

ASENKRON MOTORLARDA ROTOR KIRIKLARI ANALİZİ ve MODELLENMESİ

Özkan Kara

Yüksek Lisans Tezi

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz – 2011

ASENKRON MOTORLARDA ROTOR KIRIKLARI ANALİZİ ve MODELLENMESİ

Özkan KARA

Dumlupınar Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliği Uyarınca
Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Abdurrahman ÜNSAL

Temmuz- 2011

KABUL ve ONAY SAYFASI

Özkan Kara'nın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı ASENKRON MOTORLARDA ROTOR KIRIKLARI ANALİZİ ve MODELLENMESİ başlıklı bu çalışma, jürimizce Dumlupınar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

20/07/2011

Üye : Yrd. Doç. Dr. Abdurrahman Ünsal (Danışman)

Üye : Yrd. Doç. Dr. Serdar Tunaboşlu

Üye : Yrd. Doç. Dr. Nazım İmal

Fen Bilimleri Enstitüsün Yönetim Kurulu'nun/...../..... gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Atalay KÜÇÜKBURSA
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ASENKRON MOTORLARDA ROTOR KIRIKLARI ANALİZİ ve MODELLENMESİ

Özkan Kara

Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, 2011

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Abdurrahman Ünsal

ÖZET

Elektrik motorlarında meydana gelen arızaların tarihi, elektrik motorlarının tarihi ile neredeyse yaşıttır. Üreticiler ve kullanıcılar, başlangıçta meydana gelen arızalar karşısında basit çözümleri benimsemekteydiler. Bunlar aşırı akım koruma sistemleri, gerilim regülâtörleri, sigortalar gibi cihazlar kullanılarak veya topraklama önlemleri alınarak çözülebilmekteydi. Ancak elektrik makinelerinin ve genel olarak teknolojinin gelişimine paralel olarak, ortaya çıkan arıza çeşitlerinin de artması ile arızaların erken teşhisi ve giderilmesinin önemi artmıştır [1].

Asenkron motorların rotor devresinde meydana gelen kırık rotor çubuğu arızaları stator akımına harmonik olarak yansımaktadırlar. Bu çalışmada da sincap kafesli bir asenkron motorda meydana gelen rotor çubuğu kırıklarının stator akımlarından gözlemlenmesi MATLAB/Simulink ortamında modellenmiştir. Daha sonra deneysel verilerle kıyas edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Simulink modelinin eğitim amaçlı olarak kullanılabilirliğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Asenkron Motor, DataQ, Matlab, Rotor Çubuk Kırığı, Simülasyon

ANALYSIS AND MODELING OF BROKEN ROTOR BARS IN SQUIRREL-CAGE INDUCTION MACHINE

Özkan Kara

Elektrical and Elektronics Engineering, MSc. Thesis, 2011

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Abdurrahman Ünsal

SUMMARY

The history of faults occurring at electric motors is nearly the same age as the history of electric motors. At the beginning, manufacturers and users were to adopt themselves basic solutions against faults occurred at electric motors. Faults occurred at electric motors solved by taking measures such as grounding, using over current protectors or using voltage regulators. However, it is getting hard to diagnosing the fault and solving the problems as fault types rise with developments in electric machines. Faults also results in tangible damages. Because of all these reasons, fast fault diagnosis and intervene in the fault became important [1].

Faults occurring at rotor part of the induction machine because of the broken rotor bars reflect to stator current as harmonics. In this paper the observation of broken rotor bars at induction machines from stator current is modeled at MATLAB/Simulink medium. And than experimental results and simulation results are comoared. The results demonstrate that Simulink model can also be used for educational purposes.

Keywords: DataQ, Broken Rotor Bar, Induction Machine, Matlab, Simulation

TEŐEKKÜR

Bu alışmada bana yardımcı olan başta danışman hocam Yrd. Do. Dr. Abdurrahman Ünsal'a, desteğini hep yanımda hissettiğim aileme ve emeği geen herkese teőekkürü bir bor bilirim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
SUMMARY.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
3. ASENKRON MOTORLAR.....	4
3.1. Asenkron Motor Tarihi.....	4
3.2. Asenkron Motor Tercih Sebebi.....	5
3.3. Asenkron Motorların Yapısı.....	5
3.3.1. Stator.....	5
3.3.2. Rotor.....	6
3.3.2.1. Sincap kafesli (rotoru kısa devreli) rotor.....	6
3.3.2.2. Sargılı (bilezikli) rotor.....	7
3.3.3. Motor yan kapakları.....	8
3.4. Motor Bağlantı Türleri.....	9
3.4.1. Yıldız bağlantı.....	9
3.4.2. Delta (üçgen) bağlantı.....	10
3.5. Üç Fazlı Sargılarda Döner Alanın Oluşması.....	10
3.6. Asenkron Motorlarda Kayma.....	11
4. ASENKRON MOTOR MATEMATİKSEL MODELİ.....	12
4.1. Q-Eksen Model Hesabı	15
4.2. D-Eksen Model Hesabı.....	17
4.3. Tork Hesabı.....	20
4.4. Kayma Hesabı.....	21
5. SİMULİNK MODELİ.....	21

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
5.1. Asenkron Motor Bloğu.....	24
5.2. abc-dq0 Dönüşüm Bloğu.....	25
5.3. Motor Parametre Hesapları Bloğu.....	26
5.3.1. d Bloğu.....	28
5.3.2. q Bloğu.....	28
5.3.3. Yük seçeneği bloğu.....	28
5.3.4. Kayma parametresi blokları.....	29
5.3.4.1. Yüzde kayma s hesabı bloğu (otomatik).....	30
5.3.4.2. Kayma parametresi bloğu (manuel).....	30
5.4. Rotor Çubuk Kırığı Etkisi Bloğu.....	31
5.5. dq0-abc Dönüşüm Bloğu.....	34
5.6. Simülasyon Parametreleri.....	35
5.7. Simülasyon Sonuçları.....	36
5.7.1. Yüksüz motor simülasyonu (kırık bağımsız)	36
5.7.2. Çeyrek yüklü motor simülasyonu	37
5.7.3. Yarım yüklü motor simülasyonu	38
5.7.4. Üç çeyrek yüklü motor simülasyonu	39
5.7.5. Tam yüklü motor simülasyonu	40
6. DENEYSEL SONUÇLAR.....	42
6.1. Yüksüz Motor Verileri (Kırık Bağımsız).....	46
6.2. Çeyrek Yüklü Motor Verileri	46
6.3. Yarım Yüklü Motor Verileri	47
6.4. Üç Çeyrek Yüklü Motor Verileri	48
6.5. Tam Yüklü Motor Verileri	49
7. SİMÜLASYON VE DENEY SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI.....	52
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	60
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	62

EKLER

1. MATLAB Simulink Kodları ve Tasarımı

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.1 Stator.....	5
3.2 Sincap kafesin içi boş hali.....	6
3.3 Sincap kafesli rotor.....	7
3.4.a Rotor bilezikleri.....	7
3.4.b Sargılı rotor bilezikleri ve rotor.....	8
3.5 AC motor yan kapağı.....	9
3.6 Üç faz bobinleri ve yıldız bağlantı.....	9
3.7 Üç faz bobinleri ve üçgen bağlantı.....	10
3.8 Asenkron motor.....	11
4.1 Asenkron motor eşdeğer devresi.....	12
4.2 Q eksenini.....	12
4.3 D eksenini.....	13
5.1 Asenkron motor parametre bloğu.....	23
5.2 Asenkron motor ile giriş ve çıkış parametreleri.....	23
5.3 Asenkron motor bloğunun detayı.....	25
5.4 abc-dq0 dönüşüm bloğu.....	26
5.5 Motor parametre hesapları bloğu (otomatik).....	27
5.6 Motor parametre hesapları bloğu (manuel).....	27
5.7 d bloğu.....	28
5.8 q bloğu.....	28
5.9 Yük seçeneği bloğu.....	29
5.10 Yüzde kayma s hesabı bloğu (otomatik).....	30
5.11 Kayma parametresi bloğu (manuel).....	31
5.12 Rotor çubuk kırıği etkisi bloğu.....	32
5.13 ‘+/- 2s harmonik a akımı’ blok detayı.....	32
5.14 Çeyrek yük blok detayı.....	33
5.15 Sinüs dalga detayı.....	34
5.16 dq0-abc dönüşüm bloğu.....	35
5.17 Yüksüz motor akımı.....	36
5.18 Bir kırık rotor çubuklu çeyrek yüklü motor akımı.....	37

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.19 Dört kırık rotor çubuklu çeyrek yüklü motor akımı.....	37
5.20 Bir kırık rotor çubuklu yarım yüklü motor akımı.....	38
5.21 Dört kırık rotor çubuklu yarım yüklü motor akımı.....	38
5.22 Bir kırık rotor çubuklu üç çeyrek yüklü motor akımı.....	39
5.23 Dört kırık rotor çubuklu üç çeyrek yüklü motor akımı.....	39
5.24 Bir kırık rotor çubuklu tam yüklü motor akımı.....	40
5.25 Dört kırık rotor çubuklu tam yüklü motor akımı.....	40
6.1 Sistem blok Şeması.....	42
6.2 Deney kurulumu (önden görünüm).....	43
6.3 Deney kurulumu (yandan görünüm).....	43
6.4 Sağlam rotor.....	44
6.5 Bir kırıklı rotor.....	45
6.6 Dört kırıklı rotor.....	45
6.7 Yüksüz motor akımı.....	46
6.8 Bir kırık rotor çubuklu çeyrek yüklü motor akımı.....	46
6.9 Dört kırık rotor çubuklu çeyrek yüklü motor akımı.....	47
6.10 Bir kırık rotor çubuklu yarım yüklü motor akımı.....	47
6.11 Dört kırık rotor çubuklu yarım yüklü motor akımı.....	48
6.12 Bir kırık rotor çubuklu üç çeyrek yüklü motor akımı.....	48
6.13 Dört kırık rotor çubuklu üç çeyrek yüklü motor akımı.....	49
6.14 Bir kırık rotor çubuklu tam yüklü motor akımı.....	49
6.15 Dört kırık rotor çubuklu tam yüklü motor akımı.....	50
7.1 Yüksüz simülasyon ve deney sonuçları.....	56
7.2 Çeyrek yüklü ve bir kırık rotor çubuklu simülasyon ve deney sonuçları.....	56
7.3 Çeyrek yüklü ve dört kırık rotor çubuklu simülasyon ve deney sonuçları.....	57
7.4 Yarım yüklü ve bir kırık rotor çubuklu simülasyon ve deney sonuçları.....	57
7.5 Yarım yüklü ve dört kırık rotor çubuklu simülasyon ve deney sonuçları.....	58
7.6 Üç çeyrek yüklü ve bir kırık rotor çubuklu simülasyon ve deney sonuçları.....	58
7.7 Üç çeyrek yüklü ve dört kırık rotor çubuklu simülasyon ve deney sonuçları.....	59
7.8 Tam yüklü ve bir kırık rotor çubuklu simülasyon ve deney sonuçları.....	59
7.9 Tam yüklü ve dört kırık rotor çubuklu simülasyon ve deney sonuçları.....	60

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>		<u>Sayfa</u>
5.1	Simülasyon parametreleri	36
5.2	Simülasyon yan frekans bant akımları tepe değerleri (1 kırık).....	41
5.3	Simülasyon yan frekans bant akımları tepe değerleri (4 kırık).....	41
6.1	Deney sonucu, yan frekans bantları.....	50
6.2	Deney sonucu, yan frekans bant akımları tepe değerleri (1 kırık).....	51
6.3	Deney sonucu, yan frekans bant akımları tepe değerleri (4 kırık).....	51
7.1	Simülasyon ve deney sonuç karşılaştırma (sağ yan frekans bantları).....	52
7.2	Simülasyon ve deney sonuç karşılaştırma (sol yan frekans bantları).....	53
7.3	Simülasyon ve deney sonuç karşılaştırma (1 kırıklı sağ yan frekans akımları)...	53
7.4	Simülasyon ve deney sonuç karşılaştırma (1 kırıklı sol yan frekans akımları)...	54
7.5	Simülasyon ve deney sonuç karşılaştırma (4 kırıklı sağ yan frekans akımları)...	54
7.6	Simülasyon ve deney sonuç karşılaştırma (4 kırıklı sol yan frekans akımları)...	55

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
R_s	Stator direnci, Ω
I_s	Stator akımı, amper
I_r	Rotor akımı, amper
V_s	Kaynak gerilimi, volt
L_{ls}	Stator sızıntı indüktansı, henry
R_r	Rotor direnci, Ω
L_{lr}	Rotor sızıntı indüktansı, henry
L_m	Mıknatıslanma indüktansı, henry
L_s	Stator indüktansı, henry
L_r	Rotor indüktansı, henry
V_{qs}	q eksen stator gerilimi, volt
I_{qs}	q eksen stator akımı, amper
V_{qr}	q eksen rotor gerilimi, volt
I_{qr}	q eksen rotor akımı, amper
V_{ds}	d eksen stator gerilimi, volt
I_{ds}	d eksen stator akımı, amper
V_{dr}	d eksen rotor gerilimi, volt
I_{dr}	d eksen rotor akımı, amper
φ_{qs}	Stator q eksen akısı, weber
φ_{ds}	Stator d eksen akısı, weber
φ_{qr}	Rotor q eksen akısı, weber
φ_{dr}	Rotor d eksen akısı, weber
ω	Rotorun açısal hızı, radyan/saniye
P	Çift kutup sayısı
ω_r	Elektriksel açısal hız, radyan/saniye
T	Yük, newton-metre
T_e	Elektromanyetik tork, newton-metre
J	Rotor ve yük atalet katsayısı, kilogram-metrekare
f_0	Hat frekansı (50 Hz), hertz

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
n_s	Nominal dakikadaki devir sayısı
ω_e	Nominal açısal hız, radyan/saniye
s	Kayma değeri
k	1, 2, 3, 4...
f_b	Yan frekans bandı, hertz
b	Kırık rotor çubuk sayısı
I_a	A faz akımı, amper
I_b	B faz akımı, amper
I_c	C faz akımı, amper
I_{sa2}	A faz harmonik akımı, amper
I_{sb2}	B faz harmonik akımı, amper
I_{sc2}	C faz harmonik akımı, amper
V_a	Besleme A faz gerilimi, volt
V_b	Besleme B faz gerilimi, volt
V_c	Besleme C faz gerilimi, volt
V_d	D eksen gerilimi, volt
V_q	Q eksen gerilimi, volt
V_0	0 eksen gerilimi, volt

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
AC	Alternatif akım
DC	Doğru akım
MATLAB	MATrix LABoratory
FFT	Fast Fourier Transform (Hızlı Fourier Dönüşümü)

1. GİRİŞ

Asenkron motorlar sanayide yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Sanayide çalışma şartları ağır olduğu için bu motorlar ne kadar sağlam da olsa arızaları ortaya çıkmaktadır. Ortaya çıkan bu arızalar ne kadar kısa sürede fark edilirse motorun kendisi ve bağlı olduğu sistem o kadar az hasar görür. Dolayısıyla duruşlar ve üretim kayıpları en aza indirgenmiş olur. Motordan en yüksek verimi alabilmek için arıza sebeplerinin iyi anlaşılması gerekmektedir [2].

Asenkron motor üreticilerinin ve kullanıcılarının arıza teşhisi için yaptıkları çalışmaların arttığı dikkat çekmiştir. Arıza analizi, arızanın giderilmesinden daha çok önem kazanmıştır [3].

Motor arıza anketleri [4,5] göstermiştir ki elektrik motorlarında temelde üç arıza çeşidi vardır: mekanik arızalar, stator arızaları ve rotor arızaları.

Elektrik motor arızalarının % 38'ini mekanik arızalar oluşturur. Elektrik motorları milinin dönme hareketini sağlayan bilyeler mekanik arızaların temelini oluşturur. Bilyelerde oluşan deformasyon titreşime sebep olur. Titreşim frekansı mil yatağı geometrisini ve hızın fonksiyonları şeklindedir [6]. Mekanik arızalar rotorda dışmerkezliliğe de sebep olabilir [7].

Elektrik motor arızalarının % 40'ını stator arızaları oluşturur. Stator sargıları stator yarıklarına yerleştirilen izoleli bakır tellerden oluşmaktadır. Stator sargı arızaları genellikle sargılardaki bitişik iki bakır sargıdaki izolasyonun bozulmasıyla kısa devre olması sonucu oluşmaktadır. Bunun sonucunda aşırı sıcaklık ve elektrik motorunun manyetik alanında dengesizlik oluşur. Şayet sıcaklık yükselişi tespit edilmezse çok büyük hasarların oluşması kaçınılmazdır. Dengesiz manyetik alan titreşime sebep olur ki bu da mekanik arızaları tetikler.

Elektrik motor arızalarının % 10'unu rotor arızaları oluşturur. Rotor arızalarını rotor çubuklarında oluşan kırıklar oluşturur. Bu tip arıza hat frekansı sağ ve solunda ikiz yan frekans bantları oluşmasına sebebiyet verir.

İmalat hataları sonucu stator içinde dönen rotor merkezlenmemiş ise dışmerkezlilik arızası ortaya çıkar. Dışmerkezlilik stator ve rotor arasında dengesiz hava boşluğuna sebep olur. Dengesiz hava boşluğu dengesiz manyetik çekimi ortaya çıkarır ki bu da titreşime sebebiyet verir. Elektrik motor arızalarının % 12'sini bu tip arızalar oluşturur.

Oluşan bu arızaların teşhisinde motora ait akım, gerilim, hız, tork, sıcaklık ve titreşim gibi sinyaller izlenmektedir. İzlenen bu sinyaller birçok analiz yöntemi ile işlenerek motor

durumu hakkında bilgi sahibi olunmaktadır. Elektrik motorunun izlenmesinde ve hata teşhisinde en sık kullanılan analiz yöntemleri şunlardır:

- Zaman ve frekans boyutunda analiz,
- Elektromanyetik tork ve akının zaman boyutunda analizi,
- Sıcaklık analizi,
- Motor akım sinyalleri analizi,
- Titreşim ve gürültü analizi,
- Motor tork ve hızının harmonik analizi,
- Model, yapay zekâ ve yapay sinir ağları tabanlı yaklaşımlar.

Motor akımından elde edilen değerleri analiz etme yöntemi asenkron motor arıza teşhisinde çoğunlukla tercih edilen bir yöntemdir. Kırık rotor çubuğu, mekanik, stator sargı arızalarının teşhisinde ve tespitinde asenkron motor akım sinyallerinin yan frekans analizi yöntemi uzun zamandır kullanılmaktadır [8].

Bilindiği üzere simetrik olarak yerleştirilen üç faz stator sargıları üç fazlı simetrik kaynaktan beslenirse; stator sargılarında hızı, besleme frekansına bağlı olarak ileri yönde döner manyetik alan oluşturur. Döner manyetik alan içinde kalan rotor sargılarında oluşan kısa devre akımına bağlı olarak stator döner alanı ile aynı yönde ancak döner alan hızı kaymaya bağlı yeni bir döner manyetik alan oluşur. Ancak rotorda arıza oluşması durumunda rotor döner alanına ters yönde bir döner alan oluşur. Oluşan ters yöndeki bu döner alan stator akımında hat frekansının sağında ve solunda yan frekans bantları oluşturur. Örneğin, $s = 0.01$ için 50 Hz hat frekansının sağında (51 Hz'te) bir yan frekans bandı oluşurken solunda (49 Hz'te) bir yan frekans bandı daha oluşur. Oluşan bu yan frekanslar bantları eşitlik 1.1'de verilmektedir.

$$f_b = (1 \pm 2ks)f_0, \quad k = 1, 2, 3, 4 \quad (1.1)$$

Eşitlikte kullanılan 'f_b' yan frekans bantlarını, 's' kaymayı, 'f₀' kaynak frekansını (50 Hz) ifade etmektedir.

Oluşan yan frekans bantlarından düşük frekanslı olanı;

$(1 - 2ks)f_0$: Rotor çubuk kırığı ile ilgilidir.

Yüksek frekanslı olanı;

$(1 + 2ks)f_0$: Rotor kırık çubuğunun hızda meydana getirdiği salınım ile ilgilidir.

Tez sekiz kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısım 'giriş' kısmıdır ve elektrik motorları arıza çeşitleri ile arıza analiz yöntemlerinden bahsedilmektedir. İkinci kısım 'kaynak

araştırması' kısmıdır ve elektrik motor arızalarının teşhisinde bundan önce kullanılmış yöntemler ile tezde kullanılan yöntem ve öneminden bahsedilmektedir. Üçüncü kısım 'asenكرون motorlar' kısmıdır ve asenكرون motorların tarihi ile yapısından bahsedilmektedir. Dördüncü kısım 'asenكرون motor matematiksel modeli' kısmıdır ve tezimde kullandığım DQ modeli ile bu modele ait hesaplardan bahsedilmektedir. Beşinci kısım 'simulink modeli' kısmıdır ve tez için hazırlanan simülasyondan bahsedilmektedir. Altıncı kısım 'deneysel sonuçlar' kısmıdır ve simülasyonu yapılan motorun yapılan deney sonucu elde edilen verilerinden bahsedilmektedir. Yedinci kısım 'simülasyon ve deney sonuçlarının karşılaştırılması' kısmıdır ve simülasyon ve deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Sekizinci kısım 'sonuçlar ve öneriler' kısmıdır ve tez çalışmasının sonuçları ile bundan sonra yapılabilecek çalışmalardan bahsedilmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Elektrik motor arızalarının teşhisinde son yıllarda sinyallerin işlenmesi ön plana çıkmıştır. Filippetti F., Franceschini G. ve Tassoni C. 1995 yılında yapay sinir ağları yardımıyla elektrik motoru rotor arızalarını anlık olarak teşhis etmeyi başarmışlardır [9]. Kemal V. 2001 yılında yapay sinir ağları yardımıyla rotor akısı yönlendirilmiş vektör denetimini gerçekleştirmiştir [10]. Kalenderli Ö., Bolat S. Ve İsmailoğlu H. 2003 yılında yapay sinir ağları yardımıyla kırılma gerilimlerini tespit etmeyi başarmışlardır [11].

Chang-Eob K., Yong-Bae J., Sang-Baeck Y. ve Dal-Ho I. 1997 yılında sonlu elemanlar yöntemini kullanarak sincap kafesli elektrik motorlarının rotor arızalarını teşhis etmeyi başarmışlardır [12].

Watson J. F. 1999 yılında hat akımını kullanarak üç faz elektrik motorlarının durum izlemesini gerçekleştirmiştir [13]. Bundan sonra yapılan çalışmalarda hat akımının kullanılması önem kazanmıştır.

Saraç S. 1999 yılında titreşim analizini kullanarak elektrik motorlarında arıza teşhisini gerçekleştirmiştir [14]. Soyarslan S. 2001 yılında titreşim işaretlerinin dalga analizini kullanarak arıza tanısını gerçekleştirmiştir [15].

Desforges M. J., Jacob P. J. ve Ball A. D. 2000 yılında Kernel tabanlı olasılık yoğunluk tahmini yöntemini kullanarak elektrik motor arıza tespitini gerçekleştirmişlerdir [16]. Cruz S. M. A. ve Marques Cardoso A. J. 2000 yılında geliştirilmiş park vektör yaklaşımı yöntemini kullanarak üç faz elektrik motorlarında rotor arıza tespitini gerçekleştirmişlerdir [17].

Bellini A., Filippetti F., Franceschini G., Tassoni C. ve Kliman G. B. 2000 yılında elektrik işaret analiz yöntemini kullanarak elektrik motorları kırık rotor çubuk arızalarını teşhis etmeyi başarmışlardır [18]. Yan frekans bandı olan $(1 \pm 2s)f_0$ frekans bantlarında akım dalgalarını esas almışlardır. Burada 'f₀' kaynak frekansını (50 Hz), 's' ise kaymayı ifade etmektedir.

Sales G., Filippti F., Tassoni C., Crellet G. ve Fraanceschini G. 2000 yılında sinir ağı tekniğini kullanarak elektrik motor yükünü izleyerek arıza teşhisini gerçekleştirmişlerdir [19].

Haji M. ve Toliyat H. A. 2001 yılında örnekleri tanıtma ve böylece sistemi eğitime tekniğini kullanarak elektrik motorları rotor arıza teşhisini gerçekleştirmişlerdir [20].

Sutherland P. E. ve Salon S. J. 2002 yılında akım sinyal analizi yöntemiyle üç faz elektrik motorlarının rotor arızalarını teşhis etmeyi başarmıştır [21].

Bu tezde akım sinyal analiz yöntemi kullanılmıştır. Rotor çubuğu kırıldığı zaman stator akımında harmonikler oluşur. Bu harmonikleri yan frekans bandı olarak tanımlarız ve frekans bantları $(1 \pm 2ks)f_0$ şeklindedir. Burada 'f₀' yan frekans bantlarını, 's' kaymayı, 'f₀' kaynak frekansını (50 Hz) ve 'k' 1, 2, 3, 4 sayılarını ifade etmektedir. Kırık rotor çubuklarının stator akımına yansımalarının simülasyonu MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Daha sonra deney düzeneği kurmuş ve simülasyonda elde edilen verilerle kıyas imkânı ortaya çıkmıştır. Yapılan çalışmanın aynı zamanda eğitim amaçlı olarak da kullanılabilirliği bundan önce yapılan benzer çalışmalardan ayrışmasını sağlamıştır.

3. ASENKRON MOTORLAR

3.1. Asenkron Motor Tarihi

Asenkron motorların tarihi 1824 yılına dek uzanır. Aragon 1824 yılında AC motorların çalışma prensibini bulmuştur. 1888 yılında ilk patenti Nicola Tesla almıştır. Aynı yıl George Westinghouse bu patenti satın almıştır. 1890 yılında sanayi tipi asenkron motorların yapımına başlanmıştır. Nikola Tesla AC motor patentini sattığı Westinghouse firmasında sanayi tipi asenkron motor üretimine geçmiştir. İlerleyen yıllarda sanayi tipi asenkron üretiminde büyük gelişmeler olmuştur. Özellikle seri üretimle üretim maliyetleri düşen asenkron motorların ağırlıkları da ilk üretime başladığı 1890 yılından bugüne büyük miktarda düşmüştür [22]. İlk imal edilen motor (5 HP) ağırlığı 450 kilogramın üzerindeyken yakın güçteki tez deney düzeneğinde kullanılan motorun (5.5 HP) ağırlığı olan 25 kilograama kadar düşmüştür.

Teknoloji geliřtikçe asenkron motorun ađırlıđının daha da dűřmesi, teknolojisinin daha da yűkselmesi beklenmektedir.

3.2. Asenkron Motor Tercih Sebebi

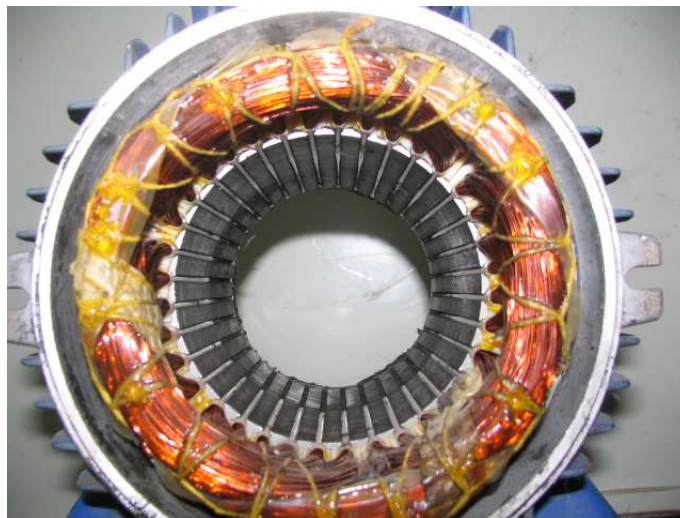
Sanayide en fazla kullanılan elektrik makineleri asenkron motorlardır. Asenkron motorlara çalıřma ilkesi bakımından indűksiyon motorları da denir. Asenkron motorların çalıřmaları sırasında elektrik arkı meydana gelmez. Ayrıca diđer elektrik makinelerine gűre daha ucuz ve sađlam oldukları için bakıma daha az ihtiyaç duyarlar. Asenkron motorlar birim hacim bařına verdikleri gű bakımından diđer motorlara űstűnlűk sađlamaktadırlar. Fabrikalarda konveyűr ve űretim bantlarında, tarımda sulama iřlerinde, tekstil ve kađıt fabrikalarında, torna tezgahlarında, freze tezgahlarında, çamařır makinesi, bulařık makinesi ve bunun gibi evlerimizde veya iřyerlerimizde hemen hemen her alanda kullanılabilir. Bu sebeplerle asenkron motorlar endűstride en çok tercih edilen ve en çok kullanılan motor çeřidi olmuřlardır.

3.3. Asenkron Motorların Yapısı

Asenkron motorlar elektriksel olarak iki ana parçadan meydana gelmektedir: Stator ve rotor.

3.3.1. Stator

Stator ű fazlı motorun hareket etmeyen kısmıdır. ű fazlı dűner manyetik alan sargıları burada bulunur. űzerine oyuklar açılır. Silisli saclar bu oyuklara sıkıca yerleřtirilir. Őekil 3.1'de stator gűrűlmektedir.



Şekil 3.1 Stator

Stator ile rotor arasındaki hava aralığı bırakılır. Motorun boş çalışma akımları bahsi geçen hava aralığı ile doğru orantılıdır. Hava aralığını ne kadar daralırsa boş çalışma akımı da o kadar azalır.

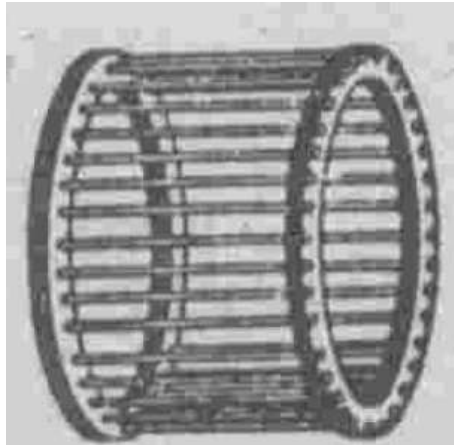
3.3.2. Rotor

Üç fazlı motorların dönen kısmına rotor denir. Üzerine oyuklar açılır. Silisli saclar bu oyuklara sıkıca yerleştirilir.

Sincap kafesli (rotoru kısa devreli) ve sargılı (bilezikli) olmak üzere iki çeşidi vardır.

3.3.2.1. Sincap kafesli (rotoru kısa devreli) rotor

Silisli saclardan paket edilir, sonra üzerindeki kanallara eritilmiş alüminyum dökülür. Dökülen alüminyum çubuklar iki baştan kısa devre edilir. Şekil 3.2’de görüldüğü gibi alüminyum çubuklar kafes şeklinde görülür.



Şekil 3.2 Sincap kafesin içi boş hali

Kısa devre rotorunun ilk döndürme momenti daha küçük ve ilk akım çekişi daha büyüktür. Kısa devre rotorlu motorların kalkınma akımı, anma akımının 8-10 katı büyüklüğünde olmaktadır. Kalkınma momentini küçük tutmak amacı ile rotor çubukları yatık ya da V- basamakları halinde tertiplenirler. Üç fazlı alternatif akımın oluşturduğu döner alan içerisinde hareket eden sincap kafesli rotor Şekil 3.3’te gösterilmiştir.



Şekil 3.3 Sincap kafesli rotor

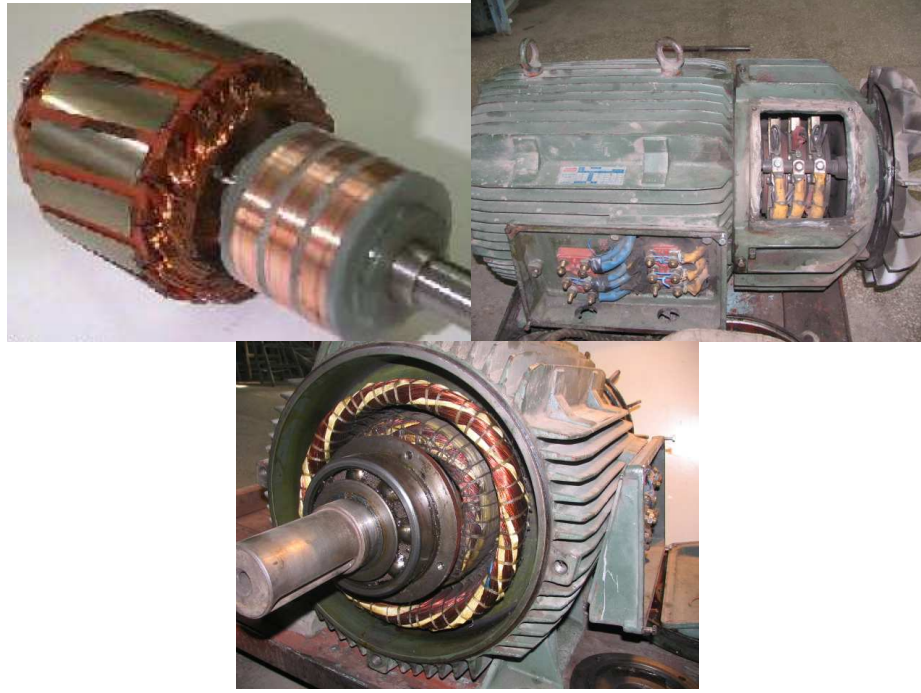
Kafes rotorlu motorlar daha hafif ve ucuzdur. Ayrıca, bakıma gereksinimleri çok azdır. Kafes rotorlu motorların fırçaları olmadığından kıvılcım (ark) oluşturmazlar. Sincap kafesli asenkron motorlardan iş makinelerinde, kaldırma düzenlerinde ve tarım makinelerinde yararlanılmaktadır.

3.3.2.2. Sargılı (bilezikli) rotor

Stator sargılarında olduğu gibi birbirine 120° faz farklı olarak rotor oyuklarına (kanal) alternatif akım sargıları yerleştirilir. Sargılar yıldız veya üçgen bağlandıktan sonra üç uç çıkarılır. Bu üç uç rotor miline sabitlenmiş olan bileziklere tutturulur. Her bilezik, milden ve diğer bileziklerden yalıtılmıştır. Akım, bileziklere basan fırçalar aracılığı ile sargılara uygulanır. Bilezikli rotorlu da denilen bu tip motorlarda devir sayısı, rotor devresindeki dirençlerle kolayca ayarlanabilmektedir. Şekil 3.4.a'da rotor bilezikleri ve Şekil 3.4.b'de sargılı rotor görülmektedir.



Şekil 3.4.a Rotor bilezikleri



Şekil 3.4.b Sargılı rotor bilezikleri ve rotor

Rotoru bilezikli asenkron motorlarda rotor akımı fırçalar üzerinden geçer. Dolayısıyla güç kayıpları oluşur. Ayrıca kömür fırçaları ve bileziklerde aşınma olur. Bu aşınmayı azaltabilmek için 20 KW gücün üstündeki motorlarda fırça tutucuları fırçaları kaldırır. Yüksek devirlerde bilezikler arasına dolan kömür tozları kısa devre problemine sebebiyet verir. Fırça tutucuları fırçaları döner bileziklerden ayırarak kısa devre neticesinde motorun görmesi muhtemel tehlikeleri ortadan kaldırır.

Rotoru bilezikli asenkron motorların kalkış akımları nominal akımlarından çok büyük değildir. Bu sebeple yüksek güç gerektiren öğütücüler, su pompaları, taş kırma makineleri, freze vb. takım tezgâhları gibi makinelerde özellikle tercih edilir. Bilezikli rotorun ilk döndürme momenti çok büyük olduğundan, büyük vinçler gibi çok kuvvetli yükler altında devamlı çalışacak makinelerin kuvvet üreten kesimlerinde bu motorlardan yararlanılmaktadır. Ayrıca devir sayıları ayarlanabildiğinden ayarlı makine tezgâhlarında sık sık kullanılmaktadır.

3.3.3. Motor yan kapakları

Motoru dış etkilere karşı koruma ve rotoru yataklama görevi yapar. Şekil 3.5'te AC motor yan kapağı görülmektedir.



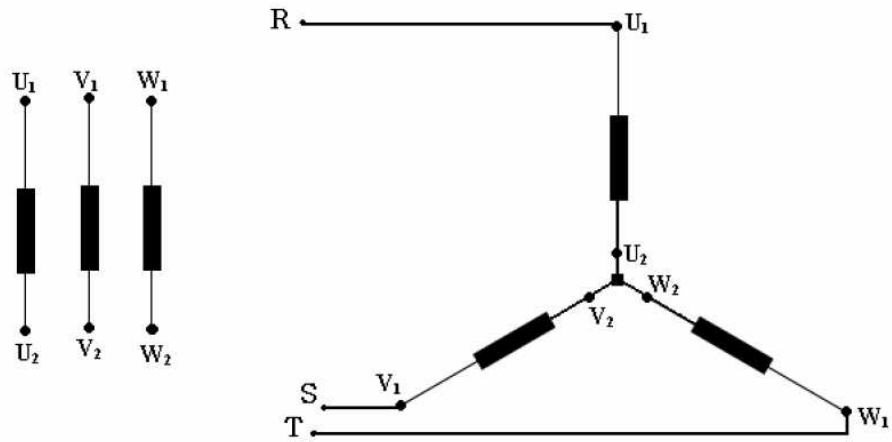
Şekil 3.5 AC motor yan kapağı

3.4. Motor Bağlantı Türleri

Motor bağlantı türleri ikiye ayrılır: Yıldız bağlantı, delta (üçgen) bağlantı.

3.4.1. Yıldız bağlantı

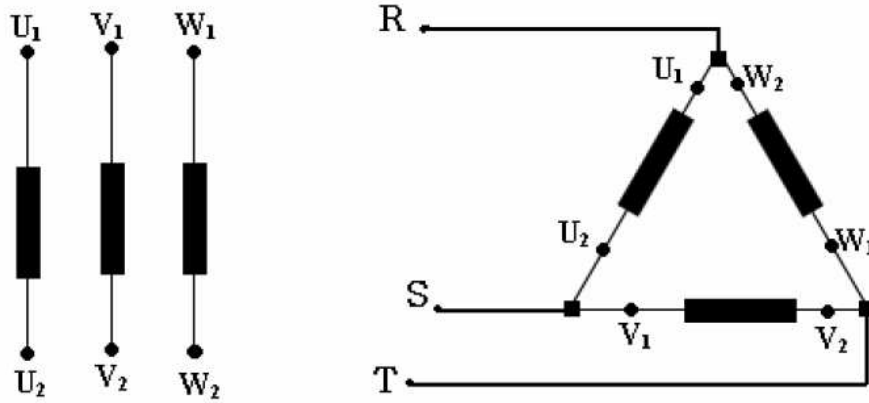
Yıldız bağlı olarak çalıştırılan motorlar kalkınma anında şebekeden daha düşük akım çeker. Devir sayısı aynı olmasına rağmen çalışma gücü üçgen bağlı motora göre zayıftır. AC üç fazlı motorlar doğrudan yıldız çalıştırılabilir. Şekil 3.6'da üç faz bobinleri ve yıldız bağlı bobinler görülmektedir.



Şekil 3.6 Üç faz bobinleri ve yıldız bağlantı

3.4.2. Delta (üçgen) bağlantı

Delta (üçgen) bağlı motorlar kalkınma anında şebekeden yüksek akım çeker. Üçgen bağlı motorların çalışma güçleri yıldız bağlantıya göre daha yüksektir. 4KW'tan büyük güçlü motorların doğrudan üçgen çalıştırılmaları sakıncalıdır. Büyük güçlü motorlar yıldız olarak kalkındırılıp ardından üçgene geçirilir. Şekil 3.7'de üç faz bobinleri ve üçgen bağlı bobinler görülmektedir.

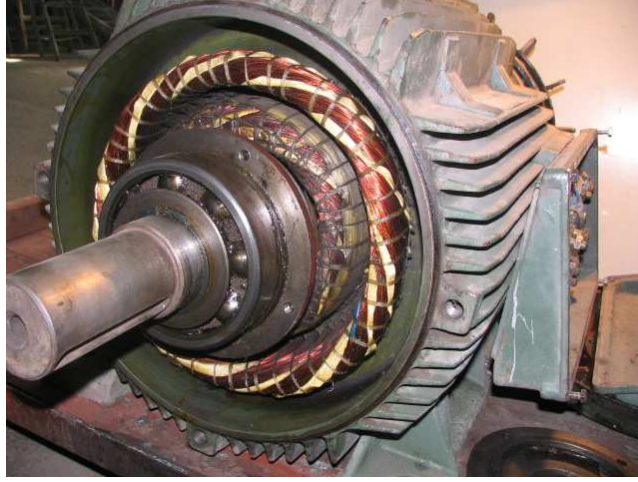


Şekil 3.7 Üç faz bobinleri ve üçgen bağlantı

3.5. Üç Fazlı Sargılarda Döner Alanın Oluşması

Stator sargılarına uygulanan üç fazlı alternatif akım bu sargılarda döner bir manyetik alan meydana getirir. Bu döner alan rotorda indüksiyon akımları meydana getirir. Rotorda oluşan endüksiyon akımları da, rotorda N-S kutuplarını oluşturur. Sonuçta rotorun kutupları döner alan kutuplarından etkilenerek (itme-çekme şeklinde) dönmeye başlar.

Stator ile rotor arasında herhangi bir temas yoktur (Şekil 3.8). Stator dışarıdan döndürülemeyeceği gibi rotor da dışarıdan bir kaynak tarafından beslenmez. Döner alan stator sargılarına uygulanan üç fazlı akımın meydana getirdiği manyetik alan sayesinde oluşur. Stator bu sayede döner daimi mıknatıslık görevini yapar. Statorlar daimi mıknatıslı yapılamayacağı için bu şekilde mıknatıslanma sağlanmaktadır [23].



Şekil 3.8 Asenkron motor

3.6. Asenkron Motorlarda Kayma

Rotor döner alanı, daima stator döner alanının gerisinde hareket eder. Rotorun devir sayısı döner alanın devir sayısından daha azdır. Stator döner alan devir sayısına senkron devir sayısı, rotor döner alan devir sayısına asenkron devir sayısı, aralarındaki devir farkına ise kayma(s) denir. Kayma hesabı aşağıda gösterilmiştir.

$$s = \frac{\omega_e - \omega}{\omega_e} \quad (3.6.1)$$

$$\omega_e = \frac{2\pi n_s}{60} \quad (3.6.2)$$

$$n_s = \frac{120 f_0}{P} \quad (3.6.3)$$

$$f_0 = 50 \text{ Hz} \quad (3.6.4)$$

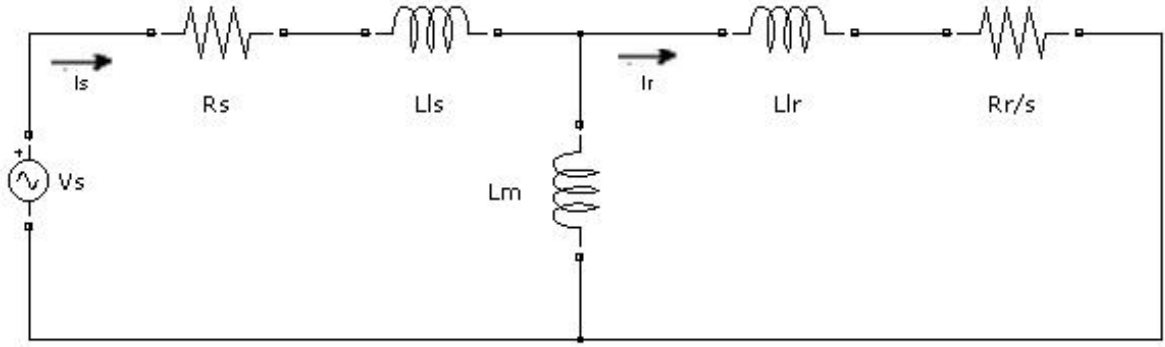
$$\omega_e = \frac{628}{P} \text{ rad/s} \quad (3.6.5)$$

$$s = \frac{\frac{628}{P} - \omega}{\frac{628}{P}} \quad (3.6.6)$$

Burada 's' kaymayı, ' ω_e ' nominal açısal hızı, ' ω ' rotorun açısal hızını, ' n_s ' nominal dakikadaki devir sayısını, ' f_0 ' hat frekansını (50 Hz) ve 'P' kutup sayısını ifade etmektedir.

4. ASENKRON MOTOR MATEMATİKSEL MODELİ

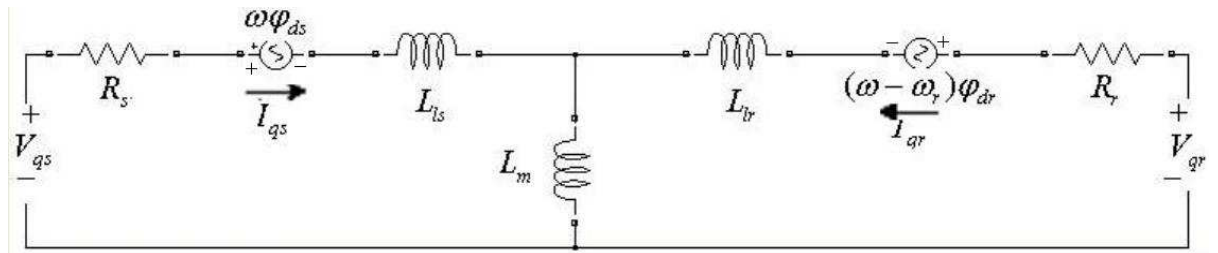
Asenkron motorun eşdeğer devresi Şekil 4.1’de gösterilmiştir [24].



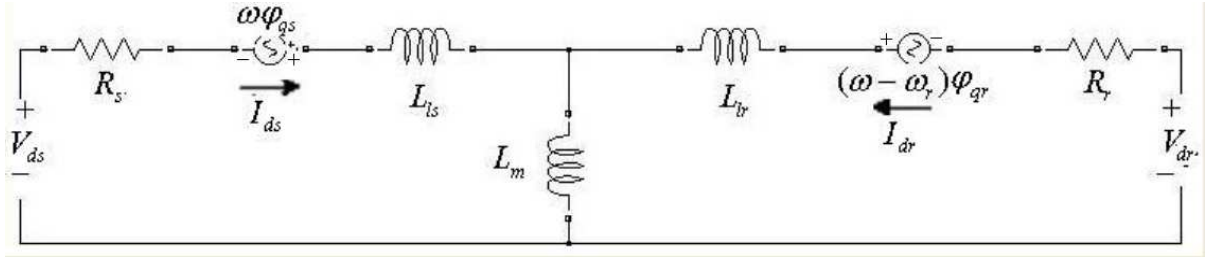
Şekil 4.1 Asenkron motor eşdeğer devresi

Tezde simülasyonun matematiksel model hesaplarında kolaylık sağlaması amacıyla üç faz gerilimlerinin oluşturduğu üçlü parametre yerine iki parametreden oluşan DQ modelinin kullanılması tercih edilmiştir.

DQ modelinde elektrik motorunun elektrik kısmı dördüncü dereceden durum uzayı modeli ile temsil edilirken mekanik kısmı ikinci derece sistem ile temsil edilir. Tüm elektriksel değişken ve parametreler stator ile ilişkilendirilir. Aşağıda elektrik motorunun tüm rotor ve stator denklemleri iki eksenli referans yapıya göre (dq yapısı) hesap edilmiş ve Şekil 4.2 ve Şekil 4.3’te gösterilmiştir [25-26]:



Şekil 4.2 Q eksenli



Şekil 4.3 D eksenini

Asenkron motor dq modeli aşağıdaki gibidir [25-26];

$$\frac{d\varphi_{qs}}{dt} = V_{qs} - R_s I_{qs} - \omega \varphi_{ds} \quad (4.1)$$

Eşitlik 4.1’de; ‘ φ_{qs} ’ stator q eksen akısını, ‘ V_{qs} ’ q eksen stator gerilimini, ‘ R_s ’ stator direncini, ‘ I_{qs} ’ q eksen stator akısını, ‘ ω ’ rotorun açısal hızını ve ‘ φ_{ds} ’ stator d eksen akısını ifade etmektedir.

$$\frac{d\varphi_{ds}}{dt} = V_{ds} - R_s I_{ds} - \omega \varphi_{qs} \quad (4.2)$$

Eşitlik 4.2’de; ‘ φ_{ds} ’ stator d eksen akısını, ‘ V_{ds} ’ d eksen stator gerilimini, ‘ R_s ’ stator direncini, ‘ I_{ds} ’ d eksen stator akısını, ‘ ω ’ rotorun açısal hızını ve ‘ φ_{qs} ’ stator q eksen akısını ifade etmektedir.

$$\frac{d\varphi_{qr}}{dt} = -R_r I_{qr} - (\omega - \omega_r) \varphi_{dr} \quad (4.3)$$

Eşitlik 4.3’te; ‘ φ_{qr} ’ rotor q eksen akısını, ‘ R_r ’ stator direncini, ‘ I_{qr} ’ q eksen rotor akısını, ‘ ω ’ rotorun açısal hızını, ‘ ω_r ’ elektriksel açısal hızı ve ‘ φ_{dr} ’ rotor d eksen akısını ifade etmektedir.

$$\frac{d\varphi_{dr}}{dt} = -R_r I_{dr} + (\omega - \omega_r) \varphi_{qr} \quad (4.4)$$

Eşitlik 4.4’te; ‘ φ_{dr} ’ rotor d eksen akısını, ‘ R_r ’ stator direncini, ‘ I_{dr} ’ d eksen rotor akısını, ‘ ω ’ rotorun açısal hızını, ‘ ω_r ’ elektriksel açısal hızı ve ‘ φ_{qr} ’ rotor q eksen akısını ifade etmektedir.

$$I_{qs} = \varphi_{qs} a_1 - \varphi_{qr} a_2 \quad (4.5)$$

Eşitlik 4.5'te; 'I_{qs}' q eksen stator akımını, 'φ_{qs}' stator q eksen akısını, 'a₁' eşitlik 4.16'yı, 'φ_{qr}' rotor q eksen akısını ve 'a₂' eşitlik 4.17'yi ifade etmektedir.

$$I_{ds} = \varphi_{ds} a_1 - \varphi_{dr} a_2 \quad (4.6)$$

Eşitlik 4.6'da; 'I_{ds}' d eksen stator akımını, 'φ_{ds}' stator d eksen akısını, 'a₁' eşitlik 4.16'yı, 'φ_{dr}' rotor d eksen akısını ve 'a₂' eşitlik 4.17'yi ifade etmektedir.

$$\varphi_{qr} = L_r I_{qr} + L_m I_{qs} \quad (4.7)$$

Eşitlik 4.7'de; 'φ_{qr}' rotor q eksen akısını, 'L_r' rotor indüktansını, 'I_{qr}' q eksen rotor akımını, 'L_m' mıknatıslanma indüktansını ve 'I_{qs}' q eksen stator akımını ifade etmektedir.

$$\varphi_{dr} = L_r I_{dr} + L_m I_{ds} \quad (4.8)$$

Eşitlik 4.8'de; 'φ_{dr}' rotor d eksen akısını, 'L_r' rotor indüktansını, 'I_{dr}' d eksen rotor akımını, 'L_m' mıknatıslanma indüktansını ve 'I_{ds}' d eksen stator akımını ifade etmektedir.

$$\varphi_{qs} = L_s I_{qs} + L_m I_{qr} \quad (4.9)$$

Eşitlik 4.9'da; 'φ_{qs}' stator q eksen akısını, 'L_s' stator indüktansını, 'I_{qs}' q eksen stator akımını, 'L_m' mıknatıslanma indüktansını ve 'I_{qr}' q eksen rotor akımını ifade etmektedir.

$$\varphi_{ds} = L_s I_{ds} + L_m I_{dr} \quad (4.10)$$

Eşitlik 4.10'da; 'φ_{ds}' stator d eksen akısını, 'L_s' stator indüktansını, 'I_{ds}' d eksen stator akımını, 'L_m' mıknatıslanma indüktansını ve 'I_{dr}' d eksen rotor akımını ifade etmektedir.

$$L_s = L_{ls} + L_m \quad (4.11)$$

Eşitlik 4.11'de; 'L_s' stator indüktansını, 'L_{ls}' stator sızıntı indüktansını ve 'L_m' mıknatıslanma indüktansını ifade etmektedir.

$$L_r = L_{lr} + L_m \quad (4.12)$$

Eşitlik 4.12'de; 'L_r' rotor indüktansını, 'L_{lr}' rotor sızıntı indüktansını ve 'L_m' mıknatıslanma indüktansını ifade etmektedir.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\varphi_{ds} I_{qs} - \varphi_{qs} I_{ds}) \quad (4.13)$$

Eşitlik 4.13'te; 'T_e' elektromanyetik torku, 'P' kutup sayısını, 'φ_{ds}' stator d eksen akısını, 'I_{qs}' q eksen stator akımını, 'φ_{qs}' stator q eksen akısını, 'I_{ds}' d eksen stator akımını ifade etmektedir.

$$\omega_r = \omega \frac{P}{2} \quad (4.14)$$

Eşitlik 4.14'te; 'ω_r' elektriksel açısal hızı, 'ω' rotorun açısal hızını ve 'P' kutup sayısını ifade etmektedir.

$$a_0 = L_s L_r - L_m^2 \quad (4.15)$$

Eşitlik 4.15'te; 'L_s' stator indüktansını, 'L_r' rotor indüktansını, 'L_m' mıknatıslanma indüktansını ifade etmektedir ve 'a₀' ise eşitlik 4.16 ve eşitlik 4.17'de kullanılmaktadır.

$$a_1 = \frac{L_r}{a_0} \quad (4.16)$$

Eşitlik 4.16'da; 'L_r' rotor indüktansını, 'a₀' ise eşitlik 4.15'i ifade etmektedir.

$$a_2 = \frac{L_m}{a_0} \quad (4.17)$$

Eşitlik 4.17'de; 'L_m' mıknatıslanma indüktansını, 'a₀' ise eşitlik 4.15'i ifade etmektedir.

4.1. Q-Eksen Model Hesabı

Eşitlik 4.1 kullanılarak aşağıdaki eşitlik q eksenini için yazılabilir;

$$\frac{d\varphi_{qs}}{dt} = V_{qs} - R_s I_{qs}$$

Eşitlik 4.9 kullanılarak 'φ_{qs}' stator q eksen akısı aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\frac{d(L_s I_{qs} + L_m I_{qr})}{dt} = V_{qs} - R_s I_{qs}$$

Dağılım yoluyla formül aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$L_s \frac{d(I_{qs})}{dt} + L_m \frac{d(I_{qr})}{dt} = V_{qs} - R_s I_{qs}$$

Eşitliğin sol tarafı eşitliği değiştirmeyecek şekilde $\left(\frac{L_m}{L_r}\right)$ ve $\left(\frac{L_r}{L_m}\right)$ sayılarıyla çarpılıp genişletilir;

$$\left(\frac{L_m}{L_r}\right)\left(\frac{L_r}{L_m}\right)\left[L_s \frac{d(I_{qs})}{dt} + L_m \frac{d(I_{qr})}{dt}\right] = V_{qs} - R_s I_{qs}$$

$\left(\frac{L_r}{L_m}\right)$ ifadesi dağılma işlemine tabi tutulur;

$$\left(\frac{L_m}{L_r}\right)\left[L_r \frac{L_s}{L_m} \frac{d(I_{qs})}{dt} + L_r \frac{d(I_{qr})}{dt}\right] = V_{qs} - R_s I_{qs}$$

Köşeli parantez içindeki ifadeye $\left[L_m \frac{d(I_{qs})}{dt}\right]$ ifadesi eklenip çıkartılır;

$$\left(\frac{L_m}{L_r}\right)\left[L_r \frac{L_s}{L_m} \frac{d(I_{qs})}{dt} + L_r \frac{d(I_{qr})}{dt} + L_m \frac{d(I_{qs})}{dt} - L_m \frac{d(I_{qs})}{dt}\right] = V_{qs} - R_s I_{qs}$$

Köşeli parantez içi tekrar düzenlenir;

$$\left(\frac{L_m}{L_r}\right)\left[L_r \frac{d(I_{qr})}{dt} + L_m \frac{d(I_{qs})}{dt}\right] + \left[\left(\frac{L_m}{L_r}\right)\left(L_r \frac{L_s}{L_m} - L_m\right) \frac{d(I_{qs})}{dt}\right] = V_{qs} - R_s I_{qs}$$

Eşitlik 4.7 kullanılarak $\left[L_r \frac{d(I_{qr})}{dt} + L_m \frac{d(I_{qs})}{dt}\right]$ ifadesi $\left[\frac{d(\varphi_{qr})}{dt}\right]$ şeklinde yazılabilir;

$$\left(\frac{L_m}{L_r}\right)\left[\frac{d(\varphi_{qr})}{dt}\right] + \left[\left(L_s - \frac{(L_m)^2}{L_r}\right) \frac{d(I_{qs})}{dt}\right] = V_{qs} - R_s I_{qs}$$

İfade tekrar düzenlenirse aşağıdaki gibi yazılır;

$$R_s I_{qs} + \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r}\right) \frac{dI_{qs}}{dt} = V_{qs} - \frac{L_m}{L_r} \frac{d\varphi_{qr}}{dt} \quad (4.1.1)$$

Eşitlik 4.5 aşağıdaki gibi ifade edilmişti;

$$I_{qs} = \varphi_{qs} a_1 - \varphi_{qr} a_2$$

Eşitlik 4.9 kullanılarak aşağıdaki ifade yazılabilir;

$$I_{qs} = (L_s I_{qs} + L_m I_{qr}) a_1 - \varphi_{qr} a_2$$

Dağılıma işlemine tabi tutulur;

$$I_{qs} = a_1 L_s I_{qs} + a_1 L_m I_{qr} - \varphi_{qr} a_2$$

Eşitlik 4.3 kullanılarak ifade aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$I_{qs} = a_1 L_s I_{qs} + a_1 L_m \frac{\left[-\frac{d(\varphi_{qr})}{dt} - (-\omega_r) \varphi_{dr} \right]}{R_r} - \varphi_{qr} a_2$$

Dağılıma işlemine tabi tutulur;

$$I_{qs} = a_1 L_s I_{qs} - a_1 \frac{L_m}{R_r} \frac{d(\varphi_{qr})}{dt} + a_1 \frac{L_m}{R_r} \omega_r \varphi_{dr} - \varphi_{qr} a_2$$

İfade tekrar düzenlenir;

$$a_1 \frac{L_m}{R_r} \frac{d(\varphi_{qr})}{dt} + \varphi_{qr} a_2 = I_{qs} (a_1 L_s - 1) + a_1 \frac{L_m}{R_r} \omega_r \varphi_{dr}$$

Eşitliğin her iki tarafı 'a₂' ye bölünür;

$$\frac{a_1 \frac{L_m}{R_r} \frac{d(\varphi_{qr})}{dt} + \varphi_{qr}}{a_2} = I_{qs} \frac{(a_1 L_s - 1)}{a_2} + \frac{a_1 \frac{L_m}{R_r} \omega_r \varphi_{dr}}{a_2}$$

Eşitlik 4.15, 4.16 ve 4.17 kullanılarak ifade aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\frac{L_r}{R_r} \frac{d(\varphi_{qr})}{dt} + \varphi_{qr} = I_{qs} L_m + \frac{L_r}{R_r} \omega_r \varphi_{dr}$$

Eşitlik 4.14 kullanılarak ifade aşağıdaki gibi yazılır;

$$\frac{L_r}{R_r} \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \varphi_{qr} = I_{qs} L_m + \frac{L_r}{R_r} \left(\omega \frac{P}{2} \right) \varphi_{dr} \quad (4.1.2)$$

4.2. D-Eksen Model Hesabı

Eşitlik 4.2 kullanılarak aşağıdaki eşitlik d eksenini için yazılabilir;

$$\frac{d\varphi_{ds}}{dt} = V_{ds} - R_s I_{ds}$$

Eşitlik 4.10 kullanılarak ' φ_{ds} ' stator d eksen akısı aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\frac{d(L_s I_{ds} + L_m I_{dr})}{dt} = V_{ds} - R_s I_{ds}$$

Dağılma yoluyla formül aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$L_s \frac{d(I_{ds})}{dt} + L_m \frac{d(I_{dr})}{dt} = V_{ds} - R_s I_{ds}$$

Eşitliğin sol tarafı eşitliği değiştirmeyecek şekilde $\left(\frac{L_m}{L_r}\right)$ ve $\left(\frac{L_r}{L_m}\right)$ sayılarıyla çarpılıp genişletilir;

$$\left(\frac{L_m}{L_r}\right) \left(\frac{L_r}{L_m}\right) \left[L_s \frac{d(I_{ds})}{dt} + L_m \frac{d(I_{dr})}{dt} \right] = V_{ds} - R_s I_{ds}$$

$\left(\frac{L_r}{L_m}\right)$ ifadesi dağılma işlemine tabi tutulur;

$$\left(\frac{L_m}{L_r}\right) \left[L_r \frac{L_s}{L_m} \frac{d(I_{ds})}{dt} + L_r \frac{d(I_{dr})}{dt} \right] = V_{ds} - R_s I_{ds}$$

Köşeli parantez içindeki ifadeye $\left[L_m \frac{d(I_{ds})}{dt} \right]$ ifadesi eklenip çıkartılır;

$$\left(\frac{L_m}{L_r}\right) \left[L_r \frac{L_s}{L_m} \frac{d(I_{ds})}{dt} + L_r \frac{d(I_{dr})}{dt} + L_m \frac{d(I_{ds})}{dt} - L_m \frac{d(I_{ds})}{dt} \right] = V_{ds} - R_s I_{ds}$$

Köşeli parantez içi tekrar düzenlenir;

$$\left(\frac{L_m}{L_r}\right) \left[L_r \frac{d(I_{dr})}{dt} + L_m \frac{d(I_{ds})}{dt} \right] + \left[\left(\frac{L_m}{L_r}\right) \left(L_r \frac{L_s}{L_m} - L_m \right) \frac{d(I_{ds})}{dt} \right] = V_{ds} - R_s I_{ds}$$

Eşitlik 4.8 kullanılarak $\left[L_r \frac{d(I_{dr})}{dt} + L_m \frac{d(I_{ds})}{dt} \right]$ ifadesi $\left[\frac{d(\varphi_{dr})}{dt} \right]$ şeklinde yazılabilir;

$$\left(\frac{L_m}{L_r}\right)\left[\frac{d(\varphi_{dr})}{dt}\right] + \left[\left(L_s - \frac{(L_m)^2}{L_r}\right)\frac{d(I_{ds})}{dt}\right] = V_{ds} - R_s I_{ds}$$

İfade tekrar düzenlenirse aşağıdaki gibi yazılır;

$$R_s I_{ds} + \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r}\right)\frac{dI_{ds}}{dt} = V_{ds} - \frac{L_m}{L_r}\frac{d\varphi_{dr}}{dt} \quad (4.2.1)$$

Eşitlik 4.6 aşağıdaki gibi ifade edilmişti;

$$I_{ds} = \varphi_{ds} a_1 - \varphi_{dr} a_2$$

Eşitlik 4.10 kullanılarak aşağıdaki ifade yazılabilir;

$$I_{ds} = (L_s I_{ds} + L_m I_{dr}) a_1 - \varphi_{dr} a_2$$

Dağılıma işlemine tabi tutulur;

$$I_{ds} = a_1 L_s I_{ds} + a_1 L_m I_{dr} - \varphi_{dr} a_2$$

Eşitlik 4.4 kullanılarak ifade aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$I_{ds} = a_1 L_s I_{ds} + a_1 L_m \frac{\left[-\frac{d(\varphi_{dr})}{dt} + (-\omega_r)\varphi_{qr}\right]}{R_r} - \varphi_{dr} a_2$$

Dağılıma işlemine tabi tutulur;

$$I_{ds} = a_1 L_s I_{ds} - a_1 \frac{L_m}{R_r} \frac{d(\varphi_{dr})}{dt} - a_1 \frac{L_m}{R_r} \omega_r \varphi_{qr} - \varphi_{dr} a_2$$

İfade tekrar düzenlenir;

$$a_1 \frac{L_m}{R_r} \frac{d(\varphi_{dr})}{dt} + \varphi_{dr} a_2 = I_{ds} (a_1 L_s - 1) - a_1 \frac{L_m}{R_r} \omega_r \varphi_{qr}$$

Eşitliğin her iki tarafı 'a₂' ye bölünür;

$$\frac{a_1 \frac{L_m}{R_r} \frac{d(\varphi_{dr})}{dt} + \varphi_{dr}}{a_2} = I_{ds} \frac{(a_1 L_s - 1)}{a_2} - \frac{a_1 \frac{L_m}{R_r} \omega_r \varphi_{qr}}{a_2}$$

Eşitlik 4.15, 4.16 ve 4.17 kullanılarak ifade aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\frac{L_r}{R_r} \frac{d(\varphi_{dr})}{dt} + \varphi_{dr} = I_{ds} L_m - \frac{L_r}{R_r} \omega_r \varphi_{qr}$$

Eşitlik 4.14 kullanılarak ifade aşağıdaki gibi yazılır;

$$\frac{L_r}{R_r} \frac{d\varphi_{dr}}{dt} + \varphi_{dr} = I_{ds} L_m - \frac{L_r}{R_r} \left(\omega \frac{P}{2}\right) \varphi_{qr} \quad (4.2.2)$$

4.3. Tork Hesabı

Eşitlik 4.13 aşağıdaki gibidir;

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\varphi_{ds} I_{qs} - \varphi_{qs} I_{ds})$$

Eşitlik 4.9 ve 4.10 kullanılarak ifade aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$T_e = 3 \frac{P}{4} [(L_s I_{ds} + L_m I_{dr}) I_{qs} - (L_s I_{qs} + L_m I_{qr}) I_{ds}]$$

Eşitliğin sağ tarafı eşitliği değiştirmeyecek şekilde $\left(\frac{L_m}{L_r}\right)$ ve $\left(\frac{L_r}{L_m}\right)$ sayılarıyla çarpılıp genişletilir;

$$T_e = 3 \frac{P}{4} \left[\frac{L_m}{L_r} \frac{L_r}{L_m} (L_s I_{ds} + L_m I_{dr}) I_{qs} - \frac{L_m}{L_r} \frac{L_r}{L_m} (L_s I_{qs} + L_m I_{qr}) I_{ds} \right]$$

$\left(\frac{L_r}{L_m}\right)$ ifadesi dağılma işlemine tabi tutulur;

$$T_e = 3 \frac{P}{4} \frac{L_m}{L_r} \left[\left(L_s \frac{L_r}{L_m} I_{ds} + L_r I_{dr} \right) I_{qs} - \left(L_s \frac{L_r}{L_m} I_{qs} + L_r I_{qr} \right) I_{ds} \right]$$

Birbirini götürülen ifadelerden sonra ifade tekrar düzenlenir;

$$T_e = 3 \frac{P}{4} \frac{L_m}{L_r} [(L_r I_{dr}) I_{qs} - (L_r I_{qr}) I_{ds}]$$

Eşitliğin içine $[(L_m I_{ds} - L_m I_{ds})]$ ve $[(L_m I_{qs} - L_m I_{qs})]$ eklenirse ifadeyi değiştirmez;

$$T_e = 3 \frac{P}{4} \frac{L_m}{L_r} [(L_r I_{dr} + L_m I_{ds} - L_m I_{ds}) I_{qs} - (L_r I_{qr} + L_m I_{qs} - L_m I_{qs}) I_{ds}]$$

Birbirini götüren ifadelerden sonra ifade tekrar düzenlenir;

$$T_e = 3 \frac{P L_m}{4 L_r} \left[(L_r I_{dr} + L_m I_{ds}) I_{qs} - (L_r I_{qr} + L_m I_{qs}) I_{ds} \right]$$

Eşitlik 4.7 ve 4.8 kullanılarak ifade aşağıdaki gibi yazılır;

$$T_e = \frac{3 P L_m}{2 L_r} (\varphi_{dr} I_{qs} - \varphi_{qr} I_{ds}) \quad (4.3.1)$$

4.4. Kayma Hesabı

Eşitlik 3.6.6'da hesaplandığı şekliyle ' $s = \frac{628 - \omega}{\frac{628}{P}}$ ', olarak ifade edilir.

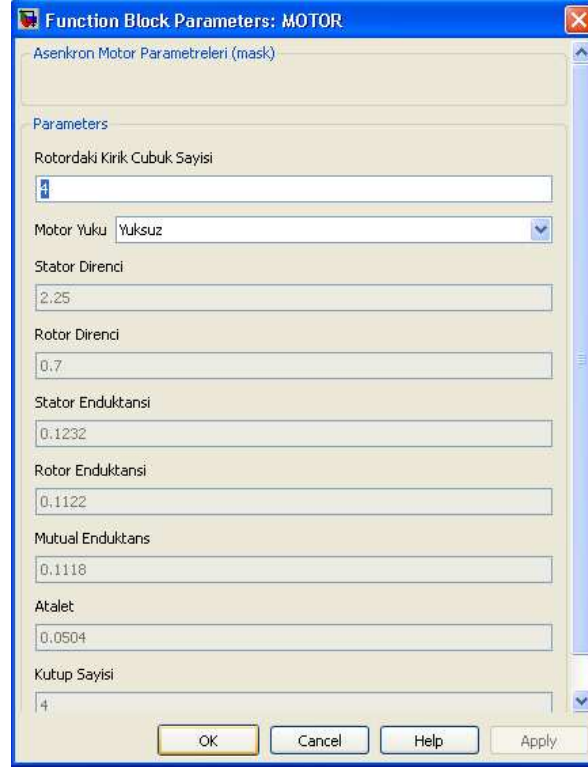
5. SİMULINK MODELİ

Dördüncü kısımda matematiksel hesapları yapılan asenkron motorun modellemesi sırasıyla şu şekilde gerçekleştirilmiştir.

- 3.6.6, 4.1.1, 4.1.2, 4.2.1, 4.2.2 ve 4.3.1 eşitlikleri kullanılarak 'Motor Parametre Hesapları' bloğu oluşturulur. Bu bloğun girdileri d eksen stator gerilimi (V_{ds}), q eksen stator gerilimi (V_{qs}), ve 0 eksen gerilimi (V_0) olmakla birlikte çıktıları ise d eksen stator akımı (I_{ds}), q eksen stator akımı (I_{qs}), 0 eksen akımı (I_0), elektromanyetik tork (T_e) ve 'Yüzde Kayma s'dir.
- 'Motor Parametre Hesapları' bloğu dq yapısında olduğu için giriş sinyallerinin iki parametrelili olması gerekir. Bu yüzden üç faz parametreler 'Motor Parametre Hesapları' bloğuna girmeden önce 'abc-dq0 Dönüşüm' bloğuna girip üç faz parametreden dq yapısı olan ikili parametreye dönüştürülür. Çıktıktan sonra ise 'dq0-abc Dönüşüm' bloğu aracılığıyla ikili dq parametreden tekrar üç faz parametreye dönüştürülür.
- 'Motor Parametre Hesapları' bloğunun hesapladığı 'Yüzde Kayma s' parametresi 'Rotor Çubuk Kırığı Etkisi' bloğuna girdi olacak şekilde bağlanır. 'Rotor Çubuk Kırığı Etkisi' bloğu 'Yüzde Kayma s' parametresine ve kullanıcıdan alınan rotor çubuk kırık sayısı bilgisine göre harmonik sinyallerini oluşturur.
- 'abc-dq0 Dönüşüm' bloğunun girdileri A faz gerilimi (V_a), B faz gerilimi (V_b), C faz gerilimi (V_c), sinüs sinyal referansı ve kosinüs sinyal referansıdır. Çıktıları ise d eksen stator gerilimi (V_{ds}), q eksen stator gerilimi (V_{qs}) ve 0 eksen gerilimidir (V_0).

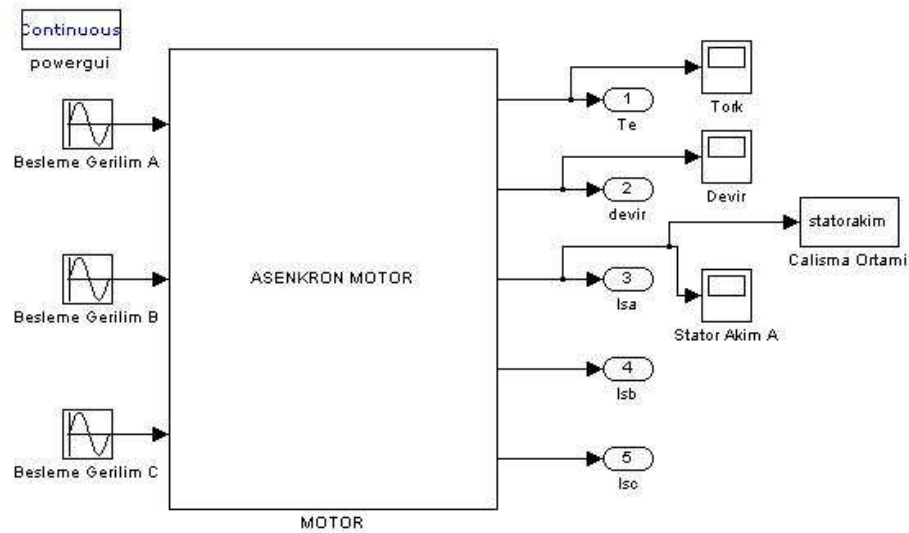
- ‘dq0-abc Dönüşüm’ bloğunun girdileri d eksen stator akımı (I_{ds}), q eksen stator akımı (I_{qs}), 0 eksen akımı (I_0), sinüs sinyal referansı ve kosinüs sinyal referansıdır. Çıktıları ise A faz akımı (I_a), B faz akımı (I_b) ve C faz akımıdır (I_c).
- ‘Rotor Çubuk Kırığı Etkisi’ bloğunun girdisi ‘Yüzde Kayma s’ parametresidir. Çıktıları ise A faz harmonik akımı (I_{sa2}), B faz harmonik akımı (I_{sb2}) ve C faz harmonik akımıdır (I_{sc2}).
- Besleme gerilimleri olan A faz gerilimi (V_a), B faz gerilimi (V_b) ve C faz gerilimi (V_c) önce ‘abc-dq0 Dönüşüm’ bloğuna girerek üç faz parametreden iki parametrelilik yapıya dönüşür. ‘abc-dq0 Dönüşüm’ bloğundan d eksen stator gerilimi (V_{ds}), q eksen stator gerilimi (V_{qs}) ve 0 eksen gerilimi (V_0) olarak çıkan çıktılar ‘Motor Parametre Hesapları’ bloğuna girer. ‘Motor Parametre Hesapları’ bloğunda işlenen girdilerden d eksen stator akımı (I_{ds}), q eksen stator akımı (I_{qs}), 0 eksen akımı (I_0), elektromanyetik tork (T_e) ve ‘Yüzde Kayma s’ olarak çıktıları elde edilir. Daha sonra ‘dq0-abc Dönüşüm’ bloğuna girdi olarak giren d eksen stator akımı (I_{ds}), q eksen stator akımı (I_{qs}), 0 eksen akımı (I_0), sinüs sinyal referansı ve kosinüs sinyal referansı çıkışta A faz akımına (I_a), B faz akımına (I_b) ve C faz akımına (I_c) dönüştürülür. Daha sonra A faz akımı (I_a), B faz akımı (I_b) ve C faz akımı (I_c); ‘Rotor Çubuk Kırığı Etkisi’ bloğundan elde edilen A faz harmonik akımı (I_{sa2}), B faz harmonik akımı (I_{sb2}) ve C faz harmonik akımı (I_{sc2}) ile birleşir. Bunun sonucu olarak stator A, B ve C faz akımları elde edilmiş olur.

Simüle edilen motor 5.5 KW gücündedir ve bu motora ait bilgiler kullanılarak simülasyon gerçekleştirilmiştir. ‘Asenkron Motor’ bloğuna çift tıklandığında Şekil 5.1’de görülen asenkron motor parametreleri ekrana gelir. Buradan görüleceği üzere kullanıcı rotordaki kırık çubuk sayısını ve motorun yükleme seviyesini belirleyebilir. Kullanıcı tarafından değiştirilemeyen diğer parametreler 5,5 KW elektrik motoru için standart değerlerdir.



Şekil 5.1 Asenkron motor parametre bloğu

Şekil 5.2’de matlab simulink ortamında simülasyonu gerçekleştirilmiş olan asenkron motorun giriş ve çıkış parametreleri gösterilmiştir.



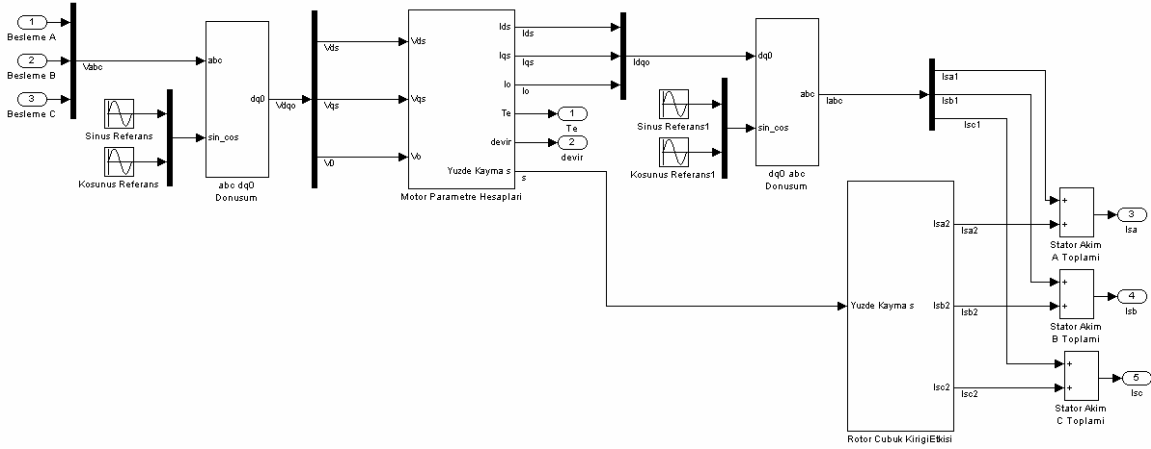
Şekil 5.2 Asenkron motor ile giriş ve çıkış parametreleri

Şekil 5.2’de görüldüğü gibi ‘Asenkron Motor’ bloğuna girdi olarak üç faz gerilim olan A faz gerilimi (V_a), B faz gerilimi (V_b) ve C faz gerilimi (V_c) verilmiştir. Asenkron motor bloğundan çıktı olarak tork, devir ve üç faz stator akım değerleri alınmıştır. Bu çıktılarından tork, devir ve stator akım A çıktıları ekrana verilerek değişim değerleri izlenmiştir. Çıktılardan ‘Stator Akım A’ çıktısı çalışma ortamına aktarılmış ve çalışma ortamından alınan verilere göre stator akımı izlenmiştir.

5.1. Asenkron Motor Bloğu

Kayma değerine (s), kırık rotor çubuk sayısına (b) ve yüke (T) bağlı olarak stator akımına yan frekans bantları bindirilmiştir. Şekil 5.3’te ‘Asenkron Motor’ bloğunun detayı gösterilmiştir. Burada ‘Motor Parametre Hesapları’ bloğundan alınan ‘Yüzde Kayma s ’ bilgisi kullanılarak ‘Rotor Çubuk Kırığı Etkisi’ bloğunda hesaplanan yan frekans bantlarının stator akımına bindiriliş şekli görülmektedir. Matematiksel hesaplamalar ‘Motor Parametre Hesapları’ bloğunda gerçekleştirildiği için hesaplamalara ait bilgiler ‘Motor Parametre Hesapları’ bloğu açıklanırken verilecektir.

Besleme gerilimleri olan A faz gerilimi (V_a), B faz gerilimi (V_b) ve C faz gerilimi (V_c) önce ‘abc-dq0 Dönüşüm’ bloğuna girerek üç faz parametreden iki parametrelilik yapıya dönüşür. ‘abc-dq0 Dönüşüm’ bloğundan d eksen stator gerilimi (V_{ds}), q eksen stator gerilimi (V_{qs}) ve 0 eksen gerilimi (V_0) olarak çıkan çıktılar ‘Motor Parametre Hesapları’ bloğuna girer. ‘Motor Parametre Hesapları’ bloğunda işlenen girdilerden d eksen stator akımı (I_{ds}), q eksen stator akımı (I_{qs}), 0 eksen akımı (I_0), elektromanyetik tork (T_e) ve ‘Yüzde Kayma s ’ olarak çıktıları elde edilir. Daha sonra ‘dq0-abc Dönüşüm’ bloğuna girdi olarak giren d eksen stator akımı (I_{ds}), q eksen stator akımı (I_{qs}), 0 eksen akımı (I_0), sinüs sinyal referansı ve kosinüs sinyal referansı çıkışta A faz akımına (I_a), B faz akımına (I_b) ve C faz akımına (I_c) dönüştürülür. Daha sonra A faz akımı (I_a), B faz akımı (I_b) ve C faz akımı (I_c); ‘Rotor Çubuk Kırığı Etkisi’ bloğundan elde edilen A faz harmonik akımı (I_{sa2}), B faz harmonik akımı (I_{sb2}) ve C faz harmonik akımı (I_{sc2}) ile birleşir. Bunun sonucu olarak stator A, B ve C faz akımları elde edilmiş olur. Tüm bloklar ileri bölümlerde detaylı olarak açıklanmıştır.



Şekil 5.3 Asenkron motor bloğunun detayı

5.2. abc-dq0 Dönüşüm Bloğu

'abc-dq0 Dönüşüm' bloğunun girdileri A faz gerilimi (V_a), B faz gerilimi (V_b), C faz gerilimi (V_c), sinüs sinyal referansı ve kosinüs sinyal referansıdır. Çıktıları ise d eksen stator gerilimi (V_{ds}), q eksen stator gerilimi (V_{qs}) ve 0 eksen gerilimidir (V_0).

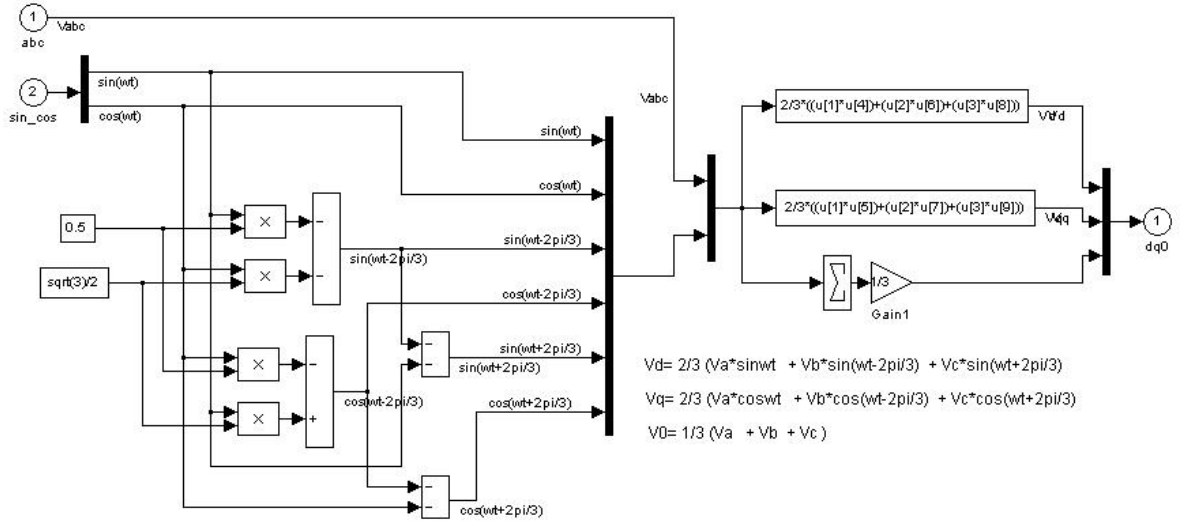
Tezimde elektrik motor modelinde DQ modeli kullanıldığı için ve dolayısıyla üç faz besleme gerilimleri 'Motor Parametre Hesapları' bloğunda iki parametre olarak hesap edildiği için üç faz parametreden ikili dq parametreye dönüştürmek gerekmektedir. 'abc-dq0 Dönüşüm' bloğu bu dönüşümü gerçekleştirmektedir. Blok aşağıda belirtilen hesaplamaları kullanmaktadır ve bloğun içeriği Şekil 5.4'te gösterilmiştir. Bu blok MATLAB Simulink ortamında hazır blok olarak bulunmaktadır.

$$V_{ds} = \frac{2}{3} [V_a \sin(\omega t) + V_b \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + V_c \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3})] \quad (5.2.1)$$

$$V_{qs} = \frac{2}{3} [V_a \cos(\omega t) + V_b \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + V_c \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3})] \quad (5.2.2)$$

$$V_0 = \frac{1}{3} [V_a + V_b + V_c] \quad (5.2.3)$$

Eşitlik 5.2.1, 5.2.2 ve 5.2.3'te ' V_a ' besleme a faz gerilimini, ' V_b ' besleme b faz gerilimini, ' V_c ' besleme c faz gerilimini, ' V_{ds} ' d eksen stator gerilimini, ' V_{qs} ' q eksen stator gerilimini, ' V_0 ' 0 eksen gerilimini ve ' ω ' rotorun açısal hızını ifade etmektedir.



Şekil 5.4 abc-dq0 Dönüşüm bloğu

5.3. Motor Parametre Hesapları Bloğu

3.6.6, 4.1.1, 4.1.2, 4.2.1, 4.2.2 ve 4.3.1 eşitlikleri kullanılarak 'Motor Parametre Hesapları' bloğu oluşturulur. Bu bloğun girdileri d eksen stator gerilimi (V_{ds}), q eksen stator gerilimi (V_{qs}), ve 0 eksen gerilimi (V_0) olmakla birlikte çıktıları ise d eksen stator akımı (I_{ds}), q eksen stator akımı (I_{qs}), 0 eksen akımı (I_0), elektromanyetik tork (T_e) ve 'Yüzde Kayma s'dir.

Tork ve devir çıktıları bu blokta hesap edilir. Ayrıca dq yapısında 'Yüzde Kayma s' parametre hesabı da bu blokta yapılır ve bu veri 'Rotor Çubuk Kırığı Etkisi' bloğunda kullanılmak üzere ilgili bloğa iletilir. Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da 'Motor Parametre Hesapları' bloğunun içeriği gösterilmiştir. Şekil 5.5'te 'Yüzde Kayma s' parametresinin otomatik hesap edildiği görülürken, Şekil 5.6'da 'Yüzde Kayma s' parametresinin manuel hesap edildiği görülmektedir.

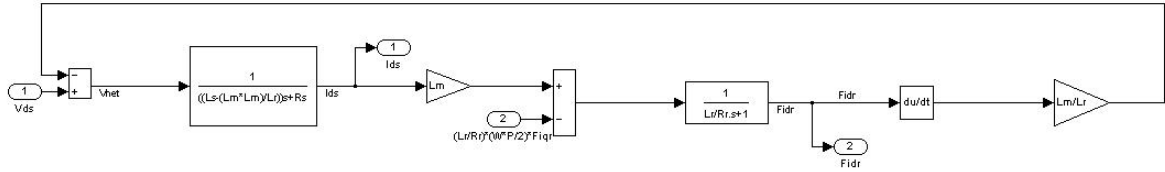
Manuel parametre hesabından kasıt kullanıcı tarafından girilen 'Motor Yük Bilgisi'ne göre belirlenmiş 'Yüzde Kayma s' parametrelerinin 'Kayma Parametresi' bloğu tarafından verilmesidir.

Otomatik parametre hesabından kasıt 'Motor Parametre Hesapları' bloğunda hesap edilen rotorun açılma hızına (ω) göre 'Yüzde Kayma s Hesabı' bloğu tarafından 'Yüzde Kayma s' parametrelerinin belirlenmesidir.

5.3.1. d bloğu

D-eksen model hesabında hesap ettiğimiz 4.2.1 ve 4.2.2 eşitlikleri kullanılarak 'd Blok' oluşturulmuştur ve içeriği Şekil 5.7'de gösterilmiştir. Girdileri V_{ds} ve $\frac{L_r}{R_r}(\omega \frac{P}{2})\varphi_{qr}$ 'dir.

Çıktıları I_{ds} ve φ_{dr} 'dir.

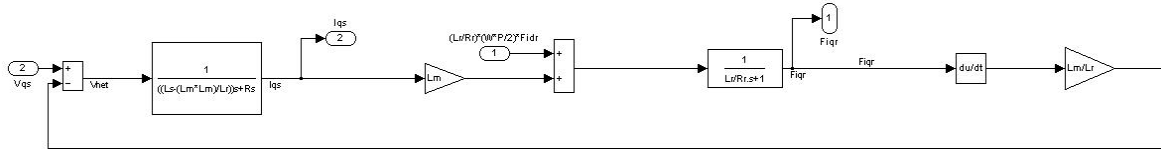


Şekil 5.7 d bloğu

5.3.2. q bloğu

Q-eksen model hesabında hesap ettiğimiz 4.1.1 ve 4.1.2 eşitlikleri kullanılarak 'q Blok' oluşturulmuştur ve içeriği Şekil 5.8'de gösterilmiştir. Girdileri V_{qs} ve $\frac{L_r}{R_r}(\omega \frac{P}{2})\varphi_{dr}$ 'dir.

Çıktıları I_{qs} ve φ_{qr} 'dir.

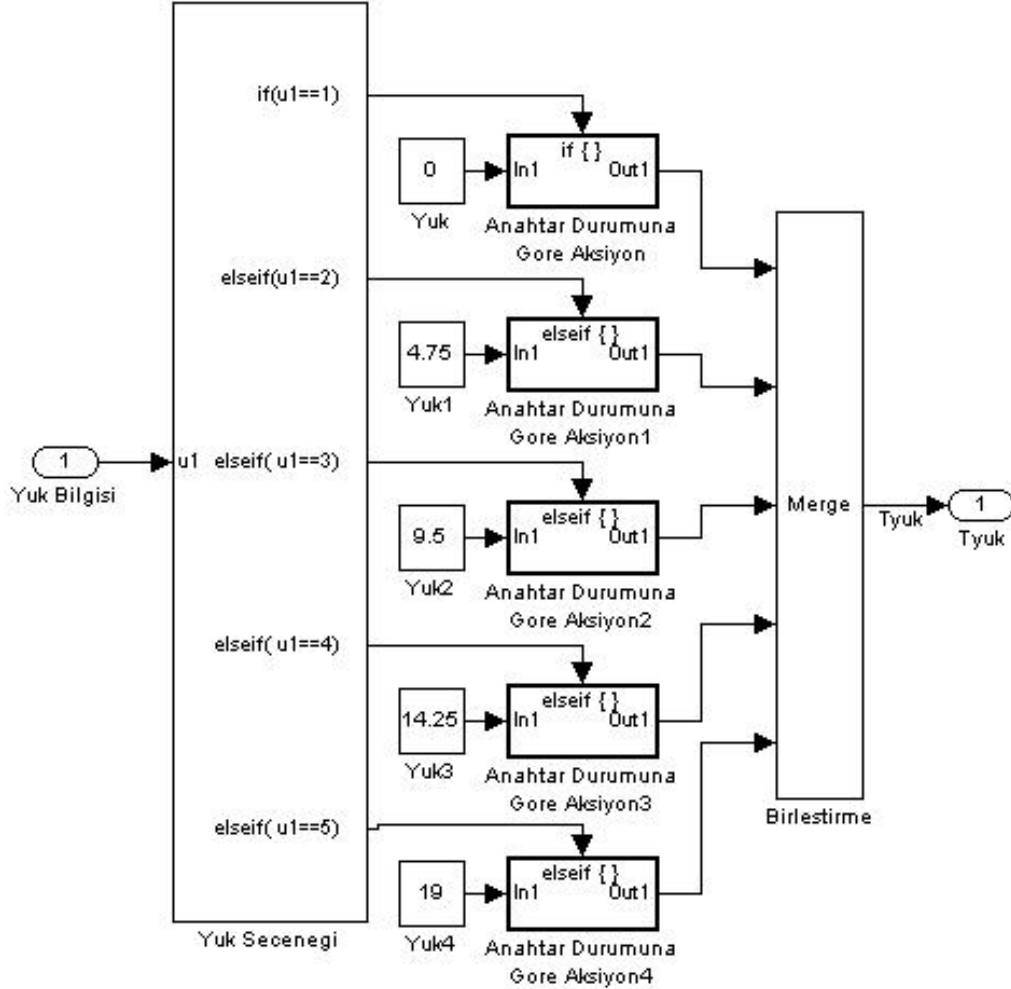


Şekil 5.8 q bloğu

5.3.3. Yük seçeneği bloğu

Kullanıcı tarafından girilen yük bilgisine göre sisteme uygun olan tork bilgisini yükler. Simülasyonda 'Asenkron Motor' bloğuna çift tıklandığında yükleme seviyesi kullanıcı tarafından girilir. Blok içeriği Şekil 5.9'da görülmektedir. Kullanıcı 'yüksüz' seçeneğini seçerse sistemde '1' numara aktifleşir ve sıfır N.m yük sisteme verilir. Kullanıcı 'çeyrek yük' seçeneğini seçerse sistemde '2' numara aktifleşir ve 4,75 N.m yük sisteme verilir. Kullanıcı 'yarım yük' seçeneğini seçerse sistemde '3' numara aktifleşir ve 9,5 N.m yük sisteme verilir. Kullanıcı 'üç çeyrek yük' seçeneğini seçerse sistemde '4' numara aktifleşir ve 14.25 N.m yük

sisteme verilir. Kullanıcı ‘tam yük’ seçeneğini seçerse sistemde ‘5’ numara aktifleşir ve 5,5 KW motorun etiket değeri olan 19 N.m yük sisteme verilir.



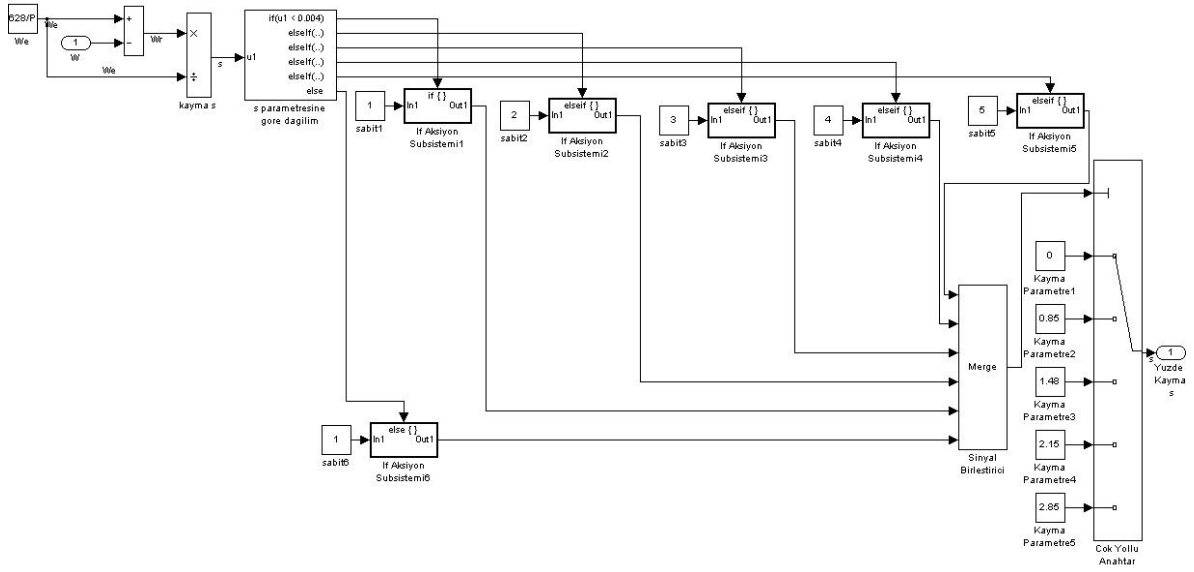
Şekil 5.9 Yük seçeneği bloğu

5.3.4. Kayma parametresi blokları

Daha önce de belirttiğim gibi iki farklı şekilde (otomatik ve manuel) dizayn ettiğim projede parametreler kullanıcı tarafından girilmek isteniyorsa ‘Motor Yük Bilgisi’ne göre belirlenmiş ‘Yüzde Kayma s’ parametreleri ‘Kayma Parametresi’ bloğu tarafından verilir. Parametreler otomatik olarak hesaplatılmak isteniyorsa ‘Motor Parametre Hesapları’ bloğu içerisindeki ‘Yüzde Kayma s Hesabı’ bloğu tarafından eşitlik 3.6.6’ya göre hesaplanan ‘Yüzde Kayma s’ bilgisi sisteme verilir.

5.3.4.1. Yüzde kayma s hesabı bloğu (otomatik)

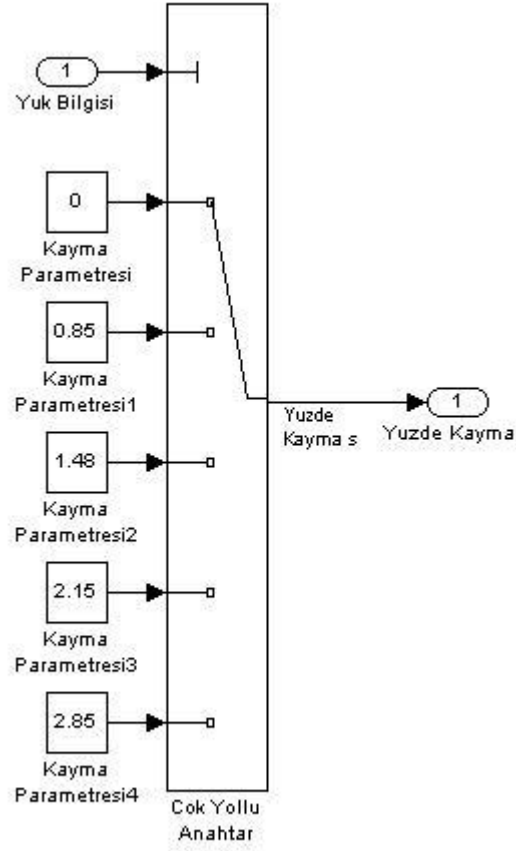
‘Motor Parametre Hesapları’ bloğu içerisindeki ‘Yüzde Kayma s Hesabı’ bloğu tarafından eşitlik 3.6.6’ya göre ‘Yüzde Kayma s’ bilgisi hesaplanır. Blok içeriği Şekil 5.10’da görülmektedir. Bloğun girdisi rotorun açısız hızıdır (ω). Bloğun çıktısı ‘Yüzde Kayma s’ parametresidir.



Şekil 5.10 Yüzde kayma s hesabı bloğu (otomatik)

5.3.4.2. Kayma parametresi bloğu (manuel)

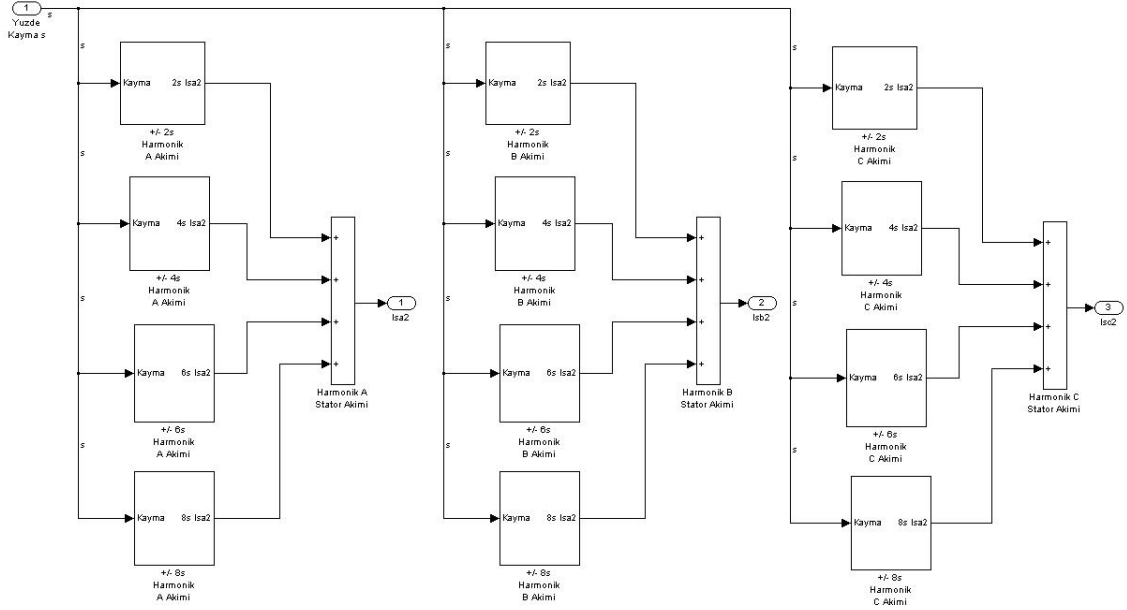
Kullanıcı tarafından girilen ‘Motor Yük Bilgisi’ne göre belirlenmiş ‘Yüzde Kayma s’ parametreleri ‘Kayma Parametresi’ bloğu tarafından sisteme verilir. Blok Şekil 5.11’de görülmektedir. Kullanıcı ‘yüksüz’ seçeneğini seçerse sistemde birinci seçenek aktifleşir ve sıfır kayma değeri sisteme verilir. Kullanıcı ‘çeyrek yük’ seçeneğini seçerse sistemde ikinci seçenek aktifleşir ve 0,85 kayma değeri sisteme verilir. Kullanıcı ‘yarım yük’ seçeneğini seçerse sistemde üçüncü seçenek aktifleşir ve 1,48 kayma değeri sisteme verilir. Kullanıcı ‘üç çeyrek yük’ seçeneğini seçerse sistemde dördüncü seçenek aktifleşir ve 2,15 kayma değeri sisteme verilir. Kullanıcı ‘tam yük’ seçeneğini sistemde beşinci seçenek aktifleşir ve 2,85 kayma değeri sisteme verilir. Kayma değerleri simülasyon çalıştırılıp simülasyondan alınmıştır.



Şekil 5.11 Kayma parametresi bloğu (manuel)

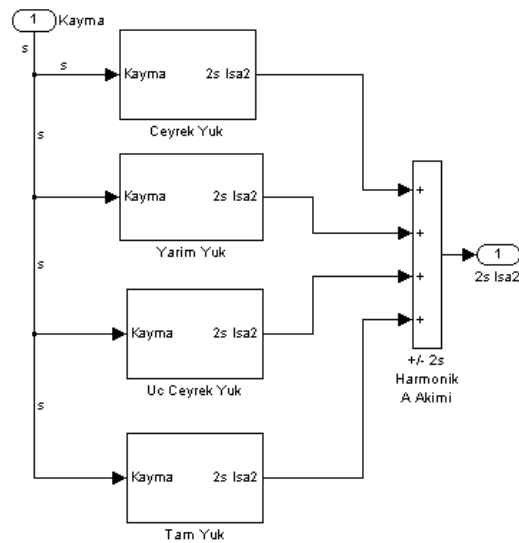
5.4. Rotor Çubuk Kırığı Etkisi Bloğu

Kayma değerine (s), kırık rotor çubuk sayısına (b) ve yüke (T) bağlı olarak stator akımına bindirilecek yan frekans bantları bu blokta hesaplanır. Şekil 5.12’te ‘Rotor Çubuk Kırığı Etkisi’ bloğunun detayları gösterilmiştir.



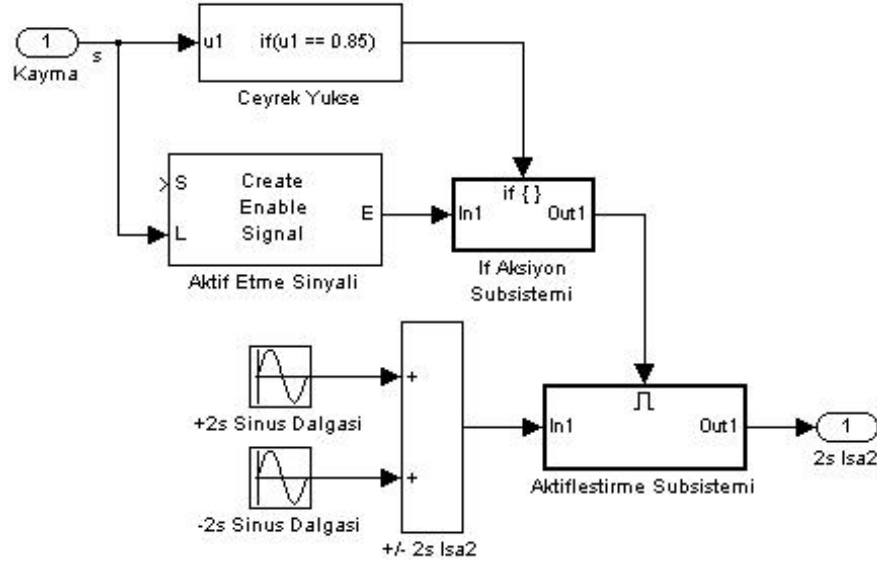
Şekil 5.12 Rotor çubuk kırığı etkisi bloğu

Şekil 5.12’de gösterilen rotor çubuk kırığı etkisi bloğunda 12 kutucuk bulunmaktadır. Dörtlü gruplar ve üç set halinde dizayn edilmiş blokta her dörtlü grup soldan sağa A, B ve C faz harmonik akımlarını temsil etmektedir. Dörtlü gruplarda ise yukarıdan aşağıya +/- 2s, +/- 4s, +/- 6s ve +/- 8s harmonik frekans bantları temsil edilmektedir. Sistemden gelen ‘Yüzde Kayma s’ parametresine göre +/- 2s, +/- 4s, +/- 6s ve +/- 8s harmonik frekans bantları hesap edilir. ‘+/- 2s harmonik A’ akımı bloğunun detayı Şekil 5.13’te gösterilmiştir.



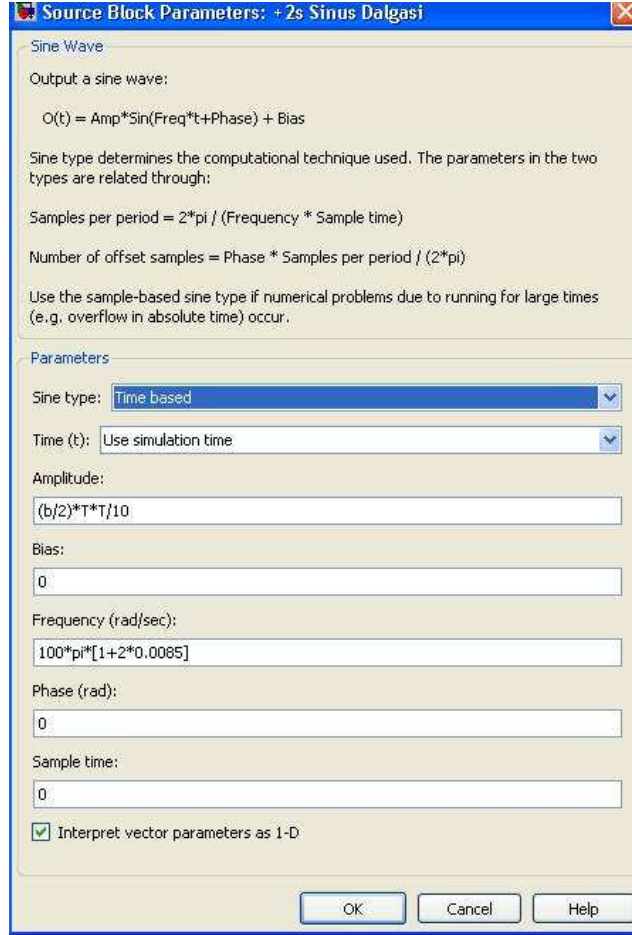
Şekil 5.13 ‘+/- 2s Harmonik A Akımı’ blok detayı

Şekil 5.13'te gösterilen '+/- 2s Harmonik A Akımı' blok detayında görülen 4 kutucuk yukarıdan aşağıya çeyrek yük, yarım yük, üç çeyrek yük ve tam yük durumlarını ifade etmektedir. Kullanıcı tarafından girilen yük bilgisine göre ilgili kutucuk aktifleşip devreye girer. Çeyrek yük bloğunun detayı Şekil 5.14'de gösterilmiştir.



Şekil 5.14 Çeyrek yük blok detayı

Şekil 5.14'te gösterilen 'Çeyrek Yük' blok detayında kullanıcı tarafından çeyrek yük bilgisi girilmişse sistemin aktifleştirildiği görülmektedir. +2s sinüs dalgasının detayı Şekil 5.15'de gösterilmiştir.



Şekil 5.15 Sinüs dalga detayı

Şekil 5.15'te kayma değerine (0,0085), kırık rotor çubuk sayısına (b) ve yüke (T) bağlı olarak stator akımına bindirilecek yan frekans bantlarının bu blokta hesaplandığı görülmektedir. Sinüs dalgası ve içeriği Simulink içerisinde hazır olarak bulunmaktadır.

5.5. dq0-abc Dönüşüm Bloğu

'dq0-abc Dönüşüm' bloğunun girdileri d eksen stator akımı (I_{ds}), q eksen stator akımı (I_{qs}), 0 eksen akımı (I_0), sinüs sinyal referansı ve kosinüs sinyal referansıdır. Çıktıları ise A faz akımı (I_a), B faz akımı (I_b) ve C faz akımıdır (I_c).

Tezimde elektrik motor modelinde DQ modeli kullanıldığı için ve dolayısıyla 'Motor Parametre Hesapları' bloğunda iki parametre olarak hesap edilen değerlerin üç faz besleme gerilimlerine dönüştürülebilmesi için ikili parametreden üçlü parametreye dönüşüm gerekmektedir. 'dq0-abc Dönüşüm' bloğu bu dönüşümü gerçekleştirmektedir. Blok aşağıda

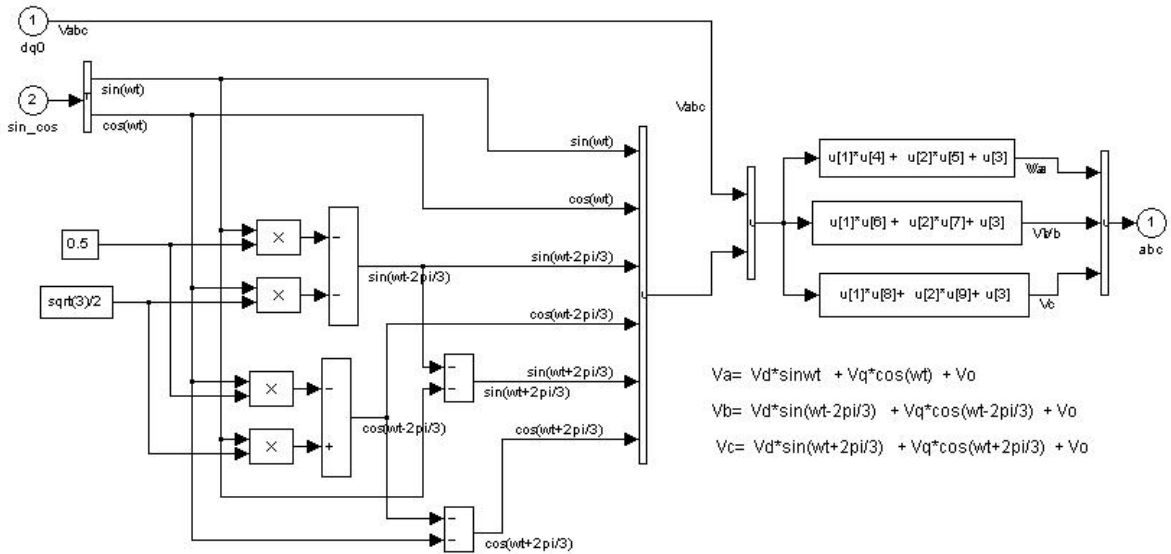
belirtilen hesaplamaları kullanmaktadır ve bloğun içeriği Şekil 5.16'da gösterilmiştir. Bu blok MATLAB Simulink ortamında hazır blok olarak bulunmaktadır.

$$I_a = [I_{ds} \sin(\omega t) + I_{qs} \cos(\omega t) + I_0] \quad (5.5.1)$$

$$I_b = [I_{ds} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + I_{qs} \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + I_0] \quad (5.5.2)$$

$$I_c = [I_{ds} \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) + I_{qs} \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) + I_0] \quad (5.5.3)$$

Eşitlik 5.5.1, 5.5.2 ve 5.5.3'te I_{ds} d eksen stator akımını, I_{qs} q eksen stator akımını, I_0 0 eksen akımını, I_a A faz akımını, I_b B faz akımını, I_c C faz akımını ve ' ω ' rotorun açısal hızını ifade etmektedir.



Şekil 5.16 dq0-abc dönüşüm bloğu

5.6. Simülasyon Parametreleri

Yan frekans bantları; kayma değerine (s) ve yüke (T) bağlı olarak Çizelge 5.1'deki gibi değişmektedir. Kayma değerleri simülasyon programı çalıştırılıp alınmıştır. Tork değerleri ise simülasyonda ve deneyde kullanılan 5,5 KW elektrik motorunun etiket değerinden alınmıştır (19 N.m). Tam yük olarak 19 N.m seçilmiş; çeyrek yük, yarım yük ve üç çeyrek yük değerleri de 19 N.m'nin alt katları olarak hesap edilmiştir. Kullanıcı tarafından girilen yük seviyesine

göre ‘Yüzde kayma s hesabı’ bloğu kayma değerini hesap eder. Hesaplanan kayma değeri eşitlik 1.1’e göre değerlendirilir ve yan frekans bantları ortaya çıkar.

Çizelge 5.1 Simülasyon parametreleri

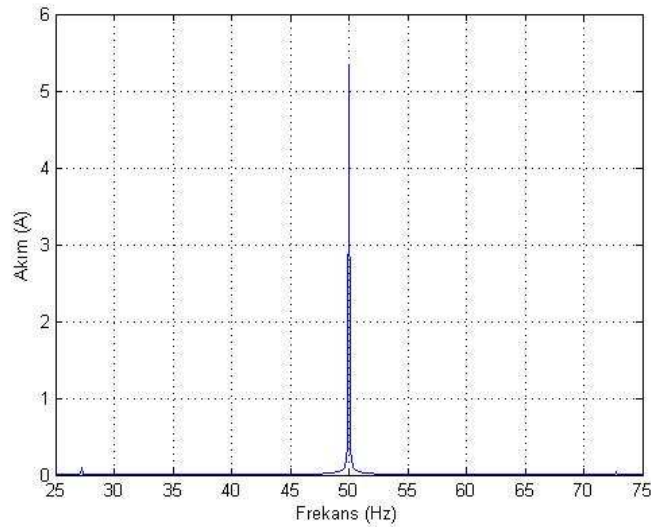
YÜK (T)	TORK (N*M)	Kayma (s)	Yan Frekans (Hz)		Yan Frekans (Hz)	
			$(1 - 2s)f_0$	$(1 + 2s)f_0$	$(1 - 4s)f_0$	$(1 + 4s)f_0$
Çeyrek(%25)	4,75	0,0085	49,15	50,85	48,3	51,7
Yarı(%50)	9,5	0,0148	48,52	51,48	47,04	52,96
Üç Çeyrek(%75)	14,25	0,0215	47,85	52,15	45,7	54,3
Tam(%100)	19	0,0285	47,15	52,85	44,3	55,7
YÜK (T)	TORK (N*M)	Kayma (s)	Yan Frekans (Hz)		Yan Frekans (Hz)	
			$(1 - 6s)f_0$	$(1 + 6s)f_0$	$(1 - 8s)f_0$	$(1 + 8s)f_0$
Çeyrek(%25)	4,75	0,0085	47,45	52,55	46,6	53,4
Yarı(%50)	9,5	0,0148	45,56	54,44	44,08	55,92
Üç Çeyrek(%75)	14,25	0,0215	43,55	56,45	41,4	58,6
Tam(%100)	19	0,0285	41,45	58,55	38,6	61,4

5.7. Simülasyon Sonuçları

Matlab ortamında yapılan simülasyon sonuçları aşağıda gösterilmiştir.

5.7.1. Yüksüz motor simülasyonu (kırık bağımsız)

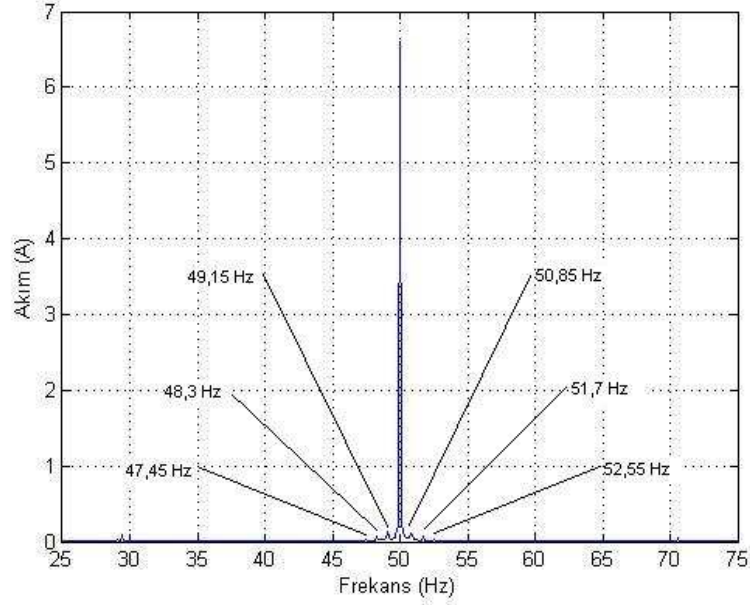
Motor yüksüz iken kırık sayısı artsa da harmonikler görülmeyecektir (Şekil 5.17).



Şekil 5.17 Yüksüz motor akımı

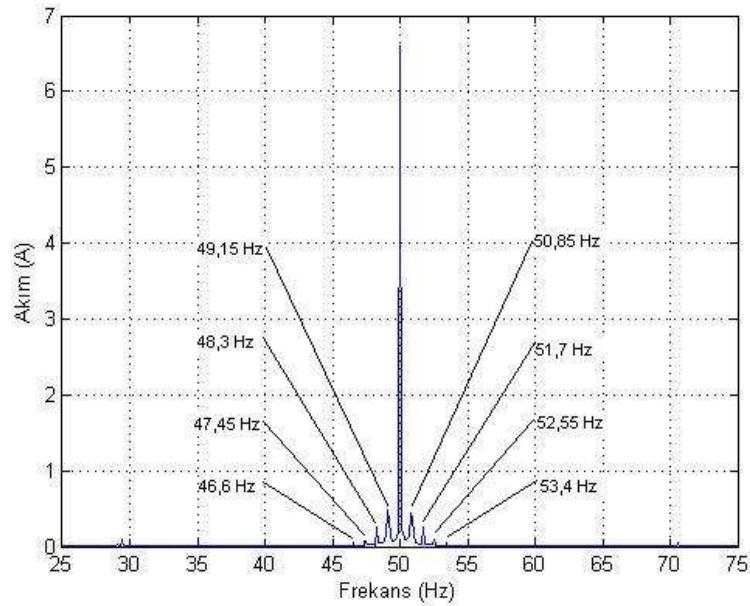
5.7.2. Çeyrek yüklü motor simülasyonu

Motor çeyrek yüklü iken ve rotorda bir kırık çubuk varken harmonikler belirsizdir (Şekil 5.18).



Şekil 5.18 Bir kırık rotor çubuklu çeyrek yüklü motor akımı

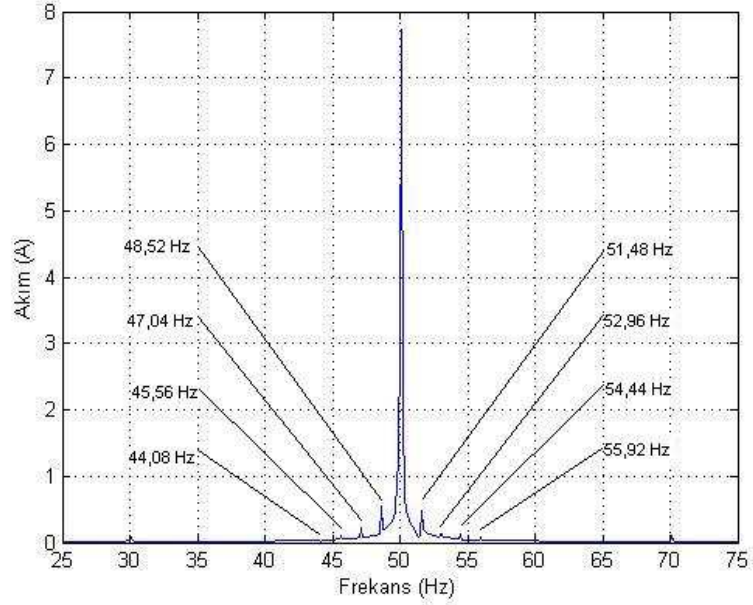
Motor çeyrek yüklü iken ve rotorda dört kırık çubuk varken harmonikler çok az belirgindir (Şekil 5.19).



Şekil 5.19 Dört kırık rotor çubuklu çeyrek yüklü motor akımı

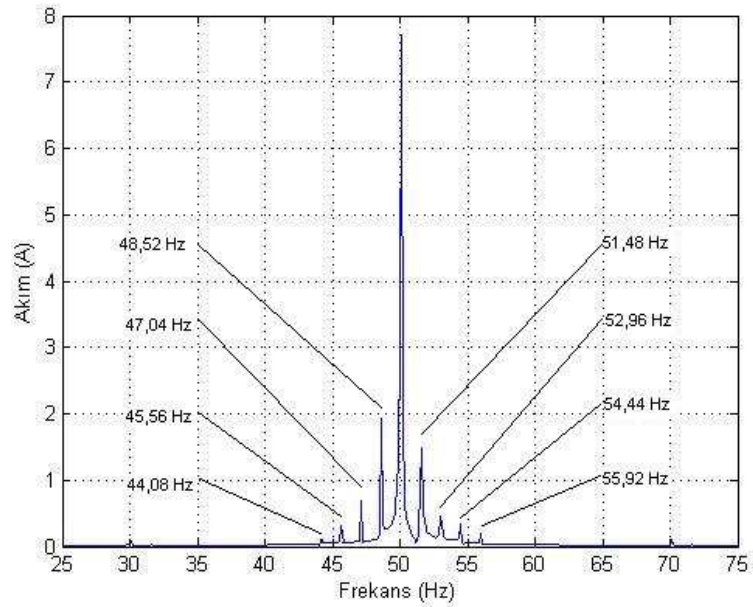
5.7.3. Yarım yüklü motor simülasyonu

Motor yarım yüklü iken ve rotorda bir kırık çubuk varken harmonikler çok az belirgindir (Şekil 5.20).



Şekil 5.20 Bir kırık rotor çubuklu yarım yüklü motor akımı

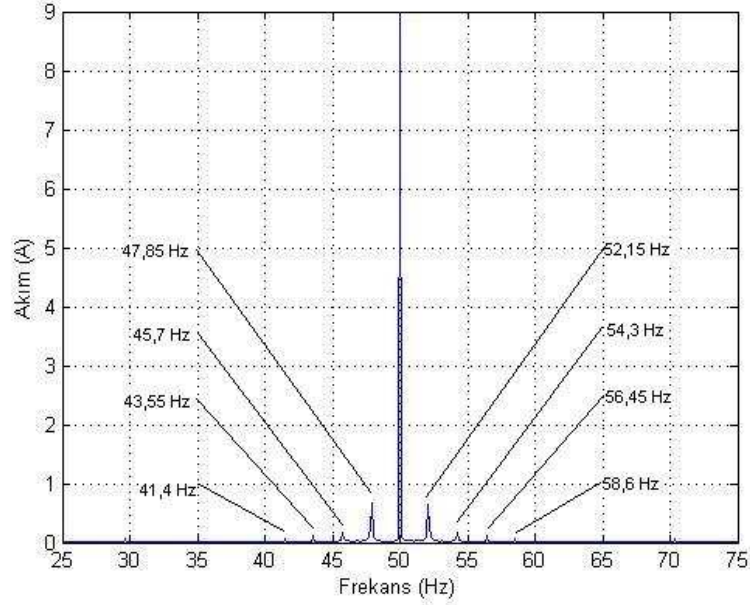
Motor yarım yüklü iken ve rotorda dört kırık çubuk varken harmonikler belirgindir (Şekil 5.21).



Şekil 5.21 Dört kırık rotor çubuklu yarım yüklü motor akımı

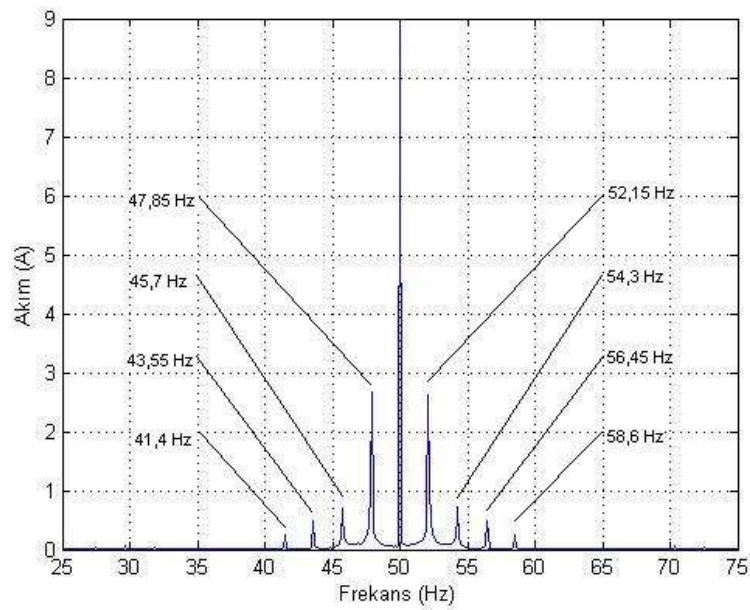
5.7.4. Üç çeyrek yüklü motor simülasyonu

Motor üç çeyrek yüklü iken ve rotorda bir kırık çubuk varken harmonikler belirgindir (Şekil 5.22).



Şekil 5.22 Bir kırık rotor çubuklu üç çeyrek yüklü motor akımı

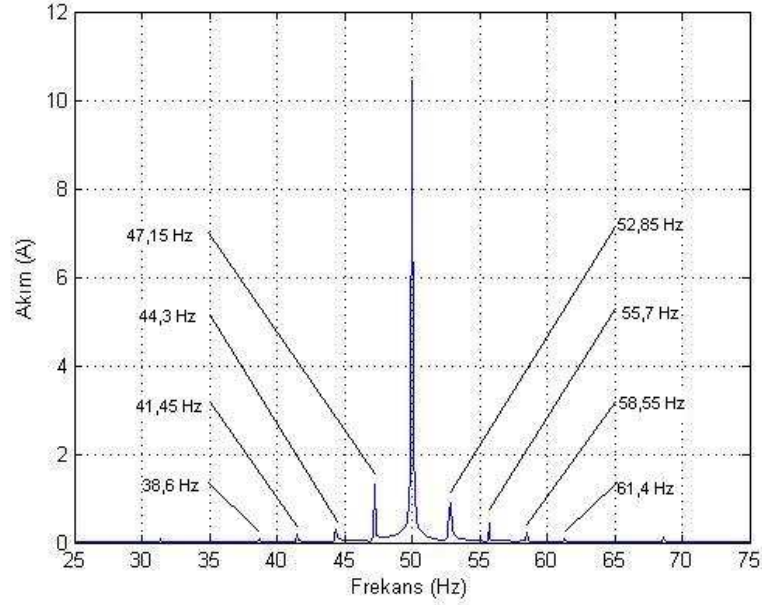
Motor üç çeyrek yüklü iken ve rotorda dört kırık çubuk varken harmonikler daha belirgindir (Şekil 5.23).



Şekil 5.23 Dört kırık rotor çubuklu üç çeyrek yüklü motor akımı

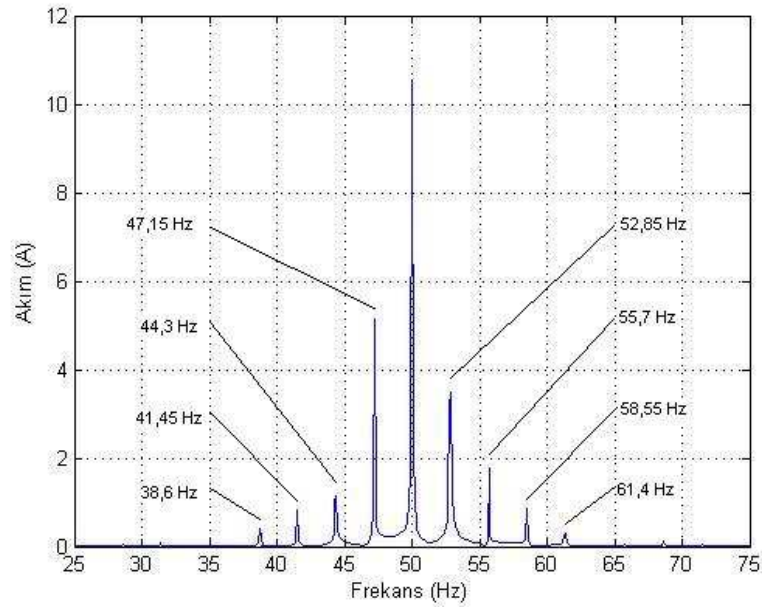
5.7.5. Tam yüklü motor simülasyonu

Motor tam yüklü iken ve rotorda bir kırık çubuk varken harmonikler daha belirgindir (Şekil 5.24).



Şekil 5.24 Bir kırık rotor çubuklu tam yüklü motor akımı

Motor tam yüklü iken ve rotorda dört kırık çubuk varken harmonikler çok belirgindir (Şekil 5.25).



Şekil 5.25 Dört kırık rotor çubuklu tam yüklü motor akımı

Bir rotor çubuk kırığı ile yapılan simülasyonun yan frekans bant akımları tepe değerleri Çizelge 5.2’de, dört rotor çubuk kırığı ile yapılan simülasyonun yan frekans bant akımları tepe değerleri Çizelge 5.3’te gösterilmiştir.

Çizelge 5.2 Simülasyon yan frekans bant akımları tepe değerleri (1 kırık)

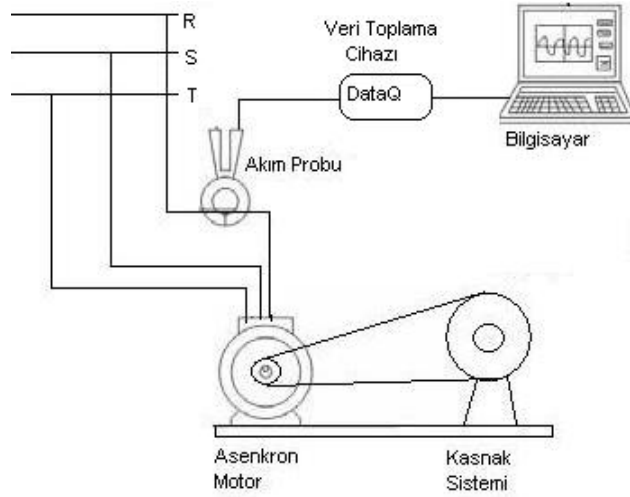
YÜK (T)	TORK (N*M)	Kayma (s)	Akım (A)		Akım (A)	
			$(1 - 2s)f_0$	$(1 + 2s)f_0$	$(1 - 4s)f_0$	$(1 + 4s)f_0$
Çeyrek(%25)	4,75	0,0085	0,2	0,2	0,1	0,1
Yarı(%50)	9,5	0,0148	0,5	0,4	0,2	0,1
Üç Çeyrek(%75)	14,25	0,0215	0,8	0,8	0,2	0,2
Tam(%100)	19	0,0285	1,4	1	0,3	0,5
YÜK (T)	TORK (N*M)	Kayma (s)	Akım (A)		Akım (A)	
			$(1 - 6s)f_0$	$(1 + 6s)f_0$	$(1 - 8s)f_0$	$(1 + 8s)f_0$
Çeyrek(%25)	4,75	0,0085	0,05	0,05	0,025	0,025
Yarı(%50)	9,5	0,0148	0,1	0,1	0,05	0,05
Üç Çeyrek(%75)	14,25	0,0215	0,1	0,1	0,05	0,05
Tam(%100)	19	0,0285	0,2	0,2	0,1	0,1

Çizelge 5.3 Simülasyon yan frekans bant akımları tepe değerleri (4 kırık)

YÜK (T)	TORK (N*M)	Kayma (s)	Akım (A)		Akım (A)	
			$(1 - 2s)f_0$	$(1 + 2s)f_0$	$(1 - 4s)f_0$	$(1 + 4s)f_0$
Çeyrek(%25)	4,75	0,0085	0,5	0,4	0,3	0,3
Yarı(%50)	9,5	0,0148	1,9	1,5	0,8	0,4
Üç Çeyrek(%75)	14,25	0,0215	2,7	2,6	0,8	0,7
Tam(%100)	19	0,0285	5,2	3,8	1,2	1,8
YÜK (T)	TORK (N*M)	Kayma (s)	Akım (A)		Akım (A)	
			$(1 - 6s)f_0$	$(1 + 6s)f_0$	$(1 - 8s)f_0$	$(1 + 8s)f_0$
Çeyrek(%25)	4,75	0,0085	0,1	0,1	0,05	0,05
Yarı(%50)	9,5	0,0148	0,3	0,3	0,1	0,1
Üç Çeyrek(%75)	14,25	0,0215	0,6	0,6	0,2	0,2
Tam(%100)	19	0,0285	0,9	0,9	0,5	0,5

6. DENEYSEL SONUÇLAR

Deney Şekil 6.1, 6.2 ve 6.3'te gösterildiği gibi kurulmuştur. Deneyde 5.5 KW asenkron motor kullanılmıştır. Asenkron motoru çeşitli yük seviyelerinde kontrol edebilmek için üç ayrı frenleme sistemi kullanılmıştır. Motor yüksüz, çeyrek yüklü, yarım yüklü, üç çeyrek yüklü, tam yüklü olmak üzere 5 ayrı yük kademesinde ve kırksız, bir kırıklı, dört kırıklı olmak üzere 3 ayrı kırık seviyesinde denenmiştir. Frenleme sistemi motorun arka bloğunda bulunan bir adet elektrikli frenleme, ön bloğunda bulunan bir adet mekanik frenleme ve kasnak bölümünde bulunan ikinci bir mekanik frenleme sistemlerinden oluşmaktadır. Kasnaktaki mekanik frenleme sistemini rahat kontrol edebilmek için kasnak devri düşürülmüştür. Sistem blok şeması Şekil 6.1'de gösterilmiştir.



Şekil 6.1 Sistem blok şeması

Şekil 6.2 ve 6.3'teki numaralandırma aşağıdaki gibi ifade edilmiştir;

1. Küçük kasnak
2. Elektrik motor ön bloğu mekanik frenleme
3. Elektrik motoru
4. Fluke marka akım probu
5. DataQ veri toplama cihazı
6. Bilgisayar
7. Büyük kasnak
8. Büyük kasnak tarafı ikincil mekanik frenleme
9. Elektrik motor arka bloğu elektrik frenleme



Şekil 6.2 Deney kurulumu (önden görünüm)



Şekil 6.3 Deney kurulumu (yandan görünüm)

Deneyde yukarıda gösterilen 5.5 KW gücündeki asenkron motordan veri alınmıştır. Fluke marka akım probu ile motordan alınan akım bilgisi veri toplama cihazına aktarılmıştır. Veri toplama cihazıyla (DataQ) asenkron motordan elde edilen veriler bilgisayara aktarılmıştır. Bilgisayara aktarılan veriler Windaq programıyla işlenmiş ve frekans domeninde analizleri yapılmıştır.

Deneyde kullanılan motorun kırksız hali Şekil 6.4'de, bir kırıklı hali Şekil 6.5'te ve dört kırıklı hali Şekil 6.6'te gösterilmiştir.



Şekil 6.4 Sağlam rotor



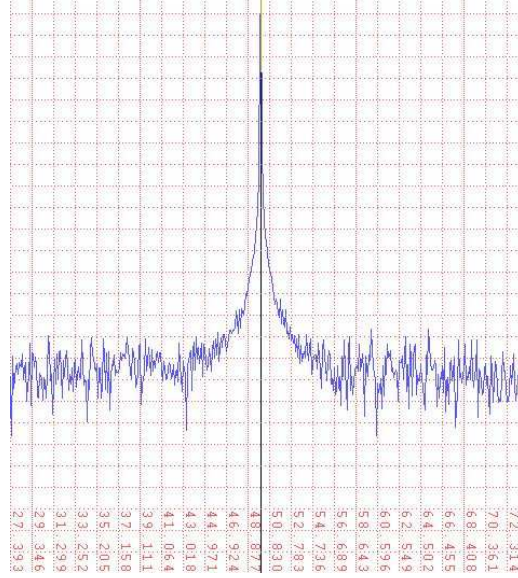
Şekil 6.5 Bir kırıklı rotor



Şekil 6.6 Dört kırıklı rotor

6.1. Yüksüz Motor Verileri (Kırık Bağımsız)

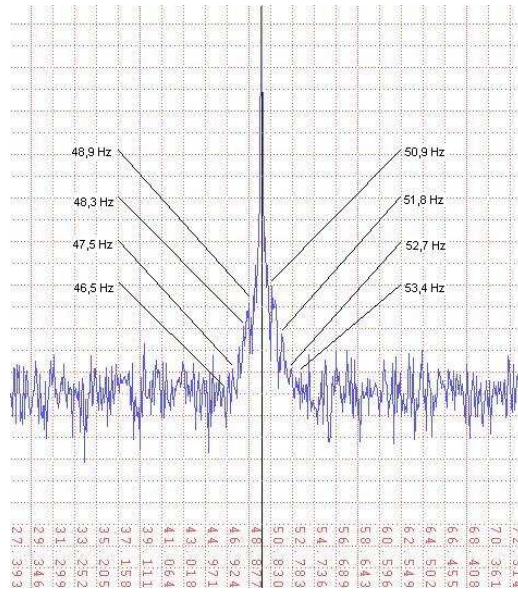
Motor yüksüz iken kırık sayısı artsa bile harmoniklerin belirsiz olduğu gözlemlendi (Şekil 6.7).



Şekil 6.7 Yüksüz motor akımı

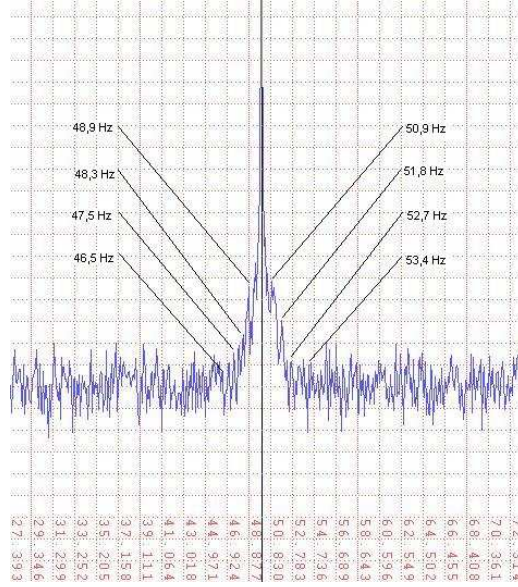
6.2. Çeyrek Yüklü Motor Verileri

Motor çeyrek yüklü iken ve rotorda bir kırık çubuk varken harmoniklerin belirsiz olduğu gözlemlendi (Şekil 6.8).



Şekil 6.8 Bir kırık rotor çubuklu çeyrek yüklü motor akımı

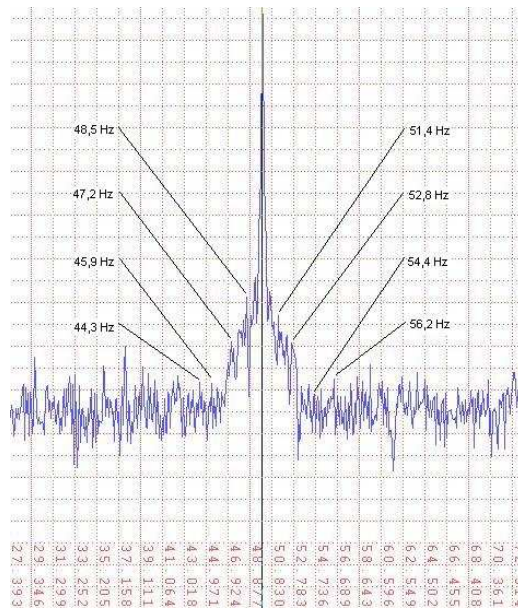
Motor çeyrek yüklü iken ve rotorda dört kırık çubuk varken harmoniklerin çok az belirgin olmaya başladığı gözlemlendi (Şekil 6.9).



Şekil 6.9 Dört kırık rotor çubuklu çeyrek yüklü motor akımı

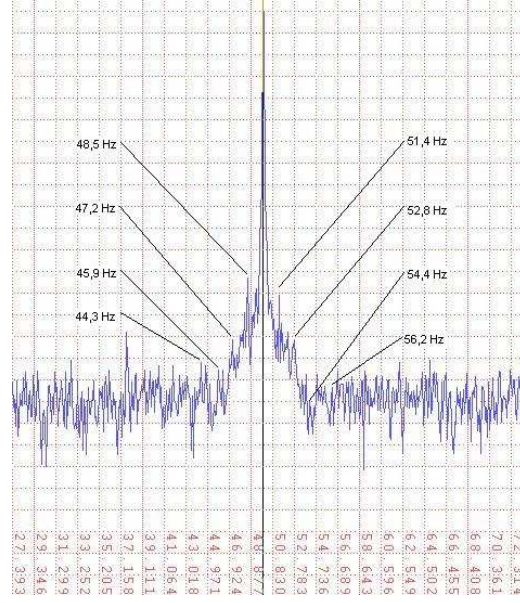
6.3. Yarım Yüklü Motor Verileri

Motor yarım yüklü iken ve rotorda bir kırık çubuk varken harmoniklerin çok az belirgin olmaya başladığı gözlemlendi (Şekil 6.10).



Şekil 6.10 Bir kırık rotor çubuklu yarım yüklü motor akımı

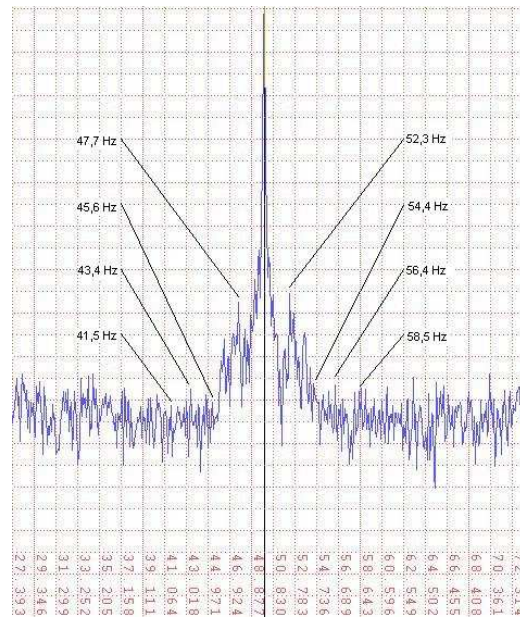
Motor yarım yüklü iken ve rotorda dört kırık çubuk varken harmoniklerin belirgin olmaya başladığı gözlemlendi (Şekil 6.11).



Şekil 6.11 Dört kırık rotor çubuklu yarım yüklü motor akımı

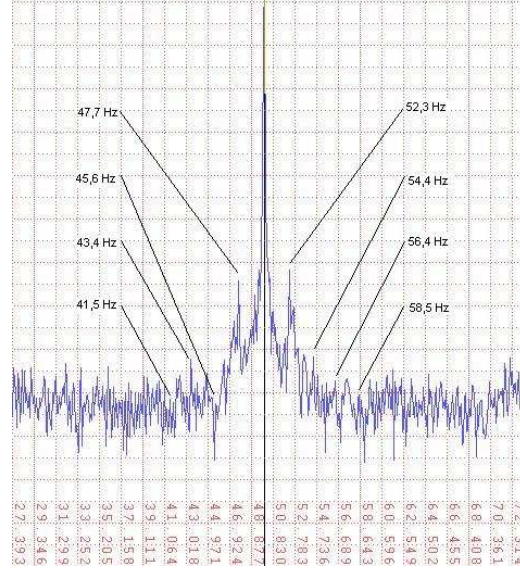
6.4. Üç Çeyrek Yüklü Motor Verileri

Motor üç çeyrek yüklü iken ve rotorda bir kırık çubuk varken harmoniklerin belirgin olmaya başladığı gözlemlendi (Şekil 6.12).



Şekil 6.12 Bir kırık rotor çubuklu üç çeyrek yüklü motor akımı

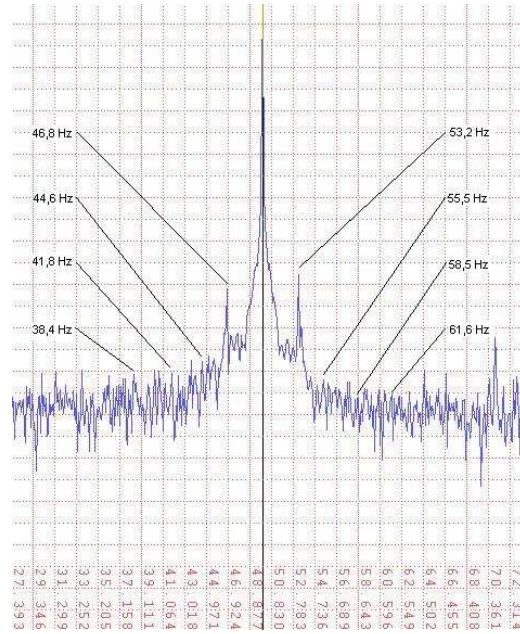
Motor üç çeyrek yüklü iken ve rotorda dört kırık çubuk varken harmoniklerin daha belirgin olmaya başladığı gözlemlendi (Şekil 6.13).



Şekil 6.13 Dört kırık rotor çubuklu üç çeyrek yüklü motor akımı

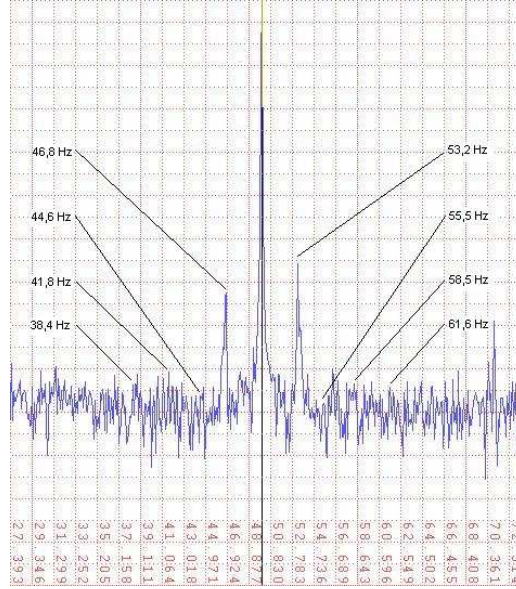
6.5. Tam Yüklü Motor Verileri

Motor tam yüklü iken ve rotorda bir kırık çubuk varken harmoniklerin daha belirgin olmaya başladığı gözlemlendi (Şekil 6.14).



Şekil 6.14 Bir kırık rotor çubuklu tam yüklü motor akımı

Motor tam yüklü iken ve rotorda dört kırık çubuk varken harmoniklerin çok belirgin olmaya başladığı gözlemlendi (Şekil 6.15).



Şekil 6.15 Dört kırık rotor çubuklu tam yüklü motor akımı

Deney sonuçları yan frekans bant yerleri olarak Çizelge 6.1’de, bir kırık için yan frekans bant akımları tepe değerleri olarak Çizelge 6.2’de, dört kırık için yan frekans bant akımları tepe değerleri olarak Çizelge 6.3’te gösterilmiştir.

Çizelge 6.1 Deney sonucu, yan frekans bantları

YÜK (T)	TORK (N*M)	Kayma (s)	Yan Frekans (Hz)		Yan Frekans (Hz)	
			$(1 - 2s)f_0$	$(1 + 2s)f_0$	$(1 - 4s)f_0$	$(1 + 4s)f_0$
Çeyrek(%25)	4,75	0,0085	48,9	50,9	48,3	51,8
Yarı(%50)	9,5	0,0148	48,5	51,4	47,2	52,8
Üç Çeyrek(%75)	14,25	0,0215	47,7	52,3	45,6	54,4
Tam(%100)	19	0,0285	46,8	53,2	44,6	55,5
YÜK (T)	TORK (N*M)	Kayma (s)	Yan Frekans (Hz)		Yan Frekans (Hz)	
			$(1 - 6s)f_0$	$(1 + 6s)f_0$	$(1 - 8s)f_0$	$(1 + 8s)f_0$
Çeyrek(%25)	4,75	0,0085	47,5	52,7	46,5	53,4
Yarı(%50)	9,5	0,0148	45,9	54,4	44,3	56,2
Üç Çeyrek(%75)	14,25	0,0215	43,4	56,4	41,5	58,5
Tam(%100)	19	0,0285	41,8	58,5	38,4	61,6

Çizelge 6.2 Deney sonucu, yan frekans bant akımları tepe değerleri (1 kırık)

YÜK (T)	TORK (N*M)	Kayma (s)	Akım (A)		Akım (A)	
			$(1 - 2s)f_0$	$(1 + 2s)f_0$	$(1 - 4s)f_0$	$(1 + 4s)f_0$
Çeyrek(%25)	4,75	0,0085	0,2	0,2	0,1	0,1
Yarı(%50)	9,5	0,0148	0,5	0,3	0,3	0,2
Üç Çeyrek(%75)	14,25	0,0215	0,8	0,9	0,2	0,3
Tam(%100)	19	0,0285	1,4	1,5	0,3	0,5
YÜK (T)	TORK (N*M)	Kayma (s)	Akım (A)		Akım (A)	
			$(1 - 6s)f_0$	$(1 + 6s)f_0$	$(1 - 8s)f_0$	$(1 + 8s)f_0$
Çeyrek(%25)	4,75	0,0085	0,05	0,05	0,025	0,025
Yarı(%50)	9,5	0,0148	0,2	0,2	0,1	0,1
Üç Çeyrek(%75)	14,25	0,0215	0,1	0,1	0,05	0,05
Tam(%100)	19	0,0285	0,2	0,2	0,1	0,1

Çizelge 6.3 Deney sonucu, yan frekans bant akımları tepe değerleri (4 kırık)

YÜK (T)	TORK (N*M)	Kayma (s)	Akım (A)		Akım (A)	
			$(1 - 2s)f_0$	$(1 + 2s)f_0$	$(1 - 4s)f_0$	$(1 + 4s)f_0$
Çeyrek(%25)	4,75	0,0085	0,8	0,8	0,3	0,3
Yarı(%50)	9,5	0,0148	1,9	1,5	0,8	0,4
Üç Çeyrek(%75)	14,25	0,0215	2,7	2,8	0,8	0,9
Tam(%100)	19	0,0285	5,2	5,5	1,2	1,8
YÜK (T)	TORK (N*M)	Kayma (s)	Akım (A)		Akım (A)	
			$(1 - 6s)f_0$	$(1 + 6s)f_0$	$(1 - 8s)f_0$	$(1 + 8s)f_0$
Çeyrek(%25)	4,75	0,0085	0,1	0,1	0,05	0,05
Yarı(%50)	9,5	0,0148	0,3	0,3	0,1	0,1
Üç Çeyrek(%75)	14,25	0,0215	0,6	0,5	0,2	0,2
Tam(%100)	19	0,0285	0,9	0,9	0,5	0,3

Özet olarak;

- Kırık rotor çubuk sayısı sabit iken; yük arttıkça yan frekans bant aralıklarının arttığı ve daha belirgin olmaya başladığı (büyüdüğü) gözlemlendi.
- Yüklü durumda rotor çubuk kırık sayısı arttıkça yan frekans bantlarının daha belirgin olmaya başladığı (büyüdüğü) gözlemlendi.

- Yükün artmasıyla birlikte kırık rotor çubuk sayısından bağımsız olarak kaymanın aynı oranda arttığı gözlemlendi.
- Hat frekansından (50 Hz) uzaklaştıkça yan frekans bantlarının güç kaybettikleri gözlemlendi. Yani +/- 2s yan frekans bant büyüklüğünün, +/- 4s yan frekans bant büyüklüğünden daha büyük olduğu, +/- 4s yan frekans bant büyüklüğünün, +/- 6s yan frekans bant büyüklüğünden daha büyük olduğu, +/- 6s yan frekans bant büyüklüğünün, +/- 8s yan frekans bant büyüklüğünden daha büyük olduğu gözlemlendi.

7. SİMÜLASYON VE DENEY SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Simülasyon ve deney sonuçları karşılaştırması Çizelge 7.1-7.6'da gösterilmiştir. Çizelge 7.1 ve 7.2'de yan frekans bantlarının simülasyon ve deneyde ortaya çıkan değerleri ile aralarındaki fark görülmektedir. Çizelge 7.3 ve 7.4'te yan frekans bant akımlarının bir kırık rotor çubuğu için simülasyon ve deneyde ortaya çıkan değerleri ile aralarındaki fark görülmektedir. Çizelge 7.5 ve 7.6'da yan frekans bant akımlarının dört kırık rotor çubuğu için simülasyon ve deneyde ortaya çıkan değerleri ile aralarındaki fark görülmektedir.

Çizelge 7.1 Simülasyon ve deney sonuç karşılaştırma (sağ yan frekans bantları)

YÜK (T)	TORK (N*M)	Kayma (s)	Yan Frekans (Hz) $f_b = (1 + 2s)f_0$			Yan Frekans (Hz) $f_b = (1 + 4s)f_0$		
			Simülasyon	Deney	Hata	Simülasyon	Deney	Hata
Çeyrek(%25)	4,75	0,0085	50,85	50,9	0,05	51,7	51,8	0,1
Yarı(%50)	9,5	0,0148	51,48	51,4	0,08	52,96	52,8	0,16
Üç Çeyrek(%75)	14,25	0,0215	52,15	52,3	0,15	54,3	54,4	0,1
Tam(%100)	19	0,0285	52,85	53,2	0,35	55,7	55,5	0,2
YÜK (T)	TORK (N*M)	Kayma (s)	Yan Frekans (Hz) $f_b = (1 + 6s)f_0$			Yan Frekans (Hz) $f_b = (1 + 8s)f_0$		
			Simülasyon	Deney	Hata	Simülasyon	Deney	Hata
Çeyrek(%25)	4,75	0,0085	52,55	52,7	0,15	53,4	53,4	0
Yarı(%50)	9,5	0,0148	54,44	54,4	0,04	55,92	56,2	0,28
Üç Çeyrek(%75)	14,25	0,0215	56,45	56,4	0,05	58,6	58,5	0,1
Tam(%100)	19	0,0285	58,55	58,5	0,05	61,4	61,6	0,2

Çizelge 7.2 Simülasyon ve deney sonuç karşılaştırma (sol yan frekans bantları)

YÜK (T)	TORK (N*M)	Kayma (s)	Yan Frekans (Hz) $f_b = (1 - 2s)f_0$			Yan Frekans (Hz) $f_b = (1 - 4s)f_0$		
			Simülasyon	Deney	Hata	Simülasyon	Deney	Hata
Çeyrek(%25)	4,75	0,0085	49,15	48,9	0,25	48,3	48,3	0
Yarı(%50)	9,5	0,0148	48,52	48,5	0,02	47,04	47,2	0,16
Üç Çeyrek(%75)	14,25	0,0215	47,85	47,7	0,15	45,7	45,6	0,1
Tam(%100)	19	0,0285	47,15	46,8	0,35	44,3	44,6	0,3
YÜK (T)	TORK (N*M)	Kayma (s)	Yan Frekans (Hz) $f_b = (1 - 6s)f_0$			Yan Frekans (Hz) $f_b = (1 - 8s)f_0$		
			Simülasyon	Deney	Hata	Simülasyon	Deney	Hata
Çeyrek(%25)	4,75	0,0085	47,45	47,5	0,05	46,6	46,5	0,1
Yarı(%50)	9,5	0,0148	45,56	45,9	0,34	44,08	44,3	0,22
Üç Çeyrek(%75)	14,25	0,0215	43,55	43,4	0,15	41,4	41,5	0,1
Tam(%100)	19	0,0285	41,45	41,8	0,35	38,6	38,4	0,2

Çizelge 7.3 Simülasyon ve deney sonuç karşılaştırma (1 kırıklı sağ yan frekans bant akımları)

YÜK (T)	TORK (N*M)	Kayma (s)	Akım (A) $f_b = (1 + 2s)f_0$			Akım (A) $f_b = (1 + 4s)f_0$		
			Simülasyon	Deney	Hata	Simülasyon	Deney	Hata
Çeyrek(%25)	4,75	0,0085	0,2	0,2	0	0,1	0,1	0
Yarı(%50)	9,5	0,0148	0,4	0,3	0,1	0,1	0,2	0,1
Üç Çeyrek(%75)	14,25	0,0215	0,8	0,9	0,1	0,2	0,3	0,1
Tam(%100)	19	0,0285	1	1,5	0,5	0,5	0,5	0
YÜK (T)	TORK (N*M)	Kayma (s)	Akım (A) $f_b = (1 + 6s)f_0$			Akım (A) $f_b = (1 + 8s)f_0$		
			Simülasyon	Deney	Hata	Simülasyon	Deney	Hata
Çeyrek(%25)	4,75	0,0085	0,05	0,05	0	0,025	0,025	0
Yarı(%50)	9,5	0,0148	0,1	0,2	0,1	0,05	0,1	0,05
Üç Çeyrek(%75)	14,25	0,0215	0,1	0,1	0	0,05	0,05	0
Tam(%100)	19	0,0285	0,2	0,2	0	0,1	0,1	0

Çizelge 7.4 Simülasyon ve deney sonuç karşılaştırma (1 kırıklı sol yan frekans bant akımları)

YÜK (T)	TORK (N*M)	Kayma (s)	Akım (A) $f_b = (1 - 2s)f_0$			Akım (A) $f_b = (1 - 4s)f_0$		
			Simülasyon	Deney	Hata	Simülasyon	Deney	Hata
Çeyrek(%25)	4,75	0,0085	0,2	0,2	0	0,1	0,1	0
Yarı(%50)	9,5	0,0148	0,5	0,5	0	0,2	0,3	0,1
Üç Çeyrek(%75)	14,25	0,0215	0,8	0,8	0	0,2	0,2	0
Tam(%100)	19	0,0285	1,4	1,4	0	0,3	0,3	0
YÜK (T)	TORK (N*M)	Kayma (s)	Akım (A) $f_b = (1 - 6s)f_0$			Akım (A) $f_b = (1 - 8s)f_0$		
			Simülasyon	Deney	Hata	Simülasyon	Deney	Hata
Çeyrek(%25)	4,75	0,0085	0,05	0,05	0	0,025	0,025	0
Yarı(%50)	9,5	0,0148	0,1	0,2	0,1	0,05	0,1	0,05
Üç Çeyrek(%75)	14,25	0,0215	0,1	0,1	0	0,05	0,05	0
Tam(%100)	19	0,0285	0,2	0,2	0	0,1	0,1	0

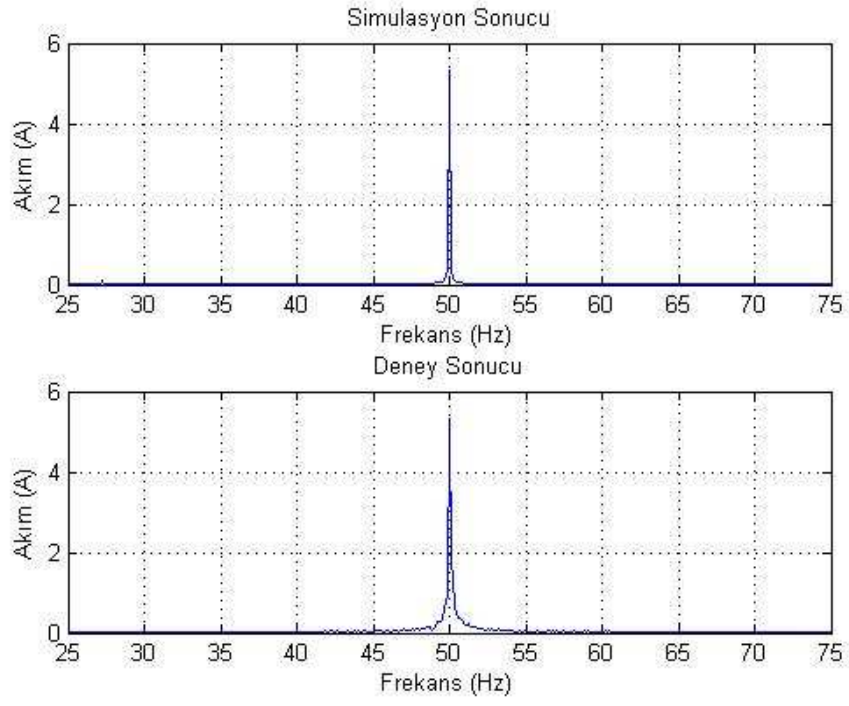
Çizelge 7.5 Simülasyon ve deney sonuç karşılaştırma (4 kırıklı sağ yan frekans bant akımları)

YÜK (T)	TORK (N*M)	Kayma (s)	Akım (A) $f_b = (1 + 2s)f_0$			Akım (A) $f_b = (1 + 4s)f_0$		
			Simülasyon	Deney	Hata	Simülasyon	Deney	Hata
Çeyrek(%25)	4,75	0,0085	0,4	0,8	0,4	0,3	0,3	0
Yarı(%50)	9,5	0,0148	1,5	1,5	0	0,4	0,4	0
Üç Çeyrek(%75)	14,25	0,0215	2,6	2,8	0,2	0,7	0,9	0,2
Tam(%100)	19	0,0285	3,8	5,5	1,7	1,8	1,8	0
YÜK (T)	TORK (N*M)	Kayma (s)	Akım (A) $f_b = (1 + 6s)f_0$			Akım (A) $f_b = (1 + 8s)f_0$		
			Simülasyon	Deney	Hata	Simülasyon	Deney	Hata
Çeyrek(%25)	4,75	0,0085	0,1	0,1	0	0,05	0,05	0
Yarı(%50)	9,5	0,0148	0,3	0,3	0	0,1	0,1	0
Üç Çeyrek(%75)	14,25	0,0215	0,5	0,5	0	0,2	0,2	0
Tam(%100)	19	0,0285	0,9	0,9	0	0,3	0,3	0

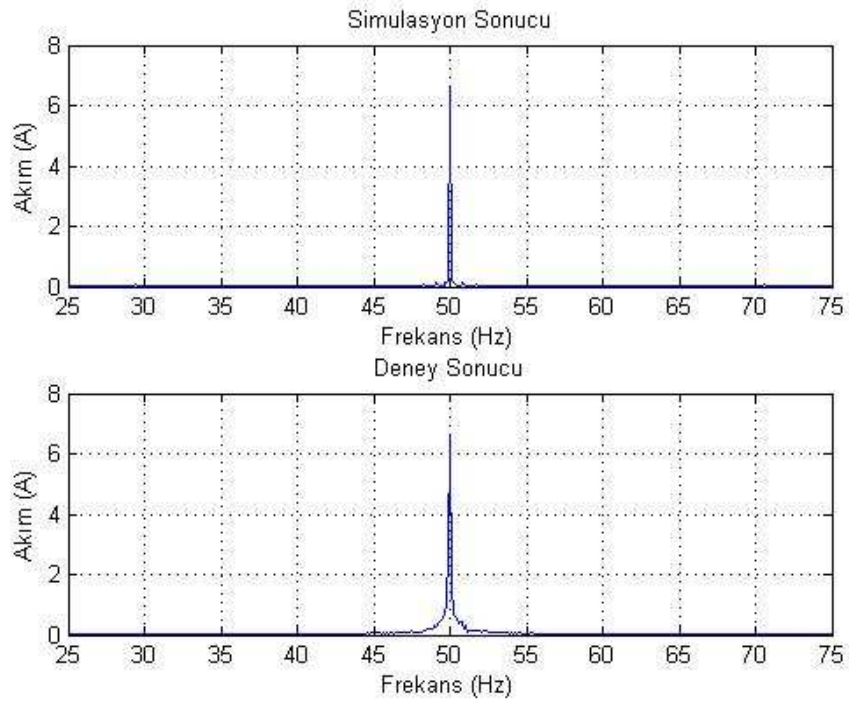
Çizelge 7.6 Simülasyon ve deney sonuç karşılaştırma (4 kırıklı sol yan frekans bant akımları)

YÜK (T)	TORK (N*M)	Kayma (s)	Akım (A) $f_b = (1 - 2s)f_0$			Akım (A) $f_b = (1 - 4s)f_0$		
			Simülasyon	Deney	Hata	Simülasyon	Deney	Hata
Çeyrek(%25)	4,75	0,0085	0,5	0,8	0,3	0,3	0,3	0
Yarı(%50)	9,5	0,0148	1,9	1,9	0	0,8	0,8	0
Üç Çeyrek(%75)	14,25	0,0215	2,7	2,7	0	0,8	0,8	0
Tam(%100)	19	0,0285	5,2	5,2	0	1,2	1,2	0
YÜK (T)	TORK (N*M)	Kayma (s)	Akım (A) $f_b = (1 - 6s)f_0$			Akım (A) $f_b = (1 - 8s)f_0$		
			Simülasyon	Deney	Hata	Simülasyon	Deney	Hata
Çeyrek(%25)	4,75	0,0085	0,1	0,1	0	0,05	0,05	0
Yarı(%50)	9,5	0,0148	0,3	0,3	0	0,1	0,1	0
Üç Çeyrek(%75)	14,25	0,0215	0,5	0,5	0	0,2	0,2	0
Tam(%100)	19	0,0285	0,9	0,9	0	0,3	0,3	0

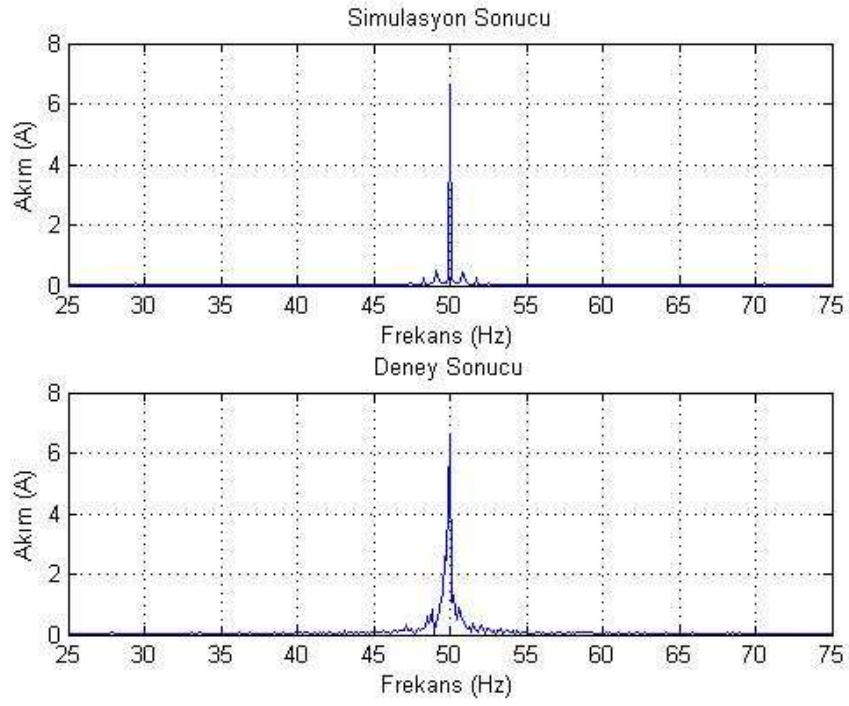
Simülasyon ve deneysel sonuçları; yan frekans bant yerleri, yan frekans bantlarının bir kırık rotor çubuğu için akım değerleri ve yan frekans bantlarının dört kırık rotor çubuğu için akım değerleri açısından kıyaslandığında birbirleriyle örtüşükleri görülür. Şekillerle karşılaştırmanın aynı ortamda yapılabilmesi için MATLAB ortamı seçilmiştir. Motordan alınmış veriler Windaq programıyla işlenmiş ve Excel dosyası haline getirilmiştir. MATLAB ortamına 'import data' ile alınan motor verileri ile simülasyon verileri şekiller yardımıyla karşılaştırılmıştır ve ilgili şekiller Şekil 7.1-7.9'da gösterilmiştir.



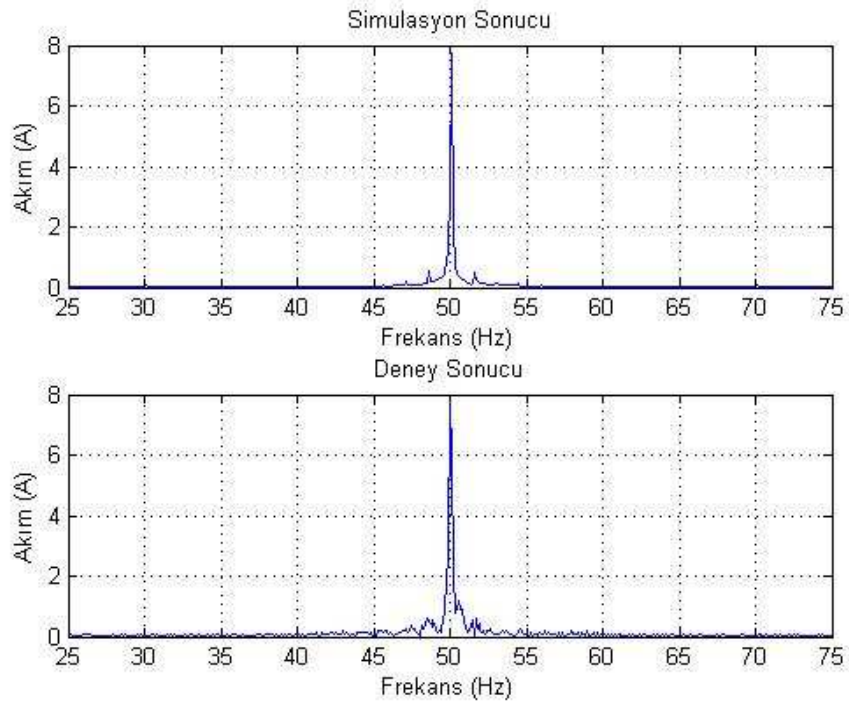
Şekil 7.1 Yüksüz simülasyon ve deney sonuçları



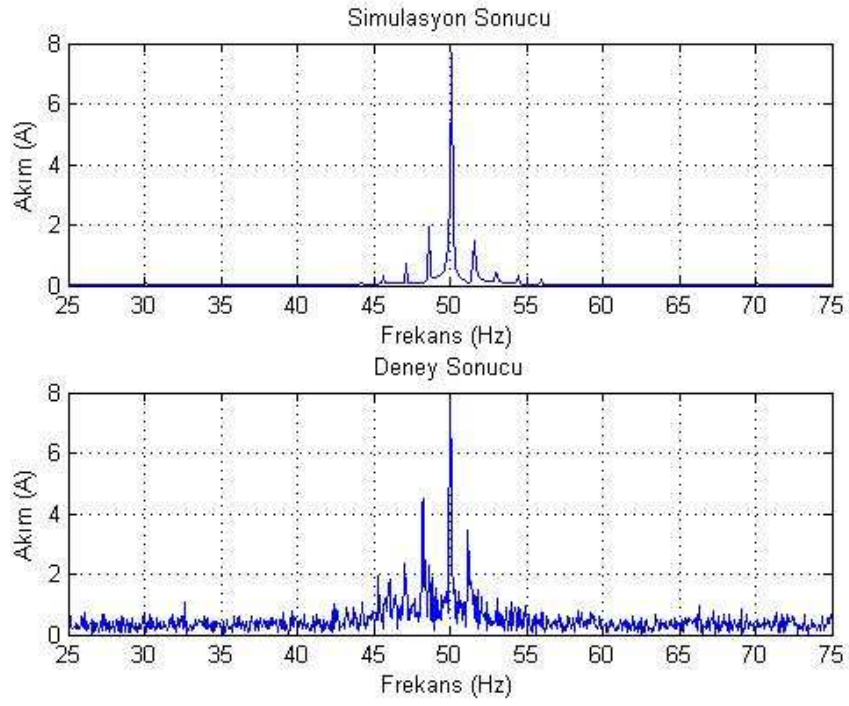
Şekil 7.2 Çeyrek yüklü ve bir kırık rotor çubuklu simülasyon ve deney sonuçları



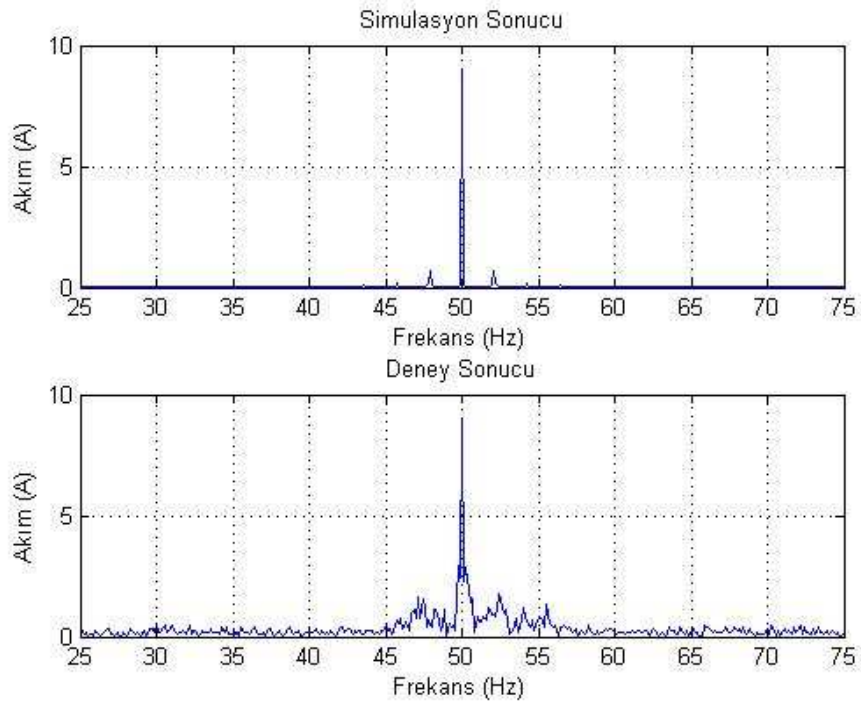
Şekil 7.3 Çeyrek yüklü ve dört kırk rotor çubuklu simülasyon ve deney sonuçları



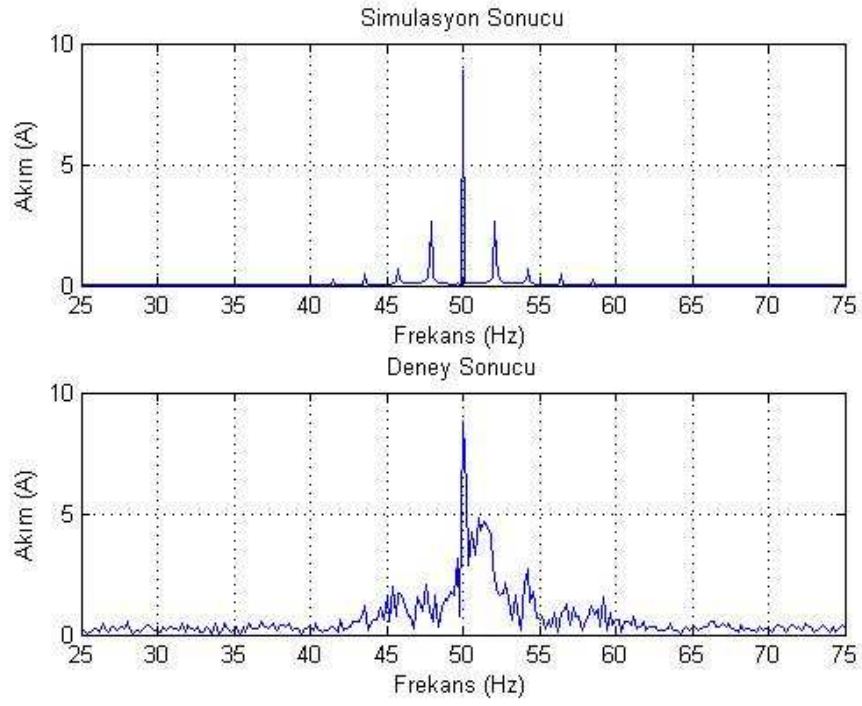
Şekil 7.4 Yarım yüklü ve bir kırk rotor çubuklu simülasyon ve deney sonuçları



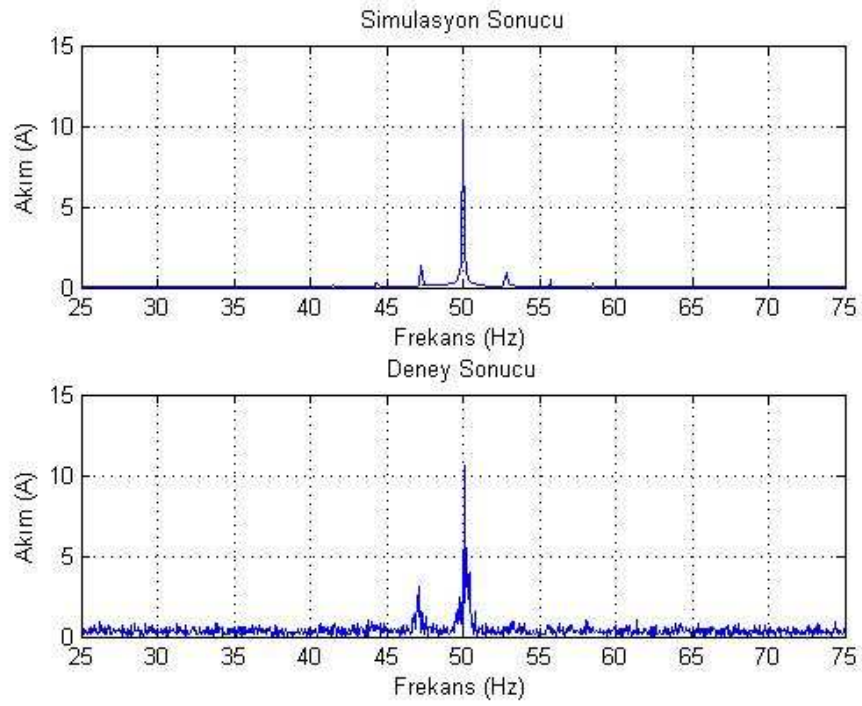
Şekil 7.5 Yarım yüklü ve dört kırık rotor çubuklu simülasyon ve deney sonuçları



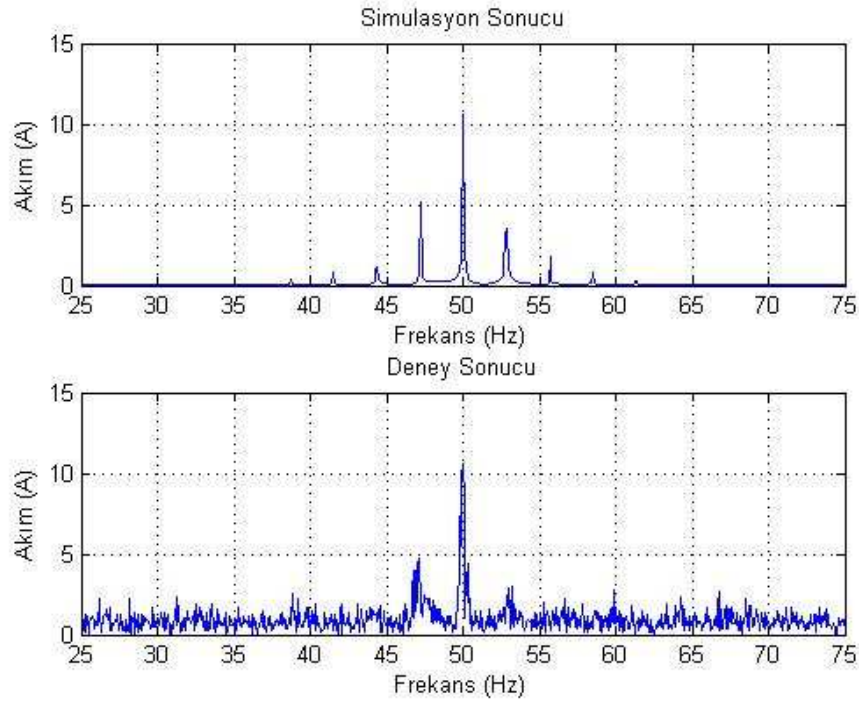
Şekil 7.6 Üç çeyrek yüklü ve bir kırık rotor çubuklu simülasyon ve deney sonuçları



Şekil 7.7 Üç çeyrek yüklü ve dört kırık rotor çubuklu simülasyon ve deney sonuçları



Şekil 7.8 Tam yüklü ve bir kırık rotor çubuklu simülasyon ve deney sonuçları



Şekil 7.9 Tam yüklü ve dört kırık rotor çubuklu simülasyon ve deney sonuçları

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada kırık rotor çubuğu arızalarının stator akımına harmonik olarak yansımalarının simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Yapılan simülasyon daha sonra deneysel olarak elde edilen akım spektrumları arasındaki farklılıklara göre her bir arızalı durum için incelenmiştir. Çalışmada on farklı durum söz konusudur;

- Rotor çubuğu kırksız yüksüz motor akım değeri,
- Kırık rotor çubuklu yüksüz motor akım değeri,
- Bir kırık rotor çubuklu çeyrek yüklü motor akım değeri,
- Dört kırık rotor çubuklu çeyrek yüklü motor akım değeri,
- Bir kırık rotor çubuklu yarım yüklü motor akım değeri,
- Dört kırık rotor çubuklu yarım yüklü motor akım değeri,
- Bir kırık rotor çubuklu üççeyrek yüklü motor akım değeri,
- Dört kırık rotor çubuklu üççeyrek yüklü motor akım değeri,
- Bir kırık rotor çubuklu tam yüklü motor akım değeri,
- Dört kırık rotor çubuklu tam yüklü motor akım değeri.

Sincap kafesli bir asenkron motorda meydana gelen rotor çubuğu kırıklarının stator akımlarından gözlemlenmesinin MATLAB/Simulink ortamında modellendiği bu çalışmada deneysel sonuçların MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilen simülasyon sonuçları ile örtüştüğü görülmüştür. Çalışmanın özeti aşağıda maddeler halinde çıkarılmıştır;

- Asenkron motorlarda meydana gelen kırık rotor çubuğu arızaları stator akımına harmonik olarak yansır.
- Kırık rotor çubuk sayısı sabit iken; yük arttıkça yan frekans bant aralıkları artar ve daha belirginleşir.
- Yüklü durumda rotor çubuk kırık sayısı arttıkça yan frekans bantları daha belirginleşir.
- Yükün artmasıyla birlikte kırık rotor çubuk sayısından bağımsız olarak kayma da aynı oranda artar.
- Hat frekansından (50 Hz) uzaklaştıkça yan frekans bantları güç kaybeder.
- Simulink modeli eğitim amaçlı olarak kullanılabilir.

Modelde kullanılan elektrik motoru 5.5 KW gücündedir. Bundan sonraki çalışmalarda tüm motor güç çeşitleri için bir modelleme düşünülebilir. Ayrıca modellemeye kırık rotor çubuğu arıza tipine ilave olarak stator, rulman ve mil kaynaklı arıza tiplerinin de ilave edilmesi düşünülebilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- [1] Tezcan, M.M. ve Çanakoğlu, A.İ., 2009, Asenkron motorlarda kırık rotor barı arızalarının sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi, 5.Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, 6 s.
- [2] Kayaalp, K., 2007, Asenkron motorlarda veri madenciliği ile hata tespiti, Yüksek lisans tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Elektronik Bilgisayar Eğitimi Anabilim Dalı, 97 s.
- [3] Tezcan, M.M. ve Çanakoğlu, A., 2008, Asenkron motorlarda kırık rotor çubuğu arızası analizi için bir deney seti geliştirilmesi, Elektrik - Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, 247-251 p.
- [4] IAS motor reliability working group, 1985, Report of large motor reliability survey of industrial and commercial installations –part I, IEEE Trans. on Ind. Appl., vol. 21, 853-864 p.
- [5] Thorsen, O.V. and Davla, M., 1999, Failure identification and analysis for high-voltage induction motors in the petrochemical industry, IEEE Trans. on Ind. Appl., vol. 35, no. 4, 810-818 p.
- [6] Vas, P., 1993, Parameter estimation, condition monitoring, and diagnosis of electrical machines, Clarendon Press, Oxford.
- [7] Nandi, S. and Toliyat, H.A., 1999, Condition monitoring and fault diagnosis of electrical machines, IEEE Ind. Appl.Society annual meeting
- [8] Akar, M. ve Çankaya, İ., 2009, Evirici ile sürülen asenkron motorlarda rotor çubuğu kırık arızasının tespiti, 5.Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, 5 s.
- [9] Filippetti, F., Franceschini, G. and Tassoni, C., 1995, Neural networks aided on-line diagnostics of induction motor rotor faults, IEEE Transactions on magnetics.
- [10] Kemal, V., 2001, Sincap kafesli asenkron makinada yapay sinir ağları ile rotor akısı yönlendirilmiş vektör denetimi, Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
- [11] Kalenderli, Ö., Bolat, S. ve İsmailoğlu, H., 2003, DEtermination of critical impulse breakdown voltage by artificial neural network, 3. Uluslar arası Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Sempozyumu.
- [12] Kim, C. E., Jung, Y.B., Yoon, S.B. and Im, D.H., 1997, The fault diagnosis of rotor bars in squirrel cage induction motors by time-stepping finite element method, IEEE Transactions on magnetics.
- [13] Watson, J. F., 1999, The use of line current as a condition monitoring tool for three phase induction motors, Design, operation and maintenance of high voltage (3.3 kV to 11 kV) electric motors for process plant.
- [14] Saraç, S., 1999, Kestirimci bakım ve elektrik motorlarında titreşim analizi ile erken arıza teşhisi, Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- [15] Soyarslan, S., 2001, Elektrik motorlarında rulman arızalarının oluşumu ve titreşim işaretlerinin spectral analizi ile arıza tanısı, Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
- [16] Desforges, M. J., Jacop, P. J. and Ball, A. D., 2000, Fault detection in rotating machinery using kernel-based probability density estimation, IEEE International Journal of Systems Science.
- [17] Cruz, S.M. A. and Marques Cardoso, A. J., 2000, Rotor cage fault diagnosis in three phase induction motors by extended park's vector approach, Electric machines and power systems.
- [18] Bellini, A., Filippetti, F., Franceschini, G., Tassoni, C. and Kliman, G. B., 2000, Quantitative evaluation of induction motor broken bars by means of electrical signature analysis, Industry applications conference.
- [19] Salles, G., Filippetti, F., Tassoni, C., Crellet, G. and Franceschini, G., 2000, Monitoring of induction motor load by neural network techniques, Power electronics
- [20] Haji, M. and Toliyat, H. A., 2001, Pattern recognition a technique for induction machines rotor fault detection 'eccentricity and broken rotor bar fault', Industry applications conference.
- [21] Sutherland, P. E. and Salon, S. J., 2002, Analysis of rotor faults in three phase induction machines, Industry applications conference.
- [22] Bezek, Ç., 2009, Sonlu elemanlar yöntemi ile asenkron motor analizinin MATLAB'da gerçekleştirilmesi, Yüksek lisans tezi, Fırat Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, 87 s.
- [23] Türkbay, H., 1997, Asenkron motorların sonlu elemanlar yöntemi ile analizi ve tasarımı, Yüksek lisans tezi, Fırat Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, 56 s.
- [24] Mohan, N., Undeland, T. M. ve Robbins, W. P., 2007, Güç Elektroniği, (Çev. N. Tuncay, M. Gökaşan, S. Boğosyan), İstanbul Teknik Üniversitesi, 429 s.
- [25] Baccarini, L.M.R., Menezes, B.R. and Caminhas, W.M., 2010, Fault induction dynamic model, suitable for computer simulation: simulation results and experimental validation, Mechanical systems and signal processing Vol.24, 300-311 p.
- [26] Matlab, 2008, Help, Product Help, SimPowerSystems, Asynchronous Machine, Electrical System, R2008B

EKLER

Ek. 1. Tez çalışmasının uygulama kısmı olan Asenkron Motorlarda Rotor Kırıkları Analizi ve Modellenmesi Projesine ait otomatik ve manuel versiyon MATLAB Simulink kodların ve tasarımının bulunduğu CD.