

**KÜÇÜK ÖLÇEKLİ RÜZGÂR VE NEHİR  
SANTRALLERİ İÇİN 4 KW GÜCÜNDE KALICI  
MİKNATISLI SENKRON GENERATÖR TASARIMI  
VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

**2017  
DOKTORA TEZİ  
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ**

**Yücel ÇETİNCEVİZ**

**KÜÇÜK ÖLÇEKLİ RÜZGÂR VE NEHİR SANTRALLERİ İÇİN 4 KW  
GÜCÜNDE KALICI MIKNATISLI SENKRON GENERATÖR TASARIMI  
VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

**Yücel ÇETİNCEVİZ**

**Karabük Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında**

**Doktora Tezi**

**Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK**

**Kasım 2017**

Yücel ÇETİNCEVİZ tarafından hazırlanan “KÜÇÜK ÖLÇEKLİ RÜZGÂR VE NEHİR SANTRALLERİ İÇİN 4 KW GÜCÜNDE KALICI MIKNATISLI SENKRON GENERATÖR TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Hüseyin DEMİREL

.....

Tez Danışmanı, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Dr. Durmuş UYGUN

.....

Tez Danışmanı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 24/11/2017

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Güngör BAL (GÜ)

.....

Üye : Prof. Dr. Mehmet AKBABA (KBÜ)

.....

Üye : Prof. Dr. Ramazan BAYINDIR (GÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Selim ÖNCÜ (KBÜ)

.....

Üye : Yrd. Doç. Dr. Hüseyin DEMİREL (KBÜ)

.....

Üye : Dr. Durmuş UYGUN

.....

Üye : Yrd. Doç. Dr. Bilgehan ERKAL (KBÜ)

.....

...../...../2017

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Filiz ERSÖZ

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdür V.



*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*

Yücel ÇETİNCEVİZ

## **ÖZET**

**Doktora Tezi**

### **KÜÇÜK ÖLÇEKLİ RÜZGÂR VE NEHİR SANTRALLERİ İÇİN 4 KW GÜCÜNDE KALICI MIKNATISLI SENKRON GENERATÖR TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

**Yücel ÇETİNCEVİZ**

**Karabük Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı:**

**Yrd. Doç. Dr. Hüseyin DEMİREL**

**Dr. Durmuş UYGUN**

**Kasım 2017, 174 sayfa**

Bu çalışmada, kırsal ve dağınık yerleşim birimlerinin enerji taleplerini karşılamak için küçük ölçekli rüzgâr ve nehir türbinlerinde kullanılacak, düşük rüzgâr hızlarında yüksek verimle çalışacak kalıcı mıknatıslı senkron generator tasarımı, optimizasyon ve üretimi amaçlanmıştır. Bu kapsamda çalışmanın ana hedefi, maliyeti düşürmek için optimum materyaller ve üretim yöntemleri kullanırken, tutma torkunu azaltan tasarım ve optimizasyon çalışmalarını gerçekleştirmek ve üretilen generatörden daha az maliyetle yüksek verim elde etmektir. Çalışmanın içeriği: tasarım, analiz, optimizasyon, üretim ve test süreçlerinden ve doğrulama çalışmalarından oluşmaktadır.

Tasarım ve analiz sürecinde bütünleşik 2D elektromanyetik alan ve devre modeli kullanılmıştır. Bu model farklı koşullarda makinenin davranışı ile ilgili kapsamlı bilgi sağlamaktadır. Optimizasyon sürecinin amacı maliyet, üretilebilirlik ve verimin yanı sıra generatörün belirlenen çıkış değerlerini sunduğu bir tasarım bulmaktır. Bunun için çok-amaçlı optimizasyon yaklaşımı kullanılmıştır. Oluk açıklığı, mıknatıs kalınlığı ve mıknatıs yayı/ kutup yayı oranı parametreleri iyileştirilmiştir. Ayrıca stator nüvesi ve rotor mıknatıslarındaki yapısal değişikliklerin tutma torku ve generatör performansı üzerine etkisi araştırılmış, analitik ve 2D-3D analiz sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Tutma torku ve zıt emk'nın hesaplanması için gerekli olan hava aralığı akı yoğunluğunun elde edilmesinde manyetik eşdeğer devre ve bağlı geçirgenlik modeli kullanılmıştır. Analizler sonucunda, prototip için hem tutma torkunu azalttığı hem de üretimi kolay olduğu için tek parçalı mıknatıs ve kaykır işleminin uygulandığı yapılandırma tercih edilmiştir. Üretim sürecinde geçilerek silikon çelik temini ve işlenmesi, sarım işlemi, mıknatıs tasarımı ve rotor gövdesinin işlenmesi gerçekleştirilmiştir. Son süreçte ise, deneysel çalışmalar ortaya konmuştur. Deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlar, simülasyon sonuçları ve hesaplama yoluyla elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

**Anahtar Sözcükler :** Kalıcı mıknatıslı senkron generatör, tasarım ve optimizasyon, 2D ve 3D sonlu elemanlar analizi, bütünleşik elektromanyetik alan ve devre modeli (co-simulation), bağlı geçirgenlik modeli, prototip.

**Bilim Kodu :** 905.1.033

## **ABSTRACT**

**Ph. D. Thesis**

### **DESIGN AND REALIZATION OF 4 KW PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS GENERATOR FOR SMALL SCALE WIND AND RIVER POWER PLANTS**

**Yücel ÇETİNCİVİZ**

**Karabük University**

**Graduate School of Natural and Applied Sciences**

**Department of Electrical and Electronics Engineering**

**Thesis Advisor:**

**Assist. Prof. Dr. Hüseyin DEMİREL**

**Dr. Durmuş UYGUN**

**November 2017, 174 pages**

In this study, it is aimed to design, optimize and produce a permanent magnet synchronous generator that will operate with high efficiency at low wind speeds for small-scale wind and river turbines to meet the energy demands of rural and dispersed settlements. The main goal of working in this context is to perform design and optimization studies that reduce cogging torque while using optimum materials and production methods reducing cost, and to achieve high efficiency at less cost than the generated generator. The content of the work consists of design, analysis, optimization, production and testing processes and validation studies. An integrated 2D electromagnetic field and circuit model is used in the design and analysis process.

This model provides comprehensive information on machine behavior under different conditions. The goal of the optimization process is to find a design that offers cost, manufacturability, and efficiency as well as generator output values. For this, a multi-objective optimization approach has been used. Slot opening, magnet thickness and magnet arc / pole ratio (embrace) parameters have been improved. In addition, the effects of stator core and rotor magnets on cogging torque and generator performance have been investigated, and analytical and 2D-3D analysis results have been compared. The magnetic equivalent circuit and the relative permittivity model have been used to obtain the air-gap flux density required for the calculation of cogging torque and back-emf. As a result of the analysis, the configuration in which the one-piece magnet and the skew process are applied is preferred since this configuration is both reducing cogging torque and simplifying production of the prototype. During the production process; silicon steel procurement and processing, winding process, magnet design and processing of the rotor body have been carried out. In the last period, experimental studies have been put forward. The results obtained in the experimental studies, the simulation results and the results obtained by calculations are given comparatively.

**Key Word** : Permanent magnet synchronous generator, design and optimization, 2D and 3D finite element analysis, coupled electromagnetic field and circuit model (co-simulation), relative permeability model, prototype.

**Science Code** : 905.1.033

## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, hazırlanmasında ve akademik hayatımın her aşamasında benden yardımını hiç bir zaman esirgemeyen, destek ve teşviklerini her zaman şükranla anacağım, danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Hüseyin DEMİREL'e teşekkürü bir borç bilirim.

Bu tez çalışmasının yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren, üretim ve deneysel çalışmaların yapılmasında yardımlarını esirgemeyen Sayın Ege Dinamik Elektromekanik Enerji ve Robot Sistemleri A.Ş.'nin genel müdürü Dr. Durmuş UYGUN'a teşekkür ederim.

Bu çalışma EEEAG-113E782 hibe numarası altında Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenmiştir. Maddi desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Sevgili aileme manevi hiçbir yardımı esirgemedi yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

|                                                 | <u>Sayfa</u> |
|-------------------------------------------------|--------------|
| KABUL .....                                     | ii           |
| ÖZET .....                                      | iv           |
| ABSTRACT .....                                  | vi           |
| TEŞEKKÜR .....                                  | viii         |
| İÇİNDEKİLER.....                                | ix           |
| ŞEKİLLER DİZİNİ .....                           | xii          |
| ÇİZELGELER DİZİNİ .....                         | xvi          |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....             | xvii         |
| <br>                                            |              |
| BÖLÜM 1 .....                                   | 1            |
| RÜZGÂR TÜRBİN TEKNOLOJİSİ.....                  | 1            |
| 1.1. KONU, KAPSAM VE LİTERATÜR ÖZETİ.....       | 3            |
| 1.2. AMAÇ VE HEDEFLER.....                      | 10           |
| <br>                                            |              |
| BÖLÜM 2 .....                                   | 11           |
| RÜZGÂR ENERJİSİ ÇEVİRİM SİSTEMLERİ .....        | 11           |
| 2.1. RÜZGÂR TÜRBİN MODELİ .....                 | 11           |
| 2.2. KALICI MIKNATISLI SENKRON GENERATÖR .....  | 14           |
| 2.2.1. KMSM'nin Yapısı.....                     | 17           |
| 2.2.1.1. İç Rotorlu KMSM.....                   | 17           |
| 2.2.1.2. Dış Rotorlu KMSM .....                 | 20           |
| 2.2.2. KMSG'nin Matematiksel Modeli .....       | 20           |
| 2.2.3. Kalıcı Mıknatıs Türleri.....             | 26           |
| <br>                                            |              |
| BÖLÜM 3 .....                                   | 29           |
| TASARIM SÜRECİ .....                            | 29           |
| 3.1. TASARIM YÖNTEMLERİ VE TEMEL KANUNLAR ..... | 31           |
| 3.2. TASARIM DÖNGÜSÜ .....                      | 32           |

|                                                                               |         |
|-------------------------------------------------------------------------------|---------|
| 3.3. BOYUTLANDIRMA PROSEDÜRÜ VE ANA BOYUTLANDIRMA.....                        | 35      |
| 3.3.1. Stator Oluğunun Boyutlandırılması .....                                | 44      |
| 3.3.2. Rotor ve Mıknatısın Boyutlandırılması.....                             | 46      |
| 3.4. TEMEL BOYUTLANDIRMA İÇİN ANALİTİK HESAPLAMALAR.....                      | 48      |
| 3.5. BİLGİSAYAR TABANLI TASARIM VE OPTİMİZASYON SÜRECİ .....                  | 54      |
| 3.5.1. Stator Sac Paketine İlişkin Parametrik Analizler.....                  | 59      |
| 3.5.2. Çok-Amaçlı Parametrik Optimizasyon .....                               | 62      |
| <br>BÖLÜM 4 .....                                                             | <br>73  |
| ANALİZ SÜRECİ .....                                                           | 73      |
| 4.1. KMSG’NİN ANALİTİK MODELİ .....                                           | 73      |
| 4.2. MANYETİK DEVRE MODELİ.....                                               | 74      |
| 4.2. HAVA ARALIĞI MANYETİK ALAN DAĞILIMI .....                                | 79      |
| 4.2.1. Mıknatıs Tarafından Üretilen Manyetik Alan .....                       | 81      |
| 4.3. ZİT EMK .....                                                            | 82      |
| 4.4. ELEKTROMANYETİK TORK.....                                                | 83      |
| 4.2.2. Endüvi Alanı .....                                                     | 85      |
| 4.5. BAĞIL GEÇİRGENLİK MODELİ .....                                           | 87      |
| 4.6. EŞDEĞER DEVRE MODELİ VE FAZÖR DİYAGRAMI .....                            | 90      |
| 4.7. TUTMA TORKUNUN AZALTILMASI.....                                          | 93      |
| 4.7.1. Düşük Tutma Torku İçin Stator Tasarımı .....                           | 94      |
| 4.7.2. Düşük Tutma Torku İçin Rotor Tasarımı.....                             | 98      |
| <br>BÖLÜM 5 .....                                                             | <br>102 |
| ANALİZ SÜRECİ (GEÇİCİ REJİM (TRANSIENT)).....                                 | 102     |
| 5.1. MAKİNEİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE 2D VE 3D<br>MANYETİK ANALİZİ..... | 102     |
| 5.2. BÜTÜNLEŞİK ELEKTROMANYETİK ALAN VE DEVRE MODELİ ...                      | 109     |
| 5.3. ARIZA ANALİZİ.....                                                       | 114     |
| 5.3.1. Kısa Devre Arızasının Eşdeğer Devre Modeli .....                       | 114     |
| 5.3.2. Arıza Senaryolarından Elde Edilen Simülasyon Sonuçları.....            | 117     |
| 5.4. ANSYS İLE MULTİ-FİZİK ANALİZLER.....                                     | 121     |

|                                                             | <u>Sayfa</u> |
|-------------------------------------------------------------|--------------|
| 5.4.1. Isıl Analiz .....                                    | 122          |
| 5.4.2. Yapısal Analiz.....                                  | 125          |
| <br>BÖLÜM 6 .....                                           | 128          |
| PROTOTİP, TEST VE DOĞRULAMA.....                            | 128          |
| 6.1. YAPISAL TASARIM VE PROTOTİPLEME.....                   | 128          |
| 6.1.1. Statorun Yapısal Tasarımı .....                      | 129          |
| 6.1.1.1. Nüve Malzemenin Seçimi Ve İşlenmesi .....          | 129          |
| 6.1.1.2. Oluk Yalıtımı ve Sarım İşlemi .....                | 133          |
| 6.1.2. Mıknatıs Tasarımı ve Rotor Gövdesinin İşlenmesi..... | 137          |
| 6.1.3. Mekanik Gövdenin Yapısal Tasarımı Ve Üretimi .....   | 139          |
| 6.2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....                              | 142          |
| 6.2.1. Test Aşamaları .....                                 | 144          |
| 6.3. DOĞRULAMA .....                                        | 148          |
| <br>BÖLÜM 7 .....                                           | 152          |
| SONUÇLAR.....                                               | 152          |
| KAYNAKLAR.....                                              | 157          |
| <br>ÖZGEÇMİŞ.....                                           | 174          |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

|                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1.1. Rüzgâr türbinleri boyutundaki gelişim .....                                                              | 2  |
| Şekil 2.1 Değişken hızlı rüzgâr türbininin ideal güç eğrisi .....                                                   | 13 |
| Şekil 2.2. Kalıcı mıknatıslı makinelerin sınıflandırılması.....                                                     | 15 |
| Şekil 2.3. Örnek KMSM yapısı.....                                                                                   | 16 |
| Şekil 2.4. İç rotor KMSG (sol) ve dış rotor KMSG (sağ) yapısı .....                                                 | 17 |
| Şekil 2.5. Radyal akıllı KMSM.....                                                                                  | 18 |
| Şekil 2.6. Eksenel akıllı KMSM .....                                                                                | 18 |
| Şekil 2.7. Farklı rotor yapıları.....                                                                               | 19 |
| Şekil 2.8. Farklı rotor yapıları.....                                                                               | 19 |
| Şekil 2.9. Dış rotor yapıllı KMSM.....                                                                              | 20 |
| Şekil 2.10. KMSM'ye ait eksenlerin şekilsel gösterimi.....                                                          | 21 |
| Şekil 2.11. Stator geriliminin referans eksenine dönüşümü .....                                                     | 23 |
| Şekil 2.12. KMSG'ün dq referans koordinat sistemindeki eşdeğer devresi.....                                         | 24 |
| Şekil 2.13. Kalıcı mıknatıslarda gelişim .....                                                                      | 27 |
| Şekil 2.14. Belirli bir hava aralığı akı yoğunluğu için mıknatıs sınıflarına göre<br>mıknatıs boyu ve maliyeti..... | 27 |
| Şekil 3.1. Bazı elektrik makinelerinin şematik gösterimi.....                                                       | 29 |
| Şekil 3.2. Senkron makinelerin sınıflandırılması.....                                                               | 31 |
| Şekil 3.3. Tasarım ve analiz süreci iş akış şeması .....                                                            | 34 |
| Şekil 3.4. İç rotorlu KMSG yapısı ve temel boyutlandırma parametreleri .....                                        | 39 |
| Şekil 3.5. Dışteki manyetik doyum katsayısına bağlı kf form faktörüve ai şekil<br>faktörü.....                      | 40 |
| Şekil 3.6. Kullanılan mıknatısa (N40SH) ait mıknatıslığı giderme (B-H) eğrisi .....                                 | 46 |
| Şekil 3.7. Stator oluk kesiti.....                                                                                  | 53 |
| Şekil 3.8. Generatörün statoruna ait boyutlandırma.....                                                             | 55 |
| Şekil 3.9. Generatör modeli .....                                                                                   | 56 |
| Şekil 3.10. M19_26G sacı B-H eğrisi .....                                                                           | 57 |
| Şekil 3.11. Verimin hız ve stator uzunluğu arasındaki ilişkisi .....                                                | 60 |
| Şekil 3.12. Hat geriliminin hız ve stator uzunluğu arasındaki ilişkisi .....                                        | 60 |
| Şekil 3.13. Elektriksel yüklenmenin hız ve stator uzunluğu arasındaki ilişkisi .....                                | 61 |

|                                                                                                 |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 3.14. Verimin hız ve stator uzunluğu arasındaki ilişkisi .....                            | 61  |
| Şekil 3.15. Hat geriliminin hız ve stator uzunluğu arasındaki ilişkisi .....                    | 62  |
| Şekil 3.16. Değişken gövde uzunluğunun $L_{stk}$ çıkış parametreleri üzerine etkisi .....       | 64  |
| Şekil 3.17. Değişen oluk açıklığının çıkış parametreleri üzerine etkisi .....                   | 64  |
| Şekil 3.18. Değişen kaykış işleminin çıkış parametreleri üzerine etkisi .....                   | 65  |
| Şekil 3.19. Mıknatıs yayı/kutup yayı oranının çıkış parametreleri üzerine etkisi .....          | 66  |
| Şekil 3.20. Değişen mıknatıs kalınlığının çıkış parametreleri üzerine etkisi. ....              | 67  |
| Şekil 3.21. Mıknatıs ofsetine göre optimizasyon.....                                            | 67  |
| Şekil 3.22. Değişken kaykış ve offset işleminin zıt emk'in THD'si üzerine etkisi .....          | 68  |
| Şekil 3.23. Optimizasyon parametrelerinin generatör performansına etkisi .....                  | 69  |
| Şekil 3.24. Sargı gerilimlerinin karşılaştırılması .....                                        | 69  |
| Şekil 3.25. Sargı akımlarının karşılaştırılması.....                                            | 70  |
| Şekil 3.26. Sargıda indüklenen gerilimlerin karşılaştırılması.....                              | 70  |
| Şekil 3.27. Tutma torkunun karşılaştırılması.....                                               | 70  |
| Şekil 4.1. Radyal akıllı rüzgâr generatörünün yapısı .....                                      | 75  |
| Şekil 4.2. Manyetik eşdeğer devre .....                                                         | 76  |
| Şekil 4.3. Tahmini hava aralığındaki akı yolu .....                                             | 80  |
| Şekil 4.4. Bir bobin tarafından üretilen manyetik alan .....                                    | 86  |
| Şekil 4.5. Düzeltme faktörünün hesabı için generator kesiti.....                                | 89  |
| Şekil 4.6. Düzeltme faktörünün hesabı için yeni generator kesiti .....                          | 90  |
| Şekil 4.7. Generatörün dinamik modeli ve prototipi.....                                         | 91  |
| Şekil 4.8. KMSG'nin bir faz eşdeğer devresi ve fazör diyagramı .....                            | 91  |
| Şekil 4.9. Önerilen model için kullanılan oluk parametreleri.....                               | 95  |
| Şekil 4.10. Tutma torku analizi için oluşturulan generatör modelleri .....                      | 95  |
| Şekil 4.11. Önerilen stator yapısı için tutma torku sonuçları .....                             | 96  |
| Şekil 4.12. Faz gerilimleri .....                                                               | 97  |
| Şekil 4.13. Parçasız mıknatıs .....                                                             | 99  |
| Şekil 4.14. Parçalı mıknatıs .....                                                              | 99  |
| Şekil 4.15. Eş parçalı mıknatıs yapısının tutma torkuna etkisi.....                             | 101 |
| Şekil 5.1. Generatörün 2D ve 3D modeline ait ekran görüntüsü .....                              | 102 |
| Şekil 5.2. Akım yoğunluğu, etkin akı yolları ve kaçak akı .....                                 | 103 |
| Şekil 5.3. Makinanın bütün yüzeyindeki manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve kuvvet çizgileri..... | 104 |
| Şekil 5.4. İndüklenen faz gerilimleri.....                                                      | 105 |

|                                                                                                                  |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 5.5. Faz akımları.....                                                                                     | 105 |
| Şekil 5.6. Elektromanyetik tork .....                                                                            | 105 |
| Şekil 5.7. Rotor yüzeyindeki mıknatısların şekli ve yerleşimi .....                                              | 106 |
| Şekil 5.8. Rotor yüzeyindeki mıknatıs yapısı 1 .....                                                             | 107 |
| Şekil 5.9. Rotor yüzeyindeki mıknatıs yapısı 2 .....                                                             | 108 |
| Şekil 5.10. Simülasyon altyapısı .....                                                                           | 109 |
| Şekil 5.11. Değişken generatör hızı ve sabit yük için değişim grafiği.....                                       | 110 |
| Şekil 5.12. Rüzgâr hızına bağlı generatör hız rejimi.....                                                        | 110 |
| Şekil 5.13. Değişken hız işletme koşullarında elde edilen simülasyon sonuçları.....                              | 111 |
| Şekil 5.14. Anma hızında değişen yük koşulları için çıkış gücü parametre eğrisi ...                              | 112 |
| Şekil 5.15. Değişken yük koşulları (omik) .....                                                                  | 112 |
| Şekil 5.16. Sabit hız, değişken yükte elde edilen simülasyon sonuçları. ....                                     | 113 |
| Şekil 5.17. Arıza modları için generatör eşdeğer modeli .....                                                    | 115 |
| Şekil 5.18. Harici arıza senaryolarını kapsayan simülasyon platformu .....                                       | 117 |
| Şekil 5.19. Generatörün bir faz açık devre arızası.....                                                          | 118 |
| Şekil 5.20. Yükün kısa devre arızası.....                                                                        | 119 |
| Şekil 5.21. Tüm yüzeydeki akı dağılımı.....                                                                      | 120 |
| Şekil 5.22. Üç faz sargı akımları.....                                                                           | 121 |
| Şekil 5.23. Multi-fizik analiz prensip şeması .....                                                              | 122 |
| Şekil 5.24. Multi-fizik analiz bağlantı yapısı .....                                                             | 122 |
| Şekil 5.25. Isıl analiz sonucunda generatörün tüm yüzeyine ait sıcaklık dağılımı ...                             | 123 |
| Şekil 5.26. Generatör parçalarının geçici ısı analiz sonuçları .....                                             | 123 |
| Şekil 5.27. Generatöre ait maksimum ve minimum sıcaklık değişimi .....                                           | 124 |
| Şekil 5.28. Generatör parçalarının zamana bağlı sıcaklık değişimi.....                                           | 125 |
| Şekil 5.29. Tasarlanan generatörde zamana bağlı olarak meydana gelen<br>(250 d/d'da) deformasyon ve gerilme..... | 126 |
| Şekil 6.1. Maxwell'den solidworks aktarılan model.....                                                           | 128 |
| Şekil 6.2. Kullanılan silikon sac ve manyetik özellikleri .....                                                  | 130 |
| Şekil 6.3. Stator boyutlandırma .....                                                                            | 131 |
| Şekil 6.4. Kalıplarda kesilen elektrik sacları .....                                                             | 132 |
| Şekil 6.5. Presleme ve paketleme.....                                                                            | 132 |
| Şekil 6.6. Polyester film malzemenin stator oluklarına yerleşimi .....                                           | 133 |
| Şekil 6.7. Stator sargılarının sarım şeması .....                                                                | 135 |
| Şekil 6.8. Sarımı tamamlanan stator .....                                                                        | 136 |

## **Sayfa**

|                                                                                 |     |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 6.9. Mıknatıslarının üretim öncesi çizimleri.....                         | 138 |
| Şekil 6.10. Mıknatısların rotor yüzeyine yerleşimi.....                         | 139 |
| Şekil 6.11. Generatörün için kapak tasarımları.....                             | 139 |
| Şekil 6.12. Ana milin tasarımı .....                                            | 140 |
| Şekil 6.13. Rotoru tutucu mekanik parçanın tasarımı .....                       | 140 |
| Şekil 6.14. Mıknatısların yapıştırıldığı yüzey.....                             | 140 |
| Şekil 6.15. Tüm sistemi dış ortamdaki koruyan gövde .....                       | 141 |
| Şekil 6.16. Statorun dış gövdeye monte edilmesi.....                            | 141 |
| Şekil 6.17. Revizyonu tamamlanan mil parçası ve kapaklar .....                  | 141 |
| Şekil 6.18. Mıknatıslara kaplama işlemi .....                                   | 142 |
| Şekil 6.19. Tasarlanan 4 kW generatörün prototipi ve kaplin bağlantısı .....    | 142 |
| Şekil 6.20. Test düzeneği.....                                                  | 143 |
| Şekil 6.21. Test düzeneğine ait blok diyagram.....                              | 143 |
| Şekil 6.22. Generatör yükleme ünitesi ile ölçme elemanları.....                 | 143 |
| Şekil 6.23. Zıt emk .....                                                       | 144 |
| Şekil 6.24. Boş çalışmada değişken hıza bağlı olarak uç gerilimin değişimi..... | 145 |
| Şekil 6.25. Sabit yükte hıza bağlı olarak uç gerilimi ve akımın değişimi.....   | 145 |
| Şekil 6.26. Anma hızında ve anma yükte (omik) generatör performansı .....       | 146 |
| Şekil 6.27. Sabit hız farklı yük koşulları için makine performansı .....        | 146 |
| Şekil 6.28. Sabit hızda (250 d/d) ve anma yükte (RL) ölçüm sonuçları .....      | 147 |
| Şekil 6.29. Simülasyon modeli .....                                             | 148 |
| Şekil 6.30. Boş çalışma çıkış eğrileri .....                                    | 149 |
| Şekil 6.31. Sabit hız, değişken yükte (omik) çıkış eğrileri.....                | 149 |
| Şekil 6.32. Sabit hız, değişken yükte (R-L) çıkış eğrileri .....                | 150 |
| Şekil 6.33. Değişken hız, sabit yükte (R-L) çıkış eğrileri .....                | 150 |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

|                                                                                                           |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Çizelge 2.1. Bazı kalıcı mıknatısların özellikleri .....                                                  | 28  |
| Çizelge 3.1. Tasarım sonucu farklı makine tiplerine ait çıkış parametreleri .....                         | 30  |
| Çizelge 3.2. Tasarım sonucu farklı makine tiplerine ait çıkış parametreleri .....                         | 30  |
| Çizelge 3.3. Çeşitli standart elektrik makinaları için manyetik devrenin izin verilen akı yoğunluğu ..... | 37  |
| Çizelge 3.4. Çeşitli makinalar için izin verilen etkin $J$ ve $A$ değerleri .....                         | 38  |
| Çizelge 3.5. Farklı elektrik makinaları için nüve uzunluğu/ hava aralığı çapı oranı..                     | 43  |
| Çizelge 3.6. Bazı mıknatıslara ait manyetik özellikler .....                                              | 47  |
| Çizelge 3.7. Generatöre ait başlangıç parametreleri ve çıkış değerleri .....                              | 58  |
| Çizelge 3.8. Statora ait sargı özellikleri .....                                                          | 59  |
| Çizelge 3.9. Generatöre ait başlangıç ve optimum değerlerin karşılaştırılması.....                        | 71  |
| Çizelge 4.1. KMSG için malzeme özellikleri .....                                                          | 77  |
| Çizelge 4.2. Bazı parametrelere bağlı olarak elde edilen karşılaştırma sonuçları.....                     | 97  |
| Çizelge 6.1. Mıknatıs malzemelerin özellikleri .....                                                      | 138 |
| Çizelge 6.2. Tam yük çıkış parametreleri .....                                                            | 151 |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

|             |                                                |
|-------------|------------------------------------------------|
| $A_{c0}$    | : tel kesiti                                   |
| $B$         | : manyetik akı yoğunluğu                       |
| $B$         | : sürtünme katsayısı                           |
| $B_{cs}$    | : stator nüve akı yoğunluğu                    |
| $B_g$       | : hava aralığı akı yoğunluğu                   |
| $B_r$       | : kalıcı mıknatıslık                           |
| $B_{sat}$   | : stator nüve doyumluk akı yoğunluğu           |
| $b_{so}$    | : oluk açıklığı                                |
| $b_{s1}$    | : alt oluk genişliği                           |
| $b_{s2}$    | : üst oluk genişliği                           |
| $b_{ts}$    | : stator dış genişliği                         |
| $B\omega_m$ | : sürtünme torku                               |
| $C$         | : makine sabiti                                |
| $C_p$       | : güç katsayısı                                |
| $C_\phi$    | : akı yığma faktörü                            |
| $d_0$       | : tel çapı                                     |
| $D_{is}$    | : stator iç çapı                               |
| $D_{ir}$    | : rotor iç çapı                                |
| $D_o$       | : stator dış çapı                              |
| $D_r$       | : rotor dış çapı                               |
| $E_0$       | : zıt emk                                      |
| $f$         | : frekans                                      |
| $f_p$       | : bağıl geçirgenlik veya oluk düzeltme faktörü |
| $g$         | : hava aralığı                                 |
| $H$         | : manyetik alan şiddeti                        |
| $H_c$       | : gidergenlik                                  |

|                |                                                               |
|----------------|---------------------------------------------------------------|
| $h_{cs}$       | : stator nüve (oluk harici) yüksekliği                        |
| $h_m$          | : mıknatıs kalınlığı                                          |
| $h_{ss}$       | : stator oluk derinliği                                       |
| $I_a$          | : sargı akımı                                                 |
| $i_{abcs}$     | : stator sargı akımları matrisi                               |
| $i_{a-sc}$     | : kısa devre akımı                                            |
| $i_{a-ss}$     | : kısa devre akımının kararlı durum değeri                    |
| $i_d$          | : d-ekseni stator akımı                                       |
| $i_q$          | : q-ekseni stator akımı                                       |
| $J$            | : akım yoğunluğu                                              |
| $j$            | : atalet momenti [kgm <sup>2</sup> ]                          |
| $k_a$          | : adım katsayısı                                              |
| $k_d$          | : dağıtım katsayısı                                           |
| $k_E$          | : emk sabiti                                                  |
| $k_f$          | : form faktör                                                 |
| $K_{fill}$     | : oluk doluluk faktörü                                        |
| $K_{lm}$       | : kaçak akı katsayısı                                         |
| $K_r$          | : relüktans faktör                                            |
| $K_{sf}$       | : nüve istifleme faktörü                                      |
| $k_w$          | : sargı faktörü                                               |
| $L_a$          | : uç bobinlerin uzunluğu                                      |
| $L_{aa}$       | : faza ait stator sargı endüktansı                            |
| $L_{ab}$       | : stator sargılarının ortak endüktansı                        |
| $L_d$          | : direk eksen (d-axis) endüktansı                             |
| $L_m$          | : ortak endüktans ve öz endüktans değişim genliği             |
| $L_q$          | : dört evreli eksen (q-axis) endüktansı                       |
| $L_{stk}$      | : stator boyu                                                 |
| $L_{\sigma s}$ | : her faza ait stator kaçak endüktansı                        |
| $m$            | : faz sayısı                                                  |
| $M_s$          | : stator ortak endüktansı                                     |
| $n_s$          | : senkron hız                                                 |
| $N_p$          | : oluk yayının dönüşü sırasında dalga şeklinin periyot sayısı |
| $N_{ms}$       | : mıknatıs eş parça sayısı                                    |

|                 |                                                             |
|-----------------|-------------------------------------------------------------|
| $N_s$           | : faz başına spir sayısı                                    |
| $p$             | : çift kutup sayısı                                         |
| $P_c$           | : geçirgenlik katsayısı                                     |
| $P_i$           | : hava aralığı aktif gücü                                   |
| $P_m$           | : rüzgâr türbininin çıkış gücü                              |
| $P_o$           | : çıkış gücü                                                |
| $P_{em}$        | : elektromekanik güç                                        |
| $P_r$           | : rüzgâr gücü                                               |
| $Q_o$           | : reaktif çıkış gücü                                        |
| $R_a$           | : endüvi direnci                                            |
| $R_L$           | : yük direnci                                               |
| $r_s$           | : stator yarıçapı                                           |
| $R_s$           | : her bir faz için stator sargı direnci                     |
| $S_i$           | : hava aralığı görünür gücü                                 |
| $T_{em}$        | : elektromanyetik tork                                      |
| $T_m$           | : türbin mili tarafından sağlanan mekanik tork              |
| $V_a$           | : makinenin hacmi                                           |
| $V_{abcs}$      | : stator sargı gerilim matrisi                              |
| $v_r$           | : rüzgâr hızı                                               |
| $w_l$           | : bir dış kenarından oluk alanı arasındaki doğrusal uzaklık |
| $X$             | : endüvi reaksiyonu etkisi                                  |
| $X_a$           | : öz endüktans reaktansı                                    |
| $X_L$           | : yük reaktansı                                             |
| $X_s$           | : senkron reaktans                                          |
| $Z_s$           | : iletken sayısı                                            |
| $\mathcal{R}_g$ | : hava aralığı relüktansı                                   |
| $\mathcal{R}_l$ | : kaçak relüktans                                           |
| $\mathcal{R}_m$ | : mıknatıs relüktansı                                       |
| $\mathcal{R}_r$ | : rotor boyunduruğu relüktansı                              |
| $\mathcal{R}_t$ | : stator dış relüktansı                                     |
| $\mathcal{R}_y$ | : stator boyunduruk relüktansı                              |
| $\omega_e$      | : elektriksel dönme hızı                                    |
| $\omega_m$      | : türbinin mekanik açısal hızı                              |

|                  |                                                           |
|------------------|-----------------------------------------------------------|
| $\lambda$        | : uç hız oranı                                            |
| $\lambda_{abcs}$ | : stator manyetik akı matrisi                             |
| $\lambda_{pm}$   | : mıknatıslar tarafından varolan manyetik akı             |
| $\Phi$           | : manyetik akı                                            |
| $\phi_g$         | : hava aralığı akısı                                      |
| $\phi_l$         | : kaçak akı                                               |
| $\phi_m$         | : mıknatıs akısı                                          |
| $\phi_r$         | : kalıcı mıknatısların artık mıknatıslığı                 |
| $\alpha_{Tc}$    | : tutma torku periyodu                                    |
| $\beta$          | : kanat açısı                                             |
| $\varphi$        | : güç açısı veya moment açısı                             |
| $\theta$         | : güç katsayı açısı                                       |
| $\theta_d$       | : stator ilave çentik açısı                               |
| $\theta_m$       | : mıknatıs açısı                                          |
| $\theta_s$       | : oluk açısı                                              |
| $\theta_{sk}$    | : kaykır açısı                                            |
| $\theta_{ss}$    | : iki eş mıknatıs parçası arasındaki mekanik kaykır açısı |
| $\theta_t$       | : stator dış açısı                                        |
| $\eta$           | : verim                                                   |
| $\rho$           | : hava yoğunluğu                                          |
| $\alpha_i$       | : akı yoğunluğu şekil faktörü                             |
| $\tau_m$         | : mıknatıs yayı                                           |
| $\tau_p$         | : kutup yayı                                              |
| $\tau_s$         | : oluk yayı                                               |
| $\chi$           | : nüve uzunluğu/ hava aralığı çapı oranı                  |
| $\varepsilon$    | : nüve uzunluğu/kutup yayı oranı                          |
| $\mu_{rec}$      | : bağlı geçirgenlik                                       |
| $\vartheta_{pm}$ | : mıknatıs sıcaklığı                                      |

## KISALTMALAR

|       |                                                                         |
|-------|-------------------------------------------------------------------------|
| AA    | : Alternatif Akım                                                       |
| ARG   | : Anahtarlama Relüktans Generatör                                       |
| Ar-Ge | : Araştırma Geliştirme                                                  |
| ARM   | : Anahtarlama Relüktans Makine                                          |
| AM    | : Asenkron Makine                                                       |
| DA    | : Doğru Akım                                                            |
| DD    | : Direct Drive (Doğrudan tahrikli)                                      |
| DFIG  | : Doubly Fed Induction Generator (Çift beslemeli asenkron generatör)    |
| IEC   | : International Electrical Commission (Uluslararası Elektrik Komisyonu) |
| İG    | : İçe Gömülü                                                            |
| KM    | : Kalıcı Mıknatıs                                                       |
| KMSG  | : Kalıcı Mıknatıslı Senkron Generatör                                   |
| NdFeB | : Neodmiyum Demir Bor                                                   |
| RM    | : Relüktans Model                                                       |
| SEA   | : Sonlu Elemanlar Analizi                                               |
| SKAG  | : Sincap Kafesli Asenkron Generatör                                     |
| SG    | : Senkron Generatör                                                     |
| SmCo  | : Samaryum Kobalt                                                       |
| THD   | : Total Harmonic Distortion (Toplam harmonik bozulma)                   |
| YY    | : Yüzey Yerleştirmeli                                                   |
| 2D    | : 2 Dimension (2 Boyut)                                                 |
| 3D    | : 3 Dimension (3 Boyut)                                                 |

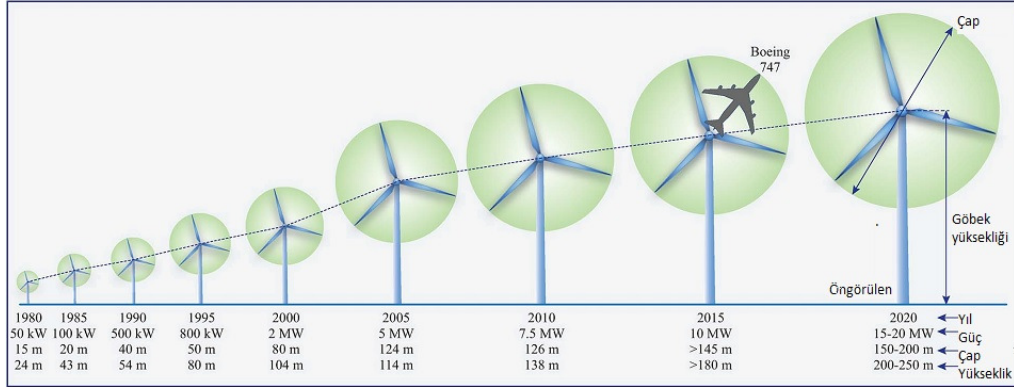
## BÖLÜM 1

### RÜZGÂR TÜRBİN TEKNOLOJİSİ

Dünya nüfusunun, kentleşmenin ve sosyal hayattaki refah düzeyinin artması, sanayileşmenin hızlı bir gelişme göstermesi ve yeni teknolojilerin kullanıma sunduğu makine-araç çeşitlenmesi gibi faktörler enerji sektörünü günümüzün en önemli sektörlerinden biri haline getirmiştir.

Rüzgâr enerjisi tükenmez potansiyelinin yanı sıra, kirlilik içermeyen bir kaynaktır [1]. Günümüzün geleneksel enerji üretim ve tüketim teknolojilerinin insan, çevre ve doğal kaynaklar üzerinde yerel, bölgesel ve küresel seviyede olumsuz etkilere neden olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, enerjinin çevreye zarar verilmeden üretilmesi ve tüketilmesi amacı ön plana çıkmıştır. Ülkeler özellikle sıfır salımı olan yenilenebilir enerji kaynaklarını güvenilir, ekonomik, kaliteli ve serbest piyasa mekanizması ile şartlarını zorlamadan ekonomiye kazandırılmasına, enerji üretim teknolojilerini bu yönde geliştirmeye, üretimi ile tüketimini teşvik edici çeşitli politikaların oluşturulmasına ve strateji belgelerinin hazırlanmasına hız vermişlerdir. 2012'ye geldiğinde dünya genelinde yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji üretimi, küresel enerji tüketiminin yaklaşık % 19'unu temsil etmektedir [2]. 2017'de, dünya genelinde, yenilenebilir güç kapasitesinin toplam güç kapasitesinde % 31'lik bir paya sahip olduğu görülmektedir [3].

Rüzgâr enerjisi geçmişte, su pompalama ve öğütme işlemi için tarım sektöründe kullanılmakta iken, son yüzyılda petrol krizinin artması nedeniyle rüzgâr enerjisi endüstrisi alanındaki araştırma ve geliştirme çalışmaları başlamıştır [1,4]. Bu çalışmalar sayesinde rüzgâr türbin boyutlarındaki artışlar elektrik güç üretimini de artırmıştır. Şekil 1' de görüldüğü gibi geçmiş 20 yılı değerlendirdiğimizde rüzgâr türbin boyutu 50 m seviyelerinden 150 m seviyelerine ulaşmıştır.



Şekil 1.1. Rüzgâr türbinleri boyutundaki gelişim [2].

Ayrıca güç kapasiteleri 1 MW değerinden 10 MW değerine yükselmiştir [2]. Küresel elektrik üreticileri, toplam enerji üretimindeki payı 2008’de %1 olan rüzgâr enerjisinin 2035’deki payının %8 yükseleceğini belirtmektedir [4]. Dünyada, yıllık enerji yakalama kapasitesini maksimum yapmak, maliyetleri en aza indirmek, tutarlı dinamik yanıt sağlamak, güç kalitesini artırmak ve son yirmi yıldaki rüzgâr enerjisindeki gelişmelerin güvenliğini sağlamak için çeşitli rüzgâr türbin teknolojileri geliştirildi ve üretildi. Özellikle son son 20 yılda çeşitli rüzgâr türbin teknolojilerinde hızlı gelişmeler olmuştur. Rüzgâr türbinlerinin dönme hızı göz önünde bulundurulduğunda bu teknolojiler [5];

- Sabit hızlı
- Sınırlı değişken hızlı
- Değişken hızlı olarak sınıflandırılabilirler.

Güç regülasyonu göz önünde bulundurulduğunda bu teknolojiler;

- Durma regülasyon
- Açık regülasyon olarak sınıflandırılabilir.

Aktarma organları göz önünde bulundurulduğunda bu teknolojiler;

- Dişli tahrikli
- Doğrudan tahrikli olarak sınıflandırılabilirler.

Çeşitli rüzgâr türbini teknolojileri arasında, sabit hızlı ve rüzgâr hızı belirli bir değerin üstüne çıktığında durdurulan rüzgâr türbinleri, çoğunlukla 1980'li ve 1990'lı yıllarda Sincap Kafesli Asenkron Generatörü (SKAG) ve çok kademeli şanzıman ile üretildi. 1990'ların sonundan buyana, güç seviyesi 1.5 MW üzerinde olan çoğu rüzgâr türbinleri için genel düşünce, şebekenin iyi bir güç kalitesi gereksinimi için değişken hız kontrollü olarak değiştirilmiştir. Ayrıca, 1991 yılından buyana, doğrudan tahrikli rüzgâr türbin sistemleri, şanzıman aksaklıklarını azaltmak ve daha düşük bakım sorunları için tercih edilmiştir [5]. Doğrudan tahrikli generatör sistemi, dişli tahrik sistemindeki bozulmaları azalttığı ve enerji verimini ve güvenilirliği artırdığı için rüzgâr türbinleri için yüksek bir potansiyele sahiptir. Kalıcı mıknatıslı (PM) makinelerin kullanımı, diğer generatörlere göre yüksek verimi, harici kaynaklara ihtiyaç duymaması, alan kayıplarının olmaması sayesinde, makinenin termal özelliklerinde optimizasyon yapıldığı takdirde yüksek güç oranı gibi avantajlarından dolayı piyasada kullanımı her geçen gün artmaktadır [5].

### **1.1. KONU, KAPSAM VE LİTERATÜR ÖZETİ**

Rüzgâr enerjisi dünya genelinde yoğun olarak çalışılan bir kavram olup son bir kaç yılda bu konu ile ilgili Ar-Ge faaliyetleri de artmıştır. Enerji kaynaklarını çeşitlendirmek ve kaynak temini konusunda mümkün olduğunca dışa bağımlılığı azaltmak bakımından yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım oranlarının artırılması ve enerji üretiminde % 100 yerli üretime destek verilmesi oldukça önemlidir. Rüzgâr enerjisi gibi enerji kaynaklarının tamamının değerlendirilmesine yönelik çalışmaların hızlanması ve özellikle temiz enerji teknolojilerinin ülke ekonomisine kazandırılmasının bir zorunluluk olduğu düşünülmektedir. Dolayısıyla rüzgâr enerjisi çözümleriyle birlikte rüzgâr türbini ve rüzgâr enerjisinden elektrik üretiminde kullanılan generatör/alternatör gibi sistemlerin ihtiyacı da giderek artmaktadır. Bu sistemlerin tasarımı ve üretiminin de önemi her geçen gün artmaktadır. Fakat bu generatör yapılarının ülkemizde üretimi pek yaygın değildir. Bu da gelecekte ülkemizin rüzgâr enerjisinden ne kadar faydalanabileceği konusunda bizleri düşündürmektedir.

Rüzgâr türbinlerinde güç üretiminin birçok konfigürasyonu vardır [1]. Rüzgâr türbinlerinde kullanılan generatörler incelendiğinde üç tip generatör ön plana çıkmaktadır. Bunlardan birincisi çift beslemeli asenkron generatör (doubly fed induction generator-DFIG) [6], ikincisi çok kademeli şanzıman ve sincap kafesli asenkron generatörü kullanan, direk şebeke bağlantılı rüzgâr türbin sistemi, üçüncüsü ise değişken hızlı herhangi bir dişli sistemine ihtiyaç duymayan kalıcı mıknatıslı senkron generatördür (direct drive permanent magnet synchronous generator-DDPMSG) [5,7]. En çok tercih edilen iki konfigürasyon, kısmen % 30'u back to back güç dönüştürücülü DFIG ve tam ölçekli güç dönüştürücüleriyle doğrudan tahrikli KMSG'dir [1].

Kalıcı mıknatıslı AA ve DA makineleri özel bazı uygulamalarda kullanılmaktaydı, fakat son yıllardaki kalıcı mıknatıs materyallerindeki gelişmeler nedeni ile askeri, elektrikli taşıt ve rüzgâr enerjisi uygulamalarında sıkça kullanılmaya başlanmıştır [8]. KMSG'ler ayrıca, asenkron ya da DA makinelerin kullanılamayacağı uygulamalar başta olmak üzere rüzgâr türbin sistemleri gibi çok sayıda uygulamada aşağıdaki özelliklerinden dolayı tercih sebebi olmaya başlamıştır.

- Türbin sistemine doğrudan tahrikli bağlanabilir [7,9-11].
- Herhangi bir hızda güç üretebilir [11,12].
- Maliyeti düşük [13,14].
- Değişken hız ve yüklerde maksimum verim [9,12,15-16]
- Kararlı ve güvenilir [9,17]
- Diğer mekanik bileşenler ile kolay bütünleşme [17]
- Maksimum güç [15,18]
- Hacimleri ve ağırlıkları az olduğu için, moment yoğunlukları ve moment/ağırlık oranları fazla [17,19].

Ulusal literatür incelendiğinde bu konuyla ilgili yeterli çalışma yapılmamıştır. Rüzgâr enerjisi sistemleri ile ilgili yapılan çalışmalar; rüzgâr türbin generator sistemlerin kontrolü [20,21], rüzgâr enerjisi üretim sistemlerinin modellenmesi [22], rüzgâr enerjisinin dünyadaki gelişmeleri ve ülkemizdeki potansiyeli [23] ve rüzgâr enerji sistemlerinin optimizasyonu [24-26] olarak özetlenebilir. Generatör tasarım

alışmalarında [27-29] ise istenmeyen hususları minimize etmek için kullanılan bir statorda kayk işlemi, etimi maliyetli ve zor olduğu için kullanılmamıştır. Uluslar arası literatür incelendiğinde rüzgâr türbinleri için generatör tasarımı ile ilgili bir çok çalışma karşımıza çıkmaktadır.

Kaynak [30]'de, son yıllarda temiz enerji üretiminin zorunluluğundan dolayı önemi her geçen gün artan rüzgâr türbinleri için 20 kW' lık güç istasyonlarında kullanılmak üzere oluksuz yüzey yerleştirmeli KMSG tasarımı ve prototipi gerçekleştirilmiştir. Stokastik algoritma kullanılarak gerçekleştirilen çok amaçlı elektromanyetik tasarım ve optimizasyon sonuçları, prototip üzerinde test edilerek sunulmuştur.

Kaynak [31]'da, büyük ölçekli rüzgâr türbinleri için doğrudan tahrikli KMSG tasarımı ve kontrol sorunlarıyla ilgili genel bir inceleme sunulmuştur. Bu incelemede büyük ölçekli rüzgâr türbinleri için 5 MW'lık eksenel akılı KMSG tasarımı detaylandırılmış ve kontrol teknikleri tartışılmıştır.

Kaynak [32]'de, nominal 1.5 kW'lık çıkış gücünde DA gerilim üreten, rüzgâr türbinleri için eksenel akılı KMSG'nin performans gereksinimlerini temel alan bir tasarım sunulmaktadır. Bu tasarım ve kurulumunda, 24 m/s'nin altındaki rüzgâr hızları için ve nominal 1.5 kW'lık çıkış gücü işletme şartlarında doğrultucu kullanarak DA gerilim üretecek iki rotor ve bir stator topolojili eksenel ak KMSG yapısı kullanılmıştır.

He ve Wang (2012) yaptıkları çalışmada, düşük hızlarda KMSG'n temel elektromıknatıs tasarımı ve optimum tasarımını sunmuştur. Bu tasarımların içeriğini; stator nüve tasarımı, stator sargı tasarımı, rotor kalıcı mıknatısların tasarımı ve rotor tasarımının temeli oluşturmaktadır. Bu tasarımın optimum olması ve rüzgâr türbininin maksimal çıkış verimi için kaos optimizasyon algoritması kullanılmıştır [33].

Chen ve Wang (2011) yaptıkları analiz çalışmasında, sonlu elemanlar metodunu kullanarak KMSG hava aralığı değişkenlerinin benzetimini yaparak hava aralığındaki çıkış geriliminin analizini gerçekleştirmiştir. Kullandıkları bu metot ile yüzey

yerleştirmeli KMSG'ün akısının ve endüvide indüklenen elektromotor kuvvetin değerinin ve dalga şeklinin tam olarak hesaplanabileceğini göstermişlerdir [34].

Widyan ve Hanitsch (2012) tarafından gerçekleştirilen tasarımda, 3 oluklu, 3 fazlı, 4 kutuplu yeni yapısıyla KMSG'ün sonlu elemanlar analizi ortaya konmuştur. Bu topoloji ve kullandıkları nadir element olan NdFeB kalıcı mıknatıslar ile yüksek güç yoğunlu ve verimi elde edilmiştir. Ayrıca farklı yüklerde ve hızlarda yapılan kararlı-hal çalıştırmada elde edilen, tutma torkunun pik değeri ile çıkış performans karakteristiğinin, başarılı bir topoloji ve geçerli bir tasarım olduğunu göstermiştir [35].

Gundogdu ve Komurgoz (2012) yaptıkları çalışmada, rüzgâr türbinleri için tasarlanan KMSG'ün uygulanabilirlik ve ekonomik analizleri ortaya konmuştur. Alan sargılı çıkıntılı kutuplu ve çevre sargılı senkron elektrik makinelerinin önemli avantajları sunulmuştur. Ayrıca tasarımda sargılardaki eddy akım etkileri dikkate alınarak verim, çıkış gücü ve hava aralığı akı yoğunluğu simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada, elektrik makinelerinin tasarım kriterlerinin belirlenmesinin gerekliliği üzerinde durulmuştur [36].

Literatürde yapılan tasarım ve analizlerde farklı rotor yapılarının kullanıldığı dikkati çekmektedir. Bu yapılar; İç rotorlu [28], Dış rotorlu [37], Çıkıntılı kutuplu [35], Yüzey yerleştirmeli [8,12,15,38], Yüzeye gömülü [39] olarak sıralanabilir. Kaynak [40, 41] 'de çıkıntılı kutuplu ve yüzey yerleştirmeli rotor yapısı karşılaştırılarak, maksimum tork ve yük koşulu altında manyetik akı dağılımları, 3. harmonik bileşenleri ve yüksüz iken rotorun tutma torku irdelenmiştir. Bu çalışmalardaki sonuçlar değerlendirildiğinde, doğrudan tahrikli rüzgâr türbinleri için çeşitli KM makine topolojilerinin kullanımı mümkün olmasına rağmen, düşük hızlarda, basit ve güvenilirliği açısından radyal akılı ve yüzey yerleştirmeli rotor yapısıyla KMSG'ün daha doğru bir tercih olduğu görülmektedir [42]. Ayrıca yüzey yerleştirmeli rotor yapısının, dengeli bir akı dağılımı sağladığı, endüvi reaksiyonu etkilerini azalttığı [39], düzgün tork üretimi sağladığı [43] ve yüzeye gömülü rotor yapısıyla karşılaştırıldığında daha yüksek verime sahip olduğu görülmektedir. Çıkıntılı kutuplu rotor yapısı ve yüzey yerleştirmeli rotor yapısı karşılaştırıldığında, yüzey yerleştirmeli yapının veriminin yüksek, demir kayıplarının düşük, bakır ve uyartım kayıplarının

olmaması [14,41] gibi nedenlerden dolayı yüzey yerleştirmeli rotor yapısı tercih edilmiştir.

Tork kalitesi ve maliyet doğrudan tahrikli kalıcı mıknatıslı (KM) rüzgâr generatörü tasarımında dikkat edilmesi gereken en önemli unsurlardan ikisidir. Her iki unsur için de bir mutlak minimum gerekli olsa da, diğer faktörler; kütle, verimlilik, ortalama tork performansı, yük momentindeki dalgalanma ve gerilim kalitesi optimizasyon sürecinde göz ardı edilemez [14]. Ayrıca harmonikler, torkdaki dalgalanmalar ve tutma torku gibi parametreler makine tasarımında önemli ve istenmeyen hususlardır. Bu hususları minimize edebilmek için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır; statorda kaykırı işlemi, kesirli oluk/kutup konfigürasyonu [7], dağıtılmış sarımlar, uygun mıknatıs kutbu yay genişliği ve küçük oluk açılma genişliğidir [44].

Prototip üretimi gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde, bu çalışmaların birkaçında [12,13,15,28,29,39,45-47]; istenmeyen hususları minimize etmek için kullanılan statorda kaykırı işlemi, üretimi zor ve maliyetli olduğu için kullanılmamıştır. Bazı çalışmalarda [42,48,49] ise maliyetli olmasına rağmen statorda kaykırı işlemi gerçekleştirilmiştir.

Kalıcı mıknatıslı radyal akıllı adı da verilen standart makinelerin tasarımı, tüm dünyada birçok firma tarafından belirli güç ve hızlarda yapılmaktadır. Ancak, her ne kadar tasarımda kullanılabilecek yazılımlar olsa bile, özel bir uygulama için makine tasarımı uzmanlık istemekte ve zaman almaktadır. Standart dışı kalıcı mıknatıslı makinelerin tasarımı ise, başlı başına uzmanlık gerektiren, makine yapısına bağlı olarak denklemleri değişen, modelleme ve sonlu elemanlar analizi (SEA) gibi analizler olmaksızın tasarımın sonlandırılmayacağı, zaman alıcı güç bir iştir. Tasarımda kullanılacak olan yöntem SEA olduğu için bu konu ile ilgili yapılan çalışmalara göz atmakta fayda vardır. Literatür incelendiğinde SEA kullanan birçok çalışma karşımıza çıkmaktadır [8,9,13,15,17,37-39,42,45,50,51]. Makine modeli, kalıcı mıknatıslı generatörün yapısına bağlı olarak, sonlu elemanlar yazılımının türünün 2 ya da 3 boyutlu olmasına göre değişir. Elde edilen tasarım ya da tasarımlardan uygulamanın özelliklerine uygun olanı ya da olanları SEA ile çözümlenerek tasarım kriterlerine uygunluğu belirlenmelidir.

Makine tasarımımda mıknatıs seçimi kuşkusuz önemli bir husustur. Bunu belirlemek için yapılan çalışmalarda belirli bir hava aralığı akı yoğunluğu için belirlenmiş olan mıknatıs sınıfına karşı mıknatıs maliyeti ve kütlesi sonlu elemanlar ile tanımlanmış, mıknatıs boyutunda büyük azalma olurken fiyatının da büyük oranda arttığı görülmüştür [52]. Rotorda kalıcı mıknatıs olarak çoğunlukla Neodmiyum Demir Bor (NdFeB) tip nadir toprak mıknatıslar ve hafif çelik malzeme kullanılmaktadır. Ayrıca Samaryum Kobalt (SmCo) gibi az bulunur ve pahalı mıknatıslar da küçük boyutlarda yüksek manyetik alan yoğunluklarına ulaşılabilir. Bu tip mıknatıslar özellikle uzay ve havacılık uygulamalarında kullanılmaktadır. Kullanılan kutup sayısı ve mıknatısın cinsi, elde edilmek istenen manyetik alan yoğunluğuna göre değişmektedir. Kullanılan mıknatıslar makine verimini mutlak suretle etkileyeceğinden tasarlanan makinede maliyet/tork göstergesi ve verimlilik ön planda olduğu için NdFeB mıknatıs çeşiti kullanılmıştır.

Verimlilik, boyutlu kısıtlama, tutma torku, soğutma durumu, geri dönüşü olmayan mıknatıssızlaştırma, üretim, kontrol performansı, maliyet ve benzeri gibi birçok unsur KMSG tasarımını sınırlandıran faktörlerdir [39]. Bu faktörler dikkate alınarak optimizasyon çalışmaları yapılmaktadır. Literatür incelendiğinde optimizasyon çalışmalarında farklı yöntemlerin kullanıldığı görülmüştür. Bu yöntemler;

- Otomatik ayarlamalı çok gruplandırılmış parçacık sürüsü optimizasyon algoritması (AT-MGPSO) [15]
- Zaman-adımlı (time-stepping) [44,50,53]
- Powell algoritması [43]
- Genetic algoritma [8,17]
- Analitik algoritma [19]
- Statik sonlu elemanlar algoritması [37,52]
- Parametrik algoritma [14]
- Kaos algoritması [48]
- Stokastik algoritma [46]

Kaynak [54]'de bir makine tasarımcısının kullanabileceği farklı nesnel fonksiyonları kullanarak, açık denizlere kurulan doğrudan tahrik rüzgâr türbinleri için büyük, düşük

hızlı generatörlerin optimizasyon süreci incelenmiştir. Diğer bir çalışmada doğrudan tahrikli rüzgâr türbin uygulamaları için nüvesiz aksenal akıllı KMSG'nin çok amaçlı tasarım ve optimizasyon çalışması sunulmuştur [55]. Aktif maddenin maliyetini düşürmek ve genaratörün yıllık enerji verimini artırmak için kısmi sürü optimizasyon algoritması kullanılarak çok amaçlı bir fonksiyon tanımlanmış ve gerçekleştirilmiştir [53].

Bu çalışmada, rüzgâr ve nehir santrallerinde kullanılmak üzere düşük hızlarda da enerji üretimi, değişken hız ve yüklerde yüksek verim ve yüksek güç sağladığı için KMSG tercih edilmiş, tasarımı, optimizasyon çalışmaları ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Önerilen bu çalışmada üretimi kolay, güvenilir, dayanımlı ve daha az maliyetle geliştirilmiş radyal akıllı yüzey yerleştirmeli rotor yapısı tasarlanmıştır. Bu yapıda mıknatıslar, hesaplanan eğim açısıyla rotor yüzeyine yerleştirilmiştir. Böylelikle tutma torkunu minimize etmek için üretimi zor ve daha yüksek maliyetli statorda kaykırı işlemine gerek kalmamaktadır [7]. Önerilen optimizasyon çalışmasında ise, tüm boyutlandırma çalışmalarının akabinde, verimlilik ve diğer çıkış parametrelerinin hedeflenen sınırlar içerisinde kalması için ANSYS Optimetrics opsiyonel yazılım programı ile çok amaçlı parametrik çözüm metodu kullanılmıştır.

Artık günümüzde kalıcı mıknatıslı makinelerin tasarım süreci sadece elektromanyetik tasarımdan ibaret değildir. Bu çalışmada tasarlanacak olan kalıcı mıknatıslı generatörün elektromanyetik, yapısal ve termal tasarım ya da analiz aşamalarını geçtikten sonra sonlandırılacaktır. Tasarım aşamalarının her biri optimum tasarımı bulabilmek için kendi içinde bir çevrim oluşturacaktır. Elektromanyetik tasarım kendi içerisinde generatör modeli, optimizasyon, 2 yada 3 boyutlu sonlu elemanlar analizi gibi uzun, yorucu ve zaman alıcı aşamaları içermektedir. Generatör modeli, kalıcı mıknatıslı generatör yapısına bağlı olarak, sonlu elemanlar yazılımının türünün 2 ya da 3 boyutlu olmasına göre değişir. Elde edilen tasarım ya da tasarımlardan uygulamanın özelliklerine uygun olanı ya da olanları ANSYS Ansoft Maxwell paket programı aracılığı ile çözümlenerek tasarım kriterlerine uygunluğu belirlenecektir. Bu döngülü proses kriterlerin zorluk derecesine göre birkaç defa tekrarlanabileceği göz önüne alınmıştır.

## 1.2. AMAÇ VE HEDEFLER

Rüzgâr enerjisi gibi enerji kaynaklarının tamamının değerlendirilmesine yönelik çalışmaların hızlanması ve özellikle temiz enerji teknolojilerinin ülkemiz ekonomisine kazandırılmasının bir zorunluluk olduğu bilinciyle, kırsal ve dağınık yerleşim birimlerinin enerji ihtiyacının karşılanması önemli olduğu düşünülmektedir. Bu hususta amaç, küçük ölçekli rüzgâr ve nehir türbinlerinde kullanılacak, düşük rüzgâr hızlarında yüksek verimle çalışacak KMSG tasarlamak ve üretimini gerçekleştirmektir. Rüzgâr türbin sistemlerinde olabildiğince rüzgâr enerjisinden faydalanmak için tasarlanacak generatörün verimliliği önemli bir parametredir. Literatürdeki çalışmalarda büyük güçlü generatörler için verim % 90-% 94 değerlerinde elde edilmişken [12,35,42], küçük güçlü generatörlerde ise %80- %85 değerlerinde elde edilmiştir

Küçük ölçekli rüzgâr ve nehir enerjisi dönüştürme sistemleri, dağıtım ağının kurulmasının ekonomik açıdan rasyonel olmadığı kentsel ve kırsal alanlarda elektrik enerjisi üretmek için cazip bir seçimdir [56]. Bu tasarım ve üretim, düşük maliyet ve yüksek verim unsurları dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Böylelikle düşük su debilerinde ve rüzgâr hızlarında enerji üretimi sağlanarak üretim maliyetlerinin kısa sürede karşılanması sağlanabilir. Ayrıca bu çalışmayla;

- Eko-ev ve Eko-işletme konsepti için ev, petrol ofisleri, çiftlikler ve küçük işletmeler gibi yerlerin enerji ihtiyacını karşılamak için kurulan hibrit enerji sistemlerinde kullanılan rüzgâr türbinleri için generatör tasarımı,
- Düşük rüzgâr hızlarında enerji üretimini sağlamak için tutma torkunu minimize eden optimizasyon çalışmalarının gerçekleştirilmesi,
- Tasarımı gerçekleştirilen generatörün analiz ve optimizasyon çalışmalarını tamamladıktan sonra üretimi,
- Mekanik tasarım, mekanik ve ısı analizler, sistem entegrasyonu, test ve doğrulama gibi faaliyetlerin milli sistem çözümü ile özgün olarak geliştirilmesi,
- Üretimi gerçekleştirilen generatörden küçük güçlü olmasına rağmen daha az maliyetle yaklaşık olarak %92 ve üzerinde verimin elde edilmesi hedeflenmektedir.

## BÖLÜM 2

### RÜZGÂR ENERJİSİ ÇEVİRİM SİSTEMLERİ

Rüzgâr enerjisi, yenilenebilir özelliğe sahip olup ve çevre bakımından da temiz bir enerji kaynağı olarak bilinmektedir. Dünyada rüzgârdan enerji kaynağı olarak yararlanma konusundaki gelişmelerin 1980 yılından sonra ortaya çıktığı ve hızla yayıldığı görülmektedir. Ülkemizde ise rüzgâr enerjisinin öneminin anlaşılması, 1990'lı yılların ortalarına rastlamaktadır. Rüzgâr enerjisini dönüştüren teknoloji, diğer güç kaynaklarına oranla daha ekonomiktir. Kullanımı da yüksek bir teknolojiyi gerektirmez. Mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren tipik bir rüzgâr türbini sistemi, rüzgâr türbini, generatör ve güç dönüştürme devresinden oluşur [57]. Buna göre rüzgâr potansiyeli iyi olan yerlerde rüzgâr enerji sistemleri kurularak büyük ekonomik yararlar sağlanabilir [58]. Böylelikle elektrik enerjisi üretimindeki dışa bağımlılığımız azaltılabilir.

#### 2.1. RÜZGÂR TÜRBİN MODELİ

Rüzgârda depolanan enerji düşük kaliteli bir enerji şeklidir. Birçok faktör rüzgâr hızının davranışını etkiler, bu nedenle enerji aralıklı ve değişken bir kaynak olarak modellenir ve büyüklüğü ve doğrultusu gelişigüzel değişken olarak karakterize edilir [59]. Türbinin statik karakteristiği (rüzgâr hızının bir fonksiyonu olarak çıktı) rüzgârın toplam gücü ve mekanik enerjisi arasındaki ilişki ile tanımlanabilir [60]. Hava kütlesi, bir rüzgâr türbininin pervanesine dikey yönde çarptığında, rüzgâr gücü aşağıdaki gibi ifade edilebilir [60,61-63].

$$P_{rüzgar} = \frac{1}{2} \rho \pi R_t^2 v_r^3 \quad (2.1)$$

Burada,  $\rho$  hava yoğunluğu ( $1,225 \text{ kg/m}^3$ ),  $R_t$  rotor yarıçapı (m),  $v_r$  rüzgâr hızıdır (m/s). Rüzgârın tüm kinetik enerjisini elde etmek imkânsızdır. Bu nedenle rüzgâr gücünün bir bölümü  $C_p$  güç katsayısı olarak çıkarılır [64]. Bu katsayının maksimum değeri % 59,3'tür. Yani rüzgâr türbininden elde edilebilecek maksimum güç toplam rüzgâr gücünün 0,593'ü veya 16/27'sidir. Bu değer Betz sınırı olarak da bilinir. Böylelikle rüzgâr türbininin çıkış gücü ve  $C_p(\lambda, \beta)$  güç katsayısı sırasıyla aşağıdaki gibi ifade edilebilir [1,55,60-70].

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \pi R_t^2 v_r^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (2.2)$$

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left( \frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{\frac{-c_5}{\lambda_i}} + c_6 \lambda \quad (2.3)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (2.4)$$

Bir kanat ucunun teğet hızı ile rüzgârın gerçek hızı arasındaki oranın  $\lambda$  ve kanat açısının  $\beta$  bir fonksiyonu olarak ifade edilir. Buradaki  $c_1$ - $c_6$  katsayıları;  $c_1 = 0.5176$ ,  $c_2 = 116$ ,  $c_3 = 0.4$ ,  $c_4 = 5$ ,  $c_5 = 21$ ,  $c_6 = 0.0068$  olarak alınmıştır [55]. Uç hız oranı [1,55,60-67];

$$\lambda = \frac{\omega_m \times R}{v_r} \quad (2.5)$$

Burada,  $\omega_m$  rotor dönüş hızı (rad/s),  $C_p$ 'nin maksimum değeri genellikle 8 ila 9 civarında olan  $\lambda$  değerlerinde elde edilir (bıçak hareketlerinin ucu rüzgârdan 8 ila 9 kat daha hızlı olduğunda) [60]. Rotor üzerindeki rüzgâr türbini torku ve sistemin elektromekanik hareket denklemi sırasıyla aşağıdaki gibi hesaplanabilir [1,60,63,71].

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_m} = \frac{1}{2} \frac{C_p \rho \pi R_t^2 v_r^3}{\omega_m} \quad (2.6)$$

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_m - T_e - B\omega_m \quad (2.7)$$

Burada:

$T_m$ : türbin mili tarafından sağlanan mekanik torku [Nm] ifade etmektedir,

$T_e$ : generatör tarafından üretilen elektromanyetik tork [Nm],

$J$ : atalet momenti [ $\text{kgm}^2$ ],

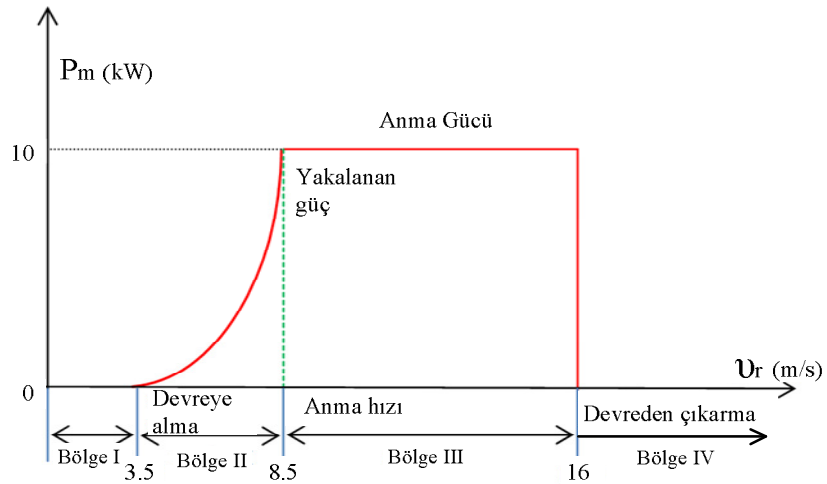
$B\omega_m$ : sürtünme torku,

$B$ : sürtünme katsayısı,

$\omega_m$ : türbinin mekanik açısal hızıdır [rad/s].

Bir rüzgâr enerjisi dönüştürme sisteminin güç üretim eğrisi Şekil 2.1’de görüldüğü gibi dört bölüme ayrılabilir [63];

- Bölge I; türbin dönmüyor ve dönüştürücü kapalı.
- Bölge II; türbin sadece bu bölgede çalışabilir. Bu bölümde gerçek bir denetleyiciye ihtiyaç duyulmaktadır.
- Bölge III; türbinin güç üretimi sınırlıdır çünkü jeneratör zaten maksimum güce sahiptir.
- Bölge IV; yüksek rüzgâr hızlarında hasar görmesini önlemek için türbin dönmeye son verilir.



Şekil 2.1 Değişken hızlı rüzgâr türbininin ideal güç eğrisi [64,65].

## 2.2. KALICI MIKNATISLI SENKRON GENERATÖR

Senkron generatör (SG), KMSG ve anahtarlamalı relüktans generator (ARG) doğrudan tahrikli (direct drive-DD) rüzgâr türbin uygulamalarında yaygın olarak kullanılan generatörlerdir [57].

Doğrudan tahrik sistemlerde, generatör rotoru doğrudan rüzgâr türbini miline bağlanır. Düşük rüzgâr hızlarında rotor hızı dolaylı tahrik sistemdeki rotor hızına göre nispeten yavaştır. Bu yüzden generatörün dolaylı tahrik sistemindeki bir generatörden daha fazla kutup içermesi gerekir; bu da generator çapının daha büyük olmasına neden olur. Bununla birlikte, doğrudan tahrikli rüzgâr türbin sistemlerinin temel avantajları daha yüksek enerji verimliliği ve güvenilirliktir [57].

Rüzgâr türbin teknolojisi üreticilerinin günümüzde DDKMSG'yi eskisinden daha fazla tercih etmelerinin bir nedeni, yüksek tork/ağırlık oranına sahip olmalarıdır. Ayrıca, dc uyarma yerine kalıcı mıknatıs kullanılmasıyla basit bir konfigürasyona sahiptir. Bu generatörlerin en popüler avantajları [57]:

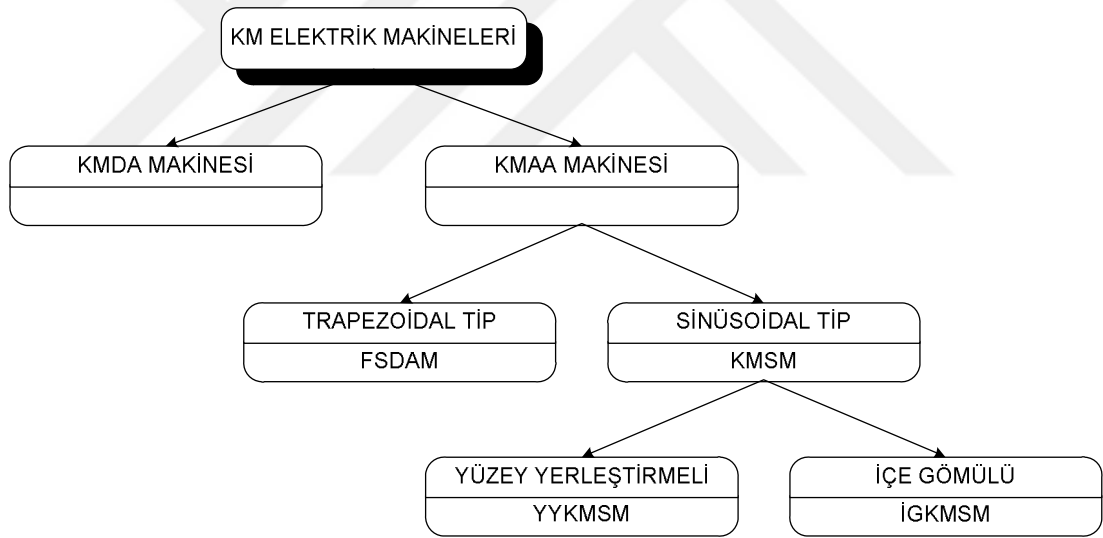
- Dişli tahrikli olmaması nedeniyle düşük maliyet,
- Yüksek verime sahip olması nedeniyle rüzgârdan maksimum enerjisi yakalaması,
- Dişli tahrikli generatörler ile karşılaştırıldığında daha az bakım gerektirmesi,
- Kolay kontrol,
- Kolay soğutma sistemi.

Ve fazlası, DDKMSG'lerin rotorunda sargı yerine mıknatısların bulunması bakır kayıplarını azaltır ve küçük boyutta yüksek güç yoğunluğuna sahiptirler [57].

Yapı olarak geleneksel senkron makinelerden ayıran özelliği ise DA uyartım devresi yerine manyetik alan oluşturmak için kullanılan kalıcı mıknatıslardır. Alan kayıplarının olmaması KM makinenin termal karakteristik özelliğini iyileştirmektedir [1]. KMSG herhangi bir enerji kaynağına ihtiyaç duymadan kendinden uyartımlı olması nedeniyle rüzgâr türbini uygulamalarında önerilmektedir [58]. En büyük

avantajı herhangi bir hızda güç üretebilmesidir. Bakım maliyeti düşüktür. Küçük ve hafif uygulamalar için uygundur. Yukarıda bahsedilen avantajlarından dolayı bu makineler rüzgâr türbin teknolojisinde etkin çözümler sunmaktadır. Bu avantajlarının yanında yüksek sıcaklıklarda mıknatıssızlaşma, üretiminde mıknatısları işlemek için zorluklar ve yüksek üretim maliyeti gibi dezavantajlarından da bahsetmek gerekir [1].

KM'lı elektrik makineleri KM'lı Doğru Akım (KMDA) Makinesi ve KM'lı Alternatif Akım (KMAA) Makinesi olmak üzere iki grupta sınıflandırılabilir. KMDA makineleri, DA makineleriyle benzerlikler göstermektedir, tek fark, alan sargıları yerine KM'lar bulunmaktadır. KMAA makinesinde ise alan, rotorda bulunan mıknatıslardan elde edilmektedir. Ayrıca bu makinelerde fırça ve bilezikler bulunmamaktadır. KMAA'lar Şekil 2.2'de görüldüğü gibi zıt emk'nın dalga şekline göre trapezoidal ve sinüsoidal olarak sınıflandırılmaktadır [1].

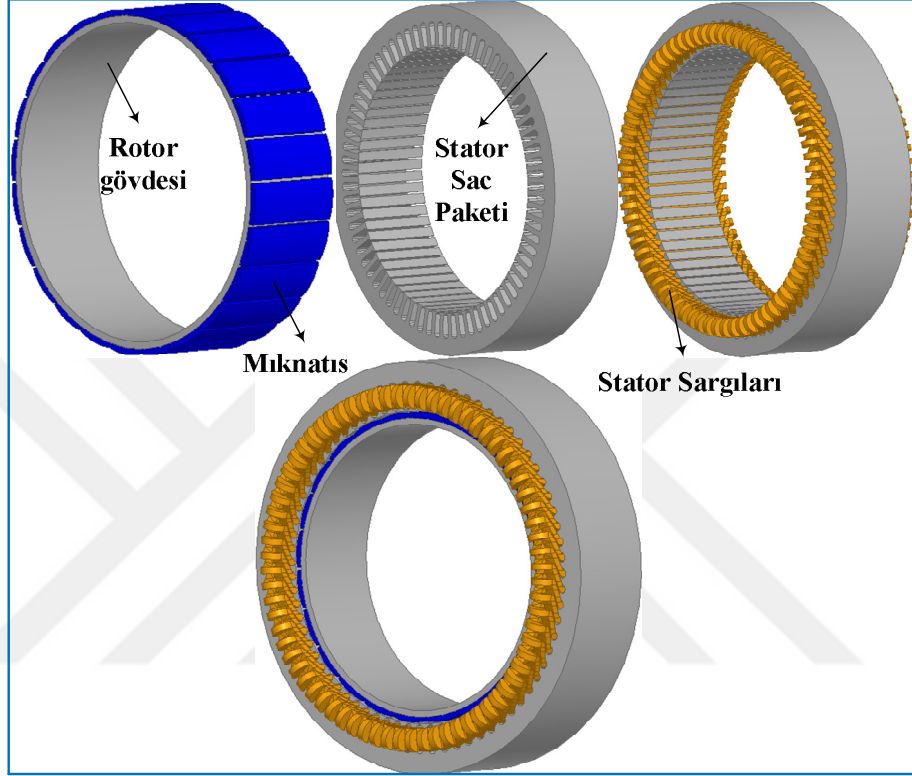


Şekil 2.2. Kalıcı mıknatıslı makinelerin sınıflandırılması [1].

Trapezoidal makineler, stator sargılarındaki zıt emk'nın trapezoidal dalga şeklinden dolayı fırçasız DA motoru olarak da adlandırılırlar. Sinüsoidal KMAA makineleri ise, statoru sinüsoidal akım ile uyarıldığı için KM senkron makine olarak adlandırılırlar [1].

KMSG yapı olarak, statoru birbirine ard arda yerleştirilmiş silisli lamineler, oluklara yerleştirilmiş sargılardan ve kalıcı mıknatıslara sahip rotordan oluşmaktadır (Şekil

2.3). Genel olarak statorları asenkron makinelerin statoruna benzemekle beraber sargılar farklı şekillerde sarılabilmektedir. Stator gövdesindeki boşluklardan geçen bobinler bir araya gelerek stator sargısını meydana getirmekte ve stator etrafında kutup çiftleri halinde dağılmaktadır.



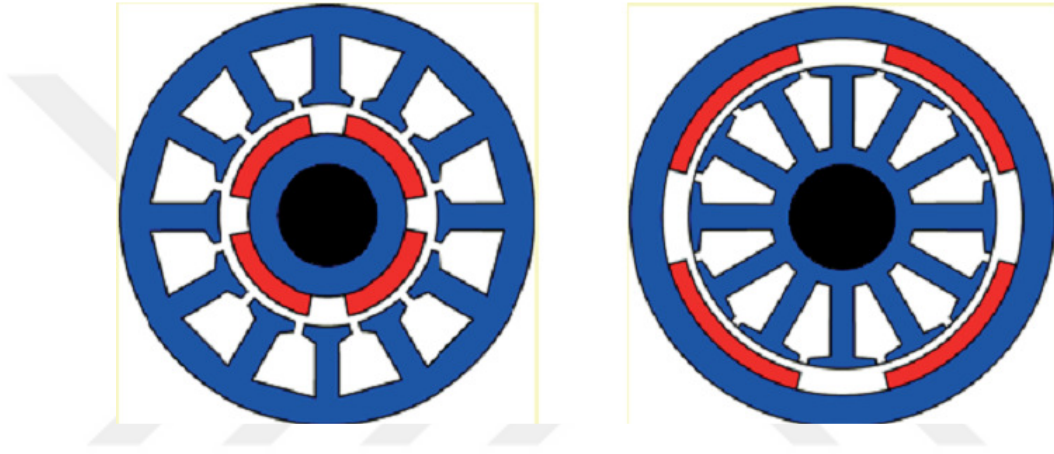
Şekil 2.3. Örnek KMSM yapısı.

Ayarlanabilir hızlı KMSM'nin analiz yaklaşımında, rotor hızı, giriş geriliminin frekansı ayarlanarak kontrol edilir. Standart fırçasız kalıcı mıknatıslı DA motorların aksine, bu tip makineler için konum sensörü kullanılmaz. Statora yerleştirilmiş çok fazlı endüvi sargıları ve bunların kutup sayısı rotor kutup sayısı ile aynıdır. Bu makineler generatör ve motor olarak çalıştırılabilirler. Makine motor olarak çalıştırıldığında, çok fazlı stator sargıları sinüsoidal bir AA kaynağından beslenebileceği gibi, DA- AA çeviricili bir DA kaynağından da beslenebilir. Makine generatör olarak çalıştırıldığında, çok fazlı stator sargıları elektrik yükleri için AA kaynağı sağlar.

### 2.2.1. KMSM'nin Yapısı

Kalıcı mıknatıslı makineler kendi aralarında da rotor yapısına ve kullanım alanına göre sınıflandırılmaktadırlar. Genel olarak bu makineleri iki grup altında toplanabilir (Şekil 2.4):

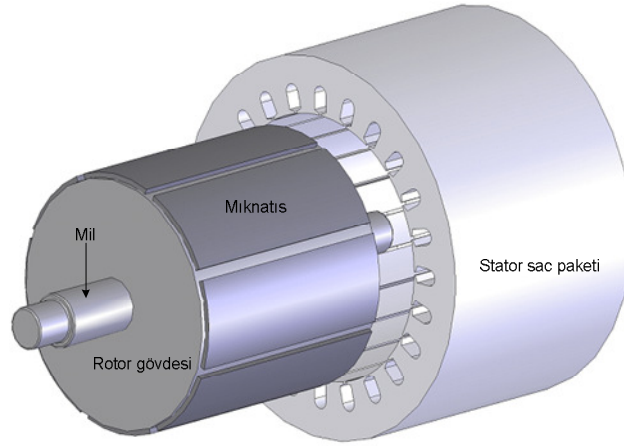
- İç rotorlu (in-runner) tip
- Dış rotorlu (out-runner) tip



Şekil 2.4. İç rotor KMSG (sol) ve dış rotor KMSG (sağ) yapısı [72].

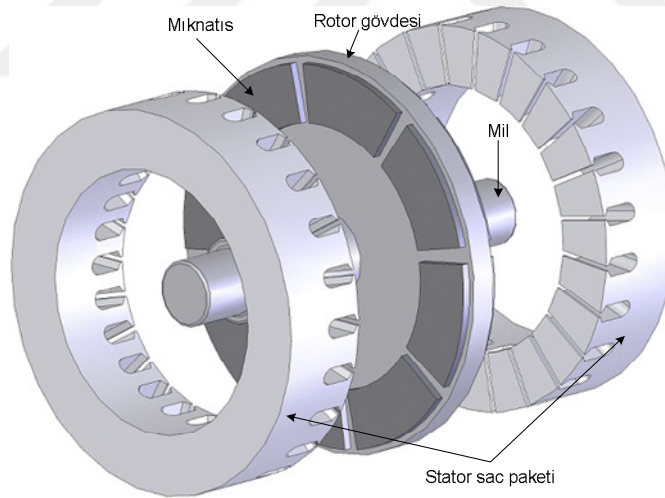
#### 2.2.1.1. İç Rotorlu KMSM

Bu tip KMSM' ların rotoru statora göre motorun iç kısmında bulunmaktadır. Gövde (stator) sabittir. Bu makinelerin genellikle hızları diğer tür olan dış rotorluya göre daha yüksektir. Buna karşılık makinelerin volt başına ürettikleri moment daha azdır. Rotorun içte olması birçok kullanım kolaylığı sağlar. Şekil 2.5 ve Şekil 2.6'da farklı KMSM yapıları görülmektedir [73]. Şekil 2.5'de görülen makine yapısında mıknatıslar rotor yüzeyine yerleştirilmiştir. Rotor gövdesi katı dökümden elde edilebileceği gibi CNC ile de işlenerek elde edilebilir. Stator saç paketinin ince laminelerden elde edilmesi girdap akım kayıplarını azaltmak için doğru tercih olacaktır [73].



Şekil 2.5. Radyal akılı KMSM [73].

Şekil 2.6’da eksenel akılı senkron makine bileşenlerinin oluşturduğu bir-rotor-iki-stator topolojisi görülmektedir. Bu topolojide mıknatıslar rotorun iki yüzeyine yerleştirilir ve kutup akıları bu mıknatıslardan geçerek kutuplar arasında bağlantı sağlanır [73]. KMSM’lar rotor yapısına göre aşağıdaki şekilde sınıflandırılırlar [1]:

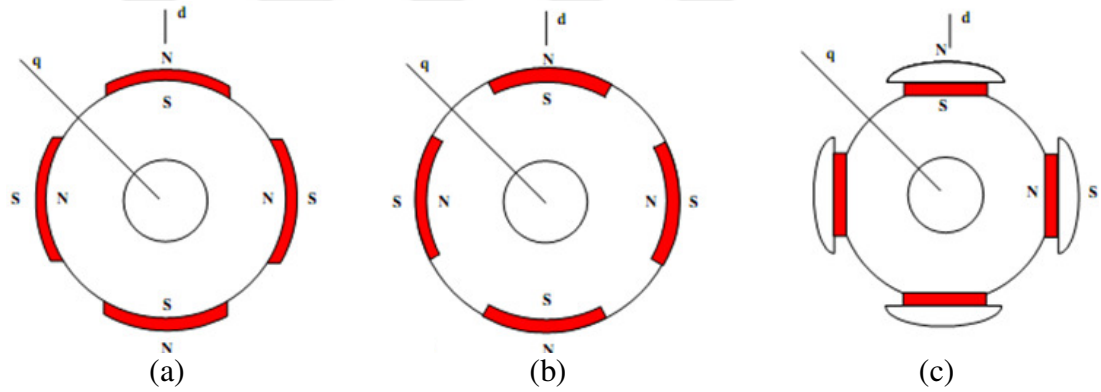


Şekil 2.6. Eksenel akılı KMSM [73].

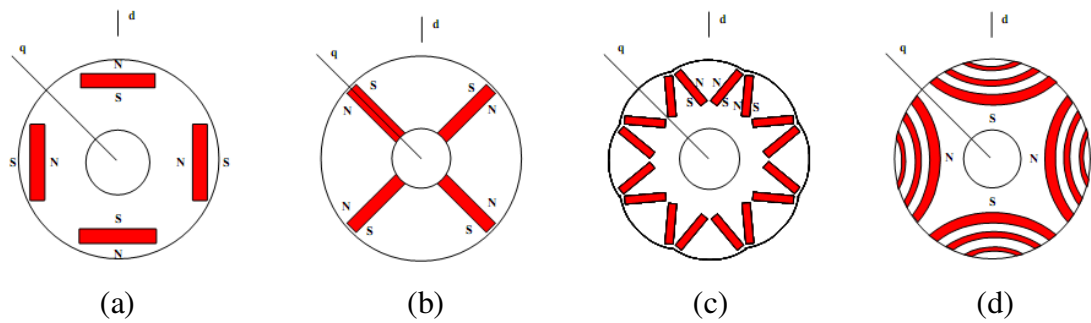
- Yüzey yerleştirmeli mıknatıs yapısı (YYKMSM). Bu yapıda mıknatıslar rotor yüzeyine yerleştirilir. Mıknatıslar hava aralığı olarak kabul edilebilir, çünkü mıknatısların manyetik geçirgenliği hava aralığının geçirgenliğine ( $\mu=1$ ) yakındır. Ayrıca mıknatısların çıkıntısı, aynı genişlikteki mıknatısların sonucu olarak önem arz etmez. Bunun sonucu olarak, direk eksen (d-axis) ve dört evreli eksen (q-axis) endüktansları eşittir ( $L_q = L_d$ ) [74].

- İçe gömülü mıknatıs yapısı (İGKMSM). Bu yapıda mıknatıslar rotor gövdesinin içine yerleştirilmiştir. Bu rotor konfigürasyonunda rotor çıkıntılı görünür ve enine eksen d-eksen hava aralığı boyuna eksen q-eksen hava aralığından fazla olur. Bunun sonucu olarak da boyuna eksen (q-ekseni) boyunca manyetik relüktans enine eksen (d-ekseni) boyunca manyetik relüktansdan daha büyüktür. Bu durumda  $L_d < L_q$  olur [10, 74].

Günümüzde Şekil 2.7 ve Şekil 2.8’de görüldüğü gibi farklı tip tasarımlar bulunmasına rağmen, genellikle rotor içine gömülmüş mıknatıs yapısı merkez kaç etkilerini azalttığı için yüksek hız, düşük güç uygulamalarında tercih edilmektedir [74]. Bu çalışmada, İGKMSM’ ye göre daha yüksek güç çıkışı sağladığı [74] için YYKMSM tercih edilmiştir.



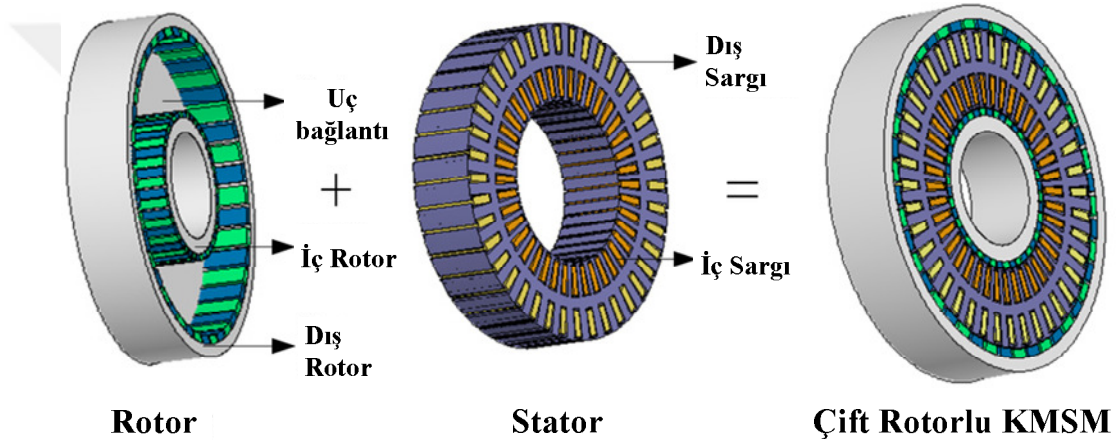
Şekil 2.7. Farklı rotor yapıları: a) yüzey yerleştirmeli mıknatıslar, b) rotor içine ekli yüzey mıknatısları, c) kutup ayalarına yerleştirilmiş yüzey mıknatısları [54,62,75,76].



Şekil 2.8. Farklı rotor yapıları: a) teğet halinde gömülmüş mıknatıslar, a) aksenal gömülmüş mıknatıslar, c) hava boşluğu ile eğimli ve gömülü V-mıknatıslar, d) KM destekli ve aksenal lamine yapılı senkron relüktans motor [73,75,77].

### 2.2.1.2. Dış Rotorlu KMSM

Şekil 2.9’da rüzgâr türbinlerinde ve elektrikli araçlarda kullanılan çift rotorlu (iç ve dış rotorlu yapı) bir makine örneği verilmiştir. Makinenin rotoru iç ve dış kısımdadır. Yani makinenin gövdesi döner, sabit kısım ise içeridedir, en iç kısımda da rotor vardır. Soğutulmaları bobin kısmının merkezde olması nedeniyle daha zordur. Dış rotorlu makinelerin hızlarının daha düşük toklarının daha yüksek olmaları nedeniyle uçan projelerde (helikopter, quadrotor, uçak, vb), elektrikli araç motorları gibi uygulamalarda daha sıklıkla kullanılırlar.



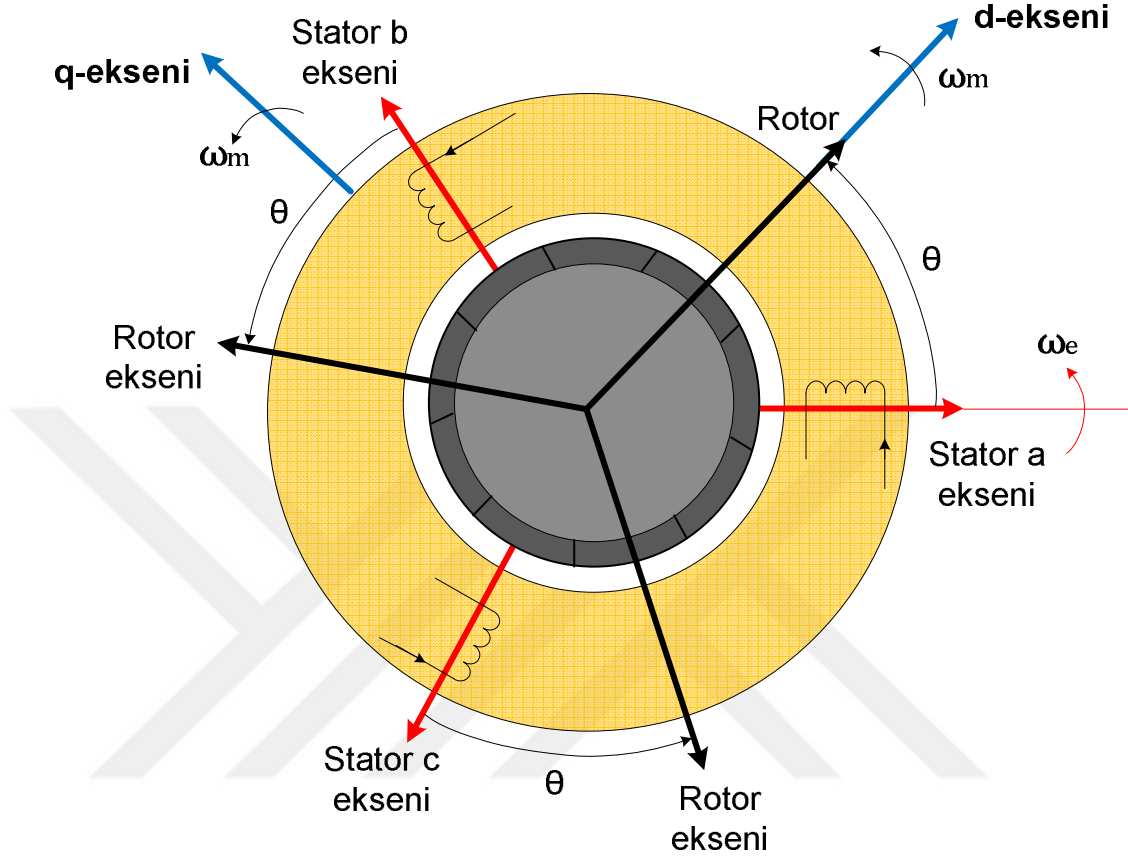
Şekil 2.9. Dış rotor yapı KMSM [78].

Makinelerde çift rulman yerine tek rulman ve mil-yatak kullanılabilmek imkânı bu tip makinelerin üretim maliyetini düşüren etkenlerdir. Diğer bir etken de mıknatıs alanının iç rotor tipine göre daha geniş yer tutabilmesidir. Böylece düşük kalitede ucuz mıknatıslar kullanılabilmektedir.

### 2.2.2. KMSG’nin Matematiksel Modeli

KMSM’nin matematiksel modelini elde etmek için genellikle Park modeli kullanılmaktadır [1,10,73,74,79-82]. Park dönüşümü, bilindiği gibi elektrik makinalarının analizini kolaylaştırmak üzere ilk defa 1929 da R.H. Park tarafından sunulmuş ve onun adıyla bir matematiksel modellemedir. d-q dönüşümü olarak da bilinen dönüşüm rotor direk eksenini ile stator ilk fazı arasındaki  $\theta$  açısı cinsinden ifade

edilip matematiksel olarak modellenir. Stator, rotor ve d-q eksenlerinin gösterimi Şekil 2.10’da verilmiştir [1,83].



Şekil 2.10. KMSM’ye ait eksenlerin şekilsel gösterimi.

Üç fazlı sistemlerde, özellikle zamana bağlı olarak değişen büyüklüklerden (abc) kurtulmak için üç faz alternatif akım değerlerini iki doğru akım büyüklüğüne indirgeyen bu metod, elektrik makinalarının kontrolünde ve analizinde büyük kolaylık sağlamaktadır [1].

Mıknatısların mekanik dönme hızına  $\omega_m$  (rad/s) bağlı olarak üretilen zık emk,

$$E_0 = \omega_e \lambda_{pm} = 2\pi f_e \lambda_{pm} \rightarrow \omega_e = p\omega_m \quad (2.8)$$

Burada,  $\omega_e$  rad/s cinsinden elektriksel dönme hızıdır ve  $\lambda_{pm}$  ise mıknatıslar tarafından varolan manyetik akıdır [59]. Mekanik açısal hız  $\omega_m$  ile elektriksel açısal hız arasında

Eşitlik 2.8'deki gibi bir bağıntı vardır. Burada  $p$  çift kutup sayısıdır. Makinenin hava aralığındaki akı dağılımının sadece temel harmonik bileşeni göz önünde bulundurulurken, uzay vektör teorisinin verdiği stator gerilimlerinin dinamik denklemleri aşağıdaki gibidir [1,74];

$$V_{abcs}(t) = -r_s i_{abcs}(t) + \frac{d\lambda_{abcs}(t)}{dt} \quad (2.9)$$

Burada  $r_s$  herbir faz için stator sargı direnci,  $i_{abcs}$  stator sargı akımları matrisi,  $\lambda_{abcs}$  stator manyetik akı matrisi ve  $V_{abcs}$  ise stator sargı gerilim matrisidir. Bu matrisler;

$$V_{abcs} = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix}, \quad i_{abcs} = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}, \quad \lambda_{abcs} = \begin{bmatrix} \lambda_{as} \\ \lambda_{bs} \\ \lambda_{cs} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

olarak ifade edilebilir. Ayrıca akı matrisi, stator akımlarından kaynaklanan akıları ve rotor kalıcı mıknatıs akılarını içermektedir. Stator akı bileşenleri, endüktans matrisi ve rotor mıknatıslanma akıları şeklinde aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$\lambda_{abcs} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_{am} \\ \lambda_{bm} \\ \lambda_{cm} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

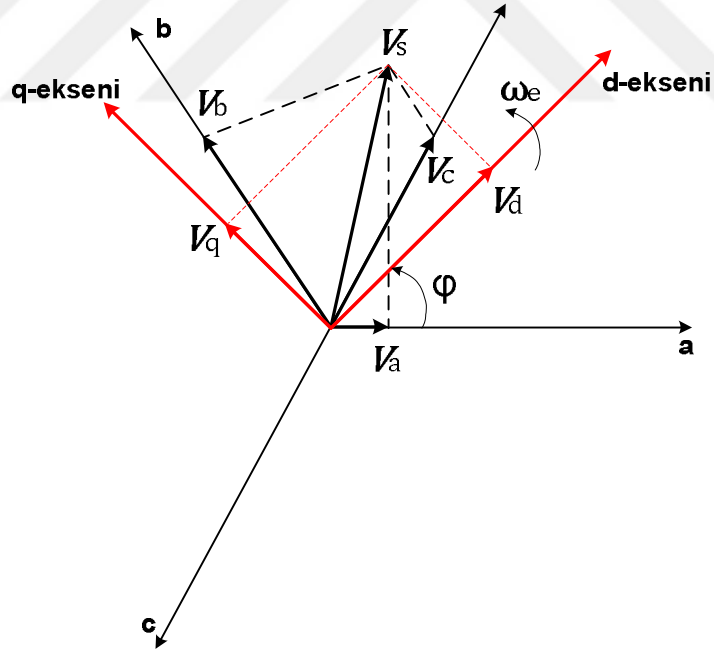
$$\begin{aligned} L_{aa} &= L_{\sigma s} + L_m \cos(2\theta_r) \\ L_{bb} &= L_{\sigma s} + L_m \cos(2(\theta_r - 2\pi/3)) \\ L_{cc} &= L_{\sigma s} + L_m \cos(2(\theta_r + 2\pi/3)) \end{aligned} \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned} L_{ab} &= L_{ba} = -M_s - L_m \cos\left(2\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{bc} &= L_{cb} = -M_s - L_m \cos(2\theta_r) \\ L_{ca} &= L_{ac} = -M_s - L_m \cos\left(2\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (2.13)$$

Burada,

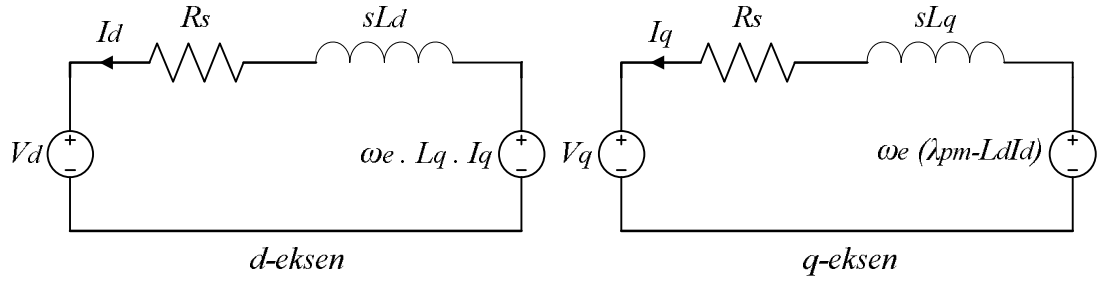
- $L_{aa}, L_{bb}$  ve  $L_{cc}$  her faza ait stator sargı endüktansı,
- $L_{ab}, L_{ac}$  ve  $L_{bc}$  stator sargılarının ortak endüktansı,
- $L_{\sigma s}$  her faza ait stator kaçak endüktansı,
- $L_m$  Rotor açısına bağlı olarak değişen ortak endüktans ve öz endüktans değişim genliği,
- $M_s$  stator ortak endüktansı (stator sargıları arasındaki ortak endüktansın ortalama değeri)

Hemen hemen tüm tahrik sistemleri bir makinenin dq dinamik modelini kullanır. Bu 3 faz AA niceliklerini DA niceliklerine çevirerek daha kolay bir kontrol formunun elde edilmesi sağlanır. Zaman domeni 3 faz stator değişkenlerinin ( $abc$ ) rotor alanı ile dönen rotor tarafına  $dq$  eksen dönüşümü Şekil 2.11’de tanımlanmıştır [1,82].



Şekil 2.11. Stator geriliminin referans eksenine dönüşümü[1,79].

Eşitlik 2.9’a Park dönüşümü uygulandığında [1,60,74], dq referans koordinat sistemine göre stator gerilim eşitlikleri (Eşitlik 2.14 ve Eşitlik 2.15), Şekil 2.12’de verilen eşdeğer devreden elde edilebilir [69,71,84,87].



Şekil 2.12. KMSG'ün dq referans koordinat sistemindeki eşdeğer devresi [1,84,85].

$$V_d = -R_s i_d - L_d \frac{di_d}{dt} + \omega_e L_q i_q \quad (2.14)$$

$$V_q = -R_s i_q - L_q \frac{di_q}{dt} - \omega_e L_d i_d + \omega_e \lambda_{pm} \quad (2.15)$$

Burada  $i_d$ ,  $i_q$  dq eksen stator akımları,  $L_d$ ,  $L_q$  dq eksen senkron endüktansları,  $R_s$  stator sargı direnci,  $\lambda_{pm}$  rotor mıknatıs akısı ve  $\omega_e$  ise elektriksel açısal hızdır. Eşitlik 2.14 ve 2.15'i tekrar düzenlenirse dq denklem takımı elde edilir [59];

$$\frac{di_d}{dt} = -\frac{R_s}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} \omega_e i_q - \frac{1}{L_d} V_d \quad (2.16)$$

$$\frac{di_q}{dt} = -\frac{R_s}{L_q} i_q - \frac{L_d}{L_q} \omega_e i_d + \frac{\lambda_m \omega_e}{L_q} - \frac{1}{L_q} V_q \quad (2.17)$$

Akı denklemleri ise Eşitlik 2.18'deki gibi ifade edilir.

$$\lambda_s = \lambda_d + j\lambda_q \Rightarrow (\lambda_d = \lambda_{pm} - L_d i_d), (\lambda_q = L_q i_q) \quad (2.18)$$

KMSM'nin dq eksen takımındaki çıkış aktif ve reaktif gücü sırasıyla aşağıdaki gibi elde edilir;

$$P_o = \frac{3}{2} (V_d i_d + V_q i_q) \quad (2.19)$$

$$Q_o = \frac{3}{2} (V_d i_q - V_q i_d) \quad (2.20)$$

Stator gerilim ifadeleri (Eşitlik 2.15 ve 2.16) Eşitlik 2.19'da yerine konulursa ve güç nicelikleri ayrılarak ifade edilirse, güç denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$P_o = -\frac{3}{2} (R_s i_d^2 + R_s i_q^2) - \frac{3}{2} \left( \frac{d}{dt} L_d \frac{i_d^2}{2} + \frac{d}{dt} L_q \frac{i_q^2}{2} \right) + \frac{3}{2} (\omega_e \lambda_d i_q + \omega_e \lambda_q i_d) \quad (2.21)$$

Birinci terim bakır kaybını, ikinci terim manyetik alanda depolanan enerjinin zamanla değişim oranını ve üçüncü terim ise mekanik enerjiden elektrik enerjisine dönüşümünü ifade etmektedir. Üçüncü terim elektromanyetik tork olarak ifade edilebilir çünkü generatör milinden giriş gücü elektromekanik güce eşit olmalıdır [1].

$$P_{em} = \omega_m T_{em} = \frac{3}{2} (\omega_e \lambda_d i_q + \omega_e \lambda_q i_d) \quad (2.22)$$

$\omega_e = p \omega_m$  ifadesi ile elektromanyetik tork denklemi aşağıdaki gibi elde edilebilir [1, 60,61,70,88-90].

$$T_e = \frac{3}{2} p \left[ \lambda_{pm} i_q + (L_q - L_d) i_d i_q \right] \quad (2.23)$$

Kalıcı mıknatıslı senkron generatörün hareket denklemi;

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_m - T_e - B\omega_m \quad (2.24)$$

Burada:

$T_m$ : türbin mili tarafından sağlanan mekanik torku [Nm] ifade etmektedir,

$T_e$ : generatör tarafından üretilen elektromanyetik tork [Nm],

$J$ : atalet momenti [kgm<sup>2</sup>],

$B\omega_m$ : sürtünme torku,  
 $B$ : sürtünme katsayısı,  
 $\omega_m$ : türbinin mekanik açısal hızıdır [rad/s].

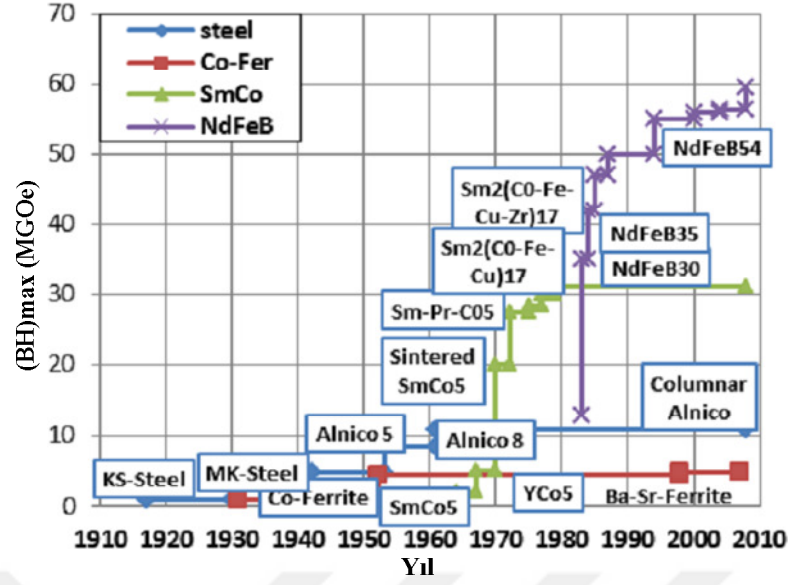
### 2.2.3. Kalıcı Mıknatıs Türleri

Kalıcı mıknatıslı AA ve DA makineler özel bazı uygulamalarda kullanılmaktaydı, fakat son yıllardaki kalıcı mıknatıs materyallerindeki gelişmeler nedeni ile askeri, elektrikli taşıt ve rüzgâr enerjisi uygulamalarında sıkça kullanılmaya başlanmıştır [8,91]. Bu makineler, çok sayıda uygulamada, verimlerinin yüksek olması [1], hacimlerinin ve ağırlıklarının az olması, moment yoğunluklarının ve moment/ağırlık oranlarının fazla olması nedeniyle tercih sebebi olmaya başlamıştır.

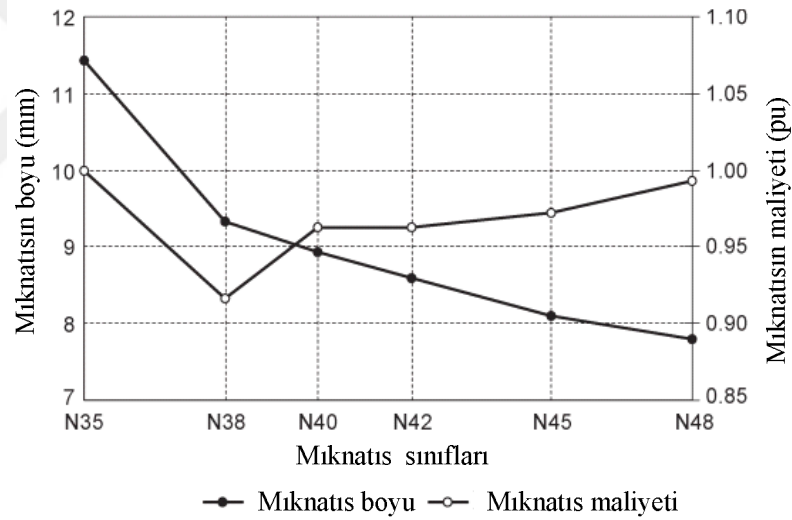
KMSM' ların öne çıkan özellikleri; asenkron ve klasik DA makinelere göre yüksek moment-güç yoğunluğuna sahip olmaları, yüksek verimlilikte çalışmaları, güvenilirliklerinin yüksek olması ve fırçasız olmalarının getirdiği bazı üstünlükler olarak sıralanabilirler [92].

Generatör hızı herhangi bir dişli kutusuna gerek kalmadan kontrol edilebilir. Kalıcı mıknatıslı senkron generatörün statoru sargılıdır ve rotoruna kalıcı mıknatıslar yerleştirilmiştir. Bu generatörlerin en yaygın kullanılan tipleri; radyal akılı [9,13,39], eksenel [15,45,93] akılı ve çapraz akılı kalıcı mıknatıslı senkron generatörlerdir.

1980'li yıllarda NdFeB mıknatısların ortaya çıkmasıyla elektrik makinelerinde kalıcı mıknatısın (KM) kullanımı büyük bir ivme kazanmıştır [91]. Şekil 2.13, son yüzyılda kalıcı mıknatıslardaki önemli gelişimleri göstermektedir. Günümüzde elektrikli araçlardan uzay sanayisine kadar pek çok alanda kalıcı mıknatıslı elektrik makineleri kullanılmaktadır. Bu alanlardan biri de rüzgâr enerjisi sistemleridir [91]. Ayrıca, rüzgâr enerjisi kullanımı hızla artıyor ve en yeni generatörler KM'leri, özellikle NdFeB türlerini kullanıyor [94].



Şekil 2.13. Kalıcı mıknatıslarda gelişim [94].



Şekil 2.14. Belirli bir hava aralığı akı yoğunluğu için mıknatıs sınıflarına göre mıknatıs boyu ve maliyeti [95].

KMSG tasarımında mıknatıs seçimi de kuşkusuz önemli bir husustur. Bunu belirlemek için yapılan çalışmalarda [95], belirli bir hava aralığı akı yoğunluğu için mıknatıs sınıfına karşı mıknatıs maliyeti ve kütlesi SEA kullanılarak tanımlanmıştır. Şekil 2.15, mıknatıs yüksekliğinde (dolayısıyla mıknatıs ve generatör kütlesi) mıknatıs sınıfına karşı büyük bir azalma olurken, mıknatıs maliyetinde sadece düşük değerde bir artış olduğunu göstermektedir. Rotorda kalıcı mıknatıs olarak çoğunlukla N48 mıknatıs

sınıfında olan Neodmiyum Demir Bor (NdFeB) tip nadir toprak mıknatıslar ve hafif çelik malzeme [13,17,45,50,96-98] kullanılmaktadır.

Çizelge 2.1. Bazı kalıcı mıknatısların özellikleri [67].

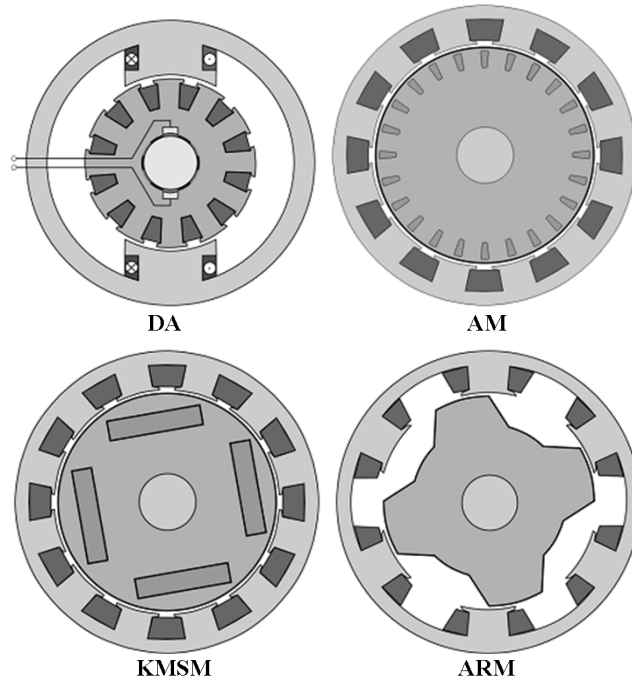
| Malzeme                            | Kalıcı mıknatıslık<br>(Br)(Tesla) | Gidergenlik<br>(Hc)(MA/m) | (BH)max<br>(kJ/m <sup>3</sup> ) |
|------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|---------------------------------|
| SrTerit                            | 0,43                              | 0,20                      | 34                              |
| Alnico 5                           | 1,27                              | 0,05                      | 44                              |
| Alnico 9                           | 1,05                              | 0,12                      | 84                              |
| SmCo <sub>5</sub>                  | 0,95                              | 1,30                      | 176                             |
| Sm <sub>2</sub> Co <sub>17</sub>   | 1,05                              | 1,30                      | 208                             |
| Nd <sub>2</sub> Fe <sub>17</sub> B | 1,36                              | 1,03                      | 350                             |

Samaryum Kobalt (SmCo) gibi az bulunur ve pahalı mıknatıslar da küçük boyutlarda yüksek manyetik alan yoğunluklarına ulaşılabilir. Bu tip mıknatıslar özellikle uzay ve havacılık uygulamalarında kullanılmaktadır. Kutup sayısı ve kullanılan mıknatısın cinsi, elde edilmek istenen manyetik alan yoğunluğuna göre değişmektedir. Kullanılan mıknatıslar makine verimini de etkilemektedir. Çizelge 2.1’de bazı kalıcı mıknatısların karakteristikleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. NdFeB mıknatıslar, samaryum kobalt, baryum ferit ve alnico gibi diğer mıknatıslar ile karşılaştırıldığında en iyi manyetik karakteristiğe sahiptir [67]. Birçok uygulama için bu olumlu özellikler NdFeB’yi mıknatısın ilk tercihi yapmış ve yaygın kullanımını sağlamıştır [94]. Tasarlanan makinede maliyet/tork göstergesi ve verimlilik ön planda olduğu için NdFeB mıknatıs çeşiti kullanılmıştır.

## BÖLÜM 3

### TASARIM SÜRECİ

Belirli bir uygulama için bir elektrikli makine seçimi genellikle nitel argümanlara dayalı olarak, anahtarlama relüktans makine, kalıcı mıknatıslı (KM) makine, asenkron makine gibi belli bir makine tipini seçerek başlar [99]. Peki hangi makine? Herhangi bir uygulama için genel parametreler nelerdir? Bu parametreler; Tork yoğunluğu, maliyet/tork oranı [99], verim [100-102], maksimum güç [15,18], moment/ağırlık oranı [17,19], güç yoğunluğu [102,103] gibi. Ayrıca güç, verim, montaj alanı ve ağırlık gibi özellikler özel bazı uygulamalar için elektrikli makinası tasarımında önemli sorunlardır. Bu argümanlar değerlendirilerek yapılan bazı çalışmalarda [102] KMSM'nin uygun bir seçim olacağı gösterilmektedir. Kaynak [102]'de yapılan çalışmada değerlendirilen makine yapıları Şekil 3.1'de görülmektedir.



Şekil 3.1. Bazı elektrik makinelerinin şematik gösterimi [102].

Anma hızında (3000 d/d) anma gücü 30 kW olan farklı makine yapıları karşılaştırıldığında, Çizelge 3.1’de görüldüğü gibi KMSM nin veriminin ve güç yoğunluğunun yüksek olduğu görülmektedir. Anma hızı 1300 d/d ve anma gücü 45kW olan Asenkron Makine (AM) ve KMSM’ye ait diğer bir çalışmada [101] Çizelge 3.2’de görüldüğü gibi KMSM’nin güç yoğunluğu ve verimi AM’ye göre yüksektir.

Çizelge 3.1. Tasarım sonucu farklı makine tiplerine ait çıkış parametreleri [102].

| Parametre                           | DC    | AM   | KMSM  | ARM  |
|-------------------------------------|-------|------|-------|------|
| Kutup çifti sayısı $p$              | 5     | 2    | 6     | 12/8 |
| Maksimum verim $\eta$               | 84%   | 89%  | 97%   | 88%  |
| Rotor çapı $Dr$ (mm)                | 239.5 | 162  | 136.8 | 159  |
| Boy $L_{stk}$ (mm)                  | 69.8  | 127  | 140.8 | 159  |
| Dış çapı $Do$ (mm)                  | 430   | 258  | 196.3 | 269  |
| Uç bobinlerin uzunluğu $la$ (mm)    | 132   | 232  | 161.5 | 207  |
| Hacim $Va$ (dm <sup>3</sup> )       | 19.2  | 12.1 | 4.9   | 11.8 |
| Güç yoğunluğu (kW/dm <sup>3</sup> ) | 1.6   | 2.5  | 6.1   | 2.6  |

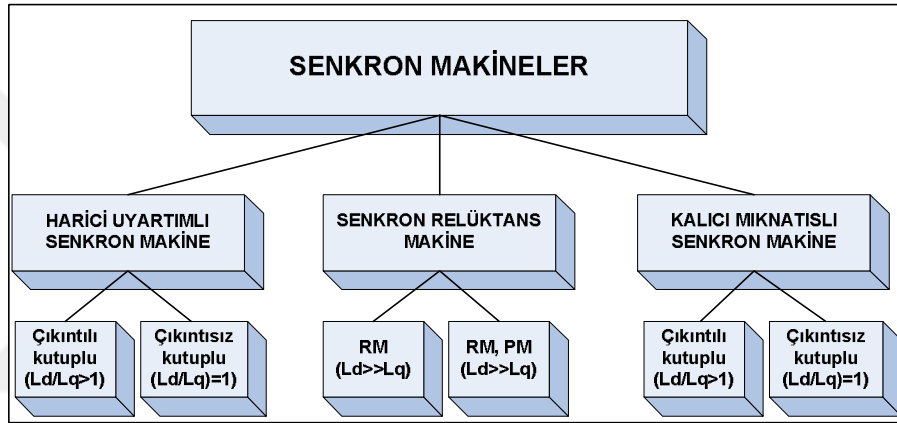
Çizelge 3.2. Tasarım sonucu farklı makine tiplerine ait çıkış parametreleri.

| Parametre                          | AM    | KMSM  |
|------------------------------------|-------|-------|
| Dış çapı $Do$ (m)                  | 0.375 | 0.48  |
| Boy $Li$ (m)                       | 0.309 | 0.15  |
| Güç yoğunluğu (kW/m <sup>3</sup> ) | 1318  | 1657  |
| Ağırlık (kg)                       | 193   | 123.9 |
| Atalet (kg.m <sup>2</sup> )        | 0.597 | 2.126 |
| Maksimum verim $\eta$              | 93.2  | 95.2  |

50 kW, 6000 d/d ve 200 Hz’lik KMSM ve AM karşılaştırıldığında [104] toplam kayıpların KMSM’de AM’ye göre %43 oranında daha az olduğu bildirilmektedir. Ayrıca KMSM ve AM’nin hızı, güç faktörü ( $\cos\phi$ ), hava aralığı, tork-gerilim karakteristiği ve maliyeti hakkında genel bir değerlendirme sunulmaktadır [104]. Senkron makinadaki geniş hava aralığı AM’ye göre onları daha güvenilir yapar. Bunun

nedeni hava aralığındaki artış, endüvi reaksiyonunun etkisini en aza indirmek, (gerekli ise) senkron reaktansı azaltmak ve kararlılığını artırmak için gereklidir [104]. Diğer birçok çalışmada da [34,103,105-107] yukarıda bahsedilen özelliklerinden dolayı KM makineler tercih edilmiştir.

Bu çalışma KMSM'nin tasarım, analiz ve üretim süreçlerini kapsamaktadır. Fırçasız DA, KM senkron ve KM adım motorları genel olarak KM fırçasız makine olarak ifade edilmektedir [108]. Ayrıca senkron makineleri Şekil 3.2'de görüldüğü gibi sınıflandırmak mümkündür.



Şekil 3.2. Senkron makinelerin sınıflandırılması [109].

### 3.1. TASARIM YÖNTEMLERİ VE TEMEL KANUNLAR

Elektrik makinelerinin fiziksel yapısını değil aynı zamanda makinedeki manyetik alanın rolü anlanırsa, elektrik makinelerinin karakteristikleri ve davranışları çok iyi anlaşılabilir ve tahmin edebilir. Çünkü tüm enerji dönüşüm aygıtları manyetik alanı aracı olarak kullanmaktadır. Manyetik alan, bir sargı (bobin) veya kalıcı mıknatıs tarafından oluşmuş olabilir. Manyetik alan sargı (bobin) tarafından üretilirse, bu sabit genlikte (DA) veya zamanın bir fonksiyonu (AA) olabilir.

Bununla birlikte, DA ve senkron makinelerde sabit manyetik alan, elektrik enerjisinin mekanik enerjiye dönüşümüne (motor) veya mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüşümüne (generatör) olarak sağlamaktadır. Aslında hem motor hem de generatör

olarak çalışmanın tüm enerji dönüşüm aygıtlarında eş zamanlı olarak var olduğu bilinmektedir. Diğer bir ifadeyle biri olmadan diğeri olamaz.

### 3.2. TASARIM DÖNGÜSÜ

Elektrik makinaları tasarlanırken belli başlı kriterler dikkate alınarak uygun tasarım gerçekleştirilmelidir. Generatörlere ait bazı tasarım kriterleri aşağıdaki gibidir.

- Düşük maliyetli tasarım
- Yüksek verimli tasarım
- Dengeli tasarım
- Yüksek Güç Yoğunluklu Tasarım

Bu çalışmada tasarlanan generatör yukarıda bahsedilen dört kriterin hepsi dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Bunun sağlanması için kullanılacak malzemeler ve tasarım yöntemi dikkatlice ele alınmalıdır. Temel olarak, bir tasarım belirtilen uluslararası standartlara uygun olarak makine parça ve çeşitli bileşen boyutlarının, ağırlıklarının, malzeme özelliklerinin, çıkış parametrelerinin ve performansının hesaplanmasını içerir. Hesaplanan parametreler nihai test sonuçlarıyla uyumlu olmayabilir. Bu nedenle tasarım, önceki işletme deneyimine sahip bu tür makinelerin tasarım analizine yakın tutulmalıdır.

Generatör tasarımında öncelikli olarak tasarlanan makinenin rotor yapısı ve akı geçiş doğrultusu gibi temel yapının belirlenmesi gereklidir. Daha sonra nominal çıkış gücü, devir sayısı, çıkış gerilimi, stator, rotor çapları ve uzunlukları, stator sacı, mıknatıs tipi ve boyutları, sarım şekli, oluk sayısı, kutup sayısı gibi konfigürasyonlar belirlenmelidir. Aşağıda belirtilen tasarım çevrimi uygulanarak temel parametreler elde edilmelidir [27].

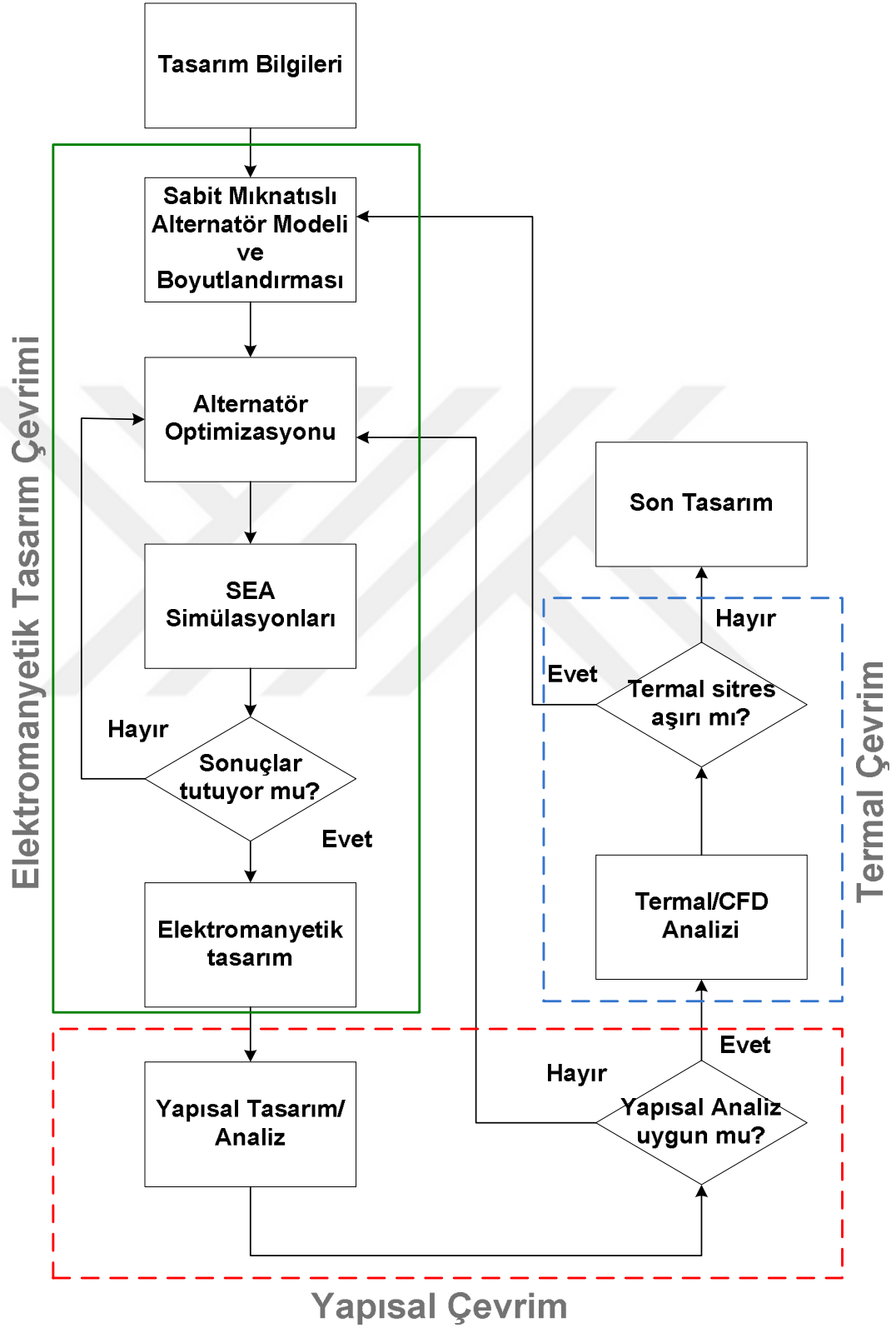
- Makine nominal değerlerinin belirlenmesi
- Farklı rotor ve akı yapılarının değerlendirilmesi
- Mıknatıs seçimi, boyutlandırılması ve mıknatıslar arası açıklık
- Kullanılacak sac seçimi

- Kutup sayısının belirlenmesi
- Oluk ve faz sayısının belirlenmesi
- Sargı adımı
- İletken katsayısı
- Temel boyutlandırma
- Hava aralığının ve manyetik yüklenmenin belirlenmesi
- Elektriksel yüklenmenin belirlenmesi
- Rotor tasarımı ve kutup akı yoğunluğu belirlenmesi
- Stator boyutlarının belirlenmesi
- İletken ve sarım sayılarının belirlenmesi
- İletken kesitlerinin ve faz direnci ile endüktansının hesaplanması
- Performans hesabı
- Akım yoğunluğu, akı yoğunlukları, oluk doluluk oranı değerlerinin kontrol edilmesi
- Sıcaklık artışı ve demagnetizasyon kontrol edilmesi
- İstenilen değerler sağlanana kadar parametrik analizlerin yapılması

KM'lı radyal akıllı adı da verilen standart generatörlerin tasarımı, tüm dünyada birçok firma tarafından belirli güç ve hızlarda yapılmaktadır. Ancak, her ne kadar tasarımda kullanılabilecek yazılımlar olsa bile, özel bir uygulama için generatör tasarımı uzmanlık istemekte ve zaman almaktadır. Standart dışı kalıcı mıknatıslı generatörlerin tasarımı ise, başlı başına uzmanlık gerektiren, makine yapısına bağlı olarak denklemleri değişen, modelleme ve sonlu elemanlar analizi (SEA) gibi analizler olmaksızın tasarımın sonlandırılmayacağı, zaman alıcı güç bir iştir.

KM'lı generatörlerin tasarım süreci günümüzde artık sadece elektromanyetik tasarımdan ibaret değildir. Şekil 3.3'de görüldüğü gibi, bu çalışmada tasarlanan generatörün elektromanyetik, yapısal ve termal tasarım ya da analiz aşamaları geçtikten sonra sonlandırılmıştır. Elektromanyetik tasarım kendi içerisinde generatör modeli, optimizasyon, 2 yada 3 boyutlu sonlu elemanlar analizi gibi uzun, yorucu ve zaman alıcı aşamaları içermektedir. Generatör modeli, KM'lı generatörün yapısına

bağlı olarak, sonlu elemanlar yazılımının türünün 2 ya da 3 boyutlu olmasına göre değişir.



Şekil 3.3. Tasarım ve analiz süreci iş akış şeması.

Bu çalışmanın temel iskeleti generatör tasarımı üzerine kurulmuştur. Bilindiği üzere elektrik makinelerinin lineer olmayan davranışları nedeniyle standart bir hesaplama yöntemi bulunmamaktadır. Farklı karakteristikteki makineler için sürekli değişen makine katsayıları bulunmakta ve bu katsayıların tespiti makine tasarımcısının tecrübelerine bağlı hale gelmektedir. Bu amaçla bir takım karmaşık elektromanyetik ve elektromekanik hesaplama yöntemleri dikkate alınarak nümerik ve sonlu eleman analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Yukarıda verilen analitik döngüler yardımı ile makinaya boyutlandırma hesaplarını gerçekleştirmeden önce gerekli prosedürler ortaya konmalıdır.

### **3.3. BOYUTLANDIRMA PROSEDÜRÜ VE ANA BOYUTLANDIRMA**

Bu bölümde kalıcı mıknatıslı senkron makinanın tasarımı için gerekli prosedürler sunulmuştur.

Günümüzde elektrik makinelerinin tasarımı için pek çok yazılım bulunmaktadır. Fakat bu yazılımlar genel itibari ile analiz çalışmaları için kullanılabilmektedir. Elektrik makinelerinin boyutlandırma çalışmaları ise başlı başına uzmanlık ve deneyim gerektirmektedir. Bu sebeple boyutlandırma çalışmaları ilk etapta analitik hesaplamalar gerçekleştirilerek yapılabilmekte ve daha sonra çeşitli yazılımlar ile optimize edilerek son boyutlarına ulaştırılmaktadır.

Verimli ve hacim olarak küçük bir generatör elde etmek için yapılan simülasyonlar tek başına yeterli olmamakta ve sonuçta beklenmedik durumlar ortaya çıkartabilmektedir. Bu yüzden gerçekleştirilecek olan manyetik simülasyonlarla birlikte generatöre ait analitik hesaplamaların da dikkatli bir şekilde gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

Doğrudan sürüslü rüzgâr uygulamalarında yüksek moment ve düşük hız ihtiyacı vardır. Bu sebeple yüksek manyetik akı yoğunluğuna sahip mıknatıslar kullanılacak (NdFeB), çok kutuplu, iç rotorlu bir tasarım öngörülmüştür. Ayrıca generatörün üretim, montaj ve kanat bağlantıları kolaylığı sebebiyle iç rotorlu konfigürasyon tercih

edilmiştir. Bu konfigürasyon ısının oluştuğu sargılar dışarda kaldığından soğutma içinde uygundur [27].

Dönen bir elektrik makinasının tasarımına, bazı temel özellikleri tanımlayarak başlanabilir, bunların en önemlileri şunlardır [109]:

- Makine tipi (Senkron, Asenkron, DA, Relüktans Makine vb.),
- Yapısı (harici kutuplu, dahili kutuplu, eksenel veya radyal akılı vb.),
- Nominal güç,
- Elektrik motorları için mil çıkış gücü (W),
- Senkron motorlar için güç faktörü,
- AA ve DA generatörleri için çıkış gücü (W),
- Senkron generatörler için görünür güç (VA) ve güç faktörü,
- Nominal hız ve açısal hız,
- Makinanın kutup çifti sayısı,
- Anma gerilimi,
- Faz sayısı,
- Makinanın muhafaza sınıfı ve yapısı,
- Verimlilik gibi ek bilgiler,
- Makine tasarımında uygulanan standartlar,
- Maliyeti,
- Üretilirliği.

Elektrik makinaları tasarımında önemli serbest parametreler vardır. Tasarımda optimal çözüm amaçlandığında, bu serbest parametrelerin bazıları bir şekilde sınırlandırılmadıkça, çözüm son derece karmaşık hale gelir. Birçok serbest parametre nadiren değişir, bu yüzden çözümü basitleştirmek için bu parametreler sabit alınır. 10 serbest parametre aşağıdaki gibi verilebilir [109];

- Stator gövdesinin dış çapı (IEC-(International Electrical Commission) standartlarına göre bu parametre genellikle belirli değerlere sabitlenir),
- Stator gövde uzunluğu,

- Stator oluk genişliği,
- Stator oluk yüksekliği,
- Hava aralığı çapı,
- Hava aralığı uzunluğu,
- Hava aralığı akı yoğunluğunun tepe değeri,
- Çift kutup sayısı ve frekans,
- Rotor oluk genişliği ve yüksekliği

Gerçek makine tasarımı, makinenin ana boyutlarının seçimi ile başlar. Bu ana boyutlar, stator oluğundan ölçülen hava aralığı çapı  $D_s$  ve eşdeğer nüve uzunluğunu  $L$  işareteder. Elektrik makinaları tasarımında akım ve akı yoğunluğu değişim aralıklarında bazı ampirik tanımlamalar vardır. Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2, iyi tasarlanan standart elektrik makinaları için bazı elektromanyetik yüklenme değerlerini vermektedir. İzin verilen yüklenme seviyeleri, bir makinenin soğutma ve izolasyon tasarım temeli için tanımlanır. Tablodaki değerler makine parametrelerin seçimi ile ilgili bazı ampirik bilgiler verir. Prensipde makinenin tasarımı, ilk olarak makinenin başlangıç değerlerinin seçildiği oldukça karmaşık iterasyon sürecidir [109].

KM makinalar için, günümüzdeki mıknatısların sınırlı artık mıknatıslığı ve mıknatıslığı giderme kapasitesinden dolayı senkron makinalar için Çizelge 3.3’de verilen değer aralığının yarısından düşük değerler seçebilir [109].

Çizelge 3.3. Çeşitli standart elektrik makinaları için manyetik devrenin izin verilen akı yoğunluğu [109].

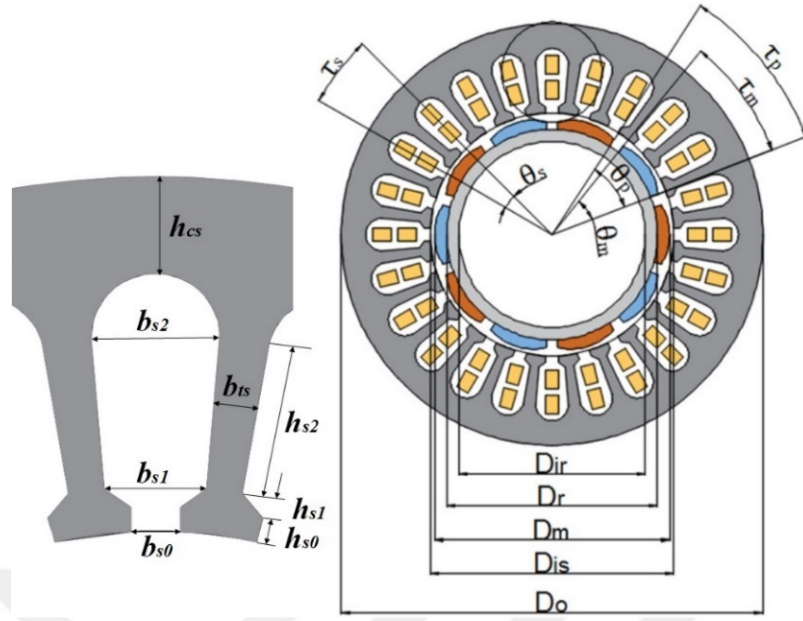
| Akı Yoğunluğu $B$ (T) |                    |                      |                       |              |
|-----------------------|--------------------|----------------------|-----------------------|--------------|
| Parametre             | Asenkron Makinalar | Çıkıntılı Kutuplu SM | Çıkıntısız Kutuplu SM | DC Makinalar |
| Hava aralığı          | 0,7-0,9            | 0,85-1,05            | 0,8-1,05              | 0,6-1,1      |
| Stator boyunduruğu    | 1,4-1,7            | 1,0-1,5              | 1,1-1,5               | 1,1-1,5      |
| Stator dişi           | 1,4-2,1            | 1,6-2,0              | 1,5-2,0               | 1,6-2,0      |
| Rotor boyunduruğu     | 1,0-1,6            | 1,0-1,5              | 1,3-1,6               | 1,0-1,5      |

Çizelge 3.4'e bakıldığında, oluk boyutları arttığında seçilecek değerler küçük oluklulara göre düşük olmalıdır. Bu yüzden küçük akım yoğunluğu ( $J$ ) büyük makinalar için ve büyük akım yoğunluğu ise küçük makinalar içindir. Buna rağmen, küçük doğrusal akım yoğunluğu ( $A$ ) küçük makinalar için, büyük doğrusal akım yoğunluğu ise büyük makinalar içindir. Eğer KMSM kesirli sargı ve geniş oluklardan imal edilirse, tabloda belirtilen uygun değerler bu durumda geçerli olacaktır.

Çizelge 3.4. Çeşitli makinalar için izin verilen etkin  $J$  ve  $A$  değerleri [109].

| Parametre                                        | Asenkron Makinalar | Çıkıntılı Kutuplu SM veya KMSM | DC Makinalar |
|--------------------------------------------------|--------------------|--------------------------------|--------------|
| Spesifik Elektriksel Yüklenme- $A$ ( $kA/m$ )    | 30-65              | 35-65                          | 25-65        |
| Spesifik Manyetik Yüklenme- $B_g$ (T)            | 0,7-0,9            | 0,85-1,05                      | 0,6-1,1      |
| Armatür Sargısı Akım Yoğunluğu- $J$ ( $A/mm^2$ ) | 3-8                | 4-6,5                          | 4-9          |

Tasarlanan generatörün nominal gücü 4 kW olacaktır. Bu gücü 250 d/d nominal hızında elde edilecektir. Ancak KMSM değişken hızlarda da güç üretebildiği için bu hızında altındaki rüzgâr hızında güç üretebilecektir. Generatörün çıkış gerilimi 400 V olacaktır. Generatör doğrudan tahrikli (direct drive) olduğu için elektromanyetik tork maksimum olacaktır. Ayrıca düşük rüzgâr hızlarında da gerilim endüklenebilmesi için ataletin ve tutma torkunun minimum olması gerekir. Şekil 3.4'de iç rotorlu bir KMSG'e ait çizim ve kesit görünümü verilmiştir.



Şekil 3.4. İç rotorlu KMSG yapısı ve temel boyutlandırma parametreleri.

Boyutlandırma çalışmalarının sağlıklı bir şekilde yürütülebilmesi için belirli bir analitik yöntemin geliştirilmesi gerekmektedir. Bu konuda dikkat edilmesi gereken en önemli parametreler çıkış eşitliklerinin ve performans denklemlerinin gerçekleştirilmesinde sıklıkla karşılaşılan stator ve rotor çap boyutları ile makina uzunluğudur. Bunun dışında kalan boyutlar sargı çalışmaları kapsamında performans göz önünde bulundurularak parametrik çözümler ışığında elde edilebilmektedir.

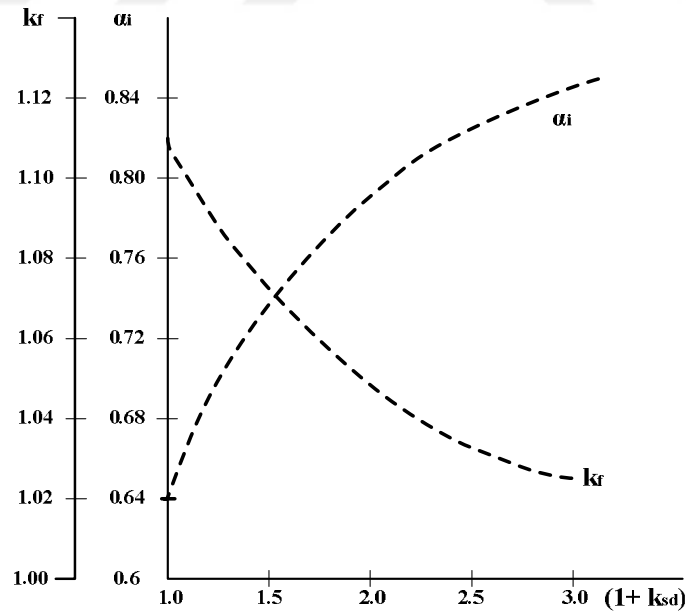
İyi tasarlanmış bir elektrikli makinenin makine sabiti ( $C$ ) de makinenin rotor boyutu tasarımıdaki gibi benzer bir temel ile elde edilebilir.  $C$  sabiti makinenin rotor hacmi ile verilen iç görünür  $S_i$  gücü veya aktif gücü  $P_i$  ifadeeder. Bu gücü etkileyen diğer bir sabit ise  $D_{is}^2.L$  çarpımıdır [18,103,110]. Gerçek makine tasarımı, makinenin ana boyutları, stator iç çapı veya hava aralığı çapı ( $D_{is}$ ) ve eşdeğer nüve uzunluğunu ( $L$ )'nin seçimi ile başlar. Bu seçimi yapabilmek için makinanın gücü ve performansı ile  $D_{is}^2.L$  arasındaki ilişkiyi açıklamak gerekir. Buna makinanın hava aralığı görünür gücünü  $S_{gap}$  hesaplayarak başlanabilir [111].

$$S_{gap} = mE_f I_a \quad (3.1)$$

$I_a$  stator faz akımının ve fazın mıknatıslanma endüktansı  $L_m$  üzerinde indüklenen emk'in  $E_f$  kullanılması ile senkron hızda  $n_s = f/p$  dönen makinanın görünür gücünü elde edilir. Hava aralığı kutup akısının bir fonksiyonu olarak indüklenen emk yazılırsa [111];

$$E_f = \frac{\omega_m k_w k_f N_s \Phi_g}{\sqrt{2}} = \frac{\omega_m k_w k_f N_s \alpha_i B_g \pi D_{is} L_{stk} / 2p}{\sqrt{2}} = k_E n_s \quad (3.2)$$

Burada  $N_s$  faz başına spir sayısı,  $\omega_m$  rotor açısal hızı (mekanik),  $2p$  kutup sayısı,  $k_w$  sargı faktörü,  $\Phi_g$  hava aralığı kutup akısı,  $k_E$  emk sabiti,  $n_s$  saniyedeki devir sayısı ve  $k_f$  Şekil 3.5'de görüldüğü gibi 1.02-1.11 değer aralığında form faktörüdür. Bu faktör hava aralığı akı yoğunluğunun birinci harmonik genliği ile normal bileşenin maksimum değeri arasındaki oranı ( $k_f = B_{g1}/B_{gmax}$ ) ifade eder [112]. Form faktörünü belirleyici olan parametre dişteki manyetik akı doyum katsayısıdır. Generatör tasarımında kullanılan silikon elektrik sacının doyması istenmediği için bu değeri minimumda tutan bir form faktörü değeri seçmek faydalı olacaktır.



Şekil 3.5. Dişteki manyetik doyum katsayısına bağlı  $k_f$  form faktörü ve  $\alpha_i$  şekil faktörü [111].

Faz sargılarına etki eden maksimum akı, kutup yüzeyindeki akı yoğunluğu ile bulunabilir.

$$\phi_m = \int_S B_g \cdot dS \quad (3.3)$$

Kutup yayı üzerindeki hava aralığı akı yoğunluğu sinüsoidal bir dağılıma sahipse ve makinenin uzunluğu ile ilgili olarak herhangi bir değişiklik yoksa yüzey integrali aşağıdaki gibi basitleştirilebilir [97].

$$\phi_m = \int_0^{\tau_p} L B_g \sin \frac{x\pi}{\tau_p} dx = L \tau_p \alpha_i B_g \quad (3.4)$$

Buradaki  $\alpha_i B_g$  bileşkesi hava aralığındaki akı yoğunluğunun ortalama değerini ifade eder.  $\alpha_i$  dişteki manyetik doyum katsayısına bağlı akı yoğunluğu şekil faktörüdür. Bu faktör kutup papucunun kutup yayına oranını ( $b_p/\tau_p$ ) veya ortalama akı yoğunluğunun maksimum akı yoğunluğuna oranını ( $B_{ort}/B_{max}$ ) ifade eder [112]. Sinüsoidal dağılım durumunda  $\alpha_i = 2/\pi$ 'dir. Diğer bir durumda uygun  $\alpha_i$  değeri, kutup yüzeyi boyunca akı yoğunluğunu dahil ederek bulunmalıdır. Örneğin yüzey yerleştirmeli mıknatıslı rotor yapısında hava aralığı akı yoğunluğu dağılımı sinüsoidal değildir. Bu gibi bir durumda hava aralığı akı yoğunluğu için ortalama  $\alpha_i$  değeri bağlı mıknatıs genişliği  $\alpha_{pm}$  kullanılarak tanımlanabilir [109]. Kutup yayı  $\tau_p$ ;

$$\tau_p = \frac{\pi D_{is}}{2p} \quad (3.5)$$

Sonuç olarak  $S_{gap}$  [109,111,112];

$$S_{gap} = k_f \alpha_i k_w \pi^2 D_{is}^2 L \frac{n}{60} A B_g \quad (3.6)$$

Elektrikli makinelerin boyutlandırma prosedürü için başlangıçta, doğrusal akım yoğunluğunun etkin değeri (spesifik elektrik yüklenme)  $A$  (A/m) [18,97,109,111,112-114] ve  $B_g$  spesifik manyetik yüklenebilirlik değeri aşağıdaki gibi belirlenebilir;

- Orta güçlü makineler için  $B_g=(0.7-0.9T)B_r$  [115] veya 0.8-1T [116] aralığında,

- Orta güçlü makineler için  $A$ , 10-55 kA/m [115], 10-40 kA/m [111,112] veya 35-65 [109,117] kA/m değer aralığında,

$$A = \frac{6N_s I}{\pi D_{is}} \quad (3.7)$$

Eşitlik 3.18'den, hacim yararlanma faktörü (Esson sabiti) [111], makine sabiti [109] ve çıkış katsayısı [112] olarak bilinen katsayıyı belirtirsek  $C_0$  [17,54,55,59];

$$C_0 = k_f \alpha_i k_w \pi^2 A B_g = \frac{60 S_{gap}}{D_{is}^2 L n} \quad (3.8)$$

Burada  $B_g$ , spesifik manyetik yüklenebilirlik olarak da bilinen [18,114] NdFeB KM senkron makineler için 0.65-0.85T değer aralığında ortalama manyetik akı yoğunluğudur [18,112,117]. Böylelikle diğer bir önemli katsayı olan  $D_{is}^2 \cdot L$  çarpımı aşağıdaki gibi ifade edilebilir [111,115,118].

$$D_{is}^2 L = \frac{1}{C_0} \frac{60}{n} \frac{K_e P_n}{\eta \cos \varphi} \quad (3.9)$$

Burada  $K_e$ , çıkış gücünün bir fonksiyonu olarak  $E_{pm}/V_a$  oranıdır [109,111] ve KMSM için yaklaşık olarak  $E_{pm} = 0.9-1.1 V_a$  dır [109].

Hesaplamalardaki diğer önemli bir adım da bu çarpımın  $D_{is}$  ve  $L_{stk}$  bileşenlerine ayrılmasıdır. Geleneksel radyal-akılı makina tasarımında  $D_{is}$  ve  $L_{stk}$ 'nin göreceli olarak ayrılması yalnızca makine uygulamasının pratik gereksinimlerine dayanmaktadır. Bu, her uygulama için  $L_{stk} / D_{is}$  olarak tanımlanan uygun bir oran katsayısının seçilmesiyle kolaylaştırılır [115]. Literatürde bu bileşenlerin ayrılması için nüve uzunluğu/kutup yayı [110,111,113] ve nüve uzunluğu/ hava aralığı çapı (stator iç çapı) [109,115,119] gibi çeşitli oranlar kullanılmaktadır. Diğer bir çalışmada ise nüve uzunluğu/ hava aralığı çapı  $L_{stk}=D_{is}/4$  oranı kullanılmıştır [117].

Bileşenlerin ayrılması için kullanılan  $\varepsilon$  nüve uzunluğu/kutup yayı oranı[111];

$$\varepsilon = \frac{L}{\tau_p} = \frac{2Lp}{\pi D_{is}}; 0,6 < \varepsilon < 3,0 \quad (3.10)$$

Ayrıca farklı elektrik makinaları için nüve uzunluğu/ hava aralığı çapı oranı Çizelge 3.5'te verilmiştir [109].

Çizelge 3.5. Farklı elektrik makinaları için nüve uzunluğu/ hava aralığı çapı oranı.

| Asenkron Makina                                   | Senkron Makinalar(p>1)                         | Senkron Makinalar(p=1)       | DA Makinaları                              |
|---------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------|--------------------------------------------|
| $\chi = \frac{L}{D} = \frac{\pi}{2p} \sqrt[3]{p}$ | $\chi = \frac{L}{D} = \frac{\pi}{4p} \sqrt{p}$ | $\chi = \frac{L}{D} = 1 - 3$ | $\chi = \frac{L}{D} = \frac{0,8 - 1,6}{p}$ |

Böylelikle stator nüve iç çapı eşitlik (9) ve (10) kullanılarak elde edilebilir [110,111, 113,117].

$$D_{is} = \sqrt[3]{\frac{D_{is}^2 \cdot L \cdot 2p}{\pi \varepsilon}} = \sqrt[3]{\frac{D_{is}^2 \cdot L}{\chi}} \quad (3.11)$$

Burada  $D_{is}$  genellikle stator iç ve rotor dış çapı olarak kullanılır ( $D \approx D_r \approx D_s$ ). Nüve uzunluğu ise,

$$L = (D_{is}^2 \cdot L) / D_{is}^2 \quad (3.12)$$

Eşitlikler 3.23 ve 3.24 makine tasarımında kullanılan standart eşitliklerdir. Ancak bunlar makinanın toplam hacmini vermek için yeterli değildir [111]. Bunun için stator dış çapını ( $D_o$ ) da belirtmek gerekir;

$$D_o = D_{is} + 2(h_{ss} + h_{cs}) \quad (3.13)$$

Burada  $h_{ss}$  ve  $h_{cs}$ , Şekil 3.4’de görüldüğü gibi sırasıyla stator oluk derinliği ve stator nüve(oluk harici) yüksekliğidir.

### 3.3.1. Stator oluğunun boyutlandırılması

Sırasıyla stator oluk derinliği, nüve(oluk harici) yüksekliği, stator dış genişliği  $b_{ts}$  ve oluk yayı  $\tau_s$  aşağıdaki gibi ifade edilebilir [109,111];

$$h_{ss} = \frac{6N_s I}{\frac{B_g}{B_{sat}} j_{con} K_{fill}} \frac{1}{\pi D_{is}} = \frac{A}{\frac{B_g}{B_{sat}} j_{con} K_{fill}} \quad (3.14)$$

$$h_{cs} = \frac{\phi_g}{2LB_{sat}} = \frac{\alpha_i}{2} \left( \frac{\pi D_{is}}{2p} \right) \frac{B_g}{B_{cs}} \quad (3.15)$$

$$b_{ts} = \frac{\tau_s}{K_{sf}} \cdot \frac{B_g}{B_{sat}} \quad (3.16)$$

$$\tau_s = \frac{\pi D_{is}}{Q_s} \quad (3.17)$$

Burada,  $B_{sat}$  stator nüve doygunluk akı yoğunluğu,  $B_{cs}$  stator nüve akı yoğunluğu,  $J_{con}$  akım yoğunluğu,  $K_{fill}$  oluk doluluk faktörü ve  $\tau_s$  oluk yayıdır.  $K_{sf}$  ise nüve istifleme faktörüdür ve değeri 0,5 mm kalınlığındaki saclar için yaklaşık olarak 0,95’dir [111]. Teknolojik sınırlamalardan dolayı dış genişliği  $3,5 \times 10^{-3}$  m’nin altında olmamalıdır [111]. Eksenel veya radyal hava soğutmalı makinalar için akım yoğunluğu 3,5-8 A/mm<sup>2</sup> aralıkta değişebilir. Spesifik elektrik yüklenme  $A$  35-65 kA/m gibi büyük bir aralık boyunca değişirken oluk yüksekliği ve oluk genişliği oranı, oluk kaçak endüktansını sınırlandırmak için  $K_{aspect} = h_s/b_s=3-6$  değer aralığında tutulmalıdır [111]. Oluk derinliğini tekrar düzenlenirse;

$$h_{ss} = K_{aspect} b_s = K_{aspect} \frac{\pi D_{is}}{N_s} \left( 1 - \frac{b_{ts}}{\tau_s} \right) = K_{aspect} \frac{\pi D_{is}}{N_s} \left( 1 - \frac{B_g}{B_{sat}} \right) \quad (3.18)$$

Ayrıca,

$$\frac{D_o}{D_{is}} \approx 1 + \frac{2K_{aspect}\pi}{N_s} \left(1 - \frac{B_g}{B_{sat}}\right) + \frac{\alpha_i}{2} \frac{\pi}{p} \frac{B_g}{B_{sat}} \quad (3.19)$$

Oranı elde edilir ve bu oran Eşitlik 3.32’de görüldüğü gibi kutup çifti sayısı, oluk derinliği, nüve derinliği, mıknatıs uzunluğu ve oluk sayısının bir fonksiyonudur [119].

$$\frac{D_o}{D_{is}} = f(h_{ss}, h_{cs}, L_{pm}, D_{is}, p, N_s) \quad (3.20)$$

Bu oran, sıcaklık etkilerini, kayıp ve verimlilik gereksinimleri karşılamak için uygun değerler seçilerek uygulanabilir. Fakat çok kutuplu makinalarda bu değerlere yakın değer aralıkları da çıkabilir. Bu farklılıklar esasında teorik ve pratik bilgilerin ya da deneysel sonuçlardan alınan verilerden kaynaklanmaktadır. Verime bağlı olarak gerçekleştirilecek optimizasyon çalışmalarında dış çap/iç çap oranı analitik hesaplamalardan daha farklı değerler elde edilmesine neden olabilir.

Kullanılabilir oluk alanını, oluk başına sarım sayısı, tel çapı ve paralel iletkenlerin sayısı ile oluk doluluk oranını da dikkate alarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$A_s = \frac{\pi d_{c0}^2 a_p Z_s}{4 \cdot K_{fill}} \quad (3.21)$$

Oluk açıklığı, oluk açıklığı yüksekliği ve kama yüksekliği için literatürde bazı değer aralıkları belirtilmiştir ( $b_{so}=2-3$  mm,  $h_{so}= 0,5-1$  mm,  $h_{sl}=1-4$  mm) [111,112]. Şekil 3.4’de görülen oluk genişliğinin alt ve üst tarafları sırasıyla aşağıdaki gibi hesaplanabilir [111,120];

$$b_{s1} = \pi \frac{(D_{is} + 2 \cdot h_{s0} + 2 \cdot h_{s1})}{Q_s} - b_{is} \quad (3.22)$$

$$b_{s2} = \pi \frac{(D_{is} + 2 \cdot h_{s0} + 2 \cdot h_{s1} + 2 \cdot h_{ss})}{Q_s} - b_{is} \quad (3.23)$$

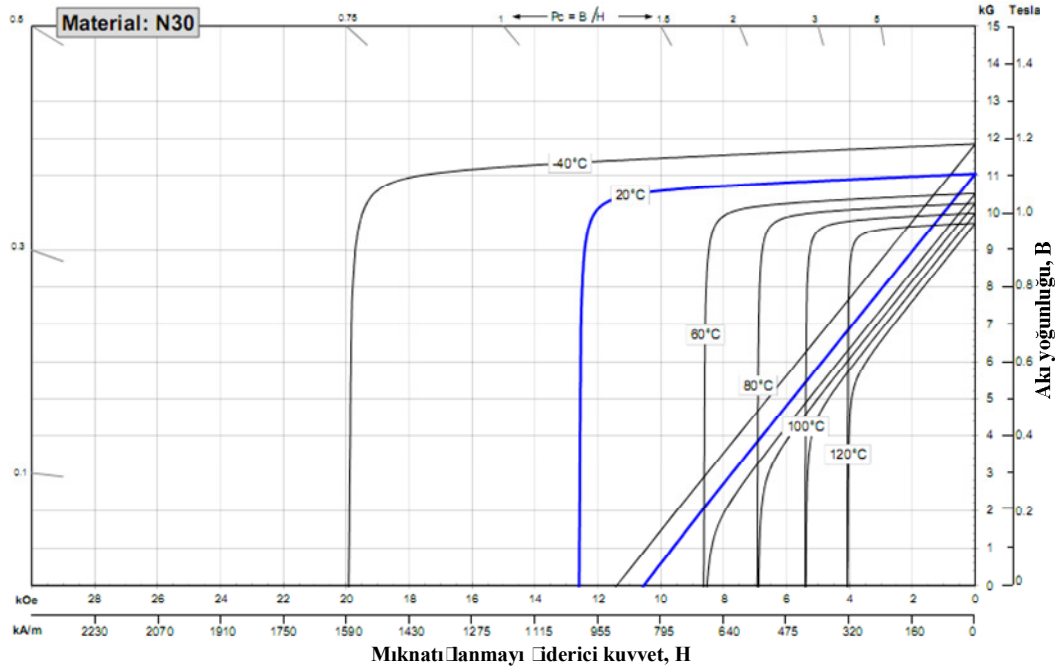
Yararlı oluk alanı ve yüksekliği sırasıyla aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$A_s = h_{s2} \frac{(b_{s1} + b_{s2})}{2} \quad (3.24)$$

$$h_{s2} = \frac{2 \cdot A_s}{b_{s1} + b_{s2}} \quad (3.25)$$

### 3.3.2. Rotor Ve Mıknatısın Boyutlandırılması

Mıknatıs kalınlığı, hava aralığı akı yoğunluğu, artık mıknatıslanma  $B_r$ , gidergenlik alan şiddeti  $H_c$  ve mıknatıs bağlı geçirgenliğinin  $\mu_{rec}$  bir fonksiyonudur [42,121]. Manyetizasyon eğrileri sıcaklığa duyarlıdır. Yani, sıcaklık arttıkça Şekil 3.6'da görüldüğü gibi  $B_r$  ve  $H_c$  azalır.



Şekil 3.6. Kullanılan mıknatısa (N40SH) ait mıknatıslığı giderme (B-H) eğrisi.

Çizelge 3.6. Bazı mıknatıslara ait manyetik özellikler.

| Sınıf | Br        | H <sub>cb</sub> | H <sub>cj</sub> | (BH) <sub>mak</sub> | Sıcaklık katsayısı<br>(%/°C) |                     | Çalışma<br>sıcaklığı (T <sub>w</sub> ) |
|-------|-----------|-----------------|-----------------|---------------------|------------------------------|---------------------|----------------------------------------|
|       | mT        | kA/m            | kA/m            | kJ/m <sup>3</sup>   | α(Br)                        | α(H <sub>cJ</sub> ) | mak °C                                 |
| N30   | 1070-1110 | 796-865         | ≥ 955           | 223-247             | -0.12                        | -0.750              | 80                                     |
| N33   | 1120-1170 | 836-915         | ≥ 955           | 243-263             | -0.12                        | -0.750              | 80                                     |
| N35   | 1160-1210 | 860-930         | ≥ 955           | 263-286             | -0.12                        | -0.750              | 80                                     |
| N30M  | 1070-1110 | 812-876         | ≥ 1114          | 207-223             | -0.12                        | -0.675              | 100                                    |
| N33M  | 1080-1150 | 836-915         | ≥ 1114          | 223-247             | -0.12                        | -0.675              | 100                                    |
| N35M  | 1120-1170 | 868-938         | ≥ 1114          | 247-263             | -0.12                        | -0.675              | 100                                    |
| N30H  | 1070-1110 | 796-865         | ≥ 1353          | 223-247             | -0.12                        | -0.605              | 120                                    |
| N33H  | 1120-1170 | 836-915         | ≥ 1353          | 247-263             | -0.12                        | -0.605              | 120                                    |
| N35H  | 1160-1210 | 868-938         | ≥ 1353          | 263-286             | -0.12                        | -0.605              | 120                                    |
| N38SH | 1220-1280 | 907-975         | ≥ 1592          | 286-310             | -0.12                        | -0.535              | 150                                    |
| N40SH | 1250-1290 | 939-955         | ≥ 1592          | 302-326             | -0.12                        | -0.535              | 150                                    |
| N42SH | 1300-1350 | 955-1010        | ≥ 1592          | 312-344             | -0.12                        | -0.535              | 150                                    |

$$B_r = B_{r20} \left[ 1 + \frac{\alpha_B}{100} (\vartheta_{pm} - 20) \right] \quad (3.26)$$

$$H_c = H_{c20} \left[ 1 + \frac{\alpha_H}{100} (\vartheta_{pm} - 20) \right] \quad (3.27)$$

Burada  $\vartheta_{pm}$  mıknatıs sıcaklığı  $B_{r20}=1,285 \text{ T}$  ve  $H_{c20}=939 \text{ kA/m}$  sırasıyla  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  deki kalıcı manyetik akı yoğunluğu ve gidergenlik alan şiddetidir. N40SH için  $\alpha_B = -0,12$  ve  $\alpha_H = -0,535$  ise sıcaklık katsayılarıdır (Çizelge 3.6) [121]. Kullanılacak mıknatısın maksimum çalışma sıcaklığı  $150$  derece olacaktır. Bu sıcaklık değerinden sonra mıknatıs demagnetize olmaya başlar. Fakat hesaplamalarda nominal yük durumları ve oda sıcaklığındaki durum göz önünde bulundurulmuştur. Motor ve generatör tasarımlarında çalışma sıcaklıkları genelde  $75\text{-}80$  derece alınır. Bağlı geçirgenlik ifadesi;

$$\mu_{rec} = \frac{1}{\mu_0} \frac{\Delta B}{\Delta H} \quad (3.28)$$

Rotor ve KM malzeme boyutlandırması için; rotor nüvesinin yüksekliği  $h_{cr}$  ve senkron makine tasarımı için gerekli kutup başına NdFeB KM malzemesinin yüksekliği  $h_m$  sırasıyla sırasıyla ifade edilebilir [115,121-123];

$$h_{cr} = \frac{\alpha_i}{2} \left( \frac{\pi(D_{is} - 2h_m)}{2p} \right) \frac{B_g}{B_{sat\_r}} \quad (3.29)$$

$$h_m = \mu_{rec} \cdot \frac{\frac{B_g}{K_{lm}}}{B_r - \frac{B_g}{K_{lm}}} \cdot g \quad (3.30)$$

Burada,  $K_{lm}$  kaçak akının, yüzey mıknatısları için tipik olarak 0,9 ila 1,0 arasında değişen bir katsayı değeridir [108]. Başlangıç tasarım için, mıknatısın yüksekliği, hava boşluğu uzunluğunun yaklaşık on katı olarak tespit edilebilir [124]. Mıknatıs kalınlığının uç gerilimine, çıkış gücüne, verime, tutma torkuna ve kayıplara etkisi olduğundan, bir sonraki adımda bütün bu parametreler göz önünde bulundurularak, parametrik analizler ile uygun mıknatıs kalınlığı belirlenecektir.

### 3.4. TEMEL BOYUTLANDIRMA İÇİN ANALİTİK HESAPLAMALAR

Doğrudan sürürlü rüzgâr uygulamalarında yüksek güç ve düşük hız ihtiyacı vardır. Bu sebeple yüksek manyetik akı yoğunluğuna sahip mıknatıslar kullanılarak (NdFeB), çok kutuplu, iç rotorlu bir tasarım öngörülmüştür. Ayrıca generatörün üretim, montaj ve kanat bağlantıları kolaylığı sebebiyle iç rotorlu konfigürasyon tercih edilmiştir. Bu konfigürasyon ısının oluştuğu sargılar dışarda kaldığından soğutma içinde uygundur [27]. Generatörün tasarım için teknik özellikleri aşağıdaki şekilde belirlenmiştir;

- Anma gücü:  $P = 4$  kW;
- Senkron hız:  $n = 250$  d/d;
- Frekans:  $f = 50$  Hz;

- Faz sayısı:  $m = 3$ ;
- Çıkış gerilimi:  $V = 400 \text{ V}$ ;
- Hedeflenen verim:  $\eta = \% 92$ ;
- Çıkıntısız kutuplu, kalıcı mıknatıslı senkron generatör.

Burada öncelikle makine tasarımında yaygın kabul gören makine sabiti  $C$  ve çıkış katsayısı  $D_{is}^2 \cdot L_{stk}$  hesaplanacaktır.

Kutup sayısı;

$$2p = \frac{120 \cdot f}{n} = \frac{120 \cdot 50}{250} = 24 \quad (3.31)$$

Makine sabiti (Eşitlik 3.20) ( $K_f=1.071$ ,  $\alpha_i=0.64$ ,  $K_w=0.96$ ,  $A=30 \text{ kA/m}$ ,  $B_g= 0.8\text{T}$ );

$$C_0 = k_f \alpha_i k_w \pi^2 A B_g = 1,07 \cdot 0,64 \cdot 0,96 \cdot 3,14^2 \cdot 30 \cdot 10^3 \cdot 0,8 = 155 \cdot 10^3 \text{ J / m}^3 \quad (3.32)$$

Çıkış katsayısı (Eşitlik 3.21);

$$D_{is}^2 \cdot L_{stk} = \frac{1}{155 \cdot 10^3} \cdot \frac{60}{250} \cdot \frac{(1 \cdot 4000)}{0,93 \cdot 1} = 6,66 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \quad (3.33)$$

Hava aralığı çapı (stator iç çapı)  $\lambda$  nüve uzunluğu/kutup yayı oranı kullanılarak elde edilebilir (Eşitlik 3.23);

$$Dis = \sqrt[3]{\frac{6,66 \cdot 10^{-3} \cdot 24}{2,3 \cdot 3,14}} = 0,280 \text{ m} \quad (3.34)$$

Nüve uzunluğu;

$$L_{stk} = \frac{D_{is}^2 \cdot L_{stk}}{D_{is}^2} = 0,085 \text{ m} \quad (3.35)$$

Literatürde bildirilen  $L_{stk}/D$  oranı ayırıcı değerleri, doğrudan tahrikli KM rüzgâr generatörü uygulamaları için 0,14 ila 0,5 arasında değişkendir [115]. Bu uygulama için  $L_{stk}/D=0,3$  oranı kabul edilebilir değerdedir. Kutup yayı;

$$\tau_p = \frac{\pi D_{is}}{2p} = \frac{3,14 \cdot 0,280}{24} = 0,0366m \quad (3.36)$$

Stator oluk derinliği (Eşitlik 3.26) ve stator nüve derinliği (Eşitlik 3.27) sırasıyla;  
 $(B_{sat}= 1,8T, B_{cs}=1,2 T$  ve  $B_g=0,8T, J_{con}=4 A/mm^2, K_{fill}=0,5)$ ;

$$h_{ss} = \frac{30000}{\frac{0,8}{1,8} \cdot 4 \cdot 10^6 \cdot 0,5} = 0,0337m \quad (3.37)$$

$$h_{cs} = \frac{0,64}{2} \cdot \frac{3,14 \cdot 0,280}{24} \cdot \frac{0,8}{1,2} = 7,522 \cdot 10^{-3}m \quad (3.38)$$

Stator dış çapı (Eşitlik 3.25);  $h_{so}=0,5$  mm ve  $h_{sl}=1$  mm için,

$$D_o = 280 + 2(33,7 + 7,522 + 0,5 + 1) = 362,44mm \quad (3.39)$$

Dış çap/iç çap oranı;

$$\frac{D_o}{D_{is}} = 1,29 \quad (3.40)$$

Bu oran kabul edilebilir değerdedir [110,111]. Oluk sayısı ve oluk yayı sırasıyla;

$$Q_s = 2pqm = 24 \times 1 \times 3 = 72 \quad (3.41)$$

$$\tau_s = \frac{\pi D_{is}}{Q_s} = \frac{3,14 \times 0,280}{72} = 0,0122 \quad (3.42)$$

İki komşu oluğun emf'leri arasındaki elektriki açı;

$$\alpha_{ec} = \frac{2\pi p}{Q_s} = 60^\circ E \quad (3.43)$$

Adım katsayısı ve dağıtım katsayısı sırasıyla; faz ve kutup başına oluk sayısı 1 olduğu için sargı adımı ve kutup adımı eşittir ( $y=y_p$ ).

$$k_a = \sin\left(\frac{y}{y_p} \cdot \frac{\pi}{2}\right) = 1 \quad (3.44)$$

$$k_d = \frac{\sin\left(q \cdot \frac{\alpha_{ec}}{2}\right)}{q \cdot \sin\left(\frac{\alpha_{ec}}{2}\right)} = \frac{\sin(30)}{1 \cdot \sin(30)} = 1 \quad (3.45)$$

Böylelikle stator sargı faktörü;

$$k_w = k_a \cdot k_d = 1 \quad (3.46)$$

Kutup akısına bağlı faz başına sarım sayısı;

$$\Phi = \alpha_i \cdot \tau_p \cdot L_{stk} \cdot B_g = 0,64 \cdot 0,0366 \cdot 0,085 \cdot 0,8 = 1,59 \times 10^{-3} Wb \quad (3.47)$$

Faz başına sarım sayısı ve iletken sayısı sırasıyla;

$$N_s = \frac{K_E \times V_{ph}}{4,44 \times f \times k_w \times \Phi} = \frac{1 \times 400 / \sqrt{3}}{4,44 \times 50 \times 1 \times 1,59 \times 10^{-3}} = 654 \text{ sarım} \quad (3.48)$$

$$Z_{ph} = 2 \cdot N_s = 2 \cdot 654 = 1308 \quad (3.49)$$

Oluk başına iletken sayısı; her bir olukta 2 bobin olduğundan iletken sayısını 2'nin katları şeklinde 54 olarak alınabilir.

$$Z_s = \frac{Z_{ph} \cdot 3}{Q_s} = 54,5 \quad (3.50)$$

Gerçek hava aralığı akı yoğunluğunu ve faz başına sarım sayısını tekrar hesaplanırsa; sırasıyla,

$$N_s = \frac{Z_s \cdot Q_s}{6} = 648 \text{ sarım} \quad (3.51)$$

$$B_g = 0,8 \frac{654}{6648} = 0,78 T \quad (3.52)$$

Faz akımı;

$$I_a = \frac{P_o}{\cos \varphi 3 V_{ph}} = \frac{4000}{1 \cdot 3 \cdot 400 / \sqrt{3}} = 5,77 A \quad (3.53)$$

Düzeltilen sarım sayısına göre kutup akısını tekrar hesalanırsa;

$$\Phi = \frac{K_E \times V_{ph}}{4,44 \times f \times k_w \times W} = \frac{1 \times 400 / \sqrt{3}}{4,44 \times 50 \times 1 \times 648} = 1,6 \times 10^{-3} Wb \quad (3.54)$$

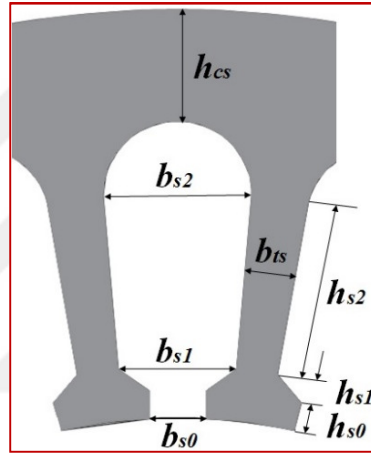
İletken tel kesiti vet tel çapı sırasıyla;

$$A_{c0} = \frac{I_a}{J_{con}} = \frac{5,77}{4} = 1,44 mm^2 \quad (3.55)$$

$$d_0 = \sqrt{\frac{4 \times A_{co}}{\pi}} = 1,35 mm \quad (3.56)$$

Sarımı kolaylaştırmak için 0,95 mm'lik 2 iletken kullanılabilir. Bakır telin kesit alanının daha küçük olması endüvi direncinin daha büyük olmasına neden olur. Aynı stator akımı için, bakır kayıpları artar. Bakır kayıpları sadece makina performansını değil aynı zamanda da sargı sıcaklığını artırır. Bu yüzden elektrik makinalarının tasarımında akım yoğunluğunun güce bağlı olarak 3,5 ila 8 A/mm<sup>2</sup> arasında tutulması tavsiye edilmektedir.

Şekil 3.7'de tercih edilen oluk şekli görülmektedir. Oluk genişliğinin alt ve üst tarafları Eşitlik 3.34 ve Eşitlik 3.35'ten sırasıyla aşağıdaki gibi hesaplanabilir.



Şekil 3.7. Stator oluk kesiti.

$$b_{s1} = \frac{3,14 \cdot (280 + 2 \cdot 0,5 + 2 \cdot 1)}{72} - 4,76 = 7,58 \text{ mm} \quad (3.57)$$

$$b_{s2} = \frac{3,14 \cdot (280 + 2 \cdot 0,5 + 2 \cdot 1 + 2 \cdot 33,7)}{72} - 4,76 = 10,52 \text{ mm} \quad (3.58)$$

Yararlı oluk yüksekliğini tekrar hesaplırsak (Eşitlik 3.37);

$$h_{s2} = \frac{2 \times 161}{7,58 + 10,52} = 17,74 \text{ mm} \quad (3.59)$$

Artık mıknatıslık ve mıknatıslığı giderme kuvveti sırasıyla (Eşitlik 3.38 ve Eşitlik 3.39);

$$B_r = 1,285 \left[ 1 + \frac{-0,12}{100} (80 - 20) \right] = 1,19T \quad (3.60)$$

$$H_c = 939 \left[ 1 + \frac{-0,535}{100} (80 - 20) \right] = 637,58 kA/m \quad (3.61)$$

Bağıl geçirgenlik (Eşitlik 3.40);

$$\mu_{rec} = \frac{1}{0,4\pi \times 10^{-6}} \times \frac{1,19}{637580} = 1,48 \quad (3.62)$$

Mıknatıs kalınlığı, yüksüz durumda hava aralığı akısı  $B_g = 0,8$  ve kaçak akı katsayısı  $K_{lm} = 0,9$  için Eşitlik 3.42'den elde edilebilir.

$$h_m = 1,48 \frac{0,8/0,9}{1 - 0,8/0,9} 0,001 = 4,39 \text{ mm} \quad (3.63)$$

### 3.5. BİLGİSAYAR TABANLI TASARIM VE OPTİMİZASYON SÜRECİ

Generatörlerin yüksek verim almanın en önemli noktalarından biri prototip çalışmalarından önce gerçekleştirilen karşılaştırmalı çalışmaların çokluğudur. Nekadar çok simülasyon çalışması gerçekleştirilir ve optimizasyon parametresi kullanılır ise, en iyi sonuca ulaşma ihtimali o kadar çok artar. Motor ve generatör gibi sistemlerin elektromanyetik analizlerinde birçok program kullanılmaktadır. Buradan sonra yapılacak işlemler karmaşık ve uzun süren hesaplamalar gerektirdiğinden bu hesaplamalar generatör tasarımı konusunda geliştirilmiş bilgisayar yazılımları ile yapılacaktır.

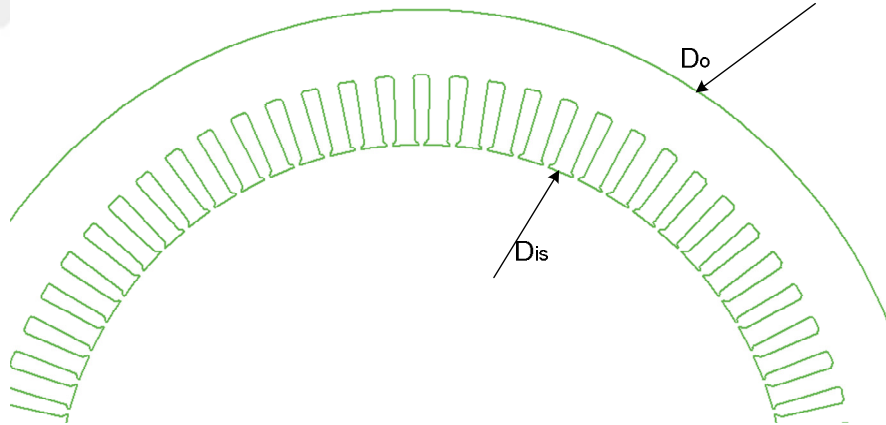
Yaklaşık rotor boyutları, oluk ve kutup sayılarının belirlenmesinden sonra RMXprt yazılımı yardımıyla makinenin analitik tasarım ve analizi yapılacaktır. Bu program yardımı ile kullanıcılar rotor tipi, malzeme seçimi, sarım şekli gibi durumları tanımlayabilmekte, program tanımlanan girdiler doğrultusunda makine performansını hesaplamaktadır. Ardından kullanıcı makine boyutları, sarım sayısı, kablo kesiti,

kontrol parametreleri gibi değerleri ayarlayarak makine analizini hızlı ve kolayca yapabilmektedir [27].

Bu adımda, bir önceki bölümde iç rotorlu radyal akılı KMSM'ye ait temel boyutlandırma için gerçekleştirilen analitik hesaplamalar sonucuna göre generatörün RMXprt yazılımı kullanılarak analitik modeli oluşturulmuştur. Bu bölüm, nominal hıza göre kutup sayısının, oluk sayısının, oluk şeklinin, mıknatıs tipinin, stator iç ve dış çapının, stator uzunluğunun, oluk yapısının, sargı adımının, hava aralığı akısının ve iletken katsayısının belirlenmesini içermektedir.

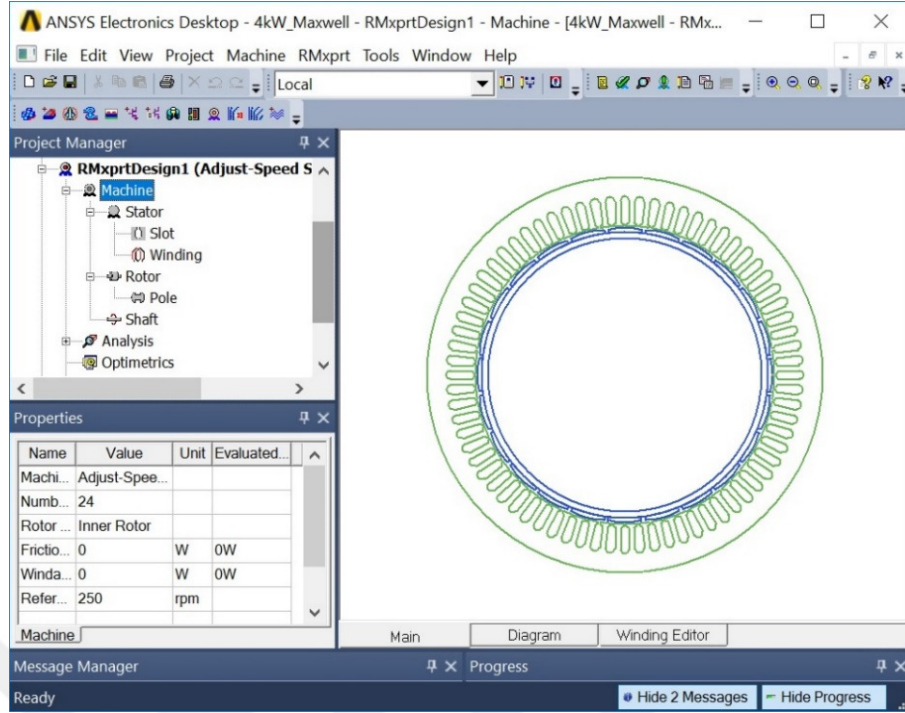
Şekil 3.8'de görüldüğü gibi KMSM'ye ait statorun iç çapı, hava aralığı, mıknatıs kalınlığı ve rotor çapı büyüklüklerinden bulunur. Böylelikle stator iç çapına ait eşitlik aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$D_{is} = D_r + 2h_m + 2g \quad (3.64)$$



Şekil 3.8. Generatörün statoruna ait boyutlandırma.

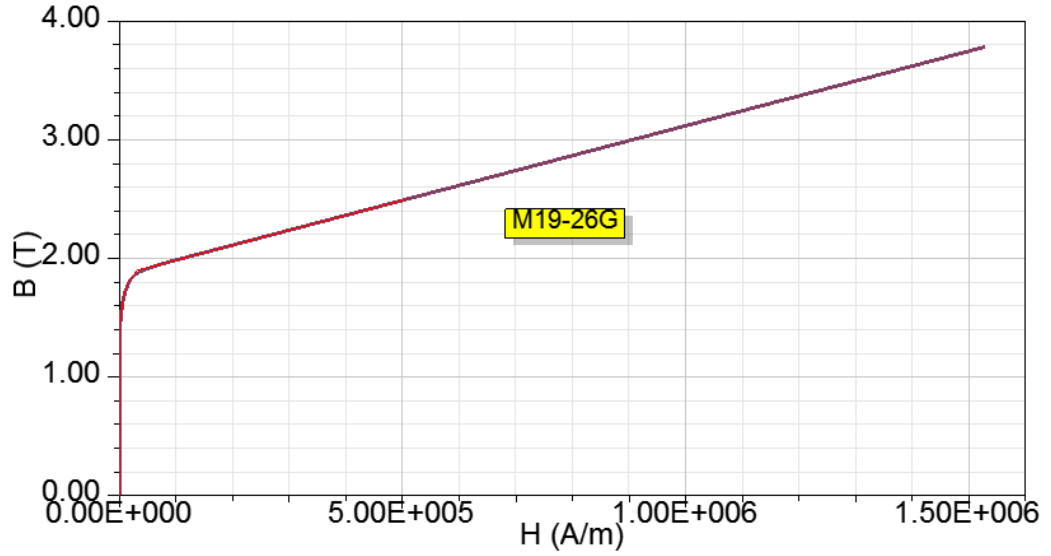
Burada  $D_{is}$  stator iç çapı,  $D_{ro}$  rotor dış çapı,  $h_m$  mıknatıs kalınlığı ve  $g$  hava aralığının uzunluğunu vermektedir. Böylelikle generatör modeli analitik hesaplamalar sonucu elde edilen başlangıç parametreleri kullanılarak RMXprt yazılımında Şekil 3.9'da görüldüğü gibi oluşturulmuştur.



Şekil 3.9. Generatör modeli.

Hava aralığı küçük güçlü makinalarda 0,25-0,5 mm aralığında, orta güçlü makinalarda 0,5-1 mm ve büyük güçlü makinalarda 3 mm'ye kadar alınabilir. Üretilecek makinada ortaya çıkabilecek mekanik hatalar dikkate alındığında 1mm'lik kabul edilebilir bir hava aralığı değerini seçmek uygundur. Ayrıca makine tasarımında kullanılacak sac malzemesinin kalitesi verimi ve maliyeti artıran diğer bir faktördür. Bu çalışmada stator sac malzemesi olarak M19\_26G sacı tercih edilmiştir. Bu malzemeyi seçilmesindeki diğer bir faktörde ülkemizde rahatlıkla bulunabiliyor olmasıdır.

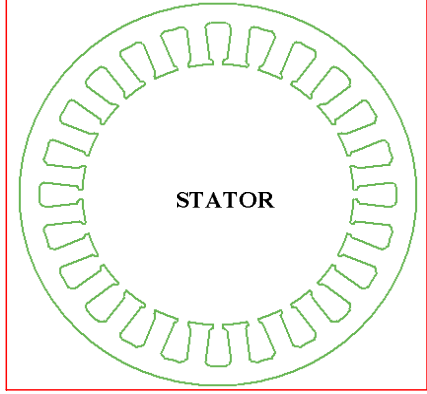
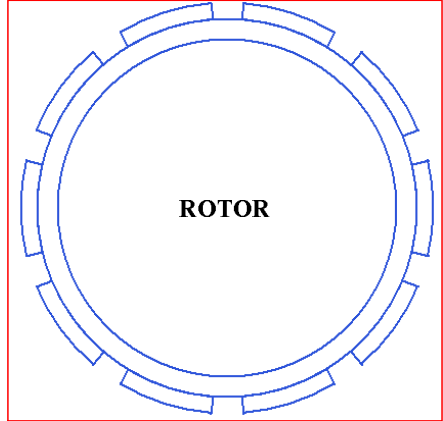
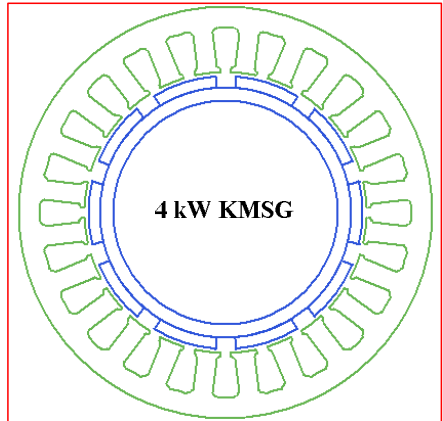
Üretilen akının uygulanan mmk'e orantılı olması istenirse, nüve doymanın olmadığı doğrusal bölgede çalıştırılmalıdır [125]. Şekil 3.10'da seçilen sacın B-H eğrisi incelendiğinde akı yoğunluğu 1.8 T değerinden sonra doyum eğrisine doğru ilerlemektedir. Bu değer üstündeki akı yoğunluğu değerlerinde histerisiz kayıpları da artacaktır.



Şekil 3.10. M19\_26G sacı B-H eğrisi.

Analitik hesaplamalar sonucu elde edilen temel boyutlandırma ve RMxpirt ile gerçekleştirilen tam yük altındaki analiz çalışmaları sonucu elde edilen parametreler Çizelge 3.7’de verilmiştir. Stator ve rotor boyutlarının belirlenmesinden sonra sarım şekli ve iletken sayılarının belirlenmesi gereklidir. Tasarlanan generatörün kutup sayısı 24, oluk sayısı 72, sargı adımı 3 olarak belirlenmişti. Generatör bir çevirici vasıtasıyla şebekeye bağlandığında, rüzgâr hızı değişken olduğu için generatörün devir sayısı ve buna bağlı olarak ürettiği gerilimin de genliği değişecektir. Anma hızında yani 250 d/d’da şebeke gerilimini üretmelidir.

Çizelge 3.7. Generatöre ait başlangıç parametreleri ve çıkış değerleri.

| Parametre                            | Değer                  | Generatör Parçaları                                                                  |
|--------------------------------------|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Yük hat gerilimi(rms)                | 389 V                  |    |
| Hat akımı (rms)                      | 6.22 A                 |                                                                                      |
| Elektriksel yüklenme                 | 27508 A/m              |                                                                                      |
| Stator akım yoğunluğu                | 2,17 A/mm <sup>2</sup> |   |
| Demir kaybı                          | 28,87 W                |                                                                                      |
| Bakır kaybı                          | 179,22 W               |                                                                                      |
| Toplam kayıp                         | 208 W                  |  |
| Çıkış gücü                           | 4,17 W                 |                                                                                      |
| Giriş gücü                           | 4,38 W                 |                                                                                      |
| Verim (%)                            | 95,25                  |                                                                                      |
| Güç faktörü                          | 0.94                   |                                                                                      |
| Nominal Tork                         | 167,404 Nm             |                                                                                      |
| Kısa devre akımı                     | 33,73 A                |                                                                                      |
| Tutma torku                          | 17,89 Nm               |                                                                                      |
| THD (zık emk)                        | 19,56 %                |                                                                                      |
| Stator dış çapı (D <sub>o</sub> )    | 362,44 mm              |                                                                                      |
| Stator iç çapı (D <sub>is</sub> )    | 280 mm                 |                                                                                      |
| Rotor dış çapı (D <sub>r</sub> )     | 269,22 mm              |                                                                                      |
| Rotor iç çapı (D <sub>ri</sub> )     | 258,22 mm              |                                                                                      |
| Mıknatıs kalınlığı (h <sub>m</sub> ) | 4,39 mm                |                                                                                      |
| Stator kutup sayısı                  | 24                     |                                                                                      |
| Stator oluk sayısı                   | 72                     |                                                                                      |
| Faz başına spir sayısı               | 648                    |                                                                                      |
| Oluk doluluk oranı                   | %96,482                |                                                                                      |
| Faz sayısı                           | 3                      |                                                                                      |
| Stator saç paketi uzunluğu           | 85 mm                  |                                                                                      |
| Mıknatıs açıklığı (Embrace)          | 1                      |                                                                                      |
| Mıknatıs eğimi (Offset)              | 0                      |                                                                                      |
| Hava aralığı uzunluğu                | 1 mm                   |                                                                                      |

Üç fazlı sargı, aralarında makine içinde uzayda elektriksel olarak 120° faz farkı olan özdeş üç adet bir fazlı sargıdan oluşmaktadır. Şekil 3.9'daki 2p=24 kutuplu, Q= 72

oluklu modele ait 72 bobinli üç fazlı sargı bobinlerinin özellikleri Çizelge 3.8’de verilmiştir.

Çizelge 3.8. Statora ait sargı özellikleri.

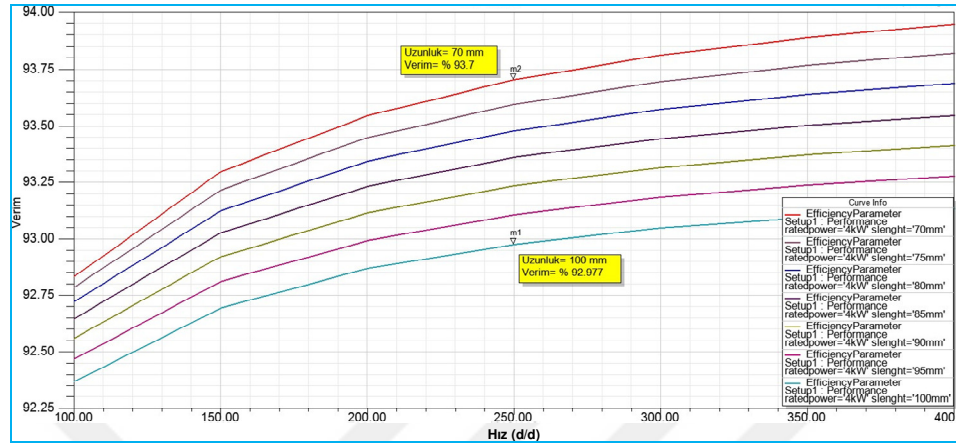
| Parametre                  | Özellik    |
|----------------------------|------------|
| Tel sayısı                 | 2          |
| Sarım tipi                 | Tam adımlı |
| Paralel kol sayısı         | 1          |
| Sargı adımı                | 3          |
| İletken kesiti             | 1.35mm     |
| Oluk başına iletken sayısı | 54         |

### 3.5.1. Stator Sac Paketine İlişkin Parametrik Analizler

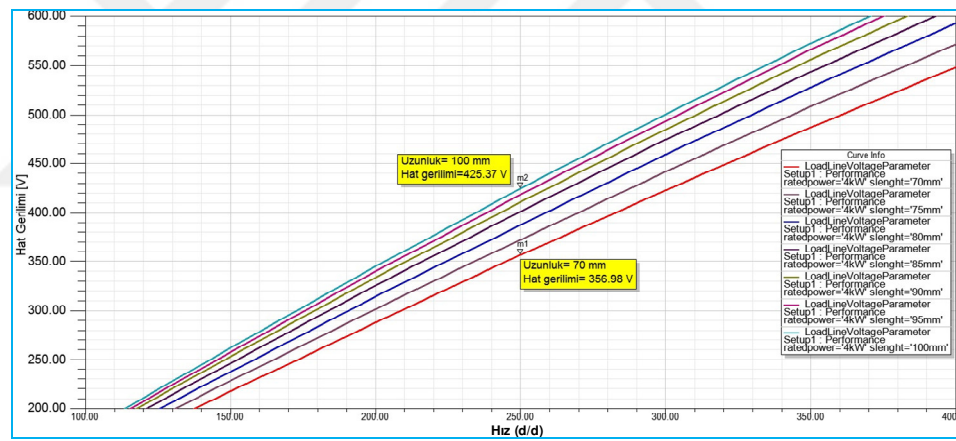
Bu analizler generatörün stator sac paketinin boyutlandırmasına ve bazı başlangıç parametrelerinin iyileştirilmesine ilişkin çalışmaları kapsamaktadır. Bu kapsamda generator uzunluğundaki ve hızındaki değişimin verime, güce ve hat gerilimine etkisi analiz edilerek optimum uzunluk ve hız değeri bulunacaktır.

Generatör değişken hızlı rüzgâr türbin yapısı için tasarlanmıştır. Generatörün anma hızı 250 d/d’dır. Fakat değişken hızlarda da makinanın çıkış karakteristikleri için de belirli sınırlar içerisinde parametrik analizler gerçekleştirilerek, ağırlık dolayısıyla maliyet ve bununla birlikte verim de dikkate alınıp uygun boyutlandırma yapılmıştır. Bunun için de generatör hızı 100-400 d/d arasında incelenmiştir. Şekil 3.11’de hız ve stator uzunluğunun verime etkisi görülmektedir. Hız değeri 250 d/d ve uzunluk 100 mm olduğunda generatör verimi yaklaşık %92,977 olurken, hız 250 d/d ve uzunluk 70 mm olduğunda verim %93,7 seviyelerine yükselmektedir. Bu grafiklerden anlaşıldığı gibi nominal hız sabit iken stator uzunluğu azaldığında verim artmaktadır. Fakat verimin artışı belirli uzunluk değerlerinde gerçekleşmektedir. Düşük stator uzunluğunun verimi artırdığı açıkça görülmektedir. Fakat Şekil 3.12’de görüldüğü gibi sac paketi uzunluğunun düşük seçilmesi hat geriliminin 400 V’un altında

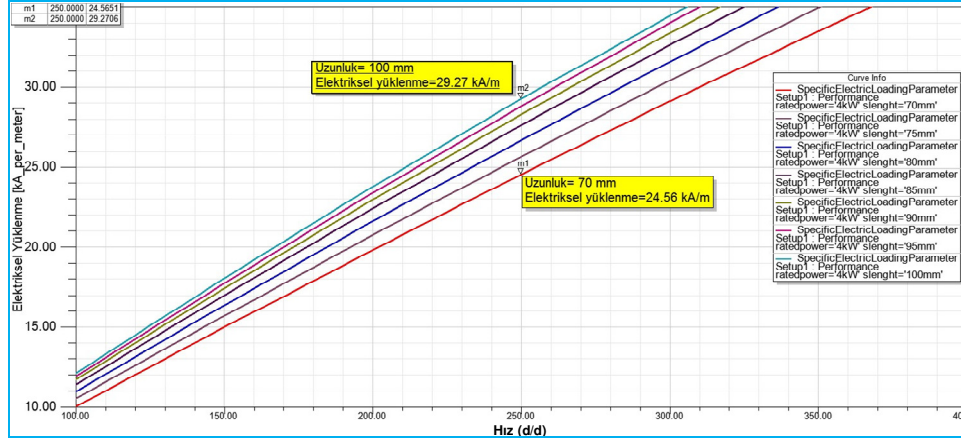
gerçekleşmesine neden olurken, büyük seçilmesi de Şekil 3.13’de görüldüğü gibi elektriksel yüklenmeyi artırmaktadır.



Şekil 3.11. Verimin hız ve stator uzunluğu arasındaki ilişkisi (L=70-100mm).

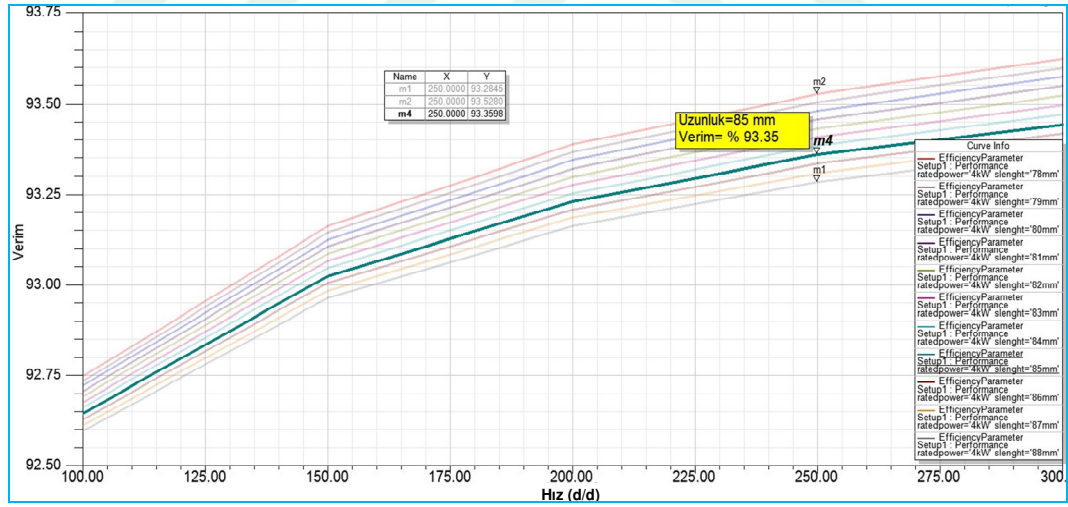


Şekil 3.12. Hat geriliminin hız ve stator uzunluğu arasındaki ilişkisi (hız=250 d/d).

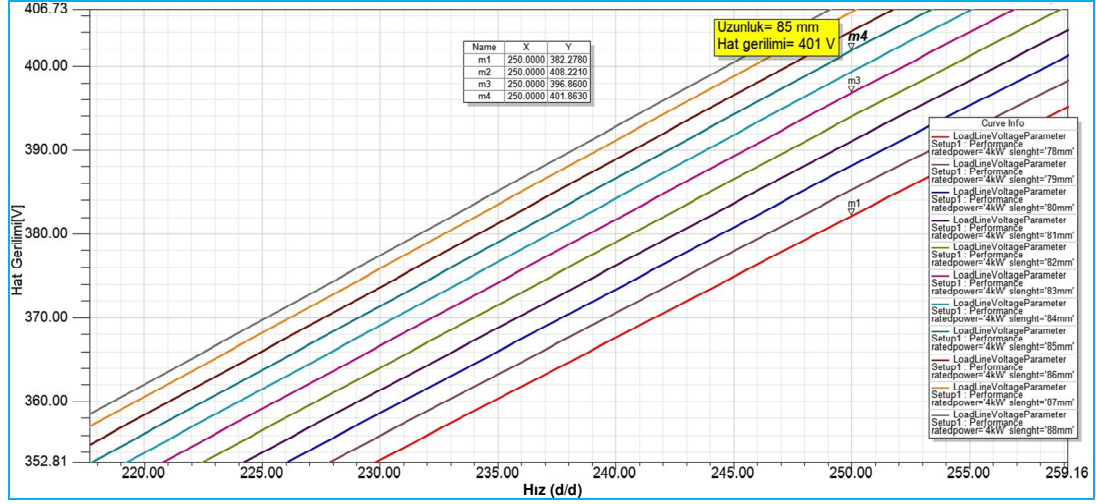


Şekil 3.13. Elektriksel yüklenmenin hız ve stator uzunluğu arasındaki ilişkisi.

Bundan dolayı sac paketi uzunluğu için hat geriliminin 380 V ve üzerinde gerçekleştiği ve elektriksel yüklenmenin 30 kA/m değerinin altında gerçekleştiği değerler için parametrik analizler daha dar bir aralıkta Şekil 3.14 ve Şekil 3.15’de görüldüğü gibi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.14. Verimin hız ve stator uzunluğu arasındaki ilişkisi (L=85mm).



Şekil 3.15. Hat geriliminin hız ve stator uzunluğu arasındaki ilişkisi (L=85mm).

### 3.5.2. Çok-Amaçlı Parametrik Optimizasyon

Elektrik makinaları tasarım sürecinde teorik hesaplamalar yoluyla önceden konfigüre edilen modelin iyileştirilmesi için parametrik analiz kullanılır. Tasarım sürecinde, gerçek modelin üretiminden geliştirme süresini kısaltmak için simülasyonları gerçekleştiren birçok yazılım ve modüller vardır. Çok sayıda alt modülü içermesi nedeniyle ANSYS RMxprt yazılımı ayrıntılı parametre analizinde kullanılır.

Optimizasyon sorunu tüm gereksinimlerini karşılayan kabul edilebilir bir tasarım bulmaktır. Ancak, hedef fonksiyonu seçmek için birçok olasılık vardır. Elektrik makinaları tasarımı birçok parametreden oluştuğundan dolayı, ana fikri aşağıdaki eşitlikte sunulan çok-amaçlı optimizasyon yaklaşımının kullanımı faydalı olacaktır [33,126,127];

$$\bar{Y} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_1(x_1, \dots, x_i) \\ f_2(x_1, \dots, x_i) \\ \vdots \\ f_j(x_1, \dots, x_i) \end{pmatrix} \rightarrow \bar{X} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_i \end{pmatrix} \rightarrow \begin{cases} i=1,2,3,\dots \\ j=1,2,3,\dots \end{cases} \quad (3.65)$$

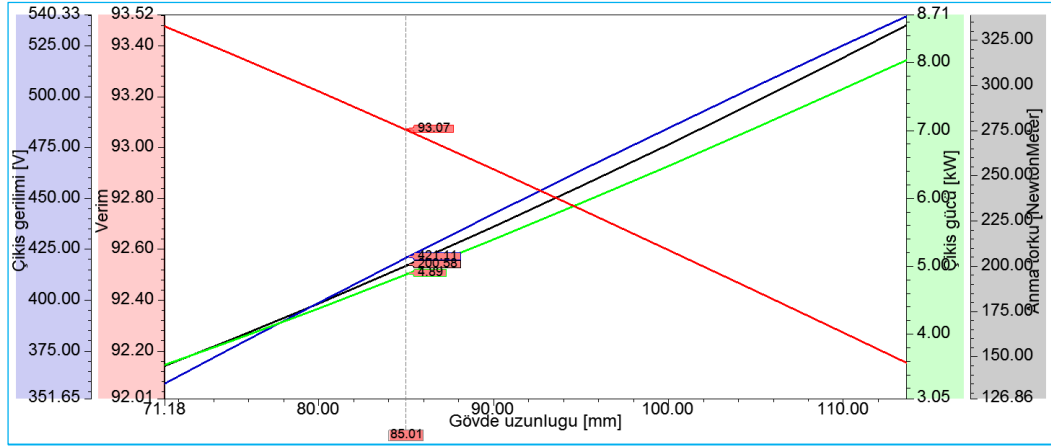
Burada y generatörün performans parametrelerinden biridir,  $x_i$  ise generator boyutu ile ilgili iterasyondaki yapısal veya boyutlama parametreleridir. En uygun generatör

tasarımını elde etmek için, generatörün çıkış gücü, verimliliği, çıkış gerilimi, tutma torku ve benzeri, çok amaçlı optimizasyon olarak seçilir. Yapısal parametreler, hesaplamalarla elde edilen serbest başlangıç parametreleri olarak seçilir.

Analitik modele dayalı optimizasyon KMSG'nin optimal geometrik yapısını ve alan dağılımlarını elde etmek için gerçekleştirilir. Bunun yanı sıra, nominal çalışma koşullarında toplam kayıpları en aza indirmek için tercih edilmektedir. Bu durumda, Eşitlik 3.78'de sunulan hesaplama yolu ile en iyi çıktıyı elde etmek için seçilen, stator ile rotor dış çapı, PMSG gövde uzunluğu  $L_{stk}$ , oluk açıklığı  $b_{so}$  ve mıknatıs kalınlığı  $h_m$ , kutup yayı ve mıknatıs yayı oranı ( $\alpha_m = \tau_p/\tau_m$ ) gibi bazı parametreler generatörün temelini oluşturmaktadır. Ana fikrin okunabileceği çok amaçlı optimizasyon yaklaşımı Eşitlik 3.78'de verilmiştir [33,126,127].

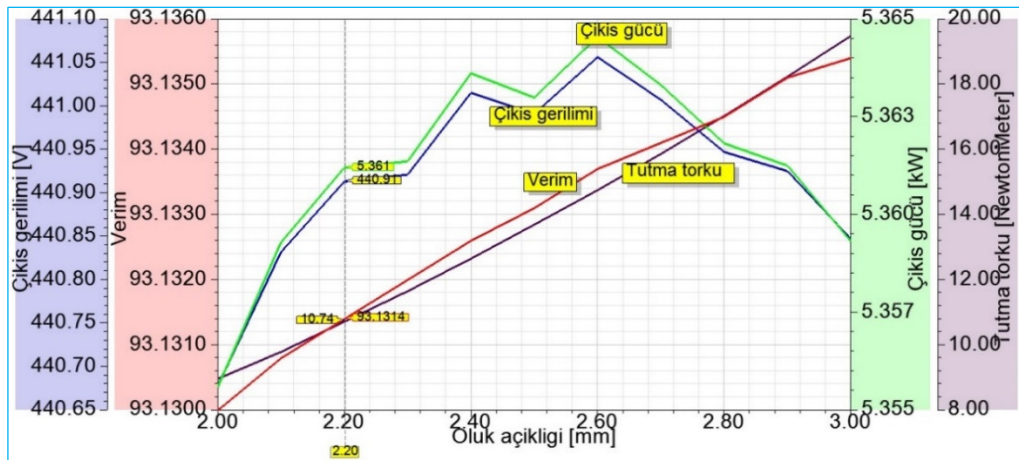
$$\left\{ \begin{array}{l} \text{mak.} \rightarrow y = f(h_m, \alpha_m, b_{so}, L_{stk}, \text{kayk}, \text{offset}) \\ \text{veya} \\ \text{min.} \rightarrow P_{\text{kayıp}} = f(h_m, \alpha_m, b_{so}, L_{stk}, \text{kayk}, \text{offset}) \\ \text{ile ilgili} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} 70\text{mm} \leq L_{stk} \leq 115\text{mm}, ++5\text{mm} \\ 3\text{mm} \leq h_m \leq 10\text{mm}, ++0,2\text{mm} \\ 0 \leq \text{kayk} \leq 1, ++0.2 \\ 70\text{mm} \leq \text{offset} \leq 90\text{mm}, ++2\text{mm} \end{array} \right\} \end{array} \right\} \quad (3.66)$$

Şekil 3.16'da gösterilen analiz, stator uzunluğunun boyutlandırılması ve başlangıç parametrelerinin iyileştirilmesi üzerine bir çalışma içerir. Anma hızında (250 d/d.) ve gövde uzunluğu 115 mm'de, generatör verimliliği yaklaşık% 92'dir, ancak gövde uzunluğu 70 mm'ye düştüğünde, verimlilik % 93,5'e yükselir. Düşük gövde uzunluğunda verimliliğin artmasına rağmen, çıkış geriliminin istenilen değerin altına düşmesine neden olur.



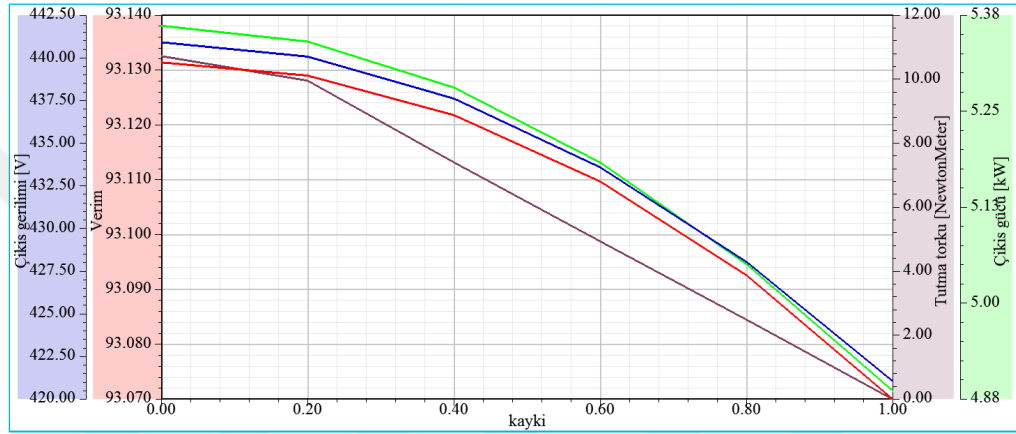
Şekil 3.16. Değişken gövde uzunluğunun  $L_{stk}$  çıkış parametreleri üzerine etkisi.

Oluk açıklığının iletkenlerin büyüklüğünde olması gereklidir. Çok küçük oluk açıklığında ise bir dişten diğerine kaçak akı oluşabilmektedir. Bu nedenle oluk açıklığı değerinin hava aralığından büyük olması gereklidir. Oluk aralığının çok büyük olması durumunda ise tutma (“cogging”) torku artmaktadır. Bütün bu sınırlar doğrultusunda optimum bir oluk açıklığı belirlenmesi gereklidir. Oluk açıklığının  $b_{so}=2-3$  mm aralığında seçilmesinin uygun olacağı belirtilmiştir [111,112]. Bu nedenle uygun verim, çıkış gerilimi ve düşük tutma torku için en iyi oluk açıklığı, 0.1mm hassasiyet ile 1mm ve 3mm arasında çok-kıstaslı parametrik analizler sonucunda tekrar hesaplanmıştır. Ve elde edilen sonuçlar Şekil 3.17’de gösterilmektedir. Özellikle tutma torkunun seçilen oluk açıklığı değerinde (optimum bölge) sıfıra çok yakın olduğu kolayca grafikte görülebilir.



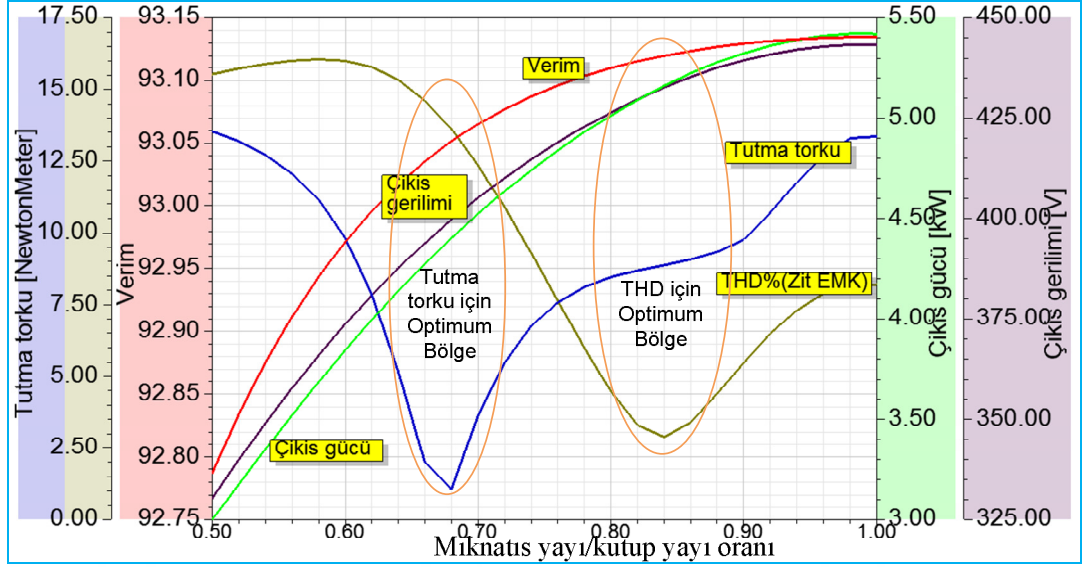
Şekil 3.17. Değişen oluk açıklığının çıkış parametreleri üzerine etkisi.

Doğrudan tahrikli generatörlerde, tutma torku etkisi oldukça önemlidir çünkü tasarlanan generatörler çok düşük hızlı uygulamada kullanılabilir. Tutma torkunu ortadan kaldırmak için kullanılan yöntemlerden biri de stator oluklarında veya mıknatıslarada yapılan kaykî işlemidir ki, mıknatıslarda kaykî işlemi, üretimi kolaylaştırdığı için tercih edilmiştir. Şekil.3.18 değişken kaykî işleminin generatörün çıkış gerilimi, çıkış gücü, verimlilik ve tutma torku parametresi üzerindeki etkisini göstermektedir.



Şekil 3.18. Değişken kaykî işleminin çıkış parametreleri üzerine etkisi.

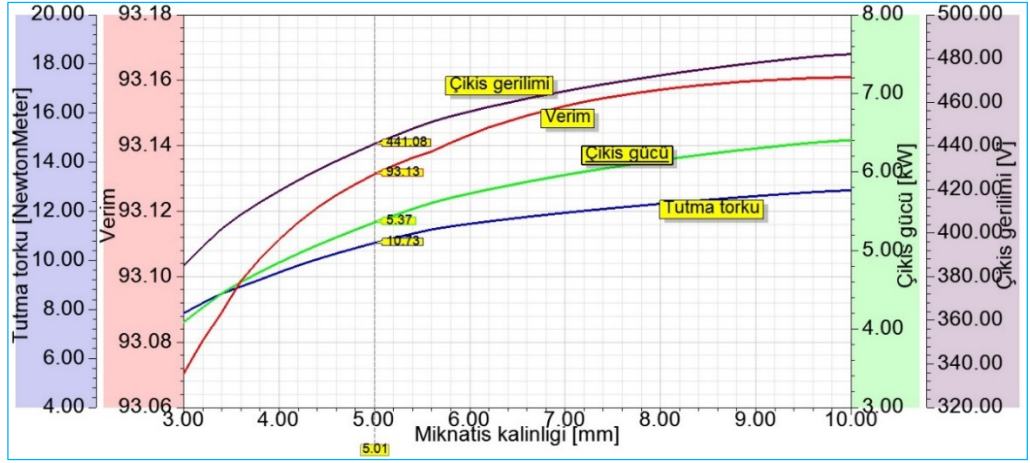
Stator veya rotora uygulanan kaykî işlemi sonucunda çıkış gerilimi temel frekansının daha küçük genliğe sahip olduğu gözlemlenebilir. Ayrıca tutma torkundaki azalmanın yanı sıra diğer çıkış parametrelerindeki düşüş de dikkate alınmalıdır. Tutma torkunu azaltmak ve çıkış gücü ve yük hat gerilimi gibi parametrelerde bazı iyileştirmeler yapmak için diğer bir yol da, kabul edilebilir bir aralık içinde mıknatıs yayı / kutup yayı oranı (embrace) değiştirmektir. Bu yüzden, mıknatıs yayı/kutup yayı oranı 0.5-1 aralığında 0.02 adımla parametrik olarak çözdürülerek bu oranın generatörün belirli parametrelerine (yük hat gerilimi, verim, çıkış gücü ve tutma torku) etkisi Şekil 3.19'da görüldüğü gibi elde edilmiştir.



Şekil 3.19. Mıknatıs yayı/kutup yayı oranının çıkış parametreleri üzerine etkisi.

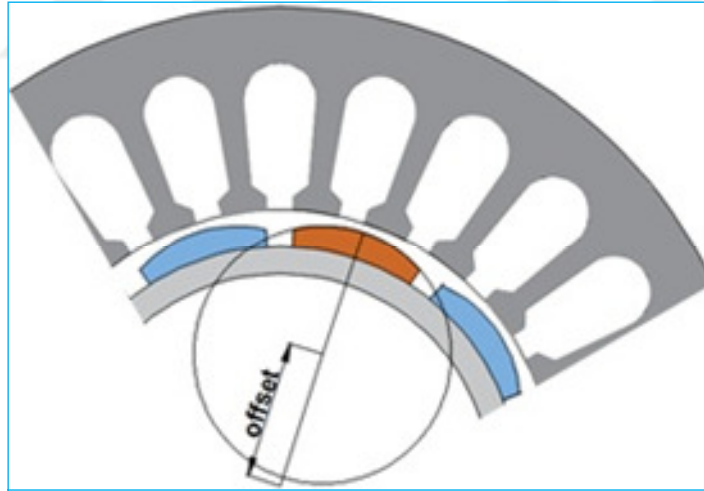
Günümüzde elektrik makineleri uygulamalarında genel olarak yüksek enerji yoğunluğuna sahip mıknatıslar kullanılmaktadır. Yapılacak olan generatör tasarımında aynı şekilde yüksek enerji yoğunluğuna sahip (NdFeB) mıknatıs kullanılacaktır. Kullanılacak olan mıknatısın akı yoğunluğu ( $B_m$ ) 1.23 T'dır. Mıknatıs kalınlığı seçimindeki önemli faktörlerden birisi mıknatıssızlaştırma olmayacak kadar kalın seçilmesidir [117]. Fakat öte yandan, kalınlık maliyeti artıran bir faktördür.

Tasarımda maliyet/verim oranı da göz önünde bulundurulacağı için uygun bir boyut belirlemek gereklidir. Mıknatıs kalınlığı için 3mm-10mm arasında 0.2mm aralıklarla parametrik çözüm gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen çözümlerde mıknatıs kalınlığının uç gerilimine, çıkış gücüne, verime ve tutma torkuna etkisi Şekil 3.20'de verilmiştir.

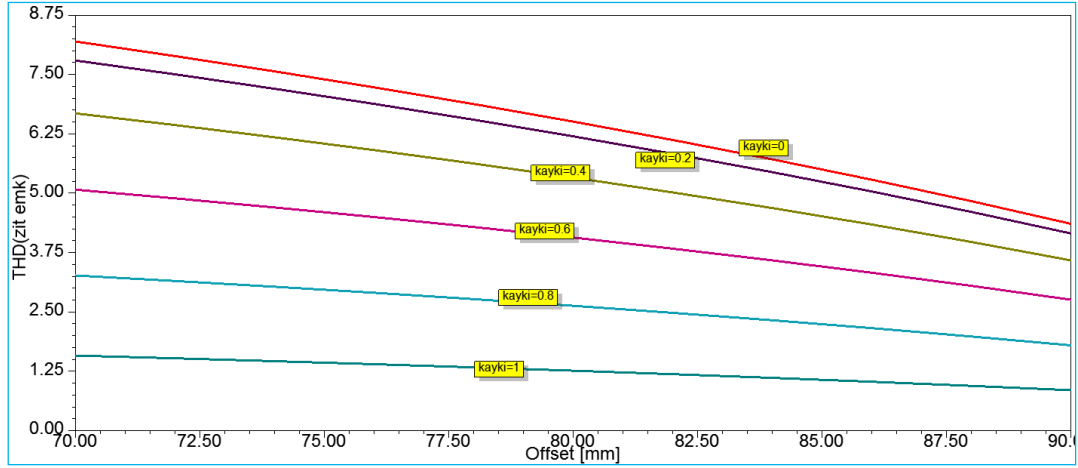


Şekil 3.20. Değişen mıknatıs kalınlığının çıkış parametreleri üzerine etkisi.

Zık emk'in kalitesi, Şekil 3.21'de gösterildiği gibi yay biçimli mıknatıs kullanılarak artırılabilir. Değişken ofset ve kaykı işleminin zıt emk'in THD'si (total harmonic distortion) üzerine etkisi Şekil 3.22'de görülmektedir. Zıt emk'in THD değerinin offset ve kaykı değerleri arttıkça azaldığını açıkça görülmektedir.



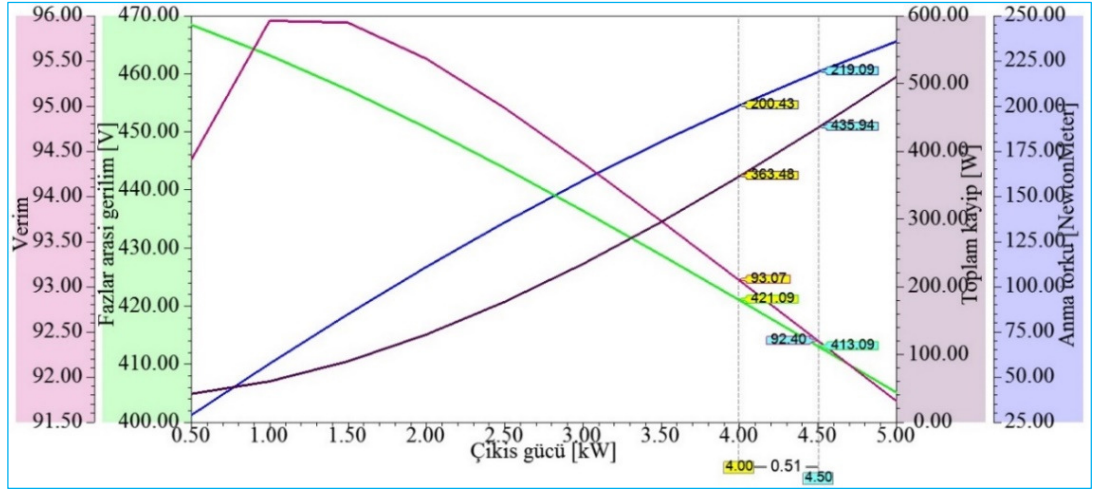
Şekil 3.21. Mıknatıs ofsetine göre optimizasyon.



Şekil 3.22. Değişken kayk ve offset işleminin zıt emk'in THD'si üzerine etkisi.

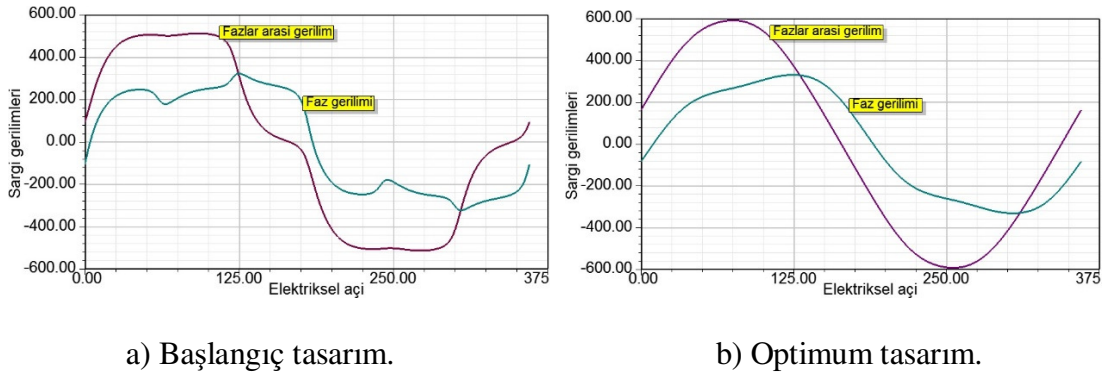
Bu çalışmada 4 kW'lık generatör için değişken parametreler olarak seçilen kutup yayı/mıknatıs yayı oranı  $\alpha_m$ , mıknatıs kalınlığı ve oluk açıklığının generatör çıkış parametrelerine etkileri araştırılmıştır. Buna göre embrace için en optimum değer 0.92 bulunmuştur. Mıknatıs kalınlığının uç gerilimine, çıkış gücüne, verime, tutma torkuna ve kayıplara etkisi olduğundan, bu parametreler göz önünde bulundurularak, parametrik analizler ile uygun mıknatıs kalınlığı belirlenmiştir. Mıknatıs kalınlığı analizlerinde makinenin çok geniş bir çalışma aralığında çalıştığı görülmüştür. Fakat maliyet ve makinenin çıkış değerleri göz önünde bulundurularak mıknatıs kalınlığı 5 mm seçilmiştir. Ayrıca oluk açıklığının, iletkenlerin kolaylıkla oluklara yerleştirilebilecek büyüklükte olması gereklidir. Çok küçük oluk açıklığında ise kaçak akımlar oluşabilmektedir. Oluk açıklığının büyük olması durumunda ise tutma torku artmaktadır. Bütün bu sınırlar doğrultusunda oluk açıklığı 2.2 mm olarak belirlenmiştir.

Bu çalışmada çok amaçlı optimizasyonlar (multi\_objective optimizations) sonucu elde edilen parametreler sabit tutularak, anma hızında (250 d/d.) farklı yük koşulları için yapılan analizde elde edilen çıkış parametreleri gayet tatmin edici bulunmuştur (Şekil. 3.23).

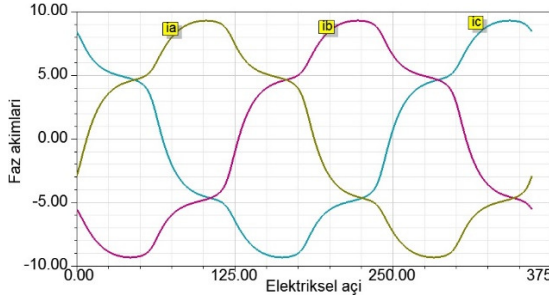


Şekil 3.23. Optimizasyon parametrelerinin generatör performansına etkisi.

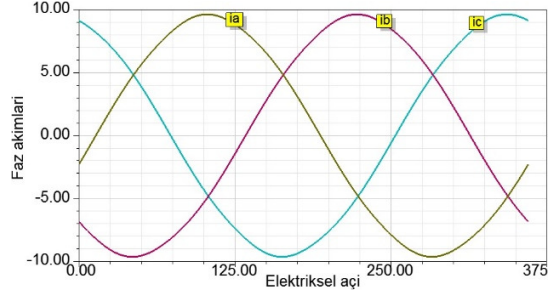
Analitik hesaplamalar sonucu elde edilen ve RMxpert'de oluşturulan generatör modeli ve optimizasyon sonucu elde edilen optimum generator modeline ait çıkış eğrileri Şekil 3.24 - Şekil 3.27'de görülmektedir. Sırasıyla Şekil 3.24 ve 3.25'te generatör nominal hızda (250 d/d) ve tam yük altında (omik  $36\Omega$ ) iken elektriksel açıya bağlı olarak sargı akımlarının ve gerilimlerinin değişim grafiği verilmiştir. Ayrıca sırasıyla Şekil 3.30 ve 3.31'de ise nominal hızda generator boşta çalışırken sargılarda indüklenen gerilimin ve mıknatıslardan kaynaklı tutma torkunun elektriksel açıya bağlı olarak değişim grafiği verilmiştir. Analiz sonuçları incelendiğinde generator, tasarım için verilen teknik özellikleri karşılamaktadır. Optimum ve başlangıç tasarımına ait sonuçlar karşılaştırıldığında, optimum tasarım sonuçlarının sinüse daha yakın bir eğri karakteristiği sunduğu grafiklerden açıkça görülmektedir.



Şekil 3.24. Sargı gerilimlerinin karşılaştırılması.

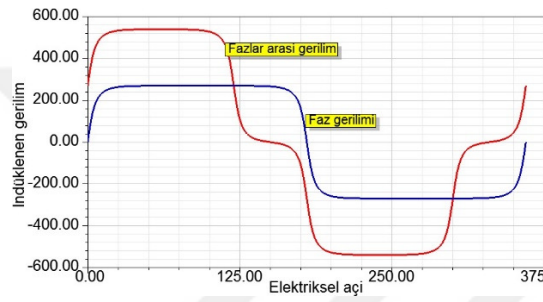


a) Başlangıç tasarımı.

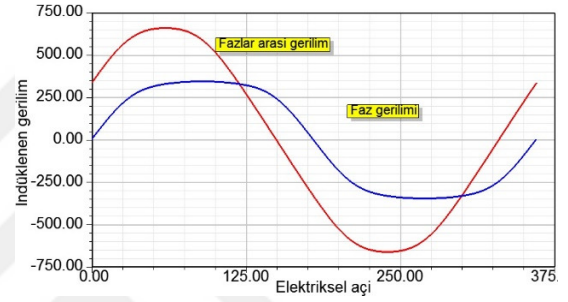


b) Optimum tasarımı.

Şekil 3.25. Sargı akımlarının karşılaştırılması.



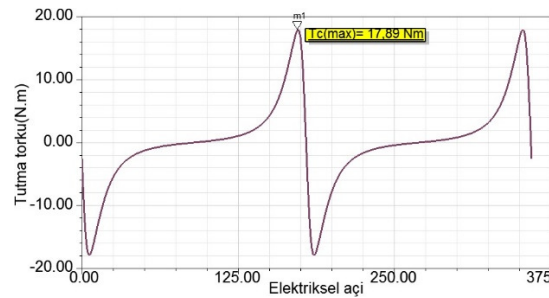
a) Başlangıç tasarımı.



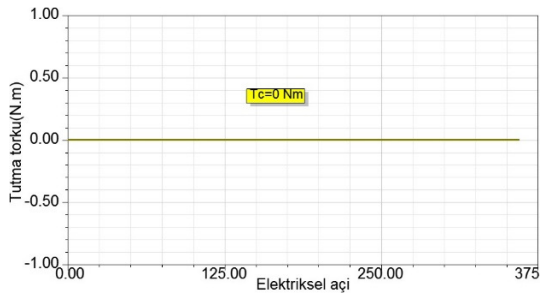
b) Optimum tasarımı.

Şekil 3.26. Sargıda indüklenen gerilimlerin karşılaştırılması.

Ayrıca başlangıç tasarımda elde edilen tutuma torku pik değeri 17,89 Nm iken optimum tasarımda bu değer 0 Nm olarak ortaya çıkmaktadır. Bu değer, analitik yaklaşımların sonucu olarak her ne kadar 0 Nm olarak elde edilse de gerçek değer bir sonraki bölümde 2D ve 3D analizler kullanılarak sunulmuştur.



a) Başlangıç tasarımı.



b) Optimum tasarımı.

Şekil 3.27. Tutma torkunun karşılaştırılması.

İç rotorlu KMSG'e ait analitik hesaplamalar gerçekleştirildikten sonra parametrik analizler ile temel boyutlandırma çalışmaları sonlandırılmıştır. Analitik hesaplamalar ile elde edilen sonuçlar ile optimum generator boyutları Çizelge 3.9'da verilmiştir.

Çizelge 3.9. Generatöre ait başlangıç ve optimum değerlerin karşılaştırılması.

a) Boyutlar.

| Parametre                    | Başlangıç | Optimum  |
|------------------------------|-----------|----------|
| Stator dış çapı ( $D_o$ )    | 362,44 mm | 370 mm   |
| Stator iç çapı ( $D_{is}$ )  | 280 mm    | 280 mm   |
| Rotor dış çapı ( $D_r$ )     | 269,22 mm | 278 mm   |
| Rotor iç çapı ( $D_{ri}$ )   | 258,22 mm | 257 mm   |
| Mıknatıs kalınlığı ( $h_m$ ) | 4,39 mm   | 5 mm     |
| Toplam ağırlık               | 37,48 kg  | 35,63 kg |
| Stator kutup sayısı          | 24        | 24       |
| Stator oluk sayısı           | 72        | 72       |
| Faz başına spir sayısı       | 648       | 672      |
| Stator gövde uzunluğu        | 85 mm     | 85 mm    |
| Mıknatıs açıklığı (Embrace)  | 1         | 0,92     |
| Mıknatıs eğimi (Offset)      | 0         | 80       |

b) Stator oluk boyutları.

| Parametre                | Başlangıç           | Optimum               | Geometri |
|--------------------------|---------------------|-----------------------|----------|
| Oluk boyutu ( $h_{s0}$ ) | 0,5 mm              | 1 mm                  |          |
| Oluk boyutu ( $h_{s1}$ ) | 1 mm                | 1,5 mm                |          |
| Oluk boyutu ( $h_{s2}$ ) | 17,74 mm            | 20,54 mm              |          |
| Oluk boyutu ( $b_{s0}$ ) | 2 mm                | 2,2 mm                |          |
| Oluk boyutu ( $b_{s1}$ ) | 7,58 mm             | 6,94 mm               |          |
| Oluk boyutu ( $b_{s2}$ ) | 10,52mm             | 8,73 mm               |          |
| Oluk alanı               | 204 mm <sup>2</sup> | 190,9 mm <sup>2</sup> |          |
| İletken çapı             | 1,35 mm             | 1,1 mm                |          |
| Kaykı genişliği          | 0 oluk              | 1 oluk                |          |

Çizelge 3.9. (devam ediyor)

c) Çıkış değerleri.

| Parametre             | Başlangıç              | Optimum                |
|-----------------------|------------------------|------------------------|
| Yük hat gerilimi      | 389 V                  | 421                    |
| Hat akımı             | 6,22 A                 | 6,73 A                 |
| Elektriksel yüklenme  | 27508 A/m              | 30867 A/m              |
| Stator akım yoğunluğu | 2,17 A/mm <sup>2</sup> | 3,54 A/mm <sup>2</sup> |
| Toplam kayıp          | 208 W                  | 363 W                  |
| Çıkış gücü            | 4,17 kW                | 4,88 kW                |
| Verim (%)             | 95,25                  | 93,07                  |
| Güç faktörü           | 0,94                   | 0,98                   |
| Nominal Tork          | 167,404 Nm             | 200,5 Nm               |
| Kısa devre akımı      | 33,73 A                | 26,9 A                 |
| Tutma torku           | 17,89 Nm               | 0                      |
| THD (zık emk)         | 19,56 %                | 1,26 %                 |

Çizelge 3.9b’de stator oluk yapısı ve boyutuna ait karşılaştırmalı sonuçlar görülmektedir. Stator dış çapının belirlenmesi için oluk boyutlarının belirlenmesi gereklidir. Stator boyutlarının belirlenmesindeki bir diğer parametre ise oluk açıklığı değeridir. Çizelge 3.9c incelendiğinde analitik hesaplamayla elde edilen değerler üzerindeki ufak iyileştirmeler ile generatörün en uygun çıkış değerleri elde edilmiştir.

## BÖLÜM 4

### ANALİZ SÜRECİ

#### 4.1. KMSG’NİN ANALİTİK MODELİ

Elektrik makinelerinin tasarımı, farklı konfigürasyonların seçimine dayanan geometrik boyutların seçimi, malzemeler, parametre hesaplamaları gibi bir dizi iteratif hesaplama gerektirir [128]. Elektrikli makineler genelde analitik olarak makine geometrisinin ve makinenin malzeme özelliklerinin bazı tahminleri ve basitleştirmeleri temelinde modellenir [129]. Makinenin boyutlarını ve malzemeleri belirlendikten sonra tasarlanan makinenin performansının hesaplanması gerekir. Makinenin performansı beklentileri karşılamadığı takdirde tasarımcının makine performansını artırmak için tasarımı değiştirmesi gerekir [128].

Makinelerinin performansını ölçmek amacıyla, genellikle sonlu elemanlar analiz (SEA) yöntemi gibi nümerik yaklaşımlar, üretim işleminden önce optimum makine tasarımını elde etmek için kullanılırlar [130]. Fakat nümerik çözümler genellikle makinelerin özelliklerini analiz etmek için daha uzun hesaplama süresi gerektirir ve tekrarlı bir tasarım prosedürünü uygulamak için uygun değildir [128,131]. Diğer taraftan, analitik yöntemler de SEA ile karşılaştırıldığında önemli ölçüde daha kısa bir zaman içinde hassas çözüm sağlayabilir [128,130]. Bu yüzden çoğu tasarımcı başlangıçta, makine parametreleri veya basitleştirilmiş analitik modeller için ampirik ilişkiler kullanır ve daha sonra, daha iyi performans değerlendirmesi için tasarımın ikinci aşamalarında SEA kullanır [128].

Hava aralığı manyetik alan yoğunluğu, makina performansının değerlendirilmesinde değerli bilgiler sağlar. Manyetik alan yoğunluğunun bilgisi sadece makine performansının hesaplanmasına imkan sağlamaz, aynı zamanda tutma torku, torkdaki dalgalanmalar, zıt emk dalga şekli gibi etkilerin hesaplanmasına da imkan verir [128].

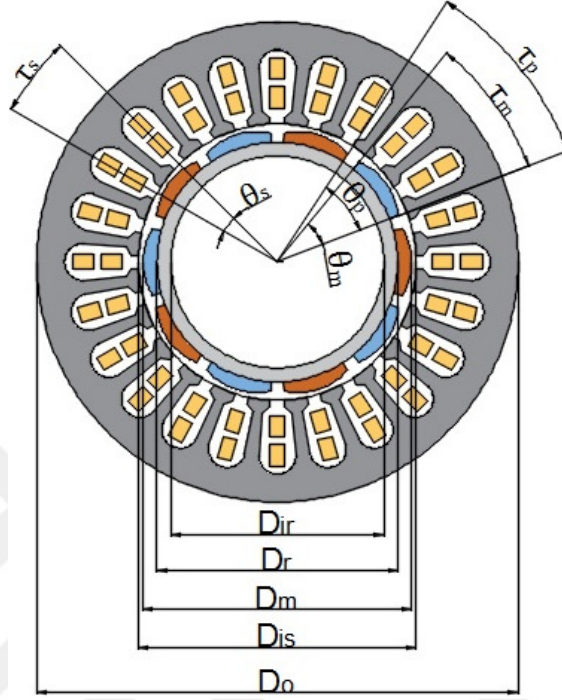
Hava aralığı alan yoğunluğunu değerlendirmek için bazı analitik çözüm modelleri geliştirilmiştir. Alt alan modeli [130,132-138], bağıl geçirgenlik modeli [132,139-142] ve konformal dönüşüm modeli [143-147] hava aralığı manyetik alan hesabında genellikle kullanılan yöntemlerdir. Bu analitik yöntemlerin hepsinde hava aralığındaki manyetik alan, KM'in alan uyartım kuvvetini temsil eden birinci fonksiyonun bir ürünü olarak hesaplanır [133]. Kaynak [134]'de KM makinelerine uygulanan analitik modeller üzerine kapsamlı inceleme gerçekleştirilmiştir. KM makinalarda manyetik alanı tahmin etmek için oluk etkilerini ve stator dışını dikkate alan veya almayan çeşitli metodlar geliştirilmiştir [130]. Zhu vd. (1993), hava aralığı akı yoğunluğunu oluk etkili 2D bağıl geçirgenlik fonksiyonunu kullanarak ifade etmiştir. Oluk etkili hava aralığı akı yoğunluğunu, oluksuz hava aralığı akı yoğunluğunu bağıl geçirgenlik fonksiyonu ile çarparak elde etmiştir [143]. Zarko vd. (2006), kaynak [143]'den farklı olarak, her bir noktanın konformal dönüşüm ile tahmin edildiği karmaşık bağıl geçirgenlik fonksiyonunu önermektedir. Burada tüm karmaşık bağıl geçirgenlik dalga şekli hesaplandığından, oluk etkisini açıklamak için elde edilen hava aralığı akı yoğunluğu kaynak [143]'ün bağıl manyetik geçirgenlik fonksiyonu ile karşılaştırıldığında, SEA sonuçları ile daha iyi bir eşleşme gösterir [145]. Diğer bir yöntem olan alt alan modeli de, önceden tanımlanmış sınır ve arayüz koşulları ile değişkenlerine ayırma tekniği kullanılarak tüm alt bölgelerde (hava aralığı bölgesi, KM bölgesi, oluk ve oluk açıklığı bölgesi) Poisson veya Laplas denklemlerinin direk çözümüne dayanır [130].

Bu çalışmada 2-boyutlu model (hem açısal konuma hem de radyal konuma bağlı olarak) üzerinde elde edilen bağıl geçirgenlik fonksiyonu kullanılarak ifade edilen hava aralığı akı yoğunluğu, zıt emk ve tutma torku parametreleri için bir çalışma sunulmuştur. Diğerlerinden farklı olarak, tutma torkunun azaltılmasına yönelik önerilen stator modeli için analizler gerçekleştirilmiştir.

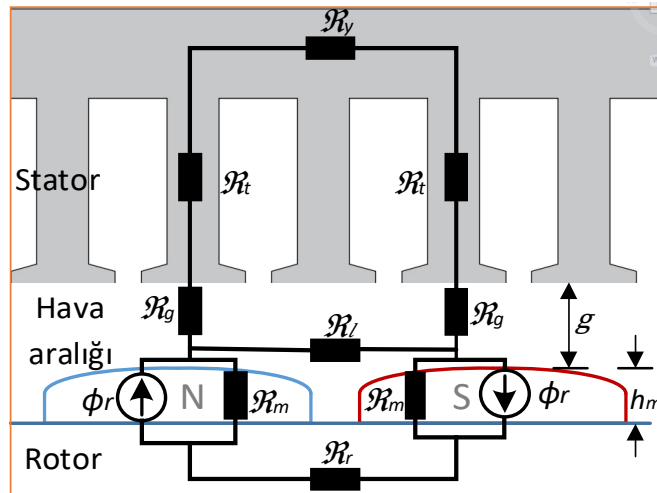
#### **4.2. MANYETİK DEVRE MODELİ**

Hava aralığı akı yoğunluğu, makine tasarımı ve performans tahmini için en önemli niteliklerden biridir [148]. Bu nedenle, hava aralığı akı yoğunluğunu elde etmek için Şekil 4.1b'deki manyetik devre modeli kullanılmaktadır. Bu yapıda, hava aralığı

dönme eksenine diktir. Basit yapı nedeniyle KM'lar rotor yüzeyine yerleştirilerek oluşturulmuştur. Şekil 4.1'de gösterilen generatör kesitini örnek olarak verilmiştir. Burada rotor, hava aralığına bakan mıknatıs kutuplarından ( $N_m=10$ ) oluşmaktadır.



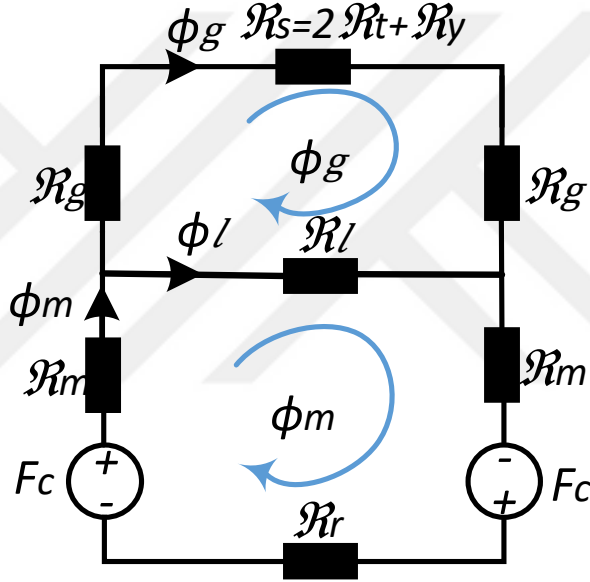
a) KMSG'nin yapısı.



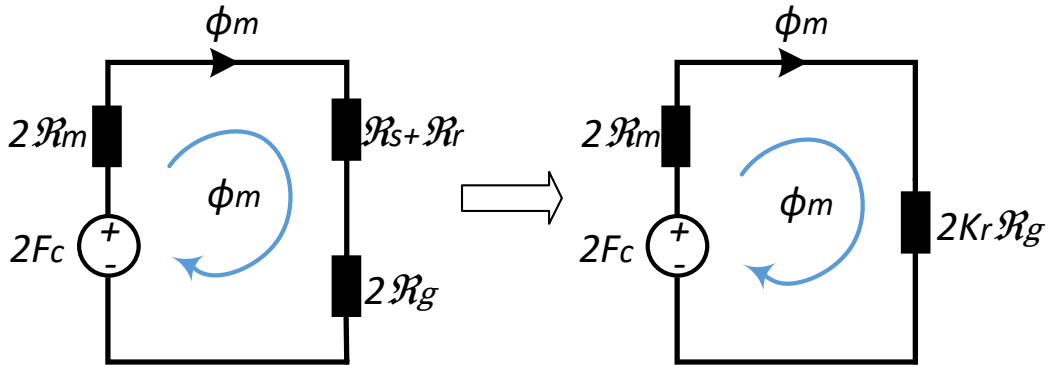
b) Doğrusal yapı ve manyetik devre modeli.

Şekil 4.1. Radyal akıllı rüzgâr generatörünün yapısı.

İlk olarak, temel akı yollarını tanımlamak ve manyetik devrenin relüktanslarını belirlemek gerekir. Kuzey kutuplarından hava aralığına çıkan mıknatıs akısı statora geçer ve tekrar hava aralığından güney kutuplarına doğru geçecek şekilde hava aralığında her biri zıt yönde hareketeden iki eşit bölüme ayrılır. Bu nedenle, generatörün manyetik devresi, stator boyunduruk relüktansı  $\mathcal{R}_y$ , stator dış relüktans  $\mathcal{R}_t$ , hava aralığı relüktansları  $\mathcal{R}_g$ , mıknatıs relüktansları  $\mathcal{R}_m$  ve mıknatıslar ile rotor boyunduruğu relüktansları  $\mathcal{R}_r$  arasındaki kaçak relüktans  $\mathcal{R}_l$  olmak üzere beş kısma ayrılmıştır. Relüktanslar Şekil 4.1b'de gösterildiği gibi bir kutup adımı içerisinde bulunur.



a) Tüm model.



b) Sadeleştirilmiş model.

Şekil 4.2. Manyetik eşdeğer devre [108].

Şekil.4.2, relüktans model (RM) olarak adlandırılan eşdeğer manyetik devreyi ve basitleştirilmiş modelini göstermektedir. Bu gösterimde, stator ve rotorlu nüveleri sırasıyla  $\mathcal{R}_s$ ,  $\mathcal{R}_r$  relüktansı ve devrenin üç akısı, mıknatıs akısı  $\phi_m$ , hava aralığı akısı  $\phi_g$  ve sızıntı akı  $\phi_l$  olarak modellenmiştir.  $\mathcal{R}_s$ , stator boyunduruk relüktansı ve stator dış relüktansını içerir. Bu model için, manyeto motor kuvveti  $F_c$  ve kalıcı mıknatısların artık mıknatıslığı  $\phi_r$ , mıknatıslanma eğrisine göre aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$F_c = h_m H_c \quad (4.1)$$

$$\Phi_r = B_r A_m \quad (4.2)$$

Çizelge 4.1. KMSG için malzeme özellikleri.

| Malzeme                                   | Özellik                 |
|-------------------------------------------|-------------------------|
| Stator gövdesi                            | Alüminyum               |
| Stator nüvesi                             | M19 (M310-50A)          |
| Rotor gövdesi                             | SD52                    |
| Şaft                                      | ASTM316 Paslanmaz çelik |
| Mıknatıs (NdFeB)                          | N40SH (nikel-kaplama)   |
| Artık mıknatıslı akı yoğunluğu $B_r$ (T)  | 1.28                    |
| Bağıl geçirgenlik $\mu_{rec}$             | 1.05                    |
| Mıknatıslığı giderici kuvvet $H_c$ (kA/m) | 989                     |
| Sıcaklık (mak. °C)                        | 150                     |

Akı malzeme özelliklerine ve mıknatıs boyutlarına bağlıdır. Burada,  $A_m$  mıknatıs kutup alanı ve  $H_c$ , mıknatıslığı giderici alan şiddetidir (Çizelge 4.1). Zıt emk'yı hesaplamak için önce hava aralığı akı yoğunluğu  $B_g$  belirlenmelidir. Hava aralığı akısı, mıknatıs akı açısından  $\phi_g = K_{lm} \phi_m$  olarak elde edilebilir. Burada  $K_{lm}$ , yüzey mıknatısları için tipik olarak 0,9 ila 1,0 aralığında olan kaçak akı katsayısı olarak ifade edilir [108]. Bazı kaynaklarda [124,149]; hava aralığı akısının mıknatıs akısına oranı olarak tanımlanır:

$$K_{lm} = \frac{\Phi_g}{\Phi_m} = \frac{\Phi_g}{\Phi_g + \Phi_l} < 1 \quad (4.3)$$

Başka bir çalışmada [104]; bu parametre, mıknatıs akısı ile hava aralığı akısının ( $K_{lm} > 1$ ,  $\phi_g = \phi_m / K_{lm}$ ) oranı olarak tanımlanmıştır. Ardından kaçak relüktans  $\mathcal{R}_l$  ve nüve relüktansları ( $\mathcal{R}_s$  ve  $\mathcal{R}_r$ ), relüktans faktör  $K_r$  ile ortadan kaldırmak suretiyle manyetik devre Şekil 4.2b'de gösterildiği gibi basitleştirilebilir. Manyetik akı, Kirchhoff'un gerilim kanunu (KGK) olarak adlandırılan elektrik devresi prensipleri Şekil 4.2b'deki devreye uygulanarak Eşitlik 4.4'te verildiği gibi elde edilebilir.

$$\Phi_m = \frac{2F_c}{2\mathcal{R}_m + 2K_r\mathcal{R}_g} = \frac{2\mathcal{R}_m}{2\mathcal{R}_m + 2K_r\mathcal{R}_g} \Phi_r \quad (4.4)$$

$\phi_g = K_{lm}\phi_m$ ,  $B_g = \phi_g / A_g$  ve  $B_r = \phi_r / A_m$ , akı yoğunluğu ilişkilerine dayanarak hava aralığı akı yoğunluğu elde edilebilir (Eşitlik 4.5) [108,124,149,150].

$$B_g = \frac{K_l}{1 + K_r \frac{\mathcal{R}_g}{\mathcal{R}_m}} \frac{A_m}{A_g} B_r \quad (4.5)$$

Burada  $B_r$  artık mıknatıslık akı yoğunluğudur,  $\mu_{rec}$  ise mıknatıslığı giderme eğrisi boyunca kalıcı bir mıknatısın bağıl geçirgenliğidir (Çizelge 4.1). Mıknatıs ve hava aralığı relüktansları sırasıyla [108,124,149,150];

$$\mathcal{R}_m = \frac{h_m}{\mu_{rec}\mu_0 A_m} = \frac{h_m}{\mu_{rec}\mu_0 \tau_m L_{stk}} \quad (4.6)$$

$$\mathcal{R}_g = \frac{g}{\mu_0 A_g} = \frac{g}{\mu_0 \tau_p L_{stk}} \quad (4.7)$$

Burada,  $A_m$  mıknatıs kesit alanı,  $A_g$  bir kutup yayının hava aralığı kesit alanı,  $\tau_m$  mıknatıs yayı ve  $\tau_p$  kutup yayıdır [151]. Böylelikle, Eşitlik 4.6 ve Eşitlik 4.7'deki

relüktans ifadeleri Eşitlik 4.5'te yerine koyulursa, hava aralığı akı yoğunluğu aşağıdaki gibi yazılabilir [108,124,149,150].

$$B_g = \frac{K_l C_\phi}{1 + K_r \frac{\mu_{rec}}{P_c}} B_r \quad (4.8)$$

Burada  $C_\phi$  akı yığma faktörü ( $C_\phi = A_m / A_g$ ) ve  $P_c$  geçirgenlik katsayısı ( $P_c = h_m / (g C_\phi)$ ); manyetik devredeki kalıcı mıknatısın çalışma noktasıdır. Eşitlik 4.8, oluksuz generatör modeli için hava aralığından geçen hava aralığı akı yoğunluğunu tanımlar. Burada generatör yüzey yerleştirmeli mıknatıs yapısı ile birlikte ele alındığında kaçak faktörü tipik olarak  $0,9 < K_l < 1,0$  aralığındadır, relüktans faktörü ise  $1,0 < K_r < 1,2$  aralığındadır ve akı yığma faktörü ideal olarak 1,0'dır. Bu değerler sabit olarak kabul edilir ve  $B_r$ , mıknatıs seçimi ile sabitlenirse, geçirgenlik katsayısı  $P_c$  hava aralığı akı yoğunluğunun genliğini belirler. Geçirgenlik katsayısı arttıkça, hava aralı akı yoğunluğu maksimuma yaklaşır ki bu da artık mıknatıslık değerinden biraz daha düşüktür. Akı yığma katsayısı olmadan,  $B_r$ 'den daha büyük bir hava aralığı akı yoğunluğu  $B_g$  elde etmek mümkün değildir. Ayrıca, geçirgenlik katsayısı ile hava aralığı akı yoğunluğu arasındaki ilişki doğrusal değildir. Eşitlik 4.8 mıknatıs kutbunun yüzeyi üzerindeki hava aralığı akı yoğunluğunun yaklaşık çözümüdür. Bu yaklaşım tam olarak değilse de, oluklu yapının ilave edilmesiyle, makinenin performansı için değerli bilgiler verir [108].

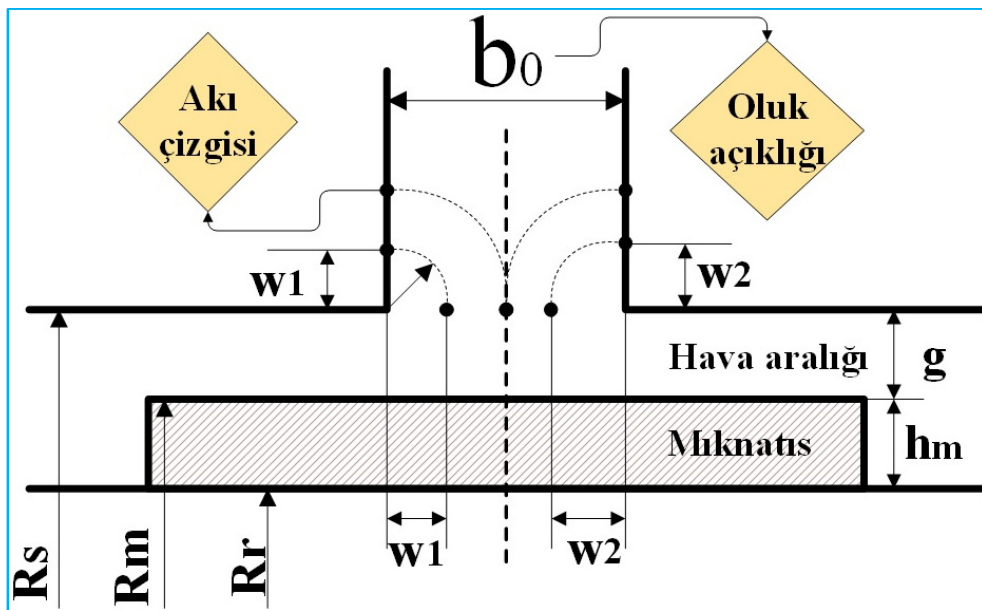
#### 4.2. HAVA ARALIĞI MANYETİK ALAN DAĞILIMI

Hava boşluğu ve mıknatıs bölgelerindeki manyetik alana ilişkin önceki bölümdeki açıklamalar, hava aralığındaki stator yüzeyinin sonsuz olarak geçirgen olduğu oluksuz bir durum için geçerlidir. Bu bölümdeki oluklu çözüm modelinde, manyetik alan oluk yerleşiminin yanı sıra mıknatıs özellikleri ve geometrik boyutların bir fonksiyonudur. Makinenin kalıcı mıknatıs alan yoğunluğu stator oluğundan etkilenir. Bu çalışmada oluk etkisiz hesaplanan manyetik alan dağılımı, uygun bir şekilde olukların dâhil edilmesiyle elde edilen bir fonksiyon dikkate alınarak tekrar ifade edilmiştir. Olukların varlığı, hava aralığı ve mıknatıs bölgelerinde manyetik alanı değiştirir veya bozar;

manyetik alan, oluklar arasındaki yarıçapın veya mesafenin bir fonksiyonu olarak değişir [108].

Çalışmanın kolaylığı için bazı varsayımlar dikkate alınmıştır:

- Kalıcı mıknatısların radyal olarak mıknatıslanması.
- Stator olukları dikdörtgen veya trapezoidal olarak basitleştirilmiştir.
- Ferromanyetik malzeme doğrusal bir B-H eğrisine sahiptir.
- Doyum ihmal edilmiştir.
- Mıknatıslar dikdörtgen şeklindedir.
- Mıknatıslar arasındaki mesafe, mıknatıslarla aynı geçirgenliğe sahiptir.
- Mıknatıslar tarafından üretilen manyetik alan, pürüzsüz bir stator yüzeyi varsayılarak 2 boyutlu bir çözümden elde edilir, yani oluk etkisi ihmal edilir.
- Manyetik alan dağılımı, mıknatıslar tarafından üretilen manyetik alan ve bağlı geçirgenlikten saptanır.
- Hava aralığı geçirgenliği, bir mıknatısın bir stator dişine baktığı yerde akının mıknatıs ve hava aralığından düz bir çizgi şeklinde ve mıknatıs bir oluk açıklığına baktığı pozisyonda bir dişin köşesinden merkezlenmiş dairesel bir yoldan geçtiği varsayılan bir alan modeline göre hesaplanır (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. Tahmini hava aralığındaki akı yolu.

#### 4.2.1. Mıknatıs Tarafından Üretilen Manyetik Alan

Mıknatıslara bağlı manyetik alan, düz bir stator yüzeyi varsayarak, silindirik bir koordinat sisteminde modellenmiş iki boyutlu bir çözümünden elde edilir [152]. İkinci çeyrek doğrusal mıknatıslanma karakteristiğine sahip mıknatıslarla donatılmış çok kutuplu bir makine için, mıknatıslanma vektörünün genliği (radyal olarak mıknatıslanma), Fourier serisi ile ifade edilebilir [152,153];

$$M = \frac{B_r}{\mu_0} \rightarrow M = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} M_n \cos(np\theta) \quad (4.9)$$

$$M_n = 2 \frac{B_r}{\mu_0} \alpha_p \frac{\sin \frac{n\alpha_p \pi}{2}}{\frac{n\alpha_p \pi}{2}} \quad (4.10)$$

Burada  $p$  kutup çifti sayısı,  $\alpha_p = \tau_m / \tau_p$  mıknatıs yayı / kutup yayı oranı ve  $\theta$  bir mıknatıs kutbunun merkezine referanslı açısal konumdur. Makinenin iç yarıçapında, yani  $r = R_s$  için, iç rotorlu makinelerde oluk etkisiz akı yoğunluğunun radyal bileşeninin genel ifadesi polar koordinat sisteminde hava aralığı manyetik potansiyel dağılım denklemlerinin çözümünden elde edilir [108,128,152,153].

$$B_{g1}(\theta) = \frac{2B_r}{\mu_r} \cdot \frac{\sin\left(\frac{\pi\alpha_p}{2}\right)}{n\pi} \cdot \left[ \frac{\left(\frac{R_m}{R_s}\right)^2 - \left(\frac{R_r}{R_s}\right)^2 + \left(\frac{R_r}{R_s}\right)^2 \cdot \ln\left(\frac{R_m}{R_r}\right)}{\frac{\mu_r + 1}{\mu_r} \left[1 - \left(\frac{R_r}{R_s}\right)^2\right] - \frac{\mu_r - 1}{\mu_r} \left[\left(\frac{R_m}{R_s}\right)^2 - \left(\frac{R_r}{R_m}\right)^2\right]} \right] \cdot \left[ 1 + \left(\frac{R_s}{r}\right)^2 \right] \cdot \cos(\theta) \quad (4.11)$$

Eşitlik 4.11’de,  $R_s$  stator yüzeyindeki yarıçapı,  $R_m$  mıknatıs yüzeyindeki yarıçapı,  $R_r$  rotor gövdesinin yarıçapını ve  $r = ((R_s + R_m)/2)$ ’yi ifade eder. Oluk etkisi dikkate alındığında;

$$B_{gs}(\theta) = B_{g1}(\theta) \cdot f_p(\theta) \quad (4.12)$$

#### 4.3. ZIT EMK

Zıt emk, hava aralığında değişken manyetik alan tarafından stator sargılarında indüklenen gerilimdir. Zıt emk’nın elde edilmesi ile ilgili iki genel tanımlama vardır. Bunlardan birincisi, zıt emk’yı sadece rotor manyetik alanın etkisi olarak görür. Diğeri ise, zıt emk’nın bir parçası olarak sargılar arasındaki karşılıklı ve öz indüklemeyen oluşan gerilimi içerir [128]. Bilindiği gibi bir devrede (birincil) üretilen değişen manyetik alan, bir ikinci devrede (ikincil) değişen gerilim ve akım indükleyebilir. İki devrenin ortak endüktansı  $M$ , birincil devredeki akım değişikliklerden kaynaklanan ikincil devredeki gerilimin boyutunu tanımlar. Bu çalışmada, ikinci tanım kullanılmıştır.

Bir fazın zıt emk değeri, o fazın her bobini tarafından indüklenen gerilimlerin toplamı olarak ifade edilebilir [128].

$$E_A(t) = - \sum_{j=1}^{Q_s} \frac{d\Phi_j}{dt} = - \sum_{j=1}^{Q_s} \frac{d \int_0^{b_{s0}} L \cdot B_j(t) dwl}{dt} \quad (4.13)$$

Burada  $\phi_j$  herhangi bir oluktaki manyetik akıdır. Eşitlik 4.17’nin sayısal ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$E_A(t) = \frac{L \cdot R_s \cdot \omega}{Q_s} \sum_{m=1}^{Q_s} \times \left[ B_{gs_n}(\theta + \omega t) + B_{A_n}(\theta) + B_{B_n}(\theta) + B_{C_n}(\theta) \right] \times sp(\theta) \quad (4.14)$$

Burada  $Q_s$ , stator oluk sayısıdır. Ayrıca;

- $sp(\theta)=1$ ;  $\theta_1$  A fazının oluğunda ve iletkenin akım yönü pozitifse.
- $sp(\theta)=-1$ ;  $\theta_1$  A fazının oluğunda ve iletkenin akım yönü negatifse.
- $sp(\theta)=0$ ; diğer koşullarda.

#### 4.4. ELEKTROMANYETİK TORK

KM makinalar, geleneksel makinalar ile karşılaştırıldığında sadece performansı artırmaz aynı zamanda tutma torkunu da artırır [132]. Literatürde tutma torkunu hesaplamak için manyetik alanın doğru sonucuna dayanan birçok analitik teknik geliştirilmiştir [128,132,133,144,146,154-160]. Genellikle dikdörtgen şekilli oluk varsayımına dayalı birleşik mıknatıs, hava aralığı ve oluk bölgelerinde manyetik akı yoğunluğu dağılımını çözmeye dayalı analitik yöntemler kullanılmıştır. Bu, tutma torkunun hesaplanabilmesi için çok güvenilir bir analiz yöntemi sağlamıştır [158]. Kaynak [159]'de yüzey yerleştirmeli KM makinalarda tutma torkunun tahmini için geliştirilen analitik modeller karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırma temel zıt emk ve ortalama tork hesabında kullanılan analitik modellerin yüksek doğrulukta olduğu gösterilmiştir.

Tutma torkunu hesaplamak için kullanılan analitik metot genellikle stator oluklarındaki manyetik akı ve stator dışındaki doyumu ihmal eder. Tutma torku hesaplamaları, belirli bir tutma torku etkisini azaltma yöntemine bağlıdır. Tutma torku, rotor pozisyonuna bağlı olarak hava aralığında depolanan enerjinin değişim oranından veya hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğundan elde edilir [155]. Literatürde genellikle generatörün analitik modeli oluksuz ya da dikdörtgen oluk yapısı varsayımına dayandırılarak oluşturulmuştur. Bu çalışmada ise elektromanyetik tork ve tutma torku ifadeleri de zık emk'da olduğu gibi bağıl geçirgenlik fonksiyonu kullanılarak elde edilen hava aralığı akı yoğunluğu ve akım yoğunluğunun etkileşimi kullanılarak elde edilmiştir.

Elektromanyetik tork, her oluk için akım-alan etkileşimi tarafından üretilen torkların toplamı olarak hesaplanabilir [128].

$$T_{em}(\theta_1) = r \cdot L \sum_{j=1}^Q \int_0^{b_{s0}} B_{gs}(w1) \cdot J(w1) dw1 \quad (4.15)$$

Eşitlik 4.19 sayısal olarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$T_{em}(\theta_1) = \frac{2\pi r^2 L}{Q} \sum_{m=1}^Q B_{gs_m} \left( \frac{2\pi}{Q} m + \theta_1 \right) \cdot J \left( \frac{2\pi}{Q} m + \theta_1 \right) \quad (4.16)$$

Burada,

- $J((2\pi/Q)+\theta)=i_a/b_{s0}$ ;  $\theta$  A fazının oluğunda ve iletkenin akım yönü pozitifse.
- $J((2\pi/Q)+\theta)=-(i_a)/(b_{s0})$ ;  $\theta$  A fazının oluğunda ve iletkenin akım yönü negatifse.
- $J((2\pi/Q)+\theta)=0$ ; oluk açıklığının dışındaki pozisyonlarda.
- B ve C fazı için de aynı durumlar söz konusudur.

Tutma torku, oluk açıklığı nedeniyle sabit olmayan hava aralığı relüktansından kaynaklanan torktur (diğer bir deyişle, rotorun düşük manyetik alan yollarıyla hizalanma eğiliminden dolayı) [128]. Tutma torku, Şekil 4.3'te gösterildiği gibi, dış duvarlarına giren akılar tarafından üretilir (Eşitlik 4.21). Alternatif olarak, tutma torku boş stator akımları ile açısal pozisyonunda manyetik enerjinin değişim oranı olarak hesaplanabilir.

$$T_{cog}(\theta_1) = \frac{L}{2\mu_0} \cdot \sum_{m=1}^Q \left[ \begin{aligned} & \left( \int_0^{b_{s0}/2} B_{gs_m}^2(w1) \cdot (R_s + w1) dw1 \right) \\ & - \left( \int_{b_{s0}/2}^{b_{s0}} B_{gs_m}^2(w2) \cdot (R_s + w2) dw2 \right) \end{aligned} \right] \quad (4.17)$$

Tutma torku, bir Fourier serisi açılımı kullanılarak aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$T_{cog}(\theta_1) = \sum_{k=1}^{\infty} T_k \sin(kQ\theta_m + \theta_1) \quad (4.18)$$

Burada  $\theta_m$  olukların açısal pozisyonu,  $\theta_l$  ise rotordaki açısal yer değiştirmedir.  $T_k$  katsayısı Eşitlik 4.21'den sayısal olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$T_k(\theta_1) = \frac{\pi \cdot L \cdot R_s}{2 \cdot \mu_0 \cdot Q} \cdot \sum_{m=1}^Q \left[ B_{gsm}^2 \left( \frac{2\pi}{Q} m + \theta_1 \right) \cdot (R_s + g_\theta) \cdot sp \right] \quad (4.19)$$

Burada,

- $sp=1$  ve  $g_\theta=w1+g$ ; pozisyon oluk açıklığının sol tarafında.
- $sp=-1$  ve  $g_\theta=w2+g$ ; pozisyon oluk açıklığının sağ tarafında.
- $sp=0$  ve  $g_\theta=0$ ; oluk açıklığı dışındaki pozisyonlarda.

#### 4.2.2. Endüvi Alanı

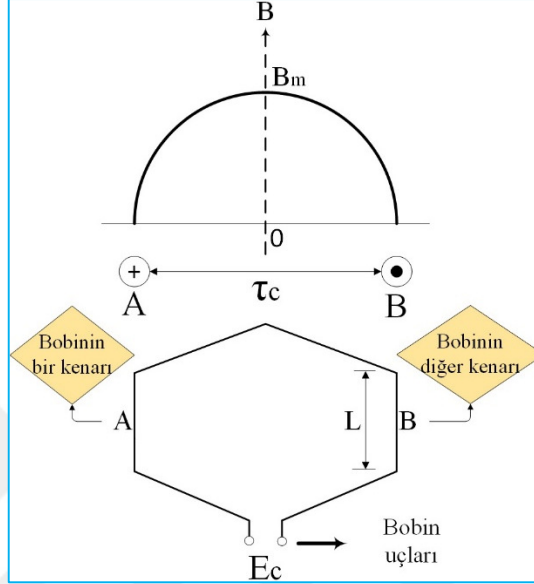
Sargı akımı tarafından üretilen manyetik alan endüvi reaksiyonu olarak bilinir. Endüvi reaksiyonu, stator oluklarındaki amper-sarım  $Ni$  tarafından üretilen manyetik alan ve bunun kalıcı mıknatıs alanı ile olan etkileşimi ifade eder. Yani bobin etrafındaki net manyetik alan, dış manyetik alanın ve bunun endüvi reaksiyonundan kaynaklanan süperpozisyonudur [108]. Bir fazın endüvi alan yoğunluğu, o fazın her bir bobiniyle oluşturulan alan yoğunluklarının bir toplamı olarak modellenenebilir [128].

Senkron generatörün stator sargısı olarak genellikle çift katmanlı özdeş sargılar kullanılır. Bu sargı türünde, her bir bobinin bir tarafı bir oluğun alt yarısına yerleştirilir ve aynı bobinin diğer tarafı bir başka oluğun üst yarısını yerleştirilir. Örneğin, üç fazlı, 12 kutuplu ve 36 oluklu bir generatörün (bu çalışmada önerilen modelin yarı simetrisi) A fazı için endüvi alanı aşağıdaki gibi türetilenebilir [128]:

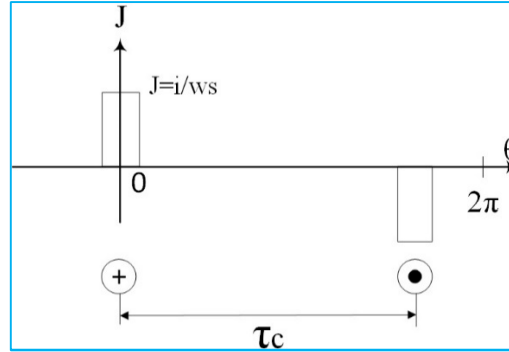
$$B_A(\theta) = B_{1-4}(\theta) + B_{7-10}(\theta) + B_{13-16}(\theta) + B_{19-22}(\theta) + B_{25-28}(\theta) + B_{31-34}(\theta) \quad (4.20)$$

Burada 1-4, 7-10, 13-16, 19-22, 25-28 ve 31-34 numaralı oluklara yerleştirilen 6 bobin, A fazı manyetik alanın oluşmasına katkı sağlar. Tek bir bobinin endüvi reaksiyon alan

yoğunluğunu hesaplamak için, bir önceki bölümde hava aralığı manyetik alanın hesabında olduğu gibi stator ilk önce oluk etkisiz olarak modellenir ve endüvi alanı hesaplanır. Daha sonra oluk etkili bağlı geçirgenlik fonksiyonu hesaplanarak bir bobin için endüvi reaksiyon alanının ifadesi elde edilir.



a) Tam adımlı sargı bobinini kesen maksimum akı.



b) Bir bobin için akım yoğunluğu.

Şekil 4.4. Bir bobin tarafından üretilen manyetik alan.

Oluk etkisiz stator endüvi alanı hesabı için, akım yoğunluğunun oluk açıklığı boyunca Şekil 4.4'te görüldüğü gibi aynı olduğu varsayılır ve Fourier serisi açılım ifadesi Eşitlik 4.14'de verilmiştir [128].

$$J(\theta) = \frac{4i}{\pi \cdot b_{s0}} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin(n \frac{b_{s0}}{2 \cdot R_s}) \cos(n \cdot (\theta - \frac{\tau_c}{2})) \quad (4.21)$$

Burada,  $i$  akımın anlık değeri,  $b_{s0}$  oluk açıklığı ve  $\tau_c$  bobin açılma açısıdır. Kutupsal koordinatlarda hava aralığındaki manyetik potansiyel dağılımından, bir bobinin (t ve k oluklarına dağıtılan) endüvi alan yoğunluğu Eşitlik 4.15'te elde edilir [128].

$$B_{ab}(\theta) = \frac{2\mu_0 i}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{r} \cdot \frac{\sin(n \frac{b_{s0}}{2R_s})}{n \frac{b_{s0}}{2R_s}} \cdot \sin(n \frac{\tau_c}{2}) \cdot (\frac{r}{R_s})^n \cdot \frac{1 + (\frac{R_r}{R_s})^{2n}}{1 - (\frac{R_r}{R_s})^{2n}} \cdot \cos(n \cdot (\theta - \frac{\tau_c}{2})) \quad (4.22)$$

Oluk etkisi dikkate alındığında;

$$B_{abS}(\theta) = B_{ab}(\theta) \cdot f_P(\theta) \quad (4.23)$$

#### 4.5. BAĞIL GEÇİRGENLİK MODELİ

Stator oluklarının etkisini düzenleyen temel ilke, olukların üzerindeki manyetik alanın stator ferromanyetik malzemesine erişmek için daha ileri gitmesi gerçeğidir. Düzeltme faktörü olarak da bilinen bağıl geçirgenlik fonksiyonu, stator oluklarının etkisine uyacak şekilde stator yüzeyinde ideal manyetik alan dağılımına uygulanabilecek bir düzeltme faktörünü tanımlar [108].

Oluk etkisinde hava aralığı uzunluğu konuma göre değişir. Manyetik devre modelinde (Bölüm 4.1) oluk etkisiz olarak elde ettiğimiz hava aralığı akı yoğunluğunu, geçirgenlik katsayısının ( $P_c(\theta) = h_m / (g(\theta) C_\phi)$ ) konuma göre değiştiği şekli ile tekrar yazılırsa [108];

$$B_g = \frac{K_l C_\phi}{1 + K_r \frac{\mu_{rec}}{P_c(\theta)}} B_r \quad (4.24)$$

elde edilir. Böylelikle, stator oluk etkisi altındaki hava aralığı akı yoğunluğu aşağıdaki gibi hesaplanabilir [108].

$$B_{gs}(\theta) = B_g(\theta) \cdot f_p(\theta) \quad (4.25)$$

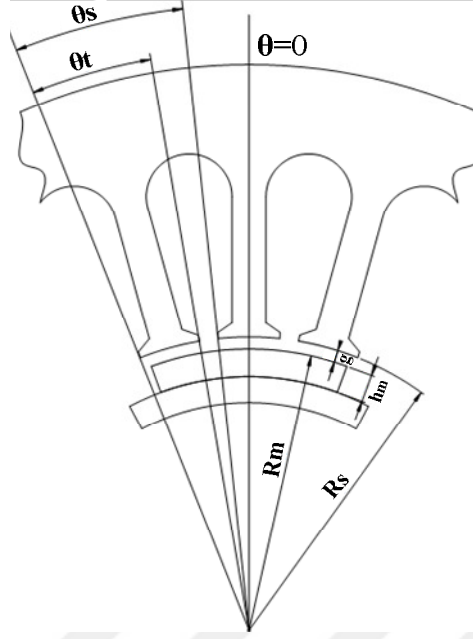
Rotor, stator oluklarından geçerken, bağlı geçirgenlik veya oluk düzeltme faktörü, stator oluklarının bulunduğu bölgede hava aralığı akı yoğunluğunu değiştirir. Eşitlik 4.23 ve 4.24 kullanılarak düzeltme faktörü aşağıdaki gibi elde edilebilir [108].

$$f_p(\theta) = \frac{B_{gs}}{B_g} = \left( \frac{K_l C_\phi}{1 + K_r \frac{\mu_{rec}}{P_c(\theta)}} B_r \right) / \left( \frac{K_l C_\phi}{1 + K_r \frac{\mu_{rec}}{P_c}} B_r \right) \quad (4.26)$$

Düzeltilme faktörü aşağıdaki gibi sadeleştirilebilir [108].

$$f_p(\theta) = \frac{1 + \frac{P_c}{K_r \mu_r}}{\frac{g(\theta)}{g} + \frac{P_c}{K_r \mu_r}} \quad (4.27)$$

Eşitlik 4.26'dan açıkça anlaşılabileceği gibi geçirgenlik katsayısının artırılması oluk etkisini azaltır. Bu oluk düzeltme faktörünün ifadesini tamamlamak için, hava aralığı uzunluğundaki  $g(\theta)$  değişimin oluk alanı için belirtilmesi gerekir. En temel çözüm,  $g(\theta)$ 'nın oluklar üzerinde son derece büyük olduğunu varsaymaktır. Fakat bu, oluklar üzerindeki hava aralığı akı yoğunluğunu sıfıra eşit hale getirir. Daha iyi bir çözüm ise, Bölüm 4.2'de açıklandığı ve Şekil 4.3'de tasvir edildiği gibi dairesel yay ve düz çizgi akı akış yaklaşımının kullanılmasıdır [108]. Bu durumda,  $g(\theta) = g + (\pi/2)wl$  burada  $wl$  bir dış kenarından oluk alanı arasındaki doğrusal uzaklıktır.

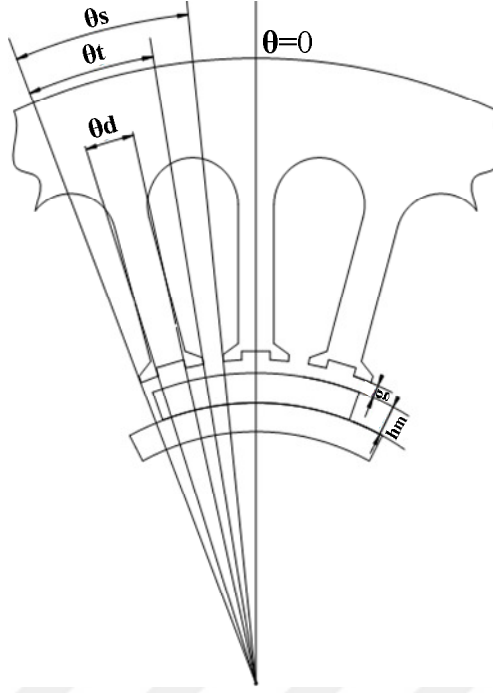


Şekil 4.5. Düzeltme faktörünün hesabı için generator kesiti.

Bu yaklaşım Şekil 4.5'te gösterilen geometriye uygulayarak bir oluk adımı  $\theta_s$  için oluk etkili hale getirilmiş hava aralığı uzunluğu elde edilir (Eşitlik 4.27).

$$g(\theta) = \left\{ \begin{array}{ll} g \rightarrow |\theta| \leq \theta_t / 2 \\ g + \frac{\pi}{2} \cdot R_s \cdot (\theta - \theta_t / 2) \rightarrow \theta_t / 2 \leq \theta \leq \theta_s / 2 \\ g - \frac{\pi}{2} \cdot R_s \cdot (\theta + \theta_t / 2) \rightarrow -\theta_s / 2 \leq \theta \leq -\theta_t / 2 \end{array} \right\} \quad (4.28)$$

Tüm açılar mekanik ölçüdedir. Manyetik alan elektriksel ölçüm açısından belirtildiğinden, Eşitlik 4.27 elektriksel ve mekanik ölçüm arasındaki ilişki ( $\theta = \theta_e / p$ ) kullanılarak yeniden yazılabilir [108]. Bir sonraki bölümde üzerinde durulacak olan tutma torkunun azaltılmasına yönelik gerçekleştirilecek stator modeli (Şekil 4.6) ve bu modele ait hava aralığı uzunluğu Eşitlik 4.28'de verilmiştir. Bu düzeltme modeli, manyetik alanın, dışın tüm yüzeyinde değişmediğini varsayar. Gerçekte, manyetik alan oluk alanına yaklaşırken biraz bozulmaya başlar [108].



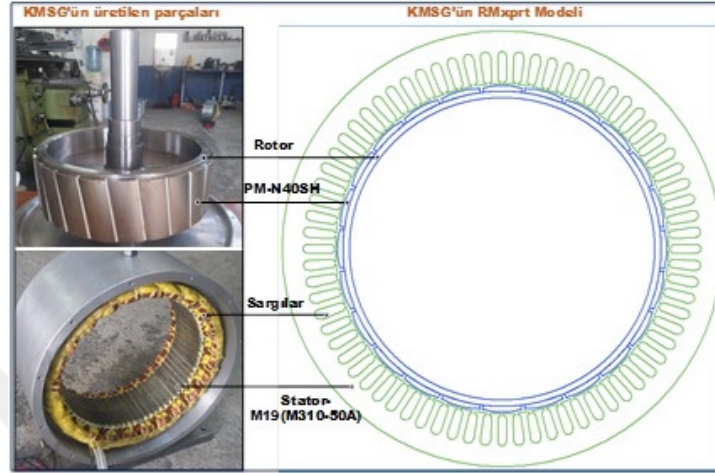
Şekil 4.6. Düzeltme faktörünün hesabı için yeni generator kesiti.

$$g(\theta) = \left\{ \begin{array}{ll} g + \frac{\pi}{2} \cdot R_s \cdot (\theta + \theta_d / 2) \rightarrow \theta > -\theta_d / 2 \\ g + \frac{\pi}{2} \cdot R_s \cdot (\theta_d / 2 - \theta) \rightarrow \theta < \theta_s / 2 \\ g \rightarrow \theta_s / 2 \leq |\theta| \leq \theta_t / 2 \\ g + \frac{\pi}{2} \cdot R_s \cdot (\theta - \theta_t / 2) \rightarrow \theta_t / 2 \leq \theta \leq \theta_s / 2 \\ g - \frac{\pi}{2} \cdot R_s \cdot (\theta + \theta_t / 2) \rightarrow -\theta_s / 2 \leq \theta \leq -\theta_t / 2 \end{array} \right. \quad (4.29)$$

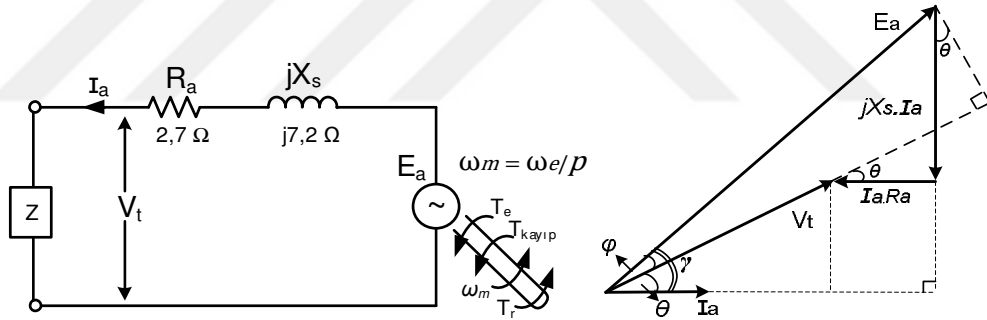
#### 4.6. EŞDEĞER DEVRE MODELİ VE FAZÖR DİYAGRAMI

Elektrik makinalarının karmaşık yapısında, her an değişebilen çalışma koşullarına göre hesap yapmak, endüvi sargılarından akan akımları, momenti, gücü, güç faktörünü, kayıpları ve diğer çıkış parametrelerini hesaplamak oldukça zaman alıcı ve hata yapmaya müsait karmaşık bir işlemdir. Bu zorluğu önlemek ve karmaşıklığı gidermek için Şekil 4.7'deki generatör yapısına göre KMSG'nin bir faz modeli Şekil 4.8'de gösterildiği gibi çıkartılmıştır. Makine modeli elde edilirken aşağıdaki üç faktörün etkileri dikkate alınmıştır.

- Endüvi reaksiyonu,
- Endüvi sargılarının öz endüktansı,
- Endüvi sargı direnci.



Şekil 4.7. Generatörün dinamik modeli ve prototipi.



Şekil 4.8. KMSG'nin bir faz eşdeğer devresi ve fazör diyagramı [161,162].

Senkron makinaların güç sistemleri analizinde; makine modelleri, yaygın olarak rotor yüzeyindeki manyetik akı yoğunluğunun temelde sinüs olduğu varsayımına dayanır [160]. Bu kapsamda, akı bir vektör olarak tanımlanabilir ve kalıcı mıknatısın akı etkisi yoluyla indüklenen gerilim  $E_a$  ise aşağıdaki gibi gösterilebilir [85];

$$E_a = \sqrt{2}\pi N \Phi f = \sqrt{2}\pi N \frac{\alpha_t \pi D l B_g}{2p} f = K \omega \Phi \quad (4.30)$$

Şekil 4.7’de;  $R_a$  ve  $X_s$  sırasıyla, sargı direnci ve senkron reaktansı temsil eder,  $\theta$  güç katsayı açısı,  $\varphi$  güç açısı veya moment açısı,  $\gamma$  ise indüklenen gerilim  $E_a$  ve  $I_a$  arasındaki açıdır.  $\Phi$  manyetik akı,  $N$  faz başına seri sarım sayısı,  $\omega$  elektriksel hız,  $D$  stator iç çapı,  $l$  yığın uzunluğu,  $B_g$  hava aralığı manyetik akı yoğunluğu ve  $\alpha_i$  stator dışındaki doyuma bağlı akı yoğunluğu şekil faktörüdür. Diğer taraftan, faz gerilimi ve akımın, fazör gösterimiyle ( $\sim$ ) ifadesi sırasıyla, Eşitlik 4.33 ve 4.34’te verilmiştir. Giriş ve çıkış gücünün ortalama değeri sırasıyla, Eşitlik 4.36 ve 4.38’de verildiği gibi formüle edilebilir [163-165];

$$\tilde{E}_a = \tilde{V}_t + R_a \tilde{I}_a + jX \tilde{I}_a + jX_a \tilde{I}_a \quad (4.31)$$

Bir elektrik makinesinde endüvi reaksiyonu ve öz endüktans etkileri reaktanslarla (sırasıyla  $X$  ve  $X_a$ ) ifade edilir. Genel olarak bu iki etki senkron reaktans  $X_s$  olarak modellenir [85]:

$$X_s = X + X_a \quad (4.32)$$

$$\tilde{E}_a^2 = (\tilde{V}_t + R_a \tilde{I}_a \cos \theta + X_s \tilde{I}_a \sin \theta)^2 + (X_s \tilde{I}_a \cos \theta - R_a \tilde{I}_a \sin \theta)^2 \quad (4.33)$$

$$\tilde{V}_t = \sqrt{\tilde{E}_a^2 - (X_s \tilde{I}_a \cos \theta - R_a \tilde{I}_a \sin \theta)^2} - R_a \tilde{I}_a \cos \theta - X_s \tilde{I}_a \sin \theta \quad (4.34)$$

$$\tilde{I}_a = \tilde{E}_a / (R_a + jX_s + Z) \quad (4.35)$$

$$P_{in} = 3E_a I_a \cos \gamma \quad (4.36)$$

$$\cos \gamma = \frac{\cos \theta V_t + R_a I_a}{E_a} \quad (4.37)$$

$$P_{out} = \frac{3V_t E_a \cos \theta}{\sqrt{(R_a + R_L)^2 + (X_s + X_L)^2}} \quad (4.38)$$

Çıkış gücünü kullanarak elektromanyetik tork ve verim ifadesi sırasıyla;

$$T_e = \frac{P_{out}}{\omega_m} = \frac{3V_t E_a \cos \theta}{\omega_m \sqrt{(R_a + R_L)^2 + (X_s + X_L)^2}} \quad (4.39)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (4.40)$$

elde edilir.

#### 4.7. TUTMA TORKUNUN AZALTILMASI

Tutma torku, KM generatörün rotoru, statoru yüksüz durumda iken döndürüldüğünde mili tarafından üretilen torkdur. Tutma torku KM'lı makinaların geometrilerinin neden olduğu doğal bir özelliğidir [156]. KM'lı generatörlerde tutma torkunu azaltmak önemli bir husustur çünkü generatörün kendi başlangıç yeteneğini etkiler ve rüzgâr türbinlerinde gürültü ve mekanik titreşim üretir [157,166]. Ayrıca torkdaki dalgalanmaların da ana bileşenidir [156].

Tutma torkunun azaltılması ile ilgili olarak literatürde birçok yöntem önerilmiştir. Kutup başına kesirli oluk sayısı, stator yığnında veya mıknatıs kutuplarında çarpıklık işlemi [167-169], kutup yayı/kutup adımı oranı değişimi (0-1), eksenel bölütleme veya mıknatıs kaydırma bu yöntemlerden bazılarıdır [154,156-158,166]. Ayrıca oluk açıklığı, mıknatıs kalınlığı ve hava aralığı genişliği gibi parametrelerin diğer çıkış değerleri de göz önünde bulundurularak optimum değerlerinin bulunması, tutma torkunu azaltmak için diğer bir yaklaşımdır [158].

Stator yığnında çarpıklık işlemi her ne kadar çok tercih edilse de nihai ürünün imalatını karmaşılaştırmasından dolayı ilave maliyetlere neden olmaktadır. Bu yöntem sargı yerleşimini zorlaştırabilir, etkin oluk alanını azaltır, iletken uzunluğu

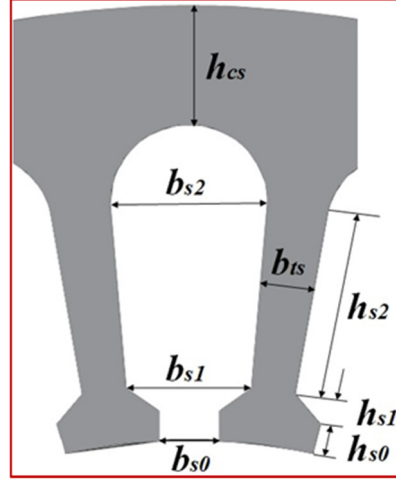
artar ve dolayısıyla stator direnci de artar [166]. Bu çalışmada, bahsedilen yöntemlere ilave olarak tutma torkunu azaltmak için statorda yardımcı dişler [170] açılarak geliştirilen yeni stator yapısının tutma torkuna ve indüklenen gerilime etkisi ortaya konmuştur. Yeni yapının analitik çözümü için bağıl geçirgenlik fonksiyonu kullanılmıştır. Ayrıca analitik çözüm sonuçları SEA ile karşılaştırılarak doğruluğu gösterilmiştir.

#### 4.7.1. Düşük Tutma Torku İçin Stator Tasarımı

Bu çalışmada önerilen yeni lamine yapısı ile stator dişleri kenarlarında manyetik doygunluğu azaltarak daha düşük tutma torku sağlamak ve böylelikle daha yüksek tork yoğunluğunun elde edilmesi amaçlanmaktadır. Tutma torkunu azaltmak için geliştirilen 5-farklı geometride stator diş yapısı SEA analizi ve analitik model ile karşılaştırılarak optimum tutma torkunun hangi lamine yapısında elde edildiği ortaya konmuştur.

Tutma torku, rotorun açısal pozisyonuna bağlı olarak hava aralığında depolanan enerjinin değişim oranı veya yanal kuvvetlerin toplamıyla manyetik akı yoğunluğu değişiminden elde edilir [156]. Eşitlik 4.22'den anlaşılabileceği gibi tutma torku hava aralığı akı yoğunluğunun karesi ile doğru orantılıdır. Bu yüzden hava aralığı akı yoğunluğunu azaltmak için oluk parametrelerine ( $h_{s0}$ ,  $h_{s1}$ ,  $h_{s2}$  ve  $b_{s0}$ -Şekil 4.9) bağlı olarak aşağıda belirtilen boyutlarda statorda yardımcı dişler açılmıştır;

- Model\_1;  $h_{s0}$ -  $b_{s0}$ .
- Model\_2;  $h_{s0}$ -  $2.b_{s0}$ .
- Model\_3;  $(h_{s0} + h_{s1})$ -  $b_{s0}$ .
- Model\_4;  $2 \tan \alpha (h_{s0} - b_{s0})$ .
- Model\_5; *Normal model (yardımcı dişi olmayan).*



Şekil 4.9. Önerilen model için kullanılan oluk parametreleri.

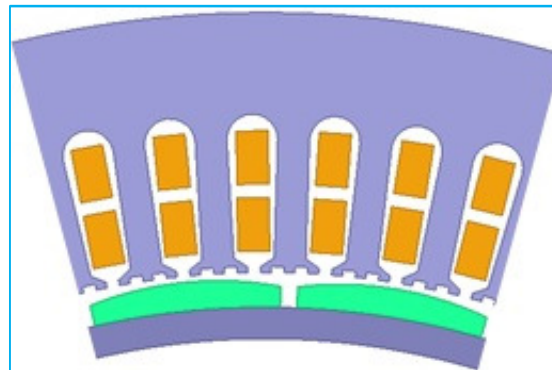
Açılan yardımcı dişler ile SEA için oluşturulan generatör yapıları Şekil 4.10'da verilmiştir.



a) Normal model.

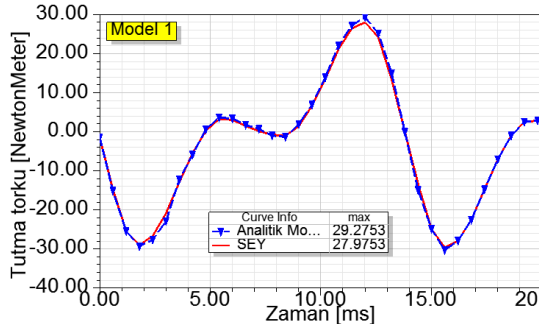


b) Tek çentikli yardımcı oluk.

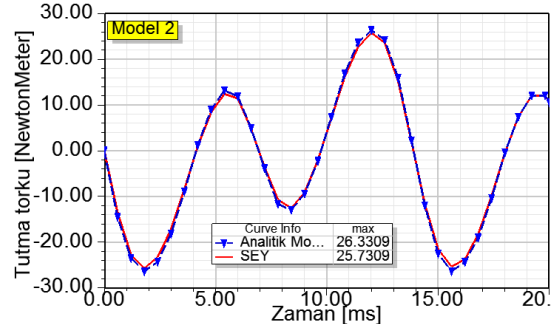


c) Çift çentikli yardımcı oluk.

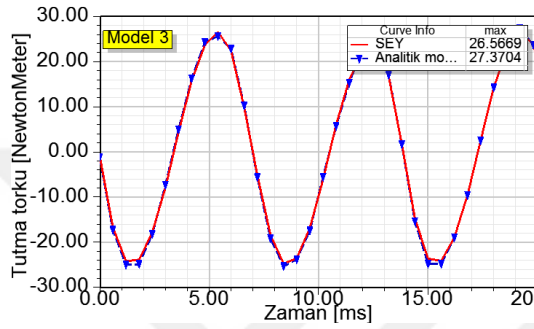
Şekil 4.10. Tutma torku analizi için oluşturulan generatör modelleri.



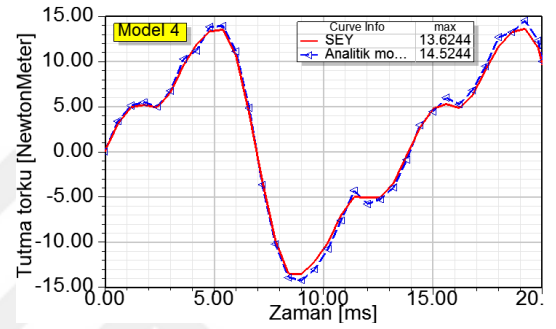
a) Model1.



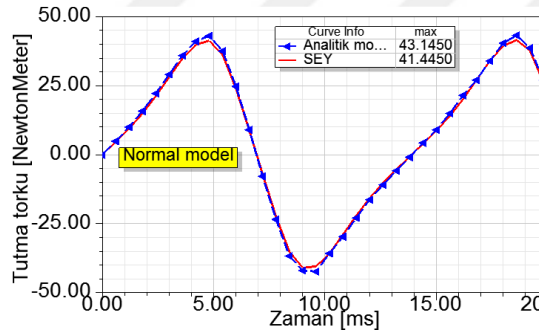
b) Model2.



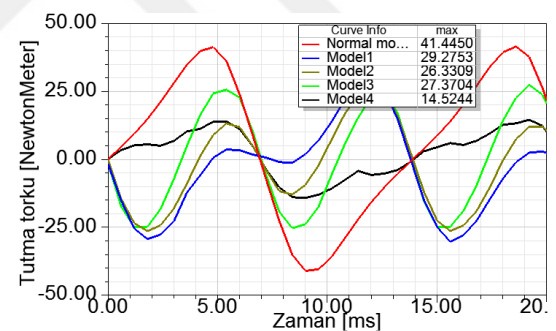
c) Model3.



d) Model4.



e) Model5.



f) Tüm modeller.

Şekil 4.11. Önerilen stator yapısı için tutma torku sonuçları.

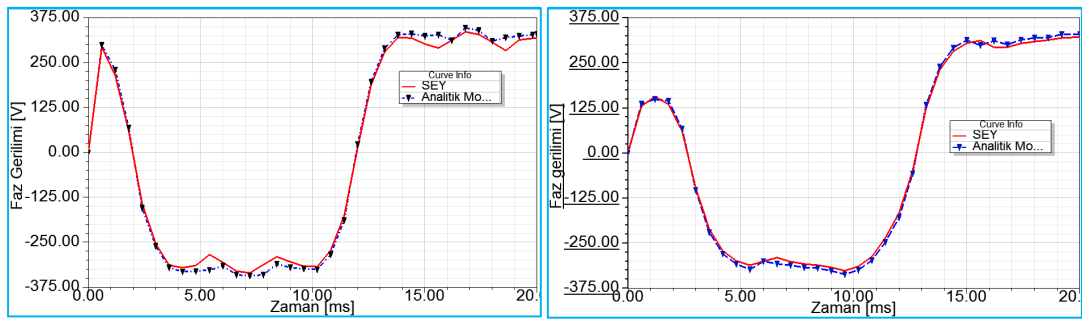
Şekil 4.11 oluk parametrelerine bağlı olarak geliştirilen yeni stator modeli ve oluk etkili normal stator modeline ait tutma torku eğrileri karşılaştırmalı olarak vermektedir. En düşük tutma torku değerinin Model\_4'deki diş açıklığında elde edildiği ortaya konmuştur. Grafikler incelendiğinde açılan diş bölgelerinde tutma torkundaki azalmalar gözlemlenmiştir. Ayrıca, 5 model için elde edilen tutma torkuna, faz gerilimleri, faz akımları ve demir kayıplarına ait değerler Çizelge 4.2'de verilmiştir. Çizelge incelendiğinde tutma torkundaki iyişme ile birlikte makinenin performansı faz gerilimi, faz akımı ve çıkış gücü açısından beklentileri karşılayacak

nitelikte kalmıştır. Karşılaştırmalı olarak verilen SEA ve analitik sonuçlar bu çalışmada önerilen analitik modeli doğrular niteliktedir. Bu parametrelere ilave olarak bu modellerin gerilim ve akımın harmonik bileşenlerine etkileri de incelenebilir.

Çizelge 4.2. Bazı parametrelere bağlı olarak elde edilen karşılaştırma sonuçları.

| Generatör                                      | Tutma Torku (Nm) | Faz Gerilimi (V) | Faz Akımı (A) | Çıkış Gücü (kW) | Demir Kaybı (W) |
|------------------------------------------------|------------------|------------------|---------------|-----------------|-----------------|
| <b>Model_1</b><br>( $h_{s0}-b_{s0}$ )          | 27,9             | 264              | 7,2           | 4,7             | 24,6            |
| <b>Model_2</b><br>( $h_{s0}-2.b_{s0}$ )        | 25,7             | 259              | 7,1           | 4,49            | 23,6            |
| <b>Model_3</b><br>( $(h_{s0}+h_{s1})-b_{s0}$ ) | 27,3             | 255              | 6,9           | 4,32            | 23,1            |
| <b>Model_4</b><br>2 tane ( $h_{s0}-b_{s0}$ )   | 14,5             | 262              | 7,1           | 4,67            | 24,3            |
| <b>Model_5</b><br>Normal model                 | 41,4             | 269              | 7,36          | 4,87            | 25,3            |

Şekil 4.12, generatör tam yükte ve yüksüz durumda iken SEA ve önerilen analitik model ile elde edilen faz gerilimlerini karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. Önerilen analitik model SEA sonuçları ile iyi bir eşleşme göstermektedir.



a) Yüksüz.

b) Tam yüklü.

Şekil 4.12. Faz gerilimleri.

#### 4.7.2. Düşük Tutma Torku İçin Rotor Tasarımı

Çalışmanın bu bölümünde, daha düşük tutma torku için KM rotor tasarımı için temel teknikler sunulacak ve tartışılacaktır. Her bir tekniğin avantajları ve dezavantajları da açıklanmaktadır.

Tutma torkunun azaltılması için en sık kullanılan bir yöntem, stator oluklarında veya alternatif olarak KM'lerde kaykы işleminin olduğu önceki bölümlerde belirtilmişti. Tutma torkunu tamamen ortadan kaldırmak için, kaykы açısı  $\theta_{sk}$ , tutma torkunun periyoduna  $\alpha_{Tc}$  eşit olmalıdır [169];

$$\theta_{sk} = \alpha_{Tc} = \frac{2\pi}{N_p Q} \quad (4.41)$$

Burada  $\alpha_{Tc} = 2\pi/(N_p Q)$ , tutma torkunun her periyoduna karşılık gelen mekanik açı,  $N_p$  ise bir oluk yayının dönüşü sırasında dalga şeklinin periyot sayısıdır ve oluk ve kutup sayısına bağlıdır (Eşitlik 4.41).

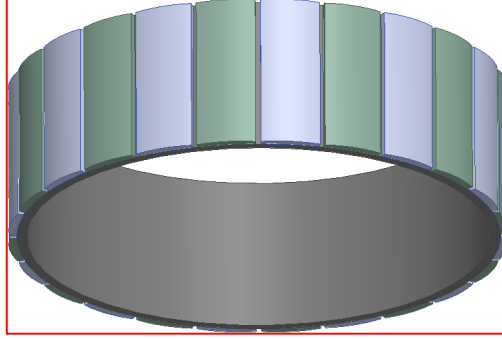
$$N_p = \frac{2p}{OBEB(Q, 2p)} \quad (4.42)$$

Statorunda veya rotorunda katkıya sahip bir makinenin tutma torku aşağıdaki gibi tekrar ifade edilebilir [169].

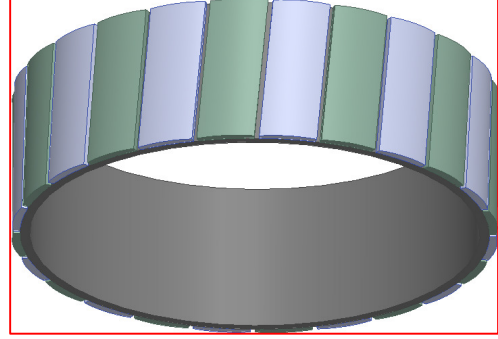
$$\begin{aligned} T_{sk} &= \frac{1}{\theta_{sk}} \int_0^{\theta_{sk}} T_{cog}(\theta_1) d\theta_1 \\ &= \frac{1}{\theta_{sk}} \sum_{k=1}^{\infty} \int_0^{2\pi/(N_p Q)} T_k \cdot \sin(kN_p Q \theta_m + \theta_1) d\theta_1 \end{aligned} \quad (4.43)$$

Kaykы işlemi, çeşitli üretim sıkıntılarının neden olabilir. Statoru eğrili üretmek, oluk dolumunu neredeyse imkânsız hale getirir. Rotorda kaykы işlemi ise, belirli şekillere sahip bir KM gerektirir, bu da imal edilmesi kolay değildir ya da yine de çok pahalıdır ve manyetize edilmesi zordur [169].

Şekil 4.13 ve Şekil 4.14 farklı rotor yapılarında tutma torku analizi için geliştirilen 3D SEA modelini sunmaktadır.



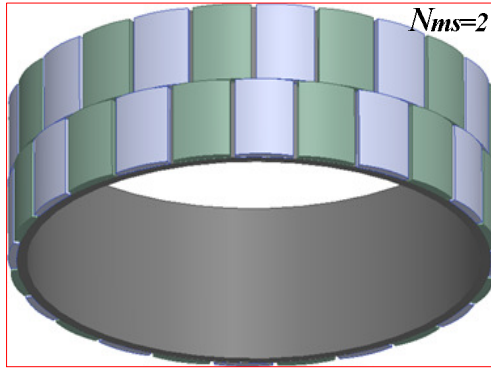
a) Normal rotor yapısı.



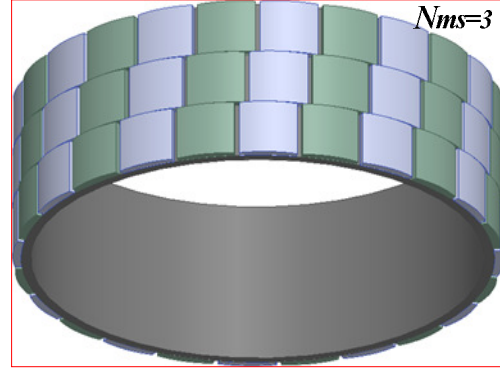
b) Rotor yapısı 1.

Şekil 4.13. Parçasız mıknatıs.

Rotor üretimini kolaylaştırmak için, Şekil 4.14'de gösterildiği gibi mıknatısı eksenel olarak  $N_{ms}$  sayısı kadar eğik basamaklarla yerleştirerek kaykı işlemi sağlanabilir. Burada  $N_{ms}$  mıknatıs eş parça sayısıdır [169].

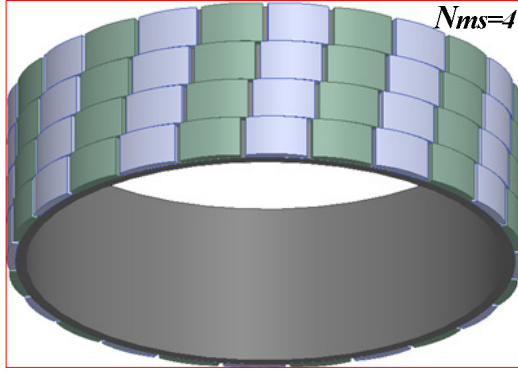


a) Rotor yapısı 2.

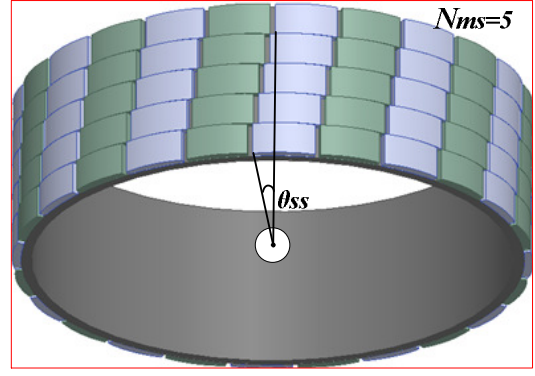


b) Rotor yapısı 3.

Şekil 4.14. Parçalı mıknatıs.



c) Rotor yapı 4.



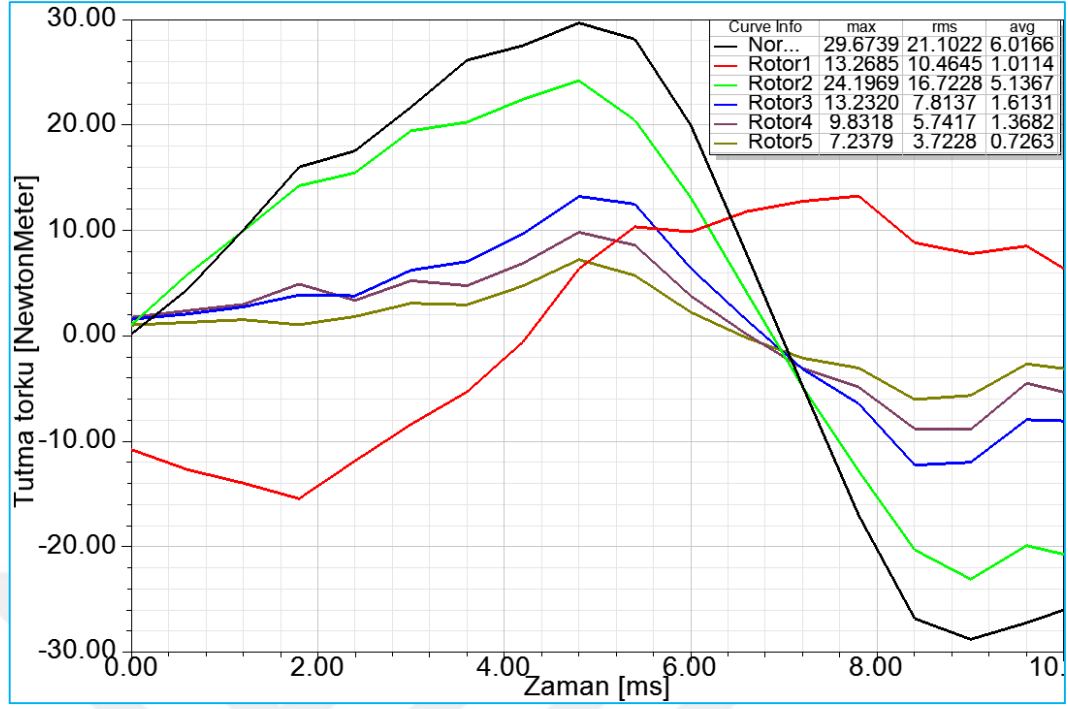
d) Rotor yapı 5.

Şekil 4.14. (devam ediyor).

Buradaki önemli husus uygulanacak eş parçalı mıknatısların hangi açıyla yerleştirilmesi gerektiğinin belirlenmesidir. Optimum tutma torku değeri Eşitlik 4.41’de verilen kaykı açısı ile sağlanmaktadır.

$$\theta_{ss} = \theta_{sk} / N_{ms} \quad (4.44)$$

Burada  $\theta_{ss}$  Şekil 4.14d’de görülen iki eş parça arasındaki mekanik kaykı açısını vermektedir. Eş parçalı mıknatıslar eşit derecede kaydırıldığında, tüm harmonikleri ortadan kaldırdığı anlaşılmaktadır (Eşitlik 4.42). Bu durum, 24 kutuplu 72 oluklu generatörün farklı parçada mıknatıs sayısı için, SEA ile elde edilen tutma torkunu karşılaştırmalı olarak gösteren Şekil 4.15 ile teyit edilmiştir. Beklendiği gibi en iyi azalma 5 eş parçalı mıknatıs yapısında,  $\theta_{ss}=1$ ’er mekanik derecelik kaykı ile toplamda 5 derecelik kaykı değerinde elde edilmiştir. Ayrıca mıknatıs eş parça sayısının  $N_{ms}$  artmasıyla hem herbir oluk adımı için periyot sayısının artışı hem de tutma torkunun azaltılması gözlemlenmiştir .



Şekil 4.15. Eş parçalı mıknatıs yapısının tutma torkuna etkisi.

Bu çalışmada tutma torku da göz önünde bulundurularak, prototip çalışmasını kolaylaştırmak için normal stator sac yapısı ( yardımcı dişleri olmayan) ve tek parçalı kaykırı uygulanmış rotor yapısı tercih edilmiştir.

## BÖLÜM 5

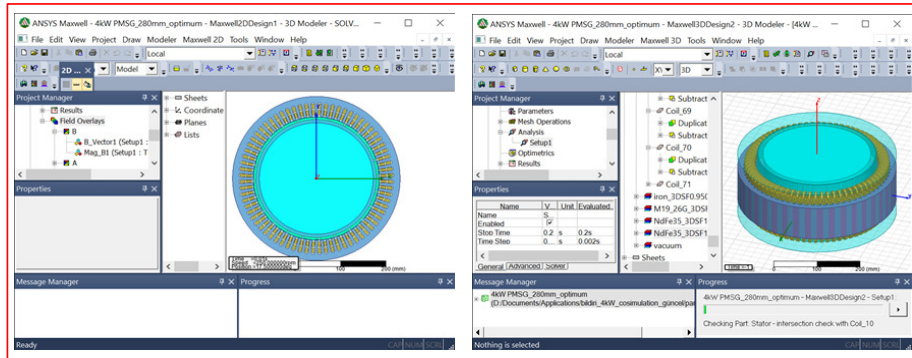
### ANALİZ SÜRECİ (GEÇİCİ REJİM (TRANSIENT))

#### 5.1. MAKİNEİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE 2D VE 3D MANYETİK ANALİZİ

RMxpert Design'da gerçekleştirilen boyutlandırma çalışmalarından sonra 2D ve 3D generatör modeli oluşturularak zamana bağlı çözümler gerçekleştirilmiştir. Maxwell 2D ve 3D elektrik, manyeto statik, Eddy akımı ve geçici durum problemlerini çözmek için SEA analizini kullanan yüksek performanslı etkileşimli bir paket programıdır.

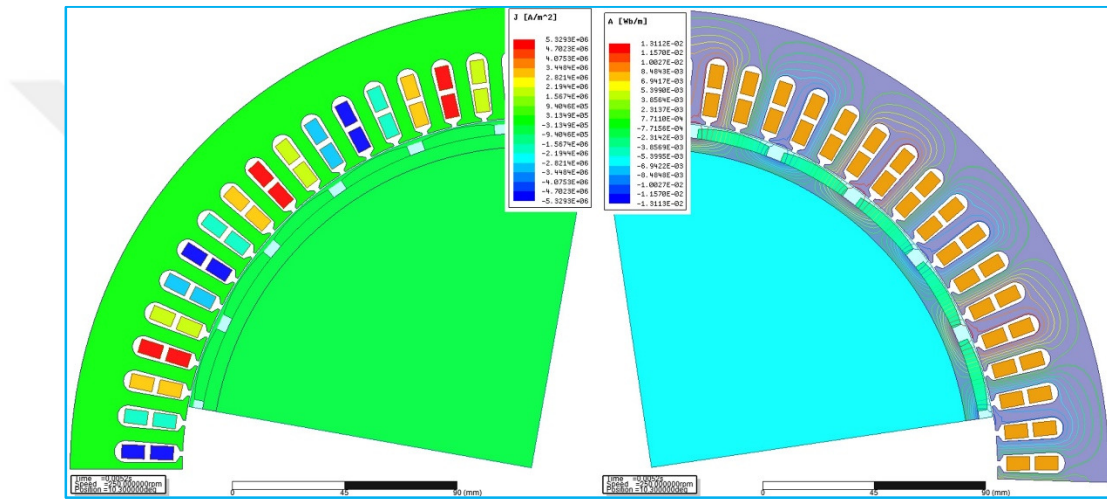
- Elektrik alanlar(Elektrostatik)
- Manyeto statik
- Eddy akımı
- Geçici rejim (Transient)

ANSYS Maxwell 2D-3D Design yazılımı kullanılarak oluşturulan generatör modeline ait zaman adımlı çözümler gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.1). Bu zaman adımlı çözümde gerilim veya akım kaynağıyla beslenen sargıların veya kalıcı mıknatıslarla oluşturulan manyetik alan çözümleri zamanın bir fonksiyonu olarak gerçekleşir.



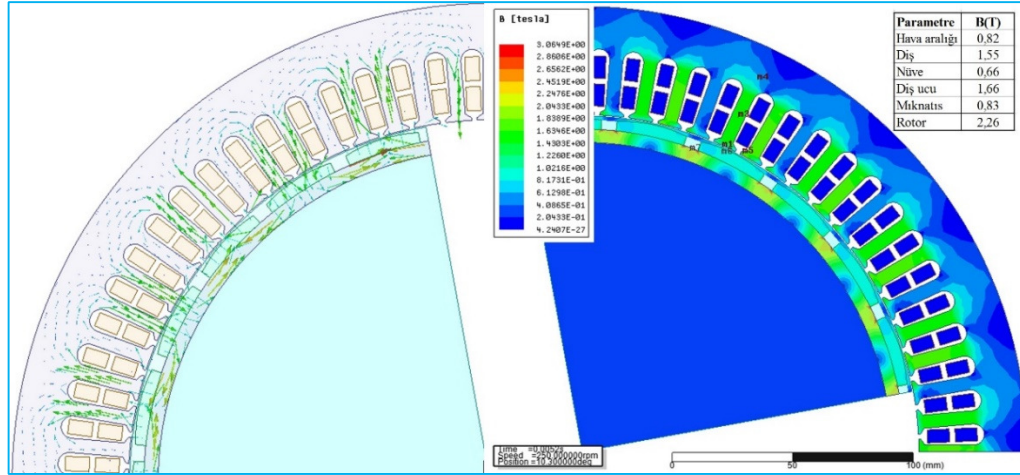
Şekil 5.1. Generatörün 2D ve 3D modeline ait ekran görüntüsü.

Mıknatıslardaki mmk manyetik akı oluşmasını sağlar. Manyetik akı başladığı yere dönerek kapalı bir devre oluşturmaktadır [117]. Mıknatısların oluşturduğu manyetik akı idealde hava aralığına oradan da stator dişlerine geçer. Daha sonra stator boyunduruğundan geçerek diğer rotor kutbuna (N kutbundan S kutbuna) ulaşır. Ancak pratikte bu mümkün olmaz. Akı geçişleri sırasında istenmeyen yolları takip eden ve kayıplara neden olan kaçak akılar oluşur. Kaçak akıların mümkün olduğu kadar az olması istenir. Bu kaçak akıların gerçek değerine yakın olarak hesaplanması ancak SEA ile mümkün olmaktadır.



Şekil 5.2. Akım yoğunluğu, etkin akı yolları ve kaçak akı.

Şekil 5.2’de mıknatıslarda oluşan manyetik akı ve akının nasıl devresini tamamladığı görülmektedir. Akı mıknatıs kutbundan başlayarak hava aralığı, stator dişleri, stator boyunduruğu ve tekrar hava aralığından diğer kutba geçerek rotor boyunduruğundan başladığı noktaya ulaşmaktadır. Ayrıca mıknatıs ve hava aralığı üzerinden ve oluklar üzerinden devresini tamamlayan kaçak akılar görülmemiştir. Sargılardaki akım yoğunluğu ise maksimum  $4,24 \text{ A/m}^2$  dir ve bu değer KMSG’ler için kabul edilebilir değer aralığındadır. İlgili iki nokta arasındaki akı, noktalar arasındaki vektör potansiyel farkı ile aksenel uzunluğun çarpımı ile hesaplanır. Bu hesaplama, halkalanma akısını (flux linkage) dolayısıyla sargıların endüktansını elde etmek için genişletilebilir [26].

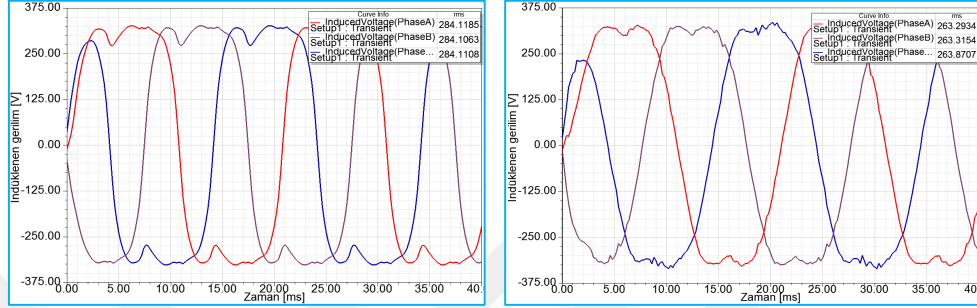


Şekil 5.3. Makinanın bütün yüzeyindeki manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve kuvvet çizgileri.

Şekil 5.3’de hava aralığı ve stator boyunduruğu manyetik akı yoğunluğu dağılımı görülmektedir. Makine üzerindeki akı yoğunluklarının görülebilmesi amacıyla 10 derecelik rotor dönüşü ile makinanın tüm kesitinde akı yoğunluğu dağılımı elde edilmiştir. Burada rotor boyunduruğu akı yoğunluğu kutup yayı merkezinde 0,9 T civarında iken karşılıklı kutupların rotora bakan yüzeylerinde ise 2,26 T’dır. Ayrıca mıknatısın akı yoğunluğu ise 0,83T civarlarındadır. Mıknatıs akı yoğunluğu demagnetizasyon analizi için önemli bir parametredir. Tüm yüzeydeki ortalama akı yoğunluğu değeri 1,3 T iken hava aralığı akı yoğunluğu 0,8-1T civarındadır ve bu değer, üçüncü bölümde Çizelge 3.3’te verilen kabul edilebilir akı yoğunluğu değer aralığındadır. Stator dişleri akı yoğunluğu ise 1,5 T değerindedir ve bu değer de Çizelge 3.3’te verilen değer aralığındadır. Kullanılan sacın doyma noktası 1,7 T olduğundan sac doyuma girmemiştir. Böylelikle makinanın histerisiz kayıpları oldukça düşük olacaktır. Ayrıca zıt yönde kutuplanmış komşu mıknatıslar arasındaki kaçak akı miktarı büyük değildir. Kalıcı mıknatıslı generatör stator tasarımında dikkat edilmesi gereken önemli parametrelerden birisi de diş ucu radyal kalınlığı ve oluk açıklığıdır. Eğer bu değer çok küçük seçilirse mıknatıs köşelerinin diş uçlarına geldiği noktalarda doymalar meydana gelir. Burada oluşan doymalarda “cogging” ve “detent” adı verilen moment dalgalanmalarına neden olur [26].

Sonlu elemanlar analizinin bir diğer önemli çıktısı ise indüklenen gerilim ve mil momentinin hesaplanmasıdır. Generatörün kutup sayısı fazla olduğundan hava

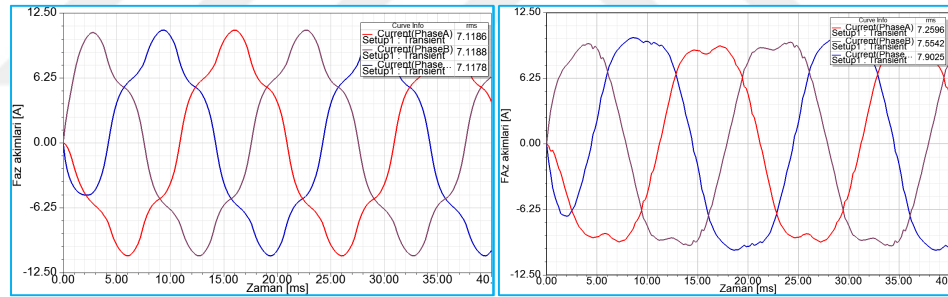
aralığındaki kaçak akılar artacaktır. Bu sebeple indüklenen gerilim ve mil momenti değerlerinin analitik yöntemlerle hesaplanan değerleri ile gerçek değerleri arasında fark olabilmektedir. Yani çok kutuplu makinelerde analitik hesaplar hatalı sonuçlar verebilmektedir. Bu sebeple indüklenen gerilim ve mil momenti değerlerinin SEA ile hesaplanması gerçeğe daha yakın değerler verecektir [26].



a) 2D analiz sonucu.

b) 3D analiz sonucu.

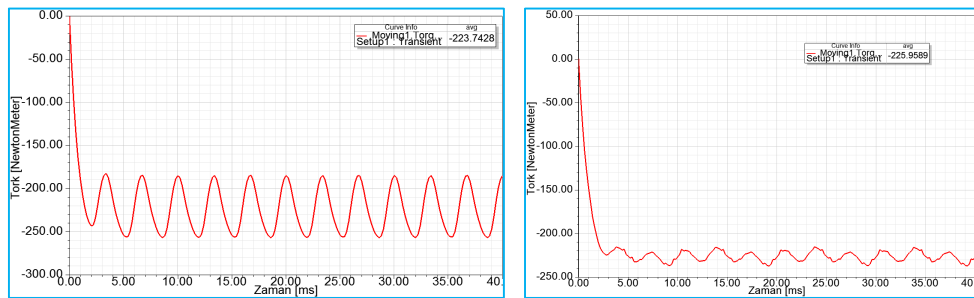
Şekil 5.4. İndüklenen faz gerilimleri.



a) 2D analiz sonucu.

b) 3D analiz sonucu.

Şekil 5.5. Faz akımları.

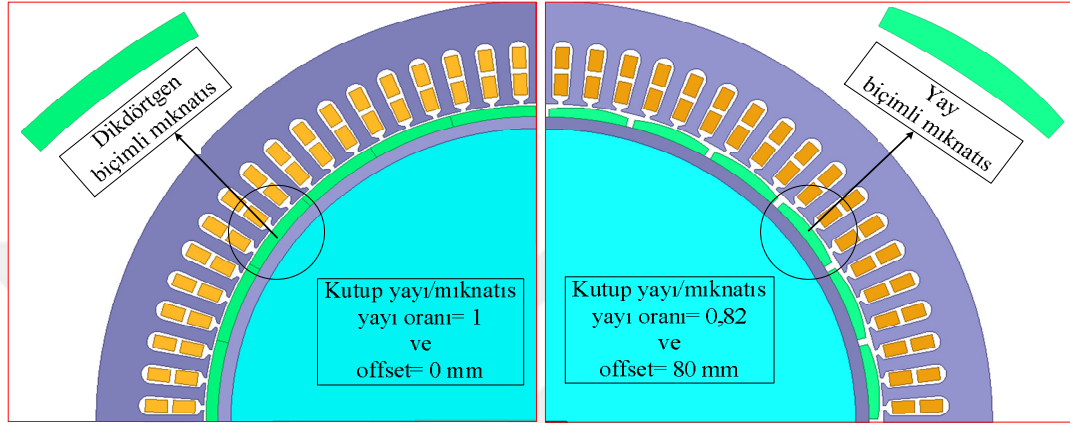


a) 2D analiz sonucu.

b) 3D analiz sonucu.

Şekil 5.6. Elektromanyetik tork.

Yapılan 2D ve 3D SEA sonucunda elde edilen faz gerilimleri, faz akımları ve generatör milindeki moment değerleri sırasıyla Şekil 5.4, 5.5 ve 5.6’da verilmektedir. 2D ve 3D model için gerçekleştirilen analiz sonuçları karşılaştırıldığında, analiz sonuçlarında fazla bir fark olmadığı görülmektedir. 3D analizler modele göre günlerce sürmektedir. Bu yüzden SEA kullanılan generatör analizlerinde 2D modeli tercih edilebilir.

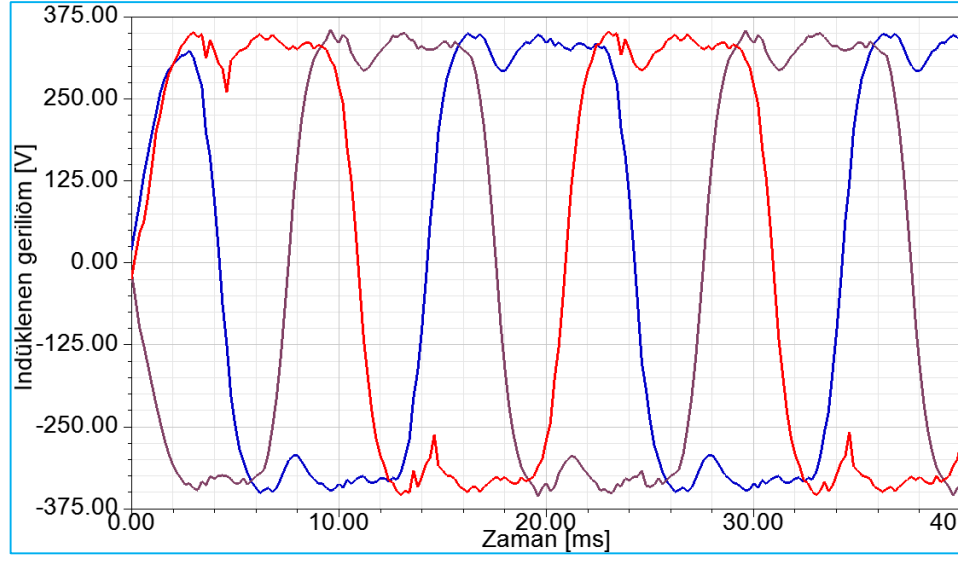


a) Dikdörtgen biçimli mıknatıs.

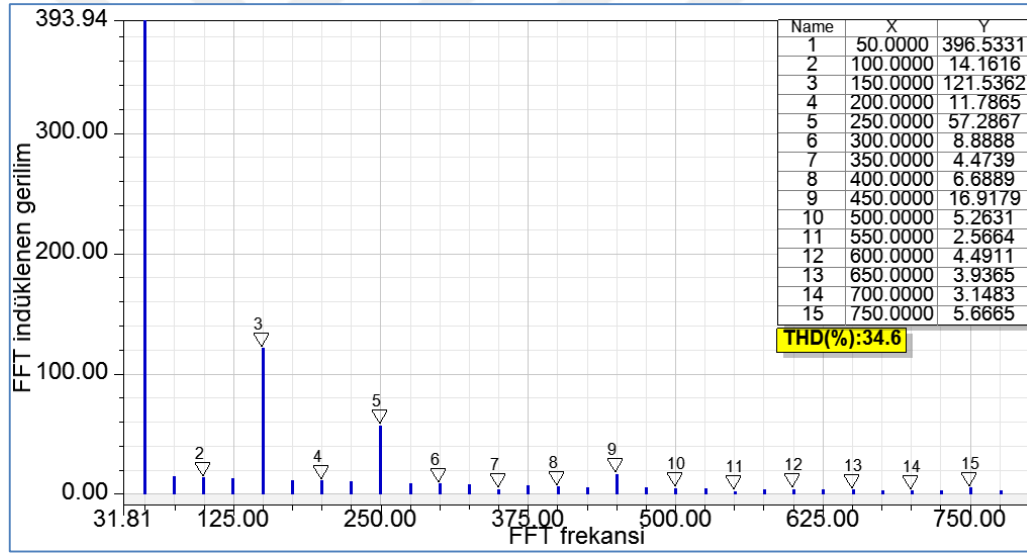
b) Yay biçimli mıknatıs.

Şekil 5.7. Rotor yüzeyindeki mıknatısların şekli ve yerleşimi.

Bu bölümde yapılan ilk analizlerde 2D ve 3D model için analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. İkinci analizde ise Şekil 5,7’de gösterildiği gibi rotor yüzeyindeki mıknatıs yapısının indüklenen gerilim ve harmonikler üzerine etkisi ile ilgili analizler yapılmıştır. Kaynak [110]’de mıknatısların konumlandırılması ve hava aralığı genişliğinin seçimi açısından karşılaştırmalı bir analiz sunulmuştur. Yapılan analizlerde mıknatıs kalınlığı, kutup yayı/mıknatıs yayı oranı ve hava aralığı genişliğinin uç gerilimi ve harmonik bileşenleri üzerine etkisi incelenmiştir. Yüksek hava aralığı genişliği, düşük mıknatıs kalınlığı ve yüksek kutup yayı/mıknatıs yayı oranının harmonik bileşenlerinin genliğini düşürdüğü yönünde veriler sunulmuştur.



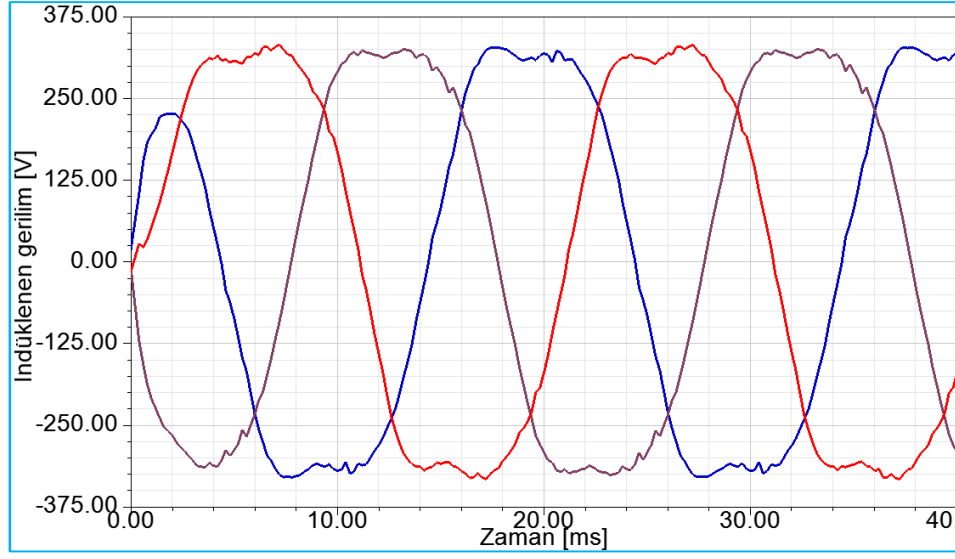
a) İndüklenen gerilim eğrisi.



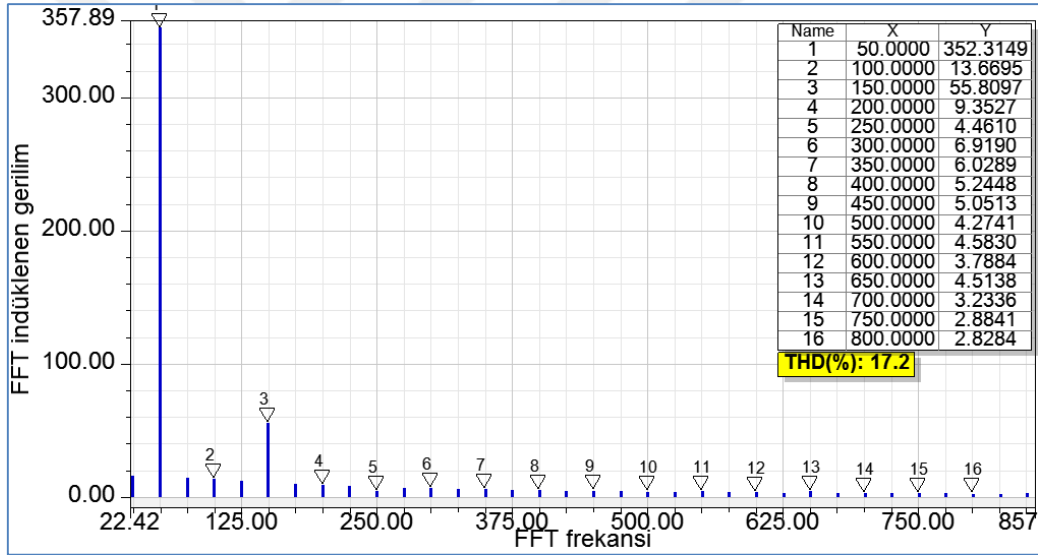
b) İndüklenen gerilimin harmonik bileşenleri.

Şekil 5.8. Rotor yüzeyindeki mıknatıs yapısı (Şekil 5.7a).

Bu çalışmada ise mıknatıs biçiminin (offset) ve kutup yayı/mıknatıs yayı oranının indüklenen gerilim ve harmonik bileşenleri üzerine etkisi incelenmiştir. Dikdörtgen biçimli mıknatıs yapısı (kutup yayı/mıknatıs yayı oranı= 1 ve offset= 0mm) için gerçekleştirilen analiz sonuçları Şekil 5.8’de, yay biçimli mıknatıs yapısı (kutup yayı/mıknatıs yayı oranı= 0,82 ve offset= 80mm) için gerçekleştirilen analiz sonuçları ise Şekil 5.9’da verilmiştir.



a) İndüklenen gerilim eğrisi.



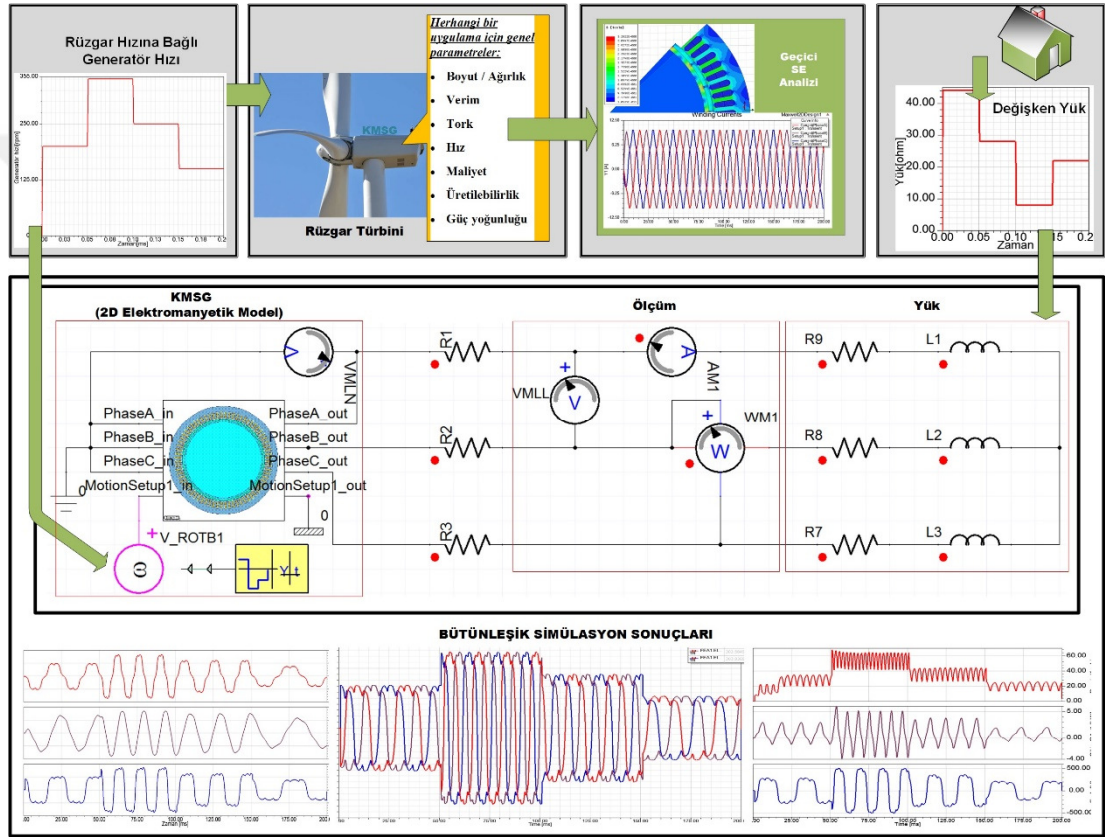
b) İndüklenen gerilimin harmonik bileşenleri.

Şekil 5.9. Rotor yüzeyindeki mıknatıs yapısı (Şekil 5.7 b).

Yapılan 3D analiz sonuçları incelendiğinde rotor yapısı 1'deki indüklenen gerilimin tüm harmonik bileşenlerinin genliği rotor yapısı 2'ye göre daha yüksektir. Rotor yapısı 2'de özellikle 3, 5 ve 9. harmonik bileşenlerinin genliğindeki azalma Şekil 5.8 ve Şekil 5.9'da açıkça görülmektedir. Ayrıca rotor yapısı 2' deki toplam harmonik bozulmada rotor yapısı 1 e göre %50,29'luk azalma gerçekleşmiştir. Tüm analizlerde 3. harmonik bileşen etkisinin yüksek olduğu ortaya çıkmaktadır. Bu da sargılarda adım kısaltma yöntemi kullanılarak giderilebilir.

## 5.2. BÜTÜNLEŞİK ELEKTROMANYETİK ALAN VE DEVRE MODELİ

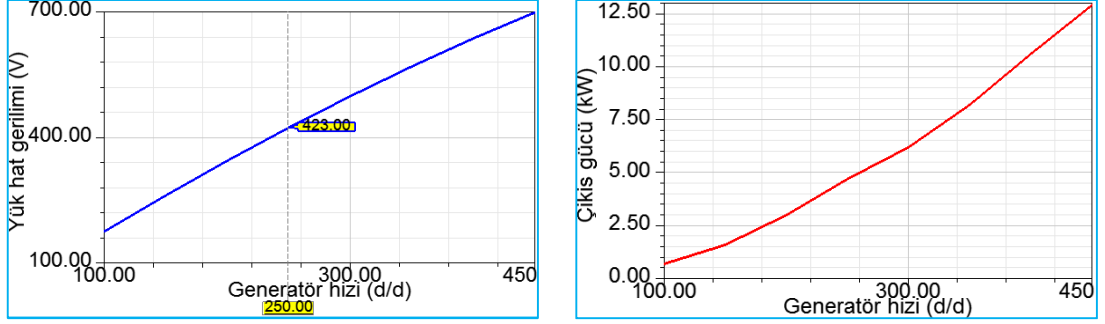
Bir bütünleşik elektromanyetik analizi yürütmenin ardındaki ana fikir, simülasyonlar ile elde edilen sonuçların, farklı koşullarda makinenin davranışı ile ilgili kapsamlı bilgi ve veri sağlaması olacaktır. Ayrıca, analitik hesaplamaların doğruluğunu ve hassasiyetini teyit etmek mümkündür. Bu kısımda, üretim aşamasına geçmeden önce 4 kW'lık generatöre ait yapısal tasarım sonuçları bu model kullanılarak sunulmuştur.



Şekil 5.10. Simülasyon altyapısı.

Önerilen model yapısı Şekil 5.10'da görülmektedir. Bu önerilen model Maxwell 2D ve 3D SEA modeli ile harici devre geçici hal simülasyon sistemini eş zamanlı olarak birlikte çözebilmektedir. Bu modelde geçici durum çözümleyiciler (Maxwell2D design Transients, Simplorer) arasında her bir zaman adımında veri transferi gerçekleşmektedir.

İlgili model, simülasyonları iki adımda gerçekleştirmek için kullanılır. Birinci adımda generatör, 100 d/d-450 d/d aralığında değişken hızlarda (100-150-200-250-300-350-400-450 d/d) ve sabit yükte ( $R_L = 44 \Omega$ ) çalıştırılmıştır.

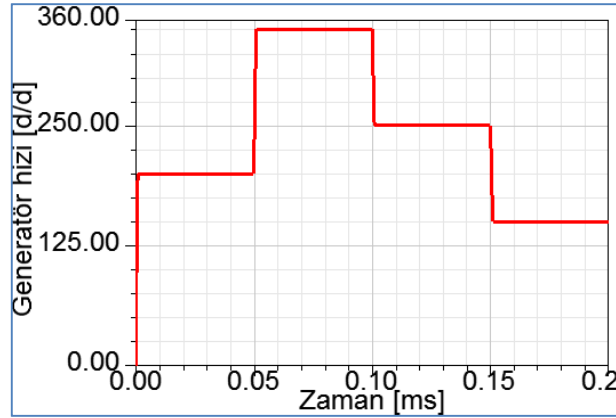


a) Yük hat gerilimi.

b) Çıkış gücü.

Şekil 5.11. Değişken generatör hızı ve sabit yük için değişim grafiği.

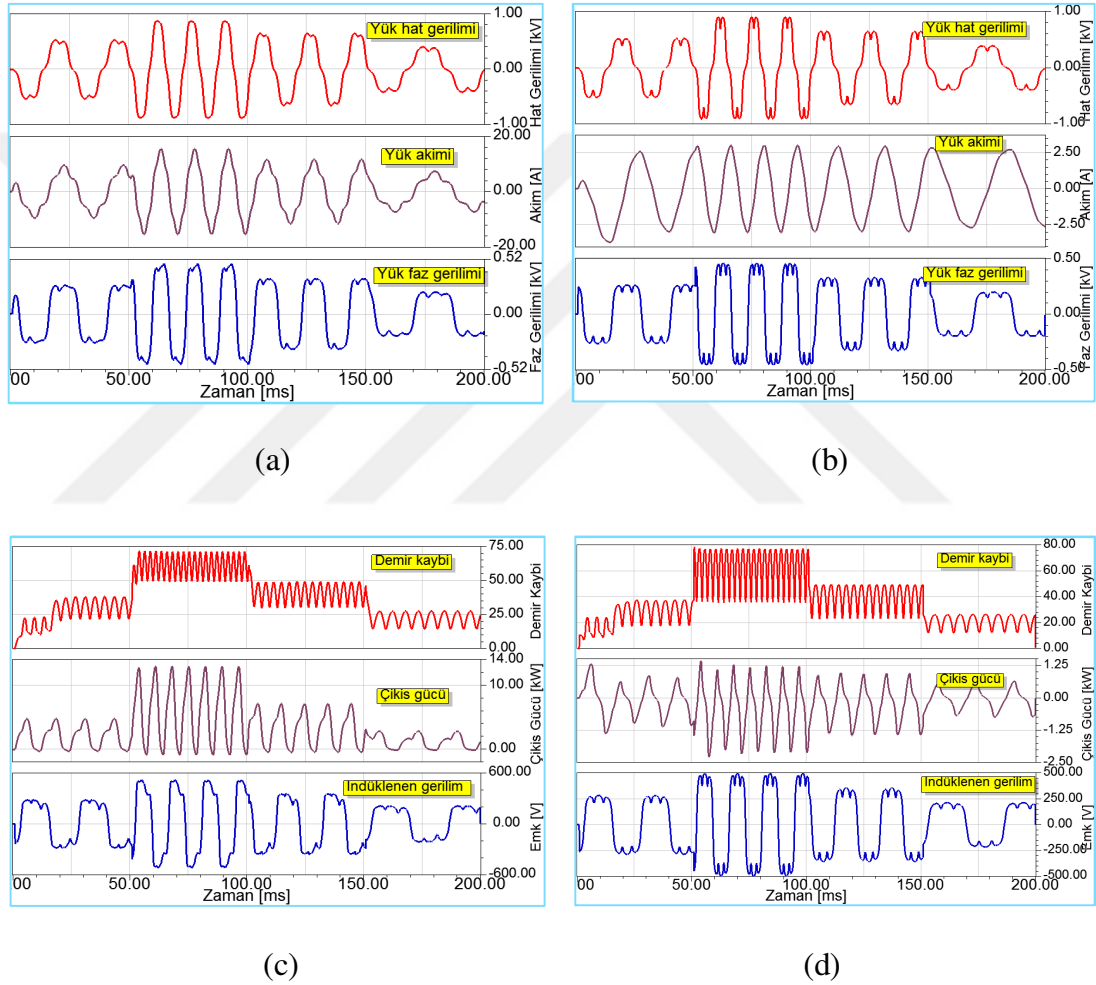
Şekil 5.11’de, generatörün sabit yükte ve farklı hız koşulları için ayrı ayrı gerçekleştirilen simülasyon sonuçlarına göre makinanın dinamik performansı elde edilmiştir.



Şekil 5.12. Rüzgâr hızına bağlı generatör hız rejimi.

Değişken hızlarda ve yük sabit iken, hız arttıkça yük hat gerilimi ve çıkış gücü de düzgün bir oranda artmaktadır. Rüzgâr hızına bağlı generatör hız rejimi (200-250-300-250 d/d) modele uygulandığında elde edilen simülasyon sonuçları, omik yük ( $R=36 \Omega$ ) için Şekil 5.13a ve c’de ve endüktif yük için ( $R=36 \Omega$ ,  $L=0,4$  H) Şekil 5.13b ve d’de verilmiştir. Şekil 5.12’de tanımlanmış rüzgâr hızı senaryosuna göre generatörün

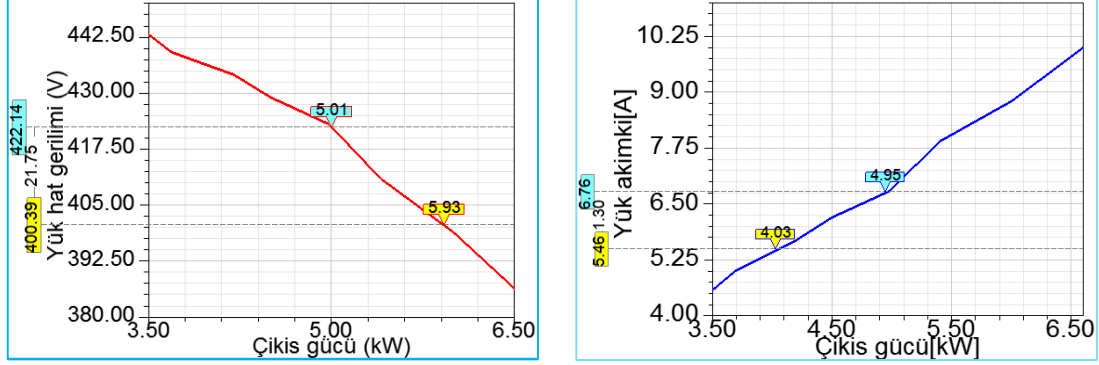
vermiş olduğu dinamik cevap, özellikle de hız değerinin beklenmedik biçimde arttığı ve azaldığı noktalarda oldukça iyi olduğunu belirtmek mümkündür. Şekil 5.13 c ve d hız artışında demir kaybının da arttığını göstermektedir. Ayrıca 3. ve 5. harmonik bileşenlerinin genliğinin yüksek olması sinüste bozulmalara neden olmuştur. Bu olumsuz durum kesirli oluk/kutup kombinasyonu ile giderilebilir. Karşılaştırmalı çıkış gerilimlerinin dalga şekilleri, endüktif yükün temel dalga şekillerinde bozulmaları artırdığını göstermektedir.



Şekil 5.13. Değişken hız işletme koşullarında elde edilen simülasyon sonuçları a) yük tarafı ölçümler (omik yük), b) yük tarafı ölçümler (endüktif yük), c) generatör tarafı ölçümler (omik yük), d) generatör tarafı ölçümler (endüktif yük).

Şekil 5. 14'te sabit hızda (250 d/d) farklı yük koşulları için (22-26-30-36-40-44-50-56  $\Omega$ ) ayrı ayrı gerçekleştirilen simülasyon sonuçlarına göre makinanın çıkış

karakteristiği elde edilmiştir. Yük artıkça yük akımının arttığı ve uç geriliminin azaldığı açıkça görülmektedir.

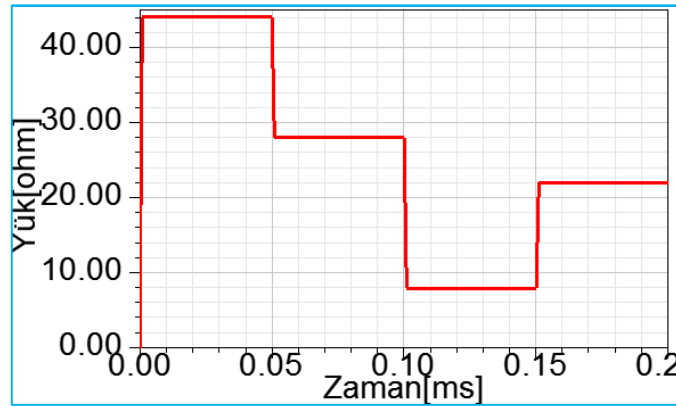


a) Yük hat gerilimi.

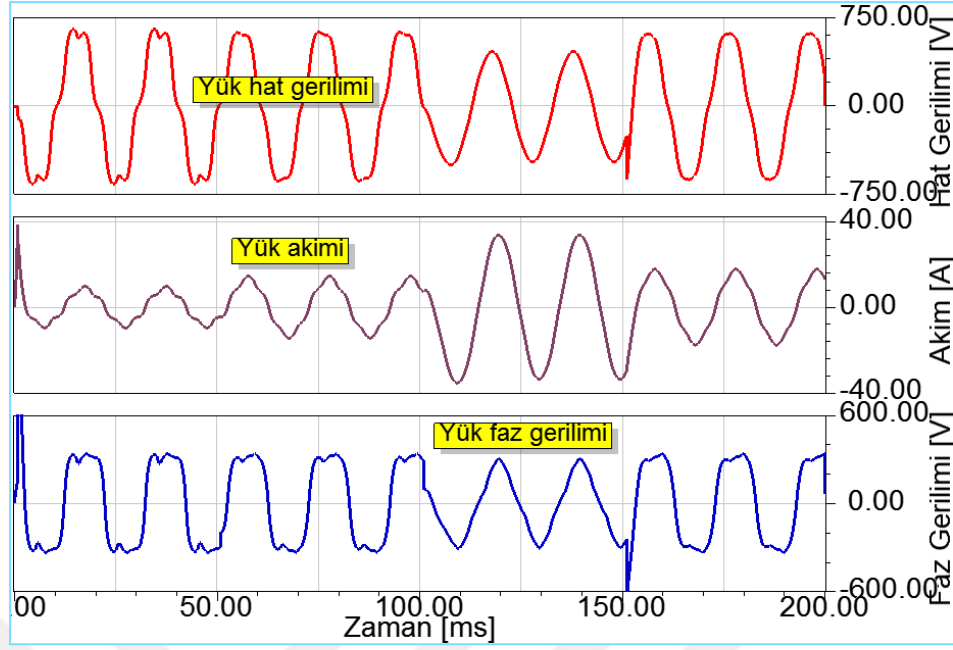
b) Yük akımı.

Şekil 5.14. Anma hızında değişen yük koşulları için çıkış gücü parametre eğrisi.

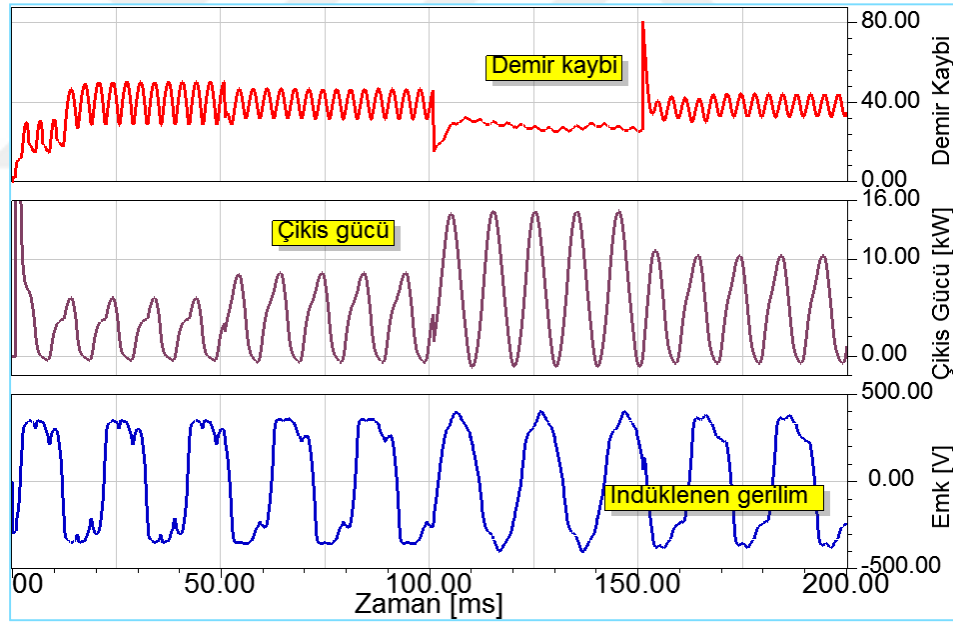
Daha önce gerçekleştirilen analizlerden farklı olarak, makinenin çıkış karakteristiği, nominal hızda değişken yük koşulları 44-28-8-22Ω olarak kaydedilmiş olan belirli bir zaman aralığında bir çalışma senaryosu Şekil 5.15'te verildiği gibi tanımlanmıştır. Sırasıyla hem güç tarafı hem de yük tarafına ait geçici değişim sonuçları Şekil 5.16'da gösterilmiştir.



Şekil 5.15. Değişken yük koşulları (omik).



a) Yük tarafı ölçümler.



b) Generatör tarafı ölçümler.

Şekil 5.16. Sabit hız, değişken yükte elde edilen simülasyon sonuçları.

Önceden tanımlanmış çalışma senaryosuna (Şekil 5.15) göre generatörün vermiş olduğu reaksiyonun, özellikle de yük değerinin beklenmedik biçimde artmış olduğu noktalarda düzgün tepkiler verdiğini belirtmek mümkündür. Aniden gerçekleşen değişimlerde torkdaki ani değişimlere bağlı olarak bazı dalgalanmalar

gözlemlenmiştir. Yük tarafındaki analizler, yükte değişim olduğu anlarda yük için uygun hat gerilimi temin etmekte oldukça güçlü olduğunu gösterir (Şekil 5.16). Diğer taraftan, 100 ila 150 ms arasında tanımlı düşük direnç değerinde harmonik etkinin daha az olduğu dalga şekillerinden anlaşılmaktadır. Bu geçici hal çözümleri 0-200 ms zaman aralığında 100  $\mu$ s'lik adımlarla elde edilmiştir. Bu zaman adımları daha küçük tutulacak olursa daha doğru sonuçlar elde edilebilir.

### 5.3. ARIZA ANALİZİ

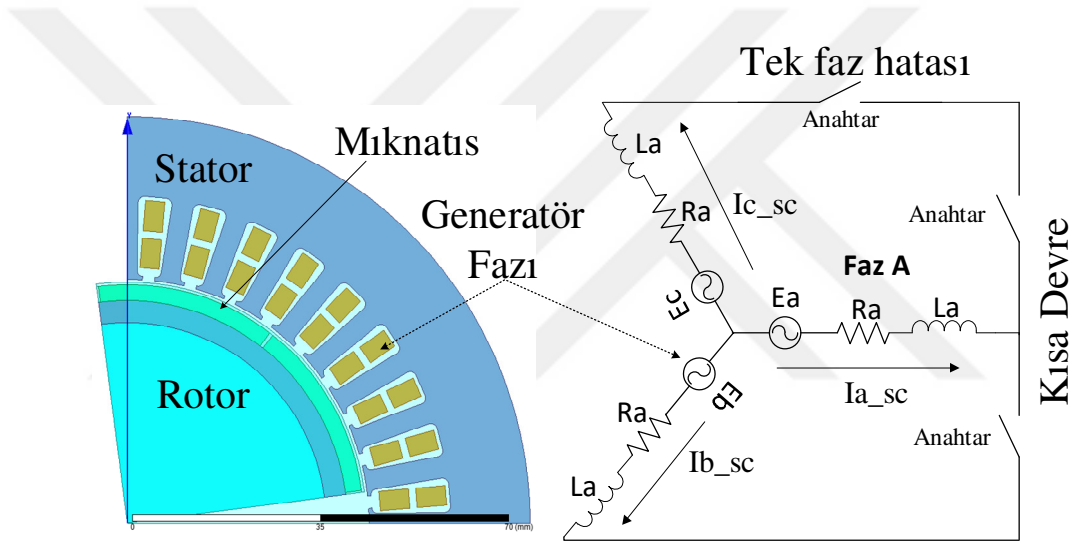
Elektromekanik enerji çevriminde KMSG'ler önemli rol oynamaktadır [171-172]. KMSG şimdi elektrikli araçlar [173], rüzgâr enerji çevrim sistemleri [174-178], karadan uzak uygulamalar [179], havacılık, demiryolu ve otomotiv sektörleri [180-182], su türbinleri [176] gibi çeşitli endüstriyel alanlarda yüksek verimliliği, yüksek güç yoğunluğu ve yüksek tork gibi [172-174,183] avantajlarından dolayı popüler bir seçenek haline geliyor [184]. Rüzgâr enerji çevrim sistemlerinde artan güvenilirlik ve kullanılabilirlik gereksiniminden dolayı KMSG ve sürme sistemlerinin önemi artmaktadır [179]. Diğer taraftan güvenilirliği artırma sürecinde dinamik modelleme oldukça önemlidir. Enerji dönüşüm sistemleri için KMSG önerilmesine rağmen, bazı arızalar kaçınılmaz [173]. Tek fazlı açık devre ve kısa devre arızaları kalıcı mıknatısların manyetik özelliğinin bozulmasına neden olabilir [173,179,184]. Özellikle KMSG için ani kısa devre arızası altında büyük akım ve tork oluşacaktır. Sonra bu durum KM makinenin demanyetizasyon veya mekanik hasarına neden olur [185]. Bu yüzden stator ve rotor kutup ayaklarında tepe akımları çok daha büyük olur. Yani KM makinaların kısa devre performansları üzerinde, hata toleransını geliştirmek için dikkatlice çalışılmalıdır [40].

#### 5.3.1. Kısa Devre Arızasının Eşdeğer Devre Modeli

Kısa devre geçici analizler için birçok çalışma geliştirilmiştir [172,177,179,180,182,184,185-187]. Bunlardan biri ayrıntılı olarak arıza analizi gerçekleştirmiştir [60]. Bu çalışma hataları tanımlamak için bütünleşik elektriksel alt sistem devreleri ile elektromanyetik alan çözümlerini kapsayan çoklu alan simülasyon temelli yaklaşımı sunmaktadır. Kaynak [184]'de zaman adımlı bütünleşik alan-devre

yöntemi KMSG'nin kısa devre performans çalışması için kullanılmıştır. Kaynaklar [182,185]'de simetri ani kısa devre akımı ifadesi 3 fazlı PM makinenin matematiksel modeline dayalı türetilmiş ve alt-geçici hal endüktans hesabı analiz edilir.

Bu çalışmada, 4 kW anma gücü ve 250 d/d nominal hızı ile mikro ölçekli rüzgâr türbini için bir önceki bölümde optimizasyon tasarımı ve dinamik performans analizi gerçekleştirilen radyal akılı KMSG'nin, çeşitli hata modlarındaki tepkisi ele alınacaktır. Bu çalışma ayrıca makinenin dinamik analizinin yanında çeşitli hata modlarının makine üzerindeki etkilerini izleme fırsatı veren bir simülasyon altyapısı sunmaktadır.



Şekil 5.17. Arıza modları için generatör eşdeğer modeli.

Şekil 5.17 makine terminali ani faz-faz kısa devre ve bir faz açık devre arıza senaryolarını içeren arıza modlarını göstermektedir. d-ekseni akım ifadesini kullanarak, faz A'nın simetrik kısa devre akımı aşağıdaki gibi hesaplanabilir [180,188]:

$$i_{a\_sc} = E_a \left[ \left( \frac{1}{X_s''} - \frac{1}{X_s'} \right) e^{-t/T''} + \left( \frac{1}{X_s'} - \frac{1}{X_s} \right) e^{-t/T'} + \frac{1}{X_s} \right] \quad (5.1)$$

Burada  $X_s''$  alt-geçici reaktansı (kaçak empedans),  $X_s'$  geçici reaktansı ve  $X_s$  senkron reaktansıdır. Ayrıca,  $T''$  kısa devre alt-geçici zaman sabiti,  $T_d'$  kısa devre geçici zaman

sabitidir. KMSG’de alan sargısı yoktur, bu yüzden  $X_s' = X_s$  ve geçici terimi ortadan kaldırma ve doğru alt-geçici terimi bırakma etkisi vardır. Bunun yanı sıra  $t = 0$ ,  $i_a = 0$  olur. Çıkıntısız kutuplu senkron generatör dikkate alındığında aşağıdaki ifade elde edilebilir:

$$i_{a-sc} = \left( \frac{E_a''}{X_s} - \frac{E_a'}{X_s} \right) e^{-t/T''} + \frac{E_a}{X_s} \quad (5.2)$$

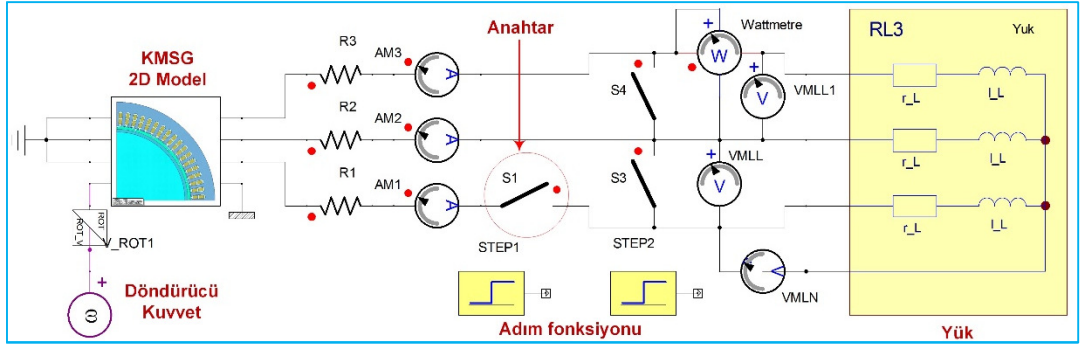
Geçici periyottan sonra, kısa devre akımının kararlı durum değeri (Eşitlik 5.3), alt geçici kısa devre bileşeni (Eşitlik 5.4) ve geçici kısa devre bileşeni (Eşitlik 5.5.) sırasıyla aşağıdaki gibi formüle edilebilir:

$$i_{a-ss} = \frac{E_a}{X_s} \quad (5.3)$$

$$i_a'' = \frac{E_a''}{X_s} \quad (5.4)$$

$$i_a' = \frac{E_a'}{X_s} \quad (5.5)$$

Şekil 5.18’de gösterilen model bütün parametreleri ile şebekeden bağımsız rüzgâr türbin generatörün tüm çalışma durumlarını sunmaktadır. Simülasyon altyapısı 6 bileşenden oluşmaktadır. Bunlar Maxwell 2D KMSG modeli, döndürücü kuvvet, anahtar, adım fonksiyonu, ölçü aletleri ve RL yük bankası. Oluşturulan model birkaç adımda simülasyonları çalıştırmak için kullanılır.

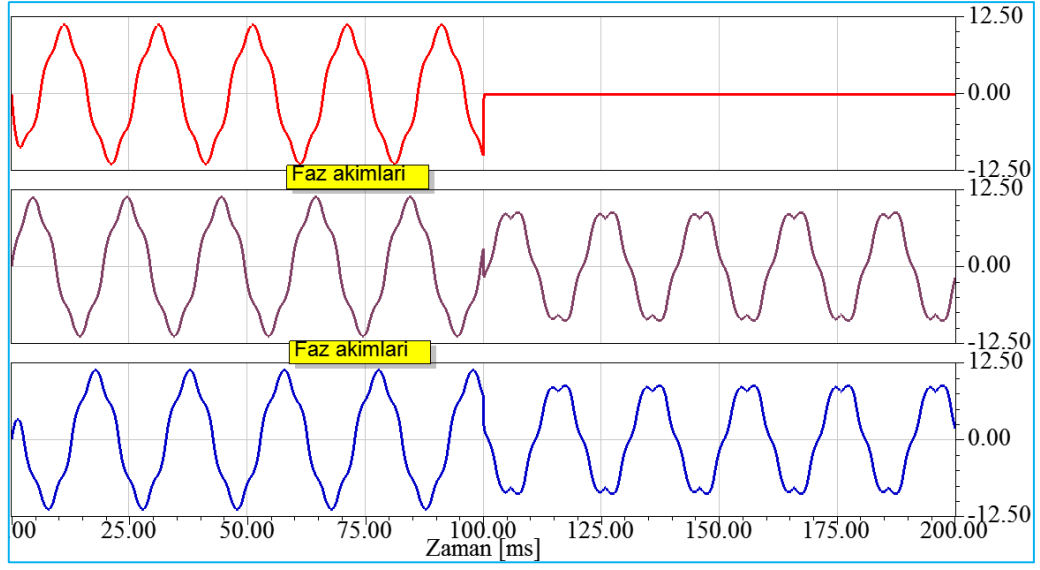


Şekil 5.18. Harici arıza senaryolarını kapsayan simülasyon platformu.

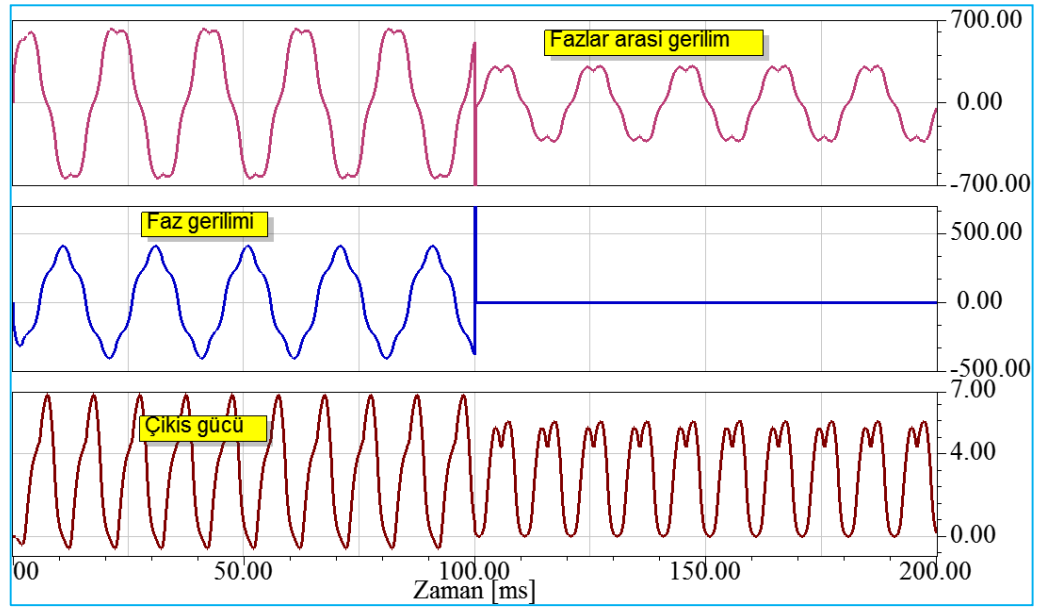
Bir önceki bölümde gerçekleştirilen değişken yük ve değişken hız çalıştırma modlarında kullanılan simülasyon modeli, generatörün kısa devre performans analizini gerçekleştirmek için de kullanılmıştır. Kısa/açık devre analizi için iki arıza senaryosu kullanılmıştır: Birinci senaryo generatörün bir fazının açık devre arızası, ikinci senaryo ise generatör terminalinin kısa devre edilmesidir. Hatlar arasına bağlanan anahtar arıza oluşturarak bu durumda makinanın davranışını görmek için devreye dâhil edilmiştir. Zaman kontrollü arıza aktivatörü belirli bir zaman diliminde veya anında adım fonksiyonu yoluyla arıza anahtarını aktive etmek için kullanılır. Bu bağlantı detayları ve arızalar arıza modunda generatör eşdeğer modeli (Şekil 5.17) dikkate alınarak verilmiştir ve simülasyon altyapısı gösterimi Şekil 5.18’de sunulmuştur.

### 5.3.2. Arıza Senaryolarından Elde Edilen Simülasyon Sonuçları

İlk durumda, generatörün bir fazı 100 ms’de açık devre yapılmıştır ve elde edilen sonuçlar Şekil 5.19’da verilmiştir. Generatör hat gerilimi, beklenen bir durumdur ki anında düştüğü ifade edilebilir. Generatör iki faza kaldığı senaryosu için, fazlar arasındaki dengesizlik görülebilir.



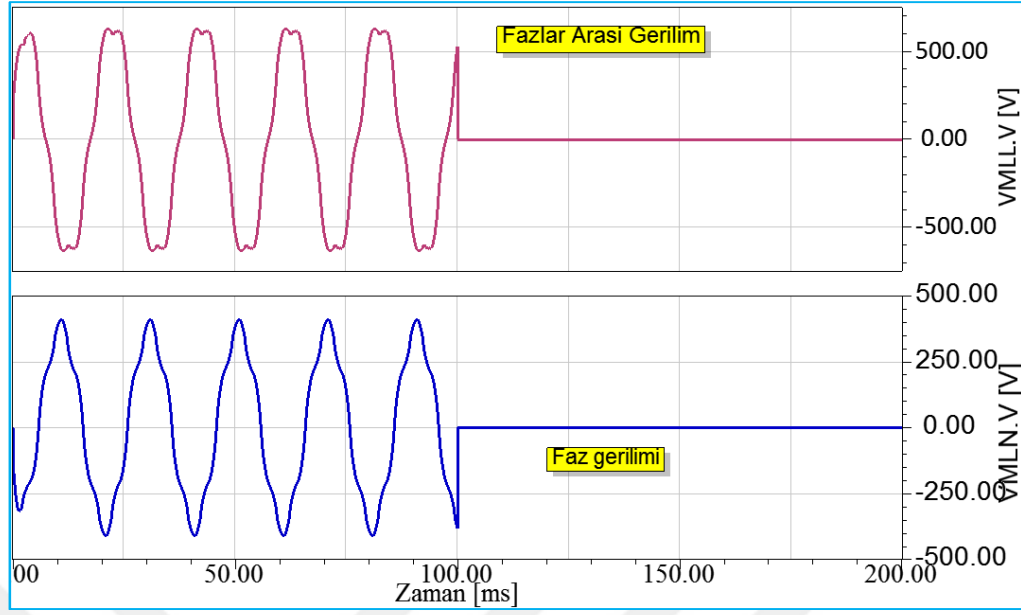
a) Faz akımları.



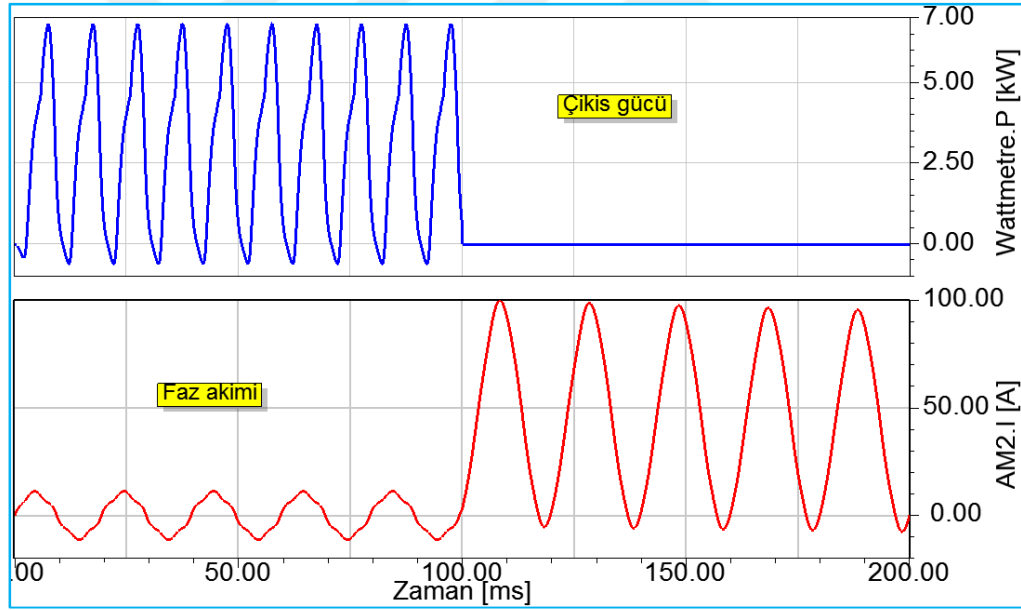
b) Çıkış gerilimi ve gücü.

Şekil 5.19. Generatörün bir faz açık devre arızası.

İkinci senaryoda, yükün kısa devre olması durumunda incelenen detaylar Şekil 5.20’de gösterilmiştir. Generatör yüklü iken generatör çıkışlarının kısa devre olması en kötü arıza durumlarından birisidir. Bu durumda, terminal ve yük akımları kritik bir şekilde artarken yük ve terminal hat gerilimlerinin aniden düşmesi ve sıfıra gitmesi beklenen durumdur.



a) Çıkış gerilimi.

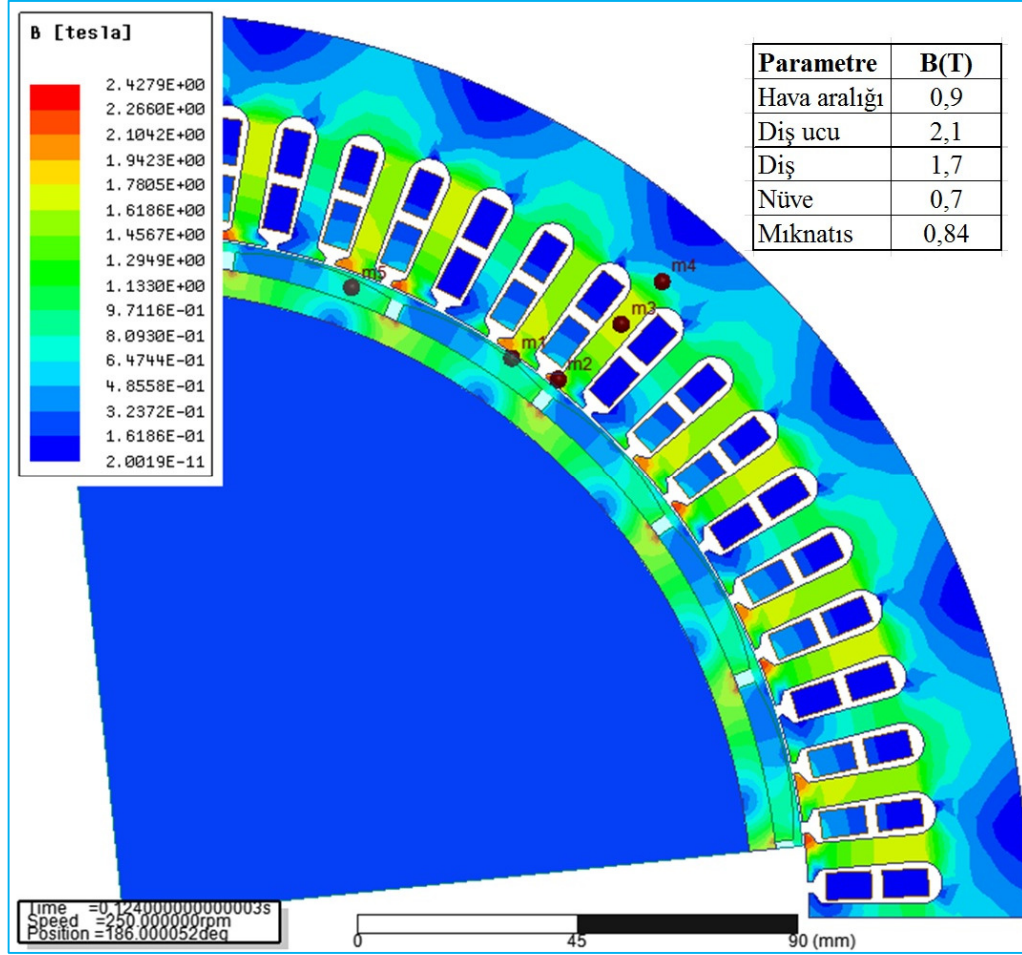


b) Faz akımı ve çıkış gücü.

Şekil 5.20. Yüken kısa devre arızası.

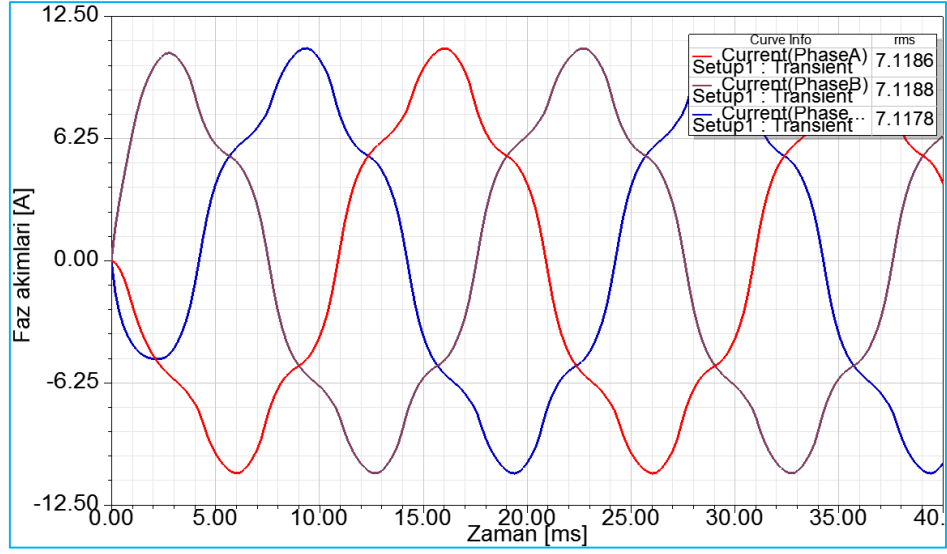
Simülasyonlardan elde edildiği gibi; 100 ms’de kısa devre arızası aktive edildiğinde, generatör çıkışı ve yük hat gerilimi sıfıra doğru düşer ve yük akımı aniden nominal akımdan 10 kat daha büyük 90 A’ e kadar yükselir. Öncelikle 186 derecelik dönüş pozisyonunda elde edilen tüm yüzeydeki akı dağılımları Şekil 5.21’de verilmiştir. Yüzeydeki akı dağılımı incelendiğinde, hava aralığı akısı beklendiği gibi 0.9 T, stator

dışındaki akı değeri 2 T ve stator sacındaki maksimum akı değeri ise 1.7 olarak gerçekleşmiştir. Bu da sacın doyma noktasına geldiğini göstermektedir.

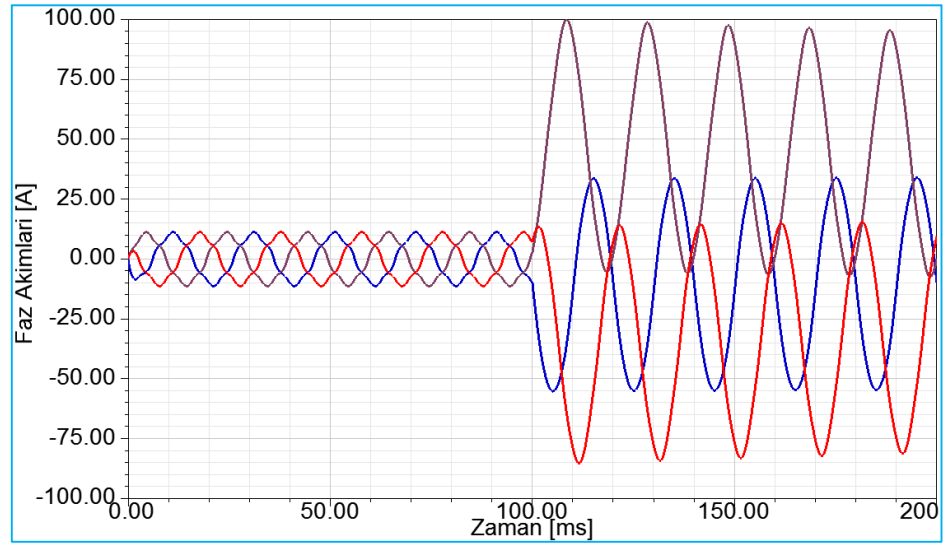


Şekil 5.21. Tüm yüzeydeki akı dağılımı.

Modele ait manyetik devrenin renk skalasından, 1 mm hava boşluğu ve 5 mm mıknatıs kalınlığında, manyetik devrenin tam kapasitede kullanıldığı ortaya çıkmaktadır. Bu, mıknatısın çok yüksek enerji performansından kaynaklanmaktadır. Normal çalışma şartında ve 100 ms sonra aktive edilen kısa devre durumunda elde edilen geçici sargı akımları Şekil 5.22’de verilmiştir. Normal şartlarda sargı akım değeri (mak.) 9 A iken, kısa devre sonrasında akım değeri yaklaşık 90 A, yani yaklaşık 10 katına çıkmıştır.



a) Normal çalışma şartları.



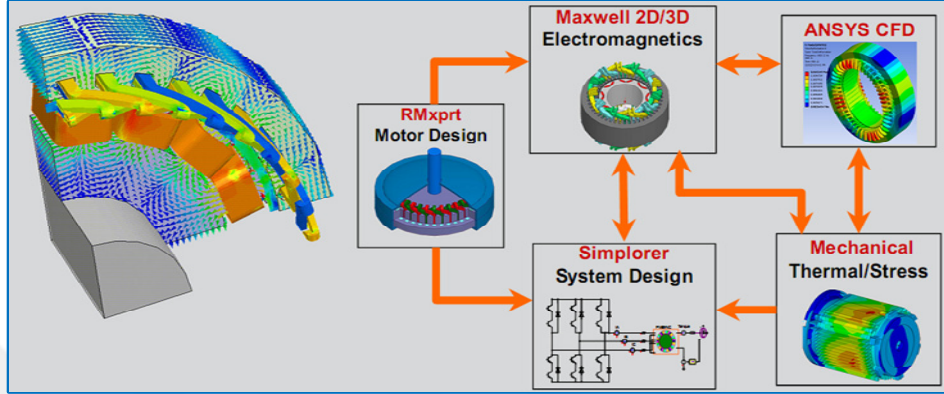
b) Kısa devre arızası.

Şekil 5.22. Üç faz sargı akımları.

#### 5.4. ANSYS İLE MULTİ-FİZİK ANALİZLER

Ansyes, elektrik makinalarının ısı ve yapısal analizi için kullanılan çok yönlü bir yazılım olup farklı makina tipleri için soğutma optimizasyonunda ve soğutma yöntemlerinde tercih edilen bir yazılımdır. Yazılımın analitik tabanlı algoritması sayesinde çok hızlı şekilde makine sıcaklıklarına ulaşılabilmekte ve gerçek makinalarda yapılamayacak çalışmaların analizine imkân tanınmaktadır. Bu kısımda

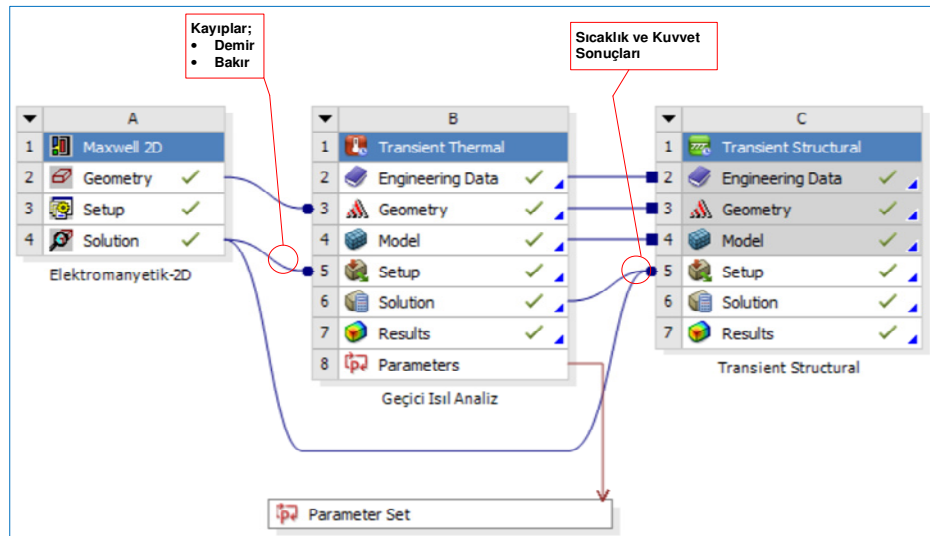
generatörün ısı ve yapısal analizleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar ortaya konmuştur. Kullanılan bu analiz yönteminde elektromanyetik ve yapısal analizler bütünlük bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu yönteme ait prensip şema Şekil 5.23’ de verilmiştir.



Şekil 5.23. Multi-fizik analiz prensip şeması.

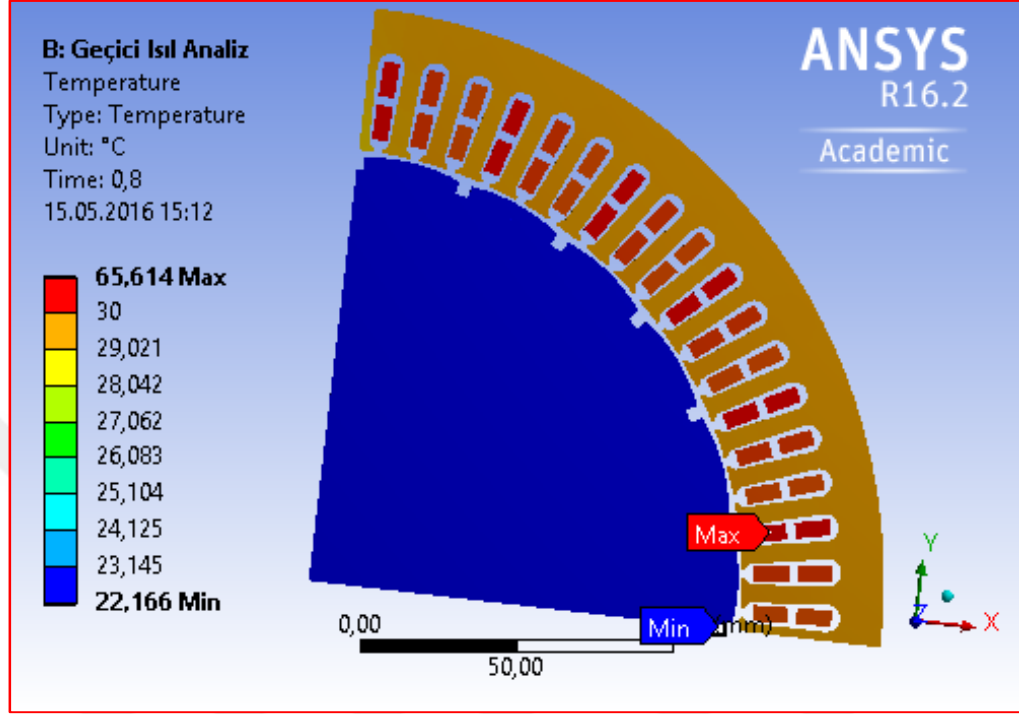
#### 5.4.1. Isıl Analiz

Isıl ve yapısal analizde dikkat edilmesi gereken en önemli nokta elektromanyetik analiz sonucu elde edilen kayıp ve kuvvet yoğunluklarının ısı ve yapısal kısma aktarılmasıdır. Bunu sağlamak için Ansys Workbench programında doğru bağlantının gerçekleştirilmesi gerekir (Şekil 5.24).

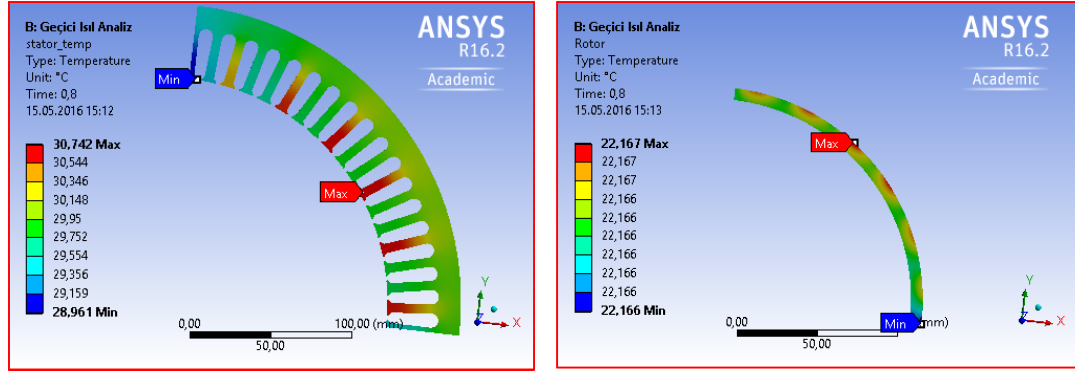


Şekil 5.24. Multi-fizik analiz bağlantı yapısı.

Ortaya konan bu parametreler ışığında generatör için elde edilmiş olan ısı analiz sonuçları Şekil 5.25 ve Şekil 5.26’da verilmektedir.



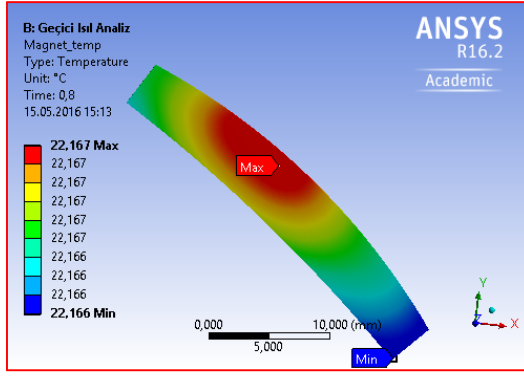
Şekil 5.25. Isıl analiz sonucunda generatörün tüm yüzeyine ait sıcaklık dağılımı.



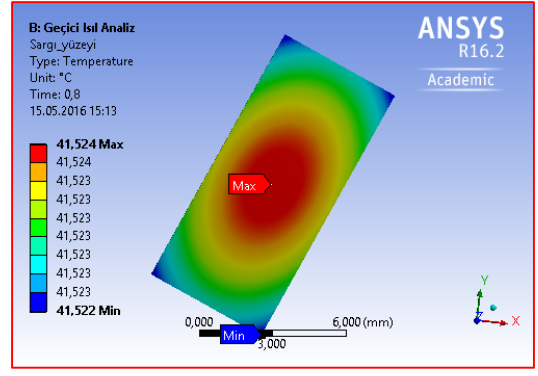
a) Stator.

b) Rotor.

Şekil 5.26. Generatör parçalarının geçici ısı analiz sonuçları.



c) Mıknatıs.

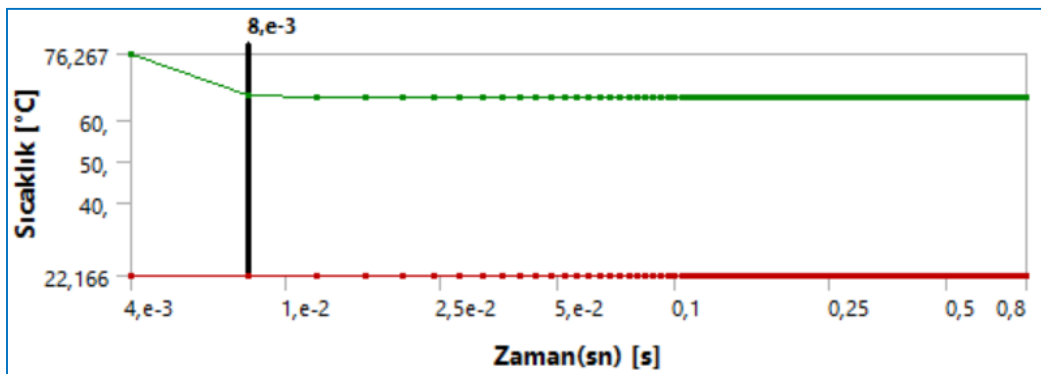


d) Sargı.

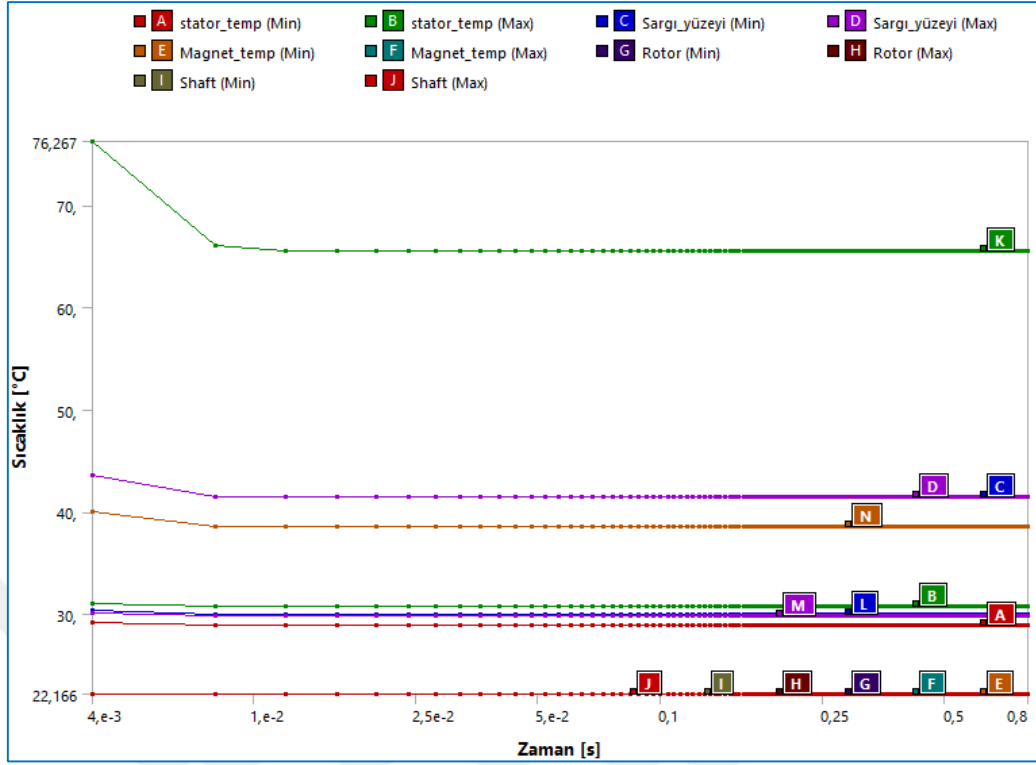
Şekil 5.26. (devam ediyor).

Şekil 5.25 ve Şekil 5.26 elde edilmiş olan ısıl analiz sonuçlarının renk skalası, generatör parçalardaki ısıl dağılımın beklenen düzeyde olduğunu ortaya koymaktadır. Elektrik makinaların en çok ısınan kısmı olan oluk için sargıları ile sargı uçlarıdır. Çalışma sonucunda bu değerlerdeki yükselmeler rahatlıkla görülebilir.

Bu sonuçlara göre generatörün gövde yapısının doğal soğutma (natural cooling) şartlarına göre tasarlanması mümkün gözükmektedir. Buna, ANSYS Fluent'te gerçekleştirilecek analizler sonucunda daha kesin karar verilebilir. Şekil 5.27 ve Şekil 5.28'de generatörün zamana bağlı sıcaklık değişimleri grafiksel olarak verilmiştir.



Şekil 5.27. Generatöre ait maksimum ve minimum sıcaklık değişimi.



Şekil 5.28. Generatör parçalarının zamana bağlı sıcaklık değişimi.

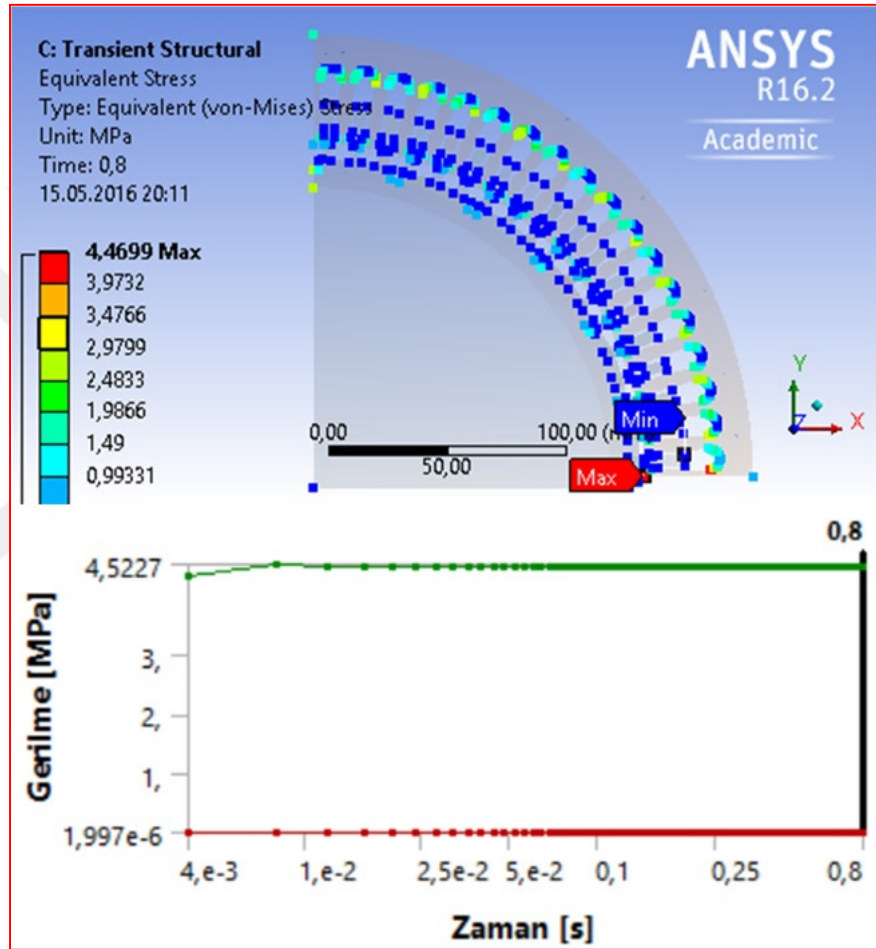
Çalışma sonucunda sıcaklık değişimleri incelendiğinde sıcaklıkların 0,008 sn sonra sabit kaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca sargılardaki akım yoğunluklarına bağlı olarak generatör sargılarında sıcaklık 66 °C ve 47.9 °C'ye çıktığı görülmüştür.

#### 5.4.2. Yapısal Analiz

Makina elemanları genel olarak değişken yüklerin ve gerilmelerin etkisi altındadır. Elemana etki eden yükler statik olsa bile kesitinde meydana gelen gerilmeler ve deformasyonlar değişken olabilir. Örneğin tasarlanan generatörün milene 250 d/d dönüş hızı uygulanarak zamana bağlı gerilmeler ve deformasyonlar değişkendir. Bu sebepten dolayı uzun süreli çalışacak olan ve en çok yüke maruz kalacak makine parçalarının yapısal yüklenme ve moment analizlerinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

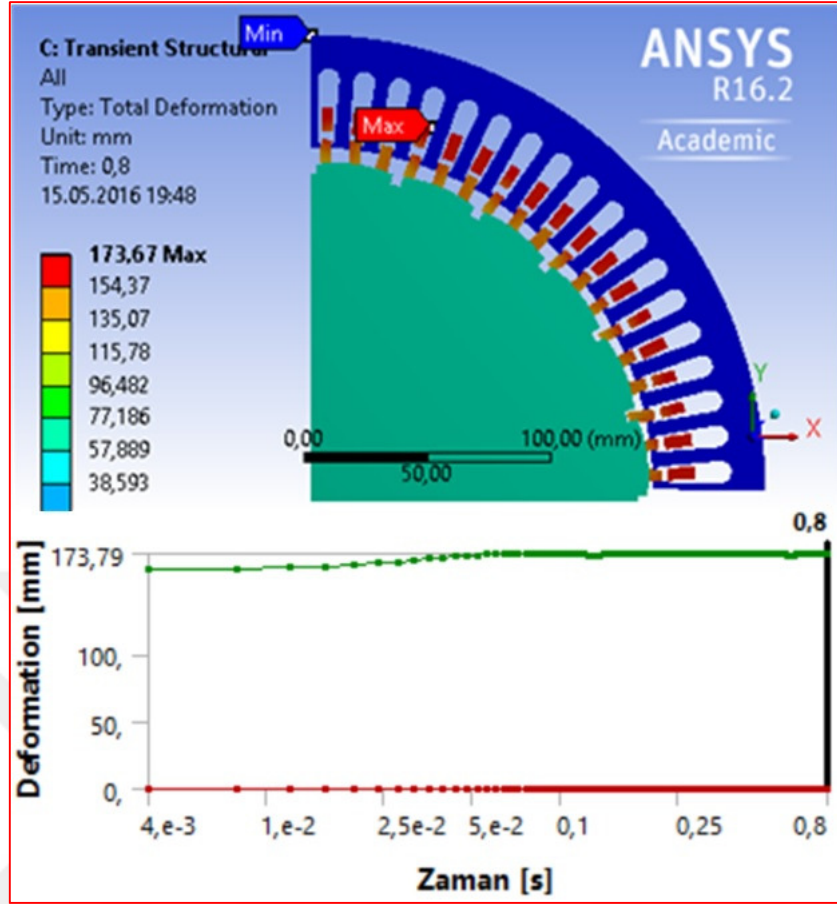
Gerçekleştirilen çalışmada tasarlanan generatör ANSYS Workbench ara yüzü ile bütünlük olarak elektromanyetik, ısı ve yapısal analizi (multi fizik) ortaya konmuştur. Bu sayede gerçekleştirilen testlerin ya da çalışma şartlarının simüle

edilmesine olanak sağlayan ANSYS, ürünlerin henüz prototipleri üretilmeden sanal ortamda test edilmelerine olanak sağlamakta ve sanal ortamdaki 3 boyutlu simülasyonlar neticesinde yapıların zayıf noktalarının tespiti ve iyileştirilmesi ile ömür hesaplarının gerçekleştirilmesi ve muhtemel problemlerin öngörülmesi mümkün olmaktadır. ANSYS Workbench'te gerçekleştirilen analiz sonuçları Şekil 5.29'da verilmiştir.



a) Toplam deformasyon

Şekil 5.29. Tasarlanan generatörde zamana bağlı olarak meydana gelen (250 d/d'da) deformasyon ve gerilme.



b) Gerilme.

Şekil 5.29. (devam ediyor).

Nominal hızda generatörde meydana gelen maksimum gerilme ve deformasyon sargılarda gerçekleşmektedir. Bunun nedeni de stator oluklarında bulunan kamanın modele konulmamasıdır. Kama da modele ilave edildiğinde bu yüksek değerler kabul edilir sınırlarda olacaktır. Ayrıca bu durum kamanın gerekliliğini göstermektedir.

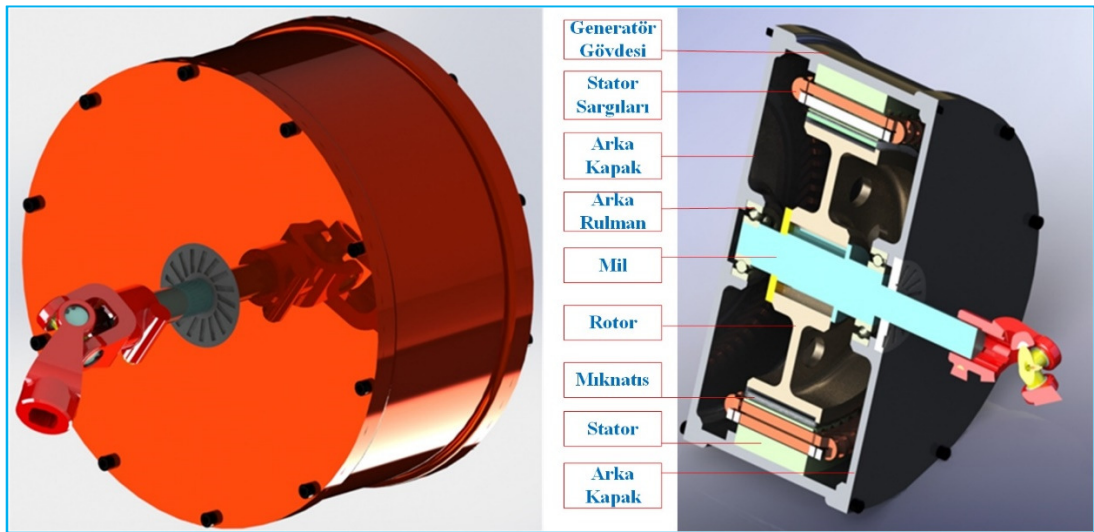
## BÖLÜM 6

### PROTOTİP, TEST VE DOĞRULAMA

#### 6.1. YAPISAL TASARIM VE PROTOTİPLEME

Bu bölümde üretim sürecinde gerçekleştirilen işlemler sunulmaktadır. Analitik hesaplamalar ve optimizasyon çalışmaları sonucu elde edilen temel boyutlandırma ve RMaxprt ile gerçekleştirilen tam yük altındaki analiz çalışmaları sonucu elde edilen verilere göre generatör üretimi gerçekleştirilmiştir.

Üretim aşamalarına geçmeden generatörün öncelikle stator ve rotorunun yapısal tasarımının gerçekleştirilmesi ve kullanılması planlanan parçaların yapısal analizlerinin ortaya konması gerekmektedir. Bunun için 3D olarak ANSYS Maxwell'de tasarımı tamamlanan model \*.sat uzantısı ile SolidWorks ortamında alınmıştır. Tasarlanan ve doğrulanan modeller SolidWorks ortamına aktarıldığında Şekil 6.1'deki gibi görünmektedir.



Şekil 6.1. Maxwell'den solidworks aktarılan model.

### 6.1.1. Statorun Yapısal Tasarımı

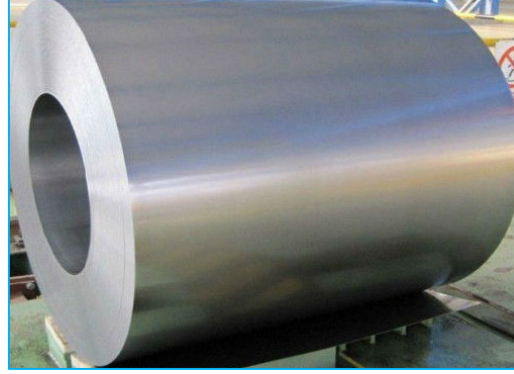
Makinelerin en önemli parçalarından birisi de statorudur. Stator sargıları taşıyan ve manyetik alanı oluşturan parçadır. Manyetik devrenin iskeletini oluşturan nüvenin en önemli özelliği 0,25, 0,3, 0,5 mm vb. gibi kalınlıklara sahip silikon elektrik saclarının belirli bir basınç altında sıkıştırılarak paket haline getirilmesinden oluşmasıdır.

#### 6.1.1.1. Nüve Malzemenin Seçimi Ve İşlenmesi

Elektrik makinelerinin tasarımı ve üretimindeki amaç olabildiğince ekonomik, istenilen özellikleri yerine getiren ve garanti eden bir makine ortaya çıkarmaktır. Bu yüzden iyi bir tasarım teknik bakışla ekonomik ve üretim yönlerine aynı önem verildiğinde geliştirilebilir. Nüve malzemesinin nasıl seçileceğinin bazı örnekleri uygulama gereksiniminden etkilenir ve bunlar aşağıda verilmiştir.

- *Evsel uygulamalarda kullanılan küçük güçlü makineler:* Bu tek fazlı makinelerin verimi tipik olarak % 60-70 civarındadır. Düşük maliyet ve seri imalata uygunluk öncelikli önemde bulunur. Bunu takip eden diğer faktörler: 890-50-D5 gibi alaşımsız (silikonsuz), yarı işlenmiş malzeme, yönlendirilmemiş yönde zımbalama kolaylığı olan ve düşük maliyetli malzemedir.
- *Standart üç fazlı indüksiyon makineler:* Bu endüstriyel uygulamalarda en yaygın kullanılan motor tipidir. 250 W'lık bir makinenin verimi tipik olarak % 70 iken 18 kW'lık bir makinenin verimi % 90'a yükselir. Burada da ekonomik etmenler önemlidir fakat dengeli bir tasarım genelde 4 W/kg civarında nüve kayıpları ile düşük kayıplı, yönlendirilmemiş, tamamen ısıl işleminden geçirilmiş elektriksel çeliklerin kullanımını zorunlu kılar.
- Adım motorları ve DA servo motorlar ile kalıcı mıknatıslı sistemler çoğu kez yüksek akı yoğunluğu (1,6-1,8 T) ile tasarımlanır ve verim bir başlangıç tasarım parametresi olarak nadiren dikkate alınır. Normalde bu tip motor ve generatörlerde ince kalınlıkta, yönlendirilmemiş elektriksel çelikler kullanılır fakat bazı tasarımlarda gelişigüzel açısal davranışta paketlenmiş tanecik yönlendirmeli malzeme de kullanılmaktadır.

Bu çalışmada M19(M310-50A) tipinde yüksek geçirgenliğe sahip silikon elektrik sacı kullanılmıştır (Şekil 6.2).



| Sınıfı<br>EN 10106 | Spesifik toplam<br>kayıp (50 Hz)<br>J= 1,5 T 1,0 T |      | Kayıp<br>anizotropisi<br>% | Manyetik kutuplanma<br>(50 Hz)<br>H= 2500 5000 10000 A/m |      |      | Mıknatıslığı<br>giderme (DA)<br>A/m | Bağıl<br>geçirgenlik<br>(1,5 T) |
|--------------------|----------------------------------------------------|------|----------------------------|----------------------------------------------------------|------|------|-------------------------------------|---------------------------------|
|                    | W/kg                                               | W/kg |                            | T                                                        | T    | T    |                                     |                                 |
|                    |                                                    |      |                            |                                                          |      |      |                                     |                                 |
| M235-35A           | 2,25                                               | 0,92 | 10                         | 1,53                                                     | 1,64 | 1,76 | 35                                  | 610                             |
| M250-35A           | 2,35                                               | 0,98 | 10                         | 1,53                                                     | 1,64 | 1,76 | 40                                  | 660                             |
| M270-35A           | 2,47                                               | 1,01 | 10                         | 1,54                                                     | 1,65 | 1,77 | 40                                  | 700                             |
| M300-35A           | 2,62                                               | 1,10 | 10                         | 1,55                                                     | 1,65 | 1,78 | 45                                  | 830                             |
| M330-35A           | 2,93                                               | 1,19 | 10                         | 1,56                                                     | 1,66 | 1,78 | 45                                  | 860                             |
| M700-35A*          | 5,50                                               | 2,53 | 7                          | 1,63                                                     | 1,71 | 1,83 | 100                                 | 1750                            |
| M250-50A           | 2,38                                               | 1,02 | 10                         | 1,55                                                     | 1,64 | 1,77 | 30                                  | 740                             |
| M270-50A           | 2,52                                               | 1,07 | 10                         | 1,55                                                     | 1,64 | 1,77 | 30                                  | 770                             |
| M290-50A           | 2,62                                               | 1,14 | 10                         | 1,56                                                     | 1,65 | 1,78 | 35                                  | 800                             |
| M310-50A           | 2,83                                               | 1,23 | 10                         | 1,57                                                     | 1,66 | 1,79 | 40                                  | 970                             |
| M330-50A           | 3,03                                               | 1,29 | 10                         | 1,58                                                     | 1,67 | 1,79 | 40                                  | 1000                            |
| M350-50A           | 3,14                                               | 1,33 | 9                          | 1,58                                                     | 1,67 | 1,79 | 45                                  | 1020                            |
| M400-50A           | 3,42                                               | 1,46 | 9                          | 1,58                                                     | 1,67 | 1,79 | 50                                  | 1070                            |
| M470-50A           | 4,05                                               | 1,79 | 6                          | 1,58                                                     | 1,67 | 1,79 | 60                                  | 1070                            |
| M530-50A           | 4,42                                               | 2,01 | 6                          | 1,59                                                     | 1,68 | 1,80 | 70                                  | 1100                            |
| M600-50A           | 5,17                                               | 2,34 | 6                          | 1,63                                                     | 1,72 | 1,83 | 85                                  | 1660                            |
| M700-50A           | 5,68                                               | 2,57 | 5                          | 1,64                                                     | 1,72 | 1,84 | 100                                 | 1730                            |
| M800-50A           | 6,60                                               | 3,05 | 5                          | 1,65                                                     | 1,74 | 1,85 | 100                                 | 1810                            |
| M940-50A           | 7,55                                               | 3,57 | 5                          | 1,65                                                     | 1,74 | 1,85 | 110                                 | 1850                            |

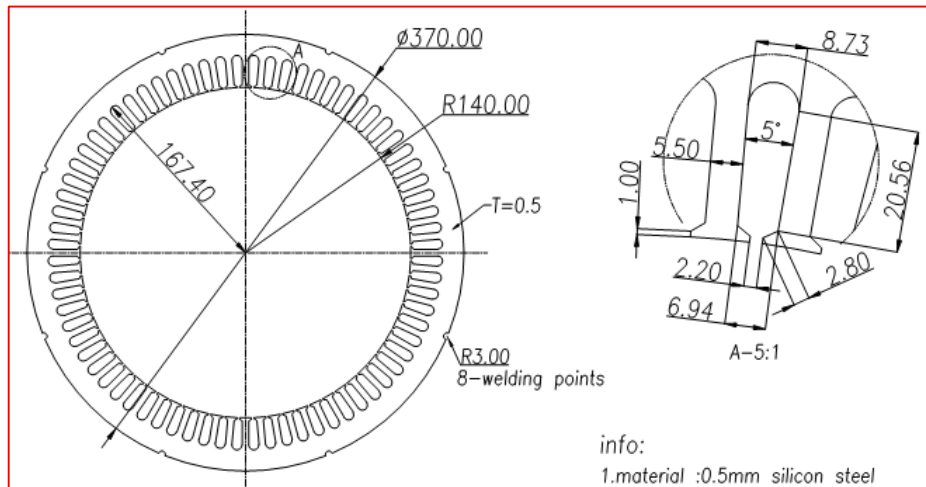
Şekil 6.2. Kullanılan silikon sac ve manyetik özellikleri.

Elektrik makine tasarımcıları için laminasyon malzemeleri olarak ta bilinen elektrik çelikleri iki tipte üretilmektedir. Bunlar yönlendirilmemiş ve tanecik yönlendirmeli çeliklerdir. 0-%3 arasında silikon içeren yönlendirilmemiş elektrik çelikleri temelde izotropiktir. Bunlar 1,3 m'ye kadar genişlik ve 0,35-0,8 mm kalınlığında şeritler olarak üretilir. Levha çoğu kez laminasyonlar arası yalıtımın sağlanması için ince bir yalıtkan katmanla kaplanmış olarak verilir. Bir yüzeyin buharla mavileştirilmesi küçük makinelerde kullanılan laminasyonlarda tercih edilirken organik veya inorganik kaplama büyük laminasyonların bir veya iki yüzeyine uygulanır. Her iki yüzeydeki

yalıtım Eddy akım kayıplarını azaltmanın yanında depolama süresince laminasyonların korozyondan korunması avantajına da sahiptir.

Yönlendirilmemiş yarı işlenmiş laminasyonlar 1,5 T ve 50 Hz de 0,5 mm ve 0,65 mm standart kalınlıklara sahiptir ve bunların tipik özgül kayıp değerleri (W/kg) sırasıyla 4,55–5,5 ve 6,0–7,1 aralığında bulunmaktadır. Tam işlenmiş malzemenin standart kalınlıkları 0,35 mm, 0,50 mm ve 0,65 mm ve 1,5 T ve 50 Hz’de garanti edilen özgül kayıp değerleri (W/kg) sırasıyla 3, 4 ve 8’dir.

Bazı istisnaların dışında çoğu makina üreticileri silikon çelik üreticileri ile doğrudan ilişki içinde değildir. Bunlar standart laminasyonların geniş bir aralığını elinde bulunduran laminasyon sağlayıcılardan zımbalanmaya hazır laminasyon alırlar. Bu projede kullanılacak olan laminasyonlar için herhangi bir standart bulunmadığı için laminasyonlar Ansoft Maxwell’de tasarlanan laminasyonlarla birebir ölçüde olacak şekilde hazırlanan kalıplarda basılarak zımbalanmıştır. Zımbalama ve kalıplama aksiyonu laminasyonun alt tarafında biçimlendirilmesi gereken çapakların oluşmasına neden olur. Önceden yalıtılmış laminasyonlar kullanıldığında, çapakların büyüklüğü nüvedeki laminasyonların kısa devre olmasını engellemek için yalıtkan filmin kalınlığından daha az bir değerde tutulmalıdır. Keskin alet ve takımlar çapak boyutunu en aza indirir ve laminasyonlar çoğu kez aşırı çapak boyutuna karşı belli sayıdaki bir işlemden sonra gözden geçirilerek kontrol edilir.



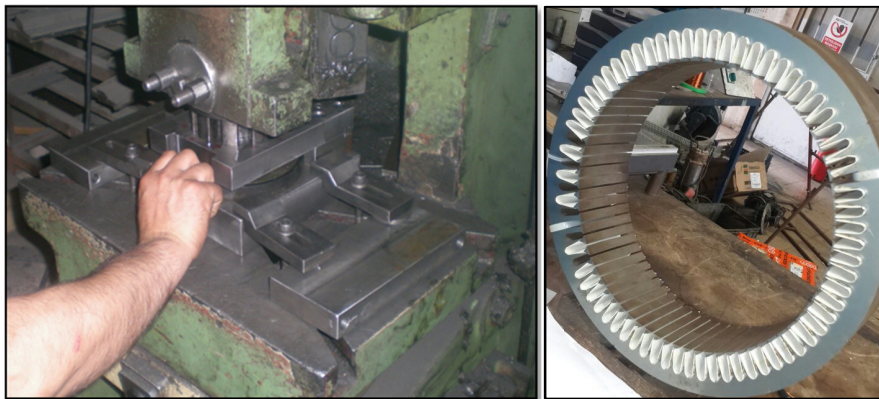
Şekil. 6.3. Stator boyutlandırma.

Ortaya çıkan sonuçlara göre boyutları Şekil 6.3’de verilen stator sacının üretimi için laminasyonlar nihayetinde kesme kalıpları oluşturulduktan sonra kesilerek stator sacları elde edilmiştir (Şekil 6.4).



Şekil 6.4. Kalıplarda kesilen elektrik sacları.

Şekillerine kavuşan saclar için bir sonraki aşama presleme ve paketlemedir (Şekil 6.5). Laminasyonlar nüve paketi olarak bir araya getirilir ve oyuklara yerleştirilen sıralama çubukları paketin düzgün doğrultuya getirilmesinin sağlanmasında kullanılır. Paketin tamamı daha sonra sıkıştırılır ve laminasyonlar nüvenin sırt kısmından kaynakla birbirine tutturulur. Küçük makinalarda laminasyon üzerinde özel olarak zımbalama ile açılmış küçük oyuklara kaynak doğrudan uygulanır. Büyük makinalarda ek mekanik desteğin sağlanması için nüve çubukları laminasyona kaynaklanır. Son olarak laminasyonların üzerindeki yüksek çıkıntılar bir eğe ile giderilir. Bunlar en aza indirilirken laminasyonların kısa devre olmasını engellemeyecek şekilde dikkatlice yapılmalıdır.



Şekil 6.5. Presleme ve paketleme.

### 6.1.1.2. Oluk Yalıtımı Ve Sarım İşlemi

Bir elektrik makinesinin oyuğunda kullanılan yalıtıcı malzemeler şu şekilde saptanabilir (Şekil 6.6): oyuk astarı (yen), kapak slaytı (oyuk kapatıcı), oyuk kaması veya takozu ve çok katmanlı sargı durumunda oyuk ayırıcı (ara slaytı). Isıl ve mekanik özellikleri sağlarken oyuktaki aktif iletken malzemenin hacminin maksimumda olabilmesi için oyuk yalıtım (aktif olmayan) sisteminin hacmi en azda tutulmalıdır. Hâlihazırda küçük elektrik makinelerinin oyuk yalıtımı mika içermeyen şu malzemelerden yapılır: tek katman (kâğıt türü malzemeler), kompozit laminantlar, emprenye (önceden emdirilmiş) tabakalar ve katı yalıtım malzemeleri.



Şekil 6.6. Polyester film malzemenin stator oluklarına yerleşimi.

A sınıfı presbantlar diğer elektriksel kâğıtlar gibi işlenen pamuk bez fiberler veya kâğıt hamurunun belli sayıda ıslak katmanlarının preslenmesi ve ısıtım işlemi ile hazırlanabilir. Bunlar yaklaşık 0,1 mm gibi minimum bir kalınlıkta üretilir. Reçine emdirilmiş elektriksel presbantlar bazı küçük makinelerde oyuk yenleri (0,25-0,5 mm kalınlık)

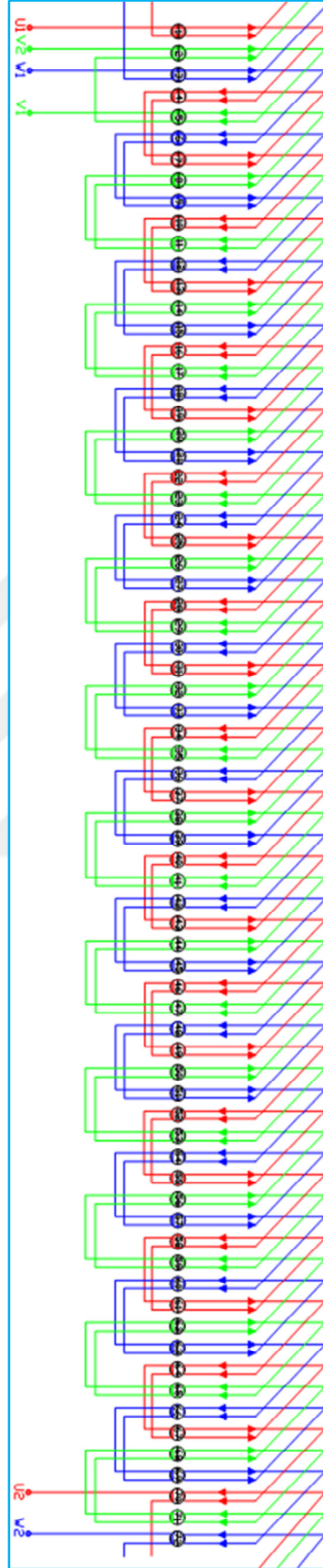
olarak kullanılır. Bununla beraber bunların en önemli kullanımı kompozit yalıtım malzemelerinin fabrikasyonunda bir bileşen olmaktır. Bu malzemeler 105°C'lik bir sınırlayıcı sıcaklıkta belirtilmiş olmakla beraber çok daha sıcaklıklara kısa süreli dayanabilirler. Bu presbantların yerine gerçekleştirilecek olan tasarımda F sınıf etilen glikol ve tereftalik asidin yoğunlaşma ürünü polyester film olarak bilinen bir plastik film kullanılacaktır. Mükemmel mekanik ve ısı özelliklerine sahiptir. Polyester film 175 °C'lik bir sıcaklık göstergesine sahiptir.

Makinede gerçekleştirilecek en önemli işlemlerden birisi de sarım işlemidir. Düzgün ve hesaplamaları doğru yapılmış sarım şekli verimli bir makine tasarlamada en önemli etkenlerden biridir. Yapılan analitik hesaplamalar ve manyetik analiz sonuçları kaç spirlik sarım yapılacağıının bilgisini vermektedir.

İletken malzemelerin olabilecek en yüksek iletkenliğe ve olabilecek en düşük direncin sıcaklık katsayısına sahip olması istenilir. Bunların aynı zamanda iletken tel, sargı ve diğer karmaşık kısımların fabrikasyonunu mümkün hale getirecek yeterli mekanik dayanıma sahip olması istenilir. Küçük elektrik makinelerinde kullanılan iletkenler normalde yüksek mekanik gerginliğe maruz kalmamasına rağmen sargıların yapım işlemi ve bunların oyuklara yerleştirilmesi bazı mekanik özellikleri zorunlu hale getirir. Ek olarak iyi kaynak yapılabilirlik ve lehimlenebilirlik bağlantı yerlerinin yüksek güvenilirliği ve elektriksel direncinin düşük olmasını garantiye alır.

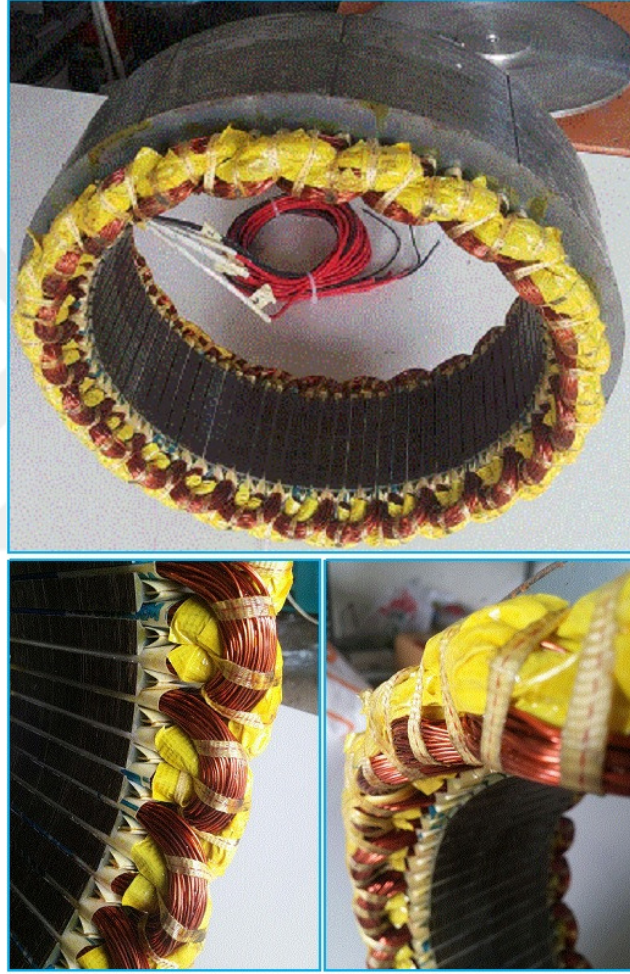
Bakır oldukça kolay işlenebilen ve yumuşak bir metaldir; dökümü yapılabilir, dövülebilir, haddelenebilir, çekilebilir ve makinede işlenebilir. Yüksek elektriksel iletkenliği ve mükemmel mekanik özelliklerinden dolayı bakır elektrik makinelerinin sargılarında en yaygın kullanılan elektriksel iletkenidir. Gerçekleştirilen çalışmada sarım malzemesi olarak bakır iletken kullanılmıştır.

Oluk başı iletken sayısı, sargı adımı, iletken kalınlığı gibi parametrelere önceki bölümlerde karar verilen generatörün stator sarım şeması Şekil 6.7'de verilmektedir.



Şekil 6.7. Stator sargılarının sarım şeması.

Generatörün stator sargıları 1.1 mm'lik iletken ile 2 katlı 672 spir (faz başına) sarılmıştır. Elde edilen akım yoğunluğu yaklaşık maksimum 4.24 A/mm<sup>2</sup>'dir. Bu değer de kabul edilebilir bir yoğunluk değeridir. Elektrik makinalarının tasarımında akım yoğunluğunun güce bağlı olarak 3,5 ila 8 A/mm<sup>2</sup> arasında tutulması tavsiye edilmektedir. Şekil 6.8'de ise sarımları tamamlanmış generatörün statoru görülmektedir.



Şekil 6.8. Sarımı tamamlanan stator.

Her ne kadar simülasyonlarda elde edilen sargı sonlarının genişliği bilinse de generatör gövde ve kapakları tasarlanmadan önce bu uzunluktan emin olunmalıdır. Bu yüzden dış kapakların tasarımına başlamadan önce sarımın bitirilmesi beklenmiştir.

### 6.1.2. Mıknatıs Tasarımı Ve Rotor Gövdesinin İşlenmesi

Özel tasarımlarda en çok problem yaşanan nokta mıknatısların tasarlanması ve üretilmesidir. Maalesef Türkiye’de mıknatıs üretimi yapan herhangi bir firma ya da kuruluş bulunmamaktadır. Şu an için tasarlanan mıknatıs çizimleri yurt dışına gönderilerek orada üretilmesi sağlanmaktadır. Mıknatıs tasarımının ardından; mıknatıslar oturması için CNC teknolojisi ile işlenmiş olan gövdeye yerleştirilmiştir.

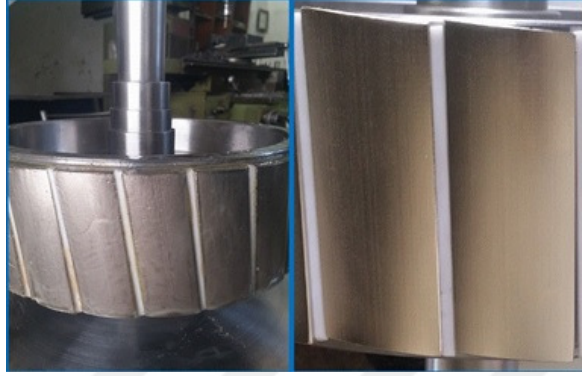
Kalıcı mıknatıslar doğru akımda uyartılan elektromıknatıslar gibi aynı etkiyi meydana getirerek elektrik makinelerinde uyartımın sağlanmasında kullanılır. Bir kalıcı mıknatıs manyetik enerjiyi depoladığı ve bu enerji aygıtın çalışmasında tüketilmediğinden kullanışlıdır. Normal sınırları içinde çalıştırıldığında mıknatıs sonsuz bir zaman için enerjisini üzerinde barındırır. Şayet kalıcı mıknatıs yerine bir elektromıknatıs kullanılarak manyetik alan oluşturulursa uyartım alanının enerjisinin korunumlu olduğuna dikkat edilmelidir. Bununla beraber uyartım akımında iletkenin direncinden dolayı omik kayıplar adında bir miktar enerji kaybolur.

Kalıcı mıknatıs malzemeler kimyasal yapılarına göre üç ana grupta gruplanabilir. Bunlar seramikler (veya Ferrit’ler), Alnico’lar ve nadir toprak mıknatıslarıdır. Ferrit’ler (manyetik olarak sert seramikler) elektriksel ve ısı yalıtkanlar iken diğer bütün mıknatıslar metalik iletkenlerdir. Alnico’lar oldukça yüksek kalıcılık ve düşük gidericiliğe sahip iken bu iki parametrenin her ikisi nadir toprak mıknatıslarında yüksek değerlere sahiptir. Seramikler çok ucuz ve bol bulunan ham maddelerden oluşmaktadır. Alnico’lar ve nadir toprak-kobalt (samarium-kobalt) mıknatısları kobalt kullanırken seramikler ve nadir toprak Ferrit’leri (neodmiyum-demir-bor mıknatıslar) bunların hiçbirini gerektirmez.

Çizelge 6.1 mıknatıs malzemelerin ana gruplarının manyetik özelliklerini özetlenmekte ve her birine ait birim enerji başına yaklaşık maliyetini vermektedir. Her malzeme grubunun çeşitli türleri olduğundan maksimum enerji çarpımının da geniş bir aralığı vardır. Kalıcılık ve gidericilik elektrik makinelerinde yaygın olarak kullanılan türler için ortalama değerler olarak alınır.



Buna göre mıknatısların yerleştirilmesi için rotor malzemesi olarak kullanılacak olan ST-37 çeliğinin kalınlığı da analitik ve manyetik analizler sonucu bilindiğine göre mekanik tasarıma ve paralel olarak üretime başlanabilir. Temin edilen mıknatıslara, tezgâhta işlenen rotor boyunduruğu ve miline ait resimler Şekil 6.10’da verilmiştir.

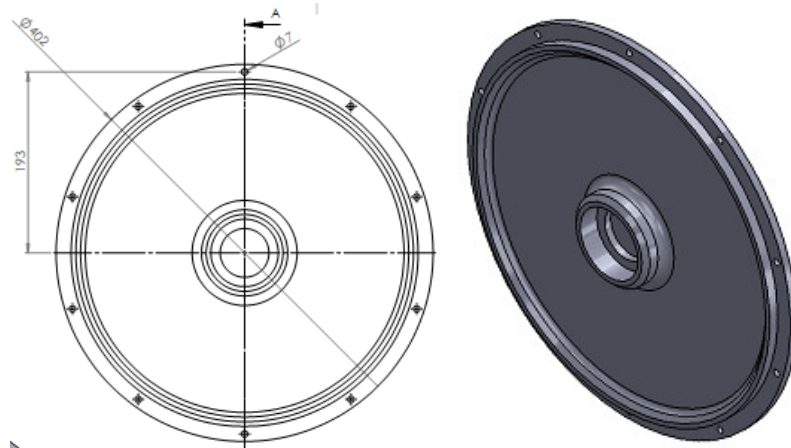


Şekil 6.10. Mıknatısların rotor yüzeyine yerleşimi.

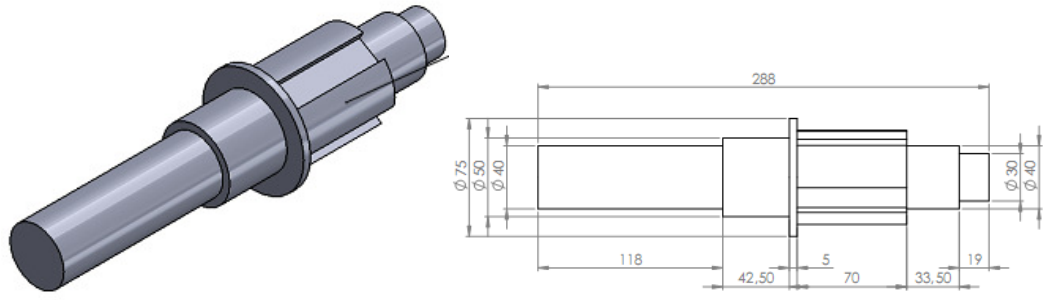
Stator ve mıknatıs temininin ardından tamamen generatörün üretimine yoğunlaşmıştır.

### 6.1.3. Mekanik Gövdenin Yapısal Tasarımı Ve Üretimi

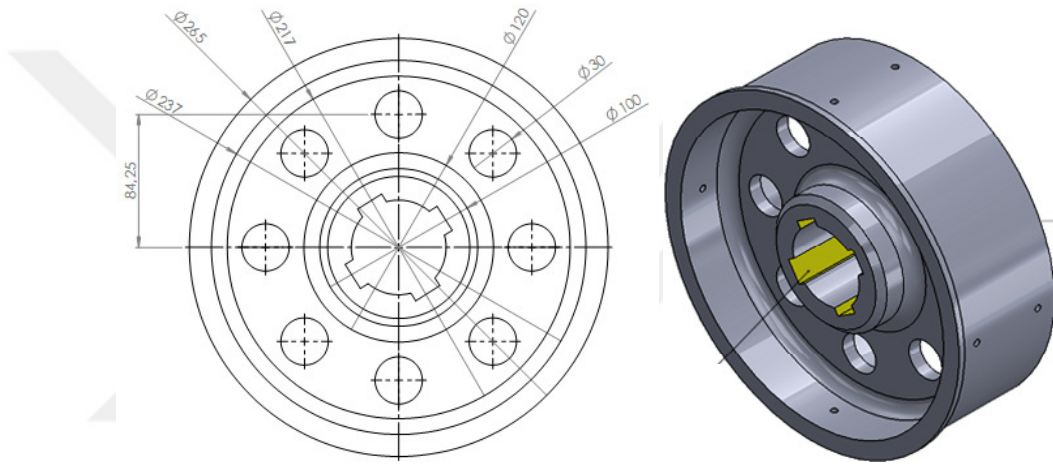
Generatörün stator, rotor ve sargı tasarımının tamamlanmasının ardından mekanik üretim için parçaların tasarımına başlanmıştır. Gerekli optimizasyonların ardından mekanik parçaların üretimi gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.11-Şekil 6.15).



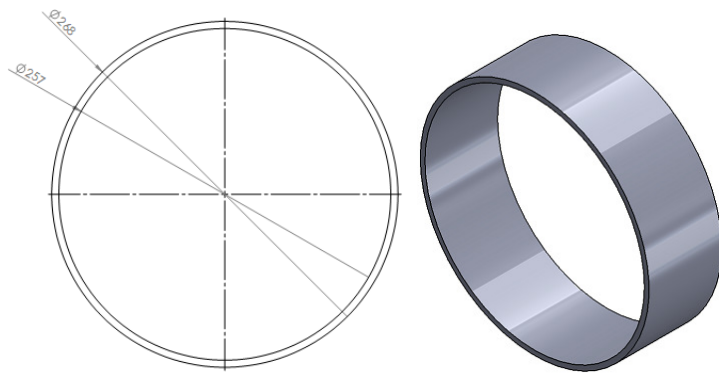
Şekil 6.11. Generatörün için kapak tasarımları.



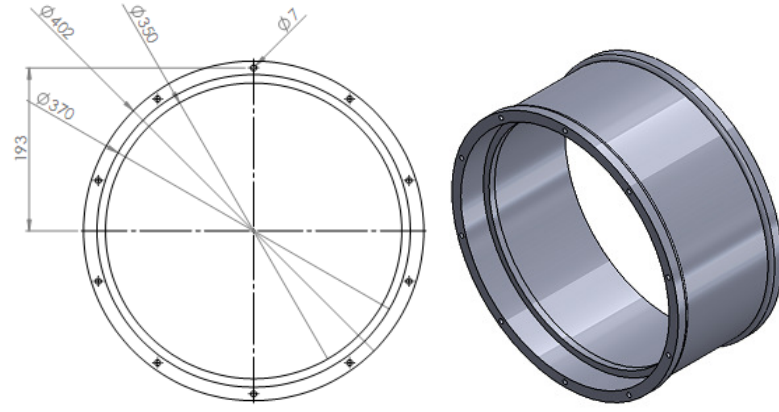
Şekil 6.12. Ana milin tasarımı.



Şekil 6.13. Rotoru tutucu mekanik parçanın tasarımı.



Şekil 6.14. Mıknatısların yapıştırıldığı yüzey.



Şekil 6.15. Tüm sistemi dış ortamdan koruyan gövde.

Aşağıdaki şekillerde de üretimi tamamlanan parçalara ait resimlere yer verilmiştir (Şekil 6.16- Şekil 6.19).



Şekil 6.16. Statorun dış gövdeye monte edilişi.



Şekil 6.17. Revizyonu tamamlanan mil parçası ve kapaklar.



Şekil 6.18. Mıknatıslara kaplama işlemi.

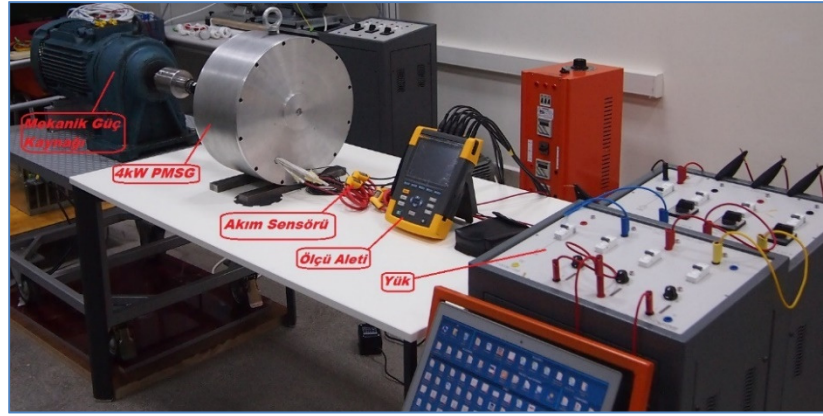


Şekil 6.19. Tasarlanan 4 kW generatörün prototipi ve kaplin bağlantısı.

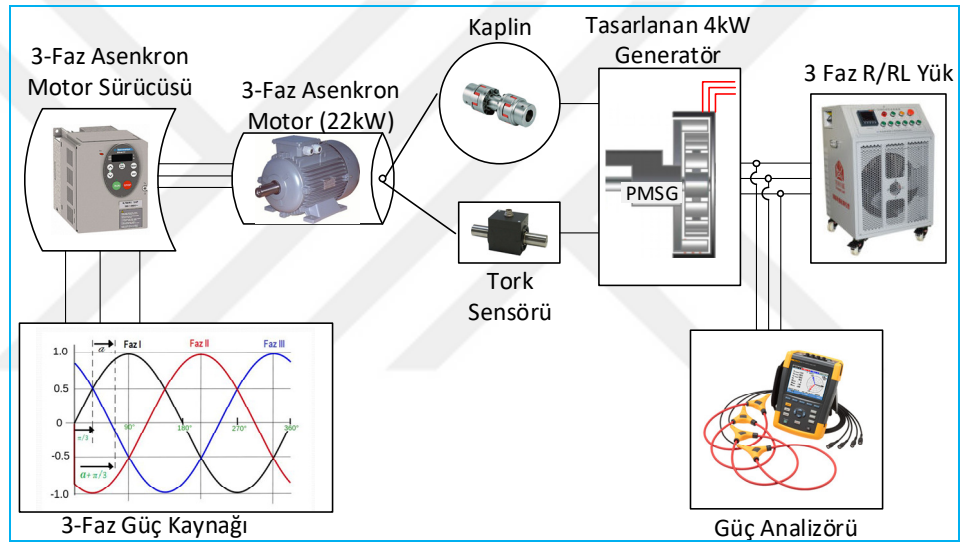
Bilindiği üzere mekanik üretim uzun ve zaman alıcı bir süreçtir. Mekanik tasarım ve entegrasyonda ortaya çıkan problemler bazı parçaların yeniden üretilmesine ya da revizyona gidilmesine sebep olabilir.

## 6.2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Burada generatörün testi için kullanılacak olan test düzeneği (Şekil 6.20) ve test düzeneğine ait blok diyagram (Şekil 6.21) verilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda, hareketlendirici olarak redüktörlü 22 kW'lık AA motoru, enerji besleme, değişken yük sistemi ve ölçme elemanlarının bağlantısının gerçekleştirildiği modüllerden oluşmaktadır.



Şekil 6.20. Test düzeneği.



Şekil 6.21. Test düzeneğine ait blok diyagramı.

Bununla birlikte generatörün farklı yüklerdeki tepkilerin görmek amacıyla kullanılan yük grubu ve ölçme elemanları Şekil 6.22’de gösterilmektedir.

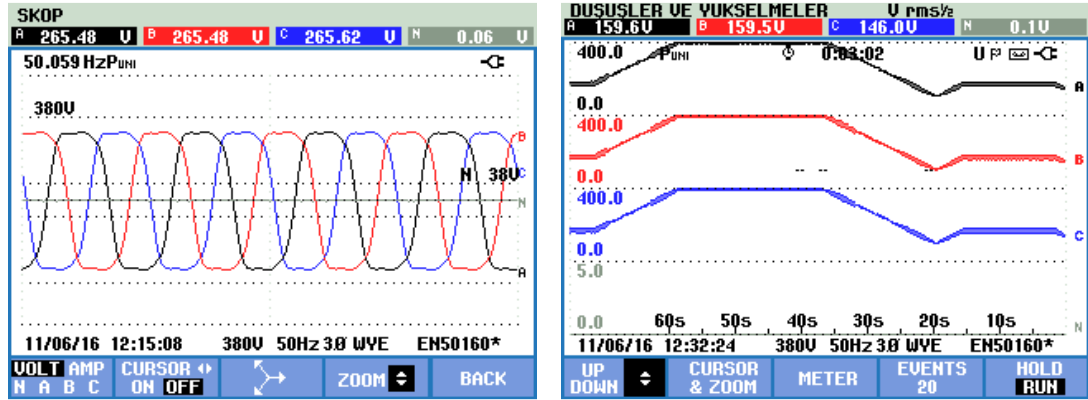


Şekil 6.22. Generatör yükleme ünitesi ile ölçme elemanları.

### 6.2.1. Test Aşamaları

Bölüm 4.6’da elde edilen senkron generatör eş değer devresinin senkron generatörün davranışını tam olarak sağlaması için hava aralığındaki akı ile zıt emk arasındaki bağıntının (Eşitlik 3.96), senkron reaktansın (Eşitlik 3.98) ve endüvi direncinin belirlenmesi gerekir [162]. Bunu için ilk adım generatörde boş çalışma deneyinin yapılmasıdır. Bu deneyde genatör uç bağlantıları tüm yüklerden ayrılır ve generatör anma hızında döndürülür. Uçlar açık olduğu için  $I_a = 0$ ’dır ve dolayısıyla  $E_a = V_t$  olur. İkinci adım, kısa devre deneyini gerçekleştirmektir. Kısa devre deneyi için generatörün uçları ampermetre ile kısa devre edilir. Böylelikle elde edilen kısa devre akımı ve boş çalışma gerilimi ile makinenin eşdeğer parametreleri Eşitlik 3.101 ile elde edilir.

Generatörün öncelikle zıt emk değerinin istenilen seviyede olup olmadığı kontrol edilmiştir. Nominal hızda (yaklaşık 250 d/d) çalıştırılan generatörün üç fazına ait zıt emk eğrisi Şekil 6.23’de görülmektedir. 266V’luk bu değer ideal zıt emk değerine yakın olduğu yorumlanmıştır. Ayrıca ani hız değişimlerinde generatörün verdiği tepkinin de gayet iyi olduğu görülmektedir (Şekil 6.23b).

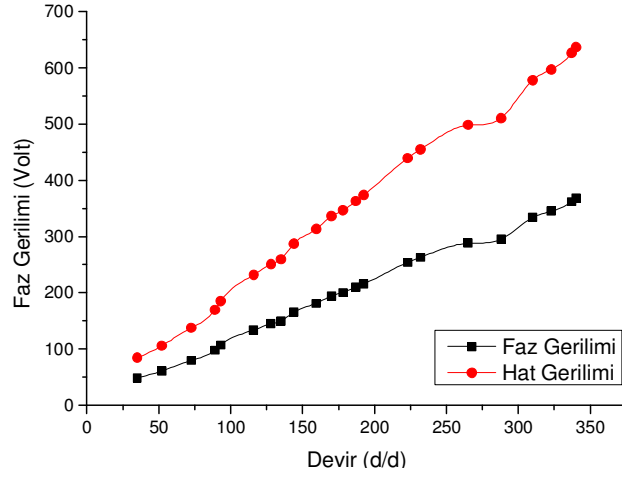


a) Sabit hız(250 d/d).

b) Değişken hız.

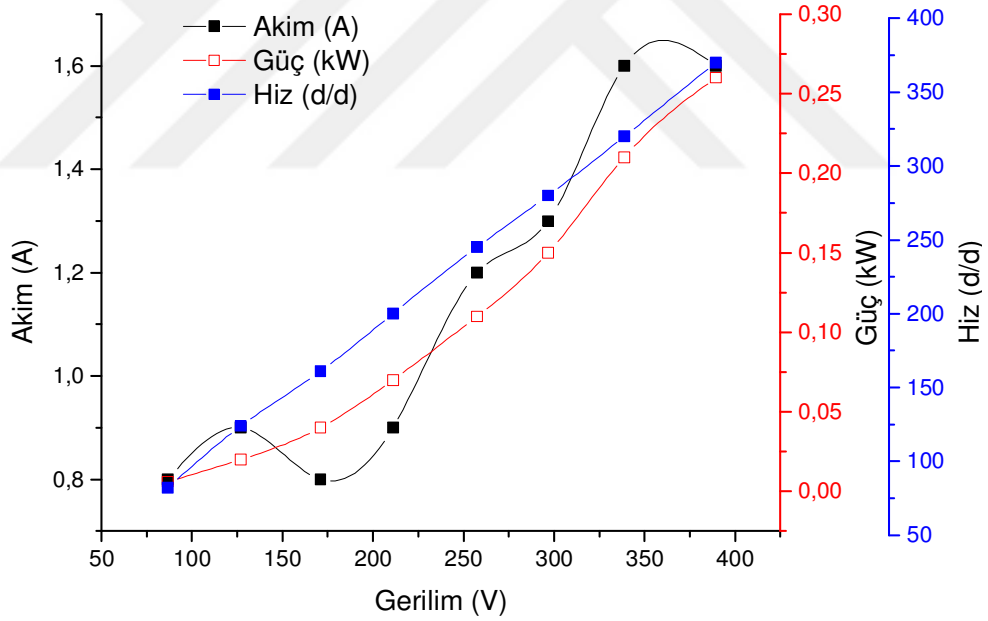
Şekil 6.23. Zıt emk.

Bununla birlikte boş çalışma deneyinde farklı hızlara göre hat gerilimi ve faz geriliminin değişimi Şekil 6.24’te verilmiştir. Burada beklendiği gibi hız arttıkça uç geriliminin artması gözlemlenmiştir.



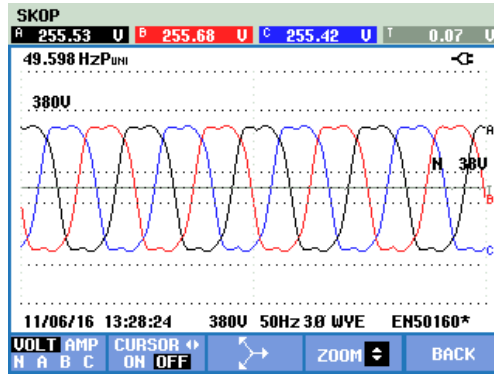
Şekil 6.24. Boş çalışmada değişken hıza bağlı olarak uç gerilimin değişimi.

Ayrıca Şekil 6.25’de farklı hızlarda sabit yükte (400W) elde edilen deneysel sonuçlar verilmiştir. Burada hız artıkça çıkış değerlerinin de arttığı görülmektedir.



Şekil 6.25. Sabit yükte hıza bağlı olarak uç gerilimi ve akımın değişimi.

Anma hız (250 d/d) ve anma yükte (omik) elde edilen faz gerilimi ait grafik, güç değerleri ve fazör sırasıyla aşağıdaki şekillerde verilmiştir (Şekil 6.26).



a) Faz gerilimleri.

**HARMONİKLER TABLOSU**

PUNİ 0:09:18

|                  | A    | B    | C    | N    |
|------------------|------|------|------|------|
| Volt             | A    | B    | C    | N    |
| H3% <sub>f</sub> | 18.2 | 18.2 | 18.3 | 41.0 |
| Volt             | A    | B    | C    | N    |
| H4% <sub>f</sub> | 0.1  | 0.1  | 0.1  | 28.3 |
| Volt             | A    | B    | C    | N    |
| H5% <sub>f</sub> | 4.3  | 4.3  | 4.3  | 26.3 |
| Volt             | A    | B    | C    | N    |
| H6% <sub>f</sub> | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 30.3 |

11/06/16 13:25:39 380V 50Hz 3Ø WYE EN50160\*

UP DOWN HARMONIC GRAPH TREND EVENTS 5 HOLD RUN

b) Harmonikler.

**GÜÇ VE ENERJİ**

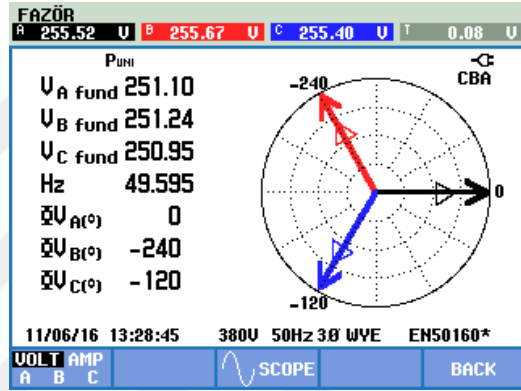
PUNİ 0:00:31

|      | A    | B    | C    | Total |
|------|------|------|------|-------|
| kW   | 1.58 | 1.61 | 1.64 | 4.82  |
| kVA  | 1.58 | 1.61 | 1.64 | 4.83  |
| kvar | 0.03 | 0.01 | 0.04 | 0.06  |
| PF   | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00  |

11/06/16 13:27:50 380V 50Hz 3Ø WYE EN50160\*

UP DOWN TREND EVENTS 0 HOLD RUN

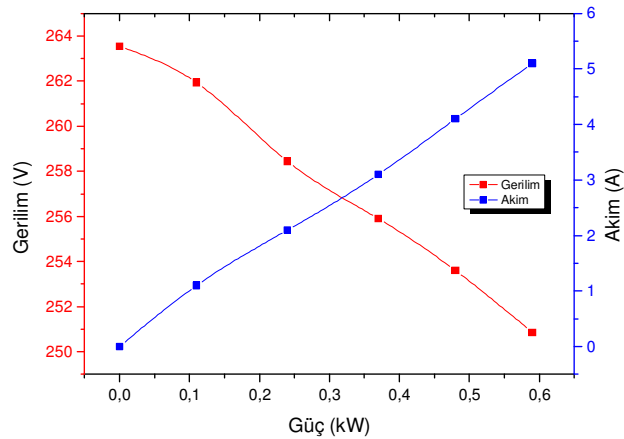
c) Güç değerleri.



d) Fazör.

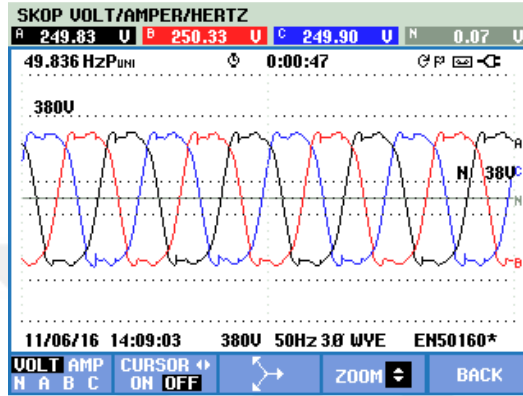
Şekil 6.26. Anma hızında ve anma yükte (omik) generatör performansı.

Generatörün 250 d/d'daki farklı yükler için performansı Şekil 6.27'de verilmektedir. Bu grafiğe göre yük artıkça gerilim düşümü yaklaşık 2 V olmaktadır. Bu da endüvi reaksiyonunun etkisinin çok az olduğu anlamına gelmektedir.



Şekil 6.27. Sabit hız farklı yük koşulları için makine performansı.

Ayrıca anma hız ve anma yükte (RL) elde edilen uç gerilimine ait grafik, akım ve güç değerleri Şekil 6.28’de verilmiştir. Uç gerilimine ait grafik incelendiğinde endüktif yükte omik yüke göre sinüs dalgasındaki bozulmanın arttığı görülmektedir (Şekil 6.28a). Endüktif yükün özellikle 5. harmoniği artırdığına dikkat edilmelidir. Bu da, doğrusal olmayan yüklerin harmonikler üzerindeki etkisini açıklamaktadır.



a) Faz gerilimleri.

HARMONİKLER TABLOSU

|      | P <sub>UNI</sub> | A    | B    | C    | N    |
|------|------------------|------|------|------|------|
| Volt |                  | A    | B    | C    | N    |
| H2%f |                  | 0.3  | 0.3  | 0.3  | 67.6 |
| Volt |                  | A    | B    | C    | N    |
| H3%f |                  | 18.6 | 18.7 | 18.9 | 31.2 |
| Volt |                  | A    | B    | C    | N    |
| H4%f |                  | 0.1  | 0.1  | 0.1  | 27.9 |
| Volt |                  | A    | B    | C    | N    |
| H5%f |                  | 5.5  | 5.5  | 5.5  | 30.4 |

11/06/16 14:13:33 380V 50Hz 3Ø WYE EN50160\*

UP DOWN HARMONIC GRAPH TREND EVENTS 0 HOLD RUN

b) Harmonikler.

VOLT/AMPER/HERTZ

|                    | P <sub>UNI</sub> | A      | B      | C      | N    |
|--------------------|------------------|--------|--------|--------|------|
| U <sub>rms</sub> Δ |                  | 249.78 | 250.46 | 250.20 | 0.07 |
| U <sub>rms</sub> Δ |                  | 426.03 | 426.22 | 425.11 |      |
| A <sub>rms</sub>   |                  | 5.7    | 5.7    | 5.7    | 1.5  |
| Hz                 |                  | 49.845 |        |        |      |

11/06/16 14:12:33 380V 50Hz 3Ø WYE EN50160\*

UP DOWN TREND EVENTS 1 HOLD RUN

c) Akım ve gerilim değerleri.

GÜÇ VE ENERJİ

|      | P <sub>UNI</sub> | A    | B    | C    | Total |
|------|------------------|------|------|------|-------|
| kW   |                  | 1.10 | 1.10 | 1.09 | 3.29  |
| kVA  |                  | 1.42 | 1.42 | 1.45 | 4.29  |
| kvar |                  | 0.89 | 0.87 | 0.94 | 2.70  |
| PF   |                  | 0.77 | 0.78 | 0.75 | 0.77  |

11/06/16 14:07:53 380V 50Hz 3Ø WYE EN50160\*

UP DOWN TREND EVENTS 0 HOLD RUN

d) Güç değerleri.

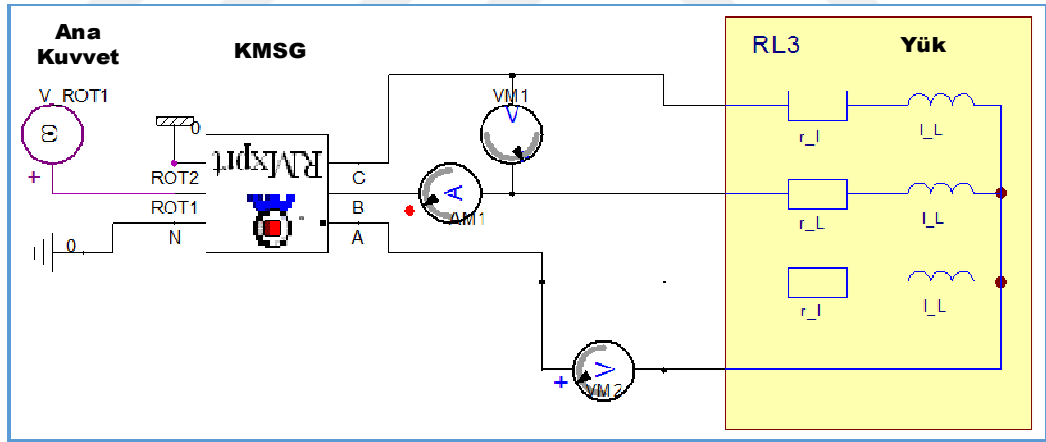
Şekil 6.28. Sabit hızda (250 d/d) ve anma yükte (RL) ölçüm sonuçları.

Elde edilen bu bilgiler ışığında farklı koşullar için gerçekleştirilen deneylerde elde edilen değerler beklentileri karşılar niteliktedir.

### 6.3. DOĞRULAMA

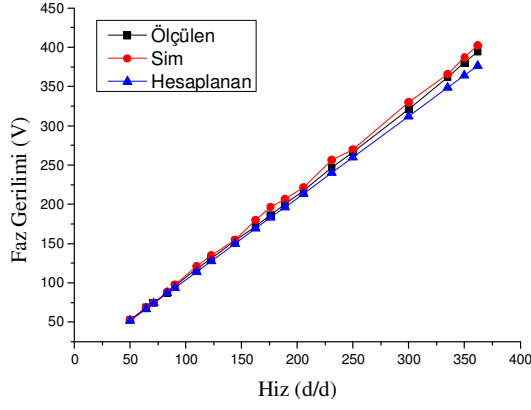
Bu kısımda üretimi gerçekleştirilmiş olan 4 kW'lık generatöre ait performans sonuçları simülasyon, analitik ve deneysel olarak sunulmuştur. Makinenin dinamik analizi için Bölüm 5.2'de önerilen simülasyon modeli ile elde edilen sonuçlar, farklı koşullarda makinenin davranışı ile ilgili kapsamlı bilgi ve veri sağlama imkânı vermiştir. Ayrıca, Bölüm 4'te önerilen analitik model kullanılarak yapılan hesaplamaların doğruluğunu ve hassasiyetini teyit etmek mümkündür. Bunun için doğrulama çalışmaları 3 ayrı çalışmanın karşılaştırılması olarak ortaya konmuştur. Generatörün farklı çalışma şartları için gerçekleştirilen deneysel, simülasyon ve analitik hesaplama çalışmaları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Şekil 6.29'da kullanılan simülasyon modelinde generatör ve harici devrenin dinamik bağlantısı gerçekleştirilerek harici devrede tanımlanan farklı koşullar için makine performansı analiz edilmiştir.

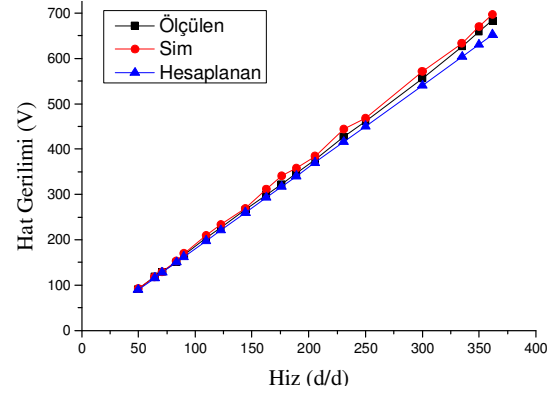


Şekil 6.29. Simülasyon modeli.

Şekil 6.30 generatöre ait boş çalışma deneyinde farklı hızlarda elde edilen faz ve hat geriliminin simülasyon ve Eşitlik 3.96 kullanılarak yapılan hesaplama sonuçlarına ait karşılaştırmayı sunmaktadır.



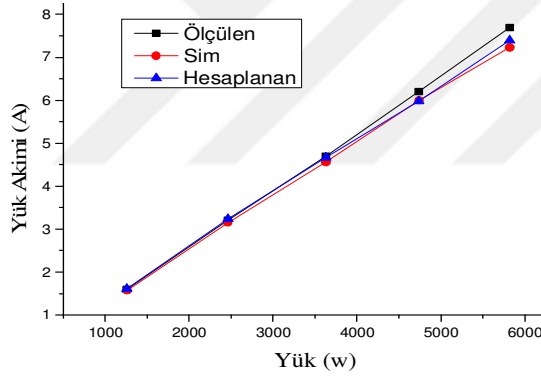
a) Faz gerilimi.



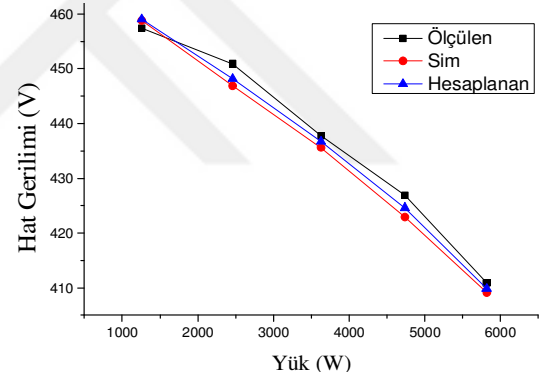
b) Hat gerilimi.

Şekil 6.30. Boş çalışma çıkış eğrileri.

Şekil 6.31’de ise nominal hızda, değişken omik yükte elde edilen yük akımı ve hat gerilimi değişimi karşılaştırmalı olarak verilmiştir (Eşitlik 3.100 ve Eşitlik 3.101).



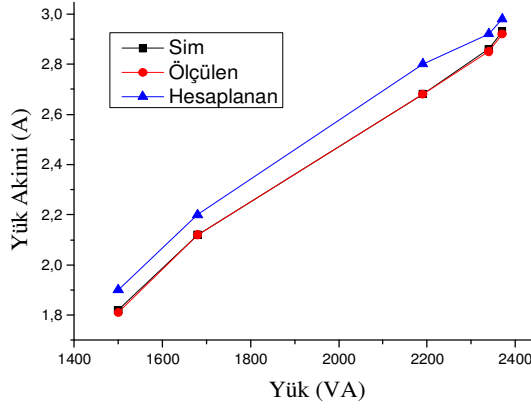
a) Yük akımı.



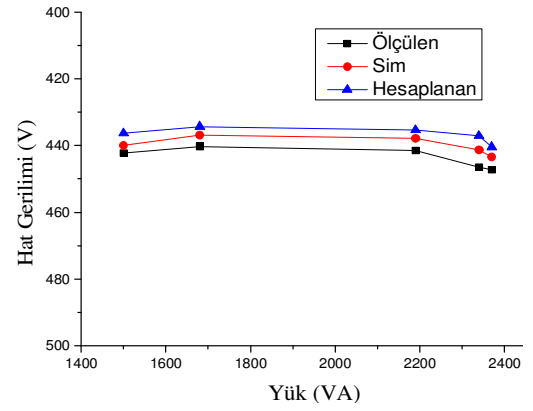
b) Hat gerilimi.

Şekil 6.31. Sabit hız, değişken yükte (omik) çıkış eğrileri.

Nominal hızda (250 d/d) farklı yük koşulları (RL) için elde edilen çıkış değerleri Şekil 6.32’de, sabit R-L değerinde, farklı hız koşulları için elde edilen çıkış değerleri ise Şekil 6.33’de verilmiştir (Eşitlik 3.100 ve Eşitlik 3.101).

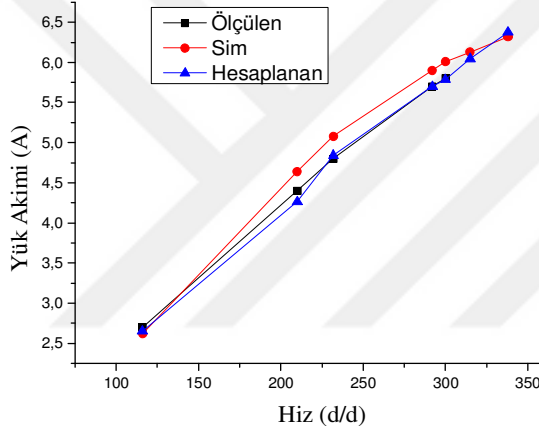


a) Yük akımı.

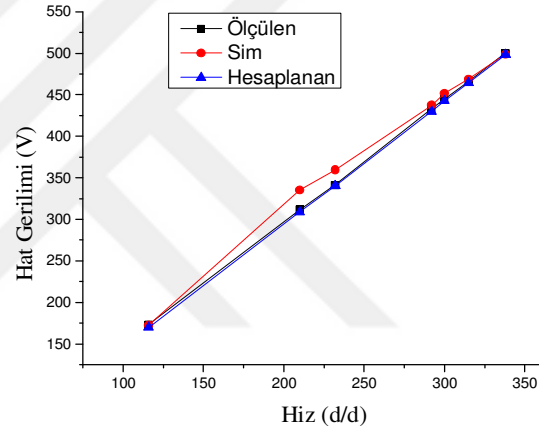


b) Hat gerilimi.

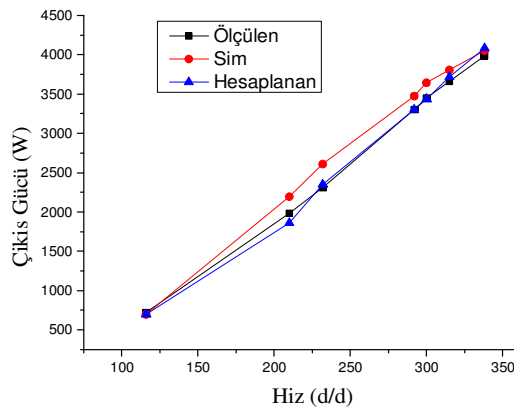
Şekil 6.32. Sabit hız, değişken yükte (R-L) çıkış eğrileri.



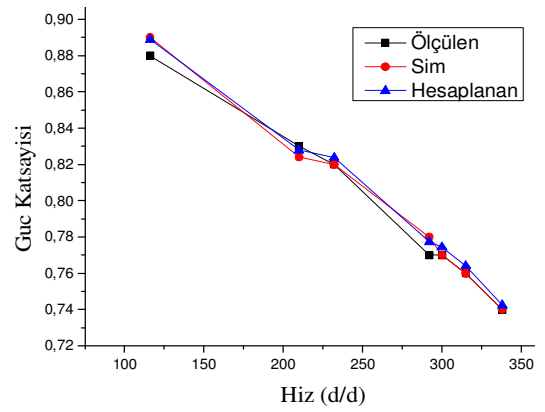
a) Yük akımı.



b) Hat gerilimi.



c) Çıkış gücü.



d) Güç katsayısı.

Şekil 6.33. Değişken hız, sabit R-L değerleri için çıkış eğrileri.

Elde edilen bu bilgiler ışığında farklı koşullar için gerçekleştirilen deneylerde elde edilen değerler generatör için simülasyon çalışmaları ile karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Böylelikle deneysel sonuçlar simülasyonlarda ortaya çıkan sonuçları doğrular niteliktedir. Ayrıca Çizelge 6.2’de simülasyon, deneysel ve hesaplama sonuçları 250 d/d’da,  $R= 36\Omega$  tam yük çıkış parametreleri için karşılaştırmalı olarak ortaya konmuştur.

Çizelge 6.2. Tam yük çıkış parametreleri.

| Parametre                    | Simülasyon | Ölçüm  | Analitik |
|------------------------------|------------|--------|----------|
| İndüklenen Gerilim $E_a$ (V) | 268,5      | 266,2  | 260      |
| Hat Gerilimi $V_h$ (V)       | 421        | 442,89 | 415,3    |
| Faz Gerilimi $V_t$ (V)       | 243        | 255.7  | 239,78   |
| Faz Akımı $I_a$ (A)          | 6,73       | 6,2    | 6,66     |
| Çıkış Gücü $P_{out}$ (W)     | 4885,87    | 4740   | 4791     |
| Giriş Gücü $P_{in}$ (W)      | 5249,67    | 5093   | 5159,6   |
| Güç Katsayısı                | 0,985      | 0,99   | 0,986    |
| Verim (%)                    | 93,07      | 93     | 92,9     |

Elde edilen bu değerler, generatörün farklı yük ve rüzgâr koşulları için gerçekleştirilen simülasyonlarla da ortaya konduğu için performans analizi açısından yeterli olduğu kanısı ortaya çıkmaktadır. Simülasyon ve deneysel olarak ortaya çıkan farklar generatörün bilinmeyen Eddy ve histerezis kayıp performansından dolayı olduğu düşünülmektedir.

## BÖLÜM 7

### SONUÇLAR

Bu çalışmada, şebekeden bağımsız küçük ölçekli rüzgâr türbinleri için uygun bir 4 kW'lık senkron generatör tasarım uygulaması geliştirilmiştir. Analitik KMSG tasarımı ve ilgili optimizasyon yönteminin sonuçları bildirilmiştir. Analitik tasarım sonucunda;

1. Makinenin iç çapı 280 mm, dış çapı 362,44 mm, uzunluğu 85 mm, mıknatıs kalınlığı 4,39 mm, oluk açıklığı 2 mm, faz başına spir sayısı 648 ve iletkenin çapı 1,35 mm elde edilmiştir.
2. Bu parametreler ile oluşturulan yıldız bağlı generatör modeline ait çıkış değerleri: hat gerilimi (rms) 389 V, hat akımı (rms) 6,22 A, çıkış gücü 4,17 kW, verim (%) 95,25, tutma torku 17,89 Nm ve makinenin toplam ağırlığı 37,48 kg olarak elde edilmiştir.

Optimizasyon yönteminin amacı makinenin boyutlandırılmasında, makine performansının verimlilik, üretilebilirlik, maliyet, çıkış gücü, uç gerilimi, tutma torku, yüksek güç yoğunluğu gibi tüm gereksinimleri karşılayacak düzeyde olmasını sağlamaktır. Bu yüzden tasarım ve optimizasyon, stator sacının ve rotorun (mıknatıslar dahil) boyutlandırılması ve başlangıç parametrelerinin optimizasyonu üzerine bir analiz içerir. Bu analizlerde tüm parametrelerin çıkış gerilimine, çıkış gücüne, verime, tutma torkuna ve kayıplara etkisinin araştırıldığı bu çalışmada çok amaçlı parametrik analizler sonucunda;

1. Gövde uzunluğu analitik tasarımda 85 mm olarak elde edildiğinden uzunluk parametresi 70-100 mm arasında 5 mm'lik adımlar ile çözdürülmüştür.

Hız değeri 250 d/d ve uzunluk 100 mm olduğunda generatör verimi yaklaşık %92,977 olurken, aynı hız değerinde uzunluk 70 mm olduğunda verim %93,7 seviyelerine yükselmektedir. Fakat sac paketi uzunluğunun düşük seçilmesi hat geriliminin 400 V'un altında gerçekleşmesine neden olurken, büyük seçilmesi de elektriksel yüklenmeyi artırmaktadır. Bu da yüksek ısı ve dolayısıyla kayıpların artması anlamına gelmektedir. Bu yüzden stator uzunluğu 85 mm olarak belirlenmiştir.

2. Kutup yayı/mıknatıs yayı oranı, 0,5-1 aralığında 0,02 adımla parametrik olarak çözdürülerek bu oran 0,92 olarak belirlenmiştir.
3. Tasarımda maliyet/verim oranı önemli olduğundan uygun bir mıknatıs kalınlığı için 3-10 mm arasında 0,2 mm aralıkla parametrik çözüm gerçekleştirilmiştir. Çözüm sonucunda mıknatıs kalınlığı 5 mm olarak belirlenmiştir.
4. Oluk açıklığı 0,1 mm hassasiyet ile 1-3 mm arasında çözdürülmüştür. Generatörün belirlenen çıkış değerlerini sağlaması ve özellikle de tutma torkunun sıfıra çok yakın olduğu 2,2 mm değeri belirlenmiştir.
5. Optimum tasarım sonuçlarının sinüse daha yakın bir eğri karakteristiği sunmuştur.
6. Makinenin iç çapı 280 mm, dış çapı 370 mm, uzunluğu 85 mm, mıknatıs kalınlığı 5 mm, oluk açıklığı 2,2 mm, faz başına spir sayısı 672 ve iletkenin çapı 1,1 mm elde edilmiştir.
7. Çıkış değerleri: hat gerilimi (rms) 421 V, hat akımı (rms) 6,73 A, çıkış gücü 4,88 kW, verim (%) 93,07, tutma torku 1,26 Nm ve makinenin toplam ağırlığı 35,63 kg olarak elde edilmiştir.

Bu çalışmada tutma torkunu azaltmak için geliştirilen 5 farklı geometride stator dış yapısının ve 6 farklı rotor yapısının SEA ve analitik model ile karşılaştırılması sonucunda;

1. Farklı stator yapıları için en düşük tutma torku değerinin 2 tane ( $h_{s0}$ -  $b_{s0}$ ) dış yapısında gerçekleştiği ve bunun yanında çıkış gücü ve çıkış gerilimi gibi parametrelerin istenen değerlerde olduğu tespit edilmiştir.
2. Farklı rotor yapıları için tutma torku değerinde en iyi azalma 5 eş parçalı mıknatıs yapısında,  $\theta_{ss}=1$ 'er mekanik derecelik kaykısı ile toplamda 5 derecelik kaykısı değerinde elde edilmiştir. Ayrıca mıknatıs eş parça sayısının artmasıyla hem herbir oluk adımı için periyot sayısının artışı hem de tutma torkunun azaltılması gözlemlenmiştir

Ayrıca bu çalışmada mıknatıs biçiminin (offset) ve kutup yayı/mıknatıs yayı oranının indüklenen gerilim ve harmonik bileşenleri üzerine etkisi incelenmiştir. İncelemeler sonucunda;

1. Yapılan 2D analizler dikdörtgen biçimli mıknatıs yapısında (kutup yayı/mıknatıs yayı oranı= 1 ve offset= 0mm) indüklenen gerilimin tüm harmonik bileşenlerinin genliği yay biçimli mıknatıslara (kutup yayı/mıknatıs yayı oranı= 0,82 ve offset= 80mm) göre daha yüksek olduğunu göstermektedir.
2. Yay biçimli mıknatıs yapısının özellikle 3, 5 ve 9. harmonik bileşenlerinin genliğinde azalma görülmüştür. Bu yapıda toplam harmonik bozulma değerinde dikdörtgen biçimli mıknatıs yapısına göre %50,29'luk azalma gerçekleşmiştir.
3. Ayrıca 3. ve 5. harmonik bileşenlerinin genliğinin yüksek olması sinüste bozulmalara neden olmuştur. Bu olumsuz durum kesirli oluk/kutup kombinasyonu ile giderilebilir.

Bu çalışmanın üretim aşamasında tutma torku da göz önünde bulundurularak, prototip çalışmasını kolaylaştırmak ve maliyeti azaltmak için normal stator sac yapısı (yardımcı dişleri olmayan) ve tek parçalı kaykısı uygulanmış yay biçimli mıknatıslara sahip rotor yapısı tercih edilmiştir.

Çıkış gücü, verimlilik, tutma torku ve çıkış gerilimine göre önerilen elektrikli makine yapılandırmasının etkinliği, tasarlanmış ve optimize edilmiş makinenin imalat öncesinde simülasyon ve gerçek yük koşullarının uygunluğunu belirten geçici bütünlük elektromanyetik alan ve devre analiz yaklaşımı ile ortaya konmuştur. 400V, 4 kW içi dönen yapısıyla generatör tasarımı, multi fizik analizler ile ısı dağılımları, deformasyonlar ve gerilme sonuçlarıyla birlikte ortaya konmuştur.

Ayrıca bu çalışmanın diğer bir amacı olan, harici arıza durumlarında makine davranışının analiz çalışması, başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar sonucunda, KM senkron generatörler şebekeler veya şebekeden bağımsız sistemlerde güç çevrim araçları için iyi bir sinüzoidal güç kaynağı olarak gösterilebilir.

Tüm tasarım ve optimizasyon çalışmalarından sonra projenin bir parçası olarak; prototip, test, doğrulama ve ileri analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Test çalışmaları sonucunda;

1. Boşta ve nominal hızda (yaklaşık 250 d/d) çalıştırılan generatörün zıt emk faz değeri 266 V elde edilmiştir.
2. Anma hız (250 d/d) ve anma yükte (omik), 255 V faz gerilimi ve 4,82 kW çıkış gücü değeri elde edilmiştir.
3. Sabit hızda (250 d/d) ve anma yükte (RL) çalıştırılan generatörün faz gerilimi 250 V, faz akımı 5,7 A, çıkış gücü 4,29 kVA ve güç faktörü 0,77 olarak elde edilmiştir.
4. Bu değerler, generatörün istenen çıkış performansını sağladığını göstermektedir. Ayrıca simülasyon ve analitik hesaplamalar deneyler sonucu elde edilen değer ile yakınlık tespit edilmiştir. Bu da önerilen simülasyon ve analitik modellerin doğruluğunu göstermektedir.

Bunun yanında;

1. Evirici/çevirici de dâhil olmak üzere tüm sistemdeki arızalar için tahmin ve tespit mekanizması sunmak,
2. KMSG'nin bütünleşik RMxpri-SEA modeliyle elde edilen simülasyon sonuçlarını doğrulamak amacıyla önemli verileri almak için veri toplama sistemi kullanmak,
3. Stator sargılarında bakır kayıplarının iyileştirilmesinin yanı sıra kalıcı mıknatıslarda Eddy akım kaybının minimize edilmesi üzerine yapılacak çalışmalar alana katkı sağlayabilir.



## KAYNAKLAR

1. Hemeida, A. M., Farag, W. A., And Mahgoub, O. A., “Modeling and control of direct driven PMSG for ultra large wind turbines”, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 59(43),918-924 (2011).
2. Yaramasu, V., Wu, B., Sen, P. C., Kouro, S., And Narimani, M., “High-power wind energy conversion systems”, *State-of-the-art and emerging technologies. Proceedings of the IEEE*, 103(5): 740-788 (2015).
3. İnternet: International Energy Agency, “Renewables 2017”, <https://www.iea.org/renewables/#section-1-3> (2017).
4. Cao, W., Xie, Y., And Tan, Z., “Wind turbine generator technologies”, Advances in Wind Power, Rupp Cariveau, *Intech Open Access Publisher*, 176-200 (2012).
5. H. Polinder, B. Deok-Je, L. H., And Chen Z., “Concept report on generator topologies, mechanical and electromagnetic optimization,” *Project UpWind*, Roskilde, Denmark, (2007).
6. Polinder H., Frank F.A.P., Vilder G.J., And Tavner P.J., “Comparison of Direct-Drive and Geared Generator Concepts for Wind Turbines”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 21(3): 725-733 (2006).
7. Fei, W., And Luk, P. C. K., "A New Technique of Cogging Torque Suppression in Direct-Drive Permanent Magnet Brushless Machines", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 46(4):, 1332-1340 (2010).
8. Pinilla N.M., And Martinez S., “Optimal design of permanent-magnet direct-drive generator for wind energy considering the cost uncertainty in raw materials”, *Renewable Energy*, 41: 267-276 (2012).
9. Duan G., Wang H., Guo H., And Gu G., “Direct Drive Permanent Magnet Wind Generator Design and Electromagnetic Field Finite Element Analysis”, *IEEE Transactions On Applied Superconductivity*, 20(3): 1883-1887 (2010).
10. Öner Y., Özçira S., And Bekiroğlu N., “Düşük Güçlü Uygulamalar için Konvansiyonel Senkron Generatörler ile Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatörlerin Karşılaştırılması”, *ELECO Elektrik - Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, Bursa, 277-281, (2008).
11. Sanchez A.G., Molina M.G., And Rizzato Lede A.M., “Dynamic model of wind energy conversion systems with PMSG-based variable-speed wind turbines for power system studies”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(13): 10064-10069 (2012).

12. Eriksson S., Bernhoff H., And Bergkvist M., “Design of a unique direct driven PM generator adapted for a telecom tower wind turbine”, *Renewable Energy*, 44: 453-456 (2012).
13. Jang S. M., Seo H.J., Park Y.S., Park H., And Choi J.Y., “Design and Electromagnetic Field Characteristic Analysis of 1.5 kW Small Scale Wind Power Generator for Substitution of Nd-Fe-B to Ferrite Permanent Magnet”, *IEEE Transactions On Magnetics*, 48(11): 2933-2936 (2012).
14. Potgieter J.H.J., And Kamper M.J., “Torque and Voltage Quality in Design Optimization of Low-Cost Non-Overlap Single Layer Winding Permanent Magnet Wind Generator”, *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, 59(5): 2147-2156 (2012).
15. Wang H., Wang Y., Liu X., Coa G., And Fan J., “Design and performance evaluation of compound permanent magnet generator with controllable air-gap flux”, *IET Electric Power Applications*, 5(9): 684-690 (2011).
16. Lee J.Y., Koo D.H., Moon S.R., And Han C.K., “Design of an Axial Flux Permanent Magnet Generator for a Portable Hand Crank Generating System”, *IEEE Transactions On Magnetics*, 48(11): 2977-2980 (2012).
17. Rostami N., Feyzi M.R., Pyrhönen J., Parviainen A., And Behjat V., “Genetic Algorithm Approach for Improved Design of a Variable Speed Axial-Flux Permanent-Magnet Synchronous Generator”, *IEEE Transactions On Magnetics*, 48(12): 4860-4865 (2012).
18. Tapia J.A., Pyrhönen J., Puranen J., Lindh P., And Nyman S., “Optimal Design of Large Permanent Magnet Synchronous Generators”, *IEEE Transactions On Magnetics*, 4(1): 642-650 (2013).
19. Dubois M.R., Polinder H., And Ferreira J.A., “Comparison of generator topologies for direct-drive wind turbines”, *Proceedings of NORPIE'00*, 22-26 (2000).
20. Köse, S., “Değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin nonlinear kontrolü”, Yüksek Lisans Tezi, *Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü*, Gebze, 3-18 (2007).
21. Çetin, N.S., “Şebeke bağlantısız PM generatörlü rüzgâr türbinlerinin YSA ile sistem optimizasyonu”, Doktora Tezi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 81-100 (2006).
22. Alişar, İ., “Rüzgâr enerjisi üretiminin stokastik modellenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-48 (2012).
23. Celayir, N., “Rüzgâr enerjisinin dünyadaki gelişimi ve Türkiye'deki potansiyeli”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 11-76 (2008).

24. Temiz, F.İ., “Rüzgâr enerjisi sistemlerinde optimizasyon”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 8-60 (2010).
25. Ateş, A.M., “Otonom rüzgâr türbinlerinde sistem karakteristiklerinin belirlenmesi ve optimizasyonu”, Doktora Tezi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 4-42 (2012).
26. Gönenç, A., “Rüzgâr enerjisinin optimizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 8-46 (2010).
27. Kütük, O., “Rüzgâr türbinleri için doğrudan sürürlü sürekli mıknatıslı senkron generatör tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 2-75 (2011).
28. Ege, E.S., “Doğrudan tahrikli rüzgâr türbinleri için enine-eksenel akılı kalıcı mıknatıslı senkron generatör tasarımı”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 9-68 (2009).
29. Yıldırım, E., “Fırçasız da jeneratörü kullanan düşük güçlü bir rüzgâr türbininin gerçekleştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 6-51 (2008).
30. Tassarolo, A., Luise, F., Raffin, P., And Venuti, V., “Multi-objective design optimization of a surface permanent-magnet slotless alternator for small power wind generation”, *Clean Electrical Power (ICCEP), 2011 International Conference on*, Italy, 371-376 (2011).
31. Yang, X., Patterson, D., And Hudgins, J., “Permanent Magnet Generator Design and Control for Large Wind Turbines”, *Power Electronics and Machines in Wind Applications*, USA, 1-5 (2012).
32. Wannakarn, P., Tanmaneeprasert, T., Rugthaicharoencheep, N., And Nedphograw, S., “Design and Construction of Axial Flux Permanent Magnet Generator for Wind Turbine Generated DA Voltage at Rated Power 1500 W”, *Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), 2011 4th International Conference on*, China, 763-766 (2011).
33. He, Q., And Wang, Q., “Optimal Design of Low-speed Permanent Magnet Generator for Wind Turbine Application”, *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, Asia-Pacific, 1-3 (2012).
34. Chen, Y., And Wang, D., “Finite Element Method Analysis of Surface-Inserted Permanent Magnets Synchronous Generator”, *Electrical and Control Engineering*, China, 665-668 (2011).
35. Widyan, M.S., And Hanitsch, R.E., “High-power density radial-flux permanent-magnet sinusoidal three-phase three-slot four-pole electrical generator”, *Electrical Power and Energy Systems*, 43:1221-1227 (2012).

36. Gundogdu, T And Komurgoz, G., “Technological and economical analysis of salient pole and permanent magnet synchronous machines designed for wind turbines”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 324: 2679-2686 (2012).
37. Johannes H., Potgieter J., And Kamper M.J., “Design of New Concept Direct Grid-Connected Slip-Synchronous Permanent-Magnet Wind Generator”, *IEEE Transactions On Industry Application*, 48(3): 913-922 (2012).
38. Potgieter,J.H.J., And Kamper M.J., “Optimum Design and Technology Evaluation of Slip Permanent Magnet Generators for Wind Energy Applications”, *Energy Conversion Congress and Exposition*, USA, 2342-2349 (2012).
39. Seo J.H., Kim S.M., And Jung H.K., “Rotor-Design Strategy of IPMSM for 42 V Integrated Starter Generator”, *IEEE Transactions On Magnetics*, 46(6): 2458-2461 (2010).
40. Wang T., And Wang Q., “Optimization Design of a Permanent Magnet Synchronous Generator for a Potential Energy Recovery System”, *IEEE Transactions On Energy Conversion*, 27(4): 856-863 (2012).
41. Patsios CH., And Kladas A.G., “Permanent magnet and wound salient pole synchronous generator design comparison”, *Journal of Optoelectronics And advanced Materials*, 10(5): 1218-1221 (2008).
42. Li H., Chan Z., And Bergkvist M., “Design optimization and site matching of direct-drive permanent magnet wind power generator systems”, *Renewable Energy*, 34: 1175–1184 (2009).
43. Kilk A., And Kallaste A., “Multipole Surface-Mounted Permanent Magnet Synchronous Generators for Wind Applications”, *Power Quality and Supply Reliability Conference*, Estonia, 235- 240 (2008).
44. Cistelecan M.V., Popescu M., And Popescu M., “Study of the Number of Slots/Pole Combinations for Low Speed Permanent Magnet Synchronous Generators”, *Electric Machines&Drives Conference*, Antalya, 1616-1620 (2007).
45. Hosseini S., Moghani J.S., Ershad N.F., And Jensen B.B., “Design, Prototyping, and Analysis of a Novel Modular Permanent-Magnet Transverse Flux Disk Generator”, *IEEE Transactions on Magnetics*, 47(4): 772-779 (2011).
46. Tessarolo A., Luise F., Raffin P., And Venuti V., “Multi-objective design optimization of a surface permanent-magnet slotless alternator for small power wind generation”, *Clean Electrical Power*, Italy, 371-376 (2011).
47. Wannakarn P., Tanmaneeprasert T., Rugthaicharoencheep N., And Nedphograw S., “Design and Construction of Axial Flux Permanent Magnet Generator for Wind Turbine Generated DA Voltage at Rated Power 1500 W”, *Electric Utility*

*Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, China, 763-766 (2011).

48. He Q., And Wang Q., “Optimal Design of Low-speed Permanent Magnet Generator for Wind Turbine Application”, **Power and Energy Engineering Conference**, Asia-Pacific, 1-3 (2012).
49. Chen Y., And Wang D., “Finite Element Method Analysis of Surface-Inserted Permanent Magnets Synchronous Generator”, **Electrical and Control Engineering**, China, 665-668 (2011).
50. Eriksson S., Bernhoff H., And Bergkvist M., “Design of a unique direct driven PM generator adapted for a telecom tower wind turbine”, **IEEE Renewable Energy**, 44: 453-456 (2012).
51. Kefalas T., Kalokiris G., Kladas A., And Tegopoulos J., “Design of skewed mounted permanent magnet synchronous generators based on 2D and 3D finite element techniques”, **Journal of Materials Processing Technology**, 161(1-2): 288-293 (2005).
52. Fenercioğlu A., And Tarımer İ., “Bir Manyetik Sistemin Maxwell 3d Alan Simülâtörü İle Statik Manyetik Analizinin Çözüm Süreçleri”, **Selçuk üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Teknik-online Dergi**, 6(3): 221-240 (2007).
53. Tassarolo A., Bassi C., And Giulivo D., “Time-Stepping Finite-Element Analysis of a 14-MVA Salient-Pole Shipboard Alternator for Different Damper Winding Design Solutions”, **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 59(6): 2524-2535 (2012).
54. McDonald, A., And Bhuiyan, N. A., “On the optimization of generators for offshore direct drive wind turbines”, **IEEE Transactions on Energy Conversion**, 32(1): 348-358 (2017).
55. Daghigh, A., Javadi, H., And Torkaman, H., “Design Optimization of Direct-Coupled Ironless Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Wind Generator With Low Cost and High Annual Energy Yield”, **IEEE Transactions on Magnetics**, 52(9): 1-11 (2016).
56. Chirca, M., Breban, S., Oprea, C., And Radulescu, M. M., “Comparative design analysis of ferrite-permanent-magnet micro-wind turbine generators”, **In Electrical Machines & Power Electronics, 2015 Intl Conference on Optimization of Electrical & Electronic Equipment & 2015 Intl Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems**, Side, 687-692 (2015).
57. Anvari, B., Li, Y., And Toliyat, H. A., “Comparison of outer rotor permanent magnet and magnet-less generators for direct-drive wind turbine applications”, **In Electric Machines & Drives Conference**, 181-186 (2015).

58. İlkılıç, Z., “Türkiye’de Rüzgâr Enerjisi ve Rüzgâr Enerji Sistemlerinin Gelişimi”, *Journal of Life Sciences*, 6 (2/2): 1-13 (2016).
59. Melício R., Mendes V.M.F., And Catalão J.P.S., “Wind Turbines with Permanent Magnet Synchronous Generator and Full-Power Converters: Modelling, Control and Simulation”, Wind Turbines, Al-Bahadly, *InTech*, 466-494, 2011.
60. Minh H.Q., Frédéric N., Najib E., And Abdelaziz H., “Control of permanent magnet synchronous generator wind turbine for stand-alone system using fuzzy logic”, *EUSFLAT-LFA*, France, 720-727, (2011).
61. Karakaya, A., And Karakaş, E., “Küçük Güçlü Rüzgâr Enerji Dönüşüm Sisteminin Benzetimi, Modellemesi ve Uygulaması”, *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 6(2): 377-386 (2016).
62. Singh, T., And Nijhawan, P. G., “Performance Analysis of PMSG Based Wind Energy Conversion System”, PhD diss., *Thapar University*, Patiala, (2016).
63. Vergauwe, J., Martinez, A., And Ribas, A., “Optimization of a wind turbine using permanent magnet synchronous generator (PMSG)”, *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, İspanya, 6: 5-7 (2006).
64. Nambiar, D. C., And Jose, C. P., “A novel fuzzy based pitch angle control scheme and SVPWM based active and reactive power flow control of a permanent magnet generator based grid tied Wind Energy Conversion System”, *In Emerging Devices and Smart Systems (ICEDSS)*, India, 94-98 (2016).
65. Fan, Z. M., “Mathematical Modelling of Grid Connected Fixed-Pitch Variable-Speed Permanent Magnet Synchronous Generators for Wind Turbines”, Phd. dissertation, *University of Central Lancashire*, (2012).
66. Quintal-Palomo, R. E., Figueroa-Espinoza, B., And Lopez-Gonzalez, J., “Analysis of a direct-drive wind turbine with Axial-Flux Permanent-Magnet Generator operating in close-shore conditions”, *In Industrial Electronics Society, IECON 2016-42nd Annual Conference of the IEEE*, Italy, 5532-5537 (2016).
67. Idayanti, N., Nanang, T. K., Septiani, A., Mulyadi, D., And Irasari, P., “The implementation of hybrid bonded permanent magnet on permanent magnet generator for renewable energy power plants”, *In Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA)*, Indonesia, 557-560 (2016).
68. Wei, C., Zhang, Z., Qiao, W., And Qu, L., “An adaptive network-based reinforcement learning method for MPPT control of PMSG wind energy conversion systems”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(11): 7837-7848 (2016).
69. Zarkov, Z., And Demirkov, B., “Power control of PMSG for wind turbine using maximum torque per ampere strategy”, *In Electrical Machines, Drives and Power Systems*, Bulgaria, 292-297 (2017).

70. Haddin, M., And Suprajitno, A., "Pitch angle controller design on the wind turbine with Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) base on Firefly Algorithms (FA)", *In Technology of Information and Communication (ISemantic), International Seminar on Application for*, Indonesia, 13-17 (2016).
71. Yao, J., Yu, M., Gao, W., And Zeng, X., "Frequency regulation control strategy for PMSG wind-power generation system with flywheel energy storage unit", *IET Renewable Power Generation*, 11(8): 1082-1093 (2017).
72. Madani, N., "Design of a permanent magnet synchronous generator for a vertical axis wind turbine", Master of Science Thesis, *Royal Institute of Technology*, Stockholm (2011).
73. Kinnunen J., "Direct-On-Line Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Generator Static and Dynamic Performance", Ph.D. Thesis, *Lappeenranta University of Technology*, Finland, (2007).
74. Oner Y., Bekiroglu N., And Ozcira S., "Dynamic Analysis of Permanent Magnet Synchronous Generator with Power Electronics", *Advances in Electrical and Computer Engineering*, 10(2): 11-15 (2010).
75. Salminen P., "Fractional Slot Permanent Magnet Synchronous Motors For Low Speed Applications", Dissertation, *Lappeenranta University of Technology*, Finland, (2004).
76. Fang, H., And Wang, D., "A Novel Design Method of Permanent Magnet Synchronous Generator From Perspective of Permanent Magnet Material Saving", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 32(1): 48-54 (2017).
77. Guo Z., And Chang L., "Fem Study On Permanent Magnet Synchronous Generators For Small Wind Turbines", *Electrical and Computer Engineering*, 641-644, (2005).
78. Li, Y., Zhao, J., Chen, Z., And Liu, X., "Investigation of a five-phase dual-rotor permanent magnet synchronous motor used for electric vehicles", *Energies*, 7(6): 3955-3984 (2014).
79. Messaoud M., And Abdessameda R., "Modeling and Optimization of Wind Turbine Driving Permanent Magnet Synchronous Generator", *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 5(6): 489-494 (2011).
80. Andriollo M., Bettanini G., Martinelli G., Morini A., And Tortella A., "Analysis of Double-Star Permanent-Magnet Synchronous Generators by a General Decoupled d-q Model", *IEEE Transactions On Industry Applications*, 45(4): 1416-1424 (2009).
81. Zhang P., Sizov G.Y., And Demerdash N.A.O., "Comparison of Torques Ripple Minimization Control Techniques in Surface-mounted Permanent Magnet

- Synchronous Machines”, *IEEE International Electric Machines & Drives Conference*, Canada, 188-193 (2011).
82. Wang Y., Zhu J., Wang S., Guo Y., Li Y., And Xu W., “Analytical Nonlinear Model for Permanent Magnet Synchronous Machine Incorporating Saturation Saliencies”, *In Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, South Korea, 1014-1019 (2010).
  83. Kim H., Shin K., Englebreton S., Frank N., And Arshad W., “Analytical Model of Multiphase Permanent Magnet Synchronous Machines for Energy and Transportation Applications”, *Electric Machines & Drives Conference*, USA, 72-179 (2013).
  84. Patel, A., And Arya, S.R., “Distributed power generation system using PMSG with power quality features”, *In Next Generation Intelligent Systems (ICNGIS)*, India, 1-8 (2017).
  85. Htet, T. Z., Zhao, Z., & Gu, Q., “Design analysis of direct-driven PMSG in wind turbine application”, *In System Reliability and Science*, France, 7-11 (2017).
  86. Dehkordi A.B., Gole A.M., And Maguire T.L., “Permanent Magnet Synchronous Machine Model for Real- Time Simulation”, *International Conference on Power Systems*, Canada, 1-6 (2005).
  87. Yaramasu, V., Dekka, A., Durán, M. J., Kouro, S., And Wu, B., “PMSG-based wind energy conversion systems: survey on power converters and controls”, *IET Electric Power Applications*, 11(6): 956–968 (2017).
  88. Voncila I., And Badea N., “Stability Analysis Of Permanent Magnet Synchronous Generator Used In Micro-Cogeneration Systems”, *System Science And Simulation in Engineering*, Romania 180-185 (2000),
  89. Dahbi, A., Hachemi, M., Nait-Said, N., And Nait-Said, M. S., “Realization and control of a wind turbine connected to the grid by using PMSG”, *Energy Conversion and Management*, 84: 346-353 (2014).
  90. Behjat, V., And Hamrahi, M., “Dynamic modeling and performance evaluation of axial flux PMSG based wind turbine system with MPPT control”, *Ain Shams Engineering Journal*, 5(4): 1157-1166 (2014).
  91. Yıldırım E., And Aydemir M.T., “Küçük Güçlü Bir Rüzgâr Jeneratöründe Kullanım İçin Eksenel Akıllı Bir Sürekli Mıknatıslı Motorun Analizi, Tasarımı Ve Gerçekleştirilmesi”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi* 24(3): 525-531 (2009).
  92. Sivachandran P., Venkatesh P., And Kamaraj N., “Cogging Torque Reduction in Dual-Rotor Permanent Magnet Generator for Direct Coupled Stand-Alone Wind Energy Systems”, *Sustainable Energy Technologies*, Singapore, 24-28 (2008).

93. Almozayen, M.A., El-Nemr, M.K., Rashad, E.M., And Shobair, A.I., "Finite-element-based design of axial field PMSG for wind energy conversion with MPPT control", *In Power Systems Conference (MEPCON)*, Egypt, 610-616 (2016).
94. Gundogdu, T., And Komurgoz, G., "The Impact of the Selection of Permanent Magnets on the Design of Permanent Magnet Machines—a Case Study: Permanent Magnet Synchronous Machine Design with High Efficiency", *Przegląd Elektrotechniczny*, 89(3a): 103-108 (2013).
95. Stegmann, J. A., And Kamper, M. J., "Design aspects of double-sided rotor radial flux air-cored permanent-magnet wind generator", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 47(2): 767-778 (2011).
96. Stegmann J.A., And Kamper M.J., "Design Aspects of Double-Sided Rotor Radial Flux Air-Cored Permanent-Magnet Wind Generator", *IEEE Transactions On Industry Applications*, 47(2): 767-778 (2011).
97. Fengxiang W., Jianlong B., Qingming H., And Jian P., "Design Features of Low Speed Permanent Magnet Generator Direct Driven by Wind Turbine", *Electrical Machines and Systems Proceedings of the Eighth International Conference on*, 2: 1017-1020 (2005).
98. Kilk A., "Low-Speed Permanent-Magnet Synchronous Generator For Small-Scale Wind Power Applications", *Estonian Academy Publishers*, 24(2): 318-331 (2007).
99. Geest M. V., Polinder H., Ferreira J. A., And Zeilstra D., "Optimization and Comparison of Electrical Machines using Particle Swarm Optimization", *International Conference on Electrical Machines*, France, 1380-1386 (2012).
100. Kai R., Nan X., Shiqing L., And Binglin L., "Efficiency Optimization Algorithm Improvement of Induction Motor Based on Minimum Input Power Searching", *International Conference on Electrical Machines and Systems*, Busan, Korea, 26-29 (2013).
101. Odvárka, E., Mebarki, A., Gerada, D., Brown, N., And Ondrušek, Č., "Electric motor-generator for a hybrid electric vehicle", *Engineering Mechanics*, 16(2): 131-139 (2009).
102. Finken, T., Felden, M., And Hameyer, K., "Comparison and design of different electrical machine types regarding their applicability in hybrid electrical vehicles", *In Electrical Machines*, 1-5 (2008).
103. Huang, S., Luo, J., Leonardi, F., And Lipo, T. A., "A general approach to sizing and power density equations for comparison of electrical machines", *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 34(1), 92-97 (1998).
104. Gieras J.F., "Permenant Magnet Motor Technology Desing And Applications", *CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group*, USA, 172-205 (2010).

105. Zhang, J., Cheng, M., Hua, W., And Zhu, X., “New approach to power equation for comparison of doubly salient electrical machines”, ***Industry Applications Conference, 41st IAS Annual Meeting***, USA, 3: 1178-1185 2006.
106. Yeo, H. K., Woo, D. K., Lim, D. K., Ro, J. S., And Jung, H. K., “Analysis and modeling of magnetic characteristics in surface-mounted permanent-magnet machines with rotor overhang”, ***In Electrical Machines and Systems (ICEMS)***, South Korea, 1248-1251 (2013).
107. Park, Y. S., Jang, S. M., Choi, J. H., Choi, J. Y., And You, D. J., “Characteristic analysis on axial flux permanent magnet synchronous generator considering wind turbine characteristics according to wind speed for small-scale power application”, ***IEEE Transactions on Magnetics***, 48(11): 2937-2940 (2012).
108. Hanselman D., “Brushless permanent magnet motor design”, ***Magna Physics Publishing***, Lebanon, 151-181 (2006).
109. Pyrhonen, J., Jokinen, T., And Hrabovcova, V., “Design Of Rotating Electrical Machines”. ***John Wiley and Sons, Ltd***, United Kingdom, 281-400 (2008).
110. Mihai, A.M., Benelghali, S., Simion, A., Outbib, R., And Livadaru, L. “Design and FEM analysis of five-phase permanent magnet generators for gearless small-scale wind turbines”, ***International Conference on Electrical Machines***, 150-156 (2012).
111. Boldea, I., and Nasar, S.A., “The induction machine handbook”, ***CRC press***, USA, 424-469 (2001).
112. Gieras, Jacek F., “Permanent magnet motor technology: design and applications”, ***CRC press***, USA, (2002).
113. Murthy, K. M., “Computer-aided design of electrical machines”, ***BS Publications***, (2008).
114. Uygun, D., Ocak, C., Cetinceviz, Y., Demir, E., And Gungor, Y., “CAD-based design, analysis and experimental verification of an out-runner permanent magnet synchronous generator for small scale wind turbines”, ***In Environment and Electrical Engineering (EEEIC)***, 179-183 (2012).
115. Faiz, J., Ebrahimi, B. M., Rajabi-Sebdani, M., And Khan, M. A., “Optimal design of permanent magnet synchronous generator for wind energy conversion considering annual energy input and magnet volume”, ***In Sustainable Power Generation and Supply***, China, 1-6 (2009).
116. Bianchi, N., And Lorenzoni, A., “Permanent magnet generators for wind power industry: an overall comparison with traditional generators”, ***Opportunities and Advances in International Electric Power Generation***, UK, 49-54 (1996).

117. Damiano, A., Marongiu, I., Monni, A., And Porru, M., “Design of a 10 MW multi-phase PM synchronous generator for direct-drive wind turbines”, *In Industrial Electronics Society, IECON*, Austria, 5266-5270 (2013).
118. Faiz, J., Valipour, Z., Shokri-Kojouri, M., And Khan, M.A. “Design of a radial flux permanent magnet wind generator with low coercive force magnets”, *In Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, Ukraine, 1-7 (2016).
119. Kilk, A., Kudrjajtsev, O., “Study and verification of a slow speed PM generator with outer rotor for small scale wind turbines”, *Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ)*, Estonia, 1-6 (2012).
120. Libert, F., “Design, optimization and comparison of permanent magnet motors for a low-speed direct-driven mixer”, Licentiate Thesis, *Royal Institute of Technology*, Stockholm, (2004).
121. Gieras, Jacek F., WANG, Rong-Jie., KAMPER, And Maarten J., “Axial flux permanent magnet brushless machines”, *NY: Springer*, New York, 128-167 (2008).
122. Comanescu, M., Keyhani, A., And Dai, M., “Design and analysis of 42-V permanent-magnet generator for automotive applications”, *IEEE Transactions on Energy conversion* 18(1): 107-112 (2003).
123. Khan, M. A., And Pillay, P., “Design of a PM wind generator, optimised for energy capture over a wide operating range”, *Electric Machines and Drives*, USA, 1501-1506 (2005).
124. Hendershot, J.R., And Miller, T.J.E., “Design of brushless permanent-magnet motors”, *Magna Physics Publishing*, New York, 94-200 (1994).
125. Bal G., “Doğru Akım Makinaları ve Sürücüler”, *Seçkin Yayınevi*, Ankara, 26-54 (2001).
126. Cafieri, S., Liberti, L., Messine, F., And Nogarede, B., “Optimal design of electrical machines: mathematical programming formulations”, *COMPEL-The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, 32(3): 977-996 (2013).
127. Cetinceviz, Y., Uygun, D., And Demirel, H., “Multi-criterion design and 2D cosimulation model of 4 kW PM synchronous generator for standalone run-of-the-river stations”, *In Renewable Energy Research and Applications*, Italy, 1470-1476 (2015).
128. Proca, A. B., Keyhani, A., El-Antably, A., Lu, W., And Dai, M., “Analytical model for permanent magnet motors with surface mounted magnets”, *IEEE transactions on energy conversion*, 18(3): 386-391 (2003).

129. Heikkilä, T., “Permanent magnet synchronous motor for industrial inverter applications-analysis and design”, *Acta Universitatis Lappeenrantaensis*, (2002).
130. Tiang, T.L., Ishak, D., And Jamil, M.K.M., “Complete subdomain model for surface-mounted permanent magnet machines”, *In Energy Conversion (CENCON)*, 140-145 (2014).
131. Rahman, M. A., And Zhou, P., “Analysis of brushless permanent magnet synchronous motors”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 43(2): 256-267 (1996).
132. Zhou, Y., Li, H., Meng, G., Zhou, S., And Cao, Q., “Analytical Calculation of Magnetic Field and Cogging Torque in Surface-Mounted Permanent-Magnet Machines Accounting for Any Eccentric Rotor Shape”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(6): 3438-3447 (2015).
133. Ackermann, B., And Sottek, R., “Analytical modeling of the cogging torque in permanent magnet motors”, *Electrical Engineering (Archiv fur Elektrotechnik)*, 78(2): 117-125 (1995).
134. Zhu, Z. Q., Wu, L. J., And Xia, Z.P., “An accurate subdomain model for magnetic field computation in slotted surface-mounted permanent-magnet machines”, *IEEE Transactions on Magnetics*, 46(4): 1100-1115 (2010).
135. Bellara, A., Amara, Y., Barakat, G., And Dakyo, B., “Two-dimensional exact analytical solution of armature reaction field in slotted surface mounted PM radial flux synchronous machines”, *IEEE Transactions on Magnetics*, 45(10): 4534-4538 (2009).
136. Zhu, Z. Q., Howe, D., Bolte, E., And Ackermann, B., “Instantaneous magnetic field distribution in brushless permanent magnet DC motors. I. Open-circuit field”, *IEEE transactions on magnetics*, 29(1): 124-135 (1993).
137. Zhou, Y., Li, H., Wang, W., Cao, Q., And Zhou, S., “Improved Method for Calculating Magnetic Field of Surface-Mounted Permanent Magnet Machines Accounting for Slots and Eccentric Magnet Pole”, *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 10(3): 1025-1034 (2015).
138. Liu, Z. J., And Li, J. T., “Analytical solution of air-gap field in permanent-magnet motors taking into account the effect of pole transition over slots”, *IEEE Transactions on Magnetics*, 43(10): 3872-3883 (2007).
139. Yeo, H.K., Woo, D.K., Lim, D.K., Ro, J.S., And Jung, H.K., “Analysis of a surface-mounted permanent-magnet machine with overhang structure by using a novel equivalent magnetic circuit model”, *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 9(6): 1960-1966 (2014).

140. Qu, R., And Lipo, T. A., "Analysis and modeling of airgap & zigzag leakage fluxes in a surface-mounted-PM machine", *In Industry Applications Conference, 37th IAS Annual Meeting*, USA, 4: 2507-2513 (2002).
141. Ding, X.F., Liu, G.L., Guo, H., And Bai, H., "A 3-D Magnetic Equivalent Circuit of an Axial-Flux MEMS Micromotor", *Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices*, China, (2016).
142. Zhu, Z. Q., Pang, Y., Howe, D., Iwasaki, S., Deodhar, R., And Pride, A., "Analysis of electromagnetic performance of flux-switching permanent-magnet machines by nonlinear adaptive lumped parameter magnetic circuit model", *IEEE Transactions on magnetics*, 41(11): 4277-4287 (2005).
143. Zhu, Z.Q., And Howe, D., "Instantaneous magnetic field distribution in brushless permanent magnet DC motors. III. Effect of stator slotting", *IEEE transactions on magnetics*, 29(1): 143-151 (1993).
144. Zarko, D., Ban, D., And Lipo, T. A., "Analytical solution for cogging torque in surface permanent-magnet motors using conformal mapping", *IEEE Transactions on Magnetism*, 44(1): 52-65 (2008).
145. Zarko, D., Ban, D., And Lipo, T.A., "Analytical calculation of magnetic field distribution in the slotted air gap of a surface permanent-magnet motor using complex relative air-gap permeance", *IEEE Transactions on Magnetism*, 42(7): 1828-1837 (2006).
146. Markovic, M., Jufer, M., And Perriard, Y., "Reducing the cogging torque in brushless dc motors by using conformal mappings", *IEEE transactions on magnetics*, 40(2): 451-455 (2004).
147. Rabinovici, R., "Magnetic field analysis of permanent magnet motors", *IEEE transactions on magnetics*, 32(1): 265-269 (1996).
148. Wei-Zhong, F., "Permanent magnet synchronous machines with fractional slot and concentrated winding configurations", Phd. Thesis, <http://dspace.lib.cranfield.ac.uk/handle/1826/6150>, (2011).
149. Wanjiku, J.G., "Design of an axial-flux generator for a small-scale wind electrolysis plant", *Diss. University of Cape Town*, (2010).
150. Hsiao, C.Y., Yeh, S.N., And Hwang, J.C., "Design of high performance permanent-magnet synchronous wind generators", *Energies*, 7(11): 7105-7124 (2014).
151. Strous, T.D., "Design of a permanent magnet radial flux concentrated coil generator for a range extender application", *Delft University of Technology*, Delft, (2010).

152. Zhu, Z. Q., And Howe, D., “Analytical prediction of the cogging torque in radial-field permanent magnet brushless motors”, *IEEE transactions on magnetics*, 28(2): 1371-1374 (1992).
153. Zhu, Z.Q., Howe, D., And Chan, C.C., “Improved analytical model for predicting the magnetic field distribution in brushless permanent-magnet machines”, *IEEE Transactions on Magnetics*, 38(1): 229-238 (2002).
154. Fei, W., And Luk, P.C.K., “A new technique of cogging torque suppression in direct-drive permanent-magnet brushless machines”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 46(4): 1332-1340 (2010).
155. Gieras, J. F., “Analytical approach to cogging torque calculation of PM brushless motors”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 40(5): 1310-1316 (2004).
156. Dosiek, L., And Pillay, P., “Cogging torque reduction in permanent magnet machines”, *IEEE Transactions on industry applications*, 43(6): 1565-1571 (2007).
157. Wang, D., Wang, X., And Jung, S. Y., “Cogging torque minimization and torque ripple suppression in surface-mounted permanent magnet synchronous machines using different magnet widths”, *IEEE Transactions on Magnetics*, 49(5): 2295-2298 (2013).
158. Zhu, Z. Q., And Howe, D., “Influence of design parameters on cogging torque in permanent magnet machines”, *IEEE Transactions on energy conversion*, 15(4): 407-412 (2000).
159. Wu, L. J., Zhu, Z. Q., Staton, D.A., Popescu, M., And Hawkins, D., “Comparison of analytical models of cogging torque in surface-mounted PM machines”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59(6): 2414-2425 (2012).
160. Hansen A.D., And Michalke G., “Modelling and Control of Variable-speed Multi-pole Permanent Magnet Synchronous Generator Wind Turbine”, *Wind Energy Wiley Interscience*, 11: 537-554, (2008).
161. Bazzo, T.D.P.M., Kölzer, J.F., Carlson, R., Wurtz, F., And Gerbaud, L., “Multidisciplinary design optimization of a direct-drive PMSG including the power converter cost and losses”, *In Electrical Machines (ICEM)*, Switzerland, 1909-1914 (2016).
162. Chapman, S., “Electric machinery fundamentals”, *Tata McGraw-Hill Education*, 267-336 (2005).
163. Sanchez, A.G., Molina, M.G., And Rizzato Lede A.M., “Dynamic model of wind energy conversion systems with PMSG-based variable-speed wind turbines for power system studies”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 37: 10064-10069 (2012).

164. Márquez, J.L., Molina, M.G., And Pacas, J.M., “Dynamic modeling, simulation and control design of an advanced micro-hydro power plant for distributed generation applications”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(11): 5772-5777 (2010).
165. Khaburi, D.A., And Nazempour, A., “Design and simulation of a PWM rectifier connected to a PM generator of micro turbine unit”, *Scientia Iranica*, 19(3): 820-828 (2012).
166. Muljadi, E., And Green, J., “Cogging torque reduction in a permanent magnet wind turbine generator”, *In ASME 2002 Wind Energy Symposium, American Society of Mechanical Engineers*, USA, 340-342 (2002).
167. Arand, S. J., And Ardebili, M., “Multi-objective design and prototyping of a low cogging torque axial-flux PM generator with segmented stator for small-scale direct-drive wind turbines”, *IET Electric Power Applications*, 10(9): 889-899 (2016).
168. McIntosh, D. R., “Skewing For Both Cogging Torque Components In Permanent Magnet Machines”, *Proceedings of the COMSOL Conference*, Boston, 1-5 (2010)
169. Bianchi, N., And Bolognani, S., “Design techniques for reducing the cogging torque in surface-mounted PM motors”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 38(5): 1259-1265 (2002).
170. Jabbari, A., “Design optimization of a permanent magnet brushless generator for a gearless wind turbine”, *In Renewable Energy & Distributed Generation (ICREDG)*, 56-62 (2016).
171. Aleksashkin, A., And Mikkola, A. “Literature review on permanent magnet generators design and dynamic behavior”, *Lappeenranta University of Technology*, (2008).
172. Romeral, L., Urresty, J. C., Riba, J. R., And Garcia, A., “Modeling of surface-mounted permanent magnet synchronous motors with stator winding interturn faults”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(5): 1576-1585 (2011).
173. Bochao, D., Shumei, C., Shouliang, H., Guoliang, W., And Bingliang, X., “A simple diagnosis of winding short-circuited fault of PMSM for electric vehicle”, *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 88-91 (2012).
174. Maia, T.A., Faria, O., Cardoso, A.A., Borges, F.S., Mendonça, H.G., Silva, M., ... And Lopes, B.M. “Electromechanical design for an optimized axial flux permanent magnet torus machine for 10kw wind turbine”, *International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, China, 1-6 (2011).

175. Hsiao, C.Y., Yeh, S.N., And Hwang, J.C., “Design of High Performance Permanent-Magnet Synchronous Wind Generators”, *Energies*, 7(11): 7105-7124 (2014).
176. Bumby, J. R., Stannard, N., Dominy, J., And McLeod, N., “A permanent magnet generator for small scale wind and water turbines”, *18th International Conference on Electrical Machines*, Portugal, 1-6, (2008).
177. Yang, J., Gao, Y., And O'Reilly, J., “Permanent magnet synchronous generator converter protection analysis during DC wind farm open-circuit fault condition”, *IEEE Electrical Power & Energy Conference (EPEC)*, Canada, 1-6 (2009).
178. Chan, T.F., Lai, L.L., And Xie, S. “Field computation for an axial flux permanent-magnet synchronous generator”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 24(1): 1-11 (2009).
179. Freire, N.M., And Marques Cardoso, A.J., “A fault-tolerant PMSG drive for wind turbine applications with minimal increase of the hardware requirements”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 50(3): 2039-2049 (2014).
180. Aubert, B., Regnier, J., Caux, S., And Alejo, D., “On-line inter-turn short-circuit detection in permanent magnet synchronous generators”, *9th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines*, Valencia, 329-335, (2013).
181. Sun, Z., Wang, J., Howe, D., And Jewell, G., “Analytical prediction of the short-circuit current in fault-tolerant permanent-magnet machines”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(12): 4210-4217 (2008).
182. Klontz, K. W., Miller, T. J., McGilp, M., Karmaker, H., And Zhong, P., “Short-circuit analysis of permanent-magnet generators”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 47(4): 1670-1680 (2011).
183. Caricchi, F., Maradei, F., De Donato, G., And Giulii Capponi, F., “Axial-flux permanent-magnet generator for induction heating gensets”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(1): 128-137 (2010).
184. Chan, T.F., Wang, W., And Lai, L.L., “Permanent-magnet synchronous generator supplying an isolated load”, *IEEE Transactions on Magnetics*, 46(8): 3353-3356 (2010).
185. Shukang, C., And Weiliang, L., “Analysis of sudden short circuit current for PMSG”, *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, China, 1-4 (2008).
186. Apostoia, C.M., And Cernat, M., “Fault Detection in Synchronous Motor Drives, a Co-Simulation Approach”, *The Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP)*, Antalya, 617-622, (2015).

187. Wang, X., Qi, J., Hou, Y., Wang, Y., Xu, W., Wang, D., And Jiao, Z., “Studies on fault analysis and protection configuration schemes in an isolated micro-grid”, *IEEE PES General Meeting Conference & Exposition*, USA, 1-5 (2014).
188. Bianchi, N., Bolognani, S., And Dai Pré, M., “Strategies for the Fault-Tolerant Current Control of a Five-Phase Permanent-Magnet Motor”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 43(4): 96-970 (2007).



## ÖZGEÇMİŞ

Yücel ÇETİNCEVİZ 1982 yılında Ankara’da doğdu; ilk ve orta öğrenimini Muğla’nın Milas ilçesinde tamamladı. Milas Anadolu Teknik Lisesi Elektrik Bölümü’nden mezun oldu. 2002 yılında Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi Bölümü’nde öğrenime başlayıp 2006 yılında yüksek onur derecesiyle mezun oldu. 2008 yılında Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı’nda başlamış olduğu yüksek lisans programını, 2011 yılında tamamladı. 2008-2009 yıllarında Ankara OSTİM’de endüstriyel otomasyon alanında çalıştı. 2009 yılında Kastamonu Üniversitesi’nde göreve başladı ve halen aynı yerde çalışmaya devam etmektedir.

### **ADRES BİLGİLERİ**

Adres : Kastamonu Üniversitesi  
Kastamonu Meslek Yüksekokulu  
Kuzeykent / KASTAMONU  
Tel : (555) 644 5997  
E-posta : yucelcetinceviz@hotmail.com