İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ASENKRON MOTOR ARIZALARININ DİNAMİK PARAMETRELERE ETKİSİ VE FREKANS ANALİZİ İLE TANISI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makina Müh. İlker ÖZELGİN

Anabilim Dalı : ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ

Programı : KONTROL VE OTOMASYON MÜHENDİSLİĞİ

EYLÜL 2006

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ASENKRON MOTOR ARIZALARININ DİNAMİK PARAMETRELERE ETKİSİ VE FREKANS ANALİZİ İLE TANISI

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Makina Müh. İlker ÖZELGİN
(504041110)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 31 Ağustos 2006
Tezin Savunulduğu Tarih : 25 Eylül 2006

Tez Danışmanı : Doç.Dr. Fuat GÜRLEYEN
Diğer Jüri Üyeleri Doç.Dr. Ata MUĞAN (A.Ü.)
Doç.Dr. Metin GÖKAŞAN (B.Ü.)

EYLÜL 2006

ÖNSÖZ

Tez çalışmam boyunca bana güvendiğini göstererek çalışmamda yol almamı sağlayan ve düşünceleriyle beni yönlendiren, kendisiyle çalışmaktan mutluluk duyduğum danışmanım Sayın Doç. Dr. Fuat GÜRLEYEN'e;

Tezim için gerekli kaynaklara ulaşmamı sağlayan arkadaşım Emrah KENDÜZLER'e;

Çalışmalarım sırasında benden arkadaşlıklarını esirgemeyen Özkan ÇELİK ve Atilla KILIÇARSLAN'a;

Son olarak, bana sağladığı büyük manevi destek, verdiği güven duygusu ve gösterdiği sabır sebebiyle annem Yektane ÖZELGİN'e sonsuz ve içten teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Eylül 2006 **İlker ÖZELGİN**

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR **vi**
TABLO LİSTESİ **vi**
ŞEKİL LİSTESİ **vi**
SEMBOL LİSTESİ **x**
ÖZET **vii**
SUMMARY **xiv**

1. GİRİŞ **1**
1.1 Arıza Tanısı ve Önemi 2
1.2 Literatürdeki Çalışmalar 3
1.3 Amaç ve Kapsam 4

2. ASENKRON MOTOR ARIZALARI **5**
2.1 Arıza Tipleri 5
2.1.1 Rotor Dengesizliği 5
2.1.2 Motora Bağlı Elemanların Etkisi 7
2.1.3 Gevşeklik 8
2.1.4 Kırık Rotor Çubuğu 8
2.1.5 Yağ Etkisi 9
2.1.6 Paralelsizlik 9
2.1.7 Şaft Eğilmesi 10
2.1.8 Stator Hataları 11
2.2 Arızaların Sebepleri 11
2.2.1 Aşırı Isınma 11
2.2.2 Isıl Dengesizlik 12
2.2.3 Dengesiz Çekme Kuvveti 12
2.2.4 Elektro Magnetik Kuvvetler 13
2.3 Arızaların Etkileri 14
2.3.1 Arızaların Farkları 15
2.4 Arıza Tanısı Yöntemleri 16
2.5 Hesaplamalarda Yapılan Kabuller ve Tanımlar 16
2.5.1 Mod 16
2.3.1 Sargı Faktörünün Hesabı 18

3. EKSEN KAÇIKLIĞI **20**
3.1 Statik Eksen Kaçıklığı 20
3.1.1 Matematiksel Modelleme 21
3.1.2 İletkenlik (Permeans) Hesabı 23
3.2 Dinamik Eksen Kaçıklığı 25
3.2.1 İletkenlik (Permeans) Hesabı 26
3.3 Eksen Kaçıklığı ile Rotor Dengesiliğinin Farkı 26

4. OLUK VE DOYMA ETKİSİ **27**

4.1 Stator ve Rotordaki Olukların Etkisi 27
4.1.1 Carter Faktörü 27
4.1.2 Oluklu Statorun ve Rotorun İletkenliğe (Permeans) Etkisi 30
4.1.3 Oluk Sayısının Etkisi 32
4.2 Doyma Etkisi 33
4.2.1 Doymanın İletkenliğe Etkisi 34

5. STATOR ve ROTOR MMK'LARI 35
5.1 Stator MMK'sı 37
5.2 Rotor MMK'sı 38
5.2.1 Harmonikler 38
5.2.2 Rotor MMK'sı 39

6. EKSEN KAÇIKLIĞININ YARATTIĞI FREKANSLARIN BELİRLENMESİ 41
6.1 Magnetik Akı Yoğunluğunun Hesabı 41
6.2 Akım Spektrumunda Oluşan Frekanslar 43
6.2.1 Thomson'un Formülü 43
6.2.2 Thomson'un Formülüyle Kendi Sonuçlarımızın Karşılaştırılması 44
6.2.2.1 DEK'ten Oluşan Frekanslar 44
6.2.2.2 DEK ve Oluk Etkisiyle Oluşan Frekanslar 46
6.2.2.3 DEK ve Doyma Etkisiyle Oluşan Frekanslar 48
6.3 Titreşim Spektrumunda Oluşan Frekanslar 48

7. RULMAN ARIZASI 51
7.1 Rulman Arızaları 52
7.2 Titreşim Sinyalinde Yarattığı Etki 52
7.3 Akım Sinyalinde Yarattığı Etki 57
7.3.1 Bilgisayar Programı Sonuçları 57

8. MOTOR PARAMETRELERİNİN EKSEN KAÇIKLIĞI ile DEĞİŞİMİ 61
8.1 Sargı Fonksiyonu Teorisi 62
8.2 Endüktans Hesabı 65
8.3 Motor Modeli 66
8.4 Sayısal Endüktans Hesabı ve Sonuçları 68
8.4.1 Hesaplamalarda Kullanılan Motor Parametreleri 68
8.4.2 SEK'te Endüktansların Değişimi 70
8.4.2.1 Stator Fazları Arasındaki Endüktans Matrisi 70
8.4.2.2 Stator Fazları ile Rotor Çubukları Arasındaki Endüktans Matrisi 71
8.4.2.3 Rotor Çubukları Arasındaki Endüktans Matrisi 72
8.4.3 DEK'te Endüktansların Değişimi 73
8.4.3.1 Stator Fazları Arasındaki Endüktans Matrisi 73
8.4.3.2 Stator Fazları ile Rotor Çubukları Arasındaki Endüktans Matrisi 75
8.4.3.3 Rotor Çubukları Arasındaki Endüktans Matrisi 76

9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 78
9.1 Sonuçlar 78
9.2 Öneriler 79

KAYNAKLAR 81

ÖZGEÇMİŞ **84**

KISALTMALAR

MMK : Magnetik Motor Kuvvet
DEK : Dinamik Eksen Kaçıklığı
SEK : Statik Eksen Kaçıklığı
MAY : Magnetik Akı Yoğunluğu
MMF : Magnetic Motor Force
MFD : Magnetic Flux Density

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 4.1: Motor dizaynı için oluk sayısının belirlenmesi 33

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1: Arıza Tanısının Akış Diyagramı 2
Şekil 2.1: Rotor Dengesizliği 6
Şekil 2.2: Rotor dengesizliğinin kütlesel gösterimi 6
Şekil 2.3: Statik dengesizlik 6
Şekil 2.4: Dinamik dengesizlik 7
Şekil 2.5: Rulmanların merkezlenememesi 10
Şekil 2.6: Şaftın eğilmesi 10
Şekil 2.7: Dış bilezik eğilmesi 10
Şekil 2.8: İç bilezik eğilmesi 10
Şekil 2.9: Akımın zamanla değişimi 13
Şekil 2.10: Kuvvetin zamanla değişimi 13
Şekil 2.11: Arızaların etkisi 14
Şekil 2.12: Mod – 1 rotor boyunca kuvvetin değişimi 17
Şekil 2.13: Mod 1 kuvvetinin etkisi 17
Şekil 2.14: Mod 2 rotor boyunca kuvvetin değişimi 18
Şekil 2.15: Mod 2 ve mod 3 kuvvetinin rotordaki etkisi 18
Şekil 3.1: Statik Eksen Kaçıklığı 21
Şekil 3.2: Oval stator 21
Şekil 3.3: Hava aralığının rotor çevresindeki değişimi 23
Şekil 3.4: Hava aralığı iletkenliğinin statik eksen kaçıklığı ile rotor çevresi boyunca değişimi 25
Şekil 3.5: Oval rotor 26
Şekil 4.1: Oluklu rotor ve düz stator çevresi boyunca oluşan magnetik akı yoğunluğu değişimi 28
Şekil 4.2: β 'nın $\frac{o}{\delta}$ 'ye göre değişimi 29
Şekil 4.3: B'nin değişimi f fonksiyonuyla gösterimi 30
Şekil 6.1: MAY'ın frekans spektrumu 45
Şekil 6.2: MAY'ın frekans spektrumundaki düşük frekanslar 45
Şekil 6.3: MAY'ın zamanla değişimi 46
Şekil 6.4: MAY'ın frekans spektrumu 47
Şekil 6.5: Oluk etkisiyle oluşan ek frekanslar 47
Şekil 6.6: MAY'ın zamanla değişimi 47
Şekil 6.7: MAY'ın frekans spektrumu 48
Şekil 6.8: Birim alandaki kuvvetin frekans spektrumu 49
Şekil 6.9: Birim alandaki kuvvetin frekans spektrumundaki düşük frekansları 50
Şekil 7.1: Bilyalı rulman 52
Şekil 7.2: Bilyalı rulmanın kinematiği 53
Şekil 7.3: Dış rulman arızasının yarattığı MAY spektrumu 59

Şekil 7.4: Dış rulman arızasının yarattığı MAY spektrumunun yakınlaştırılmış hali 59
Şekil 7.5: İç rulman arızasının yarattığı MAY spektrumunun yakınlaştırılmış hali 60
Şekil 8.1: Basit motor resmi 62
Şekil 8.2: A fazının sarım şeması 69
Şekil 8.3: A fazının sarım fonksiyonunun θ'ya göre 69
Şekil 8.4: Birinci rotor çubuğunun sarım fonksiyonunun θ'ya göre 70
Şekil 8.5: (LAr1) A fazı ile 1. rotor çubuğunun karşıt endüktanslarının konumla değişimi 71
Şekil 8.6: $\theta = \pi$ için L_{rr} matrisi 72
Şekil 8.7: $\theta = 0$ için L_{rr} matrisi 73
Şekil 8.8: A fazının öz endüktansının θ'la değişimi 74
Şekil 8.9: A fazı ile B fazı arasındaki karşıt endüktansın θ'la değişimi 74
Şekil 8.10: A fazı ile C fazı arasındaki karşıt endüktansın θ'la değişimi 75
Şekil 8.11: A fazı ile 1. rotor çubuğu arasındaki karşıt endüktansın θ'la değişimi . 75
Şekil 8.12: A fazı ile rotor çubukları arasındaki karşıt endüktansın θ'la değişimi . 76
Şekil 8.13: Rotor çubukları arasındaki endüktans matrisinin grafiği 77

SEMBOL LİSTESİ

$\mathbf{A}$	: Alan
$\mathbf{a}$	: Eksen kaçıklığının uzunluk olarak miktarı
$\mathbf{B}$	: Magnetik akı yoğunluğu
$\mathbf{C}$	: Rulmanın taşıyabileceği dinamik yük
$\mathbf{d}$	: Çap
$\mathbf{d_w}$	: Bilya çapı
$\mathbf{d_1}$	: Bilya iç bilezik çapı
$\mathbf{d_2}$	: Bilya dış bilezik çapı
$\boldsymbol{\varepsilon}$	: Bağıl eksen kaçıklığı
$\mathbf{F}$	: Kuvvet
$\mathbf{f}$	: Şebeke frekansı
$\mathbf{f_2}$	: Rotorda endüklenen gerilimin frekansı
$\mathbf{f_r}$	: Rotor dönüş frekansı
$\mathbf{H}$	: Magnetik alan şiddeti
$\mathbf{I}$	: Akım
$\mathbf{J}$	: Akım yoğunluğu
$\mathbf{K}$	: Sargı faktörü
$\mathbf{K_d}$	: Dağılma faktörü
$\mathbf{K_p}$	: Kirişleme faktörü
$\mathbf{k_c}$	: Carter katsayısı
$\mathbf{L}$	: Endüktans
$\mathbf{l}$	: Rotor uzunluğu
$\mathbf{m}$	: Faz sayısı
$\mathbf{N}$	: Her fazdaki sarım sayısı
$\mathbf{N(\theta, z, w_r \cdot t)}$	: Sargı fonksiyonu
$\mathbf{n}$	: Rotorun dakikadaki devir sayısı
$\mathbf{n_a}$	: Dış bilezik devir sayısı
$\mathbf{n_j}$	: İç bilezik devir sayısı
$\mathbf{n_k}$	: Kafes devir sayısı
$\mathbf{n_1}$	: Stator döner alanının dakikadaki devir sayısı
$\mathbf{n_w}$	: Bilyanın yuvarlanma devir sayısı
$\mathbf{n_x}$	: Devir sayısı
$\mathbf{o}$	: Oluk açıklığı
$\mathbf{P}$	: Rulmanın üzerine gelen yük
$\mathbf{p}$	: Kutup çifti sayısı
$\mathbf{q}$	: Faz ve kutup başına düşen oluk sayısı
$\mathbf{R}$	: Relüktans (Manyetik direnç)
$\mathbf{r}$	: Yarıçap
$\mathbf{S}$	: Yüzey

s : Kayma
T : Her sargıdaki sarım sayısı
T(θ, z, $w_r \cdot t$) : Sarım fonksiyonu
T_e : Elektromagnetik tork
T_l : Yük
t : Zaman
t_d : İki diş arasındaki mesafe
u : Her fazdaki sargı sayısı
V : Gerilim
v : Hız
v_a : Dış bilezik hızı
v_j : İç bilezik hızı
v_w : Bilyanın yuvarlanma hızı
W : 1 sarımın fonksiyonu
W_{ko} : Magnetik koenerji
w : Stator döner alanının açısal hızı
w_r : Rotorun açısal hızı
w_x : Çevresel hız
x : Yol
Z : Oluk sayısı
Z_b : Rulmandaki bilya sayısı
z : Eksenel yönde konum
θ : Rotorun açısal konumu
θ_e : Rotorun elektriksel açısı
λ : Permeans (İletkenlik)
Φ : Magnetik akı
Λ : Magnetik akı kaçağı
σ : Birim alana gelen kuvvet
δ : Stator ile rotor arasındaki hava aralığı
μ_0 : Havanın permeabilitesi (Geçirgenlik katsayısı)
μ_r : Bağıl permeabilite (Bağıl geçirgenlik katsayısı) (Hava için $\mu_r = 1$)
μ : Permeabilite (Geçirgenlik katsayısı)
ξ : Rotor harmoniklerinin derecesi
ν : Stator harmoniklerinin derecesi
α : Bilya temas açısı
de : Dinamik eksen kaçıklığı
rt : Rotor
se : Statik eksen kaçıklığı
st : Stator
x, y : Kartezyen koordinatları

ASENKRON MOTOR ARIZALARININ DİNAMİK PARAMETRELERE ETKİSİ VE FREKANS ANALİZİ İLE TANISI

ÖZET

Elektrik motorları günlük yaşantımızda büyük yer tutmaktadır. En önemli motor türü ise asenkron motorlardır. Fabrikalarımızda kullanılan motorların %70'i asenkron motordur.

Motorlarda oluşan değişik arızalar zamanla etkisini artırarak motorun bozulmasına sebep olur. Hayatımıza bu kadar girmiş olan motorların bozulması büyük maddi kayıplara yol açar. Bu kayıpların önüne geçilmesi için arızaların önceden tahmin edilebilmesi gerekir. Arıza tespit edildiği zaman bakım çalışması yapılır veya motor değiştirilir.

Tez çalışmam iki kısımdan oluşmaktadır. İlk bölümde elektrik motor arızalarının neler olduğu, arızaların sebepleri, arızaların etkileri ve arıza tanısı için gerekli yöntemler incelenmiştir. İkinci bölümde ise arızaların motor parametrelerinde yarattığı etki ele alınmıştır.

Elektrik motorlarında oluşan arızalar eksen kaçıklığı, rulman arızası, kırık rotor çubuğu, sargı hataları ve dengesiz rotor şaftı olarak sıralanabilir. Tez çalışmasında, arızaların %40'ını oluşturan eksen kaçıklığı ve rulman arızaları derinlemesine ele alınmıştır.

Arızalar tanımlanırken şebekeden çekilen akım ve stator yüzeyinden ölçülen titreşim sinyallerinden faydalanılır. Bunun sebebi ise, arıza oluşması halinde, kendini titreşim ve akım sinyalinde belirli frekanslarda sinyal olarak göstermesidir. Belirli frekansların hangi arızaya denk geldiği bilinmelidir. Teorik çalışmalara dayanarak eksen kaçıklığı ve rulman arızalarının oluşturduğu frekanslar ve frekansların büyüklükleri bilgisayar ortamında bulunmuştur. Önceki çalışmalarla karşılaştırılmalar yapılmıştır.

Eksen kaçıklığının akım da oluşturduğu frekansları belirlemek için hava aralığındaki MAY değişimi hesaplanmıştır. MAY'ı hesaplarken stator ve rotorda oluşan MMK'dan ve hava aralığı iletkenliğinden (permeans) faydalanılmıştır. Hava aralığı iletkenliği bulunurken oluk, doyma ve eksen kaçıklığı etkileri eklenmiştir. Hava aralığının geçirgenliği rotor ve stator çekirdeğine göre kötüdür. Stator ve rotor çekirdeklerinin geçirgenlikleri $\mu = \infty$ olarak alınmıştır. MAY hesabında sadece hava aralığı geçirgenliği kullanılmaktadır. Bu sebeple oluk ve doyma etkileri hava aralığı değişimine dönüştürülmüştür. Bulunan MAY, akımdaki sinyallerin değişimi hakkında bilgi vermektedir. Titreşim etkisini bulabilmek için maxwell kanununa göre radyal yönde oluşan birim alandaki kuvvetler bulunmuştur.

Rulmanın titreşim sinyalinde oluşturduğu frekanslar kinematik denklemler yazılarak gösterilmiştir. Rulman arızasının etkisini akım sinyalinde incelemek için anlık eksen kaçıklığı yaratılarak sonuçlar bulunmuştur. Schoen'in yaptığı çalışma sonucu bulduğu formül doğrulanmıştır. Schoen'in formülüne ek olarak eksen kaçıklığına ait frekansların oluşabileceği gösterilmiştir.

İkinci bölümde, eksen kaçıklığı arızası sebebiyle rotor ile stator arasındaki hava aralığı değişken olmasının motor parametrelerinde yarattığı etki incelenmiştir. Bu değişim motorun öz (self) endüktans ve karşıt (mutual) endüktans parametrelerinde değişimler oluşturur. Değişimler rotor ve stator için ayrı ayrı incelenerek hesaplanmıştır. Hesaplamalar için sargı fonksiyonu teorisinden faydalanılmıştır.

EFFECTS OF FAULTS ON DYNAMIC PARAMETERS AND IDENTIFICATION OF FAULTS BY FREQUENCY ANALYSIS IN CAGE INDUCTION MOTOR

SUMMARY

Electrical machines take important place in our daily life. Often, asynchronous machines are used in factories rather than other types of motor.

Failures of electrical machines make damage or lose money. The main causes of failures are faults of electrical machines. To stop failures we should predict faults before 2 or 3 months. After prediction of fault, operator can change or maintain machine.

This study is composed of two main parts. In the first part, types, reasons, results and identification methods of faults in electrical machines are studied. In the second part, effects of faults on parameters of induction machines are studied.

Some of the faults in induction machines are eccentricity, bearing faults, broken bar, winding faults and unbalanced rotor shaft. In this study, eccentricity and bearing faults that constitute %40 of faults are researched.

Current and vibration frequency spectrums are used for identification of faults. If a fault occurs, it creates vibration and current signals at specific frequencies. The frequency values at the spectrum caused by specific faults must be known. In this study, frequencies of the signal that corresponds to the eccentricity and bearing faults and their amplitudes are computed by computer theoretically. Results are compared with other studies.

To find eccentricity related frequencies, MFD in air gap between stator and rotor are used. To calculate MFD, MMF of stator and rotor, and permeance of air gap are found. Permeance is the function of saturation, eccentricity and slot of stator and rotor. Permeabilite of air gap is worse than permeabilites of core of stator and rotor. Permeabilites of core of stator and rotor are taken infinite. During calculation of MFD, only permeance of air gap variation is used. Therefore, slot and saturation effects are accepted as air gap variation. MFD gives information about current signal. To get information about vibration signal, radial force in unit area is calculated by Maxwell equation.

Bearing related frequencies in vibration signal are found by kinematic equations. To find effect of bearing on current signal, eccentricity is created instantly in computer program. Study of Schoen is verified. Also, additional frequencies to formula of Schoen are found.

In the second part, because of eccentricity, the air gap between stator and rotor is changeable around circumference of rotor. Variation of air gap causes self and mutual inductance variation. For simulation of induction motor self and mutual inductance are the important parameters. Self and mutual inductance parameters for stator and rotor are calculated by winding function theory.

1. GİRİŞ

Günlük yaşantımızda önemli yeri olan motorların arızalanması yaşantımızı etkilediği gibi fabrikalarda da üretimin durmasına sebep olur. Klasik olarak yüksek akım, yüksek gerilim ve topraklamaya karşı algılayıcılarla basit güvenlik önlemleri alınarak motorlar korunmaktadır. Klasik yöntemler, sadece çökme olurken ani olarak sistemi durdurur ve motorun korunmasını sağlar. Büyük çökmelere sebep olan asenkron motor arızalarının önceden tespit edilmesi gerekir. Arızaların tespit edilebilmesi için arıza tanısı yöntemleri geliştirilmiştir.

Elektrik motorlarında oluşan en yaygın arızalar eksen kaçıklığı, rulman arızası, kırık rotor çubuğu, sargı hataları, gevşek montaj, şaft eğilmesi, sargıdaki simetrisizlikler ve dengesiz rotor şaftı olarak sıralanabilir. Arızalardan herhangi biri oluştuğu zaman, motordaki titreşim, sıcaklık, hız, akım, tork gibi parametrelerde değişimler olur. Bu parametrelerdeki değişimlerin izlenebilmesi için ölçümlerin yapılması gerekir. Motorlarda oluşan arızaların izlenebilmesi için yapılan en yaygın ölçümler akım ve titreşim üzerinedir.

Arızaların oluşturduğu değişim kendini yukarıda saydığımız parametrelerin frekans spektrumunda gösterir. Değişik arızalar farklı frekans verileri ortaya çıkarır. Hangi arızanın hangi frekansı çıkarması gerektiği teorik çalışmalarla bulunur. Yapılan çalışmalar sonucu elde edilen matematiksel formüller arızanın tanınması için yol gösterici olmaktadır. Teorik olarak bulunan frekanslar, arızası olan motorlar üzerinde ölçüm yapılarak doğrulanır.

Bu konuda bilgili ve uzman kişilerce ancak arızalar tespit edilebilir. Yeni yapılan çalışmalarda sinir ağları (Neural Network) yapıları kullanılarak, arıza uzman operatör olmadan da tespit edilebilmektedir.

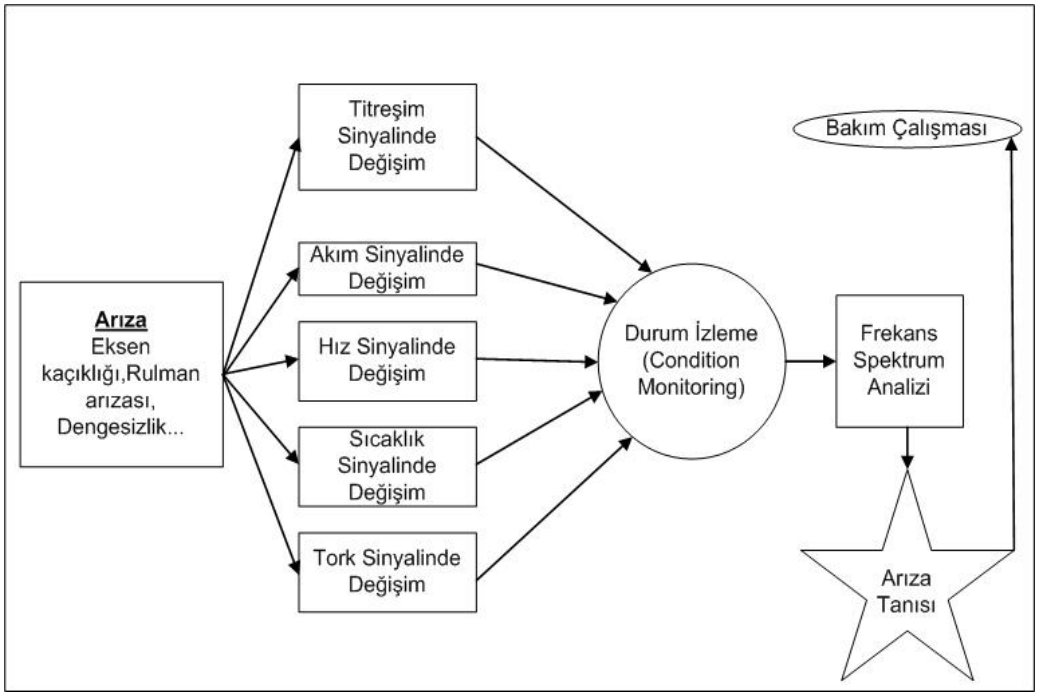
Bu tez çalışmasında bu konunun teorik kısmı olan arızaların neden belirli frekansta sinyaller çıkardığı araştırılarak sonuçlar bulundu. Yapılan değişik çalışmalarda da

motorlar üzerinde ölçümler yapılarak belirli arızaların belirli frekanslarda sinyaller ürettiği doğrulanmıştır.

Ayrıntılı olarak üzerinde çalışılan konular, eksen kaçıklığı ve rulman arızalarıdır. İki arızada da akım ve titreşimde değişik frekansta sinyaller belirlenmiştir.

1.1 Arıza Tanısı ve Önemi

Arıza tanısı, motorların durum izleme (condition monitoring) sistemleriyle takip edilip, elde edilen ölçümlerden sonuçlar çıkararak arızanın tipinin belirlenmesidir (Şekil 1.1). Arıza belirlendikten sonra motorda büyük çöküntülere mahal vermeden motora müdahale edilip, arızanın giderilmesi veya motorun değiştirilmesi gerekir. Arıza tanısı bu konuda eğitim almış kişilerce yapılabilir.



Şekil 1.1: Arıza Tanısının Akış Diyagramı

Bu konunun önemini anlatabilmek için yaşantımızdan örnekler verelim. Elektrik üretim santrallerinde soğutma için kullanılan suyun devir daimini yapan motorların bozulduğunu ve santralin devre dışı kaldığını düşünelim. Günümüzde elektriğe ne kadar bağlı olduğumuzu söylememize gerek yok. Fabrikalara sorun giderilene kadar elektrik verilemez. Fabrikalarımızda üretim durunca, maddi kayıplar kaçınılmaz olur. Motor bozulmalarının oluşabileceği en önemli yer ise nükleer santrallerdir. Burada

oluşacak bir sorun, tehlikeli boyutlara ulaşacak zararlar verebilir. Fabrikalarımızdan örnek verirsek; cam elyafı üreten bir fabrikada erimiş camın akışının durması, bütün hattaki rulolara akan camın durmasına sebep olur. Anlık kesilme bile olsa bütün ruloları çıkarıp yenilerini koymalıyız.

Ani olarak, elektrik motorlarının devre dışı kalmasının tehlike yarattığı noktalarda, motorların durum izleme (condition monitoring) sistemleriyle takip edilmesi gerekir. Çökme oluşmadan evvel arızalar tespit edilip giderilebilir.

Burada karıştırılmaması gereken durum ise arızanın 1-3 ay önceden tespit edilebildiğidir. Oluşan arızalar kademe kademe etkisini gösterir. Geçen süre müddetince etkisini artırır. En sonunda da zarar verici şekilde sistemin çökmesine sebep olur.

1.2 Literatürdeki Çalışmalar

Elektrik motor arıza tanısı son yılların güncel konusudur. Konu üzerinde ilk çalışmalar teorik olarak eksen kaçıklığı üzerine incelenmiştir. Yapılan akım ve titreşim sinyali ölçümleri ile teorinin doğruluğu kanıtlanmıştır (**Thomson, Cameron ve Dow, 1986**). Thomson (**1986**) tarafından yapılan çalışma **Vas (1993)** tarafından genelleştirilmiştir. Son zamanlarda bu konu üzerine ilgi artmıştır ve yapılan ilk çalışmadan faydalanarak eksen kaçıklığı üzerine benzetim çalışmaları yapılıp ölçümlerle kanıtlanmıştır (**Guldemir, 2002**).

Motor üzerinde yapılan ölçümler yerine eksen kaçıklığı olan motorun matematiksel modeli yaratılıp, teoride elde edilen sonuçların doğruluğu kanıtlanmaya çalışılmıştır. Yapılan ilk çalışmalardaki sargı fonksiyonu teorisinde eksen kaçıklığının etkisi tam alınmadığından dolayı doğru sonuçlar elde edilememiştir. (**Toliyat ve Arefeen, 1996**), (**Joksimovic ve diğ., 2000**). Sargı fonksiyonu teorisi, eksen kaçıklığı etkisi eklenerek yenilenmiştir (**Faiz ve Tabatabaei, 2002**). Tekrardan motor modeli bu sargı fonksiyonu teorisine göre yapılmıştır (**Joksimovic, 2005**).

Arızalardan ikinci öneme sahip olan rulman arızalarının titreşim sinyalinde ve akım sinyalinde meydana getirdiği frekanslar yapılan ölçümlerle belirlenmiştir (**Schoen ve diğ., 1995**). Rulmanın mekaniksel formülleri sayesinde titreşim sinyalindeki

frekanslar bulunmuştur. Titreşimde oluşan sinyallerin genlikleri darbe modulasyon yöntemiyle yaklaşık bulunup pratikte doğrulanmıştır (**Mcfadden ve Smith, 1984**). Eksen kaçıklığı üzerine yapılan çalışmalardan faydalanılarak, rulman arızasının akım sinyali üzerindeki frekansları da tespit edilmiştir (**Schoen ve diğ., 1995**).

Motorda oluşan arızaların sebepleri hakkında da incelemeler olmuştur (**Bonnett ve Soukup, 1988**). Genel olarak değişik elektrik motor arızalarının akım, titreşim, hız, ve tork gibi verilerde oluşturduğu frekanslar gözden geçirilmiştir (**Finley ve diğ., 1999**), (**Benbouzid, 2000**), (**Siddique ve diğ., 2005**), (**Nandi ve Toliyat, 1999**).

1.3 Amaç ve Kapsam

Elektrik motorlarında oluşabilecek arızaların önceden tespit edilebilmesi için gerekli akım ve titreşim frekans bilgilerinin elde edilebilmesi ilk amacımızdır. Bu sayede, motor arızaları sistemde önemli sorunlara mahal vermeden tespit edilip önlenmiş olacaktır. Teorisini incelediğimiz konuyu MATLAB'ta formüle edebilmek amaçlanmıştır. Bu sayede akım ve titreşim verilerinin frekans spektrumları incelenerek arıza yüzünden oluşan ek sinyalleri inceleme olanağı doğacaktır. MATLAB programı vasıtasıyla işlemleri daha hızlı ve kolay yapma olanağı sağlanacaktır.

İkinci hedefimiz, farklı arızaların yaratmış olduğu farklı karakteristikte frekansların elde edilmesidir. Sonuçta iki arıza birbirinden kolaylıkla ayırt edilebilecektir. Bu sayede operatöre ihtiyaç olmadan çalışan, sinir ağları sistemlerinin kusursuz çalışmasına olanak sağlanacaktır.

Ayrıntılı olarak incelenen eksen kaçıklığının ve rulman arızalarının neden belirli frekansta sinyal oluşturduğunun tespit edilmesi ve bu frekansların değerlerinin teorik olarak bulunması amaçlandı. Schoen tarafından bulunan, rulmanın akım sinyalinde yaratacağı frekansların doğruluğunun kanıtlanması diğer bir amaçtır.

Son olarak eksen kaçıklığının motor parametrelerinde yaratacağı etki incelenmek istenmiştir. Bu amaçla eksen kaçıklığının motor benzetimi için gerekli olan karşıt ve öz endüktansların hesabı yapılmıştır.

2. ASENKRON MOTOR ARIZALARI

Çeşitli çevre ve çalışma koşulları sebebiyle motorlarda arızalar oluşur. Bir arıza oluştuğu zaman kademe kademe etkisini arttırarak büyür. Normalde aynı anda birkaç tane arıza oluşabilir. Hatta oluşan arızalar birbirini tetikleyebilir. Böylesine karmaşık bir ortamda motorun tamir edebilmesi için, arızanın tam olarak doğru tespit edilebilmesi gerekir.

Oluşan arızalara bakarsak mekaniksel ve elektriksel olmak üzere ikiye ayırabiliriz.

Elektriksel arızalar; şebekedeki elektriksel dengesizlik, sargıların dengeli sarılmaması, sargıların kısa devre olması, sürücü devrelerdeki arızadan dolayı oluşan dengesizlikler ve rotor çubuğunun kırılması olarak sayılabilir.

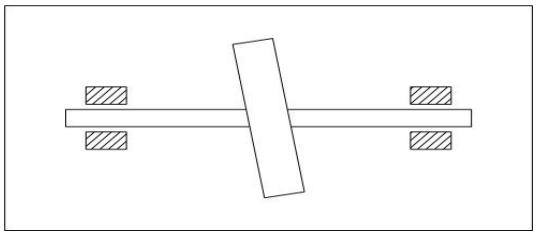
Mekaniksel arızalar; rulman arızaları, eksen kaçıklığı, şaft eğilmesi, sürtünme, rotor dengesizliği, gevşeklik ve paralelsizlik sayılabilir.

Arızaları ölçerken bizi yanıltıcı etkenler de olabilir. Bunlar dişli çarklar, vanalar, soğutma için kullanılan pervaneler ve motorun birer parçası olarak ele alabileceğimiz elemanlar olabilir. Bunların etkileri titreşim sinyalinin analizinde görülebilir.

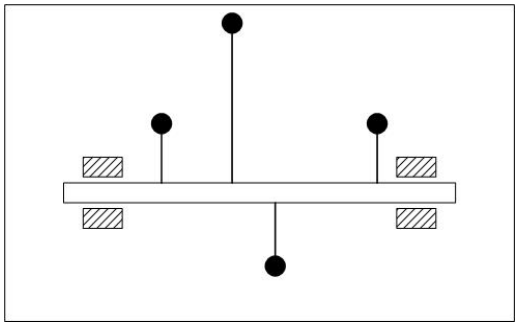
2.1 Arıza Tipleri

2.1.1 Rotor Dengesizliği

Rotor ağırlık merkezinin, rotorun dönme merkezinde olmadığı arızadır. Dengesizlik, rotor yataklarına dengesiz kuvvetlerin gelmesine sebep olur. Aynı zamanda bu kuvvetler rotor şaftını eğebilir. Titreşim spektrumundaki etkisi, motorun dönme hızındaki sinyalde olur. Dengesizlik artıkça dönme frekansındaki sinyalin değeri artmaktadır. Şekil 2.1 ve Şekil 2.2'de rotor dengesizlikleri gösterilmiştir.

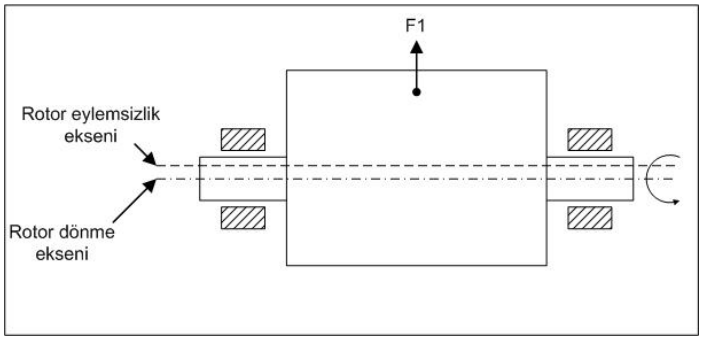


Şekil 2.1: Rotor Dengesizliği



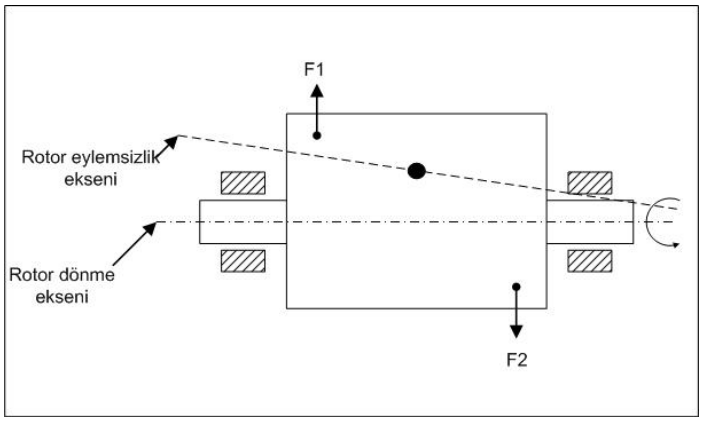
Şekil 2.2: Rotor dengesizliğinin kütlesel gösterimi

Statik ve dinamik olmak üzere iki tipi vardır. Statik dengesizlikte (Şekil 2.3), rotor eylemsizlik ekseni ile rotor dönme ekseni birbirine paraleldir ve hiçbir zaman kesişmezler. Rotoru çeken bir tane savrulma kuvveti mevcuttur. Dinamik eksen kaçıklığında (Şekil 2.4), rotor eylemsizlik ekseni ile rotor dönme ekseni birbirini yalnızca bir noktada keser. İki tane dengesiz kuvvet oluşur.



Şekil 2.3: Statik dengesizlik

Rotor dengesizliği dengeleme metotlarıyla azaltılabilir. Dengeleme metotları, yapılan hesaplamalarla uygun açılara, belirli ağırlıkların yerleştirilmesiyle yapılır. Hesaplamaları yapmadan önce motorun dönme hızının frekansındaki titreşimler filtreler sayesinde ölçülür. İvme ölçer ile titreşim ölçülerek gerekli yorumlar ve hesaplamalar yapılabilir.



Şekil 2.4: Dinamik dengesizlik

2.1.2 Motora Bağlı Elemanların Etkisi

Dişli çark, kaplin (bağlama elemanı), pompa çarkı, soğutma pervanesi, kayış ve vanalar motorda ek titreşimlere sebep olur. Ölçümlerde bunlara dikkat edilmesi gerekir. Örneğin; 40Hz'te dönen bir motora bağlı, karşılıklı iki dişli çarkta sırayla 20 ve 30 tane dişli olsun. 40x20=800Hz'te titreşim sinyali oluşur. Bu titreşimlerin sebebi karşılıklı iki dişli arasındaki gevşeklikten dolayı dişli yüzlerinin birbirine çarpmasıdır. Eğer dişlilerde kırılma olursa bu frekanstaki sinyalin boyutu artacaktır. Sinyalin boyutu arızanın boyutu hakkında bilgi olarak kullanılır.

Soğutma pervanesinin etkisi dişlinin etkisine benzer. 5 tane kanat olduğunu düşünürsek 40x5=200Hz'te titreşim yaratır. Fan dengesiz ise statik dengesizliğe yol açar. Dolayısıyla motor dönme hızında titreşim oluşur.

Motorun pompa gibi elemanlara bağlantısını sağlayan kaplin, dengesizlik olarak etki yaratır. Ağır olan kaplin motor şaftının eğilmesine neden olabilir.

Dengesizliğin, motordan mı yoksa motora bağlı pompa, kaplin veya yük gibi etkenlerden mi kaynaklandığını anlamamız gerekir. Motor çalıştırılır ve motorun dönme frekansında, motor üzerinde yapılan ölçüm kaydedilir. Motorla diğer çevre elemanını bağlayan şaft 180^o döndürülür ve gene ölçüm yapılır. İki ölçüm karşılaştırıldığında kayma olmuyorsa, dengesizlik motordan kaynaklanmaktadır. Eğer 180^o kayma varsa çevre elemanından kaynaklıdır. Motorda dengesizlik söz konusu ise direk rotor üzerinden dengeleme yapılır.

2.1.3 Gevşeklik

Parçaların zamanla gevşemesiyle oluşmaktadır. Mil dönme devrinin 1x, 2x, 3x, ... katlarında sinyaller yaratır. 2x sinyali daha baskındır. Düşük hızlarda aniden yok olabilir. Bunun sebebini örnekle açıklayalım; çok sıkı geçirilmiş bir fan olduğunu düşünelim. Motor dönerken merkezkaç etkisiyle fan sıkılığını yitirir ve gevşek davranış gösterir. Hız azaldığında tekrar sıkılaşır ve gevşekliğin etkisi ortadan kalkmış olur.

2.1.4 Kırık Rotor Çubuğu

Motor arızalarının %5'ini oluşturmaktadır. Oluşma sebeplerine bakarsak;

a) Fazla ısınma ve soğumadan kaynaklı termal stres ve dengesizlik.

b) Dengesiz elektromagnetik çekme kuvveti, elektromagnetik kuvvetler ve titreşim sebebiyle oluşan gerilmeler.

c) Üretimden kaynaklı kalıcı gerilmeler. Rotor çubukları preslerde basıldıktan sonra soğurken artık gerilmeler oluşur. Tornalama gibi üretimsel işlemlerde metal yüzeyinde sıcaklık farkından oluşan gerilmeler oluşur.

d) Şaft torkundan oluşan dinamik stresler ve merkezkaç kuvvet etkisiyle oluşan gerilmeler.

e) Rotor malzemesinde nem sebebiyle oluşan aşınmalar.

f) Rulman arızalarından kaynaklı mekanik stres.

g) Aşırı sıcaklıktan kaynaklı yüzey erimeleri.

Kırılmış olan rotor çubuğu dengesiz çekme kuvveti yaratır. Stator sargılarından akan akım ile rotor çubuklarından akan akımlar etkileşim içersindedir. Herhangi bir çubuk kırılırsa oradan akım geçmez ve o çubuğun stator sargılarıyla etkileşimi ortadan kalkar. Bu da dengesiz kuvvet yaratır. Rotor çubuklarının dirençleri farklıysa aynı sorunla karşılaşılır. Rotorun dönme hızında titreşim oluşur. Ek titreşim sinyali (f_2 x 2 x p x kırık rotor çubuğu sayısı) frekansında oluşur. f_2 rotorda endüklenen gerilimin frekansı, p kutup çifti sayısıdır. Formülden anlaşılacağı gibi yük yokken kayma

olmayacağı için bu frekans oluşmaz. Motor dönme frekansında oluşan titreşim frekansının etkisi, elektriksel enerji kesilince ortadan kalkar.

Stator akımında $(1 \pm 2 \cdot k \cdot s) \cdot f$ frekansında sinyal yaratır. s kayma, f [Hz] şebeke frekansı, k = 1, 2, 3,... . Tork ve hız sinyallerinin içeriğinde $2 \cdot s \cdot f$ ve $4 \cdot s \cdot f$ frekansları görülür (**Nandi ve Toliyat, 1999**). Stator akımındaki ek frekanslar $f_{krç} = f \cdot (k \cdot (\frac{1-s}{p}) \pm s)$ Hz'tir. k/p = 1, 5, 7, 11, 13,...'dır (**Benbouzid, 2000**). Eksen kaçıklığı ile aynı frekansları oluşturmaktadır. Yalnız eksen kaçıklığında daha fazla frekans oluştuğundan kolaylıkla ayırt edilir. Ayrıca oluk etkisi ve eksen kaçıklığının beraber yarattığı frekanslar sayesinde, eksen kaçıklığı arızası kırık rotor çubuğu arızasından ayrılabilinir.

Rotor çubuğunun kırık olup olmadığını tek sargı testiyle anlayabiliriz. Tek bir sargıya, nominal gerilimin %5'i veya %10'u oranında gerilim uygulanır ve rotor elle çevrilir. Her kırık rotor çubuğundan geçerken akımda salınım oluşur. Değişim miktarı %5'ten fazla ise kırık rotor çubuğundan bahsedilebilinir.

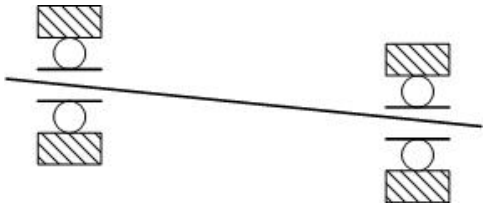
Çubukların, titreşimden ve savrulmadan dolayı kırılmasını önlemek için, kamayla sıkıştırmalı veya şekillendirilerek yuvaya yerleştirilmelidir.

2.1.5 Yağ Etkisi

Kullanılan yağın viskozitesi yüksekse, yağ soğuksa veya yağ kirlenmiş ise kaymalı yataklarda "Oil Whirl" titreşimi oluşur. Titreşim rotorun dönme hızının 0.45 katında oluşur.

2.1.6 Paralelsizlik

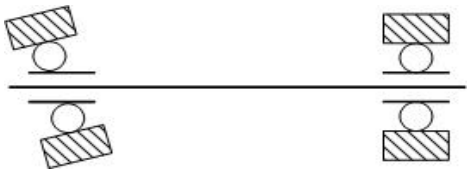
Montaj sırasında rulmanların karşı karşıya denk düşmemesi sonucu oluşur. Eksenel yönde kuvvetler doğurur. Radyal ve eksenel yönde rotor hızının 1x ve 2x katlarında titreşim oluşturur. Eksenel yönde titreşimler mevcutsa bu paralelsizliğin belirtisidir. Dört çeşit paralelsizlik mevcuttur (Şekil 2.5, Şekil 2.6, Şekil 2.7, Şekil 2.8).



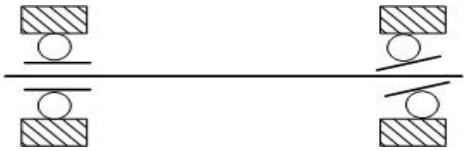
Şekil 2.5: Rulmanların merkezlenememesi



Şekil 2.6: Şaftın eğilmesi



Şekil 2.7: Dış bilezik eğilmesi



Şekil 2.8: İç bilezik eğilmesi

2.1.7 Şaft eğilmesi

Eksen kaçıklığı, dengesizlik, paralelsizlik, rotor çubuğunun kırılması gibi etkenler ile rotora gelen dengesiz kuvvetler şaftın eğilmesine sebep olur. Eğilen şaft rotor ve statorun birbirine sürtünmesine neden olabilir. Sürtünme sonucu stator çekirdeği ve sargısı zarar görür. Stator sargısında yalıtım malzemesinin zarar görmesi kısa devreye neden olabilir. Şaft eğilmesi ile oluşan dengesizlik yüzünden, rotor dönme frekansında titreşim oluşur.

Şaft eğilmesinin diğer bir sebebi esnek şaft kullanımıdır. Esneklikle kast edilen şaftın 1. kritik hızından yüksek değerlerde dönmesidir.

2.1.8 Stator Hataları

Statorda izolasyon hatalarıyla ilgili sorunlar yaşanmaktadır. Faz-faz, faz-toprak kısa devre olması hata tipleridir. Aynı fazda, birkaç yerde izolasyonun bozulması aynı faz içerisinde kısa devre oluşturabilir. Faz kendi üzerinde kısa devre olursa, fazın sarım sayısı ve direnci azalır. Stator fazının kendi üzerinde kısa devre olmasına "turn to turn" adı verilmektedir. Bu hata penman tarafından eksenel yönde akı değişimi incelenerek tespit edilmiştir (**Nandi ve Toliyat, 1999**). İnceleme sargısı rotor şaftının etrafına yerleştirilerek eksenel yönde akı değişimi ölçülür. Eksenel yöndeki akı bilgisinde $(k \pm \frac{b\cdot(1-s)}{p})\cdot f$ frekansı olarak ortaya çıkar. b =1, 2, 3, ..., (2p-1) ve k=1, 3 tür.

İzolasyona zarar veren diğer etkenlere baktığımızda aşırı sıcaklık ve yüksek gerilim sayılabilir. Sıcaklıkta her 10^o artış için izolasyonun ömrünü yarı yarıya azaltır. Sargıda yüksek gerilimden dolayı oluşan bölgesel boşalmalar izolasyonu bozalabilir.

2.2 Arızaların Sebepleri

Isıl dengesizlik, motorun bağlı olduğu zeminin zayıf olması ve gövdenin dayanımsız olması arıza sebeplerinden birkaçıdır. Titreşimin artması ise en büyük arıza sebebidir.

2.2.1 Aşırı Isınma

Motorun fanlama yönüne göre ters dönmesi, yetersiz soğutma, motorun kalkış zamanının uzaması ve sık sık dur kalk yapması motorun aşırı ısınma nedenlerindendir. Motorlar ilk kalkış anında 5 kat fazladan akım çeker. Eğer motor sıklıkla dur kalk yapıyorsa sıcaklık çabuk artar. Aşırı sıcaklıktan oluşacak arızaları önlemek için motorun operasyon sıcaklığı düşürülmeli veya izolasyonun sınıfı artırılmalıdır.

Aşırı ısınma, rotor çubuklarının fazla ısınmasına yol açar. Fazla ısınan metal üzerinde bölgesel erimeler sonucu kopan parçalardan dolayı çukurlar oluşur. Kopan parçalar stator izolasyonuna zarar vererek "turn to turn" arızasına yol açar. Bölgesel

erimeler artarsa rotor çubukları kırılabilir. Fazla ısınmanın en iyi göstergesi rotor yüzeyindeki renk değişimidir.

Rulmanlar aşırı ısınırsa, yağ özelliğini kaybedeceği için rulman arızaları oluşur.

2.2.2 Isıl Dengesizlik

Motorun kısa süre çalıştırılması motorun ısıl dengeye gelmesini önler. Isıl dengesizlik sonucunda motorun sıcaklığı salınım yaparak sürekli değişir.

Isıl dengesizlik nedeniyle rotor çubuklarının dirençlerinde farklılık oluşur. Bu da dengesiz çekme kuvvetlerini oluşturacağı için dengesizliğe mahal verir. Rotor çubuklarının bir ısınıp bir soğuması ek gerilmelere yol açar. Isıl dengesizlikten oluşan dengesiz çekme kuvvetleri, rotor çubuklarını yorarak kırılmasına neden olabilir.

Arızanın bundan kaynaklı olup olmadığını anlamak için, motor soğukken titreşim veya akım ölçümü yapılır. İkinci ölçüm, motor 15 dakika çalıştıktan sonra sıcakken yapılır. Yapılan iki ölçüm karşılaştırılır. Farklılık varsa buna neden olan ısıl dengesizliktir.

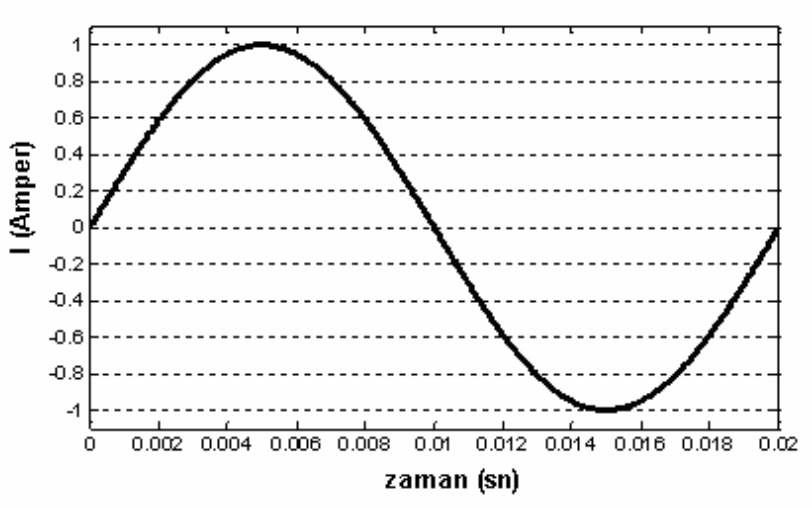
2.2.3 Dengesiz Çekme Kuvveti

Rotorun eğilerek statora vurmasına neden olabilecek kuvvetlerdir. Gerçek dünyada rotor tam olarak merkezlenemez. Bunun sebepleri eksen kaçıklığı, dengesizlik rulman aşınması, paralelsizlik gibi arızalardır. Statorla rotor arasındaki hava aralığı bir yönde azalırsa, azalan hava aralığı tarafında daha büyük çekme kuvveti oluşur. Bunun tek sebebi ise magnetik akı yolu direncinin azalmasıdır. Aynı değerdeki sargı akımı, magnetik akı yolunun azalmasıyla daha fazla akı üretir. Hava aralığının artan tarafı için bu tam tersidir. Artan kuvvet rotoru statora yaklaştırır. Hava aralığı sıfır olup rotorla stator birbirine sürtünene kadar bu sürer. Her zaman merkezleme problemi ve bundan dolayı oluşan eğme kuvveti mevcuttur. Doğal olarak bu kuvveti karşılayan ise rotor şaftının dayanımıdır. Sargılarda çoklu paralel devreler bu etkiyi azaltır.

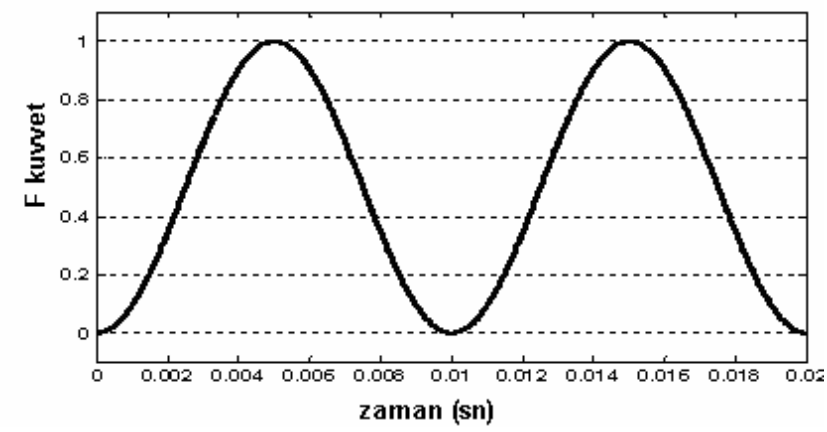
Rulman yataklarına gelen dengesiz çekme kuvvetleri, rulmanın yorulmasına ve aşınmasına sebep olur.

2.2.4 Elektro Magnetik Kuvvetler

Stator sargısından akan akım, karesiyle orantılı kuvvetler oluşturur ($F \approx I^2$). F [N] kuvvet, I [A] akım dır.



Şekil 2.9: Akımın zamanla değişimi



Şekil 2.10: Kuvvetin zamanla değişimi

Şekil 2.9 ve Şekil 2.10 'dan anlaşılacağı gibi akımın frekansı 50 Hz ise akımla karesel artan kuvvetin frekansı akımın 2 katı 100 Hz olmaktadır. Sargılardaki akım, sargıların 2xf frekansında salınmasına sebep olur. Motorun titreşim spektrumunda bu frekans görülür. Salınım stator yalıtkanının zarar görmesine ve bakırların bağlantı yerlerinden kopmasına sebep olabilir. Artan yükle akım artar ama sargıları titreştiren

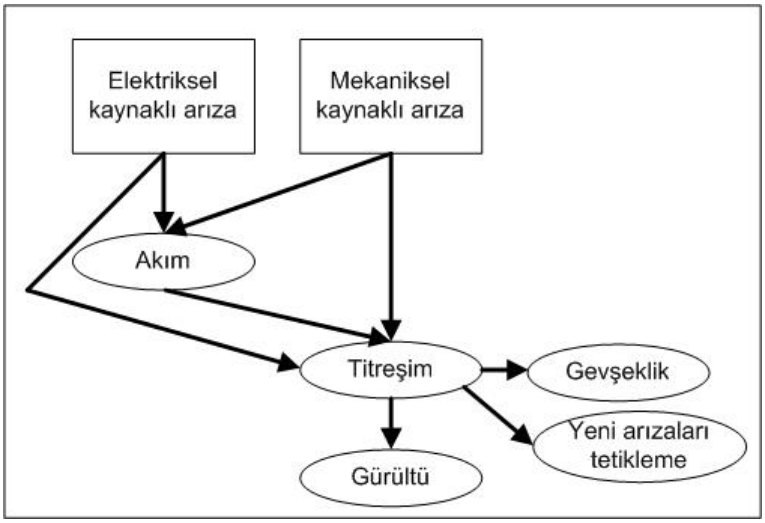
kuvvetin değeri değişmez. Bu kuvveti yaratan etken MMK'dır. Yük bindiğinde rotorda akan akımın değeri artacağı için rotor ve statordaki değişim birbirini dengeler. Magnetik akıda büyük bir değişim oluşmaz. Buradan yükle elektro magnetik kuvvetin yarattığı titreşimin değeri değişmeyeceği anlaşılmaktadır.

Uzun sargılarda yani büyük makinalarda bu etki artmaktadır. Kalkış zamanının gecikmesine bile yol açabilir.

Rotor çubukları da kendi arasında etkileşim içerisindedir. $2xf_2$ frekansında titreşim oluşur. Motor kalkış yaparken $f = f_2$ dir.

2.3 Arızaların Etkileri

Arızaların kaynağı söylediğimiz gibi elektriksel ve mekaniksel olabilir. Ama etkileri genelde tüm parametrelerde olur. Etki ettiği parametreleri sıralarsak sıcaklık, titreşim, akım, akı, tork ve hız dır. Genelde akım ve titreşim ölçümü yapılır.



Şekil 2.11: Arızaların etkisi

Elektriksel ve mekaniksel kaynaklı arızalar direk akım ve titreşim sinyali üzerinde etkide bulunabilir. Daha sonra akımdaki değişimlerde Maxwell kanununa göre titreşim sinyalini etkiler. En sonunda oluşan titreşimlerde gürültü yaratarak etkisini gösterir (Şekil 2.11).

Titreşimle makina parçaları arasındaki boşluk artar ve gevşeklik problemi oluşur. Bunun en büyük sebebiyse makinaya etki eden iç ve dış kuvvetlerdir. Titreşim diğer

arızaların oluşmasına yol açabilir. Titreşimin kaynağının veya sebebinin bulunması gerekir. Titreşimin artmasına sebep olan rezonansın olup olmadığına bakılmalıdır. Arızaların diğer parametrelerdeki etkileri aşağıdaki gibi sıralanabilir.

a) Dengesiz şebeke akımı.

b) Torktaki darbelerin artması.

c) Ortalama torkun azalması.

d) Kayıpların artması ve verimliliğin azalması.

e) Aşırı ısınma.

f) Hızda salınımlar.

g) Sıcaklık değişimi.

2.3.1 Arızaların Farkları

Elektriksel kaynaklı arızaları mekaniksel kaynaklı arızalardan ayırmanın tek yolu motor çalışır durumdayken, elektrik enerjisinin bir anda kesilip elektriksel etki ortadan kaldırılmasıyla anlaşılır. Geriye kalan tüm etki mekaniksel etkidir. Elde edilen ölçümde titreşimin zamanla azalması gerekir. Elektriksel kaynaklanan arızalara örnek verirsek kırık rotor çubuğu olabilir. Elektro magnetik titreşim kuvvetleri de elektriğin kesilmesiyle ortadan kalkar. Elektrik kesildikten sonra dengesizlik arızasının titreşim frekansındaki etkisinin hızla orantılı azalması, mekaniksel olana en iyi örnektir.

Elektriksel kaynaklı titreşimlerde, titreşimin değeri gerilimin karesiyle artar. Akımla gerilim doğru orantılıdır ($V \approx I$). MAY ile akım doğru orantılıdır ($B \approx I$). Kuvvetle MAY karesel değişir ($F \approx B^2$). Sonuçta kuvvet ($F \approx V^2$) gerilimle karesel olarak artar. Burada dikkat edilmesi gereken nokta ise doyma olduğu zaman bu durum ortadan kalkar ve eğri paraboliklikten çıkar. Gerilim ne kadar artarsa artsın titreşim artmaz sabit değer alır.

2.4 Arıza Tanısı Yöntemleri

Arıza tanısı için geliştirilen izleme yöntemleri aşağıda sıralanmıştır.

a) Elektromagnetik izleme :

Hava aralığının içerisine sargı yerleştirilerek yapılır. Statorun oluklarına yerleştirilen ek sargıyla hava aralığı gerilimi izlenir. İkinci olarak şaftın etrafına konur ve eksenel akı tespit edilir. Arızaları tespit için sıksık kullanılmaktadır.

b) Sıcaklık izlemesi :

Arızalar motor içinde sıcaklık değişimine yol açar. Değişim belirli frekanstadır. Sıcaklık algılayıcıları statordaki sargıların içine yerleştirilir ve ölçüm yapılır.

c) Gürültü veya titreşimin izlenmesi :

İvme ölçerler ile titreşim bilgisi ölçülür. Ölçüm yaparken alçak, yüksek veya aralık geçiren (band pass) filtrelerden faydalanılır. Gürültü ise gerekli ölçüm aletleriyle motorun etrafından radyal yönlü olarak ölçülür.

d) Motor akımı izlenmesi :

e) Tork izlemesi :

f) Hız izlemesi :

2.5 Hesaplamalarda Yapılan Kabuller ve Bazı Tanımlar

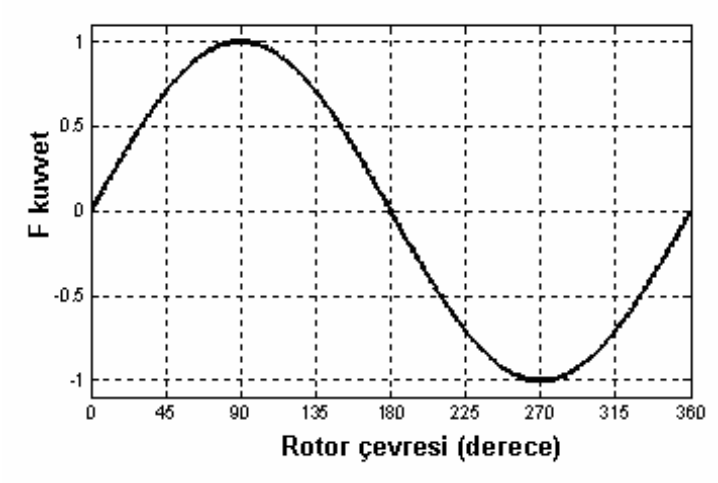
Hava aralığının geçirgenliği rotor ve stator çekirdeğine göre kötü olduğu için stator ve rotor çekirdeklerinin geçirgenlikleri $\mu = \infty$ olarak alınmıştır. Reluktans hesabında sadece hava aralığı geçirgenliği kullanılmaktadır. Faz kaymaları ve rotor çubuklarının bükülmüş olarak rotora yerleştirilmeleri ihmal edilmiştir.

2.5.1 Mod

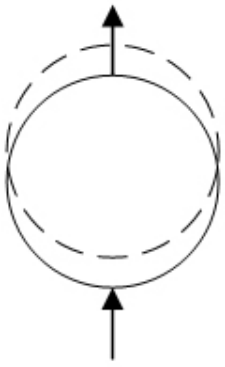
Rotor çevresi boyunca hesaplanan kuvvetlerin etkisinin anlaşılabilmesi için mod kavramını açıklamamız gerekmektedir. Örneğin; hava aralığı boyunca yaratılmış

olan $F = \sin(a \cdot \theta - w \cdot t)$ kuvveti var olsun. F kuvvetinin modu a , frekansı da $\frac{w}{2 \cdot \pi}$ dir.

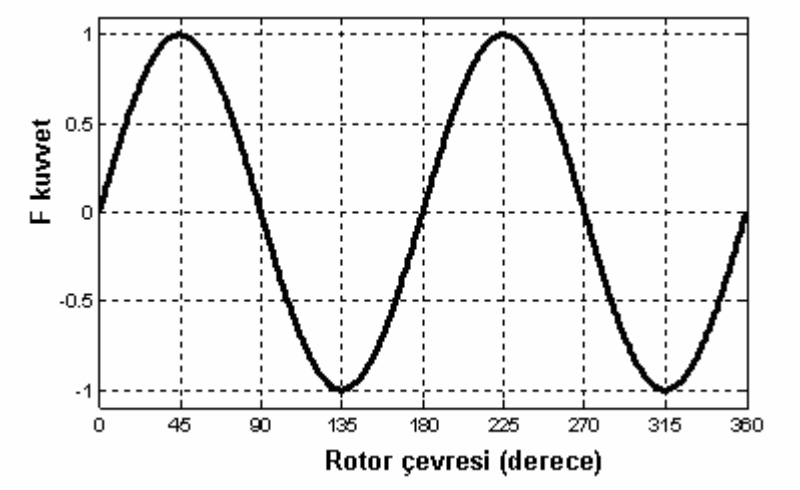
Mod kavramı, kuvvetin rotor üzerinde yaratmış olduğu çekme yönü sayısıdır. a'nın değeri 1 ise mod 1 demektir. Frekansı 50 Hz, zaman t = 0 alınsın. Rotorun çevresi θ 0'dan $2 \cdot \pi$'ye değişmektedir. θ'grafiklerde gösterirken kolaylık olması için 0^o'dan 360^o arası alınmıştır. Bu değerler için Şekil 2.12'de motorun çevresi boyunca motora etkiyen kuvvet verilmiştir. En yüksek kuvvet değerleri 90^o ve 270^o olmaktadır. Şekil 2.13'te en yüksek değerdeki kuvvetleri derece olarak yerlerine koyup gösterirsek tek yönlü motoru eğmeye çalışan bir kuvvet ortaya çıkar. Mod arttıkça rotora etki eden çekme kuvvetlerinin yönü artmaktadır. Mod sayısının düşük olması tehlikelidir. En tehlikeli kuvvet mod 1 de oluşur. Rotora az yönden çekme uygulandığı için şekil değiştirme olasılığı daha fazladır. Mod sayısı artınca her yönden çekme olacağı için rotorun şekli silindirik kalır. Dengesiz hava aralığının oluşmasına mani olur.



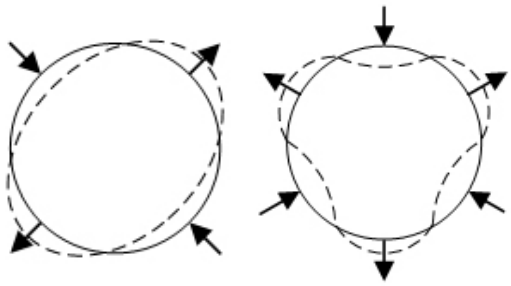
Şekil 2.12: Mod – 1 rotor boyunca kuvvetin değişimi



Şekil 2.13: Mod 1 kuvvetinin etkisi



Şekil 2.14: Mod 2 rotor boyunca kuvvetin değişimi



Şekil 2.15: Mod 2 ve mod 3 kuvvetinin rotordaki etkisi

Mod 2'de rotor çevresinde oluşan kuvvetin değişimi Şekil 2.14'te gösterilmiştir. Mod 2 ve 3'ün rotor üzerindeki etkisi Şekil 2.15'te gösterilmiştir.

2.5.2 Sargı Faktörünün Hesabı

Faz ve kutup başına düşen oluk sayısının tanımı,

$$q = \frac{N}{2 \cdot p \cdot m} \tag{2.1}$$

dir. N her fazdaki sarım sayısı, m faz sayısıdır. Elektriksel açı (θ_e [rad]) ile mekaniksel açı (θ [rad]) arasındaki ilişki denklem (2.2) ile verilmiştir.

$$\theta_e = p \cdot \theta = p \cdot \frac{2\pi}{Z} \tag{2.2}$$

Z oluk sayısıdır. Artık dağılma faktörünün formülü verilebilinir.

$$K_d = \frac{\sin(q \cdot \frac{\theta_e}{2})}{q \cdot \sin(\frac{\theta_e}{2})} \tag{2.3}$$

Harmoniğin derecesine göre dağılma faktörünün formülü yenilenmelidir.

$$K_d = \frac{\sin(\frac{\pi \cdot \nu}{m})}{\frac{Z}{2 \cdot p \cdot m} \cdot \sin(\frac{p \cdot 2 \cdot \pi \cdot \nu}{Z})} \tag{2.4}$$

ν . harmoniğin derecesidir. Kirişleme faktörünün formülü verilirse,

$$K_p = \sin(\frac{\nu \cdot \pi}{2 \cdot p}) \tag{2.5}$$

dir. Çap adımlı sargıda yani sargıların 180^o ile sarıldığı sargılarda $K_p = 1$ dir.

3. EKSEN KAÇIKLIĞI

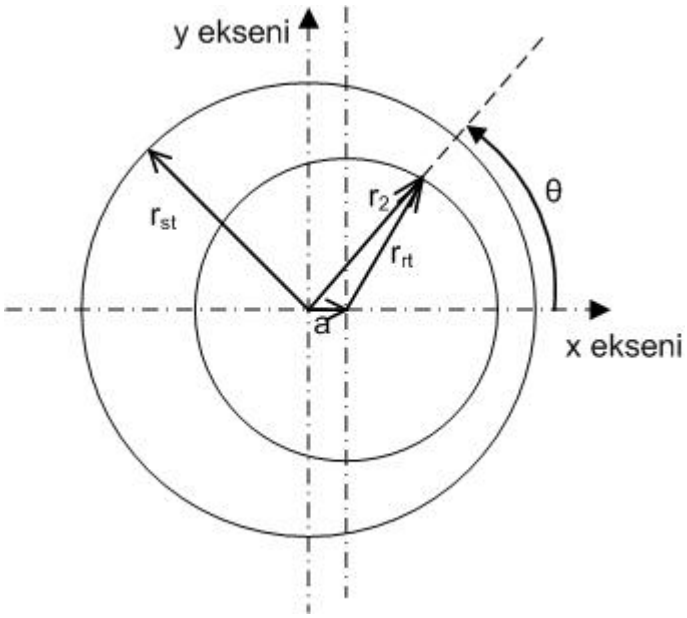
Eksen kaçıklığı elektrik motorlarında meydana gelen en önemli arızalardan bir tanesidir. Rotorun düzgün yerleştirilememesi, üretimdeki toleransların iyi olmaması, rotor şaftının dengesiz kuvvetlerden dolayı eğilmesi, rulman yataklarının zayıf olması, stator ve rotor yüzeylerinin silindirik olmaması gibi olaylar eksen kaçıklığına mahal verir.

Motorlar tasarlanırken verimliliği artırmak açısından küçük hava aralıklı yapılır. Hava aralığının bu denli küçük olması sebebiyle 1 mm'lik küçük bir kayma büyük etkiler yaratmaktadır. Eksen kaçıklığı hava aralığının homojen dağılmamasına yol açar. Bu sebeple etkisi büyük olur. Eksen kaçıklığı, rotoru statorun ekseninden uzaklaştıracak kuvvetin oluşmasına sebep olur. Bu kuvvet rulman arızalarını tetikleyebilir. Statik ve dinamik olmak üzere iki tip eksen kaçıklığı mevcuttur.

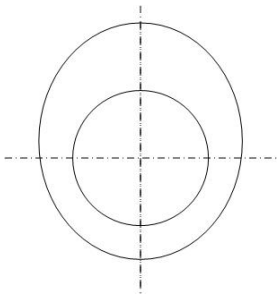
3.1 Statik Eksen Kaçıklığı

Rotor statorun ekseninden farklı bir yerde ama hala kendi ekseninde dönüyorsa bu statik eksen kaçıklığı olarak tanımlanır (Şekil 3.1). Eksen kaçıklığından oluşan minimum hava aralığı zamanla değişmeden sabit durmaktadır. SEK hava aralığının küçük olduğu tarafa doğru sabit duran magnetik çekme kuvveti yaratır.

Statik eksen kaçıklığını aşınmış rulman dış bileziği veya statorun oval oluşu (Şekil 3.2) yaratabilir. Oval statorda, rotor kendi merkezinde dönmesine rağmen statorun merkezinde dönmemektedir.



Şekil 3.1: Statik Eksen Kaçıklığı



Şekil 3.2: Oval stator

3.1.1 Matematiksel Modelleme

Amacımız statik eksen kaçıklığı sebebiyle oluşan yeni hava aralığının rotor çevresi boyunca değişimini bulmaktır. Bu amaçla Şekil 3.1'den faydalanılacaktır. İlk olarak koordinat sistemini statorun merkezine yerleştirilir. Statorun yarıçapı r_{st} [m] ve rotorun yarıçapı r_{rt} [m] dir. $\theta = 0$ konumunda rotorun merkezi statorun merkezinden a [m] kadar uzak mesafeye konularak eksen kaçıklığı oluşturulmuştur. Bu koordinat merkezine göre statorun iç yüzeyi r_1 [m], rotorun dış yüzeyi r_2 [m] şeklinde değişsin. Grafiğe baktığımızda

$$r_1 = r_{st} \tag{3.1}$$

dir. Rotorun dış yüzeyini ifade etmek için Şekil 3.1'de basit geometri kuralları uygulanarak aşağıdaki denklemler yazılır. Rotorun iç yüzeyinin (r_2), x ve y koordinatlarına denk düşen değerlerin bulunması için denklemler yazılır.

$$x = r_2 \cdot \cos(\theta) \quad \textbf{(3.2)}$$

$$y = r_2 \cdot \sin(\theta) \quad \textbf{(3.3)}$$

Rotorun yarıçapı koordinat sistemine göre şu denklemle ifade edilir.

$$(x - a)^2 + y^2 = {r_{rt}}^2 \quad \textbf{(3.4)}$$

Denklem (3.2) ve (3.3)'teki x ve y değerleri denklem (3.4)'te yerine koyulur.

$$(r_2 \cdot \cos(\theta) - a)^2 + (r_2 \cdot \sin(\theta))^2 = {r_{rt}}^2 \quad \textbf{(3.5)}$$

Denklem (3.5) açılıp gerekli sadeleştirmeler yapılır.

$${r_2}^2 \cdot \cos^2(\theta) - 2 \cdot a \cdot r_2 \cdot \cos(\theta) + a^2 + {r_2}^2 \cdot \sin^2(\theta) = {r_{rt}}^2 \quad \textbf{(3.6)}$$

$${r_2}^2 - 2 \cdot a \cdot r_2 \cdot \cos(\theta) + a^2 \cdot \cos^2(\theta) = {r_{rt}}^2 - a^2 + a^2 \cdot \cos^2(\theta) \quad \textbf{(3.7)}$$

$$r_2 - a \cdot \cos(\theta) = \sqrt{{r_{rt}}^2 - a^2 \cdot (1 - \cos^2(\theta))} \quad \textbf{(3.8)}$$

$$r_2 = r_{rt} \cdot \sqrt{1 - \frac{a^2}{{r_{rt}}^2} \cdot \sin^2(\theta)} + a \cdot \cos(\theta) \quad \textbf{(3.9)}$$

Elde edilen denklemde a değeri r_{rt} değerine göre çok küçük olduğu için $\sin^2(\theta)$'lı ifade ihmal edilir.

$$r_2 = r_{rt} + a \cdot \cos(\theta) \quad \textbf{(3.10)}$$

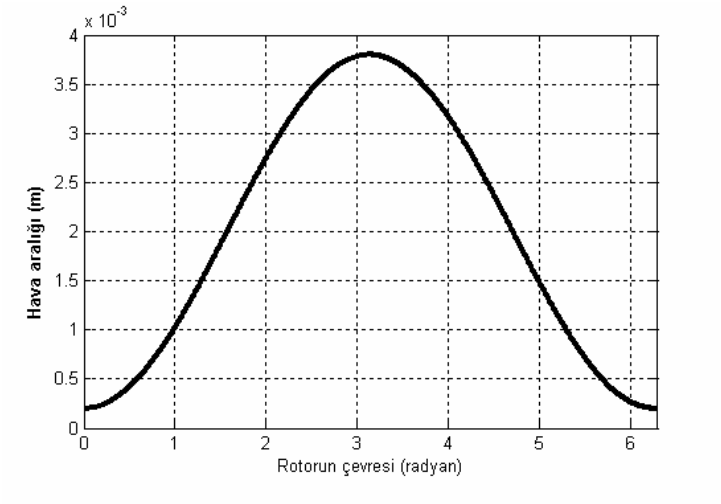
Rotor ile stator arasındaki hava aralığı değişimi $\delta(\theta)$ [m], statorun iç yüzeyi konumundan (r_1), rotorun dış yüzeyi konumu (r_2) çıkarılarak bulunur.

$$\delta(\theta) = r_1 - r_2 = r_{st} - r_{rt} - a \cdot \cos(\theta) \quad \textbf{(3.11)}$$

Eksen kaçıklığı olmadığında hava aralığının değeri δ [m], statorun dış yarıçapı r_{st} 'den, rotorun dış yarıçapı r_{rt} 'nin çıkarılmasıyla bulunur. Son haliyle eksen kaçıklığı olmayan hava aralığını koyarak eksen kaçıklığı ile değişen hava aralığı bulunur.

$$\delta(\theta) = \delta - a \cdot \cos(\theta) \quad \textbf{(3.12)}$$

Değerler verilerek rotorun çevresi boyunca eksen kaçıklığı ile değişen hava aralığının miktarını Şekil 3.3 'te görmekteyiz. a = 0,0018 m, δ = 0,002 m ve θ [rad] rotorun çevresi boyunca 0'dan 2π 'ye değişmektedir.



Şekil 3.3: Hava aralığının rotor çevresindeki değişimi

3.1.2 İletkenlik Hesabı

Akının geçtiği yolun reluktansı R [1/H],

$$R = \frac{\delta}{\mu \cdot A} \quad \textbf{(3.13)}$$

dır. A akının geçtiği yolun alanıdır. İletkenlik λ (permeans) ise reluktansa, sarım sayısına ve akıma bağlıdır.

$$\lambda = \frac{N^2 \cdot I}{R} = \frac{N^2 \cdot I \cdot A \cdot \mu}{\delta} \quad \textbf{(3.14)}$$

İletkenlik hesabında denklem (3.14)'te görüldüğü üzere iletkenlik hava aralığı ile ters orantılıdır. Burada iletkenliği hesaplanırken sadece hava aralığı hesaba katılmıştır. Bunun sebebini MAY'ın hesabının yapıldığı bölüm 6.1'de anlatılmıştır.

$$\lambda \approx \frac{1}{\delta(\theta)} \quad \textbf{(3.15)}$$

Denklem (3.15) ve (3.12)'ye göre eksen kaçıklığından oluşan hava aralığı iletkenlik değişimi aşağıdaki denklemle ifade edilir.

$$\lambda = \frac{1}{\delta(\theta)} = \frac{1}{\delta - a \cdot \cos(\theta)} \quad \textbf{(3.16)}$$

Bağıl eksen kaçıklığı ε, eksen kaçıklığının hava aralığına oranı şeklinde tanımlanır.

$$\varepsilon = \frac{a}{\delta} \quad \textbf{(3.17)}$$

Denklem (3.17) iletkenlik hesabında yerine konur.

$$\lambda = \frac{1}{\delta(1 - \varepsilon \cdot \cos(\theta))} \quad \textbf{(3.18)}$$

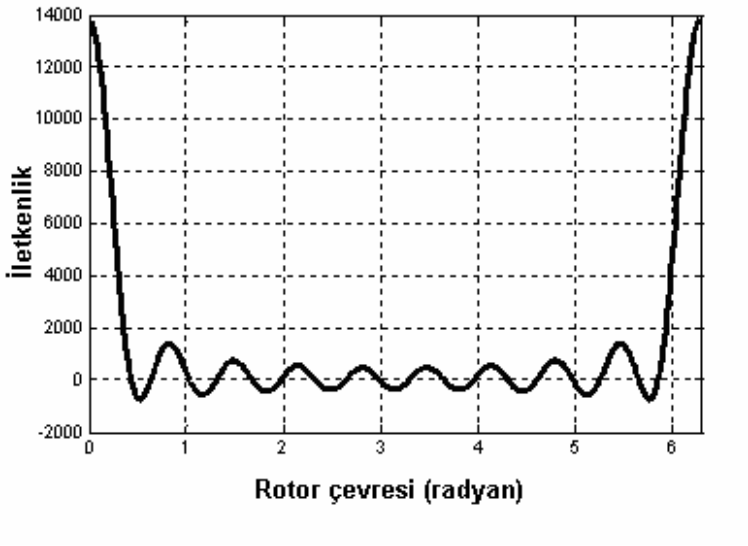
Statik eksen kaçıklığı sebebiyle oluşan hava aralığı iletkenliği fourier serilerine açılır (**Heller ve Hamata, 1977**).

$$\lambda_{se} = \frac{1}{\delta} \cdot (\lambda_0 + \lambda_1 \cdot \cos(\theta) + \lambda_2 \cdot \cos(2\theta) + ...) \quad \textbf{(3.19)}$$

$$\lambda_i = 2.\frac{(1-\sqrt{1-\varepsilon^2})^i}{\varepsilon^i \cdot \sqrt{1-\varepsilon^2}}, \qquad i = 1, 2, 3, ..., \tag{3.20}$$

$$\lambda_0 = \frac{1}{\sqrt{1-\varepsilon^2}},\ \lambda_1 = 2.\frac{(1-\sqrt{1-\varepsilon^2})}{\varepsilon \cdot \sqrt{1-\varepsilon^2}} \tag{3.21}$$

Fourier açılımına göre elde edilen yaklaşık hava aralığı iletkenliği Şekil 3.4'te çizdirilmiştir. Bunun için datalar $\delta = 0{,}002$ m, $\varepsilon = 0{,}9$, θ rotorun çevresi boyunca 0'dan 2π'ye değişmektedir ve i = 0, 1, 2,..., 10 dur.

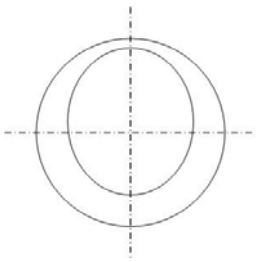


Şekil 3.4: Hava aralığı iletkenliğinin statik eksen kaçıklığı ile rotor çevresi boyunca değişimi

3.2 Dinamik Eksen Kaçıklığı

Rotor statorun ekseni etrafında döner ama kendi ekseninde dönmemektedir. Eksen kaçıklığından dolayı oluşan minimum hava aralığı rotorla beraber dönmektedir. Rotor hızıyla hareket eden hava aralığının küçük olduğu yöne doğru dengesiz çekme kuvveti yaratır. Dinamik eksen kaçıklığını statik eksen kaçıklığına göre belirlemek daha kolaydır. Çünkü DEK'te dengesiz çekme kuvveti rotorla beraber dönerken, SEK'te sabit bir yöne doğrudur. SEK'te arızanın etkisinin anlaşılabilmesi için algılayıcının konması gereken yer çok önemlidir. Rotorun yüzeyinin oval olması

(Şekil 3.5) veya rulmanın iç bileziğinin aşınmış olması dinamik eksen kaçıklığını yaratır.



Şekil 3.5: Oval rotor

3.2.1 İletkenlik Hesabı

SEK'ten tek farkı minimum hava aralığının rotorla beraber dönmesidir. SEK için geçerli olan denklemi rotorla döndürecek ufak ekleme, denklem (3.22)'de yapılmıştır.

$$\lambda_{de} = \frac{1}{\delta} \cdot (\lambda_0 + \lambda_1 \cdot \cos(\theta\text{-}w_r \cdot t) + \lambda_2 \cdot \cos(2 \cdot (\theta\text{-}w_r \cdot t)) + ...) \quad \textbf{(3.22)}$$

w_r [rad/sn] rotorun açısal hızı ve t [sn] zamandır. Tüm terimler statik eksen kaçıklığında verildiği gibi hesaplanır. Tek fark hava aralığının zamanla değişmesidir.

3.3 Eksen Kaçıklığı ile Rotor Dengesizliğinin Farkı

İki arıza karıştırıldığı için açıklamaya ihtiyaç vardır. Dengesizlik kütle merkezinin rotorun dönme merkezinde olmamasıdır. Statik eksen kaçıklığında rotorun ağırlık merkezi, rotorun dönme merkezinde olduğu için herhangi bir dengesizlik söz konusu değildir. Ama dinamik eksen kaçıklığında rotorun ağırlık merkezi, rotorun dönme merkezinde olmadığı için aynı zamanda bu bir statik dengesizliktir.

Her dengesizlik eksen kaçıklığı yaratmaz. Rotorun homojen malzemeden yapılamadığı varsayılırsa. Rotor dönme merkezinde dönmektedir, ama ağırlık merkezi rotorun dönme merkezinde değildir.

4. OLUK ve DOYMA ETKİSİ

Stator ve rotordaki oluklar ve çekirdeğin doyması, eksen kaçıklığı gibi hava aralığındaki iletkenliği etkilemektedir (**Heller ve Hamata, 1977**).

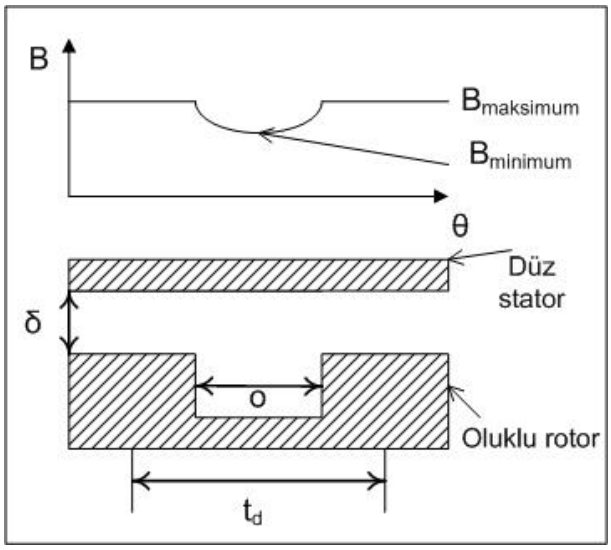
4.1 Stator ve Rotordaki Olukların Etkisi

Hava aralığındaki MAY hesaplanırken yapılan kabullerde stator ve rotor yüzeylerinin düz ve silindirik olduğu düşünülür. Halbuki stator ve rotor yüzeyinde oluklar bulunmaktadır. Oluklar hava aralığı değişimine ve dolaylı olarak iletkenlik katsayısında değişimine yol açar.

4.1.1 Carter Faktörü

Carter faktörü hava aralığı boyunca oluklardan etkilenen MAY'ın hesabının doğru yapılabilmesi için gerekli bir düzeltme katsayısıdır. Statorun düz ve rotorun oluklu olduğu düşünülürse. Hava aralığı boyunca MAY'ın değişimi Şekil 4.1'deki gibidir. Statorla rotor yüzeylerinin düz olduğu bölgede MAY maksimumdur. Rotorun oluk kısmına gelindiği zaman MAY'da bir düşüş söz konusu olur. Hesaplar yapılırken bu düşüşü göz önüne almak için bir k_c katsayısı belirlenir. Maksimum MAY değerini bu katsayıya bölerek hava aralığı boyunca oluşan ortalama MAY değeri bulunmaktadır. k_c katsayısına Carter faktörü denmektedir. Bu katsayıyı deneysel olarak Carter bulmuştur. Şekil 4.1'e göre ortalama MAY'ı Denklem (4.1) vermektedir.

$$B_{ort} = \frac{B_{maksimum}}{k_c} \qquad \textbf{(4.1)}$$



Şekil 4.1: Oluklu rotor ve düz stator çevresi boyunca oluşan magnetik akı yoğunluğu değişimi

$B_{minimum}$ [weber/m^2]'un değeri oluk açıklığı o [m], hava aralığı δ ve iki diş arasındaki mesafe t_d [m]'ye bağlıdır. MAY'daki Carter faktörü kadar azalma, hava aralığındaki artışa denk gelmektedir. Oluk etkisi sebebiyle oluşan yeni hava aralığının değeri aşağıda verilmiştir.

$$\delta_{yeni} = \delta \cdot k_c \tag{4.2}$$

Carterin bulduğu katsayı aşağıdaki denklemden faydalanarak bulunmaktadır.

$$k_c = \frac{t_d}{t_d - \gamma \cdot \delta} \tag{4.3}$$

$$\gamma = \frac{4}{\pi}\left(\frac{o}{2\delta} \tan^{-1}\left(\frac{o}{2\delta}\right) - \ln\sqrt{\left(1+\left(\frac{o}{2\delta}\right)^2\right)} \right) \tag{4.4}$$

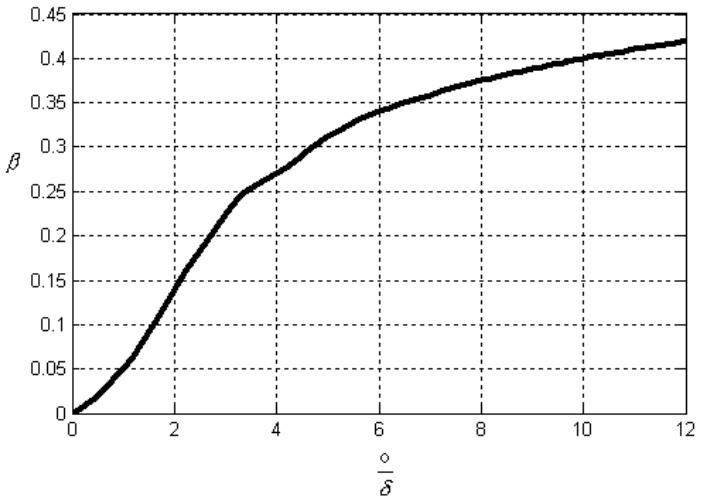
Denklem (4.4) yerine $\frac{o}{\delta} > 1$ için denklem (4.5) kullanılabilir.

$$\gamma = \frac{\left(\frac{o}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{o}{\delta}} \tag{4.5}$$

Carterden sonra daha uygun değerler için çalışılmıştır. Ossana ve Oberrett tarafından elde edilen formüller aşağıda verilmiştir.

$$\text{Ossana } k_c = \frac{t_d + 8\delta}{t_d - o + 8\delta} \qquad \textbf{(4.6)}$$

Oberrett'in formülü için $\frac{o}{\delta}$ oranına göre değişen β değişkeni Şekil 4.2'de tanımlanmıştır.



Şekil 4.2: β 'nın $\frac{o}{\delta}$ 'ye göre değişimi

$$\text{Oberrett } k_c = \frac{t_d}{t_d - 1{,}6 \cdot \beta \cdot o} \qquad \textbf{(4.7)}$$

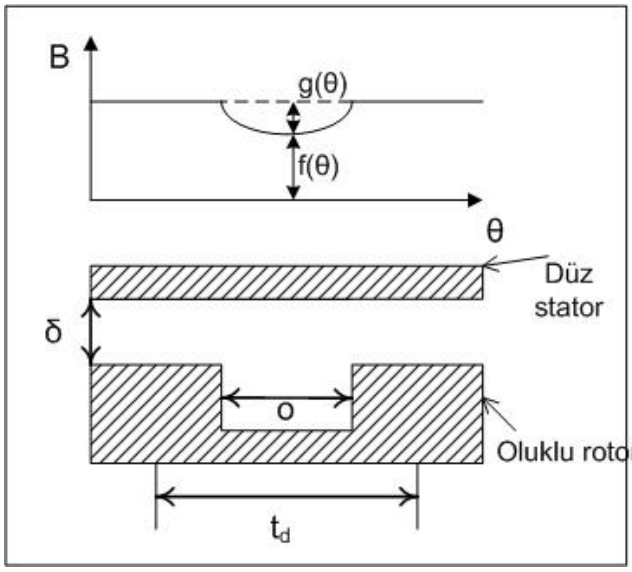
Son denklem Carter'in ilk formülüyle oldukça uyumlu olduğu için hesaplamalarda bu kullanılmıştır. Sadece rotor tarafının oluklu olduğunu düşünülerek bir k_c katsayısı bulunur. Aynı şekilde stator tarafının oluklu rotorun düz olduğunu düşünerek bir tane daha Carter sayısı elde edilir. Elde edilen iki tane Carter sayısını çarparak stator ve rotorun ikisinin de aynı anda oluklu olması için Carter sayısı bulunur (Denklem (4.8)).

$$k_c = k_{c1} \cdot k_{c2} \qquad \textbf{(4.8)}$$

4.1.2 Oluklu Statorun ve Rotorun İletkenliğe Etkisi

Magnetik iletkenlik denklem (3.15)'te görüldüğü gibi hava aralığı ile ters orantılıdır. Oluklar sebebiyle oluşan iletkenlik hava aralığı değişimi ile bulunabilir. Olukların MAY üzerindeki etkisini hava aralığı değişimine dönüştürülmelidir. Yani olukları kaldırıp yerine statorla rotor arasındaki hava aralığının değiştiği kabullenilmiştir. Şekil 4.3'te gösterildiği gibi MAY'ın değişimi f fonksiyonuyla temsil edilsin o da hava aralığı ile ters orantılı değişsin.

$$B = f(\theta) = \frac{1}{\delta(\theta)} \tag{4.9}$$



Şekil 4.3: B'nin değişimi f fonksiyonuyla gösterimi

Denklem (3.15)'e göre iletkenlik hava aralığı ile ters orantılıydı. f fonksiyonu da iletkenlikle doğru orantılı olmaktadır. Hava aralığının f fonksiyonuna göre değişimi denklem (4.10)'da yazılmıştır.

$$\delta(\theta) = \frac{1}{f(\theta)} \tag{4.10}$$

Oluk etkisiyle oluşan yeni hava aralığı, düz stator ve rotor arasındaki hava aralığına göre daha büyüktür. Oluk etkisi sonucu oluşan hava aralığı değişim miktarı, oluklu

hava aralığı değerinden düz stator ve rotor arasındaki hava aralığı değeri çıkarılarak bulunur.

$$\Delta(\theta) = \delta(\theta) - \delta = \frac{1}{f(\theta)} - \delta \qquad \textbf{(4.11)}$$

Hava aralığı değişimini yalnız rotordaki oluklardan kaynaklandığı düşünüldü. Aynı değişim stator tarafından da meydana getirilir. Stator ve rotor tarafından meydana getirilen hava aralığı değişim miktarlarını sırasıyla Δ_1 ve Δ_2 olarak tanımlanırsa. Buna göre toplam hava aralığı denklem (4.12) ile bulunur.

$$\delta(\theta) = \delta + \Delta_1(\theta) + \Delta_2(\theta) \qquad \textbf{(4.12)}$$

Δ_1 ve Δ_2 denklem (4.11)'den faydalanarak stator ve rotor için yazılıp denklem (4.12)'de yerine konur.

$$\delta(\theta) = \delta + \frac{1}{f_1(\theta)} - \delta + \frac{1}{f_2(\theta)} - \delta \qquad \textbf{(4.13)}$$

Sadeleştirmeler yapılır.

$$\delta(\theta) = \frac{1}{f_1(\theta)} + \frac{1}{f_2(\theta)} - \delta \qquad \textbf{(4.14)}$$

Rotor statora göre w_r açısal hızıyla dönmektedir.

$$\delta(\theta) = \frac{1}{f_1(\theta)} + \frac{1}{f_2(\theta - w_r \cdot t)} - \delta \qquad \textbf{(4.15)}$$

Olukların etkisiyle oluşan magnetik iletkenlik için denklem (3.15) ve (4.15)'ten faydalanılır.

$$\lambda = \frac{1}{\delta(\theta)} = \frac{1}{\frac{1}{f_1(\theta)} + \frac{1}{f_2(\theta - w_r \cdot t)} - \delta} \qquad \textbf{(4.16)}$$

İletkenliği hesaplayabilmek için artık f fonksiyonlarının hesaplanması yeterlidir. Fourier açılımı yapılırsa,

$$f_1(\theta) = a_0 - \sum_{b=1}^{\infty} a_b \cdot \cos(b \cdot Z_{st} \cdot \theta) \quad \textbf{(4.17)}$$

$$a_0 = \frac{1}{k_{c1} \cdot \delta} \quad \textbf{(4.18)}$$

$$a_b = \frac{\beta}{\delta} \cdot W_b \quad \textbf{(4.19)}$$

$$W_b = \frac{1}{b} \cdot \frac{4}{\pi} \left[0,5 + \frac{\left(\frac{b \cdot o_1}{t_{d1}} \right)^2}{0,78 - 2 \cdot \left(\frac{b \cdot o_1}{t_{d1}} \right)^2} \right] \cdot \sin(1,6 \cdot \pi \cdot \frac{b \cdot o_1}{t_{d1}}) \quad \textbf{(4.20)}$$

dir. Z_{st} stator oluk sayısı, o_1 stator oluk açıklığı, t_{d2} statorda iki oluk arası mesafe ve b = 0, 1, 2... dir. Rotor için $f_2(\theta\text{-}w_r \cdot t)$ 'yi hesaplarken gene aynı formülden faydalanılır. $f_1(\theta)$ 'dan tek fark θ yerine $(\theta\text{-}w_r \cdot t)$ yazılacak olması ve rotor için o_2, t_{d2}, Z_{rt} ve k_{c2} değerlerinin kullanılmasıdır.

İletkenlik hesabını yapılırken denklem (4.16)'dan faydalanılacaktır. Eğer kullanımı gerekirse denklem (4.16) yerine küçük bir hata ile denklem (4.21)'de kullanılabilir.

$$\lambda = \delta \cdot f_1(\theta) \cdot f_2(\theta\text{-}w_r \cdot t) \quad \textbf{(4.21)}$$

4.1.3 Oluk Sayısının Önemi

Motor dizaynı yapılırken stator ve rotor oluk sayıları iyi ayarlanmalıdır. Uyumlu olmayan oluk sayısı fazla titreşim ve gürültüye sebep olur. Bunun nedeni ise oluk sayısının motora etkiyen kuvvetlerin mod sayısını değiştirmesidir (bölüm 2.5.1). Oluk sayısı düşük mod'lu kuvvetlere yol açarsa titreşimin etkisi büyük olur. Bu

yüzden deneysel olarak bulunmuş rotor ve stator oluk sayısını belirlemeye yarayan kriterler Tablo 4.1'de verilmiştir (**Timar, 1989**).

Tablo 4.1: Motor dizaynı için oluk sayısının belirlenmesi

$Z_{rt} \neq Z_{st}$	Arnold-la, Rummel, Krond, Aparoff
$\lvert Z_{st} - Z_{rt} \rvert$ küçük olmalıdır	Galincev, Heubach
$\lvert Z_{st} - Z_{rt} \rvert \leq 10$	Raskop
$Z_{rt} < Z_{st}$	Heubach, Linker
$Z_{rt} < 1,4 \cdot Z_{st}$	Krondl
$Z_{rt} < 1,25(Z_{rt} + 2p)$	Aparoff
$Z_{rt} \neq 2p(6g+1)$	Arnold-la Cour, Kade, Kron
$Z_{rt} \neq 2p(3g+1)$	Dreese
$\lvert Z_{st} - Z_{rt} \rvert \neq 1,3,5,...$	Heubach, Raskop, Möller
$\lvert Z_{st} - Z_{rt} \rvert \neq p$	Kron, Aparoff
$\lvert Z_{st} - Z_{rt} \rvert \neq 4p$	Aparoff
$Z_{st} - Z_{rt} \neq 6p,\ 12p$	Nürnberg

4.2 Doyma Etkisi

Rotor ve statordaki dişlerde doyma etkisi gözlenir. Bunun sebebi ise denklem (3.13)'ten anlaşılabilir. Alan azalırsa reluktans artar. Denklem (3.14)'ten reluktans artarsa iletkenlik azalır. Dişlerdeki alan, çekirdeğe göre çok küçük olduğu için doyma oluşur. Demirin iletkenliğini sonsuz kabul edersek dişlerdeki reluktans değişimini, hayali hava aralığındaki değişim olarak düşünebiliriz.

4.2.1 Doymanın İletkenliğe Etkisi

Doyma sebebiyle iletkenlikteki değişimi aşağıdaki formülle bulunur (**Nandi, 2004**), (**Moreira ve Lipo, 1992**).

$$\lambda = \frac{1}{\delta} - k_m + k_m \cdot \cos(2 \cdot p \cdot \theta - 2 \cdot w_r \cdot t) \quad \textbf{(4.22)}$$

$$k_m = \frac{2}{3} \frac{(k_{doyma} - 1)}{k_{doyma} \cdot \delta} \quad \textbf{(4.23)}$$

$k_{doyma} = 0,09$ alınabilir. Esasında k_{doyma} katsayısı rotorla stator arasındaki hava aralığındaki gerilimin ölçülmesiyle bulunur. İlk ölçüm motor yüksüzken yapılır. İkinci ölçüm ise motora yük bindiğinde yapılır. İki gerilim verisinin birbirine oranı k_{doyma} katsayısını verir. Motor tam yükteyken ölçüm yapılmasının sebebi doymanın meydana gelmesidir. Motor boştayken doyma oluşmaz.

5. STATOR ve ROTOR MMK'LARI

Döner alan magnetik kuvvetinin oluşturulması (**Alger, 1970**)

a) İçinden doğru akım geçen 1 adet sargının oluşturduğu alan hesaplanır ve uzay harmoniklerine ayrıştırılır.

$$mmk = a_1 \cdot \cos(\theta_e) + a_2 \cdot \cos(2 \cdot \theta_e) + a_3 \cdot \cos(3 \cdot \theta_e) + ... + a_k \cdot \cos(k \cdot \theta_e) + ... \quad \textbf{(5.1)}$$

$$a_k = \frac{2 \cdot M}{\pi \cdot k} \sin(\frac{k \cdot p \cdot \pi}{2}) \quad \textbf{(5.2)}$$

$$mmk = \frac{2M}{\pi}\left(\sin(\frac{p\pi}{2}) \cdot \cos(\theta_e) + \frac{1}{2}\sin(\frac{2p\pi}{2}) \cdot \cos(2 \cdot \theta_e) + ... + \frac{1}{k}\sin(\frac{kp\pi}{2}) \cdot \cos(k \cdot \theta_e) + ... \right) \quad \textbf{(5.3)}$$

b) Doğru akım yerine sinüs şeklinde değişen alternatif akım kullanılır.

$$mmk = \frac{2M \cdot \cos(wt)}{\pi}\left[\sin(\frac{p\pi}{2}) \cdot \cos(\theta_e) + \frac{1}{2}\sin(\frac{2p\pi}{2}) \cdot \cos(2 \cdot \theta_e) + ... + \frac{1}{k}\sin(\frac{kp\pi}{2}) \cdot \cos(k \cdot \theta_e) + ... \right] \quad \textbf{(5.4)}$$

c) Her bir harmonik bileşeni iki tane eşit ama ters yönde dönen bileşene çevrilir.

Örneği k. terim için yapılırsa

$$\frac{2M}{\pi \cdot k} \cdot \sin(\frac{kp\pi}{2}) \cdot \cos(k \cdot \theta_e) \cdot \cos(wt) = \frac{M}{\pi \cdot k} \cdot \sin(\frac{kp\pi}{2}) \cdot \left[\cos(k \cdot \theta_e - wt) + \cos(k \cdot \theta_e + wt)\right] \quad \textbf{(5.5)}$$

Bu ayırma işlemini kirişleme ve dağılma faktörlerini de eklenerek MMK'ya uygulanır. Kirişleme ve dağılma faktörleri bölüm 2.5.2'de anlatılmıştır.

$$\begin{aligned} mmk = \frac{M \cdot u}{\pi}\Big[& K_{p1} \cdot K_{d1} \cdot \cos(\theta_e - wt) + \frac{1}{2} K_{p2} \cdot K_{d2} \cdot \cos(2\theta_e - wt) + \ldots \\ & + \frac{1}{k} K_{pk} \cdot K_{dk} \cdot \cos(k\theta_e - wt) + \ldots \Big] + \frac{M \cdot u}{\pi}\Big[K_{p1} \cdot K_{d1} \cdot \cos(\theta_e + wt) \\ & + \frac{1}{2} K_{p2} \cdot K_{d2} \cdot \cos(2\theta_e + wt) + \ldots + \frac{1}{k} K_{pk} \cdot K_{dk} \cdot \cos(k\theta_e + wt) + \ldots \Big] \end{aligned} \quad \textbf{(5.6)}$$

u her fazdaki sargı sayısıdır.

d) Aynı fazda seri bağlı sargılardaki aynı olan harmonikler toplanır.

Çift sayılı terimler birbirini yok eder.

$$\begin{aligned} mmk = \frac{2M \cdot u}{\pi}\Big[& K_{p1} \cdot K_{d1} \cdot \cos(\theta_e - wt) + \frac{1}{3} K_{p3} \cdot K_{d3} \cdot \cos(3\theta_e - wt) \\ & + \frac{1}{5} K_{p5} \cdot K_{d5} \cdot \cos(5\theta_e - wt) + \ldots \Big] \\ & + \frac{2M \cdot u}{\pi}\Big[K_{p1} \cdot K_{d1} \cdot \cos(\theta_e + wt) + \frac{1}{3} K_{p3} \cdot K_{d3} \cdot \cos(3\theta_e + wt) \\ & + \frac{1}{5} K_{p5} \cdot K_{d5} \cdot \cos(5\theta_e + wt) + \ldots \Big] \end{aligned} \quad \textbf{(5.7)}$$

e) Farklı fazdaki harmonik alanlar vektörel olarak toplanır.

3 fazlı motor için toplam MMK

$$\begin{aligned} mmk = \frac{6M \cdot u}{\pi}\Big[& K_{p1} \cdot K_{d1} \cdot \cos(\theta_e - wt) + \frac{1}{5} K_{p5} \cdot K_{d5} \cdot \cos(5\theta_e + wt) \\ & + \frac{1}{7} K_{p7} \cdot K_{d7} \cdot \cos(7\theta_e - wt) + K_{p11} \cdot K_{d11} \cdot \cos(11\theta_e + wt) \\ & + \frac{1}{13} K_{p13} \cdot K_{d13} \cdot \cos(13\theta_e - wt) \ldots \Big] \end{aligned} \quad \textbf{(5.8)}$$

$$M = \sqrt{2} \cdot T \cdot I \quad \textbf{(5.9)}$$

T her sargıdaki sarım sayısı, I [A] akım(rms), N her fazdaki sarım sayısı olsun.

$$N = 2 \cdot p \cdot u \cdot T \tag{5.10}$$

MMK'yı tekrar düzenleyip cosinüs yerine sinüs kullanılırsa yeni denklem aşağıdaki gibi olur.

$$mmk = \frac{3\sqrt{2} \cdot N \cdot I}{\pi \cdot p} \sum_{c_1=0}^{\infty} \frac{1}{\nu} \cdot K_{\nu} \cdot \sin(\nu \cdot \theta \pm w \cdot t) \tag{5.11}$$

ν hamoniğin derecesi, w [rad/sn] stator döner alanının açısal hızıdır. K_{ν} sargı faktörü bütün harmonikler için aynıdır. Denklem (5.8)'de, elektriksel açıyla mekaniksel açı arasındaki ilişki (Denklem (5.12)) yazılıp denklem (5.11) elde edildi. Denklem (5.11)'de en son MMK denklemi mekaniksel konuma bağlı yazıldı.

$$\theta_e = p \cdot \theta \tag{5.12}$$

$$\nu = p(6c_1 \pm 1) \tag{5.13}$$

Açısal hızın önündeki $\pm$ işareti denklem (5.8)'e göre yazılmalıdır. Artı olduğu zaman 1. harmonikle aynı yönlü, eksi olduğunda ters yönlü dönen harmonikten söz edilmektedir.

5.1 Stator MMK'sı

Denklem (5.11) stator MMK'sı için geçerlidir.

$$MMK_{st} = \frac{3\sqrt{2} \cdot N \cdot I_{st}}{\pi \cdot p} \sum_{c_1=0}^{\infty} \frac{1}{\nu} \cdot K_{\nu} \cdot \sin(\nu \cdot \theta \pm w \cdot t) \tag{5.14}$$

5.2 Rotor MMK'sı

Rotor MMK'sı çıkarılmıştır. Bulunan sonuç **Heller ve Hamata** (**1977**) tarafından verilen rotor MMK'sı ile aynı olduğu görülmüştür. Rotor MMK'sının yazılabilmesi için öncelikle harmonikler konusuna değinilecektir (**Boduroğlu, 1988**).

5.2.1 Harmonikler

Harmoniklerin dönme hızı, harmoniğin derecesine göre değişmektedir. Birinci harmonik stator döner alan hızıyla (n_1 [devir/dk]) dönüyorsa diğer harmoniklerin dönme hızı denklem (5.15)'le bulunur.

$$n_{1\nu} = \frac{n_1}{\nu} = \frac{f \cdot 60}{p \cdot \nu} \qquad \textbf{(5.15)}$$

Kaymanın tanımı denklem (5.16) ile verilmiştir. Rotor dönme hızı n [devir/dk] dir.

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{f_2}{f} \qquad \textbf{(5.16)}$$

$$\frac{n}{n_1} = (1 - s) \qquad \textbf{(5.16.a)}$$

Şimdi stator sargısının ν. alan harmoniği tarafından rotorda endüklenen gerilim ve akımın frekansı yazılacaktır.

$$f_{2\nu} = s_\nu \cdot f \qquad \textbf{(5.17)}$$

Rotorun ν. Harmoniğe nazaran kayması (s_ν) denklem (5.18)'de yazılmıştır.

$$s_\nu = \frac{n_{1\nu} - n}{n_{1\nu}} = 1 - \frac{n}{n_{1\nu}} \qquad \textbf{(5.18)}$$

Rotorda oluşan alan harmoniklerinin derecesinin bulunması için iki maddeyle açıklanmıştır.

I. Stator ve rotor sargılarının faz ve kutup sayılarının bir birlerine eşit olması halinde, $\xi = \nu$ dir. ξ rotor harmoniklerinin derecesidir. Bu koşulu bilezikli asenkron motor sağlamaktadır.

II. Faz ve kutup sayılarının eşit olmaması durumunda $\xi = \pm\nu + c_2 \frac{m_2}{p}$ dir. $c_2 = 0,1,2,3,...$ tür. Sincap kafesli asenkron motorlarda faz sayısı çubuk sayısına eşit olduğu için $m_2 = Z_{rt}$ dir.

Rotor harmoniklerinin devir sayısının hesaplanması gerekmektedir. Stator sargısının ν. harmoniği tarafından rotor sargısında oluşturulan ξ. harmonikler rotora göre aşağıdaki devir sayısı ile dönmektedir.

Denklem (5.15) denklem(5.18)'de yerine koyulur ve denklem (5.16.a) kullanılarak harmoniklerin rotora göre devir sayısı bulunur.

$$n_{2\,\xi} = \frac{1}{\xi}\left[1 - \nu(1-s)\right] n_1 \qquad \textbf{(5.19)}$$

$$n_{2\,\xi} = \frac{f_{2\nu} \cdot 60}{p \cdot \xi} \qquad \textbf{(5.20)}$$

Şimdi rotordan statora indirgeme yapılmalıdır. Rotor alanının ξ. Harmonik dalgası statora göre aşağıdaki devir sayısı ile döner.

$$n_{2\,\xi} + n = n_{2\,\xi} + n_1(1-s) = \frac{1}{\xi}\left[1 - (\nu - \xi)\cdot(1-s)\right] n_1 \qquad \textbf{(5.21)}$$

5.2.2 Rotor MMK'sı

Harmonikler kısmında rotorda endüklenen harmoniklerin derecesini ve statora göre dönme hızları bulundu. Bu verileri kullanarak rotor için MMK yazılmalıdır.

$$MMK_{rt} = \frac{\sqrt{2}\cdot Z_{rt} \cdot I_{rt}}{\pi \cdot p} \sum_{c_2=0}^{\infty} \frac{1}{\xi} \cdot K_{\xi} \cdot \sin(\xi \cdot \theta + (w - \nu \cdot w_r + \xi \cdot w_r) \cdot t) \qquad \textbf{(5.22)}$$

Sincap kafesli asenkron motorda sargı faktörü $K_{\xi} = 1$ dir. Sincap kafes yerine sargı koymuş olsaydık sargımızın faz sayısı $\frac{Z_{rt}}{p}$ olur. Bir çubuk için sarım sayısı da $\frac{1}{2}$ dir. Denklem (5.22) ile rotor için MMK bulunmuştur.

6. EKSEN KAÇIKLIĞININ YARATTIĞI FREKANSLARIN BELİRLENMESİ

6.1 Magnetik Akı Yoğunluğunun Hesabı

Hava aralığında oluşan MAY statorda akan akım hakkında önemli bilgiler verir. Ampere dolaşım kanununa göre, magnetik akı yoğunluğunun uzayda herhangi bir kapalı yol üzerinde dolaşması $\mu_0 \cdot \mathrm{I}$ kadar akımın sınırlanan yüzey boyunca akmasına eşittir (Denklem(6.1)) (**Cheng, 1989**).

$$\oint \mathrm{B} \cdot \mathrm{dx} = \mu_0 \cdot \mathrm{I} \qquad \textbf{(6.1)}$$

B [weber/m^2] MAY, $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} H/m$ permeabilitedir. Ampere dolaşım kanununa göre MAY'da oluşacak bir değişim akımda da oluşur. Madem arızaların akım üzerindeki etkisi inceleniyor, hava aralığındaki MAY hesaplanır. Genel kanunlardan yola çıkarak MAY'ın hesaplanmasını görülecektir. MMK amper-sarım olarak tanımlıdır. Aynı zamanda MMK reluktansla (R) akı'nın (Φ [weber]) çarpımına eşittir.

$$\mathrm{N} \cdot \mathrm{I} = \mathrm{mmk} = \mathrm{R} \cdot \Phi \qquad \textbf{(6.2)}$$

Birim alandan geçen akı MAY'ı verir.

$$\mathrm{B} = \frac{\Phi}{\mathrm{A}} = \frac{\mathrm{mmk}}{\mathrm{R} \cdot \mathrm{A}} \qquad \textbf{(6.3)}$$

Denklem (3.13) reluktans tanımı denklem (6.3)'te yerine koyulur.

$$\mathrm{B} = \frac{\mathrm{mmk} \cdot \mu}{\delta} \qquad \textbf{(6.4)}$$

Denklem (6.4)'e baktığımızda MAY hava aralığı ile ters orantılıdır. Hava aralığı magnetik iletkenlikle de ters orantılıdır. Bu yüzden kolaylık olması açısından $\lambda \approx \frac{1}{\delta}$ olarak tanımlayıp MAY hesabına eklenir.

$$B = \mu \cdot mmk \cdot \lambda \qquad \textbf{(6.5)}$$

$\mu = \mu_r \cdot \mu_0 = 1 \cdot 4\pi 10^{-7} = 4\pi 10^{-7}$ dir.

Sonuç olarak yukarıda hesaplanan stator ve rotor MMK'ları, oluk, eksen kaçıklığı ve doyma sebebiyle oluşan iletkenlikleri kullanarak MAY hesaplanabilir.

Hesaplamalarda dikkat edilmesi gereken husus şudur λ_{oluk} ve λ_{doyma} iletkenlikleri δ ile çarpıldıktan sonra kullanılmalıdır. Çünkü hava aralığı değişimi DEK veya SEK'ten gelecektir.

$$B = \mu \cdot \left(\left[mmk_{st} + mmk_{rt} \right] \cdot \lambda_{oluk} \cdot \lambda_{doyma} \cdot \lambda_{dek} \cdot \lambda_{sek} \right) \qquad \textbf{(6.5.a)}$$

Denklem (6.5.a)'ya göre oluk, doyma, DEK veya SEK etkilerinden birinin olmadığı durumda, olmayan etkinin yerine $\lambda = 1$ değeri alınır. Rotor veya stator MMK'sının birinin etkisini ortadan kaldırmak için $mmk = 0$ değeri alınır.

Eğer DEK veya SEK'ten birinin bile etkisi yoksa MAY hesabında kullanılması gereken formül denklem (6.5.b) ile verilmiştir.

$$B = \frac{1}{\delta} \cdot \mu \cdot \left(\left[mmk_{st} + mmk_{rt} \right] \cdot \lambda_{oluk} \cdot \lambda_{doyma} \right) \qquad \textbf{(6.5.b)}$$

Yukarıdaki bütün hesaplamalar MATLAB programında yazılarak MAY hesaplanmıştır. Hesaplanan MAY'ın frekans spektrumu gene bilgisayarda bulunmuştur.

6.2 Akım Spektrumunda Oluşan Frekanslar

Thomson'un (**1986**) yaptığı çalışmada eksen kaçıklığı arızasının akım ve titreşimde oluşturduğu frekanslar bulunmuştur. Thomson frekansları bulurken sadece sinüslü terimleri almış ama bunların önlerindeki katsayıları almamıştır. Bu tez çalışmasında yapılan hesaplarda tüm terimler ele alındığı için oluşacak tüm frekanslar ve bunların genlikleri hakkında tüm bilgiler elde edilmiştir. Thomson'un yaptığı çalışmada elde edilecek frekansların genlikleri hakkında bilgi sahibi olunmamaktadır.

6.2.1 Thomson'un Formülü

Stator akım frekansında eksen kaçıklığının yarattığı frekansları kolaylıkla bulunabilmesi için Thomson'un geliştirdiği formül kullanılmıştır.

$$f_{st_akım} = f\left\{\left(\tau_{rt_oluk}\cdot Z_{rt} \pm \tau_{dek}\right)\cdot\frac{(1-s)}{p} \pm 2\cdot\tau_{doyma} \pm \tau_{st_mmk}\right\} \qquad \textbf{(6.6)}$$

Thomson'un formülasyonuna göre;

τ_{rt_oluk}, rotordaki oluk etkisini göstermektedir. 0'dan ∞'a kadar değerler alır.

Z_{rt}, rotor oluk sayısı.

τ_{dek}, dinamik eksen kaçıklığı etkisini göstermektedir. 0'dan ∞'a kadar değerler alır.

τ_{doyma}, doyma etkisini göstermektedir. 0'dan ∞'a kadar değerler alır.

τ_{st_mmk}, stator MMK'sını gösterir. $\tau_{st_mmk}=1$ dir. Çünkü stator MMK denkleminde (Denklem (5.14)), w'nin önüdeki kat sayı 1 dir. **Thomson (1986)** τ_{st_mmk}'nın $-\infty$'dan ∞'a değiştiğini söylemektedir. **Vas**'da (**1993**) bu değerin $\tau_{st_mmk}=\pm1,\pm3,\pm5,\pm7...$ şeklinde değiştiğini söylemiştir. İkisi de yanlış yorumlamışlardır. Değişik makalelerde hesaplarda sadece $\tau_{st_mmk}=1$ değerini aldıkları için bunun farkına varılamamıştır.

Denklem (6.6)'ya göre çıkan sonuçlara bakılıp, sonraki bölümde kendi bulduğumuz sonuçlar sunulmuştur. Thomson'un formülünü kullanımının anlaşılması açısından örnek verelim. Sadece doyma etkisi var olduğunda oluşacak frekansları bulmak için $\tau_{\text{doyma}} = 1$ diğer etkiler 0 alınır. Şebeke frekansı 50 Hz ise sadece doyma sebebiyle 100 Hz'te akım sinyali oluşur.

6.2.2 Thomson'un Formülü ile Kendi Sonuçlarımızın Karşılaştırılması

Bütün sonuçlarda kullanılan değerler. $s = 0.1$, $p = 1$, $Z_{st} = 48$, $Z_{rt} = 40$ ve $f = 50$ Hz tir. Stator akımındaki etkiyi incelerken her zaman için stator MMK'sını hesaba katılmaktadır.

6.2.2.1 DEK'ten Oluşan Frekanslar

Thomsonun sonuçları;

$\tau_{\text{st_mmk}} = 1$, $\tau_{\text{doyma}} = 0$ ve $\tau_{\text{rt_oluk}} = 0$ dır.

$\tau_{\text{dek}} = 1$ için 5 Hz ve 95 Hz çıkar.

$\tau_{\text{dek}} = 2$ için 40 Hz ve 140 Hz çıkar.

$\tau_{\text{dek}} = 3$ için 85 Hz ve 185 Hz çıkar.

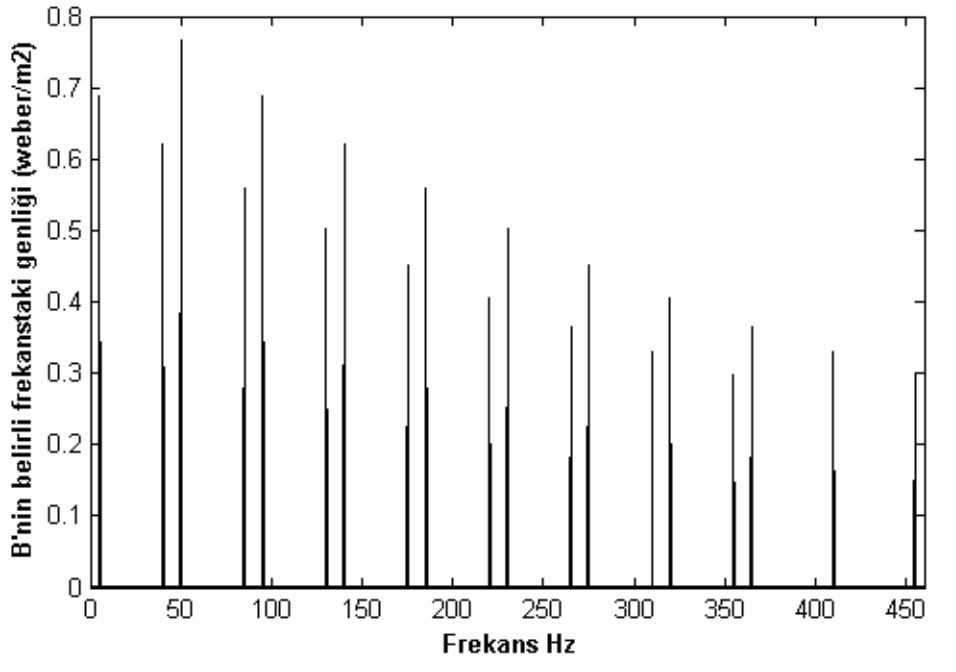
$\tau_{\text{dek}} = 4$ için 130 Hz ve 230 Hz çıkar.

DEK harmonikleri sonsuza doğru gider.

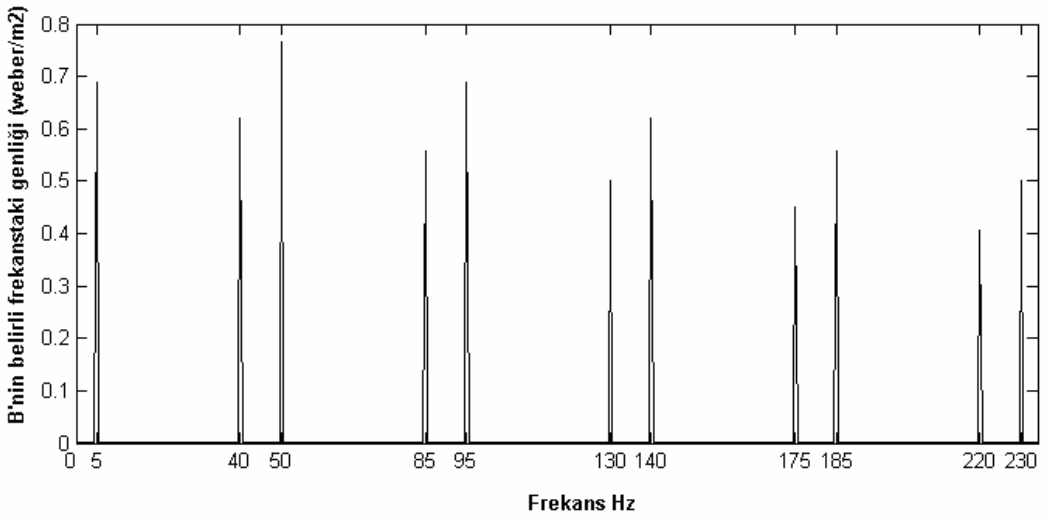
Bilgisayar programının sonuçları;

Şimdi MATLAB'ta yazılan programdan çıkan sonuçları verilecektir. Bilgisayarda yapılan hesaplamalarda kullanılan parametreler.

$\delta = 2$ mm, $l = 0.11$ m, $s = 0.1$, $p = 1$, $Z_{st} = 48$, $Z_{rt} = 40$, $f = 50$ Hz, $m = 3$, $I_{st} = 5$ A, $I_{rt} = 2$ A, $t_{dst} = 12$ mm, $t_{drt} = 10$ mm, $o_{st} = 7$ mm, $o_{rt} = 5$ mm ve $\varepsilon = 0.9$ dur.

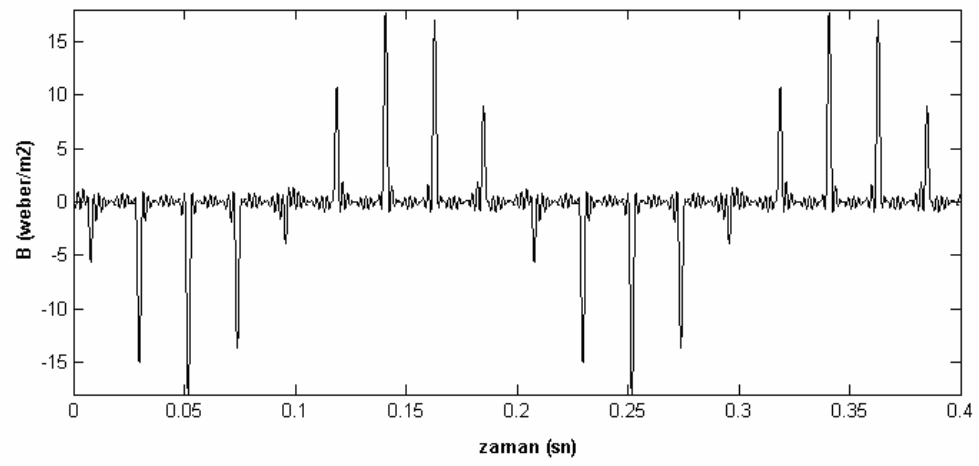


Şekil 6.1: MAY'ın frekans spektrumu



Şekil 6.2: MAY'ın frekans spektrumu düşük frekanslar

Şekil 6.1'de dinamik eksen kaçıklığından oluşan tüm frekansları görülmektedir. Statik eksen kaçıklığı akımda ve titreşimde ek frekans oluşturmaz. Sadece MAY'ın genliğini değiştirir. Statik eksen kaçıklığının titreşimdeki etkisi bölüm 2.5.1'de anlatıldığı gibi rotora etkiyen kuvvetin modunu değiştirebilir. Şekil 6.2, Şekil 6.1'in yakınlaştırılmış şeklidir. Şekil 6.2'nin gösterilmesinin sebebi Thomson'un formülüyle elde edilen frekansların aynılarının bizim yaptığımız verilerde de ortaya çıktığını ve onların genliklerini göstermektir. Şekil 6.3'te MAY'ın zamanla değişimi görülmektedir.



Şekil 6.3: MAY'ın zamanla değişimi

6.2.2.2 DEK ve Oluk Etkisi ile Oluşan Frekanslar

Thomsonun sonuçları;

$\tau_{\text{st_mmk}} = 1$, $\tau_{\text{doyma}} = 0$ ve $\tau_{\text{rt_oluk}} = 1$ dır.

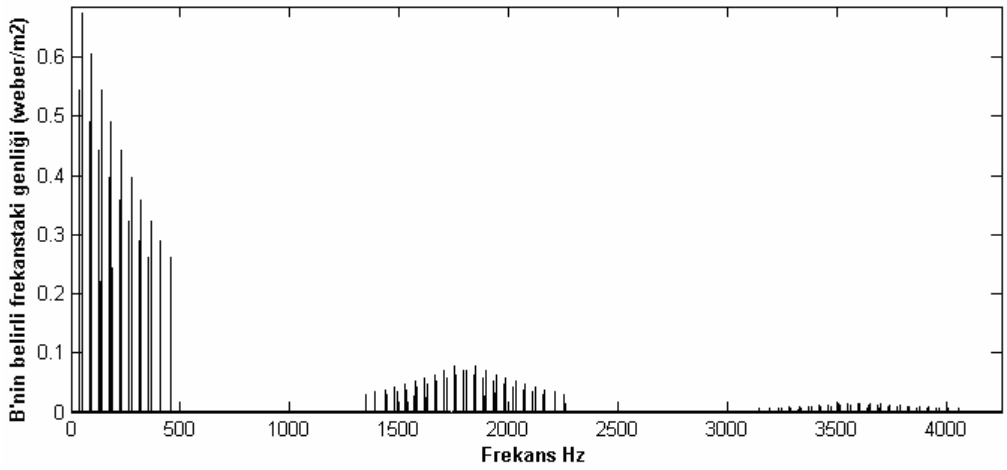
$\tau_{\text{dek}} = 1$ için 1705 Hz, 1795 Hz, 1805 Hz ve 1895 Hz çıkar.

$\tau_{\text{dek}} = 2$ için 1660 Hz, 1760 Hz, 1840 Hz ve 1940 Hz çıkar.

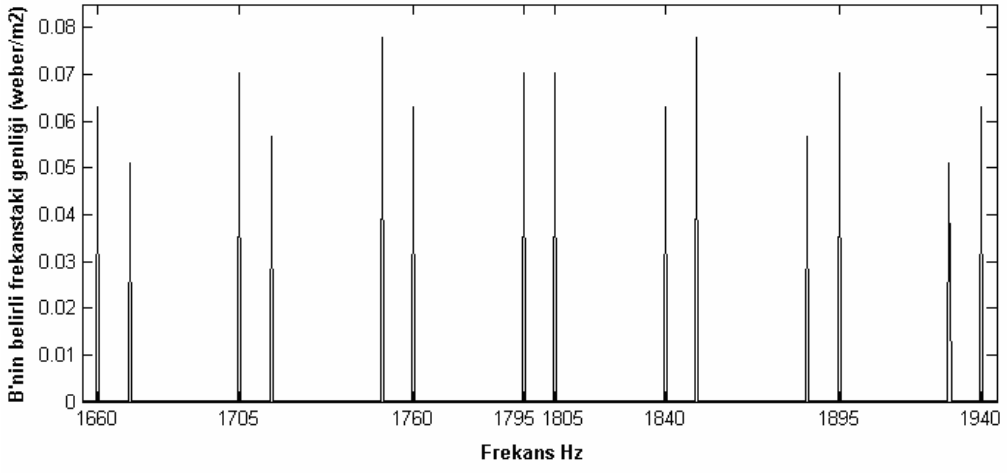
Oluk etkisi işin içine girince yüksek frekanslı akım sinyalleri oluşmaktadır. Eksen kaçıklığının diğer hatalardan ayrılmasını sağlayan bu sinyallerdir.

Bilgisayar programının sonuçları;

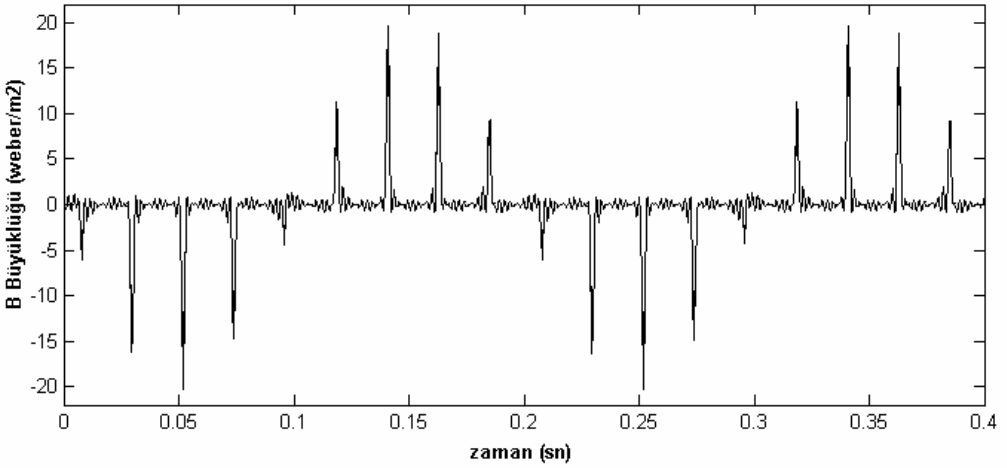
Oluk ve eksen kaçıklığının oluşturduğu frekanslar Şekil 6.4'te gözükmektedir. Frekans spektrumu incelendiğinde sadece eksen kaçıklığından (Bölüm 6.2.2.1) kaynaklanan frekanslarda oluşmuştur.



Şekil 6.4: MAY'ın frekans spektrumu



Şekil 6.5: Oluk etkisiyle oluşan ek frekanslar



Şekil 6.6: MAY'ın zamanla değişimi

Şekil 6.4'ü incelediğimizde dikkate değer iki bölüm gözükmektedir. 500 Hz altındaki sinyaller sadece DEK etkisiyle oluşurken. 1800 Hz civarındaki sinyallerde DEK ile beraber oluk etkileşimi sonucu oluşmuştur. Şekil 6.5'te Thomson'un formülünde oluşan sinyalleri göstermek için 1800 Hz civarındaki frekanslar yakınlaştırılmıştır. Şekil 6.6'da MAY'ın zamanla değişimi gösterilmiştir.

6.2.2.3 DEK ve Doyma Etkisi ile Oluşan Frekanslar

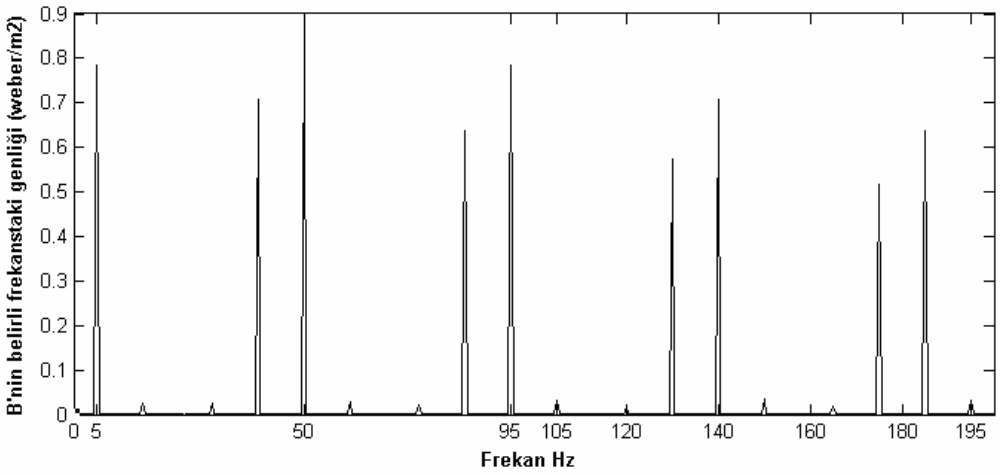
Thomson'un sonuçları;

$\tau_{\text{st_mmk}} = 1$, $\tau_{\text{doyma}} = 1$ ve $\tau_{\text{rt_oluk}} = 0$ dır.

$\tau_{\text{dek}} = 1$ için 5 Hz, 95 Hz, 105 Hz ve 195 Hz çıkar.

Bilgisayar programının sonuçları;

Şekil 6.7'de Thomson'un formülüne göre 5 Hz, ve 95 Hz değerleri büyüktür. Yalnız bunların DEK'ten dolayı oluştuğu unutulmamalıdır (Bölüm 6.2.2.1.1). 105 Hz ve 195 Hz'teki doyma etkisine bakıldığında sinyalin boyutu 0.03 (weber/m^2) kadardır.



Şekil 6.7: MAY'ın frekans spektrumu

6.3 Titreşim Spektrumunda Oluşan Frekanslar

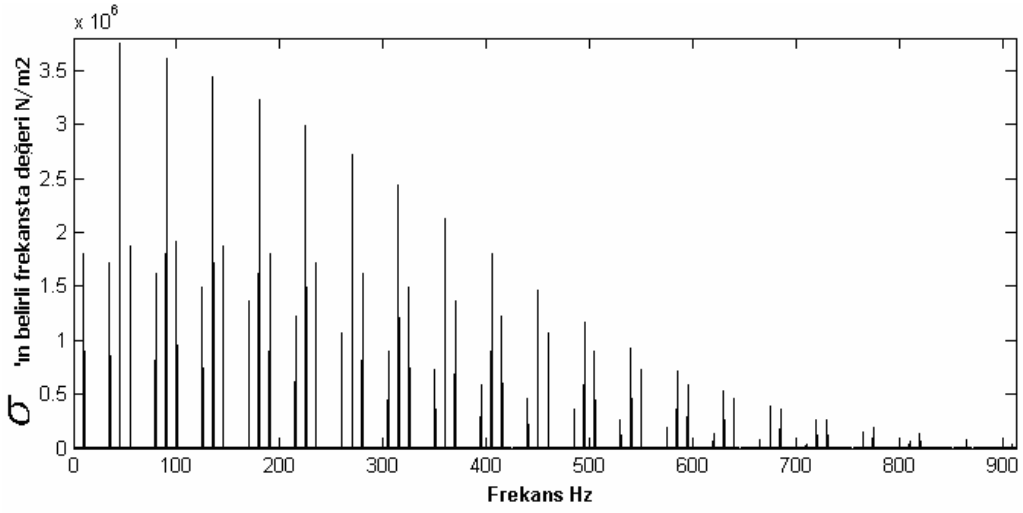
Rotora radyal yönde etkiyen kuvvetler MAY'ın karesiyle doğru orantılıdır. Rotor üzerinde birim alana düşen kuvvet σ [N/m^2] denklem (6.7)'e göre hesaplanır.

$$\sigma(\theta,t) = \frac{B^2(\theta,t)}{2\mu_0} \tag{6.7}$$

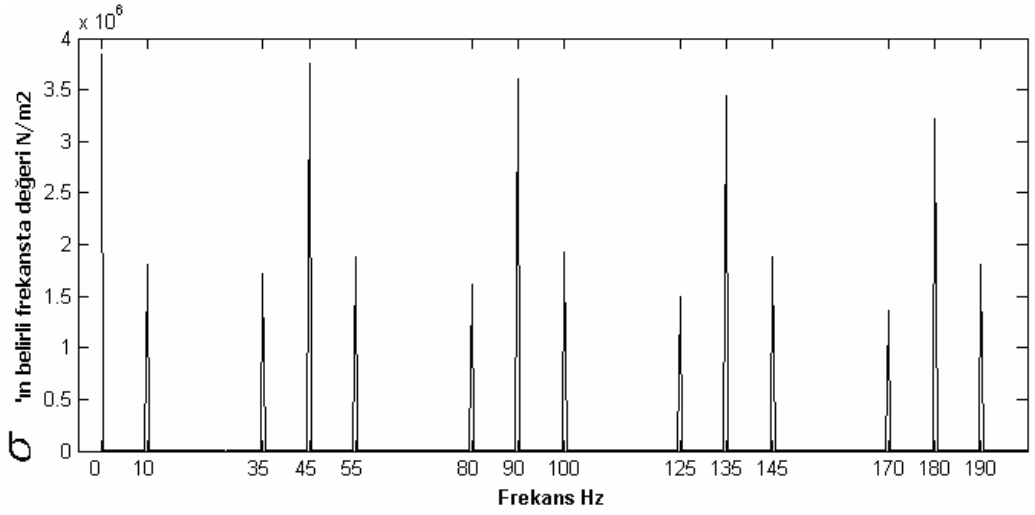
$$\cos(A)\cdot\cos(B) = \frac{1}{2}\left[\cos(A-B)+\cos(A+B)\right] \tag{6.8}$$

Denklem (6.7) bulurken denklem (6.8)'den faydalanılmalıdır. 5 Hz lik sinyalin cosinüs olduğunu düşünelim. Aynı sinyali kendisi ile çarptığımız zaman denklem (6.8)'e göre iki tane sinyal ortaya çıkar. Denklem (6.8)'e göre A-B = 5-5 = 0 Hz ve A+B = 5+5 = 10 Hz te sinyallerdir. Buradan çıkan sonuca göre MAY'ın frekans spektrumunda çıkan sinyallerin 2 katı frekanslarda titreşim frekansları ortaya çıkacaktır. Bunun yanında farklı değerdeki frekansların çarpımı sonucu, frekansların toplam ve fark değerlerinde sinyaller oluşur. Thomson'un formülünden yola çıkarak oluşacak titreşim frekanslarını hesaplamak istediğimizde, denklem (6.8) kolaylık sağlamaktadır. MATLAB'ta yazılan programa göre bu hesabı yapmadan direkt frekans spektrumunu görülmektedir. Şekil 6.8'de birim alandaki kuvvetin frekans spektrumu gözükmektedir. Şekil 6.9'u kullanarak Thomson'un formülünü kontrol edilmiştir. Bölüm 6.2.2.1'de yapılan hesaba göre 5 Hz, 95 Hz, 40 Hz, 140 Hz, 85 Hz, 185 Hz, 130 Hz ve 230 Hz çıkmıştı. Bu frekanslarla denklem (6.8)'e göre hesap yapılırsa.

5+5 = 10 Hz, 95-5 = 90 Hz, 95+5 = 100 Hz, 40-5 = 35 Hz, 40+5 = 45 Hz, 40+85 = 135 Hz ... şeklinde frekanslar ortaya çıkmaktadır.



Şekil 6.8: Birim alandaki kuvvetin frekans spektrumu



Şekil 6.9: Birim alandaki kuvvetin frekans spektrumundaki düşük frekansları

7. RULMAN ARIZASI

Elektrik makinalarının büyük çoğunluğunda bilyalı rulman kullanılmaktadır. Rulman arızaları elektrik makina arızalarının %40'ını oluşturur. Rulman iç ve dış olmak üzere iki bilezik ve iki bilezik arasında dönen bilyalardan oluşur. Bilyaları bir arada tutan kafes mevcuttur. Hataların en büyük sebebi dış kaynaklıdır. Dış kaynaklı arızalar korozyon, iyi yağlamama ve uygun olmayan montajdır.

Uygun olmayan montajda bilyalara eksenel ve radyal ek kuvvetler gelir. Gelen kuvvetlerde yorulmaya ve zorlamaya sebep olduğu için rulman arızaları oluşur. Diğer arıza sebebi fazla veya az yağlama durumunda, bilyalar yağ filmi üzerinde yuvarlanamaz. Bu durum rulmanın sürtünmeden dolayı ısınmasına sebep olur. Rulmanın sıcaklığı $100C^{o}$ 'yi geçmemelidir. Fazla ısınma yağın özelliğini kaybettirir. Yağın özelliğinin kaybolması arızaya neden olur. Son etken su ve asit gibi sıvıların korozyona yol açmasıdır. Korozyon sonucu çukurlaşmalar oluşur. Ayrıca korozyondan kopan küçük parçalar sürtünmeyle aşınma oluşturur.

Rulman arızalarına etki eden diğer önemli etken, motor üzerinde oluşan gerilim farkları sonucu rulman üzerinden akım geçmesidir. Şaft akımı statordan geçtikten sonra rotora geçebilmek için rulman üzerinden devresini tamamlamak ister. Yağ filmi dielektrik malzeme özelliği göstererek, rulmanın kapasitör gibi davranmasına sebep olur. Akım rulmandan geçerken küçük parçaların kopmasına ve kraterlerin açılmasına yol açar. Parçalarda sürtünmeyle aşınmaya neden olur. Geçen akımın değeri büyükse rulman parçalarının birbirine kaynamasına bile mahal verebilir. Rulmanın dış yüzeyi izolasyon malzemesiyle kaplanarak akımın önüne geçilir.

Rulman üzerine fazla yük binmesi ömrünü kısaltır. Rulmanın yükü sebebiyle bozulma ihtimali şöyle hesaplanmaktadır.

$$L10=\frac{10^{6}}{60\cdot n}\left(\frac{C}{P}\right)^{a} \qquad \textbf{(7.1)}$$

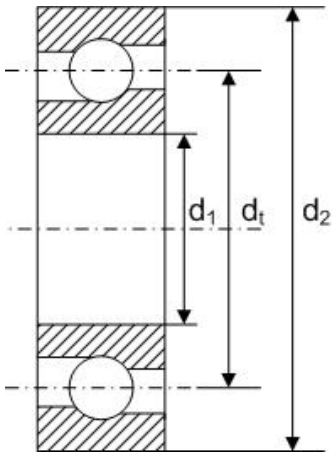
Bilyalı rulman için a = 3, n = dönme hızı (devir/dk), C = rulmanın taşıyabileceği dinamik yük, P = rulmanın üzerine gelen yük, L10 = yıl olarak zamandır. Hesaplardan L10 4 yıl çıkmış olsun, elimizdeki rulmanın 4 yıl sonunda bozulma ihtimali %10 dur. 20 yıl sonra %10 x 5 = %50 dir.

7.1 Rulman Arızaları

Üç tip arıza vardır. İç bilezik, dış bilezik ve bilyada oluşan arızalardır. Rulman arızalarını sayarsak çatlamalar, çukurlaşmalar ve yüzey pürüzlülüğü sayılabilir. Rulmanın mekaniksel yapısı sebebiyle değişik frekanslarda titreşim sinyali oluşur. Üç tane arızadan başka bilyaları tutan kafeste de arıza oluşabilir.

7.2 Titreşim Sinyalinde Yarattığı Etki

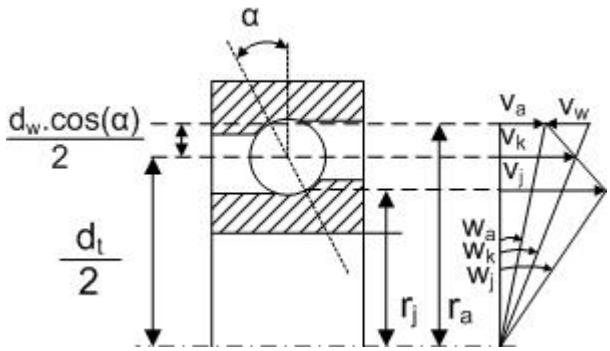
Rulmanın mekaniksel yapısı sebebiyle belirli frekansta titreşim oluşturur. Dış bilezik, iç bilezik ve bilyalar değişik frekansta titreşim yaratır. Bu frekanslar mekaniksel formüllerle bulunacaktır (**Eschmann ve diğ., 1985**).



Şekil 7.1: Bilyalı rulman

Şekil 7.1'e göre iç bilezik çapı d_1 [m] ile, dış bileziğin çapı d_2 [m]'nin ortalaması topun merkezinin çapı d_t [m]'yi verecektir.

$$d_t = \frac{d_1 + d_2}{2} \qquad \textbf{(7.2)}$$



Şekil 7.2: Bilyalı rulmanın kinematiği

Şekil 7.2'den faydalanarak rulmanın kinematik denklemlerini yazacağız. Rulmanın iç bileziğinin dakikada n_j devir sayısıyla döndüğünü, dış bileziğinde n_a devir sayısıyla döndüğü düşünülsün. Saat yönündeki dönme (+), saatin ters yönündeki dönme de (–) kabul edilsin. Rulmandaki bilyalar bileziklere α açısıyla temasta bulunsun ve kaymadan yuvarlansın. n_x [devir/dk] hızıyla dönen bir yapının açısal hızı denklem (7.3)'teki gibi hesaplanır. Açısal hızla, çevresel hız arasındaki bağıntı denklem (7.4)'te verilmiştir.

$$w_x = \frac{\pi \cdot n_x}{30} \qquad \textbf{(7.3)}$$

$$v = r \cdot w_x \qquad \textbf{(7.4)}$$

Şekil 7.2 'ye göre

$$r_j = \frac{d_t}{2} - \frac{d_w \cdot \cos(\alpha)}{2} \qquad \textbf{(7.5)}$$

$$r_a = \frac{d_t}{2} + \frac{d_w \cdot \cos(\alpha)}{2} \qquad \textbf{(7.6)}$$

dır. d_w [m] bilyanın çapıdır. Denklem (7.3),(7.4),(7.5) ve (7.6)'yı kullanarak bilyaların iç ve dış bilezikteki temas noktalarının hızları v_j [m/sn] ve v_a [m/sn] bulunabilir.

$$v_j = \frac{\pi \cdot n_j}{60}\left(d_t - d_w \cdot \cos(\alpha)\right) \tag{7.7}$$

$$v_a = \frac{\pi \cdot n_a}{60}\left(d_t + d_w \cdot \cos(\alpha)\right) \tag{7.8}$$

Topları tutan kafesin hızı v_k [m/sn] bulunacaktır. Kafesin hızı, iç bilezik ve dış bilezikteki temas noktalarının hızlarının toplamının yarısıdır.

$$v_k = \frac{v_j + v_a}{2} \tag{7.9}$$

v_j ve v_a değerlerini denklem (7.7) ve (7.8)'den alıp denklem (7.9)'da yerine yazılır.

$$v_k = \frac{\pi \cdot d_t}{60}\left[\left(1 - \frac{d_w \cdot \cos(\alpha)}{d_t}\right)\frac{n_j}{2} + \left(1 + \frac{d_w \cdot \cos(\alpha)}{d_t}\right)\frac{n_a}{2}\right] \tag{7.10}$$

Denklem (7.3) ve (7.4)'ü kullanarak kafesin dakikadaki devir sayısını bulunur.

$$n_k = \left(1 - \frac{d_w \cdot \cos(\alpha)}{d_t}\right)\frac{n_j}{2} + \left(1 + \frac{d_w \cdot \cos(\alpha)}{d_t}\right)\frac{n_a}{2} \tag{7.11}$$

Şimdiye kadar iç ve dış bileziğin döndüğünü düşünüldü. Asenkron motorlardaki rulmanların iç bilezikleri dönerken, dış bilezikleri durmaktadır. Kafesin hızı bulunurken dış bileziğin hızı $n_a = 0$ alınır. İç bileziğin hızı rotorun dönme hızıdır.

Rulman içerisinde bulunan bilyaların dönme hızı bulunacaktır. Gene kabulümüzde iç ve dış bilezikler dönmektedir. Bunu yapmaktaki amacımız farklı hızlarda dönen iç ve dış bilezikler için hesabın kolay yapılabilmesini sağlamaktır. Bu sayede iç ve dış bilezikler farklı hızlarda dönse bile elde edilen formül kullanabilir. Şekil 7.2'ye göre bilyanın merkezindeki öteleme hızını, bilyanın dış bilezikteki dönme hızına çeviririz ($w_k \cdot r_a$). Dış bilezik dönme hızından (v_a), bilyanın dönme hızı ($w_k \cdot r_a$) çıkartılarak bilyanın dış bileziğe göre bağıl dönme hızı (v_w) bulunmuş olur (Denklem (7.12)).

$$v_w = v_a - w_k \cdot r_a \tag{7.12}$$

Kafesin açısal hızı w_k [rad/sn] (Denklem (7.13)), denklem (7.12)'de yerine yazılır.

$$w_k = \frac{\pi \cdot n_k}{30} \tag{7.13}$$

$$v_w = \frac{\pi \cdot d_w}{60}\left(\frac{d_t}{d_w} - \frac{d_w \cdot \cos^2(\alpha)}{d_t}\right)\cdot\left(\frac{n_a - n_j}{2}\right) \tag{7.14}$$

Bilyanın devir sayısı denklem (7.3)'ten faydalanılarak bulunur.

$$n_w = \left(\frac{d_t}{d_w} - \frac{d_w \cdot \cos^2(\alpha)}{d_t}\right)\cdot\left(\frac{n_a - n_j}{2}\right) \tag{7.15}$$

Denklem (7.14)'te bilyaların yuvarlanma hızı bulundu. Asenkron motorlardaki rulmanların iç bilezikleri dönerken, dış bilezikleri durmaktadır. Kafesin hızı bulunurken dış bileziğin hızı $n_a = 0$ alınır. İç bileziğin hızı rotorun dönme hızıdır. Hesaplama sonucu, sonuç artı çıkıyorsa bilyalar saat yönünde, eksi çıkıyorsa saatin tersi yönünde dönmektedir.

Rulman içerisindeki bilyalar, rulmanın bir kere dönmesi sonucu iç ve dış bilezikteki noktalara belirli sayıda temas yapmaktadır. Bu temas sayısı bilya sayısına ve kafesin dönme hızına bağlıdır.

Hesabı yaparken sadece bir bileziğin döndüğü düşünülsün. Z_b rulmandaki bilya sayısı olsun. Böylece, iç bilezik dakikada $(n_j\text{-}n_k)\cdot Z_b$ kadar, dış bilezik ise $(n_a\text{-}n_k)\cdot Z_b$ kadar dönecektir. Sadeleştirmek açısından rulmanın bir kere döndüğünü düşünülürse iç bilezik ve dış bileziğin topla temas miktarı sırasıyla u_j ve u_a olarak hesaplanır.

$$u_j = \frac{Z_b}{2}\left(1 + \frac{d_w \cdot \cos(\alpha)}{d_t}\right) \tag{7.16}$$

$$u_a = \frac{Z_b}{2}\left(1 - \frac{d_w \cdot \cos(\alpha)}{d_t}\right) \quad \textbf{(7.17)}$$

Bu denklemleri kullanarak rulmanda oluşan bir arızanın frekansı bulunacaktır. Denklem (7.16) ve (7.17) rulmanın bir dönüşünde, bilyaların iç ve dış bilezikle temas sayısını vermektedir. Rulman, rotor hızıyla döndüğü için u_j ve u_a sayılarını rotorun dönüş frekansıyla çarpılır. Çarpım sonucu, iç ve dış bileziklerde oluşacak arızaların titreşimde yaratacağı frekansı verecektir.

$$f_{iç} = u_j \cdot f_r = \frac{Z_b}{2} \cdot f_r \cdot \left(1 + \frac{d_w \cdot \cos(\alpha)}{d_t}\right) \quad \textbf{(7.18)}$$

$$f_{dış} = u_a \cdot f_r = \frac{Z_b}{2} \cdot f_r \cdot \left(1 - \frac{d_w \cdot \cos(\alpha)}{d_t}\right) \quad \textbf{(7.19)}$$

Bilyada oluşan kusur, bilya yuvarlanma frekansının 2 katında titreşim yaratır. Bunun sebebi ise bilya bir kere yuvarlandığında, bilyadaki arızalı kısmın hem iç bileziğe, hem de dış bileziğe birer kez temas ederek iki kere titreşim yaratmasıdır. Denklem (7.15)'ten faydalanarak bilyanın arızasıyla oluşan titreşim frekansı hesaplanmış olur.

$$f_{bilya} = \left(\frac{d_t}{d_w} - \frac{d_w \cdot \cos^2(\alpha)}{d_t}\right) \cdot f_r \quad \textbf{(7.20)}$$

Kafeste var olan bir arızanın yaratacağı titreşim frekansı denklem (7.11)'den faydalanarak bulunur. Dikkat edilmesi gereken şey hesaplarda $n_a = 0$, n_j'de rotorun dönüş devir sayısı olarak alınmasıdır.

$$f_{kafes} = \left(1 - \frac{d_w \cdot \cos(\alpha)}{d_t}\right) \cdot \frac{f_r}{2} \quad \textbf{(7.21)}$$

Kataloglarda yer alan bilgileri kullanarak rulman arızalandığında hangi frekansta titreşim yaratacağı bulunmuştur.

7.3 Akım Sinyalinde Yarattığı Etki

Rulman arızaları mekaniksel olarak rotor şaftının oynamasına sebep olur. Bu hareketlerde hava aralığının anlık değişimine yol açar. Dış rulman bileziğinde oluşan arıza anlık statik eksen kaçıklığına denk gelirken, iç bilezikte oluşan arıza anlık dinamik eksen kaçıklığı yaratır. Anlık eksen kaçıklığının oluşma sıklığı, dış veya iç bilezik arızasının yarattığı titreşim frekansına denk düşer. **Schoen ve diğ.** (**1995**) yaptığı çalışmada rulman arızasının akım sinyalinde yaratacağı sinyalin frekansını hesaplayacak denklemi vermiştir (Denklem (7.22)).

$$f_{akım} = \left| f \pm k \cdot f_k \right| \qquad \textbf{(7.22)}$$

f [Hz] şebeke frekansı, f_k [Hz] iç bilezik, dış bilezik veya bilya arızalarından birinin yarattığı titreşim frekansı ve k = 1, 2, 3, ... şeklinde değerler almaktadır.

Schoen'in bulduğu formülün doğruluğunu kanıtlamak için yazılan MATLAB programında anlık statik veya dinamik eksen kaçıklığı oluşturuldu. Eksen kaçıklığının oluşma zamanı $t = \frac{1}{f_k}$ (sn) olarak alındı. İç bilezik arızası için dinamik, dış bilezik arızası için de statik eksen kaçıklığı oluşturulmuştur.

7.3.1 Bilgisayar Programı Sonuçları

Şekil 7.1 ve Şekil 7.2'den faydalanarak $d_w = 12$ mm, $d_t = 60$ mm, $f_r = 45$ Hz, $Z_b = 9$ ve $\alpha = 0$ rad rulman arızalarının yaratacağı titreşim frekansları denklem (7.18) ve (7.19)'dan bulundu.

$f_k = f_{dış} = 162$ Hz ve $f_k = f_{iç} = 243$ Hz tir.

Rotor 45 Hz'te döndüğü için rotorun 1 kere dönmesi ile dış bilezik arızası sonucu oluşan SEK $\frac{162}{45} = 3.6$ kere oluşur. Aynı şekilde iç bilezik arızası sonucu oluşan

DEK $\frac{243}{45} = 5.4$ kere oluşur. Diğer bir değişle dış bilezik arızası $\frac{1}{162}$ sn de bir kere SEK yaratırken, iç bilezik arızası $\frac{1}{243}$ sn de bir kere DEK yaratır.

Diğer kullanılan parametreler; $\delta = 2$ mm, $l = 0.11$ m, $s = 0.1$, $p = 1$, $Z_{st} = 48$, $Z_{rt} = 40$, $f = 50$ Hz, $m = 3$, $I_{st} = 5$ A, $I_{rt} = 2$ A ve $\varepsilon = 0.9$ dur.

$\theta = 0$ konumundaki MAY'ın zamanla değişimini hesaplayarak MAY'ın frekans spektrumu bulundu. $\theta = 0$ seçilmesinin sebebi SEK'ın minimum hava aralığının bu konumda bulunmasıdır. $\theta = 0$ konumunda yapılan hesaplarda, MAY'ın spektrumunda SEK etkisi maksimum olarak görülebilecektir. Yani dış rulman arızasının yarattığı frekansların genlikleri bu noktada maksimum olur. Örneğin $\theta = \pi$ konumu için dış rulman arızasının yarattığı frekansların genlikleri en düşük genlik değerini alır. Çünkü hava aralığı bu noktada maksimum değer almaktadır. Şekil 7.3'te dış rulman arızasının MAY'ın frekans spektrumunda oluşturduğu frekanslar görülmektedir. Şekil 7.4'te de ayrıntılı olarak frekanslar görülmektedir. Schoen'in formülüne göre yukarıda bilgileri verilen rulman için dış bilezik arızası sonucu oluşacak frekanslar şunlardır:

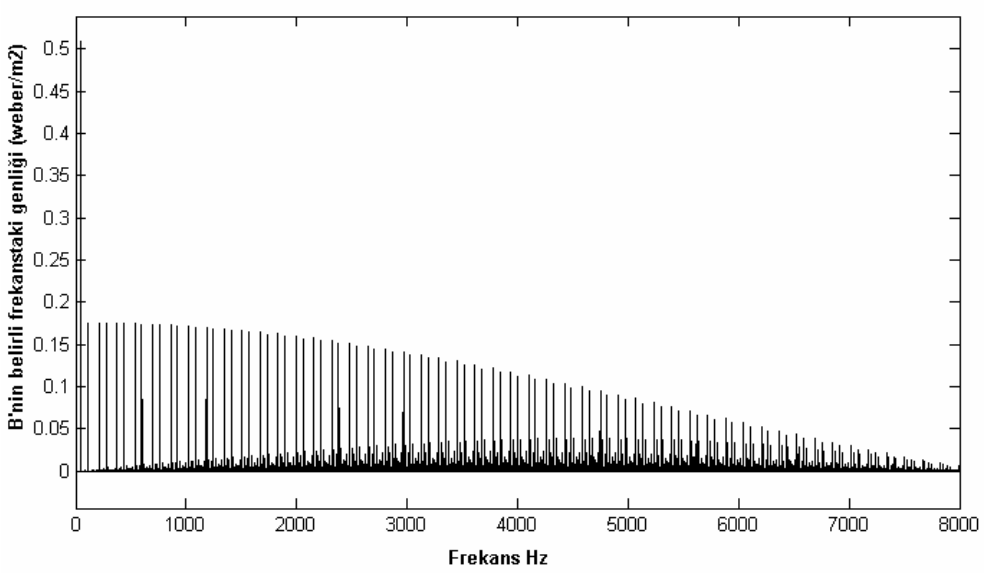
$$f_{akım} = |f \pm k \cdot f_k| = |50 \pm 1 \cdot 162| = 212 \text{ ve } 112 \text{ Hz}$$

$$f_{akım} = |f \pm k \cdot f_k| = |50 \pm 2 \cdot 162| = 374 \text{ ve } 274 \text{ Hz}$$

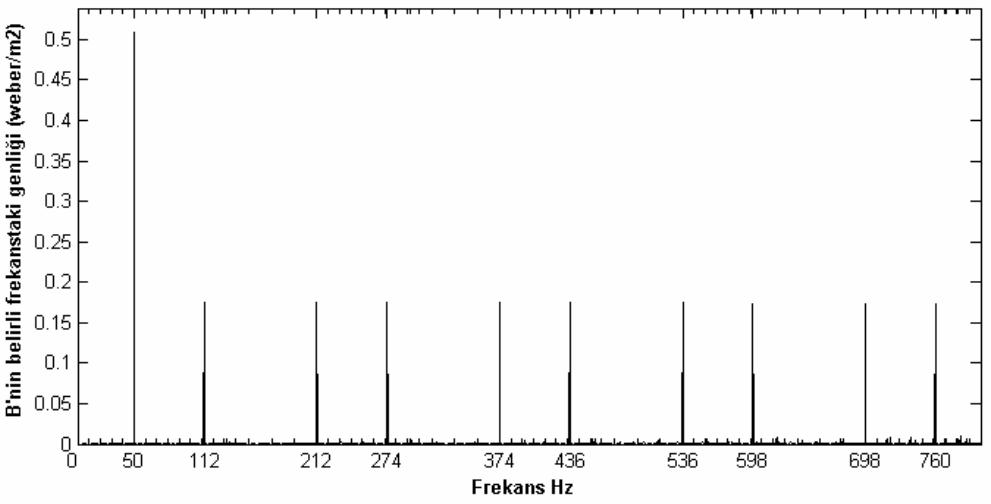
$$f_{akım} = |f \pm k \cdot f_k| = |50 \pm 3 \cdot 162| = 536 \text{ ve } 436 \text{ Hz}$$

$$f_{akım} = |f \pm k \cdot f_k| = |50 \pm 4 \cdot 162| = 698 \text{ ve } 598 \text{ Hz}$$

$f_{akım} = |f \pm k \cdot f_k| = |50 \pm 5 \cdot 162| = 760$ ve 860 Hz şeklinde devam etmektedir. Şekil 7.4'te ayrıntılı olarak bu frekanslar görülebilir.



Şekil 7.3: Dış rulman arızasının yarattığı MAY spektrumu



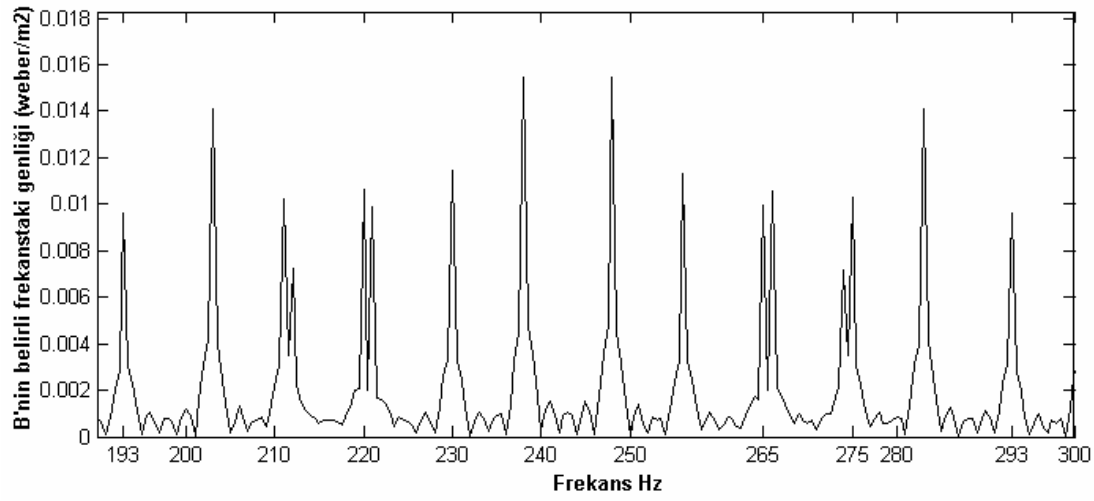
Şekil 7.4: Dış rulman arızasının yarattığı MAY spektrumunun yakınlaştırılmış hali

İç bilezik arızası oluştuğu zaman, iç bilezik rotorla hareket ettiği için oluşan eksen kaçıklığı da hareket halindedir. İç bilezik arızasını, eksen kaçıklığı hareket halinde olduğu için anlık DEK olarak tanımlanır. Bilgisayarda yazılan programda iç bilezik arızasını oluşturmak için anlık DEK yaratılarak elde edilen sonuçlar Şekil 7.5'te gösterilmiştir.

Gene Schoen'in formülünü kullanarak iç bilezik arızasının yaratması gereken sinyal bulunacaktır.

$$f_{akım} = |f \pm k \cdot f_k| = |50 \pm 1 \cdot 243| = 293 \text{ ve } 193 \text{ Hz}$$

Bu sinyaller Şekil 7.5'te gözükmektedir. Şekil 7.5 iyice incelenirse başka frekansların da olduğu gözükmektedir. Bu frekanslar DEK'ın yarattığı sinyallerdir. Schoen'in bulduğu formüle ek olarak iç bilezik arızası oluştuğu zaman DEK'e ait frekanslar da oluşur. Şekil 7.5'teki DEK'e ait frekansları Thomson'un formülüne göre 220 Hz, 265 Hz ve 275 Hz olarak bulunmuştur.



Şekil 7.5: İç rulman arızasının yarattığı MAY spektrumunun yakınlaştırılmış hali

8. MOTOR PARAMETRELERİNİN EKSEN KAÇIKLIĞI ile DEĞİŞİMİ

Hava aralığının değişmesiyle oluşan asenkron motor endüktans parametreleri hesaplanacaktır. Hava aralığı değişiminin sebebi eksen kaçıklığı olarak düşünülmektedir. Endüktans hesapları sargı fonksiyonu teorisine göre yapılacaktır.

Hesaplanan endüktanslar motor modeli için kullanılabilir. Bunun için motor modelinin denklemlerini verilecektir. Bilinen d-q modeli yapılırken bazı kabuller yapılmaktadır.

a) Stator sargılarının sinüzoidal dağıldığı düşünülmektedir. Bu kabulle sargı dağılımında oluşan bütün harmonikler yok sayılmaktadır.

b) Doyma, diş ve oluk etkileri ihmal edilmektedir.

c) Histerisiz ve fuko kayıpları ihmal edilmektedir.

d) Magnetik kısımların geçirgenliği sonsuz sayılmaktadır.

e) Direnç ve endüktansların sıcaklık ve frekansla değişimleri ihmal edilmektedir.

f) Düzgün hava aralıklı motor olduğu düşünülmektedir.

Gerçekte bütün bu etkiler vardır. Burada eksen kaçıklığı olan motor modeli oluşturulmaya çalışılmıştır. Normalde d-q motor modeli simülasyon için kullanılmaktadır. Motor parametreleri zamanla değiştiği için bu modeli kullanamıyoruz. Ortaya konan modelin ismi çoklu-bağlı devredir (multiple-coupled circuit) (**Luo ve diğ., 1995**). Endüktans hesabı için sargı fonksiyonu kurulmuştur (**Ghoggal ve diğ., 2005**).

8.1 Sargı Fonksiyonu Teorisi

Sargı fonksiyonu teorisini bulurken Şekil 8.1'den faydalanılmıştır. a ve b noktaları $\theta = 0, z = 0$, c ve d noktaları da θ, z olarak hizalanmıştır. θ [rad] rotorun konumu, z [m] eksenel yönde konum. Rotorun eksenel uzunluğu l [m]'dir. a ve d noktası statorun iç yüzeyinde, b ve c noktası da rotorun dış yüzeyinde konumlandırılmıştır.

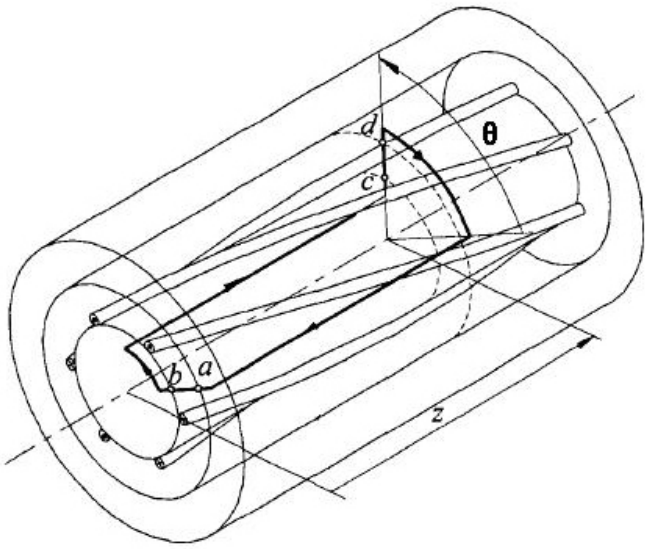
Kapalı abcda yolu üzerinde amper yasasını uygulanırsa,

$$\oint_{abcda} H(\theta, z, w_r \cdot t) \cdot dx = \int_S J \cdot dS \qquad \textbf{(8.1)}$$

H [A/m] magnetik alan şiddetini, J [A/m^2] akım yoğunluğunu, S abcda kapalı yolu tarafından oluşturulan yüzeyi ifade etmektedir. x, abcda yolunun uzunluğudur. $w_r \cdot t$, rotorun statora göre zamanla konumunun değişmesini temsil eden parametredir. Denklem (8.1)'i düzenlenirse.

$$\oint_{abcda} H(\theta, z, w_r \cdot t) \cdot dx = T(\theta, z, w_r \cdot t) \cdot I \qquad \textbf{(8.2)}$$

dır. $T(\theta, z, w_r \cdot t)$, sarım fonksiyonu olarak nitelendirilir. Sarım fonksiyonu şekilsel olarak ilerleyen bölümlerde anlatılmıştır.



Şekil 8.1: Basit motor resmi

MMK ile magnetik alan şiddeti arasındaki ilişki denklem (8.3) ile verilmiştir.

$$H(\theta, z, w_r \cdot t) = \frac{MMK(\theta, z, w_r \cdot t)}{x} \tag{8.3}$$

Denklem (8.2) ve (8.3)'ü kullanarak 4 noktadan ayrılmış olan sistem yeni forma dönüştürülecektir.

$$\oint_{ab} \frac{MMK_{ab}(0, 0, w_r \cdot t)}{x_{ab}} \cdot dx + \oint_{bc} \frac{MMK_{bc}}{x_{bc}} \cdot dx + \oint_{cd} \frac{MMK_{cd}(\theta, z, w_r \cdot t)}{x_{cd}} \cdot dx + \oint_{da} \frac{MMK_{da}}{x_{da}} \cdot dx = T(\theta, z, w_r \cdot t) \cdot I \tag{8.4}$$

$x_{ab} = \delta(0, 0, w_r \cdot t)$ ve $x_{cd} = \delta(\theta, z, w_r \cdot t)$ hava aralığına eşittir. Rotor ve stator çekirdeklerinin iletkenliği sonsuz düşünüldüğü için $MMK_{bc}(\theta, z, w_r \cdot t)$ ve $MMK_{da}(\theta, z, w_r \cdot t)$ ihmal edilir. $MMK_{bc} = MMK_{da} = 0$ dır.

$$\oint_{ab} \frac{MMK_{ab}(0, 0, w_r \cdot t)}{\delta(0, 0, w_r \cdot t)} \cdot dx + \oint_{cd} \frac{MMK_{cd}(\theta, z, w_r \cdot t)}{\delta(\theta, z, w_r \cdot t)} \cdot dx = T(\theta, z, w_r \cdot t) \cdot I \tag{8.5}$$

İntegral alınırsa δ hava aralığı terimi yok olur. Sadece MMK'lar kalır.

$$MMK_{ab}(0, 0, w_r \cdot t) + MMK_{cd}(\theta, z, w_r \cdot t) = T(\theta, z, w_r \cdot t) \cdot I \tag{8.6}$$

Eşitliğin her iki tarafını hava aralığı fonksiyonuna böleriz. Daha sonra θ'ya göre $0\text{-}2\pi$ aralığında, z'ye göre 0-*l* aralığında integral alınır.

$$\int_0^{2\pi}\int_0^{l} \frac{MMK_{ab}(0, 0, w_r \cdot t)}{\delta(\theta, z, w_r \cdot t)} \cdot dz \cdot d\theta + \int_0^{2\pi}\int_0^{l} \frac{MMK_{cd}(\theta, z, w_r \cdot t)}{\delta(\theta, z, w_r \cdot t)} \cdot dz \cdot d\theta = \int_0^{2\pi}\int_0^{l} \frac{T(\theta, z, w_r \cdot t) \cdot I}{\delta(\theta, z, w_r \cdot t)} \cdot dz \cdot d\theta \tag{8.7}$$

$MMK_{ab}(0, 0, w_r \cdot t)$ başlangıç koşulunu bulmak için gauss yasasından faydalanılır (denklem (8.8)).

$$\oint_S \mathrm{B} \cdot dS = 0 \tag{8.8}$$

S, stator ile rotor arasına yerleştirilmiş yarıçapı r olan silindirsel bir yüzey olarak düşünülebilir. MAY'dan magnetik alan şiddetine geçiş yapmamız gerekmektedir.

$$\oint_S \mu_0 \cdot \mathrm{H}(\theta, \mathrm{z}, \mathrm{w_r} \cdot \mathrm{t}) \cdot \mathrm{r} \cdot dz \cdot d\theta = 0 \tag{8.9}$$

Magnetik alan şiddeti ile MMK arasındaki ilişki yazıldığında.

$$\mathrm{H}(\theta, \mathrm{z}, \mathrm{w_r} \cdot \mathrm{t}) = \frac{\mathrm{MMK}(\theta, \mathrm{z}, \mathrm{w_r} \cdot \mathrm{t})}{\delta(\theta, \mathrm{z}, \mathrm{w_r} \cdot \mathrm{t})} \tag{8.10}$$

dır. Denklem (8.10) denklem (8.9)'da yerine koyulur.

$$\mu_0 \cdot \mathrm{r} \oint_S \frac{\mathrm{MMK}(\theta, \mathrm{z}, \mathrm{w_r} \cdot \mathrm{t})}{\delta(\theta, \mathrm{z}, \mathrm{w_r} \cdot \mathrm{t})} \cdot dz \cdot d\theta = 0 \tag{8.11}$$

Denklem (8.11)'i denklem (8.7)'de kullanarak denklem (8.12) elde edilir.

$$\int_0^{2\pi} \int_0^{l} \frac{\mathrm{MMK_{ab}}(0, 0, \mathrm{w_r} \cdot \mathrm{t})}{\delta(\theta, \mathrm{z}, \mathrm{w_r} \cdot \mathrm{t})} \cdot dz \cdot d\theta = \int_0^{2\pi} \int_0^{l} \frac{\mathrm{T}(\theta, \mathrm{z}, \mathrm{w_r} \cdot \mathrm{t}) \cdot \mathrm{I}}{\delta(\theta, \mathrm{z}, \mathrm{w_r} \cdot \mathrm{t})} \cdot dz \cdot d\theta \tag{8.12}$$

$\mathrm{MMK_{ab}}(0, 0, \mathrm{w_r} \cdot \mathrm{t})$ sabit bir sayıdır. Statik ve dinamik eksen kaçıklığında z boyunca hava aralığı fonksiyonu değişmez. Eşitsizliğin sol tarafının integrali bu bilgiler doğrultusunda alınır.

$$\begin{aligned} &\mathrm{MMK_{ab}}(0, 0, \mathrm{w_r} \cdot \mathrm{t}) \cdot 2 \cdot \pi \cdot l \cdot \left\langle \delta^{-1}(\theta, \mathrm{z}, \mathrm{w_r} \cdot \mathrm{t}) \right\rangle = \\ &\int_0^{2\pi} \int_0^{l} \mathrm{T}(\theta, \mathrm{z}, \mathrm{w_r} \cdot \mathrm{t}) \cdot \delta^{-1}(\theta, \mathrm{z}, \mathrm{w_r} \cdot \mathrm{t}) \cdot \mathrm{I} \cdot dz \cdot d\theta \end{aligned} \tag{8.13}$$

$\left\langle \delta^{-1}(\theta, \mathrm{z}, \mathrm{w_r} \cdot \mathrm{t}) \right\rangle$ ortalama değeri simgelemektedir.

$$\left\langle \delta^{-1}(\theta, z, w_r \cdot t) \right\rangle = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \delta^{-1}(\theta, z, w_r \cdot t) \cdot d\theta \tag{8.14}$$

Denklem (8.13) düzenlenirse,

$$MMK_{ab}(0, 0, w_r \cdot t) = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot l \cdot \left\langle \delta^{-1}(\theta, z, w_r \cdot t) \right\rangle} \int_0^{2\pi} \int_0^{l} T(\theta, z, w_r \cdot t) \cdot \delta^{-1}(\theta, z, w_r \cdot t) \cdot I \cdot dz \cdot d\theta \tag{8.15}$$

Elde edilen denklem (8.15)'i denklem (8.6)'da kullanarak $MMK_{cd}(\theta, z, w_r \cdot t)$ bulunmalıdır.

$$MMK_{cd}(\theta, z, w_r \cdot t) = T(\theta, z, w_r \cdot t) \cdot I - \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot l \cdot \left\langle \delta^{-1}(\theta, z, w_r \cdot t) \right\rangle} \int_0^{2\pi} \int_0^{l} T(\theta, z, w_r \cdot t) \cdot \delta^{-1}(\theta, z, w_r \cdot t) \cdot I \cdot dz \cdot d\theta \tag{8.16}$$

Sargı fonksiyonu ile MMK arasındaki ilişki denklem (8.17)'de verilmiştir.

$$N(\theta, z, w_r \cdot t) = \frac{MMK_{cd}(\theta, z, w_r \cdot t)}{I} \tag{8.17}$$

$$N(\theta, z, w_r \cdot t) = T(\theta, z, w_r \cdot t) - \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot l \cdot \left\langle \delta^{-1}(\theta, z, w_r \cdot t) \right\rangle} \int_0^{2\pi} \int_0^{l} T(\theta, z, w_r \cdot t) \cdot \delta^{-1}(\theta, z, w_r \cdot t) \cdot dz \cdot d\theta \tag{8.18}$$

Denklem (8.18) sargı fonksiyonunu vermektedir. Sargı fonksiyonunu endüktans hesabında kullanılır.

8.2 Endüktans Hesabı

A fazının oluşturduğu MMK ile sarım fonksiyonu arasındaki ilişki denklem (8.19) da tekrar yazılmıştır.

$$MMK_A(\theta, z, w_r \cdot t) = N_A(\theta, z, w_r \cdot t) \cdot I_A \tag{8.19}$$

A fazının diferansiyel bir alanda oluşturduğu diferansiyel akı ise.

$$d\Phi_B = \mu_0 \cdot MMK_A(\theta, z, w_r \cdot t) \cdot \delta^{-1}(\theta, z, w_r \cdot t) \cdot r \cdot dz \cdot d\theta \quad \textbf{(8.20)}$$

dır. Rotor ve stator boyunca oluşan akıyı bulmak için rotor çevresi ve boyunca integral alınır.

$$\Phi_B = \mu_0 \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^{l} N_A(\theta, z, w_r \cdot t) \cdot I_A \cdot \delta^{-1}(\theta, z, w_r \cdot t) \cdot r \cdot dz \cdot d\theta \quad \textbf{(8.21)}$$

A fazının, B fazında oluşturduğu toplam akı kaçağını bulmak için B fazının sarım fonksiyonu ile denklem (8.21)'i çarpılır.

$$\Lambda_{BA} = \mu_0 \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^{l} n_B(\theta, z, w_r \cdot t) \cdot N_A(\theta, z, w_r \cdot t) \cdot I_A \cdot \delta^{-1}(\theta, z, w_r \cdot t) \cdot r \cdot dz \cdot d\theta \quad \textbf{(8.22)}$$

A fazında akan akım sonucu B fazında oluşan karşıt endüktans

$$L_{BA} = \frac{\Lambda_{BA}}{I_A} = \mu_0 \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^{l} n_B(\theta, z, w_r \cdot t) \cdot N_A(\theta, z, w_r \cdot t) \cdot \delta^{-1}(\theta, z, w_r \cdot t) \cdot r \cdot dz \cdot d\theta \quad \textbf{(8.23)}$$

dır. B fazı yerine A fazına ait bilgiler yazılırsa öz endüktans hesaplamış olur.

8.3 Motor Modeli

m stator devresi olan (fazı değil) ve n rotor çubuğu olan bir motor ele alınsın. Motor için denklemler yazılırsa.

$$[V_{st}] = [R_{st}][I_{st}] + \frac{d[\Lambda_{st}]}{dt} \quad \textbf{(8.24)}$$

$$[V_{rt}] = [0] = [R_{rt}][I_{rt}] + \frac{d[\Lambda_{rt}]}{dt} \quad \textbf{(8.25)}$$

$[V]$ [volt] gerilim matrisi, $[I]$ akım matrisi, $[R]$ [ohm] direnç matrisi, $[L]$ [H] endüktans matrisi ve $[\Lambda]$ kaçak akı matrisidir.

$$I_{st} = [I_{st1}, I_{st2}, ..., I_{stm}]^t \quad \textbf{(8.26)}$$

$$I_{rt} = [I_{rt1}, I_{rt2}, ..., I_{rtn}]^t \quad \textbf{(8.27)}$$

$$V_{st} = [V_{st1}, V_{st2}, ..., V_{stm}]^t \quad \textbf{(8.28)}$$

$$V_{rt} = [V_{rt1}, V_{rt2}, ..., V_{rtn}]^t \quad \textbf{(8.29)}$$

$$[R_{st}] = \begin{bmatrix} R_{st1} & 0 & 0 \\ 0 & R_{st2} & 0 \\ 0 & 0 & R_{st3} \end{bmatrix} \quad \textbf{(8.30)}$$

$$[\Lambda_{st}] = [L_{ss}][I_{st}] + [L_{sr}][I_{rt}] \quad \textbf{(8.31)}$$

$$[\Lambda_{rt}] = [L_{rs}][I_{st}] + [L_{rr}][I_{rt}] \quad \textbf{(8.32)}$$

Elektro-magnetik tork ve mekanik denklemler yazılırsa.

$$T_e = \left(\frac{dW_{ko}}{d\theta} \right) \quad \textbf{(8.33)}$$

$$T_e - T_l = J \frac{dw}{dt} \quad \textbf{(8.34)}$$

$$w = \frac{d\theta}{dt} \quad \textbf{(8.35)}$$

$$W_{ko} = \frac{1}{2}\left(\left[I_{st}^{T}\right]\left[L_{ss}\right]\left[I_{st}\right] + \left[I_{st}^{T}\right]\left[L_{sr}\right]\left[I_{rt}\right] + \left[I_{rt}^{T}\right]\left[L_{rs}\right]\left[I_{st}\right] + \left[I_{rt}^{T}\right]\left[L_{rr}\right]\left[I_{rt}\right]\right) \qquad \textbf{(8.36)}$$

Denklem (8.23)'te endüktans hesabı için gerekli denklem bulundu. Bu denklemi statik ve dinamik eksen kaçıklığı olan motorun endüktans matrislerinin hesabı için kullanılır. Hesaplanan endüktans matrisleri yukarıdaki motor modeline konularak eksen kaçıklı motor modeli yaratılabilir. Bu tezde sadece endüktanslar hesaplanmıştır. Motor modeli değişik iterasyonlar yapılmasına rağmen çözülememiştir.

8.4 Sayısal Endüktans Hesabı ve Sonuçlar

8.4.1 Hesaplamalarda Kullanılan Motor Parametreleri

Kutup çifti sayısı $p = 2$, şebeke frekansı $f = 50$ Hz, rotor uzunluğu $l = 0.11$ m, rotor ile stator arasındaki ortalama yarıçap $r = 0.082$ m, stator oluk sayısı $Z_{st} = 48$, rotor oluk sayısı $Z_{rt} = 40$, bir sargıdaki sarım sayısı $T = 28$, hava aralığı $\delta = 0.8$ mm ve bağıl eksen kaçıklığı $\varepsilon = 0.9$ dur.

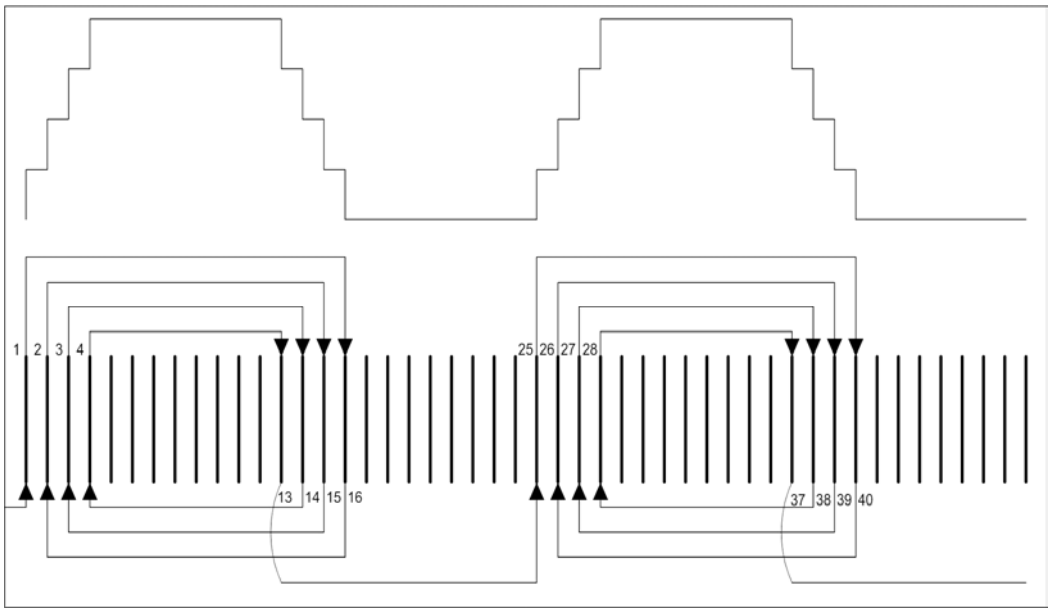
Motor parametreleri dışında motorun sargı düzeni gösterilmelidir. Motor sargı düzenine göre sarım fonksiyonu ortaya çıkacaktır.

A fazı ; $1 - 16' - 2 - 15' - 3 - 14' - 4 - 13' - 25 - 40' - 26 - 39' - 27 - 38' - 28 - 37'$

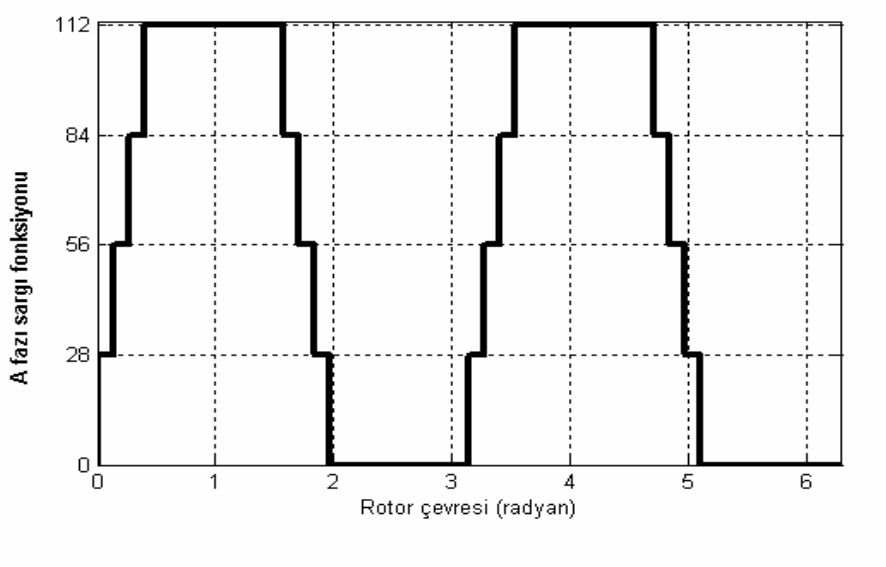
B fazı ; $9 - 24' - 10 - 23' - 11 - 22' - 12 - 21' - 33 - 48' - 34 - 47' - 35 - 46' - 36 - 45'$

C fazı ; $5' - 20 - 6' - 19 - 7' - 18 - 8' - 17 - 29' - 44 - 30' - 43 - 31' - 42 - 32' - 41$

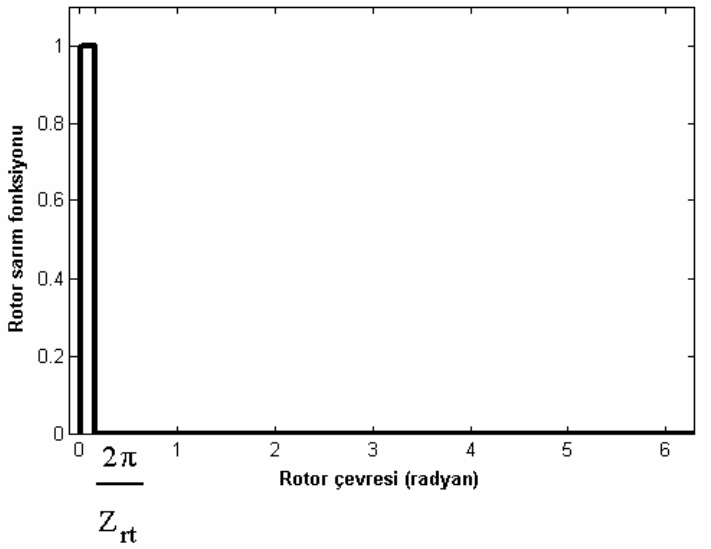
Sayıların üzerindeki çizgi akımın o noktadan ters yönde geçtiğini bildirmektedir. A fazının sarım şeması ve sargı fonksiyonunun değişimi Şekil 8.2'de gösterilmiştir. Hesaplarda kullanılan sarım fonksiyonu Şekil 8.3'te gösterilmiştir. Şekil 8.3'teki her bir basamak sarım sayısı T'yi göstermektedir. Diğer fazlarda aynı şekilde çizdirilip sarım fonksiyonları belirlenebilir. Birinci rotor çubuğunun sarım fonksiyonu eklerde Şekil 8.4'te gösterilmiştir. Rotor çubuğunda sarım sayısı T = 1 alınmaktadır. Rotor sarım fonksiyonu iki oluk arasındaki uzaklık kadardır. Çubuğun bulunduğu oluk genişliğince sargı fonksiyonu 1 dir. Diğer yerlerde 0 değerini alır.



Şekil 8.2: A fazının sarım şeması



Şekil 8.3: A fazının sarım fonksiyonunun θ'ya göre değişimi



Şekil 8.4: Birinci rotor çubuğunun sarım fonksiyonu

8.4.2 SEK'te Endüktansların Değişimi

Statik eksen kaçıklığında dikkat edilmesi gereken konu, hava aralığının rotor çevresince değişip, zamanla değişmemesidir.

8.4.2.1 Stator Fazları Arasındaki Endüktans Matrisi

Stator fazlarının kendi arasında olan öz ve karşıt endüktansları rotorun hareketiyle değişmez ve 3x3 boyutlu matris oluşturur. Bütün karşıt ve öz endüktans değerleri birbirinden farklıdır. Bunun sebebi ise hava aralığının rotor çevresince değişmesidir. Kullanılan motor parametrelerine göre MATLAB programında yazılan programla elde edilen sonuç aşağıdaki matristir.

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} 0{,}2253 & -0{,}092683 & -0{,}093389 \\ -0{,}092683 & 0{,}22981 & -0{,}067399 \\ -0{,}093389 & -0{,}067399 & 0{,}13902 \end{bmatrix} [H]$$

Eğer hava aralığında dengesizlik olmasaydı, elde edilecek matris aşağıdaki gibidir.

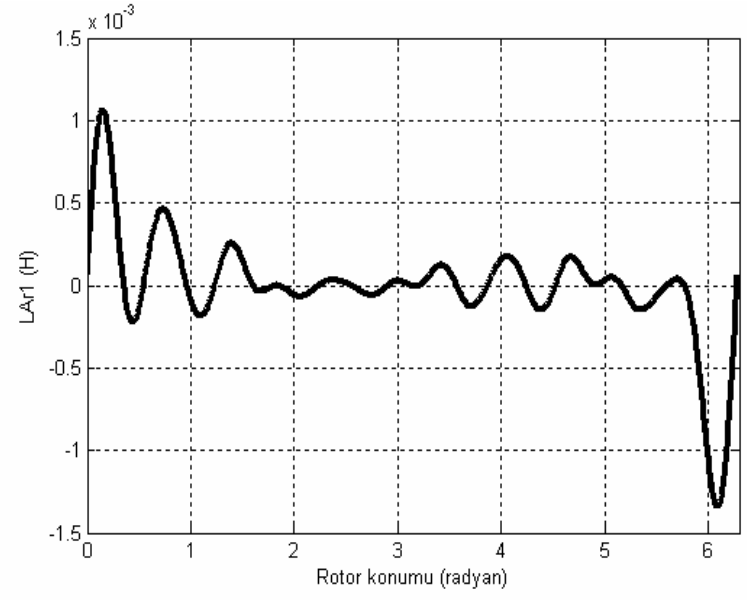
$$L_{ss} = \begin{bmatrix} 0{,}22 & -0{,}09 & -0{,}09 \\ -0{,}09 & 0{,}22 & -0{,}09 \\ -0{,}09 & -0{,}09 & 0{,}22 \end{bmatrix} [H]$$

8.4.2.2 Stator Fazları ile Rotor Çubukları Arasındaki Endüktans Matrisi

Statorla rotor arasındaki endüktans matrisi, 3 stator fazı ve 40 rotor çubuğu olmasından dolayı 3x40 boyutundadır. Bu matris rotorun konumuna bağlıdır. Çünkü rotor çubuklarının yarattığı sarım fonksiyonu rotorla beraber dönmektedir. Elde edilen matriste her bir eleman, rotorun konumuna bağlı fonksiyon olarak bulunur. Bu denklemleri bulurken ilk önce denklem (8.23)'e göre L_{sr} ile θ arasındaki ilişkiyi veren 1000 kadar data alınmıştır. Alınan datalar fourier serilerine açılarak, dataları temsil eden denklem bulunmuştur. Matrisin 1. sütun ve 1. kolonu A fazı ile 1. rotor çubuğu arasındaki karşıt endüktansi vermektedir (Denklem (8.37)). Denklem (8.37)'nin grafiksel gösterimi Şekil 8.5'te gösterilmiştir.

Statordaki A fazıyla 1. rotor çubuğu arasındaki denklemi elde ettikten sonra 2. rotor çubuğu ile statordaki A fazı arasındaki denklemi, elde edilen ilk denklemi $\frac{2\pi}{40}$ kadar öteleyerek bulunabilir. İki denklem arasındaki faz farkı rotor çubukları arasındaki mesafe kadardır.

$$L_{Ar1} = 10^{-7}\left[\text{-}2.18\text{-}310\cdot\cos(\theta)+567\cdot\sin(\theta)\text{-}480\cdot\cos(2\theta)+1194\cdot\sin(2\theta)\right.$$
$$\left.-442\cdot\cos(3\theta)+1160\cdot\sin(3\theta)....\right] \qquad \textbf{(8.37)}$$



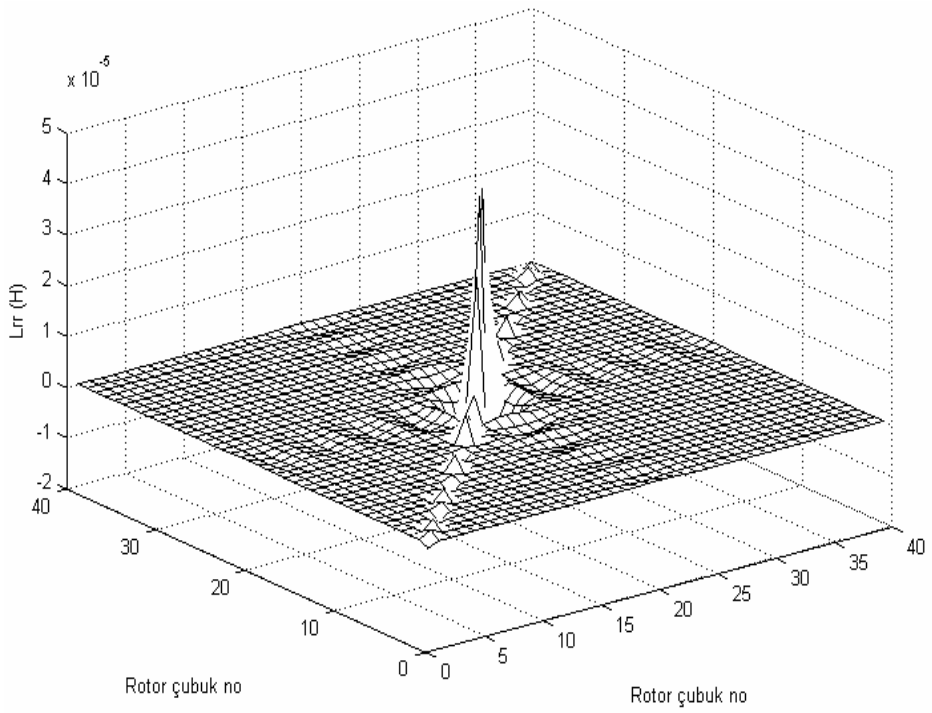
Şekil 8.5: (LAr1) A fazı ile 1. rotor çubuğunun karşıt endüktanslarının konumla değişimi

$[L_{sr}]$ bulunduktan sonra $[L_{rs}]$'de denklem (8.38)'le bulunur.

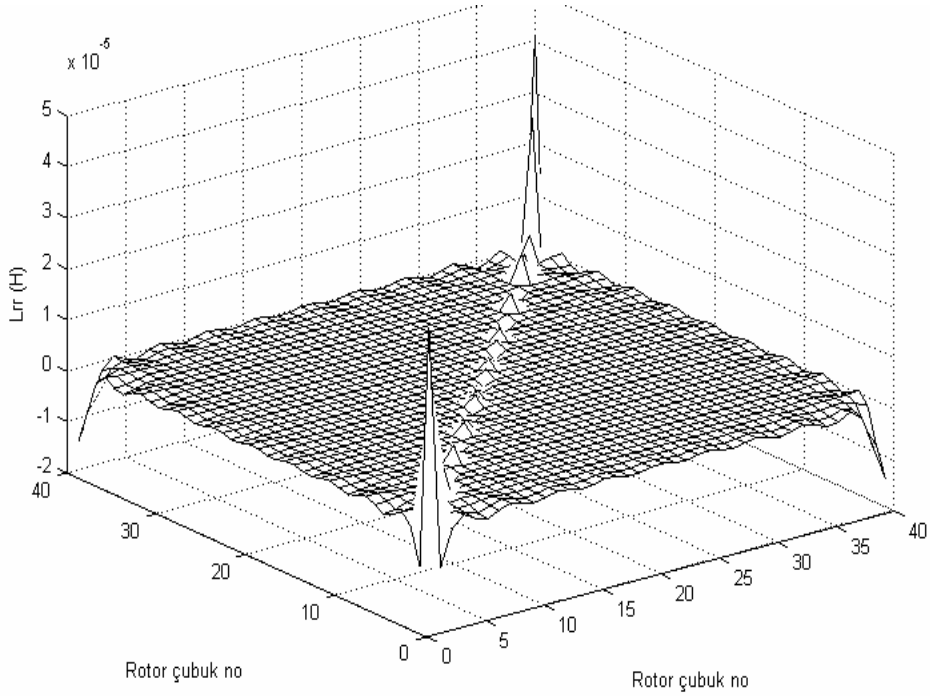
$$[L_{sr}]^T = [L_{rs}] \tag{8.38}$$

8.4.2.3 Rotor Çubukları arasındaki Endüktans Matrisi

Bu matriste rotorun konumuna bağlı olarak değişmektedir. Hesaplanması en zor matristir. Matrisin boyutu rotor çubuk sayısından dolayı 40x40 boyutundadır. Şekil 8. ve Şekil 8. sırasıyla $\theta = \pi$ ve $\theta = 0$ için L_{rr} matrisini vermektedir. Şekiller rotor çubukları arasındaki endüktans değerlerini belirli konumlar için vermektedir. Matrisin her bir elemanı fourier serileri ile θ'ya bağlı denklem haline getirilmiştir. Denklemler uzun olduğu için teze yazılamamıştır.



Şekil 8.6: $\theta = \pi$ için L_{rr} matrisi



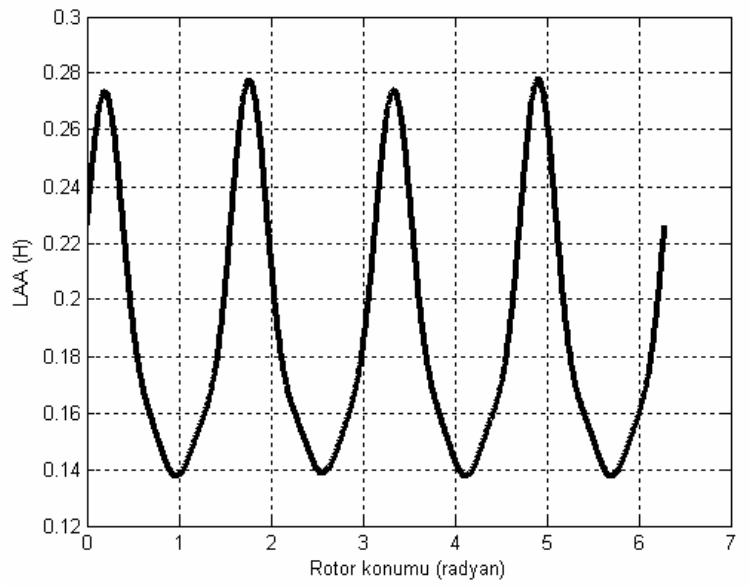
Şekil 8.7: $\theta = 0$ için L_{rr} matrisi

8.4.3 DEK'te Endüktansların Değişimi

Dinamik eksen kaçıklığında dikkat edilmesi gereken konu, hava aralığının rotor çevresince ve zamanla değişmesidir.

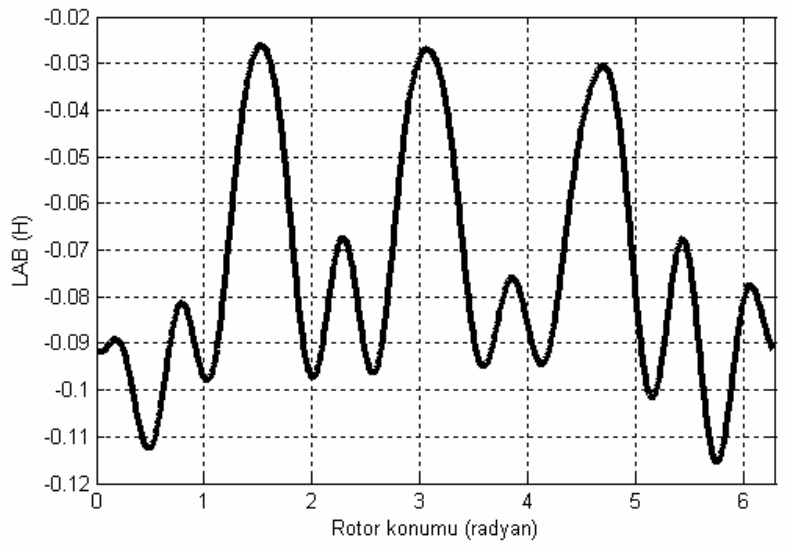
8.4.3.1 Stator Fazları Arasındaki Endüktans Matrisi

Hava aralığı zamanla değiştiği için stator fazları arasındaki endüktans matrisi rotorun dönmesine göre değişir. Rotorun bulunduğu konum θ'ya göre değişen 3x3 boyutunda matris elde edilir. Matrisin her bir elemanı θ'ya göre değişen denklemlerdir.

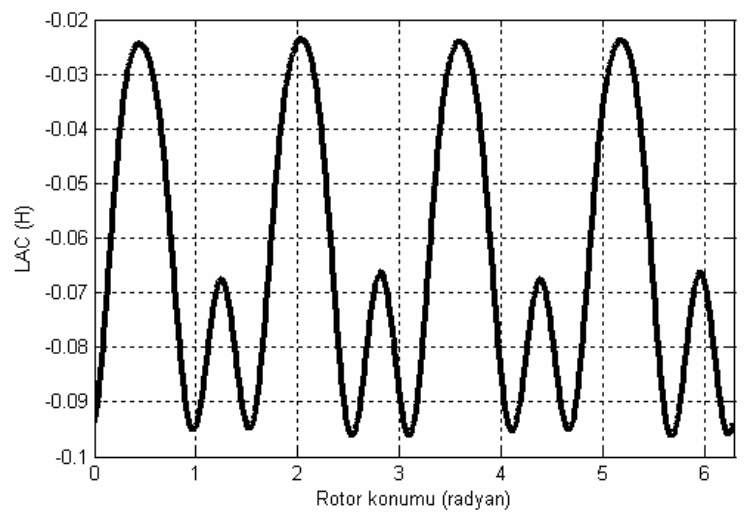


Şekil 8.8: A fazının öz endüktansının θ'la değişimi

Matris içindeki A fazının öz endüktansı Şekil 8.'de, A ve B fazları arasındaki karşıt endüktans değişimi Şekil 8.'da, ve A ve C fazları arasındaki karşıt endüktansın değişimi Şekil 8.'da hesaplanmıştır.



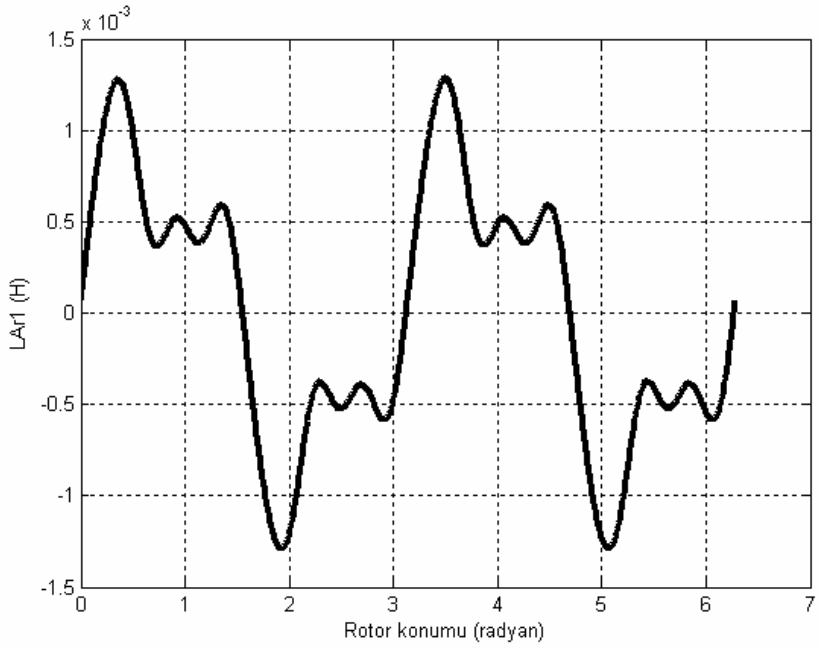
Şekil 8.9: A fazı ile B fazı arasındaki karşıt endüktansın θ'la değişimi



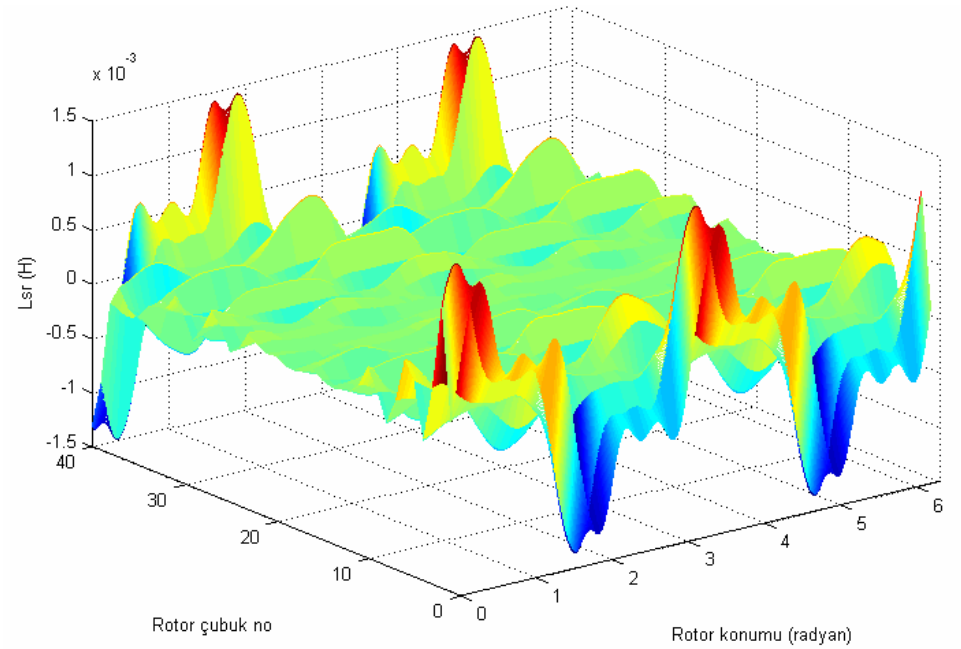
Şekil 8.10: A fazı ile C fazı arasındaki karşıt endüktansın θ'la değişimi

8.4.3.2 Stator Fazları ile Rotor Çubukları Arasındaki Endüktans Matrisi

Hesaplar yapılırken MATLAB'ta yazılan program hava aralığı ile rotor çubuklarının beraber döndüğü düşünülerek yazılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre A fazı ile 1. rotor çubuğu arasındaki karşıt endüktansın konumla değişimi Şekil 8.'de gösterilmiştir. Gene A fazı ile diğer rotor çubukları arasındaki değişim Şekil 8.'de gösterilmiştir.



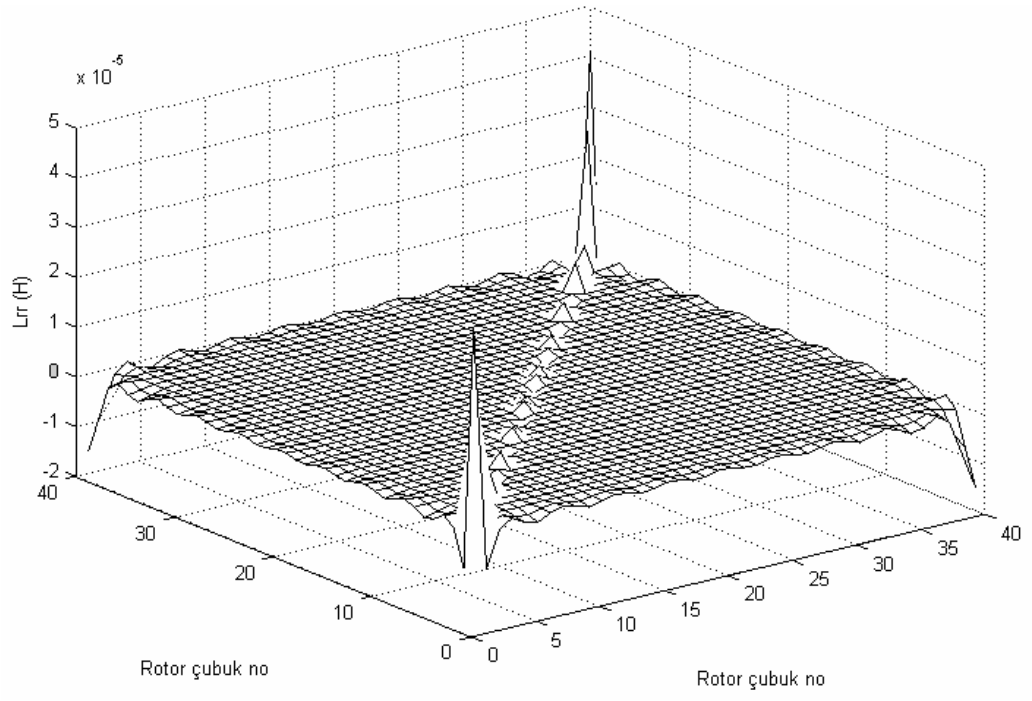
Şekil 8.11: A fazı ile 1. rotor çubuğu arasındaki karşıt endüktansın θ'la değişimi



Şekil 8.12: A fazı ile rotor çubukları arasındaki karşıt endüktansın θ'la değişimi

8.4.3.3 Rotor Çubukları arasındaki Endüktans Matrisi

Rotor ve hava aralığı beraber döndüğü için rotor çubuklarının birbirleri arasındaki karşıt endüktans konumla değişmez. Şekil 8.13'te rotor çubukları arasındaki endüktans matrisini gösteren grafik verilmiştir. Grafikte dikkat edilirse rotor çubuklarının öz endüktansları, diğer çubuklarla olan karşıt endüktanslarından çok büyüktür. Eksen kaçıklığından dolayı 1. rotor çubuğunun olduğu yerde minimum hava aralığının olması buradaki öz endüktansının diğerlerine göre daha büyük olmasını sağlamıştır.



Şekil 8.13: Rotor çubukları arasındaki endüktans matrisinin grafiği

9. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

9.1 Sonuçlar

Motor arızalarının, sistemin çökmesine sebep olmadan evvel tespit edilebileceği gösterilmiştir. Değişik tipteki arızaların tanıtımı yapılıp sebepleri ve sonuçları üzerinde durulmuştur. Durum izleme sistemleri ile arıza tanısı sağlanabileceği gösterilmiştir.

Teorik çalışma ile eksen kaçıklığı ve rulman arızalarının oluşturduğu frekanslar bulunmuştur.

Eksen kaçıklığı ile kırık rotor çubuğunun yarattığı titreşim ve akım frekanslarını ayıracak metotlar ve ek frekans oluşumları ortaya konmuştur. Bu hususta oluk etkisinin faydası çoktur. Oluk etkisi ve eksen kaçıklının beraber oluşturduğu frekanslar en büyük ayrımı yapar.

SEK'in DEK gibi ek akım frekansı yaratmaması çıkarılan sonuçlardan biridir. SEK'i ayıran önemli faktör tek yönlü çekme kuvveti oluşturmasıdır. SEK rotora gelen çekme kuvvetinin modunu değiştirmektedir.

Thomson'un formülü, yapılmış olan bilgisayar programıyla aynı sonuçları vermiştir. Thomson'un formülüne ek olarak, bilgisayar programında yapılan çalışmada bu frekansların genlikleri hakkında bilgi sahibi olunmuştur. Fazla uğraşmadan değişik veriler için sonuçlar kolaylıkla alınabilmiştir. Thomson'un formülünde bulunan τ_{st_mmk} sadece 1 değeri alabilir. Thomson ve Vas bu sayının değişik değerler alabileceğini savunmuşlardır.

Rotor MMK'sının denklemi çıkarılmıştır. Çıkarılan son denklem **Heler ve Hamata** (**1977**) tarafından verilen denklemle aynıdır.

Schoen'in rulman arızasının akım sinyalinde çıkaracağı frekansları veren formülün, yazılan bilgisayar programı sayesinde doğruluğu kanıtlanmıştır. İç bilezik arızası anlık oluşan DEK olarak, dış bilezik arızası ise anlık oluşan SEK olarak ele alınmıştır. İç bilezik arızası oluştuğu zaman, iç bilezik arızasının yarattığı frekansların yanında DEK'in yalnız başına oluşturduğu frekansların da oluştuğu gözlenmiştir.

Eksen kaçıklığı olan motor modeli oluşturulmaya çalışılmıştır. Bunun için eksen kaçıklığı ile oluşan endüktans değişimleri hesaplanmıştır. Motor modeli için verilen denklemler çözülemediği için eksen kaçıklığı olan motor modeli oluşturulamamıştır. Motor modeli için verilen denklemlerin anlık olarak çözülmesi gerekmektedir. Anlık olarak çözülememesinden ötürü iterasyonla denklem çözümüne gidilmiştir. Ama başarılı olunamamıştır. Normalde eksen kaçıklığı olmayan bir motorda simülasyon için d-q motor modeli kullanılmaktadır. D-q motor modeli kurulurken hava aralığının düzgün dağıldığı kabulü yapıldığı için kullanılamamaktadır.

Endüktans değişimlerinin hesabında kullanılan sarım fonksiyonu verilmiştir. Bu fonksiyonun 3 fazlı sincap kafesli asenkron motora uygulanması gösterilmiştir.

Yapılan tez çalışması öğrencilere motor arızaları konusunda bilgi verip, teori kısmının daha ayrıntılı anlaşılması açısından yol gösterici bir kaynak olmuştur.

9.2 Öneriler

Motor arıza tanısı gelişmekte olan bir konu olduğu için araştırmaya değecek bir konudur. Bütün motor arıza tipleri üzerindeki çalışmalar artırılmalıdır. Verilen bilgilerin doğruluğu araştırılmalıdır. Motor arızaları konusunda kaynaklar birleştirilerek belirli bir literatür oluşturulmalıdır.

Arıza tanısını uzman operatörlere ihtiyaç olmadan yapan sinir ağları konusunda doğruluğu artırıcı çalışmalar yapılmalıdır. Doğruluğu artıracak çalışmalar arasında, belirli bir arızanın meydana getirdiği sinyalin sadece onun tarafından oluşturulduğundan emin olunmalıdır. Çünkü farklı arızalar aynı frekansta sinyal oluşturabilir. Bu yüzden her arıza için oluşacak özel frekansların sayısı teorik çalışmalarla artırılmalıdır.

Ölçümler bozucu ve diğer etkilerden etkilenmemesi için doğru yapılmalıdır. Yanlış ölçümler operatörü veya sinir ağları yapısını yanıltabilir.

Sinir ağları ile beraber bulanık mantık sistemlerinin kullanımı artırılmalıdır. Ayrıca sensor fusion yapılmalıdır. Bunun için akım, hız, sıcaklık, tork ve titreşim verileri beraber kullanılmalıdır.

Tezde verilmiş olan motor modeli iterasyonla veya başka bir metotla yaklaşık olarak çözülebilirse, bize önemli katkılar sağlayacaktır. Bu konu üzerinde çalışmalar artırılırsa eksen kaçıklığı olan motor modelinin kontrolü üzerinde çalışmalar yapılabilir. Motor modeli çözülmesi halinde paralelsizlik ve rulman arızası olan motor modeli de oluşturulabilir.

KAYNAKLAR

Alger P. L., 1970. Induction Machines Their Behavior and Uses, Gordon and Breach Publishers, Amsterdam.

Benbouzid M. EL H., 2000. A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection, *IEEE Trans. Ind. Appl.,* **Vol.47, No. 5,** pp. 984-993.

Boduroğlu T., 1988. Elektrik Makinaları Dersleri Cilt: 2, Kısım: 2, BETA Basım Yayım Dağıtım A.Ş., İstanbul.

Boldea I., Nasar S. A., 2002. Induction Machines Handbook, CRC Press, London.

Bonnett A. H., and Soukup G. C., 1988. Analysis of rotor failures in squirrel-cage induction motors, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, **Vol.24, No. 6,** pp. 1124-1130.

Bonnett A. H. et al., 1991. Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors, *IEEE Trans. Ind. Appl.*,**Vol.28, No. 4,** pp. 921-937.

Cheng D. K. 1989. Field and Wave Electromagnetics, Addison-Wesley Publishing Company, New York.

Costello M. J., 1991. Shaft voltages & Rotating machinery, *IEEE Petroleum and Chemical Industry Conference*, Industry Applications Society 38th Annual, 9-11 SEPT.

Eschmann, Hasbargen, and Weigand, 1985. Ball and Roller Bearings Theory, Design, and Application, John Wiley & Sons Ltd., New York.

Faiz J., and Tabatabaei I. T., 2002. Extension of winding function theory for nonuniform air gap in electric machinery, *IEEE Trans. Magn.,* **Vol. 38, No. 6,** pp. 3654-3657.

Finley W. R., Hodowanec M. M., and Holter W. G., 1999. An analytical approach to solving motor vibration problems, *IEEE Petroleum and Chemical Industry Conference*, Industry Applications Society 46th Annual, 13-15 SEPT.

Finley W. R., 1994. Troubleshooting motor problems, *IEEE Trans. Industry Appl.*, **Vol. 30, No. 5,** pp. 1383-1397, SEPT.-OCT.

Ghoggal A., Sahraoui M., Aboubou A., Zouzou S. E., and Razik H., 2005. An improved model of the induction machine dedicated to faults detection

– Extension of modified winding function, *IEEE Industrial Technology, ICIT 2005, International Conference*, 14-17 DEC.

Guldemir H., 2002. Detection of airgap eccentricity using line current spectrum of induction motors, *Electric Power System Research.,* **64, No. 2,** pp. 109-117.

Heller B., Hamata V., 1977. Harmonic Field Effects in Induction Machines, Elsevier Scientific Publishing Company, New York.

Joksimovic G. M., Durovic M. D., Penman J. and Arthur N., 2000. Dynamic simulation of dynamic eccentricity in induction machines–winding function approach, *IEEE Trans. Energy Conversion,* **Vol. 15, No. 2,** pp. 143-148.

Joksimovic G. M., 2005. Dynamic simulation of cage induction machine with air gap eccentricity, *IEE Proc. Electr. Power Appl.,* **Vol. 152, No. 4,** pp. 803-811.

Luo X., Liao Y., Toliyat H. A., El-Antably A., and Lipo T. A., 1995. Multiple coupled circuit modeling of induction machines, *IEEE Trans. Ind. Appl.,* **Vol.31, No. 2,** pp. 311-317.

Mcfadden P. D., and Smith J. D., 1984. Model for the vibration produced by a single point defect in a rolling element bearing, *Journal of Sound and Vibration ,* **Vol. 96,** pp. 69-82.

Mergen F., 2004. Elektrik Makinaları Ders Notları, İ.T.Ü..

Moreira J. C., and Lipo T. A., 1992. Modeling of saturated ac machines including air gap flux harmonic components, *IEEE Trans. Ind. Appl.,* **Vol.28, No. 2,** pp. 343-349.

Nandi S., 2004. A detailed model of induction machines with saturation extendable for fault analysis, *IEEE Trans. Ind. Appl.,* **Vol.40, No. 5,** pp. 1302-1308.

Nandi S., and Toliyat H. A., 1999. Condition monitoring and fault diagnosis of electrical machines – A review, *IEEE Proc. Ind. Appl.,* **Vol.1,** pp. 197-204.

Orhan S., 2003. Dönen makinelerde oluşan arızalar ve titreşim ilişkisi, *TEKNOLOJİ,* **Sayı 3-4,** sf. 41-48.

Sarıoğlu M. K., Gökaşan M., Boğosyan S., 2003. Asenkron Makinalar ve Kontrolü, Birsen Yayınevi, İstanbul.

Schmitz N. L., 1965. Introductory Electromechanics, John Wiley & Sons, New York.

Schoen R. R., Habetler T. G., Kamran F., and Bartheld R. G., 1995. Motor bearing damage detection using stator current monitoring, *IEEE Trans. Ind. Appl.,* **Vol.31, No. 6,** pp. 1274-1279.

Siddique A., Yadava G. S., and Singh B., 2005. A review of stator fault monitoring techniques of induction motors, *IEEE Trans. Energy Conversion,* **Vol. 20, No. 1,** pp. 106-113.

Stack J. R., Habetler T. G., and Harley R. G., 2003. Experimentally generating faults in rolling element bearing shaft current, *IEEE Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives Atlanta,* GA, USA, pp. 188-191, 24-26 AUGUST.

Thomson W. T., Cameron J. R., and Dow A. B., 1986. Vibration and current monitoring for detecting airgap eccentricity in large induction motors, *IEE Proc.*, **Vol. 133, Pt. B, No. 3,** pp. 155-186.

Timar P. L., 1989. Noise and Vibration of Electrical Machines, Elsevier, New York.

Toliyat H. A., Arefeen M. S., and Parlos A. G. 1996. A method for dynamic simulation of air-gap eccentricity in induction machines, *IEEE Trans. Ind. Appl.,* **Vol.32, No. 4,** pp. 910-917.

Vas P., 1993. Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines, U.K.:Clarendon, Oxford.

Yang S. J., 1981. Low-noise electrical motors, Clarendon Press, Oxford.

ÖZGEÇMİŞ

İlker Özelgin 1981 yılında Bursa'da doğdu. Lise eğitimini Bursa Erkek Lisesi'nde tamamladı. 1999 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği programında eğitim görmeye hak kazandı. Bir yıl İngilizce hazırlık sınıfına devam ettikten sonra, 2000 yılında başladığı Makine Mühendisliği eğitimini 2004 yılında tamamlayarak mezun oldu. Lisans eğitimi sırasında Elektrik Mühendisliğinde çift anadal programına katıldı. 2005 yılında Elektrik Mühendisliğinden mezun oldu. 2004 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Yüksek Lisans Programı'nda başladığı yüksek lisans eğitimine devam etmektedir.