

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ASENKRON MAKİNEDE KAFES KIRILMASININ
İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ
Murat İMERYÜZ**

Anabilim Dalı : Elektrik Mühendisliği

Programı : Elektrik Mühendisliği

MART 2009

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ASENKRON MAKİNEDE KAFES KIRILMASININ
İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ
Murat İMERYÜZ
(504992002)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 24 Nisan 2008

Tezin Savunulduğu Tarih : 09 Mart 2009

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Faik MERGEN (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. İlhami ÇETİN (İTÜ)
Prof. Dr. İbrahim ŞENOL (YTÜ)
Prof. Dr. Feriha ERFAN (KOÜ)
Prof. Dr. Metin GÖKAŞAN (İTÜ)**

MART 2009

Anneme...

ÖNSÖZ

1994 yılında başladığım, önce çeşitli talihsizlikler ardından kendi ihmalim nedeniyle iki kere ara verdiğim ve tekrar yeni yönetmeliklerle yeniden başladığım doktora çalışmam sanırım bu tez ile sonuçlanıyor. Bu çalışmada, Asenkron Makinede Kafes Kırılmasının İncelenmesi başlığı altında, rotor kafesi arızalı olan asenkron motorların işletme özellikleri, sargı akımı, hava aralığı magnetik büyüklükleri ve döndürme momenti bakımından incelenmektedir. Farklı makine modelleri kullanılarak sonuçlar karşılaştırılmaktadır. Ayrıca incelemeler, magnetik analiz programları ve deneysel çalışmalarla desteklenmektedir.

Akademik ve özel hayatımın en umutsuz ve en sıkıntılı zamanlarında engin hoşgörüsü ve yardımı ile beni destekleyen, tezin hazırlanmasında akademik açıdan fikirler veren tez danışmanım Prof.Dr. Faik Mergen'e, yalnız mühendislik ve bilimsel görüşlerinden değil, yaşam görüşlerinden de her zaman esinlendiğim, uzun yıllar asistanlığını yaptığım, emekli oluncaya kadar doktora tez danışmanlığını yürüten Prof.Dr. İlhami Çetin'e, bana bütün olanakları sunan ve her bakımdan destek olan ARÇELİK Çerkezköy Motor İşletmesi A.Ş. Ar-Ge Bölümünde çalışan meslekdaşlarıma, beni ısrarla motive eden çalışma arkadaşlarım Yrd.Doç.Dr.Özgür Üstün'e ve Öğr.Gör.Taşdemir Aşan'a, yardımını hiç esigemeyen Araş.Gör.Dr.Murat Yılmaz ve Yrd.Doç.Dr.Emine AYZA'ya çok teşekkür ederim.

Bu akademik tablonun yanı sıra hayatımın her döneminde yanımda hissettiğim ve destek aldığım aileme, doktora bitirmem konusundaki ısrarlarından hiç vazgeçmeyen ablalarıma ve yaşantımın büyük bölümünde birlikte olduğum, gerek tezin yazılmasında ve gerekse diğer tüm konularda hep yanımda hissettiğim Alpim Eğitim'deki iş arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

Bu doktora tezini 2000 yılında kaybettiğim annem merhum Müşerref Ahıpaşaoğlu İmeryüz'e ithaf ediyorum.

Nisan 2008

Murat İmeryüz
Elektrik Yüksek Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vii
KISALTMALAR.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xix
SUMMARY.....	xxi
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Arızalı Motorun İşletme Davranışını İnceleyen Yayınlar	6
1.2 Rotor Arızasını Tanımaya Yönelik Yayınlar	8
2. KAFES ARIZALARI VE TANI YÖNTEMLERİ	11
2.1 Motor Arızalarının Nedenleri	11
2.1.1 Isısal zorlanmalar	12
2.1.2 Magnetik zorlanmalar	13
2.2 Kafes Arızaları için Arıza Tanıma Yöntemleri	13
3. ASENKRON MAKİNEİNİN DİNAMİK MODELLERİ	21
3.1 Asenkron makinenin zamana bağlı büyüklüklerle modellenmesi.....	22
3.1.1 Stator sargısının modellenmesi	22
3.1.2 Rotor devresinin modellenmesi.....	27
3.1.3 İç momentin hesaplanması	33
3.2 Asenkron Makinenin Uzak Fazörleri ile Modellenmesi	34
3.2.1 Stator uzak fazörleri	34
3.2.2 Statorun akı uzak fazörü ve gerilim denklemi	36
3.2.3 Rotor uzak fazörleri.....	38
3.2.4 Rotorun akı uzak fazörü ve gerilim denklemi	39
3.3 Rotor Arızasının Modellenmesi	41
3.4 Asenkron Makinenin Ani Değerli Simetrik Bileşenlerle İncelenmesi ve Kafes Arızası için Yaklaşık Çözüm Modeli.....	42
3.4.1 Temel dönüşümler.....	43
3.4.2 Statorun gerilim denklemi	46
3.4.3 Rotorun gerilim denklemi	46
3.4.4 Kafesi arızalı makine için yaklaşık çözüm modeli.....	48
4. HATA AKIMI YÖNTEMİ.....	53
4.1 Hesaplama Yöntemi	54
4.2 Rotor Akım Dağılımı.....	60
4.3 Hata Akımlarının Yarattığı Magnetik Alan.....	61
5. MAGNETİK ANALİZ SONUÇLARI.....	63
5.1 Flux 2D için Asenkron Motorun FEM Modelinin Kurulması	63
5.2 Asenkron Motorun FEM Modelinin Doğruluğunun Denetlenmesi	68
5.3 Asenkron Motorda Kafes Arızalarının Magnetik Analizleri.....	70

5.3.1 Magnetik akı ve magnetik akı yoğunluğunun değişimi	73
5.3.2 Hava aralığı magnetik akı yoğunluğunun değişimi.....	91
5.3.3 Stator belli bir noktasında magnetik akı yoğunluğunun değişimi	110
5.4 Motorun İşletme Büyüklüklerinin Değişiminin İncelenmesi	122
5.4.1 Döndürme momentinin ve motor akımının kayma ile değişimi.....	122
5.4.2 Devir hızının zamana göre değişimi ve motor akımının harmonikleri	127
5.5 Anma İşletmesinde Oluşan Çubuk Kırıklarının Geçici Olay İncelemesi.....	132
6. SAYISAL ÇÖZÜMLEME SONUÇLARI VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	137
6.1 Çalışmada Kullanılan Asenkron Makinenin Yapım Büyüklükleri	138
6.2 Sayısal İnceleme için Motorun Eşdeğer Devre Elemanlarının Hesaplanması.....	141
6.3 Kafes Arızaları için Sayısal Çözümlemeler	145
6.3.1 Kafes arızasının modellenmesi ve dinamik modelin sonuçları	145
6.3.2 Hata akımı analizi sonuçları	149
6.4 Deneysel Çalışmalar	152
6.4.1 Performans deneylerinin sonuçları ve karşılaştırılması.....	154
6.4.2 Akım özeğrileri ve harmonik analizi	157
6.4.3 Isınma deneyleri	170
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	173
KAYNAKLAR.....	179
EKLER.....	187

KISALTMALAR

HFD	: Hızlı Fourier Dönüşümü
FEM	: Sonlu Elemanlar Yöntemi

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 5.1	: Örnek alınan motorun çeşitli işletme büyüklüklerinin katalog, deney ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması.....	69
Çizelge 5.2	: Magnetik analizlerin yapıldığı temel değerler.....	74
Çizelge 5.3	: Değişik sayıdaki rotor çubuk arızalarında hava aralığı akı yoğunluğu değişiminin harmonik dağılımı	105
Çizelge 5.4	: Hava aralığı akı yoğunluğunun ve bileşenlerinin etkin değerleri...	106
Çizelge 5.5	: Stator boyunduruğunda belli bir noktadaki akı yoğunluğunun etkin değerleri	110
Çizelge 5.6	: Statorun belli bir noktasındaki akı yoğunluğu değişiminin değişik sayıdaki çubuk kırıklarında harmonik dağılımı	119
Çizelge 5.7	: Statorun belli bir noktasındaki akı yoğunluğu değişiminin y bileşeninin değişik sayıdaki çubuk kırıklarında harmonik dağılımı	120
Çizelge 5.8	: Çeşitli sayıdaki çubuk kırıklarında stator akımının harmonik dağılımı	131
Çizelge 6.1a	: Sürekli halde FEM ile bulunan rotor çubuk akımları	149
Çizelge 6.1b	: Hata akımı analizi ile bulunan rotor çubuk akımları	151
Çizelge 6.2	: Sağlam ve ardışık kırıklar için motorun işletme büyüklüklerinin analiz ve deney sonuçları	155
Çizelge 6.3	: Sağlam, herhangi iki çubuğu (kSSSk) ve simetrik iki çubuğu kırık olan motorun işletme büyüklüklerinin analiz ve deney sonuçları	156
Çizelge 6.4	: Anma akımlarının ani değerlerinin çubuk arızaları ile değişimi	160
Çizelge 6.5	: Sağlam ve arızalı motorlarda ısınma deneylerinin sonuçları.....	171
Çizelge D.1	: Birinci rotor için sağlam durumda yükleme deneyi sonuçları.....	190
Çizelge D.2	: Birinci rotor için bir kafes çubuğu kırık durumda yükleme deneyi sonuçları.....	191
Çizelge D.3	: Birinci rotor için ardışık iki kafes çubuğu kırık durumda yükleme deneyi sonuçları	192
Çizelge D.4	: Birinci rotor için ardışık üç kafes çubuğu kırık durumda yükleme deneyi sonuçları	193
Çizelge D.5	: Birinci rotor için ardışık dört kafes çubuğu kırık durumda yükleme deneyi sonuçları	194
Çizelge D.6	: İkinci rotor için sağlam durumda yükleme deneyi sonuçları	195
Çizelge D.7	: İkinci rotor için bir kafes çubuğu kırık durumda yükleme deneyi sonuçları.....	196
Çizelge D.8	: Birinci rotor için herhangi iki kafes çubuğu kırık durumda yükleme deneyi sonuçları	197
Çizelge D.9	: Dördüncü rotor için sağlam durumda yükleme deneyi sonuçları ...	198

Çizelge D.10 : Dördüncü rotor için bir kafes çubuğu kırık durumda yükleme deneyi sonuçları	199
Çizelge D.11 : Dördüncü rotor için simetrik iki kafes çubuğu kırık durumda yükleme deneyi sonuçları	200

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Sağlam rotorlu motorun akım iz analizi	15
Şekil 2.2 : Bir kafes çubuğu arızalı motorun akım iz analizi.....	16
Şekil 2.3 : İki kafes çubuğu arızalı motorun akım iz analizi	16
Şekil 2.4 : Kafesi sağlam motorun titreşim analizi.....	17
Şekil 2.5 : Bir kafes çubuğu arızalı motorun titreşim analizi	18
Şekil 2.6 : Asenkron motorun akım iz analizi ile bulunan arıza tanı rehberi	19
Şekil 3.1 : Kafesli asenkron motorun ilkesel sargı ve kafes yapısı.....	23
Şekil 3.2 : Stator ve rotor sargı dağılımı	26
Şekil 3.3 : Rotorun ilkesel yapısı ve faz çokgeni.....	28
Şekil 3.4 : Kafes yapısının açılmış ve dairesel eşdeğer devresi.....	29
Şekil 3.5 : Faz sargı akımlarının makine içerisindeki konumu.....	35
Şekil 3.6 : Rotor akımlarının makine içerisindeki konumları.....	39
Şekil 4.1 : Hata akımının oluşturduğu halkalanma akısı	54
Şekil 4.2 : Bir kırık çubuk için hata yönteminin rotor eşdeğer devresi	55
Şekil 4.3 : Çubuk hata akımlarının vektörel gösterimi	57
Şekil 4.4 : Ardışık iki kırık için rotorun hata akım analiz modeli	58
Şekil 4.5 : Ardışık üç kırık için rotorun hata akım analiz modeli.....	59
Şekil 4.6 : Sağlam motor akımı ile hata akımlarının vektörel olarak toplanması.....	60
Şekil 4.7 : Hata akımlarının oluşturduğu akı yoğunluklarının dağılımı	61
Şekil 5.1 : Kafesli asenkron motorun tasarım geometrisi	64
Şekil 5.2 : Makine geometrisinin malzeme özelliklerine göre sınıflandırılması	64
Şekil 5.3 : Magnetik malzemenin histerezis öz eğrisi	65
Şekil 5.4 : Rotor konumunun ve hızın başlangıç değerleri akımı.....	65
Şekil 5.5 : Rotor kısa devre segmanının direnç ve indüktans değerleri.....	66
Şekil 5.6 : Magnetik analiz için mekanik sabitlerin değerleri	66
Şekil 5.7 : Motorun elektriksel devre bağlaması	67
Şekil 5.8 : Magnetik analiz için bölmelenmiş makine geometrisi	68
Şekil 5.9 : Deneysel ve analizle bulunan motor momentinin devir hızı ile değişim özeğrileri.....	70
Şekil 5.10 : Makine geometrisinde arızalı rotor çubuklarının gösterilmesi.....	72
Şekil 5.11 : Magnetik analizde bir sorgu ekranı	73
Şekil 5.12 : Sağlam rotorlu motorun magnetik akı dağılımı 326,2 ms.....	75
Şekil 5.13 : Sağlam rotorlu motorun magnetik akı yoğunluğu dağılımı 326,12 ms.....	76
Şekil 5.14 : Sağlam rotorlu motorun magnetik akı dağılımı 330 ms	77
Şekil 5.15 : Sağlam rotorlu motorun magnetik akı yoğunluğu dağılımı 330 ms.....	78
Şekil 5.16 : Bir kafes çubuğu kırık motorun magnetik akı dağılımı 388,75 ms.....	79
Şekil 5.17 : Bir kafes çubuğu kırık motorun magnetik akı yoğunluğu dağılımı 388,75 ms.....	80
Şekil 5.18 : Ardışık iki kafes çubuğu kırık motorun magnetik akı dağılımı 451,5 ms	81

Şekil 5.19 : Ardışık iki kafes çubuğu kırık motorun magnetik akı yoğunluğu dağılımı 451,5 ms	82
Şekil 5.20 : Ardışık üç kafes çubuğu kırık motorun magnetik akı dağılımı 473,75ms	83
Şekil 5.21 : Ardışık üç kafes çubuğu kırık motorun magnetik akı yoğunluğu dağılımı 473,75 ms	84
Şekil 5.22 : Ardışık dört kafes çubuğu kırık motorun magnetik akı dağılımı 330 ms	85
Şekil 5.23 : Ardışık dört kafes çubuğu kırık motorun magnetik akı yoğunluğu dağılımı 330 ms	86
Şekil 5.24 : Arasında üç sağlam bara olan herhangi iki kafes çubuğu kırık motorun magnetik akı dağılımı 409,75 ms	87
Şekil 5.25 : Arasında üç sağlam bara olan herhangi iki kafes çubuğu kırık motorun magnetik akı yoğunluğu dağılımı 409,75 ms	88
Şekil 5.26 : Simetrik iki kafes çubuğu kırık motorun magnetik akı dağılımı 368,3 ms	89
Şekil 5.27 : Simetrik iki kafes çubuğu kırık motorun magnetik akı yoğunluğu dağılımı 368,3 ms	90
Şekil 5.28 : Sağlam birinci rotor için hava aralığı akı yoğunluğu değişimi.....	92
Şekil 5.29 : Sağlam ikinci rotor için hava aralığı akı yoğunluğu değişimi.....	92
Şekil 5.30 : Bir kırık çubuk için hava aralığı akı yoğunluğu değişimi	93
Şekil 5.31 : Ardışık iki kırık çubuk için hava aralığı akı yoğunluğu değişimi	93
Şekil 5.32 : Ardışık üç kırık çubuk için hava aralığı akı yoğunluğu değişimi.....	94
Şekil 5.33 : Ardışık dört kırık çubuk için hava aralığı akı yoğunluğu değişimi	94
Şekil 5.34 : Herhangi iki kırık çubuk için hava aralığı akı yoğunluğu değişimi	95
Şekil 5.35 : Simetrik iki kırık çubuk için hava aralığı akı yoğunluğu değişimi	95
Şekil 5.36 : Sağlam rotor için akı yoğunluğunun normal bileşeninin değişimi.....	96
Şekil 5.37 : Bir kırık çubuk için akı yoğunluğunun normal bileşeninin değişimi	96
Şekil 5.38 : Ardışık iki kırık çubuk için akı yoğunluğunun normal bileşeninin değişimi	97
Şekil 5.39 : Üç kırık çubuk için akı yoğunluğunun normal bileşeninin değişimi.....	97
Şekil 5.40 : Ardışık dört kırık çubuk için akı yoğunluğunun normal bileşeninin değişimi.....	98
Şekil 5.41 : Herhangi iki kırık çubuk için akı yoğunluğunun normal bileşeninin değişimi.....	98
Şekil 5.42 : Simetrik iki kırık çubuk için akı yoğunluğunun normal bileşeninin değişimi.....	99
Şekil 5.43 : Sağlam rotor için akı yoğunluğunun teğetsel bileşeninin değişimi	100
Şekil 5.44 : Bir kırık çubuk için akı yoğunluğunun teğetsel bileşeninin değişimi	100
Şekil 5.45 : Bir kırık çubuk için akı yoğunluğunun teğetsel bileşeninin değişimi	101
Şekil 5.46 : Ardışık iki kırık çubuk için akı yoğunluğunun teğetsel bileşeninin değişimi.....	101
Şekil 5.47 : Ardışık üç kırık çubuk için akı yoğunluğunun teğetsel bileşeninin değişimi.....	102
Şekil 5.48 : Ardışık dört kırık çubuk için akı yoğunluğunun teğetsel bileşeninin değişimi.....	103
Şekil 5.49 : Herhangi iki kırık çubuk için akı yoğunluğunun teğetsel bileşeninin değişimi	103

Şekil 5.50 : Simetrik iki kırık çubuk için akı yoğunluğunun teğetsel bileşeninin değişimi	104
Şekil 5.51 : Sağlam motorun akı yoğunluğunun zamanla ve çevresel uzunlukla değişimi	107
Şekil 5.52 : Bir çubuğu kırık motorun akı yoğunluğunun zamanla ve çevresel uzunlukla değişimi.....	108
Şekil 5.53 : Ardışık iki çubuğu kırık motorun akı yoğunluğunun zamanla ve çevresel uzunlukla değişimi	109
Şekil 5.54 : Sağlam birinci rotor için statorun belli noktasındaki akı yoğunluğunun değişimi	111
Şekil 5.55 : Sağlam ikinci rotor için statorun belli noktasındaki akı yoğunluğunun değişimi	111
Şekil 5.56 : Bir kırık çubuk için statorun belli noktasındaki akı yoğunluğunun değişimi	112
Şekil 5.57 : Ardışık iki kırık çubuk için statorun belli noktasındaki akı yoğunluğu değişimi	112
Şekil 5.58 : Ardışık üç kırık çubuk için statorun belli noktasındaki akı yoğunluğu değişimi	113
Şekil 5.59 : Ardışık dört kırık çubuk için statorun belli noktasında akı yoğunluğu değişimi	113
Şekil 5.60 : Herhangi iki kırık çubuk için statorun belli noktasında akı yoğunluğu değişimi	114
Şekil 5.61 : Simetrik iki kırık çubuk için statorun belli noktasında akı yoğunluğu değişimi	114
Şekil 5.62 : Sağlam birinci rotor için stator akı yoğunluğunun y-eksen bileşeninin değişimi	115
Şekil 5.63 : Sağlam ikinci rotor için stator akı yoğunluğunun y-eksen bileşeninin değişimi	115
Şekil 5.64 : Bir kırık çubuk için stator akı yoğunluğunun y-eksen bileşeninin değişimi.....	116
Şekil 5.65 : Ardışık iki kırık çubuk için stator akı yoğunluğunun y-eksen bileşeninin değişimi.....	116
Şekil 5.66 : Ardışık üç kırık çubuk için stator akı yoğunluğunun y-eksen bileşeninin değişimi.....	117
Şekil 5.67 : Ardışık dört kırık çubuk için stator akı yoğunluğunun y-eksen bileşeninin değişimi.....	117
Şekil 5.68 : Herhangi iki çubuğu kırık motorun stator akı yoğunluğunun y bileşeninin değişimi.....	118
Şekil 5.69 : Simetrik iki çubuğu kırık motorun stator akı yoğunluğunun y bileşeninin değişimi.....	118
Şekil 5.70 : Rotor arızalarında döndürme momentinin kayma ile değişim eğrisi	123
Şekil 5.71 : Devrilme momentlerinin kayma ile değişimi	123
Şekil 5.72 : Anma momentlerinin kayma ile değişimi	124
Şekil 5.73 : Kalkış momentlerinin kayma ile değişimi	124
Şekil 5.74 : Rotor arızalarında motor akımının kayma ile değişimi	125
Şekil 5.75 : Kalkış akımlarının kayma ile değişimi.....	126
Şekil 5.76 : Anma akımlarının kayma ile değişimi	126
Şekil 5.77 : Değişik rotor kafes arızalarında motorun devir hızının zamanla değişimi	128

Şekil 5.78 :	Ardışık rotor çubuk kırıklarında 3...9. harmonik dağılımları	129
Şekil 5.79 :	Ardışık rotor çubuk kırıklarında 21...30. harmonik dağılımları	129
Şekil 5.80 :	İki tane rotor çubuğu kırıklarında 3...9. harmonik dağılımları	130
Şekil 5.81 :	İki tane rotor çubuğu kırıklarında 21...30. harmonik dağılımları	130
Şekil 5.82 :	Bir kırıktan üç ardışık kırık geçişinde motor büyüklüklerinin değişimi	134
Şekil 5.83 :	Üç ardışık kırık için, arızalı çubuğa ikinci komşu olan bara akımının değişimi	134
Şekil 5.84 :	Bir kırık arızasında, arızalı çubuğa komşu baranın akımının değişimi	135
Şekil 5.85 :	Sağlam, bir kırık, üç kırık geçişlerinde devir hızının değişimi.....	135
Şekil 6.1 :	Makinenin rotor çekirdeğinin teknik resmi	139
Şekil 6.2 :	Makinenin rotor kesitinin teknik resmi.....	140
Şekil 6.3 :	Rotor grubunun teknik resmi	140
Şekil 6.4 :	Stator laminasyonunun teknik resmi	141
Şekil 6.5 :	Kafes kırıklarının eşdeğer devrede modellenmesi.....	146
Şekil 6.6 :	Anma yükünde motor akımının simetrik bileşen ve sonlu eleman modelleri için karşılaştırılması	147
Şekil 6.7 :	Bir çubuğu arızalı motorun birinci yaklaşık ve ikinci yaklaşık simetrik bileşen modeli sonuçları	148
Şekil 6.8 :	Ardışık iki çubuğu arızalı motorun birinci yaklaşık ve ikinci yaklaşık simetrik bileşen modeli sonuçları.....	148
Şekil 6.9 :	Bir kafes kırığı için hata akımı analizi eşdeğer devresi.....	150
Şekil 6.10 :	Deneyisel çalışmalarda kullanılan rotorların resimleri.....	153
Şekil 6.11 :	Motorun deney düzeneğinin fotoğrafı	154
Şekil 6.12 :	Anma yükünde motor akımlarının zamana bağlı değişim eğrileri	159
Şekil 6.13 :	Fem analizi sonuçları ile deney sonuçlarının karşılaştırılması.....	160
Şekil 6.14 :	Boşta çalışmada motor akımlarının zamana bağlı değişim eğrileri.....	162
Şekil 6.15 :	Dördüncü rotor için arızalı motor akımlarının frekans açılım değerleri	163
Şekil 6.16 :	Sağlam ve bir çubuğu kırık motorun akımlarının frekanslarına açılımı	163
Şekil 6.17 :	Sağlam ve simetrik iki kırık için motor akımlarının dağılımları	164
Şekil 6.18 :	Bir kırık ve simetrik iki kırık için motor akımlarının dağılımları	164
Şekil 6.19 :	Ardışık iki kırık için motor akımının frekans değerlerine açılımı.....	165
Şekil 6.20 :	Herhangi iki kırık için motor akımının frekans değerlerine açılımı	165
Şekil 6.21 :	Ardışık dört kırık için motor akımının frekans değerlerine açılımı.....	166
Şekil 6.22 :	Ardışık iki ve dört kırık için motor akımının frekans değerlerine açılımı	166
Şekil 6.23 :	Herhangi iki kırık ve ardışık iki kırık için motor akımının frekans değerlerine açılımı	167
Şekil 6.24 :	Anma yükünde sağlam ve arızalı motor akımlarının frekans bantlarına açılımı	167
Şekil 6.25 :	Boşta çalışmada ikinci rotor için sağlam ve arızalı motor akımlarının frekans bantlarına açılımı	169
Şekil 6.26 :	Boşta çalışmada birinci rotor için sağlam ve arızalı motor akımlarının frekans bantlarına açılımı	170
Şekil D.1 :	Birinci rotor için sağlam durumda motor özdeşleri	201
Şekil D.2 :	Birinci rotor için bir kafes çubuğu kırık durumda motor özdeşleri	202
Şekil D.3 :	Birinci rotor için ardışık iki kafes çubuğu kırık durumda motor	

özeğrileri.....	203
Şekil D.4 : Birinci rotor için ardışık üç kafes çubuğu kırık durumda motor özeğrileri.....	204
Şekil D.5 : Birinci rotor için ardışık dört kafes çubuğu kırık durumda motor özeğrileri.....	205
Şekil D.6 : İkinci rotor için sağlam durumda motor özeğrileri.....	206
Şekil D.7 : İkinci rotor için bir kafes çubuğu kırık durumda motor özeğrileri.....	207
Şekil D.8 : İkinci rotor için herhangi iki kafes çubuğu kırık durumda motor özeğrileri.....	208
Şekil D.9 : Dördüncü rotor için sağlam durumda motor özeğrileri	209
Şekil D.10 : Dördüncü rotor için bir kafes çubuğu kırık durumda motor özeğrileri.....	210
Şekil D.11 : Dördüncü rotor için simetrik iki kafes çubuğu kırık durumda motor özeğrileri.....	211

ASENKRON MAKİNEDE KAFES KIRILMASININ İNCELENMESİ

ÖZET

Endüstride, elektrik enerjisinin mekanik enerjiye dönüştürülmesinde büyük yoğunlukla asenkron motorlar kullanılır. Elektrik motorları içerisinde asenkron motorların payının % 90 olduğu tahmin edilmektedir. Bu nedenle pek çok çalışmada asenkron makinelerin işletme davranışı incelenmektedir. Bu motor tipinin yaygın kullanımı nedeniyle arızalarının kısa süre içerisinde saptanması ve giderilmesi, yani işletmedeki ölü zamanların azaltılması teknolojik ve ticari anlamda önemli bir kavram haline gelmiştir.

Bu doktora çalışmasında öncelikle kafes arızalarının motorun işletme davranışına ve magnetik büyüklüklerine olan etkisi incelenmektedir. Bu amaçla asenkron makinenin geçici hal davranışının incelenebileceği modeller verilmektedir. Yöntemler kafes kırıklarının dinamik analizi için, uygulanabilirlik, basitlik, işlem yükü ve fiziksel bakımdan yorumlanabilme yetenekleri bakımından karşılaştırılmaktadır. Fiziksel olarak yorumlanabildiği için çalışmada daha çok ani değerli simetrik bileşenler üzerinde çalışılmıştır. Çalışmada kafes arızaları sonucu oluşan yapısal simetrisizliği simetrik bileşenler yöntemiyle daha basit biçimde inceleyen üç tane yaklaşık çözüm modeli önerilmektedir.

Kafes çubuğu arızalı asenkron motorun magnetik büyüklüklerini incelemek için Flux 2-D magnetik analiz programından yararlanılmıştır. Makinenin sonlu elemanlar modeli kurularak sağlam ve arızalı durumlarda hava aralığı akı yoğunluğunun, hava aralığı uzunluğuna göre değişimi ve statorda belli bir noktanın akı yoğunluğunun zamana göre değişimi incelenmiştir. Ayrıca incelenen her durumda stator akımı, hız ve rotor çubuklarının akım değerleri kaydedilmiştir. Magnetik analizler, belli bir kurgu çerçevesinde sağlam, tek çubuğu kırık, ardışık iki çubuğu kırık, ardışık üç ve dört çubuğu kırık durumlar için tekrarlanmıştır. Ayrıca simetrik iki kırık ve üç sağlam barayı çevreleyen iki kırık çubuk durumları incelenmiştir. Elde edilen akı ve akı yoğunluğu değişimleri harmonik bileşenlerine ayrılarak, kafes kırıklarının magnetik büyüklüklere yaptığı etki belirlenmiştir.

Sonlu elemanlar yöntemiyle incelenen modelde, makinenin sürekli hal işletme büyüklükleri de incelenmiştir. Çeşitli kafes kırıkları için döndürme momentinin ve motor akımının kayma büyüklüğüne bağlı değişimi araştırılmıştır. Aynı zamanda motor çalışırken oluşan kırıkların etkisini modellemek için bir kırık arızalı durumunda sürekli hal modeli incelenirken, bir anda üç ardışık kırığa geçilerek makinede oluşan geçici olaylar incelenmiştir. Bu analizlerin yanı sıra, kafes çubuğu arızalı asenkron motorun işletme davranışını üst üste bindirme ilkesi ile inceleyen hata akımları analizi yöntemi de kullanılmıştır. Yöntem tanıtıldıktan sonra ardışık iki kırık ve üç kırık için, oluşan hata akımının diğer çubuklara hangi oranda dağıldığı hesaplanmıştır.

Bu teorik çalışmaları desteklemek amacıyla, incelenen her arıza durumunda motorlara yükleme deneyi yapılarak, işletme özeğrileri çıkarılmıştır. Böylelikle çeşitli düzeydeki kafes kırıklarının asenkron motorun işletme davranışına olan etkileri araştırılmıştır. Yükte ve boşta deneyler sırasında, akım dalga şekli izlenmiştir. Boşta akım hem alçak bant, hem de yüksek bant değerlerinde, yükte akım ise yalnız yüksek bant değerlerinde frekans bileşenlerine ayrılmıştır. Böylelikle kafes arızası için akım büyüklüğünde iz oluşturan frekans bantları değerlendirilmiştir. Aynı zamanda yapılan incelemelerde akım zarf eğrilerinin salınım frekansından ve akımın tepe değerinin değişiminden yararlanılarak ,doğrudan arıza tanısı yapılabileceği saptanmıştır.

Son olarak kırık kafes çubuklarının, motor sıcaklığına olan etkilerini incelemek için deneysel ve teorik olarak incelenen btn arızalar için ısınma deneyleri yapılmıştır.

THE ANALYSIS OF BROKEN BARS ON THE ASYNCHRONOUS MACHINES

SUMMARY

In industry, most of the electromechanical energy converters are the induction motors. It is estimated that the ninety percent of electrical motors are induction motors. Thus, the analysis of behavior of induction motor in many applications is an important research area. Because of excessive use of induction motor, from technological and economical point of view, it is also important the detecting and managing the faults by means of shortening the dead time intervals.

In this study, the cage fault types of induction motors and their effects on operation and magnetic parameters are investigated. For this purpose, the transient-state models are given. The dynamic models are compared by means of simplicity, usability etc. Because of the physical comment ability, the instantaneous symmetrical component method is preferred. In this study, three simple methods are proposed for analyzing the structural asymmetry caused by the cage faults by symmetrical components method.

The Flux 2D magnetic analysis software is used for calculating the magnetic parameters of an induction motor having a cage fault. First, the FEM model of the machine is built and then that the variation of the air-gap magnetic flux density along the air-gap length and the time variation of the stator magnetic flux density in a given point are investigated for either normal or fault operation. However, the stator current, rotation speed and the current through the rotor bars are recorded. Magnetic analysis is conducted for the normal rotor, the rotor with single broken bar, the rotor with two broken bars in sequence, the rotor with three broken bars in sequence and the rotor with four broken bars in sequence. The symmetrical two broken bars and the three unbroken bars surrounded by two broken bars are other analyzed situations. The obtained flux and flux density data are analyzed by means of harmonic analysis and then the effect of broken cage bars on the motor magnetic parameters are determined.

The FEM model of motor is used for calculating the transient and steady state parameter values. For the certain types of broken cage bars, the motor torque and the motor current are studied depending on the slip. However, to model the effects of broken bars during motor running, an algorithm is built for the transition from steady state operation with single broken rotor bar to the transient state operation with three broken rotor bars.

A superposition solution method of the fault currents is implemented for determining the behavior of the motor with broken rotor bars.

The loading tests are used to determine the actual operation characteristics of the motor. Each fault condition is analyzed by means of loading and the motor current is monitored. The frequency analysis of the rated and no-load current values is accomplished for the certain frequency bands. At last, the effects of broken rotor bars on the motor temperature are evaluated by conducting a series of laboratory tests for each fault condition.

1. GİRİŞ

Endüstride, elektrik enerjisinin mekanik enerjiye dönüştürülmesinde büyük çoğunlukla asenkron motorlar kullanılır. Elektrik motorları içerisinde asenkron motorların payının % 90 olduğu tahmin edilmektedir. Bu nedenle pek çok çalışmada asenkron makinelerin işletme davranışı incelenmektedir.

Stator yapısı değişmemek üzere rotor yapım biçimine göre biri kafesli, diğeri bilezikli olmak üzere iki temel asenkron motor tipi ayırt edilir. Sanayide ve diğer pek çok alanda kullanılan kafesli tip yapımı en kolay, en dayanıklı, işletme güvenliği en yüksek, bakım gereksinimi en az ve en yaygın kullanılan elektrik motorudur. Bu motor tipinin yaygın kullanımı nedeniyle arızalarının kısa süre içerisinde saptanması ve giderilmesi, yani işletmedeki ölü zamanların azaltılması teknolojik ve ticari anlamda önemli bir kavram haline gelmiştir. Kafesli asenkron motorlarda oluşan yapısal arızalar, stator ve rotorda olmak üzere iki ana başlıkta toplanabilir. Bunlara ek olarak saptanması daha kolay olan bilye arızaları vardır. Statorda oluşan arızalar, çoğunlukla ısısal zorlanmalar nedeniyle oluşan ve kolay saptanabilen sargı arızalarıdır. Rotorda oluşan kafes arızaları kafes çubuklarında ve/veya kısa devre bileziklerinde oluşan çeşitli derecedeki çatlak ve kırıklardır. Rotor devresi kapalı olduğundan kafes arızalarının saptanması oldukça güçtür. Sonuç olarak kafesli asenkron motorlarda oluşan rotor arızalarının çoğunluğu çubuk kırılmalarıdır.

Rotor kafesi, küçük ve orta güçlerde sıvı alüminyumun hazır sac paketi içerisine basınçla püskürtülmesiyle yapılır. Üretimin kalitesi alüminyumun saflığına, kullanılan kalıpların ve rotor sac paketinin niteliğine bağlıdır. Büyük güçlü veya ağır iş makinelerinin tahriğinde kullanılan asenkron motorların kafesinde oluk biçimli bakır veya alaşım çubuklar kullanılır. Tahrik edilecek sistemin işletme özellikleri rotorda kullanılacak malzemeyi belirler. Bu tip kafeslerde çubuklar kısa devre halkalarına kaynakla bağlanır. Rotorun bu basit yapımına karşın, yapımsal kusurlar oluşabilir.

İşletme sırasında ise elektriksel, mekanik, ısısal veya kimyasal nedenlerden dolayı kısa devre bileziklerinde kopmalar ya da çubuklarda kırılmalar oluşabilir. Rotor

ubukları özellikle kalkış sırasında hem mekanik hem de ısısal bakımdan zorlanır. Eğer motor simetrisiz ve st-titreşimli bir şebekeden besleniyorsa, bu zorlanma daha da artar. Ayrıca eksenleme hataları kafes çubuklarında oluşan gerilme kuvvetini arttırır.

Kafes arızalarında elektriksel ve mekanik zorlanmaların yanı sıra, ısısal zorlanmalar da önemli bir etkindir. Özellikle yüksek ubuklu, akım yığılmalı motorlarda akımlar ve dolayısıyla kayıp ısı dağılımı eşit değildir. Bu, rotor çubuklarında ve kısa devre bileziğinde eğilme zorlanmalarına neden olur. Isı kaynaklı malzeme genleşmesi sonucu, çubuklar kısa devre bileziklerine bağlantı noktasından kırılabilir veya kısa devre halkasında kopmalar oluşabilir. Öte yandan, alüminyum kafeste döküm kalitesi iyi değilse, elektromagnetik etkileşimle oluşan eksenel kuvvetler malzeme yorulmasına neden olur ve eğilme salınımları sonucu çubuk kırılır.

Büyük güçlü asenkron motorlarda kalkış sırasında akım yığılması çok etkilidir. Bu nedenle, kafes çubuklarındaki ısısal dağılım kalkış süresince türdeş değildir. Bu düzensiz ısı dağılımı sonucu kafes çubuğunun st ve alt kısımları farklı uzunlukta genleşir ve kafes çubukları eğilir. Bu biçimdeki bir kafes çubuğu, mekanik dayanıklılığı zayıflayacağı için, özellikle kısa devre bileziğine ek yapıldığı yerden kırılabilir.

Kafes arızalarında diğer bir etken de bilye arızaları ve eksenleme hatalarıdır. retime bağlı olarak ise, akmalı rotorlarda kaynak hataları, alüminyum döküm kafeslerde ise hava kabarcıkları kafes arızalarına neden olabilir.

retimden kaynaklanan bir hata yoksa, rotor yapısal simetriye sahiptir. Her kafes çubuğu elektriksel bakımdan özdeştir ve aralarında aynı geometrik aı vardır. Yapısal simetriden motor simetriden ve st-titreşim bulunmayan şebekeden beslendiğinde, rotor çubuk akımlarının ve kısa devre bilezik akımlarının genliği eşit olur. Birbirini izleyen çubuk akımları arasında aynı faz açısı vardır. İçerisinde N ubuk bulunan rotorda, özdeş N tane özdeş kapalı devre vardır.

Rotorda bir çubuk ve/veya bilezik arızası olduğunda, yapısal ve elektriksel simetri bozulur. Elektriksel simetrisizlik nedeniyle rotor faz ve devre akımları farklılık gösterir, rotor alan dağılımı bozulur, st-titreşimleri artar. Stator sargılarında $(1-2s)f_1$ frekansında bir gerilim bileşeni indüklenir. Bu nedenle kayıplar, moment salınımları ve işletme sıcaklığı artar. Makine verimi ve işletme iyiliği azalır. Hatalı ubuk sayısına göre arızanın büyüklüğü değişir. Çoğu zaman bir çubuğun tamamen

kırılması sonucu oluşan değişiklikler algılanamayacak kadar küçüktür. Ancak hata belirlenemez ise kırık, yanlara doğru genişler. Yapısal simetrisinin bozulması sonucu, rotor çevresinde dik kuvvet bileşenleri birbirini dengelemez. Bu nedenle eksenleme bozulur ve bilye arızaları oluşur. Kısa devre bileziğinde oluşan arızalarda eksenel kuvvet bileşenleri de oluşur.

Asenkron makinede kafes arızaları üzerine yapılan çalışmalar iki ana başlıkta toplanabilir: Kafes arızalarının belirlenmesine dayalı arıza tanıma amaçlı çalışmalar, rotor arızalarını ve arızalı motorun işletme davranışını incelemeyi amaçlayan çalışmalardır. Gerçekte arıza tanıma yöntemlerinin yeterliliği, arızalı makinedeki işletme özelliklerinin ve büyüklüklerinin ne kadar doğru incelenebildiğine bağlıdır.

Bu çalışmada öncelikle kafes arızalarının motorun işletme davranışına ve magnetik büyüklüklerine etkisi incelenmektedir. İncelemede asenkron makinenin dinamik modelleri, magnetik analiz programları ve sürekli hal büyüklükleri için tanımlanan hata akımları yöntemi kullanılmaktadır. Çalışmada ardışık biçimde oluşan kafes kırıkları, ayırık iki kırık ve elektriksel bakımdan simetrik iki kırık arızaları incelenmektedir. Teorik çalışmalar aynı arızalar için yapılan deneysel çalışmalarla karşılaştırılmaktadır. Ayrıca, kafes arızalarını tanıma yöntemlerine değinilmekte ve yapılan deneysel çalışmaların verileri kullanılarak frekans aralıklarına göre incelemeler yapılmaktadır.

Giriş bölümünde, kafesi arızalı motorun işletme davranışını inceleyen çalışmalarla, arıza tanımaya yönelik çalışmalar iki ana başlık halinde sunulmaktadır.

İkinci bölümde genel olarak rotor arızaları, bunların oluşma nedenleri açıklanmakta ve arıza tanıma yöntemleri ölçme büyüklüklerine ve doğruluklarına göre sınıflandırılmaktadır.

Tezin üçüncü bölümünde, sağlam makinenin ve kafesi arızalı makinenin geçici hal işletme davranışının incelendiği dinamik makine modelleri verilmektedir. Çalışmada, zamana bağlı büyüklükler kullanılarak matris modeli, zamana bağlı büyüklüklerin uzay fazörleri tanımlanarak uzay vektör modeli ve ani değerli simetrik bileşenler kullanılarak pozitif ve negatif sistem modeli kurulmaktadır. Simetrik bileşenler modelinde basitleştirmeler yapılarak, yaklaşık çözüm modelleri önerilmektedir. Modelleme iki kutuplu makine için yapılmıştır.

Tezin dördüncü bölümünde rotoru arızasını sürekli hal denklemleri ile analitik olarak inceleyen hata akımı yöntemi anlatılmaktadır. Literatürde yalnız bir kafes çubuğu arızası için yapılan inceleme, değişik sayıdaki çubuk arızaları için kısmen tekrarlanarak, hesaplama basitleştirmeleri gösterilmektedir. Ayrıca rotor simetrisizliği sonucu oluşan magnetik alan büyüklükleri için hesaplanma yöntemi verilmektedir. Bu yöntem aşağıdaki gibi özetlenebilir:

Kafeste oluşan bir arıza sonucunda rotor akımının çubuklara ve kısa devre bileziklerine dağılımı ile hava aralığı magnetik akı yoğunluğunun dağılımı değişir. Bu değişim üst üste bindirme ilkesi ile bulunabilir. Üç fazlı simetrik gerilimle beslenen arızasız asenkron motorun işletme büyüklükleri ile, rotor çubuklarındaki arıza akımlarının oluşturduğu işletme büyüklükleri üst üste toplanarak, arızalı asenkron motorun işletme davranışı belirlenir.

Kafesin arızalı çubuğun işletme akımına eşit ancak, karşıt yönlü bir akım ile beslendiği düşünülerek arıza modellenir. Arızalı çubuktaki akımın diğer çubuklara dağılımı, konuma bağlı bir dağılım katsayısı ile matematiksel biçimde tanımlanır. Bu dağılımdan yararlanılarak, arıza sonucu oluşan magnetik akı yoğunluğu ve üst-titreşimleri hesaplanır. Bu yöntemle sürekli işletmede çubuk arızaları incelenmektedir.

Tezin beşinci bölümünde magnetik analiz sonuçları ve sonlu elemanlar modeli ile hesaplanan işletme özdeşleri verilmektedir. Magnetik incelemeler Flux 2D hazır yazılım programında yapılmıştır. Öncelikle yazılımın sınır koşulları ve değişken katsayıları sağlam örnek motorun işletme büyüklüklerini sağlayacak biçimde düzenlenmiştir. Magnetik analizler deneysel ve teorik olarak incelenen her çubuk arızası için yapılmıştır. Analizlerle, hava aralığı magnetik akı yoğunluğu ve bileşenleri gibi ölçülmesi çok zor olan büyüklükler, rotor çubuk akımları, iç döndürme momenti, vb. işletme büyüklükleri hesaplanmaktadır. Bu işletme büyüklüklerinin ve motor akımının kaymaya bağlı değişimi incelenerek, kafes arızalarının motorun işletme özelliklerine olan etkisi araştırılmaktadır.

Tez çalışmasının altıncı bölümünde deneysel çalışmalar ve sayısal çözümleme sonuçları verilmektedir. İlk olarak, 3. Bölümde simetrik bileşenler yöntemi için önerilen yaklaşık modellerle elde edilen sonuçlar, magnetik analiz sonuçları ile karşılaştırılmaktadır. Ayrıca hata akımı analiz yönteminin bir uygulaması olarak, bir

kırık, ardışık iki kırık ve ardışık üç kırık için, hata akım dağılımları hesaplanmaktadır.

Sayısal yöntemlerde en önemli nokta stator ve rotora ait devre elemanlarının – stator direnci, öz ve karşıt indüktansı, rotor çubuklarının ve kısa devre halkasının direnci, öz, karşıt ve kaçak indüktansı vb. – doğru olarak hesaplanmasıdır. Teorik çalışmanın deneysel sonuçlara uygunluğu çoğunlukla bu büyüklüklere bağlıdır.

Bu büyüklükler literatürde açıklanan çeşitli deneysel formüllerle, analitik çözümlemelerle veya motor tasarımlarında kullanılan hazır programlarla hesaplanabilir. Bu çalışmada motorun devre elemanlarının hesaplanmasında ARÇELİK İşletmelerinde motor tasarımında kullanılan SPEED hazır yazılım programı kullanılmıştır. Programın değişken katsayıları deney motorunun işletme büyüklüklerini sağlayacak biçimde düzenlenerek, devre parametrelerinin doğru hesaplanması sağlanmıştır.

Deneysel çalışmaların tamamı ARÇELİK Çayırova Ar-Ge Laboratuvarı ve ARÇELİK Çerkezköy Ar-Ge Laboratuvarında yapılmıştır. Kafes arızası ile ilgili deneysel çalışmalarda 3 kW lık bir asenkron kafesli asenkron motor kullanılmıştır.. Deneyler, teorik ve analitik incelemeye uygun olarak sağlam, bir kafes çubuğu, ardışık iki kafes çubuğu, ardışık üç kafes çubuğu ve ardışık dört kafes çubuğu, simetrik iki çubuğu ve rastgele iki çubuğu arızalı rotorlar için boşa ve anma yükünde tekrarlanmıştır. Her arıza durumu için anma yükünde ısınma deneyi yapılmıştır. Ayrıca bir veri toplama sistemi yardımı ile stator faz akım ve gerilimlerinin zamana bağlı değişimi incelenmiştir.

Bu incelemeler sonucu literatüre katlı yapıldığı düşünülen ana başlıklar aşağıda sıralanmaktadır:

1. Küçük ve orta büyüklükteki asenkron motorlarda, çeşitli kafes çubuğu kırıkları ve kırık kombinasyonları için, motorun döndürme momentinde ve şebeke akımında oluşan değişimler kalkış, devrilme ve anma çalışma bölgeleri için elde edilmektedir. Sonuçlar deneysel çalışmalarla doğrulanmaktadır.
2. Literatürdeki çalışmalar kafes kırıklarını tekil olarak incelemektedir. Tezde motor sürekli halde çalışırken çubuk kırılması veya kırık çubuk sayısının artması sonucu oluşan geçici olaylar analitik olarak incelenmektedir.

3. Kafesi çubuğu arızalı asenkron motorun ani değerli simetrik bileşen modelinde çözümleme kolaylığı getiren, üç ayrı yaklaşık çözüm yöntemi önerilmektedir.

1.1. Arızalı Motorun İşletme Davranışını İnceleyen Yayınlar

Rotor simetrisizliği ile ilgili ilk çalışma bilezikli asenkron motorda Görges tarafından yapılmıştır [1]. Bu çalışmada yarı senkron hız bölgesindeki moment azalması incelenmiştir.

Daha sonra 1928 yılında H. Weichsel kısa devre bileziği arızalı olan makineyi incelemiştir. Aynı konu 1955 yılında, Miskin tarafından incelenmiştir [2],[3].

1941 yılında Schuiskey çubuk ve kısa devre halkası kırılmalarında, işletme davranışındaki değişiklikleri belirlemek için ayrıntılı deneyler yapmıştır [4].

Aynı yıllarda Jordan ve Schmitt arızalı makineyi, kırık olan çubuğu dışarıdan hayali bir akımla besleyerek modellemeye çalışmıştır. İnceleme sürekli-hal büyüklükleri ile yapılmıştır [5].

Kafesi arızalı asenkron makinenin işletme davranışını inceleyen en önemli özgün çalışma 1942 yılında Hiller tarafından yapılmıştır [6]. Hiller, kafes çubuk arızasının etkisini, üst üste bindirme ilkesine dayanarak incelemiştir. Yöntemde, üç fazlı simetrik gerilimle beslenen asenkron motorun işletme büyüklükleri ile rotor çubuklarındaki arıza akımlarının oluşturduğu işletme büyüklükleri üst üste toplanarak arızalı motorun işletme davranışı incelenmektedir. Arıza, kafesin tamamının arızalı çubuk akımına eşit ancak ters yönlü bir akımla beslendiği düşünülerek modellenmiştir.

D'Alessandro ve Pogono 1969 yılında kafes çubuğu arızasını sürekli halde çok fazlı simetrik bileşenler yöntemiyle incelemiştir. Bir ve iki kafesli makinelerde, kırık çubuk sayısının tek ve çift sayı olması durumları için çalışmalar yapmıştır [7].

Rotoru simetrisiz olan asenkron makinenin işletme davranışı üzerine pek çok çalışma yapılmıştır [8...13]. Bunların çoğunluğu bilezikli asenkron makinede rotor simetrisizliğini incelemektedir.

M. Jufer ile M. Abdelaziz, 1978 yılında kafes çubuklarının ve kısa devre bileziğinin arızasını d-q eksen modeli ile incelemiştir [14]. Çalışma sürekli hal büyüklükleri ile yapılmıştır. Modelde, arızalı çubuk üzerinde magnetik potansiyeli en büyük olan

eksen q , sıfır olan eksen ise d eksenini olarak tanımlanmıştır. Park dönüşümü kullanılarak tek veya ardışık çok çubuk arızaları incelenmektedir.

Williamson 1981 yılında sürekli hal büyüklükleri kullanarak her iki kafes arızasını döner alan teorisine göre incelemiştir [15]. Yapısal bakımdan simetrik ve simetrisiz arızaları dikkate almıştır. Bu çalışmada ilk kez teorik akım verileri deneysel değerlerle karşılaştırılmıştır. Akım ölçümleri dış rotorlu iki kutuplu bir makinede yapılmıştır.

Deleroi, 1982 yılından başlayarak, Hiller'in tanımladığı üst üste bindirme yöntemini kullanarak önemli bir dizi yayın yapmıştır [16],[17],[18]. Rotor çubuk arızalarını daha iyi biçimde inceleyen, tüm etkilerini hesaplamaya uygun, çok basit bir hesap yöntemi geliştirmiştir. Yöntem yalnız bir devre analizi çözümüne benzemesine karşın, olaya fiziksel bir anlaşılabilirlik getirmiştir. Rotorun eş değer devre elemanlarına bağlı olan bir hata akımı ve bu akımın karmaşık sönümleme kat sayısını tanımlamıştır. Bu yöntem bu çalışmada "Hata Akımı Yöntemi" olarak adlandırılmaktadır.

A. Patyk, tek ve çift kafesli motorlarda, çubuk arızalarını ani değer büyüklüklerini kullanarak doğru ve ters döner alan bileşenleri yöntemiyle incelemiştir [19],[20]. Çalışma iki bölümdür. Çalışmasında, harmonik etkilerini dikkate almış, arızalı makine moment ve akım dağılımı hesapları yapmıştır.

1980'lerin ikinci yarısında uzay fazörü konusunda çalışmalar yoğunlaşmıştır [21],[22]. Uzay fazörü tanımının kavranmasından ve öğrenilmesinden sonra, kafesi arızalı asenkron motorların işletme davranışını dinamik makine modelleri kullanarak inceleyen yayınlar yapılmıştır.

Bu çalışmaların bir tanesinde Toliyat, sargı impedanslarının farklılığından dolayı oluşan simetrisiz çalışmayı incelemiştir [23]. Çalışmada uzay harmoniklerini kapsayacak biçimde Sargı Fonksiyonu kavramı getirilmiştir.

Toliyat 1991 yılında kare veya dikdörtgen dalgalı frekans dönüştürücülerle beslenen kafesli asenkron makinelerin sargı yapısını inceleyen iki yayın yapmıştır [24],[25]. Motorlar saf sinüs biçimli gerilimle beslenmediği için sargı yapıları farklıdır. Çalışmada indüktans hesaplama yöntemi ve bir dinamik motor modeli incelenmiştir.

Toliyat ve Lipo tarafından 1995 yılında yapılan çalışmada makine geometrisi dikkate alınarak bütün sargılar bobin-bobin modellenerek ayrıntılı bir indüktans hesabı yapılmış, simetrisiz durumlar için dinamik model kurulmuştur [26].

Yine Toliyat 1995 yılında daha önce tanımlanan dinamik modeli kullanılarak çubuk ve kısa devre bileşiği arızasını incelemiştir [27]. Model zamana bağlı büyüklüklerle kurulmuştur. İnceleme yalnız rotoru arızalı ve hem rotoru hem de statoru arızalı yapıyı kapsamaktadır.

1996 yılında Penmam ve Stawrou, Deleroi'nin geliştirdiği hata akımı yöntemini kullanarak, arızalı makinenin geçici işletmesini d-q modeli ile incelemiştir [28]. Çalışma daha çok arıza tanımaya yöneliktir.

1999 yılında Munoz sağlam kafesli bir asenkron makine için uzay fazörlerini kullanarak yeni bir model oluşturmuştur [29]. Çalışmada deri etkisi dikkate alınmış, d-q eksen dönüşümü kullanılmış ve eş değer devre parametreleri hesaplanmıştır.

C. Kral 1999...2001 yıllarında elektromagnetik dalganın temel bileşenini dikkate alarak, bir dizi yayın yapmıştır [30],[31],[32]. Kafesi arızalı bir makine için ani değerleri simetrik bileşenler yöntemini kullanarak bir model kurmuştur. Denklemleri s domenine dönüştürerek transfer fonksiyonlarını bulmuş ve makine parametrelerini hesaplamıştır.

2003 yılında P. Vas ve F. Filippetti, arıza tanıma amacı ile tanınan bir çalışmada α - β dönüşümü ile kafesi arızalı makinenin geçici hal modelini kurmuştur [33]. Çalışmada α - β dönüşümünden d-q dönüşümüne geçiş yapılmaktadır.

2003 yılında Cunha, yine rotor arızalarını farklı bir model üzerinden incelemiş ve çalışmalarını sonlu elemanlar yöntemini kullanarak desteklemiştir [34],[35].

2006 yılında Li Weili ve L.Szoba tarafından daha ayrıntılı magnetik analizler içeren iki ayrı çalışma yapılmıştır [36],[37].

1.2. Rotor Arızasını Tanımaya Yönelik Yayınlar

Rotor arızalarını belirleyen ilk yöntemler, rotorun stator içine yerleştirilmeden tek başına denendiği elektromagnetik deney düzenekleridir. Bunun için U biçimli bir bobin kullanılmaktadır. Rotor bir doğru alan içerisinde yavaşça döndürülerek rotor devresindeki direnç değişiminden hatalı rotor saptanır [38].

Elektromagnetik bir diğer yöntem, Armaur tarafından geliştirilmiştir [39]. Magnetik alan eksenine dik bir ölçme bobini yerleştirilir ve galvonometre bağlanır. Sapma farklılıklarından arızalı rotor ayırt edilir.

Bu tür sistemlerin en güvenilir olanı rotorun örnek bir stator içine yerleştirilerek çalıştırılmasıdır [40]. İşletme sırasında ölçülen değerler, daha önce oluşturulan çeşitli arızalara sahip motorların işletme değerleri ile karşılaştırılır.

W.Rogge ve O. Leinch 1981 yılında rotor simetrisizliğinin gözetiminde yalnızca rotor arızalarında bozucu etki taşıyan diğer arızalardan etkilenmeyen bir işaret kullanmıştır [41]. Bu amaçla statora, yalnızca rotor simetrisizliği sonucu oluşan harmonik alanların indüklemeye yapabileceği bir ölçme bobini koymayı tasarlamıştır. Sonuçta çalışma pek çok arıza tanıma yönteminde olduğu gibi $(1-2s)f_1$ frekansındaki negatif sistem bileşeni üzerine kurulmuştur.

W.Deleroi 1983 yılında yayınlanan makalede, çubuk ve halka kırılması durumunda sürekli hal büyüklüklerini kullanarak elektromagnetik alan davranışını incelemiştir [42]. Çeşitli rotor arızaları için incelemeyi tekrarlayarak, bu motorların alan dağılımlarını karşılaştırmış ve arızanın yerini ve türünü belirleyen bir yöntem geliştirmiştir. Çalışma özellikle kısa devre bilezik arızaları için son derece başarılıdır.

W.Deleroi 1984 yılında ölçme bobininde indüklenen gerilimlerin frekans analizinin, rotor arızalarının tanınması için ayırt edici olmadığını ispatlamıştır [18]. Çalışmada döndürme momentini incelemiş, kaymadan bağımsız çok duyarlı bir ölçme yöntemi tanımlanmıştır.

1988 yılında Heinrich, Hall algılayıcısı veya ölçme bobini kullanmadan, yalnız stator akımlarının uzay fazörünün denetimine dayalı bir yöntem geliştirmiştir [43]. Ancak yöntem rotor arızalarını belirleme açısından ayırt edici değildir.

Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD) hızla gelişmesi sonucu, işletme büyüklüklerinin zamana göre değişimleri frekans bantlarına açılarak pek çok arıza tanıma yöntemi geliştirilmiştir. Bu konuda 1985...2002 yılları arasında temel makaleler yayınlanmıştır [44...51].

Bunlar dikkate alındığında literatürde rotor arızalarının tanısı amaçlı

- Stator akımına HFD uygulanmasıyla ilgili [52...57] kaynakları,
- Döndürme momenti ve devir hızı salınımlarını algılayan [58...60] yayınları,
- Stator gövdesinin titreşimini ölçerek, HFD uygulanmasıyla ilgili [61],[62] kaynakları,
- Stator gerilim dalgasını frekans yan bantlarına açan [63] çalışmaları,
- Gürültü dalgasını inceleyen [64] yayını ve
- Eksenel akının etkisini dikkate alan [65] çalışmaları

- Makine parametrelerinin tahmine dayalı [66], [67] vardır.

Bu temel çalışmaların yanı sıra, işaret işleme tekniklerindeki gelişmelere paralel olarak tanı amaçlı yeni yayınlar vardır [68...70].

Çalışmada burada sıralanan yayınlara ek olarak elektrik makinelerinin işletme davranışını inceleyen, kafes arızalarını benzer yöntemlerle inceleyen çeşitli kaynaklar kullanılmıştır [71...74].

2. KAFES ARIZALARI VE TANI YÖNTEMLERİ

Elektrik makineleri, 1980'li yıllara kadar aşırı yük akımı, simetrisiz besleme gerilimi, kısa devre vb. gibi arızalara karşı önlem alınarak çalıştırılmıştır. Ancak günümüzde gelişen teknoloji ile beraber arıza kavramı değişmiştir. Makine büyüklüklerinin dalga şekillerinin işaret tekniği yöntemleri ile incelenmesiyle, henüz arızanın başlangıcında, makine devre dışı kalmadan önlem almak olasıdır. Bu bölümde genel olarak motor arızalarına ve rotor arızalarının tanı yöntemlerine değinilecektir.

2.1. Motor Arızalarının Nedenleri

Asenkron makinelerde oluşan arızalar aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

- a) Stator sargısının bobininde oluşan arızalar,
- b) Yanlış bağlama sonucu oluşan arızalar,
- c) Rotor çubuklarının ve/veya kısa devre bileziğinin kırılması,
- d) Hava aralığının statik ve/veya dinamik düzensizliği sonucu oluşan arızalar,
- e) Bilezikli makinelerde rotor sargı arızaları,
- f) Yatak arızaları,
- g) Motor milinde oluşan çatlak veya kırılmalar.

Yapılan araştırmalarda, bu arızaların %30...40 ının stator sargısı kökenli, %40..50 sinin yatak-bilye kökenli ve % 5...10 kadarının da rotor çubuk ve bilezik kaynaklı olduğu belirtilmektedir [47].

Kafes çubuğu ve kısa devre halkası arızalarının temel nedenleri ise şu ana başlıklarda toplanabilir:

- a) Aşırı yüklenme, simetrisiz beslenme ve temas yüzeyinin bozukluğu nedeniyle oluşan ısısal zorlamalar,
- b) Elektromagnetik kuvvetler ve titreşim nedeniyle oluşan magnetik zorlanmalar,

- c) Üretim hatası nedeniyle oluşan dengesiz kuvvetler,
- d) Mil momenti ve merkezkaç kuvvetler gibi dinamik zorlanmalar,
- e) Motorun çalıştığı ortamın koşullarına bağlı olan çevresel etkiler, ıslaklık, toz vb. gibi etkiler,
- f) Bilye ve yatak bozulması gibi nedenlerden oluşan mekanik zorlanmalar.

Bu zorlanmalar sonucu kafes yapı dayanımının zayıf olan yerden çatlar veya zarar görür. Kafes arızaları nedeniyle elektrik makinelerinde

- a) Moment salınımları artar.
- b) Moment azalır.
- c) Kayıplar artar, verim azalır.
- d) Makine fazla ısınır ve ısı dağılımı bozulur.
- e) Eksenleme ve hava aralığı akı dağılımı bozulur.

2.1.1. Isısal zorlanmalar

Bu tür zorlanmalar kalkışta ve/veya işletmede oluşabilir. Makinenin sıcaklığının artması veya güç elektroniği düzenleri ile beslenen makinelerde kısmısal ısınmalar biçimindedir. Motor ve rotorun sıcaklık sınır değerleri farklıdır. Motorun güvenli çalışması açısından kalkışta rotor sıcaklığı, işletmede ise stator sıcaklığı belirleyicidir. Bu nedenle, motor sıcaklığını ölçmek için stator sargısına yerleştirilen ısı algılayıcısı, kalkışta rotorda oluşan sıcaklık artışını algılayamaz. Daha etkin önlemler almak gerekir. Isısal zorlanmalar genellikle,

- art arda sık yol verme,
- motor milinin kilitlenmesi,
- yatak arızası,
- yetersiz soğutma,
- simetrisiz besleme,
- deri etkisi, akım yığılması, gibi nedenlerden oluşur.

2.1.2. Magnetik zorlanmalar

Rotor çubuklarından akan akımın yarattığı akı, elektrodinamik kuvvetler oluşturur. Bu kuvvetler akım ile karesel orantılıdır. Kafes çubuğuna yarıçapsal doğrultusunda, rotor yüzeyinden mile doğru, etkir. Çubuk $2sf_1$ ve $4sf_1$ frekansında titreşir. Bu nedenle kafes çubuğu kırılabilir. Kalkışta rotor akımı çok büyük değerlerde olduğundan, çubuk çok fazla zorlanır. Bu kuvvetin denklemi literatürde verilmiştir [79].

Diğer bir magnetik etki, yapısal simetrisizlik sonucu oluşur. Rotorun yanlış eksenlenmesi veya yatak arızası gibi durumlarda, hava aralığında normal doğrultudaki kuvvetlerin bileşkesi sıfır olmaz. Rotor, hava aralığı küçük olan tarafa doğru gitmek ister, çubuklara etkiyen kuvvet artar.

Aynı zamanda, ani yük momenti değişimi nedeniyle oluşan darbe momentleri, aşırı hızlanmaya bağlı merkezkaç kuvvetler gibi dinamik etkiler de arızaya neden olur. Elektrik motorunun çalıştığı yerin fiziki şartları çevresel zorlanmalar olarak adlandırılmıştır. Ortamın tozlu, ıslak, yağlı olması gibi çevre koşulları motorun işletme iyiliğini olumsuz etkiler. Arızalanma olasılığını artırır.

2.2. Kafes Arızaları İçin Arıza Tanıma Yöntemleri

Kafesli motorlarda bir tane kafes çubuğunun kırılması makinenin işletme davranışını çok belirgin biçimde değiştirmez. Ancak, oluşan kırılma nedeniyle rotordaki akım dağılımı, hava aralığı akısı, kuvvet dengesi ve sıcaklık dağılımı bozulur, ısınma ve zorlanmalar artar. Arıza derhal diğer çubuklara yayılır. İlk olarak arızalı kafes çubuğunun komşu çubukları ve/veya kısa devre halka parçaları kırılır. Özellikle ağır sanayide kullanılan büyük güçlü makinelerde bu tür arızalar hem üretim bakımından hem de parasal bakımdan kayıplar yaratır.

Bu bağlamda henüz bir çubuk arızalıyken – tam kırık olması gerekmez, rotor çubuk direncinin artması yeterlidir – durumun saptanması çok önemlidir. Ancak arızanın başlangıcında işletme büyüklüklerinin doğrudan gözlenmesi ile bir sonuç alınamadığı için, Hızlı Fourier Dönüşümüne dayalı çeşitli tanı yöntemleri geliştirilmiştir.

Hata tanı yöntemlerinin güvenilir olması için, arızalı makinenin elektriksel ve magnetik davranışının özellikle, tanı amacıyla kullanılan büyüklüğün değişiminin

çok iyi irdelenmesi gerekir. Kafes çubuğu kırıldığında, rotor elektriksel ve yapısal bakımdan simetrisiz olur. Bu durumda oluşan harmonik akılar, yani negatif sistem bileşeni, stator sargısında $(1-2s)f_1$ frekansında gerilim indükler. Burada s motorun işletme kayması, f_1 şebekenin frekansıdır.

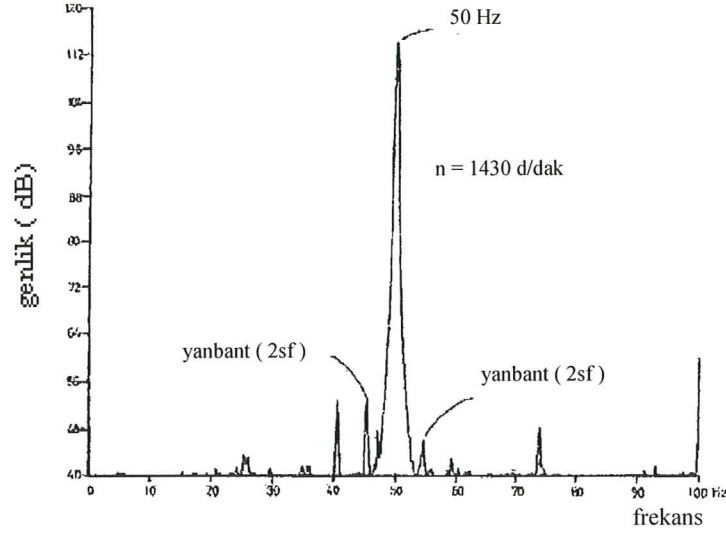
Hava aralığı akısında alt ve üst frekans değerlerinde bileşenler oluştuğundan oluk harmonikleri, stator çekirdeğinin titreşim dalgası değişir. Stator titreşim dalgasının $2sf_1$ frekansında yan bant bileşenleri oluşur. Ayrıca magnetik kuvvetler akı yoğunluğuna karesel bağlıdır. Bu nedenle magnetik kuvvetler değişir ve mil döndürme momenti ile devir hızında $2sf_1$ ve $4sf_1$ frekansında salınımlar oluşur [64]. Şebeke $(1-2s)f_1$ frekansında bir gerilim bileşeni içermediği için, bu frekans değerinde kısa devre edilmiş gibi davranır [13]. Bu nedenle stator akımında aynı frekans bileşenleri oluşur. Sonuç olarak, aşağıda maddeler halinde verilen işletme büyüklüklerinin gözetimi ile rotor çubuk arızası tanınabilir.

Bunlar:

1. Stator akımı gözetimi, stator akımı iz analizi,
2. Stator titreşiminin, oluk harmoniklerinin, gözetimi,
3. Eksenel akı değişiminin mil etrafına konulan bir bobinle gözetlenmesi,
4. Hız ve moment salınımlarının gözetimidir.

Stator akımı iz analizi dışında kalan diğer yöntemlerde denetlenecek büyüklüğün ölçülebilmesi için duyarlı dönüştürücüler kullanmak gerekir. Arızanın belirlenebilmesi, bu ara elemanların doğru çalışmasına bağlıdır. Örneğin sahada ağır işletme koşullarında çalışan bir motorun titreşimini veya moment salınımlarını ölçmek oldukça güçtür. Aynı biçimde mile eksenel akı bileşenlerinin etkisini belirlemek için yerleştirilen bobinin güvenli çalışmasını sağlamak da zordur.

Bunlara karşın, motor akımını gözlemek için sahada makine üzerinde çalışan bir dönüştürücü gerekmez. Diğer yöntemlere göre son derece basit ve kullanışlıdır. Motor besleme panosunda kurulan bir düzenele akım dalga şekli kaydedilebilir ve değerlendirilir, (Şekil 2.1). Bu çalışmada yapılan deneysel çalışmalara paralel olarak, akım dalga şeklinden ve stator gövdesinin titreşiminden arıza tanısına biraz daha ayrıntılı değinilecektir.



Şekil 2.1 : Sağlam rotorlu motorun akım iz analizi.

Yüksek çözünürlükte motor akımındaki frekans yan bant bileşenlerini Fourier dönüşümü ile belirleyen arıza tanı yöntemine “ Motor Akımı İz Analizi “ (MAİA) denir. Temelde rotor arızasının belirlendiği frekans bileşeni,

$$f_b = (1 \pm 2s).f_1 \quad (2.1)$$

biçimindedir. Daha yüksek frekans değerleri dikkate alındığında,

$$f_b = (1 \pm 2.k.s).f_1 \quad k = 1, 2, 3... \quad (2.2)$$

formülü ile ifade edilir. Akım iz analizinde her arıza türü için bulunan frekans yan bantları farklıdır [46]. Rotor arızası için akım iz analizinde

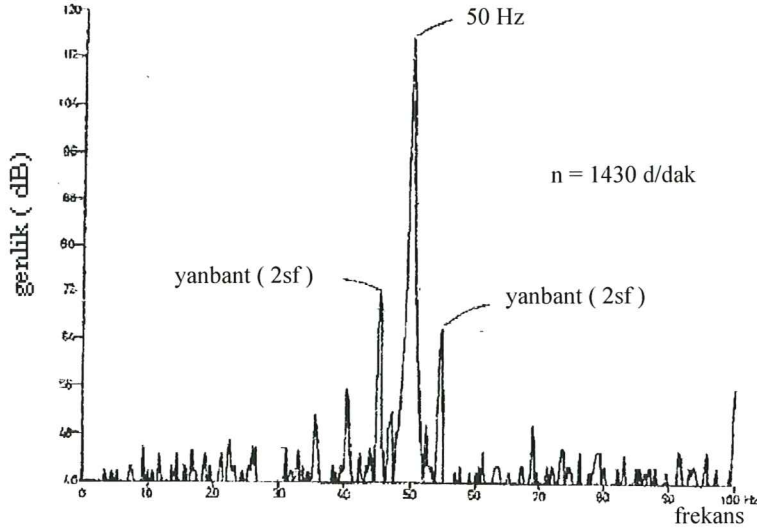
$$f_b = \left[\left(\frac{k}{p} \right) . (1-s) \pm s \right] . f_1 \quad k = 1, 2, 3... \quad (2.3)$$

değerlerinde frekans bileşeni bulunup bulunmamasıyla karar verilir. Bu denklemlerde p çift kutup sayısı, k harmonik derecesini gösteren bir pozitif tamsayı,

f_1 şebeke frekansı ve s işletme kaymasıdır. Normal sargılı bir makinede $\frac{k}{p}$ oranı

1,5,7,11 ... olarak alınır [49], [56], [60].

Sağlam rotorda stator akımı yan bant frekans bileşenlerinin genliği 30...50 dB değerleri arasındadır, (Şekil 2.3). Bir çubuğu arızalı makinede ise bu değer, 80 dB



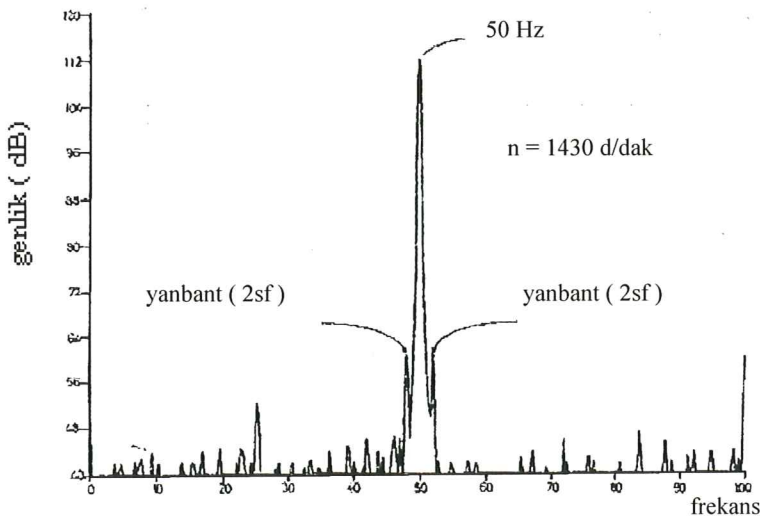
Şekil 2.2 : Bir kafes çubuğu arızalı motorun akım iz analizi.

değerine çıkmaktadır. Şekil 2.4 ve Şekil 2.5 de bir ve iki çubuğu arızalı motorların iz analiz sonuçları verilmiştir.

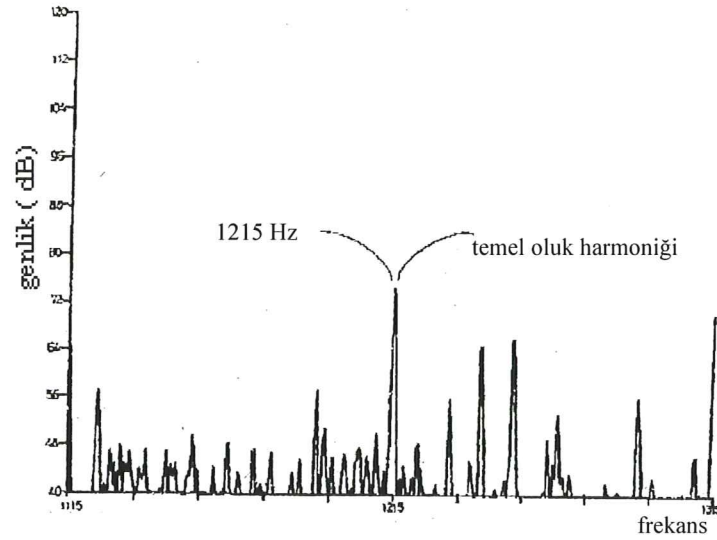
Diğer bir nokta, akımdan kırık çubuk sayısının belirlenmesidir. Bunun için literatürde

$$n = \frac{2N}{\frac{R}{10^{20} + 2p}} \quad (2.4)$$

denklemini vardır [46]. Burada N rotor çubuk sayısı, p çift kutup sayısı, R, $(1-2s)f_1$ frekansındaki yan bant bileşenlerinin genliği ve n hesaplanan kırık çubuk sayısıdır. Bu denklemin doğrulanması için pek çok arıza deneyi yapılmıştır.



Şekil 2.3 : İki kafes çubuğu arızalı motorun akım iz analizi.



Şekil 2.4 : Kafesi sağlam motorun titreşim analizi.

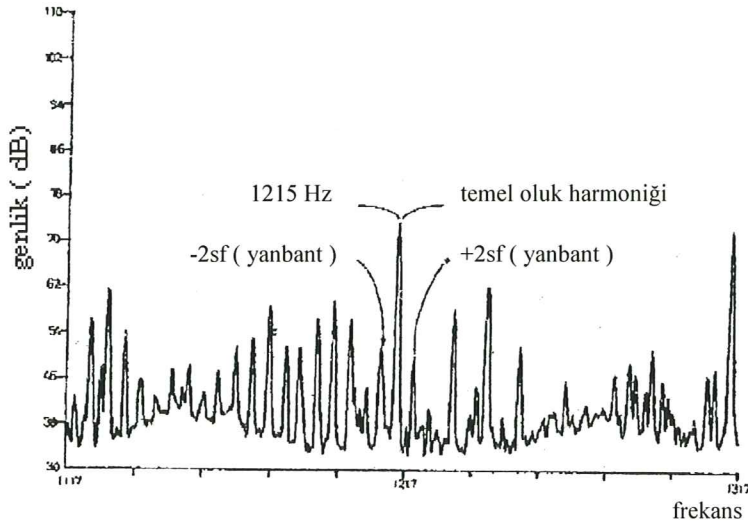
Benzer inceleme, moment ve devir hızının zamanla değişimine uygulanarak da yapılabilir. Rotoru arızalı motorun iz analizinde $2sf_1$ ve $4sf_1$ frekansında salınım bileşenleri görülür.

Arıza tanısı için kullanılan diğer bir yöntem motor titreşiminin analizidir. Rotor çubuğu arızalı olan motorun titreşim davranışı, hem hava aralığı magnetik alanının bozulması bakımından, hem de magnetik kuvvetlerin simetrisizliği bakımından incelenebilir. Oluk harmonikleri nedeniyle oluşan titreşimin frekansı aşağıdaki denklemle hesaplanır [46].

$$f_{svb} = \left[\frac{N}{p} (1-s) \pm k_v \right] \cdot f_1 \quad k_v = 0, 2, 4, \dots \quad (2.5)$$

Burada f_1 şebeke frekansı, N rotorun çubuk sayısı, p çift kutup sayısı ve s işletme kaymasıdır. Kırık çubuklu rotorda titreşim dalgasının $2sf_1$ ve $4sf_1$ frekansında yan bant bileşenleri vardır [44]. Şekil 2.4 ve Şekil 2.5 de sağlam ve bir çubuğu kırık motorun titreşim dalgasının frekans analizi verilmiştir.

Rotor çubuk arızalarında rotor iletkenlerine etkiyen çekim kuvvetlerinin simetrisi bozulur. Bu nedenle hava aralığı uzunluğu rotorun hareketi ile sürekli değişir. Makine titreşim bakımından dinamik eksenleme hatası olan asenkron motora benzer. Eksenleme hataları sonucu, stator titreşim dalgasının (2.6) denkleminde verilen alçak frekans değerlerinde bileşenleri oluşur.



Şekil 2.5 : Bir kafes çubuğu arızalı motorun titreşim analizi.

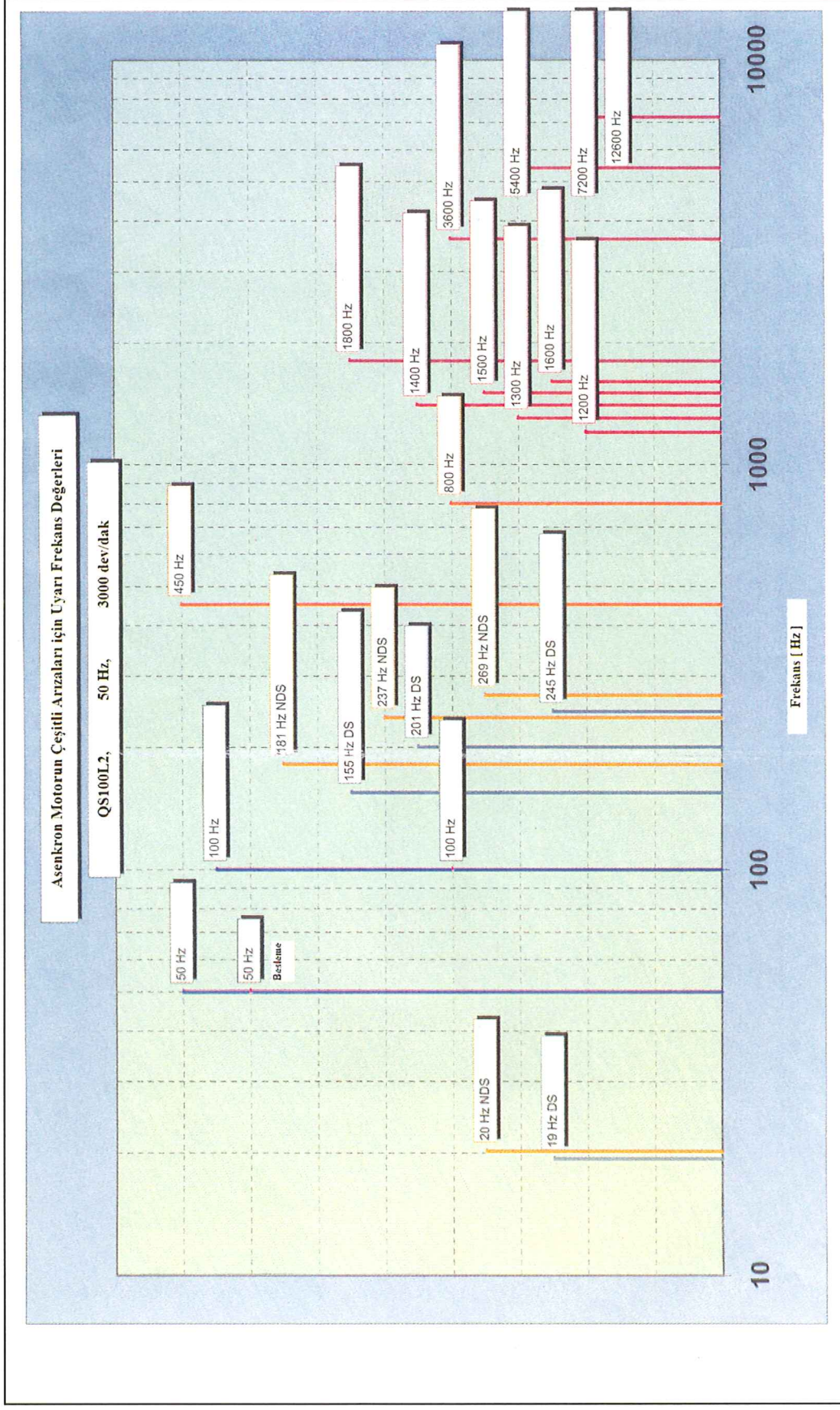
$$f_{vb} = 2f_1 \pm f_2 \quad (2.6)$$

Bu denklemde f_1 şebeke frekansı, f_2 rotor frekansıdır. Şekil 2.6 da motor akımının iz analizi ile bulunan bir arıza tanı frekans rehberi verilmiştir.

Ayrıca, motorun şebekeden aldığı etkin gücün Fourier analizi yapılarak rotor arızası saptanabilir [81]. Ancak çok yaygın bir yöntem değildir. Diğer bir uygulamada, arızalı durumda, rotor eşdeğer devre parametrelerinin değişiminden yararlanılmıştır. Sağlam ve çeşitli dereceden çubuk arızası olan motorların eşdeğer devre büyüklükleri karşılaştırılarak arıza tanısı yapılmaktadır [33]. Ancak yöntem birden fazla kırık çubuk olduğunda yeterli doğrulukta sonuç vermektedir.

Yukarıda açıklanan bütün arıza tanı yöntemleri, kafes arızası durumunda değişen hava aralığı akısının ikincil etkilerinden yararlanmaktadır. Stator sargısına bir ölçme -tanı- bobini yerleştirilerek ve hava aralığı akısının bu bobinde indüklediği gerilim frekans yan bantlarına açılarak arıza saptanabilir [62]. Ancak motor üzerinde ek düzenler ve bağlamalar gerekir.

Bütün bu yöntemler sanayi amaçlı bir ürün bazında kullanıldığında, korunacak motor için çeşitli arıza senaryoları yaratarak bunların incelenmesi, akım iz sonuçlarının bir akıllı sisteme aktarılması gerekmektedir. Tasarım her makine için ayrı yapılır.



Şekil 2.6 : Asenkron motorun akım iz analizi ile bulunan arıza tanı rehberi.

Şekil 2.6 da iki kutuplu asenkron motor arızalarının uyarım frekans değerleri akım iz analizine göre verilmektedir. Şekilde görülen frekansların, izini taşıdığı arıza türleri aşağıda maddeler halinde sıralanmaktadır.

- 19 Hz, DS tipi rulman için kafes hatası,
- 20 Hz, NDS tipi rulman için kafes hatası,
- 50 Hz küçük genlik, şebeke besleme frekansı,
- 50 Hz büyük genlik, simetrisiz besleme gerilimi,
- 100 Hz küçük genlik, moment salınımları,
- 100 Hz büyük genlik, rotor uyumsuzluğu,
- 155 Hz, DS tipi rulman için dış bilezik hatası,
- 181 Hz, NDS tipi rulman için dış bilezik hatası,
- 201 Hz, DS tipi rulman için bilye hatası,
- 237 Hz, NDS tipi rulman için bilye hatası,
- 245 Hz, DS tipi rulman için iç bilezik hatası,
- 269 Hz, NDS tipi rulman için iç bilezik hatası,
- 450 Hz, soğutucu pervane arızası,
- 800 Hz, rotor fan arızası,
- 1200 Hz, 1300 Hz, rotorun magnetik simetrisizliği veya eksenleme hatası,
- 1400 Hz, 1500 Hz, rotorun magnetik simetrisizliği veya eksenleme hatası,
- 1600 Hz, 1800 Hz, rotorun magnetik simetrisizliği veya eksenleme hatası,
- 3600 Hz, 5400 Hz, statorun magnetik simetrisizliği,
- 7200 Hz, statorun magnetik simetrisizliği,
- 12.500 Hz statorun oluk sayısı ile rotorun çubuk sayısının ortak katında magnetik simetrisizlik veya eksenleme hatası arızası.

3. ASENKRON MAKİNEİN DİNAMİK MODELLERİ

Bu bölümde, sağlam ve arızalı asenkron makinenin geçici hal işletme davranışının incelenmesi için kullanılan dinamik makine modelleri verilmektedir. Tanımlanan makine modellerinde hava aralığı magnetik dalgasının yalnız temel bileşeni dikkate alınmıştır. Rotor arızalarını geçici hal makine modeli kullanarak inceleyen literatürdeki çalışmalar dikkate alındığında, yalnız temel dalga bileşeninin kullanılmasının yeterli olduğu görülmektedir. Sürekli hal büyüklükleri ile yapılan analitik çözümlerlerde ise üst titreşim dalgaları dikkate alınmalıdır [30].

Asenkron makine zamana bağlı büyüklükler veya bu büyüklüklerin uzay fazör ifadeleri kullanılarak modellenebilir. Aynı zamanda ani değerli simetrlili bileşen veya d-q eksen modeli kurulabilir. Bu yöntemlerin yeterliliği ve kullanılabilirliği daha önce incelenmiştir [81,82,13]. Tez de bu modellere ek olarak, ani değerli simetrlili bileşenler modelinde bir takım çözüm basitleştirmeleri sunulmaktadır.

Zaman büyüklükleri kullanıldığında, üç fazlı kafesli bir asenkron makinenin statoru üç tane, rotoru ise çubuk sayısı kadar diferansiyel denklemle tanımlanır. Oysa, uzay fazörleri ile bu karmaşık yapı yalnız iki tane diferansiyel denkleme dönüşür. Zamana bağlı büyüklükler yerine bunların uzay fazörleri, göstericileri, kullanıldığında model son derece basitleşir. Ancak bu yöntem, yapısal simetrisizlik yaratan stator ve/veya rotor arızalarında, sargı arızası, çubuk kırılması vb.için, yeterli değildir. Direnç ve indüktans değerleri özdeş olmadığı için, işletme büyüklükleri bir uzay fazörü ile temsil edilemez. Simetrlili makine modeli ile birlikte, arızayı tanımlayan yeni denklemler dikkate alınmalıdır [13].

Bu çalışmada kafesli asenkron makinenin zamana bağlı matris modeli, uzay fazör modeli ve ani değerli simetrlili bileşenler modeli tanımlanacak, çözümü kolaylaştıran basitleştirmeler önerilecektir. İnceleme, ilkesel sargı bağlaması Şekil 3.1. de verilen üç fazlı yapısal simetrlili bir asenkron makinede yapılmaktadır. Rotorda N tane özdeş kafes çubuğu vardır. Aynı zamanda makinenin uzayındaki magnetik akı dalgasının ve işletme büyüklüklerinin saf sinüs biçiminde değiştiği,

hava aralığının düzgün olduğu kabul edilmekte, doyma ve çubuklar arasındaki akımlar dikkate alınmamaktadır.

3.1. Asenkron Makinenin Zamana Bağlı Büyüklüklerle Modellenmesi

3.1.1. Stator sargısının modellenmesi

İlkesel sargı bağlaması Şekil 3.1 de verilen üç fazlı kafesli bir asenkron makinenin stator sargısı, her faz için yazılan diferansiyel denklemlerle modellenir.

$$v_{SA} = R_1 \cdot i_A + \frac{d\psi_{SA}}{dt} \quad (3.1a)$$

$$v_{SB} = R_1 \cdot i_B + \frac{d\psi_{SB}}{dt} \quad (3.1b)$$

$$v_{SC} = R_1 \cdot i_C + \frac{d\psi_{SC}}{dt} \quad (3.1c)$$

Bu denklemlerde ψ_{SA} , ψ_{SB} ve ψ_{SC} simgeleri stator sargısının sırası ile A, B, ve C fazlarına ait büyüklüklerini göstermektedir. R_1 stator sargılarının sargı direncidir. Çözümün gerçek değerlere yakınlığı, Ψ halkalanma akılarının dolayısı ile indüktans değerlerinin ne doğrulukta hesaplanabildiğine bağlıdır. Doyma dikkate alınmadığında halkalanma akısı ifadesi

$$\psi = L \cdot i \quad (3.2)$$

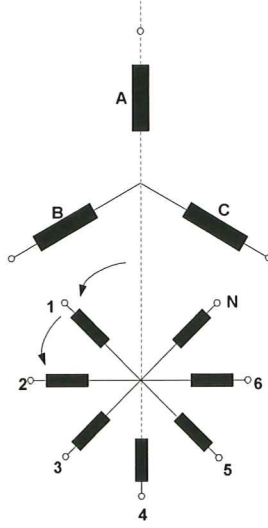
biçiminde tanımlanır. Bu basit ilişki asenkron makineye uygulandığında, bir stator fazına ait akı büyüklüğü Ψ_{S*} , diğer stator faz akımlarının yarattığı akı bileşeni Ψ_{S*S} ile rotor akımlarının yarattığı akı bileşeni Ψ_{S*R} olmak üzere iki temel parça halinde tanımlanabilir (3.3). Bu akı denklemleri stator sargıların öz indüktansı L_s , ve stator ile rotor arasındaki karşılıklı indüktans L_m olmak üzere aşağıdaki gibi yazılabilir.

Denklemlerde altı çizili ifadeler vektörel büyüklükleri gösterir.

$$\underline{\Psi}_{S*} = \underline{\Psi}_{SS} + \underline{\Psi}_{SR} \quad (3.3)$$

$$\underline{\Psi}_{SS} = L_s \cdot \underline{i}_S \quad (3.4)$$

$$\underline{\Psi}_{SR} = L_m \cdot \underline{i}_R \quad (3.5)$$



Şekil 3.1 : Kafesli asenkron motorun ilkesel sargı ve kafes yapısı.

Statorun A faz sargısının akı denklemi aşağıdaki gibi elde edilebilir: Stator faz akımlarının, statorun A faz sargısında yaptığı indüklemeye,

$$\Psi_{SAS} = (L_{\sigma s} + L_{ms}) \cdot i_A + L_{ms} \cdot i_B \cdot \cos 120 + L_{ms} \cdot i_C \cdot \cos 240 \quad (3.6a)$$

$$\Psi_{SAS} = L_{\sigma s} \cdot i_A + L_{ms} \cdot \text{Re} \left[i_A + a \cdot i_B + a^2 \cdot i_C \right] \quad (3.6b)$$

denkleminle, rotor akımlarının, stator A faz sargısında yaptığı indüklemeye ise,

$$\Psi_{SAR} = L_m \cdot i_{R_1} \cos \theta + L_m \cdot i_{R_2} \cdot \cos(\theta + \gamma) + L_m \cdot i_{R_3} \cdot \cos(\theta + 2\gamma) + \dots + L_m \cdot i_{R_n} \cdot \cos[\theta + (N-1)\gamma]$$

$$\Psi_{SAR} = L_m \cdot \text{Re} \left[(i_{R_1} + b \cdot i_{R_2} + b^2 \cdot i_{R_3} + \dots + b^{N-1} \cdot i_{R_N}) \cdot e^{j\theta} \right] \quad (3.7a,b)$$

denkleminle ifade edilir. Benzer inceleme diğer stator fazları için yapılırsa, B faz sargısının akı denklemleri,

$$\Psi_{SBS} = L_{ms} \cdot i_A \cos 240 + (L_{\sigma s} + L_{ms}) \cdot i_B + L_{ms} \cdot i_C \cdot \cos 120 \quad (3.8a)$$

$$\Psi_{SBS} = L_{\sigma s} \cdot i_B + L_{ms} \cdot \text{Re} \left[a^2 \cdot i_A + i_B + a \cdot i_C \right] \quad (3.8b)$$

$$\Psi_{SBR} = L_m \cdot i_{R_1} \cdot \cos(240 + \theta) + L_m \cdot i_{R_2} \cdot \cos(240 + \gamma + \theta) \dots + L_m \cdot i_{R_N} \cdot \cos[240 + (N-1)\gamma + \theta]$$

$$\Psi_{SBR} = L_m \cdot \text{Re} \left[a^2 (i_{R_1} + b \cdot i_{R_2} + b^2 \cdot i_{R_3} + \dots + b^{N-1} \cdot i_{R_N}) \cdot e^{j\theta} \right] \quad (3.9a,b)$$

biçiminde, C faz sargısının akı denklemi ise

$$\Psi_{SCS} = L_{\sigma s} \cdot i_C + L_{ms} \cdot \text{Re} \left[a \cdot i_A + a^2 \cdot i_B + i_C \right] \quad (3.10)$$

$$\psi_{SCR} = L_m \cdot \text{Re} \left[a \left(i_{R_1} + b \cdot i_{R_2} + b^2 \cdot i_{R_3} + \dots + b^{N-1} \cdot i_{R_N} \right) \cdot e^{j\theta} \right] \quad (3.11)$$

olarak elde edilir.

Bu denklemlerde L_{ms} stator faz sargılarının karşılıklı mıknatıslanma indüktansı, $L_{\sigma s}$ stator sargılarının kaçak indüktansı, L_m stator ve rotor fazlarının karşılıklı mıknatıslanma indüktansıdır. $i_{R_1}, i_{R_2}, i_{R_3} \dots i_{R_N}$ sırasıyla rotor çubuk akımlarıdır. θ , statorun A fazının ve birinci rotor çubuğunun magnetik eksenleri arasındaki konum açısıdır. γ ise rotor faz çubukları arasındaki geometrik açıdır. Bu açı N rotor çubuk sayısı olmak üzere

$$\gamma = \frac{2\pi}{N} \quad (3.12)$$

biçimde ifade edilir, (Şekil 3.1).

Yukarıda verilen akı denklemlerindeki trigonometrik ifadeler, aşağıda tanımlanan dönüşümler yardımı ile karmaşık sayılı biçimde ifade edilmiştir.

$$a = e^{j120} \quad a^2 = e^{j240} \quad (3.13a)$$

$$\text{Re}\{a\} = \cos 120 \quad \text{Re}\{a^2\} = \cos 240 \quad (3.13b)$$

$$\text{Re}\{e^{j\theta}\} = \cos \theta \quad (3.13c)$$

$$b = e^{j\frac{2\pi}{N}} = e^{j\gamma} \quad (3.13d)$$

$$\cos n\gamma = \text{Re}\{b^N\} \quad (3.13e)$$

$$\cos(\theta + \gamma) = \text{Re}\{e^{j(\theta+\gamma)}\} = \text{Re}\{e^{j\gamma} \cdot e^{j\theta}\} = \text{Re}\{b \cdot e^{j\theta}\} \quad (3.13f)$$

Bu matematiksel basitleştirmeler yapıldığında stator sargısının akı ifadesi aşağıdaki matris biçiminde yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} \psi_{AS} \\ \psi_{BS} \\ \psi_{CS} \end{bmatrix} = L_{os} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + L_{ms} \cdot \text{Re} \left\{ \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ a^2 & 1 & a \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \right\} + L_m \cdot \text{Re} \left\{ \begin{bmatrix} 1 & b & b^2 & \dots & b^{n-1} \\ a^2 & ba^2 & b^2 a^2 & \dots & b^{n-1} a^2 \\ a & ba & b^2 a & \dots & b^{n-1} a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{R_1} \\ i_{R_2} \\ \vdots \\ i_{R_N} \end{bmatrix} \cdot e^{j\theta} \right\}$$

$$\theta = p \cdot \omega \cdot t \quad (3.14)$$

burada p, kutup çifti sayısıdır.

Bu denklem ifade basitliği açısından

$$\psi_s = L_{os} \cdot i_s + L_{ms} \cdot \text{Re} [A \cdot i_s] + L_m \cdot \text{Re} [B \cdot i_R \cdot e^{j\theta}] \quad (3.15)$$

biçiminde yazılabilir. ψ_s , i_s , i_R akı matrisi ve akım matrisleridir. Akı matrisinin türevi alındığında aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\frac{d\psi_s}{dt} = L_{os} \cdot \frac{di_s}{dt} + L_{ms} \cdot \text{Re} \left[A \cdot \frac{di_s}{dt} \right] + L_m \cdot \text{Re} \left\{ \left[B \cdot \frac{d}{dt} i_R \right] \cdot e^{j\theta} + B \cdot i_R \cdot \frac{de^{j\theta}}{dt} \right\} \quad (3.16)$$

Bu denklem (3.1) de verilen gerilim ifadesinde kullanıldığında, zamana bağlı büyüklükler cinsinden statorun gerilim denklemi elde edilir. Ek-A da akı matrislerinin trigonometrik ifadelerinin kullanıldığı biçimi verilmiştir.

Bu denklemlerde kullanılan indüktans değerleri yeterli doğrulukta hesaplanabilmeli veya ölçülebilmelidir. Bu konuda literatürde çok önemli ve yeterli doğrulukta sonuçlar veren ayrıntılı çalışmalar vardır [23], [24].

Stator mıknatıslanma indüktansı L_{ms} ,

$$L_{ms} = \frac{\mu_o \cdot l \cdot r}{g} \cdot N_s^2 \cdot \left(\frac{\pi}{4} \right) \quad (3.17)$$

ifadesi ile hesaplanır [27]. Burada ℓ net paket boyu, g hava aralığı genişliği, r ortalama hava aralığı yarıçapı (rotorun dış yarıçapı ile statorun iç yarıçapının ortalama değeri) ve N_s bir stator fazındaki sarım sayısıdır.

L_m , stator ve rotor fazlarının karşılıklı indüktansıdır. Demir malzemenin geçirgenliği sonsuz alındığında sargı fonksiyonu yöntemiyle hesaplanabilir [79],[80].

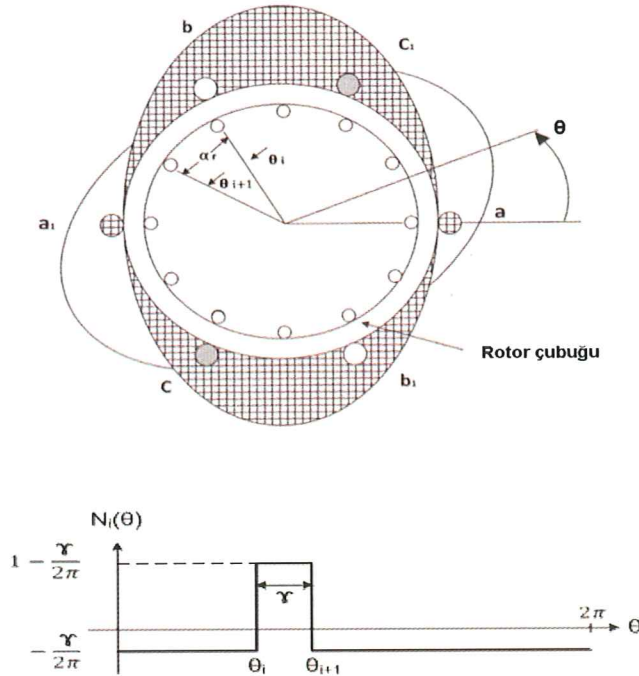
$$L_{ij}(\theta) = \mu_o \cdot \ell \cdot r \cdot \int_0^{2\pi} g^{-1}(\varphi, \theta) \cdot N_i(\varphi, \theta) \cdot N_j(\varphi, \theta) d\varphi \quad (3.18)$$

Bu denklemde θ herhangi bir referans eksene göre açısal rotor konumu, φ hava aralığındaki bir referans noktadır. $g^{-1}(\varphi, \theta)$ hava aralığı fonksiyonunun ters fonksiyonudur. Hava aralığının düzgün olduğu varsayılırsa, ihmal edilebilir. N_i ve N_j ifadeleri hava aralığı ampersarım dağılımından bulunan sargı fonksiyonlarıdır [26]. Stator sargıları ile rotor çubuğunun karşılıklı durumları Şekil 3.2a da verilmiştir. Statorun A fazının magnetik ekseni referans alındığında bu sargı için indirgenmiş stator sargı fonksiyonu

$$N_A(\theta) = \frac{N_s}{2} \cos(\theta) \quad (3.19)$$

olarak hesaplanır. Burada N_s stator faz sargısının sarım sayısıdır. Statorun B ve C faz sargıları için ifade $\pm 120^\circ$ ötelenir.

Rotor devresinin indirgenmiş sargı fonksiyonunu bulmak için, i. rotor devresinin 1 A lik akımla beslendiği düşünülürse, magnetik alan dağılımı Şekil 3.2b deki gibi olur. Diğer rotor devreleri içinde aynı dağılım geçerlidir. Bu durumda referans eksene göre açı değişimi dikkate alınır i. rotor devrelerinin indirgenmiş sargı fonksiyonu aşağıdaki gibi ifade edilir [26], [29].



Şekil 3.2 : a) Stator sargı dağılımı, b) rotor devresi sargı dağılımı.

$$N_i(\theta) = \begin{cases} -\gamma/2\pi, & 0 < \theta \leq \theta_i \\ 1 - \frac{\gamma}{2\pi}, & \theta_i < \theta \leq \theta_{i+1} \\ -\gamma/2\pi, & \theta_{i+1} < \theta \leq 2\pi \end{cases} \quad (3.20)$$

Bu denklemlerde γ iki ardışık rotor çubuğu arasındaki açı, θ_i ve θ_{i+1} referans eksene göre çubuk numarasını tanımlar. Bunlar dikkate alınarak, (3.18) denklemi çözüldüğünde statorun A fazı ile rotorun i. devresi arasındaki karşılıklı indüktans

$$L_{Ai} = \frac{\mu_o \cdot \ell \cdot r}{g} \int_0^{2\pi} N_A(\theta) \cdot N_i(\theta) \cdot d\theta \quad (3.21)$$

$$= \frac{\mu_o \cdot \ell \cdot r}{g} \frac{N_s}{2} [\sin \gamma \cdot \cos \theta_i - (1 - \cos \gamma) \sin \theta_i]$$

biçimini alır ve L_m indüktansı,

$$\delta = \frac{\gamma}{2} \quad \text{olmak üzere}$$

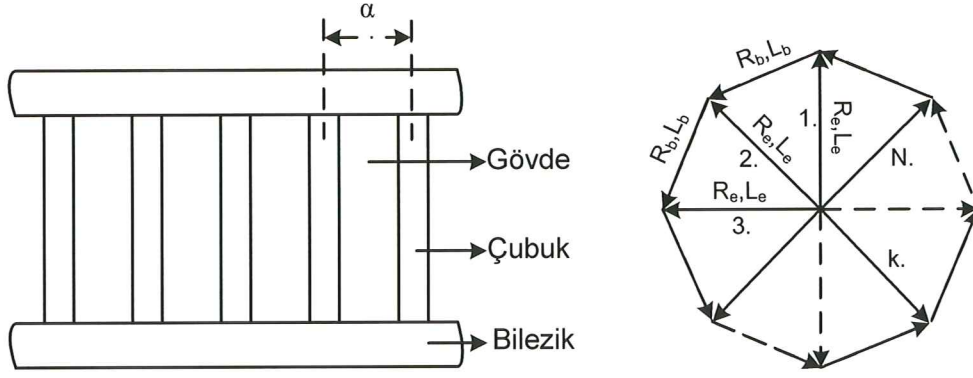
$$L_m = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\sin \delta}{N_s} \cdot L_{ms} \quad (3.22)$$

denklemini ile hesaplanır.

3.1.2. Rotor devresinin modellenmesi

Kafesli asenkron motorun rotorunda kafes çubuğu sayısı kadar faz olduğu kabul edilir. Fazların dönüş iletkenleri olmadığı için sarım sayıları $\frac{1}{2}$ dir. Rotorun kutup sayısı ise statorun kutup sayısı ile aynıdır. Kafes akımları stator ve rotorun kutup sayısı eşit olacak biçimde akar. Kafes çubukları, kısa devre bilezikleri ile iki taraftan kısa devre edilmiştir. Yapımsal simetrik olan bir rotorun ilkesel yapısı ve faz çokgeni Şekil 3.3 de verilmiştir. Elektriksel bakımdan özdeş olan rotorda faz çokgeni, bir düzgün çokgendir. Faz çubuklarının arasında aynı konum açısı γ vardır ve genlikleri eşittir.

Yapımsal ve elektriksel bakımdan simetrik olan bir rotor, magnetik olarak birbirine bağlı çubuk sayısı kadar özdeş göz -devre- ile modellenir. N tane kafes çubuğu olan bir rotorun eşdeğer devresinde $2N$ tane düğüm, $2N$ tane kısa devre bilezik parçası



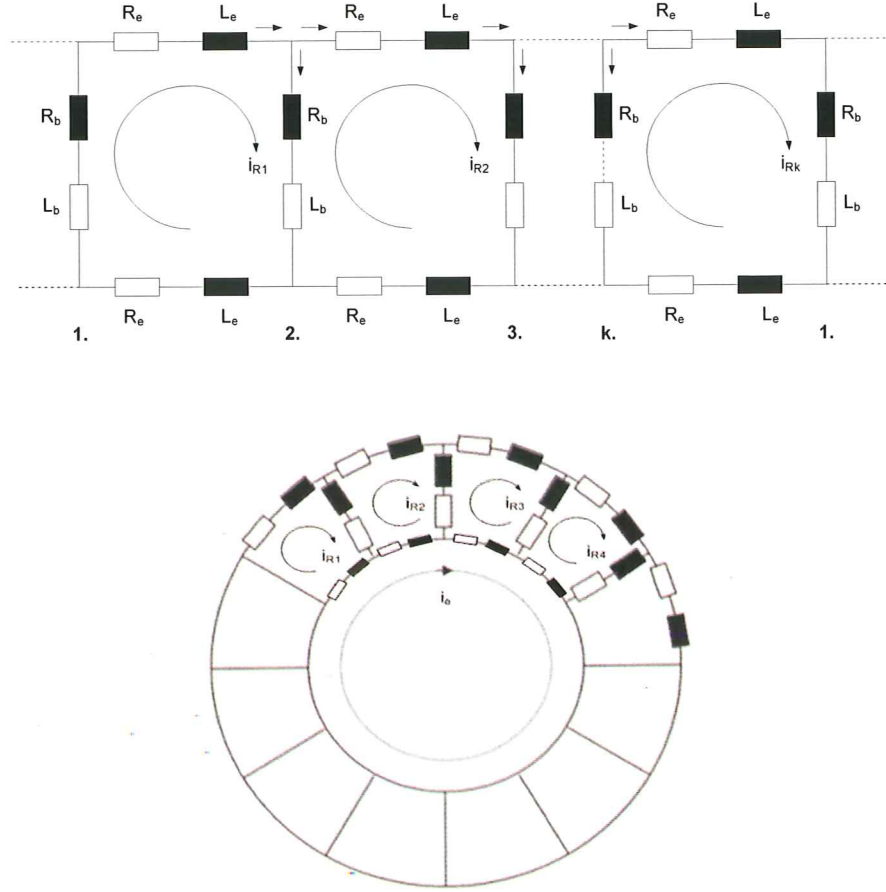
Şekil 3.3 : Rotorun ilkesel yapısı ve faz çokgeni.

-segman-, N tane rotor devresi akımı vardır, (Şekil 3.4). Gerçekte N çubuklu bir kafeste N+2 tane kapalı devre vardır. Daha önce belirtildiği gibi bunların N tanesi çubuklara aittir. Diğer devre ise kısa devre bileziği üzerinden kapanır. Hava aralığı akısının aksel bileşeni ihmal edilirse bu devrenin akımı sıfır olur. Bu çalışmada bu akım dikkate alınmamıştır.

Şekil 3.4 de verilen eşdeğer devrede düşey kollar kafes çubuklarını, yatay kollar ise kısa devre bileziğinin segmanlarını göstermektedir. Çubukların özdeş, kısa devre bileziklerinin türdeş olduğu kabul edilmiştir. Çubuklar ve segmanlar elektriksel olarak birer direnç ve birer kaçak indüktans ile modellenmiştir. Devrede b simgesi çubuk, e simgesi ise segman büyüklüklerini tanımlamaktadır. Her bir rotor devresi, iki komşu çubuk ve bunları birbirine bağlayan segmanlardan oluşmaktadır. i_{R_k} , k. rotor devresinin akımını göstermek üzere, k. rotor devresinin gerilim denklemi,

$$0 = 2(R_b + R_e)i_{R_k} - R_b i_{R_{(k-1)}} - R_b i_{R_{(k+1)}} + \frac{d\psi_{R_k}}{dt} \quad (3.23)$$

Biçiminde yazılabilir. Bu denklemde R_b rotor çubuk direncini, R_e iki rotor çubuğu arasındaki kısa devre bileziği direncini göstermektedir. ψ_{R_k} k. rotor devresinin akı ifadesidir. Rotor devreleri özdeş kabul edildiğinden, rotor gerilim denklemi matris biçiminde aşağıdaki gibi yazılabilir.



Şekil 3.4 : Kafes yapısının, a) açılmış, b) dairesel biçimde eşdeğer devresi.

$$R_o = 2(R_b + R_e) \quad (3.24a)$$

olmak üzere, rotor gerilim denklemi

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_o & -R_b & 0 & \cdots & -R_b \\ -R_b & R_o & -R_b & \cdots & 0 \\ 0 & -R_b & R_o & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -R_b & 0 & 0 & \cdots & R_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{R1} \\ i_{R2} \\ i_{R3} \\ \vdots \\ i_{RN} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{R1} \\ \psi_{R2} \\ \psi_{R3} \\ \vdots \\ \psi_{RN} \end{bmatrix} \quad (3.24b)$$

gibi yazılır.

Kafes yapıda k . devre akısı olan ψ_{Rk} nin iki temel bileşeni vardır. Bunlardan birincisi, stator akımlarının oluşturduğu ψ_{RkS} akısı, diğeri ise, rotor devre akımlarının

oluşturduğu ψ_{RkR} akı bileşenidir. Burada karmaşık yapı nedeniyle statör ve rotor akımlarının oluşturduğu akı bileşenleri ayrı ayrı incelenecektir.

Statör akımlarının rotorda oluşturduğu akılar aşağıdaki gibi ifade edilir: Birinci rotor fazı için,

$$\psi_{R1S} = L_m i_A \cdot \cos(-\theta) + L_m i_B \cos(120 - \theta) + L_m i_C \cos(240 - \theta) \quad (3.25)$$

ikinci rotor fazı için,

$$\psi_{R2S} = L_m i_A \cdot \cos(-\theta - \gamma) + L_m i_B \cos(120 - \theta - \gamma) + L_m i_C \cos(240 - \theta - \gamma) \quad (3.26)$$

N. rotor fazı için

$$\psi_{RNS} = L_m i_A \cdot \cos[-\theta - (N-1)\gamma] + L_m i_B \cos(120 - \theta - (N-1)\gamma) + L_m i_C \cos(240 - \theta - (N-1)\gamma) \quad (3.27)$$

biçimindedir. Bu denklemlerde γ iki rotor çubuğu arasındaki elektriksel açı, θ ise rotor ile statörün referans eksenleri arasındaki açıdır, (Şekil 3.1). Trigonometrik ifadeler yerine karmaşık sayı dönüşümleri kullanıldığında aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$\psi_{R1S} = L_m \cdot \text{Re} \left\{ (i_A + a i_B + a^2 i_C) e^{-j\theta} \right\} \quad (3.28)$$

$$\psi_{R2S} = L_m \cdot \text{Re} \left\{ b^{-1} (i_A + a i_B + a^2 i_C) e^{-j\theta} \right\} \quad (3.29)$$

$$\psi_{RNS} = L_m \cdot \text{Re} \left\{ b^{1-n} (i_A + a i_B + a^2 i_C) e^{-j\theta} \right\} \quad (3.30)$$

Akı ifadesi matris biçiminde

$$\begin{bmatrix} \psi_{R1S} \\ \psi_{R2S} \\ \psi_{R3S} \end{bmatrix} = L_m \cdot \text{Re} \left\{ \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ b^{-1} & b^{-1}a & b^{-1}a^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ b^{1-n} & b^{1-n}a & b^{1-n}a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \cdot e^{-j\theta} \right\} \quad (3.31)$$

Denklemleri ile tanımlanır. Yazım basitliği açısından aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\psi_{RS} = L_m \cdot \text{Re} \left\{ B^{*T} \cdot i_s \cdot e^{-j\theta} \right\} \quad (3.32)$$

ψ_{RS} , i_s , i_R akı ve akım matrisleridir.

Rotor akımlarının rotor devresinde oluşturduğu akıyı incelemek ise daha karmaşıktır. Şekil 3.4 de görüldüğü gibi her rotor fazında, komşu devre akımları da indüklemeye

yapar. Aşağıda verilen akı denklemlerinde L_{kk} , k. rotor devre akımının kendisinde oluşturduğu öz indüktansı, L_{ki} , i. rotor devre akımının k. rotor devresinde oluşturduğu karşılıklı indüktansı göstermektedir. L_b kafes çubuklarının, L_e segmanların kaçak indüktanslarıdır. Buna göre birinci rotor devresi için,

$$L_o = 2L_b + 2L_e \quad (3.33)$$

olmak üzere,

$$\Psi_{R1R} = L_{11} \cdot i_{R_1} + L_{12} \cdot i_{R_2} \cdot \cos \gamma + L_{13} \cdot i_{R_3} \cdot \cos 2\gamma + \dots + L_{1N} \cdot i_{R_N} \cdot \cos(N-1)\gamma + L_o \cdot i_{R_1} - L_b \cdot i_{R_2} \cdot \cos \gamma - L_b \cdot i_{R_N} \cdot \cos(N-1)\gamma \quad (3.34)$$

ikinci rotor devresi için,

$$\Psi_{R2R} = L_{21} \cdot i_{R_1} \cdot \cos(N-1)\gamma + L_{22} \cdot i_{R_2} + L_{23} \cdot i_{R_3} \cdot \cos \gamma + \dots + L_{2N} \cdot i_{R_N} \cdot \cos(N-2)\gamma + L_o \cdot i_{R_2} - L_b \cdot i_{R_1} \cdot \cos \gamma - L_b \cdot i_{R_N} \cdot \cos(N-1)\gamma \quad (3.35)$$

N. rotor devresi için

$$\Psi_{RNR} = L_{N1} \cdot i_{R_1} \cdot \cos \gamma + L_{N2} \cdot i_{R_2} \cdot \cos 2\gamma + L_{N3} \cdot i_{R_3} \cdot \cos 3\gamma + \dots + L_{NN} \cdot i_{R_N} + L_o \cdot i_{R_N} - L_b \cdot i_{R_1} \cdot \cos \gamma - L_b \cdot i_{R_{N-1}} \cdot \cos(N-1)\gamma \quad (3.36)$$

akı denklemleri elde edilir.

Kafes çubuklarının özdeş olduğu dikkate alınır, rotor devrelerinin karşılıklı indüktansları birbirine eşit alınır.

$$L_{mr} = L_{12} = L_{13} = \dots = L_{ki} \quad (3.36a)$$

Yukarıda verilen (3.34), (3.35) ve (3.36) denklemlerinde karmaşık sayılı büyüklüklerden yararlanarak, akı denklemi iki farklı matematiksel biçimde ifade edilebilir (3.37), (3.38).

$$\begin{bmatrix} \Psi_{R1R} \\ \Psi_{R2R} \\ \vdots \\ \Psi_{RNR} \end{bmatrix} = \text{Re} \left\{ \begin{bmatrix} (L_{11} + L_o) & (L_{mr} - L_b) \cdot b & \dots & (L_{mr} - L_b) \cdot b^{n-1} \\ (L_{mr} - L_b) \cdot b^{n-1} & (L_{22} + L_o) & \dots & (L_{mr} - L_b) \cdot b^{n-2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (L_{mr} - L_b) \cdot b & (L_{mr} - L_b) \cdot b^2 & \dots & (L_{nn} + L_o) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{R_1} \\ i_{R_2} \\ \vdots \\ i_{R_N} \end{bmatrix} \right\} \quad (3.37)$$

Rotorun akı denkleminin statorun akı denklemine yapı olarak benzetilmesi fiziksel yorumlama bakımından önemlidir. Yukarıdaki denklemde kaçak indüktans bileşeni

yeteri kadar açık değildir. Bu nedenle denklem (3.37) de verilen ifade aşağıdaki biçime dönüştürülebilir. Rotor kaçak indüktansı $L_{\sigma r}$ dir

$$L_{\sigma r} = L_o - 2L_b \cdot \cos \gamma = 2L_e + 2L_b (1 - \cos \gamma)$$

olmak üzere,

$$\begin{bmatrix} \Psi_{R1R} \\ \Psi_{R2R} \\ \vdots \\ \Psi_{RNR} \end{bmatrix} = L_{\sigma r} \begin{bmatrix} i_{R_1} \\ i_{R_2} \\ \vdots \\ i_{R_N} \end{bmatrix} + \text{Re} \cdot \left\{ \begin{bmatrix} L_{11} & b.L_{12} & b^2.L_{13} & \cdots & b^{n-1}.L_{1N} \\ b^{n-1}.L_{21} & L_{22} & b.L_{23} & \cdots & b^{n-2}.L_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b.L_{N1} & b^2.L_{N2} & b^3.L_{N3} & \cdots & L_{NN} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{R_1} \\ i_{R_2} \\ \vdots \\ i_{R_N} \end{bmatrix} \right\} \quad (3.38)$$

dir.

Ψ_{RR} , i_s , i_R akı ve akım matrisleri olmak üzere

$$\Psi_{RR} = L_{\sigma r} i_R + \text{Re} [C \cdot i_R] \quad (3.39)$$

yalın biçimi ile yazılır.

Akı denklemlerinde verilen L_{kk} öz indüktansları ve L_{ik} veya L_{mr} ile gösterilen farklı rotor devre akımlarının birbiri üzerinde oluşturduğu indüktanslar aşağıdaki integraller kullanılarak hesaplanır [29].

$$L_{kk} = \frac{\mu_o \cdot \ell \cdot r}{g} \cdot \int_0^{2\pi} N_k^2(\theta) \cdot d\theta = \frac{\mu_o \cdot \ell \cdot r}{g} \cdot \gamma \left(1 - \frac{\gamma}{2\pi} \right) \quad (3.40)$$

$$L_{ik} = \frac{\mu_o \cdot \ell \cdot r}{g} \cdot \int_0^{2\pi} N_k(\theta) \cdot N_i(\theta) d\theta = \frac{\mu_o \cdot \ell \cdot r}{g} \cdot \left(-\frac{\gamma^2}{2\pi} \right) \quad (3.41)$$

Burada ℓ net paket boyu, g hava aralığı genişliği, r ortalama hava aralığı yarıçapı, $N_k(\theta)$ ve $N_i(\theta)$ i. ve k. rotor sargı dağılımlarıdır, (Şekil 3.2).

Rotorun toplam akı ifadesi (3.32) ve (3.39) denklemlerinin toplanması ile elde edilir.

$$\begin{aligned} \Psi_R &= \Psi_{RR} + \Psi_{RS} \\ \Psi_R &= L_{\sigma r} i_R + \text{Re} \{ C i_R \} + L_m \cdot \text{Re} \{ B^{*T} \cdot i_s \cdot e^{-j\theta} \} \end{aligned} \quad (3.42)$$

Bu denklemin türevi alınarak,

$$\frac{d\Psi_R}{dt} = L_{\sigma r} \cdot \frac{di_R}{dt} + \text{Re} \left\{ C \cdot \frac{di_R}{dt} \right\} + L_m \cdot \text{Re} \left\{ B^{*T} \left(\frac{di_s}{dt} \right) e^{-j\theta} + B^{*T} \cdot i_s \frac{d(e^{-j\theta})}{dt} \right\} \quad (3.43)$$

rotorun gerilim denkleminde kullanıldığında, zamana bağlı büyüklükler cinsinden rotor modeli elde edilir.

Farklı bir indüktans hesap yaklaşımı ile rotorun akı denklemini basitleştirmek olanaklıdır. Rotor devre akımlarının kendi üzerinde oluşturduğu özindüktans ile, birbirleri arasında oluşturdukları karşılıklı indüktanslar yaklaşık eşit alınabilir [86].

Bu, L_{mr} rotorun mıknatıslanma indüktansıdır.

$$L_{11} = L_{22} \dots = L_{NN} = L_{12} = L_{21} = \dots = L_{ki} = L_{mr} \quad (3.44)$$

Bu durumda (3.34), (3.35), (3.36) denklemleri aşağıda verilen biçimi alır. Yapı olarak statorun akı denklemine benzer (3.45).

$$\begin{bmatrix} \Psi_{R1R} \\ \Psi_{R2R} \\ \vdots \\ \Psi_{RNR} \end{bmatrix} = L_{\sigma r} \begin{bmatrix} i_{R1} \\ i_{R2} \\ \vdots \\ i_{RN} \end{bmatrix} + L_{mr} \text{Re} \left\{ \begin{bmatrix} 1 & b & b^2 & \dots & b^{N-1} \\ b^{N-1} & 1 & b & \dots & b^{N-2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b & b^2 & b^3 & \dots & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{R1} \\ i_{R2} \\ \vdots \\ i_{RN} \end{bmatrix} \right\} \quad (3.45)$$

Yazım basitliği ile,

$$\Psi_{RR} = L_{\sigma r} \cdot i_R + L_{mr} \cdot \text{Re} \{ C' \cdot i_R \} \quad (3.46)$$

biçimini alır.

Rotorun gerilim denkleminde kullanılarak rotor modeli tamamlanır.

3.1.3. İç döndürme momentinin hesaplanması

Modelleme denklemlerinin sonuncusu hareket denklemdir. Motor ve yük momentinin cebirsel farkı eylemsizlik momentine eşittir.

$$M_M - M_L = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (3.47)$$

Bu denklemde kayıplar ihmal edilerek mil momenti M_m yerine elektriksel moment yani iç moment dikkate alınabilir. Elektriksel moment, magnetik enerjiden hesaplanır. Sistemin doğrusal olduğu düşünülürse depolanan magnetik enerji,

$$W = \frac{1}{2} i_s \cdot L_{ms} \cdot i_s + \frac{1}{2} i_s \cdot L_m \cdot i_R + \frac{1}{2} i_R \cdot L_m \cdot i_s + \frac{1}{2} i_R \cdot L_{mr} \cdot i_R \quad (3.48)$$

denklemleri ile hesaplanır.

Moment ise,

$$M_e = \frac{p}{2} \cdot i_s \cdot \frac{dL_m}{d\theta} \cdot i_r \quad (3.49)$$

dir. Burada p kutup sayısıdır.

3.2. Asenkron Makinenin Uzak Fazörleri ile Modellenmesi

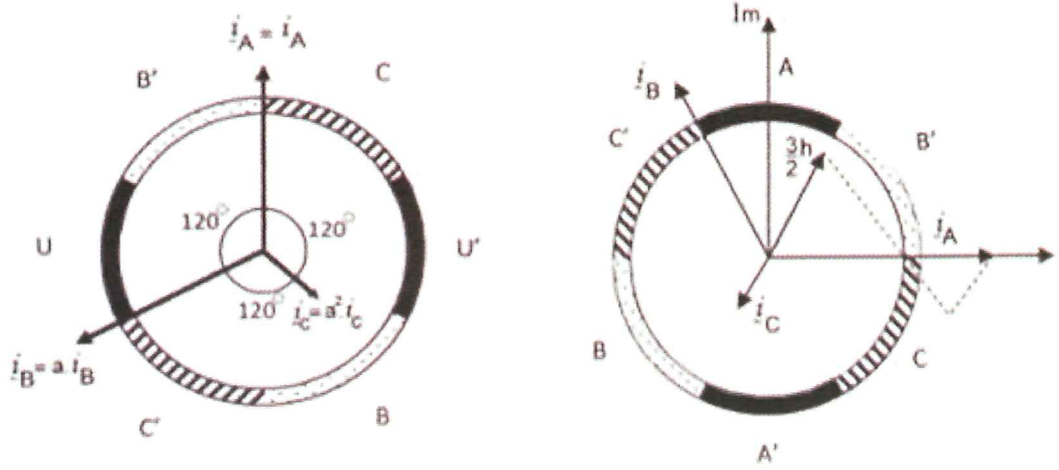
Bu bölümde yapısal simetrik bir kafesli asenkron makinenin, zamana bağılı büyüklüklerinden yararlanılarak, uzak fazörleri kullanılan gerilim denklemleri çıkarılacaktır. Makine uzayında belirli bir elektromagnetik dalgayı temsil eden ve karmaşık sayı biçiminde verilen ani değeri büyüklüklerine uzak fazörü, uzak göstericisi veya uzak vektörü denir. İlk olarak J. Stepina tarafından tanımlanmıştır [84]. Üç fazlı bir asenkron makinenin geçici ve sürekli hal işletme davranışı, zamana bağılı büyüklüklerin uzak fazörü tanımları yapılarak elde edilen, stator ve rotor gerilim denklemleri ile kolaylıkla incelenebilir. Böylelikle N+3 tane denklem yerine, üç tane diferansiyel denklem çözülerek, bütün fazların işletme büyüklükleri bulunabilir. Ancak bu yöntem her türlü simetrisiz çalışmayı aynı basitlikle inceleyemez. Yalnızca besleme devresine ilişkin gerilim simetrisizliklerinde çözüm kolaylığı sağlar. Bu anlamda, diğer simetrisiz çalışmalara, rotor simetrisizliği, sargı simetrisizliği vb. ilişkin işletme büyüklüklerinin bulunmasında, “ani değerlerin simetrik bileşenleri yöntemini” kullanmak gerekir.

3.2.1. Stator uzak fazörleri

Üç fazlı, simetrik bir stator sargısında faz akımlarının ani değeri, ilgili faz sargısının magnetik ekseni üzerinde alınır (Şekil 3.5). Bu anlamda stator akım uzak fazörü, gerçek ekseni statorun A faz sargısının magnetik ekseni üzerinde bulunan bir karmaşık düzlemde aşağıda verilen denklem ile tanımlanabilir (Şekil 3.5), [83].

$$\underline{i}_s = \frac{2}{3} (i_A + ai_B + a^2 i_C) \quad (3.50)$$

Bu denklemde i_A , i_B , i_C sırası ile statorun A, B ve C faz sargı akımlarının ani



Şekil 3.5 : Faz sargı akımlarının makine içerisindeki konumu.

değerleridir. $\underline{i}_s$ stator akımlarının uzay fazörüdür. $2/3$ ise, serbest seçilmiş bir çarpandır. Bu biçimde seçilerek, gerilim denkleminin matematiksel olarak daha yalın bir hal alması sağlanır. Stator akım uzay fazörü bir karmaşık sayıdır, zamana bağlı değildir ve stator eksen takımında, kutupsal koordinatlarda ifade edilebilir. Her t anı için faz akım üçlüsünün değerlerine bağlı olarak, karmaşık düzlemdeki konumu ve genliği değişir.

$$\underline{i}_s = i_s e^{j\alpha} \quad (3.51)$$

Stator faz akımlarının ani değerleri, akım uzay fazörü kullanılarak bulunabilir.

$$\text{Re}(\underline{i}_s) = i_A \quad (3.52a)$$

$$\text{Re}(a^2 \underline{i}_s) = i_B \quad (3.52b)$$

$$\text{Re}(a \underline{i}_s) = i_C \quad (3.52c)$$

Yukarıdaki denklemlerden görüldüğü gibi, A faz sargısı akımının ani değeri, uzay vektörü $\underline{i}_s$ doğrudan A faz sargı eksenine izdüşürülerek bulunur. B ve C sargı akımlarını ise, uzay vektörü $\underline{i}_s$ ve sargı eksenleri sırası ile pozitif 240° ve 120° döndürülerek, akım uzay fazörlerinin gerçek eksen üzerine izdüşürülmesi ile bulunur. Eğer sıfır bileşen akımı varsa, stator akım uzay vektörünün tanım denklemi

$$\underline{i}_s = \frac{2}{3} [(i_A + i_o) + a(i_B + i_o) + a^2(i_C + i_o)] \quad (3.53)$$

biçimini alır.

Aynı yöntemle, stator gerilim ve akı uzay vektörleri de tanımlanır.

$$\underline{v}_s = \frac{2}{3} (v_A + av_B + a^2 v_C) \quad (3.54)$$

$$\underline{\psi}_s = \frac{2}{3} (\psi_{sA} + a\psi_{sB} + a^2 \psi_{sC}) \quad (3.55)$$

Akı uzay fazörü $\underline{\psi}_s$ in fiziksel bir anlamı vardır. Bu tanım denklemi, makine uzayındaki magnetik akı dalgasının uzay vektörüdür. Bir elektromagnetik dalgayı temsil eder. Gerilim uzay fazörüne ise, bazı yaklaşıklıklarla fiziksel bir anlam yüklenebilir. Gerçekte, faz sargılarında indüklenen gerilim uzay dalgasını temsil eder. Bu anlamda besleme gerilimini bir uzay göstericisi-fazörü- ile tanımlayabilmek için, faz sargı dirençlerinde ve kaçak reaktanslarında oluşan gerilim düşümünü de, bir uzay fazörü ile tanımlamak gerekir. Her bir faz akısının ve geriliminin ani değerleri (3.52) denkleminde tanımlanan yöntem kullanılarak bulunabilir [81].

3.2.2. Statorun akı uzay fazörü ve gerilim denklemi

Üç fazlı asenkron makinede ani değer işletme büyüklükleri kullanılarak, statorun faz gerilim ifadeleri denklem (3.1) de verilmektedir. Yapımsal simettrili stator sargısında faz sargı dirençleri birbirine eşittir. Bu bağlamda, yukarıda açıklanan uzay vektörü tanımına uygun olarak gerilim denklemleri sırasıyla $2/3$, $(2/3)a$ ve $(2/3)a^2$ ile çarpılarak, taraf tarafa toplanırsa,

$$\frac{2}{3} (v_A + av_B + a^2 v_C) = R_s \cdot \frac{2}{3} (i_A + ai_B + a^2 i_C) + \frac{2}{3} \frac{d}{dt} (\psi_{sA} + \psi_{sB} + \psi_{sC}) \quad (3.56a)$$

ve (3.1) denklemi yerine,

$$\underline{v}_s = R_s \cdot \underline{i}_s + \frac{d\underline{\psi}_s}{dt} \quad (3.57b)$$

denklemi elde edilir. Yukarıdaki denklemde görüldüğü gibi üç fazlı yapımsal simettrili makinenin stator gerilim denklemleri, stator akım, gerilim ve akı uzay göstericiler kullanılarak tek bir denklemle ifade edilebilir. Bu denklem, üç fazlı makinenin stator büyüklüklerinin çok basit bir ifadesidir. Stator faz sargı

akımlarındaki, gerilimlerindeki ve halkalanma akımlarındaki değişimleri her t anı için tanımlar.

Stator akısının uzay fazörü $\underline{\psi}_s$ denklem (3.14) de verilen matrisin satırları sırasıyla 1, a ve a² çarparak taraf tarafa toplanırsa,

$$\underline{\psi}_s = L_{\sigma s} \cdot \underline{i}_s + \frac{3}{2} L_{ms} \underline{i}_s + \frac{N}{2} L_m \underline{i}_R \cdot e^{j\theta} \quad (3.58)$$

biçiminde elde edilir. Bu denklemde $L_{\sigma s}$ stator sargılarının kaçak indüktansı, L_{ms} stator sargılarının mıknatıslanma indüktansı, L_m stator fazları ile rotor devreleri arasındaki karşılıklı indüktanstır. $\underline{i}_R$, rotor akım uzay fazörü, N rotorun çubuk sayısıdır.

$$\underline{i}_R = \frac{2}{N} \left[i_{R_1} + b i_{R_2} + b^2 i_{R_3} + \dots + b^{N-1} i_{R_N} \right] \quad (3.59)$$

$$b = e^{j\frac{2\pi}{N}}$$

Denklem (3.58),

$$L_s = L_{\sigma s} + \frac{3}{2} L_{ms} \quad (3.60)$$

olmak üzere,

$$\underline{\psi}_s = L_s \cdot \underline{i}_s + \frac{N}{2} L_m \cdot \underline{i}_R \cdot e^{j\theta} \quad (3.61)$$

biçimini alır. Bu akı ifadesi denklem (3.57b) de verilen denklemde kullanıldığında duran eksen takımına göre stator gerilim denklemi

$$\theta = p \cdot \omega \cdot t$$

olmak üzere,

$$\underline{v}_s = R_s \cdot \underline{i}_s + L_s \frac{d}{dt} \underline{i}_s + \frac{N}{2} L_m \frac{d}{dt} \left[\underline{i}_R \cdot e^{j\theta} \right] \quad (3.62a)$$

$$\underline{v}_s = R_s \cdot \underline{i}_s + L_s \frac{d}{dt} \cdot \underline{i}_s + \frac{n}{2} L_m \left[\frac{d}{dt} \cdot \underline{i}_R \right] \cdot e^{j\theta} + j \cdot p \cdot \omega \frac{N}{2} L_m \underline{i}_R \cdot e^{j\theta} \quad (3.62b)$$

biçiminde elde edilir. Burada p çift kutup sayısı, ω , motor devir hızıdır.

3.2.3 Rotor uzay fazörleri

Rotorun işletme büyüklüklerinin uzay fazörleri, matematiksel olarak stator uzay fazörlerine benzer biçimde tanımlanır. Bilezikli asenkron makinede her iki sargının faz sayıları eşit olduğundan uzay fazör denklemleri aynıdır. Kafesli asenkron makinede ise rotorda N tane kafes çubuğu yani rotor fazı olduğu dikkate alınmalıdır. Her rotor fazı arasındaki konum açısı γ nın karmaşık sayılı ifadesi b olmak üzere, rotor akım uzay fazörü aşağıdaki biçimde yazılır.

$$\underline{i}_R = \frac{2}{N} \left[i_{R_1} + b i_{R_2} + b^2 i_{R_3} + \dots + b^{N-1} i_{R_N} \right] \quad (3.63)$$

Burada, $\gamma = \frac{2\pi}{N}$, $b = e^{j\gamma}$ olarak alınmıştır.

Bu denklemde i_{R_1} , i_{R_2} ve i_{R_N} sırasıyla rotor devre akımlarıdır.

$$\text{Re} \{ \underline{i}_R \} = i_{R_1} \quad (3.64a)$$

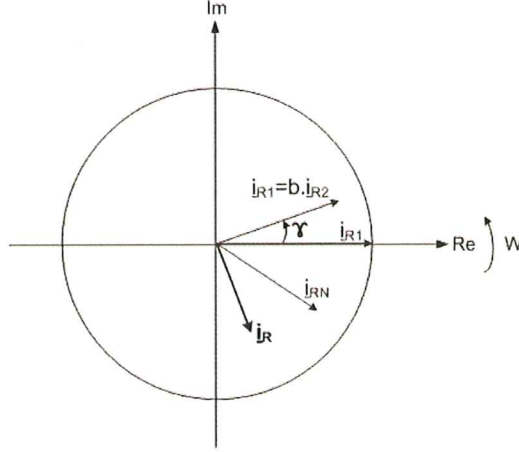
$$\text{Re} \{ b^{n-1} \underline{i}_R \} = i_{R_2} \quad (3.64b)$$

$$\text{Re} \{ b^{n-2} \underline{i}_R \} = i_{R_3} \quad (3.64c)$$

$$\text{Re} \{ b \cdot \underline{i}_R \} = i_{R_N} \quad (3.64d)$$

Stator akımının uzay fazöründe tanımlandığı gibi, rotor akım uzay fazörü izdüşürülerek devre akımlarının ani değerleri bulunabilir, (3.64a,b,c,d).

Stator uzay fazörleri ile rotor uzay fazörleri arasında tanımlama biçimi bakımından bir farklılık yoktur. Ancak tanımlandıkları eksen takımları ve faz sayıları farklıdır. Stator uzay göstericileri duran bir karmaşık düzlemde tanımlanırken, rotor uzay vektörleri rotorla birlikte dönen bir karmaşık düzlemde tanımlanır. Bu karmaşık düzlemin gerçek eksen, rotorun birinci kafes çubuğunun magnetik eksenidir. Sanal eksen ise, düzlemde gerçek eksene diktir, (Şekil 3.6).



Şekil 3.6 : Rotor akımlarının makine içerisindeki konumları.

Rotor faz gerilimlerinin ve akılarının uzay göstericileri bu dönen eksen takımında,

$$\underline{v}_R = \frac{2}{N} \left[V_{R_1} + bV_{R_2} + \dots + b^{N-1}V_{R_N} \right] \quad (3.65)$$

$$\underline{\psi}_R = \frac{2}{N} \left[\psi_{R_1} + b\psi_{R_2} + \dots + b^{N-1}\psi_{R_N} \right] \quad (3.66)$$

biçiminde tanımlanır. Kafesli makinede $\underline{v}_R$ rotor geriliminin uzay fazörü sıfıra eşittir.

3.2.4. Rotorun akı uzay fazörü ve gerilim denklemi

Kafesli asenkron makine için rotor devresinin uzay fazörü denklemlerini ifade etmek bilezikli makineye göre oldukça güçtür. Amaç benzer yaklaşımla

$$0 = R_2 \cdot \underline{i}_R + \frac{d\underline{\psi}_R}{dt} \quad (3.67)$$

denkleminde ulaşmaktır.

Rotor kafesi için stator sargılarında olduğu gibi bir R_2 rotor direnci ve rotor indüktansı tanımlamak matematiksel bakımdan zordur. Benzer biçimde akı ifadesini de basitleştirmek güçtür. Stator akımlarının oluşturduğu rotor akısının uzay fazörü

denklemini elde etmek için, denklem (3.31) de verilen akı matrisinin satırları sırasıyla 1, b, b² ... b^{N-1} ile çarpılarak taraf tarafa toplanırsa,

$$\underline{\Psi}_{RS} = \frac{3}{2} \cdot L_m \cdot \underline{i}_S \cdot e^{-j\theta} \quad (3.68)$$

ifadesi bulunur.

Rotor akımlarının rotor devresinde oluşturduğu akının uzay fazörü ifadesini bulmak için aynı yaklaşım kullanılır. Denklem (3.37) de verilen akı denklemleri 1, b, b² ... b^{N-1} ile çarpılır ve gerekli işlemler yapılırsa, rotor akımlarının oluşturduğu akının uzay fazörü aşağıdaki biçimde elde edilir.

$$\underline{\Psi}_{RR} = [2 \cdot L_b (1 - \cos \gamma) + 2 \cdot L_e] \cdot \underline{i}_R + \left[\frac{\mu_o \ell r}{g} \cdot \gamma \right] \cdot \underline{i}_R \quad (3.69a)$$

$$L_{\sigma r} = 2 \cdot L_b (1 - \cos \gamma) + 2 \cdot L_e \quad (3.69b)$$

$$L = \frac{\mu_o \ell r}{g} \cdot \gamma \quad (3.69c)$$

Bu rotor akı denklemi

$$L_r = L_{\sigma r} + L \quad (3.69d)$$

olmak üzere

$$\underline{\Psi}_{RR} = L_r \cdot \underline{i}_R \quad (3.69e)$$

biçimini alır.

Her iki akı bileşeni toplanarak rotorun toplam akı fazörü aşağıdaki denklemle belirlenir.

$$\underline{\Psi}_R = L_r \cdot \underline{i}_R + \frac{3}{2} \cdot L_m \underline{i}_S e^{-j\theta} \quad (3.70)$$

Benzer biçimde (3.45) denkleminin satırları 1, b, b² ... b^{N-1} ile çarpılır ve matematiksel işlemler tekrarlanırsa rotor akımlarının kendi üzerinde oluşturduğu akı ifadesinin bir diğer uzay fazörü denklemi elde edilir.

$$\underline{\Psi}_{RR} = L_{\sigma r} \cdot \underline{i}_R + \frac{N}{2} \cdot L_{mr} \underline{i}_R \quad (3.71a)$$

$$L_r = L_{\sigma r} + L_{mr} \quad \text{olmak üzere}$$

$$\underline{\psi}_{RR} = L_r \cdot \underline{i}_R \quad (3.71b)$$

elde edilir. Toplam akı ifadesi değişmez. (3.69a) ile (3.71a) denklemleri arasındaki ifade farkı, yalnızca rotor indüktans tanımından kaynaklanmaktadır.

Eşdeğer rotor direncini bulmak için, akı için yapılan işlemler tekrarlanır. Denklem (3.21) de verilen gerilim denkleminin her satırı sırasıyla 1, b, b² ...bⁿ⁻¹ ile çarpılıp toplandığında eşdeğer rotor direnci,

$$R_2 = 2 R_e + 2R_b (1 - \cos \gamma) \quad (3.72)$$

biçiminde bulunur.

Bütün bu ifadeler (3.51) denkleminde kullanırsa, dönen eksen takımında, kafesli bir asenkron makinenin rotor uzay vektör gerilim denklemi,

$$0 = R_2 \cdot \underline{i}_R + L_r \frac{d}{dt} \cdot \underline{i}_R + \frac{3}{2} L_m \left[\frac{d}{dt} \cdot \underline{i}_s \right] \cdot e^{-j\theta} - j.p.\omega \frac{3}{2} L_m \underline{i}_s \cdot e^{-j\theta} \quad (3.73)$$

olarak elde edilir. Burada p çift kutup sayısı, ω , motor devir hızıdır.

Elektriksel döndürme momenti uzay fazörleri ile

$$m_m = \frac{3}{2} \text{Im} \left[\underline{\psi}_s^* \cdot \underline{i}_s \right] \quad (3.74)$$

denklemleri ile hesaplanır. Böylelikle iki gerilim denklemi ve hareket denkleminin bilgisayar ortamında sayısal çözülmesi ile yapımsal simetrik asenkron makinenin işletme davranışı incelenir. Gerilim denklemlerinin aynı eksen takımında tanımlanması gerekir. Bu nedenle öncelikle eksen dönüşümü yapılır [21].

3.3. Rotor Arızasının Modellenmesi

Rotor çubuk arızaları çeşitli düzeyde olabilir. Çoğunlukla arıza kılcal bir çatlak ile başlar, sonra yayılır. Bu çalışmada arızalı çubuğun tamamen devre dışı kaldığı düşünülmektedir. Arızanın modellenmesi zamana bağlı büyüklüklerle kurulan modelde son derece basittir. Arızalı faza ait direnç ve indüktans sonsuz büyük değerde alınarak tanımlanır. Örneğin 2. ve 3. rotor devreleri arasındaki çubuğun kırıldığı düşünülürse, $i_{R_2} = i_{R_3}$ olacaktır. Yani iki gözden de aynı akım

değeri geçecektir. Bu, rotor denklemlerinde bu iki akım değerine karşı gelen sütunların toplanması ile tanımlanır. Bu yöntemle birden fazla kırık yapısı ve/veya kısa devre bileziğindeki kırıklar da incelenebilir.

Rotor arızası sonucu asenkron makinenin rotor devresi simetrisiz hale gelir. Bu nedenle stator sargılarında $(1-2s).f_1$ frekansında bir indükleme olur. Makinenin işletme özellikleri 3.4 Bölümde söz edilen ani değer simetrik bileşenleri ile incelenebilir. Ancak rotor devresi için, çubuk sayısı kadar bileşen tanımlamak gerekir.

Bölüm 4 de rotoru arızalı olan bir motorda hata akımı analizi yapılarak, kırık çubuk akımının diğer çubuklara dağılımı hesaplanmaktadır. Bu akımların genlikleri ve faz açıları birbirinden farklıdır. Bu farklılık bir karmaşık çarpanla ifade edilebilir. Ayrıca çubuk akımlarının uzay konumları değişmediği için hata akımlarına bir uzay vektörü tanımlanabilir.

3.4. Asenkron Makinenin Ani Değerli Simetrik Bileşenlerle İncelenmesi ve Kafes Arızası için Yaklaşık Çözüm Modeli

Bölüm 3.1 ve 3.2 de zamana bağlı büyüklükler ve uzay fazörleri kullanılarak asenkron makinenin dinamik modelleme denklemleri elde edilmektedir. Zamana bağlı büyüklüklerle kurulan denklemler matris biçimlidir, matematiksel çözümü oldukça karmaşık ve güçtür. Ancak her türlü besleme simetrisizliği ve/veya yapısal simetrisizlik oluşturan tüm arızalar bu yöntemle incelenebilir. Öte yandan uzay fazörleri kullanılarak kurulan makine modeli, sonuç denklemleri ve matematiksel çözümü bakımından son derece basittir. Ancak, genel biçimi ile yapısal simetrisizlikleri incelemek için uygun değildir. Bu bölümde bu iki yöntemin bir arakesiti olarak, kafesli asenkron makinenin ani değer simetrik bileşenleri ile kurulan dinamik modeli verilecektir.

Elektrik makinelerinde geçici olayların incelenmesinde kullanılan ani değerlerin simetrik bileşenleri, 1954 yılında W.V.Lyon tarafından matematiksel olarak tanımlanmıştır [82]. Elektrik makinelerindeki yaygın kullanım biçimi ise K.P.Kovaks tarafından verilmiştir [83].

Ani değerli simetrik bileşenlerde makinenin büyüklük denklemlerinin tanımlama biçimi uzay fazörlerine benzer. Besleme simetrisizliği durumunda yapısal simetrik bir makinenin işletme davranışı simetrik bileşenlerine ayrılarak incelenir. Çözüm

matematiksel olarak çok basittir. Farklı bileşenlerle yapılan inceleme sayesinde işletme büyüklükleri ve bunlarda oluşan değişimler fiziksel olarak yorumlanabilir.

Yapısal simetrisizlik yaratan rotor arızalarında, ani değer simetrlili bileşenleri ile kurulan modelin matematiksel çözümü, zamana bağlı büyüklüklerle yapılan inceleme kadar zor ve karmaşıktır. Ancak, rotor arızasının yarattığı yapısal simetrisizliğin işletme ve magnetik büyüklüklere olan etkisi farklı bileşenlerle incelendiği için, yalnız en büyük değişimi yaratan bileşen dikkate alınabilir. Böylelikle, küçük bir hata ile matematiksel olarak çok kolay çözümlenen yeni bir model oluşturulabilir. Elde edilen denklemler uzay fazörlerine olduğu kadar basittir.

3.4.1. Temel dönüşümler

Açısal bakımdan simetrlili, genlik bakımından simetrisiz üç vektör, üç tane simetrlili vektör sistemine ayrıştırılabilir. Bunlar sırası ile pozitif, negatif ve sıfır sistemlerdir. Pozitif sistem ile negatif sistemdeki vektörlerin sırası farklıdır. Üç fazlı asenkron makine dikkate alındığında, pozitif sistem normal faz sırası ile beslenen, yani motor olarak çalışan, negatif sistem ise iki fazı yer değiştirilmiş olarak beslenen, yani fren çalışan, makine olarak düşünülebilir. Sıfır sistem bileşeni ise bir alternatif alandır. Makinenin, stator faz sargıları ara arda bağlanarak, alternatif gerilimle beslenmesi olarak düşünülebilir. Bu çalışmada sıfır sistem bileşeni dikkate alınmamaktadır.

Statorun normal çalışma büyüklüklerinin, ani değerli simetrlili bileşenlerine dönüştürülmesi için T_s dönüşüm matrisi ile çarpılması gerekir. T_s' ise ters dönüşüm matrisini göstermektedir.

$$T_s = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (3.75)$$

$$T_s' = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (3.76)$$

N fazlı sistemlerde ise, N tane simetrlili bileşen vardır. Bu bileşenlerin üç tanesi pozitif, negatif ve sıfır bileşenlerdir. Pozitif sistem yine aynı faz sırasındadır. Negatif

bileşen, matris biçiminde tanımlanan dönüşümde, son simetrik bileşendir. Birinci ve sonuncu fazların yer değiştirmiş biçimidir. Diğer N-3 bileşeni fiziksel olarak tanımlamak ve yorumlamak pek olanaklı değildir. Yalnız, vektörel bakımdan matematiksel bir ifade olarak düşünülebilir. Rotorun normal çalışma büyüklüklerinin, ani değerli simetrik bileşenlerine dönüştürülmesi için T_R dönüşüm matrisi ile çarpılması gerekir. T_R' ise ters dönüşüm matrisini göstermektedir.

$$T_R = \frac{1}{N} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & b & b^2 & \dots & b^{N-1} \\ 1 & b^2 & b^4 & \dots & b^{2(N-1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & b^{N-1} & b^{N-2} & \dots & b \end{bmatrix} \quad (3.77)$$

$$T_R' = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & b^{N-1} & b^{N-2} & \dots & b \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & b^2 & b^4 & \dots & b^{2(N-1)} \\ 1 & b & b^2 & \dots & b^{N-1} \end{bmatrix} \quad (3.78)$$

Asenkron makinenin Bölüm 3.2 de tanımlanan zamana bağlı işletme büyüklük matrisleri, indüktans ve direnç matrisleri, aşağıda verilen dönüşüm denklemleri ile ani değerli simetrik bileşenlerine ayrılır. Bu denklemlerde $'$ simgeleri ile simetrik bileşenlere dönüşmüş büyüklük matrislerini, $_s$ simgesi stator, $_r$ simgesi rotor büyüklüklerini gösterir. Gerilim ve akım dönüşümleri,

$$\underline{V}_s' = T_s \cdot \underline{V}_s \quad \underline{i}_s' = T_s \cdot \underline{i}_s \quad \underline{i}_r' = T_r \cdot \underline{i}_r \quad (3.79)$$

biçimindedir. R_1 , stator sargı direnç matrisi, R_2 denklem (3.24) de tanımlanan rotor devresinin direnç matrisi olmak üzere direnç dönüşümleri,

$$\underline{R}_1' = T_s \cdot R_1 \cdot T_s' \quad \underline{R}_2' = T_r \cdot R_2 \cdot T_r' \quad (3.80)$$

kaçak indüktas dönüşümleri,

$$\underline{L}_{\sigma s}' = T_s \cdot L_{\sigma s} \cdot T_s' \quad \underline{L}_{\sigma r}' = T_r \cdot L_{\sigma r} \cdot T_r' \quad (3.81)$$

denklem (3.15), (3.39) ve (3.45) de verilen tanımlamalar dikkate alınarak

$$L_{ss} = L_{ms} \cdot \text{Re}\{A\} \quad L_{rr} = \text{Re}\{C\} \quad L_{rr} = L_{mr} \cdot \text{Re}\{D\} \quad (3.82)$$

stator ve rotor mıknatıslanma indüktansı dönüşümleri

$$\underline{L}'_{ss} = T_S \cdot L_{ss} \cdot T'_S \quad \underline{L}'_{rr} = T_R \cdot L_{rr} \cdot T'_R \quad (3.83)$$

ve benzer biçimde stator ile rotor arasındaki karşılıklı indüktanslar dönüşümleri için denklem (3.15) ve denklem (3.32) dikkate alınarak

$$L_{sr} = L_m \cdot \text{Re}\{B\} \quad L_{rs} = L_m \cdot \text{Re}\{B^{*T}\} \quad (3.84)$$

olmak üzere

$$\underline{L}'_{sr} = T_S \cdot L_{sr} \cdot T'_R \quad \underline{L}'_{rs} = T_R \cdot L_{rs} \cdot T'_S \quad (3.85)$$

biçimindedir.

Bu denklemlerde, o , p ve n simgeleri ile sıfır, pozitif ve negatif sistem bileşenler tanımlanmak üzere,

$$\underline{V}'_S = [\underline{V}_{so}, \underline{V}_{sp}, \underline{V}_{sn}]^T \quad \underline{V}_S = [V_{SA}, V_{SB}, V_{SC}]^T \quad (3.86a)$$

$$\underline{i}'_S = [\underline{i}_{so}, \underline{i}_{sp}, \underline{i}_{sn}]^T \quad \underline{i}_S = [i_A, i_B, i_C]^T \quad (3.86b)$$

$$\underline{i}'_R = [\underline{i}_{ro}, \underline{i}_{rp}, \underline{i}_1, \underline{i}_2, \dots, \underline{i}_{N-3}, \underline{i}_m]^T \quad \underline{i}_R = [i_{R1}, i_{R2}, i_{R3}, i_{R4}, \dots, i_{RN}]^T \quad (3.86c)$$

dönüştürülmüş makine denklemleri,

$$\underline{V}'_S = \underline{R}'_1 \cdot \underline{i}'_S + (\underline{L}'_{ss} + \underline{L}'_{ss}) \cdot \frac{d\underline{i}'_S}{dt} + \frac{d}{dt} (\underline{L}'_{sr} \cdot \underline{i}'_R) \quad (3.87a)$$

$$0 = \underline{R}'_2 \cdot \underline{i}'_R + (\underline{L}'_{rr} + \underline{L}'_{rr}) \cdot \frac{d\underline{i}'_R}{dt} + \frac{d}{dt} (\underline{L}'_{rs} \cdot \underline{i}'_S) \quad (3.87b)$$

biçimindedir. Bu simetrlili bileşen modelinin denklem sayısı, klasik model ile aynıdır. Bu nedenle bir çözüm basitliği sağlamaz. Ancak, yapımsal simetrisiz makine simetrlili pek çok makine olarak incelendiğinden sonuçlar fiziksel olarak yorumlanabilir.

Bu denklemlerde kullanılan büyüklükler zamana bağlı karmaşık sayılardır. Statorun simetrlili bileşenlerinin açık ifadeleri dikkate alınırsa, pozitif sistem bileşeninin negatif sistem bileşeninin eşleniği olduğu görülür.

$$\underline{V}_{sp} = \underline{V}_{sn}^* \quad \underline{i}_{sp} = \underline{i}_{sn}^* \quad (3.88a)$$

Bu matematiksel benzerlik rotorun simetrlili bileşenleri için de geçerlidir.

$$\underline{i}_{rp} = \underline{i}_{rm}^* \quad \underline{i}_k = \underline{i}_{N-k}^* \quad k \in \{1, 2, 3, \dots, N-2\} \quad (3.88b)$$

Aynı zamanda stator ve rotorun uzay fazör büyüklükleri ile ani değerli simetrlili bileşenler arasında

$$\underline{i}_s = \underline{i}_{sp} + \underline{i}_{sn}^* \quad (3.89a)$$

$$\underline{i}_s = \underline{i}_{sp} + \underline{i}_1 + \underline{i}_2 + \dots + \underline{i}_{N-2} + \underline{i}_{N-1} + \underline{i}_{sn}^* \quad (3.89b)$$

denklemleri tanımlanır.

3.4.2. Statorun gerilim denklemi

Yapımsal simetrlili bir asenkron makinede stator sargısının dönüştürülmüş direnç matrisi $\underline{R}_1'$ in, dönüştürülmüş indüktans matrisleri $\underline{L}_{\sigma s}'$ ve $\underline{L}_{ss}'$ nin yalnızca köşegenlerinde eleman vardır. Matrislerin diğer elemanları sıfırdır. Bunun yanısıra, karşılıklı indüktans matrisi $\underline{L}_{sr}'$ nin köşegeni üzerinde yalnızca iki tane eleman vardır. Bunlar pozitif ve negatif sistem bileşenlerini tanımlar. Kalan bütün elemanlar sıfırdır. Stator sargısının, dönüştürülmüş büyüklük matrisleri kullanılarak yazılan gerilim denklemi Ek-B de ayrıntılı biçimde verilmiştir. Buna göre yapımsal simetrlili makine için bu denklemden elde edilen pozitif ve negatif sistem bileşen denklemleri

$$\underline{L}_s = \underline{L}_{\sigma s} + \frac{N}{2} \underline{L}_{ms} \quad (3.90a)$$

olmak üzere duran eksen takımında

$$\underline{v}_{sp} = R_1 \underline{i}_{sp} + L_s \frac{d\underline{i}_{sp}}{dt} + \frac{N}{2} L_m \frac{d\underline{i}_{rp}}{dt} e^{j\theta} + j\omega \frac{N}{2} L_m \underline{i}_{rp} e^{j\theta} \quad (3.90b)$$

$$\underline{v}_{sn} = R_1 \underline{i}_{sn} + L_s \frac{d\underline{i}_{sn}}{dt} + \frac{N}{2} L_m \frac{d\underline{i}_{rm}}{dt} e^{-j\theta} - j\omega \frac{N}{2} L_m \underline{i}_{rm} e^{-j\theta} \quad (3.90c)$$

biçiminde yazılır.

3.4.3. Rotorun gerilim denklemi

Yapımsal simetrlili bir makinenin rotor devresinin gerilim denklemi çok gözlü devre modeli yardımı ile çıkarılabilir, (Şekil 3.4). Rotor için, zamana bağlı büyüklüklerin ani değerli simetrlili bileşenleri dikkate alındığında, stator denklemlerinden daha karışık büyüklük denklemleri bulunur. Temel sorun rotor kaçak indüktans matrisini ve rotor direnç matrisini dönüştürmektir. Ayrıca, N tane bileşen için tanımlanan denklemler matematiksel olarak birbirinden farklıdır.

Yapımsal simetri dikkate alındığında, dönüştürülmüş rotor mıknatıslanma indüktans matrisi $\underline{L}'_{rr}$ nin köşegeninde yalnız iki eleman vardır. Matrislerin diğer elemanları sıfırdır. Karşılıklı indüktans matrisi $\underline{L}'_{rs}$, $\underline{L}'_{sr}$ nin eşleniğinin devriğidir. Köşegeninde iki eleman vardır. Dönüştürülmüş direnç matrisi $\underline{R}'_2$ nün ve dönüştürülmüş kaçak indüktans matrisi $\underline{L}'_{\sigma r}$ nün yalnız köşegenleri üzerinde elemanları vardır. Bunlar özdeş değildir. Pozitif ve negatif bileşen denklemlerindeki direnç ve kaçak indüktans büyüklükleri, $_{[i,j]}$ simgesi matrisin i. satır, j. sütun elemanını göstermek üzere ve $\gamma = 2.\pi / N$ olmak üzere,

$$R_{2p} = \underline{R}'_{2[2,2]} = 2R_e + 2R_b (1 - \cos \gamma), \quad (3.91a)$$

$$R_{2n} = \underline{R}'_{2[N,N]} = R_{2p} \quad (3.91b)$$

$$L_{\sigma p} = \underline{L}'_{\sigma r[2,2]} = 2.L_b (1 - \cos \gamma) + 2.L_e \quad (3.91c)$$

$$L_{\sigma n} = \underline{L}'_{\sigma r[N,N]} = L_{\sigma p} \quad (3.91d)$$

biçimindedir. Rotorun, rotor eksen takımında tanımlanan pozitif ve negatif sistem bileşen gerilim denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$0 = R_{2p} \cdot \underline{i}_{rp} + L_{\sigma p} \cdot \frac{d\underline{i}_{rp}}{dt} + \frac{N}{2} L_{mr} \cdot \frac{d\underline{i}_{rp}}{dt} + \frac{3}{2} L_m \frac{d\underline{i}_{sp}}{dt} \cdot e^{-j\theta} - j\omega \frac{3}{2} L_m \underline{i}_{sp} \cdot e^{-j\theta} \quad (3.92a)$$

$$0 = R_{2n} \cdot \underline{i}_{rn} + L_{\sigma n} \cdot \frac{d\underline{i}_{rn}}{dt} + \frac{N}{2} L_{mr} \cdot \frac{d\underline{i}_{rn}}{dt} + \frac{3}{2} L_m \frac{d\underline{i}_{sn}}{dt} \cdot e^{j\theta} + j\omega \frac{3}{2} L_m \underline{i}_{sn} \cdot e^{j\theta} \quad (3.92b)$$

Diğer bileşenlerin gerilim denklemlerinde yalnız kaçak indüktansın ve rotor direncinin etkisi vardır. Karşılıklı indüklemeyi tanımlayan terimler yoktur. Ancak yapımsal simetrisizlik sözkonusu olduğunda diğer bileşenlerin gerilim denklemleri değişir. Bu anlamda dönüştürmüş direnç ve kaçak indüktans matrislerinin diğer köşegen elemanları

$$R_{21} = \underline{R}'_{2[3,3]} = 2R_e + 2R_b (1 - \cos 3.\gamma), \quad R_{2i} = \underline{R}'_{2[i,i]} = 2R_e + 2R_b (1 - \cos i.\gamma) \quad (3.93a)$$

$$L_{\sigma 1} = \underline{L}'_{\sigma r[3,3]} = 2.L_b (1 - \cos 3.\gamma) + 2.L_e, \quad L_{\sigma i} = \underline{L}'_{\sigma r[i,i]} = 2.L_b (1 - \cos i.\gamma) + 2.L_e \quad (3.93b)$$

$$\gamma = 2.\pi / N$$

olmak üzere i . simetrik bileşen için gerilim bileşen denklemleri

$$0 = R_{2pi} \cdot i_{ri} + L_{\sigma i} \cdot \frac{di_{ri}}{dt} + \frac{N}{2} L_{mr} \cdot \frac{di_{ri}}{dt}, \quad i \in \{1, 2, \dots, N-3\} \quad (3.94)$$

biçiminde ifade edilir. Yukarıda verilen denklemlerden görüldüğü gibi, pozitif ve negatif sistem bileşen denklemleri geleneksel üç fazlı sistem yapısındadır ve eşleniktir. Diğer bileşen denklemlerinde ise, yalnız kendi fazlarına ait direnç ve indüktans bileşenleri vardır. i .denklem $(N-i)$. nin eşleniğidir.

3.4.4. Kafesi arızalı makine için yaklaşık çözüm modeli

Kafes çubukları veya kısa devre bileziği arızalı olan asenkron makinede rotorun yapımsal simetrisi bozulur. Bu nedenle direnç ve indüktans matrislerinde kullanılan hesaplama basitliği ortadan kalkar. Stator ile rotorun simetrik bileşenlerine dönüşmüş direnç ve indüktans matrislerinin köşegen biçimli yapısı bozulur. Makinenin tam olarak işletme davranışını inceleyebilmek için, bütün simetrik bileşen denklemlerini çözmek gerekir. Bir nedenle, ani değer simetrik bileşen modeli, bir çözüm kolaylığı getirmez. Yalnız arızayı fiziksel anlamda yorumlamak kolaylaşır.

Burada ani değer simetrik bileşenlerini kullanarak, bir takım hata kabulleri ile, rotor yapısı simetrisiz olan bir asenkron makine için çözüm kolaylığı sağlayan bir modelleme ve çözüm yöntemi önerilmektedir.

Rotor arızalarında, stator sargılarının yapımsal simetrisini bozulmaz. Bu nedenle, stator sargılarının direnç matrisi, statora ilişkin kaçak ve mıknatıslanma indüktans matrisleri değişmez. Ancak rotor simetrisizliği nedeniyle, karşılıklı indüktanslar ve hava aralığı akısı değişir. Önerilen yöntemde karşılıklı indüktanslardaki bu değişim dikkate alınmamaktadır. Hava aralığı akısındaki değişimin etkileri ise, negatif sistem bileşeni ile kapsanır. Bu yaklaşımla denklem (3.90b) ve denklem (3.90c) de verilen statorun simetrik bileşen gerilim denkleminin değişmediği kabul edilir.

Bir kafes çubuğu arızası, rotor eşdeğer direnç matrisi R_2 ile kaçak reaktans matrisi $L_{\sigma r}$ yi ve bileşenlerine dönüştürülmüş biçimlerini doğrudan değiştirir. Bu nedenle iki matrisin yapısında değişiklik yapılarak bir çözüm basitliği sağlanamaz. Daha önce belirtildiği gibi kafes çubuk arızaları çeşitli düzeylerde olabilir. Bu çalışmada arızalı çubuğun tamamen devre dışı kaldığı düşünülmektedir. Bu nedenle rotor modelinde arızalı çubuğun komşu gözlerinin akımları birbirine eşit olur. Kırılan çubuk kendi

üzerinde ve komşu rotor çubuklarında bir indükleme oluşturmaz. Bu nedenle kendi üzerinde oluşturduğu öz indüktans ile, diğer rotor devreleri oluşturduğu indüktanslar sıfır kabul edilebilir. Benzer yaklaşım karşılıklı indüktans matrisi L_{ms} ve L_{ms} içinde uygulanır. Rotoru arızalı olan makine için tanımlanan her iki indüktans matrisinde denklem (3.83) ve denklem (3.85) de tanımlandığı gibi dönüşüm uygulanır, ancak yaklaşık modelde bu matrislerin tüm elemanları kullanılmaz.

Rotora ait yapısal simetrisizliklerde ve bu nedenle oluşan elektriksel ve magnetik simetrisizliklerde, makinenin işletme davranışındaki değişimi temelde negatif sistem bileşeni belirler. Bu nedenle rotor simetrisizliğinin, rotor gerilim denklemindeki $\underline{L}'_{rr}$ ve $\underline{L}'_{rs}$ indüktanslarında yarattığı etkiler, yalnızca pozitif ve negatif sistem bileşenleri dikkate alınarak yaklaşık olarak incelenebilir. Rotor arızasının etkileri, rotor modelinde bir $\underline{v}_h$ gerilimi ile tanımlanırsa denklem (3.87b) aşağıdaki biçime dönüşür.

$$0 = \underline{R}'_2 \cdot \underline{i}'_R + \underline{L}'_{\sigma r} \cdot \frac{d\underline{i}'_R}{dt} + \underline{v}_h \quad (3.95a)$$

$$\underline{v}_h = \underline{L}'_{rr} \frac{d\underline{i}'_R}{dt} + \frac{d}{dt}(\underline{L}'_{rs} \cdot \underline{i}'_s) \quad (3.95b)$$

Bu yaklaşıma göre $\underline{v}_h$ denkleminde dönüştürülmüş rotor öz indüktans matrisinin $\underline{L}'_{rr[p,p]}$, $\underline{L}'_{rr[p,n]}$, $\underline{L}'_{rr[n,p]}$, $\underline{L}'_{rr[n,n]}$ terimleri ve karşılıklı indüktans matrisinin $\underline{L}'_{rs[p,p]}$, $\underline{L}'_{rs[p,n]}$, $\underline{L}'_{rs[n,p]}$ ve $\underline{L}'_{rr[p,p]}$ terimleri dikkate alınır. Bu yaklaşımla rotor gerilim denklemleri kısmen yapısal simetrikli biçime dönüşür. Aşağıda rotor devresine ilişkin simetrikli bileşen denklemleri, önerilen birinci yaklaşık çözüm yöntemi için, matris biçiminde verilmektedir

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & R_{pp} & R_{p1} & \cdots & R_{pn} \\ 0 & R_{1p} & R_{11} & \cdots & R_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & R_{np} & R_{n1} & \cdots & R_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{i}_{ro} \\ \underline{i}_{rp} \\ \underline{i}_1 \\ \vdots \\ \underline{i}_{rn} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & L_{\sigma pp} & L_{\sigma pn} & \cdots & L_{\sigma pn} \\ 0 & L_{\sigma 1p} & L_{\sigma 11} & \cdots & L_{\sigma 1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & L_{\sigma np} & L_{\sigma n1} & & L_{\sigma nn} \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \underline{i}_{ro} \\ \underline{i}_{rp} \\ \underline{i}_1 \\ \vdots \\ \underline{i}_{rn} \end{bmatrix} \quad (3.96a)$$

$$\underline{v}_h' = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & L_{rpp} & 0 & \cdots & L_{rpn} \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & L_{mp} & 0 & & L_{mn} \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \underline{i}_{ro} \\ \underline{i}_{rp} \\ \underline{i}_1 \\ \vdots \\ \underline{i}_{rn} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \left\{ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_{mpp} & L_{mpn} \\ 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & L_{mnp} & L_{mnn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{i}_{so} \\ \underline{i}_{sp} \\ \vdots \\ \underline{i}_{sn} \end{bmatrix} \right\} \quad (3.96b)$$

Bu yaklaşık model kullanılarak, rotor arızası ile oluşan yapımsal simetrisizliğin rotor ve stator eşdeğer devre elemanları üzerindeki etkileri yeterli doğrulukta dikkate alınmaktadır. Bu simetrisizliğin makinenin elektriksel ve magnetik işletme büyüklüklerinde oluşturduğu etkiler ise, bütün bileşen denklemleri dikkate alınmadığı ve inceleme yapımsal simetrikli makineye benzetilerek yapıldığı için kısmen dikkate alınmaktadır. Bu yaklaşım Bölüm 6.3. de verilen sayısal benzeşim sonuçlarına göre yeterli doğruluktadır.

Rotor denkleminde dönüştürülmüş rotor mıknatıslanma indüktansı ve karşılıklı indüktans için uygulanan basitleştirme, dönüştürülmüş rotor direnç ve kaçak indüktans matrislerinde de kullanılabilir. Eşdeğer eleman matrisleri, simetrisiz yapıya göre kurularak, ani değerli simetrikli bileşenler yöntemine uygun olacak biçimde dönüşüm uygulandıktan sonra, yalnız pozitif ve negatif sistem bileşenlerini içeren elemanlar kullanılır, diğer bileşen elemanları dikkate alınmaz. Bu durumda denklem (3.96a) da verilen rotor gerilim denkleminin ilk kısmı aşağıdaki biçimi alır, $\underline{v}_h'$ ifadesi değişmez.

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & R_{pp} & 0 & \cdots & R_{pn} \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & R_{np} & 0 & \cdots & R_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{i}_{ro} \\ \underline{i}_{rp} \\ \underline{i}_1 \\ \vdots \\ \underline{i}_{rn} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & L_{\sigma pp} & 0 & \cdots & L_{\sigma pn} \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & L_{\sigma np} & 0 & & L_{\sigma nn} \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \underline{i}_{ro} \\ \underline{i}_{rp} \\ \underline{i}_1 \\ \vdots \\ \underline{i}_{rn} \end{bmatrix} \quad (3.97)$$

Böylelikle, yaklaşık model daha da basitleştirilmiş olur ve rotor arızası iki bileşen denklemi ile incelenebilir. Bunu ikinci yaklaşık çözüm yöntemi olarak adlandırabiliriz.

Bu denklemlerde her iki simetrikli bileşenin çözümü zorlaştıracak biçimde birbirlerine etkisi vardır. Bu nedenle analitik çözümü çok daha da yalın kılmak için, indüktans ve

direnç elemanlarının, yalnız kendi bileşenlerine etkisi dikkate alınabilir. Böylelikle, bütün rotor denklemi matrislerle ifade edilirse, üçüncü yaklaşık yöntem için,

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & R_{pp} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & R_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{i}_{ro} \\ \underline{i}_{rp} \\ \underline{i}_l \\ \vdots \\ \underline{i}_{rn} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & L_{\sigma pp} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & & L_{\sigma nn} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \underline{i}_{ro} \\ \underline{i}_{rp} \\ \underline{i}_l \\ \vdots \\ \underline{i}_{rn} \end{bmatrix} \quad (3.98a)$$

$$\underline{v}_h' = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & L_{rpp} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & & L_{mn} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \underline{i}_{ro} \\ \underline{i}_{rp} \\ \underline{i}_l \\ \vdots \\ \underline{i}_{rn} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \left\{ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_{mpp} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & L_{mnn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{i}_{so} \\ \underline{i}_{sp} \\ \underline{i}_{sn} \end{bmatrix} \right\} \quad (3.98b)$$

biçiminde tanımlanır. Bileşenlerine ayrılarak yazılırsa,

$$0 = R_{2pp} \cdot \underline{i}_{rp} + L_{\sigma pp} \cdot \frac{d\underline{i}_{rp}}{dt} + \frac{N}{2} L_{rpp} \cdot \frac{d\underline{i}_{rp}}{dt} + \frac{3}{2} L_{mpp} \frac{d\underline{i}_{sp}}{dt} \cdot e^{-j\theta} - jp\omega \frac{3}{2} L_{mpp} \underline{i}_{sp} \cdot e^{-j\theta} \quad (3.90a)$$

$$0 = R_{2nn} \cdot \underline{i}_{rn} + L_{\sigma nn} \cdot \frac{d\underline{i}_{rn}}{dt} + \frac{N}{2} L_{rnn} \cdot \frac{d\underline{i}_{rn}}{dt} + \frac{3}{2} L_{mnn} \frac{d\underline{i}_{sn}}{dt} \cdot e^{j\theta} + jp\omega \frac{3}{2} L_{mnn} \underline{i}_{sn} \cdot e^{j\theta} \quad (3.90b)$$

olarak ifade edilir. Bu biçimi ile, direnç ve indüktans değerlerinin hesaplama farklılığı dışında, aynı bilezikli asenkron motorun rotor ani değer simetrlili bileşen denklemlerine benzer.

4. HATA AKIMI YÖNTEMİ

Rotor çubuk arızalarının asenkron motorun sürekli hal işletme davranışına olan etkilerini inceleyen en önemli yöntemlerden bir tanesi hata akımı analizidir. Yöntem kafes çubuğu kırıkları için ilk olarak Jordan, kısa devre bileziği kırıkları için ise Jufer tarafından önerilmiştir [5], [14]. Yöntemin temeli, kırılan çubuğun veya kısa devre bileziğinin davranışını, dışarıdan bir akım kaynağı ile modellemeye dayanır. Uygulanabilir biçimini W. Deleroi'nin önemli katkıları ile almıştır [42].

Asenkron makinenin kafes yapısında oluşan bir çatlak veya kırık, rotor devresini elektromagnetik bakımdan simetrisiz hale getirir. Rotor devresindeki simetrik akım dağılımı bozulur. Kırık çubuk akımının, diğer rotor çubuklarına ve kısa devre bileziği parçalarına dağılması sonucu, hava aralığı akı yoğunluğu değişir. Negatif sistem bileşeni oluşur. Bu işletme durumunda asenkron motorun davranışını incelemek için üst üste bindirme ilkesinden yararlanılır. Öncelikle kırılan çubuk akımının diğer çubuklara dağılımı hesaplanır. Bu dağılıma göre, üç fazlı simetrik gerilimle beslenen arızasız asenkron motorun işletme büyüklükleri ile, rotor çubuklarındaki arıza akımlarının oluşturduğu işletme büyüklükleri üst üste toplanarak, arızalı asenkron motorun işletme davranışı saptanır.

Bu bölümde hata akımı dağılımının hesaplama yöntemi verilerek, bulunan hata akım büyüklüklerinden hava aralığı akı yoğunluğundaki değişimin hesaplama yöntemi verilecektir. Ayrıca ardışık iki ve üç kırıklar için akım dağılımının hesaplanabileceği eşdeğer devre modelleri önerilecektir. Bu arızalar için akım dağılımı 6. Bölümde hesaplanmıştır.

Literatürde yalnızca bir kafes kırığı için yapılan incelemeler vardır.

4.1. Hesaplama Yöntemi

Kırılan çubuk akımının diğer çubuklara dağılımını hesaplamak için, arızalı çubuğun aynı akımla karşıt yönde beslendiği düşünülür. Yani kırık çubuk bir bağımsız akım kaynağı ile tanımlanır. Gerçek işletme davranışını modelleyebilmek

için, stator sargısının anma geriliminde beslendiği, ancak makinenin dönmediği kabul edilir. Stator ile rotor arasındaki açısal konum değişmediğinden, karşılıklı indüktanslar sabit değerdedir. Çubuklardan akan hata akımlarının oluşturduğu akıların, statorun sac paketi üzerinden devresini tamamladığı düşünülür.

Kısa devre bileziğinin parçaları ile stator arasındaki halkalanma akısının oluşturduğu indüktans L_Z dış indüktansdır. Şekil 4.1 de bu halkalanma gösterilmektedir. İndüktansın sayısal değeri aşağıda verilen denklemle hesaplanır.

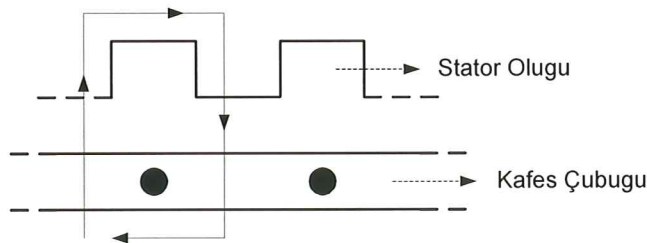
$$L_Z = N^2 \cdot \Lambda = N^2 \cdot \ell \cdot \lambda = N^2 \mu_0 \cdot \frac{b_Z \cdot \ell}{g} \quad (4.1)$$

Bu denklemde, b_Z dış genişliği, ℓ net paket boyu ve g hava aralığı genişliğidir. Bu indüktansın her iki kısa devre bileziği arasında eşit paylaşıldığı kabul edilir. Bu özel çalışma biçiminde, normal işletmedeki esas indüktansı temsil eder.

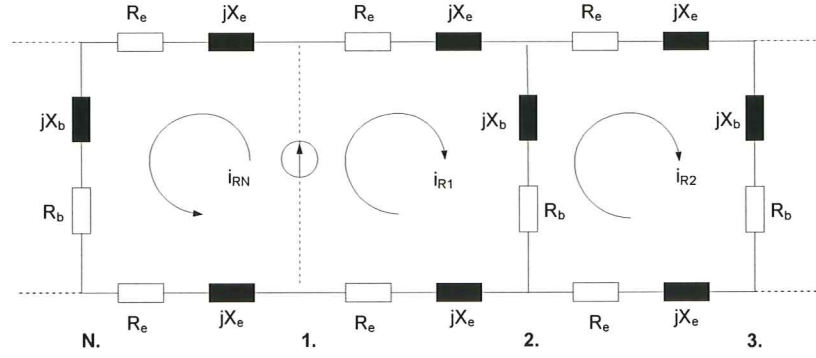
Şekil 4.2 de bir çubuğu kırık olan motor için, rotorun eşdeğer devre modeli verilmektedir. Bu devre çözülerek, diğer çubuklarda oluşan hata akımları hesaplanır. Rotorun çubuk sayısı bir çift sayı olduğundan, tek sayılı kırıklar için bu devre simetriktr. Bu nedenle kırık çubuğun akımının iki tarafa eşit dağıldığı kabul edilir.

Devrede R_b , çubuk direncini, X_b çubuk reaktansını göstermektedir. Segman direnci R_e dir. X_{Ze} reaktansı, hem segman, hem de dış reaktansını tanımlar. Arızanın incelendiği kayma değeri s olmak üzere çubuk ve segman impedansları,

$$\underline{Z}_e = R_e + j.s \left(X_e + \frac{1}{2} X_Z \right) \quad (4.2)$$



Şekil 4.1 : Hata akımının oluşturduğu halkalanma akısı.



Şekil 4.2 : Bir kırık çubuk için hata yönteminin rotor eşdeğer devresi.

$$\underline{Z}_b = R_b + j.s.X_b \quad (4.3)$$

denklemleri ile hesaplanır.

Şekil 4.2 de verilen modelde, rotor devrelerinin çevre denklemleri yazıldığında, $\underline{A}$,

$$\underline{A} = \frac{R_e + j.s.\left(X_e + \frac{1}{2}X_z\right)}{R_b + j.s.X_b} \quad (4.4)$$

denklemini ile ifade edilen impedans oranı olmak üzere, denklem (4.5) de verilen matris biçimli denklem elde edilir. Simetri nedeniyle N tane denklem yerine, N/2 denklem çözülebilir.

$$\begin{bmatrix} 2(1-A)-1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 2(1-A) & -1 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 2(1-A) & -1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & -1 & 2(1-A) & -1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & -1 & 2(1-A)-1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{R1} \\ I_{R2} \\ I_{R3} \\ I_{R4} \\ \vdots \\ I_{RN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U/Z_1 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ U/Z_N \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Bu denklemde çarpan olarak bulunan oranlanmış empedans matrisine, akım dağılım matrisi denir. Matris kırık çubuğun tanımlandığı devre dışında tekrarlıdır. Birinci ve sonuncu deve dışında, diğer devre gerilimleri sıfırdır. Yalnız birinci ve sonuncu göz akımları bilinmektedir (4.6).

$$\underline{I}_{R1} = \underline{I}_{RN} = \frac{\underline{I}_{b1}}{2} \quad (4.6)$$

Simetrik yapı nedeniyle segman akımlarının birbirine oranı sabittir. Bu oran, $\underline{d}$ dağılım veya sönümlleme katsayısı ile tanımlanır. $\underline{d}$ karmaşık sayılı bir büyüklüktür. Rotor devre akımları, $\underline{d}$ sönümlleme katsayısına bağlı olarak ifade edilirse, aşağıda verilen denklem elde edilir.

$$\underline{I}_{Ri} = \underline{I}_{R1} \cdot \underline{d}^{i-1} \quad (4.7)$$

$$\underline{I}_R = \left[1, \underline{d}, \underline{d}^2, \dots, \underline{d}^{\left(\frac{N}{2}-1\right)} \right]^T \cdot \underline{I}_{R1} \quad (4.8)$$

Buna göre, 2. devre denklemi

$$\underline{d}^{i-2} - 2(1 + \underline{A}) \cdot \underline{d}^{i-1} + \underline{d}^i = 0 \quad (4.9)$$

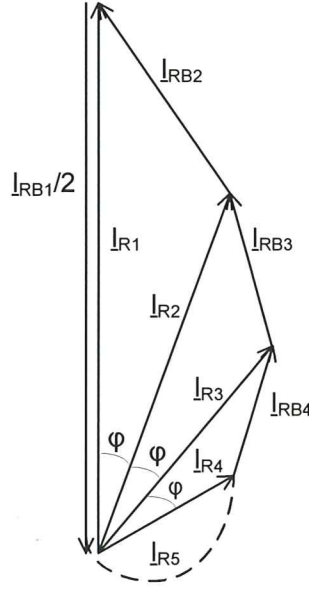
çözüldüğünde $\underline{d}$ için

$$\underline{d} = (1 + \underline{A}) \pm \sqrt{(1 + \underline{A})^2 - 1} \quad (4.10)$$

ifadesi elde edilir.

Segman akımları için tanımlanan dağılıma oranı, çubuk hata akımları ve bunların oluşturdukları magnetik akı yoğunlukları için de geçerlidir.

$$\underline{d} = \frac{\underline{I}_{R_{i+1}}}{\underline{I}_{R_i}} = \frac{\underline{I}_{b_{i+1}}}{\underline{I}_b} \quad (4.11)$$



Şekil 4.3 : Çubuk hata akımlarının vektörel gösterimi.

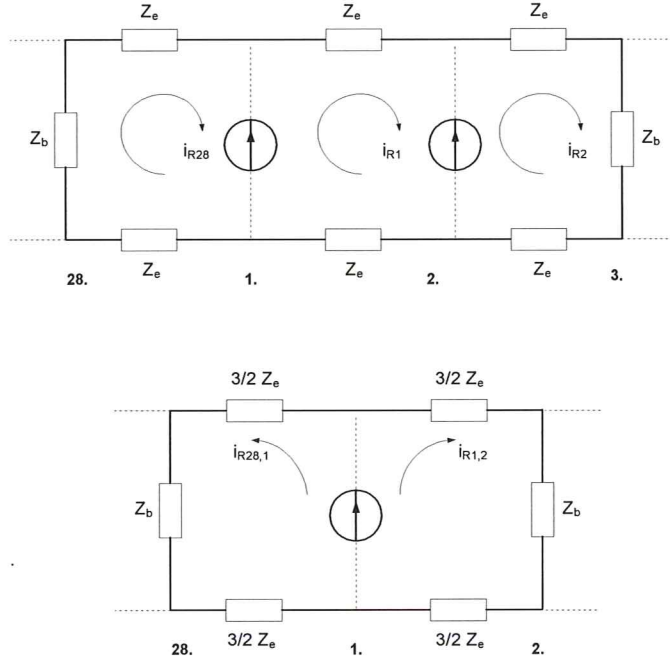
Şekil 4.3 de görüldüğü gibi, dağılma, sönümlenme, katsayısı $\underline{d}$ hata akımlarına bir genlik değişikliği ve φ açısı kadar bir dönme verir. Hata akımı analizi yönteminde kırık çubuk akımının, diğer çubuklara sönümleme katsayısı oranında, geometrik biçimde azalarak sönümlendiği varsayılır. Basitlik bakımından hesaplamalarda yalnız çubuk direnci dikkate alınırsa sönümleme katsayısı, faz açısı ve $\underline{A}$ impedans oranı,

$$\underline{d} = \left(\frac{\cos \theta}{1 + \sin \theta} \right) \cdot e^{-j\theta} \quad (4.12)$$

$$\cos \theta = -\frac{\underline{A}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\underline{A}}{2} \right)^2 + 1} \quad (4.13)$$

$$\underline{A} = j \frac{s}{2} \cdot \frac{X_z}{R_{si}} \quad (4.14)$$

biçiminde elde edilir.



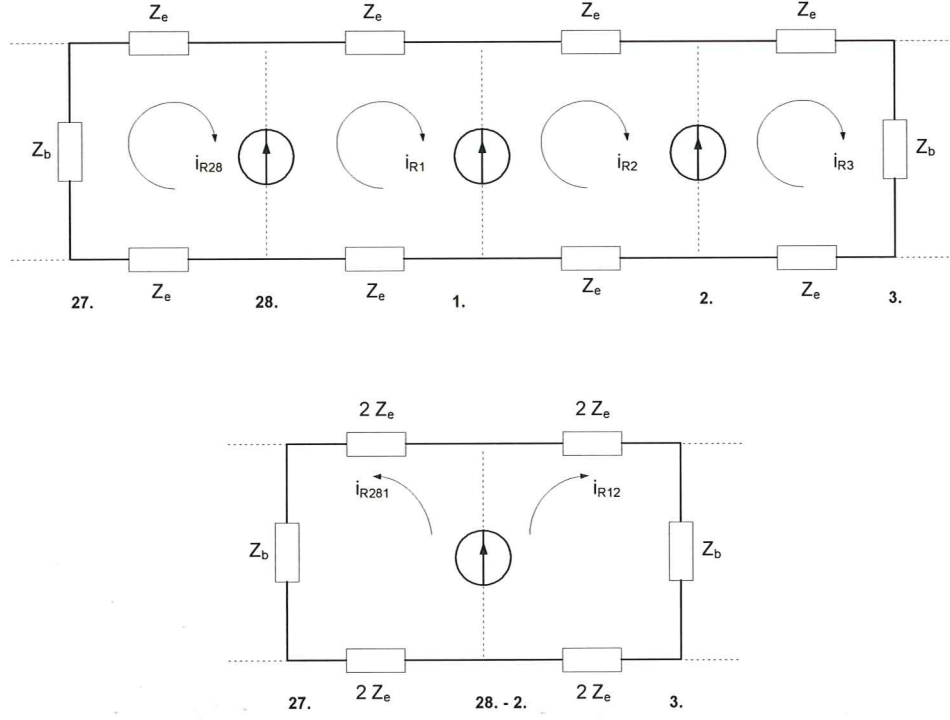
Şekil 4.4 : Ardışık iki kırık için rotorun hata akım analiz modelleri, **a)** ayrıntılı, **b)** basitleştirilmiş devreler.

Bu çalışmada, bir kırık arızasının yanı sıra, ardışık iki çubuk ve ardışık üç çubuk arızaları da incelenmiştir. Şekil 4.4 de iki çubuk arızasında hata akım analizinde kullanılan eşdeğer model verilmektedir.

Buna göre oranlanmış dağılım impedans matrisi,

$$\begin{bmatrix}
 2(1 + \frac{3}{2}A) - 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & -1 \\
 -1 & 2(1 + \frac{3}{2}A) & -1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\
 0 & -1 & 2(1 + \frac{3}{2}A) & -1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & -1 & 2(1 + \frac{3}{2}A) & -1 \\
 -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -1 & 2(1 + \frac{3}{2}A)
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 \underline{I}_{R1,2} \\
 \underline{I}_{R3} \\
 \underline{I}_{R4} \\
 \underline{I}_{R5} \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \underline{I}_{R26} \\
 \underline{I}_{R27} \\
 \underline{I}_{R28,1}
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 U/Z_1 \\
 U/Z_2 \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 U/Z_N
 \end{bmatrix}
 \quad (4.15)$$

biçiminde elde edilir.



Şekil 4.5 : Ardışık üç kırık için rotorun hata akım analiz modelleri, a) ayrıntılı, b) basitleştirilmiş devreler.

Ardışık üç kırık arızası için de Şekil 4.5 de verilen devre kullanılarak, hata akımlarının dağılımı yapılmıştır. Oranlanmış impedans matrisi

$$\begin{bmatrix}
 2(1+2A)-1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & -1 \\
 -1 & 2(1+2A) & -1 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\
 0 & -1 & 2(1+2A) & -1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & -1 & 2(1+2A) & -1 \\
 -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & -1 & 2(1+2A)
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 \underline{I}_{R1,2} \\
 \underline{I}_{R2} \\
 \underline{I}_{R3} \\
 \vdots \\
 \underline{I}_{R26} \\
 \underline{I}_{R27,28}
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 U/Z_1 \\
 U/Z_2 \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 U/Z_1
 \end{bmatrix}
 \quad (4.16)$$

biçimindedir. Her üç durum için hesaplanan arıza akımları ve sönümlenme oran katsayıları 6. Bölümde verilmektedir.

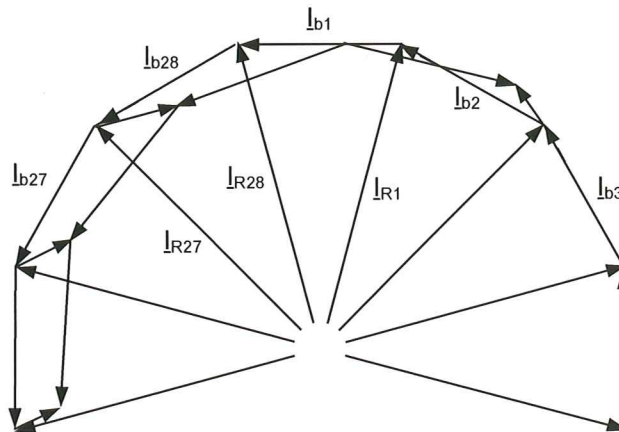
4.2. Rotor Akım Dağılımı

Sağlam rotorda inceleme yapılan s kayma değeri için, kafes çubuklarının ve çubuklar arasındaki kısa devre parçalarının sürekli hal akım değerleri bilinmektedir. Yalnız temel bileşen dikkate alındığında, yapımsal simetrikli durum için bu akımlar N tane gözü olan düzgün bir çokgen, akım yıldızı, oluşturur, Şekil 3.3. Bu çokgende N rotor oluk sayısını, p çift kutup sayısının belirtmek üzere, $N/2$ tane ışın vardır.

Arızalı durumda, kırık çubuk akımlarının diğer çubuklara dağılımı, hata akımı analiz yöntemiyle, d sönümlenme katsayısına bağlı olarak hesaplanır. Böylelikle yalnızca arızalı çubuğun etkisi incelenir.

Arızalı motorun rotor akımları, üst üste bindirme ilkesine dayanarak, sağlam durumdaki rotor akım fazörleri ile, hata akımı fazörlerinin akım yıldızı üzerinde vektörel olarak toplanması ile bulunur. Hatalı çubuktan uzaklaştıkça, akım hatasız haline yaklaşmaktadır. Arıza noktasına eşit uzaklıktaki çubuk akımlarının genlikleri ve faz açıları birbirine eşittir.

Şekil 4.6 dan görüldüğü gibi hata akım fazörleri negatif sistem bileşeni olarak düşünülebilir. Ardışık iki kırıkta hata akımı, bir çubuk akımının yaklaşık iki katı olarak düşünülebilir. Gerçekte vektörel olması gereken toplam, faz farkının küçük olması nedeniyle aritmetik yapılabilir.



Şekil 4.6 : Sağlam motor akımı ile hata akımlarının vektörel olarak toplanması.

4.3. Hata Akımlarının Yarattığı Magnetik Alan

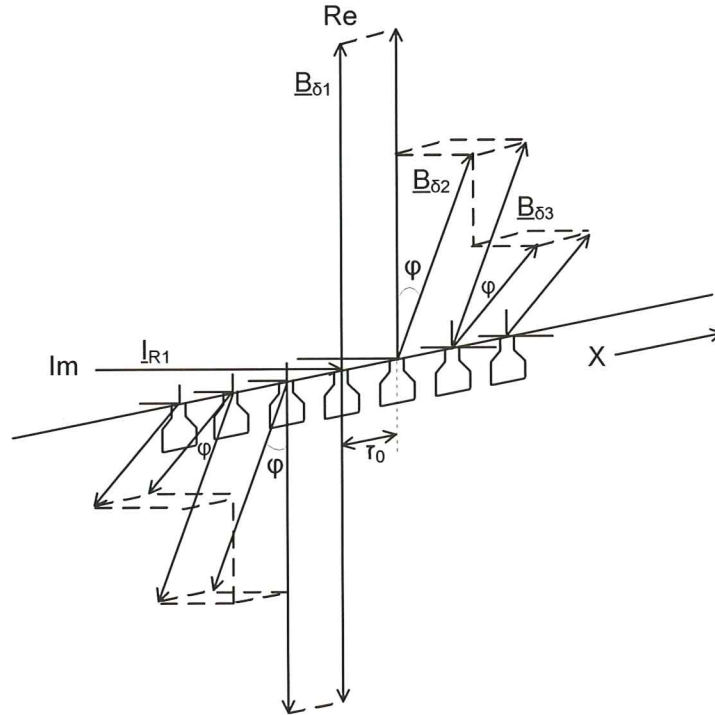
Rotor çubuklarından akan hata akımları, stator boyunduruğundan halkalanarak bir magnetik akı ve akı yoğunluğu oluşturur. Bu akı yoğunluğu dalgası rotor kayma frekansındadır. Diğer çubuklarda oluşan hata akımlarının başlangıç dalgasının genliği

$$B_g = \mu_0 \cdot \frac{I_R}{g} \quad (4.17)$$

denklemi ile hesaplanır. Magnetik akı yoğunluğu dalgasının, aynı çubuk akımlarında ve devre akımlarında olduğu gibi, hatalı çubuktan uzaklaştıkça d sönümleme katsayısına bağlı olarak hem genliği azalır, hem de makine uzayındaki konumu değişir. Hatalı çubuğa i . uzaklıktaki çubuğun akı yoğunluğu

$$B_{gi} = B_g \cdot d^{(i-1)} \quad (4.18)$$

denklemi ile hesaplanır. Şekil 4.7 de rotor çubuklarında hata akımlarının oluşturduğu, akı yoğunluklarının uzaydaki konumu ve genliği verilmektedir.



Şekil 4.7 : Hata akımlarının oluşturduğu akı yoğunluklarının dağılımı.

Hata akımlarının oluşturduğu boyunduruk akısı, dış akı dağılımlarının toplamından oluşur. Bu akının büyüklüğü denklem (4.19) ile hesaplanır.

$$\underline{\Phi} = \sum_{n=1}^{\infty} B_{\delta_n} \cdot \ell \cdot b_z = B_{\delta_1} \cdot \ell \cdot b_z \cdot \left(\frac{1}{1-\underline{d}} \right) \quad (4.19a)$$

$$\underline{\Phi} = \Phi_z \cdot \left(\frac{1}{1-\underline{d}} \right) \quad (4.19b)$$

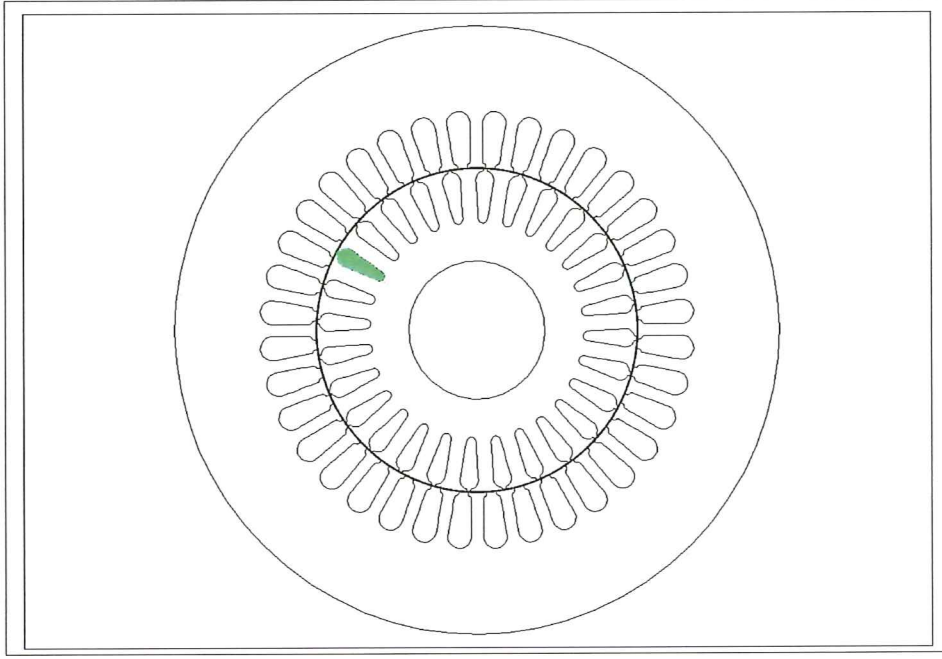
Bu biçimde kırık çubuk merkezli her iki yana sönümlenerek ilerleyen alan dalgası oluşur.

5. MAGNETİK ANALİZ SONUÇLARI

Günümüzde elektrik makinelerinin tasarımında ve analizinde Sonlu Elemanlar Yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu bölümde kafes çubuk arızalarının asenkron motorun işletme davranışına ve hava aralığı akısına olan etkisini incelemek için yapılan teorik ve deneysel çalışmalar, magnetik analizlerle desteklenmektedir. Magnetik analizlerde FLUX 2D hazır yazılım programı kullanılmıştır. Yapılan analizlerin gerçeğe yakınlığı, sınır koşullarına, motor geometrisinin doğru tanımlanmasına ve stator ile rotorun indüktans ve direnç değerlerine bağlıdır. Bu nedenle öncelikle yazılımın sınır koşullarını ve değişken katsayılarını belirlemek için analitik bir programdan yararlanılmıştır. SPEED hazır yazılımı kullanılarak örnek alınan motorun işletme büyüklüklerini sağlayacak biçimde bu değişkenler belirlenmiştir. Magnetik analizlerle sağlam bir kafes çubuğu, ardışık iki kafes çubuğu, ardışık üç kafes çubuğu ve ardışık dört kafes çubuğu arızalı olan motorlar incelenmiştir. Ayrıca sanayi uygulamalarında pek sık görülmemesine karşın rastgele iki çubuk arızası ve simetrik olan iki çubuk arızası da incelenmektedir. Bu analizlerle stator ve rotor akım değerlerinin yanı sıra, hava aralığı magnetik akı yoğunluğu ve bileşenleri gibi ölçülmesi çok zor olan büyüklükler hesaplanmıştır.

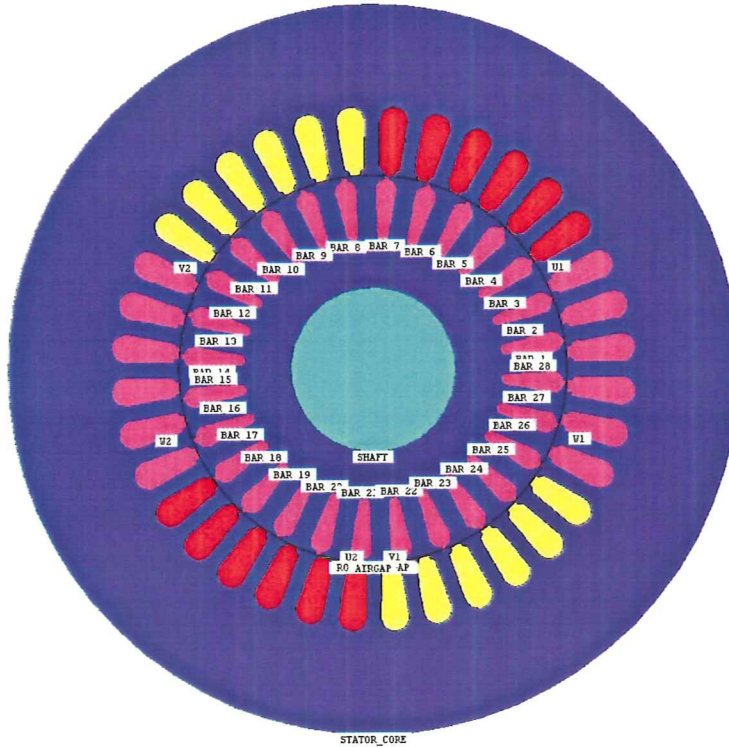
5.1 Flux 2D için Asenkron Motorun FEM Modelinin Kurulması

Modelin kurulabilmesi için öncelikli olarak, makine geometrisinin ayrıntılı biçimde çizilmesi gerekir. Şekil 5.1 de deneysel ve teorik çalışmalarda kullanılan ARÇELİK Motor İşletmeleri A.Ş. de üretilen QS100L2A tipi, iki kutuplu kafesli asenkron motorun tasarım geometrisi verilmektedir.

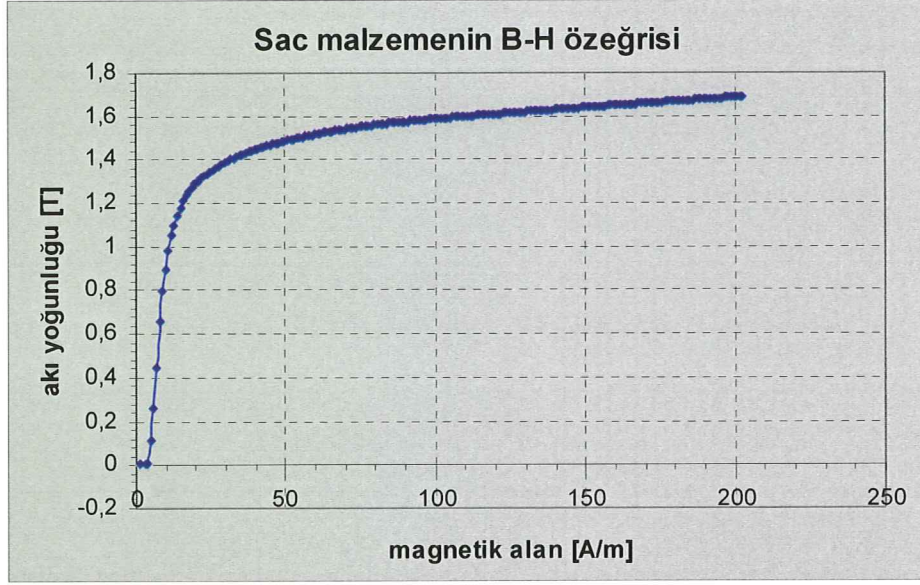


Şekil 5.1 : Kafesli asenkron motorun tasarım geometrisi.

İkinci aşamada, bu geometri üzerindeki bölgeler, yapımsal malzemelerine göre numaralandırılarak isimlendirilir. Ardından bu parçaların malzeme özellikleri tanımlanır (Şekil 5.2). Örnek olması bakımından motorun sac paketinde kullanılan malzemenin B-H eğrisi Şekil 5.3 de verilmiştir.



Şekil 5.2 : Makine geometrisinin malzeme özelliklerine göre sınıflandırılması.



Şekil 5.3 : Magnetik malzemenin histerezis özeğrisi.

Üçüncü aşamada, analiz yöntemi, sürekli hal veya geçici hal belirlenerek başlangıç değerleri verilir. Analiz iki boyutlu yapıldığından statorun paket boyu ve rotor kısa devre segmanının direnç ve indüktans değerleri mutlaka girilmelidir. Şekil 5.4 , Şekil 5.5 ve Şekil 5.6 da sınır değerlerin girildiği soru ekranı verilmiştir.

The screenshot shows the "Edit Mechanical set[ROTOR]" dialog box. The "Mechanical set name" field contains "ROTOR". The "Comment" field also contains "ROTOR". The "Type of mechanical set" is set to "Rotation around one axis". Under "Axis \ Kinematics \", the "Type of kinematics" is set to "Coupled load". The "General \ Internal characteristics \ External characteristics \ Mechanical stops \ " section contains two input fields: "Velocity at time t= 0s (rpm) *" with the value "2885" and "Position at time t= 0s. (deg) *" with the value "0". The "Mechanical set sub-system" is set to "MECHANICAL_SYSTEM_1". At the bottom, there are buttons for "OK", "Apply", "Cancel", and a help icon.

Şekil 5.4 : Rotor konumunun ve hızın başlangıç değerleri ekranı.

Edit Squirrel cage[Q1]

Squirrel cage name *
Q1

Comment

Model \ Evaluated information \

Number of bars *
25

Resistance of the portion of end rings between two adjacent bars (Ohm) *
(4.559E-6/10)*3 r0

Inductance of the portion of end rings between two adjacent bars (Henry) *
1.13367E-9 r0

OK Apply Cancel Detail >>

Şekil 5.5 : Rotor kısa devre segmanının direnç ve indüktans değerleri.

Edit Mechanical set[ROTOR]

Mechanical set name *
ROTOR

Comment
ROTOR

Type of mechanical set
Rotation around one axis

Axis \ Kinematics \

Type of kinematics
Coupled load

General \ Internal characteristics \ External characteristics \ Mechanical stops \

Type of load
Inertia, friction coefficients and spring

Moment of inertia (kg.m2) *
0.00241 r0

Friction

Constant friction coefficient (N.m) *
0.2165 r0

Viscous friction coefficient (proportional to speed) (N.m.s/degree) *
0 r0

Spring

☐ Spring

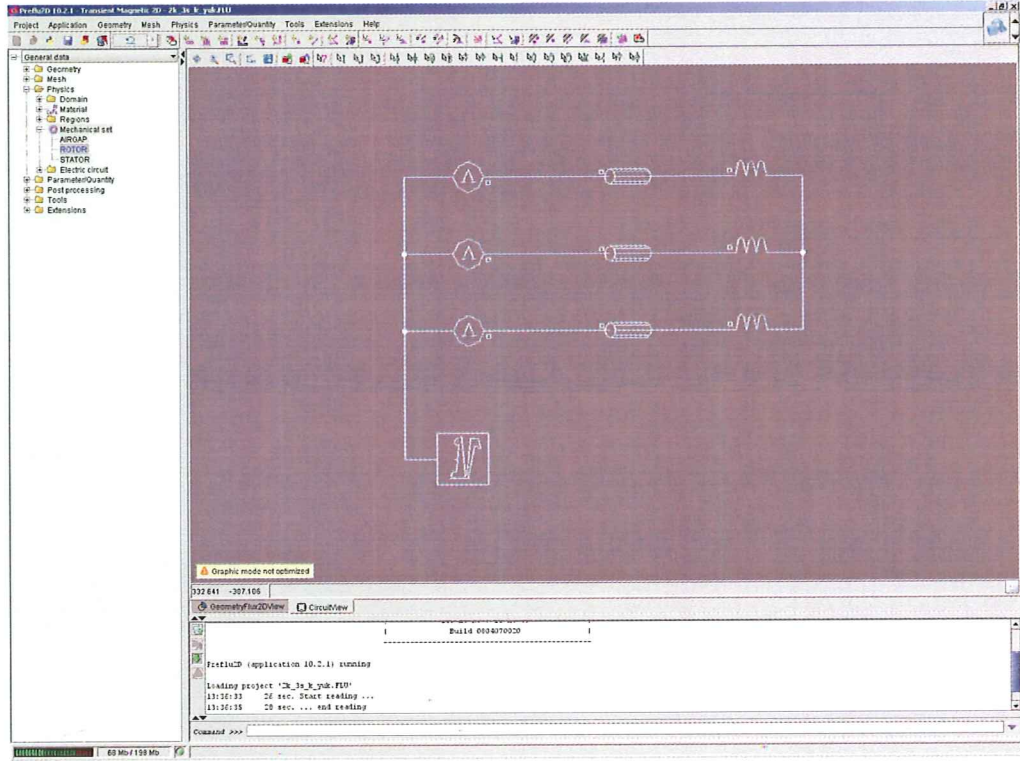
Spring constant (N.m/degree) *
r0

Initial stretching/compression of the spring /position at rest (degree) *
r0

Mechanical set sub-system
MECHANICAL_SYSTEM_1

OK Apply Cancel

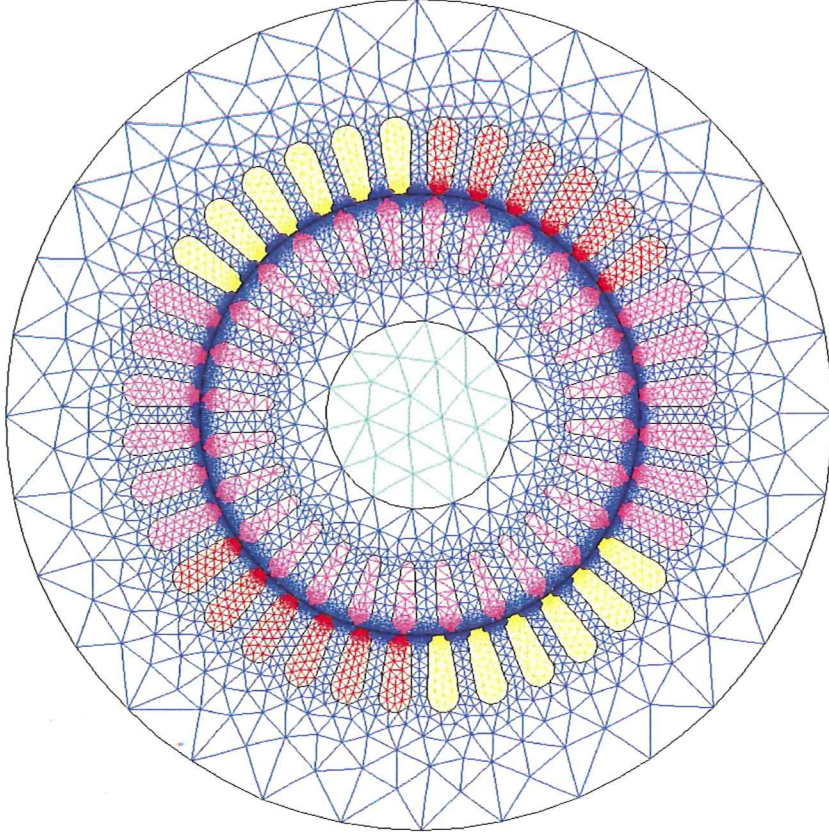
Şekil 5.6 : Magnetik analiz için mekanik sabitlerin değerleri.



Şekil 5.7 : Motorun elektriksel devre bağlaması.

Dördüncü aşamada, elektriksel devrenin modellenmesi için başka bir programda devre şeması çizilir ve bu devre makine geometrisi ile eşleştirilerek fazlar tanımlanır (Şekil 5.7).

Bu aşamadan sonra istenen çözüm duyarlılığına göre makine geometrisine bir ağ tanımlanır. Şekil 5.8 de yapılan analizlerde kullanılan ağlanmış makine geometrisi verilmektedir. Bu tanımlama ile FEM modeli tamamlanır. Örnekleme zamanı ve iterasyon sayısı belirlenerek çözüme başlanır. Bu çalışmada analiz süresini hızlandırmak için başlangıç hızı olarak 2800 dev/dak alınmıştır. Yalnız birkaç analizde kalkışta oluşan geçici olaylar incelenmiştir. Anma işletmesinde oluşan rotor arızalarının, motor işletme büyüklüklerinde oluşturduğu değişiklikler geçici olay olarak incelenmiştir.



Şekil 5.8 : Magnetik analiz için bölmelenmiş makine geometrisi.

FEM analizi elde edilen sonuçların doğruluğu başlangıç değerlerine ve kullanılan malzemelerin özelliklerinin doğru tanımlanmasına bağlıdır.

5.2. Asenkron Motorun FEM Modelinin Doğruluğunun Denetlenmesi

Sonlu elemanlar yöntemi için kurulan model ile pek çok kafes arızasının magnetik analizi yapılacağından, doğruluğundan emin olunması gerekir. Bu bağlamda öncelikle kafes arızası olmayan sağlam bir motorun işletme büyüklüklerini, bir yazılım programı ile hesaplanan işletme büyüklükleri ile karşılaştırılmak gerekir. Böylelikle modelde kullanılan devre elemanlarının değerleri doğrulanmış olur. Bu çalışmada hazır yazılım olarak SPEED kullanılmıştır. Ardından FEM modeli ile bulunan işletme büyüklükleri deneysel verilerle karşılaştırılır.

Bu amaçla tez çalışmasında kullanılan motor ile yapılan deney sonuçları, SPEED ve Flux 2D ile hesaplanan işletme büyüklükleri Çizelge 5.1 de verilmektedir. Deneyler pek çok gerilim değeri ve rotor arızası için tekrarlanmıştır. Burada deneylerden

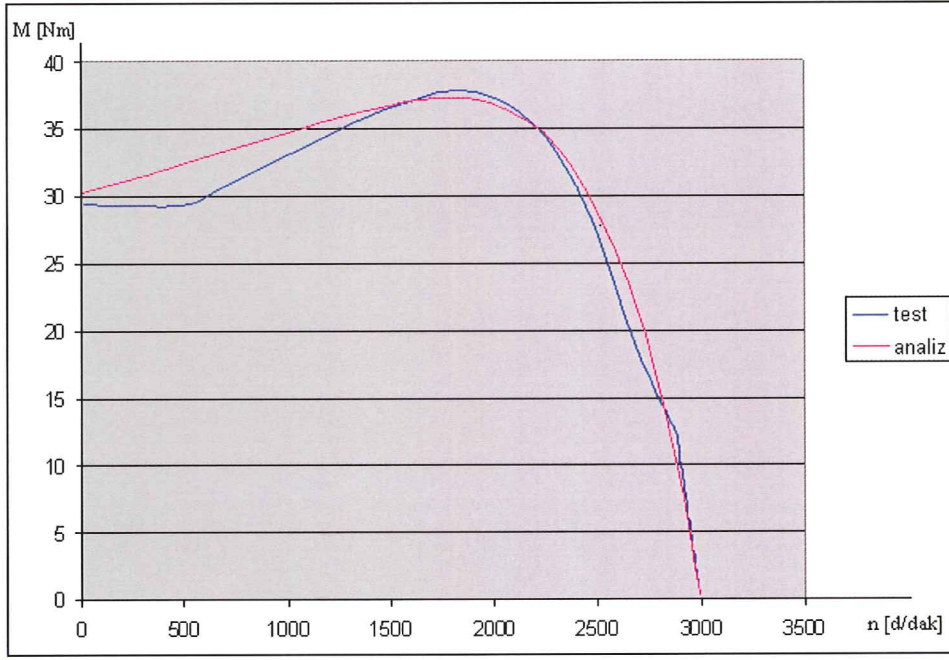
yalnızca üç tanesi verilmektedir. Deneysel çalışmalara ilişkin ayrıntılı açıklamalar ve bütün sonuçlar 6. Bölüm de verilecektir.

Çizelge 5.1 : Örnek alınan motorun çeşitli işletme büyüklüklerinin katalog, deney ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması.

İşletme Büyüklükleri	Katalog değerleri	1. deney sonuçları	2. deney sonuçları	3. deney sonuçları	Analiz sonuçları	
Mil gücü [kW]	3	3,007	3,014	3,022	2,999	
Devir hızı [d/dak]	2890	2898	2905	2912	2876	
Besleme gerilimi [V]	400	400	400	400	400	
Motor akımı [A]	6,1	6,01	6,14	6,11	5,84	
Mil momenti [Nm]	9,91	9,91	9,91	9,91	9,96	
Güç katsayısı [1]	0,88	0,86	0,89	0,85	0,93	
Verim [1]	0,83	0,828	0,825	0,828	0,8378	

Çizelgede verilen işletme büyüklerinin yanı sıra motor moment özgeğrilerinden de modelin doğruluğu denetlenir. Şekil 5.9 da moment özgeğrileri karşılaştırmalı olarak verilmektedir. Bu özgeğrilerden görüldüğü gibi deneysel sonuçlar ile hesaplanan değerler arasında semer bölgesi dışında büyük oranda eşlik vardır. Yapılan magnetik analizde ve dinamik incelemede yalnız hava aralığı akısının temel bileşeni dikkate alındığından, semer momentinin hesaplanamaması son derece doğaldır. Bu nedenle kurulan FEM modeli semerleşme bölgesi dışında yeterli doğruluktadır. Kafesi arızalı motorların işletme davranışları ve magnetik büyüklükleri bu model ile incelenebilir. Gerçekte, inceleme kalkış ve anma işletmesinde yoğunlaşacağı için semer bölgesindeki farklılığın analizin yeterliliği açısından bir önemi yoktur.

Ayrıca, SPEED ve Flux 2D modelleri yeterli doğrulukta olduğundan, bu programlarla hesaplanan indüktans ve direnç değerleri 3. Bölümde anlatılan dinamik model denklemlerinde kullanılabilir. Bu değerler 6. Bölümde verilmektedir.



Şekil 5.9 : Deneysel ve analizle bulunan motor momentinin devir hızı ile değişim özeğrileri.

5.3. Asenkron Motorda Kafes Arızalarının Magnetik Analizleri

Kafesi arızalı motorların yükte anma işletmesi için Flux 2D ile yapılan analizlerinde magnetik bakımdan,

- hava aralığı akı yoğunluğunun ve bileşenlerinin rotor konumuna göre, yani rotor çevresi boyunca, değişimi ve bu değişimin üst-titreşimleri,
- makine geometrisinde oluşan akı dağılım çizgileri,
- makine geometrisinde akı yoğunluğunun değişimi,
- stator boyunduruğunun belli bir noktasında, konum sabit, bir peryot için akı yoğunluğunun ve bileşenlerinin zamanla değişimi ve üst-titreşimleri,
- hava aralığı akı yoğunluğunun ve bileşenlerinin bir peryot için konuma ve zamana bağlı üç boyutlu değişimi

incelenmiştir.

Yine aynı analiz sonuçları ile, işletme ve motorun elektriksel büyüklükleri bakımından,

- stator besleme gerilimi,
- motor akımının zamanla değişimi,
- incelenen rotor arıza türüne göre çeşitli rotor çubuk akımlarının zamanla değişimi,

- kalkıştan, anma hızına kadar stator akımının kayma ile değişimi,
- magnetik analiz boyunca, hızın zamanla değişimi,
- kalkıştan anma işletmesine kadar mil momentinin kayma ile değişimi

incelenmiştir.

Literatürde kafes arızasının, motor momentinin ve akımının kayma ile değişimine etkilerini inceleyen bir çalışma yoktur.

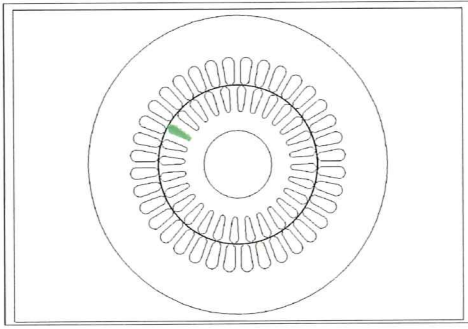
Magnetik analizler,

- sağlam makine için,
- bir kafes çubuğu arızası için,
- ardışık iki kafes çubuğu arızası için,
- ardışık üç kafes çubuğu arızası için,
- ardışık dört çubuğu arızası için,
- herhangi, arasında üç sağlam çubuk bulunan, iki kafes çubuğu arızası için,
- magnetik bakımdan simetrik iki kafes çubuğu arızası için,

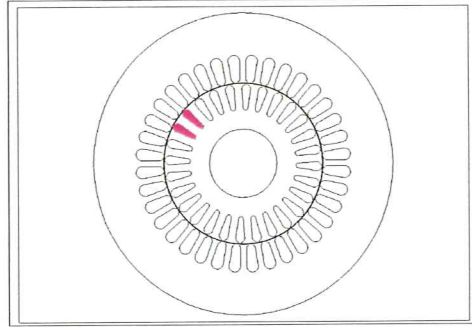
yapılmıştır. Sağlam makine, rastgele iki arızası olan makine ve simetrik arızalı makine için, iki farklı işletme zamanı için analiz sonuçları alınmıştır. Tüm incelemelerde, magnetik ve elektriksel sonuçların stator ile rotor aynı konumda iken alınmasına özen gösterilmiştir. Ancak ardışık dört kırık arızasında çok az, sağlam, rastgele kırık ve simetrik kırık arızalarının birer tanesinde çok belirgin konumlama hataları yapılmıştır. Şekil 5.10 da makine geometrisi içinde arızalı çubukların konumu gösterilmektedir. Bir kafes arızasında renkli olan oluk, magnetik tanımlamada 28. rotor çubuğu olarak alınmıştır. Rotor çubukları saatin dönüş yönünde numaralanmıştır. Ayrıca Şekil 5.11 de magnetik analiz aşamasında bir sorgu ekranı verilmiştir. Resimde makine üzerinde işaretli olan yer stator akı yoğunluğunun zamana göre değişiminin incelendiği noktadır.

Rotor kafes çubuğu arızaları kalkış sırasında veya normal işletmede aşırı zorlanmalar sonucu oluşmaktadır. Bu çalışmada anma işletmesinde oluşan arızaların etkisi incelenmektedir. Ayrıca, anma yükünde sabit bir devir hızında çalışan sağlam bir motorun, sürekli haldeki işletme ve magnetik değerleri, bir kafes çubuğu arızalı makine için başlangıç değeri olarak kullanılarak, dinamik bir inceleme yapılmıştır. Aynı inceleme önce bir çubuğu arızalı motorun üç çubuk arızasına geçişi için yinelenmiştir. Böylelikle, kararlı işletme durumunda oluşan bir kafes arızasının akım,

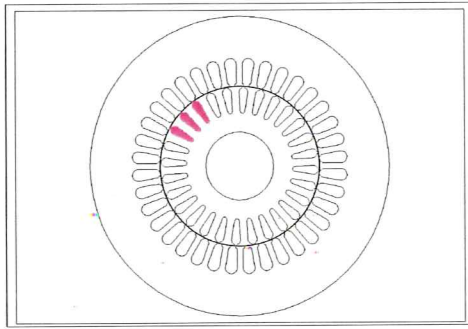
devir hızı, mil momentı gibi, işletme büyüklüklerinde yarattığı geçici değışiklikler incelenmiştir. Böyle bir inceleme literatürde yoktur.



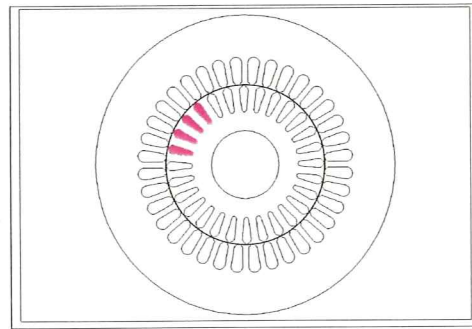
a)



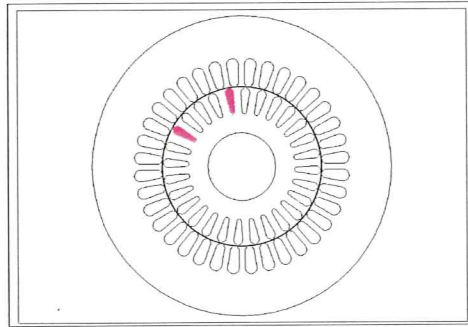
b)



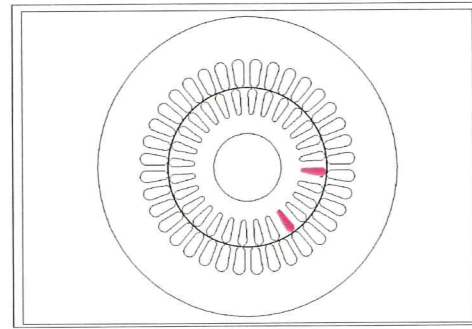
c)



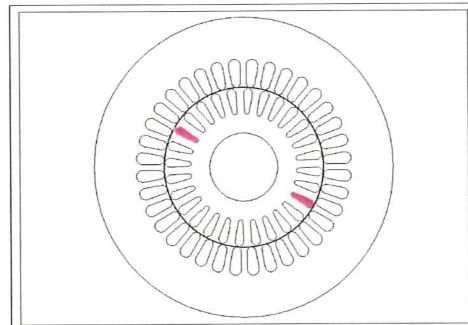
d)



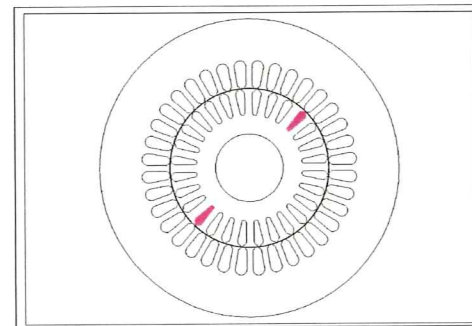
e)



f)

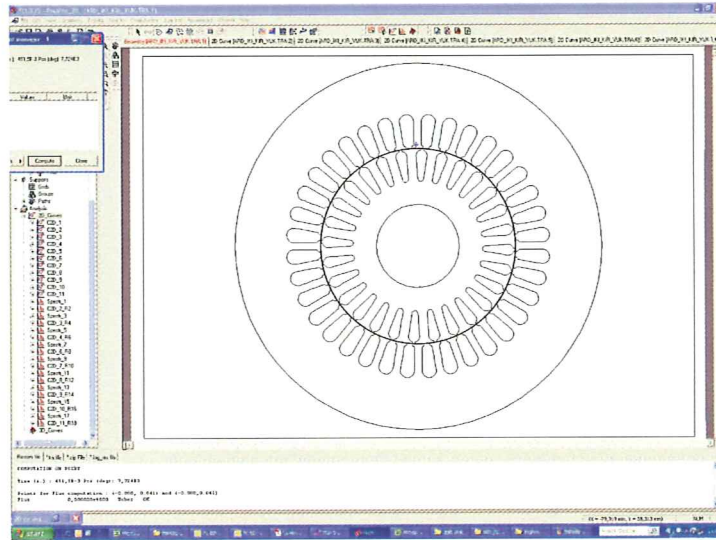


g)



h)

Şekil 5.10 : Makine geometrisinde arızalı rotor çubuklarının gösterilmesi,
a) Bir çubuk arızası, b) iki çubuk arızası, c) üç çubuk arızası,
d) dört çubuk arızası, e,f) rast gele iki çubuk arızası,
g,h) simetrik iki çubuk arızası.



Şekil 5.11 : Magnetik analizde bir sorgu ekranı.

5.3.1. Magnetik akı ve magnetik akı yoğunluğunun değişimi

Daha önce birkaç kere vurgulandığı gibi rotor kafesinde oluşan arızalar sonucu magnetik bakımdan en temel değişim akı dağılımında ve hava aralığı akı yoğunluğunda oluşur. Bu nedenle asenkron makinede rotor arızalarının saptanmasına yönelik bütün çalışmalar doğrudan veya dolaylı olarak magnetik akının ve/veya hava aralığı akı yoğunluğun değişimine ve harmonik dağılımına dayanır. Kafes arızasının motorun işletme davranışına etkisinin incelenmesinde ise hava aralığı akı yoğunluğunun sürekli veya geçici haldeki negatif sistem bileşeninin büyüklüğü önem kazanır. Bu bağlamda, çalışmada anma işletmesi için dikkate alınan rotor çubuk arızalarında, magnetik akı ve akı yoğunluğunun makine geometrisindeki dağılımı ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Çizelge 5.2 de yapılan magnetik analizlerin temel değerler verilmektedir.

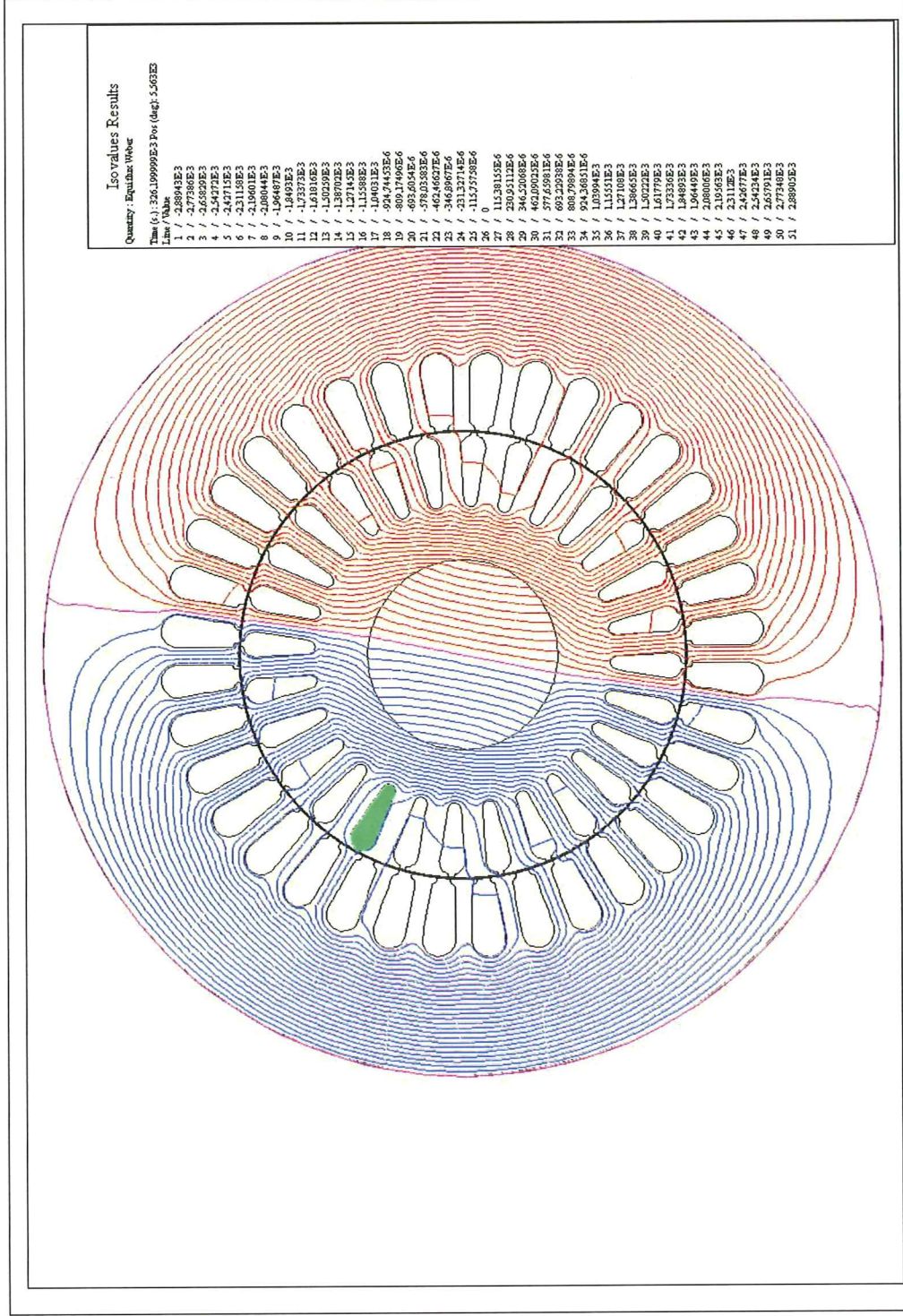
Çizelge 5.2 : Magnetik analizlerin yapıldığı temel değerler.

	Motor devir hızı [d/dak.]	Hava aralığı akı yoğunluğunun incelendiği zaman [ms]	Stator boyunduruğunda bir nokta ve üç boyutlu analizler için zaman aralığı [ms]
Sağlam 1. analiz	2892	330	310...330
Sağlam 2. analiz	2891,4	326,12	306,2...326,2
Bir kırık	2887,7	388,75	388,75...408,75
Ardışık iki kırık	2885,5	451,5	431,5...451,5
Ardışık üç kırık	2900,1	473,75	473,75...457,75
Ardışık dört kırık	2894,3	330	330...350
Rasgele iki kırık 1. analiz	2883,2	400	380...400
Rasgele iki kırık 2. analiz	2884	409,75	387,75...409,75
Simetrik iki kırık 2. analiz	2887	368,3	348,3...368,3

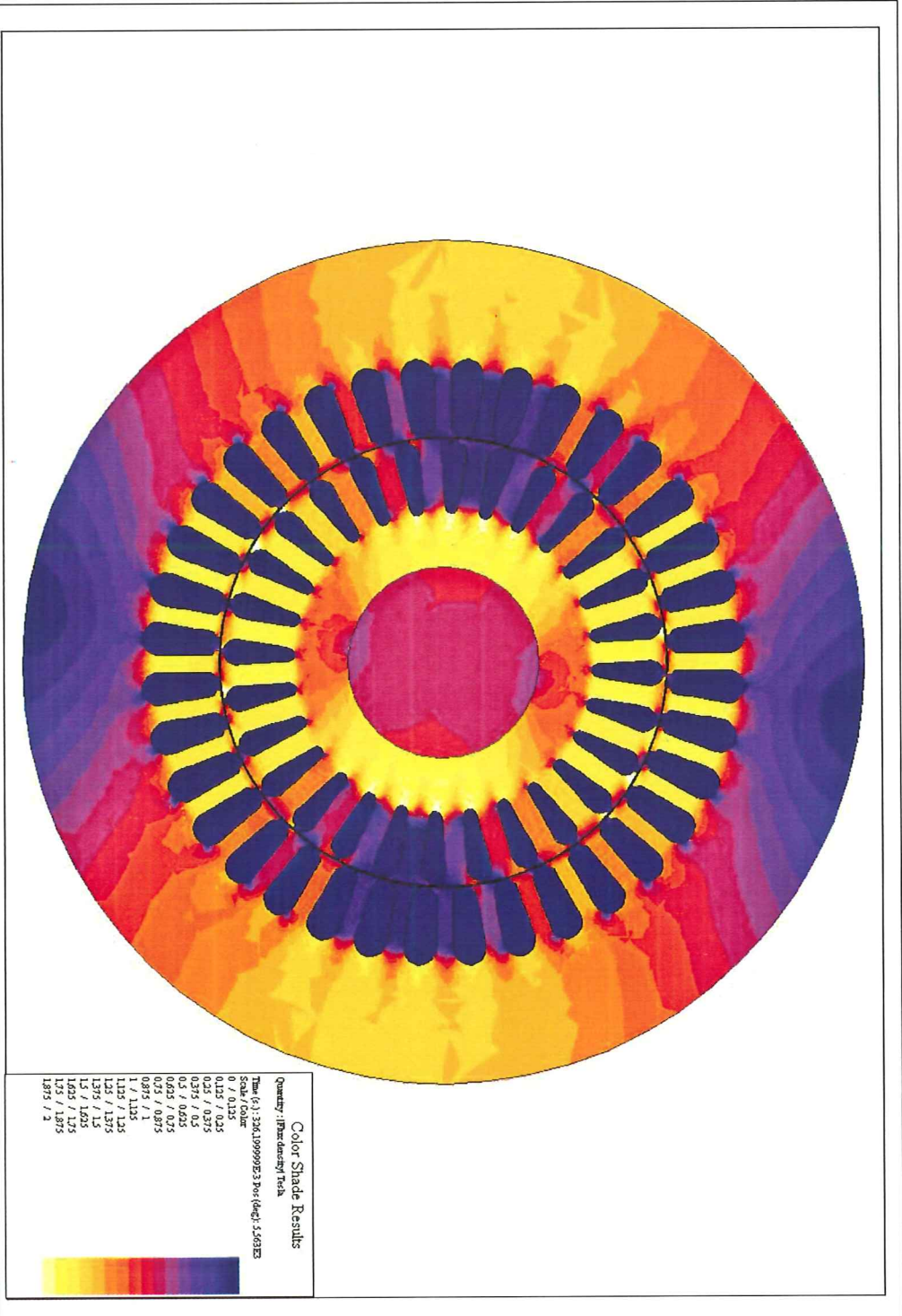
İncelenen bütün arızalar için Şekil 5.12 ile Şekil 5.27 arasında magnetik akı çizgilerinin makine geometrisindeki dağılımları ve magnetik akı yoğunluğunun mutlak değerinin büyüklüğüne göre makine geometrisinde renklendirilmiş dağılımı verilmektedir.

Yapılan çalışmada asenkron motorun sürekli hal işletme davranışı ve sürekli halde oluşan kafes arızaları ile ilgilenildiği için Magnetik analizlerde motor devir hızının ilk değeri 2800 d/dak. alınarak çalıştırılmıştır. Bu nedenle magnetik analizlerde kırık çubuklar için geometrik olarak doğru konumlama yapılmasına karşın magnetik bakımdan her analizde aynı konumlama sağlanamamıştır. Ancak bu, analiz sonuçlarını kendi aralarında karşılaştırmaya engel değildir. Her arızalı durum sağlam analiz ile kolaylıkla karşılaştırılmıştır.

Sağlam motor için 362,2. ms de elde edilen magnetik akı çizgileri ve akı yoğunluğu boyaması Şekil 5.12 de ve Şekil 5.13 de verilmektedir.

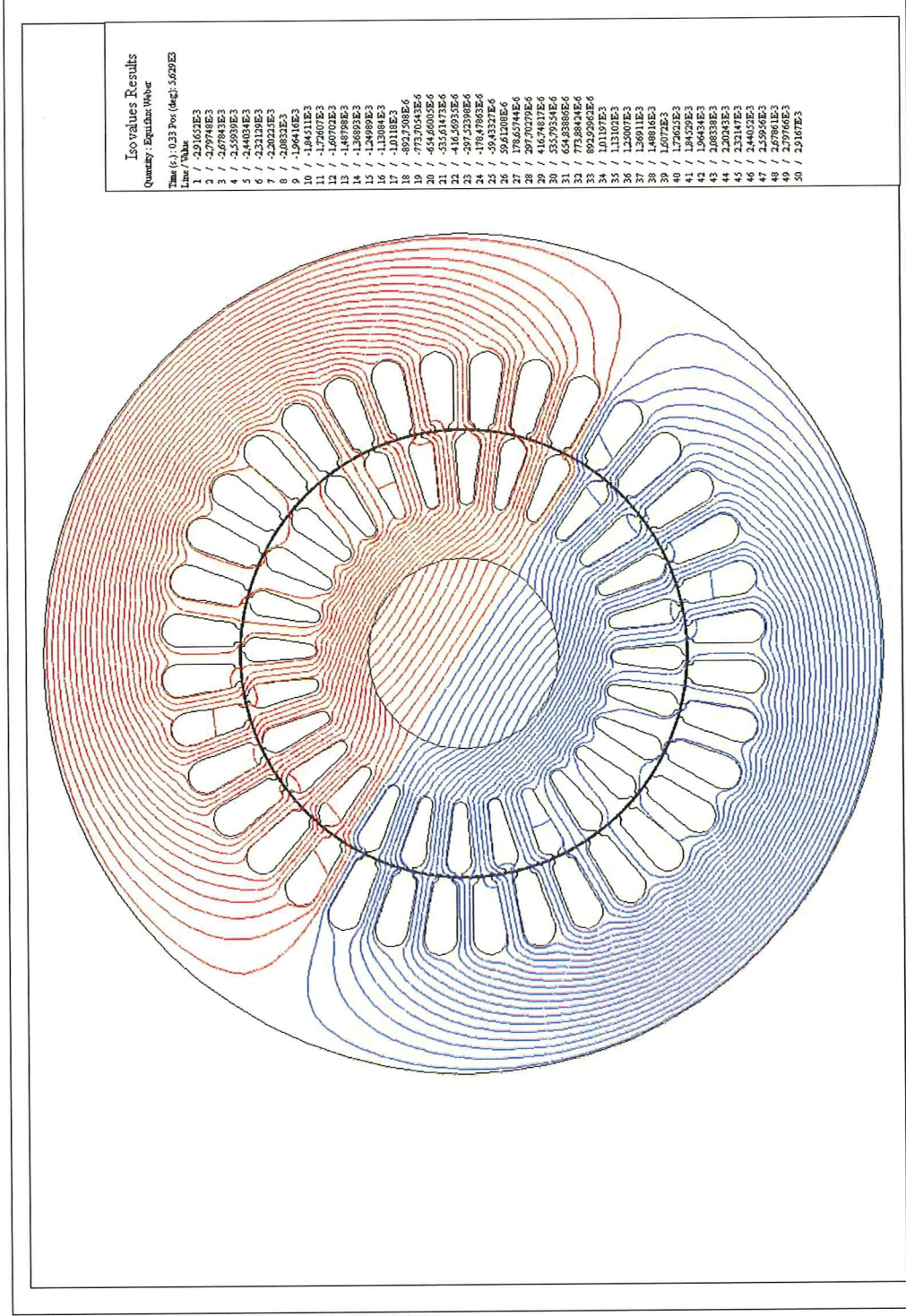


Şekil 5.12 : Sağlam rotorlu motorun magnetik akı dağılımı 326,2. ms.

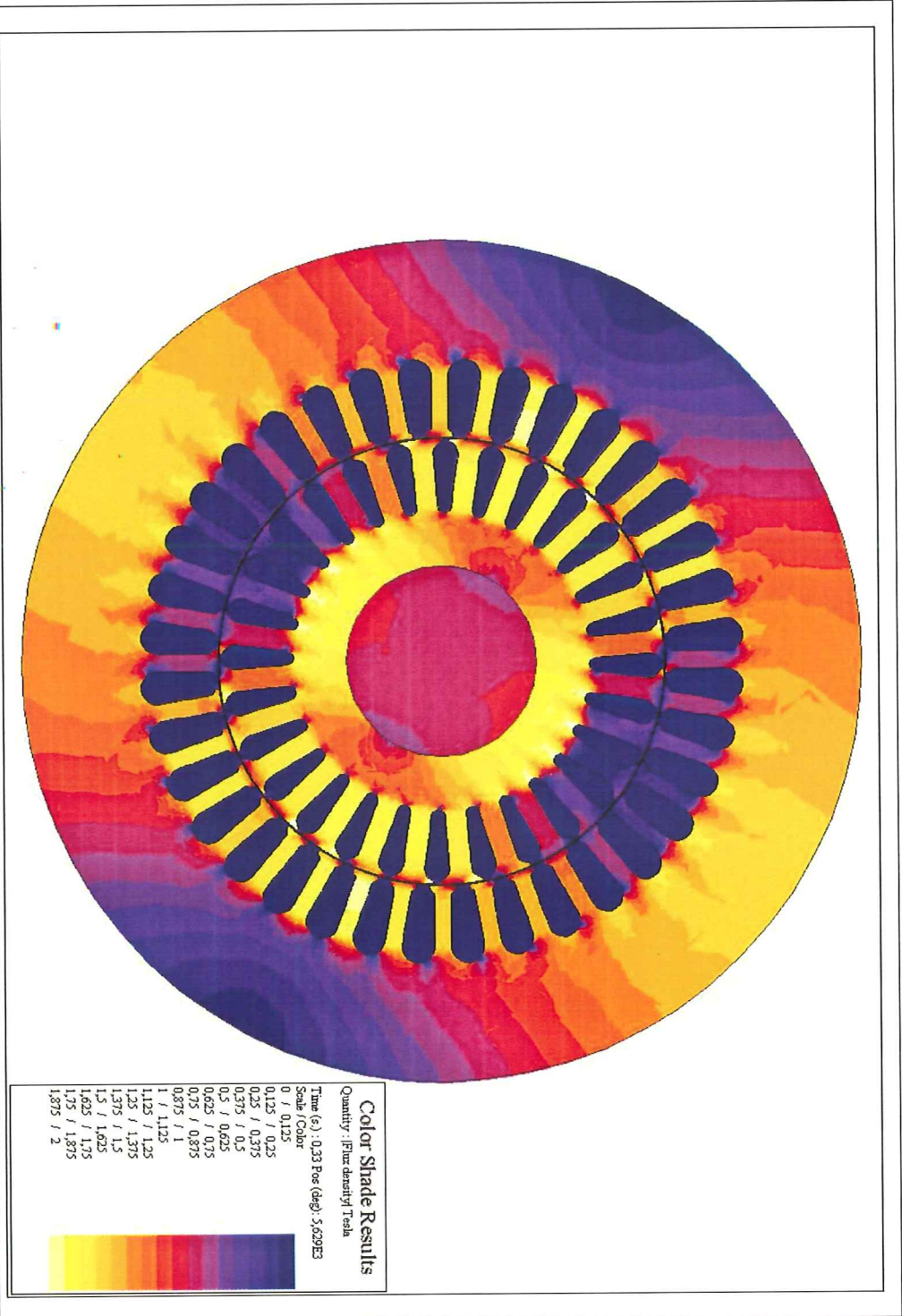


Şekil 5.13 : Sağlam rotorlu motorun magnetik akı yoğunluğu dağılımı 326,12. ms.

Sağlam motorda 330. ms için magnetik akı çizgileri ve akı yoğunluğu boyaması Şekil 5.14 ve Şekil 5.15 de verilmektedir.

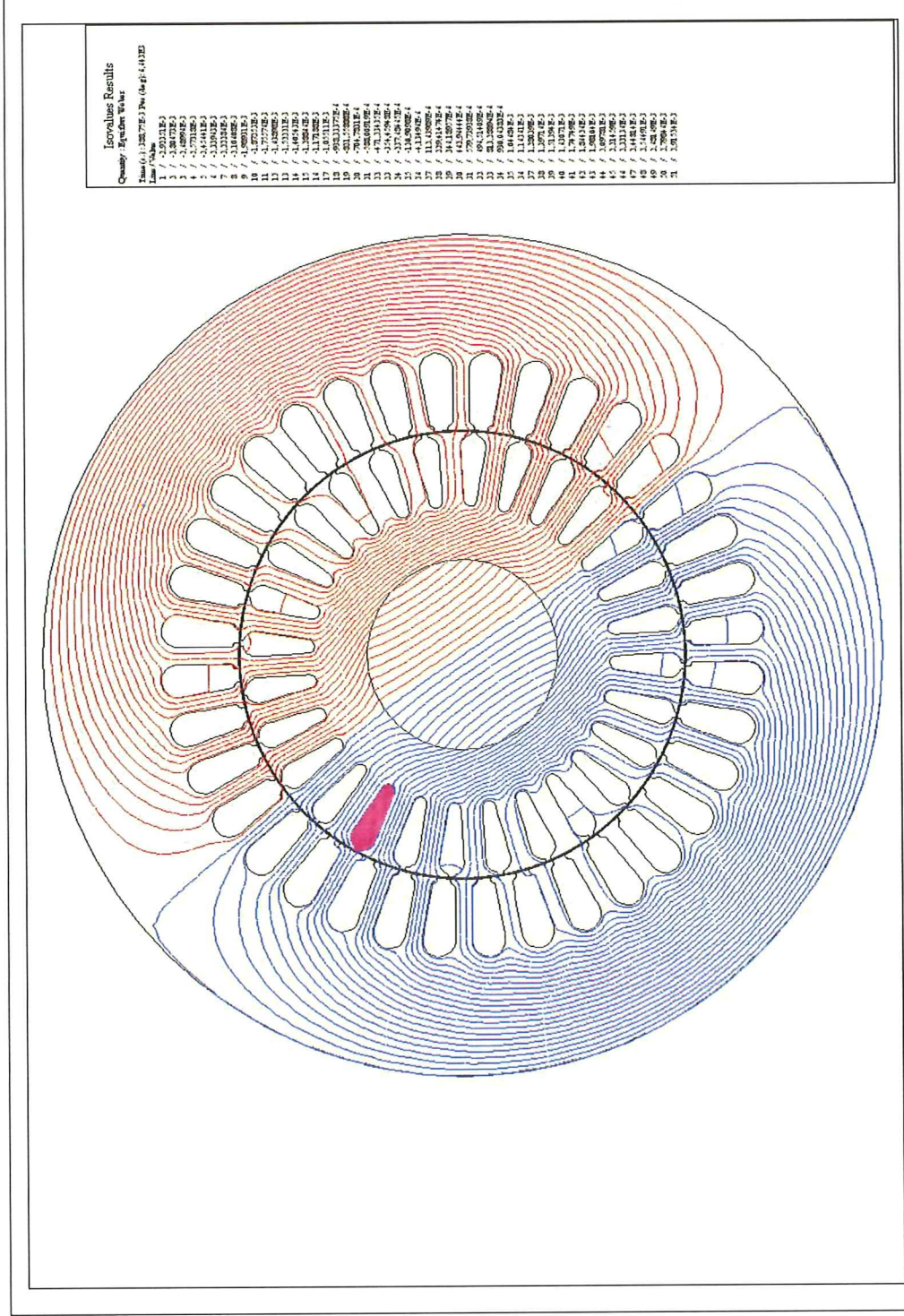


Şekil 5.14 : Sağlam rotorlu motorun magnetik akı dağılımı 330. ms.

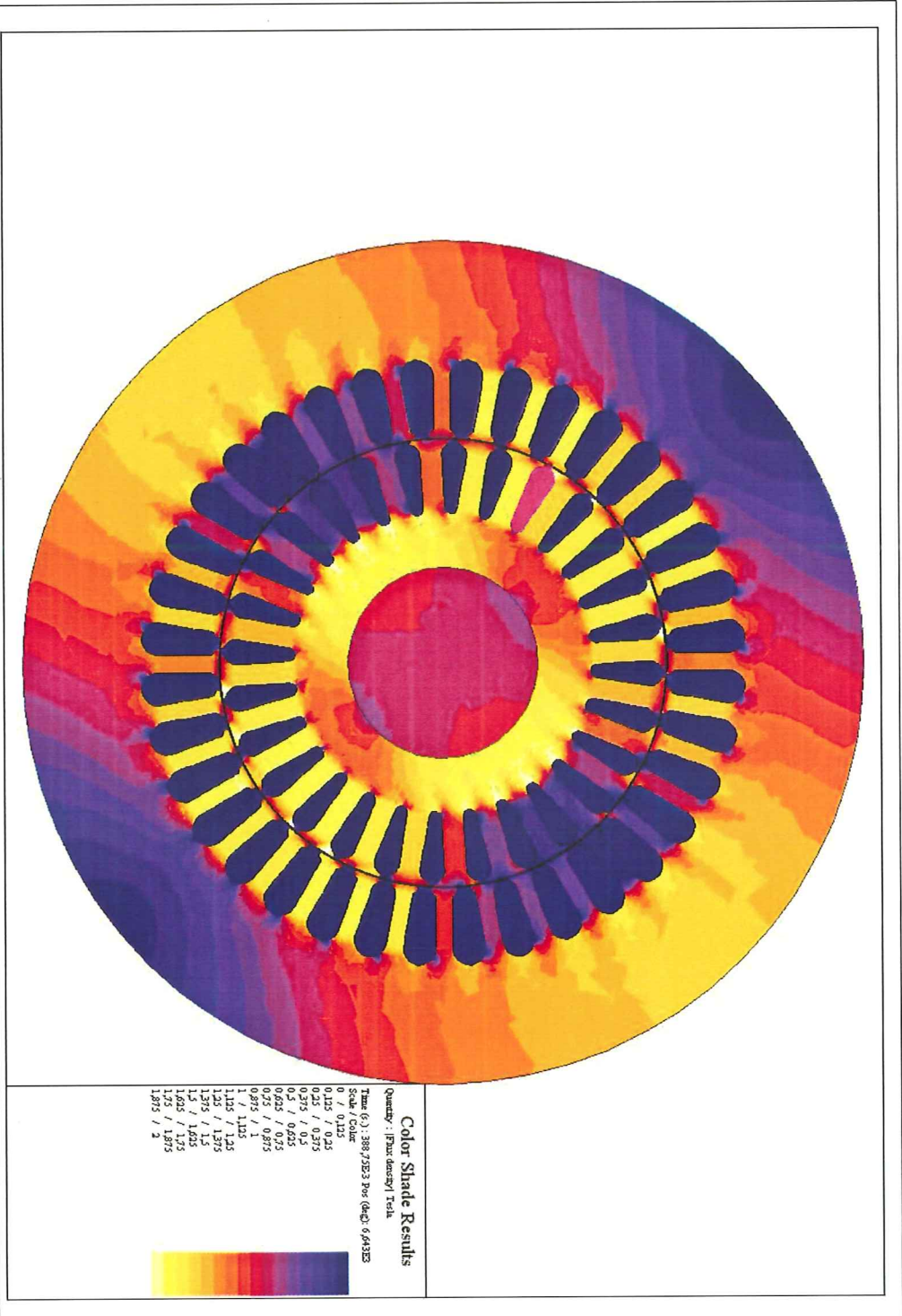


Şekil 5.15 : Sağlam rotorlu motorun magnetik akı yoğunluğu dağılımı 330. ms.

Bir rotor çubuğu kırık olan motor için magnetik akı çizgileri ve akı yoğunluğu boyaması Şekil 5.16 ve Şekil 5.17 de verilmektedir.

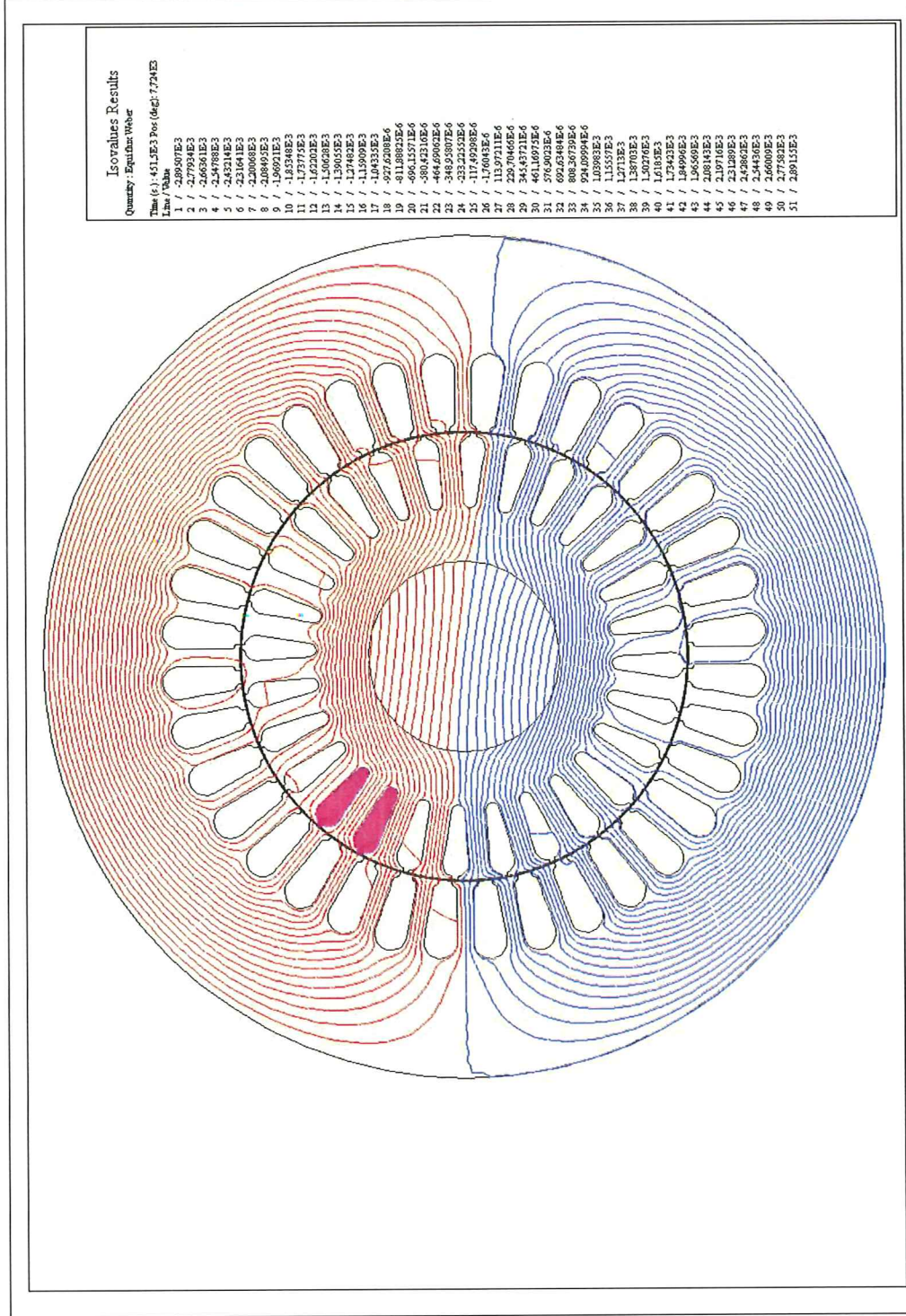


Şekil 5.16: Bir kafes çubuğu kırık motorun magnetik akı dağılımı 388,75. ms.

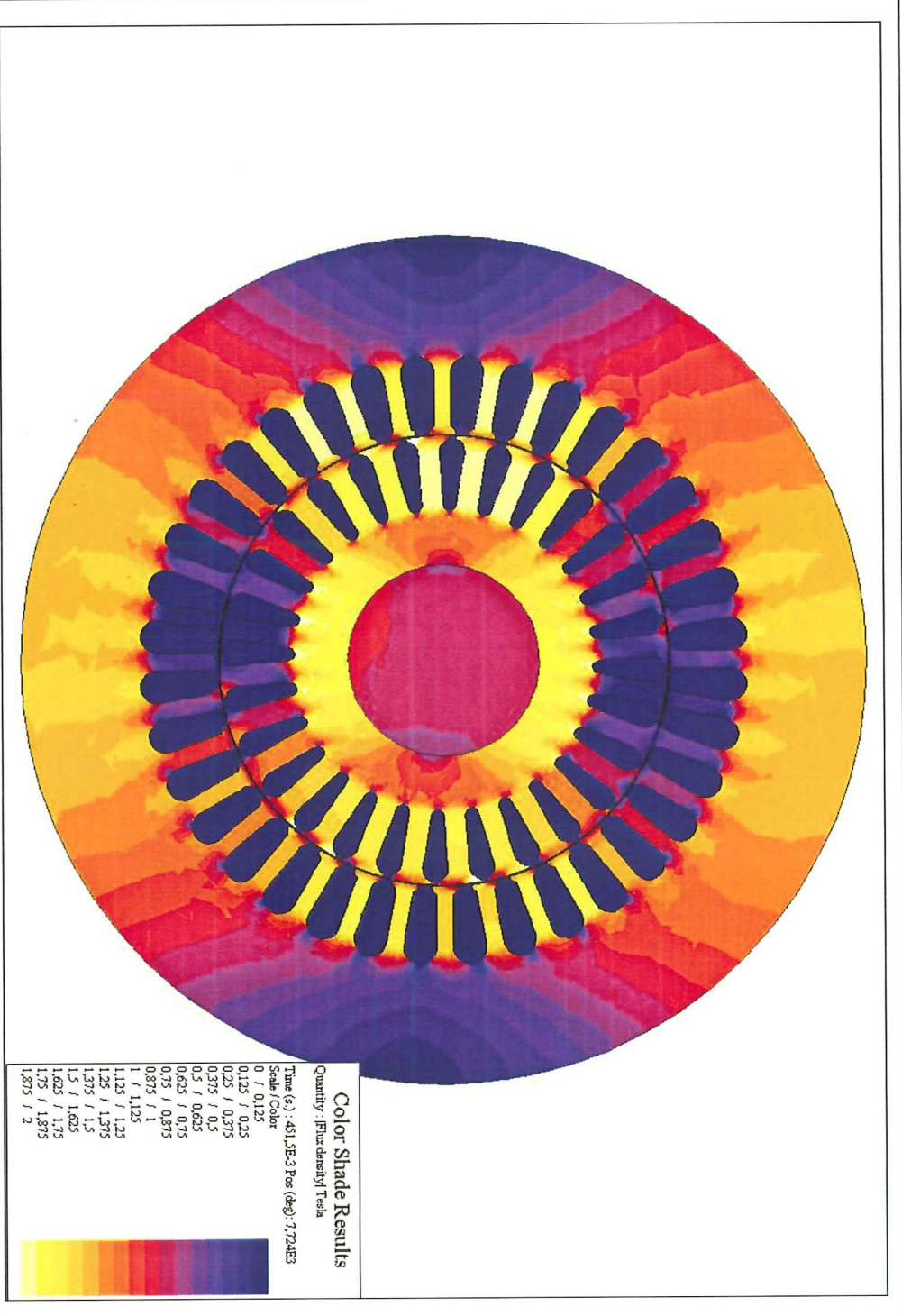


Şekil 5.17 : Bir kafes çubuğu kırık motorun magnetik akı yoğunluğu dağılımı 388,75. ms.

Ardışık iki çubuğu kırık olan motor için magnetik akı çizgileri ve akı yoğunluğu boyaması Şekil 5.18 ve Şekil 5.19 da verilmektedir.

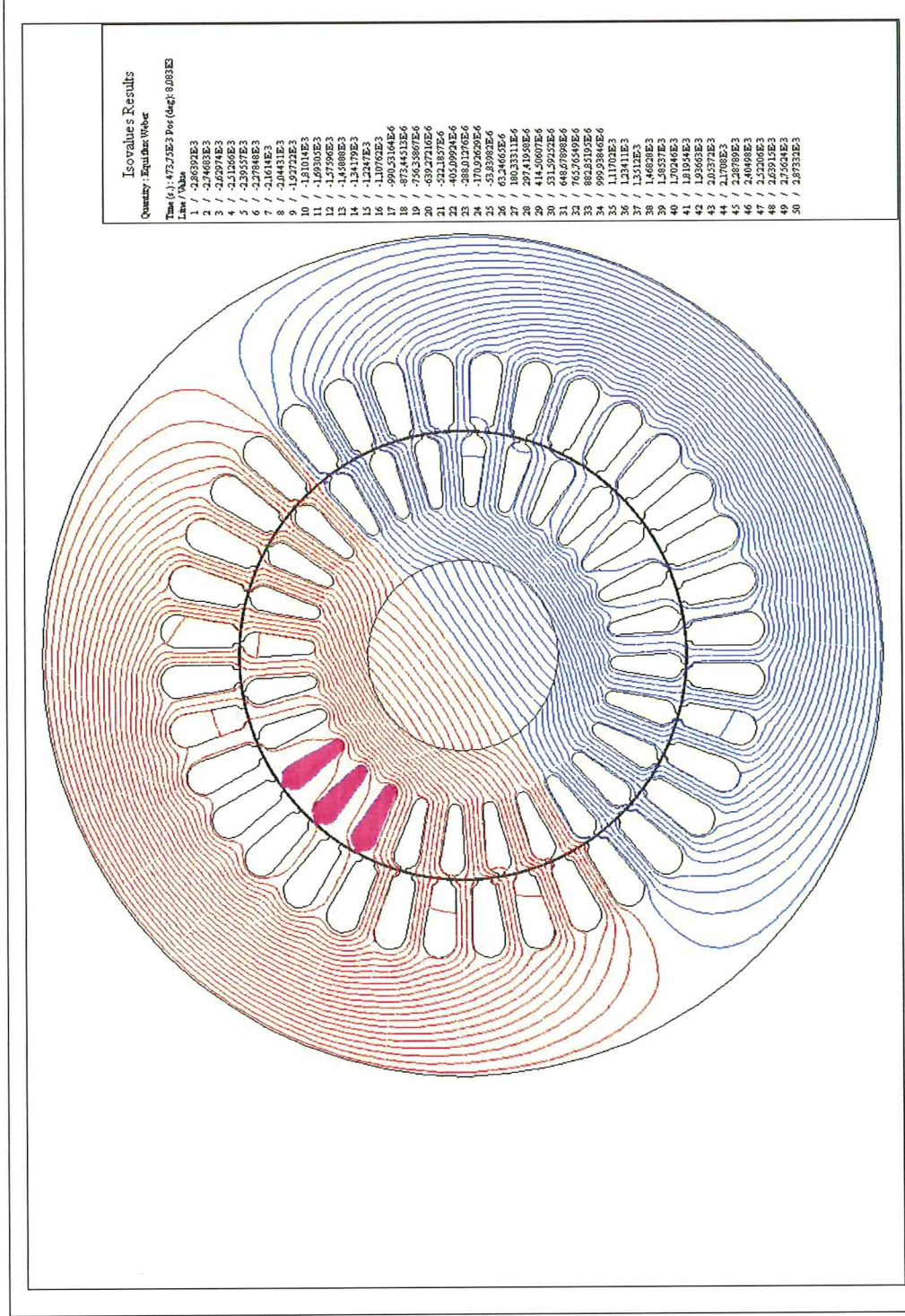


Şekil 5.18 : Ardışık iki kafes çubuğu kırık motorun magnetik akı dağılımı 451,5. ms.

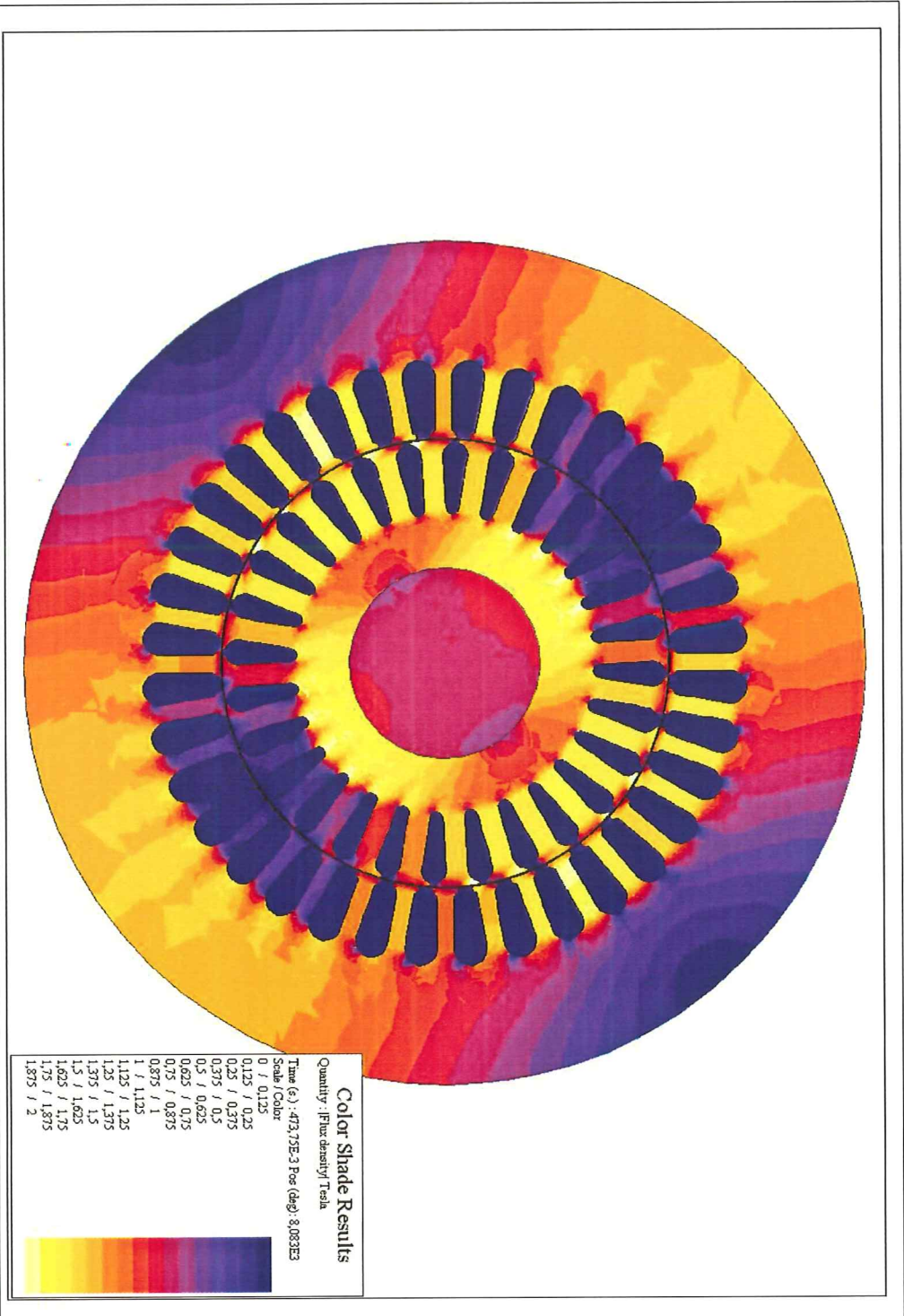


Şekil 5.19 : Ardışık iki kafes çubuğu kırık motorun magnetik akı yoğunluğu dağılımı 451,5. ms.

Ardışık üç çubuğu kırık olan motor için magnetik akı çizgileri ve akı yoğunluğu boyaması Şekil 5.20 ve Şekil 5.21 de verilmektedir.

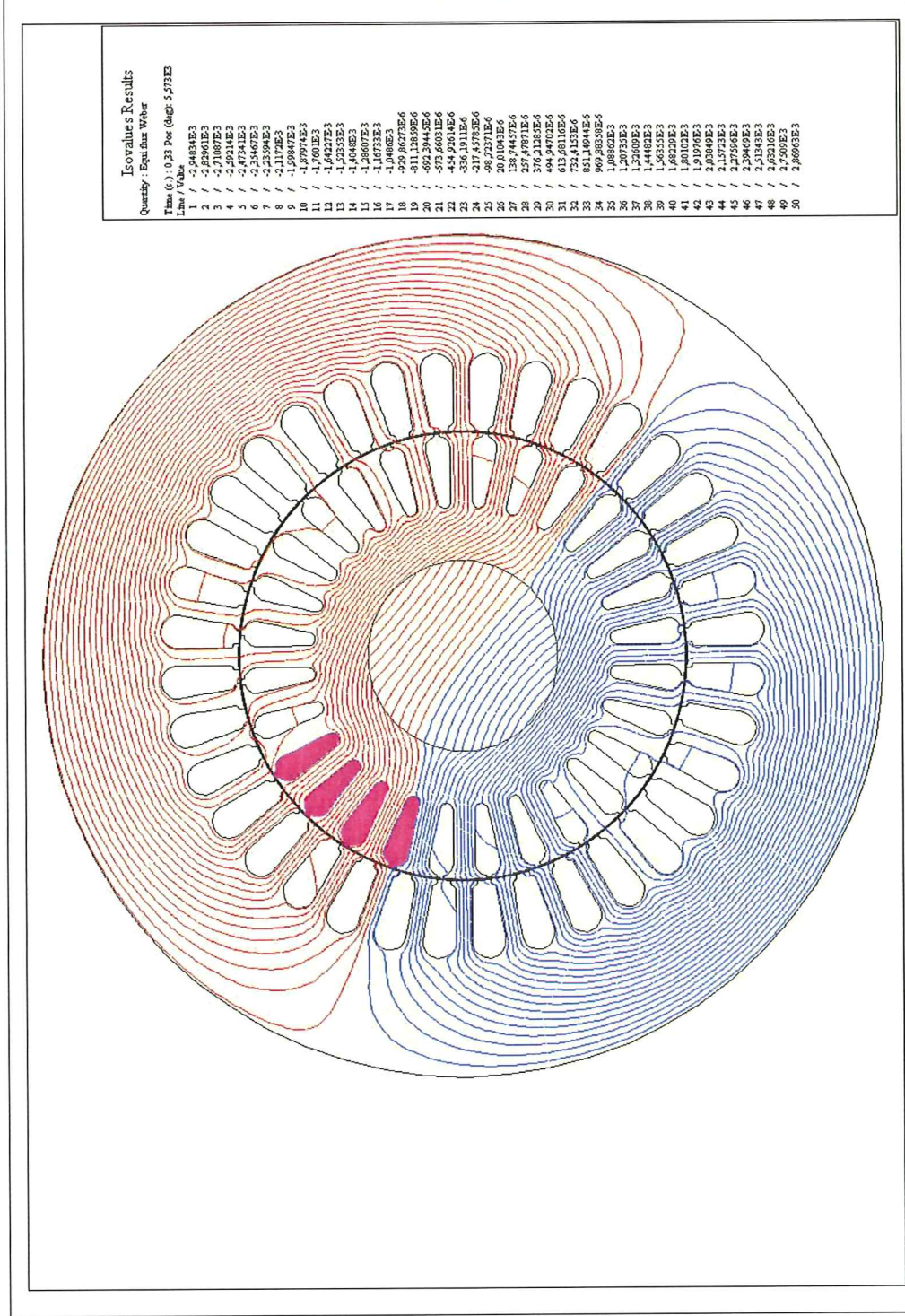


Şekil 5.20 : Ardışık üç kafes çubuğu kırık motorun magnetik akı dağılımı 473,75. ms.

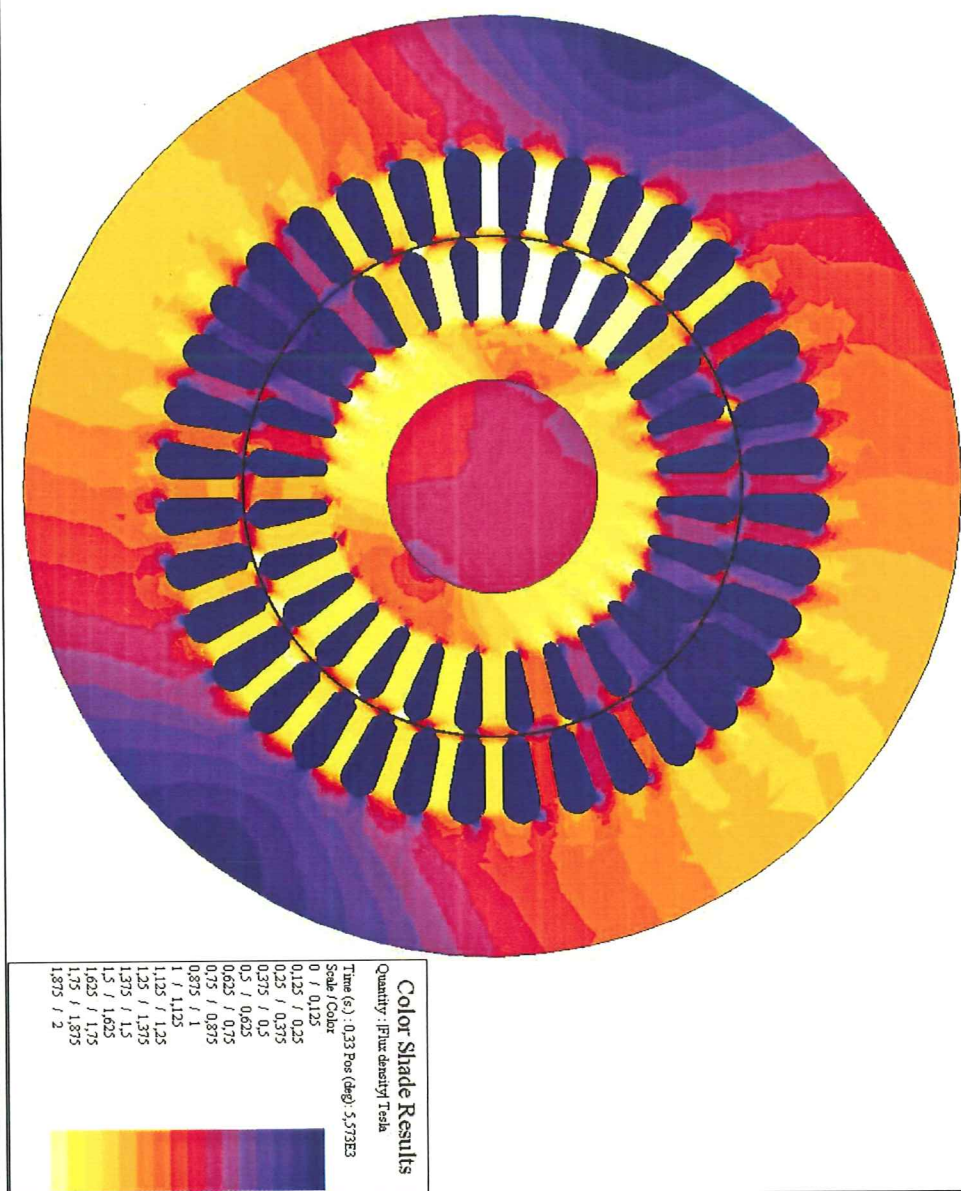


Şekil 5.21 : Ardışık üç kafes çubuğu kırık motorun magnetik akı yoğunluğu dağılımı 473,75. ms.

Ardışık dört çubuğu kırık olan motor için magnetik akı çizgileri ve akı yoğunluğu boyaması Şekil 5.22 ve Şekil 5.23 de verilmektedir.

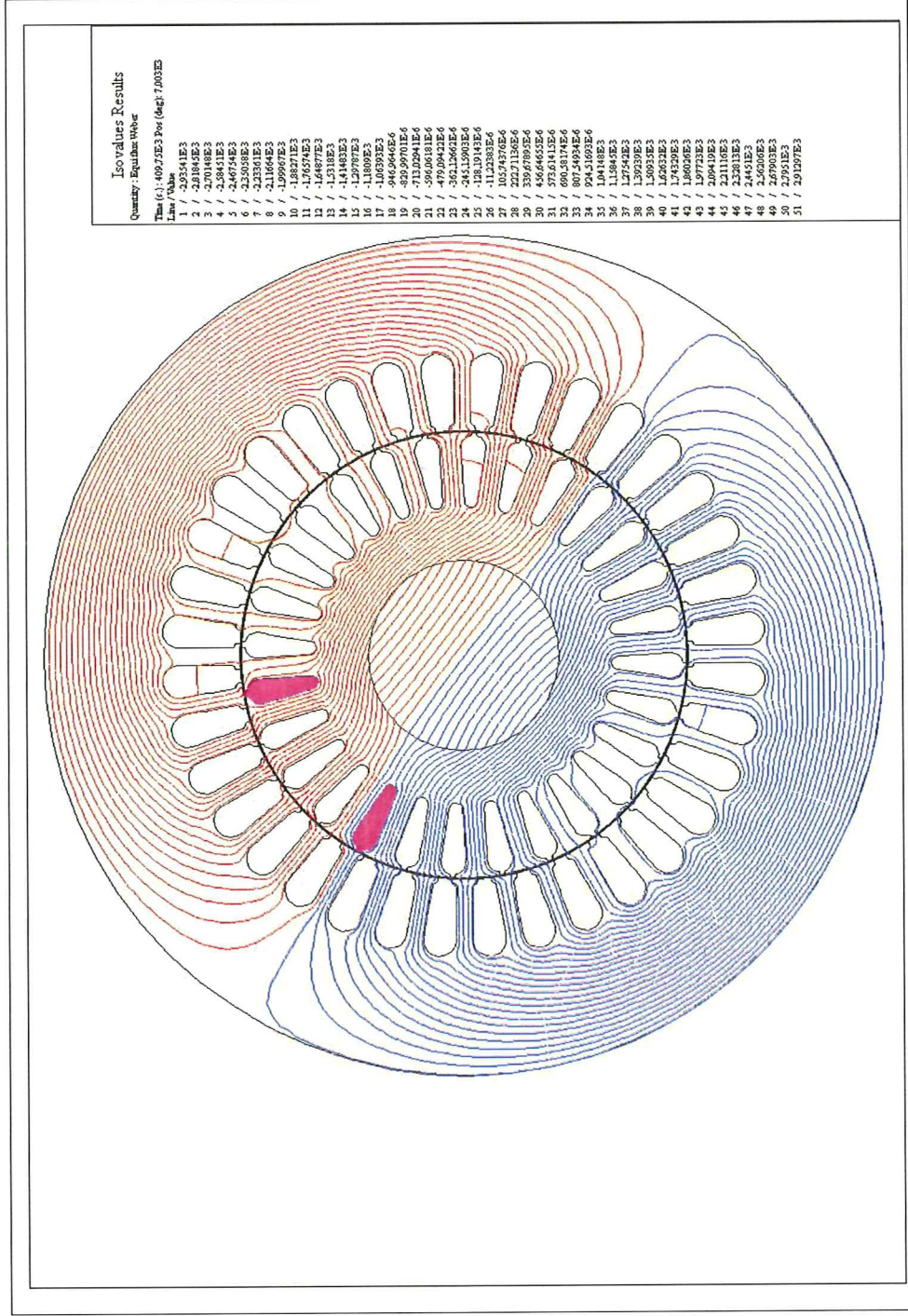


Şekil 5.22 : Ardışık dört kafes çubuğu kırık motorun magnetik akı dağılımı 330. ms.

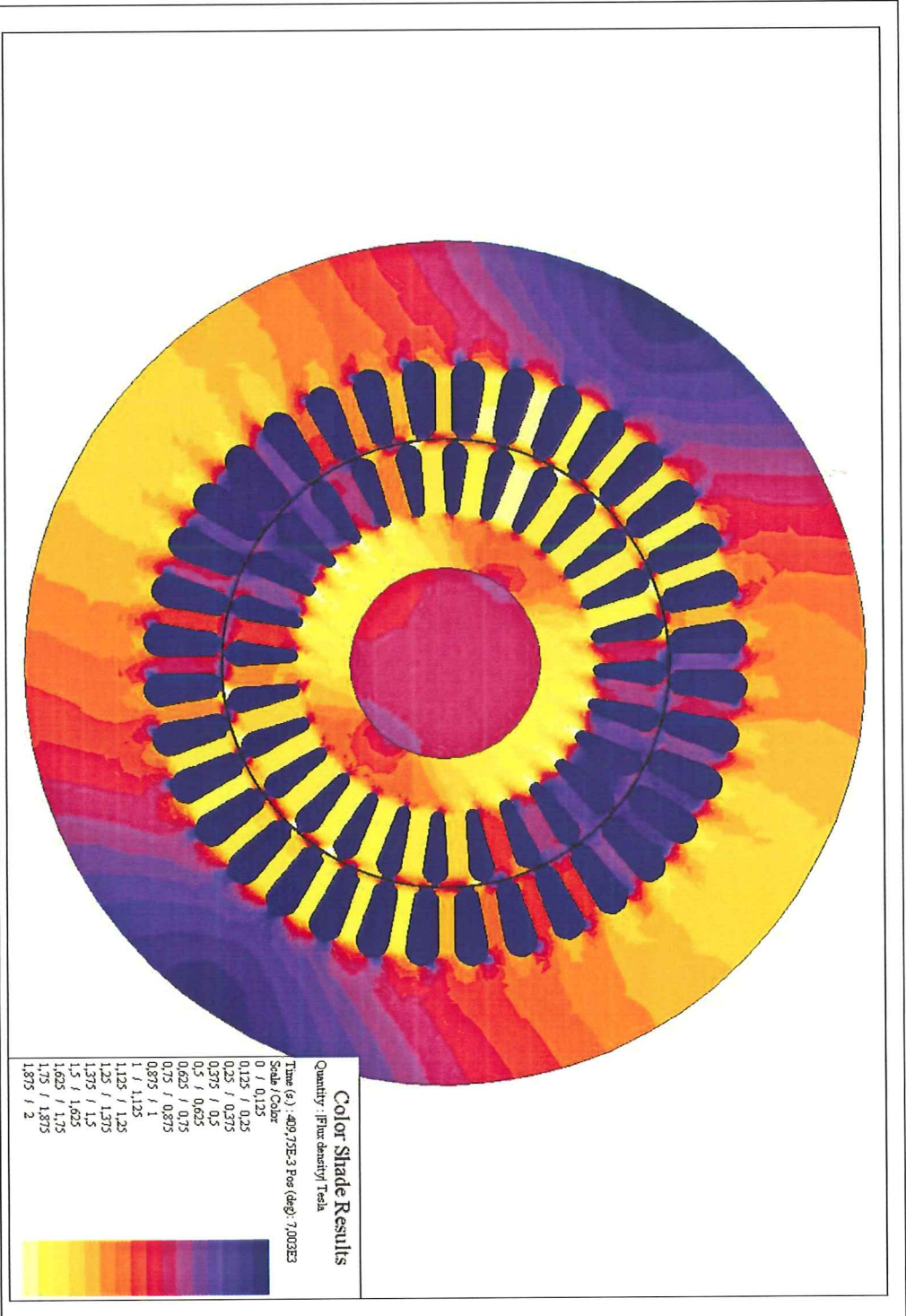


Şekil 5.23 : Ayrışık dört kafes çubuğu kırık motorun magnetik akı yoğunluğu dağılımı 330. ms.

Aralarında üç sağlam çubuk olacak biçimde herhangi iki çubuğu kırık olan motor magnetik akı çizgileri ve akı yoğunluğu boyaması Şekil 5.24 ve Şekil 5.25 de verilmektedir.

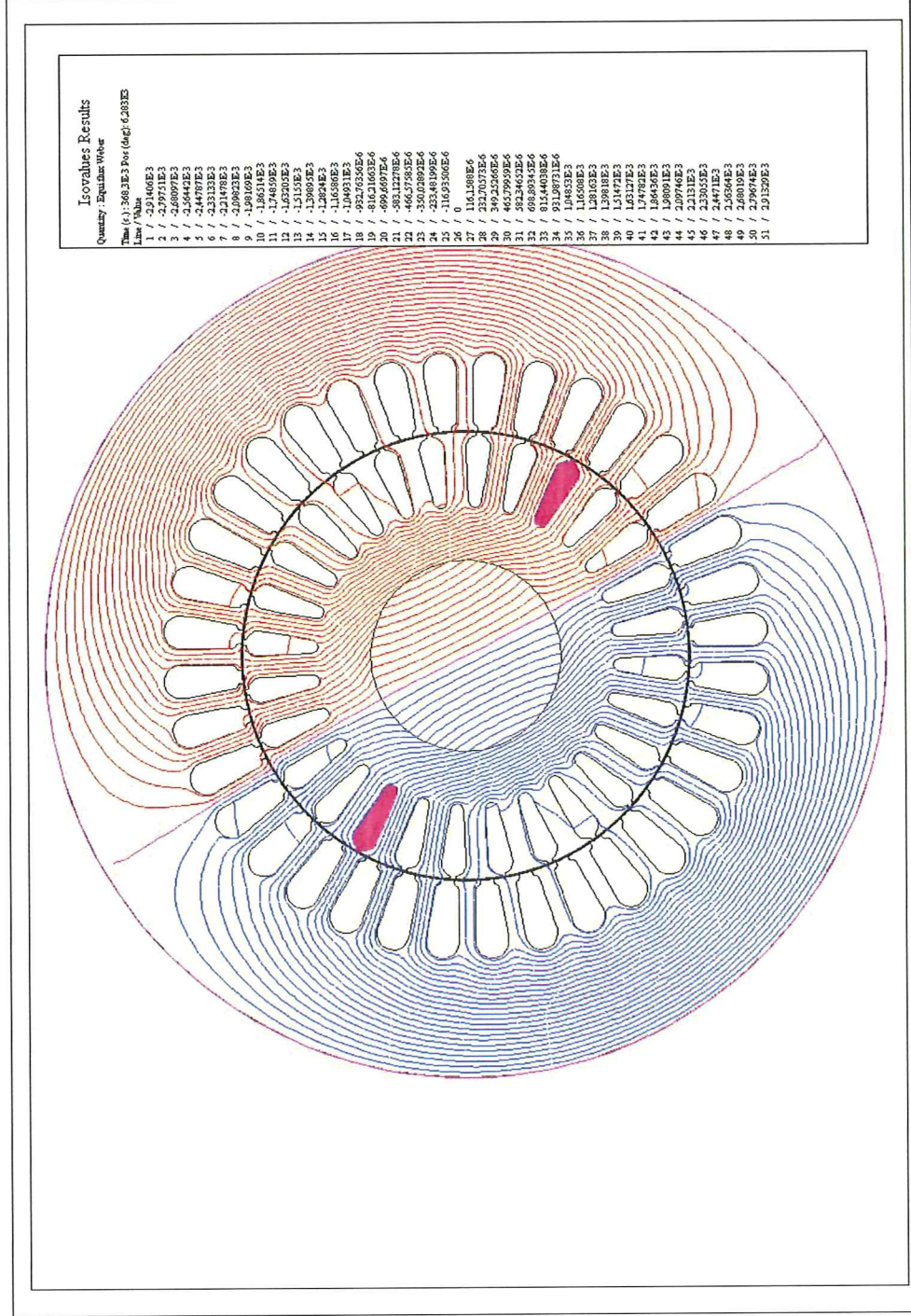


Şekil 5.24 : Arasında üç sağlam çubuk olan herhangi iki kafes çubuğu kırık motorun magnetik akı dağılımı 409,75. ms.

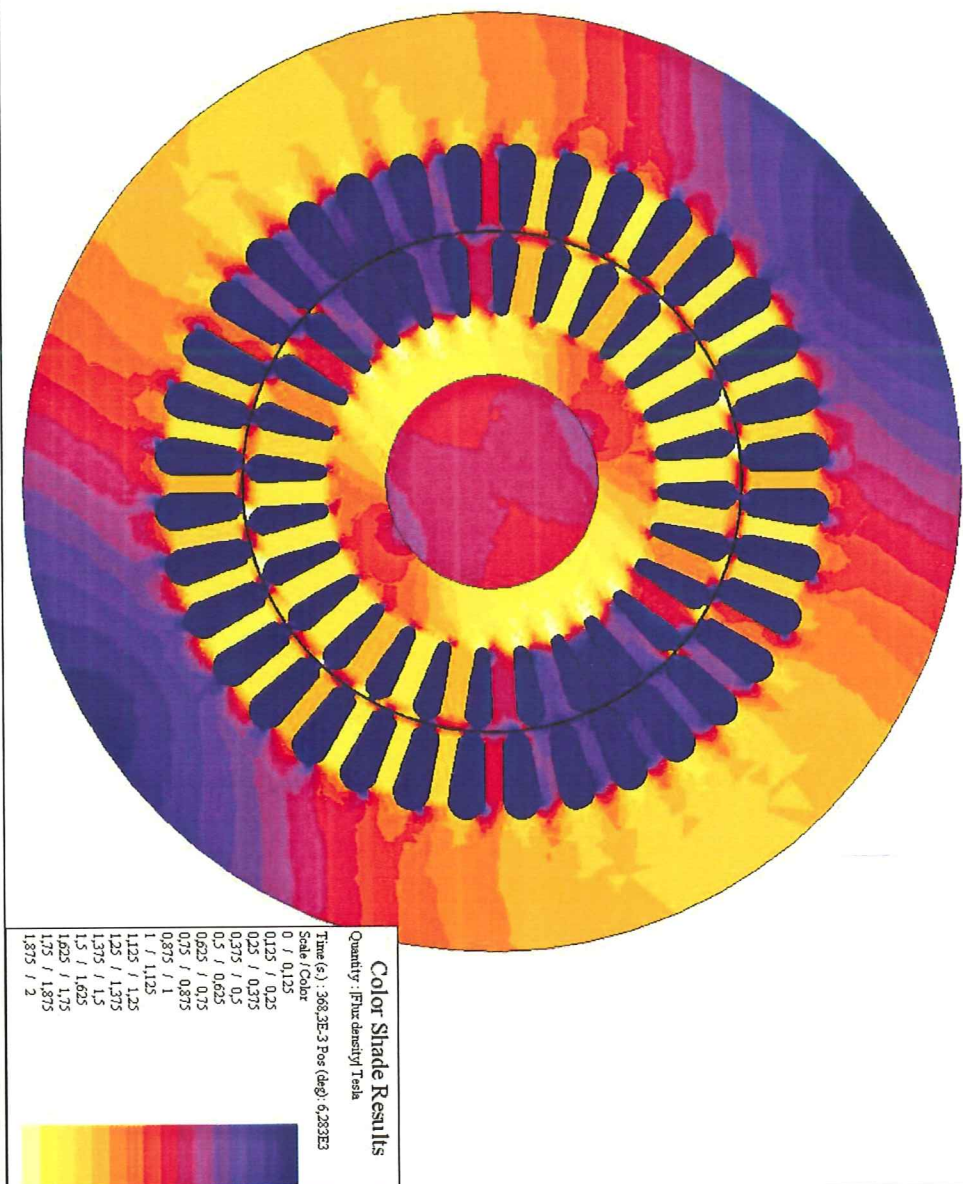


Şekil 5.25 : Arasında üç sağlam çubuk olan herhangi iki kafes çubuğu kırık motorun magnetik akı yoğunluğu dağılımı 409,75. ms.

Elektriksel bakımdan simetrik iki rotor çubuğu kırk motor için magnetik akı çizgileri ve akı yoğunluğu boyaması Şekil 5.26 ve Şekil 5.27 de verilmektedir.



Şekil 5.26 : Simetrik iki kafes çubuğu kırk motorun magnetik akı dağılımı 368,3. ms.



Şekil 5.27 : Simetrik iki kafes çubuğu kırık motorun magnetik akı yoğunluğu dağılımı 368,3. ms.

Yukarıda verilen akı dağılımları ve akı yoğunluğu boyaması incelendiğinde aşağıda sıralanan değerlendirmelere erişilir:

S.1. Ardışık olan arızalar kendi aralarında ve sağlam analiz ile karşılaştırıldığında makine geometrisindeki her bölge için arızalı çubuk civarındaki ve arızalı çubukların arasındaki magnetik akı çizgilerinin arttığı,

S.2. bu artımın ardışık arızalarda ampersarım dengesini sağlamak için arıza sayısı ile orantılı olduğu,

S.3. benzer şekilde ardışık oluşan arızalarda arızalı çubuklara karşı gelen stator dişlerindeki ve boyunduruğundaki magnetik akı çizgilerinin de arttığı,

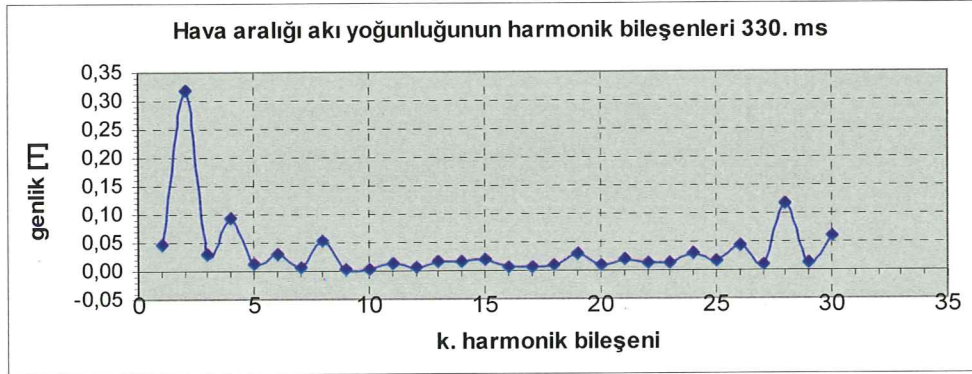
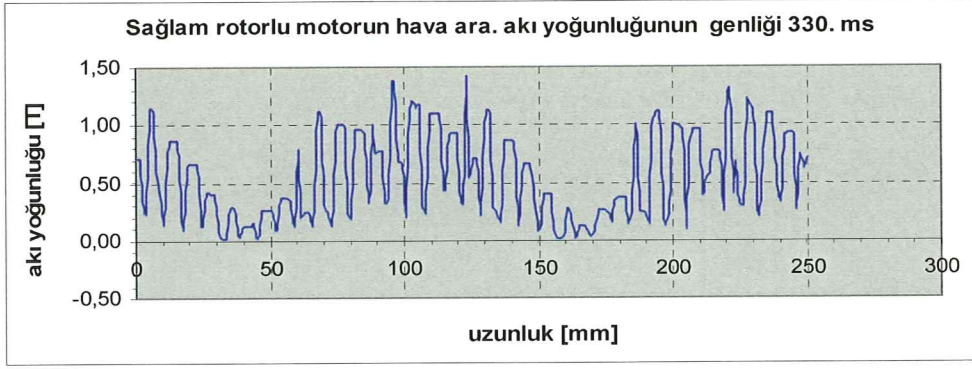
S.4. boyalı magnetik akı yoğunluğu dağılımı incelendiğinde, yukarıda açıklanan kırık bölgelerinde ve bunlara karşı gelen stator dişlerindeki akı yoğunluklarının aşırı arttığı, üç ardışık kırıktan sonra bunun daha da belirgin olduğu,

S.5. benzer etkinin rast gele iki kırıklı motorun analizlerinde de görüldüğü, rast gele oluşan kırıklara yakın bölgelerde ve statorda akı yoğunluğunun arttığı,

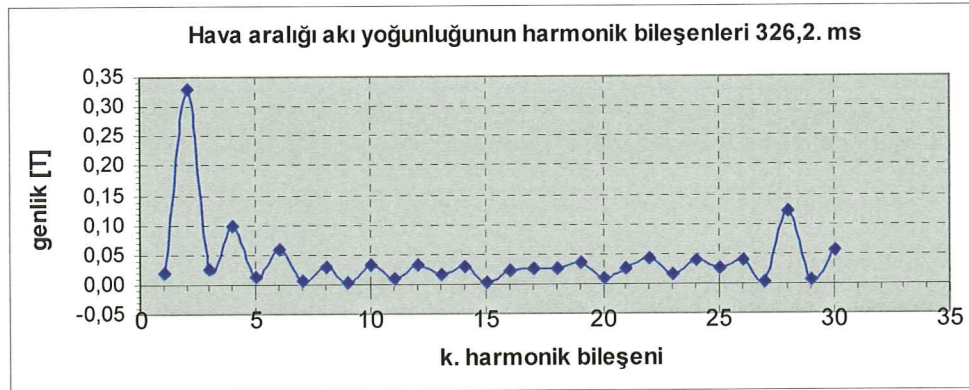
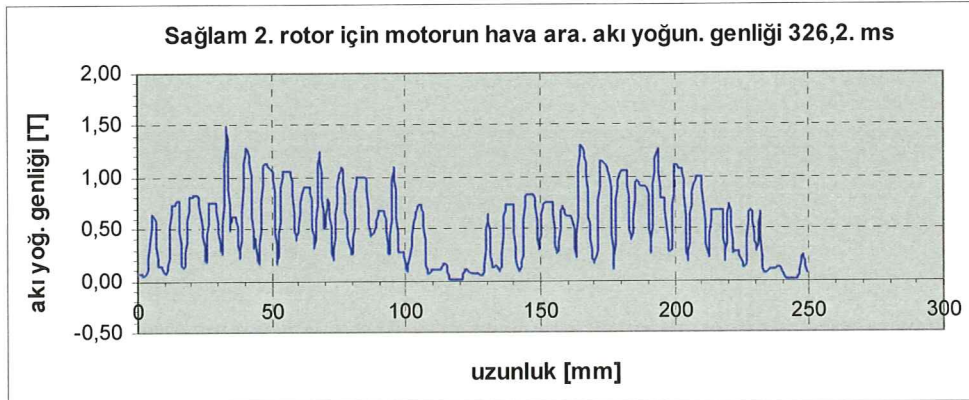
S.6. bunlara karşın, magnetik ve geometri olarak iki kırık çubuğun analizleri incelendiğinde, arızalı rotor çubuklarının yanlarındaki bölgelerde akı yoğunluklarının azaldığı görülmektedir.

5.3.2. Hava aralığı magnetik akı yoğunluğunun değişimi

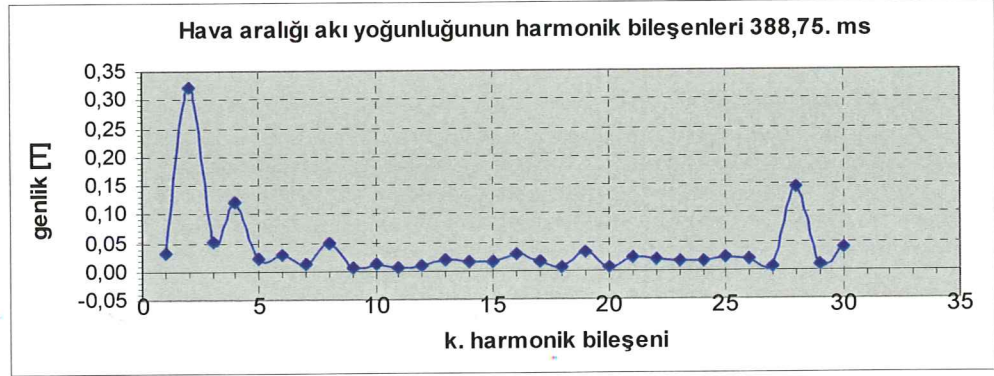
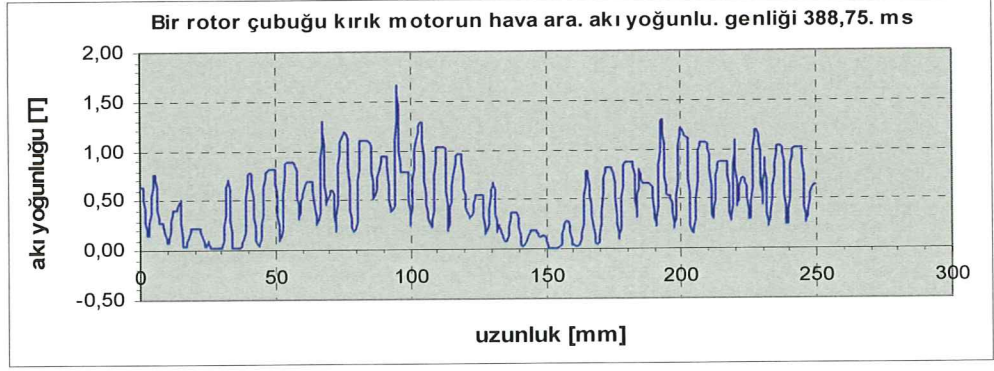
Bir diğer akı incelemesi hava aralığında yapılabilir. Magnetik analizlerde hava aralığında seçilen bir yarıçapsal noktaya göre, hava aralığı akı yoğunluğu büyüklüğünün ve bileşenlerinin rotorun çevresel uzunluğuna göre değişimi hesaplanmıştır. İnceleme Çizelge 5.2 de verilen zamana ait magnetik konumda yapılmıştır. Hesaplanan akı yoğunluğunun değişimi ve harmonik dağılım değerleri aşağıdaki şekillerde verilmektedir. Uzunluk eksenini makine uzayında x ekseninden başlanmaktadır. Saatin ters dönüş yönünde artmaktadır. Büyüklük ve bileşenlerinin doğrudan değişimlerini incelemek yerine, yine bunlara ilişkin harmonik dağılımları dikkate alınarak bulunan sonuçlar yorumlanabilir. Ayrıca hava aralığı akı yoğunluğunun hem konuma hem de zamana bağlı değişimi de incelenmiştir. Ancak üç boyutlu bir analiz programı kullanılmadığından konuma bağlı olarak bulunan değişim eğrilerinin belli bir uzunluk farkı ile tekrarını içeren özeğriler yumağı elde edilmiştir (Şekil 5.51, Şekil 5.52 ve Şekil 5.53).



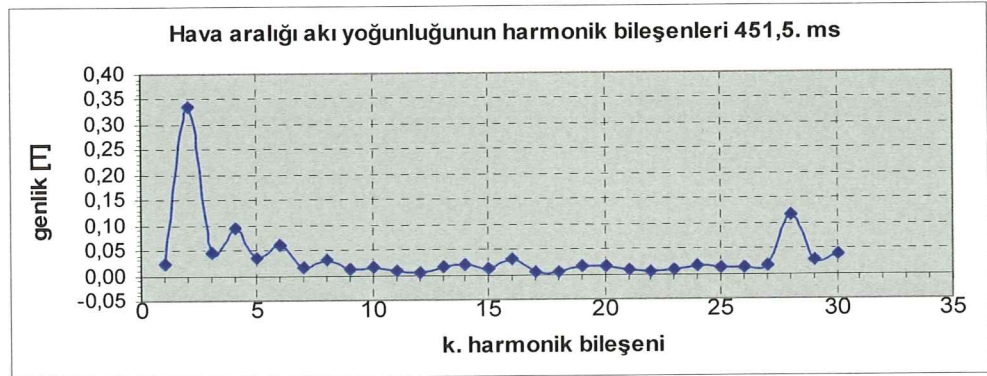
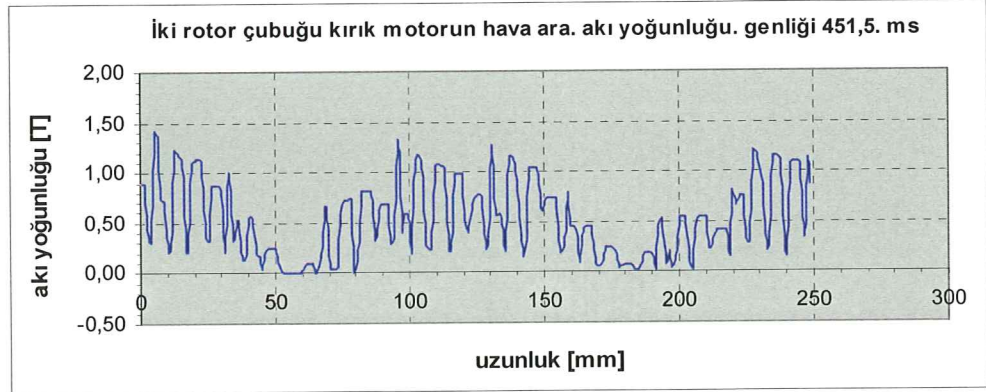
Şekil 5.28 : Sağlam birinci rotor için hava aralığı akı yoğunluğu değişimi.



Şekil 5.29 : Sağlam ikinci rotor için hava aralığı akı yoğunluğu değişimi.

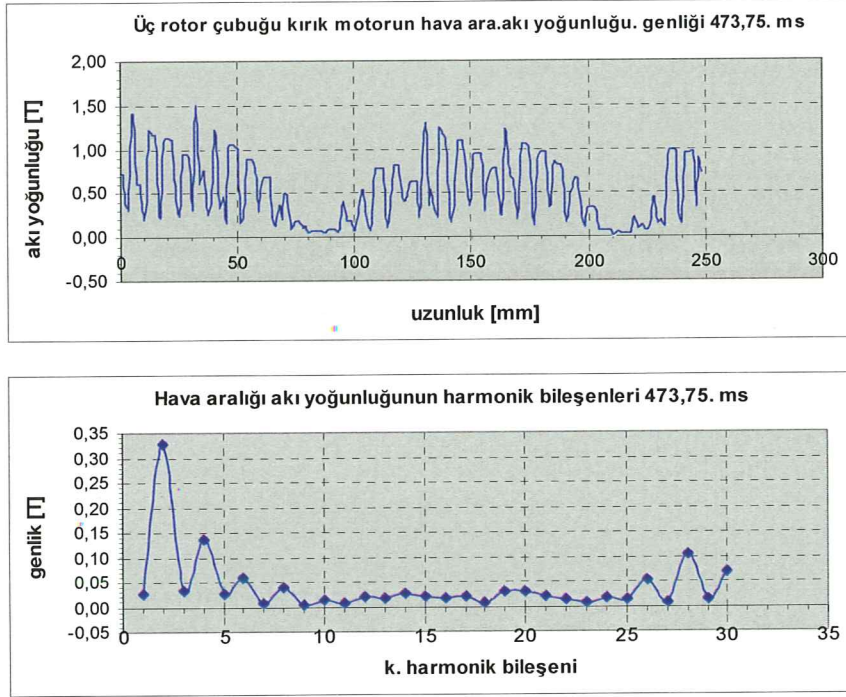


Şekil 5.30 : Bir kırık çubuk için hava aralığı akı yoğunluğu değişimi.

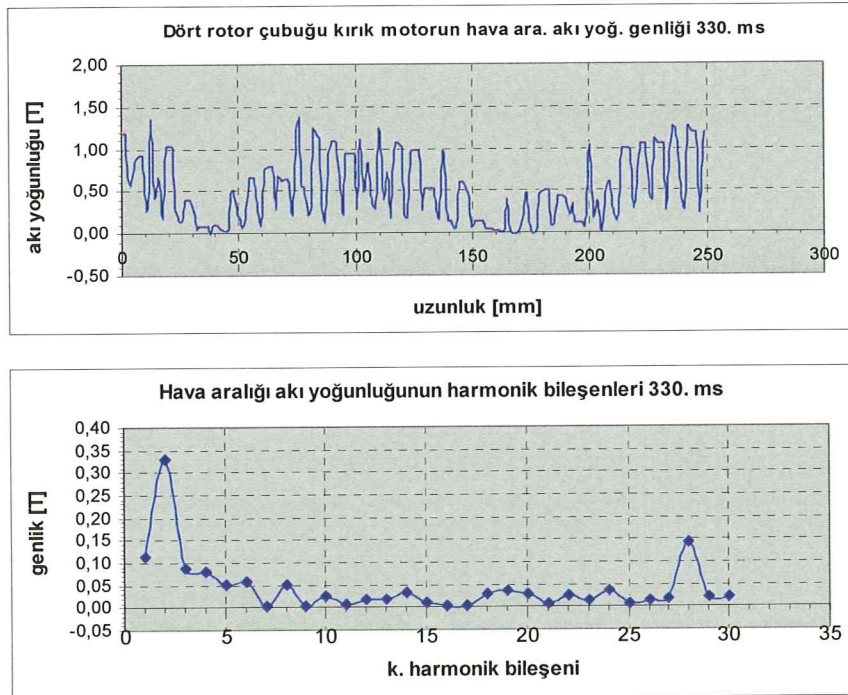


Şekil 5.31 : Ardışık iki kırık çubuk için hava aralığı akı yoğunluğu değişimi.

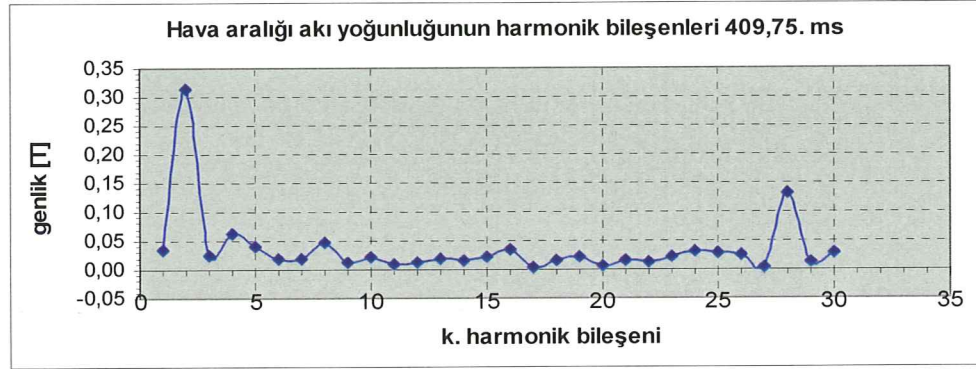
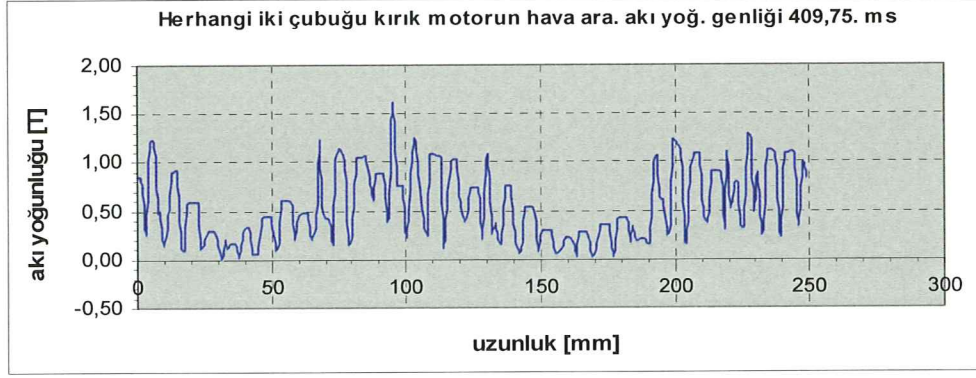
Hava aralığı akı yoğunluğu genliğinin harmonik bileşenleri arızalı çubuk sayısı ile orantılı olarak artmaktadır. Şekil 5.32 ve Şekil 5.33 de ardışık üç ve dört kırık çubuk için akı yoğunluğunun, hava aralığı boyunca değişim eğrileri ve harmonik dağılımları verilmektedir.



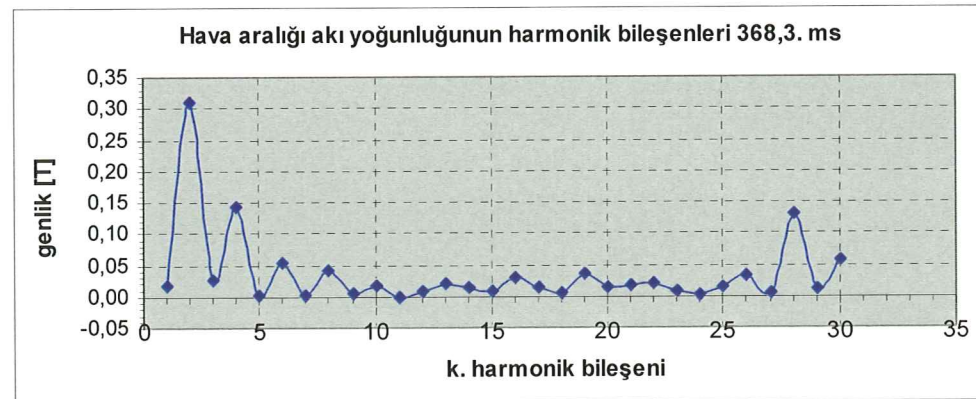
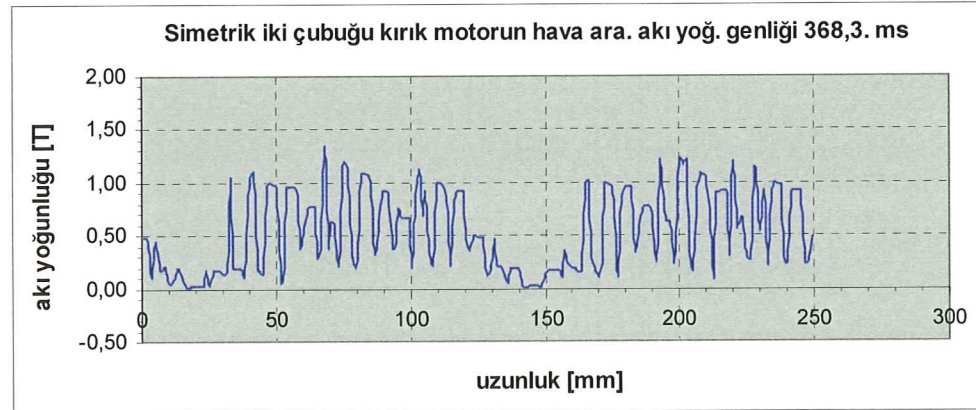
Şekil 5.32 : Ardışık üç kırık çubuk için hava aralığı akı yoğunluğu değişimi.



Şekil 5.33 : Ardışık dört kırık çubuk için hava aralığı akı yoğunluğu değişimi.

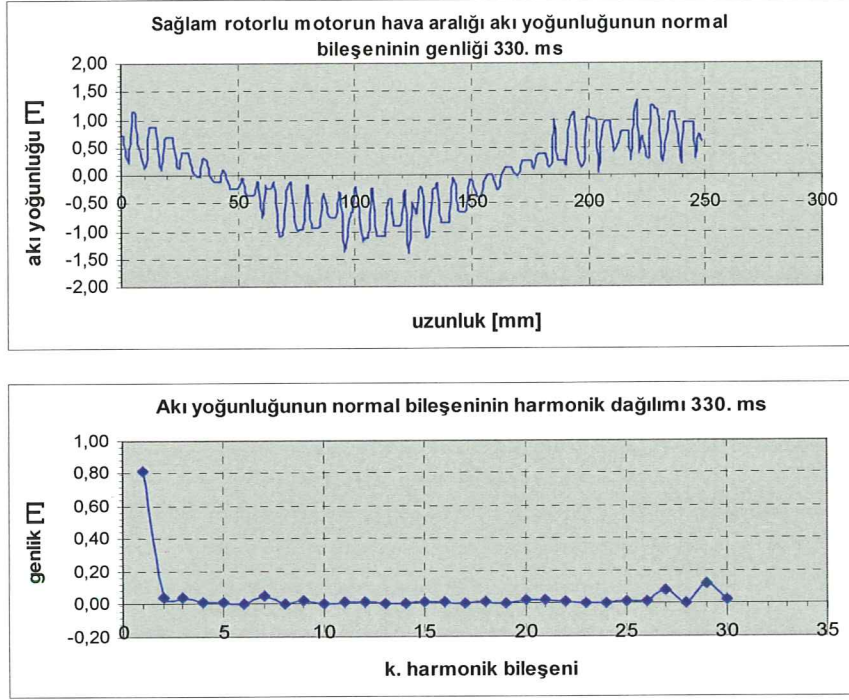


Şekil 5.34 : Herhangi iki kırık çubuk için hava aralığı akı yoğunluğu değişimi.

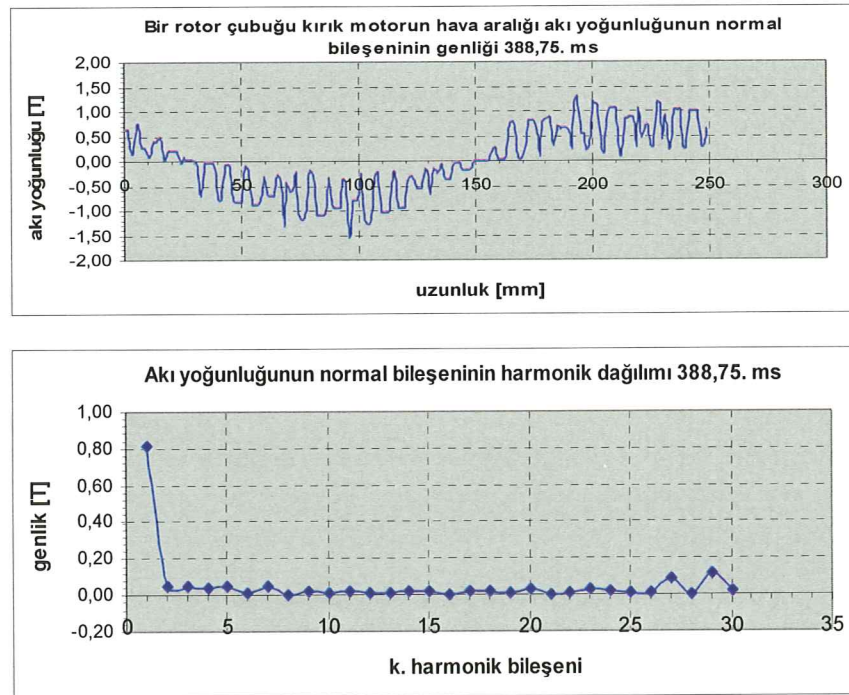


Şekil 5.35 : Simetrik iki kırık çubuk için hava aralığı akı yoğunluğu değişimi.

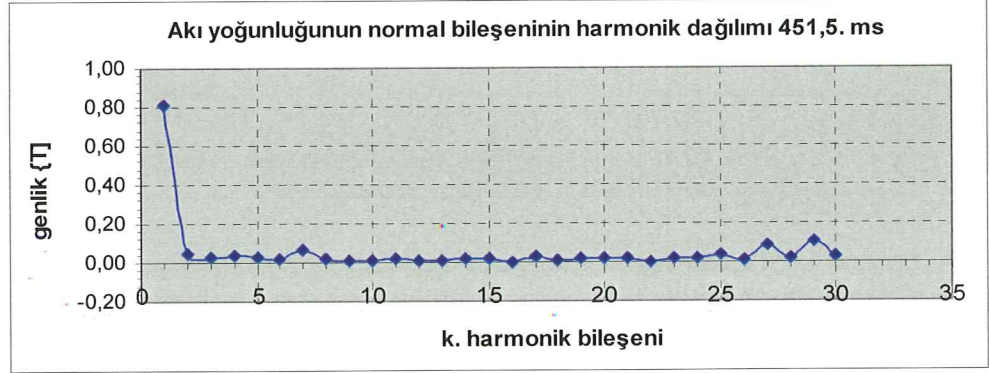
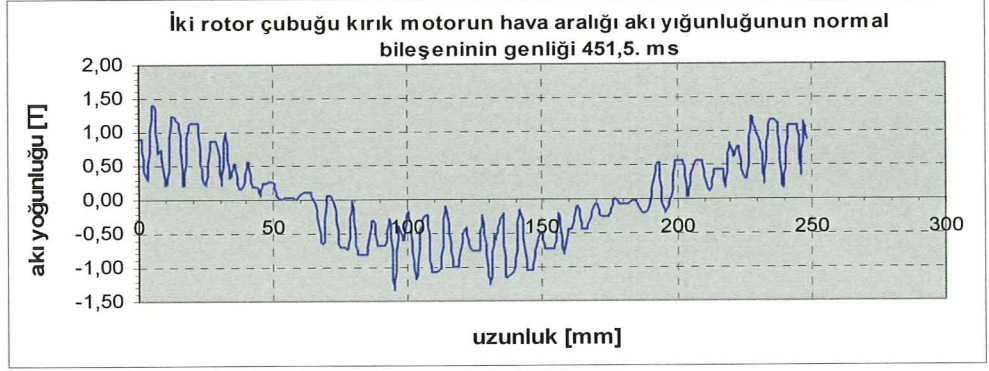
Benzer biçimde, hava aralığı akı yoğunluğunun normal bileşenin çevresel uzunluk ile değişimi ve bu değişim eğrilerinin harmonik dağılımları incelenmiştir. Sağlam rotor ve değişik sayıdaki kırık çubuklu rotorlar için elde edilen eğriler aşağıda verilmektedir (Şekil 5.36...Şekil 5.42).



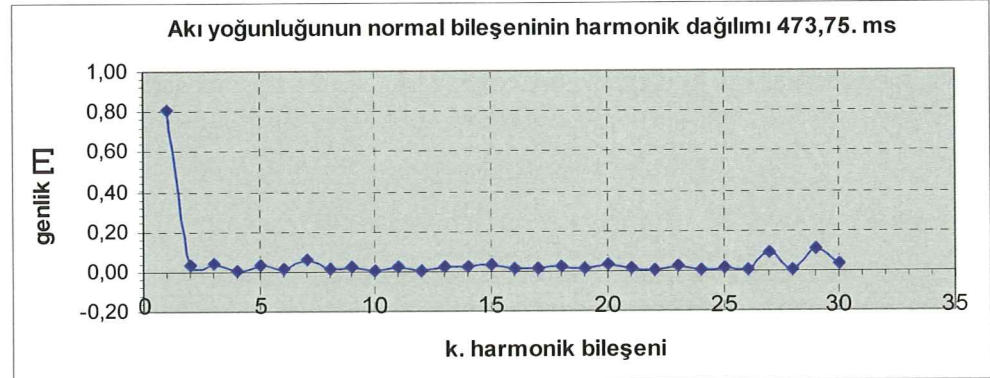
Şekil 5.36 : Sağlam rotor için akı yoğunluğunun normal bileşenin değişimi.



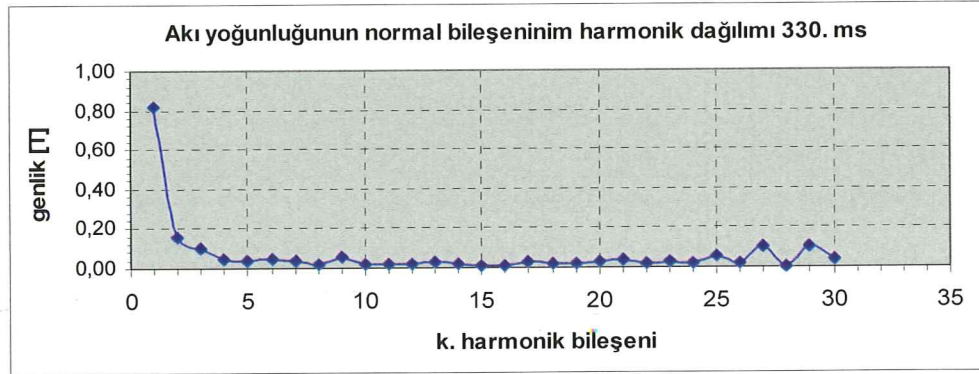
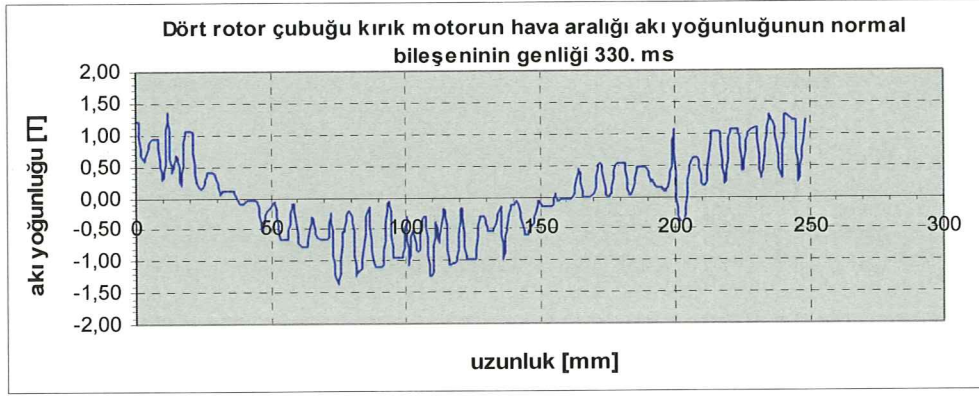
Şekil 5.37 : Bir kırık çubuk için akı yoğunluğunun normal bileşenin değişimi.



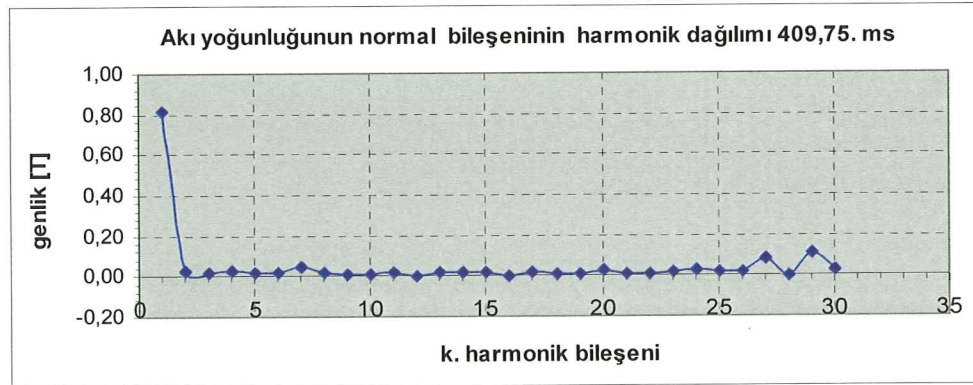
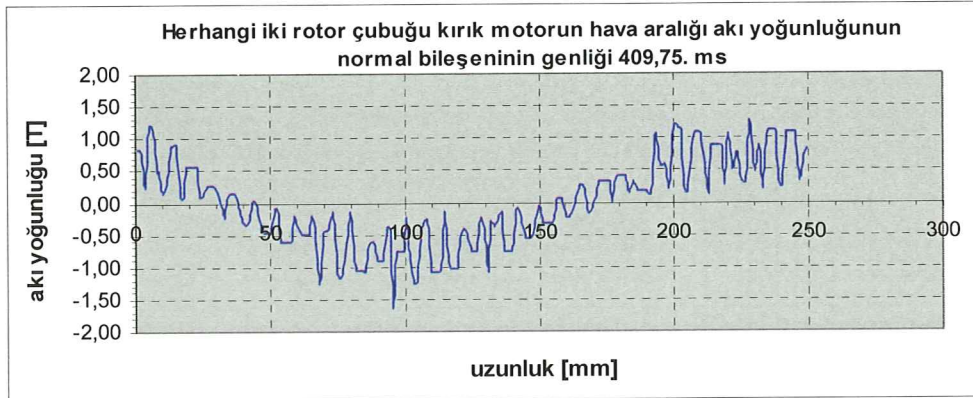
Şekil 5.38 : Ardışık iki kırık çubuk için akı yoğunluğunun normal bileşeninin değişimi.



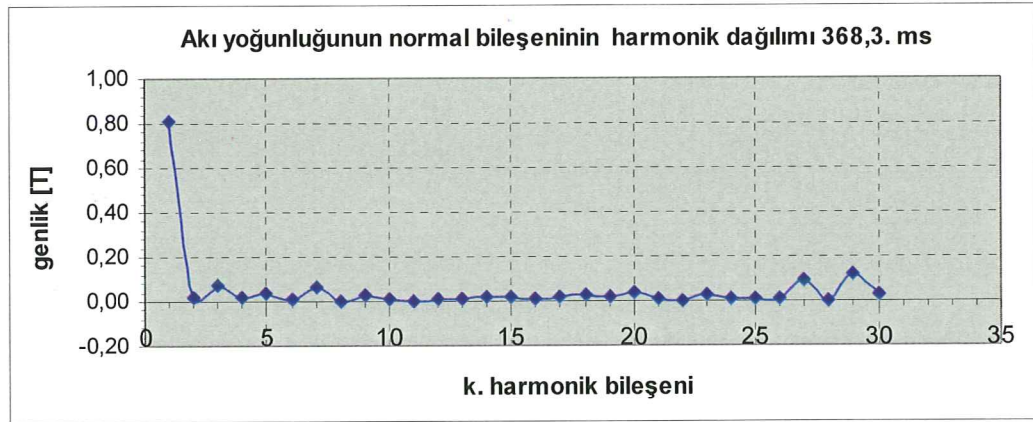
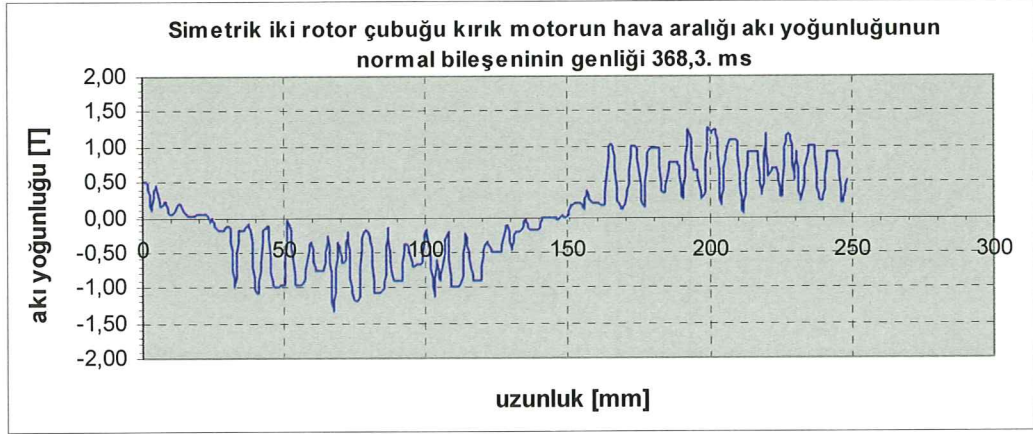
Şekil 5.39 : Ardışık üç kırık çubuk için akı yoğunluğunun normal bileşeninin değişimi.



Şekil 5.40 : Ardışık dört kırık çubuk için akı yoğunluğunun normal bileşeninin değişimi.

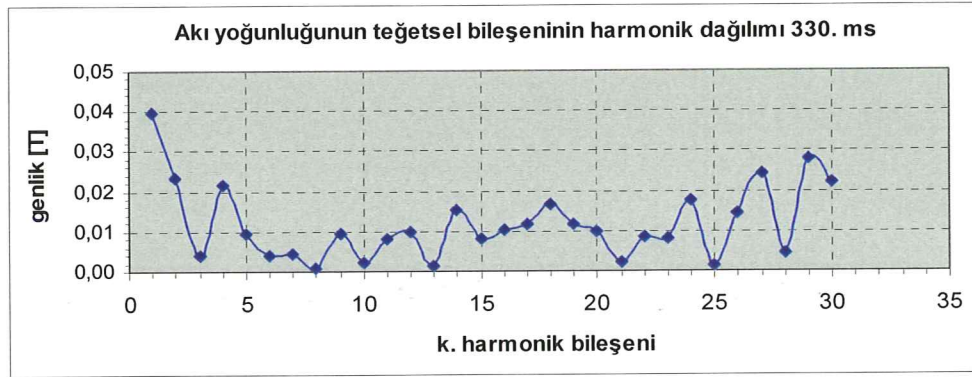
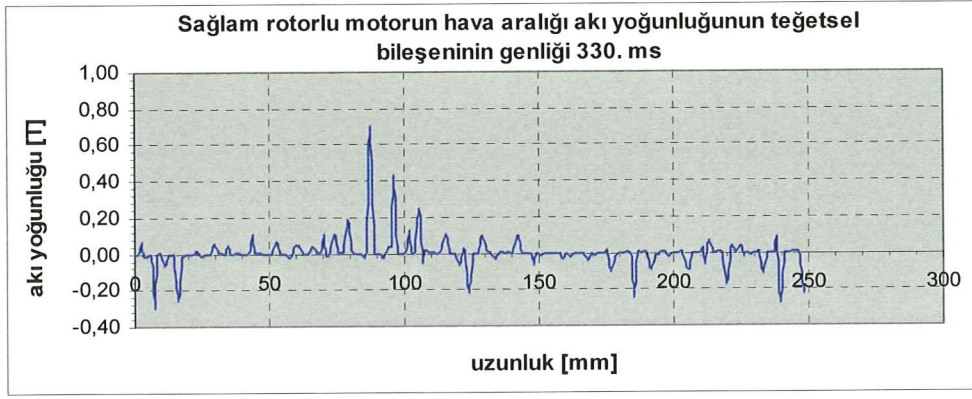


Şekil 5.41 : Herhangi iki kırık çubuk için akı yoğunluğunun normal bileşeninin değişimi.

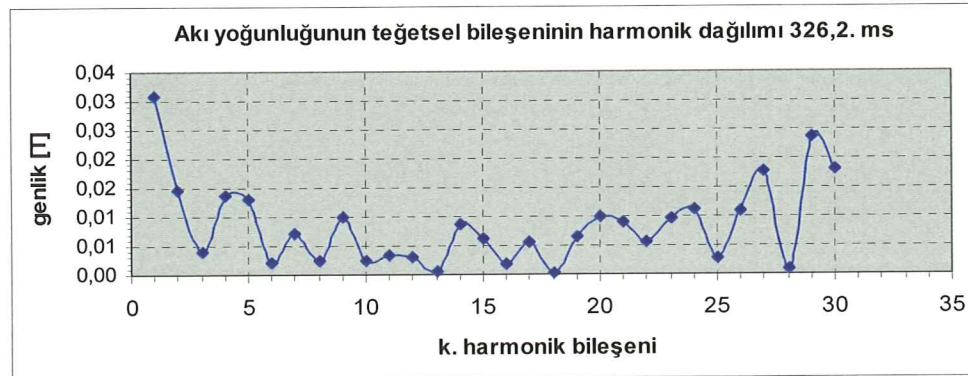
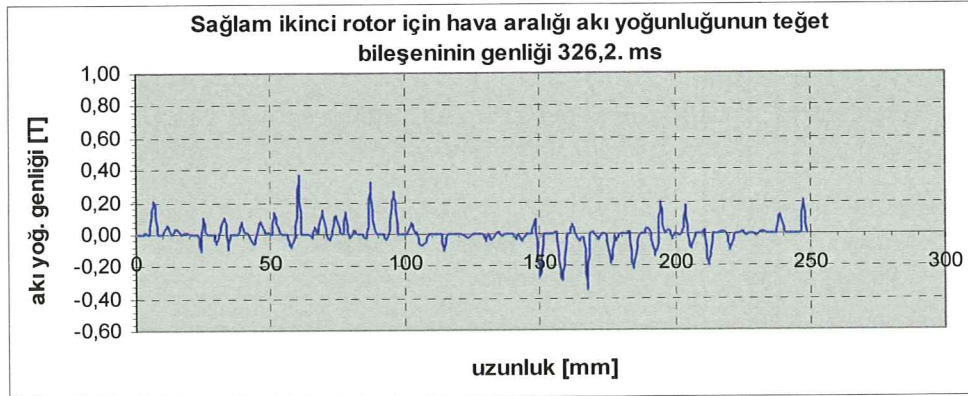


Şekil 5.42 : Simetrik iki kırık çubuk için akı yoğunluğunun normal bileşeninin değişimi.

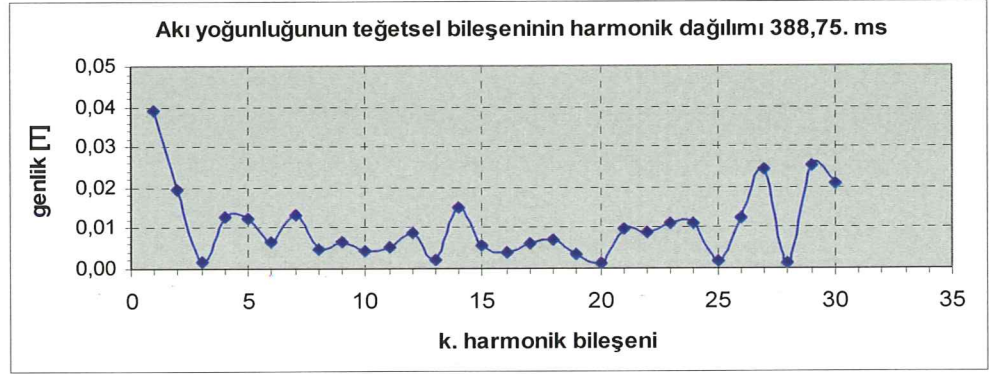
Kırık çubuk sayısına bağlı olarak yarıçapsal çekim kuvvetlerinin simetrik yapısı bozulur. Bu nedenle kafes çubuklarının kırılması ile hava aralığı akı yoğunluğunda oluşan değişimin, akı yoğunluğunun normal bileşeninde daha belirgin olduğu düşünülmektedir. Buna karşın, yapılan incelemede hava aralığı akı yoğunluğunun teğetsel bileşenin çevresel uzunluk ile değişimi ve bu değişim eğrilerinin harmonik dağılımları da incelenmiştir. Sağlam rotor ve değişik sayıdaki kırık çubuklu rotorlar için elde edilen eğriler aşağıda verilmektedir (Şekil 5.43...Şekil 5.50).



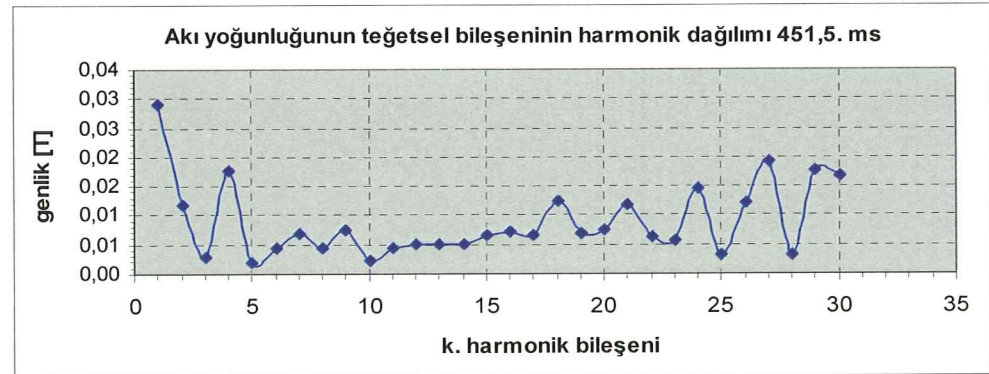
Şekil 5.43 : Sağlam birinci rotor için akı yoğunluğunun teğetsel bileşeninin değişimi.



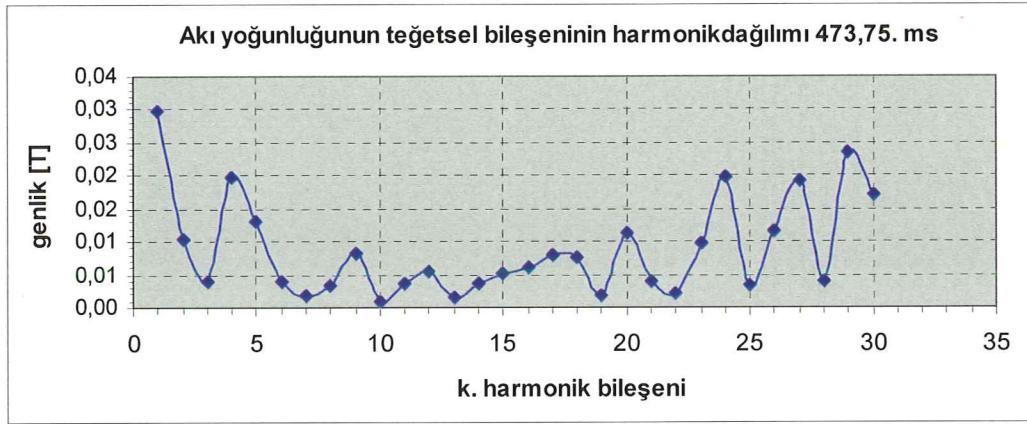
Şekil 5.44 : Sağlam ikinci rotor için akı yoğunluğunun teğetsel bileşeninin değişimi.



Şekil 5.45 : Bir kırık çubuk için akı yoğunluğunun teğetsel bileşeninin değişimi.



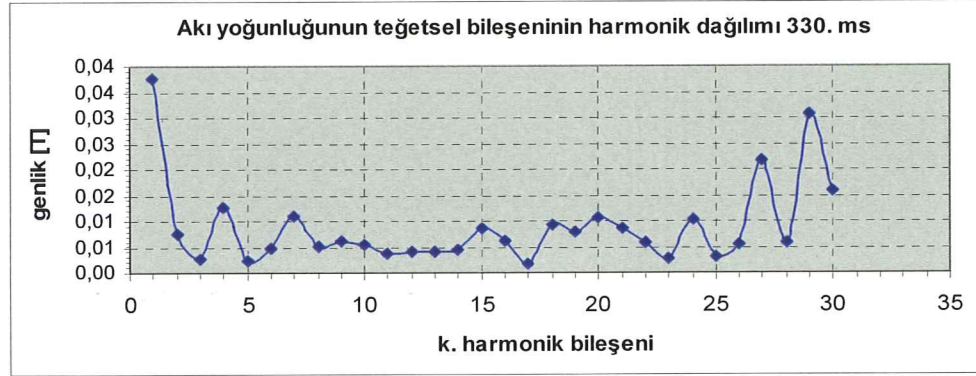
Şekil 5.46 : Ardışık iki kırık çubuk için akı yoğunluğunun teğetsel bileşeninin değişimi.



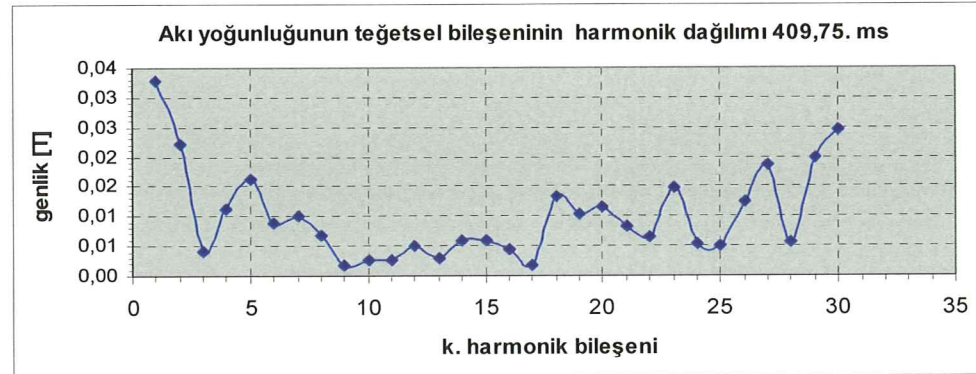
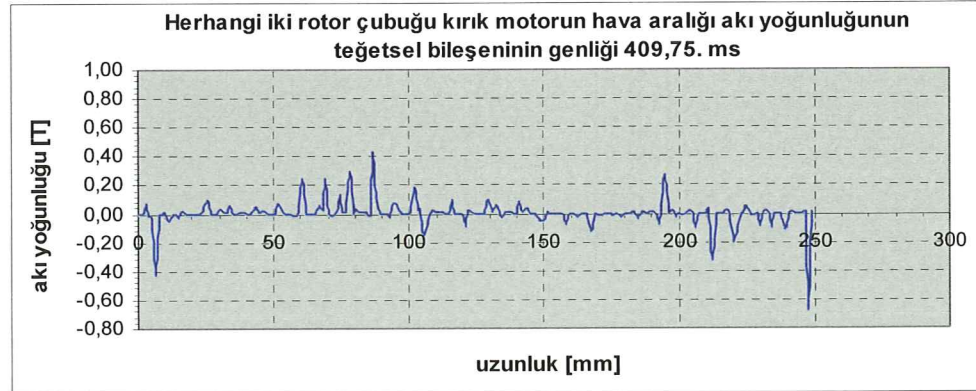
Şekil 5.47 : Ardışık üç kırık çubuk için akı yoğunluğunun teğetsel bileşeninin değişimi.

Şekil 5.43 ile Şekil 5.48 arasında sağlam ve çeşitli sayıdaki ardışık kırıklar için hava aralığı akı yoğunluğunun teğetsel bileşeninin değişimi ve harmonik bileşenleri verilmektedir. Harmonik bileşenlerin bazılarında arızalarla birlikte değişimler olmasına karşın, anma işletmesinde teğetsel bileşen çok küçük değerde olduğundan bu değişimler ayırt edici olmamaktadır.

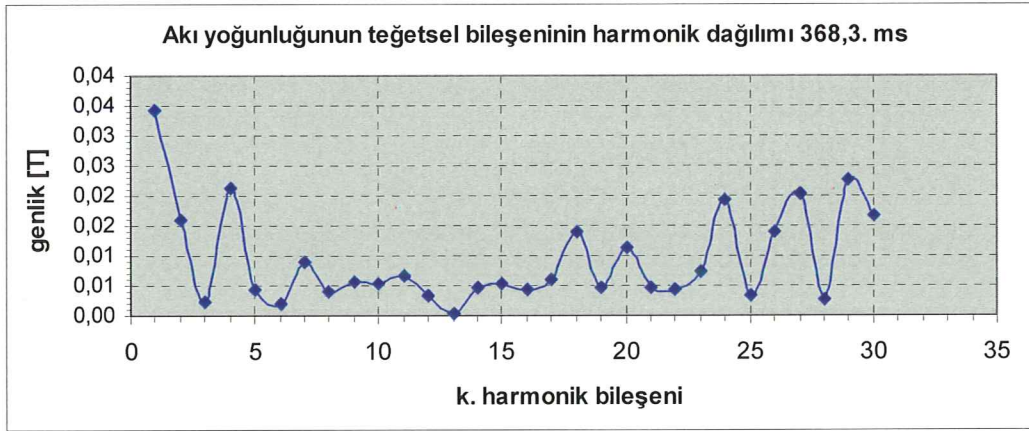
Şekil 5.49 da aralarında üç sağlam çubuk olacak biçimde iki kafes çubuğu kırığı için, Şekil 5.50 de ise birbirine göre elektriksel bakımdan simetrik iki çubuk için yapılan analizlerin sonuçları verilmektedir.



Şekil 5.48 : Ardışık dört kırık çubuk için akı yoğunluğunun teğetsel bileşeninin değişimi.



Şekil 5.49 : Herhangi iki kırık çubuk için akı yoğunluğunun teğetsel bileşeninin değişimi.



Şekil 5.50 : Simetrik iki kırık çubuk için akı yoğunluğunun teğetsel bileşeninin değişimi.

Anma işletmesinde çeşitli sayıdaki kafes çubuğu kırıkları için, hava aralığı akı yoğunluğunun teğetsel bileşeninin, hava aralığının çevresel uzunluğuna göre değişim eğrileri ve bunların harmonik bileşenleri incelendiğinde, akı yoğunluğunun teğetsel bileşeninde çok ayırt edici bir değişimin olmadığı görülmektedir.

Hava aralığı akı yoğunluğunun büyüklüğünün harmonik dağılımları, dikkate alınan bütün arızalar için Çizelge 5.3 de toplu olarak verilmektedir. Akı yoğunluğunun normal ve teğet bileşenlerinin harmonik dağılımlarında çok büyük değişimler olmadığı için toplu olarak verilmemiştir. Ayrıca Çizelge 5.4 de akı yoğunluklarının etkin değerleri verilmiştir.

Çizelge 5.3 : Değişik sayıdaki rotor çubuk arızalarında hava aralığı akı yoğunluğu değişiminin harmonik dağılımı.

Hız [d/dak.]	2892	2891,4	2887,7	2885,5	2900,1	2894,3	2883,2	2884	2891	2887
Harmonik bileşeni	sağlam 1.	sağlam 2.	1 kırık	2 ard. kırık	3 ard. kırık	4 ard. kırık	rast.2 kırık 1.	rast.2 kırık 2.	smrk.2 kırık 1.	smrk.2 kırık 2.
1	0,0453	0,0210	0,0335	0,0242	0,0279	0,1142	0,0442	0,0339	0,0380	0,0184
2	0,3152	0,3296	0,3191	0,3350	0,3265	0,3313	0,3128	0,3115	0,3175	0,3104
3	0,0314	0,0277	0,0510	0,0482	0,0339	0,0873	0,0127	0,0259	0,0310	0,0259
4	0,0926	0,0973	0,1220	0,0937	0,1374	0,0805	0,0725	0,0629	0,0823	0,1453
5	0,0129	0,0141	0,0214	0,0371	0,0261	0,0515	0,0263	0,0408	0,0182	0,0017
6	0,0286	0,0578	0,0285	0,0600	0,0592	0,0610	0,0188	0,0184	0,0321	0,0543
7	0,0075	0,0057	0,0113	0,0182	0,0080	0,0044	0,0060	0,0175	0,0085	0,0032
8	0,0525	0,0297	0,0481	0,0306	0,0416	0,0519	0,0576	0,0479	0,0455	0,0418
9	0,0034	0,0026	0,0058	0,0120	0,0040	0,0064	0,0115	0,0120	0,0045	0,0049
10	0,0048	0,0312	0,0118	0,0157	0,0150	0,0286	0,0066	0,0215	0,0200	0,0162
11	0,0117	0,0090	0,0069	0,0113	0,0072	0,0072	0,0103	0,0096	0,0061	0,0007
12	0,0080	0,0313	0,0091	0,0055	0,0200	0,0211	0,0147	0,0119	0,0239	0,0081
13	0,0167	0,0163	0,0202	0,0179	0,0178	0,0181	0,0137	0,0177	0,0059	0,0210
14	0,0164	0,0278	0,0155	0,0195	0,0260	0,0331	0,0079	0,0164	0,0262	0,0152
15	0,0186	0,0041	0,0146	0,0131	0,0200	0,0118	0,0132	0,0227	0,0074	0,0075
16	0,0074	0,0242	0,0284	0,0316	0,0187	0,0041	0,0240	0,0341	0,0007	0,0298
17	0,0054	0,0256	0,0142	0,0048	0,0206	0,0045	0,0069	0,0044	0,0057	0,0159
18	0,0098	0,0250	0,0074	0,0047	0,0071	0,0298	0,0202	0,0145	0,0092	0,0060
19	0,0285	0,0375	0,0321	0,0164	0,0293	0,0371	0,0197	0,0229	0,0344	0,0369
20	0,0083	0,0079	0,0066	0,0172	0,0309	0,0288	0,0285	0,0047	0,0239	0,0150
21	0,0216	0,0250	0,0229	0,0110	0,0212	0,0086	0,0054	0,0170	0,0093	0,0184
22	0,0146	0,0425	0,0178	0,0074	0,0161	0,0286	0,0242	0,0127	0,0285	0,0205
23	0,0135	0,0173	0,0160	0,0082	0,0067	0,0174	0,0108	0,0231	0,0191	0,0095
24	0,0310	0,0409	0,0154	0,0151	0,0193	0,0395	0,0355	0,0304	0,0461	0,0033
25	0,0179	0,0272	0,0232	0,0121	0,0151	0,0078	0,0184	0,0293	0,0287	0,0151
26	0,0418	0,0397	0,0184	0,0149	0,0522	0,0153	0,0155	0,0239	0,0278	0,0321
27	0,0108	0,0016	0,0052	0,0166	0,0096	0,0203	0,0146	0,0040	0,0102	0,0055
28	0,1174	0,1234	0,1425	0,1183	0,1048	0,1446	0,1468	0,1307	0,1471	0,1318
29	0,0140	0,0046	0,0083	0,0285	0,0156	0,0238	0,0235	0,0118	0,0045	0,0109
30	0,0597	0,0556	0,0387	0,0407	0,0683	0,0242	0,0256	0,0293	0,0193	0,0571

Çizelge 5.4 : Hava aralığı akı yoğunluğunun ve bileşenlerinin etkin değerleri.

	Motor devir hızı [d/dak]	zaman [ms]	Hava aralığı akı yoğunluğu etkin değeri [T]		
			Büyüklik	Normal	Teğetsel
Sağlam 1. analiz	2892	330	0,653	0,647	0,08439
Sağlam 2. analiz	2891,4	326,12	0,654	0,65	0,0757
Bir kırık	2887,7	388,75	0,657	0,651	0,0862
Ardışık iki kırık	2885,5	451,5	0,6514	0,647	0,07605
Ardışık üç kırık	2900,1	473,75	0,6529	0,6476	0,0823
Ardışık dört kırık	2894,3	330	0,668	0,663	0,081
Rasgele iki kırık 1. analiz	2883,2	400			
Rasgele iki kırık 2. analiz	2884	409,75	0,6558	0,645	0,08745
Simetrik iki kırık 2. analiz	2887	368,3	0,6536	0,6486	0,08057

Akı yoğunluğu büyüklüğünün harmonik değer dağılımı incelendiğinde aşağıdaki değerlendirmeler yapılır:

S.7. En büyük genlikli harmonik bileşenleri 2., 4. ve rotorun çubuk sayısı olan 28. bileşendir. Her üçünde genliği ardışık artan kırık sayısı ile artmaktadır.

S.8. İkinci harmonik bileşenin rastgele ve simetrik iki kırıkta oluşan genlik değişimleri, ardışık üç ve dört kırığa göre daha azdır. Buna karşın 28. harmonik dağılımında, bu iki durumda genlik değerleri artmaktadır.

S.9. Diğer harmoniklerin genlik değerleri küçüktür. Genel olarak pek çoğunun genlik değerleri arızalı çubuk sayısı ile artmaktadır. Ancak çok belirgin bir değişim yoktur.

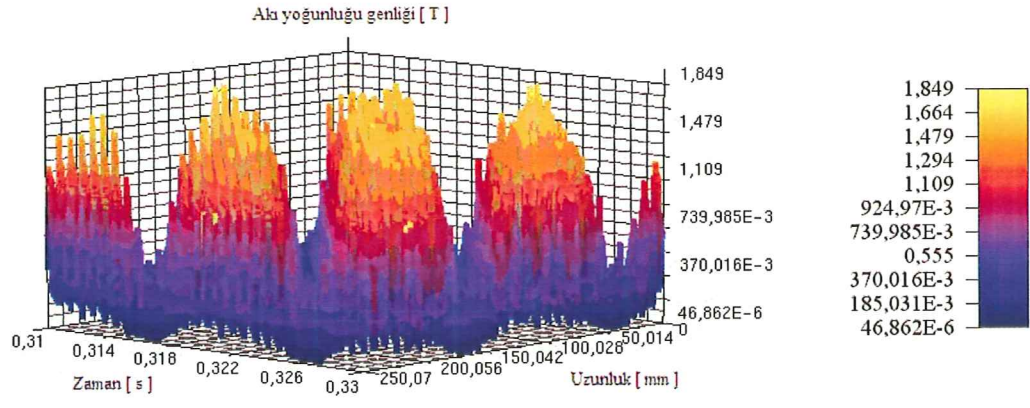
Aynı yaklaşımla hava aralığı akı yoğunluğunun normal bileşeni de aşağıdaki gibi değerlendirilebilir.

S.10. Rotorda oluşan arızalarda temel bileşenin genliğinde küçük değişimler oluşmaktadır. Ancak belirgin bir artış yoktur.

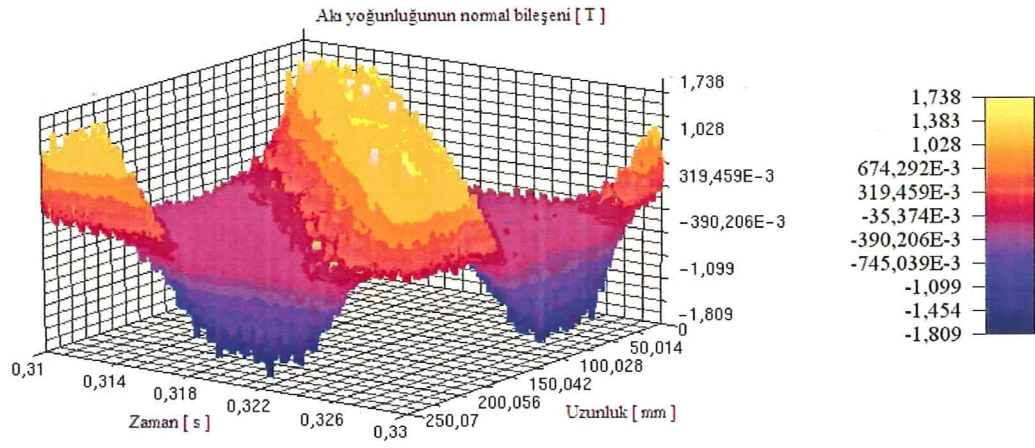
S.11. Birinci bileşenin yanında, rotor çubuk sayısına yakın tek değerli harmonik bileşenlerin, 27. ve 29., genlikleri büyüktür.

S.12. Diğer harmonik bileşenlerde oluşan değişimler çok küçük değerdedir.

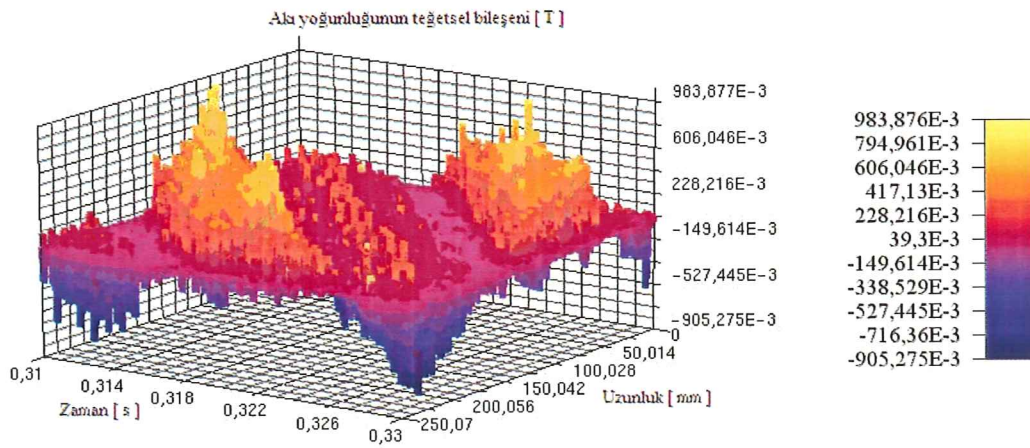
Bunun yanı sıra Şekil 5.51 de sağlam motor için 20 ms lik bir aralıkta yapılan üç boyutlu analiz sonuçları verilmektedir.



a)

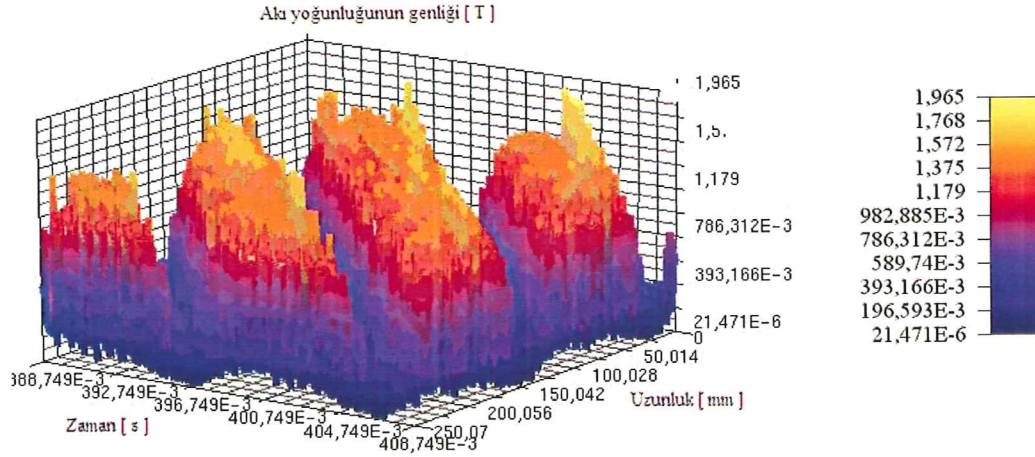


b)

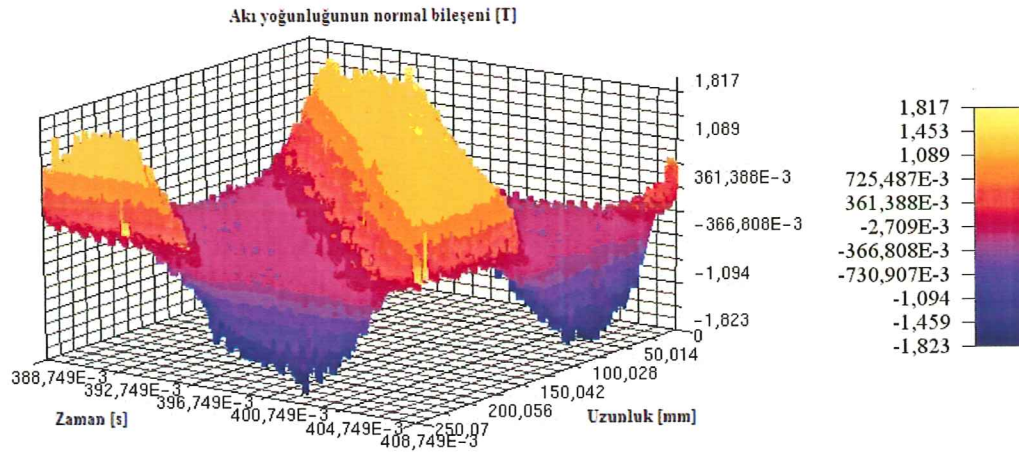


c)

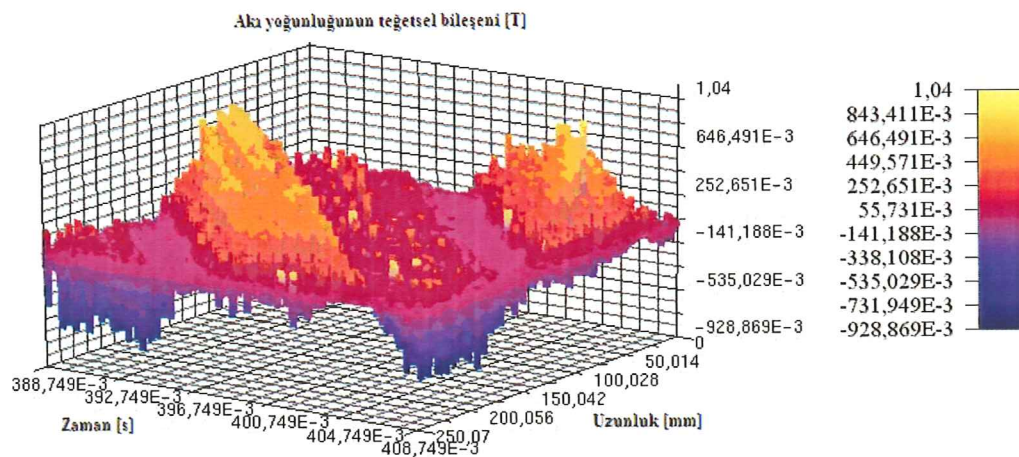
Şekil 5.51: Sağlam motorun akı yoğunluğunun zamanla ve çevresel uzunlukla değişimi.



a)

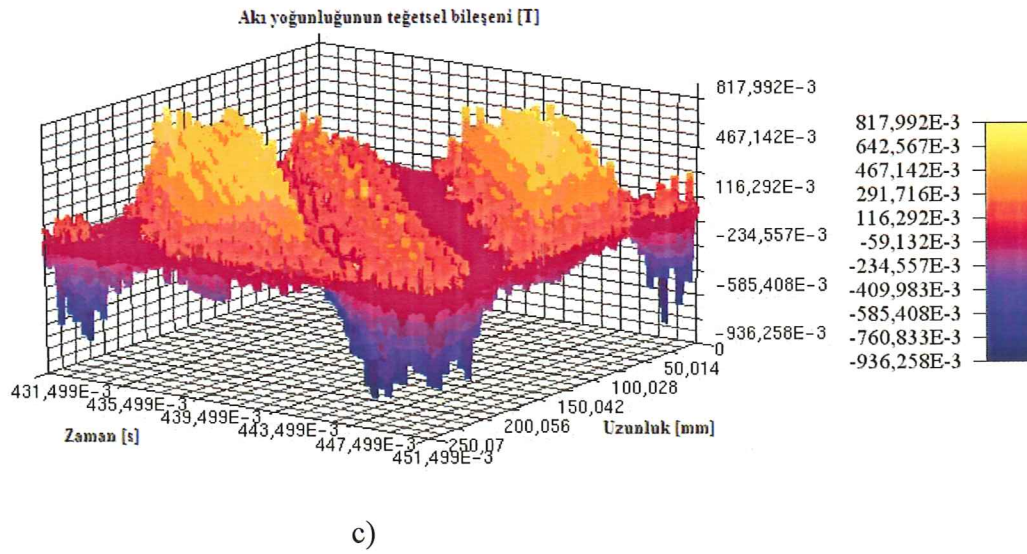
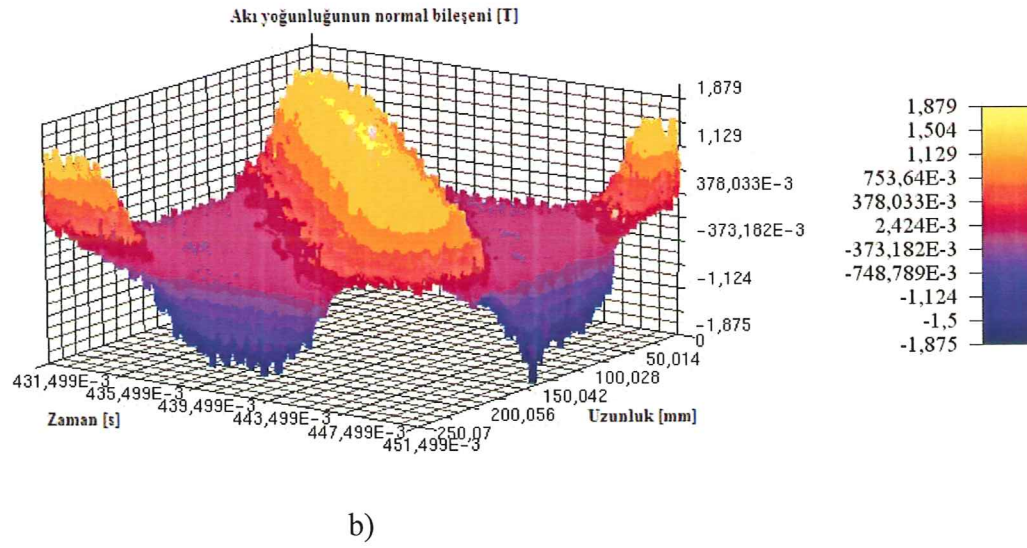
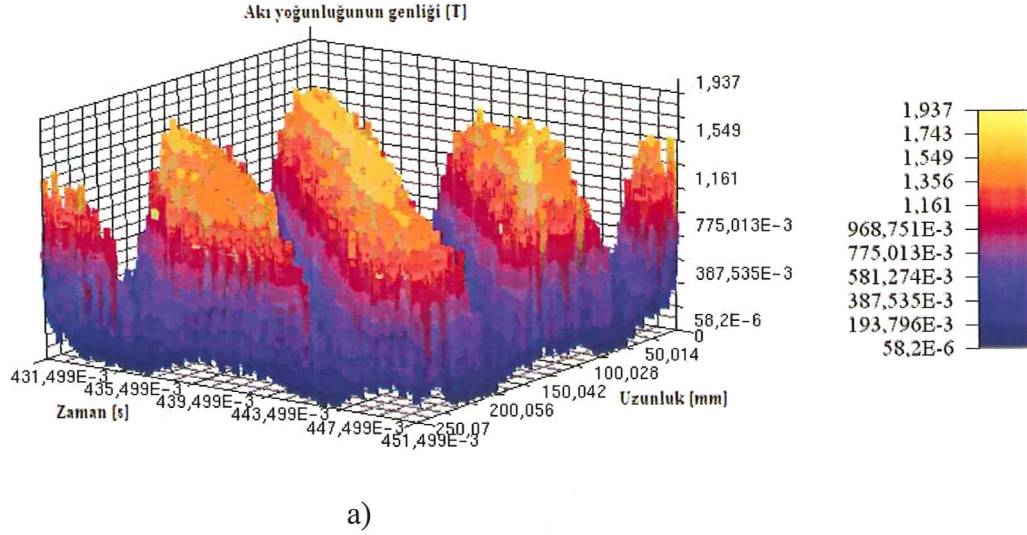


b)



c)

Şekil 5.52: Bir çubuğu kırık motorun akı yoğunluğunun zamanla ve çevresel uzunlukla değişimi.



Şekil 5.53: Ardişik iki çubuğu kırık motorun akı yoğunluğunun zamanla ve çevresel uzunlukla değişimi.

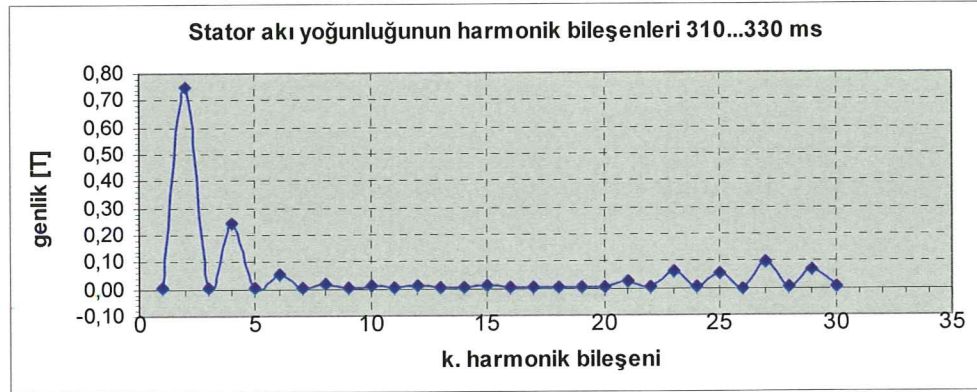
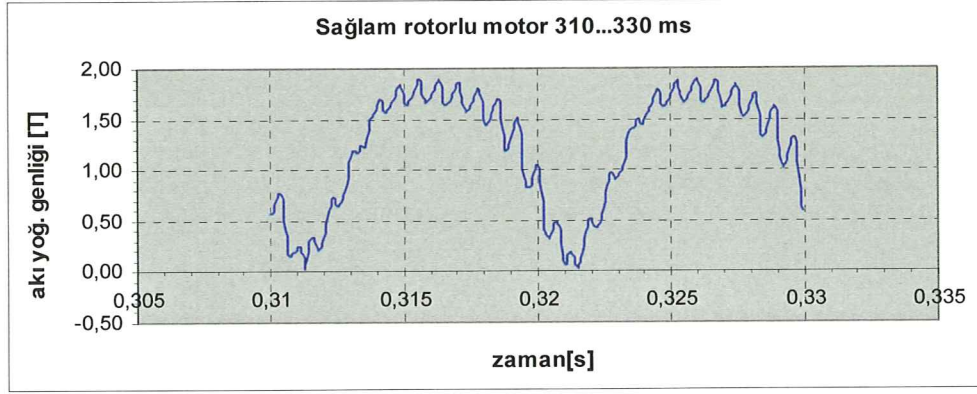
5.3.3. Statorun belli bir noktasında magnetik akı yoğunluğunun değişimi

Stator sac paketinde akı yoğunluğunun zamanla değişimi, motor gövdesinde titreşim ölçümlerinin yapıldığı bölgenin altında kalan, iki stator oluğu arasındaki bir noktada incelenmiştir (Şekil 5.12) . Bu noktada değişik kafes arızaları için akı yoğunluğunun genliği ve y eksen bileşeni hesaplanarak üsttitreşim bileşenleri bulunmuştur. Böylelikle hem stator akısının değişiminin yorumlanması, hem de ileride yapılacak bir çalışmaya yönelik olarak stator sac paketinin titreşim hesabına ilişkin bir veri tabanı oluşturulmuştur.

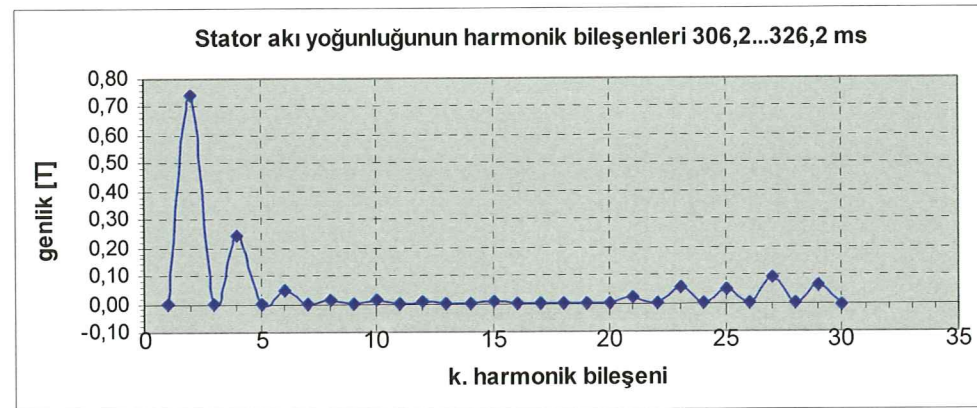
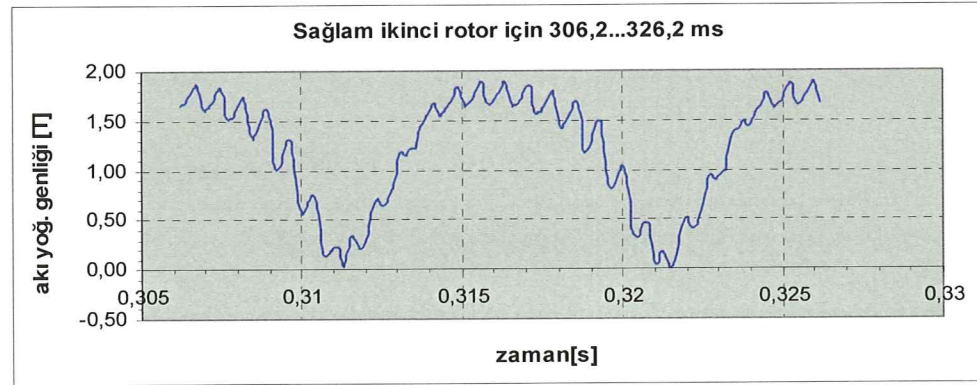
Aşağıdaki şekillerde, akı yoğunluklarının 20 ms lik bölüm içerisinde zamanla değişimi ve harmonik dağılımı ard arda verilmektedir. Bunların yorumlanmasında büyüklük ve bileşen özeğrilerinden çok harmonik dağılımlarından yararlanılmıştır. Akı yoğunluklarının, sağlam ve çeşitli sayıdaki kırık çubuklar için magnetik analizlerle hesaplanan etkin değerleri Çizelge 5.5 de verilmektedir. Ayrıca bu değişim eğrilerinin harmonik bileşenleri Çizelge 5.6 da ve Çizelge 5.7 de toplu olarak ayrıntılı biçimde verilmiştir.

Çizilge 5.5 : Stator boyunduruğunda belli bir noktadaki akı yoğunluğunun etkin değerleri.

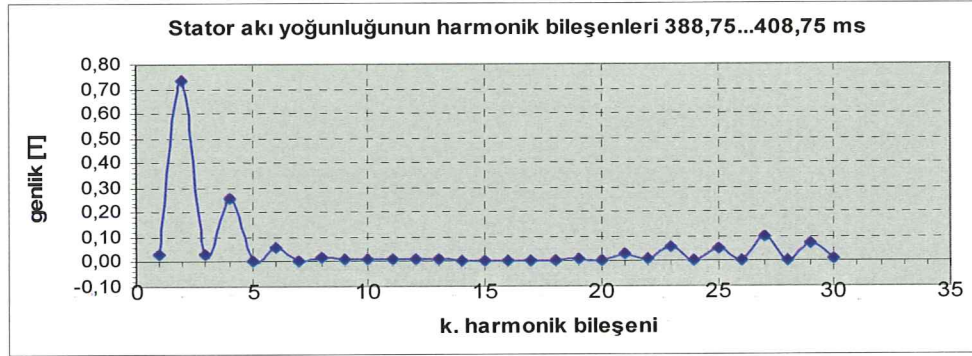
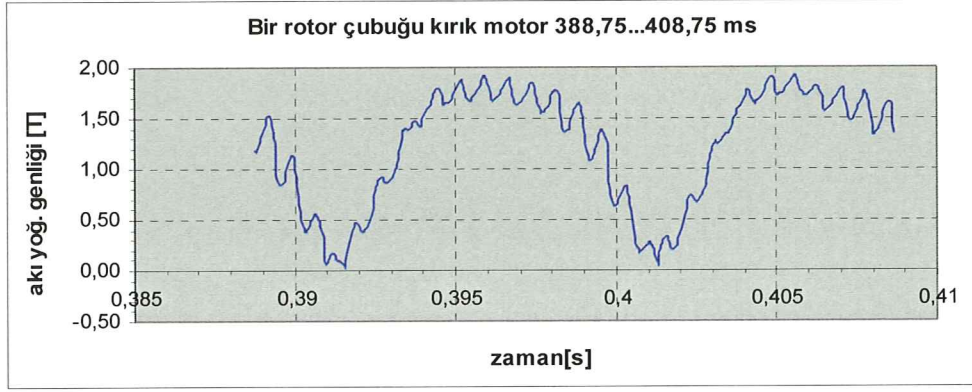
	Motor devir hızı [d/dak]	zaman [ms]	Stator boyunduruğunda bir noktada akı yoğunluğu [T]	
			Büyüklük	Y-Bileşeni
Sağlam 1. analiz	2892	330	1,339	1,338
Sağlam 2. analiz	2891,4	326,12	1,339	1,338
Bir kırık	2887,7	388,75	1,346	1,344
Ardışık iki kırık	2885,5	451,5	1,34	1,339
Ardışık üç kırık	2900,1	473,75	1,3365	1,3353
Ardışık dört kırık	2894,3	330	1,372	1,37
Rasgele iki kırık 1. analiz	2883,2	400	1,336	1,334
Rasgele iki kırık 2. analiz	2884	409,75	1,344	1,3433
Simetrik iki kırık 2. analiz	2887	368,3	1,356	1,3546



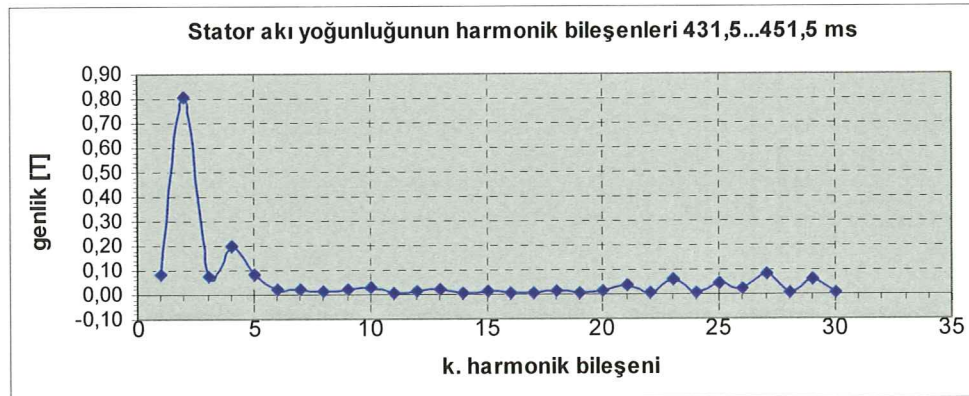
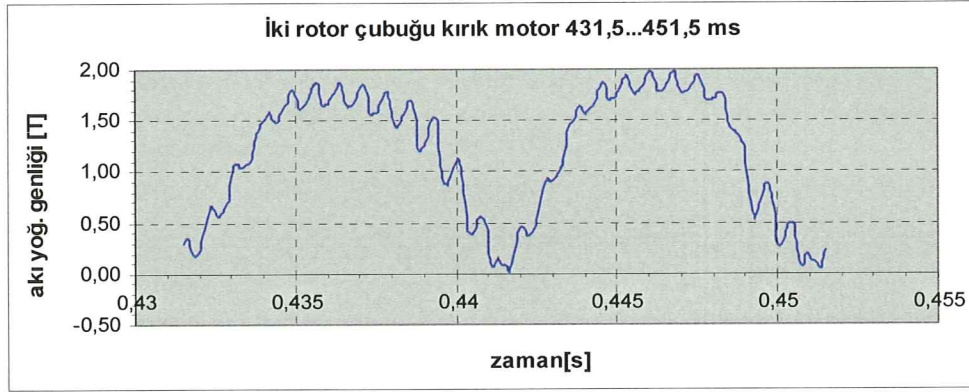
Şekil 5.54 : Sağlam birinci rotor için statorun belli noktasındaki akı yoğunluğunun değişimi.



Şekil 5.55 : Sağlam ikinci rotor için statorun belli noktasındaki akı yoğunluğunun değişimi.

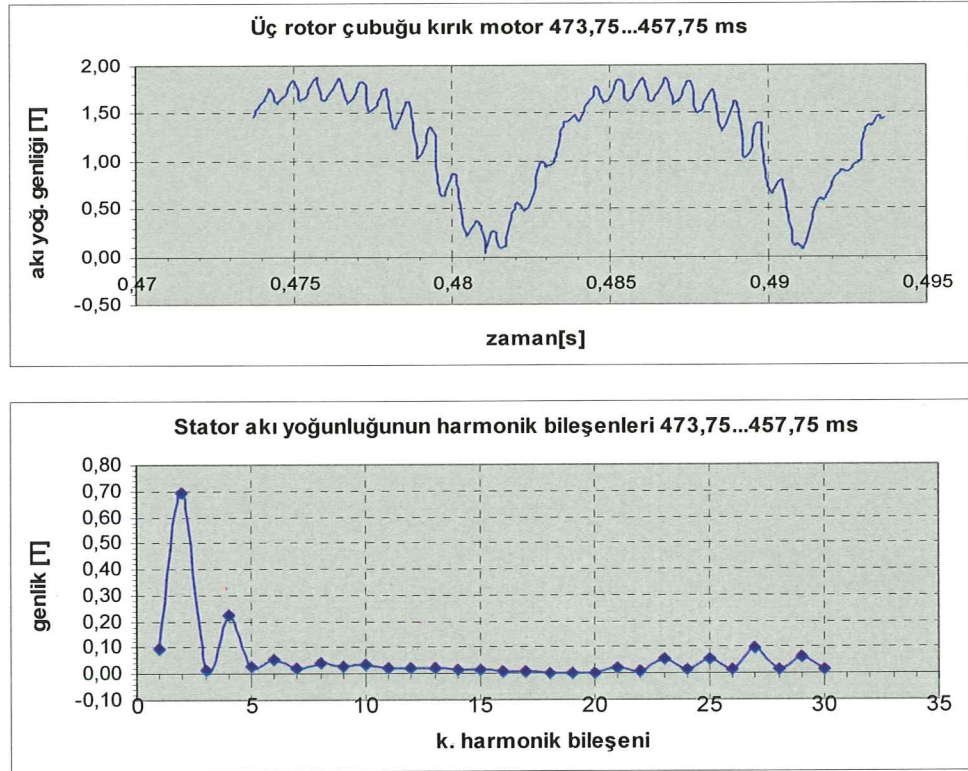


Şekil 5.56 : Bir kırık çubuk için statorun belli noktasındaki akı yoğunluğunun değişimi.

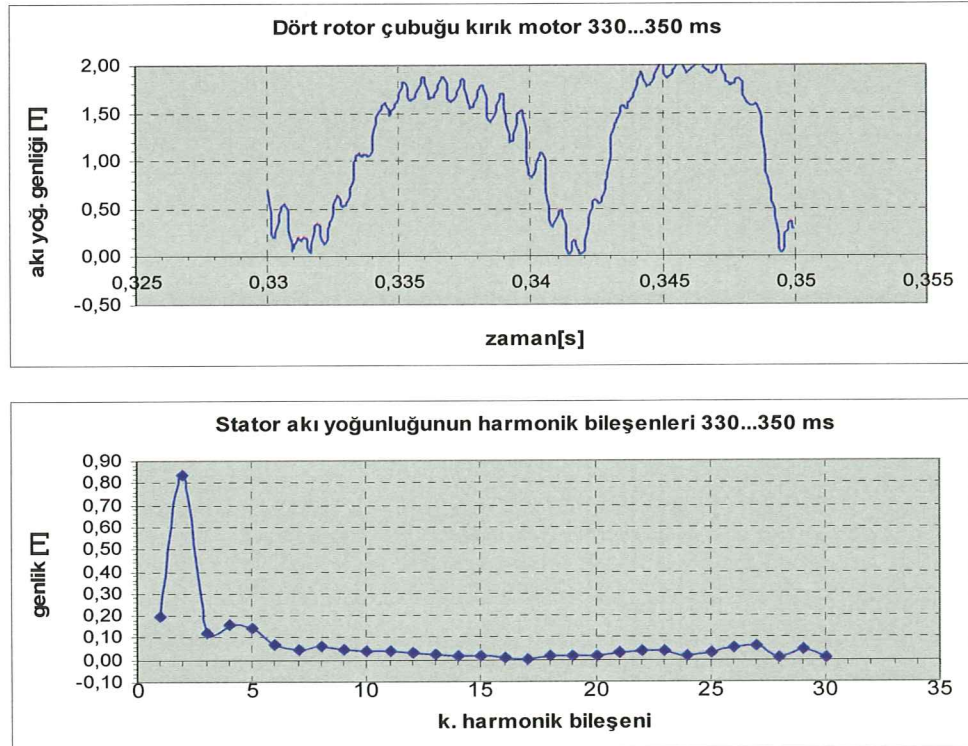


Şekil 5.57 : Ardışık iki kırık çubuk için statorun belli noktasındaki akı yoğunluğu değişimi.

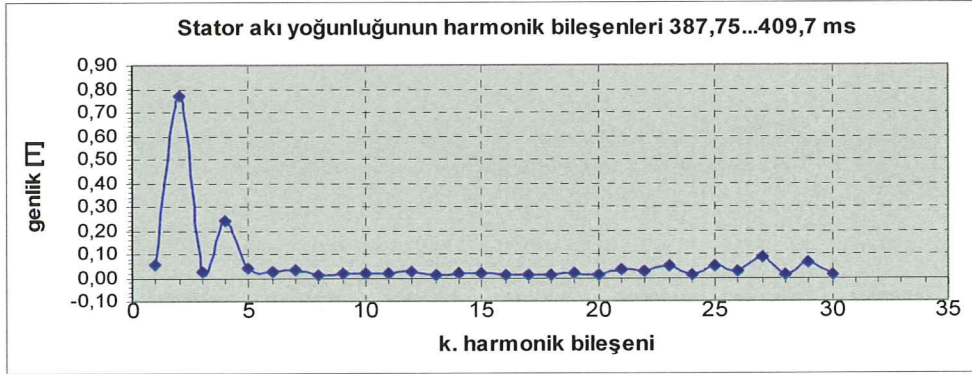
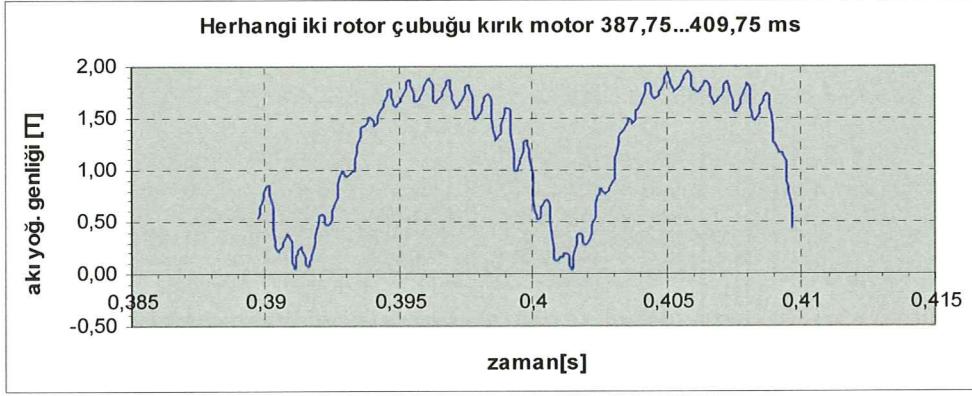
Stator sac paketinin belli bir noktasındaki akı yoğunluğunun ardışık üç ve dört kırık için zamana bağlı değişimleri aşağıda verilmektedir.



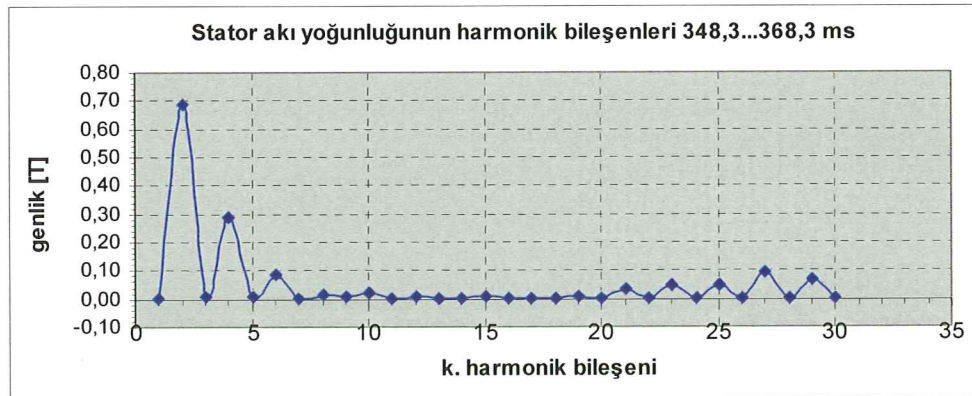
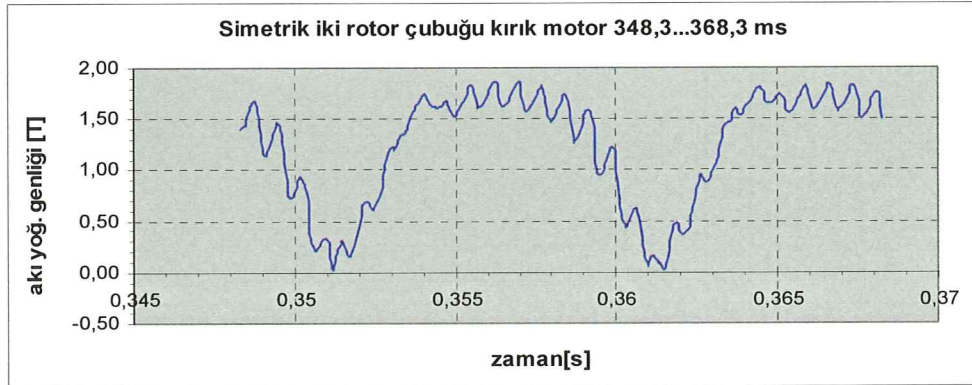
Şekil 5.58 : Ardışık üç kırık çubuk için statorun belli noktasındaki akı yoğunluğu değişimi.



Şekil 5.59 : Ardışık dört kırık çubuk için statorun belli noktasında akı yoğunluğu değişimi.

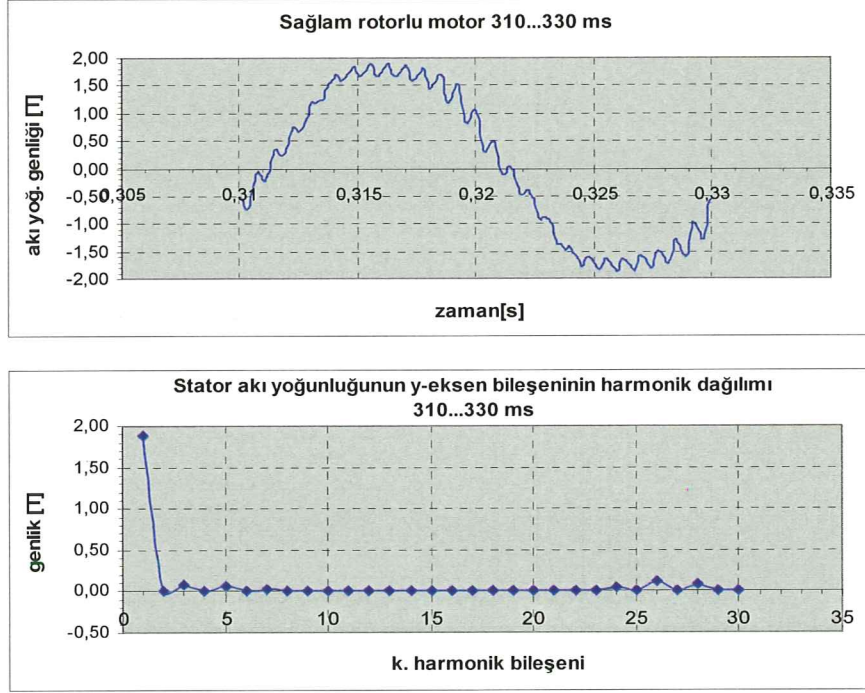


Şekil 5.60 : Herhangi iki kırık çubuk için statorun belli noktasında akı yoğunluğu değişimi.

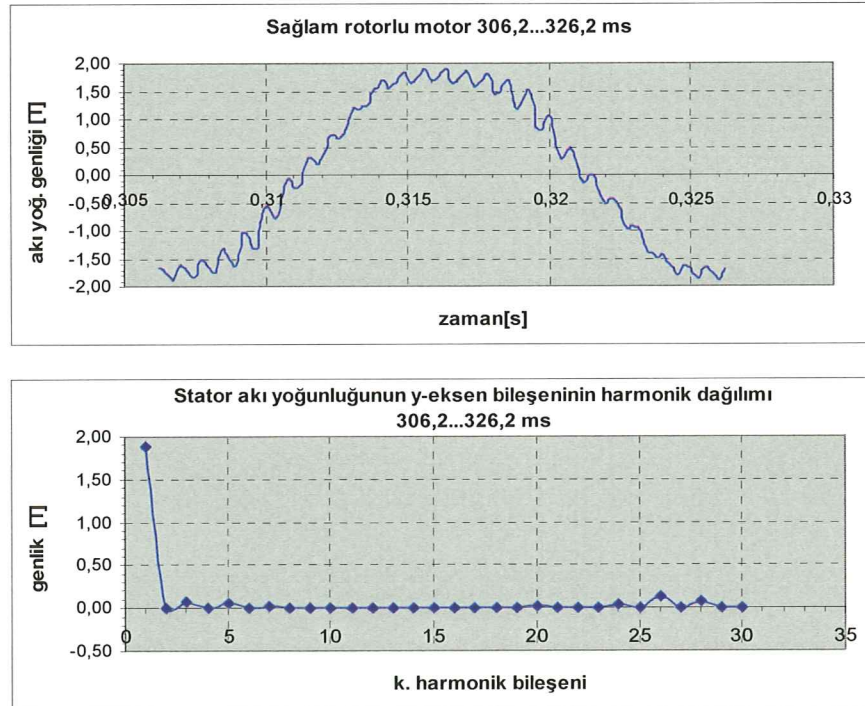


Şekil 5.61 : Simetrik iki kırık çubuk için statorun belli noktasında akı yoğunluğu değişimi.

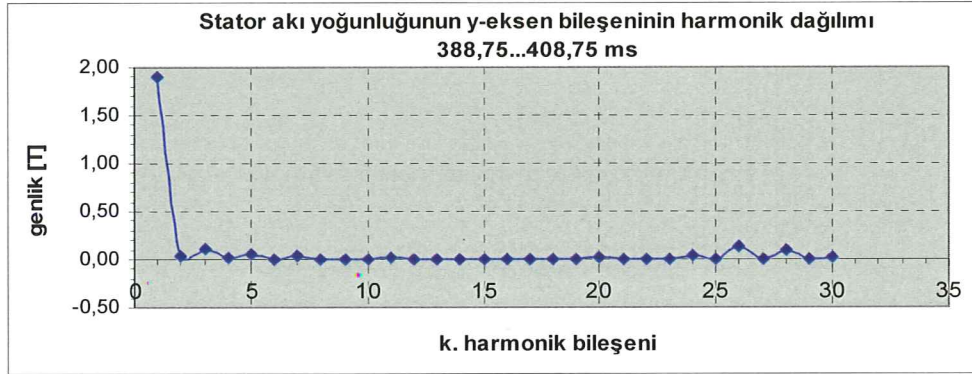
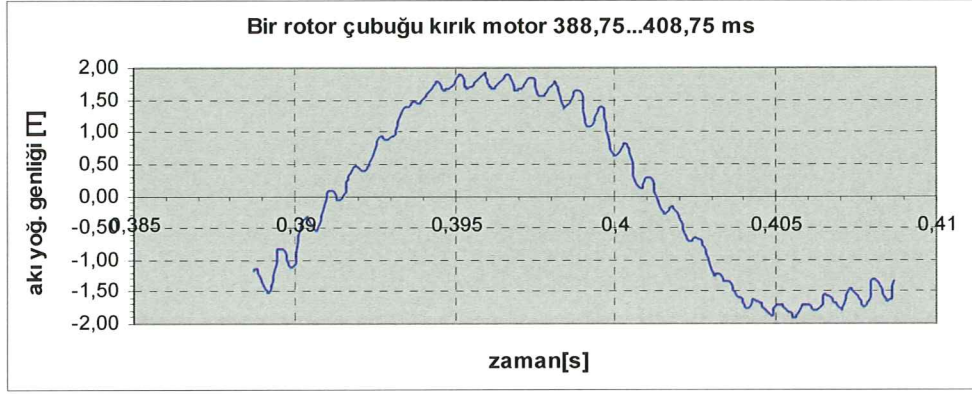
Benzer biçimde, statorun belli bir noktasındaki akı yoğunluğunun y-eksen bileşeninin zaman ile değişimi ve bu değişim eğrilerinin harmonik dağılımları incelenmiştir. Sağlam rotor ve değişik sayıdaki ardışık kırık çubuklu rotorlar için elde edilen eğriler aşağıda verilmektedir.



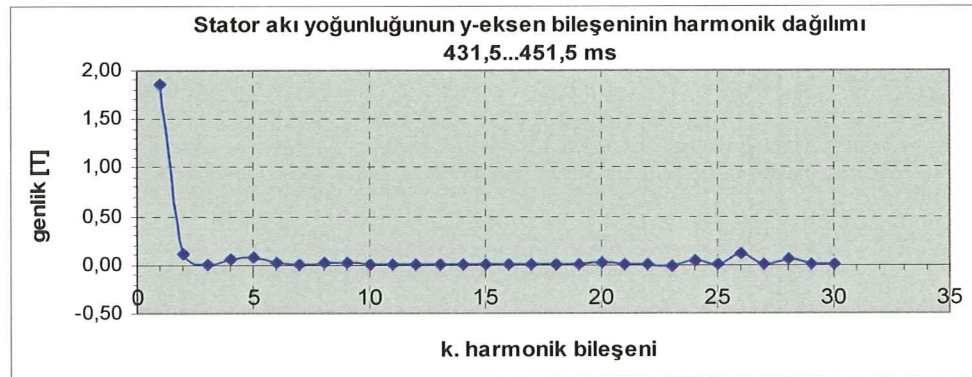
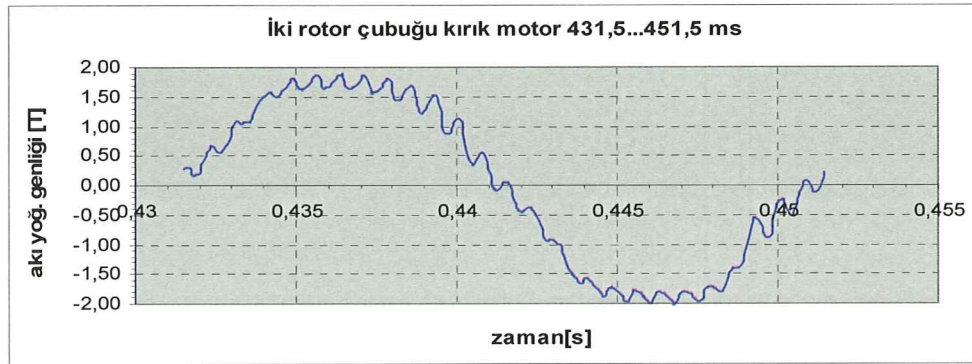
Şekil 5.62 : Sağlam birinci rotor için stator akı yoğunluğunun y-eksen bileşeninin değişimi.



Şekil 5.63 : Sağlam ikinci rotor için stator akı yoğunluğunun y-eksen bileşeninin değişimi.

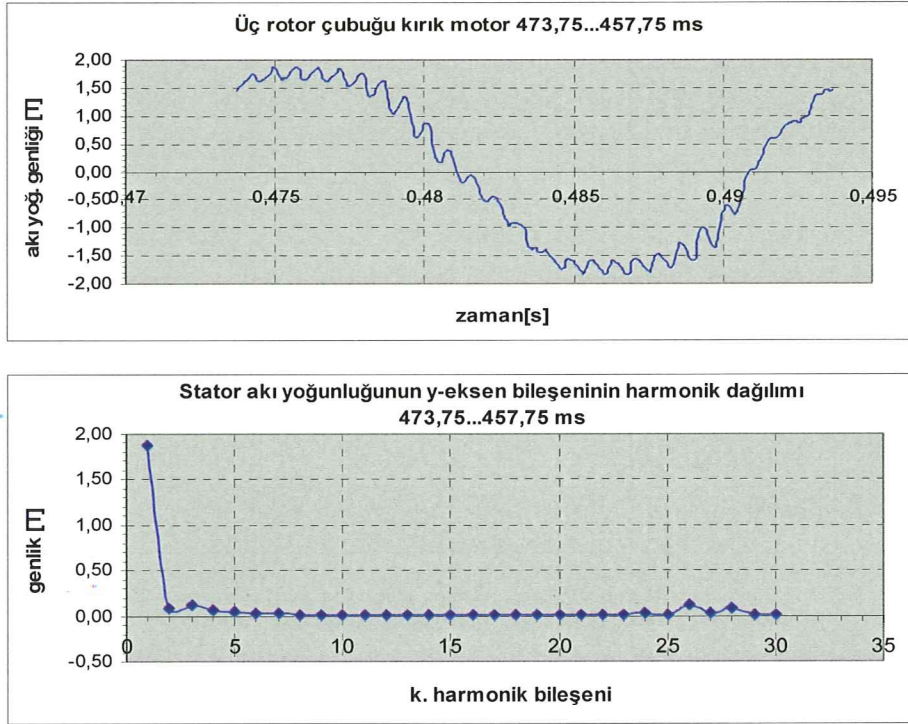


Şekil 5.64 : Bir kırık çubuk için stator akı yoğunluğunun y-eksen bileşeninin değişimi.

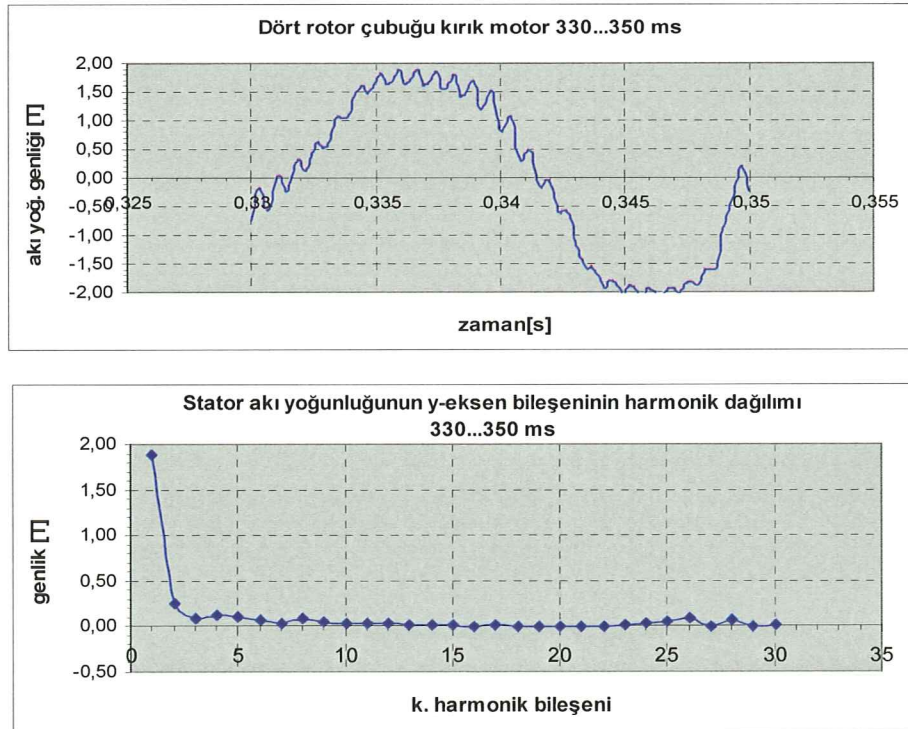


Şekil 5.65 : Ardışık iki kırık çubuk için stator akı yoğunluğunun y-eksen bileşeninin değişimi.

Stator sac paketinin belli bir noktasındaki akı yoğunluğunun y-eksen bileşeninin ardışık üç ve dört kırık için zamana bağlı değişimleri aşağıda verilmektedir.

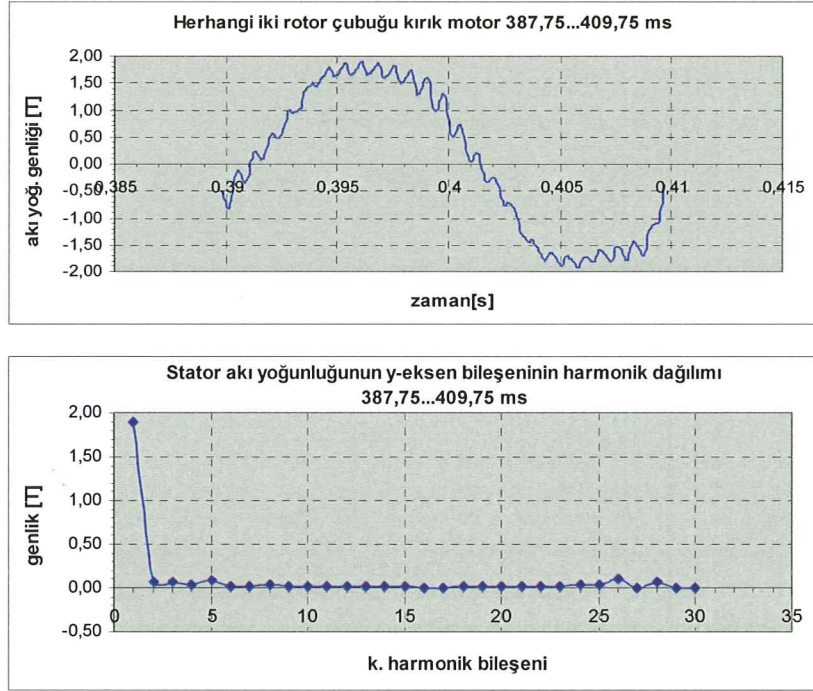


Şekil 5.66 : Ardışık üç kırık çubuk için stator akı yoğunluğunun y-eksen bileşeninin değişimi.

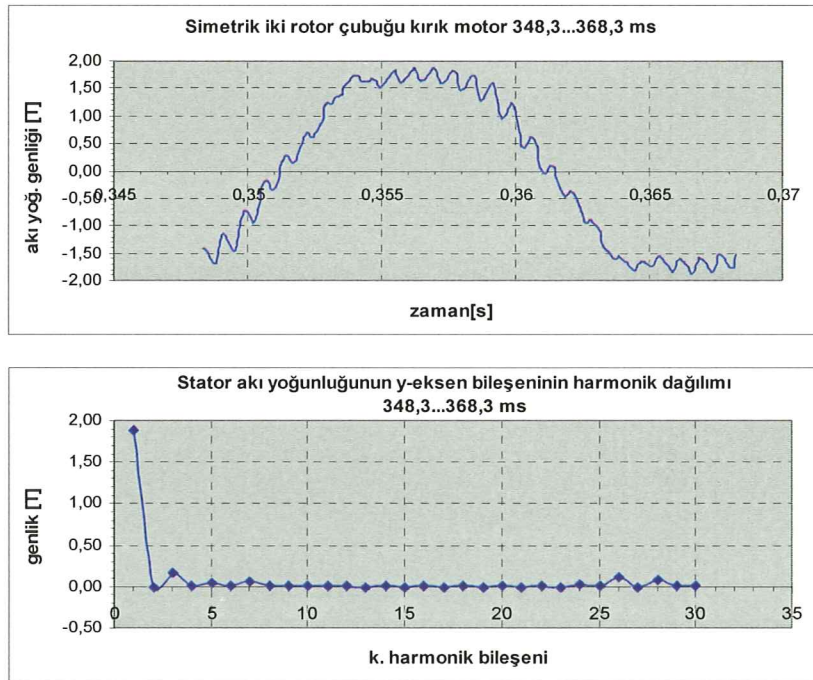


Şekil 5.67 : Ardışık dört kırık çubuk için stator akı yoğunluğunun y-eksen bileşeninin değişimi.

Stator sac paketinin belli bir noktasındaki akı yoğunluğunun y-eksen bileşeninin herhangi iki kırık çubuk ve simetrik iki kırık çubuk için zamana bağlı değişimleri aşağıda verilmektedir.



Şekil 5.68 : Herhangi iki çubuğu kırık motorun stator akı yoğunluğunun y bileşeninin değişimi.



Şekil 5.69 : Simetrik iki çubuğu kırık motorun stator akı yoğunluğunun y bileşeninin değişimi.

Çizelge 5.6 : Statorun belli bir noktasındaki akı yoğunluğu değişiminin değişik sayıdaki çubuk kırıklarında harmonik dağılımı.

Hız [d/dak.]	2892	2891,4	2887,7	2885,5	2900,1	2894,3	2883,2	2884	2891	2887
Harmonik derecesi	sağlam 1.	sağlam 2.	1 kırık	2 ard. kırık	3 ard. kırık	4 ard. kırık	rast.2 kırık 1.	rast.2 kırık 2.	smrk.2 kırık 1.	smrk.2 kırık 2.
1	0,0029	0,0031	0,0301	0,0861	0,0948	0,2040	0,0680	0,0521	0,0042	0,0041
2	0,7411	0,7414	0,7311	0,8066	0,6950	0,8378	0,7545	0,7634	0,7227	0,6915
3	0,0030	0,0026	0,0307	0,0804	0,0181	0,1273	0,0298	0,0234	0,0096	0,0095
4	0,2427	0,2429	0,2595	0,2029	0,2243	0,1614	0,2306	0,2428	0,2358	0,2911
5	0,0025	0,0027	0,0037	0,0813	0,0255	0,1518	0,0549	0,0439	0,0087	0,0133
6	0,0550	0,0550	0,0596	0,0242	0,0563	0,0758	0,0383	0,0289	0,0750	0,0865
7	0,0020	0,0024	0,0015	0,0240	0,0244	0,0476	0,0146	0,0299	0,0070	0,0063
8	0,0211	0,0209	0,0174	0,0164	0,0399	0,0657	0,0243	0,0080	0,0463	0,0146
9	0,0023	0,0025	0,0066	0,0193	0,0255	0,0517	0,0129	0,0208	0,0118	0,0127
10	0,0148	0,0145	0,0132	0,0303	0,0338	0,0417	0,0217	0,0179	0,0303	0,0266
11	0,0031	0,0030	0,0074	0,0109	0,0242	0,0393	0,0040	0,0170	0,0159	0,0063
12	0,0088	0,0086	0,0124	0,0149	0,0235	0,0318	0,0106	0,0245	0,0248	0,0130
13	0,0064	0,0059	0,0083	0,0203	0,0192	0,0252	0,0178	0,0105	0,0191	0,0072
14	0,0047	0,0054	0,0051	0,0081	0,0140	0,0182	0,0108	0,0151	0,0177	0,0018
15	0,0083	0,0080	0,0059	0,0117	0,0145	0,0216	0,0118	0,0149	0,0219	0,0128
16	0,0024	0,0029	0,0053	0,0110	0,0072	0,0140	0,0055	0,0101	0,0113	0,0076
17	0,0045	0,0045	0,0013	0,0085	0,0085	0,0036	0,0062	0,0135	0,0220	0,0064
18	0,0022	0,0023	0,0018	0,0153	0,0040	0,0167	0,0072	0,0126	0,0061	0,0033
19	0,0032	0,0039	0,0071	0,0102	0,0038	0,0221	0,0051	0,0185	0,0177	0,0111
20	0,0026	0,0016	0,0050	0,0132	0,0032	0,0178	0,0148	0,0143	0,0029	0,0026
21	0,0256	0,0265	0,0303	0,0347	0,0236	0,0325	0,0309	0,0350	0,0186	0,0368
22	0,0031	0,0026	0,0074	0,0069	0,0066	0,0400	0,0101	0,0237	0,0041	0,0063
23	0,0593	0,0602	0,0573	0,0622	0,0580	0,0416	0,0572	0,0480	0,0496	0,0490
24	0,0020	0,0031	0,0064	0,0087	0,0118	0,0225	0,0072	0,0093	0,0020	0,0072
25	0,0560	0,0546	0,0519	0,0479	0,0579	0,0317	0,0504	0,0454	0,0493	0,0513
26	0,0005	0,0023	0,0026	0,0240	0,0152	0,0572	0,0146	0,0239	0,0025	0,0046
27	0,0956	0,0959	0,0980	0,0841	0,0974	0,0675	0,0940	0,0874	0,0944	0,0931
28	0,0022	0,0015	0,0052	0,0094	0,0142	0,0160	0,0137	0,0079	0,0027	0,0029
29	0,0676	0,0673	0,0712	0,0591	0,0614	0,0526	0,0696	0,0652	0,0623	0,0709
30	0,0014	0,0003	0,0068	0,0047	0,0125	0,0135	0,0062	0,0100	0,0031	0,0072

Çizelge 5.7 : Statorun belli bir noktasındaki akı yoğunluğu değişiminin y bileşeninin değişik sayıdaki çubuk kırıklarında harmonik dağılımı.

Hız [d/dak.]	2892	2891,4	2887,7	2885,5	2900,1	2894,3	2883,2	2884	2891	2887
Harmonik bileşeni	sağlam 1.	sağlam 2.	1 kırık	2 ard. kırık	3 ard. kırık	4 ard. kırık	rast.2 kırık 1.	rast.2 kırık 2.	smrk.2 kırık 1.	smrk.2 kırık 2.
1	1,8811	1,8817	1,8883	1,8781	1,8733	1,8942	1,8738	1,8877	1,9064	1,8994
2	0,0007	0,0008	0,0411	0,1259	0,0830	0,2671	0,0811	0,0648	0,0050	0,0047
3	0,0868	0,0867	0,1155	0,0158	0,1174	0,1009	0,0713	0,0676	0,1112	0,1659
4	0,0012	0,0008	0,0134	0,0683	0,0621	0,1315	0,0371	0,0329	0,0053	0,0134
5	0,0620	0,0623	0,0647	0,0843	0,0485	0,1128	0,0687	0,0838	0,0470	0,0562
6	0,0015	0,0012	0,0015	0,0421	0,0303	0,0878	0,0332	0,0250	0,0122	0,0093
7	0,0311	0,0311	0,0319	0,0118	0,0372	0,0387	0,0236	0,0182	0,0056	0,0608
8	0,0012	0,0009	0,0051	0,0269	0,0200	0,0894	0,0164	0,0309	0,0112	0,0094
9	0,0013	0,0012	0,0066	0,0248	0,0175	0,0673	0,0173	0,0218	0,0282	0,0174
10	0,0006	0,0004	0,0057	0,0167	0,0100	0,0380	0,0077	0,0122	0,0120	0,0090
11	0,0054	0,0057	0,0095	0,0106	0,0076	0,0474	0,0065	0,0140	0,0268	0,0117
12	0,0016	0,0011	0,0036	0,0178	0,0037	0,0446	0,0132	0,0179	0,0160	0,0056
13	0,0016	0,0015	0,0010	0,0169	0,0054	0,0236	0,0143	0,0133	0,0160	0,0032
14	0,0010	0,0015	0,0045	0,0087	0,0041	0,0267	0,0107	0,0169	0,0188	0,0057
15	0,0008	0,0012	0,0026	0,0068	0,0036	0,0256	0,0047	0,0160	0,0118	0,0052
16	0,0043	0,0041	0,0038	0,0130	0,0047	0,0136	0,0116	0,0085	0,0197	0,0108
17	0,0015	0,0010	0,0018	0,0130	0,0032	0,0173	0,0070	0,0082	0,0103	0,0013
18	0,0022	0,0024	0,0049	0,0094	0,0068	0,0121	0,0050	0,0158	0,0119	0,0117
19	0,0016	0,0010	0,0044	0,0072	0,0090	0,0091	0,0086	0,0169	0,0092	0,0029
20	0,0146	0,0151	0,0159	0,0281	0,0187	0,0074	0,0219	0,0147	0,0149	0,0175
21	0,0009	0,0013	0,0040	0,0153	0,0092	0,0063	0,0146	0,0153	0,0051	0,0052
22	0,0092	0,0090	0,0047	0,0124	0,0174	0,0045	0,0058	0,0102	0,0161	0,0079
23	0,0012	0,0002	0,0063	0,0022	0,0067	0,0303	0,0087	0,0177	0,0011	0,0024
24	0,0417	0,0436	0,0448	0,0465	0,0328	0,0404	0,0439	0,0435	0,0405	0,0401
25	0,0019	0,0027	0,0078	0,0204	0,0097	0,0606	0,0154	0,0281	0,0029	0,0100
26	0,1257	0,1254	0,1237	0,1166	0,1147	0,0971	0,1218	0,1138	0,1146	0,1190
27	0,0010	0,0024	0,0048	0,0097	0,0253	0,0093	0,0082	0,0048	0,0025	0,0028
28	0,0824	0,0816	0,0866	0,0733	0,0865	0,0780	0,0860	0,0793	0,0844	0,0872
29	0,0020	0,0014	0,0068	0,0060	0,0085	0,0154	0,0135	0,0040	0,0044	0,0057
30	0,0073	0,0057	0,0093	0,0076	0,0135	0,0240	0,0144	0,0089	0,0089	0,0066

Şekil 5.54 den Şekil 5.61 e kadar verilen eğrilerde statordaki belirli bir noktada akı yoğunluğunun genliğinin harmonik değerleri incelendiğinde aşağıdaki değerlendirmeler yapılır:

S.13. Birinci bileşenin genliği ardışık arızalarda artmaktadır. Simetrik iki arıza durumunda ise, yaklaşık sağlam durumdaki değerlerine eşittir.

S.14. Harmonik dağılımında en büyük genlikli bileşenler 2. ve 4. bileşenlerdir.

S.15. İkincil büyüklükteki bileşenler ise, 6., 8., 23., 25., 27 ve 29. bileşenlerdir Çizelge 5.6. Diğer bileşenlerde genlikler çok küçüktür. Harmonik dağılımları ayrıntılı olarak incelendiğinde, artan ardışık arıza sayısı ile, harmonik bileşenlerinin genliğinin arttığı, rast gele iki kırık ve simetrik iki kırık durumunda ayırt edici belirgin bir fark bulunamadığı belirtilebilir.

Şekil 5.62 den, Şekil 5.69 a kadar verilen eğrilerde akı yoğunluğunun y bileşeni harmonik değerleri incelendiğinde,

S.16. Hesaplama yapılan nokta dikkate alındığında, y eksen bileşen değerleri normal bileşen değerlerine yaklaşık eşittir. Artan rotor arızaları ile titreşimin arttığı düşünülürse, y eksen harmonik bileşen değerlerinin artması beklenmektedir. Hesaplanan değerlere göre, temel bileşen değerleri ardışık, rastgele ve simetrik kırıklar için çoğunlukla artmaktadır.

S.17. En büyük harmonik bileşeni 26. bileşendir. İkincil büyüklükteki harmonik bileşen genlikleri ise, 3., 28., 5. ve 24. bileşenlerdir (Çizelge 5.7).

S.18. Verilen değerler ayrıntılı olarak incelendiğinde yapılan magnetik konumlama hataları dışında harmonik genliklerinin arıza sayısı ile arttığı görülmüştür. Ancak simetrik kırıklı arızalarda artış o denli belirgin değildir.

Akı yoğunlukları ve bileşenleri için yapılan bu incelemelerde, temel bileşenin ve rotorun çubuk sayısındaki veya bu sayıya yakın harmonik bileşenlerin, büyük genlikli olduğu, rotor arızaları ile belirgin biçimde değiştiği saptanmıştır. Gerçekte kafesli makine çevrimsel tekrarlı olarak düşünülürse, kafes sayısına yakın değerli bileşenlerin de, birinci bileşene yakın olduğu varsayılabilir.

5.4. Motorun İşletme Büyüklüklerinin Değişiminin İncelenmesi

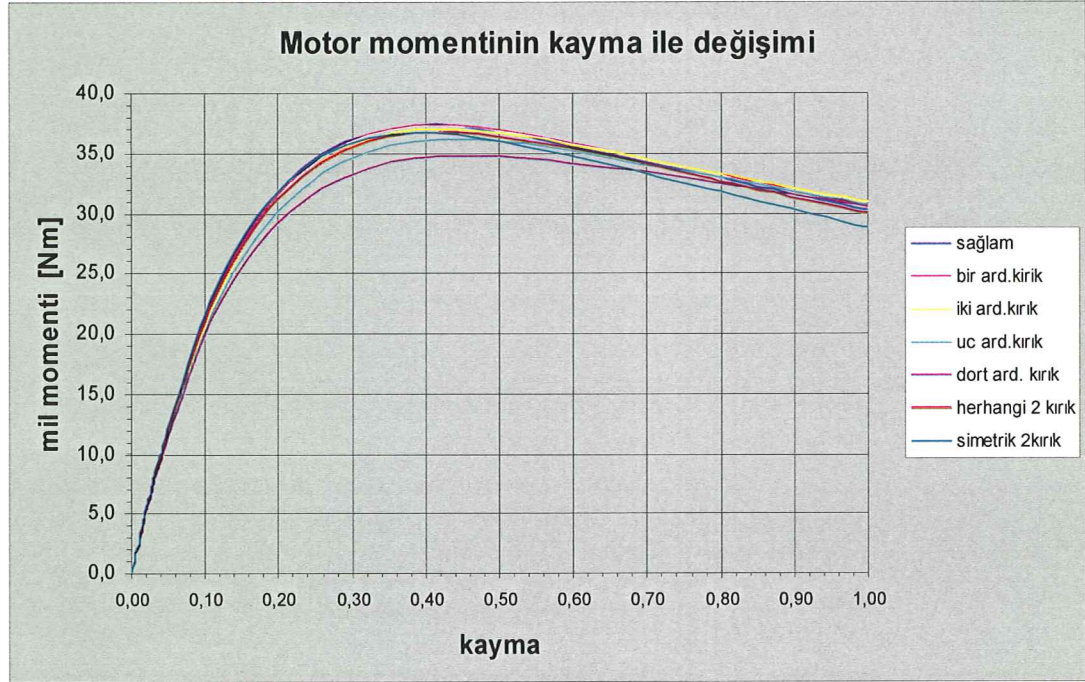
Asenkron makinede oluşan kafes çubuğu arızalarında şebeke akımı, döndürme momenti, devir hızı, ender biçimde besleme gerilimi gibi işletme büyüklüklerinin değişimi FFT yöntemi ile gözetlenerek motor arızası saptanmaktadır. İşletme büyüklüklerindeki geçici hal değişimleri arızanın belirlenmesinde kullanılmaktadır. Bu yöntemler oldukça ileri bir teknoloji uygulamasıdır. Sanayide, bu arıza saptama teknolojileri büyük güçlü, fiyatı nedeniyle yedeklenemeyen veya işletme bakımından çok önemli olan motorlarda kullanılmaktadır. Orta ve küçük güçlü pek çok motorda uygulanmamaktadır. Bu bağlamda önemli olan diğer bir konu, kafes arızası olan asenkron motorun sürekli hal işletme davranışının, işletme büyüklüklerinin değişiminin farklı arızalarda belirlenmesidir. Bununla ilgili olarak 4. Bölümde rotor çubuk akımlarının arızalı durumda değişimleri incelenmiştir. Ayrıca 3. Bölümde kafesi arızalı asenkron makinelerin işletme davranışının incelenebileceği tam ve önerilen basitleştirilmiş dinamik modelleri verilmiştir.

Bu bölümde 3. ve 4. bölümdeki çalışmalara ek olarak, değişik rotor arızalarında asenkron motorun Flux 2D için kurulan modeli kullanılarak, motorun devir hızının tüm analiz süresindeki değişimi ve stator akımının değişimi dikkate alınan 20 ms lik zaman aralığındaki değişimi incelenmektedir. Ayrıca rotor çubuk akımlarının arızalı durumlardaki dağılım değişimi de araştırılacak ve magnetik analiz sonuçları kullanılarak, bir bilgisayar programı ile motor akımının ve döndürme momentinin kaymaya bağlı değişim özeğrileri tüm arızalar için çıkarılacaktır.

5.4.1. Döndürme momentinin ve motor akımının kayma ile değişimi

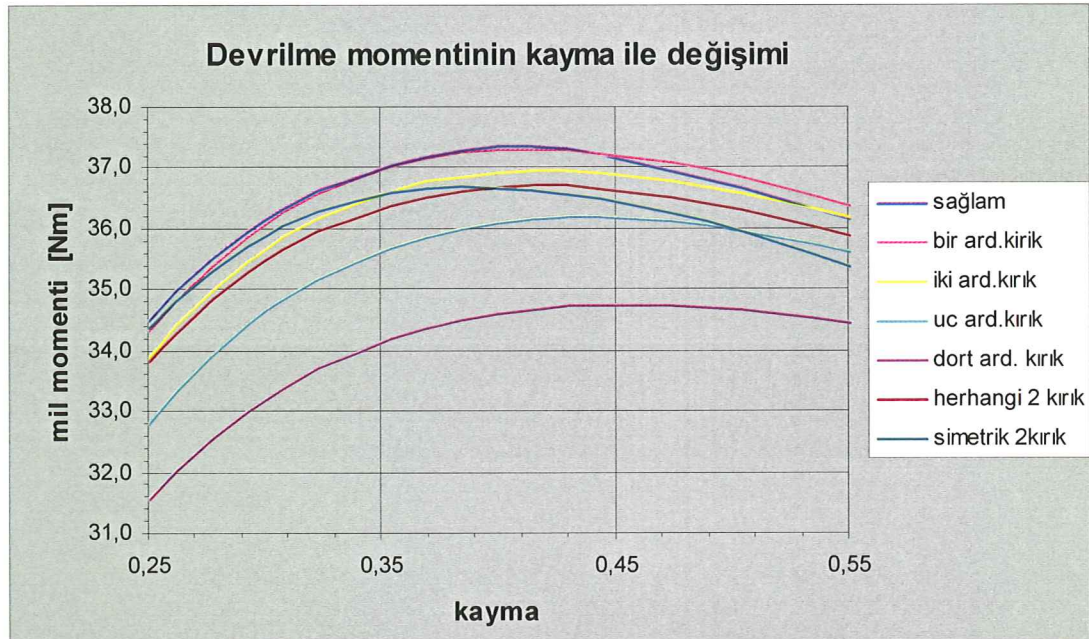
Çizelge 5.2 de verilen bütün kafes arızaları için motorun döndürme momentinin işletme kayması ile değişimi genel olarak verilmiştir. Ayrıca daha ayrıntılı biçimde değerlendirilebilmesi için kalkış, devrilme ve anma momentleri ayrı ayrı çizdirilmiştir.

S.19. Bu özeğrilerden görülebileceği gibi moment değeri özellikle devrilme bölgesinde oldukça belirgin bir biçimde azalmaktadır. Azalmanın büyüklüğü, ardışık arıza sayısı ile artmaktadır. En düşük devrilme momenti ardışık dört çubuk kırıldığında oluşur. Bu arızada hesaplanan moment değerlerine göre devrilme

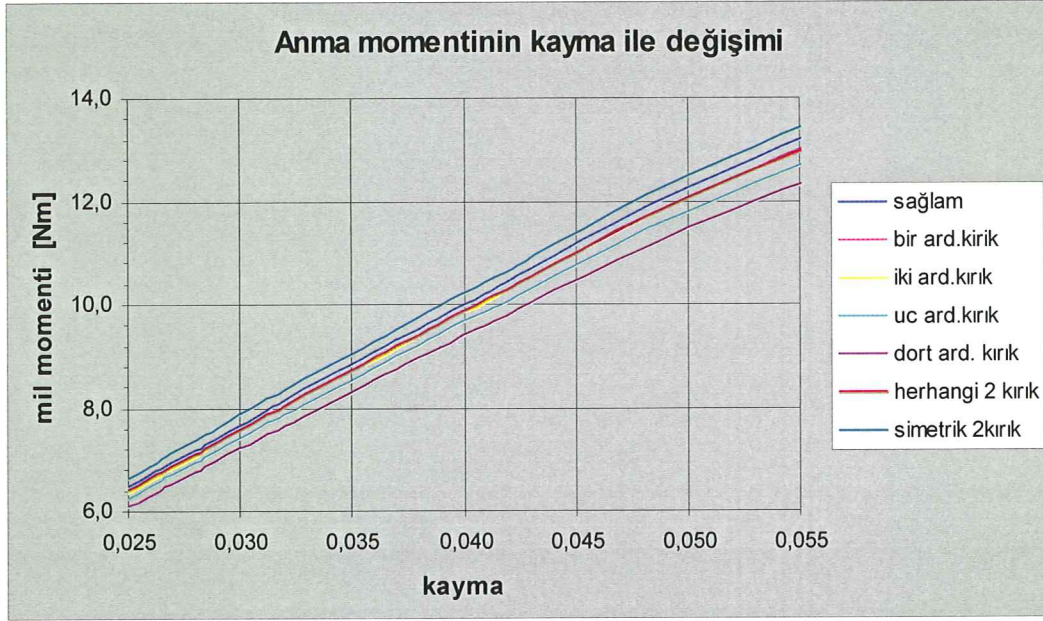


Şekil 5.70 : Rotor arızalarında döndürme momentinin kayma ile değişim özgeğrisi.

momenti % 7 oranında azalmaktadır. Devrilme momenti, ardışık üç bara arızasında % 3,16, bir çubuk kırıldığında ise % 0,15 azalmaktadır. İki çubuğun arızalı olduğu üç tane incelemede benzer oranda değişimler olmuştur. Ardışık iki çubuk kırıldığında % 1, aralarında üç sağlam bara olacak biçimde herhangi iki çubuk kırıldığında % 1,73, simetrik iki çubukda ise % 1,83 oranında devrilme momenti azalır.

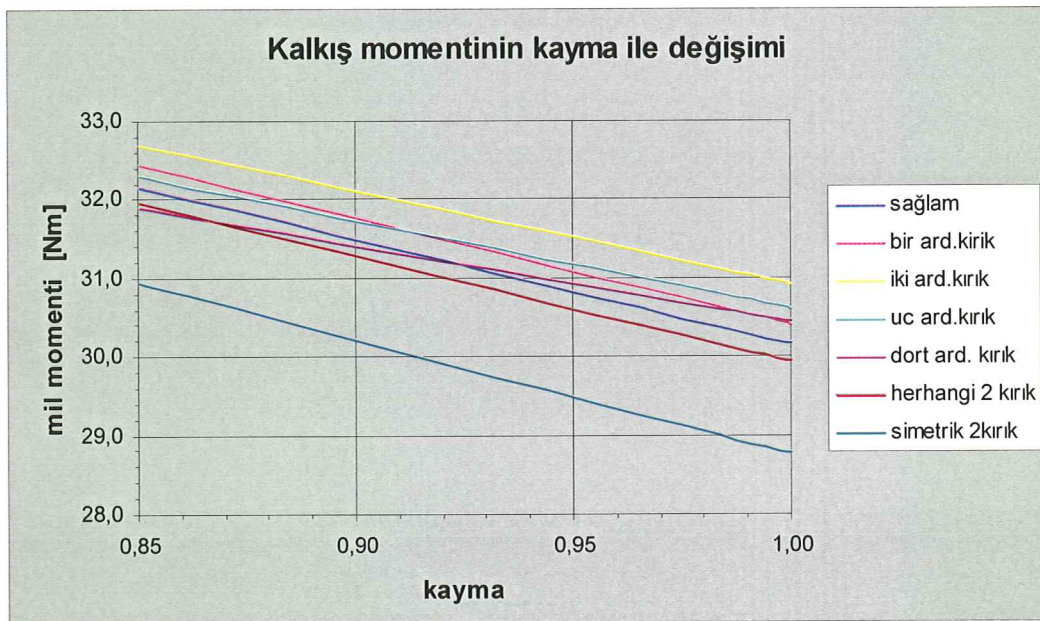


Şekil 5.71 : Devrilme momentlerinin kayma ile değişimi.



Şekil 5.72 : Anma momentlerinin kayma ile değişimi.

S.20. Yukarıdaki şekilde anma hızı bölgesinde motor momentlerinin değişimi verilmiştir. Özeğriler incelendiğinde anma hızına yaklaştıkça moment değerlerindeki azalmaların daha küçük düzeyde olduğu görülmektedir. Eğriler moment ekseninden uzaklaşmaktadır. Aynı devrilme momentinde olduğu gibi en fazla değişim ardışık üç ve dört bara kırığındadır. Gerçekte bu değişim miktarının küçük olması magnetik analiz sonuçlarını doğrulamaktadır. Çizelge 5.3 de verilen hava aralığı akı yoğunluğunun ve bileşenlerinin anma hızındaki etken değerleri incelendiğinde, bütün

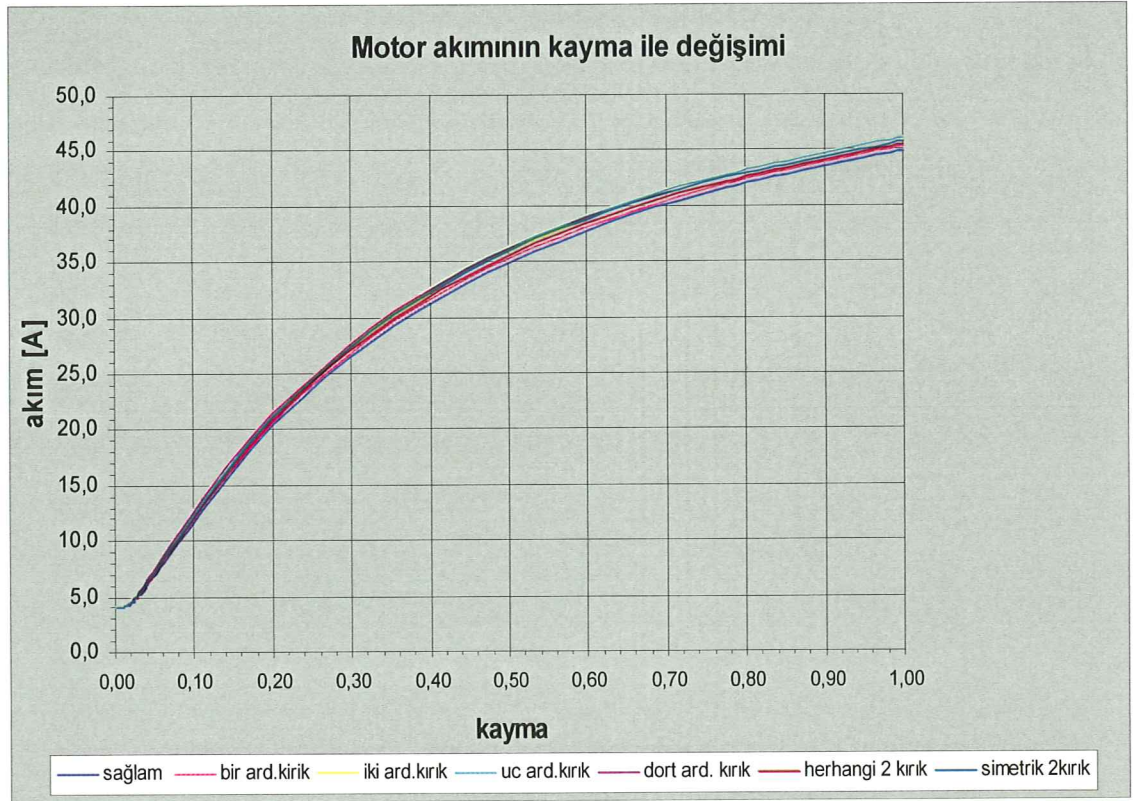


Şekil 5.73 : Kalkış momentlerinin kayma ile değişimi.

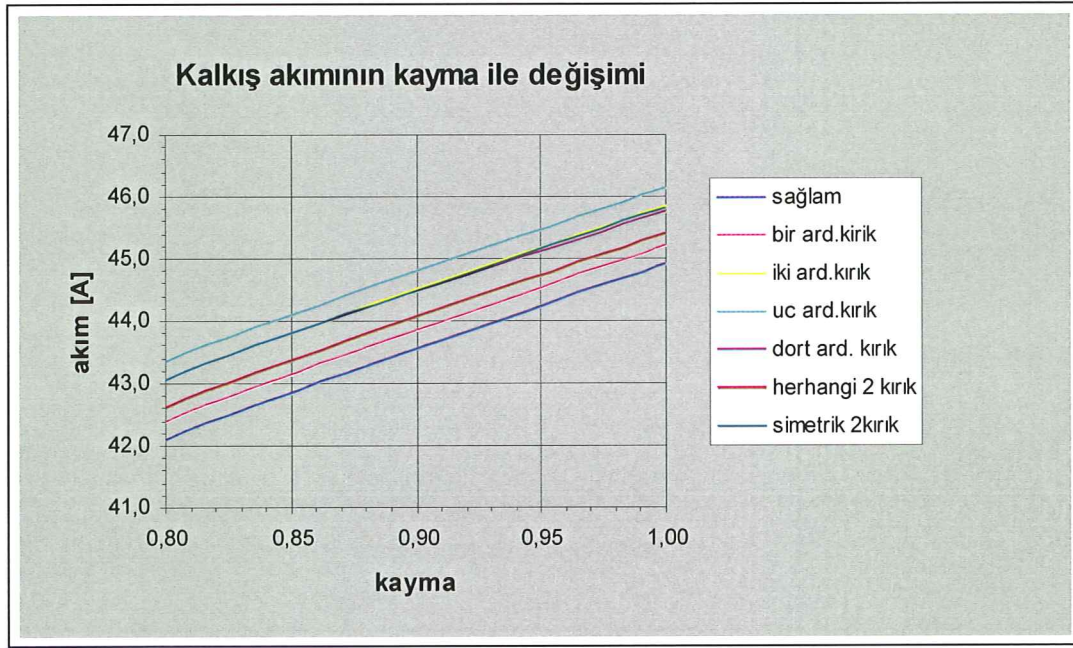
analizlerde bu değerlerin birbirine yakın olduğu görülmektedir. Bu anlamda mil döndürme momentinin anma hızı bölgesinde pek fazla değişmeyeceği açıktır. Buna karşın arızalı durumda oluşan harmonikler nedeniyle moment salınımları olacağı düşünülebilir.

S.21. Motorun kalkış momenti tek ve ardışık çubuk kırıklarında küçük değerlerde artmaktadır (Şekil 5.73). Ancak simetrik ve herhangi iki kırık durumunda kalkış momenti azalmaktadır.

S.22. Motor akımının kayma değerine göre değişimi Şekil 5.74 de bütün arıza durumları için verilmektedir. Özeğriler üzerindeki incelemeyi kolaylaştırmak için kalkış ve anma işletmesi bölgelerindeki motor akım özeğrileri daha ayrıntılı çizilmiştir (Şekil 5.75, Şekil 5.76). Artan arıza sayısı ile kalkış akımında küçük değerli artışlar olmaktadır. Arıza türüne göre ortalama % 0,6 ile % 3 arasında bir artış olmaktadır. Anma işletmesi bölgesinde ise motor akımı, anma akımına göre en fazla % 7,6 oranında artmaktadır.



Şekil 5.74 : Rotor arızalarında motor akımının kayma ile değişim özeğrisi.



Şekil 5.75 : Kalkış akımlarının kayma ile değişimi.

S.23. Bu incelemelere göre, küçük sayıdaki kafes çubuğu arızalarında makinenin işletme büyüklüklerinde, rotor bara akımları hariç, çok büyük artışlar olmamaktadır. Bu anlamda bu arızaların başlangıçta motorun işletme kalitesi ile ilgili sorunlar yarattığı görülmektedir. Ancak, arızalı rotorda özellikle komşu çubuk akımlarındaki büyük artışlar nedeniyle kırık çubuk sayısı hızla artmaktadır. Bunun sonucu, işletme iyiliği kötüleşir, moment ve devir hızında salınımlar artar, makine doymaya girer ve



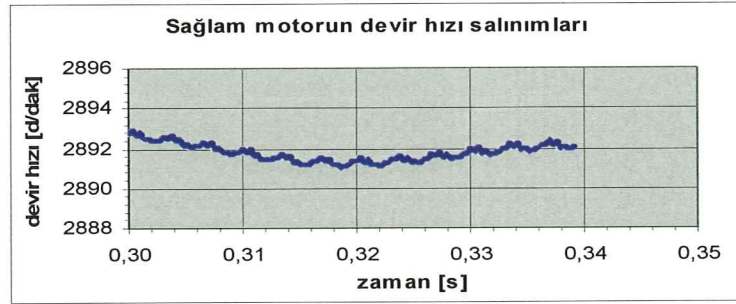
Şekil 5.76 : Anma akımlarının kayma ile değişimi.

ısı dağılımı bozulacağında aşırı ısınır. Bu çalışmada incelenen rotor arızalarına ilişkin kalkış, devrilme ve anma momentleri, kalkış ve anma akımlarının matematiksel analiz ile bulunan sonuçları ve aynı büyüklüklerin deneysel ölçümlerle ile bulunan sonuçları 6. Bölümde, Çizelge 7. de verilerek karşılaştırılmaktadır.

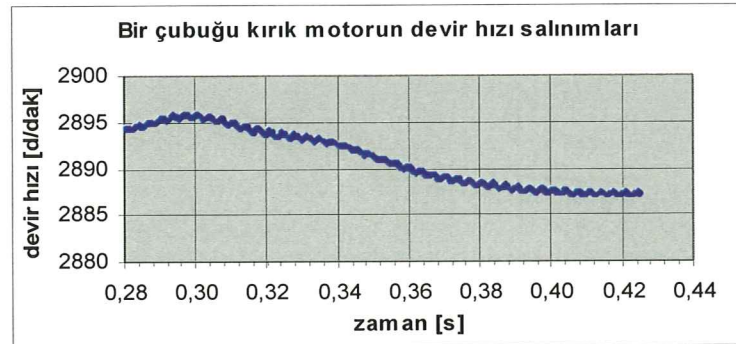
5.4.2. Devir Hızının Zamana Göre Değişimi ve Motor Akımının Harmonikleri

Kafes çubuğu arızalarının motorun devir hızına etkisi iki ayrı biçimde incelenebilir. Birinci incelemede hızın ortalama değeri, ikinci incelemede ise hız salınımları dikkate alınır. Bölüm 5.4.1 de açıklandığı gibi kırık çubuk sayısı arttıkça, anma motor momenti azalmaktadır. Bu anlamda sabit yük momentinde motorun devir hızı azalır.

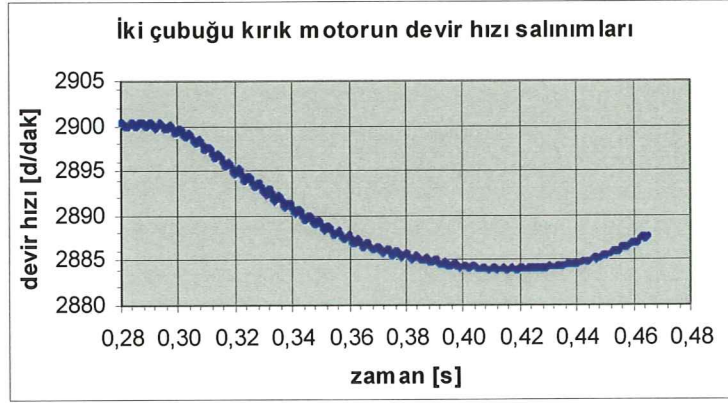
S.24. Şekil 5.77 de motorun devir hızının zamana bağlı değişimi çeşitli rotor arızaları için verilmektedir. Bu özeğrilerden görüldüğü gibi, hız değişiminin büyüklüğü, arızalı çubuk sayısına bağlıdır. Kırık çubuk sayısı arttıkça, ortalama devir hızı azalır. Yapılan incelemeye göre motorun ortalama devir hızı, bir kırık için 2 d/dak, ardışık iki kırık için 3 d/dak, ardışık üç kırık için 4 d/dak ve ardışık olmayan iki kırık için ise 10 d/dak azalmaktadır (Şekil 5.77).



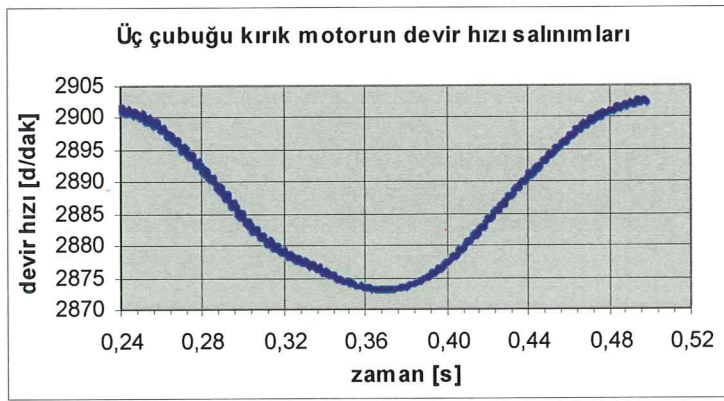
a)



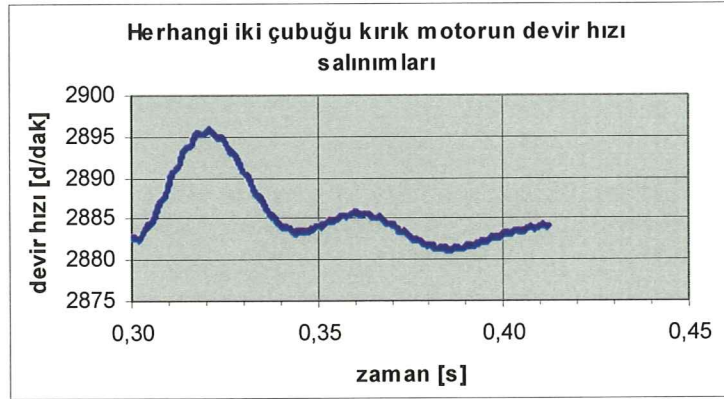
b)



c)



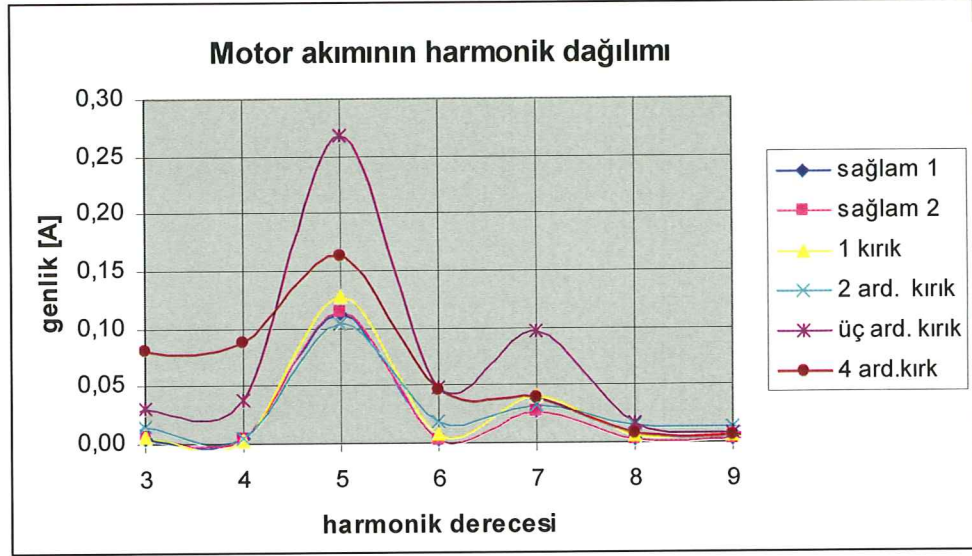
d)



e)

Şekil 5.77 : Değişik rotor kafes arızalarında motorun devir hızının zamanla değişimi. **a)** Sağlam rotor, **b)** bir çubuk kırık, **c)** ardışık iki çubuk kırık, **d)** ardışık üç çubuk kırık, **e)** herhangi iki çubuk kırık.

S.25. Diğer bir inceleme hız salınımları için yapılabilir. Kafes çubuğu kırılınca, normal doğrultuda oluşan çekim kuvvetleri bakımından rotor simetrisi bozulur. Bu nedenle rotorda dinamik olarak değişen bir eksen kaçması oluşur, mil salınır. Ayrıca,

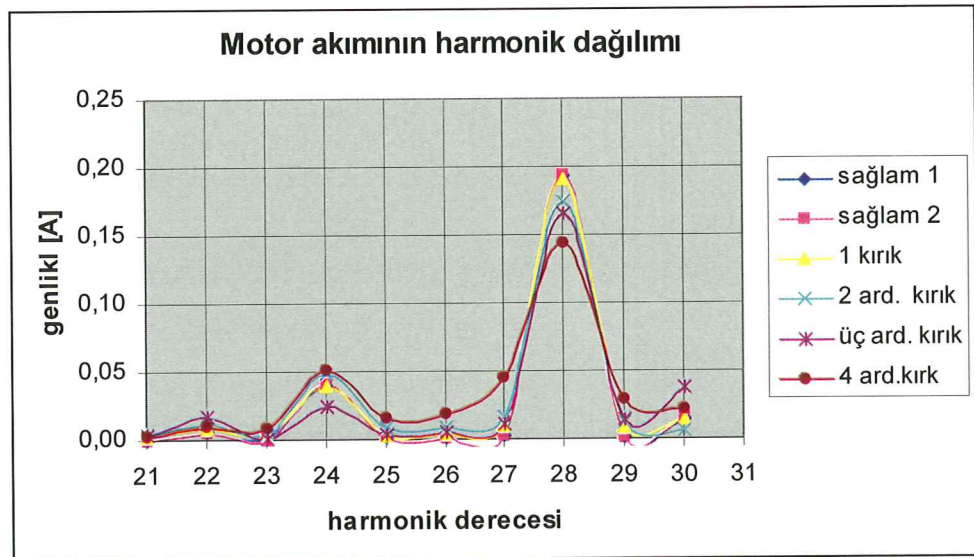


Şekil 5.78 : Ardışık rotor çubuk kırıklarında 3...9. harmonik dağılımları.

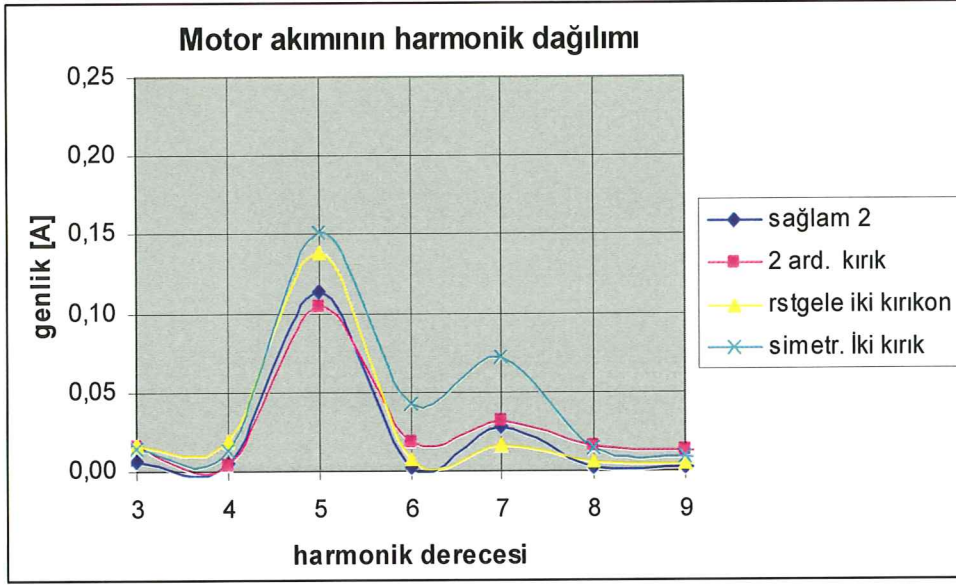
devir hızında da salınımlar görülür. Salınımların genliği tamamen arızalı çubuk sayısına ve bunların birbirine göre konumuna bağlıdır.

S.26. Şekil 5.77 den de görülebileceği gibi, ardışık arızalar arttıkça, çoğunlukla kafes arızası böyle ilerler, hızın salınım genliği artmaktadır. Ardışık olamayan iki kırıkta hızın ortalama değeri çok azalmasına karşın, hız salınımının genliği 3 d/dak kadardır. Daha öncede belirtildiği gibi bu salınımlar arıza tanısında kullanılabilir. Salınım frekansı $2s.f_1$ veya $4s.f_1$ dir.

Stator akımının zamanla değişimi, anma yükünde çalışan motorun farklı arızaları için 20 ms lik dönemde incelenmiştir. Çizelge 5.8 de akım harmonik dağılımı verilmiştir.

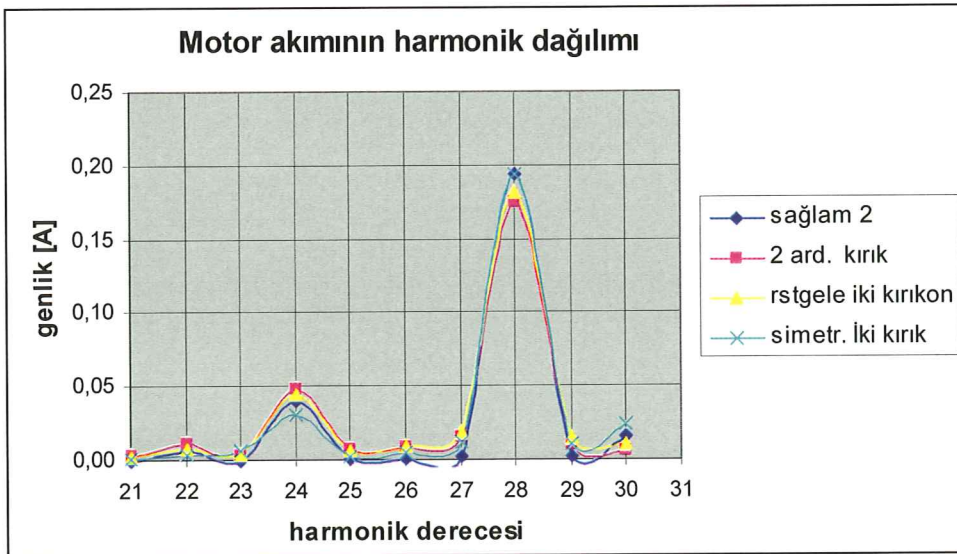


Şekil 5.79 : Ardışık rotor çubuk kırıklarında 21...30. harmonik dağılımları.



Şekil 5.80 : İki tane rotor çubuğu kırıklarında 3...9. harmonik dağılımları.

S.27. Bu harmonik değerlerine göre Şekil 5.78 ve Şekil 5.79 da ardışık kırıkların Şekil 5.80 ve Şekil 5. 81 de ise çeşitli iki kırıkların harmonik dağılımı çizilmiştir. Motor akımının temel bileşeni artan kırık sayısı ile artmaktadır. Kafes simetrisi bozulduğunda, negatif sistem bileşenini tanımlayan 5. harmonik bileşeninin genliğinin belirgin biçimde artması yapılan analizleri doğrulamaktadır. Ayrıca aynı akı dağılımlarında olduğu gibi, rotor oluk sayısı değerinde çok belirgin bir harmonik bileşeni vardır.



Şekil 5.81: İki tane rotor çubuğu kırıklarında 21...30. harmonik dağılımları.

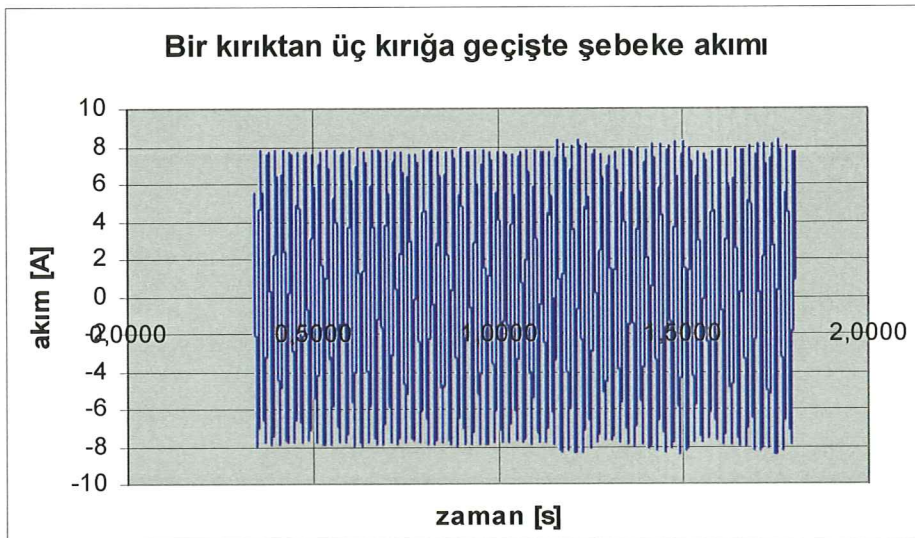
Çizelge 5.8 : Çeşitli sayıdaki çubuk kırıklarında stator akımının harmonik dağılımı.

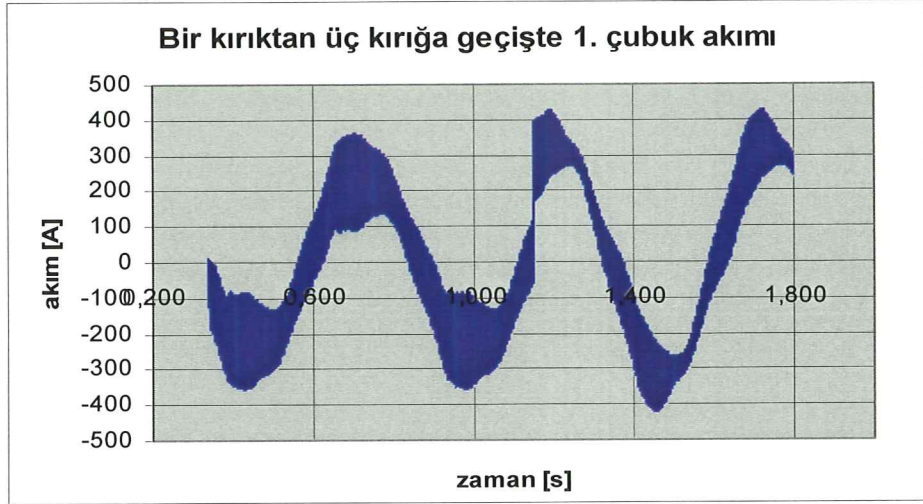
Harmonik bileşeni	sağlam 1	sağlam 2	1 kırık	2 ard. kırık	üç ard. kırık	4 ard.kırık	rstgele iki kırık	simetr. iki kırık
1	7,48819	7,48502	7,56460	7,54615	7,58985	7,69681	7,50856	7,69168
2	0,00899	0,01100	0,01099	0,03305	0,04928	0,12675	0,02307	0,02222
3	0,00398	0,00501	0,00483	0,01417	0,03021	0,08070	0,01546	0,01290
4	0,00296	0,00339	0,00225	0,00298	0,03747	0,08802	0,01858	0,01156
5	0,11222	0,11340	0,12737	0,10288	0,26769	0,16174	0,13897	0,15011
6	0,00235	0,00125	0,00625	0,01735	0,04714	0,04545	0,00608	0,04121
7	0,02546	0,02640	0,04027	0,03137	0,09637	0,03816	0,01671	0,07153
8	0,00108	0,00171	0,00605	0,01479	0,01522	0,00668	0,00554	0,01337
9	0,00109	0,00154	0,00442	0,01183	0,00768	0,00488	0,00407	0,00757
10	0,00194	0,00101	0,00376	0,00917	0,00471	0,00810	0,00564	0,00548
11	0,00377	0,00405	0,00542	0,01326	0,01459	0,02082	0,00134	0,00839
12	0,00036	0,00158	0,00098	0,01030	0,01407	0,01305	0,00494	0,01385
13	0,00029	0,00056	0,00510	0,00560	0,01748	0,00924	0,00318	0,01009
14	0,00057	0,00102	0,00345	0,00706	0,00681	0,00629	0,00110	0,00225
15	0,00059	0,00085	0,00295	0,00682	0,00507	0,00558	0,00048	0,00120
16	0,00222	0,00189	0,00209	0,00924	0,00448	0,00788	0,00091	0,00195
17	0,00111	0,00049	0,00118	0,00446	0,00540	0,00349	0,00404	0,00612
18	0,00167	0,00168	0,00289	0,00591	0,00865	0,00253	0,00381	0,00996
19	0,00058	0,00048	0,00257	0,00410	0,00271	0,00388	0,00101	0,00157
20	0,00069	0,00054	0,00278	0,00460	0,00385	0,00249	0,00200	0,00155
21	0,00067	0,00052	0,00283	0,00448	0,00511	0,00258	0,00239	0,00120
22	0,00582	0,00628	0,00896	0,01199	0,01812	0,00992	0,00819	0,00397
23	0,00077	0,00065	0,00450	0,00444	0,00182	0,00842	0,00433	0,00643
24	0,04043	0,04066	0,03928	0,04830	0,02497	0,05081	0,04474	0,03070
25	0,00145	0,00165	0,00314	0,00835	0,00482	0,01614	0,00719	0,00272
26	0,00147	0,00160	0,00476	0,00920	0,00646	0,01953	0,00953	0,00546
27	0,00287	0,00252	0,00983	0,01589	0,01225	0,04487	0,01879	0,01215
28	0,19422	0,19408	0,19108	0,17463	0,16661	0,14419	0,18198	0,19401
29	0,00206	0,00211	0,00874	0,01153	0,01431	0,02949	0,01440	0,01037
30	0,01412	0,01577	0,01466	0,00630	0,03823	0,02239	0,01121	0,02441

5.5. Anma İşletmesinde Oluşan Çubuk Kırıklarının Geçici Olay İncelemesi

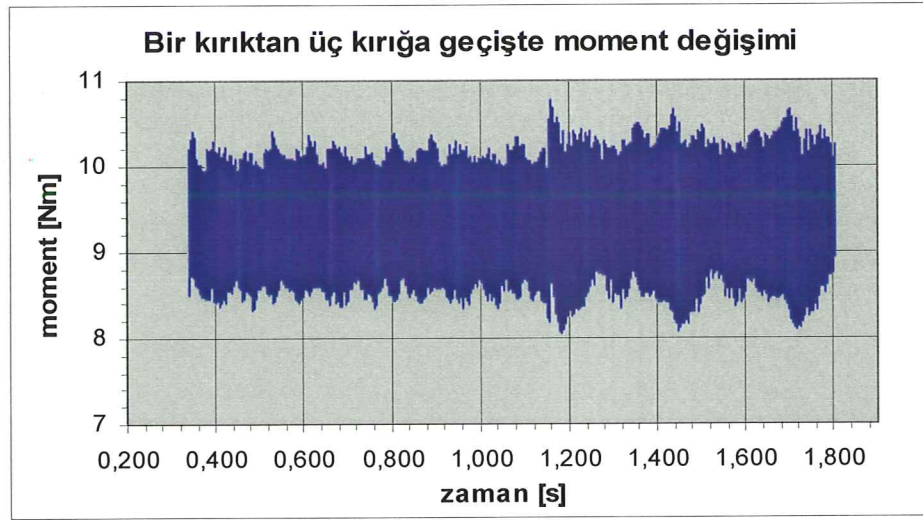
Önceki bölümlerde sunulan bütün analizlerde herhangi bir kafes arızası durumunda asenkron makinenin sürekli hal büyüklükleri incelenmiştir. İşletme sırasında bir rotor çubuğunun kırılması durumunda oluşan geçici olaylar dikkate alınmamıştır. Bu bölümde anma işletmesinde çalışan motorun önce bir, ardından üç kafes çubuğunun kırılması durumunda moment, devir hızı, motor akımı, rotor çubuk akımları gibi işletme büyüklüklerinde oluşan geçici hal değişimleri incelenmektedir. Böylelikle, çeşitli rotor arızalarında motor büyüklüklerinde oluşan değişimlerin daha doğru biçimde belirlenmesi amaçlanmaktadır. Rotor akımı için arızalı çubuğun yanındaki bara dikkate alınmıştır. Bir kafes çubuğu kırıldıktan sonra arızanın çoğunlukla iki yana doğru simetrik genişlediği 4. Bölüm de görülmüştür. Bu nedenle bir kırıktan üç kırığa geçilmiştir. Ayrıca sağlam motorun, bir rotor çubuğu kırıldığında oluşan geçici olaylarda hız değişimi bakımından incelenmiştir.

Aşağıda art arda verilen şekillerde bir kırıktan üç kırığa geçiş sırasında, stator akımının, mil momentinin, arızalı çubuğa komşu olan rotor bara akımının, stator boyunduruğundaki bir noktada akı yoğunluğunun ve y bileşeninin zamanla değişimleri verilmektedir.

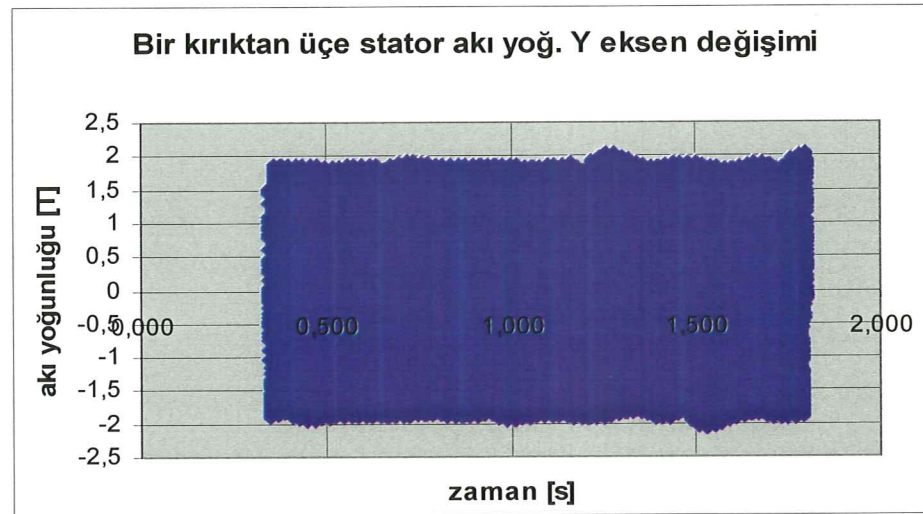




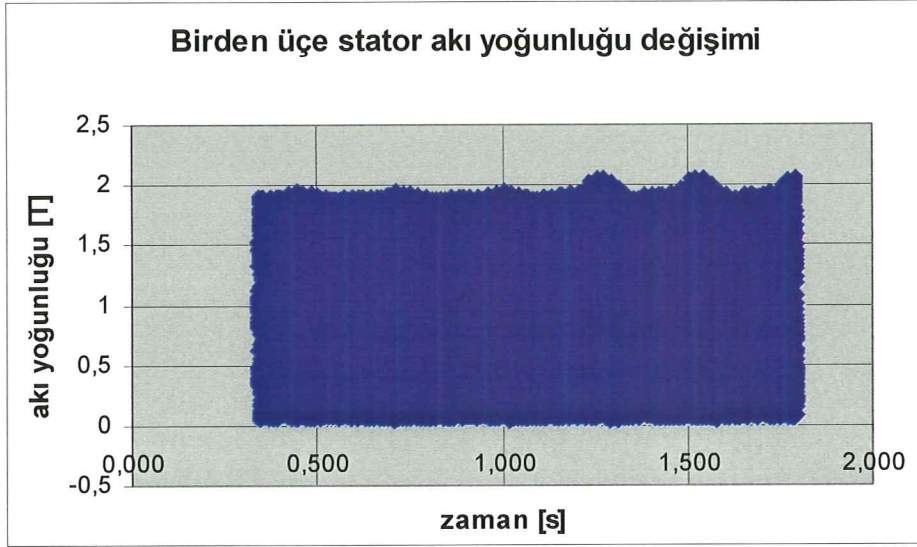
b)



c)



d)



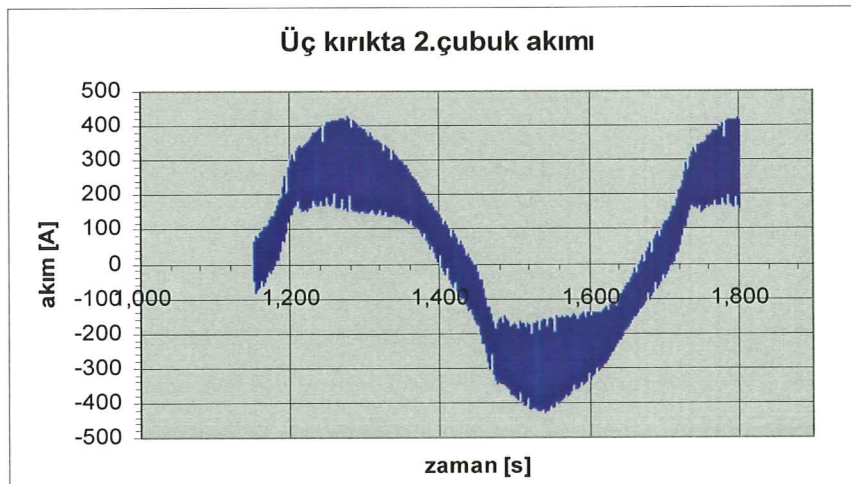
e)

Şekil 5.82 : Bir kırıkta üç ardışık kırık geçişinde a) motor akımının, b) komşu çubuk akımının, c) mil momentinin, d)stator akı yoğunluğunun y eksen bileşeninin, e) stator akı yoğunluğunun değişimleri.

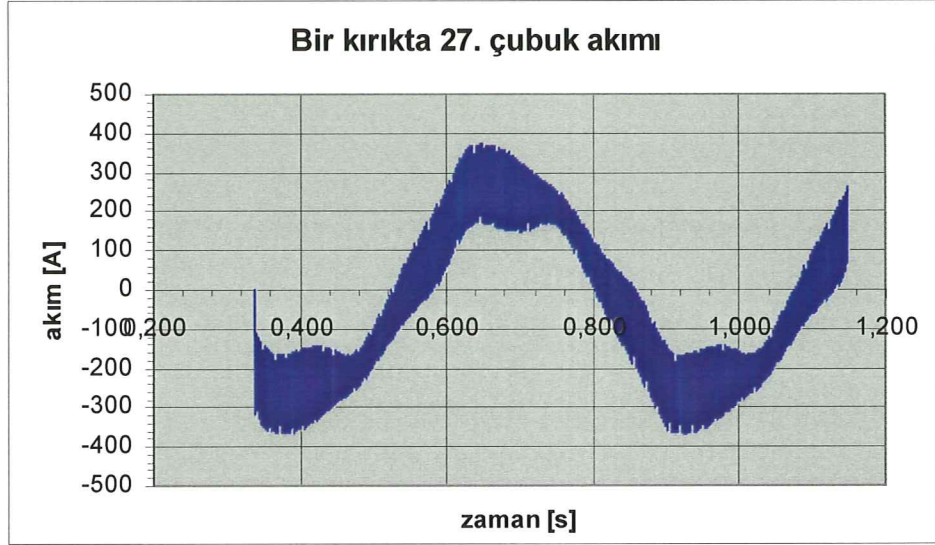
Bu özegriler incelendiğinde,

S.28. motor akımının arttığı ve zarf eğrisinin salınım genliğinin büyüdüğü, rotor bara akımlarında kestirildiği gibi önemli artışlar olduğu görülmektedir. Bir çubuk arızasında komşu bara akımının etkin değeri 261,6 A iken, arıza üç çubuğa yayıldığında bu değer 308,4 A e çıkmaktadır. Üç kırık durumunda ikinci komşu bara akımının etkin değeri ise 290 A dir (Şekil 5.83).

S.29. Bu farkın oluşumu 4. Bölüm de açıklanmaktadır. Benzer biçimde mil momentinin salınım genliği artmaktadır. Bu nedenle bilyelerin, kavrama ve aktarma elemanlarının mekanik ömrü kısalmaktadır.

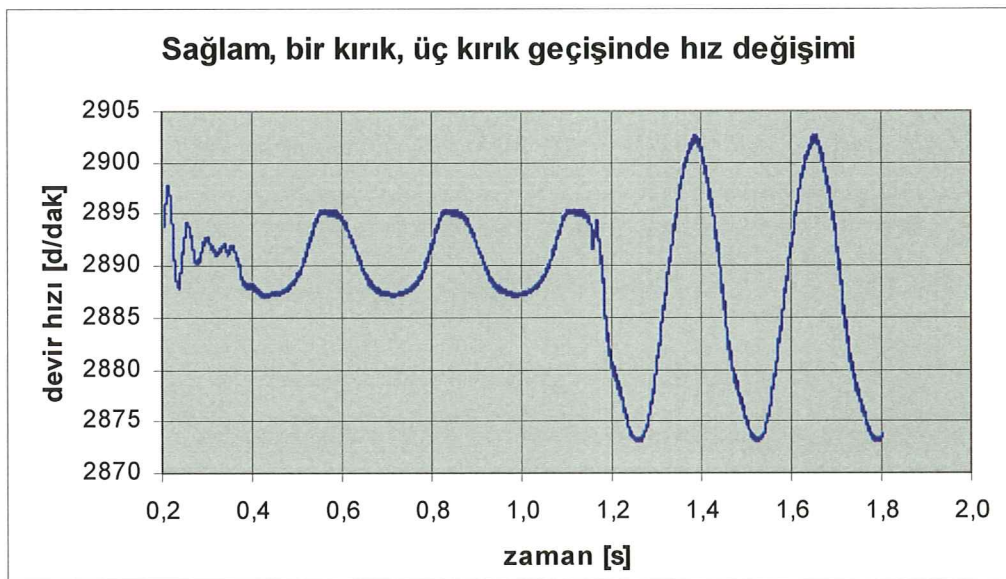


Şekil 5.83 : Üç ardışık kırık için, arızalı çubuğa ikinci komşu olan bara akımının değişimi.



Şekil 5.84 : Bir kırık arızasında, arızalı çubuğa komşu baranın akımının değişimi.

S.30. Statorda dikkate alınan belli bir nokta içinde gerek akı yoğunluğunun, gerekse y bileşeninin salınım genlikleri artmaktadır. Bu nedenle motor titreşimi artar. Bütün bu Salınımların frekansı, negatif sistem frekansı olan $2s.f_1$ dir. Mil momentinde ve stator akı yoğunluğunda oluşan genlik salınımının en belirgin yansıması devir hızında görülür. Aşağıdaki şekilde sağlam, bir kırık ve üç kırık geçişlerinde devir hızının zamanla değişimi verilmektedir. Hız salınımları sağlam motorda 1...2 d/dak, bir kırıkta 7...8 d/dak, üç kırıkta ise 25...30 d/dak dır.



Şekil 5.85 : Sağlam, bir kırık, üç kırık geçişlerinde devir hızının değişimi.

6. SAYISAL ÇÖZÜMLEME SONUÇLARI VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde öncelikle magnetik analizlerde dikkate alınan asenkron motorun yapımsal büyüklükleri ve teknik resimleri verilmektedir. Ardından makinenin dinamik modelinin analitik olarak çözülebilmesi için gerekli olan eşdeğer devre elemanları hesaplanmaktadır. Bunlar stator sargı direnci, rotor çubuk ve segmen direnci, mıknatıslanma indüktansları, kaçak indüktanslar, öz ve karşılıklı indüktanslardır. Değerlerin bir kısmı, motorun anma işletme performansının incelendiği SPEED hazır yazılımı ile, diğer kısmı ise literatürde tanımlanan ve 3. Bölümde verilen yöntemlerle hesaplanmıştır.

Yapılan ön çalışmanın ardından, magnetik analizi yapılan kafes çubuğu arızalarından bir tanesi için ani değerli simetrik bileşen yöntemi ile analitik çözümleme yapılmıştır. Aynı incelemeler, 3. Bölümünde önerilen yaklaşık dinamik modeller ile tekrarlanmaktadır. Son olarak analitik çözümler, deneysel sonuçlar ve Flux 2D ile bulununan analiz sonuçları bazı işletme büyüklükleri bakımından karşılaştırılmaktadır. Benzer inceleme farklı dinamik modellerle yapılan analitik çözümlere de uygulanarak basitleştirilmiş dinamik modelin yeterliliği incelenmiştir.

Bölümün son kısmı tamamen deneysel çalışmaların sonuçlarına ayrılmıştır. Burada, daha önce Flux 2D magnetik yazılımı ve simetrik bileşenler dinamik modeli ile incelenen rotor arızaları için, yükte ve boşta stator akımının değişimi ve motor mil momentinin değişimi verilmektedir. Ayrıca, 2. Bölümde açıklanan arıza tanıma yöntemleri bakımından stator akımının ve titreşim ivmesinin zamanla değişimi Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD) yöntemi ile incelenerek, değişim dalgaları alçak ve yüksek frekans bantlarına açılmıştır.

6.1. Çalışmada Kullanılan Asenkron Makinenin Yapım Büyüklükleri

Çeşitli kafes arızalarının bilgisayar ortamında modellenmesinde ARÇELİK ÇERKEZKÖY MOTOR İŞLETMELERİ'nde üretilen QS100L2-A tipi üç fazlı kafesli bir asenkron motorun yapım büyüklükleri kullanılmıştır. Aşağıda bu motora ait yapımsal büyüklükler sıralanmaktadır:

Faz sayısı	:	Üç fazlı
Kutup sayısı	:	2
Stator oluk sayısı	:	36 oluk
Rotor çubuk sayısı	:	28 çubuk
Hava aralığı genişliği	:	0,34 mm

Stator sac paketinin,

dış çapı	:	150 mm
iç çapı	:	80 mm
paket boyu	:	89,5 mm
oluk alanı	:	$64,6655 \text{ mm}^2$
dolu oluk alanı:		$51,3198 \text{ mm}^2$
oluk derinliği	:	23,985 mm
dış genişliği	:	3,00 mm

Stator sargısının,

sarım sayısı	:	29 sarım
tel çapı	:	$2 \times 0.75 \text{ mm}^2$
kutup adımı	:	125,6637 mm
tabaka sayısı	:	1
paralel kol sayısı	:	1
sargı uzunluğu	:	$89,5 + 2 \times 4,2 \text{ mm}$
özgül direnci	:	$2,0289 \cdot 10^{-8} \text{ ohm.m}$

Rotor sac paketinin

dış çapı	:	79,32 mm
mil çapı	:	34 mm
rotor paket boyu	:	89,5 mm
rotor oluk alanı	:	$43,0609 \text{ mm}^2$

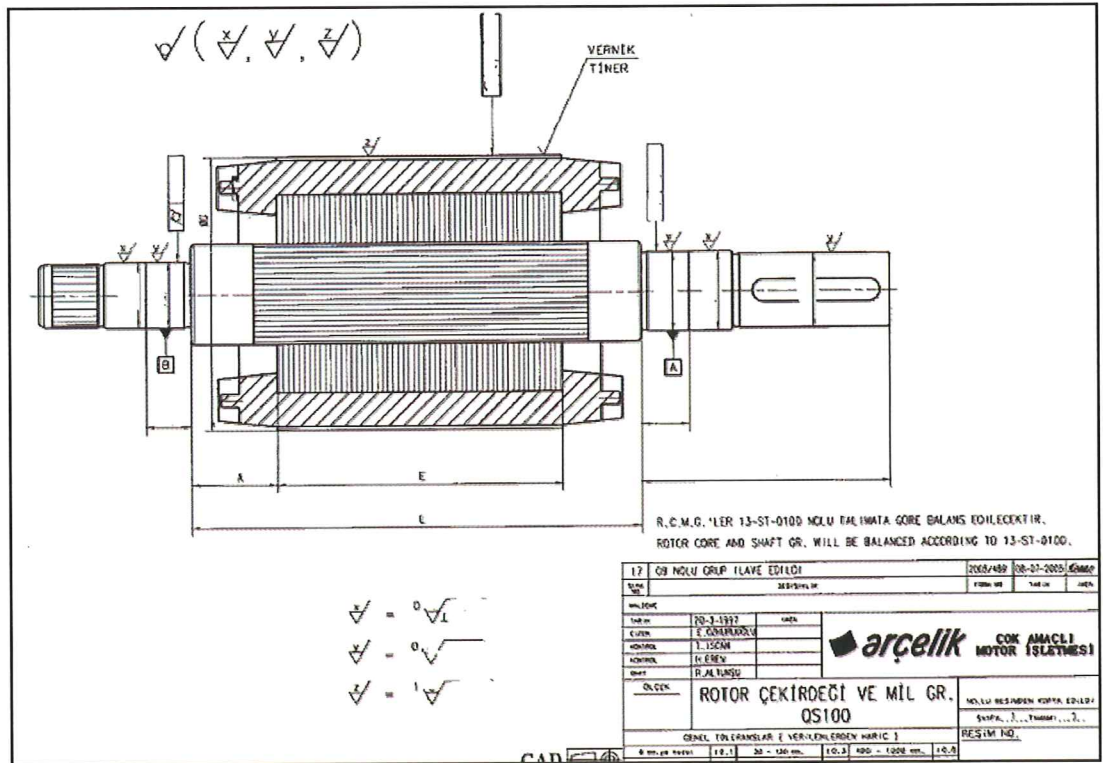
kafes çubuk kayması :	1 oluk
oluk tipi :	açık oluk
oluk derinliği :	12,83 mm
oluk arası dış genişliği:	3,79 mm

Kısa devre bileziğinin

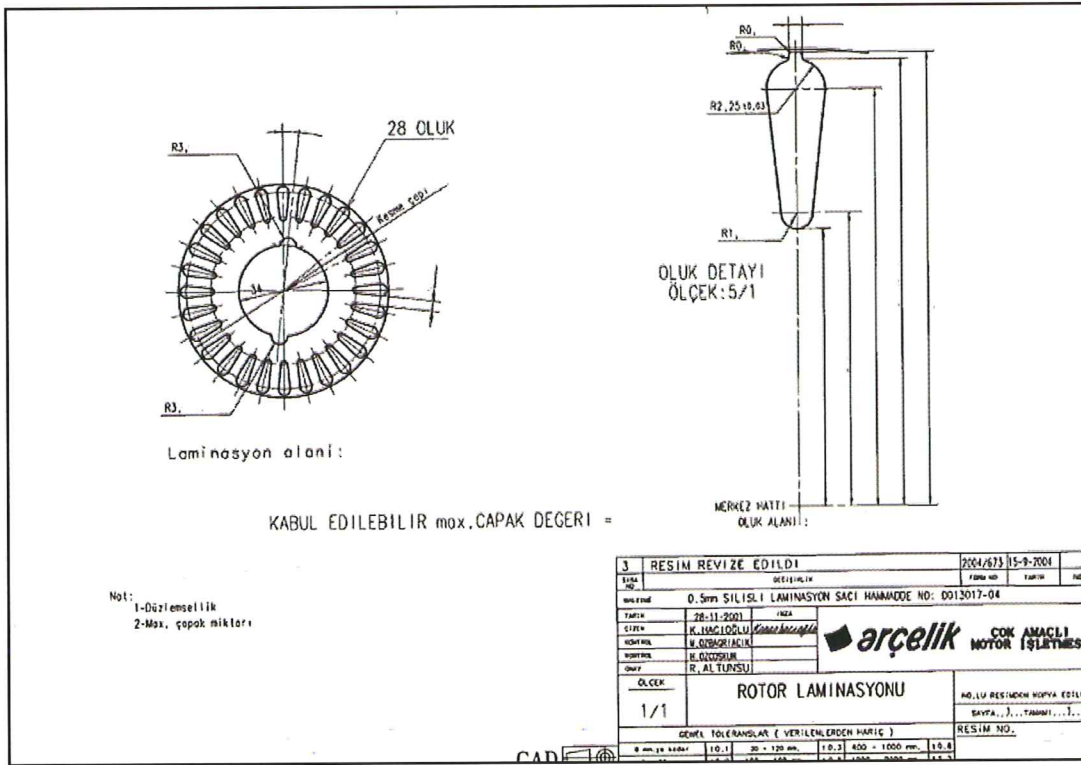
iç alt çapı :	44 mm
iç üst çapı :	47 mm
dış alt çapı :	79 mm
dış üst çapı :	77,5 mm
uzunluğu :	14 mm
iletken alanı :	237,16 mm ²

Rotor iletkeni özgül direnci : $4,1978 \cdot 10^{-8}$ ohm.m

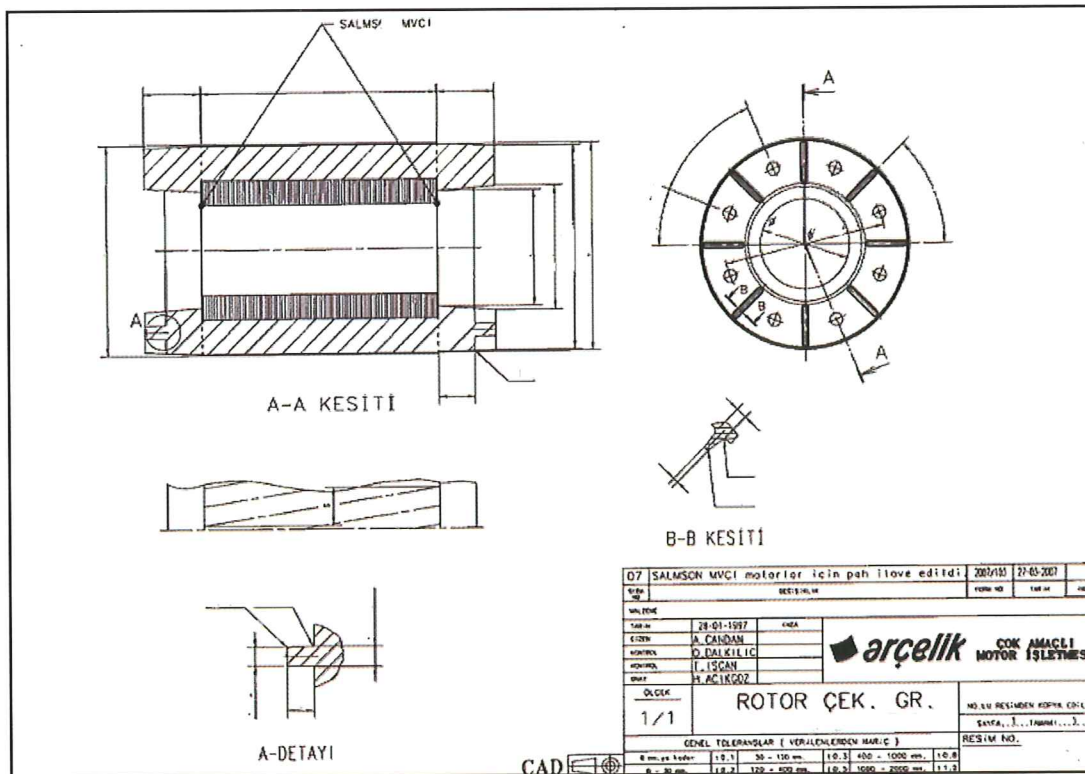
Bu yapımsal büyüklüklerin yanı sıra , motora ait stator ile rotor oluk şekilleri, rotorun teknik resmi kısmen boyutlandırılarak Şekil 6.1, Şekil 6.2, Şekil 6.3 ve Şekil 6.4 de verilmektedir. Kopyalanma tehlikesine karşın bütün teknik resimler verilmemiştir.



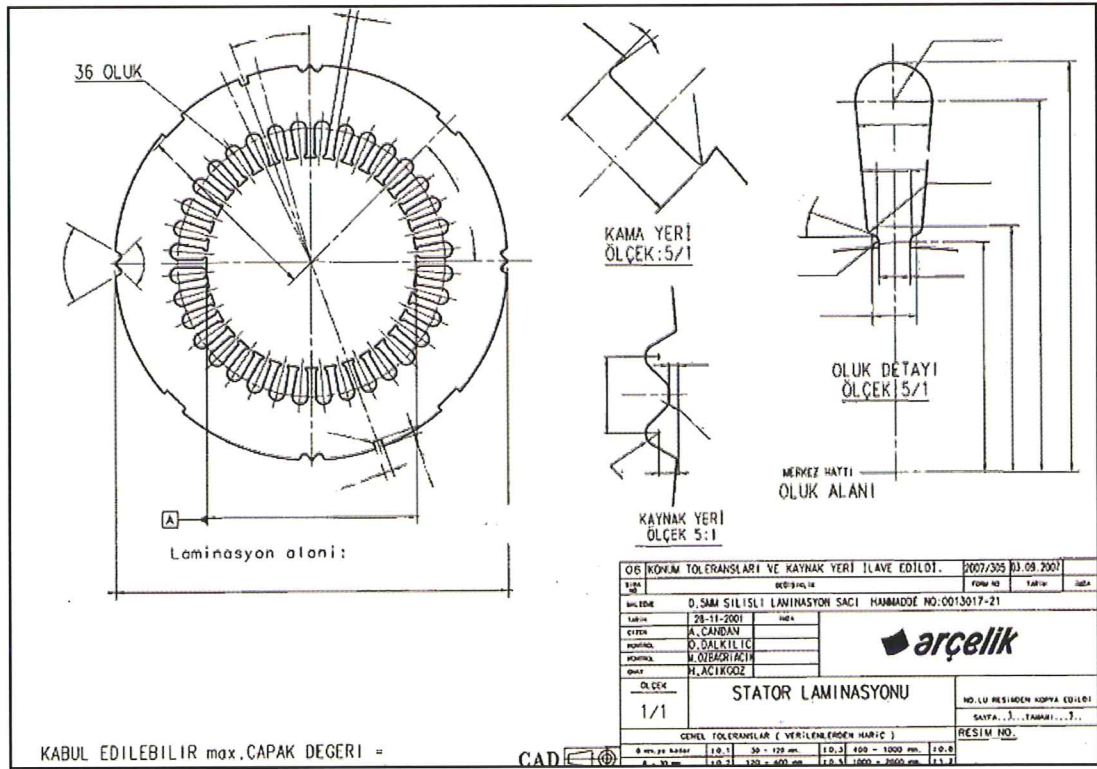
Şekil 6.1 : Makinenin rotor çekirdeğinin teknik resmi.



Şekil 6.2 : Makinenin rotor kesitinin teknik resmi.



Şekil 6.3 : Rotor grubunun teknik resmi.



Şekil 6.4 : Stator laminasyonunun teknik resmi.

6.2. Sayısal İnceleme İçin Motorun Eşdeğer Devre Elemanlarının Hesaplanması

Asenkron makinenin 3. Bölümde ayrıntılı olarak anlatılan dinamik modellerinin yeterliliği, temel ifadelerde kullanılan rotor ve statora ait indüktans ve direnç değerlerinin doğruluğuna bağlıdır. Bu anlamda makinenin eşdeğer devre elemanlarının ve karşılıklı indüktanslarının hesaplanma yöntemi büyük önem taşır. Bu nedenle çalışmada bir kaç hesaplama yöntemi kullanılmıştır. Hesaplanan eşdeğer devre elemanları kullanılarak sağlam ve arızalı makinenin simetrik bileşenler tam modeli ve yaklaşık modelleri çözümlenmektedir.

Asenkron makinenin sürekli hal T eşdeğer devre elemanları SPEED yazılımı ile hesaplanmıştır. Bulunan değerler, alışılagelen kısadevre ve boşa deney sonuçları ile hesaplanan T eşdeğer devre elemanları ile karşılaştırılarak, doğruluğu denetlenmiştir. Stator ve özellikle rotor devresine ait kaçak indüktans değerlerinin ayrıntılı hesabı, SPEED ve Flux 2D FEM yazılımında yapılmıştır. Bazı parametreler klasik yöntemlerle elle hesaplanarak denetlenmiştir. Stator ve rotor arasındaki indüktansların, stator faz sargılarının ve rotor devrelerinin kendi aralarında

oluşturduğu indüktansların hesabında ise, 3. Bölümde verilen doğruluğu pek çok referans ile onaylanan analitik denklemler kullanılmıştır. Buna göre çalışmalarda kullanılan asenkron makinenin anma değerleri, eşdeğer devre elemanları ve önemli mekanik sabitleri aşağıda verilmektedir. Bazı hesaplama örnekleri EK-C de verilmiştir.

Anma değerleri:

3 kW, 400 V Y, 6,1 A, 50 Hz, 2890 d/dak, $\cos\varphi = 0,88$, $\eta = \%83$

T eşdeğer devre elemanları:

Stator sargı direnci, R_1	: 1,917 Ω	25° C da soğuk durum
	: 2,2955 Ω	75 ° C da sıcak durum
Stator kaçak reaktansı, $X_{\sigma s}$	: 1,6537 Ω	
Mıknatıslanma reaktansı, X_m	: 104,524 Ω	
Demir kayıp direnci, R_{Fe}	: 1,062 k Ω	
Rotorun bir faza ait kafes direnci, R_2	: $1,3272 \cdot 10^{-4} \Omega$	
Rotor çubuk direnci, R_{2b}	: $8,7437 \cdot 10^{-5} \Omega$	
Rotor kısa devre bile.direnci, R_{2e}	: $4,5270 \cdot 10^{-5} \Omega$	
Durmada rotor kaçak reaktansı, $X_{\sigma ro}$	: $1,2553 \cdot 10^{-4} \Omega$	doymamış
	: $1,0949 \cdot 10^{-4} \Omega$	doymuş
İndirgeme için çevirme oranı, $\ddot{u}$	: 108,914	
İndirgenmiş,		
rotor kafesi faz direnci, R_2'	: 1,5743 Ω	
rotor çubuk direnci, R_{2b}'	: 1,0372 Ω	
rotor bilezik faz direnci, R_{2e}'	: 0,5370 Ω	
rotor kaçak reaktansı, $X_{\sigma ro}'$	: 1,4891 Ω	doymamış
	: 1,2988 Ω	doymuş

Dinamik modeller için direnç ve indüktans değerleri:

Stator kaçak indüktansı, $L_{\sigma s}$	: $5,26389.10^{-3}$ H	
Rotor kaçak indüktansı, $L_{\sigma ro}$	: $3,99583.10^{-7}$ H	doymamış
	: $3,48518.10^{-7}$ H	doymuş
Rotor bara indüktansı, L_b	: $1,75788.10^{-7}$ H	doymamış
	: $1,53323.10^{-7}$ H	doymuş
Uç halkası indüktansı, L_E	: $1,12568.10^{-7}$ H	doymamış
	: $9,81818.10^{-8}$ H	doymuş
Uç halkası segman indüktansı, L_e	: $113,367.10^{-11}$ H... $175,325.10^{-11}$ H	doymuş
Değişik rotor kaçak indüktansı, L_d	: $1,55636.10^{-7}$ H	doymamış
	: $1,35746.10^{-7}$ H	doymuş
Kaçak indüktans çarpanı	: 0,9	
Doyma çarpanı	: 0,8722	
Rotor bara direnci, R_b	: $8,7437.10^{-5}$ Ω	
Rotor uç halkası segma direnci, R_e	: $1,3677.10^{-6}$ Ω ... $1,6168.10^{-6}$ Ω	
Stator mıknatıslanma indüktansı		
denklem 4. e göre, L_{ms}	: 0,3133 H	
Rotor mıknatıslanma indüktansı		
denklem 4. e göre, L_{mr}	: $2,8510.10^{-6}$ H	
Karşılıklı indüktans		
denklem 4. göre, L_m	: $0,1475.10^{-5}$ H	

Mekanik sabitler:

Rotor eylemsizliği, J	: $0,0023 \text{ kg.m}^2$
-----------------------	---------------------------

Bunun yanısıra anma yükü için, makinenin çeşitli elektriksel ve magnetik büyüklükleri analitik olarak hesaplanmıştır. Bu değerlerden bazıları karşılaştırmalı olarak aşağıda verilmektedir:

Besleme gerilimi, V_1	: 400 V	
Stator akımı, I_1	: 5,84 A	anma değeri : 6,1 A

Devir hızı, n	: 2876 d/dak	anma değeri : 2890 d/dak
Güç katsayısı, $\cos\phi$	: 0,9317	anma değeri : 0,88
Verim, η	: % 83,78	anma değeri : % 83
Mil momenti, M_m	: 9,96 Nm	anma değeri : 9,91 Nm
İç güç, P_i	: 3,234 kW	
İç moment, M_i	: 10,28 Nm	
Stator bakır kayıpları, V_{CuS}	: 235,2 W	
Rotor bakır kayıpları, V_{CuR}	: 133,6 W	
Demir kayıpları, V_{Fe}	: 116,15 W	
Ek kayıplar, V_z	: 55,04 W	
Mekanik kayıplar, V_m	: 66,85 W	
Stator akım yoğunluğu, J_s	: 6,6086 A/mm ²	$I_1 = [J_s \cdot A_s] / Z_1 = 5,84 \text{ A}$
Rotor çubuk akım yoğunluğu,		
Ref.[86] e göre, J_{rb}	: 4,4038 A/mm ²	$I_{2b} = J_{rb} \cdot A_b = 189,63 \text{ A}$
V_{CuR} ' ye göre, J_{rb}	: 3,9920 A/mm ²	$I_{2b} = J_{rb} \cdot A_b = 171,90 \text{ A}$
Kısadevre bileziği akım yoğ.		
Ref.[86] e göre, J_{re}	: 3,5707 A/mm ²	$I_{2e} = J_{re} \cdot A_e = 846,83 \text{ A}$

Ayrıca rotor hata akım dağılımı yöntemi için gereken reaktans ve direnç değerleri de aşağıda verilmektedir:

Rotor kafes çubuğu rektansı	: $4,97 \cdot 10^{-5} \Omega$
Kısa devre segman reaktansı	: $3,5615 \cdot 10^{-7} \Omega$
Rotor çubuk direnci	: $8,744 \cdot 10^{-5} \Omega$
Segman direnci	: $1,3677 \cdot 10^{-6} \Omega$
Dış reaktansı	: $1,559 \cdot 10^{-4} \Omega$
Kafes çubuğu impedansı	: $(8,744 \cdot 10^{-5} + j \cdot 4,97 \cdot 10^{-5}) \Omega$
Segman impedansı	: $[1,3677 \cdot 10^{-6} + j(3,5615 \cdot 10^{-7} + 1,559 \cdot 10^{-4})] \Omega$

Analizleri yapılan makine için, bu değerler kullanılarak bir ve üç kırık için hata akımı analizi yapılmıştır. Literatürde yalnız bir kırık için yapılan çalışmalar vardır.

6.3. Kafes Arızaları İçin Sayısal Çözümlemeler

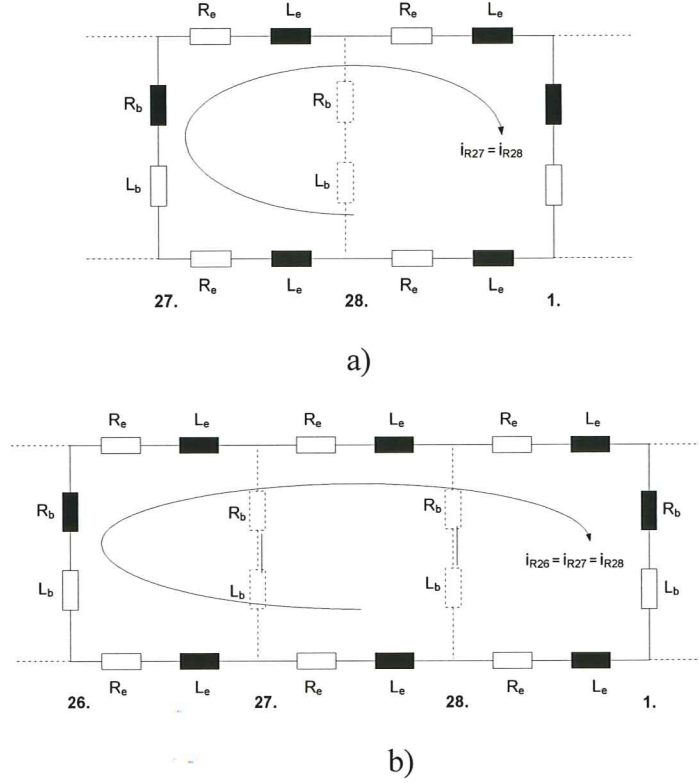
Burada 3. ve 4. Bölümlerde anlatılan ve önerilen, kafesi arızalı motorun geçici ve sürekli hal çözümleme yöntemlerine göre yapılan sayısal çalışmaların sonuçları verilmektedir. Geçici hal çözümlerinde önerilen yaklaşık çözüm modelinin değerlendirilebilmesi açısından ani değerli simetrlili bileşenleri kullanılmıştır.

Öte yandan 5. Bölümde açıklandığı gibi, kafes arızalarında en önemli değişim sürekli hal işletme büyüklüklerinde oluşmaktadır. Özellikle rotor çubuklarının akım dağılımı ve rotor sıcaklığı değişmektedir. Bu nedenle literatürde yalnız bir çubuk arızası için yapılan hata akım analizi, bir kaç çubuk arızası durumu için incelenmiştir. Sonuçlar magnetik model ile bulunan sonuçlarla karşılaştırılarak, genel geçer bir yaklaşım araştırılmıştır. Arızalı rotorlar için hesaplanan akım dağılımları rotor sıcaklık analizi için önemli bir veri tabanıdır.

6.3.1. Kafes arızasının modellenmesi ve dinamik modelin sonuçları

Kafesli asenkron makinenin dinamik modellerinde kafes çubuk arızası tanımlamak için iki ayrı yöntemden yararlanılabilir:

Birinci yöntemde, arızalı çubuğun tamamen devre dışı kaldığı düşünülür. Bu çubuğa komşu olan iki rotor devresi birleştirilir, devre akımları birbirine eşit olur. Şekil 6.5 deneysel ve magnetik çalışmalara uygun olarak, 28. çubuk ve 27. ile 28. çubukların birlikte kırık olduğu durumlar için rotor eşdeğer devreleri verilmektedir. Arızayı, makinenin zamana bağlı büyüklüklerle kurulan dinamik modelinde tanımlamak son derece basittir. Rotor gerilim denkleminde, rotor direnci matrisi R_2 nin, rotor indüktans matrisleri $L_{\sigma r}$ ve L_{rr} nin arızalı çubuğun komşu devrelerine karşı gelen satırları ve sütunları kendi aralarında toplamak yeterlidir. Karşılıklı indüktans matrisi L_{RS} de ise ilgili rotor devre akımlarına karşı gelen satırlar, L_{SR} de ise sütunlar kendi aralarında toplanır. Böylelikle, rotor büyüklük matrislerinin derecesi bir derece küçülür. Aynı yöntem diğer kırık çubuklar için de uygulanır. Her arızada rotor büyüklük matrislerinin boyutu küçülür. Bu nedenle simetrlili bileşen dönüşümlerinde, dönüşüm matrisleri ve rotorun simetrlili bileşen denklemleri arıza ile için değişir, yeniden tanımlamak gerekir. Bu işlem yükünü arttırır.



Şekil 6.5 : Kafes kırıklarının eşdeğer devrede modellenmesi.
a) Bir çubuk, b) ardışık iki çubuk arızalı.

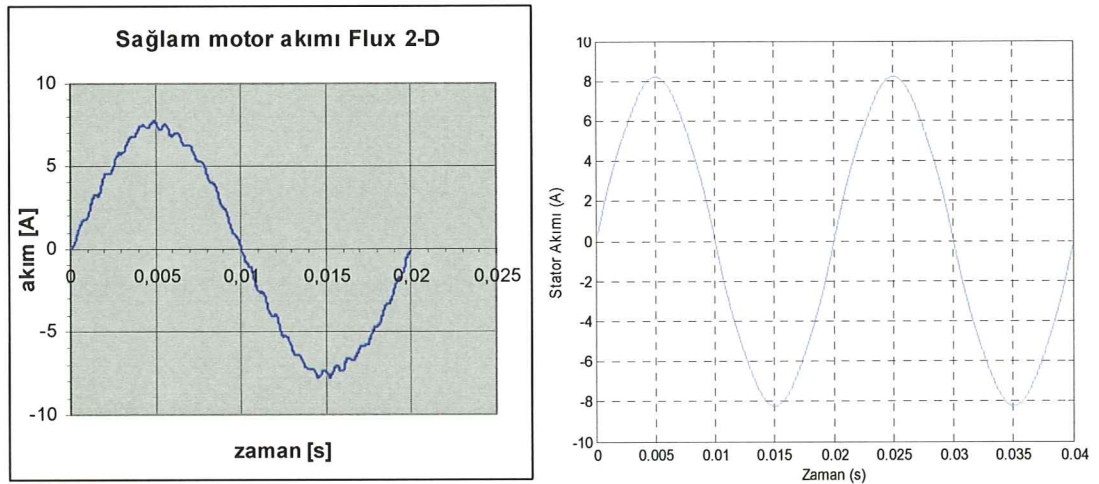
İkinci yöntemde, arızalı kafes çubuğunun arıza derecesi devre parametreleri ile dolaylı olarak tanımlanır. Çubuğun tamamen devre dışı kalması için, üzerinden akım akmaması gerekir. Bunun için devre denklemlerinde, çubuk direnci R_b çok büyük değerde tanımlanır. Ayrıca, direnç değeri değiştirilerek, kötü temas yüzeyi, döküm hatası, kılcal çatlak, tam kırık gibi farklı arızalar ve arıza dereceleri modellenebilir. Aşağıdaki denklemde 28. kafes çubuğunda oluşan bir arıza için, rotor direnç matrisinde değiştirilmesi gereken eleman değerleri koyu renk yazılarak belirtilmiştir.

$$\cdots \begin{bmatrix} R_o & -R_b & \cdots & 0 & 0 & -R_b \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & -R_b & \mathbf{R_o} & \mathbf{-R_b} \\ -R_b & 0 & \cdots & 0 & \mathbf{-R_b} & \mathbf{R_o} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{R1} \\ \vdots \\ i_{R27} \\ i_{R28} \end{bmatrix} \cdots \quad (6.1)$$

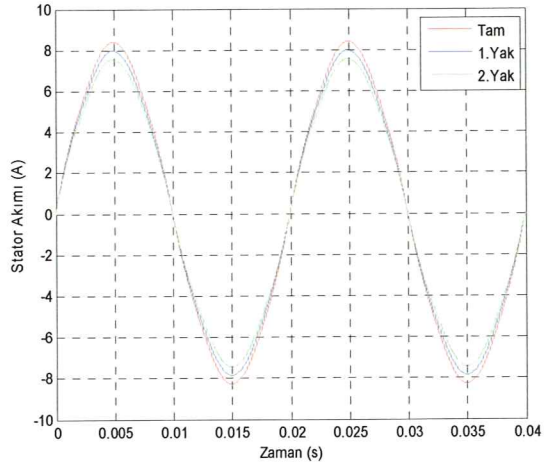
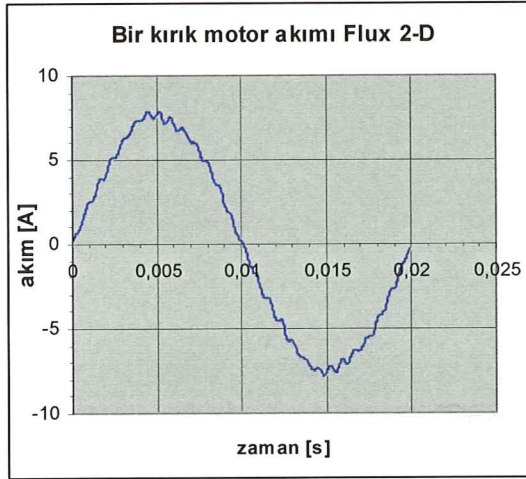
Kırık çubuğun akımı, diğer akımlara göre çok küçük olduğundan kaçak indüktans değeri L_b sıfır olarak düşünülebilir. Ayrıca tam kırık durumu için, stator fazları ile ve

diğer rotor devreleri ile oluşturduğu karşılıklı indüktanslar da sıfır olarak kabul edilebilir. Rotor gerilim denkleminde, rotor indüktans matrisleri L_{or} ve L_{rr} de arızalı çubuğun satır ve sütun elemanları sıfır alınır. Karşılıklı indüktans matrisi L_{RS} de kırık çubuğa karşı gelen satırın elemanları, L_{SR} de ise sütunun elemanları sıfır alınır. Bu yöntemde rotor büyüklük matrislerinin boyutu değişmez. Bu nedenle simetrik bileşen modellerinde tek bir dönüşüm matrisi kullanılır. Arızalı duruma göre tanımlanan direnç ve indüktans matrislerine, simetrik bileşenler yöntemi uygulanarak tam veya yaklaşık model ile motorun işletme davranışı incelenir.

Şekil 6.6 da sağlam motor için, FEM analizi ile bulunan akım dalga şekli ile, tam simetrik bileşenler modeli ile bulunan akım eğrisi karşılaştırılmaktadır. Simetrik bileşenler yöntemi ile elde edilen eğri, doyma, uzay harmoniklerinin etkileri ve sıfır bileşen dikkate alınmadığından, FEM analizi ile elde edilen akım eğrisine göre daha sinüs biçimlidir. Tepe değerleri arasında % 8...10 civarında bir fark vardır.

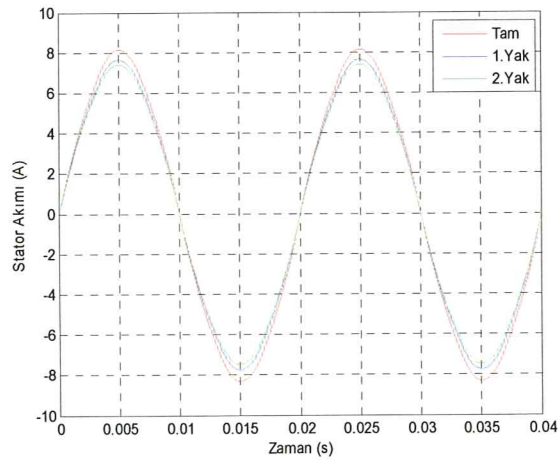
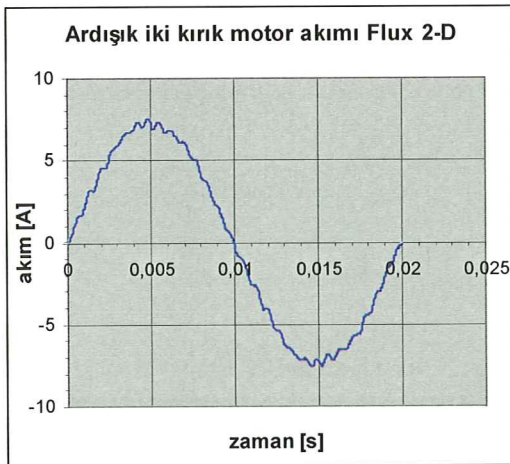


Şekil 6.6 : Anma yükünde motor akımının simetrik bileşen ve sonlu eleman modelleri için karşılaştırılması.



Şekil 6.7 : Bir çubuğu arızalı motorun birinci yaklaşık ve ikinci yaklaşık simetrlili bileşen modeli sonuçları.

Şekil 6.7 de bir çubuğu kırık, Şekil 6.8 de ise ardışık iki çubuğu kırık makinenin FEM analizi ile ve ani değerli simetrlili bileşenler modeli ile hesaplanan akım eğrileri verilmektedir. Ayrıca simetrlili bileşen modelleri tam, birinci yaklaşık model ve ikinci yaklaşık model bakımından kendi aralarında karşılaştırılmaktadır. Buna göre birinci yaklaşık model ile bulunan akım eğrisi, tam modele göre ortalama % 4...5 hatalıdır. İkinci yaklaşık model ise tam modele göre ortalama % 9...11 kadar hatalı sonuç vermektedir. Buna karşın akımın harmonik analizinde rotor kafes hatalarını ayırt edecek izler vardır.



Şekil 6.8 : Ardışık iki çubuğu arızalı motorun birinci yaklaşık ve ikinci yaklaşık simetrlili bileşen modeli sonuçları.

6.3.2. Hata akımı analizi sonuçları

Magnetik analizlerle 5. Bölümde yapılan incelemelerde rotor çubuk akımlarının sürekli hal değerleri hesaplanmıştır. Buna göre sağlam, bir çubuğu kırık ve ardışık üç kırık olan makineler için, kırık çubuklara komşu olan çubukların akım dağılımları Çizelge 6.1a da verilmektedir. Renkli bölgeler kırık çubukları göstermektedir.

Çizelge 6.1a : Sürekli halde FEM ile bulunan rotor çubuk akımları.

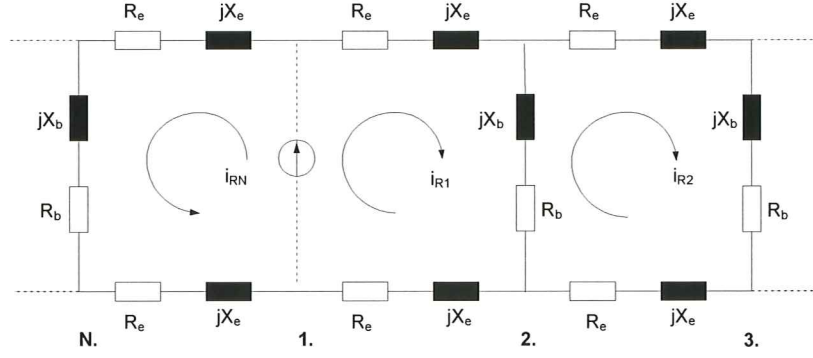
Çubuk numarası:	24	25	26	27	28	1	2	3
Çubuk akımları [A]								
Sağlam		189,6	189,6	189,6	189,6	189,6	189,6	
Bir bara kırık				261,6		254,6		
Ardışık üç bara kırık		308,4				301,2	299,8	

Verilen bu dağılımdan görülebileceği gibi, yalnız bir kırıkta, kırık çubuk akımının % 72' si komşu iki çubuğa dağılmaktadır. Üç kırık durumunda ise bu oran kırık çubukların toplam akımının % 40,5 ine düşmektedir.

Hata akımları yöntemi ile 4. Bölümde incelenen tek çubuk kırıklarında simetri nedeniyle, birbirine komşu olan çubukların akım oranları sabit kalır. Tek kırık çubuk için Bölüm 6.2 de hesaplanan devre elemanları göre, % 3,63 lük kayma değerinde komşu devre akımlarının oranı, yani hatanın sönümlenme oranı $\underline{d}$,

$$\underline{d} = \frac{I_{Rk+1}}{I_{Rk}} = 0,2370.e^{-j63,6^\circ} \quad (6.2)$$

olarak hesaplanır. Benzer oran komşu çubuk akımları için de geçerlidir, kırık olan çubuğun akımı, diğer kafes çubuklarına sönümlenme oranına göre dağılır. Çubuk sayısı çift sayı olduğundan tek sayılı kırıklar için hata akım dağılımı simetriktir. Buna göre, 1.çubuğun kırıldığı düşünülürse, 1. ve 28. devrelerin akımlarının genliği kırık çubuk akımının yarısı olan 94,95 A olur. Bu hata akımının $\underline{d}$ sönümlenme oranına göre, 2. çubuğa 70,3 A lik, 3. çubuğa 16,7 A lik kısmının dağıldığı hesaplanır. Benzer biçimde diğer çubuk akımları da bulunur. Dördüncü komşu



Şekil 6.9 : Bir kafes kırığı için hata akımı analizi eşdeğer devresi.

çubuktan sonra hata akımları dikkate alınmayacak kadar küçüktür. Akım dağılımı Çizelge 6.1b de verilmektedir.

Bir kırık çubuk için Çizelge 6.1b de verilen hata akımı yöntemi ile Çizelge 6.1a da verilen FEM nin hesaplama sonuçları birbiri ile tutarlıdır. Arızalı çubuk akımının yaklaşık %70 kadarı simetrik komşu iki çubuğa dağılmaktadır. Ardışık iki çubuk ve ardışık üç çubuk arızaları için de Şekil 4.4 ve Şekil 4.5 de verilen çok gözlü basitleştirilmiş modellere göre hesaplama yapılmıştır.

Gerçekte çift sayılı kırıklarda devre simetrisi bozulduğundan sabit bir sönümlenme oranı yoktur. Ancak yapılan basitleştirme ile ilk ve son köşegen impedans değerleri eşit alınarak simetri oluşturulmuştur. Ardışık iki kırık arızasında, komşu devre akımları için, sönümlenme katsayısı $\underline{d}$,

$$\underline{d} = \frac{I_{Rk+1}}{I_{Rk}} = 0,2370.e^{-j63,6^\circ} \quad (6.3)$$

olarak hesaplanır. Kafes çubukları arasındaki açı küçük olduğundan hata akımı olarak çubuk akımlarının vektörel toplamı yerine, aritmetik toplamı alınabilir. Buna göre arızaya komşu ilk baraların akımları 156 A, diğer komşu bara akımları ise sırasıyla 37 A, 8,8 A, 2,1 A... artmaktadır.

Ardışık üç kırık arızasında hata akımı analizi % 3,75 lik kayma değeri için Şekil 4.5 de verilen model ile yapılmıştır. Bu devreye göre, sönümleme katsayısı $\underline{d}$, diğer arızalardaki değerlere yaklaşık eşit bulunur. Genlik ve faz açıları, binde birler düzeyinde farklılık göstermektedir. Hata akımı dağılımına göre ardışık üç

Çizelge 6.1b : Hata akımı analizi ile bulunan rotor çubuk akımları.

	Çubuk numarası:										
Çubuk akımlarının genliği [A]	24	25	26	27	28	1	2	3	4	5	6
Sağlam	189,6	189,6	189,6	189,6	189,6	189,6	189,6	189,6	189,6	189,6	189,6
Bir bara kırık		190,5	193,5	207,2	259,9		259,9	207,2	193,5	190,5	
Ardışık iki bara kırık		191,7	198,4	226,6	345,6			345,6	226,6	198,4	191,7
Ardışık üç bara kırık	192,9	203,5	248,1	435,6				435,6	248,1	203,5	192,9

çubuk arızasında, ilk komşu baraya 246 A, sonraki çubuklara sırasıyla 58,5 A, 13,9 A, 3,3 A...lik akım dağılmaktadır.

Hata akımlarının sönümlenme oranları yaklaşık eşit olmasına karşın, artan kırık sayısı ile hata akımı büyüdüğünden, komşu çubuklara dağılan akım oranı artmaktadır. Bu oran birinci komşu çubuk akımında, bir kırık için %70 iken, ardışık iki kırıkta % 82,3 ve ardışık üç kırıkta % 85 e çıkmaktadır.

Sonuç olarak, incelenen hata akımı analiz modellerinde kısa devre bilezik parçasının (segman) impedansı, bara impedansına göre büyük değerdedir. Rotor kafesinin eşdeğer impedans değerleri, devrenin çok gözlü paralel yapısı nedeniyle, farklı çubuk sayısındaki arızalar için, küçük değişimler gösterir. Bu nedenle hata akımı dağılma oranı, başka bir ifade ile hata akımı sönümlenme katsayısı $\underline{d}$, incelenen devre modellerine göre arızalı ardışık kırık çubuk sayısından bağımsızdır, yaklaşık olarak sabit değerde kalır.

6.4. Deneysel Çalışmalar

Bu çalışmada asenkron makinenin çeşitli kafes çubuğu arızalarındaki işletme davranışı ve magnetik büyüklükleri Flux 2D sonlu elemanlar yöntemi ile ve makinenin dinamik modeli kurularak simetrik bileşenler yöntemi ile incelenmiştir. Yapılan teorik çalışmaların sonuçlarını doğrulamak amacıyla, analizlerde yapımsal büyüklükleri kullanılan ARÇELİK A.Ş. Çerkezköy Motor Fabrikasında üretilen QS100L2-A tipi sağlam ve arızalı asenkron motorların boşa ve anma yükünde deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarının karşılaştırılabilmesi için, dört özdeş rotor üzerinde çalışılmıştır. Çeşitli arızalar için yapılan deneylerin sırası aşağıda maddeler halinde verilmektedir:

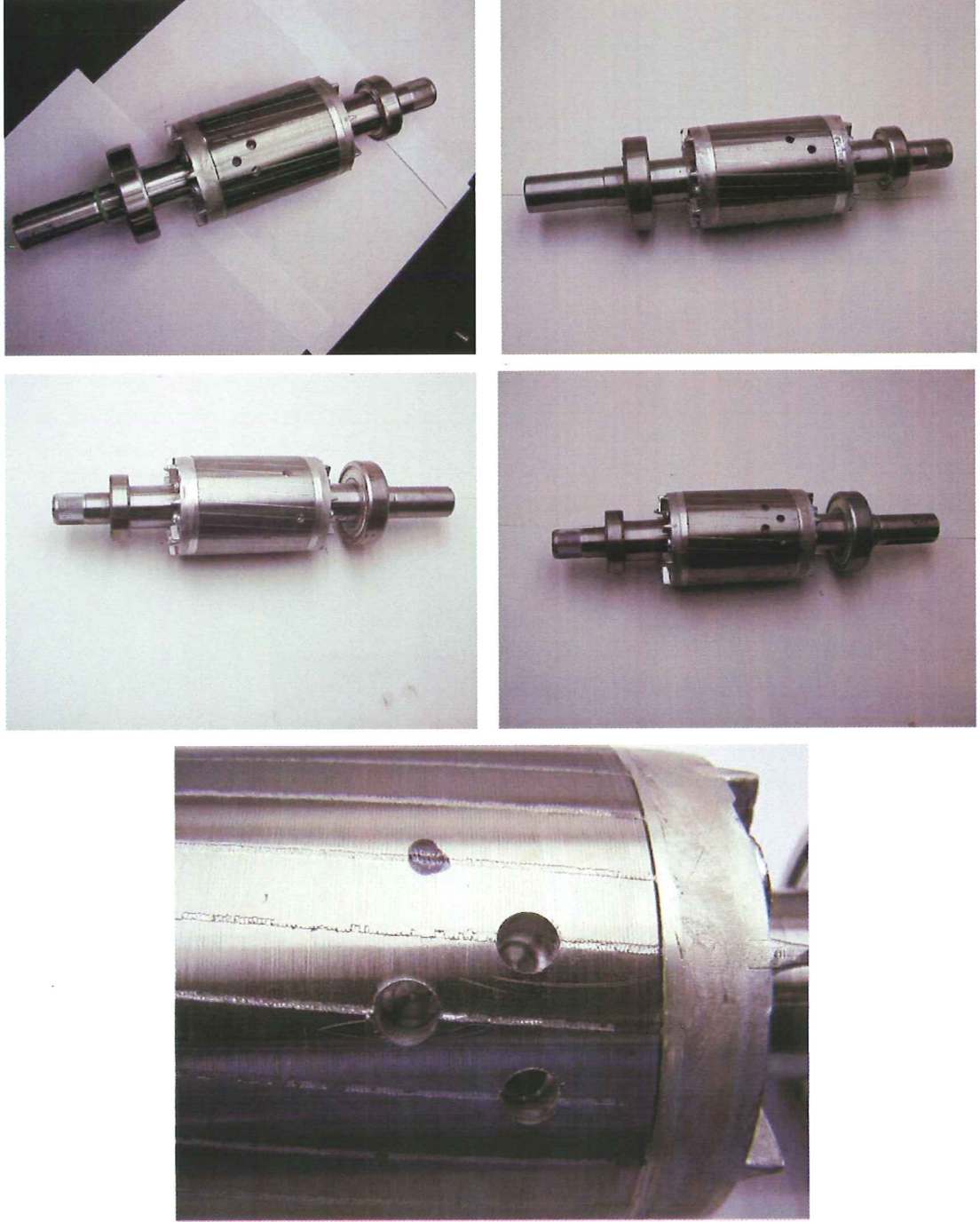
- Motor anma yükünde yüklenerek, akım, moment, verim vb. gibi işletme özeğrilerinin çıkarılması,
- boşa ve anma yükünde akım özeğrilerinin osiloskop yardımıyla alınması, kalkış akımlarının özeğrisinin kaydedilmesi,
- anma yükünde ısınma deneyinin yapılması.

Bütün bu deney aşamaları dört tane rotor ve iki farklı stator gövdesi için değişik arıza algoritmaları için tekrarlanmıştır. Birinci ve ikinci rotor deneyleri birinci stator gövdesinde, üçüncü rotor testleri ikinci stator gövdesinde yapılmıştır.

- Birinci rotorda, incelenen arızanın temel yapısına uygun biçimde sağlam, bir kırık, ardışık iki kırık, ardışık üç kırık ve ardışık dört kırık için,
- İkinci rotorda, sağlam, bir kırık ve aralarında üç sağlam çubuk olacak biçimde herhangi iki kırık için,
- Üçüncü rotorda, sağlam, bir kırık ve magnetik bakımdan simetrik iki kırık için deneyler yapılmıştır.

Bütün deneysel çalışmalar ARÇELİK Motor İşletmeleri Çerkezköy Fabrikası, Ar-Ge Laboratuvarlarında yapılmıştır. Şekil 6.10 ve Şekil 6.11 de deney düzeneğinin ve deneyleri yapılan rotorların resimleri verilmektedir. Resimlerden de görülebileceği gibi, kafes arızaları çubuktan parça alınarak yaratılmıştır. Gerçekte kırık kafes

durumunda bu denli parça eksilmesi söz konusu değildir. Bu nedenle kafes arızaları yaratıldıktan sonra, rotor, parça eklenerek tekrar dengelenmiştir. Böylelikle yarıçapsal dengesizliğin, ölçüm sonuçlarında yaratacağı hatalar nlenmiştir, (şekil 6.10).



şekil 6.10 : DeneySEL çalışmalarda kullanılan rotorların resimleri.



Şekil 6.11 : Motorun deney düzeneğinin fotoğrafı.

6.4.1. Performans deneylerinin sonuçları ve karşılaştırılması

Bölüm 5 de sağlam ve rotor kafesi arızalı olan motorlar için yapılan magnetik analizlerin sonuçları incelendiğinde, kafes arızalarında motorun işletme büyüklüklerinde oluşan geçici hal değişimlerinin, motorun işletme performansına çok büyük bir etkisinin olmadığı, geçici hal incelemelerinin çoğunlukla arıza tanısı amaçlı olduğu belirtilmişti. Bu doğrultuda yapılan çalışmada, dinamik analizler ile geçici hal büyüklük ölçümleri yapılmıştır. Çeşitli arızalarda motorun sürekli hal işletme performansındaki değişim, mil momenti, motor akımı, devir hızı bakımından incelenmektedir.

FEM analizi ile arızalı motorun işletme büyüklüklerinde saptanan değişimlerin doğrulanması için, bu motorların Bölüm 5 de FEM ile yapılan analizlerde motorun sürekli işletme büyüklüklerindeki değişim hesaplanmıştır. Öngörülen bu değişimlerin doğrulanması bakımından incelenen her bir arızalı durum için, farklı rotorlar üzerinde asenkron motorun performans deneyleri yapılmıştır (EK-D) . Arıza kurgusuna göre dört ayrı rotor üzerinde yapılan deneylerin sonuçları FEM sonuçları ile birlikte Çizelge 6.2 ve Çizelge 6.3 de verilmektedir.

Çizelge 6.2 : Sağlam ve ardışık kırıklar için motorun işletme büyüklüklerinin analiz ve deney sonuçları.

	Sağlam				Bir Kırık				Ard. İki Kırık		Ard. Üç Kırık		Ardışık 4 Kırık	
	Hesapla	Ölçülen			Hesapla	1.rotor	2.rotor	4.rotor	Hesapla	Ölçülen 1.rotor	Hesapla	Ölçülen 1.rotor	Hesapla	Ölçülen 1.rotor
Gerilim: 400 V														
Frekans: 50 Hz														
Mil gücü [kW]	3	3,022	3,070	3,025	3	3,009	3,019	3,015	3	3,004	3	3,015	3	2,991
Kalkış akımı [A]	44,92	48,86	48,24	48,89	45,2	47,88	48,38	47,52	45,84	46,85	46,13	45,78	45,75	44,25
Anma akımı [A]	6,02	6,11	6,01	6,06	6,16	6,11	6,10	6,09	6,27	6,04	6,57	6,16	6,70	6,28
Boşta akım [A]	4,03	3,22	3,05	3,06	4,05	3,19	3,18	3,01	4,05	3,13	4,05	3,12	4,04	ölçme hatası
Kalkış momenti [Nm]	30,174	28,31	28,92	29,71	30,416	29,39	29,46	29,58	30,93	29,39	30,624	29,45	30,458	30,68
Anma momenti [Nm]	9,91	9,91	9,91	9,91	9,91	9,91	9,91	9,91	9,91	9,91	9,91	9,91	9,91	9,91
Devrilme momenti [Nm]	37,241	37,49	37,41	38,15	37,284	37,00	37,54	37,11	36,954	36,58	36,669	35,5	34,727	34,02
Devrilme hızı [d/dak]	1764	1935	1752	1765	1746	1735	1755	1748	1734	1568	1692	1568	1638	1402
Devrilme kayması %	41,2	35,5	41,6	41,2	41,8	42,2	41,5	41,7	42,2	47,7	43,6	47,7	45,4	53,3
Anma hızı [d/dak]	2880	2912	2898	2915	2879,5	2900	2910	2905	2879	2895	2876,5	2905	2872	2882
Anma kayması %	3,97	2,93	3,4	2,83	4,02	3,33	3	3,17	4,03	3,5	4,12	3,17	4,26	3,93

Çizelge 6.3 : Sağlam, herhangi iki çubuğu (kSSSk) ve simetrik iki çubuğu kırık olan motorun işletme büyüklüklerinin analiz ve deney sonuçları.

	Sağlam				Bir Kırık				Ard. İki Kırık		Herhangi 2 Kırık kSSSk		Simetrik 2 Kırık	
	Gerilim: 400 V	Ölçülen			Ölçülen			Ölçülen		Hesapla	Ölçülen	Hesapla	Ölçülen	
Frekans: 50 Hz	Hesapla	1.rotor	2.rotor	4.rotor	Hesapla	1.rotor	2.rotor	4.rotor	Hesapla	1.rotor	Hesapla	2.rotor	Hesapla	4.rotor
Mil gücü [kW]	3	3,022	3,070	3,025	3	3,009	3,019	3,015	3	3,004	3	3	3	3,015
Kalkış akımı [A]	44,92	48,86	48,24	48,89	45,2	47,88	48,38	47,52	45,84	46,85	45,38	48,23	45,82	46,79
Anma akımı [A]	6,02	6,11	6,01	6,06	6,16	6,11	6,10	6,09	6,27	6,04	6,15	6,07	6,175	6,17
Boşta akım [A]	4,03	3,22	3,05	3,06	4,05	3,19	3,18	3,01	4,05	3,13	4,03	3,05	4,04	3,12
Kalkış momenti [Nm]	30,174	28,31	28,92	29,71	30,416	29,39	29,46	29,58	30,93	29,39	29,947	29,3	28,782	29,92
Anma momenti [Nm]	9,91	9,91	9,91	9,91	9,91	9,91	9,91	9,91	9,91	9,91	9,91	9,91	9,91	9,91
Devrilme momenti [Nm]	37,241	37,49	37,41	38,15	37,284	37,00	37,54	37,11	36,954	36,58	36,694	37,57	36,657	36,36
Devrilme hızı [d/dak]	1764	1935	1752	1765	1746	1735	1755	1748	1734	1568	1740	1765	1740	1755
Devrilme kayması %	41,2	35,5	41,6	41,2	41,8	42,2	41,5	41,7	42,2	47,7	42,0	41,2	38,6	41,5
Anma hızı [d/dak]	2880	2912	2898	2915	2879,5	2900	2910	2905	2879	2895	2879	2891	2884	2905
Anma kayması %	3,97	2,93	3,4	2,83	4,02	3,33	3	3,17	4,03	3,5	4,03	3,63	3,88	3,17

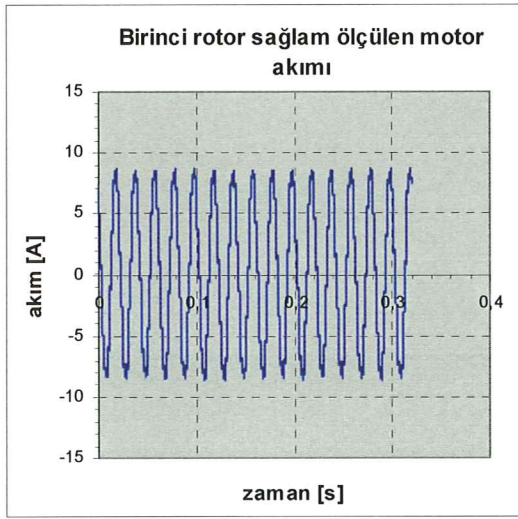
Ardışık çubuk arızaları için Çizelge 6.2. de verilen deney sonuçları incelendiğinde, kalkış akımı, kalkış momenti ve devrilme momentinde oluşan değişimlerin, 5. Bölümde magnetik analiz modelleri ile bulunan sonuçlara büyük oranda benzerlik gösterdiği saptanır. Bu değerlere ve Ek-D de verilen performans özeğrilerine göre moment değeri devrilme bölgesinde belirgin biçimde azalmaktadır. Devrilme momenti ardışık dört kırık çubuk için, % 7,6 azalmaktadır. Bu oran üç kırık için % 3, ardışık iki kırık için % 2,5 düzeyindedir. Bu değerler sayısal çözümlemede, dört kırık için % 7, üç kırık için % 3,16 ve iki kırık için %1,7...% 1,83 olarak hesaplanmıştır. Anma işletmesinde motorun devir devir hızındaki değişim, bir kırık için 7 d/dak, iki kırık için 20 d/dak ve dört kırık için ise 30 d/dak kadardır. Üç kırık için bir ölçme hatası oluşmuştur.

6.4.2. Akım özeğrileri ve harmonik analizi

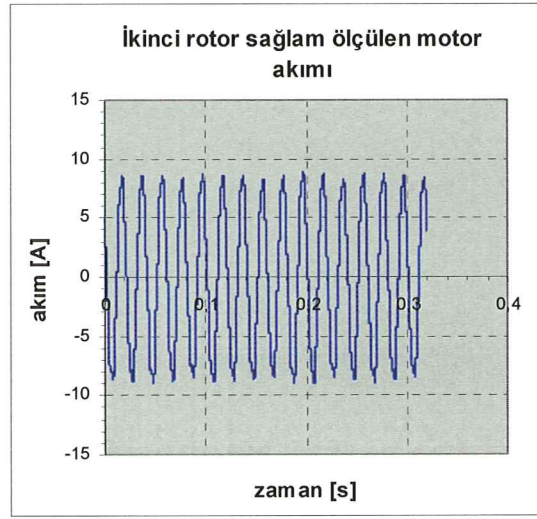
Çeşitli rotor arızalarında işletme özeğrileri çıkarılan motorların, anma işletmesi ve boşa çalışma durumu için akım özeğrilerinin zamana bağlı değişimi bir çevirici ile kaydedilmiştir. Kullanılan sistemin örnekleme zamanı $1/10^6$ s dir. Örnekleme zamanının yeterince küçük olmasına karşın, bu verilerin Hızlı Fourier açılımında alçak frekans bantı için arızaları tanımlayan belirleyici işaretler elde edilememiştir. Bu nedenle, bu veriler alışılagelen harmonik analizinde kullanılmıştır. Hızlı Fourier Dönüşüm sonuçları ise, üst frekans bantlarında bulunan işaretler bakımından incelenmiştir. Motor akımının izini alçak frekans bantlarında inceleyebilmek için, akım eğrisini kaydederek doğrudan belirlenen aralıkta frekans bantlarına açan ayrı bir analizör kullanılmıştır. Ancak bu deneyler yalnızca boşa çalışma durumunda yapılabilmektedir.

Aşağıda Şekil 6.12 de çeşitli rotor arızalarında anma yükü için motor akımının zamana bağlı değişim eğrileri verilmiştir. Eğriler incelendiğinde, magnetik analiz sonuçlarına uygun olarak, artan kırık sayısı ile, akımın tepe değerinin ve salınım genliğinin arttığı görülmektedir. Değişim değerleri Çizelge 6.4 de verilmektedir.

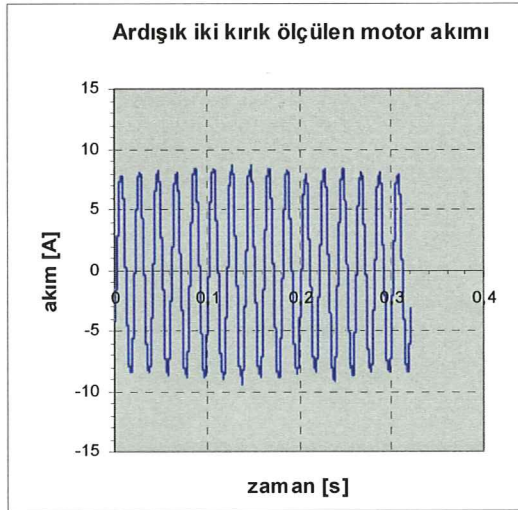
Arıza tanısı için pek çok yöntem motor akımını Hızlı Fourier Analizi ile frekans bantlarına açarak, belirli frekanslarda genlik artışları aramaktadır. Literatürde doğrudan akım dalga biçimini inceleyen bir çalışma yoktur. Aşağıda verilen akım özeğrileri incelendiğinde, motor akım zarf eğrilerinin salınım frekanslarına ve genlik değişim aralıklarına göre arıza tanısı yapılabileceği görülmektedir.



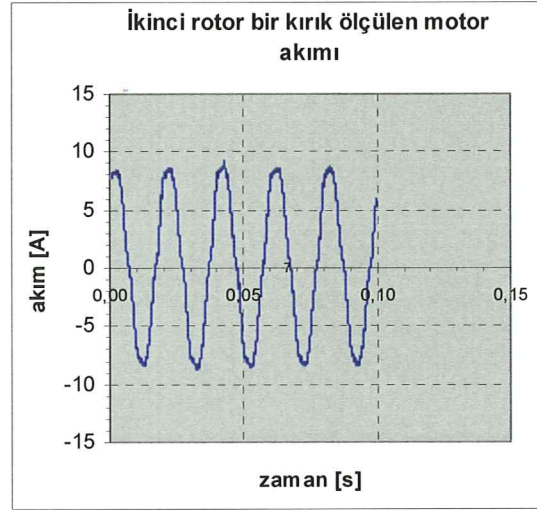
a)



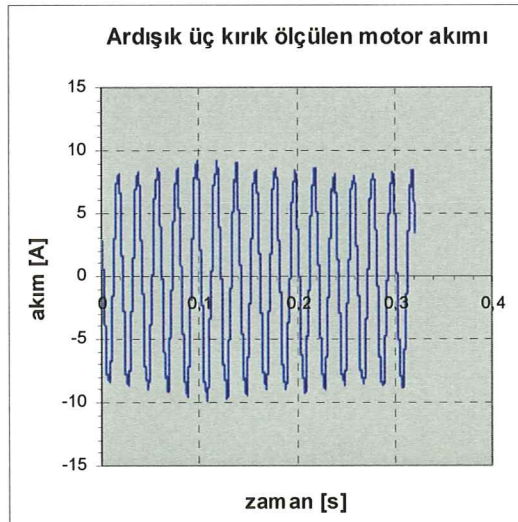
b)



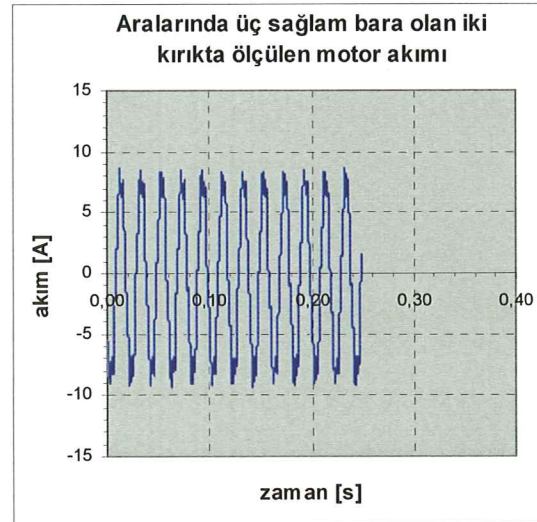
c)



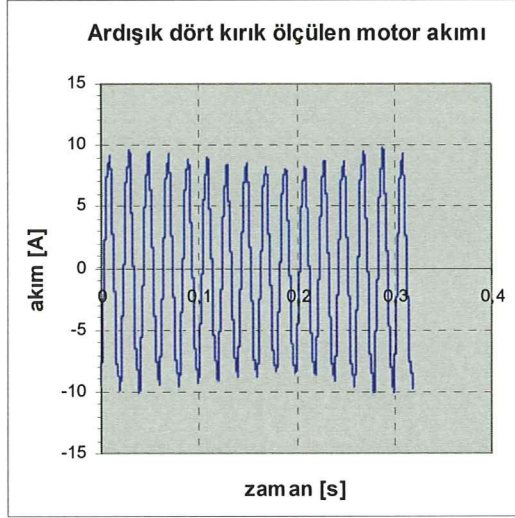
d)



e)



f)



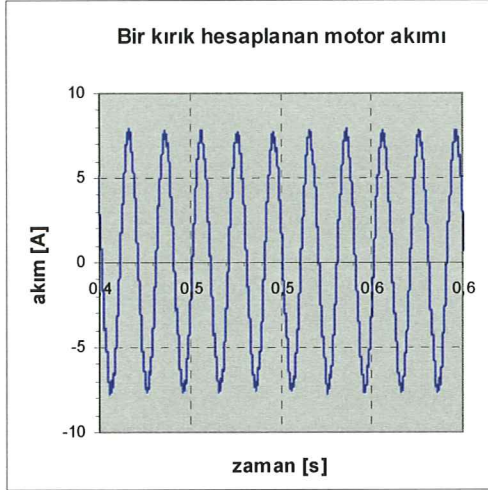
g)

Şekil 6.12 : Anma yükünde motor akımlarının zamana bağlı değişim eğrileri.

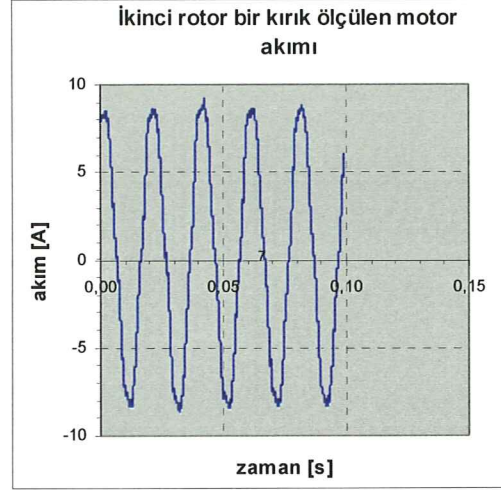
a) Sağlam birinci. rotor, b) sağlam ikinci rotor, c) ardışık iki çubuğu kırık, d) bir çubuğu kırık, e) ardışık üç çubuğu kırık, f) herhangi iki çubuğu kırık, g) ardışık dört çubuğu kırık motor akımları.

Akım özeğrilerinde sağlam makine için akım zarfının değişim periyodu 4.T, genlik değişim aralığı ise 0,2 A dir. Akım zarf eğrisinin periyodu, ardışık iki kırıkta 7.T ye, üç ardışık kırıkta 12.T ye ve dört ardışık kırıkta 7.T ye çıkmaktadır. Genlik değişim aralıkları ise, ardışık iki kırık için 1 A, ardışık üç kırık için 1,2 A ve ardışık dört kırık için 1,6 A kadardır. Bu değişimleri motorun anma akımlarına oranlayarak dikkate almak daha doğrudur. Akımın ani değer büyüklüğüne göre, bu oran sağlam durumda, % 2,32, iki kırıkta % 13, üç kırıkta % 14 ve dört kırıkta % 18,5 kadar değişim vardır. Ancak Şekil 6.14 da verilen boşta akım eğrileri için böyle belirgin ve ayırt edici bir değişim yoktur.

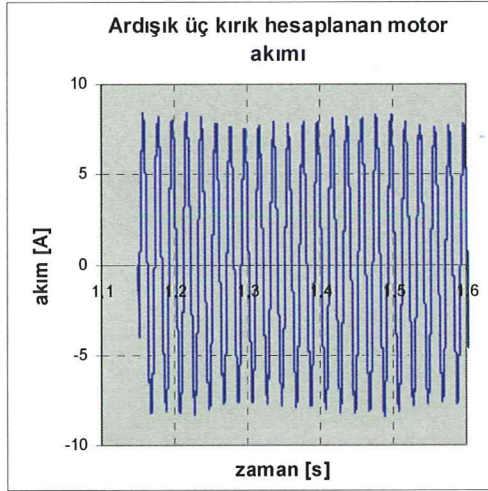
Benzer karşılaştırma bir kırık ve üç kırık durumları için, hesaplanan akım değerleri ile gerçek ölçülen değerler arasında yapılabilir. Aşağıda her iki duruma ait akım eğrileri verilmektedir.



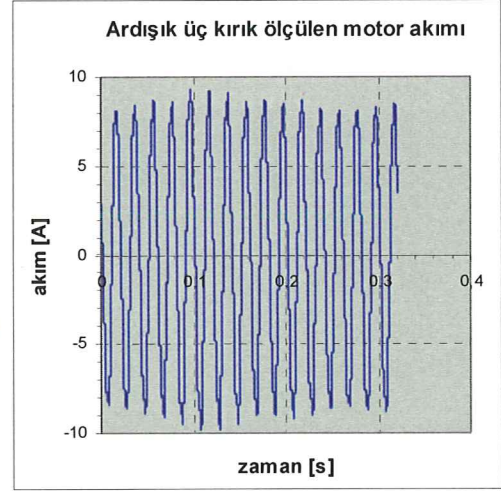
a)



b)



c)



d)

Şekil 6.13 : Fem analizi sonuçları ile deneysel sonuçların karşılaştırılması.

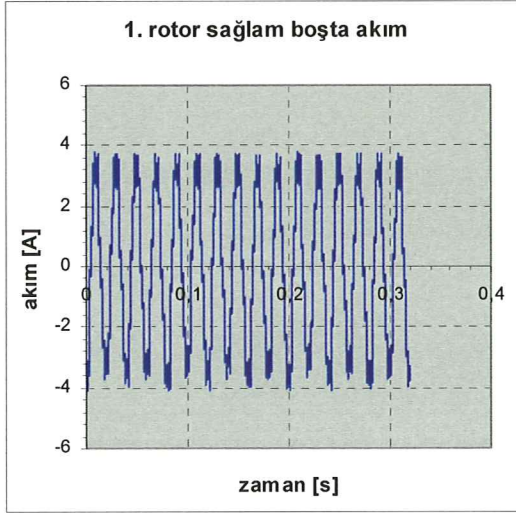
a,b) Bir kırık çubuk için,

c,d) ardışık üç kırık çubuk için motor akım eğrisi.

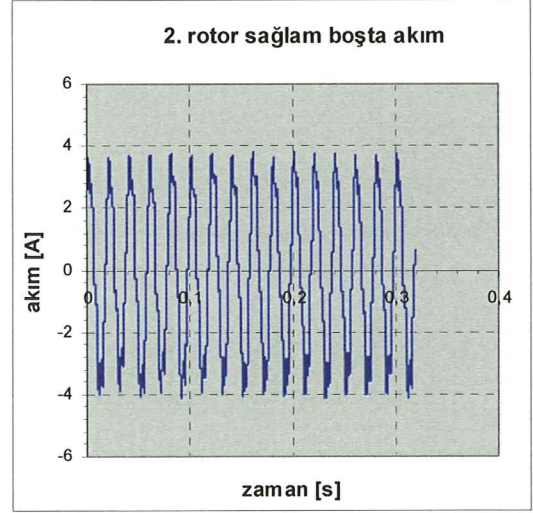
Akım eğrilerinden görüleceği gibi, benzeşim sonuçları ile deneysel sonuçlar büyük ölçüde yakınlık göstermektedir. Bu anlamda yapılan analizlerle, gerçek işletme durumu modellenmiştir. Akım büyüklükleri bakımından diğer bir inceleme boşa çalışma akımı ile yapılır. Şekil 6.14 da dikkate alınan arızalı motorların boşa çalışma akımlarının zamanla değişim eğrileri verilmektedir.

Çizelge 6.4: Anma akımlarının ani değerlerinin çubuk arızaları ile değişimi.

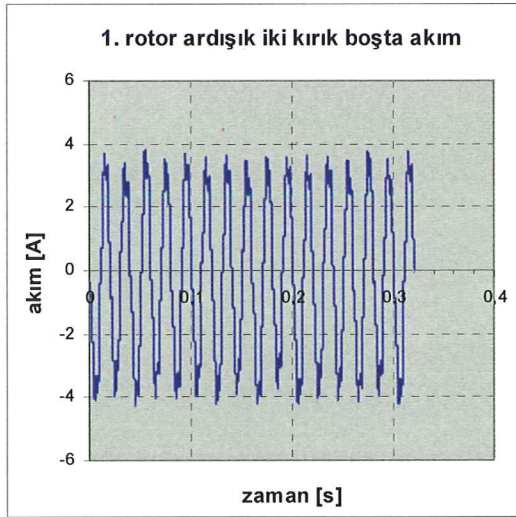
Motor akımının tepe değeri [A]	sağlam	bir kırık	ardışık iki kırık	ardışık üç kırık	ardışık dört kırık
En büyük [A]	8,50	8,60	8,70	9,25	9,63
En küçük [A]	8,30	8,05	7,70	8,00	7,90



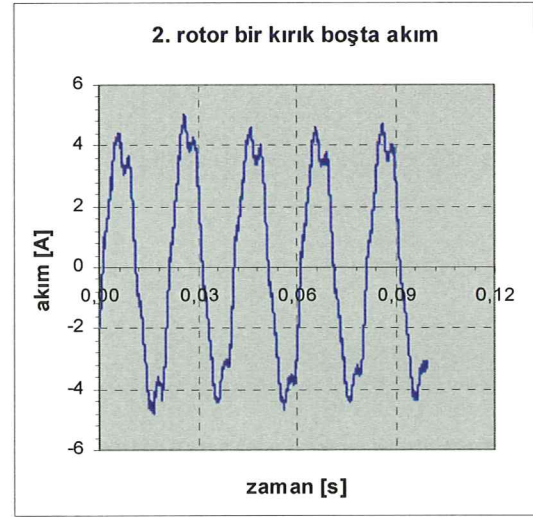
a)



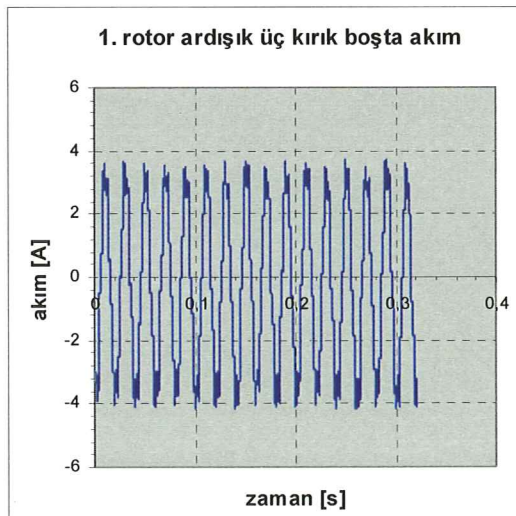
b)



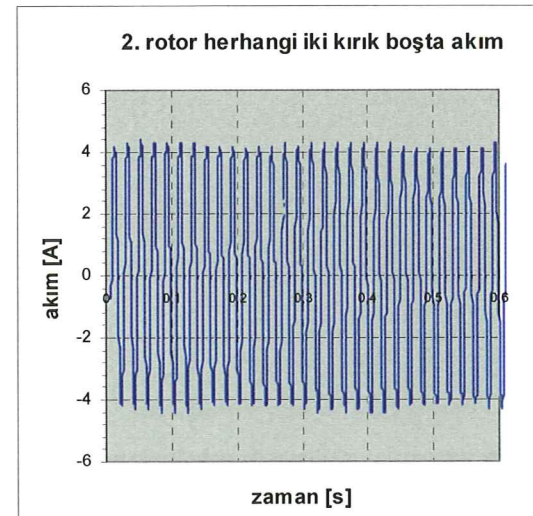
c)



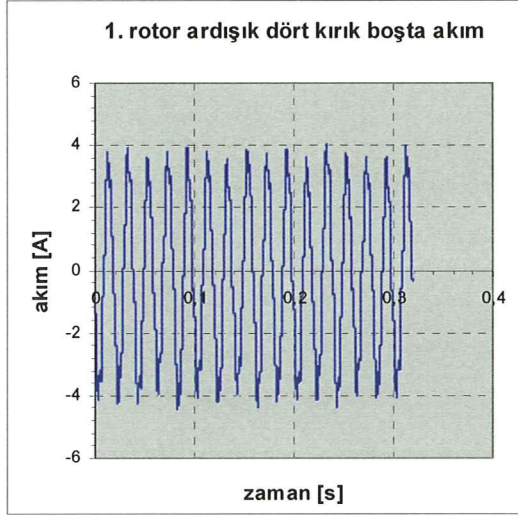
d)



e)



f)



g)

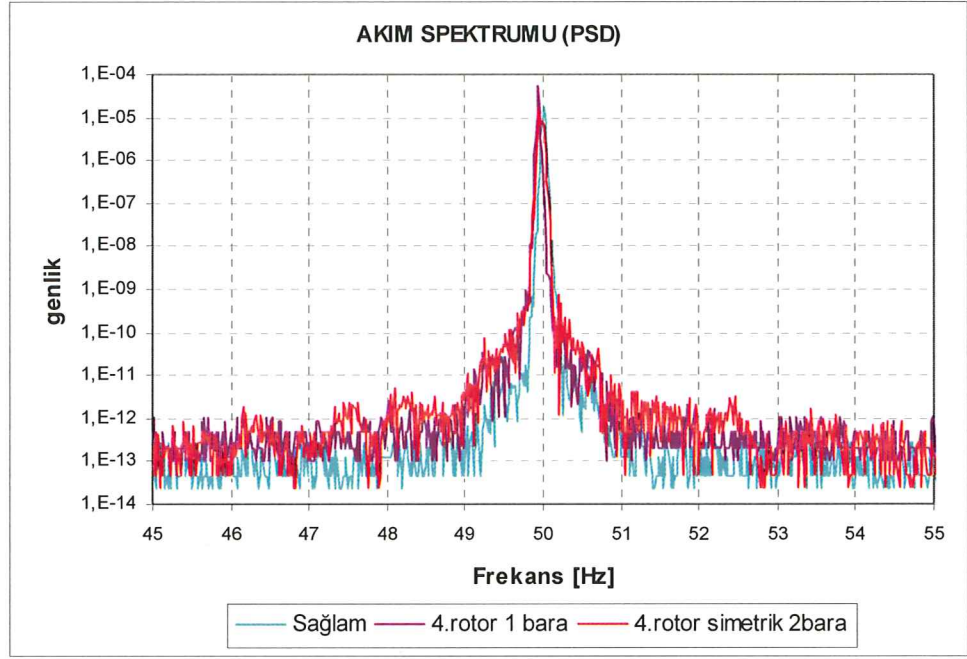
Şekil 6.14 : Boşta çalışmada motor akımlarının zamana bağlı değişim eğrileri.

a) Sağlam birinci rotor, b) sağlam ikinci rotor, c) ardışık iki çubuğu kırık, d) bir çubuğu kırık, e) ardışık üç çubuğu kırık, f) herhangi iki çubuğu kırık, g) ardışık dört çubuğu kırık motor akımları.

Arızalı durumlarda boşta akım özeğrilerindeki bozulma, anma yükündekine göre daha fazladır. Özellikle tepe bölgelerinde büyük çöküşler vardır. Bu anlamda, kafes arızaları boşta çalışma akımında anma akımına göre daha belirgin izler bırakmaktadır.

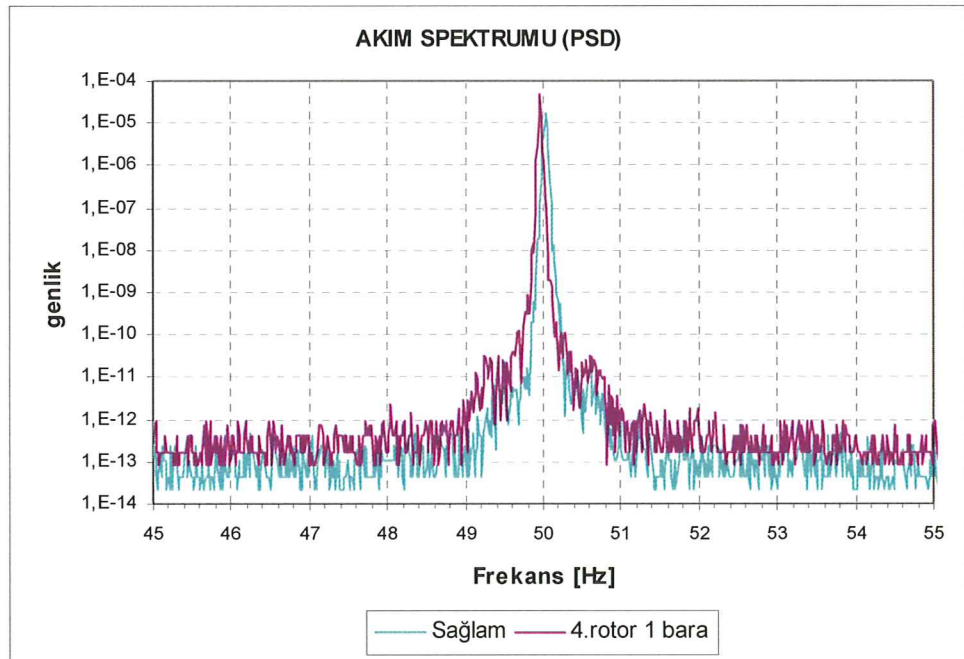
Daha önce de belirtildiği gibi, HFD leri alçak frekans bantlarında boşta çalışma akımları için uygulanmıştır. İnceleme dört ayrı rotor üzerinde ardışıl olarak veya farklı rotorlarda farklı arızaların incelenmesi ve karşılaştırılması ile yapılmıştır. Dördüncü rotor üzerinde sağlam, bir çubuk arızası ve simetrik iki çubuk arızası incelenmiştir. Ayrıca birinci rotorda ardışık iki bara ve ardışık dört bara arızaları, birinci ve üçüncü rotor ardışık iki çubuk ve arasında üç sağlam bara olan herhangi iki çubuk arızaları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Aşağıda HFD ilişkin akım şekilleri verilmektedir. Bütün şekillerde y-ekseni logaritmik olarak ölçeklenmiştir. Bu eğriler, hem arızanın türüne göre genlik bakımından, hem de arıza izi bakımından karşılaştırılmaktadır. Daha önce 2. Bölüm de açıklandığı gibi akım iz analizinde rotor arızasına ilişkin olarak, şebeke frekansının $\pm 2k.s.f_1$ kadar yan batlarında genlik artışları aranmaktadır.

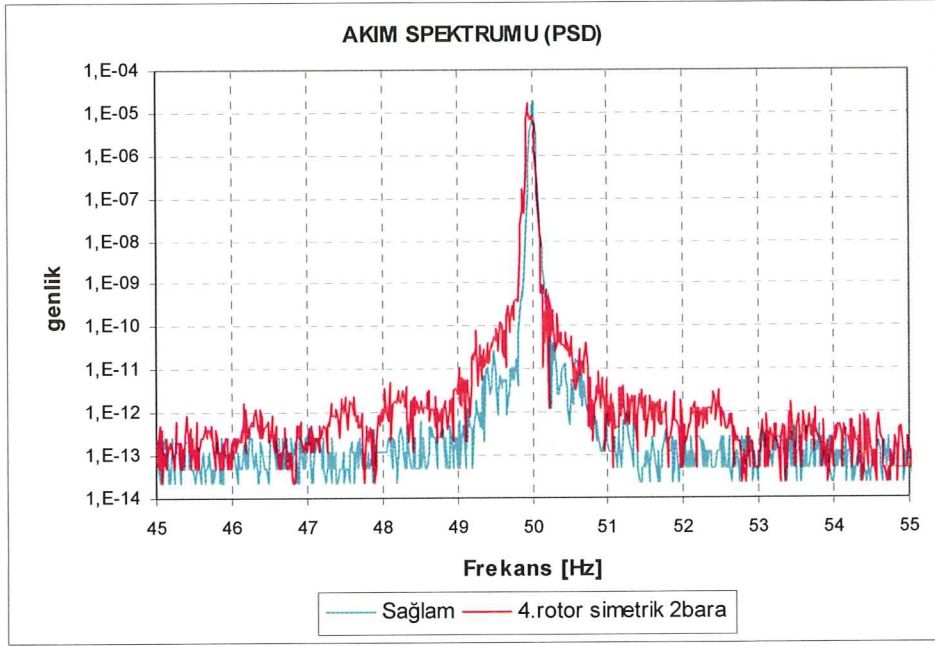


Şekil 6.15 : Dördüncü rotor için arızalı motor akımlarının frekans açılım değerleri.

Şekil 6.15 de dördüncü rotor için boşa çalışma akımlarının frekans bantlarına açılmış biçimleri toplu olarak verilmektedir. Şekil 6.16, Şekil 6.17 ve Şekil 6.18 de ise bu akımlar ikili olarak karşılaştırılmıştır. Sağlam rotorlu motorun kayma değeri % 0,3 dür. Bir rotor çubuğu arızalı iken kayma, % 0,5 dir. Bu doğrultuda verilen şekiller incelendiğinde

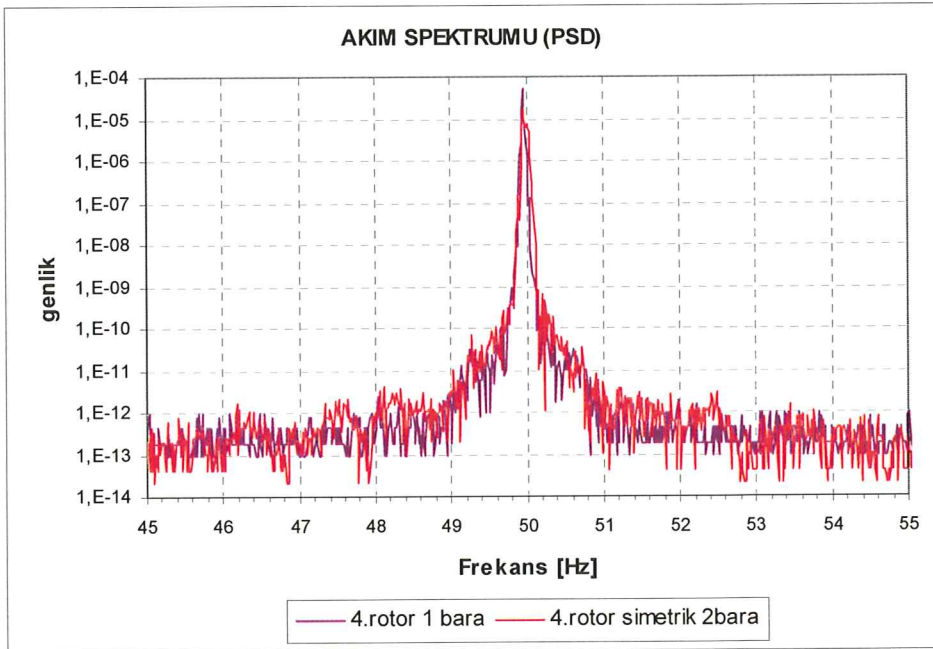


Şekil 6.16 : Sağlam ve bir çubuğu kırık motorun akımlarının frekanslarına açılımı.

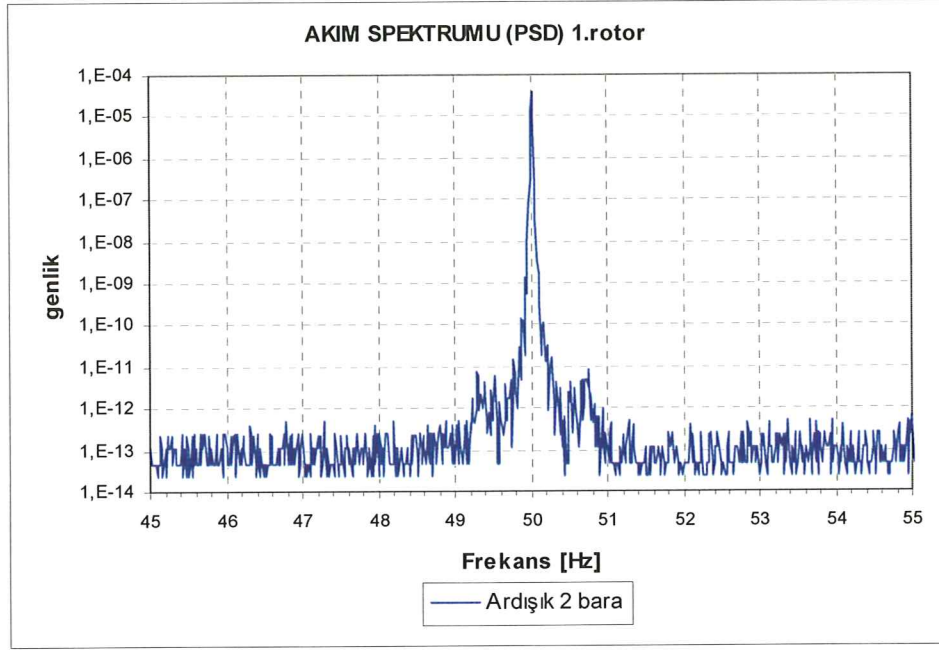


Şekil 6.17 : Sağlam ve simetrik iki kırık için motor akımlarının dağılımları.

$\pm 2sf_1$, $\pm 4sf_1$ ve $\pm 6sf_1$ değerlerine karşı gelen $50 \pm 0,5$ Hz, 50 ± 1 Hz ve 50 ± 2 Hz frekans değerlerinde akım izleri vardır. Simetrik iki rotor çubuğu kırık olan motorun kayma değeri % 0,67 dir. Buna göre şekiller incelendiğinde $50 \pm 0,67$ Hz, $50 \pm 1,3$ Hz ve $50 \pm 2,03$ Hz da akım izleri vardır. Arıza sayısı ile işaretlerin genliği artmaktadır. Ayrıca simetrik iki kırık için daha geniş bir frekans aralığında genlik artışı vardır.

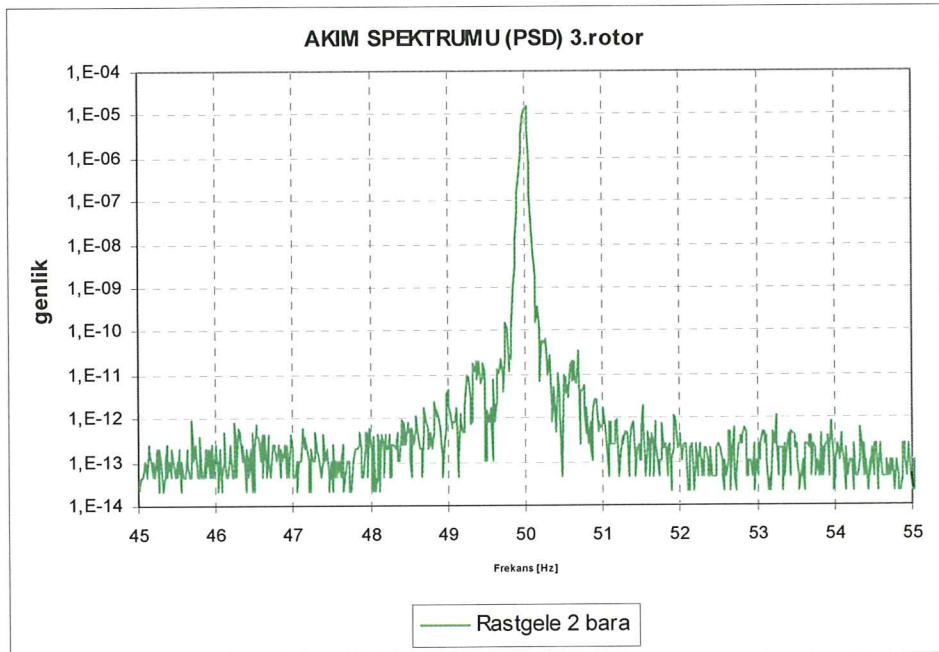


Şekil 6.18 : Bir kırık ve simetrik iki kırık için motor akımlarının dağılımları.

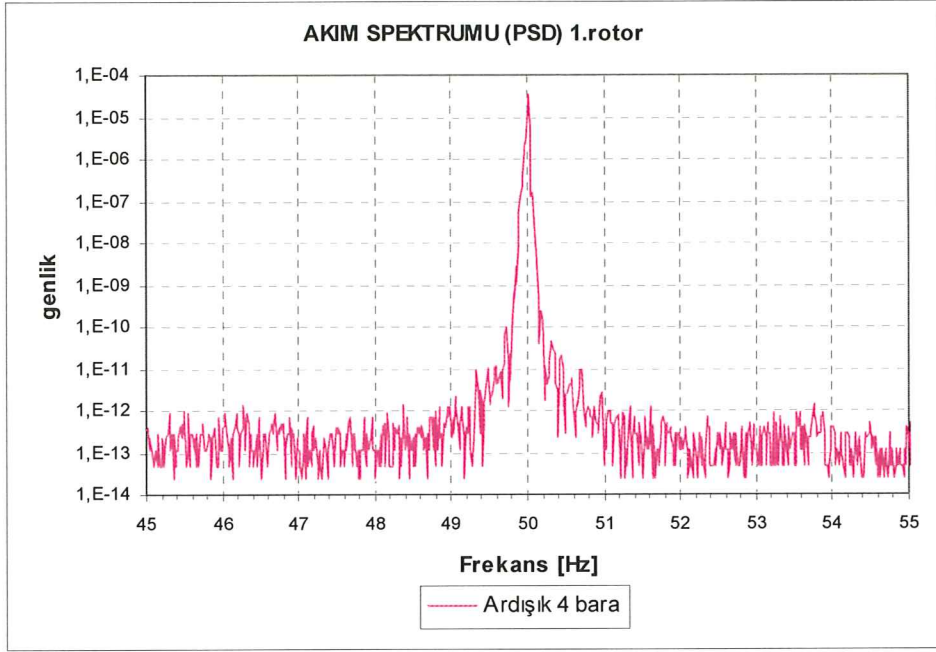


Şekil 6.19 : Ardışık iki kırık için motor akımının frekans değerlerine açılımı.

Bunların yanı sıra Şekil 6.19 de ardışık iki kırık için, Şekil 6.20 de ardışık dört kırık için ve Şekil 6.21 de arasında üç sağlam bara olan iki kırık için akım açılımları verilmektedir. Ardışık veya herhangi iki çubuk arızalı iken motor kayma değeri, simetrik iki kırıkta olduğu gibi % 0,67 dir. Şekiller incelendiğinde aynı yan frekans değerlerinde arızayı

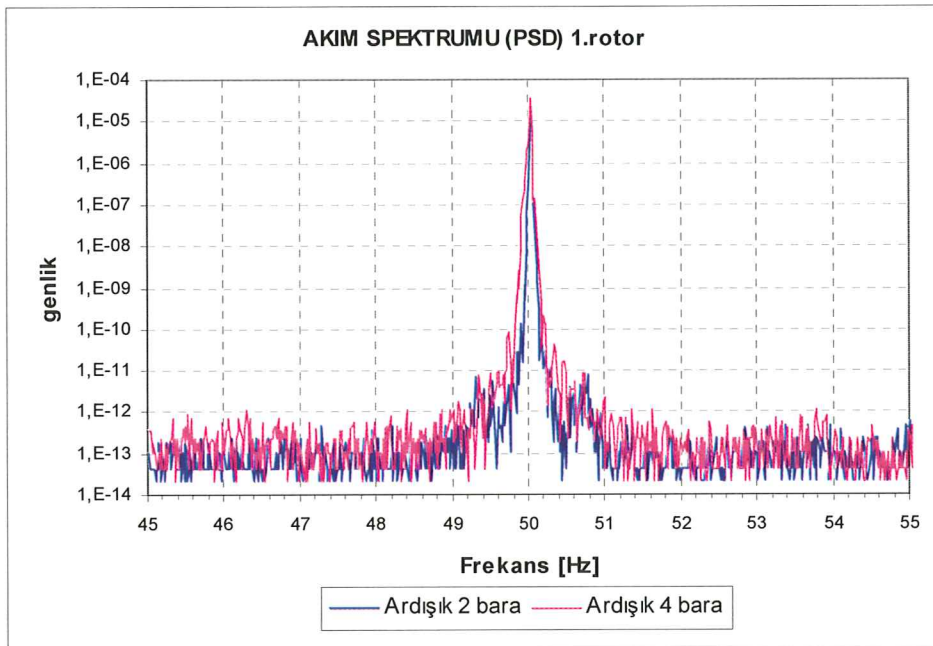


Şekil 6.20 : Herhangi iki kırık için motor akımının frekans değerlerine açılımı.

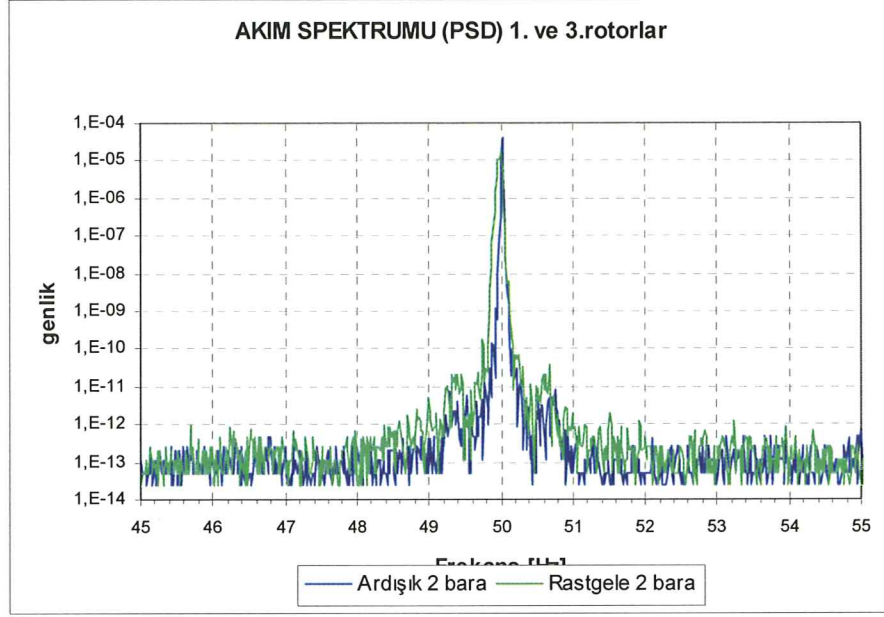


Şekil 6.21 : Ardışık dört kırık için motor akımının frekans değerlerine açılımı.

tanımlayan izler olduğu görülür. Herhangi iki çubuk arızasında genlik artışları daha belirgindir. Ardışık dört kırık arızasında da devir hızı 2978 d/dak dır. Yine ($50 \pm 2ksf_1$) Hz frekanslarında belirgin akım genlik artışları vardır. Şekil 6.22. de ardışık iki ve dört kırık için, Şekil 6.23 de ise ardışık ve herhangi iki kırık için akım açılımları

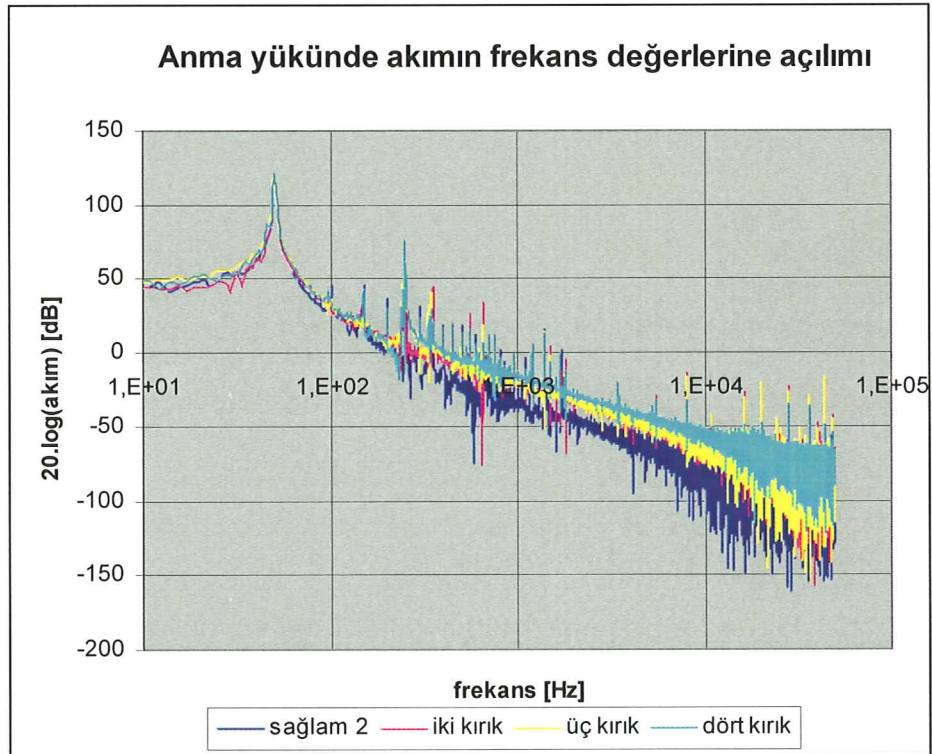


Şekil 6.22 : Ardışık iki ve dört kırık için motor akımının frekans değerlerine açılımı.



Şekil 6.23 : Herhangi iki kırık ve ardışık iki kırık için motor akımının frekans değerlerine açılımı.

karşılaştırılmaktadır. Bu şekillerden de görüldüğü gibi dört kırık durumunda ve ardışık olamayan arızalarda çok belirgin bir artış vardır. Literatürde arızalı çubuk sayısına göre iz frekansındaki genlik artışlarını inceleyen çalışmalar olmasına karşın yeterli güvenilirlikte değildir.



Şekil 6.24 : Anma yükünde sağlam ve arızalı motor akımlarının frekans bantlarına açılımı.

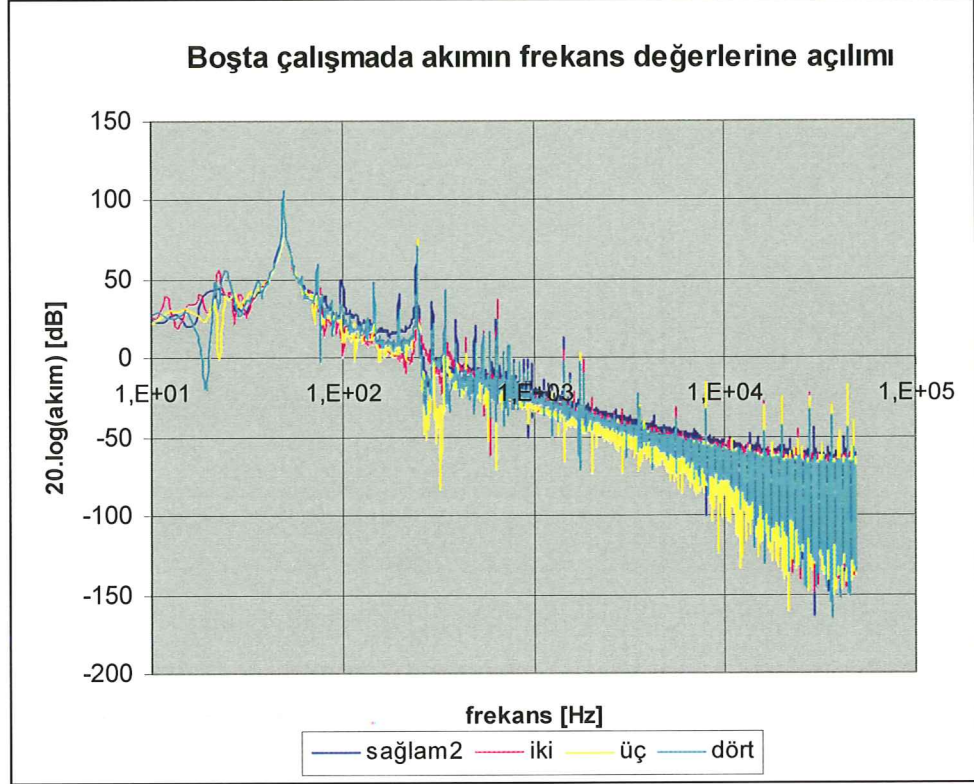
Şekil 6.24 de sağlam ve arızalı motor akımlarının frekans değerlerine açılımı aynı grafikte verilmiştir. Eğriler incelendiğinde, daha önce 6. Bölümde FEM nin analizi ile bulunan frekans değerlerinde belirgin izler olduğu görülür. Öncelikle 250 Hz de negatif sistem bileşeni vardır. Benzer biçimde negatif bileşenin kat bileşenleri olan 550 Hz ve 850 Hz de izler vardır. Negatif sistem ve kat bileşenlerinin genlikleri arıza sayısı ile artmaktadır. Benzer biçimde 350 Hz ve 650 Hz de oluşan pozitif sistemin üst kat bileşenlerinin de genlikleri arıza sayısı ile artmaktadır.

Şekil 6.24 de verilen frekans açılımında 1400 Hz de görülen iz, oluk harmonikleri nedeniyle oluşur. Rotor çubuk sayısının bir katıdır, (2.5). Ayrıca 1400 Hz civarındaki artış ise, çubuk kırığı sonucu hava aralığında oluşan dinamik eksen kaçıklığını gösterir. Özellikle 1200 Hz de belirgindir. Denklem (6.4) de, dinamik eksen kaçıklığının derecesi n_d ye bağlı olarak, iz beklenen frekans değerlerinin ifadesi verilmektedir. Burada N, rotor oluk sayısı, p çift kutup sayısı, k_v şebekenin harmonik derecesi, s kayma değeri ve n_d arıza derecesidir.

$$f_h = \left[(k.N \pm n_d) \cdot \frac{1-s}{p} \right] \cdot f_1, \quad n_d = 1, 2, 3, 4 \dots \quad (6.4)$$

Denklem 6.4 e göre anma çalışma akımı için yapılan harmonik incelemesinde, n_d nin çift sayılı değerlerine karşı gelen frekanslarda, 1200 Hz ,1600 Hz, belirgin izler vardır. Bu frekanslardaki genlik değerleri arızalı çubuk sayısı ile artmaktadır. 1,8 kHz de görülen işaret stator oluk harmoniğidir. 8 kHz ve üzerindeki izler, daha çok eksenel kaçıklık arıza frekansının, stator ve rotorun magnetik geçirgenlik frekansının katlarıdır. Ayrıca stator ile rotorun oluk sayılarının ortak katında da belirlin izler vardır.

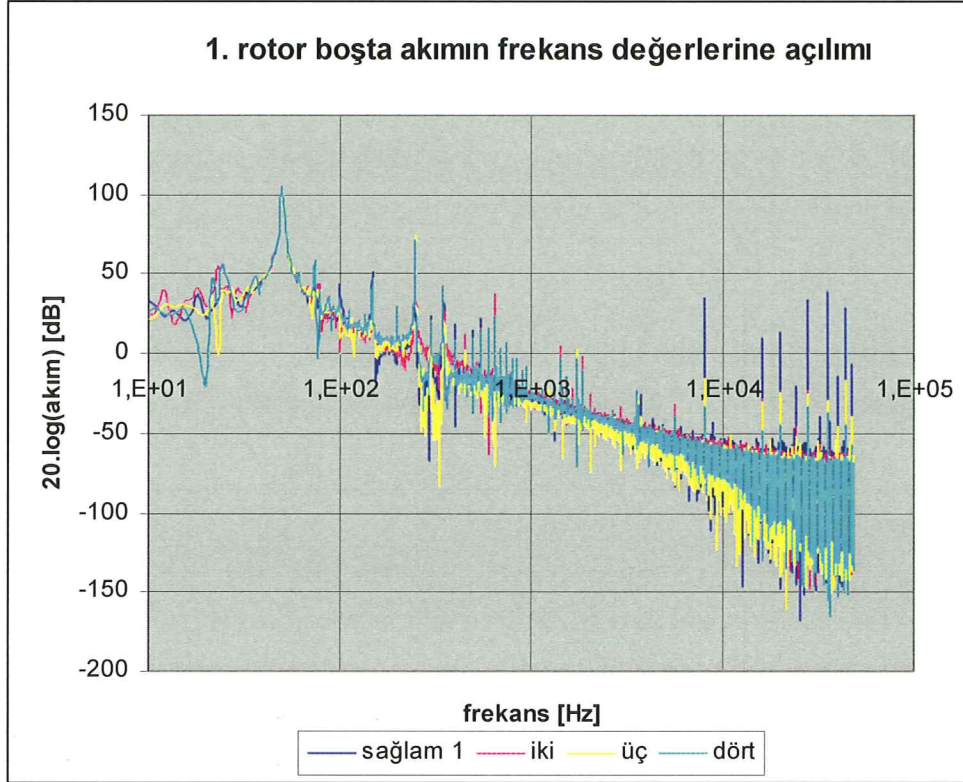
Şekil 6.25 ve Şekil 6.26 de ise boşta çalışma akımlarının iki farklı rotor için frekans analizi verilmektedir. Her iki egride de 25 ve 75 Hz değerlerinde anma akımında olmayan çok belirgin izler vardır. Bunun yanı sıra anma işletme akımının analizinde olduğu gibi, 250 Hz de negatif sistem bileşeni, 550 Hz ve 850 Hz de bunun kat bileşenleri vardır. Bu işaretlerin genlikleri arıza sayısı ile artmaktadır. Benzer biçimde 350 Hz ve 650 Hz de oluşan pozitif sistemin üst kat bileşenleri de vardır.



Şekil 6.25 : Boşta çalışmada ikinci rotor için sağlam ve arızalı motor akımlarının frekans bantlarına açılımı.

Anma akımının analizinde olduğu gibi, boşta akım analizinde de 1000 Hz ile 2000 Hz aralığında rotor oluk harmoniği ve dinamik eksen kaçıklığı nedeniyle oluşan frekanslarda izler vardır. Ancak boşta çalışma akımında, denklem (6.4) de verilen arıza derecesi n_d nin tek sayılı değerlerine karşı gelen frekanslarda izler oluşmaktadır. Bunlar 1250 Hz, 1450 Hz ve 1750 Hz de çok belirgindir.

Benzer biçimde 1,8 kHz de stator oluk harmoniği bileşenin işareti vardır. 8 kHz ve üzerindeki izler, stator ve rotorun magnetik geçirgenlik frekansının katlarıdır. Şekil 6.25 ile Şekil 6.26 arasında 8 kHz den sonraki frekans bileşenlerinin genliklerinde büyük bir farklılık vardır. Bu sağlam çalışma deneyi için birinci rotor kullanılan motorda, bir statik eksenleme hatası olduğunu göstermektedir.



şekil 6.26 : Boşta çalışmada birinci rotor için sağlam ve arızalı motor akımlarının frekans bantlarına açılımı.

6.4.3. Isınma deneyleri

Rotor arızalarının motorun sürekli hal işletme sıcaklığına olan etkisini incelemek için, sağlam ve arızalı motorlara anma yükünde ısınma deneyi yapılmıştır. Deneyde motor sıcaklıkları, doğru gerilim-akım yöntemi ile sıcaklık ölçümü yapan, bir aygıt kullanılmıştır. Böylelikle, motoru şebekeden ayırarak yapılan ölçümlerde oluşan hatalarda kaçınılmıştır. Aşağıda izelge 6.5 de sağlam ve kırık ubuklu rotorlar için ısınma deneyi sonuçları verilmektedir.

Çizelge 6.5 : Sağlam ve arızalı motorlarda ısınma deneylerinin sonuçları.

	sağlam motor	bir kırık	ardışık iki kırık	ardışık üç kırık	ardışık dört kırık	herhangi iki kırık (ksssk)
Deney başlangıcında ortam sıcaklığı [$^{\circ}\text{C}$]	24,8	27,2	24,0	24,0	25,2	19,9
Soğuk durumda stator sargı direnci [Ω]	1,903	1,962	1,911	1,911	1,927	1,868
Deney sonunda motor sıcaklığı [$^{\circ}\text{C}$]	76,3	80,6	80,1	79,9	82,4	77,6
Motor sıcaklık artışı [$^{\circ}\text{K}$]	51,5	53,4	56,1	55,9	57,2	56,7

Bu deney sonuçlarına göre, rotor çubuk arızalarının motorun sıcaklığı üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Bu değerlere bakılarak, bir kafes arızası olduğu sonucuna varılabilir. Daha belirgin bir sonuca ulaşılabilmesi için, gövdenin, stator sac paketinin vb. motor kısımlarının bölgesel olarak sıcaklıkların ölçülmesi veya hesaplanması gerekir. Bu deneylerden, kafes arızalarının motor sıcaklığını arttırıcı etkisi olduğu sonucuna varılmıştır.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan bu çalışmada aşağıda maddeler halinde sıralanan sonuçlar elde edilmiştir:

1. Asenkron makinede kafes çubuğu arızalarını, zamana bağlı büyüklükler yerine bunların uzay fazörlerini kullanarak doğrudan incelemek olanaksızdır.
2. Dinamik incelemelerde ani değerli simetrik bileşenler modeli kullanıldığında, kafes arızaları sonucu motorun magnetik büyüklüklerinde ve işletme büyüklüklerinde oluşan değişimler fiziksel bakımdan daha kolay yorumlanabilir.
3. Bu doğrultuda çalışmada ani değerli bileşenler modeli üzerinde durularak, sayısal çözümlemelerde işlem yükünü azaltacak üç tane yaklaşık çözüm önerisi getirilmiştir, (Bölüm 3.4).
4. Bu önerilerde, rotor simetrisizliğinin yarattığı negatif sistem bileşeni dikkate alınarak, diğer etkiler ihmal edilmiştir. Birinci yaklaşık çözüm yöntemi, tam modele göre ortalama % 4...5 kadar, ikinci yaklaşık modeli ise % 9...11 kadar hatalıdır. Ancak, akım iz analizlerinde, rotor arızalarını ayırt eden üst-titreşim bileşenleri vardır.
5. Çeşitli kafes kırığı arızaları için magnetik analizleri yapılmıştır. Buna göre, Şekil 5.13 ile Şekil 5.28 arasında verilen akı dağılımı çizgileri ve magnetik akı yoğunluğu boyaması incelendiğinde,
 - a) ardışık olan arızalar kendi aralarında ve sağlam analiz ile karşılaştırıldığında makine geometrisindeki her bölge için arızalı çubuk civarındaki ve arızalı çubukların arasındaki magnetik akı çizgilerinin arttığı,
 - b) bu artımın ardışık arızalarda arıza sayısı ile orantılı olduğu,
 - c) benzer şekilde ardışık oluşan arızalarda, arızalı çubuklara karşı gelen stator dişlerindeki ve boyunduruğundaki magnetik akı çizgilerinin de arttığı,

- d) boyalı magnetik akı yoğunluğu dağılımı incelendiğinde, yukarıda açıklanan kırık bölgelerinde ve bunlara karşı gelen stator dişlerindeki akı yoğunluklarının aşırı arttığı, üç ardışık kırıktan sonra bunun daha da belirgin olduğu,
 - e) benzer etkinin rastgele iki kırıklı motorun analizlerinde de görüldüğü, rastgele oluşan kırıklara yakın bölgelerde ve statorda akı yoğunluğunun arttığı,
 - f) bunlara karşın, magnetik ve geometri olarak simetrikli iki kırık çubuğun analizleri incelendiğinde, arızalı rotor çubuklarının yanlarındaki bölgelerde akı yoğunluklarının azaldığı görülmektedir.
6. Magnetik analizlerde hava aralığında seçilen bir yarıçapsal noktaya göre, hava aralığı akı yoğunluğu büyüklüğünün ve bileşenlerinin rotorun çevresel uzunluğuna göre değişimi hesaplanmıştır. Şekil 5.29 ile Şekil 5.35 arasında verilen hava aralığı akı yoğunluğu genliğinin değişim eğrileri ve Çizelge 5.3 de verilen harmonik bileşenleri incelendiğinde aşağıdaki sonuçlar bulunur:
- a) En büyük genlikli harmonik bileşenleri 2., 4. ve rotorun çubuk sayısı olan 28. bileşendir. Her üçünde genliği ardışık olarak artan kırık sayısı ile artmaktadır.
 - b) İkinci harmonik bileşenin rastgele ve simetrik iki kırıkta oluşan genlik değişimleri, ardışık üç ve dört kırığa göre daha azdır. Buna karşın 28. harmonik dağılımında, bu iki durumda genlik değerleri artmaktadır.
 - c) Diğer harmoniklerin genlik değerleri küçüktür. Genel olarak pek çoğunun genlik değerleri arızalı çubuk sayısı ile artmaktadır. Ancak çok belirgin bir artış gözlenmemiştir.
- Aynı yaklaşımla Şekil 5.36 ile Şekil 5.42 arasında verilen hava aralığı akı yoğunluğunun normal bileşeninin değişim eğrileri ve Çizelge 5.3 de verilen harmonik değerleri incelendiğinde aşağıdaki sonuçlar bulunur:
- d) Rotorda oluşan arızalarda temel bileşenin genliğinde küçük değişimler oluşmaktadır. Ancak belirgin bir artış yoktur.
 - e) Temel bileşenin yanında, rotor çubuk sayısına yakın tek değerli harmonik bileşenlerin, 27. ve 29., genlikleri büyüktür.
 - f) Diğer harmonik bileşenlerde oluşan değişimler çok küçük değerdedir.

7. Analizlerde stator sac paketinde akı yoğunluğunun zamanla değişimi iki stator oluğu arasındaki bir noktada incelenmiştir. Buna göre Şekil 5.54 den Şekil 5.61 e kadar verilen statordaki belirli bir noktada akı yoğunluğunun genliğinin değişim eğrilerinden ve Çizelge 5.6 ile Çizelge 5.7 de verilen harmonik analizlerinden aşağıdaki değerlendirmeler yapılır:

- a) Temel bileşenin genliği ardışık arızalarda artmaktadır. Simetrik iki arıza durumunda ise, yaklaşık sağlam durumdaki değerlerine eşittir.
- b) Harmonik dağılımında en büyük genlikli bileşenler 2. ve 4. bileşenlerdir.
- c) İkincil büyüklükteki bileşenler ise, 6., 8., 23., 25., 27 ve 29. bileşenlerdir. Diğer bileşenlerde genlikler çok küçüktür. Harmonik dağılımları ayrıntılı olarak incelendiğinde, artan ardışık arıza sayısı ile, harmonik bileşenlerinin genliğinin arttığı, rastgele iki kırık ve simetrik iki kırık durumunda ayırt edici belirgin bir fark bulunamadığı görülmüştür.

Şekil 5.62 den Şekil 5.69 a kadar verilen akı yoğunluğunun y bileşeninin değişim eğrilerinden ve Çizelge 5.6 ile Çizelge 5.7 de verilen harmonik analizlerinden aşağıdaki değerlendirmeler yapılır:

- d) Hesaplama yapılan nokta dikkate alındığında, y eksen bileşen değerleri normal bileşen değerlerine yaklaşık eşittir. Artan rotor arızaları ile titreşimin arttığı düşünülürse, y eksen harmonik bileşen değerlerinin artması beklenmektedir. Hesaplanan değerlere göre, temel bileşen değerleri ardışık, rastgele ve simetrik kırıklar için çoğunlukla artmaktadır.
- e) En büyük harmonik bileşeni 26. bileşendir. İkincil büyüklükteki harmonik bileşen genlikleri ise, 3., 28., 5. ve 24. bileşenlerdir, Çizelge 5.7.
- f) Verilen değerler ayrıntılı olarak incelendiğinde yapılan magnetik konumlama hataları dışında harmonik genliklerinin arıza sayısı ile arttığı görülmüştür. Ancak simetrik kırıklı arızalarda artış yeterince belirgin değildir.

8. Akı yoğunlukları ve bileşenleri için yapılan bu incelemelerde, temel bileşenin ve rotorun çubuk sayısındaki veya bu sayıya yakın harmonik bileşenlerin, büyük genlikli olduğu, rotor arızaları ile belirgin biçimde değiştiği saptanmıştır.
9. Şekil 5.70 ile Şekil 5.73 arasında verilen moment-kayma değeri özegrilerinden görülebileceği gibi, moment değeri özellikle devrilme bölgesinde oldukça belirgin bir biçimde azalmaktadır. Azalmanın büyüklüğü, ardışık arıza sayısı ile artmaktadır. En düşük devrilme momenti ardışık dört çubuk kırıldığında oluşur. Bu arızada hesaplanan moment değerlerine göre devrilme momenti % 7 oranında azalmaktadır. Devrilme momenti, ardışık üç çubuk arızasında % 3,16, bir çubuk kırıldığında ise % 0,15 azalmaktadır. İki çubuğun arızalı olduğu üç tane incelemede benzer oranda değişimler olmuştur. Ardışık iki çubuk kırıldığında % 1, aralarında üç sağlam çubuk olacak biçimde herhangi iki çubuk kırıldığında % 1,73, simetrik iki çubukda ise % 1,83 oranında devrilme momenti azalır.
10. Anma çalışma bölgesinde moment azalmaları daha küçük düzeydedir. Bu na karşın harmonikler nedeniyle moment salınımları oluşmaktadır.
11. Motorun kalkış momenti tek ve ardışık çubuk kırıklarında küçük değerlerde artmaktadır (Şekil 5.73). Ancak simetrik ve herhangi iki kırık durumunda kalkış momenti azalmaktadır.
12. Şekil 5.74 ile Şekil 5.76 arasında verilen motor akımının kaymaya bağlı değişim eğrilerine göre, artan arıza sayısı ile kalkış akımında küçük değerli artışlar olmaktadır. Arıza türüne göre ortalama % 0,6 ile % 3 arasında bir artış vardır. Anma işletmesi bölgesinde ise motor akımı, anma akımına göre en fazla % 7,6 oranında artmaktadır.
13. Küçük ve orta güçlü asenkron makinelerde az sayıdaki kafes çubuğu arızalarında rotor çubuk akımları hariç, motorun diğer işletme büyüklüklerinde çok büyük değişimler olmamaktadır. Bu anlamda başlangıçta kafes arızalarının yarattığı elektromagnetik salınımlar nedeniyle motorun işletme kalitesi ile ilgili sorunlar oluşmaktadır. Ancak, arızalı çubuğa komşu olan rotor çubuk akımlarındaki büyük artış arızanın hızla yayılmasına neden olmaktadır.

14. Motorun devir hızı çubuk kırıkları ile azalmaktadır. Bunun yanı sıra kırık çubuklar nedeniyle hava aralığı çekim kuvvetlerinin dengesi bozulduğundan hız salınımları oluşmaktadır. Örneğin bir kırıkta 7...8 d/dak olan hız salınımı, ardışık üç kırıkta 25...30 d/dak. ya çıkmaktadır (Şekil 5.85).
15. Kafes arızalarında motor akımı, arızayı saptamak için çok belirgin izler taşımaktadır. Şekil 5.78 ile Şekil 5.81 arasında verilen akım harmonik dağılımları incelendiğinde, beklendiği gibi 5. harmoniğin ve 7. harmoniğin genliğinin arızalı çubuk sayısı ile çok belirgin biçimde arttığı görülmektedir. Ayrıca 24. ve 28. harmoniklerde dinamik eksen kaçıklığı nedeniyle çok belirgin izler vardır. Bu harmonik etkileri nedeniyle işletme sırasında motor akımı salınır.
16. Çalışmada kırık çubuklu asenkron motorun işletme davranışını üst üste bindirme ilkesine dayanarak inceleyen, hata akımı analizi yöntemi de anlatılmaktadır. Bu yöntemle bir kırık, ardışık iki kırık ve ardışık üç kırık arızaları için, eşdeğer kafes modelleri önerilerek rotor çubuklarının hata akımları hesaplanmaktadır. Literatürde yalnızca bir kırık için yapılan çalışmalar vardır. Yapılan analizlerde hata akımının, yani kırık çubuk akımlarının toplamının, bir kırık arızası için % 70,3 inin, ardışık iki kırıkta % 82,3 ünün ve ardışık üç kırıkta % 85 inin kırık çubuğa simetrik komşu olan iki çubuğa dağıldığı hesaplanmıştır.
17. Çeşitli sayıda rotor çubuk arızaları için yapılan hata akımı dağılımlarında, 4. Bölümde tanımlanan d sönümleme katsayısının, tek sayılı kırıklarda sabit, çift sayılı kırıklarda yaklaşık sabit kaldığı saptanmıştır.
18. Arızalı motorların anma işletme akımları ve boşta akımları ölçülerek HFD ile frekans bileşenlerine açılmıştır. Şekil 6.25, Şekil 6.26 ve Şekil 6.27 de verilen bu dağılımlar incelendiğinde, yükte çalışmada dinamik eksen kaçıklığı arıza derecesi n_d nin çift sayılı değerlerine karşı gelen frekanslarda, boşta çalışmada ise n_d nin tek sayılı değerlerine karşı gelen frekanslarda belirgin izler olduğu saptanmıştır.
19. Bütün arızalı motorlar için yapılan deneysel çalışmalarda, yükte ve boşta motor akımlarının zamanla değişimi kayıt edilmiştir. Bu eğriler incelendiğinde, akım zarf eğrilerinin salınım frekansındaki değişimlerin ve akımın tepe değerinde oluşan genlik değişimlerinin, yükte çalışmada, arıza

tanısı için ayırt edici bir özellik olduğu saptanmıştır (Çizelge 6.4). Bu anlamda yükte motor akımının zamanla değişimi doğrudan gözetlenerek, kafes çubuğu arıza tanısı yapılabilir.

20. Anma işletmesinde çalışan motorun önce bir, ardından üç kafes çubuğunun kırılması durumunda moment, devir hızı, motor akımı, rotor çubuk akımları gibi işletme büyüklüklerinde oluşan geçici hal değişimleri incelenmektedir. Arıza geçişi sırasında uzun süren bir geçici olayın olmadığı, ancak arızanın yapısı gereği işletme büyüklüklerinde $\pm 2k_s.f_1$ frekansında salındığı saptanmıştır. Bu anlamda, kafesi arızalı asenkron motorun, yalnız sürekli hal işletme davranışını incelemenin konunun aydınlatılması bakımından yeterli olduğu görüşüne varılmıştır.
21. Ardışık kafes çubuğu arızaları için, arızalı motorlara yükte ısınma deneyleri yapılmıştır. Çizelge 6.5 de verilen deney sonuçlarına göre rotor arızalarının motor sıcaklığı üzerinde etkili olduğu, kafes arızalarının motor sıcaklığını arttırdığı görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] **Görges H.**, 1896. Über drechstrommotoren mit verminderter Tourenzahl, *ETZ*, **17**, 517-518.
- [2] **Weichsel H.**, 1928. Squirrel-cage rotors with split resistance rings, *J.American Inst.Elect.Engrs*, **47**, 606-610.
- [3] **Mishkin E.**, 1955. Disturbances in the Induction Machine Due To Broken Squirrel-Cage Rings, *J. Franklin Inst.*, **259**, 133-143.
- [4] **Schuisky W.**, 1941. Brüche im kurzschlußkäfig eines induktionsmotors und ihre einflüsse auf das verhalten des Motors, *Arch. Elektrotech.*, **35**, 287-298
- [5] **Jordan H., Schmitt W.**, 1942. Über den einfluß fehlender stäbe auf das verhalten vom kurzschlußmotor, *AEG Mitt.*, **9**, 57-65.
- [6] **Hiller M.**, 1962. Einfluss fehlender laeufertaefel auf die elektrischen eigenschaften von kurzschlusslaeufertmotoren, *ETZ-A*, **83**, No.12, 94-97.
- [7] **D'Alessandro, E.P.**, 1969. Asynchronmotoren mit elektrisch unsymmetrischem kaefiglauer, *ETZ-A*, **90**, 582-586.
- [8] **Gabriano H.L. and Gross E. T.B.**, 1950. The Georges Phenomenon-induction Motors with Unbalanced Rotor Impedances, *Trans.Amer. Inst.Electr. Engrs.*, **69**, 1569-1575.
- [9] **Barton T.H. and Doxey B.C.**, 1955. The operation of Three-Phase Induction Motors with Unsymmetrical Impedance in the Secondary Circuit, *Proc. IEE*, **102A**, 71-79.
- [10] **Vas P.**, 1975. Performance of Three-Phase SquirrelCage Induction Motors with Rotor Asymmetries., *Period. Polytech. Electr. Eng.*, **19**, 309-315.

- [11] **Vas, P. and Vas, J.**, 1977. Transient and Steady-State Operation of Induction Motors with Rotor Asymmetries, *Archiv für Elektrotechnik*, **59**, 55-60.
- [12] **Kovacs K.P. and Racz I.**, 1959. *Transiente Vorgeange in Wechselstrommaschinen*, Verlag der Ungarischen Akademie der Wissenschaften, Budapest.
- [13] **İmeryüz, M.**, 1994. Asenkron makinede geçici olayları inceleme yöntemleri ve uygulamaları, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [14] **Jufer, M. and Abdelaziz, M.**, 1978. Influence d'une rupture de barre ou d'un anneau sur les caractéristiques externes d'un moteur asynchrone a cage, *Bull.SEV*, **69 (9)**, 921-925.
- [15] **Williamson, S. and Smith, A.C.**, 1982. Steady-state analysis of 3-phase cage motors with rotor-bar and end-ring faults, *IEE Proc. Part-B*, **129**, No.3, 93-100.
- [16] **Deleroi, W.**, 1982. Squirrel-cage motor with broken bar in the rotor; physical phenomena and their experimental assessment, *ICEM Budapest*.
- [17] **Deleroi, W.**, 1983. Der Stabbruch im Kaefiglaeufer eines Asynchronmotors Teil 1:, *Archiv für Elektrotechnik*, **67**, 91-99.
- [18] **Deleroi, W.**, 1984. Der Stabbruch im Kaefiglaeufer eines Asynchronmotors Teil 2:, *Archiv für Elektrotechnik*, **67**, 141-149.
- [19] **Patyk A.**, 1986. Application of forward/backward components to the analysis of failure states of the squirrel-cage motor, Part-1, *Archiv für Elektrotechnik*, **69**, 429-43.
- [20] **Patyk A.**, 1986. Application of forward/backward components to the analysis of failure states of the squirrel-cage motor, Part-2, *Archiv für Elektrotechnik*, **69**, 439-443.
- [21] **Stepina J.**, 1990. Komplexe Grundgleichung der Asynchron-machine, *Archiv für Elektrotechnik*, **73**, 45-99.
- [22] **Stepina J.**, 1979. Non-Transformational Matrix Analysis of Electrical Machinery, *Electrical Machines and Elektromechanics*, **4**, 255-268.

- [23] **Toliyat, H.A. and Rahimian, M. M.**, 1992. Transient Analysis of Inductions Machines Under Internal Faults Using Winding Functions, *Third International Conference on Electrical Rotating Machines-Elroma, Bombay, India.*
- [24] **Toliyat, H.A., Lipo, T.A. and White, J.C.**, 1991. Analysis of a Concentrated Winding Induction Machine for Adjustable Speed Drive Applications,-part I(Motor Analysis) *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **6**, No. 4, 679-684.
- [25] **Toliyat, H.A., Lipo, T.A. and White, J.C.**, 1991. Analysis of a Concentrated Winding Induction Machine for Adjustable Speed Drive Applications,-part II(Motor Analysis) *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **6**, No. 4, 685-692.
- [26] **Luo X., Liano Y. and Toliyat, H.A.**, 1995. Multiple Couple Circuit Modeling of Induction Machines, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, **31**, 311-317.
- [27] **Toliyat, H.A. and Lipo, T.A.**, 1995. Transient Analysis of Cage Induction Machines Under Stator, Rotor Bar and End Ring Faults, *IEEE Trans. On Energy Con.*, **10**, No.2, 241-247.
- [28] **Penman, J. and Stavrou, A.**, 1996. Broken rotor bars: their effect on the transient performance of induction machines, *IEEE. Proc. Elec. Pover App.*, **143**, No.6, 449-457.
- [29] **Munoz, A.R. and Lipo, T.A.**, 1999. Complex Vector Model of thr Squirrel-Cage Induction Machine Including Instantenous Rotor Bar Currents, *IEEE Trans. On. Ind.App.*, **35**, No.6, 1332-1340.
- [30] **Kral C.** 1999. Derivation of the Space Phasor Equations and the Required Parameters of a Squirrel Cage Induction Machine with Faulty Rotor Bars, *Proc. SDEMPED' 99*, 395-400.
- [31] **Kral C., Pirker T. and Pascoli G.**, 2000. On the sensitivity of Induction Machine rotor Cage Monitoring- The Vienna Monitorig Method, *Proc. Symp. Power Electronics, Electrical Drives, Automotion and Drives*, **B1/13-18**.

- [32] **Kral C.**, 2002. Detection of Rotor Faults in Squirrel-Cage Induction Machines at Standstill for Batch Tests by Means of the Vienna Monitoring Method, *IEEE Transactions on Industry Applications*, **38**, No.3.
- [33] **Filippetti F. and Vas P.**, 1994. Broken Bar Detection In Induction Machines: Comparison Between Current Spectrum Approach And Parameter Estimation Approach, *IEEE 0-7803-1993-1/94*, 95-102.
- [34] **Cunha C.C.M. and Soares F.B.R.**, 2002. A new Method to Simulate Induction Machines with Rotor Asymmetries, *IEEE IECON' 02 Conference Records*.
- [35] **Cunha C.C.M. and Oliveira P.S.**, 2003 Simulation and Analysis of Induction Machines with Rotor Asymmetries. *IEEE 0-7803-7883-0/03*, 883-889.
- [36] **Weili L. and Ying X.**, 2006 Finite Element Analysis of Field Distribution and Characteristic Performance of Squirrel Cage Induction Motor with Broken Bars, *IEEE 1-4244-0320-0/06*.
- [37] **Lorand S. and Barna D.**, 2004 Rotors Faults Dedection in Squirrel-Cage Induction Motors by Current Signature Analysis, *IEEE – TTTC – International Conference on Automation*.
- [38] **Pollini E.**, 1964. Il problema del controllo dele gabbie pressofuse , *l' Elettrotecnica.*, **51**, 849-856.
- [39] **Armour. A. M. and Walley. J. W.**, 1956. A magneto-electric method for detecting defects in cast aluminium rotor windings for squirrel cage motors, *Metropolitan-Vickers Gazete*, No.27, 314-317.
- [40] **Trickey. P.H.**, 1946. Die cast rotor testing by test stator method, *Trans. Amer. Inst. Elect. Engrs.*, **65**, 139-141.
- [41] **Rogge D. and Seinsch H.O.**, 1981. Erkennung und Überwachung Von Elektrischen Läuferunsymmetrien In Käfigläufern, *ETZ-A*, **3**, **H.2**, 39-45.
- [42] **Deleroi. W.**, 1983. Überwachen, analysieren und orten von elektrischen Ungleichförmigkeiten in Käfigläufern., *ETZ-A*, **5**, 95-101.
- [43] **Heinrich W.**, 1988 Meßtechnische Erfassung von Läuferfehlern aus Klemmengrößen, *ETZ-A*, **10**, **H.2**, 61-63.

- [44] **Thomson W.T., Rankin D.**, 1987. Case Histories of On-Line Rotor cage Fault Diagnosis, *Condition monitoring* '87, 798-819.
- [45] **Nandi Subhasis, Toliyat Hamid A.**, 1999 Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Machines – A Review. IEEE pp. 1-8
- [46] **Milimonfared, J. and Toliyat, A.H.**, 1999. A novel Approach for Broken-Rotor-Bar Detection in Cage Induction motors, *IEEE Trans. On. Ind.App.*, **35**, No.5, 1000-1006.
- [47] **Nandi, S. and Bharadwaj, R. M.**, 1999. Study of Three Phase Induction Motors with Incipient Rotor Cage Faults Under Different Supply Conditions, in *Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting*, **3**, 1922-1928.
- [48] **Benbouzid, M.E.H.**, 1999. Bibliography on Induction Motors Faults Detection and Diagnosis, *IEEE Transactions on Energy Conersion*, **14**, No.4, 1065-1074.
- [49] **Thomson, W. and Fenger, M.**, 2001. Current Signature Analysis to Detect Induction Motor Faults, *IEEE Industry Applications Magazine*, 26-34.
- [50] **Masoud, H. and Toliyat, H. A.**, 2001. Pattern Recognition- A Technigue for Induction Machines Rotor Broken Bar Detection, *IEEE Transactions On Energy Conversion*, **16**, No.4, 312-317.
- [51] **Arezki, M. and Mohammed, S.**, 2004. Stator Current Analysis of Incipient Fault Into Asynchronous Motor Rotor Bars Using Fourier Fast Transform, FEI STU ISSN 1335-3632 *Journal of Electrical Engineering*, **55**, No.:5-6, 122-130.
- [52] **Cameron, J.R. and Thomson, W.T.**, 1986. Vibration and Current Monitoring for Detecting Airgap Eccentricity in Large Induction Motors, *IEEE Procc., Part.B*, **133** No.3, 155-163.
- [53] **Thomson. W. T., Cameron. J.R. and Dow. A.B.**, 1987. On-line Diagnostics of Large Induction Motors NATO ARW, Catholic University of Leuven, August, 1986 to be published in the NATO Asl Series, pub 'Martinus Hijhoff' February/March 1987.
- [54] **Kliman, G.B., Koegl, R.A., Stein, J., Endicott, R. D. and Madden, M.W.**, 1988. Noninvasive Detection of Broken Rotor Bars in Operating Induction Motors, *IEEE Trans. Energy Conv.*, **3**, No.4, 873-879.

- [55] **Penman J., Stavrau A.**, 1995. Effects of Broken Rotor Bars on the Transient Run up of Inductions Machines, “*Electrical Machines and Drives*” *Conference Publication*, No: 412, 33-37.
- [56] **Thomson, W.T., Leonard, R.A., Milne A.J. and Penman, J.**, 1983 Failure Identification of Offshore Induction Motor Systems Using On-line Condition Monitoring, *Proceedings of 4th National Reliability Conference*. Birmingham. UK., **2C/3/1-2C/3/11**.
- [57] **Thomson, W.T., Leonard, R.A., Milne, A.J. and Deans, N.D.**, 1983. Condition Monitoring of Induction Motors for Availability Assessment in Offshore Installations, *Proceedings of 4th Euredata Conference. Venice, Italy*.
- [58] **Gaydon, B.G.,**, 1979. An Instrument to Detect Induction Motor Rotor Circuit Defects by Speed Fluctation Measurements, *Electric Test and Measuring Instrumentation- Testmex '79 Conf. Papers*, 5-8.
- [59] **Filippetti, F. and Franceschini, G.**, 1996. AI Techniques in Induction Machines Diagnosis Including the Speed Ripple Effect, *IEEE-IAS Annu. Meeting, San Diego, CA.*, 655-662.
- [60] **Elkasabgy, N. M., A.R. and Dawson, G.E.**, 1992. Detection of Broken Bars in the Cage Rotor on an Induction Machine. *IEEE Trans. Ind. Appli.*, **22**, 165-171.
- [61] **Leonard, R.A. and Thomson, W.T.**, 1984. Vibration and Stray Flux Monitoring for Unbalanced Supply and Intern-Turn Winding Fault Diagnosis in Induction Motors, *Proc. Of 1st UK INternational Conference on Condition Monitoring Uni College of Swansea*, 340-354.
- [62] **Muller, G.H. and Landy, C.F.**, 1994. Vibration Produced in Squirrel Cage Induction Motors Having Broken Rotor Bars and Interbar Currents, *International Conference on Electrical Machines*, 595-600.
- [63] **Tavner, P. J. and Penman, J.**, 1987. Condition Monitoring of Electrical Machines. Letchwort, U.K. Research Studies Press.

- [64] **Pozanski, A.**, 1977 Acoustic Measurement of Three-Phase Asynchronous Motors With a Broken Bar in the Cage Rotor. *Zesz. Nauk. Politech.Lodz.Elekt.* No.60, 121-131.
- [65] **Jrzyna W.** 1995. Diagnostic Characteristics of Axial Flux in an Induction Machine, *Electrical Machines and Drives*, Conference Publication IEE, No.412, 141-145.
- [66] **Vas P.** 1993. *Parameter Estimation Condition Monitoring and Diagnosis of Electrical Machines*. Oxford University Pres
- [67] **Filippetti F. and Vas P.** 1994. Broken Bar Detection in Induction Machines: Comparison Between Current Spectrum Approach and Parameter Estimation Approach. *IEEE 0 – 7803 – 1993 – 1/94*.
- [68] **Chow, M.Y.**, 1998. Set theoretic based neural-fuzzy motor fault detector, *Proceedings of the IEEE Industrial Electronics Soci.*, Aachen, **4**, 1908-1913.
- [69] **Shirikhodai, A.**, 1998. A comparative study on performance of neural-networks for condition monitoring of rotary machinery, *Proceedings of the Meeting of the Society for Machinery Failure Prevention Technology*, 73-80.
- [70] **Chun, S.**, 1997. A fuzzy expert system for vibration cause identification in rotating machines, *IEEE Int. Conf. on Fuzzy Sys.*, **1**, 555-560.
- [71] **Boguslawky, I. and Demirtschian, K.**, 1992. Stromverteilung in unregelmässigen und unsymmetrischen kurzgeschlossenen Läuferwicklungen von Wechselstrommaschinen, *Archiv für Elektrotechnik*, **75**, 433-441.
- [72] **Behrooz, M.**, 2004. Induction Machine Broken-Bar Fault Diagnosis Using The Rotor Magnetic Field "Space-Vector" Orientation, *IEEE*, **0093-9994**, 534-542.
- [73] **Rusek, J.**, 1985. Analytische Erfassung der Käfigunsymmetrien einer Asynchronmaschine im stationären Betriebszustand, *ETZ-A*, **7**, H-6, 197-202.

- [74] **Huth, G.**, 1987. Beschreibung der Transienten Stromverdrängung in Käfigläuferstäben über Numerisch bestimmte Ersatznetze, *Archiv für Elektrotechnik*, **70**, 31-37.
- [75] **Say MG.**, 1948. *The Performance and Design of Alternating Current Machines*, Pitman, London, Second Edition.
- [76] **Bonnett, A.H. and Soukup, G.C.**, 1986. Rotor Failures in Squirrel Cage Induction Motors, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, **22**, No.6, 1165-1173.
- [77] **Burns, R. L.**, 1977. Rotor Bar Failures in Large A.C. Squirrel Cage Rotors, *Electr. Eng.* No.54, 11-14.
- [78] **Drif, M'hamed and Benouzza, N.**, 2002. Squirrel Cage Rotor Faults Detection, In *Induction Motor Utilizing Stator Power Spectrum Approach, Conferans Publication*, No: 487, 133-138.
- [79] **Lyon, W.V.**, 1954. *Transient Analysis of Alternating Current Machinery*, John Wiley and Sons, New York.
- [80] **Stepina, J.**, 1979. *Einführung In Die Allgemeine Raumzeiger-Theorie Der Elektrischen Maschinen*, Kaiserslautern.
- [81] **Kovacs, K.P.**, 1984. *Transient Phenomena in Electrical Machines*, Elsevier, Amsterdam.
- [82] **Stepina, J.**, 1962. Die Physikalische bedeutung der symmetrischen komponenten der momentanwerte in elektrischen maschinen und ihre verallgemeinerung, *Acta Technica Csav*, No:5, 451 - 471.
- [83] **Stepina, J.**, 1989. Komplexe grössen in der elektrotechnik, *Archiv für Elecktrotechnik*, **72**, 407 - 414.
- [84] **Miller, T.J.E., Megilp M.I. and Ionel, D.M.**, 1998. *Design Simulation Software for AC Induction Motors*, University of Glasgow
- [85] **Timar, P.L.**, 1989. *Noise and Vibration of Electrical Machines*, Elsevier.
- [86] **Schuisky W.**, 1960. *Brechnung Elektrischer Maschinen*, Springer.
- [87] **Kovacs, K.P.**, 1962. *Symmetrische Komponenten in Wechselstrommaschinen*, Birkheuser Verlag, Basel.

EKLER

EK A : Stator sargısının trigonometrik ifadeler içeren akı denklemi

Stator kendi arasında oluşturduğu akı denklemi:

$$\begin{bmatrix} \Psi_{SAS} \\ \Psi_{SBS} \\ \Psi_{SCS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{r\sigma} + L_{ms} & L_{ms} \cdot \cos 120 & L_{ms} \cdot \cos 240 \\ L_{ms} \cdot \cos 240 & L_{\sigma s} + L_{ms} & L_{ms} \cdot \cos 120 \\ L_{ms} \cos 120 & L_{ms} \cos 240 & L_{\sigma s} + L_{ms} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix}$$

Stator faz sargılarının rotor devreleri ile oluşturduğu akı denklemleri:

$$\begin{bmatrix} \Psi_{SAR} \\ \Psi_{SBR} \\ \Psi_{SCR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_m \cdot \cos \theta & L_m \cdot \cos(\theta + \gamma) & L_m \cdot \cos(\theta + 2\gamma) & \dots & L_m \cdot \cos(\theta + (n-1)\gamma) \\ L_m \cdot \cos(240 + \theta) & L_m \cdot \cos(240 + \theta + \gamma) & L_m \cdot \cos(240 + \theta + 2\gamma) & \dots & L_m \cdot \cos(240 + \theta + (n-1)\gamma) \\ L_m \cdot \cos(120 + \theta) & L_m \cdot \cos(120 + \theta + \gamma) & L_m \cdot \cos(120 + \theta + 2\gamma) & \dots & L_m \cdot \cos(120 + \theta + (n-1)\gamma) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{R_1} \\ i_{R_2} \\ \vdots \\ i_{R_N} \end{bmatrix}$$

EK B : Stator sargısının, simetrlili bileşenler dönüşüm matrisleri kullanılarak yazılan gerilim bileşen denklemi

Statorun zamana bağlı büyüklükler kullanılan matris biçimli gerilim denklemi:

$$\underline{v}_S = \underline{R}_1 \cdot \underline{i}_S + (\underline{L}_{\sigma s} + \underline{L}_{ss}) \cdot \frac{d\underline{i}_S}{dt} + \frac{d}{dt}(\underline{L}_{sr} \cdot \underline{i}_R)$$

Simetrlili bileşen dönüşümü:

$$\underline{T}_S \cdot \underline{v}_S = \underline{T}_S \cdot \underline{R}_1 \cdot \underline{T}_S^{-1} \cdot \underline{i}'_S + (\underline{L}_{\sigma s} + \underline{L}_{ss}) \cdot \frac{d[\underline{T}_S^{-1} \cdot \underline{i}'_S]}{dt} + \underline{T}_S \cdot \frac{d}{dt}[\underline{L}_{sr} \cdot \underline{T}_R^{-1} \cdot \underline{i}'_R]$$

Statorun simetrlili bileşen büyüklüklerine dönüştürülmüş gerilim bileşen denklemleri:

$$\begin{bmatrix} \underline{v}_{so} \\ \underline{v}_{sp} \\ \underline{v}_{sn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0 \\ 0 & R_1 & 0 \\ 0 & 0 & R_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{i}_{so} \\ \underline{i}_{sp} \\ \underline{i}_{sn} \end{bmatrix} + \left\{ \begin{bmatrix} \underline{L}_{\sigma s} & 0 & 0 \\ 0 & \underline{L}_{\sigma s} & 0 \\ 0 & 0 & \underline{L}_{\sigma s} \end{bmatrix} + \frac{3}{2} L_{ms} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \right\} \cdot \frac{d}{dt} \left\{ \begin{bmatrix} \underline{i}_{so} & \underline{i}_{sp} & \underline{i}_{sn} \end{bmatrix}^T \right\} +$$

$$\frac{d}{dt} \left\{ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{N}{2} L_m \cdot e^{j\theta} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \frac{N}{2} L_m \cdot e^{j-\theta} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{i}_{ro} & \underline{i}_{rp} & \underline{i}_1 & \underline{i}_2 & \dots & \underline{i}_{N-3} & \underline{i}_m \end{bmatrix}^T \right\}$$

EK C : Motor parametreleri için hesaplama örnekleri

İndüktans hesabı:

$$\ell = 895.10^{-4} \text{ m}$$

$$R_{\text{ort}} = 3983.10^{-5} \text{ m}$$

$$N = 27.6$$

$$g = 34.10^{-5} \text{ m}$$

$$\mu_0 = 0,4\pi.10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{A.m}}$$

Stator mıknatıslanma indüktansı:

$$\begin{aligned} L_{\text{ms}} &= \frac{\mu_0 \cdot \ell \cdot r}{g} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (N_s)^2 \\ &= 0,3133 \text{ (H)} \end{aligned}$$

Karşılıklı indüktans:

$$\begin{aligned} L_m &= \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\sin \frac{\gamma}{2}}{N_s} \cdot L_{\text{ms}} \\ &= 0,1475.10^{-5} \cdot (N_s) \end{aligned}$$

Rotorun mıknatıslanma indüktansı:

$$\begin{aligned} L_{\text{mr}} &= \frac{\mu_0 \cdot \ell \cdot r}{g} \cdot \gamma \cdot \left(1 - \frac{\gamma}{2\pi}\right) \\ &= 2,8501.10^{-6} \text{ H} \end{aligned}$$

Diş indüktansı:

$$\begin{aligned} L_z &= \mu_0 \cdot \frac{b_z \cdot \ell}{g} \\ &= 99,238.10^{-8} \Omega \end{aligned}$$

EK D : Performans deneylerinin sonuçları

Çizelge D.1 : Birinci rotor için sağlam durumda yükleme deneyi sonuçları.

Motor Type : OS100L2A-40			Serial No : 24839hh		test no.	10227
					Date :	07.07.2008
					U [V]	400
I [A]	P [kW]	n [rpm]	f [Hz]	Cos Ø	T [Nm]	% E
6,1	3	2890	50	0,88	9,91	83



load operation

Uav [V]	I_1 [A]	I_2 [A]	I_3 [A]	Iav [A]	power in [W]	OS_PHI_1 [°]	Açıklamalar:			
420	1,12	0,90	1,25	1,09	136,98	0,32	Standart 1. rotor sağlam			
404	3,09	3,22	3,38	3,23	306,50	0,14				
383	2,61	2,55	2,65	2,61	256,24	0,15	%I			
362	2,12	2,06	2,20	2,13	239,39	0,18	8,84%			
342	1,94	1,80	1,91	1,89	210,89	0,19	Atmosph.	R1	R2	R3
323	1,72	1,60	1,67	1,67	190,98	0,21	23,8	1,909	1,913	1,911
302	1,55	1,41	1,54	1,50	176,87	0,22	ind.resist. 25°C	1,920		
282	1,39	1,26	1,44	1,36	162,25	0,24				
262	1,29	1,09	1,31	1,23	154,10	0,28	IP	A.Control	PROTOTYPE	
#SAYI/0!	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				

performans

Uav [A]	I_1 [A]	I_2 [A]	I_3 [A]	Iav [A]	power in [W]	torque [Nm]	speed [rpm]	power out [W]	ETA [°]	OS_PHI_123 [°]
414	6,12	5,97	6,25	6,11	3652,63	9,91	2918	3028,50	82,91	0,83
427	6,31	6,06	6,47	6,28	3675,81	9,91	2925	3035,24	82,57	0,79
404	3,36	3,44	3,54	3,45	1113,93	2,48	2980	772,98	69,44	0,46
403	3,99	4,02	4,16	4,06	1931,96	4,96	2960	1535,90	79,50	0,68
403	5,01	4,93	5,13	5,02	2776,80	7,43	2940	2288,14	82,40	0,79
404	6,07	6,00	6,25	6,11	3650,27	9,91	2912	3022,07	82,80	0,85
403	7,26	7,16	7,39	7,27	4511,64	12,38	2891	3748,24	83,08	0,89
382	6,17	6,02	6,22	6,14	3631,81	9,91	2905	3014,73	83,01	0,89
363	6,35	6,22	6,37	6,31	3627,64	9,91	2890	2999,16	82,68	0,91

Start		
Uav [V]	torque [Nm]	Iav [A]
400	28,37	48,91
400	28,31	48,86

Pull-Up		
Uav [V]	torque [Nm]	speed [rpm]
401	28,04	310
400	27,93	

Break down		
Uav [V]	torque [Nm]	speed [rpm]
402	37,94	1935
400	37,49	

Prepared by:	Control:
--------------	----------

Çizelge D.2 : Birinci rotor için bir kafes çubuğu kırık durumda yükleme deneyi sonuçları.

Motor Type : QS100L2A-40			Serial No : 849HH			test no.	10227a
						Date :	12.05.2008
						U [V]	400
I [A]	P [kW]	n [rpm]	f [Hz]	Cos Ø	T [Nm]	% E	
6,1	3	2890	50	0.88	9,91	83	



load operation

Uav [V]	I_1 [A]	I_2 [A]	I_3 [A]	Iav [A]	power in [W]	OS_PHI_1 °	Açıklamalar: Standart 1. rotor bir çubuk kırık			
429	4,19	4,33	4,03	4,18	355,74	0,11				
402	3,03	3,19	3,07	3,10	275,47	0,13				
382	2,47	2,57	2,49	2,51	240,42	0,14	%ØI			
362	2,05	2,14	2,10	2,10	208,74	0,16	5,06%			
342	1,87	1,78	1,81	1,82	197,71	0,18	Atmosph.	R1	R2	R3
321	1,60	1,63	1,58	1,60	172,19	0,19	23,8	1,909	1,913	1,911
301	1,49	1,45	1,41	1,45	168,23	0,22	ind.resist. 25°C	1,920		
281	1,35	1,30	1,25	1,30	149,30	0,24				
261	1,25	1,19	1,12	1,19	135,81	0,25	IP	A.Control	PROTOTYPE	
#SAYI/0!	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				

performans

Uav [A]	I_1 [A]	I_2 [A]	I_3 [A]	Iav [A]	power in [W]	torque [Nm]	speed [rpm]	power out [W]	ETA %	OS_PHI_123 °
427	6,32	6,27	6,21	6,27	3668,37	9,91	2907	3017,19	82,25	0,79
411	6,09	6,10	6,05	6,08	3612,22	9,91	2902	3011,29	83,36	0,83
402	3,37	3,46	3,34	3,39	1093,59	2,48	2975	771,68	70,56	0,46
402	4,01	4,07	3,97	4,02	1899,58	4,96	2946	1528,87	80,48	0,68
401	5,04	4,99	4,90	4,98	2780,40	7,43	2925	2276,46	81,88	0,80
401	6,16	6,07	6,10	6,11	3668,43	9,91	2900	3009,54	82,04	0,86
402	7,32	7,26	7,16	7,25	4480,74	12,38	2878	3731,61	83,28	0,89
381	6,24	6,07	6,11	6,14	3617,11	9,91	2885	2993,97	82,77	0,89
361	6,41	6,37	6,28	6,35	3632,84	9,91	2876	2984,99	82,17	0,91

Start		
Uav [V]	torque [Nm]	Iav [A]
400	29,39	47,88
400	29,37	47,86

Pull-Up		
Uav [V]	torque [Nm]	speed [rpm]
400	29,54	295
400	29,47	

Break down		
Uav [V]	torque [Nm]	speed [rpm]
400	36,94	1735
400	37,00	

Prepared by:	Control:
--------------	----------

Çizelge D.3 : Birinci rotor için ardışık iki kafes çubuğu kırık durumda yükleme deneyi sonuçları.

Motor Type : QS100L2A-40			Serial No : 849HH		test no.	10227b
					Date :	08.07.2008
					U [V]	400
I [A]	P [kW]	n [rpm]	f [Hz]	Cos Ø	T [Nm]	% E
6,1	3	2890	50	0,88	9,91	83



load operation

Uav [V]	I_1 [A]	I_2 [A]	I_3 [A]	Iav [A]	power in [W]	OS_PHI_123 [°]	Acıklamalar: Standart 1. rotor ardışık iki çubuk kırık			
425	3,98	3,99	4,00	3,99	326,33	0,11				
402	3,14	3,13	3,14	3,14	257,39	0,12				
381	2,59	2,53	2,48	2,54	231,51	0,14	%-I			
361	2,16	2,08	2,06	2,10	199,81	0,15	0,28%			
341	1,91	1,77	1,81	1,83	177,76	0,16	Atmosph.	R1	R2	R3
322	1,68	1,59	1,60	1,63	165,42	0,18				
302	1,49	1,36	1,45	1,44	149,72	0,20	ind.resist. 25°C		0,000	
281	1,38	1,23	1,31	1,31	137,51	0,22				
262	1,22	1,15	1,19	1,18	125,95	0,23	IP	A.Control		PROTOTYPE
#SAYI/0!	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				

performans

Uav [A]	I_1 [A]	I_2 [A]	I_3 [A]	Iav [A]	power in [W]	torque [Nm]	speed [rpm]	power out [W]	ETA [°]	OS_PHI_123 [°]
424	6,26	6,04	6,25	6,18	3686,14	9,91	2908	3017,52	81,89	0,81
412	6,29	6,11	6,19	6,20	3655,38	9,91	2900	3009,54	82,33	0,83
402	3,25	3,33	3,21	3,26	1088,53	2,48	2975	771,68	70,89	0,48
402	3,95	3,95	3,88	3,93	1895,68	4,96	2955	1533,08	80,87	0,69
402	5,06	4,88	4,88	4,94	2788,49	7,43	2925	2276,24	81,71	0,81
401	6,16	5,97	5,98	6,04	3598,11	9,91	2895	3004,35	83,52	0,86
401	7,41	7,19	7,36	7,32	4525,74	12,38	2866	3715,53	82,16	0,89
381	6,24	6,05	6,08	6,12	3637,58	9,91	2884	2993,37	82,29	0,90
361	6,44	6,31	6,46	6,40	3668,14	9,91	2865	2973,22	81,10	0,92

Start		
Uav [V]	torque [Nm]	Iav [A]
401	29,50	46,94
400	29,39	46,85

Pull-Up		
Uav [V]	torque [Nm]	speed [rpm]
399	30,67	305
400	30,76	

Break down		
Uav [V]	torque [Nm]	speed [rpm]
400	36,58	1568
400	36,56	

Prepared by:	Control:
--------------	----------

Çizelge D.4 : Birinci rotor için ardışık üç kafes çubuğu kırık durumda yükleme. deneyi sonuçları.

Motor Type: QS100L2A-40			Serial No : 849HH		test no.	10227C
					Date :	09.07.2008
					U [V]	400
I [A]	P [kW]	n [rpm]	f [Hz]	Cos Ø	T [Nm]	% E
6,1	3	2890	50	0,88	9,91	83



load operation

Uav [V]	I_1 [A]	I_2 [A]	I_3 [A]	Iav [A]	power in [W]	OS_PHI_12 °	Açıklamalar:			
426	4.17	3.97	4.03	4.06	329,59	0.11	Standart 1. rotor ardışık üç çubuk kırık			
404	3.22	3.12	3.04	3.13	258,54	0.12				
384	2.62	2.54	2.51	2.56	218,00	0.13	%U			
363	2.18	2.08	2.06	2.11	206,32	0.16	5,69%			
343	1.91	1.81	1.84	1.85	178,55	0.16	Atmosph.	R1	R2	R3
323	1.62	1.59	1.64	1.62	163,81	0.18	23,8	1,909	1,913	1,911
302	1.49	1.47	1.39	1.45	149,33	0.20	ind.resist. 25°C	1,920		
283	1.35	1.27	1.32	1.32	140,89	0.22				
262	1.26	1.17	1.22	1.22	129,36	0.23	IP	A.Control	PROTOTYPE	
#SAYI/01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				

performans

Uav [A]	I_1 [A]	I_2 [A]	I_3 [A]	Iav [A]	power in [W]	torque [Nm]	speed [rpm]	power out [W]	ETA %	OS_PHI_123 °
424	6,16	6,05	6,34	6,18	3686,13	9,91	2905	3014,73	81,82	0,81
413	6,20	6,09	6,35	6,21	3748,50	9,91	2904	3013,52	80,45	0,84
402	3,35	3,29	3,32	3,32	1142,50	2,48	2978	772,36	67,58	0,49
403	4,09	4,03	4,19	4,10	1924,25	4,96	2952	1531,63	79,61	0,67
402	5,09	5,07	5,25	5,14	2728,89	7,43	2930	2280,35	83,57	0,76
403	6,16	6,17	6,17	6,16	3729,34	9,91	2905	3014,73	80,88	0,87
402	7,29	7,35	7,37	7,34	4449,64	12,38	2874	3725,86	83,75	0,87
383	6,05	6,08	6,27	6,14	3645,30	9,91	2890	2999,16	82,28	0,90
362	6,35	6,35	6,47	6,39	3598,20	9,91	2873	2981,05	82,85	0,90

Start		
Uav [V]	torque [Nm]	Iav [A]
401	29,54	45,86
400	29,45	45,78

Pull-Up		
Uav [V]	torque [Nm]	speed [rpm]
400	30,73	305
400	30,71	

Break down		
Uav [V]	torque [Nm]	speed [rpm]
401	35,50	1568
400	35,41	

Prepared by:	Control:
--------------	----------

Çizelge D.5 : Birinci rotor için ardışık dört kafes çubuğu kırık durumda yükleme deneyi sonuçları.

Motor Type : QS100L2A-40			Serial No : 849HH		test no.	10227D
					Date :	09.07.2008
					U [V]	400
I [A]	P [kW]	n [rpm]	f [Hz]	Cos Ø	T [Nm]	%E
6,1	3	2890	50	0,88	9,91	83



load operation

Uav	0	0	0	Iav	0	0	Acıklamalar: Standart 1. rotor ardışık dört çubuk kırık			
0	0	0	0	0	0	0				
#SAYI/0!	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				
#SAYI/0!	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				
#SAYI/0!	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	%01			
#SAYI/0!	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	#SAYI/0!			
#SAYI/0!	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	Atmosph.	R1	R2	R3
#SAYI/0!	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				
#SAYI/0!	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	ind.resist. 25°C 0,000			
#SAYI/0!	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				
#SAYI/0!	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	IP	A.Control	PROTOTYPE	
#SAYI/0!	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				

performans

Uav	I_1	I_2	I_3	Iav	power in	torque	speed	power out	ETA	OS_PHI_123
[A]	[A]	[A]	[A]	[A]	[W]	[Nm]	[rpm]	[W]	η	η
424	6,49	6,30	6,55	6,45	3832,57	9,91	2895	3004,35	78,51	0,81
413	6,32	6,33	6,48	6,38	3810,28	9,91	2895	3004,35	79,00	0,83
403	3,48	3,44	3,38	3,44	1079,59	2,48	2960	767,80	71,12	0,45
402	4,02	3,99	3,99	4,00	1923,69	4,96	2940	1525,53	79,36	0,69
403	5,25	5,25	5,29	5,26	2862,71	7,43	2910	2264,79	79,12	0,78
402	6,27	6,25	6,33	6,28	3744,20	9,91	2882	2990,95	80,11	0,85
403	7,45	7,42	7,56	7,48	4561,36	12,38	2852	3697,06	81,05	0,88
383	6,43	6,50	6,48	6,47	3820,34	9,91	2866	2974,07	77,97	0,89
362	6,50	6,54	6,63	6,56	3709,38	9,91	2853	2961,02	80,01	0,90

Start		
Uav	torque	Iav
[V]	[Nm]	[A]
401	30,80	44,34
400	30,68	44,25

Pull-Up		
Uav	torque	speed
[V]	[Nm]	[rpm]
401	31,30	500
400	31,16	

Break down		
Uav	torque	speed
[V]	[Nm]	[rpm]
401	34,25	1402
400	34,02	

Prepared by:	Control:
--------------	----------

Çizelge D.6 : İkinci rotor için sağlam durumda yükleme deneyi sonuçları.

Motor Type : QS100L2A-40			Serial No : 24839 hh		test no.	10230
					Date :	10.07.2008
					U [V]	400
I [A]	P [kW]	n [rpm]	f [Hz]	Cos Ø	T [Nm]	% E
6,1	3	2890	50	0,88	9,91	83



load operation

Uav [V]	I_1 [A]	I_2 [A]	I_3 [A]	Iav [A]	power in [W]	OS_PHI_123 []	Açıklamalar:			
429	4,15	4,06	4,26	4,16	353,65	0,11	standart 2.rotor sağlam			
404	3,12	3,05	3,21	3,13	277,63	0,13				
383	2,45	2,41	2,50	2,46	232,25	0,14	%01			
364	2,13	1,98	2,14	2,08	208,24	0,16	5,06%			
343	1,84	1,67	1,83	1,78	179,75	0,17	Atmosph.	R1	R2	R3
323	1,63	1,54	1,60	1,59	160,05	0,18	23,8	1,909	1,913	1,911
303	1,44	1,34	1,45	1,41	154,92	0,21	ind.resist. 25°C	1,920		
283	1,32	1,20	1,37	1,29	139,43	0,22				
263	1,21	1,07	1,22	1,17	124,33	0,23	IP	A.Control	PROTOTYPE	
#SAYI/0!	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				

performans

Uav [A]	I_1 [A]	I_2 [A]	I_3 [A]	Iav [A]	power in [W]	torque [Nm]	speed [rpm]	power out [W]	ETA []	OS_PHI_123 []
427	6,14	6,03	6,37	6,18	3679,41	9,91	2906	3016,22	81,98	0,81
414	5,99	5,92	6,18	6,03	3629,95	9,91	2905	3014,73	83,05	0,84
404	3,30	3,37	3,37	3,35	1132,73	2,48	2972	771,03	68,06	0,48
404	3,91	3,97	4,08	3,99	1924,59	4,96	2952	1531,64	79,59	0,69
404	4,96	4,87	5,01	4,95	2790,42	7,43	2925	2276,46	81,58	0,81
403	6,06	5,94	6,04	6,01	3627,64	9,91	2898	3007,64	82,91	0,86
403	7,27	7,13	7,37	7,26	4540,41	12,38	2870	3720,76	81,95	0,90
383	6,14	5,97	6,18	6,09	3629,69	9,91	2885	2993,97	82,49	0,90
363	6,26	6,22	6,36	6,28	3627,82	9,91	2866	2974,07	81,98	0,92

Start		
Uav [V]	torque [Nm]	Iav [A]
402	29,22	48,49
400	28,92	48,24

Pull-Up		
Uav [V]	torque [Nm]	speed [rpm]
401	29,13	308
400	28,92	

Break down		
Uav [V]	torque [Nm]	speed [rpm]
403	37,88	1752
400	37,41	

Prepared by:	Control:
--------------	----------

Çizelge D.7 : İkinci rotor için bir kafes çubuğu kırık durumda yükleme deneyi sonuçları.

Motor Type : QS100L2A-40			Serial No : 24839 HH		test no.	10230A
					Date :	17.07.2008
					U [V]	400
I [A]	P [kW]	n [rpm]	f [Hz]	Cos Ø	T [Nm]	% E
6,1	3	2890	50	0,88	9,91	83



no load operation

Uav [V]	I_1 [A]	I_2 [A]	I_3 [A]	Iav [A]	power in [W]	OS_PHI_12	Aciklamalar:			
431	4,41	4,52	4,00	4,31	408,14	0,13	Standart 2. rotor bir çubuk kırık akım ölçümü için kullanıldı.			
402	3,09	3,18	3,03	3,10	308,12	0,14				
382	2,52	2,49	2,38	2,46	263,49	0,16				
362	2,14	2,08	2,00	2,07	236,94	0,18	%01			
342	1,90	1,81	1,70	1,80	215,41	0,20	4,66%			
322	1,72	1,58	1,57	1,62	192,24	0,21	Atmosph.	R1	R2	R3
302	1,53	1,39	1,39	1,43	179,15	0,24	Wind.resist. 25°C			0,000
282	1,39	1,27	1,26	1,31	160,28	0,25				
261	1,25	1,15	1,20	1,20	149,04	0,27	IP	A.Control		PROTOTYPE
#SAYI/01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				

performans

Uav [A]	I_1 [A]	I_2 [A]	I_3 [A]	Iav [A]	power in [W]	torque [Nm]	speed [rpm]	power out [W]	ETA	OS_PHI_123
427	6,44	6,15	6,28	6,29	3679,61	9,91	2913	3022,98	82,18	0,79
413	6,21	5,93	6,13	6,09	3633,71	9,91	2907	3016,57	83,02	0,83
402	3,27	3,36	3,18	3,27	1082,22	2,48	2980	772,94	71,42	0,48
402	4,12	4,06	3,97	4,05	1989,60	4,96	2954	1532,90	77,12	0,70
402	5,06	4,98	4,94	4,99	2765,06	7,43	2935	2284,24	82,61	0,80
401	6,18	6,07	6,06	6,10	3640,58	9,91	2910	3019,92	82,95	0,86
400	7,32	7,20	7,21	7,24	4482,59	12,38	2885	3740,20	83,44	0,89
381	6,10	6,01	6,02	6,04	3588,99	9,91	2895	3004,17	83,71	0,90
361	6,33	6,18	6,19	6,23	3575,00	9,91	2880	2988,79	83,62	0,92

Start		
Uav [V]	torque [Nm]	Iav [A]
400	29,46	48,38
400	29,47	48,40

Pull-Up		
Uav [V]	torque [Nm]	speed [rpm]
401	29,77	493
400	29,67	

Break down		
Uav [V]	torque [Nm]	speed [rpm]
401	37,54	1755
400	37,33	

Prepared by:	Control:
--------------	----------

Çizelge D.8 : Birinci rotor için herhangi iki kafes çubuğu kırık durumda yükleme deneyi sonuçları.

Motor Type : QS100L2A-40			Serial No : 24839 hh		test no.	10227e
					Date :	25.09.2008
					U [V]	400
I [A]	P [kW]	n [rpm]	f [Hz]	Cos Ø	T [Nm]	% E
6,1	3	2890	50	0,88	9,91	83



load operation

Uav [V]	I_1 [A]	I_2 [A]	I_3 [A]	Iav [A]	power in [W]	OS_PHI_12 [°]	Aciklamalar:			
423	4,00	4,06	3,64	3,90	323,95	0,11	Standart 2. rotor herhengi iki kırık (KsssK)			
401	3,02	3,05	2,80	2,96	256,45	0,12				
380	2,35	2,49	2,24	2,36	214,47	0,14	%81			
361	2,13	2,06	1,91	2,03	192,76	0,15	8,80%			
340	1,89	1,75	1,66	1,77	177,19	0,17	Atmosph.	R1	R2	R3
321	1,65	1,53	1,44	1,54	155,51	0,18				
301	1,52	1,39	1,33	1,41	145,14	0,20	ind.resist. 25°C		0,000	
281	1,36	1,22	1,18	1,25	130,97	0,21				
261	1,26	1,12	1,09	1,16	120,66	0,23	IP	A.Control		PROTOTYPE
#SAYI/0!	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				

performans

Uav [A]	I_1 [A]	I_2 [A]	I_3 [A]	Iav [A]	power in [W]	torque [Nm]	speed [rpm]	power out [W]	ETA [°]	OS_PHI_123 [°]
436	6,75	6,31	6,30	6,45	3739,70	9,91	2910	3019,44	80,74	0,77
422	6,45	6,05	6,12	6,21	3728,37	9,91	2910	3019,90	81,00	0,82
401	3,39	3,44	3,18	3,34	1102,30	2,48	2968	769,97	69,86	0,48
401	4,12	4,03	3,72	3,96	1943,97	4,96	2945	1528,12	78,61	0,71
401	5,14	4,96	4,83	4,97	2770,55	7,43	2920	2272,57	82,03	0,80
400	6,23	6,03	5,96	6,07	3657,00	9,91	2891	3000,36	82,06	0,87
400	7,51	7,27	7,25	7,34	4550,95	12,38	2863	3711,73	81,57	0,90
379	6,33	5,99	6,03	6,12	3593,57	9,91	2877	2985,99	83,10	0,90
360	6,58	6,21	6,27	6,35	3633,80	9,91	2863	2970,76	81,78	0,92

Start		
Uav [V]	torque [Nm]	Iav [A]
398	28,94	47,93
400	29,30	48,23

Pull-Up		
Uav [V]	torque [Nm]	speed [rpm]
397	29,52	323
400	29,91	

Break down		
Uav [V]	torque [Nm]	speed [rpm]
398	37,17	1765
400	37,57	

Prepared by:	Control:
--------------	----------

Çizelge D.9 : Dördüncü rotor için sağlam durumda yükleme deneyi sonuçları.

Motor Type : QS100L2A-40			Serial No : 24839HH		test no.	10453
					Date :	12.11.2008
					U [V]	400
I [A]	P [kW]	n [rpm]	f [Hz]	Cos Ø	T [Nm]	% E
6	3	2890	50	0,88	9,91	83



no load operation

Uav [V]	I_1 [A]	I_2 [A]	I_3 [A]	Iav [A]	power in [W]	OS_PHI_12 []	Aciklamalar: STT 6417329			
425	4,14	4,17	3,74	4,02	363,77	0,12	Standart motor 4. rotor saglam			
401	3,00	3,06	2,83	2,96	291,22	0,14				
380	2,51	2,44	2,29	2,41	240,18	0,15	%÷I			
360	2,14	2,05	1,94	2,04	224,31	0,18	7,76%			
340	1,90	1,82	1,64	1,79	202,87	0,19	Atmosph.	R1	R2	R3
320	1,66	1,52	1,54	1,57	174,32	0,20	22,3	1,898	1,897	1,895
300	1,53	1,34	1,34	1,40	160,91	0,22	Wind.resist. 25°C 1,917			
281	1,38	1,22	1,23	1,28	155,65	0,25				
260	1,28	1,13	1,10	1,17	143,27	0,27	IP	A.Control	PROTOTYPE	
#SAYI/0!	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	54			

performans

Uav [A]	I_1 [A]	I_2 [A]	I_3 [A]	Iav [A]	power in [W]	torque [Nm]	speed [rpm]	power out [W]	ETA	OS_PHI_123
447	7,07	6,55	6,51	6,71	3695,45	9,91	2920	3030,30	82,00	0,71
425	6,44	6,04	6,12	6,20	3653,81	9,91	2913	3022,81	82,73	0,80
401	3,35	3,33	3,10	3,26	1123,62	2,48	2982	773,47	68,84	0,50
400	4,07	3,96	3,77	3,93	1905,63	4,96	2960	1535,90	80,60	0,70
400	5,04	4,82	4,76	4,87	2698,39	7,43	2936	2284,97	84,68	0,80
400	6,23	5,97	5,99	6,06	3643,33	9,91	2915	3025,11	83,03	0,87
400	7,42	7,25	7,16	7,28	4515,46	12,38	2887	3742,53	82,88	0,90
380	6,26	6,02	5,99	6,09	3590,08	9,91	2900	3009,54	83,83	0,90
360	6,51	6,19	6,21	6,30	3607,43	9,91	2880	2988,79	82,85	0,92

Start		
Uav [V]	torque [Nm]	Iav [A]
397	29,32	48,57
400	29,71	48,89

Pull-Up		
Uav [V]	torque [Nm]	speed [rpm]
398	29,62	505
400	29,90	

Break down		
Uav [V]	torque [Nm]	speed [rpm]
399	37,91	1765
400	38,15	

Prepared by:	Control:
--------------	----------

Çizelge D.10 : Dördüncü rotor için bir kafes çubuğu kırık durumda yükleme deneyi sonuçları.

Motor Type: OS100L2A-40			Serial No: 24839HH		test no.	10230b
					Date:	21.11.2008
					U [V]	400
I [A]	P [kW]	n [rpm]	f [Hz]	Cos Ø	T [Nm]	% E
6	3	2890	50	0,88	9,91	83



no load operation

Uav [V]	I_1 [A]	I_2 [A]	I_3 [A]	Iav [A]	power in [W]	OS_PHI_12	Acıklamalar:			
429	4,38	4,19	3,88	4,15	398,63	0,13	Standart 4.rotor bir cubuk kırık			
402	3,09	3,01	2,94	3,01	310,44	0,15				
381	2,56	2,45	2,36	2,46	275,34	0,17	%E			
361	2,18	2,07	1,94	2,06	244,74	0,19	5,20%			
341	1,89	1,75	1,74	1,80	223,46	0,21	Atmosph.	R1	R2	R3
321	1,71	1,55	1,54	1,60	203,12	0,23				
300	1,52	1,42	1,33	1,42	180,37	0,24	Wind.resist 25°C			0,000
281	1,42	1,25	1,25	1,31	170,93	0,27				
261	1,28	1,18	1,10	1,19	171,67	0,32	IP	A.Control		PROTOTYPE
#SAYI/0!	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				

performans

Uav [A]	I_1 [A]	I_2 [A]	I_3 [A]	Iav [A]	power in [W]	torque [Nm]	speed [rpm]	power out [W]	ETA	OS_PHI_123
449	7,17	6,57	6,58	6,77	3711,97	9,91	2921	3031,54	81,67	0,70
425	6,45	5,87	6,26	6,20	3639,79	9,91	2912	3021,85	83,02	0,80
401	3,41	3,27	3,22	3,30	1095,81	2,48	2970	770,46	70,31	0,48
401	4,11	3,95	3,98	4,01	1912,30	4,96	2950	1530,71	80,05	0,69
401	5,12	4,82	4,86	4,94	2724,89	7,43	2929	2279,41	83,67	0,79
400	6,29	5,94	6,04	6,09	3628,02	9,91	2905	3014,73	83,10	0,86
400	7,51	7,17	7,26	7,32	4550,08	12,38	2875	3727,24	81,92	0,90
380	6,30	5,93	6,13	6,12	3626,35	9,91	2891	3000,71	82,76	0,90
360	6,53	6,08	6,34	6,31	3620,36	9,91	2879	2987,50	82,52	0,92

Start		
Uav [V]	torque [Nm]	Iav [A]
398	29,58	47,52
400	29,84	47,73

Pull-Up		
Uav [V]	torque [Nm]	speed [rpm]
399	29,10	307
400	29,24	

Break down		
Uav [V]	torque [Nm]	speed [rpm]
399	36,99	1748
400	37,11	

Prepared by:	Control:
--------------	----------

Çizelge D.11 : Dördüncü rotor için simetrik iki kafes çubuğu kırık durumda yükleme deneyi sonuçları.

Motor Type : QS100L2A-40			Serial No : 24839HH		test no.	10230C
					Date :	21.11.2008
					U [V]	400
I [A]	P [kW]	n [rpm]	f [Hz]	Cos Ø	T [Nm]	% E
6	3	2890	50	0,88	9,91	83



no load operation

Uav [V]	I_1 [A]	I_2 [A]	I_3 [A]	Iav [A]	power in [W]	OS_PHI_12 [°]	Aciklamalar: Standart 4.rotor simetrik iki kırık			
425	4,13	4,18	3,63	3,98	356,71	0,12				
400	3,04	3,12	2,77	2,97	285,08	0,14				
381	2,55	2,48	2,28	2,44	250,03	0,16	%E			
360	2,17	2,15	1,82	2,04	223,92	0,18	11,81%			
340	1,89	1,81	1,59	1,77	195,51	0,19	Atmosph.	R1	R2	R3
321	1,70	1,58	1,45	1,58	187,25	0,21				
300	1,55	1,46	1,27	1,43	174,01	0,23	Wind.resist. 25°C	0,000		
280	1,35	1,25	1,23	1,28	156,77	0,25				
260	1,27	1,16	1,07	1,16	149,04	0,28	IP	A.Control	PROTOTYPE	
#SAYI/0!	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				

performans

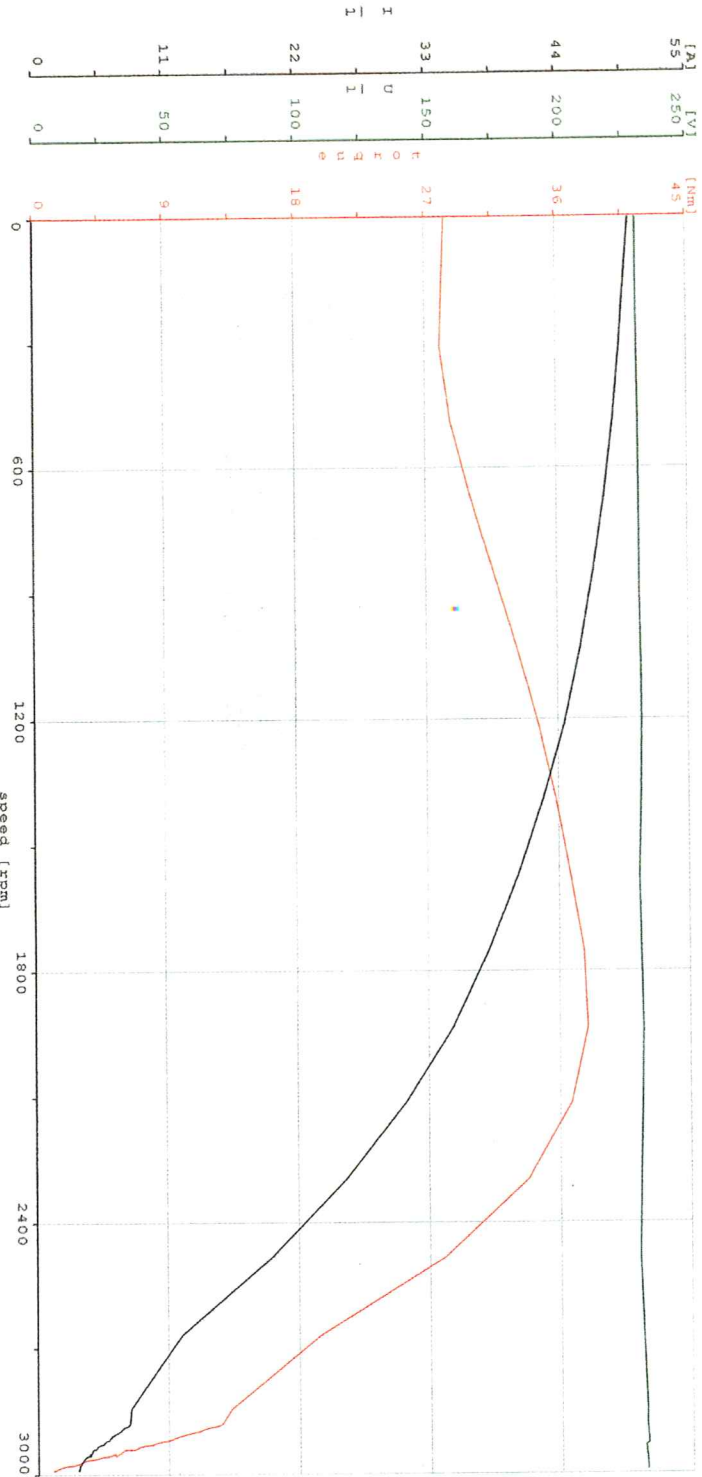
Uav [A]	I_1 [A]	I_2 [A]	I_3 [A]	Iav [A]	power in [W]	torque [Nm]	speed [rpm]	power out [W]	ETA [°]	OS_PHI_123 [°]
446	7,14	6,34	6,58	6,68	3802,85	9,91	2920	3030,30	79,69	0,74
425	6,47	5,90	6,14	6,17	3660,46	9,91	2915	3025,11	82,68	0,81
402	3,39	3,43	3,18	3,34	1094,00	2,48	2970	770,39	70,42	0,47
402	4,23	4,04	3,84	4,04	1884,10	4,96	2949	1530,36	81,28	0,67
402	5,29	5,02	4,89	5,06	2813,60	7,43	2930	2280,35	81,05	0,80
402	6,25	5,93	5,88	6,02	3618,69	9,91	2905	3014,73	83,33	0,86
400	7,55	7,20	7,20	7,31	4524,77	12,38	2875	3726,81	82,38	0,89
381	6,27	5,93	6,10	6,10	3607,05	9,91	2890	2999,16	83,17	0,90
360	6,46	6,15	6,24	6,28	3573,03	9,91	2865	2973,58	83,23	0,91

Start		
Uav [V]	torque [Nm]	Iav [A]
399	29,81	46,70
400	29,92	46,79

Pull-Up		
Uav [V]	torque [Nm]	speed [rpm]
400	30,08	492
400	30,08	

Break down		
Uav [V]	torque [Nm]	speed [rpm]
401	36,47	1755
400	36,36	

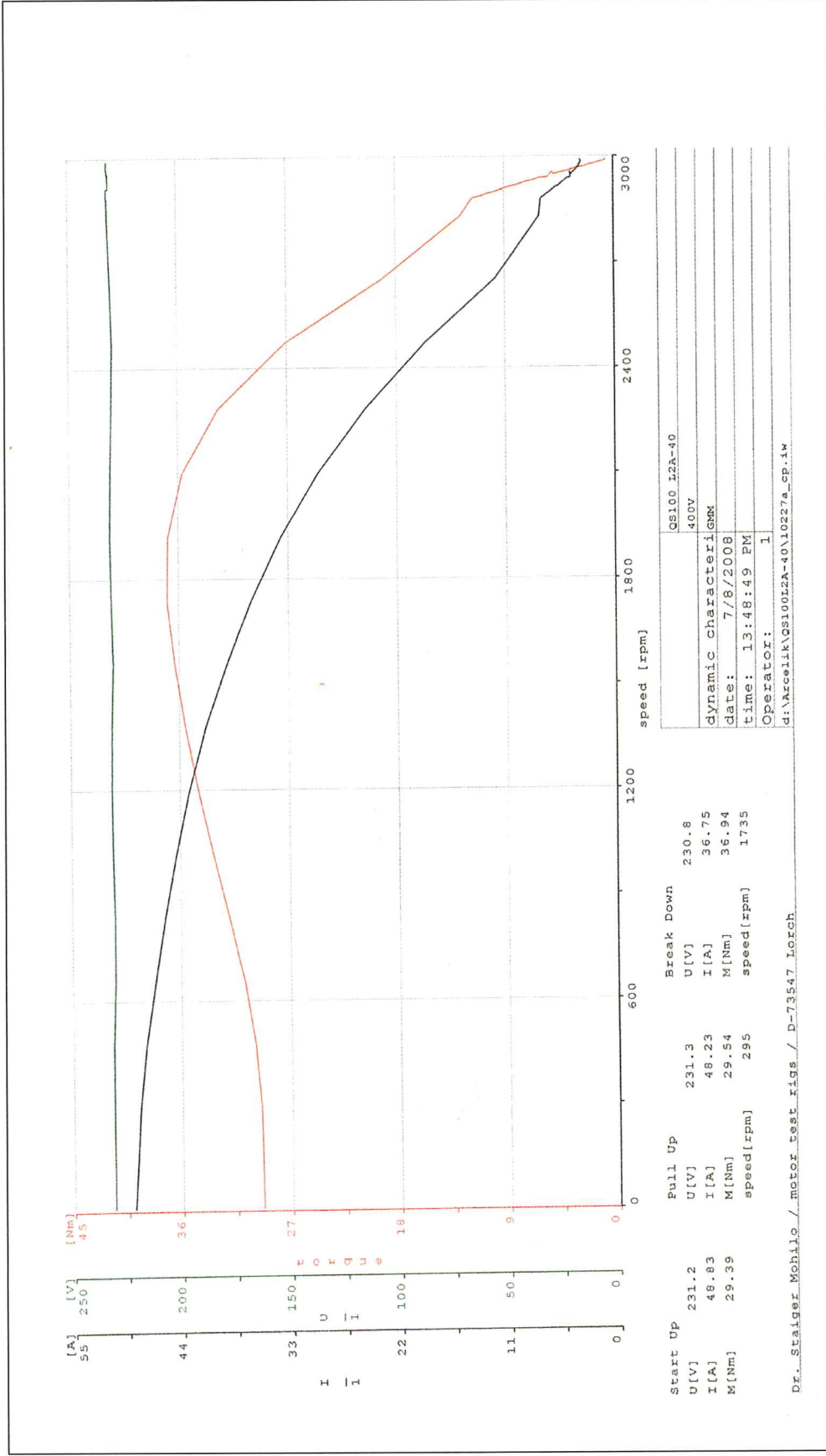
Prepared by:	Control:
--------------	----------



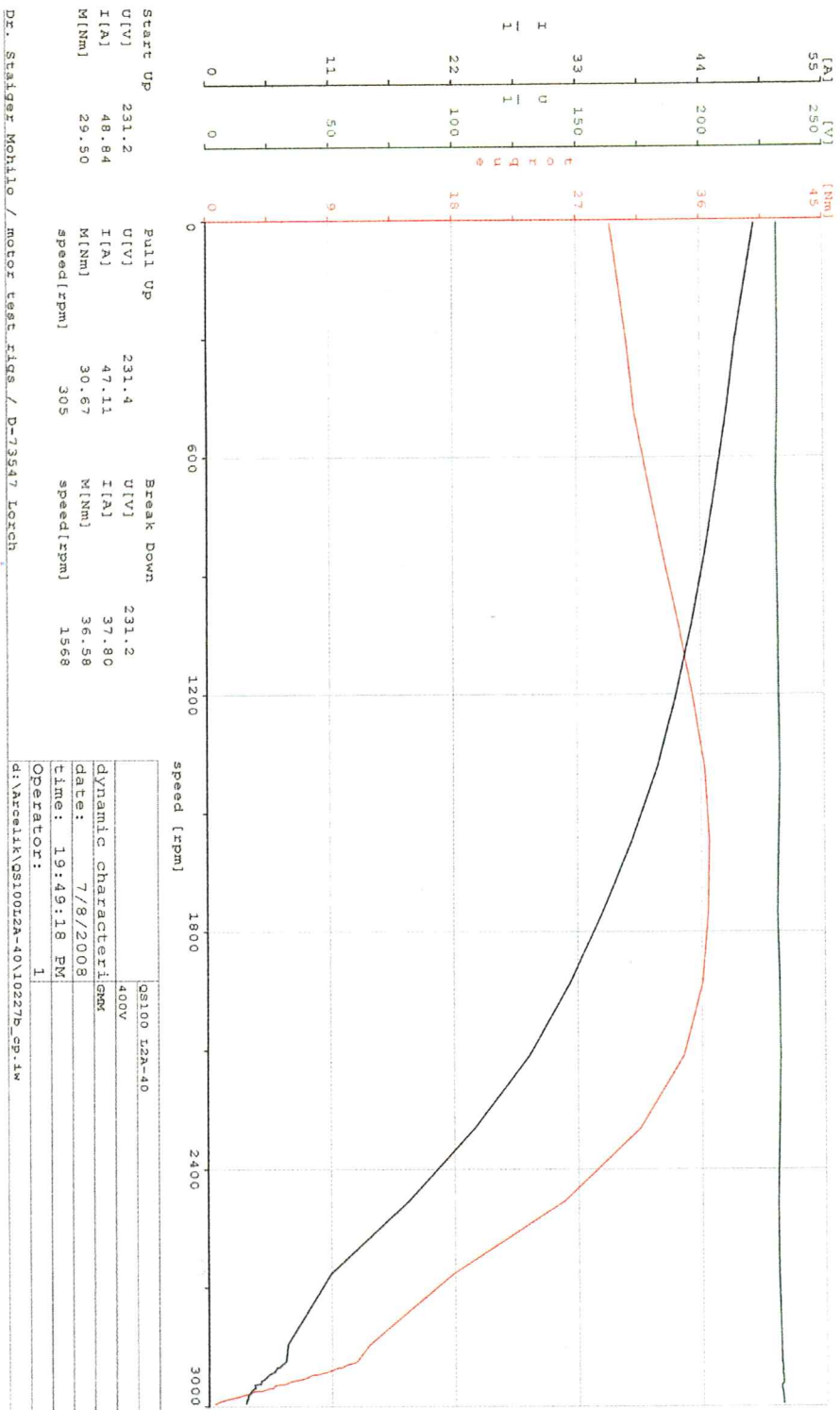
Dr. Stepper Motor / motor test rig / D-73547 Lorch

QSI00 L2A-40
400V
dynamic character
date: 7/7/2008
time: 16:34:27 PM
operator: 1
d:\arcelik\QSI00L2A-40\10227_cp.iv

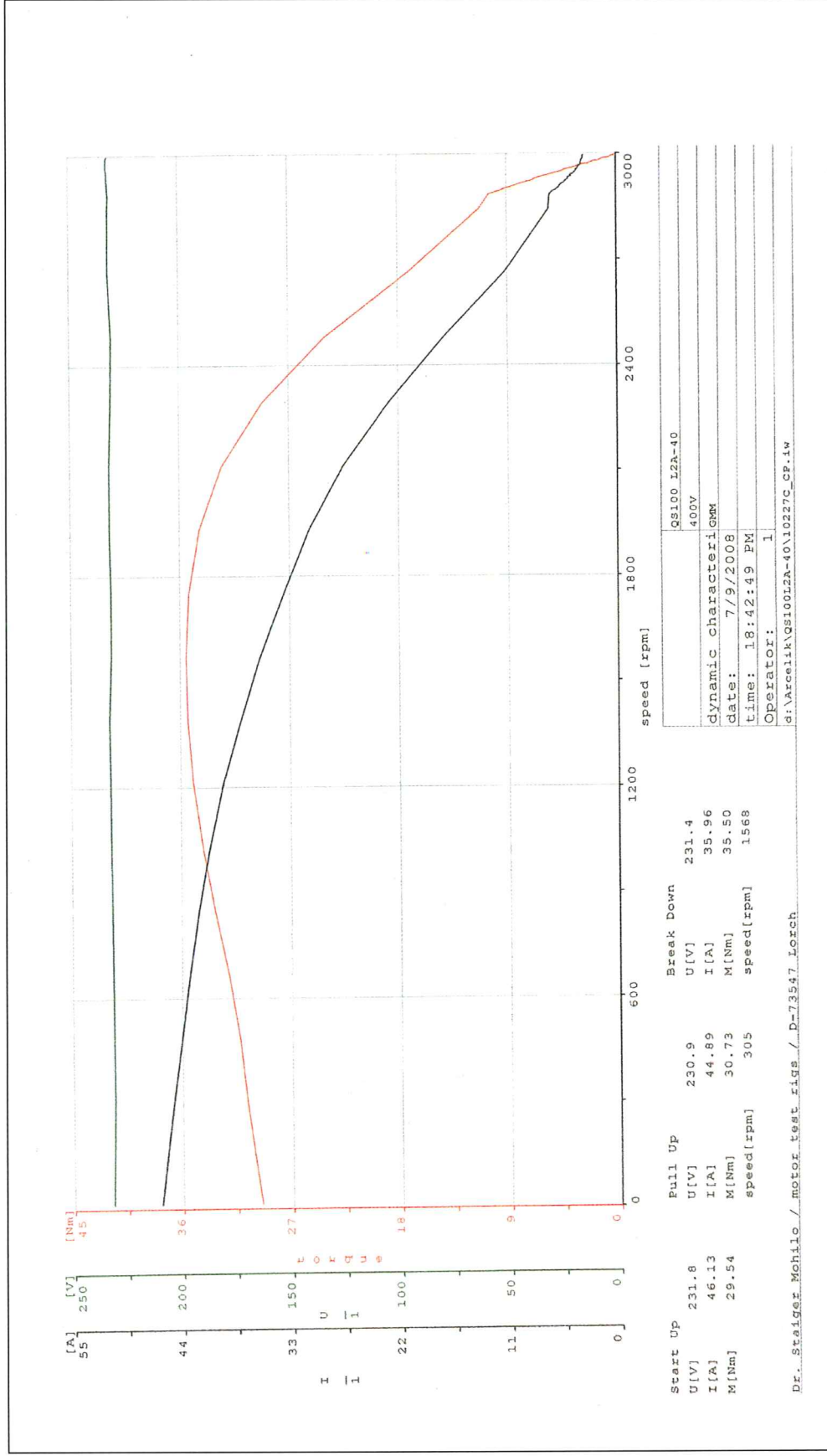
Şekil D.1 : Birinci rotor için sağlam durumda motor özgeçirleri.



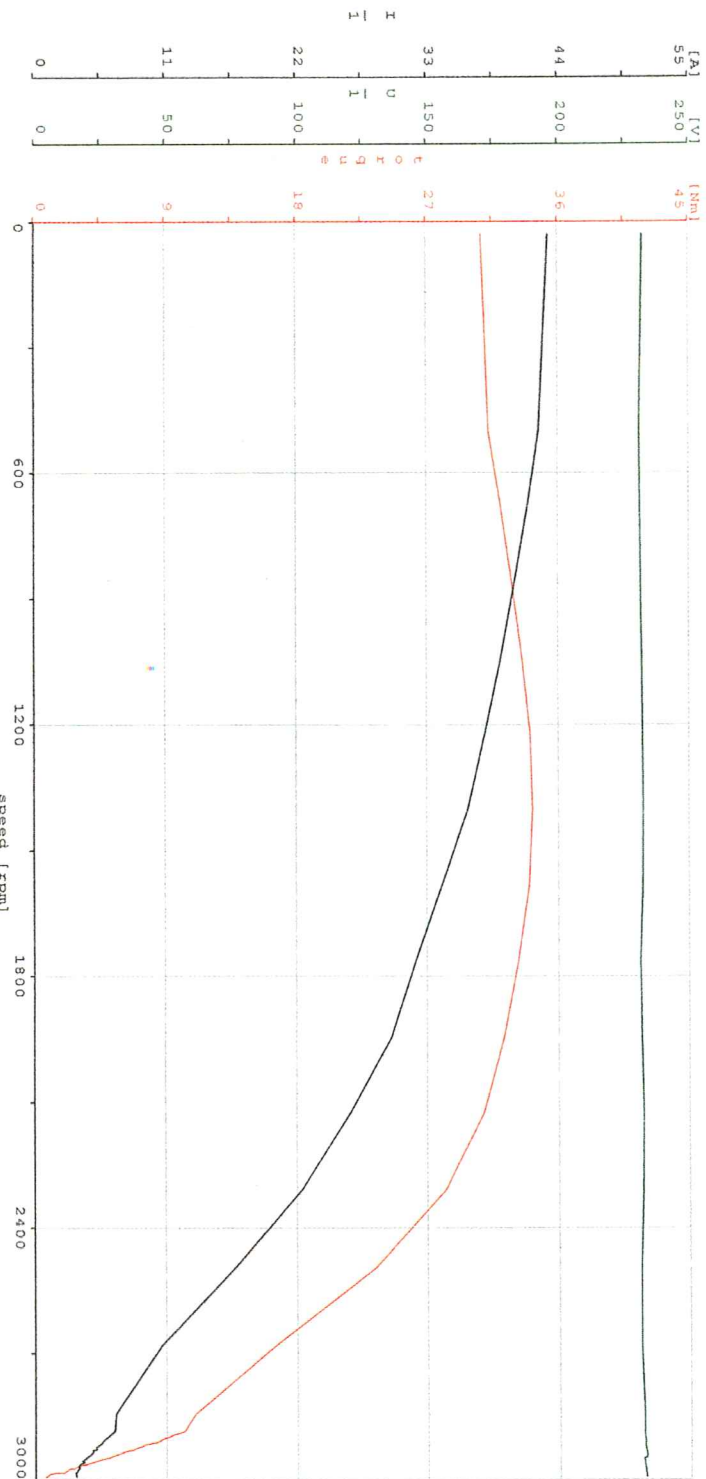
Şekil D.2 : Birinci rotor için bir kafes çubuğu kırık durumda motor özgeçirileri.



Şekil D.3 : Birinci rotor için ardışık iki kares çubuğu kırık durumda motor özgeçirileri.



Şekil D.4 : Birinci rotor için ardışık üç kafes çubuğu kırık durumda motor özdeşleri.



Start Up

U[V]	232.2
I[A]	43.21
M[Nm]	30.80

Pull Up

U[V]	231.0
I[A]	42.40
M[Nm]	31.30
speed[rpm]	500

Break Down

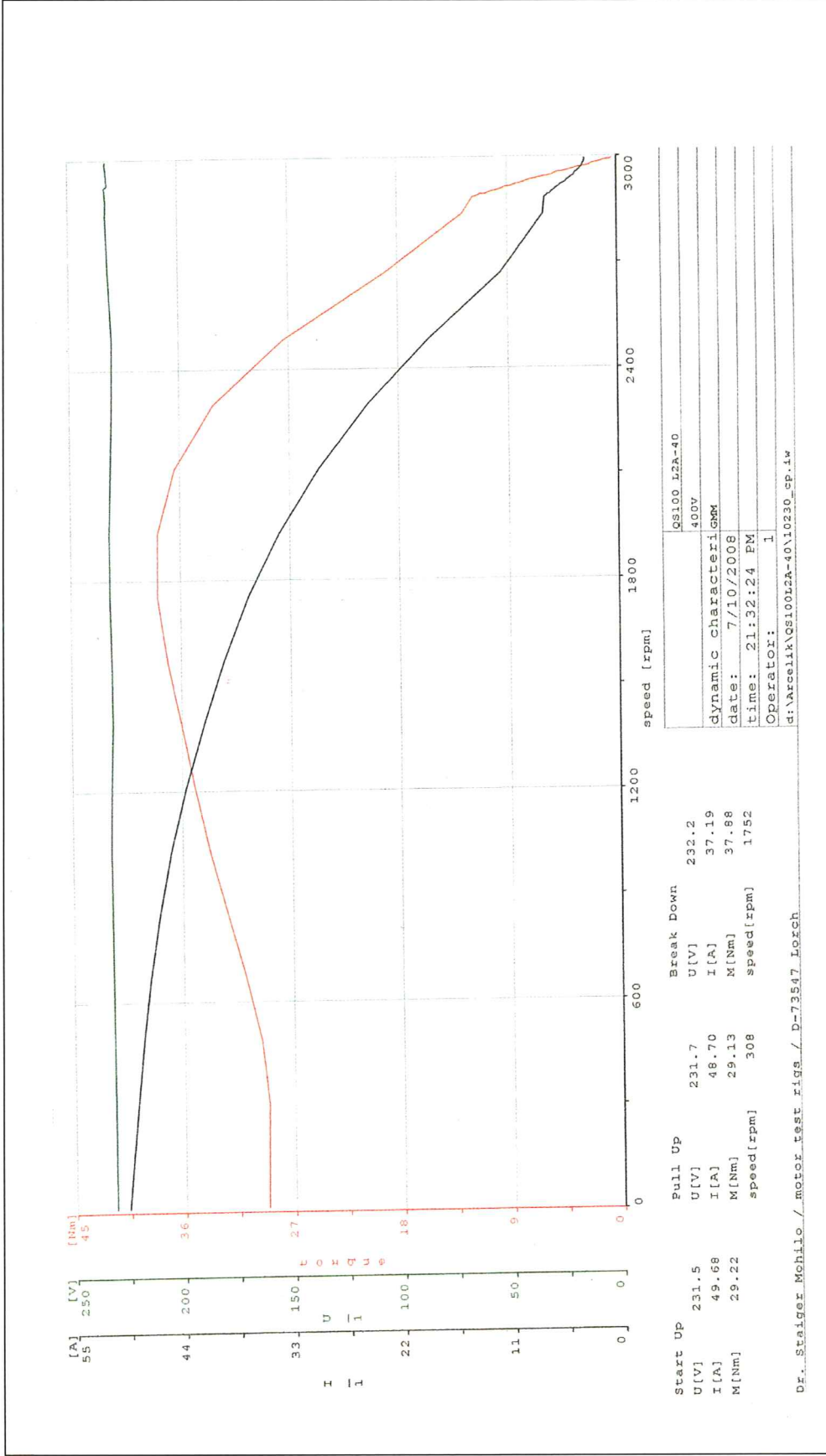
U[V]	232.3
I[A]	36.42
M[Nm]	34.25
speed[rpm]	1402

dynamic Characteristic

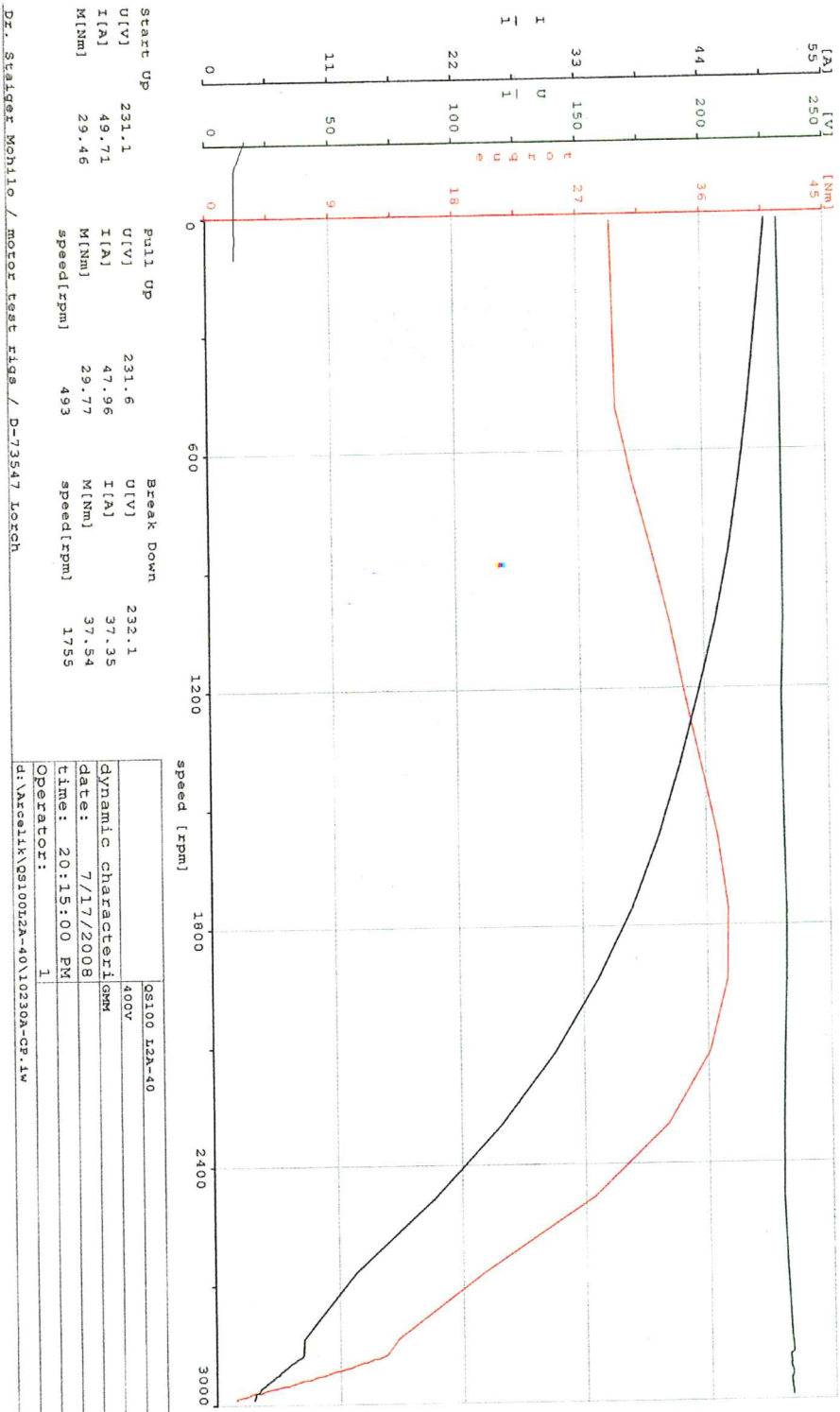
date:	7/9/2008
time:	22:23:32 PM
Operator:	1

di:\arcelik\GS100L2A-40\10227D_CP.1w

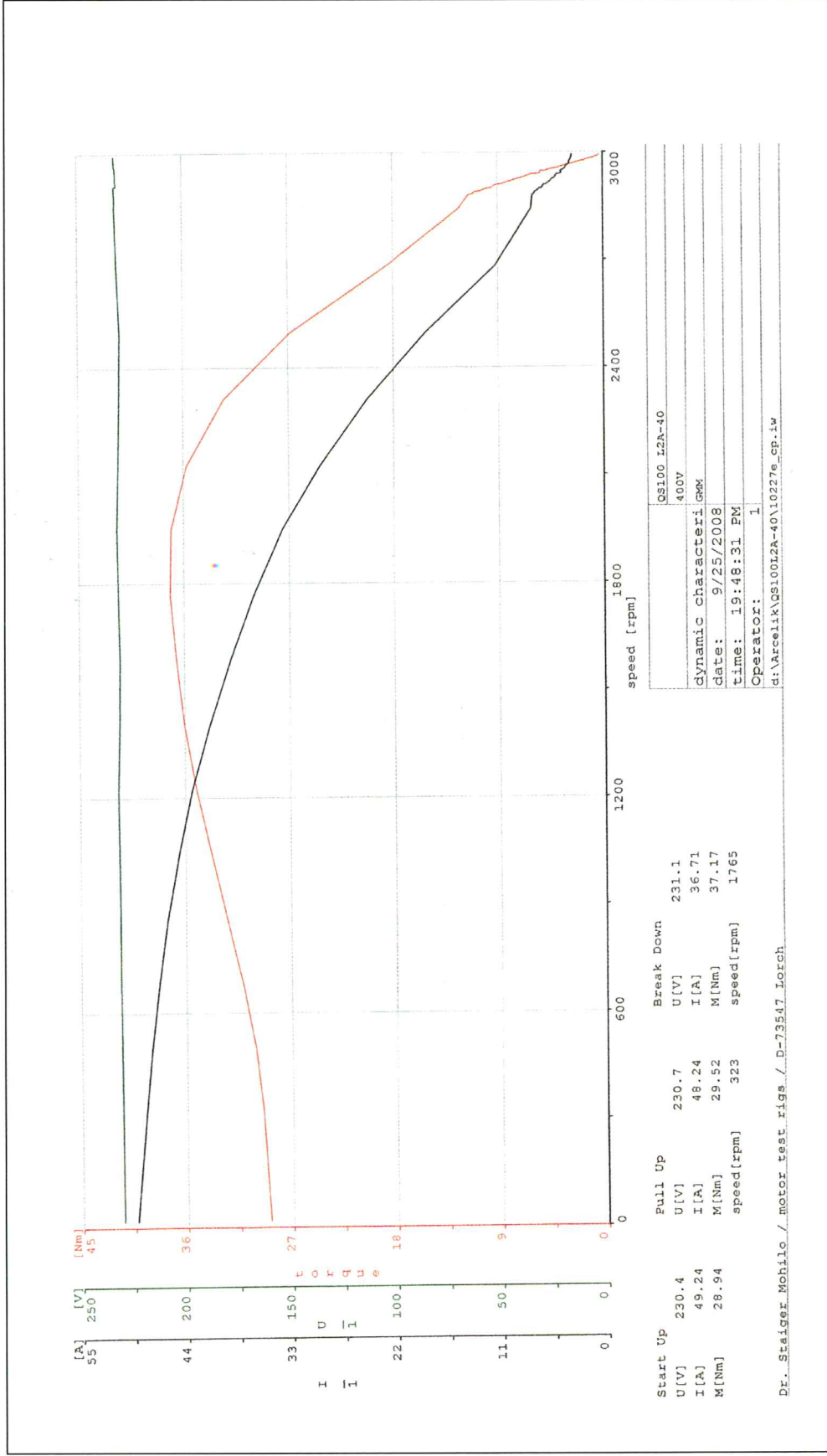
Şekil D.5 : Birinci rotor için ardışık dört kafes çubuğu kırık durumda motor özgeçirileri.



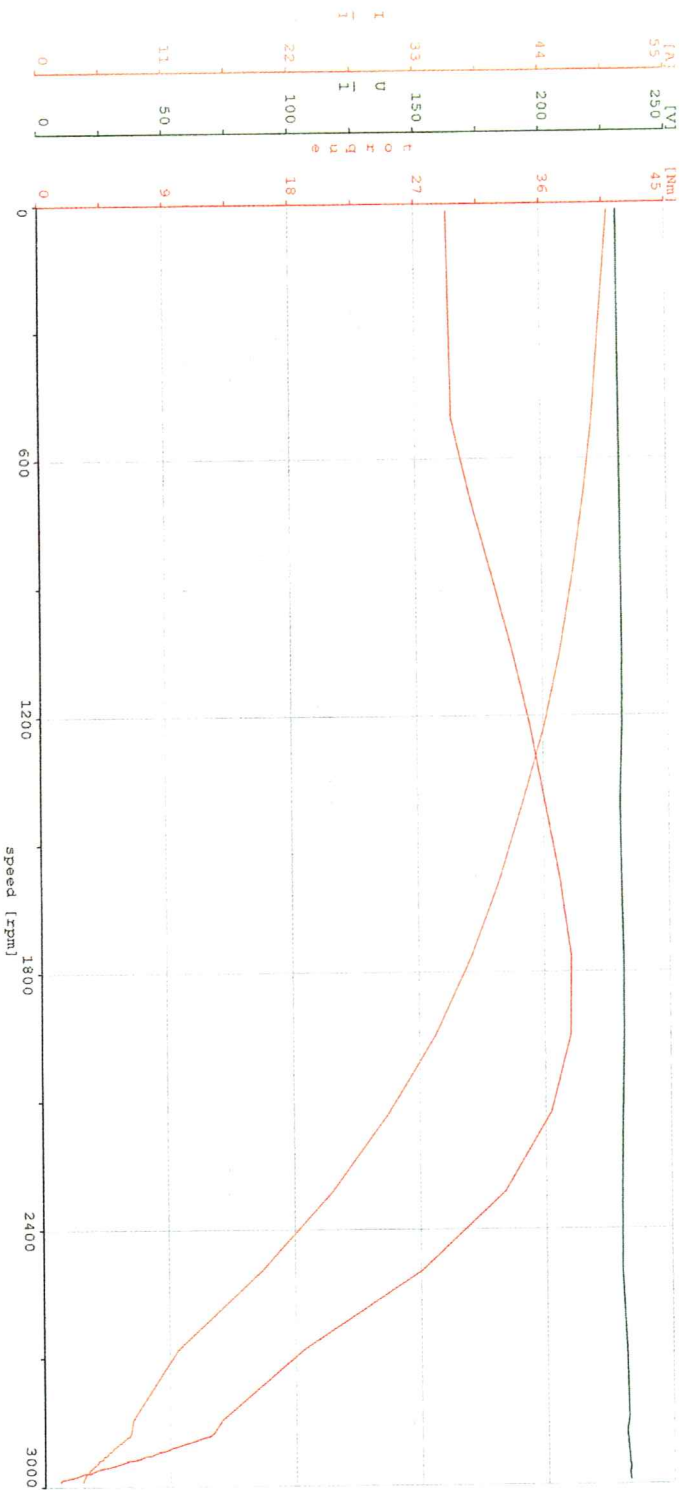
Şekil D.6 : İkinci rotor için sağlam durumda motor özgeçirileri.



Şekil D.7 : İkinci rotor için bir kafes çubuğu kırık durumunda motor özgeçirileri.



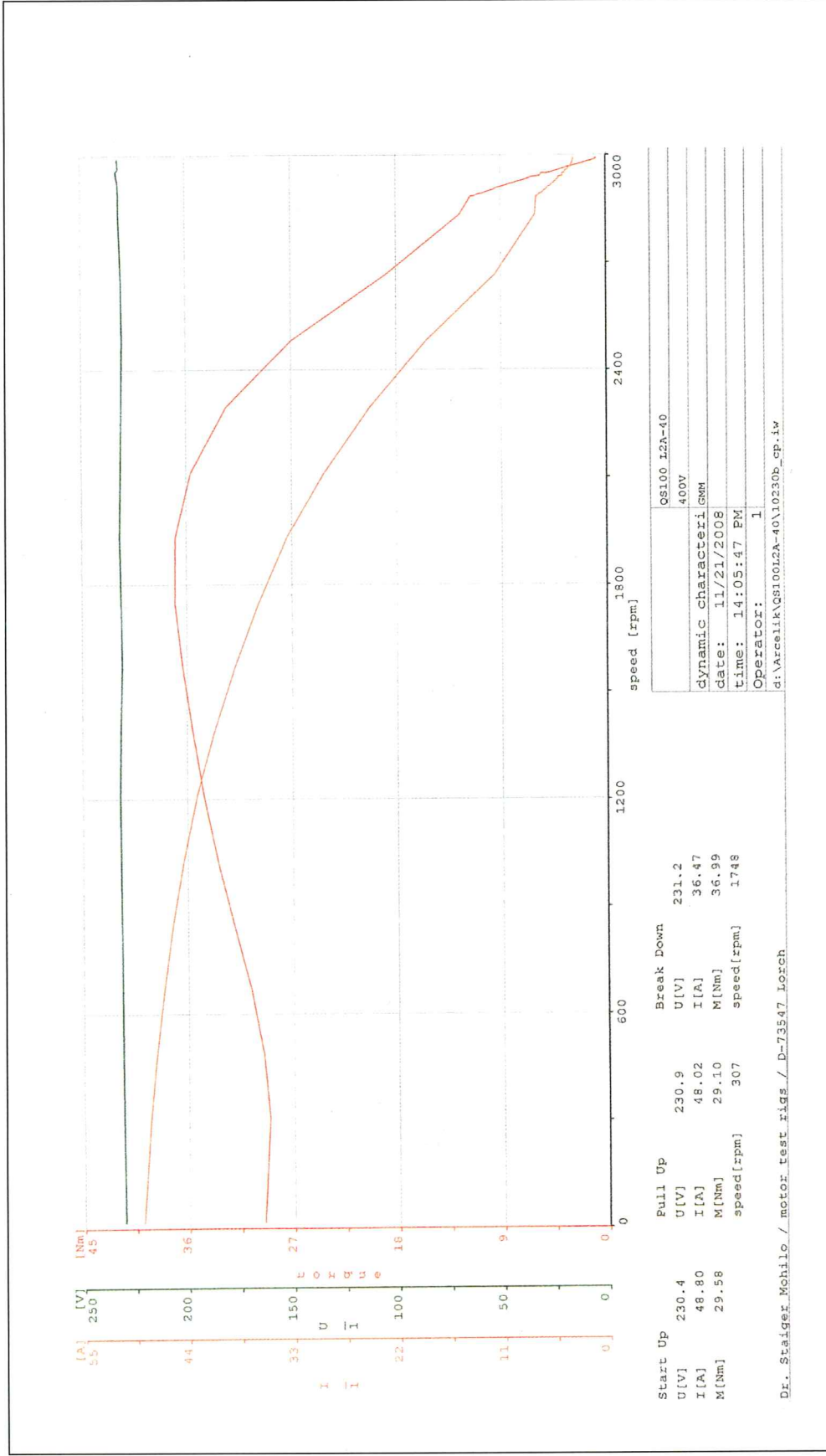
Şekil D.8 : İkinci rotor için herhangi iki kafes çubuğu kırık durumda motor özgeçirleri.



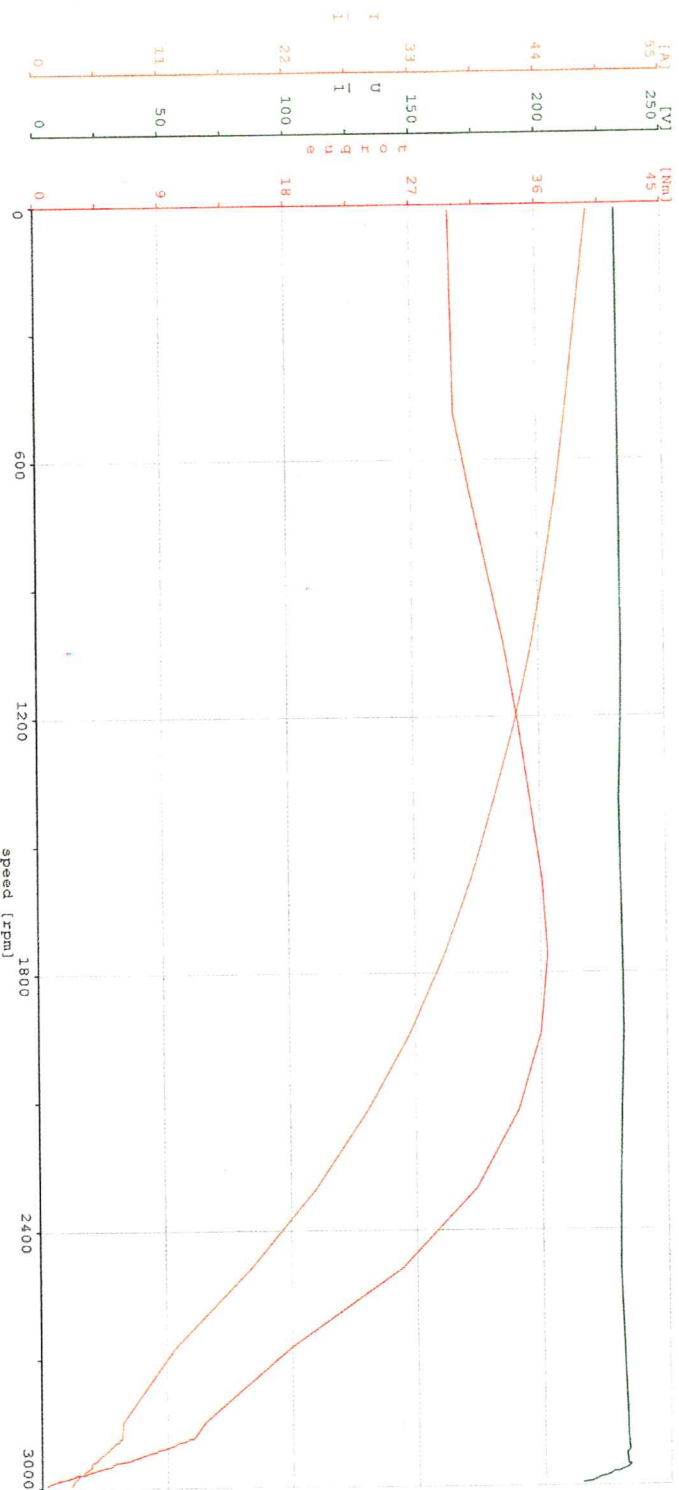
Dr. Steiger Mohilo / motor test rig / D-73547, Lorch

dynamic characteri	QSI00 12A-40
date: 11/12/2008	400V
time: 9:00:58 AM	
Operator:	
	1
	d:\Vercell\QSI0012A-40\10453_CP.lw

Şekil D.9 : Dördüncü rotor için sağlam durumda motor özgeğirleri.



Şekil D.10 : Dördüncü rotor için bir kafes çubuğu kırık durumda motor özdeşimleri.



Dr. Staiger Mohilo / motor test rig / D-73547 Jorich

dynamic characteri	400V
date:	11/21/2008
time:	15:13:40 EM
Operator:	1
d:\Arceik\OS10012A-40\10230C_CP_1W	

Şekil D.11 : Dördüncü rotor için simetrik iki kafes çubuğu kırık durumda motor özgeğirleri.

ÖZGEÇMİŞ

VESİKALIK
FOTO

Ad Soyad: Murat İMERYÜZ

Doğum Yeri ve Tarihi: 05.05.1967, Ankara

**Adres: İTÜ Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü
Maslak/İstanbul**

**Lisans Üniversite: İTÜ Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği
Bölümü**

**Yüksek Lisans: İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Anabilim Dalı, Elektrik
Programı**

Yayın Listesi:

- İmeryüz, M., Çetin İ., 1991: Senkronlanan Asenkron Motor İncelemesi ve Kullanılabilirlik Analizi, *Elektrik Mühendisliği 4. Ulusal Kongresi*, İzmir, 13-16.
- İmeryüz, M., Cebeci, S.E., 1993: Üç Fazlı Kafesli Bir Asenkron Motorun Tek Faza Kalmada İşletme Özellikleri, *ELMEKSEM '93*, 185-192.
- Sarıkaya, P., İmeryüz, M., 1997 : Kafesli Asenkron Makinelerde Isısal Eşdeğer Devrenin Modellenmesine Yönelik Bir Çalışma, *ELMEKSEM'97*, 213-216.
- İmeryüz, M., Ergene L.,T., Akkaya, H., 1997: Kafesli Asenkron Motörlere Ototransformatörle Yolvermede Geçici Olay İncelemesi, *ELMEKSEM'97*, 217-222..

