



T.C.

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SİNCAP KAFESLİ ASENKRON MOTORLARDA KAFES ARIZALARININ MOTOR PERFORMANSINA ETKİLERİ

Hayri ARABACI

DOKTORA TEZİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Anabilim Dalını

Hayri ARABACI-Haziran 2011
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

DOKTORA TEZİ

SİNCAP KAFESLİ ASENKRON MOTORLARDA KAFES ARIZALARININ MOTOR PERFORMANSINA ETKİLERİ

Hayri ARABACI

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Osman BİLGİN

2011, 162 Sayfa

Jüri
Danışman Yrd. Doç. Dr. Osman BİLGİN
Prof. Dr. Saadetdin HERDEM
Doç. Dr. Mehmet ÇUNKAŞ
Doç. Dr. Abdullah ÜRKMEZ
Doç. Dr. Erkan MEŞE

Bu çalışmada dalgıç asenkron motorlarda sincap kafesi arızalarının motor performansına yaptığı etkiler incelenmiş ve bu etkiler arıza büyüklüğüne göre kademelendirilmiştir. Asenkron motorlardaki rotor arızalarıyla ilgili yapılan literatürdeki çalışmalarda genellikle arızaların belirtileri veya teşhisi üzerinde durulmuştur. Motor performansı ile ilgili çalışmalar mevcut olmasına rağmen rotor arızalarının motor performansına yaptığı etkiler hakkındaki çalışmaların sayısı sınırlıdır. Literatürden farklı olarak bu çalışmada, rotor arızalarının güç faktörüne ve motor verimine etkilerinin incelemeleri yapılmış ve bu etkiler kademelendirilmiştir. Ayrıca rotor kafes arızaları içerisine kısa devre halkası arızasının dahil edilmesi ve analizler için derin kuyu asenkron motorlarının kullanılması açısından literatürden farklıdır. Bu çalışmada dört farklı büyüklükte motor kullanılmıştır. Motorların her biri, sağlam ve beş farklı rotor arızası olmak üzere 6 farklı durumda incelenmiştir. Analizler için benzetimler ve deneyler yapılmıştır. Benzetimler için CEDRAT firmasının FLUX programı kullanılmıştır. Deneylerde dalgıç motor üretim fabrikasında oluşturulan deney düzeneği kullanılmıştır. İncelemeler, arızaların kararlı durumdaki, yol alma sürecindeki ve hız-moment eğrisi üzerindeki etkileri olmak üzere üç ana bölümde yapılmıştır. Performans kapsamında; motor akımı, momenti, hızı, güç faktörü ve verimi değerlendirilmiştir. Motor hızının hesaplanmasında Hızlı Fourier Dönüşümü kullanılmıştır. Hız hesabında kullanılan yöntem itibariyle literatürden ayrılmaktadır. Sonuçlar, etkilerin dalgalanma ve ortalama değerde azalma olarak ortaya çıktığını göstermiştir. Analizler ayrı ayrı ve genelleştirilerek yapılmış ve arıza büyüdükçe motor performansına yaptığı etkinin üstel olarak arttığı, bunun motor büyüklüne göre değişmediği ve halka kırık arızasının kırık çubuk arızasıyla benzer etkiler yaptığı ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Asenkron motor, derin kuyu motorları, hız-moment eğrisi, kararlı durum analizi, rotor arızaları, performans analizi, yol alma süreci analizi.

ABSTRACT

Ph.D THESIS

THE EFFECTS OF CAGE FAULTS ON MOTOR PERFORMANCE IN SQUIRREL CAGE INDUCTION MOTORS

Hayri ARABACI

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF SELÇUK UNIVERSITY
THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY
IN ELECTRICAL-ELECTRONICS ENGINEERING

Advisor: Assist. Prof. Dr. Osman BİLGİN

2011, 162 Pages

Jury
Advisor Assist. Prof. Dr. Osman BİLGİN
Prof. Saadetdin HERDEM
Assoc. Prof. Mehmet ÇUNKAŞ
Assoc. Prof. Abdullah ÜRKMEZ
Assoc. Prof. Erkan MEŞE

In this study effects of squirrel cage faults on submersible induction motor performance were investigated and these effects were ranked according to fault size. Studies on rotor faults in the literature have generally focused on diagnostics and symptoms of these faults. Studies about motor performance are available in the literature. But the number of studies about effects of rotor faults on motor performance is limited. Unlike the literature in this study, these effects on motor power factor and efficiency were investigated and effects of rotor faults on motor performance were ranked according to fault size. Furthermore, including of end-ring fault to rotor faults and using of submersible induction motor in investigations makes different this study from others. Four different motors were used for the simulation and experimental studies under healthy and five different rotor faults conditions. FLUX package program was used for simulations. Experiments were done in submersible induction motor factory by using test system. The effects of faults were investigated in three sections; analyzing of steady-state condition, analyzing of start-up duration and analyzing of speed-torque curve. The stator current, torque, power factor, speed and efficiency of motor are addressed within the context of performance. The variations of these outputs are examined in the time domain. So, the effects of fluctuations and mean value of the outputs are analyzed and ranked according to rotor fault size.

Keywords: Analysis at during start-up, induction motor, performance analysis, rotor faults, speed-torque curve, steady-state analysis, submersible induction motors.

ÖNSÖZ

Bu tezin hazırlanmasının her aşamasında çalışmalarımı büyük bir titizlikle yönlendiren danışmanım Yrd. Doç. Dr. Osman BİLGİN'e, tez izleme komitesi üyeleri Prof. Dr. Saadetdin HERDEM'e ve Doç. Dr. Mehmet ÇUNKAŞ'a, bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım bölümümüz değerli öğretim üyeleri ve elemanlarına teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca gösterdiği sabır ve anlayıştan dolayı eşime, en olumsuz anlarda bile bütün iş stresini bir anda unutmamı sağlayan oğluma, maddi ve manevi her türlü destekleriyle yanımda olan arkadaşlarıma teşekkürü borç bilirim.

Hayri ARABACI

KONYA-2011

İÇİNDEKİLER

TEZ BİLDİRİMİ iii

ÖZET iv

ABSTRACT v

ÖNSÖZ vi

İÇİNDEKİLER vii

SİMGELER VE KISALTMALAR x

1. GİRİŞ 1

1.1. Tezin Amacı ve Önemi 1
1.1.1. Tezin organizasyonu 3

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI 4

3. ASENKRON MOTORLAR VE ROTOR ARIZALARI 10

3.1. Asenkron Motorun Yapısı 10
3.1.1. Stator 11
3.1.2. Rotor 12
3.1.2.1. Bilezikli rotor 12
3.1.2.2. Sincap kafesli rotor 13
3.2. Asenkron Motor Arızaları ve Etkileri 13
3.2.1. Stator arızaları 13
3.2.2. Rulman ve yatak arızaları 14
3.2.3. Eksen kayıklığı arızaları 14
3.2.4. Rotor arızaları 14
3.2.4.1. Rotor arızalarının oluşumu 15
3.2.4.2. Rotor arızalarının etkileri 16

4. ASENKRON MOTOR PERFORMANS ANALİZİ 17

4.1. Kararlı Durum Analizi 18
4.1.1. Kararlı durumda motor akımlarının analizi 19
4.1.2. Kararlı durumda motor momentinin analizi 20
4.1.3. Kararlı durumda motor hızının hesabı ve analizi 20
4.1.4. Kararlı durumda motor güç faktörü hesabı ve analizi 21
4.1.5. Kararlı durumda motor mekaniki gücü hesabı ve analizi 22
4.1.6. Kararlı durumda motor verimi hesabı ve analizi 23
4.2. Motorun Yol Alma Süreci Analizi 24
4.3. Hız-Moment Eğrisi Analizi 24

5. SİNCAP KAFESLİ ASENKRON MOTORLADA ROTOR ARIZALARININ BENZETİMİ 25

5.1. Asenkron Motorun Rotor Çubuk ve Stator Faz Sargıları Sayına Bağlı Matematiksel Modeli 25

5.2. Asenkron Motorun Flux Programı ile Benzetimi 31
5.2.1. Sargı sonu indüktansı ve direncinin hesabı 31
5.2.2. Kısa devre halkası indüktansı ve direncinin hesabı 33
5.2.3. Atalet momenti ve sürtünme katsayısının hesabı 34
5.2.4. Motorların kesit çizimleri ve malzemelerin atanması 34
5.2.5. Elektriksel devreler ve elemanları 37
5.2.6. Rotor arızalarının benzetimi 39
5.2.7. Benzetimin gerçekleştirilmesi 41
5.3. Benzetim Sonuçlarının Doğrulanması 42

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR 43

6.1. Kullanılan Deney Düzeneği 43
6.2. Motor Verilerinin Okunması ve Kaydedilmesi 47
6.3. Rotor Arızalarının Oluşturulması 50
6.3.1. Yüksek dirençli çubuk arızası 51
6.3.2. Kırık çubuk arızası 52
6.3.3. Kısa devre halkası arızası 53

7. BEZETİM SONUÇLARI 55

7.1. Kararlı durum için benzetim sonuçları 55
7.1.1. Kararlı durumda motor akımları 55
7.1.2. Kararlı durumda motor momentleri 63
7.1.3. Kararlı durumda motor hızları 65
7.1.4. Kararlı durumda motor güç faktörleri 66
7.1.5. Kararlı durumda motor mekaniki güçleri 68
7.1.6. Kararlı durumda motor verimleri 70
7.2. Yol alma durumu için benzetim sonuçları 71
7.2.1. Yol alma sürecindeki motor akımları 72
7.2.2. Yol alma sürecindeki motor momentleri 79
7.2.3. Yol alma sürecindeki motor hızları 87
7.3. Hız-moment eğrisi için benzetim sonuçları 88

8. DENEYSEL SONUÇLAR 91

8.1. Kararlı durum için deneysel sonuçlar 91
8.1.1. Kararlı durumda motor akımları 91
8.1.2. Kararlı durumda motor momentleri 101
8.1.3. Kararlı durumda motor hızları 102
8.1.4. Kararlı durumda motor güç faktörleri 104
8.1.5. Kararlı durumda motor mekaniki güçleri 106
8.1.6. Kararlı durumda motor verimleri 107
8.2. Yol alma durumu için deneysel sonuçlar 109
8.2.1. Yol alma sürecindeki motor akımları 109
8.2.2. Yol alma sürecindeki motor momentleri 118
8.2.3. Yol alma sürecindeki motor hızları 127
8.3. Hız-moment eğrisi için deneysel sonuçlar 129

9. BEZETİM VE DENEYSEL SONUÇLARIN ANALİZİ VE TARTIŞMA..... 132

9.1. Kararlı Durum Analizi 132
9.1.1. Motor akımları 132
9.1.2. Motor momentleri 133
9.1.3. Motor hızları 136
9.1.4. Motor güç faktörleri 138
9.1.5. Motor mekaniki güçleri 141
9.1.6. Motor verimleri 143
9.2. Yol Alma Durumu Analizi 145
9.2.1. Yol alma sürecindeki motor akımları 145
9.2.2. Yol alma sürecindeki motor momentleri 147
9.2.3. Yol alma sürecindeki motor hızları 148
9.3. Hız-Moment Eğrisinin Analizi 148
9.3.1. Devrilme momenti 149
9.3.2. Kalkınma momenti 150

10. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 152

KAYNAKLAR 157

ÖZGEÇMİŞ 161

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

D_{bo} : Rotor dış çapı (mm).
D_{ext} : Stator iç çapı (mm).
D_i : Kısa devre halkasının iç kenarının mil merkezine olan uzaklığı (m).
D_r : Rotor çubuğunun merkezinin mil merkezine olan uzaklığı (m).
d_w : İletken telin çapı (mm).
e_{eq} : Kısa devre halkasının yüksekliği (m).
f : Şebeke frekansı (Hz).
h_{eq} : Kısa devre halkasının genişliği (m).
h_{ss} : Stator oyuk yüksekliği (mm).
i : Akım (A).
i_e : Kısa devre halkası çevre akımı (A).
I_j : Jeneratör akımı (A).
i_{Nr-1} : Nr'inciden bir önceki rotor çubuğunun yanındaki çevre akımı (A).
J : Atalet momenti katsayısı (kg.m^2).
L : İndüktans (H).
L_{bNr} : Nr'inci rotor çubuğunun indüktansı (H).
L_e : Kısa devre halkası indüktansı (H).
L_{kh} : Kısa devre halkasının k'ıncı bölümünün indüktansı (H/aralık).
L_{ls} : Stator sargısının öz indüktansı (H).
L_{ms} : Stator sargıları arasındaki ortak indüktans (H).
L_{ss} : Sargı sonu indüktansı (H/faz).
n : Motor hızı (d/d).
N_c : Faz başına paralel sargı sayısı.
N_r : Sincap kafesli rotordaki çubuk sayısı.
N_{spp} : Kutup başına stator oyuk sayısı.
N_{ss} : Stator oyuk sayısı.
N_{tpp} : Oyuk başına sarım sayısı.
N_w : Sarımda kullanılan teldeki iletken sayısı.
p_1 : Kutup sayısı.
P_e : Motorun ürettiği güç (W).
P_{giris} : Motorun giriş gücü (W).
P_{mek} : Mekaniki güç (W).
P_o : Motorun boşta çalışmada şebekeden çektiği güç (W).
P_{o_bagli} : Motor jeneratöre bağlı ve jeneratör yüklenmemiş durumda motorun şebekeden çektiği güç (W).
R_b : Rotor çubuğunun direnci (ohm).
R_{bNr} : Nr'inci rotor çubuğunun direnci (ohm).
R_e : Kısa devre halkası direnci (ohm).
R_{en} : Jeneratör endüvi sargı direnci (ohm).
R_{kh} : Kısa devre halkasının direnci (ohm/aralık).
R_s : Stator sargı direnci (ohm).
R_{ss} : Sargı sonu direnci (ohm/faz).
T : Periyot (s).
U_j : Jeneratör gerilimi (V).
U_Δ : Jeneratörün fırçalarında meydana gelen gerilim düşümü (V).
V : Gerilim (V).

η : Verim.
θ_r : Rotorun mekanik dönme açısı (rad).
θ_{er} : Rotorun elektriksel dönme açısı (rad).
μ_o : Manyetik geçirgenlik (H/m).
δ_{er} : Kısa devre halkası malzemesinin özdirenci (ohm.mm^2/m).

Kısaltmalar

SEM : Sonlu Elemanlar Metodu
AC : Alternatif akım
DKASM : Derin kuyu asenkron motoru
HFD : Hızlı Fourier dönüşümü
KDH : Kısa devre halkası
YR : Yüksek dirençli çubuk arızası
HK : Halka kırık arızası
1K : Bir çubuğu kırık arızası
2K : İki çubuğu kırık arızası
3K : Üç çubuğu kırık arızası

1. GİRİŞ

1.1. Tezin Amacı ve Önemi

Endüstride hareket ve tahrik ihtiyacı birçok işlem için kaçınılmazdır. Bu ihtiyacın büyük bir kısmı elektrik motorları ile karşılanmaktadır. Çok çeşitli güçlerde bulunabilmesi, sağlamlığı ve maliyetinin düşük olmasından dolayı bu motorların büyük çoğunluğunu asenkron motorlar oluşturmaktadır. Motorların arızalanmaları durumunda hem kendisi hem de bağlı bulunduğu sistem arızadan olumsuz etkilenmektedirler. Bu durumun getirdiği mali zararlardan dolayı motorlarda arıza teşhisi ön plana çıkmış ve son yıllarda bu alanda birçok bilimsel çalışma yapılmıştır. Asenkron motor arızaları dört kısımda incelenebilir;

- Stator arızaları,
- Rotor arızaları,
- Yatak ve rulman arızaları,
- Eksen kayıklığı arızaları.

Stator arızalarının belirtileri büyük olduğu için teşhisi basit yöntemlerle yapılabilmektedir. Yatak arızaları ve rotor arızaları, genellikle küçük bir oluşumla başlar ve zamanla motor çalıştıkça büyürler. Rotor arızalarının belirtileri basit ölçü aletleriyle ve basit tekniklerle anlaşılması zordur. Bu sebeple son yıllarda arıza tespit algoritmaları üzerinde çok sayıda çalışma yapılmıştır (Yazici ve Kliman, 1999; Branco ve ark., 2003; Cupertino ve ark., 2003; Kim ve ark., 2003; Sun ve ark., 2004; Ayhan ve ark.,2005; Didier ve ark., 2006; Cosido ve ark., 2008). Özellikle çalışmalarda, arızaların erken aşamalarda tespiti üzerinde olduğu görülmektedir. Arızaların başlangıç aşamalarında, rotor arızalarının belirtileri çok küçük olduğundan (Arabacı ve Bilgin, 2010) tespitlerinin doğruluk oranları belirli değerlerin üzerine çıkmamaktadır. Oluşturulan teşhis sistemleri, arızaları genellikle belirli bir büyüklüğe ulaştığı zaman teşhis edebilmektedir. Bu tür sistemlerin henüz ekonomik hale getirilmiş bir ürünü bulunmadığından bu arızalara, genellikle arızanın etkileri duyu organları ile hissedilebilir büyüklüğe eriştiği zaman müdahale edilir durumdadır. Bu aşamaya kadar motor ve bağlı bulunduğu sistemin çalışması normal gibi göründüğünden dolayı rotor arızalarının motor performansına etkisi dikkate alınmamıştır. Bu alandaki çalışmalar genellikle arıza teşhisi üzerinde yoğunlaşmıştır. Bu doktora çalışmasında rotor kafes arızalarının başlangıç aşamasından itibaren fark edilebilirlik seviyesine kadar ulaşmış

arızaları ele alarak her bir arıza büyüklüğünün motor performansına yapmış olduğu etkileri incelemek ve motorun performansına etkilerini arıza büyüklüğüne göre derecelendirme amacını taşımaktadır.

Rotor kafes arızalarının hissedilebilir belirtilerinin erken aşamalarda gürültülü çalışma ve sarsıntılı çalışma olduğu düşünüldüğünde derin kuyu pompalarında bu belirtilerin hissedilmesi mümkün olmamaktadır. Bu sebeple derin kuyu pompalarında kullanılan asenkron motorlarda rotor arızalarının performansa etkisi daha bir önem kazanmaktadır. Bu sebeple bu çalışmada dalgıç asenkron motorun sincap kafesi arızaları üzerinde durulmuştur.

Rotor arızaları üzerine yapılan çalışmalarda genellikle küçük güçteki motorlar üzerinde inceleme yapılmıştır. Bu doktora çalışmasında dört farklı büyüklükte motor (10, 30, 40 ve 50 HP) kullanılarak motor gücüne göre de arızaların etkileri incelenmiştir.

Literatürdeki çalışmaların çoğu kırık çubuk arızaları üzeri olmuştur. Başlangıç aşamasının önemli olduğu bu tür arızaların başlangıcı sayılan çubuktaki reaktans düşüklüğü ve kısa devre halkası arızası bu doktora çalışmasında literatürden farklı olarak ayrıca incelenmiştir. Rotor arızalarının başlangıç aşamasında fark edilebilir düzeye kadarki sürecinin incelenmesi için bu çalışmada beş farklı arıza durumu ve sağlam durum olmak üzere altı farklı arıza durumu incelenmiştir. İncelenilen arıza durumları; bir çubuğu yüksek reaktanslı rotor, bir çubuğu kırık rotor, iki çubuğu kırık rotor, üç çubuğu kırık rotor ve kısa devre halkası kırık rotordur.

Rotor kafes arızalarının motor performansına yaptığı etkiler üç temel bölümde incelenmiştir; yol alma sürecindeki etkileri, hız-moment eğrisine etkileri ve kararlı durumdaki performansına etkileridir. Bu üç ayrı motor çalışma durumunda arızaların etkilerini incelemek için motor yol alma sürecinde ve kararlı durumda; her bir motor, 6 farklı durum için benzetimler ve deneyler yapılmıştır. Deneyler dalgıç motor üretim fabrikasında oluşturulan deney seti vasıtasıyla yapılmıştır. Her bir arıza durumu için motorlar bütün üretim aşamalarından ayrı ayrı geçirilerek imal ettirilmiştir. Böylece birleşik arızalarının önüne geçilmiştir. Benzetimler CEDRAT firmasının yazılımı olan Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) tabalı Flux programı ile yapılmıştır.

Motor hızının ölçümü literatürde üç ayrı yöntemle yapılmaktadır(Petrella ve Tursini, 2008). Bunlar; periyot ölçümü ile hız hesaplama, darbe sayımı ile hız ölçümü ve belirli periyotlarda darbe sayımı ile hız ölçümü şeklindedir. Literatürden farlı olarak bu doktora çalışmasındaki deneylerde motor hızının hesaplanmasında Hızlı Fourier

Dönüşümü (HFD) kullanılmıştır. Hız-moment eğrisinin hesaplamasında aynı yöntem kullanılmıştır.

Kararlı durum performans analizinde performans kapsamı içerisinde; motor akımı, momenti, hızı, güç faktörü ve verimi değerlendirilmiştir. Motorların benzetim ve deney sonuçları kullanılarak her bir motor ve bu motorlara ait arızalı ve sağlam durumlar için sonuçların analiz edilmesi bu tez çalışmasının temel amacıdır.

1.1.1. Tezin organizasyonu

Tezin birinci bölümü; tezin amacını ve önemini anlatan giriş bölümünden oluşmaktadır.

İkinci bölümde kaynak araştırması bulunmaktadır.

Üçüncü bölümünde, incelenilen arızaların daha iyi anlaşılması açısında asenkron motorun yapısı ve parçalarına değinilmiştir. Ayrıca asenkron motor arızaları, rotor arızalarının oluşumu ve etkileri anlatılmıştır.

Dördüncü bölümde, motor performansının kapsamı ve performansın inceleneceği üç farklı motor çalışma durumu anlatılmıştır.

Beşinci bölümde, asenkron motorun benzetiminde temel alınan matematiksel model, benzetim için kullanılan Flux programı ve program için gerekli parametrelerin hesabı anlatılmıştır.

Altıncı bölümde, deneysel çalışma, deney düzeneği ve arızaların oluşturulması bulunmaktadır.

Yedinci bölümde, benzetim sonuçları; kararlı durum, yol alma süreci ve hız-moment eğrisi için ayrı ayrı ve grafiksel olarak verilmiştir.

Sekizinci bölümde, deneysel sonuçlar; kararlı durum, yol alma süreci ve hız-moment eğrisi için ayrı ayrı ve grafiksel olarak verilmiştir.

Dokuzuncu bölümde, sonuçların analizleri ve analizler sonunda ulaşılan noktalar ve tartışmaları bulunmaktadır.

Onuncu bölümde, genelleştirilmiş ifadeleriyle çalışmada ulaşılan sonuçlar ve gelecek çalışmalar için öneriler yer almaktadır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Asenkron motor performans analizleri ilk olarak eşdeğer devre üzerinden yapılan çalışmalarla başlamıştır. Agarwal (1960) motor performans analizlerini eşdeğer devre üzerinden yapmıştır. Sincap kafesi yapısındaki rotor çubuklarında meydana gelen kayıpları da hesaplayabilecek bir eşdeğer devre oluşturmuştur. Bu şekilde rotor çubuklarının dirençlerinin ve indüktanslarının performansa etkilerini incelemiştir. Oluşturduğu eşdeğer devre rotordaki toplam kayıpları dikkate almaktadır ve kafes arızalarının etkilerini incelemeye uygun değildir.

Ito ve ark. (1981) rotor çubuklarını da kapsayan analitik bir model oluşturmuşlardır. Böylece rotor çubuk şekli ve yerleşimi ve bunların motor manyetik akısındaki değişmelerini incelemişlerdir. Çalışmada stator oyuklarının ve rotor şeklinin motor performansına etkileri asıl olarak incelenmiştir. Bunun yanında çok sayıda (13) kırık çubuk durumu için manyetik akı değişimi ve buna bağlı olarak hava aralığındaki manyetik değişimi incelemişlerdir. Bu çalışmada kırık çubukla ilgili sadece hava aralığındaki manyetik akıya yaptığı etki incelenmiştir. Ancak bu çalışma kırık çubuğun etkilerini daha detaylı incelemeye olanak sağlayacak motor modelinin oluşturulabileceğini göstermesi açısından önemlidir.

Bilgisayarlardaki donanımsal ve yazılımsal gelişmeler asenkron motorun yoğun işlem gerektiren matematiksel modelinin çözümünü olanaklı hale getirmiştir. Baldassari ve Demerdash (1992) kararlı durum modeli ve sonlu elemanlar yöntemini birleştiren bir model oluşturmuşlardır. Bu modelle rotor çubuk akımlarını ve gerilimlerini hesaplama imkanı sağlanmıştır. Böylece rotor kafesi geometrik yapısının etkileri hesaplamalara dahil edilir hale gelmiştir. Ayrıca bu model ile kırık rotor çubuğu arızalarının etkilerinin incelebileceğine ve bunların bu arızalarının teşhisinde kullanılabileceğine vurgu yapılmıştır. Bu makalede kırık çubukla ilgili bir çalışma yapmasalar da bu yıllardan sonra kırık çubuk arızalarının teşhisi üzerine çalışmalar yoğunlaşmıştır.

Bonnett ve Soukup (1992) çalışmalarında sincap kafesli asenkron motorun stator ve rotor arızalarının sebepleri ve motor ömrüne etkilerini detaylı bir şekilde açıklamışlardır. Ancak deneysel bir çalışmaları bulunmamaktadır. Rotor arızalarının etkilerinde bir derecelendirme de yapmamışlardır.

Fiser ve ark. (1995) sincap kafesli asenkron motorun matematiksel modelini oluşturarak kırık rotor çubuklarının moment ve motor akımı üzerine etkilerini incelemişlerdir. Benzetim sonuçlarını test sonuçları ile karşılaştırarak doğruluk

değerlerini göstermişlerdir. Ancak buradaki deneysel çalışma sadece benzetim sonucunu doğrulamak için yapılmıştır. Kırık rotor çubuğu arızalarının moment ve akım üzerine etkilerinde bir derecelendirme yapılmamıştır.

Luo ve ark. (1995) asenkron motorların dengesiz çalışma ve stator sargısı arızalarını simüle etmek için birleştirilmiş bir devre modelini oluşturmuşlardır. Modelde parametreler makinenin geometrisinden ve sargı şeklinden hesaplanmış, simetri kullanılmamıştır. Modellerinde diğer motor arızalarının yanı sıra kırık rotor çubuğu arızasını da simüle ederek moment ve hız eğrilerini elde etmişlerdir. Bu çalışma rotor arızalarının simüle edilebilirliğini göstermiştir.

Benbouzid (1998) bu çalışmasında asenkron motorların arızaları ve sinyal analizi ile arıza tespiti konularında genel bir bilgilendirme yapmıştır. Asenkron motor arızalarını üç guruba ayırmıştır: Stator arızaları, Rotor arızaları ve Yatak arızaları. Rotor arızalarının motor akımına yapmış olduğu etkileri anlatmıştır. Ancak bu etkilerden akım ve dolayısıyla motor çıkış parametrelerinin nasıl etkilendiği konularına girmemiştir.

Menolas ve Tegopoulos (1999) sincap kafesli asenkron motorlarda kırık rotor çubuğu ve kısa devre halkası arızalarının analizini yapmışlardır. Yapılan çalışmada sadece bir kırık rotor çubuğu durumu ve halka kırık durumu incelenmiştir. Motor hızı, akımı ve momenti üzerine arızaların etkileri incelenmiş ama kademelendirme veya arıza büyüklüğüne göre etki değişimi konusunda inceleme yapılmamıştır.

Trzynadlowski ve Ritchie (2000) çalışmalarında rotor kafes arızalarının teşhisini gerçekleştiren deneysel sonuçların karşılaştırmasını sunmuşlardır. Burada hat akımı, fazlar arası parçalı aktif güçleri kullanılarak teşhis gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca moment değerlerini hesaplayarak elde etmişlerdir. Güç değerlerinin spektrumlarını incelemişlerdir. Deneysel veriler sadece arıza teşhisi için kullanılmıştır. Bozucu etki olarak motor değerlerini ne derece etkilediği konusunda bir bilgilendirme veya araştırma yapmamışlardır.

Ye ve ark. (2000) çeşitli mekanik arızalara sahip üç fazlı asenkron motorların matematiksel modelini oluşturmuşlardır. İndüktans ve direnç değerleri motor geometrik değerlerinden sargı fonksiyonu metodu ile hesaplanmıştır. Ayrıca model motor manyetik çekirdeğinin lineer olamama durumunu ve manyetik doyumunu da hesaba katmışlardır. Bir, iki ve üç kırık rotor çubuk arızalarını karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Moment ve motor hızı değişim eğrilerini elde etmişler ancak detaylı bir inceleme ve deneysel bir çalışma yapmamışlardır.

Ye ve Wu (2000) asenkron motor arızalarına genel bir bakış yapmışlar ve bu arızaların teşhis tekniklerinden bahsetmişlerdir. Hangi arızanın hangi yöntemle teşhis edilebileceği hakkında bilgi vermişlerdir. Ancak arızaların motor değerleri üzerine ne tür etkilerinin olduğu ve bu etkilerin hangi arızalarda ne büyüklükte olduğu konusuna değinmemişlerdir.

Devanneaux ve ark. (2001) asenkron motor rotor arızalarını simüle etmek için sincap kafesini de içine alan devre modelini yapmışlardır. Gerçekleştirilen matematiksel model geçici durumları da incelemeye olanak sağlamaktadır. Bir kırık çubuklu rotor arızasını simüle etmişler ve motor hızına ve momentine olan etkilerinin eğrilerini elde etmişlerdir. Rotor arızaların etkilerin bir derecelendirme incelemesi yapılmamıştır ve çalışma sadece benzetim olarak yapılmıştır.

Didier ve ark. (2001) asenkron motorlarda kırık rotor çubuğu arızalarının teşhisini yeni bir yöntemle gerçekleştirmişlerdir. Fourier dönüşümüyle bir kırık çubuğun bulanabildiğini ancak yarı-kırık çubuk durumunda bu dönüşümün yeterli olmadığını belirtmişlerdir. Bu durumda Hilbert dönüşümü yapılarak yarı-kırık rotor çubuğu arızalarının tespit edilebildiğini göstermişlerdir. Aynı zamanda bu yöntemle arızasız motor bilgisine ihtiyaç duyulmadığını da bildirmişlerdir. Bu çalışma tamamen yeni bir yöntemin tanıtılması ile ilgilidir. Rotor arızalarının etkileri hakkında bir çalışma yapılmamıştır.

Abbaszadeh ve ark. (2002) asenkron motorlarda kırık rotor çubuğu arızalarının teşhisini Dalgacık Dönüşümü ile gerçekleştirmişlerdir. Burada rotor arızalarının motorda oluşturduğu olumsuz etkilerden bahsedilmiştir. Bu etkilerden başlıcaları;

- ısı artışından dolayı ısıl baskıların yükselmesi ve kayıpların artması,

- dengesiz manyetik çekme ve itme kuvvetlerinden dolayı gürültü ve titreşim oluşması,

- imalattan dolayı çubuk direncindeki farklılıklar dolayısıyla rotor çubuklarındaki dengesiz akımlardır.

Ancak bu belirlenen etkilerin derecelendirilmesi veya arızanın büyüklüğüne göre değişimi konusunda bilgilendirme yapmamışlardır.

Liang ve ark. (2002) asenkron motorların çalışmasının bilgisayar ortamında benzetimi gerçekleştirmişlerdir. Motorun dinamik davranışlarını ve elektromekanik etkileşimlerini incelemişlerdir. Deneysel ve teorisel çalışmaları ayrı ayrı incelemişlerdir. Motor hızındaki ve momentindeki değişmeler karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada ele

aldıkları kırık rotor çubuğu arızası sadece tek çubuk kırık durumudur. Dolayısıyla bir derecelendirme yapılmamıştır.

Hugo ve ark. (2004) yaptıkları çalışmada arıza teşhisi için on-line bir görüntüleme amacıyla kırık rotor çubuğunu temsil edebilecek düzeyde bir matematiksel model oluşturmuşlar ve benzetim yapmışlardır. Ayrıca kırık rotor çubuğu arızasının ilk belirtilerinin fark edilebilirliğinin az olduğunu ancak ikincil arızalarının büyük hasarlara yol açacağını, bu sebeple de arıza tespitinin olabildiğince erken yapılması gerektiğini belirtmişlerdir. Kırık rotor çubuklarının motor içindeki akı çizgilerini bozacağını bununda momenti etkileyeceğini belirtmişlerdir. Ama belirtilen etkilerde rotor arızalarına göre herhangi bir kademelendirme yapmamışlardır.

Nait-Said ve ark. (2004) asenkron motorların reaktif gücünden rotor parametrelerini hesaplayarak rotor çubuk arızalarını teşhis eden yeni bir yöntemi orta koymuşlardır. Burada reaktif gücü H-H metodu ile stator tarafından yapılan ölçümlerle elde etmişlerdir. Reaktif güç ve H parametreleri ile rotor direncini hesaplayarak rotor direncindeki değişimleri incelemişler ve yük momenti değişimlerine göre rotor direncideki değişimleri incelemişlerdir. Kırık rotor çubuğu durumda rotor direncinin artacağı göz önünde bulundurularak direnç değişimlerine bağlı arıza teşhisi yapmışlardır. Çalışma sadece arıza teşhisi üzerinedir.

Yazidi ve ark. (2005) çalışmalarında sincap kafesli asenkron motorların rotor arızalarının teşhisi için motorun kaçak akısından faydalanmışlardır. Rotor arızalarının sebepleri ve bu arızaların nerelere etki yaptığı konusunda bilgilendirme yapmışlardır. Genel olarak belirtileri;

- dengesiz ters emk ve hat akımları,
- moment dalgalılığında artış,
- ortalama momentte düşme,
- kayıplarda artış ve verimde düşme,
- aşırı ısınma,
- akım, gerilim ve akı dalga şekillerinde bozulma

şeklinde sıralamışlardır. Ancak arıza belirtilerinin arızanın büyüklüğüne göre değişimi konusunda bilgi verilmemişlerdir.

Bachir ve ark. (2006) sincap kafesli asenkron motorların stator ve rotor arızalarının temsil edilebileceği yeni bir matematiksel model oluşturmuşlardır. Bu model üzerindeki parametrelerin rotor ve stator arızalarından dolayı etkilenmeleri incelenmiş ve arıza durumunda sahip oldukları değerler ile sağlam durumdaki değerleri

karşılaştırılarak arıza teşhisi yapılmıştır. Bu çalışmada kişisel bir model oluşturulduğu için parametrelerdeki değişmeler genelleştirileme uygun değildir.

Faiz ve ark. (2007) rotor çubuğu arızalarını zaman adımlı SEM ile teşhis etmişlerdir. Bir rotoru kırık ve sağlam motor için motor akımı, manyetik akı dağılımı, manyetik potansiyel vektörü, manyetik akı yoğunluğu, moment ve motor hızını hesaplamışlar ve spektrum analizi yaparak motor titreşimi, gürültüsü, moment dalgalanmasını ve akımlardaki bozulmayı incelemişlerdir. Bu değerleri arıza teşhisi için kullanmışlardır. Çalışma sadece benzetimden ibarettir ve rotor arızalarında bir derecelendirme yapılmamıştır.

Cusidó ve ark. (2008) yaptıkları çalışmada asenkron motor arızalarının teşhisini yeni bir metod ile gerçekleştirmişlerdir. Arıza teşhisinde en yaygın kullanılan yöntemin motor akımı izlenmesi olduğunu ancak akım spektrumunda bulunan arıza belirtilerinin yük ve momentteki değişimlerden etkileneceğini bunun da teşhisi zorlaştıracağını savunmaktadırlar. İyi bir teşhis için zaman içindeki değişimleri de gösteren kısa zamanlı Fourier analizini sonuçlarını çeşitli metodlarla kullanarak teşhis gerçekleştirmişlerdir. Çalışmanın amacı arıza teşhisi olduğu için rotor arızaları ve etkileri konusunda bir inceleme yapılmamıştır.

Ying (2009) kırık rotor çubuğu arızalarının etkileri incelemiştir. Çalışmasında bir kırık ve iki kırık çubuk durumları için motor akımı, momenti, stator demir kayıpları ve hava aralığı manyetik akısı incelenmiştir. Benzetim çalışmasında 2D manyetik alan analizi kullanılmıştır ve deneysel çalışma tek bir motor ile yapılmıştır. Kırık çubuk arızalarının etkileri ile ilgili bir derecelendirme yapılmamıştır. Performans kapsamındaki değerlendirmelerinde de motor güç faktörü ve verim bulunmamaktadır.

Faiz ve Ebrahimi (2009) kırık rotor çubuğunun motor akımı ve momenti üzerine yaptığı etkileri incelemişlerdir. Çalışmalarında akım ve moment üzerinde kırık rotor çubuklarından dolayı meydana gelen harmonikler üzerinde durulmuş ve bunların arıza teşhisi için kullanılabilirliği üzerinde yoğunlaşılmıştır. Benzetim çalışmalarında zaman adımlamalı sonlu elemanlar yöntemini kullanmışladır. Bu sayede kırık çubuk arızalarının etkilerinin incelenebilmesi için motor çıkış parametrelerin hem geçici durumlarının hem de kararlı durumda zamanla değişiminin elde edilebileceğini göstermişlerdir.

Nemec ve ark. (2010) kırık rotor çubuğu arızalarını teşhis için arızaların sincap kafesinde oluşturduğu elektriksel ve manyetik bozukluklardan faydalanan yeni bir metot önermişlerdir. Kırık rotor çubuğunun motorun geçici ve kararlı durum performansını

olumsuz etkilediğini bunun manyetik alan dağılımındaki değişmeden kaynaklandığını göstermişlerdir. Rotor arızalarının motor hızında ve momentinde yaptığı değişmeleri özellik olarak kullanarak arıza teşhisi yapmışlardır. Çalışmalarında sadece yedi kırık çubuk arızasını incelemişlerdir. Bu çalışmada amaç arıza teşhis algoritmasındaki işlem yükünü azalmaktır. Bu sebeple rotor arızalarının motor performansına etkileri hakkında doğrudan bir çalışma değildir.

De Angelo ve ark. (2010) çalışmalarında rotor çubuk arızalarının tespitini motor reaktif ve aktif gücünü kullanarak yapmışlardır. Bundan dolayı kırık rotor çubuğu arızalarının motor aktif reaktif gücüne yaptığı etkileri incelemişlerdir. Motorun aktif ve reaktif gücünün frekans eksenindeki kayma değerinin iki katında meydana gelen etkiler incelenerek bu frekans değerleri teşhis için özellik olarak kullanılmıştır. Bu çalışmadaki asıl amaç rotor arızaları ile frekans ekseninde aynı belirtileri gösteren yükteki düşük salınımlı değişmeleri birbirinden ayırt etmektir. Bu sebeple aktif ve reaktif güçteki arızaların yaptığı etkiler performans kapsamında düşünülerek incelenmemiştir.

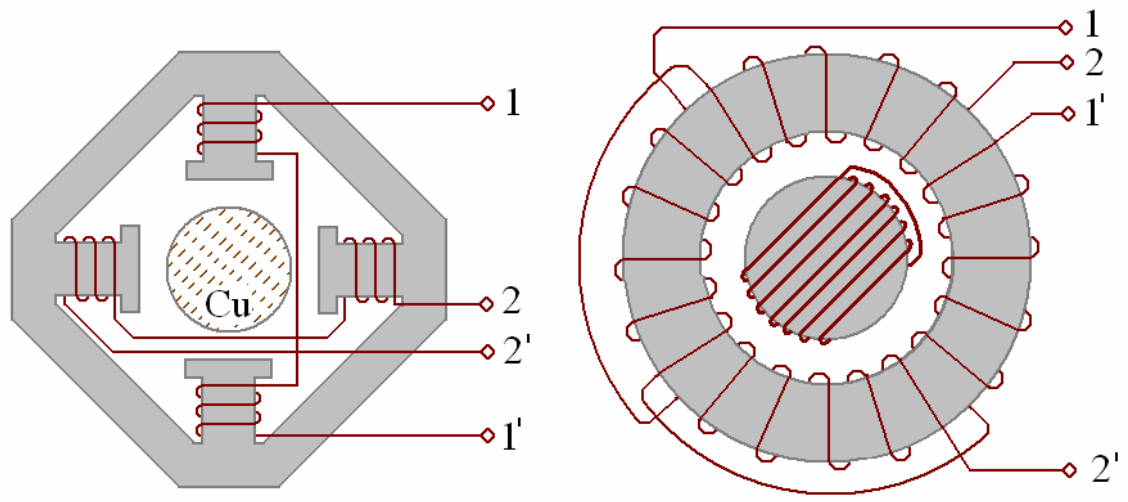
Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak bu tez çalışmasında; rotor arızalarının motor performansı üzerine yaptığı etkiler arızanın büyüklüne göre kademelendirilmiştir. Ayrıca literatürde performans kapsamında özellikle moment ve akım üzerindeki etkilere değinilmiştir. Bu çalışmada bu motor çıktılarının yanında motor hız, mekanik gücü ve özellikle verim, güç faktörü değerleri incelenmiştir. Literatürde bu alandaki çalışmalar geleneksel asenkron motorlar ile yapılmıştır. Bu çalışmada derin kuyu asenkron motorları kullanılmıştır.

3. ASENKRON MOTORLAR VE ROTOR ARIZALARI

İnsanoğlu varlığı boyunca gerek kendisi gerekse kullandığı her türlü araç için harekete ihtiyaç duymuştur. Başlangıçta bu hareket ihtiyacını kendi fiziksel gücü ile karşılamıştır. Daha sonraları sanayinin ve teknolojinin gelişimiyle hareket ihtiyacı tabiatta var olan çeşitli enerjilerden karşılanır olmuştur. Başlarda hareket için ihtiyaç duyulan enerji ısıdan sağlanırken elektriğin bulunması ve elektrik motorlarının keşfinden sonra elektrik enerjisinden sağlanır hele gelmiştir. Günümüzde ev aletlerinden ağır sanayi makinelerine kadar çok geniş bir yelpazede elektrik motorları kullanılmaktadır. Bu motorlar içerisinde en yaygın kullanılanı asenkron motorlardır. Sağlam yapısı, imalatının kolaylığı, maliyetinin düşük olması ve şebekeden üç fazlı ve tek fazlı olarak doğrudan beslenebilir olması gibi birçok neden asenkron motorun yaygın kullanılmasına sebep olmuştur.

3.1. Asenkron Motorun Yapısı

Tarihte Faraday kanunlarının (1831) ve arkasından Maxwell denklemlerinin (1860) ortaya çıkması asenkron motorun icadını hızlandırmıştır. Birbirine yakın tarihlerde Galileo Ferrari (1885) ve Nicola Tesla (1886) bu bilgiler ışığında kendilerine has asenkron motorlarını tasarlayıp patentlerini almışlardır. Her iki motorun da temel yapısı Şekil 3.1'de verilmiştir.

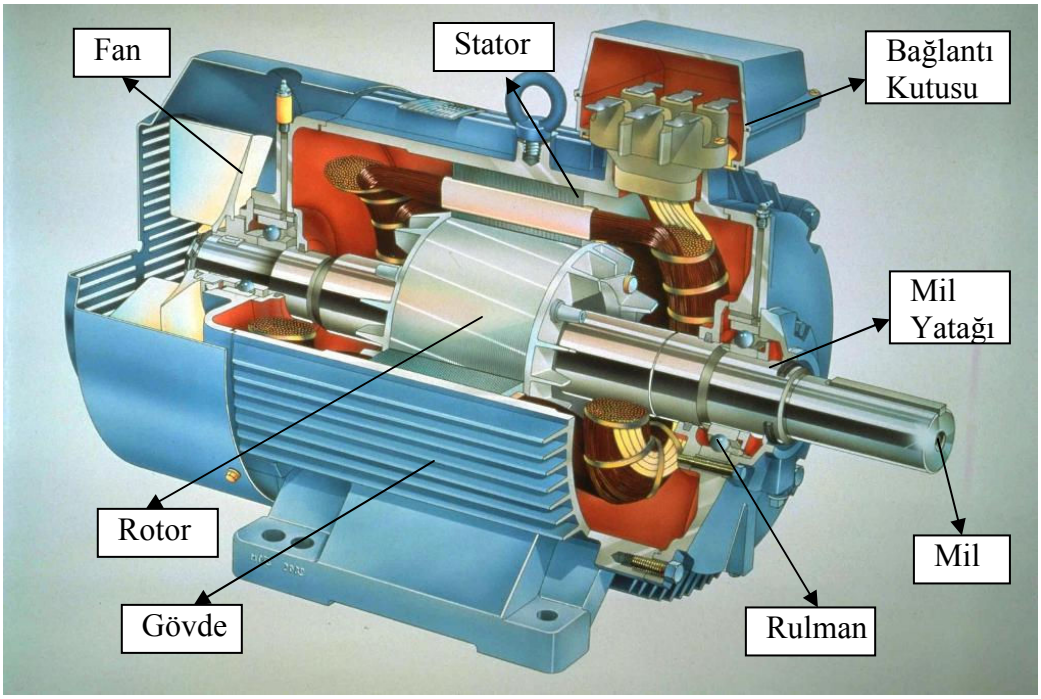


(a) (b)

Şekil 3.1. (a) Ferrari'nin asenkron motorunun yapısı, **(b)** Tesla'nın asenkron motorunun yapısı

Bu iki benzer yapı iki fazlı alternatif gerilimle beslenmektedir ve sabit kısımlarında ikişer sargı bulunmaktadır. Aralarındaki fark; Ferrari rotor kısmını bakır silindirden yapmış, Tesla ise ferromanyetik silindir üzerine kısa devre edilmiş sargı sarmıştır. Temel prensipleri günümüze kadar değişmeden gelen asenkron motorun zamanla yapısında bazı değişikler ile performansı çok daha iyi hale getirilerek modern bir yapıya kavuşturulmuştur (Boldea, 2002).

Asenkron motorlar temel olarak iki ana kısımdan oluşurlar. Bunlar sabit kısım olan stator ve dönen kısım olan rotordur. Bunların dışında, motorun bütün parçalarının bir arada tutulmasını sağlayan motor gövdesi, rotoru gövdeye bağlayan ve sürtünmeleri azaltan rulmanlar, motorun soğutulmasını sağlayan hava akışını oluşturan fan ve elektriksel bağlantıların yapıldığı bağlantı kutusu gibi parçaları da mevcuttur. Asenkron motor ve parçaları Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Asenkron motor parçalarının gösterimi.

3.1.1. Stator

Asenkron motorun çalışma prensibinin temelinde; rotordaki iletkenlerde indüklenen gerilimin kısa devre edilmiş rotor iletkenleri içerisinden akım akmasına sebep olması ve böylece rotorun hareket etmesi bulunmaktadır. Rotor iletkenlerinde gerilim indüklenebilmesi için değişken bir manyetik alan gerekmektedir. Bu manyetik

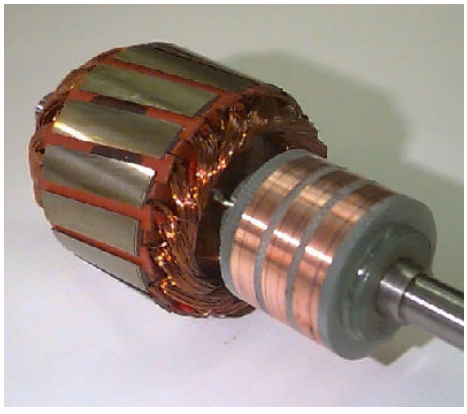
alan statorda bulunan sargılarla oluşturulmaktadır. Üç fazlı asenkron motorlarda statorda üç adet birbirine 120 derece açılarla yerleştirilmiş sargılar vardır. Bu sargılara üç fazlı gerilim uygulandığında, ihtiyaç duyulan dönen (değişken) manyetik alanının oluşması sağlanmış olur. Stator saç gövdesi, belirli kalınlıkta manyetik saçların oyukların şeklini de içeren kalıplarla kesilerek ve elde edilen saç parçalarının aralarının elektriksel olarak yalıtılarak sıkıştırılmasıyla yapılır. Stator sargıları bu stator oyuklarına yerleştirilmektedirler.

3.1.2. Rotor

Rotor asenkron motorun dönen kısmıdır. Üzerinde iletkenler ve statordakine benzer kalıpla üretilmiş manyetik saçlar vardır. Günümüzde rotorlar iki farklı şekilde yapılmaktadır; bilezikli rotor ve sincap kafesli rotor.

3.1.2.1. Bilezikli rotor

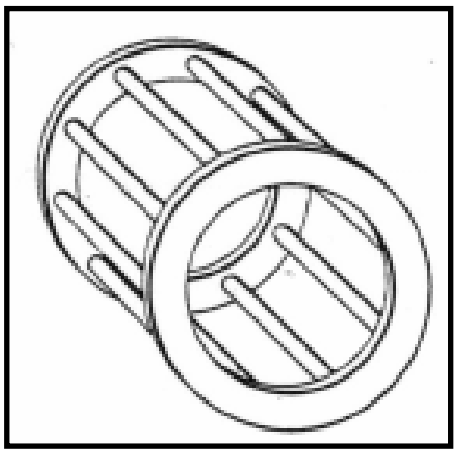
Bilezikli rotorda rotor iletkenleri sargı şeklindedir. Rotorda birer uçları yıldız bağlanmış üç sargı mevcuttur. Diğer uçları bilezik-fırça düzeneği vasıtasıyla motorun bağlantı kutusuna çıkartılmıştır. Dışarı çıkarılan uçlar kullanılarak rotor direncine dışarıdan müdahale edilebilmektedir. Böylece motorun moment ve hız karakteristikleri motor çalışırken ayarlanabilmektedir. Bu sayede özellikle kalkınma akımı ve momenti istenilen değerde tutulabilmektedir. Bilezikli rotorlu asenkron motorlar daha çok yüksek kalkınma momenti gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır. Şekil 3.3'de bir bilezikli rotor görülmektedir.



Şekil 3.3. Bilezikli rotor fotoğrafı.

3.1.2.2. Sincap kafesli rotor

Sincap kafesli rotorda iletkenler, çubuk (kalın ve tek parça) şeklindir ve rotor boyunca uzanır. Döner alan sebebiyle üzerlerinde gerilim indüklenir. Fakat uçları açık olur ise akım akmayacağından rotor dönme hareketi yapamayacaktır. Bu sebeple rotordaki bütün iletken çubuklar rotorun her iki yanından birbirleri ile kısa devre yapılır. Çubukları kısa devre yapan bu halka şeklindeki yapıya "kısa devre halkası" adı verilir. İletkenlerde indüklen gerilimler, halka ve çubukların üzerinden akım akmasını sağlar ve böylece motor döner. Kısa devre halkası ve iletkenlerin oluşturduğu şekil sincap kafesine benzediği için bu tür rotorlara sincap kafesli rotor denmektedir. Şekil 3.4'de sincap kafesli rotorun saçları çıkartılmış çizimi görülmektedir.



Şekil 3.4. Rotordaki sincap kafesinin yapısı.

3.2. Asenkron Motor Arızaları ve Etkileri

Asenkron motor arızaları genellikle arızanın meydana geldiği motor bölümüne göre adlandırılır. Temel olarak asenkron motor arızalarını dört grupta inceleyebiliriz.

3.2.1. Stator arızaları

Statorda meydana gelen arızaların büyük kısmını stator sargısı arızaları oluşturur. Stator sargısı arızaları, sargılardaki yalıtım problemlerinden dolayı ortaya çıkar. Yalıtım arızaları nem, aşırı ısınma ve sistem ani yüklenmesinden dolayı oluşur. Genellikle de iki sarımı veya sargı ile gövdeyi kısa devre ederek stator empedansında

asimetriye sebep olur. Bunun sonucu olarak da motor dengesiz faz akımları çekmeye başlar. Bu arızalar fark edilemeyen küçük sarım arızaları olarak başlar, büyür ve sonunda bütün sargıyı içine alır. Bilinen asenkron motor arızalarının yaklaşık %30-%40'ı bu kategoriye girer (Haji ve Toliyat, 2001).

3.2.2. Rulman ve yatak arızaları

Yataklar genellikle içte ve dışta iki halka, bu halkaların arasında bir yol içinde yuvarlanan top veya silindir setinden oluşur. Normal çalışma durumunda yorulma arızası, giderek artan gürültü ve yüzeyde hissedilebilir titreşimler üreten küçük ince çatlaklar ile başlar. Motor miline uygulanan devamlı baskı elamandaki çatlakların küçük parçalar halinden koparak yerleşmiş bir yorgunluk oluşturmasına sebep olur (Benbouzid ve Kliman, 2003). Bu durum bir kere başladığı zaman etkilenen alan yağlama kirlenmesi ile hızlı bir şekilde yayılır. Sonunda arıza yatağın pütürlüleşmesine sebep olur. Motor arızalarının yaklaşık %40-%50'si yatak arızaları ile ilişkilidir.

3.2.3. Eksen kayıklığı arızaları

Stator ile rotor arasındaki hava aralığı uzunluğunun tüm iç çevre boyunca düzgün olmaması durumda dış eksen kayıklığı arızaları oluşur. Stator ile rotor arasındaki minimum radyal hava aralığının stator rotor boyunca konumu sabit ise statik dış merkezlilik adını alır. Bu durum stator saç gövdesinin iç kısmının oval olmasından veya birleştirme aşamasında statorun ya da rotorun pozisyonunun doğru olmamasından kaynaklanabilir. Rotorun merkezi, dönme merkezinde değilse minimum hava aralığı uzunluğunun pozisyonu rotorla birlikte döner. Bu duruma dinamik dış merkezlilik denir (Faiz ve ark., 2008). Bu durum rotor milinin eğik olması, yatak aşınması veya yatakların aynı hizada olmaması, kritik hızlarda mekanik rezonanslar gibi sebeplerden dolayı oluşabilir (Le ve Wu, 2007). Motor arızalarının yaklaşık %8-%12'si eksen kayıklığı arızaları ile ilişkilidir.

3.2.4. Rotor arızaları

Rotor arızaları motor arızalarının %5-10'ini oluşturmaktadır (Haji ve Toliyat, 2001; Bacha ve ark., 2004; Yazidi ve ark., 2005). Asenkron motorların sincap kafesli

rotorları temel olarak üç parçadan oluşur. Bunlar; rotor çubuğu, kısa devre halkası ve rotor saçlarıdır. Bu parçaların üretimi ve materyalleri, motorun gücüne ve tipine göre değişiklik gösterir. Büyük güçlü motorlarda çubuklar ile kısa devre halkaları vidalarla, derin kuyu asenkron motorlarında kaynak yapılarak ve küçük ve orta güçlerdeki klasik asenkron motorlarında çubuklar ile kısa devre halkaları üretim aşamasında dökümle birleştirilmektedirler. Dolayısı ile rotor arızaları aşağıdaki gibi dört grupta incelenebilir:

— Hiç temas etmeyecek kadar kopmuş (kırık) rotor çubukları ya da kısa devre halkaları,

— Tamamen kopmamış ama temas yüzeyi azalmış (yüksek dirençli) rotor çubukları ya da kısa devre halkaları,

— Rotor çubuğu ile kısa devre halkası arsındaki kötü veya yüksek dirençli bağlantılar,

— Kısa devre olmuş rotor saçları.

3.2.4.1. Rotor arızalarının oluşumu

Rotor çubuğu ve kısa devre halkasının kırılmasının ana sebebi imalat hatalarıdır (Sasi ve ark., 2006). Özellikle rotor çubukları; dökümle yapılan rotor imalatında döküm yapma işlemi sırasında rotor çubuğu oyuğu içerisinde kalan yabancı materyal parçacıkları, kir veya hava gibi nesnelerden dolayı, rotor çubuğunun iki ucu arasında ya tam temas etmeyen yüzeyin kalması sonucu tam kırık ya da temas yüzeyinin azalması sonucu yüksek dirençli olarak imalat hatasıyla üretimden çıkabilmektedir. Derin kuyu pompalarındaki gibi rotor çubuklarının rotor oyuklarına çakılarak yerleştirildiği uygulamalarda ise genellikle arıza bilinçli iki yönlü çakma sonucu ortada boşluk kalması sonucu yada çakılan çubukla kısa devre halkası arasındaki kaynağın düzgün olmamasından kaynaklanmaktadır. Büyük güçlü makinelerde ise çubuk ile kısa devre halkası arasındaki bağlantının düzgün yapılmamasından dolayı oluşmaktadır.

Rotor çubuk arızaları zaman içerisinde küçük bir oluşumla başlar ve motor çalıştıkça çubuk üzerinde oluşan gerek termal gerekse fiziksel baskıların etkisiyle giderek büyür. Bu büyümeyi geçici olaylar hızlandırır (Penman ve Stavrou, 1996).

Çalışma durumunda çubuk arızalarının oluşmasına sebep olan belli başlı etkenler aşağıdaki gibidir(Abbaszadeh ve ark, 2001; Sasi ve ark., 2006):

a. Üretim hatalarından dolayı çubuklardaki direnç değişmeleri,

b. Dengesizlik ve aşırı yüklenmeden, sıcak noktalardan veya kayıp artışından dolayı oluşan ısınmalar ve bunların çubuklar üzerinde oluşturduğu baskılar,

c. Elektromanyetik kuvvetler, dengesiz manyetik çekme, elektromanyetik gürültü ve titreşimden dolayı oluşan manyetik baskılar,

d. Mil momentinden, merkezkaç kuvvetlerinden ve dairesel baskılardan dolayı ortaya çıkan dinamik baskılar,

e. Nem ve kimyasallardan dolayı rotor malzemelerinin aşınması veya kirlenmesinden kaynaklanan çevresel etkiler,

f. Gevşek rotor saçları, yorulan parçalar veya yatak arızasından dolayı oluşan mekanik etkiler.

3.2.4.1. Rotor arızalarının etkileri

Rotor çubuklarından biri kırıldığı veya yüksek dirençli hale geldiği zaman rotor çubuklarındaki akımların dağılımı değişir. Akımların, sincap kafesindeki yeni dağılımı sağlam rotordakinden farklı hale gelir. Akımın bu yeni dağılımı hava aralığındaki manyetik akıyı değiştirir. Akıdaki bu değişme stator akımı üzerinde küçük ve kötü bir etki yapar. Bu etkiler stator akımının ana bileşeni etrafında yan-bant çiftlerinin oluşmasına sebep olur ve faz akımına Denklem 3.1'de verilen yan-bant bantlarının bir sırası şeklinde etki eder (Casimir ve ark., 2003; Faiz ve Ebrahimi, 2007):

$$f_b = (1 \pm 2ks) f \tag{3.1}$$

Burada f besleme frekansı, s kayma ve k tamsayıdır (k = 1,2,3,...).

4. ASENKRON MOTOR PERFORMANS ANALİZİ

Performans kelime anlamı itibariyle randıman, verim demektir. Daha geniş ifadeyle; bir makine veya cihazın rakamlarla ifade edilen gerçek çalışma kapasitesini çeşitli itibari büyüklüklerle ifade etmek demektir. Anlam itibariyle performans kapsamı çok genişletilebilir. Bu alanı daraltan performansından söz edilen varlığın özelliğidir. Asenkron motorlar elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren makinelerdir. Temel işlevi dönüşüm olduğu için önemli çıktılardan biri verimdir. Motorun kullanımı ile amaçlanan mekaniki güç temini olduğu için diğer önemli çıktı; motordan elde edilen mekaniki güçtür. Motor aynı zamanda mekaniki gücü hareket olarak ürettiği için motor milindeki hız ve moment diğer önemli çıktılardır. Şebekeye getirdiği yük ve dolayısıyla yük kalitesini belirleyen bir parametre olması açısından da bir diğer çıktı motorun güç faktörüdür. Bütün bunların bir etkeni olarak motor akımı da performans kapsamı içerisine alınmıştır.

Rotor arızalarının motor performansına yaptığı etkileri analiz için çeşitli güçlerde dört adet DKASM, beş farklı arızalı rotor durumu ve sağlam durum olmak üzere toplam altı farklı motor durumunda incelenmiştir. İncelenilen motor durumları aşağıda verilmiştir:

a. Sağlam motor,
b. Bir rotor çubuğu yüksek dirençli motor,
c. Bir rotor çubuğu kırık motor,
d. İki rotor çubuğu kırık motor,
e. Üç rotor çubuğu kırık motor,
f. Kısa devre halkası kırık motor.

Bu motor durumlarının motorun çalışmasına etkilerini incelemek için motora ait aşağıdaki veriler kullanılmıştır:

a. Motor faz akımları,
b. Motor faz gerilimleri,
c. Motor hızı,
d. Motor momenti.

Bu veriler kullanılarak aşağıda listelenen motor verilerine ulaşılmıştır. Böylece motor giriş ve çıkış verilerinin zamanla değişimleri incelenmiştir.

a. Motor güç faktörleri,

b. Motor giriş güçleri,
c. Motor mekaniki gücü,
d. Motor verimi.

Motorların yol alama esnasındaki davranışları ile kararlı durumdaki davranışlarının farklılık göstermesinden dolayı yol alma ve kararlı durumdaki çalışmaları ayrı ayrı incelenmiştir. Ayrıca asenkron motorlarda hız-moment eğrilerinin motor karakteristiğinin incelenmesinde önemli bir kıstas olmasından dolayı hız-moment eğrileri elde edilerek bu çalışmada ayrıca incelenmiştir.

Motor verilerindeki dalgalanmalar ve ortalama değerdeki azalmalar hesaplanarak arızaların etkilerinin incelenmesinde kullanılmıştır. Dalgalanma hesabı tepeden tepeye dalgalılığın verinin ortalama değerine bölümünün yüzdesi olarak yapılmıştır. Bu ifade verinin, dalgalılığın hesaplanması istenen bölgesinde Denklem 4.1 kullanılarak hesaplanmıştır. Ortalama değer hesaplaması geçici durumlar için pencereleme (windowing) kullanılarak verinin zamanla ortalama değer değimi elde edilmiştir. Kararlı durumlar için verinin tamamının ortalaması alınarak ortalama değer hesaplaması yapılmıştır.

$$DaIgalanma = 100 \cdot \frac{Verinin\ Maksimum\ Degeri - Verinin\ Minumum\ Degeri}{\left(Verinin\ Maksimum\ Degeri + Verinin\ Minumum\ Degeri\right)/2} \quad (4.1)$$

4.1. Kararlı Durum Analizi

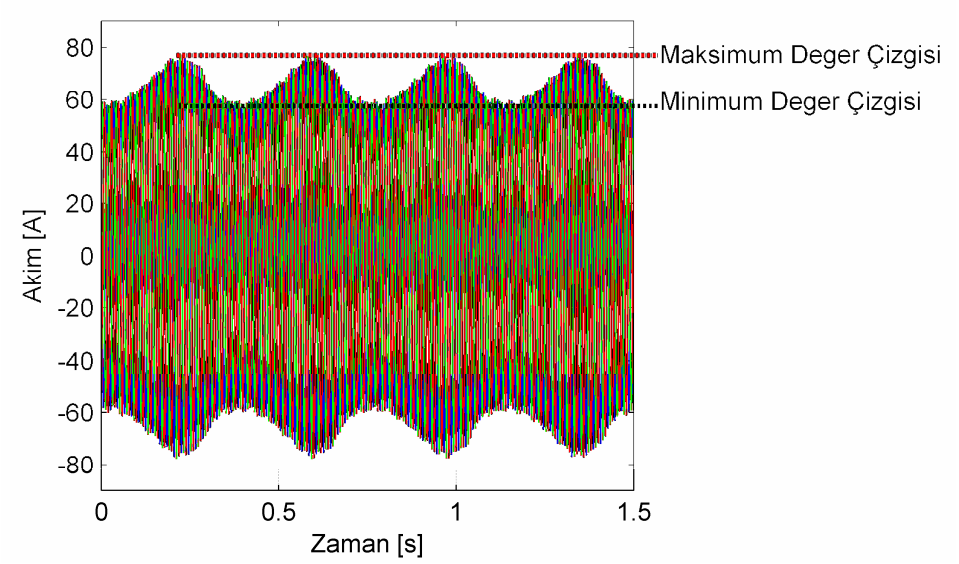
Motorun kararlı durumda çalışmasının performans analizi aşağıdaki motor çıktıları incelenerek yapılmıştır:

a. Motor akımları,
b. Motor momenti,
c. Motor hızı,
d. Motor güç faktörü,
e. Motor mekaniki gücü,
f. Motor verimi.

Arızaların kararlı durumdaki etkilerini incelemek için motor verileri belirli zaman uzunluklarına sahip veriler halinde alınıp zaman ekseninde incelenmiştir.

4.1.1. Kararlı durumda motor akımlarının analizi

Motor akımları doğrudan motordan temin edildiği için herhangi bir hesaplamaya gerek kalmadan zaman eksenindeki dalgalanmaları incelenmiştir. Motor akımlarının değerleri negatif ve pozitif değerlere sahip olmasından ve ortalama değerinin, hesaplamada kullanılan veri aralığına bağlı olarak yaklaşık sıfır olacağından dolayı dalgalanma hesabı için Denklem 4.1 doğrudan kullanılamaz. Bu sebeple akım dalgalaması için Şekil 4.1'de gösterilen dalgalanmanın maksimum değeri Denklem 4.1'deki "Verinin Maksimum Değeri" olarak, Şekil 4.1'de gösterilen dalgalanmanın minimum değeri Denklem 4.1'deki "Verinin Minimum Değeri" olarak alınmış ve akım dalgalanmaları buna göre hesaplanmıştır.



Şekil 4.1. Motor akımının dalgalanma hesabında kullanılan değerlerin gösterimi.

4.1.2. Kararlı durumda motor momentinin analizi

Moment değerleri deneysel çalışmada deney düzeneğindeki moment sensöründen okunmuştur. Okunan değerler sensörün dönüştürme oranı ile çarpılarak motor moment değerleri (birimi Nm) elde edilmiştir. Benzetimlerde elde edilen motor moment değerleri ise kullanılan Flux programında doğrudan (birim Nm) hesaplandığı için herhangi bir hesaplamaya gerek kalmadan direk olarak incelemelerde kullanılmıştır. Rotor arızaları moment değerlerinde dalgalanmalar oluşturmaktadır. Bu

sebeple motor moment değerleri dalgalılık ve ortalama değerdeki azalma açısından incelenmiştir.

4.1.3. Kararlı durumda motor hızının hesabı ve analizi

Rotor arızalarının motor hız değerlerine yaptığı etkileri incelemek için benzetimler yapılmıştır. Benzetimlerden motor hız değerleri birimi [devir/dakika] olarak benzetim programı tarafından doğrudan hesaplanmaktadır. Dolayısıyla benzetimlerden elde edilen mor hız değerleri için herhangi bir hesaplamaya gerek kalmadan direk olarak incelenmiştir.

Deneysel çalışmada hız bilgisi hız sensöründen alınmaktadır. Hız sensörü her devir için 60 adet kare dalga sinyali vermektedir. Hız sensöründen alınan kare dalga sinyalleri farklı hız sevileri için farklı metotlarla motor hızı hesabında kullanılmaktadır. Kare dalga hız sinyalleri aşağıdaki gibi üç farklı şekilde ölçülebilir (Petrella ve Tursini, 2008);

a. Ardışık kare dalgalar arasındaki zamanın okunması,
b. Belirli zaman aralıklarında kare dalga sinyallerinin sayılması,
c. Belirli sayıdaki kare dalga sinyali için geçen sürenin okunması.

Bu üç yöntemin doğrulukları ve ölçebilecekleri motor hızı aralıkları kullanılan sensörün çentik sayısına göre değişir. Motor hızının yavaş olduğu durumlarda birinci yöntemin doğruluğu yüksektir ama motor hızı artıkça doğruluk azalır. Motor hızının yüksek olduğu durumda da ikinci yöntemin doğruluğu yüksektir ancak bu yöntemde de düşük hızlarda doğruluk azalır. Üçüncü yöntem birinci ve ikinci yöntemin birleşimi şeklindedir. Belirli sayıda sinyalin periyodu ölçülerek hız hesaplanır. Böylece yavaş hızlarda ve yüksek hızlarda doğruluk artırılır. Ancak düşük hızlara doğru hız hesaplama frekansı düşeceğinden yüksek çözünürlüklü hız eğrisi elde edilemeyecektir.

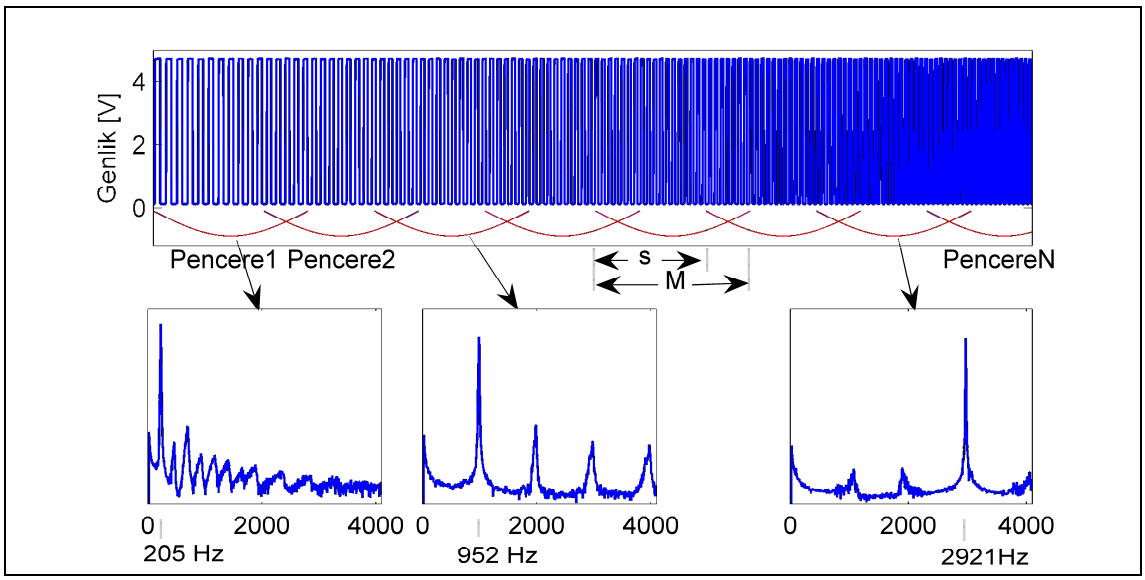
Bu doktora çalışmasında literatürden farklı olarak kare dalga hız sinyallerinden motor hızının hesaplanmasında Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform) (HFD) kullanılmıştır. Deneysel çalışmada motor verileri önce kaydedilip daha sonra kaydedilen veriler değerlendirildiği için hız sensöründen gelen bilgiler analog olarak kare dalga şeklinde kaydedilmiştir. Kayıtlı bu kare dalga verisinden HFD kullanılarak hız bilgisi hesaplanmıştır. Hesaplamada iç içe geçen pencereleme kullanılmasıyla hız eğrisinin çözünürlüğü artırılmıştır.

Motor hızının HFD ile hesaplanması için öncelikle hız sensöründen gelen sinyaller diğer motor verileri ile eş zamanlı olarak örneklenmiş ve kaydedilmiştir.

Kayıtlı hız bilgisi HFD ile frekans eksenli hale getirilmiştir. Burada maksimum genliğe sahip frekans bileşenin frekansı bulunarak Denklem 4.2 kullanılarak motor hızı birimi [devir/dakika] olarak hesaplanmıştır.

$$n = \frac{f_{hiz}}{S_{cen}} \cdot 60 \qquad (4.2)$$

Burada f_{hiz} frekans eksenindeki maksimum genliğe karşılık gelen frekans değeri, S_{cen} hız sensöründeki çentik sayısıdır. Şekil 4.2'de örneklenen hız sinyali, kullanılan pencereler, pencere uzunluğu (M), iç içe geçme (hopping) uzunluğu (s) ve bazı pencerelere ait frekans ekseninde maksimum genliğe karşılık gelen frekans değerleri gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Hız sensöründen örneklenen kare dalga hız sinyali ve HFD ile bulunan bazı pencerelerin frekans değişimleri.

Rotor arızaları motor hızında dalgalanma ve dalgalılığa sebep olmuştur. Bundan dolayı motor hız değerleri hem dalgalılık hem de ortalama değerdeki azalma açısından incelenmiştir.

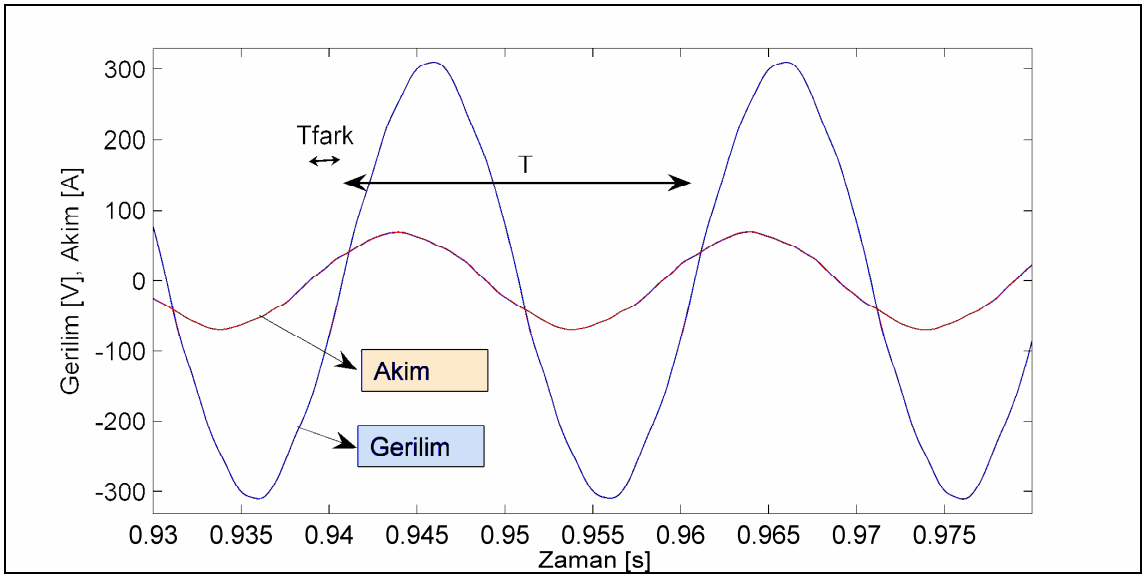
4.1.4. Kararlı durumda motor güç faktörü hesabı ve analizi

Motor güç faktörü değerleri, eş zamanlı olarak kaydedilen akım ve gerilim verilerinin her bir periyot için sıfır geçiş noktalarından faydalanılarak hesaplanmıştır.

Öncelikle hem akım hem de gerilimin sıfır geçiş noktaları bulunarak periyotlar bulunmuştur. Sonra gerilimin sıfır geçiş noktasıyla akım sıfır geçiş noktası arasındaki mesafe belirlenerek Denklem 4.3'de görüldüğü gibi periyot değerine oranlanarak güç faktörleri hesaplanmıştır. Hesaplama işlemi gerilimin her periyodu için ayrı ayrı ve ardışık olarak yapılarak güç faktörünün zamanla değişimi elde edilmiştir.

$$\cos\varphi = \cos\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{T_{fark}}{T}\right) \tag{4.3}$$

Burada T_{fark} gerilim sıfır geçişiyle akım sıfır geçiş noktası arsındaki fark, T ise gerilimin periyodudur. Bu iki ifadenin gösterimi Şekil 4.3'de verilmiştir.



Şekil 4.3. Güç faktörünün hesaplamasında kullanılan ifadelerin gösterimi.

Motor güç faktörü değerleri hem dalgalılık hem de ortalama değerdeki azalma açısından incelenmiştir.

4.1.5. Kararlı durumda motor mekaniki gücü hesabı ve analizi

Motor mekaniki güç değerleri benzetimlerde doğrudan program tarafından hesaplanmaktadır. Dolayısıyla benzetimden elde edilen motor mekaniki güç değerleri için herhangi bir hesaplamaya gerek kalmadan direk olarak incelenmiştir. Deneysel

çalışmada mekaniki güç jeneratör çıkış değerlerinden hesaplanmıştır. Mekaniki gücün jeneratör değerlerinden hesaplanmasında Denklem 4.4 kullanılmıştır.

$$P_{mek} = U_j \cdot I_j + R_{en} \cdot I_j^{\,2} + U_\Delta \cdot I_j + \left(P_{o_bagli} - P_o\right) \tag{4.4}$$

Burada U_j jeneratör gerilimi, I_j jeneratör akımı, R_{en} jeneratör endüvi sargı direnci, U_Δ jeneratör fırçalarında düşen gerilim, P_{o_bagli} motor jeneratöre bağlıyken boştaki şebekeden çektiği toplam güç, P_o motorun boşta şebekeden çektiği toplam güçtür. Denklem 4.4'deki birinci ifade jeneratörün çıkış gücünü, ikinci ifade endüvi sargılarında endüvi direncinden dolayı oluşan kayıpları, üçüncü ifade fırçalarda gerilim düşümünden dolayı oluşan kayıpları ve dördüncü ifade de motor-jeneratör deney setinin sürtünme kayıplarını vermektedir. Motor mekaniki gücü değerleri hem dalgalılık hem de ortalama değerdeki azalma açısından incelenmiştir.

4.1.6. Kararlı durumda motor verimi hesabı ve analizi

Motor verimi, mekaniki gücün anlık değerlerinin motor giriş gücünün anlık değerlerine bölünmesiyle Denklem 4.5'deki gibi hesaplanmıştır.

$$\eta = 100 \cdot \frac{P_{mek}}{P_{giris}} \tag{4.5}$$

Motor giriş gücü eş zamanlı olarak kaydedilen üç faz akım ve gerilim verilerinin anlık çarpımlarının toplanmasıyla elde edilmiştir. Elde edilen giriş güç ifadesi yine zaman eksenlidir ve giriş gücünün zamanla değişimi buradan görülebilir. Dolayısıyla Denklem 4.5'e göre elde edilen verim sonuçları da anlık değerler olacaktır. Böylece verimin zamanla değişimi bu verilerden incelenmiştir. Motor mekanik gücü değerleri hem dalgalılık hem de ortalama değerdeki azalma açısından incelenmiştir.

4.2. Motorun Yol Alma Süreci Analizi

Motorların yol alma sürecindeki davranışları birçok uygulama için oldukça önemlidir. Bu sebeple bu çalışmada yol alma sürecindeki motor akım ve moment

değişimleri zaman ekseninde incelenmiştir. Yol alma süreci analizinde kalkınma moment değerleri, momentteki dalgalanmalar ve kalkınma akımındaki dalgalanmalar incelenmiştir. Akımdaki dalgalanma hesabı, kararlı durumda akım dalgalanma hesaplamasıyla aynı şekilde dalgalamanın maksimum olduğu bölge kullanılarak yapılmıştır. Moment dalgalanma hesabı Denklem 4.1'e göre dalgalanmanın maksimum olduğu veri aralık bölgesinde yapılmıştır. Kalkınma momenti değerleri ise kalkınma anında momentteki dalgalanma çok olduğundan il 10 ms'lik moment verilerinin ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Momentteki ve akımdaki dalgalanmalar ile kalkınma momentindeki değişmeler analiz edilmiştir.

4.3. Hız-Moment Eğrisinin Analizi

Asenkron motorlarda hız moment eğrisi moment karakteristiğinin incelenmesinde önemli bir referanstır. Moment hız eğrisinden kalkınma ve devrilme moment değerleri kıyaslanabilmektedir. Motorların boşta yol alma sürecinde moment ve hız değerlerinin eş zamanlı olarak okunmasıyla hız moment eğrisi elde edilmiştir. Benzetim programı doğrudan hız ve moment değerlerini verdiği için zaman referans alınarak hıza karşılık moment değerlerinin oluşturulması ve grafiğinin çizilmesiyle hız moment eğrisi kolayca elde edilebilir. Ancak yol alma sırasındaki moment değerinin çok salınımlı olacağından dolayı belirli uzunlukta pencereleme kullanılmış ve her bir pencere aralığı için ortalamalar alınarak ortalama değerlerden oluşan yeni moment eğrisi oluşturulmuştur. Yeni oluşturulan eğrinin çözünürlüğü düşük olacaktır. Çözünürlüğü büyütmek için pencereleme işleminde iç içe geçen pencerelerin kullanımı ve pencerelerin çakışan uzunluğunun büyük tutulmasıyla daha yüksek çözünürlüklü ortalama değerli moment eğrisi elde edilmiştir. Her pencerelemeden bir sonuç elde edilmektedir. Moment verisinin uzunluğu belirli bir verinin ortalaması şeklinde olduğundan küçülmüştür. Bundan dolayı hız veri uzunluğu ile moment veri uzunluğu aynı olmayacaktır. Hız moment eğrisinin düzgün çizilebilmesi için moment için uygulanan işlemin aynısı hız verisi için de uygulanarak moment veri ile aynı uzunlukta hız verileri elde edilmiş ve böylece hız moment eğrisi çizilmiştir. Böylece aynı zamana karşılık gelen hız ve moment değerleri eğride çakıştırılmış olmaktadır. Deneysel verilerden hız, kararlı durumdaki hız hesaplamasıyla aynı şekilde HFD ve pencereleme kullanarak yapılmıştır. Hız moment eğrisi analizinde kalkınma momenti ve devrilme momentinin değerleri incelenmiştir.

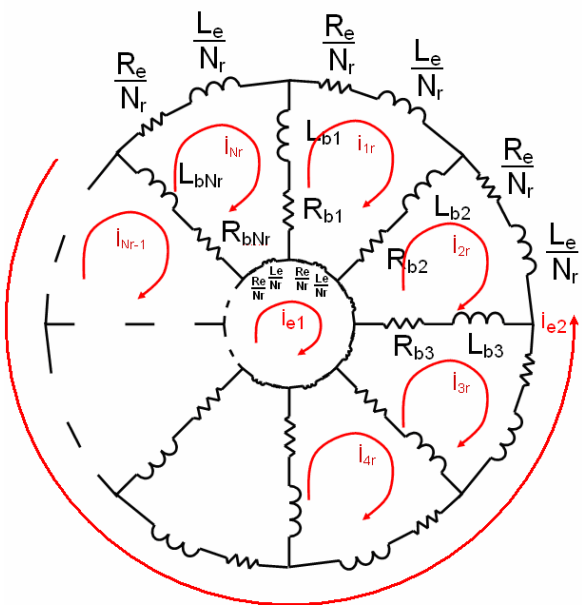
5. SİNCAP KAFESLİ ASENKRON MOTORLADA ROTOR ARIZALARININ BENZETİMİ

Üç fazlı sincap kafesli asenkron motorların geçici ve kararlı durumlardaki çıkış parametrelerini incelmek için basit yapısından dolayı hesaplama kolaylığı sağlaması sebebiyle genellikle rotoru sargılı asenkron motorun matematiksel modeli kullanılır. Bu matematiksel model ile rotor arızalarının modellenmesi mümkün değildir. Rotor arızalarının modellenebilmesi için kullanılacak olan model içerisinde rotor çubuklarının ve halkasının devre modellerinin ve parametrelerinin yer alması gerekmektedir (Luo ve ark., 1995). Rotor arızalarının matematiksel model üzerinden analiz edilebilmesi için asenkron motorun rotor çubuk ve stator faz sargıları sayına bağımlı matematiksel model kullanılması gerekmektedir.

.

5.1. Asenkron Motorun Rotor Çubuk ve Stator Faz Sargıları Sayına Bağımlı Matematiksel Modeli

Asenkron motorun rotor çubuk ve stator faz sargıları sayına bağımlı matematiksel modeli için her bir rotor çubuğu ve kısa devre halkasının iki çubuk arasında kalan bölümü bir endüktans ve bir dirençle temsil edilmektedir. Bu şekilde oluşturulan N_r sayıda rotor çubuklu 3 fazlı asenkron motorun rotor eşdeğer devresi Şekil 5.1'de görülmektedir.



Şekil 5.1. Rotor çevre akımları ile rotor kafesi.

İki rotor çubuğu ve bu iki çubuk arasında kalan her iki yandaki kısa devre halkasının kısımları bir kapalı çevre oluşturmaktadır. Her bir kapalı çevre için çevre akımları ile gerilim denklemleri yazılarak matematiksel model oluşturulabilir (Boldea, 2002).

Statorun her bir fazı için faz denklemleri Denklem 5.1'de görüldüğü gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned} V_a &= R_s i_a + \frac{d\Psi_a}{dt} \\ V_b &= R_s i_b + \frac{d\Psi_b}{dt} \\ V_c &= R_s i_c + \frac{d\Psi_c}{dt} \end{aligned} \tag{5.1}$$

Bura R_s stator faz direnci, $\Psi_{a,b,c}$ stator faz akılarıdır. Rotor kafesinin oluşturduğu devrede k. çubuğun yanındaki çevre denklemi Denklem 5.2'deki gibi yazılabilir.

$$0 = 2\left(R_b + \frac{R_e}{N_r}\right) i_{kr} + \frac{d\Psi_{kr}}{dt} - R_b\left(i_{(k-1)r} + i_{(k+1)r}\right) \tag{5.2}$$

Burada i_{kr} k. rotor çubuğunun yanındaki çevre akımı, R_b rotor çubuk direnci, R_e kısa devre halkası direnci, N_r rotor toplam çubuk sayısı, Ψ_{kr} rotor çubuk akılarıdır. Diğer çubukların çevre denklemleri aynı şekilde olacaktır. Çubukların arasındaki bu çevrelerden farklı olarak kısa devre halkalarının oluşturduğu iki çevre daha bulunmaktadır. Bu çevrelerden kısa devre halkasının bir tanesi için çevre denklemi Denklem 5.3'de görüldüğü gibi yazılabilir.

$$0 = R_e i_e + L_e \frac{di_e}{dt} - \sum_{1}^{N_r}\left(\frac{R_e}{N_r} i_{kr} + \frac{L_e}{N_r}\frac{di_{kr}}{dt}\right) \tag{5.3}$$

Asenkron motor için temel olarak üç grup indüktans vardır. Bunlar;

a. Stator faz sargısının öz indüktansları ve stator fazlarını etkileyen stator faz sargıları arası oluşan ortak indüktanslar.

b. Benzer şekilde her bir rotor çubuğunun ve kısa devre halkası bölümlerinin öz indüktansı ve bunların birbirleri ile olan ortak indüktansları.
c. Stator faz sargıları ile rotor çubuk ve kısa devre halkası indüktansları arasındaki ortak indüktanslar.

Bu modelde en önemli kısım ortak indüktaslardır. Çubuk sayısı ile stator sargı sayısının çarpımı kadar ortak indüktans oluşacaktır. Bu durum indüktans matrisi olarak düşünülebilir. Stator üç faz indüktansları eşit olarak alınır ve her biri aynı şekilde hesaplanır. Statorun öz ve ortak indüktansları standart olarak Denklem 5.4'de verilmiştir.

$$\begin{aligned} L_{aa} &= L_{bb} = L_{cc} = L_{ls} + L_{ms} \\ L_{ab} &= L_{bc} = L_{ca} = -\frac{1}{2} L_{ms} \end{aligned} \tag{5.4}$$

Burada L_{aa} a fazına ait stator indüktansı, L_{bb} b fazına ait stator indüktansı, L_{cc} c fazına ait stator indüktansı, L_{ls} faz sargılarınına ait öz indüktansları, L_{ms} stator faz sargılarının birbirleri arasındaki ortak indüktanstır. Stator ve rotor arasındaki ortak indüktanslar a fazı için L_{aKr}, b fazı için L_{bKr} ve c faz için L_{cKr} hesapları Denklem 5.5'de verilmiştir.

$$\begin{aligned} L_{aKr}(\theta_r) &= L_{sr} \cos[\theta_{er} + (k_r - 1)\alpha] \\ L_{bKr}(\theta_r) &= L_{sr} \cos\left[\theta_{er} + (k_r - 1)\alpha - \frac{2\pi}{3}\right] \\ L_{cKr}(\theta_r) &= L_{sr} \cos\left[\theta_{er} + (k_r - 1)\alpha + \frac{2\pi}{3}\right] \end{aligned} \tag{5.5}$$

Burada $\alpha = p_1 2\pi / N_r$, θ_{er} elektriksel rotor açısıdır ve rotorun fiziksel açısının kutup çifti sayısıyla çarpımı ile bulunur ($\theta_{er} = p_1 \theta_r$), p_1 kutup çifti sayısı, L_{sr} stator ile rotor çubukları arasındaki ortak indüktanstır ve k_r k. rotor çubuğunu temsil eder.

Motorun stator, rotor ve stator rotor arası indüktans etkileşimleri düşünüldüğü zaman gerilim denklemleri matris formunda Denklem 5.6'daki gibi yazılabilir.

$$[V] = [R][I] + \frac{d[\Psi]}{dt} \tag{5.6}$$

Denklem 5.6'daki gerilim ve akım matrislerinin açık şekilleri Denklem 5.7'deki görüldüğü gibi olacaktır. Rotor çubuklarının her birinin direnç değerleri imalatta bir hata yoksa birbirine eşit olacaktır. Her bir çubuk direnci R_b ve kısa devre halkasının tamamının direnç değeri R_e ile gösterilir ise Denklem 5.6'daki [R] direnç matrisinin açık ifadesi Denklem 5.8'de görüldüğü gibi olacaktır.

$$\begin{aligned}[V] &= [V_a, V_b, V_c, 0, 0, ..., 0]^T \\ [I] &= [i_a, i_b, i_c, i_{1r}, i_{2r}, ..., i_{Nr}, i_e]^T\end{aligned} \tag{5.7}$$

$$[R] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & & & & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 & & & & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2\left(R_b + \frac{R_e}{N_r}\right) & -R_b & 0 & 0 & -R_b & -\frac{R_e}{N_r} \\ 0 & 0 & 0 & -R_b & 2\left(R_b + \frac{R_e}{N_r}\right) & -R_b & & 0 & -\frac{R_e}{N_r} \\ \cdots & \cdots & \cdots & 0 & -R_b & \cdots & \cdots & & -\frac{R_e}{N_r} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & & & \cdots & -R_b & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -R_b & 2\left(R_b + \frac{R_e}{N_r}\right) & -\frac{R_e}{N_r} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{R_e}{N_r} & -\frac{R_e}{N_r} & -\frac{R_e}{N_r} & -\frac{R_e}{N_r} & -\frac{R_e}{N_r} & R_e \end{bmatrix} \tag{5.8}$$

Akı matrisi $[\Psi]$ akım matrisi ve indüktans matrisinin çarpımına eşittir. Bu durumdaki ifade denklem 5.9'da verilmiştir. İndüktans matrisinin her bir elemanının da θ_{er} değişkenine bağlı olduğu (Denklem 5.5) göz önünde bulundurulduğunda akı matrisinin zamana göre türevi Denklem 5.10'da verildiği gibi olacaktır.

$$[\Psi] = [L][I] \tag{5.9}$$

$$\frac{d[\Psi]}{dt} = [L]\left(\frac{d[I]}{dt}\right) + \left(\frac{d[L]}{d\theta_{er}}\frac{d\theta_{er}}{dt}\right)[I] \tag{5.10}$$

Denklem 5.10'daki [L] indüktans matrisinin açık ifadesi Denklem 5.11'de verilmiştir.

$$[L]=\begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & L_{aN_r}(\theta_{er}) & 0 \\ L_{ab} & L_{bb} & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & L_{bN_r}(\theta_{er}) & 0 \\ L_{ac} & L_{bc} & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & L_{cN_r}(\theta_{er}) & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & & & & & \cdots & -\frac{L_e}{N_r} \\ \vdots & \vdots & & \ddots & & & & \cdots & \cdots \\ L_{a3r}(\theta_{er}) & L_{b3r}(\theta_{er}) & \cdots & \cdots & \ddots & \cdots & \cdots & L_{3rN_r}(\theta_{er}) & -\frac{L_e}{N_r} \\ \vdots & \vdots & & & & \ddots & & \cdots & \cdots \\ L_{aN_r}(\theta_{er}) & L_{bN_r}(\theta_{er}) & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \ddots & L_{N_rN_r}(\theta_{er}) & -\frac{L_e}{N_r} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{L_e}{N_r} & -\frac{L_e}{N_r} & -\frac{L_e}{N_r} & -\frac{L_e}{N_r} & -\frac{L_e}{N_r} & +L_e \end{bmatrix} \tag{5.11}$$

Denklem 5.10'daki ifade Denklem 5.6'da yerine konularak Denklem 5.12 elde edilir. Denklem 5.12'de eşitliğin her iki tarafı akım matrisinin transpozesi ile çarpılırsa Denklem 5.13 elde edilir.

$$[V]=[R][I]+[L]\left(\frac{d[I]}{dt}\right)+\left(\frac{d[L]}{d\theta_{er}}\frac{d\theta_{er}}{dt}\right)[I] \tag{5.12}$$

$$[I]^T[V]=[I]^T[R][I]+\frac{1}{2}[I]^T[L]\left(\frac{d[I]}{dt}\right)+\frac{1}{2}[I]^T\left(\frac{d[L]}{d\theta_{er}}\frac{d\theta_{er}}{dt}\right)[I] \tag{5.13}$$

Denklem 5.13'de eşitliğin sağ tarafındaki birinci ifade bakır kayıplarını, ikinci ifade depolanan manyetik enerji değişimini ve üçüncü ifade de motorun ürettiği elektromanyetik gücü temsil etmektedir. $\frac{d\theta_{er}}{dt}$ ifadesinin kutup çifti sayısı ile açısal hız çarpına eşit olduğu düşünüldüğünde motorun ürettiği güç ifadesi Denklem 5.14'deki gibi yazılabilir.

$$P_e = p_1[I]^T \frac{\partial[L]}{d\theta_{er}}[I]\omega_r \tag{5.14}$$

Denklem 5.13 içerisindeki elektromanyetik moment ifadesi Denklem 5.15'deki gibi yazılabilir.

$$T_e = p_1[I]^T \frac{d[L]}{d\theta_{er}}[I] \tag{5.15}$$

Son olarak hız denklemleri Denklem 5.16 ve Denklem 5.17'da verilmiştir.

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{p_1}{J}\left(T_e - T_{yük}\right) \tag{5.16}$$

$$\omega_r = \frac{1}{p_1}\frac{d\theta_{er}}{dt} \tag{5.17}$$

Burada J rotorun atalet momenti katsayısıdır. Motorun çıkış parametrelerinin hesaplanabilmesi için öncelikle akım değerlerinin bulunması gerekmektedir. Bunun için Denklem 5.12'nin çözülmesi gerekmektedir. Buradaki denklemler nümerik metotlarla çözülebilir. Bu modelin çözümünde aşağıdaki kabullerin yapılması gerekmektedir (Ying, 2009):

a. Nüve kayıpları ihmal edilir.
b. Rotor çubukları ve kısa devre halkası rotor saçlarına temas etmemektedir.
c. Rotor ve statordaki kaçak akımlar ihmal edilir.
d. Hava aralığındaki manyetik akı çizgilerin rotoru tam dik olarak kestiği kabul edilir.

Bu kabullerin yanı sıra manyetik doyumu da hesaba katmak istersek fazladan algoritmalar üretmemiz gerekecektir. Yukarıda bahsedilen denklemelerin nümerik çözümleri yapılabilmektedir. Yapılan kabullerden dolayı elde edilen motor çıkış parametrelerinin değerleri belirli seviyelerde etkilenecektir.

Bilgisayar teknolojisinin ve hızlarının gelişmesi hem motor modellemeleri için hem de bu modellemelerde çeşitli çözüm yöntemlerinin kullanılabilmesini olanaklı hale getirmiştir. Asenkron motorların sınır değerlerinin belirli olmasından dolayı çözüm

yöntemlerinin başında Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) yaygın olarak kullanılmaktadır. SEM kullanan çözüm algoritmalarında yine yukarıda anlatılan matematiksel modellin temeline dayanan yukarıdaki bahsedilen kabuller kullanılmaksızın çözümler yapılabilir hale gelmiştir (Bangura ve Demerdash, 1999; Mohammed ve ark., 2006; Faiz ve Ebrahimi, 2008; Sprooten ve Maun, 2009). Ayrıca motor kesit çizimlerine olanak sağlayacak paket programların geliştirilmiştir. Böylece motor modelinin çözümü için gerekli birçok parametre, çizimler ve kullanılan malzemenin karakteristik özelileri kullanıcı tarafından girilebilir hale getirilmiştir. Bu sayede motor çıktıları çok daha düzgün hesaplanıp motor analizlerinin daha hassas yapılmasına olanak sağlamaktadır. Ayrıca elektrik devre modellerinin de çizilip eklenebilir olması gerçek şebeke benzetimlerinin da yapılabilmesine olanak sağlamaktadır.

5.2. Asenkron Motorun Flux Programı ile Benzetimi

Bu doktora çalışmasında motor benzetimleri için CEDRAT firmasına ait Flux programı kullanılmıştır. Flux programı motor modellerinin çözümlerinde SEM kullanmaktadır. Flux programında motorların modellenmesi genel olarak 5 adımda tamamlanır. Bu aşamalar aşağıdaki gibi verilebilir:

a. Motor kesitinin çizimi,
b. Motorda kullanılacak malzemelerin özelliklerinin tanıtımı,
c. Sincap kafesinin tanıtımı,
d. Elektriksel devrenin teşkili,
e. Çizim, elektriksel devre ve malzeme özelliklerinin eşleştirilmesinin yapılması.

Motor kesitinin çizilmesi ve malzeme özellilerinin girilmesiyle motorun matematiksel modeli içerisindeki birçok parametre program tarafından hesaplanır. Ancak bazı değerler haricen kullanıcı tarafından girilmesi gerekmektedir. Bunların başında da sargı sonu indüktansı, sargı sonu direnci, kısa devre halkası indüktansı ve kısa devre halkası direnci gelmektedir.

5.2.1. Sargı sonu indüktansı ve direncinin hesabı

Sargı sonu indüktansı motorun fiziksel yapısıyla doğrudan bağlantılıdır. Hesaplamasında birçok değere ihtiyaç duyar. Bu değerler genellikle stator boyutları ile

ilgilidir. Bu çalışmada sargı sonu indüktansı birimi H/faz olarak Denklem 5.18'de verilen denklem ile hesaplanmıştır (CEDRAT, 2005).

$$L_{ss} = \frac{\mu_o}{18p}\left(\frac{N_{ss}N_{tpp}}{N_c}\right)^2 P \tag{5.18}$$

Burada μ_o manyetik geçirgenlik, p kutup sayısı, N_{ss} stator oyuk sayısı, N_{tpp} oyuk başına sarım sayısı, N_c faz başına paralel sargı sayısıdır. Denklem 5.18'deki P ifadesi Denklem 5.19'dan hesaplanır.

$$P = 0.67l_{ss} - 0.3L_{ap} \tag{5.19}$$

Burada l_{ss} sargı sonu indüktansının uzunluğudur. L_{ap} değeri ise Denklem 5.20'den hesaplanır.

$$L_{ap} = \frac{\pi}{2p}\left(D_{bo} + h_{ss}\right) \tag{5.20}$$

Burada D_{bo} rotor dış çapı, h_{ss} stator oyuk yüksekliğidir.

Sargı sonu direnci ise birimi ohm/faz olarak Denklem 5.21'de verilen denklem ile hesaplanır.

$$R_{ss} = \frac{8\delta l_{ss}N_{tpp}N_{spp}}{N_c N_w \pi d_w^2} \tag{5.21}$$

Burada δ sargılarda kullanılan kablonun özdirenci, N_{tpp} oyuk başına sarım sayısı, N_{spp} kutup başına stator oyuk sayısı, N_c faz başına paralel sargı sayısı, N_w sarımda kullanılan teldeki iletken sayısı, d_w iletken telin çapıdır. l_{ss} ise Denklem 5.22'den hesaplanır.

$$l_{ss} = \frac{\pi}{2p}\left(D_{ext} + 2h_{ss}\right) + 2h_{ss} \tag{5.22}$$

Burada D_{ext} stator iç çapıdır.

5.2.2. Kısa devre halkası indüktansı ve direncinin hesabı

Kısa devre indüktansı iki rotor çubuğu arasında kalan her bir parça için birimi H/aralık olarak Denklem 5.23'den hesaplanır (CEDRAT, 2005).

$$L_{kh} = \frac{\pi \mu_o}{N_r}\left(D_{ext} - h_{eq}\right)\lambda_a \tag{5.23}$$

Burada μ_o manyetik geçirgenlik, N_r rotor çubuk sayısı, D_{ext} rotor dış çapı, h_{eq} kısa devre halkasının genişliğidir. λ_a ifadesi Denklem 5.24'den hesaplanır.

$$\lambda_a = 0.365 \log \frac{3\pi\left(D_{ext} - h_{eq}\right)}{4\left(h_{eq} - e_{eq}\right)} \tag{5.24}$$

Burada e_{eq} kısa devre halkasının yüksekliğidir.

Kısa devre halkasının iki çubuk arasında kalan kısmının direnci ise birimi ohm/aralık olacak şekilde Denklem 5.25 kullanılarak hesaplanır.

$$R_{kh} = \frac{2\pi D_r \delta_{er}}{N_r h_{er}\left(D_r - D_i\right)} K_{halka} \tag{5.25}$$

Burada δ_{er} kısa devre halkası malzemesinin özdirenci, D_r rotor çubuğunun merkezinin mil merkezine olan uzaklığı, D_i kısa devre halkasının içi kenarının mil merkezine olan uzaklığı, h_{er} kısa devre halkasının genişliğidir. K_{halka} ise Denklem 5.26'den hesaplanır.

$$K_{halka} = \left[\frac{1 + \left(\frac{D_i}{D_r}\right)^{2p}}{1 - \left(\frac{D_i}{D_r}\right)^{2p}}\right]\left(1 - \frac{D_i}{D_r}\right) \tag{5.26}$$

5.2.3. Atalet momenti ve sürtünme katsayısı hesabı

Atalet momenti katsayısının hesabı Denklem 5.27 kullanılarak yapılır (CEDRAT, 2005).

$$J = \frac{\sum Kayip}{\omega_{no\,\min al} \dfrac{\Delta\omega}{\Delta t}} \tag{5.27}$$

Burada toplam kayıptan kasıt, motorun mekanik kayıplarıdır. Toplam mekanik kayıplar için motorun boşta çalışma kayıplarından yararlanılır. Motor boşta çalışma kayıpları Denklem 5.28'deki gibi yazılabilir.

$$P_o = P_{f+w} + 3R_s I_o^2 + P_{Fe} \tag{5.28}$$

Burada P_{Fe} demir kayıpları, P_{f+w} mekanik kayıplar, R_s faz sargısı direncidir. Toplam mekanik kayıp gücü bulmak için sargı direncinden dolayı oluşan kayıpları boştaki kayıplardan çıkarmak yeterli olacaktır. Böylece toplam mekanik kayıp güç ifadesi Denklem 5.29'daki hale gelir.

$$P_{mek_kay} = P_o - 3R_s I_o^2 \tag{5.29}$$

Sürtünme katsayısı ise toplam mekanik kayıp gücün ω_o boştaki rotor açısal hıza bölünmesiyle Denklem 5.30'da verildiği gibi hesaplanabilir (CEDRAT, 2005).

$$f = \frac{\sum Kayip}{\omega_o^2} \tag{5.30}$$

5.2.4. Motorların kesit çizimleri ve malzemelerin atanması

Bu doktora çalışmasında dört adet farklı güçlerde sincap kafesli derin kuyu asenkron motoru (DKASM) hem benzetimlerde hem de deneylerde kullanılmıştır. Bu motorların genel özellikleri 3 fazlı, 380V, 50Hz ve 2 kutuplu olmalarıdır. Diğer özellikleri aşağıdaki gibidir:

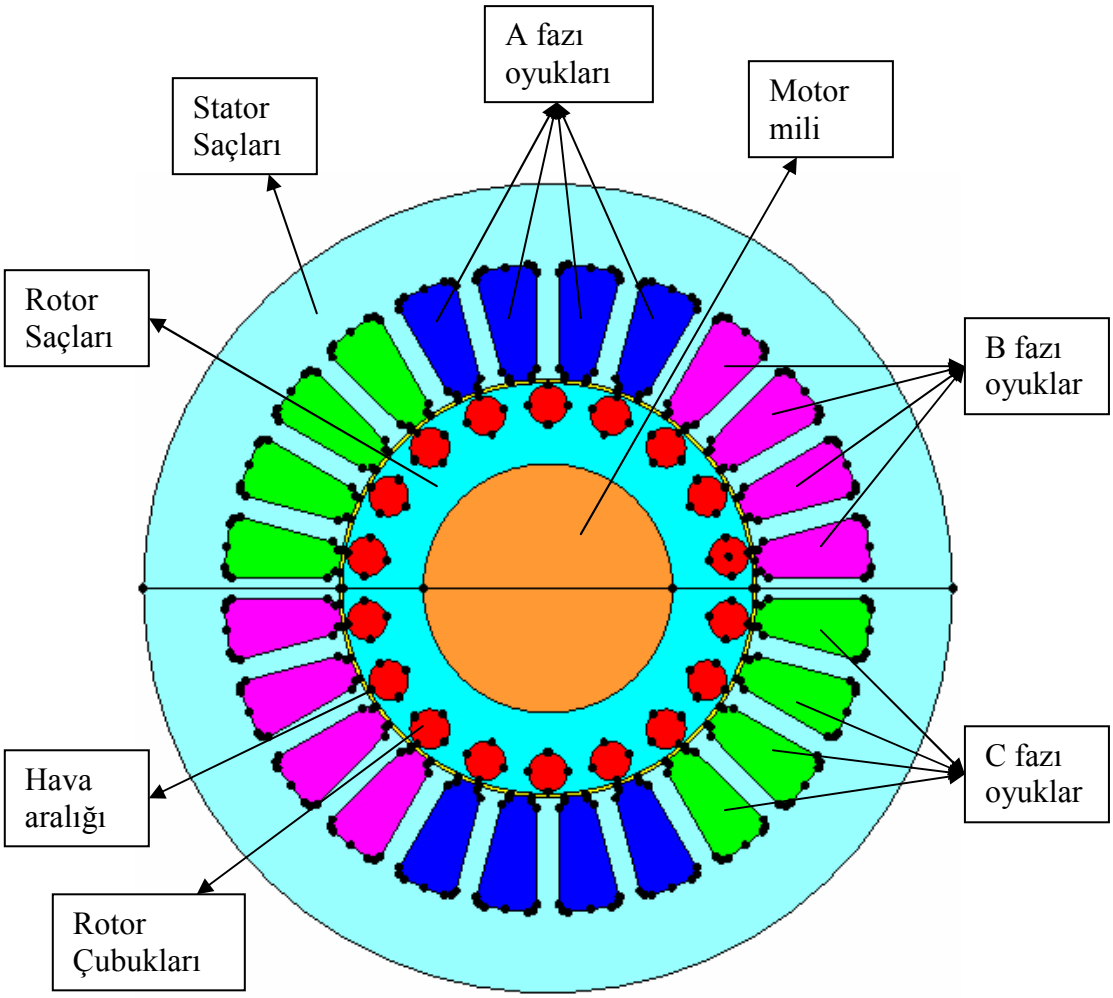
Motor1: 50 HP, 8 ich, 18 rotor çubuklu, 24 stator oyuklu.

Motor2: 30 HP, 8 ich, 18 rotor çubuklu, 24 stator oyuklu.

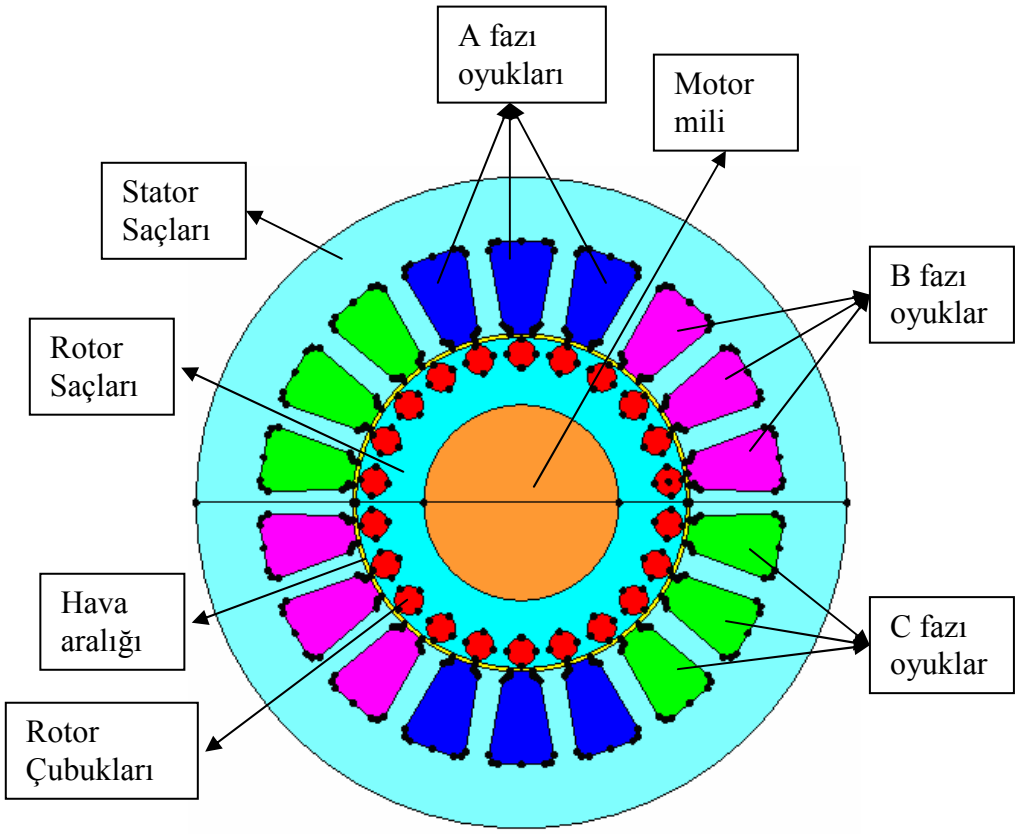
Motor3: 25 HP, 6 ich, 22 rotor çubuklu, 18 stator oyuklu.

Motor4: 10 HP, 6 ich, 22 rotor çubuklu, 18 stator oyuklu.

Motor1 ve Motor2'nin rotor çubuk sayısı ve stator oyuk sayısı aynıdır. Bu sebeple kesit çizimleri aynı olacaktır. Aradaki güç farkı rotor uzunluğu ile sağlanmaktadır. Motor1'in rotor boyu 410 mm ve Motor2'nin rotor boyu 280 mm'dir. Motor3 ve Motor4'ün de rotor çubuk sayısı ve stator oyuk sayısı aynı sayıdadır. Motor3'in rotor boyu 520 mm ve Motor4'nin rotor boyu 250 mm'dir. Bu iki motor için de kesit çizimi aynı olacaktır. Dört motorun da kullanılan malzemeleri, oyuk ve rotor çubuk şekilleri aynıdır. Sadece çizimlerdeki ilgili uzunlukları ve sayıları farklıdır. Motor1 ve Motor2 için yapılan kesit çizimi Şekil 5.1'de, Motor3 ve Motor4 için kesit çizimi Şekil 5.2'de verilmiştir.



Şekil 5.1. Benzetim için Motor1 ve Motor2'nin Flux programında çizilmiş motor kesitleri.



Şekil 5.2. Benzetim için Motor3 ve Motor4'nin Flux programında çizilmiş motor kesitleri.

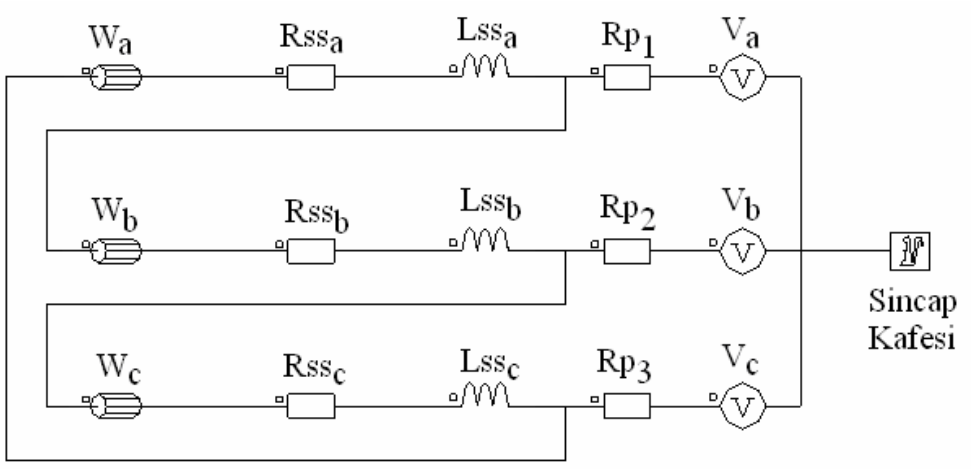
Motor modellemelerinde motorun simetrik yapısından faydalanılarak sadece simetrik parçalardan birisinin çizilmesi yeterlidir. Bu şekilde benzetimde işlem sayısı azaltılmış olacaktır. Bu çalışmada da motorun iki kutuplu olmasından dolayı sağlam motor için motor kesitinin sadece yarısının çizilmesi benzetimler için yerli olacaktır. Ancak rotor çubuk arızalarının benzetimi için tüm motorda bir kırık rotor çubuğunun benzetimi simetriyi bozmaktadır. Bu sebeple motorların benzetimi için motor kesitinin tamamı çizilmiştir.

Dalgıç tipi asenkron motorların modellenmesinde önemli bir nokta; derin kuyu asenkron motorlarının geleneksel asenkron motorlardan farkının; rotor boylarının uzun ve rotor çaplarının küçük olmasıdır. Rotor çapı küçük olduğu için motorun rotor kısmında manyetik doyma önem kazanmaktadır. Eğer rotor mili manyetik olmayan malzemeden yapılacak olursa motorda oluşan manyetik akının geçtiği yüzey alan daralacağı için çabuk doyuma gidecektir. Bu sebeple DKASM'lerde mil malzemesinin seçimi çok önemlidir. Mil malzemesi mutlaka manyetik seçilmelidir.

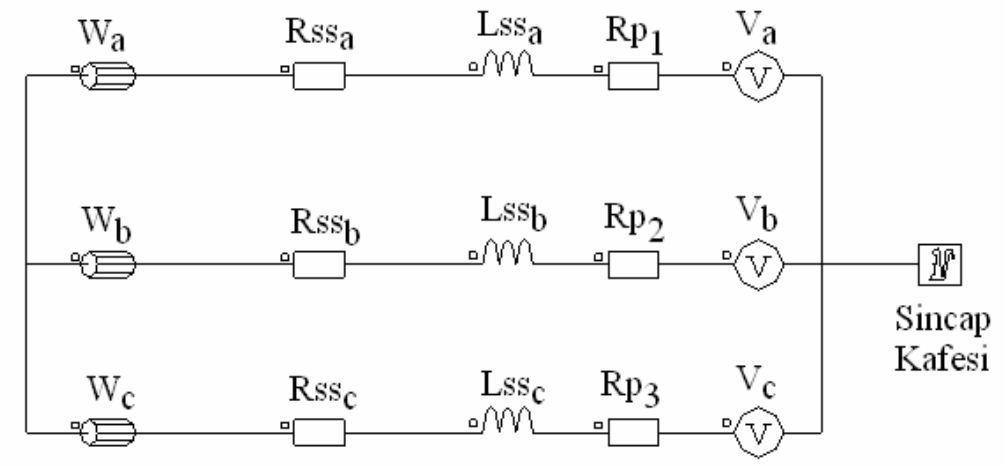
Önemli bir diğer nokta da benzetimlerde manyetik doyumun etkilerinin çıkış değerlerine yansıyabilmesi için stator ve rotor saçlarının B-H eğrilerinin kullanılacak malzemeye göre girilebiliyor olmasıdır.

5.2.5. Elektriksel devreler ve elemanları

Benzetimi yapılan motorlardan Motor1, Motor2 ve Motor3'ün stator faz sargıları üçgen bağlanmıştır. Motor4'ün sargıları ise yıldız bağlanmıştır. Motor1, Motor2 ve Motor3'ün elektriksel devresi Şekil 5.3'de, Motor4'ün elektriksel devresi Şekil 5.4'de verilmiştir.



Şekil 5.3. Benzetimde kullanılan Motor1, Motor2 ve Motor3 için Flux programında çizilmiş elektriksel devresi.



Şekil 5.4. Benzetimde kullanılan Motor4 için Flux programında çizilmiş elektriksel devresi.

Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'deki Lss_a, Lss_b ve Lss_c motor faz sargılarına ait sargı sonu indükatansları, Rss_a, Rss_b ve Rss_c motor faz sargılarına ait sargı sonu dirençleri, W_a, W_b ve W_c stator sargıları, Rp_1, Rp_2 ve Rp_3 gerilim kaynağı iç dirençleri ve V_a, V_b and V_c gerilim kaynaklarıdır. Rp dirençleri motor yol alma durumlarında yüksek akımlardan kaynaklanan gerilim düşümlerinin benzetime yansıması için konulmuştur.

Denklem 5.18 ve 5.21'e göre motorların sargı sonu indüktansları ve dirençleri hesaplanmıştır. Motorların gerekli parametre değerleri ve elde edilen sonuçlar Çizelge 5.1'de verilmiştir. Ayrıca Çizelge 5.1'de stator faz sargıları W_a, W_b ve W_c'ye ait bilgiler de mevcuttur.

Çizelge 5.1. Motor sargı sonu indüktanslarının ve dirençlerinin hesaplanması için gerekli parametreler ve hesaplama sonuçları.

Parametre Açıklaması	Birimi	Motor1	Motor2	Motor3	Motor4
Kablonun özgül direnci	ohm.mm^2/m	0,0178571	0,0178571	0,0178571	0,0178571
Oyuk başına sarım sayısı		16	23	22	27
Kutup başına slot sayısı		4	4	3	3
Faz başına paralel sargı sayısı		1	1	1	1
Sarımda kullanılan teldeki iletken sayısı		1	1	1	1
Tel çapı	mm	2,1	1,6	1,5	1,3
Stator iç çapı	mm	95,50	95,50	72,50	72,50
Oyuk yüksekliği	mm	26,25	26,25	20,00	20,00
Kutup çifti sayısı		1	1	1	1
Stator sargı sonu direnci	**ohm/faz**	**0,2078393**	**0,5146763**	**0,3195238**	**0,5220837**
Manyetik geçirgenlik	H/m	0,0000013	0,0000013	0,0000013	0,0000013
Stator oyuk sayısı		24,00	24,00	18,00	18,00
Rotor dış çapı	mm	94,75	94,75	71,75	71,75
Stator sargı sonu indüktansı	**H/faz**	**0,0013309**	**0,0027502**	**0,0010786**	**0,0016246**

Sincap kafesine ait temel bilgiler çubuk sayısı, rotor boyu (dolayısıyla çubuk boyu), çubuk direnci ve indüktansı, KDH direnci ve indüktansıdır. Çubuk sayısı ve rotor boyu programa doğrudan girilmektedir. Çubuk direnci ve indüktansı; kesit çizimi, girilen çubuk sayısı ve rotor boyu değerleri ile program tarafından hesaplanmaktadır. KDH direnci ve indüktansı değerleri ise Denklem 5.23 ve Denklem 5.25'e göre hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler programa hariçten girilir. Hesaplama için gerekli parametre değerleri ve elde edilen sonuçlar Çizelge 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Kısa devre halkasının indüktanslarının ve dirençlerinin hesaplanması için gerekli parametreler ve hesaplama sonuçları.

Parametre Açıklaması	Birimi	Motor1	Motor2	Motor3	Motor4
Çubuk merk. mil merk. uzaklığıx2 (çap)	m	0,084	0,084	0,0636	0,0636
KDH'nın iç kenarının mil merk.uzaklık çapı	m	0,057	0,057	0,042	0,042
KDH'nın yüksekliği	m	0,019	0,019	0,015	0,015
KDH'nın genişliği	m	0,019	0,019	0,015	0,015
Çubuk sayısı		18	18	22	22
Rotor dış çapı	m	0,095	0,095	0,072	0,072
Rotor sargı sonu direnci	**ohm/aralık**	**7,266E-07**	**7,266E-07**	**8,659E-07**	**8,659E-07**
Rotor sargı sonu indüktansı	**H/aralık**	**1,565E-08**	**1,565E-08**	**1,126E-08**	**1,126E-08**

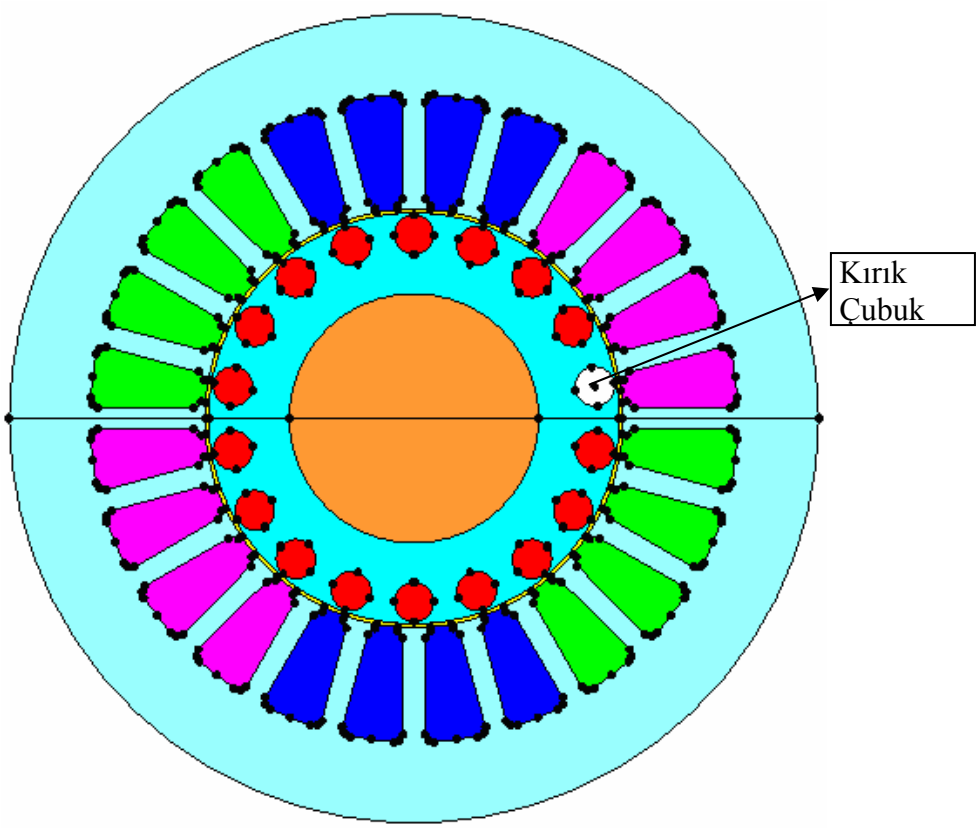
Gerilim kaynakları sinüzoidal ve efektif değeri 380V olan üç fazlı gerilim kaynaklarıdır.

5.2.6. Rotor arızalarının benzetimi

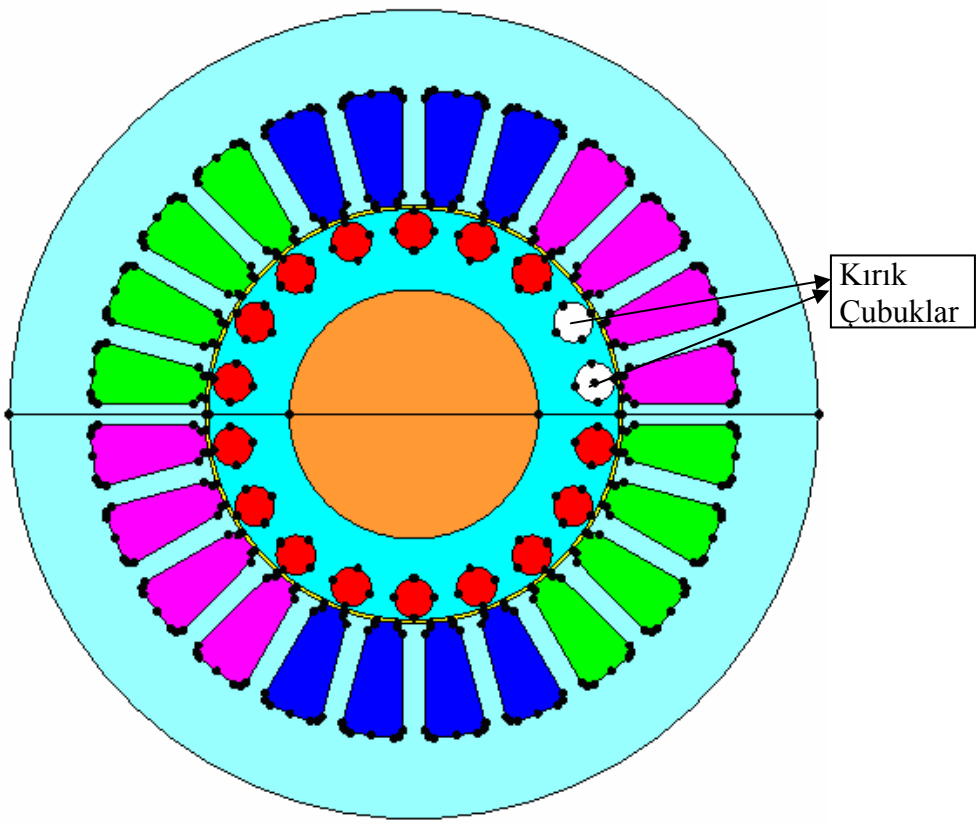
Bu doktora çalışmasında biri sağlam, beşi rotor arızası olmak üzere 6 farklı motor durumu incelenmiştir. İncelenilen rotor arızaları aşağıda verilmiştir:

a. Bir çubuğu yüksek dirençli rotor,
b. Bir çubuğu kırık rotor,
c. İki çubuğu kırık rotor,
d. Üç çubuğu kırık rotor,
e. Kısa devre halkası kırık rotor.

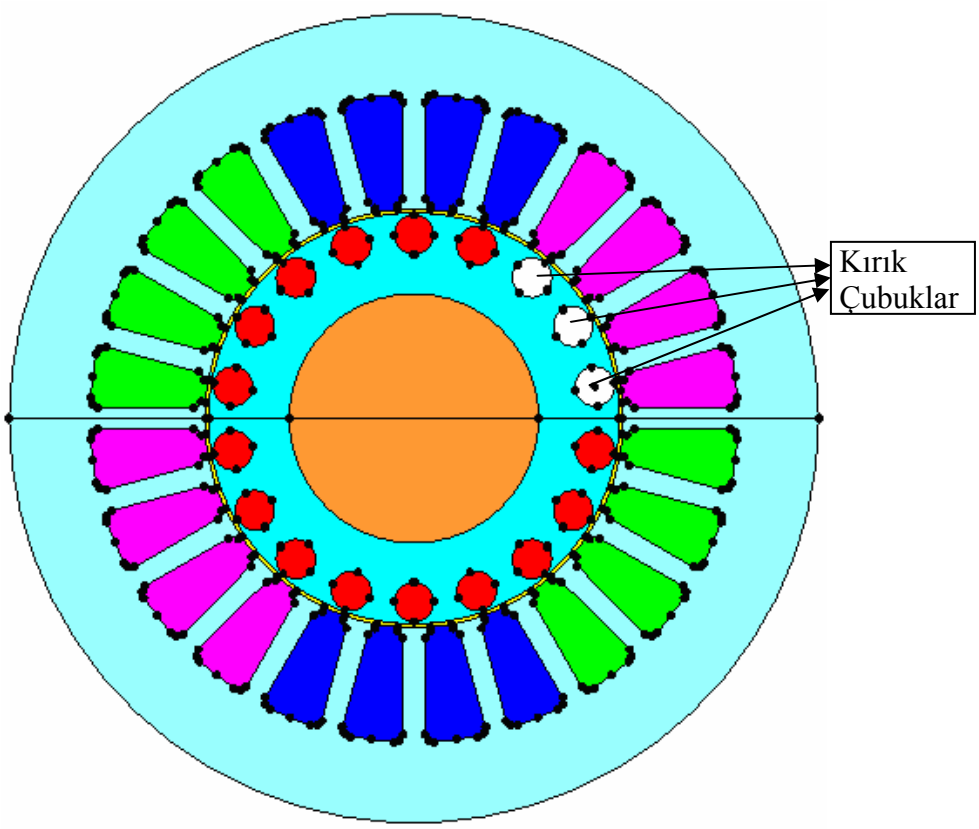
Yüksek dirençli çubuk, programda çizilen motor kesitinde rotor çubuklarına malzeme bilgisi girilirken direnç değeri diğerlerinden %6 azalacak şekilde bir özdirenç değeri girilerek elde edilmiştir. Kırık çubuklar için ise malzeme bilgisi ataması yaparken özdirenç değerinin çok büyük bir değer girilmesi yeterlidir. Motor1 için Şekil 5.5'de bir kırık, Şekil 5.6'da iki kırık ve Şekil 5.7'de üç kırık çubuk arızalarının benzetimleri için direnç değerleri sonsuz yapılan rotor çubukları renk değiştirilerek gösterilmiştir. Diğer üç motorda da aynı konumdaki çubuklar seçilmiştir. İki boyutlu benzetim kullanıldığı için halka kırık arızasının benzetimi yapılmamıştır.



Şekil 5.5. Motor1'de bir kırık çubuk arızası benzetimi için seçilen rotor çubuğunun kesitte gösterimi.



Şekil 5.6. Motor1'de iki kırık çubuk arızası benzetimi için seçilen rotor çubuklarının kesitte gösterimi.



Şekil 5.7. Motor1'de üç kırık çubuk arızası benzetimi için seçilen rotor çubuklarının kesitte gösterimi.

5.2.7. Benzetimin gerçekleştirilmesi

Motorların benzetimleri motorun yol alma sürecini ve kararlı durumda çalışmasını incelemek için iki ayrı şekilde yapılmıştır. Benzetimler sağlam, bir çubuğu yüksek dirençli rotor, bir çubuğu kırık rotor, iki çubuğu kırık rotor, üç çubuğu kırık rotor arızaları için ayrı ayrı hem yol alma hem de kararlı durum için yapılmıştır ve sonuçlar kaydedilmiştir. Kararlı durum benzetimi için motor nominal hızında benzetimleri yapılmıştır. Yol alama sürecinin benzetimi için motora boşta yol verilmiştir.

Arızaların etkilerinin zamanla değişimlerini görebilmek için benzetimde motor modelinin çözümü için iki boyutlu zaman adımlamalı tranzient manyetik çözüm (2D time stepping transient magnetic algorithm) algoritması kullanılmıştır. Benzetimler gerekli olan motorların atalet momenti ve sürtünme katsayıları Denklem 5.29 ve 5.30'a göre hesaplanmıştır. Motorların gerekli parametre değerleri ve elde edilen sonuçlar Çizelge 5.3'te verilmiştir.

Çizelge 5.3. Motor atalet momenti ve sürtünme katsayılarının hesaplanması için gerekli parametreler ve hesaplama sonuçları.

Parametre Açıklaması	Birimi	Motor1	Motor2	Motor3	Motor4
Boştaki giriş gücü	w	5200	4800	4500	3750
Boştaki akım	A	27	19	25,88	11
Sargı direnci	ohm/faz	0,47	0,96	0,96	0,75
Toplam mekanik kayıplar	W	4172,11	3760,32	2571,0497	3477,75
w nominal	rad/s	301,0693	301,17402	300,5457	300,33626
n nominal	d/d	2875	2876	2870	2868
Δw	rad/s	401,43	401,57	400,73	400,45
Δt (durma süresi)	s	60,00	60,00	60,00	60,00
J (atalet momenti katsayısı)	**kg.m^2**	**2,0712634**	**1,8655304**	**1,2808609**	**1,7349835**
Bostaki hız	d/d	2997	2997	2997	2997
w bosta	rad/s	313,84511	313,84511	313,84511	313,84511
f (sürtünme katsayısı)	**N.m.s/rad**	**0,042357**	**0,0381763**	**0,0261024**	**0,0353076**

5.3. Benzetim Sonuçlarının Doğrulanması

Benzetimlerde kullanılan yöntemlerin, çizimlerin ve hesaplamaların doğruluğunu kontrol etmek için benzetim sonuçları ile motorların etiket değerleri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar test edilen motorların etiket değerleri baz alınarak benzetimlerden elde edilen motor akımları, motor momentleri ve mekaniki güçleri kullanılarak yapılmıştır. Çizelge 5.4'de motorların etiket değerleri ve benzetim sonuçları verilmiştir. Yüzde olarak yaklaşımları Çizelge 5.5'de görülmektedir.

Çizelge 5.4. Motor etiket değerleri ve benzetim sonuçları.

	MOTOR1	MOTOR2	MOTOR3	MOTOR4
Etiket Değerleri [A]	55,0	50,0	42,0	17,3
Benzetim Akımı [A]	53,0	49,7	39,5	16,7
Etiket Değerleri [W]	26370	22080	18400	7360
Benzetim Pmek [W]	27818	25124	19104	8094
Etiket Değerleri [Nm]	86,2	73,0	60,9	24,3
Benzetim Moment [Nm]	91,0	83,5	63,5	27,0

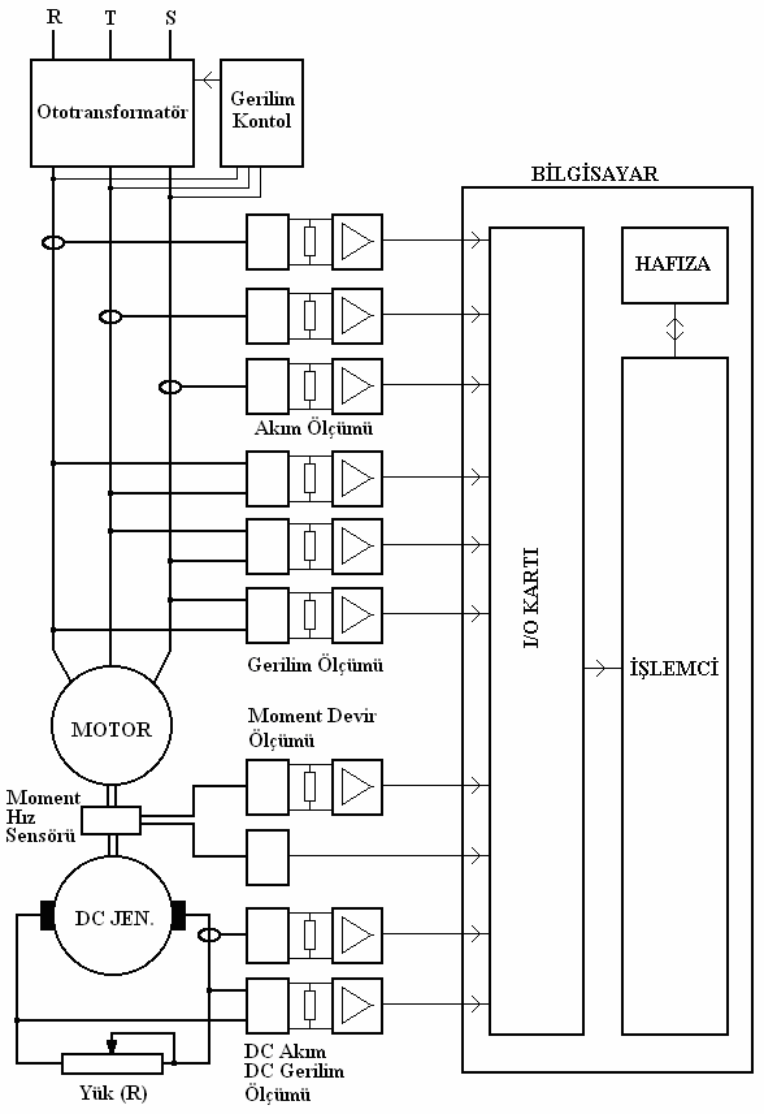
Çizelge 5.5. Benzetim sonuçları ile motor etiket değerleri arasındaki farkın karşılaştırması.

	MOTOR1	MOTOR2	MOTOR3	MOTOR4
Benzetim Akımı [%]	3,7	0,6	6,0	3,2
Benzetim Pmek [%]	-5,5	-13,8	-3,8	-10,0
Benzetim Moment [%]	-5,5	-14,3	-4,3	-10,7

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1. Kullanılan Deney Düzeneği

Deneyler Konya ilinde bulunan DKASM üretimi yapan POLMOT motor fabrikasında yapılmıştır. Fabrikanın ürün geliştirmesinde yeni tasarlanan motorların karakteristiklerinin incelenmesi için Doç.Dr. Abdullah ÜRKMEZ ve Yrd.Doç.Dr. Osman BİLGİN tarafından bir deney seti tasarlanmış ve kurulmuştur. Bu test sistemi, geçici durum analizi yapmaya uygun hale getirilerek bu doktora çalışmasının deneyleri için kullanılmıştır. Deney düzeneğine ait blok şema Şekil 6.1'de ve fotoğrafı Şekil 6.2'de verilmiştir.



Şekil 6.1. Kullanılan deney düzeneğine ait blok şeması.



Şekil 6.2. Kullanılan deney düzeneğinin fotoğrafı.

Motor verilerinin okunabilmesi ve okunan değerlerin kaydedilmesi için bilgisayar kullanılmıştır. Motordan alınan bilgiler sensörlerden analog sinyaller olarak geldiği için bilgisayara PCI slotuna bağlanabilen, 250 kHz örnekleme hızına sahip, 16 analog girişli veri erişim kartı kullanılmıştır.

Test edilecek motorların beslemesi 150 kVA'lık bir ototrafosu üzerinden yapılmıştır. Ototrafonun çıkış gerilimi elektronik olarak elle ayarlanabilmektedir. Deney setine ait Ototrafonun fotoğrafı Şekil 6.3'de verilmiştir.



Şekil 6.3. Deney düzeneğine ait ototrafonun fotoğrafı.

Motor akımlarını ve gerilimlerini okumak için lineerliği çok iyi, hassasiyeti yüksek ve elektriksel yalıtımı olan sensörler kullanılmıştır. Bu sensörler Hall etkisi

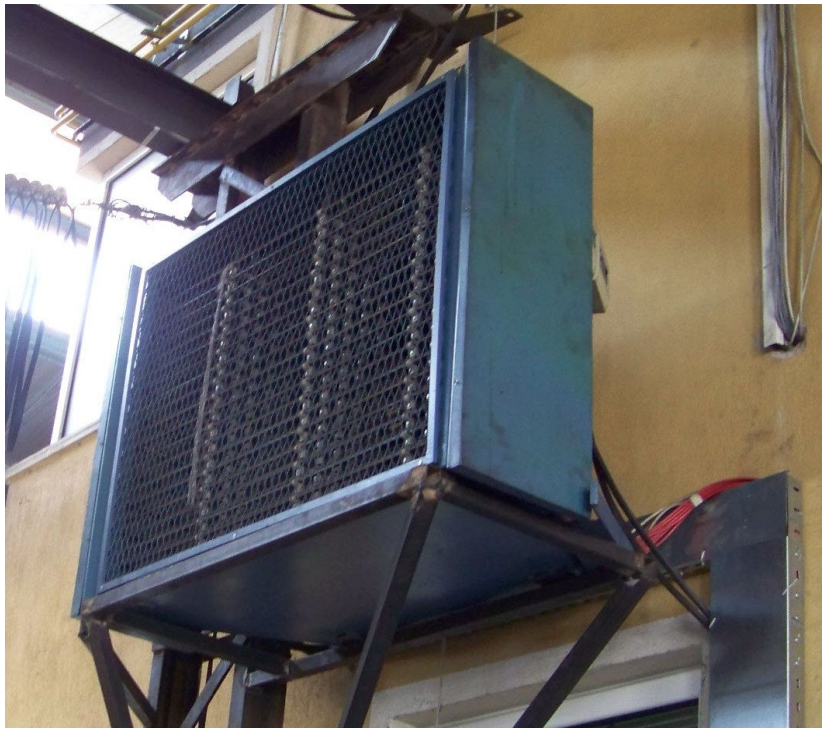
prensibine göre çalışmaktadır. Bu sebeple bir besleme gerilimine ihtiyaç duymaktadırlar. Ayrıca sensörlerin yapı itibariyle akım bilgisine ihtiyaç duymasından dolayı gerilim hattından sensöre gelen uçlardan her birine seri olarak bir direnç bağlanmıştır. Ayrıca bu sensörler yapı itibariyle geçen akıma bağlı olarak bir potansiyel farkı üretirler. Bu üretilen farkın okunabilmesi için sensörün çıkışlarına paralel bir direnç bağlanmıştır. Direnç uçlarındaki gerilim okunarak girişteki değer bilgisine ulaşılmıştır. Burada önemli bir nokta da dirençlerin çalışmaları boyunca sürekli olarak ısınmalarıdır. Direnç ısındıkça değeri değişeceğinden burada kullanılan ölçü dirençlerinin soğutulması gerekmektedir. Bu sebeplerden dolayı bir sensör ara kartı yapılmıştır. Bu ara kart sayesinde motor akımları ve gerilimlerine ait sensör çıkış sinyalleri veri erişim kartının girişlerine uygun hale getirilmiştir. Oluşturulan akım gerilim okuma kartının fotoğrafı Şekil 6.4'de görülmektedir.



Şekil 6.4. Motor akım ve gerilimlerini okumak için yapılan sensör kartı fotoğrafı.

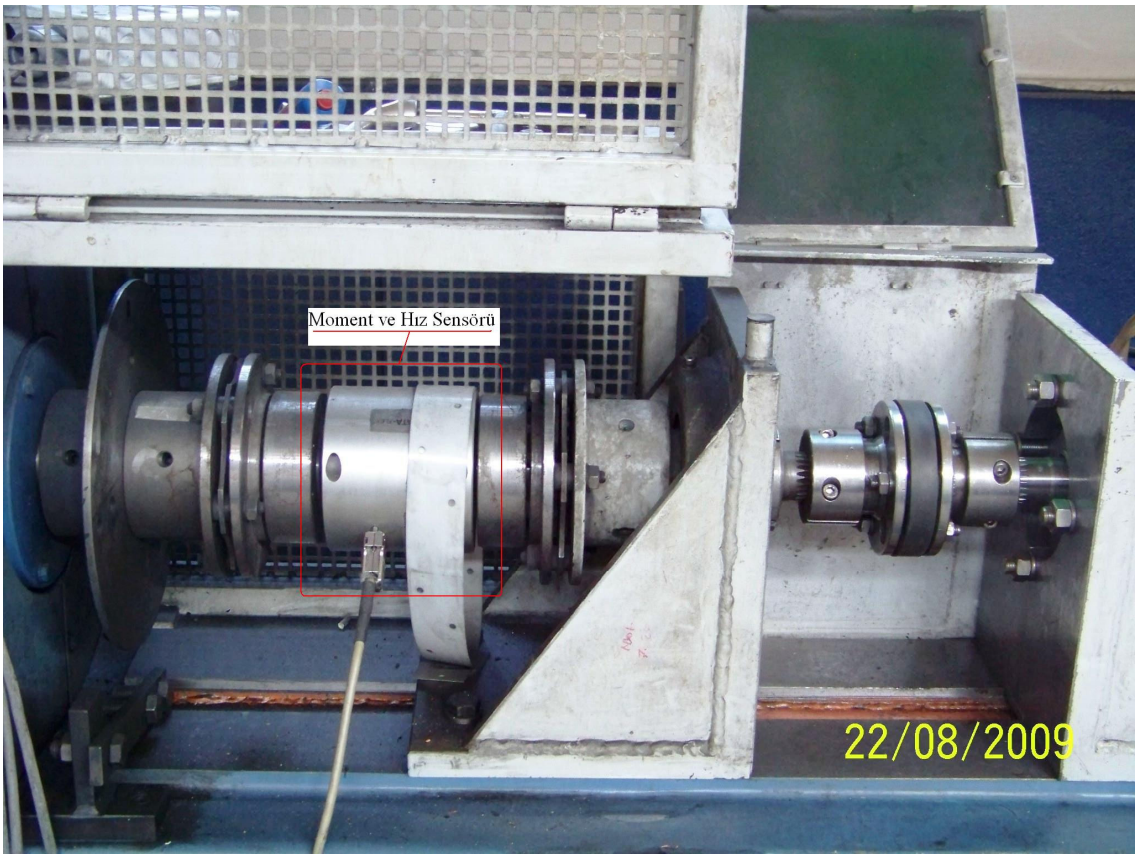
Deneylerde motorları yüklemek için doğru akım jeneratörü kullanılmıştır. Jeneratörlerin yüklenebilmesi için (dolaylı olarak motoru istenilen kademede yükleyebilmek için) de yük dirençleri kullanılmıştır. Kullanılan dirençlerin fotoğrafı Şekil 6.5'de verilmiştir. Jeneratör akım ve gerilimini ölçmek için elektriksel yalıtımlı, doğru akım ve gerilim ölçümlerinde lineer çıkış verebilen akım ve gerilim sensörleri

kullanılmıştır. Her iki sensör sırasıyla 0-500A ve 0-400V giriş değerlerine karşı 0-10V gerilim çıkışı üretmektedir. Bu çıkışlar doğrudan bilgisayardaki veri erişim kartına bağlanmıştır.



Şekil 6.5. Jeneratörü yüklemek için kullanılan dirençlerin fotoğrafı.

Moment ve hız bilgisini almak için motor ile jeneratör milleri arasında eksenel olarak yerleştirilmiş burulmaya bağlı moment bilgisi üreten moment sensörü kullanılmıştır. Bu sensör aynı zamanda hız bilgisi için 60 çentikli dolayısıyla bir devirde 60 kare dalga sinyali üretebilen hız sensörü içermektedir. Moment sensörü 0-500 Nm'ye karşılık 0-5V lineer gerilim vermektedir. Doğrudan veri erişim kartına bağlanmıştır. Hız sensöründen gelen kare dalga sinyalin Lojik 0 seviyesi 0.7V ve Lojik 1 seviyesi 4.5V olacak şekilde optokuplörlü bir ara devre ile veri erişim kartına bağlantısı yapılmıştır. Moment ve hız sensörünün deney setindeki bağlantının fotoğrafı Şekil 6.6'da verilmiştir.



Şekil 6.6. Moment ve hız sensörü ve deney düzeneğine bağlanmış halinin fotoğrafı.

Deney düzeneğinden okunan verilerin öncelikle parazitler için donanımsal filtrelerle filtrelenmesi gerekmektedir. Örnekleme frekansı yüksek tutularak yazılımsal olarak dijital filtrelerle istenilen düzeyde filtremle yapılabilmektedir (Costa ve ark., 2004).Veri erişim kartına ait bağlantı klamensi üzerinde bulunan alçak geçiren filtreler kullanılarak bütün motor verileri donanımsal olarak filtrelenmiştir. Verilerin incelenmesi aşamasında da hem alçak geçiren hem yüksek geçiren dijital filtreler kullanılmıştır.

6.2. Motor Verilerinin Okunması ve Kaydedilmesi

Motor verilerinin okunması PCI slotuna bağlanabilen veri erişim kartı ile yapılmıştır. Okunan motor verileri aşağıda listelenmiştir:

1. Motor A fazı gerilimi,
2. Motor B fazı gerilimi,
3. Motor C fazı gerilimi,
4. Motor A fazı akımı,

5. Motor B fazı akımı,
6. Motor C fazı akımı,
7. Motor momenti,
8. Motor hızı,
9. Jeneratör gerilimi,
10. Jeneratör akımı.

Her bir motor için okunan veri sayısı 10 adettir. Her bir veri için örnekleme frekansının 7500 Hz olması bu çalışma için yeterlidir. Bütün verileri eş zamanlı olarak örneklemek için veri erişim kartının örnekleme frekansı 75 kHz olarak ayarlanmış ve bütün veriler sırayla örneklenmiştir. Ancak hız bilgisinin kare dalga olması ve analog olarak örneklenecek olmasından dolayı 7500 Hz'lik örnekleme frekansı yüksek motor hızları için yetersiz kalmaktadır. Bundan dolayı hız bilgisinin örnekleme frekansını 22500 Hz'e çıkarmak için hız verisi eşit aralıklı olacak şekilde üç kez örneklenmiştir. Buna göre örnekleme sırası aşağıda verildiği gibi yapılmıştır:

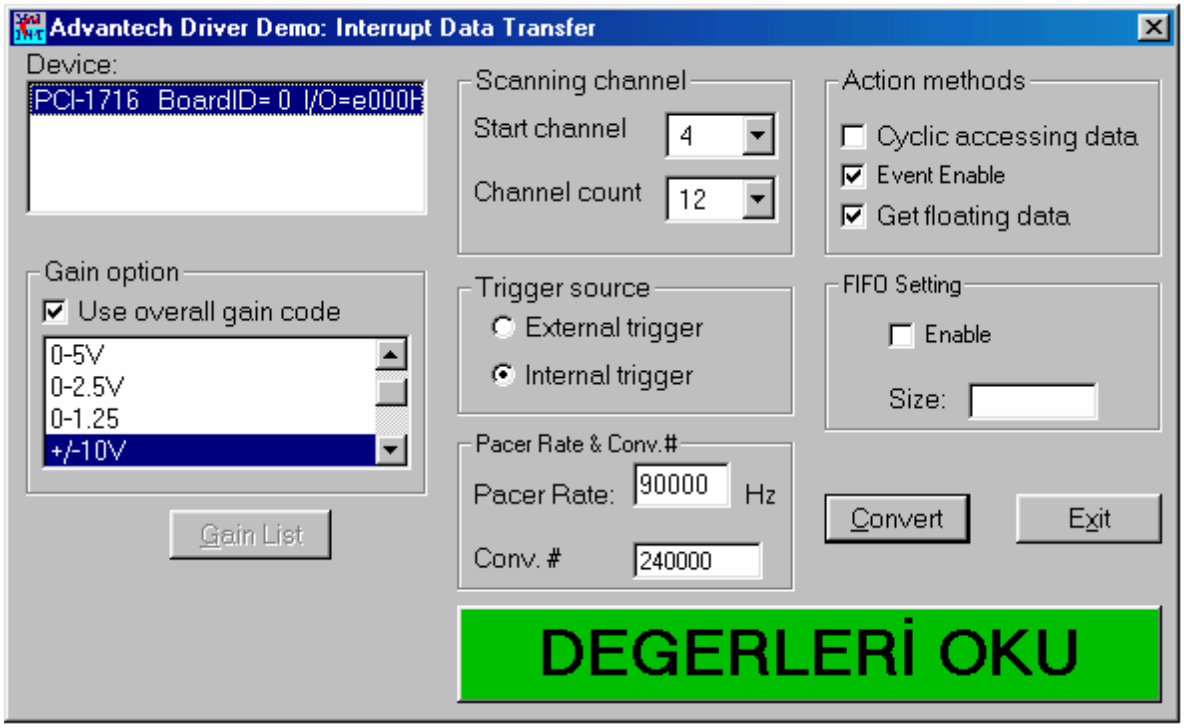
1. Motor A fazı gerilimi,
2. Motor B fazı gerilimi,
3. Motor C fazı gerilimi,
4. Motor hızı,
5. Motor A fazı akımı,
6. Motor B fazı akımı,
7. Motor C fazı akımı,
8. Motor hızı,
9. Motor momenti,
10. Jeneratör gerilimi,
11. Jeneratör akımı,
12. Motor hızı.

Örneklenecek veri sayısı 12'ye çıktığı için her veri örnekleme süresinin 7500 Hz'de kalmasını sağlamak amacıyla veri erişim kartı örnekleme hızı 90 kHz'e çıkartılmıştır. Kararlı durum çalışmasında her bir motor ve her bir arıza durumu için üçer saniyelik veriler alınıp kaydedilmiştir. Yol alma durumu için ise yine her bir motor ve her bir arıza durumu için 10'ar saniyelik veriler alınarak kaydedilmiştir. Veri erişim kartının ayarlarının yapılması, motor verilerinin veri erişim kartıyla örneklenmesi, örneklenen verilerin kaydedilme öncesi kontrolü ve verilerin kaydedilmesi için nesneye yönelik programlama dili ile bir program yazılmış ve deneylerde bu program

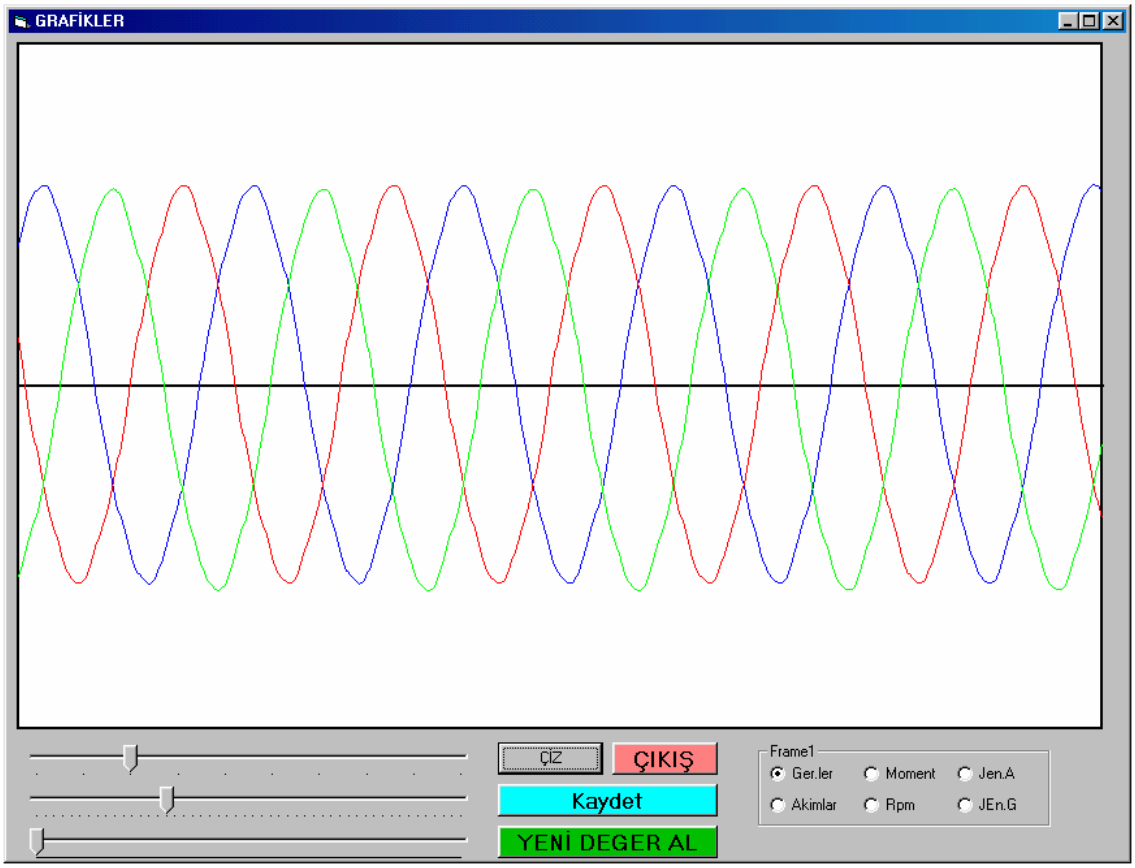
kullanılmıştır. Programın ana ara yüzü Şekil 6.7'de, veri erişim kartı ayarlarının yapıldığı ara yüz Şekil 6.8'de ve alınan verilerin kontrolünün yapıldığı ara yüzü Şekil 6.9'da verilmiştir.



Şekil 6.7. Veri erişim kartının kontrolü ve motor verilerinin alınması için yazılan programın ana ara yüzü.



Şekil 6.8. Veri erişim kartının ayarlarının yapıldığı ara yüz.



Şekil 6.9. Alınan verilerin ilk kontrollerinin yapıldığı grafik ara yüzü.

6.3. Rotor Arızalarının Oluşturulması

Rotor arızalarının motor performansına etkilerini incelemek için yapılan deneysel çalışmada sağlam motorla birlikte beş farklı rotor arızası incelenmiştir. İncelenilen rotor arızaları aşağıda verilmiştir:

a. Bir çubuğu yüksek dirençli rotor,
b. Bir çubuğu kırık rotor,
c. İki çubuğu kırık rotor,
d. Üç çubuğu kırık rotor,
e. Kısa devre halkası kırık rotor.

Rotorların imalatındaki aşamalar aşağıdaki gibi 7 ana başlıkta sıralanabilir:

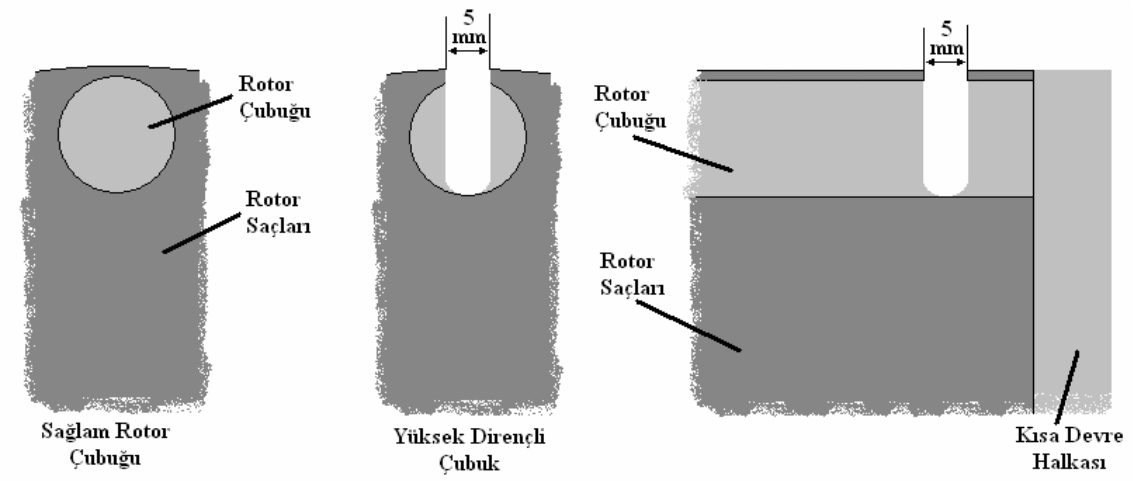
1. Rotor saçlarının birleştirilmesi,
2. Rotor milinin rotor saçlarına yerleştirilmesi,
3. Rotor çubuklarının çakılması,
4. Kısa devre halkalarının kaynatılması,
5. Balans halkalarının takılması,

6. Rotor yüzeyinin taşlanması,
7. Balansının alınması ve montajının yapılması.

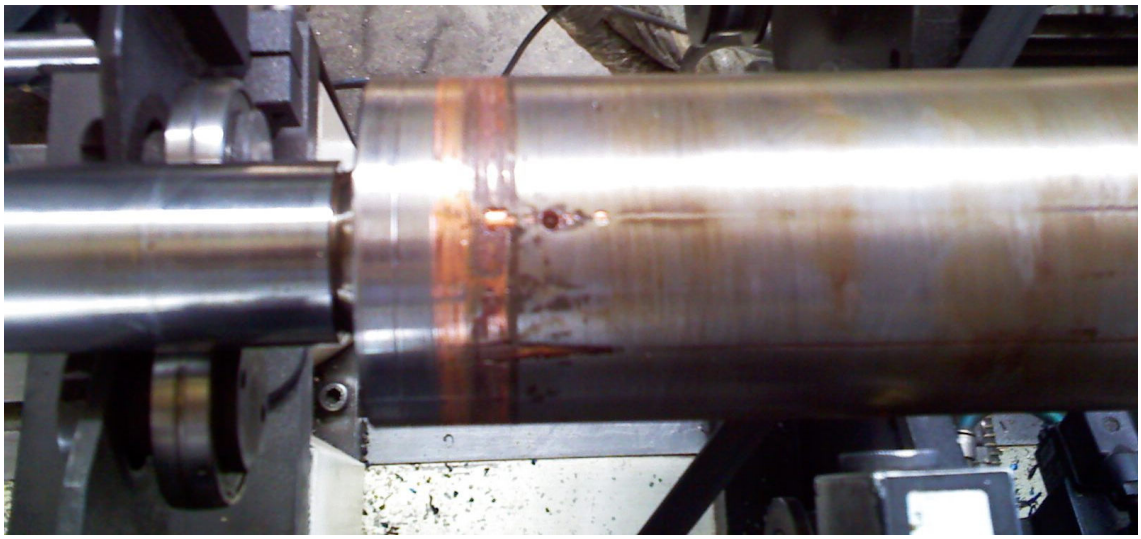
Deneysel amaçla oluşturulan rotor arızalarının her biri bu son beş aşamadan ayrı ayrı geçirilerek birleşik arızaların oluşması önlenmiş ve arızaların gerçeğe daha yakın olması sağlanmıştır.

6.3.1. Yüksek dirençli çubuk arızası

Yüksek dirençli çubuk arızası; rotor çubuğu üzerinde oluşan arıza ya da hata sonucu çubuk iletkenliğinin tamamen yok olmadığı ama çubuğun iletkenliğinin azaldığı arızaları temsil etmektedir. Bu gibi arızalara dökümle oluşturulan çubuklarda arada kalmış hava kabarcığı ve ya yabancı bir cisim ya da kaynakla yapılan imalatlarda kısa devre halkasına iyi kaynatılamamış rotor çubuğu arızaları örnek verilebilir. Yüksek dirençli çubuk arızasını deneysel olarak temsil etmek için rotor çubuklarından biri çubuk kesiti azaltılacak şekilde çubuk uç kısmına yakın bölgeden 5mm matkap ucu ile delinmiştir. Böylece direnci %6 oranında yükseltilmiştir. Yapılan işlemin gösterimi Şekil 6.10'da verilmiştir. Bu şekilde elde edilen rotorun fotoğrafı Şekil 6.11'de verilmiştir.



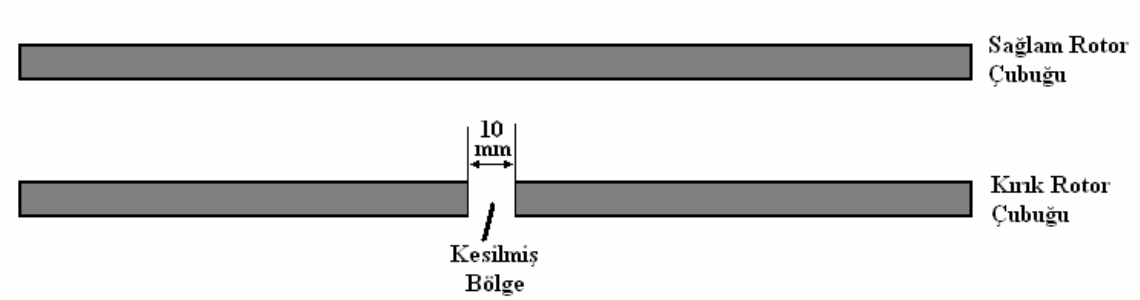
Şekil 6.10. Yüksek dirençli çubuğun elde edilmesi.



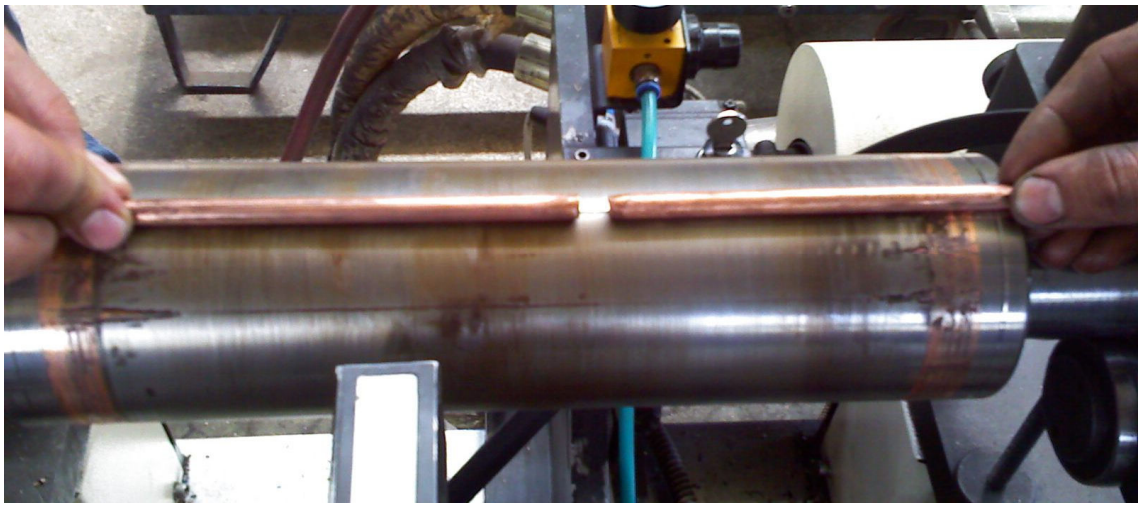
Şekil 6.11. Yüksek dirençli çubuk bulunan rotorun fotoğrafı.

6.3.2. Kırık çubuk arızası

Kırık çubuk arızası; rotor çubuğunun iletkenliğinin tamamen kaybolduğu arıza durumlarını temsil etmektedir. Bu gibi arızalara dökümle oluşturulan çubuklarda arada kalmış hava kabarcığı ve ya yabancı bir cismin çubuk kanalını tamamen kapatacağı şekilde oluşması ya da kaynakla yapılan imalatlarda kısa devre halkasına hiç kaynamamış olduğu durumlar örnek verilebilir. Kırık çubuk arızasını deneysel olarak temsil etmek için rotor çubuklarından biri ortasından 10mm kadar bir parçanın alınmasıyla elde edilmiştir. Böylece çubuğun iletkenliği tamamen yok edilmiştir. Yapılan işlemin gösterimi Şekil 6.12'de verilmiştir. Bu şekilde elde edilen rotorun fotoğrafı Şekil 6.13'de gösterilmiştir.



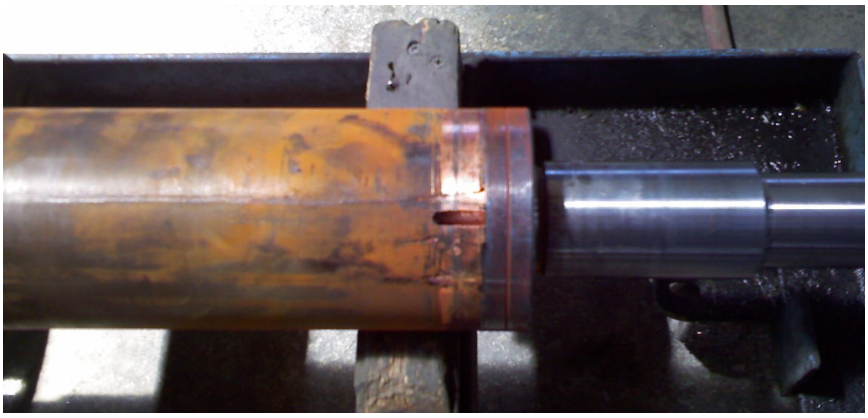
Şekil 6.12. Kırık çubuğun elde edilmesi.



Şekil 6.13. Kırık çubuk arızasının rotor üzerinde gösterilmesi.

6.3.3. Kısa devre halkası arızası

Kısa devre halkası arızası; kısa devre halkasının herhangi bir bölümünde iletkenliğinin tamamen kaybolduğu arıza durumlarını temsil etmektedir. Bu gibi arızalara dökümle oluşturulan halkalarda arada kalmış hava kabarcığı ve ya yabancı bir cismin çubuk kanalını tamamen kapatacağı şekilde oluşması ya da kaynakla yapılan imalatlarda kısa devre halkasının çubuk kısımlarında meydana gelen kütü kaynak sonucu ortaya çıkan durumlar örnek verilebilir. Kısa devre halkası kırık rotor arızasını deneysel olarak temsil etmek için rotor halkası iki çubuk arasından iletkenliği tamamen gidecek şekilde 5mm genişliğinde bir oyuk açılmasıyla elde edilmiştir. Böylece halkanın o bölgedeki iletkenliği tamamen yok edilmiştir. Bu şekilde elde edilen rotorun fotoğrafı Şekil 6.14'de verilmiştir.



Şekil 6.14. Kısa devre halkası kırık rotorun fotoğrafı.

Deneylerde kullanılan DKASM'larından üç tanesinin fotoğrafı Şekil 6.15'de verilmiştir.



Şekil 6.15. Deneylerde kullanılan DKASM'lar.

7. BENZETİM SONUÇLARI

Benzetimler 50HP, 30HP, 25HP ve 10HP gücünde dört farklı motor için sağlam motor ve dört farklı rotor arızası olmak üzere toplam 5 durumda yapılmıştır. Her bir durum için benzetimlerden elde edilen sonuçlar kararlı durum, yol alma durumu ve hız-moment eğrisi için üç ayrı grupta incelenmiştir. Benzetimlerde incelenilen rotor arızaları aşağıda verilmiştir:

a. Bir çubuğu yüksek dirençli rotor,
b. Bir çubuğu kırık rotor,
c. İki çubuğu kırık rotor,
d. Üç çubuğu kırık rotor.

7.1. Kararlı Durum İçin Benzetim Sonuçları

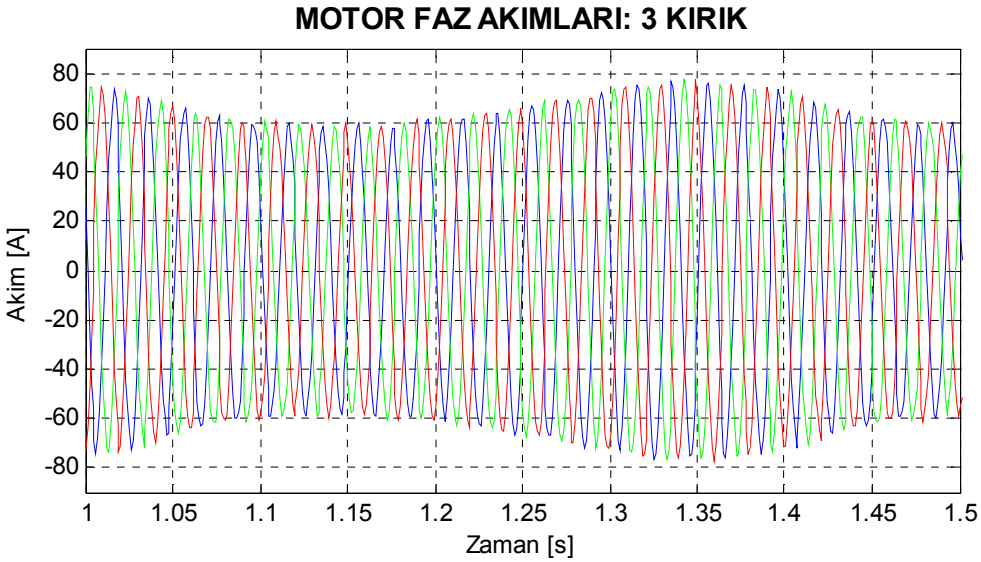
Benzetimle elde edilen sonuçlarla arızaların motor performansına yaptığı etkiler incelenmiştir. Performans kapsamında incelenilecek motor çıktıları aşağıda verilmiştir:

a. Motor akımları,
b. Motor momenti,
c. Motor hızı,
d. Motor güç faktörü,
e. Motor mekaniki gücü,
f. Motor verimi.

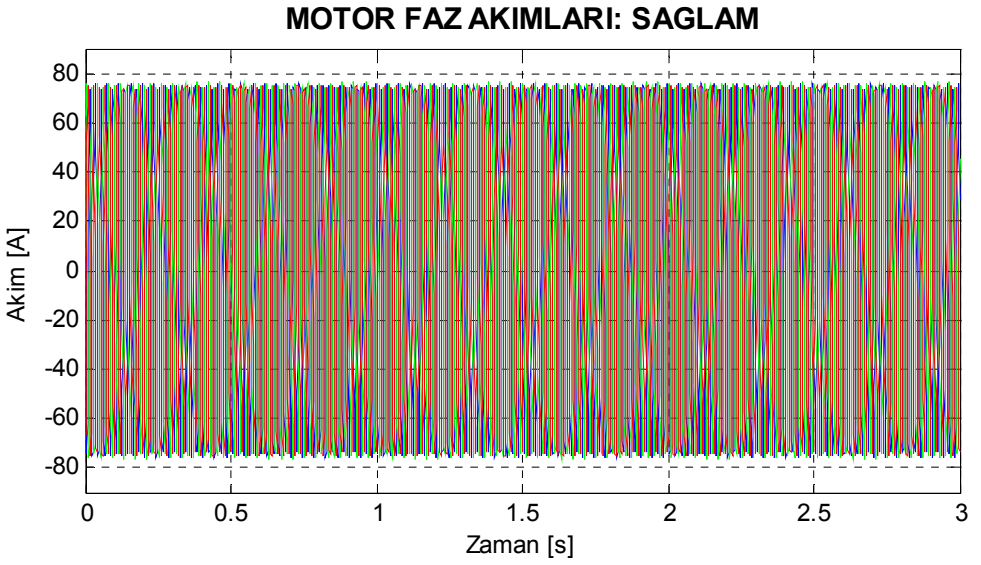
7.1.1. Kararlı durumda motor akımları

Rotor arızalarının motor akımına etkileri kaymaya bağlı olarak (Denklem 3.1) düşük frekanslarda oluşacağından dolayı kısa veri aralığı yerine etkilerin daha net görülebilmesi için uzun veri aralıkları kullanılarak akım grafikleri çizdirilmiştir. Üç kırık çubuklu motor durumu için motor akımının kısa veri aralığı ile çizilmiş hali Şekil 7.1'de verilmiştir. Benzetimle elde edilen motor akımlarının uzun veri aralıklı grafikleri Motor1 için sağlam, yüksek dirençli, 1 kırık, 2 kırık ve 3 kırık çubuklu arıza durumları için sırasıyla Şekil 7.2, Şekil 7.3, Şekil 7.4, Şekil 7.5 ve Şekil 7.6'da; Motor2 için sağlam, yüksek dirençli, 1 kırık, 2 kırık ve 3 kırık çubuklu arıza durumları için sırasıyla Şekil 7.7, Şekil 7.8, Şekil 7.9, Şekil 7.10 ve Şekil 7.11'de; Motor3 için sağlam, yüksek

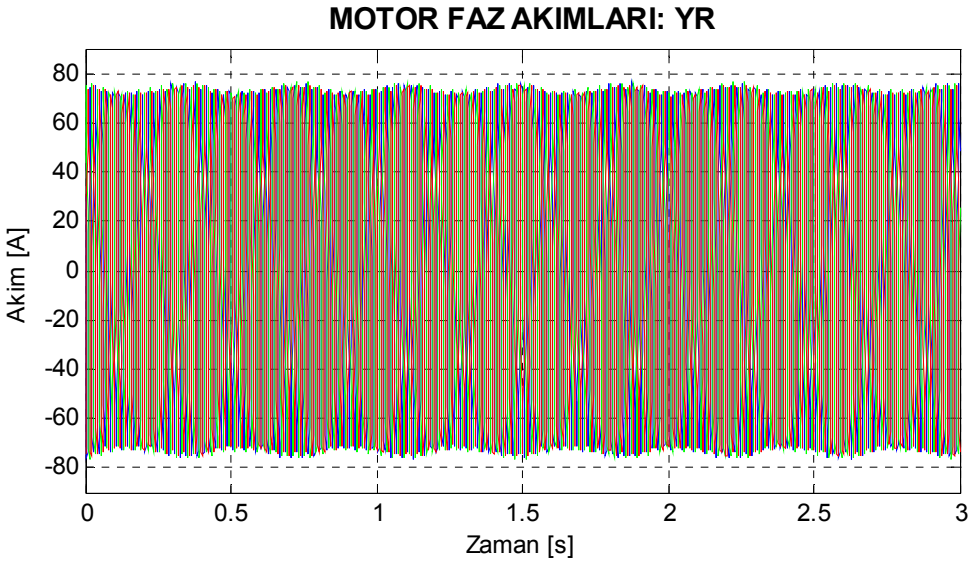
dirençli, 1 kırık, 2 kırık ve 3 kırık çubuklu arıza durumları için sırasıyla Şekil 7.12, Şekil 7.13, Şekil 7.14, Şekil 7.15 ve Şekil 7.16'da; Motor4 için sağlam, yüksek dirençli, 1 kırık, 2 kırık ve 3 kırık çubuklu arıza durumları için sırasıyla Şekil 7.17, Şekil 7.18, Şekil 7.19, Şekil 7.20 ve Şekil 7.21'de verilmiştir.



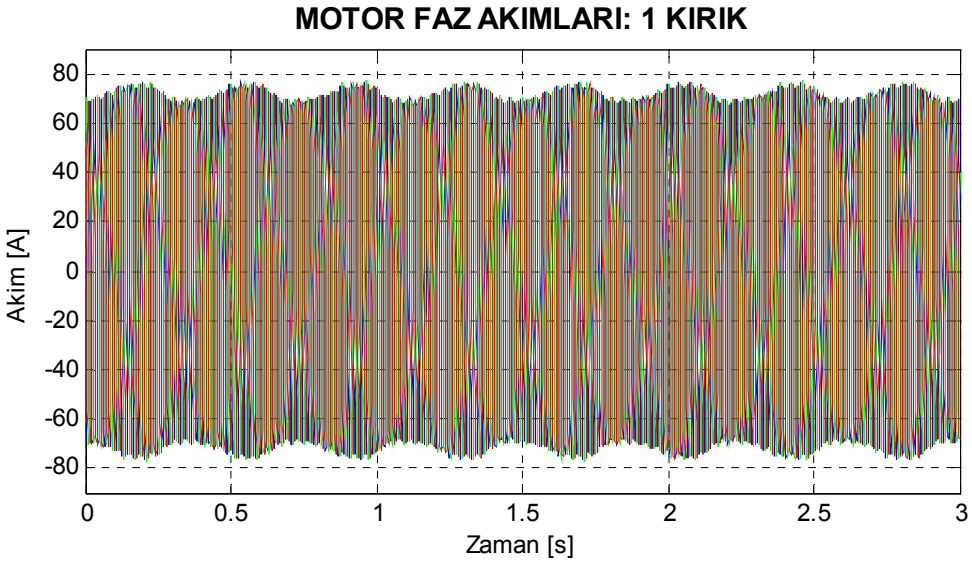
Şekil 7.1. Motor1 için benzetimle elde edilen üç kırık çubuklu rotor arızası için kısa veri aralığıyla çizilmiş motor akımı grafiği.



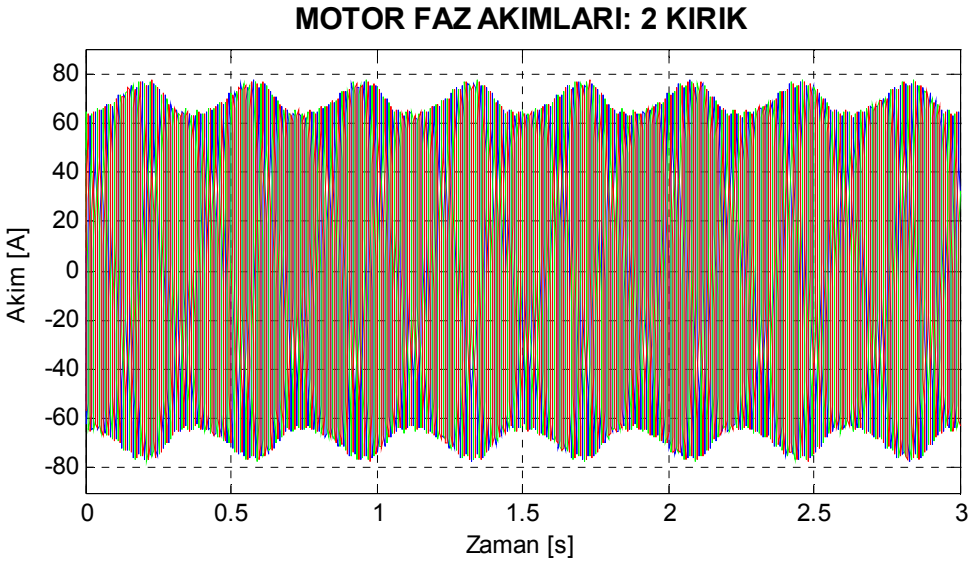
Şekil 7.2. Motor1 sağlam motor durumu için benzetimle elde edilen stator akımları.



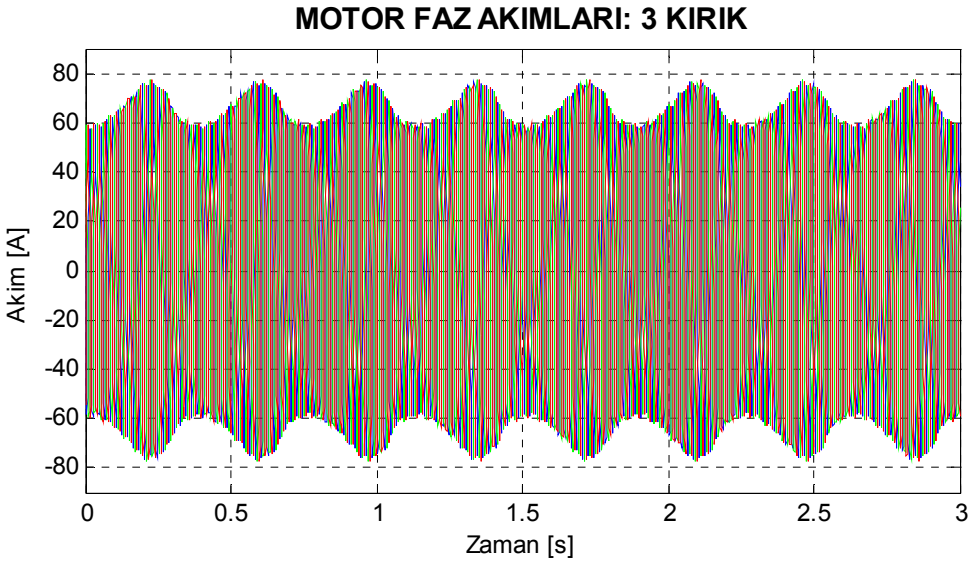
Şekil 7.3. Motor1 bir çubuğu yüksek dirençli rotor için benzetimle elde edilen stator akımları.



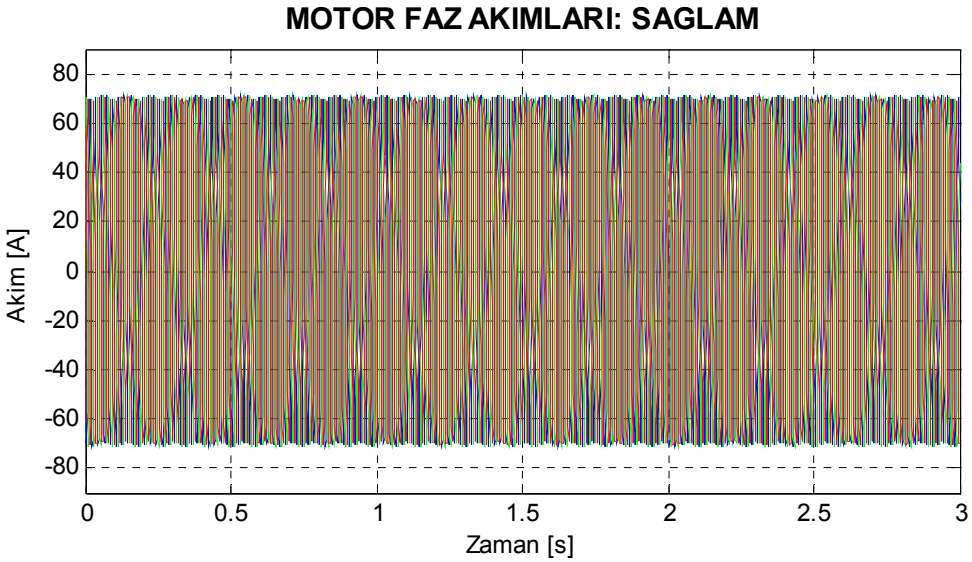
Şekil 7.4. Motor1 bir çubuğu kırık rotor için benzetimle elde edilen stator akımları.



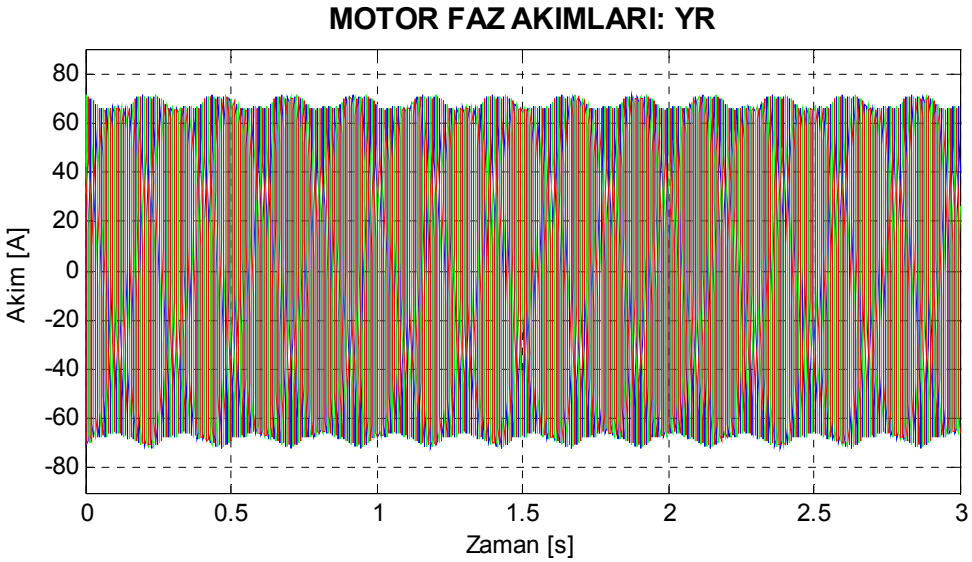
Şekil 7.5. Motor1 iki çubuğu kırık rotor için benzetimle elde edilen stator akımları.



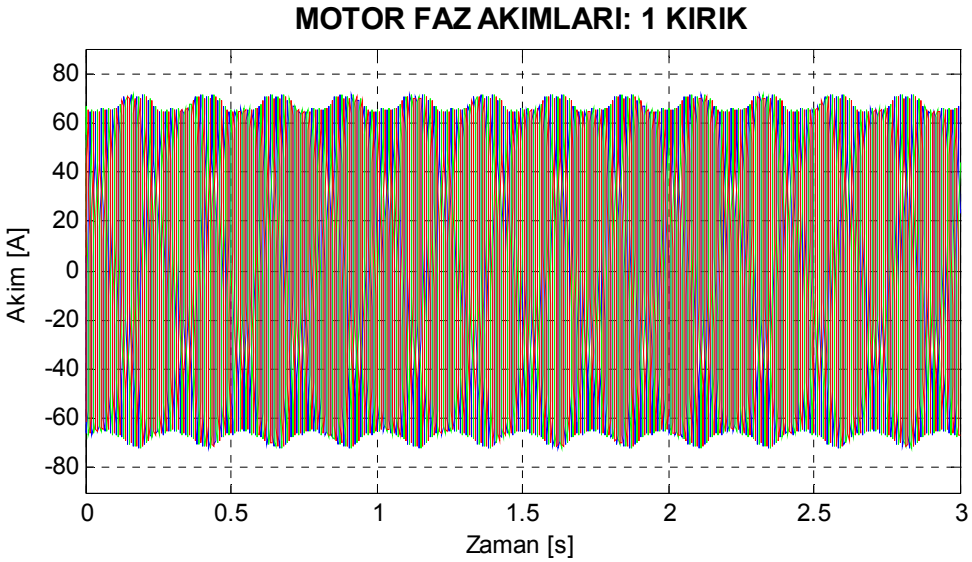
Şekil 7.6. Motor1 üç çubuğu kırık rotor için benzetimle elde edilen stator akımları.



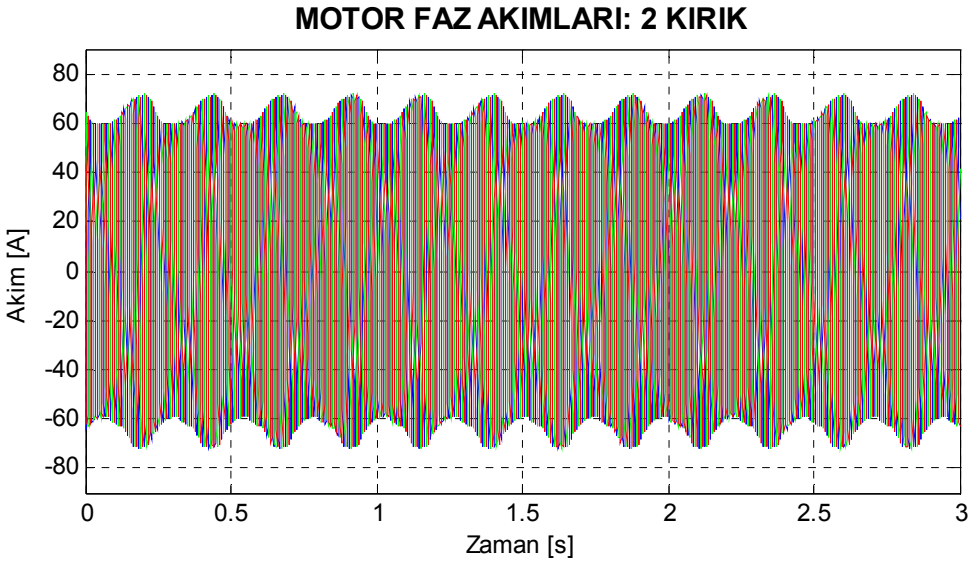
Şekil 7.7. Motor2 sağlam motor durumu için benzetimle elde edilen stator akımları.



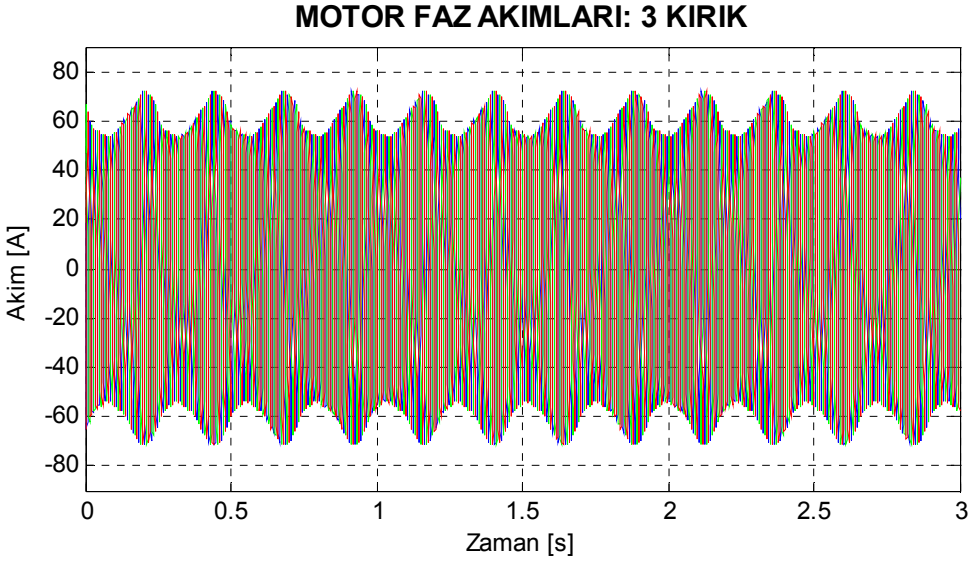
Şekil 7.8. Motor2 bir çubuğu yüksek dirençli rotor için benzetimle elde edilen stator akımları.



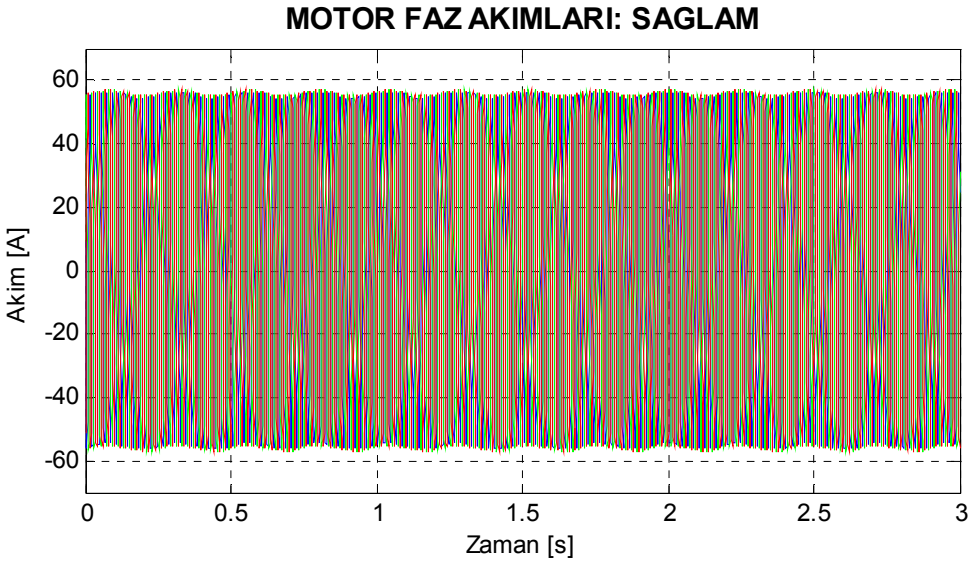
Şekil 7.9. Motor2 bir çubuğu kırık rotor için benzetimle elde edilen stator akımları.



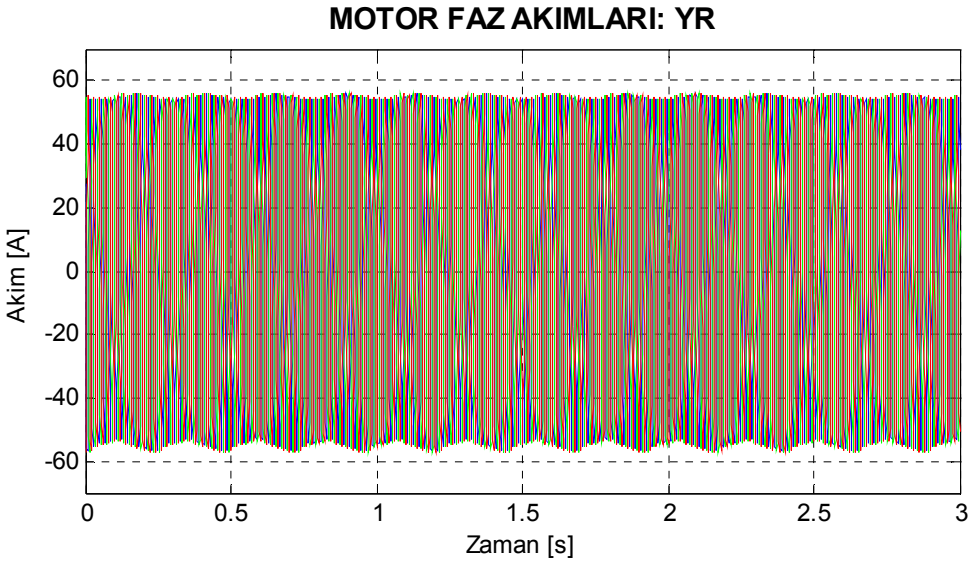
Şekil 7.10. Motor2 iki çubuğu kırık rotor için benzetimle elde edilen stator akımları.



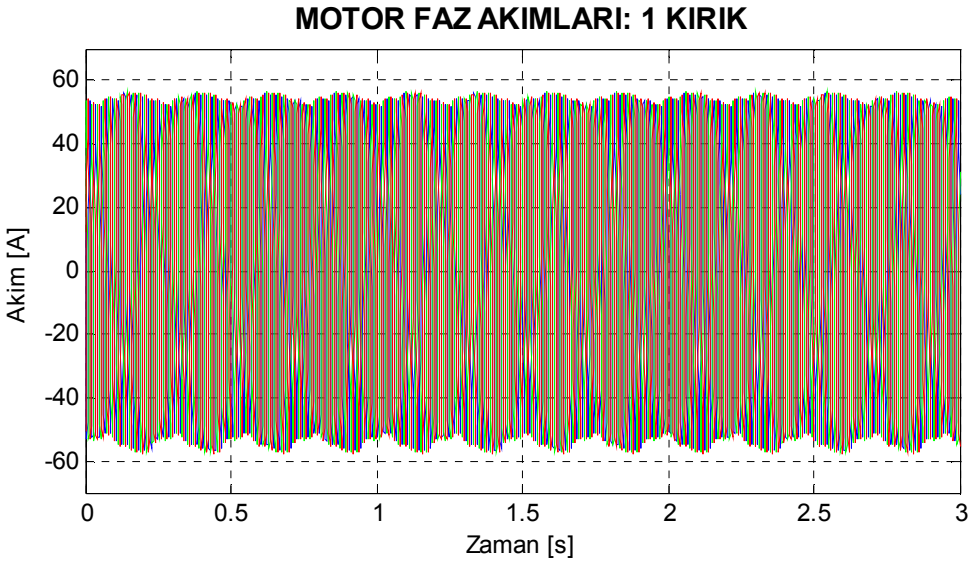
Şekil 7.11. Motor2 üç çubuğu kırık rotor için benzetimle elde edilen stator akımları.



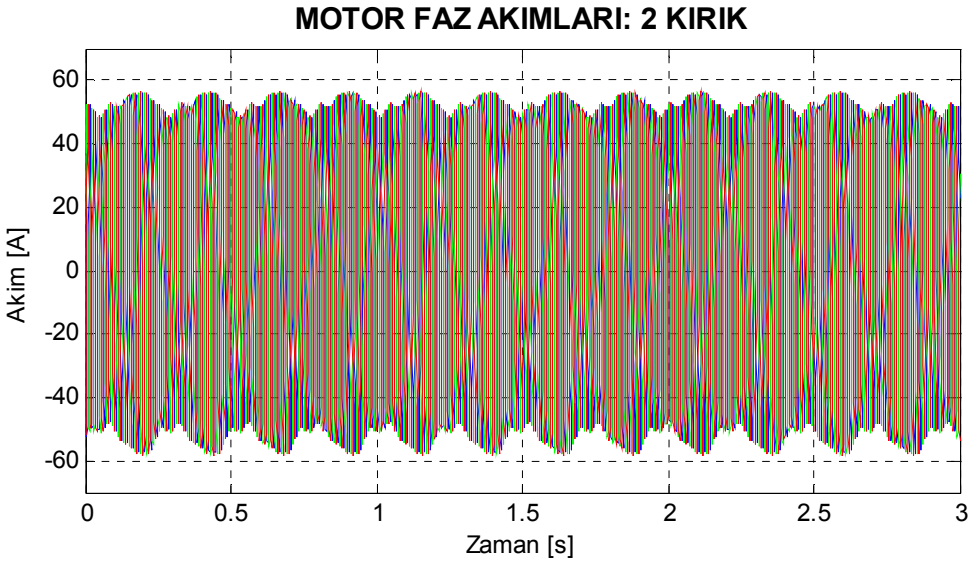
Şekil 7.12. Motor3 sağlam motor durumu için benzetimle elde edilen stator akımları.



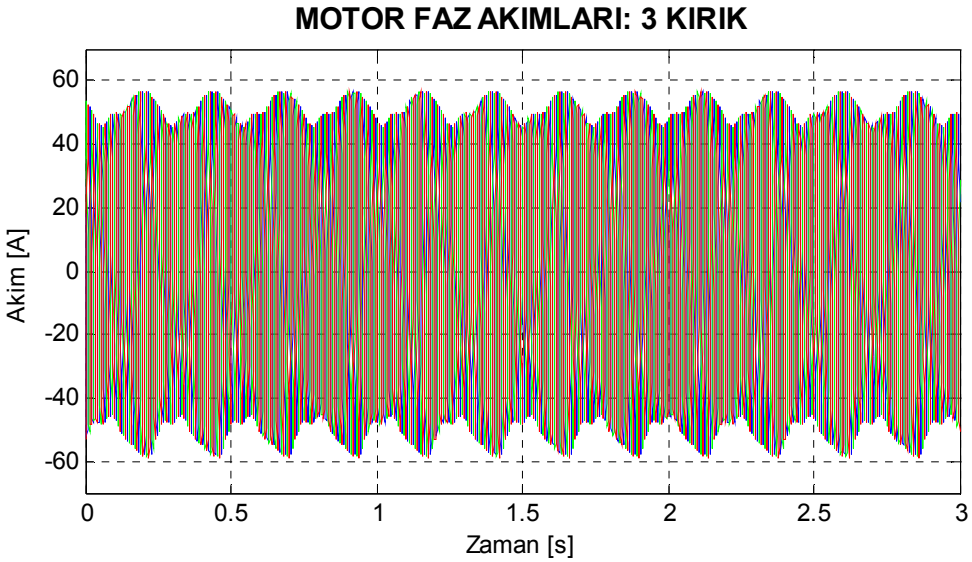
Şekil 7.13. Motor3 bir çubuğu yüksek dirençli rotor için benzetimle elde edilen stator akımları.



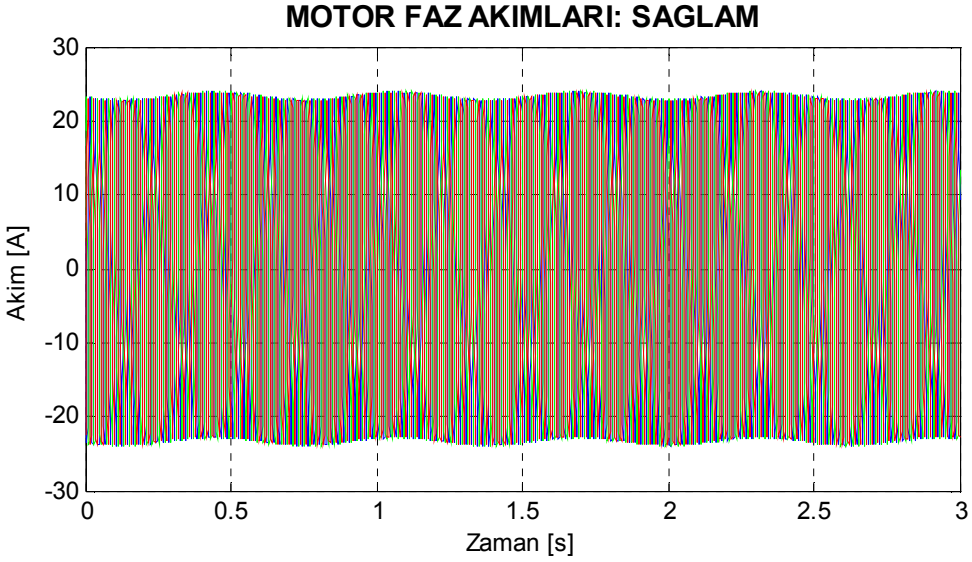
Şekil 7.14. Motor3 bir çubuğu kırık rotor için benzetimle elde edilen stator akımları.



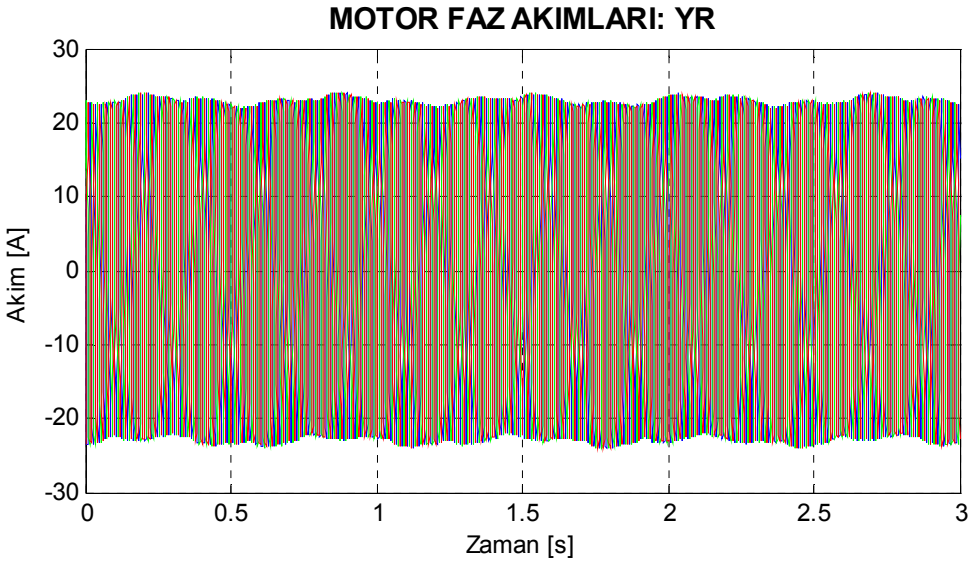
Şekil 7.15. Motor3 iki çubuğu kırık rotor için benzetimle elde edilen stator akımları.



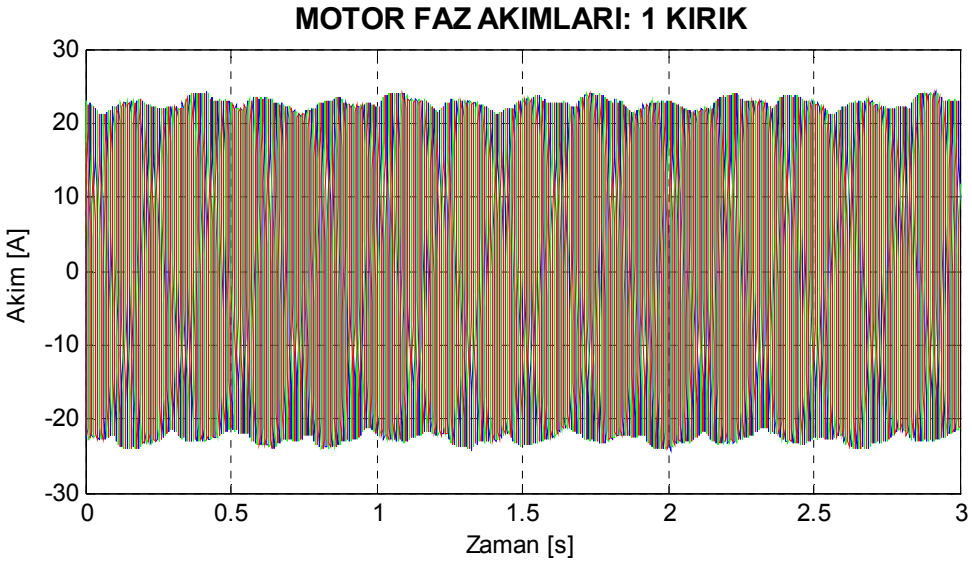
Şekil 7.16. Motor3 üç çubuğu kırık rotor için benzetimle elde edilen stator akımları.



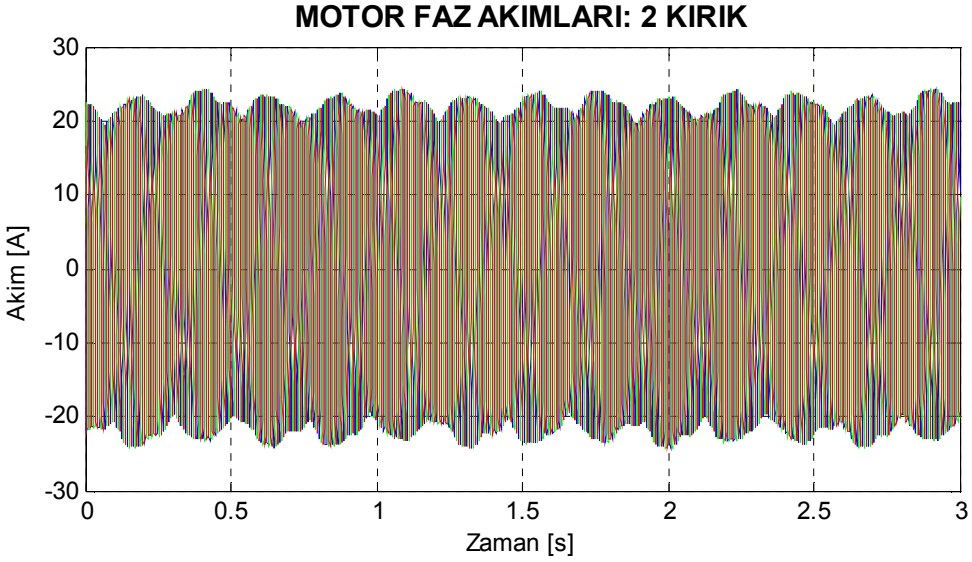
Şekil 7.17. Motor4 sağlam motor durumu için benzetimle elde edilen stator akımları.



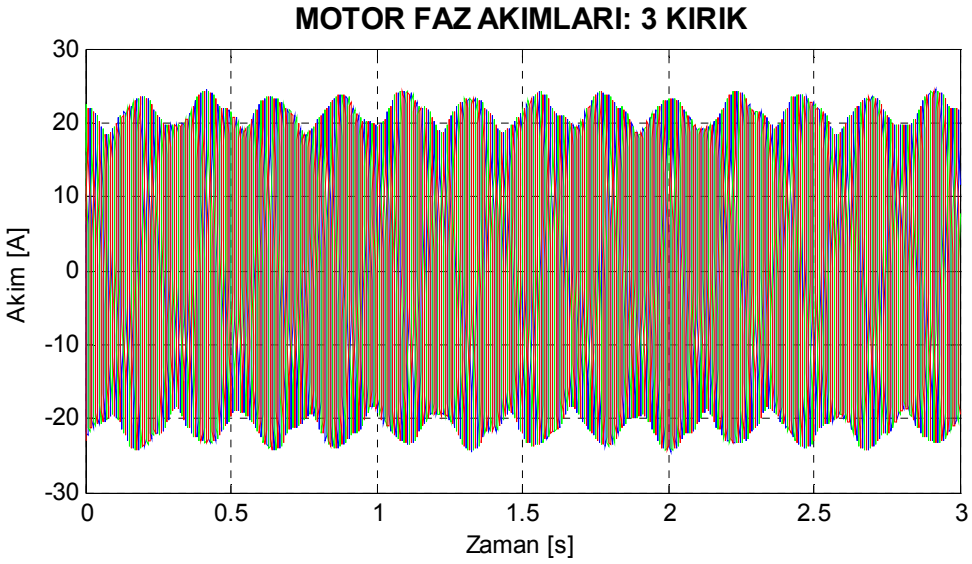
Şekil 7.18. Motor4 bir çubuğu yüksek dirençli rotor için benzetimle elde edilen stator akımları.



Şekil 7.19. Motor4 bir çubuğu kırık rotor için benzetimle elde edilen stator akımları.



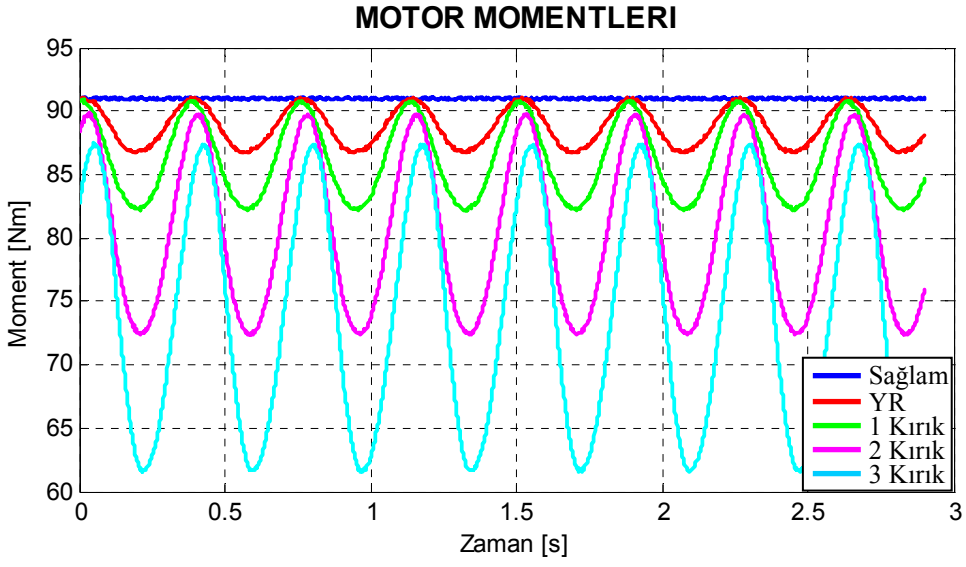
Şekil 7.20. Motor4 iki çubuğu kırık rotor için benzetimle elde edilen stator akımları.



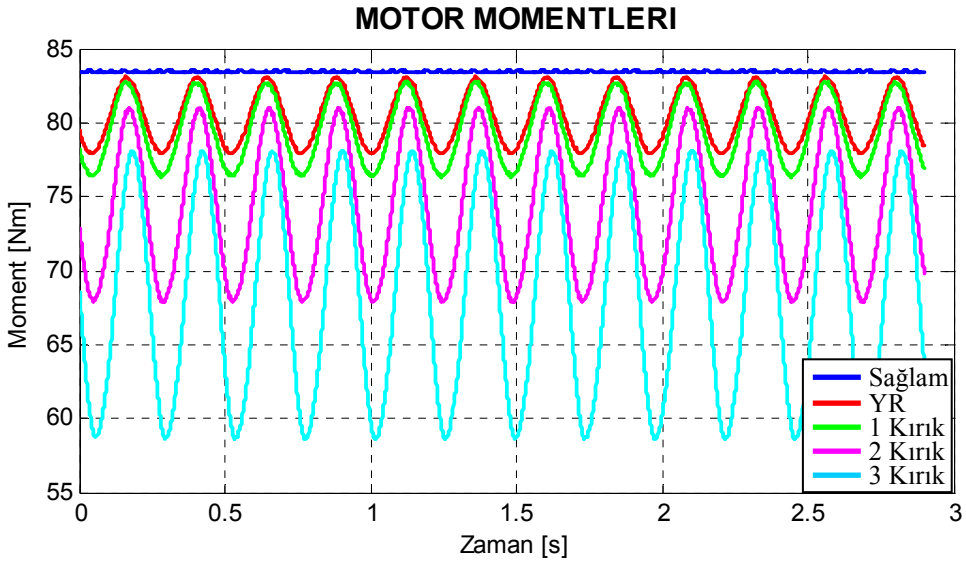
Şekil 7.21. Motor4 üç çubuğu kırık rotor için benzetimle elde edilen stator akımları.

7.1.2. Kararlı durumda motor momentleri

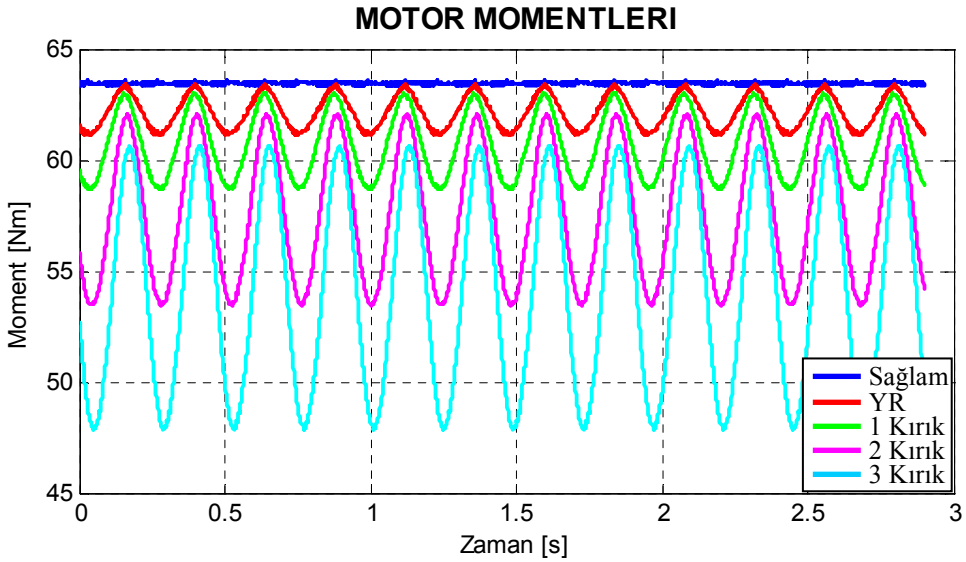
Rotor arızalarının motor momentine etkileri incelemek için benzetim ile elde edilen moment grafikleri Motor1 için Şekil 7.22'de, Motor2 için Şekil 7.23'de, Motor3 için Şekil 7.24'de ve Motor4 için Şekil 7.25'de verilmiştir.



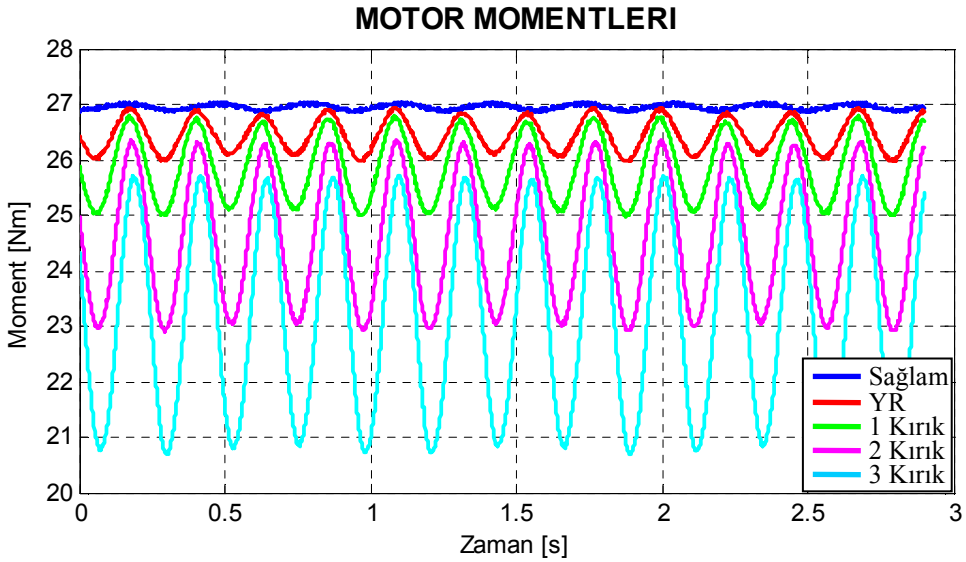
Şekil 7.23. Motor1 için benzetimle elde edilen arıza durumlarına göre çizilmiş moment grafikleri.



Şekil 7.24. Motor2 için benzetimle elde edilen arıza durumlarına göre çizilmiş moment grafikleri.



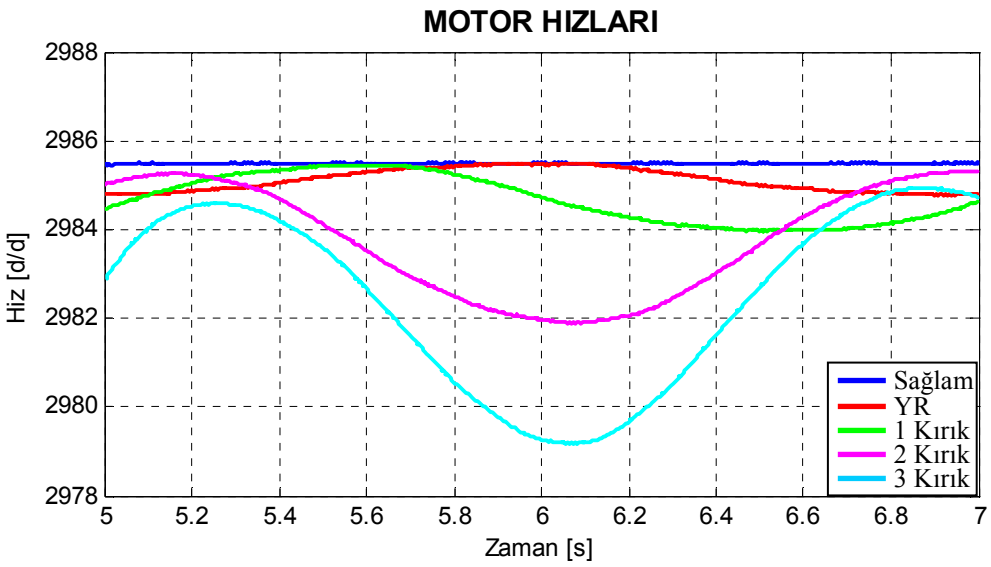
Şekil 7.25. Motor3 için benzetimle elde edilen arıza durumlarına göre çizilmiş moment grafikleri.



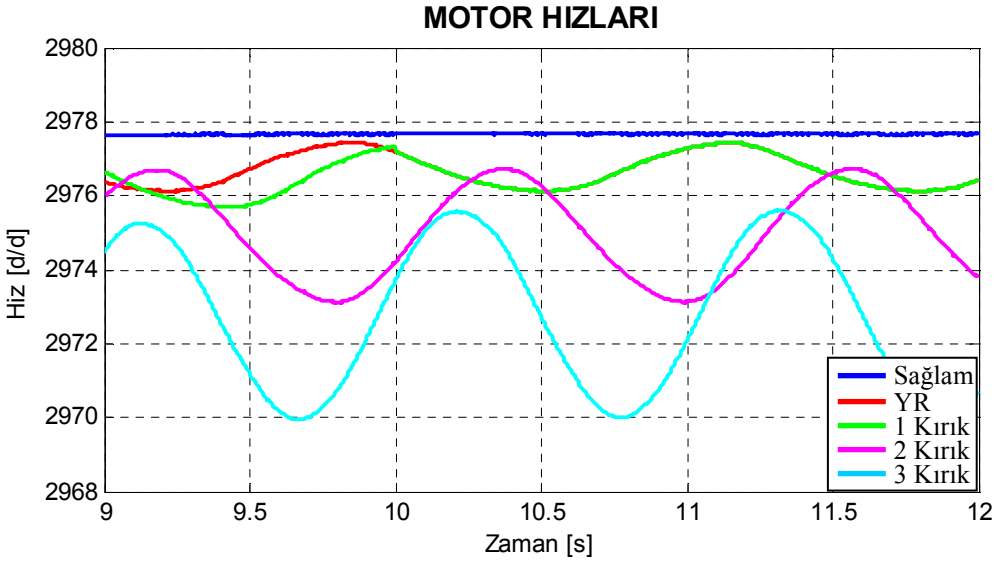
Şekil 7.26. Motor4 için benzetimle elde edilen arıza durumlarına göre çizilmiş moment grafikleri.

7.1.3. Kararlı durumda motor hızları

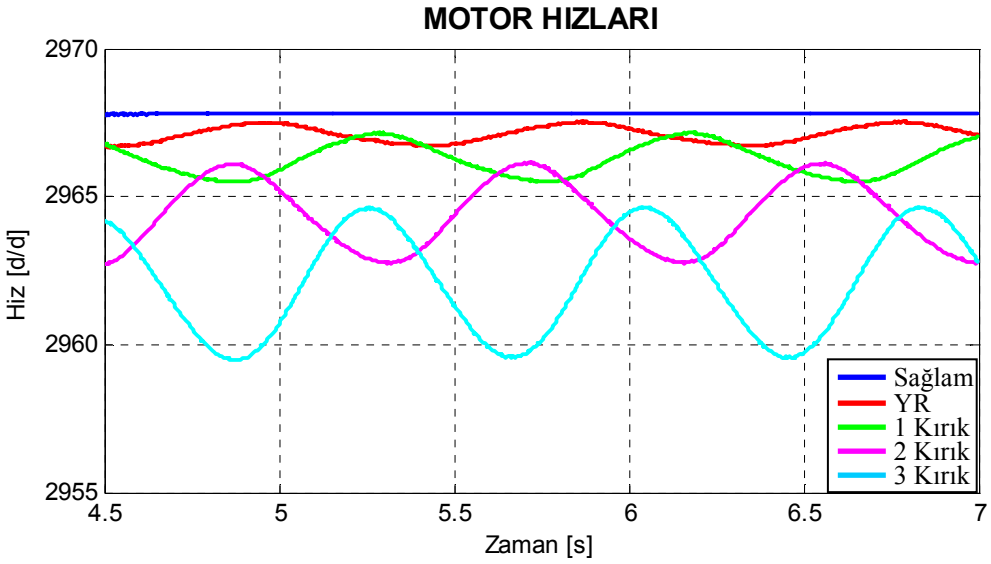
Rotor arızalarının motor hızlarına etkileri incelemek için benzetim ile elde edilen hız-zaman eğrileri Motor1 için Şekil 7.26'de, Motor2 için Şekil 7.27'de, Motor3 için Şekil 7.28'de ve Motor4 için Şekil 7.29'da verilmiştir.



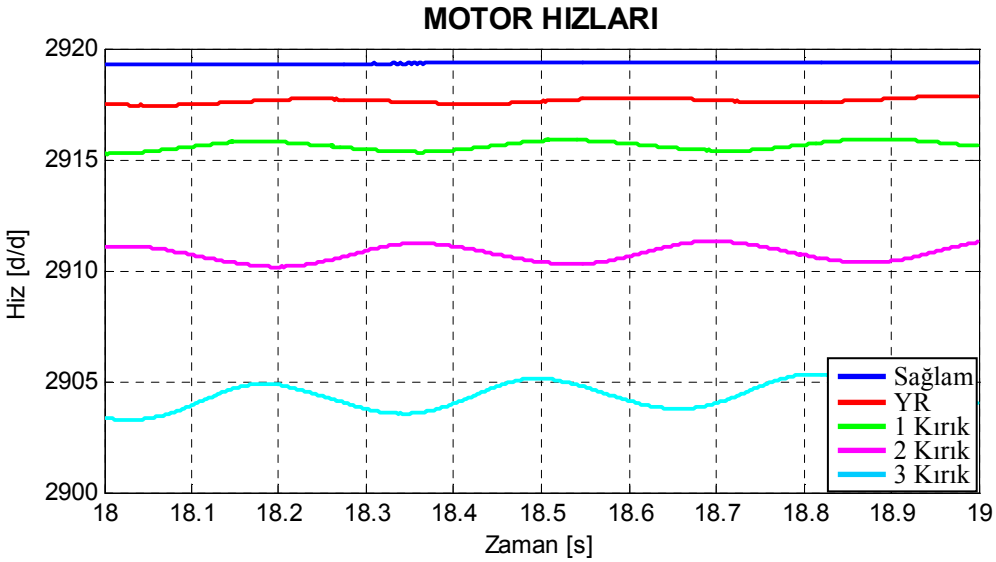
Şekil 7.23. Motor1 için benzetimle elde edilen arıza durumlarına göre çizilmiş hız-zaman grafikleri.



Şekil 7.24. Motor2 için benzetimle elde edilen arıza durumlarına göre çizilmiş hız-zaman grafikleri.



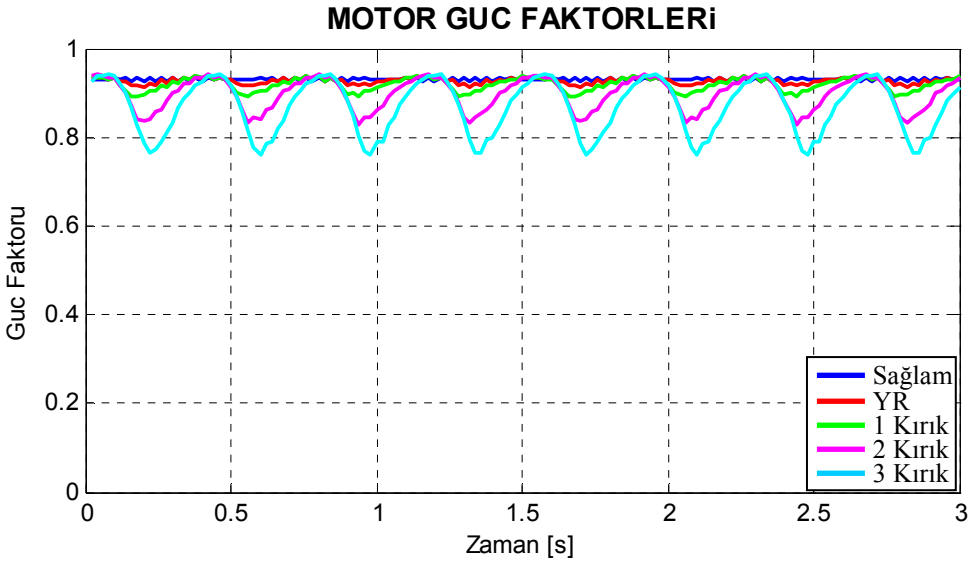
Şekil 7.25. Motor3 için benzetimle elde edilen arıza durumlarına göre çizilmiş hız-zaman grafikleri.



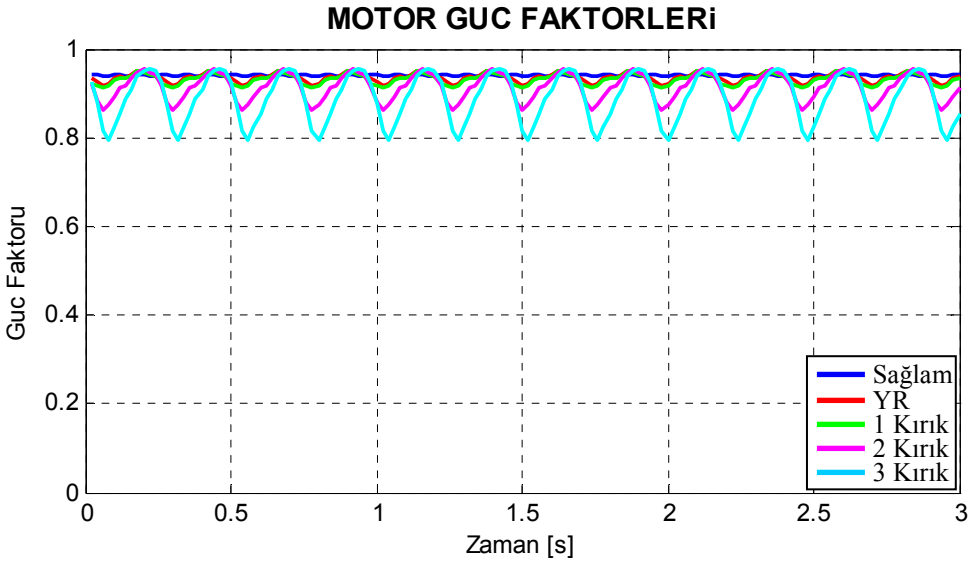
Şekil 7.26. Motor4 için benzetimle elde edilen arıza durumlarına göre çizilmiş hız-zaman grafikleri.

7.1.4. Kararlı durumda motor güç faktörleri

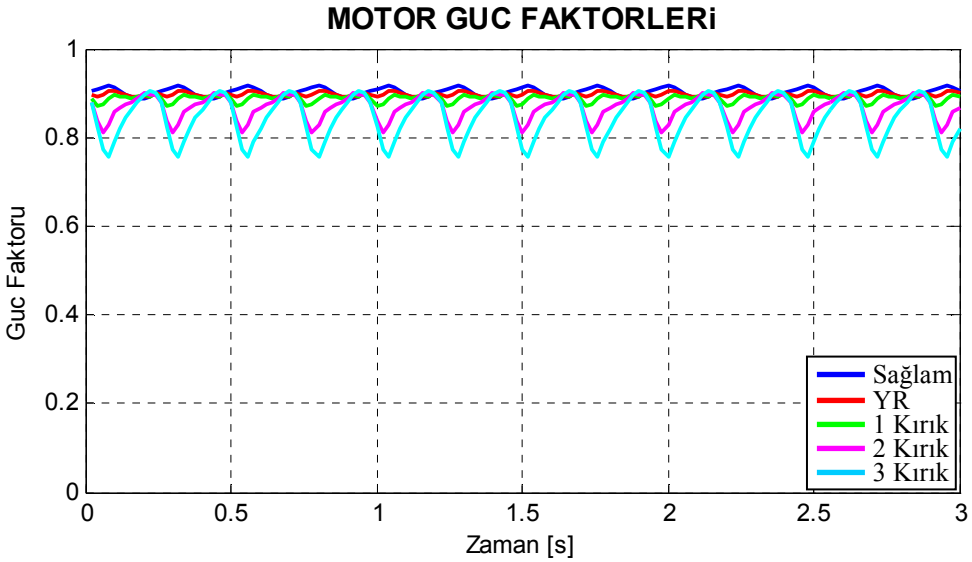
Motor güç faktörleri üç faz için ayrı ayrı hesaplanıp üç fazın ortalamaları alınarak rotor arızalarının motor güç faktörlerine etkileri incelenmiştir. Benzetim ile elde edilen güç faktörü grafikleri Motor1 için Şekil 7.27'de, Motor2 için Şekil 7.28'de, Motor3 için Şekil 7.29'da ve Motor4 için Şekil 7.30'da verilmiştir.



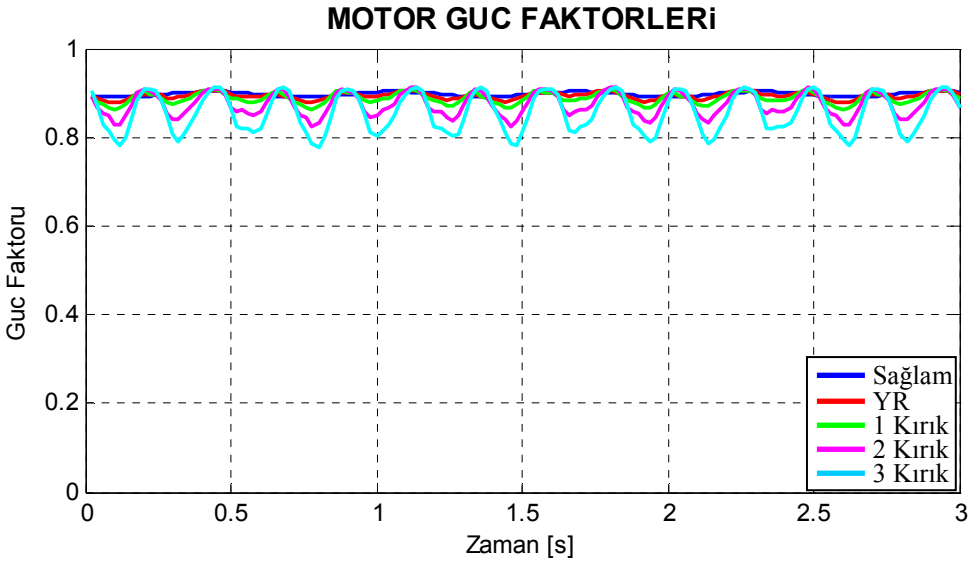
Şekil 7.27. Motor1 için benzetimle elde edilen arıza durumlarına göre çizilmiş güç faktörü grafikleri.



Şekil 7.28. Motor2 için benzetimle elde edilen arıza durumlarına göre çizilmiş güç faktörü grafikleri.



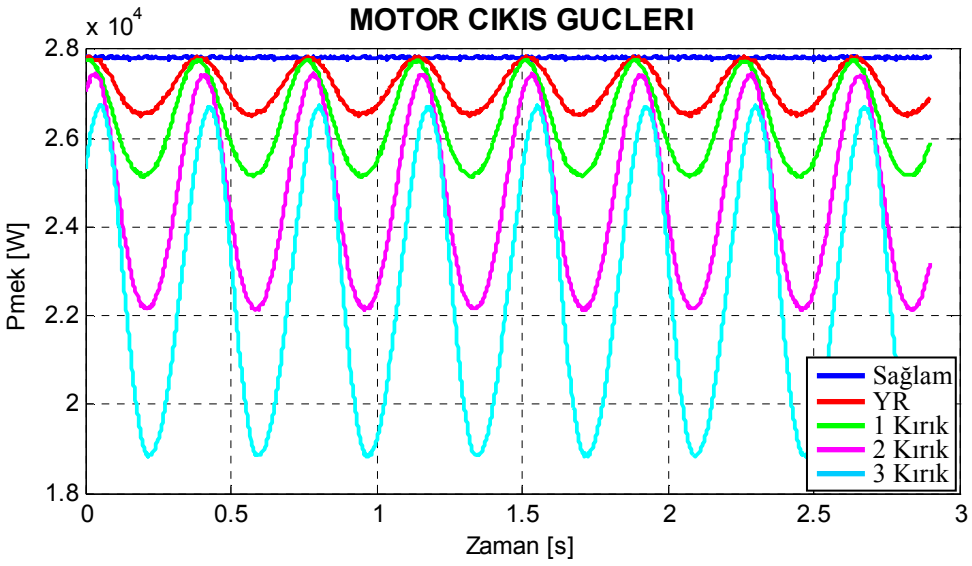
Şekil 7.29. Motor3 için benzetimle elde edilen arıza durumlarına göre çizilmiş güç faktörü grafikleri.



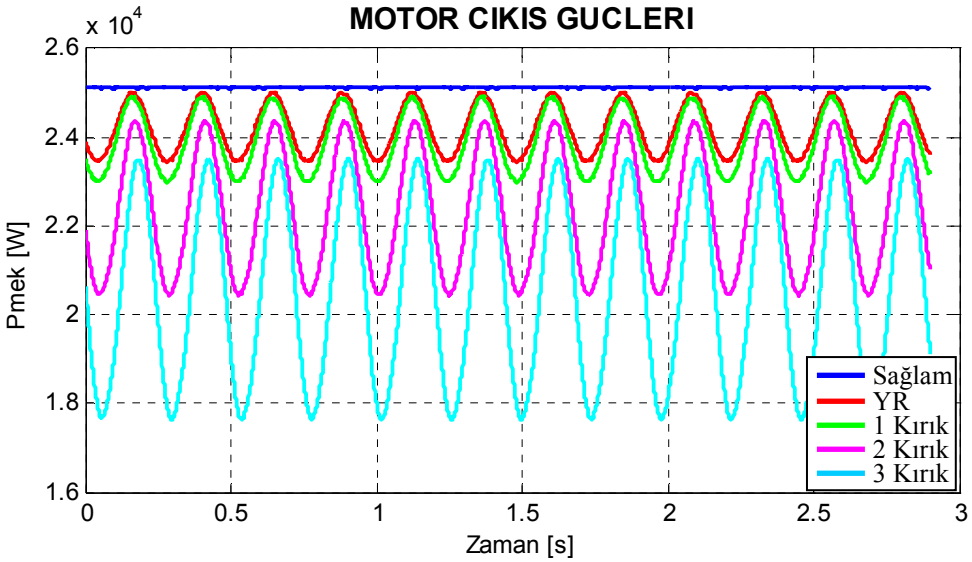
Şekil 7.30. Motor4 için benzetimle elde edilen arıza durumlarına göre çizilmiş güç faktörü grafikleri.

7.1.5. Kararlı durumda motor mekaniki güçleri

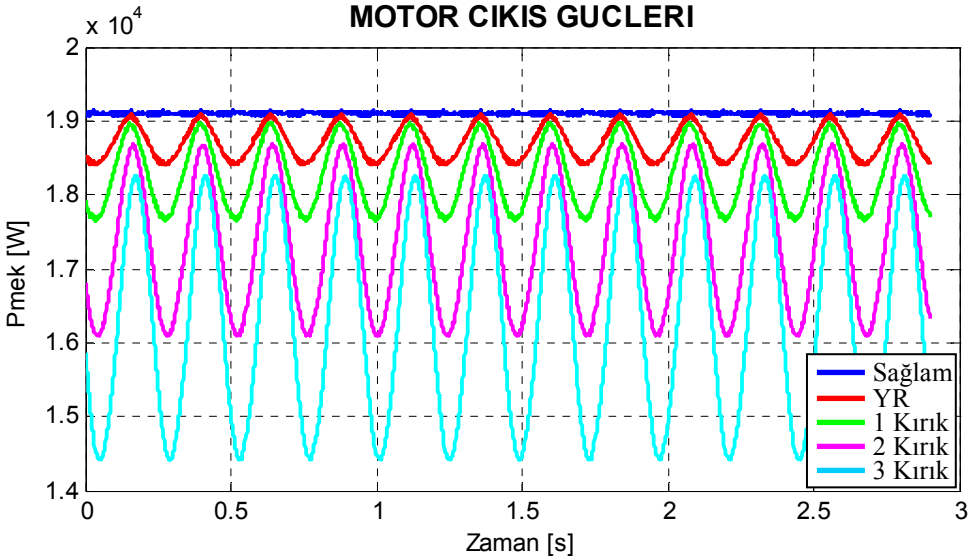
Rotor arızalarının motor mekaniki güçlerine yaptığı etkileri incelemek için benzetim ile elde edilen mekaniki güç grafikleri Motor1 için Şekil 7.31'de, Motor2 için Şekil 7.32'de, Motor3 için Şekil 7.33'de ve Motor4 için Şekil 7.34'de verilmiştir.



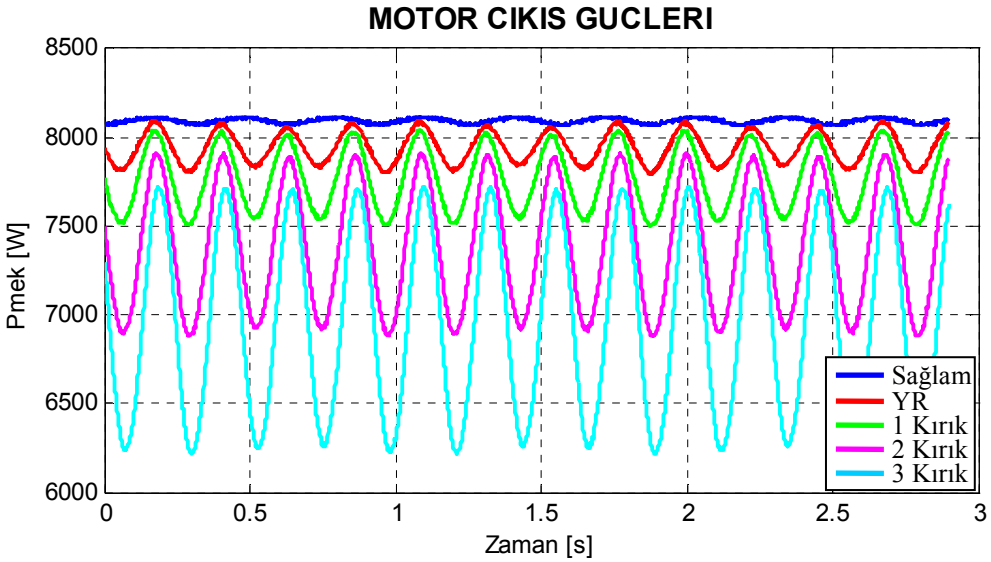
Şekil 7.31. Motor1 için benzetimle elde edilen arıza durumlarına göre çizilmiş mekaniki güç grafikleri.



Şekil 7.32. Motor2 için benzetimle elde edilen arıza durumlarına göre çizilmiş mekaniki güç grafikleri.



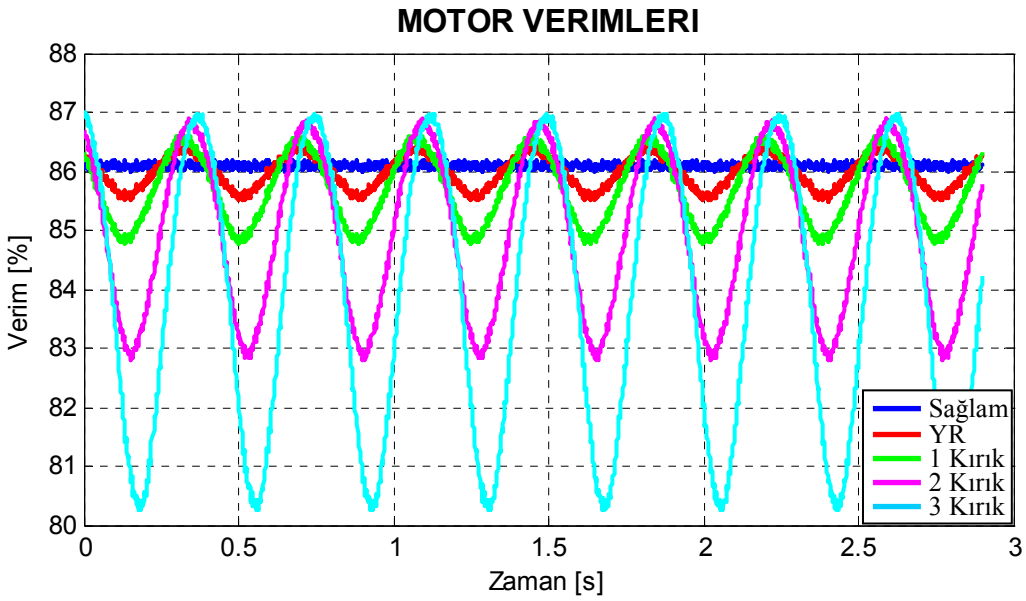
Şekil 7.33. Motor3 için benzetimle elde edilen arıza durumlarına göre çizilmiş mekaniki güç grafikleri.



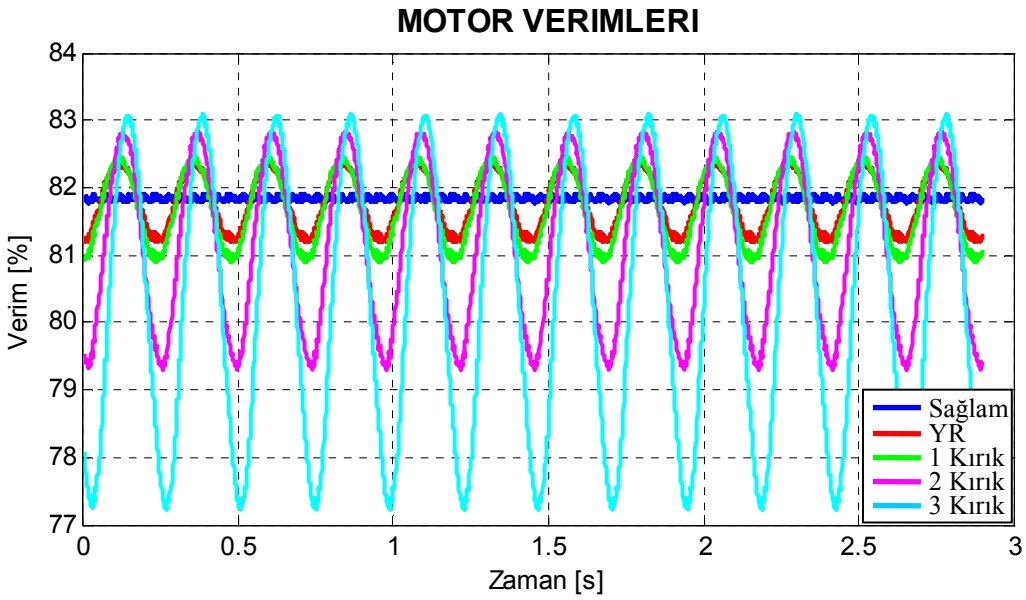
Şekil 7.34. Motor4 için benzetimle elde edilen arıza durumlarına göre çizilmiş mekaniki güç grafikleri.

7.1.6. Kararlı durumda motor verimleri

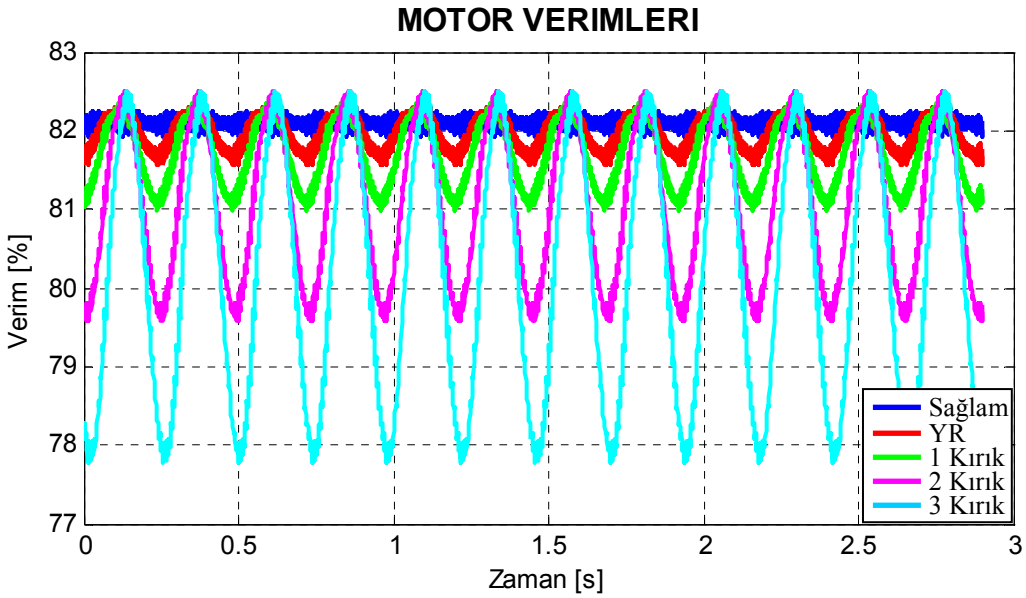
Rotor arızalarının motor verimlerine yaptığı etkileri incelemek için benzetim ile elde edilen verim grafikleri Motor1 için Şekil 7.35'de, Motor2 için Şekil 7.36'da, Motor3 için Şekil 7.37'de ve Motor4 için Şekil 7.38'de verilmiştir.



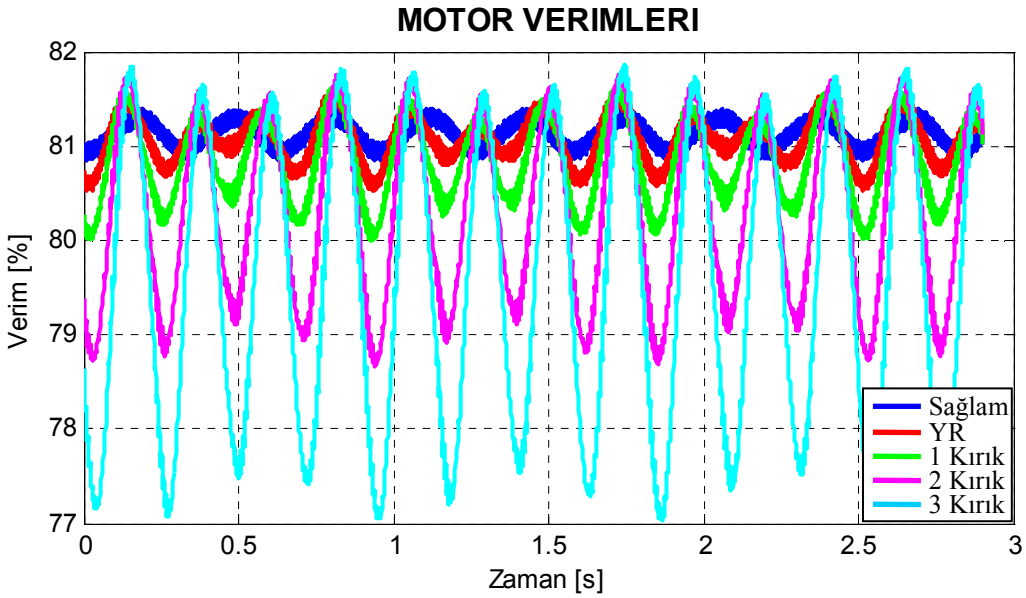
Şekil 7.35. Motor1 için benzetimle elde edilen arıza durumlarına göre çizilmiş verim grafikleri.



Şekil 7.36. Motor2 için benzetimle elde edilen arıza durumlarına göre çizilmiş verim grafikleri.



Şekil 7.37. Motor3 için benzetimle elde edilen arıza durumlarına göre çizilmiş verim grafikleri.



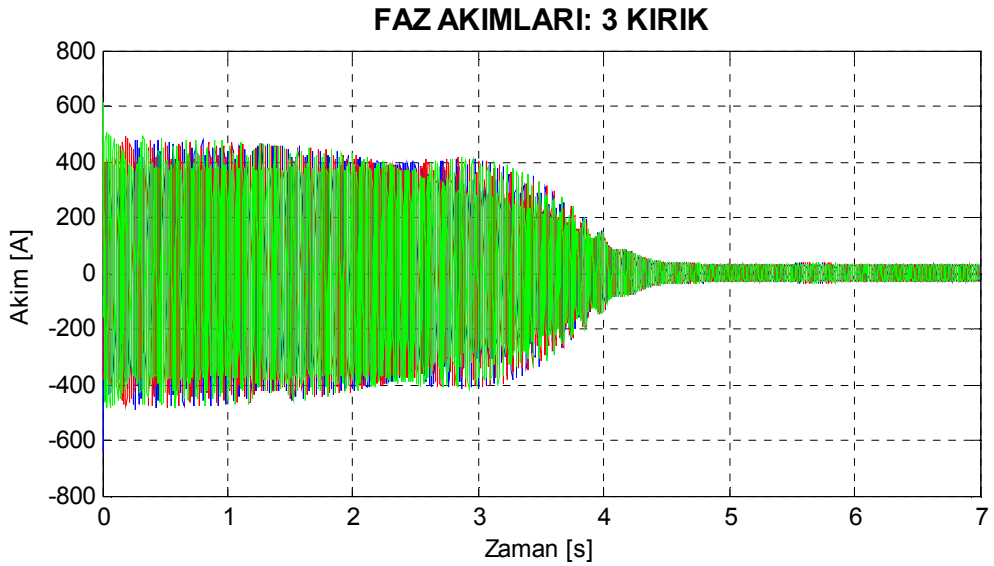
Şekil 7.38. Motor4 için benzetimle elde edilen arıza durumlarına göre çizilmiş verim grafikleri.

7.2. Yol Alma Durumu İçin Benzetim Sonuçları

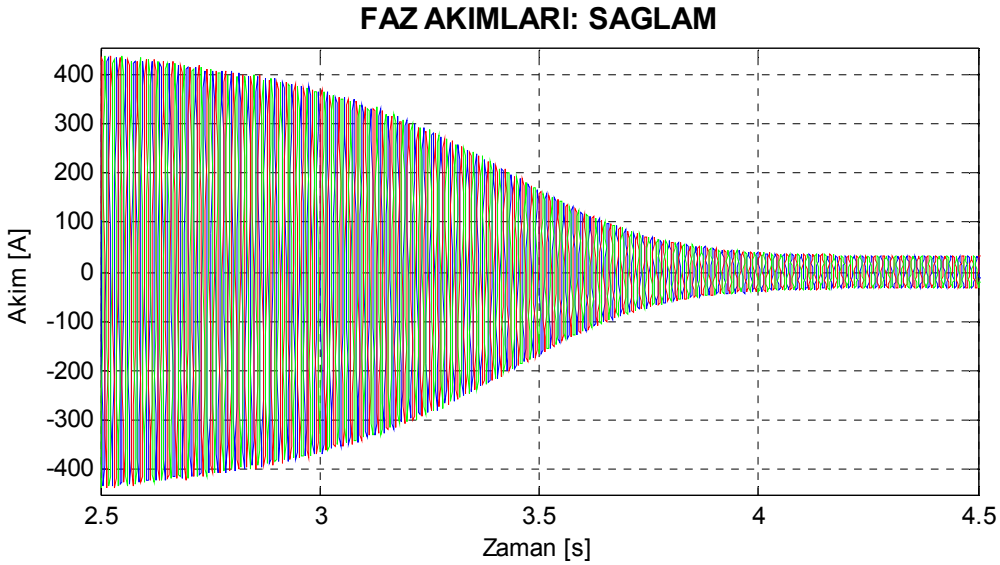
Yol alma durumundaki rotor arızalarının etkileri incelemek için motorlara boşta yol verilmiş ve kararlı duruma oturuncaya kadar geçen süreçteki motor akım, moment ve hız bilgileri kaydedilip zaman ekseninde incelenmiştir. Motor1, Motor2 ve Motor3'ün stator sargıları üçgen bağlı, Motor4'ün stator sargıları ise yıldız bağlı olarak motorlara yol verilmiştir.

7.2.1. Yol alma sürecindeki motor akımları

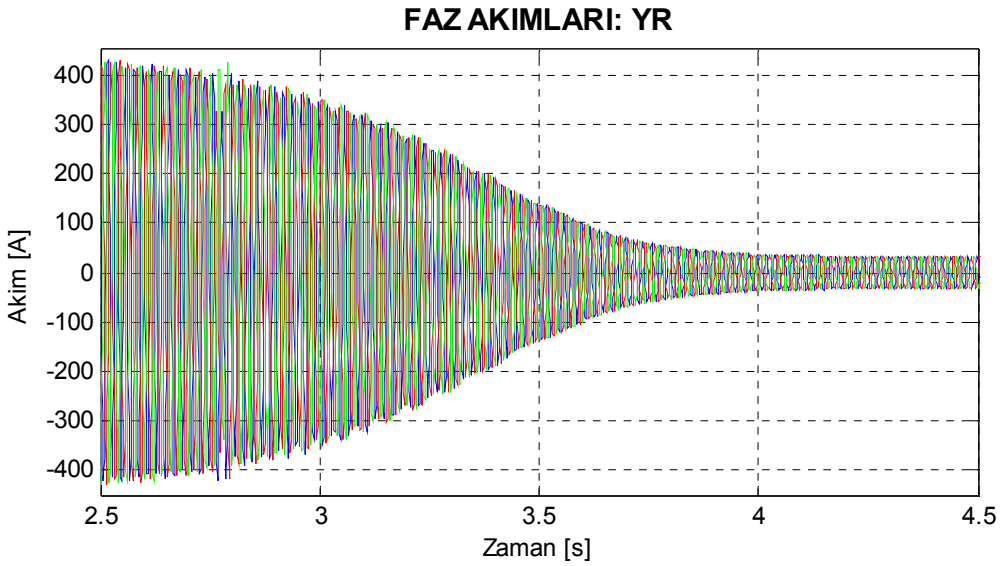
Yol alma sürecinin başlangıcında motor akımı çok büyük olacaktır. Motor yol aldıkça akım da küçülecektir. Kararlı duruma geldiğinde ise belirli bir seviyede sabit kalacaktır. Yol alma sürecinin uzunluğu motor parametrelerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Yapılan benzetimlerde arızaların etkileri kararlı duruma yaklaşıldığı anlarda daha belirgin olduğu için yol alma akımının tüm yol alma süreci için değil belirtilerin bulunduğu veri aralığı için karşılaştırmalar yapılmıştır. Üç kırık çubuklu motor durumunda motor akımının değişimi, yol alma sürecinin tamamı için Şekil 7.39'da verilmiştir. Benzetimle elde edilen yol alma sürecindeki motor akımlarında meydana gelen etkilerin en belirgin olduğu veri aralığı kullanılarak çizilen grafikler Motor1 için sağlam, yüksek dirençli, 1 kırık, 2 kırık ve 3 kırık çubuklu arıza durumları için sırasıyla Şekil 7.40, Şekil 7.41, Şekil 7.42, Şekil 7.43 ve Şekil 7.44'de; Motor2 için sağlam, yüksek dirençli, 1 kırık, 2 kırık ve 3 kırık çubuklu arıza durumları için sırasıyla Şekil 7.45, Şekil 7.46, Şekil 7.47, Şekil 7.48 ve Şekil 7.49'da; Motor3 için sağlam, yüksek dirençli, 1 kırık, 2 kırık ve 3 kırık çubuklu arıza durumları için sırasıyla Şekil 7.50, Şekil 7. 51, Şekil 7.52, Şekil 7.53 ve Şekil 7.54'de; Motor4 için sağlam, yüksek dirençli, 1 kırık, 2 kırık ve 3 kırık çubuklu arıza durumları için sırasıyla Şekil 7.55, Şekil 7.56, Şekil 7.57, Şekil 7.58 ve Şekil 7.59'da verilmiştir.



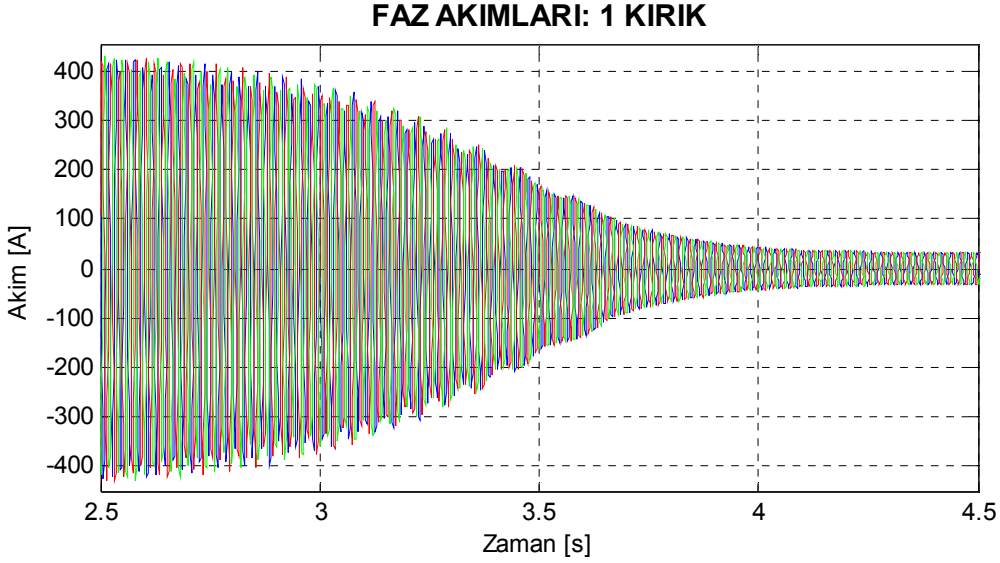
Şekil 7.39. Benzetimle elde edilen Motor1 üç kırık çubuklu rotor arızası için yol alma sürecinin tamamını içeren motor akım grafiği.



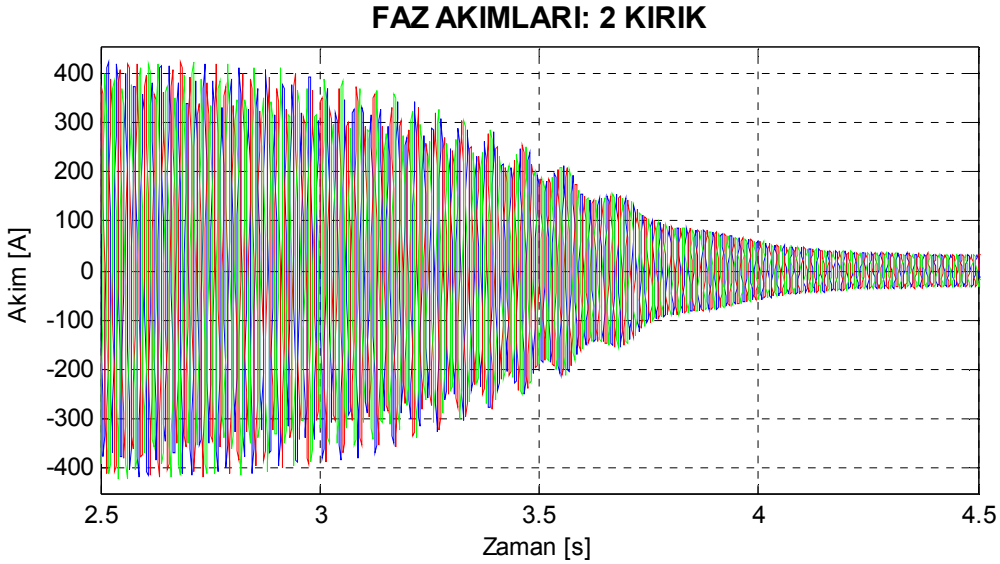
Şekil 7.40. Motor1 sağlam motor durumu için benzetimle elde edilen yol alma akımları.



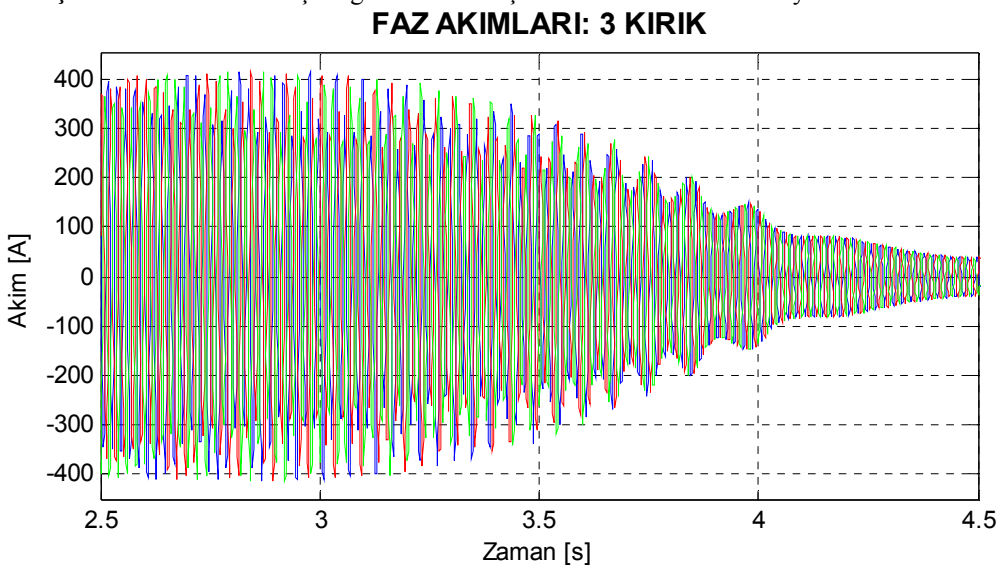
Şekil 7.41. Motor1 bir çubuğu yüksek dirençli rotor için benzetimle elde edilen yol alma akımları.



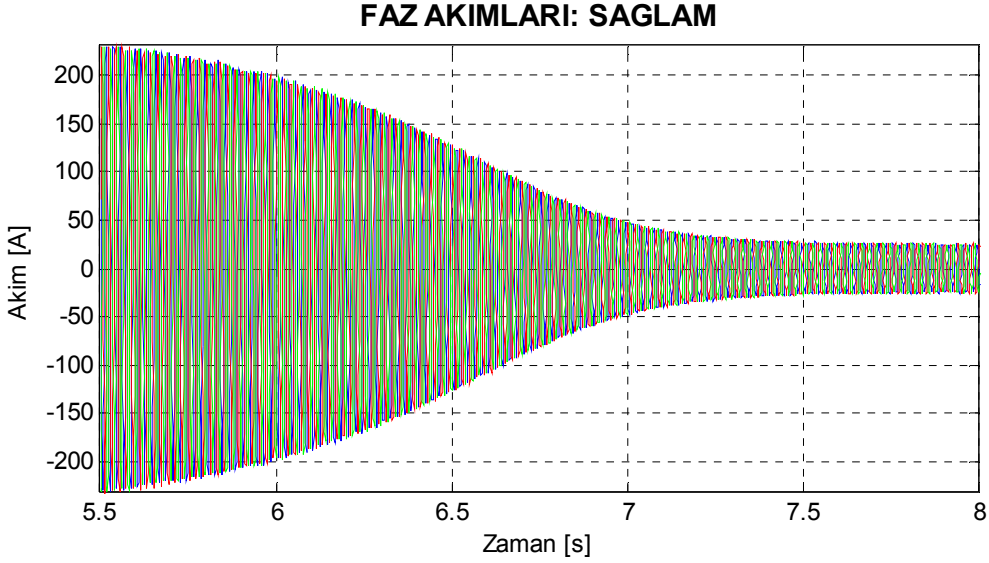
Şekil 7.42. Motor1 bir çubuğu kırık rotor için benzetimle elde edilen yol alma akımları.



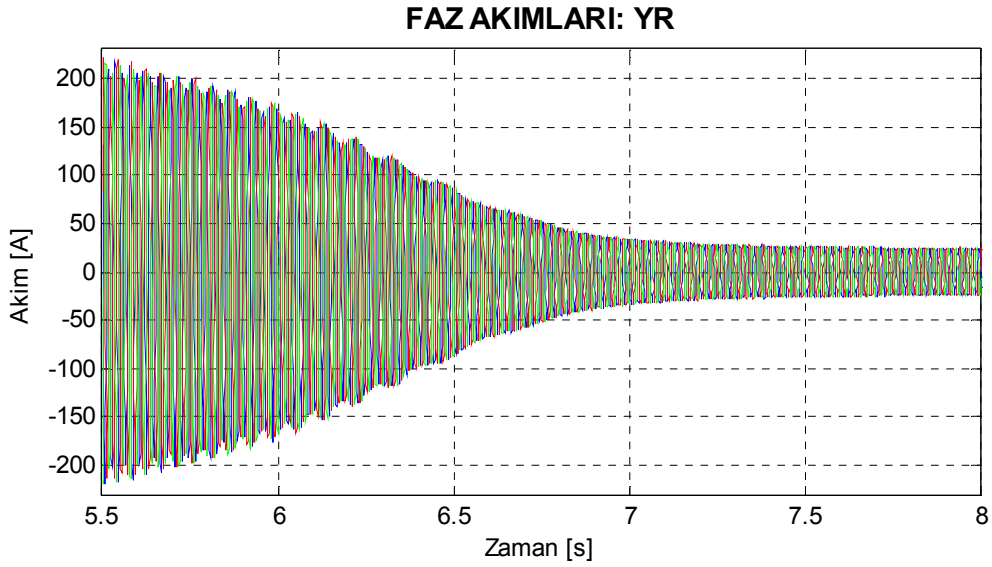
Şekil 7.43. Motor1 iki çubuğu kırık rotor için benzetimle elde edilen yol alma akımları.



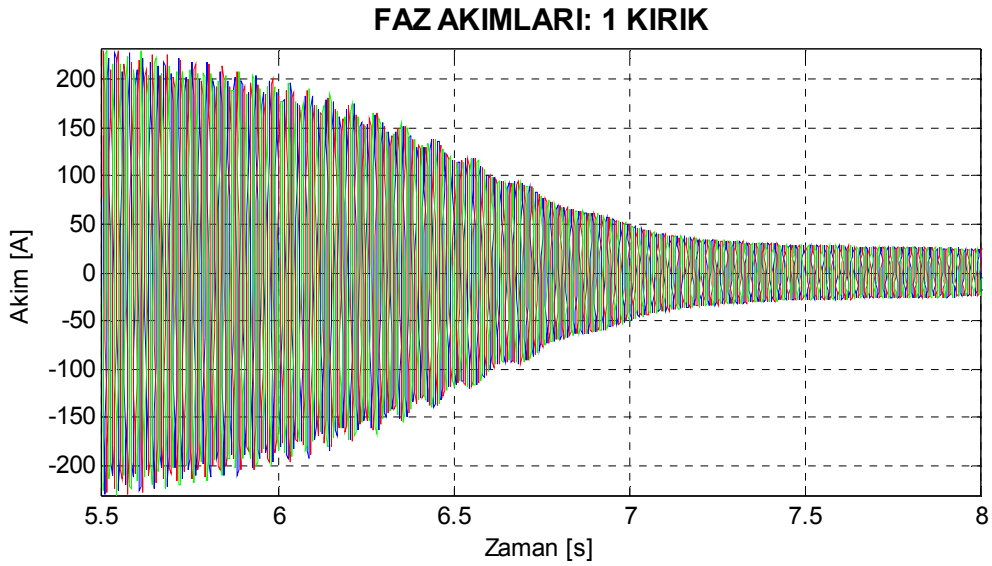
Şekil 7.44. Motor1 üç çubuğu kırık rotor için benzetimle elde edilen yol alma akımları.



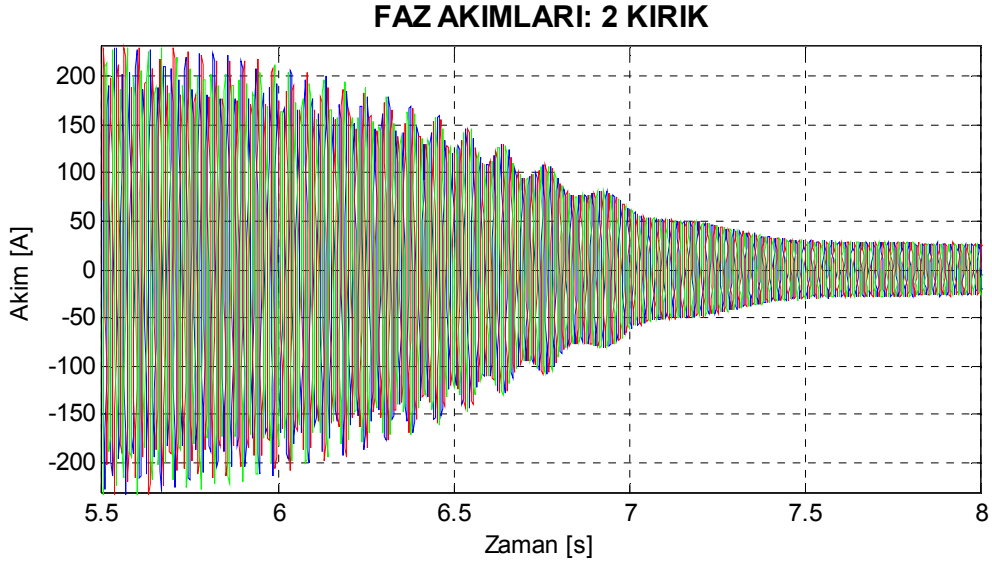
Şekil 7.45. Motor2 sağlam motor durumu için benzetimle elde edilen yol alma akımları.



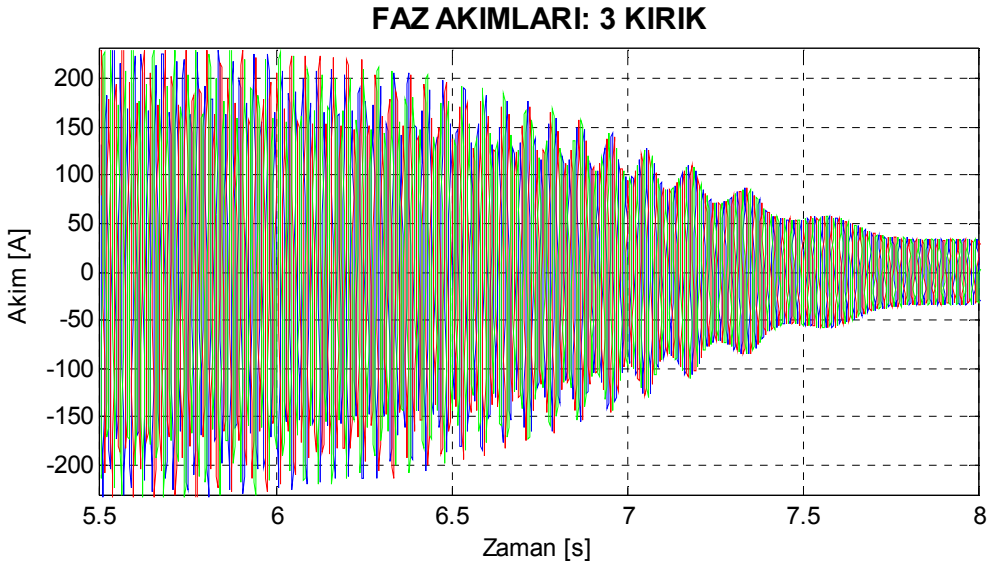
Şekil 7.46. Motor2 bir çubuğu yüksek dirençli rotor için benzetimle elde edilen yol alma akımları.



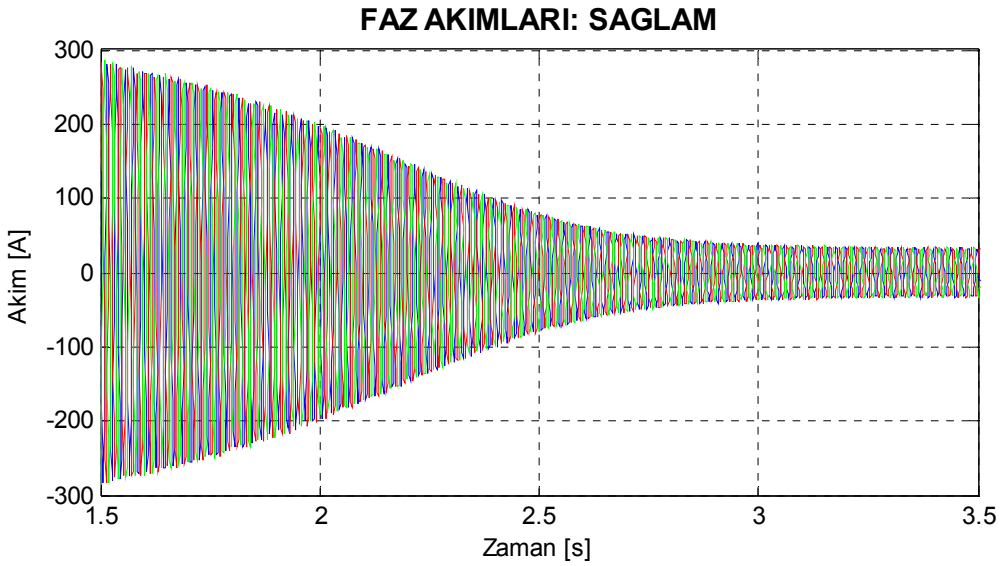
Şekil 7.47. Motor2 bir çubuğu kırık rotor için benzetimle elde edilen yol alma akımları.



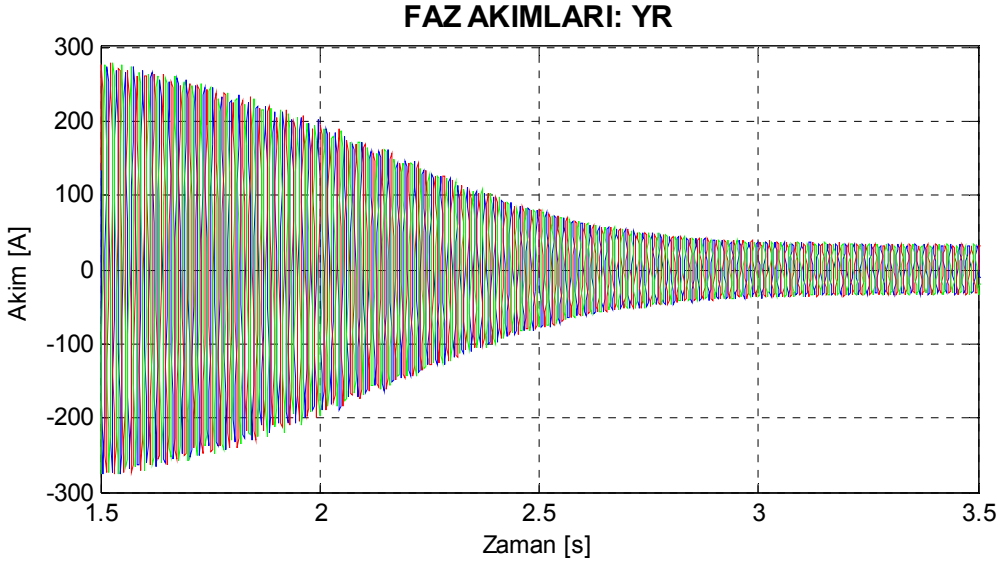
Şekil 7.48. Motor2 iki çubuğu kırık rotor için benzetimle elde edilen yol alma akımları.



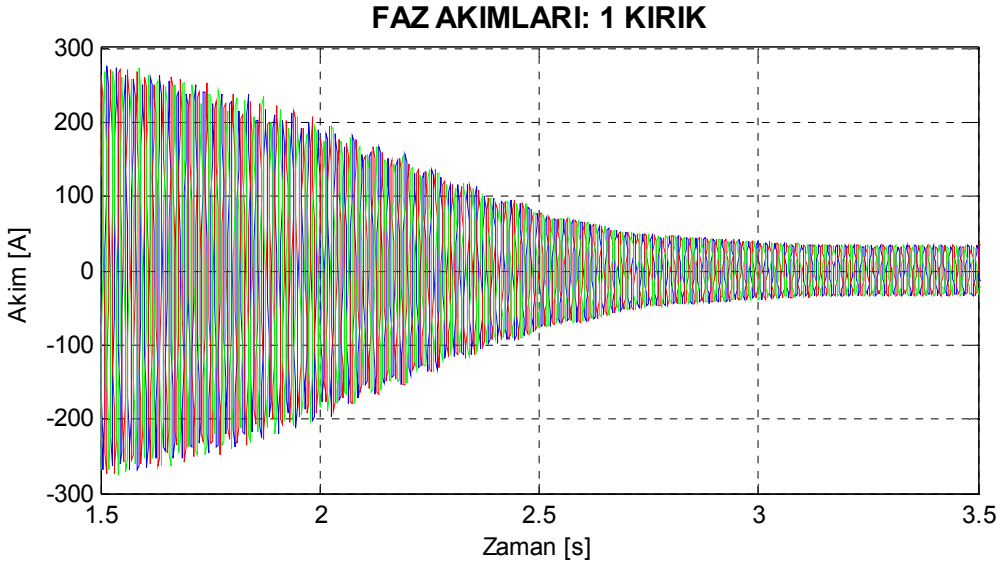
Şekil 7.49. Motor2 üç çubuğu kırık rotor için benzetimle elde edilen yol alma akımları.



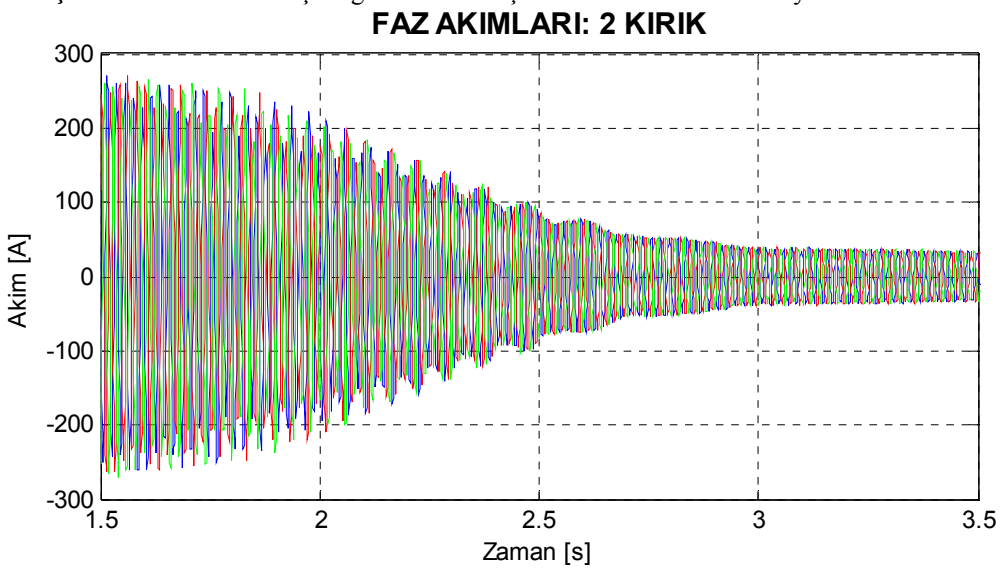
Şekil 7.50. Motor3 sağlam motor durumu için benzetimle elde edilen yol alma akımları.



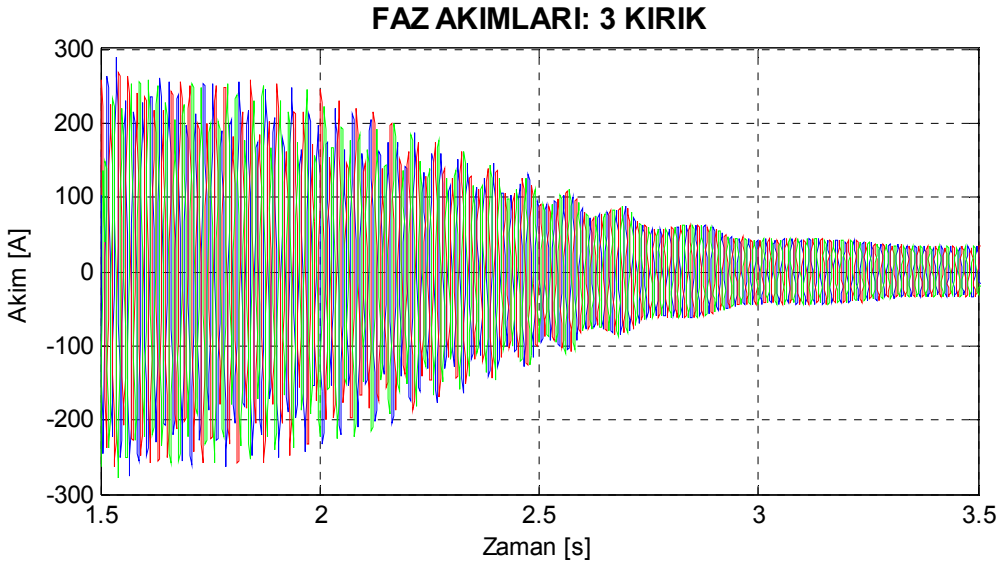
Şekil 7.51. Motor3 bir çubuğu yüksek dirençli rotor için benzetimle elde edilen yol alma akımları.



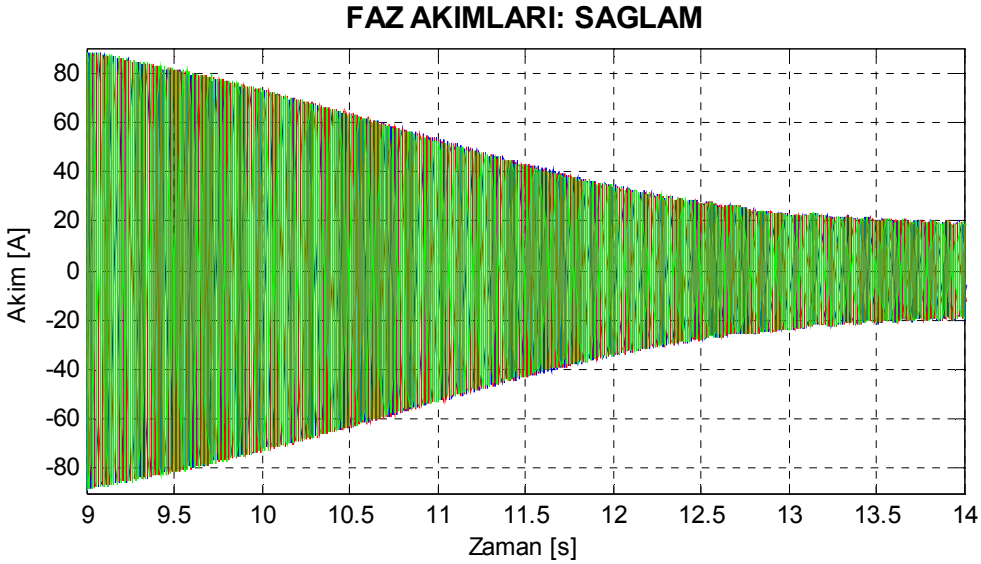
Şekil 7.52. Motor3 bir çubuğu kırık rotor için benzetimle elde edilen yol alma akımları.



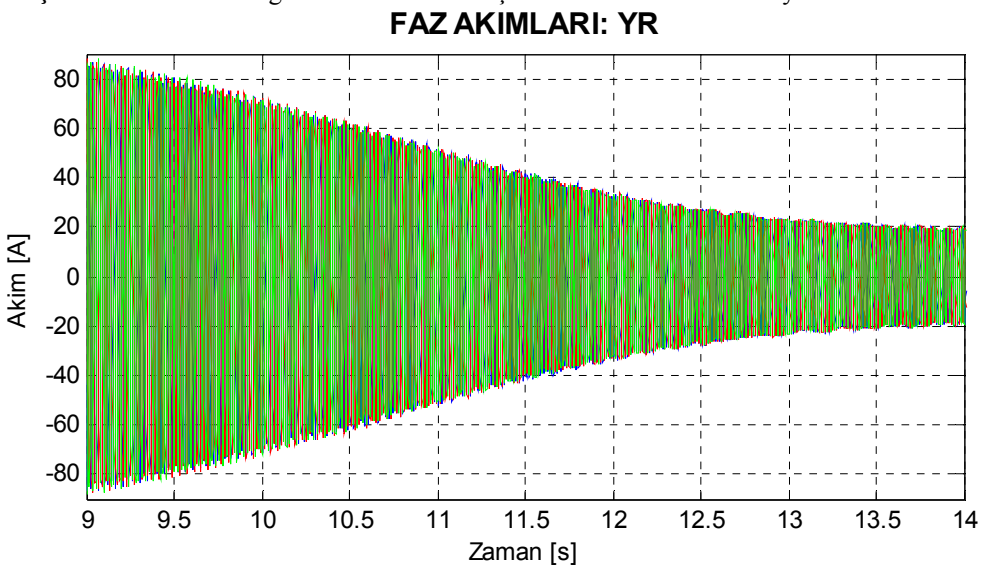
Şekil 7.53. Motor3 iki çubuğu kırık rotor için benzetimle elde edilen yol alma akımları.



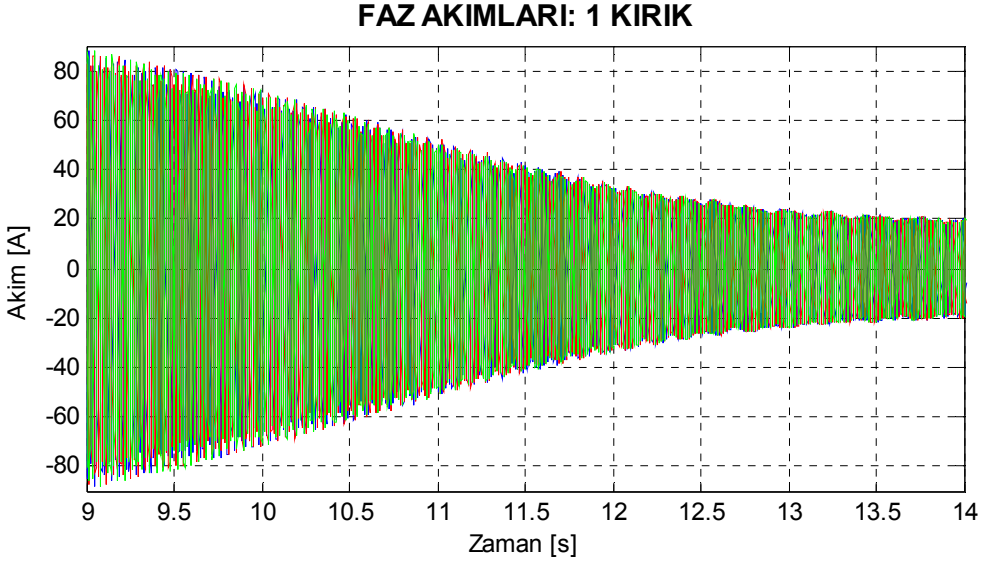
Şekil 7.54. Motor3 üç çubuğu kırık rotor için benzetimle elde edilen yol alma akımları.



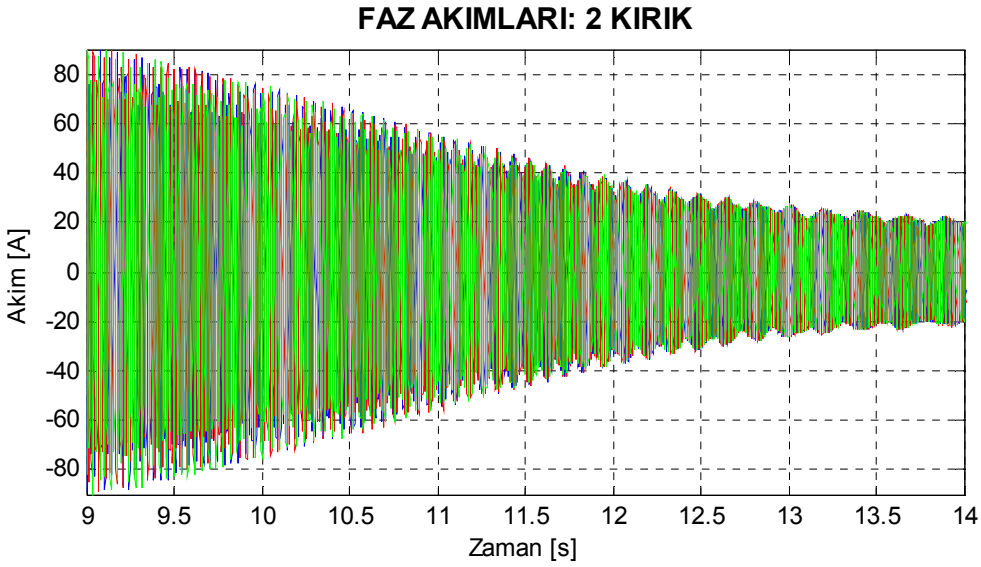
Şekil 7.55. Motor4 sağlam motor durumu için benzetimle elde edilen yol alma akımları.



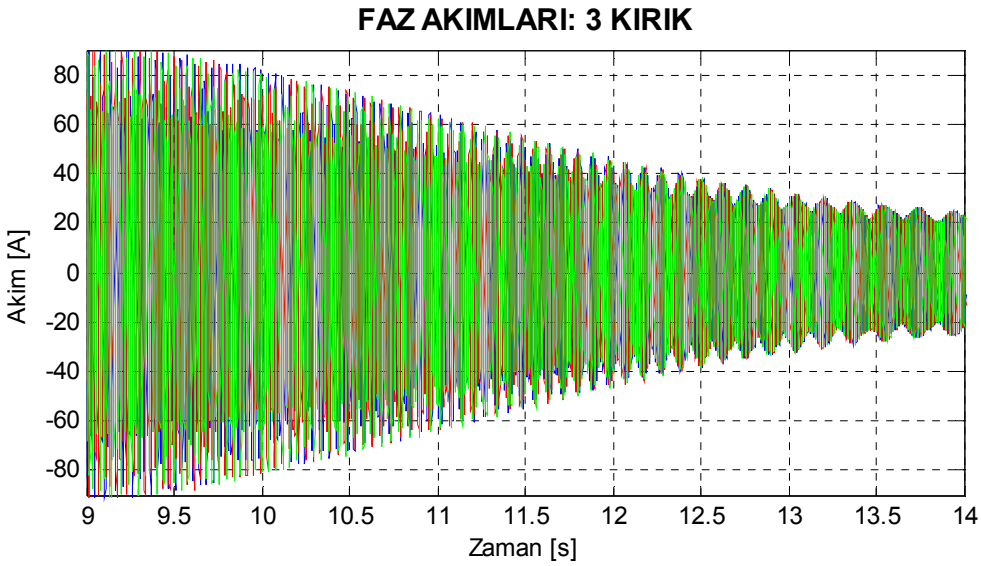
Şekil 7.56. Motor4 bir çubuğu yüksek dirençli rotor için benzetimle elde edilen yol alma akımları.



Şekil 7.57. Motor4 bir çubuğu kırık rotor için benzetimle elde edilen yol alma akımları.



Şekil 7.58. Motor4 iki çubuğu kırık rotor için benzetimle elde edilen yol alma akımları.

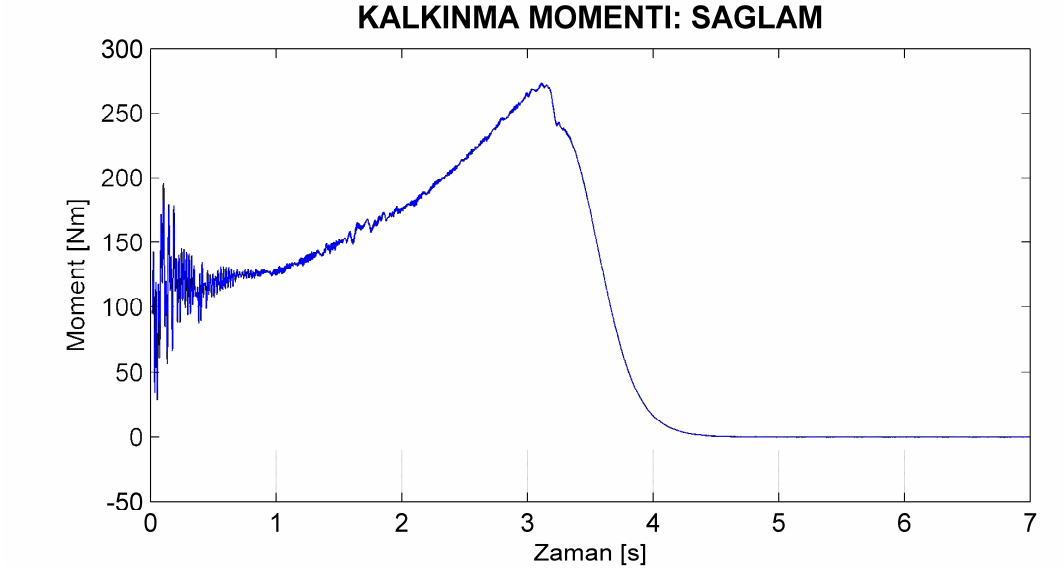


Şekil 7.59. Motor4 üç çubuğu kırık rotor için benzetimle elde edilen yol alma akımları.

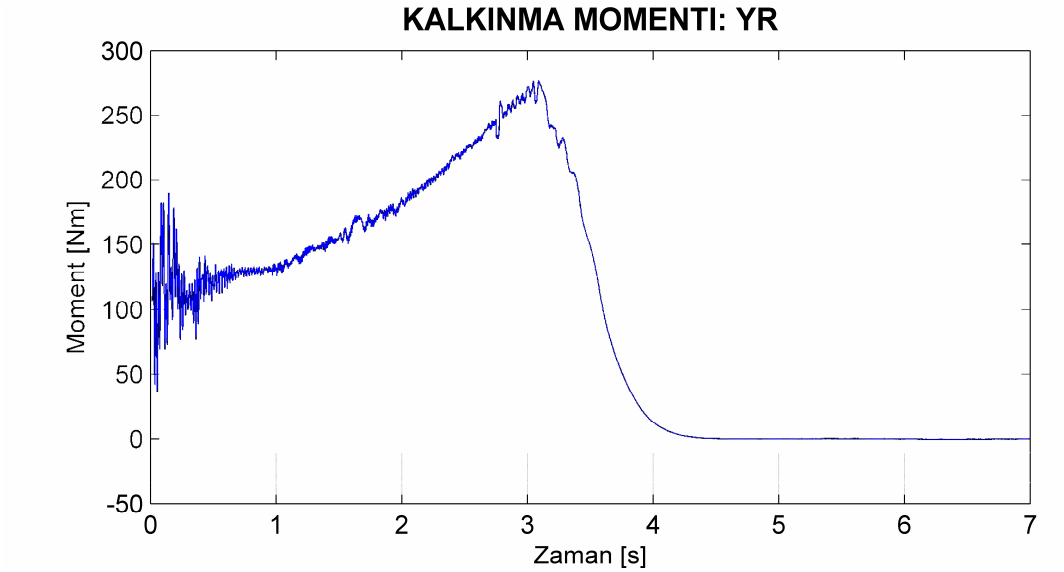
7.2.2. Yol alma sürecindeki motor momentleri

Rotor arızalarının yol alama sürecinde motor momentine etkilerini incelemek için yol alma sürecindeki moment değerlerini incelemek amacıyla benzetimler yapılmıştır. Yol alma sürecinde momentin değişimlerini gösteren grafikler; Motor1 için sağlam, yüksek dirençli, 1 kırık, 2 kırık ve 3 kırık çubuklu arıza durumları için sırasıyla Şekil 7.60, Şekil 7.61, Şekil 7.62, Şekil 7.63 ve Şekil 7.64'de; Motor2 için sağlam, yüksek dirençli, 1 kırık, 2 kırık ve 3 kırık çubuklu arıza durumları için sırasıyla Şekil 7.65, Şekil 7.66, Şekil 7.67, Şekil 7.68 ve Şekil 7.69'da; Motor3 için sağlam, yüksek dirençli, 1 kırık, 2 kırık ve 3 kırık çubuklu arıza durumları için sırasıyla Şekil 7.70,

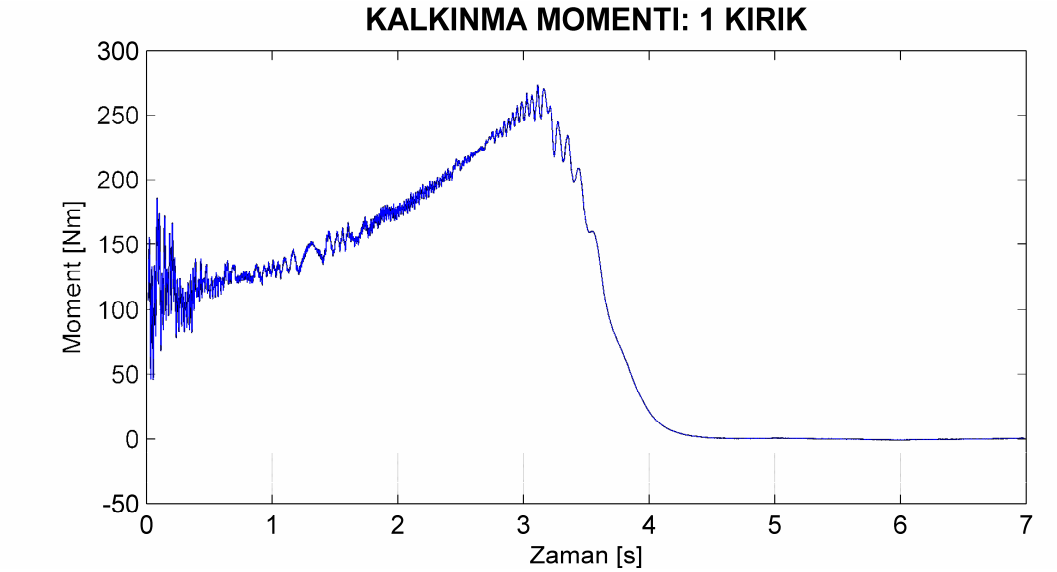
Şekil 7. 71, Şekil 7.52, Şekil 7.73 ve Şekil 7.74'de; Motor4 için sağlam, yüksek dirençli, 1 kırık, 2 kırık ve 3 kırık çubuklu arıza durumları için sırasıyla Şekil 7.75, Şekil 7.76, Şekil 7.77, Şekil 7.78 ve Şekil 7.79'da verilmiştir.



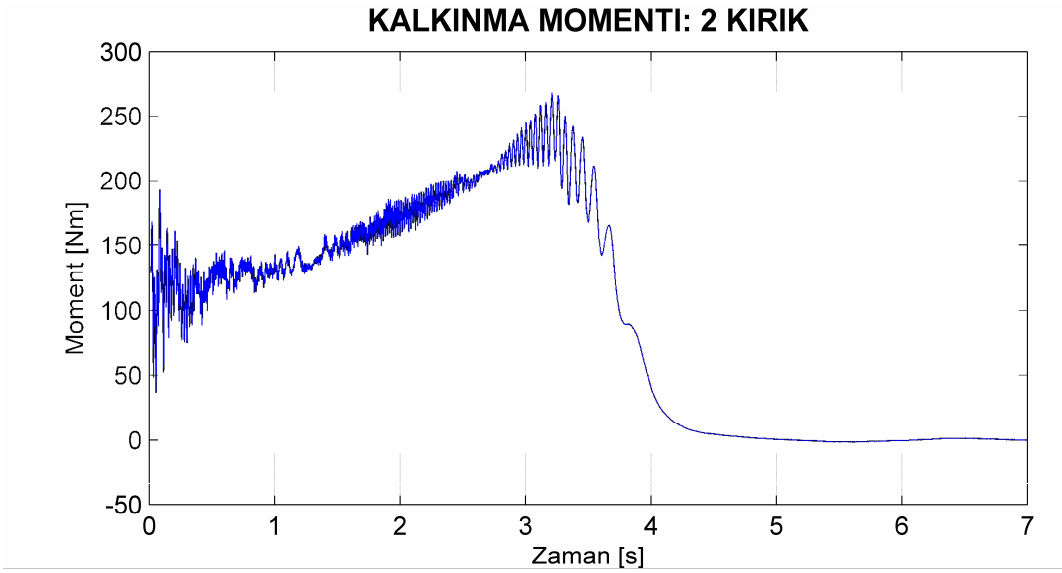
Şekil 7.60. Motor1 sağlam motor durumu için benzetimle elde edilen yol alma momentleri.



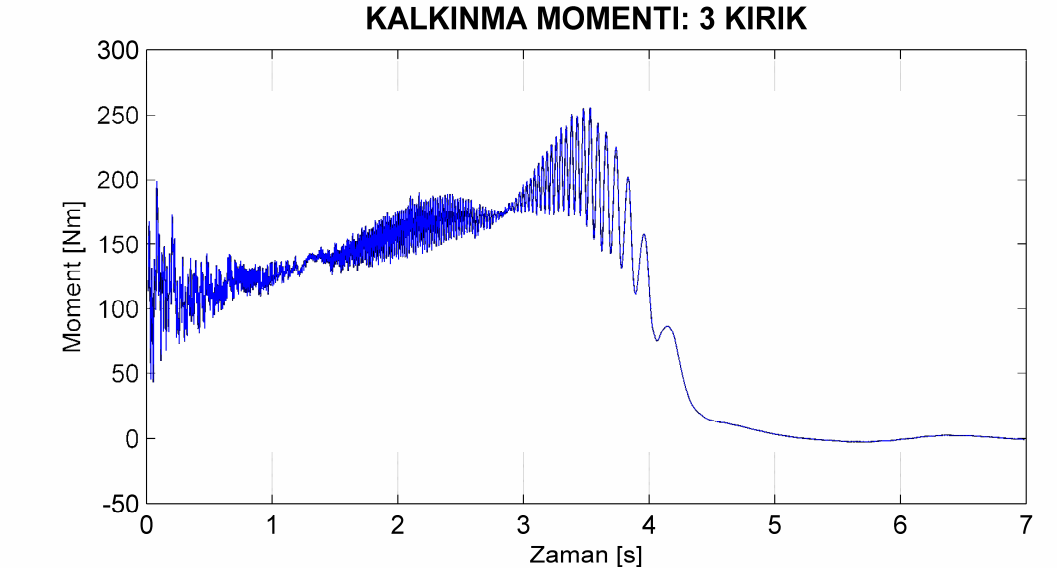
Şekil 7.61. Motor1 bir çubuğu yüksek dirençli rotor için benzetimle elde edilen yol alma momentleri.



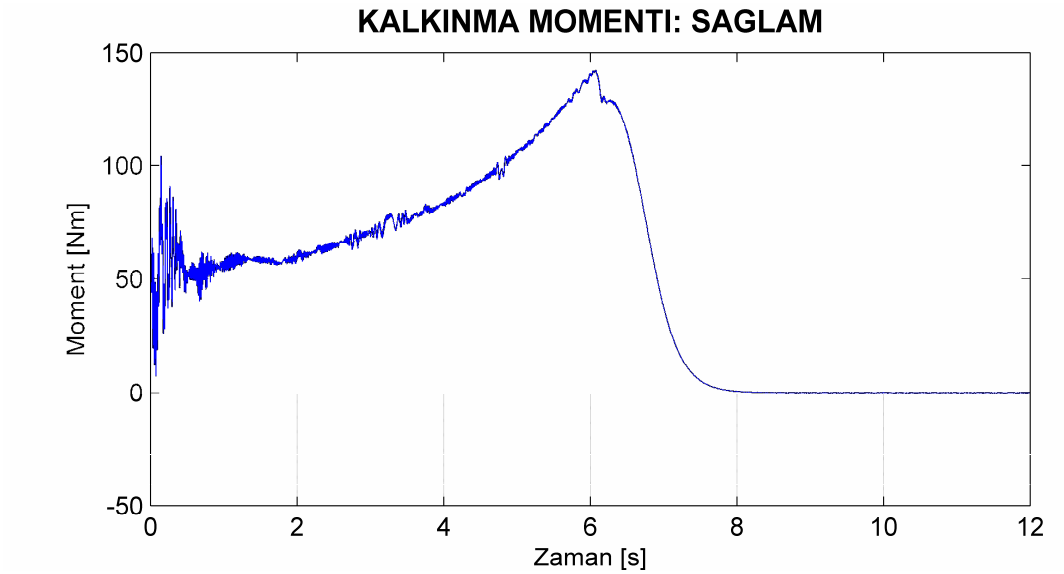
Şekil 7.62. Motor1 bir çubuğu kırık rotor için benzetimle elde edilen yol alma momentleri.



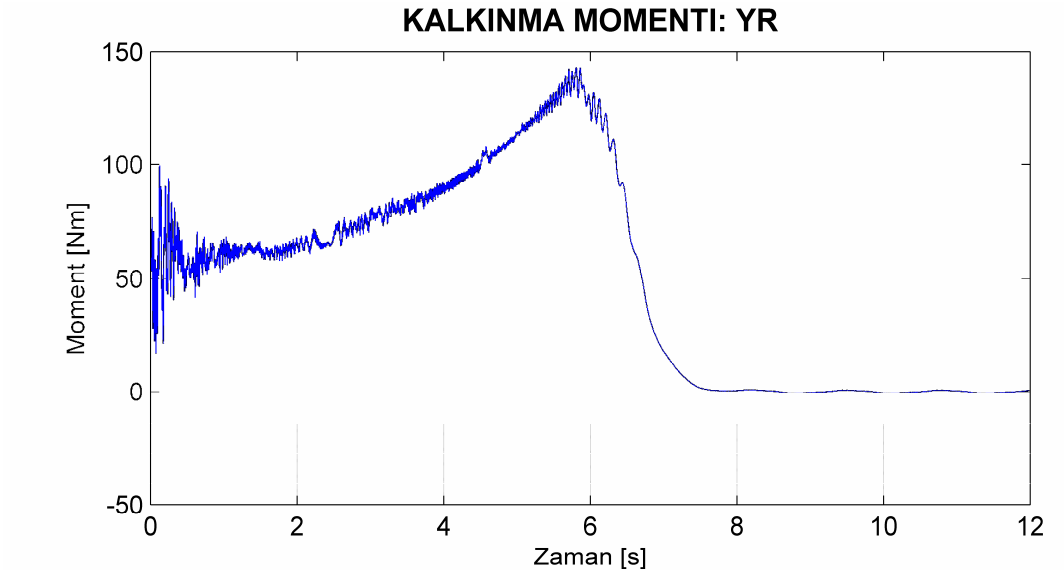
Şekil 7.63. Motor1 iki çubuğu kırık rotor için benzetimle elde edilen yol alma momentleri.



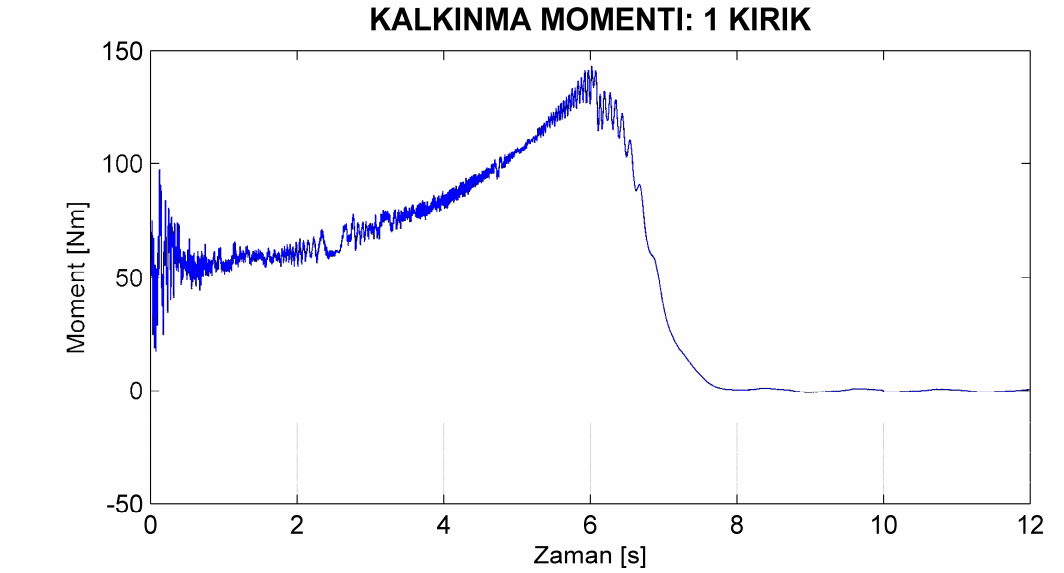
Şekil 7.64. Motor1 üç çubuğu kırık rotor için benzetimle elde edilen yol alma momentleri.



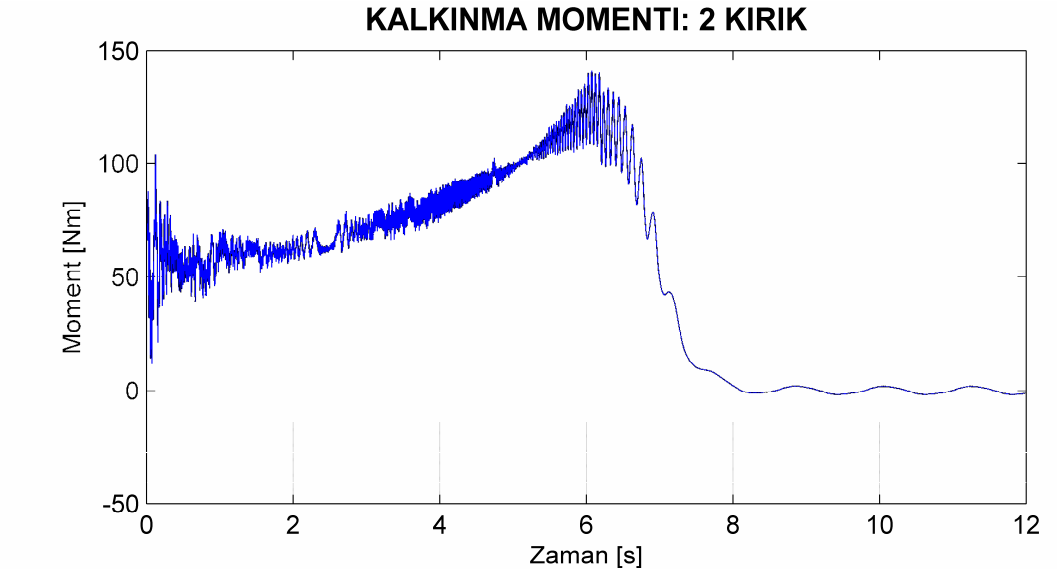
Şekil 7.65. Motor2 sağlam motor durumu için benzetimle elde edilen yol alma momentleri.



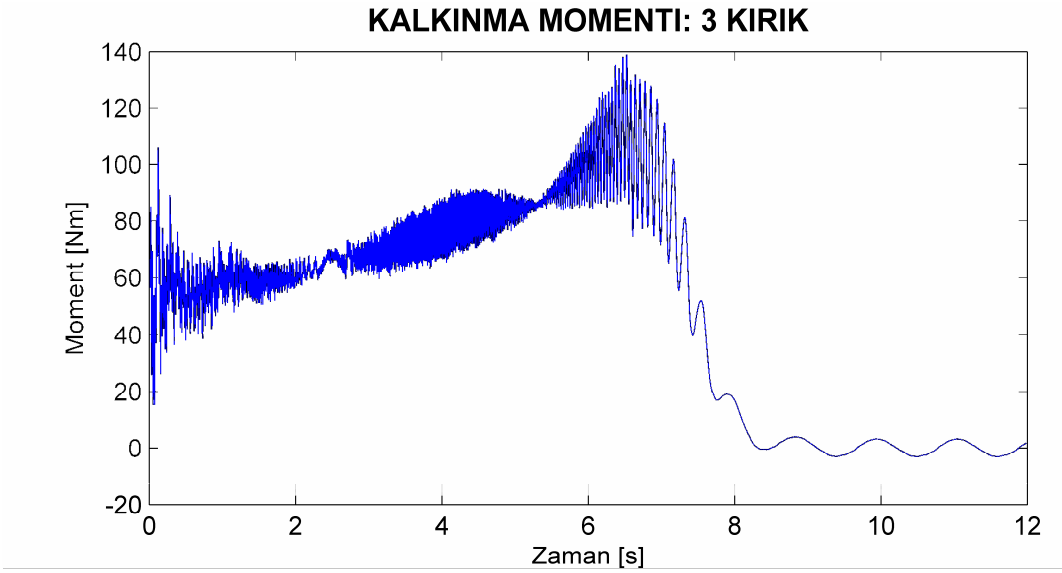
Şekil 7.66. Motor2 bir çubuğu yüksek dirençli rotor için benzetimle elde edilen yol alma momentleri.



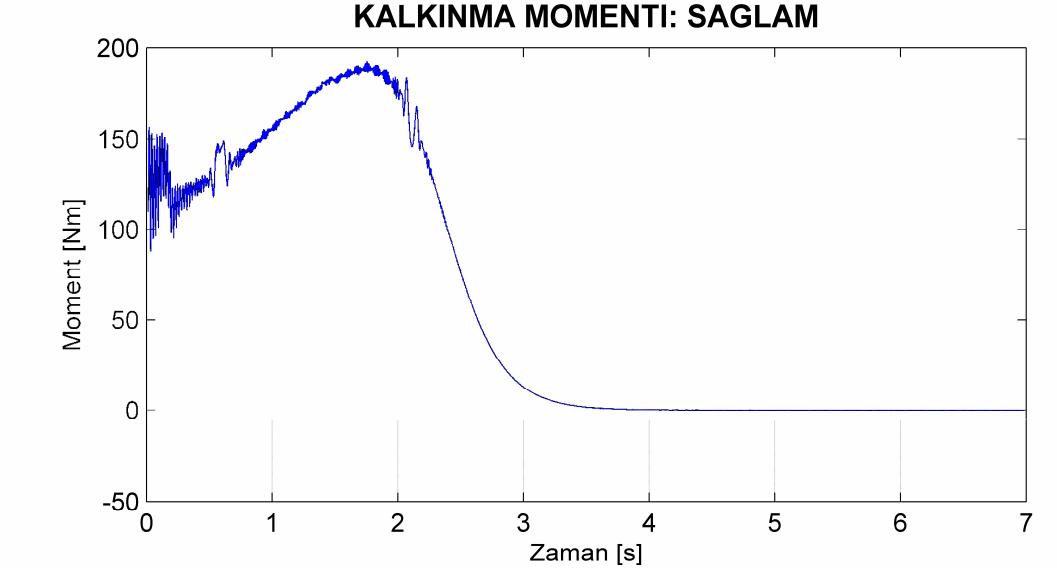
Şekil 7.67. Motor2 bir çubuğu kırık rotor için benzetimle elde edilen yol alma momentleri.



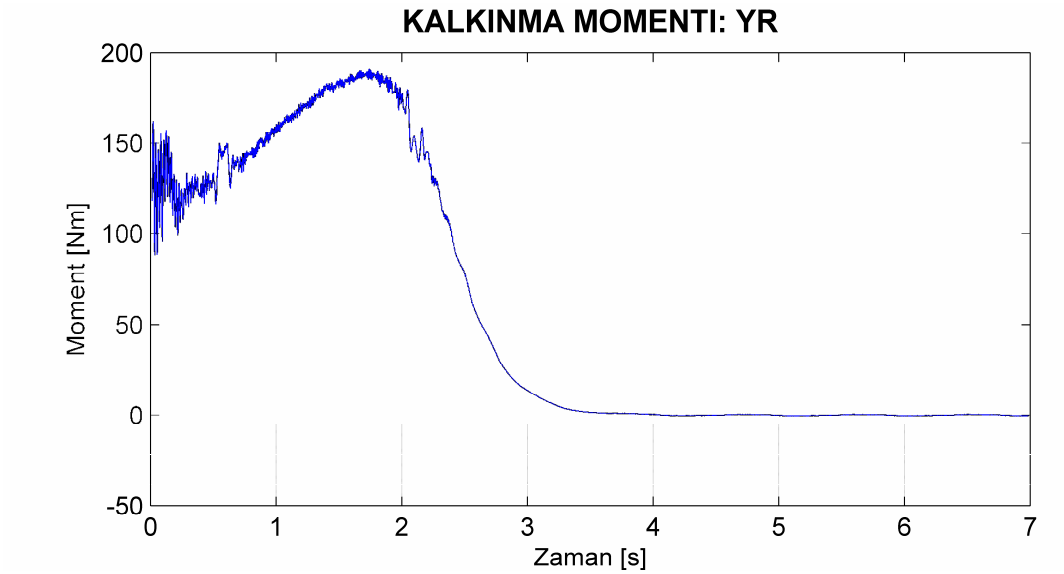
Şekil 7.68. Motor2 iki çubuğu kırık rotor için benzetimle elde edilen yol alma momentleri.



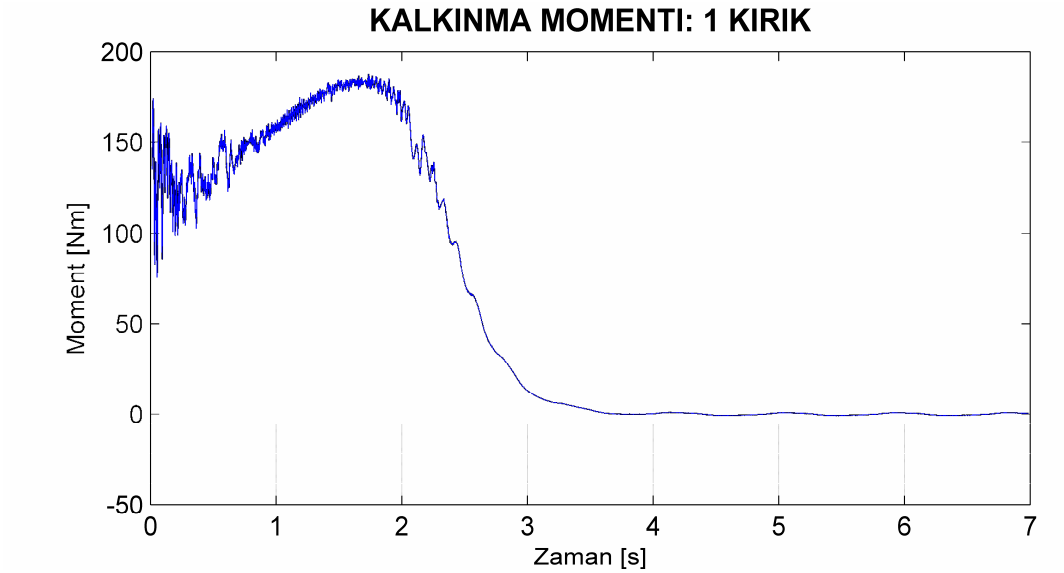
Şekil 7.69. Motor2 üç çubuğu kırık rotor için benzetimle elde edilen yol alma momentleri.



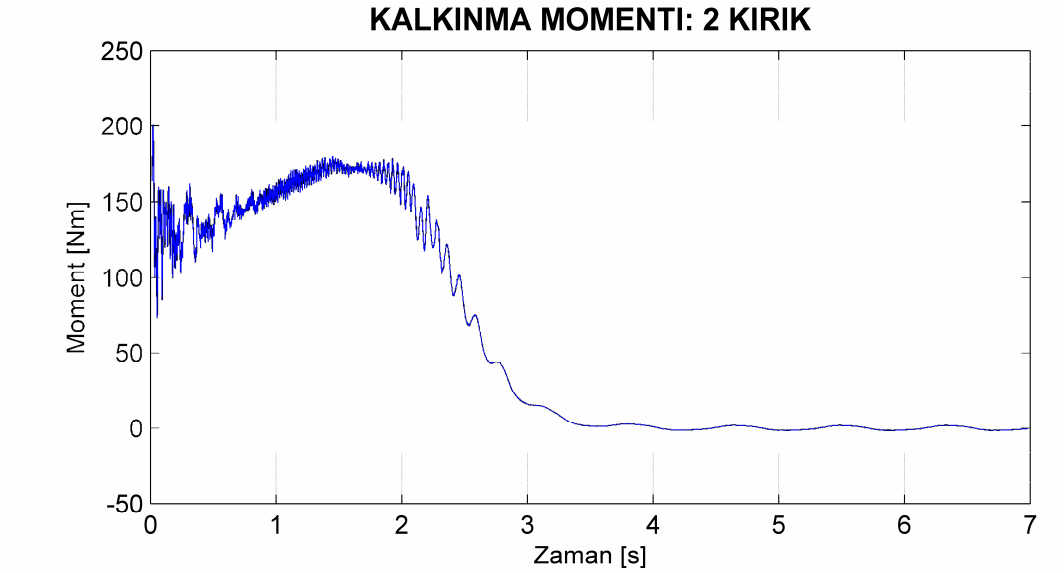
Şekil 7.70. Motor3 sağlam motor durumu için benzetimle elde edilen yol alma momentleri.



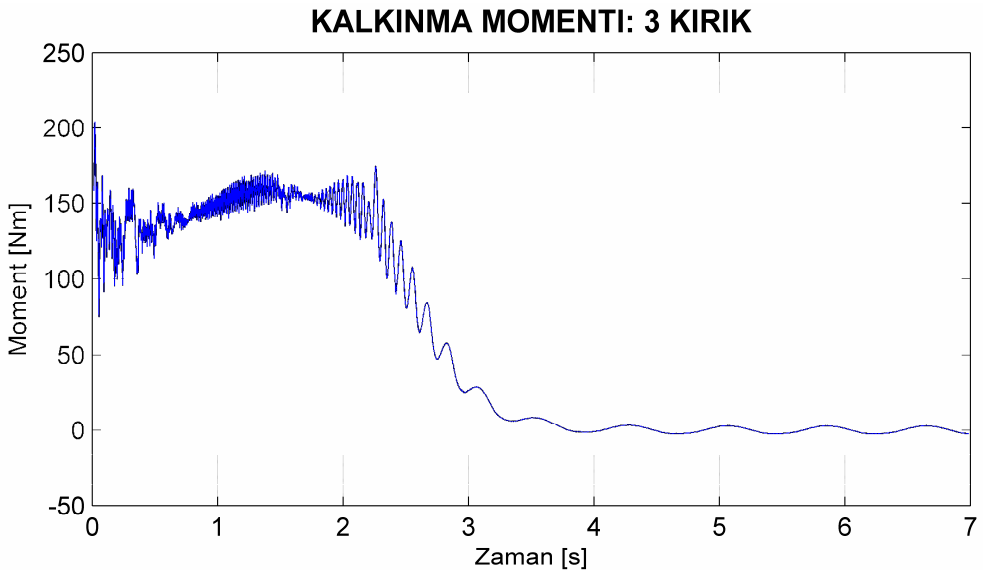
Şekil 7.71. Motor3 bir çubuğu yüksek dirençli rotor için benzetimle elde edilen yol alma momentleri.



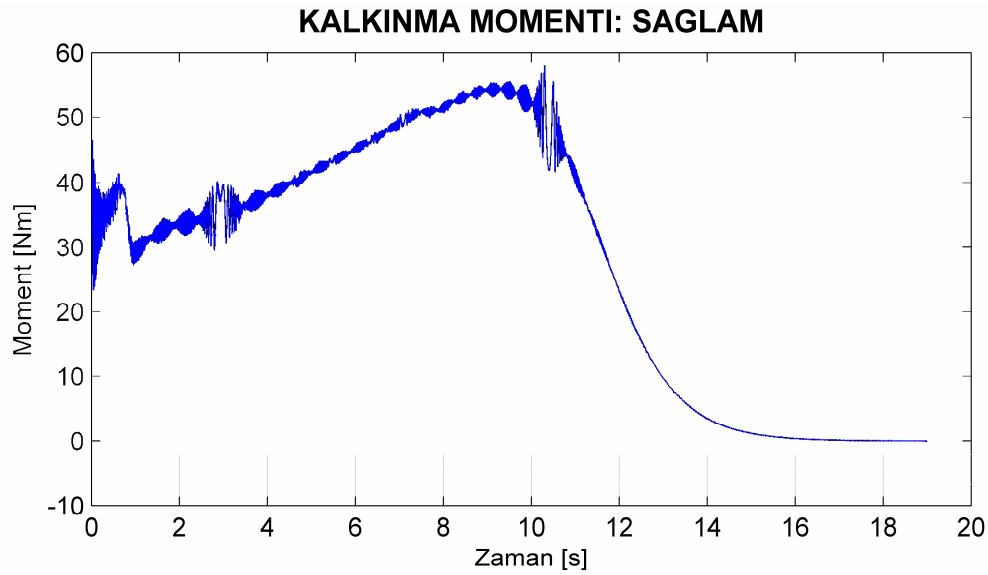
Şekil 7.72. Motor3 bir çubuğu kırık rotor için benzetimle elde edilen yol alma momentleri.



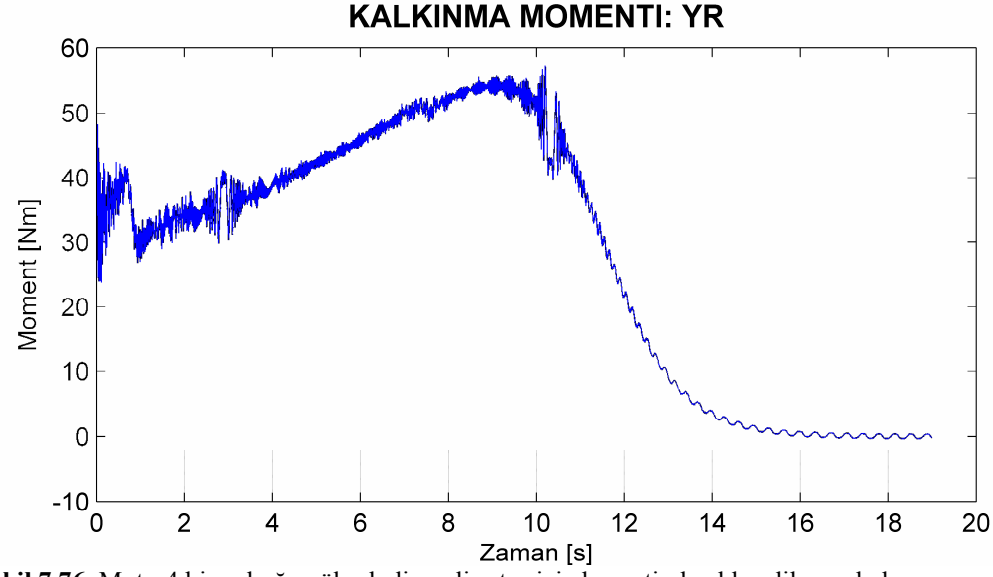
Şekil 7.73. Motor3 iki çubuğu kırık rotor için benzetimle elde edilen yol alma momentleri.



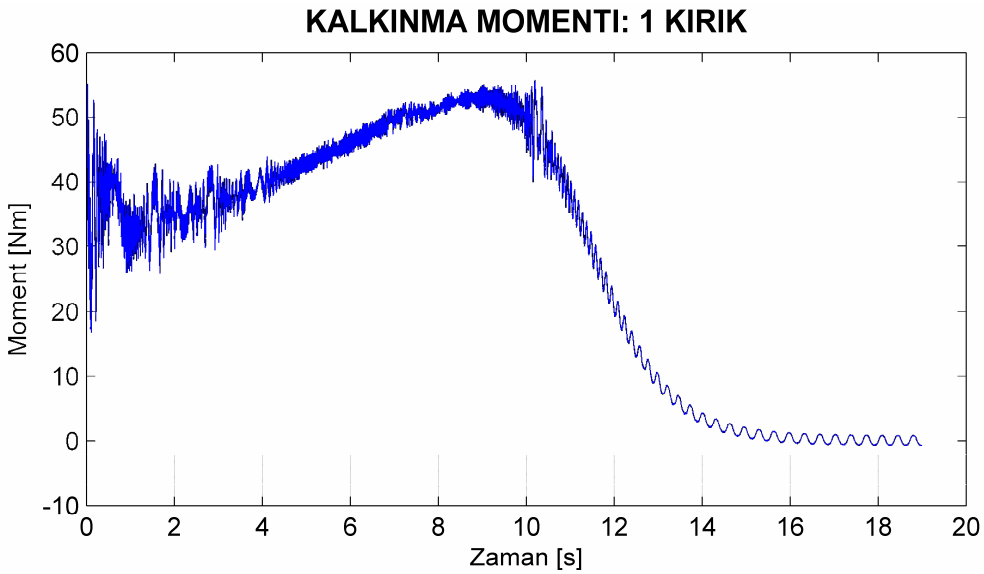
Şekil 7.74. Motor3 üç çubuğu kırık rotor için benzetimle elde edilen yol alma momentleri.



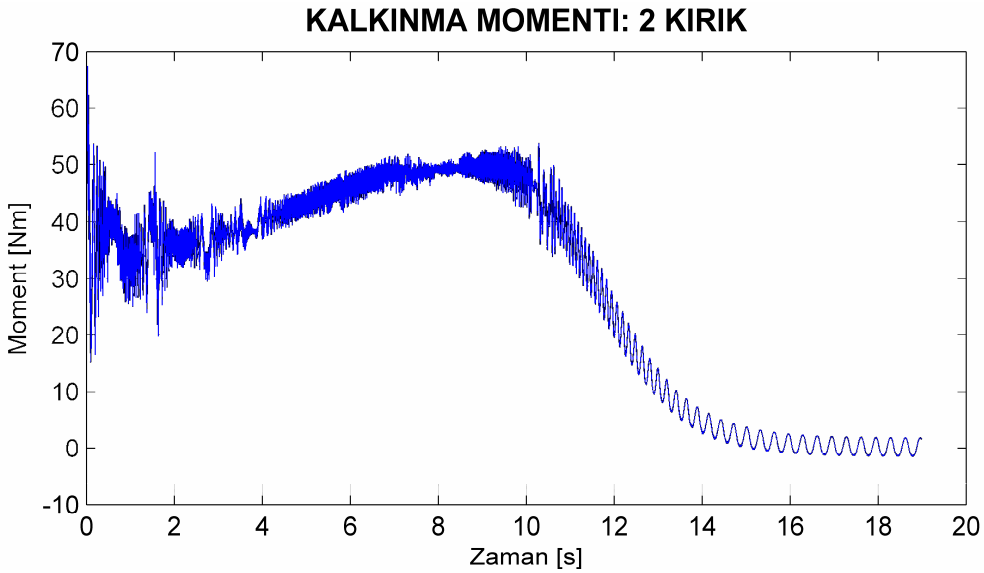
Şekil 7.75. Motor4 sağlam motor durumu için benzetimle elde edilen yol alma momentleri.



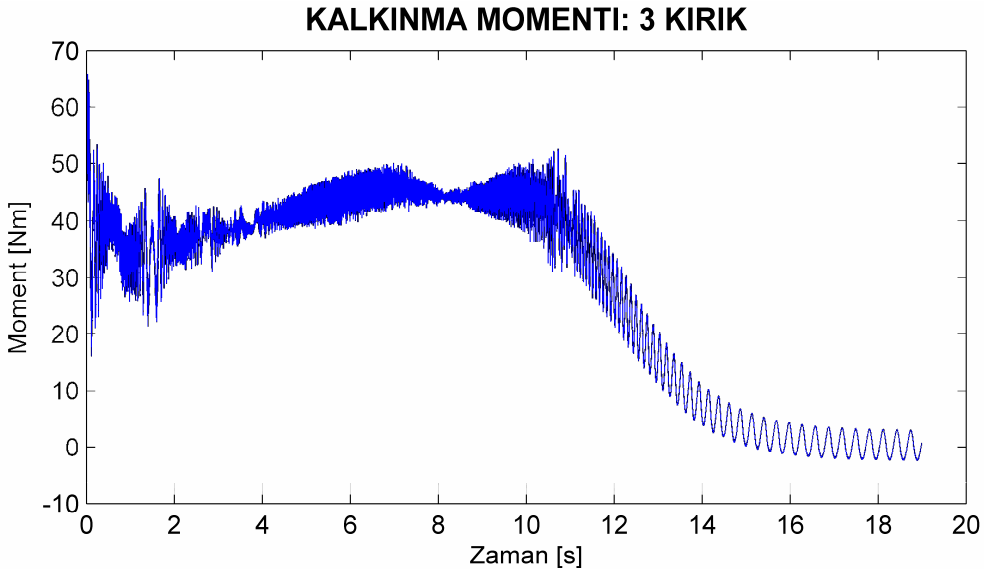
Şekil 7.76. Motor4 bir çubuğu yüksek dirençli rotor için benzetimle elde edilen yol alma momentleri.



Şekil 7.77. Motor4 bir çubuğu kırık rotor için benzetimle elde edilen yol alma momentleri.



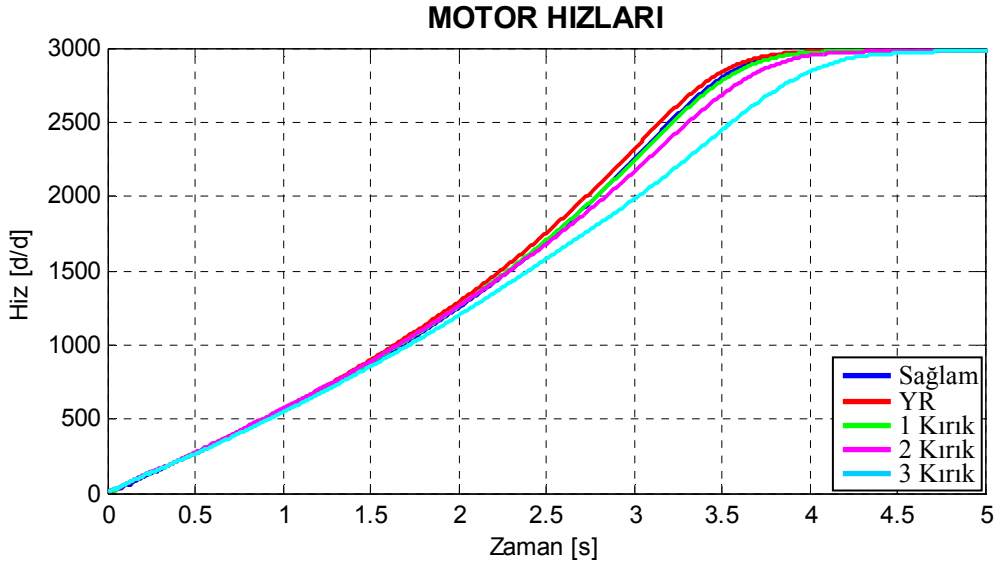
Şekil 7.78. Motor4 iki çubuğu kırık rotor için benzetimle elde edilen yol alma momentleri.



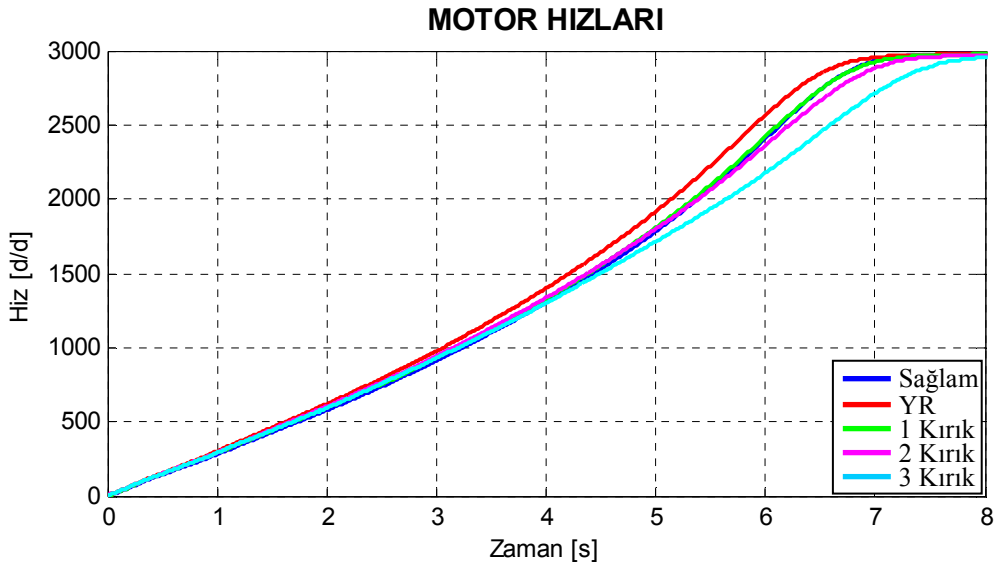
Şekil 7.79. Motor4 üç çubuğu kırık rotor için benzetimle elde edilen yol alma momentleri.

7.2.3. Yol alma sürecindeki motor hızları

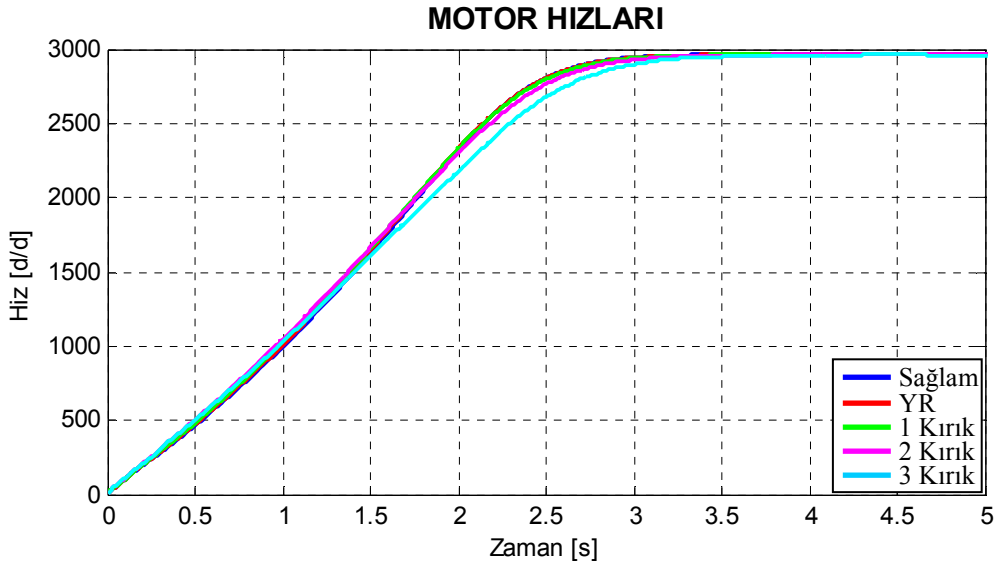
Motorun yol alma sürecinde motor hızlarındaki değişimin rotor arızalarına göre yaptığı etkileri incelemek için yol alma sürecindeki hız değerleri benzetimlerle elde edilmiştir. Yol alma sürecinde arızalara göre hızda meydana gelen değişimleri gösteren grafikler Motor1 için Şekil 7.80'de, Motor2 için Şekil 7.81'de, Motor3 için Şekil 7.82'de ve Motor4 için Şekil 7.83'de verilmiştir.



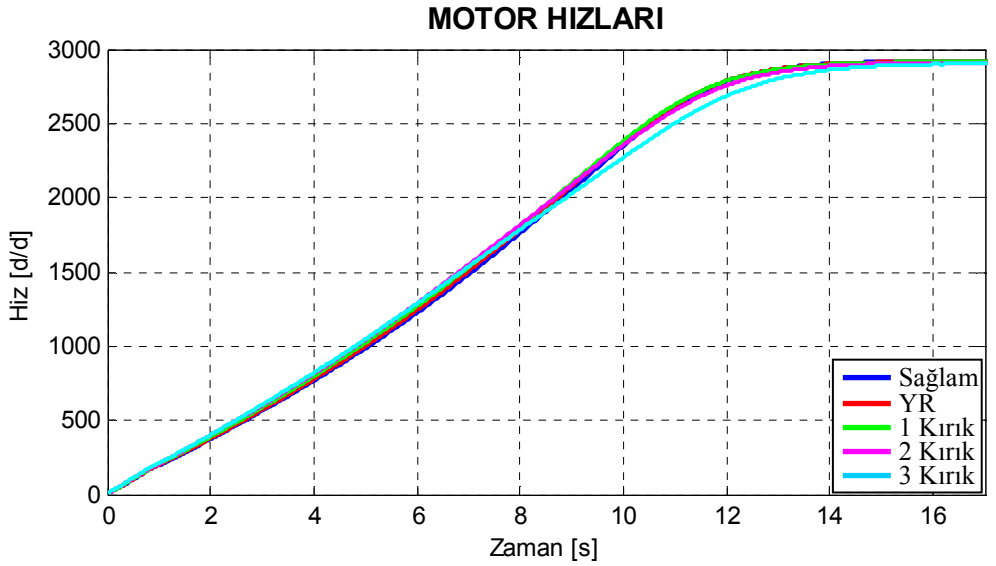
Şekil 7.80. Motor1 için benzetimle elde edilen arıza durumlarına göre çizilmiş yol alma hız grafikleri.



Şekil 7.81. Motor2 için benzetimle elde edilen arıza durumlarına göre çizilmiş yol alma hız grafikleri.



Şekil 7.82. Motor3 için benzetimle elde edilen arıza durumlarına göre çizilmiş yol alma hız grafikleri.

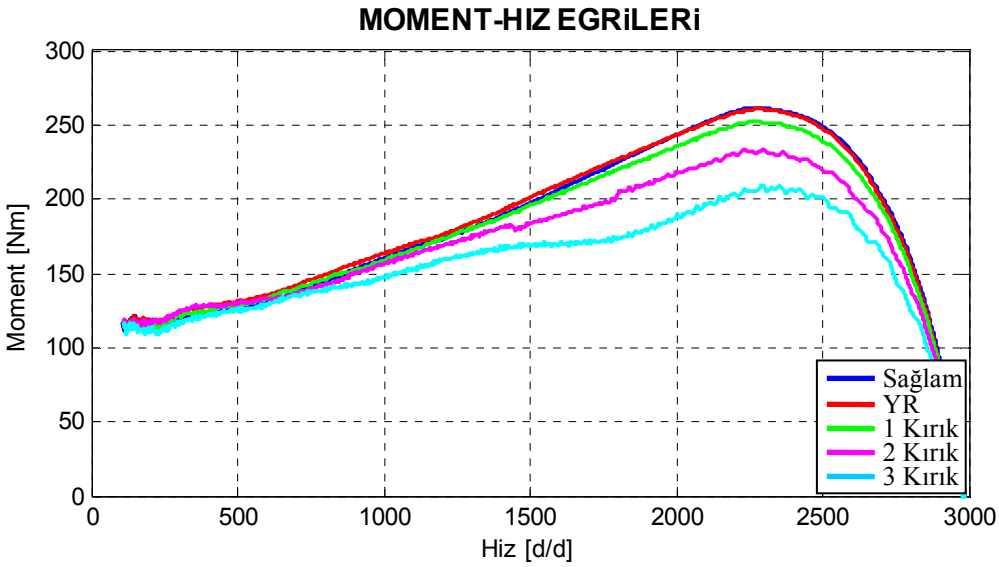


Şekil 7.83. Motor4 için benzetimle elde edilen arıza durumlarına göre çizilmiş yol alma hız grafikleri.

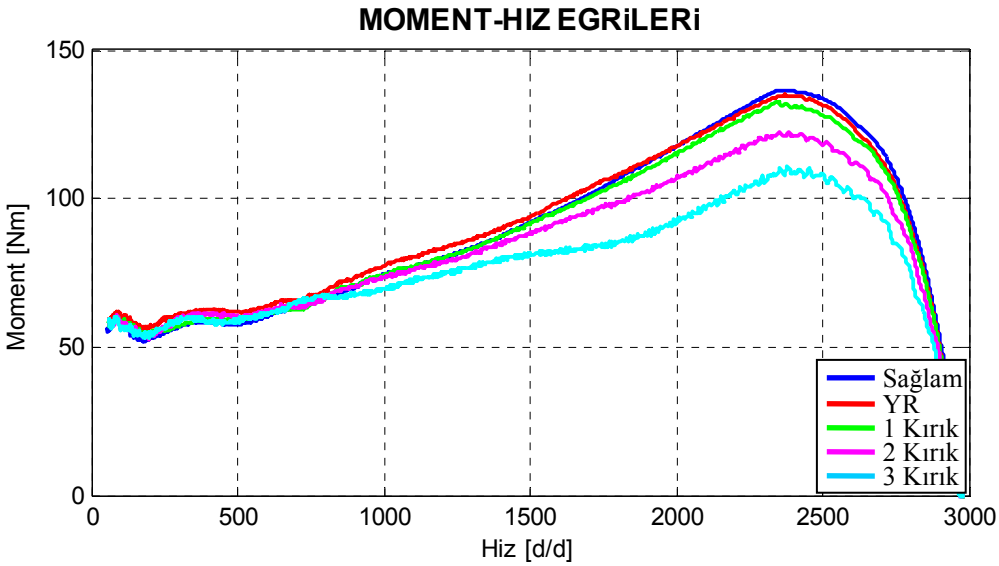
7.3. Hız-Moment Eğrisi İçin Benzetim Sonuçları

Motor karakteristik incelemesinde kullanılan önemli referanslardan birisi de hız-moment eğrisidir. Rotor arızalarının hız-moment eğrisi üzerindeki etkirini görmek için yol alma sürecinde eş zamanlı olarak kaydedilen moment ve hız değerleri kullanılarak hız-moment eğrileri çizdirilmiştir. Elde edilen hız-moment eğrileri Motor1 için Şekil 7.84'de, Motor2 için Şekil 7.85'de, Motor3 için Şekil 7.86'da ve Motor4 için Şekil 7.87'de verilmiştir. Hız-moment eğrilerinden devrilme moment değerleri ve kalkınma

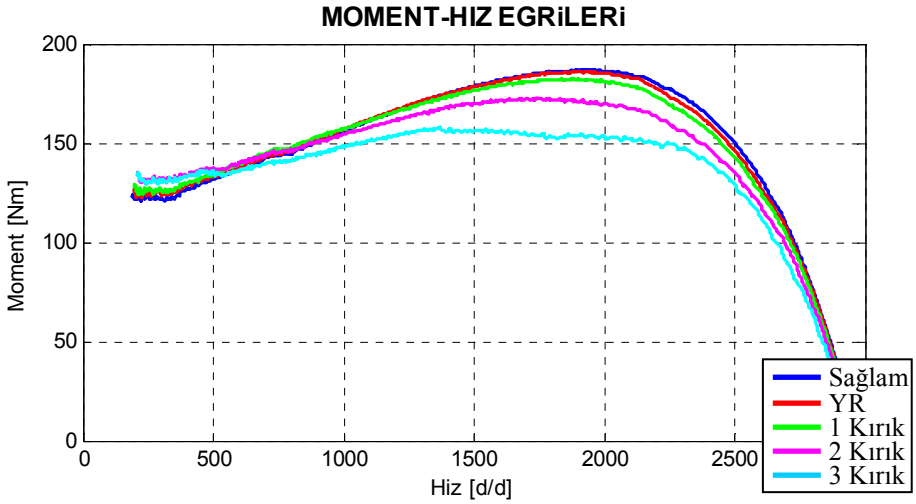
moment değerlerindeki değişmeler incelenmiştir. Motorların devrilme moment değerleri Çizelge7.1'de, kalkınma moment değerleri de Çizelge 7.2'de verilmiştir.



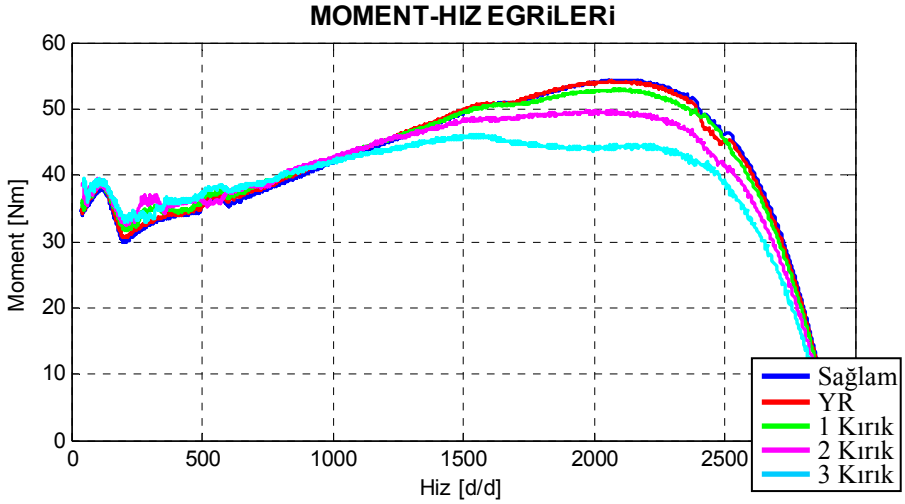
Şekil 7.84. Motor1 için benzetimle elde edilen arıza durumlarına göre çizilmiş hız-moment eğrileri.



Şekil 7.85. Motor2 için benzetimle elde edilen arıza durumlarına göre çizilmiş hız-moment eğrileri.



Şekil 7.86. Motor3 için benzetimle elde edilen arıza durumlarına göre çizilmiş hız-moment eğrileri.



Şekil 7.87. Motor4 için benzetimle elde edilen arıza durumlarına göre çizilmiş hız-moment eğrileri.

Çizelge 7.1. Hız-moment eğrisinden hesaplanan devrilme moment değerlerinin arızalara göre değişimi.

	Sa [Nm]	YR [Nm]	1k [Nm]	2k [Nm]	3k [Nm]
Motor1	261,4	261,5	252,6	233,5	209,9
Motor2	132,0	130,5	127,9	118,9	107,2
Motor3	187,2	185,9	182,4	172,6	158,4
Motor4	53,9	53,8	52,6	49,4	45,6

Çizelge 7.2. Hız-moment eğrisinden hesaplanan kalkınma moment değerlerinin arızalara göre değişimi.

	Sa [Nm]	YR [Nm]	1k [Nm]	2k [Nm]	3k [Nm]
Motor1	111,2	122,0	127,2	133,0	133,2
Motor2	41,5	51,2	50,2	53,2	52,9
Motor3	128,5	129,2	132,0	141,7	145,2
Motor4	35,1	35,9	38,2	45,7	50,5

8. DENEYSEL SONUÇLAR

Deneysel çalışmada benzetimlerde kullanılan motorların bire bir aynısı kullanılmıştır. Bu motorlar 50HP, 30HP, 25HP ve 10HP gücünde dört farklı derin kuyu asenkron motordur. Bu motorlar için sağlam ve beş farklı rotor arızası olmak üzere toplam 6 durumda deneyler yapılmıştır. Benzetimde yapılamayan halka kırık arızası deneylerde incelenmiştir. Her bir durum için deneylerden elde edilen sonuçlar kararlı durum, yol alma durumu ve hız-moment eğrisi için üç ayrı grupta incelenmiştir. Deneylerde incelenilen rotor arızaları aşağıda verilmiştir:

a. Bir çubuğu yüksek dirençli rotor,
b. Bir çubuğu kırık rotor,
c. İki çubuğu kırık rotor,
d. Üç çubuğu kırık rotor.
e. Kısa devre halkası kırık rotor.

8.1. Kararlı Durum İçin Deneysel Sonuçlar

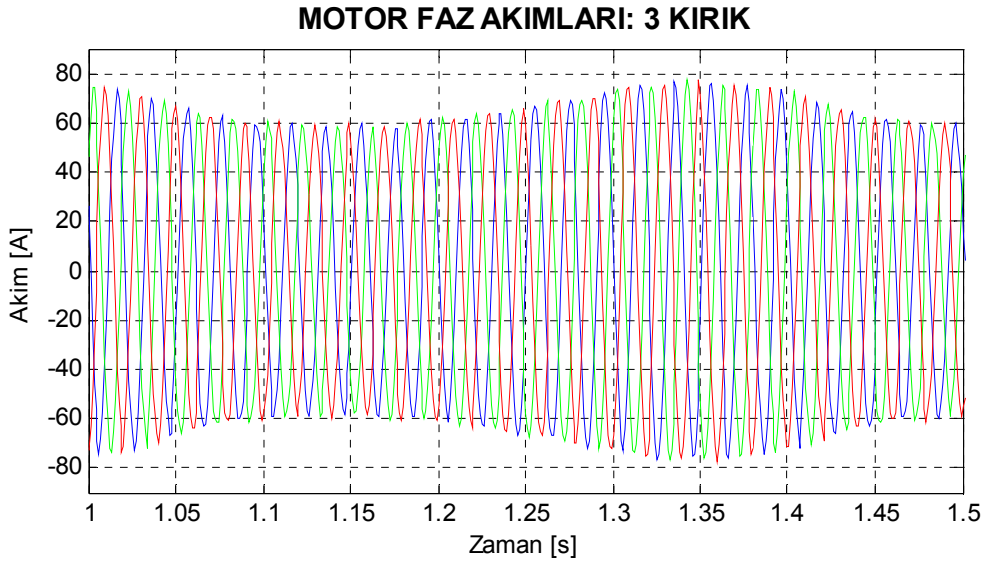
Deneysel sonuçlar, kararlı durum çalışmasında arızaların motor performansına yaptığı etkilerin analizi aşağıdaki motor çıktıları incelenerek yapılmıştır:

g. Motor akımları,
h. Motor momenti,
i. Motor hızı,
j. Motor güç faktörü,
k. Motor mekaniki gücü,
l. Motor verimi.

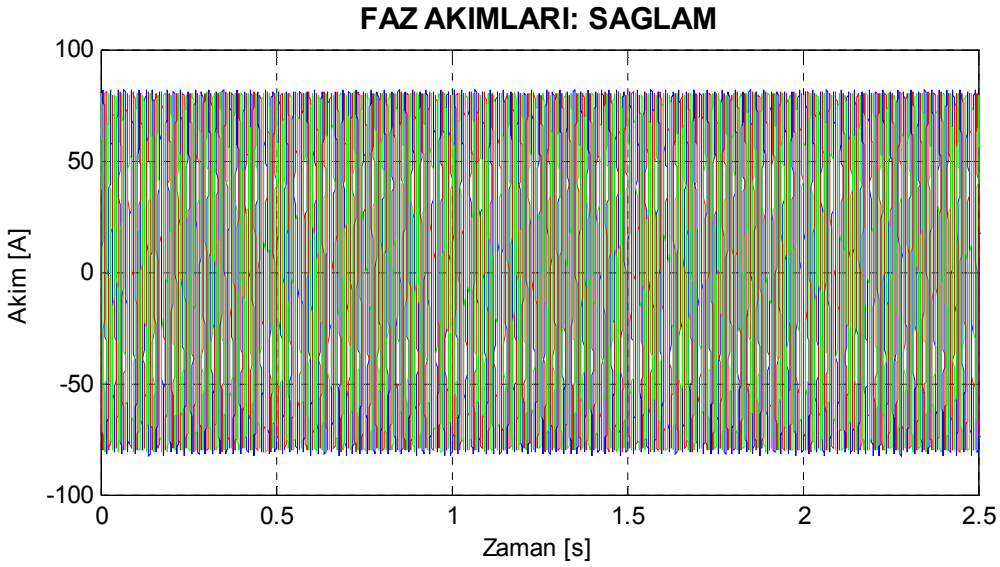
8.1.1. Kararlı durumda motor akımları

Kararlı durumda deneysel sonuçların incelenmesinde benzetimde izlenilen yolun aynısı kullanılmıştır. Rotor arızalarının motor akımına etkileri incelemek için etkilerin daha çok düşük frekanslarda oluşacağından dolayı kısa veri aralığı yerine etkilerin daha net görülebilmesi için uzun veri aralıkları kullanılarak akım grafikleri çizdirilmiştir. Üç kırık çubuklu motor durumu için motor akımının kısa veri aralığı ile çizilmiş hali Şekil 8.1'de verilmiştir. Deneylerden elde edilen motor akımları için çizilen grafikleri de

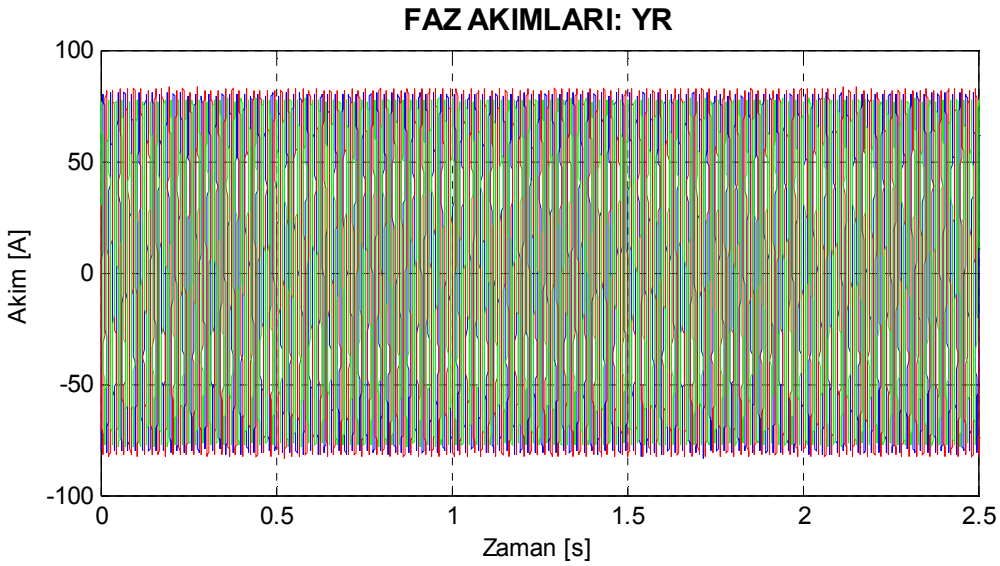
Motor1 için sağlam, yüksek dirençli, 1 kırık, 2 kırık, 3 kırık çubuklu ve kısa devre halkası kırık arıza durumları için sırasıyla Şekil 8.2, Şekil 8.3, Şekil 8.4, Şekil 8.5, Şekil 8.6 ve Şekil 8.7'de; Motor2 için sağlam, yüksek dirençli, 1 kırık, 2 kırık ve 3 kırık çubuklu ve kısa devre halkası kırık arıza durumları için sırasıyla Şekil 8.8, Şekil 8.9, Şekil 8.10, Şekil 8.11, Şekil 8.12 ve Şekil 8.13'de; Motor3 için sağlam, yüksek dirençli, 1 kırık, 2 kırık ve 3 kırık çubuklu ve kısa devre halkası kırık arıza durumları için sırasıyla Şekil 8.14, Şekil 8.15, Şekil 8.16, Şekil 8.17, Şekil 8.18 ve Şekil 8.19'da; Motor4 için sağlam, yüksek dirençli, 1 kırık, 2 kırık ve 3 kırık çubuklu ve kısa devre halkası kırık arıza durumları için sırasıyla Şekil 8.20, Şekil 8.21, Şekil 8.22, Şekil 8.23, Şekil 8.24 ve Şekil 8.25'de verilmiştir.



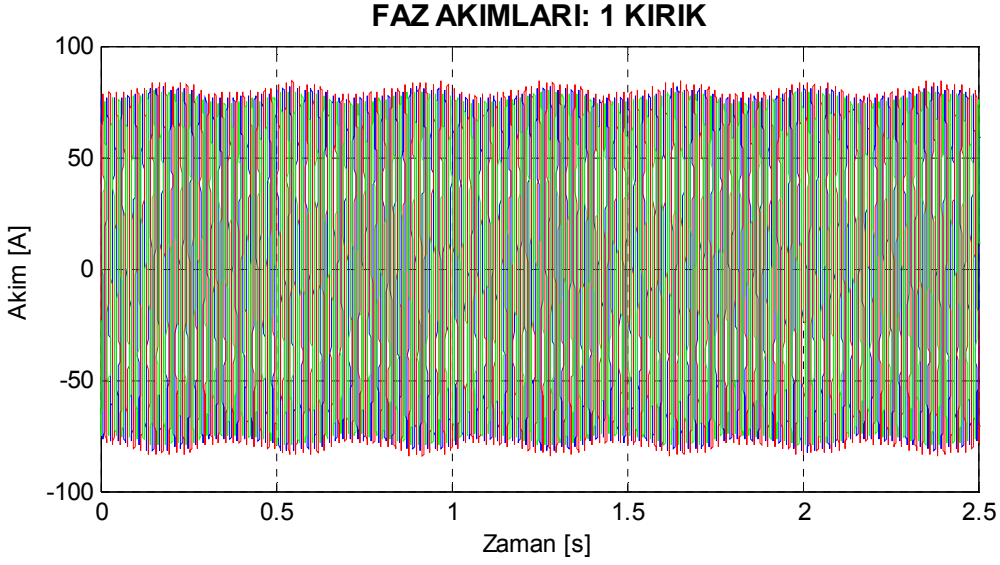
Şekil 8.1. Motor1 için deneysel üç kırık çubuklu rotor arızası için kısa veri aralığıyla çizilmiş motor akımları grafiği.



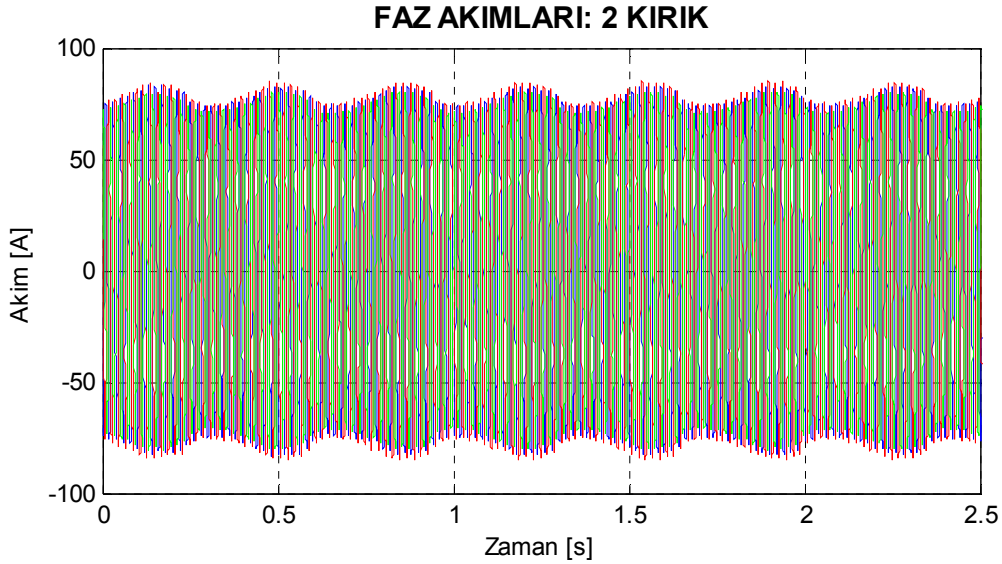
Şekil 8.2. Motor1 sağlam motor durumu için deneysel stator akımları.



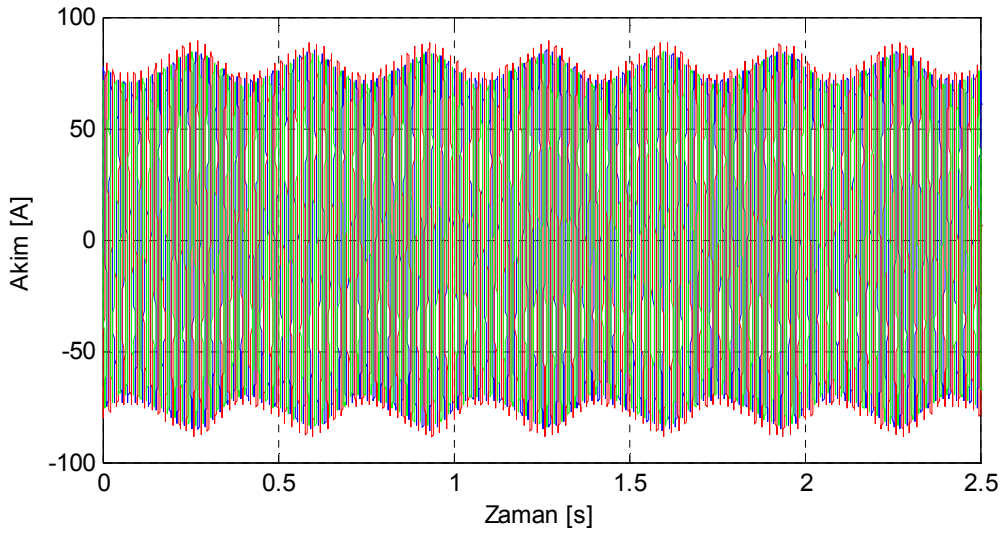
Şekil 8.3. Motor1 bir çubuğu yüksek dirençli rotor için deneysel stator akımları.



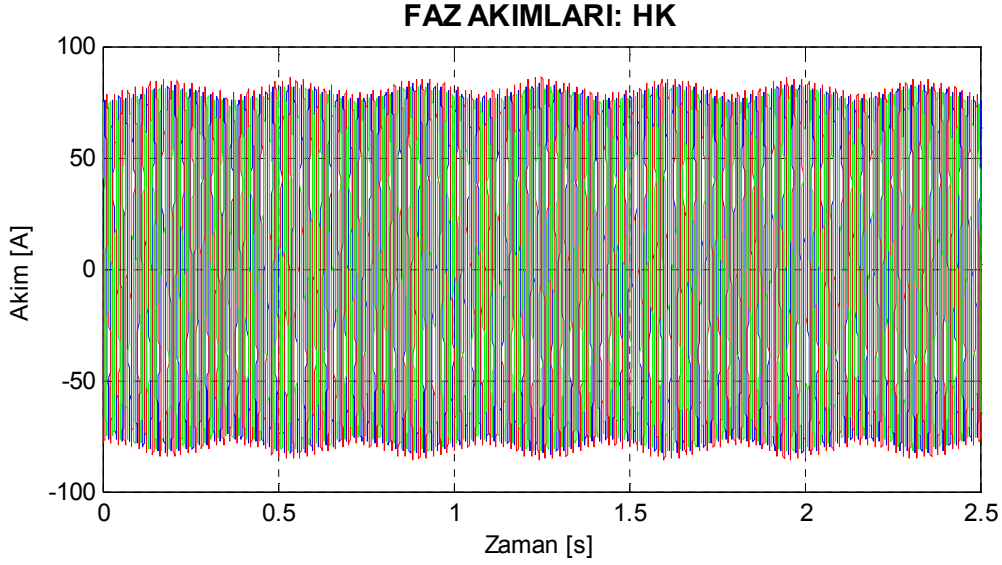
Şekil 8.4. Motor1 bir çubuğu kırık rotor için deneysel stator akımları.



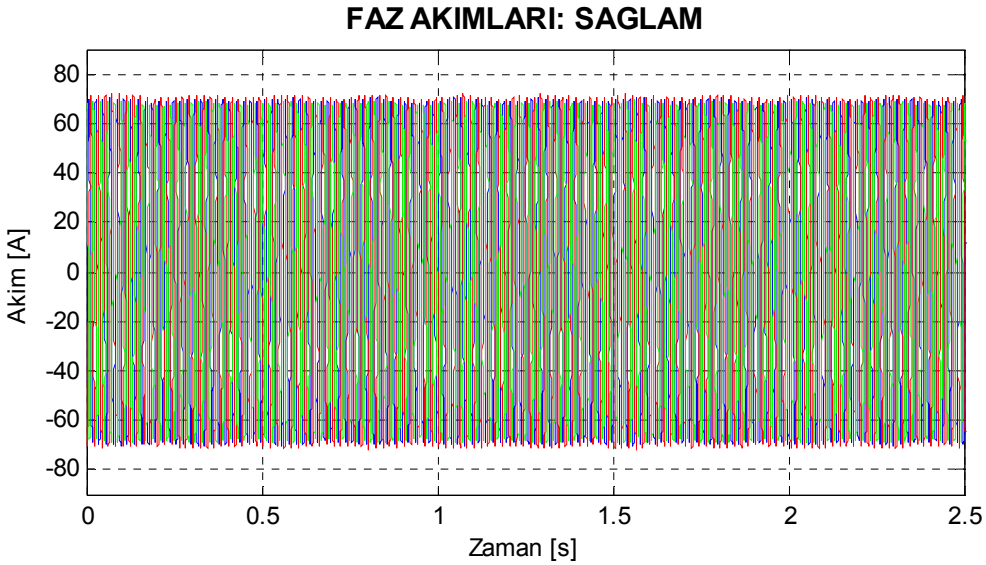
Şekil 8.5. Motor1 iki çubuğu kırık rotor için deneysel stator akımları.



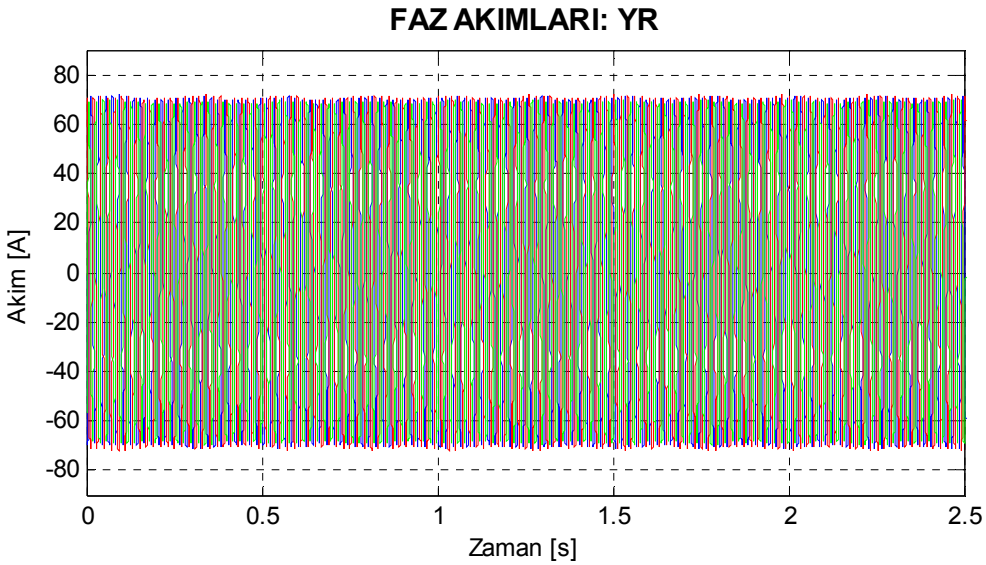
Şekil 8.6. Motor1 üç çubuğu kırık rotor için deneysel stator akımları.



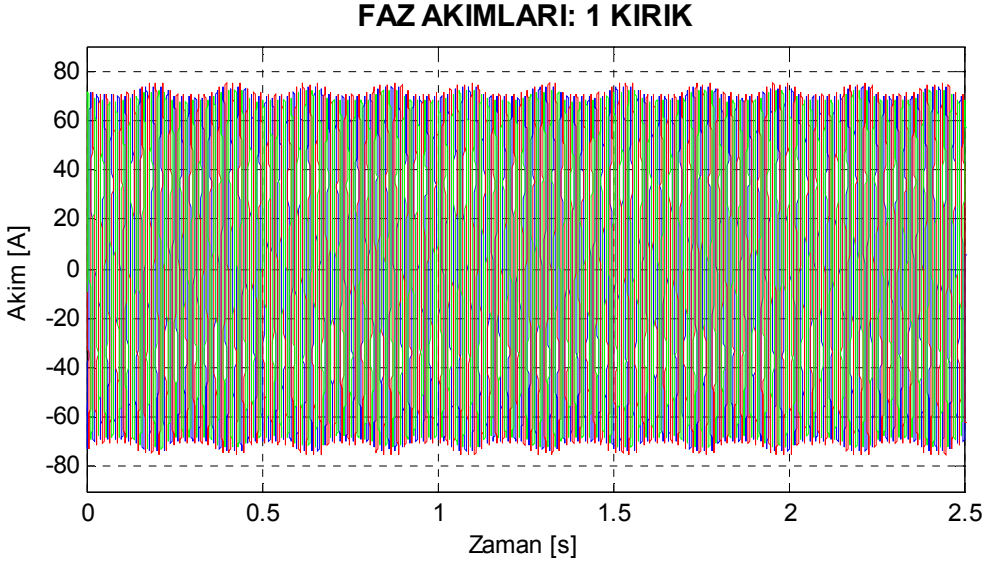
Şekil 8.7. Motor1 kısa devre halkası kırık rotor için deneysel stator akımları.



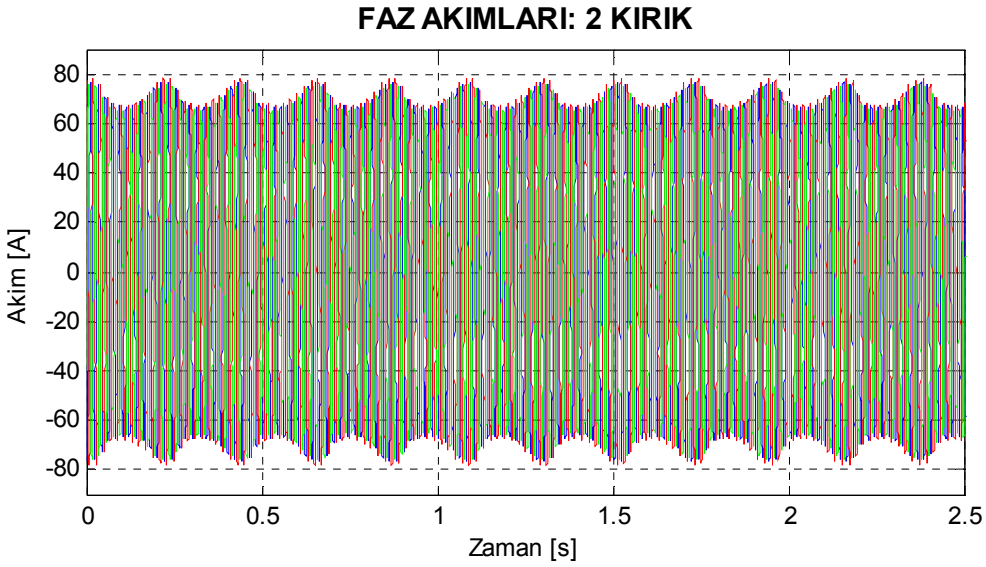
Şekil 8.8. Motor2 sağlam motor durumu için deneysel stator akımları.



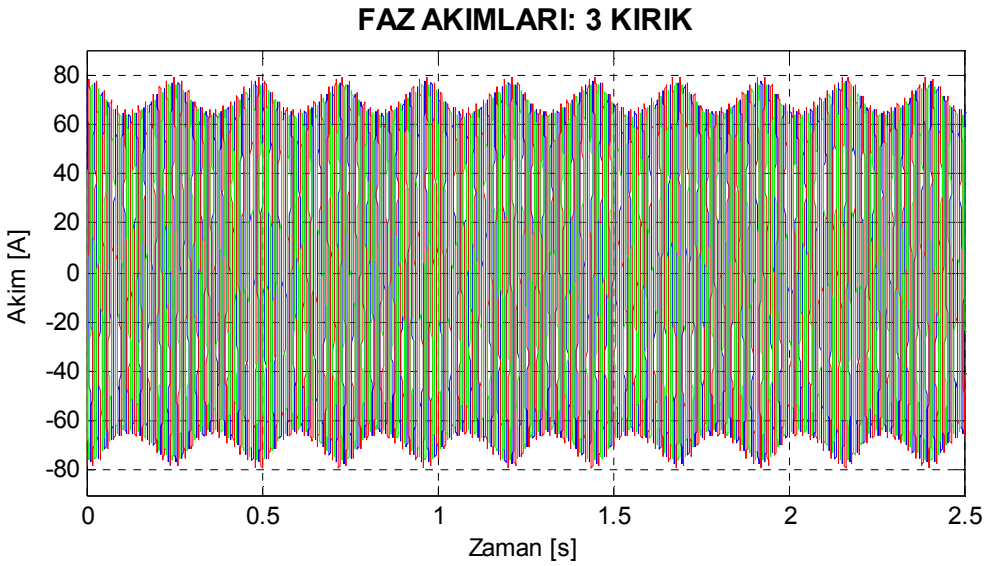
Şekil 8.9. Motor2 bir çubuğu yüksek dirençli rotor için deneysel stator akımları.



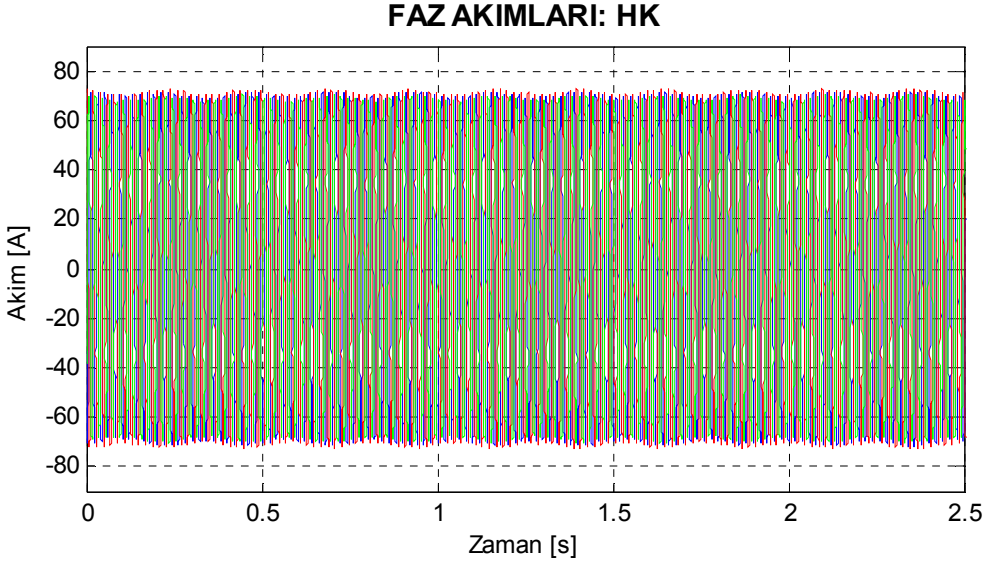
Şekil 8.10. Motor2 bir çubuğu kırık rotor için deneysel stator akımları.



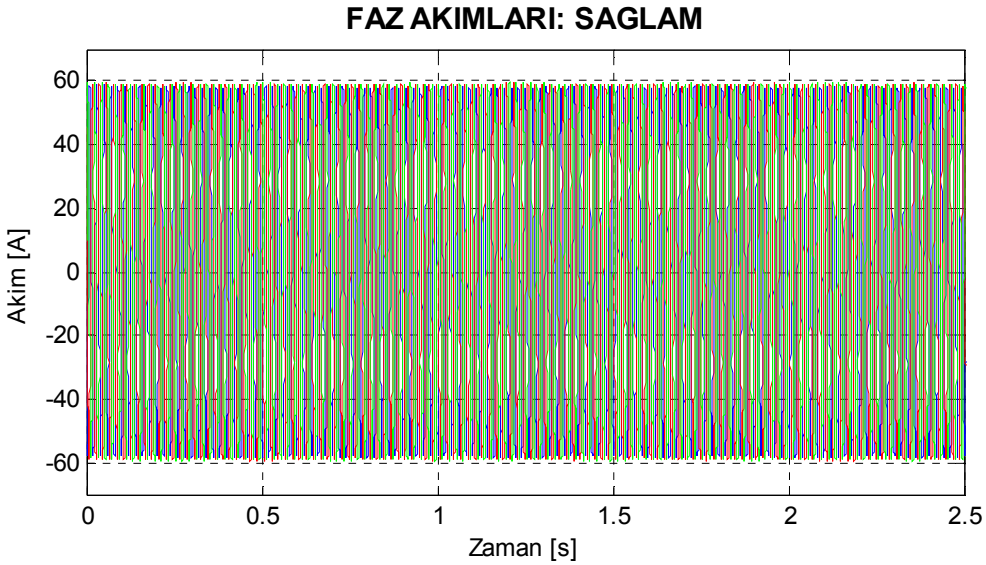
Şekil 8.11. Motor2 iki çubuğu kırık rotor için deneysel stator akımları.



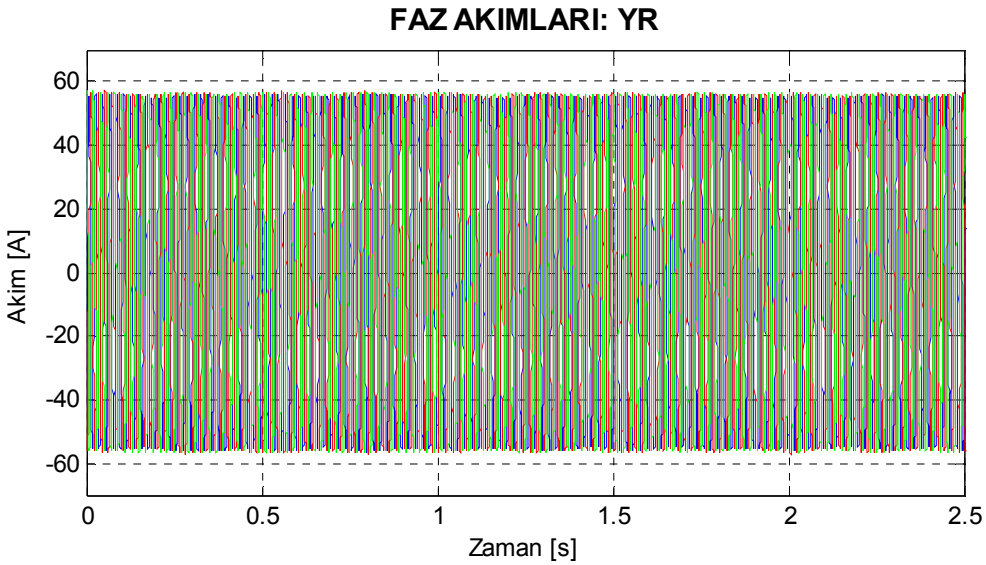
Şekil 8.12. Motor2 üç çubuğu kırık rotor için deneysel stator akımları.



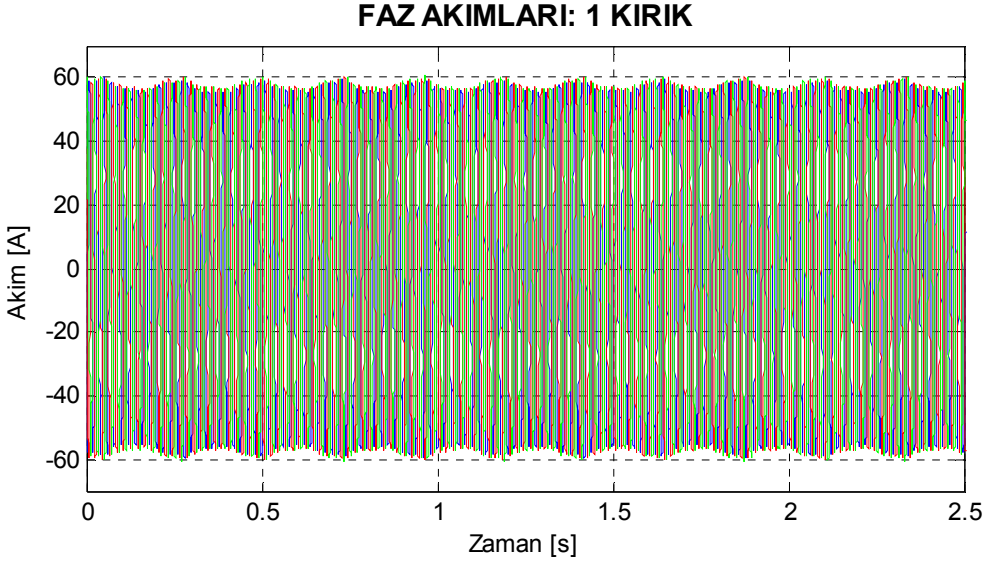
Şekil 8.13. Motor2 kısa devre halkası kırık rotor için deneysel stator akımları.



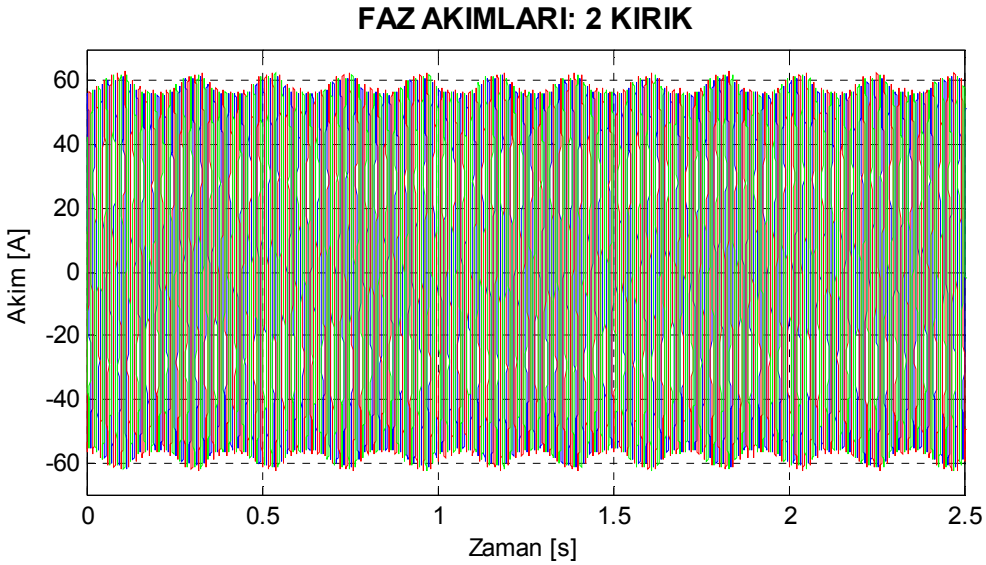
Şekil 8.14. Motor3 sağlam motor durumu için deneysel stator akımları.



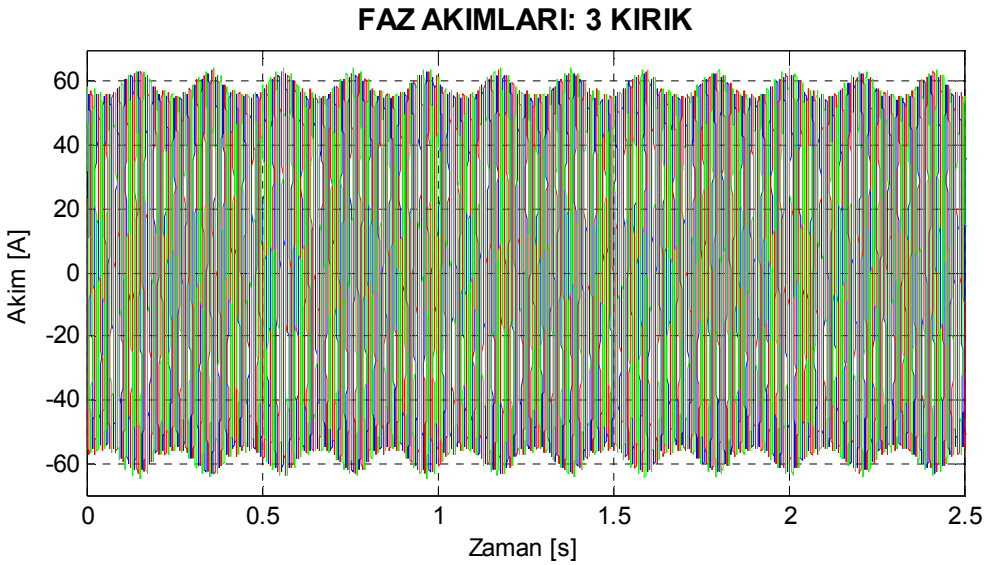
Şekil 8.15. Motor3 bir çubuğu yüksek dirençli rotor için deneysel stator akımları.



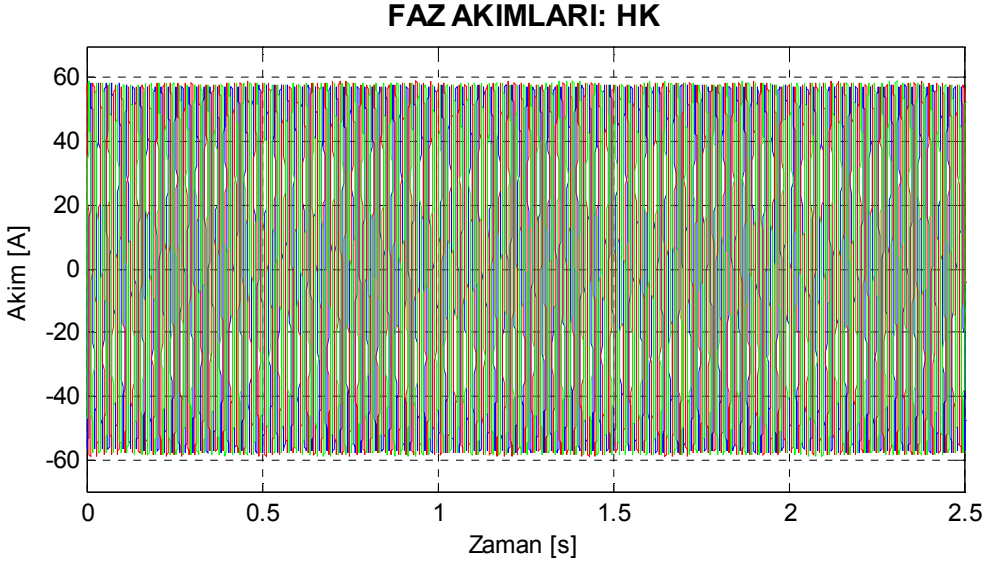
Şekil 8.16. Motor3 bir çubuğu kırık rotor için deneysel stator akımları.



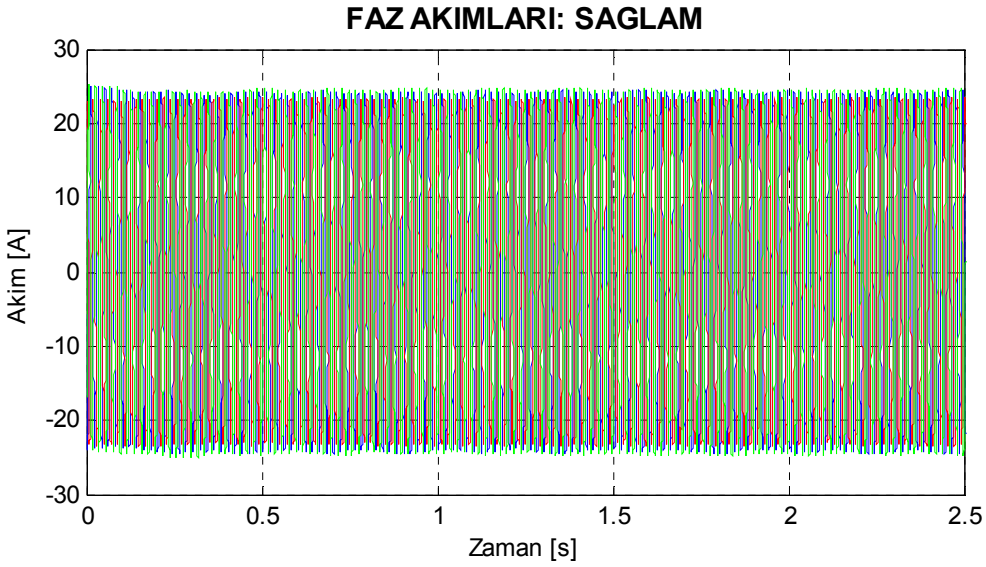
Şekil 8.17. Motor3 iki çubuğu kırık rotor için deneysel stator akımları.



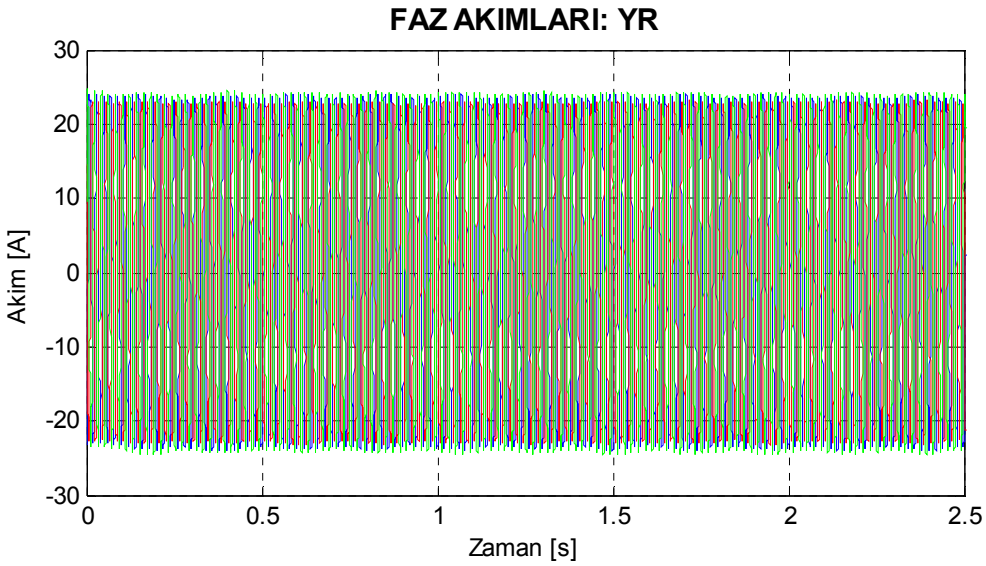
Şekil 8.18. Motor3 üç çubuğu kırık rotor için deneysel stator akımları.



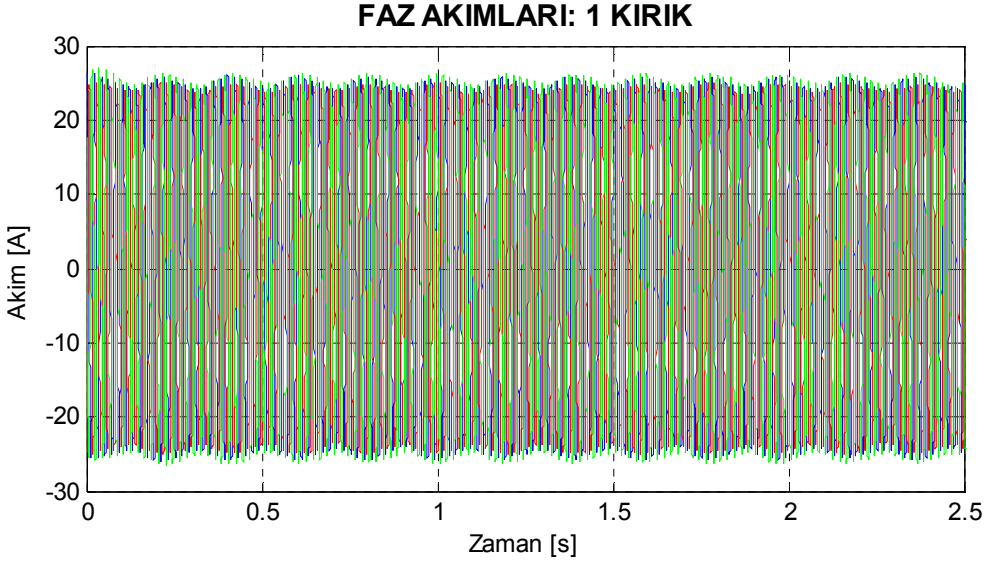
Şekil 8.19. Motor3 kısa devre halkası kırık rotor için deneysel stator akımları.



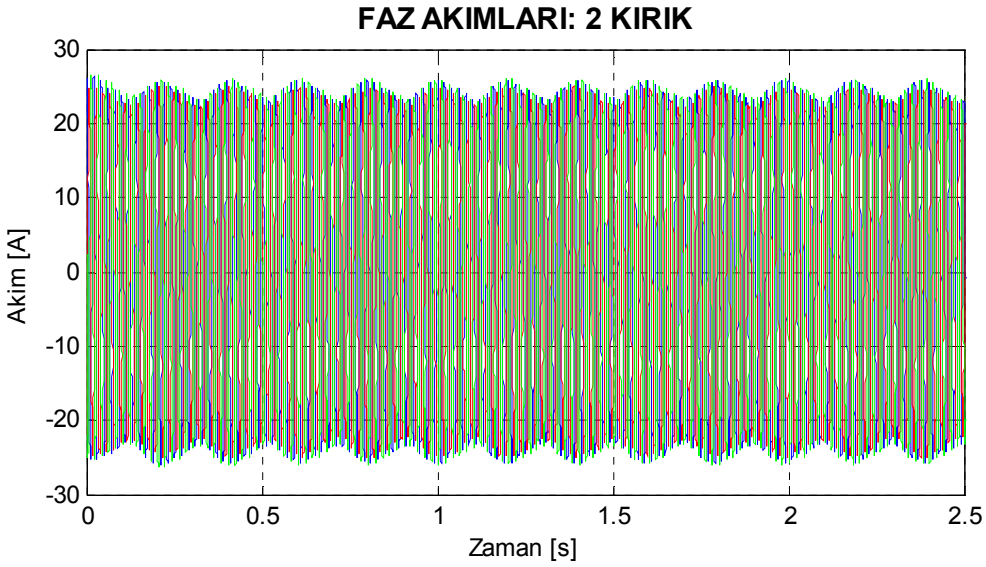
Şekil 8.20. Motor4 sağlam motor durumu için deneysel stator akımları.



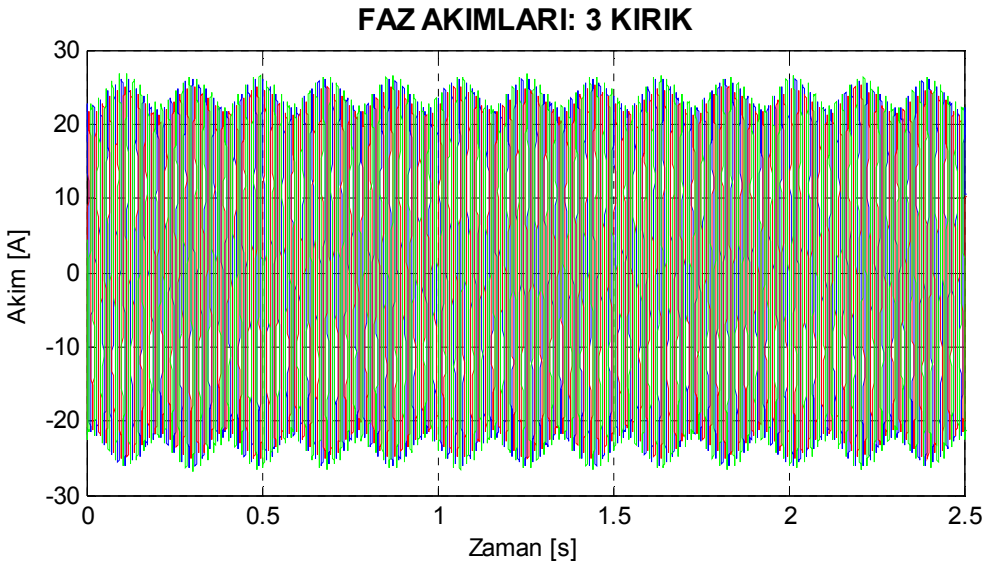
Şekil 8.21. Motor4 bir çubuğu yüksek dirençli rotor için deneysel stator akımları.



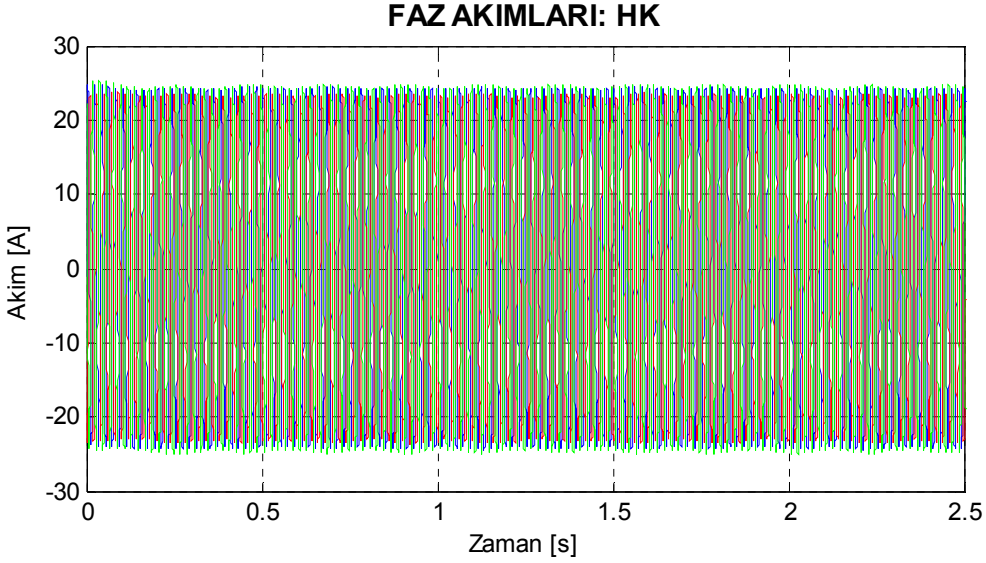
Şekil 8.22. Motor4 bir çubuğu kırık rotor için deneysel stator akımları.



Şekil 8.23. Motor4 iki çubuğu kırık rotor için deneysel stator akımları.



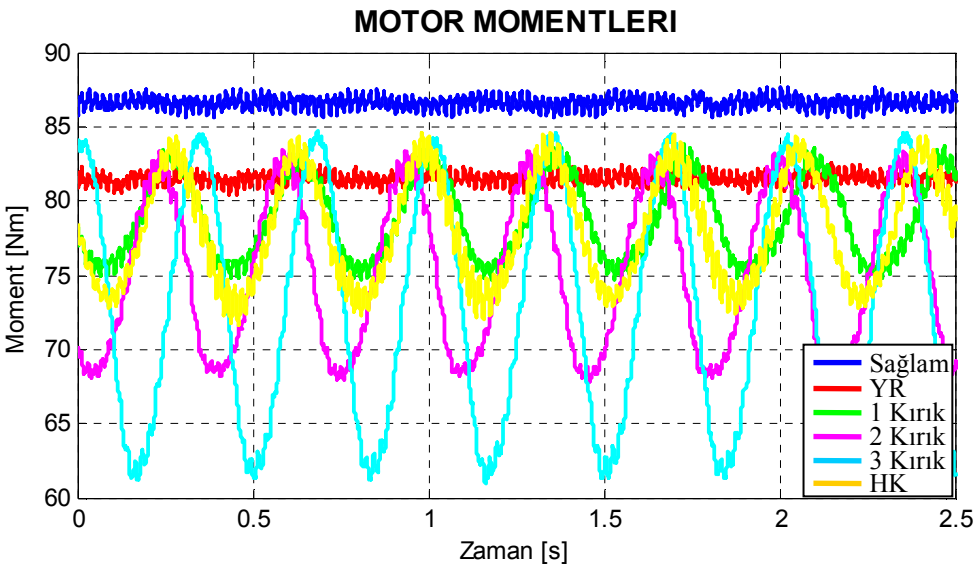
Şekil 8.24. Motor4 üç çubuğu kırık rotor için deneysel stator akımları.



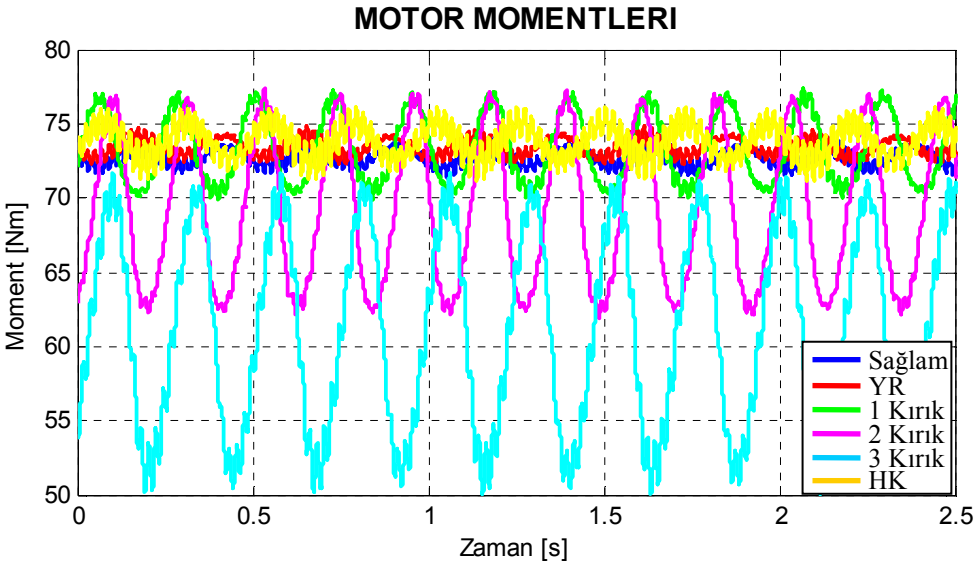
Şekil 8.25. Motor4 kısa devre halkası kırık rotor için deneysel stator akımları.

8.1.2. Kararlı durumda motor momentleri

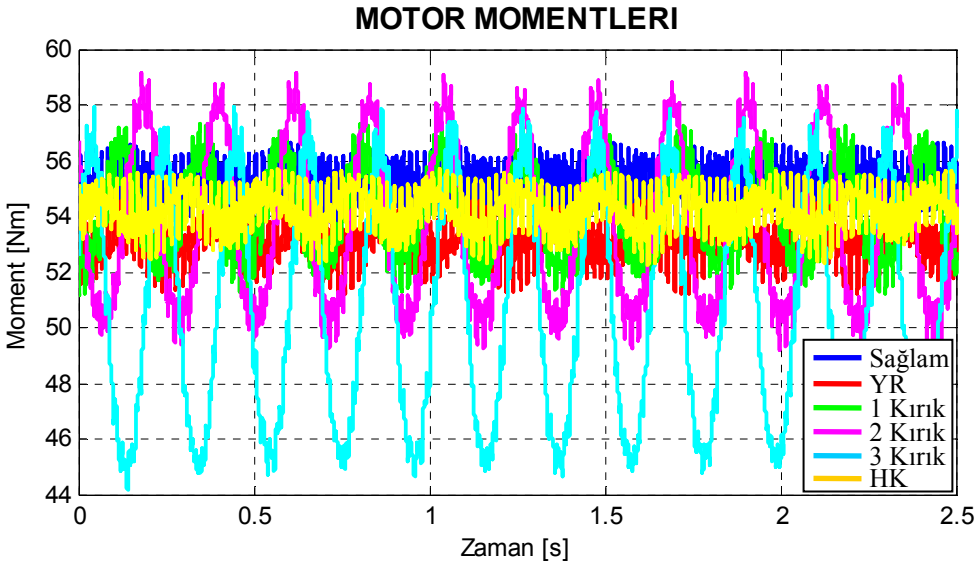
Rotor arızalarının motor momentine etkileri incelemek için deneysel çalışmalardan elde edilen moment grafikleri Motor1 için Şekil 8.26'da, Motor2 için Şekil 8.27'de, Motor3 için Şekil 8.28'de ve Motor4 için Şekil 8.29'da verilmiştir.



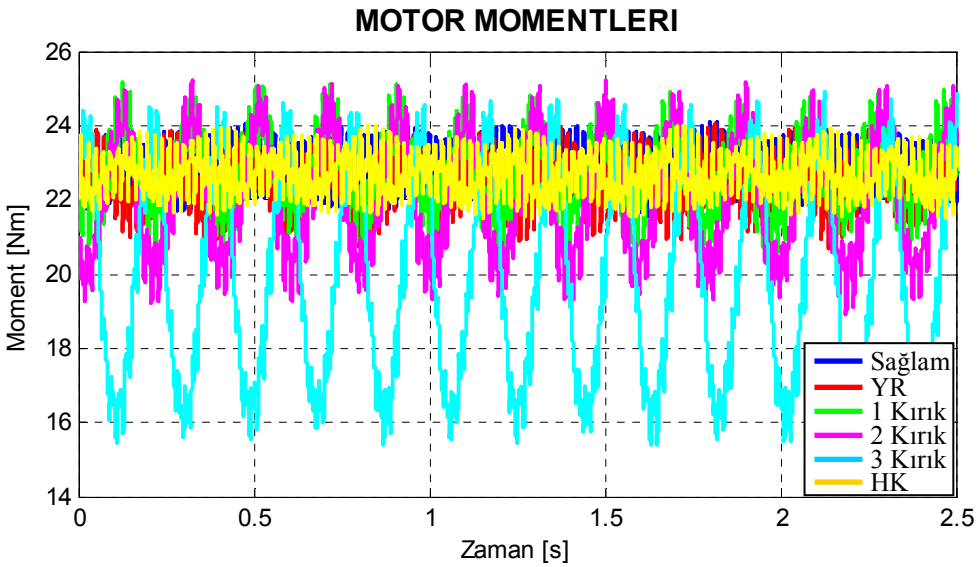
Şekil 8.26. Motor1 için deneysel arıza durumlarına göre çizilmiş moment grafikleri.



Şekil 8.27. Motor2 için deneysel arıza durumlarına göre çizilmiş moment grafikleri.



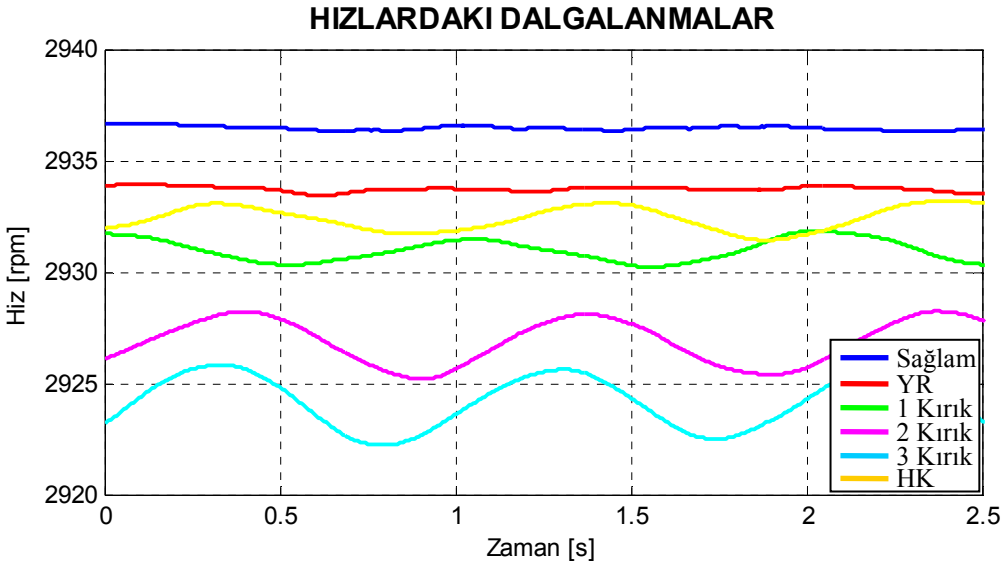
Şekil 8.28. Motor3 için deneysel arıza durumlarına göre çizilmiş moment grafikleri.



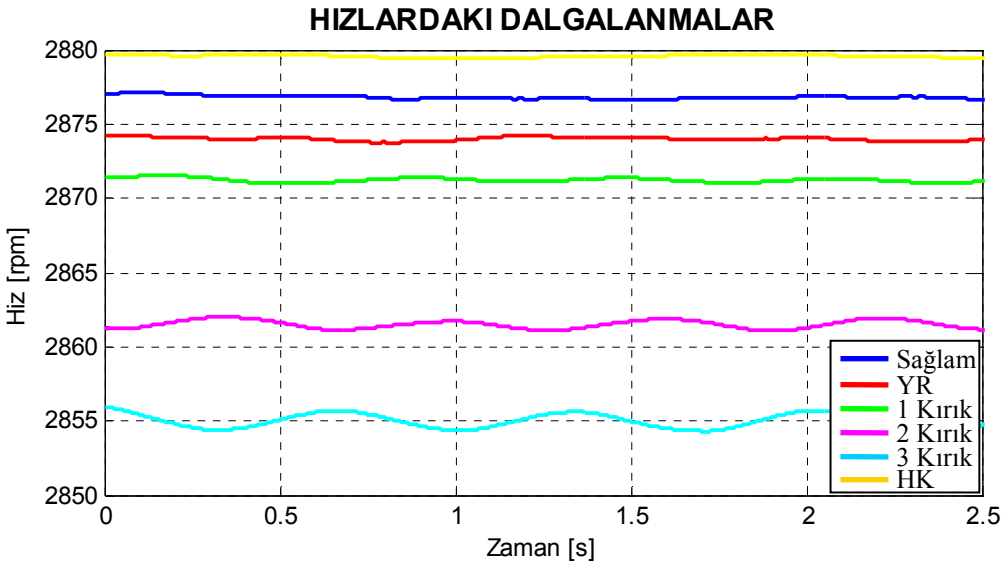
Şekil 8.29. Motor4 için deneysel arıza durumlarına göre çizilmiş moment grafikleri.

8.1.3. Kararlı durumda motor hızları

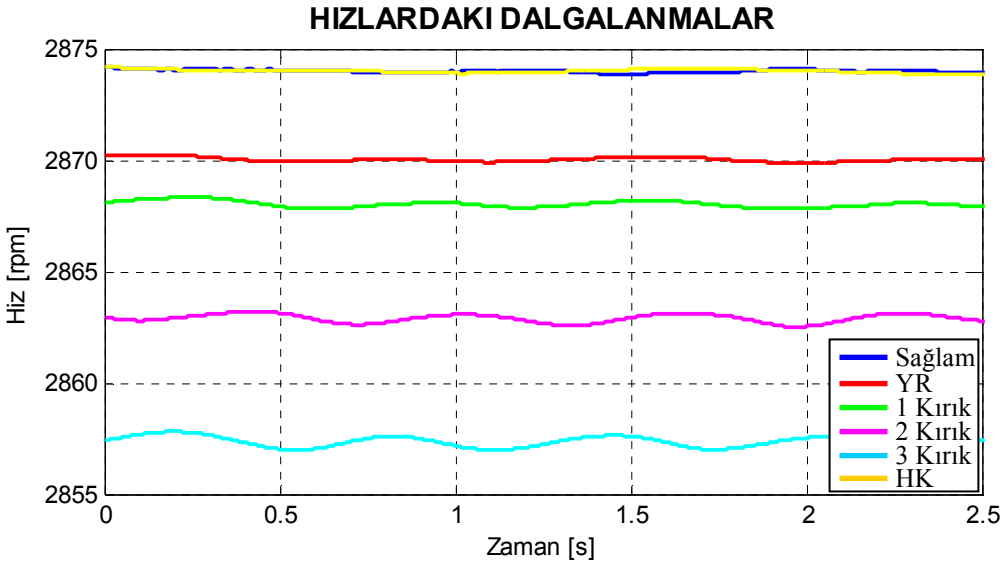
Rotor arızalarının motor hızlarına etkileri incelemek için deneysel hız-zaman eğrileri Motor1 için Şekil 8.30'da, Motor2 için Şekil 8.31'de, Motor3 için Şekil 8.32'da ve Motor4 için Şekil 8.33'de verilmiştir.



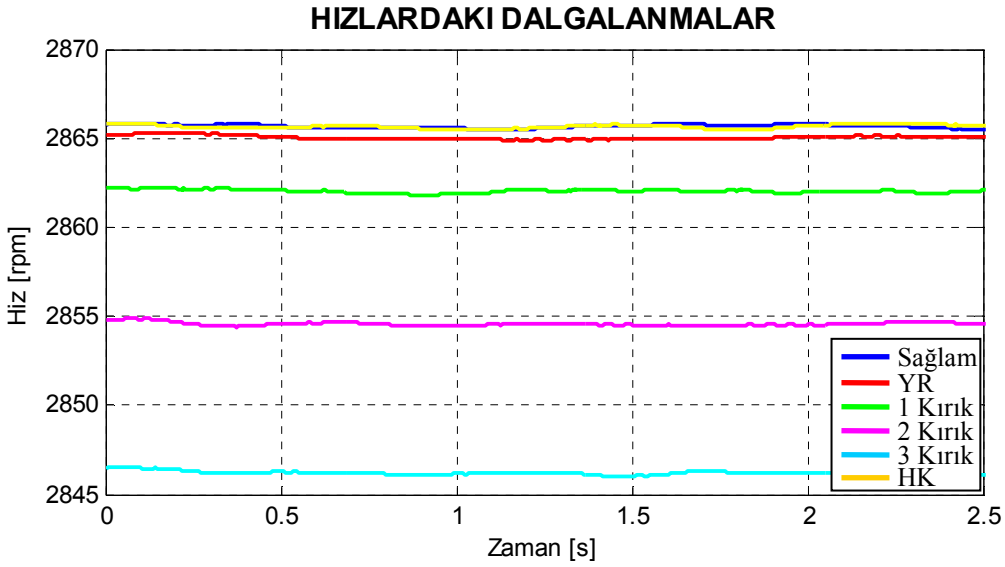
Şekil 8.30. Motor1 için deneysel arıza durumlarına göre çizilmiş hız-zaman grafikleri.



Şekil 8.31. Motor2 için deneysel arıza durumlarına göre çizilmiş hız-zaman grafikleri.



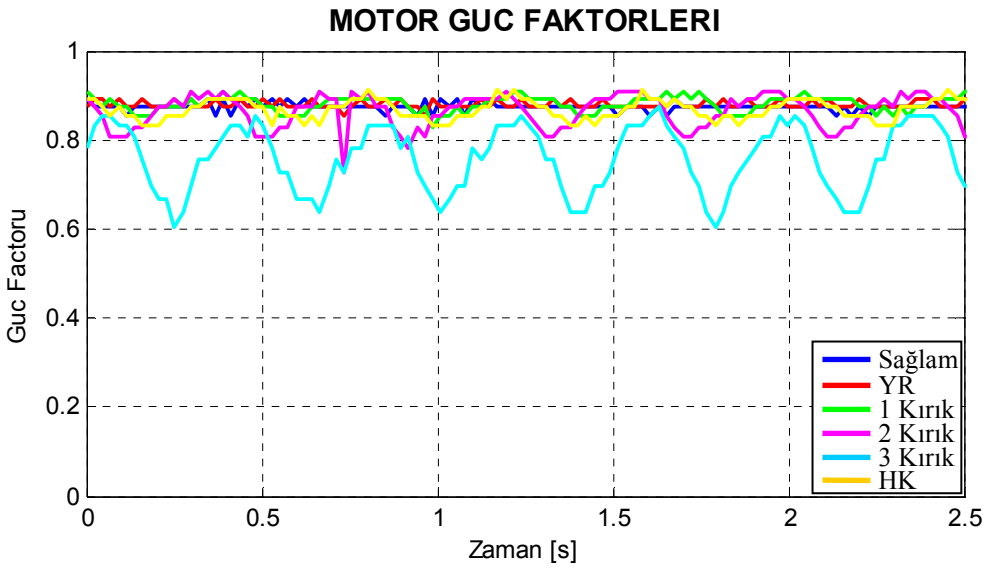
Şekil 8.32. Motor3 için deneysel arıza durumlarına göre çizilmiş hız-zaman grafikleri.



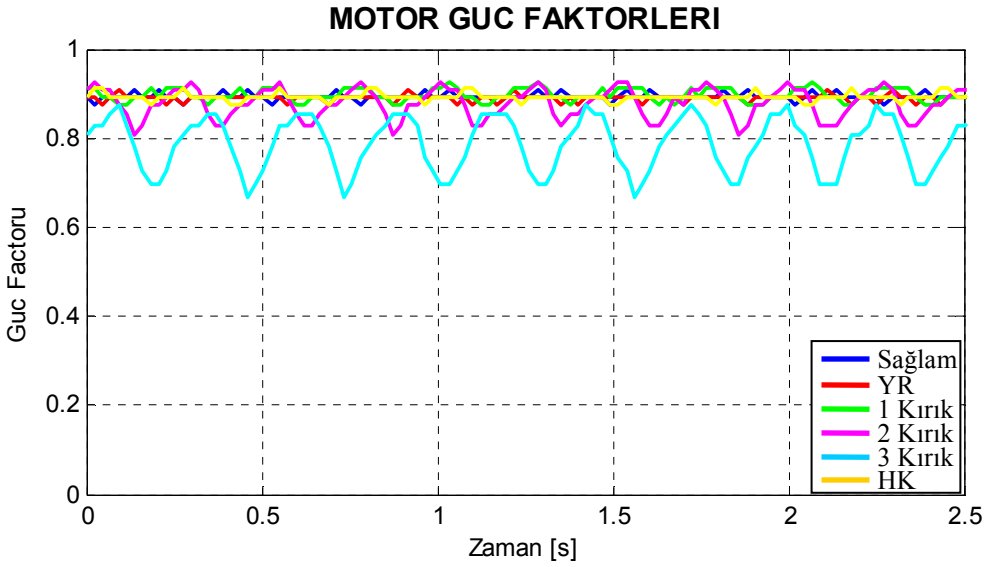
Şekil 8.33. Motor4 için deneysel arıza durumlarına göre çizilmiş hız-zaman grafikleri.

8.1.4. Kararlı durumda motor güç faktörleri

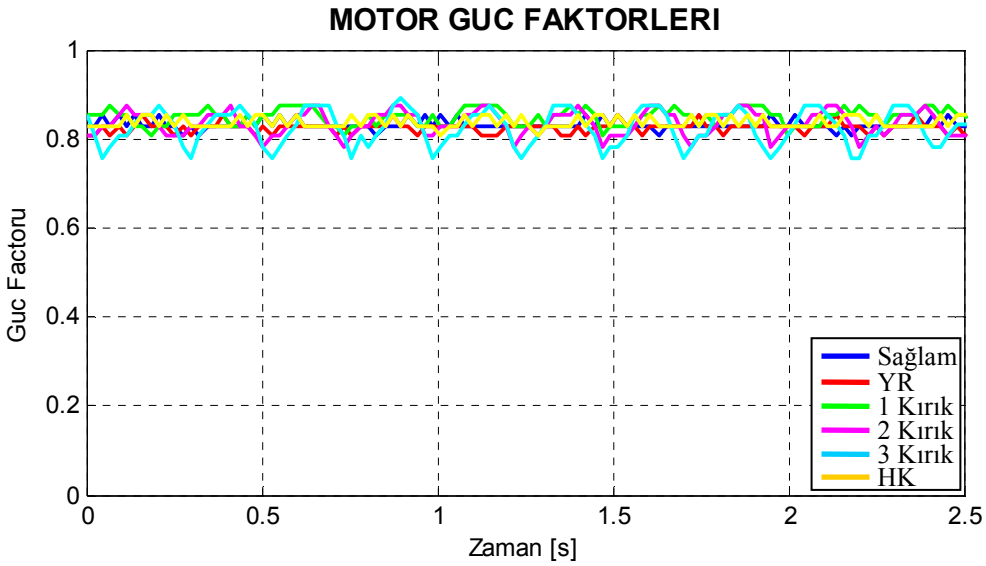
Motor güç faktörleri üç faz için ayrı ayrı hesaplanıp üç fazın ortalamaları alınarak rotor arızalarının motor güç faktörlerine etkileri incelenmiştir. Deneysel çalışmalarla elde edilen güç faktörü grafikleri Motor1 için Şekil 8.34'de, Motor2 için Şekil 8.35'de, Motor3 için Şekil 8.36'da ve Motor4 için Şekil 8.37'de verilmiştir.



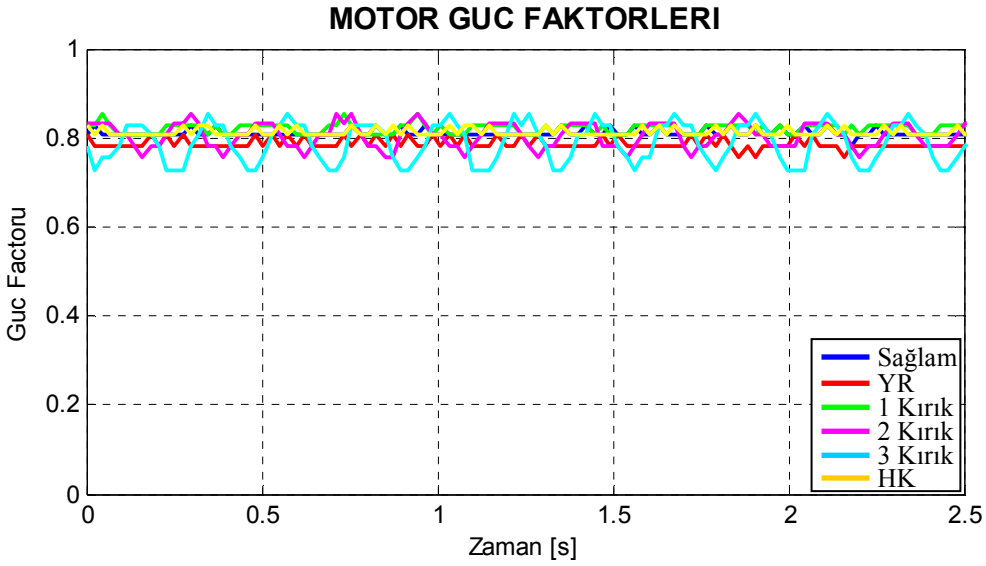
Şekil 8.34. Motor1 için deneysel arıza durumlarına göre çizilmiş güç faktörü grafikleri.



Şekil 8.35. Motor2 için deneysel arıza durumlarına göre çizilmiş güç faktörü grafikleri.



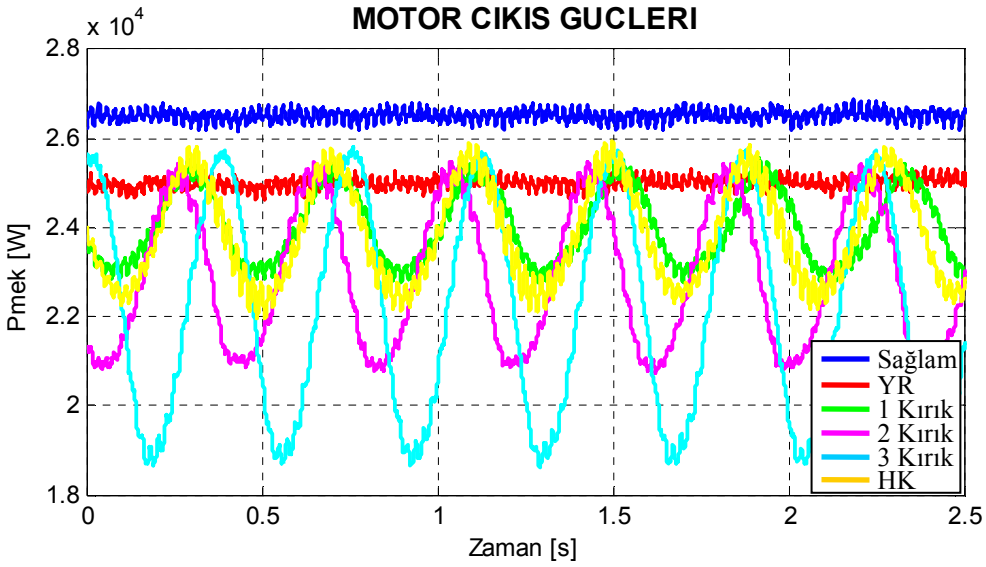
Şekil 8.36. Motor3 için deneysel arıza durumlarına göre çizilmiş güç faktörü grafikleri.



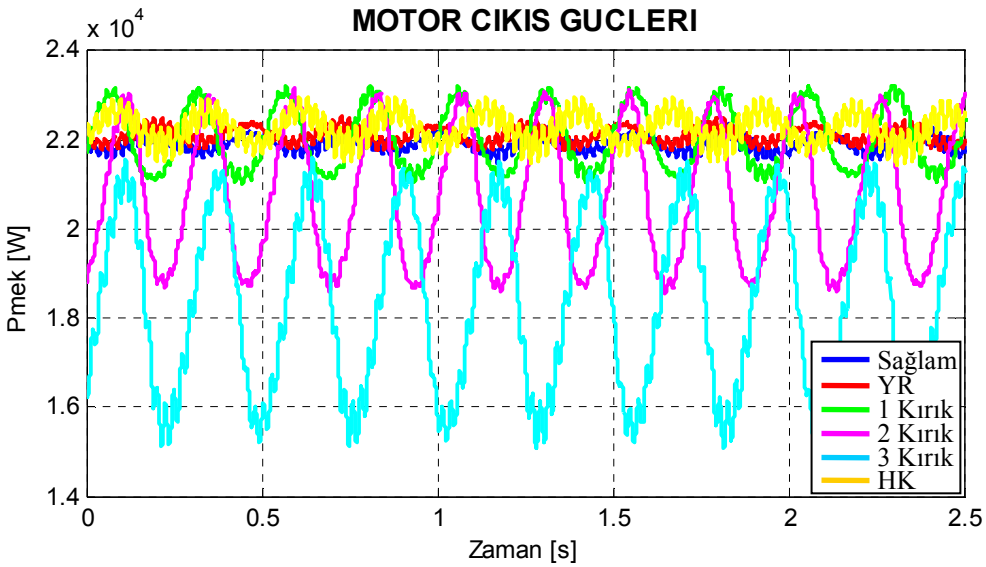
Şekil 8.37. Motor4 için deneysel arıza durumlarına göre çizilmiş güç faktörü grafikleri.

8.1.5. Kararlı durumda motor mekaniki güçleri

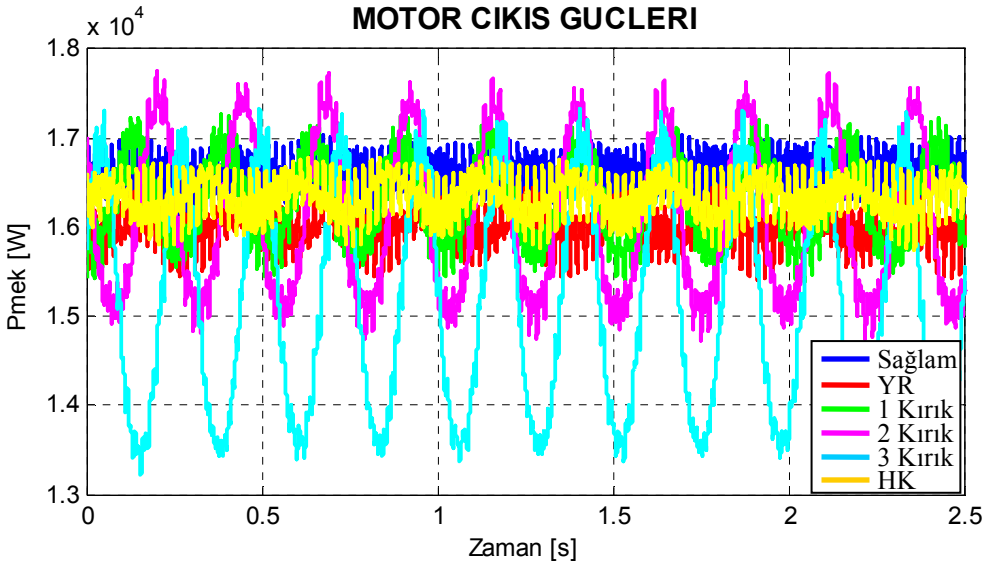
Rotor arızalarının motor mekaniki güçlerine yaptığı etkileri incelemek için deneysel çalışmalarla elde edilmiş mekaniki güç grafikleri Motor1 için Şekil 8.38'de, Motor2 için Şekil 8.39'da, Motor3 için Şekil 8.40'da ve Motor4 için Şekil 8.41'de verilmiştir.



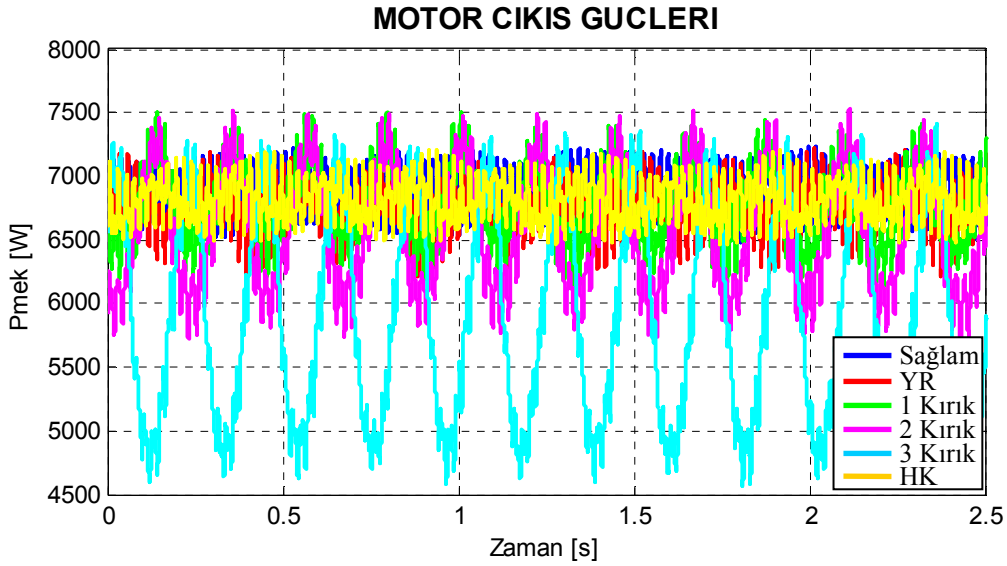
Şekil 8.38. Motor1 için deneysel arıza durumlarına göre çizilmiş mekaniki güç grafikleri.



Şekil 8.39. Motor2 için deneysel arıza durumlarına göre çizilmiş mekaniki güç grafikleri.



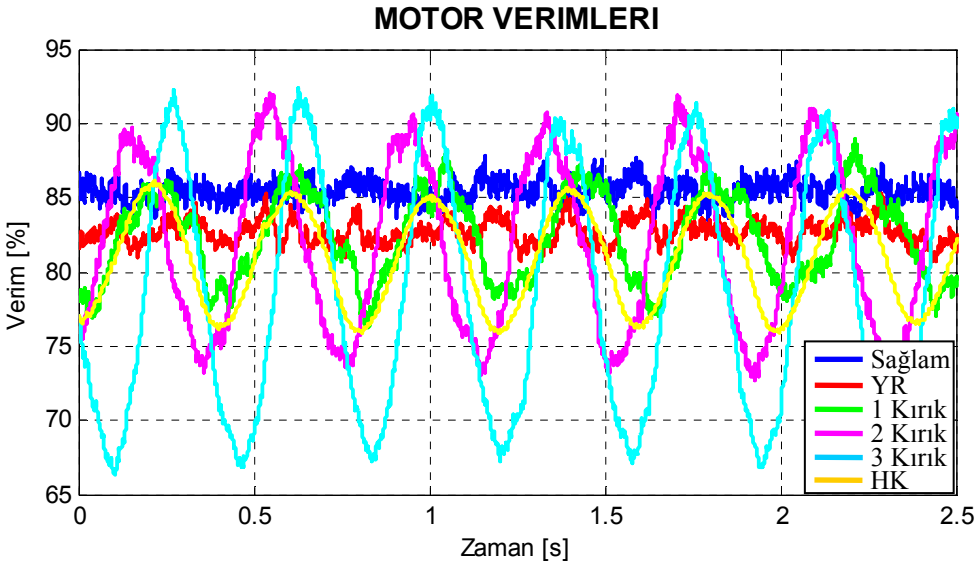
Şekil 8.40. Motor3 için deneysel arıza durumlarına göre çizilmiş mekaniki güç grafikleri.



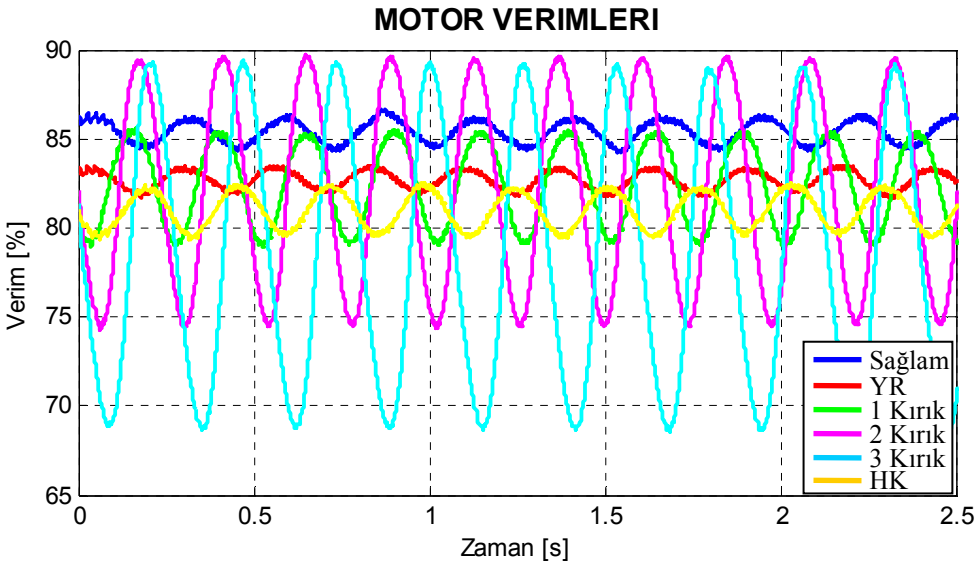
Şekil 8.41. Motor4 için deneysel arıza durumlarına göre çizilmiş mekaniki güç grafikleri.

8.1.6. Kararlı durumda motor verimleri

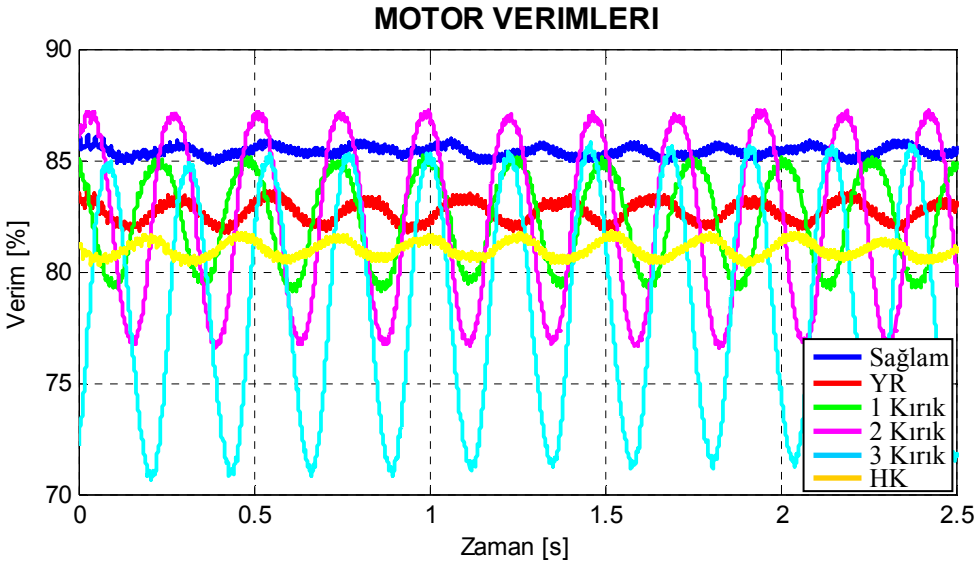
Rotor arızalarının motor verimlerine yaptığı etkileri incelemek için deneysel verim grafikleri Motor1 için Şekil 8.42'de, Motor2 için Şekil 8.43'de, Motor3 için Şekil 8.44'de ve Motor4 için Şekil 8.45'de verilmiştir.



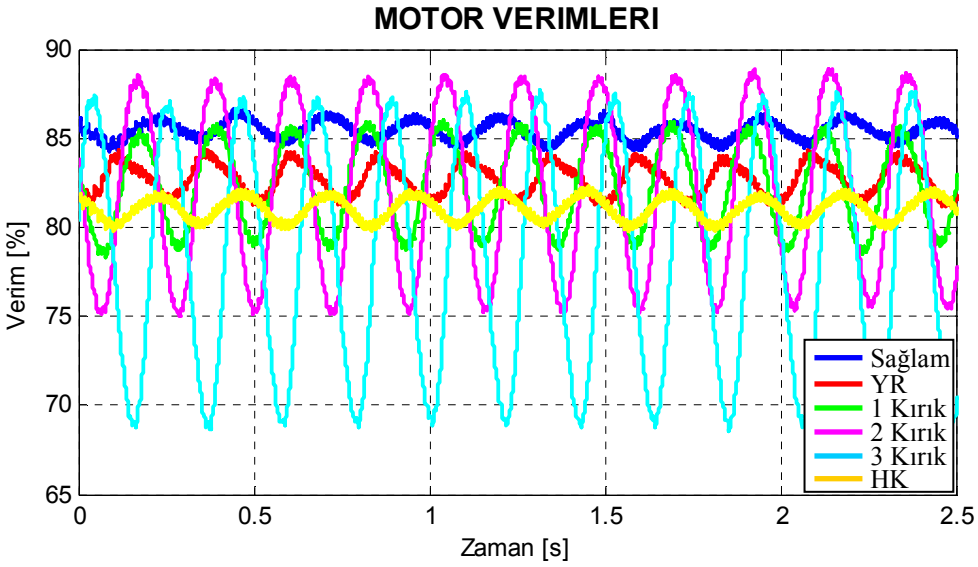
Şekil 8.42. Motor1 için deneysel arıza durumlarına göre çizilmiş verim grafikleri.



Şekil 8.43. Motor2 için deneysel arıza durumlarına göre çizilmiş verim grafikleri.



Şekil 8.44. Motor3 için deneysel arıza durumlarına göre çizilmiş verim grafikleri.



Şekil 8.45. Motor4 için deneysel arıza durumlarına göre çizilmiş verim grafikleri.

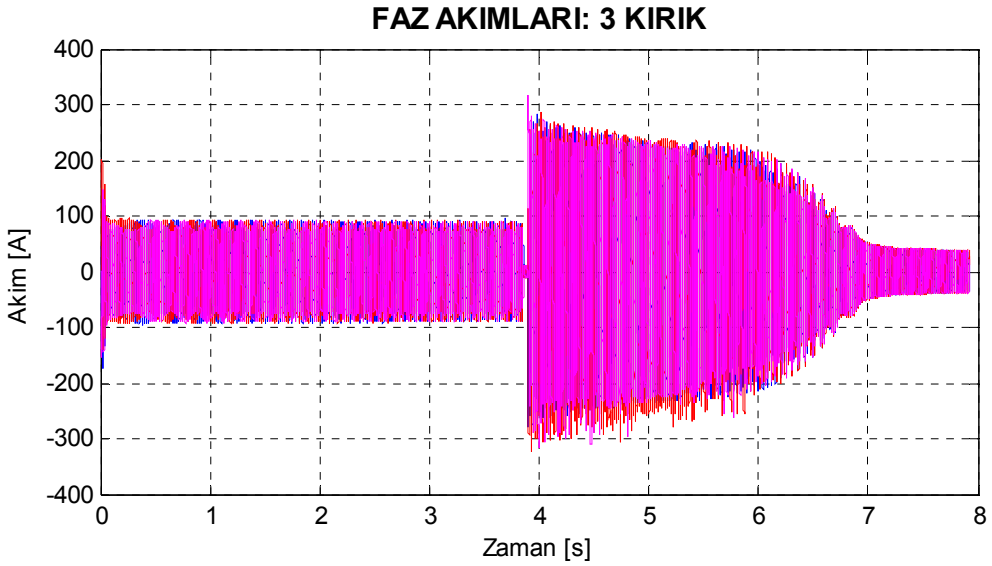
8.2. Yol Alma Durumu İçin Deneysel Sonuçlar

Yol alma sürecindeki rotor arızalarının etkilerini incelemek için motorlara boşta yol verilmiş ve kararlı duruma oturuncaya kadar geçen süreçteki motor akım, moment ve hız bilgileri kaydedilip zaman ekseninde incelenmiştir. Motor1, Motor2 ve Motor3'e yıldız-üçgen yol verilmiştir. Yıldızdan üçgene geçiş 4. saniyede yapılmıştır. Motor4'e ise yıldız bağlı olarak yol verilmiştir.

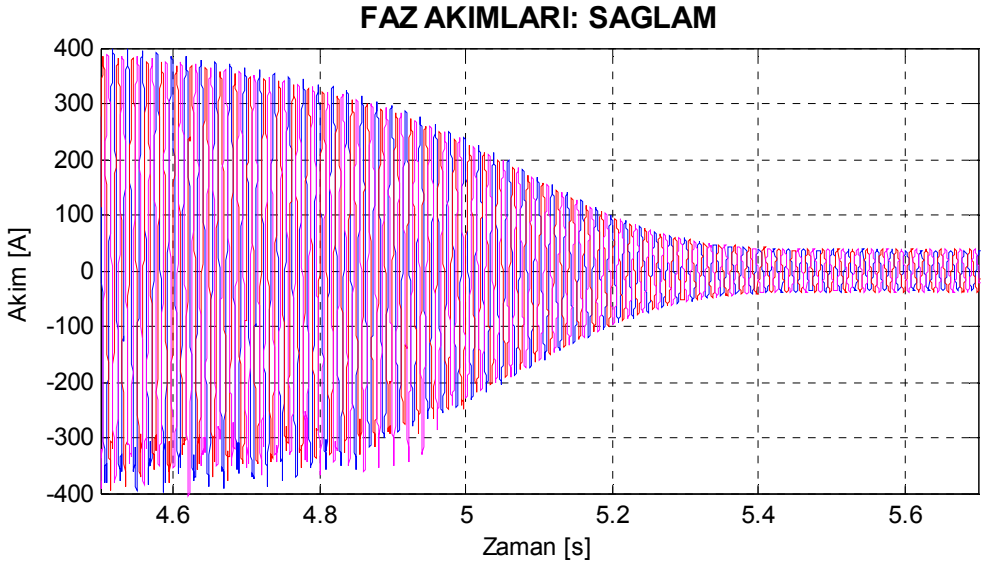
8.2.1. Yol alma sürecindeki motor akımları

Rotor arızalarının yol alma sürecinde motor çıktılarına yaptığı etkileri incelemek için izlenilen yöntem, benzetim sonuçlarının incelenmesinde kullanılan yöntem ile aynıdır. Yol alma sürecinin başlangıcında motor akımı çok büyüktür ve yol aldıkça akım küçülür. Kararlı duruma geldiğinde ise belirli bir seviyede sabit kalır. Yol alma sürecinin uzunluğu motor parametrelerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Yapılan deneylerde arızaların etkileri kararlı duruma yaklaşıldığı anlarda daha belirgin olduğu için yol alma akımının tüm yol alma süreci için değil belirtilerin bulunduğu veri aralığı için karşılaştırmalar yapılmıştır. Üç kırık çubuklu motor durumu için motor akımının değişimi yol alma sürecinin tamamı için Şekil 8.46'da verilmiştir. Deneysel yol alma akımlarının etkilerinin en belirgin olduğu veri aralığı kullanılarak çizilen grafikleri ise Motor1 için sağlam, yüksek dirençli, 1 kırık, 2 kırık, 3 kırık çubuklu ve

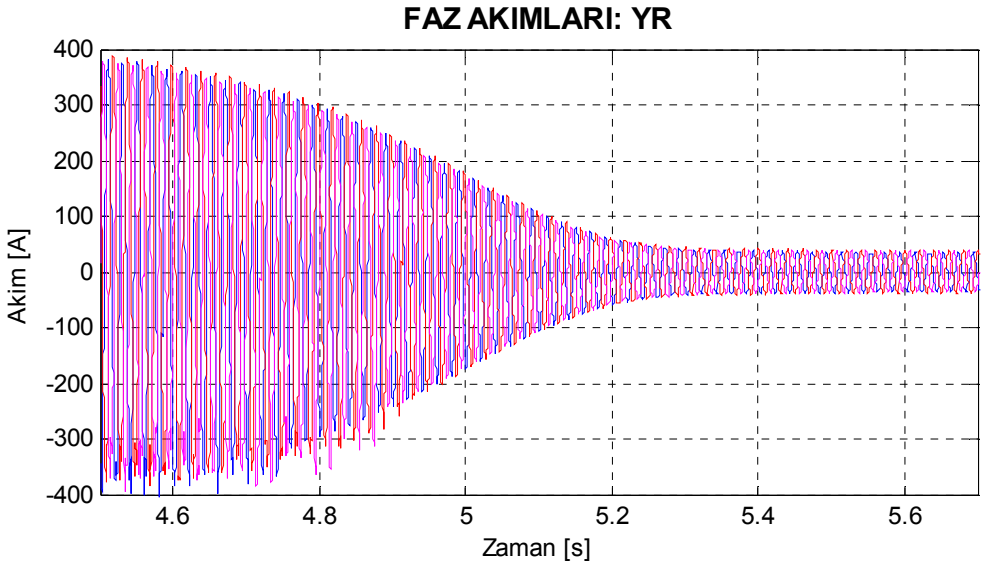
kısa devre halkası kırık arıza durumları için sırasıyla Şekil 8.47, Şekil 8.48, Şekil 8.49, Şekil 8.50, Şekil 8.51 ve Şekil 8.52'de; Motor2 için sağlam, yüksek dirençli, 1 kırık, 2 kırık, 3 kırık çubuklu ve kısa devre halkası kırık arıza durumları için sırasıyla Şekil 8.53, Şekil 8.54, Şekil 8.55, Şekil 8.56, Şekil 8.57 ve Şekil 8.58'de; Motor3 için sağlam, yüksek dirençli, 1 kırık, 2 kırık, 3 kırık çubuklu ve kısa devre halkası kırık arıza durumları için sırasıyla Şekil 8.59, Şekil 8.60, Şekil 8.61, Şekil 8.62, Şekil 8.63 ve Şekil 8.64'de; Motor4 için sağlam, yüksek dirençli, 1 kırık, 2 kırık, 3 kırık çubuklu ve kısa devre halkası kırık arıza durumları için sırasıyla Şekil 8.65, Şekil 8.66, Şekil 8.67, Şekil 8.68, Şekil 8.69 ve Şekil 8.70'de verilmiştir.



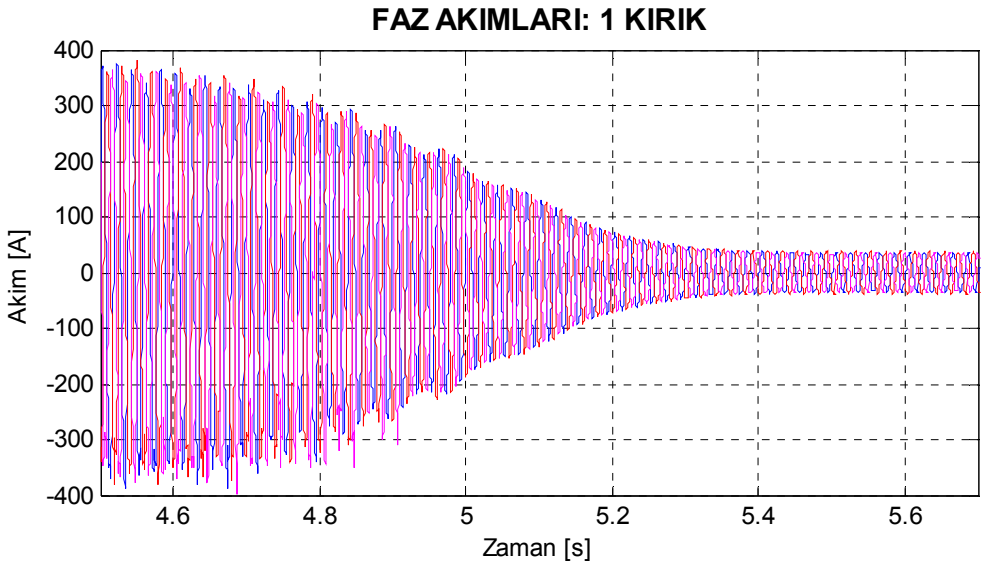
Şekil 8.46. Motor1 üç kırık çubuklu rotor arızası için yol alma sürecinin tamamı için çizilen deneysel motor akım grafiği.



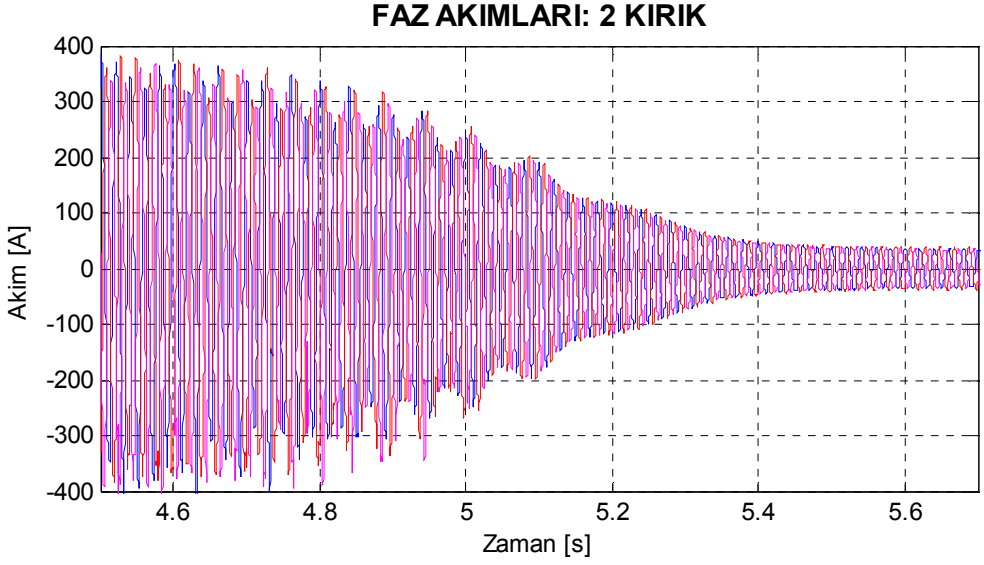
Şekil 8.47. Motor1 sağlam motor durumu için deneysel yol alma akımları.



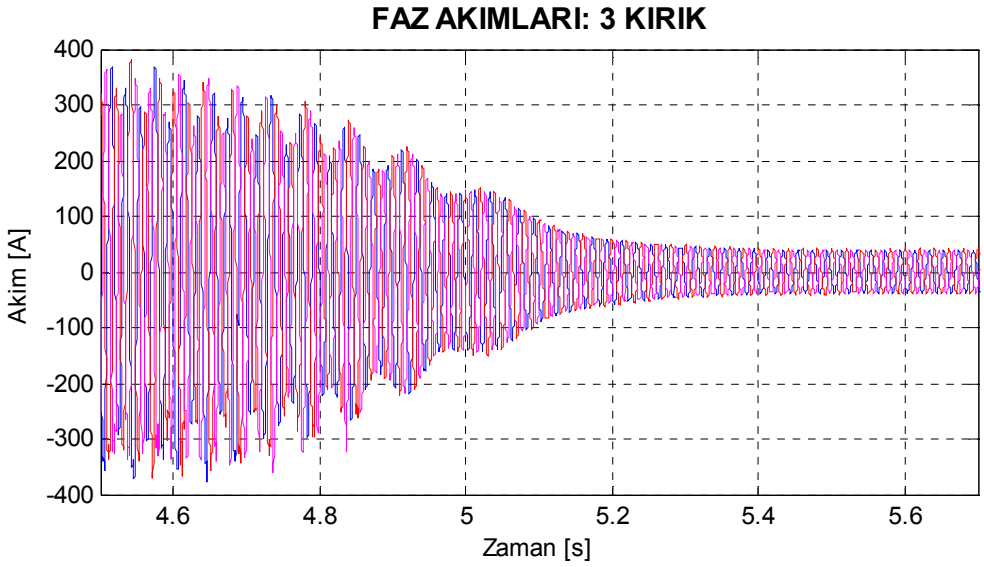
Şekil 8.48. Motor1 bir çubuğu yüksek dirençli rotor için deneysel yol alma akımları.



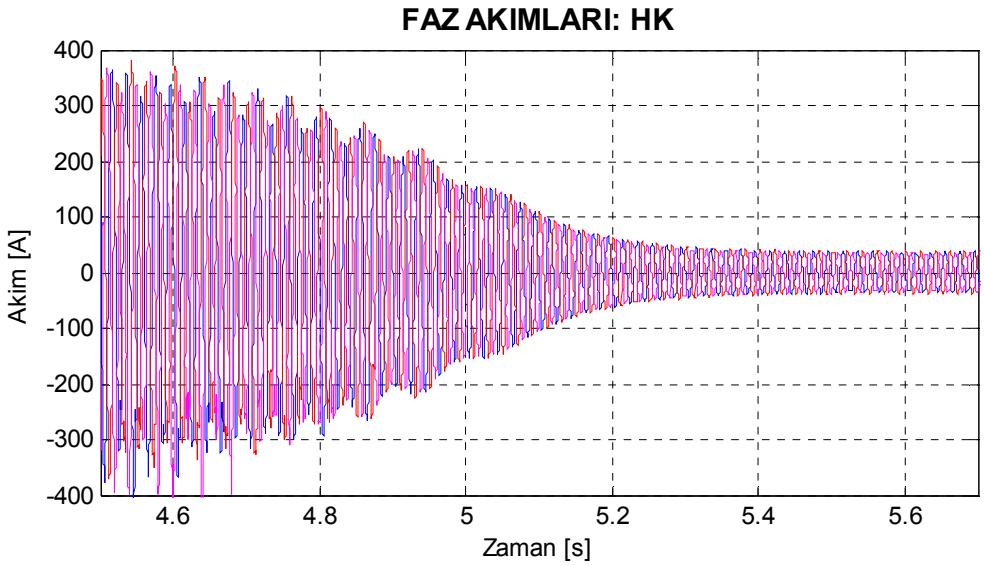
Şekil 8.49. Motor1 bir çubuğu kırık rotor için deneysel yol alma akımları.



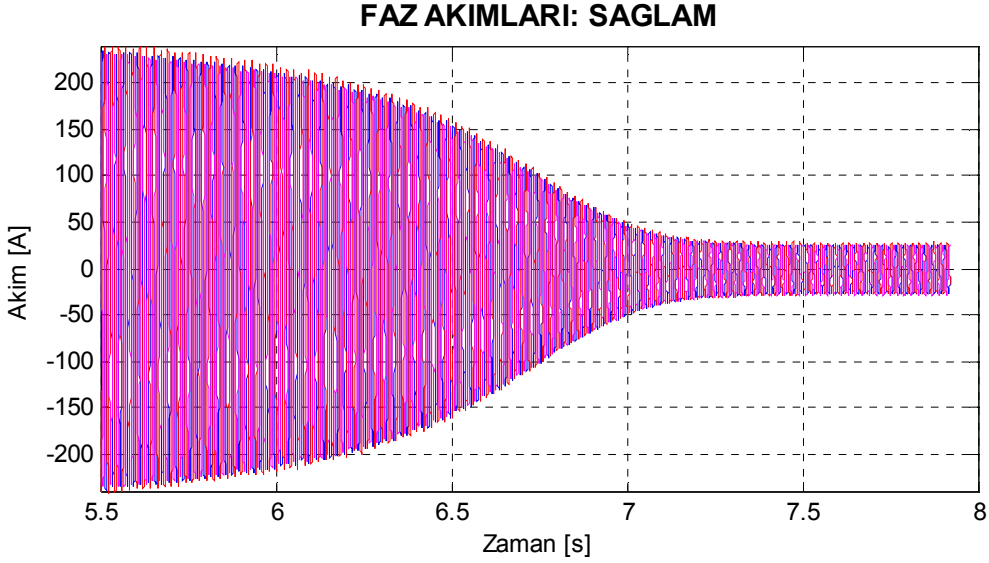
Şekil 8.50. Motor1 iki çubuğu kırık rotor için deneysel yol alma akımları.



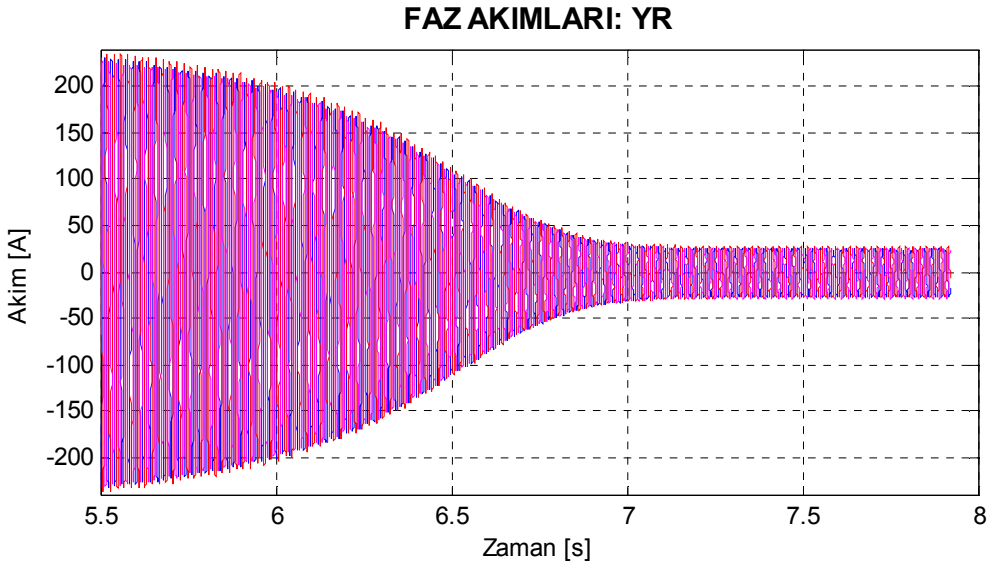
Şekil 8.51. Motor1 üç çubuğu kırık rotor için deneysel yol alma akımları.



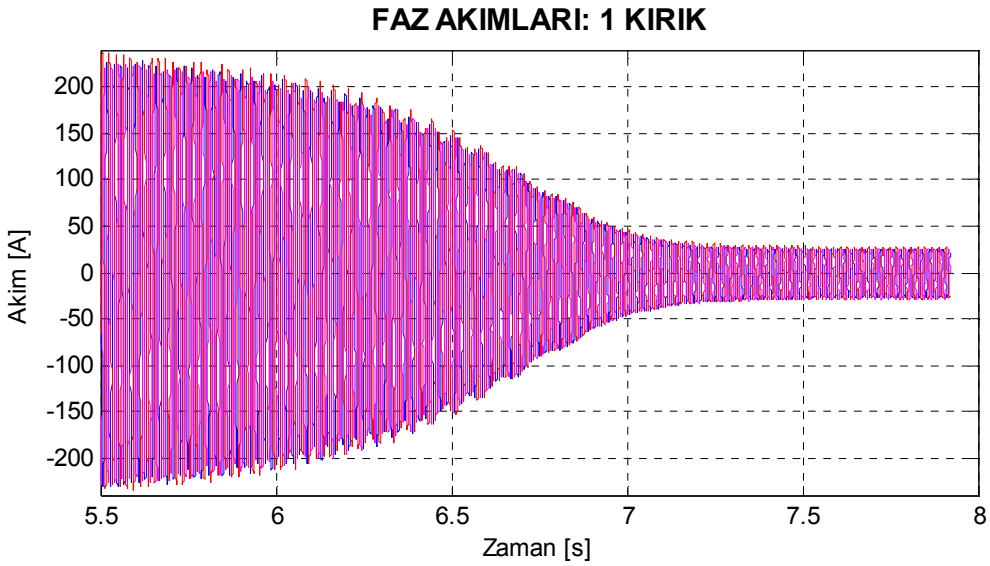
Şekil 8.52. Motor1 kısa devre halkası kırık rotor için deneysel yol alma akımları.



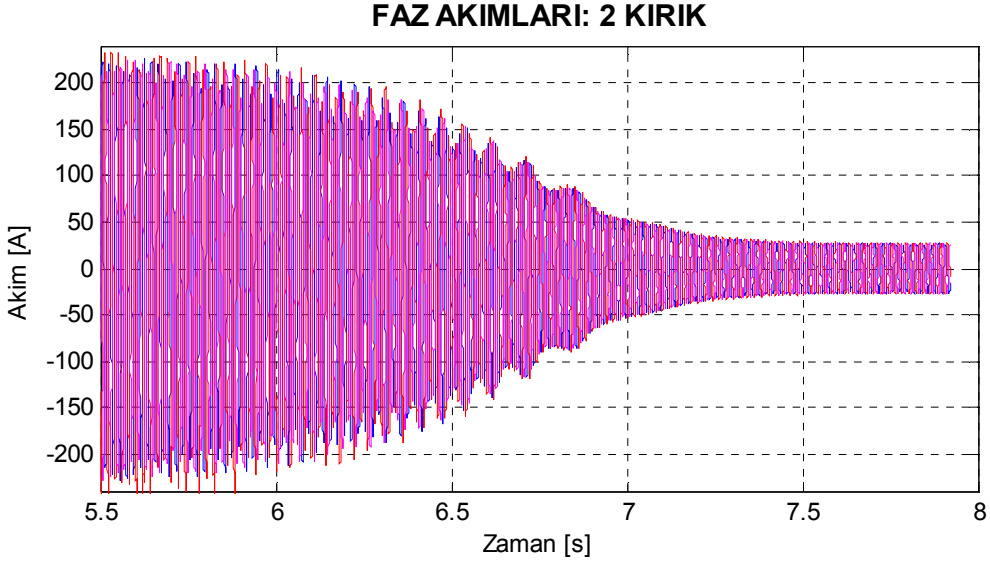
Şekil 8.53. Motor2 sağlam motor durumu için deneysel yol alma akımları.



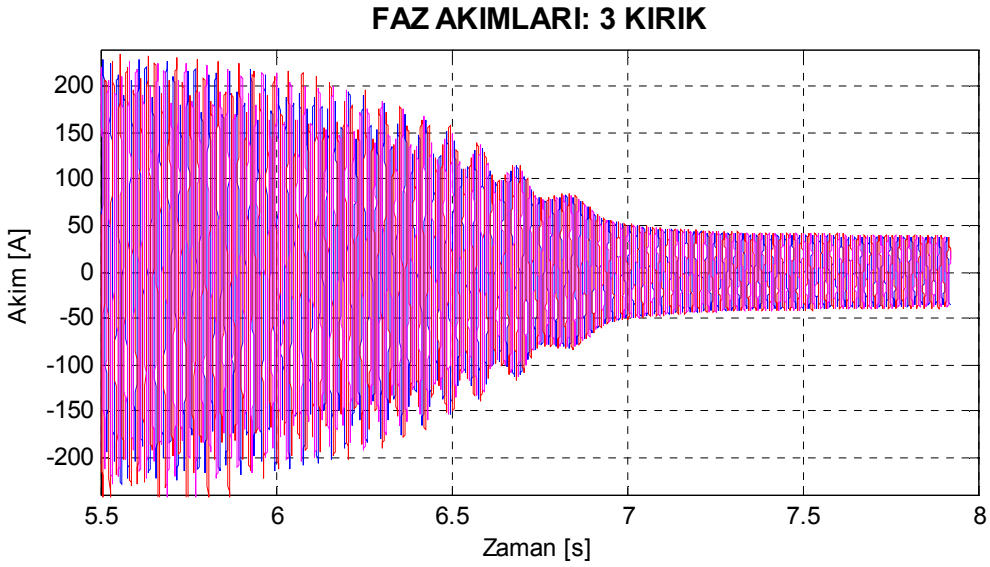
Şekil 8.54. Motor2 bir çubuğu yüksek dirençli rotor için deneysel yol alma akımları.



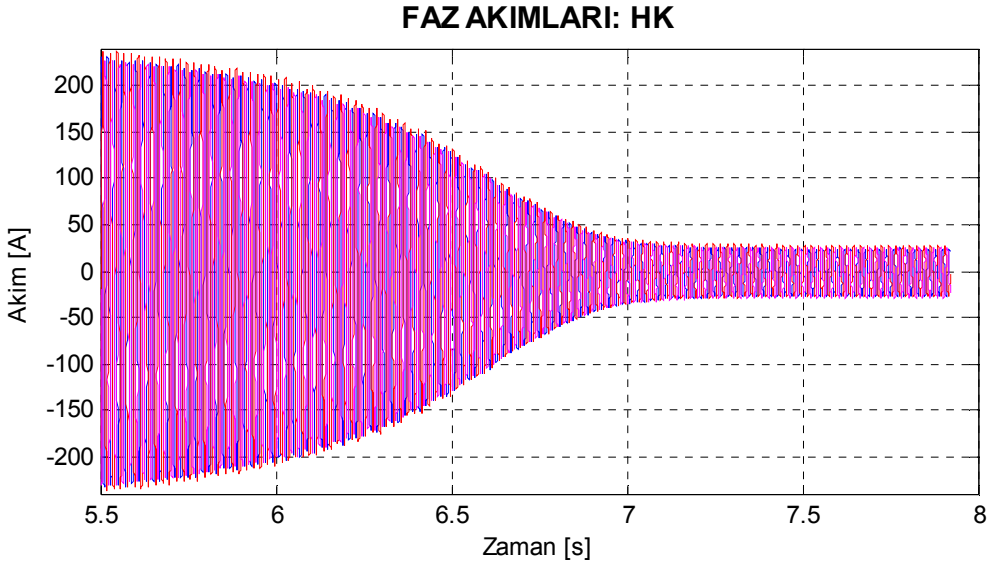
Şekil 8.55. Motor2 bir çubuğu kırık rotor için deneysel yol alma akımları.



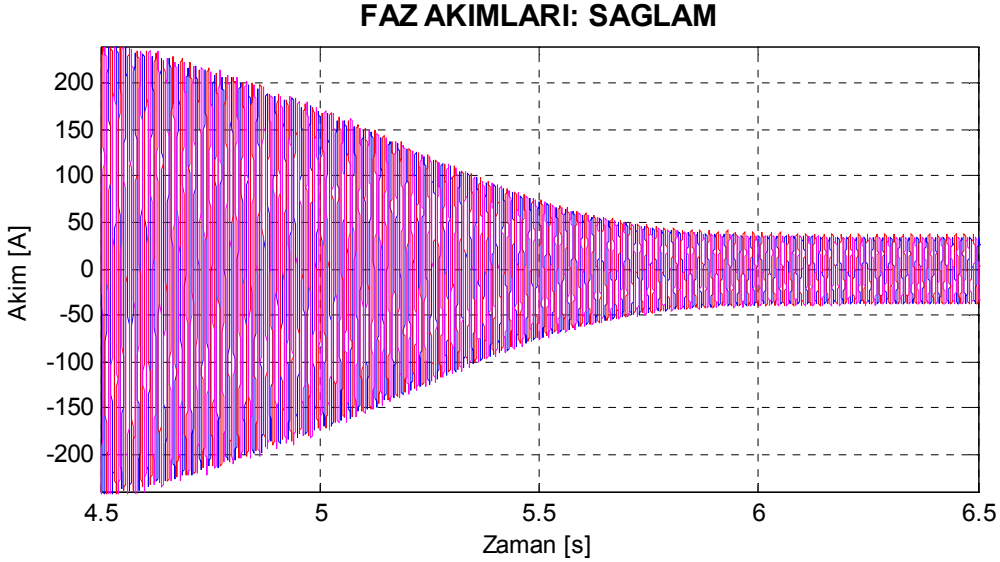
Şekil 8.56. Motor2 iki çubuğu kırık rotor için deneysel yol alma akımları.



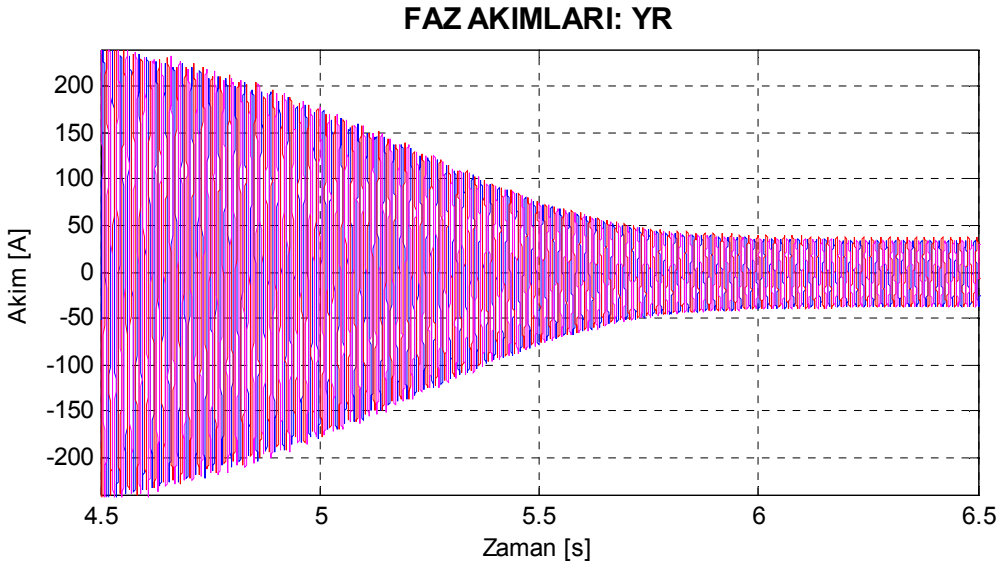
Şekil 8.57. Motor2 üç çubuğu kırık rotor için deneysel yol alma akımları.



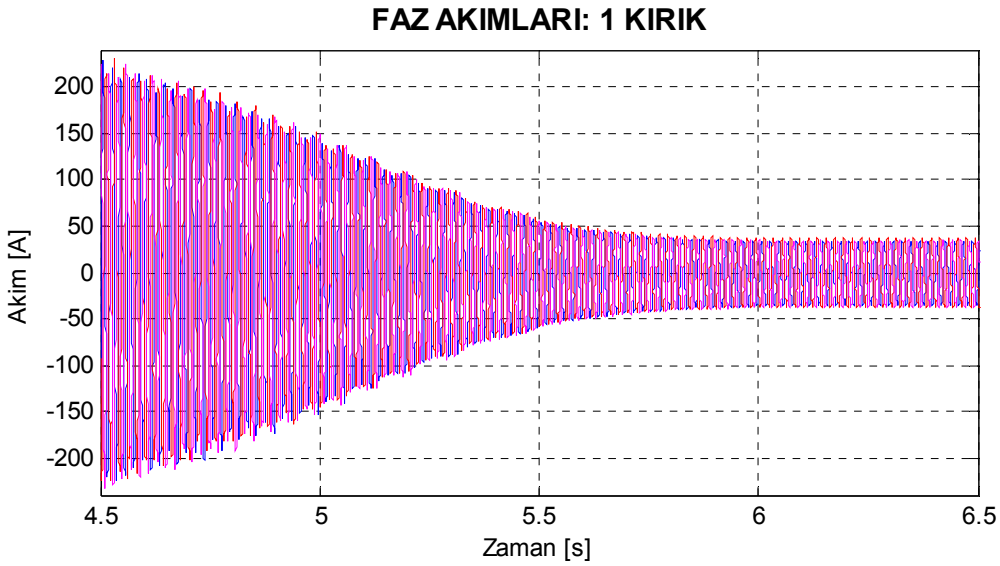
Şekil 8.58. Motor2 kısa devre halkası kırık rotor için deneysel yol alma akımları.



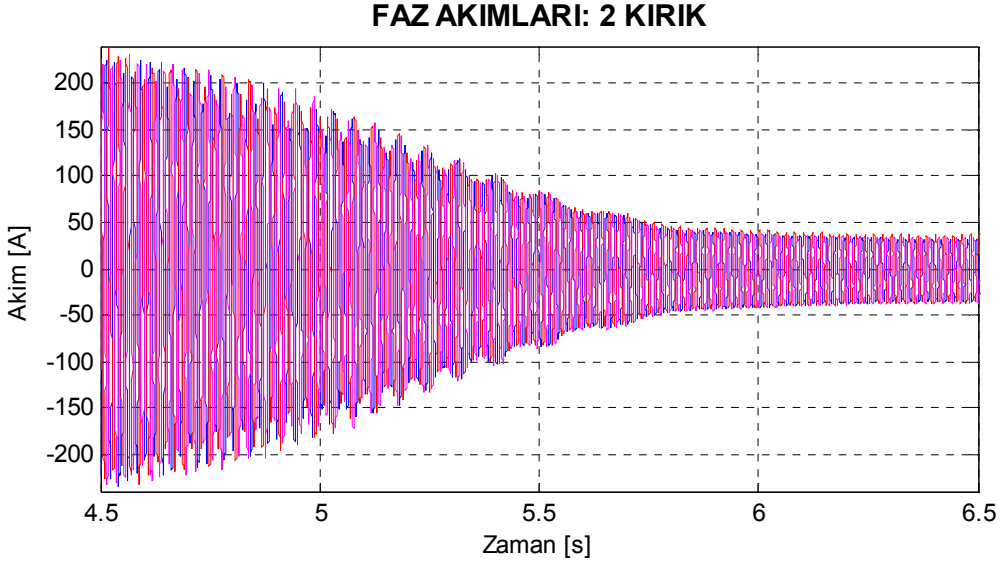
Şekil 8.59. Motor3 sağlam motor durumu için deneysel yol alma akımları.



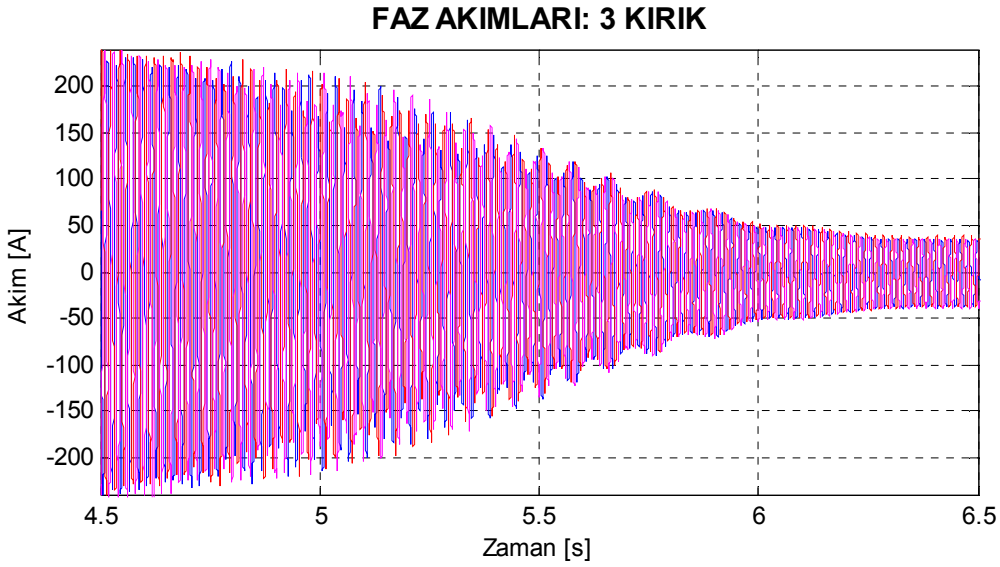
Şekil 8.60. Motor3 bir çubuğu yüksek dirençli rotor için deneysel yol alma akımları.



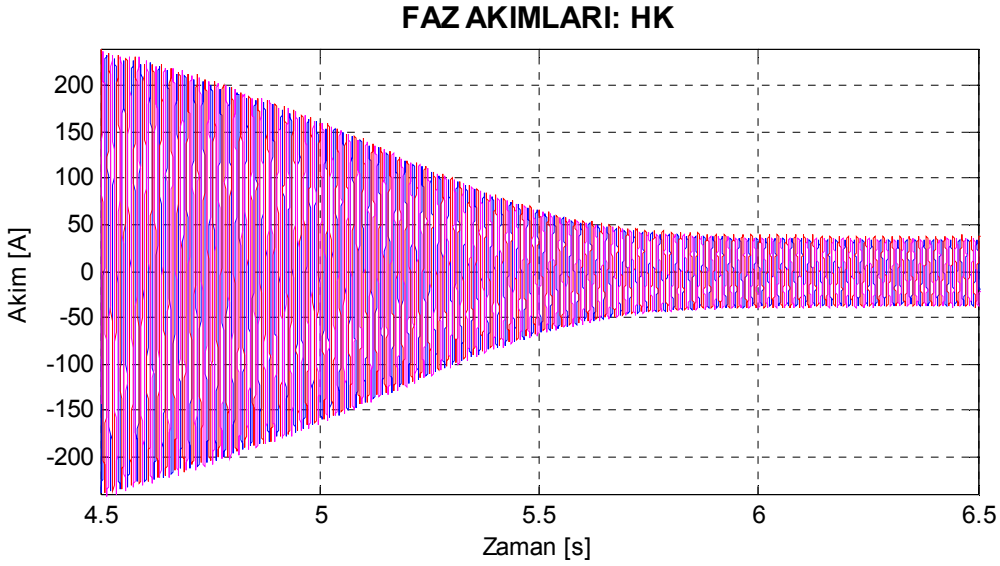
Şekil 8.61. Motor3 bir çubuğu kırık rotor için deneysel yol alma akımları.



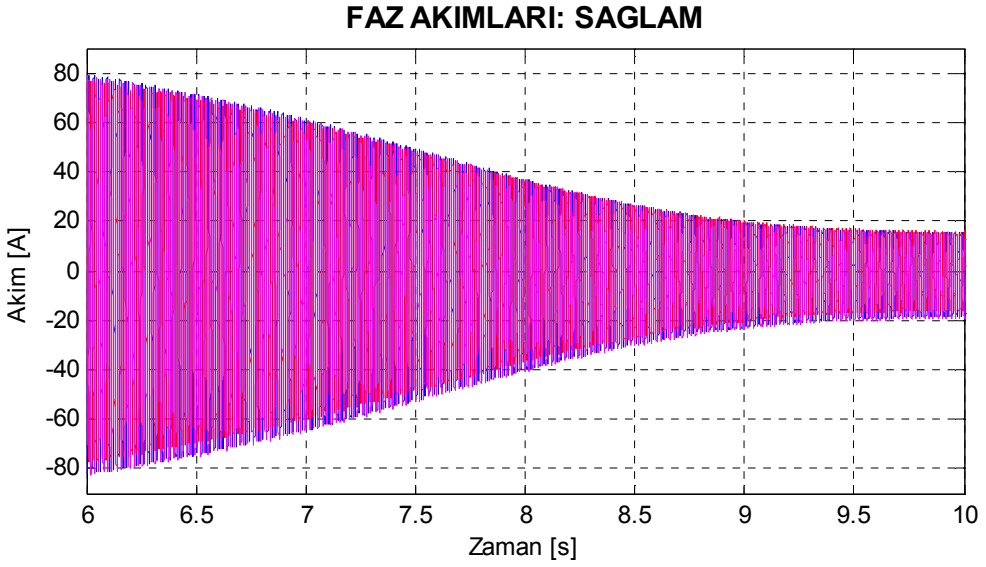
Şekil 8.62. Motor3 iki çubuğu kırık rotor için deneysel yol alma akımları.



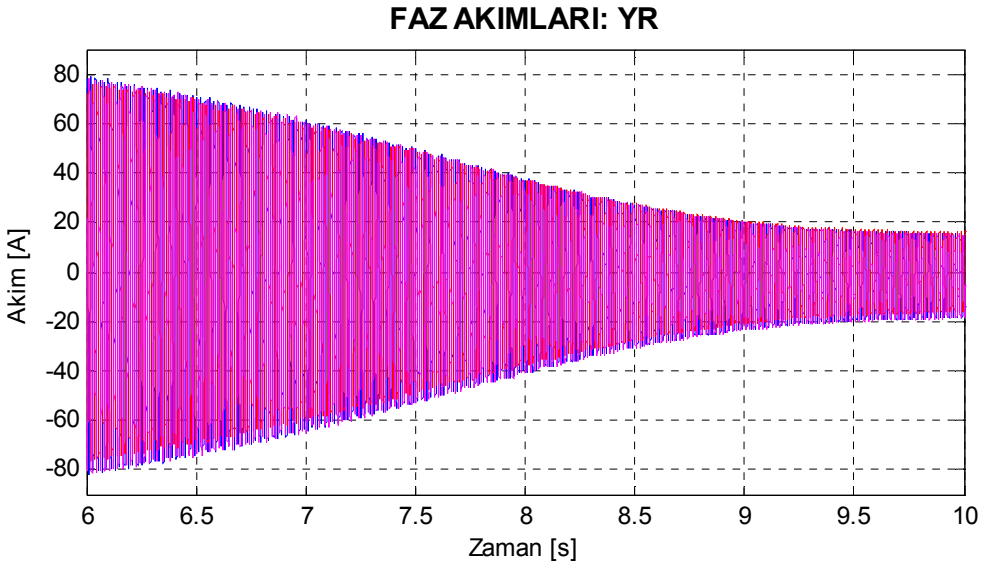
Şekil 8.63. Motor3 üç çubuğu kırık rotor için deneysel yol alma akımları.



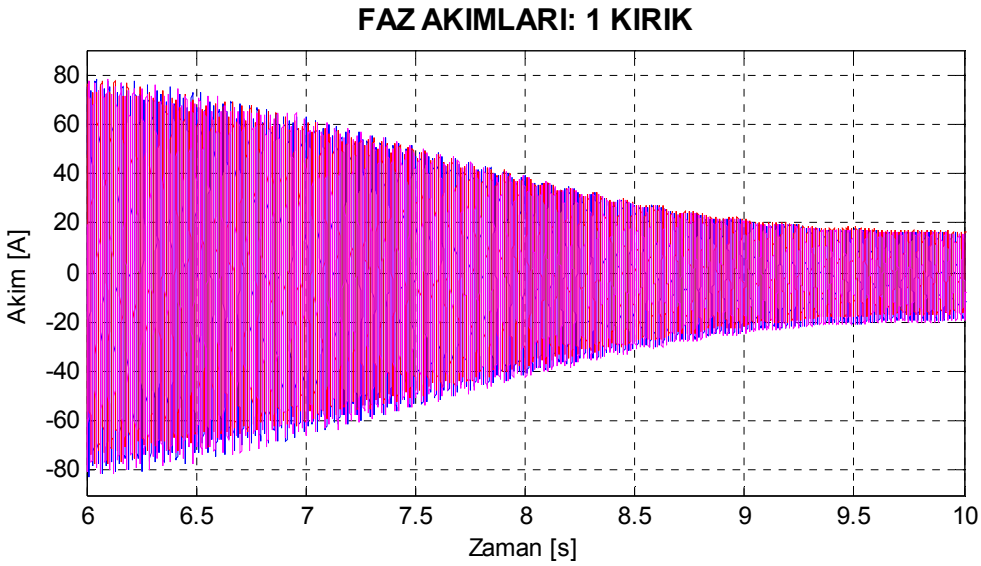
Şekil 8.64. Motor3 kısa devre halkası kırık rotor için deneysel yol alma akımları.



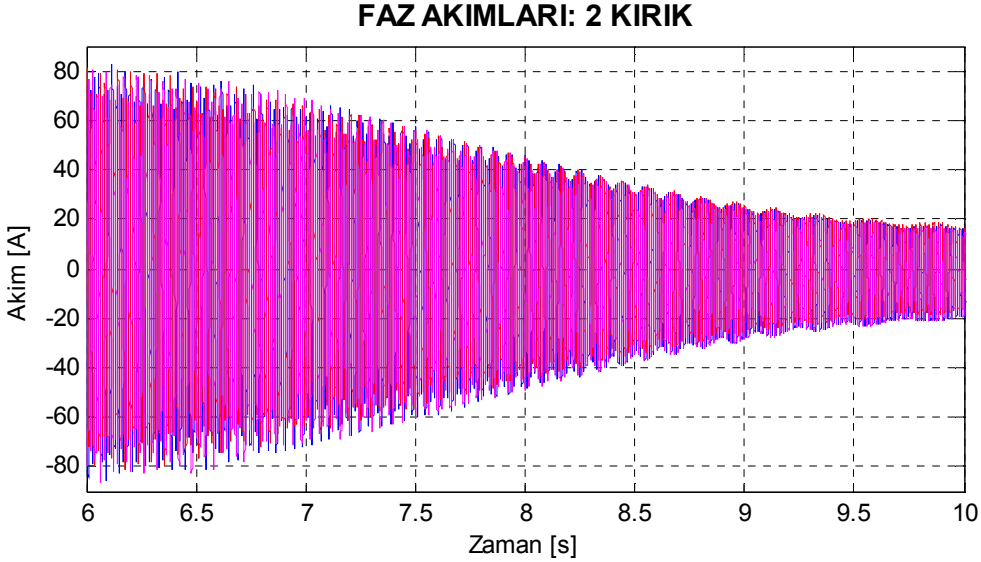
Şekil 8.65. Motor4 sağlam motor durumu için deneysel yol alma akımları.



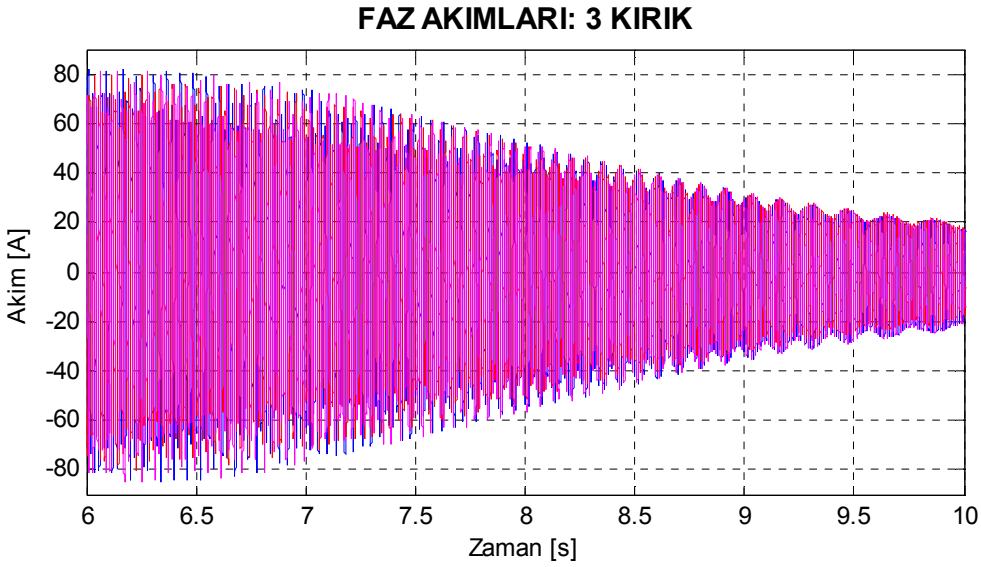
Şekil 8.66. Motor4 bir çubuğu yüksek dirençli rotor için deneysel yol alma akımları.



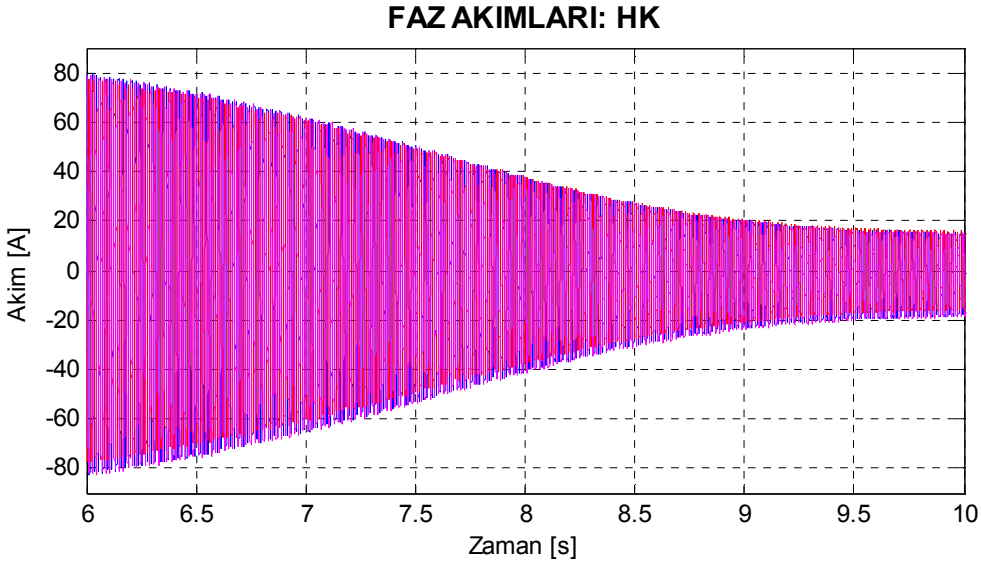
Şekil 8.67. Motor4 bir çubuğu kırık rotor için deneysel yol alma akımları.



Şekil 8.68. Motor4 iki çubuğu kırık rotor için deneysel yol alma akımları.



Şekil 8.69. Motor4 üç çubuğu kırık rotor için deneysel yol alma akımları.

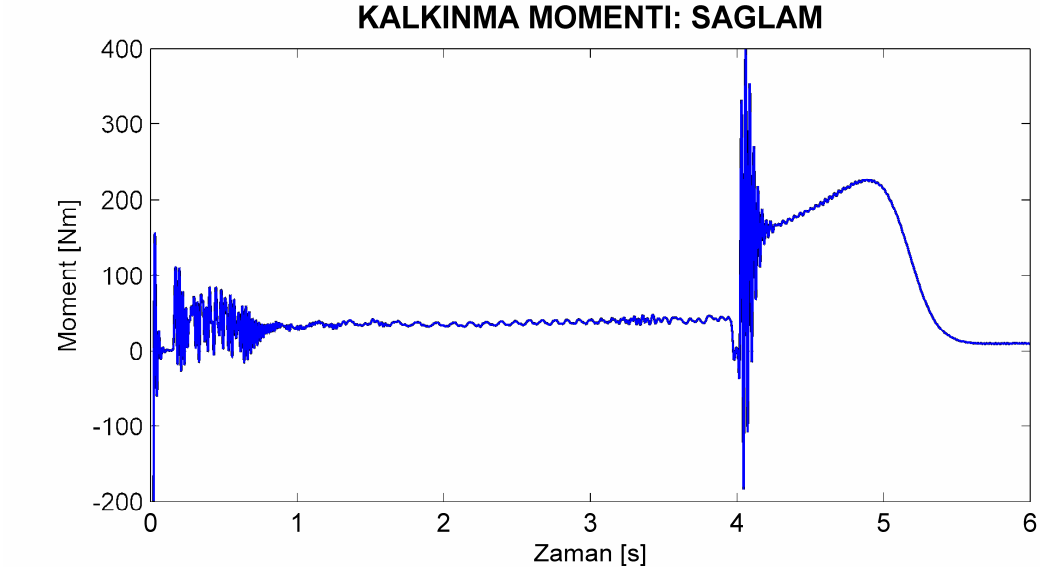


Şekil 8.70. Motor4 kısa devre halkası kırık rotor için deneysel yol alma akımları.

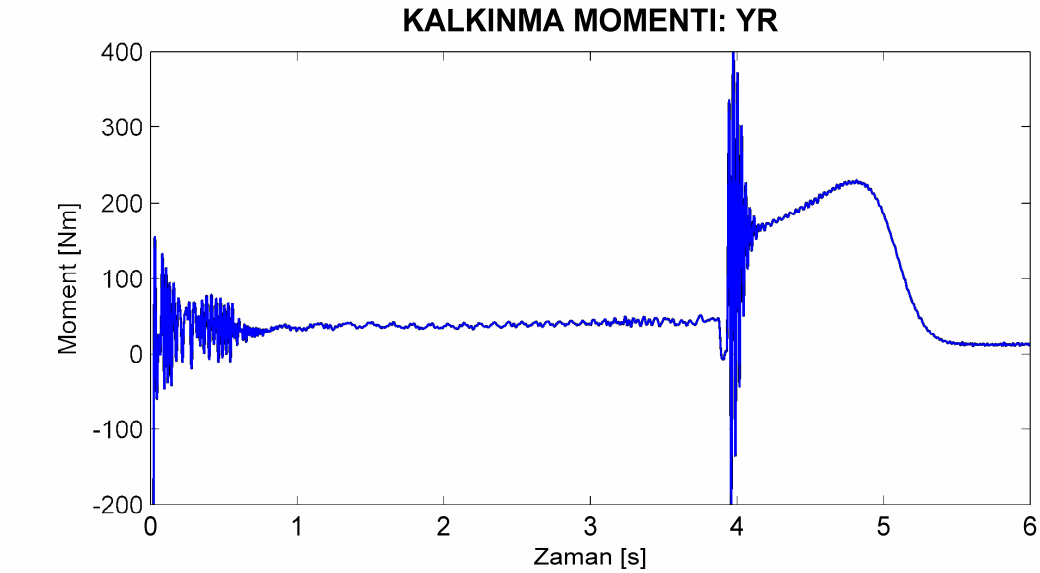
8.2.2. Yol alma sürecindeki motor momentleri

Rotor arızalarının yol alama sürecinde motor momentine yaptığı etkileri incelemek için motorun yol alma sürecindeki moment değerleri kaydedilmiştir. Yol alma sürecinde momentin değişimlerini gösteren deneysel grafikler; Motor1 için sağlam, yüksek dirençli, 1 kırık, 2 kırık, 3 kırık çubuklu ve kısa devre halkası kırık arıza durumları için sırasıyla Şekil 8.71, Şekil 8.72, Şekil 8.73, Şekil 8.74, Şekil 8.75 ve Şekil 8.76'da; Motor2 için sağlam, yüksek dirençli, 1 kırık, 2 kırık, 3 kırık çubuklu ve kısa devre halkası kırık arıza durumları için sırasıyla Şekil 8.77, Şekil 8.78, Şekil 8.79, Şekil 8.80, Şekil 8.81 ve Şekil 8.82'de; Motor3 için sağlam, yüksek dirençli, 1 kırık, 2 kırık, 3

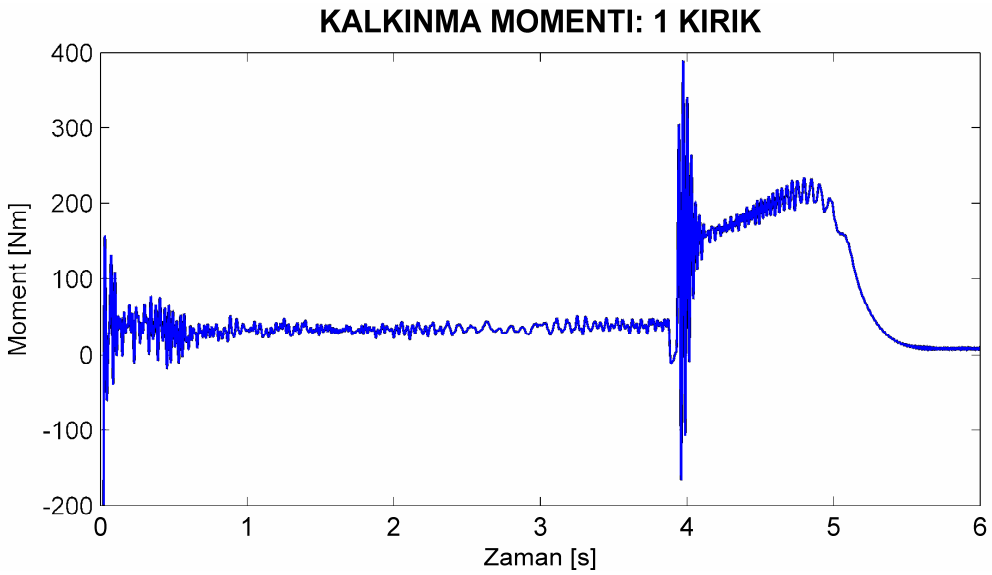
kırık çubuklu ve kısa devre halkası kırık arıza durumları için sırasıyla Şekil 8.83, Şekil 8.84, Şekil 8.85, Şekil 8.86, Şekil 8.87 ve Şekil 8.88'de; Motor4 için sağlam, yüksek dirençli, 1 kırık, 2 kırık, 3 kırık çubuklu ve kısa devre halkası kırık arıza durumları için sırasıyla Şekil 8.89, Şekil 8.90, Şekil 8.91, Şekil 8.92, Şekil 8.93 ve Şekil 8.94'de verilmiştir.



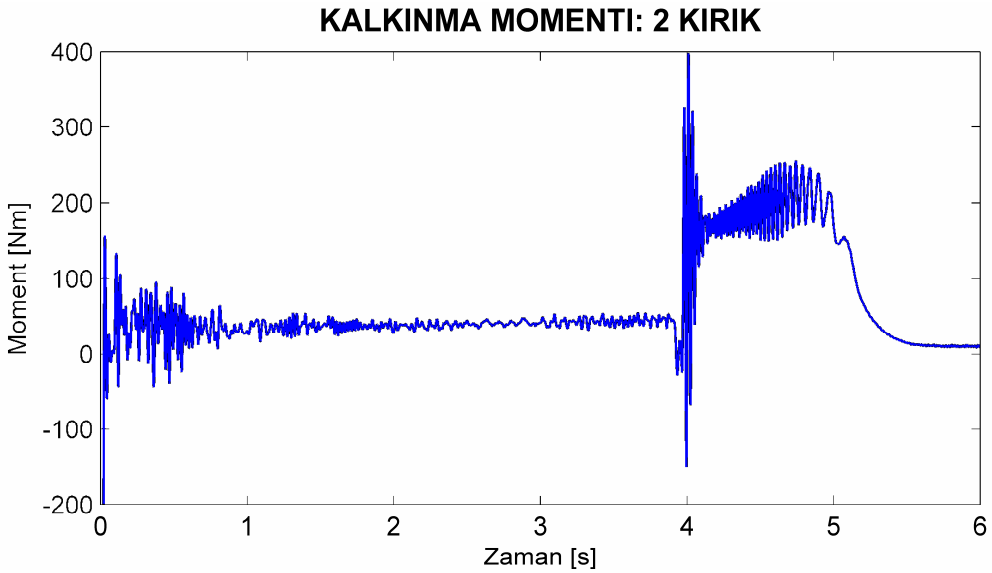
Şekil 8.71. Motor1 sağlam motor durumu için deneysel yol alma momentleri.



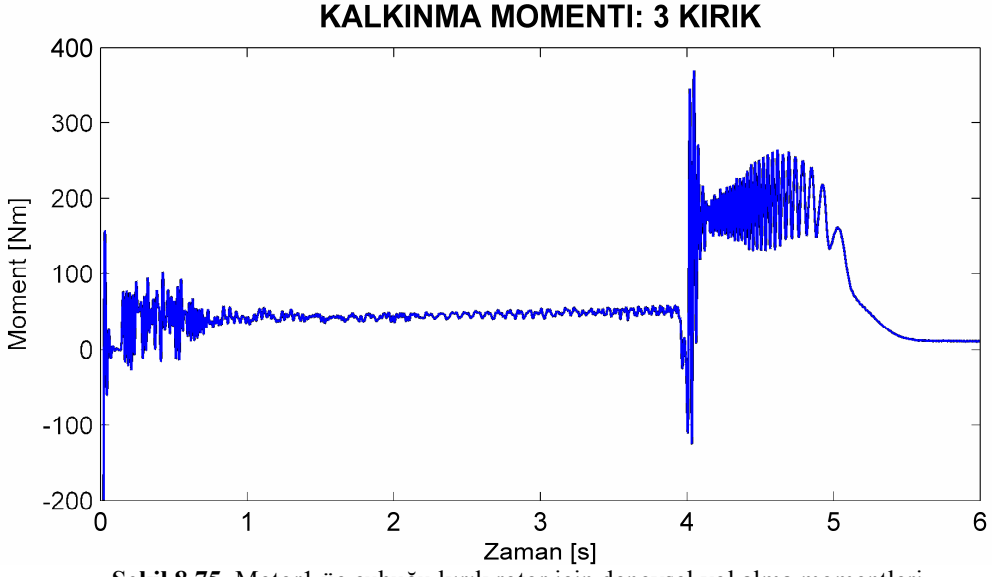
Şekil 8.72. Motor1 bir çubuğu yüksek dirençli rotor için deneysel yol alma momentleri.



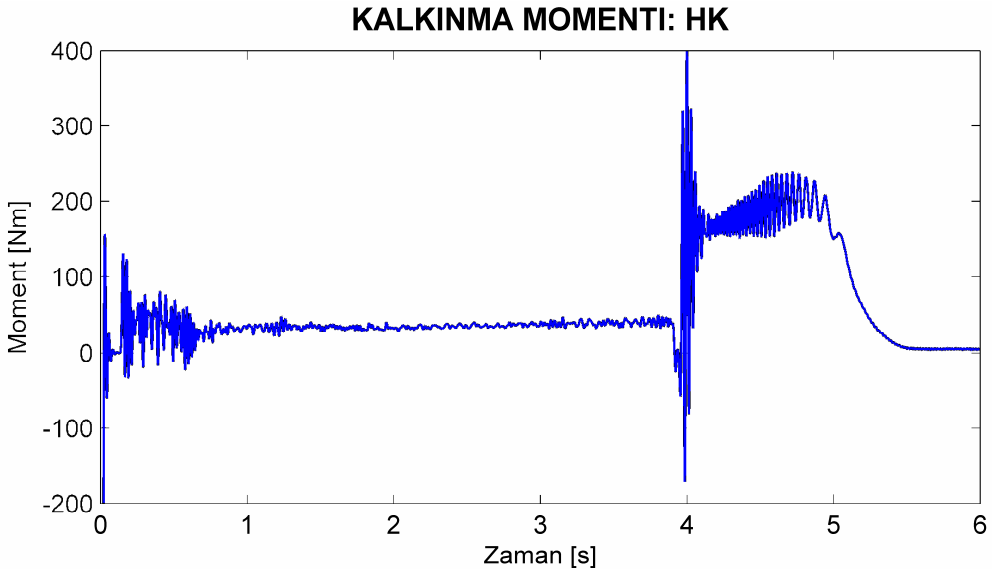
Şekil 8.73. Motor1 bir çubuğu kırık rotor için deneysel yol alma momentleri.



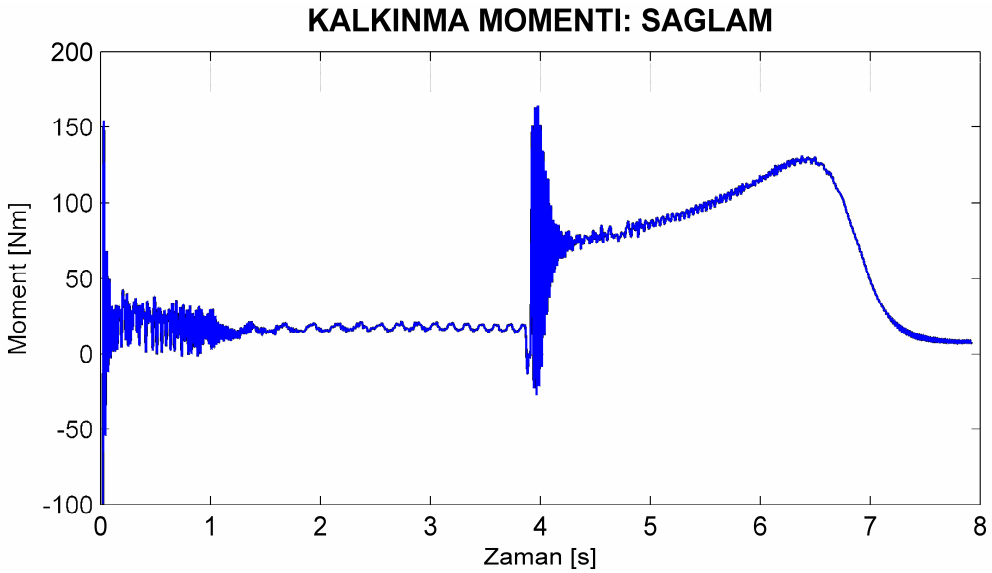
Şekil 8.74. Motor1 iki çubuğu kırık rotor için deneysel yol alma momentleri.



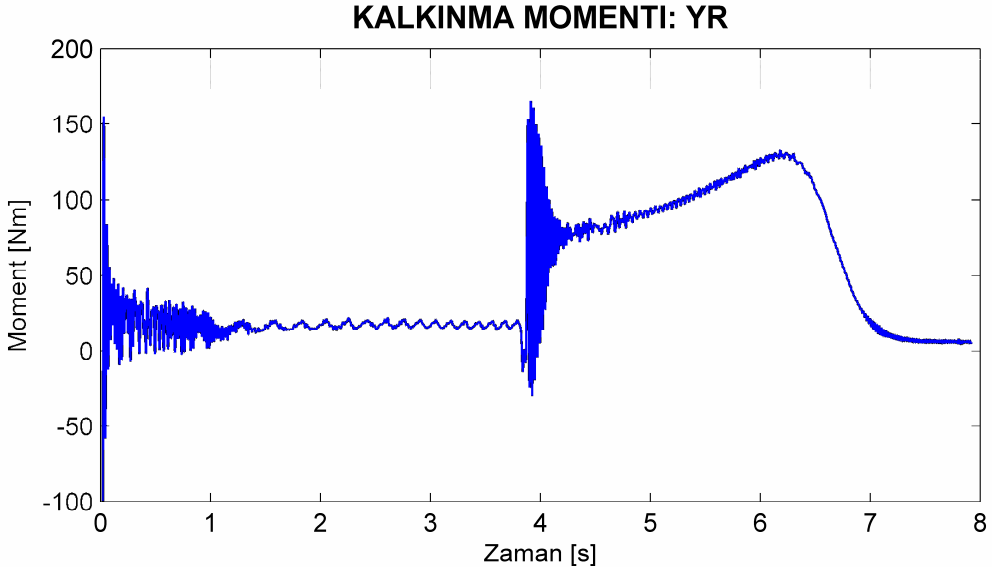
Şekil 8.75. Motor1 üç çubuğu kırık rotor için deneysel yol alma momentleri.



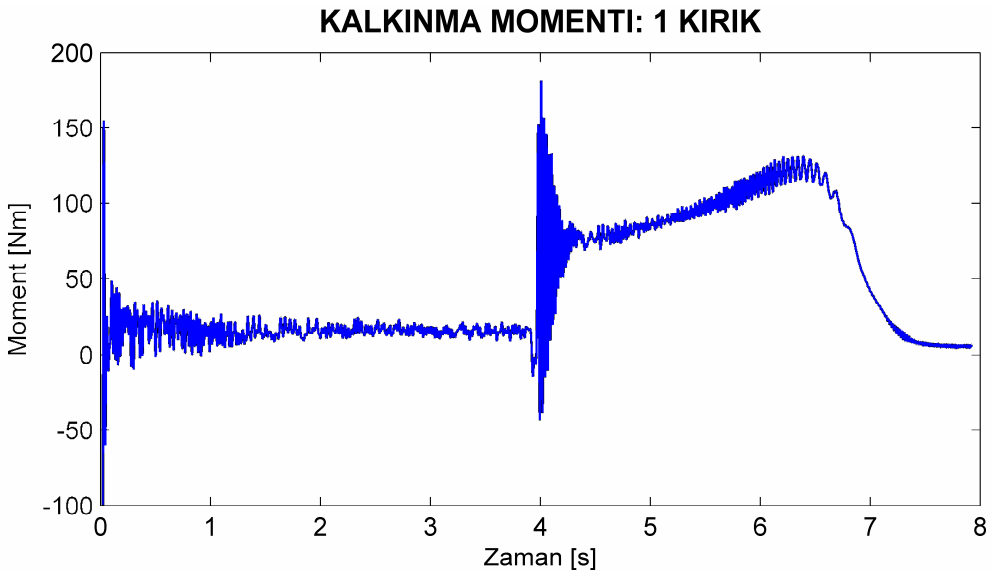
Şekil 7. 8.76. Motor1 kısa devre halkası kırık rotor için deneysel yol alma momentleri.



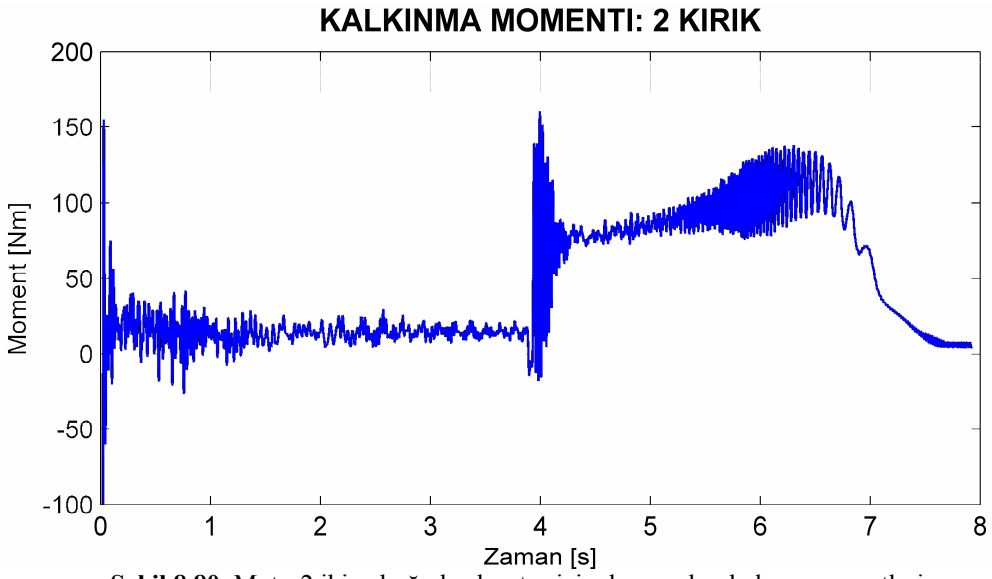
Şekil 8.77. Motor2 sağlam motor durumu için deneysel yol alma momentleri.



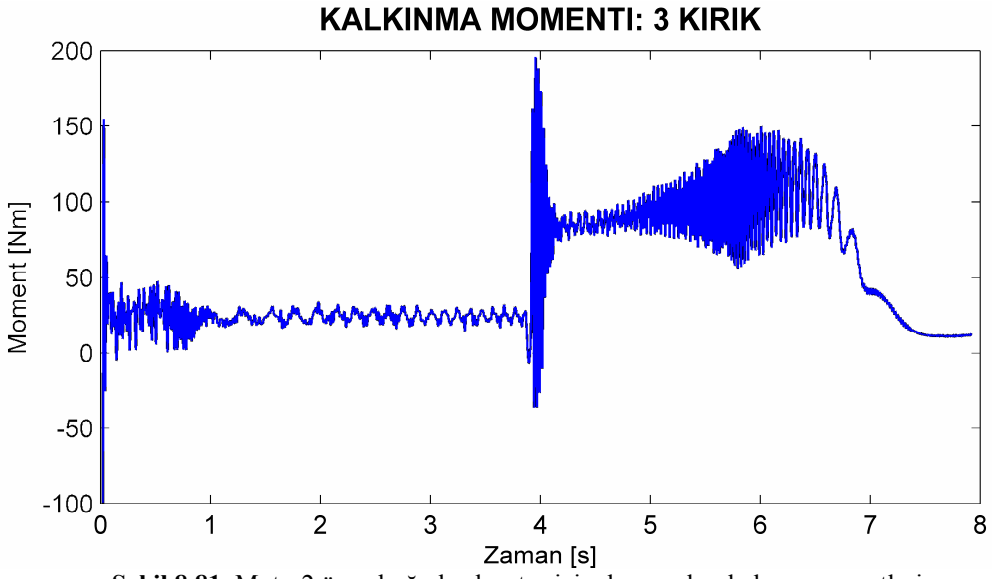
Şekil 8.78. Motor2 bir çubuğu yüksek dirençli rotor için deneysel yol alma momentleri.



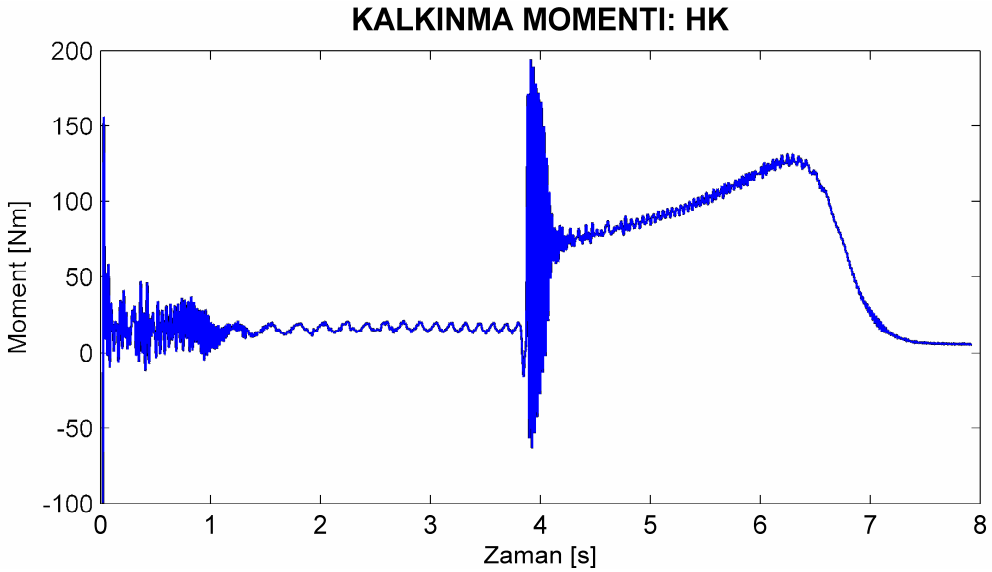
Şekil 8.79. Motor2 bir çubuğu kırık rotor için deneysel yol alma momentleri.



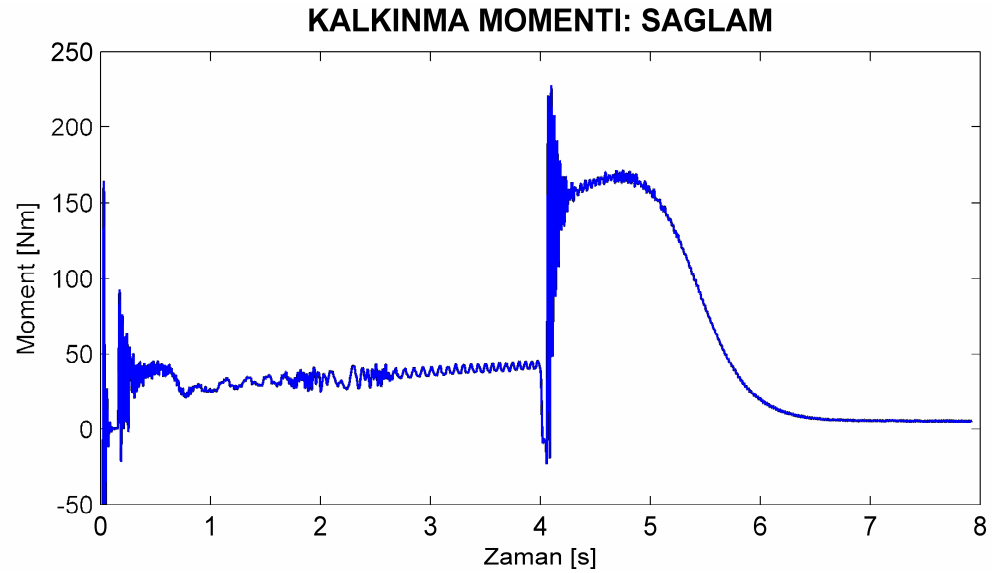
Şekil 8.80. Motor2 iki çubuğu kırık rotor için deneysel yol alma momentleri.



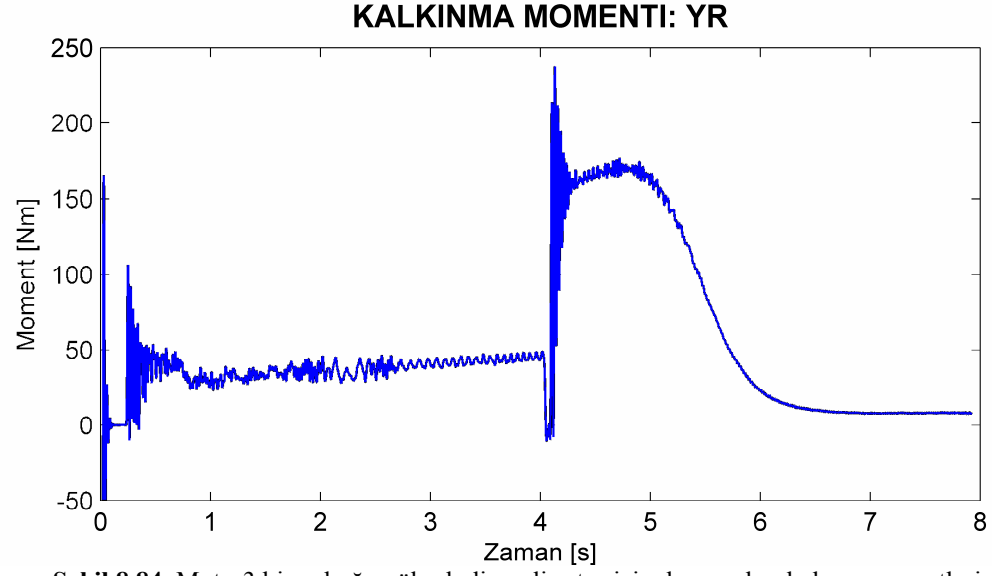
Şekil 8.81. Motor2 üç çubuğu kırık rotor için deneysel yol alma momentleri.



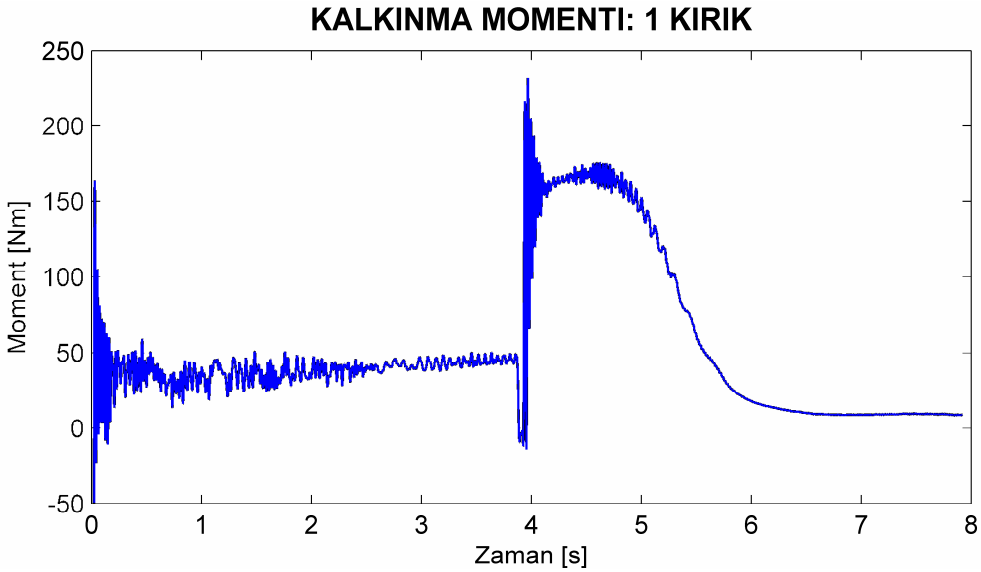
Şekil 8.82. Motor2 kısa devre halkası kırık rotor için deneysel yol alma momentleri.



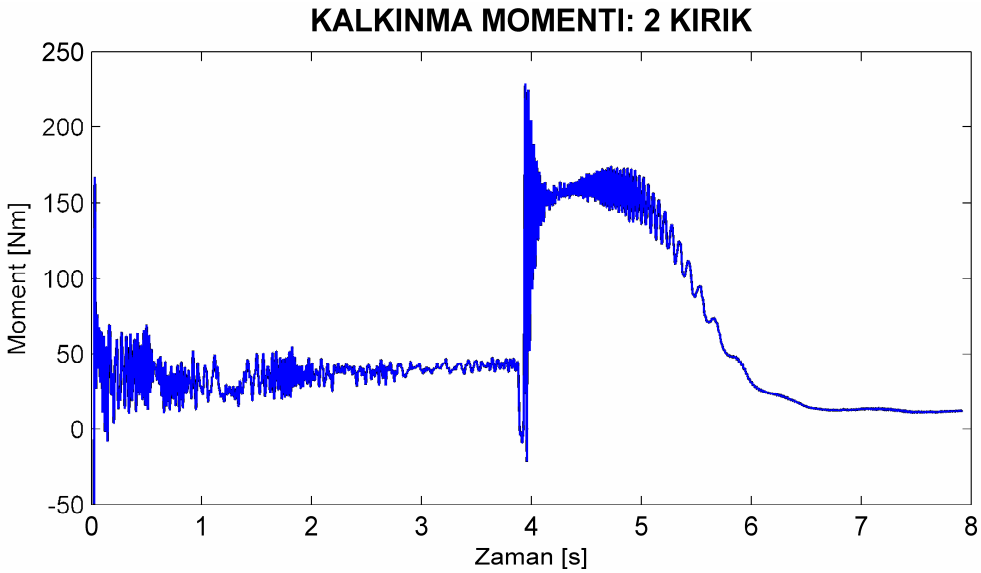
Şekil 8.83. Motor3 sağlam motor durumu için deneysel yol alma momentleri.



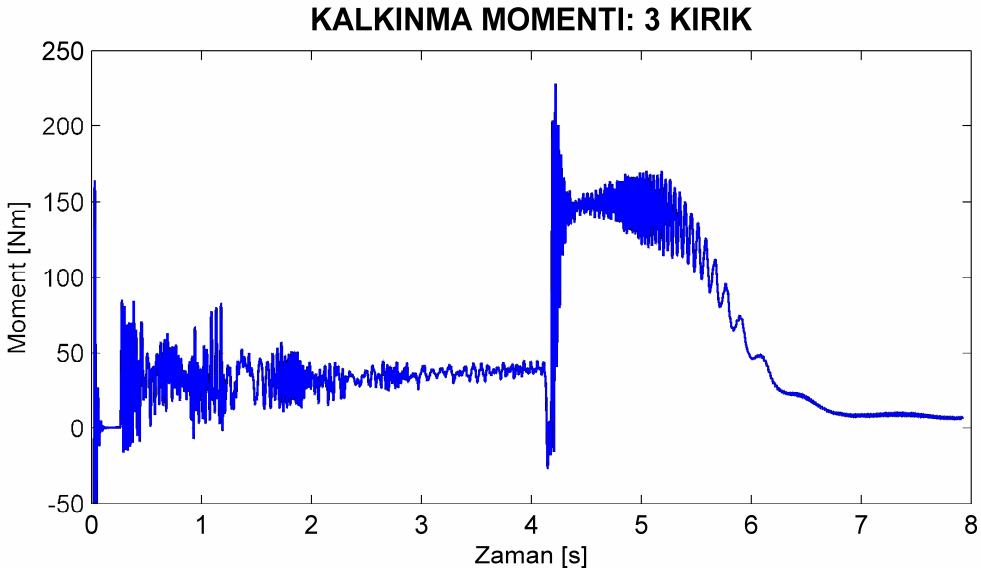
Şekil 8.84. Motor3 bir çubuğu yüksek dirençli rotor için deneysel yol alma momentleri.



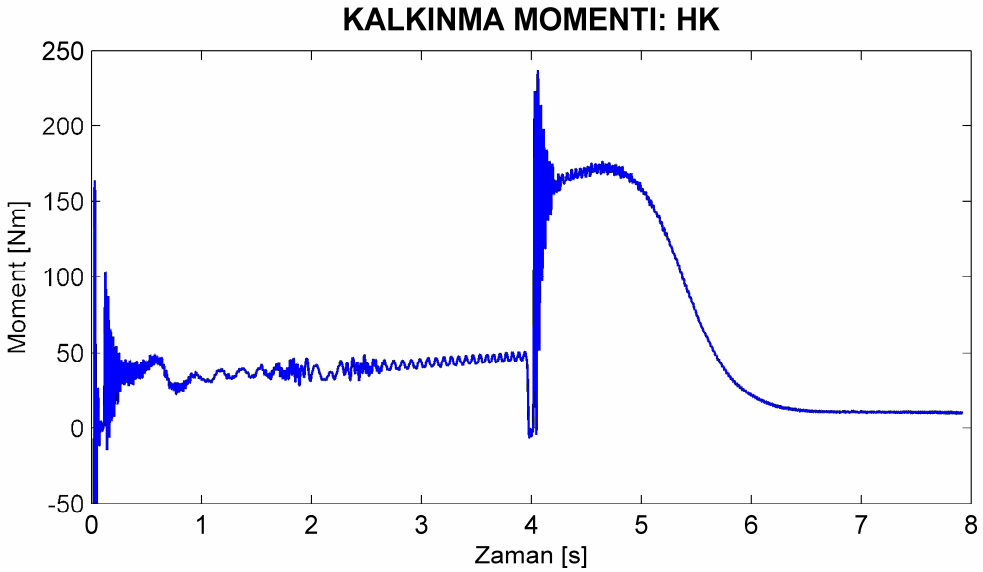
Şekil 8.85. Motor3 bir çubuğu kırık rotor için deneysel yol alma momentleri.



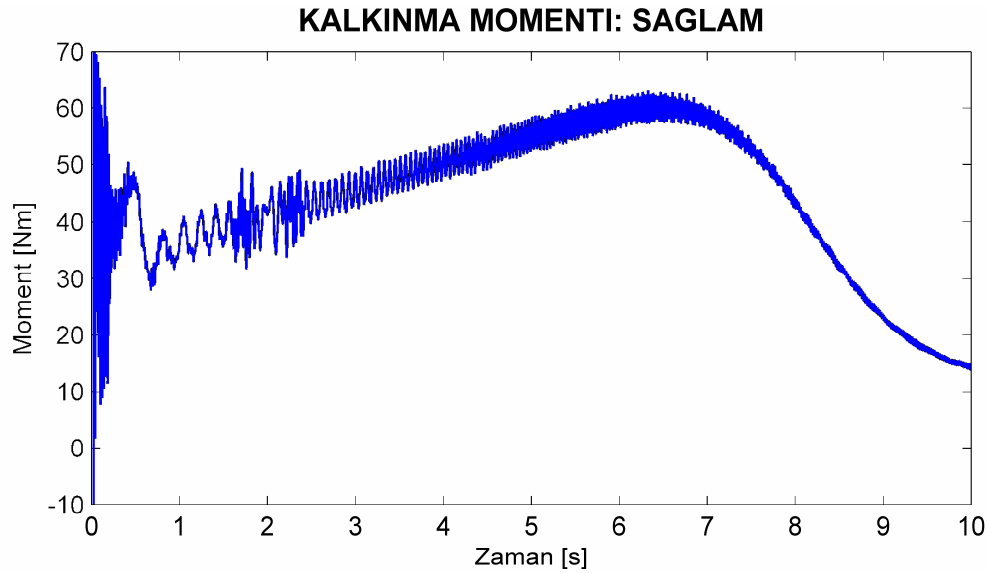
Şekil 8.86. Motor3 iki çubuğu kırık rotor için deneysel yol alma momentleri.



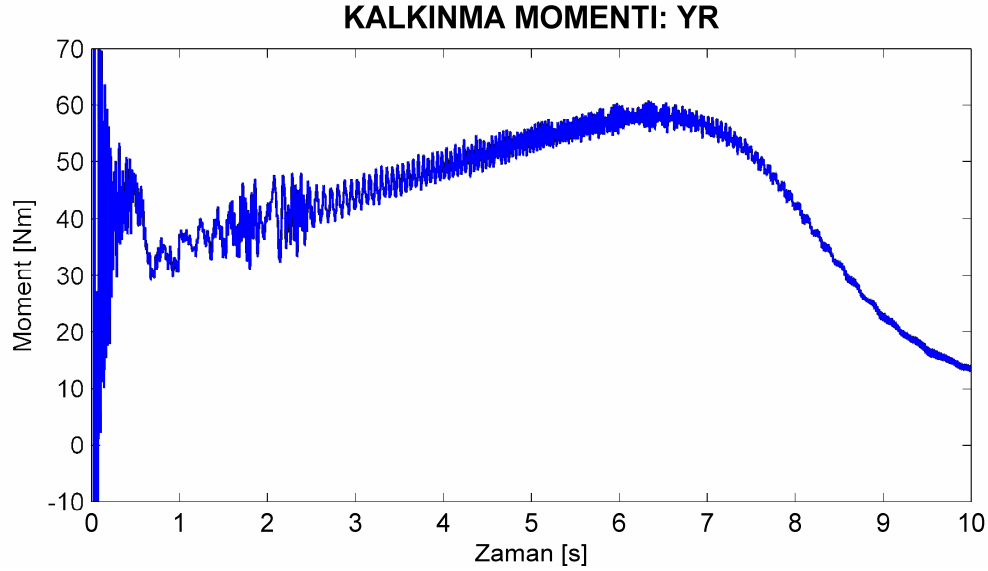
Şekil 8.87. Motor3 üç çubuğu kırık rotor için deneysel yol alma momentleri.



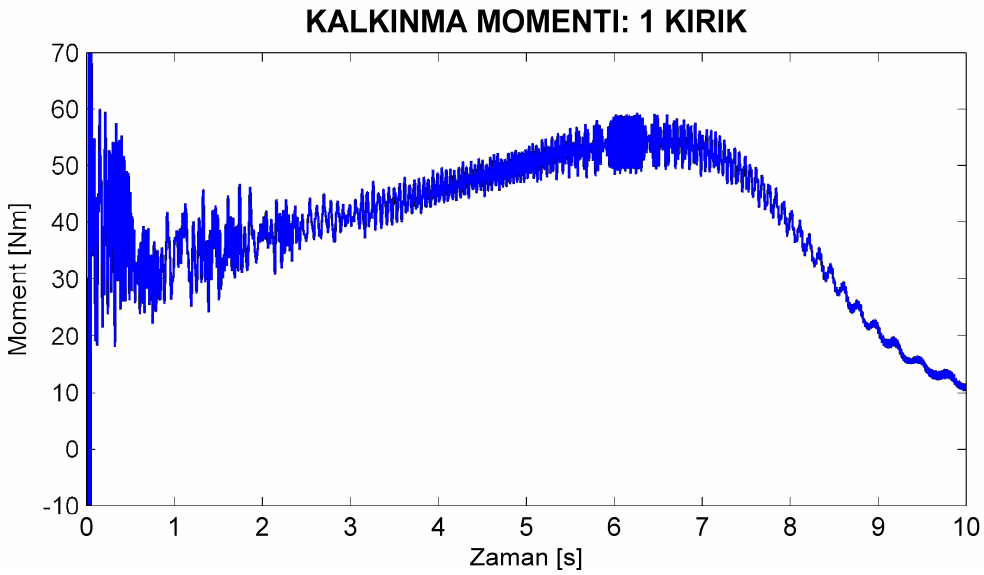
Şekil 8.88. Motor3 kısa devre halkası kırık rotor için deneysel yol alma momentleri.



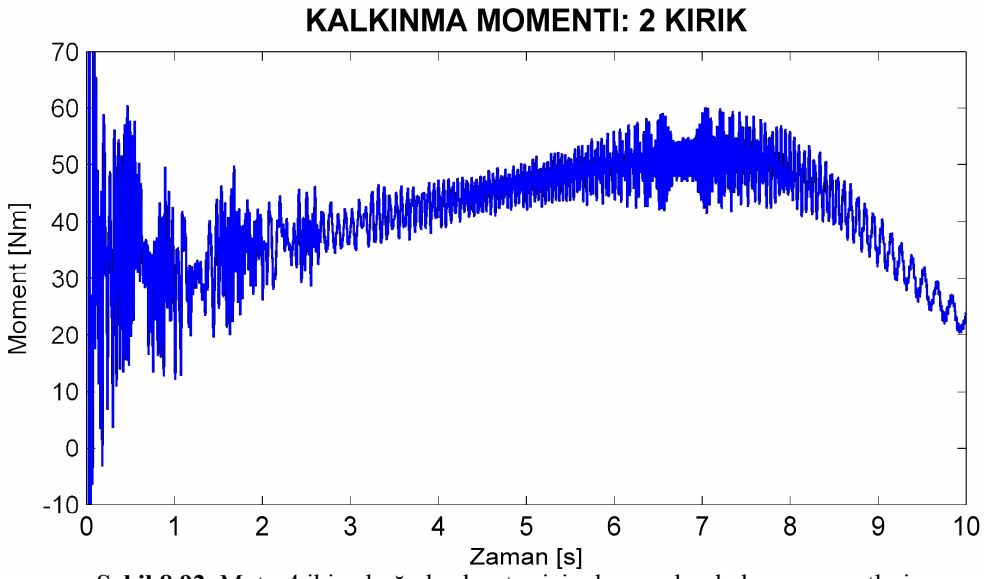
Şekil 8.89. Motor4 sağlam motor durumu için deneysel yol alma momentleri.



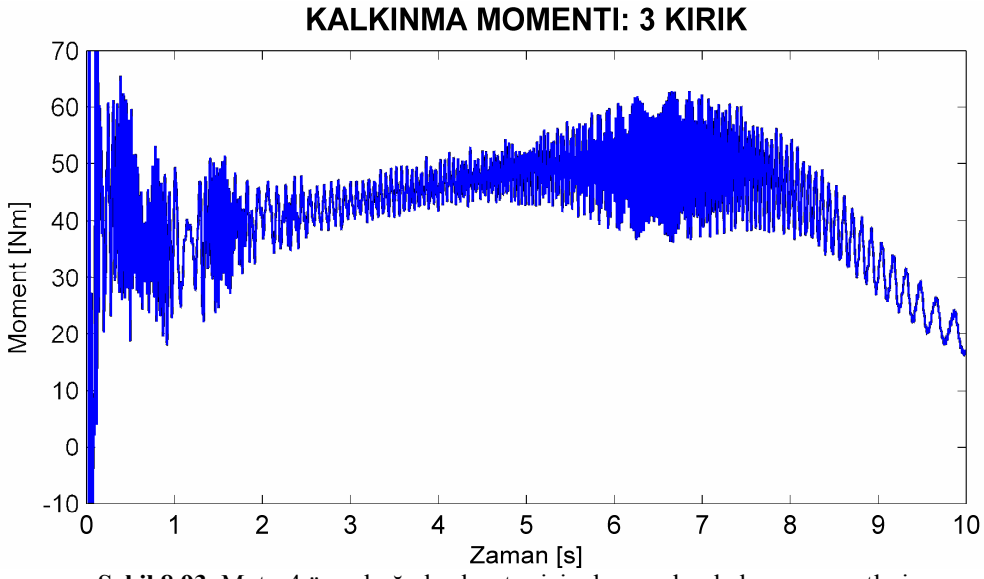
Şekil 8.90. Motor4 bir çubuğu yüksek dirençli rotor için deneysel yol alma momentleri.



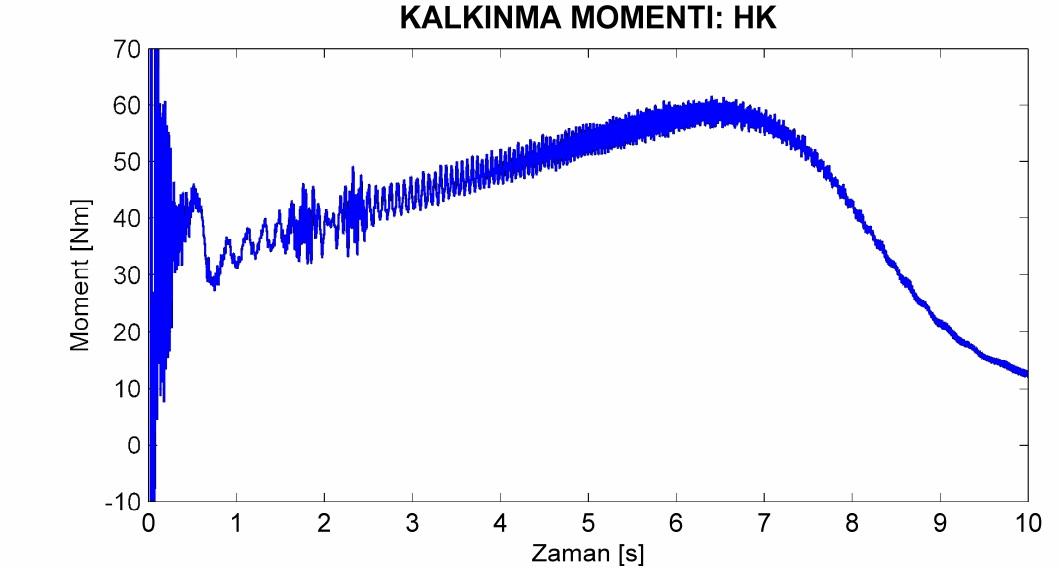
Şekil 8.91. Motor4 bir çubuğu kırık rotor için deneysel yol alma momentleri.



Şekil 8.92. Motor4 iki çubuğu kırık rotor için deneysel yol alma momentleri.



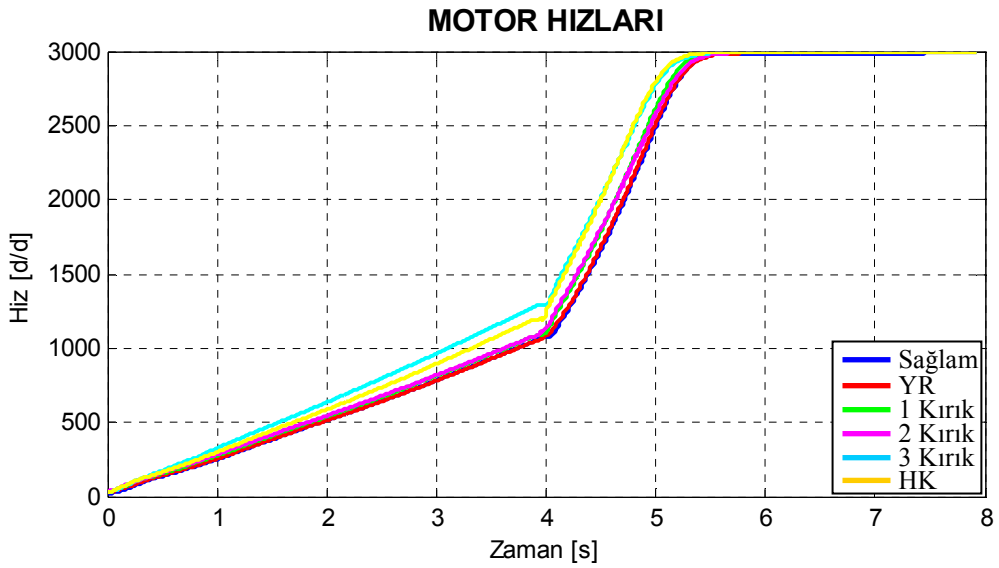
Şekil 8.93. Motor4 üç çubuğu kırık rotor için deneysel yol alma momentleri.



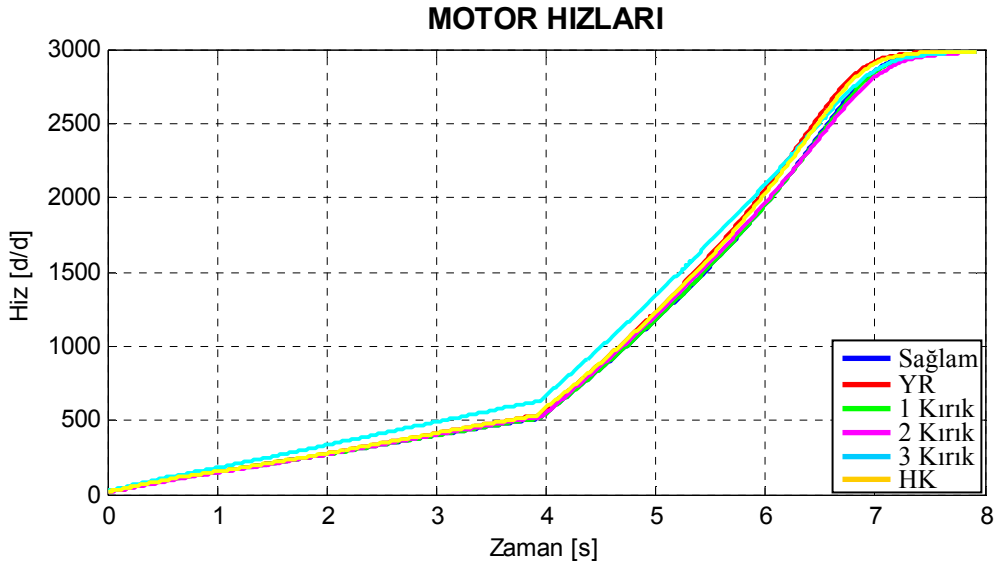
Şekil 8.94. Motor4 kısa devre halkası kırık rotor için deneysel yol alma momentleri.

8.2.3. Yol alma sürecindeki motor hızları

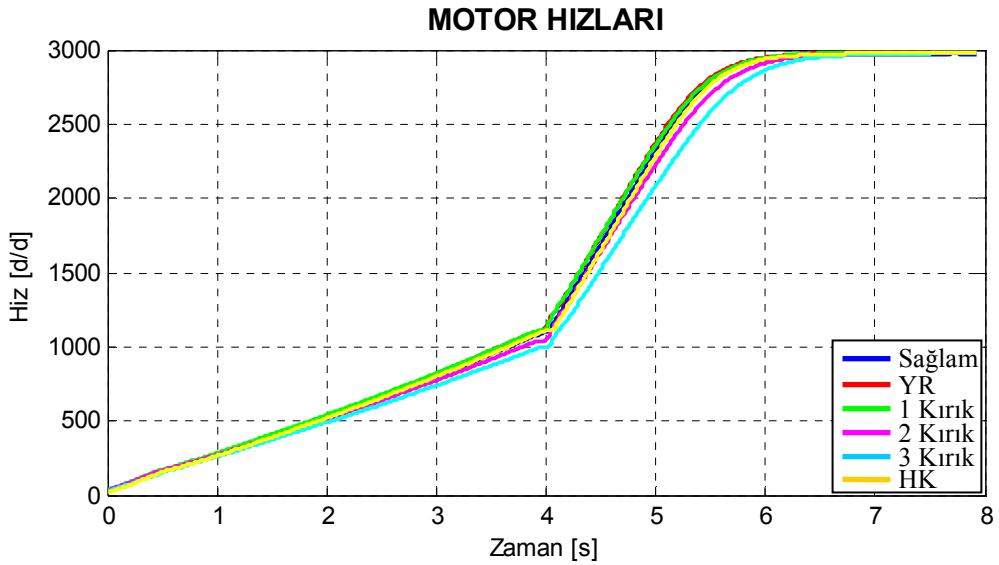
Motorun yolma sürecinde motor hızlarındaki değişimin rotor arızalarına göre yaptığı etkileri incelemek için yol alma sürecindeki hız değerleri benzetimlerle birlikte deneylerden de elde edilmiştir. Yol alma sürecinde arızalara göre hızda meydana gelen değişimleri gösteren deneysel grafikler Motor1 için Şekil 8.95'de, Motor2 için Şekil 8.96'da, Motor3 için Şekil 8.97'de ve Motor4 için Şekil 8.98'de verilmiştir.



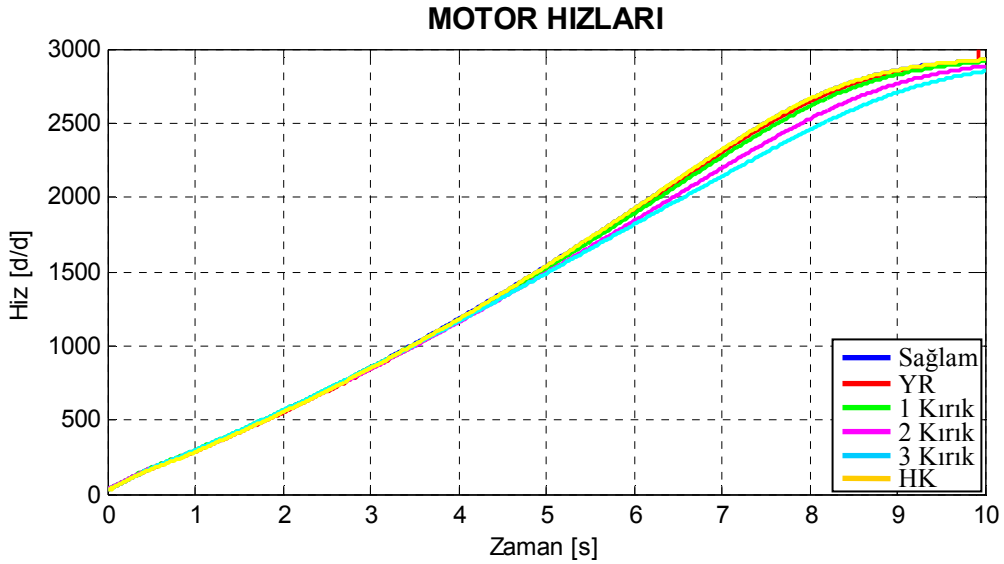
Şekil 8.95. Motor1 için arıza durumlarına göre çizilmiş deneysel yol alma hız grafikleri.



Şekil 8.96. Motor2 için arıza durumlarına göre çizilmiş deneysel yol alma hız grafikleri.



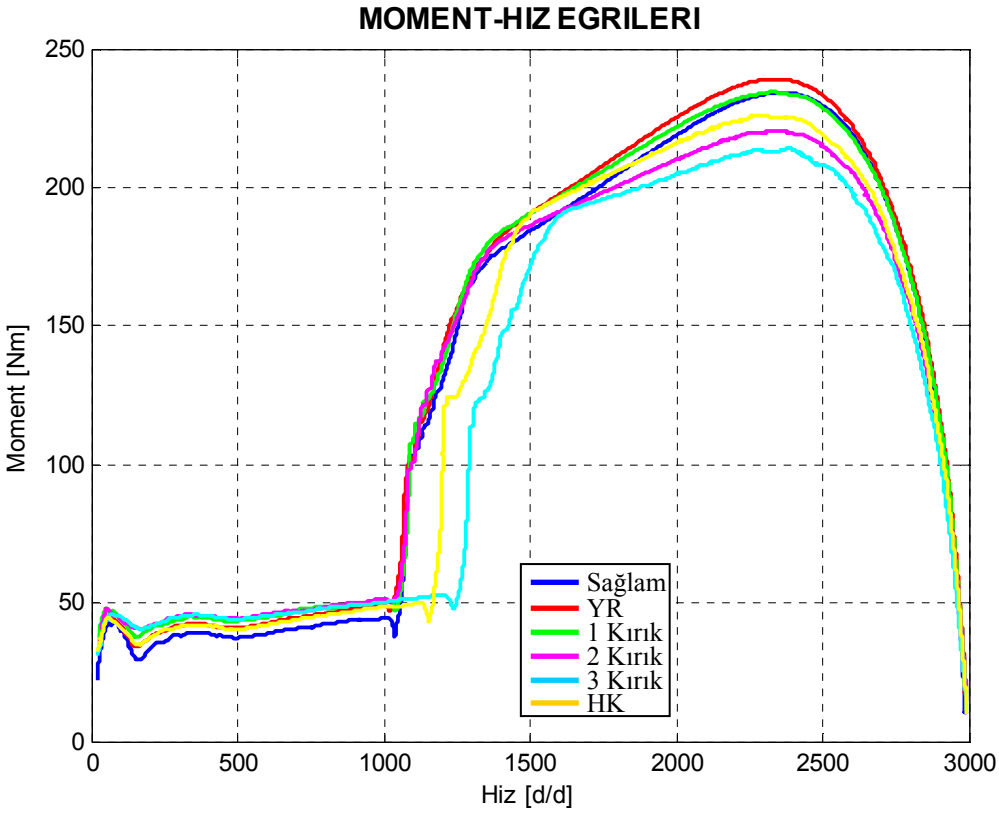
Şekil 8.97. Motor3 için arıza durumlarına göre çizilmiş deneysel yol alma hız grafikleri.



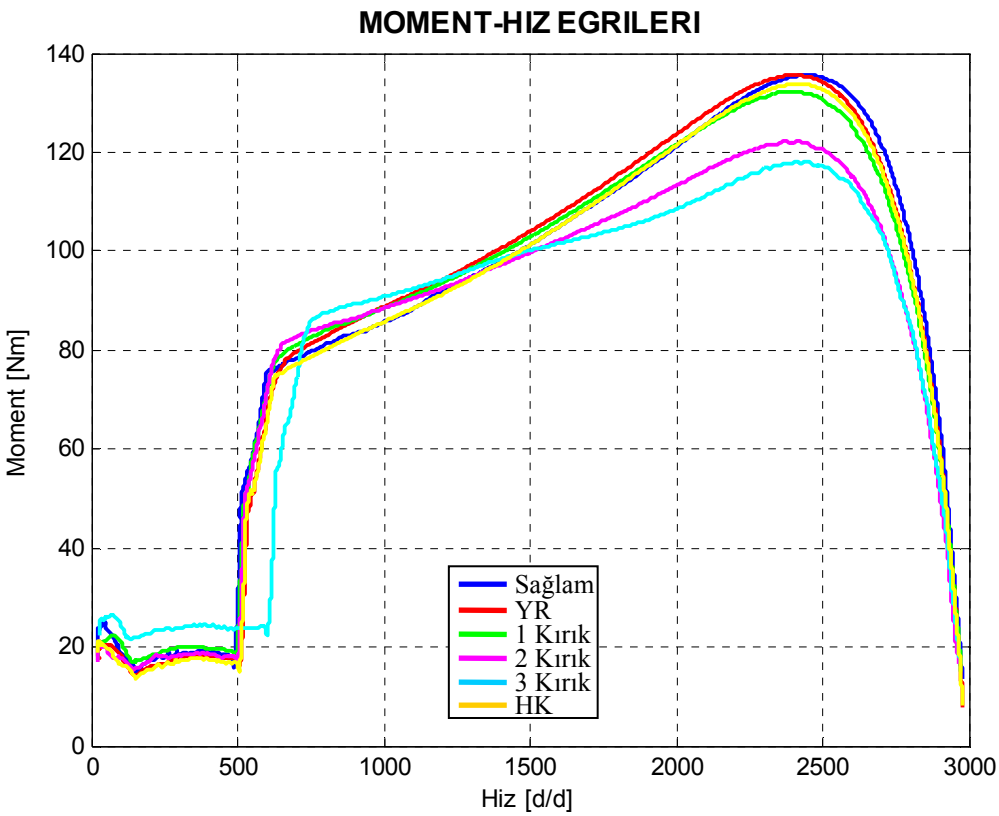
Şekil 8.98. Motor4 için arıza durumlarına göre çizilmiş deneysel yol alma hız grafikleri.

8.3. Hız-Moment Eğrisi İçin Deneysel Sonuçlar

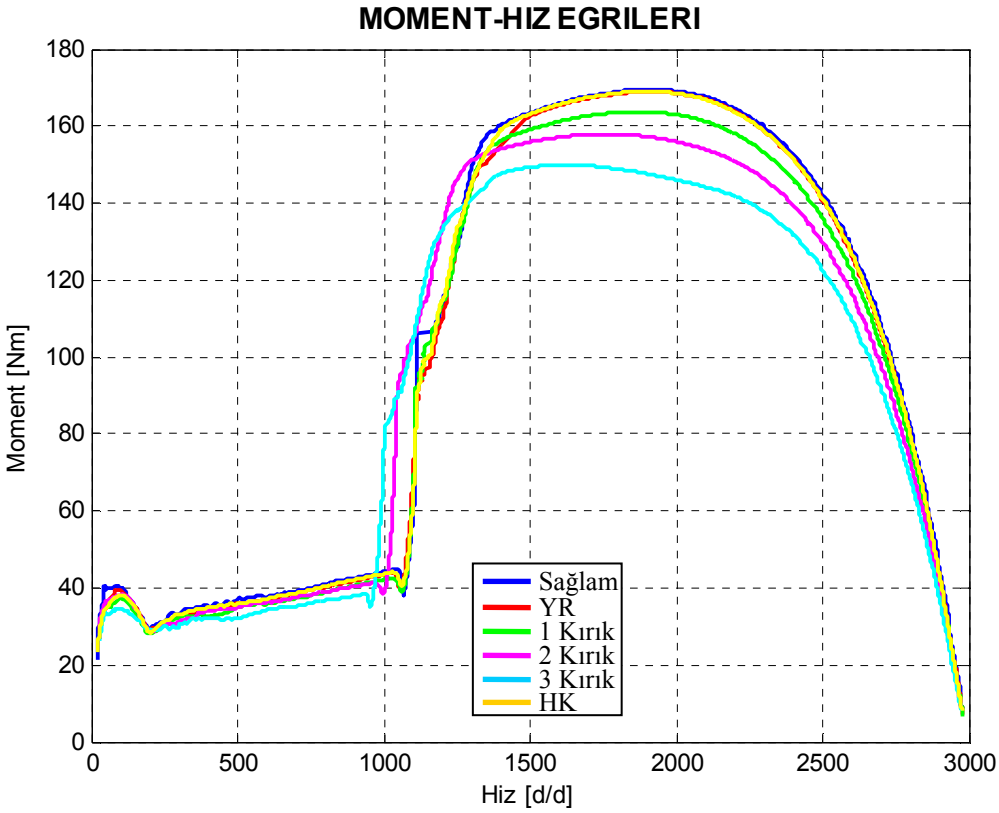
Motor karakteristik incelemesinde kullanılan önemli referanslardan birisi de hız-moment eğrisidir. Rotor arızalarının hız-moment eğrisi üzerindeki etkirini görmek için yapılan deneylerde yol alma sürecinde eş yamanlı olarak kaydedilen moment ve hız değerleri kullanılarak hız-moment eğrileri elde edilmiştir. Elde edilen deneysel hız-moment eğrileri Motor1 için Şekil 8.99'da, Motor2 için Şekil 8.100'de, Motor3 için Şekil 8.101'de ve Motor4 için Şekil 8.102'de verilmiştir. Hız-moment eğrilerinden devrilme moment değerleri ve kalkınma moment değerlerindeki değişmeler incelenmiştir. Motorların devrilme moment değerleri Çizelge8.1'de, kalkınma moment değerleri de Çizelge 8.2'de verilmiştir.



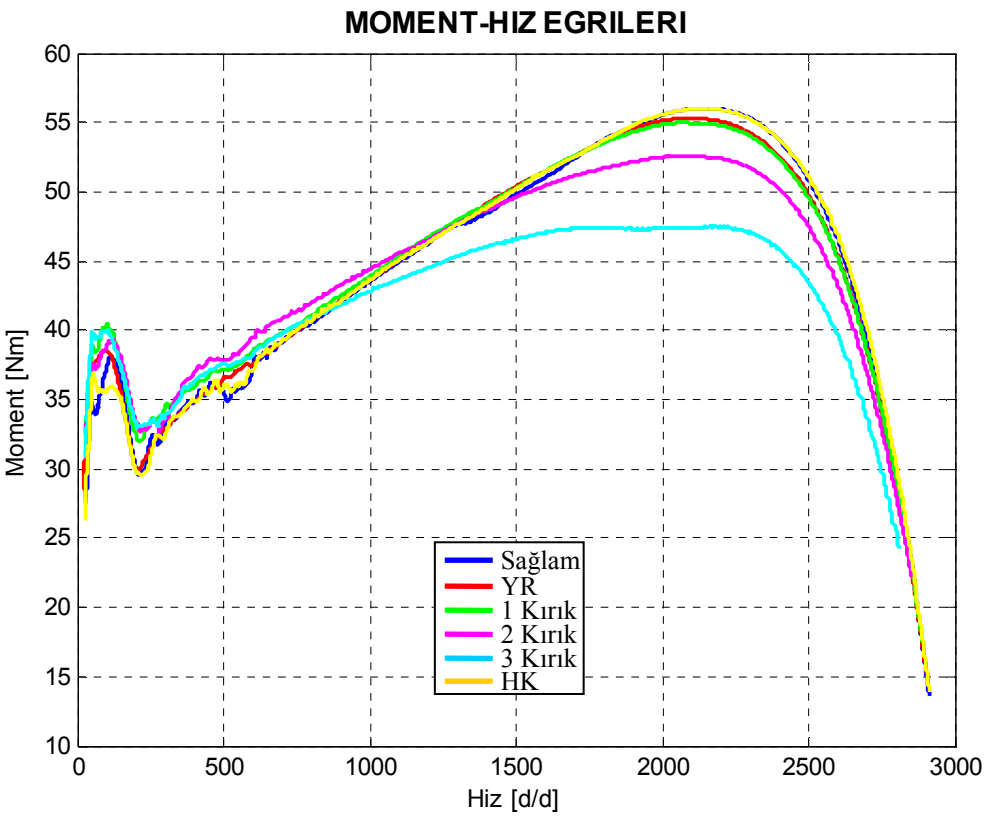
Şekil 8.99. Motor1 için arıza durumlarına göre çizilmiş deneysel hız-moment eğrileri.



Şekil 8.100. Motor2 için arıza durumlarına göre çizilmiş deneysel hız-moment eğrileri.



Şekil 8.101. Motor3 için arıza durumlarına göre çizilmiş deneysel hız-moment eğrileri.



Şekil 8.102. Motor4 için arıza durumlarına göre çizilmiş deneysel hız-moment eğrileri.

Çizelge 8.1. Hız-moment eğrisinden hesaplanan devrilme moment değerlerinin arızalara göre değişimi.

	Sa [Nm]	YR [Nm]	1k [Nm]	2k [Nm]	3k [Nm]	HK [Nm]
Motor1	241,5	239,0	234,4	220,4	214,0	225,9
Motor2	135,6	135,6	132,3	122,3	118,1	133,8
Motor3	169,6	169,0	163,8	157,9	150,0	169,0
Motor4	56,1	55,3	55,0	52,6	47,5	56,0

Çizelge 8.2. Hız-moment eğrisinden hesaplanan kalkınma moment değerlerinin arızalara göre değişimi.

	Sa [Nm]	YR [Nm]	1k [Nm]	2k [Nm]	3k [Nm]	HK [Nm]
Motor1	29,9	30,1	33,1	34,5	40,1	34,9
Motor2	14,5	14,6	17,1	17,9	21,1	14,9
Motor3	27,7	28,0	29,3	29,8	30,4	30,1
Motor4	38,1	39,7	40,6	41,0	42,4	41,8

9. BENZETİM VE DENEYSEL SONUÇLARIN ANALİZİ VE TARTIŞMA

Benzetimlerden ve deneylerden elde edilen motor çıktılarının grafikleri incelendiğinde (bkz. Bölüm 7 ve 8) rotor arızalarının motor değerlerine etkileri iki temel şekilde ortaya çıkmaktadır:

1. Zaman ekseninde dalgalanma,
2. Ortalama değerde düşme.

Motorların yol alma davranışlarının önemi göz önünde bulundurulduğunda motorların kararlı durumdaki davranışlarının yanında yolma sürecindeki davranışları da ayrıca incelenmiştir. Bunlara ek olarak motor kalitesi hakkında doğrudan bilgi vermesi açısından hız-moment eğrisi üzerindeki etkilerin incelemeleri de yapılmıştır.

9.1. Kararlı Durum Analizi

Motorların kararlı durumda çalışmaları esnasında elde edilen verilerde ilk göze çarpan; zaman eksenindeki dalgalanmaların artışıdır. Bu artış rotor kafes arızası büyüdükçe artmaktadır. Bu artışların oranlarının belirlenmesi için motor çıktılarından elde edilen grafiklerdeki dalgalanmalar rotor arızalarına göre her bir motor çıktısı için ayrı ayrı Denklem 4.1'e göre hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler benzetim ve deneysel sonuçlar için ayrı tablolarda gösterilmiştir.

9.1.1. Motor akımları

Motor akımlarındaki dalgalanmalar, benzetimlerden ve deneysel çalışmalardan elde edilen akımların her biri (bkz. Bölüm7 ve 8) için Denklem 4.1'e göre hesaplanmıştır. Hesaplama sonuçları benzetimler için Çizelge 9.1'de ve deneysel sonuçlar için Çizelge 9.2'de verilmiştir.

Çizelge 9.1. Kararlı durumda benzetimle elde edilen motor akımındaki dalgalanmalar.

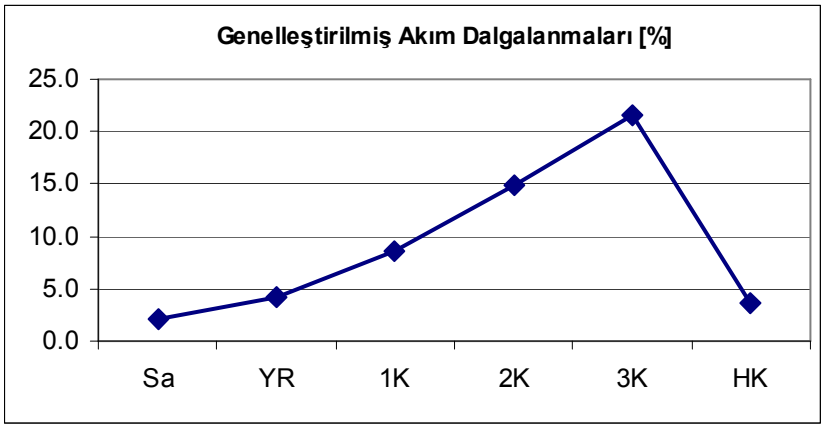
	Sağlam [%]	YR [%]	1K [%]	2K [%]	3K [%]
Motor1	2,7	6,1	10,4	19,8	26,9
Motor2	2,8	8,8	11,1	18,8	28,8
Motor3	3,2	3,6	7,5	14,9	21,9
Motor4	4,3	8,7	13,3	20,7	30,6

Çizelge 9.2. Kararlı durumda deneysel motor akımındaki dalgalanmalar.

	Sağlam [%]	YR [%]	1K [%]	2K [%]	3K [%]	HK [%]
Motor1	0,6	0,8	7,2	12,3	16,6	8,4
Motor2	1,8	2,0	6,0	14,6	17,6	3,2
Motor3	0,3	1,8	6,8	9,4	13,0	3,7
Motor4	1,3	1,3	5,7	8,4	16,5	1,3

Çizelgelerden açık olarak görülmektedir ki rotor arızası büyüdükçe akım dalgalanması artmaktadır. Artış doğrusal değildir. Arıza büyüdükçe dalgalılık daha fazla büyümektedir. Halka kırık arızasının belirtileri 1 kırık çubuk arızasına benzer etki göstermiştir. Motor akımındaki bu dalgalanmalar, motorun diğer çıkış parametrelerinin akımdan doğrudan etkilendiğinden dolayı motorun diğer çıktılarını da etkileyeceği açıktır.

Benzetimlerde ve deneylerde kullanılan motorlar için bir genelleştirme yapılarak etkilerin daha genel ifadesi elde edilebilir. Buna göre benzetim ve deneysel sonuçların dalgalanmalarının ortalaması alınarak elde edilen sonuçlarla oluşturulan grafik Şekil 9.1'de verilmiştir. Buradan arızaya göre artışın doğrusal olmadığı, eksponansiyel bir artışın olduğu doğrudan görülmektedir.



Şekil 9.1. Genelleştirilmiş arızalara göre motor akımı dalgalanması grafiği.

9.1.2. Motor momentleri

Kararlı durumda motor momentlerindeki dalgalanmalar, benzetimlerden ve deneysel çalışmalardan elde edilen moment değerlerinin her biri (bkz. Bölüm7 ve 8) için Denklem 4.1'e göre hesaplanmıştır. Motor momentlerindeki dalgalanmalar

benzetim sonuçları için Çizelge 9.3'de ve deneysel sonuçlar için Çizelge 9.4'de verilmiştir.

Çizelge 9.3. Kararlı durumda benzetimle elde edilen motor momentlerindeki dalgalanmalar.

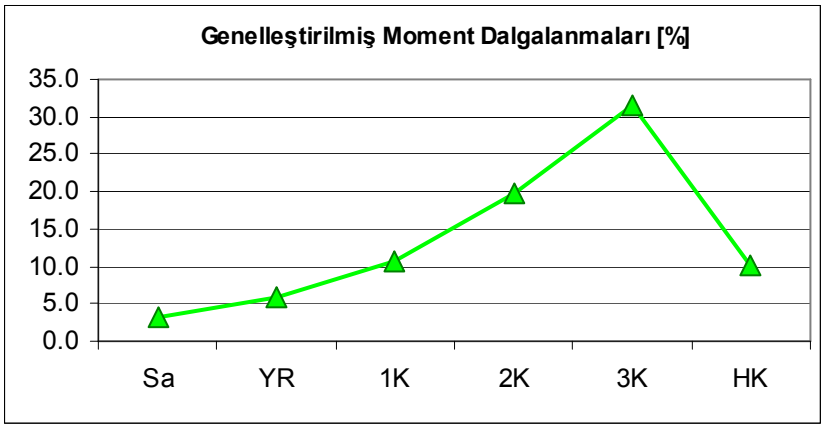
	Sağlam [%]	YR [%]	1K [%]	2K [%]	3K [%]
Motor1	0,3	4,9	10,0	21,6	35,0
Motor2	0,2	6,5	8,1	17,6	28,6
Motor3	0,4	3,7	7,2	14,9	23,6
Motor4	0,6	3,7	7,0	14,0	21,7

Çizelge 9.4. Kararlı durumda deneysel motor momentlerindeki dalgalanmalar.

	Sağlam [%]	YR [%]	1K [%]	2K [%]	3K [%]	HK [%]
Motor1	2,4	2,7	11,6	20,6	32,6	16,6
Motor2	4,0	3,4	10,2	22,2	35,6	6,8
Motor3	5,5	6,5	11,4	18,4	26,9	6,4
Motor4	11,3	15,1	20,4	28,4	47,8	11,0

Motor momentinde arıza büyüdükçe dalgalanmanın da arttığı görülmektedir. Özellikle 3 kırık çubuk arızası durumunda ciddi bir dalgalanmanın olduğu çizelgelerden görülmektedir. Artış doğrusal değildir. Arıza büyüdükçe dalgalılık daha fazla büyümektedir. Halka kırık arızasının belirtileri 1 kırık ile 2 kırık çubuk arızaları arasında bir etki göstermiştir.

Benzetimlerde ve deneylerde kullanılan motorlar için bir genelleştirme yapılarak etkilerin daha genel ifadesini elde etmek amacıyla benzetim ve deneysel sonuçların dalgalanmalarının ortalaması alınmıştır. Buna göre elde edilen sonuçlarla oluşturulan grafik Şekil 9.2'de verilmiştir. Dalgalanmalardaki artışın doğrusal olmadığı, arıza büyüdükçe dalgalanma artışının da arttığı görülmektedir.



Şekil 9.2. Genelleştirilmiş arızalara göre motor momentlerindeki dalgalanma oranları.

Momentteki bu dalgalanmalar doğrudan kararlı durumda motor momentlerinin ortalama değerlerini etkilemektedir. Bu etkileri belirlemek için her bir motor ve arıza durumu için moment verilerinin ortalamaları alınmıştır. Buna göre benzetimlerden ve deneysel çalışmalardan elde edilen moment değerlerinin (bkz. Bölüm 7 ve 8) ortalama değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan bu ortalama değerler benzetim için Çizelge 9.5'de ve deneysel sonuçlar için Çizelge 9.6'da verilmiştir.

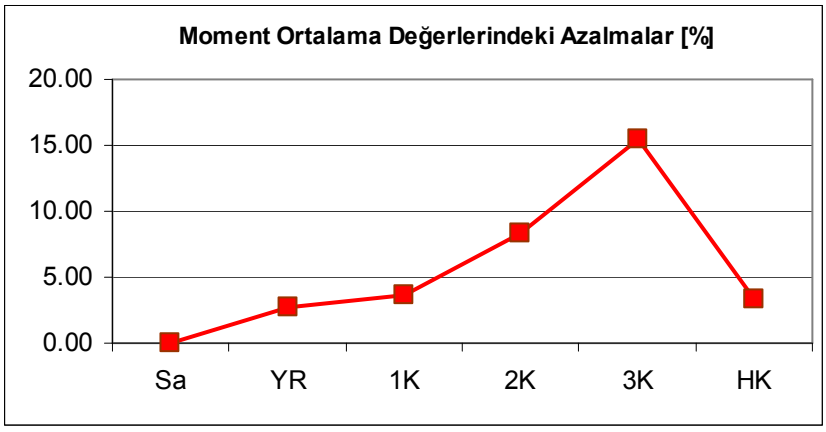
Çizelge 9.5. Benzetimle elde edilen motor momentlerinin ortalama değerlerinin arızalara göre değişimi.

	Sağlam [Nm]	YR [Nm]	1K [Nm]	2K [Nm]	3K [Nm]
Motor1	91,0	88,8	86,2	80,5	74,0
Motor2	83,5	80,4	79,5	74,3	68,2
Motor3	63,5	62,2	60,7	57,6	54,1
Motor4	27,0	26,5	25,9	24,6	23,2

Çizelge 9.6. Deneysel motor momentlerinin ortalama değerlerinin arızalara göre değişimi.

	Sağlam [Nm]	YR [Nm]	1K [Nm]	2K [Nm]	3K [Nm]	HK [Nm]
Motor1	85,9	80,8	79,8	76,7	72,2	78,2
Motor2	72,7	73,5	73,5	69,4	60,7	73,6
Motor3	55,2	52,8	54,2	54,2	50,9	54,0
Motor4	22,5	22,4	22,9	22,0	20,1	22,8

Motor momentinde, arıza büyüdükçe momentlerin ortalama değerlerinin azaldığı görülmektedir. Azalmaların daha iyi anlaşılması için benzetim ve deneysel sonuçlarının ortalamaları sağlam motor değerlerine göre değerlendirilip yüzde olarak ifade edilmiştir. Bu değerlere göre çizilen grafik Şekil 9.3'de verilmiştir. Buradan arızaya göre bir azalmanın olduğu ve azalma oranlarının doğrusal olmadığı görülmektedir.



Şekil 9.3. Ortalama moment değerlerindeki azalmanın genelleştirilmiş oranlarının arızalara göre gösterimi.

9.1.3. Motor hızları

Motor hızlarındaki dalgalanmalar, benzetimlerden ve deneylerden elde edilen hız değerlerinden (bkz. Bölüm 7 ve 8) Denklem 4.1 kullanılarak hesaplanmıştır. Hız dalgalanmaları benzetim için Çizelge 9.7'de ve deneysel sonuçlar için Çizelge 9.8'de verilmiştir.

Çizelge 9.7. Kararlı durumda benzetimle elde edilen motor hızlarındaki dalgalanmalar.

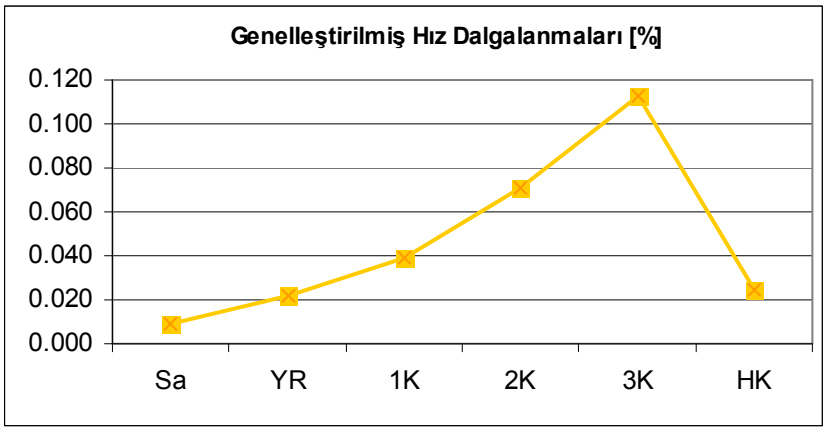
	Sağlam [%]	YR [%]	1K [%]	2K [%]	3K [%]
Motor1	0,002	0,024	0,050	0,115	0,193
Motor2	0,002	0,045	0,059	0,121	0,191
Motor3	0,013	0,029	0,072	0,119	0,222
Motor4	0,005	0,013	0,023	0,040	0,071

Çizelge 9.8. Kararlı durumda deneysel sonuçlara göre motor hızlarındaki dalgalanmalar.

	Sağlam [%]	YR [%]	1K [%]	2K [%]	3K [%]	HK [%]
Motor1	0,012	0,018	0,056	0,100	0,120	0,060
Motor2	0,018	0,016	0,018	0,032	0,056	0,012
Motor3	0,006	0,013	0,018	0,024	0,030	0,012
Motor4	0,013	0,013	0,015	0,016	0,018	0,014

Rotor arızası büyüdükçe hız dalgalanmasının da arttığı görülmektedir. Ancak bu artış çok küçük değerlerde kalmaktadır. Dalgalanmanın en büyük olduğu 3 kırık çubuk arızası için hız dalgalanması %0,12 civarlarındadır. İki kutuplu bir motor düşünüldüğünde bile bu orana karşılık gelen değer 3 d/d'ya ulaşmamaktadır. Bazı uygulamalar için devir sayısı çok önemli olsa da bu dalgalanma oldukça küçük olduğundan dolayı etkileri çok belirgin olmayacaktır. Halka kırık arızasının 1 kırık çubuk arızalarına yakın değerlerde bir etki göstermekte olduğu çizelgelerden görülebilir.

Rotor arızalarının motor hız dalgalanmalarına etkilerinin benzetim ve deneysel sonuçlar kullanarak daha genel bir ifadesi elde etmek amacıyla benzetim ve deneysel sonuçlarından elde edilen dalgalanma oranlarının ortalaması alınmıştır. Bu ortalama değerler ile oluşturulan grafik Şekil 9.4'de verilmiştir. Rotor arızalarından dolayı oluşan motor hızındaki bu dalgalanmalar her ne kadar küçük olsa da arızaya göre artış eksponansiyeldir.



Şekil 9.4. Genelleştirilmiş arızalara göre motor hızlarındaki dalgalanma oranları.

Motor hızlarındaki dalgalanmalar kendi ortalama değerlerini etkilemektedir. Benzetim ve deneysel hız verilerinden ortalama değerlerdeki arızaların etkilerini belirlemek için her bir motor durumu için hız verilerinin ortalamaları alınmıştır. Buna göre elde edilen ortalama değerler benzetim için Çizelge 9.9'da ve deneysel sonuçlar için Çizelge 9.10'da verilmiştir.

Çizelge 9.9. Benzetimle elde edilen motor hızlarının ortalama değerlerinin arızalara göre değişimi.

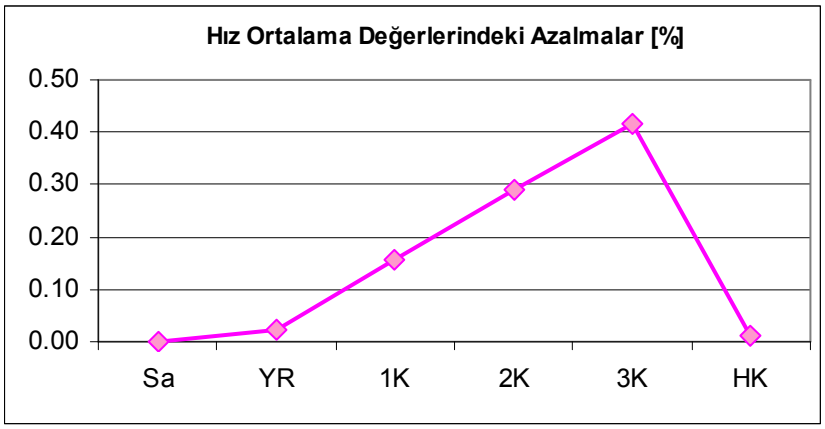
	Sağlam [d/d]	YR [d/d]	1K [d/d]	2K [d/d]	3K [d/d]
Motor1	2986	2978	2968	2919	2986
Motor2	2985	2977	2967	2918	2985
Motor3	2985	2977	2966	2916	2985
Motor4	2984	2975	2964	2911	2984

Çizelge 9.10. Deneysel motor hızlarının ortalama değerlerinin arızalara göre değişimi.

	Sağlam [d/d]	YR [d/d]	1K [d/d]	2K [d/d]	3K [d/d]	HK [d/d]
Motor1	2924	2921	2916	2917	2914	2921
Motor2	2878	2875	2871	2861	2855	2876
Motor3	2874	2873	2871	2862	2860	2873
Motor4	2868	2868	2856	2852	2846	2865

Rotor arızası büyüdükçe motor hızlarının ortalama değerlerinin azaldığı çizelgelerden görülmektedir. Azalmaların daha iyi anlaşılması için benzetim ve deneysel sonuçlarının ortalamaları sağlam motor değerlerine göre değerlendirilip yüzde olarak ifade edilmiştir. Buna göre elde edilen sonuçlarla oluşturulan grafik Şekil 9.5'de verilmiştir. Buradan ortalama değerdeki azalmanın arıza büyüdükçe çak daha fazla

azaldığı görülmektedir. Her ne kadar hızdaki dalgalanma küçük olsa da ortalama hız değerlerinde azalmanın %0,4 değerlerine kadar çıkması birçok uygulama için kritik öneme sahiptir. Bu değer iki kutuplu bir motor için yaklaşık 12 d/d yapmaktadır ki bazı uygulamalar için bu değer oldukça büyük bir değer olarak kabul edilebilir.



Şekil 9.5. Ortalama hız değerlerindeki azalmanın genelleştirilmiş oranlarının arızalara göre gösterimi.

9.1.4. Motor güç faktörleri

Benzetimlerden ve deneysel çalışmalardan elde edilen akım ve gerilim değerlerinden hesaplanan motor güç faktörleri (bkz. Bölüm 7 ve 8), rotor arızalarının güç faktörüne yaptığı dalgalanma etkilerini hesaplamak için kullanılmıştır. Dalgalanma değerleri Denklem 4.1'e göre hesaplanmış ve elde edilen dalgalanma oranları benzetimler için Çizelge 9.11'de ve deneysel sonuçlar için Çizelge 9.12'de verilmiştir.

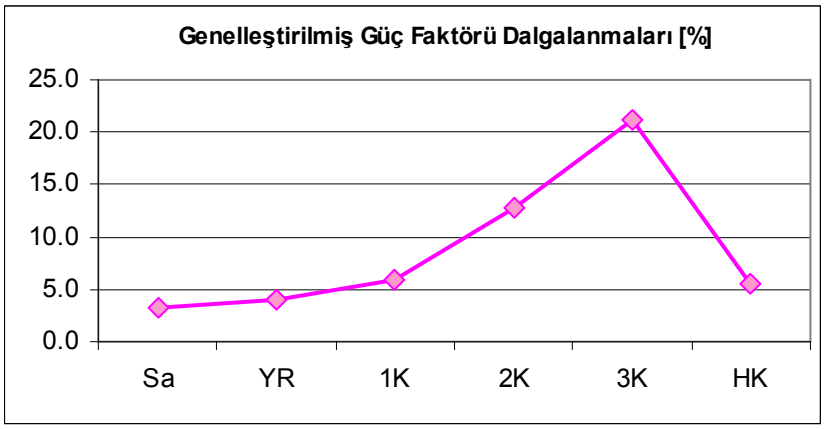
Çizelge 9.11. Kararlı durumda benzetimle elde edilen motor güç faktörlerindeki dalgalanmalar.

	Sağlam [%]	YR [%]	1K [%]	2K [%]	3K [%]
Motor1	1,0	2,9	5,2	12,8	21,6
Motor2	0,6	3,5	4,0	10,0	18,4
Motor3	3,1	1,6	3,4	10,3	17,7
Motor4	1,5	3,2	5,3	10,2	16,0

Çizelge 9.12. Kararlı durumda deneysel sonuçlara göre motor güç faktörlerindeki dalgalanmalar.

	Sağlam [%]	YR [%]	1K [%]	2K [%]	3K [%]	HK [%]
Motor1	4,6	4,6	9,3	22,5	36,6	9,3
Motor2	4,2	4,2	6,0	13,9	26,7	4,2
Motor3	5,6	5,6	8,0	11,2	16,8	5,6
Motor4	6,1	6,6	5,6	12,2	15,9	2,9

Motor güç faktörlerinde dalgalanmaların özellikle 3 kırık çubuk arızasında çok fazla arttığı çizelgelerden görülmektedir. Arıza büyüdükçe dalgalanmanın da arttığı ancak artışın doğrusallıktan çok uzak olduğu açıkça görülmektedir. Halka kırık arızasının belirtileri yüksek dirençli çubuk ile 1 kırık çubuk arızaları arasında bir değerde etki göstermektedir. Güç faktörlerinin dalgalanma değerlerinde daha genel bir ifade için benzetim ve deneysel sonuçlardan elde edilen dalgalanmaların ortalaması alınmıştır ve oluşturulan grafik Şekil 9.6'da verilmiştir. Rotor arızalarından dolayı oluşan motor güç faktörlerindeki bu dalgalanmaların doğrusal bir artışa sahip olmadığı, eksponansiyel bir artışın olduğu doğrudan görülmektedir.



Şekil 9.6. Arızalara göre motor güç faktörlerindeki genelleştirilmiş dalgalanma oranları.

Güç faktörlerindeki dalgalanmalar doğrudan kendi ortalama değerlerini etkilemektedir. Bu etkileri belirlemek için her bir motor ve arıza durumu için güç faktörü verilerinin ortalamaları alınmıştır. Buna göre elde edilen ortalama değerler benzetim için Çizelge 9.13'de ve deneysel sonuçlar için Çizelge 9.14'de verilmiştir.

Çizelge 9.13. Benzetimle elde edilen motor güç faktörlerinin ortalama değerlerinin arızalara göre değişimi.

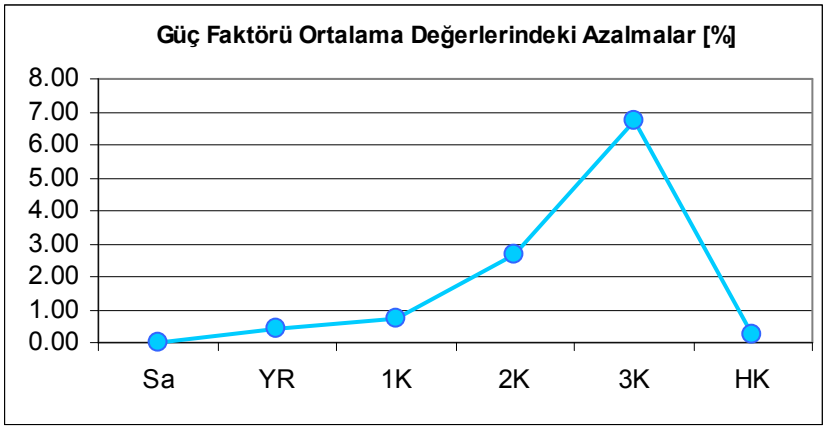
	Sağlam	YR	1K	2K	3K
Motor1	0,931	0,927	0,919	0,892	0,867
Motor2	0,940	0,935	0,932	0,915	0,888
Motor3	0,902	0,897	0,888	0,868	0,843
Motor4	0,897	0,894	0,889	0,875	0,856

Çizelge 9.14. Deneysel sonuçlara göre güç faktörlerinin ortalama değerlerinin arızalara göre değişimi.

	Sağlam	YR	1K	2K	3K	HK
Motor1	0,848	0,824	0,806	0,805	0,726	0,840
Motor2	0,876	0,876	0,880	0,865	0,774	0,877
Motor3	0,824	0,811	0,835	0,822	0,811	0,826
Motor4	0,805	0,787	0,824	0,796	0,786	0,812

Rotor arızalarının motor güç faktörlerinin ortalama değerlerine yaptığı etkilerin arıza büyüdükçe arttığı, arıza büyüdükçe ortalama değerlerinin azaldığı görülmektedir. Genel bir ifadenin elde edilmesi için Çizelge 9.13 ve Çizelge 9.14'deki ortalama değerler sağlam motor değerlerine göre oranlanarak yüzde olarak ifade edilmiştir. Bu şekilde elde edilen sonuçlar Şekil 9.7'de verilmiştir. Güç faktörlerinin ortalama değerlerindeki azalmanın arıza büyüdükçe eksponansiyel olarak azaldığı doğrudan görülmektedir.

Güç faktörleri üç kırık çubuk arızası için 0,7 değerlerine kadar düşmektedir. Bu durum motorun güç kalitesini etkilemektedir. Bu değer 50HP gibi büyük güçler düşünüldüğünde reaktif gücün değerini de oldukça büyütecektir.



Şekil 9.7. Ortalama güç faktörü değerlerindeki azalmanın genelleştirilmiş oranlarının arızalara göre gösterimi.

9.1.5. Motor mekaniki güçleri

Motor mekaniki güçlerindeki dalgalanmalar benzetim için Çizelge 9.15'de ve deneysel sonuçlar için Çizelge 9.16'de verilmiştir.

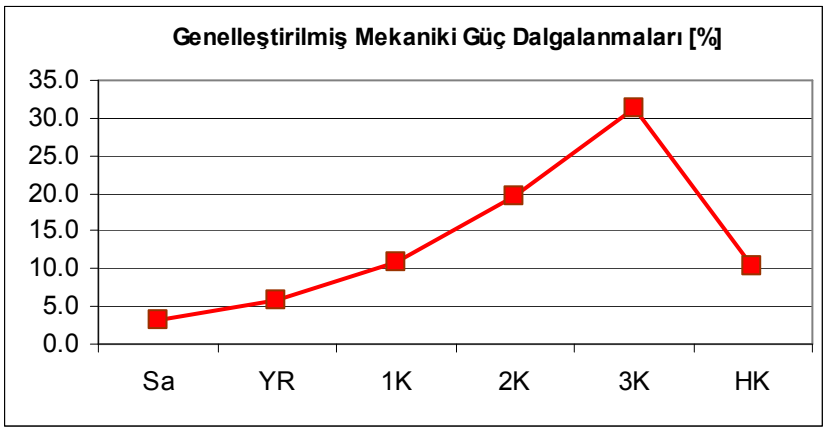
Çizelge 9.15. Kararlı durumda benzetimle elde edilen motor mekaniki güçlerindeki dalgalanmalar.

	Sağlam [%]	YR [%]	1K [%]	2K [%]	3K [%]
Motor1	0,3	4,9	10,0	21,6	35,0
Motor2	0,2	6,5	8,1	17,6	28,6
Motor3	0,4	3,7	7,2	14,9	23,6
Motor4	0,6	3,7	7,0	14,0	21,7

Çizelge 9.16. Kararlı durumda deneysel sonuçlara göre motor mekaniki güçlerindeki dalgalanmalar.

	Sağlam [%]	YR [%]	1K [%]	2K [%]	3K [%]	HK [%]
Motor1	2,6	2,9	11,7	20,6	32,3	16,7
Motor2	4,0	3,5	10,3	22,1	35,7	6,9
Motor3	5,6	6,7	11,5	18,6	26,9	6,4
Motor4	11,2	15,1	20,3	28,6	47,4	11,0

Mekaniki güçlerdeki dalgalanmaların arıza büyüdükçe arttığı görülmektedir. Bu artış doğrusala yakın olsa da tam olarak doğrusal değildir. Halka kırık arızasının belirtileri yüksek dirençli çubuk arızasına yakın ama halka kırık ile 1 kırık çubuk arızaları arasında bir değerdedir. Benzetimlerde ve deneylerde kullanılan motorlar için bir genelleştirme yapılarak etkilerin daha genel ifadesi elde edilmiştir. Bunun için benzetim ve deneysel sonuçların dalgalanmalarının ortalaması alınmıştır. Buna göre elde edilen sonuçlarla oluşturulan grafik Şekil 9.8'de verilmiştir.



Şekil 9.8. Arızalara göre motor mekaniki güçlerindeki genelleştirilmiş dalgalanma oranları.

Motor mekaniki güçlerindeki dalgalanmaların ortalama değerlerine etkilerini incelemek için deneylerden ve benzetimlerden elde edilen mekaniki güç değerlerinin (bkz. Bölüm 7 ve 8) her bir motor durumu için ortalamaları alınmıştır. Buna göre elde edilen ortalama değerler benzetim için Çizelge 9.17'de ve deneysel sonuçlar için Çizelge 9.18'da verilmiştir.

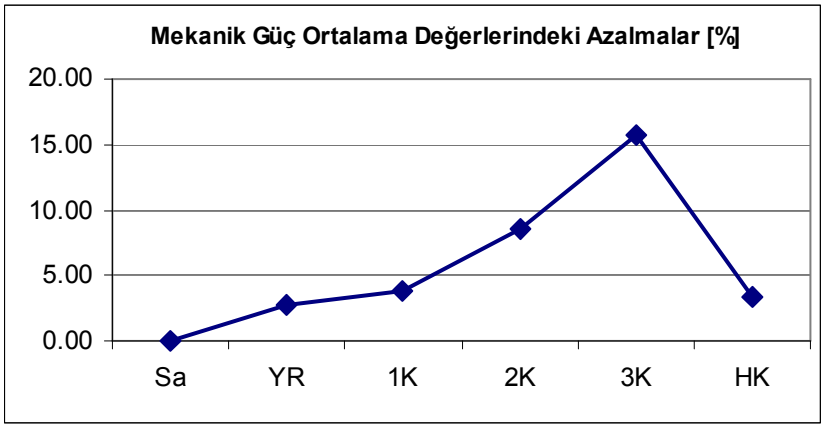
Çizelge 9.17. Benzetimle elde edilen motor mekaniki güçlerinin ortalama değerlerinin arızalara göre değişimi.

	Sağlam [W]	YR [W]	1K [W]	2K [W]	3K [W]
Motor1	27818	27147	26355	24601	22615
Motor2	25124	24215	23921	22360	20545
Motor3	19104	18722	18287	17344	16293
Motor4	8094	7945	7768	7384	6952

Çizelge 9.18. Deneysel sonuçlara göre ortalama mekaniki güç değerlerinin arızalara göre değişimi.

	Sağlam [W]	YR [W]	1K [W]	2K [W]	3K [W]	HK [W]
Motor1	26373	24845	24412	23487	22074	24000
Motor2	22002	22184	22158	20839	18338	22242
Motor3	16656	15960	16349	16291	15273	16318
Motor4	6799	6751	6840	6608	6015	6865

Rotor arızasının büyüklüğü arttıkça mekaniki güçlerin ortalama değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bu azalmalar hakkında genel bir ifadeye ulaşmak için benzetim ve deneysel sonuçlarının ortalamaları sağlam motor değerlerine oranlanmış ve yüzde olarak ifade edilmiştir. Elde edilen oranlar 9.9'da verilmiştir. Rotor arızası büyüdükçe motor mekaniki gücünde meydana gelen azalmanın çok daha fazla olduğu ve giderek daha fazla arttığı görülmektedir.



Şekil 9.9. Ortalama mekaniki güç değerlerindeki azalmanın genelleştirilmiş oranlarının arızalara göre gösterimi.

Motor mekaniki güçlerindeki ortalama değerdeki azalma üç kırık çubuk arızası için %15 değerlerine kadar ulaşmaktadır. Bu değer 50HP gibi büyük güçler düşünüldüğünde rotor arızası yüzünden 4000 W değerlerine ulaşan bir kayıp güç olacağı anlamına gelmektedir.

9.1.6. Motor verimleri

Motor verimlerindeki dalgalanmalar benzetimlerden ve deneylerden elde edilen giriş ve çıkış güçlerinden hesaplanan verim değerlerinden (bkz. Bölüm 7 ve 8) Denklem 4.1 kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplanan dalgalanma oranları benzetim için Çizelge 9.19'da ve deneysel sonuçlar için Çizelge 9.20'de verilmiştir.

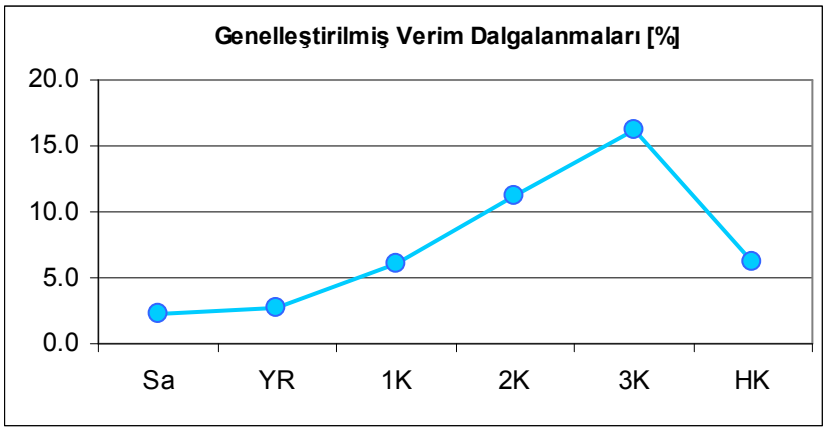
Çizelge 9.19. Kararlı durumda benzetimle elde edilen motor verimlerindeki dalgalanmalar.

	Sağlam [%]	YR [%]	1K [%]	2K [%]	3K [%]
Motor1	0,3	1,1	2,2	4,9	8,1
Motor2	0,2	1,5	1,9	4,4	7,3
Motor3	0,4	1,0	1,7	3,6	5,9
Motor4	0,7	1,3	2,0	3,9	6,1

Çizelge 9.20. Kararlı durumda deneysel sonuçlara göre motor verimlerindeki dalgalanmalar.

	Sağlam [%]	YR [%]	1K [%]	2K [%]	3K [%]	HK [%]
Motor1	5,1	5,6	15,4	24,4	32,8	12,7
Motor2	3,0	2,2	8,1	18,8	26,3	3,9
Motor3	3,2	5,4	8,2	13,0	19,4	3,5
Motor4	5,4	4,0	9,4	17,0	24,5	4,6

Motor verimlerindeki dalgalanmaların arıza büyüdükçe arttığı görülmektedir. Bu artış doğrusal değildir. Halka kırık arızasının belirtileri yüksek dirençli çubuk arızasına yakın değerlerde bir etki göstermektedir. Benzetimlerde ve deneylerde kullanılan motorlar için bir genelleştirme yapılarak etkilerin daha genel ifadesi elde edilmiştir. Bunun için benzetim ve deneysel sonuçların dalgalanmalarının ortalaması alınmıştır. Buna göre elde edilen sonuçlarla oluşturulan grafik Şekil 9.10'da verilmiştir. Rotor arızalarından dolayı oluşan motor verimlerindeki bu dalgalanmalar doğrusal olmayıp eksponansiyel bir artışa sahiptir.



Şekil 9.10. Arızalara göre motor verimlerindeki genelleştirilmiş dalgalanma oranları.

Verim için asıl önemli olan da ortalama değerdeki değişimdir. Rotor arızalarının motor verimlerinin ortalama değerlerine etkilerini incelemek için her bir motor durumu için deneysel ve benzetim verilerinden elde edilen motor verim değerlerinin (bkz. Bölüm 7 ve 8) ortalamaları alınmıştır. Elde edilen ortalama değerler benzetim için Çizelge 9.21'de ve deneysel sonuçlar için Çizelge 9.22'de verilmiştir.

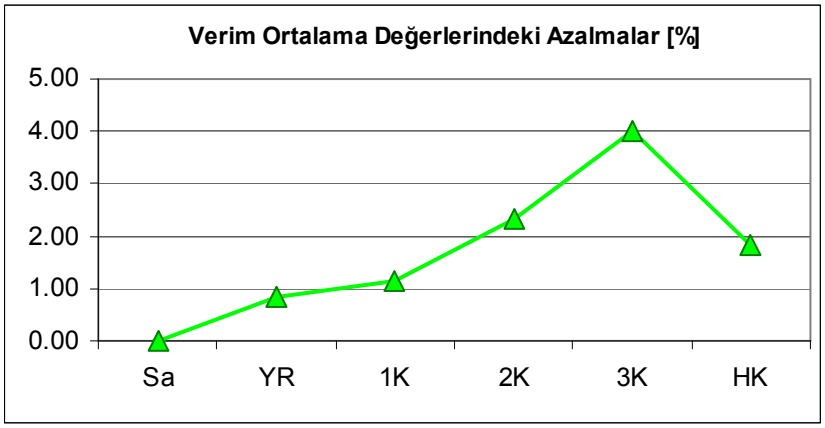
Çizelge 9.21. Benzetimle elde edilen motor verimlerinin ortalama değerlerinin arızalara göre değişimi.

	Sağlam [%]	YR [%]	1K [%]	2K [%]	3K [%]
Motor1	86,09	85,98	85,70	84,93	83,86
Motor2	81,84	81,80	81,69	81,14	80,29
Motor3	82,10	81,99	81,73	81,08	80,21
Motor4	81,12	81,07	80,85	80,30	79,54

Çizelge 9.22. Deneysel sonuçlara göre motor verimlerinin ortalama değerlerinin arızalara göre değişimi.

	Sağlam [%]	YR [%]	1K [%]	2K [%]	3K [%]	HK [%]
Motor1	85,4	82,7	82,4	82,2	78,5	81,0
Motor2	79,3	78,6	78,2	75,3	75,6	78,8
Motor3	76,6	76,3	76,7	76,0	72,7	75,7
Motor4	75,1	73,6	73,0	71,4	70,8	75,1

Arıza büyüdükçe verimlerin ortalama değerlerinin azaldığı görülmektedir. Azalmaların daha iyi anlaşılması için benzetim ve deneysel sonuçlarının ortalamaları sağlam motor değerlerine göre değerlendirilip yüzde olarak ifade edilmiştir. Buna göre elde edilen sonuçlar Şekil 9.11'de verilmiştir. Buradan arızaya göre azalmanın doğrusal olmadığı, arıza büyüklüğüne göre azalmanın değişiklik gösterdiği görülmektedir.



Şekil 9.11. Ortalama verim değerlerindeki azalmanın genelleştirilmiş oranlarının arızalara göre gösterimi.

9.2. Yol Alma Durumu Analizi

Bu çalışmada motorların yol alma davranışlarının önemli olmasından dolayı motorların yolma sürecindeki davranışları ayrıca incelenmelidir. Yol alma esnasında motorlardan alınan verilerde ilk göze çarpan moment ve akım değerlerindeki dalgalanmalardır. Rotor kafes arızası büyüdükçe dalgalanma artmaktadır. Bu artışların oranlarının belirlenmesi için motor akım, moment ve hız grafiklerindeki dalgalanmalar rotor arızalarına göre ayrı ayrı hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler benzetim ve deneysel sonuçlar için ayrı tablolarda verilmiştir.

8.2.1. Yol alma sürecinde motor akımları

Yol alma sürecinde motor akımlarındaki dalgalanmaların en büyük olduğu bölge için dalgalanmalar hesaplanmıştır. Hesaplamalar için Bölüm 7 ve 8'deki benzetim ve deneysel yol alma değerleri kullanılmıştır. Bu değerler benzetim için Çizelge 9.23'de ve deneysel sonuçlar için Çizelge 9.24'de verilmiştir.

Çizelge 9.23. Yol alma durumunda benzetimle elde edilen motor akımlarındaki dalgalanmalar.

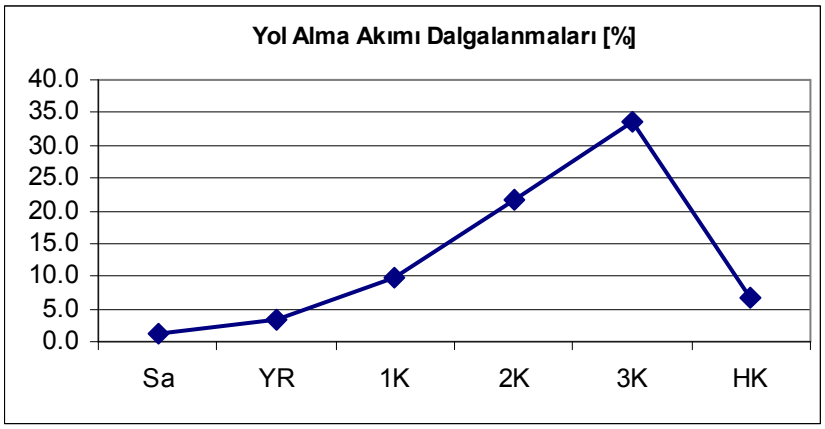
	Sağlam [%]	YR [%]	1K [%]	2K [%]	3K [%]
Motor1	2,1	5,5	9,4	23,2	36,1
Motor2	1,0	7,0	10,9	20,6	39,0
Motor3	3,9	4,5	11,9	23,9	37,1
Motor4	1,4	4,2	9,9	22,5	37,8

Çizelge 9.24. Yol alma durumunda deneysel sonuçlara göre motor akımlarındaki dalgalanmalar.

	Sağlam [%]	YR [%]	1K [%]	2K [%]	3K [%]	HK [%]
Motor1	0,0	0,4	10,7	24,2	32,7	18,0
Motor2	0,0	0,4	11,5	22,9	29,0	3,9
Motor3	0,0	2,0	4,2	18,9	28,4	1,6
Motor4	1,1	3,8	9,7	16,5	29,1	3,3

Yol alma sürecinde motor akımlarındaki dalgalanmaların arıza büyüdükçe arttığı görülmektedir. Bu artış doğrusal değildir. Halka kırık arızasının belirtileri yüksek dirençli çubuk arızasına yakın değerlerde bir etki göstermektedir.

Benzetimlerde ve deneylerde kullanılan motorlar için bir genelleştirme yapılarak rotor arızalarının motor momenti üzerine yaptığı etkilerin daha genel ifadesi elde edilmiştir. Bunun için benzetim ve deneysel sonuçların dalgalanmalarının ortalaması alınmıştır. Buna göre elde edilen sonuçlarla oluşturulan grafik Şekil 9.13'de verilmiştir. Yol alma esnasında rotor arızalarından dolayı oluşan motor momentlerindeki bu dalgalanmalar doğrusal olmayıp eksponansiyeldir.



Şekil 9.13. Yol alma sürecinde arızalara göre motor akımlarındaki genelleştirilmiş dalgalanma oranları.

Yol alma sürecindeki motor momentlerinde görülen bu dalgalanmalar motor ve bağlı bulunduğu sistemi olumsuz etkileyecektir. Bu etkiler gürültü ve titreşim olarak kendini gösterecektir. Üç kırık çubuk arızası durumunda dalgalanma değerlerinin %50 seviyelerine ulaşması bu durumun önemini ortaya koymaktadır.

9.2.2. Yol alma sürecinde motor momentleri

Yol alma sürecinde, motor moment verilerinde dalgalanmaların en büyük olduğu bölge için dalgalanmalar hesaplanmıştır. Bu değerler benzetim için Çizelge 9.25'de ve deneysel sonuçlar için Çizelge 9.26'da verilmiştir.

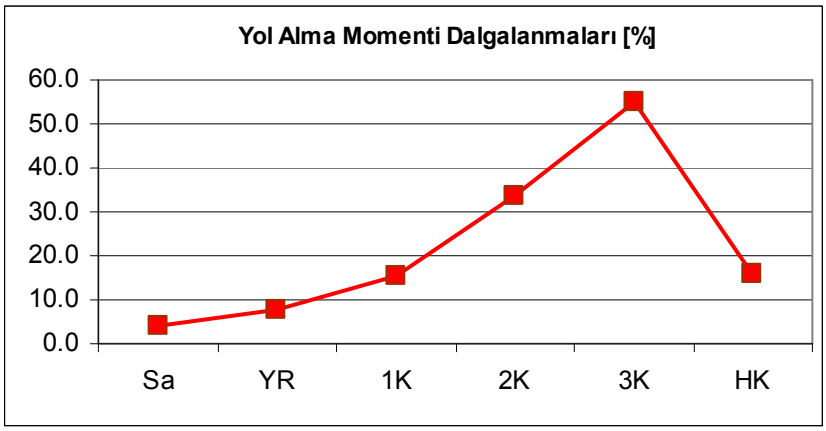
Çizelge 9.25. Yol alma durumunda benzetimle elde edilen motor momentlerindeki dalgalanmalar.

	Sağlam [%]	YR [%]	1K [%]	2K [%]	3K [%]
Motor1	1,2	3,5	12,1	26,2	43,4
Motor2	2,3	10,4	13,8	31,0	60,1
Motor3	4,1	12,1	16,0	26,5	45,1
Motor4	6,1	10,3	17,7	27,0	44,8

Çizelge 9.26. Yol alma durumunda deneysel sonuçlara göre motor momentlerindeki dalgalanmalar.

	Sağlam [%]	YR [%]	1K [%]	2K [%]	3K [%]	HK [%]
Motor1	2,1	2,6	16,4	48,0	66,7	42,4
Motor2	3,7	4,6	15,5	42,1	87,7	6,0
Motor3	5,3	7,5	10,6	32,5	40,0	5,2
Motor4	8,5	9,8	20,1	36,0	53,2	9,7

Rotor arızalarının yol alma sürecinde motor momentlerine yaptığı dalgalanma etkilerinin arıza büyüdükçe arttığı görülmektedir. Dalgalanmalardaki artış eksponansiyele yakındır. Halka kırık arızasının belirtileri yüksek dirençli çubuk arızasına yakın değerlerde bir etki göstermektedir. Yol alma sürecinde motor akımlarındaki dalgalanma oranlarında bir genelleştirme yapabilmek için benzetim ve deneysel sonuçların dalgalanmalarının ortalaması alınmıştır. Elde edilen dalgalanma oranları ile oluşturulan grafik Şekil 9.14'de verilmiştir. Yol alma esnasında rotor arızasının büyüklüğüne göre meydana gelen akımlarındaki dalgalanma artışlar eksponansiyel olarak artmaktadır.



Şekil 9.14. Yol alma sürecinde arızalara göre motor momentlerindeki genelleştirilmiş dalgalanma oranları.

Motor akımlarındaki bu dalgalanmalar doğrudan yol alma moment değerlerini de etkileyecektir. Buradaki salınımların büyük olması motor ve bağlı bulunduğu sistemin yol alma esnasında sarsıntılı ve gürültülü çalışmasına sebep olacaktır. Üç kırık çubuk arızası için dalgalanma değerleri % 35'ler seviyelerine ulaştığı görülmektedir. Bu oranlar sarsıntının boyutunu göstermektedir.

9.2.3. Yol alma sürecinde motor hızları

Yol alma sürecinde motor hız verilerinden elde edilen hız-zaman grafiklerinden (bkz. Bölüm 7 ve 8) arızalardan dolayı oluşan belirgin bir etkinin olmadığı görülmektedir. Akımdaki salınımların hıza yansıması olmamıştır. Dikkati çeken tek nokta arıza büyüdükçe motorun kararlı duruma yerleşme süresinin artmasıdır. Yol alma süresi düşünüldüğünde bu gecikme ihmal edilebilir düzeylerde kalmaktadır.

9.3. Hız-Moment Eğrisinin Analizi

Asenkron motorların devrilme momenti ve kalkınma momentleri motorun önemli parametrelerindendir. Bu sebeple bu doktora çalışmasında her bir motor için hız-moment eğrileri çizdirilerek bu parametreler incelenmiştir. Rotor kafes arızası büyüdükçe devrilme moment değerinin düştüğü net olarak ortaya konmuştur (bkz. Bölüm 7 ve 8). Kalkınma moment değerleri ise arıza büyüdükçe artmıştır ancak bu oranlar çok büyük değerlerde değildir. Bunlara ait hesaplanan değerler benzetim ve deneysel sonuçlar için ayrı tablolarda verilmiştir.

9.3.1. Devrilme momenti

Bölüm 7 ve 8'deki hız-moment eğrilerinden devrilme momenti eğerleri elde edilmiştir. Bu değerler benzetim için Çizelge 9.27'da ve deneysel sonuçlar için Çizelge 9.28'de verilmiştir.

Çizelge 9.27. Benzetimle elde edilen devrilme momentleri.

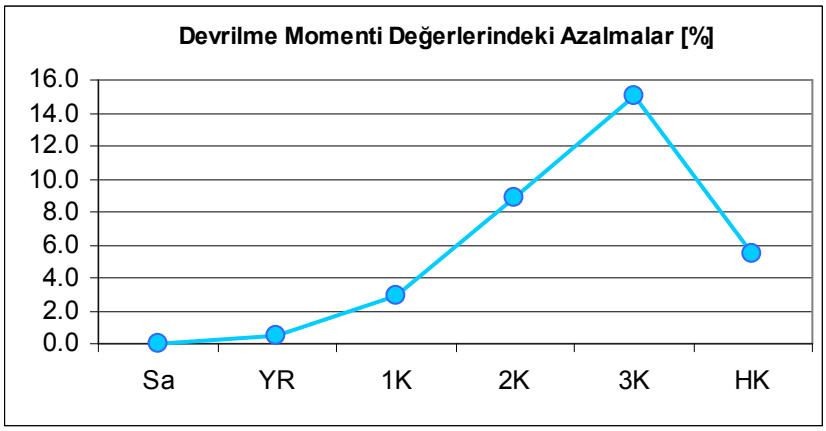
	Sağlam [Nm]	YR [Nm]	1K [Nm]	2K [Nm]	3K [Nm]
Motor1	261,4	261,5	252,6	233,5	209,9
Motor2	132,0	130,5	127,9	118,9	107,2
Motor3	187,2	185,9	182,4	172,6	158,4
Motor4	53,9	53,8	52,6	49,4	45,6

Çizelge 9.28. Deneysel sonuçlara göre devrilme momentleri.

	Sağlam [Nm]	YR [Nm]	1K [Nm]	2K [Nm]	3K [Nm]	HK [Nm]
Motor1	241,5	239,0	234,4	220,4	214,0	225,9
Motor2	135,6	135,6	132,3	122,3	118,1	133,8
Motor3	169,6	169,0	163,8	157,9	150,0	169,0
Motor4	56,1	55,3	55,0	52,6	47,5	56,0

Hız-moment eğrisi üzerinde devrilme momenti değerlerinin arıza büyüdükçe azaldığı görülmektedir. Bu azalma doğrusal değildir. Halka kırık arızasının belirtileri 1 kırık çubuk arızasına yakın değerlerde bir etki göstermektedir.

Benzetimlerde ve deneylerde kullanılan motorlar için bir genelleştirme yapılarak rotor arızalarının devrilme momenti üzerine yaptığı etkilerin daha genel ifadesi elde edilmiştir. Bunun için benzetim ve deneysel sonuçlarından hesaplanan devrilme momentlerinin ortalaması alınmıştır. Buna göre elde edilen sonuçlarla oluşturulan grafik Şekil 9.15'de verilmiştir. Devrilme momentlerindeki rotor arızalarından dolayı oluşan motor bu azalmanın doğrusal olmayıp eksponansiyel olduğu görülmektedir.



Şekil 9.15. Hız-moment eğrisindeki devrilme momentlerinin arızalara göre azalma oranları.

9.3.2. Kalkınma momenti

Hız-moment eğrisinden kalkınma momenti eğerleri elde edilmiştir. Bu değerler benzetim için Çizelge 9.29'da ve deneysel sonuçlar için Çizelge 9.30'da verilmiştir.

Çizelge 9.29. Benzetimle elde edilen kalkınma momentleri.

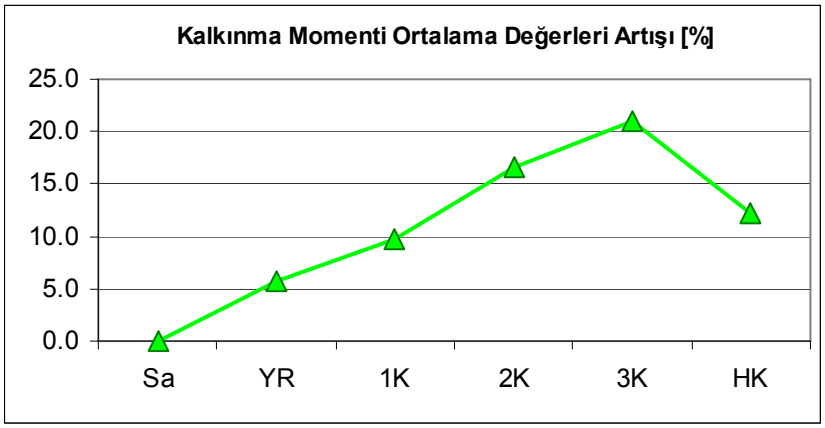
	Sağlam [Nm]	YR [Nm]	1K [Nm]	2K [Nm]	3K [Nm]
Motor1	111,2	122,0	127,2	133,0	133,2
Motor2	41,5	51,2	50,2	53,2	52,9
Motor3	128,5	129,2	132,0	141,7	145,2
Motor4	35,1	35,9	38,2	45,7	50,5

Çizelge 9.30. Deneysel sonuçlara göre kalkınma momentleri.

	Sağlam [Nm]	YR [Nm]	1K [Nm]	2K [Nm]	3K [Nm]	HK [Nm]
Motor1	29,9	30,1	33,1	34,5	40,1	34,9
Motor2	14,5	14,6	17,1	17,9	21,1	14,9
Motor3	27,7	28,0	29,3	29,8	30,4	30,1
Motor4	38,1	39,7	40,6	41,0	42,4	41,8

Deneysel kalkınma momentlerinin düşük olmasının sebebi deneysel çalışmalarda motorlara yıldız-üçgen yol verilerek çalıştırmalarıdır. Kalkınma momenti değerlerinin arıza büyüdükçe arttığı görülmektedir. Bu durumun en belirgin sebebi kırılan motorun rotor direncini yükseltmesidir. Arızalara göre kalkınma momentlerinde oluşan bu artış doğrusala yakındır. Halka kırık arızasının belirtileri 2 kırık çubuk arızasına yakın değerlerde bir etki göstermektedir.

Rotor arızalarının kalkınma moment değerine yaptığı etkilerde bir genelleştirme yapmak için benzetim ve deneysel sonuçlarından hesaplanan kalkınma momentlerinin ortalaması alınmıştır. Elde edilen ortalama kalkınma moment değerleri Şekil 9.16'da verilmiştir. Kalkınma momentlerindeki rotor arızalarından dolayı oluşan motor bu azalmanın doğrusala yakın bir artış gösterdiği grafikten görülmektedir.



Şekil 9.16. Hız-moment eğrisindeki kalkınma momentlerinin arızalara göre yükselme oranları.

10. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında sincap kafesli asenkron motorda meydana gelen rotor kafesi arızalarının motor performansına etkileri analiz edilmiştir. Sağlam ve beş farklı rotor arızası durumları için incelemeler hem benzetim hem de deneysel veriler kullanılarak yapılmıştır. Kararlı durum davranışları, yol alma süreci ve hız-moment eğrisi için analizler yapılmıştır. Kararlı durumda motor performansı kapsamında motor akımı, momenti, devir sayısı, güç faktörü, mekaniki gücü ve verimi değerlendirilmiştir. Yol alma sürecinde motor akımı, momenti ve hızı değerlendirilmiştir. Hız moment eğrisinde ise kalkınma momenti ve devrilme momentleri incelenmiştir.

Asenkron motorun kararlı durumda elde edilen benzetim ve deneysel sonuçlarının analizi Bölüm 9'da her bir motor için benzetim ve deneysel sonuçlar ayrı ayrı incelenmiştir. Yapılan incelmeler sonucunda rotor arızalarının etkilerine motor kararlı durum çalışmasına iki şekilde yansıdığı görülmüştür:

1. Motor çıktılarında dalgalanma,
2. Motor çıktılarının ortalama değerlerinde azalma.

Benzetim ve deneysel sonuçlar kullanarak genel bir ifadeye ulaşılmıştır. Rotor arızalarının büyüklüklerine göre motor performansına yaptığı etkiler hem dalgalanma hem de ortalama değerlerdeki değişmeler ortalama olarak belirlenmiştir. Arızaların motor çıktılarında yaptığı dalgalanma etkileri Çizelge 10.1'de verilmiştir.

Çizelge 10.1. Rotor arızalarının motor performansına yaptığı dalgalanma etkilerinin ortalama değerleri.

	Sağlam [%]	**YR [%]**	**1K [%]**	**2K [%]**	**3K [%]**	**HK [%]**
Akım Dalgalanmaları	2,1	4,1	8,5	14,9	21,5	3,6
Mekanik Güç Dalgalanmaları	3,1	5,9	10,8	19,7	31,4	10,2
Moment Dalgalanmaları	3,1	5,8	10,7	19,7	31,5	10,2
Verim Dalgalanmaları	2,3	2,8	6,1	11,2	16,3	6,2
Güç Faktörü Dalgalanmaları	3,3	4,0	5,8	12,9	21,2	5,5
Hız Dalgalanmaları	0,009	0,021	0,039	0,071	0,113	0,024

Arıza büyüdükçe dalgalanmanın arttığı açıkça görülmektedir. Ancak bu artış doğrusal değildir. Arıza büyüdükçe dalgalanma eksponansiyel olarak artmaktadır. Bu artışın büyüklüğü motor çıktısına göre değişmektedir. Dalgalanma en çok motor momentinde ve mekaniki güçte görülmektedir. Motor hızında ise dalgalanma çok küçük değerlerde kalmıştır. Elde edilen maksimum dalgalanma düşünüldüğün de bile

iki kutuplu motor için bu değere karşılık gelen devir yaklaşık 4 d/d olmaktadır. Rotor arızalarının rotor hızında önemsenecek bir dalgalanma etkisi oluşturmadığı söylenebilir.

Mekaniki güç ve motor momentindeki dalgalanmalar oldukça önemli değerlerdedir. Bu dalgalanmalar doğrudan motorun bağlı bulunduğu sistemi olumsuz etkileyeceğinden kötü sonuçlar oluşturacaktır.

Güç faktörü ve verimdeki dalgalanmaların değerleri 3 kırık çubuk arızası durumunda önemsenecek büyüklüklere ulaşmaktadır. Güç faktörü ve verimdeki dalgalanmalar motora doğrudan bir etki yapmayacaktır. Ancak dalgalanmalardan dolayı ortalama değerlerinde değişmeler olduğu benzetim ve deneysel sonuçlarından hesaplanan değerlerden görülmüştür. Arızalara göre motor çıktılarının ortalama değerlerinde meydana gelen ortalama azalma değerleri Çizelge 10.2'de verilmiştir.

Çizelge 10.2. Rotor arızalarının motor çıktılarına yaptığı genelleştirilmiş ortalama azalma miktarları.

	Sağlam [%]	**YR [%]**	**1K [%]**	**2K [%]**	**3K [%]**	**HK [%]**
Mekanik Güç	0,00	2,76	3,87	8,59	15,70	3,35
Moment	0,00	2,75	3,68	8,36	15,53	3,28
Verim	0,00	0,85	1,13	2,34	4,02	1,83
Güç Faktörü	0,00	0,40	0,72	2,65	6,75	0,27
Hız	0,00	0,02	0,16	0,29	0,41	0,01

Motorun momenti ve mekaniki gücü önemli ölçüde azalmaktadır. Üç kırık arızasında bu değer %15'ler seviyesine çıkmaktadır ki bu değer 50 HP'lik motorda arıza büyüdükçe yaklaşık 4000W'lık bir gücü üretemediği anlamına gelmektedir. Mekaniki gücün düşmesi girişten çekilen gücüde düşürecektir. Ancak verim sonuçları bunun aynı oranda olmadığını yine üç kırık çubuk arızası durumunda verim kayıplarının %4 civarında azaldığını göstermektedir. Bu değer büyük güçlü motorlar düşünüldüğünde oldukça büyük bir enerji kaybı anlamına gelmektedir.

Rotor arızalarından dolayı motor hızının ortalama değerinin düştüğü benzetim ve deneysel sonuçlardan görülmektedir. Azalma her ne kadar 3 kırık arızasında bile %0,4 seviyesinde olsa bile iki kutuplu motor için bu değer yaklaşık 12 d/d'ya karşılık gelmektedir. 12 d/d değeri bazı uygulamalar için önem arz etmektedir.

Motor yol alma sürecinden elde edilen benzetim ve deneysel sonuçlar incelendiğinde temel etkinin dalgalanma olduğu çok açık olarak görülmektedir (bkz Bölüm 7.2 ve 8.2). Sonuçlardan hesaplanan ortalama dalgalanma değerleri Çizelge 10.3'de verilmiştir.

Çizelge 10.3. Rotor arızalarının motor yol alma sürecinde akım ve momentte meydana getirdiği genelleştirilmiş dalgalanma oranları.

	Sağlam [%]	**YR [%]**	**1K [%]**	**2K [%]**	**3K [%]**	**HK [%]**
Kalkınma Akımı Dalgalanmaları	1,2	3,5	9,8	21,6	33,6	6,7
Kalkınma Momenti Dalgalanmaları	4,2	7,6	15,3	33,7	55,1	15,8

Yol alma sürecindeki momentte meydana gelen dalgalanmanın sarsıntıya sebep olacağı açıktır. Bu sarsıntı özellikle mekanik baskılara sebep olacak bu da hem motoru hem de bağlı bulunduğu sistemi zorlayacaktır. Dalgalanmalar motor akımı ve momentinde çok belirgin iken motorun hızına aynı oranda yansımamaktadır.

Ayrıca arıza büyüdükçe motorun kararlı duruma oturma süresi uzamaktadır. Ancak bu uzama süresi yol alma süresi düşünüldüğünde çok küçük kaldığından herhangi bir özür teşkil etmemektedir.

Motor yol alma sürecinde alınan veriler kullanılarak hız-moment eğrileri elde edilmiştir. Bu eğriler vasıtasıyla motorun kalkınma moment değerleri ile devrilme moment değerleri incelenmiştir (bkz Bölüm 7.3 ve 8.3). Eğrilerden hesaplanan ortalama kalkınma ve devrilme moment değerleri Çizelge 10.4'de verilmiştir.

Çizelge 10.4 Rotor arızalarının motor yol alma sürecinde hız-moment eğrisinde kalkınma ve devrilme momenti üzerinde meydana getirdiği genelleştirilmiş ortalama değişme oranları.

	Sağlam [%]	**YR [%]**	**1K [%]**	**2K [%]**	**3K [%]**	**HK [%]**
Kalkınma Momenti Ort. Değ. **Artma**	0,0	5,7	9,7	16,5	21,0	12,2
Devrilme Momenti Ort. Değ. **Azalma**	0,0	0,5	2,9	8,9	15,1	5,5

Rotor arızası büyüdükçe kalkınma moment değerinin artığı çizelgeden görülmektedir. Bu her ne kadar olumlu bir etki olsa da arıza sonucunda oluşmasından dolayı hiçbir önemi yoktur.

Devrilme momenti ise kalkınma momentinin aksine arıza büyüdükçe azalmaktadır. Motor kalite ölçütünün parametrelerinden biri olması sebebiyle devrilme momentindeki arızalardan dolayı oluşan bu düşme istenmeyen bir durumdur. Hız-moment eğrisi düşünüldüğünde devrilme momentindeki düşme doğrudan çalışma noktasını da sola kaydıracağından dolayı motorun performansını olumsuz yönde

etkilemektedir. Bu durumun arıza büyüdükçe arttığı Çizelge 10.4'den açıkça görülmektedir.

Kısa devre halkası kırık arızasının belirtileri ve motor performansına etkileri, hem kararlı durum hem de yol alma sürecinde bir çubuğu yüksek dirençli ile bir kırık çubuklu rotor arızaları arasında bir etki göstermektedir. Yapılan çalışmada rotordaki tek tarafta sadece iki çubuk arasındaki halka kısmı kırılmıştır. Bu kırık sayısının artması veya diğer tarafta da kırık oluşması arızayı büyütecektir. Böylece daha büyük değerde etkiler gösterecektir.

Bu çalışmada, motor hızının elde edilmesinde kullanılan HFD yönteminin sonuçlarının daha doğru ve zamanla hız değişimi izlenebilirliğinin gerçeğe daha yakın olduğunu göstermiştir. Dolayısıyla bu yöntemin bu tür deneysel çalışmalarda kullanılabileceğini ayrıca göstermiştir.

Bunlara ek olarak bu çalışma, benzetimlerde derin kuyu pompalarının mil malzemesinin seçiminde manyetik malzeme seçilmesi gerekliliğini benzetim ve deneysel sonuçlarla göstermiştir.

Yapılan bu çalışma rotor arızasına göre motor performansında meydana gelen değişmeleri net olarak kademelendirmiştir. Bu etkiler gösteriyor ki arıza büyüdükçe arızanın motor performansına yaptığı olumsuz etkiler de büyümektedir. Rotor arızalarının motor çalıştıkça mekanik ve elektromanyetik baskılardan dolayı giderek büyüdüğü göz önüne alınırsa; motorda rotor arızası oluştuktan sonra arıza giderek büyüyeceğinden performansı giderek kötüleşecektir. Bu sebeple arıza olabildiğince erken teşhis edilmelidir.

Bu çalışmanın bir diğer faydası da erken teşhis için rotor arızalarının motor çıktılarına etkilerini ortaya koymuş olmasıdır. Bu etkilerden faydalanılarak arıza teşhisi için uygun belirti ve yöntem seçimi yapmak için bir yol gösterici olacaktır.

Benzetimlerde ve deneylerde derin kuyu asenkron motorları kullanılmış ve bunların analiz sonuçları ile genelleştirmeler yapılmıştır. Yapılan bu genellemeler derin kuyu asenkron motorları kapsamında kalmıştır. Daha geniş kapsamlı bir genelleme için diğer tip asenkron motorlardan veri alınarak performans analizi yapılmalıdır.

Deneysel çalışmalarda motor hızı ölçümü için bu çalışmada HFD kullanılarak iyi sonuçlar alınmıştır. Hızdaki dalgalanmaların maksimum 4 d/d gibi küçük değerlerde olduğu görülmektedir. Küçük arızalarda bu değer daha da küçülmektedir. Bu dalgalanmaları daha belirgin hale getirebilmek için kullanılacak sensörde çentik sayısının yüksek olanı tercih edilmesi hem dalgalanmayı doğrulama hem de değişimi

daha net görmeyi olanaklı hale getirecektir. Ayrıca çentikli hız sensörünün yanında takojeneratörlü hız sensörü de beraber kullanılarak hız değişimleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilebilir.

KAYNAKLAR

Abbaszadeh, K., Milimonfared, J., Haji, M. ve Toliyat, H.A., 2001, Broken Bar Detection in Induction Motor via Wavelet Transformation, *The 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society- IECON'01*, 95-99.

Agarwal, P. D., 1960, Equivalent Circuits ve Performance Calculations of Canned Motors, *on Power Apparatus and Systems Part-III Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 79 (3), 635-642.

Arabaci, H. ve Bilgin, O., 2010, Automatic Detection ve Classification of Rotor Cage Faults in Squirrel Cage Induction Motor, Neural Computing And Applications, 19 (5), 713-723.

Ayhan, B., Chow, M. ve Song, M., 2005, Multiple Signature Processing-Based Fault Detection Schemes for Broken Rotor Bar in Induction Motors, *IEEE Transactions On Energy Conversion*, 20 (2), 336-343.

Bacha, K., Gossa, M. ve Capolino, G.-A., 2004, Diagnosis of Induction Motor Rotor Broken Bars, *IEEE International Conference on Industrial Technology*, Hammamet-Tunisia, 979-984.

Bachir, S., Tnani, S., Trigeassou, J.C. ve Champenois, G., 2006, Diagnosis by Parameter Estimation of Stator and Rotor Faults Occurring in Induction Machines, *IEEE Transactions on Industrıal Electronics*, 53 (3), 963-973.

Baldassari, P. ve Demerdash, N.A., 1992, A combined finite element-state space modeling environment for induction motors in the ABC frame of reference: the blocked-rotor and sinusoidally energized load conditions, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 7 (4), 710-720.

Bangura, J. F. ve Demerdash, N.A., 1999, Diagnosis and Characterization of Effects of Broken Bars and Connectors in Squirrel-Cage Induction Motors by a Time-Stepping Coupled Finite Element-State Space Modeling Approach, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 14 (4), 1167-1176.

Benbouzid, M.E.H., A Review of Induction Motors Signature Analysis as a Medium for Faults Detection, *24th IEEE Annual Conference-IECON '98*, 1950-1955.

Benbouzid, M.E.H. ve Klimam, G.B., 2003, What stator current processing-based technique to use for induction motor rotor faults diagnosis?, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 18 (2), 238-244.

Boldea, I. ve Nasar, S.A., 2002, The Induction Motor Handbook, *PRC Press LLC*, Florida-Boca Raton, 1-3.

Bonnett, A.H. ve Soukup, G.C., 1992, Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors, *IEEE Transactions on Industry Applications,* 28 (4), 921–937.

Branco, P.J.C., Dente, J.A. ve Mendes, R.V., 2003, Using Immunology Principles for Fault Detection, *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, 50 (2), 362-373.

Casimir, R., Boutleux, E., Clerc, G. ve Chappuis, F., 2003, Broken bars detection in an induction motor by pattern recognition, *IEEE Bologna PowerTech Conference*, Bologna-Italy, 1-7.

CEDRAT, 2005, Flux induction motor with skewed rotor technical paper, Fransa, 8-12.

Costa, F.F., Almeida, L.A.L., Naidu, S.R. ve Braga-Filho, E. R., 2004, Improving the Signal Data Acquisition in Condition Monitoring of Electrical Machines, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 53 (4), 1015-1019.

Cupertino, F., Vanna, E., Salvatore, L. ve Stasi, S., 2003, Comparison of Spectral Estimation Techniques Applied to Induction Motor Broken Bars Detection, *Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives*, Atlanta-USA, 129-134.

Cusido,J., Romeral, L., Ortega, J.A., Rosero, J.A. ve Espinosa, A.G., 2008, Fault Detection in Induction Machines Using PowerSpectral Density in Wavelet Decomposition, *IEEE Transactions on Industrıal Electronics*, 55 (2), 633-643.

De Angelo, C.H., Bossio, G.R. ve G.O. Garcia, 2010, Discriminating broken rotor bar from oscillating load effects using the instantaneous active and reactive powers, IET Transactions on Electric Power Applications, 4 (4), 281-290.

Devanneaux, V., Kabbaj, H., Dagues, B. ve Faucher, J., 2001, An Accurate Model of Squirrel Cage Induction Machines Under Rotor Faults, *Fifth International Conference on IEEE Electrical Machines and Systems-ICEMS 2001*, 384–387.

Didier, G., Ternisien, E., Caspary, O. ve Razik, H., 2001, A new approach to detect broken rotor bars in induction machines by current spectrum analysis, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 21 (2), 1127–1142.

Didier, G., Ternisien, E., Caspary, O. ve Razik, H., 2006, Fault Detection of Broken Rotor Bars in Induction Motor Using a Global Fault Index, *IEEE Transactions On Industry Applications*, 42 (1), 79-88.

Faiz, J., Ebrahimi, B.M. ve Toliyat, H.A., 2007, Signature Analysis of Electrical and Mechanical Signals for Diagnosis of Broken Rotor Bars in an Induction Motor, *Taylor&Francis Electromagnetics*, 27, 507–526.

Faiz, J. ve Ebrahimi, B.M., 2008, A New Pattern for Detecting Broken Rotor Bars in Induction Motors During Start-Up, *IEEE Transactions on Magnetics*, 44 (12), 4673-4683.

Faiz, J., Ebrahimi, B.M., Akin, B. ve Toliyat, H.A., 2008, Finite-Element Transient Analysis of Induction Motors Under Mixed Eccentricity Fault, *IEEE Transactions on Magnetics*, 44 (1), 66-74.

Faiz, J. ve Ebrahimi, B.M., 2009, Locating rotor broken bars in induction motors using finite element method, *Energy Conversion and Management*, 50, 125-131.

Fiser, R., Ferkolj, S. Ve Solinc, H., 1995, Steady State Analysis of Induction Motor with Broken Rotor Bars, *Seventh International Conference on Electrical Machines and Drives* , 42-46.

Haji, M. ve Toliyat, H.A., 2001, Pattern recognition – a technique for induction machines rotor fault detection 'Eccentricity and broken bar fault', *Thirty-Sixth IAS Annual Meeting IEEE Industry Applications Conference*, Illinois-USA, 1572-1578.

Hugo, R.C., Hadjicostis, C.N. ve Stankovic, A.M., 2004, Model-Based Broken Rotor Bar Detection on an lFOC Driven Squirrel Cage Induction Motor, *Proceeding of the 2004 American Control Conference*, Boston-USA , 3094-3099.

Ito, M., Fujimoto, N., Okuda, H., Takahashi, N. ve Miyata, T., 1981, Analytical Model for Magnetic Field Analysis of Induction Motor Performance, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-100 (11), 4582-4590.

Kim, K., Parlos, A.G. ve Bharadwaj, R.M., 2003, Sensorless Fault Diagnosis of Induction Motors, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 50 (5), 1038-1051.

Li, X. ve Wu, Q., 2007, Performance Analysis of a Three-Phase Induction Machine With Inclined Static Eccentricity, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 43 (2), 531-541.

Liang, B., Ball, A.D. ve Iwnicki, S.D., 2002, Simulation And Fault Detection of Three-Phase Induction Motors, *IEEE TENCON'02*, Beijin-China, 1-5.

Luo, X., Liao, Y., Toliyat, H.A., El-Antably, A. ve Lipo, T.A., 1995, Multiple couple circuit modelling of induction machines, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 31 (4), 311–318.

Menolas, ST.J. ve Tegopoulos, J.A., 1999, Analysis of Squirrel Cage Induction Motors with Broken Bars and Rings, *IEEE Transactions on Enegy Conversion*, 14(4), 1300-1305.

Mohammed, O.A., Abed, N.Y. ve Ganu, S., 2006, Modeling and Characterization of Induction Motor Internal Faults Using Finite-Element and Discrete Wavelet Transforms, *IEEE Transactions on Magnetics*, 42 (10), 3434-3436.

Nait-Said, N., Nait-Said, M.S. ve Bouguechal, N., 2004, Rotor Resistance Estimation of an Induction Motor to Detect Broken Bars Fault Using H-H Method, *Electric Power Components and Systems*, 32 (2), 149–161.

Nemec, M., Drobnic, K., Nedeljkovic, D., Fiser, R. ve Ambrožic, V., 2010, Detection of Broken Bars in Induction Motor Through the Analysis of Supply Voltage Modulation, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 57 (8), 2879-2888.

Penman, J. ve Stavrou, A., 1996, Broken Rotor Bars Their Effect on the Transient Performance of Induction Machines, *IEE Proc.-Electrical Power Applications*, 143 (6), 449-457.

Petrella, R. ve Tursini M., 2008, An Embedded System for Position and Speed Measurement Adopting Incremental Encoders, IEEE Transactions on Industry Applications, 44 (1), 131-141.

Sasi, A.Y.B., Gu, F., Li, Y. ve Ball, A.D., 2006, A validated model for the prediction of rotor bar fault in squirrel-cage motors using instantaneous angular speed, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20, 1572-1589.

Sprooten, J. ve Maun, J.C., 2009, Influence of Saturation Level on the Effect of Broken Bars in Induction Motors Using Fundamental Electromagnetic Laws and Finite Element Simulations, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 24 (3), 557-564.

Sun, L., Li, H. ve Xu, B., 2004, A Hybrid Detection Method of Broken Rotor Bars in Cage Induction Motors, *Intematlonal Confemnce on Power System Technology - POWERCON 2004*, Singapore, 177-181.

Trzynadlowski, A.M. ve Ritchie, E., Comparative Investigation of Diagnostic Media for Induction Motors: A Case of Rotor Cage Faults, 2000, *IEEE Transactions on Industrıal Electronics*, 47 (5), 1092-1099.

Yazici, B. ve Kliman, G. B., 1999, An Adaptive Statistical Time–Frequency Method for Detection of Broken Bars and Bearing Faults in Motors Using Stator Current, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 35 (2), 442–452.

Yazidi, A.ve Henao, H. and Capolino, G.N., 2005, Broken Rotor Bars Fault Detection in Squirrel Cage Induction Machines, *IEEE Electric Machines and Drives Conference*, 741-747

Ye, Z., Wu, B. ve Zargari, N., 2000, Modeling and Simulation of Induction Motor with Mechanical Fault Based on Winding Function Method, *26th Annual Confjerence IEEE Industrial Electronics Society-IECON2000,* 2334 – 2339.

Ye, Z. ve Wu, B., 2000, A Review on Induction Motor Online Fault Diagnosis, 2000, *Power Electronics and Motion Control Conference- PIEMC 2000*, 1353-1358.

Ying, X., 2009, Characteristic Performance Analysis of Squirrel Cage Induction Motor with Broken Bars, *IEEE Transactions on Magnetics*, 45 (2), 759-766.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Hayri ARABACI
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : Beyşehir 11/11/1977
Telefon : 542 3651961
Faks : 332 2410635
e-mail : hayriarabaci@selcuk.edu.tr

EĞİTİM

Derece		Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Üniversite	:	**Selçuk Üniversitesi, Selçuklu, Konya**	**2001**
Yüksek Lisans	:	**Selçuk Üniversitesi, Selçuklu, Konya**	**2005**
Doktora	:		

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
9	**Selçuk Üniversitesi**	**Araştırma Görevlisi**

UZMANLIK ALANI
Elektrik Makinaları

YABANCI DİLLER İngilizce

BELİRTMEK İSTEĞİNİZ DİĞER ÖZELLİKLER

YAYINLAR

• ARABACI H., BİLGİN O., Squirrel Cage of Induction Motors Simulation via Simulink, IEEE International Conference on Modeling, Simulation and Control (ICMSC 2010), Kahire, 2010, s 266-270.

• ARABACI H., BİLGİN O., Effects of Rotor Faults in Squirrel-Cage Induction Motors on The Torque-Speed Curve, IEEE XIX International Conference On Electrical Machines, Roma, 2010, s 1-5. (Doktora Tezinden Yapılmıştır)

• ARABACI H., BİLGİN O., Automatic Detection and Classification of Rotor Cage Faults in Squirrel Cage Induction Motor, Neural Computing And Applications, 2010, Vol:19, No:5, s 713-723. (Yüksek Lisans Tezinden Yapılmıştır)

• ARABACI H., BİLGİN O., Neural Network Classification and Diagnosis of Broken Rotor Bar Faults by Means of Short Time Fourier Transform, IEEE International MultiConference of Engineers and Computer Scientists, Hong Kong, 2009, s 219-223.

• ARABACI H., BİLGİN O., ÜRKMEZ A.,The Detection of Rotor Faults in the Manufacturing of Submersible Induction Motor, IEEE International Aegean Conference on Electric Machines, Power Electronics and Electromotion Joint Conference, Bodrum, 2007, s 222-226. (Yüksek Lisans Tezinden Yapılmıştır)

• ARABACI H., BİLGİN O., Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü Kullanılarak Rotor Arızalarının Teşhisi , IEEE 15. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı, Eskişehir, 2007.

• ARABACI H., BİLGİN O., Yapay Sinir Ağları Kullanarak Rotor Arızalarının Teşhisi, IEEE 14. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı, Antalya, 2006. (Yüksek Lisans Tezinden Yapılmıştır)

• ARABACI H., BİLGİN O., The Detection of Broken Rotor Bars in Squirrel Cage Induction Motors Based on Neural Network Approach, 4. Uluslararası Elektrik-Elektronik Mühendisliği Kongresi, Bursa, 2005, s148-151. (Yüksek Lisans Tezinden Yapılmıştır)

• ARABACI H., BİLGİN O., Kırık Rotor Çubuğu Arızalarının Yapay Sinir Ağları İle Teşhisi, 4rd International Advanced Technologies Symposium, Konya, 2005. (Yüksek Lisans Tezinden Yapılmıştır)

• ARABACI H., BİLGİN O., CEYLAN M., CEYLAN R., Asenkron Motorlarda Kırık Rotor Çubuğu Arızalarının Yapay Sinir Ağları ile Teşhisi, ELECO'2004 Eletrik Elektronik Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, Bursa, 2004, s 153-156. (Yüksek Lisans Tezinden Yapılmıştır)

• ARABACI H., BİLGİN O., AKKAYA R., AYDIN M., PID Kontrollü İklimlendirme Sisteminin PLC ile Tasarımı, 9. Ulusal Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisleri Kongresi, BURSA, 2001.

TEZLER

• ARABACI H., Asenkron Motorlarda Kırık Rotor Çubuğu Arızalarının Yapay Sinir Ağları ile Teşhisi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2005.