

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜK SALINIMI DURUMUNDA ASENKRON MOTORDA ROTOR ÇUBUK
ARIZASININ GERÇEK ZAMANLI TESPİTİ**

TANER GÖKTAŞ

DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜH. ANABİLİM DALI

AĞUSTOS 2015

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜK SALINIMI DURUMUNDA ASENKRON MOTORDA ROTOR ÇUBUK
ARIZASININ GERÇEK ZAMANLI TESPİTİ**

TANER GÖKTAŞ

DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜH. ANABİLİM DALI

AĞUSTOS 2015

Eşim ve Kızıma

Tezin Başlığı: Yük Salınımı Durumunda Asenkron Motorda Rotor Çubuk Arızasının Gerçek Zamanlı Tespiti

Tezi Hazırlayan: Taner GÖKTAŞ

Sınav Tarihi: 03.08.2015

Yukarıda adı geçen tez jürimizce değerlendirilerek Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Sınav Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Mehmet Salih MAMİŞ
İnönü Üniversitesi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Müslüm ARKAN
İnönü Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Murat KÖSEOĞLU
İnönü Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Ahmet ORHAN
Fırat Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Bilal GÜMÜŞ
Dicle Üniversitesi

Prof. Dr. Alaattin ESEN
Enstitü Müdürü

ONUR SÖZÜ

Doktora Tezi olarak sunduğum “**Yük Salınımı Durumunda Asenkron Motorda Rotor Çubuk Arızasının Gerçek Zamanlı Tespiti**” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların, hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Taner GÖKTAŞ

ÖZET

Doktora Tezi

YÜK SALINIMI DURUMUNDA ASENKRON MOTORDA ROTOR ÇUBUK ARIZASININ GERÇEK ZAMANLI TESPİTİ

Taner GÖKTAŞ

İnönü Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

102+xiii sayfa

2015

Danışman: Doç. Dr. Müslüm ARKAN

Kırık rotor arızasının tespiti için kullanılan en yaygın metot motor akım imza analizi ile arızaya ilişkin temel harmoniğin yan bandlarının analiz edilmesidir. Eğer motor düşük frekanslı yük momenti salınımına maruz kalırsa, salınım ile ilişkili harmonikler kırık rotor çubuk arızasına benzer bir davranış sergilerler. Pratikte, asenkron motorda kayma frekansının iki katına yakın frekanstaki yük salınımları stator akımında kırık rotor arızası ile aynı etkiye sahiptir. Bu gibi durumlarda stator akım spektrumu analizi yanlış anlaşılabilen ve bundan dolayı kırık rotor çubuk arızasının tespiti zorlaşabilmektedir.

Bu tez çalışmasında asenkron motorlarda kırık rotor çubuk arızasını düşük frekanslı yük momenti salınımından ayırtmak için üç farklı metot önerilmektedir. İlk olarak Hilbert dönüşümü (HT) ve uzay vektör açısız dalgalanma (SVA) metodunun birleşiminden oluşan analitik sinyalin açısız dalgalanması (ASAF) metodu kullanılmaktadır. Yeni geliştirilen bu metotta Hilbert dönüşümü ile elde edilen analitik sinyalden belirlenen örnekleme frekansına göre uzay vektörünün açısız dalgalanması bulunmaktadır. Elde edilen ASAF sinyalinin spektrumundan yararlanılarak ayırtma işlemi sağlanmaktadır. Geliştirilen ASAF metodu hem şebeke hem de V/f açık çevrim kontrollü sürücüler ile beslenen asenkron motorlarda uygulanabilmektedir.

Kırık rotor çubuk arızasını düşük frekanslı yük momenti salınımından ayırtmak için geliştirilen diğer bir metot ise; moment ve motor faz gerilimlerinin detaylıca analizinden elde edilen spektrumlarından yararlanılarak ayırtma harmoniklerinin tanımlanmasıdır. Bu metotta motor faz geriliminin doğru olarak ölçülebilmesi için asenkron motorun statoru yıldız bağlı olmalıdır. Ayırtma

harmoniklerini belirlemek ve doğrulamak için iki boyutlu zaman adımı sonlu elemanlar metodu (2D-TSFEM) kullanılmıştır.

Asenkron motorlarda hız ve moment kontrolü için doğrudan moment kontrollü (DTC) sürücüler yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, DTC sürücülerde kırık rotor çubuk arızasının düşük frekanslı yük momenti salınımından ayrıştırılması henüz literatürde açıklanmamıştır. Bu tez de, son olarak DTC asenkron motor sürücülerinde kırık rotor çubuk arızasını düşük frekanslı yük momenti salınımından ayrıştırmak için durağan referans çatıdaki v_{qs} gerilim ve i_{qs} akım bileşenlerinin spektrumları kullanılarak arıza indeksleri tanımlanmış ve bu arıza indeksleri kullanılarak bir ayrıştırma metodu geliştirilmiştir.

Bilgisayar benzetimi ve deneysel sonuçlar, üç fazlı asenkron motorda kırık rotor çubuk arızasının düşük frekanslı yük momenti salınımından ayrıştırılması için geliştirilen algoritmaların uygulanabilirliğini ispatlamak için sunulmuştur.

ANAHTAR KELİMELER: Kırık rotor çubuk arızası, Yük momenti salınımı, ASAF metodu, Doğrudan moment kontrolü (DTC), Moment ve faz gerilimi analizi

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

ONLINE ROTOR BAR FAULT DETECTION IN INDUCTION MOTOR UNDER LOAD OSCILLATION

Taner GÖKTAŞ

İnönü University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Electrical-Electronics Engineering

102+xiii pages

2015

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Müslüm ARKAN

The most common method for detecting broken rotor bar faults is to observe the corresponding fundamental sidebands harmonics through motor current signature analysis (MCSA). If a motor is subjected to low frequency load oscillation, then the oscillation related sidebands exhibit similar behaviors as broken rotor bar failure. In practice, the presence of load oscillation near to twice slip frequency has the same effect on a stator current of induction motor as a broken rotor bar fault. In such cases the stator current spectrum analysis can be misleading and therefore the detection of broken rotor bar failure becomes difficult.

In this thesis, three different methods are proposed to separate broken rotor bar failure from low frequency load torque oscillation in three-phase induction motor. To discern broken rotor bar fault and load torque oscillations, firstly, the Analytical Signal Angular Fluctuation (ASAF) method, which is a combination of Hilbert Transform (HT) and the Space Vector Angular Fluctuation (SVAf) method, is used. In this newly proposed method, space vector angular fluctuations are calculated by sampling the analytical signal obtained from Hilbert transform (HT) with a predefined sampling frequency. The separation process is achieved from obtained ASAF signal spectrum. Proposed ASAF method can be applied to either line fed or V/f scalar controller induction motors.

Another method to separate broken rotor bar failure from low frequency load torque oscillation is to analyze torque and motor phase voltage waveforms for defined separation harmonics. In this method, induction motor should be star connected to measure the phase voltage accurately. In order to define and justify the separation harmonics, 2-D Time Stepping Finite Element Method (TSFEM) is used.

Induction motor drivers are widely run in direct torque control (DTC) mode to control its torque and speed. However, discerning of broken rotor bar failure from low frequency load oscillation for DTC drives remains unexplored. In this thesis, finally, a separation method is proposed to discern broken rotor bar failures from low frequency load torque oscillation in (DTC) induction motor drives using fault indexes that are defined from stationary v_{qs} voltage and i_{qs} current components spectrums.

Computer simulations and experimental results are presented to prove the proposed methods for separation broken rotor bar faults from load torque oscillation in three-phase induction motor.

KEYWORDS: Broken bar fault, load torque oscillation, Direct torque control, Torque and phase voltage analysis

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca bilgi, birikim ve ilminden her zaman faydalandığım, çalışmalarımın her safhasında yardım ve önerilerini benden eksik etmeyen, beni her zaman cesaretlendiren, insani ve ahlaki değerler ile de kendime örnek edindiğim, değerli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Müslüm ARKAN'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Doktora çalışmalarım boyunca beni değerli bilgileriyle yönlendiren tez izleme komitesi üyeleri Sayın Prof. Dr. M. Salih MAMİŞ ve Yrd. Doç. Dr. Murat KÖSEOĞLU'na teşekkür ederim.

The University of Texas at Dallas'taki doktora çalışmalarına farklı bir boyut kazandıran, beni her zaman destekleyen Sayın Dr. Bilal AKIN'a ayrıca güç elektroniği ve sürücüler grubundaki değerli arkadaşlarıma, özellikle benden desteğini esirgemeyen, çalışmalarına değerli yorumlarda bulunan Serkan DÜŞMEZ ve Mohsen ZAFARANI'ye teşekkürü bir borç bilirim.

Bugünlere gelmemde büyük pay sahibi olan, hayatımın her evresinde maddi ve manevi olarak beni hep destekleyen annem, babam ve kardeşime ayrıca tez çalışmam boyunca bana her zaman destek olup, cesaretlendiren, sonsuz anlayış ve sabır gösteren hayatımdaki en değerli varlıklarım eşim ve kızıma en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam boyunca bana sağladığı imkân ve olanaklardan dolayı T.C. Hitit Üniversitesi'ne ve doktora çalışmalarımı her zaman destekleyen, bana inanan ve güvenen Sayın Yrd. Doç. Dr. S. Oğuzhan KIVRAK'a teşekkürü bir borç bilirim.

Doktora çalışmalarımı finansal olarak destekleyen T.C. İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine ve laboratuvarlarında çalışma imkânı bulduğum Elektrik-Elektronik Mühendisliği çalışanlarına ve saygıdeğer hocalarıma içten teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, 2214-A Doktora Sırası Araştırma Projesi kapsamında The University of Texas at Dallas'da doktora çalışmalarımı yürütmem için bana finansal destek sağlayan Türkiye Cumhuriyeti'ne ve TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
TABLolar LİSTESİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Genel Bakış.....	1
1. 2. Kırık Rotor Çubuk Arızası.....	4
1. 3. Yük Momenti Salınımı	9
1. 4. Tezin Amacı.....	12
1. 5. Tez İçeriği.....	13
2. DAHA ÖNCE YAPILAN ÇALIŞMALARIN ÖZETİ.....	14
2.1. Kırık Rotor Çubuğu Arızasının Tespiti Üzerine Yapılan Çalışmalar	14
2.2. Kırık Rotor Çubuk Arızası ile Yük Momenti Salınımının Ayırıştırılması Üzerine Yapılan Çalışmalar	18
2.3. Sonuç	23
3. KIRIK ROTOR ÇUBUK ARIZASININ DÜŞÜK FREKANSLI YÜK MOMENTİ SALINIMINDAN AYRIŞTIRILMASI	24
3.1. Analitik Sinyalin Açısal Dalgalanması Metodu	24
3.1.1. Analitik sinyalin elde edilmesi.....	26
3.1.2. Analitik sinyalin açısal dalgalanması	29
3.2. Moment ve Faz Gerilimi Spektrumu Kullanılarak Kırık Rotor Çubuk Arızasının Düşük Frekanslı Yük Momenti Salınımından Ayırıştırılması	36
3.2.1. Moment spektrumundaki ayırıştırma harmonikleri.....	36
3.2.2. Motor faz gerilimi spektrumundaki ayırıştırma harmonikleri	39

3.3. Doğrudan Moment Kontrollü Sürücüler ile Beslenen Asenkron Motorlarda Kırık Rotor Çubuk Arızasını Düşük Frekanslı Yük Momenti Salınımından Ayrıştırmak için Yeni Bir Yöntem	40
3.4. Sonuç	46
4. ÜÇ FAZLI ASENKRON MOTORUN MODELLENMESİ ve BENZETİM SONUÇLARI	48
4.1. Üç Fazlı Asenkron Motorun Modellenmesi	48
4.1.1. Asenkron motorun lineer modeli (Matlab Modeli)	48
4.1.2. Asenkron motorun lineer olmayan modeli (2D- FEM).....	52
4.2. Benzetim Sonuçları	60
4.2.1. Analitik sinyal açısız dalgalanma metodu için benzetim sonuçları	60
4.2.2. Moment ve faz gerilimi spektrumu için benzetim sonuçları	64
4.3. Sonuç	70
5. DENEYSEL DEVRE DÜZENEGİ ve DENEYSEL SONUÇLAR.....	71
5.1. Deneysel Düzenek.....	71
5.1.1. Veri toplama sistemi.....	71
5.1.2. Motor ve yükleme sistemi.....	73
5.2. Deneysel Sonuçlar	76
5.2.1. Analitik sinyal açısız dalgalanma metodu deneysel sonuçları.....	76
5.2.2. Faz gerilimi spektrumu deneysel sonuçları	82
5.2.3. DTC ile beslenen asenkron motorda deneysel sonuçlar	84
5.3. Sonuç	87
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	88
6.1. Sonuçlar	88
6.2. Öneriler	90
7. KAYNAKLAR.....	92

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1	Asenkron motorlarda meydana gelen arızalar	1
Şekil 1.2	Büyük motorlar için motor arızaları anketi	2
Şekil 1.3	Motor akım imza analizi metodu	3
Şekil 1.4	Asenkron motorda alanların gösterimi a) Kayma kavramı b) Sağlıklı durumda rotorda oluşan alan c) Kırık rotor arızası durumunda rotorda oluşan alanlar	6
Şekil 1.5	Kırık rotor çubuğu arızasından dolayı oluşan alanların etkileşimi	7
Şekil 1.6	Stator akım spektrumu a) Sağlıklı rotor b) Kırık rotor çubuk arızası	8
Şekil 1.7	Kırık rotor çubuk arızası durumunda karakteristik hata harmoniklerinin değişimi	9
Şekil 1.8	Yük momenti salınımı durumunda stator akım spektrumu	11
Şekil 1.9	Kırık rotor çubuk ve düşük frekanslı yük momenti salınımı durumunda stator akım spektrumu	12
Şekil 3.1	Simetrik olmayan besleme kaynağı durumunda kırık rotor çubuk arızası var iken oluşan manyetik alanların gösterimi	24
Şekil 3.2	Analitik sinyalin açısız dalgalanması metodunun algoritması	25
Şekil 3.3	Bir gerçek sinyal (i_{sa}) ve bu sinyalin Hilbert Dönüşümü ($HT(i_{sa})$)	26
Şekil 3.4	Kırık rotor çubuk arızası durumunda frekans spektrumu a) i_{sa} b) $HT(i_{sa})$	28
Şekil 3.5	Kırık rotor çubuk arızası, tüm frekans bileşenleri a) i_{sa} b) $AS = i_{sa} + HT(i_{sa})$	29
Şekil 3.6	Sağlıklı bir motorda analitik sinyalin referans vektörlerinin gösterimi	33
Şekil 3.7	Farklı besleme kaynağı dengesizlikleri durumunda $(1-s)2fs$ bileşenin değişimi	35
Şekil 3.8	Farklı atalet momenti durumunda $(1-s)2fs$ bileşenin değişimi (İki kırık rotor çubuk ve %0.4 besleme kaynağı asimetrisi)	35
Şekil 3.9	Açık çevrim kontrollü inverter ile beslenen motorda ASAF spektrumu (50 Hz, iki kırık rotor çubuğu arızası ve yük moment salınımı durumunda) ($2sf_s = 4.4 \text{ Hz}$) ($f_{osc} = 7 \text{ Hz}$)	36
Şekil 3.10	Kırık rotor çubuk arızası ve yük momenti salınımı durumunda moment spektrumu	38
Şekil 3.11	Motor faz gerilimi ölçümü, V_{faz-a}	39

Şekil 3.12 Kırık rotor çubuk arızası ve yük momenti salınımı durumunda faz gerilimi spektrumu.....	40
Şekil 3.13 DTC komple blok diyagramı	41
Şekil 3.14 Faz akımı spektrumu (i_b) a) İki kırık rotor çubuk arızası b) Yük momenti salınımı	43
Şekil 3.15 Faz gerilimi spektrumu (v_b) a) İki kırık rotor çubuğu arızası b) Yük momenti salınımı	43
Şekil 3.16 Clarke dönüşümü	44
Şekil 3.17 DTC ile beslenen bir asenkron motorda kırık rotor çubuk arızasını düşük frekanslı yük momenti salınımından ayırştırmak için geliştirilen algoritma.....	46
Şekil 4.1 Asenkron motorun kırık rotor çubuk arızası içeren simulink modeli	49
Şekil 4.2 Simulink modeli, Faz akımı a) Sağlıklı motor b) İki kırık rotor çubuk arızası c) Düşük frekanslı yük momenti salınımı.....	50
Şekil 4.3 Simulink modeli, Yük momenti a) Sağlıklı motor b) İki kırık rotor çubuk arızası c) Düşük frekanslı yük momenti salınımı	51
Şekil 4.4 Asenkron motorun 2D-FEM Modeli.....	53
Şekil 4.5 Oluşturulan modelde stator faz sargılarının dizilimi	54
Şekil 4.6 Oluşturulan modelde kırık rotor çubuk arızasının oluşturulması	55
Şekil 4.7 FEM modeli, Faz akımı a) Sağlıklı motor b) İki kırık rotor çubuk arızası c) Düşük frekanslı yük momenti salınımı.....	56
Şekil 4.8 FEM modeli, Yük momenti a) Sağlıklı motor b) İki kırık rotor çubuk arızası c) Düşük frekanslı yük momenti salınımı.....	57
Şekil 4.9 Hava aralığındaki radyal manyetik akı yoğunlukları a) Sağlıklı motor b) İki kırık rotor çubuk arızası c) Yük momenti salınımı	58
Şekil 4.10 Manyetik akı yoğunluğu ve akı çizgileri dağılımı a) Sağlıklı motor b) İki kırık rotor çubuk arızası c) Yük moment salınımı	59
Şekil 4.11 Asenkron motorun besleme uçlarına verilen üç faz gerilim (%0.4 kaynak dengesizliği)	61
Şekil 4.12 Asenkron motora uygulanan %6'lık yük salınımı momenti.....	61
Şekil 4.13 İki kırık rotor çubuk, %75 yük a) Stator Akım b) ASAF spektrum (0-12Hz) c) ASAF spektrum (92-108 Hz).....	62

Şekil 4.14 Yük momenti salınımı, %75 yük a) Stator akım b) ASAF spektrum(0-12 Hz) c) ASAF spektrum (92-108 Hz).....	62
Şekil 4. 15 İki kırık rotor çubuk ve %6 yük momenti salınımı durumunda, %75 yükte a) ASAF spektrum (0Hz - 12Hz) b) ASAF spektrum (92Hz - 108Hz).....	64
Şekil 4.16 Simplorer ile oluşturulan model	65
Şekil 4.17 Benzetim sonuçları, tam yükte, ($2sf_s=f_{osc}=4.4 Hz$) a) Stator akım spektrumu b) Moment spektrumu c) Faz gerilimi spektrumu.....	66
Şekil 4.18 Benzetim sonuçları, tam yükte, ($2sf_s =4.4 Hz, f_{osc}=6 Hz$),Kırık rotor çubuk arızası ve yük momenti salınımı aynı anda iken a) Stator akım spektrumu b) Moment spektrumu c) Faz gerilimi spektrumu.....	68
Şekil 4.19 Moment ve faz gerilimi spektrumundaki harmoniklerinin yük momentine göre değişimi.....	69
Şekil 5. 1 Gerilim ölçme devresi	72
Şekil 5. 2 Deneyde kullanılan rotorlar	73
Şekil 5. 3 Deney düzeneğinin şematiği.....	75
Şekil 5.4 Deney düzeneğinin fotoğrafı a) Asenkron motor b) DC jeneratör c) Yükseltici devre d) Reosta e) Sinyal jeneratörü.....	75
Şekil 5.5 İki kırık rotor çubuk, %75 yük a)Stator Akım b) ASAF spektrum (0-20 Hz) c) ASAF spektrum (90-110 Hz)	78
Şekil 5.6 Yük momenti salınımı, %75 yük a) Stator Akım b) ASAF spektrum (0-20 Hz) c) ASAF spektrum (90-110 Hz).....	78
Şekil 5.7 Deneysel sonuç, iki kırık rotor çubuğu ve %5 yük salınımı durumunda, %75 yükte a) ASAF spektrum (0Hz - 20Hz) b) ASAF spektrum (90Hz - 110Hz)	79
Şekil 5.8 Deneysel sonuç, iki kırık rotor çubuğu ve %4 yük salınımı durumunda, %40 yükte a) ASAF spektrum (0Hz - 20Hz) b) ASAF spektrum (90Hz - 110Hz).....	79
Şekil 5.9 Deneysel sonuç, ASAF spektrumları, tam yükte, 50 Hz kaynak frekansı a) İki kırık rotor çubuk arızası ($2sf_s=5.5 Hz$) b) Yük moment salınımı ($f_{osc}=5 Hz$) c) İki kırık rotor ve yük moment salınımı aynı anda iken ($2sf_s=4.4 Hz, f_{osc}=7Hz$).....	81

Şekil 5.10 Deneysel sonuç, ASAF spektrumları, tam yükte, 30 Hz kaynak frekansı a) İki kırık rotor çubuk arızası ($2sf_s=3$ Hz) b) Yük moment salınımı ($f_{osc}=5$ Hz) c) İki kırık rotor ve yük moment salınımı aynı anda iken ($2sf_s=2.4$ Hz, $f_{osc}=7$ Hz).....	82
Şekil 5.11 Deneysel sonuç, Faz gerilimi spektrumu, %80 yükte tam yükte, ($2sf_s=f_{osc}=4.2$ Hz)	83
Şekil 5.12 Deneysel sonuç, Faz gerilimi spektrumu, %80 yükte tam yükte, ($2sf_s=4.2$ Hz, $f_{osc}=6$ Hz) Kırık rotor çubuk arızası ve yük momenti salınımı aynı anda var iken	83
Şekil 5.13 İki kırık rotor çubuk arızası durumu a) i_{qs} spektrum b) v_{qs} spektrum	85
Şekil 5.14 Yük momenti salınımı durumu a) i_{qs} spektrum b) v_{qs} spektrum.....	85
Şekil 5.15 İki kırık rotor çubuk arızası ve yük momenti salınımı farklı frekanslarda a) i_{qs} spektrum b) v_{qs} spektrum	85
Şekil 5.16 İki kırık rotor çubuk arızası ve yük momenti salınımı aynı frekanslarda a) i_{qs} spektrum b) v_{qs} spektrum	86

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 4.1 Test motorun parametreleri (Matlab@Simulink).....	50
Tablo 4.2 Test motorun parametreleri (ANSYS@Maxwell)	53
Tablo 4.3 Moment ve faz gerilimdeki harmonikler (N/A = uygun değil).....	69

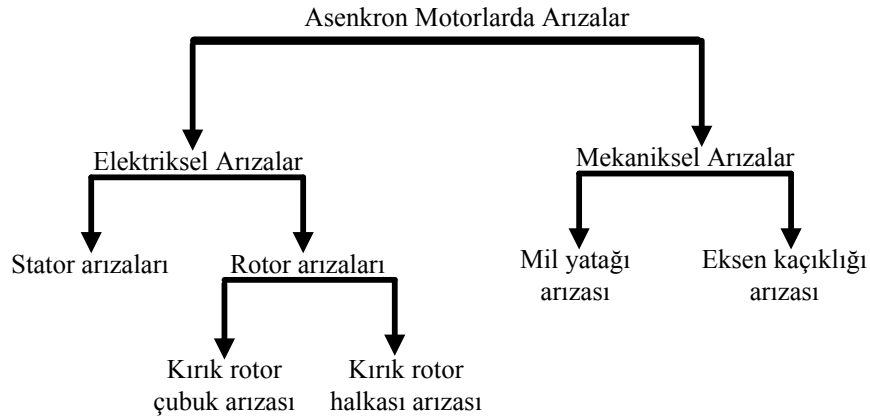
SİMGELER VE KISALTMALAR

f_s	Besleme gerilimi frekansı
n_m	Rotor dönme hızı
s	Motor kayması
f_b	Kırık rotor çubuk arızası frekansı
f_r	Rotor akımları frekansı
f_{osc}	Yük momenti salınımı frekansı
T_{load}	Yük momenti
T_{osc}	Salınımlı yük momenti
i_{qs}	Durağan referans çatıdaki q -ekseni akım bileşeni
v_{qs}	Durağan referans çatıdaki q -ekseni gerilim bileşeni
F_i	Akım arıza indeksi
F_v	Gerilim arıza indeksi

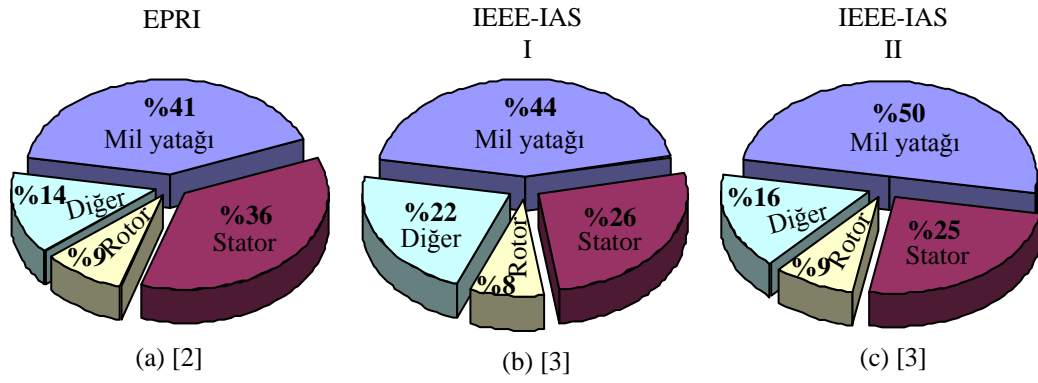
1. GİRİŞ

1.1. Genel Bakış

Asenkron motorlar dayanıklı, güvenilir ve bakım gerektirmeyen yapılarından dolayı yıllar boyunca endüstride üretimin neredeyse tüm aşamalarında en yoğun iş yüküne sahip motorlardır. Bu tip motorlar dayanıklı olmasına rağmen kötü çalışma koşulları, sık kalkma-durma, üretim aşamasındaki bazı aksaklıklar vb. sebepler motorun çalışmasını etkilemekte ve motorda beklenmedik arızalara sebep olmaktadır. Asenkron motorlarda oluşan bu beklenmedik arızalar endüstride üretimin durmasına, finansal kayıplara dolayısıyla üretim maliyetlerinin artmasına ve üretim veriminin düşmesine sebep olmaktadır. Bu yüzden özellikle üretimin yaygın olduğu alanlarda bu motorlarda oluşabilecek olası arızaların önceden öngörülmesi üretimin devamlılığı, ürün kalitesi ve verim açısından son derece önemlidir. Genel olarak asenkron motorda oluşan arızalar, mekaniksel ve elektriksel olmak üzere iki temel başlık altında toplanabilir (Şekil 1.1). Mekaniksel arızalar daha çok motorun mekanik kısmından kaynaklanan arızalar iken elektriksel arızalar motordaki elektriksel hatalardan dolayı meydana gelen arızalardır. Stator sargı arızaları, kırık rotor arızası, eksen kaçıklığı ve mil yatağı arızası asenkron motorda meydana gelen başlıca arızalardandır. Şekil 1.2 EPRI [2] ve IEEE[3] tarafından yapılan araştırmalarda büyük motorlarda meydana gelen arızaların yüzdelerini göstermektedir. Bu sonuçlara göre mil yatağı ve stator arızaları baskın arıza tiplerindedir. Bununla birlikte rotor arızaları %10 civarında olup net bir şekilde sınıflandırılabilmektedir.



Şekil 1.1 Asenkron motorlarda meydana gelen arızalar [1]



Şekil 1.2 Büyük motorlar için motor arızaları anketi [2, 3]

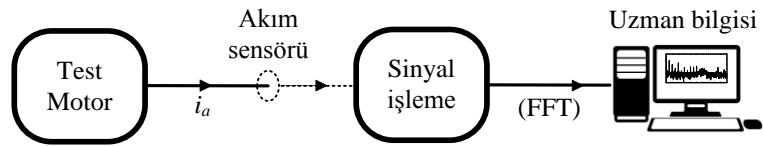
Asenkron motorda herhangi bir arıza meydana geldiğinde arızanın türüne ve yoğunluğuna bağlı olarak, giriş gerilimi ve akımında dalgalanma, moment ve hızda salınım ve sargılarda aşırı ısınma meydana gelebilmektedir. Meydana gelen arızaları tespit etmek için değişik durum izleme ve hata tespit teknikleri bulunmaktadır. Bunlar temel olarak vibrasyon analizi, termal analiz ve elektriksel analiz olmak üzere üç ana başlıkta toplanmaktadır.

Vibrasyon analizinde temel mantık motordaki titreşim büyüklüğünü frekans fonksiyonuna bağlı olarak ifade etmeye çalışmaktır. Motorda herhangi bir arıza meydana geldiğinde moment veya hızdaki salınımlar motorun dinamiğini etkilemekte ve motorda mekaniksel titreşimlere sebep olmaktadır. Bu tip bir analiz genel olarak rotor, mil yatağı ve eksen kaçıklığı arızalarının tespitinde kullanılmaktadır [4-7]. Ancak vibrasyon analizinde bu titreşimleri ölçebilmek için ek sensörlere ihtiyaç duyulmakta, bu ek sensörler de ek maliyet gerektirmektedir. Aynı zamanda ölçüm yapılacak test motorunun bulunduğu ortam çevresel titreşimlerden etkilendiğinden dolayı yanıltıcı sinyaller ortaya çıkabilmektedir.

Termal analizde stator çekirdeği, stator sargıları ve motor yataklarındaki bölgesel sıcaklıkların ölçümü yapılarak arıza tespiti sağlanmaktadır [5]. Motordaki herhangi bir arıza sonucu artan sıcaklık bilgisi motorun çalışma durumu hakkında bilgiler verir. Motor sıcaklıklarını ölçebilmek için termokuplörler ve direnç sıcaklık saptayıcılar (RTD) kullanılır. Bu sensörler motor üretim aşamasında iken motora monte edilmektedir. Sistemin getirdiği ek maliyetten dolayı genellikle büyük boyutlu motorlarda bu tip sıcaklık sensörleri kullanılmaktadır. Arıza durumunda sıcaklık

belirlenen değeri aştığında sensörlerin uyarı vermesi sonucu hata tespiti sağlanmaktadır.

Elektriksel analizde ise makinenin stator akımı, gerilimi ve manyetik akı gibi elektriksel büyüklüklerine bakılarak hata tespiti yapılmaktadır. Herhangi bir mekaniksel veya elektriksel arıza durumunda makinedeki akım, gerilim ve akı gibi elektriksel değişkenler karakteristik hata sinyallerini içerir. Motordaki elektriksel büyüklükler arasında motor stator akımının analizi; düşük maliyetli durum izleme ve motorun durum bilgisini anlık olarak sağlaması gibi sebeplerden dolayı en çok tercih edilen elektriksel analiz türüdür. Stator akımı besleme kaynağı harmoniklerinden, statik ve dinamik yük durumlarından, mekaniksel ve elektriksel arızalardan etkilenmektedir. Makineden elde edilen elektriksel büyüklükleri zaman ekseninde incelemek ve hata tespitini sağlamak oldukça zordur. Bu yüzden elde edilen büyüklükler frekans eksenine dönüştürülerek frekans spektrumu elde edilmekte ve hata tespiti sağlanmaktadır. Stator akım spektrumunun incelenmesi metoduna motor akım imza analizi (MCSA) denilmektedir. Şekil 1.3’de görüldüğü gibi motor akım imza analizi yöntemi ile arıza tespiti temel olarak üç adımdan oluşmaktadır. Motorun fazından sensörler vasıtasıyla alınan faz analog akım bilgisi, belirli bir frekansta örneklenerek dijital bilgiye çevrilir. Elde edilen bu dijital akım bilgisine sinyal işleme yöntemleri uygulanarak frekans spektrumu elde edilir. Burada en yaygın olarak kullanılan sinyal işleme yöntemi Hızlı Fourier Dönüşümüdür (FFT). Elde edilen frekans spektrumunda ortaya çıkan karakteristik arıza harmonikleri arıza çeşidi, yüzdesi vb. motor durum bilgilerini içermektedir.



Şekil 1.3 Motor akım imza analizi metodu

Motor akım imza analizi yönteminin diğer kullanılan yöntemlere göre en önemli avantajları arasında herhangi ek bir fiziksel donanıma gerek kalmadan motor durum tespitini anlık olarak sağlayabilmesi, motorun iç kısmına ulaşamadığı durumlarda ve tehlikeli çalışma ortamlarında bile motor akım bilgilerini basit bir

akım probu ile elde edilebilmesi olarak sıralanabilir. MCSA tekniği ile asenkron motorlarda kırık rotor çubuk arızası, stator kısa devre arızası, eksen kaçıklığı, mil yatağı vb. arızalar tespit edilebilmektedir.

1. 2. Kırık Rotor Çubuk Arızası

Asenkron motorlarda sargılı ve sincap kafesli olmak üzere iki çeşit rotor tipi bulunmaktadır. Rotoru sargılı asenkron motorlarda rotor sargıları rotor çekirdeği üzerindeki oluklara stator sargısıyla aynı yapıda sarılmaktadır. Bu sargılar bilezikler vasıtasıyla birbirine bağlanmaktadır. Sincap kafese sahip asenkron motorlar daha az bakım gerektirmesi, yüksek verimi gibi sebeplerden dolayı rotoru sargılı motorlara göre daha çok tercih edilmektedir. İsminden de anlaşıldığı gibi rotoru sincap kafesini andıran rotor çubuklarından oluşmaktadır. Bu rotor çubukları oluk harmoniklerini azaltmak için belli bir eğimle yerleştirilmektedir. Rotor çubukları genelde düşük dirençli eritilmiş döküm alüminyumun rotor çubuk yataklarına enjekte edilmesinden elde edilmektedir. Rotor çubukları ve rotor çubuk yuvaları arasında herhangi bir yalıtım bulunmamaktadır.

Akımın aktığı bu rotor çubukları çeşitli sebeplerden dolayı bazen çatlayabilir veya kırılabilirler. Bu olaya kırık rotor çubuk arızası denilmektedir. Kırık rotor çubuk arızası şu sebeplerden dolayı meydana gelebilir [5];

- Üretim aşamasında rotor çubuklarında yapılan hatalar
- Aşırı veya dengesiz yüklerden dolayı rotor çubuklarının aşırı ısınması ve yüksek mekaniksel zorlanmalar
- Elektromanyetik gürültü ve titreşim
- Aşırı durma-kalkma yapan motorlarda çekilen anlık yüksek akımlar
- Nem, rutubet veya kimyasal etkiler gibi çevresel faktörler
- Motor mil yatağı düzensizliği

Kırık rotor çubuk arızası direkt olarak motorun fiziksel dinamiğini etkilemese de bu arızadan dolayı kırık rotor çubuklarında aşırı ısınma meydana gelmektedir. Ayrıca kırık rotor çubuğu yüksek hızlarda stator çekirdeğinde yüksek gerilimlerin oluşmasına sebep olmaktadır. Bu durum ciddi yalıtım sorunlarına, sargıların yanmasına, yüksek onarım maliyetine ve dolayısıyla üretim maliyetinin artması gibi sorunlara sebep olmaktadır. Rotorda herhangi bir rotor çubuğu kırıldığında kırık olan

rotor çubuğundan akım akamayacaktır. Kırık rotor çubuğundan akması gereken akım kırık rotor çubuğuna komşu olan diğer çubuklardan akacaktır. Bu aşırı akımlardan dolayı komşu rotor çubukları da kısa sürede zarar görecektir.

Kırık rotor çubuk arızası MCSA tekniği ile akımdaki harmoniklere bakılarak tespit edilebilmektedir [8]. Akımda ortaya çıkan harmonikleri açıklamak için asenkron motorun çalışma prensibi dikkate alınabilir [9].

Üç fazlı asenkron motorda dönen manyetik alanın senkron hızı (n_s) besleme kaynağının frekansına ve sargı kutup çifti sayısına (p) bağlıdır.

$$n_s = \frac{60f_s}{p} \quad (1.1)$$

Tam dengeli bir besleme kaynağı ile beslenen tam simetrik sargıya sahip bir asenkron motorda sadece senkron hızda dönen ileri yönlü bir manyetik alan bulunur. Stator sargılarında veya besleme kaynağındaki herhangi bir dengesizlik ters yönde dönen bir manyetik alana sebep olmaktadır. Rotor n_m hızı ile dönmektedir. Asenkron motorların çalışma prensibine göre Şekil 1.4a'da gösterildiği gibi rotorun dönme hızı her zaman stator manyetik alan hızından düşüktür. Bu dönüşler arasındaki fark kayma olarak adlandırılır.

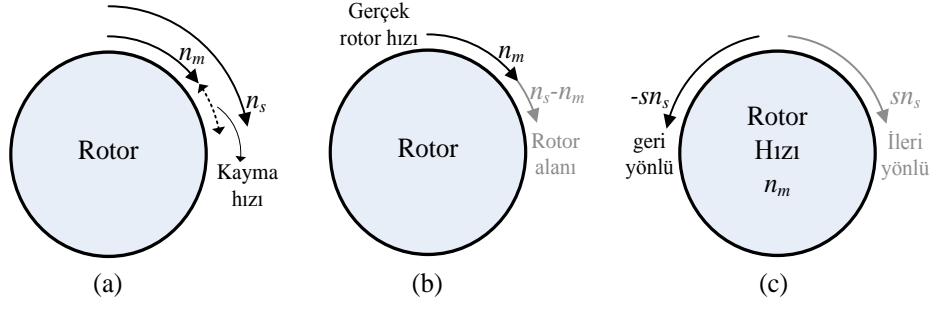
$$s = \frac{n_s - n_m}{n_s} \quad (1.2)$$

Bu kayma değeri aslında bir birime indirgenmiş (p.u) terimdir ve genellikle yüzde olarak ifade edilir. Kayma hızı (n_{kayma}) ise tam olarak dönen manyetik alan hızı ile rotorun gerçek dönme hızı arasındaki dönüş farkıdır.

$$n_{kayma} = n_s - n_m \quad (1.3)$$

Rotor akımlarının frekansı, yani kayma frekansı f_r , asenkron motor teorisine göre denklem (1.4)' te tanımlanmıştır.

$$f_r = sf_s \quad (1.4)$$



Şekil 1.4 Asenkron motorda alanların gösterimi a) Kayma kavramı b) Sağlıklı durumda rotorda oluşan alan c) Kırık rotor arızası durumunda rotorda oluşan alanlar

Normal bir çalışmada sağlıklı bir motorda, statora göre rotor çubuklarından akan akımın ürettiği manyetik alan hızı rotorun gerçek dönme hızı n_m 'den daha yüksek bir hızdadır (Şekil 1.4b). Bu durumda durağan stator sargılarına göre akım taşıyan rotor iletkenleri tarafından üretilen dönen manyetik alanın hızı;

$$n_m + n_{kayma} = n_m + n_s - n_m = n_s \quad (1.5)$$

Denklem 1.5'ten de görüldüğü gibi sabit stator sargısında ki durağan bir gözlemciye göre, rotorda oluşan dönen manyetik alanın toplam hızı stator manyetik alanın hızı olan n_s 'e eşittir.

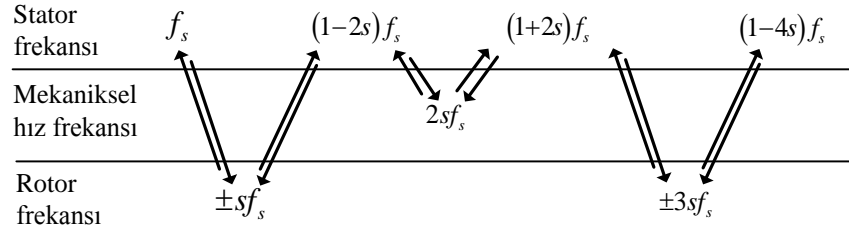
Kırık rotor çubuk arızası durumunda rotor hızına göre kayma hızında fakat ters yönde ek bir dönen manyetik alan ortaya çıkmaktadır (Şekil 1.4c). Kırık rotor çubuklarından dolayı rotor tarafından üretilen ters yönde dönen manyetik alanın hızı n_b olarak adlandırılırsa;

$$\begin{aligned} n_b &= n_m - sn_s = \overbrace{n_s(1-s)}^{n_m} - sn_s \\ &= n_s - 2sn_s \\ &= (1-2s)n_s \end{aligned} \quad (1.6)$$

Kırık rotor durumunda durağan stator sargılarının gördüğü dönen manyetik alan, $(1-2s)n_s$ 'tir. Denklem (1.6) frekansa bağlı olarak yazılırsa kırık rotor çubuk arızası frekansı (f_b) elde edilir.

$$f_b = (1-2s)f_s \quad (1.7)$$

Şekil 1.5’de kırık rotor çubuğu arızası durumunda oluşan manyetik alanlar gösterilmektedir. Denklem (1.7)’ye göre kırık rotor çubuk arızası frekansında (f_b) dönen manyetik alan stator sargılarını keser ve statorda $(1-2s)f_s$ frekansında bir akım bileşeni akmaya başlar. Bu akım bileşeninin genliği tam olarak sol yan band bileşeninin genliğini belirtmektedir. Statorda $(1-2s)f_s$ frekansında oluşan bu alan rotor da tekrar $-sf_s$ frekansında bir manyetik alan oluşturur. Bu arada hız ve momentte kayma frekansının iki katı kadar olan $2sf_s$ frekansında bir salınım meydana gelmektedir. $2sf_s$ frekansında salınan manyetik alan statorda eşit genlikli $(1-2s)f_s$ frekansında sol yan band ve $(1+2s)f_s$ frekansında sağ yan band bileşenlerini oluşturur. Ek sol yan band bileşeni daha önce oluşan orijinal sol yan band bileşeni ile üst üste çakışmaktadır. Fakat bu iki bileşen birbirlerine göre zıt fazdadır. Bu yüzden statorda görülen gerçek sol yan band bileşeni, bu iki sol yan band bileşeninin farkından elde edilebilir [10]. Ayrıca kırık rotor çubuk durumunu gösteren gerçek sol yan band bileşeninin değeri, sağ ve sol yan band bileşenlerinin toplamından da elde edilebilir. Statorda oluşan sağ yan band bileşeni $(1+2s)f_s$ ise rotorda $3sf_s$ frekansında bir gerilim indükler. Bu gerilimden dolayı rotorda oluşan manyetik alan statorda $(1-4s)f_s$ frekansında bir akım akmasına sebep olmaktadır.



Şekil 1.5 Kırık rotor çubuğu arızasından dolayı oluşan alanların etkileşimi [10]

Görüldüğü gibi sol yan band bileşeni kırık rotor çubuğunu belirtirken sağ yan band bileşeni ise hız salınımı sonucu oluşmaktadır. Böylece kırık rotor çubuğu arızası durumunda stator akımında kayma frekansının iki katı frekanslarındaki sol ve sağ yan band bileşenlerine bakılarak arıza tespiti sağlanabilmektedir [11-16].

$$f_b = (1 \pm 2ks) f_s \quad k = 1, 2, 3 \dots \quad (1.8)$$

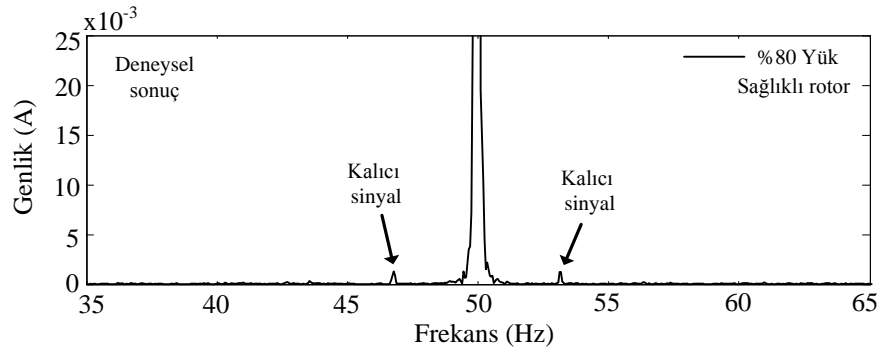
Bazen bu yan band harmonikleri üretim aşamasındaki aksaklıklardan dolayı sağlıklı bir motorda bile frekans spektrumunda görülebilmektedir. Fakat bu

harmonikler genelde kırık rotor çubuğu durumunda ortaya çıkan harmoniklerden çok daha küçük değerdendirler. Motor faz spektrumunda gözlenebilen diğer spektral bileşenler denklem 1.9'da tanımlanmaktadır [14].

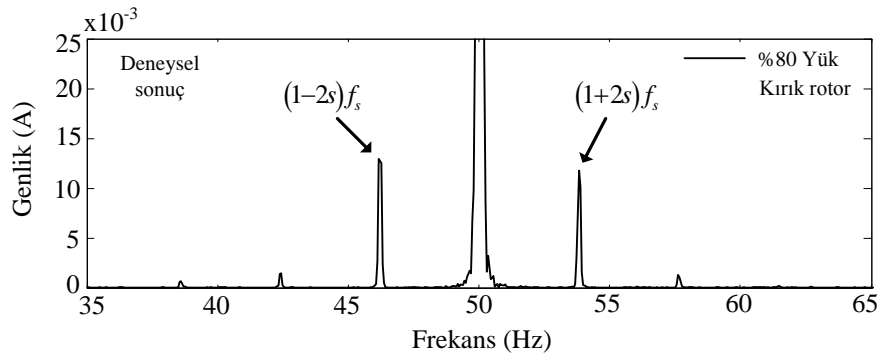
$$f_b = \left[\left(\frac{k}{p} \right) (1-s) \pm s \right] f_s \quad \frac{k}{p} = 1, 3, 5 \dots \quad (1.9)$$

Şekil 1.6'da sağlıklı ve kırık rotor çubuk arızası durumunda bir asenkron motorda tam yük koşullarında motor stator akım spektrumu verilmiştir. Sağlıklı bir motorda stator akımında sadece ana harmonik görülürken (Şekil 1.6a), kırık rotor çubuğu durumunda ise sağ ve sol yan bandlarda karakteristik arıza harmonikleri görülmektedir (Şekil 1.6b).

Kırık rotor durumunda ortaya çıkan sağ ve sol yan band harmoniklerinin genliği rotorun atalet momentine, motor yüküne ve kırık rotor çubuğu sayısına bağlıdır. Yan band harmoniklerinin ana harmoniğe olan uzaklığı ise motor kayma miktarına bağlıdır. Motorda kayma değeri arttıkça bu harmoniklerin ana harmoniğe olan uzaklığı artmaktadır (Şekil 1.7).

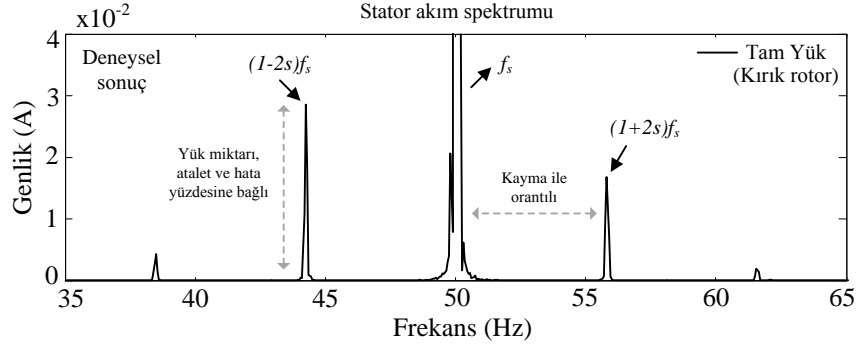


(a)



(b)

Şekil 1.6 Stator akım spektrumu a) Sağlıklı rotor b) Kırık rotor çubuk arızası



Şekil 1.7 Kırık rotor çubuk arızası durumunda karakteristik hata harmoniklerinin değişimi

1. 3. Yük Momenti Salınımı

Asenkron motorlar çalışma şartları ve yük durumuna bağlı olarak bazen yük salınımına maruz kalabilirler. Yük momentindeki salınım asenkron motorun kontrol ve sistem dinamiğini etkilemekle birlikte yük salınımına maruz kalan bu tip motorlarda doğru ve net bir durum tespiti yapmak oldukça zorlaşmaktadır. Çünkü yük momentindeki salınımlar motorda mekaniksel büyüklüklerin yanı sıra elektriksel büyüklükleri de etkilemektedir. Asenkron motorlarda durum tespit yöntemleri dikkate alındığında bugüne kadar yapılan birçok çalışmada motor yük durumu sabit olarak ele alınmıştır. Ancak yük momentindeki salınımı durumunda asenkron motorların akım spektrumu incelendiğinde yanıtıcı hata sinyalleri görülebilmektedir. Bu sinyaller karakteristik arıza sinyalleri üzerinde arıza tespitini zorlaştıracak yönde bir etkiye sebep olmaktadır.

Asenkron motorlarda genel olarak meydana gelen yük salınımları pozisyona bağlı, periyodik yük momentindeki salınımı ve tek frekansta salınan yük salınımları olmak üzere üç farklı grup altında toplanmaktadır [17]. Değişik tipteki bu yük momentindeki salınımlarından tek frekansta salınan yük salınımları stator akım spektrumunda kırık rotor çubuğu arızası ile benzer bir etkiye sebep olabilmektedir. Bu tip bir moment salınımı tek bir frekansta (f_{osc}) salınan bir momentin sabit bir moment üzerine bindirilmesi sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu tip bir yük salınımı denklem (1.10)'da matematiksel olarak ifade edilebilir.

$$T_{load} = T_r + \alpha T_r \cos(2\pi f_{osc} t) \quad (1.10)$$

burada T_r sabit yük momentini, α sabit yük momentine göre oluşan salınım oranını ve f_{osc} ise salınan yük momentini frekansını belirtmektedir. Eğer salınan yük momentinin büyüklüğü sabit yük momentine göre düşükse ve yük salınım frekansı (f_{osc}), kaynak frekansından (f_s) küçük ise yük salınımı analizi küçük sinyal yaklaşımı kullanılarak yapılabilir [18].

Yük momentini salınımı durumunda yarı kararlı duruma ulaşılır ulaşılmaz elektromanyetik moment (T_e), yük momentini (T_{load}) ve hız değişimi arasındaki ilişki küçük sinyal modeli ile ifade edilebilir.

$$J \frac{d\Delta\omega_r(t)}{dt} = \Delta T_e(t) - \alpha T_r \cos(2\pi f_{osc} t) \quad (1.11)$$

Burada J atalet momenti sabitidir. Motorun hız moment karakteristiği eğrisi lineer kabul edilirse, stator direnci ve reaktansı ihmal edildiğinde motorun elektromanyetik momentini denklem (1.12)' deki gibi yazılabilir;

$$T_e \cong \left(\frac{3P}{2\pi f_s} \right) \left(\frac{V^2}{R_2} \right) \left(1 - \frac{P\omega_r}{2\pi f_s} \right) \quad (1.12)$$

Kalıcı durum değerlerinden küçük sinyaller ayrıştırılırsa;

$$\begin{aligned} \Delta T_e(t) &= \left(-\frac{3P^2}{(2\pi f_s)^2} \right) \left(\frac{V^2}{R_2} \right) \Delta\omega_r(t) \\ &= -k\Delta\omega_r(t) \end{aligned} \quad (1.13)$$

Burada k değeri hız ve moment değişimleri arasındaki kazancı göstermektedir. Denklem (1.13), denklem (1.11)'de yerine koyulursa yük salınımı ve moment salınımı arasında birinci dereceden bir diferansiyel denklem elde edilir.

$$J \frac{d\Delta\omega_r(t)}{dt} + k\Delta\omega_r(t) = -\alpha T_r \cos(2\pi f_{osc} t) \quad (1.14)$$

Hız ve elektromanyetik momentteki dalgalanmalar ise;

$$\Delta\omega_r(t) = -\frac{\alpha T_r}{\sqrt{k^2 + (2\pi f_{osc} J)^2}} \cos\left(2\pi f_{osc} t - \arctan \frac{2\pi f_{osc} J}{k}\right) \quad (1.15)$$

$$\Delta T_e(t) = \frac{k\alpha T_r}{\sqrt{k^2 + (2\pi f_{osc} J)^2}} \cos\left(2\pi f_{osc} t - \arctan \frac{2\pi f_{osc} J}{k}\right) \quad (1.16)$$

Yük salınımindaki değişim yükün nominal değerine yakın ise denklem (1.15) ve (1.16)'dan görüldüğü gibi hız ve moment aynı salınım frekansında (f_{osc}) salınımlarıdır. Bu salınımın büyüklüğü ve yeri salınımın frekansına, atalet momentine, hız ve moment arasındaki kazanç (k) bağlıdır.

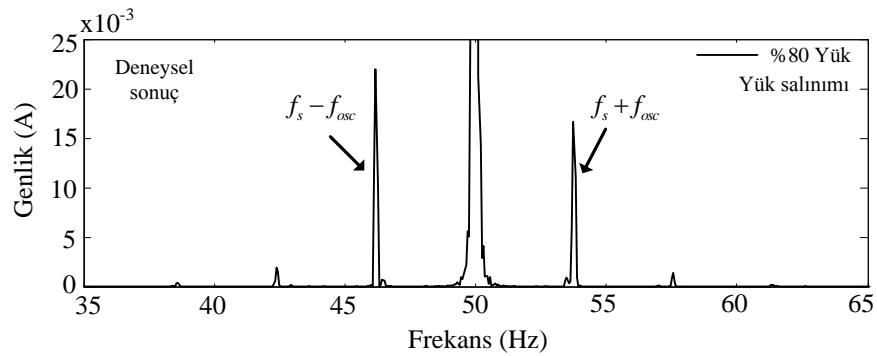
Referans [18]'deki analitik hesaplamaların sonucunda motorda yük salınımları var ise stator akım spektrumunda ana frekansın sağ ve sol yan bandlarında $f_s \pm k f_{osc}$ ($k=1,2,3\dots$) harmonikleri görülmektedir.

Harmonik akım modülasyonunun (ΔI) genliği ile yükteki dalgalanmanın genliği (ΔT_{load}) arasındaki ilişki [18]:

$$\frac{\Delta I}{\sqrt{2} I \cos \varphi} = \frac{\Delta T_e}{T_r} = \frac{k}{\sqrt{k^2 + (2\pi f_{osc} J)^2}} \frac{\Delta T_{load}}{T_r} \quad (1.17)$$

Denklemlerle verilebilir. Burada $\sqrt{2} I \cos \varphi$ stator ana akımını göstermektedir. Çok düşük frekanslarda ($2\pi f_0 J \ll k$) elektromanyetik momentteki salınım neredeyse yük momentindeki salınıma eşittir. Frekans değeri arttıkça yük salınımlarının elektromanyetik momente ve stator akımına olan etkisi azalmaktadır.

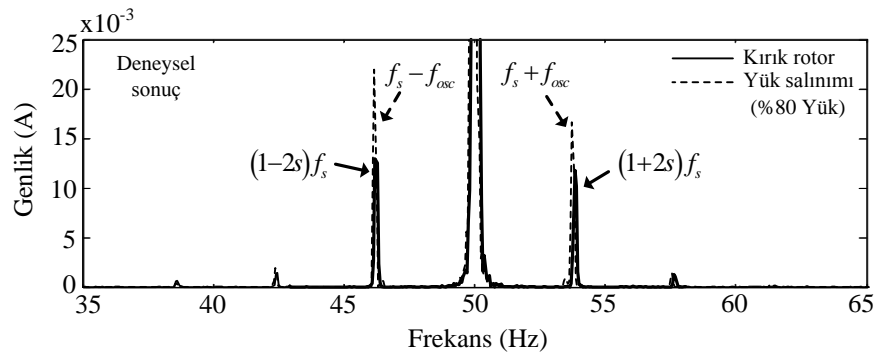
Şekil 1.8'de bir asenkron motorda düşük frekansta yük momenti salınımları var iken stator akım spektrumu verilmiştir. Motor %80 yükte ve ortalama momente göre %5'lik salınımda çalışmaktadır. Yük momenti salınımları frekansı 4.5 Hz'dir. Stator akım spektrumu incelendiğinde ana harmoniğin sol ve sağ yan bandlarında ortaya çıkan salınıma ilişkin karakteristik harmonikler $f_s \pm f_{osc}$ frekanslarında net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 1.8 Yük momenti salınımları durumunda stator akım spektrumu

Bazen yük momenti salınımindan dolayı ortaya çıkan yan band harmonikleri ($f_s \pm f_{osc}$) kırık rotor çubuğu arızası durumunda ortaya çıkan harmonikler $(1 \pm 2s)f_s$ ile üst üste çakışabilir. Özellikle yük momenti salınımı frekansı kırık rotor çubuk arızası frekansına eşit ise yük momenti salınımı ve kırık rotor çubuğu arızasına ait olan harmonikler stator akım spektrumunda aynı frekanslarda görülmektedir.

Şekil 1.9'da %80 yükte çalışan bir asenkron motorda kırık rotor çubuk arızası ve yük momenti salınımı var iken stator akım spektrumu incelenmiştir. Yük salınımı frekansı kırık rotor çubuk arızası frekansına eşit olduğundan ortaya çıkan harmonikler aynı frekanslarda görülmektedir. Bu yüzden bu harmoniklerin gerçekten kırık rotor çubuk arızasına ait olup olmadığı yalnızca stator akım spektrumuna tespit edilememektedir.



Şekil 1.9 Kırık rotor çubuk ve düşük frekanslı yük momenti salınımı durumunda stator akım spektrumu

1. 4. Tezin Amacı

Daha önceki bölümlerde bahsedildiği gibi kırık rotor çubuk arızası ve yük momenti salınımı stator akım spektrumunda ana harmoniğin yan bandlarında benzer harmoniklerin görünmesine sebep olmaktadır. Özellikle yük momenti salınımı frekansı kırık rotor çubuk arızası frekansına eşit ise sadece stator akım spektrumundaki karakteristik harmoniklerine bakılarak motor durumu hakkında doğru bir bilgi elde edilememektedir. Bu yüzden doğru bir arıza tespiti için bu iki etkinin birbirinden ayrıştırılması gereklidir.

Bu tezin ana amacı şebekeden ve sürücü ile beslenen üç fazlı asenkron motorlarda kırık rotor çubuk arızası ile düşük frekanslı yük moment salınımlarını

birbirinden ayrıştırarak doğru bir arıza tespiti sağlamaktır. Bunun için geliştirilen temel algoritma ve metotlar şunlardır;

- Stator akımına Hilbert dönüşümü uygulayarak analitik sinyal vektörünün elde edilmesi ve bu vektörün uygun bir örnekleme tekniğiyle örneklenmesinden elde edilen spektrumun kullanılması.
- Stator akım spektrumu yerine motor yük momenti ve stator faz gerilimi spektrumlarından yararlanılarak bir hata tespit yönteminin tanımlanması
- Doğrudan moment kontrollü (DTC) asenkron motorlarda akım ve gerilim q -ekseni bileşenlerinden (i_{qs} ve v_{qs}) yararlanılarak bir ayrıştırma algoritmasının geliştirilmesi

1. 5. Tez İçeriği

Bu tez çalışması 6 Bölümden oluşmaktadır. Bölüm 2’de kapsamlı bir literatür taraması yapılmıştır. Bu bölümde ilk olarak kırık rotor çubuk arızası tespiti üzerine yapılan araştırmalar incelenmiştir. Daha sonra kırık rotor çubuk arızası ile düşük frekanslı yük momenti salınımının birbirinden ayrıştırılması üzerine yapılan araştırmalar incelenmiştir.

Bölüm 3’te kırık rotor çubuk arızası ile düşük frekanslı yük momenti salınımına sahip asenkron motorlarda bu iki etkiyi ayrıştırmak için geliştirilen algoritmalar sunulmuştur.

Bölüm 4’de asenkron motorun bilgisayar benzetimi ve bu benzetime ait sonuçlar verilmiştir. Bu bölümde asenkron motor modellendikten sonra Bölüm 3’te belirtilen algoritma ve metotlar temel alınarak benzetim sonuçları incelenmiştir.

Bölüm 5’te geliştirilen algoritmaları uygulamak için gereken deney düzeneği ve elde edilen bilgileri toplamak ve işlemek için gereken donanım detaylı olarak açıklanmıştır. Ayrıca laboratuvar ortamında oluşturulan deney düzeneğinden elde edilen deneysel sonuçlar incelenmiştir.

Bölüm 6 bu tezin sonuçlarını, katkısını ve gelecekte yapılması planlanan çalışmalar için önerileri içermektedir.

2. DAHA ÖNCE YAPILAN ÇALIŞMALARIN ÖZETİ

2.1. Kırık Rotor Çubuk Arızasının Tespiti Üzerine Yapılan Çalışmalar

Simetrik bir sistemden beslenen sağlıklı bir asenkron motorda sadece ana harmonik akımı stator sargularından akar. Kırık rotor çubuk arızası olduğunda kırık rotor çubuğundan akım akmayacak ve kırık rotor çubuğunun yanındaki çubuklardan ek akımlar akacaktır. Böylece sistemde bir dengesizlik meydana gelecektir. Bu dengesizlik stator akım spektrumunda sağ ve sol yan bantlarda $(I \pm 2s)f_s$ frekanslarında gözlenebilmektedir [12-15]. Sol yan band harmoniği moment ve hızda $2sf_s$ frekansında salınımına sebep olmaktadır [19, 20]. Eğer moment ve hızdaki salınım harmonikleri göz önüne alınırsa, stator akımında k tekil sayı olmak üzere $(I-s)f_s \pm ksf_s$ 'de hata frekansları da görülebilmektedir [16]. Kırık rotor durumunda stator akımında görülen $(I+2s)f_s$ bileşeni hızdaki dalgalanmadan ve manyetik doyumundan dolayı ortaya çıkmaktadır [21, 22] ve bu harmoniğin genliği genellikle $(I-2s)f_s$ harmoniğinin genliğinden düşüktür [23]. Aynı zamanda bu yan band harmoniklerinin genliği rotor eğim faktörünün artmasıyla da düşmektedir [24].

Arıza durumunda stator akımında görülen sol yan band bileşenin $(I-2s)f_s$ [12], sağ ve sol yan band harmoniklerinin toplamı olduğu [25], ve rotor manyetik alan uzay vektör yönlendirme metodu ile elde edilen salınım aralığının [26] kırık rotor çubuğu sayısı ile ilişkili olduğu gösterilmiştir.

Stator akımında baskın olan ana harmoniğin olumsuz etkilerini ortadan kaldırmak için bazı analog filtreler (notch) kullanılmaktadır. Bu analog filtrelerin yerine dijital bir filtre tasarlanarak ana stator akımı bastırılmakta ve kırık rotor arızası tespiti sağlanmaktadır [27, 28]. Ayrıca Pwelch metodu, Ayrık zamanlı Fourier Dönüşümü ve AR-Tabanlı spektrum yöntemleri farklı pencere genişlikleri kullanılarak motor giriş akımına uygulanmaktadır. Sonuç olarak AR-Tabanlı spektrum yönteminin arıza tespitinde daha az örnekleme oranı kullanarak diğer metotlar kadar performans sağlandığı belirtilmiştir [28].

Motor kalkış anında stator akımındaki salınımların fazla olması ve motor kalkış süresinin çok kısa olmasından dolayı stator akımlarının Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) ile analizi oldukça güç olmaktadır. Wavelet ve Hilbert dönüşümü gibi sinyal işleme teknikleri ile hem kalıcı hem de geçici durumlarda motor akımlarının analizi yapılabilmektedir. Motor kalkış anında stator akımları Wavelet-Ridge metodu [29],

kompleks-Wavelet fonksiyonu [30] ve Hilbert dönüşümü [31] ile analiz edilmiştir. Sol yan band bileşeni $(1-2s)f_s$ genliğinin motor hızlandıkça büyüdüğü gösterilmiştir. Referans [32]'de kalkış durumundaki geçici ve kalıcı stator akımları wavelet analizi ile gözlenmekte ve kırık rotor çubuk arızası tespit edilmektedir. Bunun yanı sıra kırık rotor çubuk arızası durumunda motor kalkış akımlarının analizi sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmiştir [33]. Bu analiz sonucunda motor kalkış durumunda iken stator akım spektrumunda $4sf_s$, $7sf_s$, $10sf_s$, harmoniklerinin kırık rotor çubuk arızası durumunda ortaya çıktığı görülmektedir.

Motorun yüklü olmadığı durumlarda kayma çok düşük olduğundan kırık rotor çubuk arızası tespiti çok zorlaşmaktadır. Özellikle yarım kırık rotor çubuğu durumunda motor yüksüz iken bu tip bir arızanın tespiti neredeyse imkânsızdır. Referans [34]'de motor yüksüz durumda çalışırken yarım kırık rotor çubuk arızası durumunda vibrasyon sinyali ile akım sinyalinin korelasyonundan yararlanılarak arıza tespiti sağlanmaktadır. Aynı zamanda [34]'de kompleks-wavelet fonksiyonu kullanılarak motor kalkış akımları incelenmiştir. Wavelet paket dağılımı (WPD) ve yapay sinir ağları (YSA) metotları kullanılarak kırık rotor çubuk arızası tespit edilmiştir [35]. Bu çalışmada stator akımına WPD uygulanarak yeni özellik katsayıları elde edilmekte ve bu katsayılar YSA metodu ile bir öğretim algoritmasından geçirilerek hata tespiti sağlanmaktadır. Bir diğer çalışmada motor iki faz akımı, giriş gerilimleri ve hız bilgisi kullanılarak Daubechies Wavelet dönüşümü ile kırık rotor çubuk arızası tespit edilmektedir [36]. Frekans analizi metotları genellikle hız veya kayma bilgisine ihtiyaç duyarak arıza tespiti sağlarlar. Ancak Referans [37]'de hız ve kayma bilgisine ihtiyaç duymadan Mallat algoritması tabanlı ayrık zamanlı Wavelet dönüşümü kullanılarak sadece örnekleme frekansı ve örnek sayısı kullanılarak kırık rotor çubuk arızası tespit edilmiştir.

Motor akımları spektrumları yanı sıra anlık güç spektrumları da durum izleme teknikleri arasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Güç spektrumlarında hata sinyalleri daha belirgin olarak görülmektedir. Ayrıca ana frekans bileşenin etkisi güç spektrumlarında ortadan kalkmaktadır. Referans [38] ve [39]'da anlık güç spektrumlarında $2sf_s$ frekansında kırık rotor çubuk arızasına ilişkin harmonikler net bir şekilde görülmektedir.

Motorun besleme kaynağından ilişkisi kesildikten sonra rotor akımları belli bir süre akmaya devam edecektir. Bu akımlar Faraday indüksiyon yasası gereği statorda

bir gerilim indükleyecektir. Bu gerilimin analizi yapılarak kırık rotor çubuk arızası tespit edilebilmektedir [40, 41]. Böylece besleme kaynağının etkileri, motorun doyum etkisi vb. sorunlar ortadan kaybolmaktadır. Elde edilen bu gerilimlerden uzay vektör gerilimleri elde edilip FFT yerine çoklu sinyal sınıflandırılma (MUSIC) analizi ile kırık rotor tespiti daha etkin bir şekilde sağlanmaktadır [41].

Güç elektroniği ve yarı iletken teknolojisindeki gelişmelerden dolayı asenkron motorlarda hız ve moment kontrolü için değişken frekanslı veya doğrudan moment kontrollü sürücüler tercih edilmektedir. Asenkron motorlar sürücüler ile beslendiğinde anahtarlama frekansı, kontrol parametrelerinin etkisinden dolayı oluşan gürültüler karakteristik hata sinyalleri üzerinde olumsuz etkiler oluşturmaktadır. Bu yüzden araştırmalar sürücüler ile beslenen asenkron motorlarda arıza tespiti ve yeni karakteristik arıza sinyallerinin tespiti üzerine yoğunlaşmaktadır. Referans [42]'de inverter ile beslenen bir asenkron motorda kırık rotor çubuk arızası meydana geldiğinde çift dereceli harmoniklerin arttığı gözlemlenmektedir. Kırık rotor çubuğu sayısında artma meydana geldikçe motor ana manyetik alanı bozulmakta ve bu bozulmadan dolayı makinenin statik ve dinamik davranışı etkilenmektedir. Ayrıca arıza durumunda makinede bölgesel manyetik doyumların kırık rotor çubuğu civarında daha çok olduğu bilinmektedir. Bu düzensizliklerden dolayı hız ve momentte oluşan dalgalanmalar inverter çıkış gerilimlerinde görülebilmektedir. Bu gerilimlerdeki yüksek frekanslı harmonikler filtre kullanılarak ayrıştırılıp düşük frekanslı görev periyodu dalgalanması elde edilmektedir. Stator geriliminin görev periyodundaki bu dalgalanmaya bakılarak kırık rotor çubuk arızası tespit edilebilmektedir [43].

Referans [44]'de yapay karınca kümelenme (Artificial Ant Clustering) tekniği kırık rotor çubuk arızasının tespitinde kullanılmıştır. Bu metot ile stator akımındaki harmonik bozukluk minimize edilmektedir. Ayrıca değişken frekans sürücülerle beslenen asenkron motorlarda kırık rotor arızasının tespiti için önceden tanımlanan bir anahtarlama frekansında indüktans değişimi sıfır-ardışık bileşen geriliminde (zero sequence voltage) incelenmiştir [45]. Referans [46]'da parametrik olmayan bir yaklaşım metodu ile yüksek frekanslı eşdeğer motor direnci kullanılarak arıza tespiti sağlanmaktadır. Düşük genlikli yüksek frekanslı bir taşıyıcı sinyalin besleme kaynağına enjekte edilmesiyle de rotor ve stator arızaları tespit edilebilmektedir [47]. Rotor alan yönlendirme kontrollü inverter sürücülerinde sanal akım (virtual-current)

tabanlı bir model kullanılarak d -ekseni bileşeninin salınımı gözlemlenerek kırık rotor arızası tespit edilmiştir [48]. Referans [49]'da manyetik ve moment akım bileşenlerinin hata sinyallerinin frekans spektrumundan yararlanılarak kapalı çevrim kontrollü sistemlerde kırık rotor çubuk arızası tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra dolaylı rotor akı kontrollü sürücülerde tahmin edilen rotor akısı kırık rotor arızası tespiti için ideal bir değişken olduğu görülmektedir [50]. Vektör kontrollü asenkron motor sürücülerinde akım spektrumun yanı sıra gerilim spektrumu da rotor arızasına ait hata sinyalleri içermektedir [51].

Sonlu elemanlar yöntemi makinenin gerçek ölçülerini, malzeme yapısını ve stator sargı yapısını dikkate aldığından durum izleme metotları ve motor tasarımı konusunda oldukça sık kullanılmaktadır. Referans [52] asenkron motor simetrik ve asimetric bir kaynaktan beslendiği durumda elektromanyetik alan denklemlerini sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak göstermektedir. Bu çalışmada hava aralığına yerleştirilen bir araştırma bobini ile hava aralığı akısı sağlıklı ve kırık rotor durumunda gözlenmektedir. Elde edilen sonuçlarda arıza durumunda hava aralığı akısında 3. harmonikte artma görülmektedir. Referans [53]'de motor anma gerilimi ve daha düşük gerilimde çalıştırılarak manyetik doyumunun kırık rotor arızası tespiti üzerine etkisi araştırılmıştır. Sonuç olarak bölgesel doyumların varlığının kırık rotor çubuk arızasının tespiti üzerine etkisinin az olduğu ayrıca kırık rotor çubuk arızası durumunda makine çekirdeğinde yüksek doyum bölgelerinin oluştuğu gözlenmiştir.

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak hava aralığındaki akının fiziksel analizi ile kırık rotor çubuğunun yeri tespit edilebilmektedir [54]. Sonuçta kırık rotor çubuğu yerinin sol yan band harmoniğinin genliğine etki ettiği görülmüştür. Diğer bir çalışmada sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak motorun sağlıklı ve arızalı durumda iken motorun termal analizi incelenmiştir [55]. Rotor ısısının çok yüksek olduğu aynı zamanda stator sargılarındaki ısının stator çekirdeği ısısından daha yüksek olduğu görülmektedir. Rotorda kırık rotor çubuğu olduğu durumda motor toplam sıcaklık dağılımının çok fazla değişmediği ancak kırık rotor çubuklarından akım akmadığı için sıcaklığın kırık çubuklarında çok düşük olduğu gözlenmiştir [55]. Sonlu elemanlar yöntemi ile asenkron motorlarda kırık rotor çubukları etrafında manyetik alan doyumunun fazla olduğu, depolanan manyetik enerji miktarının kırık rotor çubuğu sayısı arttıkça azaldığı, stator ve rotordaki çekirdek kayıplarının kırık rotor arızasından etkilenmediği gösterilmiştir [56, 57].

Yapay zekâ algoritmaları kullanılarak elektrik makinelerinde verimli ve efektif bir hata tespiti sağlanabilmektedir. Uzman sistemler, sinir ağları, bulanık mantık ve bulanık-yapay ağ algoritmaları hata tespitinde ve sınıflandırılmasında oldukça önemlidir [10]. Referans [58]'de simetrik ve asimetrik gerilim ile beslenen asenkron motorda kırık rotor çubuk arızası genetik algoritma ve bulanık mantık kullanılarak tespit edilmiştir. Ayrıca Hilbert dönüşümü ile elde edilen stator akım zarfı bilgisi kullanılarak da kırık rotor arızası tespit edilebilmektedir [59]. Burada elde edilen hata frekansı ve DC bileşen bilgisi bulanık mantık bloğunun girişi olarak kullanılmakta ve rotorun durum bilgisi sağlanmaktadır.

Kırık rotor çubuğu durumunda stator akımındaki sıfır geçiş zamanı bilgisi kullanılarak hata tespiti sağlanabilmektedir. Burada amaç üç faz stator akımlarının sıfır geçiş noktalarını tespit edip bu noktalar arasındaki farkı karşılaştırarak rotor çubuk arızasını tespit etmektir [60].

Stator akım bilgisi kullanılarak yapılan tespit algoritmalarının yanı sıra kaçak akı bilgileri, hava aralığı akı bilgileri, etkin dijital sinyal işleme teknikleri ve mikroişlemci tabanlı sistemler kullanılarak yeni hata tespit algoritmaları hızla gelişmektedir.

2.2. Kırık Rotor Çubuk Arızası ile Yük Momenti Salınımının Ayrıştırılması Üzerine Yapılan Çalışmalar

Asenkron motorlarda motor akım imza analizi (MCSA) kullanılarak elde edilen stator akım spektrumları motorun durum bilgisi hakkında neredeyse tüm bilgileri içermektedir. Asenkron motorlarda meydana gelen farklı tip arızalar stator akım spektrumunda genellikle farklı karakteristik hata frekans bileşenlerinde ortaya çıkmaktadır. Fakat motor yük durumu, motor besleme kaynağının durumu vb. bazı dış etkenler stator akımında yanıltıcı hata sinyallerinin ortaya çıkmasına sebep olabilmektedir.

Asenkron motorlarda oluşan elektromanyetik moment, yük momentindeki tüm frekans bilgilerini içermektedir. Düşük frekanslı yük moment salınımı stator akım spektrumunda kırık rotor çubuk arızası ile aynı etkiye sebep olmaktadır. Özellikle yük salınım frekansı kırık rotor çubuk arızası frekansına eşit ise stator akım spektrumunda yük salınımına ait olan harmonikler ile kırık rotor çubuğuna ait olan

harmonikler aynı frekansta gözlenmektedir. Bu yüzden doğru ve güvenilir bir hata tespiti için bu iki etkinin birbirinden ayrıştırılması gerekmektedir. Bu iki etkiyi birbirinden ayrıştırmak için literatürde birçok çalışma bulunmaktadır.

Eğer yük momentinin salınımı rotor dönüş hızı ile değişiyorsa kırık rotor çubuğu ile aynı harmonikler akım spektrumunda ortaya çıkabilmektedir [61]. Bu iki etkiyi birbirinden ayrıştırmak için yük momenti ve hatanın uzaysal pozisyon bilgisi gerekmektedir. Bu çalışmada [61] rotor pozisyonuna bağlı olan yük salınımlarında kırık rotor arızasının tespiti akım spektrumu kullanılarak yapılmıştır. Senkron referans çatıda stator akımı stator akısı ile aynı eksene ayarlandıktan sonra, manyetik alandaki herhangi bir anormalliğin (kırık rotor arızası gibi) i_d ve i_q bileşenlerini etkilediği ancak yük salınımının sadece i_q 'ye etki ettiği görülmektedir.

Referans [62]'de pozisyona bağlı yük salınımlarının stator akımındaki etkilerini ortadan kaldırmak için üç faz akım ve gerilim bilgisine ihtiyaç duyan yeni bir metod geliştirilmiştir. Üç faz akım ve gerilimler aracılığıyla sağlıklı bir motorda d -ekseni akımının tahmini sağlanmaktadır. Tahmin edilen d -ekseni akımından gerçek akım bilgisi çıkartılırsa sadece rotor arızası tarafından indüklenen harmonikler ortaya çıkmaktadır. Böylece yük salınımı etkisi ortadan kaldırılmaktadır.

Referans [63]'de yük salınımı tarafından üretilen pozitif ardışık bileşen harmonikler ile rotor arızası tarafından üretilen negatif ardışık bileşen harmonikler arasındaki etkileşimden yararlanılarak bir arıza indeksi oluşturulmuştur. Bu etkileşim sonucunda yük salınımı var iken kırık rotor çubuk arızası d -ekseni akım spektrumunda DC değerinin varlığı ile tespit edilebilmektedir.

Statorun bir veya birkaç dişine eklenen düşük sarımlı sargılar aracılığıyla hem hata tespiti hem de rotor arızası ile yük momenti salınımları ayrıştırılabilmektedir. Referans [64] ve [65]'de stator dişinde indüklenen manyetik alanın ölçümü tabanlı düşük maliyetli bir tespit metodu geliştirilmiştir. Bu çalışmalarda yapılan sonlu elemanlar yöntemi (FEM) tabanlı benzetimler sonucunda kırık rotor çubuk arızası olduğunda sağlıklı rotora göre motorun bir kutbunun manyetik ekseninin yerinin değiştiği ve kutup uzunluğunun salınım yaptığı görülmektedir. Ancak yükün salımlı olması durumunda bu salınımın tüm kutuplara aynı etkiyi yaptığı ayrıca herhangi bir yer değiştirme ve kutup uzunluğu salınımının olmadığı görülmektedir.

Statorun bir dişi etrafına sarılan sargıdan elde edilen gerilim bilgisinin ardışık sıfır geçiş noktaları hesaplanarak kırık rotor çubuk arızası ile yük salınımı birbirinden ayrıştırılabilmektedir [64]. Eğer sıfır geçiş noktaları arasındaki fark sabit bir değer ise bu durum sağlıklı ve/veya yük salınımlı motoru temsil etmektedir. Eğer sıfır geçiş noktaları arasındaki fark sabit değilse motorda kırık rotor çubuk arızası durumunu göstermektedir. Bu metodun sağlıklı çalışabildiği yük aralığının %50-%100 olduğu belirtilmiştir. Referans [66]'da ise referans [64]'de olduğu gibi sıfır geçiş noktaları arasındaki fark kullanılmakta ancak burada hataya sebep olan farkları daha belirgin göstermek için yeni bir arıza indeksi tanımlanmaktadır.

Stator akımındaki yüksek dereceli uzay harmonikleri tarafından oluşan bileşenler yardımıyla kırık rotor çubuk arızası yük momenti salınımindan ayrıştırılabilmektedir [67]. Motorda oluşan her arıza ve yük salınımı durumu için bir genel modülasyon indeksi (Global Modulation index) akım spektrumundan yararlanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen modülasyon indeksi kırık rotor çubuk arızası ile artarken yük salınımı durumunda değişmemektedir.

Kırık rotor çubuğu arızası ile düşük frekanslı yük momenti salınımlarını birbirinden ayırtmak için gerilim ve akım matematiksel modellerinden elde edilen akı halkası uzay vektörü (flux linkage space phasor) ve elektromanyetik momenti hesaplayan Vienna Monitoring Method (VMM) kullanılmıştır [68]. Gerilim anlık moment (t^v) ve akım anlık moment (t^i) modellerinin farkından yararlanılarak bir arıza indeksi (Δt) elde edilmektedir. Sağlıklı bir motorda bu fark sıfıra eşit iken kırık rotor çubuğu arızası durumunda sıfırdan farklı bir değerdedir. Bu arıza indeksinin yük salınımindan etkilenmediği görülmüştür.

Referans [69]'da stator akımındaki anlık aktif ve reaktif akım bileşenleri elde edilerek kırık rotor çubuk arızası ve düşük frekanslı yük momenti salınımları incelenmiştir. Anlık aktif (p) ve reaktif güç (q) denklem (2.1) ve (2.2)'deki gibi tanımlanmaktadır.

$$p = v_{\alpha} i_{\alpha} + v_{\beta} i_{\beta} \quad (2.1)$$

$$q = v_{\beta} i_{\alpha} - v_{\alpha} i_{\beta} \quad (2.2)$$

burada v_α , i_α alfa eksenini gerilim ve akımları gösterirken, v_β ve i_β beta eksenini gerilim ve akımı temsil etmektedir. Anlık aktif reaktif güçlerden elde edilen anlık aktif ve reaktif akım bileşenleri alfa ve beta eksenini için tanımlanabilmektedir [69].

$$i_{\alpha p} = \frac{v_\alpha}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} p \quad (2.3)$$

$$i_{\alpha q} = \frac{v_\beta}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} q \quad (2.4)$$

$$i_{\beta p} = \frac{v_\beta}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} p \quad (2.5)$$

$$i_{\beta q} = \frac{-v_\alpha}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} q \quad (2.6)$$

Burada $i_{\alpha p}$, $i_{\alpha q}$ alfa eksenini anlık aktif ve reaktif akımı, $i_{\beta p}$ ve $i_{\beta q}$ beta eksenini anlık aktif ve reaktif akımı göstermektedir. Düşük frekanslı yük momenti salınımlarına ait harmonikler anlık aktif akım spektrumunda baskın bir şekilde gözlemlenirken kırık rotor çubuk arızasına ilişkin harmonikler anlık reaktif akımda net bir şekilde gözlenmektedir [69].

Anlık aktif ve reaktif güç spektrumlarının analizi yardımıyla da kırık rotor çubuk arızası düşük frekanslı yük momenti salınımlarından ayrıştırılmaktadır [70]. Anlık aktif ve reaktif güç spektrumlarında arıza durumunda ortaya çıkan $2sf_s$ bileşeni farklı yük ve çalışma koşullarında incelenmiştir. Kırık rotor çubuk arızası durumunda anlık reaktif güçteki $2sf_s$ bileşeninin değeri anlık aktif güç spektrumundaki $2sf_s$ bileşeninin değerinden büyüktür. Yük salınımlı durumunda ise bu olayın tam tersi bir durum söz konusudur. Bu bileşenler arasındaki fark motor-yük ataleti arttıkça azalmaktadır. Bu çalışmada ayrıca anlık reaktif güç spektrumunda $2sf_s$ harmoniğinin genliğine dayalı yükten bağımsız uygun bir hata yoğunluk faktörü tanımlanmaktadır.

Anlık aktif ve reaktif güç teorisinden elde edilen anlık aktif ve reaktif Park's akım vektörlerinden yararlanılarak kırık rotor çubuğu arızası düşük frekanslı yük salınımlarından ayrıştırılmıştır [71]. Anlık aktif Park's vektör (R_p) ve reaktif Park's vektör (R_q), anlık aktif ve reaktif akımlardan (denklemler (2.3) - (2.6)) yararlanılarak elde edilir.

$$R_p = \begin{bmatrix} i_{\alpha p} \\ i_{\beta p} \end{bmatrix} = \frac{P}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$R_q = \begin{bmatrix} i_{\alpha q} \\ i_{\beta q} \end{bmatrix} = \frac{Q}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\beta \\ -v_\alpha \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Sağlıklı bir motorda bu Park vektörlerin genlikleri sadece bir DC bileşen içerirken, arıza durumunda bu DC bileşenin yanı sıra ek bileşenlerde anlık aktif ve reaktif Park vektör spektrumunda görülmektedir. Kırık rotor çubuk arızası anlık reaktif Park vektörde net bir şekilde gözlenirken yük salınımı arızası anlık aktif Park's vektörde görülmektedir.

Referans [72] ve [73]'de yük çeşidinden bağımsız olarak aktif ve reaktif güçlerin birleşiminden oluşan ve rotor arızası ile yük salınımını birbirinden ayırıştırabilen bir metot geliştirilmiştir. Bu metot aktif ve reaktif güç spektrumlarının faz ve genlik analizinin birleşiminden oluşmaktadır. Aktif ve reaktif güç spektrumları düşük kayma durumlarında hata frekansları ile DC değerin karışmaması için DC değerden ayırıştırılarak aktif ve reaktif güç spektrumlarının frekans spektrumları incelenir. Bu frekans spektrumlarındaki bilgiler aracılığıyla aktif ve reaktif güç arasındaki faz farkı incelenmektedir. Eğer bu faz farkı 90° 'den küçük ise zamanla değişen yükleri eğer büyükse rotor arızasını göstermektedir. Bu açının 90° 'ye eşit olduğu durumlar da ise DC değerin ortadan kaldırıldığı aktif Δp ve reaktif Δq güç salınım spektrumları kontrol edilir. Eğer $\Delta q < \Delta p$ ise yük salınımını aksi durumda rotor arızasını göstermektedir [72, 73].

Anlık aktif ve reaktif güç spektrumları ve bunlardan türetilen anlık güç faktörü ve faz açısından yararlanılarak rotor arızası, yük salınımı ve hava aralığı düzensizliği birbirinden ayırıştırılabilir [74]. Aktif gücün $p_0(t)$, görünen güce $s_0(t)$ oranı ile elde edilen anlık güç faktörü $\lambda_0(t)$ ve bu oranın tersi alınarak elde edilen güç faktörü faz açısı $\varphi_0(t)$ spektrumları DC bileşen ile birlikte hata frekansları içermektedir. Kırık rotor arızası reaktif güç $q_0(t)$ ve $\varphi_0(t)$ 'de net bir şekilde görülürken yük salınımı $p_0(t)$ ve $\varphi_0(t)$ 'de gözlemlenebilmektedir.

Asenkron motorda ölçülen terminal gerilim ve akımlarının oranı ile hesaplanan stator anlık kompleks görünen empedansından yararlanılarak kırık rotor çubuk arızası ve yük momenti salınımı birbirinden ayırıştırılabilmektedir [75]. Stator

anlık görünen empedansın gerçek ve sanal bileşenlerin spektrumu ana harmonik yerine sadece DC bileşen ve ek karakteristik hata bileşenleri içermektedir. Rotor arızaları anlık stator empedansının gerçek bileşeninde $r_d(t)$ daha baskın bir şekilde görülürken yük momenti salınımı sanal bileşeninde $x_d(t)$ görülmektedir.

Stator uzay vektörünün aktif ve reaktif bileşenleri de kırık rotor arızası ile yük salınımı arızası durumunda farklı şekilde davranmaktadır [76-79]. Kırık rotor arızası durumunda aktif ve reaktif uzay vektörlerinden elde edilen yer eğrilerinin (locus) genişliği artan atalet momenti ile artmakta ve eğrilerin eksenleri imajiner yöne doğru yönelmektedir. Oysaki yük salınımını durumunda yer eğrilerinin genişliği artan atalet momenti ile azalmakta ve eğrilerin eksenlerinde herhangi bir değişiklik olmamaktadır. Başka bir deyişle uzay vektör bileşenleri arasındaki faz değişimleri göz önüne alınırsa eğer aktif bileşen reaktif bileşenden $\pi/2$ 'den daha az kadar geri veya ileri ise bu durum rotor arızasını aksi durum ise yük salınımını göstermektedir [76-79]. Böylece aktif ve reaktif bileşenlerden elde edilen yer eğrilerinin açılmal yer değiştirmeleri ve fiziksel genişlikleri kullanılarak rotor arızası ile yük salınımı birbirinden ayrıştırılabilmektedir.

Tek fazlı asenkron motorlarda kalkış anında kullanılan yardımcı sargıdan yararlanılarak kırık rotor çubuk arızası yük momenti salınımı durumunda tespit edilebilmektedir [80]. Motor kalkış yaptıktan sonra yardımcı sargı devre dışı olmaktadır ve normal çalışmada bu sargı bir araştırma bobini olarak kullanılabilir. Bu yardımcı sargıda indüklenen gerilimde 5. Harmoniğin sol yan band harmoniğinin $((5-4s)f_s)$ varlığı kırık rotor arızasını göstermektedir. Yük momenti salınımı durumunda ise bu harmoniğin değeri gürültü düzeyindedir.

2.3. Sonuç

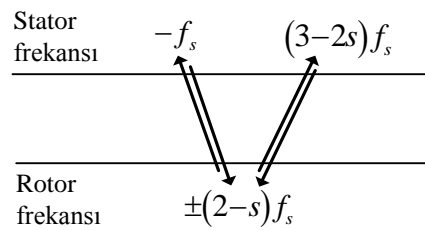
Yapılan çalışmaların çoğunda görüldüğü gibi akım veya gücün aktif ve reaktif bileşenlerini ve bu bileşenlerden elde edilen ek bileşenler kullanılarak kırık rotor çubuk arızası düşük frekanslı yük momenti salınımından ayrıştırılmıştır. Mevcut metotların çoğunda asenkron motor şebeke ile beslenmektedir.

3. KIRIK ROTOR ÇUBUK ARIZASININ DÜŞÜK FREKANSLI YÜK MOMENTİ SALINIMINDAN AYRIŞTIRILMASI

3.1. Analitik Sinyalin Açısal Dalgalanması Metodu

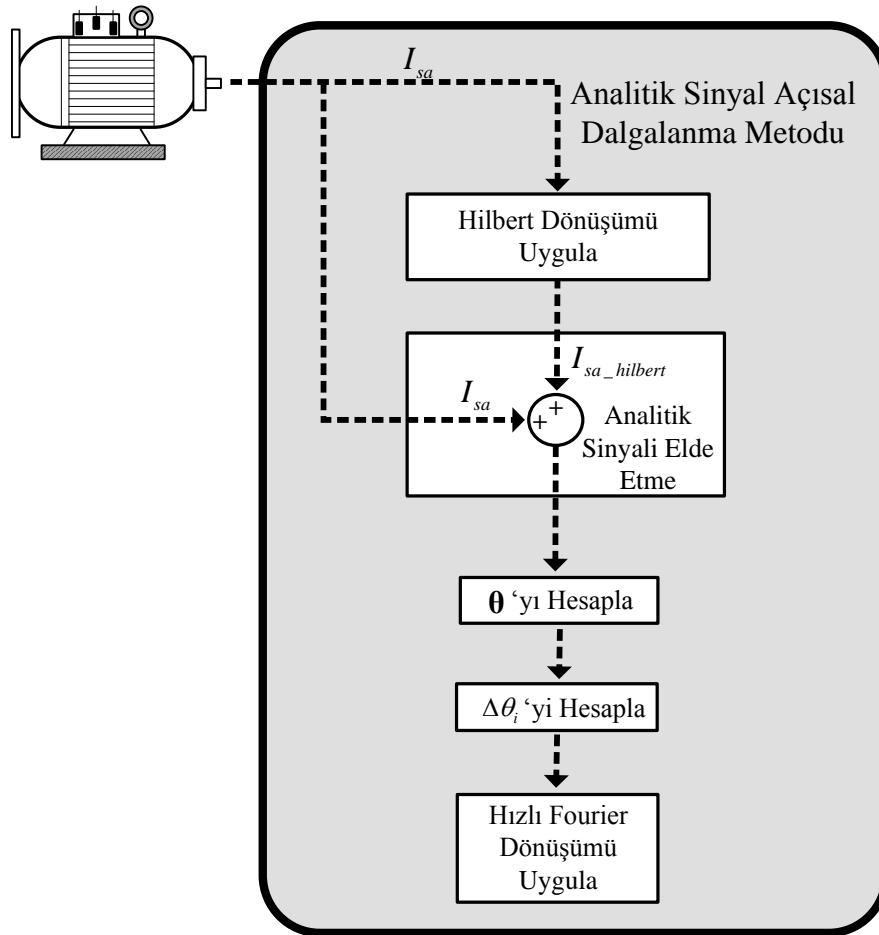
Tez kapsamında kırık rotor çubuğu arızasını düşük frekanslı yük momenti salınımlarından ayırtmak için yeni bir metot geliştirilmiştir. Bu metot temel olarak Hilbert dönüşümü [81] ile uzay vektör açısal dalgalanması (SVA) metodunun [82] birleşiminden oluşmaktadır.

Bu metodun uygulanabilmesi için sistemde besleme kaynağında bir dengesizlik olması gerekmektedir. Sistem simetrik bir besleme kaynağından beslendiğinde kırık rotor çubuk arızasının ana harmoniğin yan bandlarında $(1 \pm 2s)f_s$ frekanslarında görüldüğü bilinmektedir (Bakınız Şekil 1.6). Ancak besleme kaynağında olabilecek herhangi bir dengesizlik statorda ileri yönlü ω_s hızında dönen manyetik alana ek olarak geri yönlü $-\omega_s$ hızında bir manyetik alana sebep olacaktır. Burada $\omega_s = 2\pi f_s$ 'dir ve f_s sistemin besleme gerilimi frekansını göstermektedir. Statorda bulunan bu geri yönlü manyetik alan asenkron motor teorisine göre rotorda $-\omega_s - \omega_r = -(2-s)\omega_s$ ve $(2-s)\omega_s$ manyetik alanlarını indükler. Rotorda oluşan bu dönen manyetik alanlar stator sargılarında $\omega_r - (2-s)\omega_s = -\omega_s$ ve $\omega_r + (2-s)\omega_s = (3-2s)\omega_s$ olarak görünür. Bu olaylar döngüsü sürekli olarak kendini tekrar etmektedir. Bu durum Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi kırık rotor çubuğu arızası durumunda eğer sistem simetrik olmayan bir kaynaktan besleniyorsa temel yan band harmonikleri haricinde 3. harmoniğin yan bandında $(3-2s)f_s$ frekanslarında bir bileşen görülmektedir.



Şekil 3.1 Simetrik olmayan besleme kaynağı durumunda kırık rotor çubuk arızası var iken oluşan manyetik alanların gösterimi

Analitik sinyalin açısız dalgalanması metodunda ilk olarak bir faz akımının analitik sinyali elde edilir. Analitik sinyali elde etmek için Hilbert Dönüşümü (HT) kullanılmaktadır. Daha sonra elde edilen analitik sinyal kullanılarak uzay vektörünün açıları hesaplanır. Seçilen örnekleme frekansına göre referans açı ile uzay vektörünün açıları arasındaki farklar bulunur. Elde edilen açısız dalgalanmanın spektrumdan yararlanılarak kırık çubuk rotor arızası düşük frekanslı yük momenti salınımından ayrıştırılır. Analitik sinyalin açısız dalgalanması metodunun genel algoritması Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2 Analitik sinyalin açısız dalgalanması metodunun algoritması

3.1.1. Analitik sinyalin elde edilmesi

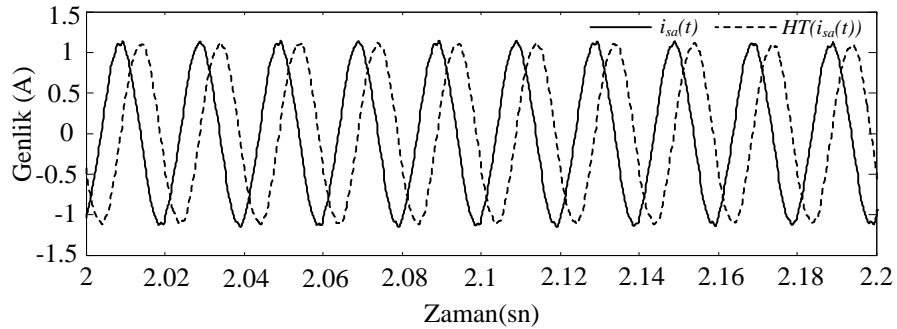
Analitik sinyali elde etmek için Hilbert Dönüşümü kullanılmaktadır. Hilbert Dönüşümünde orijinal sinyalin genlik değerleri değişmeden negatif faz bileşenleri $+90^\circ$ ve pozitif faz bileşenleri -90° kaymaktadır. Böylece sinüs bileşenleri kosinüs bileşenlerine, kosinüs bileşenleri de sinüs bileşenlerine dönüşmektedir.

Herhangi gerçek bir sinyalin ($g(t)$), Hilbert Dönüşümü (HT), bu sinyalin $1/\pi t$ ile konvolusyonundan elde edilmektedir [81].

$$HT(g(t)) = \frac{1}{\pi t} * g(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{g(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (3.1)$$

Gerçek bir sinyali zaman ekseninden frekans eksenine dönüştüren Fourier dönüşümünden farklı olarak Hilbert Dönüşümü, değişkenin veya sinyalinin bulunduğu eksenini değiştirmez. Zaman eksenindeki $g(t)$ sinyalinin Hilbert dönüşümü yine zaman eksenindeki $HT(g(t))$ 'dir ve eğer $g(t)$ gerçek bir değerse, $HT(g(t))$ 'de gerçek bir değerdir.

Şekil 3.3'te gerçek bir sinyal (i_{sa}) ve bu sinyalin Hilbert Dönüşümü ($HT(i_{sa})$) gösterilmektedir. Görüldüğü gibi iki sinyalin genlikleri aynı iken Hilbert Dönüşümü ile sinyalin fazı 90° kaymaktadır.



Şekil 3.3 Bir gerçek sinyal (i_{sa}) ve bu sinyalin Hilbert Dönüşümü ($HT(i_{sa})$)

Hilbert dönüşümü aynı zamanda frekans ekseninde de ifade edilebilmektedir. Hilbert dönüşümünün ana bileşeni olan $1/\pi t$ 'nin Fourier Dönüşümü denklem (3.2)'de gösterilmektedir.

$$FFT\left(\frac{1}{\pi t}\right) = -j \operatorname{sgn}(f) \quad (3.2)$$

Signum fonksiyonunun tanım bağıntısı dikkate alınır;

$$\operatorname{sgn}(f) = \begin{cases} -j, & f > 0 \\ 0, & f = 0 \\ +j, & f < 0 \end{cases} \quad (3.3)$$

Eğer gerçek bir sinyal olan $g(t)$ 'nin Fourier dönüşümü $G(f)$ ise, Fourier Dönüşümünün konvolüsyon özelliğinden $HT(g(t))$ 'nin Fourier dönüşümü denklem (3.4)'te belirtilmiştir.

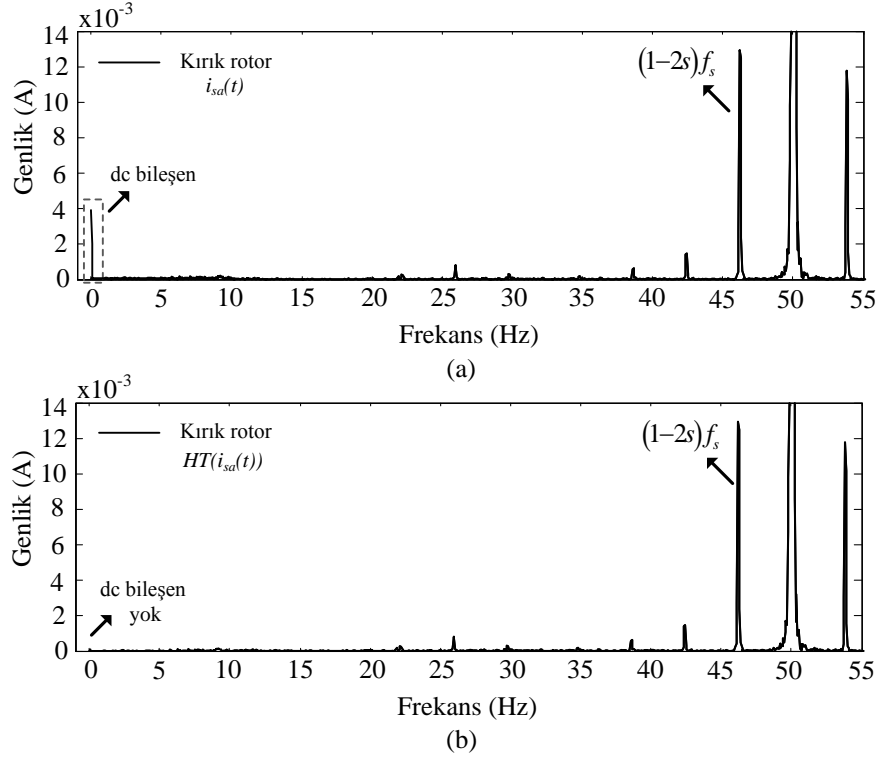
$$HT(g(f)) = -j \operatorname{sgn}(f) G(f) \quad (3.4)$$

Böylece Hilbert dönüşümünü zaman eksenini yerine frekans ekseninde incelemek daha anlaşılır olmaktadır. Denklem (3.4)'tende görüldüğü gibi Hilbert Dönüşümü, $G(f)$ 'nin genliğini değiştirmez sadece sinyalin fazını değiştirir. Pozitif frekanslarda Fourier dönüşümü değerleri $-j$ (fazın $-\pi/2$ ile çarpımı) ile çarpılırken, negatif frekanslardaki Fourier dönüşüm değerleri $+j$ (fazın $\pi/2$ ile çarpımı) ile çarpılmaktadır. Başka bir deyişle herhangi bir f değerinde $G(f) = a + bj$ olduğunu varsayarsak; Eğer $f > 0$ ise $HT(G(f)) = b - aj$ 'dir. Eğer $f < 0$ ise $HT(G(f)) = -b + aj$ 'dir. Yani Hilbert dönüşümü aslında $G(f)$ 'in reel ve sanal kısımlarını herhangi birinin işaretini değiştirerek yer değiştirir.

Herhangi zamanla değişmeyen sabit bir sinyalin ($g(t) = c$) Hilbert Dönüşümü $HT(g(t)) = 0$ 'dir. Lineerlik özelliğinden dolayı;

$$HT(g(t) + c) = HT(g(t)) \quad (3.5)$$

Denklem (3.5)'ten görüldüğü gibi Hilbert Dönüşümü alınan bir sinyalin DC offset değeri ortadan kalkmaktadır. Şekil 3.4 offsetli gerçek bir sinyal ile bu sinyalin Hilbert Dönüşümü sonrası frekans spektrumları görülmektedir.



Şekil 3.4 Kırık rotor çubuk arızası durumunda frekans spektrumu a) i_{sa} b) $HT(i_{sa})$

Herhangi bir sinyali frekans ekseninde incelemek yerine anlık fazı $\varphi(t)$ ve anlık büyüklüğü $A(t)$ olarak ifade edilen dönen bir vektör ile de incelenebilir. Böyle bir analiz için analitik sinyalin elde edilmesi gerekir. Analitik sinyal $\bar{g}(t)$, gerçek sinyal olan $g(t)$ ve bu sinyalin Hilbert Dönüşümü olan $HT(g(t))$ 'nin toplamından elde edilmektedir [81].

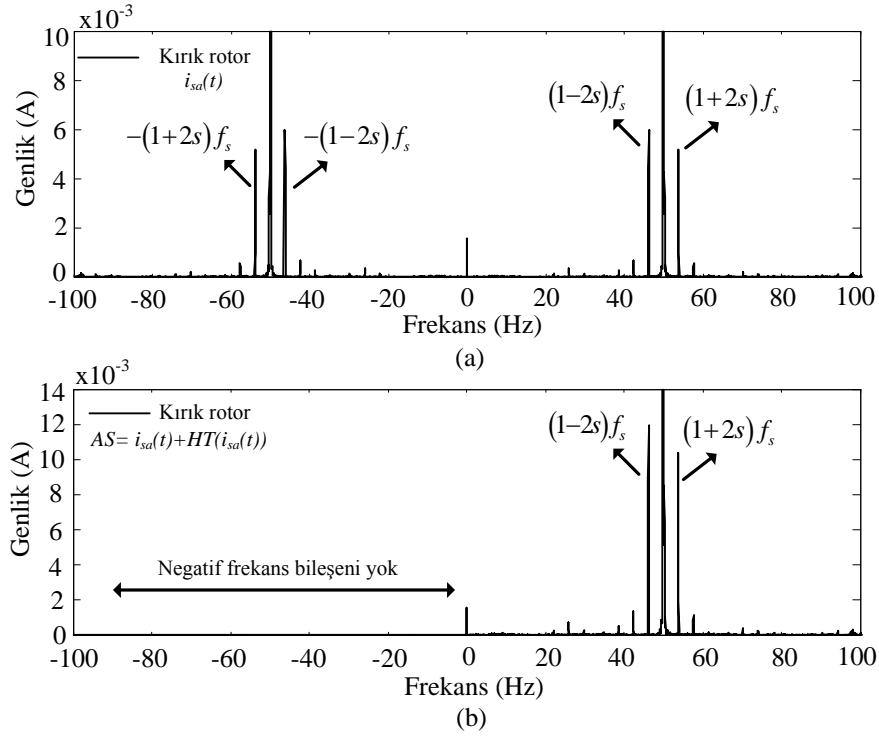
$$\bar{g}(t) = g(t) + j HT(g(t)) = A(t) e^{j\varphi(t)} \quad (3.6)$$

$$A(t) = \sqrt{[g(t)]^2 + [HT(g(t))]^2} \quad (3.7)$$

$$\varphi(t) = \arctan\left(\frac{HT(g(t))}{g(t)}\right) \quad (3.8)$$

Analitik sinyalin Fourier dönüşümü alındığında elde edilen frekans spektrumunda negatif frekans bileşenleri görülmemektedir. Bununla birlikte $g(t)$ ve $HT(g(t))$ aynı enerjiye sahiptir. Şekil 3.5a'da bir $g(t)$ gerçek sinyalinin frekans spektrumu negatif bileşenleride içerecek şekilde gösterilmektedir. Şekil 3.5b'de ise $HT(g(t))$ 'nin sadece

pozitif bileşenleri içerdiği net bir şekilde görülmektedir. Böylece analitik sinyalin frekans spektrumunda negatif frekans bileşenleri ortadan kalktığı görülmektedir.



Şekil 3.5 Kırık rotor çubuk arızası, tüm frekans bileşenleri a) i_{sa} b) $AS = i_{sa} + HT(i_{sa})$

3.1.2. Analitik sinyalin açısız dalgalanması

Uzay Vektör Açısız Dalgalanması (SVAF) metodu uzay vektör düzleminde sıfır geçiş zamanları ve bu zamanlardaki açısız dalgalanmaları ifade etmektedir [82]. SVAF metodu motordaki herhangi bir arıza durumunda referans bir vektöre göre oluşan salınımları inceleyerek motor durumu hakkında bilgi vermektedir [82]. SVAF metodunun matematiksel ifadeleri ve metodun analizi [82, 90, 91]'de detaylı şekilde verilmiştir. Ancak bu metotta en az iki faz stator akımının örnekleme ihtiyacı vardır.

En az iki faz akımının kullanılarak elde edilen akım uzay vektörü yerine Hilbert Dönüşümü kullanılarak sadece bir faz akımının örnekleme ile elde edilen analitik sinyalin motor durum tespitinde kullanılabileceği önerilmiştir [83, 84].

Sağlıklı bir motorda stator faz akımı:

$$i_a(t) = I \cos(\omega_s t + \varphi) \quad (3.9)$$

burada $\omega_s = 2\pi f_s$ 'tir. I ise bir faz stator akımının tepe değerini göstermektedir. Denklem (3.9)'daki akım sinyali kompleks eksponansiyel fonksiyonlar açısından yazılırsa

$$i_a(t) = \frac{I}{2} e^{j(\omega_s t + \varphi)} + \frac{I}{2} e^{-j(\omega_s t + \varphi)} \quad (3.10)$$

Denklem (3.10)'da $i_a(t)$ akımının Hilbert Dönüşümü alınırsa

$$HT(i_a(t)) = -j \frac{I}{2} e^{j(\omega_s t + \varphi)} + j \frac{I}{2} e^{-j(\omega_s t + \varphi)} \quad (3.11)$$

Analitik sinyali temsil eden stator α -fazı akımı denklem (3.12)'de gösterilmektedir.

$$\overline{i_a}(t) = I e^{j(\omega_s t + \varphi)} \quad (3.12)$$

Görüldüğü gibi negatif frekans bileşenleri $i_a(t)$ spektrumunda görülmeyecektir. Sağlıklı bir motor için vektör düzleminde $i_a(t)$ 'nin yer eğrisi (locus) tam mükemmel bir çemberdir. Kırık rotor çubuk arızası durumunda ters yönde dönen manyetik alan üretilen ve bu ters yönlü dönen manyetik alan statorunda $(1-2s)f_s$ harmonik bileşenini indükleyecektir. Bu durumda stator α -faz akımının kompleks formu denklem (3.13)'deki gibi ifade edilebilir.

$$i_{af}(t) = \frac{I}{2} e^{j(\omega_s t + \varphi)} + \frac{I}{2} e^{-j(\omega_s t + \varphi)} + \frac{I_f}{2} e^{j((1-2s)\omega_s t + \varphi_f)} + \frac{I_f}{2} e^{-j((1-2s)\omega_s t + \varphi_f)} \quad (3.13)$$

burada I_f ve φ_f sırasıyla $(1-2s)f_s$ akım harmonik bileşeninin genliği ve faz açısını göstermektedir. Kırık rotor çubuğu arızası durumunda Hilbert dönüşümü kullanılarak elde edilen sonuç analitik sinyali denklem (3.14)'de gösterilmektedir.

$$\overline{i_{af}}(t) = I e^{j(\omega_s t + \varphi)} + I_f e^{j((1-2s)\omega_s t + \varphi_f)} \quad (3.14)$$

Analitik sinyalin açısal dalgalanması (ASAF) metodu sağlıklı duruma göre dalgalanmaları ölçmektedir. Denklem (3.14), denklem (3.12)'ye bölünürse elde edilen sonuç;

$$\frac{\overline{i_{af}(t)}}{i_a(t)} = 1 + \frac{I_f}{I} e^{-j(2s\omega_s t + \varphi - \varphi_f)} \quad (3.15)$$

Referans [82]'deki gibi SVAF metoduna benzer olarak, analitik sinyalin açısız dalgılanması denklem (3.16)'daki gibi elde edilmektedir.

$$\Delta\theta = \arctan\left(-\frac{I' \sin(2s\omega_s t + \varphi - \varphi_f)}{1 + I' \cos(2s\omega_s t + \varphi - \varphi_f)}\right) = \arctan(-\alpha) \quad (3.16)$$

Burada $I' = I_f / I$ 'dir. Ayrıca $I' < 1$ ve $|\alpha| < 1$ olduğundan dolayı arctan'ın polinomial açılımı ve arctan argümanının binomial açılımı kullanılarak $\Delta\theta$ elde edilir;

$$\Delta\theta = \beta(I' \sin(2s\omega_s t + \varphi - \varphi_f) - \frac{I'^2}{2} \sin(4s\omega_s t + 2\varphi - 2\varphi_f) + \dots) \quad (3.17)$$

Burada β arctan'ın polinomial açılımı sabitidir. Görüldüğü gibi arıza ve yük salınımlarına ait harmonikler analitik sinyalin açısız dalgılanması (ASAF) spektrumunda direkt olarak görülmektedir.

Daha önce bahsedildiği gibi, kırık rotor ve stator asimetrisinden (besleme kaynağı dengesizliği veya stator arızası) dolayı stator akım spektrumunda 3. harmoniğin yan bandında $(3-2s)f_s$ harmoniği ortaya çıkmaktadır. Stator akımı 3. harmoniğin yan bandları da göz önüne alınarak yeniden ifade edilirse;

$$i_{af}(t) = \frac{I}{2} e^{j(\omega_s t + \varphi)} + \frac{I}{2} e^{-j(\omega_s t + \varphi)} + \frac{I_f}{2} e^{j((1-2s)\omega_s t + \varphi_f)} + \frac{I_f}{2} e^{-j((1-2s)\omega_s t + \varphi_f)} + \frac{I_f'}{2} e^{j((3-2s)\omega_s t + \varphi_f')} + \frac{I_f'}{2} e^{-j((3-2s)\omega_s t + \varphi_f')} \quad (3.18)$$

burada I_f' ve φ_f' sırasıyla $(3-2s)f_s$ akım harmoniğinin genliğini ve faz açısını göstermektedir. Besleme kaynağı dengesizliği durumunda kırık rotor çubuk arızası var iken elde edilen sonuç analitik sinyali ise;

$$\overline{i_{af}(t)} = I e^{j(\omega_s t + \varphi)} + I_f e^{j((1-2s)\omega_s t + \varphi_f)} + I_f' e^{j((3-2s)\omega_s t + \varphi_f')} \quad (3.19)$$

Denklem (3.19)'un denklem (3.12)'ye bölüldüğünde sağlıklı bir motora göre arızalı durumda elde edilen salınımlar ifade edilebilmektedir.

$$\frac{\overline{i_{af}}(t)}{\overline{i_a}(t)} = 1 + \frac{I_f}{I} e^{-j(2s\omega_s t + \varphi - \varphi_f)} + \frac{I_f'}{I} e^{j((2-2s)\omega_s t - \varphi + \varphi_f)} \quad (3.20)$$

Denklem (3.20)'den de görüldüğü gibi asimetrik bir besleme kaynağında veya stator asimetrisi durumunda ASAF spektrumunda 2. harmoniğin yan bandlarında kırık rotor çubuk arızasına ilişkin harmonik $(2-2s)\omega_s$ görülmektedir.

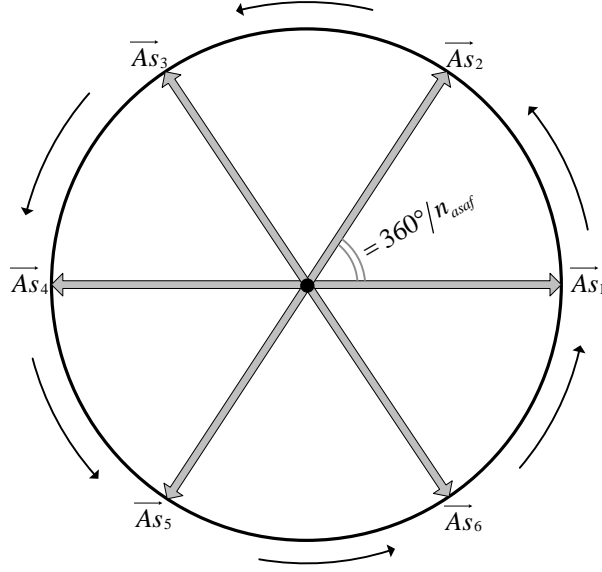
ASAF sinyallerini elde etmek için, ilk olarak analitik sinyalin anlık vektör pozisyonları θ hesaplanır. Daha sonra SVAF metoduna benzer olarak bir örnekleme frekansı seçilir. Bu örnekleme frekansı besleme kaynağı frekansına ve seçilen örnekleme nokta sayısı olan n_{asaf} 'a bağlıdır. Seçilen ASAF örnekleme nokta sayısı üç fazlı sistemdeki sıfır geçiş nokta sayısı olan 6 ve 6'nın katı olmalıdır. Böylece örnekleme frekansı;

$$f_{asaf} = n_{asaf} f_s \quad (3.21)$$

Bu tez çalışmasında 12 örnekleme noktası seçilmiştir. Böylece örnekleme frekansı $12 f_s = 600$ Hz'dir. Örnekleme frekansına bağlı olarak, sağlıklı bir durumda iki ASAF vektörü arasındaki referans açısı θ_{ref} denklem (3.22)'deki gibi hesaplanır.

$$\theta_{ref} = \frac{360^\circ}{n_{asaf}} \quad (3.22)$$

Bu tez çalışmasında 12 örnekleme noktası seçildiği için $\theta_{ref} = 30^\circ$ olacaktır. Şekil 3.6'da analitik sinyalin referans vektörleri gösterilmektedir. Görüldüğü gibi 6 adet ASAF vektörün aralarında 60° açı olacak şekilde bir düzlemde temsil edilmektedir. Sağlıklı durumda bu vektörler tam düzgün mükemmel bir çember oluştururken, herhangi bir arıza durumunda bu çemberlerin simetrisi bozulmaktadır.



Şekil 3.6 Sağlıklı bir motorda analitik sinyalin referans vektörlerinin gösterimi

İki ardışık analitik sinyal vektörü ve iki vektör arasındaki hesaplanan referans açısı θ_{ref} kullanılarak analitik sinyaldeki salınımlar denklem (3.23)'deki gibi bulunabilir.

$$\Delta\theta_i = \theta_i - \theta_{i-1} - \theta_{ref} \quad (3.23)$$

Burada $i-1$ alt indisi bir önceki örneklenen vektörü ifade etmektedir. Elde edilen sonuç ASAF sinyali $\Delta\theta_i$, sağlıklı durum için sifıra eşittir. Çünkü referans vektörler ve bu vektörler arasındaki açı sağlıklı bir motorda her zaman aynı değerdedir. Ancak kırık rotor çubuk arızası durumunda sonuç ASAF sinyali sifırdan farklıdır ve arızanın miktarına, besleme kaynağının durumuna göre belli değerlerde salınım yapmaktadır. Elde edilen bu salınımın incelenmesiyle kırık rotor çubuk arızası düşük frekanslı yük momenti salınımindan ayrıştırılmaktadır. Sonuç ASAF sinyali referans bir vektöre göre salınımları incelediğinden dolayı baskın olan ana harmoniğin etkisi ortadan kalkmakta ve kırık rotor çubuk arızası ve yük momenti salınımları ile ilgili olan harmonikler ASAF spektrumunda kesin değerlerinde görülmektedir.

Asimetrik besleme veya kalıcı stator asimetrisi durumunda, stator üç faz akımı pozitif ve negatif ardışık akım bileşenleri içermektedir. Negatif sıralı akımlar $-\omega_s$ hızında döndüğünden bu akımların analitik vektörleri de aynı hızda dönmektedir.

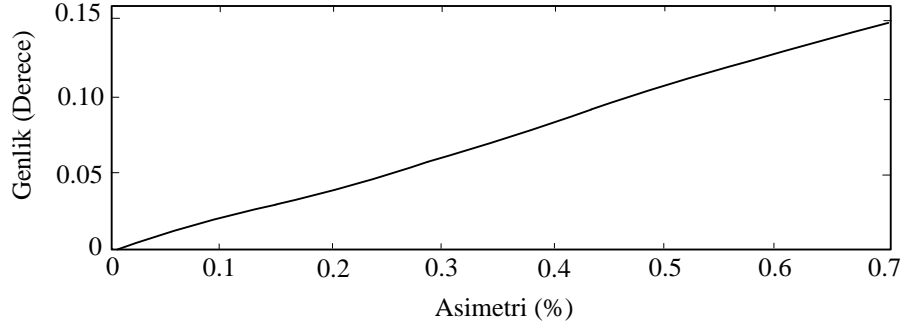
Uzay vektör açısız dalgalanması (SVAF) spektrumuna benzer olarak dengesiz besleme kaynağının ve asimetrik statorun etkisi ASAF spektrumunda besleme kaynağı frekansının iki katı olan $2f_s$ görülmektedir. Motorda asimetrik besleme veya kalıcı stator asimetrisi durumunda kırık rotor çubuğu arızası meydana gelirse, ASAF spektrumunda daha önceki bölümlerde de belirtildiği gibi $(1-s)2f_s$ harmoniği 2. harmoniğin yan bandında görülmektedir. Motorda düşük frekanslı yük momenti salınımı durumunda ise ASAF spektrumunda $2f_s$ 'in yan bandlarında yük salınımına ilişkin harmonikler gürültü düzeyindedir.

Sistemde herhangi bir besleme kaynağı dengesizliği olduğunda stator akımında bu besleme kaynağı dengesizliği $3f_s$ 'te görülürken, analitik sinyalin açısız dalgalanması spektrumunda bu dengesizlik $2f_s$ 'te görüldüğü bilinmektedir. Analitik sinyalin açısız dalgalanması metodunun uygulanabilmesi için besleme kaynağında az da olsa bir dengesizlik olması gerekmektedir. ASAF spektrumu bu dengesizlikten dolayı meydana gelen $2f_s$ harmoniği ve arıza durumunda ortaya çıkan $2f_s$ 'in yan band harmoniklerini kullanarak kırık rotor çubuğu arızasını düşük frekanslı yük momenti salınımından ayırtmaktadır.

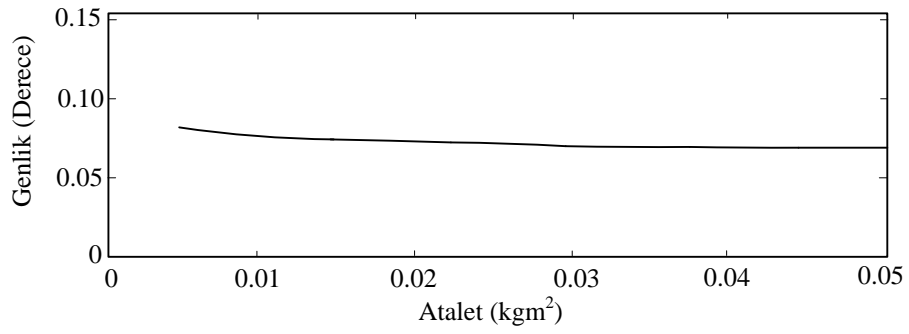
ASAF spektrumunda DC bileşen civarında bulunan $2sf_s$ harmoniğinin genliği direkt olarak kırık rotor çubuğu sayısına bağlıdır. Bu durumda $2sf_s$ harmoniği arıza miktarının belirlenmesinde kullanılabilir. Ancak kaynak frekansının iki katı olan $2f_s$ 'in yan bandlarındaki harmonikler kırık rotor çubuk arızası ile yük salınımını ayırtmak için kullanılabilirken arıza miktarının belirlenmesinde kullanılamaz. Çünkü bu yan band bileşenleri stator asimetrisine veya besleme kaynağı dengesizliği bağlıdır.

Şekil 3.7'de kırık rotor çubuk arızası durumunda $2f_s$ 'in yan band harmoniği olan $(1-s)2f_s$ 'in besleme kaynağı dengesizliği yüzdesine göre değişimi verilmektedir. Görüldüğü gibi bu bileşenin büyüklüğü sistemin dengesizlik yüzdesi ile lineer bir şekilde değişmektedir.

Şekil 3.8'de ise $(1-s)2f_s$ harmoniğinin sistem atalet momentine göre değişimi gösterilmektedir. Kırık rotor arızasına ilişkin $(1-s)2f_s$ harmoniğinin büyüklüğü sistemin atalet momentinden bağımsız olduğu net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 3.7 Farklı besleme kaynağı dengesizlikleri durumunda $(1-s)2f_s$ bileşenin değişimi

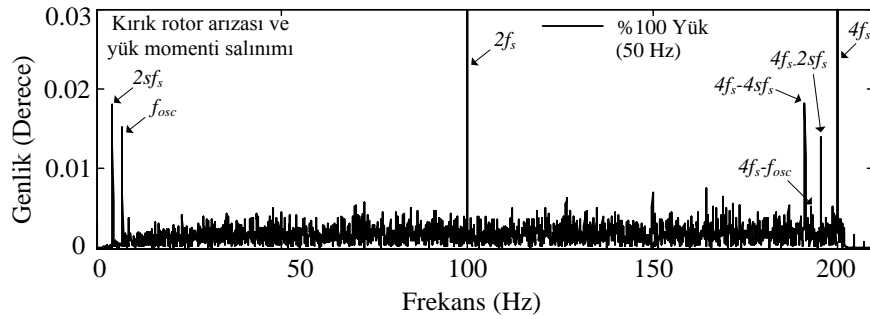


Şekil 3.8 Farklı atalet momenti durumunda $(1-s)2f_s$ bileşenin değişimi (İki kırık rotor çubuk ve %0.4 besleme kaynağı asimetrisi)

Güç elektroniği ve yarı iletken teknolojisindeki gelişmeler ile birlikte asenkron motorların hız ve moment kontrolünü sağlayan değişken frekanslı sürücüler günümüzde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Sanayide bulunan bu sürücülerin yoğun olarak kullanımından dolayı analitik sinyalin açısız dalgalanması metodunu farklı çalışma frekanslarında uygulayarak ASAF spektrumları incelenmiştir. Bu testler sonucunda farklı çalışma frekanslarında ASAF spektrumunda $4f_s$ 'in yan bandlarında bulunan harmonikler kullanılarak kırık rotor çubuk arızası düşük frekanslı yük momenti salınımindan ayrıştırılabileceği önerilmektedir.

Şekil 3.9'da V/f açık çevrim kontrollü inverter ile beslenen üç fazlı bir asenkron motorda hem iki kırık rotor çubuk hem de %5 yük dalgalanması var iken 50 Hz'lik çalışma frekansında ASAF spektrumu incelenmiştir. ASAF spektrumunda kırık rotor çubuk arızasına ($2sf_s$) ve yük momenti salınıma (f_{osc}) ait olan

harmonikler DC bileşen civarlarında net bir şekilde görülmektedir. Ancak şebeke ile besleme durumundan farklı olarak V/f açık çevrim kontrollü inverter ile beslenen asenkron motorda ASAF spektrumunda $4f_s$ 'in yan bandlarında ayrıştırma harmonikleri bulunmaktadır. Kırık rotor çubuk arızasına ait olan $4f_s-2sf_s$ ve $4f_s-4sf_s$ harmonikleri ASAF spektrumunda net bir şekilde görülürken yük momenti salınımına bağlı olan $4f_s f_{osc}$ harmoniği gürültü düzeyindedir. Bu durumda açık çevrim inverter ile beslenen asenkron motorda $4f_s$ 'in yan bandları kullanılarak kırık rotor çubuk arızası yük momenti salınımından ayrıştırılabilmektedir. Farklı çalışma frekanslarında elde edilen sonuçlar daha sonra deneysel sonuçlar bölümünde sunulacaktır.



Şekil 3.9 Açık çevrim kontrollü inverter ile beslenen motorda ASAF spektrumu (50 Hz, iki kırık rotor çubuğu arızası ve yük moment salınımı durumunda) ($2sf_s=4.4$ Hz) ($f_{osc}=7$ Hz)

3.2. Moment ve Faz Gerilimi Spektrumu Kullanılarak Kırık Rotor Çubuk Arızasının Düşük Frekanslı Yük Momenti Salınımından Ayrıştırılması

3.2.1. Moment spektrumundaki ayrıştırma harmonikleri

Asenkron motorda kırık rotor çubuk arızası olduğunda kırık rotor çubuğundaki akım komşu çubuklardan akacağından motorda bir asimetri oluşmaktadır. Bu asimetri momentte ve hızda salınımına sebep olmaktadır. Ortaya çıkan bu salınımlar motor performansını düşürmektedir.

Moment spektrumu kullanılarak kırık rotor çubuk arızası tespiti üzerine yapılan birçok çalışma bulunmaktadır. Kırık rotor çubuk arızası olduğunda elektromanyetik moment spektrumunda bu arızaya ilişkin harmonikler DC bileşen civarlarında denklem (3. 24)'deki gibi tanımlanmıştır [85].

$$f_{t,b} = 2ksf_s, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (3.24)$$

burada s motor kaymasını, f_s ise besleme gerilimi frekansını belirtmektedir. Bu harmoniklerin genliği kırık rotor çubuğu sayısına ve meydana gelen yük momenti salınıminin genliğine bağlıdır.

Kırık rotor çubuk arızasına benzer olarak bir asenkron motorda herhangi bir yük momenti salınımı olduğunda DC bileşen civarında yük momenti salınımı frekansında (denklem 3.25) harmonikler görülmektedir.

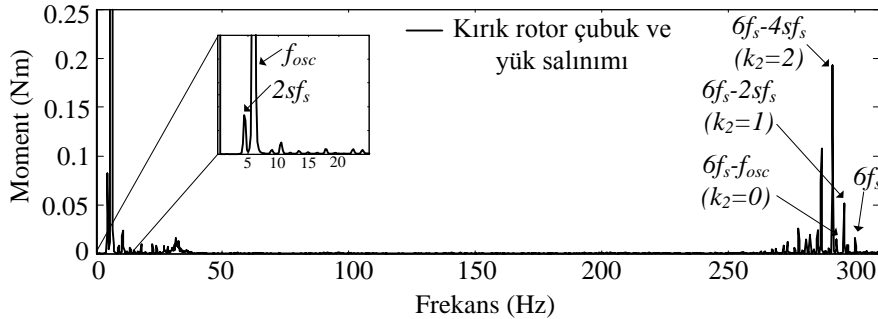
$$f_{t,osc} = kf_{osc}, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (3.25)$$

burada f_{osc} yük momenti salınımı frekansını belirtmektedir. Bu harmoniklerin büyüklüğü yük momenti salınımı ve salınım yüzdesi ile doğru orantılıdır. Bazen bu yük momenti salınımları kırık rotor çubuk arızası frekansı ile aynı frekanslarda meydana gelebilmektedir. Bu durumda moment spektrumunun DC bileşenleri civarında görülen harmonikler kullanılarak kırık rotor çubuk arızasını yük momenti salınımindan ayırtmak oldukça zordur. Referans [85]'te motor manyetik doyum noktalarında çalışırken kırık rotor çubuk arızası için moment spektrumunda bazı yeni harmonikler tanımlanmıştır. Bu harmonikler besleme kaynağı frekansının 6 katı olan $6f_s$ harmoniğinin yan bandlarında bulunmaktadır. Kırık rotor çubuk arızası durumunda moment spektrumunda DC bileşene yakın olan $2ksf_s$ harmoniğine ilaveten $6f_s$ 'in yan bandlarında $6f_s - 2ksf_s$ harmonikleri görülmektedir [85].

Bu tez çalışmasında moment spektrumu, düşük frekanslı yük momenti salınımı durumunda da incelenmiştir. Yük momenti salınımı durumunda, moment spektrumu incelenirse DC bileşen civarlarında yük salınıma ait olan kf_{osc} harmonikleri net bir şekilde görülürken $6f_s$ 'in yan bandlarında $6f_s - kf_{osc}$ harmonikleri gürültü düzeyindedir. Bu durum yük veya shaft momentinin yüksek frekans bölgelerinde yük momenti salınımlarından etkilenmemesinin sonucudur. Motorun atalet momenti $6f_s$ gibi yüksek frekanslarda yük momenti salınımlarını bastırmaktadır. Böylece kırık rotor çubuk arızasını yük momenti salınımdan ayırtmak için moment spektrumunda $6f_s$ 'in yan band harmoniklerinin kullanılacağı görülmüştür. Moment spektrumundaki bu ayırtma harmonikleri denklem (3.26)'daki gibi tanımlanmaktadır.

$$\begin{aligned}
& k_1 \left(\frac{2sf_s}{f_{osc}} \right); \\
& 6f_s - k_2 \left(\frac{2sf_s}{f_{osc}} \right); \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} k_1 = 1, 2, \dots \text{ (kırık rotor , yük salınımı)} \\ k_2 = 1, 2 \text{ (sadece kırık rotor)} \\ k_2 = 0 \text{ (sadece yük salınımı)} \end{array} \right\} \quad (3.26)
\end{aligned}$$

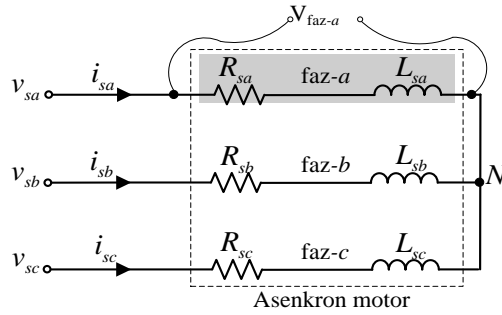
Denklem (3.26)'da tanımlanan ayrıştırma harmonikleri k_1 ve k_2 olmak üzere iki sabit tamsayı içermektedir. İlk sabit olan k_1 DC bileşene yakın olan kırık rotor ($k_1 2sf_s$) ve yük momenti salınımı ($k_1 f_{osc}$) durumunda ortaya çıkan harmonikleri göstermektedir. Kırık rotor çubuk arızasını düşük frekanslı yük momenti salınımindan ayırtmaya yarayan ikinci sabit k_2 tamsayısı $6f_s$ 'in yan band harmonikleri ile ilişkidir. Kırık rotor çubuk arızası olduğunda sıfırdan farklı olan k_2 değerleri $6f_s$ 'in yan band harmonikleri olan $6f_s - 2sf_s$, $6f_s - 4sf_s$ harmoniklerini göstermektedir. Kırık rotor arızasından farklı olarak bu k_2 değerleri düşük frekanslı yük salınımı durumunda sıfıra eşit olmaktadır. Bir başka ifadeyle düşük frekanslı yük momenti salınımı durumunda $6f_s$ 'in yan bandlarında herhangi bir harmonik bulunmamaktadır. Denklem (3.26)'da görüldüğü gibi k_2 moment spektrumunda hatanın kaynağını gösteren önemli bir değişkendir. Şekil 3.10'da kırık rotor çubuk ve yük momenti salınımı durumunda moment spektrumu görülmektedir. Kırık rotor çubuk arızasına ve yük momenti salınıma ait olan harmonikler DC bileşen civarında net bir şekilde görülmektedir. Ancak $6f_s$ 'in yan bandları incelendiğinde sadece kırık rotor çubuk arızasına ait olan harmonikler ($6f_s - 2sf_s$, $6f_s - 4sf_s$) görülmektedir. Yük momenti salınıma ait olan harmonikler $6f_s$ 'in yan bandlarında gürültü düzeyindedir.



Şekil 3.10 Kırık rotor çubuk arızası ve yük momenti salınımı durumunda moment spektrumu

3.2.2. Motor faz gerilimi spektrumundaki ayrıştırma harmonikleri

Kırık rotor çubuk arızasını düşük frekanslı yük momenti salınımindan ayrıştırmak için motorun gerçek faz gerilimi de incelenmiştir. Faz gerilimini elde etmek için stator nötr noktası ile motor giriş gerilimi arasındaki gerilim farkı ölçülmektedir. Şekil 3.11’de motor faz geriliminin ölçüm taslağı görülmektedir. Faz gerilimini ölçmek için stator yıldız noktasının ulaşılabilir olması gerekmektedir.



Şekil 3.11 Motor faz gerilimi ölçümü, V_{faz-a}

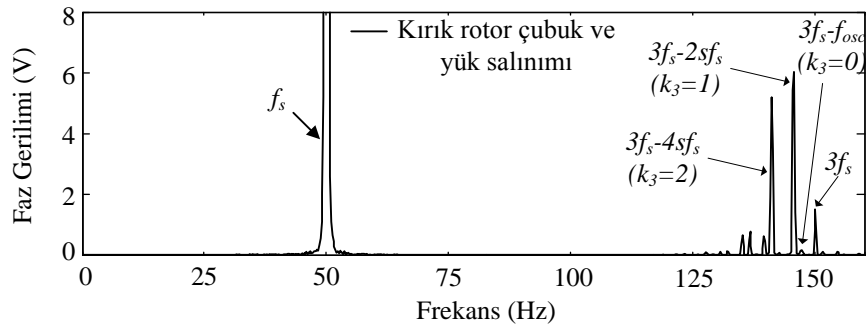
Asenkron motorda herhangi bir fazdaki faz geriliminin değeri o fazdan geçen akıma ve fazda indüklenen akıya bağlıdır. Motor faz gerilimi denklem (3.27)’deki gibi hesaplanmaktadır.

$$v_{faz-a} = R_{sa} i_{sa} + \frac{d\psi_{sa}}{dt} \quad (3.27)$$

burada i_{sa} stator akımını, R_{sa} faz direncini ve ψ_{sa} ise stator A fazında indüklenen akıyı göstermektedir. Denklem (3.27)’de görüldüğü gibi faz akımındaki ve indüklenen akıdaki herhangi bir değişiklik motor faz gerilimini de etkileyecektir. Bu tez çalışmasında arızaya ait bileşenlerinin etkilerini gözlemlemek için kırık rotor çubuğu ve yük momenti salınımlı durumda motor faz gerilim spektrumu analiz edilmiştir. Yapılan testler sonucunda motor faz gerilimi spektrumunda 3. harmoniğin yan bandlarında kırık rotor çubuğu arızasına ait harmonikler mevcut iken yük momenti salınımlına ait harmonikler gürültü düzeyindedir. Motor faz gerilimi spektrumundaki ayrıştırma harmonikleri denklem (3.28)’deki gibi tanımlanabilir.

$$3f_s - k_3 \left(\frac{2sf_s}{f_{osc}} \right); \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} k_3 = 1, 2 \quad (\text{kırık rotor}) \\ k_3 = 0 \quad (\text{yük salınımlı}) \end{array} \right\} \quad (3.28)$$

Denklem (3.28)'de görüldüğü gibi motor faz gerilimi spektrumunda $3f_s$ 'in yanbandları kırık rotor çubuk arızasını düşük frekanslı yük momenti salınımindan ayırtmak için kullanılmaktadır. Ayırıştırma harmonikleri sadece k_3 sabit tamsayı değerini içermektedir. Kırık rotor çubuk arızası durumunda $3f_s$ 'in yan bandları olan $3f_s-2sf_s$ ($k_3=1$) ve $3f_s-4sf_s$ ($k_3=2$) harmonikleri faz gerilim spektrumunda görülürken, yük momenti salınımı durumunda $3f_s$ 'in yan bandlarında herhangi bir harmonik bulunmamaktadır ($k_3=0$). Her iki arıza durumunda da ana harmonik olan f_s faz gerilimi spekturumunda görülmektedir. Ancak faz akımından farklı olarak ana harmoniğin yan bandlarında herhangi bir arıza veya yük salınımları harmoniği bulunmamaktadır. Böylece k_3 kat sayısı, kırık rotor çubuk arızasını düşük frekanslı yük salınımindan ayırtmak için iyi bir sabit değişkendir. Şekil 3.12'de görüldüğü gibi kırık rotor çubuk arızasına ait olan harmonikler $3f_s$ 'in yan bandlarında net bir şekilde görülürken yük momenti salınımlarına ait olan harmonikler gürültü düzeyindedir. Sonuçlar bölümünde elde edilen sonuçlar detaylıca sunulacaktır.



Şekil 3.12 Kırık rotor çubuk arızası ve yük momenti salınımları durumunda faz gerilimi spektrumu

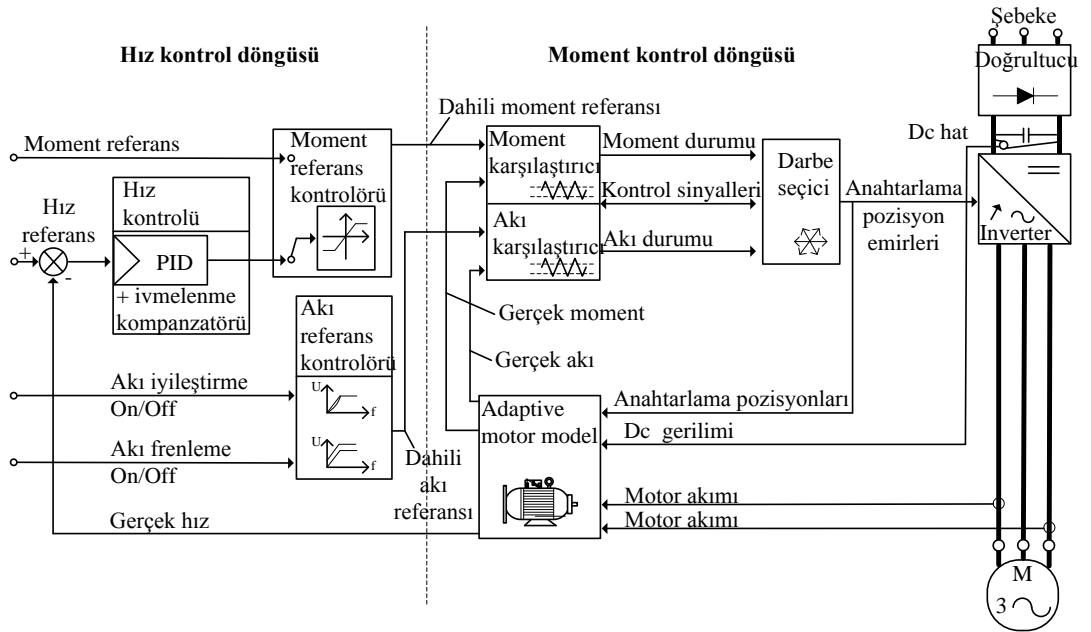
3.3. Doğrudan Moment Kontrollü Sürücüler ile Beslenen Asenkron Motorlarda Kırık Rotor Çubuk Arızasını Düşük Frekanslı Yük Momenti Salınımindan Ayırtmak için Yeni Bir Yöntem

Gelişen teknolojiler ile birlikte doğrudan moment kontrollü (DTC) sürücüler asenkron motorun hız ve momentini kontrol etmek için tercih edilir bir hale gelmiştir. Bu tip sürücüler kullanıldığında arıza tespiti ve teşhisi sadece stator akımına bakılarak oldukça güçtür. DTC sürücülerle beslenen asenkron motorlarda stator akımında sürücü kontrol parametreleri, anahtarlama frekans vb. etkilerden dolayı ilave harmonikler görülmektedir. Faz akım ve gerilimindeki, yan band

harmonikleri $(1 \pm 2s)f_s$ kırık rotor tespiti için kullanılsa da bu harmoniklerin büyüklüğü kontrolör yapısından ve parametrelerinden etkilenmektedir [49, 86, 87]. Literatürde var olan ayrıştırma metotları genellikle şebeke ile beslenen asenkron motorlar içindir. Ancak DTC kontrollü asenkron motorlarda kırık rotor çubuk arızasını düşük frekanslı yük salınımindan ayrıştırmak için herhangi bir metot bulunmamaktadır.

Bu tez kapsamında doğrudan moment kontrollü sürücüler ile beslenen asenkron motorlarda kırık rotor çubuk arızasını düşük frekanslı yük salınımindan ayrıştırmak için q -ekseni bileşenleri olan v_{qs} gerilim ve i_{qs} akım bileşenlerinin spektrumlarının kullanılması önerilmektedir. İlk olarak ölçülen stator akım ve gerilim bilgileri Clarke dönüşümü kullanılarak abc ekseninden durağan dq eksenine dönüştürülmüştür. Daha sonra v_{qs} gerilim ve i_{qs} akım bileşenlerine FFT uygulanarak bu bileşenlerin spektrumları elde edilmektedir. Bu spektrumlar normalize edilerek arıza indeksleri tanımlanmıştır. Bu arıza indeksleri kullanılarak düşük frekanslı yük momenti salınımlı olduğunda kırık rotor çubuk arızası tespit edilmiştir.

Doğrudan moment kontrolü, motor manyetik akısını ve momenti direkt olarak kontrol eden bir AC sürücü teknolojidir. DTC sürücülerinin temel çalışma algoritması Şekil 3.13'te verilmiştir.



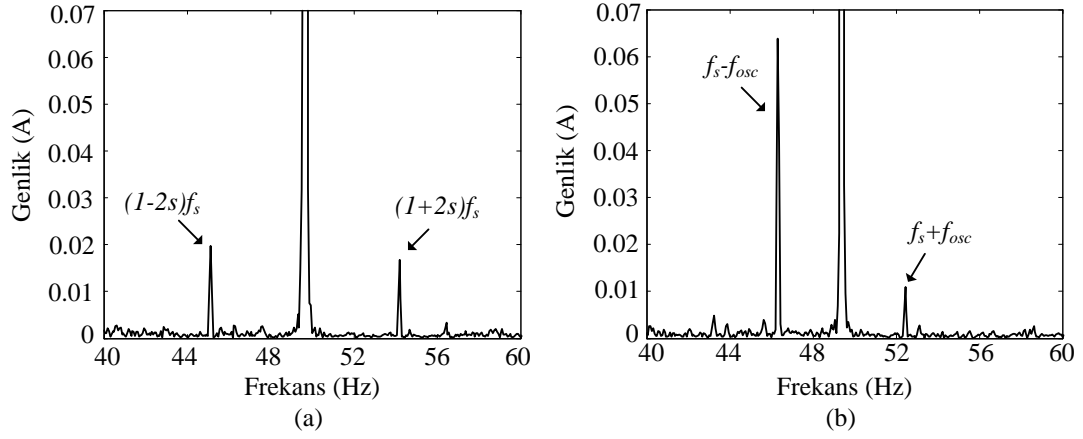
Şekil 3.13 DTC komple blok diyagramı [88]

Motor manyetik akısı ve momenti iki farklı histerisiz kontrol döngüsü tarafından kontrol edilmektedir. Moment ve akı direkt olarak kontrol edildiğinden frekans ve gerilimi kontrol etmek için herhangi bir modülatöre ihtiyaç yoktur [88]. DTC sürücülerde herhangi bir geri besleme olmaksızın kesin bir moment kontrolü sağlanmaktadır. Motor modeli DTC çalışma algoritmasında en önemli kısımdır. DTC sürücü aktif olduğu anda, kontrol sistemi içerisindeki motor modelini kullanarak motor parametrelerini hesaplamaktadır. Bu parametrelerden bazıları; stator direnci, ortak direnç, rotor zaman sabiti ve manyetik indüktanstır.

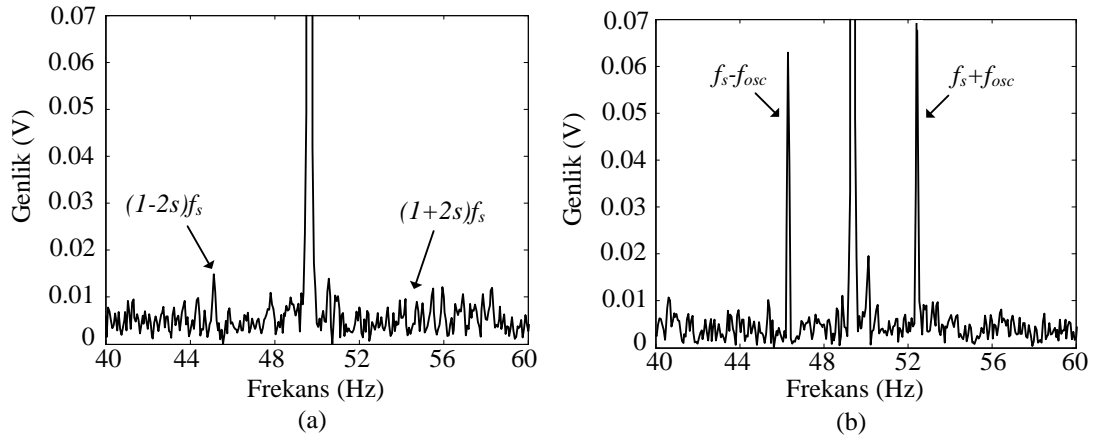
Motorda herhangi bir arıza meydana geldiğinde DTC sürücülerin yapısı gereği stator akımlarının yanı sıra stator gerilimleri de etkilenmektedir. Yani DTC ile beslenen asenkron motorlarda rotor arızaları veya yük momenti salınımları ile ilgili harmonikler hem stator akımında hem de geriliminde görülmektedir. Bu yüzden doğru bir tespit için stator akımları yanı sıra stator gerilimleri de incelenmelidir.

Şekil 3.14a'da iki kırık rotor çubuk arızası durumunda stator akım spektrumunda $(1\pm 2s)f_s$ yan band bileşenleri çok net bir şekilde görülmektedir. Şekil 3.14b'de yük momenti salınımı durumunda $f_s\pm f_{osc}$ yan band bileşenleri akım spektrumunda görülmektedir. DTC sürücü yapısından dolayı motorda oluşan hız ve moment salınımını olabildiğince düşürmeye çalıştığından yük momenti salınımindan dolayı oluşan sağ yan band harmoniği $(1+2s)f_s$, sol yan band harmoniğinden $(1-2s)f_s$ daha düşük değerdedir. DTC yapısı gereği hız salınımını düşürdüğçe bu salınımdan dolayı oluşan sağ yan band harmoğinin $(1+2s)f_s$ değeri akım spektrumunda düşmektedir.

Şekil 3.15a'da ise iki kırık rotor çubuk arızası olan bir asenkron motorda stator gerilim spektrumu incelenmektedir. Şekil 3.15a'da da görüldüğü gibi stator gerilim spektrumu kırık rotor çubuk arızasına ait harmonikleri içermektedir. Şekil 3.15b'de ise düşük frekanslı yük momenti salınımı durumunda stator gerilim spektrumunda sağ ve sol yan band harmonikleri $f_s\pm f_{osc}$ görülmektedir. Sağ yan band harmoniği f_s+f_{osc} akım spektrumunda yük salınımını bastırıldığından dolayı değeri sol yan band harmoniği olan f_s-f_{osc} 'ye göre daha büyüktür.

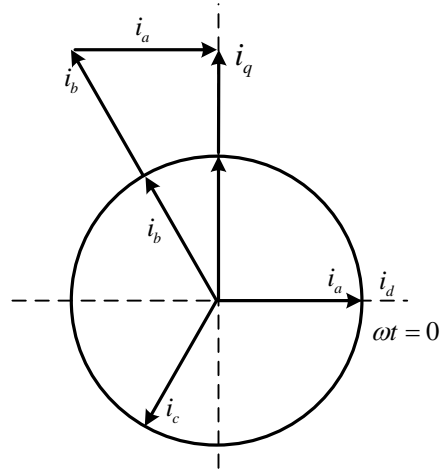


Şekil 3.14 Faz akımı spektrumu (i_b) a) İki kırık rotor çubuk arızası b) Yük momenti salınımı



Şekil 3.15 Faz gerilimi spektrumu (v_b) a) İki kırık rotor çubuk arızası b) Yük momenti salınımı

Bu tez çalışmasında abc faz akım ve gerilim bileşenlerinin yerine, Clarke dönüşümünden elde edilen $d-q$ eksenli bileşenleri kırık rotor çubuk arızasını düşük frekanslı yük momenti salınımindan ayırıştırmak için kullanılmıştır. Clarke dönüşümünün vektörel gösterimi Şekil 3.16’da gösterilmektedir. Bu dönüşüm ile üç faz akım veya gerilim bileşenleri birbirlerine göre 90° faz farkı olan iki faz akım veya gerilim bileşenlerine dönüştürülür.



Şekil 3.16 Clarke dönüşümü

Ölçülen abc faz akımları ve gerilimlerini durağan referans çatıda $d-q$ eksenlerine dönüştürmek için denklem (3.29) ve denklem (3.30) kullanılmaktadır.

$$\begin{aligned} i_{ds} &= \frac{2}{3} \left(i_a - \frac{1}{2} i_b - \frac{1}{2} i_c \right) \\ i_{qs} &= \frac{2}{3} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} i_b - \frac{\sqrt{3}}{2} i_c \right) \end{aligned} \quad (3.29)$$

$$\begin{aligned} v_{ds} &= \frac{2}{3} \left(v_a - \frac{1}{2} v_b - \frac{1}{2} v_c \right) \\ v_{qs} &= \frac{2}{3} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} v_b - \frac{\sqrt{3}}{2} v_c \right) \end{aligned} \quad (3.30)$$

Yapılan analizler sonucunda d ve q eksenli akım ve gerilim bileşenlerinin frekans spektrumlarında kırık rotor çubuk arızası ve yük salınımlarına ait harmonikler gözlenmektedir. Fakat rotor arıza harmonikleri q -eksenli akım bileşeninde, q -eksenli gerilim bileşenine göre daha baskın olarak görülmektedir. Rotor arızasından farklı olarak, yük momenti salınımları baskın olarak q -eksenli gerilim bileşen spektrumunda görülmektedir. Bunun temel sebebi q -eksenli bileşenlerinin moment bilgilerini içermesidir. Momentte meydana gelen herhangi bir değişiklik q eksenli bileşenlerinde daha net bir şekilde görülmektedir. Bu tezde düşük frekanslı yük momenti salınımları durumunda kırık rotor çubuk arızasını doğru bir şekilde tespit etmek için ana harmoniğin yan bandlarındaki akım ve gerilim harmonik bileşenlerinin normalize edilmiş band büyüklükleri kullanılarak arıza indeksleri tanımlanmıştır. Sol ve sağ yan band bileşenlerinin band büyüklük değerleri $(1-2s)f_s$ ve $(1+2s)f_s$ harmoniklerinin

ortalayacak şekilde akım ve gerilim normalize edilmiştir. Bu normalizasyonda 2 Hz'lik bir frekans aralığı kullanılmıştır. Akım arıza indeksi denklem (3.31)'de ki gibi tanımlanmaktadır.

$$F_i = \frac{I_l + I_u}{2} \quad (3.31)$$

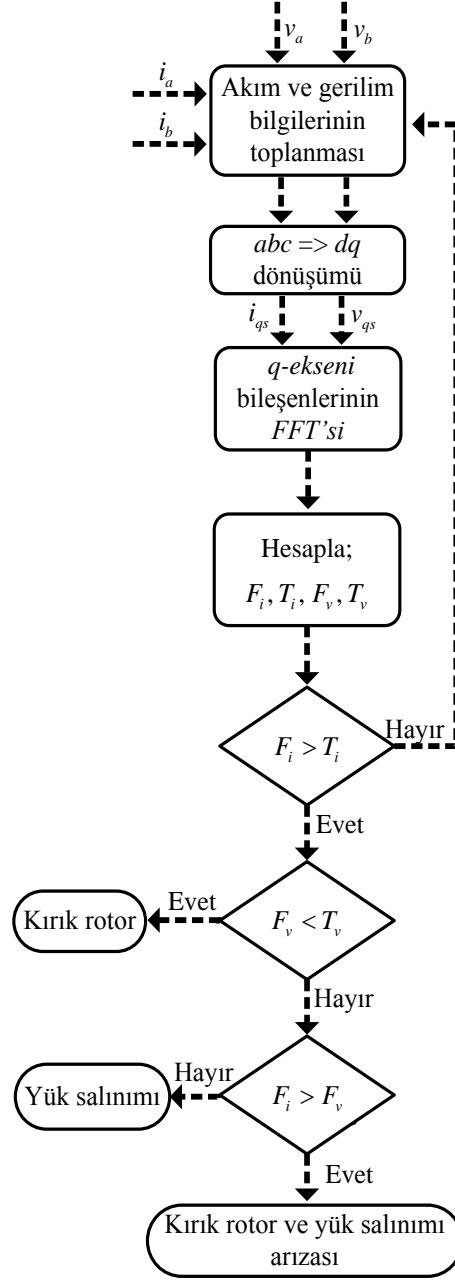
burada I_l ve I_u belirlenen frekans aralığındaki i_{qs} akım spektrumunda bulunan sol (düşük) ve sağ (yüksek) yan band harmoniklerinin toplamının büyüklüğünü göstermektedir.

Gerilim arıza indeksi ise;

$$F_v = \frac{V_l + V_u}{2} \quad (3.32)$$

olarak tanımlanmıştır. Burada V_l ve V_u belirlenen frekans aralığındaki v_{qs} gerilim spektrumunda bulunan sol (düşük) ve sağ (yüksek) yan band harmoniklerinin toplam büyüklüğünü göstermektedir. Hesaplanan arıza indeksleri için i_{qs} akım spektrumunda eşik (threshold) seviyesi T_i , v_{qs} gerilim spektrumunda eşik seviyesi T_v tanımlanmıştır. Eğer denklem (3.31) ve denklem (3.32)'de tanımlanan arıza indeks değerleri eşik seviyesinin üzerinde ise bu durum bir anormalliğin olduğunu işaret etmektedir. Kırık rotor çubuk arızasını düşük frekanslı yük momenti salınımlarından ayırtmak için geliştirilen metodun algoritması Şekil 3.17'de verilmektedir.

Kırık rotor çubuk arızası durumunda F_i akım arıza indeksi değeri eşik değerinden büyüktür ve F_v gerilim arıza indeksi eşik değerinin altındadır. Yük salınımı durumunda ise F_i ve F_v , eşik seviyesinin üstündedir. Fakat F_v gerilim arıza indeksi, F_i akım arıza indeksi değerinden büyüktür. Eğer kırık rotor çubuk arızası ve yük momenti salınımı aynı anda olursa F_i ve F_v , eşik değerinin üzerindedir ancak F_i akım arıza indeksi, F_v gerilim arıza indeksinden büyük değerdedir. Böylece DTC ile beslenen üç fazlı asenkron motorda denklem (3.31) ve denklem (3.32)'deki tanımlanan arıza indeksleri ve eşik değerleri kullanılarak kırık rotor çubuk arızası düşük frekanslı yük momenti salınımlarından ayırtılmaktadır.



Şekil 3.17 DTC ile beslenen bir asenkron motorda kırık rotor çubuk arızasını düşük frekanslı yük momenti salınımindan ayırtmak için geliştirilen algoritma

3.4. Sonuç

Bu tez çalışmasında kırık rotor çubuk arızasını düşük frekanslı yük momenti salınımindan ayırtmak için bir faz akımından elde edilen analitik sinyal uzay vektör açısız dalgalanması metoduna göre örneklenmiştir. Elde edilen frekans spektrumuna analitik sinyalin açısız dalgalanması (ASAF) spektrumu adı verilmiştir.

Bu metodun etkin ve doğru bir sonuç verebilmesi için besleme kaynağında veya statorda bir asimetri olmalıdır. Bu çalışmada şebeke ile beslenen bir asenkron motorda besleme kaynağı dengesizliği göz önüne alınmıştır. Besleme kaynağının dengesizliği stator akımında 3. harmonikte görülürken ASAF spektrumunda 2. harmonikte görülmektedir. ASAF spektrumunda 2. harmoniğin yan bandları kullanılarak ayrıştırma sağlanmaktadır. Bu harmoniklerden kırık rotor çubuk arızasına ait olanların değerleri her ne kadar besleme kaynağı dengesizliğine bağlı olsa da düşük frekanslı yük momenti salınımına ait olan yan band harmonikleri her zaman gürültü düzeyindedir. Ayrıca bu metot açık çevrim (V/f) kontrollü asenkron motorda farklı çalışma frekanslarında ASAF spektrumunda 4. harmoniğin yan bandları dikkate alınarak bir ayrıştırma sağlanmaktadır.

Şebeke ile beslenen asenkron motorda stator akım spektrumu yerine moment ve faz gerilimi spektrumu kullanılarak da kırık rotor çubuk arızası düşük frekanslı yük momenti salınımından ayrıştırılabilir. Moment spektrumunda $6f_s$ 'in yan bandlarında kırık rotor çubuk arızasına ilişkin harmonikler var iken yük momenti salınımına ilişkin harmonikler gürültü düzeyindedir. Benzer bir durum motor faz gerilimi spektrumunda da geçerlidir. Faz gerilimi spektrumunda 3. harmoniğin yan bandlarında kırık rotor çubuk arızasına ilişkin harmonikler var iken yük momenti salınımına ilişkin harmonikler gürültü düzeyindedir. Bu bilgilerden yararlanılarak moment ve faz gerilimi spektrumunda farklı ayrıştırma harmonikleri tanımlanmıştır.

Doğrudan moment kontrollü sürücüler ile beslenen asenkron motorda kırık rotor çubuk arızasını düşük frekanslı yük momenti salınımından ayırtmak için q -ekseni akım ve gerilim bileşenlerinden yararlanılmıştır. Bu bileşenlerin normalize edilmiş band spektrumlarına bakılarak arıza indeksleri tanımlanmıştır. Bu arıza indeksleri dikkate alınarak bir algoritma geliştirilmiştir ve böylece kırık rotor çubuk arızası düşük frekanslı yük momenti salınımından ayrıştırılmaktadır.

4. ÜÇ FAZLI ASENKRON MOTORUN MODELLENMESİ ve BENZETİM SONUÇLARI

4.1. Üç Fazlı Asenkron Motorun Modellenmesi

Kırık rotor çubuk arızasını yük salınımindan ayırıştırmak için yeni metotlar geliştirmek ve geliştirilen metotları test etmek için asenkron motorun lineer ve lineer olmayan olmak üzere iki farklı modeli kullanılmıştır. Lineer model için Matlab@Simulink, lineer olmayan model için ise sonlu elemanlar yöntemini (Finite Element) kullanan ANSYS@Maxwell programı kullanılmaktadır. Matlab@Simulink ortamında kullanılan lineer model temel olarak makine elektriksel parametrelerini dikkate alırken oluşturulan lineer olmayan ANSYS@Maxwell modelinde ise makinenin hem fiziksel hem de elektriksel büyüklükleri göz önüne alınmaktadır.

4.1.1. Asenkron motorun lineer modeli (Matlab Modeli)

Benzetim sonuçları için Matlab@Simulink'te bilezikli asenkron motor modeli kullanılmıştır. Bu tip bir modelde makine değişkenleri açısından klasik teknikler kullanılarak gerilim ve moment denklemleri elde edilmektedir. Asenkron motorun lineer modeli için temel bazı yaklaşımlar yapılmıştır. Bu yaklaşımlar;

- Geometrik ve elektriksel makine konfigürasyonu simetriktir.
- Stator ve rotor manyetik akının uzay harmonikleri ihmal edilmektedir.
- Stator ve rotor sargıları sinüzoidal olarak dağılmaktadır.
- Çıkıntı ve oluk etkileri ihmal edilmektedir.
- Manyetik doyum, çekirdek kayıpları ve deri etkisi ihmal edilmektedir.
- Sargı direnci ve reaktansı sıcaklık ile değişmemektedir.
- Akım ve gerilimler saf sinüzoidal şekildedir.

Kabul edilen tüm bu yaklaşımlar asenkron motorda normal çalışma esnasında motorun dinamik davranışı üzerinde etkisi olsa da motorda gerçek beklenen sonuçlar üzerinde çok büyük bir etkiye sahip değildir.

Bilindięi gibi asenkron motorda herhangi bir kırık rotor çubuk arızası olduğunda ilgili faz veya çubukta akım akmayacak ve o fazın direnç değeri artacaktır. Kırık rotor çubuğu arızası durumunda ilgili fazdaki direnç değerinin r_{ext}

kadar arttığı kabul edilebilir [25]. Böylece kırık rotor çubuk arızası durumunda ilgili rotor fazındaki direnç değeri

$$r_{r_fault} = (r_r + r_{ext}) \quad (4.1)$$

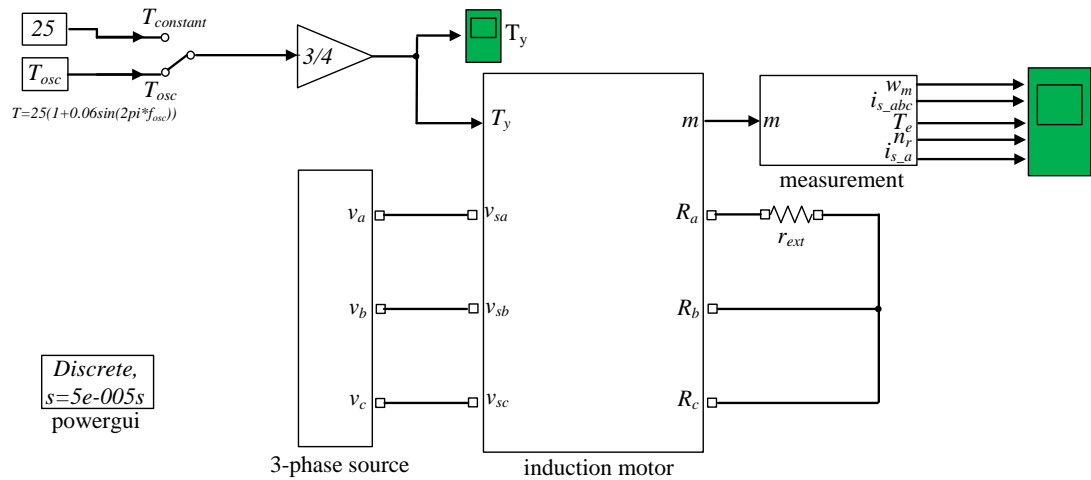
olur. Rotorun bir fazına eklenen bu ilave direncin değeri kırık rotor çubuğu sayısına bağlıdır. Rotor kısa devre halkalarının (end-ring) etkisi ihmal edilirse bu direncin değeri aşağıdaki gibidir [25]

$$r_{ext} = \frac{n}{N/3-n} r_r \quad (4.2)$$

burada n kırık rotor çubuk sayısı ve N ise toplam rotor çubuk sayısını göstermektedir. Kullanılan Matlab/Simulink modelindeki rotor faz dirençlerinden birinin değeri denklem (4.1) ve (4.2) göz önüne alınarak değiştirilmiştir (Şekil 4.1).

Motor sabit ve salınımlı yük olmak üzere iki çeşit yük momenti ile yüklenmektedir. Bu iki yük tipi araya konulan bir anahtar vasıtasıyla birbirinden ayrıştırılmaktadır. Yük momenti salınımlı için denklem (1.10)'daki gibi bir yük momenti uygulanmaktadır. Böylece istenilen frekans ve genlikte yük salınımlı elde edilebilmektedir.

Motor ölçüm uçlarından faz akımı, moment vb. değişkenler bir osiloskop aracılığıyla ölçülmektedir. Simulink modelinde kullanılan motor parametreleri Tablo 4.1'de verilmektedir.

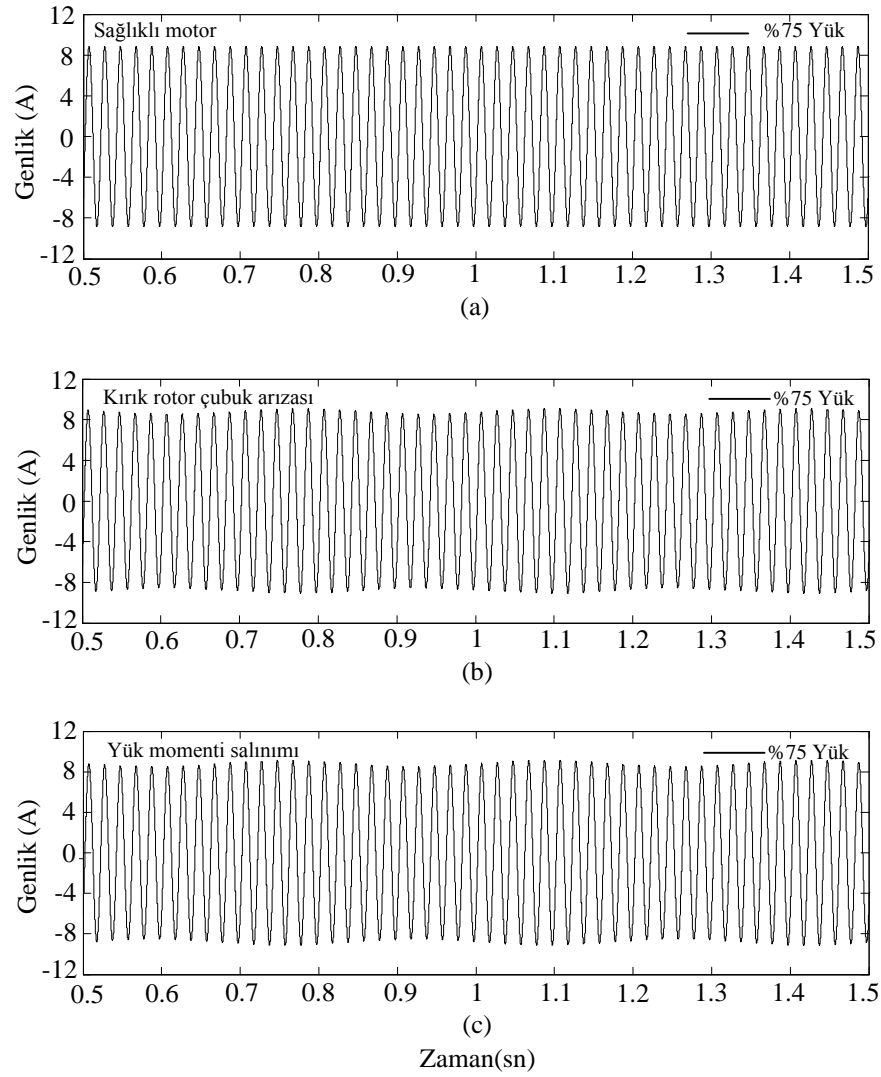


Şekil 4.1 Asenkron motorun kırık rotor çubuk arızası içeren simulink modeli

Tablo 4.1 Test motorun parametreleri (Matlab@Simulink)

Kutup sayısı	4
Anma gücü, kW	4
Rotor çubuk sayısı	28
Hat-hat gerilimi, V	400
Anma frekansı, Hz	50
Stator direnci, Ω	1.405
Rotor direnci, Ω	1.395
Ortak indüktans, H	0.1722

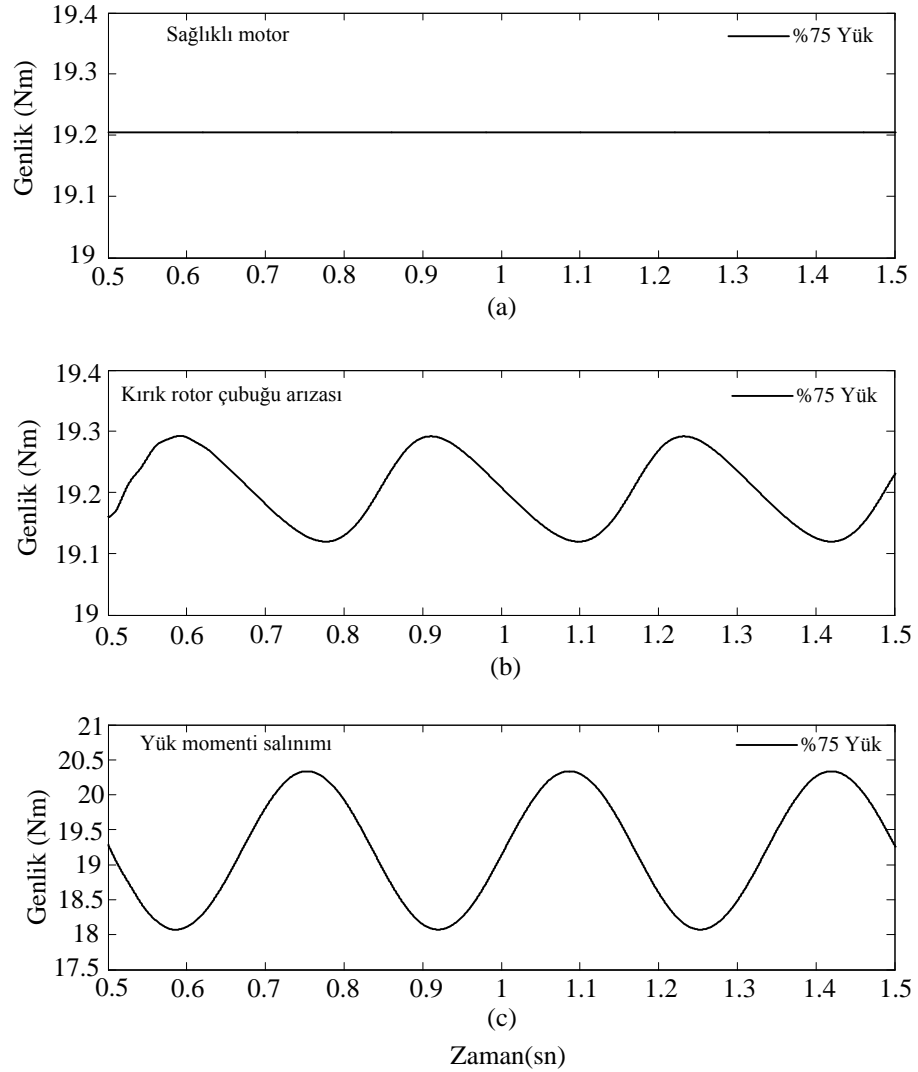
Şekil 4.2a'da sağlıklı asenkron motorda tam yükte motor bir faz akımı olan i_{sa} 'nın dalga şekli gösterilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi stator akımında zaman ekseninde herhangi bir salınım görülmemektedir.



Şekil 4.2 Simulink modeli, Faz akımı a) Sağlıklı motor b) İki kırık rotor çubuğu arızası c) Düşük frekanslı yük momenti salınımı

Şekil 4.2b'de ise iki kırık rotor çubuğu durumunda i_{sa} stator akımı gözlenmektedir. Motor faz akımının tepe değerlerindeki dalgalanma net bir şekilde görülmektedir. Şekil 4.2c'de ise motorda düşük frekanslı yük momenti salınımı var iken i_{sa} akımında oluşan dalgalanma açık bir şekilde görülmektedir. Kırık rotor çubuk arızası ve yük momenti salınımı durumunda i_{sa} 'da meydana gelen dalgalanmalar diğer fazlarda da görülecektir.

Şekil 4.3a'da sağlıklı bir asenkron motorda tam yükte motor yük momentinin dalga şekli gösterilmektedir. Şekil 4.3a'dan da görüldüğü gibi yük momentinde zaman ekseninde herhangi bir salınım bulunmamaktadır. Şekil 4.3b'de ise iki kırık rotor çubuk arızası durumunda, Şekil 4.3c'de ise yük momenti salınımı var iken motor yük momentinde meydana gelen dalgalanmalar net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 4.3 Simulink modeli, Yük momentini a) Sağlıklı motor b) İki kırık rotor çubuk arızası c) Düşük frekanslı yük momentini salınımı

Daha sonraki bölümlerde bu model kullanılarak geliştirilen analitik sinyalin açılal dalgalanması metodunun benzetim sonuçları analiz edilecektir.

4.1.2. Asenkron motorun lineer olmayan modeli (2D- FEM)

Lineer modelden farklı olarak lineer olmayan asenkron motor modelinde makine geometrisi, kullanılan malzemeler, stator sargı yapısı, makine doyum eğrileri gibi elektriksel ve manyetik parametreler göz önüne alınmaktadır. Bu tarz bir modelde makinenin gerçek davranışını gözlemlemek mümkün olmaktadır. Asenkron motorun lineer olmayan modeli için iki boyutlu Sonlu elemanlar yöntemini kullanan ANSYS@Maxwell 2-D interaktif yazılım paket programı kullanılmıştır.

Sonlu elemanlar yöntemi (FEM) önceden tanımlanmış bir sınır aralığında oluşturulan model için yaklaşık sonuçlar elde etmek için kullanılmaktadır. Yazılım paketindeki geçici çözüm analizi ile (Transient solver) oluşturulan modelde manyetik alanlar, güç, moment, hız ve akı gibi büyüklükler değişik zaman adımları ile belirli bir periyotta analiz edilebilir [89]. Modeldeki değişkenler z-yönünde zamana bağlı bir hareket denkleminde (denklem 4.3) göre kendini sürekli güncellemektedir.

$$\nabla \times \nu \nabla \times A = J_s - \sigma \frac{dA}{dt} - \sigma \nabla V + \nabla \times H_c \quad (4.3)$$

burada H_c koersivite, A manyetik vektör potansiyelini, V elektriksel potansiyeli, ν manyetik direnci, J_s ise akım yoğunluğunu göstermektedir. Denklem (4.3), FEM modelinin her düğümünde her zaman adımı ile çalışmaktadır. Oluşturulan motor modelinde fuko akım etkilerini en aza indirmek için, her sargıda dağılmış iletken yapısı kullanılmaktadır. Her dağılmış sargıdaki saçaklar birçok farklı yerde birbirlerine seri veya paralel bağlanmaktadır. Her saçaktaki akım birbirleri ile aynıdır ve aşağıdaki denklem ile tanımlanır.

$$\nabla \times \nu \nabla \times A = J_s \quad (4.4)$$

Böylece bir sargı terminalindeki gerilim;

$$u_s = J_s \iint \frac{dA}{dt} \cdot d\Omega + R \cdot i_f + L \cdot \frac{di_f}{dt} \quad (4.5)$$

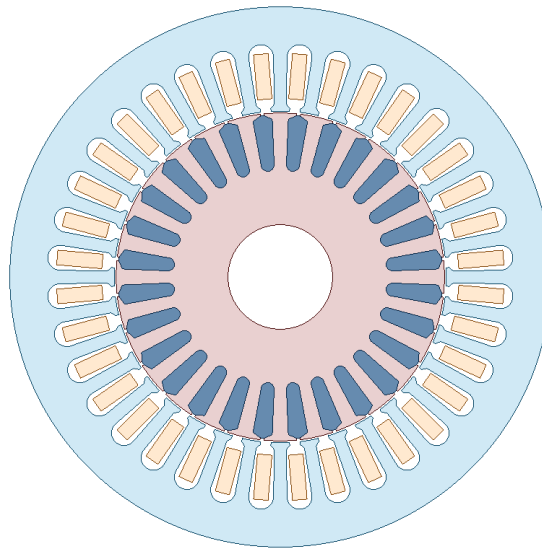
burada R , L ve i_f sırasıyla sargı direnci, indüktansı ve sargı akımını göstermektedir. Benzetim sonuçları ile deneysel sonuçları detaylı olarak karşılaştırabilmek için

stator/rotor yapısı ile gerçek hayatta kullanılan test motorunun parametreleri aynı olarak seçilmiştir. Modellenen asenkron motorun elektriksel ve mekaniksel parametreleri Tablo 4.2’de verilmektedir.

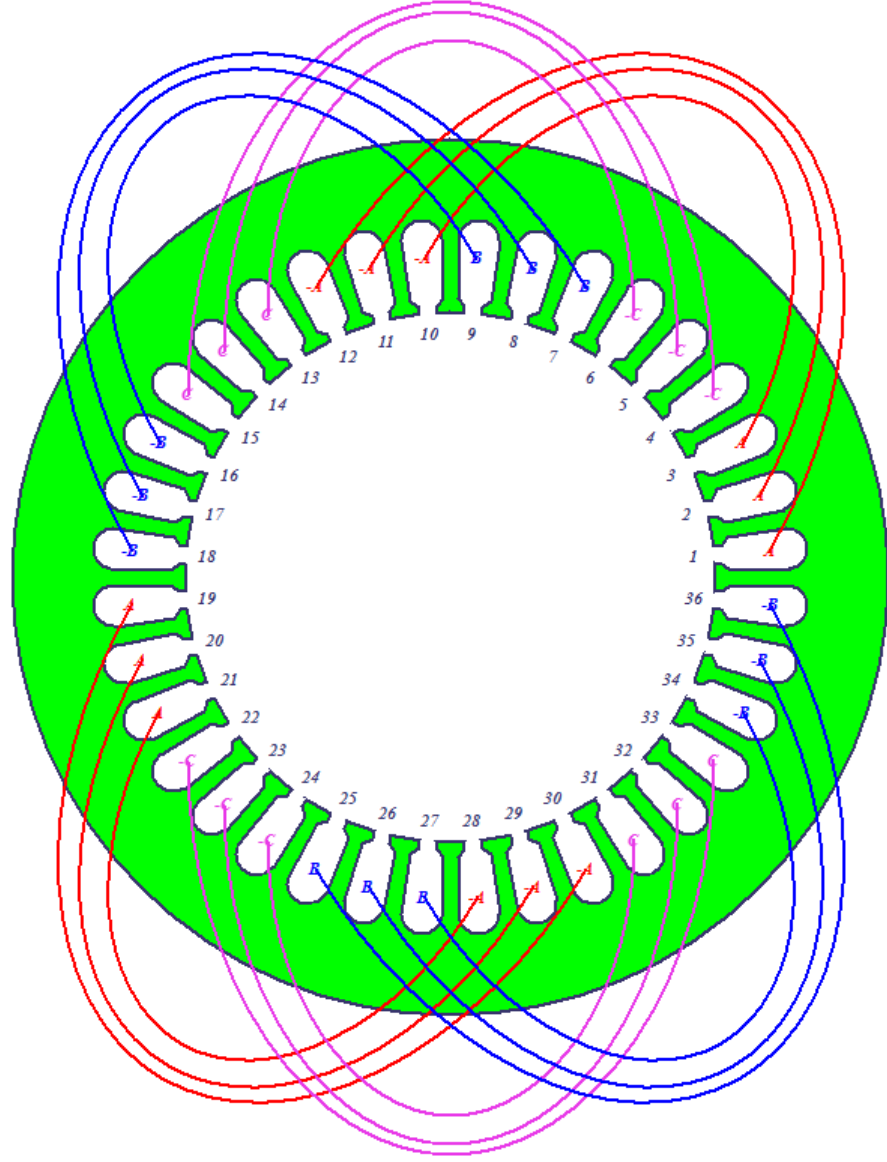
Tablo 4.2 Test motorun parametreleri (ANSYS@Maxwell)

Kutup sayısı	4
Stator dış çapı, <i>mm</i>	145
Stator iç çapı, <i>mm</i>	89
Rotor dış çapı, <i>mm</i>	88
Rotor iç çapı, <i>mm</i>	34.7
Stator slot sayısı, <i>mm</i>	36
Rotor çubuk sayısı	28
Anma gerilimi, <i>V</i>	400
Anma frekansı, <i>Hz</i>	50
Anma gücü, <i>kW</i>	2.2
Anma akımı, <i>A</i>	4.7
Rotor ataleti, <i>kgm²</i>	0.047

Maxwell@ANSYS paket programı kullanılarak oluşturulan asenkron motor benzetim modeli Şekil 4.4’de gösterilmektedir. Bu modelde stator çekirdeği çapı, rotor çekirdeği çapı, shaft çapı, rotor çubuk yapıları ve motor çekirdeğinin derinliği gibi gerçek motor ölçüleri ve geometrisi göz önüne alınarak asenkron motor modeli oluşturulmuştur.



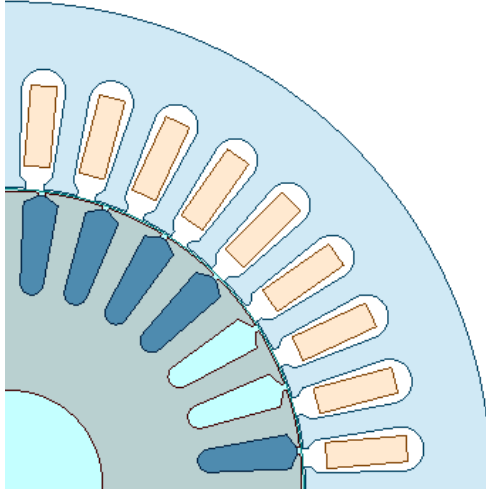
Şekil 4.4 Asenkron motorun 2D-FEM Modeli



Şekil 4.5 Oluşturulan modelde stator faz sargılarının dizilimi

Ayrıca stator sargı yapısı, hava aralığı, stator iletkenlerinin fiziksel durumu, stator ve rotor manyetik malzemeleri de oluşturulan asenkron motor modelinde dikkate alınmıştır. Stator sargılarının dizilimi Şekil 4.5'te verilmektedir.

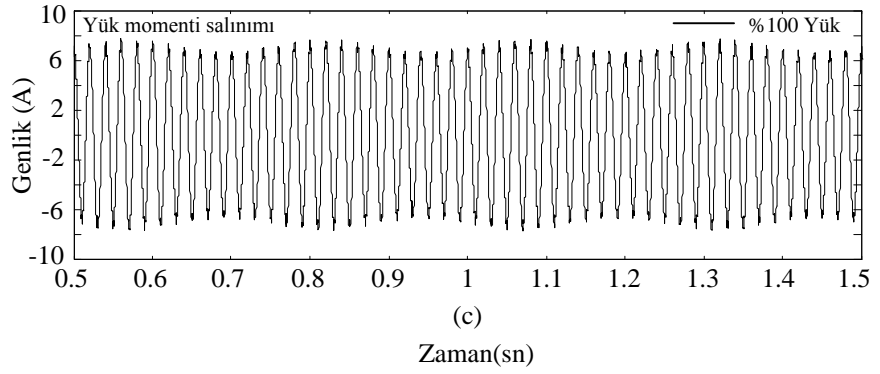
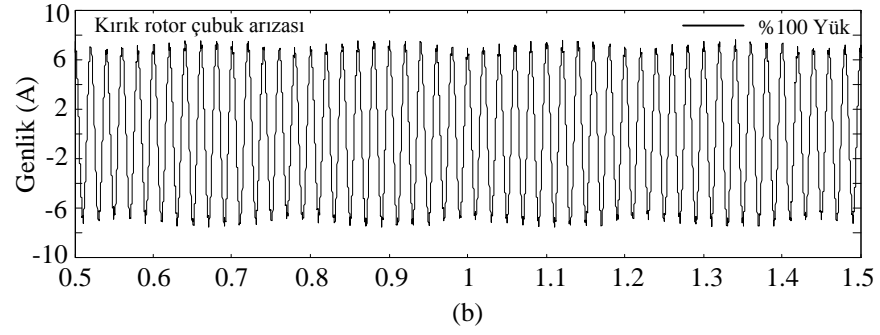
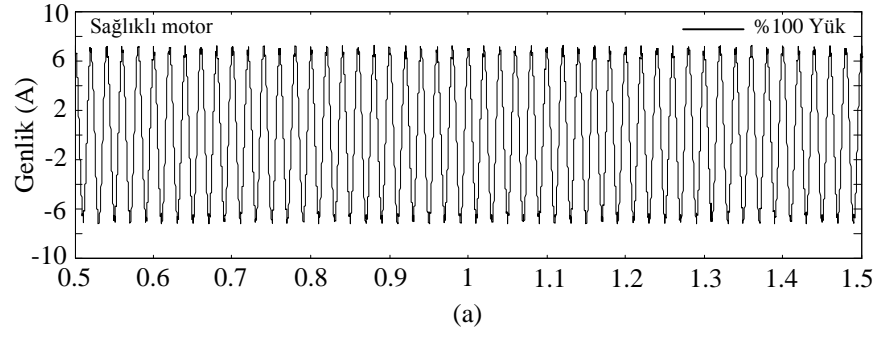
Kırık rotor çubuk arızası oluşturmak için belirlenen rotor çubuklarından akım akmaması için rotor çubuklarından iki tanesi modelden çıkarılmıştır. Böylece bu iki çubuktan akım akması engellenmiş olmaktadır. Bu durum Şekil 4.6'da net bir şekilde görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi iki kırık rotor çubuk arızası çubuk-1 ve çubuk-2 numaralı çubuklarda oluşturulmuştur.



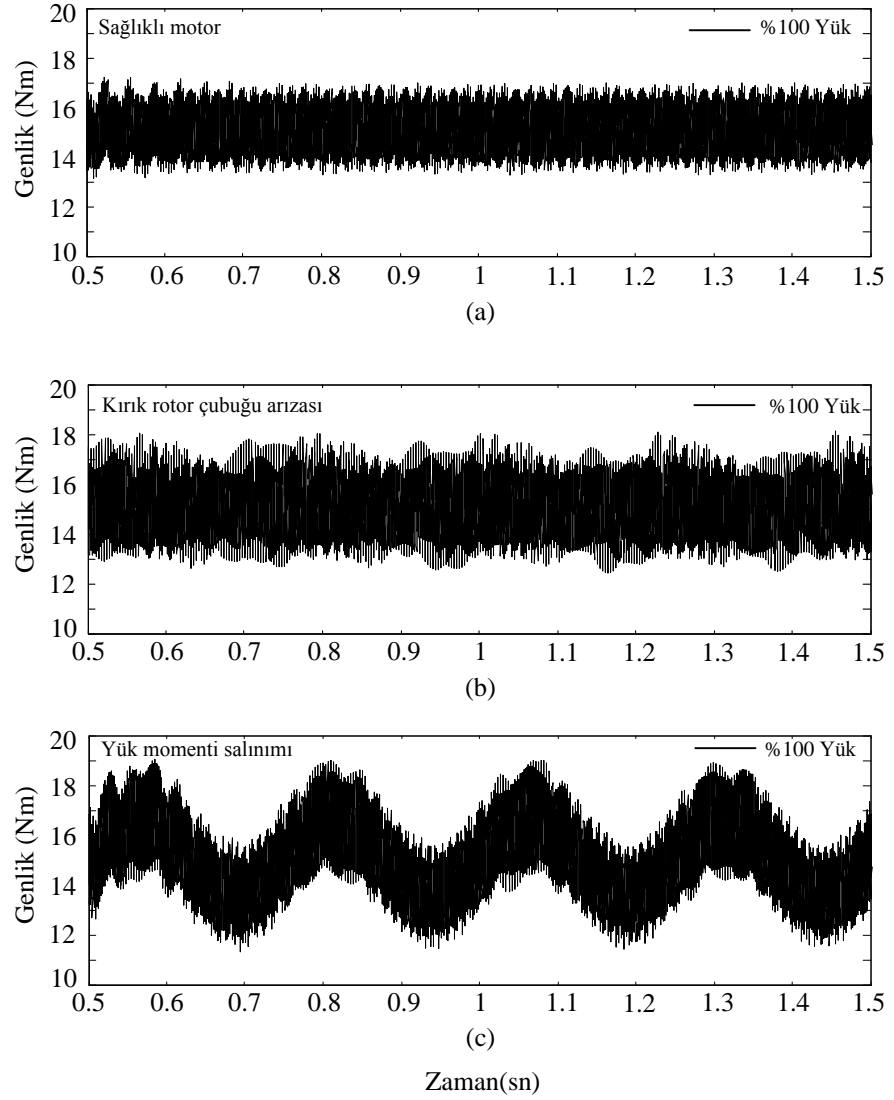
Şekil 4.6 Oluşturulan modelde kırık rotor çubuk arızasının oluşturulması

Şekil 4.7a'da sağlıklı motorda 2 boyutlu modelin benzetiminden elde edilen motor faz akım bilgileri zaman ekseninde gösterilmektedir. Kırık rotor çubuk arızası durumunda bu akımın salınım yaptığı net bir şekilde görülmektedir (Şekil 4.7b). Yük salınımı durumunda da benzer şekilde motor faz akımının yük momentindeki salınım frekansına bağlı olarak salınım yaptığı görülmektedir (Şekil 4.7c).

Şekil 4.8a'da sağlıklı bir asenkron motorda 2-D Maxwell@ANSYS asenkron motor modelinden elde edilen motor yük momenti zaman ekseninde gösterilmektedir. Asenkron motor sağlıklı durumda iken herhangi bir yük salınımının olmadığı net bir şekilde görülmektedir. Ancak asenkron motorda kırık rotor çubuğu arızası durumunda yük momentinin $2sf_s$ frekansında salınım yaptığı Şekil 4.8b'de görülmektedir. Benzer olarak asenkron motorda yük momenti salınımı durumunda da yük salınımı frekansı f_{osc} 'da yük momentinde bir dalgalanma olduğu görülmektedir (Şekil 4.8c).



Şekil 4.7 FEM modeli, Faz akımı a) Sağlıklı motor b) İki kırık rotor çubuk arızası c) Düşük frekanslı yük momenti salınımı

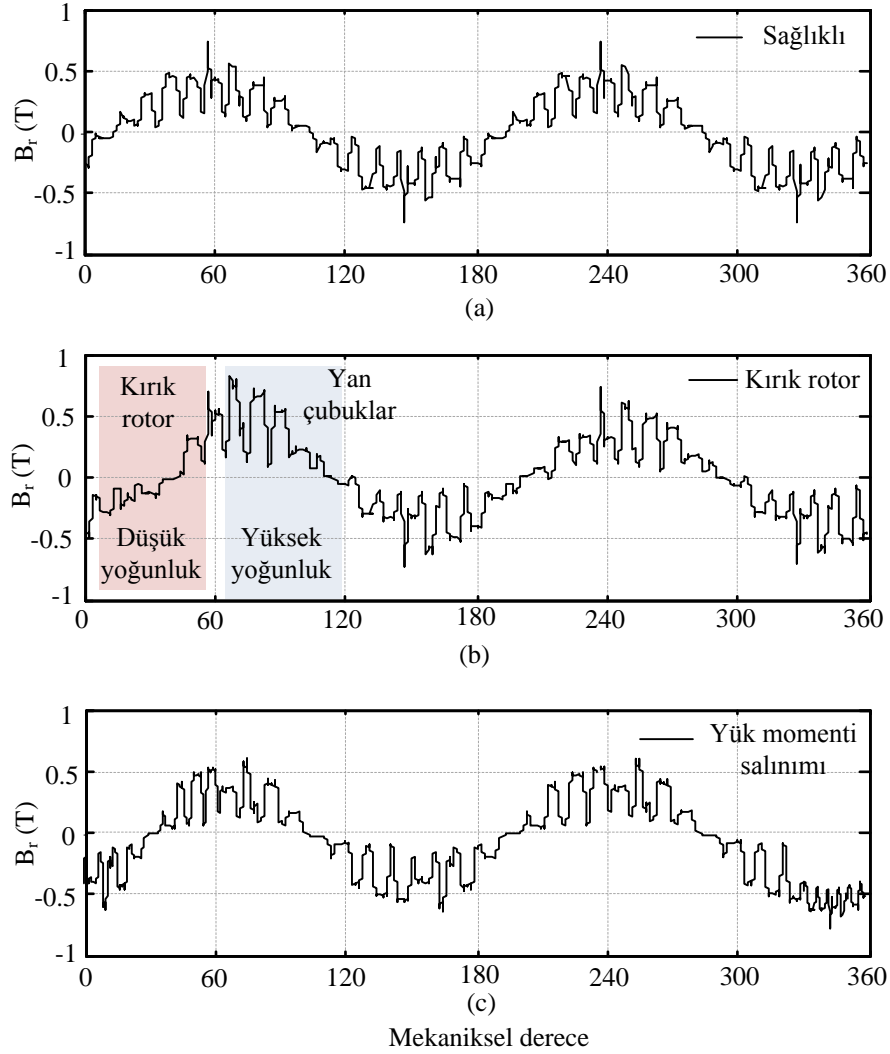


Şekil 4.8 FEM modeli, Yük momenti a) Sağlıklı motor b) İki kırık rotor çubuk arızası c) Düşük frekanslı yük momenti salınımı

İki boyutlu ANSYS@Maxwell paket programı motorun elektriksel büyüklüklerinin yanı sıra manyetik akı, manyetik alan vektörleri ve akı yoğunluğu gibi büyüklüklerin incelenmesine imkan vermektedir. Bu tarz büyüklüklerin incelenebilmesi motorun dinamik davranışı hakkında detaylı bilgilere sahip olmanızı sağlamaktadır.

Şekil 4.9 asenkron motorun hava aralığındaki radyal akı yoğunluğunu bir mekaniksel periyot için göstermektedir. Motor, rotor aynı pozisyonda iken sağlıklı, kırık rotor çubuk ve yük momenti salınımı durumunda incelenmiştir. Şekil 4.9b'de görüldüğü gibi kırık rotor çubuklarının olduğu yerde radyal akı yoğunluğu düşmekte iken kırık rotor çubukları etrafındaki komşu rotor çubuklarında radyal akı yoğunluğu

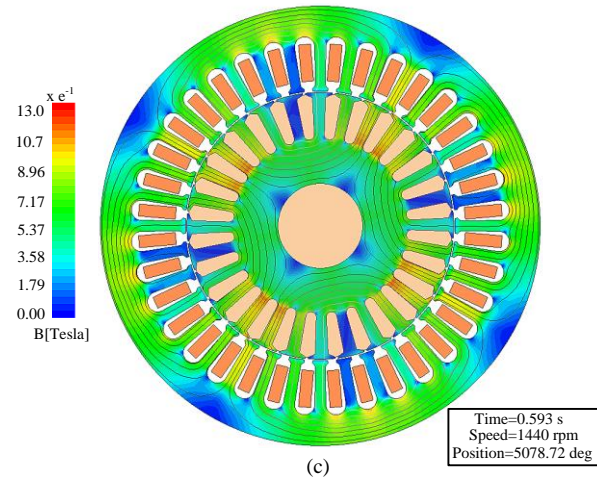
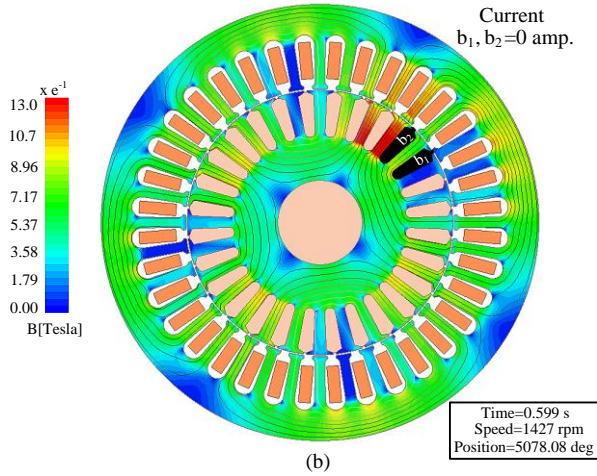
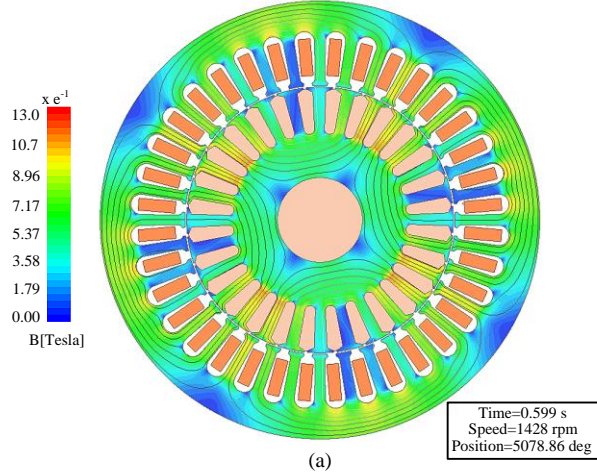
artmaktadır. Şekil 4.9c’de yük salınımı durumunda ise sağlıklı duruma göre herhangi bir değişim gözlenmemektedir.



Şekil 4.9 Hava aralığındaki radyal manyetik akı yoğunlukları a) Sağlıklı motor b) İki kırık rotor çubuk arızası c) Yük momenti salınımı

Şekil 4.10 asenkron motordaki manyetik akı yoğunluğunu ve akı dağılım çizgilerini sağlıklı, iki kırık rotor çubuğu ve yük salınımı durumları için göstermektedir. Şekil 4.10a (sağlıklı) ve Şekil 4.10c’de (yük salınımı) görüldüğü gibi akı yoğunluğu dağılımı simetrik bir şekildedir. Ancak şekil 4.10b incelendiğinde motordaki akı yoğunluğu dağılımında bir asimetri olduğu görülmektedir. Özellikle kırık rotor çubuklarının etrafında akı yoğunluğu artmaktadır. Çünkü kırık rotor çubuklarından akmayan akım komşu çubuklardan akacaktır. Komşu rotor

çubuklarından akan akımın artması ile o bölgedeki akı yoğunluğu da artmaktadır. Böylece akı dağılımında bir düzensizlik meydana gelmektedir.



Şekil 4.10 Manyetik akı yoğunluğu ve akı çizgileri dağılımı a) Sağlıklı motor b) İki kırık rotor çubuk arızası c) Yük moment salınımı

Benzetim sonuçları bölümünde, Maxwell modeli yardımıyla yük momenti ve faz gerilimi analizinden faydalanılarak önerilen yönteme ait benzetim sonuçları sunulacaktır.

4.2. Benzetim Sonuçları

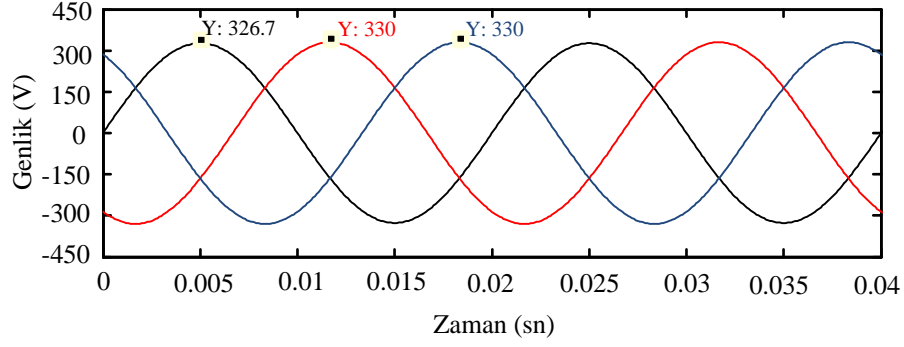
Bu bölümde daha önceki bölümlerde oluşturulan benzetim modellerinden yararlanılarak geliştirilen arıza tespit algoritmaları test edilmiştir. Kırık rotor çubuk arızasını düşük frekanslı yük momenti salınımindan ayırtmak için geliştirilen metotlardan analitik sinyalin açısız dalgalanması (ASAF) metodu için Matlab@Simulink lineer asenkron motor modelinden yararlanılırken motor yük momenti ve faz gerilimi analizi için ise Maxwel@ANSYS ortamında oluşturulan model kullanılmaktadır.

4.2.1. Analitik sinyal açısız dalgalanma metodu için benzetim sonuçları

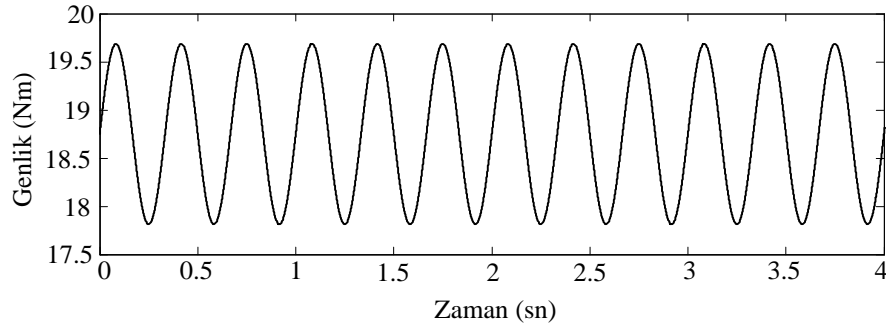
Kırık rotor çubuk arızasını düşük frekanslı yük momenti salınımindan ayırtmak için geliştirilen ASAF metodunu kullanarak Matlab@Simulink modeli ile elde edilen benzetim sonuçları sunulmaktadır. Benzetimde modellenen asenkron motor sağlıklı motor, kırık rotor çubuk, yük momenti salınımı ve hem kırık rotor çubuk hem de yük momenti salınımı aynı anda var iken çalıştırılmıştır. Daha önceki bölümde belirtildiği gibi kırık rotor çubuk arızası için rotor uçlarından birine ilave direnç eklenmiştir. Bu ilave direncin değeri denklem 4.2’de belirtilmektedir.

ASAF metodunun uygulanabilmesi için Bölüm 3.1’de de açıklandığı gibi az da olsa bir kaynak dengesizliğine ihtiyaç duyulmaktadır. Lineer modelde asenkron motorun girişine uygulanan üç faz sinüzoidal besleme kaynaklarından bir tanesinin genliği değiştirilerek kaynak dengesizliği sağlanmaktadır.

Şekil 4.11’de asenkron motorun besleme uçlarına verilen üç faz gerilimi gösterilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi A fazındaki gerilimin genliği, diğer iki faza göre daha düşüktür. Benzetim sonuçlarında kaynak dengesizliği % 0.4 olarak ele alınmıştır.



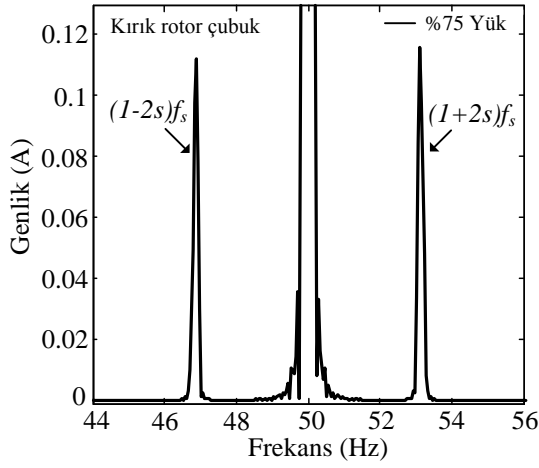
Şekil 4.11 Asenkron motorun besleme uçlarına verilen üç faz gerilim (%0.4 kaynak dengesizliği)



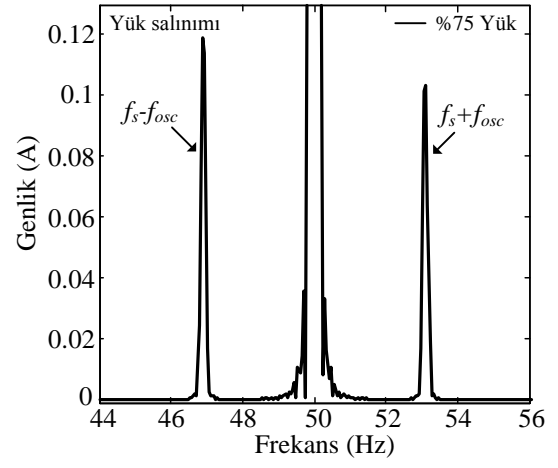
Şekil 4.12 Asenkron motora uygulanan %6'lık yük momentini salınımı

Yük momentini salınımı modeli için denklem 1.10'dan yararlanılmıştır. Şekil 4.12 asenkron motorun moment girişine uygulanan yük momentini göstermektedir. Burada yükte %6'lık bir yük salınımı bulunmaktadır.

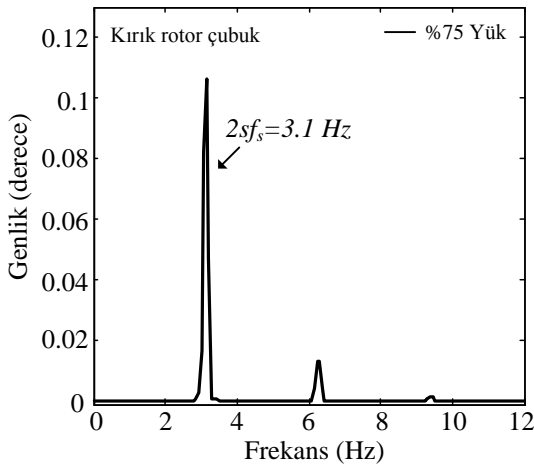
Şekil 4.13'de asenkron motor %75 sabit yükte iki kırık rotor çubuk arızası durumunda stator faz akımı spektrumu (Şekil 4.13a) ve ASAF sinyal spektrumu (Şekil 4.13b ve Şekil 4.13c) gösterilmektedir. Motor kayma değeri $s=0.031$ 'dir. ASAF spektrumu kolay analiz edilebilmesi için [0-20 Hz] ve [90-110 Hz] aralığı olmak üzere iki kısımda incelenmiştir. Şekil 4.13a'da akım spektrumunda görüldüğü gibi kırık rotor çubuk arızasına ait harmonikler 46.9 Hz ve 53.1 Hz'de ana harmoniğin yan bandlarında görülmektedir. Şekil 4.13b'de kırık rotor arızasına ait harmonik $2sf_s$ frekansında görülmektedir. Şekil 4.13c'de ise kırık rotor çubuk arızası durumunda $2f_s$ 'in yan bandında $(1-s)2f_s$ harmoniği net bir şekilde görülmektedir.



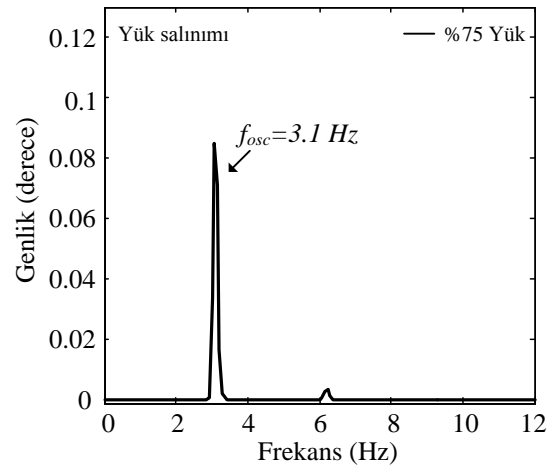
(a)



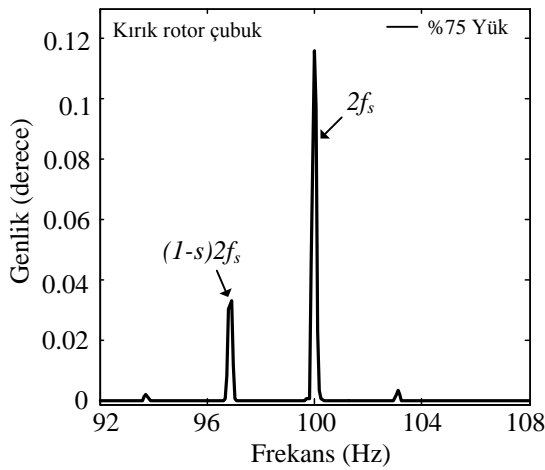
(a)



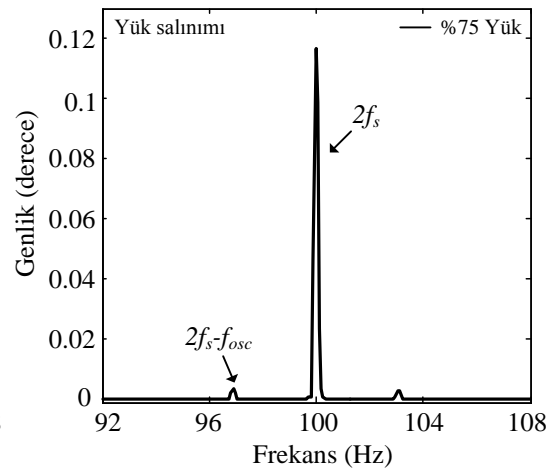
(b)



(b)



(c)



(c)

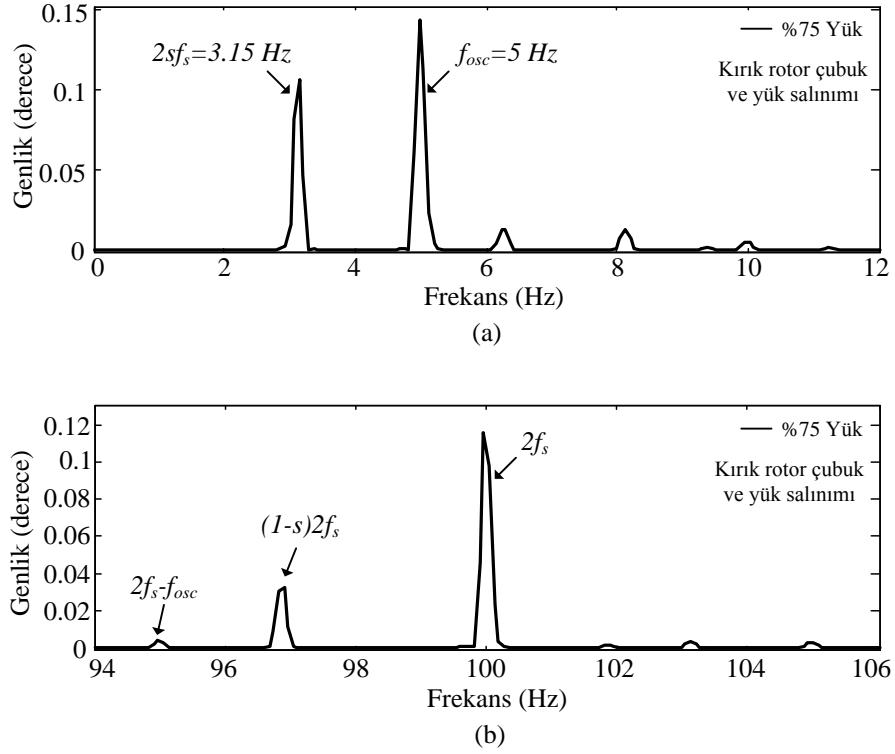
Şekil 4.13 İki kırık rotor çubuk, %75 yük
a) Stator akım spektrumu
b) ASAF spektrum (0 Hz- 12Hz)
c) ASAF spektrum (92Hz- 108Hz)

Şekil 4.14 Yük salınımı, %75 yük
a) Stator akım spektrumu
b) ASAF spektrum (0 Hz- 12Hz)
c) ASAF spektrum (92Hz- 108Hz)

Şekil 4.14'de asenkron motorda $f_{osc}=3.1$ Hz'de %6 yük salınımı var iken stator akım spektrumunu (Şekil 4.14a) ve ASAF spektrumunu (Şekil 4.14b ve Şekil 4.14c) gösterilmektedir. Ortalama yük momenti tam yük momentinin %75'i kadardır. Yük momenti salınımı frekansı, kırık rotor çubuk arızası frekansı ile aynı seçilmiştir. Bu nedenle Şekil. 4.14a'da stator akımında ana harmoniğin yan bandlarında yük momenti salınımına ait harmonikler 46.9 Hz ve 53.1 Hz'de net bir şekilde görülmektedir. Şekil 4.14b'de yük momenti salınımına ait harmonik $f_{osc}=3.1$ Hz frekansında görülmektedir. Şekil 4.14c'de ise yük momenti salınımı durumunda $2f_s$ 'in yan bandında yük salınımına ait $2f_s-f_{osc}$ neredeyse gürültü düzeyindedir.

ASAF metodunun performansını göstermek için, motor hem iki kırık rotor çubuk arızası durumunda hem de %6 yük salınımı aynı anda var iken çalıştırılmıştır. Yük momenti tam yük momentinin %75'i kadardır. Şekil 4.15'te ASAF spektrumunda $2f_s$ 'in yan bandları kullanılarak bu iki etki birbirinden ayrıştırılabilmektedir. Şekil 4.15a'da yük salınımına ait olan f_{osc} harmoniği $2f_s$ 'ten daha büyük olsa bile Şekil 4.15b'de $2f_s$ 'in yan bandlarında kırık rotor ile ilişkili olan $(1-s)2f_s$ harmoniği yük salınımına ait olan $2f_s-f_{osc}$ harmoniğinden daha büyük değerdedir. Ayrıca yük momenti salınımına ait olan $2f_s-f_{osc}$ harmoniği gürültü düzeyindedir.

Sunulan benzetim sonuçlarına göre ASAF spektrumunda yük momenti salınımı sadece f_{osc} 'de görülürken kırık rotor çubuk arızası hem $2f_s$ hem de $(1-2s)f_s$ 'de görülmektedir.

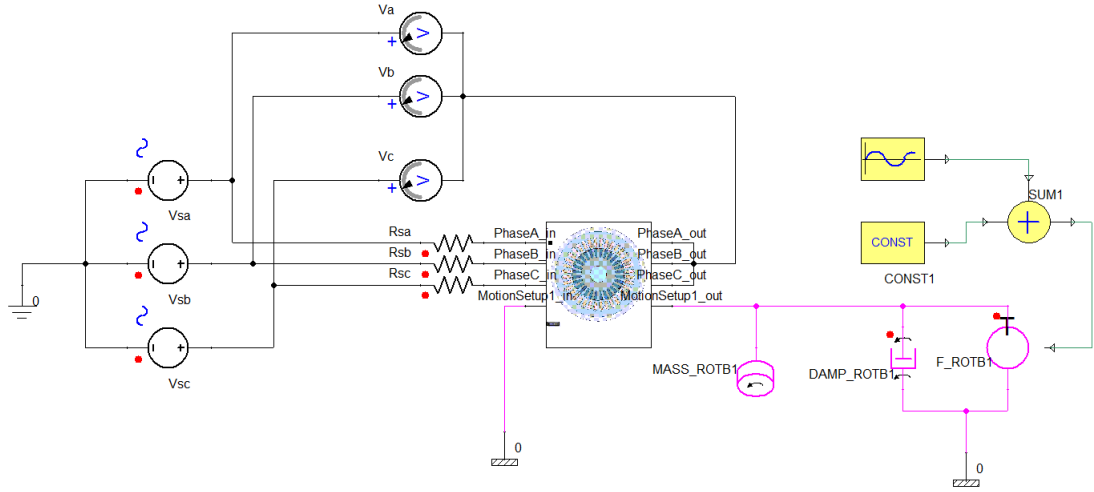


Şekil 4. 15 İki kırık rotor çubuk ve %6 yük momenti salınımlı durumda, %75 yükte
a) ASAF spektrum (0Hz - 12Hz) b) ASAF spektrum (92Hz - 108Hz)

4.2.2. Moment ve faz gerilimi spektrumu için benzetim sonuçları

Üç fazlı yıldız bağlı bir asenkron motorda şebeke ile besleme durumunda kırık rotor çubuk arızasını düşük frekanslı yük momenti salınımlarından ayırtmak için moment ve faz gerilim spektrumları incelenmiştir. Benzetim sonuçları için ANSYS@Maxwell paket programı ile bağlantı içerisinde olan bir multi-domain simulator programı olan Simplorer@ANSYS kullanılmıştır. Simplorer paket programı kullanılarak Maxwell@ANSYS modelinden elde edilen tüm benzetim bilgileri Simplorer paket programına aktarılıp orada işlenebilmektedir. Böylece Simplorer@ANSYS ile motor gerçek faz gerilim bilgisi ölçülebilmektedir.

Şekil 4.16'da oluşturulan Maxwell modeli ile entegre olmuş Simplorer modeli gösterilmektedir.

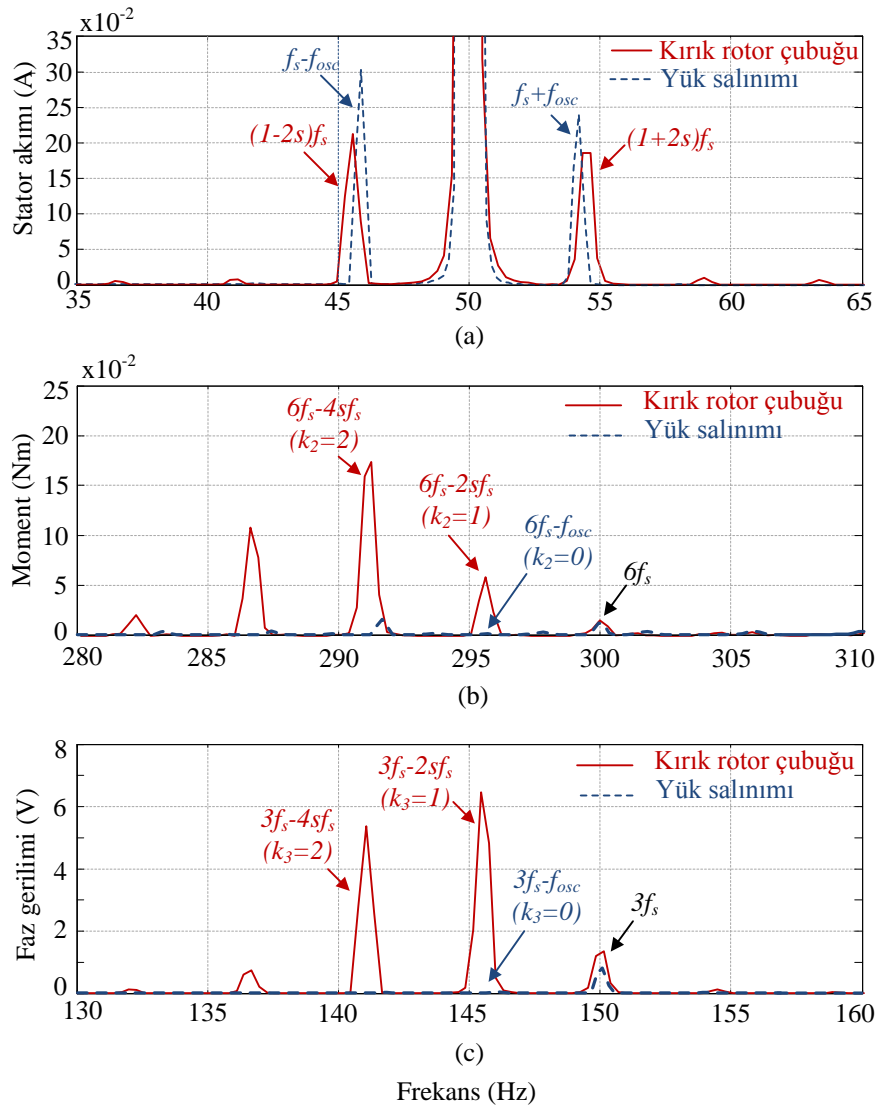


Şekil 4.16 Simplorer ile oluşturulan model

Benzetimde motor üç fazlı dengeli bir sistemden beslenmektedir. Benzetimde modellenen asenkron motor sağlıklı motor, kırık rotor çubuk arızası, yük moment salınımları ve hem kırık rotor çubuk arızası hem de yük moment salınımları aynı anda var iken çalıştırılmıştır. Benzetimler tam yükte, 50 Hz'lik besleme kaynağı frekansında yapılmıştır.

Şekil 4.17a'da asenkron motorda iki kırık rotor çubuk arızası ile düşük frekanslı yük moment salınımları durumunda stator akım spektrumu görülmektedir. Motor dönüş hızı $n_m = 1434$ rpm ve motor kayma değeri $s = 0.044$ 'dür. Yük moment salınımları ile kırık rotor çubuk arızasını karşılaştırmak için yük moment salınımları frekansı kırık rotor çubuk arızası frekansına eşit seçilmiştir ($f_{osc} = 4.4$ Hz). Şekil 4.17a'da stator akımının yan bandlarında kırık rotora ve yük moment salınımlarına ait olan yan band bileşenleri 45.6 Hz ve 54.4 Hz'de görülmektedir. Yük moment salınımları frekansı kırık rotor çubuk arızası ile aynı olduğundan sadece stator akımına bakılarak arıza kaynağının tespiti neredeyse imkânsızdır. Ancak Şekil 4.17b'deki moment spektrumunda $6f_s$ 'in yan bandlarında kırık rotor çubuk arızasına ait olan harmonikler $6f_s - 2sf_s$ ve $6f_s - 4sf_s$ net bir şekilde görülürken yük moment salınımlarına ait olan yan band harmonikleri görülmemektedir. Bu yüzden Şekil 4.17b'de yük moment salınımları durumunda denklem (3.26)'daki k_2 değeri sıfıra eşittir. Ayrıca moment spektrumunda DC bileşen civarlarında kırık rotor çubuğuna ait $2sf_s$ harmoniği ve yük moment salınımlarına ait f_{osc} harmoniği bulunmaktadır. Fakat bu harmonikler her iki durum içinde moment spektrumunda mevcut olduğundan

ayırıştırma harmonikleri olarak kullanılmamaktadır. Kırık rotor çubuk arızası durumunda yük moment salınımindan farklı olarak k_2 değeri denklem (3.26)'daki ayırıştırma yönteminde belirtildiği gibi sabit tamsayı değerleri almaktadır ($k_2=1,2$) (Şekil 4.17b). Şekil 4.17c'de motor faz gerilimi spekturumunda görüldüğü gibi kırık rotor çubuk arızası durumunda 3. harmoniğin yan bandlarında $3f_s-2sf_s$ ve $3f_s-4sf_s$ harmonikleri gözlenmektedir. Denklem (3.28)'deki arıza tespit yönteminde k_3 değeri sıfırdan farklı sabit tamsayı değerleri almaktadır ($k_3=1, 2$). Ancak yük momenti salınıımı durumunda Şekil 4.17c'de net bir şekilde görüldüğü gibi faz gerilimi spekturumunda 3. harmoniğin yan bandlarında $3f_s-f_{osc}$ frekansında herhangi bir harmonik bulunmamaktadır ($k_3=0$).

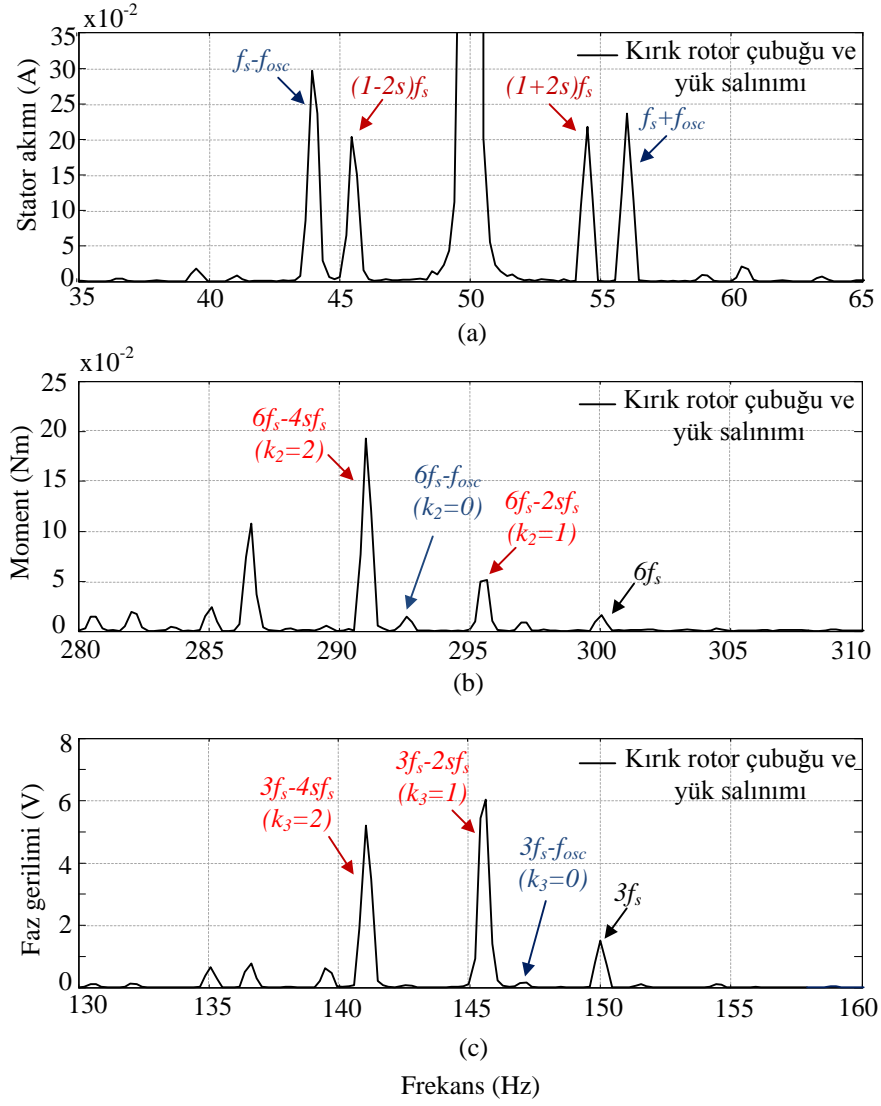


Şekil 4.17 Benzetim sonuçları, tam yükte, ($2sf_s = f_{osc} = 4.4$ Hz) a) Stator akımı spekturumu b) Moment spekturumu c) Faz gerilimi spekturumu

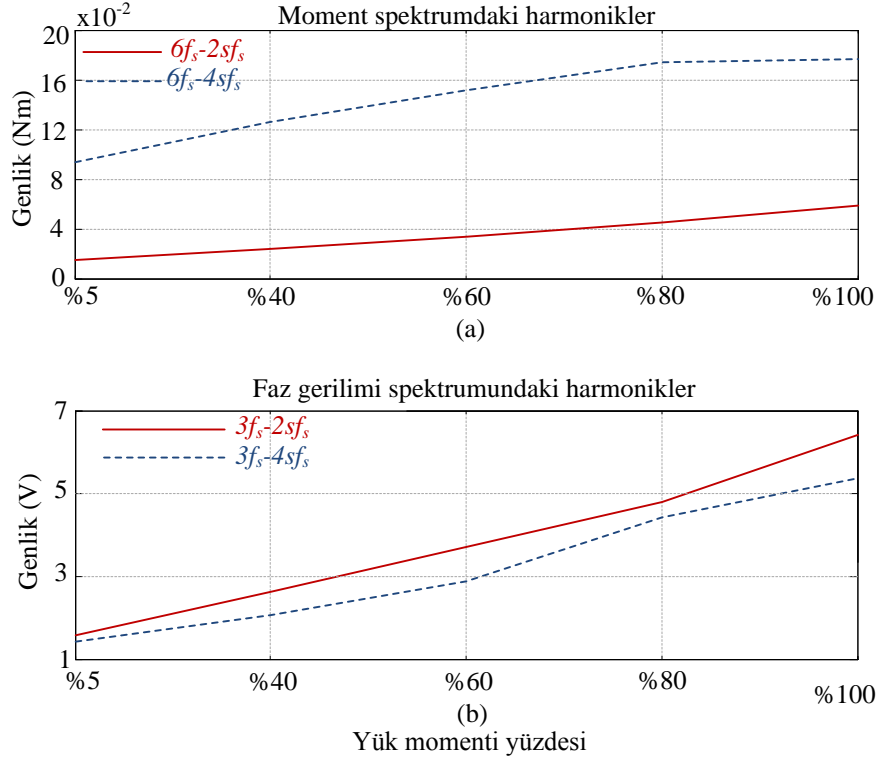
Ayrıştırma harmoniklerinin performansını test etmek için hem iki kırık rotor çubuk arızası hem de düşük frekanslı yük momenti salınımı aynı anda var iken benzetim sonuçları elde edilmiştir. Yük moment salınımı frekansı kırık rotor çubuk frekansından farklı seçilmiştir ($f_{osc}=6$ Hz ve $2sf_s=4.4$ Hz).

Şekil 4.18a'da yük moment salınımı ($f_s \pm f_{osc}$) ve kırık rotor çubuk arızasına ($(1 \pm 2s)f_s$) ilişkin yan band harmonikleri stator akım spekturumunda farklı frekanslarda görülmektedir. Moment spekturumunda ise şekil 4.18b'de görüldüğü gibi 6. harmoniğin yan bandlarında kırık rotor çubuk arızasına ilişkin $6f_s-2sf_s$ ve $6f_s-4sf_s$ harmonikler net bir şekilde görülürken yük moment salınımına ilişkin yan band $6f_s-f_{osc}$ harmoniği moment spekturumunda gözlemlenmemektedir. Denklem (3.26)'da tanımlı olan moment spekturumundaki ayrıştırma harmoniğinde sabit tam sayı değişkeni k_2 ; kırık rotor çubuk arızası için $k_2=1, 2$ değerlerini alırken yük moment salınımı için $k_2=0$ değerini almaktadır. Şekil 4.18c kırık rotor çubuğu arızası ve yük moment salınımı durumunda motor faz gerilimi spekturumunu göstermektedir. Şekil 4.18c'de görüldüğü üzere kırık rotor çubuk arızası durumunda motor faz gerilimi spekturumunda 3. harmoniğin yan bandlarında $3f_s-2sf_s$ ve $3f_s-4sf_s$ harmonikleri görülürken yük moment salınımı durumunda $3f_s-f_{osc}$ harmoniği görülmemektedir.

Moment ve faz gerilim spekturumlarında tanımlı olan ayrıştırma harmoniklerinde yük momentinin etkisini göstermek için asenkron motor farklı yük seviyelerinde çalıştırılarak benzetim sonuçları elde edilmiştir. Şekil 4.19a'da görüldüğü gibi moment spekturumundaki ayrıştırma harmoniklerinin ($6f_s-2sf_s$ ve $6f_s-4sf_s$) genliği artan yük moment değerleri ile lineer olarak artmaktadır. Ayrıca çok düşük yüklerde bile yüksek genlik değerine sahip olan $6f_s-4sf_s$ harmoniği, $6f_s-2sf_s$ 'den daha güvenli bir sonuç vermektedir. Şekil 4.19b farklı yük moment değerlerinde motor faz gerilim spekturumundaki harmoniklerin davranışını göstermektedir. Ayrıştırma harmonikleri $3f_s-2sf_s$ ve $3f_s-4sf_s$ genlikleri artan yük ile lineer olarak artmakta ve $3f_s-2sf_s$ harmoniği tüm yük koşullarında $3f_s-4sf_s$ harmoniğinden daha büyük değerdedir.



Şekil 4.18 Benzetim sonuçları, tam yükte, ($2sf_s = 4.4 \text{ Hz}$, $f_{osc} = 6 \text{ Hz}$), Kırık rotor çubuk arızası ve yük momenti salınımı aynı anda iken a) Stator akım spektrumu b) Moment spektrumu c) Faz gerilimi spektrumu



Şekil 4. 19 Moment ve faz gerilimi spektrumundaki harmoniklerinin yük momentine göre değişimi

Tablo 4.3 farklı tip arızalarda kritik harmoniklerin listesini göstermektedir. Tabloda belirtildiği gibi $6f_s-2sf_s$ ve $6f_s-4sf_s$ harmonikleri moment spektrumunda, $3f_s-2sf_s$ ve $3f_s-4sf_s$ harmonikleri motor faz gerilimi spektrumunda kırık rotor çubuk arızasını temsil etmektedir.

Tablo 4.3 Moment ve faz gerilimdeki harmonikler (N/A = uygun değil)

Harmonik	Moment		Faz gerilimi	
	Kırık rotor	Yük salınımı	Kırık rotor	Yük salınımı
$2sf_s$	✓	x	N/A	N/A
f_{osc}	x	✓	N/A	N/A
$6f_s - 2sf_s$	✓	x	N/A	N/A
$6f_s - 4sf_s$	✓	x	N/A	N/A
$6f_s - f_{osc}$	x	x	N/A	N/A
$3f_s - 2sf_s$	N/A	N/A	✓	x
$3f_s - 4sf_s$	N/A	N/A	✓	x
$3f_s - f_{osc}$	N/A	N/A	x	x

4.3. Sonuç

Bu bölümde Bölüm 3'te geliştirilen algoritmaları uygulamak için gereken benzetim modelleri oluşturulmuştur. Modelleme olarak iki temel yaklaşımdan yararlanılmıştır. Bunlar; lineer asenkron motor modeli ve lineer olmayan asenkron motor modelidir. Lineer asenkron motor modelinde Matlab@Simulinkten yararlanılmıştır. Bu modelde kırık rotor çubuk arızasını modellemek için rotorun bir faz sargısının direnç değeri arttırılmıştır. Lineer olmayan asenkron motor modeli için sonlu elemanlar yöntemini kullanan ANSYS@Maxwell paket program kullanılmıştır. Bu paket program ile makinenin elektriksel büyüklüklerinin yanı sıra fiziksel büyüklüğü, kullanılan malzemelerin yapısı vb. göz önüne alınmıştır.

Kırık rotor çubuk arızasını düşük frekanslı yük moment salınımindan ayırtmak için ilk olarak bir faz akımından yararlanılarak elde edilen analitik sinyalin uzay vektör açısız dalgalanma sinyali spektrumundan yararlanılmıştır (ASAF metodu). Bu metoda göre $2f_s$ 'in yan bandlarından yararlanılarak ayırma sağlanmıştır. Kırık rotor çubuk arızası durumunda $2f_s$ 'in yan bandlarında $(1-s)2f_s$ harmoniği var iken düşük frekanslı yük moment salınımı durumunda $2f_s$ 'in yan bandlarında yük moment salınıma ait herhangi bir harmonik görülmemektedir.

Motor akımının yanı sıra motor yük moment ve faz gerilimi spektrumundan yararlanılarak kırık rotor çubuk arızası düşük frekanslı yük moment salınımindan ayırılmıştır. Yük moment ve faz gerilimi spektrumunda ayırma indeksleri tanımlanmıştır. Kırık rotor çubuk arızası durumunda yük moment spektrumunda $6f_s$ 'in yan banlarında $6f_s-2k_2sf_s$ ($k_2=1,2$) harmonikleri, faz gerilimi spekturumunda ise $3f_s$ 'in yan bandlarında $3f_s-2k_3sf_s$ ($k_3=1,2$) harmonikleri görülürken düşük frekanslı yük moment salınıma durumunda yük momentinde $6f_s$ 'in yan bandlarında, faz gerilimi spekturumunda ise $3f_s$ 'in yan bandlarında yük moment salınıma ilişkin herhangi bir harmonik görülmemektedir. Ayırma harmoniklerinin yüke bağlı performansını test etmek için asenkron motor farklı yükleme koşullarında çalıştırılmıştır. Yük momentinin değeri değiştikçe arıza harmoniklerinin genlik değerleri lineer olarak değişmektedir.

Bölüm 5'te ise kırık rotor çubuk arızasını düşük frekanslı yük moment salınımindan ayırtmak için geliştirilen metotlar ve ayırma harmoniklerinin uygulanabilirliğini göstermek için deneysel sonuçlar sunulacaktır.

5. DENEYSEL DEVRE DÜZENİĞİ ve DENEYSEL SONUÇLAR

Bu bölümde kırık rotor çubuk arızası ve yük momenti salınımı durumları için deneysel sonuçlar incelenmektedir. Kırık rotor çubuk arızasını yük momenti salınımindan ayırtmak için geliştirilen algoritmaların uygulanabilirliğini test etmek için kullanılan deneysel düzenek kısaca tanıtılmaktadır. Asenkron motor sağlıklı, kırık rotor çubuk arızası ve düşük frekanslı yük momenti salınımı durumunda farklı yük ve hızlarda test edilmiştir.

5.1. Deneysel Düzenek

Bu bölümde ilk olarak asenkron motordan elde edilen verileri toplama sistemi anlatılacaktır. Daha sonra asenkron motorun yükleme sistemi hakkında bilgi verilecektir.

5.1.1. Veri toplama sistemi

Kırık rotor çubuk arızasını düşük frekanslı yük momenti salınımindan ayırtmak için geliştirilen algoritmalarda üç faz gerilim ve akımlar ölçülmektedir. Ölçülen bu analog sinyaller analog dijital dönüştürücüler (ADC) vasıtasıyla istenilen düzeye dönüştürülmektedir.

Motor fazlarından gelen gerilim bilgisini ölçmek için bir arayüz devre kullanılmaktadır. Motorun girişine bağlanan üç faz gerilimler, kaynaktan akan akımı sınırlamak için üç adet fark alıcı yükseltici ile beslenmektedir. Fark alıcı yükselteçler ortak mod etkileşimini (Common Mode Interference) düşürmek için ters çevirmeyen mod da kullanılmaktadır. Gerilim sinyalleri diğer devrelerden izoleli olacak şekilde gerilim ölçme devresinden küçük bir akım ile sürülür ve Analog/Dijital dönüştürücünün girişine uygun olacak bir şekilde çıkış vermektedir.

Bir faz için çıkış gerilimi;

$$v_{a_out} = -\frac{R_2}{R_1}v_a + \frac{R_1 + R_2}{R_1} \frac{3R_3}{3R_3 + R_1}v_n \quad (5.1)$$

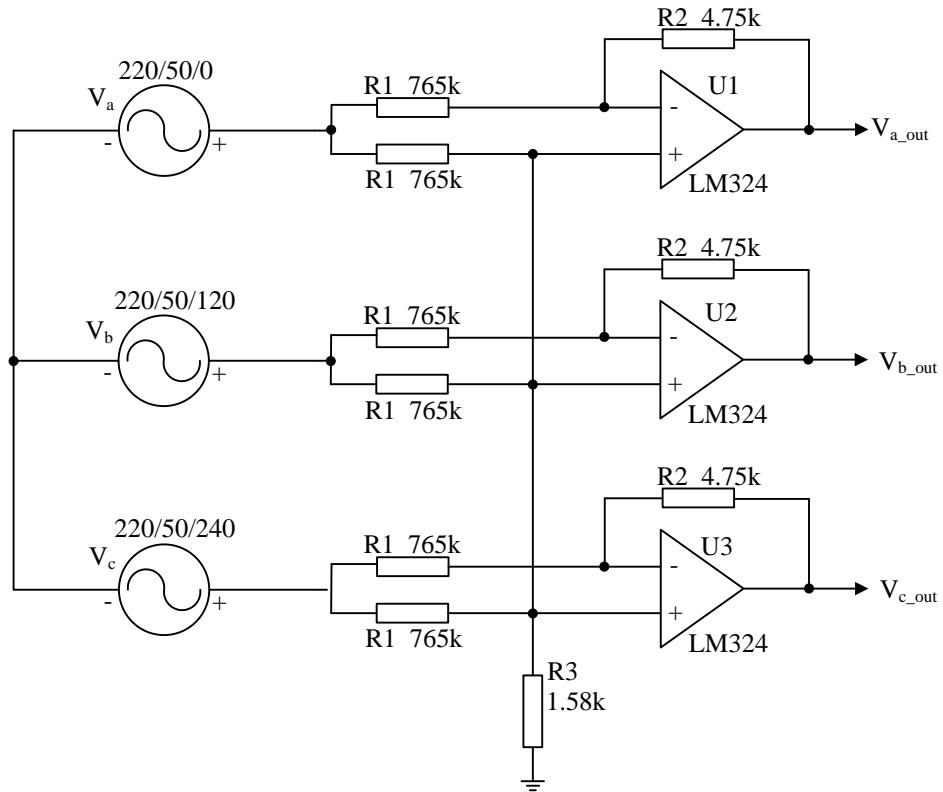
$R_2 = 3R_3$ iken;

$$v_{a_out} = -\frac{R_2}{R_1}(v_a - v_n) \quad (5.2)$$

Burada $v_n = \frac{V_a + V_b + V_c}{3}$ kaynaktaki sıfır ardışık bileşendir. Dengeli bir yük

için $v_a = v_b = v_c$, ve v_n sıfıra eşittir.

Görüldüğü gibi dengesiz besleme koşullarında ölçülen gerilimler faz gerilimleri değildir. Aslında bu ölçülen gerilimler faz gerilimleri ile sıfır ardışık gerilimlerin farkıdır. Şekil 5.1'de gerilim ölçümü için tasarlanan devre şeması görülmektedir.



Şekil 5. 1 Gerilim ölçme devresi

Motor terminallerinden akan kaynak akımı LEM firmasının LTA50P/ST1 kodlu Hall Effect akım dönüştürücüsü kullanılarak ölçülmektedir. Sensörün nominal çıkış akımı her bir giriş amper sarım için 1 mA'dir (sarım oranı 1/1000). Giriş maksimum tepe akım değeri 50A'dir. Duyarlılığı arttırmak için motor kablosu 2 sarım olarak sensörün çekirdeğine sarılmıştır. Böylece 5A'lık motor akımı için $\pm 1.5V$ aralığında tepeden tepeye bir çıkış sağlanmaktadır. Örnekleme için 16 bitlik Eagle PCI30G DAQ kartı kullanılmıştır. İstenilen frekansta ve sürede verileri

toplamak için DAQ kartı ile birlikte gelen Agilent VEE'de yazılmış arayüz programı kullanılmıştır.

5.1.2. Motor ve yükleme sistemi

Kırık rotor arızasını düşük frekanslı yük momenti salınımından ayırtmak için 2.2 kW, 4 kutuplu üç faz bir asenkron motor kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan asenkron motorun parametreleri Bölüm 4'te Tablo 4.2' de verilmiştir. Asenkron motor sağlıklı rotor, kırık rotor çubuğu ve yük momenti salınımı var iken test edilmektedir. Tüm deneylerde asenkron motorun statoru aynı iken sadece arıza tipine göre rotoru değiştirilmektedir. Asenkron motorda kullanılan rotorlar 28 rotor çubuklu iki eş rotordur. Bu iki eş rotor kullanılarak sağlıklı ve kırık rotor çubuk arızası test edilebilmektedir. Kırık rotor çubuk arızası rotor çubuklarından ikisinin matkap yardımı ile çubuklardan akım akmayacak şekilde delinmesiyle elde edilmiştir (Şekil 5.2).



Şekil 5. 2 Deneyde kullanılan rotorlar

Asenkron motoru yüklemek için serbest uyarımlı bir DC jeneratör kullanılmaktadır. Bu DC jeneratör asenkron motorun shaftına herhangi bir eksen kaçıklığı arızasına sebep olmayacak şekilde bağlanmaktadır. Bunun için Fixturlaser GOPro lazer ayarlama cihazı kullanılmaktadır. Bu cihaz ile karşılıklı rotor shaftlarının pozisyonlarının lazer ölçümü yapılarak eksen kaçıklığı tespit edilir. Tespit edilen bu

eksen kaçıklığına göre motor bacaklarına ek şimler ilave edilerek asenkron motor ve DC jeneratör arasında çok iyi bir fiziksel bağlantı sağlanmaktadır.

DC jeneratörü yüklemek için armatür çıkış uçlarına ayarlanabilir dirençler bağlanmıştır. Bu dirençlerin değeri değiştirilerek jeneratörün yük momenti ayarlanabilir.

Yük momenti salınımı için DC jeneratörün alan beslemesi kullanılmıştır. Bir DC jeneratörde üretilen moment

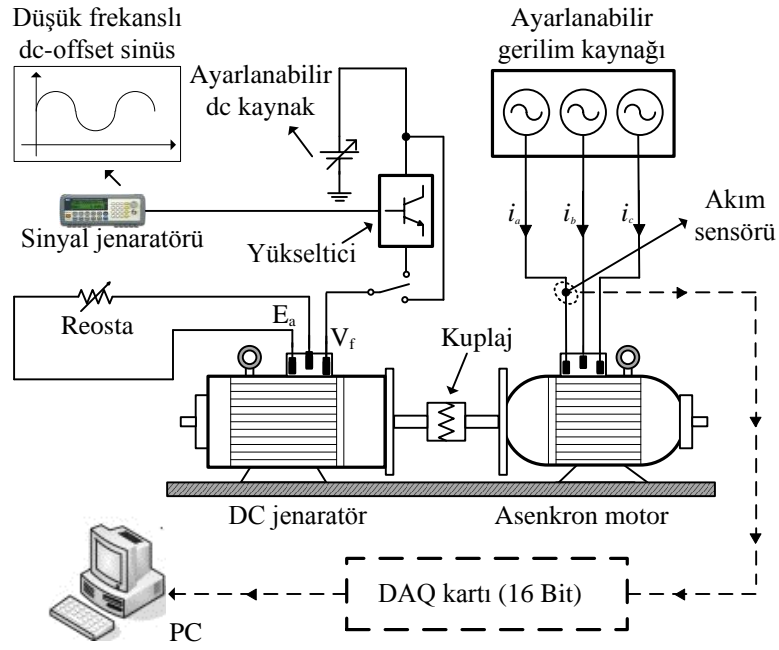
$$T = k\phi I_a \quad (5.3)$$

burada ϕ toplam akı, I_a armatür akımı ve k ise moment sabitidir. Yük momentinin salınımlı olabilmesi için ya akının ya da armatür (yük) akımının salınımlı olması gerekmektedir. Bu çalışmada alan akısı salınımlı yapılarak düşük frekanslı yük momenti salınımı sağlanmaktadır. Toplam akı jeneratörün alan sargılarına uygulanan gerilim ile ilişkilidir. Armatür etkisi ihmal edilirse ve akının lineer bölgede olduğu varsayılırsa

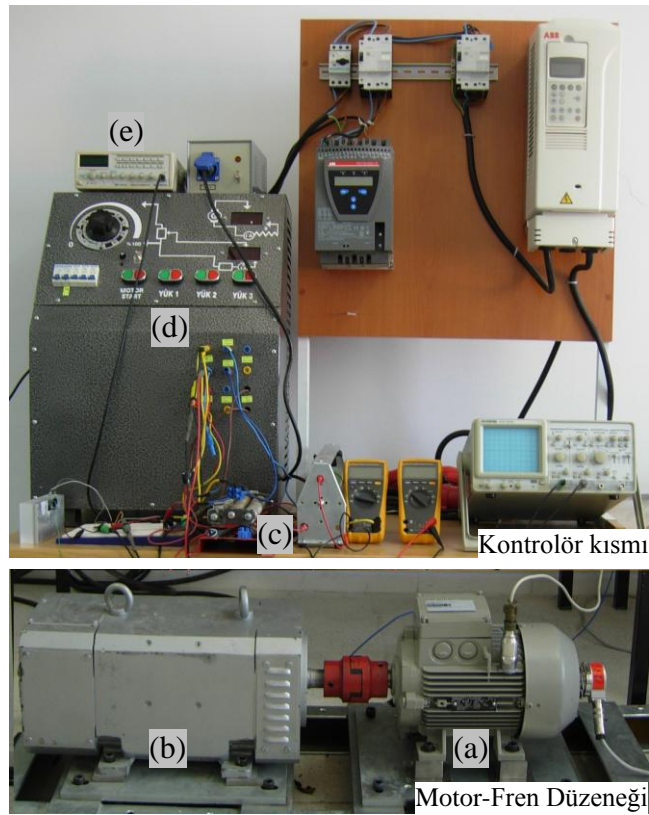
$$\phi = k_v V_f \quad (5.4)$$

yazılabilir. Burada V_f jeneratörün alan sargı terminallerine uygulanan gerilim ve k_v ise bir sabittir. Eğer bu gerilim salınımlı olursa alan akısı salınımlı olur. Dolayısıyla jeneratörün ürettiği momentte salınımlı olacaktır. Böylece V_f gerilimi kontrol edilerek yük momenti salınımı istenilen frekans ve genlikte sağlanabilmektedir.

Şekil 5.3'te görüldüğü gibi jeneratörün sargı uçlarına verilen gerilim, yük moment salınımını ve sabit yüklemeyi sağlayacak şekilde araya konulan mekaniksel anahtar aracılığıyla sağlanmaktadır. Yükün sabit olması gerektiği durumlarda mekanik anahtar aracılığıyla sabit bir DC gerilim jeneratörün sargı uçlarına uygulanmaktadır. Yük momenti salınımı durumunda ise anahtar konumu değiştirilerek alan sargısı terminallerine salınımlı gerilim uygulanmaktadır. Alan sargılarına yüksek genlikli ve salınımlı gerilim uygulanabilmesi için bir yükseltici devre tasarlanmıştır. Yükseltici devre transistör ve dirençlerden oluşan ve aktif bölgede çalışan basit bir devredir. Burada transistörün kollektör ucuna ayarlı DC gerilim, bazına ise ofsetli AC sinyal (sinüs) verilmektedir. Böylece sinyal jeneratörü kullanılarak istenilen frekansta ve genlikte bir yük salınımı sağlanabilmektedir.



Şekil 5. 3 Deney düzeneğinin şematığı



Şekil 5.4 Deney düzeneğinin fotoğrafı a) Asenkron motor b) DC jeneratör c) Yükseltici devre d) Reosta e) Sinyal jeneratörü

Asenkron motoru besleyen kaynak gerilimin dengesizlik yüzdesini ayarlayabilmek için direkt olarak şebekeye bağlamak yerine tek fazlı üç adet oto transformatör kullanılmaktadır. Bu oto transformatörlerin her birinin çıkış uçlarındaki gerilim seviyeleri değiştirilerek kaynak dengesizliği arttırıp azaltılabilmektedir. Şekil 5.4'de deney düzeneğinin fotoğrafı görülmektedir.

Sürücü ile besleme için ABB firmasının ACS800 model Doğrudan Moment Kontrollü (DTC) motor sürücüsü kullanılmaktadır. Kullanılan motor sürücüsü inverter (V/f) veya DTC kontrol modlarının seçilmesine olanak vermektedir.

5. 2. Deneysel Sonuçlar

5.2.1. Analitik sinyal açısız dalgalanma metodu deneysel sonuçları

Deneyler sağlıklı rotorda, kırık rotor arızası durumunda, yük momenti salınımlarında ve hem kırık rotor arızası hem de yük momenti salınımı var iken yapılmıştır. Tüm test koşullarında kaynak dengesizliği %0.4 civarındadır. İlk olarak deneylerde kullanılan asenkron motor şebeke ile beslenmektedir. Daha sonraki deneylerde sürücü ile beslenen asenkron motorun ASAF metoduna ait sonuçları incelenecektir.

Şebeke ile beslenen asenkron motor %75 sabit yükte yüklü iken iki kırık rotor çubuk arızası durumu Şekil 5.5'de gösterilmektedir. Motor kayması $s=0.038$ 'dir. Stator akım spektrumunda kırık rotor arızasına ilişkin düşük ve yüksek yan band arıza harmonikleri sırasıyla 46.2 Hz ve 53.8 Hz'te görülmektedir (Şekil 5.5a). Analitik sinyalin açısız dalgalanması (ASAF) spektrumu kolay incelenebilmesi açısından iki kısım halinde sunulmaktadır. ASAF spektrumunda kırık rotor arızası frekansı $2sf_s$ (Şekil 5.5b) ve bu arızaya ilişkin $2f_s$ 'in yan band harmoniği $(1-s)2f_s$ (Şekil 5.5c) net bir şekilde görülmektedir.

Stator akım ve ASAF spektrumunda yük momenti salınımlarının etkilerini göstermek için, kırık rotor arızası frekansı ile aynı frekansta ($f_{osc}=3.8\text{Hz}$) salınan %5'lik yük durumu göz önüne alınmıştır (Şekil 5.6). Yük momenti salınımlar frekansı kırık rotor çubuk arızası frekansına eşit olduğundan ($f_{osc}=2sf_s$), akım spektrumundaki yan band harmonikleri kırık rotor durumu ile aynı arıza frekanslarında 46.2 Hz ve 53.8 Hz'de görülmektedir (Şekil 5.6a). Yük momenti salınımlar frekansı f_{osc} net bir

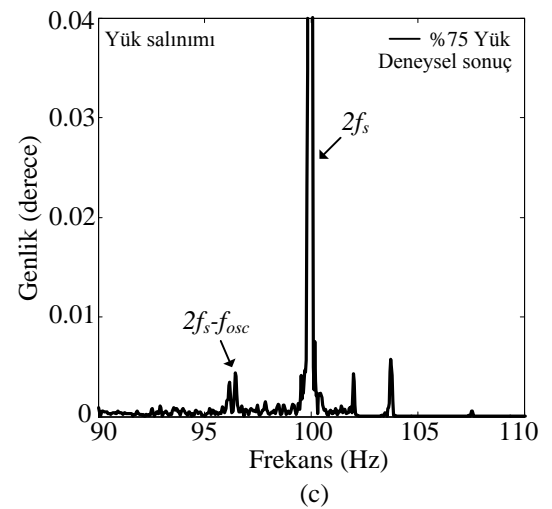
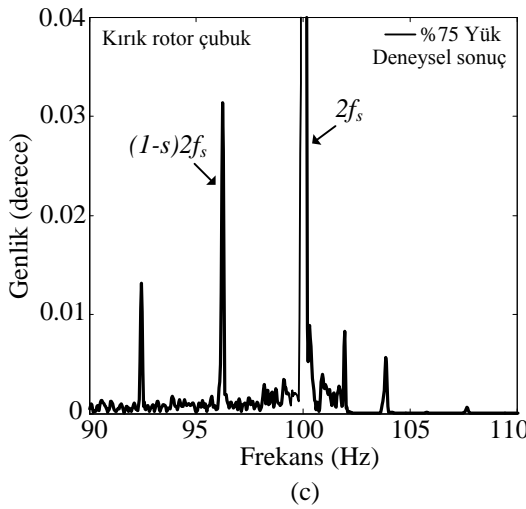
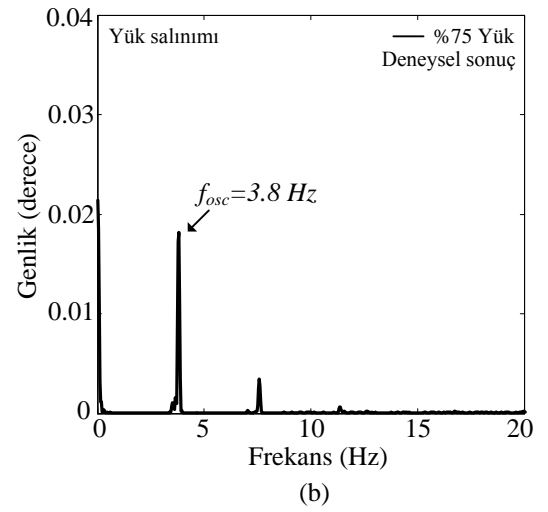
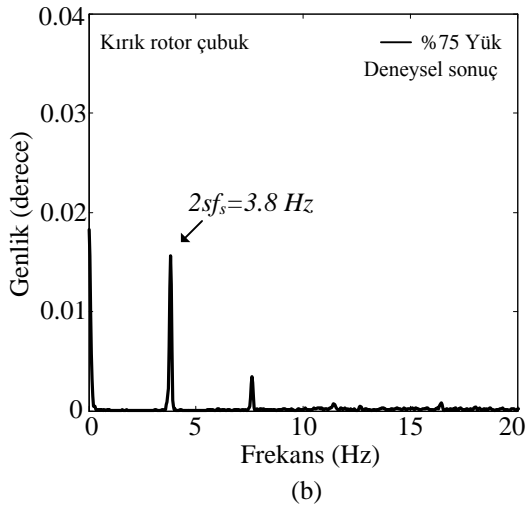
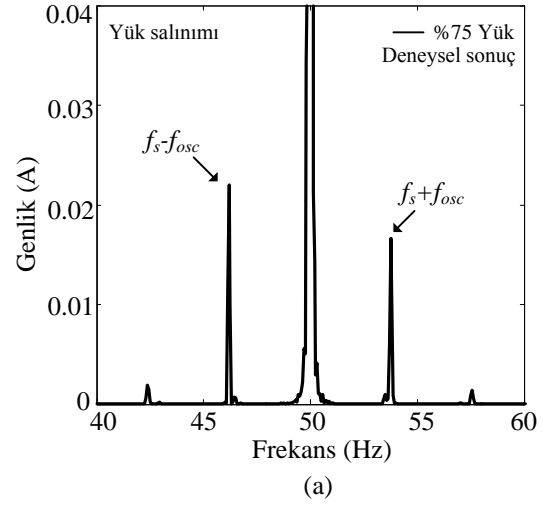
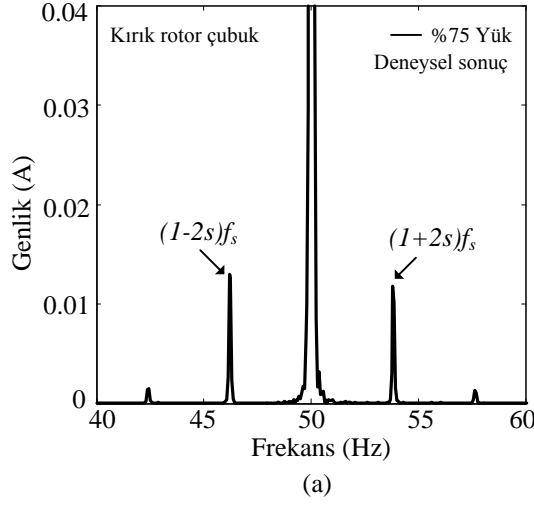
şekilde ASAF spektrumunda görülürken (Şekil 5.6b), yük salınımına ilişkin $2f_s$ 'in yan band harmoniğinin ($2f_s-f_{osc}$) genliği rotor arızası durumunda ortaya çıkan harmonikten çok daha küçük değerdedir (Şekil 5.6c).

Kırık rotor çubuk arızasının yük momenti salınımından ayrıştırılması için önerilen ASAF metodunun performansını göstermek için asenkron motor iki kırık rotor çubuk arızası ve %5'lik yük momenti salınımı aynı anda var iken test edilmiştir. Ortalama yük momenti tam yük momentinin %75'i kadardır. Yük momenti salınımı frekansı $f_{osc}=4.5$ Hz olarak seçilmiştir. ASAF spektrumu sonuçları Şekil 5.7'de verilmektedir. Şekil 5.7b'de görüldüğü gibi bu iki etki $2f_s$ 'in yan bandları kullanılarak net bir şekilde ayrıştırılabilir. Yük momenti salınımı frekansı f_{osc} 'nin genliği rotor çubuk arızası frekansı $2sf_s$ 'den daha büyük olmasına rağmen (Şekil 5.7a), rotor arızası yan band bileşeni $(1-s)2f_s$ 'in genliği yük salınımı yan band bileşeni ($2f_s-f_{osc}$)'nin genliğinden daha büyüktür (Şekil 5.7b).

Asenkron motor düşük kayma koşullarında çalışırken ASAF metodunun ayrıştırma yeteneğini test etmek için ek bir deney yapılmıştır. Şekil 5.7'de ki deneye benzer olarak motor iki kırık rotor çubuğu ve %4'lük yük momenti salınımı aynı anda var iken test edilmiştir. Düşük kayma çalışmasını test etmek için motor tam yük momentinin %40'ında çalıştırılmıştır. Yük salınımı frekansı 2.56 Hz olarak seçilmiştir. Şekil 5.8b'deki ASAF spektrumundan görüldüğü gibi düşük kayma koşullarında bile kırık rotor ve yük salınımı etkileri birbirlerinden kolayca ayrıştırılabilir. Şekil 5.8a'daki kırık rotor çubuk arızası frekansı $2sf_s$ yüke bağlı olduğundan çok düşük kaymalarda hata tespiti oldukça güç olacaktır.

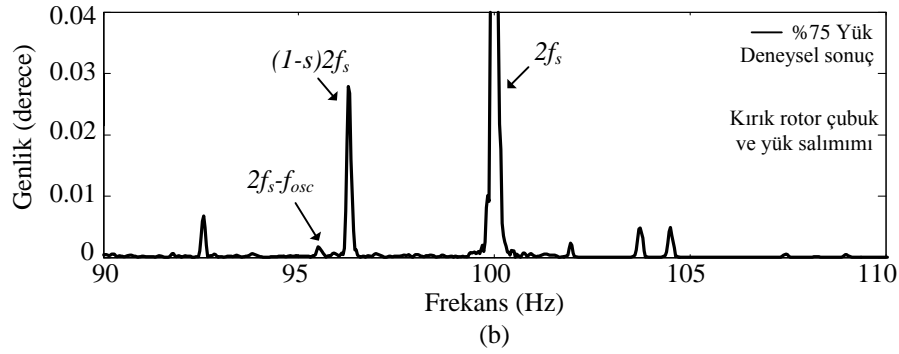
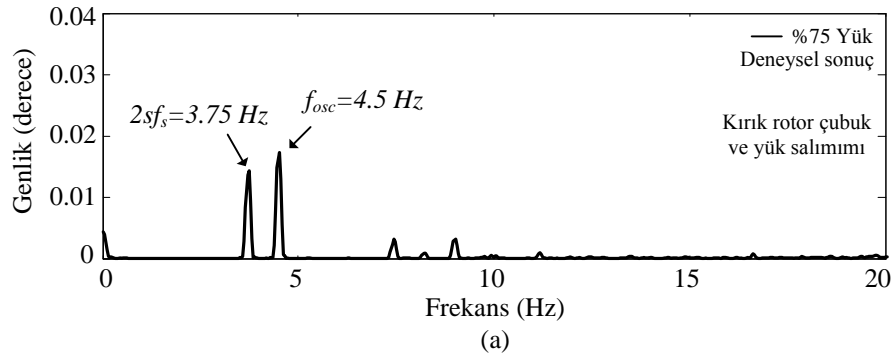
$2f_s$ 'in yan band harmoniklerinin genliği besleme kaynağı dengesizliği ile lineer olarak değişmesine rağmen yük momenti salınımına ilişkin $2f_s-f_{osc}$ harmoniğinin genliği her zaman kırık rotor çubuk arızasına ilişkin yan band $(1-s)2f_s$ harmoniğinin genliğinden çok daha düşüktür. Bu durum eşik seviyesinin tespitinde kullanılabilir.

Elde edilen sonuçlara göre eğer kaynakta bir dengesizlik veya statorda bir asimetri var ise kırık rotor çubuk arızası motorda düşük frekanslı yük momenti salınımı var iken dahi tespit edilebilmektedir.

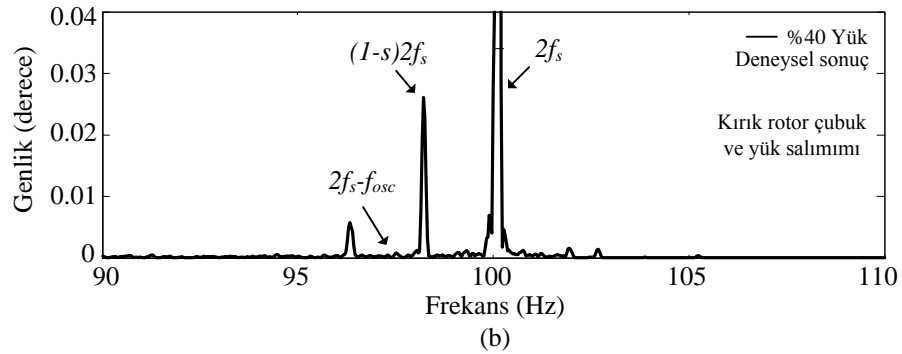
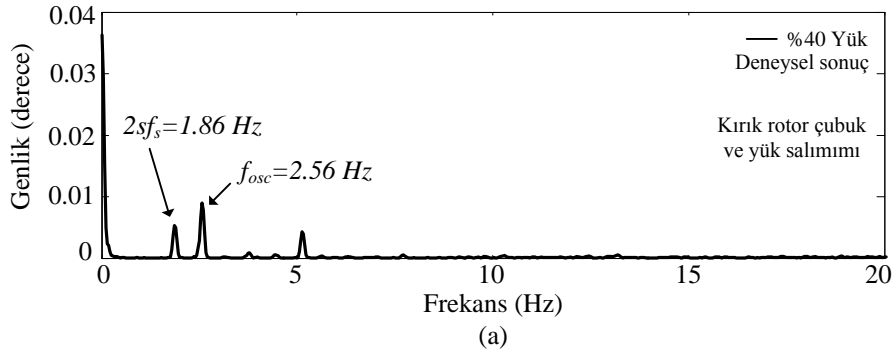


Şekil 5.5 İki kırık rotor çubuk, %75 yük
a) Stator akım spektrumu
b) ASAF spektrum (0 Hz- 20Hz)
c) ASAF spektrum (90Hz- 110Hz)

Şekil 5.6 Yük salınımı, %75 yük
a) Stator akım spektrumu
b) ASAF spektrum (0 Hz- 20Hz)
c) ASAF spektrum (90Hz- 110Hz)



Şekil 5.7 Deneysel sonuç, iki kırık rotor çubuğu ve %5 yük salınımı durumunda, %75 yükte a) ASAF spektrum (0Hz - 20Hz) b) ASAF spektrum (90Hz - 110Hz)



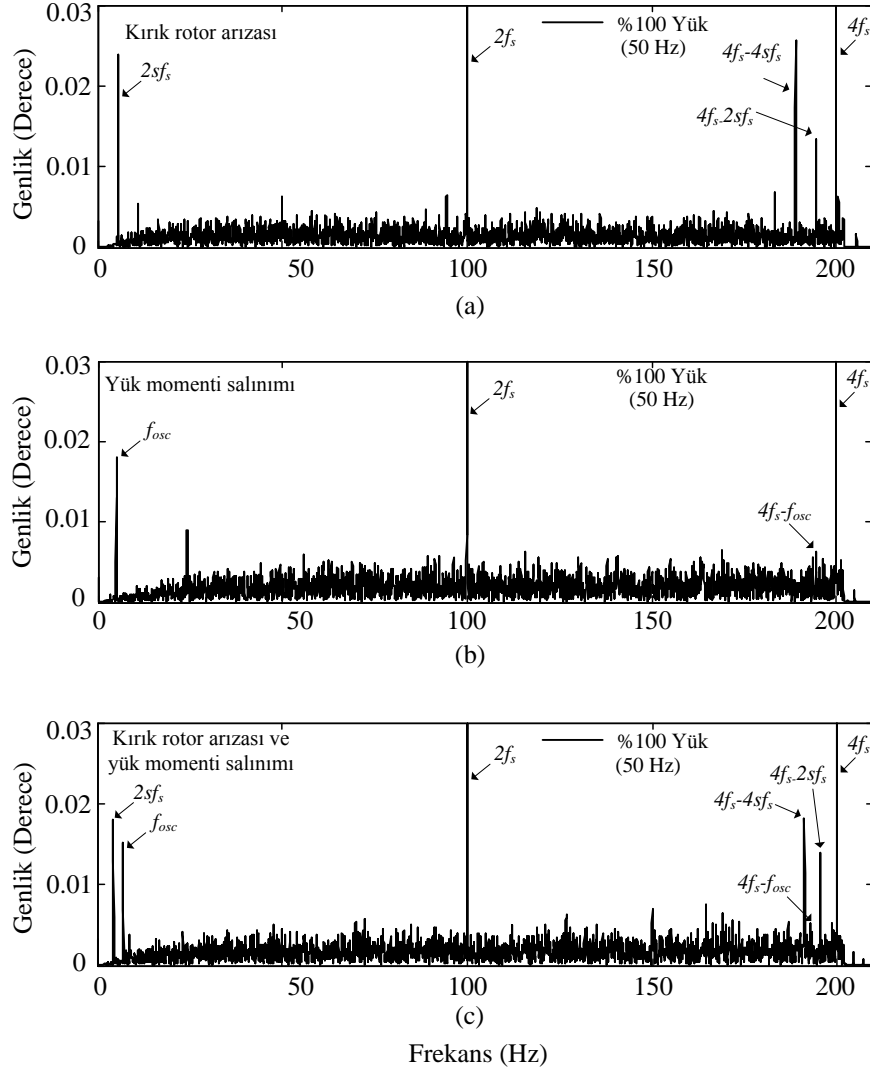
Şekil 5.8 Deneysel sonuç, iki kırık rotor çubuğu ve %4 yük salınımı durumunda, %40 yükte a) ASAF spektrum (0Hz - 20Hz) b) ASAF spektrum (90Hz - 110Hz)

Sürücü ile beslenen asenkron motorlarda ASAF metodunun uygulanabilirliğini test etmek için farklı çalışma frekanslarında sağlıklı motor, kırık rotor ve yük momenti salınımı durumunda deneyler yapılmıştır. Farklı çalışma frekanslarının seçimi için açık çevrim V/f kontrollü inverter sürücüsü kullanılmıştır.

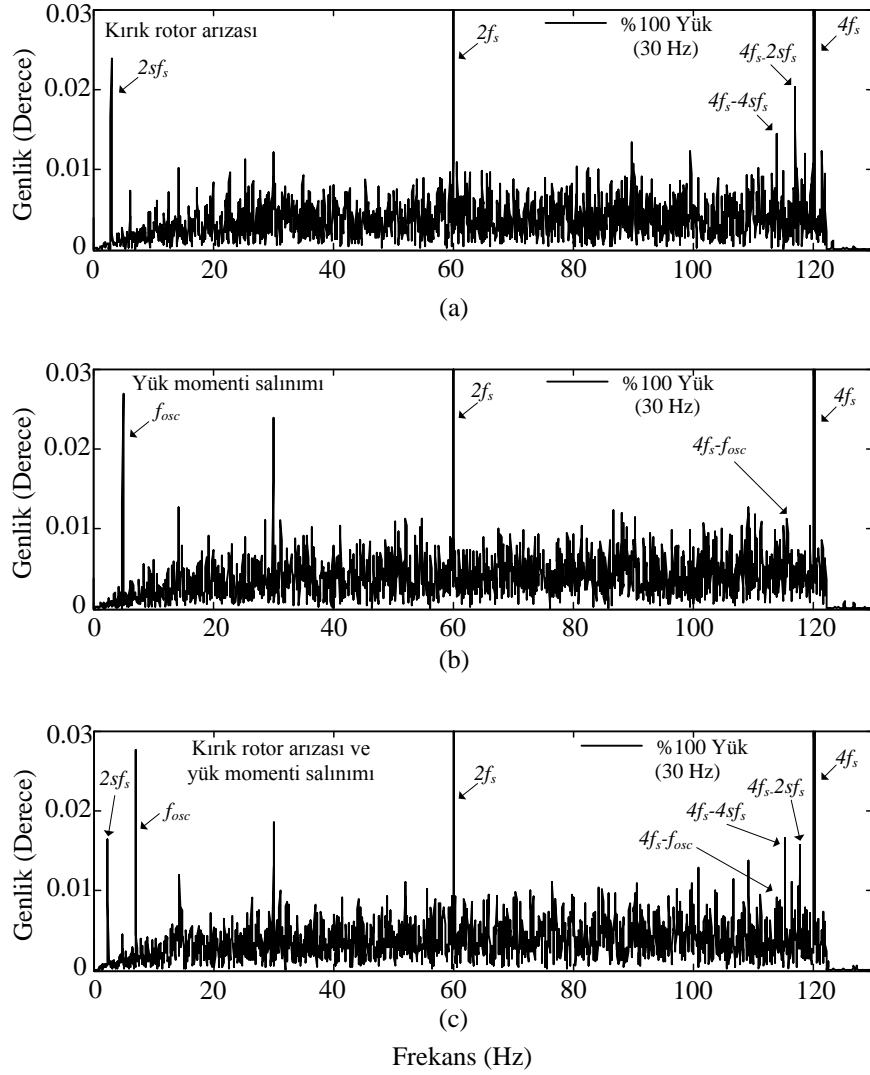
Şekil 5.9a'da tam yükleme koşulunda sabit yükte 50 Hz'lik besleme kaynağı frekansı durumunda iki kırık rotor çubuk arızası var iken elde edilen deneysel sonuçlar gösterilmiştir. Burada $2sf_s$, $4f_s-2sf_s$ ve $4f_s-4sf_s$ harmonikleri ASAF spektrumunda net bir şekilde görülmektedir. Şekil 5.9b'de ise tam yükte %5 yük momenti salınımı var iken ASAF spektrumunda sadece f_{osc} harmoniği görülmektedir. Yük salınımı durumunda $4f_s$ 'in yan band harmoniği olan $4f_s-f_{osc}$ harmoniği gürültü düzeyindedir (Şekil 5.9b).

Açık çevrim V/f kontrollü inverterler ile beslenen asenkron motorlarda 50 Hz çalışma frekansında önerilen metodun performansını test etmek için motor iki kırık rotor çubuk arızası ve %5'lik yük momenti salınımı durumunda çalıştırılmıştır. Yük salınımı frekansı $f_{osc}=7$ Hz olarak seçilmiştir (Şekil 5.9c). Kırık rotor çubuk arızasına ait olan harmonik $2sf_s$ ve yük momenti salınımına ait olan harmonik f_{osc} ASAF spektrumunda açık bir şekilde görülürken $4f_s$ 'in yan bandlarında sadece kırık rotor çubuk arızasına ait olan $4f_s-2sf_s$ ve $4f_s-4sf_s$ harmonikleri görülmektedir (Şekil 5.9c).

Benzer deneyler farklı besleme kaynağı frekansında da yapılmıştır. Şekil 5.10'da 30 Hz'lik besleme kaynağı frekansında elde edilen deneysel sonuçları göstermektedir. Şekil 5.10a tam yük çalışma koşullarında 30 Hz'lik çalışma frekansında iki kırık rotor çubuk arızası var iken elde edilen sonuçları göstermektedir. Arıza frekansı $2sf_s$ ve arıza ile ilişkin diğer frekanslar $4f_s-2sf_s$ ve $4f_s-4sf_s$ ASAF spektrumunda net bir şekilde görülmektedir. Bununla birlikte %5'lik yük momenti salınımı durumunda sadece yük salınımına ilişkin f_{osc} harmoniği baskın olarak görülmektedir. $4f_s$ 'in yan band harmoniği olan $4f_s-f_{osc}$ harmoniği (Şekil 5.10b) gürültü düzeyindedir. Şekil 5.10c'de ise 30 Hz'lik çalışma frekansında hem kırık rotor çubuk arızası hemde %5'lik yük momenti salınımı var iken elde edilen sonuçlar gösterilmektedir. Yük salınımı frekansı $f_{osc}=7$ Hz olarak seçilmiştir. Kırık rotor çubuk arızası harmoniği $2sf_s$ ve yük momenti salınımı harmoniği f_{osc} ASAF spektrumunda net bir şekilde görülse de $4f_s$ 'in yan bandlarında sadece kırık rotor çubuk arızasına ait olan $4f_s-2sf_s$ ve $4f_s-4sf_s$ yan band harmonikleri baskın olarak görülmektedir (Şekil 5.10c).



Şekil 5.9 Deneysel sonuç, ASAF spektrumları, tam yükte, 50 Hz kaynak frekansı a) İki kırık rotor çubuk arızası ($2sf_s=5.5$ Hz) b) Yük moment salınımı ($f_{osc}=5$ Hz) c) İki kırık rotor ve yük moment salınımı aynı anda iken ($2sf_s=4.4$ Hz, $f_{osc}=7$ Hz)



Şekil 5.10 Deneysel sonuç, ASAF spektrumları, tam yükte, 30 Hz kaynak frekansı a) İki kırık rotor çubuk arızası ($2sf_s=3$ Hz) b) Yük moment salınımı ($f_{osc}=5$ Hz) c) İki kırık rotor ve yük moment salınımı aynı anda iken ($2sf_s=2.4$ Hz, $f_{osc}=7$ Hz)

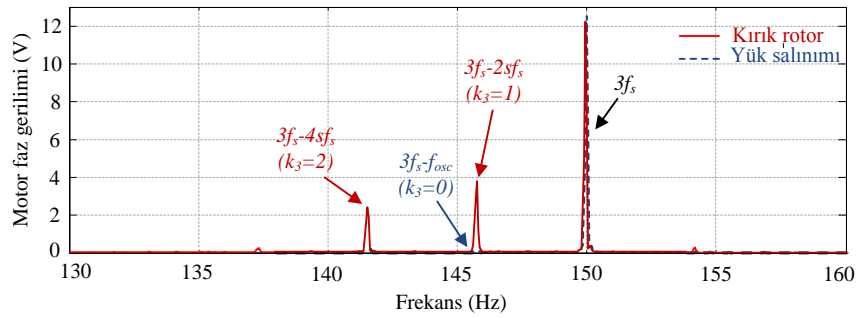
5.2.2. Faz gerilimi spektrumu deneysel sonuçları

Bölüm 3.2’de tanımlanan ayrıştırma harmoniklerine ait deneysel sonuçlar sadece faz gerilmi için incelenmiştir. Deneyler sağlıklı motor, iki kırık rotor çubuk arızası ve yük moment salınımı durumlarında yapılmıştır. Deneylerde kullanılan asenkron motor şebeke ile beslenmekte ($f_s=50$ Hz) ve statoru yıldız bağlıdır.

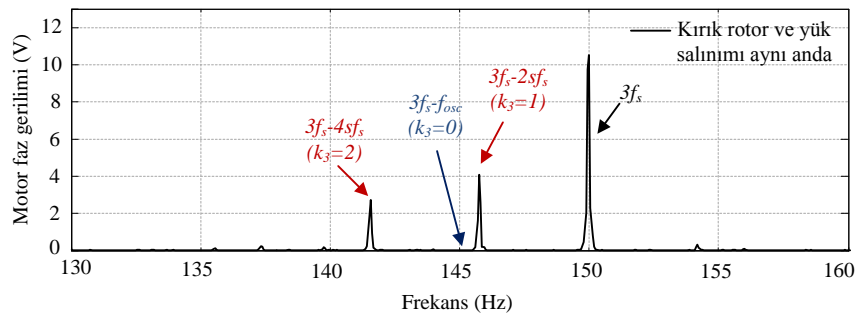
Şekil 5.11 50 Hz’lik kaynak frekansında %80 yükte iki kırık rotor çubuk arızasına ve yük moment salınımı durumlarında faz gerilimi spektrumu incelenmiştir. Bu çalışma koşullarında kırık rotor çubuk arızası ($2sf_s$) ve yük

momenti salınımı (f_{osc}) frekansları birbirine eşit seçilmiştir ($2s_f=f_{osc}=4.2$ Hz). Motor faz gerilimi spektrumunda $3f_s$ 'in yan bandları incelendiğinde (Şekil 5.11), kırık rotor çubuk arızasına ait olan harmonikler $3f_s-2s_f$ ($k_3=1$) ve $3f_s-4s_f$ ($k_3=2$) net bir şekilde gözlemlenirken, yük moment salınımına ait olan harmonikler $3f_s$ 'in yan bandlarında görülmemektedir (Şekil 5.11).

Ayrıştırma harmoniklerinin performansını göstermek için bir sonraki deneyde yük moment salınımı frekansı kırık rotor çubuk arızası frekansından farklı seçilmiştir. Yük moment salınımı ve kırık rotor çubuk arızası frekansları sırasıyla $f_{osc}=6$ Hz ve $2s_f=4.2$ Hz'dir. Faz gerilimi spektrumu incelendiğinde $3f_s$ 'in yan bandlarında sadece kırık rotor çubuk arızasına ait olan $3f_s-2s_f$ ve $3f_s-4s_f$ harmonikleri gözlenmektedir. Yük moment salınımına ait olan harmonik $3f_s-f_{osc}$ harmoniği faz gerilim spektrumunda görülmemektedir (Şekil 5.12).



Şekil 5.11 Deneysel sonuç, Faz gerilimi spektrumu, %80 yükte tam yükte, ($2s_f=f_{osc}=4.2$ Hz)



Şekil 5.12 Deneysel sonuç, Faz gerilimi spektrumu, %80 yükte tam yükte, ($2s_f=4.2$ Hz, $f_{osc}=6$ Hz) Kırık rotor çubuk arızası ve yük moment salınımı aynı anda var iken

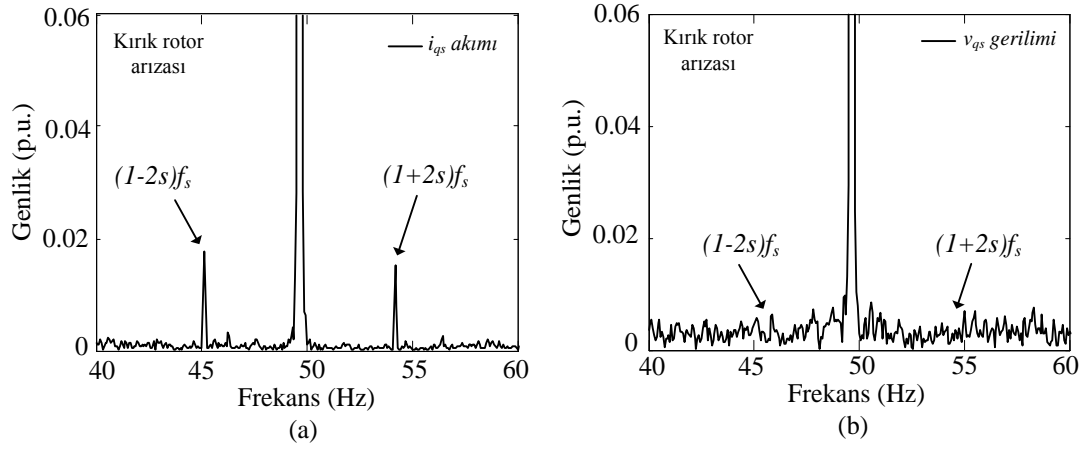
Böylece şebeke ile beslenen yıldız bağlı asenkron motorlarda faz gerilimi spektrumunda $3f_s$ 'in yan band harmonikleri kullanılarak kırık rotor çubuk arızası düşük frekanslı yük momentı salınımindan ayrıştırılabilmektedir.

5.2.3. DTC ile beslenen asenkron motorda deneysel sonuçlar

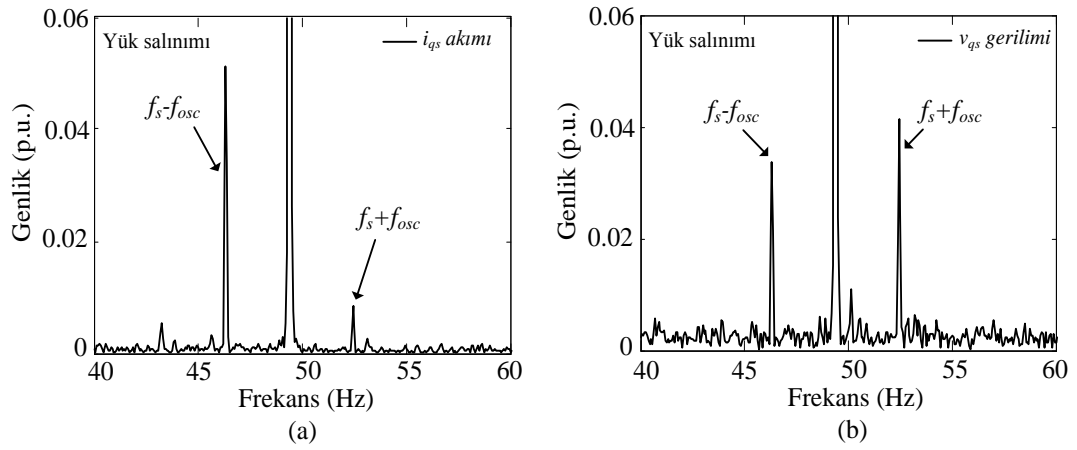
Bu bölümde doğrudan moment kontrollü (DTC) sürücüler ile beslenen asenkron motorlarda kırık rotor çubuk arızasının düşük frekanslı yük momentı salınımindan ayrıştırılması için geliştirilen algoritma için deneysel sonuçlar incelenmiştir. Daha önceki bölümlerde de olduğu gibi deneyler sağlıklı motor, kırık rotor çubuk arızası ve yük momentı salınımı durumunda yapılmıştır. Spektrumda görülen genlikler akım ve gerilimin temel harmoniğin maksimum değeri kullanılarak normalize edilmiştir. Bu yüzden elde edilen tüm spektrum sonuçları per-unit (*pu*)'dir.

DTC ile beslenen asenkron motor tam yükte iki kırık rotor çubuk arızası var iken geliştirilen algoritma test edilmiştir. Bu testte hız değeri 1421 d/d'dır. Kırık rotor çubuk arızasına ait olan harmonikler 45.1 Hz ve 54.2 Hz'dedir. Şekil 5.13a'da i_{qs} akım spektrumu incelendiğinde iki yan band harmoniği net bir şekilde görülmektedir. Fakat Şekil 5.13b'deki v_{qs} gerilim spektrumu incelendiğinde kırık rotor çubuk arızasına ilişkin harmonikler gürültü düzeyindedir. Arıza indekslerinden $F_i=0.0369$ pu eşik değerinden büyük ve F_v eşik değerinin altındadır. Bu durum kırık rotor çubuk arızasını temsil etmektedir (Bakınız Şekil 3.17).

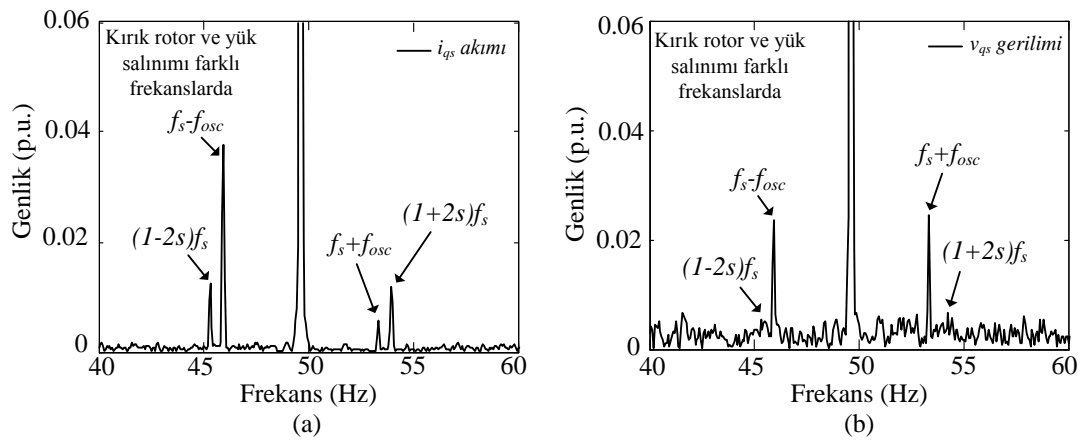
Yük momentı salınıminin etkilerini incelemek için asenkron motor tam yükte 3 Hz'lik yük salınımi var iken çalıştırılmıştır. Şekil 5.14a'da i_{qs} akım spektrumunda görüldüğü gibi yüksek yan band harmoniği f_s+f_{osc} , düşük yan band harmoniği f_s-f_{osc} 'den düşük değerdedir. Çünkü DTC çalışma algoritması gereği hız ve momentteki salınımları düşürmeye çalışmaktadır. Yüksek yan band harmonikleri yük momentı salınımi ile ilişkili olduğundan bu harmoniğin değeri azalmaktadır. Fakat 5.14b'de yüksek yan band f_s+f_{osc} ve düşük yan band f_s-f_{osc} harmonikleri v_{qs} spektrumunda net bir şekilde görülmektedir. Ayrıca v_{qs} gerilim spektrumunda f_s-f_{osc} harmoniğinin genliği f_s+f_{osc} harmoniğinkinden düşüktür. Bu testte her iki arıza indeks değeri eşik değerinin üzerindedir ve gerilim arıza indeksi $F_v=0.0816$ pu akım arıza indeksi $F_i=0.0743$ pu'den daha büyüktür. Bu durum yük momentı salınıminin temsil etmektedir (Bakınız Şekil 3.17).



Şekil 5.13 İki kırık rotor çubuk arızası durumu a) i_{qs} spektrum b) v_{qs} spektrum



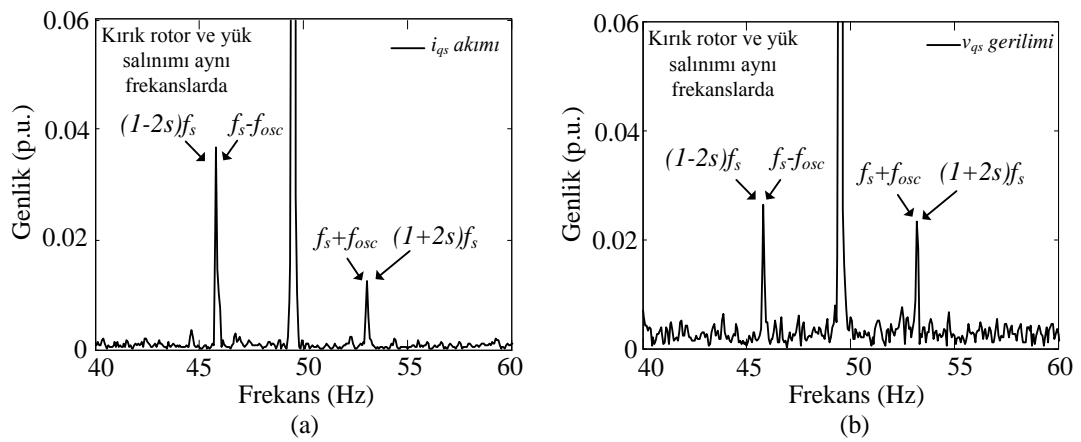
Şekil 5.14 Yük momenti salınımı durumu a) i_{qs} spektrum b) v_{qs} spektrum



Şekil 5.15 İki kırık rotor çubuk arızası ve yük momenti salınımı farklı frekanslarda a) i_{qs} spektrum b) v_{qs} spektrum

Asenkron motor hem iki kırık rotor çubuk arızası hemde düşük frekanslı yük momenti salınımı var iken test edilmiştir. Yük salınımı frekansı f_{osc} kırık rotor çubuk arızası frekansı $2sf_s$ 'e yakın seçilmiştir. Şekil 5.15a'da görüldüğü gibi i_{qs} spektrumunda hem kırık rotor çubuk arızası harmonikleri $(1\pm 2s)f_s$, hemde yük momenti salınımı harmonikleri $f_s\pm f_{osc}$ net bir şekilde görülmektedir. Şekil 5.15b'de v_{qs} gerilim spektrumu incelendiğinde, yük salınımına ait harmonikler net bir şekilde gözlemlenirken kırık rotor çubuk arızasına ait olan harmonikler gürültü düzeyindedir. Bu çalışma koşulunda arıza indeks değerleri $F_i=0.0754$ pu ve $F_v=0.0420$ pu eşik değerinin üzerinde ve akım arıza indeksi F_i , gerilim arıza indeksinden F_v 'den büyük değerdedir. Bu durum Şekil 3.17'deki algoritmaya göre yük momenti salınımı durumunda kırık rotor çubuk arızasını temsil etmektedir.

Son olarak asenkron motor yine tam yükte hem kırık rotor çubuk arızası hem de yük momenti salınımı var iken çalıştırılmıştır. Fakat bu testte yük momenti salınımı frekansı (f_{osc}) kırık rotor çubuk arızası frekansına ($2sf_s$) eşit seçilmiştir. Şekil 5.16'da görüldüğü gibi hem i_{qs} hemde v_{qs} spektrumunda kırık rotor çubuk arızası harmonikleri $(1\pm 2s)f_s$, ve yük momenti salınımı harmonikleri $f_s\pm f_{osc}$ görsel olarak birbirinden ayırtılamamaktadır. Akım ve gerilim spektrumlarından elde edilen arıza indeksi değerleri $F_i=0.0702$ pu ve $F_v=0.0484$ pu'dir. Ancak kırık rotor çubuk arızasına ve yük momenti salınımına ilişkin harmonikler i_{qs} and v_{qs} spektrumunda aynı frekanslarda görülse bile arıza indeks değerleri yük momenti salınımı durumunda kırık rotor çubuk arızasını temsil etmektedir.



Şekil 5.16 İki kırık rotor çubuk arızası ve yük momenti salınımı aynı frekanslarda
a) i_{qs} spektrum b) v_{qs} spektrum

DTC ile beslenen asenkron motorlarda q -ekseni akım ve gerilim spektrumlarından elde edilen F_i ve F_v arıza indeksleri kullanılarak kırık rotor çubuk arızası düşük frekanslı yük momentinden ayrıştırılabilmektedir.

5.3. Sonuç

Kırık rotor çubuk arızasının düşük frekanslı yük momentinden ayrıştırılması için Bölüm 3'te geliştirilen algoritmalar asenkron motorda deneysel olarak uygulanmıştır. Bu bölümde ilk olarak deneysel düzenek tanıtılmıştır. Tüm testler temel olarak sağlıklı motor, iki kırık rotor çubuk arızası ve düşük frekanslı yük momentinden ayrıştırılması durumunda yapılmıştır.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Yük momenti salınımı frekansı kırık rotor çubuk arızası frekansına yakın veya eşit olursa stator akımında aynı arıza frekanslarında harmonikler görülmektedir. Bu yüzden doğru bir arıza tespiti için yükün salınımlı olup olmadığı durumu göz önüne alınmalıdır.

Bu tez çalışmasında asenkron motorlarda kırık rotor çubuk arızasını düşük frekanslı yük momenti salınımindan ayırtmak için güvenilir ve uygulanması basit üç farklı algoritma geliştirilmiştir.

Geliştirilen algoritmalarından ilki; Hilbert dönüşümü ile Uzay vektör açısız dalgalanma metodunun birleşiminden elde edilen analitik sinyalin açısız dalgalanması (ASAF) metodudur. Bu metot ile şebeke ve V/f açık çevrim kontrollü sürücüler ile beslenen üç fazlı asenkron motorlarda kırık rotor çubuk arızası düşük frekanslı yük momenti salınımindan ayırtılmıştır. Bu algoritmanın uygulanabilmesi için besleme kaynağında veya statorda az da olsa bir dengesizliğin olması gerekmektedir. Bu kaynak dengesizliği veya stator asimetrisi genel olarak her sistemde mevcuttur. Şebeke ile çalışmada besleme kaynağı veya statordaki herhangi bir asimetri durumunda ASAF spektrumunda $2f_s$ 'in yan bandları kullanılarak kırık rotor çubuk arızası ve yük momenti salınımı birbirinden ayırtılmıştır. Kırık rotor arızasına ait olan harmonikler ASAF spektrumunda $2sf_s$ ve $(1-s)2f_s$ frekanslarında görülürken yük momenti salınıma ait harmonikler sadece DC bileşen civarlarında f_{osc} frekansında görülmektedir. Ayrıca bu tez çalışmasında üç fazlı asenkron motor V/f açık çevrim kontrollü sürücüler ile beslendiğinde farklı çalışma frekanslarında ASAF spektrumu incelenmiş ve bu spektrumda $4f_s$ 'in yan bandları kullanılarak kırık rotor çubuk arızası düşük frekanslı yük momenti salınımindan ayırtılmıştır. Besleme kaynağı frekansı 50 Hz ve 30 Hz iken deneysel sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre V/f açık çevrim kontrollü sürücüler ile beslenen asenkron motorlarda ASAF spektrumunda $4f_s$ 'in yan bandlarında kırık rotor çubuk arızası $4f_s-2sf_s$ ve $4f_s-4sf_s$ frekanslarında net bir şekilde görülürken yük momenti salınıma ait olan harmonik $4f_s-f_{osc}$ gürültü düzeyindedir.

ASAF spektrumu geleneksel motor akım spektrumu analizine göre bazı avantajlara sahiptir. ASAF spektrumunda ana harmonik bileşenin etkisi görülmediğinden, bu ana harmoniğin dağılma etkileri ortadan kalkmaktadır.

Ayrıca ASAF spektrumu ile logaritmik eksen yerine lineer eksen kullanılmaktadır. Çok düşük kaymalarda stator akımı analizinde kırık rotor çubuk arızasına ilişkin harmonikler ana harmoniğe yakın olacağından arıza tespiti oldukça zordur. Ancak geliştirilen ASAF metodu ile çok düşük kaymalarda bile kırık rotor çubuk arızası tespit edilebilmektedir.

Geliştirilen diğer bir algorithmada şebeke ile beslenen üç fazlı yıldız bağlı bir asenkron motorda moment ve faz gerilimi spektrumunda tanımlanan ayrıştırma harmonikleri kullanılarak kırık rotor çubuk arızası düşük frekanslı yük momenti salınımindan ayrıştırılmaktadır. Moment spektrumunda $6f_s$ 'in düşük yan band harmonikleri, faz gerilimi spektrumunda ise $3f_s$ 'in düşük yan band harmonikleri kullanılarak kırık rotor çubuk arızası düşük frekanslı yük momenti salınımindan ayrıştırılmıştır. Kırık rotor çubuk arızası durumunda moment spektrumunda $6f_s-2sf_s$ ve $6f_s-4sf_s$ harmonikleri, faz gerilimi spektrumunda ise $3f_s-2sf_s$ ve $3f_s-4sf_s$ harmonikleri görülürken yük momenti salınımlı durumda moment spektrumunda $6f_s$ 'in yan bandlarında, faz gerilimi spektrumunda ise $3f_s$ 'in yan bandlarında herhangi bir harmonik görülmemektedir. Moment ve gerilim spektrumunda tanımlanan ayrıştırma harmonikleri tüm hız ve yükleme koşullarında güvenilir sonuçlar sağlamaktadır.

Asenkron motorlarda hız ve moment kontrolü artık günümüzde üretimin ve tüketimin her aşamasında gerekmektedir. Bu gelişmelerden dolayı sürücüler ile beslenen elektrik makinelerinde modern ve doğru arıza tespit tekniklerine ihtiyaç duyulmaktadır. Son olarak bu tez çalışmasında doğrudan moment kontrollü (DTC) sürücü ile beslenen asenkron motorlarda kırık rotor çubuk arızasını düşük frekanslı yük momenti salınımindan ayırtmak için durağan çatıda q -ekseni akım (i_{qs}) ve gerilim (v_{qs}) spektrumlarından yararlanılarak bir algoritma geliştirilmiştir. Kırık rotor çubuk arızası durumunda arızaya ilişkin harmonikler i_{qs} spektrumunda net bir şekilde gözlemlenirken, v_{qs} spektrumunda bu harmonikler gürültü düzeyindedir. Ancak yük momenti salınımlı durumda hem i_{qs} hem de v_{qs} spektrumunda yük momenti salınımlı ile ilişkili harmonikler baskın olarak mevcuttur. Geliştirilen algorithma akım ve gerilim spektrumlarında doğrudan harmonik büyüklüklerini kullanmak yerine

Bölüm 3.3'te tanımlanan arıza indeksleri F_i ve F_v kullanılarak kırık rotor çubuk arızası yük momenti salınımından ayrıştırılmıştır. Geliştirilen algoritma q -ekseni bileşenlerini elde etmek için sadece iki faz akım ve gerilimlere ihtiyaç duyulmaktadır. Önerilen metodun uygulanabilmesi oldukça basit ve motor parametrelerinden bağımsızdır.

Geliştirilen tüm metotların uygulanabilirliğini test etmek için bilgisayar benzetimi ve deneysel düzenek oluşturulmuştur. Bilgisayar benzetimi için Bölüm 4'te sunulduğu gibi Matlab@Simulink modeli ve sonlu elemanlar yöntemini kullanan ANSYS@Maxwell modeli olmak üzere iki model oluşturulmuştur. Bölüm 5'teki deneylerde üç fazlı sincap kafesli bir asenkron motor kullanılmıştır. Sunulan deneysel ve benzetim sonuçları ile kırık rotor çubuk arızasının düşük frekanslı yük momenti salınımından basit ve güvenilir bir şekilde ayrıştırılabileceği gösterilmiştir.

6.2 Öneriler

Geliştirilen algoritmalar farklı yükleme koşullarında laboratuvar ortamında deneysel olarak test edilmiştir. Bu deneyler her ne kadar gerçek çalışma koşulları dikkate alınarak uygulansa da sanayi ve endüstri koşullarında test edilmesi beklenmeyen etkilerin geliştirilen algoritmalar üzerindeki etkisinin incelenmesi açısından fayda sağlayacaktır.

Tez kapsamında tanımlanan arıza indeksleri kullanılarak Aşırı Öğrenme Makineleri (ELM) ve Yapay Sinir Ağları (YSA) yöntemleriyle kırık rotor çubuk arızası ve düşük frekanslı yük momenti salınımının birbirinden ayrıştırılması üzerine çalışmalar yapılabilir.

Yıldız bağlı asenkron motorda faz gerilim spektrumundan yararlanılarak tanımlanan ayrıştırma harmoniklerinin kullanımı üçgen bağlı motorlar için de araştırılabilir.

Büyük güçlü asenkron motorlarda motorun soğumasına yardımcı olması açısından rotorda hava kanalları (air duct) bulunmaktadır. Yapılan çalışmalarda bu hava kanallarının bazen kırık rotor çubuk arızası ile aynı frekansta harmoniklere sebep olduğu görülmektedir. Bu tez de geliştirilen algoritmalar kullanılarak rotorda

bulunan hava kanallarının etkisi ile kırık rotor çubuk arızasının ayrıştırılması üzerine çalışmalar yapılması planlanmaktadır.

Stator kaçak akıları motor anlık durumu hakkında bilgi içermektedir. Stator kaçak akı ölçümü genel olarak stator dış çevresine konulan bir sarım ile yapılmaktadır. Ancak bu sarım ile kaçak akıların oluşturduğu zıt emk gerilimleri izlenmektedir. Günümüzde akı ölçümü için mevcut akı sensörleri (fluxgate sensor) geliştirilmektedir. Bu sensörler ile direkt akı bilgisi ölçülmektedir. Bu sensörler kullanılarak kırık rotor çubuk arızasının düşük frekanslı yük momenti salınımından ayrıştırılması üzerine çalışmalar yapılabilir.

7. KAYNAKLAR

- [1] Mirafzal, B.; Demerdash, N.A.O., On innovative methods of induction motor inter-turn and broken-bar fault diagnostics, Proceedings of Electric Machines and Drives, IEEE International Conference on, San Antonio, TX, May 15-15 (2005), pp.762-769.
- [2] EPRI EL-2678, Improved Motors for Utility Applications, , Vol 1, 1763-1, final report, 1982.
- [3] Motor Reliability working Group, *Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations, Part I, and II*, **IEEE Trans. On Industry Applications**, 4: (1985).
- [4] Thomson, W.T., A review of on-line condition monitoring techniques for three-phase squirrel-cage induction motors- past present and future, Proceedings of IEEE International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives, IEEE SDEMPED'99, (1999), pp. 3-18.
- [5] Tanver, P.J., and Penman, J., Condition Monitoring of Electrical Machines, Research Studies Press Ltd., 1987.
- [6] Calis, H., *Current based detection of mechanical faults in induction motors*, PhD Thesis, University of Sussex, 1998.
- [7] Thorsen, O.V. and Dalva, M., *A survey of faults on induction motors in offshore oil industry, petrochemical industry, gas terminals, and oil refineries*, **IEEE Trans. On Industry Applications**, 31:5 (1995) 1186-1196.
- [8] G. B. Kliman and J. Stein, *Methods of motor current signature analysis*, **Elect. Power Compon. Syst.**, 20:5 (1992) 463-474.
- [9] Thomson, William T., and Ronald J. Gilmore, Motor current signature analysis to detect faults in induction motor drives-fundamentals, data interpretation, and industrial case histories, Proceedings of 32nd Turbo machinery Symposium, A&M University, Texas, USA (2003).
- [10] Bellini, A.; Filippetti, F.; Tassoni, C.; Capolino, G.-A., *Advances in diagnostic techniques for induction machines*, **Industrial Electronics, IEEE Transactions on** , 55:12 (2008) 4109-4126.
- [11] S. Nandi, and H. A. Toliyat, *Condition monitoring and fault diagnosis of electrical machines—A review*, **IEEE Trans. Energy Convers.**, 20:4 (2005) 719-729.
- [12] C. Hargis, B.g. Gaydon, and K. Kamish, The detection of rotor defects in induction motors, Proceedings of Institute Electrical Engineering EMDA Conf, London, (1982), pp. 216-220.

- [13] W.T. Thomson, I.D. Stewart, Online current monitoring for fault diagnosis in inverter fed induction motors, Proceedings of Third International Conference on Power Electronics and Variable-Speed Drives, (1988) pp. 432-435.
- [14] G.B. Kliman, R.A. Koegl, J. Stein, R.D. Endicott, M.W. Madden, *Noninvasive detection of broken rotor bars in operating induction motors*, **IEEE Transactions on Energy Conversion**, 3:, (1988) 873-879.
- [15] Elkasabgy, N.M.; Eastham, Anthony R.; Dawson, Graham E., *Detection of broken bars in the cage rotor on an induction machine*, **Industry Applications, IEEE Transactions on**, 28:1 (1992) 165-171.
- [16] F. Filippetti, G. Franceschini, C. Tassoni, P. Vas, AI techniques in induction machines diagnosis including the speed ripple effect, Proceedings of IEEE Industry Applications Society Annual Meeting Conference, (1996) pp. 655-662.
- [17] W. Long, T.G. Habetler, and R.G. Harley, A review of separating mechanical load effects from rotor faults detection in induction motors, Proceedings of IEEE SDEMPED, Gracow, Poland, (2007), pp. 221-225.
- [18] G. Salles, F. Filippetti, C. Tassoni, G. Crelet, and G. Franceschini, *Monitoring of induction motor load by neural network techniques*, **IEEE Transactions on Power Electronics**, 15:4 (2000) 762-768.
- [19] D. G. Dorrel, N. C. Paterson, and J. F. Watson, The causes and quantification of sideband currents for use in rotor fault detection systems for cage induction motors, Proceedings of ICEM'96, Vigo, Spain, Sept., (1996), pp. 414-419.
- [20] F. Filippetti, G. Franceschini, C. Tassoni, and P. Vas, Impact of speed ripple on rotor fault diagnosis of induction machines, Proceedings of ICEM'96, Vigo, Spain, Sept., (1996), pp. 452-457.
- [21] Y. Liao and T. A. Lipo, *Effect of saturation third harmonic on the induction machine performance*, **Elect. Mach. Power Syst.**, 22: (1994) 155-171.
- [22] E. Ritchie, X. Deng, S. Palko, and T. Jokinen, Rotor fault analysis of induction motors by dynamic model and finite element method, Proceedings of IEEE/KTH Stockholm Power Tech. Conf., Stockholm, Sweden, June, (1995), pp. 368-372.
- [23] Sittisrijan, N.; Ruangsinchaiwanich, S., Analysis of stator current waveforms of induction motor with broken bar conditions, Proceedings of Electrical Machines and Systems (ICEMS), International Conference on, 20-23 Aug., (2011) pp.1-6.
- [24] Benbouzid, M.E.H.; Kliman, G.B., *What stator current processing-based technique to use for induction motor rotor faults diagnosis?*, **Energy Conversion, IEEE Transactions on**, 18:2 (2003) 238-244.

- [25] Bellini, A., Filippetti, F., Franceschini, G., Tassoni, C., Kliman, G.B., *Quantitative evaluation of induction motor broken bars by means of electrical signature analysis*, **Industry Applications, IEEE Transactions on**, 37:5 (2001) 1248-1255.
- [26] Mirafzal, B.; Demerdash, N.A.O., Induction machine broken-bar fault diagnosis using the rotor magnetic field space vector orientation, Proceedings of Industry Applications Conference, 38th IAS Annual Meeting. Conference Record of the, 12-16 Oct. (2003) pp.1847-1854.
- [27] Costa, F.F.; de Almeida, L.A.L.; Naidu, S.R.; Braga-Filho, E.R., *Improving the signal data acquisition in condition monitoring of electrical machines*, **Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on**, 53:4 (2004) 1015-1019.
- [28] Ayhan, B.; Trussell, H.J.; Mo-Yuen Chow; Myung-Hyun Song, *On the use of a lower sampling rate for broken rotor bar detection with DTFT and AR-based spectrum methods*, **Industrial Electronics, IEEE Transactions on**, 55:3 (2008) 1421-1434.
- [29] Zhengping Zhang; Zhen Ren; Wenying Huang, *A novel detection method of motor broken rotor bars based on wavelet ridge*, **Energy Conversion, IEEE Transactions on**, 18:3 (2003) 417-423.
- [30] Cusido, J.; Romeral, L.; Ortega, J.A.; Rosero, J.A.; Garcia Espinosa, A., *Fault detection in induction machines using power spectral density in wavelet decomposition*, **Industrial Electronics, IEEE Transactions on**, 55:2 (2008) 633-643.
- [31] Pineda-Sanchez, M.; Riera-Guasp, M.; Antonino-Daviu, J.A.; Roger-Folch, J.; Perez-Cruz, J.; Puche-Panadero, R., *Instantaneous frequency of the left sideband harmonic during the start-up transient: a new method for diagnosis of broken bars*, **Industrial Electronics, IEEE Transactions on**, 56:11 (2009) 4557-4570.
- [32] Douglas, H.; Pillay, P.; Ziarani, A.K., *A new algorithm for transient motor current signature analysis using wavelets*, **Industry Applications, IEEE Transactions on**, 40:5 (2004) 1361-1368.
- [33] Faiz, J.; Ebrahimi, B.-M., *A new pattern for detecting broken rotor bars in induction motors during start-up*, **Magnetics, IEEE Transactions on**, 44:12 (2008) 4673-4683.
- [34] Rangel-Magdaleno, J.; Romero-Troncoso, R.; Osornio-Rios, R.A.; Cabal-Yepez, E.; Contreras-Medina, L.M., *Novel methodology for online half-broken-bar detection on induction motors*, **Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on** 58:5 (2009) 1690-1698.

- [35] Sadeghian, Alireza; Zhongming Ye; Bin Wu, Online detection of broken rotor bars in induction motors by wavelet packet decomposition and artificial neural networks, **Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on**, 58:7 (2009) 2253-2263.
- [36] Bouzida, A.; Touhami, O.; Ibtouen, R.; Belouchrani, A.; Fadel, M.; Rezzoug, A., *Fault diagnosis in industrial induction machines through discrete wavelet transform*, **Industrial Electronics, IEEE Transactions on**, 58:9 (2011) 4385-4395.
- [37] Kia, S.H.; Henao, H.; Capolino, G.-A., *Diagnosis of broken-bar fault in induction machines using discrete wavelet transform without slip estimation*, **Industry Applications, IEEE Transactions on**, 45:4 (2009) 1395-1404.
- [38] Cruz, S.M.A.; Cardoso, A.J.M., Rotor cage fault diagnosis in three-phase induction motors by the total instantaneous power spectral analysis, Proceedings of Industry Applications Conference Thirty-Fourth IAS Annual Meeting. Conference Record of the, (1999) pp.1929-1934.
- [39] Zhenxing Liu; Xianggen Yin; Zhe Zhang; Deshu Chen; Wei Chen, *Online rotor mixed fault diagnosis way based on spectrum analysis of instantaneous power in squirrel cage induction motors*, **Energy Conversion, IEEE Transactions on**, 19:3 (2004) 485-490.
- [40] Milimonfared, J.; Kelk, H.M.; Nandi, S.; Minassians, A.D.; Toliyat, H.A., *A novel approach for broken-rotor-bar detection in cage induction motors*, **Industry Applications, IEEE Transactions on**, 35:5 (1999) 1000-1006.
- [41] Cupertino, F.; de Vanna, E.; Salvatore, Luigi; Stasi, S., *Analysis techniques for detection of IM broken rotor bars after supply disconnection*, **Industry Applications, IEEE Transactions on**, 40:2 (2004) 526-533.
- [42] Akin, B.; Orguner, U.; Toliyat, H.A.; Rayner, M., *Low order pwm inverter harmonics contributions to the inverter-fed induction machine fault diagnosis*, **Industrial Electronics, IEEE Transactions on**, 55:2 (2008) 610-619.
- [43] Nemec, M.; Drobnic, K.; Nedeljkovic, D.; Fiser, R.; Ambrozic, V., *Detection of broken bars in induction motor through the analysis of supply voltage modulation*, **Industrial Electronics, IEEE Transactions on**, 57:8 (2010) 2879-2888.
- [44] Soualhi, A.; Clerc, G.; Razik, H., *Detection and diagnosis of faults in induction motor using an improved artificial ant clustering technique*, **Industrial Electronics, IEEE Transactions on**, 60:9 (2013) 4053-4062.
- [45] Bossio, G.; De Angelo, C.; Garcia, G.; Solsona, Jorge; Valla, M.I., Effects of rotor bar and end-ring faults over the signals of a position estimation strategy for induction motors, Proceedings of *Electric Machines and Drives Conference, IEMDC'03 IEEE International* 1-4 June, (2003) pp.151-155.

- [46] Sung-Kuk Kim; Jul-Ki Seok, *High-frequency signal injection-based rotor bar fault detection of inverter-fed induction motors with closed rotor slots*, **Industry Applications, IEEE Transactions on**, 47:4 (2011) 1624-1631.
- [47] Briz, F.; Degner, M.W.; Diez, A.B.; Guerrero, J.M., *Online diagnostics in inverter-fed induction machines using high-frequency signal injection*, **Industry Applications, IEEE Transactions on**, 40:4 (2004) 1153-1161.
- [48] Cruz, S.M.A.; Stefani, A.; Filippetti, F.; Marques Cardoso, A.J., *A new model-based technique for the diagnosis of rotor faults in RFOC induction motor drives*, **Industrial Electronics, IEEE Transactions on**, 55:12 (2008) 4218-4228.
- [49] Cunha, C.C.M.; Filho, B.J.C.; Lyra, R.O.C., *Detection of rotor faults in torque controlled induction motor drives*, *Proceedings of Power Electronics and Applications, European Conference on*, 2-5 Sept., (2007), pp.1-10.
- [50] Cruz, S.M.A.; Cardoso, A.J.M., *Diagnosis of rotor faults in closed-loop induction motor drives*, *Proceedings of Industry Applications Conference, 41st IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2006 IEEE*, 8-12 Oct., (2006) pp.2346-2353.
- [51] Menacer, A.; Moreau, S.; Champenois, G.; Benakcha, A.; Nait Said, M.S., *Rotor failures diagnosis of Induction Machines by current or voltage spectrum analysis in function of the type of feeding and the load*, *Proceedings of Reliability in Electromagnetic Systems, 2007 IET Colloquium on*, 24-25 May, (2007), pp.1-5.
- [52] Xie Ying, *Characteristic performance analysis of squirrel cage induction motor with broken bars*, **Magnetics, IEEE Transactions on**, 45:2 (2009) 759-766.
- [53] Sprooten, J.; Maun, J.-C., *Influence of saturation level on the effect of broken bars in induction motors using fundamental electromagnetic laws and finite element simulations*, **Energy Conversion, IEEE Transactions on**, 24:3 (2009) 557-564.
- [54] Riera-Guasp, M.; Cabanas, M.F.; Antonino-Daviu, J.A.; Pineda-Sanchez, M.; Garcia, C.H.R., *Influence of nonconsecutive bar breakages in motor current signature analysis for the diagnosis of rotor faults in induction motors*, **Energy Conversion, IEEE Transactions on**, 25:1 (2010) 80-89.
- [55] Xie Ying, *Performance evaluation and thermal fields analysis of induction motor with broken rotor bars located at different relative positions*, **Magnetics, IEEE Transactions on**, 46:5 (2010) 1243-1250.
- [56] Aileen, C.J.; Nagarajan, S.; Reddy, S.R., *Detection of broken bars in three phase squirrel cage induction motor using finite element method*, *Proceedings of Emerging Trends in Electrical and Computer Technology (ICETECT), 2011 International Conference on*, 23-24 March (2011), pp.249-254.

- [57] Ying Xie; Wenping Cao, Influence of broken bar fault on the performance of squirrel-cage induction motor at standstill, *Proceedings of Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2011 International Conference on*, 20-23 Aug., (2011), pp.1-5.
- [58] Razik, H.; de Rossiter Correa, M.B.; da Silva, E.R.C., *A novel monitoring of load level and broken bar fault severity applied to squirrel-cage induction motors using a genetic algorithm*, **Industrial Electronics, IEEE Transactions on**, 56:11 (2009) 4615-4626.
- [59] Laala, W.; Guedini, S.; Zouzou, S., Novel approach for diagnosis and detection of broken bar in induction motor at low slip using fuzzy logic, *Proceedings of Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics & Drives (SDEMPED), 2011 IEEE International Symposium on*, 5-8 Sept. (2011) pp.511-516.
- [60] H. Calis, A. Cakır, *Rotor bar fault diagnosis in three phase induction motors by monitoring fluctuations of motor current zero crossing instants*, **Electrical Power System Research** 77:5 (2007) 385–392.
- [61] Habetler, T.G., *Effects of time-varying loads on rotor fault detection in induction machines*, **Industry Applications, IEEE Transactions on**, 31:4 (1995) 900-906.
- [62] Schoen, R.R.; Habetler, T.G., Evaluation and implementation of a system to eliminate arbitrary load effects in current-based monitoring of induction machines, *Proceedings of Industry Applications Conference, Thirty-First IAS Annual Meeting, IAS '96., Conference Record of the 1996 IEEE*, 6-10 Oct., (1996), pp.671-678.
- [63] Long Wu; Habetler, T.G.; Harley, R.G., Separating load torque oscillation and rotor fault effects in stator current-based motor condition monitoring, *Proceedings of Electric Machines and Drives, 2005 IEEE International Conference on*, 15-15 May (2005), pp.1889-1894.
- [64] Cabanas, M.F.; Pedrayes, F.; Gonzalez, M.R.; Melero, M.G.; Rojas, C.H.; Orcajo, G.A.; Cano, J.M.; Nuno, F., A new electronic instrument for the early detection of broken rotor bars in asynchronous motors working under arbitrary load conditions, *Proceedings of Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, SDEMPED 2005 5th IEEE International Symposium on*, 7-9 Sept. (2005), pp.1-6.
- [65] Cabanas, M.F.; Pedrayes, F.; Rojas, C.H.; Melero, M.G.; Norniella, J.G.; Orcajo, G.A.; Cano, J.M.; Nuno, F.; Fuentes, D.R., *A new portable, self-powered, and wireless instrument for the early detection of broken rotor bars in induction motors*, **Industrial Electronics, IEEE Transactions on**, 58:10 (2011) 4917-4930.
- [66] Cabanas, M.F.; Glez, F.P.; Gonzalez, M.R.; Melero, M.G.; Orcajo, G.A.; Cano, J.M.; Rojas, C.H., A new on-line method for the early detection of broken rotor bars in asynchronous motors working under arbitrary load conditions, *Proceedings of Industry Applications Conference, Fortieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the*, 2-6 Oct., (2005), pp. 662-669.

- [67] Didier, G.; Ternisien, E.; Razik, H., Detection of incipient rotor cage fault and mechanical abnormalities in induction motor using global modulation index on the line current spectrum, Proceedings of Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, SDEMPED 2005 5th IEEE International Symposium on, vol., 7-9 Sept. (2005), pp.1-6.
- [68] Kral, C.; Kapeller, H.; Pirker, F.; Pascoli, G., Discrimination of rotor faults and low frequency load torque modulations of squirrel cage induction machines by means of the vienna monitoring method, Proceedings of Power Electronics Specialists Conference, PESC '05 IEEE 36th, 16-16 June, (2005), pp.2861-2866.
- [69] Bossio, G.R.; De Angelo, C.H.; Bossio, J.M.; Pezzani, C.M.; Garcia, G.O., *Separating broken rotor bars and load oscillations on IM fault diagnosis through the instantaneous active and reactive currents*, **Industrial Electronics, IEEE Transactions on**, 56:11 (2009) 4571-4580.
- [70] De Angelo, C.H.; Bossio, G.R.; Garcia, G.O., *Discriminating broken rotor bar from oscillating load effects using the instantaneous active and reactive powers*, **Electric Power Applications, IET**, 4:4 (2010) 281-290.
- [71] Pezzani, C.M.; Donolo, P.D.; Castellino, A.M.; Bossio, G.R.; De Angelo, C.H., A new approach to the Park's vector for broken bars and load oscillation diagnosis on IM, Proceedings of Industrial Technology (ICIT), 2010 IEEE International Conference on, 14-17 March, (2010), pp.1221-1226.
- [72] Cruz, Sergio, and Flavio Gaspar. *A new method to diagnose rotor faults in 3-phase induction motors coupled to time-varying loads*, **Przeglad Elektrotechniczny 1a** : (2012) 202-206.
- [73] Cruz, S.M.A., *An active–reactive power method for the diagnosis of rotor faults in three-phase induction motors operating under time-varying load conditions*, **Energy Conversion, IEEE Transactions on**, 27:1 (2012) 71-84.
- [74] Drif, M.; Cardoso, A.J.M., *Discriminating the simultaneous occurrence of three-phase induction motor rotor faults and mechanical load oscillations by the instantaneous active and reactive power media signature analyses*, **Industrial Electronics, IEEE Transactions on**, 59:3 (2012) 1630-1639.
- [75] Drif, M.; Estima, J.O.; Cardoso, A.J.M., Discriminating rotor cage faults and mechanical load oscillations in three-phase induction motors by the stator instantaneous complex apparent impedance, Proceedings of Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), IEEE, 15-20 Sept. (2012), pp.3024-3031.
- [76] Concari, C.; Franceschini, G.; Tassoni, C., Discerning mechanical load unbalances from rotor faults in induction machines through current space vector components, Proceedings of IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 7-10 Nov., (2010), pp.2609-2614.

- [77] Concari, C.; Tassoni, C.; Toscani, A., A new method to discern mechanical unbalances from rotor faults in induction machines, Proceedings of Electrical Machines (ICEM), XIX International Conference on, 6-8 Sept., (2010), pp.1-8.
- [78] Concari, C.; Franceschini, G.; Tassoni, C., A MCSA procedure to diagnose low frequency mechanical unbalances in induction machines, Proceedings of Electrical Machines (ICEM), XIX International Conference on, 6-8 Sept., (2010), pp.1-6.
- [79] Concari, C.; Franceschini, G.; Tassoni, C., *Induction machine current space vector features to effectively discern and quantify rotor faults and external torque ripple*, **Electric Power Applications, IET**, 6:6 (2012) 310-321.
- [80] De Angelo, C.H.; Bossio, G.R.; Bossio, J.M.; Garcia, G.O., Broken bar detection in single-phase reciprocating compressors, Proceedings of Industrial Electronics, IECON 2008 34th Annual Conference of IEEE, 10-13 Nov., (2008) pp.1125-1130.
- [81] Feldman M., *Hilbert Transforms, in Encyclopedia of Vibration*, Academic press, 2002, pp 642–648.
- [82] Kostic-Perovic D, Arkan M, and Unsworth PJ., Induction motor fault detection by space vector angular fluctuation. Proceedings of IEEE Industry Applications Conference 34th Annual Meeting – World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy, Rome, (2000), pp. 388–394.
- [83] Punche-Panadero R, Pineda-Sanchez M, Riera-Guasp M, Roger-Folch J, Hurtado-Perez E, and Perez-Cruz J., *Improved resolution of the MCSA method via Hilbert Transform, enabling the diagnosis of rotor asymmetries at very low slip*, **IEEE Transactions on Energy Conversion** 24:1 (2010) 52-59.
- [84] Alshandoli AF, Ball AD, and Gu F., Instantaneous phase variation (IPV) for rotor bar fault detection and diagnosis., Proceedings of Second International Conference on Electrical Engineering, Lahore, (2008), pp. 1-7
- [85] Gyftakis, K. N., Spyropoulos, D.V., Kappatou, J. C., et al: *A novel approach for broken bar fault diagnosis in induction motors through torque monitoring*, **IEEE Trans. Energy Convers.**, 28:2 (2013) 267-277.
- [86] Bellini, A.; Concari, C.; Franceschini, G.; Tassoni, C., Different procedures for the diagnosis of rotor fault in closed loop induction motors drives, Proceedings of Electric Machines & Drives Conference, IEMDC '07 IEEE International, 3-5 May, (2007), pp.1427-1433.
- [87] Martins Cunha, C.C.; Filho, B.J.C., Detection of rotor faults in squirrel-cage induction motors using adjustable speed drives, Proceedings of Industry Applications Conference, 41st IAS Annual Meeting. Conference Record of the IEEE, 8-12 Oct. (2006), pp.2354-2359.

- [88] ABB drives, Technical guide No. 1, Direct torque control- the world's most advanced AC drive technology, Chap. 4, (2011), pp. 28.
- [89] Maxwell Online Help: 'ANSYS Electromagnetics Suite 15.0'(2013)
- [90] Kostic-perovic D., *On-line diagnosis of faults in induction motor and pump*, PhD thesis, University of Sussex, 2000
- [91] Arkan M., Calis H., Tagluk M.E., *Bearing and misalignment fault detection in induction motors by using space vector angular fluctuation signal*, **Electr. Eng.**, 87:4 (2005) 197–206.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Taner GÖKTAŞ

Doğum Yeri ve Tarihi: ELAZIĞ/ 02.10.1983

Adres: Sürsürü Mah. Mesire Sok. Örnek Sit. B Blok No: 2/21 ELAZIĞ

E-Posta: tanergoktas@hitit.edu.tr, taner.goktas@gmail.com

Lisans:

(2002-2006) Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Müh.

Y. Lisans:

(2006-2010) Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Makineleri A.B.D.

Mesleki Deneyim:

(2006-2010) Servis Mühendisi, Öz Fırat Medikal LTİ. ŞTİ.- ELAZIĞ

(2010-Devam) Öğretim Görevlisi, Hitit Üniversitesi Osmancık Ö. Derindere MYO -
ÇORUM

Ödüller:

(2014-2015) Tubitak 2214-A Yurt Dışı Doktora Sırası Araştırma Bursu (1 Yıl),
The University of Texas at Dallas, USA

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR

Proje:

T. Goktas, M. Arkan, “Sürücü ile Beslenen Bir Asenkron Motorda Rotor Hatalarının Gerçek Zamanlı Tespiti”, İ.Ü. BAP birimi, Proje No: 2013/47

Uluslararası SCI indekslerde taranan makaleler:

1. T.Goktas, M.Arkan, O.F. Ozguven, “Detection of rotor fault in three-phase induction motor in case of low frequency load oscillation,” Springer, Electrical Engineering DOI: 10.1007/s00202-015-0342-5, 2015.

Uluslararası konferanslarda sunulan bildiriler:

2. Goktas, T.; Arkan, M.; Ozguven, O.F., "A new method to separate broken rotor failures and low frequency load oscillations in three-phase induction motor," *Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), 2013 9th IEEE International Symposium on*, vol., no., pp.122,127, 27-30 Aug. 2013

3. Goktas, Taner; Arkan, Muslum, "Diagnosis of broken rotor fault in inverter-fed IM by using analytical signal angular fluctuation," *Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition (PEMC), 2014 16th International*, vol., no., pp.337,342, 21-24 Sept. 2014

4. T. Goktas, M. Arkan, M. Zafarani and B. Akin, “Separation Harmonics for Detecting Broken Bar Fault in case of Load Torque Oscillation”, in Proc: *IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC 2015)*, May 2015