakaları kullanılmazsa, geçirgenlik harmonikleri nedeniyle yüzey kaybı önemli ölçüde artabilir (Pyrhönen ve ark., 2014).

q-eksen indüktansı hava aralığı uzunluğuna bağlı değildir. Fakat, hava aralığı uzunluğunun artması ile d-eksen indüktans değeri azalır. Bu da çıkıntı oranını azaltır. Üretilen tork ile güç faktörünü etkiler.

Bu nedenle, makinede büyük bir tork elde etmek için daha düşük bir hava aralığı uzunluğu tercih edilir. Bununla birlikte, büyük bir hava boşluğu daha düşük tork dalgalanması ve rotor demir kayıpları ile sonuçlanır (Jahan, 2019).

Hava aralığı Denklem (3.9) ile ifade edilebilir.

$$\delta = 0.3\left(0.4 + 7\sqrt{D_i\, l_i}\right).10^{-3} \tag{2.28}$$

Burada, l_i stator nüve uzunluğu ve D_i stator iç çapı olarak ifade edilmektedir.

Kutup adımı tanımlanırsa, hava aralığı çevresinde bir kutbun kapladığı uzunluğa veya çevre yayına oranı olarak ifade edilir. Kutup adımı

$$\tau = \frac{\pi\, D_i}{2p} \tag{2.29}$$

olarak verilebilir. Buradan stator oluk kutup adımı hesaplanırsa

$$t_1 = \frac{\pi\, D_i}{Z_1} \tag{2.30}$$

şeklinde tanımlanır. Burada, Z_1 stator oluk sayısıdır.

2.8. Relüktans Hesabı

Relüktans, manyetik devrede malzemenin düzeninin geçirgenliği ve düzenlenmesi ile belirlenir. Bu durumda, relüktans elemanları, paralel yüzlü elemanlar tarafından

ayrıştırılır. Havadaki relüktanslar için geçirgenlik sabittir. Manyetik çelikteki relüktanslar için, geçirgenlik malzemenin ve akı yoğunluğunun fonksiyonudur. Relüktans;

$$\Re = \frac{l}{\mu S} \tag{2.31}$$

ile verilir. Burada, l, akı yönündeki uzunluktur (m), S, akı yönünde normal yüzeydir (mm^2), μ mutlak geçirgenliktir ($\mu=\mu_0\mu_r$). μ_r malzeme göreceli geçirgenliğidir. μ_0 boşluk geçirgenliğidir (H/m).

Belirtildiği gibi, stator ve rotorun relüktansları akı yoğunluğuna ve dolayısıyla akıya bağlı olarak değişkendir, bu nedenle relüktans ağı doğrusal olmayan bir sistemdir.

Relüktansların bir başka özelliği de Denklem (2.32) ve (2.33)'te gösterilen etkili hava aralığı tanımını hesaba katarak Carter'ın katsayısı ile çarpılması gereken hava aralığının relüktanslarıdır.

$$g' = g \,.\, K_c \tag{2.32}$$

$$R_g = \frac{g'}{\mu_0 S} = \frac{g}{\mu_0 S} K_c \tag{2.33}$$

Carter Katsayısı Denklem (2.34) ile ifade edilir.

$$K_c = \frac{5 + s}{5 + s - \frac{s^2}{\lambda}} \tag{2.34}$$

Burada, s, oluk açıklığı/g oranıdır. λ, oluk adımı/g oranıdır. g hava aralığı uzunluğudur (Sharifian ve ark 2009, Torres ve ark. 2016).

2.9. Malzeme Seçiminin Yapılması

SEY tasarımında kullanılan malzemeler Stator ve rotor nüvesi için M470-50A çelik seçilmiştir. Rotor oluklarına yerleştirilen sürekli mıknatıslı malzeme N35H seçilmiştir.

2.9.1. Manyetik malzemeler

Manyetik malzemelerin davranışı ve performansı üç farklı parametre ile açıklanır;

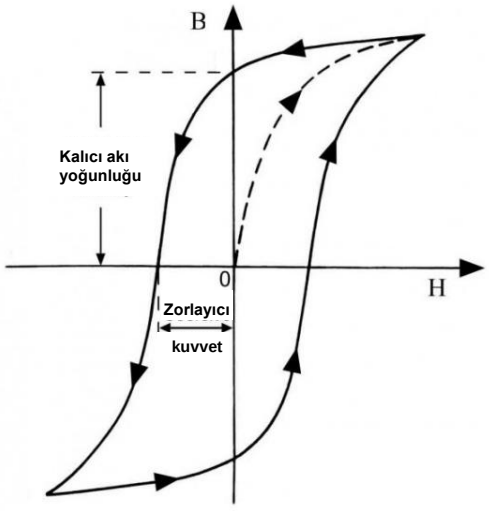
- Akı yoğunluğu veya Manyetik İndüksiyon B (T)
- Manyetik Alan H (A/m)
- Mıknatıslanma M (A/m)

Bu parametreler, uzayda bir noktadaki akı yoğunluğunu, bir alan kaynağı tarafından oluşturulan alanı ve malzemenin manyetik durumunu tanımlayan vektörlerdir. Bu vektörler

$$\mathbf{B} = \mu_0\mathbf{H} + \mu_0\mathbf{M} = \mu_0\mathbf{H} + \mathbf{J} \tag{2.35}$$

şeklinde tanımlanır. Burada J polarizasyondur.

Tüm manyetik malzemeler arasında ortak bir özellik, doğrusal olmayan davranışlarıdır. Aslında, manyetik geçirgenlik $\mu = \mu_0\mu_r$ sabit bir değer değildir, ancak aslında dikkate alınan malzeme kısmındaki manyetik indüksiyon seviyesine bağlıdır. μ değişkenliği, Şekil 2.9'da gösterildiği gibi tipik manyetik histerezis döngüsü ile tanımlanır "sert manyetik malzemeler" veya sabit mıknatıs için geniş bir iç alan ve "yumuşak manyetik malzemeler" için küçük bir iç alandır.



Şekil 2.9. Sert manyetik malzeme histerezis döngüsü

B-H eğrisi enerji üretimi sağlar. En büyük B-H'ı ikinci çeyrekte üretir. Enerji yoğunluğu açısından en iyi manyetik çalışma sunar (Marino,2015).

Bir elektrik makine tasarımında dikkate alınması gereken birkaç sabit mıknatıs türü vardır.

Bazı mıknatıslar, yüksek sabit akı yoğunluğuna ve daha yüksek maliyete sahiptir, ancak çalışma sıcaklığında sınırlıdır. Öte yandan, bazı mıknatıslar daha yüksek bir sıcaklıkta çalışabilir ancak düşük enerjili ürün ve akı yoğunluğu tasarımdaki mıknatısın kütlesini arttırır.

Sabit mıknatıs için yaygın olarak kullanılan malzemelerden bazıları şunlardır:

- Samarium Cobalt (SmCo),
- Neodimyum-Demir-Bor (NdFeB),
- Alüminyum Nikel Kobalt (AlNiCo)
- Ferrite

Tablo 2.3'te farklı SM'lerin karşılaştırması verilmiştir.

Tablo 2.3. Farklı SM'lerin karşılaştırması

Mıknatıs Malzemesi	Avantajları	Dezavantajları
NdFeB	Yüksek çalışma sıcaklığı (80°C-220°C) Çok yüksek akı yoğunluğu (1.4T)	Yüksek sıcaklık katsayısı Korozyona karşı hassas Pahalı
SmCo	Yüksek çalışma sıcaklık (250°C-350°C) Yüksek akı yoğunluğu (1.2 T'ya kadar) Düşük sıcaklık katsayısı Demanyetizasyon ve korozyona karşı yüksek direnç	En pahalı mıknatıs
AlNiCo	Yüksek çalışma sıcaklığı (810°C-860°C) Düşük sıcaklık katsayısı	Demanyetize etmek kolay
Ferrite	En az pahalı mıknatıs Yüksek çalışma sıcaklığı (250°C)	En düşük kalıcı akı yoğunluğu (0.4T)

Asenkron motorun çalışma sıcaklığı 110 °C (Sınıf F izolasyon) ile sınırlandırılmıştır, bu nedenle tasarım için NdFeB ve ferrite tipi mıknatıslar seçilmiştir. Tork yoğunluğu asenkron motordan daha yüksekse, aynı yükü sürmek için gereken akım daha az olacak ve daha fazla sıcaklık düşüşü beklenecektir. Maksimum çalışma sıcaklığı, sargı izolasyon sınıfıyla sınırlı olduğundan, çalışma sıcaklığı mıknatıs seçimini basitleştirmek için kullanılabilir. NdFeB daha yüksek akı yoğunluğuna sahip olduğundan, ana tasarım bu

mıknatısı temel alacaktır. Tasarımda kullanılan yay şeklindeki mıknatıs Şekil 2.10'da gösterilmiştir.



Şekil 2.10. Tasarımda kullanılan N35H mıknatıs

2.10. Stator ve Rotor Boyutlarının Hesaplanması

2.10.1. Stator

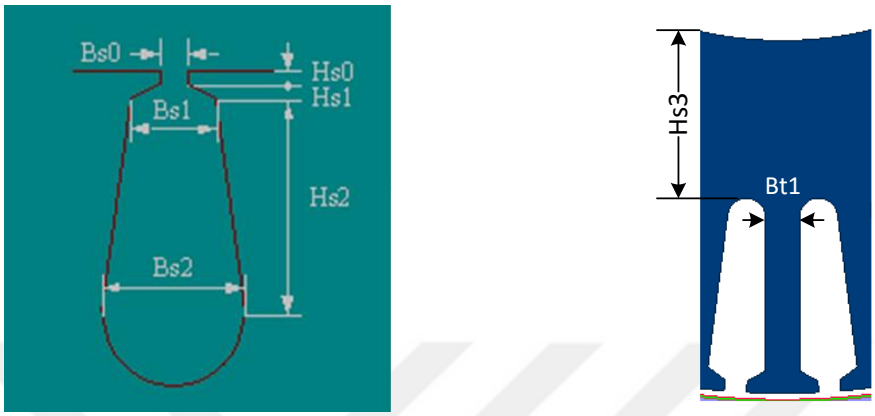
Stator tasarımında oluklar, dişler ve boyunduruklar belirlendiğinde stator geometrisi seçilmiş olur. Daha sonra yüksek tork ve yüksek güç yoğunluğuna sahip üç fazlı dış rotorlu bir SMSynRM motoru tasarlamak için öncelikle iyi bir oluk/kutup kombinasyonu oluşturmak ile başlanır. Tork dalgalanmasını minimuma indirmek için dağıtılmış sargı tipi ve çift sarım seçmek gerekir. Aynı zamanda makine boyutlarının izin vereceği ölçüde oluk sayısının da fazla olması tork dalgalanmalarının azaltılmasında önemli rol oynar.

Araştırmalara bakıldığında, oluk/kutup kombinasyonunun birkaç önemli parametre üzerindeki etkisini bulmak mümkündür. Bunlar:

- Temel sargı faktörü,
- Tork dalgalanması,
- Titreşimler,
- Rotor kayıpları,
- İndüktanslardır (Marino, 2015).

Tasarımda tercih edilen stator oluk yapısı Şekil 2.11'de verilmiştir. Burada H_{s3}, boyunduruk yüksekliğidir. D_{is}, stator yarıçapı ile olukların sonlandığı kısım arasındaki

boşluktur. B_{s0}, oluk açıklığıdır. Oluk açıklığı oluğa yerleştirilecek iletkenlerin çapından büyük olacak şekilde boyutlandırılır. H_{s2} oluk yüksekliğidir. H_{s0} diş yüksekliğidir belirlenen değerin önemi yoktur 1.5 mm olarak belirlenmiştir. Aynı şekilde H_{s1} de 1.5 mm olarak belirlenmiştir. Bs1 oluk genişliğidir. B_{t1} diş genişliğidir.



Şekil 2.11. Stator oluk şekli

Stator tasarımı ile başlamak için faz başına sipir sayısı;

$$N_s = \frac{\sqrt{2}\,E}{\omega_e k_w l_{eff} \tau_p \frac{D_{is}}{2} \alpha_i \widehat{B}_g} \tag{2.36}$$

olarak tanımlanır. Burada E, zıt-EMK'dır. ω_e, mekaniksel hızdır (rad/s). l_{eff}, makinenin etkin uzunluğudur. $\widehat{B}_g$, hava aralığındaki tepe akı yoğunluğudur. k_w, sargı faktörüdür. α_i, akı yoğunluğunun aritmetik ortalamasını elde etmek için katsayıdır. Sinüzoidal akı yoğunluğu ele alındığında α_i'nin değeri 0.64 (2/π) (Pyrhönen ve ark. 2014). D_{is} stator iç yarıçapıdır. τ_p oluk adımıdır.

Olukların boyutunu hesaplamak için her oluktaki iletken sayısı ve diş boyutu gereklidir. Faz başına seri bağlı tur sayısı hesaplandığında, her oluktaki iletken sayısı (z_q):

$$z_q = \frac{2mN_{ph}}{Q_s} \tag{2.37}$$

olarak tanımlanır. Burada m, faz sayısıdır. N_{ph}, faz başına sipir sayısıdır. Q_s, oluk sayısıdır.

Hava aralığındaki akı yoğunluğu

$$\widehat{B}_{g_new} = \frac{\sqrt{2}E}{\omega_e k_{w1} l_{eff} \tau_p \frac{D_{is}}{2} N_{ph_new}} \tag{2.38}$$

olarak hesaplanır.

Manyetik akı yoğunluğu

$$\phi_t = \widehat{B}_{g_new} l_{eff} \tau_s \frac{D_{is}}{2} \tag{2.39}$$

şeklinde tanımlanabilir.

Doğru boyutta diş elde etmek için, bu motor parçası üzerinde izin verilen maksimum manyetik akı yoğunluğu 1.5 T ile 1.8 T arasında sabitlenmiştir. Böylece,

$$B_{t1} = \frac{\phi_t}{k_{sf} \widehat{B}_t} L_{stk} \tag{2.40}$$

Burada B_{t1}, izin verilen maksimum manyetik akı yoğunluğudur ve k_{sf} istifleme faktörüdür.

Hava aralığındaki manyetik akı

$$\phi_g = \frac{2}{\pi} \widehat{B}_{g_new} l_{eff} \tau_p \frac{D_{is}}{2} \tag{2.41}$$

şeklindedir.

Boyunduruk genişliği

$$Hs3 = \frac{\phi_g}{2 k_{sf} \widehat{B}_y} L_{stk} \tag{2.42}$$

ile ifade edilebilir. Burada, $\widehat{B}_y$ boyunduruğun maksimum izin verilen manyetik akı yoğunluğudur. Manyetik çelik sac tabakalarının B-H eğrisinin dirsek noktasına karşılık gelen 1.4 T ve 1.6 T arasında sabittir.

Diş genişliği bilindiği zaman oluk genişliği

$$b_s = \tau_s \frac{D_{is}}{2} - B_{t1} \tag{2.43}$$

ile hesaplanır ve oluk yüksekliği

$$S_{slot} = b_s h_s = \frac{z_q}{J k_u} \tag{2.44}$$

$$h_s = \frac{z_q I_{ph}}{J k_u b_s} \tag{2.45}$$

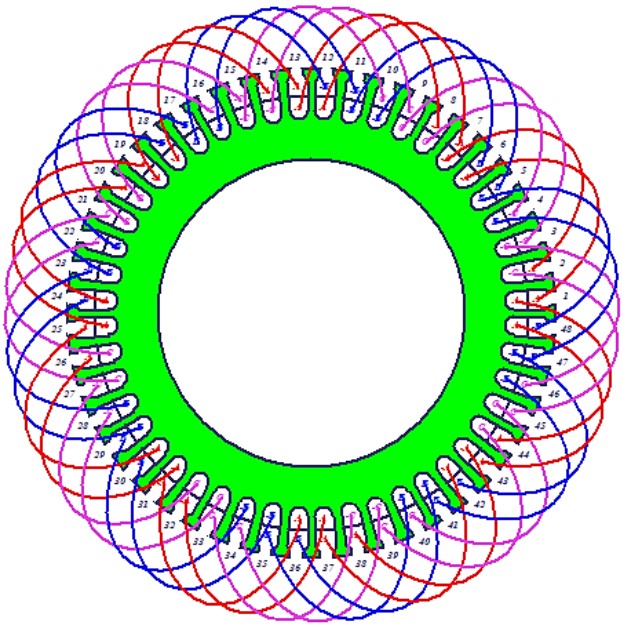
ile elde edilir. Burada, J, akım yoğunluğudur (A/m^2) ve bu tasarımda 3.08 A/m^2 seçildi. k_u, 0.40'ta sabitlenebilen sargı faktörüdür (Hendershot ve ark. 1994, Torres ve ark. 2019).

Tasarlanan SMSynRM'nin stator oluk parametreleri Tablo 2.4'te verilmiştir.

Tablo 2.4. Stator oluk parametreleri

Parametre	Değer
H_{s0}	1.5 mm
H_{s1}	1.5 mm
H_{s2}	20 mm
H_{s3}	20 mm
B_{s0}	3 mm
B_{s1}	7.7 mm
B_{s2}	5.1 mm
B_{t1}	4.5 mm

SMSynRM stator yapısı asenkron motorun stator yapısına benzerdir. Bu çalışmada optimize edilmiş minimum tork dalgalanması sağlayan kombinasyon 48 oluk/8 kutup olarak seçilmiştir. Bu veriler ışığında tasarlanan stator ve sargılar Şekil 2.12'de verilmiştir.



Şekil 2.12. SMSynRM statoru ve sarım şekli

Hava boşluğu uzunluğu, doğrudan eksen indüktansını, stator kaçak akı indüktansını, demir kayıplarını ve mekanik kayıp değerlerini etkiler. Hava aralığı uzunluğunun azaltılması, d-ekseni indüktansını etkin bir şekilde artırır. q-ekseni indüktansı üzerindeki hava boşluğu uzunluğu etkisi, rotor iç akı bariyerlerinden oluşan nispeten büyük relüktans nedeniyle küçüktür.

SynRM'de yeteri kadar yüksek güç faktörü elde etmek için hava aralığı uzunluğunu küçük seçmek gerekir. SMSynRM'de kutup sayısı sınırlandırılmıştır. Çünkü d-eksen ve q-eksen indüktanslar kutup sayısının bir fonksiyonu olarak azalır (Haataja, 2003).

Tasarımda hava aralığı 1 mm olarak seçilmiştir.

2.10.2. Rotor

SMSynRM'yi karakterize eden en önemli parçalardan biri bariyerlerdir. Bariyerler sac levhalarında açılan uzun delikler olarak tanımlanır.

Tasarlanmış statora göre akı bariyerlerinin sayısının seçilmesi tork dalgalanması üzerinde önemli bir etkiye sahiptir ve aynı zamanda güç faktörünü de etkiler. Tasarımda d-eksendeki indüktansı yani d-eksendeki akı değerini maksimum değerde tutmak, q-eksen indüktans değerini minimumda tutmak gerekir. d-eksen akı değerinin maksimum değerde olması için akı bariyerlerinin geniş tutulması sağlanır, fakat q-eksen akı değerinin

artmasından kaçınılmaz. Motor performansını en çok etkileyen rotorun geometrik parametreleridir ve bu parametrelerin SEA'da belirlenmesi son derece önemlidir (Aghazadeh ve ark., 2018).

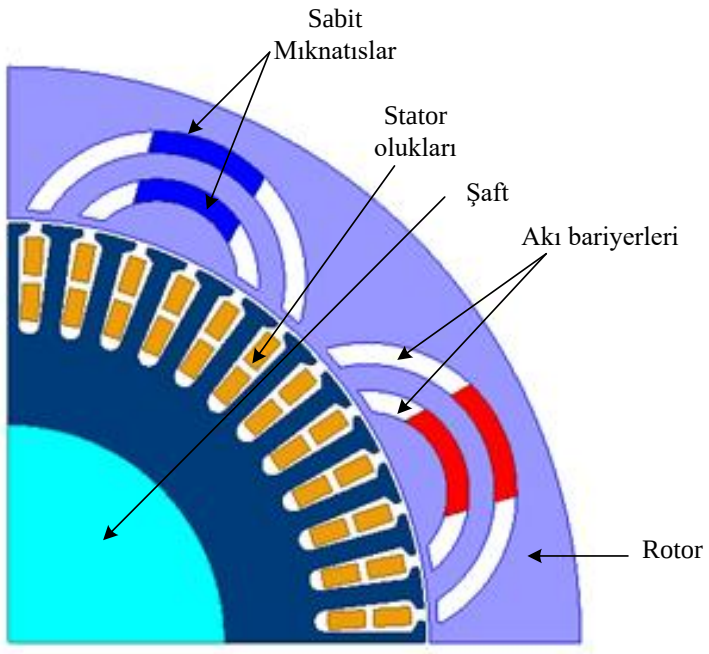
SMSynRM rotor tasarımında temel amaç akı bariyerlerinin geometrisi, hava demir oranı, bariyer sayısı gibi parametrelere göre bir optimizasyon işlem sırası bulmaktır. Bu işlemler yapılırken önemli olan SMSynRM'nin en iyi performans değerlerini elde etmek için tork, güç faktörü, tork dalgalanması ve verimlilik değerlerini uygun olarak veren rotor tasarımına ulaşmaktır. SMSynRM rotor tasarım optimizasyonu için bazı değişkenlerin belirlenmesi gerekmektedir. Ek olarak, akı bariyeri sayısı, tork dalgalanmasının yanı sıra stator ve rotor etkileşimi üzerinde büyük etkiye sahiptir. Makinede uygun bir bariyer sayısının seçimi karmaşıktır. (Ersöz ve ark., 2016; Jahan, 2019).

Rotor bariyer sayısı

$$n_r = n_s \pm 4 \tag{2.46}$$

olarak tanımlanabilir. Burada n_r kutup başına rotor bariyer oluk sayısı, n_s ise kutup başına stator oluk sayısıdır (Bacco ve ark. ,2019).

Şekil 2.13'te dış rotorlu SMSynRM'nin çeyrek kesiti gösterilmiştir.



Şekil 2.13. SMSynRM'nin çeyrek kesiti

Mıknatısların yerleştirilmesi makinenin performansı açısından oldukça önemlidir. Mıknatısların toplam hacmini sabit tutmak tork dalgalanması ve tork üretimi açısından daha uygundur. Mıknatıs hacminin çoğunu rotorun derinliklerinde tutmak, zayıf mıknatıslar kullanıldığında çok önemli olan manyetikliği gidermeye karşı korumaya yardımcı olur (Khan, 2010).

2.10.2.1. Rotor bariyer yalıtım oranı

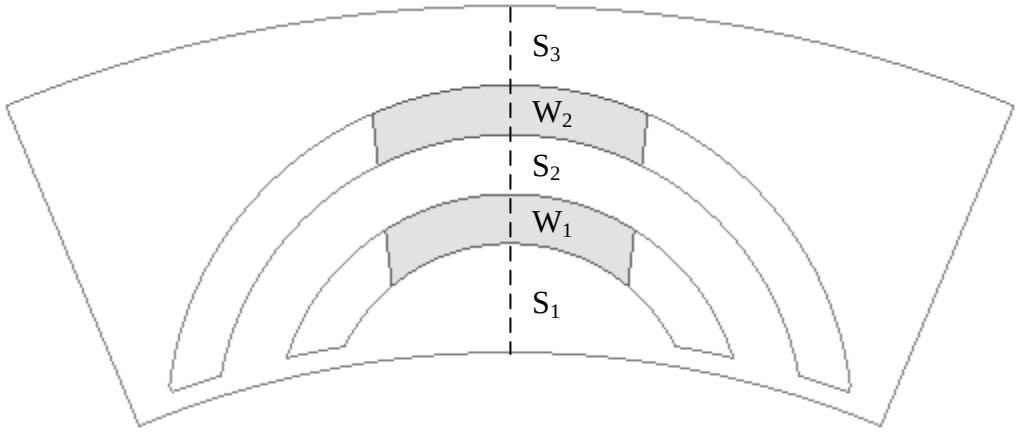
Farklı geometriler, farklı tasarımlar arasında karşılaştırma yapmak ve farklı tasarımlar arasında karar verebilmek için yalıtım oranı adı verilen bir tasarım parametresi tanımlanmıştır.

d ve q-ekseni arasındaki çıkıntı oranı ve indüktans farklılıkları rotor yalıtım genişliğinin ($W_{yalıtım}$) rotor demiri genişliğine (W_{demr}) oranına (K_w) bağlıdır (Wang ve ark., 2013).

$$K_w = \frac{W_{yalıtım}}{W_{demir}} \tag{2.47}$$

Burada K_w, yalıtım/demir oranıdır. $W_{yalıtım}$, tüm akı bariyerlerinin toplam genişliğidir ve W_{demir}, demir bölümlerin toplam genişliğidir (Khan,2011 ve Moghaddam, 2007). Burada $K_w = 0$ ise rotorun tamamen demirden yapıldığı, $K_w = 1$ olduğunda ise rotordaki hava boşluğu ile laminasyon bölümlerinin eşit olduğu anlaşılır.

Şekil 2.14'te yalıtım oranın elde edilmesi için gerekli parametreler gösterilmiştir.



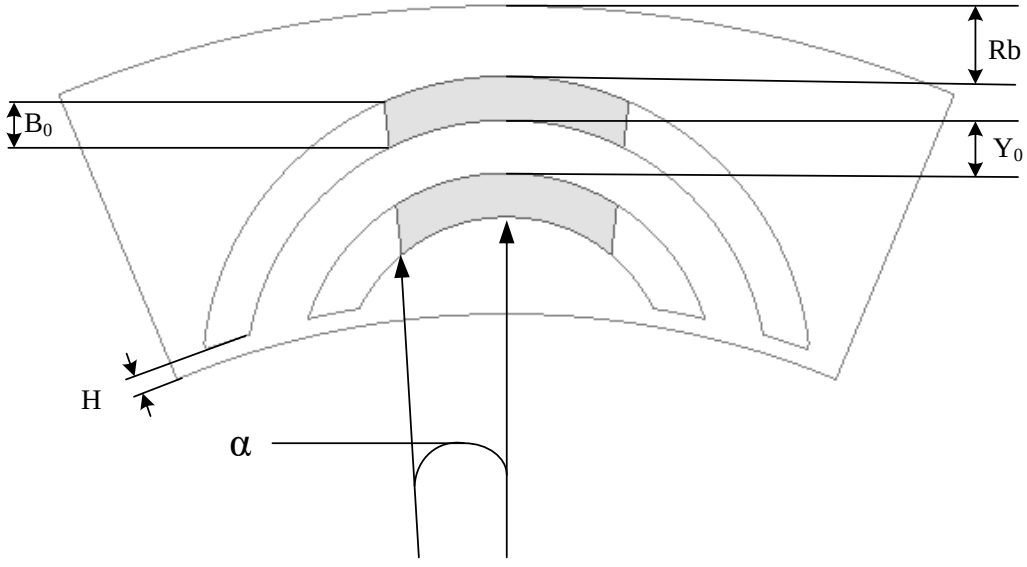
Şekil 2.14. Yalıtım oranı parametreleri

Motorun tork üretimi ve güç faktörü yalıtım oranlarından etkilenir. Motordaki relüktans bu d ve q eksenleri yalıtım oranları ile belirlenir. Motordaki akı bağını etkiler. Bu nedenle demirin doygunluk seviyesi de etkilenir. Böylece motordaki indüktanslar da değişir (Jahan,2019).

2.10.2.2. Rotor parametrelerinin belirlenmesi

SMSynRM motorlar güçlü manyetik doygunluklarından dolayı doğrusal olmayan motorlardır. Bu yüzden bu motorların analizlerinin doğru yapılabilmesi önemli çaba gerektirir (Wang ve ark., 2016).

Şekil 2.15'te $\pi/8$ bir kutup durumundaki iki katmanlı akı bariyerleri ve optimize edilen değerler gösterilmiştir. Burada B_0, mıknatıs kalınlığıdır. Y_0, bariyerler arasındaki mesafedir. H, bariyer alt kenarı ile hava aralığı arasındaki mesafedir. Rb, rotor dış yüzeyi ile bu yüzeye en yakın bariyer arasındaki uzaklıktır. α, mıknatısın genişliğini belirleyen bir parametredir ve orijin noktası ile mıknatıs kenarları arasındaki açı değeridir.



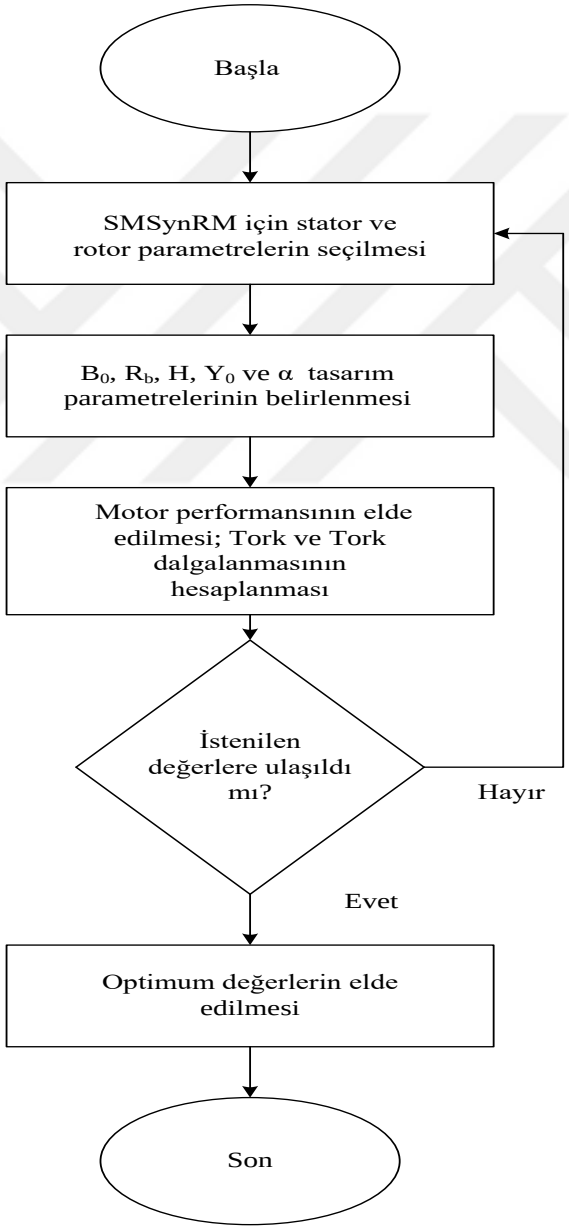
Şekil 2.15. π/8 bir kutup durumundaki iki katmanlı akı bariyerleri

Daha kısa tamamlanma süresi nedeniyle, rotor parametrelerinin farklı değerleri üzerinden her modelin 1/8'lik kısmında akım analizleri yapılmıştır. Parametrik analizlerde kullanılan rotor parametrelerinin alt ve üst sınırları Tablo 2.5'te verilmiştir.

Tablo 2.5. Rotor parametrelerinin alt ve üst sınırları

Tasarım değişkenleri	Birim	Alt sınır	Üst sınır
α	derece	16	20
B_0	mm	2	6
R_b	mm	3	7
Y_0	mm	2.5	5
H	mm	1	4

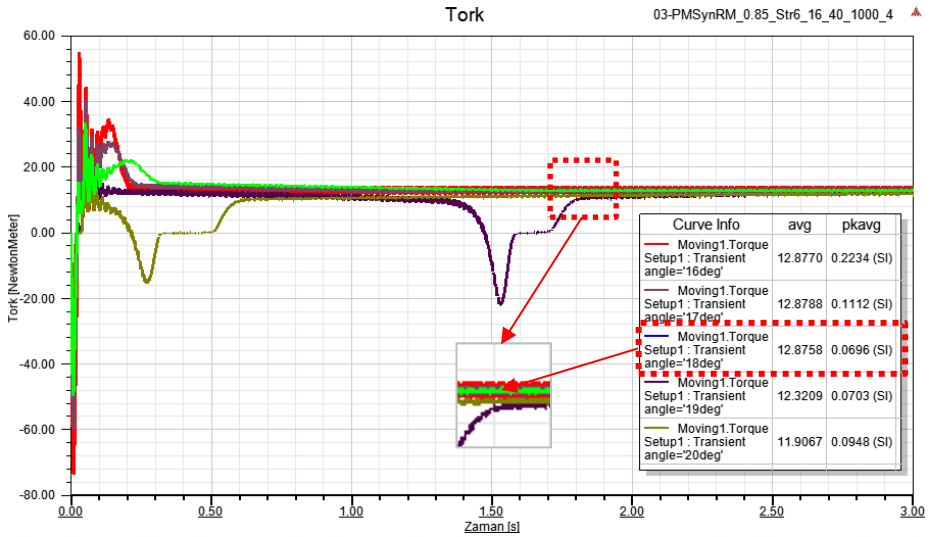
Şekil 2.16'da rotor tasarım optimizasyon algoritması verilmiştir.



Şekil 2.16. Rotor tasarım optimizasyon algoritması

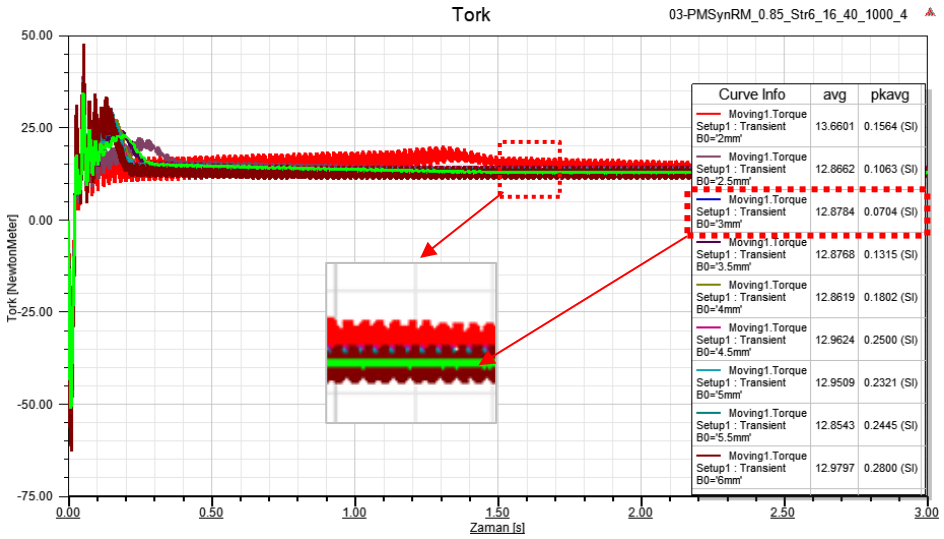
Burada üç fazlı dış rotorlu SMSynRM'nin stator ve rotor parametrelerinin seçiminden sonra yüksek çıkış torku ve minimum tork dalgalanması değerleri için H, Rb, B_0, Y_0 ve α değerleri ile parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. İstenilen optimum değerler elde edilinceye kadar iterasyon işlemine devam edilmiştir.

Mıknatısların genişliğini belirleyen α parametresinin belirlenen alt ve üst sınırlar arasındaki değişiminin tork ve tork dalgalanmasına etkisi Şekil 2.17'de gösterilmiştir. Sonuçlar değerlendirildikten sonra α parametresi 18 derece olarak seçilmiştir.



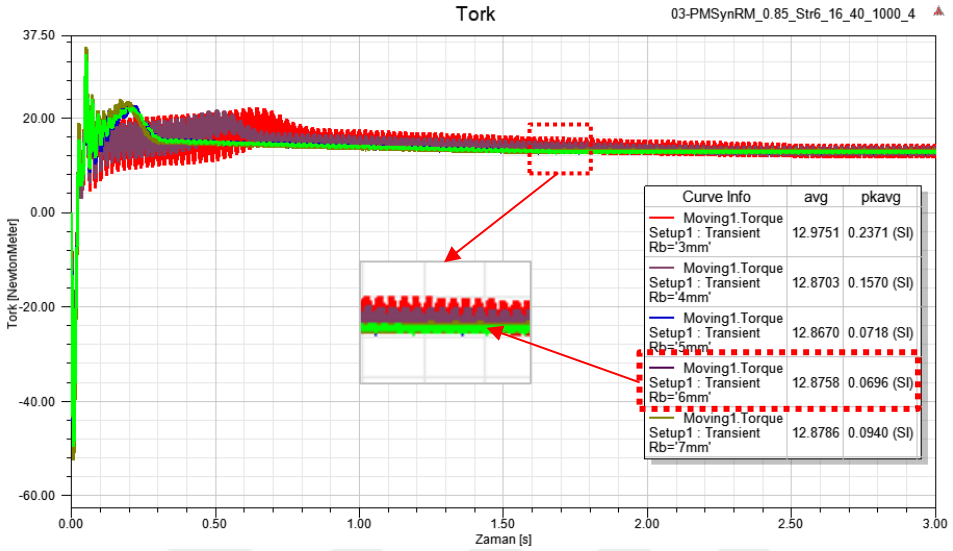
Şekil 2.17. α parametresinin tork ve tork dalgalanmasına etkisi

Mıknatısların kalınlığını ifade eden B_0 parametresinin belirlenen alt ve üst sınırlar arasındaki değişiminin tork ve tork dalgalanmasına etkisi Şekil 2.18'de gösterilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde B_0 parametresi 3 mm olarak seçilmiştir.



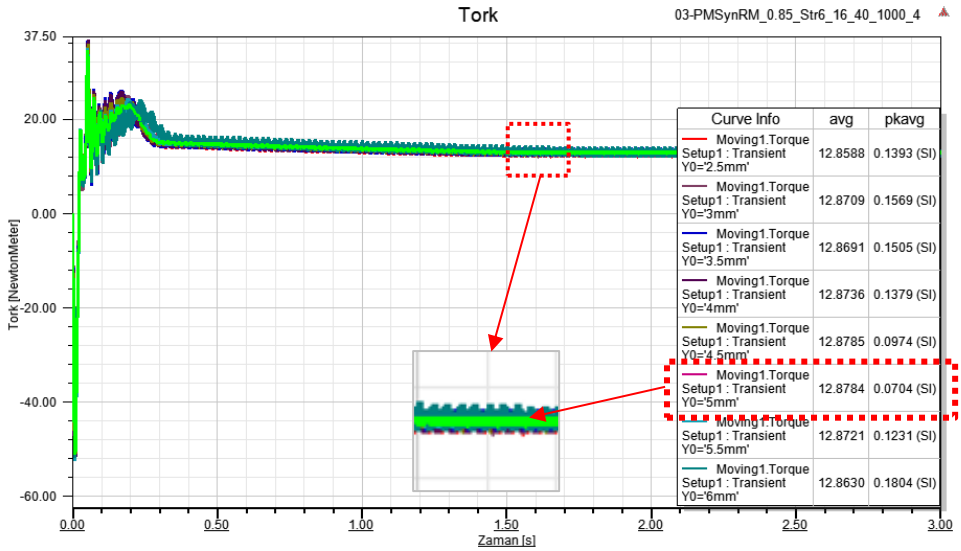
Şekil 2.18. B_0 parametresinin tork ve tork dalgalanmasına etkisi

En dışta bulunan bariyerin rotor dış kenarından olan uzaklığını ifade eden R_b parametresinin belirlenen alt ve üst sınırlar arasındaki değişiminin tork ve tork dalgalanma değerlerine etkisi Şekil 2.19'da gösterilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde Rb parametresi 6 mm olarak seçilmiştir.



Şekil 2.19. R_b parametresinin tork ve tork dalgalanmasına etkisi

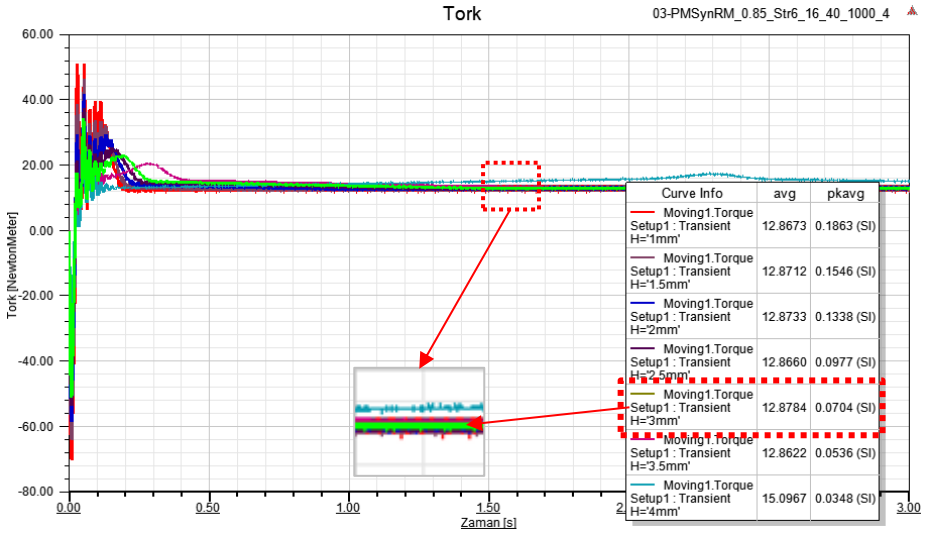
Bariyerler arası uzaklığı ifade eden Y_0 parametresinin belirlenen alt ve üst sınırlar arasındaki değişiminin tork ve tork dalgalanma değerlerine etkisi Şekil 2.20'de gösterilmiştir. Sonuçlar değerlendirildikten sonra Y_0 parametresi 5 mm olarak seçilmiştir.



Şekil 2.20. Y_0 parametresinin tork ve tork dalgalanmasına etkisi

Bariyerler bacakları ile hava aralığı arasındaki uzaklığı ifade eden H parametresinin belirlenen alt ve üst sınırlar arasındaki değişiminin tork ve tork dalgalanma değerlerine

etkisi Şekil 2.21'de gösterilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde H parametresi 3 mm olarak seçilmiştir.



Şekil 2.21. H parametresinin tork ve tork dalgalanmasına etkisi

Ayrıca bu eniyileme süreci kapsamında stator sargılarında kullanılan iletkenlerin çapları ve tur sayıları üzerinde de testler yapılarak nihai tasarım değerleri elde edilmiştir.

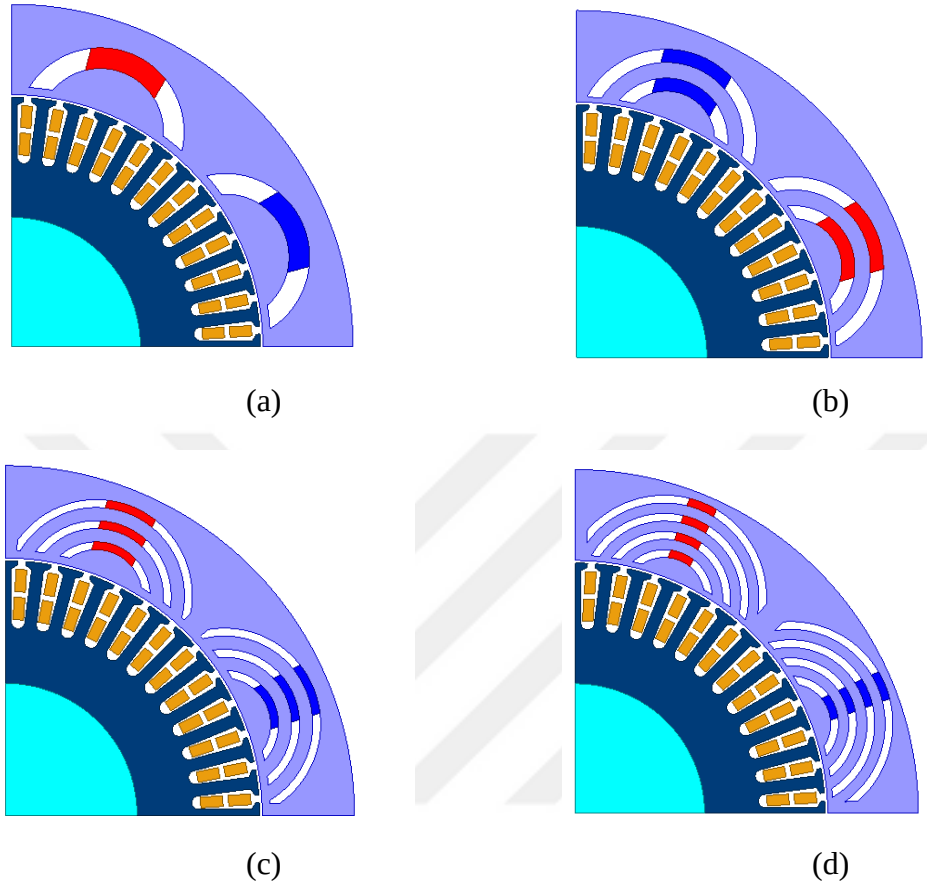
2.10.2.3. Rotor bariyer sayısına göre karşılaştırma yapılması

Tekerlek içi montajlı direkt sürücü uygulamalarında hızlanma, yavaşlama ve aşırı yüklü durumda tırmanmayı sağlamak için genellikle yüksek çıkış torku gerekir. Bununla birlikte tork dalgalanmaları da göz önünde bulundurmalıdır. Bu nedenle çıkış torku ve tork dalgalanmaları optimizasyon hedefleri olarak seçilmelidir (Zhu ve ark., 2016). İyi bir manyetik akı dağılımı elde etmek yani tork dalgalanmasında azalmayı sağlamak için rotor bariyerlerin konumu ve sayısı önemlidir (Nagarajan ve ark., 2019). Denklem (2.48) ile tork dalgalanma yüzdesi hesaplanabilir.

$$T_{rip.}(\%) = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{avg}} \text{ x } 100 \qquad (2.48)$$

Tasarımda tek bariyerli, iki bariyerli, üç bariyerli ve dört bariyerli tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon işlemleri yapıldıktan sonra çıkış torku ve tork dalgalanması değerleri elde edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Şekil 2.22'de tasarımda üzerinde çalışılan farklı rotor topolojileri gösterilmiştir. Tablo 2.6'da farklı

rotor topolojilerinden elde edilen çıkış tork değeri ve tork dalgalanması değerleri verilmiştir.



(a) (b)

(c) (d)

Şekil 2.22. Rotor topolojileri a) tek bariyerli b) 2 bariyerli c) 3 bariyerli d) 4 bariyerli

Tablo 2.6. Bariyer sayılarına göre çıkış torku ve tork dalgalanma değerleri

Bariyer sayısı	Çıkış torku (Nm)	Tork dalgalanması
1	12,6467	% 22,93
2	12,6446	% 12,88
3	**12,8717**	**% 6,96**
4	12,5851	% 9,01

Tablo 2.6'da görüldüğü gibi en optimum tork ve minimum tork dalgalanması 3 bariyerli tasarımda elde edilmiştir.

2.11. Kayıplar ve Verim

SMSynRM'de oluşan kayıplar incelendiğinde;

-Bakır Kayıpları (P_{Cu}): akımın karesine bağlı olarak stator sargılarında ürettiği joule etkisidir.

- Demir Kayıpları (P_{Fe}): histerezis ve manyetik akının (akı yoğunluğu ve frekansına bağlı olarak) zaman değişimine bağlı olarak motor çeliğinde indüklenen girdap akımları kayıplarından oluşan kayıplar,

- Sürekli mıknatıs kayıpları (P_{SM}): manyetik akının zaman değişimiyle (akı yoğunluğuna ve frekansına bağlı olarak) sürekli mıknatıs malzemesinde indüklenen histerezis ve girdap akımları kayıplarından oluşan kayıplar,

- Mekanik kayıplar (P_{mek}): sürtünme ve viskozite gibi mekanik olaylardan dolayı (dönme hızına bağlı olarak) olan kayıplar,

-Kaçak kayıplar (P_{st}): geleneksel kayıp koşullarında hesaba katılmayan her şeyi içeren kayıplardır (yani, indüksiyon makinelerinde yüksüz duruma kıyasla yük koşullarında meydana gelen ekstra kayıplar) (Deng, 1999, Bertotti ve ark. 1991, Marin, 2015).

$$\eta = \frac{P_{çıkış}}{P_{çıkış} + P_{kayıp}} \tag{2.49}$$

Burada η verim, $P_{çıkış}$ çıkış gücü ve $P_{kayıp}$ kayıp güçler toplamıdır.

2.12. Zıt EMK

Zıt EMK dalga biçimi önemlidir. İki temel sebepten dolayı zıt EMK dalga biçiminin iyi bir tahmini gereklidir. İlk etapta, motorun pürüzsüz tork üretme yeteneğinin önemli bir göstergesidir. Kare dalga motorlar, iletişim bölgesi boyunca düz olan bir zıt EMK dalga formuna ihtiyaç duyarken, bir sinüs dalgası motoru esasen sinüzoidal zıt EMK dalga formları gerektirir. Teoride, herhangi bir zıt EMK dalga formu ile pürüzsüz tork üretilecek şekilde kırpılarak mevcut dalga biçiminin profilini çıkarmak mümkündür, ancak bu sofistike elektronik gerektirir. Çoğu zaman, tasarımcılar, üretim kısıtlamalarının getirdiği makul sınırlar içinde, zıt EMK dalga biçimini yamuk veya sinüzoidal normlara mümkün olduğunca yaklaştırmayı amaçlamaktadır.

Zıt EMK dalga biçiminin iyi bir tahminini gerektirmenin ikinci nedeni, kontrolörü ile çalışan motorun doğru benzetimini, mevcut dalga biçimini ve doğru kontrol stratejisini belirlemektir.

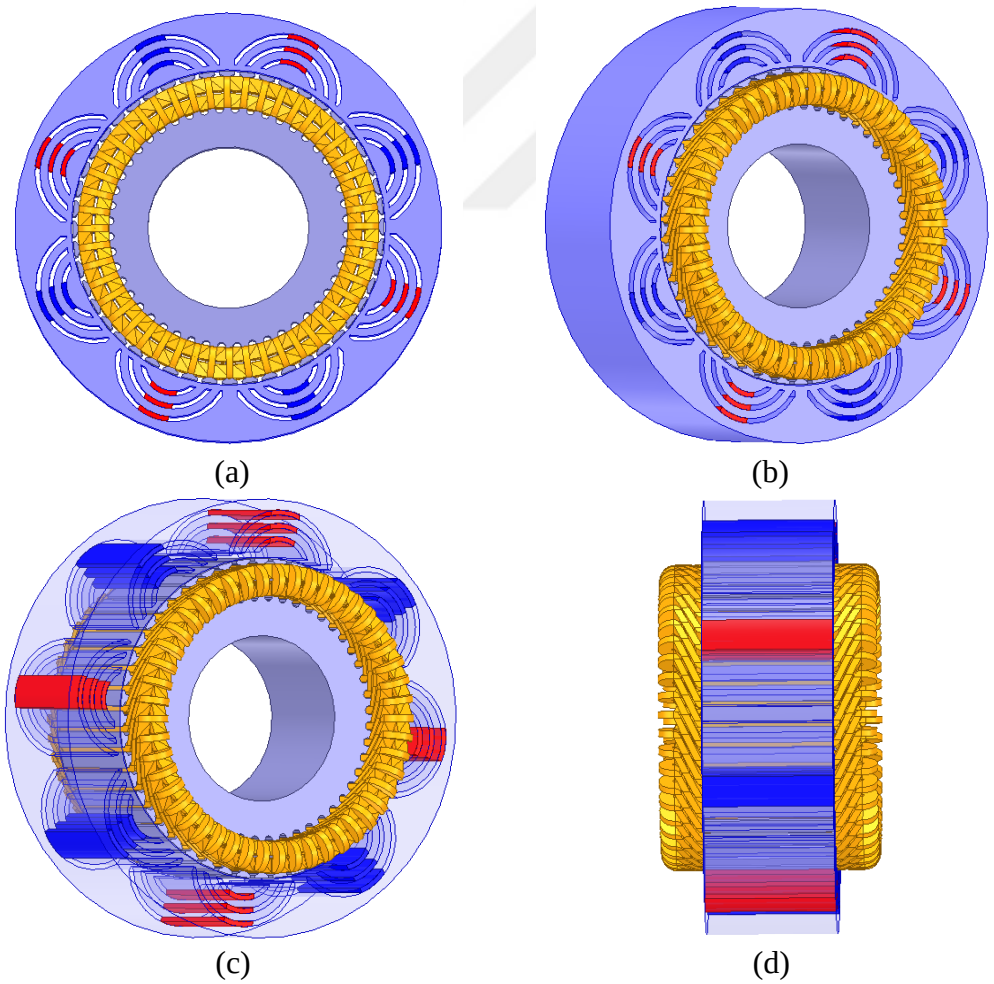
Zıt EMK, rotordaki sabit mıknatıslar tarafından üretilen akı bağından dolayı stator sargılarında indüklenen gerilimdir. Zıt EMK

$$E_{pm} = \frac{d\lambda pm}{dt} \tag{2.50}$$

olarak ifade edilebilir (Vartainan 2014).

2.13. Tasarımın 3-Boyutlu Görünümü

Şekil 2.23'te tasarlanan üç fazlı SMSynRM'nin farklı açılardan 3-B görüntüleri verilmiştir.



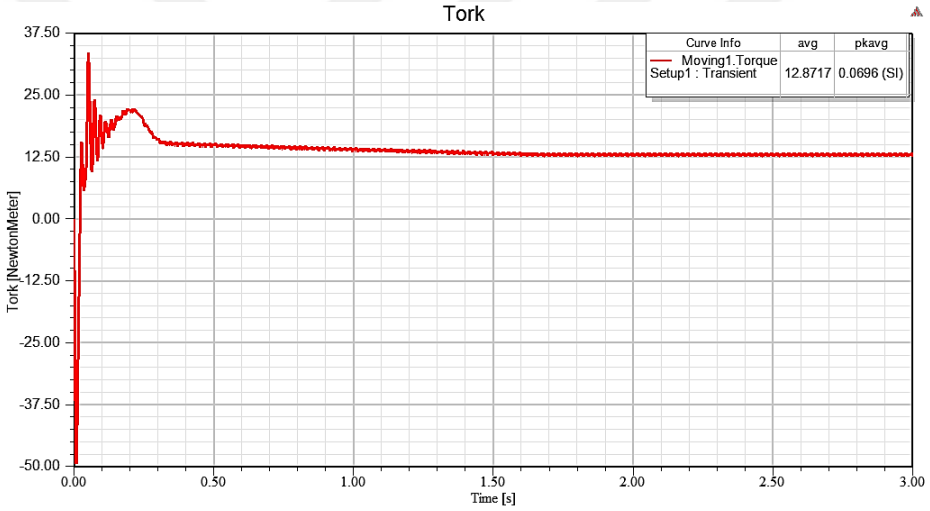
Şekil 2.23. SMSynRM'nin 3B görünüşleri

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

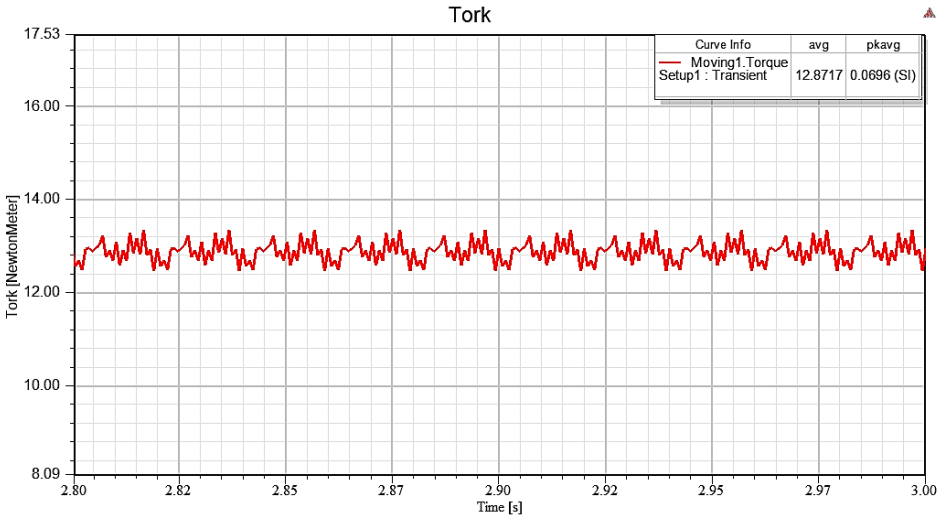
Bu bölümde eniyileme işlemleri sonrasında nihai ölçüleri belirlenmiş olan dış rotorlu SMSynRM'nin ANSYS Maxwell'de gerçekleştirilen analiz işlemlerinin sonuçları, motorun imalat aşamaları ve performans test sonuçları üzerinde durulmuştur.

3.1.Benzetim Sonuçları

Tasarlanan üç fazlı dış rotorlu SMSynRM motorun benzetim sonuçlarında öncelikle üzerinde durulan motorun çıkış tork üretimi ve minimum tork dalgalanmasının elde edilmesidir. Bu işlem optimizasyon sürecinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.1'de motorun ürettiği tork-zaman grafiği ve Şekil 3.2'de tork dalgalanmaları görülmektedir. Bu motor 12.87 Nm tork üretmektedir ve tork dalgalanması %6.96'dır.

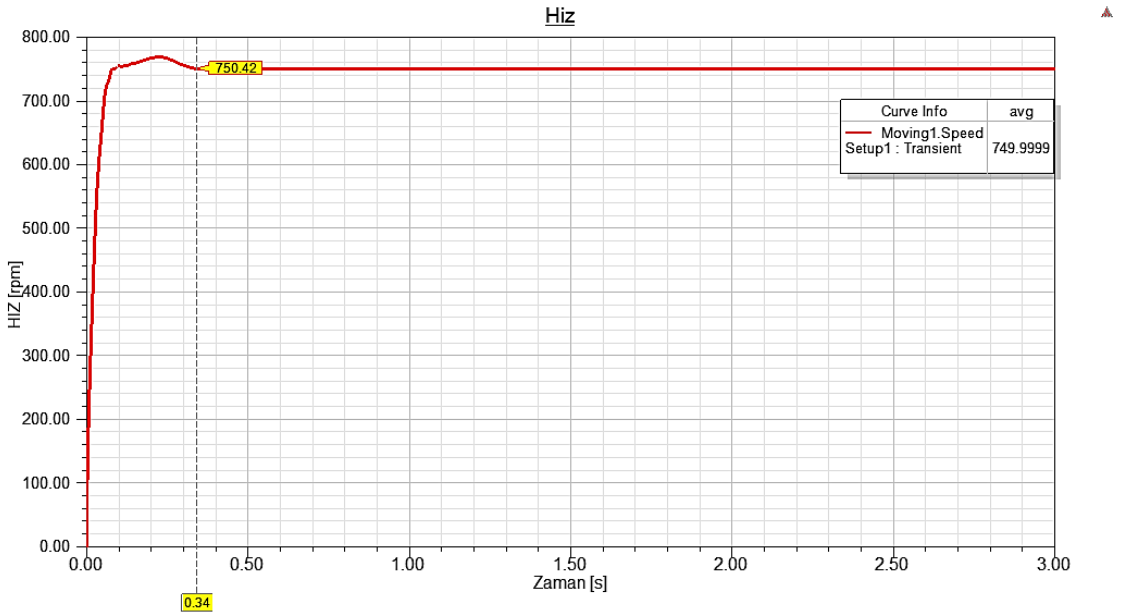


Şekil 3.1. Tork-zaman grafiği



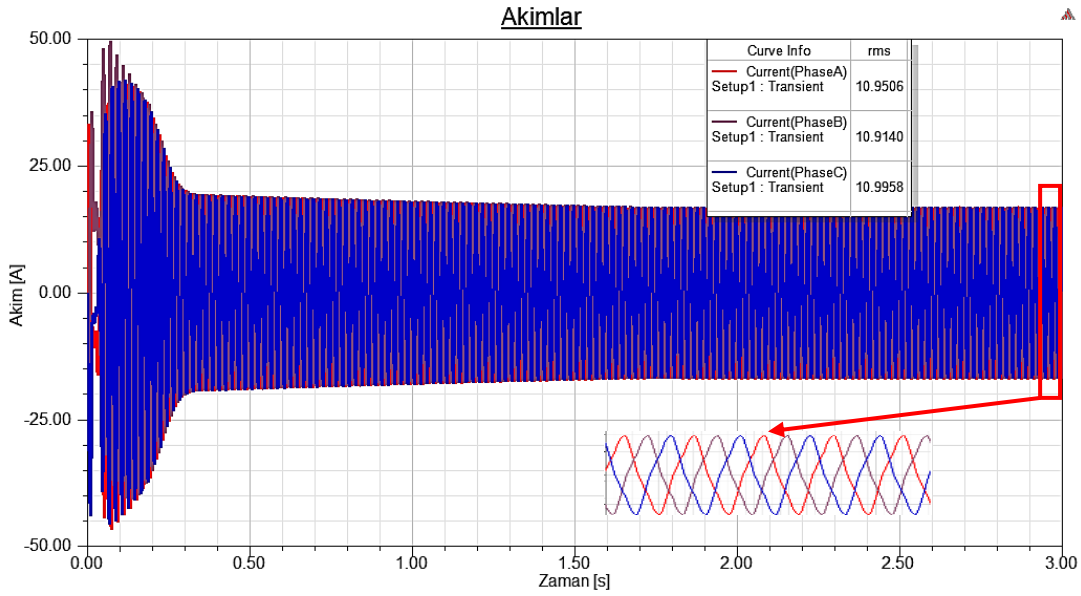
Şekil 3.2. Tork dalgalanması

Şekil 3.3'te üç fazlı, dış rotorlu SMSynRM'nin hız-zaman grafiği verilmiştir. Burada tasarlanan motorun 0.34 sn'de nominal hız olan 750 d/d'ye ulaştığı görülmektedir.



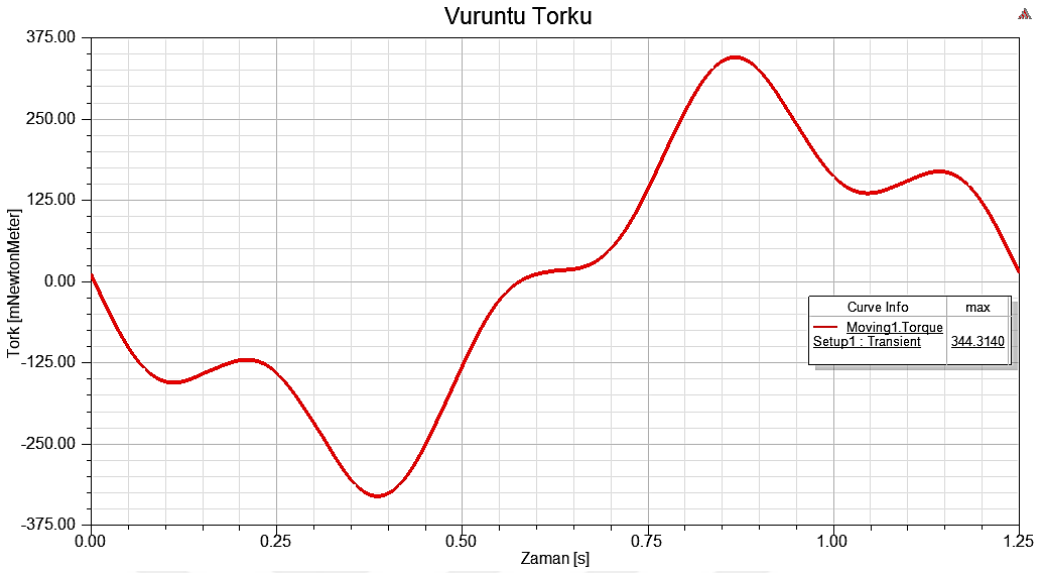
Şekil 3.3. Hız-zaman grafiği

Tasarlanan motorun stator sargılarından çekeceği üç faz akımları gösteren grafik Şekil 3.4'te verilmiştir. Stator sargılarından çekilen akımların etkin değeri yaklaşık 10.95 A'dir. Bu değer tasarım başlangıcında belirtilen anma akımının 13 A'den küçük olması şartını sağlamaktadır.



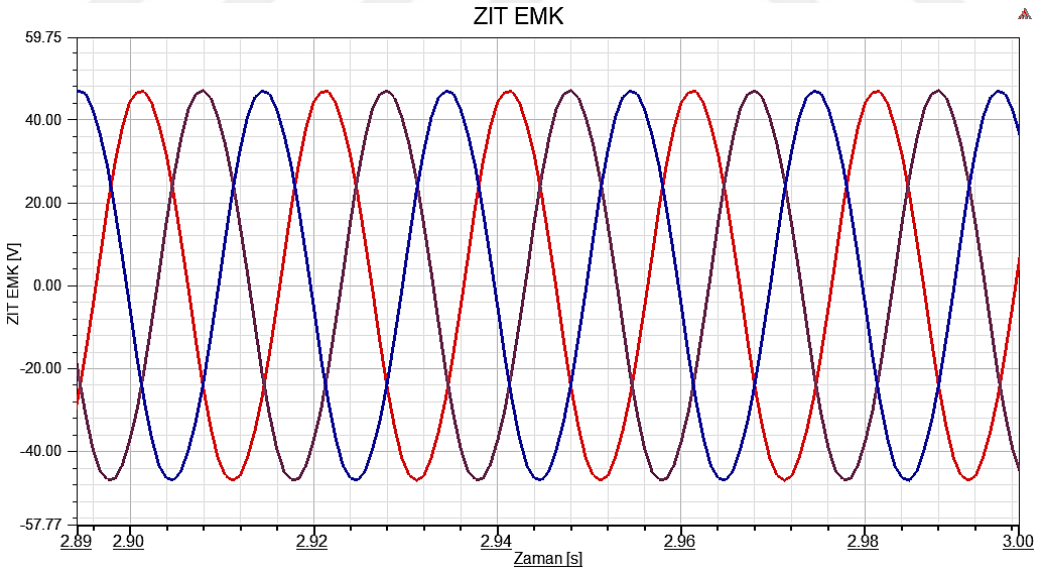
Şekil 3.4. Üç faz akım-zaman grafiği

Tasarlanan SMSynRM'nin vuruntu tork eğrisi Şekil 3.5'te verilmiştir. Buna göre vuruntu tork değeri 0.34 Nm'dir.



Şekil 3.5. Vuruntu torku

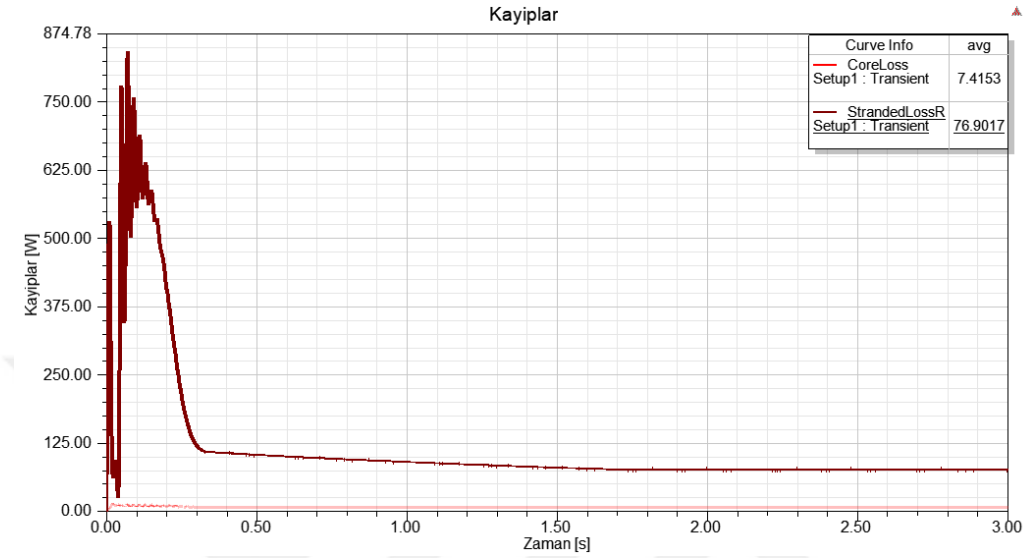
Sargılarda indüklenen gerilimler Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi sargılarda oluşan zıt EMK düzgün bir sinüs dalgası şeklindedir.



Şekil 3.6. Zıt EMK

Tasarlanan üç fazlı dış rotorlu SMSynRM'nin en önemli özelliği rotor yapısında sargılarının olmaması aynı zamanda sargıların yerine sabit mıknatısların yerleştirilmesi motorun verimini artırmıştır. Tasarlanan motorda optimum değerler elde edildikten sonra verim de değerlendirilmiştir. 750 d/d hızdaki motorun çıkış gücü ($P_{çıkış}$) 1 kW'tır.

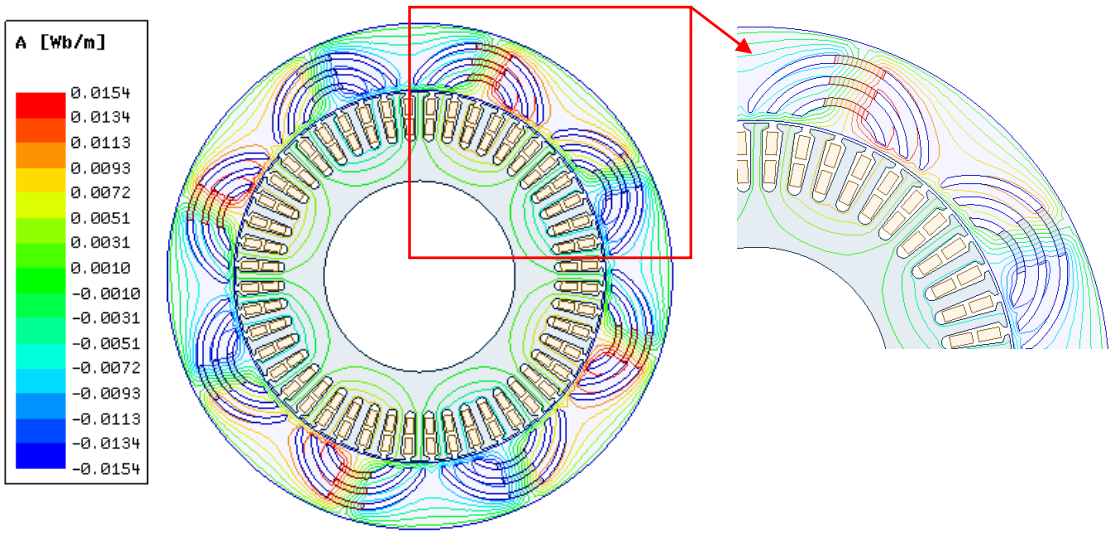
Şekil 3.7'de analizler sonrası elde edilen kayıplar gösterilmiştir. Kayıp güçleri ($P_{kayıp}$) değerlendirecek olursak; demir kayıpları 7.41 W, kaçak kayıplar 76.9 W ve diğer kayıplar 12 W olarak kabul edildiğinde Denklem (2.49)'dan motorun verimi %91.30 olarak elde edilmiştir.



Şekil 3.7. Kayıplar

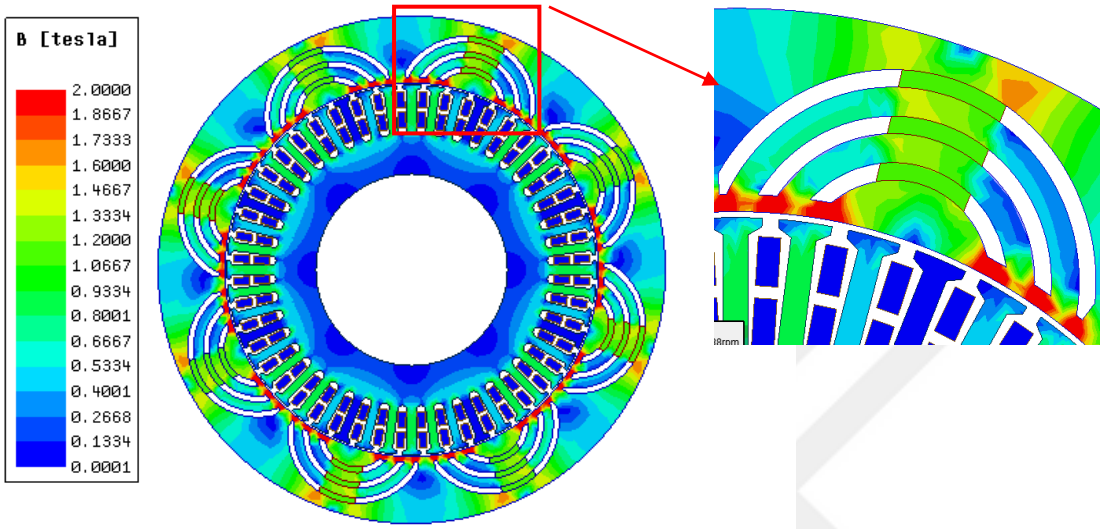
3.2.Manyetik Analiz

Mıknatıslar ve bobinler tarafından üretilen manyetik akı çizgilerinin stator ve rotor nüvesi üzerindeki dağılımı Şekil 3.8'de üç fazlı dış rotorlu SMSynRM için gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi akı çizgilerinin dağılımlarının düzenli olduğu ve rotorda düzenli bir kutuplaşmanın olduğu görülmektedir.



Şekil 3.8. SMSynRM'nin akı dağılımı

Şekil 3.9'da üç fazlı SMSynRM'nin rotor ve statorundaki manyetik akı yoğunlukları gösterilmiştir. Burada rotor ve stator nüvesinde oluşan manyetik akı yoğunluğunun sadece bariyer ayakları ile hava aralığı arasındaki bölgelerde maksimum 2 T olduğu ve aynı zamanda da düzgün bir manyetik akı dağılımının gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 3.9. Manyetik akı yoğunluğu

3.3.Sabit Güçte Farklı Hız Testleri

EA'lardaki çekiş uygulamalarında çok çeşitli sabit güç hızları sağlamak önemlidir. Yapılan analizlerle tasarlanan motorun sabit güçte farklı hızlardaki tork, tork dalgalanması, akım, toplam kayıp ve verimlilik değerleri elde edilmiş ve elde edilen tüm değerler Tablo 3.1'de gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Tasarlanan motorun sabit güçte ve farklı hızlarda temel karakteristikleri.

Hız (d/d)	500	600	750	800	1000	1200	1500
Tork (Nm)	19.09	16.10	12.87	12.21	10.05	8.07	6.47
Tork dalgalanması	6.09%	6.69%	6.96%	7.99%	8.25%	10.52%	12.44%
Akım (A)	13.49	12.13	10.95	10.92	10.61	9.99	10.06
Toplam kayıp (W)	137.42	115.11	96.32	94.74	90.76	81.74	82.38
Çıkış gücü (W)	999.25	1011.25	1010.87	1022.53	1052.35	1014.03	1016.15
Giriş gücü (W)	1136.67	1126.36	1107.18	1117.27	1143.11	1095.77	1098.53
Verim	87.91%	89.78%	91.30%	91.52%	92.06%	92.54%	92.50%

Tablo incelendiğinde nominal hızın altındaki hızlarda verim değerlerinin nominal hızdaki verim değerinden düşük, nominal hızdan yüksek hızlarda ise yüksek olduğu görülmektedir.

3.4. Farklı Yüklerdeki Benzetim Sonuçları

Tasarımı yapılan SMSynRM'nin farklı yüklerde nasıl davranacağının belirlenmesi amacıyla 13 Nm, 20 Nm ve 26 Nm yükler kullanılarak yükleme analizleri gerçekleştirilmiş ve edilen sonuçlar Tablo 3.2'de verilmiştir. Sonuçlara bakıldığında, tasarlanan SMSynRM, tam yüklenme değeri olan 13 Nm'nin %50 ve %100 fazlası ile yüklendiğinde verim değerinde yaklaşık %5 düşme görülmüştür.

Tablo 3.2. Benzetim ortamında farklı yüklerde çalışma test sonuçları

Yük (Nm)	Giriş Gücü (W)	Çıkış Gücü (W)	Verim
13	1107,18	1010,87	91,30%
20	1796,02	1548,42	86,21%
26	2100,80	1809,80	86,14%

3.5.Dış Rotorlu SMSynRM'nin İmalatı

Başlangıç ve sınır değerlerinin belirlenmesiyle başlayan çalışmamızın tüm geçici zaman analizi ile manyetik ve akım-gerilim analizleri yapıldıktan sonra istenilen performanslar Maxwell programında SEA ile elde edilmiştir. Tezin bu aşamasında ise tasarlanan SMSynRM'nin prototip imalatı ve performans testleri yapılmıştır.
Prototip imalatına önce stator ve rotor sac kesimleriyle başlanmıştır. Sonrasında stator ve rotor sacları paketlenmiş, stator sargı sarımı yapılmış ve rotor bariyerlerine mıknatıslar yerleştirilmiştir. Prototip imalatı tamamlandıktan sonra bir motor test düzeneğinde çalışması sağlanmış ve performans testleri yapılmıştır.

3.5.1. Statorun imalatı

SEA'da gerçekleştirilen stator boyutlandırılması ve stator oluklarının belirlenen tip ve boyutlarına göre stator saç kesimi lazer kesim yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Şekil 3.10'da kesim sonrası bir stator sac tabakası görülmektedir.



Şekil 3.10. Stator sac tabakası

Stator sac tabakaları 0.5 mm M470-50A sac kullanılarak yapılmıştır. Prototipin paket boyu değerine göre toplamda 160 stator sac tabakası kullanılarak stator paketlenmiştir. Statorun paketlenmesi işlemi Şekil 3.11'de gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Stator sac tabakalarının paketlenmesi

Stator paketlendikten sonra SEA' de belirlenen stator sarım şekli, iletken türü ve tur sayısına göre stator sargı sarımı yapılmıştır. Şekil 3.12'de sargı sarım işlemi ve Şekil 3.13'te sarımı tamamlanmış stator görülmektedir.



Şekil 3.12. Stator sargı sarımı



Şekil 3.13. Sarımı tamamlanmış stator

3.5.2. Rotorun imalatı

SEA'da elde edilen rotor boyutlandırması ve bariyer sayısı referans alınarak rotor sac kesimleri lazer kesim yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Şekil 3.14'te kesimi yaptırılan rotor sac tabakası gösterilmiştir.



Şekil 3.14. Rotor sac tabakası

Rotor 160 adet 0.5 mm M470-50A sac tabakasının paketlenmesiyle yapılmıştır. Paketlenmesi tamamlanmış rotor Şekil 3.15'te gösterilmiştir.



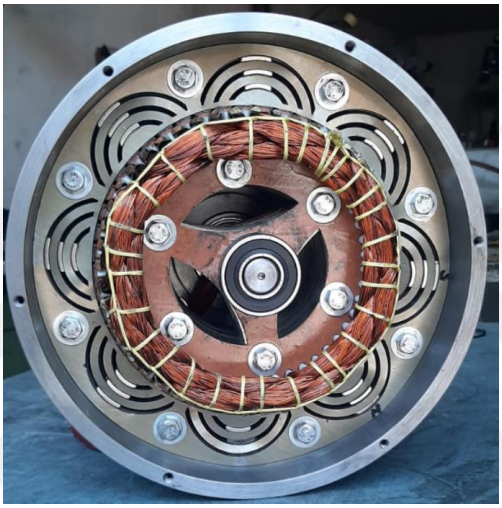
Şekil 3.15. Paketlenmiş rotor

Rotor sac tabakalarının paketlenmesinden sonra rotor bariyerlerine Şekil 3.16'da gösterilen N35H arc mıknatıslar yerleştirilmiştir.



Şekil 3.16. N35H arc mıknatıslar

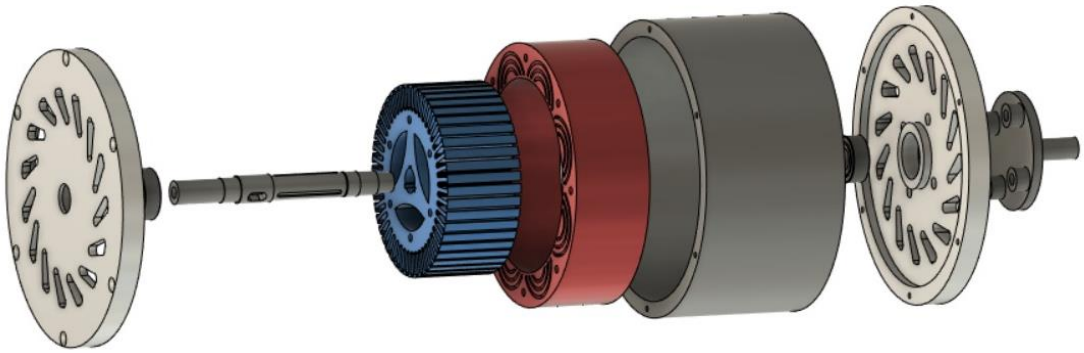
Şekil 3.17'de bariyerlere mıknatısların yerleştirilmesi sonrası durum gösterilmiştir.



Şekil 3.17. Mıknatısların rotor bariyerlerine yerleşimi

3.6. Motor Parçaların Birleştirilmesi

İmalatı tamamlanan prototipin stator ve rotorunum bir araya getirilmesi ve motorun dönme hareketinin aktarılmasını sağlamak için kapak ve mil tasarımı ve imalatı yapılmıştır. Şekil 3.18'de tasarlanan motor kapağı ve motor mili verilmiştir.



Şekil 3.18. Motor parçalarının birleştirilmesi

Motorun kapak ve mil tasarımı dış rotorlu SMSynRM'nin elektrikli aracın tekerleğine monte edilebilmesini sağlayacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Kapaklar ve dış kılıf birbirlerine sıkıca bağlanmış, milde bulunan rulmanlar ile rotorun statordan bağımsız hareketi sağlanmıştır. Burada mil stator sargılarının motor dışına alınmasında da görev yapmaktadır. Bunlara ek olarak, stator elektrikli araca sabitlenecek olduğundan rotorun araç tekerleği ile senkron bir şekilde dönmesi mümkün hale getirilmiştir. Şekil 3.19'da tasarımı gerçekleştirilen motor parçalarının birleştirilmesi aşamaları gösterilmiştir.



(a)



(b)

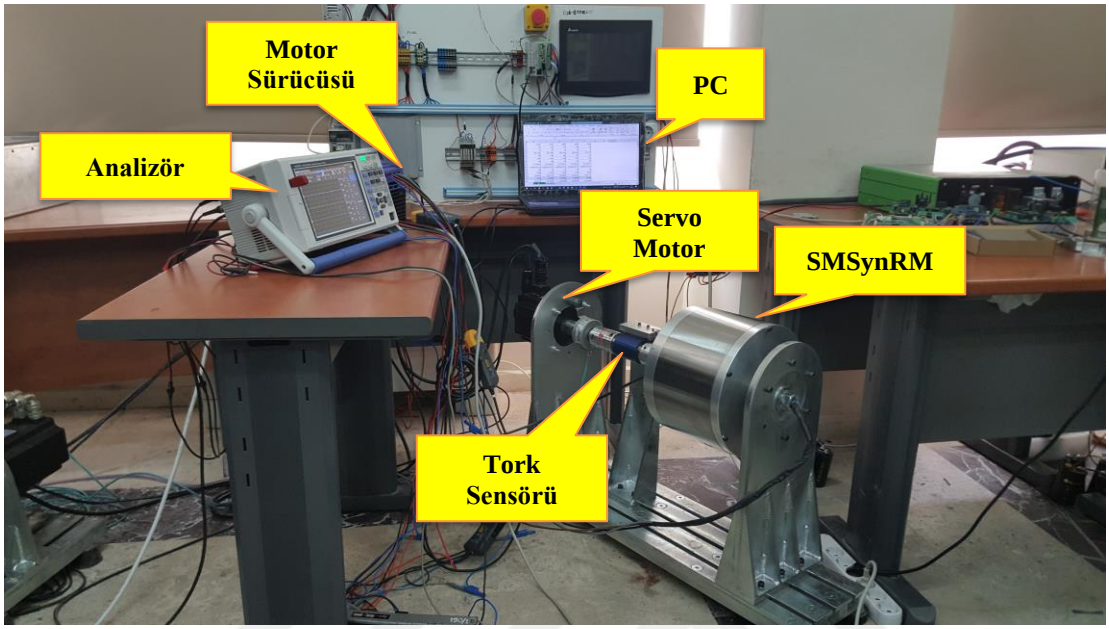


(c)

Şekil 3.19. Parçaların birleştirilmesi a) Rotoun gövdeyle birleştirilmesi b) Rotor ve statorun birleştirilmesi c) İmalatı tamamlanan motor prototipi

3.7. Dış rotorlu SMSynRM'nin Test Edilmesi

SMSynRM, prototip imalatı tamamlandıktan sonra performans analizi gerçekleştirmek için motor bir test düzeneğine bağlanmıştır. Test düzeneği Şekil 3.20'de görülmektedir.



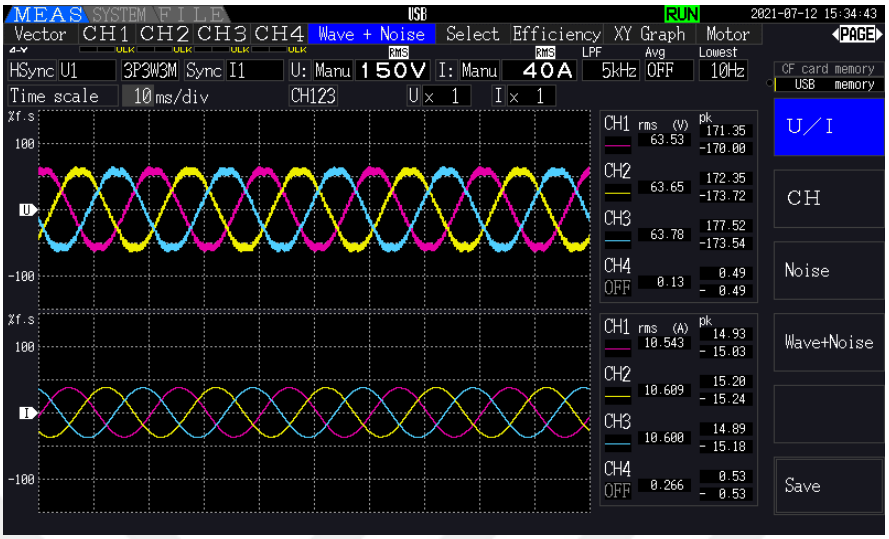
Şekil 3.20. Test düzeneği

Yükleme ve dinamik analizlerin yapılabilmesi için prototipin miline bir SMSM jeneratör modunda bağlanmıştır. Test düzeneği ile tasarlanan motorun boşta çalıştırılabilmesi ve farklı torklarda yüklerin motora uygulanması ya da devre dışı bırakılması mümkün olmuştur. Motor miline bağlı tork sensörü ile motorun eş zamanlı yüklenme durumu gözlemlenebilmiş, deney düzeneğinde istenilen akım, gerilim, tork ve güç gibi motorun dinamik değerleri güç analizörü ile izlenmiş ve tüm test verileri analizöre takılan bir flash belleğe CSV formatında dosyalar olarak kaydedilmiştir. Ayrıca analizörün ekran görüntüsü yakalama özelliği kullanılarak ekran görüntüleri de alınmıştır.

3.8. Deneysel Sonuçlar

Tasarımı ve imalatı yapılan prototipin farklı yüklerde nasıl davranacağının belirlenmesi için 750 d/d sabit hızda, boşta ve farklı yüklerde performans testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testler sırasında akım, gerilim, tork ve güç değerleri analizör ile izlenmiştir. Şekil 3.21'de prototipin nominal tork değeri olan 13 Nm yük altında stator sargılarındaki akım ve gerilim değerlerine ait analizörden alınan ekran görüntüsü verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi stator sargılarından 13 Nm yük altında 10.61 A akımın geçtiği ve bu

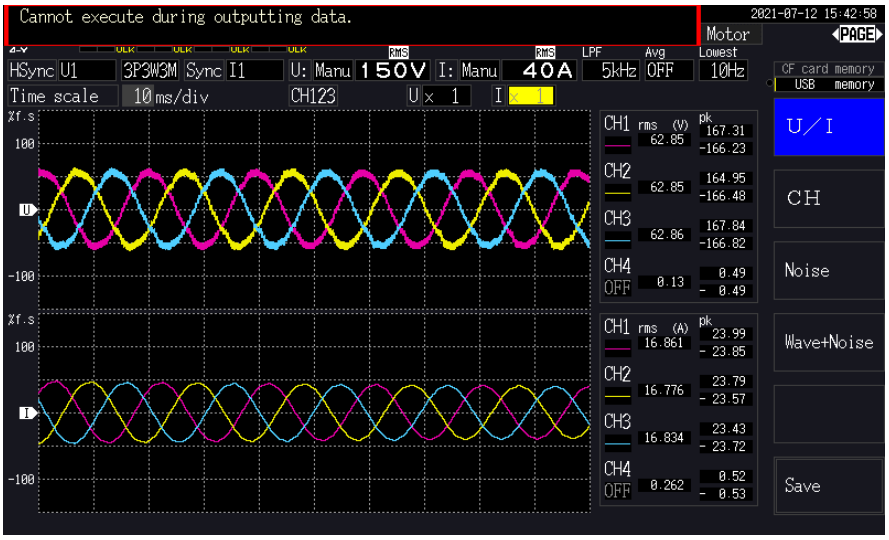
değerin Şekil 3.4'teki benzetim sonuçlarında görülen 10.95 A'lik akım değerinden daha düşük bir değer olduğu belirlenmiştir.



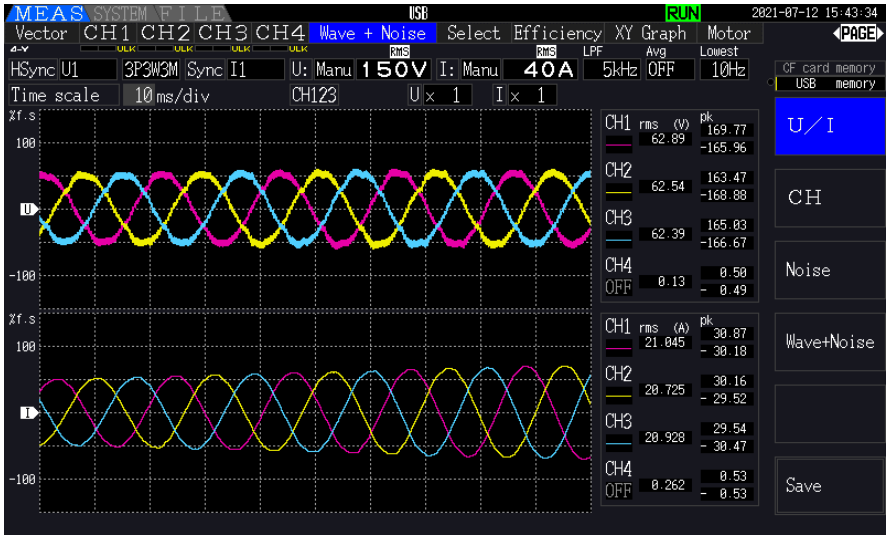
Şekil 3.21. 13 Nm yükte elde edilen akım ve gerilim değerleri

Nominal tork değerinin üzerindeki yüklerde prototipin nasıl davranacağının tespit edilebilmesi için 20 Nm ve 26 Nm yüklerde de performans testleri gerçekleştirilmiştir.

Şekil 3.22'de 20 Nm ve Şekil 3.23'te ise 26 Nm yük altında stator sargılarındaki akım ve gerilim değerlerine ait analizör ekran görüntüleri verilmiştir.



Şekil 3.22. 20 Nm yükte elde edilen akım ve gerilim değerleri



Şekil 3.23. 26 Nm yükte elde edilen akım ve gerilim değerleri

Şekil 3.23'teki görüntüde gösterilen akım eğrisinin baş kısmındaki değer ile son kısmındaki değer arasındaki farklılık ekran görüntüsü alma işleminin 20 Nm yükten 26 Nm yüke geçme aralığında yapılmasından kaynaklanmıştır.

20 Nm yükte stator sargılarından geçen akım olan 16.86 A değeri ile 26 Nm yükte gözlemlenen 21 A değerlerinin benzetim sırasında elde edilen sırasıyla 18.48 A ve 23.60 A değerlerinden düşük olduğu belirlenmiştir. Kaydedilen güç değerleri ve bu değerlerden hesaplanan verim değerleri Tablo 3.3'te verilmiştir.

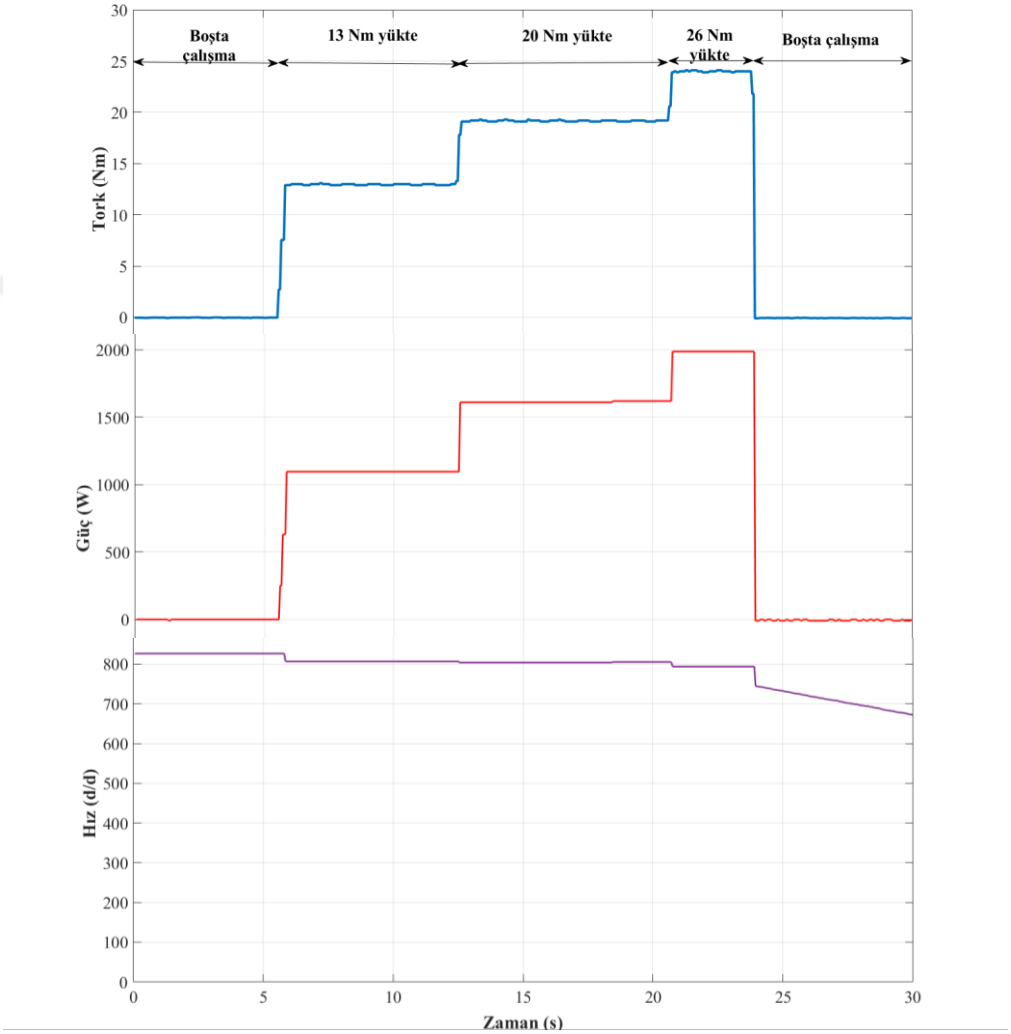
Tablo 3.3. Benzetim ve Deneysel testlerdeki farklı yüklerde çalışma test sonuçları

Yük (Nm)	Benzetim Giriş Gücü (W)	Performans Testi Giriş Gücü (W)	Benzetim Çıkış Gücü (W)	Performans Testi Çıkış Gücü (W)	Benzetim Verim	Performans Testi Verim
13	1107,18	**1210,40**	1010,87	**1095,97**	91,30%	**90,55%**
20	1796,02	**1815,05**	1548,42	**1613,47**	86,21%	**88,89%**
26	2100,80	**2275,01**	1809,80	**1994,67**	86,14%	**87,68%**

Deneysel çalışmada elde edilen sonuçların benzetimde elde edilen sonuçlara yakın olduğu tespit edilmiştir. Arada oluşan küçük farklılıklar benzetimde öngörülen sürtünme kayıplarının düşük olmasından kaynaklanmaktadır.

Tasarımı ve imalatı gerçekleştirilen SMSynRM'nin farklı yüklerde çalışmasının gözlemlenmesi için ikinci bir yükleme testi yapılmıştır. Bu testte prototipin yaklaşık 6 sn boşta, ardından sırasıyla yaklaşık 7 sn 13 Nm, yaklaşık 8 sn 20 Nm ve son olarak da

yaklaşık 3 sn 26 Nm yüklerle yüklenmesinin beraberce uygulandığı bir test senaryosu uygulanmıştır. Bu test sürecinden elde edilen tork, güç ve hız değerleri analizörden flash belleğe kaydedilmiştir. Bu kayıt alma işleminde tüm kayıtların aynı işlem süresi ve örnekleme zamanı ile kaydedilmeleri sebebi ile üç ayrı veri grubu alt alta getirilerek grafikleştirilmiş ve elde edilen grafik grubu Şekil 3.24'te gösterilmiştir.



Şekil 3.24. Farklı yüklerde tork, güç ve hız

Sonuç grafikleri incelendiğinde güç ve hız eğrilerinde dalgalanmalar meydana gelmesine rağmen dış rotorlu SMSynRM'nin uygulanan yüklere uygun bir şekilde reaksiyon gösterdiği, ayrıca deney sisteminden analizöre yapılan ölçüm bağlantılarında herhangi bir filtrenin olmayışı ve prototipin yüklenmesinde bir SMSM kullanılmasının getirdiği vuruntular sebebiyle oluştuğu belirlenmiştir. Buna rağmen benzetim sonuçları ile performans testlerinde elde edilen sonuçların örtüştüğü görülmüştür.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Efficiency Challenge yarışmalarına katılacak bir EA için dış rotorlu üç fazlı bir SMSynRM tasarımı yapılmıştır. Tez sürecinin başında literatür araştırmaları yapılmıştır. Bu kapsamda EA'larda ve HEA'larda kullanılan motorlar incelenmiş ve bunların avantaj ve dezavantajları belirlenmiştir. Ardından SynRM ve SMSynRM'ler incelenmiş ve bu motorların karşılaştırmaları yapılmıştır.

Bilgisayar destekli tasarım uygulamaları ANSYS Maxwell programı kullanılmıştır. Tasarıma başlangıç özellikleri ve sınır koşulları belirlenerek başlanmıştır. Motorun boyutlandırılması, kullanılacağı EA'nın tekerleğinin içine yerleştirilecek şekilde uygun boyutlarda yapılmıştır. Tasarım şartlarında belirtilen tork ve düşük tork dalgalanması değerlerinin elde edilmesi için farklı geometride bariyerlere, farklı bariyer sayılarına ve farklı mıknatıs boyutlarda ve geometrilerde mıknatıslara sahip rotor topolojileri tasarlanmıştır. Bunlara ek olarak farklı oluk tipleri, oluk sayıları ve sargı türleri de denenmiştir.

Tüm tasarımlar modellerinin 1/8'lik parçaları ile ayrı ayrı akım analizi ile parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen tüm analiz sonuçları ayrı ayrı dosyalarda sınıflanmış ve değerler değerlendirilmiştir. Yapılan değerlendirmeler sonrasında 48 oluk/8 kutup kombinasyonu, iki katman stator sargı tipi ve 3 bariyerli rotor topolojisi seçilmiştir. Motor 750 d/d hızda, 1 kWatt güçte çalışacak ve 12.8717 Nm tork üretecek şekilde tasarlanmıştır. Aynı zamanda tasarlanan motorun verimi analizler sonucunda %91.30 olarak bulunmuştur. Benzetim sonuçları ANSYS Maxwell programında 2D SEA yöntemi ile elde edilmiştir. Aynı zamanda dağıtılmış ve iki katmanlı sargı ile tork dalgalanmaları en az seviyeye indirilmeye çalışılmıştır. Bunun için rotor akı bariyerlerinin de stator oluk sayı ve kutup sayısı kombinasyonuna uygunluğu optimizasyonda göz önünde bulundurulmuştur. Motor stator dişlerinde ve rotor sac tabakası üzerindeki akı yoğunlukları istenen değerlerin içerisinde olduğundan doyum bölgesine yakın bir çalışma noktasında çalıştırılmaktadır. Bu sayede yüksek verim değeri elde edilmiştir.

Motorun nihai tasarımı elde edildikten sonra benzetim ortamında sabit güçte farklı hızlarda motorun çalışması ile ilgili testler gerçekleştirilmiş ve sonuçlar tablolanmıştır. Farklı hız test sonuçları incelendiğinde nominal hızın altındaki hızlarda verim

değerlerinin nominal hızdaki verim değerinden düşük, nominal hızdan yüksek hızlarda ise nominal hızdaki verim değerinden yüksek verim değerleri elde edilmiştir.

Yine benzetim ortamında tasarımı yapılan SMSynRM'nin farklı yüklerde nasıl davranacağının belirlenmesi amacıyla 13 Nm, 20 Nm ve 26 Nm'de yükler kullanılarak motorun yüklenme analizleri gerçekleştirilmiştir. Test sonuçlarına göre tasarımı yapılan SMSynRM, tam yüklenme değeri olan 13 Nm'nin %50 ve %100 fazlası ile yüklendiğinde verim değerinde yaklaşık %5 düşme görülmüştür.

Benzetim sürecindeki tasarım ve analizler sonrasında nihai tasarım modeline ulaşılmış ve prototip imalatı yapılmış ve ardından performans testleri gerçekleştirilmiştir. Performans testi kapsamında prototipin 13 Nm yük altında 10.61 A akımın geçtiği ve bu değerin aynı şartlardaki benzetim sonuçlarında görülen 10.90 A'lik akım değerinden daha düşük bir değer olduğu belirlenmiştir. Ayrıca 20 Nm yükte stator sargılarından geçen akım olan 16.86 A değeri ile 26 Nm yükte gözlemlenen 21 A değerinin benzetim sırasında elde edilen sırasıyla 18.48 A ve 23.60 A değerlerinden düşük olduğu gözlemlenmiştir.

SMSynRM'nin farklı yükler altında performansının gözlemlenmesi için ikinci bir yükleme testi yapılmıştır. Bu testte prototip farklı zaman aralıklarında ve artarda boşta, 13 Nm, 20 Nm ve 26 Nm yüklerle yüklendiği bir test senaryosu uygulanmıştır. Bu test sürecinden elde edilen tork, güç ve hız değerleri tek bir şekil altında birleştirilmiş ve değerlendirilmiştir. Bu grafiklerde güç ve hız eğrilerinde oluşan dalgalanmalara rağmen prototipin uygulanan yüklere uygun bir şekilde reaksiyon gösterdiği görülmüştür. Bu dalgalanmalara analizöre yapılan ölçüm bağlantılarında herhangi bir filtrenin olmayışının ve prototipin yüklenmesinde bir SMSM kullanılmasının getirdiği vuruntuların sebep olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Buna rağmen benzetim sonuçları ile performans testlerinde elde edilen sonuçların örtüştüğü ve tasarlanan üç fazlı dış rotorlu SMSynRM EA'larda kullanım için istenilen performansı sağlayacağı belirlenmiştir.

Gelecekte yapılacak çalışmalar olarak farklı rotor topolojileri ile bu tez çalışmasında elde edilen daha yüksek güce, yüksek torka ve düşük tork dalgalanmasına sahip yeni SMSynRM tasarımı yapılması planlanmaktadır. Ayrıca EA'lar için tasarımı ve imalatı gerçekleştirilen bu tip motorların performans testlerinin yapılması için yeni test düzeneklerinin kurulması ile ilgili projelerin hayata geçirilmesi düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

Aghazadeh, H., Afjei, E., Siadatan, A., (2018), Sensitivity Analysis of External-Rotor Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor, World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Energy and Power Engineering, 12(6), 426-430.

Aghazadeh, H., Afjei, E., Siadatan, A., (2019), Comparative Analysis of Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor with External-Rotor, 10th International Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC), 12-14 February, Shiraz University, Iran.

Aghazadeh, H., Afjei, E., Siadatan, A., (2019), Comprehensive Design Procedure and Manufacturing of Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor, International Journal of Engineering, 32 (9), 1299-1305.

Anekunu, A. Y., Chowdhury, S. P. and Chowdhury, S., (2013), A Review of Research and Development on Switched Reluctance Motor for Electric Vehicles, IEEE Power & Energy Society General Meeting, 21-25 July, Vancouver, BC, Canada.

Ashkezari, J. D., Khajeroshanaee, H., Niasati, M., Mojibian, M., J., (2017), Optimum Design and Operation Analysis of Permanent Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Motor, Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 25, 1894-1907.

Bacco G., Bianchi, N., (2019), Design Criteria of Flux-Barriers in Synchronous Reluctance Machines, IEEE Transactions on Industry Applications, 55(3), 2490-2498.

Bertotti, G., Boglietti, A., Chiampi, M., Chiarabaglio, D., Fiorillo, F., & Lazzari, M., (1991), An improved estimation of iron losses in rotating electrical machines. IEEE Transactions on Magnetics, 27(6), 5007–5009.

Betz, R.E., Lagerquist, R., Jovanovic, M., Miller, T.J.E.and Middleton, R.H., (1993), Control of Synchronous Reluctance Machines, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 29(6), 1110-1122.

Bianchi, N. (2013), Synchronous Reluctance and Interior Permanent Magnet Motors. IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD), 11-12 March, Paris.

Bianchi, N., Bolognani, S., Carraro, E., Castiello, M. and Fornasiero, E., (2016), Electric Vehicle Traction Based on Synchronous Reluctance Motors, IEEE Transactions on Industry Applications, 52(6), 4762-4769.

Boldea, I., Fu, Z. X., Nasar, S. A., (1994), Performance Evaluation of Axially Laminated Anisotropic (ALA) Rotor Reluctance Synchronous Motors. IEEE Transactions on Industry Applications, 30(4), 977–985.

Boldea, I., Tutelea, L., (2019), Reluctance Synchronous Machines Drives and Control, CRC Press, Taylor&Francis Group.

Bondar, M., (2018), Prehistoric innovations: Wheels and Wheeled Vehicles, Acta Archaeologica Academiae Scientiarum Hungaricae, 69, 271-298.

Bonthu, S. S. R., Islam M. Z. and Choi, S., (2017), Design of A Rare Earth Free External Rotor Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor, 2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), 21-24 May, Miami, FL, USA.

Bonthu, S. S. R., Islam, M. Z., Arafat, A. Choi, S., (2017), Five-Phase External Rotor Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor for In-Wheel Applications, IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), 22-24 June, Chicago, IL, USA.

Bonthu, S., S., R., Choi, S., Gorgani, A., Jang, K., (2015), Design of Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor with External Rotor Architecture, 2015 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 10-13 May, Coeur d'Alene, ID, USA.

Cai, C-L., Wang, X-G., Bai Y-W., Xia Y-C, Liu K., (2011), Key Technologies of EA Motor Drive System Design, Elsevier, Procedia Engineering, 16, 356-362.

Chan, C., C., (2002), The State of the Art of Electric and Hybrid Vehicles, Proceedings of the IEEE, 90(2), 247-275.

Chau, K.T., (2015), Electric Vehicle Machines and Drives, Design, Analysis and Applications, IEEE press, John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., Singapore.

CheshmehBeigi, H., M., Behroozi, L. (2020), Analytical Design, Electromagnetic Field Analysis and Parametric Sensitivity Analysis of An External Rotor Permanent Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Motor, Electrical Engineering, 102, 1947–1957.

Colla, D., (2015), Encyclopedia of Automotive Engineering 6-Volume set, John Wiley&Sons Ltd., Chichester, West Sussex, United Kingdom.

Cruickshank, A. J. O., Menzies, R. W., & Anderson, A. F. (1966). Axially Laminated Anisotropic Rotors for Reluctance Motors. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 113(12), 2058-2060.

Deng. F., (1999), An Improved Iron Loss Estimation for Permanent Magnet Brushless Machines. IEEE Transactions on Energy Conversion, 14(4), 1391–1395.

Dulanto, A. O., (2015), Design of a Synchronous Reluctance Motor Assisted with Permanent Magnets for Pump Applications, Master Thesis, KTH Royal Institute of Technology Electrical Engineering, Kungliga Tekniska Högskolan, Sweden.

Ehsani, M., Gao, Y. and Miller, J., M., (2007), Hybris Electric Vehicles: Architecture and Motor Drives, Proceedings of the IEEE, 95(4), 719-728.

Ehsani, M., Gao, Y., Gay, S., E., Emadi, A., (2005), Modern Electric, Hybris Electric, and Fuel Cell Vehicles, Fundamentals, Theory, and Design, CRC Press LLC, Florida.

Ersöz, M., (2015), Akı Bariyerli Senkron Relüktans Motor Tasarımı ve Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye.

Ersöz, M., Öner, Y., Bingöl, O., (2016), Akı Bariyerli TLA Tipi Senkron Motor Tasarımı ve Optimizasyonu, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 31:4, 941-950.

Fuad, U-N, Sanjeevikumar, P., Lucian M-P., Mohammad N., M., Eklas H., (2017), A Comprehensive Study of Key Electric Vehicle (EA) Components, Technologies, Challenges, Impacts, and Future Direction of Development, Energies, 10, 1217, 1-82.

Goncalves, A. P., Cruz, S. M. A., Ferreira, F. J. T. E., Mendes, A. M. S. and De Almeida, A. T., (2014), Synchronous Reluctance Motor Drive for Electric Vehicles Including

Cross-Magnetic Saturation, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 27-30 October, Coimbra, Portugal.

Guan, Y., Zhu, Z., Q., Afinowi, I., A., A., Mipo, J., C., Farah, P., (2016), Design of Synchronous Reluctance and Permanent Magnet Synchronous Reluctance Machines for Electric Vehicle Application, The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 35(2), 586 – 606.

Gürdal, O., (2001), Elektrik Makinalarının Tasarımı, Atlas Yayın Dağıtım, 535, Ankara.

Haataja, J., Pyrhönen, J., (2003), Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor: An Alternative Motor in Variable Speed Drives, Energy Efficiency in Motor Driven Systems, Lappeenranta, Finland: Springer, 101-110.

Hendershot, J.R., Miller, T. J. E., (1994), Design of Brushless Permanent-Magnet Motors (Monographs in Electrical and Electronic Engineering). Hillsboro, OH: Magna Pysics Pub.; Oxford: Clarendon Press.

Huynh, T. A. and Hsieh, M.-F., (2018), Performance Analysis of Permanent Magnet Motors for Electric Vehicles (EA) Traction Considering Driving Cycles, Energies, 11(6), 1385.

Huynh, T. A., Hsieh, M., Shih, K. and Kuo, H., (2018), An Investigation into the Effect of PM Arrangements on SMSynRM Performance, IEEE Transactions on Industry Applications, 54(6), 5856-5868.

Ibrahim, M.N.F., Rashad, E., Sergeant, P., (2017), Performance Comparison of Conventional Synchronous Reluctance Machines and PM-Assisted Types with Combined Star-Delta Winding, Energies, 10, 1500.

Islam, M., Z., (2019), Design and Performance Analysis of Rare-Earth-Free Five- Phase Permanent Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Motor, PhD, Thesis, The Graduate Faculty of The University of Akron, ABD.

Islam, M.Z., Choi, S., Elbuluk, M.E., Bonthu, S.S.R., Arafat, A., Baek, J., (2021), Design of External Rotor Ferrite-Assisted Synchronous Reluctance Motor for High Power Density. Appl. Sci., 11, 3102.

Jahan, I., (2019), Implementation and Experimental evaluation of a parameterized PMSynRM model using Matlab and Comsol Multiphysics, Master Thesis in Electrical Machines and Drives, KTH Royal Institute of Technology School of Electrical Engineering and Computer Science Division of Electrical Power and Energy Systems, Sweden.

Kamper, M. J., Van der Merwe, F. S., & Williamson, S., (1996), Direct finite element design optimisation of the cageless reluctance synchronous machine. IEEE Transactions on Energy Conversion, 11(3), 547–555.

Khan, K., (2011), Design of a Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Machine for a Plug-In Hybrid Electrical Vehicle, licentiate thesis, KTH, Sweden.

Khan, K., Wallmark, O., Leksell, M., (2010), Design Aspects on Magnet Placement In Permanent-Magnet Assisted Synchronous Reluctance Machines, 5th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2010). Institution of Engineering and Technology.

Kim, W-H., Kim, K-S., Kim, S-J., Kang, D-W., Go, S-C., Chun, Y-D. And Lee, J., (2009), Optimal PM Design of SMSynRM for Wide Constant-Power Operation and Torque Ripple Reduction, IEEE Transactions on Magnetics, 45(10), 4660-4663.

Liu, C-T., Luo, T-Y., Shih, P-C., Yen, S-C., Lin, H-N., Hsu, Y-W., and Hwang, C-C., (2017), On the Design and Construction Assessments of a Permanent-Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Motor, IEEE Transaction on Magnetics, 53(11), 1-4.

Luthra, G., (2017), Comparison of Characteristics of Various Motor Drives Currently Used in Electric Vehicle Propulsion System, International Journal of Mechanical and Production Engineering, 5(6), 38-41.

Malan, J., Kamper, M., J. and Williams, P., N., T., (1998), Reluctance Synchronous Machine Drive for Hybrid Electric Vehicle, IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Proceedings ISIE '98., 367-372.

Marino, L., (2015), Design and Analysis of a Fractional-Slot Concentrated-Wound PM-Assisted Reluctance Motor, Degree Project, Electric Power Engineering, Second Level Stockholm, Sweden.

Matsuo, T., Lipo, T. A., (1994), Rotor Design Optimization of Synchronous Reluctance

Machine, IEEE Transactions on Energy Conversion, 9(2), 359-365.

Miller, T. J. E., Hutton, A., Cossar, C. Staton, D. A., (1991), Design of a Synchronous Reluctance Motor Drive, IEEE Transactions on Industry Applications, 27(4), 741-749.

Moghaddam, R.R., (2007), Synchronous Reluctance Machine (SynRM) Design, Master Thesis, Royal Institute of Technology Department of Electrical Engineering Electrical Machines and Power electronics Stockholm, 5.

Mohammadi, A. and Mirimani, S. M., (2020), Design and Analysis of a Novel Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Machine Using Finite-Element-Method, 11th Power Electronics, Drive Systems, and Technologies Conference (PEDSTC), 4-6 February, Tehran, Iran.

Morimoto, S., Ooi, S., Inoue, Y., and Sanada, M., (2014), Experimental Evaluation of a Rare-Earth-Free PMASynRM With Ferrite Magnets for Automotive Applications, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 61(10), 5749-5756.

Nagarajan, V.S., Kamaraj, V., Sivaramakrishnan, S., (2019), Geometrical Sensitivity Analysis Based on Design Optimization and Multiphysics Analysis of PM Assisted Synchronous Reluctance Motor, Bulletin of The Polish Academy of Sciences Technical Sciences , 67(1).

Niazi, P., (2005), Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor Design and Performance Improvement, PhD Thesis, Electrical Engineering, Texas A&M University, USA.

Nyamwange, J., Nyamwange M., (2014), Major Innovations in Transportation: Evolution of Automobiles, International Journal of Humanities and Social Science, Vol.4, No.5 (1), 40-45.

Öner, Y., 2004. Sabit Mıknatıslı Küresel Motorun Bilgisayar Destekli Üç Boyutlu Manyetik Analizi, Tasarımı ve Uygulaması, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Dok. Tezi, 189, Ankara.

Pellegrino, G., Jahns, T., M., Bianchi, N., Soong, W., L., Cupertino, F., (2016) The Rediscovery of Synchronous Reluctance and Ferrite Permanent Magnet Motors Tutorial Course Notes, Springer Briefs in Electrical and Computer Engineering eBook.

Pellegrino, G., Vagati, A., Boazzo, B., and Guglielmi, P., (2012), Comparison of Induction and PM Synchronous Motor Drives for EA Application Including Design Examples, IEEE Transactions on Industrial Applications, 48(6), 2322-2332.

Pellegrino, G., Vagati, A., Guglielmi, P. and Boazzo, B., (2012), Performance Comparison Between Surface-Mounted and Interior PM Motor Drives for Electric Vehicles Application, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 59(2), 803-811.

Pyrhönen, J., Jokinen, T., Hrabovcova, V., (2014), Design of Rotating Electrical Machines, Second Edition, Wiley.

Rahim, N., A., Ping, H., W., Tadjuddin, M., (2006), Design of an In-Wheel Axial Flux Brushless DA Motor for Electric Vehicle, 2006 International Forum on Strategic Technology, 18-20 October 2006, Ulsan, South Korea.

Rahman, Z., Ehsani, M. and Butler, K. L., (2000), An Investigation of Electric Motor Drive Characteristics for EA and HEV Propulsion Systems, SAE Technical Paper Series, Vol. 109, Section 6, 2396-2403.

Sharifan, M. M. M., Feyzi, M. R., Farrokhifar, M., Shaarbafi, K., Mohammadi, R. (2009), Slot Fringing Effect on the Magnetic Characteristics of Electrical Machines. Journal of Electrical Engineering, 60, 18-23.

Smaka, S., Masic, S., Cosovic, M., Salihbegovic, I., (2010), Switched Reluctance Machines for Hybrid Electric Vehicles, XIX International Conference on Electrical Machines- ICEM2010, 6-8 September, Rome, Italy.

Taghavi, S., (2015), Design of Synchronous Reluctance Machines for Automotive Applications, PhD, Thesis, Department of Electrical and Computer Engineering, Concordia University, Montreal, Quebec, Canada.

Tahir, A., Z., Ahmadu A., G. and Maruf A., A., (2019), Review of Motors for Electric Vehicles, Journal of Scientific Research & Reports, 24 (6), 1-6.

Torres, C. L., (2018), Analysis and Implementation of a Methodology for Optimal PMa-SynRM Design Taking into Account Performances and Reliability, PhD Thesis, Electrical Engineering, Universitat Politecnica De Catalunya Barcelonatech, Spain.

Torres, C., L., Espinosa, A., G., Riba, J., R., (2019), Reliable Design of PMaSynRM. New Trends in Electrical Vehicle Powertrains. Chapter 6, IntechOpen, Editor: Luis Romeral Martínez and Miguel Delgado Prieto, Rijeka, Croatia.

Torres, C., L., Michalski, T., Espinosa, A., Romeral, L., (2016), Rotor of Synchronous Reluctance Motor Optimization by Means Reluctance Network and Genetic Algorithm, XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM), 4-7 September, Lausanne, Switzerland.

Tumbek, M. and Kesler, S., (2019), Design and Implementation of a Low Power Outer-Rotor Line-Start Permanent-Magnet Synchronous Motor for Ultra-Light Electric Vehicles, Energies, 12 (16), 3174.

Vartanian, R., (2014), Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Machine (SMSynRM) Design and Performance Analysis for Fan and Pump Applications, PhD Thesis, Electrical Engineering, Texas A&M University, USA.

Vartanian, R., Toliyat, H. A., (2009), Design and comparison of an optimized permanent magnet-assisted synchronous reluctance motor (PMa-SynRM) with an induction motor with identical NEMA Frame stators, IEEE Electric Ship Technologies Symposium, 107-112.

Wang Y, Ionel DM, Rallabandi V, Jiang M, Stretz SJ, (2016), Large-scale optimization of synchronous reluctance machines using CE-FEA and differential evolution, IEEE Transaction Industrial Application, 52 (6), 4699–4709.

Wang, K., Zhu, Z. Q., Ombach, G., Koch, M., Zhang, S., & Xu, J., (2013), Optimal slot/pole and flux-barrier layer number combinations for synchronous reluctance machines. 2013 Eighth International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles -and Renewable Energies (EVER), 27-30 March, Monte Carlo, Monaco.

Wu, W., X. Zhu, L. Quan, Y. Du, Z. Xiang and X. Zhu, (2018), Design and Analysis of a Hybrid Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor Considering Magnetic Saliency and PM Usage, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 28(3), 1-6.

Yammine, M. S., (2015), Contribution A L'amelioration des Performances De LA Machine A Reluctance Variable Synchrone Par LA Conception Et L'injection D'harmoniques, PhD Thesis, Universite de Toulouse, France.

Zeraouila, M., Benbouzid, M. E. H. and Diallo, D., (2005), Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion Systems: A Comparative Study, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 7-9 September, Chicago, IL, USA.

Zeraoulia, M., Benbouzid, M., E., H., and Diallo, D., (2006), Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion Systems: A Comparative Study, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 55(6), 1756-1764.

Zhu, X., Shu, Z., Quan, L., Xiang, Z., Pan, X., (2016), Multi-objective Optimization of an Outer-Rotor V-Shaped Permanent Magnet Flux Switching Motor Based on Multi-Level Design Method, IEEE Transactions on Magnetics, 52 (10), 1-8.

ÖZGEÇMİŞ

Tezden Üretilmiş Bilimsel Eserler

SCI, SCI Expanded, SSCI, AHCI ve ESCI kapsamındaki dergilerde yayınlanan makaleler

1- Bozkurt, A.; Baba, A.F.; Oner, Y. Design of Outer-Rotor Permanent-Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Motor for Electric Vehicles. Energies 2021, 14, 3739. https://doi.org/10.3390/en14133739

Uluslararası ve ulusal kongrelerde sunulan ve tam metni veya özeti yayınlanmış, sözlü veya poster bildiriler (Kitap Bölümleri)

1- Bozkurt A., Oner Y., Baba A.F., Ersoz M. (2021) Design of External Rotor Permanent Magnet Synchronous Reluctance Motor (PMSynRM) for Electric Vehicles. In: Hemanth J., Yigit T., Patrut B., Angelopoulou A. (eds) Trends in Data Engineering Methods for Intelligent Systems. ICAIAME 2020. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, vol 76. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-79357-9_38