

**TC
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Asenkron Motorlarda Oluşan Arızaların
Modellenmesi ve Analizi**

MÜCAHİT ŞENOL

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK ANABİLİM DALI**

MALATYA

2008

Tezin Başığı: Asenkron Motorlarda Oluşan Arızaların Modellenmesi ve Analizi

Tezi Hazırlayan: Múcahit şENOL

Sınav Tarihi : 25.09.2008

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

Sınav Jürisi Üyeleri

Prof. Dr. M. Salih MAMIř.....

Prof. Dr. Teymuraz ABBASOV.....

Yrd. Doç. Dr. Müslüm ARKAN.....

.....

.....

.....

İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

.....

Prof.Dr.İsmail ÖZDEMİR
Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ASENKRON MOTORLARDA OLUŞAN ARIZALARIN MODELLENMESİ VE ANALİZİ

Mücahit Şenol

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Anabilim Dalı

vii + 68 sayfa

2008

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Müslüm Arkan

Asenkron motorlar bugün sanayide en çok kullanılan makinelerden birisidir. Bunlar yük ve gerilim değişimlerine karşı dayanıklı ve verimleri, benzerlerine göre yüksek makinelerdir. Asenkron motorlarda meydana gelebilecek hataların önceden tespiti, sistemin uzun süre kapalı kalmaması, sağlık ve güvenlik problemleri ve işgücü ve maddi kayıplar açısından önem kazanmıştır.

Bu çalışmada öncelikle asenkron motorlarda oluşabilecek arızalar ve bu arızaları tespit etmek için geliştirilmiş çeşitli arıza tespit yöntemleri incelenmiştir. Ardından asenkron motorlarda en çok karşılaşılan hatalardan biri olan stator sarım hataları ele alınmıştır. Stator sarım hataları genellikle sarım-sarım arası kısa devre hatası olarak başlar ve daha sonra faz-faz veya faz-nötr arası kısa devre arızasına yol açar. Bundan dolayı, stator sarım hatalarının gerçek zamanlı erken tespiti veya tahmini meydana gelebilecek zararların en asgari seviyeye indirilmesi için önemlidir.

Bu tezde asenkron motorlarda oluşan sarım kısa devre arızalarının analizi için stator sarımında kısa devre bulunan bir arızalı motor modeli elde edilmiş ve bu model Matlab Simulink programı kullanılarak simülasyon yapılmıştır. Değişik çalışma koşulları için sonuçlar verilmiştir. Gerçekleştirilen simülasyondan elde edilen sonuçlar akımın FFT'si alınarak analiz edilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Asenkron motorlar, stator sarımı, hata tespiti, modelleme.

ABSTRACT

Master Thesis

MODELLING AND ANALYSIS OF INDUCTION MOTOR FAULTS

İnönü University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electric and Electronic

vii + 68 pages

2008

Today induction motors are widely used and preferred by the industry. These motors are robust against load and supply variations and their efficiency is high when compare to other types of motor. Fault detection in early time is important because of preventing extended process shutdown, health and safety problems, and power and money losses.

In this study, first, induction motors faults types and fault prediction and detection methods are examined. Then, one of the most common faults, stator winding faults, are discussed. It is believed that stator winding faults start as undetected turn-to-turn faults within a coil, which lead to catastrophic phase-to-phase or phase-to-ground short circuit faults. To achieve prior warning of failure for minimization of harmful effects, shorted turns within a stator winding coil must be detected or predicted via on-line monitoring.

In this thesis, to analyse stator winding short-circuit faults, a model of an induction motor with shorted turns in stator winding is presented. The presented model has been simulated in MATLAB Simulink. Results are given for various working conditions. Simulation results have been analysed by using FFT of motor current.

KEYWORDS: Asynchronous motors, stator windings, fault detection, modelling.

TEŞEKKÜR

Bu alıőmanın her aőamasında yardım, destek ve tavsiyeleriyle bana yol gosteren, normal mesaisi dışında da bana vakit ayıran hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Müslüm Arkan'a;

Dersler ve tez aőamasında benden yardımlarını esirgemeyen hocam Sayın Prof. Dr. Teymuraz Abbasov'a;

Bu tezin her aőamasında büyük fedakarlıklarla bana yardım eden değerli eőim Elektrik Elektronik Yüksek Mühendisi Sümeyra'ya teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
TABLolar DİZİNİ	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR	vii
1. GİRİŞ	1
2. ASENKRON MOTORDA ARIZALAR, DURUM İZLEME VE TESPİT YÖNTEMLERİ	3
2.1. Durum İzleme Yöntemleri	3
2.2. Arıza Tespit Yöntemleri	3
2.3. Asenkron Motor Arızaları	4
2.3.1. Yataklama problemleri	5
2.3.2. Stator sarım problemleri	6
2.3.3. Elektriksel dengesizlik	8
2.3.4. Rotor arızaları	8
2.3.5. Gövdeye kaçak	10
2.4. Arızaların Sınıflandırılması	10
3. ARIZASIZ ASENKRON MOTORUN MODELLENMESİ	12
3.1. Stator referans dönüşümü ile $qd0$ dönüşümü	16
3.1.1. $qd0$ gerilim denklemleri	18
3.1.2. $qd0$ Moment denklemleri	22
3.1.3. Temel değerler	23
3.2. $qd0$ Stator Referans Denklemleri	23
3.3. İndüksiyon motorun stator referans düzleminde simülasyonu	25
4. STATOR SARIM HATALI ASENKRON MAKİNELER İÇİN GEÇİCİ REJİM MODELİ	29
4.1. Sarım Hatalı Asenkron Makinelerin Analizi	30
4.1.1. abc değişkenlerinde geçici rejim denklemleri	31
4.1.2. Referans Çerçeve dönüşümü	35
5. MATLAB © SIMULINK İLE MODELLEME	47
5.1. Arızasız Asenkron Motorunun Simulink Modeli	49
5.2. Arızalı Asenkron Motorunun Simulink Modeli	52
6. SİMÜLASYON SONUÇLARI	55
7. SONUÇ	65
KAYNAKLAR	66
ÖZGEÇMİŞ	68

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2. 1. Sağlıklı bir makine (a) ve dört adet kırık rotor çubuğu bulunan makinenin (b) deneysel hız sonuçları.....	9
Şekil 3. 1. abc ve rasgele $qd0$ arası ilişki.....	17
Şekil 4. 1. Asenkron makinenin stator sarım hataları.....	30
Şekil 4. 2. Tek faz üzerinde sarım-sarım hatası bulunan 3 fazlı stator sarım şeması.....	30
Şekil 5. 1. Arızasız asenkron motor q eksen Simulink blok diyagramı.....	49
Şekil 5. 2. Arızasız asenkron motor d eksen Simulink blok diyagramı.....	50
Şekil 5. 3. Arızasız asenkron motor elektromanyetik moment Simulink blok diyagramı.....	50
Şekil 5. 4. Arızasız Bir indüksiyon motoru için oluşturulan simülasyon modeli.....	51
Şekil 5. 5. Arızalı asenkron motor q eksen Simulink blok diyagramı.....	52
Şekil 5. 6. Arızalı asenkron motor d eksen Simulink blok diyagramı.....	52
Şekil 5. 7. Arızalı asenkron motor elektromagnetik torq Simulink blok diyagramı.....	53
Şekil 5. 8. Stator sarım hatası kaynaklı hata akımının Simulink blok diyagramı.....	53
Şekil 5. 9. Arızalı bir indüksiyon motoru için oluşturulan simülasyon modeli.....	54
Şekil 6. 1. Arızasız asenkron motorun tam yük altında hızlanma için simülasyon çıkış değerleri.....	56
Şekil 6. 2. Stator sarımında 1 adet kısa devre bulunan arızalı asenkron motorun tam yük altında hızlanma için simülasyon çıkış değerleri.....	57
Şekil 6. 3. Arızasız asenkron motorun tam yük kalıcı durum için moment simülasyon çıkış değerleri.....	57
Şekil 6. 4. Stator sarımında 1 adet kısa devre bulunan arızalı asenkron motorun tam yük kalıcı durum için moment simülasyon çıkış değerleri.....	58
Şekil 6. 5. Arızasız ve arızalı (1 sargı kısa devre) asenkron motorun tam yük kalıcı durum için akım spektrumu.....	58
Şekil 6. 6. Arızasız ve arızalı (1 sargı kısa devre) asenkron motorun tam yük kalıcı durum için moment spektrumu.....	59
Şekil 6. 7. Stator sarımında 4 adet kısa devre bulunan arızalı asenkron motor.....	60
Şekil 6. 8. Stator sarımında 4 adet kısa devre bulunan arızalı asenkron motor.....	60
Şekil 6. 9. Stator sarımında 10 adet kısa devre bulunan arızalı asenkron motor.....	61
Şekil 6. 10. Arızasız ve 10 sargısı kısa devre edilmiş arızalı asenkron motorun tam yük kalıcı durum için akım spektrumu.....	62
Şekil 6. 11. Arızasız ve 10 sargısı kısa devre edilmiş arızalı asenkron motorun tam yük kalıcı durum için moment spektrumu.....	62
Şekil 6. 12. 1, 4 ve 10 sargı kısa devre edilmiş arızalı motordan elde edilen akım spektrumu.....	63
Şekil 6. 13. Arızasız ve 1, 4 ve 10 sargı kısa devre edilmiş arızalı motordan elde edilen moment spektrumu.....	63
Şekil 6. 14. Kısa devre sarım sayısı – hata akımı (i_f) değişimi.....	64

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 6. 1. Asenkron motor simülasyon parametreleri	55
---	----

SİMGELER ve KISALTMALAR

B	stator hava aralığında oluşan döner alanın manyetik akı yoğunluğu
$\cos \varphi$	güç faktörünün
e	rotorda indüklenen emk
f	şebeke frekansı
i_r	bir rotor iletkeninden geçen akım
P_g	hava aralığı manyetik iletgenliği
N_s	stator sarım sayısı
N_r	rotor sarım sayısı
L_{ls}	her faz için sarım kaçak indüktansı
L_{lr}	sarım başına rotor sarım kaçak indüktansı
L_{ss}	stator sarımının self indüktansı
L_{rr}	rotor sarımının self indüktansı
L_{sm}	stator sarımları arası ortak indüktansı
L_{rm}	rotor sarımları arası ortak indüktansı
L_{sr}	stator-rotor arası ortak indüktansın tepe değeri
l	rotor çubuklarının uzunluğu
n	döner manyetik alanın hızı, devir sayısı
p	çift kutup sayısı
V	rotorun hızı
ω	açısal hız
λ	akı bağı
ψ	saniye bazında akı terimleri
X	reaktans
$(\theta-\theta_r)$	rotor için dönüştürme açısı

1. GİRİŞ

Asenkron motorlar günümüzde en çok kullanılan elektrik motor sürücüleridir. Asenkron motorlar, yapılarının basit, sağlam, güvenilir, verimli, ucuz, kolay anlaşılır olması, birim hacimdeki gücünün yüksek olması ve fazla bakım gerektirmemeleri gibi nedenlerle diğer motorlara nispeten tercih edilirler. Bu özelliklerinden dolayı sanayide, tarımda ve ev aletlerinde en çok kullanılan motorlardır. KW mertebesinden MW mertebesine kadar çeşitli güçlerde olabilen, patlayıcı ortamlar dahil her türlü ortamda çalışabilen asenkron makineler her alanda kullanılabilir. Asenkron motorlarda da sağlam ve güvenilir yapılarına rağmen, tüm mekanik sistemlerde olduğu gibi arıza oluşabilir. Asenkron makinelerdeki bu yaygın kullanım, hem maddi kayıpları hem de çalışanların güvenliği ve sağlığı açısından, asenkron makinelerde meydana gelecek hataların ve bu hataların yol açacağı arızaların önceden tespitini ve makine çalışmaz duruma gelmeden önce tamirini önemli kılmaktadır.

Artık modern sanayide elektrik makinelerinin arızalarının önceden tespiti ve bakımı, işletme stratejileri arasında yer almaktadır. Bugün gelinen yüksek teknolojik seviye ve üretim kolaylığından dolayı firmalar için önemli olan arızalardan kaynaklanan üretim aksamalarını önlemektir. Elektrik makinelerinin normal olmayan şartlar altında çalışma prensipleri ve elektrik makinelerindeki arızalar yıllardan beri araştırmacıların ilgi alanı olmuştur. Elektrik makinelerindeki arızalar elektrik arızaları ve mekanik arızaları olmak üzere iki kısma ayrılabilir.

Asenkron motorlarda en çok görülen arızalar rulman, stator ve rotor arızalarıdır. Asenkron motor arızalarının %36'sı stator sarım hatalarından kaynaklanmaktadır. Bu hatalar, tespit edilememiş sarım-sarım arası hatalar olarak başlarlar ve bu hataları faz-faz arası yada faz-toprak arası gibi daha büyük kısa devre hataları izler [1]. En sık rastlanılan hatalardan biri olması nedeniyle bu çalışma stator arızaları üzerine temellendirilmiştir.

Stator sarım hatası tespit sistemi tasarlamak için yapılması gereken ilk şey sarımlarında kısa devre olan bir asenkron motor modeli oluşturmaktır. Literatürde geliştirilmiş olan motor modellerinden bazıları şunlardır; Rangarajan M. Tallam tarafından stator sarım hatalarını tespit için geliştirilen Tallam modeli, M.Arkan ve arkadaşları tarafından hazırlanan sarımlar arası hata modeli, Sıklıkla kullanılan AR-MA model ve öz nitelik vektörü vb.

Elektrik makinelerinin geçici ve kalıcı durum analizi için genellikle ortagonal veya $qd0$ eksen teorisi ile birleştirilen elektrik makineleri genel teorisi tercih edilir. Böylece elektrik makinelerinin modellenmesi abc 'den $qd0$ 'ya dönüşüm kullanılarak daha kolay yapılabilir. Aynı dönüşüm yöntemleri asimetrik (arızalı) makinelerin modellenmesi ve analizi içinde uygulanabilir. Bu tezde modelleme mantığından hareketle ilk olarak sağlam bir asenkron motorun matematiksel modeli oluşturulacaktır. Elde edilen matematiksel model denklemleri MATLAB SIMULINK kullanılarak bir arızasız asenkron motor simülasyonu gerçekleştirilecektir.

Arızasız asenkron motor üzerinde yapılan bu çalışma temel alınarak Rangarajan M. Tallam'ın arızalı modeline geçiş yapılacaktır [2]. Stator sarım hatalı bir asenkron makinenin matematiksel denklemleri elde edilecek ve modellenecektir. Arızasız modelde olduğu gibi abc domenindeki denklemler $qd0$ domenine dnüşürülecektir. Son aşamada ise MATLAB SIMULINK kullanılarak stator sarım hatalı bir asenkron makine simülasyonu gerçekleştirilecektir. Simülasyonlar sonucunda elde edilen sonuçların analizi yapılacaktır.

2. ASENKRON MOTORDA ARIZALAR, DURUM İZLEME VE TESPİT YÖNTEMLERİ

Asenkron makineler sanayide en çok kullanılan elektrik makineleridir ve endüstriyel yükün yaklaşık %90'ını oluştururlar. Patlayıcı ortamlar dahil her türlü kötü ortam koşulunda çalışabilirler. Bu makineler çalışmaları sırasında ise elektriksel, mekaniksel, termal ve çevresel birçok zorlamalara maruz kalırlar. Bu durum neticesinde de beklenmedik bir şekilde bozulabilirler ve sistem arızasına yol açabilirler.

Endüstride en yaygın olarak kullanılan motorlar olmaları nedeni ile özellikle büyük güçlü asenkron motorlarda arızaların motor onarılamayacak duruma gelmeden önce tespit edilmesi önem kazanmıştır.

2.1. Durum İzleme Yöntemleri

Asenkron motorlarda meydana gelen hataların tespit edilebilmesi için sistemin sürekli gözetim altında tutulması gerekir. Motorlarda titreşim, termal, akustik, kimyasal ve elektriksel veriler izlenerek sürekli bir denetim sağlanabilir. Bu izleme neticesinde elde edilen sistem parametreleri periyodik olarak değerlendirilir ve sistemde bir aksama olup olmadığına yani motorda bir hata oluşup oluşmadığına karara verilir. Bu konu ilerleyen bölümlerde daha geniş ele alınacaktır.

2.2. Arıza Tespit Yöntemleri

Durum izleme yöntemleri ile sistemde bir problem olduğu anlaşıldığında bu problemin kaynağını tespit etmek için uygulanacak arıza tespit yöntemleri vardır. Titreşim analizi, parametre tahmini, kısmi boşalma test yöntemleri, spektrum analizi (FFT), ardışık bileşenler gibi klasik yöntemlerin yanı sıra yumuşak hesaplama yöntemleri diye de adlandırılan ileri hata tespit metodları da kullanılır. Bunlar, bulanık mantık, yapay sinir ağları genetik algoritma, geri yayılım algoritması, zaman serileri veri madenciliği gibi yöntemlerdir.

2.3. Asenkron Motor Arızaları

Asenkron motor arızaları genel olarak, stator sargılarında oluşan hatalar (%36), sincap kafesli motorlarda rotorda oluşan mekanik arızalar (%9), rulman arızaları (% 41) ve diğer hatalar (% 14) olarak sınıflandırılabilir [3, 4]. Motorlarda ana hatalar aşağıdaki gibi sıralanabilir [5]:

- 1) Bir veya birden fazla stator faz sarımı, kısa devre veya açık devreden kaynaklanan stator hataları
- 2) Statorun sargılarının yanlış bağlanması
- 3) Kırık rotor çubuğu veya çatlak rotor bilezikleri
- 4) Statik ve/veya dinamik hava boşluğu düzensizliği
- 5) Eğik şaft
- 6) Rotor alanı sarımlarının kısa devre olması
- 7) Yatak ve dişli kutusu hataları

Yukarıdaki hatalardan 1)Yataklama, 2) stator veya armatür hataları, 3) indüksiyon makinelerinde kırık rotor çubukları ve halka hataları, 4)Eksantrik kaynaklı hatalar, en çok rastlanan hatalardır ve çok dikkat gerektirir. Bu hatalar aşağıdaki olaylara sebep olur:

- 1) Dengesiz hava boşluğu gerilimi ve hat akımları
- 2) Yüksek tork darbeleri
- 3) Düşük ortalama tork
- 4) Düşük kayıplar ve verimde azalma
- 5) Yüksek ısınma

Bir arıza tespit işlemi üç kısımdan oluşur. Bunlar; arızanın tespiti, arızanın türü ve yerinin belirlenmesi ve motorun o arızayla ne kadar daha çalışabileceğinin tespitidir. Bunlarla birlikte arıza tespitinde esas önemli olan arızanın muhtemel zamanının tespit edebilmektir ve bu çok kapsamlı bir işidir. Üstelik bu noktada motorun cinsi, arızanın karakteristiği arızanın cinsi de baş etkenlerdendir [6].

Motorda arıza meydana getiren olası hataları tespit etmek için şimdiye kadar birçok yol keşfedilmiştir. Bu metotlar şu şekilde sıralanabilir [5,7]:

- 1) Elektromanyetik alan izleme, bobinleri araştırma, Motor şaftı etrafında bobin zararları (eksenel akıya bağlı tespit)
- 2) Sıcaklık ölçümleri
- 3) Kızılötesi tanımlama
- 4) Radyo frekansı emisyonu izleme
- 5) Ses ve titreşim izleme
- 6) Kimyasal analiz
- 7) Akustik ses ölçümleri
- 8) Motor-akım sinyal analizi
- 9) Model, yapay zeka, sinir ağı tabanlı teknikleri

Genel olarak karşılaşılan hataları ve tespit yöntemlerini kısaca incelersek:

2.3.1. Yataklama problemleri

3 fazlı asenkron makinelerde arızalara neden olan birincil hata yataklama hatalarıdır [8]. Elektrik makinelerinin çoğunluğu rulman veya dönen eleman yataklarını kullanır. Her yatak bir iç, biri dış olmak üzere iki halkadan oluşur. Rulman veya dönen elemanlar, bu halkaların içinde yollara yerleşmiştir. Normal çalışma şartlarında, dengeli yükleme ve iyi hizalama yapılmış olsa bile eskime hataları oluşabilir. Bu hatalar, yüksek ses ve yüksek titreşime neden olabilir. Yataktan kopan küçük parçalar, yatakların pullanması veya parçalanmasına sebep olabilir.

Yataklar titreşim, doğal dışmerkezlilik ve yatak akımları gibi iç sebeplere ek olarak aşağıdaki nedenlerle de bozulabilir:

- 1) Sert ve aşındırıcı parçaların neden olduğu kirlenme ve korozyon. Su, asit gibi maddelerin paslandırma etkisi
- 2) Uygunsuz yağlama: Aşırı veya eksik yağlamanın neden olduğu ısınma veya aşınma
- 3) Mil yatağının uygunsuz yerleşimi: yatağın şafta zorlayarak yerleşimi

Motor arızalarının %40-50 si yataklama ile alakalıdır. Bazı yataklama hataları rotor asimetri hatası olarak görülebilir [7]. Yataklama hataları motorda sürtünme ve

sarım kayıplarına neden olduklarından ötürü enerji tüketimini arttırlar. Bu da aşırı ısınma ve sonucunda sarımlarda voltaj ve empedans dengesizliğine yol açar. Parçaların balanslarının bozuk yapılması veya yapılan işlemde dolayı yüksek titreşim olan alanlara yeterince titreşim izolasyonu yapılmaması da titreşime neden olur. Bu durum motor yataklarına aşırı yük binmesine bunun sonucu olarak da sürtünmenin artıp yatakların ömrünün azalmasına neden olur.

Bu arızaların tespitinde en yaygın kullanılan durum değerlendirme tekniği titreşim analizidir [9]. Titreşim frekansının analizi yataklama arızalarının tespit edilmesinde çok etkilidir. Titreşim frekansının aletsel olarak denetlenmesi için ek sensörler gerekeceği için, özellikle küçük ve orta ölçekli makinelerde fiziksel ve ekonomik olarak uygulaması kolay değildir. Bu tür makinelerle portatif aletlerle periyodik olarak denetim yapmak mümkündür, ancak bu da süreklilik sağlamayacağı için garantili değildir. Bununla birlikte yataklama hatasıyla ilişkili titreşim frekansı bilinen yataklama geometrisi ve rotor hızından kolaylıkla hesaplanabilir. Böylece motor akım verilerini kullanarak sürekli bir denetim sağlamak mümkün olur. Yataklama sağlığındaki bozulmanın tespiti için hata frekansı karakteristik değerleri temel değerler ile karşılaştırılır [8].

Yataklama durumu kötüleşmiş bir makinede titreşim sinyalleri dönüş hızından da etkilenmektedir. Makine titreşimi arttığında bir arıza durumunun yakın olduğu düşünülebilir. Yatak ömrü aynı zamanda değişken makine hızına da bağlıdır.

2.3.2. Stator sarım problemleri

Bu hatalar genellikle izolasyon bozukluğuna bağlı olarak ortaya çıkar. Genel olarak faz-toprak ve faz-faz arası hatalar olarak bilinir. Bu hataların tespit edilemeyen sarım-sarım arası küçük hatalardan başladığı ve sonunda büyüyerek ana hatanın ortaya çıktığı kabul edilir.

Stator izolasyonu birkaç sebebe bağlı olarak hata verebilir. Bunlardan önde gelenleri şunlardır [10]:

- 1) Stator çekirdeği veya sargı yüksek sıcaklığı
- 2) Gevşek bağlanmış çekirdek sacları, bağlantı noktaları
- 3) Sargı sonlarındaki hatalı bağlamalar

- 4) Nem, yağ ve toza bağlı kirlenme
- 5) Kısa devre veya motorun başlangıç mukavemeti
- 6) Elektriksel boşalmalar
- 7) Soğutma sistemindeki kaçaklar.

Stator sarım problemleri elektrik motorunun hem enerji tüketimini artırır, hem de verimini hızlı bir şekilde düşürür.

Bunların sonucunda ilk olarak aynı bobin içindeki kondüktörlerin izolasyonu bozulur. Daha sonra bu aynı fazdaki bobinlere ve diğer fazlardaki bobinlere sıçrar. Kondüktörlerdeki değişikliklerin belirlenmesi makinenin bozulmadan önce tamirine veya yenilenmesine olanak sağlar.

Voltajdaki dengesizlikler elektrik motorunun çalışma sıcaklığını aşırı bir şekilde artırır. %3.5 lik bir voltaj dengesizliği elektrik motorunun çalışma sıcaklığında %25 lik bir artışa sebep olabilir. Sıcaklıktaki bu artış, sarım kaybını ve enerji tüketimini artırır ve elektrik motorunun güvenilirliğini düşürür. (Sıcaklıktaki her 10 derece artışı izolasyon ömrünü, dolayısıyla motor ömrünü yarı yarıya azaltır.)

Hatalı bağlantılardan dolayı oluşan dengesiz empedans, hatalı sarım teknikleri (hem yeni hem de tamir edilmiş motorlarda) ve izolasyon koşulları (sarımlardaki kısıklıklar ve açıklıklar), motorun çalışma sıcaklığını ve güvenilirliğini tıpkı voltajdaki dengesizlikler gibi etkileyebilirler. Bunlara ek olarak motorun kullanım maliyeti hızlı şekilde artabilir.

Hem voltaj, hem de empedans dengesizliğinde; eğer dengesizlik yeterince sürerse, yüksek voltaj ve düşük empedans fazı fazla akım çeker ve sıcaklığı artar. Muhtemelen de o fazın yanmasına sebep olur. Voltajdan veya empedanstan kaynaklanıyor olsa da, bu çeşit hatalar tek fazlılık olarak adlandırılır ve bir fazdaki voltaj kaybının sonucunda olabileceği gibi hatalı bağlantıdan ya da uygun olmayan sarım tekniklerinden de kaynaklanabilir. Voltajdaki ve akımdaki dalgalanmanın %2 yi aşmaması tavsiye edilir. Frekans değişimleri gibi istenmeyen etkiler tesisteki koruma elemanlarını aşarak motora ulaşırsa motoru mutlaka etkiler.

Stator arızalarının tespitinde birkaç yöntem vardır: Büyük jeneratörler ve stator sargıları 4kV ve üstü cihazlar için; kısmi-boşalma test yöntemleri güvenilir sonuçlar vermektedir. TGA-B adı verilen taşınabilir bir test aygıtı da bu iş için yeterli olabilmektedir.

Bununla birlikte düşük gerilimli motorların stator arızalarının tespiti hala bir

standart kazanmamıştır. Literatürde makine şaftını çevreleyen ortak merkezli büyük bir bobin ile motorun aksel akı bileşenlerinin analizi ile sarım-sarım hataları tespit edilebilmiştir [11]. Bu konuyla ilgili yapılmış başka bir çalışmada bu arızaların makine empedansında asimetriye yol açtığı; bunun da dengesiz faz akımları oluşmasını sağladığı gösterilmiştir [12].

2.3.3. Elektriksel dengesizlik

Elektriksel dengesizlikten kaynaklanan arızalar, motorlarda olabilecek ve dönme eksenini ile ağırlık merkezinin çakışmamasından kaynaklanan mekanik dengesizlik gibi makine çalışmasını menfi yönde etkiler. Elektrik motorları manyetik merkezlerini sabitleyemedikleri zaman şebeke frekansındaki titreşimlerinde modülasyon ve harmonikler oluşur.

2.3.4. Rotor arızaları

Stator dizaynının aksine rotor kafes dizayn ve üretiminde küçük değişikliklere gidilmiştir. Bu nedenle karşılaşılan rotor hataları nispeten daha azdır. Rotor çubuğu ve bilezik arızaları aşağıdaki sebeplerden dolayı oluşabilir.

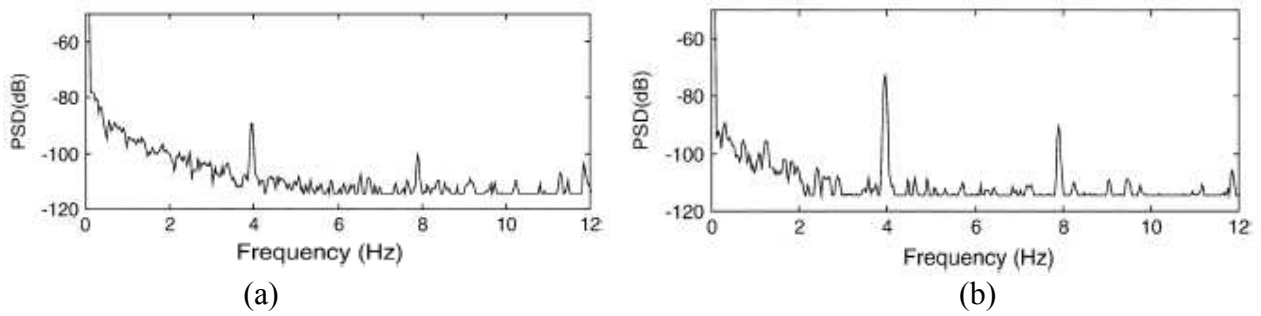
- 1) Aşırı ve dengesiz sıcaklık, aşırı kayıplar ve kıvılcımlardan kaynaklanan termal etkiler.
- 2) Elektromanyetik kuvvetler, dengesiz manyetik çekim, elektromanyetik gürültü ve titreşimlerden kaynaklanan manyetik etkiler.
- 3) Üretim problemlerinden kaynaklanan etkiler.
- 4) Şaft torkundan, merkezkaç kuvvetinden ve döngüsel mukavemetten dolayı ortaya çıkan dinamik etkiler.
- 5) Kirlenme ve nem-kimyasallar nedeni ile rotor malzemesindeki aşırı yıpranmanın neden olduğu çevresel etkiler.
- 6) Sac kayıpları, eskiyen parçalar ve yataklama hatalarından kaynaklanan mekanik etkiler.
- 7) Genellikle kırık rotor kısa devre çubuklarından, döküm boşluklarından ya da rotor ve stator arasındaki hava boşluğu düzensizliğinden kaynaklanan sorunlar.

Rotor arızalarının sonucu olarak üretilen torkun düşmesi verimliliğin de azalması anlamına gelir. Yüksek titreşim elektrik motorunun veriminin düşmesine neden olur.

Sincap kafesli asenkron motorlar, yük altında kalkış yaptıklarında rotor kafes malzemesi zorlanmaktadır. Kafesin yapımından kaynaklanan hatalar varsa büyük arızalara sebep olmaktadır. Kafesli asenkron motorlar bilezikli asenkron motorlara göre daha fazla ısınır. Bilezikli rotorlarda, rotorda oluşan ısının çoğu dış dirençlerde oluşur ve motor zorlanmaz.

Geçici bir rejim olan kalkış esnasında oluşan kuvvetler, mekanik ve ısı (sıcaklık etkisiyle meydana gelen) zorlanmalar, büyük güçlü asenkron motorlarda rotor çubuklarının kırılmasına neden olabilir. Bu tür bir arıza motorun işletmeye alınması esnasında değil de bir kaç bin saate varabilen bir işletme sonrasında da görülebilir. Böyle bir arıza durumunda kalkışlar uzar ve güçleşir, motorun çalışma gürültüsü değişir. Sürekli çalışmaya geçince stator akımlarında bozulmaya sebep olur. Kafes arızası zamanında fark edilmezse kafesin, hatta rotor sac paketinin tamamen değişmesi gerekebilir.

Rotor arızalarının tespitinde stator bobinlerinde oluşan gerilimin zaman-frekans domeninde analizi kullanılmıştır. Ayrıca shaft akısının ya da genel ifade ile bir makinenin shaftının etrafına konulan bir sarıma bağlı olarak izlenen aksel kaçak akının frekans domeni analizi ile de bu arızalar tespit edilmiştir.



Şekil 2. 1. Sağlıklı bir makine (a) ve dört adet kırık rotor çubuğu bulunan makinenin (b) deneysel hız sonuçları

2.3.5. Gövdeye kaçak

Motor gövdesi ve bobinler arasında meydana gelen elektriki temasa gövdeye kaçak denir. Bu kaçak:

- a) kapakları gövdeye tespit edilen civataların bobinlere temas etmesi,
- b) iletkenlerin stator oluklarına yerleştirirken oyuk ağızlarına temas etmesi,
- c) bağlantı klemenslerinin yanması veya bağlantı uçlarının koparak gövdeye temas etmesi,
- d) aşırı ısınmadan dolayı iletkenlerin izolesinin bozularak gövdeye temas etmesi gibi nedenlerden dolayı meydana gelebilir.

- Bobin grupları arasında kısa devre: bobinler yerleştirilirken çizilme sonucunda değişik fazlara temas edebilir. İzolasyonun zayıflaması durumunda, zaman içerisinde bozulmalar kısa devreye yol açabilir.

- Bobinler içinde kısa devre: Bobinler içerisinde iki veya daha fazla iletkenin temas etmesi kısa devreye sebep olur. Bunun dışında, aşırı yük sonucu ısınma sebebiyle yalıtkanlığın bozulması sebebiyle kısa devre meydana gelebilir.

- Bobinlerde veya bağlantılarda kopukluk: klemens tablosunda gevşeme, bobin grupları bağlantı yerlerinde gevşeme ve kopukluk, herhangi bir nedenle bobin iletkenlerinde kopma bu arızayı meydana getirir.

2.4. Arızaların Sınıflandırılması

Hataların sınıflandırılmasında genel olarak, motor titreşiminin ölçülmesi ve stator akımının frekans bileşenlerinin çeşitli yöntemlerle analizi metotları kullanılır [13].

Literatürde mekanik rulman arızaları iç bilezik, dış bilezik ve bilye arızaları olarak sınıflandırılmış ve her bir arıza nedeniyle ortaya çıkan titreşimin çapı, bilye çapı ve bilye sayısının bir fonksiyonu olarak hesaplanmıştır [14-15]. Ölçülen mekanik titreşimin dalga şekline dalgacık dönüşümü uygulanmış ve ayrıntı katsayıları bir sınır ağına girilerek rulman arızaları sınıflandırılmıştır [8]. Rulman arızaları motorun yapısına etki ederek stator akımının frekans bileşenlerinde de bozulmaya yol açar . Bu bozulma şu şekilde gerçekleşir: Elektrik makinelerinde, rotor-stator arasındaki ilişki bu iki parça arasındaki hava aralığından geçen manyetik akı ile sağlanır. Eğer hava aralığı

rotorun 60 derecelik çevresi boyunca simetrik olarak dağılmamışsa, o zaman motor içinde düzgün olmayan manyetik alanlar oluşur. Bu manyetik dengesizlikler stator sargılarının hareketine sebep olan kuvvetleri oluşturur ve sonuç olarak sargılarda tahribata sebebiyet verir ve titreşimler oluşturur. Rotor ve stator arasındaki bu tip bir arıza durumu çoğu zaman rotor eksenel kaçıklığı (bozukluğu) olarak nitelendirilir. Benzer şekilde, hava aralığı içindeki manyetik akı yoğunluğundaki bozulmaları üreten bu eksenel kaçıklıklar, rulman kaynaklı titreşimlerle stator akımları arasındaki spektral ilişki ile de belirlenebilir. Çünkü söz konusu bu eksenel bozukluk manyetik akıda değişimlere sebep olur ve motor endüktansları üzerindeki etkisi ile stator akımlarında harmonikler üretir [4].

Literatürdeki diğer çalışmalarda arızalı motorlardan alınan stator akımı verilerinin belli bir kayıt aralığında kesikli Fourier dönüşümüyle elde edilen frekans spektrumu bir sinir ağına girilerek [15], veya ayrıntılı dalgacık dönüşümü katsayılarının istatistiksel analizleriyle [16] rulman arızaları sınıflandırılabilir. Arızaların motorun yüklü durumdayken belirlenmesi amacıyla benzer çalışmalar yapılmış ve stator akımının frekans spektrumunda, mekanik yükün dairesel yapısındaki bozukluk nedeniyle ortaya çıkan bazı frekanslar elimine edilerek rulman hataları sınıflandırılmıştır [17,18].

Söz konusu çalışmaların çoğunda asenkron motor arızalarının sınıflandırılmasında, stator akımına veya titreşim dalga şekline uygulanan dönüşüm yöntemleri sonucunda elde edilen veriler tümüyle sınıflandırıcıya girilmektedir [19]. Arızalı motorlardan elde edilen veriler, sağlam motorlardan alınan verilerle karşılaştırılarak sınıflandırma ve hata tespiti yapılır.

3. ARIZASIZ ASENKRON MOTORUN MODELLENMESİ

Günümüzde dünya üzerinde endüstride kullanılan motorların %90' ını asenkron motorlar oluşturmaktadır [20]. Ucuz olması, fırça ve kolektörün bulunmaması ve az arıza yapması gibi nedenlerle sık tercih edilirler. Asenkron makinelerde hız sabittir. Güç ile çok az değişir ve ancak kademeli olarak ayarlanabilir. Son yıllarda yarı iletken güç elektroniğindeki ve mikro-elektronikteki gelişmeler asenkron makinelerin kontrolünü kolaylaştırdığı için kullanımının daha da yaygınlaşmasını sağlamıştır.

Asenkron makinelerin en önemli dezavantajlarından birisi, şebekeden reaktif akım geçmemesidir. Bu da sonuçta makinenin $\cos \phi$ güç faktörünün azalmasına neden olur. Bir diğeri ise asenkron makinelerin yol verme akımlarının büyük olmasıdır.

Alternatif akım makinelerinde stator sargılarında oluşan manyetik alan alternatif bir alan olup dönme özelliğine sahiptir. Asenkron motorlarda stator sargılarında döner manyetik alanın hızı yani devir sayısı (n_1) besleme şebekesinin frekansına bağlı olup aşağıdaki şekildedir.

$$n_1 = \frac{60 * f}{p} \quad (3.1)$$

f : şebeke frekansı , p : çift kutup sayısı

Bu devir sayısına asenkron makinenin senkron hızı denir.

Rotorda indüklenen emk;

$$e = [V \times B] * l \quad (3.2)$$

şeklindedir. $V \perp B \perp l$ olduğuna göre, $e = V * B * l$ olur.

V : rotorun hızı , l : rotor çubuklarının uzunluğu

Stator sargılarına gerilim uygulandığında, Biot-Savart yasasına göre bir F kuvveti uygulanır ve rotorda bir döndürme torku elde edilir.

$$F = B * l * I_1 \quad (3.3)$$

B : stator hava aralığında oluşan döner alanın manyetik akı yoğunluğu,

I_r : bir rotor iletgeninden geçen akım.

$$T_{load} = F \frac{D}{2} \quad (3.4)$$

$$T_{ind} = T_{load} + T_{F\&W} + J \frac{d\omega_r}{dt} \quad (3.5)$$

Dönme hareketinin gerçekleşebilmesi için asenkron motorun ürettiği tork, yük torkunu, sürtünme ve rüzgar torkunu ve atalet torkunu karşılamalıdır. Motorun çalışmasında döndürme torku döner alan yönündedir. Döndürme torku, rotoru döner alana yaklaştırmaya çalışır. Boş çalışmada rotor senkron hıza yakın bir hızda döner. Motor yüklendikçe rotorla döner alan arasındaki hız farkı giderek artar. Asenkron motorun çalışma ilkesi gereği, normal çalışma şartları altında rotor hızı hiç bir zaman döner alan hızına erişemez [21].

Döner alanın etkisiyle rotor döner alanın peşinden döner, hızı n' dir. O halde $n_1 - n'$ indükleyen hız nispi hız adını alır ve $V = n_1 - n = n_2$ olur. Dolayısı ile rotor devir sayısı n ile stator devir sayısı n_1 arasında $n_1 > n$ bağıntısı vardır. Bu bağıntı asenkron motorun endükleme prensibinin en temel bağıntısıdır. Asenkron motorlarda $n_1 = n$ olması düşünülemez. Bu durumda endükleme etkisi son bulur, rotor akımları ve döndürme momenti sıfır olur.

Stator döner alanı hızı ile rotor hızı arasındaki cebirsel farka kayma hızı ve bu hızın döner alan hızına oranına kayma denir. Kayma makinenin incelenmesinde en önemli büyüklüktür. S ile gösterilir.

$$S = \frac{n_2}{n_1} = \frac{n_1 - n}{n_1}$$
$$\%S = \% \frac{n_1 - n}{n_1} * 100 \quad (3.6)$$

Rotorda indüklenen n' nin frekansı;

$$f_2 = \frac{p * n_2}{60} = \frac{p(n - n_1)}{60} = \frac{p * n_1}{60} * \frac{n_1 - n}{n_1}$$

$$f_2 = f_1 * \frac{n_1 - n}{n_1}, \quad f_2 = S * f_1 \quad (3.7)$$

Asenkron motorda kaymanın $s = 0$ olduğu durumda rotorda herhangi bir indükleme söz konusu olmaz. Rotor akımı sıfır olur. Bu durumda rotor torku da sıfır olur ve rotor dönmez.

3 fazlı bir asenkron motorda manyetik olarak bağlı bulunan stator ve rotor denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_s^{abc} &= p\lambda_s^{abc} + \mathbf{r}_s^{abc} \mathbf{i}_s^{abc} \\ \mathbf{V}_r^{abc} &= p\lambda_r^{abc} + \mathbf{r}_r^{abc} \mathbf{i}_r^{abc} \end{aligned} \quad (3.8)$$

burada $p = \frac{d}{dt}$ 'dır. Daha açık ifade edersek:

$$\begin{aligned} V_{as} &= r_s i_{as} + \frac{d\lambda_{as}}{dt} \quad \text{V} \\ V_{bs} &= r_s i_{bs} + \frac{d\lambda_{bs}}{dt} \quad \text{V} \\ V_{cs} &= r_s i_{cs} + \frac{d\lambda_{cs}}{dt} \quad \text{V} \end{aligned} \quad (3.9)$$

$$\begin{aligned} V_{ar} &= r_r i_{ar} + \frac{d\lambda_{ar}}{dt} \quad \text{V} \\ V_{br} &= r_r i_{br} + \frac{d\lambda_{br}}{dt} \quad \text{V} \\ V_{cr} &= r_r i_{cr} + \frac{d\lambda_{cr}}{dt} \quad \text{V} \end{aligned} \quad (3.10)$$

Akı denklemleri: Asenkron makinenin akı denklemlerini, sarım, akım ve indüktansları cinsinden ifade edersek:

$$\begin{bmatrix} \lambda_s^{abc} \\ \lambda_r^{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{ss}^{abc} & \mathbf{L}_{sr}^{abc} \\ \mathbf{L}_{rs}^{abc} & \mathbf{L}_{rr}^{abc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_s^{abc} \\ \mathbf{i}_r^{abc} \end{bmatrix} \quad \mathbf{Wb.turn} \quad (3.11)$$

Burada;

$$\lambda_s^{abc} = \begin{bmatrix} \lambda_{as} \\ \lambda_{bs} \\ \lambda_{cs} \end{bmatrix}, \quad \lambda_r^{abc} = \begin{bmatrix} \lambda_{ar} \\ \lambda_{br} \\ \lambda_{cr} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{i}_s^{abc} = \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{as} \\ \mathbf{i}_{bs} \\ \mathbf{i}_{cs} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{i}_r^{abc} = \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{ar} \\ \mathbf{i}_{br} \\ \mathbf{i}_{cr} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Stator-stator arası ve rotor-rotor arası sarım indüktansları aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\mathbf{L}_{ss}^{abc} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ss} & L_{sm} & L_{sm} \\ L_{sm} & L_{ls} + L_{ss} & L_{sm} \\ L_{sm} & L_{sm} & L_{ls} + L_{ss} \end{bmatrix} \quad \mathbf{H} \quad (3.13)$$

$$\mathbf{L}_{rr}^{abc} = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_{ss} & L_{rm} & L_{rm} \\ L_{rm} & L_{lr} + L_{rr} & L_{rm} \\ L_{rm} & L_{rm} & L_{lr} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad \mathbf{H} \quad (3.14)$$

Stator-rotor arası ortak indüktanslar rotor açısına bağlı olarak ifade edilmelidir:

$$\mathbf{L}_{sr}^{abc} = [\mathbf{L}_{rs}^{abc}]^t = L_{sr} \begin{bmatrix} \cos\theta_r & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta_r & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta_r \end{bmatrix} \quad \mathbf{H} \quad (3.15)$$

Burada; L_{ls} her faz için sarım kaçak indüktansı, L_{lr} sarım başına rotor sarım kaçak indüktansı, L_{ss} stator sarımının self indüktansı, L_{rr} rotor sarımının self indüktansı, L_{sm} stator sarımları arası ortak indüktansı, L_{rm} rotor sarımları arası ortak indüktansı, L_{sr} stator-rotor arası ortak indüktansın tepe değerini ifade etmek için kullanılmıştır.

Demirdeki kaçaklar göz ardı edilirse yukarıdaki indüktanslardan bazılarını, stator ve rotor sarım sayıları (N_s ve N_r) ve hava aralığı manyetik iletkenliği (P_g) cinsinden ifade edebiliriz:

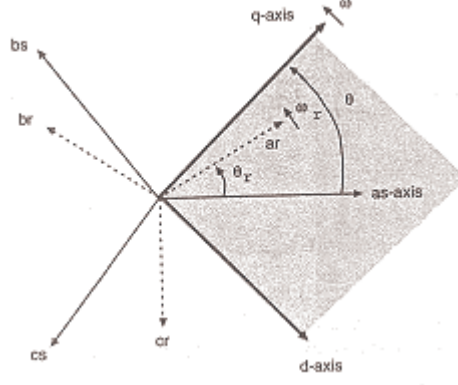
$$\begin{aligned}
 L_{ss} &= N_s^2 \cdot P_g & L_{sr} &= N_r^2 \cdot P_g \\
 L_{sm} &= N_s^2 \cdot P_g \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) & L_{rm} &= N_r^2 \cdot P_g \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) \\
 L_{sr} &= N_s N_r \cdot P_g
 \end{aligned} \tag{3.16}$$

3-faz ideal makine, her sarım için 6 adet birinci derece diferansiyel denklem ile tanımlanır. Bu denklemler sarımlar arası indüktanslara dolayısıyla birbirine bağlıdır. Stator-rotor kuplaj terimleri rotor pozisyonuna bağlı fonksiyonlar olup, rotor dönünce zamana bağlı olarak değişirler.

dq ve $\alpha\beta$ gibi matematiksel dönüşümler, yukarıdaki asenkron makine modelinin geçici rejim çözümünün hesaplanmasını kolaylaştırır. Bu dönüşüm ile zamana göre değişen indüktanslar, sabit indüktanslı diferansiyel denklemlere dönüştürülmüş olur.

3.1. Stator referans dönüşümü ile $qd0$ dönüşümü

Bu bölümde arızasız makinenin abc denklemleri $qd0$ değişkenlerine dönüştürülecektir. İdeal üç fazlı asenkron makinenin simetrik hava boşluğu olduğu varsayılır. $qd0$ referans çerçeveleri kullanılabilirlik ve diğer elemanlarla uyumluluk esasına göre seçilir. Stator ve senkron olmak üzere genelde kullanılan iki tür referans çerçeve modeli vardır. İkisinin de bazı durumlarda avantajları bulunmakla birlikte, bu çalışmada stator kısa devre sarım hataları için bir model oluşturulduğundan, biz modelimizde stator referans çerçeve modelini kullanacağız.



Şekil 3. 1. *abc* ve rasgele *qd0* arası ilişki

İlk önce ω hızı ile rotor ile aynı yönde dönen bir rasgele çerçevede asenkron motor denklemlerini çıkaracağız. $\omega=0$ yaparak durağan referans çerçeve denklemleri, $\omega=\omega_e$ hızı ile senkron dönen çerçeve denklemleri elde edilebilir. Öncelikle makinenin gerilim ve moment denklemlerini faz nicelikleriyle ifade etmek gerekir. ω açısal hızı ile dönen bir referans çerçevede *abc* değişkenleriyle *qd0* değişkenleri arasındaki ilişki Şekil 3.1’de verilmiştir. [22] den *abc* → *dq0* dönüşüm matrisi ve tersi aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$T_{qd0}(\theta) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin(\theta) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$\left[T_{qd0}(\theta)\right]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

3.1.1. $qd0$ gerilim denklemleri

Matris gösterimi olarak, stator sarım abc gerilim denklemleri aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\mathbf{V}_s^{\text{abc}} = p\boldsymbol{\lambda}_s^{\text{abc}} + \mathbf{r}_s^{\text{abc}}\mathbf{i}_s^{\text{abc}} \quad (3.19)$$

Eşitliğin iki tarafına $abc \rightarrow dq0$ dönüşüm matrisi uygulanırsa:

$$\left[T_{qd0}(\theta) \right] \mathbf{V}_s^{\text{abc}} = \left[T_{qd0}(\theta) \right] p\boldsymbol{\lambda}_s^{\text{abc}} + \left[T_{qd0}(\theta) \right] \mathbf{r}_s^{\text{abc}} \mathbf{i}_s^{\text{abc}} \quad (3.20)$$

$\boldsymbol{\lambda}_s^{\text{abc}} = \left[T_{qd0}(\theta) \right]^{-1} \boldsymbol{\lambda}_s^{\text{qd0}}$ ve $\mathbf{i}_s^{\text{abc}} = \left[T_{qd0}(\theta) \right]^{-1} \mathbf{i}_s^{\text{qd0}}$ olduğundan:

$$\left[T_{qd0}(\theta) \right] \mathbf{V}_s^{\text{abc}} = \left[T_{qd0}(\theta) \right] p \left[T_{qd0}(\theta) \right]^{-1} \boldsymbol{\lambda}_s^{\text{qd0}} + \left[T_{qd0}(\theta) \right] \mathbf{r}_s^{\text{abc}} \left[T_{qd0}(\theta) \right]^{-1} \mathbf{i}_s^{\text{qd0}} \quad (3.21)$$

$p \left[T_{qd0}(\theta) \right]^{-1} \boldsymbol{\lambda}_s^{\text{qd0}}$ kısmını açarsak:

$$p \left[T_{qd0}(\theta) \right]^{-1} \boldsymbol{\lambda}_s^{\text{qd0}} = \left(p \left[T_{qd0}(\theta) \right]^{-1} \right) \boldsymbol{\lambda}_s^{\text{qd0}} + \left[T_{qd0}(\theta) \right]^{-1} (p\boldsymbol{\lambda}_s^{\text{qd0}})$$

$$p \rightarrow \frac{d}{dt} \Rightarrow \frac{d}{dt} \frac{d\theta}{d\theta} \text{ şeklinde yazarsak } p \rightarrow \frac{d}{d\theta} \frac{d\theta}{dt}$$

$$p \left[T_{qd0}(\theta) \right]^{-1} = \frac{d}{d\theta} \left[T_{qd0}(\theta) \right]^{-1} \frac{d\theta}{dt} \quad \left(\frac{d\theta}{dt} = \omega \text{ açısal hız} \right)$$

$$p \left[T_{qd0}(\theta) \right]^{-1} \boldsymbol{\lambda}_s^{\text{qd0}} = \left[T_{qd0}(\theta) \right]^{-1} = \begin{bmatrix} -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 0 \\ -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 0 \end{bmatrix} \frac{d\theta}{dt} \boldsymbol{\lambda}_s^{\text{qd0}} + \left[T_{qd0}(\theta) \right]^{-1} (p\boldsymbol{\lambda}_s^{\text{qd0}}) \quad (3.22)$$

Bulunanları (3.21) de yerine koyarsak:

$$\mathbf{V}_s^{qd0} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin(\theta) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 0 \\ -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 0 \end{bmatrix} \omega \boldsymbol{\lambda}_s^{qd0} \\ + \left[T_{qd0}(\theta) \right]^{-1} (p \boldsymbol{\lambda}_s^{qd0}) \left[T_{qd0}(\theta) \right] + \underbrace{\left[T_{qd0}(\theta) \right] \mathbf{r}_s^{abc} \left[T_{qd0}(\theta) \right]^{-1}}_{r_s^{qd0}} \mathbf{i}_s^{qd0}$$

Burada $\left[T_{qd0}(\theta) \right] \mathbf{r}_s^{abc} \left[T_{qd0}(\theta) \right]^{-1} = r_s^{qd0}$ dir

Statora kilitlemiş dönüştürme için ($\theta = 0$) alınırsa:

$$\mathbf{V}_s^{qd0} = \omega \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \boldsymbol{\lambda}_s^{qd0} + p \boldsymbol{\lambda}_s^{qd0} + \mathbf{r}_s^{abc} \mathbf{i}_s^{qd0} \quad (3.23)$$

$$\text{Burada } \omega = \frac{d\theta}{dt} \quad \mathbf{r}_s^{qd0} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Aynı şekilde rotor parametrelerini de aynı $qd0$ tabanına dönüştürmeliyiz. Rotor için dönüştürme açısı $(\theta - \theta_r)$ 'dir. Bu durumda abc - $qd0$ dönüştürme matrisi

$\left[T_{qd0}(\theta - \theta_r) \right]$ şeklinde alınırsa aşağıdaki ifade elde edilebilir.

$$\mathbf{V}_r^{qd0} = (\omega - \omega_r) \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \boldsymbol{\lambda}_r^{qd0} + p \boldsymbol{\lambda}_r^{qd0} + \mathbf{r}_r^{abc} \mathbf{i}_r^{qd0} \quad (3.24)$$

Stator için gerilim formülünü hatırlayalım:

$$\mathbf{V}_s^{qd0} = \omega \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \boldsymbol{\lambda}_s^{qd0} + p \boldsymbol{\lambda}_s^{qd0} + \mathbf{r}_s^{abc} \mathbf{i}_s^{qd0}$$

$$\boldsymbol{\lambda}_s^{abc} = \mathbf{L}_{ss}^{abc} \mathbf{i}_s^{abc} + \mathbf{L}_{sr}^{abc} \mathbf{i}_r^{abc}$$

Dönüşüm yaparsak:

$$\boldsymbol{\lambda}_s^{qd0} = [\mathbf{T}_{qd0}(\theta)] (\mathbf{L}_{ss}^{abc} \mathbf{i}_s^{abc} + \mathbf{L}_{sr}^{abc} \mathbf{i}_r^{abc}) \quad (3.25)$$

$$\mathbf{i}_s^{abc} = [\mathbf{T}_{qd0}(\theta)]^{-1} \mathbf{i}_s^{qd0}$$

ifadelerini yerine koyarsak

$$\mathbf{i}_r^{abc} = [\mathbf{T}_{qd0}(\theta)]^{-1} \mathbf{i}_r^{qd0}$$

$$\boldsymbol{\lambda}_s^{qd0} = \left([\mathbf{T}_{qd0}(\theta)] \mathbf{L}_{ss}^{abc} [\mathbf{T}_{qd0}(\theta)]^{-1} \mathbf{i}_s^{qd0} + [\mathbf{T}_{qd0}(\theta)] \mathbf{L}_{sr}^{abc} [\mathbf{T}_{qd0}(\theta)]^{-1} \mathbf{i}_r^{qd0} \right)$$

İfadenin ilk terimini $\theta=0$ alarak yazarsak:

$$[\mathbf{T}_{qd0}(\theta)] \mathbf{L}_{ss}^{abc} [\mathbf{T}_{qd0}(\theta)]^{-1} \mathbf{i}_s^{qd0} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ss} & L_{ms} & L_{ms} \\ L_{ms} & L_{ls} + L_{ss} & L_{ms} \\ L_{ms} & L_{ms} & L_{ls} + L_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix} \mathbf{i}_s^{qd0}$$

$$\boldsymbol{\lambda}_s^{qd0} = \begin{bmatrix} L_{ls} + 3L_{ss}/2 & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls} + 3L_{ss}/2 & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} \end{bmatrix} \mathbf{i}_s^{qd0} + \begin{bmatrix} 3L_{sr}/2 & 0 & 0 \\ 0 & 3L_{sr}/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{i}_r^{qd0} \quad (3.26)$$

Benzer şekilde $qd0$ rotor akı denklemleri:

$$\lambda_r^{abc} = L_{rs}^{abc} i_s^{abc} + L_{rr}^{abc} i_r^{abc}$$

$$\lambda_r^{qd0} = \left([T_{qd0}(\theta - \theta_r)] L_{rs}^{abc} [T_{qd0}(\theta - \theta_r)]^{-1} i_s^{qd0} + [T_{qd0}(\theta - \theta_r)] L_{rr}^{abc} [T_{qd0}(\theta - \theta_r)]^{-1} i_r^{qd0} \right)$$

$$\lambda_r^{qd0} = \begin{bmatrix} 3L_{sr}/2 & 0 & 0 \\ 0 & 3L_{sr}/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} i_s^{qd0} + \begin{bmatrix} L_{lr} + 3L_{rr}/2 & 0 & 0 \\ 0 & L_{lr} + 3L_{rr}/2 & 0 \\ 0 & 0 & L_{lr} \end{bmatrix} i_r^{qd0} \quad (3.27)$$

(3.26) ve (3.27) denklemlerini birleştirerek stator ve rotor akı bağlantıları için aşağıdaki matrisi elde edebiliriz:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{qs} \\ \lambda_{ds} \\ \lambda_{0s} \\ \lambda'_{qr} \\ \lambda'_{dr} \\ \lambda'_{0r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_m & 0 & 0 & L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls} + L_m & 0 & 0 & L_m & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} & 0 & 0 & 0 \\ L_m & 0 & 0 & L'_{lr} + L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_m & 0 & 0 & L'_{lr} + L_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L'_{lr} + L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{0s} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \\ i'_{0r} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Burada başlıca rotor değerleri stator tarafındaki aşağıdaki bağlantılara bağlı olarak ifade edilmiştir.

$$\lambda'_{qr} = \frac{N_s}{N_r} \lambda_{qr} \quad \lambda'_{dr} = \frac{N_s}{N_r} \lambda_{dr} \quad (3.29)$$

$$i'_{qr} = \frac{N_s}{N_r} i_{qr} \quad i'_{dr} = \frac{N_s}{N_r} i_{dr} \quad (3.30)$$

$$L'_{lr} = \left(\frac{N_s}{N_r} \right)^2 L_{lr} \quad (3.31)$$

$$L_m = \frac{3}{2} L_{ss} = \frac{3}{2} \frac{N_s}{N_r} L_{sr} = \frac{3}{2} \frac{N_s}{N_r} L_{rr} \quad (3.32)$$

3.1.2. $qd0$ Moment denklemleri

Stator ve rotorun tüm fazlarının anlık giriş güçlerinin toplamı aşağıdaki şekilde verilmiştir.

$$P_{in}^{abc} = v_{as}i_{as} + v_{bs}i_{bs} + v_{cs}i_{cs} + v'_{ar}i'_{ar} + v'_{br}i'_{br} + v'_{cr}i'_{cr} \quad W \quad (3.33)$$

$qd0$ değişkenleri için anlık giriş gücü şu şekildedir.

$$P_{in}^{qd0} = \frac{3}{2} (V_{qs}i_{qs} + V_{ds}i_{ds} + V_{0s}i_{0s} + V'_{qr}i'_{qr} + V'_{dr}i'_{dr} + V'_{0r}i'_{0r}) \quad W \quad (3.34)$$

(3.23) ve (3.24) denklemlerini (3.34) denkleminin sağ tarafındaki gerilimler için kullanırsak, üç çeşit terim görürüz: i^2r , $ip\lambda$ ve $\omega\lambda i$. i^2r bakır kayıplarıdır. $ip\lambda$, sarımlar arası manyetik alan enerjisi değişimini ifade eder. $\omega\lambda i$ mekanik işe dönüşen enerji oranını temsil eder. $\omega\lambda i$ terimlerinin toplamı tarafından verilen, makine tarafından oluşturulan elektromekanik moment; mekanik hıza bölünerek şu şekilde ifade edilebilir:

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2\omega_r} \left(\omega (\lambda_{ds}i_{qs} - \lambda_{qs}i_{ds}) + (\omega - \omega_r) (\lambda'_{dr}i'_{qr} - \lambda'_{qr}i'_{dr}) \right) \quad N.m \quad (3.35)$$

(3.28) denklemindeki akı ilişkilerinden şunu gösterebiliriz:

$$\lambda_s i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds} = -(\lambda'_{dr} i'_{qr} - \lambda'_{qr} i'_{dr}) = L_m (i_{dr} i_{qs} - i_{qr} i_{ds}) \quad (3.36)$$

Öyle ise (3.35) denklemini aşağıdaki şekillerde yazılabilir:

$$\begin{aligned} T_{em} &= \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda'_{qr} i'_{dr} - \lambda'_{dr} i'_{qr}) \quad N.m \\ T_{em} &= \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \quad N.m \\ T_{em} &= \frac{3}{2} \frac{P}{2} L_m (i'_{dr} i_{qs} - i'_{qr} i_{ds}) \quad N.m \end{aligned} \quad (3.37)$$

Simülasyon amaçlı olarak yukarıdaki denklemlerden amacımıza uygun olan ifade kullanılabilir.

3.1.3. Temel değerler

Çoğu zaman, makine denklemleri λ 'lar ve L 'ler yerine; saniye bazında akı terimleri (ψ 'ler) ve reaktanslar (x 'ler) cinsinden ifade edilir. Bunlar, açısal frekansa (ω_b) aşağıdaki şekilde bağlıdır:

$$\psi = \omega_b \lambda = \omega_s \lambda \Rightarrow \lambda = \frac{\psi}{\omega_b} \quad (3.38)$$

ve

$$x = \omega_b L = \omega_s L \quad H \quad (3.39)$$

Burada, $\omega_b = \omega_s = 2\pi f_{rated}$ saniyedeki elektriksel radyan, f_{rated} Hertz bazında frekanstır. Temel gerilim, reaktif güç ve akım denklemleri aşağıdaki şekildedir.

$$V_b = \sqrt{2/3} V_{rated}$$

$$S_b = S_{rated}$$

$$I_b = \frac{2S_b}{3V_b}$$

3.2. $qd0$ Stator Referans Denklemleri

Asenkron makine için denklemler, saniye bazında akı terimleri (ψ 'ler) ve reaktanslar (x 'ler) cinsinden ifade edilmelidir. (3.23) de duran bir makine için açısal hız $\omega=0$ alınırsa stator için aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$v_{qs}^s = r_s i_{qs}^s + \frac{p}{\omega_b} \psi_{qs}^s$$

$$v_{ds}^s = r_s i_{ds}^s + \frac{p}{\omega_b} \psi_{ds}^s \quad (3.40)$$

$$v_{0s}^s = r_s i_{0s}^s + \frac{p}{\omega_b} \psi_{0s}^s$$

Aynı şekilde (3.24) de $\omega=0$ alınrsa rotor denklemleri aşağıdaki şekilde elde edilir:

$$v_{qr}^s = r_r i_{qr}^s + \frac{p}{\omega_b} \psi_{qr}^s - \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_{dr}^s$$

$$v_{dr}^s = r_r i_{dr}^s + \frac{p}{\omega_b} \psi_{dr}^s + \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_{qr}^s \quad (3.41)$$

$$v_{0r}^s = r_r i_{0r}^s + \frac{p}{\omega_b} \psi_{0r}^s$$

(3.28) denklemlerinde (3.38) ve (3.39) i uygulayarak saniye bazında akı terimlerini aşağıdaki şekilde elde edebiliriz:

$$\begin{bmatrix} \psi_{qs} \\ \psi_{ds} \\ \psi_{0s} \\ \psi_{qr}' \\ \psi_{dr}' \\ \psi_{0r}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{ls} + x_m & 0 & 0 & x_m & 0 & 0 \\ 0 & x_{ls} + x_m & 0 & 0 & x_m & 0 \\ 0 & 0 & x_{ls} & 0 & 0 & 0 \\ x_m & 0 & 0 & x_{lr}' + x_m & 0 & 0 \\ 0 & x_m & 0 & 0 & x_{lr}' + x_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_{lr}' + x_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{qs}' \\ \psi_{ds}' \\ \psi_{0s}' \\ \psi_{qr}' \\ \psi_{dr}' \\ \psi_{0r}' \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

Moment ifadesini elde etmek için (3.37)'de (3.38)'i uygularsak:

$$\begin{aligned} T_{em} &= \frac{3}{2} \frac{P}{2\omega_b} (\psi_{qr}' i_{dr}^s - \psi_{dr}' i_{qr}^s) \\ &= \frac{3}{2} \frac{P}{2\omega_b} (\psi_{ds}^s i_{qs}^s - \psi_{qs}^s i_{ds}^s) \\ &= \frac{3}{2} \frac{P}{2\omega_b} x_m (i_{dr}' i_{qs}^s - i_{qr}' i_{ds}^s) \end{aligned} \quad (3.43)$$

3.3. İndüksiyon motorun stator referans düzleminde simülasyonu

Bu bölümde simülasyon için gerekli son denklemler sunulacaktır. $qd0$ bazında stator gerilim denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$v_{qs}^s = \frac{2}{3}v_{as} - \frac{1}{3}v_{bs} - \frac{1}{3}v_{cs} = \frac{2}{3}v_{ag} - \frac{1}{3}v_{bg} - \frac{1}{3}v_{cg} \quad (3.44)$$

$$v_{ds}^s = \frac{1}{\sqrt{3}}(v_{cs} - v_{bs}) = \frac{1}{\sqrt{3}}(v_{cg} - v_{bg}) \quad (3.45)$$

$$v_{0s}^s = \frac{1}{3}(v_{as} + v_{bs} + v_{cs}) = \frac{1}{3}(v_{ag} + v_{bg} + v_{cg}) \quad (3.46)$$

Benzer şekilde rotor için gerilim denklemleri aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$v_{qr}^r = \frac{2}{3}v'_{ar} - \frac{1}{3}v'_{br} - \frac{1}{3}v'_{cr} = \frac{2}{3}v'_{an} - \frac{1}{3}v'_{bn} - \frac{1}{3}v'_{cn} \quad (3.47)$$

$$v_{dr}^r = \frac{1}{\sqrt{3}}(v'_{cs} - v'_{bs}) = \frac{1}{\sqrt{3}}(v'_{cg} - v'_{bg}) \quad (3.48)$$

$$v_{0r}^r = \frac{1}{3}(v'_{ar} + v'_{br} + v'_{cr}) = \frac{1}{3}(v'_{an} + v'_{bn} + v'_{cn}) \quad (3.49)$$

Simülasyon için gerekli stator akı denklemlerini elde etmek için (3.41) den aşağıdaki ifade yazılabilir:

$$\frac{p}{\omega_b} \psi_{qs}^s = v_{qs}^s - r_s i_{qs}^s$$

Burada (3.42) denklemini kullanırsak:

$$\begin{aligned}
\psi_{qs}^s &= (x_{ls} + x_m)i_{qs} + x_m i_{qr}' \\
&= x_{ls}i_{qs} + x_m i_{qs} + x_m i_{qr}' \\
&= x_{ls}i_{qs} + x_m \underbrace{(i_{qs} + i_{qr}')}_{\psi_{mq}^s}
\end{aligned}$$

$$i_{qs} = \frac{\psi_{qs}^s - \psi_{mq}^s}{x_{ls}}$$

i_{qs} ifadesini yerine koyarsak

$$\frac{p}{\omega_b} \psi_{qs}^s = v_{qs}^s - r_s \frac{\psi_{qs}^s - \psi_{mq}^s}{x_{ls}}$$

$$p\psi_{qs}^s = \omega_b \left(v_{qs}^s + \frac{r_s}{x_{ls}} (\psi_{mq}^s - \psi_{qs}^s) \right)$$

$$\psi_{qs}^s = \omega_b \int \left(v_{qs}^s + \frac{r_s}{x_{ls}} (\psi_{mq}^s - \psi_{qs}^s) \right) dt \quad (3.50)$$

Benzer yollardan diğer ifadeler de aşağıdaki biçimde elde edilebilir.

$$\psi_{ds}^s = \omega_b \int \left(v_{ds}^s + \frac{r_s}{x_{ls}} (\psi_{md}^s - \psi_{ds}^s) \right) dt \quad (3.51)$$

$$i_{0s}^s = \frac{\omega_b}{x_{ls}} \int (v_{0s}^s - i_{0s}^s r_s) dt \quad (3.52)$$

Rotorun $qd0$ akı bileşenleri de yukarıdaki yöntemle elde edildiğinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılır.

$$\psi_{qr}^s = \omega_b \int \left(v_{qr}^s + \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_{dr}^s + \frac{r_r'}{x_{lr}'} (\psi_{mq}^s - \psi_{qr}^s) \right) dt \quad (3.53)$$

$$\psi_{dr}^s = \omega_b \int \left(v_{dr}^s - \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_{qr}^s + \frac{r_r'}{x_{lr}'} (\psi_{md}^s - \psi_{dr}^s) \right) dt \quad (3.54)$$

$$i_{0r}^s = \frac{\omega_b}{x_{lr}'} \int (v_{0r}^s - i_{0r}^s r_r') dt \quad (3.55)$$

Burada ψ_{mq}^s ve ψ_{md}^s terimleri aşağıdaki şekildedir:

$$\psi_{mq}^s = x_m (i_{qs}^s + i_{qr}^s) \quad (3.56)$$

$$\psi_{md}^s = x_m (i_{ds}^s + i_{dr}^s) \quad (3.57)$$

Simülasyonda kullanılacak akımlarda akı ve reaktanslar cinsinden (3.41) ve (3.42) denklemlerini kullanarak aşağıdaki şekilde elde edebiliriz:

$$\psi_{qs}^s = x_{ls} i_{qs}^s + \psi_{mq}^s \Rightarrow i_{qs}^s = \frac{\psi_{qs}^s - \psi_{mq}^s}{x_{ls}} \quad (3.58)$$

$$\psi_{ds}^s = x_{ls} i_{ds}^s + \psi_{md}^s \Rightarrow i_{ds}^s = \frac{\psi_{ds}^s - \psi_{md}^s}{x_{ls}} \quad (3.59)$$

$$\psi_{qr}^s = x'_{lr} i_{qr}^s + \psi_{mq}^s \Rightarrow i_{qr}^s = \frac{\psi_{qr}^s - \psi_{mq}^s}{x'_{lr}} \quad (3.60)$$

$$\psi_{dr}^s = x'_{lr} i_{dr}^s + \psi_{md}^s \Rightarrow i_{dr}^s = \frac{\psi_{dr}^s - \psi_{md}^s}{x'_{lr}} \quad (3.61)$$

ψ_{mq}^s ve ψ_{md}^s terimlerini de akı ve reaktans cinsinden ifade edelim:

$$\begin{aligned} \psi_{mq}^s &= x_m (i_{qs}^s + i_{qr}^s) \\ &= x_m \left(\frac{\psi_{qs}^s - \psi_{mq}^s}{x_{ls}} + \frac{\psi_{qr}^s - \psi_{mq}^s}{x'_{lr}} \right) \\ \psi_{mq}^s &= \frac{x_m}{x_{ls}} \psi_{qs}^s + \frac{x_m}{x'_{lr}} \psi_{qr}^s - \frac{x_m}{x_{ls}} \psi_{mq}^s - \frac{x_m}{x'_{lr}} \psi_{mq}^s \\ \frac{x_m}{x_m} \psi_{mq}^s + \frac{x_m}{x_{ls}} \psi_{mq}^s + \frac{x_m}{x'_{lr}} \psi_{mq}^s &= x_m \left(\frac{\psi_{qr}^s}{x'_{lr}} + \frac{\psi_{qs}^s}{x_{ls}} \right) \\ \cancel{x_m} \psi_{mq}^s \left(\frac{1}{x_m} + \frac{1}{x_{ls}} + \frac{1}{x'_{lr}} \right) &= \cancel{x_m} \left(\frac{\psi_{qr}^s}{x'_{lr}} + \frac{\psi_{qs}^s}{x_{ls}} \right) \end{aligned}$$

İfadeyi daha sade yazmak için:

$$\frac{I}{X_M} = \left(\frac{I}{x_m} + \frac{I}{x_{ls}} + \frac{I}{x'_{lr}} \right) \quad (3.62)$$

kullanılırsa

$$\psi_{mq}^s = X_M \left(\frac{\psi_{qr}'^s}{x'_{lr}} + \frac{\psi_{qs}^s}{x_{ls}} \right) \quad (3.63)$$

(3.57)'de (3.59) ve (3.61) kullanalım:

$$\psi_{md}^s = x_m (i_{ds}^s + i_{dr}'^s)$$

$$\psi_{md}^s = x_m \left(\frac{\psi_{ds}^s - \psi_{md}^s}{x_{ls}} + \frac{\psi_{dr}'^s - \psi_{md}^s}{x'_{lr}} \right)$$

$$\psi_{md}^s = \frac{x_m}{x_{ls}} \psi_{ds}^s + \frac{x_m}{x'_{lr}} \psi_{dr}'^s - \frac{x_m}{x_{ls}} \psi_{md}^s - \frac{x_m}{x'_{lr}} \psi_{md}^s$$

$$\frac{x_m}{x_m} \psi_{md}^s + \frac{x_m}{x_{ls}} \psi_{md}^s + \frac{x_m}{x'_{lr}} \psi_{md}^s = x_m \left(\frac{\psi_{ds}^s}{x_{ls}} + \frac{\psi_{dr}'^s}{x'_{lr}} \right)$$

$$\cancel{x_m} \psi_{md}^s \left(\frac{1}{x_m} + \frac{1}{x_{ls}} + \frac{1}{x'_{lr}} \right) = \cancel{x_m} \left(\frac{\psi_{ds}^s}{x_{ls}} + \frac{\psi_{dr}'^s}{x'_{lr}} \right)$$

$$\psi_{md}^s = X_M \left(\frac{\psi_{ds}^s}{x_{ls}} + \frac{\psi_{dr}'^s}{x'_{lr}} \right) \quad (3.64)$$

Moment için (3.43)'den aşağıdaki eşitliği kullanabiliriz.

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2\omega_b} (\psi_{ds}^s i_{qs}^s - \psi_{qs}^s i_{ds}^s) \quad N.m \quad (3.65)$$

$$j \frac{d\omega_{rm}}{dt} = T_{em} + T_{mech} - T_{damp} \quad N.m$$

Burada $T_{damp}=0$ alınabilir.

4. STATOR SARIM HATALI ASENKRON MAKİNELER İÇİN GEÇİCİ REJİM MODELİ

Güvenilir bir hata tespit yöntemi tasarımında ilk basamak, ölçülmüş sinyallerden uygun hata işaretlerinin çıkarımıdır. Elektrik makinelerinin matematiksel modeli, gerilimler ve akımlar gibi ölçülmüş çıkış nicelikleri üzerindeki hata etkisinin tanımlanmasını sağlar. Stator sarım hataları gibi kesin durumlarda, hata işaretleri, hatanın kendisinden başka kaynakların da etkisinde olabilir. Güvenilir bir model, ölçülmüş sinyaller üzerindeki benzer işaretlerin ürettiği hataların etkisini ayırtmak için bir anahtar işlevi görür. Bununla beraber, matematiksel modeller; nicelikçe temsil edilemeyişten kaynaklanan olağanüstülük ve modeldeki parametrelerin kesin olmayışından dolayı, daima karmaşıklık ve güvenilirlik arasında bir ödün verme gösterir.

Özelde stator sarım hataları için, çıkış sinyallerindeki (negatif ardışık bileşenler) hata işaretleri nispeten düşük genliklidir ve enerji dönüşüm bileşeni tarafından sık sık belirsizleştirilir. Makine durumunu güvenilir bir şekilde teşhis edebilmek için sinyal işleme, ölçümde ve arızanın etkilerini ayıran diğer algoritmalarda yüksek kesinlik derecesi gereklidir. Bundan dolayı, matematiksel model hata işaretlerinden anlam çıkarmak için değil bir yardımcı olarak kullanılmalıdır.

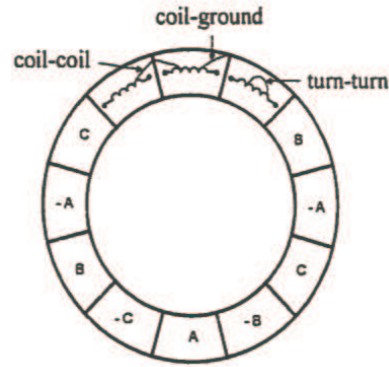
Hata tespit yöntemleri açısından makine modelinin çok karmaşık olması faydaları aynı derecede artırmaz. Sarım hatalarını tespit etmek için, çıkış akımlarının negatif ardışık bileşeni üzerinde, dengesiz voltajları ve hata etkilerini öngörebilen basit bir genel makine modeli yeterlidir. Böyle bir modelde; hatanın etkisi ve hata sinyalinin büyüklüğünü inceleme fırsatı sınırlıdır.

Bu bölümde stator sarım hatalı bir asenkron makine için genel bir geçici rejim modeli Referans Çevre Dönüşüm Teorisi kullanılarak türetilecektir. Kalıcı durum sırasında, model, negatif ardışık akım bileşeni üzerindeki hata etkilerini niceleyen seri bileşen eşdeğer devrelerine indirgenir. Bu devreler Kohler [23] tarafından gözlemlenen anormal davranışları (bazı şartlarda sarım hatası meydana geldiğinde negatif ardışık akım azalır) açıklamak için kullanılabilir [2].

4.1. Sarım Hatalı Asenkron Makinelerin Analizi

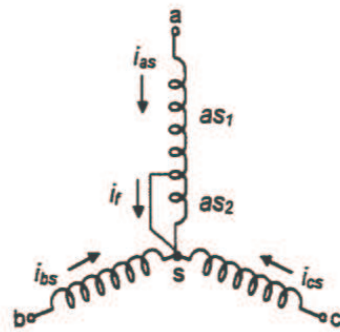
Bir asenkron makinedeki stator sarım hatası Şekil 4.1' de görüldüğü üzere, sarım-sarım, çekirdek-çekirdek veya sarım-toprak gibi pek çok şekilde olabilir. Bununla beraber, hata farklı fazlardaki sarımlar arasında da meydana gelse de, tek fazdaki sarım-sarım hataları en yaygın olanlarıdır. Analiz için aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır:

- Hata tek fazdaki sarımları kapsamaktadır, kendi aralarında kümelenebilirler, uzaysal pozisyon etkileri gözardı edilmiştir.
- Sadece temel frekans voltaj ve akımları göz önüne alınmıştır.
- Makine doğal olarak simetriktir.



Şekil 4. 1. Asenkron makinenin stator sarım hataları

Yukarıdaki varsayımlarla birlikte, üç fazlı stator sarımı, Şekil 4.2' de gibi gösterilebilir [2]. Burada as_2 kısa devre sarımını gösterir, i_f ise kısa devre hata akımıdır.



Şekil 4. 2. Tek faz üzerinde sarım-sarım hatası bulunan 3 fazlı stator sarım şeması

Şekil 4.2' den de açıkça görüleceği gibi, makine sanki statorda as_1 , as_2 , bs ve cs gibi dört farklı sarım varmış gibi modellenecektir [2]. Bu yaklaşım aşağıdaki türetmelerde kullanılacaktır.

4.1.1. abc değişkenlerinde geçici rejim denklemleri

Şekil 4.2'den hareketle, bir simetrik asenkron makine için stator ve rotor denklemleri şu şekilde ifade edilir.

$$\mathbf{V}_s = \mathbf{R}_s' \mathbf{i}_s + \frac{d\lambda_s'}{dt} \quad (4.1)$$

$$\mathbf{V}_r = \mathbf{R}_r' \mathbf{i}_r + \frac{d\lambda_r'}{dt} \quad (4.2)$$

Burada voltaj, akım ve akı vektörleri aşağıdaki gibi açıklanabilir.

$$\mathbf{V}_s = \begin{bmatrix} v_{as1} \\ v_{as2} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{i}_s = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{as} - i_f \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{i}_r = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$\lambda_s' = \begin{bmatrix} \lambda_{as1} \\ \lambda_{as2} \\ \lambda_{bs} \\ \lambda_{cs} \end{bmatrix} = \mathbf{L}'_{ss} \mathbf{i}_s + \mathbf{L}'_{sr} \mathbf{i}_r \quad (4.4)$$

$$\lambda_r' = \begin{bmatrix} \lambda_{ar} \\ \lambda_{br} \\ \lambda_{cr} \end{bmatrix} = \mathbf{L}'_{sr} \mathbf{i}_s + \mathbf{L}'_{rr} \mathbf{i}_r \quad (4.5)$$

Stator ve rotor için direnç, self ve ortak indüktans matrisleri aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\mathbf{R}_s = \begin{bmatrix} 1-\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{R}_r = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

$$\mathbf{L}'_{ss} = \mathbf{L}^{abc}_{ss} = \begin{bmatrix} L_{ls}(1-\mu) + L_{ms}(1-\mu)^2 & L_{ms}\mu(1-\mu) & -L_{ms}\frac{1-\mu}{2} & -L_{ms}\frac{1-\mu}{2} \\ L_{ms}\mu(1-\mu) & L_{ls}\mu + L_{ms}\mu^2 & -L_{ms}\frac{\mu}{2} & -L_{ms}\frac{\mu}{2} \\ -L_{ms}\frac{1-\mu}{2} & -L_{ms}\frac{\mu}{2} & L_{ls} + L_{ms} & -L_{ms}\frac{1}{2} \\ -L_{ms}\frac{1-\mu}{2} & -L_{ms}\frac{\mu}{2} & -L_{ms}\frac{1}{2} & L_{ls} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

$$\mathbf{L}^{abc}_{rr} = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_{ms} & -L_{ms}\frac{1}{2} & -L_{ms}\frac{1}{2} \\ -L_{ms}\frac{1}{2} & L_{lr} + L_{ms} & -L_{ms}\frac{1}{2} \\ -L_{ms}\frac{1}{2} & -L_{ms}\frac{1}{2} & L_{lr} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

$$\mathbf{L}^{abc}_{sr} = \mathbf{L}_{ms} \begin{bmatrix} (1-\mu)\cos\theta_r & (1-\mu)\cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & (1-\mu)\cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \mu\cos\theta_r & \mu\cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \mu\cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta_r & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & (1-\mu)\cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta_r \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Yukarıdaki denklemler türetilirken, hatalı sarımın sarım direnci ve kaçak indüktansın, kısa devre yapılan sargı parçasıyla orantılı (μ) olduğu varsayılmaktadır.

Denklem (4.1)' deki matrisin ilk iki sütunu toplanırken, $v_{as1} + v_{as2} = v_{as}$ olduğu dikkate alınarak makinenin voltaj denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\mathbf{V}_s = \mathbf{R}'_s \mathbf{i}_s + \frac{d\lambda'_s}{dt} - \mu \mathbf{A}_1 \mathbf{i}_f \quad (4.10)$$

Burada: $\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} R \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$ dir. Rotor gerilim denklemi:

$$\mathbf{V}_r = \mathbf{R}'_r \mathbf{i}_r + \frac{d\lambda'_r}{dt} \quad (4.11)$$

Sincap kafesli asenkron motor için $V_r=0$ dir.

Burada makinenin akı ifadesini denklem (4.4)' den şu şekilde hesaplayabiliriz:

$$\lambda'_s = \mathbf{L}'_{ss} \mathbf{i}'_s + \mathbf{L}'_{sr} \mathbf{i}'_r \quad (4.12)$$

Yukarıdaki denklemin ilk kısmını hesaplırsak:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{as_1} \\ \lambda_{as_2} \\ \lambda_{bs} \\ \lambda_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ls}(1-\mu) + L_{ms}(1-\mu)^2 & L_{ms}\mu(1-\mu) & -L_{ms}\frac{1-\mu}{2} & -L_{ms}\frac{1-\mu}{2} \\ L_{ms}\mu(1-\mu) & L_{ls}\mu + L_{ms}\mu^2 & -L_{ms}\frac{\mu}{2} & -L_{ms}\frac{\mu}{2} \\ -L_{ms}\frac{1-\mu}{2} & -L_{ms}\frac{\mu}{2} & L_{ls} + L_{ms} & -L_{ms}\frac{1}{2} \\ -L_{ms}\frac{1-\mu}{2} & -L_{ms}\frac{\mu}{2} & -L_{ms}\frac{1}{2} & L_{ls} + L_{ms} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{as} - i_f \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}$$

$$\lambda_{as_1} = (L_{ls}(1-\mu) + L_{ms}(1-\mu)^2)i_{as} + (L_{ms}\mu(1-\mu))(i_{as} - i_f) + \left(-L_{ms}\frac{1-\mu}{2}\right)i_{bs} + \left(-L_{ms}\frac{1-\mu}{2}\right)i_{cs}$$

$$\lambda_{as_2} = (L_{ms}\mu(1-\mu))i_{as} + (L_{ls}\mu + L_{ms}\mu^2)(i_{as} - i_f) + \left(-L_{ms}\frac{\mu}{2}\right)i_{bs} + \left(-L_{ms}\frac{\mu}{2}\right)i_{cs}$$

$\lambda_{as} = \lambda_{as_1} + \lambda_{as_2}$ olacağından aşağıdaki şekilde devam edilebilir:

$$\begin{aligned} \lambda_{as} = \lambda_{as_1} + \lambda_{as_2} = & \left[(L_{ls}(1-\mu) + L_{ms}(1-\mu)^2) + (L_{ms}\mu(1-\mu)) + (L_{ms}\mu(1-\mu)) + (L_{ls}\mu + L_{ms}\mu^2) \right] i_{as} \\ & + \left(-L_{ms}\frac{1-\mu}{2} - L_{ms}\frac{\mu}{2} \right) i_{bs} + \left(-L_{ms}\frac{1-\mu}{2} - L_{ms}\frac{\mu}{2} \right) i_{cs} + i_f (-L_{ms}\mu(1-\mu) - L_{ls}\mu - L_{ms}\mu^2) \end{aligned}$$

$$\lambda_{as} = (L_{ls} + L_{ms})i_{as} + \left(-\frac{L_{ms}}{2}\right)i_{bs} + \left(-\frac{L_{ms}}{2}\right)i_{cs} - \mu(L_{ls} + L_{ms})i_f$$

$$\begin{aligned} \lambda_{bs} &= \left(-L_{ms}\frac{1-\mu}{2}\right)i_{as} + \left(-L_{ms}\frac{\mu}{2}\right)(i_{as} - i_f) + (L_{ls} + L_{ms})i_{bs} + \left(-L_{ms}\frac{1}{2}\right)i_{cs} \\ &= \left(-L_{ms}\frac{1-\mu}{2} - L_{ms}\frac{\mu}{2}\right)i_{as} + (L_{ls} + L_{ms})i_{bs} + \left(-\frac{L_{ms}}{2}\right)i_{cs} - \left(-L_{ms}\frac{\mu}{2}\right)i_f \\ &= \left(-\frac{L_{ms}}{2}\right)i_{as} + (L_{ls} + L_{ms})i_{bs} + \left(-\frac{L_{ms}}{2}\right)i_{cs} - \left(-L_{ms}\frac{1}{2}\right)\mu i_f \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\lambda_{cs} &= \left(-L_{ms} \frac{1-\mu}{2}\right) i_{as} + \left(-L_{ms} \frac{\mu}{2}\right) (i_{as} - i_f) + \left(-L_{ms} \frac{1}{2}\right) i_{bs} + (L_{ls} + L_{ms}) i_{cs} \\
&= \left(-L_{ms} \frac{1-\mu}{2} - L_{ms} \frac{\mu}{2}\right) i_{as} + \left(-\frac{L_{ms}}{2}\right) i_{bs} + (L_{ls} + L_{ms}) i_{cs} - \left(-L_{ms} \frac{\mu}{2}\right) i_f \\
&= \left(-\frac{L_{ms}}{2}\right) i_{as} + \left(-\frac{L_{ms}}{2}\right) i_{bs} + (L_{ls} + L_{ms}) i_{cs} - \left(-L_{ms} \frac{1}{2}\right) \mu i_f \\
\mathbf{A}_2 &= \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ms} \\ -L_{ms} \frac{\mu}{2} \\ -L_{ms} \frac{\mu}{2} \end{bmatrix} \tag{4.13}
\end{aligned}$$

Yukarıdaki akı denklemlerini tek bir ifadede toplarsak:

$$\lambda'_s = \mathbf{L}'_{ss} \mathbf{i}_s + \mathbf{L}'_{sr} \mathbf{i}_r - \mu \mathbf{A}_2 i_f \tag{4.14}$$

λ_{as2} akı ifadesini (4.4) denklemini kullanarak hesaplırsak:

$$\begin{bmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ L_{ms} \mu (1-\mu) & L_{ls} \mu + L_{ms} \mu^2 & -L_{ms} \frac{\mu}{2} & -L_{ms} \frac{\mu}{2} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{as} - i_f \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \mu L_{ms} \begin{bmatrix} \cdot & \cdot & \cdot \\ \cos \theta_r & \cos \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
\lambda_{as2} &= (L_{ms} \mu (1-\mu)) i_{as} + (L_{ls} \mu + L_{ms} \mu^2) (i_{as} - i_f) + \left(-L_{ms} \frac{\mu}{2}\right) i_{bs} + \left(-L_{ms} \frac{\mu}{2}\right) i_{cs} \\
&+ L_{ms} \mu \cos \theta_r i_{ar} + L_{ms} \mu \cos \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) i_{br} + L_{ms} \mu \cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) i_{cr} \\
&= \left((L_{ms} \mu (1-\mu)) + (L_{ls} \mu + L_{ms} \mu^2) \right) i_{as} + \left(-L_{ms} \frac{\mu}{2}\right) i_{bs} + \left(-L_{ms} \frac{\mu}{2}\right) i_{cs} \\
&+ L_{ms} \mu \left(\cos \theta_r i_{ar} + \cos \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) i_{br} + \cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) i_{cr} \right) - i_f \mu (L_{ls} + L_{ms} \mu) \\
&= (L_{ls} + L_{ms}) i_{as} + \left(-L_{ms} \frac{\mu}{2}\right) i_{bs} + \left(-L_{ms} \frac{\mu}{2}\right) i_{cs} \\
&+ L_{ms} \mu \left(\cos \theta_r i_{ar} + \cos \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) i_{br} + \cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) i_{cr} \right) - i_f \mu (L_{ls} + L_{ms} \mu)
\end{aligned}$$

$$\lambda_{as2} = \mu A_2 i_s + \mu A_3 i_r - \mu (L_{ls} + L_{ms} \mu) i_f \quad (4.15)$$

Burada,

$$A_3 = L_{ms} \begin{bmatrix} \cos \theta_r \\ \cos \left(\theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left(\theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

Ayrıca kısa devre sarım için gerilim denklemi R_f kısa devre direnci olmak üzere aşağıdaki şekilde olur:

$$v_{as2} = R_f i_f = \mu R_s (i_{as} - i_f) + \frac{d\lambda_{as2}}{dt} \quad (4.17)$$

Rotor için akı ifadesi aşağıdaki şekilde elde edilebilir.

$$\lambda_r = L_{abc}^{sr} i_s + L_{abc}^{rr} i_r - \mu A_3 i_f \quad (4.18)$$

(4.10)-(4.18) denklemlerinde, sarım hatalı bir asenkron makinenin bütün dinamikleri, abc değişkenleriyle ifade edilmiştir. Bu aşamadan sonra $qd0$ dönüşümü yapılabilir.

4.1.2. Referans Çerçeve dönüşümü

abc değişkenlerindeki makine denklemlerinin referans çerçeve dönüşümü, sabit indüktans değerleri içeren dinamik denklemlerin elde edilmesini sağlar. Bu, modelin karmaşıklığını düşürdüğü gibi dijital simülasyonu da kolaylaştırır. Yukarıda elde edilen denklemlerin sabit referans çerçeve dönüşümünde; makinenin yıldız-bağlı olduğu, bunun için de sıfır ardışık bileşen akımının sıfır olduğu varsayılmıştır.

$qd0$ dönüşümü için akı ifadeleri (4.14) denkleminin her iki yanının $abc \rightarrow qd0$ dönüşüm matrisi ile çarpılarak bulunabilir:

$$\begin{aligned}\lambda_{qd0}^s &= T_{qd0}(0) \left[L_{abc}^{ss} i_{abc} + L_{abc}^{sr} i_{abc}^r - \mu A_2 i_f \right] \\ \lambda_{qd0}^s &= T_{qd0}(0) L_{abc}^{ss} T_{qd0}(0)^{-1} i_{qd0} + T_{qd0}(0) L_{abc}^{sr} T_{qd0}(0)^{-1} i_{qd0}^r - T_{qd0}(0) \mu A_2 i_f\end{aligned}$$

Bu dönüşümde ilk iki terim bir önceki bölümdeki ifadeyi vereceğinden; λ_{qds}^s 'in i_f e bağlı bileşenini hesaplayalım:

$$T_{qdo}(0) \mu A_2 i_f = \frac{2}{3} \mu \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ms} \\ -\frac{L_{ms}}{2} \\ -\frac{L_{ms}}{2} \end{bmatrix} i_f$$

Burada q, d ve 0 bileşenleri hesaplırsak:

$$\begin{aligned}\lambda_{aq}^s &= \mu \frac{2}{3} \left(L_{ls} + L_{ms} + \frac{L_{ms}}{4} + \frac{L_{ms}}{4} \right) i_f = \\ &= \mu \frac{2}{3} \left(L_{ls} + \frac{6L_{ms}}{4} \right) i_f = \mu \frac{2}{3} \left(L_{ls} + \frac{3}{2} L_{ms} \right) i_f = \mu \frac{2}{3} L_s i_f\end{aligned}$$

$$\lambda_{ad}^s = \frac{2}{3} \mu \left[\left(-\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \left(-\frac{L_{ms}}{2} \right) + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \left(-\frac{L_{ms}}{2} \right) \right] \quad (4.19)$$

$$\lambda_{a0}^s = 0$$

$$\lambda_{a0}^s = \frac{2}{3} \mu \left[\frac{1}{2} \left(L_{ls} + L_{ms} - \frac{L_{ms}}{2} - \frac{L_{ms}}{2} \right) \right]$$

$$\lambda_{a0}^s = \frac{1}{3} \mu L_{ls}$$

$$\begin{aligned}\lambda_{qds}^r &= T_{qdo}(-\theta_r) \left(L_{abc}^{sr} i_s + L_{abc}^{rr} i_r - \mu A_3 i_f \right) \\ &= T_{qdo}(-\theta_r) L_{sr} T_{qdo}(-\theta_r)^{-1} i_{qdo} + T_{qdo}(-\theta_r) L_{sr} T_{qdo}(-\theta_r)^{-1} i_{qdo}^r - T_{qdo}(-\theta_r) \mu A_3 i_f\end{aligned}$$

Aynı şekilde ilk iki terim bir önceki bölümdeki ifadeyi vereceğinden; λ_{qds}^r 'in i_f e bağlı bileşenini hesaplayalım:

$$\begin{aligned}
T_{qdo}(-\theta_r)\mu A_3 i_f &= \frac{2}{3}\mu i_f \begin{bmatrix} \cos(-\theta_r) & \cos\left(-\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(-\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin(-\theta_r) & \sin\left(-\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(-\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} L_{ms} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \\
&= \frac{2}{3}\mu i_f L_{ms} \begin{bmatrix} \cos(-\theta_r)\cos(\theta_r) + \cos\left(-\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right)\cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) + \cos\left(-\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right)\cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin(-\theta_r)\cos(\theta_r) + \sin\left(-\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right)\cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) + \sin\left(-\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right)\cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2}\left(\cos(\theta_r) + \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) + \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right)\right) \end{bmatrix} \\
&= \frac{2}{3}\mu i_f L_{ms} \begin{bmatrix} (\cos^2(\theta_r)) + \cos^2\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) + \cos^2\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin(-\theta_r)\cos(\theta_r) + \sin\left(-\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right)\cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) + \sin\left(-\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right)\cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2}\left(\cos(\theta_r) + \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) + \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right)\right) \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

Birinci satırdaki terimi hesaplırsak:

$$\begin{aligned}
\cos^2(\theta_r) &+ \left[\cos(\theta_r) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) - \sin(\theta_r) \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) \right]^2 + \left[\cos(\theta_r) \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) + \sin(\theta_r) \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{3}\right) \right]^2 \\
\cos^2(\theta_r) &+ \left[-\frac{1}{2}\cos(\theta_r) - \frac{\sqrt{3}}{2}\sin(\theta_r) \right]^2 + \left[-\frac{1}{2}\cos(\theta_r) + \frac{\sqrt{3}}{2}\sin(\theta_r) \right]^2
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \cos^2(\theta_r) + \left[\frac{1}{4} \cos^2(\theta_r) + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(\theta_r) \cos(\theta_r) + \frac{3}{4} \sin^2(\theta_r) \right] \\
& \quad + \left[\frac{1}{4} \cos^2(\theta_r) - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos(\theta_r) \sin(\theta_r) + \frac{3}{4} \sin^2(\theta_r) \right] \\
& \cos^2(\theta_r) + \frac{1}{4} \cos^2(\theta_r) + \frac{3}{4} \sin^2(\theta_r) + \frac{1}{4} \cos^2(\theta_r) + \frac{3}{4} \sin^2(\theta_r) \\
& [T_{qdo}(-\theta_r) \mu A_3 i_f]_{11} = \frac{3}{2} [\cos^2(\theta_r) + \sin^2(\theta_r)] = \frac{3}{2}
\end{aligned}$$

İkinci satırı hesaplırsak:

$$\begin{aligned}
& = -\sin(\theta_r) \cos(\theta_r) - \sin\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) - \sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\
& = -\frac{1}{2} \left[\sin 2(\theta_r) + \sin\left(2\theta_r + \frac{4\pi}{3}\right) - \sin\left(2\theta_r - \frac{4\pi}{3}\right) \right] \\
& = -\frac{1}{2} \left[\sin 2(\theta_r) + \sin 2\theta_r \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) + \cos 2\theta_r \sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) + \sin 2\theta_r \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) - \cos 2\theta_r \sin\left(\frac{4\pi}{3}\right) \right] \\
& = -\frac{1}{2} \left[\sin 2(\theta_r) + 2 \sin 2\theta_r \cos\left(\frac{4\pi}{3}\right) \right] \\
& [T_{qdo}(-\theta_r) \mu A_3 i_f]_{21} = -\frac{1}{2} \left[\sin 2(\theta_r) + 2 \sin 2\theta_r \left(-\frac{1}{2}\right) \right] = 0
\end{aligned}$$

Bulunanlara göre ifadeyi yinelersek:

$$= \frac{2}{3} \mu i_f L_{ms} \begin{bmatrix} \frac{3}{2} \\ 0 \\ \frac{1}{2} \left(\cos(\theta_r) + \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) + \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \right) \end{bmatrix}$$

$$T_q(-\theta_r) \mu A_3 i_f = \frac{2}{3} \mu i_f L_{ms} \frac{3}{2} = \mu i_f L_{ms} = \mu \frac{2}{3} L_m i_f \quad \left(L_{ms} = \frac{2}{3} L_m \right) \quad (4.20)$$

Sonuç olarak yukarıda bulunan sonuçlar birleştirilirse aşağıdaki ifadeler elde edilir:

$$v_{qs}^s = R_s i_{qs}^s + p \lambda_{qs}^s - \frac{2}{3} \mu R_s i_f \quad (4.21)$$

$$v_{ds}^s = R_s i_{ds}^s + p \lambda_{ds}^s - \frac{2}{3} \mu R_s i_f \quad (4.22)$$

$$v_{qr}^s = R_r i_{qr}^r + (p - j\omega r) \lambda_{qr}^s = 0 \quad (4.23)$$

$$v_{dr}^s = R_r i_{qdr}^r + (p - j\omega r) \lambda_{dr}^s = 0 \quad (4.24)$$

$$v_{os}^s = -\frac{1}{3} \mu R_s i_f + p \lambda_{os}^s \quad (4.25)$$

$$\begin{aligned} \lambda_{qs}^s &= L_s i_{qs}^s + L_m i_{qr}^s - \frac{2}{3} \mu L_s i_f \\ \lambda_{ds}^s &= L_s i_{ds}^s + L_m i_{dr}^s - \frac{2}{3} \mu L_s i_f \\ \lambda_{qr}^s &= L_m i_{qd}^s + L_r i_{qd}^s - \frac{2}{3} \mu L_m i_f \\ \lambda_{dr}^s &= L_m i_{ds}^s + L_r i_{dr}^s - \frac{2}{3} \mu L_m i_f \\ \lambda_o^s &= -\frac{1}{3} \mu L_{ls} i_f \end{aligned} \quad (4.26)$$

'a' fazındaki kısa devreden gelen gerilim ve akı değerleri ise aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\begin{aligned} &\mu \mathbf{T}_{qdo}(0) \mathbf{A}_3 \mathbf{T}_{qdo}^{-1}(-\theta_r) \mathbf{i}_{qd0r} = \\ &= \frac{2}{3} L_{ms} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & 0 & 0 \\ 0 & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & 0 \\ 0 & 0 & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(-\theta_r) & \sin(-\theta_r) & 1 \\ \cos\left(-\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(-\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(-\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(-\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$v_{as_2} = \mu R_s (i_{qs}^s - i_f) + p \lambda_{as_2} \quad (4.27)$$

$$\lambda_{as_2} = \mu L_{ls} (i_{qs}^s - i_f) + \mu L_m \left(i_{qs}^s + i_{qr}^s - \frac{2}{3} \mu i_f \right) \quad (4.28)$$

Simülasyon öncesi son denklemler aşağıdaki gibi yazabiliriz:

$$v_{qs}^s = R_s i_{qs}^s + p \lambda_{qs}^s - \frac{2}{3} \mu R_s i_f + p \lambda_{a2_qs}^s \quad (4.29)$$

$$v_{ds}^s = R_s i_{ds}^s + p \lambda_{ds}^s + 0 \quad (0 = p \lambda_{a2_ds}^s) \quad (4.30)$$

$$v_{qr}^s = 0 = R_r i_{qr}^s + p \lambda_{qr}^s - \omega_r \lambda_{dr}^s - p \lambda_{a2_qr}^s \quad (4.31)$$

$$v_{dr}^s = 0 = R_r i_{dr}^s + p \lambda_{dr}^s + \omega_r \lambda_{qr}^s + 0 \quad (4.32)$$

$$\lambda_{qs}^s = (L_{ls} + L_m) i_{qs}^s + L_m i_{qr}^s \quad (4.33)$$

$$\lambda_{ds}^s = (L_{ls} + L_m) i_{ds}^s + L_m i_{dr}^s \quad (4.34)$$

$$\lambda_{qr}^s = (L_{lr} + L_m) i_{qr}^s + L_m i_{qs}^s \quad (4.35)$$

$$\lambda_{dr}^s = (L_{lr} + L_m) i_{dr}^s + L_m i_{ds}^s \quad (4.36)$$

Arızalı sarımın stator tarafındaki qd akı ifadesi:

$$\lambda_{a2_qs}^s = \mu \frac{2}{3} \left(L_{ls} + \frac{3}{2} L_{ms} \right) i_f = \mu \frac{2}{3} (L_{ls} + L_m) i_f \quad (4.37)$$

$$\lambda_{a2_ds}^s = 0 \quad (4.38)$$

Arızalı sarımın rotor tarafındaki qd akı ifadesi:

$$\lambda_{a2_qr}^s = \mu \frac{2}{3} L_m i_f \quad \text{denklem (4.20) den} \quad (4.39)$$

$$\lambda_{a2_dr}^s = 0 \quad (4.40)$$

Buradaki ifadeleri zamana bağlı akı ve reaktanslar cinsinden ifade edelim:

$$\psi = \omega_b \lambda = \omega_s \lambda \Rightarrow \lambda = \frac{\psi}{\omega_s} \quad , \quad x = \omega_b L = \omega_s L \quad (4.41)$$

(4.41) ifadelerini (4.29) ve (4.30) denklemlerinde kullanırsak stator için qd gerilim bileşenleri:

$$v_{qs}^s = R_s i_{qs}^s + p \frac{\psi_{qs}^s}{\omega_s} - \frac{2}{3} \mu R_s i_f + p \frac{\psi_{a2_{qs}}^s}{\omega_s} \quad (4.42)$$

$$v_{ds}^s = R_s i_{ds}^s + p \frac{\psi_{ds}^s}{\omega_s} \quad (4.43)$$

(4.41) ifadelerini (4.31) ve (4.32) denklemlerinde kullanırsak rotor için qd gerilim bileşenleri:

$$v_{qr}^s = 0 = R_r i_{qr}^s + p \frac{\psi_{qr}^s}{\omega_s} - \frac{\omega_r}{\omega_s} \psi_{dr}^s - \psi_{a2_{qr}}^s \quad (4.44)$$

$$v_{dr}^s = 0 = R_r i_{dr}^s + p \frac{\psi_{dr}^s}{\omega_s} + \frac{\omega_r}{\omega_s} \psi_{qr}^s \quad (4.45)$$

Hatalı sarımdan kaynaklanan değerler aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\psi_{a2_{qs}}^s = \frac{2}{3} \mu (x_{ls} + x_m) i_f \quad (4.46)$$

$$\psi_{a2_{qr}}^s = \mu \frac{2}{3} x_m i_f \quad (4.47)$$

(4.42) ve (4.43) den ψ değerlerini çekersek:

$$\psi_{qs}^s = \omega_s \int \left(v_{qs}^s - R_s i_{qs}^s + \frac{2}{3} \mu R_s i_f \right) dt - \psi_{a2_{qs}}^s \quad (4.48)$$

$$\psi_{ds}^s = \omega_s \int \left(v_{ds}^s - R_s i_{ds}^s \right) dt \quad (4.49)$$

(4.44) ve (4.45) dan ψ değerlerini çekersek:

$$\psi_{qr}^s = \omega_s \int \left(\frac{\omega_r}{\omega_s} \psi_{dr}^s - R_r i_{qr}^s \right) dt + \psi_{a2_{qr}}^s \quad (4.50)$$

$$\psi_{dr}^s = -\omega_s \int \left(\frac{\omega_r}{\omega_s} \psi_{qr}^s + R_r i_{dr}^s \right) dt \quad (4.51)$$

(4.33)-(4.36) de (4.41) uygularsak:

$$\psi_{qs}^s = (x_{ls} + x_m) i_{qs}^s + x_m i_{qr}^s$$

$$\psi_{ds}^s = (x_{ls} + x_m) i_{ds}^s + x_m i_{dr}^s$$

$$\psi_{qr}^s = (x_{ls} + x_m) i_{qr}^s + x_m i_{qs}^s$$

$$\psi_{dr}^s = (x_{ls} + x_m) i_{dr}^s + x_m i_{ds}^s$$

$$\psi_{qs}^s = x_{ls} i_{qs}^s + x_m (i_{qs}^s + i_{qr}^s) = x_{ls} i_{qs}^s + \psi_{mq}^s \quad (4.52)$$

$$\psi_{ds}^s = x_{ls} i_{ds}^s + x_m (i_{ds}^s + i_{dr}^s) = x_{ls} i_{ds}^s + \psi_{md}^s \quad (4.53)$$

$$\psi_{qr}^s = x_{lr} i_{qr}^s + x_m (i_{qs}^s + i_{qr}^s) = x_{lr} i_{qr}^s + \psi_{mq}^s \quad (4.54)$$

$$\psi_{dr}^s = x_{lr} i_{dr}^s + x_m (i_{ds}^s + i_{dr}^s) = x_{lr} i_{dr}^s + \psi_{md}^s \quad (4.55)$$

Yukarıdaki denklemlerde şu varsayımlar kullanılmıştır:

$$\psi_{mq}^s = x_m (i_{qs}^s + i_{qr}^s) \quad (4.56)$$

$$\psi_{md}^s = x_m (i_{ds}^s + i_{dr}^s) \quad (4.57)$$

(4.52) denkleminde

$$i_{qs}^s = \frac{\psi_{qs}^s - \psi_{mq}^s}{x_{ls}} \quad (4.58)$$

(4.53) denkleminde

$$i_{ds}^s = \frac{\psi_{ds}^s - \psi_{md}^s}{x_{ls}} \quad (4.59)$$

(4.54) denkleminde

$$i_{qr}^s = \frac{\psi_{qr}^s - \psi_{mq}^s}{x_{lr}} \quad (4.60)$$

(4.55) denkleminde

$$i_{dr}^s = \frac{\psi_{dr}^s - \psi_{md}^s}{x_{lr}} \quad (4.61)$$

(4.48) denkleminde

$$\psi_{qs}^s = \omega_s \int \left(v_{qs}^s - R_s \left(\frac{\psi_{qs}^s - \psi_{mq}^s}{x_{ls}} \right) + \frac{2}{3} \mu R_s i_f \right) dt - \psi_{a2_qs}^s \quad (4.62)$$

(4.49) denkleminde

$$\psi_{ds}^s = \omega_s \int \left(v_{ds}^s - R_s \frac{\psi_{ds}^s - \psi_{md}^s}{x_{ls}} \right) dt \quad (4.63)$$

(4.50) denkleminde

$$\psi_{qr}^s = \omega_s \int \left(\frac{\omega_r}{\omega_s} \psi_{dr}^s - R_r \frac{\psi_{qr}^s - \psi_{mq}^s}{x_{lr}} \right) dt + \psi_{a2_qr}^s \quad (4.64)$$

(4.51) denkleminde

$$\psi_{dr}^s = -\omega_s \int \left(\frac{\omega_r}{\omega_s} \psi_{qr}^s + R_r \frac{\psi_{dr}^s - \psi_{md}^s}{x_{lr}} \right) dt \quad (4.65)$$

(4.56) denklemi (4.58) ve (4.60) ile tekrar yazılırsa:

$$\begin{aligned} \psi_{mq}^s &= x_m \left(\frac{\psi_{qs}^s - \psi_{mq}^s}{x_{ls}} + \frac{\psi_{qr}^s - \psi_{mq}^s}{x_{lr}} \right) \\ \psi_{mq}^s &= x_m \left(-\frac{\psi_{mq}^s}{x_{ls}} + \frac{\psi_{qs}^s}{x_{ls}} - \frac{\psi_{mq}^s}{x_{lr}} + \frac{\psi_{qr}^s}{x_{lr}} \right) \\ \frac{\psi_{mq}^s}{x_m} + \frac{\psi_{mq}^s}{x_{ls}} + \frac{\psi_{mq}^s}{x_{lr}} &= \left(\frac{\psi_{qs}^s}{x_{ls}} + \frac{\psi_{qr}^s}{x_{lr}} \right) \\ \psi_{mq}^s &= X_M \left(\frac{\psi_{qs}^s}{x_{ls}} + \frac{\psi_{qr}^s}{x_{lr}} \right) \\ \frac{1}{X_M} &= \frac{1}{x_m} + \frac{1}{x_{ls}} + \frac{1}{x_{lr}} \end{aligned} \quad (4.66)$$

Benzer şekilde (4.57) denklemi (4.59) ve (4.61) ile yeniden yazılırsa:

$$\psi_{md}^s = x_m \left(\frac{\psi_{ds}^s - \psi_{ms}^s}{x_{ls}} + \frac{\psi_{dr}^s - \psi_{mr}^s}{x_{lr}} \right)$$

Ara işlemler yukarıdaki gibi yapılırsa aşağıdaki sonuca varılabilir.

$$\psi_{md}^s = X_M \left(\frac{\psi_{ds}^s}{x_{ls}} + \frac{\psi_{dr}^s}{x_{lr}} \right) \quad (4.67)$$

Hatalı sarım için (4.27) ve (4.28) den aşağıdaki denklemler yazılabilir:

$$v_{as2} = \mu R_s (i_{qs} - i_f) + p \frac{\psi_{as2}^s}{\omega_s} = R_f i_f \quad (4.68)$$

$$\psi_{as2}^s = \mu x_{ls} (i_{qs} - i_f) + \mu x_m \left(i_{qs}^s + i_{qr}^s - \frac{2}{3} \mu i_f \right) \quad (4.69)$$

(4.68) denkleminde aşağıdaki ifadeler elde edilebilir:

$$\begin{aligned} \psi_{as2} &= \omega_s \int (v_{as2} - \mu R_s i_{qs} - \mu R_s i_f) dt \\ \psi_{as2} &= \omega_s \int (R_f i_f - \mu R_s i_{qs} - \mu R_s i_f) dt \\ \psi_{as2} &= \omega_s \int ((R_f - \mu R_s) i_f - \mu R_s i_{qs}) dt \end{aligned} \quad (4.70)$$

(4.69) denkleminde hata akımı (i_f) aşağıdaki şekilde bulunabilir:

$$\begin{aligned} \psi_{a2} &= \left(\mu x_{ls} (i_{qs}^s - i_f) + \mu x_m (i_{qs}^s + i_{qr}^s) - \mu^2 \frac{2}{3} x_m i_f \right) \\ &= \mu i_{qs} (x_{ls} + x_m) + \mu x_m i_{qr}^s - \mu x_{ls} i_f - \mu^2 \frac{2}{3} x_m i_f \\ i_f &= \left(\frac{\mu i_{qs} (x_{ls} + x_m) + \mu x_m i_{qr}^s - \psi_{a2}}{\mu x_{ls} + \mu^2 \frac{2}{3} x_m} \right) \end{aligned} \quad (4.71)$$

$$i_f = \gamma i_{qs}^s + \beta i_{qr}^s - \alpha \psi_{a2} \quad (4.72)$$

Burada kullanılan katsayılar aşağıda sunulmuştur:

$$\gamma = \frac{\mu(x_{ls} + x_m)}{\mu x_{ls} + \mu^2 \frac{2}{3} x_m}$$

$$\beta = \frac{\mu x_m}{\mu x_{ls} + \mu^2 \frac{2}{3} x_m}$$

$$\alpha = \frac{1}{\mu x_{ls} + \mu^2 \frac{2}{3} x_m}$$

$$\psi_{a2} = \omega_s \int \left((R_f - \mu R_s) (\gamma i_{qs}^s + \beta i_{qr}^s - \alpha \psi_{a2}) - \mu R_s i_{qs}^s \right) dt \quad (4.73)$$

Momentin hesaplanması

$$\begin{aligned} T_{em} &= \frac{3}{2} \frac{p}{2\omega_s} \left[\psi_{qr}^s i_{dr}^s - \psi_{dr}^s i_{qr}^s \right] \\ &= \frac{3}{2} \frac{p}{2\omega_s} \left[\left((x_{lr} + x_m) i_{qr}^s + x_m i_{qs}^s - \mu \frac{2}{3} x_m i_f^s \right) i_{dr}^s - \left((x_{lr} + x_m) i_{dr}^s + x_m i_{ds}^s \right) i_{qr}^s \right] \\ &= \frac{3}{2} \frac{p}{2\omega_s} \left[\cancel{x_{lr} i_{qr}^s i_{dr}^s} + \cancel{x_m i_{qr}^s i_{dr}^s} + x_m i_{qs}^s i_{dr}^s - \mu \frac{2}{3} x_m i_f^s i_{dr}^s - \cancel{x_{lr} i_{dr}^s i_{qr}^s} - \cancel{x_m i_{dr}^s i_{qr}^s} - x_m i_{ds}^s i_{qr}^s \right] \\ T_{em} &= \frac{3}{2} \frac{p x_m}{2\omega_s} \left(i_{qs}^s i_{dr}^s - i_{ds}^s i_{qr}^s \right) - \mu \frac{2}{3} x_m i_f^s i_{dr}^s \quad (4.74) \end{aligned}$$

Son olarak simülasyonda kullanılmak üzere $qd0$ gerilim denklemleri aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$v_{qs}^s = \frac{2}{3} v_{as} - \frac{1}{3} v_{bs} - \frac{1}{3} v_{cs} = \frac{2}{3} v_{ag} - \frac{1}{3} v_{bg} - \frac{1}{3} v_{cg} \quad (4.75)$$

$$v_{ds}^s = \frac{I}{\sqrt{3}}(v_{cs} - v_{bs}) = \frac{I}{\sqrt{3}}(v_{cg} - v_{bg}) \quad (4.76)$$

$$v_{qr}^s = 0 \quad (4.77)$$

$$v_{dr}^s = 0 \quad (4.78)$$

5. MATLAB © SIMULINK İLE MODELLEME

Bir sistemi gerçekleştirmeden önce, sistemin çeşitli çalışma koşulları altında davranışının incelenmesi ve uygun kontrol kurallarının belirlenmesi istenir. Bu amaçla gerçekleştirilecek sistemin en doğru şekil de temsil eden denklemlere gerek vardır. Modelleme işlemi ile sistem davranışını veren matematiksel ifadeler elde edilir. Asenkron makinenin modelinin elde edilmesinde yapılan varsayımlar şunlardır:

- 1) Stator sargıları stator çevresine düzgün yayılmış olup hava aralığındaki akı değişiminin sinüzoidal olarak dağıldığı kabul edilecektir.
- 2) Üç fazlı stator sargılarının çevreye 120 derecelik elektrik açısı ile düzgün bir şekilde yayıldığı varsayılacaktır.
- 3) Doyma, dış ve oluk etkileri ihmal edilecektir.
- 4) Histerizis ve fuko kayıpları ihmal edilecektir.
- 5) Magnetik kısımların geçirgenliği sonsuz sayılacaktır.
- 6) Akım yığılması ihmal edilecektir.
- 7) Rotor çubuklarını çevreye simetrik yayıldığı varsayılacaktır.
- 8) Direnç ve indüktansların sıcaklık ve frekansla değişimleri ihmal edilecektir.
- 9) Rotorun her çubuğu bir rotor faz sargısı olarak varsayılacaktır.

İncelenen modelin simülasyonu, MATLAB® Simulink® kullanılarak hazırlanacaktır. MATLAB, sayısal ve sembolik hesaplamalar, veri çözümü, gerçek ortamda test ve ölçüm yapabilme, çok gelişmiş çizim işlemleri, algoritma geliştirme, ileri seviye programlama, C/C++ ile tümleşik çalışabilme, mühendislik ve bilimsel uygulamaları ile tüm dünyada bir çok alanda yaygın olarak kullanılan yazılımdır. MATLAB yazılım ailesinin en güzel yanı Web sitesinin çok zengin yardımcı kaynaklara sahip olması ve bunları ücretsiz sunmasıdır. MATLAB yazılımı, kullanıcıya çok kolay ve etkin uygulama geliştirme olanağı verir. Özellikle Toolbox adı verilen ve hemen hemen birçok matematiksel ve mühendislik alanını kapsayan alt modülleri ile ilgili her konuda kolayca ve pratik bir şekilde uygulamalar yapılabilir. Gün geçtikçe gelişen Simulink ile gerçek zamanlı uygulamaların (iletişim, işaret ve görüntü işleme, mekanik ve elektriksel sistemler vb) benzetimini gerçekleştirmeyi olanaklı hale getirmiştir. MATLAB, ülkemizde de başta üniversitelerimiz olmak üzere özel sektörde de kullanılmaya başlanmıştır. MATLAB gerek istatistik ve matematik öğrencilerine gerekse finans ve

mühendislik alanlarındaki öğrencilere öğretim yaşamlarında ve sonrası iş yaşamlarında bilgisayarı kullanabilme ortamı sunmaktadır. MATLAB, tıbbi araştırmalardan uzay araştırmalarına kadar çok geniş yelpazede kullanılmaktadır; kullanıcıya, güvенеbileceği hızlı bir analiz ve tasarım ortamı sağlar. Yüzlerce hazır fonksiyonla veya programcı tarafından yazılacak fonksiyonlarla işlemler son derece kolaylaştırılabilir. Örneğin, 100x100 matrisin tersi alınabilir; bir elektrik motorunun denetimi gerçekleştirilebilir. MATLAB, sayısal ve simgesel hesaplama, ayrıca gerçek ortamların simülasyonu ve analizi için Simulink adı verilen ek bir program kullanır.

Simulink; dinamik sistem modellerinin kurulması, benzetimi ve çözümünde kullanılan bir MATLAB eklentisidir. Mühendislik sistemlerinde simülasyonun önemi gün geçtikçe artmaktadır. Sistemlerin tasarımında büyük oranda bilgisayar simülasyonlarından faydalanmakta, mümkün olduğunda tasarımın test aşamaları da bilgisayarlar yardımıyla yapılmaktadır. Bu da prototiplere olan ihtiyacı azaltarak maliyetlerin büyük oranda düşmesini sağlamaktadır. Simulink blok diyagramları sayesinde bir sistem kurulabilir, kurulan sistemler bir laboratuvar ortamında gibi incelenebilir. Simulink, sanal bir laboratuvar seti gibi çalışarak kurulan sistemlere ait analiz, tasarım ve geliştirme işlemlerinin yapılabilmesine imkan tanır. Dinamik sistemleri modellemek, sistem elemanlarının blok diyagramlar halinde verildiği Simulink kütüphanesinden yapılacak sürükle bırak işlemlerinin uygulandığı bir grafiksel kullanıcı arayüzü ile olur. Bu arabirim ile modeller, kağıda çiziyormuşçasına bir kolaylıkla tasarlanabilir. Simulink birçok matematiksel ifadeden başlayarak; elektrik, elektronik, sinyal işleme, kontrol sistemleri gibi özel alanlara kadar yayılmış birçok blok kütüphanesine sahiptir. Simulink sadece ideal lineer sistemlerin değil, gerçekçi lineer olmayan sistemlerin de sürekli zamanlı (continuous time), örnekleme zamanlı (sampled time) veya her iki ortak zamanlı olarak simülasyonunda kullanılabilir. Simulink ile dinamik sistemler; sistem girdilerinin, sistem çıktılarının ve gerekli işlemlerin tayiniyle kolayca modellenir.

Simulink,

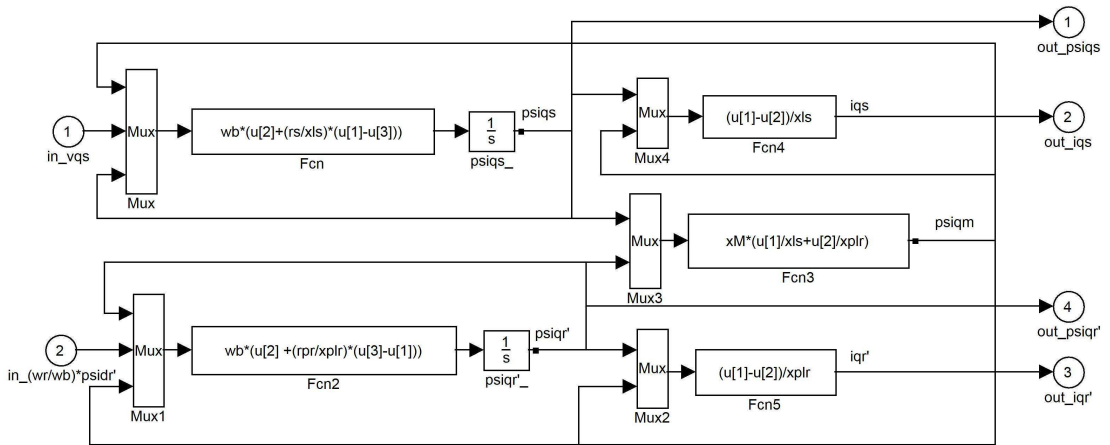
- İş akış kontrolü
- Isı, soğutma, süsbansiyon ve fren sistemleri
- Sayısal İşaret İşleme ve haberleşme
- Diferansiyel denklem çözümü
- Durum-uzay modelleri

- Transfer fonksiyonları
- Neuro-Fuzzy sistem modelleme
- Elektrik devre çözümü
- Kontrol sistemleri (Uçuş kontrol, PID kontrolü)
- Dış ortam ile veri alışverişi
- Uzaktan ve Web temelli kontrol

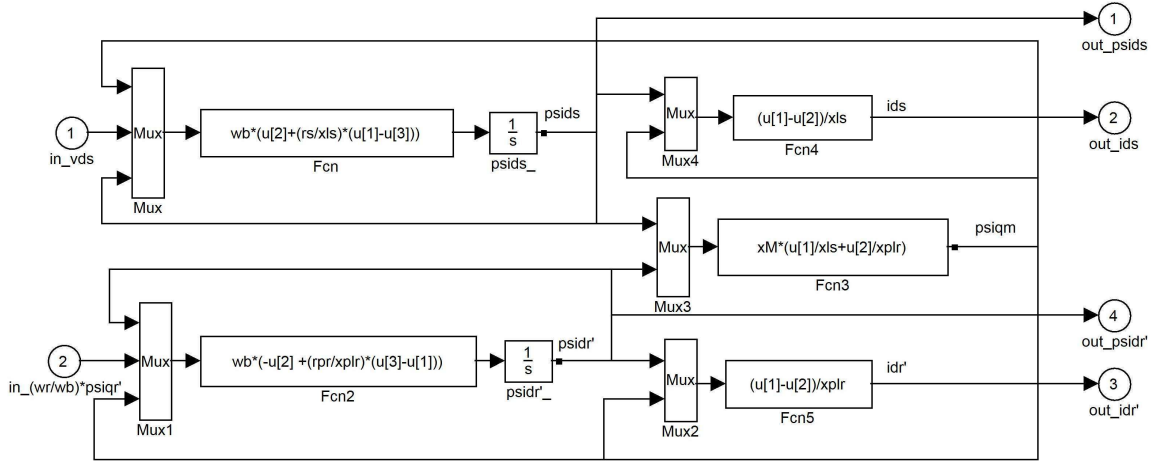
gibi birçok elektrik, elektronik, finans, mekanik ve termodinamik gerçek dünya sistemini simüle edebilir [24].

5.1. Arızasız Asenkron Motorunun Simulink Modeli

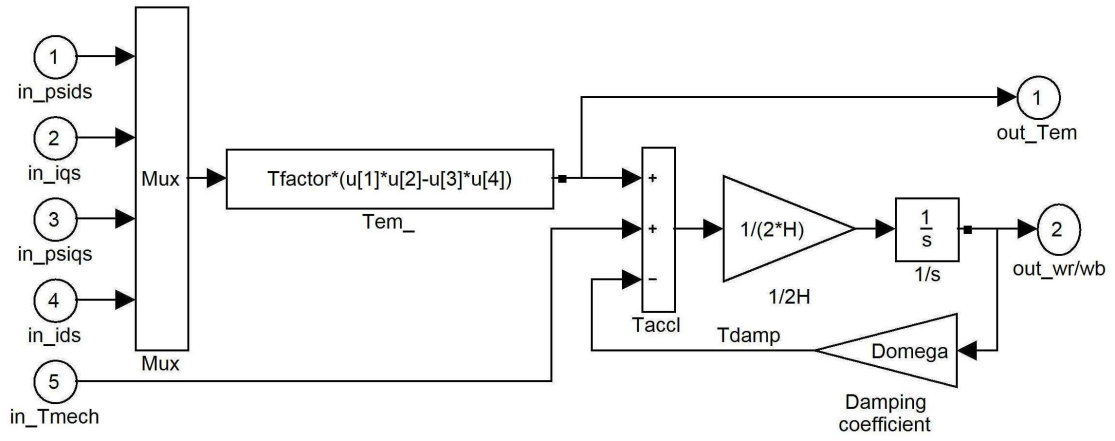
Arızasız asenkron motorun simülasyonu için öncelikle önceki bölümlerde elde edilen denklemlerden faydalanılarak aşağıdaki blok şemalar oluşturulmuştur:



Şekil 5. 1. Arızasız asenkron motor q eksenli Simulink blok diyagramı

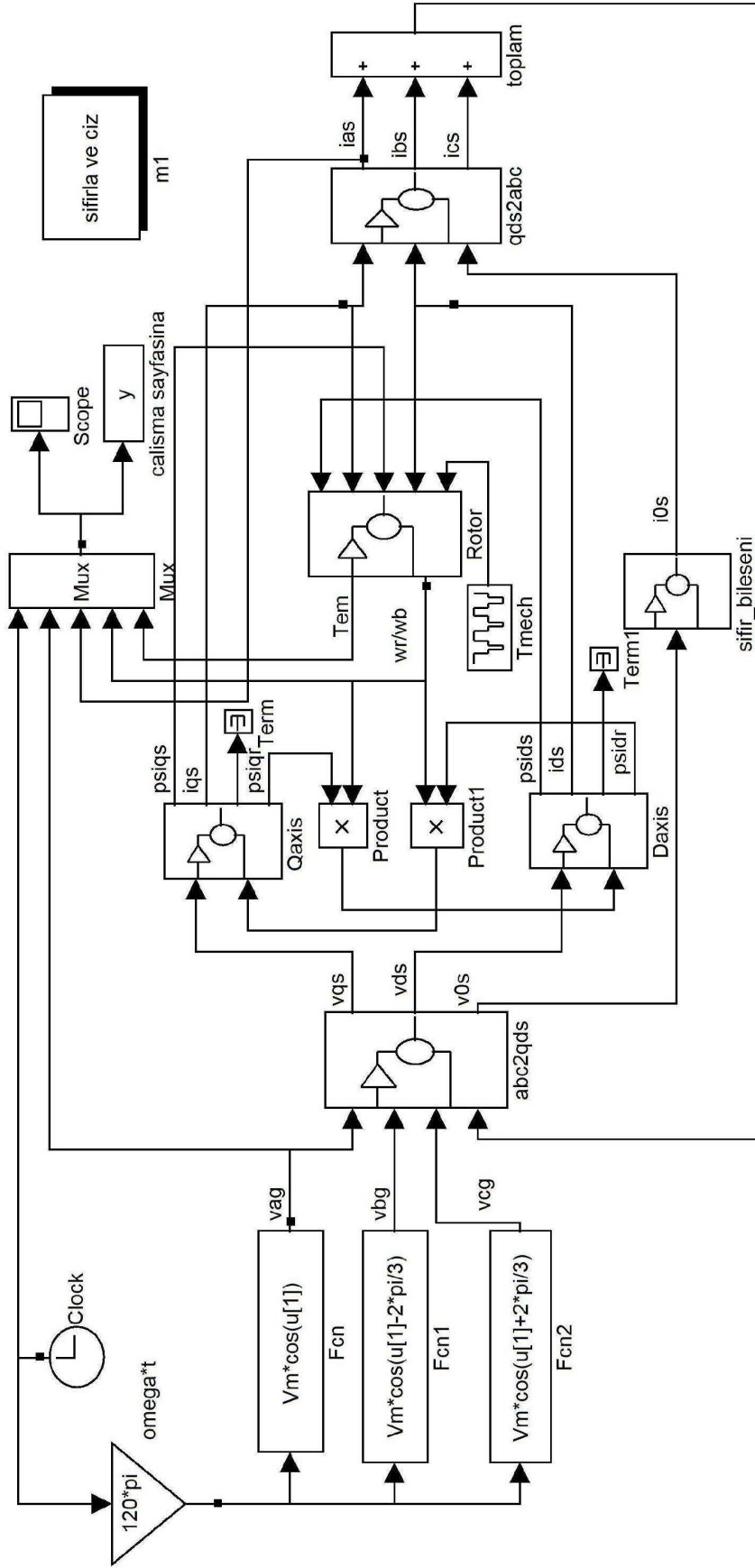


Şekil 5. 2. Arızasız asenkron motor d eksenli Simulink blok diyagramı



Şekil 5. 3. Arızasız asenkron motor elektromanyetik moment Simulink blok diyagramı

Yukarıda bulunan bütün diyagramlar $abc \leftrightarrow qd0$ dönüşüm blok diyagramları ile birleştirilerek Şekil 5.4 deki bütün Simulink devresi elde edilmiştir.

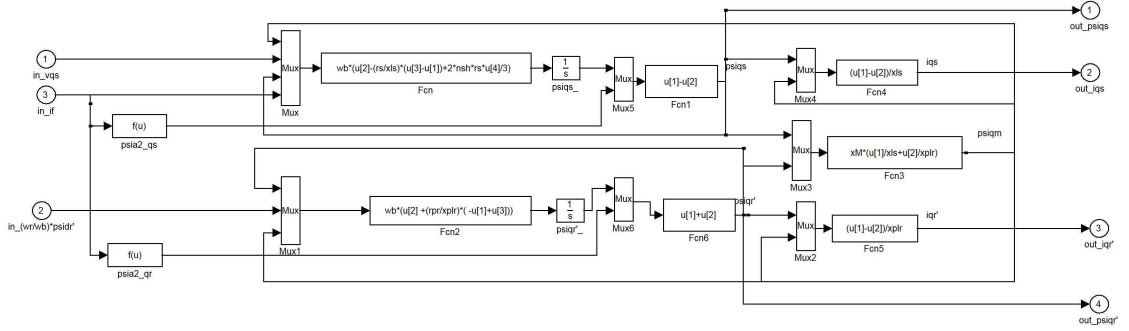


İndüksiyon motor simülasyonu

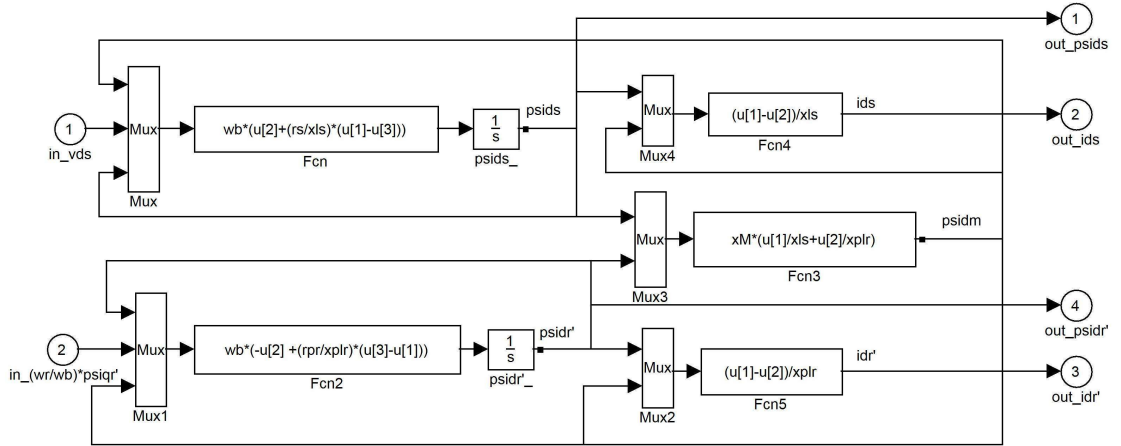
Sekil 5.4. Arızasız Bir indüksiyon motoru için oluşturulan simülasyon modeli

5.2. Arızalı Asenkron Motorunun Simulink Modeli

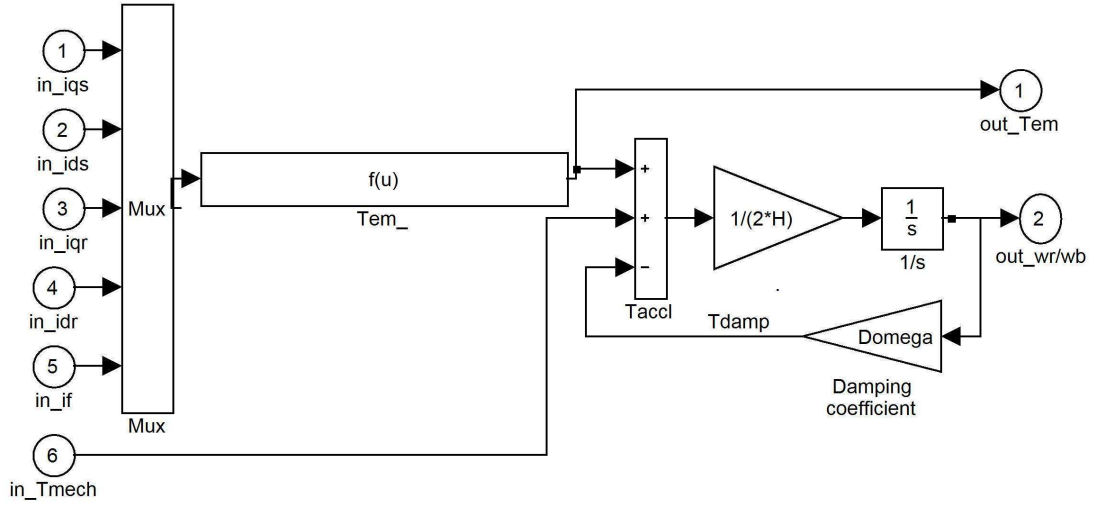
Arızasız modele benzer olarak; 4. Bölümde elde edilen denklemlerden stator sarım hatalı bir asenkron motorun $q - d$ eksenli, elektromanyetik moment ve hata akımı için aşağıdaki Simulink diyagramları oluşturulabilir. Arızalı sistemin simülasyonu gerçekleştirildiğinde ise altıncı bölümdeki çıkış fonksiyonları elde edilmiştir.



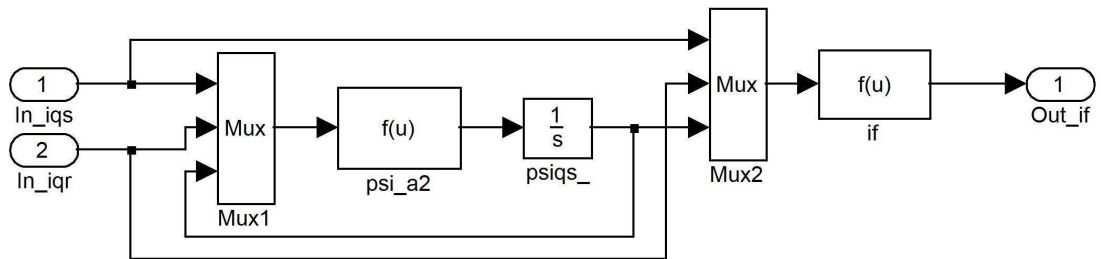
Şekil 5. 5. Arızalı asenkron motor q eksenli Simulink blok diyagramı



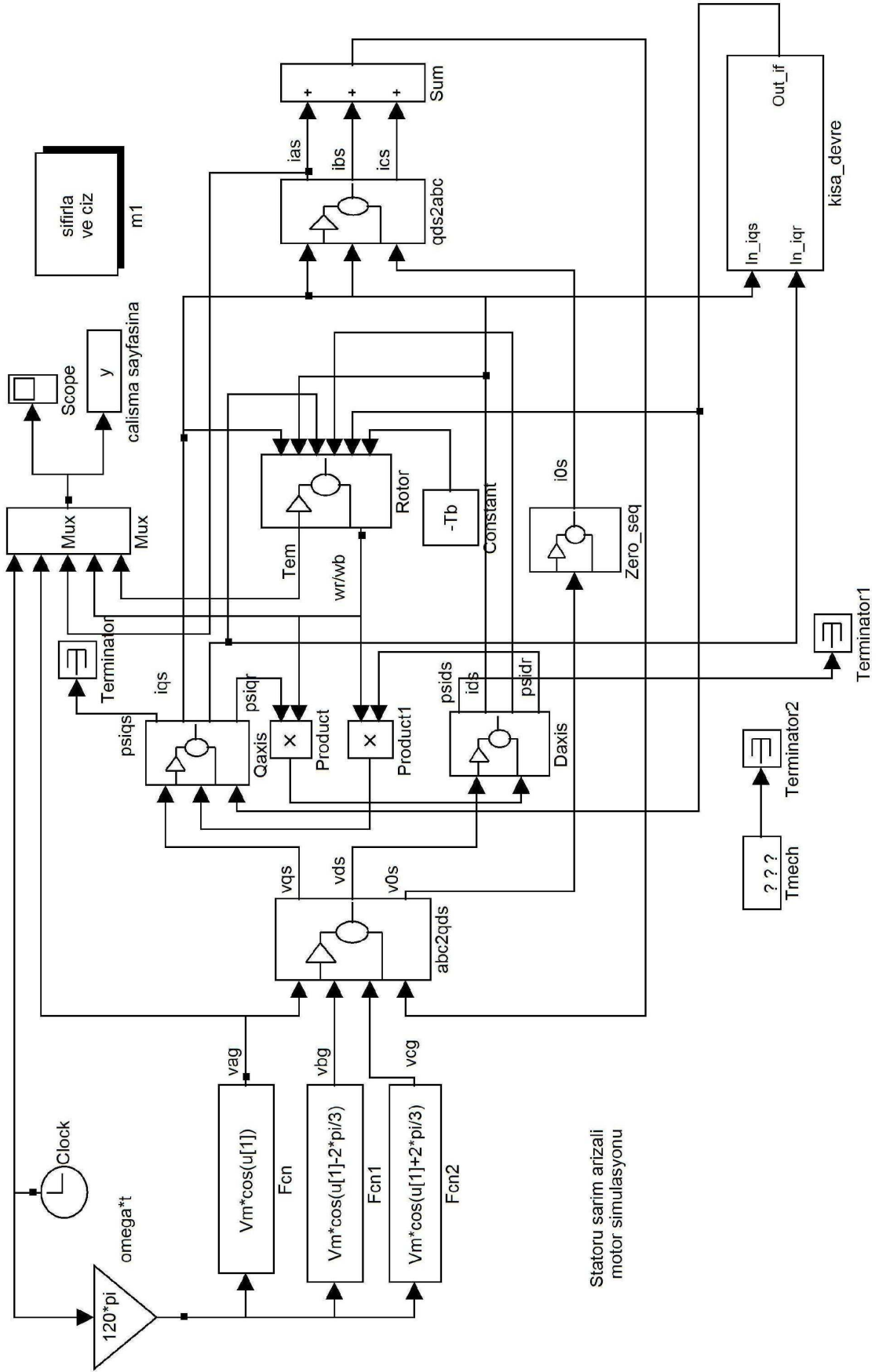
Şekil 5. 6. Arızalı asenkron motor d eksenli Simulink blok diyagramı



Şekil 5. 7. Arızalı asenkron motor elektromagnetik tork Simulink blok diyagramı



Şekil 5. 8. Stator sarım hatası kaynaklı hata akımının Simulink blok diyagramı



Sekil 5.9. Arızalı bir indüksiyon motoru için oluşturulan simülasyon modeli

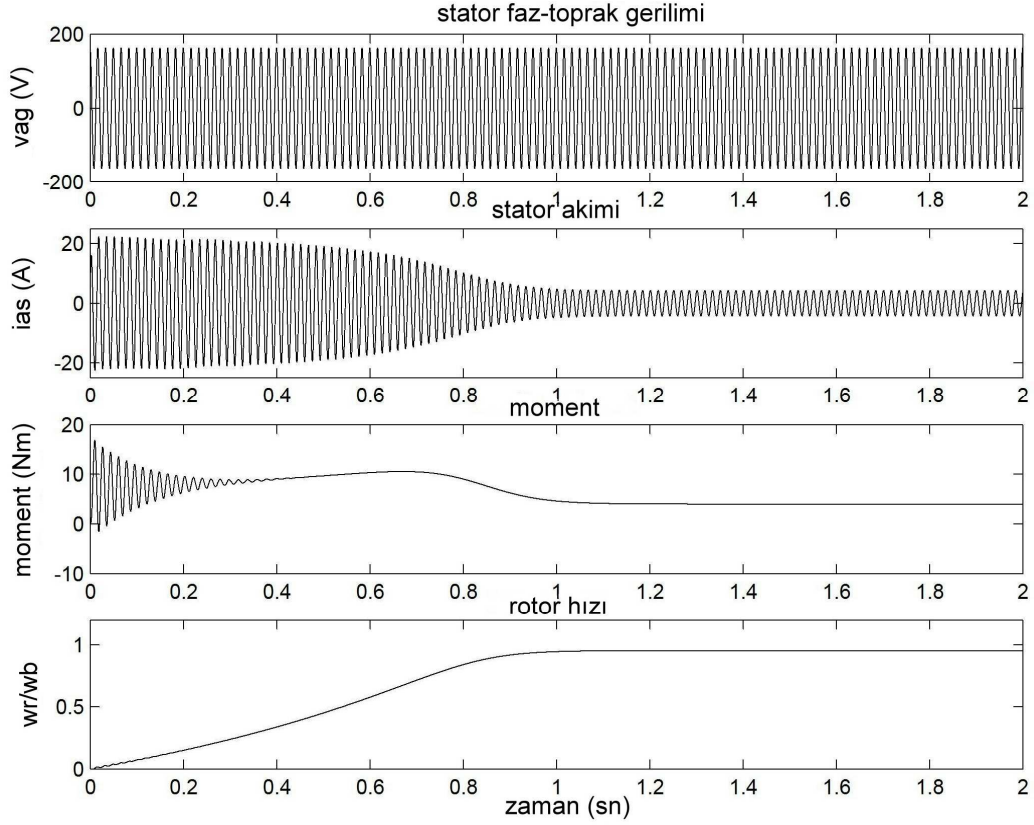
6. SİMÜLASYON SONUÇLARI

Bu bölümde, önceki bölümde elde edilen arızasız ve arızalı asenkron motorun Matlab Simulinkte gerçekleştirilen modellerinden elde edilen simülasyon sonuçları incelenmiştir. Simülasyon sonuçları parametreleri Tablo 6.1’de verilen asenkron motor için gerçekleştirilmiştir.

Tablo 6. 1. Asenkron motor simülasyon parametreleri

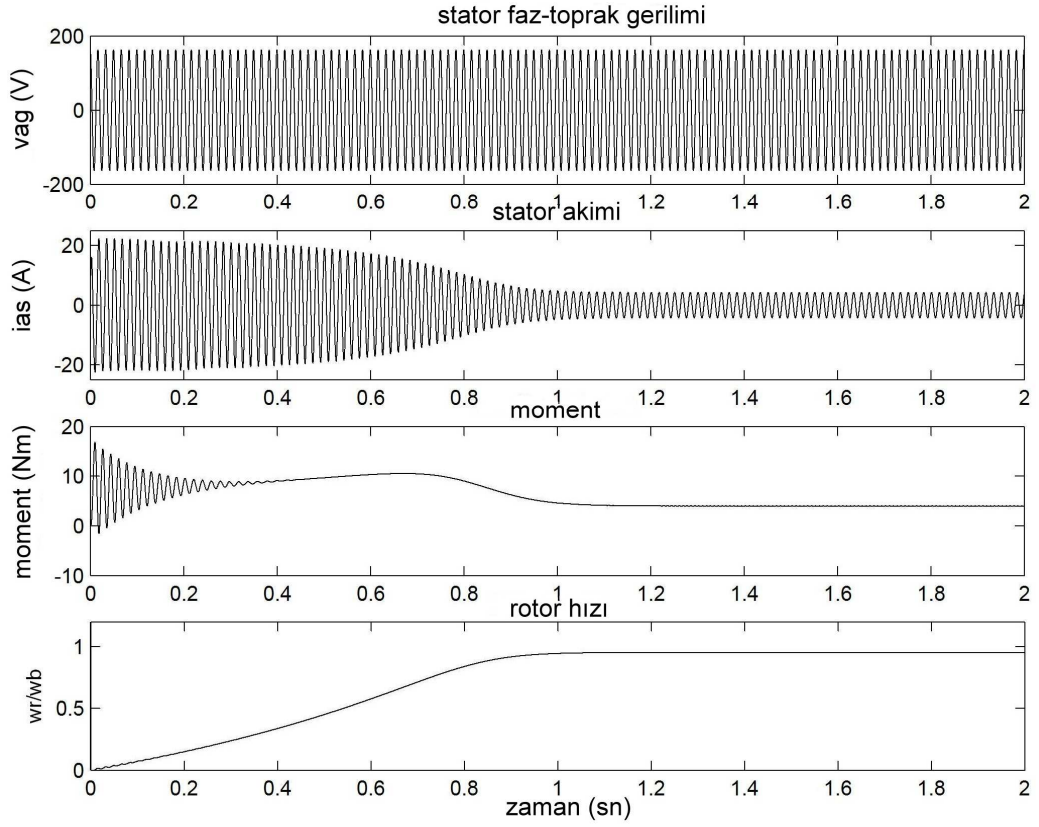
Güç (VA)	750
Çıkış gücü (W)	750
Hat-hat arası gerilim (V)	200
Güç faktörü	0.8
Kutup sayısı	4
Frekans (Hz)	60
Kısa devre direnci (r_f (ohm))	1
Rotor ataleti (kg m ²)	J = 0.1
Stator sarım sayısı	252

Şekil 6.1 arızasız asenkron motorun simülasyonundan elde edilen faz voltajı, akım, moment ve hız sinyallerini göstermektedir. Motor tam yük altında 0 hızdan tam hıza kadar çalıştırılmıştır.

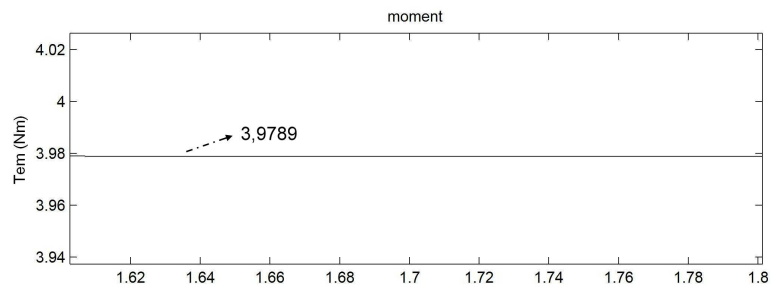


Şekil 6. 1. Arızasız asenkron motorun tam yük altında hızlanma için simülasyon çıkış değerleri

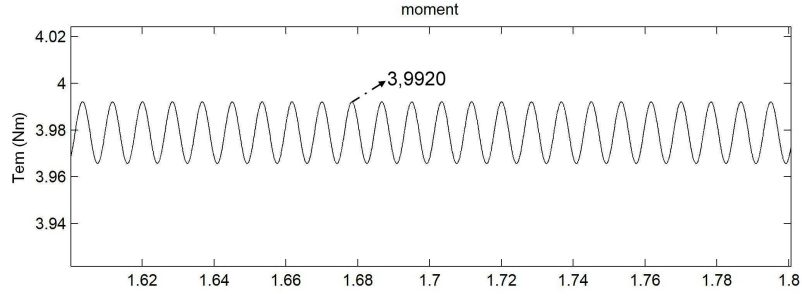
Şekil 6.2’de ise stator sargılarında 1 sargı kısa devre edilerek motor tam yük altında 0 hızdan tam hıza kadar çalıştırılmıştır. Şekilden görüldüğü gibi arızalı ve arızasız durum için elde edilen bu sinyallerdeki değişimi görmek zordur. Gerçekte arızalı durumda motorun akımı asimetrik olduğundan motoru pozitif ve negatif yönde döndürmeye çalışan iki farklı alan oluşur. Bu momentin (dolayısıyla hızın) dalgalı olmasına neden olur. Bunu daha net görmek için Şekil 6.1 ve Şekil 6.2’de elde edilen moment sinyalleri motor kararlı duruma (hızlanma tamamlandıktan sonra) geldikten sonraki kısım için Şekil 6.3 ve Şekil 6.4’de arızalı ve arızasız durum için yeniden çizilmiştir.



Şekil 6. 2. Stator sarımında 1 adet kısa devre bulunan arızalı asenkron motorun tam yük altında hızlanma için simülasyon çıkış değerleri



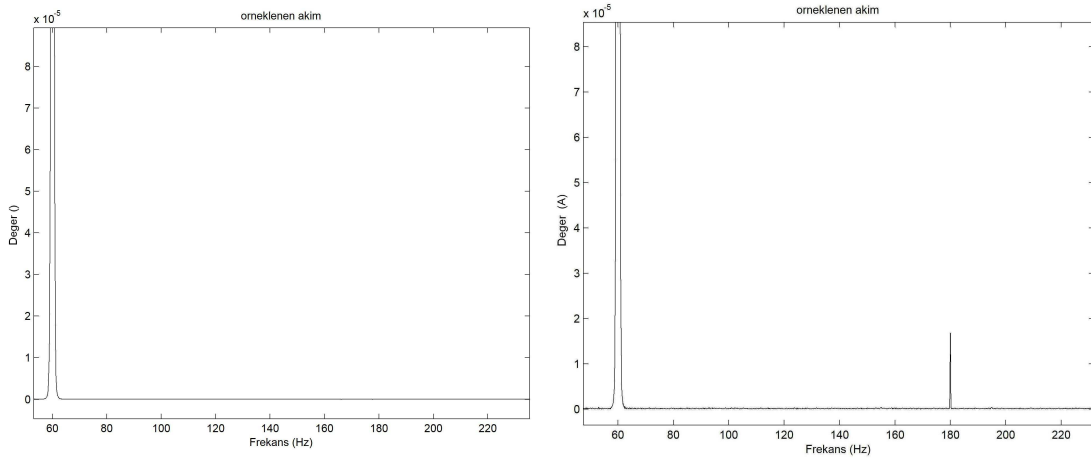
Şekil 6. 3. Arızasız asenkron motorun tam yük kalıcı durum için moment simülasyon çıkış değerleri



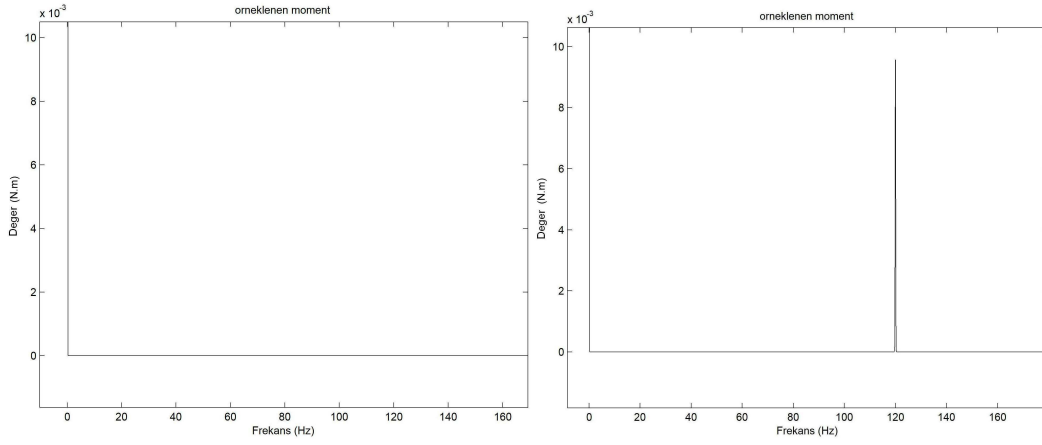
Şekil 6. 4. Stator sarımında 1 adet kısa devre bulunan arızalı asenkron motorun tam yük kalıcı durum için moment simülasyon çıkış değerleri

Yukarıdaki şekillerden de görüldüğü gibi arızalı durumda moment küçükte olsa dalgalanma göstermektedir. Bu dalgalanmanın hangi harmoniklerde oluştuğunu zaman domeninde anlamak zordur. Arıza tespiti için bu harmonikler önemli olduğundan sinyallerin spektrumuna bakmak yararlı olacaktır.

Şekil 6.5 ve Şekil 6.6’da arızasız ve arızalı (1 sargı kısa devre edilmiş) motorun tam yükte çalıştırılmasından elde edilen akım ve moment sinyallerinin spektrumları verilmiştir. Karşılaştırmanın kolay olması için motor kalıcı duruma (hızlanma tamamlandıktan sonra) geldikten sonraki sinyal değerleri kullanılmıştır.



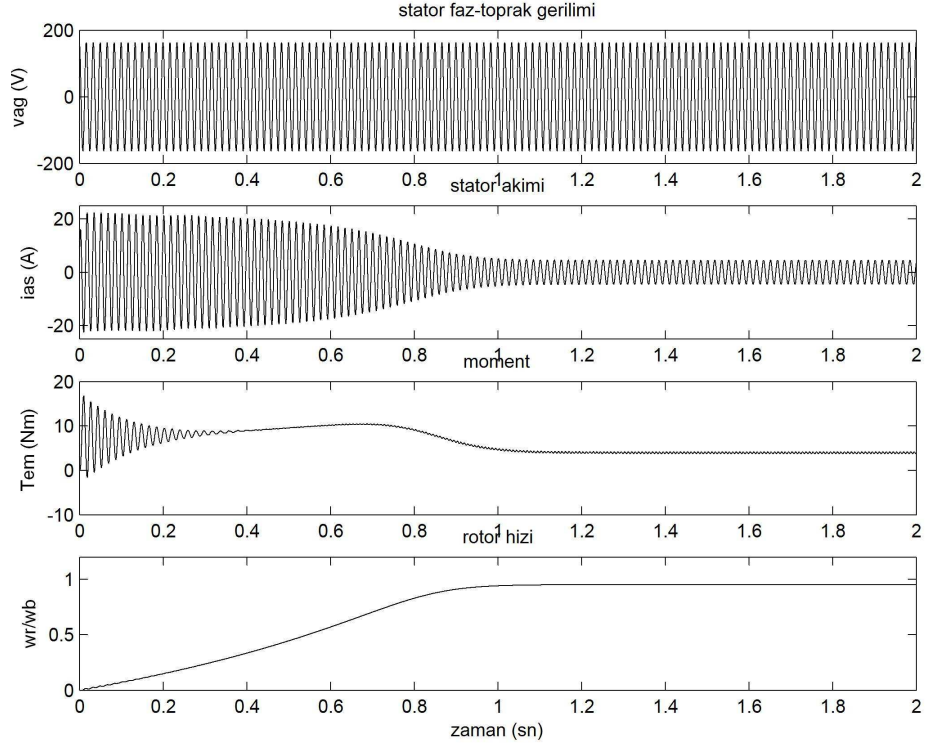
Şekil 6. 5. Arızasız ve arızalı (1 sargı kısa devre) asenkron motorun tam yük kalıcı durum için akım spektrumu.



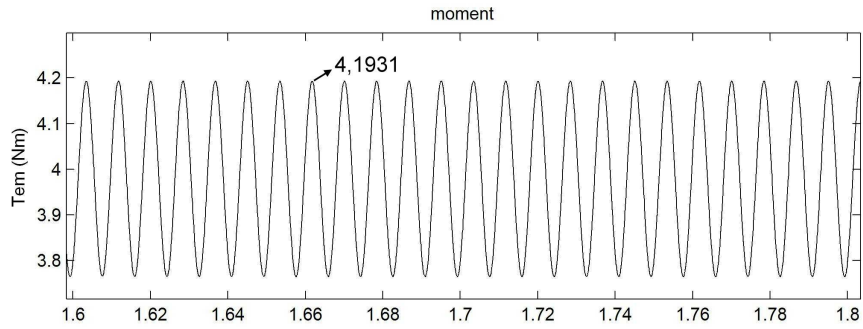
Şekil 6. 6. Arızasız ve arızalı (1 sargı kısa devre) asenkron motorun tam yük kalıcı durum için moment spektrumu.

Elde edilen akım ve moment spektrumla incelendiğinde, sargı kısa devre durumda akım spektrumunda 3. harmoniğin (Şekil 6.5) ve moment spektrumunda ise 2. harmoniğin (Şekil 6.6) oluştuğu net bir şekilde görülmektedir.

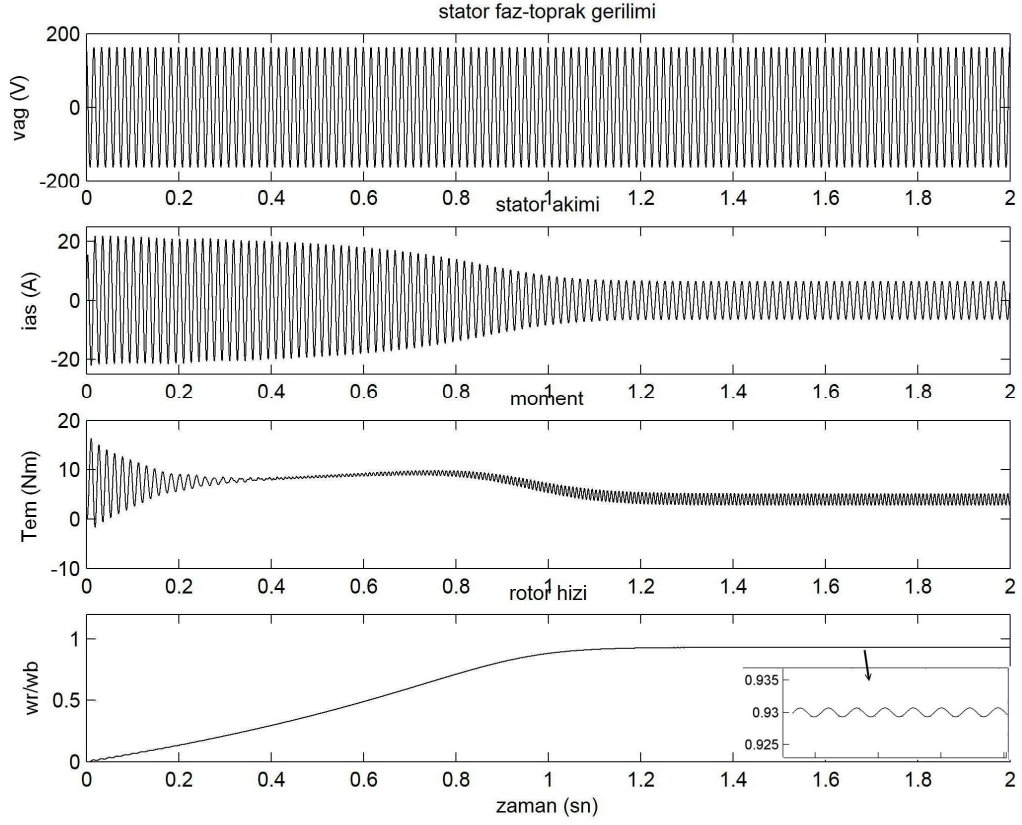
Kısa devre sargılarının etkisini gözlemlemek için ayrıca 4 ve 10 adet sargının kısa devre edilme durumu içinde simülasyon sonuçları elde edilmiştir. Şekil 6.7 ve Şekil 6.9 elde edilen sonuçları göstermektedir. Görüldüğü gibi arıza arttıkça moment ve hızdaki dalgalanma artmaktadır.



Şekil 6. 7. Stator sarımında 4 adet kısa devre bulunan arızalı asenkron motor simülasyon çıkış değerleri

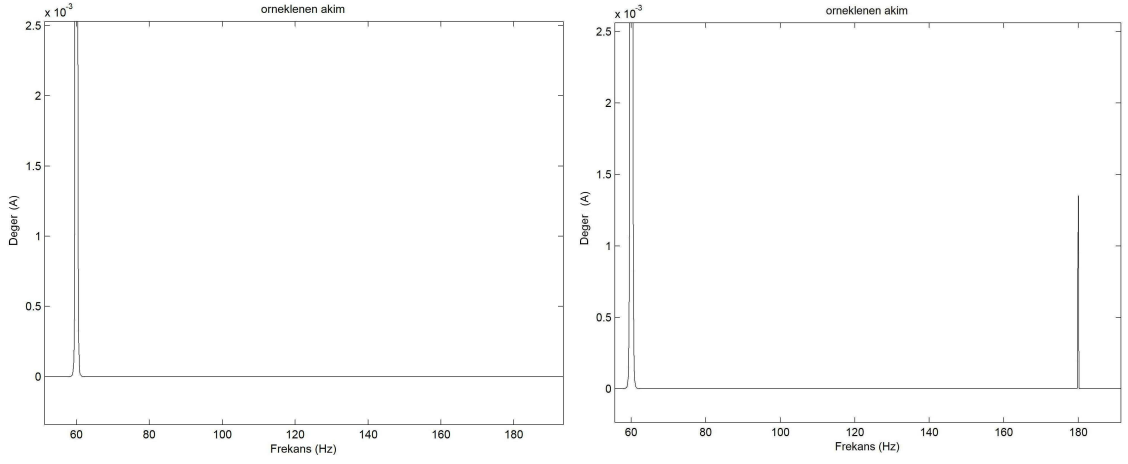


Şekil 6. 8. Stator sarımında 4 adet kısa devre bulunan arızalı asenkron motor kararlı hal sonrası moment değerleri

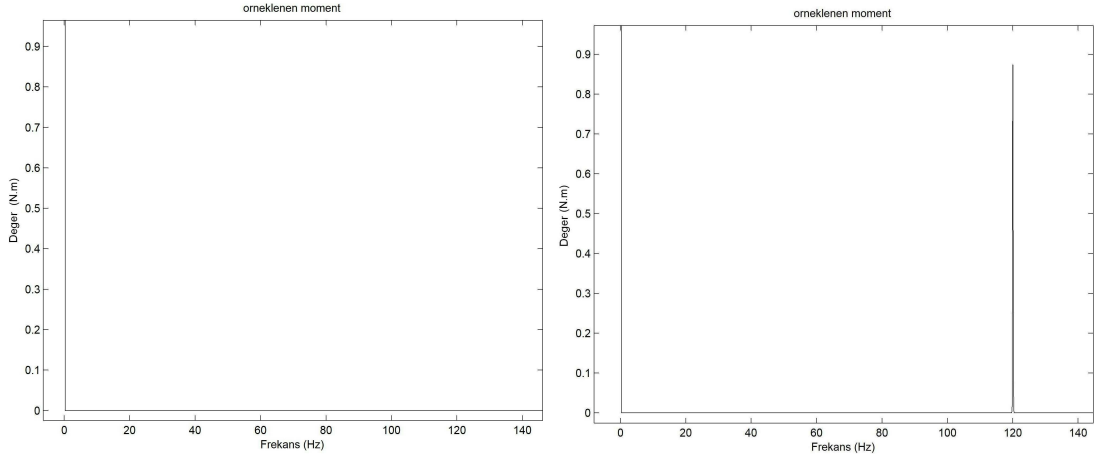


Şekil 6. 9. Stator sarımında 10 adet kısa devre bulunan arızalı asenkron motor simülasyon çıkış değerleri

Şekillerin daha net yorumlanması için Şekil 6.10 ve Şekil 6.11’de arızasız ve 10 sargısı kısa devre edilmiş arızalı motorun tam yükte çalıştırılmasından elde edilen akım ve moment sinyallerinin spektrumları verilmiştir. Karşılaştırmanın kolay olması için motor kalıcı duruma (hızlanma tamamlandıktan sonra) geldikten sonraki sinyal değerleri kullanılmıştır.

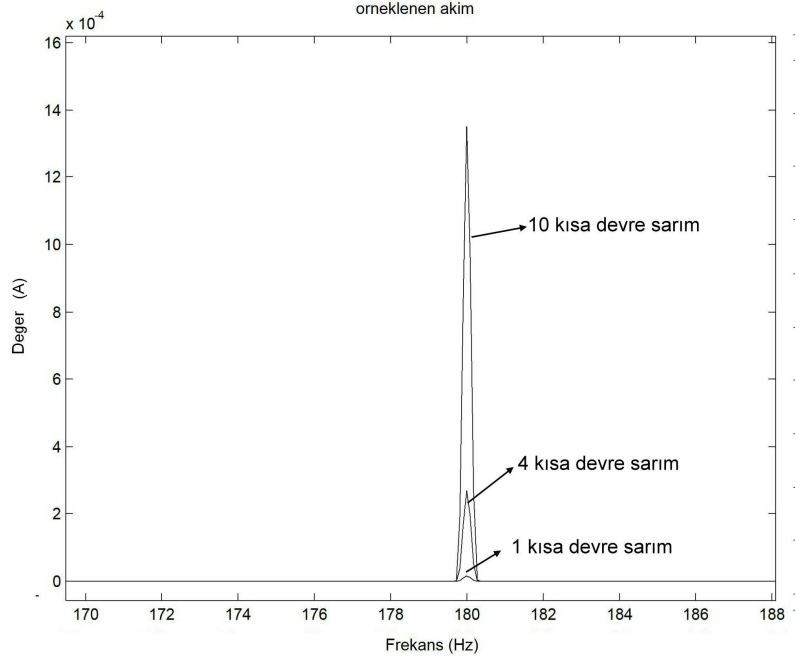


Şekil 6. 10. Arızasız ve 10 sargısı kısa devre edilmiş arızalı asenkron motorun tam yük kalıcı durum için akım spektrumu.

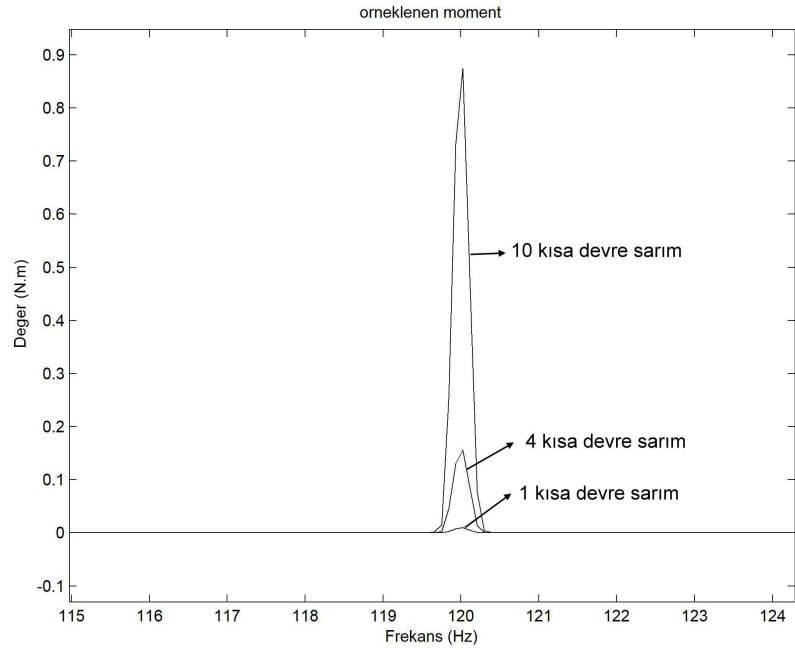


Şekil 6. 11. Arızasız ve 10 sargısı kısa devre edilmiş arızalı asenkron motorun tam yük kalıcı durum için moment spektrumu.

Şekillerden açıkça görüldüğü gibi arıza artıçça akımdaki 3. harmoniğin ve momentteki 2. harmoniğin değerleri de artmaktadır. Bunu daha net görmek için 1, 4 ve 10 sargısı kısa devre edilmiş arızalı motordan elde edilen akım ve moment spektrumları Şekil 6.12 ve Şekil 6.13'te üst üste çizilmiştir.

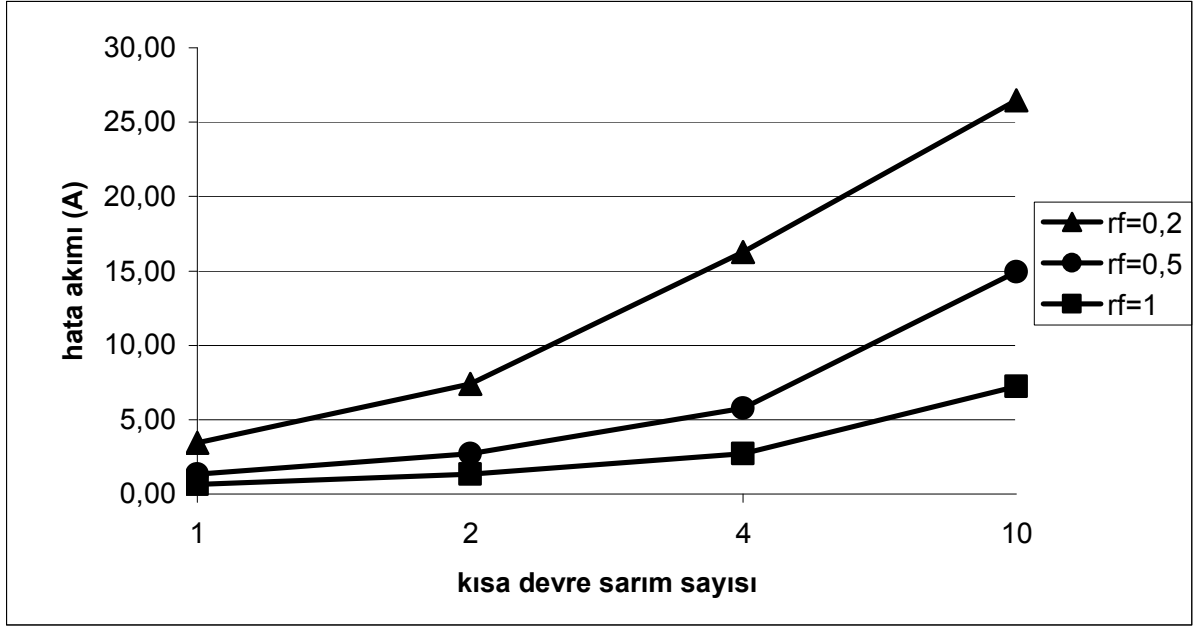


Şekil 6. 12. 1, 4 ve 10 sarğı kısa devre edilmiş arızalı motordan elde edilen akım spektrumu.



Şekil 6. 13. Arızasız ve 1, 4 ve 10 sarğı kısa devre edilmiş arızalı motordan elde edilen moment spektrumu.

Stator sargılarında meydana gelen kısa devre arızaları genelde küçük bir bölgede gerçekleşir ve daha sonra yayılır. Ayrıca kısa devre her zaman doğrudan olmayabilir. Bunun etkisini gözlemlemek için kısa devre direncini değiştirerek kısa devre akımına bakmak yararlı olacaktır. Aşağıdaki şekil kısa devre sarım sayısına bağlı kısa devre akımının değişimini farklı kısa devre direncine göre göstermektedir.



Şekil 6. 14. Kısa devre sarım sayısı – hata akımı (i_f) değişimi

7. SONUÇ

Asenkron motorların endüstriyel kullanımda öneminin artmasına paralel olarak, bu motorlarda meydana gelebilecek arızaları tespit etme alanındaki çalışmalar da önem kazanmıştır. Bunun için geliştirilmiş pek çok teknik mevcuttur. Bu hataları daha iyi analiz edebilmek için hata modelleme çalışmaları yapılmaktadır.

Bu çalışmada stator sarım hatası bulunan bir asenkron motorun referans çerçeve dönüşüm teorisi kullanılarak genel matematiksel modeli türetilmiştir. Var olan metotlardan farklı olarak; çıkarılan model, makineye özgü parametrelere veya sarım konfigürasyonu ve makine geometrisine ihtiyaç duymamaktadır. Öncelikle Arızasız bir motor ele alınmış, bu motor için matematiksel parametrelerden yola çıkılarak bir simülasyon elde edilmiştir. Daha sonra arızalı model, 4. bölümde elde edilen denklemler üzerine modellenmiştir.

Modelde hatalı sarım sayısı kolaylıkla değiştirilip çıkış değerleri gözlenebilmektedir.

Gözlenen çıkış parametreleri sonucunda hatalı sarımların; motor çıkış akımı, momenti ve hızı üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir.

Kısa devre sarım sayısının 1 ve 4 adet gibi çok küçük olduğu durumlarda, bu hataların çıkış parametreleri üzerindeki etkisini gözle görebilmek çok zordur. Bundan dolayı arıza tespiti için sinyallerin spektrumlarına bakılmıştır.

Spektrumlar incelendiğinde moment sinyali için $2f_s$ 'de; akım sinyali içinse $3f_s$ 'de harmoniklerin oluştuğu ve değerlerinin arıza ile orantılı biçimde arttığı görülmüştür.

Bunlara ek olarak; kısa devrenin her zaman doğrudan meydana gelmeyebileceği düşünülerek kısa devre direncinin kısa devre akımı üzerindeki etkisi kontrol edilmiştir. Kısa devre direnci azaldıkça hata akımının arttığı ve bunun sonucu olarak çıkış parametrelerinin değiştiği görülmüştür.

Asenkron motorlarda arıza başlangıcı olan 1 kısa devre sarımda dahi spektrum incelenerek hatanın farkına varılabilmektedir. Yapılan çalışmanın asenkron motor arıza tespitine katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1]M. Arkan, D. Kostic-Perovic and P.J. Unsworth, “*Modeling and simulation of induction motors with inter-turn faultsfor diagnostics*”, Electric Power System Research, 75 (2005), 57-66
- [2]R.M. Tallam, T.G. Habetler and R.G. Harley, “*Transient model for induction machines with stator winding turn faults*”, IEEE Trans. Ind. Appl. 38 3 (2002), pp. 632–637.
- [3]Epri Survey
- [4]E.Ayaz ve S.Şeker, *İleri işaret işleme yöntemi ile elektrik motorlarında rulman arıza tanısı*, itüdergisi, cilt 1, sayı 1, ağustos 2002
- [5]P. Vas, *Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines*. Oxford, U.K.: Clarendon, 1993.
- [6]Hakan Çalış ve Kıyas Kayaalp, “*Asenkron Motor Hata Teşhisinde Modern Metotlar*”, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, (2007) 2, 49-57
- [7]G. B. Kliman and J. Stein, “*Induction motor fault detection via passive current monitoring,*” in *Proc. Int. Conf. Electrical Machines*, Cambridge, MA, Aug. 1990, pp. 13–17.
- [8]Devaney M. J., Eren L., *Detecting Motor Bearing Faults*, IEEE Instrumentation and Measurement Magazine, Vol. 7, No. 4, pp 30-35,2004.
- [9]B.K.N. Rao, *Handbook of Condition Monitoring*. Oxford, UK: Elsevier Advanced Technology, 1996.
- [10]P. J. Tavner and J. Penman, *Condition Monitoring of Electrical Machines*. Letchworth, U.K.: Res. Studies Press, 1987.
- [11]J. Penman, H. G. Sedding, B. A. Lloyd, and W. T. Fink, “*Detection and motors,*” IEEE Trans. Energy Convers., vol. 9, no. 4, pp. 652–658, Dec. 1994.
- [12]H. A. Toliyat and T. A. Lipo, “*Transient analysis of cage induction machines under stator, rotor bar and end ring faults,*” IEEE Trans. Energy Convers., vol. 10, no. 2, pp. 241–247, Jun. 1995.
- [13]D.G.Ece ve Ö.N.Gerek, *Stator akımından asenkron motor arızalarının sınıflandırılması için yeni bir öznitelik vektörü*
- [14]Schoen R. R., Habetler G., Kamran F., Bartheld R. G., *Motor Bearing Damage Detection Using Stator Current Monitoring*, IEEE Trans. On Ind. Appl., Vol. 31, No. 6, pp 1274-1279, 1995.
- [15]Schoen R., Lin B. K., Habetler T. G., Schlag J. H., Farag S., *An Unsupervised, On-Line System for Induction Motor Fault Detection Using Stator Current Monitoring*, IEEE Trans. On Ind. Appl., Vol. 31, No. 6, pp 1280-1286, 1995.
- [16]Eren L., Devaney M. J., “*Bearing Damage Detection via Wavelet Packet Decomposition of the Stator Curren*”t, IEEE Trans. On Instrumentation and Measurement, Vol. 53, No. 2, pp 431-436, 2004.
- [17]Schoen R. R., Habetler T. G., “*Effects of Time-Varying Loads on Rotor Fault Detection in Induction Machine*”s, IEEE Trans. On Ind. Appl., Vol. 31, No. 4, pp 900-906, 1995.
- [18] -----,” *Evaluation and Implimentation of a System to Eliminate Arbitrary Load Effects in Current-Based Monitoring of Induction Machine*”s, IEEE Trans. On Ind. Appl., Vol. 33, No. 6, pp 1571-1577, 1997.
- [19]D. Gökhan Ece, Ö. Nezhik Gerek, “*Motor Arızalarının Sınıflandırılması İçin AR-MA Model Parametrelili Yeni Bir Öznitelik Vektörü,*” SIU 2006, 14. IEEE Sinyal işleme ve İletişim Uygulamaları, Antalya, Türkiye, 17-19 Nisan 2006.

- [20]M. Peltola, "Slip of ac induction motors and how to minimize it," Drives Mag., Aug. 19, 2002 [Online]. Available: <http://www.drivesurvey.com>
- [21]H.Çelik, " *Asenkron motor değişkenlerinin bilgisayar yardımıyla belirlenmesi ve motorların korunması*" yüksek lisans tezi, Gazi üniversitesi Türkiye, 2000
- [22]Chee-Mun Ong, *Dymanic Simulations of Electric Machinery using Matlab Simulink*, Prendice Hall PTR, New Jersey, 1998
- [24]<http://www.bilimonline.8k.com/matlab/simulink/simpower.htm>
- [23]J.L. Kohler, J. Sottile ve F.C. Trutt, "Alternatives for assessing the electrical integrity of induction motors", Conference Record of the IEEE Industry Applications Society, vol.2, pp 1580-1586, 1989

ÖZGEÇMİŞ

05.06.1979 tarihinde Ankara'da dünyaya geldi. Liseyi Malatya'da tamamladıktan sonra 1997' de girdiği İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliđi bölümünden 2002 yılında mezun oldu. Bir süre Elektrik Üretim A.Ş'de İşletme Mühendisi olarak görev yaptı. Halen Ankara'da bir kamu kuruluşunda teknik personel olarak çalışmaktadır.