

**T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**KESİRLİ SARIMLI KALICI MIKNATISLI SENKRON MAKİNELERDE
DENGESİZ MANYETİK YÜK ANALİZİ**

Aykut KURTOĞLU

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa NİL



MANİSA-2024

Aykut
KURTOĞLU

KESİRLİ SARIMLI KALICI MIKNATISLI SENKRON MAKİNELERDE
DENGESİZ MANYETİK YÜK ANALİZİ

2024

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Aykut KURTOĞLU



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

| | |
|---------------------------|----------------------------------|
| A | Kesit Alanı |
| AC | Alternative Current |
| AR-GE | Araştırma-Geliştirme |
| B | Manyetik Akı Yoğunluğu |
| B_r | Radyal akı yoğunluğu |
| B_t | Teğetsel akı yoğunluğu |
| CPS | Conductor Per Slot |
| DC | Direct Current |
| FEA | Finite Element Analysis |
| F_r | Radyal Kuvvet |
| F_t | Teğetsel Kuvvet |
| H | Manyetik akı şiddeti |
| KMSM | Kalıcı Mıknatıslı Senkron Makine |
| N | Tur Sayısı |
| p | Pole (kutup) |
| rpm | Revolution Per Minute |
| s | Slot (oluk) |
| UMF | Unbalanced Magnetic Force |
| W_{enerji} | Depolanan Enerji |
| Ø | Manyetik Akı |

ŞEKİLLER DİZİNİ

| | |
|---|----|
| Şekil 1.1 KMSM'lerin Dünya Piyasasındaki Yeri..... | 4 |
| Şekil 2.1 Elektrik Motorlarının Sınıflandırılması | 11 |
| Şekil 2.2 (a) Toplu Sargı Yapısı (b) Faz Diyagramı | 13 |
| Şekil 2.3 (a) Dağıtılmış Sargı Yapısı (b) Faz Diyagramı..... | 13 |
| Şekil 2.4 (a) Yüzey Montajlı KMSM (b) Gömülü Mıknatıslı KMSM..... | 15 |
| Şekil 2.5 Histerezis Eğrisi (B-H) | 18 |
| Şekil 2.6 KMSM Hava Aralığı | 18 |
| Şekil 2.7 (a) Silindirik Koordinat Sistemi (b) Silindirik Motor..... | 20 |
| Şekil 2.8 Kartezyen Koordinat Sisteminde Üçgensel Sonlu Eleman | 26 |
| Şekil 2.9 KMSM' nin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Ayrışması | 27 |
| Şekil 2.10 Sonlu Eleman Analizi | 28 |
| Şekil 3.1 Ansys Maxwell Süreç Akış Diyagramı | 32 |
| Şekil 3.2 Rmxprt İçerisinde Yer Alan Farklı Tip Makine Çeşitleri | 33 |
| Şekil 3.3 Makineye Ait Ana Parametrelerin Girişi..... | 34 |
| Şekil 3.4 Makinenin Stator Parametreleri | 34 |
| Şekil 3.5 Stator Oluklarının Ölçü Değerleri | 35 |
| Şekil 3.6 Stator Sargı Parametre Değerleri | 35 |
| Şekil 3.7 Makineye Ait Rotor Parametreleri..... | 36 |
| Şekil 3.8 Rotor Mıknatıslarına Ait Parametreler | 36 |
| Şekil 3.9 Tasarımı Tamamlanan Makinenin Analizi için Setup Parametreleri | 37 |
| Şekil 3.10 Makineye ait Rmxprt Analiz Sonuçları | 38 |
| Şekil 3.11 (a) Maxwell 2D ye Aktarma (b) Maxwell 3D ye Aktarma | 38 |
| Şekil 3.12 Ansys Maxwell 2D Analiz..... | 39 |
| Şekil 3.13 Ansys Maxwell 3D Analiz..... | 39 |
| Şekil 3.14 GA Akış Şeması | 41 |
| Şekil 3.15 GA Optimizasyon Analizi | 42 |
| Şekil 3.16 Parametrik Optimizasyon Örneği (a) Sınır Değerleri (b) Çıktılar | 43 |
| Şekil 3.17 Parametrik Optimizasyon Analizi..... | 43 |
| Şekil 3.18 Analiz Çözüm Yöntemi | 44 |
| Şekil 3.19 Vektör Potansiyel | 45 |
| Şekil 3.20 3 Fazlı Sargılara Akım Ataması | 46 |
| Şekil 3.21 Field Calculator Manyetik Akı Yoğunluğu Hesaplama | 47 |
| Şekil 3.22 Hava Boşluğuna Çizilen Yay | 48 |
| Şekil 4.1 Tasarlanan Statorun Ölçüm Parametreleri..... | 52 |
| Şekil 4.2 M19_24G tipi Laminasyon Malzemenin B-H Eğrisi | 53 |
| Şekil 4.3 20 Kutup için Nominal Akımda Oluşan Kayıplar | 54 |
| Şekil 4.4 20 Kutup için Nominal Akımdaki Moment Grafiği | 54 |
| Şekil 4.5 20 Kutup için Yüksüz Durumda Sargılarda Oluşan Gerilimlerin Grafiği .. | 55 |
| Şekil 4.6 20 Kutup için 50 Hz Frekansta Hız Grafiği..... | 55 |
| Şekil 4.7 20 Kutup için Yüksüz Durumda Yayılan Manyetik Akı Çizgileri..... | 56 |
| Şekil 4.8 20 Kutup için 0 Amperde Oluşan B_r , B_t , F_x , F_y Grafikleri | 56 |

| | | |
|------------|--|----|
| Şekil 4.9 | 20 Kutup için 0 Amper için F_{net} Analizi | 57 |
| Şekil 4.10 | 20 Kutup için 1 Amperde Oluşan B_r , B_t , F_x , F_y Grafikleri | 57 |
| Şekil 4.11 | 20 Kutup için 1 Amperde Oluşan F_{net} Grafiği | 58 |
| Şekil 4.12 | 20 Kutup için 3 Amperde Oluşan B_r , B_t , F_x , F_y Grafikleri | 58 |
| Şekil 4.13 | 20 Kutup için 3 Amperde Oluşan F_{net} Grafiği | 59 |
| Şekil 4.14 | 20 Kutup için 5 Amperde Oluşan B_r , B_t , F_x , F_y Grafikleri | 59 |
| Şekil 4.15 | 20 Kutup için 5 Amperde Oluşan F_{net} Grafiği | 60 |
| Şekil 4.16 | 20 Kutup için 10 Amperde Oluşan B_r , B_t , F_x , F_y Grafikleri | 60 |
| Şekil 4.17 | 20 Kutup için 10 Amperde Oluşan F_{net} Grafiği | 61 |
| Şekil 4.18 | 22 Kutup için Nominal Akımda Oluşan Kayıplar | 62 |
| Şekil 4.19 | 22 Kutup için Nominal Akımdaki Moment Grafiği | 62 |
| Şekil 4.20 | 22 Kutup için Yüksüz Durumda Sargılarda Oluşan Gerilimlerin Grafiği | 63 |
| Şekil 4.21 | 22 Kutup için 50 Hz Frekansta Oluşan Hız Grafiği | 63 |
| Şekil 4.22 | 22 Kutup için Yüksüz Durumda Yayılan Manyetik Akı Çizgileri | 64 |
| Şekil 4.23 | 22 Kutup için 0 Amperde Oluşan B_r , B_t , F_x , F_y Grafikleri | 64 |
| Şekil 4.24 | 22 Kutup için 0 Amperde oluşan F_{net} grafiği | 65 |
| Şekil 4.25 | 22 Kutup için 0.95 Amperde Oluşan B_r , B_t , F_x , F_y Grafikleri | 65 |
| Şekil 4.26 | 22 Kutup için 0.95 Amperde Oluşan F_{net} Grafiği | 66 |
| Şekil 4.27 | 22 Kutup için 2.84 Amperde Oluşan B_r , B_t , F_x , F_y Grafikleri | 66 |
| Şekil 4.28 | 22 Kutup için 2.84 Amperde Oluşan F_{net} Grafiği | 67 |
| Şekil 4.29 | 22 Kutup 4.74 Amperde Oluşan B_r , B_t , F_x , F_y Grafikleri | 67 |
| Şekil 4.30 | 22 Kutup için 4.74 Amperde Oluşan F_{net} Grafiği | 68 |
| Şekil 4.31 | 22 Kutup için 9.49 Amperde Oluşan B_r , B_t , F_x , F_y Grafikleri | 68 |
| Şekil 4.32 | 22 Kutup için 9.49 Amperde Oluşan F_{net} Grafiği | 69 |
| Şekil 4.33 | 26 Kutup için Nominal Akımda Oluşan Kayıplar | 70 |
| Şekil 4.34 | 26 Kutup için Nominal Akımda Oluşan Moment Grafiği | 70 |
| Şekil 4.35 | 26 Kutup için Yüksüz Durumda Sargılarda Oluşan Gerilimlerin Grafiği | 71 |
| Şekil 4.36 | 26 Kutup için 50 Hz Frekansta Hız Grafiği | 71 |
| Şekil 4.37 | 26 Kutup için Yüksüz Durumda Yayılan Manyetik Akı Çizgileri | 72 |
| Şekil 4.38 | 26 Kutup için 0 Amperde Oluşan B_r , B_t , F_x , F_y Grafikleri | 72 |
| Şekil 4.39 | 26 Kutup için 0 Amperde Oluşan F_{net} Grafiği | 73 |
| Şekil 4.40 | 26 Kutup için 1 Amperde Oluşan B_r , B_t , F_x , F_y Grafikleri | 73 |
| Şekil 4.41 | 26 Kutup için 1 Amperde Oluşan F_{net} Grafiği | 74 |
| Şekil 4.42 | 26 Kutup için 3 Amperde Oluşan B_r , B_t , F_x , F_y Grafikleri | 74 |
| Şekil 4.43 | 26 Kutup için 3 Amperde Oluşan F_{net} Grafiği | 75 |
| Şekil 4.44 | 26 Kutup için 5 Amperde Oluşan B_r , B_t , F_x , F_y Grafikleri | 75 |
| Şekil 4.45 | 26 Kutup için 5 Amperde Oluşan F_{net} Grafiği | 76 |
| Şekil 4.46 | 26 Kutup için 10 Amperde Oluşan B_r , B_t , F_x , F_y Grafikleri | 76 |
| Şekil 4.47 | 26 Kutup için 10 Amperde F_{net} Grafikleri | 77 |
| Şekil 4.48 | 28 Kutup için Nominal Akımda Oluşan Kayıplar | 78 |
| Şekil 4.49 | 28 Kutup için Nominal Akımda oluşan Moment Grafiği | 78 |
| Şekil 4.50 | 28 Kutup için Yüksüz Durumda Sargılarda Oluşan Gerilimlerin Grafiği | 79 |
| Şekil 4.51 | 28 Kutup için 50 Hz Frekansta Hız Grafiği | 79 |
| Şekil 4.52 | 28 Kutup için Yüksüz Durumda Yayılan Manyetik Akı Çizgileri | 80 |

| | | |
|------------|--|----|
| Şekil 4.53 | 28 Kutup için 0 Amperde Oluşan B_r , B_t , F_x , F_y Grafikleri | 80 |
| Şekil 4.54 | 28 Kutup için 0 Amperde Oluşan F_{net} Grafiği | 81 |
| Şekil 4.55 | 28 Kutup için 0.96 Amperde Oluşan B_r , B_t , F_x , F_y Grafikleri | 81 |
| Şekil 4.56 | 28 Kutup için 0.96 Amperde Oluşan F_{net} Grafiği | 82 |
| Şekil 4.57 | 28 Kutup için 2.88 Amperde Oluşan B_r , B_t , F_x , F_y Grafikleri | 82 |
| Şekil 4.58 | 28 Kutup için 2.88 Amperde Oluşan F_{net} Grafikleri..... | 83 |
| Şekil 4.59 | 28 Kutup için 4.8 Amperde Oluşan B_r , B_t , F_x , F_y Grafikleri | 83 |
| Şekil 4.60 | 28 Kutup için 4.8 Amperde Oluşan F_{net} Grafiği | 84 |
| Şekil 4.61 | 28 Kutup 9.59 Amperde Oluşan B_r , B_t , F_x , F_y Grafikleri | 84 |
| Şekil 4.62 | 28 Kutup için 9.59 Amperde F_{net} Grafiği..... | 85 |
| Şekil 5.1 | Akı Dağılımı Simetrik Olan Motorun X Eksenindeki Kuvvet Analizi | 86 |
| Şekil 5.2 | Manyetik Akı Dağılımı..... | 87 |
| Şekil 5.3 | F_{net} Analizi..... | 88 |
| Şekil 5.4 | 21 Oluklu Dâhili Rotorlu KMSM' nin UMF Grafiği | 89 |
| Şekil 5.5 | 27 Oluklu Dâhili KMSM' nin UMF Grafiği | 91 |
| Şekil 5.6 | 20 Kutup/ 21 Oluk için Radyal ve Teğetsel Kuvvet Grafiği | 93 |
| Şekil 5.7 | 20 Kutup/ 21 Oluk Birinci Harmonik Distorsiyon Bileşenleri..... | 94 |
| Şekil 5.8 | 22 Kutup/ 21 Oluk için Radyal ve Teğetsel Kuvvet Grafiği | 94 |
| Şekil 5.9 | 22 Kutup/ 21 Oluk için birinci harmonik distorsiyon bileşenleri..... | 95 |
| Şekil 5.10 | 26 Kutup/ 27 Oluk için Radyal ve Teğetsel Kuvvet Grafiği | 96 |
| Şekil 5.11 | 26 Kutup/ 27 Oluk için Birinci Harmonik Distorsiyon Bileşenleri..... | 96 |
| Şekil 5.12 | 28 Kutup/ 27 Oluk için Radyal ve Teğetsel Kuvvet Grafiği | 97 |
| Şekil 5.13 | 28 Kutup/ 27 Oluk için Birinci Harmonik Distorsiyon Bileşenleri..... | 97 |

TABLO DİZİNİ

| | |
|---|----|
| Çizelge 2.1 Farklı Mıknatıslara Ait Büyüklükler | 16 |
| Çizelge 2.2 Farklı Mıknatıslara Ait Isıl Değerler | 17 |
| Çizelge 2.3 Maxwell Denklemleri | 23 |
| Çizelge 4.1 Tasarlanan Motorlara Ait Ortak Parametreler | 51 |
| Çizelge 4.2 KMSM Farklı Parametreleri | 52 |
| Çizelge 5.1 20 Kutup Makinenin Elektrik Yükleme Parametreleri | 90 |
| Çizelge 5.2 22 Kutup Makinenin Elektrik Yükleme Parametreleri | 90 |
| Çizelge 5.3 26 Kutup Makinenin Elektriksel Yükleme Parametreleri | 91 |
| Çizelge 5.4 26 Kutup Makinenin Elektriksel Yükleme Parametreleri | 92 |



TEŞEKKÜR

Tez çalıőmam boyunca destek ve bilgilerini esirgemeyen danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Mustafa NİL' e, tez konusu belirlemede fikirlerini paylaşan ve tez çalıőmam boyunca tecrübesinden faydalandığım Dr. Öğr. Üyesi Cihan Alp ŐAHİN' e ve tez çalıőmama desteklerinden ötürü Dr. Öğr. Üyesi Cemil OCAK ve Dr. Öğr. Üyesi Ali BAKBAK' a teşekkür ederim.

Son olarak, öğrenim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme teőekkürü bir borç bilirim.

Aykut KURTOĞLU
Manisa, 2024



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KESİRLİ SARIMLI KALICI MIKNATISLI SENKRON MAKİNLERDE DENGESİZ MANYETİK YÜK ANALİZİ

Aykut KURTOĞLU

Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mustafa NİL

Elektrikli makinaların otomotiv, yenilenebilir enerji, havacılık ve uzay sektörlerinde yaygınlaşmasıyla bu alandaki çalışmalar hız kazanmıştır. Kesirli sarımlı kalıcı mıknatıslı senkron makineler; yüksek tork ve güç yoğunluğundan dolayı bu alanlarda sıkça tercih edilmektedir. Fakat kesirli sarımlı kutup-oluk kombinasyonuna sahip kalıcı mıknatıslı elektrik makinelerinde manyetik akı çizgileri simetrik olarak dağılamamaktadır ve bu da stator ve rotor arasında bulunan hava boşluğunda dengesiz manyetik kuvvet (UMF) oluşumuna sebep olmaktadır. Dengesiz manyetik kuvvetler makineler üzerinde mekanik titreşim, akustik gürültü ve motor milinin zamanla aşınmasına sebep olmaktadır. Bu çalışmada farklı kutup-oluk kombinasyonlarına sahip $s=2p\pm 1$ olan kesirli sargılı kalıcı mıknatıslı senkron makine tasarımları yapılmış, bu makinelerin UMF analizleri sonlu elemanlar yöntemi ve Maxwell Stress Tensor ile gerçekleştirilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucuna göre kutup sayısı oluk sayısından bir fazla olduğunda UMF değerinin daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kalıcı Mıknatıslı Senkron Makine, Kesirli Sargı, Dengesiz Manyetik Kuvvet, Maxwell Stress Tensor, Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEA).

2024, 103 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

UNBALANCED MAGNETIC FORCE ANALYSIS OF FRACTIONAL WINDING PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MACHINE

Aykut KURTOĞLU

**Manisa Celal Bayar University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Electrical and Electronics Engineering**

Supervisor: Asts. Prof. Dr. Mustafa NİL

With the spread of electric machines in the automotive, renewable energy, aviation and space industries, studies in this field have accelerated. Fractional winding permanent magnet synchronous machines are frequently preferred in these areas due to its high torque and power density. However, in permanent magnet electric machines with fractional winding pole-slot combination, magnetic flux lines cannot be distributed symmetrically, and this causes the formation of unbalanced magnetic force (UMF) in the air gap between the stator and rotor. UMF can cause mechanical vibration, acoustic noise on machines and wear of the motor shaft over time. In this study, fractional winding permanent magnet synchronous machine designs with $s=2p\pm 1$ with different pole-slot combinations were made, UMF analyzes of these machines were carried out with the finite element method (FEA) and Maxwell Stress Tensor and the results were compared. According to the comparison results, it was observed that the UMF value was lower when the number of poles was one more than the number of slots.

Keywords: Permanent Magnet Synchronous Machine, Fractional Winding, Unbalanced Magnetic Force, Maxwell Stress Tensor, Finite Element Analysis (FEA)

2024, 103 pages

İÇİNDEKİLER

| | |
|--|----|
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ | I |
| ŞEKİLLER DİZİNİ..... | II |
| TABLO DİZİNİ | V |
| TEŞEKKÜR..... | VI |
| 1. GİRİŞ | 3 |
| 1.1. Literatür Taraması | 5 |
| 1.2. Tez Çalışmasının Amacı | 8 |
| 2. GENEL BİLGİLER | 10 |
| 2.1. Elektrik Makineleri..... | 10 |
| 2.2. Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorların Genel Yapısı | 11 |
| 2.2.1. Stator | 12 |
| 2.2.2. Rotor..... | 13 |
| 2.2.3. Mıknatıslar | 15 |
| 2.2.4. Hava Aralığı | 18 |
| 2.3. Kalıcı Mıknatıslı Senkron Makinelerdeki Kuvvetler | 19 |
| 2.3.1. Radyal Kuvvetler (F_r)..... | 21 |
| 2.3.2. Teğetsel Kuvvetler (F_t)..... | 22 |
| 2.3.3. Maxwell Stress Tensor | 22 |
| 2.3.4. Maxwell Stress Tensor ile Manyetik Kuvvet Hesaplama | 23 |
| 2.4. Sonlu Elemanlar Yöntemi | 25 |
| 3. ANSYS MAXWELL PROGRAMINDA MOTOR TASARIMI VE MANYETİK KUVVET ANALİZİ..... | 31 |
| 3.1. Ansys Maxwell | 31 |
| 3.2. Ansys Maxwell RMXprt Motor Tasarımı | 33 |
| 3.3. Optimizasyon..... | 40 |
| 3.3.1. Genetik Algoritma (GA) | 40 |
| 3.3.2. Parametrik Optimizasyon..... | 42 |
| 3.4. Ansys Maxwell 2D Analiz | 44 |
| 3.5. Ansys Maxwell Manyetik Kuvvet Analizi | 47 |
| 4. KMSM TASARIM VE ANALİZ SONUÇLARI | 50 |
| 4.1. 20 Kutup/ 21 Oluk KMSM' nın Analiz Sonuçları | 53 |
| 4.2. 22 Kutup/ 21 Oluk KMSM' nın Analiz Sonuçları | 61 |

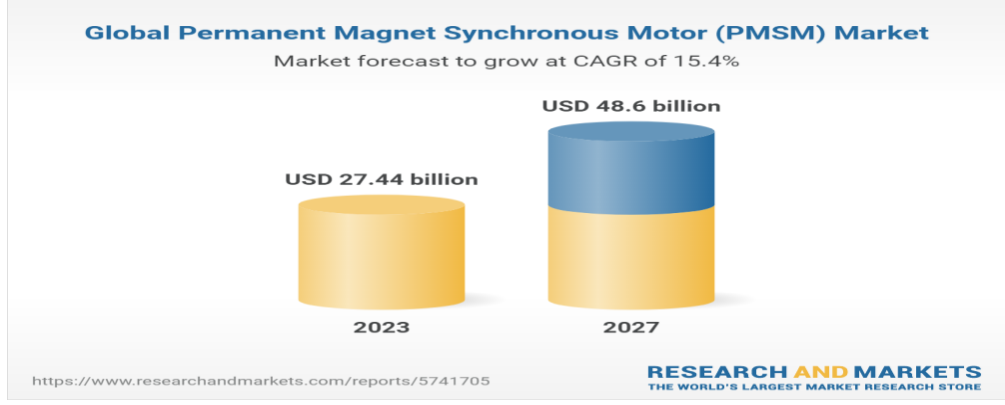
| | | |
|------|---|-----|
| 4.3. | 26 Kutup/ 27 Oluk KMSM un Analiz Sonuçları..... | 69 |
| 4.4. | 28 Kutup/ 27 Oluk KMSM' nın Analiz Sonuçları | 77 |
| 5. | TASARLANAN MOTORLARIN ANALİZ SONUÇLARININ KIYASLANMASI | 86 |
| 5.1. | Tasarlanan Motorların Kuvvet Analizlerinin Karşılaştırılması..... | 88 |
| 5.2. | Tasarlanan Motorların FFT Analizi | 92 |
| 6. | SONUÇ VE ÖNERİLER..... | 98 |
| | KAYNAKÇA..... | 100 |
| | ÖZGEÇMİŞ | 103 |



1. GİRİŞ

Bilim ve teknolojiadaki gelişmelere bağılı olarak uygulama alanları genişleyen elektrik makineleri günlük hayatımızda ve endüstriyel uygulamalarda çokça kullanılan cihazlardır. Doğada var olan mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirmekle birlikte elektrik enerjisinden mekanik enerji üretmesi elektrik makinelerini cazip hale getirmektedir. Her geçen gün artan Araştırma ve Geliştirme çalışmalarında (AR-GE) elektrik makinelerinden beklenen en az maliyetle daha stabil performans elde edebilmektir. Bu sebeple elektrik makineleri alanında yapılan çalışmalarda öncelikli amaç kayıp kaçakları azaltarak olabildiğince daha fazla fayda sağlayabilmektir. Bunun için literatür çalışmalarında ve endüstriyel uygulamalarda farklı modeller kullanılmaktadır. Özellikle klasik elektrik makinelerinin aksine günümüzde farklı yapılara sahip özel elektrik makine tasarımları mevcuttur. Bu çalışmalardan biri de Kalıcı Mıknatıslı Senkron Makinelere (KMSM).

Kalıcı Mıknatıslı Senkron Makineleri, son zamanlarda mıknatıs teknolojisindeki gelişmelere bağılı olarak popülerliğı artan elektrik makineleridir. KMSM, yüksek verimliğı, kompakt yapısı, tork kontrolü ve büyük güç yoğunluklarına sahiptir. Sahip olduğı bu özelliklerinden dolayı, elektrikli araç uygulamalarında, endüstriyel otomasyon ve robotik uygulamalarında, havacılık ve uzay sanayi uygulamalarında, yenilenebilir enerji sistemlerinde, tıbbi çalışmalarda ve günlük hayatımızda kullandığımız ev aletlerinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Geniş bir kullanım yelpazesine sahip olan Kalıcı Mıknatıslı Senkron Makinelerin verimi ve kayıpları ile ilgili AR-GE çalışmaları önem kazanmıştır. “Research and Markets” adlı firmanın araştırmasına göre, 2022 yılında 23.77 milyar dolar olan Kalıcı Mıknatıslı Senkron motorlarının pazarı 2023 yılında %15.5 artışla 27.44 milyar dolara yükselmiştir. Şekil 1.1’de bu piyasanın 2027 yılında ise 48.6 milyar dolara yükselmesi belirtilmiştir.



Şekil 1.1: KMSM'lerin Dünya Piyasasındaki Yeri

Kalıcı Mıknatıslı Senkron Makinelerin en temel özelliği ise rotor kısmında oluşan manyetik alanın rotora sabit bir şekilde monte edilen mıknatısların vasıtasıyla gerçekleştirilmesidir. Klasik makinelerin rotorunda bulunan sargılar yerine mıknatıslar kullanılmıştır. Bu sebepten ötürü rotor sargılarında akım verilerek elde edilen manyetik alanın yerine sabit mıknatısların kullanılması, Kalıcı Mıknatıslı Senkron Makinelerde ısınmadan dolayı oluşan bakır kayıplarını ortadan kaldırmış ve makinenin termal sıcaklığını azaltmıştır. Bu durum makinenin toplam kaybını azaltmakta, verimini artırmaktadır.

Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorlarda yukarıda ifade edilen avantajların yanında mıknatıslı yapıya sahip olmasından dolayı vuru mu momentine sahiptir. Vuru mu momenti, mıknatıslı elektrik makinelerinde stator dişleri ve mıknatıslar arasındaki etkileşimden dolayı oluşan ve istenmeyen bir momenttir. Rotordaki mıknatısların oluşturduğu manyetik akı çizgileri stator dişleri üzerinden en düşük relüktanslı yoldan tamamladığı için pozisyonunu değiştirmesinde tutucu bir etki yaratır. Bu durumda makinenin momentine zıt bir kuvvet oluşturur ve toplam momentte bir azalma olur [1]. Bu istenmeyen momentin sıfıra yakınsaması için belli başlı yöntemler vardır. Kalıcı Mıknatıslı Senkron Makinelerde vuru mu momentini azaltmak için stator oluklarına veya rotor üzerinde bulunan mıknatıslara eğim verilmesi, kalıcı mıknatısların ölçeklendirilmesi veya özel şekiller verilmesi ve kaydırılması, stator kısmında yardımcı olukların veya dişlerin kullanılması, mıknatıs kutupları üzerinde optimizasyon çalışmasının yapılması, kesirli sargıların kullanılması gibi çözüm yöntemleri öne sürülmüştür [2]. Bu konu ile ilgili yapılan literatür taraması yapıldığında Kalıcı Mıknatıslı Senkron Makinelerde kesirli sargıların kullanılması,

vuruntu momentinin azaltılmasında etkili bir yöntem olduğu gözlemlenmiştir [3]. Kesirli sargı yöntemi, makinenin oluk sayısının makinenin kutup sayısına bölüldüğünde ortaya çıkan kesirli sayıyı ifade eder. Makine tasarımı esnasında dikkate alınabilecek bu yöntem, ilave bir maliyet veya işçilik gerektirmemektedir [4]. Böylece kesirli sargı yöntemiyle Kalıcı Mıknatıslı Senkron Makinelerde vuruntu momenti minimize edilerek toplam momentum değerinde bir artış gözlenebilmektedir ve makinenin stabilitesine pozitif bir şekilde yansımaktadır.

Elektrik makinelerinde manyetik alan kuvvetleri ile analiz yapılırken silindirik koordinat sistemi kullanılır. Bir makinenin silindirik koordinat sisteminde incelendiğinde radyal, teğetsel ve aksel manyetik kuvvetleri olmak üzere üç farklı kuvvet türleri vardır. Bunlardan radyal kuvvet, bütün makine tiplerinde akustik gürültü ve titreşim ile ilgili çalışmalarda ön plana çıkmaktadır [5]. Kesir sarımlı Kalıcı Mıknatıslı Elektrik Makinelerinde oluk/kutup kombinasyon değerinin tam sayı olmamasından dolayı rotor mıknatıslarının oluşturduğu manyetik akı çizgileri stator sargılarında dengeli bir şekilde dağılamamaktadır. Asimetrik sargı yapısından dolayı asimetrik alan dağılımından Dengesiz Manyetik Kuvvet (Unbalanced Magnetic Force (UMF)) oluşur. Bu dengesiz manyetik kuvvet Kalıcı Mıknatıslı Senkron Makinede gürültü ve titreşime sebep olurken makine milinde torku oluşturan teğetsel kuvvet ise dengesiz manyetik kuvvetten dolayı zamanla motor milinin aşınmasına sebep olmaktadır [6].

1.1. Literatür Taraması

Bu bölümde, farklı yapıdaki kesirli sarımlı Kalıcı Mıknatıslı Senkron Makinelerde yapılan dengesiz manyetik yükün analizinde kullanılan analiz programları, analiz için kullanılan yöntemleri ve yorumları, dengesiz manyetik yük ile ilgili varılan sonuçları ve UMF analizi ile ilgili yapılan bu tez çalışmasına destek olan literatür çalışmaları yer almaktadır.

Zhu ve ark. (2011) yapmış oldukları çalışmada, kutup ve sargı sayıları arasındaki fark bir veya iki olan makineler gibi manyetik akı yoğunluğunun asimetrik dağıldığı kalıcı mıknatıslı makinelerde dengesiz manyetik yükün oluştuğunu belirtmiştir. Bu doğrultuda yapılan çalışmada hava aralığı akı yoğunluğunu hesaplayabilmek için

Sonlu Elemanlar (FE) yöntemine dayalı analitik metot kullanarak oluk/kutup oranının dengesiz manyetik yüke olan etkisini incelemiştirlerdir. Bunun için 8 kutup/9 oluk, 8 kutup/6 oluk, 16 kutup/15 oluk, 16 kutup/18 oluk için motor tasarımı yapılmış ve dengesiz manyetik yük analizi gerçekleştirilmiştir. Oluk/Kutup kombinasyonunun dengesiz manyetik yük üzerindeki etkisinin araştırıldığı bu çalışmada, dâhili rotorlu makinenin çift kutup sayısı, üçün katından bir eksik olduğunda “additive” yani dengesiz manyetik kuvveti artıran, çift kutup sayısı üçün katından bir fazla olduğunda “cancelling” yani dengesiz manyetik kuvveti azaltan yönde bir kombinasyon olduğu yapılan analizler sonucunda tespit edilmiştir. Varılan analiz sonuçları ile yapılan yorumları doğrulayabilmek amacıyla 9 Oluk/8 Kutup, 9 Oluk/10 Kutup kombinasyonlarına sahip makineler üzerinde deneysel düzenek kurularak oluşan titreşim ve gürültünün ölçümü yapılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen veriler ile simülasyon ortamında elde edilen sonuçların paralel olduğu doğrulanmıştır [7].

Dahaman ve ark. (2007), kalıcı mıknatıslı makinede yük arttırıldığında dengesiz manyetik yükün nasıl değiştiğine dair bir çalışma yürütmüşlerdir. Bu çalışma için oluk/kutup sayısının kesirli olduğu fırçasız AC ve DC makine tasarımları üzerinde durulmuştur. Bunun için 9 Oluk/ 8 Kutup ve 3 Oluk/2 Kutup kombinasyonlarına sahip makinelerinde sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak dengesiz manyetik yükün analizi gerçekleştirilmiştir. Ve sonuç olarak her iki makine kombinasyonunda da faz akımlarının artmasıyla birlikte dengesiz manyetik yüklerin arttığı gözlemlenmiştir. Bu gözlemleri desteklemek amacıyla 3 Oluk/2 Kutup yapısına sahip motor üzerinde deney yapılmıştır. Elde edilen deney sonuçları ile 2 boyutlu analitik modelde elde edilen deney sonuçlarının birbirlerini desteklediği sonucuna varılmıştır. Ve sonuç olarak motor tasarımı yapılırken yüksek elektrik yükleri ile yüklenen motorlarda dengesiz manyetik yük çalışması da hesaba katılmalıdır [8].

Dorrel ve ark. (2008) kesirli Oluk/Kutup sayısının kalıcı mıknatıslı makinelerde oluşturduğu dengesiz manyetik yük ile ilgili bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmalarında, 9 Oluk/8 Kutup ve 18oluk/16 kutuplu fırçasız kalıcı mıknatıslı motor tasarımları üzerinde çalışılmıştır. Ayrıca dengesiz manyetik yükten bağımsız olarak motor tasarımından dolayı oluşan hataların da hava aralığındaki akı yoğunluğunun asimetrik dağılmasına neden olduğu ifade edilmiştir. Tasarım hatalarından biri olan

motor kaçıklığının %10 olduğu durumda makinenin rotoru 60 derece döndürerek dengesiz manyetik yükün analizi gerçekleştirilmiştir. Hem kesirli oluk/kutup sayısından dolayı hem de %10'luk kaçıklıktan dolayı dengesiz manyetik yükün değerleri hesaplanmıştır. Bunun somut etkisi ise motor torkundaki ortalama değerindeki düşüş ve titreşim-gürültü gibi etki yarattığı ifade edilmiştir [9].

Yang Z. ve ark. (2020), kesirli sarımlı kalıcı mıknatıslı motorlarda gürültü ve titreşime sebep olan radyal elektromanyetik kuvvet analizini ele almışlardır. Bunun için Ansys Maxwell analiz programında 12 oluklu ve 14 kutuplu kalıcı mıknatıslı senkron motor tasarımı yapılmıştır. Ansys Maxwell programında dengesiz manyetik yükün analizini gerçekleştirebilmek için Maxwell Stress Tensor yönteminden ve Lorenz Kuvvet yönteminden faydalanılmıştır. Bu metotların ortak özelliği bir yüzeyde oluşan kuvvet, stres ve basınç gibi büyüklükleri hesaplamak için kullanılmaktadır. Programda bu yöntemleri kullanarak motorun yüklü ve yüksüz durumlarında radyal elektromanyetik kuvvet analizi zaman ve uzay düzleminde gerçekleştirilmiştir [10].

Bu makale çalışmasında kalıcı mıknatıslı motorlarda dâhili ve harici rotorlu makineleri kıyaslayarak dengesiz manyetik yükün analizini gerçekleştirmişlerdir. Wu ve arkadaşları dâhili ve harici rotor yapısına sahip 8p/9s, 10p/9s, 4p/6s, 8p/6s'lu kalıcı mıknatıslı motorlarda dengesiz manyetik yük analizini gerçekleştirerek bu iki topolojiden hareketle analitik modeller üzerinde çalışılmış ve sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analizler sonucunda harici rotorlu makinelerde $2p$ (çift kutup sayısı) = $3k+1$ ise dengesiz manyetik kuvveti artıran bir tasarıma sahiptir ve harici rotorlu makinelerde ise dengesiz manyetik yükü azaltacak yönde bir yapıya sahiptir. Eğer $2p= 3k-1$ olması durumunda dâhili rotorlu makinelerde dengesiz manyetik yükü daha da artırıldığı, harici rotorlu makinelerde ise tam tersi bir durum olduğu ifade edilmiştir [11].

Jie Ma ve ark. (2018), kesirli sargılı motor yapısına sahip 3s/2p kombinasyonlu motorlar için bir dengesiz manyetik yük analizi ve fiziksel olarak deney çalışmaları yürütmüşlerdir. Aynı oluk/kutup sayısına sahip 3 ayrı motorun incelendiği bu makalede farklı yardımcı olukların dengesiz manyetik yüke olan etkisi analiz edilip kıyaslama yapılmıştır. Farklı çalışma yükleri için analizi yapılan kalıcı mıknatıslı motorlarda yardımcı olukların dengesiz manyetik yükün azalmasında önemli bir çözüm olduğu elde edilen verilerle gösterilmiştir. Bu veriler doğrultusunda

yardımcı sargılar için farklı optimizasyon çalışmalarının yapıldığı 3s/2p kombinasyonuna sahip üç ayrı makinede dengesiz manyetik yüklerin belirli oranlarla azaldığı fakat tork değerlerinde de bir azalma olduğu görülmüştür. Dengesiz manyetik yükü azaltmak için yapılan çözüm yöntemi başarıya ulaşsa da motorun diğer önemli bir parametresi için problem oluşturmuştur. Ayrıca yapılan deneysel düzenekle, elde edilen değerlerin analiz değerleri ile paralel olduğu gözlemlenmiştir [12].

Bu çalışmanın konusu ise vuruğu momentinin sıfıra yakınsaması için kullanılan yöntemlerden biri olan kesirli sarım yöntemi azaltılan vuruğu momenti ile dengesiz manyetik yükün analizidir. Kalıcı mıknatıslı makinelerde stator kaçıklığı ve mıknatısların dengesiz manyetik akı dağılımından dolayı oluşan dengesiz manyetik analizleri gerçekleştirilmiştir. 12p/9s yapılı kalıcı mıknatıslı motorun incelendiği bu çalışmada, kalıcı mıknatısların manyetizmaların 3. harmonikleri incelenerek dengesiz manyetik yükün genliği ile ilgili analiz gerçekleştirilmiştir. Deneysel olarak üzerinde akustik gürültü ölçümleri yapılarak analiz ölçümleri ile karşılaştırılmış ve sonuçların birbirine yakın değerler olduğu görülmüştür [13].

1.2. Tez Çalışmasının Amacı

Kalıcı mıknatıslı senkron makinelerde kutup/oluk sayısının kesirli bir sayı olmasından dolayı makinenin hava aralığında oluşan dengesiz manyetik kuvvetlerin asimetrik olarak dağıldığı yapılan literatür çalışmalarında görülmüştür. Bu dengesiz manyetik kuvvetlerin, doğru kutup/oluk seçimi yapılmadığı takdirde makine üzerinde titreşim, akustik gürültü veya mekanik hasarlar gibi fiziksel etkiler yaratmasından dolayı bu konu kalıcı mıknatıslı makinelerde önemli bir sorun teşkil etmektedir. Yapılan literatür taramasında kutup/oluk sayısının doğru seçilmesi makinenin performansı ve stabilitesi açısından önem arz ettiği görülmüştür. Makine tasarımı sürecinde kutup/oluk sayısının karar verildikten sonra belli başlı analiz programları ile akustik gürültü ve titreşime sebep olan manyetik akı kuvvet değerlerinin hesaplanması gerekmektedir. Yapılan analiz sonuçları ile elde edilen veriler dâhilinde makine tasarımı optimize edilerek dengesiz manyetik yükü azaltan çalışmalar yapılarak motorun stabilitesi daha da artırılabilir.

Bu tez çalışmasında, farklı kesirli kutup/oluk yapısına sahip kalıcı mıknatıslı dâhili rotorlu makinelerde dengesiz manyetik kuvvetlerin analizini gerçekleştirmek ve belli başlı parametreleri sabit tutarak kendi aralarında bir kıyaslama yapılması amaçlanmıştır. Bunun için 4 farklı kutup/oluk sayısı kesirli olan 1kW güce sahip dâhili rotorlu kalıcı mıknatıslı senkron motor tasarlanmıştır. Motorların tasarımı tamamlanarak dengesiz manyetik yükü oluşturan manyetik kuvvet değerleri ile ilgili analizler yapılarak motorlar arasında bir karşılaştırma yapılmıştır. Kıyaslama yapılırken dikkate alınan ana düşünce dengesiz manyetik yükün olabildiğince sıfıra yakınsamasını sağlamaktır. Bu düşünceyle yapılan bu çalışmada amaç, farklı kesirli sargı yapısına sahip makinelerin analizinde en uygun makine tasarımına ulaşarak performans açısından daha stabil bir tasarım amaçlanmıştır.



2. GENEL BİLGİLER

Bu bölümde elektrik makineleri hakkında genel bilgilere, elektrikli makinelerin önemli bir çeşidi olan kalıcı mıknatıslı makinelere ve makinelerde oluşan manyetik akı kuvvet bileşenleri ile ilgili bilgilere yer verilmiştir.

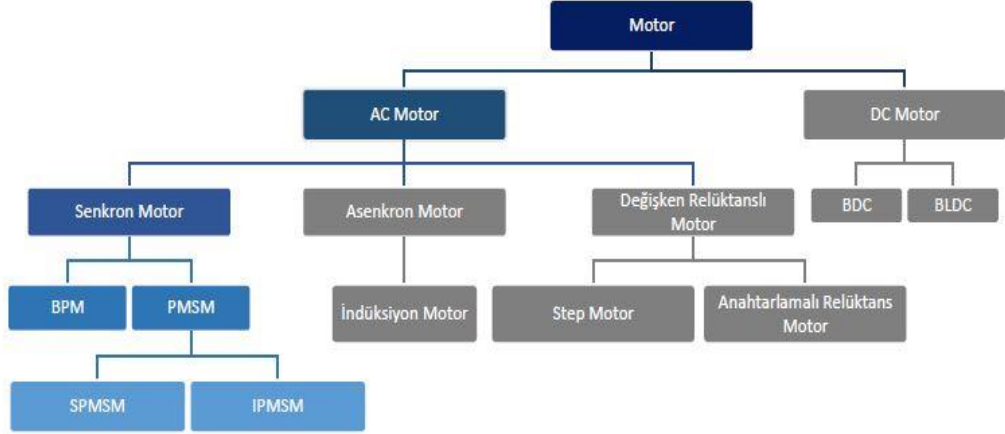
2.1. Elektrik Makineleri

Endüstriyel sanayi ve modern günlük hayatımızda oldukça kullanılan elektrik makineleri, verimleri yüksek, kontrolü kolay ve yenilenebilir bir enerji kaynağı olmasından dolayı her geçen gün önem kazanmaktadır. Özellikle fosil yakıt türlerinin azalması ve çevreye verdiği zarar dikkate alındığında elektrik makineleri temiz bir enerji kaynağı olduğu için dikkatleri üstüne çekmektedir. Bu yüzden elektrik makineleri teknolojinin gelişimine bağlı olarak gün geçtikçe farklı yapılar kazanarak daha da verimli hale gelmiştir. Elektrik makinelerinin temel amacı elektrik enerjisini mekanik enerjiye veya mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çeviren cihazlardır.

Elektrik makineleri ile ilgili tarihteki ilk çalışmayı 1820 yılında Danimarkalı bilim adamı Hans Christan Orsted tarafından yapılmıştır. Orsted yaptığı deneyler sonucunda bir iletkenin geçen akımın manyetik alan oluşturduğunu keşfetmiştir. Daha sonra İngiliz bilim adamı Michael Faraday ise oluşan bu manyetik alan ile dönme kuvveti oluşturduğunu ifade ederek ilk elektrik motoru ile ilgili çalışmayı yapan kişidir.

Elektrik makineleri iki ana bölümden oluşur. Bunlar rotor ve statordur. Rotor (rotating) makinenin dönen parçasıdır, stator ise makinenin sabit kısmıdır. Stator kısmında oluklar bulunur ve bu oluklarda elektrik sargıları vardır. Bu sargılara akım uygulandığında sargıların etrafında döner manyetik alan oluşur. Makinenin rotor kısmında ise sargı veya sabit mıknatıslar vasıtasıyla bir manyetik akı yoğunluğu oluşturulur. “Aynı kutuplar birbirini iter, farklı kutuplar birbirini çeker” manyetizma prensibine göre rotor kısmında ise oluşturulan manyetik akı çizgileri stator döner manyetik alan ile etkileşime girerek momentum oluşur. Moment üretimi stator ve rotor arasında bulunan hava aralıkları yardımı ile gerçekleşmektedir.

Elektrik makineleri farklı amaçlar doğrultusunda sınıflandırılmaktadır. Elektrik makineleri sınıflandırılması aşağıdaki gibidir. Şekil 1. 1 de farklı yapıdaki makine çeşitlerine yer verilmiştir. Kalıcı Mıknatıslı Senkron (PMSM) Motor makine çeşitlerinden biridir.



Şekil 2.1 Elektrik Motorlarının Sınıflandırılması

2.2. Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorların Genel Yapısı

Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorlarda, rotor kısmında manyetik alan üretmek için mıknatıs kullanılan makinelerdir ve yenilenebilir enerji sistemlerinde, elektrikli araçlarda, endüstriyel uygulamalarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Tasarım aşamasında rotorda mıknatıs kullanılması motorun dinamik performansını artırmaktadır.

Stator tarafında üretilen döner manyetik alanın dönüş hızı ile rotor aynı hızda döndüğü için bir çeşit senkron motor türüdür. Rotor kısmında iletken tel yerine mıknatıs kullanılması, bakır kayıplarını ortadan kaldırmaktadır. Bu sebeple bu tür motorlarda verimin artmasını sağlamaktadır. Ayrıca klasik motorlardan farklı olarak yapısında fırça ve kolektör bulunmamaktadır. Kalıcı Mıknatıslı Senkron motorlarda kolektör ve fırçanın olmaması, düzenli bakım ihtiyacını ortadan kaldırmak, motorun ömrünü artırmaktadır. Bu da motor ile ilgili bakım maliyetini ve zaman kaybını azaltmaktadır. Hava aralığında daha fazla manyetik akı yoğunluğu oluşturduğu için elektromanyetik uyartımlı motorlara göre daha iyi bir performansa sahiptir. Bir diğer olumlu özelliği ise bu tür motorlarda mıknatıs kullanıldığı için kompakt bir yapıya sahip ve bu özelliğinden dolayı rotoru sargılı motorlarla kıyasla daha küçük bir yapıya

sahiptir. Daha küçük bir hacme sahip olduğu için güç yoğunluğu diğer motorlara göre daha fazladır [14].

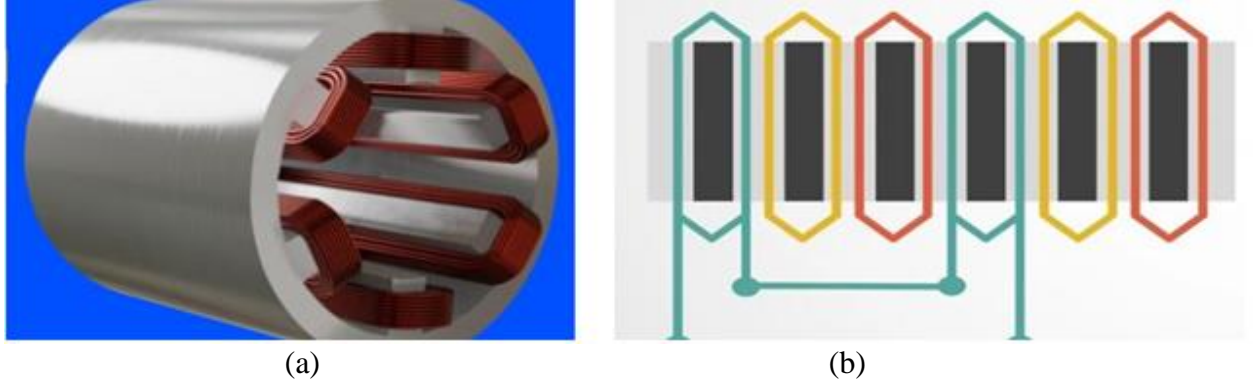
2.2.1. Stator

Stator, Kalıcı mıknatıslı motorların sargılarının bulunduğu, tek tek kesilen silisyum saçlarından oluşan pakettir. Kalıcı mıknatıslı Senkron Motorun stator kısmı, sargıların sarıldığı nüve ve dış gövdeden oluşur. Ayrıca stator kısmında, sargıların sarıldığı oluklar bulunmaktadır. Stator kısmında üç fazlı sargılar, stator dişlerine sarılırlar. Toplamda 360 derecelik açı oluşturan sargılar 120 derece faz farkı ile birbirinden ayrılırlar. Diğer AC motor tiplerinde olduğu gibi, sargılara alternatif akım uygulandığında döner manyetik alan oluşur ve rotor manyetik akıları ile etkileşime girerek manyetik kuvvetler birbirlerini iter veya çeker ve böylece dönme hareketi elde edilmiş olur.

Elektrik makinelerinde stator tasarımına göre iki sınıfa ayrılırlar. Bunlar Toplu sargılı (Concentrated) ve Dağıtılmış (Distributed) sargılı motorlar olarak literatürde yer almaktadır.

2.2.1.1. Toplu Sargılı Senkron Motorlar

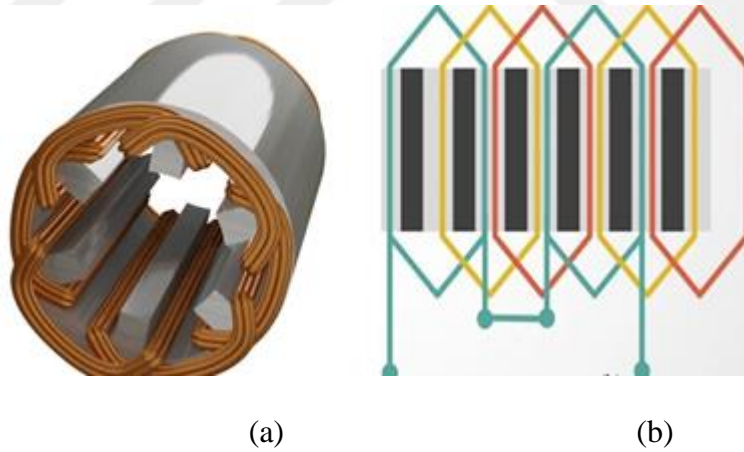
Toplu sargılı makinelerde, stator sargıları tek bir oluk üzerine sarılıdır. Şekil 2. 2' de bu sargı yapısına ait görsele yer verilmiştir. Tek bir stator dişine sarılı olması motorun üretimi açısından kolaylık sağlamaktadır. Ayrıca toplu sargıda kullanılan tellerin uzunluğu dağıtılmış sargılı statorda kullanılan tel uzunluğuna göre daha kısa olduğu için omik kayıplar dağıtılmış sargılılara göre daha azdır. Bu sargı tipinde omik kaybın az olmasından dolayı verimini yüksektir.



Şekil 2.2 (a) Toplu Sargı Yapısı (b) Faz Diyagramı

2.2.1.2. Dağıtılmış Sargılı Senkron Motorlar

Dağıtılmış sargılı motorlar Şekil 2. 3'te görüldüğü gibi statorun en az iki dişine bağlanır. Bu tip sargı yapısına sahip elektrik makinelerinde ters EMK grafiği yaklaşık olarak sinüzoidal bir yapıya sahiptir. Bu yapıdaki motorlarda harmonik oranı düşüktür.



Şekil 2.3 (a) Dağıtılmış Sargı Yapısı (b) Faz Diyagramı

2.2.2. Rotor

Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorlarda rotor kısmında manyetik alan oluşturabilmek için sargılar yerine mıknatıs kullanıldığı için “Kalıcı Mıknatıslı” olarak ifade edilmektedir. Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorları Asenkron Motorlardan ayıran en önemli, fark stator döner manyetik alan ile rotor manyetik alanın hızlarının birbirine

eşit olmasıdır. Asenkron motorlarda bu hız birbirine eşit değildir. Bu sebeple dışarıdan beslendiği kaynağın frekansı ile makinenin frekansı aynı olmalıdır. Kalıcı mıknatıslı senkron motorların bu yüzden dönüş hızı sabittir. Motorun hızı, tasarım aşamasında kutup sayısı ile belirlenebilir. Motorun dönüş hızı ile mıknatıs sayısı ile doğru orantılıdır. Buna göre bir AC motorun senkron hızı 2.1 belirtilen denkleme göre ile hesaplanabilir. Buna göre;

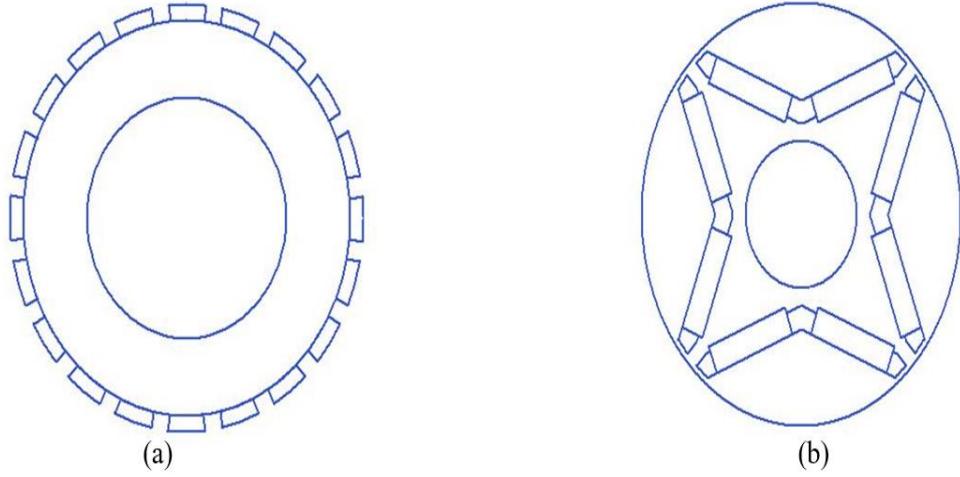
$$n = 120.f / 2p \quad (2.1)$$

n : Senkron Hızı (rpm)

f : Elektrik Frekansı (Hz)

2p : Çift Kutup Sayısı

Kalıcı mıknatıslı senkron motorların farklı tipte rotor yapıları vardır. Farklı yapıdaki rotor tipleri performans hedefine ve uygulamalara özgü olarak tasarlanmaktadır. Literatürde kalıcı mıknatıslı senkron motor uygulamalarında genellikle iki tip rotor kullanılır. Bunlar yüzey montajlı kalıcı mıknatıslı senkron motorlar ve gömülü mıknatıslı senkron motorlardır. Şekil 2. 4' bu tipteki motorların yapısına ait görsele yer verilmiştir.



Şekil 2.4 (a) Yüzey Montajlı KMSM (b) Gömülü Mıknatıslı KMSM

Şekil 2.4 (a)' da yüzey montajlı kalıcı mıknatıslı senkron makine yapısına yer verilmiştir. Motor tasarımının basit olmasından dolayı çokça tercih edilir. Yüzey montajlı senkron motorlarda, motorlarda mıknatıslar rotor yüzeyine yapıştırılır ve yarıçap ekseninde mıknatıslanırlar. Yüze monte edilen mıknatıslar, rotorun dönme hızından dolayı oluşan merkezkaç kuvvetine karşı dayanıklı olması için epoksi gibi güçlü yapıştırıcılar ile yapıştırılmalıdır. Aksi takdirde yüksek hızlarda rotor üzerindeki mıknatısların yerinden fırlama olasılığı vardır. Bu yüzden düşük hızda çalışan uygulamalarda tercih edilmektedir. Şekil 2.4 (b)' de ise gömülü mıknatıslı senkron makine yapısına yer verilmiştir. Yüksek hızlarda mıknatısın fırlama ihtimaline karşın çözü için bu tarz bir rotor yapısı geliştirilmiştir. Bu tip tasarımlarda mıknatıslar, rotor içine açılan deliklere yapıştırılarak yerleştirilir ve böylece yüksek hızlarda oluşabilecek merkezkaç kuvvetine karşın mekanik olarak sağlam bir rotor yapısı elde edilir. Fakat bu işlemlerin yüzey montajlı senkron makinelerle göre kolay bir işçiliği olamamasından dolayı gömülü mıknatıslı senkron makinelerin maliyeti yüksektir [15].

2.2.3. Mıknatıslar

Bir kalıcı mıknatıslı senkron motorun performansını belirleyen en önemli parametrelerden biri de mıknatıslardır. Mıknatıs alanındaki gelişmeler ile birlikte yüksek enerjili mıknatıslar üretilmeye başlanmış ve senkron motorlar üzerinde önemli

parametrik değişikler olmuştur. Elde edilen yüksek yoğunluklu mıknatıslar sayesinde muadillerine kıyasla daha küçük ve kompakt yapıya sahip motor tasarımları yapılmıştır. Senkron motor tasarımında kullanılan mıknatıslar genellikle demir nikel ve kobalt gibi elementlerin karışımından oluşur. Farklı elementlerin karışımından elde edilen mıknatıslardan yüksek manyetik akı yoğunluğuna sahip olmasıdır [16].

Yapılan literatür çalışmalarına bakıldığında, kalıcı mıknatıslı senkron motorlarda yaygın olarak Neodimyum Demir Bor (NdFeB) kullanıldığı görülmüştür. Çünkü verimin ön planda tutulduğu kalıcı mıknatıslı senkron motorlarda üstün manyetik özelliklerinden dolayı Neodimyum Demir Bor mıknatıslar tercih edilmektedir [15].

Çizelge 2.1 Farklı Mıknatıslara Ait Büyüklükler

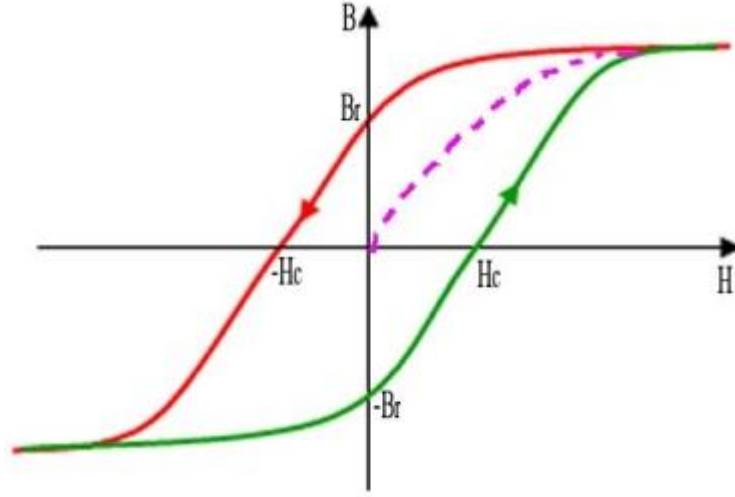
| Mıknatıs Cinsi | Br (T) | HcB (kA/m) | (BH)max (kJ/m³) |
|-----------------------|---------------|-------------------|-----------------------------------|
| Al-Ni-Co | 1,2 | 50 | 44 |
| Ferrit | 0,4 | 250 | 30 |
| SmCo | 0,9 | 250 | 150 |
| Nd-Fe-B | 1,2 | 900 | 250 |

Öte yandan bu tip mıknatısların dezavantajları kırılganlıkları, Curie sıcaklıklarının düşük olması ve artan motor sıcaklıklarına karşı olumsuz etkilenmeleridir [17]. Bu sebeple kalıcı mıknatıslı senkron motor tasarımı yapılırken sıcaklık gibi çevresel faktörlerde dikkate alınmalıdır.

Çizelge 2.2 Farklı Miknatıslara Ait Isıl Değerler

| Miknatıs Cinsi | Curie Sıcaklığı °C (T_c) | Isıl Değişim (H_{cB}) %/Kelvin | Çalışma Sıcaklığı °C | Isıl Değişim (Br) %/Kelvin |
|-----------------------|---|---|-----------------------------|-----------------------------------|
| Al-Ni-Co | 800 | -0,03 | 500 | 0,02 |
| Ferrit | 450 | -0,2 | 300 | -0,4 |
| SmCo | 720 | -0,02 | 250 | -0,045 |
| Nd-Fe-B | 310 | -0,6 | 120 | -0,13 |

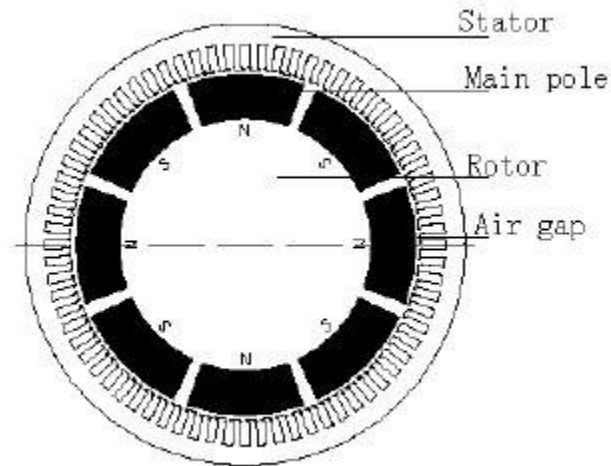
Kalıcı miknatıslı senkron motorların yapımında kullanılan malzemelerin manyetik alandaki tepkileri farklı olabiliyor. Birim yüzey alanı üzerinden manyetik akı yoğunluğuna bakıldığında en verimli olan malzeme ferromanyetik malzemelerdir [18]. Bu ve bunun gibi malzemelerin manyetik alandaki tepkilerini izlemek için histerezis (B-H) eğrisinden faydalanılır. Malzeme, üzerine uygulanan manyetik akı yoğunluğu belirli bir noktadan sonra doyum noktasına ulaşır. Bu noktadaki anlık manyetik akı şiddeti azaltılırsa, kullanılan malzemenin akı yoğunluğu sıfırlanmayıp belirli bir değerde kalır. Bu kalıcı noktayı sıfırlamak için ise ters yönlü manyetik alan şiddeti uygulanarak grafik ilk noktaya gelir.



Şekil 2.5 Histerezis Eğrisi (B-H)

2.2.4. Hava Aralığı

Elektrik makinelerinde, rotor ve stator arasındaki hava boşluğunu ifade etmektedir. Makinenin mıknatıslanma karakteristiğini belirleyen yerdir. Kalıcı mıknatıslı Senkron motorun çıkış torku, stator ile rotor arasındaki hava boşluğunda oluşan manyetik akı yoğunluğuna bağlı olduğu için stabilite ve performans açısından önem arz etmektedir [19].



Şekil 2.6 KMSM Hava Aralığı

Rotorda bulunan mıknatıslardan yayılan manyetik akı çizgileri stator üzerinden devresini tamamlayabilmesi için hava boşluğundan geçmesi gerekir. Bu

yüzden statora doğru yayılan manyetik akı yoğunluklarında belli miktarda düşüş meydana gelir. Çünkü havanın geçirgenliği (permeabilitesi) makinenin nüvesini oluşturan malzemenin geçirgenliğinden düşüktür.

$$\Phi_{\text{core}} = \Phi_{\text{gap}} \quad (2.2)$$

$$A_{\text{core}} < A_{\text{gap}} \quad (2.3)$$

$$B = \Phi / A_{\text{gap}} \quad (2.4)$$

$$W_{\text{enerji}} = \int B dH \quad (2.5)$$

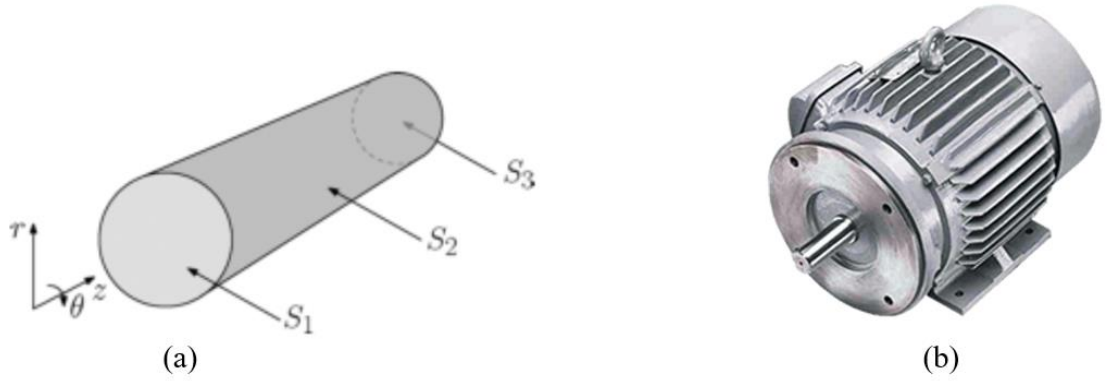
Hava boşluğundaki manyetik akı yoğunluğu aynı zaman hava aralığının büyüklüğüne bağlıdır. Eşitlik 2. 2' deki denkleme göre hava boşluğundaki manyetik akı çizgilerinin sayısı ile nüvedeki hava aralıklarının sayısı aynıdır. Fakat hava boşluğunun büyüklüğüne bağlı olarak (Eşitlik 2. 2) hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu, hava boşluğunun hacmi arttıkça manyetik akı yoğunluğunu düşürmektedir. Bu durumda hava aralığındaki enerjinin azalmasına sebep olmaktadır (Eşitlik 2. 5). Bu yüzden hava aralığının büyüklüğü ve kontrolü motor tasarımı evresinde önemlidir.

2.3. Kalıcı Mıknatıslı Senkron Makinelerdeki Kuvvetler

Kalıcı mıknatıslı Senkron makinelerde, manyetik alanın hesaplanabilmesi için analitik model kullanımı literatür çalışmalarında oldukça yaygın olduğu gözlemlenmiştir. Nümerik analizle kıyaslandığında analitik model, daha hızlı ve doğru sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Özellikle manyetik alanlar, makine içinde oluşan kuvvetler, ters EMK gibi parametrelerin hesaplanması ve analizinde analitik modelden yararlanılmaktadır. Kalıcı mıknatıslı motorlar gibi 3 boyutlu yapıların analiz hesapları için kuvvet bileşenlerinin hesaplanmasında analitik model kullanılmaktadır.

Kalıcı mıknatıslı senkron makinelerde dönme hareketi, motor içerisindeki manyetik kuvvetler sayesinde gerçekleşmektedir. Elde edilmek istenen hareketi üretmek için elektromanyetik kuvvetlerin etkileşimi sonucunda gerçekleşmektedir. Bu kuvvetler, stator döner manyetik alan ve rotor mıknatıslarının manyetik çizgilerinin

etkileşimleri ile gerçekleşmekte ve dönme hareketi oluşmaktadır. Oluşan bu hareketlerin analizini gerçekleştirebilmek amacıyla silindirik koordinat sistemi kullanılır. Silindirik koordinat sistemi, uzay düzlemindeki bir noktanın pozisyonunu adreslemek için kullanılan 3 boyutlu bir koordinat sistemidir. Bu sistemde r , θ , z olmak üzere üç yönlü bir gözlem yapılmaktadır. Silindirik koordinat sistemi, bir diğer koordinat sistemi olan Kartezyen koordinat sisteminde x , y , z eksenlerine karşılık gelmektedir [20].



Şekil 2.7 (a) Silindirik Koordinat Sistemi (b) Silindirik Motor

Şekil 2. 7 (a)' da görüldüğü gibi, bir silindirik koordinat sisteminde 3 farklı kuvvet yönü mevcuttur. Makinanın içerisinde oluşan bu kuvvetlerin yönleri şekilde görüldüğü gibi farklı alanlara dağılmaktadır.

Burada r yönünde oluşan kuvvet radyal kuvvetlerdir. Radyal kuvvet motorun eksenine dik oluşan kuvvetlerdir. Bu kuvvetler mıknatıs kaynağı ile oluşan manyetik akı çizgileri ile stator sargılarında oluşan döner manyetik alanın birbirleriyle etkileşimi sonucunda ortaya çıkan kuvvetlerdir. Motor tasarım aşamasında, motorun performansını belirleyen önemli parametrelerden bir tanesidir. Bu yüzden dengesiz manyetik yükün incelenmesinde dikkat edilen bir kuvvettir.

θ yönünde oluşan kuvvet çevresel kuvvetlerdir ve rotorun eksenine paralel oluşur. Bu kuvvet motorda hareket kabiliyeti yaratır. Rotor üzerinde yer alan kalıcı mıknatısların oluşturduğu manyetik alan ile stator sargılarında oluşan döner manyetik

alanın etkileşimi sonucunda oluşur ve bu kuvvet sayesinde motor milinde dönme hareketi gerçekleşir ve böylece elektrik enerjisinden mekanik enerji elde edilmiş olur.

Koordinat sisteminde z yönünde oluşan kuvvet ise aksel kuvvetlerdir. Stator döner manyetik alanları ile rotorda bulunan kalıcı mıknatısların oluşturduğu manyetik akı çizgilerinin birbiriyle etkileşimi sonucunda oluşan kuvvettir. Dengesiz manyetik kuvvet analiz çalışmalarında bu kuvvete bakılmamaktadır ve genellikle radyal kuvvet ve aksel kuvvetin neticeleri dikkate alınmaktadır.

[7]' de ifade edildiği gibi dengesiz manyetik yükün oluşumunda radyal ve çevresel kuvvetler neden olmaktadır. Çünkü radyal kuvvetler motorun yüzeyine doğru fiziksel olarak baskı oluşturan kuvvetlerdir. Bu kuvvetlerin motor içerisinde dengesiz dağılımı motorda akustik titreşime ve gürültüye sebep olmaktadır. Ayrıca dengesizliğin arttığı bölgelerde motor rulmanının ömrünü kısaltmaktadır.

2.3.1. Radyal Kuvvetler (F_r)

Yukarıda da bahsedildiği gibi radyal kuvvetlerin makine içerisinde simetrik olarak dağılmaması sonucunda motorlarda istenmeye akustik gürültü ve titreşim meydana gelmektedir. Bu sebeple oluşan olumsuz fiziksel durumların önüne geçmek için radyal kuvvetlerin analiz edilmesi gerekmektedir. Elektrik makineleri silindirik koordinat sisteminde incelendiği için radyal kuvvetler silindirik koordinat düzleminde ele alınmakta ve analiz edilmektedir. Ve böylece akustik gürültünün analizi ve titreşim kaynağının analiz edilmesi bu düzlemde ele alınmaktadır.

Radyal kuvvetlerin hesaplanmasında genellikle manyetik akı yoğunluklarından yararlanılmaktadır. Manyetik akı yoğunlukları (B) sonlu elemanlar analizinden elde edilmektedir. Radyal kuvvetlerin hesaplanmasında 2. 6 eşitliğinde belirtilen eşitlik ile bulunmaktadır. Bu eşitliğe göre;

$$F_r = (1/ 2\mu_0)(B_r^2 - B_t^2) \quad (2. 6)$$

Burada F_r , radyal kuvveti, B_r manyetik akı yoğununun radyal bileşenini, B_t 'nin ise manyetik akı yoğunluğunun teğetsel bileşenini ifade etmektedir. Eşitlik 2. 6' ya göre, radyal kuvvet, manyetik kuvvetin radyal ve teğetsel bileşenlerine bağlıdır [21].

2.3.2. Teğetsel Kuvvetler (F_t)

Teğetsel kuvvetler tıpkı radyal kuvvetlerde olduğu gibi dengesiz bir şekilde dağılması sonucunda üretilen tork üzerinde bir titreşime sebep olur. Bu yüzden makine performansı açısından teğetsel kuvvetin analizi önem arz etmektedir. Çünkü motor tasarımına başlanmadan önce yapılan sonlu elamanlar analizi ile daha sağlıklı bir tork elde etmek mümkündür. Bunun içinde radyal kuvvetlerle birlikte teğetsel kuvvetlerin analizi birlikte yapılmaktadır. Makinenin yapısı silindirik bir yapıda olduğu için teğetsel kuvvetlerin analizi silindirik koordinat sisteminde yapılmaktadır. Buna göre bir silindirik koordinat sisteminin analizi aşağıda belirtilen eşitliğe göre hesaplanmaktadır.

$$F_t = (1/\mu_0)(B_r \cdot B_t) \quad (2. 7)$$

Burada F_t , manyetik akı yoğunluğunun radyal bileşeni ile manyetik akı yoğunluğunun teğetsel bileşenine bağlıdır.

2.3.3. Maxwell Stress Tensor

İsmi İskoç matematikçi ve bilim insanı olan James Clerk Maxwell'den alan bu tensör, mekanik momentum ile elektromanyetik kuvvetlerin birbirleriyle olan ilişkisini ifade etmektedir. Maxwell Stress Tensor, elektrik alanı ile manyetik alanın birbirleri arasındaki ilişkiyi ortaya koymada, elektromanyetik alanlardaki kuvvet oluşumunu hesaplamada, bir yüzeyde oluşan elektromanyetik kuvvetler ile tork değerleri arasındaki ilişkiyi incelemede literatürde ve çeşitli uygulamalarda oldukça kullanılan bir metottür. Maxwell Stress Tensor'un kullanım amacı ise bir yüzeyde oluşan stresin analiz edebilmektir. Bunun için ise elektromanyetik alanda oluşan stres ve kuvvet değerlerinin dağılımını incelemektedir.

Bu metot, elektromanyetiğin temelleri olan Maxwell denklemlerinden türetilmiştir. Elektromanyetiğin temelleri olan 4 Maxwell denklemi kullanarak oluşan bir kuvvet eşitliğinden elde edilebilmektedir. Literatür çalışmalarında ve uygulamalarda faydalanılan Maxwell denklemleri elektrik enerjisi ile elektrik enerjisinin oluşturmuş olduğu manyetik alan arasındaki ilişkileri veya var olan manyetik alanın elektrik enerjisi ile olan ilişkilerini ifade etmektedir. Elektromanyetiğin temellerini oluşturan bu Maxwell denklemlerine çizelge 2. 3' te yer verilmiştir [22].

Çizelge 2.3 Maxwell Denklemleri

| Maxwell Denklem İsmi | Diferansiyel Form |
|------------------------------------|--|
| 1- Gauss Yasası | $\nabla \cdot E = \rho / \epsilon_0$ |
| 2- Manyetik Alan için Gauss Yasası | $\nabla \cdot B = 0$ |
| 3- Maxwell Faraday Denklemi | $\nabla \times E = - \partial B / \partial t$ |
| 4- Amper Yasası | $\nabla \times B = \mu_0 J + \mu_0 \epsilon_0 \partial E / \partial t$ |

Maxwell Stress Tensor analizi yapılırken Gauss yasasından faydalanılmaktadır. Elektrik ve manyetik alanların yönünü, kuvvetini ve davranışlarını analiz etmede Gauss yasaları, elektromanyetik indüksiyon analizleri için Faraday denklemlerinden ve bir yüzeydeki akım ile manyetik akı yoğunluğu arasındaki bağlantıyı ifade eden Amper yasasından türetilmiştir.

2.3.4. Maxwell Stress Tensor ile Manyetik Kuvvet Hesaplama

Kalıcı mıknatıslı Senkron motorlarda, dengesiz manyetik yükün analizi ile birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalarda dengesiz manyetik yükün analizinin yapılabilmesi için kullanılan yöntemin Maxwell Stress Tensor olduğu gözlemlenmiştir. Yukarıda da ifade edildiği gibi Maxwell Stress Tensor, Maxwell denklemleri kullanarak üretilen hesaplama yöntemidir. Bu yöntem ile incelenmek istenen manyetik alanda, oluşan manyetik kuvvetler veya baskı-stres hesaplanabilmektedir.

Silindirik koordinat sisteminde elde edilen kuvvet değerlerinden dengesiz manyetik kuvvetin net değerini hesaplayabilmek için kuvvet bileşenleri arasında koordinat dönüşümü yapılması gerekmektedir. Bunun için radyal ve teğetsel kuvvet bileşenlerine bağlı denklemler kullanılmaktadır. Bu denklemler vasıtasıyla radyal kuvvetler ve teğetsel bileşenler Kartezyen koordinat sisteminde x yönünde oluşan kuvvetlere ve y yönünde oluşan kuvvetlere dönüştürülmektedir. [12]' de bu koordinat sistemleri arasındaki dönüşümlere yer verilmiştir. Buna göre Maxwell Stress Tensor'e göre dengesiz manyetik kuvvet analizi aşağıda belirtilen eşitliklere hesaplanabilmektedir.

$$F_x = r \cdot l_a \int (\sigma \cdot \cos\alpha + T \cdot \sin\alpha) d\alpha \quad (2. 8)$$

$$F_y = r \cdot l_a \int (\sigma \cdot \sin\alpha - T \cdot \cos\alpha) d\alpha \quad (2. 9)$$

Burada F_x ve F_y bileşenleri dengesiz manyetik yükün x ve y eksenlerinde oluşturduğu kuvvet değerleridir. Silindirik koordinat sisteminden Kartezyen koordinat sistemine 2. 8 ve 2. 9'da ifade edildiği gibi bir dönüşüm gerçekleştirilmektedir. Eşitliklerde yer alan r, stator ile rotor arasındaki hava boşluğunun ortasındaki yarıçapı ifade etmektedir. α ise mekanik açıda rotorun yaptığı açığı ifade etmektedir. l_a ile motorun uzunluğu bir diğer ifadeyle motorun derinliğini ifade etmektedir. σ ve T ise radyal ve teğetsel stresleri ifade etmektedir ve Eşitlik 2. 6 ve 2. 7 de ifade edilen F_r ve F_t eşitliklerine karşılık gelmektedir. Kartezyen koordinat düzleminde elde edilmek istenen kuvvet değerleri yukarıdaki parametrelerle birlikte integrali alınmaktadır. Bu integralin sınırları 0 ile 2π ($0- 360^\circ$) arasındadır [12].

Net kuvvetin hesabı için ise;

$$F_{net} = (F_x^2 + F_y^2)^{1/2} \quad (2. 10)$$

Bu eşitliklerin ortaya çıkışı ise aşağıda ifade edilen eşitliklerden elde edilmektedir. Buna göre;

$$B_r = B_{mr} + B_{ar} \quad (2. 11)$$

$$B_t = B_{mt} + B_{at} \quad (2. 12)$$

B_r ve B_t ifadeleri, hava boşluğu akı yoğunluklarının radyal ve teğetsel bileşenlerini ifade etmektedir. B_{mr} , B_{ar} , B_{mt} , B_{at} ifadeleri ise döner manyetik alan ile mıknatısların oluşturduğu manyetik alanın radyal ve teğetsel akı yoğunluklarını ifade etmektedir. Ayrıca motorlarda kullanılan mıknatısların etkisini görebilmek amacıyla stator sargılarındaki akım değeri sıfır olmalıdır. Böylece döner manyetik alan oluşturmayarak mıknatısların dengesiz manyetik yük analizindeki etkisi analiz edilmektedir. Radyal ve teğetsel manyetik kuvvetlerin ayrıştırılması ve analizi daha kolay bir hale gelmektedir. Bu ayrıştırma şekli aşağıdaki eşitliklerde gösterildiği gibidir.

$$F_r = (B_{mr}^2 - B_{mt}^2) / 2\mu_0 + (B_{ar}^2 - B_{at}^2) / 2\mu_0 + [(B_{mr} \cdot B_{ar}) - (B_{at} \cdot B_{mt})] / \mu_0 \quad (2. 13)$$

$$F_t = B_{mr} \cdot B_{mt} / \mu_0 + B_{ar} \cdot B_{at} / \mu_0 + (B_{mr} \cdot B_{at} + B_{ar} \cdot B_{mt}) / \mu_0 \quad (2. 14)$$

Eşitliklerde kullanılan kısaltmaların açıklaması şu şekildedir:

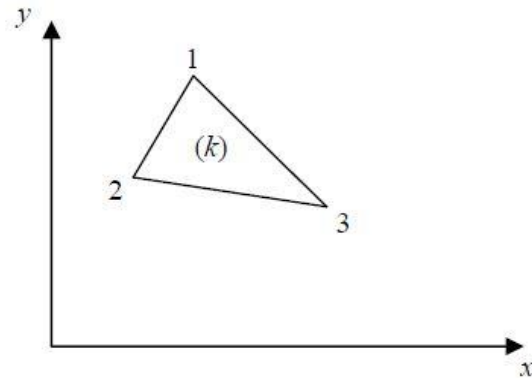
B_{mr} mıknatısın oluşturduğu radyal akı yoğunluğunu ifade etmektedir. B_{mt} ise mıknatısın oluşturduğu teğetsel akı yoğunluğunu ifade etmektedir. B_{ar} döner manyetik alanın (armatür alanın) oluşturduğu radyal akı yoğunluğunu göstermektedir. B_{at} ise döner manyetik alanın oluşturduğu teğetsel akı yoğunluğunu ifade etmektedir. Böylece mıknatısların kendi aralarında oluşturduğu radyal ve teğetsel kuvvetler, döner manyetik alanların kendi başına oluşturduğu radyal ve teğetsel kuvvetler ve mıknatıs manyetik alanları ile döner manyetik alanların birbirleriyle olan etkileşimleri sonucunda oluşan radyal ve teğetsel kuvvetlerin analizleri, Eşitlik 2. 12 ve 2. 13'te gösterildiği gibi ifade edilmektedir.

2.4. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar analizi, karmaşık yapıdaki sistemleri veya modelleri analiz etmede ve çözümlenmede kullanılan yaygın bir sayısal analiz yöntemidir. Bu analiz yöntemiyle elde edilen veriler doğrultusunda sonuçlar yorumlanarak prototipe

başlanmadan eksikler ve hatalar tespit edilebilmektedir. Özellikle karmaşık modelleri veya problemleri analiz etmek adına yapılan işlemleri basit hale dönüştürmede kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi, dinamik ve statik yapılarda basit ve doğruya yakın analizlerinden dolayı yapısal, mekanik, havacılık, elektrik gibi çok farklı alanlarda yoğun olarak kullanılmaktadır. Isı transferlerinde, yapısal ve mekanik analizlerde ve tez konumuzun dahil olduğu elektromanyetik enerji dönüşü ile ilgili çalışmalarda en yaygın yöntemlerden biri olduğu literatür çalışmalarında görülmüştür. Karmaşık geometriye sahip modellerin yapısının zor sınır şartlarına sahip olmasından dolayı bu modellerin analiz edilmesi uzun sürebilmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi ise karmaşık yapıları analizlerde küçük bileşenlere ayrıştırılmaktadır. Mühendislik çalışmalarında yapının analiz edilebilmesi için öncelikle yapının matematiksel modele dönüştürülmesi gerekmektedir. Dönüşümü yapılan matematiksel modellerin sınır ve başlangıç koşulları belirlenir ve model daha küçük parçalara ayırarak her bir parçanın analizi gerçekleştirilir.

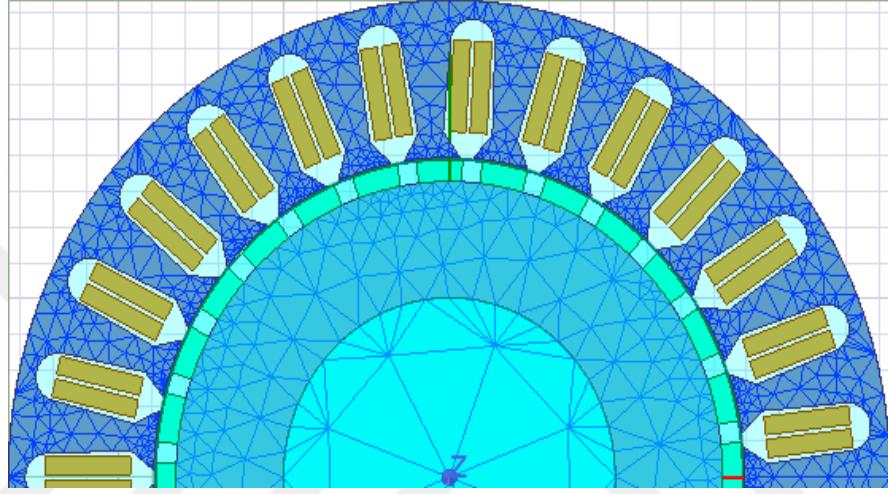
Analizi yapılacak model üzerinde bir bileşenin davranışını gözlemleyebilmek için ilk olarak sonlu elemanlar yöntemiyle ayrıştırılması gerekmektedir. Literatür çalışmaların bu ayrıştırma sınır uyumluluğu açısından genellikle üçgen veya dörtgen şeklindedir. Şekil 2. 8’de Kartezyen koordinat sisteminde üçgensel bir sonlu eleman yöntemi gösterilmiştir.



Şekil 2.8 Kartezyen Koordinat Sisteminde Üçgensel Sonlu Eleman

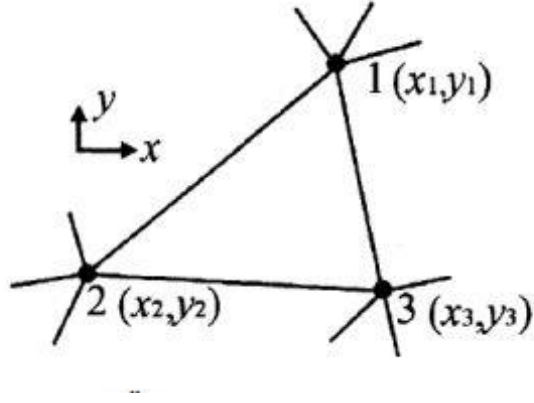
Analiz edilmek istenen model Şekil 2. 8’ de gösterildiği gibi çok küçük üçgen parçaları düğüm noktalarına bağlıdır. Üçgenlerle sarılı olan model bu yapıya ağ (mesh)

denmektedir. Bu ağ yapısı, belli şartlar altında her bir üçgensel bölgenin davranışını takip etmek amacıyla oluşturulmaktadır. Ansys Maxwell programında analiz edilmek istenen modellerin çözümlenebilmesi için modelin mesh ağını oluşturmaktadır. Program bu şekilde analize başlamaktadır. Şekil 2. 9' da Ansys Maxwell programında oluşturulan kalıcı mıknatıslı senkron motor modeli üzerinde oluşturulan mesh analizi ile ilgili görsele yer verilmiştir.



Şekil 2.9 KMSM' nin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Ayrışması

Analiz şartlarının belirtilmesinden sonra uygun enterpolasyon seçimi yapılmalıdır. Enterpolasyon yöntemi, değeri bilinen parametreden hareketle değeri bilinmeyen parametrelerin tahmin edilmesi yöntemidir. Bu enterpolasyon seçimi çoğunlukla polinom olarak ifade edilmektedir.



Şekil 2.10 Sonlu Eleman Analizi

Kartezyen koordinat sisteminde analizi gerçekleştirilen sonlu elemanlar yönteminde koordinat sistemine ait değişkenler eşitlik 2.15 te ifade edilmiştir.

$$A = a_1 + a_2 x + a_3 y \quad (2.15)$$

Eşitlikte belirtilen x ve y, koordinat sisteminin eksenlerini, a_1 , a_2 , a_3 polinom katsayılarını ifade etmektedir. Üçgensel olarak parsellenen modellerde her bir nokta elektriksel potansiyelleri göstermektedir. Buna göre Şekil 2. 10 da gösterilen sonlu elemanlar analizi şu şekilde yazılabilir:

$$A_1 = a_1 + a_2 x_1 + a_3 y_1 \quad (2.16)$$

$$A_2 = a_1 + a_2 x_2 + a_3 y_2 \quad (2.17)$$

$$A_3 = a_1 + a_2 x_3 + a_3 y_3 \quad (2.18)$$

Yukarıda belirtilen eşitlikler ile her bir noktanın elektrik potansiyelleri hesaplanabilmektedir. Bundan sonra ise elemanların Stiffness matrisi ile yük vektörlerinin elde edilmesi gerekmektedir. Elde edilen denklemlerden diferansiyel denklem elde edilebilmesi için Stiffness matrisi oluşturulması gerekmektedir. Stiffness matrisi diferansiyel denklemlerin nümerik çözümü için sonlu elemanlarda kullanılan bir matristir.

$$a_2 = \det \left(\frac{1}{D} \begin{bmatrix} A_1 & x_1 & y_1 \\ A_2 & x_2 & y_2 \\ A_3 & x_3 & y_3 \end{bmatrix} \right) \quad (2.19)$$

$$a_2 = \det \left(\frac{1}{D} \begin{bmatrix} 1 & A_1 & y_1 \\ 1 & A_2 & y_2 \\ 1 & A_3 & y_3 \end{bmatrix} \right) \quad (2.20)$$

$$a_3 = \det \left(\frac{1}{D} \begin{bmatrix} A_1 & x_1 & A_1 \\ A_2 & x_2 & A_2 \\ A_3 & x_3 & A_3 \end{bmatrix} \right) \quad (2.21)$$

$$D = \det \left(\begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix} \right) \quad (2.22)$$

2.19, 2.20 ve 2.21 ifadelerinde yer alan D sabiti 2.22 denkleminde yer alan matris ile elde edilmektedir. a_1 , a_2 ve a_3 polinom katsayıları ise yukarıda belirtilen eşitlikler doğrultusunda hesaplanmaktadır. Bu katsayılar hesaplandıktan sonra Eş. 2. 23 hesaplanır.

$$A(x, y) = \frac{1}{D} \sum_{i=1}^3 (p_i + q_i x + r_i y) A_i \quad (2.23)$$

P_i , q_i ve r_i x-y koordinat sistemindeki polinom katsayıları ile hesaplanmaktadır. Bunun için ise Eşitlik 2. 24'te yer alan matris hesaplanmaktadır.

$$\begin{bmatrix} p_1 & q_1 & r_1 \\ p_2 & q_2 & r_2 \\ p_3 & q_3 & r_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 y_3 - x_1 y_3 & y_2 - y_3 & x_3 - x_2 \\ x_3 y_1 - x_1 y_3 & y_3 - y_1 & x_1 - x_3 \\ x_1 y_3 - x_2 y_1 & y_1 - y_2 & x_2 - x_1 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Yukarıda ifade edilen matrislerin çözümleri sonucu elde edilen stiffness matrisleri ve yükleme vektörlerinin birleştirilmesi gerekmektedir. Eş. 2.25'te elde edilen değerlerin toplanmasını ifade eden eşitliğe yer verilmiştir.

$$\vec{P} = [K] \vec{\theta} \quad (2.25)$$

2.15 te K stiffness matrisini, θ modsal displacement vektörünü P ise tasarımı yapılan modelin modsal güçlerinin vektörüdür. Son olarak bilinmeyen düğüm değiştirmeler için sınır durumları dikkate alındıktan sonra eşitlik denklemini aşağıdaki gibi olur.

$$\vec{P} = [K] \vec{M} \quad (2.26)$$

3. ANSYS MAXWELL PROGRAMINDA MOTOR TASARIMI VE MANYETİK KUVVET ANALİZİ

Bu tez çalışmasında amaç kalıcı mıknatıslı senkron makineler üzerinde kesir (fraksiyonel) sarımlı kombinasyonların manyetik yükün dağılımına olan etkisi üzerinde durulmuştur. Bunun için analiz programında 4 farklı kutup\oluk kombinasyonlarına sahip kalıcı mıknatıslı senkron motor tasarımı yapılmıştır. Motorların tasarımları yapılırken endüstride kullanılan motorların stabilitesi ve performansları göz önünde bulundurulmuştur. Ayrıca farklı kutup\oluk yapısına sahip bu motorlar arasında kıyaslama yapılabilmesi adına belli başlı parametreleri sabit tutularak tasarımları gerçekleştirilmiştir. Tasarımı gerçekleştirilen motorların elektromanyetik analizlerini gerçekleştirebilmek için 2D' ye aktarılarak analizleri gerçekleştirilmiştir. 2D analiz ile elde edilen veriler kullanılarak MATLAB ortamında koordinat değişikliği yapılarak net kuvvet değerleri hesaplanmıştır.

Bu bölümde öncelikle Ansys Maxwell programında farklı kutup\oluk yapısına sahip dahili rotorlu kalıcı mıknatıslı senkron motorların tasarımı ile ilgili bilgiler paylaşılmış ve programın motor tasarımı yapılırken kullanılan özellikleri açıklanmıştır.

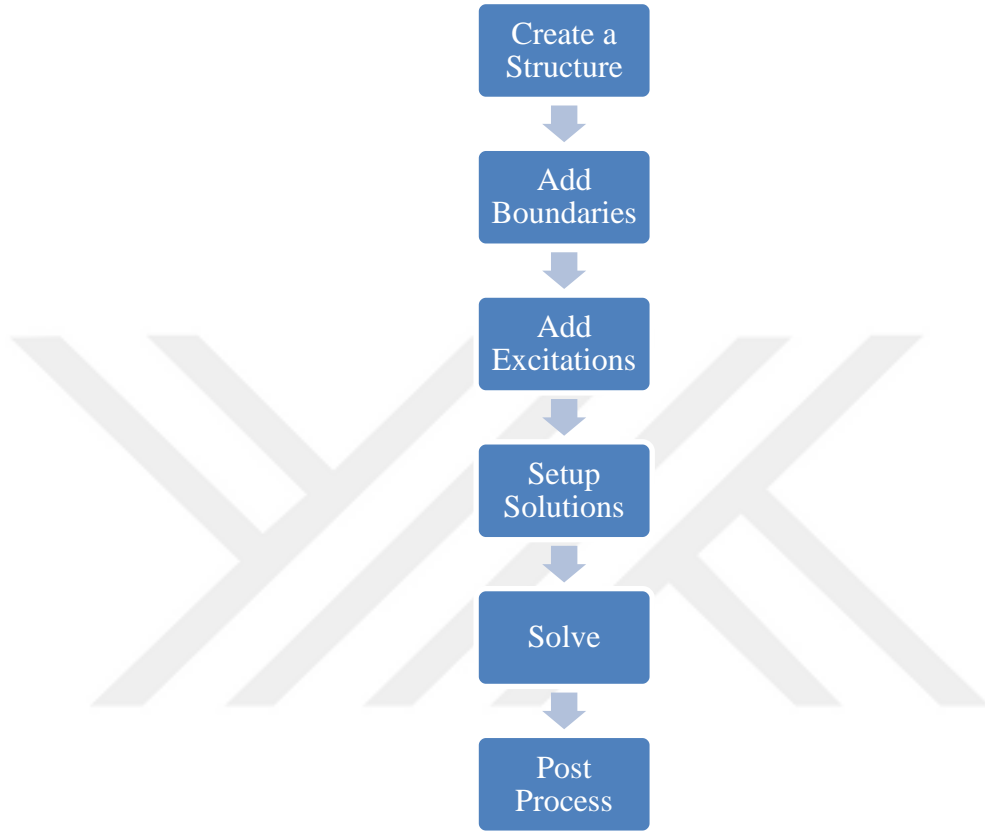
3.1. Ansys Maxwell

Endüstride ve akademik çalışmalarda oldukça yaygın olarak kullanılan profesyonel analiz programlarından biridir. Ansys Maxwell programı, manyetik veya elektrik ile ilgili modelleri oluşturmak ve analiz etmek için Sonlu Elemanlar Analizini kullanan bir yazılım programıdır. Trafolar, dönüştürücüler, makineler, manyetik malzemelerin analizi gibi pek çok amaç için kullanılmaktadır. Modelin üretim aşamasından önce eksikleri tespit edilmekte, gerekli iyileştirme çalışmaları ile tasarımın performansı artırılabilir.

Ansys Maxwell programı, elektromanyetik alan analizlerini çizelge 2. 3'te belirtilmiş olan Maxwell denklemlerini kullanarak kullanıcı tarafından belirlenen başlangıç koşullarına ve uzayın sonlu bölgesinde uygun sınır koşullarına göre analizleri gerçekleştirmektedir. Elektromanyetik modellerin analizinde, transient

analiz, magnetostatik analiz, elektrostatik analiz, eddy akımı gibi analizler oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [23].

Ansys Maxwell programı, bu analiz yöntemlerini aşağıda gösterilen akış şemasına göre oluşturmaktadır [23].

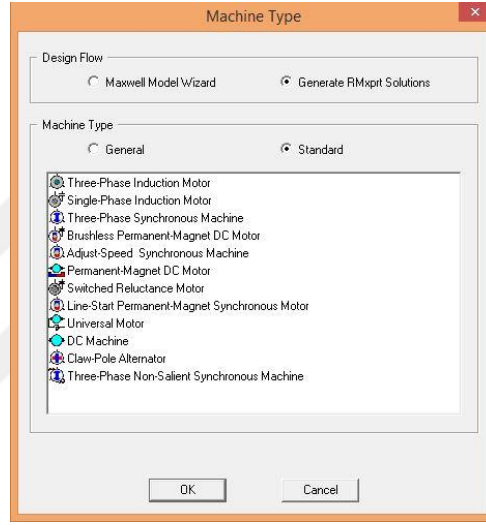


Şekil 3.1 Ansys Maxwell Süreç Akış Diyagramı

Ansys Maxwell programı temelinde 3 farklı tasarım bölümden oluşmaktadır. Bu tasarım tipleri RMXprt, Maxwell 2D ve Maxwell 3D olarak isimlendirilmektedir.

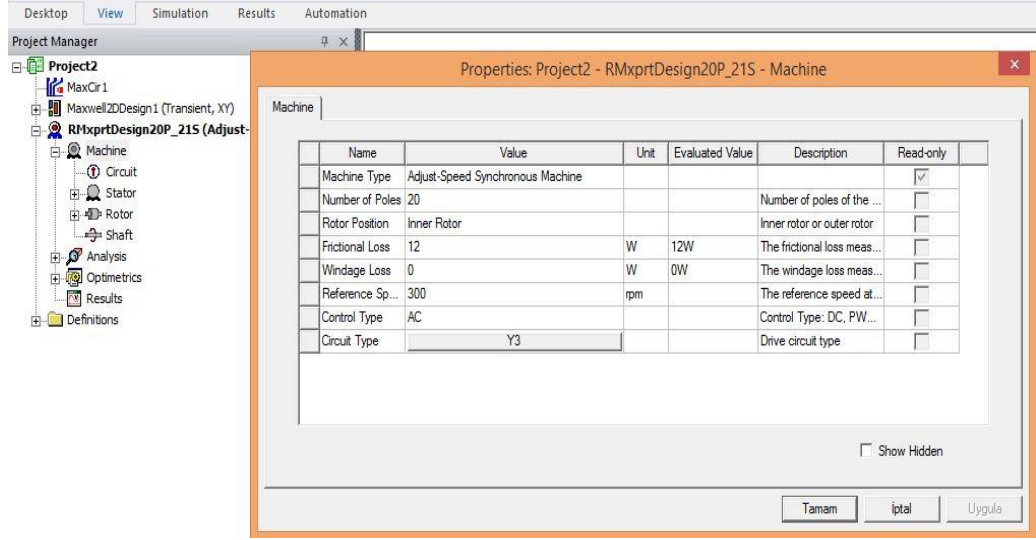
3.2. Ansys Maxwell RMxprt Motor Tasarımı

RMxprt (Rotating Machinery Expert), elektromanyetik analiz yapmak amacıyla makinelerin tasarımı ve temel analizleri bu bölümde gerçekleştirebilmektedir. RMxprt kısmında kullanıcı istediği motor tasarım parametrelerini tanımlayarak Ansys Maxwell programı motor tasarımını kendisi oluşturmaktadır. Ansys Maxwell programının içerisinde bulunan RMxprt düzlemi, farklı tipteki elektrik motorları ve jeneratörlerin tasarımına imkân sağlamaktadır. Tasarlamak istenilen motor tipleri RMxprt programı içerisinde seçilmektedir.



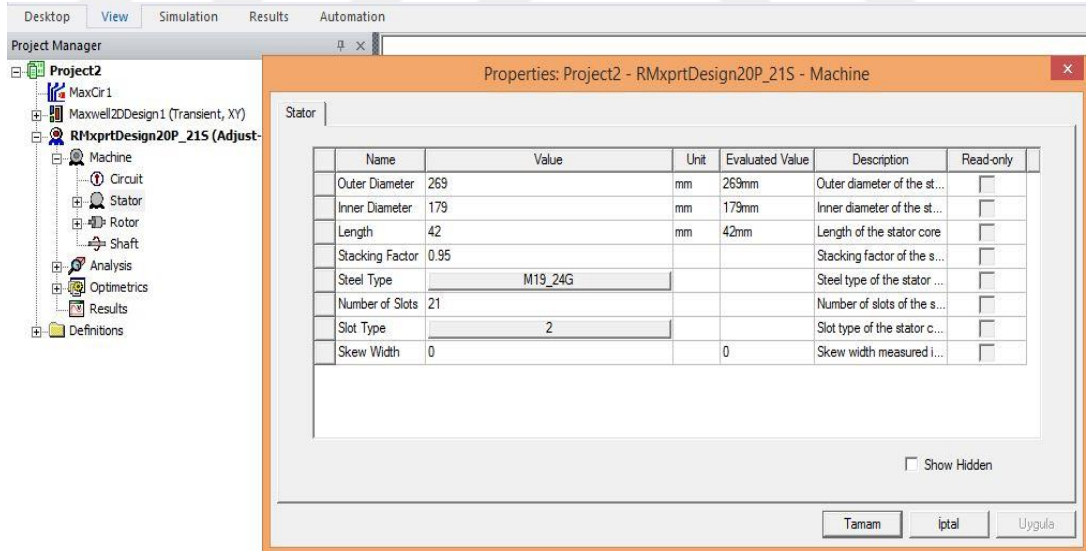
Şekil 3.2 RMxprt İçerisinde Yer Alan Farklı Tip Makine Çeşitleri

Tasarımı yapılan makinenin seçimi yapıldıktan sonra programın sol tarafında “Project Manager” bölümünde seçilen makine için yeni bir sekme açılmaktadır. Program bu bölümde tasarlanmak istenen makine ile ilgili parametrelerin girilmesini istemektedir. “Machine” sekmesine çift tıklandığında makinenin ana parametreleri girilmektedir.

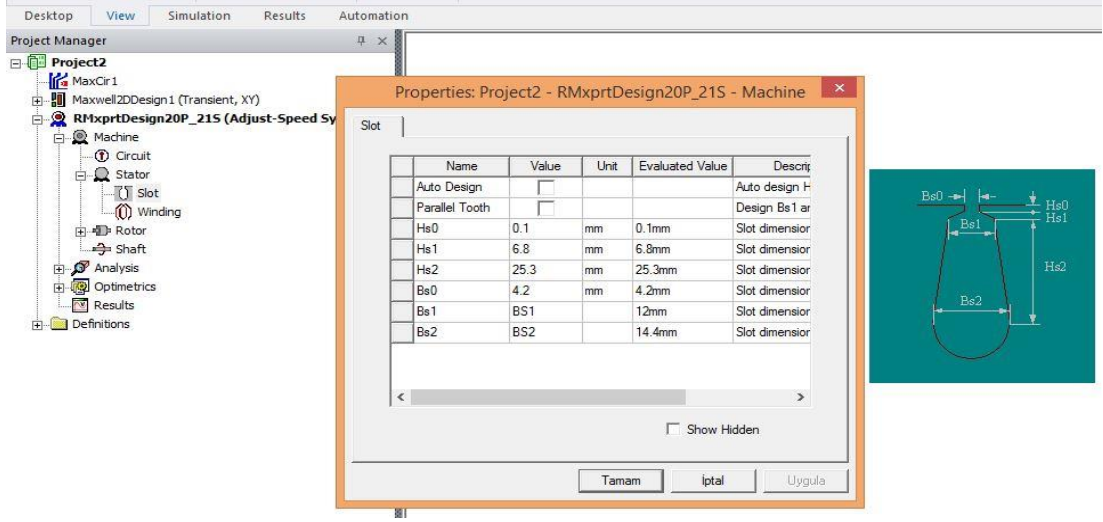


Şekil 3.3 Makineye Ait Ana Parametrelerin Girişi

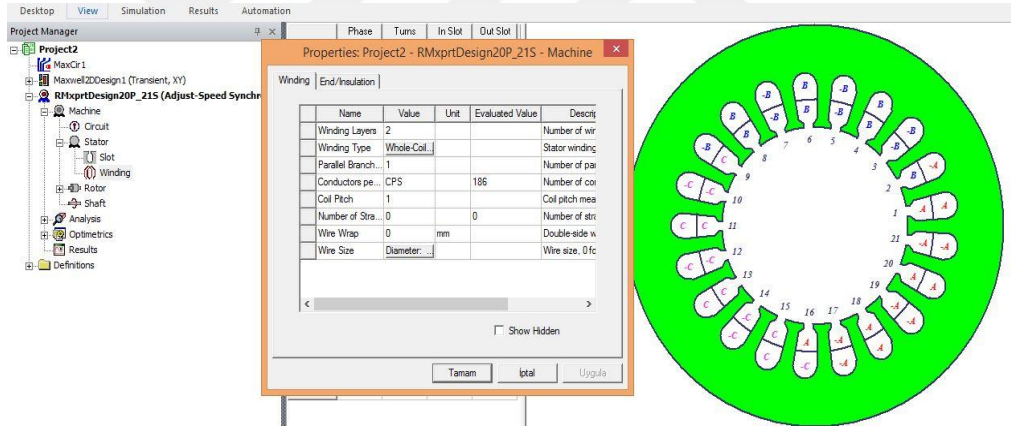
Girilen ana parametrelerin ardından makinenin stator ile ilgili bilgileri girilmesi gerekmektedir. Burada statorun dış ve iç çapları, statorun derinlik uzunlukları, makinenin oluk sayısı, olukların ölçüleri ve oluklarda kullanılan sargılar ile ilgili parametrelerin girilmesi gerekmektedir.



Şekil 3.4 Makinenin Stator Parametreleri

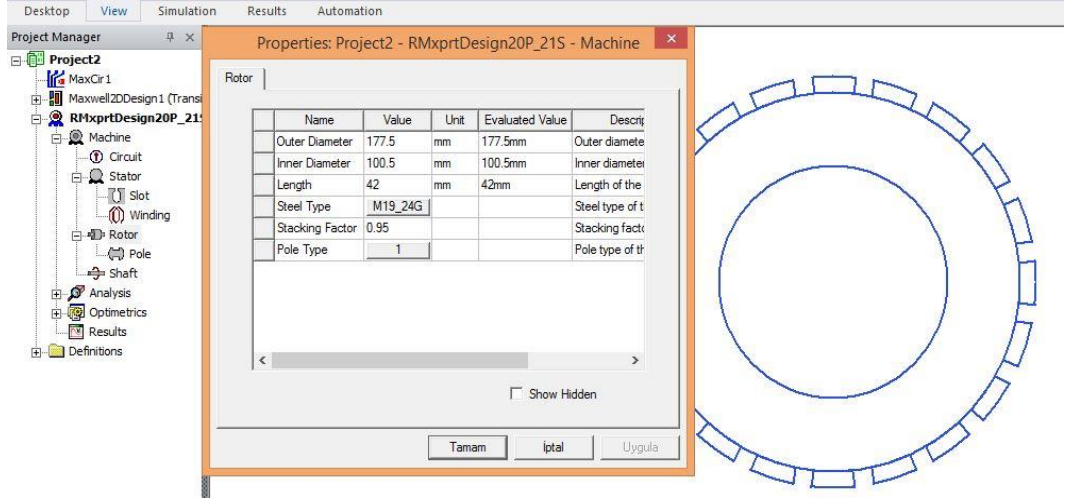


Şekil 3.5 Stator Oluklarının Ölçü Değerleri

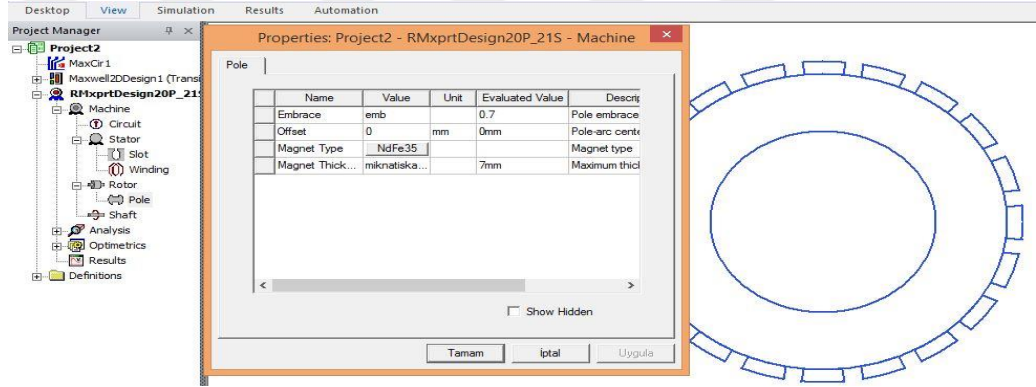


Şekil 3.6 Stator Sargı Parametre Değerleri

Stator parametreleri bu şekilde tamamlandıktan sonra makinenin rotor parametreleri girilmelidir. Rotor kısmında rotorun ana parametreleri ve tez konumuz dahili rotorlu kalıcı mıknatıslı senkron motor olduğu için mıknatıslar ile ilgili parametre değerlerinin girilmesi gerekmektedir.

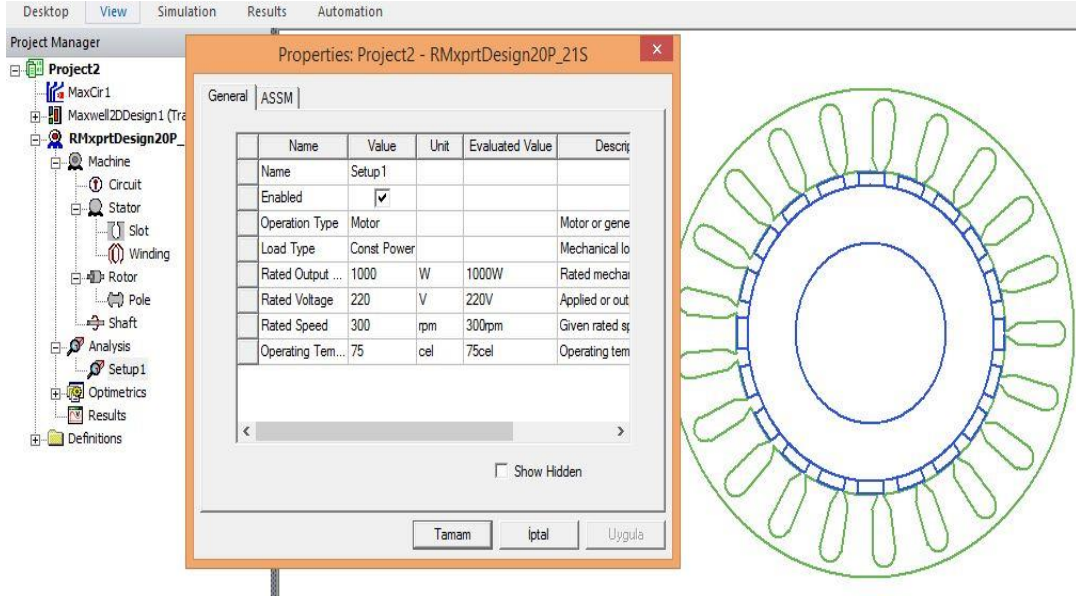


Şekil 3.7 Makineye Ait Rotor Parametreleri



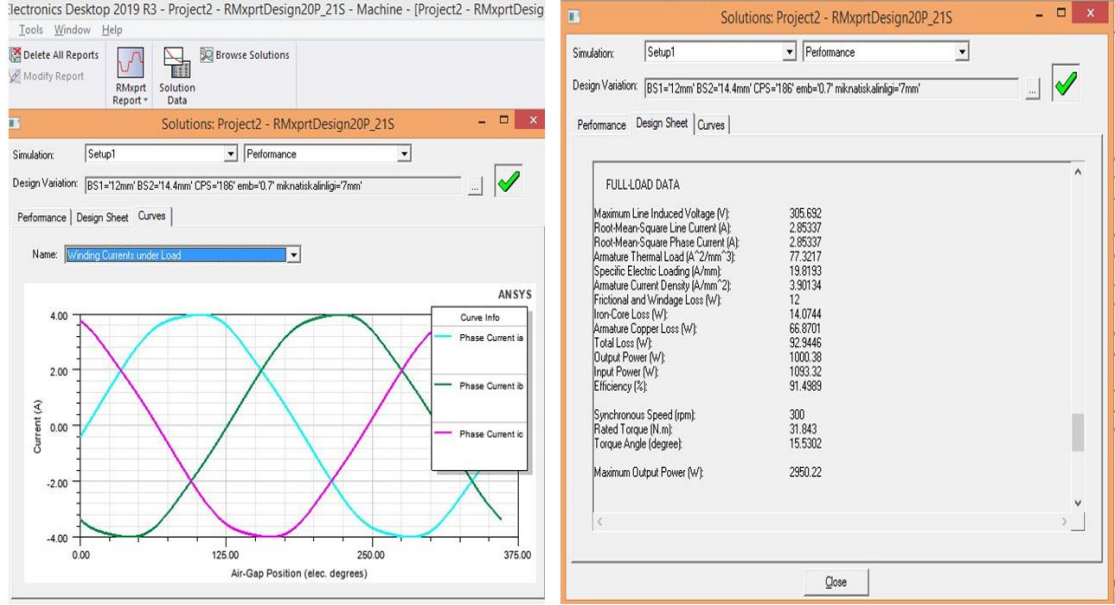
Şekil 3.8 Rotor Mıknatıslarına Ait Parametreler

Tasarımı tamamlanan makinenin analizini gerçekleştirebilmek amacıyla analiz setup kurulumunun yapılması gerekmektedir. Kurulumu yapılan setup'a çift tıklayarak makine ile ilgili ana parametreler girilmelidir.



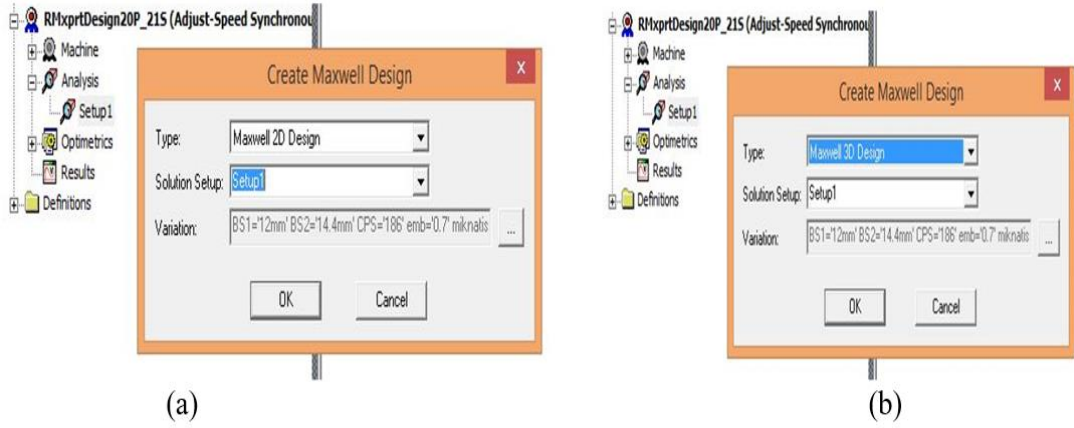
Şekil 3.9 Tasarımı Tamamlanan Makinenin Analizi için Setup Parametreleri

Girilen setup parametrelerinin ardından tamamlanan tasarım için analiz yapılması gerekmektedir. Bunun için tamamlanmış olan setup'ın analizi gerçekleştirilir. Analizi tamamlanan makinenin RMXprt "Solution Data" ya tıklayarak burada makine ile ilgili performans değerlerine, tasarım değerlerine ve grafiklere ulaşılabilir.



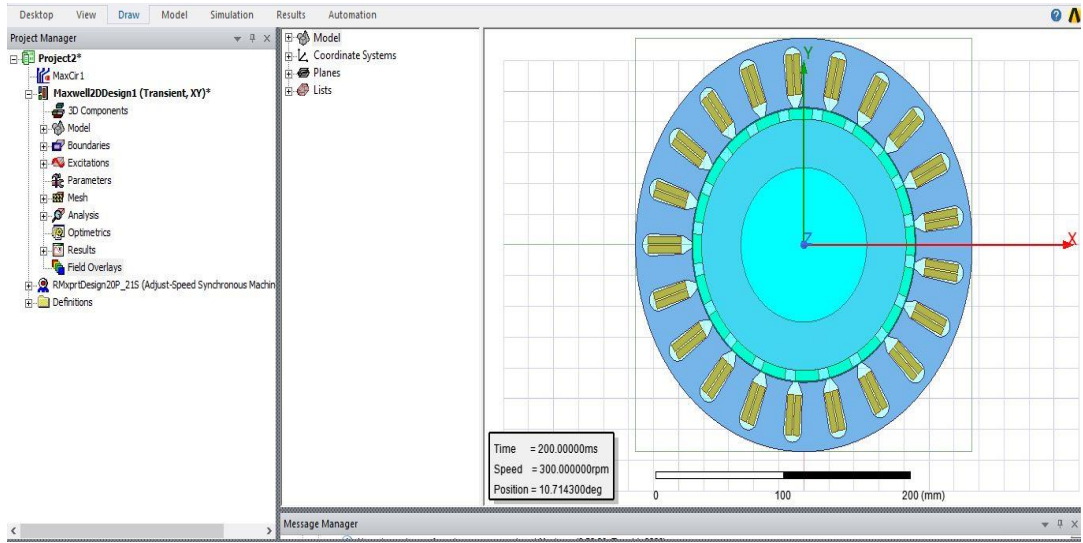
Şekil 3.10 Makineye ait Rmxprt Analiz Sonuçları

Eğer kullanıcı 2D veya 3D analiz yapmak isterse RMxprt'ten Maxwell 2D veya Maxwell 3D ye tasarımı aktarmak mümkündür.



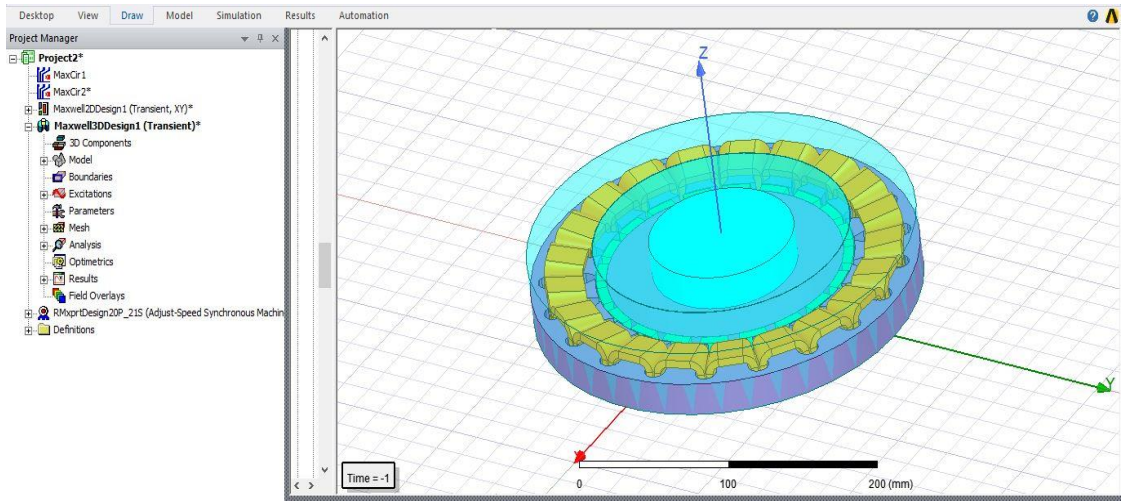
Şekil 3.11 (a) Maxwell 2D ye Aktarma (b) Maxwell 3D ye Aktarma

Maxwell 2D 'de kullanıcı kendi tasarımını elle yapabileceği gibi RMxprt ten 2D' ye tasarlamış olduğu elektrik makinesi aktarabilir. Maxwell 2D analizinde Sonlu Elemanlar Analizi kullanılmaktadır ve tasarım ve analizi XY kartezyen koordinat sisteminde gerçekleştirmektedir.



Şekil 3.12 Ansys Maxwell 2D Analiz

Maxwell 3D 'de kullanıcı kendi tasarımını elle yapabileceği gibi RMXprt ten 3D' ye tasarlamış olduğu elektrik makinesi aktarabilir. Maxwell 3D analizinde Sonlu Elemanlar Analizi kullanılmaktadır. Tasarımı ve analizi 3 boyutlu elektromanyetik alanda çözümlenebilir.



Şekil 3.13 Ansys Maxwell 3D Analiz

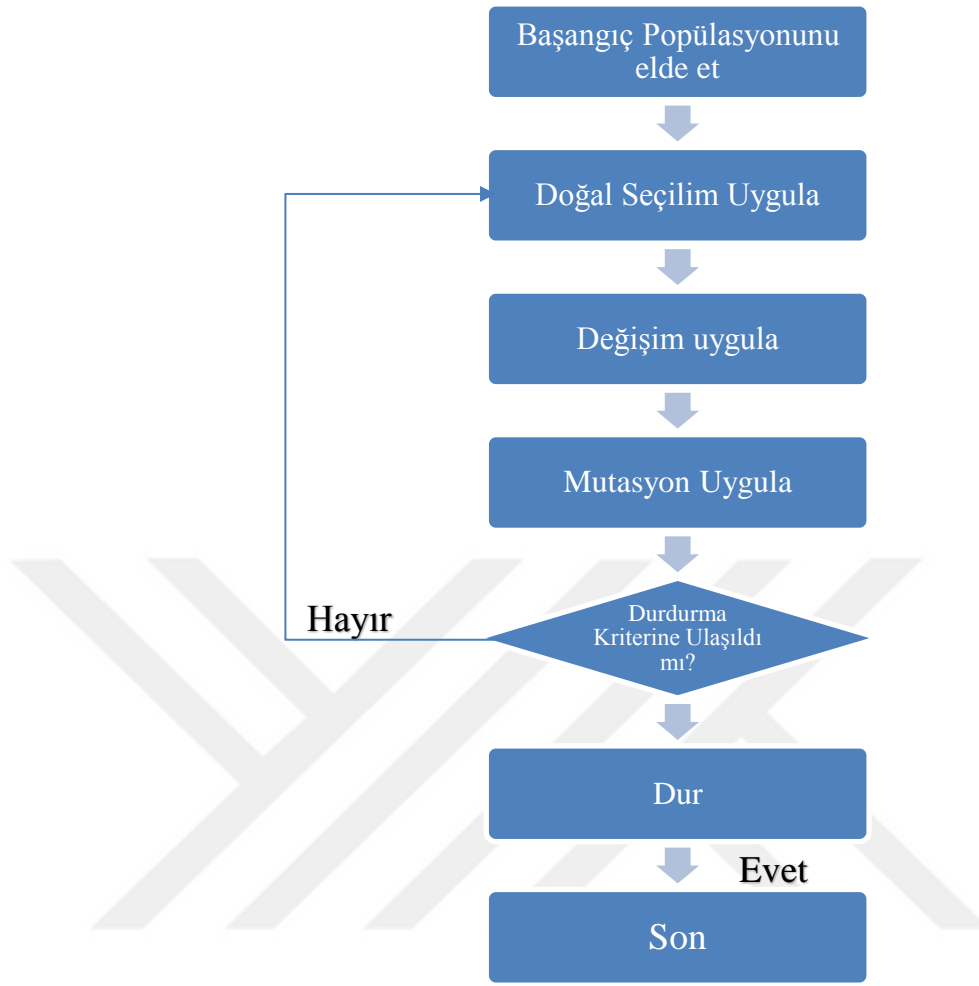
3.3. Optimizasyon

Bir makine tasarımcısı, üretim safhasına geçmeden önce tasarlamış olduğu makinelerinde oluşan hataların sifira yakınsamasını ister. Makinenin tasarımına başlamadan önce istenilen modeli tasarlar ve analizini gerçekleştirir. Analiz sonucunda eksik ve hatalı yanlarını görme fırsatı bulan tasarımcı, makinenin sıkıntılı yönlerini iyileştirmek için optimizasyon çalışması yürütür. Elde edilen veriler doğrultusunda tasarımcı makinenin değişik parametrelerinde değişiklik yaparak motorun performansında yükseliş görmeyi amaçlar ve stabilitesini korumak amacıyla değişikliklere yönelir. Bu değişiklikleri yapabilmesi için makine ile ilgili bazı parametreleri belli değerler arasında sınırlayarak iyileştirilmek istenen parametrenin performansına bakılır. Makinenin veriminin arttığı noktalardaki sınır değerleri baz alınarak stabilitesi korunarak performans arttırılabilir. Bu yüzden makine üretimi öncesinde tasarımı yapılan elektrik makinesinin optimizasyona sokulması önemli arz etmektedir. Optimizasyon işlemleri bu tez kapsamında kullanılan Ansys Maxwell analiz programında da yapılabilmektedir.

Bu tez kapsamında kullanılan Ansys Maxwell programında tasarlanan makinelerin performanslarının iyileştirilmesi adına optimizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Makinelerin analiz çalışmaları Maxwell 2D 'ye aktarılmadan evvel RMXprt düzleminde makineler tasarlanmış ve parametrik analizleri gerçekleştirilmiştir. Ansys Maxwell programlarında parametrik optimizasyonun kullanımının yanı sıra çok kapsamlı analizler içinde gelişmiş Genetik Algoritma optimizasyonu mevcuttur. Daha ayrıntılı optimizasyon çalışmaları için Genetik Algoritma yöntemi makine tasarımlarında kullanılan optimizasyon süreçlerinde kullanılmaktadır.

3.3.1. Genetik Algoritma (GA)

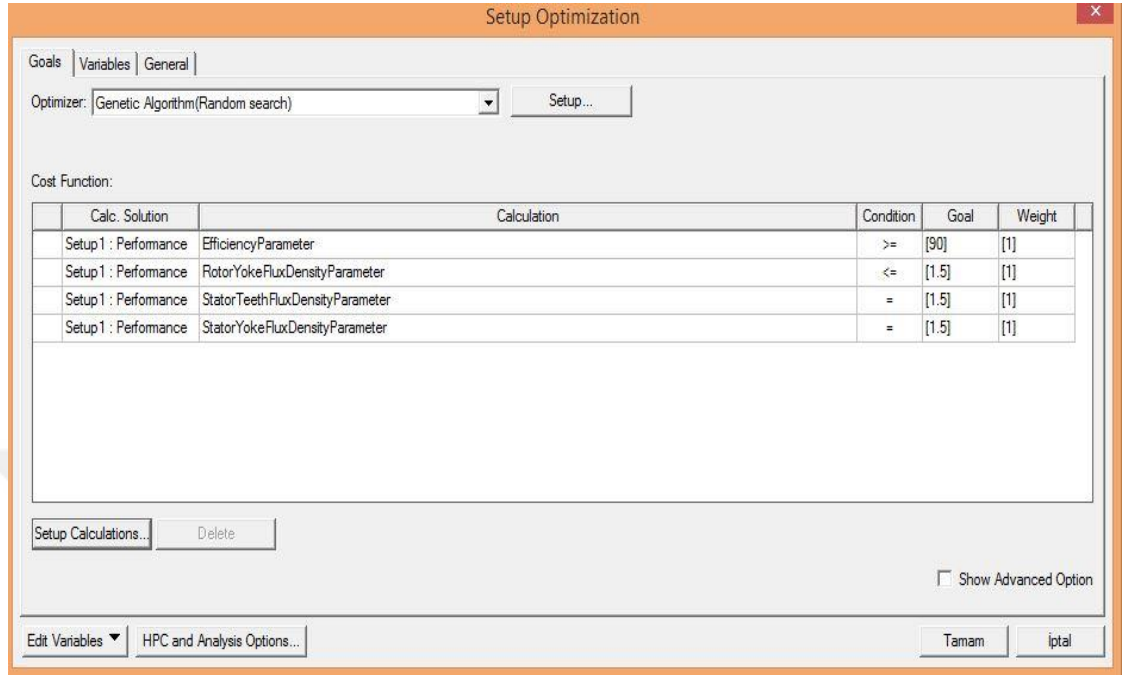
Genetik algoritma analizlerde kullanılan optimizasyon algoritmasıdır. Bir olayı veya durumu oluşturan popülasyon, mutasyon, çaprazlama sınırlamaları tanımlanmaktadır. Elde edilmek istenen popülasyon için belirlenen sınır koşulları ile birlikte istenilen fonksiyon uygulanarak optimizasyon akış şeması oluşturulur ve algoritma çalıştırılır. Şekil 3.14' da genetik algoritma ile ilgili görsele yer verilmiştir.



Şekil 3.14 GA Akış Şeması

Genetik algoritma elektromanyetik enerji dönüşümlerinde yapılan analiz yöntemlerinde yaygın olarak kullanılan metotlardan biridir. Ansys Maxwell programında hazır bulunan genetik algoritma yöntemi nümerik modeldir. Parametrik optimizasyondan farklı olarak belirtilen sınırları tek tek denemek yerine hedefte belirtilen değere ulaşmak için belli bir noktaya yoğunlaşmaktadır. Böylece tüm parametreleri adım adım denemek yerine daha az zamanda hedefe ulaşmak için analizlerini gerçekleştirmektedir. Şekil 3.15’ de Ansys Maxwell programında kullanılan genetik algoritma yöntemi ile ilgili optimizasyon çalışmasına yer verilmiştir. Burada elde edilmek istenen değerler için gerekli parametrelerin ataması yapılmalıdır. İlgili parametrelerin ataması ile birlikte hangi aralıklarda genetik algoritma ile optimizasyon yapılacağı “goal” kısmına girilerek belirtilmektedir.

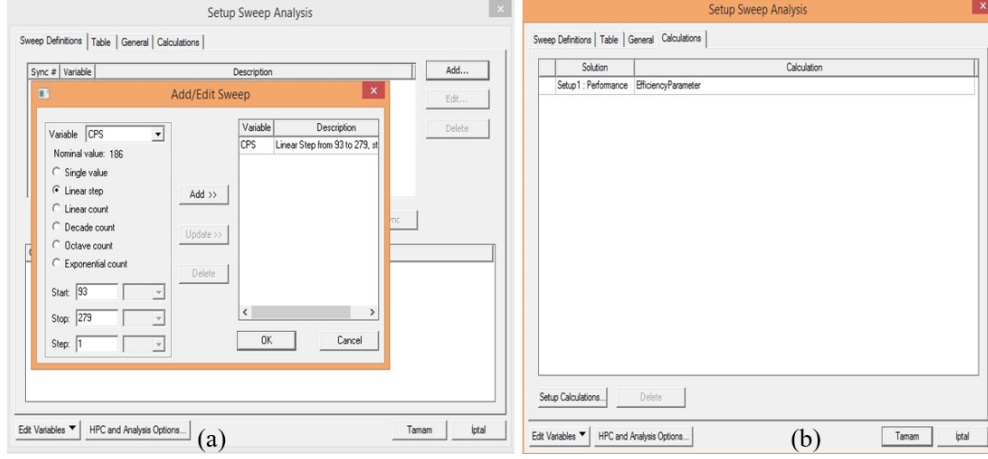
Belirtilen hedefler doğrultusunda genetik algoritma yöntemi analizini gerçekleştirmektedir. Böylece doğruya yakınsayan analiz sonuçları elde edilmektedir.



Şekil 3.15 GA Optimizasyon Analizi

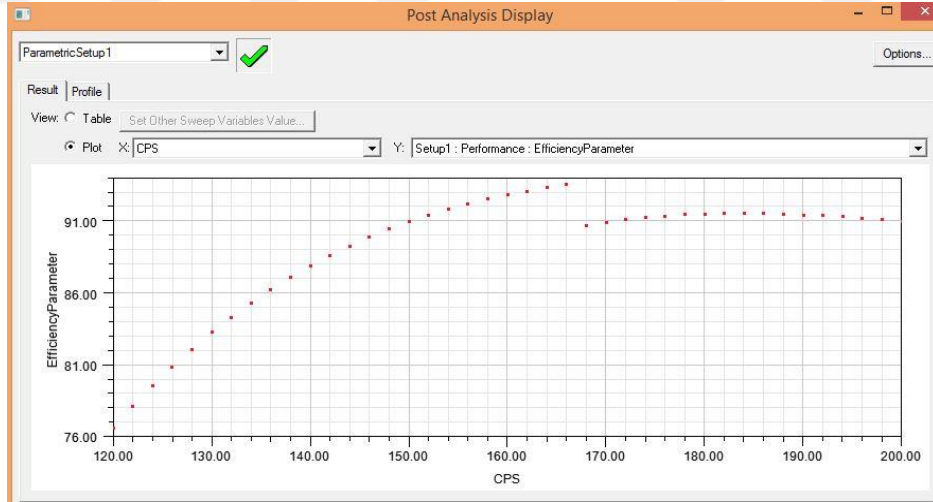
3.3.2. Parametrik Optimizasyon

Tasarımcıların, analizini gerçekleştirecekleri modellerin boyutlarının ve parametrelerinin en optimum şeklini bulmak için kullandıkları yöntemdir. Analiz programları içerisinde bulunan parametrik optimizasyon, belirli sınırlar dahilinde istenilen en iyi tasarımın elde edilebilmesi amacıyla yapılmaktadır. Böylece elde edilen değerlerle tekrar tekrar tasarım yapma gereksinimi ortadan kalkmış olur. Ansys Maxwell programında parametrik optimizasyon, “Optimetrics” sekmesinden yapılmaktadır. Bunun öncesinde optimizasyonu yapılmak istenen parametre için bir isim ataması yapılması gerekmektedir. İsim ataması yapılan parametre ile ulaşılmak istenen parametre arasında optimizasyon çalışması yapılmaktadır.



Şekil 3.16 Parametrik Optimizasyon Örneği (a) Sınır Değerleri (b) Çıktılar

Örneğin Şekil 3.16 te bir stator oluğunda bulunan tel sayısı ile ilgili bir optimizasyon görseli mevcuttur. Bu süreçte başlangıç ve bitiş sınırları ve adım sayısının ataması yapılmaktadır. Ayrıca “Calculations” kısmından ise optimizasyonu yapılmak istenen değerin ataması gerçekleştirilmektedir. Bu şekilde optimizasyon parametresi atanarak analizi gerçekleştirilmektedir.



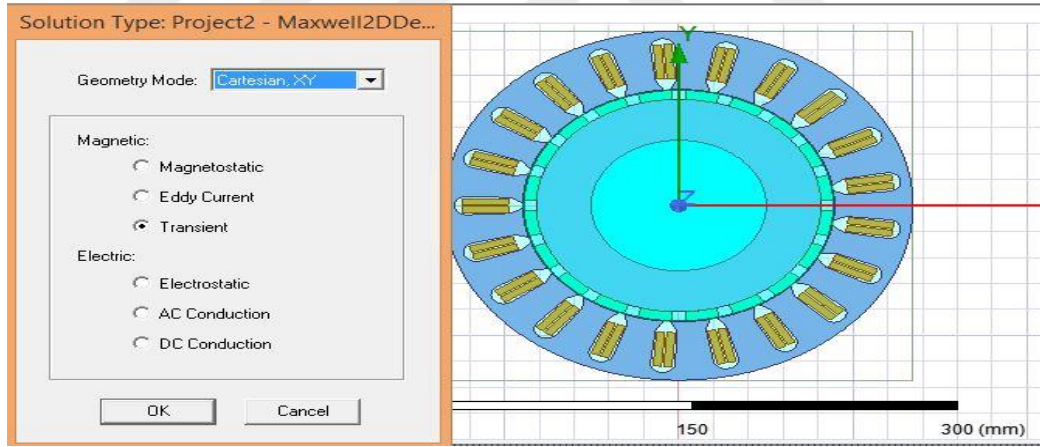
Şekil 3.17 Parametrik Optimizasyon Analizi

Şekil 3.17’ te sınırları tayin edilen parametre ile analiz edilmek istenen parametrenin analizi yapılmıştır. Farklı kombinasyonları, belli periyodik süreçlerle ilerleten parametrik optimizasyon ile optimum tasarım bu şekilde elde edilebilmektedir. Kritik olan parametrelerin analizi bu şekilde gerçekleştirilmektedir.

3.4. Ansys Maxwell 2D Analiz

Ansys Maxwell programında makine tasarımı, Rmxprt'te hazır paket şeklinde olduğu gibi, 2D düzleminde en baştan oluşturulabilmektedir. Bu tez kapsamında tasarlanan motorlar Rmxprt'te dâhili rotorlu kalıcı mıknatıslı motor tasarımı 2D düzleminde tasarlamaya göre kolay olduğu için Rmxprt'ten 2D ye aktarılmıştır. Tasarımı gerçekleştirilen makinelerin 2D ye aktarımı Şekil 3. 11 (a) da gösterilmiştir. Ansys Maxwell programında tasarlanan makinelerde yapılmak istenen elektromanyetik analizler için mesh çözüm yöntemi kullanılmaktadır. Mesh yöntemi Maxwell 2D veya 3D aktarımlarda kullanılmaktadır.

RMxprt ten Maxwell 2D ye aktarılan tasarımlar için farklı çözüm yöntemleri bulunmaktadır. Analize başlanmadan seçilmesi gereken çözüm yöntemlerini Ansys Maxwell elektrik ve manyetik olarak iki ana gruba ayırmaktadır. Bu çözüm yöntemi doğrultusunda modelin analizi gerçekleştirilmektedir.

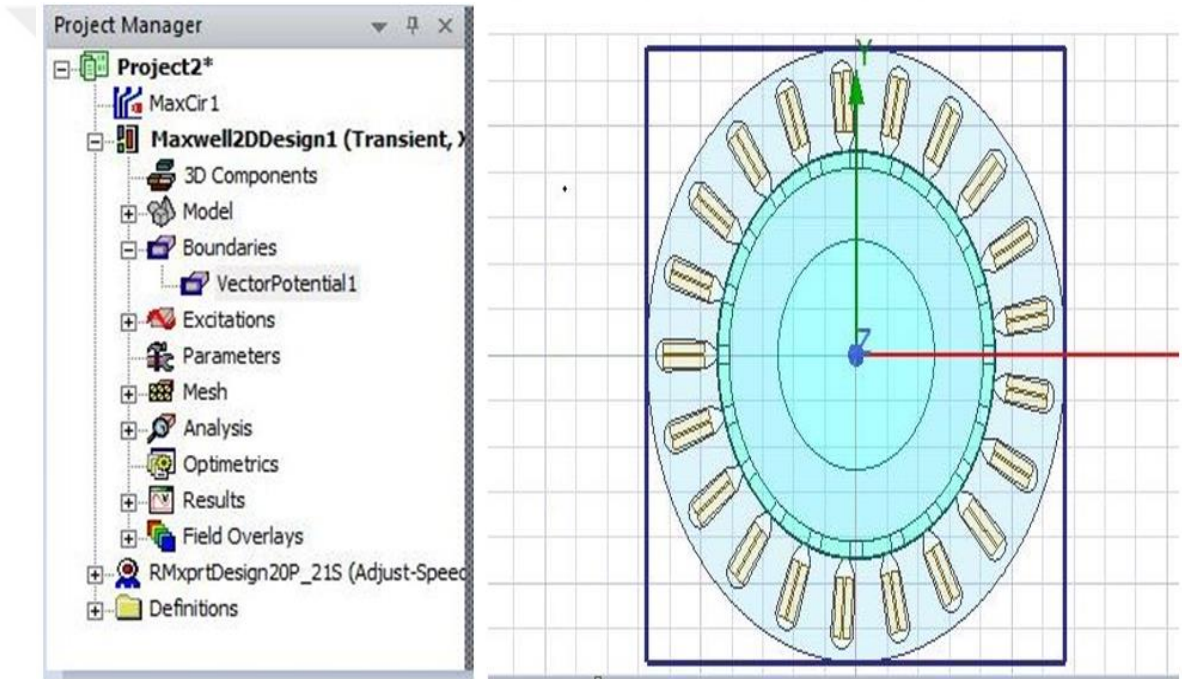


Şekil 3.18 Analiz Çözüm Yöntemi

Bu tez kapsamında dengesiz manyetik yükün araştırması yapılacağı için manyetik çözüm yöntemi seçilmiştir. Manyetik çözüm yöntemi de kendi içinde magnetostatik, eddy ve transient çözüm olarak analiz edilebilmektedir. Magnetostatik analiz, analizi yapılan bölgede kalıcı mıknatısların ve enerjinin statik durumdaki dağılımını (DC) analiz etmek amacıyla kullanılan çözüm yöntemidir. Eddy current, analiz yapılan bölgede AC akımın etkisini analiz etmek amacıyla kullanılan çözüm yöntemidir. Transient analiz ise akım veya voltaj kaynaklarının model üzerindeki hız,

tork, pozisyon gibi etkilerini zaman domaininde hesaplamak amacıyla kullanılan çözüm yöntemidir. Bu tez çalışmasında amaç farklı akım değerlerinde makinede oluşan dengesiz manyetik yüklerin zamanla etkisini araştırabilmek amacıyla transient analiz tercih edilmiştir.

Rmxprt' te tasarımı tamamlanan makineler için hangi analizler amaçlanıyorsa Maxwell 2D de buna göre adımlar atılmalıdır. Bu tez kapsamında Rmxprt' ten Maxwell 2D düzlemine aktarılan makineler için öncelikle analiz sınırları belirlenmiştir. Bir bölgedeki veya bir periyottaki elektrik veya manyetik alan davranışlarının incelenebilmesi ve kontrol edilebilmesi için sınır koşulları analiz başlangıcında belirtilmelidir. Tasarlanan makineler için vektör potansiyel sınır tipi seçilmiş ve Şekil 3.19' de seçilen vektör potansiyelinin görseline yer verilmiştir.

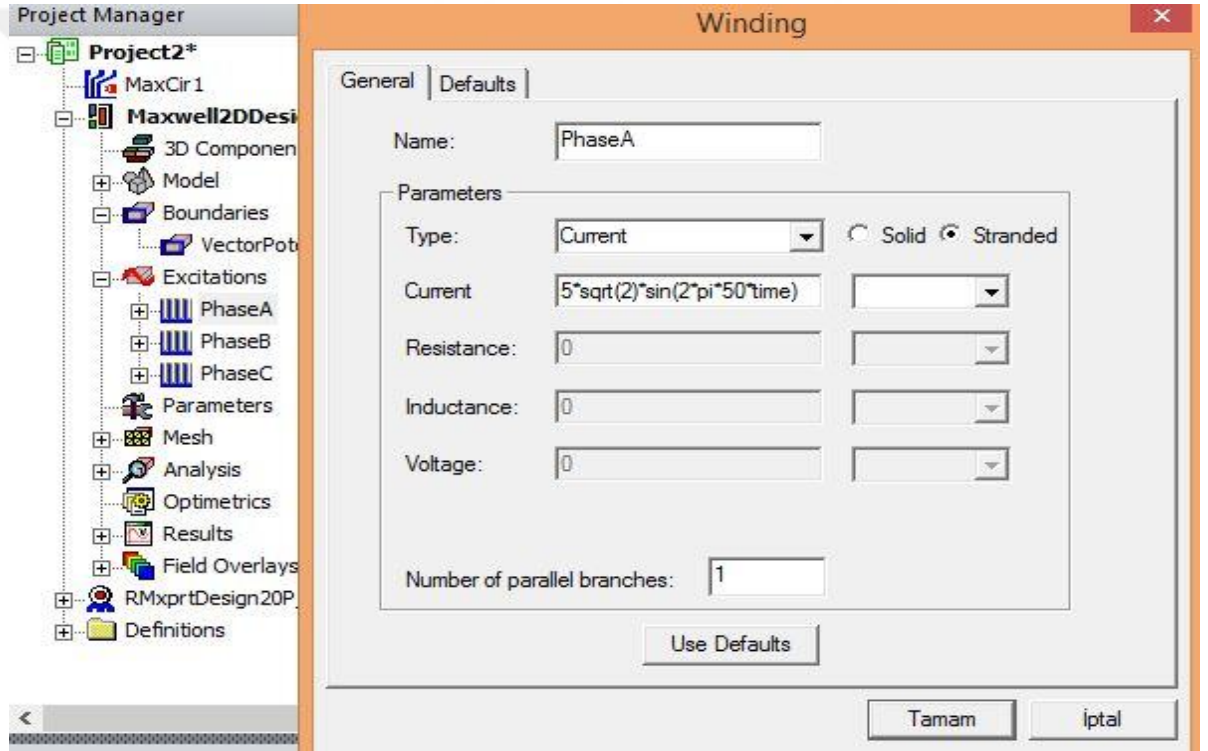


Şekil 3.19 Vektör Potansiyel

Vektör potansiyel sınırları genellikle manyetik vektör analizleri için kullanılmaktadır. Radyal, teğetsel ve eksenel yönde oluşan manyetik akı şiddetlerinin davranışlarının analizinde bu sınır tipi ile analizler gerçekleştirilmektedir [23].

Elektrik makinelerinin sargularından geçen akım ile oluşan manyetik alan ve kalıcı mıknatısların oluşturduğu manyetik alanların etkileşimleri makine mili dönmektedir. Bu yüzden makinenin tork u akım ile kontrol edilebilmektedir. Bu tez

kapsamında araştırılan dengesiz manyetik kuvvetlerin temelini manyetik alanlar belirlemektedir. Bu yüzden stator tarafında oluşan döner manyetik alan sargılara verilen akım ile doğru orantılıdır. Eşitlik 2. 10 ve 2.11’ de akım ile silindirik koordinat sisteminde radyal ve teğetsel kuvvetlerin ilişkisine yer verilmiştir. Bu eşitliklerde sargı akımlarının oluşturduğu döner manyetik alanın radyal ve teğetsel manyetik akı yoğunluklarına etkileri gösterilmiştir. Bu sebepten dolayı bu tez çalışmasının konusu olan dengesiz manyetik yük analizinde, sargılara farklı değerlerde AC akım uygulayarak manyetik alanlara olan etkisi amaçlanmıştır. Ansys Maxwell programında transient analiz yapılırken 3 fazlı sargıları otomatik olarak gruplara ayırmaktadır.

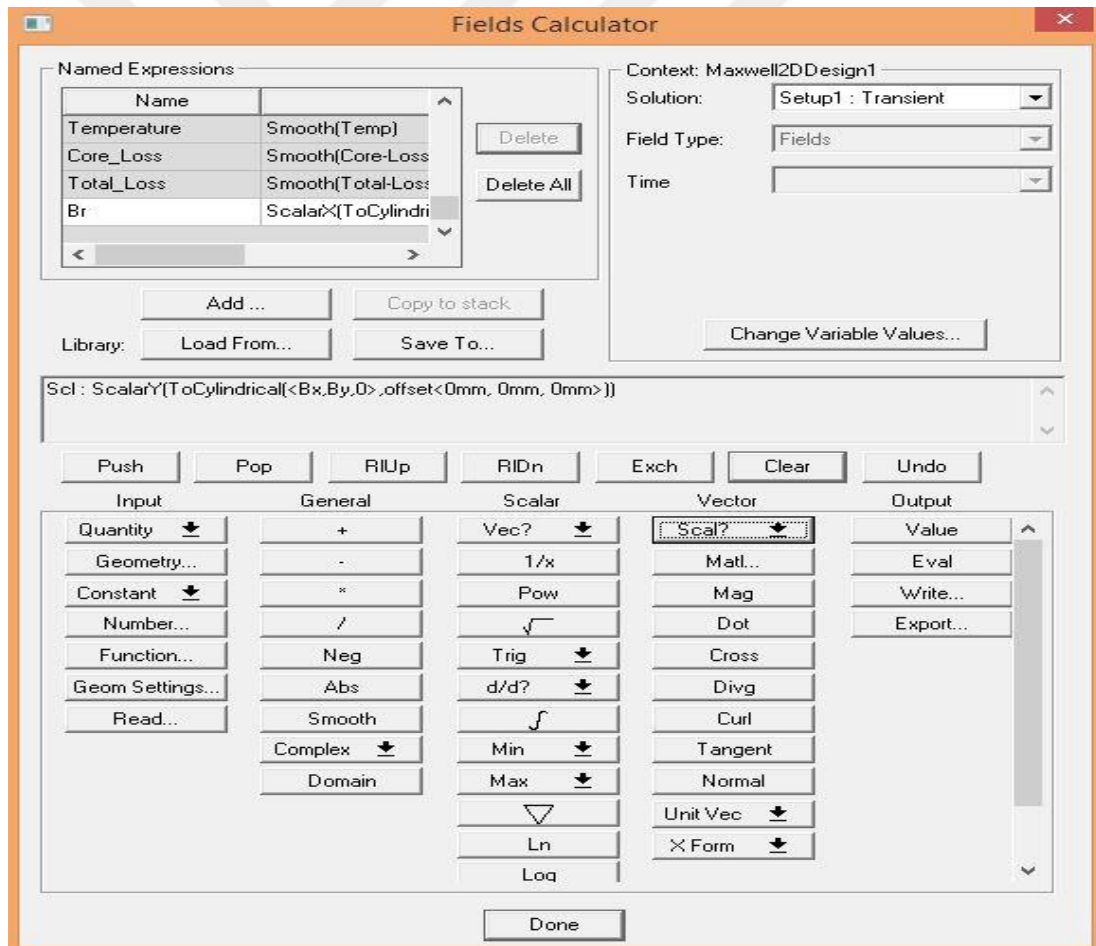


Şekil 3.20 3 Fazlı Sargılara Akım Ataması

“Project manager” kısmında yer alan “excitations” kısmında yer alan faz sargılarına uygulanmak istenen faz akımları girilmelidir. Burada tasarımı tamamlanan makinenin sağlıklı bir şekilde çalışabilmesi için A, B, C fazlarına AC akım uygulandığı için 120 derecelik faz farkı uygulanmalı ve akım büyüklükleri aynı değerlerde olmalıdır.

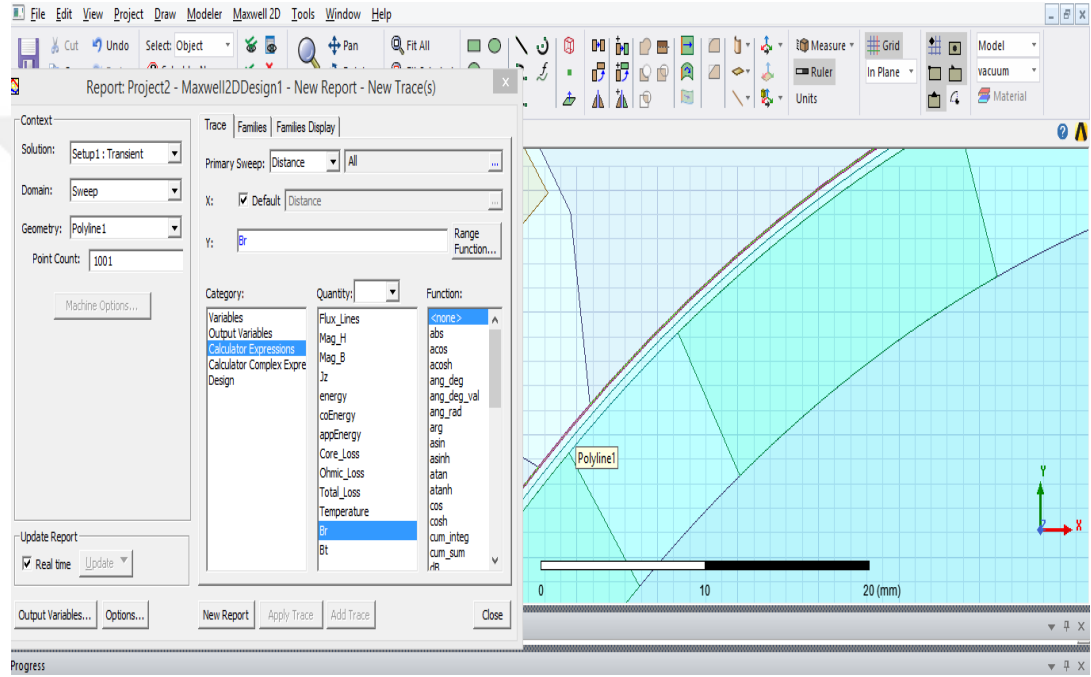
3.5. Ansys Maxwell Manyetik Kuvvet Analizi

Bölüm 2. 5' te makine içerisinde oluşan manyetik kuvvetlerin hesaplanması ile ilgili bilgilere yer verilmiştir. Ansys Maxwell programı bu eşitlikleri kullanarak manyetik kuvvetlerin analizini gerçekleştirebilmektedir. Bu manyetik kuvvetlerin analiz edilebilmesi için Maxwell Stress Tensor yöntemine göre stator ile rotor arasında yer alan hava boşluğu içerisinde oluşan manyetik akı yoğunluklarının analiz edilmesi gerekmektedir. Bunun için Ansys Maxwell programında radyal manyetik kuvvet ile teğetsel manyetik kuvvetlerin denklemlerinde yer alan radyal manyetik akı yoğunluğu ile teğetsel manyetik akı yoğunluğunun hesaplanması gerekmektedir. Bu manyetik akı yoğunluklarının hesaplanabilmesi için programın “Field Calculator” bölümünden analiz için gerekli olan parametrelerin girilmesi gerekmektedir.



Şekil 3.21 Field Calculator Manyetik Akı Yoğunluğu Hesaplama

Şekil 3.21’ de manyetik akı yoğunluklarının hesaplandığı görsele yer verilmiştir. Bu görsele gerekli parametreler, [25]’ teki kaynağa göre girilerek radyal ve teğetsel akı yoğunlukları hesaplanması için gerekli adımları göstermektedir. Manyetik akı yoğunluklarının hesaplanması için gerekli adımları gösteren bu kaynaktaki yöntemi uyguladıktan sonra Maxwell Stress Tensor’ün uygulanması için stator ile rotor arasında yer alan hava boşluğuna 360 derecelik bir yay çizilmelidir. Böylece yay üzerinde oluşan manyetik akı yoğunlukları ve kuvvetleri Maxwell Stress Tensor metodu ile hesaplayabiliriz.



Şekil 3.22 Hava Boşluğuna Çizilen Yay

Şekil 3. 22’ de stator ile rotor arasındaki hava boşluğuna bir yay çizimi gösterilmiştir. Böylece manyetik akı yoğunluklarını ve manyetik kuvvetlerin hesaplanabilmesi için Maxwell Stress Tensor’üne göre referans alınabilecek bir yüzey veya alan ataması yapılmış oldu. Daha önceden “Field Calculator” sekmesinden radyal ve teğetsel akı yoğunluklarının tanımı yapıldığı için “results→create field report” tıkladığında analiz sekmesi, Şekil 3.22’nin solunda görüldüğü gibi çıkmaktadır. Buradan geometri kısmında daha önceden çizmiş olduğumuz yayı seçerek radyal ve teğetsel akı yoğunluklarının analizlerini gerçekleştirebiliriz. Radyal ve teğetsel manyetik akı yoğunluklarını bu adımları takip ederek grafiklerini ve ortalama

değerlerini bu şekilde elde edilmektedir. Elde edilen değerleri 2. 6 ve 2. 7 denklemlerindeki formüllerine uygulayarak radyal ve teğetsel kuvvetler bulunmaktadır. Silindirik koordinat sisteminde yer alan bu kuvvetleri Kartezyen koordinat sistemine çevirerek net kuvvetlerin hesaplaması yapılabilir. Bunun içinde 2. 8 ve 2. 9'da ifade edilen eşitlikler kullanılarak kuvvetlerin x ve y eksenlerindeki değerleri hesaplanabilmektedir.



4. KMSM TASARIM VE ANALİZ SONUÇLARI

Motor tasarım ve analizi için yazılım paketi olarak Sonlu Elemanlar Yöntemini kullandığı için Ansys Maxwell Electromagnetic Suite 2019 R3 programı kullanılmıştır. Program analizlerini gerçekleştirebilmek amacıyla Intel® Core™ i5-4210U CPU 1.70 GHz 8,00 GB RAM bilgisayar kullanılmıştır.

Bu bölümde tezin amacı doğrultusunda yapılan çalışmalara dair verilere yer verilmiştir. 3. Bölümde ifade edilen materyal ve yöntemler doğrultusunda tasarlanan dahili rotorlu kesir sarımlı kalıcı mıknatıslı senkron motor tasarımları ve analizleri ile ilgili teknik bilgilere yer verilmiştir. Bu bilgiler ışığında tasarımı oluşturmak ve analizleri gerçekleştirmek amacıyla aşağıda maddeler halinde yazılan adımlar uygulanmıştır.

- Rmxprt düzleminde motorlara ait parametrelerin girilmesi ve analizinin yapılması. Verimi düşük olan motorların parametrik optimizasyonunun yapılması.
- Rmxprt' te tasarımı tamamlanan motorların Maxwell 2D düzlemine aktarılması ve analiz için sınır koşullarının atanması ve manyetik kuvvet analizi için hava aralığına yay çizilmesi.
- Radyal ve teğetsel manyetik akı yoğunluklarının hesaplanması için "Field Calculator" üzerinden formüllerin tanımlanması.
- Tasarlanan motorların farklı akım değerlerinde manyetik kuvvet ve parametrik analizlerinin tamamlanması.

Bu adımları tamamladıktan sonra Manyetik akı yoğunluklarından elde edilen değerleri manyetik kuvvet değerlerine çevirebilmek için analiz sonuçları MATLAB ortamında hesaplanabilmesi amacıyla veriler kaydedilmiştir. Kaydedilen veriler Excel'de düzeltilerek MATLAB yüklenmiştir. Excel'den çekilen ham verileri gerekli kodlar yazılarak MATLAB'ta analize sokulmuştur. Burada Silindirik koordinat sisteminde hesaplanan radyal ve teğetsel manyetik kuvvet değerleri Kartezyen koordinat sistemine çevrilmiş ve x-y koordinat düzleminde manyetik kuvvet değerlerinin analizi gerçekleştirilmiştir. x ekseninde kuvvet değerleri ile y eksenindeki kuvvet değerlerinin karelerinin karekökleri alınarak net manyetik kuvvet hesaplanmıştır. Kutup/ oluk sayısı tam sayı olan bir motorun hava aralığındaki net

manyetik kuvvet dağılımının sıfıra yakın olması beklenmektedir [27]. Fakat bu tez kapsamın tasarlanan motorlar kesir sarımlı motorlardır. Tasarlanan motorlar birbirleriyle kıyaslayabilmek amacıyla birbirine yakın kutup/oluk kombinasyonları tercih edilmiştir.

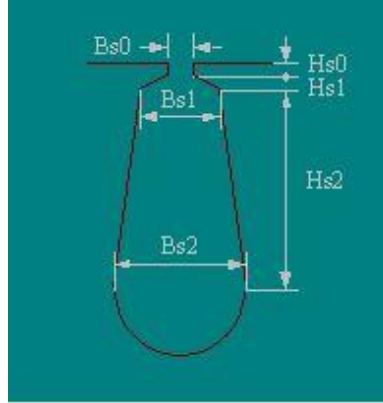
Bu tez çalışmasında Ansys Maxwell programında 1 kW gücünde 4 farklı motor tasarımı gerçekleştirilmiştir. Motorların tasarımı gerçekleştirilirken verimlerinin yüksek olması amaçlanmış Yapılan tasarımlar sonucunda yüksek verimli tasarımlar elde edilse de bütün motorların verim yüzdeleri aynı değerde değildir. Bunun sebebi ise motorlar arasında dengesiz manyetik yükleri kıyaslayabilmek adına bazı parametrelerin sabit tutulması ile ilgilidir. Çünkü sağlıklı kıyaslama yapabilmek amacıyla motorun birtakım parametrelerinin aynı olması gerekmektedir. Bu parametreler stator dış çapı, stator iç çapı, rotor dış çapı, rotor iç çapı, motor derinlikleri, hava boşluğu aralığı, stator ve rotorda kullanılan malzemeler, mıknatıs türleri olarak belirlenmiştir. Motorlara ait oluk ölçüleri sargılarda kullanılan tel sayıları verimi etkileyen parametreler olduğu için motorlara göre değişiklik göstermektedir. Tez kapsamında analizi yapılan kalıcı mıknatıslı kutup/oluk kombinasyonları 20/21, 22/21, 26/27, 28/27 olarak tasarlanmıştır. Çizelge 4. 1' de tasarlanan motorlara ait ortak parametrelere yer verilmiştir.

Çizelge 4.1 Tasarlanan Motorlara Ait Ortak Parametreler

| Parametre Adı | Parametre Değeri |
|---------------------------------|------------------|
| Stator Dış Çapı(mm) | 269 |
| Stator İç Çapı, (mm) | 179 |
| Rotor Dış Çapı (mm) | 177.5 |
| Rotor İç Çapı (mm) | 100.5 |
| Derinliği (mm) | 42 |
| Hava Aralığı Boşluğu (mm) | 0.75 |
| Nüve Manyetik Geçirgenliği (T) | 1.84 |
| Mıknatıs Bağlı Geçirgenliği (T) | 1.1 |

Tasarımı gerçekleştirilen motorların bazı parametreleri aynı iken bazı parametreleri optimizasyon çalışmaları sonucunda farklı değerler elde edilmiştir. Bu elde edilen değerler doğrultusunda motor tasarımları tamamlanmıştır. Çizelge 4. 2 de farklı parametre değerleri ile ilgili tabloya yer verilmiştir.

Şekil 4. 1' de ise stator ölçü parametreleri görsel olarak ifade edilmiştir.

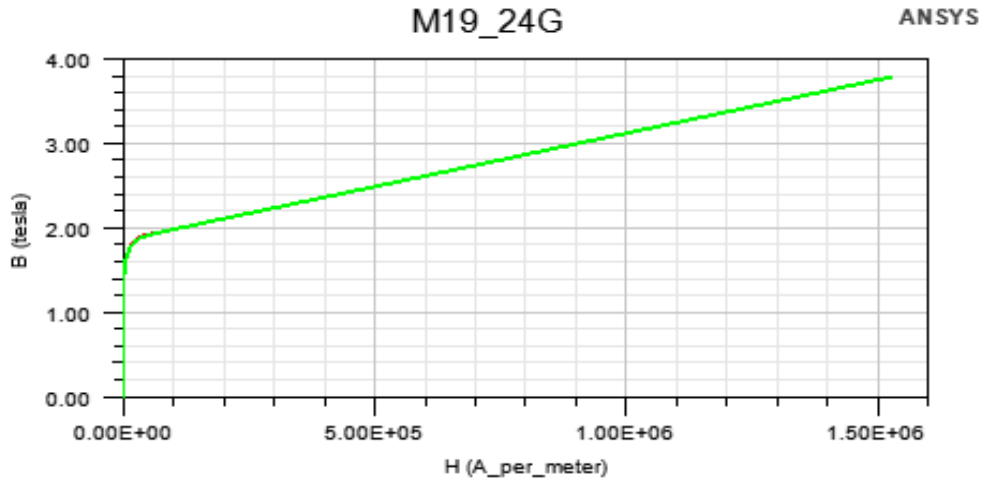


Şekil 4.1 Tasarlanan Statorun Ölçüm Parametreleri

Çizelge 4.2 KMSM Farklı Parametreleri

| Tasarlanan Motorlar | 20/21 | 22/21 | 26/27 | 28/27 |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|
| B0 (mm) | 4.2 | 4.2 | 4.2 | 4.2 |
| B1 (mm) | 12 | 14 | 14.9 | 14.9 |
| B2 (mm) | 14.4 | 12.2 | 13.79 | 13.49 |
| H0 (mm) | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| H1 (mm) | 6.8 | 6.8 | 6.8 | 6.8 |
| H2 (mm) | 25.3 | 25.3 | 25.3 | 25.3 |
| Tel sayısı/ faz | 186 | 196 | 188 | 196 |

Manyetik yüklerin kıyaslamasını doğru yapabilmek için tasarımı yapılan bütün motorların nüve malzemesi olarak M19_24G seçilmiştir. Mıknatıslanma eğrisi Şekil 4. 2'de gösterilen bu manyetik malzemenin manyetik akı yoğunluğu yaklaşık 1. 8 Tesla'dır.



Şekil 4.2 M19_24G tipi Laminasyon Malzemenin B-H Eğrisi

Tasarımı yapılan motorların asimetric kuvvet dağılımını hesaplayabilmek için sargılara 0, 1, 3, 5, 10 Amper değerlerinde akımlar uygulanmıştır. Uygulanan her bir akım değerleri için motor hava aralığının ortasında yer alan 360 derecelik yay üzerindeki manyetik akı yoğunlukları B_r ve B_t analiz edilmiştir. Analizi gerçekleştirilen bu manyetik akı yoğunlukları, Maxwell Stress Tensor metoduyla MATLAB ortamına aktarılmıştır. Silindirik koordinat sisteminde oluşan radyal (F_r) ve teğetsel (F_t) kuvvetler, Maxwell Stress Tensor'ünde ifade edilen denklemlerle Kartezyen koordinat sistemine çevrilmiştir. Kartezyen düzleminde hesaplanan F_x ve F_y bileşenleri hesaplanarak grafik haline getirilmiştir. Elde edilen bu bileşenler yoluyla F_{net} değeri hesaplanmış ve grafik olarak çizdirilmiştir. Tasarımı gerçekleştirilen motorlar, yukarıda ifade edilen adımlar takip edilerek analizleri gerçekleştirilmiştir. Bundan sonraki bölümde analiz tamamlanan motorlarla ilgili grafiklere yer verilmiştir.

4.1. 20 Kutup/ 21 Oluk KMSM' nın Analiz Sonuçları

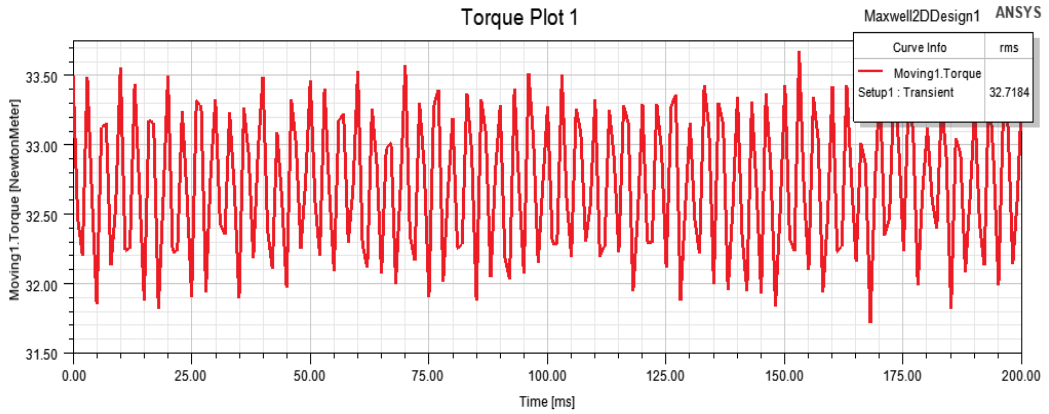
Tasarımı Ansys Maxwell Rmxprt düzleminde gerçekleştirilen 20 kutup/ 21 oluklu kalıcı mıknatıslı dahili rotorlu senkron motorun 2D düzleminde analizi gerçekleştirilmiştir. Motorun nominal akımı 2. 85 A'dir fakat bir kıyaslama yapabilmek amacıyla diğer motorların nominal çalışma akımına yakın bir akım değeri

seçilmiştir. Bu tasarlanan motorların nominal akımı yaklaşık olarak 3 Amperdir. Sargılardan akan akımın akım yoğunluğu (J) 3.90 A/mm^2 olarak analiz edilmiştir. Maxwell 2D de yapılan analizde, nominal akım çalıştığında oluşan kayıplar ile ilgili grafik Şekil 4. 3'te verilmiştir. Bakır kaybı, eddy akımı dolayısıyla oluşan kayıp, histerezis ve nüve kaybından dolayı oluşan kayıpların toplamı 45.77 W olarak analiz edilmiştir.



Şekil 4.3 20 Kutup için Nominal Akımda Oluşan Kayıplar

Nominal akımda oluşan tork grafiğine, sargılarda indüklenen gerilimin grafiklerine, 20 kutup 50 Hz frekansta oluşan hız grafiğine, motor üzerinde yayılan manyetik akı çizgileri ile ilgili görsellere yer verilmiştir.



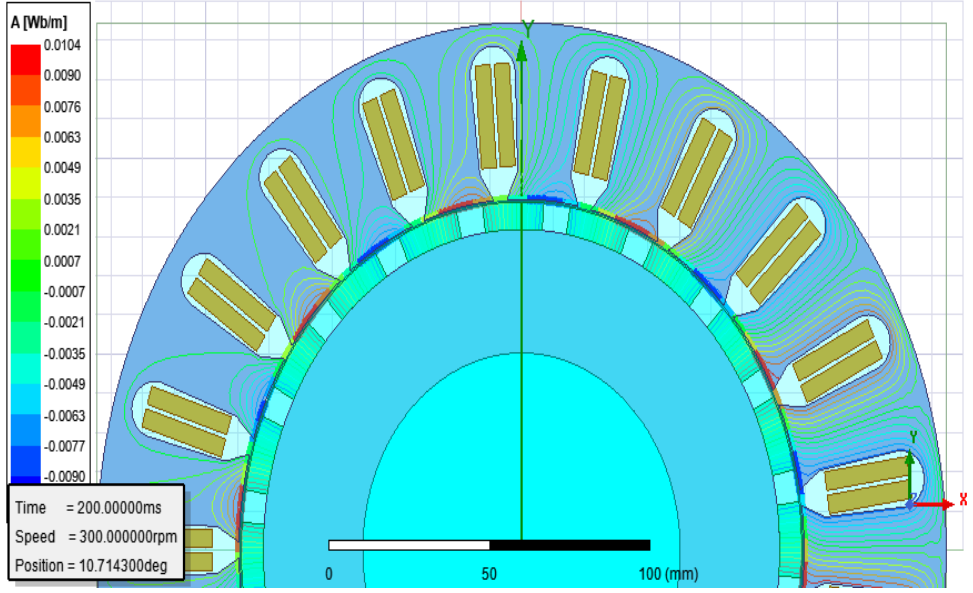
Şekil 4.4 20 Kutup için Nominal Akımdaki Moment Grafiği



Şekil 4.5 20 Kutup için Yüksüz Durumda Sargılarda Oluşan Gerilimlerin Grafiği



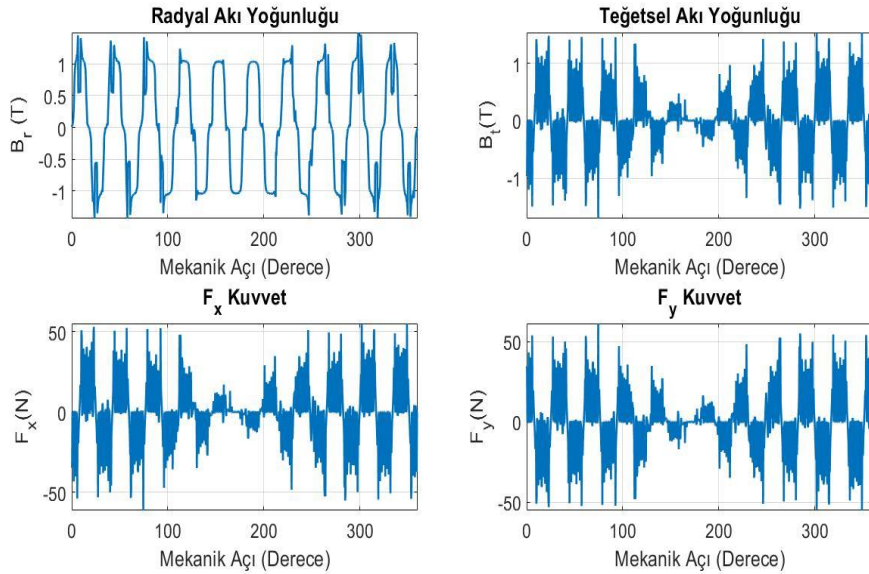
Şekil 4.6 20 Kutup için 50 Hz Frekansta Hız Grafiği



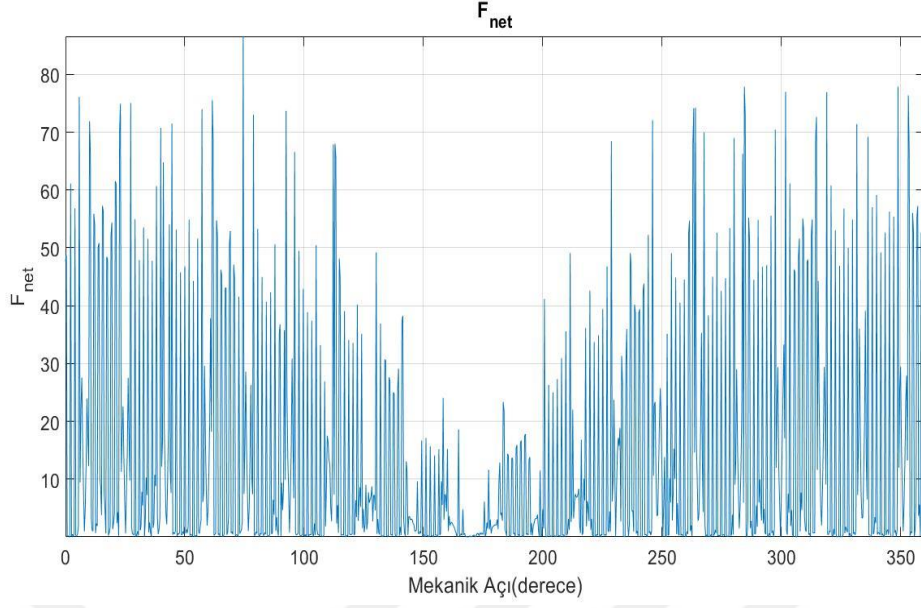
Şekil 4.7 20 Kutup için Yüksüz Durumda Yayılan Manyetik Akı Çizgileri

Şekil 4. 6' e bakıldığında, 20P/21S motorun kesir sarımlı olmasından dolayı manyetik akı dağılımının asimetrik bir şekilde olduğu analiz programı aracılığı ile gözlemlenmiştir. Ansys Maxwell programından elde edilen verilerin Maxwell Stress Tensor'ün gereksinimleri uygulanmış ve MATLAB ortamında grafikleri çizdirilmiştir.

Aşağıdaki Şekil 4. 8 ve Şekil 4. 9' da 0 Amperde yapılan UMF analizi sonucunda elde edile grafiklerin görsellerine yer verilmiştir.

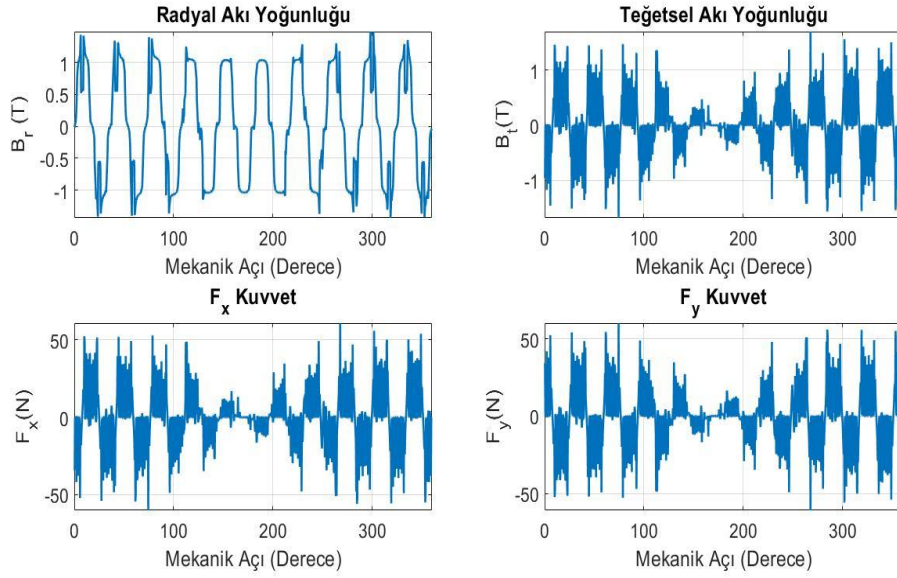


Şekil 4.8 20 Kutup için 0 Amperde Oluşan B_r , B_t , F_x , F_y Grafikleri

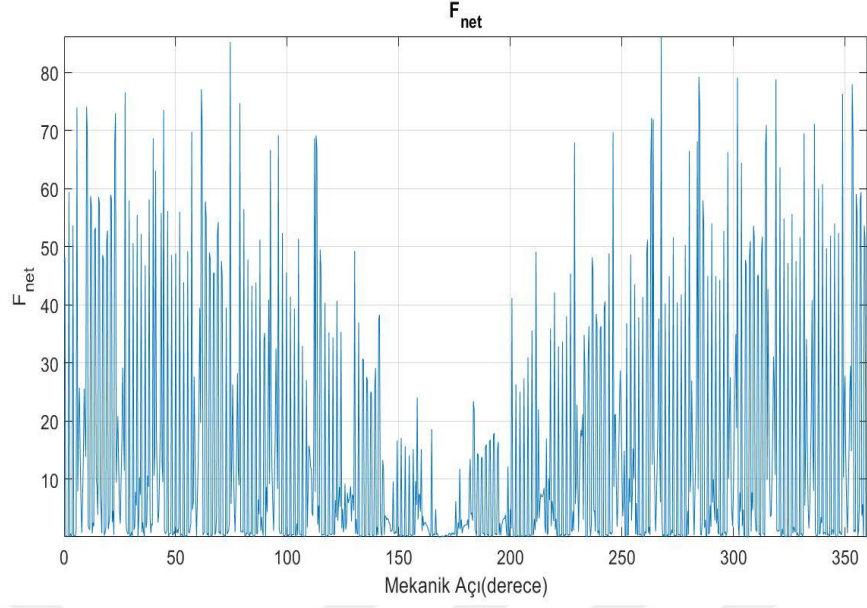


Şekil 4.9 20 Kutup için 0 Amper için F_{net} Analizi

Aşağıdaki Şekil 4. 10 ve Şekil 4. 11’ de 1 Amperde yapılan UMF analizi sonucunda elde edile grafiklerin görsellerine yer verilmiştir.

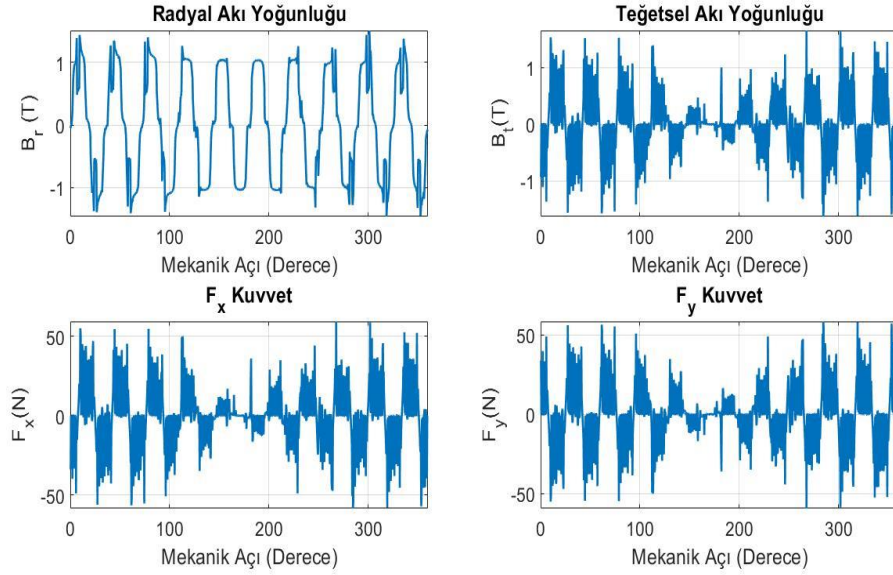


Şekil 4.10 20 Kutup için 1 Amperde Oluşan B_r , B_t , F_x , F_y Grafikleri

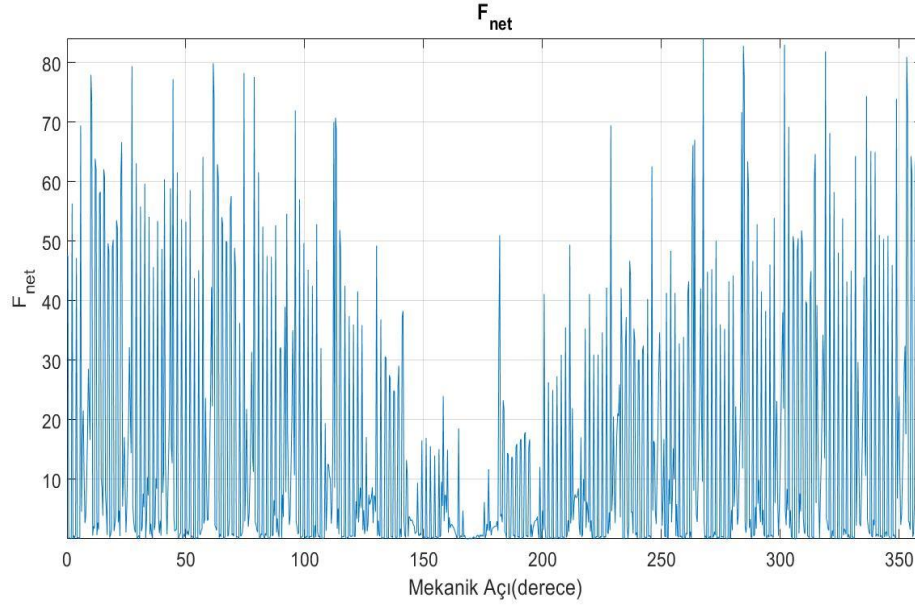


Şekil 4.11 20 Kutup için 1 Amperde Oluşan F_{net} Grafiği

Aşağıdaki Şekil 4. 12 ve Şekil 4. 13’ de 3 Amperde yapılan UMF analizi sonucunda elde edile grafiklerin görsellerine yer verilmiştir.

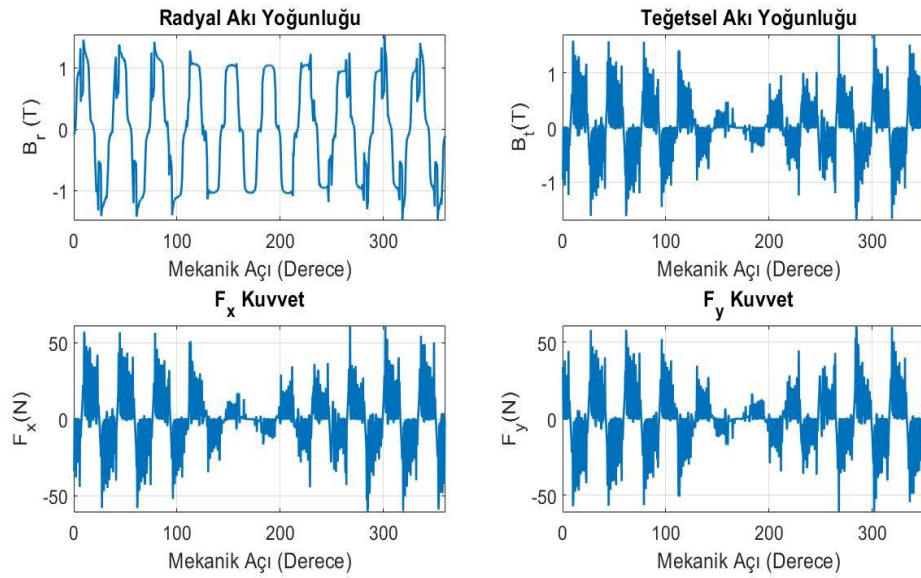


Şekil 4.12 20 Kutup için 3 Amperde Oluşan B_r , B_t , F_x , F_y Grafikleri

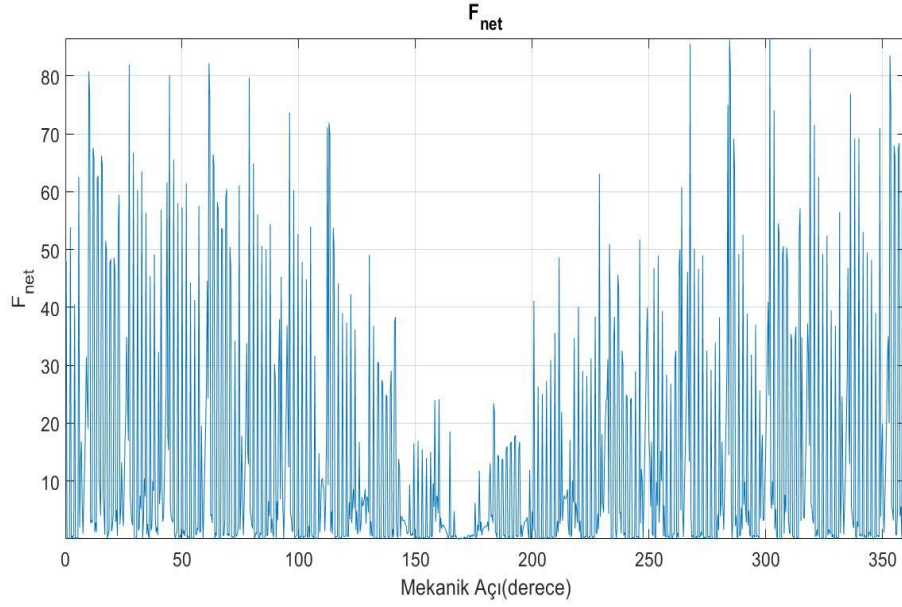


Şekil 4.13 20 Kutup için 3 Amperde Oluşan F_{net} Grafiği

Aşağıdaki Şekil 4. 14 ve Şekil 4. 15' de 5 Amperde yapılan UMF analizi sonucunda elde edile grafiklerin görsellerine yer verilmiştir.

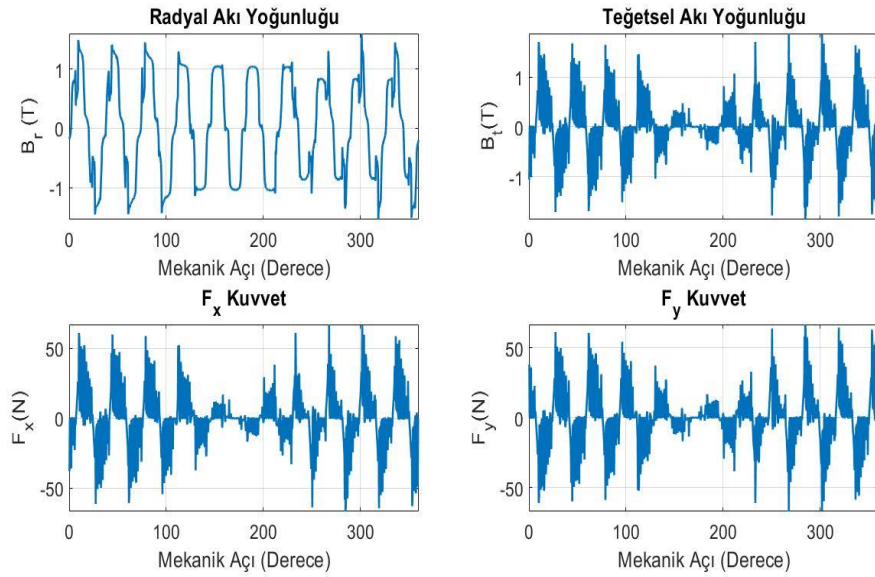


Şekil 4.14 20 Kutup için 5 Amperde Oluşan B_r , B_t , F_x , F_y Grafikleri

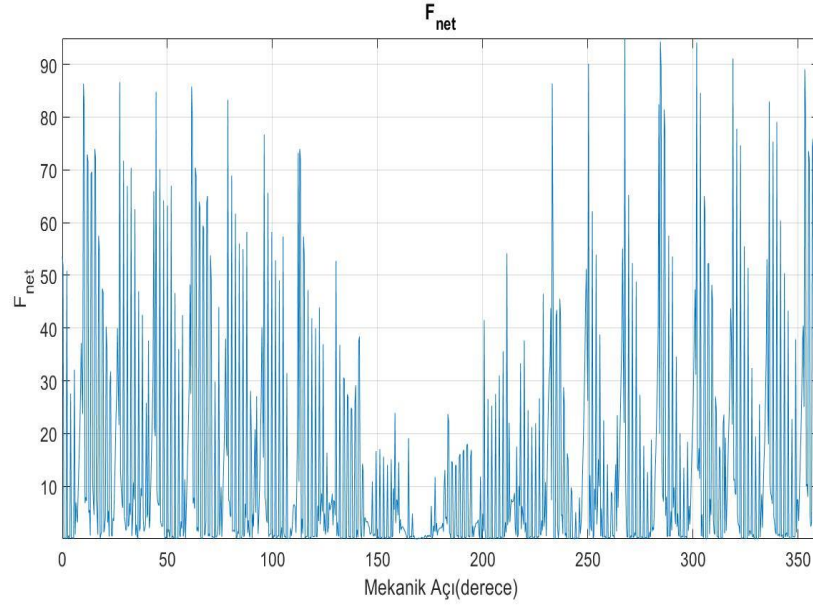


Şekil 4.15 20 Kutup için 5 Amperde Oluşan F_{net} Grafiği

Aşağıdaki Şekil 4. 16 ve Şekil 4. 17' de 10 Amperde yapılan UMF analizi sonucunda elde edile grafiklerin görsellerine yer verilmiştir.



Şekil 4.16 20 Kutup için 10 Amperde Oluşan B_r , B_t , F_x , F_y Grafikleri



Şekil 4.17 20 Kutup için 10 Amperde Oluşan F_{net} Grafiği

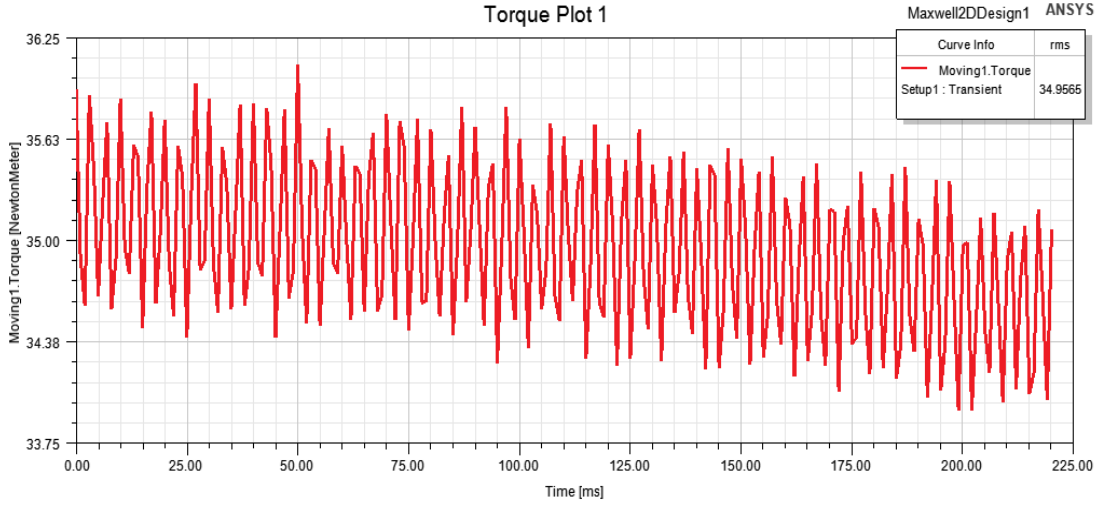
4.2. 22 Kutup/ 21 Oluk KMSM' nin Analiz Sonuçları

Tasarımı Ansys Maxwell Rmxprt düzleminde gerçekleştirilen 22 kutup/ 21 oluklu kalıcı mıknatıslı dahili rotorlu senkron motorun 2D düzleminde analizi gerçekleştirilmiştir. Motorun nominal akımı 2.95 A'dir. Sargılardan akan akımın akım yoğunluğu (J) 4.03 A/mm^2 olarak analiz edilmiştir. Maxwell 2D de yapılan analizde, nominal akım çalıştığında oluşan kayıplar ile ilgili grafik Şekil 4.17 de verilmiştir. Bakır kaybı, eddy akımı dolayısıyla oluşan kayıp, histerezis ve nüve kaybından dolayı oluşan kayıpların toplamı 36.19 W olarak analiz edilmiştir.

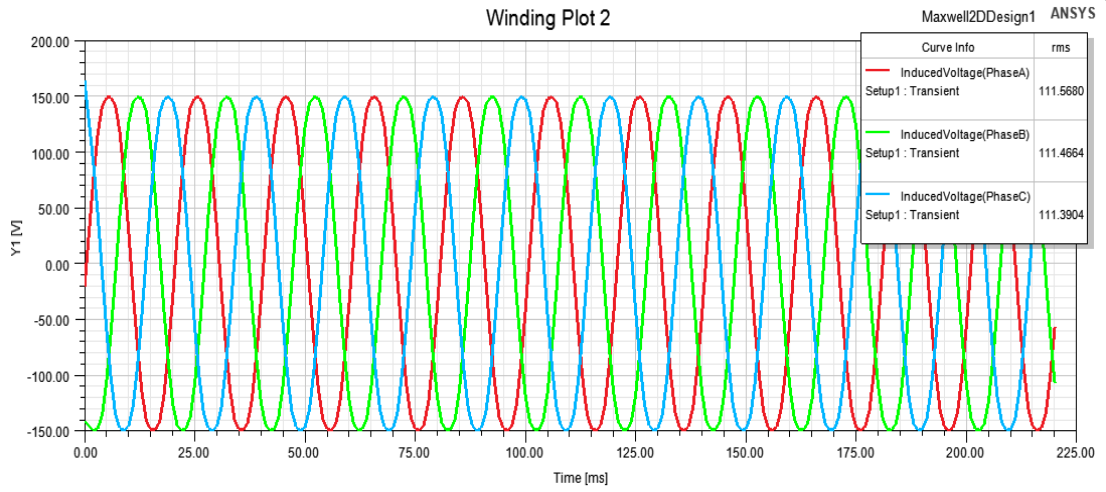


Şekil 4.18 22 Kutup için Nominal Akımda Oluşan Kayıplar

Nominal akımda oluşan tork grafiğine, sargılarda indüklenen gerilimin grafiklerine, 22 kutup 50 Hz frekansta oluşan hız grafiğine, motor üzerinde yayılan manyetik akı çizgileri ile ilgili görsellere yer verilmiştir.



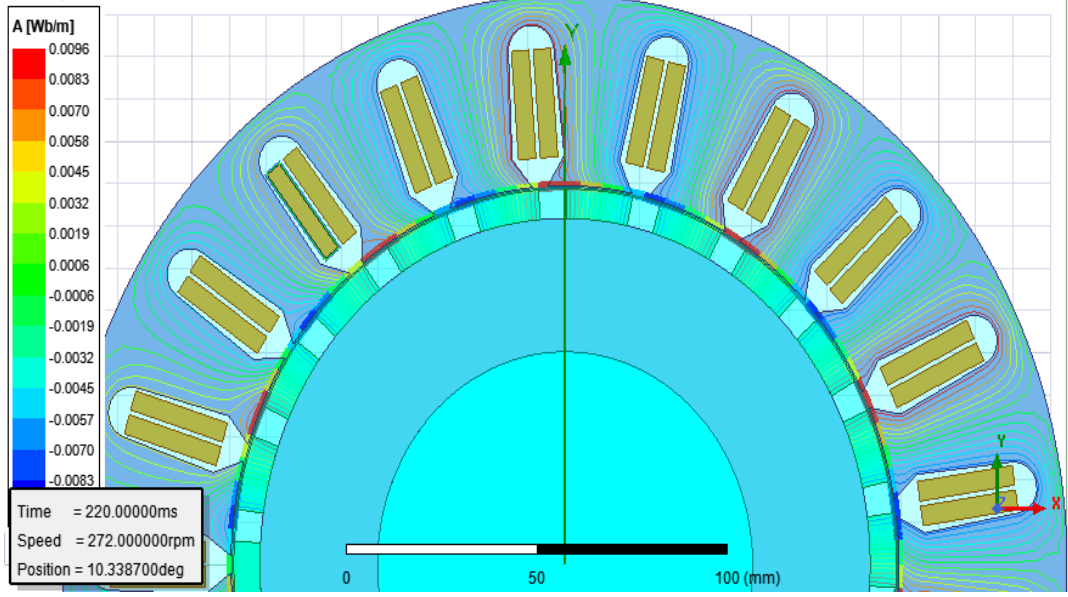
Şekil 4.19 22 Kutup için Nominal Akımdaki Moment Grafiği



Şekil 4.20 22 Kutup için Yüksüz Durumda Sargılarda Oluşan Gerilimlerin Grafiği



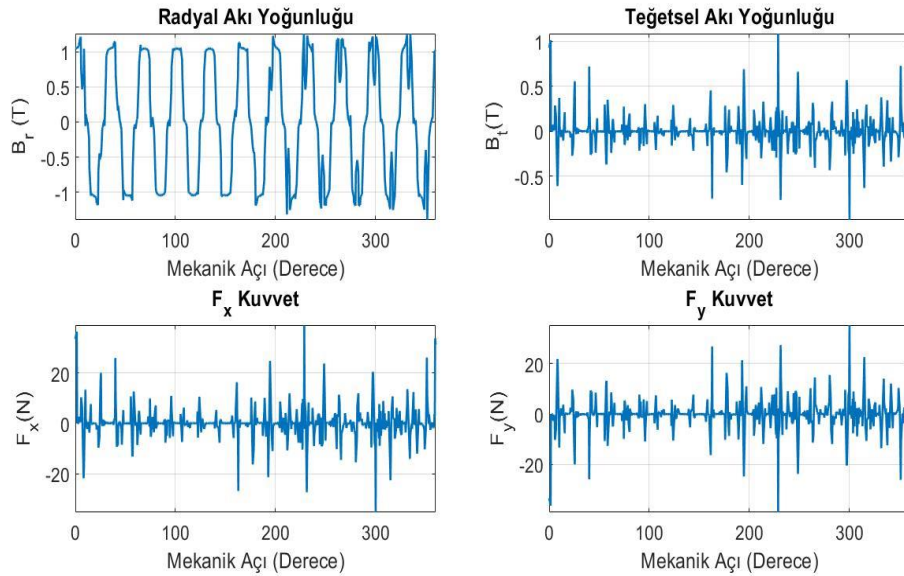
Şekil 4.21 22 Kutup için 50 Hz Frekansta Oluşan Hız Grafiği



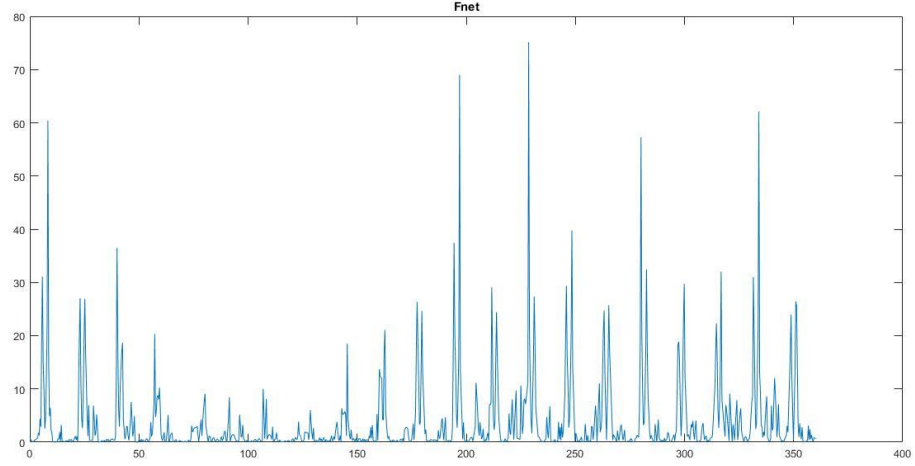
Şekil 4.22 22 Kutup için Yüksüz Durumda Yayılan Manyetik Akı Çizgileri

Ansyst Maxwell programından elde edilen veriler ile Maxwell Stress Tensor'un gereksinimleri uygulanmış ve MATLAB ortamında grafikleri çizdirilmiştir. Aşağıda elde edilen grafiklerin görsellerine yer verilmiştir.

Aşağıdaki Şekil 4. 23 ve Şekil 4. 24' de 0 Amperde yapılan UMF analizi sonucunda elde edile grafiklerin görsellerine yer verilmiştir.

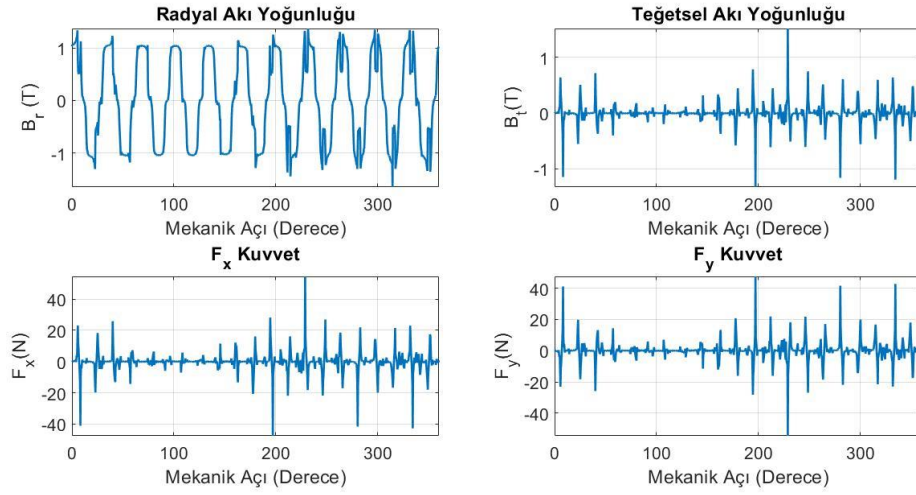


Şekil 4.23 22 Kutup için 0 Amperde Oluşan B_r , B_t , F_x , F_y Grafikleri

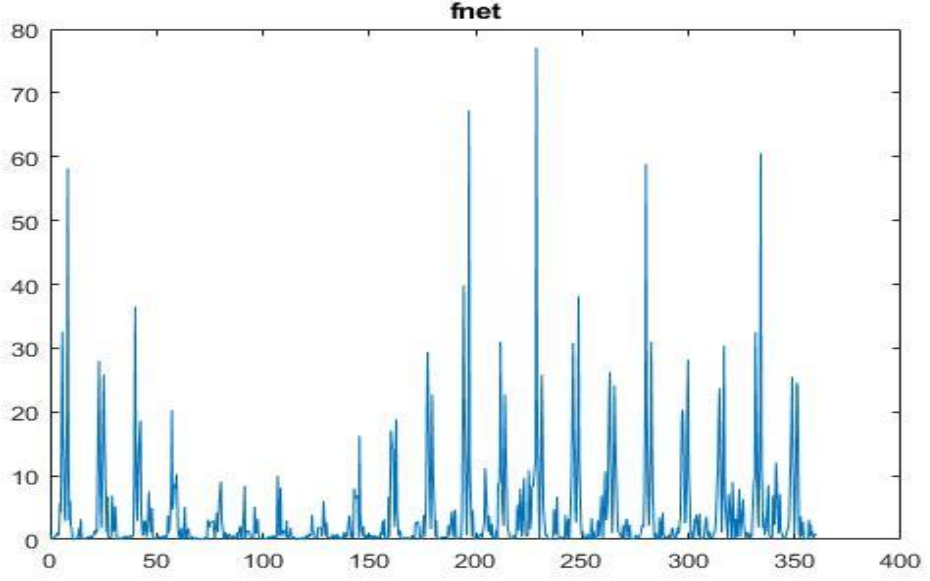


Şekil 4.24 22 Kutup için 0 Amperde oluşan F_{net} grafiği

Aşağıdaki Şekil 4. 25 ve Şekil 4. 26' da 0.95 Amperde yapılan UMF analizi sonucunda elde edile grafiklerin görsellerine yer verilmiştir.

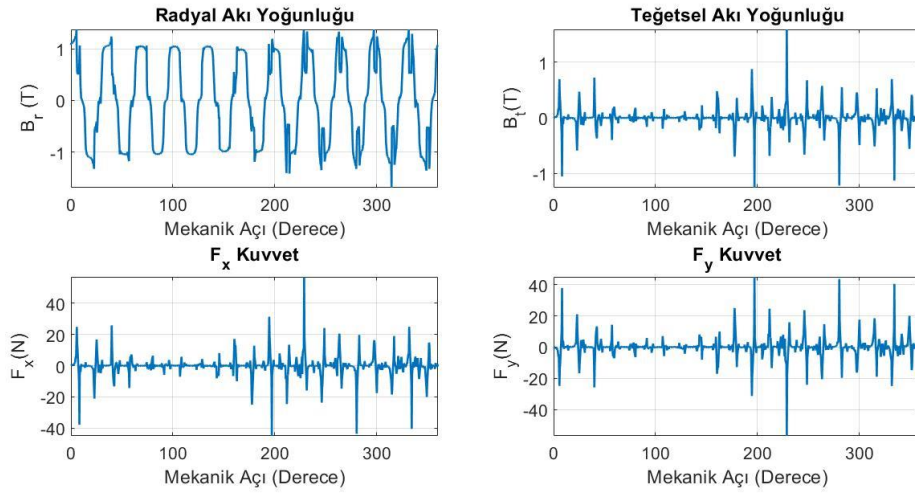


Şekil 4.25 22 Kutup için 0.95 Amperde Oluşan B_r , B_t , F_x , F_y Grafikleri

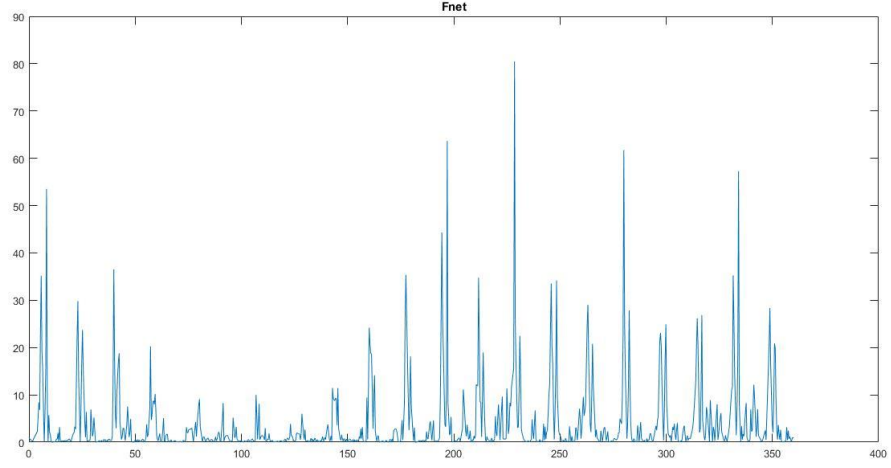


Şekil 4.26 22 Kutup için 0.95 Amperde Oluşan F_{net} Grafiği

Aşağıdaki Şekil 4. 27 ve Şekil 4. 28' de 2.84 Amperde yapılan UMF analizi sonucunda elde edile grafiklerin görsellerine yer verilmiştir.

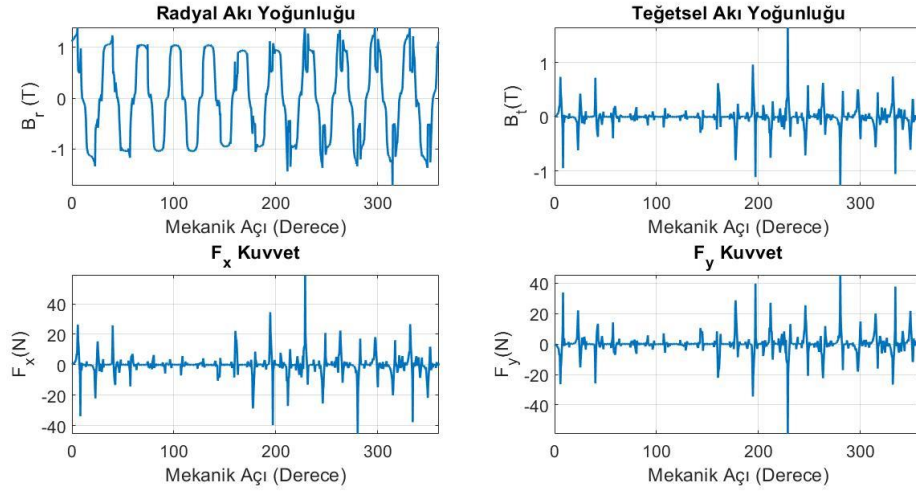


Şekil 4.27 22 Kutup için 2.84 Amperde Oluşan B_r , B_t F_x F_y Grafikleri

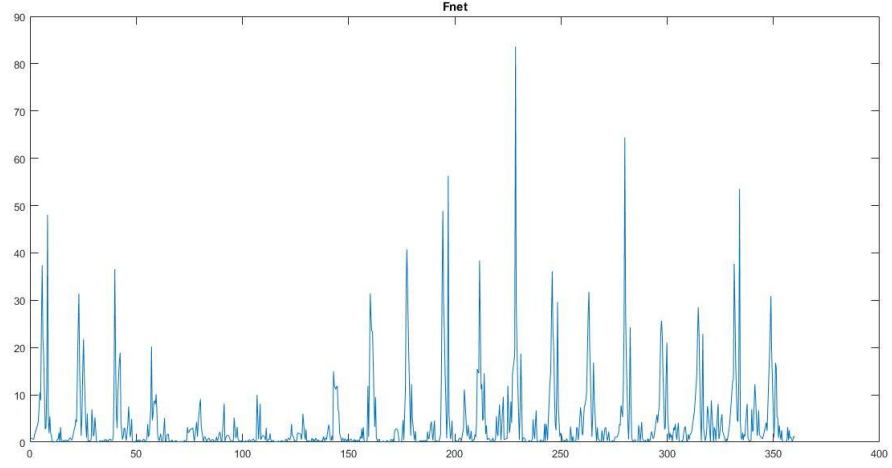


Şekil 4.28 22 Kutup için 2.84 Amperde Oluşan F_{net} Grafiği

Aşağıdaki Şekil 4. 29 ve Şekil 4. 30' da 4.74 Amperde yapılan UMF analizi sonucunda elde edile grafiklerin görsellerine yer verilmiştir.

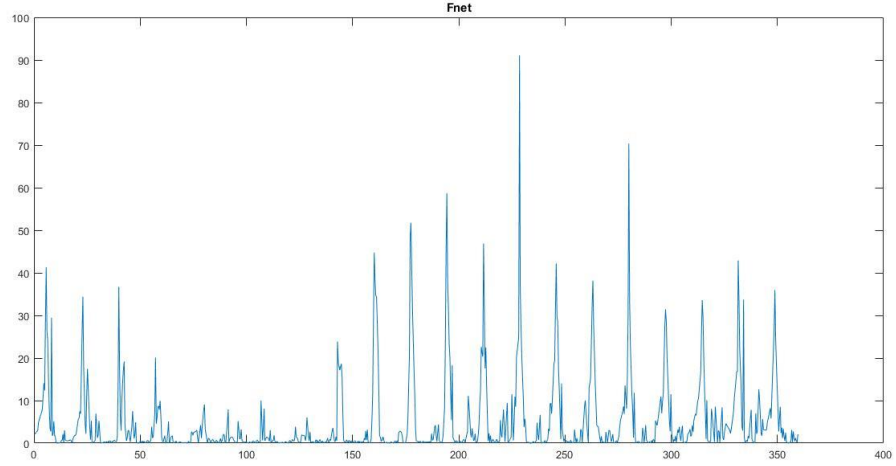


Şekil 4.29 22 Kutup 4.74 Amperde Oluşan B_r , B_t , F_x , F_y Grafikleri

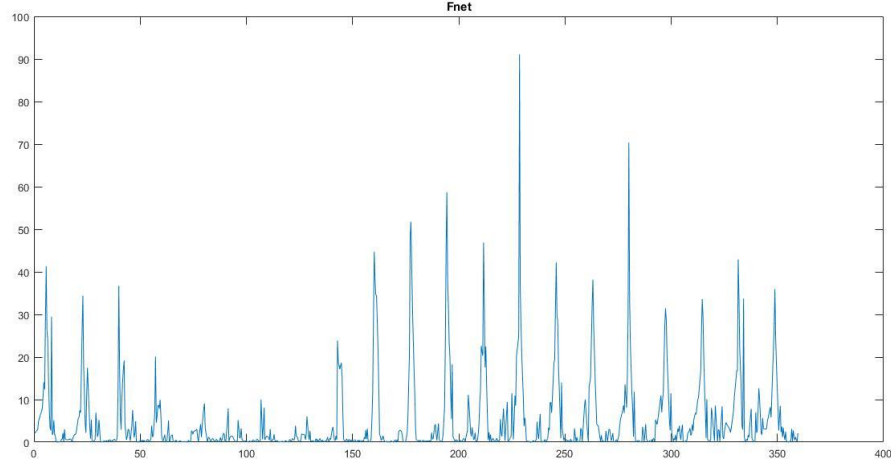


Şekil 4.30 22 Kutup için 4.74 Amperde Oluşa F_{net} Grafiği

Aşağıdaki Şekil 4. 31 ve Şekil 4. 32’ de 9.49 Amperde yapılan UMF analizi sonucunda elde edile grafiklerin görsellerine yer verilmiştir.



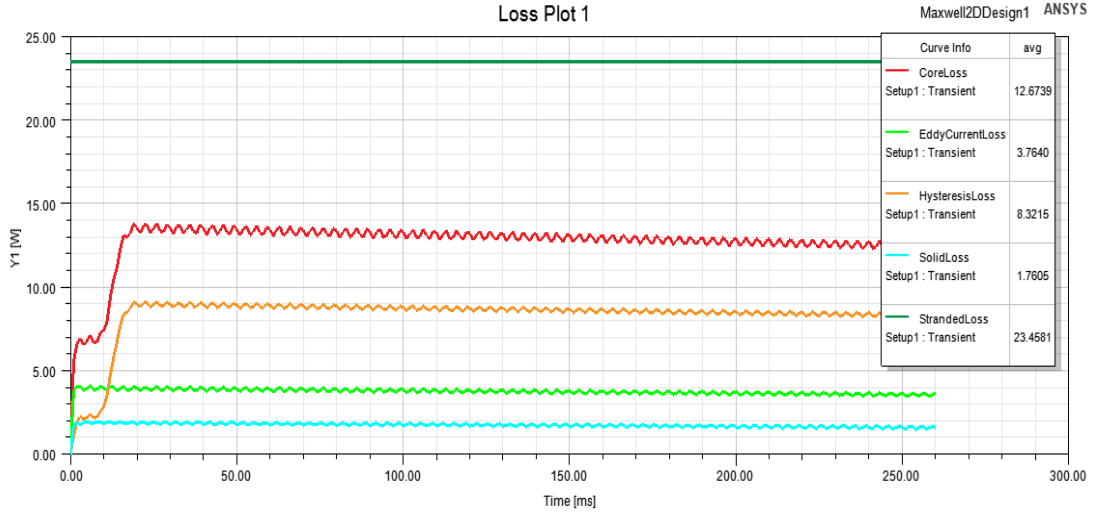
Şekil 4.31 22 Kutup için 9.49 Amperde Oluşan B_r , B_t , F_x , F_y Grafikleri



Şekil 4.32 22 Kutup için 9.49 Amperde Oluşan F_{net} Grafiği

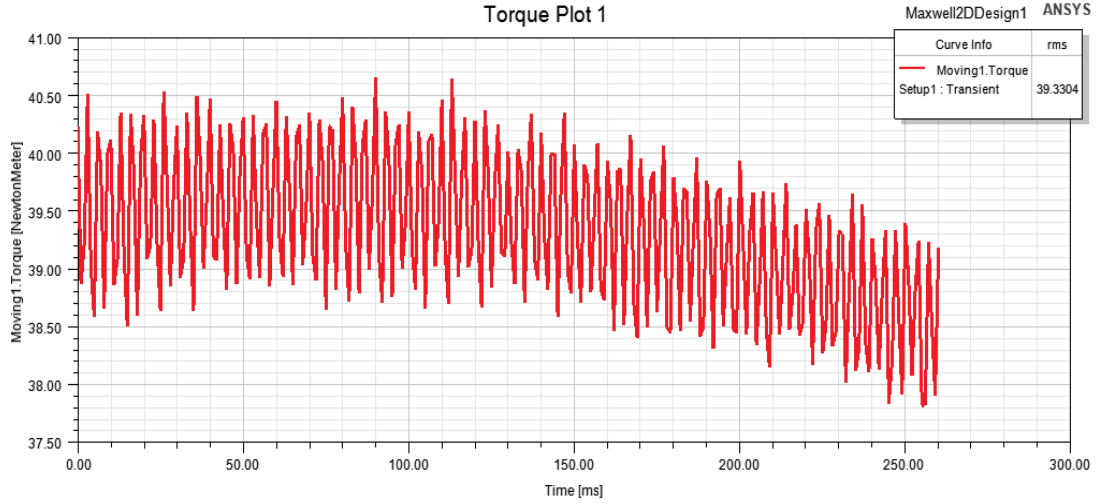
4.3. 26 Kutup/ 27 Oluk KMSM un Analiz Sonuçları

Tasarımı Ansys Maxwell Rmxprt düzleminde gerçekleştirilen 26 kutup/ 27 oluklu kalıcı mıknatıslı dahili rotorlu senkron motorun 2D düzleminde analizi gerçekleştirilmiştir. Motorun nominal akımı 2.91 A'dir. Sargılardan akan akımın akım yoğunluğu (J) 3.98 A/mm^2 olarak analiz edilmiştir. Maxwell 2D de yapılan analizde, nominal akım çalıştığında oluşan kayıplar ile ilgili grafik Şekil 4.3' te verilmiştir. Bakır kaybı, eddy akımı dolayısıyla oluşan kayıp, histerezis ve nüve kaybından dolayı oluşan kayıpların toplamı 49.97 W olarak analiz edilmiştir.

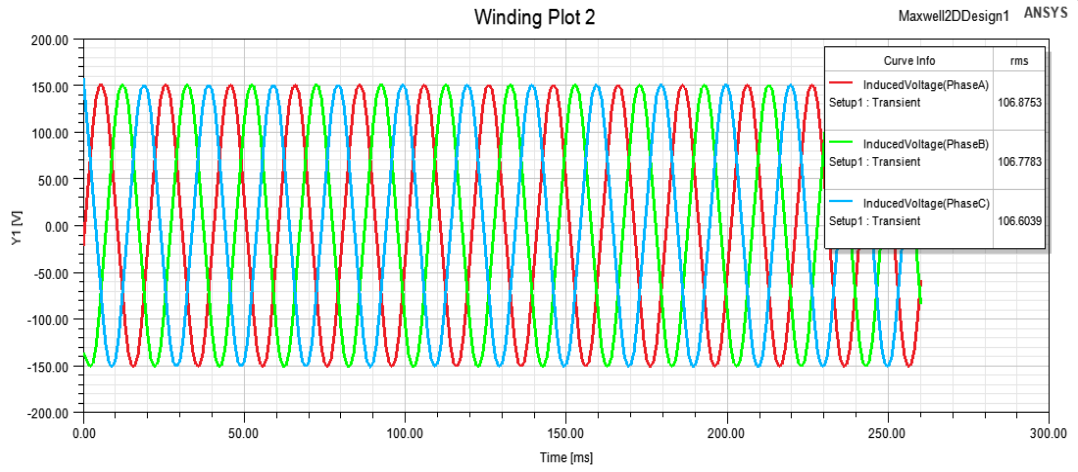


Şekil 4.33 26 Kutup için Nominal Akımda Oluşan Kayıplar

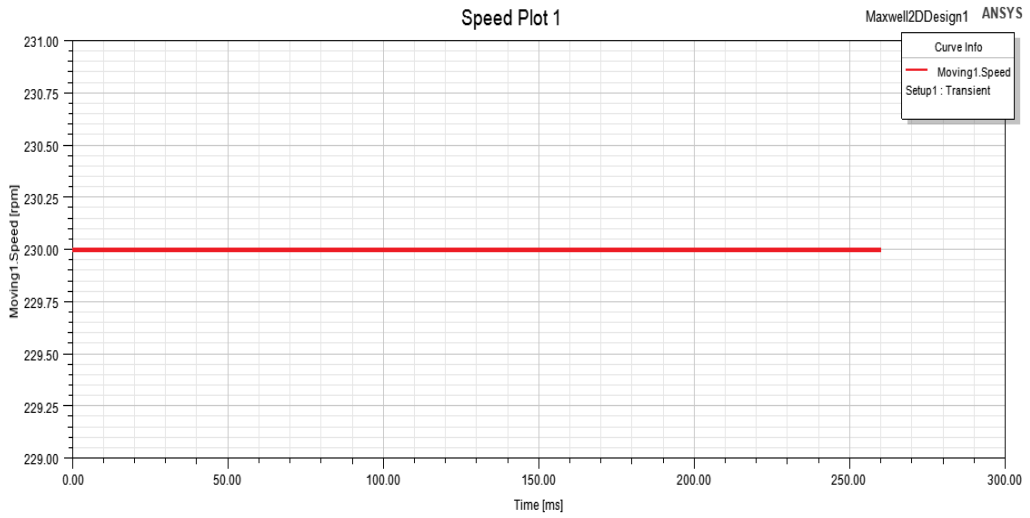
Nominal akımda oluşan tork grafiğine, sargılarda indüklenen gerilimin grafiklerine, 26 kutup 50 Hz frekansta oluşan hız grafiğine, motor üzerinde yayılan manyetik akı çizgileri ile ilgili görsellere yer verilmiştir.



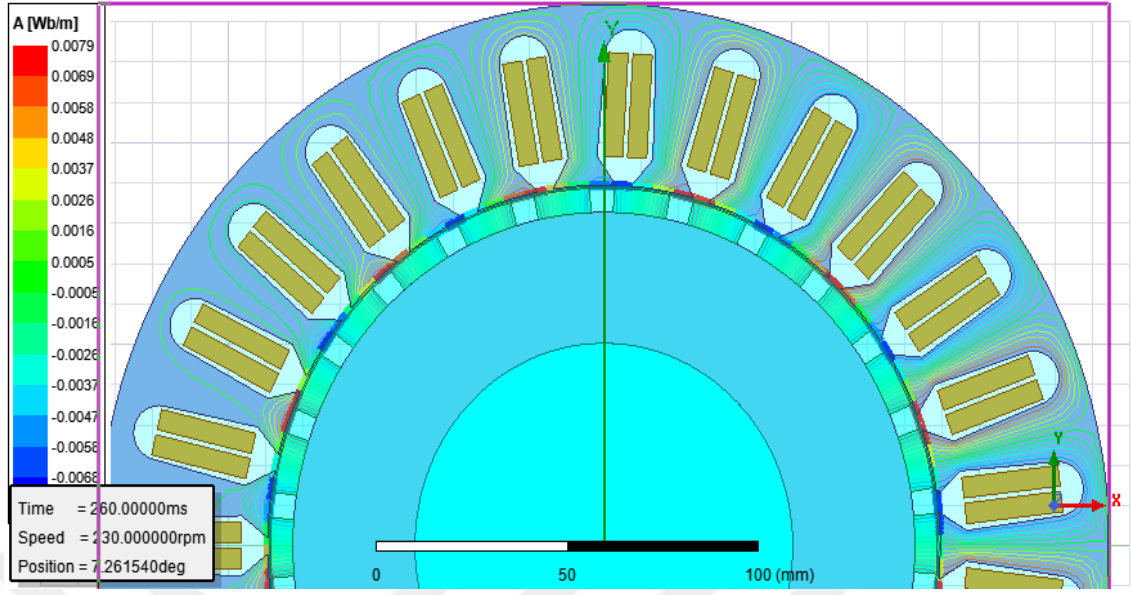
Şekil 4.34 26 Kutup için Nominal Akımda Oluşan Moment Grafiği



Şekil 4.35 26 Kutup için Yüksüz Durumda Sargılarda Oluşan Gerilimlerin Grafiği



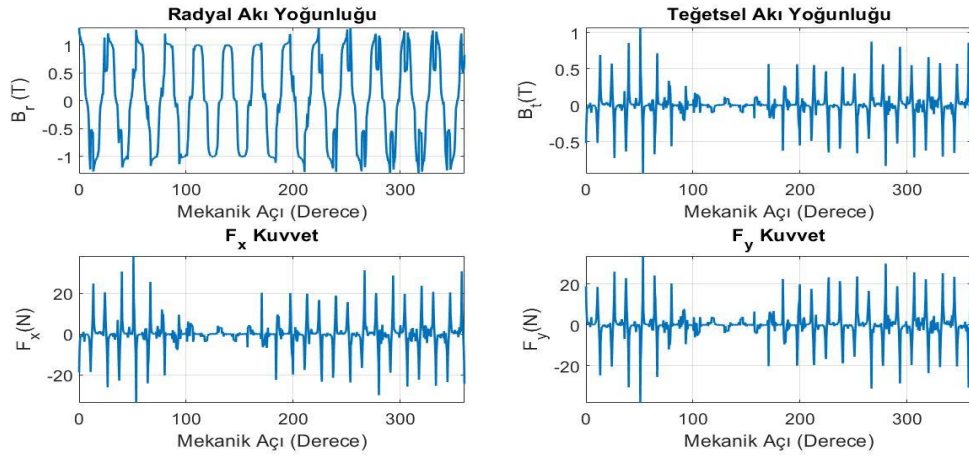
Şekil 4.36 26 Kutup için 50 Hz Frekansta Hız Grafiği



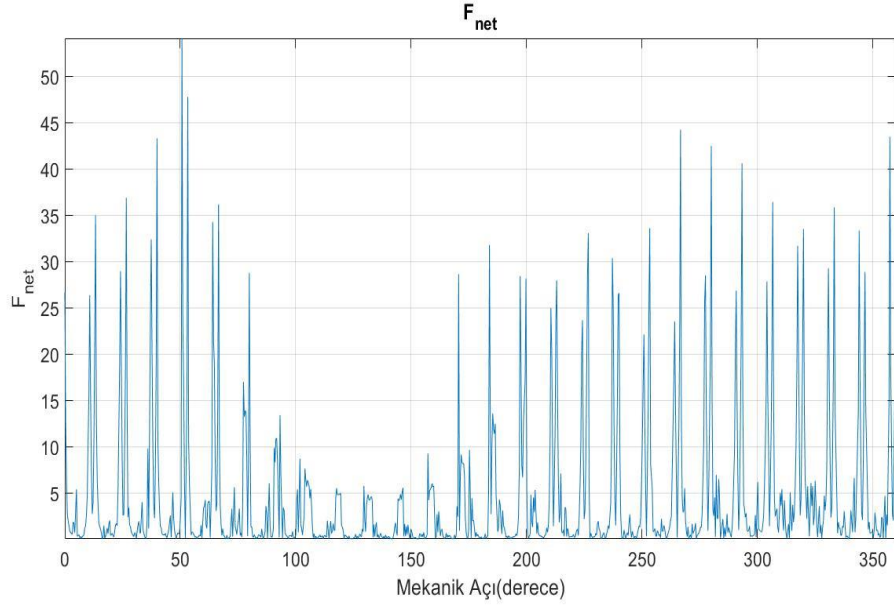
Şekil 4.37 26 Kutup için Yüksüz Durumda Yayılan Manyetik Akı Çizgileri

Ansyz Maxwell programından elde edilen veriler ile Maxwell Stress Tensor'un gereksinimleri uygulanmış ve MATLAB ortamında grafikleri çizdirilmiştir. Aşağıda elde edilen grafiklerin görsellerine yer verilmiştir.

Aşağıdaki Şekil 4. 38 ve Şekil 4. 39' da 0 Amperde yapılan UMF analizi sonucunda elde edile grafiklerin görsellerine yer verilmiştir.

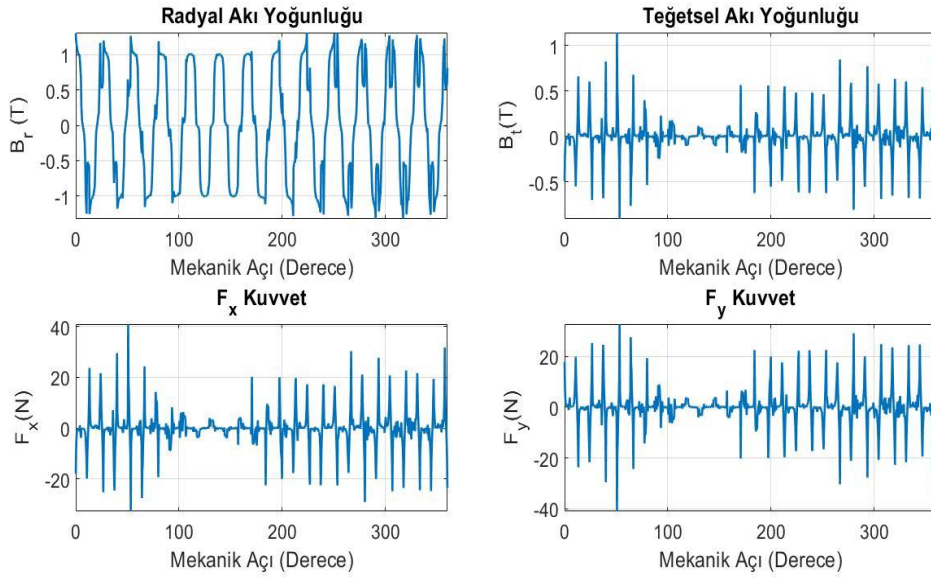


Şekil 4.38 26 Kutup için 0 Amperde Oluşan B_r , B_t , F_x , F_y Grafikleri

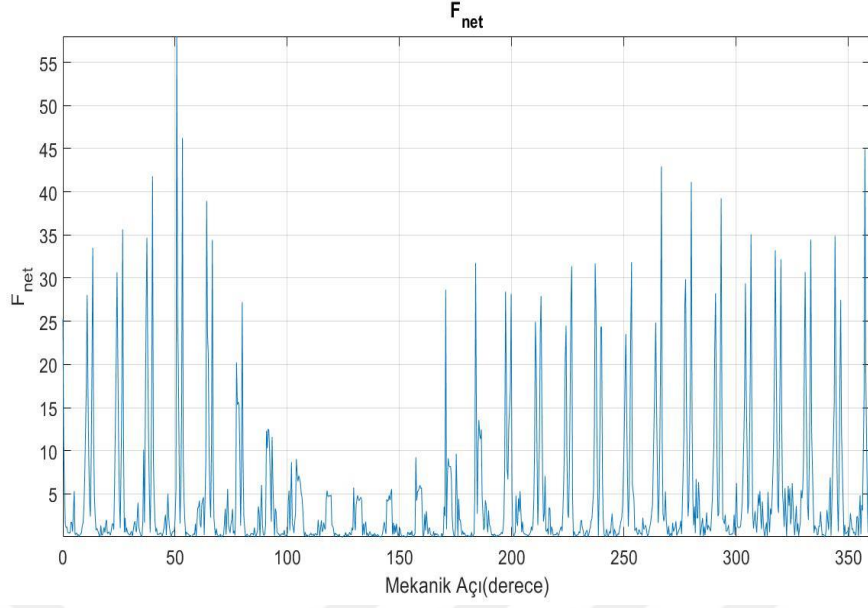


Şekil 4.39 26 Kutup için 0 Amperde Oluşan F_{net} Grafiği

Aşağıdaki Şekil 4. 40 ve Şekil 4. 41' de 1 Amperde yapılan UMF analizi sonucunda elde edile grafiklerin görsellerine yer verilmiştir.

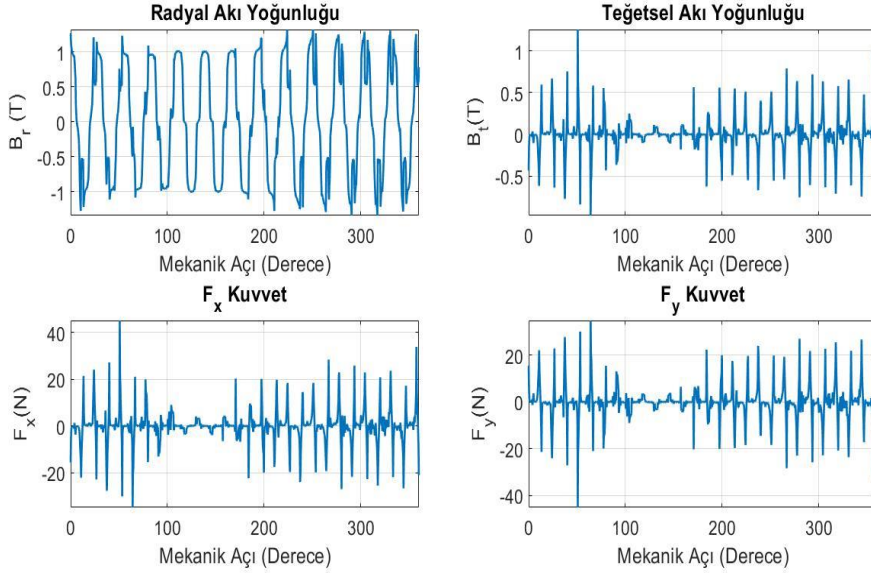


Şekil 4.40 26 Kutup için 1 Amperde Oluşan B_r , B_t , F_x , F_y Grafikleri

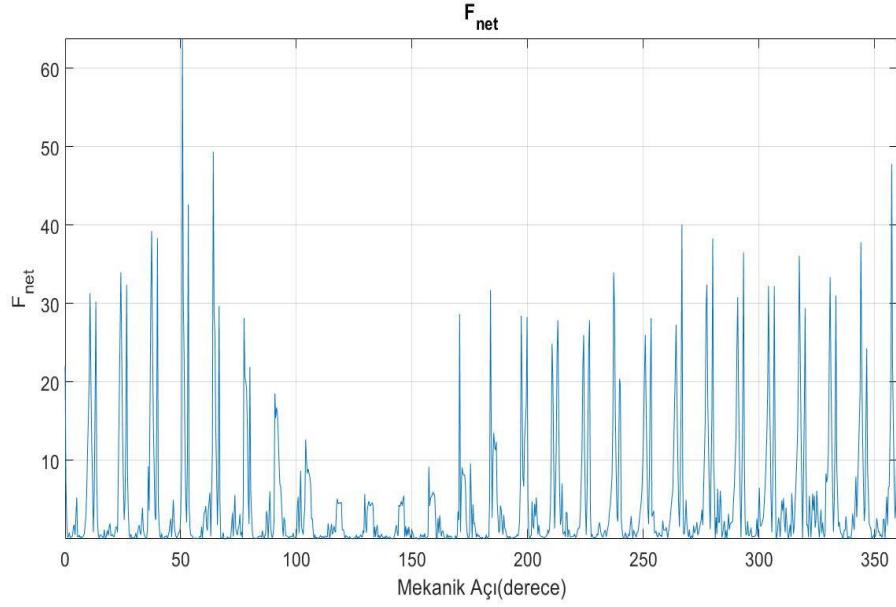


Şekil 4.41 26 Kutup için 1 Amperde Oluşan F_{net} Grafiği

Aşağıdaki Şekil 4. 42 ve Şekil 4. 43’ de 3 Amperde yapılan UMF analizi sonucunda elde edile grafiklerin görsellerine yer verilmiştir.

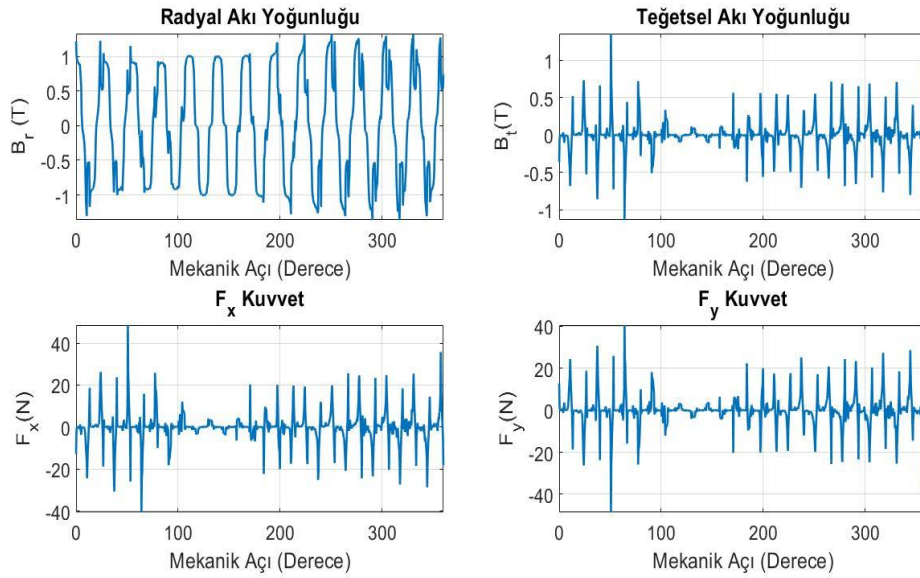


Şekil 4.42 26 Kutup için 3 Amperde Oluşan B_r , B_t , F_x , F_y Grafikleri

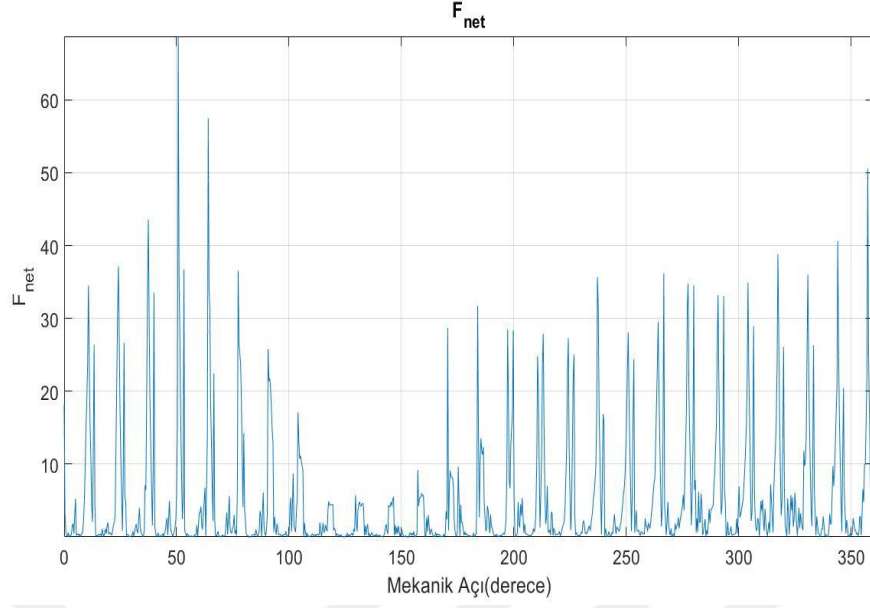


Şekil 4.43 26 Kutup için 3 Amperde Oluşan F_{net} Grafiği

Aşağıdaki Şekil 4. 44 ve Şekil 4. 45’ de 5 Amperde yapılan UMF analizi sonucunda elde edile grafiklerin görsellerine yer verilmiştir.

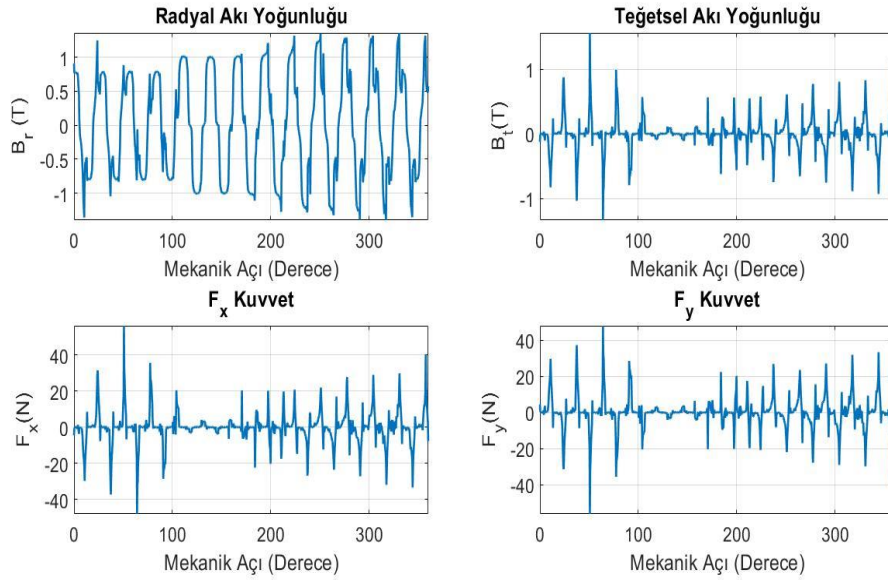


Şekil 4.44 26 Kutup için 5 Amperde Oluşan B_r , B_t , F_x , F_y Grafikleri

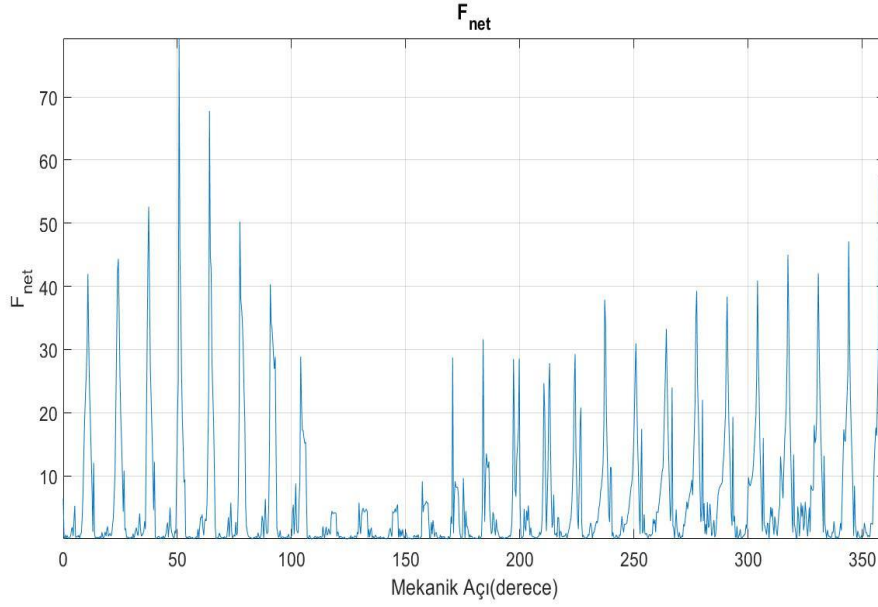


Şekil 4.45 26 Kutup için 5 Amperde Oluşan F_{net} Grafiği

Aşağıdaki Şekil 4. 46 ve Şekil 4. 47' de 10 Amperde yapılan UMF analizi sonucunda elde edile grafiklerin görsellerine yer verilmiştir.



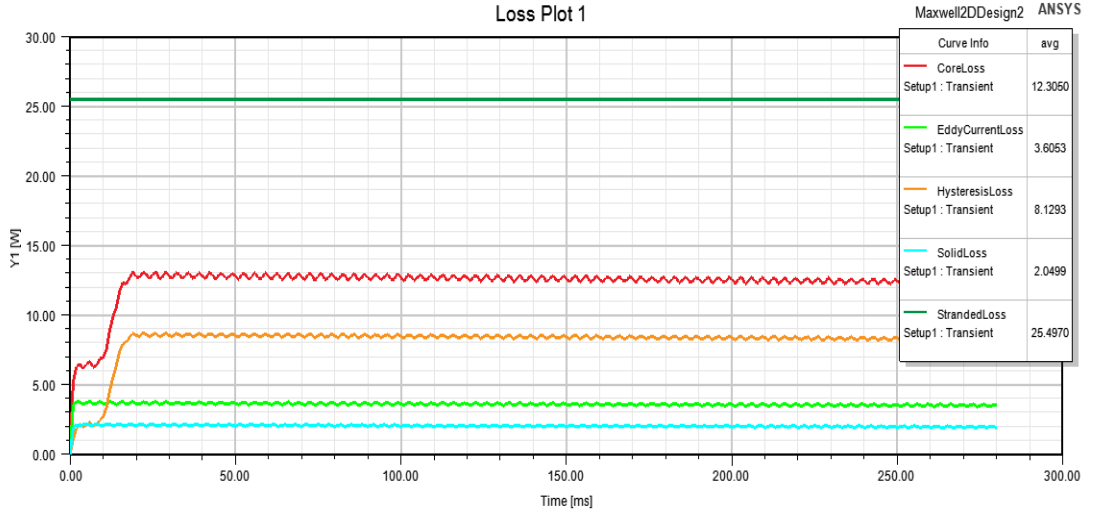
Şekil 4.46 26 Kutup için 10 Amperde Oluşan B_r , B_t , F_x , F_y Grafikleri



Şekil 4.47 26 Kutup için 10 Amperde F_{net} Grafikleri

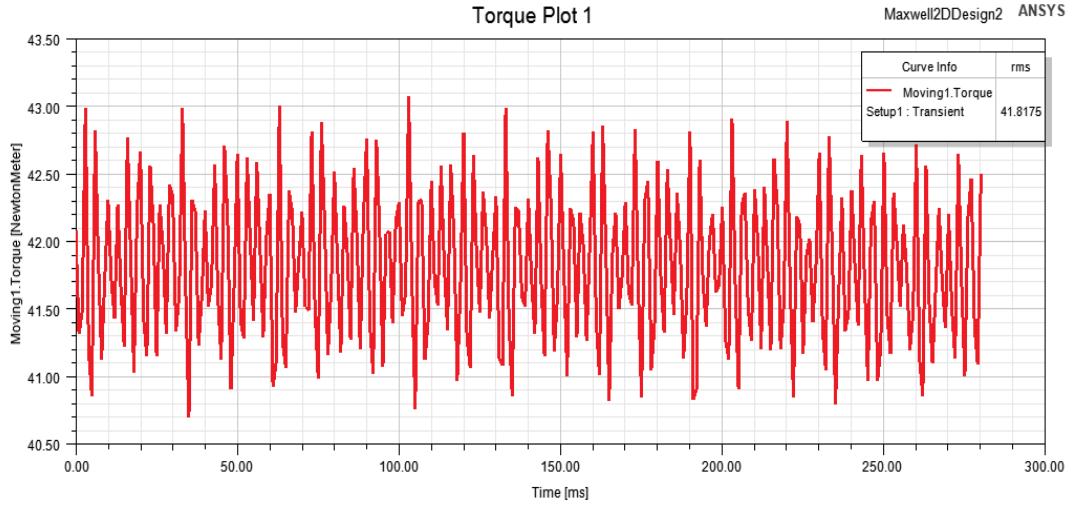
4.4. 28 Kutup/ 27 Oluk KMSM' nin Analiz Sonuçları

Tasarımı Ansys Maxwell Rmxprt düzleminde gerçekleştirilen 28 kutup/ 27 oluklu kalıcı mıknatıslı dahili rotorlu senkron motorun 2D düzleminde analizi gerçekleştirilmiştir. Motorun nominal akımı 3.02 A'dir. Sargılardan akan akımın akım yoğunluğu (J) 4.13 A/mm^2 olarak analiz edilmiştir. Maxwell 2D de yapılan analizde, nominal akım çalıştığında oluşan kayıplar ile ilgili grafik Şekil 4.45 de verilmiştir. Bakır kaybı, eddy akımı dolayısıyla oluşan kayıp, histerezis ve nüve kaybından dolayı oluşan kayıpların toplamı 51.58 W olarak analiz edilmiştir.

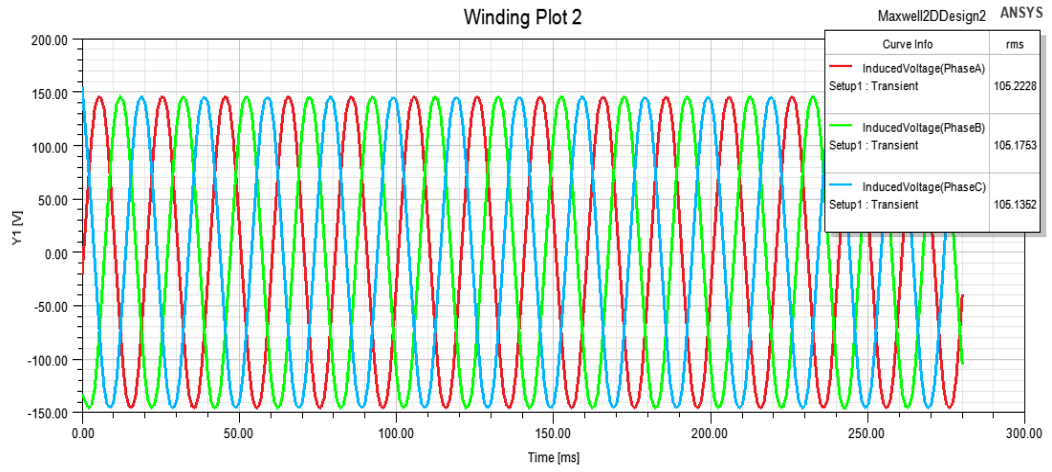


Şekil 4.48 28 Kutup için Nominal Akımda Oluşan Kayıplar

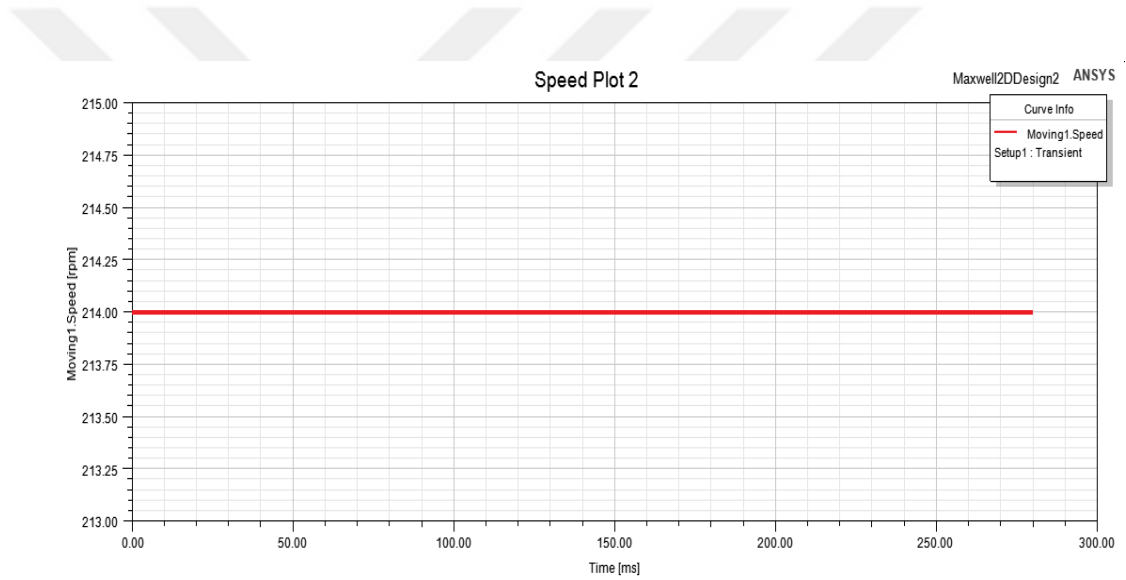
Nominal akımda oluşan tork grafiğine, sargılarda indüklenen gerilimin grafiklerine, 28 kutup 50 Hz frekansta oluşan hız grafiğine, motor üzerinde yayılan manyetik akı çizgileri ile ilgili görsellere yer verilmiştir.



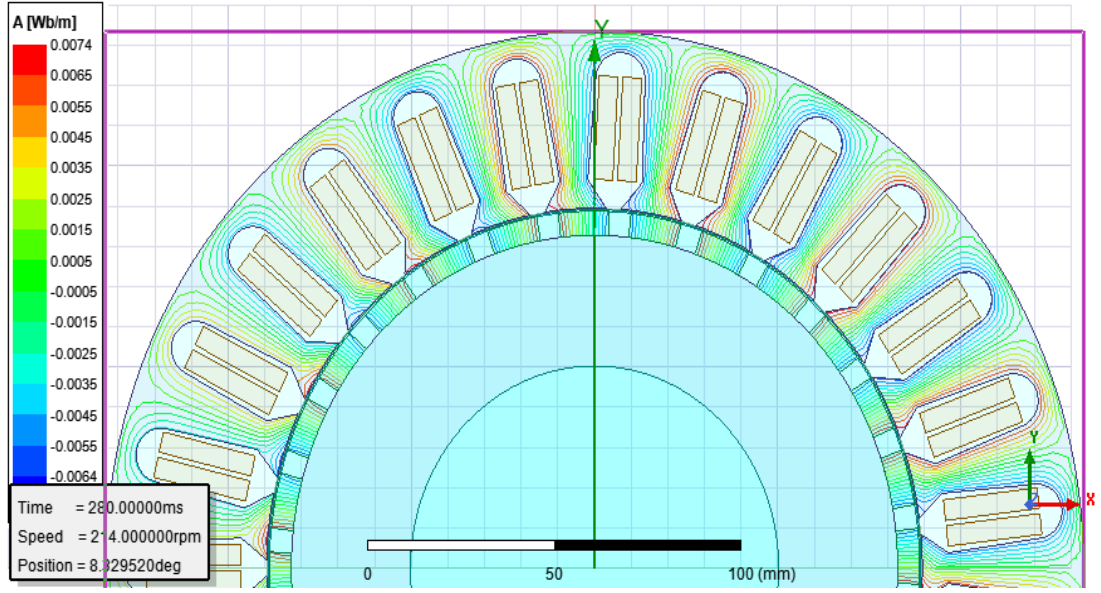
Şekil 4.49 28 Kutup için Nominal Akımda oluşan Moment Grafiği



Şekil 4.50 28 Kutup için Yüksüz Durumda Sargılarda Oluşan Gerilimlerin Grafiği



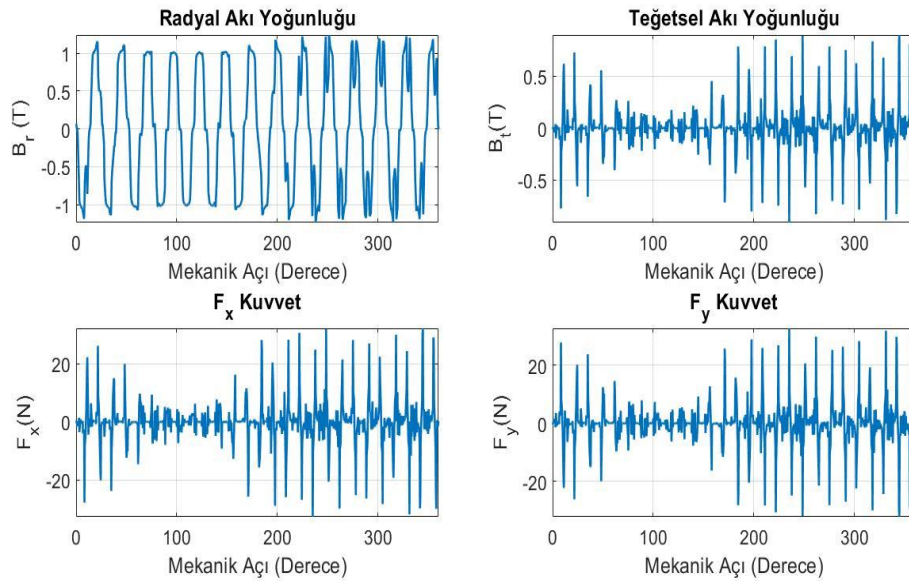
Şekil 4.51 28 Kutup için 50 Hz Frekansta Hız Grafiği



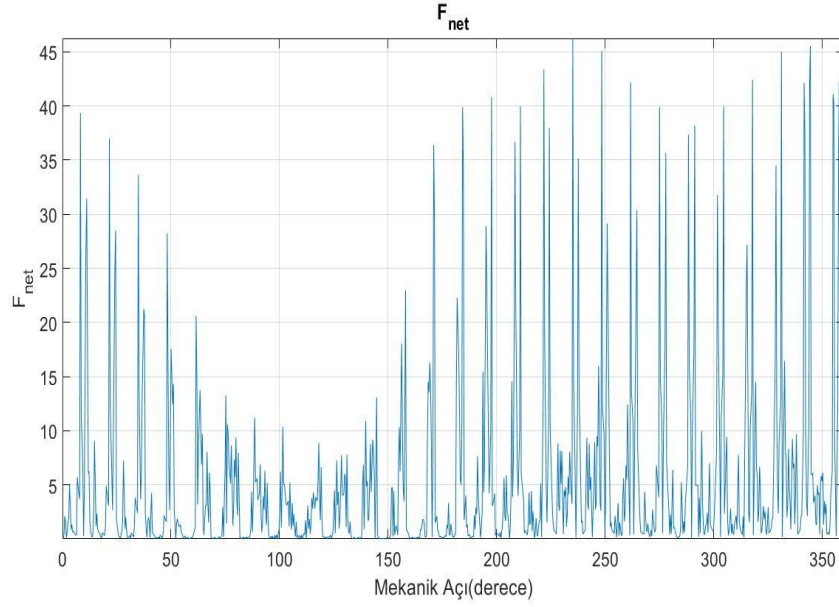
Şekil 4.52 28 Kutup için Yüksüz Durumda Yayılan Manyetik Akı Çizgileri

Ansys Maxwell programından elde edilen veriler ile Maxwell Stress Tensor'ün gereksinimleri uygulanmış ve MATLAB ortamında grafikleri çizdirilmiştir. Aşağıda elde edilen grafiklerin görsellerine yer verilmiştir.

Aşağıdaki Şekil 4. 53 ve Şekil 4. 54' de 0 Amperde yapılan UMF analizi sonucunda elde edile grafiklerin görsellerine yer verilmiştir.

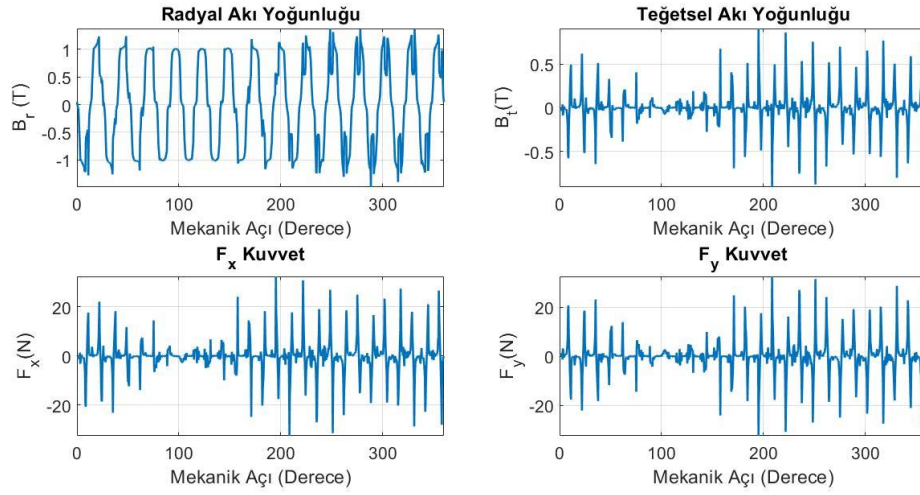


Şekil 4.53 28 Kutup için 0 Amperde Oluşan B_r , B_t , F_x , F_y Grafikleri

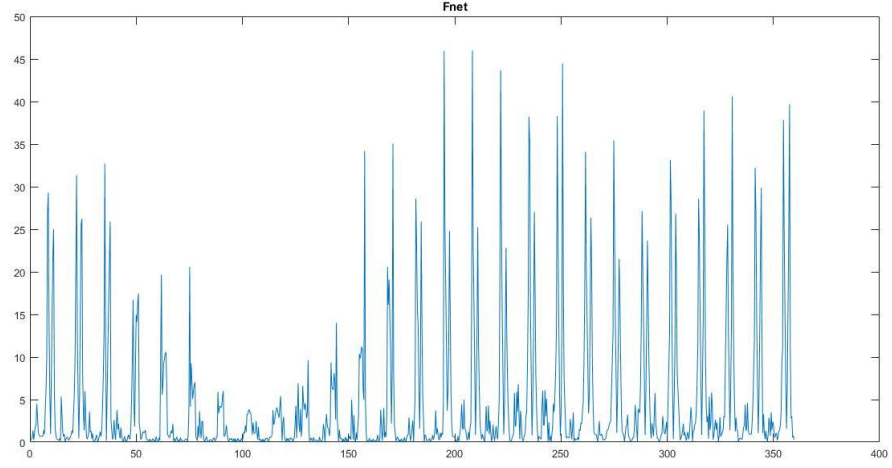


Şekil 4.54 28 Kutup için 0 Amperde Oluşan F_{net} Grafiği

Aşağıdaki Şekil 4. 55 ve Şekil 4. 56' da 0.96 Amperde yapılan UMF analizi sonucunda elde edile grafiklerin görsellerine yer verilmiştir.

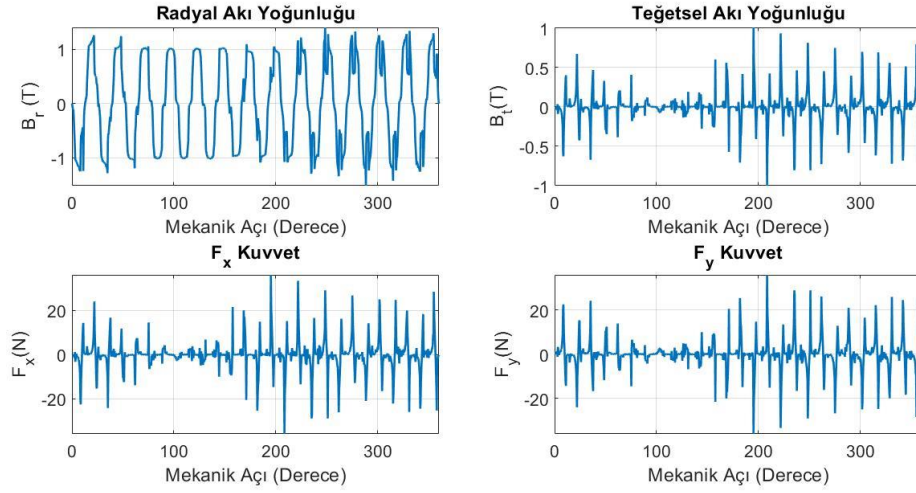


Şekil 4.55 28 Kutup için 0.96 Amperde Oluşan B_r , B_t , F_x , F_y Grafikleri

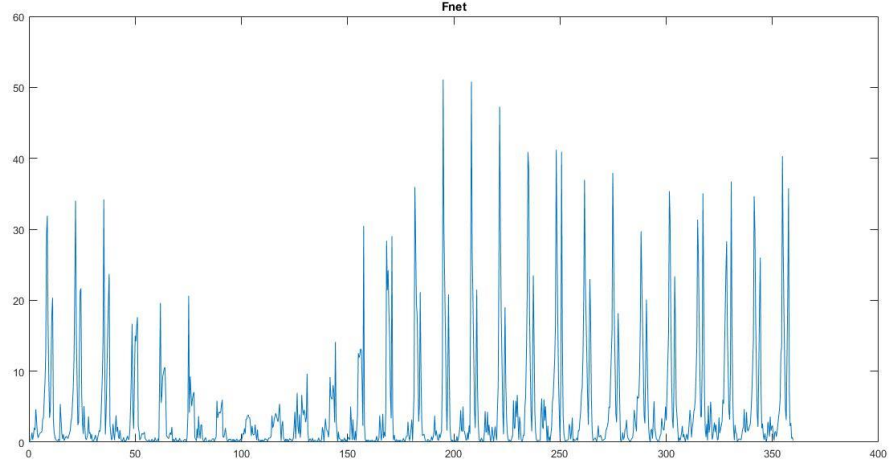


Şekil 4.56 28 Kutup için 0.96 Amperde Oluşan F_{net} Grafiği

Aşağıdaki Şekil 4.57 ve Şekil 4.57' de 2.88 Amperde yapılan UMF analizi sonucunda elde edile grafiklerin görsellerine yer verilmiştir.

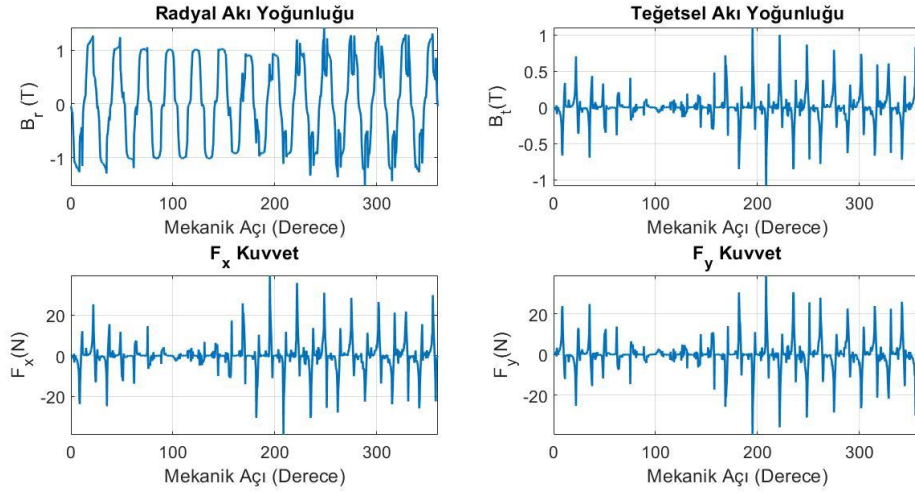


Şekil 4.57 28 Kutup için 2.88 Amperde Oluşan B_r , B_t , F_x , F_y Grafikleri

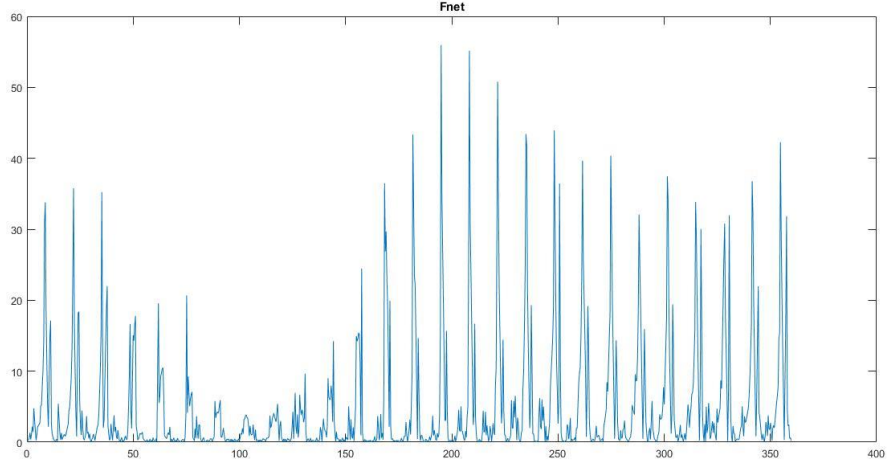


Şekil 4.58 28 Kutup için 2. 88 Amperde Oluşan F_{net} Grafikleri

Aşağıdaki Şekil 4. 59 ve Şekil 4. 60' de 4. 8 Amperde yapılan UMF analizi sonucunda elde edile grafiklerin görsellerine yer verilmiştir.

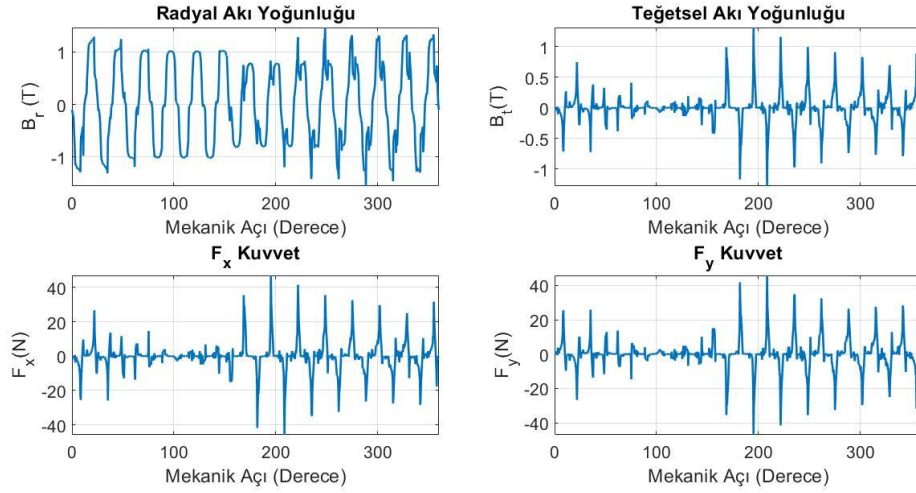


Şekil 4.59 28 Kutup için 4. 8 Amperde Oluşan B_r , B_t , F_x , F_y Grafikleri

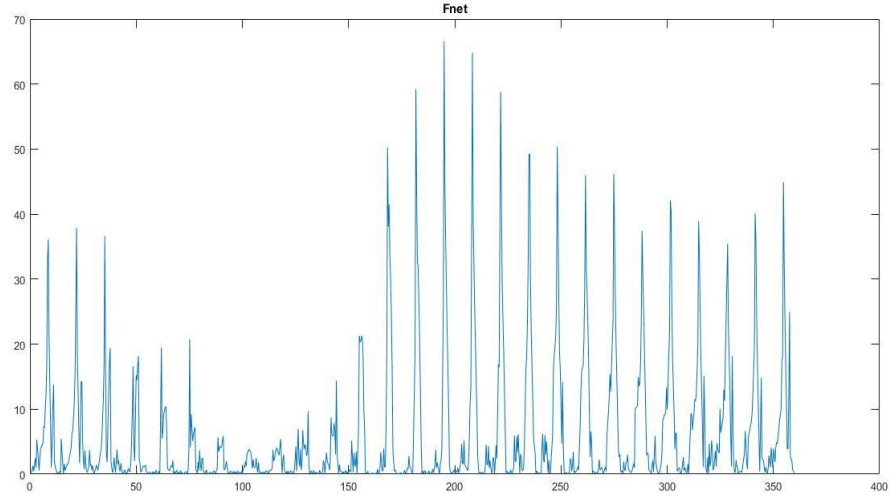


Şekil 4.60 28 Kutup için 4. 8 Amperde Oluşan F_{net} Grafiği

Aşağıdaki Şekil 4. 61 ve Şekil 4. 62’ de 9.59 Amperde yapılan UMF analizi sonucunda elde edile grafiklerin görsellerine yer verilmiştir.



Şekil 4.61 28 Kutup 9.59 Amperde Oluşan B_r , B_t , F_x , F_y Grafikleri

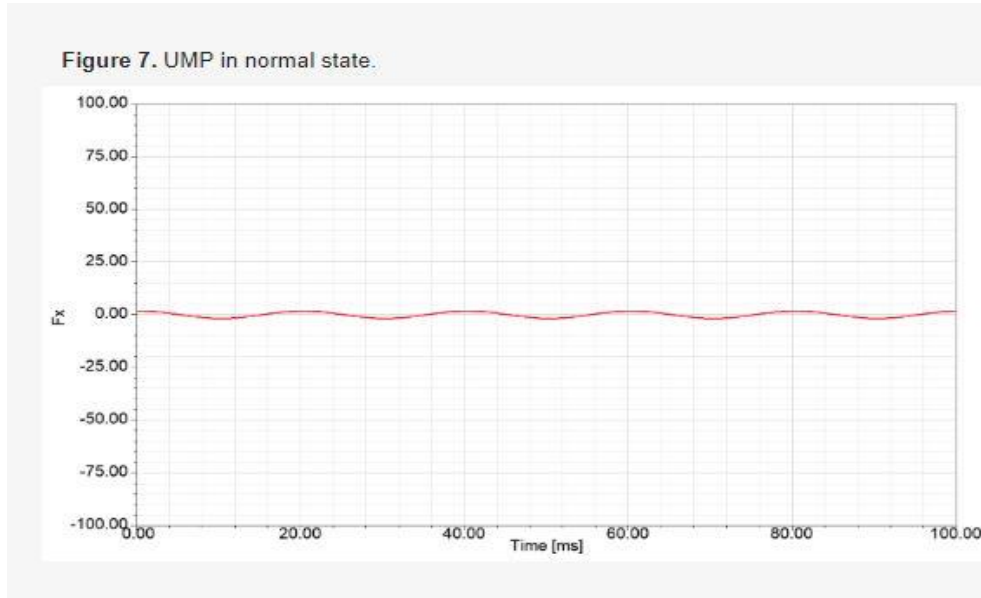


Şekil 4.62 28 Kutup için 9.59 Amperde F_{net} Grafiği

5. TASARLANAN MOTORLARIN ANALİZ SONUÇLARININ KİYASLANMASI

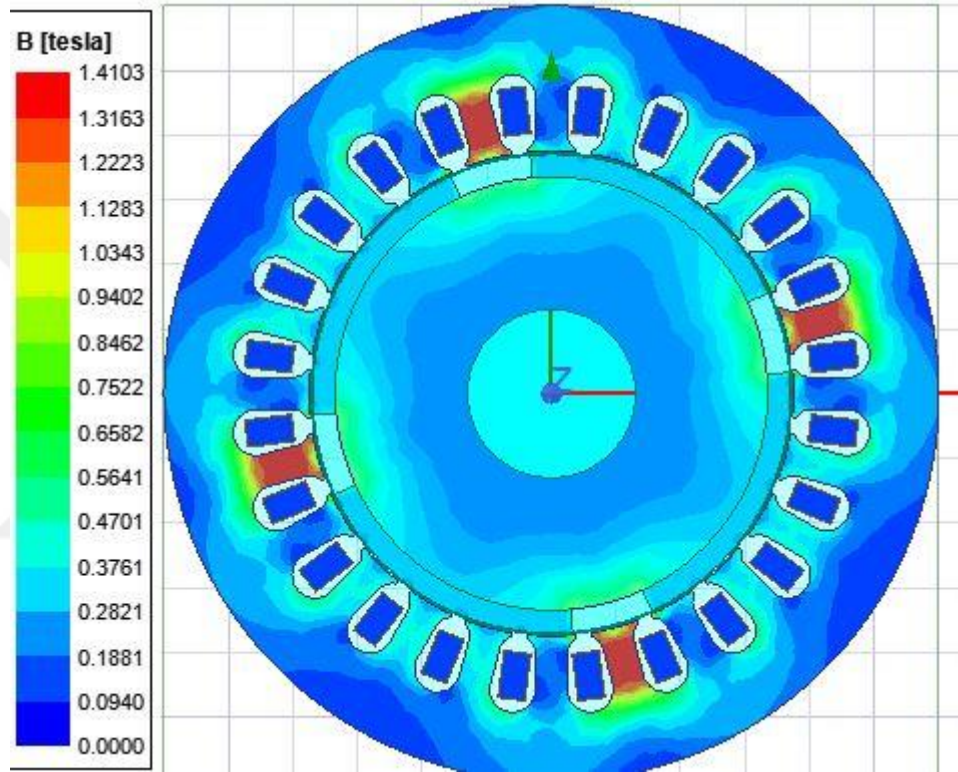
Bir önceki bölümde, Ansys Maxwell programında tasarlanan 4 farklı kutup oluk kombinasyonuna sahip motorların analiz sonuçları grafiksel olarak gösterilmiştir. Bu analizlerden biri olan manyetik akı yoğunluğu grafiklerinden radyal ve teğetsel manyetik akı yoğunluklarının verileri işlenmek üzere kaydedilmiştir. Bu kaydedilen veriler MATLAB programına aktarılarak, Maxwell Stress Tensor metodunda ifade edilen formüllere göre hesaplanmıştır. Hesaplanan kuvvet değerleri grafiksel olarak ifade edilmiştir.

Kesir sarımlı motor tasarımına sahip motorlarda dengesiz manyetik yükün oluştuğunu literatür taramalarındaki çalışmalarında görülmüştür. Aynı zamanda kutup/ oluk oranı bir tam sayı olduğunda ise dengesiz kuvvetin sıfıra yakınsadığını literatür taramasında tespit edilmiştir. Buna göre Rui Zhu ve Ark. 4 kutup/ 24 oluk kombinasyonlu kalıcı mıknatıslı senkron motor üzerinde dengesiz manyetik yük analizini gerçekleştirmişlerdir. [27]' de stator ile rotor arasında yer alan hava aralığında manyetik akı dağılımı simetrik olduğunda dengesiz manyetik yük dağılımının sıfıra yakın olduğunu ifade edilmiştir. Şekil 5. 1 de bu durumu ifade eden analiz grafiğine yer verilmiştir.

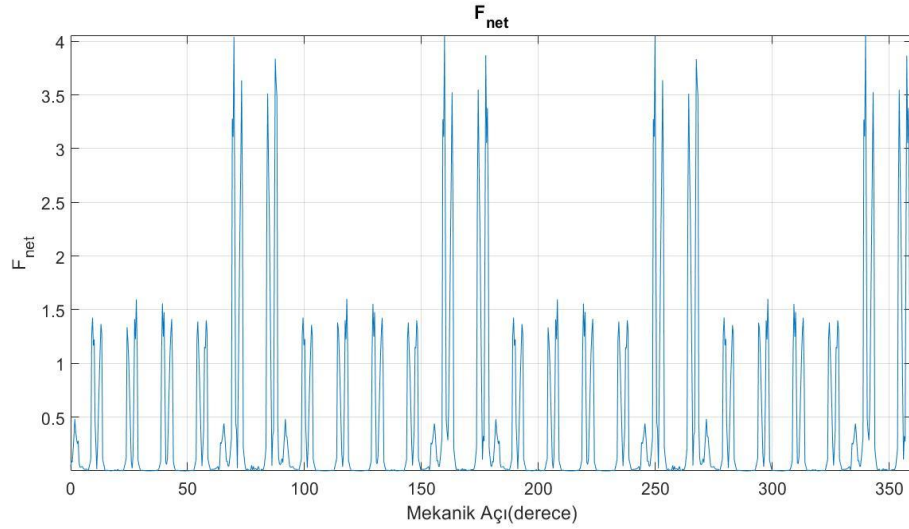


Şekil 5.1 Akı Dağılımı Simetrik Olan Motorun X Eksenindeki Kuvvet Analizi

Dahili rotorlu kalıcı mıknatıslı senkron motorların kesir sarımlı olması durumunda oluşan asimetrik manyetik akı dağılımı ile görseller ve net kuvvet analizleri, 4. Bölümde tasarlanan motorlar ile ilgili kısımda yer verilmiştir. Buna göre bir kıyaslama yapabilmek amacıyla bu tez çalışması için 4 kutuplu 24 oluklu dahili rotorlu kalıcı mıknatıslı senkron motor tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarımı yapılan bu motor analiz edildiğinde manyetik akı dağılımının simetrik olduğu ve net kuvvet değerinin sıfıra yakınsadığı görülmüştür.



Şekil 5.2 Manyetik Akı Dağılımı



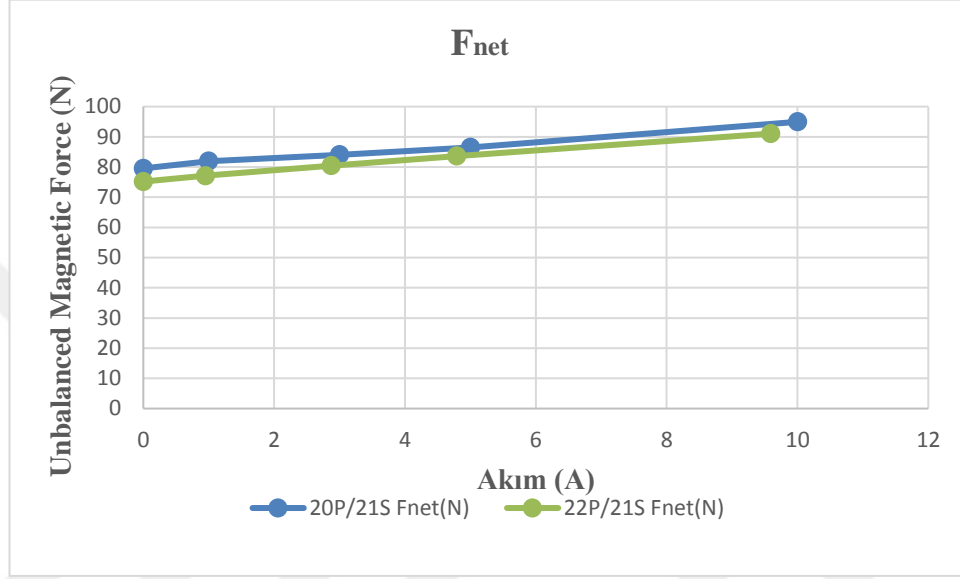
Şekil 5.3 F_{net} Analizi

5.1. Tasarlanan Motorların Kuvvet Analizlerinin Karşılaştırılması

Bu bölümde kesir sarımlı motorların dengesiz manyetik yükünü kıyaslayabilmek için 4. Bölümde yer alan 4 farklı motorun farklı akım değerlerinde elde edilen manyetik akı yoğunlukları ve radyal ve teğetsel kuvvetlerin analiz grafiklerinden elde edilen verilerden faydalanılmıştır.

[3] ve [7] de yapılan çalışmalar, kutup oluk kombinasyonunun dengesiz manyetik kuvvet üzerine etkisi üzerinedir. Bu çalışmalara göre, aynı oluk sayısına sahip dahili rotorlu kalıcı mıknatıslı senkron motorlarda çift kutup sayısı oluk sayısından 1 eksik ($2p=3k-1$) ise dengesiz manyetik kuvvetin oluk sayısından bir fazla ($2p=3k+1$) olan motora göre daha fazla değerlerde dengesiz manyetik kuvvete sahip olduğu gözlemlenmiş ve yapılan deneyler ile bu tespit doğrulanmıştır. Fakat harici rotorlu kalıcı mıknatıslı senkron motorlarda tam tersi bir durum tespit edilmiştir. Buna göre aynı oluk sayısına sahip harici rotorlu kalıcı mıknatıslı senkron motorlarda çift kutup sayısı oluk sayısından 1 eksik ($2p=3k-1$) ise dengesiz manyetik kuvvetin oluk sayısından bir fazla ($2p=3k+1$) olan motora göre daha düşük değerlerde dengesiz manyetik kuvvete sahip olduğu gözlenmiştir.

Bu doğrultuda bu tez çalışması için tasarlanan 20 kutup/ 21 oluk ve 22 kutup/ 21 oluk kombinasyonlarına sahip dahili rotorlu kalıcı mıknatıslı senkron motorların dengesiz manyetik yükleri kıyaslandığında [3] ve [7]'de yapılan çalışmaların sonuçlarıyla paralel sonuçlar elde edilmiştir. 20 kutuplu motorun 22 kutuplu dahili rotorlu motora kıyasla daha yüksek bir dengesiz manyetik kuvvete sahip olduğu Şekil 5. 2 de gösterilen grafikte görülmektedir.



Şekil 5.4 21 Oluklu Dâhili Rotorlu KMSM' nin UMF Grafiği

Makineler arasında sağlıklı kıyaslama yapılabilmesi için elektriksel yüklemeleri aynı olmalıdır. Makine verimi açısından bir oluktaki sargı sayısı (CPS) sabit tutularak akım değerleri (I) farklı girilmiştir. Tasarımı gerçekleştirilen 20 Kutup/ 21 Oluk ve 22 Kutup/ 21 Oluk kombinasyonlarına sahip makinelerin yük akımları, moment değerleri ve tur sayısına bağlı (N) N. I değerleri aşağıda belirtilen Çizelge 5. 1 ve Çizelge 5. 2' de belirtilmiştir. Elektriksel yükleme kıyaslamasında 20 kutuplu makinenin sargısı ve sargı akımı sabit tutularak UMF analizi gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 5.1 20 Kutup Makinenin Elektrik Yükleme Parametreleri

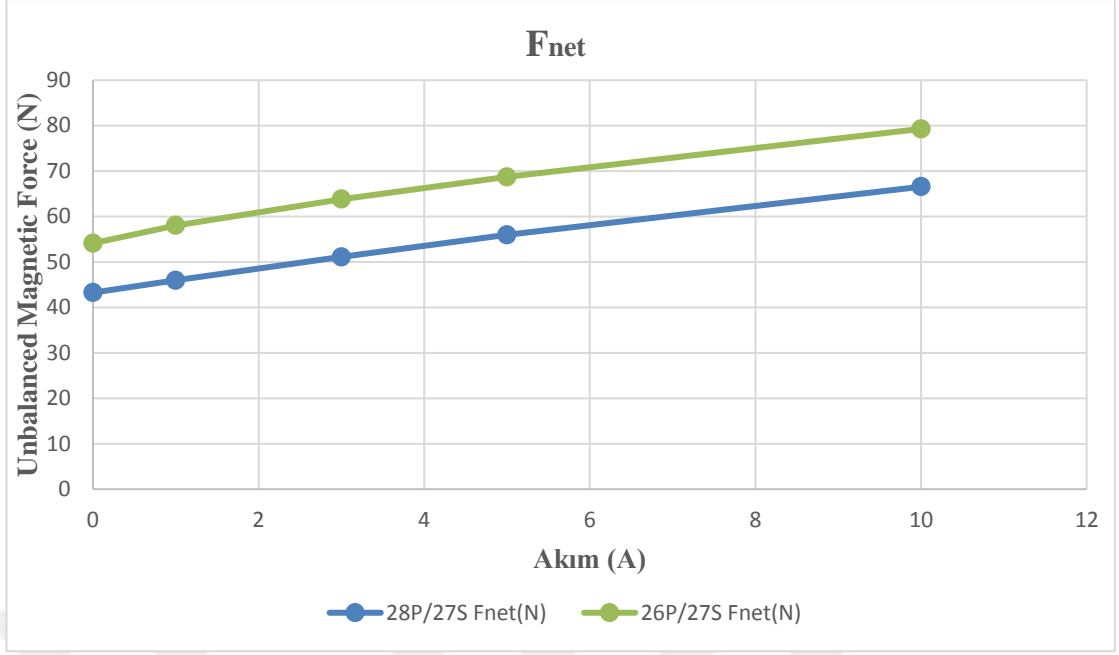
| 20P/ 21S | | | |
|----------|-----|------|---------------|
| Akım (A) | CPS | N.I | Moment (N. m) |
| 0 | 186 | 0 | 0 |
| 1 | 186 | 186 | 11.06 |
| 3 | 186 | 558 | 32.78 |
| 5 | 186 | 930 | 53.71 |
| 10 | 186 | 1860 | 99.96 |

Çizelge 5. 2' de elektriksel yükleme kıyaslamasında 22 kutuplu makinenin sargısı sabit tutulmuş akım değerleri değiştirilerek UMF analizi yapılmıştır.

Çizelge 5.2 22 Kutup Makinenin Elektrik Yükleme Parametreleri

| 22P/ 21S | | | |
|----------|-----|------|--------------|
| Akım (A) | CPS | N.I | Moment (N.m) |
| 0 | 196 | 0 | 0 |
| 0.95 | 196 | 186 | 11.23 |
| 2.85 | 196 | 558 | 33.20 |
| 4.74 | 196 | 930 | 54.91 |
| 9.49 | 196 | 1860 | 106.04 |

Yine aynı şekilde, 26 kutup/ 27 oluk ve 28 kutup/ 27 oluk kombinasyonlarına sahip dahili rotorlu kalıcı mıknatıslı senkron motorların dengesiz manyetik yükleri kıyaslandığında [3] ve [7]'de yapılan çalışmaların sonuçlarıyla paralel sonuçlar elde edilmiştir. 26 kutuplu dahili rotorlu senkron motorun 28 kutuplu dahili rotorlu senkron motora kıyasla daha yüksek bir dengesiz manyetik kuvvete sahip olduğu Şekil 5. 3'te belirtilen grafikte görülmektedir.



Şekil 5.5 27 Oluklu Dâhili KMSM' nin UMF Grafiği

UMF hesaplaması yapılırken 26 kutuplu makinenin sargısı ve sargı akımı sabit tutularak analiz çalışması gerçekleştirilmiştir. Çizelge 5. 3' te ise elektriksel yüklemeye bağlı parametrelere yer verilmiştir.

Çizelge 5.3 26 Kutup Makinenin Elektriksel Yükleme Parametreleri

| 26P/ 27S | | | |
|----------|-----|------|--------------|
| Akım (A) | CPS | N.I | Moment (N.m) |
| 0 | 188 | 0 | 0 |
| 1 | 188 | 188 | 13.25 |
| 3 | 188 | 564 | 39.38 |
| 5 | 188 | 940 | 64.54 |
| 10 | 188 | 1880 | 119.63 |

28 kutuplu makinenin UMF hesaplaması yapılırken Çizelge 5. 4' te yer alan parametreler doğrultusunda analiz çalışması yapılmıştır.

Çizelge 5.4 26 Kutup Makinenin Elektriksel Yükleme Parametreleri

| 28P/ 27S | | | |
|----------|-----|------|--------------|
| Akım (A) | CPS | N.I | Moment (N.m) |
| 0 | 196 | 0 | 0 |
| 0.96 | 196 | 188 | 13.53 |
| 2.88 | 196 | 564 | 40.33 |
| 4.80 | 196 | 940 | 65.79 |
| 9.59 | 196 | 1880 | 120.12 |

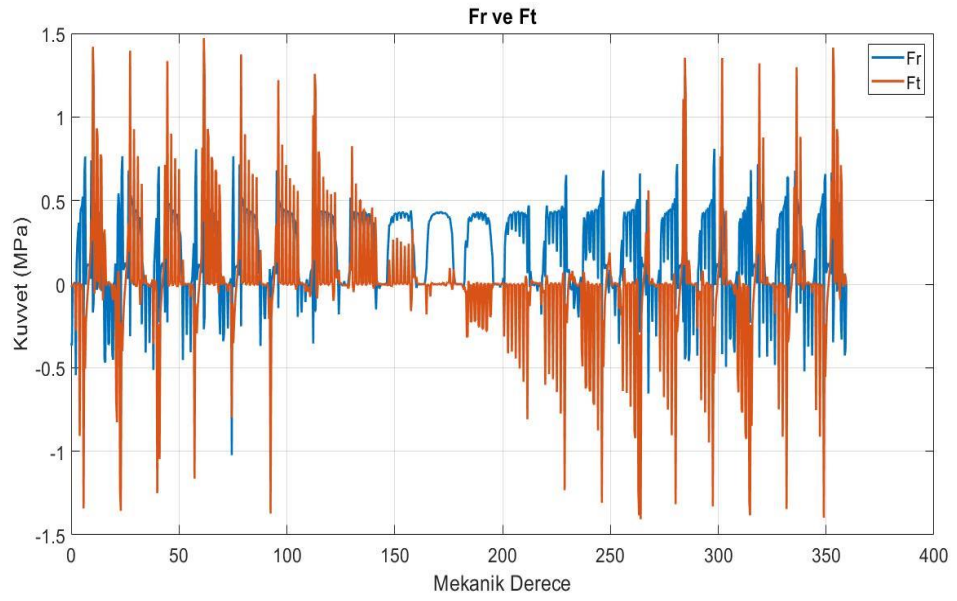
5.2. Tasarlanan Motorların FFT Analizi

Bir önceki bölümde farklı fraksiyonel sargılara sahip dahili rotorlu kalıcı mıknatıslı senkron motorların kuvvet analizleri ile ilgili bir karşılaştırma yapılmıştır. Bu karşılaştırmaya göre, bu tez kapsamında tasarımı gerçekleştirilen kalıcı mıknatıslı senkron motorların oluk sayıları sabit tutularak oluk sayısına göre kutup sayıları bir fazla olanların bir eksik olanlara göre daha düşük değerlerde UMF değerine sahip olduğu tespit edilmiş ve literatürde yapılan UMF çalışmaları ile örtüşen sonuçlar elde edilmiştir.

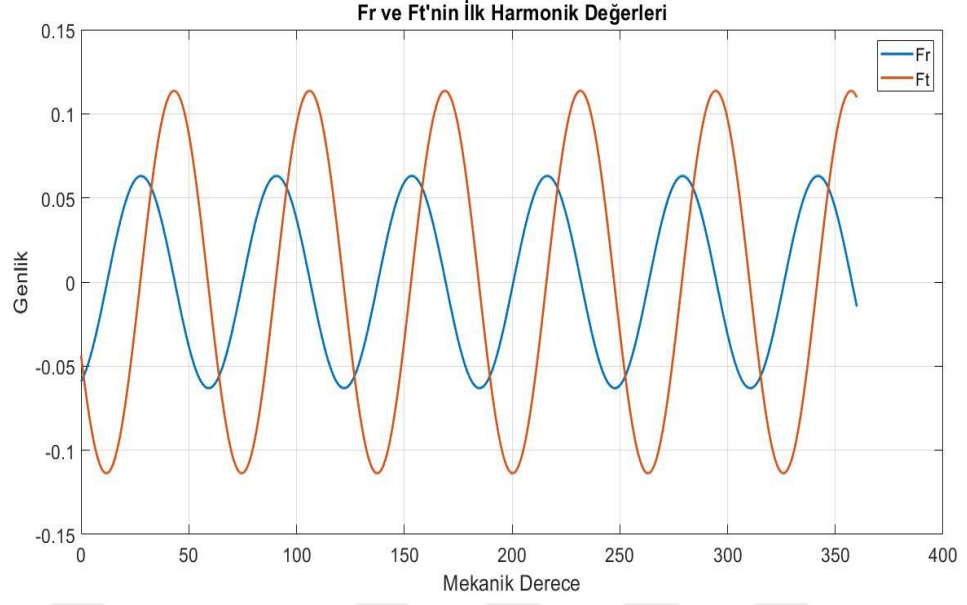
Daha önceki bölümlerde net dengesiz manyetik yükün hesaplanmasında Maxwell Stress Tensor'un kullanıldığı ifade edilmişti. Bu metoda göre net dengesiz kuvvetin silindirik koordinat sistemindeki kuvvet karşılıkları radyal ve teğetsel kuvvetler olduğu ifade edilmektedir. Radyal ve teğetsel kuvvet bileşenlerinin dengesiz manyetik yük analizinde incelenmesi gereken önemli parametreler olduğu literatür çalışmalarında tespit edilmiştir. Bu çalışmalarda radyal ve teğetsel kuvvetlerin FFT analizi gerçekleştirildiğinde birinci harmonik distorsiyonun dengesiz manyetik yükün analizinde incelenmesi gereken kuvvet bileşenleri olduğu ifade edilmiştir. Radyal ve teğetsel kuvvet bileşenlerinin dengesiz manyetik yüke olan etkisini incelemek için FFT analizlerinin incelenmesi gerekmektedir. Buna göre bu konu ile ilgili makaleler incelendiğinde radyal ve teğetsel kuvvetlerin titreşim ve akustik gürültüye doğrudan katkı sağladığı tespit edilmiştir [7-28].

Bu tez kapsamında tasarımı yapılan makinelerin hava aralığına çizilen kapalı kontur üzerine düşen radyal ve teğetsel kuvvetlerin ve birincil harmoniklerinin

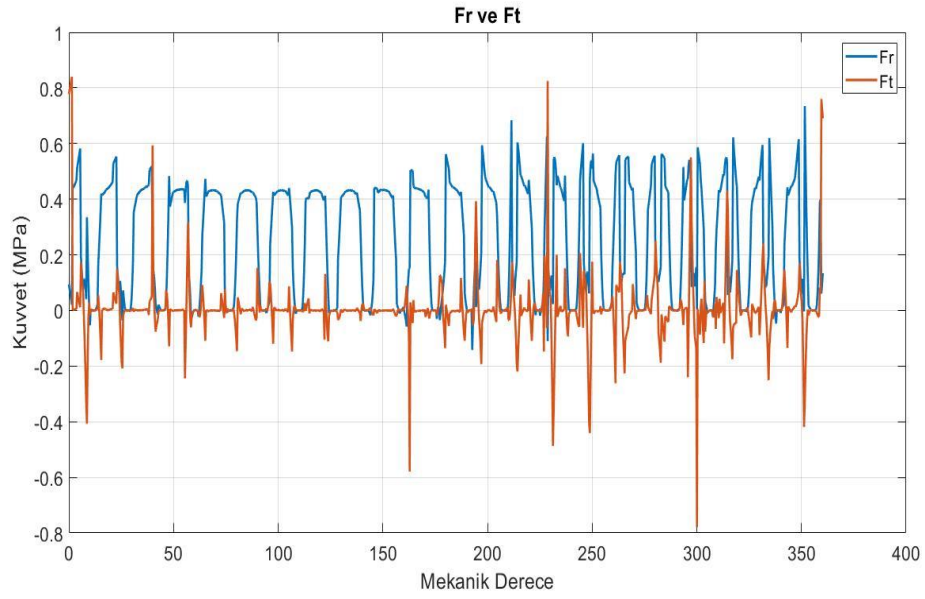
grafikleri oluşturulmuştur. Birincil harmonik grafikleri incelendiğinde 20 Kutup/21 Oluk konfigürasyonunda radyal ve teğetsel kuvvetlerin birbiri ile aynı yönde ve dengesiz manyetik kuvvet dağılımını arttırıcı etkide bulunduğu, 22 Kutup/21 Oluk konfigürasyonunda radyal ve teğetsel kuvvetlerin birbirine tersi yönde ve dengesiz manyetik kuvvet dağılımını azaltıcı etkide bulunduğu görülmüştür. Bu konfigürasyonlara ait radyal-teğetsel kuvvet dağılımı ve birincil harmonik bozulma grafikleri Şekil 5.7 – 5.9’ da gösterilmiştir.



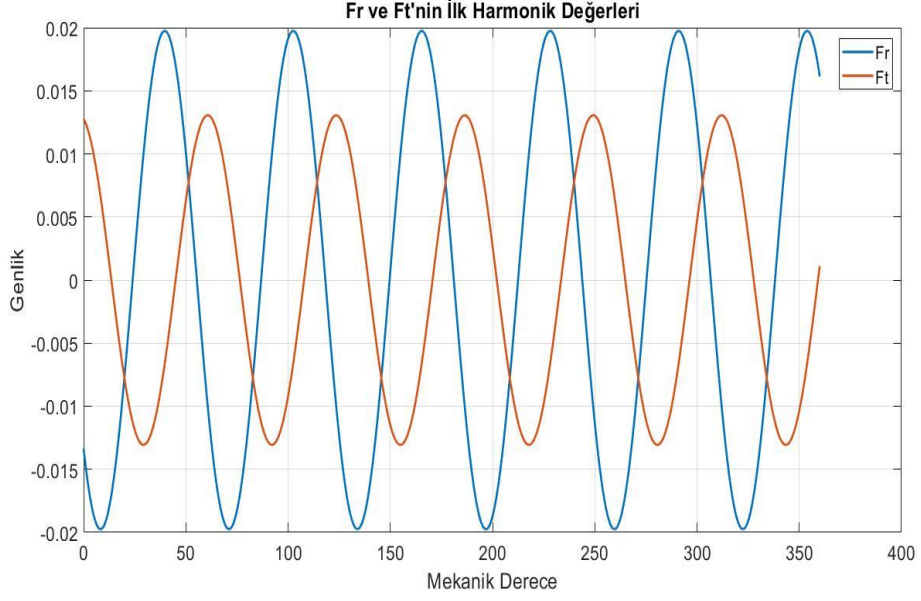
Şekil 5.6 20 Kutup/ 21 Oluk için Radyal ve Teğetsel Kuvvet Grafiği



Şekil 5.7 20 Kutup/ 21 Oluk Birinci Harmonik Distorsiyon Bileşenleri

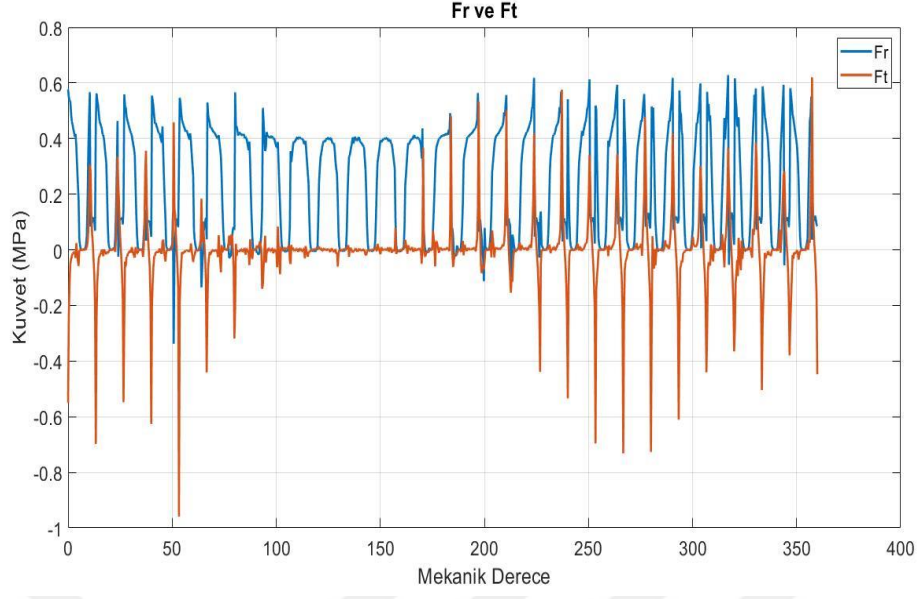


Şekil 5.8 22 Kutup/ 21 Oluk için Radyal ve Teğetsel Kuvvet Grafiği

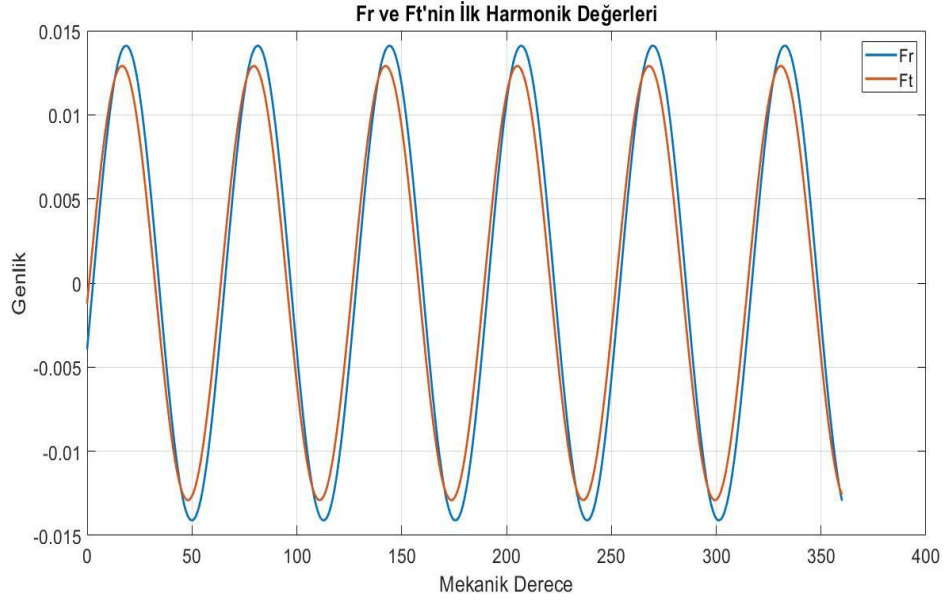


Şekil 5.9 22 Kutup/ 21 Oluk için birinci harmonik distorsiyon bileşenleri

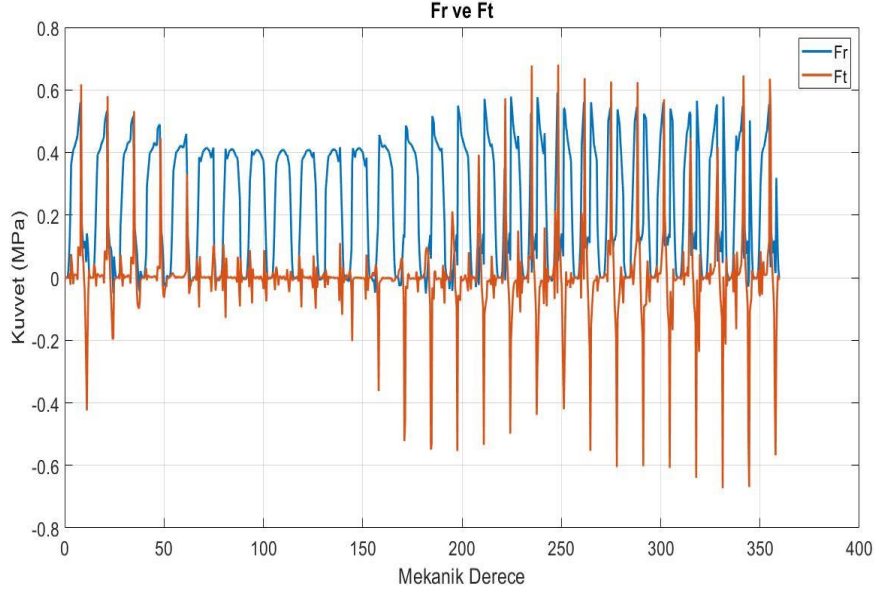
26 Kutup/27 Oluk konfigürasyonunda radyal ve teğetsel kuvvetlerin birbiri ile aynı yönde ve dengesiz manyetik kuvvet dağılımını arttırıcı etkide bulunduğu, 28 Kutup/27 Oluk konfigürasyonunda radyal ve teğetsel kuvvetlerin birbirine tersi yönde ve dengesiz manyetik kuvvet dağılımını azaltıcı etkide bulunduğu görülmüştür. Bu konfigürasyonlara ait radyal-teğetsel kuvvet dağılımı ve birincil harmonik bozulma grafikleri Şekil 5.11 – 5.13'te verilmiştir.



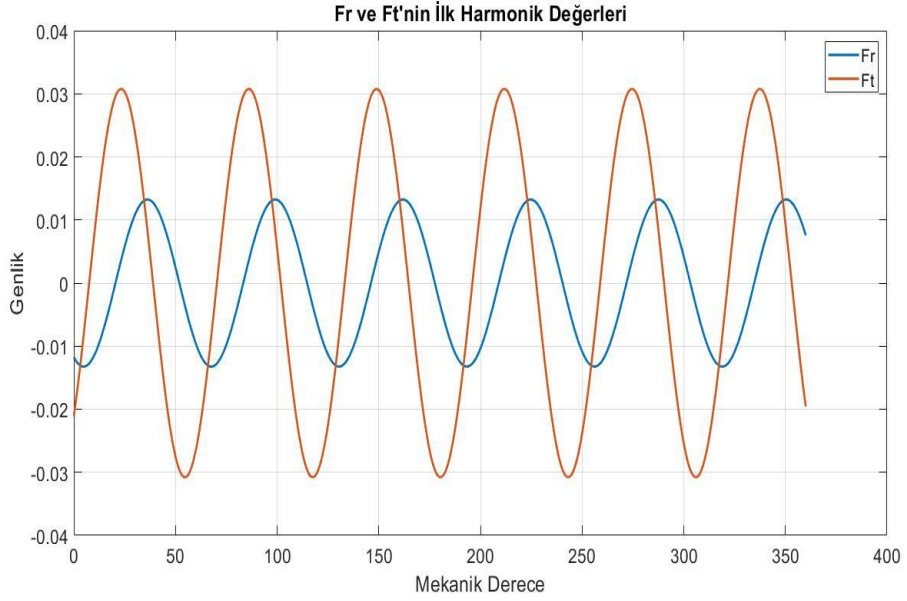
Şekil 5.10 26 Kutup/ 27 Oluk için Radyal ve Teğetsel Kuvvet Grafiği



Şekil 5.11 26 Kutup/ 27 Oluk için Birinci Harmonik Distorsiyon Bileşenleri



Şekil 5.12 28 Kutup/ 27 Oluk için Radyal ve Teğetsel Kuvvet Grafiği



Şekil 5.13 28 Kutup/ 27 Oluk için Birinci Harmonik Distorsiyon Bileşenleri

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Kalıcı mıknatıslı senkron makineler, rotor kısmında sargı bulundurmadığı için daha az bakır kaybı ve daha az hacim kapladığı için verimi ve hacimsel güç yoğunluğu daha yüksektir. Bu özelliklerinden dolayı elektrikli makine uygulamalarında kalıcı mıknatıslı senkron makineler yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu tür motorların rotorunda sabit mıknatıslar bulunduğu için vuruş momenti oluşmaktadır. Bu sorunun üstesinden gelmek için makine tasarımı aşamasında kesirli kutup-oluk kombinasyonları tercih edilmektedir. Ancak kesirli sargılı makinelerde manyetik akının hava boşluğunda simetrik olarak dağılmamasından dolayı dengesiz manyetik kuvvet oluşmaktadır. Bu dengesiz kuvvet oluşumu makinede mekanik titreşime, akustik gürültüye ve makine şaftında zayıflamaya sebep olmaktadır.

Dengesiz manyetik kuvvet, silindirik koordinat sisteminde incelenmektedir. Bu koordinat sistemine göre hava boşluğunda çizilen kapalı bir kontur üzerine etki eden iki farklı kuvvet mevcuttur. Bu kuvvetler radyal ve teğetsel kuvvetlerdir. 360 derecelik bir mekanik turda hava aralığına çizilen bu kontur üzerinde simetrik manyetik akı dağılımında net kuvvetin sıfır veya sıfıra yakın olduğu görülmektedir. Fakat kesirli sargılı makinelerde manyetik akı dağılımı simetrik olmadığından net kuvvet sıfırdan farklıdır. Bu çalışmada farklı kesirli sargılı kalıcı mıknatıslı senkron makineler tasarlanarak bu makineler üzerinde oluşan dengesiz manyetik kuvvetler incelenmiştir.

Tasarımı gerçekleştirilen dâhili rotorlu kesirli sargılı makinelerin kuvvet analizleri sonucunda elde edilen veriler doğrultusunda net dengesiz manyetik kuvvetler hesaplanmış ve harmonik bozulma analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler sonucunda kutup sayısı oluk sayısından bir fazla olan makinelerde kutup sayısı oluk sayısından bir eksik olan makinelere kıyasla daha düşük dengesiz kuvvet oluşumu gözlemlenmiştir. Bunun sebebi ise dengesiz kuvveti oluşturan radyal ve teğetsel kuvvetlerin birinci harmonik değerlerinin; kutup sayısı oluk sayısından bir fazla olan makinelerde radyal ve teğetsel kuvvet farklı yönde olduğu için dengesiz manyetik kuvveti azaltıcı yönde, kutup sayısı oluk sayısından bir eksik olan makinelerde radyal ve teğetsel kuvvet aynı yönde olduğu için dengesiz manyetik kuvveti arttırıcı yönde etki etmesidir.

Sonuç olarak, dengesiz manyetik kuvvetle ilgili bundan sonra yapılacak olan çalışmalar çeşitli Şekilde gerçekleştirilebilir. Örneğin; tasarlanan makineler prototiplenerek mekanik titreşim ve akustik gürültüleri llerek elde edilen analiz sonuçları ile karşılaştırılarak doğrulanabilir veya daha yüksek nominal güce sahip makineler üzerinde dengesiz kuvvet analizleri yapılarak çeşitli karşılaştırmalar yapılabilir ve böylece yapılan bu çalışmalar sonucunda bir makine tasarım aşamasında kuvvet analizi gerçekleştirerek daha stabil ve sağlıklı bir makine tasarım çalışma gerçekleştirilebilir.



KAYNAKÇA

- [1]- Dosiek L. Cogging Torque Reduction in Permanent Magnet Machines. IEEE Transactions On Industry Applications, Vol. 43, No. 6, November/December, 2007.
- [2]- Aydın, M. Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Elektrik Motorlarında Vuruntu Moment Minimizasyonu. Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli.
- [3]- L. J. Wu, Z. Q. Zhu, Fellow, Difference in Unbalanced Magnetic Force of Fractional-Slot PM Machines between Internal and External Rotor Topologies. Royal Academy of Engineering, Cee Transactions On Electrical Machines And Systems, Vol. 1, N0. 2, June 201
- [4]- Mamur, H. Maksimum Güçlü, Minimum Kayk Momentli ve Harici Rotorlu Kalıcı Mıknatıslı Senkron Jeneratör Tasarımı, Optimizasyonu ve Deneysel Doğrulaması. Tübitak, Manisa, Ekim-2016.
- [5]- Naik S. , Bag B. , Chandrasekaran K. Performance Analysis of Low Power Interior PMSM with different magnet Topology in Rotor Using FEM. Research Square, August 29th, 2022.
- [6]- G. H. Jang, J. W. Yoon, N. Y. Park, and S. M. Jang. Torque and unbalanced magnetic force in a rotational unsymmetric brushless DC motors. IEEE Transactions on Magnetics, vol. 32, pp. 5157-5159, 1996.
- [7]- Zhu Z.Q. Jamil M., Wu L. Influence of slot and pole number combinations on unbalanced magnetic force in permanent magnet machines. IEEE, the Department of Electrical and Electronic Engineering, The University of Sheffield, Sheffield, S1 3JD, U.K.
- [8]- Ishak D.,Zhu Q., Howe D. Unbalanced Magnetic Forces in Permanent-Magnet Brushless Machines With Diametrically Asymmetric Phase Windings. IEEE Transactions On Industry Applications, Vol. 43, No. 6, November/December 2007.

[9]- Dorrel D., Popescu M., Cossar C., Ionel D., Unbalanced Magnetic Pull in Fractional-Slot Brushless PM Motors. IEEE Industry Applications Society, November 2008.

[10]- Yang Z., Li W., Gou Y., Cai T. Research on Radial Force of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Maxwell. Journal of Electrical Engineering & Technology, The Korean Institute of Electrical Engineers, 6 August 2020.

[11]- Wu L., Zhu Q., Difference in Unbalanced Magnetic Force of Fractional-Slot PM Machines between Internal and External Rotor Topologie, Ces Transactions On Electrical Machines And Systems, Vol. 1, No. 2, June 2017.

[12]- Ma J., Zhu Q., Mitigation of Unbalanced Magnetic Force in PM Machine with Asymmetric Winding by Inserting Auxiliary Slots .IEEE Transactions on Industry Applications, 54 (5). pp. 4133-4146. ISSN 0093-9994.

[13]- Seo B., Sung S., Kang K., Song J., Jang G., Unbalanced magnetic force and cogging torque of PM motors due to the interaction between PM magnetization and stator eccentricity, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016

[14]- Othman, M. N. B. Design and Evaluation of High Power Density Brushless DC Permanent Magnet Machines. The University of Nottingham, Department of Electrical and Electronic Engineering, 2012, 158.

[15]- Özçıra S. Sabit Mıknatıslı Senkron Motorun Kontrol Yöntemleri ve Endüstriyel Uygulamaları. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007 (Yüksek Lisans Tezi)

[16]- Kocabıyık H. Sabit Mıknatıslı Senkron Motorun Uzay Vektör Modülasyonlu Alan Yönlendirme Ve Doğrudan Moment Kontrolünün Benzetim Ve Analizi. Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, Temmuz – 2019.

[17]- Mutluer M. Yapay Zekâ Tekniklerini Kullanarak Yüksek Verimli Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motor Tasarımı. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Nisan-2013.

[18]- Özmen T. Yüzey Yerleşimli Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatörde Karşılaştırmalı Başarım Analizi. Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa-2021.

[19]- Zhao C., Li S., Yan Y., Influence Factor Analysis of PMSM Air Gap Flux Density, International Conference on Electrical Machines and Systems, Chine, 2005.

[20]- Meessen K. , Paulides J. , Lomonova E. Force Calculations in 3D Cylindrical Structures Using Fourier Analysis and the Maxwell Stress Tensor, Eindhoven University of Technology, 5600MB Eindhoven, the Netherlands.

[21]- Naik S. , Performance Analysis of Low Power Interior PMSM with different magnet Topology in Rotor Using FEM, National Institute of Technology Raipur, Research Square.

[22]- https://en.wikipedia.org/wiki/Maxwell_stress_tensor#Motivation

[23]- Ansys, Inc, Maxwell Help Guidance , Release 2019 R3, July 2019.

[24]- Soygenç O., Ergene L., Geometric optimization of PMSM using Halbach array and PSO algorithm, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 35:4 (2020) 2045-2059.

[25]- <https://forum.ansys.com/forums/reply/212008/>

[26]- Ghaffarlou A, Sonlu Elemanlar Yöntemi Yardımıyla Transformatörün Manyetik Alan ve Kayıp Analizi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ekim 2014.

[27]- Zhu Rui, Tong X., Han Q., He K., Wang X., “ Calculation and Analysis of Unbalanced Magnetic Pull of Rotor under Motor Air Gap Eccentricity Fault” MDPI, Published: 24 May 2023.

[28]- Zhu Q., Xia Z.P, Wu L.J, Jewell G.W, Influence of Slot and Pole Number Combination on Radial Force and Vibration Modes in Fractional Slot PM Brushless Machines Having Single- and Doublelayer Windings, Department of Electronic and Electrical Engineering, University of Sheffield, Sheffield S1 3JD, U.K.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Aykut KURTOĞLU

Doğum Yeri ve Yılı :

Medeni Hali :

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta :

Eğitim Durumu

Lise : Salihli Borsa İstanbul Anadolu Teknik Lisesi, 2014

Lisans : Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, 2019

Mesleki Deneyim

Ege Üniversitesi
TÜBİTAK Proje Bursiyeri : 2021-2022

Türk Havacılık ve
Uzay Sanayii (TAI)
Uçuş Test Enstrümantasyon
Mühendisi : 2022- (halen)