



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**ASENKRON MOTORUN DİNAMİK DAVRANIŞLARININ
DQ REFERANS ÇERÇEVESİNDE MATLAB/SIMULINK
İLE EĞİTİM AMAÇLI İNCELENMESİ**

ROHULLAH RAHMATULLAH

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı (Türkçe)
Yüksek Lisans Programı

DANIŞMAN

Prof. Dr. Necibe Füsun Oyman SERTELLER

EŞ-DANIŞMAN

Prof. Dr. Vedat TOPUZ

İSTANBUL, 2021



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**ASENKRON MOTORUN DİNAMİK DAVRANIŞLARININ
DQ REFERANS ÇERÇEVESİNDE MATLAB/SIMULINK
İLE EĞİTİM AMAÇLI İNCELENMESİ**

ROHULLAH RAHMATULLAH
523117912

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı (Türkçe)
Yüksek Lisans Programı

DANIŞMAN

Prof. Dr. Necibe Füsun Oyman SERTELLER

EŞ-DANIŞMAN

Prof. Dr. Vedat TOPUZ

İSTANBUL, 2021

ÖNSÖZ

Eğitim hayatım boyunca beni destekleyen kıymetli ailem başta olmak üzere bu yolculukta bana yol gösteren ve destek olan tüm hocalarıma, özellikle de bu tezi yazmakta bana danışmanlık yapan, emeğini ve zamanını esirgemeyen, şefkat ve pozitif enerjisi ile daima beni teşvik eden Prof. Dr. Necibe Füsun Oyman SERTELLER’e teşekkürü borç biliyorum. MATLAB/SIMULINK çalışmalarımda sunduğu katkı ve paha biçilemez emekten dolayı Prof. Dr. Vedat TOPUZ hocama çok teşekkür ediyorum.

Şubat 2021

Rohullah Rahmatullah

İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER.....	i
ABSTRACT	v
SEMBOLLER.....	vii
KISALTMALAR.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
TABLO LİSTESİ	xiii
1. GİRİŞ ve AMAÇ.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Kaynak Taraması.....	2
1.3. Tezin Amacı ve önemi	5
1.4. Tezin Yapısı	6
2. ASENKRON MOTORLARIN YAPISI, ÇALIŞMA İLKESİ VE MATEMATİKSEL MODELLENMESİ	8
2.1. Asenkron Motorların Yapısı	8
2.1.1. Manyetik nüve	9
2.1.2. Stator yapısı.....	9
2.1.3. Rotor yapısı	10
2.1.3.1. Bilezikli rotor (Sargılı rotor).....	10
2.1.3.2. Sincap kafesli rotor (Kısa devreli rotor)	11
2.2. ASM'ların Çalışma İlkesi	13
2.3. ÜÇ Fazlı ASM'lerde Sargılar ve Döner Manyetik Alan.....	15
2.4. ASM'un Dinamik Modellenmesi	19
2.4.1. A,B,C Düzleminde modellenmesi.....	20
2.4.1.1. Elektriksel denklemler	21
2.4.1.2. Mekaniksel Denklemler	25
2.4.2. ASM'un qd0 referans düzleminde modellenmesi	26
2.4.2.1. Koordinat eksen dönüşümleri	27
2.4.2.2. ASM'un qd0 keyfi referans düzleminde modellenmesi.....	32

2.4.2.3.	ASM'un $qd0$ sabit referans düzleminde modellenmesi	40
2.4.2.4.	ASM'un $qd0$ rotor referans düzleminde modellenmesi	42
2.4.2.5.	ASM'ların senkron hız ile dönen $qd0$ referans düzleminde modellenmesi.	44
3.	ASENKRON MOTORLRDA OLUŞAN DENGESİZLİKLER VE ARIZALAR	46
3.1.	Arızalara Neden Olan Faktörler	46
3.2.	Arızaların Motor Performansı Üzerindeki Etkiler.....	47
3.3.	ASM'larda Arızaların Sınıflandırılması	47
3.3.1.	Elektriksel Arızalar	48
3.3.1.1.	Stator sargılarında meydana gelen arızalar	48
3.3.1.2.	Rotor arızaları.....	51
3.3.2.	Mekaniksel arızaları	52
3.3.2.1.	Eksen kaçıklığı	52
3.3.2.2.	Rulman arızaları.....	54
3.4.	ASM'larda Arıza Tespiti ve Durum İzleme Yöntemleri	55
3.4.1.	Termal izlemeler	57
3.4.2.	Moment izleme.....	57
3.4.3.	Gürültü izlenme	58
3.4.4.	Titreşim izleme.....	58
3.4.5.	Ani açısal hız izleme.....	58
3.4.5.	İndüklenen gerilim izlenmesi.....	59
3.4.6.	Kısmi boşalma izlenmesi	59
3.4.7.	Anlık elektriksel güç izleme	59
3.4.8.	Akım izlenme yöntemi	59
3.4.8.1.	Fourier Dönüşümü (FD)	60
3.4.8.2.	MCSA-HFD yöntemi kullanılarak arıza teşhisine yönelik teorik yaklaşım.....	62
3.4.8.3.	Akım park vektörü yöntemi (APV)	64
3.5.	Arızalı ASM'un qdo Referans Düzleminde Modellenmesi.	67
3.5.1.	Statorda oluşan kısa devre arızası modellenmesi.....	67

3.5.2.	Kırık rotor çubuklu ASM'un modellenmesi	72
3.5.3.	Düzensiz hava aralığının modellenmesi.....	76
3.6.	ASM'un MATLAB/SIMULINK Uygulaması	78
3.7.	MATLAB/GUI Uygulanması	86
4.	SİMÜLASYON SONUÇLARI VE BULGULAR.....	92
4.1.	Sağlam ASM	92
4.2.	Stator Sargıları Kısa Devre Arızası	97
4.3.	Kırık Rotor Çubukları	104
4.4.	Eksen Kaçıklığı Arızası.....	111
5.	SONUÇLAR ve TARTIŞMALAR.....	116

ÖZET

ASENKRON MOTORUN DİNAMİK DAVRANIŞLARININ DQ REFERANS ÇERÇEVESİNDE MATLAB/SIMULINK İLE EĞİTİM AMAÇLI İNCELENMESİ

Asenkron motorlar (ASM)'lar eskiden beri mekaniksel enerjinin gerekli olduğu endüstriyel uygulamalarda geniş bir kullanım alanı kapsamaktadır. Günümüzde ASM'ların kontrol teknolojisinde kullanılan güç elektronik aygıtlarının çeşitlendirilmesinde ve mikro işlemci teknolojisinde ilerleme ASM'ların kullanımı daha etkin bir hale getirmiştir. ASM'lar yapısal olarak sağlam motorlar olduğu için her türlü zor koşullarda kullanılması tercih edilen motorlardır. Dolayısıyla çalışma sırasında bazen beklenmedik zorlamalar sonucunda motorda çeşitli arızalar meydana gelebilmektedir. Arızalı ASM'ların davranışlarını incelenmesi ve çeşitli arızaların tespiti için yapılan bilimsel çalışmaların çoğu deneysel sonuçlardan elde edilen veriler kullanılarak çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Motorun fiziksel yapısına müdahale edilerek arızanın deneysel olarak oluşturulması ve oluşturulan arıza verileri üzerinden arıza tespit analizi eğitim amaçlı uygulamalarda maliyet ve zaman bakımından uygun olmayan bir yöntemdir. Yukarıdaki olumsuz durumları göz önünde bulundurarak yapılan bu tez çalışmasında arızasız ve arızalı ASM'un davranışları MATLAB/SIMULINK programı ile incelenmiştir. Matematiksel modellerin karmaşıklığını azaltma adına arızalı ve arızasız ASM'un dinamik modelleri qd0 referans çerçevesinde elde edilmiştir. İlk olarak arızasız ASM'un dinamik davranışları qd0 referans çerçevesinde sabit referans, rotor referans ve senkron referans düzleminde incelenmiştir. Bundan sonra stator sargıları kısa devre arızalı, kırık rotor çubuğu arızalı ve eksen kaçıklığı arızalı ASM'un dinamik modelleri duran referans düzleminde ele alınmıştır. Arızalı ASM'un dinamik davranışlarının incelenmesi amacıyla söz konusu modellerin simülasyonu arızaların farklı şiddet senaryolarında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen simülasyon sonuçları kullanılarak arıza durumu analizi akım izleme yöntemi, akım Park vektör yöntemi ve akım Park hızlı Fourier dönüşümü yöntemleri ile incelenmiştir. Yapılan çalışmayı eğitim amaçlı kullanılabilir hale getirmek için MATLAB/SIMULINK ortamında arızalı ve arızasız motor için oluşturulan modellerin aynı platform üzerinde incelenmesi amaçlı MATLAB/GUI uygulaması geliştirilmiştir.

ABSTRACT

ANALYSIS OF DYNAMIC BEHAVIOR OF ASYNCHRONOUS MOTOR WITH MATLAB / SIMULINK IN THE DQ REFERENCE FRAME FOR THE EDUCATIONAL PURPOSE

Induction motors have long been used in industrial applications where mechanical energy is required. Recently, the diversification of power electronic devices used in the control technology of induction motors and the advancement in microprocessor technology has made the use of induction motors more effective. Since induction motors are structurally robust motors, they are preferred to be used in all kinds of difficult conditions. Therefore, various faults may occur in the motor due to the unexpected forces during the operations. Majority of the scientific studies conducted to examine the behavior of defective induction motor and to detect various malfunctions, various methods have been developed using the data obtained from experimental results. Experimental creation of the fault by intervening in the physical structure of the motor and fault detection analysis through the fault data generated is an unsuitable method in terms of cost and time in educational applications. In this thesis study, which was made considering the above negative situations, a simulation study was conducted based on a mathematical model to examine the behavior of the healthy and faulty induction motors using MATLAB/SIMULINK program. Dynamic models of a healthy and faulty induction motor were obtained in the $qd0$ reference frame in order to reduce the complexity of mathematical models. First, the dynamic behavior of healthy induction motor was examined in the $qd0$ reference frame as fixed reference frame, rotor reference and synchronous reference frame. Later, the mathematical models of the faulty induction motor with stator short circuit windings fault, broken rotor bar fault and misalignment fault were created individually in the stationary reference frame. In order to examine the dynamic behavior of the defective induction motor, the simulation of these models was carried out in different severity scenarios of the failures. Using the simulation results obtained, fault condition analysis was investigated by motor current signature analysis, current Park vector method and current Park fast Fourier transform methods. To make the study usable for educational purposes, MATLAB / GUI application has been developed in order to examine

the models created for healthy and faulty motors on the same platform in MATLAB / SIMULINK environment.



SEMBOLLER

n_s	Senkron hız(devir/dek)
i_{as}, i_{bs}, i_{cs}	Stator a,b ve c faz akımları(A)
i_{ar}, i_{br}, i_{cr}	Rotor a,b ve c faz akımları(A)
V_{as}, V_{bs}, V_{cs}	Stator a,b ve c faz sargılarına uygulanan gerilimler(V)
V_{ar}, V_{br}, V_{cr}	Rotor a, b ve c faz sargı akımları(V)
L_s, L_r	Stator ve rotor sargılarının öz endüktansları(H)
L_{sr}, L_{rs}	Stator ve rotor arası ortak endüktanslar (H)
$\lambda_s^{abc}, \lambda_r^{abc}$	Stator ve rotor a, b ve c faz akı bağlantıları(Wb)
R_r, R_s	Rotor ve stator sargı direcleri(Ω)
T_L	Yük momenti (Nm)
T_e	Endüklenen moment (Nm)
L_{1s}, L_{1r}	Rotor ve stator kaçak endüktansları(H)
L_m	Mıknatıslanma endüktansı((H)
f_s	Kaynak frekansı(f)
i_s^q, i_s^d, i_s^0	qd0 eksen takımındaki stator akım bileşenleri(A)
i_r^q, i_r^d, i_r^0	qd0 eksen takımındaki rotor akım bileşenleri(A)
$\lambda_s^q, \lambda_s^d, \lambda_s^0$	qd0 eksen takımında stator akı bağlantıları(Wb)
$\lambda_r^q, \lambda_r^d, \lambda_r^0$	qd0 eksen takımında rotor akı bağlantıları(Wb)

v_s^q, v_s^d, v_s^0 qd0 eksen takımında stator gerilim bileşenleri(V)

v_r^q, v_r^d, v_r^0 qd0 eksen takımında rotor gerilim bileşenleri(V)



KISALTMALAR

ASM	:Asenkron Motor, Asenkron Makine
APV	: Akım Park Vektörü
AFD	: Ayrık Fourier Dönüşümü
DEK	:Dinamik Eksen Kaçıklığı
GUI	: Graphical User Interface
HFD	: Hızlı Fourier Dönüşümü
KEK	: Karma Eksen Kaçıklığı
KRÇ	: Kırık Rotor Çubuğu
MATLAB	: Matrix Laboratory
MCSA	: Motor Current Signature Analysis
SEK	:Statik Eksen Kaçıklığı

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1. Üç fazlı sincap kafesli ASM'un yapısı.	8
Şekil 2.2. ASM'un Manyetik nüve kesiti	9
Şekil 2.3. Bilezikli ASM rotor yapısı farklı açılardan görüntüsü (a),(b).	11
Şekil 2.4. Sincap kafesli ASM rotor yapısı	12
Şekil 2.5. ASM'in kaymaya göre çalışma bölgeleri	14
Şekil 2.6. Stator oluklarına yerleştirilmiş sargıların dağılımı.	15
Şekil 2.7. Üç fazlı ASM stator akımları.	16
Şekil 2.8. Grafik yöntemi ile dönen manyetik alan için (a) $t = t_0$ (b) $t = t_1$ (c) $t = t_2$ (d) $t = t_3$ anlarında mmk vektörleri.	17
Şekil 2.9. İki kutuplu, 3 fazlı ASM	21
Şekil 2.10. 3 fazlı yıldız bağlı ASM 3 faz düzlemiminde eş değer devresi.....	21
Şekil 2.11. İki faz duran ve dönen eksen ilişkisi.....	31
Şekil 2.12. 3 faz iki faz ilişkisi	34
Şekil 2.13. qd0 Keyfi referans düzleminde eşdeğer devresi.	39
Şekil 3.1 ASM'lerde arızaların sınıflandırılması.....	48
Şekil 3.2. Stator sargılarının arıza tipleri.....	50
Şekil 3.3. Eksen Kaçıklığı durumunda stator, rotor ve rotor dönüş merkezlerinin yer değişimi.	53
Şekil 3.4. Durum izleme ve arıza teşhisi süreci.	56
Şekil 3.5. Akım frekans Spektrumu	62
Şekil 3.6. ASM'un Sağlam durumu için APV modülü	65
Şekil 3.7. Stator arızası için APV temsili.	66
Şekil 3.8. Rotor arızası için APV temsili.	66
Şekil 3.9. Eksen kaçıklığı Arızası için APV temsili.	67
Şekil 3.10. Stator sargıları kısa devre arızalı ASM için qd0 referans düzleminde matematiksel denklemlerin simülasyon akış diyagramı.	72
Şekil 3.11. KRÇ arızalı ASM için qd0 referans düzleminde matematiksel denklemlerin simülasyon akış diyagramı.	75
Şekil 3.12. Eksen kaçıklığı durumunda (a)SEK geometrisi, (b) DEK geometrisi, (c) KEK geometrisi.	78
Şekil 3.13. Arızasız ASM'un keyfi referans düzleminde genel SIMULINK modeli.	80
Şekil 3. 14. Arızasız ASM için (a) stator gerilim dönüşüm bloğu (b) q eksen akımlarını hesaplayan blok, (c) d eksen akımlarını hesaplayan blok,(c) sıfır akım bileşeni hesaplayan bloklar.	82
Şekil 3.15. Sator sargıları kısa devre arızalı ASM için (a) q eksen akımlarını hesaplayan blok ,(b) d eksen akımlarını hesaplayan blok,(c) sıfır akım bileşenlerini hesaplayan bloklar.	83
Şekil 3.16. RKÇ arızalı ASM için (a) q eksen akımlarını hesaplayan blok, (b) d eksen akımlarını hesaplayan blok, (c) sıfır akım bileşenlerini hesaplayan simulink blokları.	84

Şekil 3.17. Tork ve rotor hızını hesaplayan blok.	85
Şekil 3.18. sırasıyla stator ve rotor bileşenlerini 3 faz düzlemine dönüştüren bloklar.	85
Şekil 3.19. ASM'un MATLAB/SIMULINK Modelini oluşturan bloklar.	86
Şekil 3.20. 'Doğrusal ASM' ana sayfası.	87
Şekil 3.21. 'ASM Dengesiz stator' ana sayfası	88
Şekil 3.22. ASM Dengesiz Rotor' ana sayfası	89
Şekil 3.23. Eksen Kaçıklığı' ana sayfası	89
Şekil 3.24. MATLAB/GUI çalışma akışı	91
Şekil 4.1. (a),(b),(c) Sabit referans çerçevesinde qd eksenı sırasıyla stator gerilimleri, akımları ve rotor akımlarıdır.	93
Şekil 4.2. (a),(b) sırasıyla, sabit referans çerçevesinde stator q eksenı akımı ve 3 faz düzleminde statorun a faz akımı.	93
Şekil 4.3. (a),(b),(c) sırasıyla rotor referans çerçevesinde qd eksenı Stator gerilimi, akımı ve rotor akımıdır.	94
Şekil 4.4. (a),(b) sırasıyla rotor referans çerçevesinde rotor q eksenı akımı ve üç faz düzleminde rotor a faz akımı.	94
Şekil 4.5. (a),(b),(c) sırasıyla senkron referans çerçevesinde qd eksenı Stator gerilimi, akımı ve rotor akımı.	95
Şekil 4.6. (a),(b) sırasıyla 0.4sn'den sonra tam yüklü çalışma için stator ve rotor üç faz akımları.	96
Şekil 4.7. (a),(b),(c) 0.4sn'den sonara tam yük altında rotorda indüklenen moment, rotor hızı ,hız -moment değışimi	96
Şekil 4.8. a fazında %3 kısa devre arızası için stator faz akımlarının simülasyon çıkışı.	97
Şekil 4.9. Sağlam, a fazda %5, %10 ve %15 kısa devre arızası durumlarında 0.5sn'den sonra tam yük altında, (a) a faz akımı, (b) moment, (c) hız, (d) hız moment için elde edilen simülasyon sonuçları.	98
Şekil 4.10. a fazında (a) sağlam (b) %5, (c) %10 ve (d) %15 kısa devre arızası durumları için a faz akımın frekans spektrumları. Model ode45 solver-variable step- step size e-4 ile çözülmüştür simülasyon süresi 60sn olarak ayarlanmıştır.	99
Şekil 4.11. Sağlam, a,b,c fazlarda %10 stator sargıları Kısa devreli motor için APV modülleri.	101
Şekil 4.12. a faz akımın (a) sağlam, (b) %5, (c) %10, (d) %15 kısa devre arızası durumları için çizdirilmiş APV modülleri (b) APV Modüllerinde bozulma oranı.	102
Şekil 4.13. Sağlam, %5, %10 ve %15 kısa devre arızası durumlar için APV modüllerinin zaman dizisinde açılımları, (b) APV Modüllerinin frekans spektrumları.	103
Şekil 4.14. Stator a faz akımı için sağlam 1KRÇ, 3KRÇ ve 5RKÇ arızaların durumlarında simülasyon çıkışı.	104
Şekil 4.15. Sağlam, 1KRÇ, 3KRÇ ve 5KRÇ arızası durumlarında 0.5sn'den sonra tam yük altında, (a) a faz akımı, (b) moment, (c) hız, (d) hız moment için simülasyon sonuçları.	105
Şekil 4.16. 1KRÇ, 3KRÇ ve 5KRÇ arızası için (a), (c), (e) %50 yükleme ve (b), (d), (f) tam yükleme durumunda stator a faz akımının frekans spektrumları.	107

Şekil 4.17. Sağlam, 1KRÇ, 3KRÇ ve 5KRÇ arızası durumlarında APV modülleri (a)Sağlam, (b)1KRÇ, (c) 3KRÇ, (d) 5KRÇ.	109
Şekil 4.18. Sağlam, 1KRÇ,3KRÇ ve 5KRÇ için APV modülünün halka kalınlığındaki değişimi.....	110
Şekil 4.19. Sağlam,1KRÇ ,3KRÇ ve 5KRÇ durumları için APV modülerinin zaman dizisinde açılımları, (b)APV Modülerinin frekans spektrumları.	111
Şekil 4.20. Sağlam, SEK, DEK ve KEK arızası durumlarında 0.5sn'den sonra tam yük altında, (a) a faz akımı, (b) hız, (c) moment, (d) hız moment davranışları.	112
Şekil 4.21. Sağlam, (b) SEK, (c) DEK, (d) KEK arızası durumlarında stator a faz akımının frekans spektrumları.....	113
Şekil 4.22. APV modülleri (a)Sağlam, (b)DEK, (c)SEK, (d) KEK	115
Şekil 4.23. DEK, SEK, KEK arıza durumlarında APV modülerinin zamand dizisinde açılımları	115

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1. Döner manyetik alanın faz akıları ve mmk'lerin değerleri	18
Tablo 2.2. ASM'ların modellenmesinde kullanılan referans çerçeveler.....	32
Tablo 3.1. ASM'lerde Arızların yüzdesi istatistiksel.....	46
Tablo 4.1. stator sargıları Kısa devre arızası için a faz akımının frekans spektrumları ve genlikleri.....	100
Tablo 4.2. %50 yükleme ve tam yükleme koşullarında 1KRÇ, 3KRÇ ve 5KRÇ için simülasyon sonuçları.....	108
Tablo 4.3. Tam yük koşullarında SEK, DEK ve KEK arızası durumlarında A faz akımı frekans spektrumları.	114

1. GİRİŞ ve AMAÇ

1.1.Giriş

Endüstriyel uygulamalarda kullanılan doğrusal ve döner hareketli uygulamalar için gerekli olan mekanik enerjinin büyük bir kısmı asenkron makineler tarafından sağlanmaktadır. Asenkron makineler (ASM)'ler endüstriyel dünyanın beynini oluşturan makineler olup genellikle endüstriyel sistemlerde kontrol ve otomasyon bölümlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. ASM'lerin konum ve hız kontrolü DC makinelere göre daha zor ve karmaşık olmasına rağmen piyasada çok kullanılan makinelerdir. Bu makineler kendinden uyarımlı olduğundan DC makinelerin tersine, ark oluşumuna sebep olan fırça ve komütatör yapısını içermediği için elektriksel gürültü, fırça aşınması ve yüksek sürtünme gibi problemler içermemektedir. ASM'ler endüstride motor ve nadiren jeneratör olarak kullanılan makinelerdir. Motor modunda yani enerji verildiğinde çalıştırılırken statora verilen elektriksel enerji, makinenin iç kayıplarını yenerek mekanik enerjiye dönüştürülür. Jeneratör olarak çalıştırıldığında rotora verilen mekanik enerji stator sargılarından kayıplar çıktıktan sonra elektrik enerjisi olarak alınır. ASM)'ler sağlam, güvenilir, dayanıklı, az bakım gerektiren ve maliyeti düşük olan makinelerdir. Genel olarak enerji verildiğinde sabit nominal hız ile çalışır ancak bazı uygulamalarda değişen hızda çalışan ASM'lere de ihtiyaç duyulur. Yarı iletken teknolojisinden önce ASM'lerden değişken hız elde etmek için dişli sistemler kullanılıyordu. Gelişen teknoloji sayesinde ASM'lerden değişen hızın elde edilişi, dişli sistemlerinin yerine güç elektronik ve kontrol sistemleri tarafından sağlanmaktadır. Güç elektroniği ile donanımlı motorlar, kontrolün yanında sistemdeki ortalama güç tüketimi ve motorun gürültü oranını da azaltmaktadır. [1-3].

ASM'ların doğrusal olmayan fiziksel yapısından kaynaklanan matematiksel modelindeki karmaşıklığı nedeniyle motorun klasik ve eski yöntemlerle simülasyonu ve kontrolü DC makinelere göre daha zor bir şekilde gerçekleştirilmektedir. Bunun yanında ASM'lar enüklitif yük olduğundan, başlangıçta şebekeden yüksek akımlar çektiği için ilk kalkış performansı kötü olan makineler olup hız kontrol aralığı dar olan makinelerdir. Buna ilaveten ASM'ların mekanik zaman sabiti ile elektrik zaman sabiti arasındaki doğrusal olmayan bağlantı, motordan iyi bir performansın elde edilmesini oldukça zorlaştırmaktadır. Son yıllarda güç

elektroniği ve mikro işlemciler teknolojisinin hızla gelişmesiyle birlikte karmaşık motor kontrol yöntemlerinin motor sürücülerine dahil edilmesi, ASM'un performansının iyileştirilmesinde ve hız kontrol aralığının genişletilmesinde önemli katkı sağlamıştır. ASM'lerin benzetimi, kontrolü ve tasarımının gerçekleştirilebilmesi için makineye ait dinamik modelin iyi bilinmesi gerekmektedir. Bunun yanında, motorun matematiksel modelindeki karmaşıklığın azaltılabilmesi için bazı varsayımların ve ihmallerin kullanılması ise avantaj sağlamaktadır [1,3].

3 fazlı ASM hareketli bir sistem olduğundan motorun matematiksel modelini ifade eden, diferansiyel denklemlerdeki ortak endüktansları rotor konumunun fonksiyonu olduğundan sürekli olarak değişecektir. Dolayısıyla ASM'ların analizi için kullanılan akım, gerilim ve akı değişkenleri de sürekli olarak değişiyor. ASM'nin matematiksel Modelini oluşturan diferansiyel denklemlerdeki değişkenlerin birbirine zamana ve rotor konumuna bağlı olarak değişmesi, motorun modellenmesini zorlaştıran unsurlardır. Diferansiyel denklemlerdeki katsayıları rotor durma halinin dışında sürekli olarak değişiyor. 3 fazlı ASM'nin simülasyonu için bilgisayar ortamında daha basit ve bilgisayarın hızlı ve doğru cevap verecek şekilde bir model kullanılmalı. [1-3].

ASM'un fiziksel yapısının matematiksel olarak modellenmesi ve elde edilen modelin benzetim programları ile davranışları incelenmesi motorun kontrolü, tasarımı ve oluşacak hataların analizi için uygulamalarda zaman kazanma ve maliyet azaltma bakımından ve eğitimde motor davranışlarının görsel olarak incelenmesinde katkı sağlamaktadır[4].

1.2.Kaynak Taraması

Marques Cardoso ve arkadaşları, 1999'da ASM'larda stator kısa devre arızası tespiti etmek için akım park vektörü yöntemi kullanmıştır. Deneysel olarak ölçülen akım verilerini kullanarak bilgisayar destekli bu yaklaşımda arızanın meydana geldiğinde akım park vektörü modülünde elipsel şeklinde bozulma ortaya çıktığını, arıza artışıyla birlikte elipsel şeklinde bozulma daha da arttığını ve arızanın hangi fazda oluşması elipsin ana eksen eğimi ile ilişkili olduğunu belirtmiştir [5].

Toliat ve arkadaşları 2000’de, ASM’larda eksen kaçıklığı etkisinin simülasyonunun gerçekleştirilmesi için sarım fonksiyonlarından türetilmiş matematiksel modele dayalı bir çalışma yapmıştır. Geliştirilen model ile rotorun statik eksen kaçıklığı arızası durumunda motorun geçici ve kararlı haldeki performansı simüle edilmiştir. [6]

Chen, 2008’de, yaptığı tez çalışmasında rotor çubukları kırıklı olan 3 fazlı ASM için sadece rotor direnç değişimini dikkate alarak dq0 referans düzleminde matematiksek model çıkartmıştır. Elde edilen matematiksel denklemlerin MATLAB/SIMULINK ortamında modelini geliştirmiş, simülasyon sonuçları ile deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında birbirine yakın olduğu belirlemiştir. MATLAB/SIMULINK’te geliştirilen model üzerinde kırık rotor çubuklarının değiştirilmesine ve motorun farklı yük altında çalıştırmaya kolaylık sağladığı için çalışmalardaki önemi vurgulamıştır. Kırık rotor çubukları arızası teşhisi için simülasyon ve deneysel olarak stator akım için elde edilen veriler üzerine prony analiz yöntemi kullanmış. Prony ve ayırık Fourier Dönüşümü (AFD) analiz yöntemleri veri penceresi bakımından birbiri ile karşılaştırıldığında düşük veri pencereleri için AFD yönteminin sonuçların doğruluğu açısından başarısız olduğu görülmüştür [7].

Mehala, 2010’da ASM’larda rotor arızaları, stator sargılarının kısa devre arızaları, yanlış hizalama ve yatak arızaları için deneysel sonuçlardan elde edilen stator akım sinyal verilerini kullanarak arızaları tespit etmeye dair bir tez çalışması yapmıştır. Rotor arızaları sonucunda oluşan yan bantlardaki frekans bileşenlerinin yük artışıyla birlikte daha belirgin hale geldiğini ve Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD), kısa süreli fourier dönüşümü (STFT) ve dalgacık dönüşümü (WT) yöntemleri rotor arızası tespiti için etkili yöntemler olacağı sonucuna varmıştır. Stator sargılarının kısa devre olması durumunda yan bantta oluşan arıza frekanslarının genliği yük veya arıza şiddetiyle arttığını göstermiş, stator sargısı kısa devre arızaları tespiti için HDF, Gabor Dönüşümü (GT) ve akım park vektörü (PV) etkili yöntemlerin olduğu sonucuna varmıştır. Eksen kaçıklığı arızaları statik dinamik ve karma eksen kaçıklığı olarak ele almış, arıza tespit amacı için HDF tekniği kullanmış ve stator faz akımları ile eksen kaçıklığı arızası tespiti yapılabilme sonucuna varmıştır [8].

Tufan, 2012’de, tez çalışmasında üç fazlı sincap kafesli ASM’da kırık çubukların mevcut olması durumunda deneysel çalışma yapmış, deneysel olarak elde edilen akım verileri

üzerine HFD ve YÖT-MTA (yeniden örnekleme tabanlı merteye takibi analizi) tekniklerini kullanarak hata tespiti yapmıştır. Bu çalışmada farklı rotor çubukların kırılma ve farklı yükleme durumunda dinamik ve duran çalışma koşullarda söz konusu yöntemleri incelemiştir [9].

Aynı yıllarda Hegde ve arkadaşları (2012) deneysel çalışmalarında ASM'larda hava boşluğu eksantrik arızasını tespit analizi için titreşim sinyali izleme ve motor akım izleme yöntemlerini kullanmıştır. Yapılan bu çalışmalarda titreşim sinyali için kullanılan Mekanik - Elektro- Mekanik sistem (MEMS) ivme metre ve akım sinyali ölçmek için kullanılan hal etkisi akım sensörlerinden ölçülen verileri HFD Yöntemi ile incelemiştir. Her iki sinyalin güç spektrumunda, hatadan dolayı kaynak frekansı etrafında üst bant ve alt bantta frekans bileşenleri olduğu görülmüştür. [10]

Küçükler ve arkadaşları 2015'teki çalışmalarında ASM'da stator sargı-sargı ve faz-faz arası arıza tespiti için anlık güç izleme analizi kullanmıştır. Deneysel olarak yapılan bu çalışmada, her iki arızadan dolayı oluşan frekans bileşenlerinin eşit bantta yer aldıklarını, faz-faz arası arızası durumunda ise oluşan harmoniklerin genliklerinin stator sargı-sargı arası arızasına göre daha belirgin genliklere sahip olduklarını göstermiştir. [11]

Chawla ve arkadaşları 2018'de, çalışmasında stator açık devre arızası tespiti amaçlı PV yöntemi kullanmış, açık devre etkisinin modellenmesi için stator sargılarına seri bir direnç bağlayarak motorun matematiksel modelini qd0 referans düzleminde açıklamış, açık devre etkisini incelemek için modelin matlab Simulink ile simülasyonu gerçekleştirmiştir. Sağlam ve seri dirençlerin farklı değerler için elde edilen *iqs* ve *ids* akım verilerini kullanarak park vektöründe oluşan bozulmayı grafiksel olarak göstermiştir. Simülasyon sonuçlarını deneysel sonuçlar ile doğrulamıştır [12].

Maraaba ve arkadaşları aynı yılda (2018)., ASM'larda bir fazda stator sarım-sarım arası kısa devre arızası modellenmesi için dq0 referans düzleminde matematiksel model elde etmiş. Geliştirilen modelin matlab Simulink ortamında farklı kısa devre yüzdesi, farklı güçteki ve farklı yükleme altındaki motorlar için simülasyonunu gerçekleştirmiştir. Arıza tespiti için moment sinyalleri kullanmıştır. Simülasyonda kullandıkları motorlardan ölçülen veriler üzerine MFNN (Multi-layer Feed-forward Netural Network) yönetimi uygulayarak

simülasyon kullanmadığı motorlarda yüzde kaç kısa devre olduğuna dair bir makale çalışması yapmıştır [13].

Ojaghi ve Mohammadi aynı yıllarda (2018)., ASM’larda eksensel olarak üniforma ve üniforma olmayan eksantriklik arızalarının analizi için stator rotor arası ortak endüktansların ve öz endüktansların rotor konumuna bağlı değişimi ifade etmek için iki boyutlu modifiye edilmiş sargı fonksiyon teorisini kullanarak MCSM (multiple coupled circuit model) modele dayalı bir çalışma yapmış. Deneysel olarak yapılmış bu çalışmada aynı eksantriklik arıza şiddetine sahip olan eksensel olarak üniforma olmayan eksen kaçıklığı frekans bileşenlerinin genlikleri eksensel olarak üniforma eksen kaçıklığı durumuna göre daha belirgin oldukları gözlemlenmiştir. Geliştiren MCSM benzetim sonuçları deneysel sonuçları ile doğrulanmış [14].

Ünsal ve Güçlü ,2019’da ASM’larda eksen kaçıklığı arızalarını Shannon entropisi ile analiz etmiştir. Yapılan bu deneysel çalışmada ölçülen stator akım sinyalinin ve titreşim sinyallerinin verilerine ait entropi değerleri hesaplanmıştır. Eksen kaçıklığı olan motorun titreşim sinyallerinin entropisi değerlerinde sağlam motora göre daha belirgin artış ortaya çıktığı görülmüştür. Akım sinyallerinin sağlam ve arızalı durumdaki entropi değerlerinde ise anlamlı bir değişim olmadığı gözlemlenmiştir [15].

Cherif ve arkadaşları (2020)., çalışmasında ASM’larda stator sargı-sargı arası kısa devre ve dengesiz kaynak gerilim arızaları teşhisi için motor akım izleme analizi (MCSA) ve ayrık dalgacılık enerji oranı (DWER) tekniklerini kullanmış. Stator sargı-sargı arası kısa devre ve dengesiz gerilim arızası koşullarında ölçülen akım verileri üzerine MCSA yöntemi kullanmıştır. Her iki durumda arıza frekansları aynı yan bant ve üst bantta oluşmuş, dolayısıyla MCSA yöntemi stator sargı-sargı- arası arızayı dengesiz gerilim arızasından ayırtmakta başarısız bir yöntem olduğunu ve DWER’in durum için daha etkili bir yöntem olduğunu deneysel sonuçlar ile göstermiştir [16].

1.3.Tezin Amacı ve önemi

Bu tez çalışmasında önce arızasız ASM analizleri qd0 referans çerçevesinde ele alınmış olup farklı referanslarda etkileri araştırılarak çalışmanın temeli oluşturulmuştur. Daha sonra

motorda oluşacak farklı arıza durumları için modeller geliştirilmiştir. Bundan sonra da, bu çalışma matematiksel denklemleri açık ve anlaşılabilir, görselliği fazla, üzerinde uygulama yapılabilecek bir ortama taşınmıştır.

Bu çalışmada, farklı referans modeller çalışıldıktan sonra sağlam ve arızalı ASM'un kararlı ve geçici rejimde sergiledikleri davranışlarını yansıtabilen qd0 tabanlı dinamik modeller geliştirilmiştir. Geliştirilen bu modeller motorun qd0 referans düzlemindeki bileşenlerinin ve makinenin gerçek büyüklüklerinin aynı platform üzerinde sabit (duran) referans, rotor referans ve senkron referans düzleminde incelenmesine ortam sağlamaktadır. Bununla birlikte tasarlanan modeller ile motor durumunu izleme, farklı arızaların analizi ve teşhisi ve arızaların motor performansını nasıl etkilediğini incelemek için simülasyon araç olarak kullanılmıştır.

MATLAB/SIMULINK tabanlı simülasyon amaçlı yapılan bu çalışmanın amacı, sağlam 3 fazlı sincap kafesli ASM'un farklı referans düzlemi için genel qd0 matematiksel modelin çıkartılması, arızalı ASM için stator sargılarının kısa devre arızası, kırık rotor çubuklarının arızası ve eksen kaçıklığı arızası için qd0 referans düzleminde ayrı ayrı matematiksel modeller elde edilmiştir. Sağlam ve arızalı durumlar için elde edilen matematiksel modeller MATLAB/SIMULINK ortamına taşınarak simulink modelleri oluşturulmuştur. Çeşitli arıza senaryoları için elde edilen q ve d eksen akımının simülasyon verileri üzerine Akım park vektörü (APV) yönetimi ve motor akım izleme yöntemleri (MCSA) kullanarak arıza durumu analizi ve teşhisi yapılmıştır.

Yapılan çalışmayı eğitim amaçlı kullanabilir hale getirmek için tasarlanan ASM'un MATLAB/SIMULINK modelleri için MATLAB/SIMULINK/GUI uygulaması geliştirilmiştir.

1.4. Tezin Yapısı

Bu tez çalışması beş bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm, çalışma hakkında genel bilgiler, çalışmanın amacı, önemi ve çalışma ile ilgili yapılan bilimsel kaynakları kapsamaktadır.

Tezin ikinci bölümü, üç fazlı sincap kafesli ASM'un yapısı, çalışma prensibi, üç faz düzleminde matematiksel modellenmesi ve qd0 referans düzleminde sağlam ASM'un sabit referans, rotor referans ve senkron referans düzleminde matematiksel modelleri içermektedir.

Tezin üçüncü bölümü, arızalı ASM kısmıdır. Bu bölümde asenkron mortolarda oluşabilen arızaların sınıflandırılması, arızalara yol açan faktörler, arızaların motor üzerindeki etkileri, çeşitli arızaların analizi ve tespiti için kullanılan yöntemler araştırılmaktadır. Arızalı ASM için stator sargıları kısa devre arızası, kırık rotor çubuğu arızası ve eksen kaçıklığı arızası için her bir arızanın etkisini ifade eden matematiksel modeller elde edilmiştir. Bu bölümün sonunda sağlam ve arızalı ASM için elde edilen matematiksel modellerin MATLAB/SIMULINK ortamında uygulanması ve MATLAB/SIMULINK'te geliştirilen modellerin eğitim amaçlı kullanılabilir hale getirilmesi için tasarlanan MATLAB/SIMULINK /GUI uygulaması anlatılmıştır.

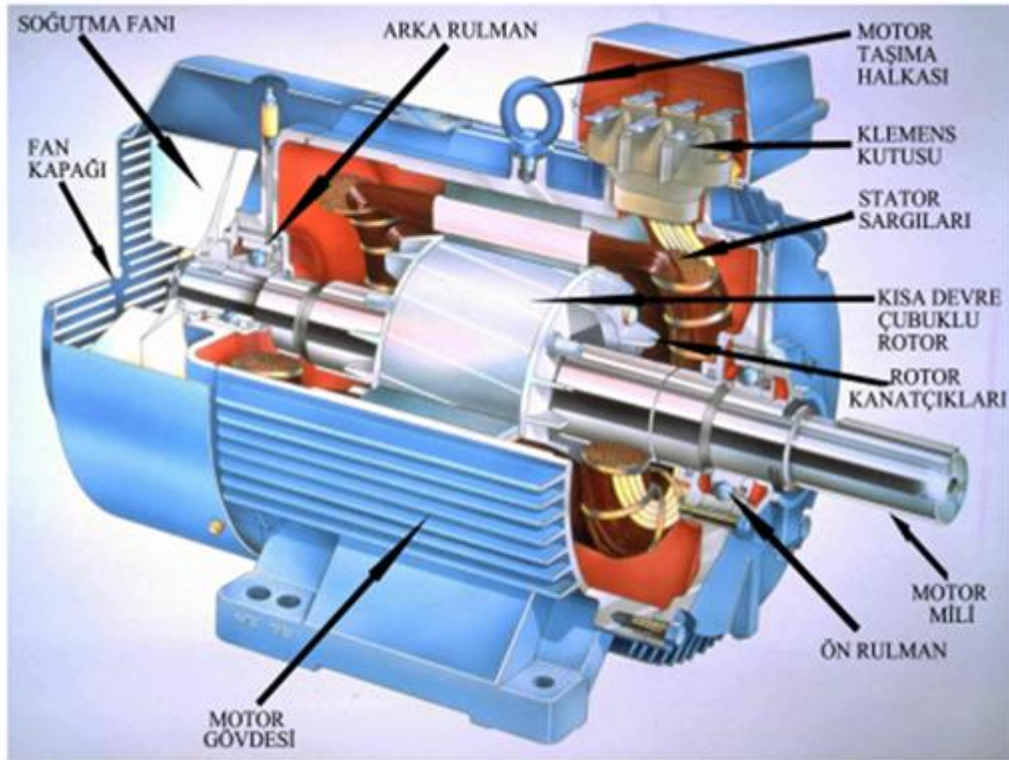
Tezin dördüncü bölümünde sağlam ve arızalı ASM'un dinamik davranışlarının simülasyon sonuçları zaman uzayında gösterilmiştir. Arıza analizi ve tespiti simülasyondan elde edilen verileri kullanarak MCSA ve APV yöntemleri ile incelenmiştir.

Tezin beşinci bölümü tartışmalar ve sonuçlardan oluşmaktadır.

2. ASENKRON MOTORLARIN YAPISI, ÇALIŞMA İLKESİ VE MATEMATİKSEL MODELLENMESİ

2.1.Asenkron Motorların Yapısı

ASM'lar, temelini oluşturan stator ve rotor olarak adlandırılan sabit ve dönme hareketi yapan parçalardan oluşmaktadır. Stator hava aralığında döner manyetik alanı oluştururken, rotor ise hareketi sağlayacak kuvveti üretmektedir. Bunların yanında motor mili, stator oluklu manyetik çekirdek, stator sargıları, rotor oluklu manyetik çekirdek, rotor sargıları, stator gövdesi ve yatakları, soğutma sistemi ve terminal kutusu gibi bileşenler, ASM'un fiziksel yapısını oluşturan bölümlerdir. ASM'lar rotor şekline göre rotor uçları kısa devre edilmiş (sincap kafesli) ve sargılı (bilezikli) ASM olarak piyasada bulunmaktadır. Bilezikli ve sincap kafesli ASM, her ikisi de aynı stator yapısına sahip olup sadece rotor yapısında değişiklik göstermektedir [17,18].

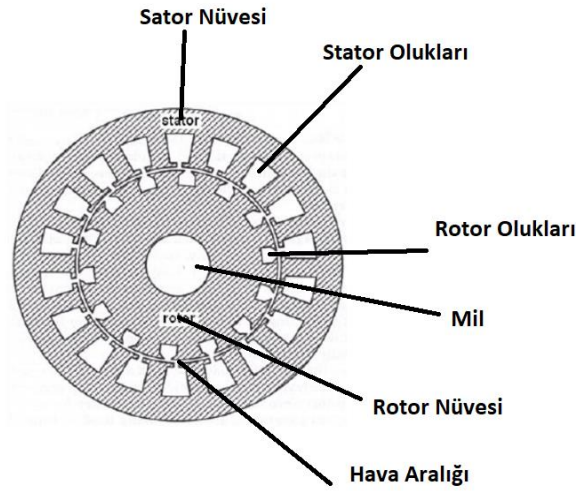


Şekil 2.1.Üç fazlı sincap kafesli ASM'un yapısı[19].

2.1.1. Manyetik nüve

ASM’larda stator ve rotor manyetik nüvesi histerisiz ve girdap akım kayıplarını azaltmak için yönlenmemiş ince taneli silikon çelik saclardan yapılmaktadır. Saclarda stator ve rotor sargılarının yerleştirilmesi için üretim aşamasında oluklar açılır, daha sonra saclar bir araya getirilerek sac paketi(yığın) oluşturulur. Sac ASM’larda manyetik akı iletimini sağlayan kısımdır. Stator ve rotor laminasyon işlemi tasarlanacak makinenin gücüne bağlı olarak tek yığınlı ve çok yığınlı şekilde paketlenir. Sacların tek yığın halinde paketlenmesi küçük güçteki makineler için yapılırken, büyük güçteki makineler için çok katlı sac paketlenme işlemi gereklidir [17].

Silikon çelik sacların kalınlığı, tasarlanacak makinenin temel frekansına göre seçilir. Düşük frekanslı ASM’lar için sac kalınlığı 0.5mm iken, yüksek frekanslı ASM’lar için daha ince laminsyona ihtiyaç duyulur [17].



Şekil 2.2. ASM’un Manyetik nüve kesiti .

2.1.2. Stator yapısı

Stator ASM’un sabit bölümü olup şebekeden elektrik enerjisini alan stator sargılarından, manyetik akıyı ileten stator sac paketinden ve stator gövdesinden oluşmaktadır. Stator sac paketi, kalınlığı 0,4-0,5 veya 0,8 mm olan silisyumlu demir saclardan yapılır. Saclar üretimden sonra ilk olarak yüzeyleri yalıtım amacı için ince bir lak tabakasıyla kaplanır, daha

sonra kurutma işlemine sokulur. İlk olarak statorun dış çevresi, rotor olukları, mil ve stator olukları için yerler açılır. Hava aralığına göre statorun iç çapı ve rotorun dış çapı kesilerek stator ve rotor sacları elde edilir. Saclar bir araya getirilerek sıkıştırılma işlemine tabi tutulup, sac paketleri elde edilir. Sacların oluşturduğu sac paketlerin arasında soğutma amacıyla radyal veya eksensel kanallar bırakılır [19]. Stator sac paketinde stator sargılarının yerleştirilmesi için belirli sayıda oluklar açılır. Oluk geometrisi ve sac paketini oluşturan malzemelerin üzerine çalışma yapılarak motorun verimi artırılabilir [20].

2.1.3. Rotor yapısı

Rotor, ASM'lerde, stator sargıları tarafından oluşturan döner manyetik alan içerisinde hareketli olan kısımdır. Rotor manyetik çekirdek, sargılar ve gövdeden oluşmaktadır. Demir çekirdek rotorun manyetik devresini oluşturan kısmı olup, genellikle silikon çelik alaşımından yapılmaktadır. Gövde ASM'lerde moment dönüştürme ve rotor hareketini destekleyen bölümdür ve genellikle orta karbonlu çelikten yapılmaktadır [17]. Stator ile rotor arası yani hava aralığı, tasarlanacak makinenin nominal gücüne göre ayarlanır ve genelde ASM'lerde boşta çalışma akımı düşük seviyede olması ve güç faktörü ve verimi yüksek olması için hava aralığı mümkün olabildiği kadar küçük tutulur [18]. Rotor sargıları, stator tarafından meydana gelen manyetik alanı keserek indüklenen akımı üretir. ASM'ler Rotor yapısına göre sincap kafesli ve bilezikli ASM'ler olarak üretilmektedirler.

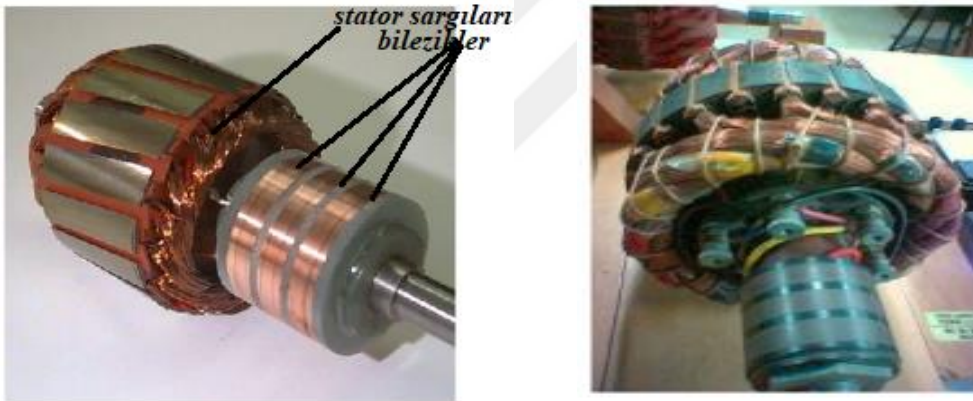
2.1.3.1. Bilezikli rotor (Sargılı rotor)

Bilezikli ASM'lerde rotor oluklarında 3 fazlı birbirinden yalıtılmış yıldız bağlı sargılar yer almaktadır. Sargıların yıldız noktası rotor içerisinde kalırken, diğer giriş uçları motor üzerine monte edilmiş ve milden izole edilmiş 3 adet bileziğe bağlanır. Bilezikler mil dönmesiyle birlikte döner [17,18].

Bilezikli ASM'lerde stator kutup sayısı ile rotor kutup sayısı eşit seviyede tasarlanır. Rotor sargılarının ucu, mil üzerine yerleştirilmiş bilezikler yardımıyla dışarıya çıkarılarak fırça vasıtasıyla frekans veya genliği ayarlanabilir gerilim kaynağına direk veya empedanslar üzerinden bağlanır. Söz konusu empedanslar ile motorun başlatma sırasında yüksek akımın önüne geçilir ve dolayısıyla yüksek başlatma torku elde edilebilir. Motor nominal çalışma

moduna geçince dirençler (empedanslar) otomatik olarak devreden çıkartılır. Dolayısıyla sürekli ve nominal çalışma durumunda bilezikli ASM ile sincap kafesli ASM aynı davranışları sergilerler. Bilezikli ASM’larda dışarıdan bağlanan dirençler yardımıyla devir sayısı ile hareket momenti kolay bir şekilde kontrol edilebilir.

Bilezikli ASM’larda ilk kalkış akımı nominal akımına yakın olduğundan yüksek gücün gerekli olduğu tezgâhlarda, kalkış momentinin yüksek olmasından kuvvetli yükler altında devamlı çalışan kuvveti üreten makineler bölümünde ve hız sayıları ayarlanabilir olmasından dolayı da ayarlı makine işletmelerinde tercih edilmektedir. Bununla birlikte bilezikli ASM’larda kömür fırçaları üzerinden akan rotor akımları kayıpların artmasına neden olur. Motorun sürekli çalışması sebebiyle de fırçalarda aşınma meydana gelir. Ayrıca makineye dışarıdan bağlanacak dirençler de kayıpların artmasına yol açar.



(a)

(b)

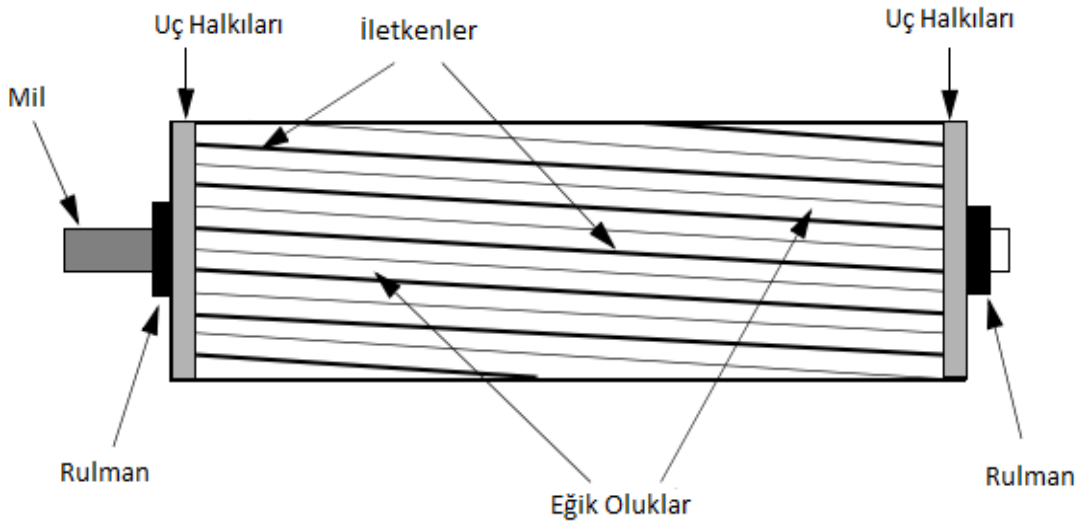
Şekil 2.3. Bilezikli ASM rotor yapısı farklı açılardan görüntüsü (a),(b)[22].

2.1.3.2. Sincap kafesli rotor (Kısa devreli rotor)

Sincap kafesli ASM’larda rotor oluklarının içerisine sargılar yerine eritilmiş alüminyum dökülerek rotor çubukları elde edilir. Büyük ASM’lerde alüminyum yerine oluklar içerisine bakır çubukları yerleştirilir. Rotor çubukları motorun her iki tarafında kısa devre edilerek kısa devreli rotor elde edilir. Sincap kafesli ASM’larda stator olukları ile rotor olukları eşit sayıda olmaması gerekir, eşit sayıda olduğu takdirde motorda kalkınma momenti oluşmaz. Bunun yanında motorda gürültü azaltmak için ve iyi bir kalkınma momentinin oluşturulması

için rotor olukları motor miline hafifçe meyilli şekilde açılır. Sincap kafesli ASM'lar bilezik ve fırça gibi yapıları içermediği için daha sağlam ve maliyeti düşük makineler olması sebebiyle sanayide en çok tercih edilen makinelerdir[17,18].

Sincap kafesli ASM'ların rotor direncine dışardan müdahale edilemediği için geçici rejim bölgesinde nominal akım değerinin 10 katından daha fazla akım çeker. Dolayısıyla ilk kalkış momentinin iyileştirilmesi için rotor çubukları yatık veya v şeklinde imal edilir. Bununla birlikte bazı sincap kafesli ASM'larda yol alma özelliği iyileştirilme adına rotor çubukları yüksek çubuklu veya çift kafesli şeklinde imal edilir[21,23]. Çift kafesli ASM'larda rotor alt kafes (işleme kafesi) üste kafes (yol verme kafesi) olmak üzere iki kafesten oluşmaktadır. Motor çalışma başladığı anda üsteki ve alttaki kafes çubuklarının üzerinden AA akım akar. Dolayısıyla üsteki çubukların kendi ve komşu çubukların üzerinde oluşturduğu manyetik alan, çubuklarda deri etkisini yaratır. Aynı şekilde alttaki çubukların alan çizgileri demir üzerinden geçerek direncin yükselmesine neden olur. Deri etkili direnci frekans ile doğru orantılı olduğu için motorun geçici rejim bölgesinde rotor frekansı yüksek olduğundan değeri yüksektir. Motor karalı hale geldiğinde rotor hızı yükseldiği için frekansı düşer ve direnci azalır. Böylece deri etkili rotor kullanılarak sincap kafesli ASM'da yüksek kalkış momenti ve yumuşak yol alma momenti elde edilir.



Şekil 2.4. Sincap kafesli ASM rotor yapısı[24]

2.2. ASM'ların Çalışma İlkesi

ASM'un sabit kısmına (stator sargılarına) uygulanan AA gerilimi, stator sargılarında zaman ile değişen manyetik alan oluşturur. Meydana gelen bu manyetik alanın N ve S kutupları rotor sargılarını keserek rotor sargılarında gerilim indüklenmesine sebep olur. Rotor sargıları kısa devre olduğu için "Faraday Yasası" gereği rotor sargılarından akım akacaktır. Rotor sargılarından akan indüksiyon akımı rotor sargılarında dönen manyetik alanın N ve S kutuplarını oluşturur. Stator manyetik alanı ile rotor manyetik alanının etkileşimi sonucunda (aynı kutuplar birbirini iter, zıt kutupları birbirini çeker) döndürme momenti oluşup rotor dönmeye başlayacak. Rotor devir hızı döner manyetik alan hızına eşit olduğunda rotor sargıları döner manyetik alan çizgiler tarafından kesilmez, rotor sargılarında emk indüklenmez ve rotordan akım akmaz, dolayısıyla döndürme momenti ortadan kalkmış olur ve rotor dönmeyecektir.

Döner manyetik alan hızı ya da senkron hızı statora uygulanan şebeke frekansı ile doğru orantılı olup motorun kutup sayısı ile ters orantılıdır.

$$n_s = \frac{120f_s}{2P} \quad (2.1)$$

Burada n_s : senkron hız, f_s : kaynak frekansı ve P : kutup sayısını göstermektedir.

ASM'lar boşta çalışırken bile rotor hızı döner alan hızına ulaşmaz. ASM'larda döner alan hızı (senkron hız) ile rotor hızı n_r arasındaki fark, kayma olarak adlandırılır ve % olarak verilir.

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \times 100 \quad (2.2)$$

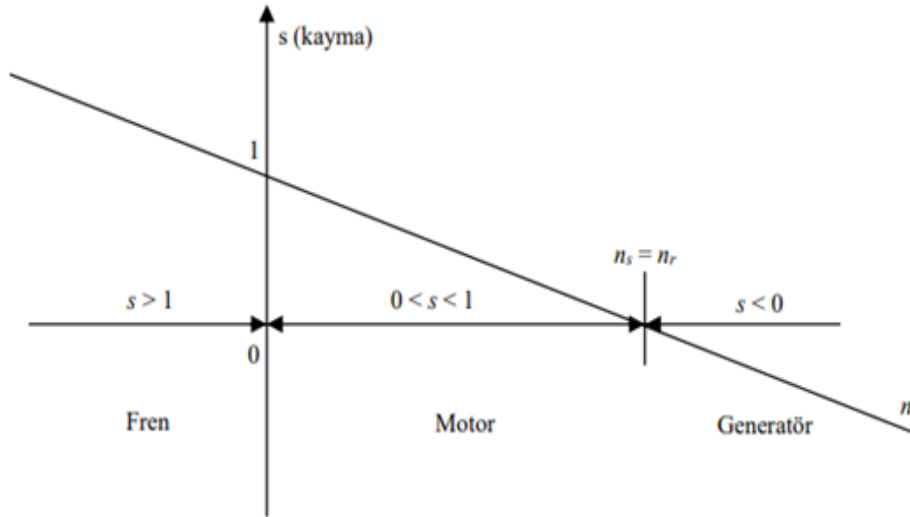
Denklem(2.3)'te görüldüğü gibi motor kararlı haline geldiğinde bile ventilasyon ve iç kayıpların mevcut olmasından ve rotor ataletinden dolayı ASM'larda rotor hızı senkron hızı hiçbir zaman eşit olmaz.

$$n_r = (1-s)n_s \quad (2.3)$$

Kayma, ASM'lerin karakteristik özelliklerini özetleyen önemli bir parametre olup Şekil 2.5'te görüldüğü gibi $-\infty < s < \infty$ arasında değerler alır. ASM'un rotoruna dışarıdan bir güç kaynağı ile enerji vererek rotor hızı senkron hızın üzerine çıkartıldığında stator akımı 180° yer değiştirerek şebekeye enerji verecek, dolayısıyla makine jeneratör olarak çalışıp $1 < s < \infty$ arası kayma bölgesini kullanacaktır.

Motor çalışma modunda stator sargılarına gerilim uygulanmaktadır. Uygulanan gerilim, motorun iç kayıplarını yenecek ve rotora bağlanan yük için gereken enerjiyi sağlayacak büyüklükte olmalıdır. Motor çalışma bölgesinde rotor döner manyetik alan ile aynı yönde dönmektedir. Rotor hızı ise döner manyetik alanın hızından düşük olduğundan kayma $0 < s < 1$ arası değerler alır. Statora uygulanan enerji mile bağlı yük için gereken döndürme momenti sağlanamadığı durumlarda rotor hızı sıfır olduğu için $s = 1$ olacak ve makine bir transformatör (kısa devre çalışması) gibi çalışacaktır. $s = 0$ veya bu değere çok yakın çalışması ASM'un boşta çalışma olarak tanımlanır.

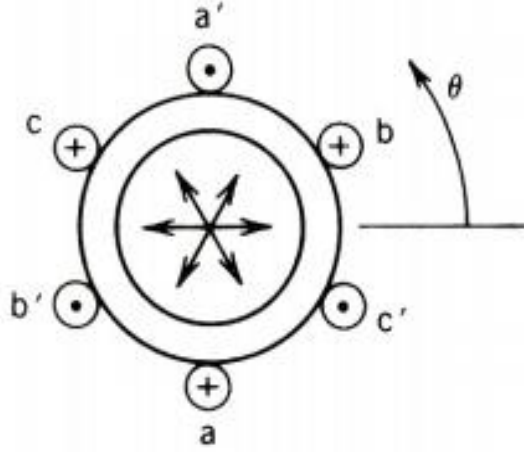
Motor çalışma sırasında stator sargılarının iki fazının yönü değiştirilirse (ters akımla frenleme) motor ters yönde dönmeye çalışacak ve bu sırada hızlı bir şekilde yavaşlayacaktır ve $s = -s$ olacak, dolayısıyla $-\infty < s < 0$ bölgesinde frenlenecektir, fazların yer değiştirmesi devam ederse motor ters yönde çalışmasına devam edecektir.



Şekil 2.5. ASM'in kaymaya göre çalışma bölgeleri

2.3.ÜÇ Fazlı ASM'lerde Sargılar ve Döner Manyetik Alan

Şekil 2.6, fiziksel olarak arasında 120° açılar ile yer alan aa', bb' ve cc' bobinlerinden oluşan stator sargılarını göstermektedir. Söz konusu sargılardan 120° sinüzoidal dalga şeklinde akım aktığında stator sargılarının üzerinde manyetik alan oluşmaktadır [25].



Şekil 2.6.. Stator oluklarına yerleştirilmiş sargıların dağılımı[25].

Bu faz sargılar üzerinden geçen akım ifadeleri zaman uzayında aşağıdaki gibi yazılır.

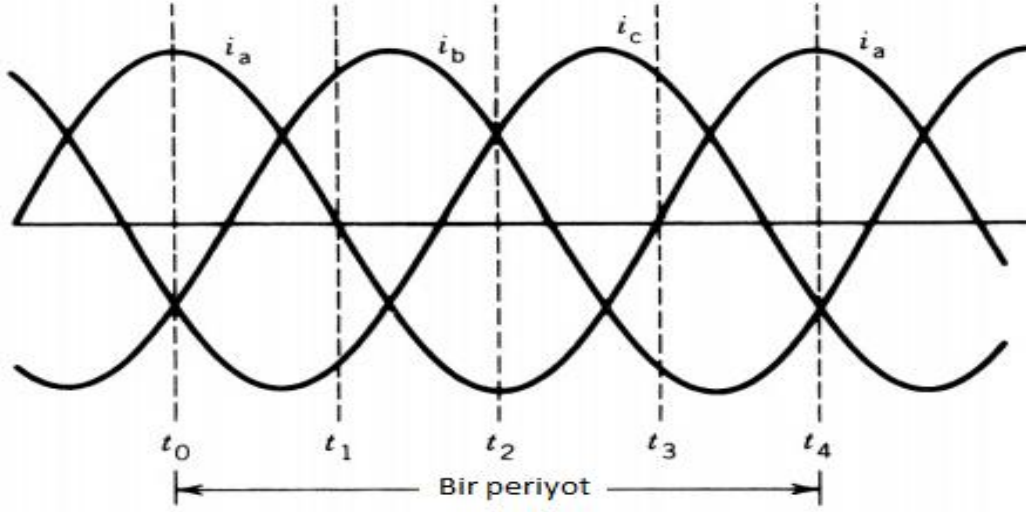
$$\begin{aligned} i_a &= i_{\max} \cos(\omega t) \\ i_b &= i_{\max} \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ i_c &= i_{\max} \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{aligned} \quad (2.5)$$

Stator sargılarından akan her bir sargı akımı, aynı ekseninde salınan ve uzayda sinüzoidal şeklinde dağıtılmış bir mmk dalgasını oluşturur. Her bir mmk dalgası, ilgili akımın anlık değerleri ile orantılı büyüklükte faz eksenini buyunca bir uzay vektörü ile ifade edilmektedir. Üç fazın toplam manyetik dalgalarının sonucunda hava aralığında sabit hıza sahip net döner manyetik alan oluşmaktadır [25].

Her bir fazda meydana gelen mmk vektörünün genlikleri ve yönleri ve bunların sonucunda oluşan net döner manyetik alan Şekil 2.7'deki faz akım dalgalarının belirli zamanlardaki

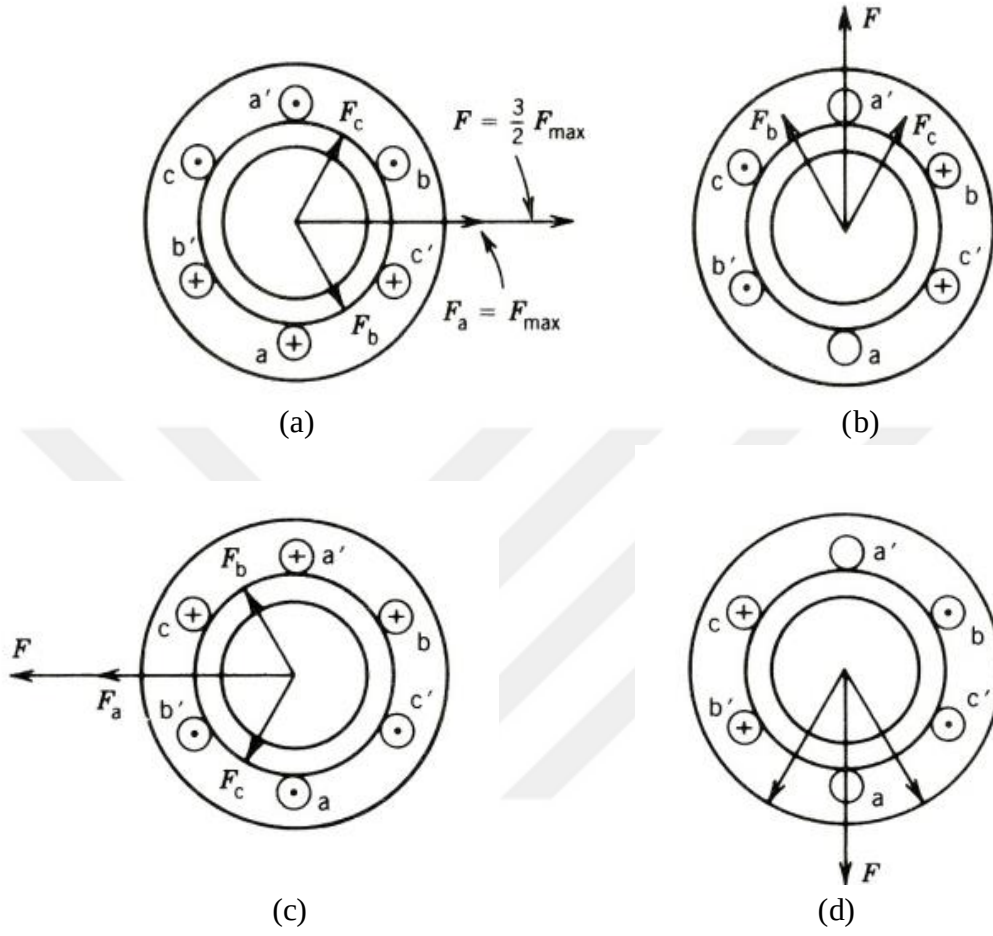
yönleri ve genlikleri dikkate alarak grafiksel olarak hesaplanabilir. $t = t_0 = 0$ anında a,b ve c fazların akım genlikleri aşağıdaki gibi yazılır

$$i_a = i_{\max}, i_b = -\frac{i_{\max}}{2}, i_c = -\frac{i_{\max}}{2} \quad (2.6)$$



Şekil 2.7. Üç fazlı ASM stator akımları.

Şekil 2.8 (a), (b), (c),(d), t_0, t_1, t_2, t_3 sırasıyla, farklı t değerlerinde, a,b ve c akım girişleri ve a',b' ve c' akım çıkışları olmak üzere mmk yönlerini ve büyüklüklerini göstermektedir. mmk yönü sağ el kuralı ile bulunur. Şekil 2.8(a)'da $i_a = i_{\max}$ olduğundan a faz manyetik alan kuvveti $F_a = F_{\max}$ genliğe sahip olup yönü ise a fazı eksenı buyunca yer almaktadır. Aynı şekilde b ve c fazı manyetik alan kuvvetleri $F_b = F_c = F_{\max}/2$ olup yönleri ilgili eksenlerin negatif tarafındadır. Hava aralığı net döner manyetik alanının vektörü 3 faz mmk vektörün toplamı olup genliği $\frac{3}{2}F_{\max}$ dir ve yönü ise a fazının eksenı buyunca yer almaktadır. Şekil 2.8 (b),(c),(d) farklı t anındaki faz akımların ve akımların yönleri göstermektedir. Tablo 1.1'de söz konusu anlarda faz akımlarının, akımlarının ve net manyetik alanın genlikleri özetlenmiştir.



Şekil 2.8. Grafik yöntemi ile dönen manyetik alan için (a) $t = t_0$ (b) $t = t_1$ (c) $t = t_2$ (d) $t = t_3$ anlarında mmk vektörleri.

Tablo 2.1. Döner manyetik alanın faz akıları ve mmk'lerin değerleri.

$t(ms)$	t_0	t_1	t_2	t_3
i_a	$i_{\max}$	0	$-i_{\max}$	0
i_b	$-\frac{1}{2}i_{\max}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}i_{\max}$	$\frac{1}{2}i_{\max}$	$-\frac{\sqrt{3}}{2}i_{\max}$
i_c	$-\frac{1}{2}i_{\max}$	$-\frac{\sqrt{3}}{2}i_{\max}$	$\frac{1}{2}i_{\max}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}i_{\max}$
F_a	F_m	0	$-F_m$	0
F_b	$-\frac{1}{2}F_m$	$\frac{\sqrt{3}}{2}F_m$	$\frac{1}{2}F_m$	$-\frac{\sqrt{3}}{2}F_m$
F_c	$-\frac{1}{2}F_m$	$-\frac{\sqrt{3}}{2}F_m$	$\frac{1}{2}F_m$	$\frac{\sqrt{3}}{2}F_m$
$\mathring{a} F_n$	$\frac{3}{2}F_m$	$\frac{3}{2}F_m$	$\frac{3}{2}F_m$	$\frac{3}{2}F_m$
θ	90°	180°	270°	360°

Şekil 2.8'de bir periyot boyunca hava aralığının toplam mmk F_m analitik olarak aşağıdaki gibi yazılır.

$$F_m(\theta) = F_a(\theta) + F_b(\theta) + F_c(\theta) \quad (2.7)$$

Her fazın mmk'sı mevcut fazın anlık akım değerleri ile sarım sayı çarpımına eşittir.

$$\begin{aligned} F_a(\theta) &= Ni_a \cos(\theta) \\ F_b(\theta) &= Ni_b \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ F_c(\theta) &= Ni_c \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{aligned} \quad (2.8)$$

Denklem (2.5) ve (2.8)'i denklem (2.7)'de düzenlediğimizde döner manyetik alanın analitik ifadesi denklem (2.9) gibi elde edilir.

$$F_a(\omega, t) = N_{im} \cos(\theta) \cos(\omega t) + N_{im} \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) + N_{im} \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) = \frac{3}{2} i_m N \cos(\theta - \omega t) \quad (2.9)$$

Burada θ mmk 'in a faza göre konumu ve $\omega = 2\pi f$ mmk dalgasının hızını ifade eder. Denklem (2.9) 3 fazlı ASM'lerde döner manyetik alanın sabit genliğe ve hıza sahip olduğunu ve hava aralığında sinüzoidal şeklinde dağılımını göstermektedir.

2.4.ASM'un Dinamik Modellenmesi

Matematiksel modeller, AA makinelerin geçici ve sürekli çalışma halindeki dinamik davranışlarını temsil etmek için kullanılır. Matematiksel modeller, sistemin davranışlarının benzetim ve denetimi için gerçek sistemin fiziksel davranışlarını yansıtacak niteliğinde olması gerekmektedir. Matematiksel modeller, sistemin benzetim ve denetim süresi kısa tutulması için daha basit ve az varsayımlarına dayanarak oluşturulmalı.

Üç fazlı ASM'un kararlı ve sürelik halindeki davranışlarının modellenmesi için tek fazlı eşdeğer devre modelinin kullanılması yeterlidir. Ancak motoru harekete geçirme, motoru durdurma ve sistemden kaynaklanan ve motor performansını etkileyen gürültüler, halinde geçici davranışlarını incelemek için motorun üç faz sisteminde modellenmesi gerekmektedir. ASM'un geçici ve kararlı halindeki dinamik davranışları, gerçekleşebilir bir kapsam dahilinde motorun fiziksel yapısını ve karmaşıklığını tam olarak tanımlayan bir matematiksel model ile ifade edilebilir. ASM'un stator sargıları ile rotor sargıları arasında nispi hareketin olmasından dolayı matematiksel modeli lineer olmayan diferansiyel denklemler ile ifade edilir [26].

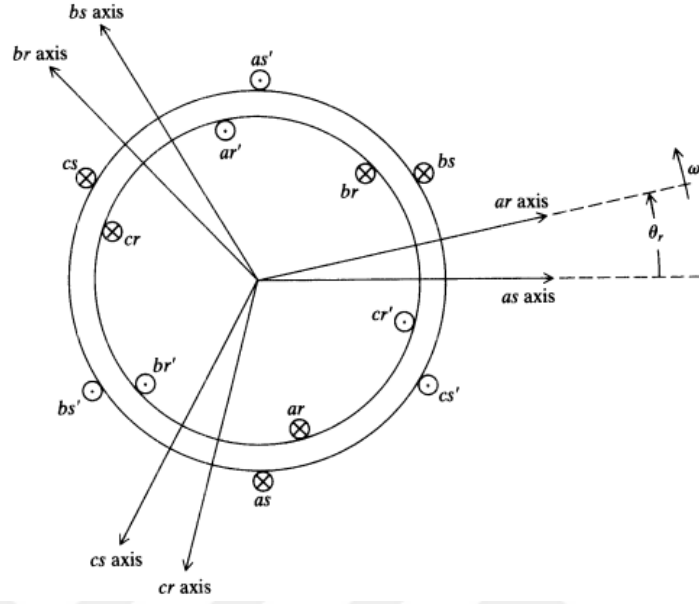
ASM'lar elektrik sisteminden mekanik sistemlerine enerji dönüşüm işlemini yapan sistem olduğundan matematiksel modeli, elektro -mekanik integral-diferansiyel denklemlerinin oluşturulması ile gerçekleşebilir. Söz konusu bu model motorun stator sargılarına uygulanan akım veya gerilim, akım ve gerilime ait frekansı ve sürekli çalışmasında motora uygulanan yük moment değişimi, gerçek sistemin fiziksel davranışlarını yansıtmalı [26].

2.4.1. A,B,C Düzleminde modellenmesi

Üç fazlı bir ASM'un stator ve rotor sargıları arasındaki ortak endüktanslarının rotor konumu ve zamanına göre değişimi, değişken kat sayılara sahip çok karmaşık ve doğrusal olmayan beşinci mertebeden diferansiyel denklemler ile ifade edilir. Söz konusu modelin çözümü ve simülasyon programlarında benzetimi gerçekleştirilmesi zor bir süreçtir, bundan dolayı modelin daha basit bir hale getirilmesi için bazen ihmallerin ve varsayımların kullanılması avantaj sağlamaktadır. ASM'un benzetim, tasarım ve kontrolü için kullanılan model makinenin kararlı ve geçici çalışma durumundaki dinamik etkileri yeterli ölçüde yansıtmalıdır [27]. Genelde ASM'un matematiksel modeli, aşağıdaki varsayımların, çalışma amacına uygun bir şekilde birkaç tanesine veya tamamına dayanarak oluşturulabilir [27,28].

- Stator sargıları hava aralığında sinüzoidal biçimde akı oluşturulması için stator oluklarına üniforma şekilde yerleştirilmesi.
- Manyetik devrenin doğrusal olması ve doyumun oluşmaması.
- Sıcaklık ve frekans değişiminin dirençlerin ve endüktansların üzerine etkileri ihmal edilmesi.
- Manyetik devrenin geçirgenliği sonsuz olması.
- Histersiz ve fuko(girdap) kayıpların ihmal edilmesi.
- Dış ve oluk etkilerin ihmal edilmesi.
- Akım yığılmanın (deri etkisi) ihmal edilmesi.

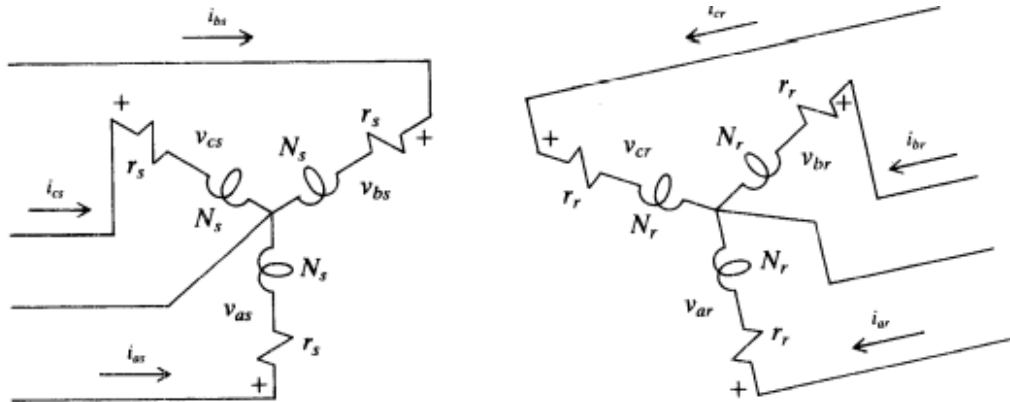
ASM'un giriş büyüklüklerine ait elektriksel denklemler motorun eşdeğer devresinden "Kirschoff" kuralı ile bulunur, çıkış büyüklüklerin değişimi "Newton "kuralı ile bulunan mekanik denklemler ile ifade edilir. 3 fazlı sincap kafesli ASM'un stator sargılarına ait 3 adet, rotor sargılarına ait n tane ve motorun mekanik kısmına ait 1 tane denklem olmak üzere toplam $(3+n+1)$ diferansiyel denklem ile temsil edilir. Şekil 2.9'da 3 fazlı ASM'un stator ve rotor sargılarına ait büyüklükleri 3 faz eksen düzleminde verilmiştir [27].



Şekil 2.9. İki kutuplu, 3 fazlı ASM [27].

2.4.1.1. Elektriksel denklemler

3 fazlı sincap kafesli ASM'un stator faz sargılarının sarım sayıları N_s birbirine eşit olup 120° faz farkıyla emk'in sinüzoidal bir şekilde olması için stator oluklarına yerleştirilmiş. Aynı şekilde rotor sargılarının efektif sarımları N_r birbirine eşit olacak şekilde rotor oluklarına 120° faz farkıyla yerleştirilmiştir, varsayımlar ile elde edilen 3 faz eşdeğer devresi şekil 2.10 'da gösterilmektedir [27].



Şekil 2.10. 3 fazlı yıldız bağlı ASM 3 faz düzlemimde eş değer devresi[27]

Üç fazlı sincap kafesli ASM'un stator ve rotor sargılarına ait gerilim denklemleri 3 fazlı akım ve akılar cinsinden aşağıdaki matris formunda yazılır.

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \\ v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \\ i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_{as} \\ \lambda_{bs} \\ \lambda_{cs} \\ \lambda_{ar} \\ \lambda_{br} \\ \lambda_{cr} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Denklem (2.10) üç fazlı sincap kafesli ASM'un gerilim denklemleri motorun doğal referans düzleminde elde edilen denklemlerdir. Motorun doğal referans düzleminde stator gerilim denklemleri statora sabitlenmiş duran referans düzleminde ifade edilmektedir. Rotor gerilim denklemleri ise rotora sabitlenmiş döner referans düzleminde formüle edilir [27].

3 fazlı ASM'ların endüktası matrisi kaçak endüktansları, öz endüktansları, mıknatıslanma endüktansları ve ortak endüktanslarının ifadelerini içermektedir.

$$L = \begin{bmatrix} l_{asas} & l_{asbs} & l_{ascs} & l_{asar} & l_{asbr} & l_{ascr} \\ l_{bsas} & l_{bsbs} & l_{bscs} & l_{bsar} & l_{bsbr} & l_{bscr} \\ l_{csar} & l_{csbs} & l_{cscs} & l_{csar} & l_{csbr} & l_{cscr} \\ l_{aras} & l_{arbr} & l_{arcr} & l_{arar} & l_{arbr} & l_{arcr} \\ l_{bras} & l_{brbr} & l_{brbs} & l_{brar} & l_{brbr} & l_{brcr} \\ l_{crar} & l_{crbs} & l_{crscs} & l_{crar} & l_{crbr} & l_{crccr} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Sargıların öz endüktansları mıknatıslanma endüktansının ve kaçak endüktansının toplamından ibarettir. Stator ve rotora ait sargılar özdeş olduklarından öz endüktanslar birbirine eşittir.

$$\begin{aligned} l_{asas} &= l_{bsbs} = l_{scsc} = l_{ms} + l_{1s} \\ l_{arar} &= l_{brbr} = l_{crccr} = l_{mr} + l_{1r} \end{aligned} \quad (2.12)$$

Ortak endüktanslar, stator-stator, stator-rotor, rotor-rotor ve rotor stator sargıların arasında oluşan endüktanslardır. Bunlardan stator-stator ve rotor-rotor sargılar arasındaki endüktanslar sabit iken rotor-stator ve stator rotor arasında oluşan endüktanslar rotor konumuna bağlı olarak değişim göstermektedir [27].

$$\begin{aligned}
l_{asbs} &= l_{asc s} = l_{bsas} = l_{bscs} = l_{csas} = l_{csbs} = -\frac{1}{2}l_{ms} \\
l_{arbr} &= l_{arcr} = l_{brar} = l_{brcr} = l_{crar} = l_{crbr} = -\frac{1}{2}l_{mr}
\end{aligned} \tag{2.13}$$

$$\begin{aligned}
l_{asar} &= l_{bsbr} = l_{cscr} = l_{sr} \cos(\theta_r) \\
l_{asbr} &= l_{bscr} = l_{csar} = l_{sr} \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\
l_{ascr} &= l_{bsar} = l_{csar} = l_{sr} \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\
l_{aras} &= l_{brbs} = l_{crbs} = l_{rs} \cos(\theta_r) \\
l_{arbs} &= l_{brbs} = l_{crbs} = l_{rs} \cos(\frac{2\pi}{3} - \theta_r) \\
l_{arcs} &= l_{bras} = l_{crbs} = l_{rs} \cos(\frac{2\pi}{3} - \theta_r)
\end{aligned} \tag{2.14}$$

Stator ve rotor sargılarının özdeş olması durumunda L matrisi aşağıdaki gibi düzenlenebilir

$$L = \begin{bmatrix} L_s & L_{sr} \\ L_{rs} & L_{rr} \end{bmatrix} \tag{2.15}$$

Burada L_s stator sargılar arası endüktanslar, L_r rotor sargılarındaki endüktanslar L_{sr} stator ile rotor arasında oluşan endüktanslar ve L_{rs} rotor ile stator sargılar arasında oluşan endüktansları ifade ederler. L_s, L_r, L_{sr} ve L_{rs} endüktanslar denklem (2.12)'den (2.14)'e kadar aşağıdaki gibi yazılırlar [27].

$$L_s = \begin{bmatrix} l_{ms} + l_{1s} & -\frac{1}{2}l_{ms} & -\frac{1}{2}l_{ms} \\ -\frac{1}{2}l_{ms} & l_{ms} + l_{1s} & -\frac{1}{2}l_{ms} \\ -\frac{1}{2}l_{ms} & -\frac{1}{2}l_{ms} & l_{ms} + l_{1s} \end{bmatrix} \tag{2.16}$$

$$L_r = \begin{bmatrix} l_{mr} + l_{1r} & -\frac{1}{2}l_{mr} & -\frac{1}{2}l_{mr} \\ -\frac{1}{2}l_{mr} & l_{mr} + l_{1r} & -\frac{1}{2}l_{mr} \\ -\frac{1}{2}l_{mr} & -\frac{1}{2}l_{mr} & l_{mr} + l_{1r} \end{bmatrix} \tag{2.17}$$

$$L_{sr} = l_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

$$L_{sr} = l_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Akı denklemleri akımlar cinsinden aşağıdaki matris şeklinde yazılır.

$$\begin{bmatrix} \lambda_{as} \\ \lambda_{bs} \\ \lambda_{cs} \\ \lambda_{ar} \\ \lambda_{br} \\ \lambda_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{ms} + l_{ls} & -\frac{1}{2}l_{ms} & -\frac{1}{2}l_{ms} & l_{sr}\cos(\theta_r) & l_{sr}\cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & l_{sr}\cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ -\frac{1}{2}l_{ms} & l_{ms} + l_{ls} & -\frac{1}{2}l_{ms} & l_{sr}\cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & l_{sr}\cos(\theta_r) & l_{sr}\cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ -\frac{1}{2}l_{ms} & -\frac{1}{2}l_{ms} & l_{ms} + l_{ls} & l_{sr}\cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & l_{sr}\cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & l_{sr}\cos(\theta_r) \\ l_{rs}\cos(\theta_r) & l_{rs}\cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & l_{rs}\cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & l_{mr} + l_{lr} & -\frac{1}{2}l_{mr} & -\frac{1}{2}l_{mr} \\ l_{rs}\cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & l_{rs}\cos(\theta_r) & l_{rs}\cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\frac{1}{2}l_{mr} & l_{mr} + l_{lr} & -\frac{1}{2}l_{mr} \\ l_{rs}\cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & l_{rs}\cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & l_{rs}\cos(\theta_r) & -\frac{1}{2}l_{mr} & -\frac{1}{2}l_{mr} & l_{mr} + l_{lr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \\ i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Denklem (2.20) denklem (2.10)'da yerleştirildiğinde denklem (2.21)'de üç fazlı simetrik ASM için üç faz düzleminde genel gerilim denklemleri elde edilir.

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \\ v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \\ i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} l_{ms} + l_{ls} & -\frac{1}{2}l_{ms} & -\frac{1}{2}l_{ms} & l_{sr}\cos(\theta_r) & l_{sr}\cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & l_{sr}\cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ -\frac{1}{2}l_{ms} & l_{ms} + l_{ls} & -\frac{1}{2}l_{ms} & l_{sr}\cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & l_{sr}\cos(\theta_r) & l_{sr}\cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ -\frac{1}{2}l_{ms} & -\frac{1}{2}l_{ms} & l_{ms} + l_{ls} & l_{sr}\cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & l_{sr}\cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & l_{sr}\cos(\theta_r) \\ l_{rs}\cos(\theta_r) & l_{rs}\cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & l_{rs}\cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & l_{mr} + l_{lr} & -\frac{1}{2}l_{mr} & -\frac{1}{2}l_{mr} \\ l_{rs}\cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & l_{rs}\cos(\theta_r) & l_{rs}\cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\frac{1}{2}l_{mr} & l_{mr} + l_{lr} & -\frac{1}{2}l_{mr} \\ l_{rs}\cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & l_{rs}\cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & l_{rs}\cos(\theta_r) & -\frac{1}{2}l_{mr} & -\frac{1}{2}l_{mr} & l_{mr} + l_{lr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \\ i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix}$$

(2.21)

2.4.1.2.Mekaniksel Denklemler

ASM'larda 3 faz stator ve 3 faz rotor sargıları olmak üzere toplam 6 tane devreye ait depolanan enerji, her bir sargı akımının karesinin yarısının ve tüm karşılıklı endüktansların ve öz endüktansının toplamıdır [27].

$$w_f = \frac{1}{2}(i_{abcs})^T L_s i_{abcs} + (i_{abcs})^T L_{sr} i'_{abr} + \frac{1}{2}(i'_{abcr})^T L_r i'_{abcr} \quad (2.22)$$

P kutuplu ASM için dönme halinde enerji değişimi aşağıdaki gibi yazılır [27]

$$dw_m = -T_e \theta_m \quad (2.23)$$

Burada θ_m rotorun mekaniksel konumu olup elektriksel konum çisinden aşağıdaki gibi yazılır.

$$\theta_m = \frac{P}{2} \theta_r \quad (2.24)$$

L_s ve L_r öz endüktansların rotor konumu θ_r 'den bağımsız olduğundan elektromekanik moment oluşumunda bir katkısı yoktur [27].

$$T_e(i\theta_r) = \frac{P}{2} \frac{\partial W_c(i, \theta_r)}{\partial \theta_r} = \frac{P}{2} (i_{abcs})^T \frac{\partial}{\partial \theta_r} [L_{sr}'] i'_{absr} = -\frac{P}{2} l_{ms} \{ [i_{as}(i'_{ar} - \frac{1}{2}i'_{br} - \frac{1}{2}i'_{cr}) + i_{bs}(i'_{br} - \frac{1}{2}i'_{ar} - \frac{1}{2}i'_{cr}) + i_{cs}(i'_{cr} - \frac{1}{2}i'_{br} - \frac{1}{2}i'_{ar})] \sin \theta_r + \frac{\sqrt{3}}{2} [i_{as}(i'_{br} - i'_{cr}) + i_{bs}(i'_{cr} - i'_{ar}) + i_{cs}(i'_{ar} - i'_{br})] \cos \theta_r \} \quad (2.25)$$

Motorun hareket denklemleri moment cinsinde aşağıdaki gibi elde edilir [27].

$$\omega_m = \frac{1}{J} \int (T_e - B\omega_m - T_L) dt \quad (2.26)$$

Burada T_L :yük momenti, B :sürtünme katsayısı, ω_m :Mekaniksel hız, T_e :elektromagnetik moment, J : eylemsizlik sabitini göstermektedir.

2.4.2. ASM'un qd0 referans düzleminde modellenmesi

ASM'larda üç fazlı rotor sargıları üç fazlı sabit stator sargılarına göre hareket eder. Dolayısıyla matematiksel model, stator ve rotor arası zaman ve rotor konumu ile değişen ortak endüktanslarının ifadelerini içermektedir. Rotor ve stator arası ortak endüktansların rotor konumuna bağlı olması ASM modellenmesinde daha karmaşık bir yapıya yol açar. Denklem (2.21)'de üç fazlı ASM'un üç faz düzleminde elde edilen gerilim denklem sistemleri, değişken ve zamana bağlı katsayıları içerdiği için doğrusal olmayan diferansiyel denklemlerden oluşmaktadır, çünkü rotor açısı zamanın doğrusal olmayan bir fonksiyonudur. Bununla birlikte doyum koşullarında bazen endüktansların akım ile değişken olmaması durumunda bile motorun diğer parametreleri değişim göstermektedir [28]. Eğer motorun bütün parametrelerinin sabit olduğu kabul edilse bile denklem (2.11)'de görüldüğü gibi 36 tane endüktas değerlerinin rotor konumuna bağlı olarak değişiyor olması gerilim denklemleri sayısını çok arttıracaktır. 3 fazlı eksen takımında stator ve rotor akıplarının rotor açısal konumuna bağlı olması denklem (2.20) çözümü zorlayacak ve motor analizinin bilgisayar ortamında hem daha fazla zamana hem de daha fazla belleğe ihtiyaç duyulmasını sağlayacaktır. Bu sebeple araştırmacıların odaklandığı diğer bir yön, denklemlerin sayısının azaltılmasıdır, çünkü geleneksel modeller tarafından çözüm hem çok zamana ihtiyaç duyar ve hem de döngü ortamında gecikme süresi oluşturur. Dolayısıyla ASM'un gerilim, akım ve yük anlık değişimi için geçerli olan, motorun hem sürekli ve hem geçici durumdaki

performans ve davranışlarını ifade eden dinamik modeli qdo referans teorisi ile daha az sayıda denklemle ve büyük bir doğrulukla elde edilebilmektedir.

2.4.2.1.Koordinat eksen dönüşümleri

Üç fazlı ASM'ların dinamik modelinden iyi bir performans elde etmek için motora ait denklemleri azaltılabilen ve sonucu daha hızlı bir şekilde hesaplayabilen yöntem ve algoritmaların geliştirilmesi gereklidir. Söz konusu yöntemler koordinat eksen transformasyonu işlemi ile gerçekleştirilir. Koordinat eksen dönüşümü(transformasyonu) yöntemler, ASM'lere ait diferansiyel denklemlerin daha kolay ve hızlı bir şekilde çözümünü sağlar. 3 fazlı sistemlerin bileşenlerinin davranışlarını ve kontrolünü incelemek için temel olarak Clark ve Park dönüşüm teknikleri kullanılmaktadır. 3 faz sistemlerine ait değişkenlerin 2 faz sabit değişkenlere dönüştürme işlemi "Clark transformasyonu" olarak adlandırılır, aynı şekilde 2 faz sabit ekseninden 3 faz eksen takımına dönüştürme işlemine "ters Clark transformasyon" adı verilir. 3 faz takımındaki sistemlerin değişkenlerini, senkron hız ile dönen 2 faz takımına indirgenme işlemi "Park transformasyonu" ile yapılır. Aynı şekilde senkron hız ile dönen 2 faz ekseninden 3 faz eksene dönüştürme işlemine "ters Park transformasyonu" denir. Clark ve Park dönüşümleri ASM'larda gerilim denklemlerinin karmaşıklığı azaltmanın yanında motorun kontrol tekniklerinin geliştirilmesinde önemli rol oynar.

Clark ve Park dönüşümleri için analitik ifadeleri elde etmek için denklem (2.9)'da stator akımları tarafından oluşan sinüzoidal bir şekilde hava aralığında ω_s hız ile a faz referans konumuna göre pozitif yönde dönen mmk ifadesini ele alalım [25].

$$F_a(\theta_a, t) = N[i_a \cos(\theta_a) \cos(\omega_s t) + i_b \cos(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}) \cos(\theta_a - \frac{2\pi}{3}) + i_c \cos(\omega_s t + \frac{2\pi}{3}) \cos(\theta_a + \frac{2\pi}{3})] \quad (2.27)$$

Denklem (2.27) üzerine Euler özdeşliği kullanarak aşağıdaki gibi uzay vektör şeklinde yazılabilir

$$\begin{aligned}\bar{F} &= N[e^{j(\theta_a - \omega_s t)}(i_a + i_b e^{-j\frac{2\pi}{3}} + i_c e^{-j\frac{4\pi}{3}}) + e^{-j(\theta_a - \omega_s t)}(i_a + i_b e^{j\frac{2\pi}{3}} + i_c e^{j\frac{4\pi}{3}})] = \\ N(\bar{I}_2 e^{j(\theta_a - \omega_s t)} + \bar{I}_1 e^{-j(\theta_a - \omega_s t)})\end{aligned}\quad (2.28)$$

Burada $\bar{I}_2$ ve $\bar{I}_1$ stator akımlarının pozitif ve negatif akım bileşenlerinin uzay vektörleridir, $\bar{I}_2$ ve $\bar{I}_1$ stator akımı i_a, i_b ve i_c vektörleri cinsinden aşağıdaki gibi yazılabilir [25].

$$\begin{aligned}\bar{I}_2 &= i_a + i_b e^{-j\frac{2\pi}{3}} + i_c e^{-j\frac{4\pi}{3}} = i_a + (-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2})i_b + (-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2})i_c \\ &= \frac{1}{2}(3i_a + j\sqrt{3}(i_b - i_c) - (i_a + i_b + i_c))\end{aligned}\quad (2.29)$$

$$\begin{aligned}\bar{I}_1 &= i_a + i_b e^{j\frac{2\pi}{3}} + i_c e^{j\frac{4\pi}{3}} = i_a + (-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2})i_b + (-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2})i_c \\ &= \frac{1}{2}(3i_a - j\sqrt{3}(i_b - i_c) - (i_a + i_b + i_c))\end{aligned}\quad (2.30)$$

$\bar{I}_2 = (\bar{I}_1)^*$ Uzay vektörleri birbirinin eşleniğidir, denklem (2.29) ve denklem (2.30)'dan akım sıfır bileşenlerini çıkartmak için her denklemin iki tarafını 2/3 ile çarpalım.

$$\bar{I}_2 = (\bar{I}_1)^* = \frac{3}{2}\bar{I} = i_a + j\sqrt{3}(i_b - i_c) - \frac{1}{3}(i_a + i_b + i_c)\quad (2.31)$$

Burada $i_0 = 1/3(i_a + i_b + i_c)$ üç faz akımlarının sıfır bileşenini ifade etmektedir. Denklem (2.29), denklem (2.30) ve denklem (2.31) aşağıdaki gibi matris formunda düzenlenebilir.

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ i_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & e^{-j\frac{2\pi}{3}} & e^{-j\frac{4\pi}{3}} \\ 1 & e^{j\frac{2\pi}{3}} & e^{j\frac{4\pi}{3}} \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}\quad (2.32)$$

$\bar{I} = \frac{2}{3} \bar{I}_2 = \frac{2}{3} (\bar{I}_1)^* = i_\alpha - j i_\beta$ Olarak tanımladığımızda, i_α bileşeni denklem (2.32) matrisin birinci satır reel eksen ve i_β bileşeni ise matristin ikinci satırın imajiner bileşenlerini ifade eder. Denklem (2.31) ve denklem (2.32)'i aşağıdaki gibi matris formunda düzenleyebiliriz.

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

Yukarıdaki matris denklemi daha basit bir şekilde düzenlenebilir.

$$[i_{\alpha\beta 0}] = [T_{\alpha\beta 0}] [i_{abc}] \quad (2.34)$$

Burada $T_{\alpha\beta 0}$ üç fazlı sistemi duran iki faz sistemine dönüştüren matristir.

➤ Clark dönüşümü (ABC- $\alpha\beta$)

Clark dönüşümü veya alfa beta transformasyonu olarak bilinen dönüşüm, üç faz sistemdeki değişkenleri iki faz sabit veya duran eksen takımında tanımlı değişkenlere dönüştürür. Denklem (2.33)'te sabit referans için elde edilen matrisi üç fazlı ASM' büyüklükleri üzerine uygulanıp iki fazlı duran α, β düzlemine taşınmış olur.

$$[f_{\alpha\beta}] = [T_{\alpha\beta 0}] [f_{abc}] \quad (2.35)$$

Aynı şekilde iki fazlı sabit eksen takımından üç fazlı eksen takımına geçiş işlemi, ters Clark transformasyonunu $[T_{\alpha\beta 0}]^{-1}$ ile gerçekleştirilebilir.

$$[f_{abc}] = [T_{\alpha\beta}]^{-1} [f_{\alpha\beta}] \quad (2.36) \quad [T_{\alpha\beta}]^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

➤ (A.B.C)-qd0 Eksen Dönüşümü (Park Transformasyonu)

Park dönüşümü, iki fazlı veya üç fazlı sabit eksen takımında tanımlanan ASM değişkenlerini, iki fazlı senkron hızı ile dönen yeni referans çerçevesinde tanımlar. Bu yeni eksen takımında tanımlanan ASM akım, gerilim ve akı denklemleri, gerçek sistemin akım, akı ve gerilim cinsinden yazılabilir. Clark dönüşümü ile ilk önce üç fazlı sisteme ait f_a, f_b ve f_c değişkenleri birbirine dik olan f_α ve f_β iki fazlı sabit referans çerçevesine yönlendirilir ve daha sonra sabit eksen takımında tanımlanan f_α ve f_β değişkenleri senkron hız ile dönen qd0 referans çerçevesinde tanımlanan f_q ve f_d bileşenlere dönüştürülür.

Denklem (2.31)'da $\bar{I}$ duran uzay vektörünün bileşenlerinin dönen bileşenlere taşınması aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\bar{I}_3 = i_q - ji_d = \bar{I} e^{-j\theta} = (i_\alpha - ji_\beta) e^{-j\theta} = (i_\alpha \cos\theta - i_\beta \sin\theta) - j(i_\alpha \sin\theta + i_\beta \cos\theta) \quad (2.38)$$

Yukarıdaki denklem akım sıfır bileşeniyle birlikte aşağıdaki matris formunda yazılabilir.

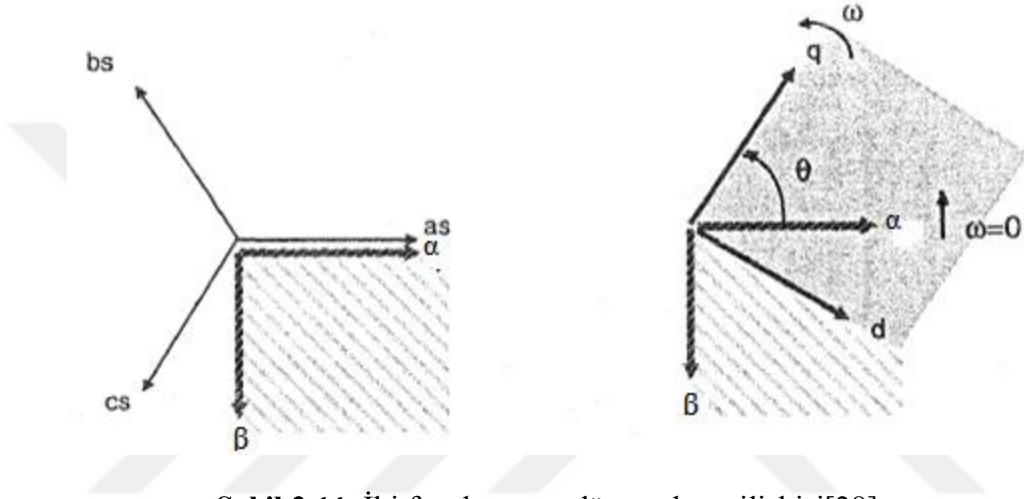
$$\begin{bmatrix} i_q \\ i_d \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

2 fazlı sabit eksen büyüklüklerini iki fazlı dönen bileşenlere dönüştüren matrisi denklem (2.40)' taki gibi elde edilir.

$$[T_{qd0}] = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [T_{\alpha\beta 0}] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin\theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

Burada $[T_{qd0}]$ Clark dönüşüm matrisidir. Aynı şekilde dönen iki faz bileşenlerinin üç faz düzlemine taşınması ters Clark dönüşümüyle yapılır.

$$[f_{abc}] = [T_{qd0}]^{-1} [f_{qd0}] \quad (2.41) \quad [T_{qd0s(\theta)}]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & \frac{1}{2} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{2} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.42)$$



Şekil 2.11. İki faz duran ve dönen eksen ilişkisi[28].

Burada $\theta = \int \omega t + \theta(0)$ α eksenini ile q ekseninin arasında $qd0$ referans çerçevesinin açısal konumudur. d eksenini ise q ekseninin $\pi/2$ gerisinde yer almaktadır. ω , qdo referans çerçevesinin açısal hızı olup motorun matematiksel modelin oluşturulmasında keyfi hıza, senkron hıza, rotor hızına veya sabit (duran) hıza eşit olarak seçilebilir.

Tablo 2.2. ASM'ların modellenmesinde kullanılan referans çerçeveler

qd0 Referans çerçevesi	Referans çerçevesinin açısal hızı	Referans çerçevesinin açısal konumu	Değişkenler	Dönüşüm matrisi
Keyfi referans	ω	θ	f_{qd0}	$[T_{qd0(\theta)}]$
Senkron referans	ω_e	θ_e	f_{qd0}^e	$[T_{qd0e(\theta)}]$
Rotor referans	ω_r	θ_r	f_{qd0}^r	$[T_{qd0r(\beta)}]$
Duran referans	ω_s	θ_s	f_{qd0}^s	$[T_{qd0s(\theta)}]$

2.4.2.2.ASM'un qd0 keyfi referans düzleminde modellenmesi

Keyfi referans düzleminde stator ve rotor değişkenleri herhangi bir referans hızı ile dönen qd0 referans çerçevesine dönüştürülür. ASM'un dinamik modeli ilk olarak keyfi referans çerçevesinde oluşturulup daha sonra senkron referans, duran referans ve rotor referans modelleri bu genel referans (qd0 keyfi referans) modelinden elde edilebilir.

$$\begin{bmatrix} f_{qs} \\ f_{ds} \\ f_{0s} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{as} \\ f_{bs} \\ f_{cs} \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

$$\begin{bmatrix} f_{qr} \\ f_{dr} \\ f_{0r} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\beta) & \cos(\beta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\beta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\beta) & \sin(\beta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\beta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{ar} \\ f_{br} \\ f_{cr} \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

Burada f_{as}, f_{bs}, f_{cs} ve f_{ar}, f_{br}, f_{cr} stator ve rotorun üç faz düzlemindeki değişkenleridir. θ ise referans çerçevesinin açısal konumu bağlı olup stator a fazı ile herhangi ω hız ile dönen q eksenini arasındaki açıyı ifade eder. $\beta = \theta - \theta_r$ 'da θ_r , rotor a fazı ile stator a faz arasındaki açısal konumu gösterir. β ise rotor a fazı ile $\omega(t)$ hızı ile dönen q eksenini arasındaki açısal konumu ifade eder.

$$\theta(t) = \int_0^t \omega(t) dt + \theta(0) \quad (2.45)$$

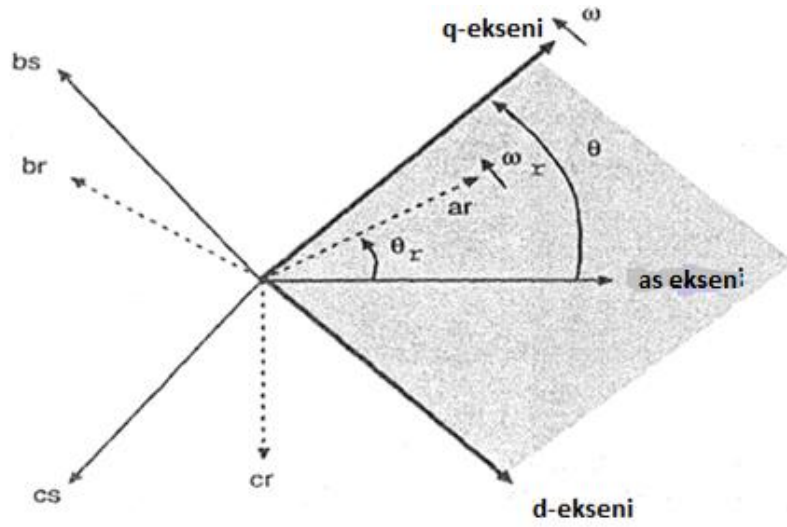
$$\beta(t) = \int_0^t \omega(t) dt + \theta(0) - \omega_r(t) + \theta_r(0) \quad (2.46)$$

qd0 keyfi referans düzleminde stator ve rotor bileşenlerinin abc faza taşınması ters qd0 transformasyon işlemi ile yapılmaktadır.

$$\begin{bmatrix} f_{as} \\ f_{bs} \\ f_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{qs} \\ f_{ds} \\ f_{0s} \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

$$\begin{bmatrix} f_{ar} \\ f_{br} \\ f_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & \sin(\beta) & 1 \\ \cos(\beta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\beta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\beta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\beta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{qr} \\ f_{dr} \\ f_{0r} \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

Burada f_{qs}, f_{ds}, f_{0s} ve f_{qr}, f_{dr}, f_{0r} stator ve rotor iki faz düzlemindeki q, d ve sıfır bileşenlerini göstermektedir. f_{0s}, f_{0r} Dengeli koşullar için sıfıra eşit iken dengesiz motor modellenmesinde dikkate alınmalı.



Şekil 2.12. 3 faz iki faz ilişkisi[28]

2.4.2.2.1. qd0 Keyfi referans düzleminde ASM'un elektriksel denklemleri

ASM stator sargılarına ait üç fazlı gerilim matrisi (abc) referans eksen takımında aşağıdaki gibi yazılır.

$$[v_s^{abc}] = [R_s^{abs}][i_s^{abs}] + \frac{d}{dt}[\lambda_s^{abs}] \quad (2.49)$$

$[T_{qd0s(\theta)}]$ Transformasyon işlemi, üç fazlı sistemde tanımlanan gerilim, akım ve akı üzerine uyguladığımızda

$$\begin{aligned} [v_s^{abc}] &= [T_{qd0s(\theta)}]^{-1} [v_s^{qd0}] \\ [i_s^{abc}] &= [T_{qd0s(\theta)}]^{-1} [i_s^{qd0}] \\ [\lambda_s^{abc}] &= [T_{qd0s(\theta)}]^{-1} [\lambda_s^{qd0}] \end{aligned} \quad (2.50)$$

Elde edilir. Bu durumda denklem (2.49) yerine yazıldığında

$$[T_{qd0s(\theta)}]^{-1} [v_s^{qd0}] = [R_s^{abc}] [T_{qd0s(\theta)}]^{-1} [i_s^{qd0}] + \frac{d}{dt} [T_{qd0s(\theta)}]^{-1} [\lambda_s^{qd0}] \quad (2.51)$$

Olarak elde edilir. Denklem (2.51)'in her iki tarafını $[T_{qd0s(\theta)}]$ ile çarptığımızda denklem (2.51) yeniden denklem (2.52) gibi yazılır.

$$[v_s^{qd0}] = [R_s^{abc}][T_{qd0s(\theta)}][T_{qd0s(\theta)}]^{-1}[i_s^{qd0}] + [T_{qd0s(\theta)}] \frac{d}{dt} [T_{qd0s(\theta)}]^{-1} [\lambda_s^{qd0}] \quad (2.52)$$

Bu denklemin **EK A-1**'de basitleştirildiği gibi denklem (2.53)'te qd0 keyfi referans düzleminde stator gerilim matrisi elde edilmiş olur.

$$\begin{bmatrix} v_s^q \\ v_s^d \\ v_s^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \omega \begin{bmatrix} \lambda_s^q \\ \lambda_s^d \\ \lambda_s^0 \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_s^q \\ \lambda_s^d \\ \lambda_s^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s^q \\ i_s^d \\ i_s^0 \end{bmatrix} \quad (2.53)$$

Burada v_s^q, v_s^d ve v_s^0 qd0 referans çerçevesinin stator gerilim bileşenleri, $\lambda_s^q, \lambda_s^d, \lambda_s^0$ qd0 referans çerçevesinin stator akı bileşenleri ve i_s^q, i_s^d, i_s^0 ise qd0 referans çerçevesinin stator akım bileşenlerini ifade eder.

Aynı şekilde ASM rotor sargılarının (abc) eksen düzlemindeki gerilim denklemi (2.54)'teki gibi matris formunda yazılır.

$$[v_r^{abc}] = [R_r^{abs}][i_r^{abs}] + \frac{d}{dt} [\lambda_r^{abs}] \quad (2.54)$$

Üç faz eksen takımında tanımlanan gerilim akım ve akı uzay vektörleri üzerine $[T_{qd0(\beta)}]$ transformasyon işlemi uygulandığımızda

$$[T_{qd0(\beta)}]^{-1} [v_r^{qd0}] = [R_r^{abc}][T_{qd0(\beta)}]^{-1} [i_r^{qd0}] + \frac{d}{dt} [T_{qd0(\beta)}]^{-1} [\lambda_r^{qd0}] \quad (2.55)$$

elde edilir. Denklem (2.55)'nin her iki tarafını $[T_{qd0(\beta)}]$ ile çarptığımızda

$$[v_r^{qd0}] = [R_r^{abc}][T_{qd0(\beta)}]^{-1} [T_{qd0(\beta)}] [i_r^{qd0}] + [T_{qd0(\beta)}] \frac{d}{dt} [T_{qd0(\beta)}]^{-1} [\lambda_r^{qd0}] \quad (2.56)$$

Elde edilmiş olur. Bu denklem **EK A-2**'de basitleştirildiği gibi denklem (2.57)'de qd0 keyfi referans düzleminde rotor gerilim matrisi elde edilmiş olur.

$$\begin{bmatrix} v_r^q \\ v_r^d \\ v_r^0 \end{bmatrix} = (\omega - \omega_r) \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_r^q \\ \lambda_r^d \\ \lambda_r^0 \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_r^q \\ \lambda_r^d \\ \lambda_r^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_r^q \\ i_r^d \\ i_r^0 \end{bmatrix} \quad (2.57)$$

Burada v_r^q, v_r^d, v_r^0 qd0 referans çerçevesinin rotor gerilim bileşenleri, $\lambda_r^q, \lambda_r^d, \lambda_r^0$ qd0 referans çerçevesinin rotor akı bileşenleri ve i_r^q, i_r^d, i_r^0 ise qd0 referans çerçevesinin rotor akım bileşenlerini ifade eder.

2.4.2.2.2. Akı denklemleri

ASM üç fazlı stator sargılarının akı denklemleri aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$[\lambda_s^{abc}] = [i_s^{abc}][L_{ss}^{abs}] + [i_r^{abs}][L_{sr}^{abs}] \quad (2.58)$$

qd0 referans çerçevesindeki akı denklemleri, üç fazlı stator akı denklemleri transformasyon matrisi çarpmasıyla elde edilir.

$$[\lambda_s^{qd0}] = [T_{qd0(\theta)}][T_{qd0(\theta)}]^{-1} [i_s^{qd0}][L_{ss}^{abs}] + [T_{qd0(\theta)}][T_{qd0(\beta)}]^{-1} [i_r^{qd0}][L_{sr}^{abs}] \quad (2.59)$$

Yukarıdaki denklemi çözdüğümüzde

$$[\lambda_s^{qd0}] = \begin{bmatrix} L_{1s} + \frac{3}{2}L_{ss} & 0 & 0 \\ 0 & L_{1s} + \frac{3}{2}L_{ss} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{3}{2}L_{ss} \end{bmatrix} [i_s^{qd0}] + \begin{bmatrix} \frac{3}{2}L_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}L_{sr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [i_r^{qd0}] \quad (2.60)$$

elde edilmiş olur. Aynı şekilde üç fazlı rotor sargılarının akı denklemleri aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$[\lambda_r^{abc}] = [i_r^{abc}][L_{rr}^{abs}] + [i_s^{abs}][L_{rs}^{abs}] \quad (2.61)$$

qd0 takımında rotor akı bağlantılar aşağıdaki gibi elde edilir.

$$[\lambda_r^{qd0}] = [T_{qd0(\beta)}][T_{qd0(\beta)}]^{-1} [i_r^{qd0}][L_{rr}^{abs}] + [T_{qd0(\beta)}][T_{qd0(\theta)}]^{-1} [i_s^{qd0}][L_{rs}^{abs}] \quad (2.62)$$

Yukarıdaki denklem basitleştirildiğinde

$$[\lambda_r^{qd0}] = \begin{bmatrix} L_{1r} + \frac{3}{2}L_{rr} & 0 & 0 \\ 0 & L_{1r} + \frac{3}{2}L_{rr} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{3}{2}L_{rr} \end{bmatrix} [i_r^{qd0}] + \begin{bmatrix} \frac{3}{2}L_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}L_{sr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [i_s^{qd0}] \quad (2.63)$$

Burada $L_m = \frac{3}{2}L_{ss} = \frac{3N_s}{2N_r}L_{sr} = \frac{3N_s}{2N_r}L_{rr}$, ifadeleri denklem (2.60)' ve denklem (2.63)'te yerleştirdiğimizde denklem (2.64)'te olduğu gibi qd0 referans çerçevesinde tanımlı olan akı matrisi akımlar cinsinden elde edilmiş olur [27].

$$\begin{bmatrix} \lambda_s^q \\ \lambda_s^d \\ \lambda_s^0 \\ \lambda_r^q \\ \lambda_r^d \\ \lambda_r^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{1s} + L_m & 0 & 0 & L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_{1s} + L_m & 0 & 0 & L_m & 0 \\ 0 & 0 & L_{1s} & 0 & 0 & 0 \\ L_m & 0 & 0 & L_{1r} + L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_m & 0 & 0 & L_{1r} + L_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{1r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s^q \\ i_s^d \\ i_s^0 \\ i_r^q \\ i_r^d \\ i_r^0 \end{bmatrix} \quad (2.64)$$

Burada $\lambda_r^q, \lambda_r^d, \lambda_r^0, i_r^q, i_r^d$ ve i_r^0 statora indirgenmiş bileşenlerini ve L_{1r} ve R_r statora indirgenmiş rotor kaçak endüktansını ve direncini ifade eder. Denklem (2.64) akı denklemleri denklem (2.53) ve denklem (2.57) gerilim denklemlerine yerleştirdiğimizde, akımlar cinsinden gerilim denklemleri aşağıdaki gibi elde edilir.

$$V_s^q = R_s i_s^q + \frac{d}{dt} \lambda_s^q + \omega \lambda_s^d = i_s^q \left(R_s + \frac{d}{dt} (L_{1s} + L_m) \right) + \omega (L_{1s} + L_m) i_s^d + \frac{d}{dt} L_m i_r^q + \omega L_m i_r^d \quad (2.65)$$

$$V_s^d = R_s i_s^d + \frac{d}{dt} \lambda_s^d - \omega \lambda_s^q = i_s^d \left(R_s + \frac{d}{dt} (L_{1s} + L_m) \right) - \omega (L_{1s} + L_m) i_s^q + \frac{d}{dt} L_m i_r^d - \omega L_m i_r^q \quad (2.66)$$

$$V_s^0 = i_s^0 \left(R_s + \frac{d}{dt} L_{1s} \right) \quad (2.67)$$

$$V_r^q = R_r i_r^q + \frac{d}{dt} \lambda_r^q + (\omega - \omega_r) \lambda_r^d = i_r^q \left(R_r + \frac{d}{dt} (L_{1r} + L_m) \right) + (\omega - \omega_r) (L_{1r} + L_m) i_r^d + \frac{d}{dt} L_m i_s^q + (\omega - \omega_r) L_m i_s^d \quad (2.68)$$

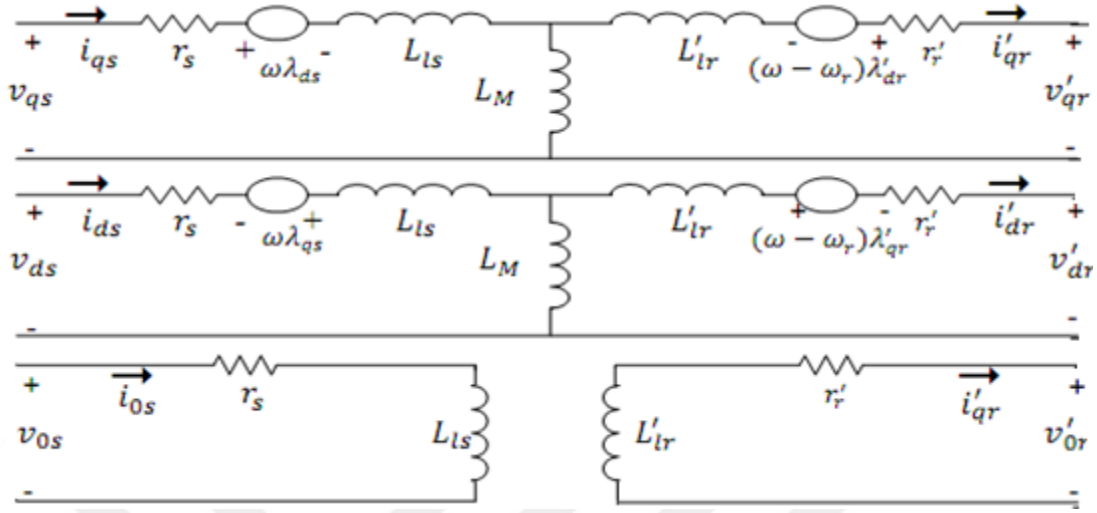
$$V_r^d = R_r i_r^d + \frac{d}{dt} \lambda_r^d - (\omega - \omega_r) \lambda_r^q = i_r^d \left(R_r + \frac{d}{dt} (L_{1r} + L_m) \right) - (\omega - \omega_r) (L_{1r} + L_m) i_r^q + \frac{d}{dt} L_m i_s^d - (\omega - \omega_r) L_m i_s^q \quad (2.69)$$

$$V_r^0 = i_r^0 \left(R_r + \frac{d}{dt} L_{1r} \right) \quad (2.70)$$

Denklem (2.65)'ten denklem (2.70)'e kadar denklemleri aşağıdaki matris şeklinde düzenlediğimiz ASM'un qd0 keyfi referans düzleminde genel gerilim matrisi qd0 akım bileşenleri cinsinden elde edilmiş olur.

$$\begin{bmatrix} v_s^q \\ v_s^d \\ v_s^0 \\ v_r^q \\ v_r^d \\ v_r^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + \rho(L_{1s} + L_m) & \omega(L_{1s} + L_m) & 0 & \rho L_m & \omega L_m & 0 \\ -\omega(L_{1s} + L_m) & R_s + \rho(L_{1s} + L_m) & 0 & -\omega L_m & \rho L_m & 0 \\ 0 & 0 & R_s + \rho L_{1s} & 0 & 0 & 0 \\ \rho L_m & (\omega - \omega_r) L_m & 0 & R_r + \rho(L_{1r} + L_m) & (\omega - \omega_r)(L_{1r} + L_m) & 0 \\ -(\omega - \omega_r) L_m & \rho L_m & 0 & -(\omega - \omega_r)(L_{1r} + L_m) & R_r + \rho(L_{1r} + L_m) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r + \rho L_{1r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s^q \\ i_s^d \\ i_s^0 \\ i_r^q \\ i_r^d \\ i_s^0 \end{bmatrix} \quad (2.71)$$

Burada $\rho = d/dt$ Operatörü gösterilmektedir. Denklem (2.53) ve denklem (2.57) kullanılarak ASM qd0 referans çerçevesinde eşdeğer devresi şekil 2.12'deki gibi düzenlenebilir.



Şekil 2.13. qd0 Keyfi referans düzleminde eşdeğer devresi.

2.4.2.2.3. qd0 Keyfi Referans düzleminde Mekanik Denklemleri

ASM stator ve rotor sargılarına uygulanan toplam anlık giriş gücü P_g stator ve rotor sargılarının toplam gücünden ibarettir.

$$P_g = v_{as}i_{as} + v_{bs}i_{bs} + v_{cs}i_{cs} + v_{ar}i_{ar} + v_{br}i_{br} + v_{cr}i_{cr} \quad (2.72)$$

Giriş gücü qd0 akım ve gerilim bileşenler cinsinden aşağıdaki gibi bulunur.

$$P_g = \left([T_{qd0(0)}]^{-1} \begin{bmatrix} V_s^q \\ V_s^d \\ V_s^0 \end{bmatrix} \right)^T [T_{qd0b}]^{-1} \begin{bmatrix} i_s^q \\ i_s^d \\ i_s^0 \end{bmatrix} + \left([T_{qd0\beta}]^{-1} \begin{bmatrix} V_r^q \\ V_r^d \\ V_r^0 \end{bmatrix} \right)^T [T_{qd0\beta}]^{-1} \begin{bmatrix} i_r^q \\ i_r^d \\ i_r^0 \end{bmatrix} \quad (2.73)$$

Bu denklemi çözdüğümüzde ASM'un toplam giriş anlık gücü denklemi aşağıdaki gibi elde edilmiş olur.

$$P_g = \frac{2}{3} (v_{qs}i_{qs} + v_{ds}i_{ds} + 2v_{0s}i_{0s} + v_{qr}i_{qr} + v_{dr}i_{dr} + v_{or}i_{or}) \quad (2.74)$$

Denklem (2.53) ve denklem (2.57) qd0 akım bileşenleri ile çarptığımızda denklem (2.75) teki gibi yazılır.

$$\begin{aligned}
v_s^q i_s^q &= i_s^q i_s^q R_s + \omega i_s^q \lambda_s^d + \rho i_s^q \lambda_s^q \\
v_s^d i_s^d &= i_s^d i_s^d R_s - \omega i_s^d \lambda_s^q + \rho i_s^d \lambda_s^d \\
v_r^q i_r^q &= i_r^q i_r^q R_r + (\omega - \omega_r) \lambda_r^d i_r^q + \rho \lambda_r^q i_r^q \\
v_r^d i_r^d &= i_r^d i_r^d R_r - (\omega - \omega_r) \lambda_r^q i_r^d + \rho \lambda_r^d i_r^d
\end{aligned} \tag{2.75}$$

Bu denklemler iR , ρli ve ωli olmak üzere üç çeşit güç ifadeleri içerir. Burada iR toplam bakır kayıpları, $i_s^q \lambda_s^q$, $i_s^d \lambda_s^q$ ve $\lambda_r^q i_r^q$, $i_r^d \lambda_r^d$ stator ve rotor sargılar arası değişen manyetik alan gücü ve ωli elektrikten mekaniğe dönüşen gücü gösterir. Motorda üretilen toplam elektrikten mekaniğe dönüşen güç P_{em} , $\omega i_s^d \lambda_s^q$, $\omega i_s^q \lambda_s^d$ ve $(\omega - \omega_r) \lambda_r^d i_r^q$, $(\omega - \omega_r) \lambda_r^q i_r^d$ terimlerin toplamından ibarettir.

$$P_{em} = \frac{2}{3} [\omega i_s^q \lambda_s^d - \omega i_s^d \lambda_s^q + (\omega - \omega_r) \lambda_r^d i_r^q - (\omega - \omega_r) \lambda_r^q i_r^d] \tag{2.76}$$

Üç fazlı ve P kutuplu ASM'un milden elde edilen tork T_{em} , güç cinsinden aşağıdaki gibi yazılır.

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\omega_g} = \frac{\frac{2}{3} [\omega i_s^q \lambda_s^d - \omega i_s^d \lambda_s^q + (\omega - \omega_r) \lambda_r^d i_r^q - (\omega - \omega_r) \lambda_r^q i_r^d]}{\frac{2\omega}{P}} \tag{2.77}$$

Burada ω_g motorun mekaniksel (geometrik) hızıdır. Denklem (2.64)'te verilen akı denklemlerinden $i_s^q \lambda_s^d - i_s^d \lambda_s^q = -(\lambda_r^d i_r^q - \lambda_r^q i_r^d) = L_m(i_r^d i_s^q - i_r^q i_s^d)$ olarak elde edilir. Buna göre denklem (2.77) yeniden düzenlendiğinde denklem (2.78)'deki gibi ASM için qd0 bileşenler cinsinden milde indüklenen gerçek tork ifadesi elde edilmiş olur.

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} L_m (i_r^d i_s^q - i_r^q i_s^d) \tag{2.78}$$

2.4.2.3.ASM'un qd0 sabit referans düzleminde modellenmesi

Sabit referans çerçevesinde ASM'un q eksenin stator sargıları, motorun a fazı ile sıfır açısız konumda yer almaktadır. Dolayısıyla a faz değişkenleri ile q bileşenleri aynı davranışlar sergilemektedir. Sabit referans düzleminde referans çerçevesi statora sabitlendiği için qd0

çerçevesinin açısal hızı sıfırdır. Denklem (2.71)'de $\omega = 0$ yerleştirildiğinde q_d0 sabit referans çerçevesinde genel gerilim matrisi denklem (2.79) hale gelmektedir.

$$(2.79) \quad \begin{bmatrix} v_s^q \\ v_s^d \\ v_s^0 \\ v_r^q \\ v_r^d \\ v_r^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + \rho(L_{1s} + L_m) & 0 & 0 & \rho L_m & 0 & 0 \\ 0 & R_s + \rho(L_{1s} + L_m) & 0 & 0 & \rho L_m & 0 \\ 0 & 0 & R_s + \rho L_{1s} & 0 & 0 & 0 \\ \rho L_m & -\omega_r L_m & 0 & R_r + \rho(L_{1r} + L_m) & -\omega_r(L_{1r} + L_m) & 0 \\ \omega_r L_m & \rho L_m & 0 & \omega_r(L_{1r} + L_m) & R_r + \rho(L_{1r} + L_m) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r + \rho L_{1s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s^q \\ i_s^d \\ i_s^0 \\ i_r^q \\ i_r^d \\ i_r^0 \end{bmatrix}$$

Duran eksen takımında açısal konumun ifadesi, denklem (2.40) transformasyon matrisinde yerleştirildiğinde 3 fazlı stator değişkenleri denklem (2.80)'de q_d0 duran referansına taşınmış olur.

$$(2.80) \quad \begin{bmatrix} f_s^{sq} \\ f_r^{sd} \\ f_0^{s0} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_s^a \\ f_s^b \\ f_s^c \end{bmatrix}$$

Üç fazlı dengeli bir ASM için $f_s^a + f_s^b + f_s^c = 0$ olduğundan denklem (2.80) yeniden aşağıdaki gibi yazılır.

$$(2.81) \quad f_s^{sq} = f_s^a \quad (2.82) \quad f_s^{sd} = \frac{1}{\sqrt{3}}(f_s^c - f_s^b)$$

Burada f_s^{sd} duran referans düzleminde q eksenin akım gerilim veya akı bileşenleridir, f_s^a ise üç faz düzleminde a faz gerilim, akım veya akı değişkenlerini ifade eder, dolayısıyla duran referans düzleminde statorun q eksenin bileşenleri ile stator a faz değişkenleri birbirine eşittirler.

Duran referans düzleminde akılar cinsinden gerilim denklemleri $\omega = \omega_s = 0$ olmasından stator ve rotor denklemleri denklem (2.83) ve denklem (2.84) gibi yazılır

$$\begin{aligned}
v_s^{sq} &= i_s^{sq} R_s + \rho \lambda_s^{sq} \\
v_s^{sd} &= i_s^{sd} R_s + \rho \lambda_s^{sd} \\
v_s^{s0} &= R_s i_s^{s0} + \rho \lambda_s^{s0}
\end{aligned}
\tag{2.83}$$

$$\begin{aligned}
v_r^{sq} &= i_r^{sq} R_r - \omega_r \lambda_r^{sd} + \rho \lambda_r^{sq} \\
v_r^{sd} &= i_r^{sd} R_r + \omega_r \lambda_r^{sq} + \rho \lambda_r^{sd} \\
v_r^{s0} &= R_r i_r^{s0} + \rho \lambda_r^{s0}
\end{aligned}
\tag{2.84}$$

Motorda indüklenen moment duran referans düzleminde denklem (2.85) gibi elde edilir.

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} L_m (i_r^{ds} i_s^{qs} - i_r^{qs} i_s^{ds}) \tag{2.85}$$

2.4.2.4.ASM'un qd0 rotor referans düzleminde modellenmesi

Rotor referans düzleminde rotorun q eksenini rotorun a faz eksenine denk gelmektedir. Dolayısıyla rotorun q eksenine ait değişkenler rotorun a fazı ile aynı davranışları göstermektedir. Rotor referans çerçevesinde qd0 dönme hızı $\omega = \omega_r$ ifadesi denklem (2.71)'de yerine yerleştirildiğinde rotor referans düzleminde gerilim denklemleri akımlar cinsinden denklem (2.86)'daki gibi düzenlenebilir.

$$\begin{bmatrix} v_s^q \\ v_s^d \\ v_s^0 \\ v_r^q \\ v_r^d \\ v_r^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + \rho(L_{1s} + L_m) & \omega_r(L_{1s} + L_m) & 0 & \rho L_m & \omega_r L_m & 0 \\ -\omega_r(L_{1s} + L_m) & R_s + \rho(L_{1s} + L_m) & 0 & \omega_r L_m & \rho L_m & 0 \\ 0 & 0 & R_s + \rho L_{1s} & 0 & 0 & 0 \\ \rho L_m & 0 & 0 & R_r + \rho(L_{1r} + L_m) & 0 & 0 \\ 0 & \rho L_m & 0 & 0 & R_r + \rho(L_{1r} + L_m) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r + \rho L_{1s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s^q \\ i_s^d \\ i_s^0 \\ i_r^q \\ i_r^d \\ i_r^0 \end{bmatrix}
\tag{2.86}$$

Rotor referans düzleminde $\omega = \omega_r$ 'dir, dolayısıyla rotorun açısal konumu $\beta = \theta - \theta_r = 0$ ifadesi $[T_{qd0(\beta)}]$ dönüşüm matrisinde yerleştirilerek üç fazlı rotor değişkenleri aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} f_r^{rq} \\ f_r^{rd} \\ f_0^{r0} \end{bmatrix} \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_r^a \\ f_r^b \\ f_r^c \end{bmatrix} \quad (2.87)$$

Üç fazlı rotor akımlarının toplamı dengeli koşullarda $f_r^a + f_r^b + f_r^c = 0$ olduğundan f_r^{rq} ve f_r^{rd} rotor bileşenleri denklem (2.87) aşağıdaki gibi düzenlenebilir.

$$f_r^{rq} = f_r^a \quad (2.88)$$

$$f_r^{rd} = \frac{1}{\sqrt{3}} (f_r^c - f_r^b) \quad (2.89)$$

Aynı şekilde sabit referans düzleminde olduğu gibi f_r^{rq} rotor referans düzleminde rotorun q eksenini akım gerilim veya akı bileşenleridir, f_r^a ise üç faz düzleminde rotor a faz gerilim, akım veya akı değişkenlerini ifade eder, dolayısıyla rotor referans düzleminde rotorun q eksenini bileşenleri ile rotorun a faz değişkenleri birbirine eşitirler.

Rotor referans düzleminde $\omega_r = 0$ olduğuna göre gerilim denklemleri aşağıdaki gibi yazılır.

$$\begin{aligned} v_r^{rq} &= i_s^{rq} R_s - \omega_r \lambda_s^{rd} + \rho \lambda_s^{rq} \\ v_r^{rd} &= i_s^{rd} R_s + \omega_r \lambda_s^{rq} + \rho \lambda_s^{rd} \\ v_r^{r0} &= R_s i_s^{r0} + \rho \lambda_s^{r0} \end{aligned} \quad (2.90)$$

$$\begin{aligned} v_s^{rq} &= i_r^{rq} R_r + \rho \lambda_r^{rq} \\ v_s^{rd} &= i_r^{rd} R_r + \rho \lambda_r^{rd} \\ v_s^{r0} &= R_r i_r^{r0} + \rho \lambda_r^{r0} \end{aligned} \quad (2.91)$$

Elektromanyetik tork stator ve rotor akım bileşenlerinin cinsinden aşağıdaki gibi yazılır.

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} L_m (i_r^{rd} i_s^{rq} - i_r^{rq} i_s^{rd}) \quad (2.92)$$

Rotor referans çerçevesi rotor değişkenleri ile ilgilendiğinde kullanılmaktadır. Bunu yanında hız kontrolü rotor tarafından yapılan ASM modellenmesinde ve kayma gücünü geri kazanma

gibi uygulamalarda kullanılması tercih edilmektedir [28,23]. Ayrıca denklem (2.91)'de görüldüğü gibi rotor referans düzlemi, rotor denklemleri rotor hızından bağımsız hale getirir. Dolayısıyla rotor tarafında meydana gelen arızaları ve dengesizliklerin qd0 referans düzleminde modellenmesi istendiğinde “rotor referans” düzleminin kullanılması daha avantajlıdır.

2.4.2.5.ASM'ların senkron hız ile dönen qd0 referans düzleminde modellenmesi.

Senkron olarak dönen referans düzleminde rotor ve stator değişkenleri senkron hızı ile dönen qd0 referans çerçevesine aktarılmaktadır. Referans çerçevenin hızı $\omega = \omega_e$ ve açılal pozisyon $\theta = \theta_e$ olması durumunda denklem (2.71), denklem (2.93)'teki gibi yine den düzenlenebilir.

$$\begin{bmatrix} v_s^q \\ v_s^d \\ v_s^0 \\ v_r^q \\ v_r^d \\ v_r^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + \rho(L_{1s} + L_m) & \omega_e(L_{1s} + L_m) & 0 & \rho L_m & \omega_e L_m & 0 \\ -\omega_e(L_{1s} + L_m) & R_s + \rho(L_{1s} + L_m) & 0 & -\omega_e L_m & \rho L_m & 0 \\ 0 & 0 & R_s + \rho L_{1s} & 0 & 0 & 0 \\ \rho L_m & (\omega_e - \omega_r)L_m & 0 & R_r + \rho(L_{1r} + L_m) & (\omega_e - \omega_r)(L_{1r} + L_m) & 0 \\ -(\omega_e - \omega_r)L_m & \rho L_m & 0 & -(\omega_e - \omega_r)(L_{1r} + L_m) & R_r + \rho(L_{1r} + L_m) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r + \rho L_{1s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s^q \\ i_s^d \\ i_s^0 \\ i_r^q \\ i_r^d \\ i_r^0 \end{bmatrix} \quad (2.93)$$

Senkron referans düzleminde gerilim ve moment denklemleri aşağıdaki gibi yazılır.

$$\begin{aligned} v_s^{eq} &= i_s^{eq} R_s + \omega_e \lambda_s^{ed} + \rho \lambda_s^{eq} \\ v_s^d &= i_s^{ed} R_s - \omega_e \lambda_s^{eq} + \rho \lambda_s^{ed} \\ v_s^{e0} &= R_s i_s^{e0} + \rho \lambda_s^{e0} \end{aligned} \quad (2.94)$$

$$\begin{aligned} v_r^{eq} &= i_r^{eq} R_r + (\omega_e - \omega_r) \lambda_r^{ed} + \rho \lambda_r^{eq} \\ v_r^{ed} &= i_r^d R_r - (\omega_e - \omega_r) \lambda_r^{eq} + \rho \lambda_r^{ed} \\ v_r^{e0} &= R_r i_r^{e0} + \rho \lambda_r^{e0} \end{aligned} \quad (2.95)$$

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} L_m (i_r^{ed} i_s^{eq} - i_r^{eq} i_s^{ed}) \quad (2.96)$$

Senkron referans düzleminde referans hızı stator ve rotor sargılarının emk dalgaların elektriksel hızına eşit olduğu için stator ve rotor sargılarına ait değişkenlerin değişimi DC dalga şeklinde olur. Senkron referans düzlemi 3 fazlı sinüzoidal şeklindeki giriş değişkenleri dc niceliklere

dönüştürür. Dolayısıyla bu model küçük sinyaller denklemlerin geliştirilmesinde olduğu gibi kararlı haldeki değişkenlerin değerlerinin dc formunda istenmesi gereken uygulamalarda kullanır. Bunun yanında yüksek performanslı kontrol algoritmalarında kontrol girişlerinin tahmin edilmesinde ve ASM'un vektörel kontrolünde olduğu gibi moment ve akı ifadelerin ayrıştırılması dc makinelere benzer bir şekilde yapılmasına olanak sağladığı için de tercih edilir. Ayrıca Stator ve rotor voltajlar dengeli ve sürekli ise bu uygulamalarda tercih edilmektedir. Senkron referans Stator ve rotor tüm voltajlar dengeli ve sürekli ise kullanılması en uygun referans sistemidir [28,21,23].



3. ASENKRON MOTORLARDA OLUŞAN DENGESİZLİKLER VE ARIZALAR

ASM'lar çoğunlukla zorlu endüstriyel ortamlarda kullanıldıkları için, çalışma esnasında beklenmedik zorlanmalara maruz kalması sonucunda motorun elektriksel veya mekanik kısımlarında olası arızalar meydana gelebilir. Genel olarak stator ve rotor yapısı, motorun simetrik özelliklerini sağlayacak şekilde tasarlanır, ancak herhangi bir sebepten dolayı oluşan arızalar bu simetriği bozmaktadır. Asimetrikler, makinelerde dengesiz hava aralığının, gerilimlerin ve akımların oluşumu, uzay harmonilerinde artış, ortalama momentte azalma, moment darbelerinde artış, kayıpların artması ve verimliliğin azalması gibi sorunlara yol açmaktadır [29]. Temel olarak ASM'larda arızalar, elektriksel, mekaniksel, çevresel ve termal zorlanmalar sonucunda meydana gelmektedirler. ASM'larda en sık rastlanan arızalar stator sargılarının açık veya kısa devre olması, rotor çubuklarının veya halkalarının kırılması, eksen kaçıklığı ve rulman arızalarıdır. IEEE Industry Applications Society (IAS) Working Group ve Electrical Power Research Institute (EPRI) tarafından motor arızaları için yapılan istatistiksel çalışmaların sonuçları Tablo 3.1'de gösterilmektedir [30,31].

Tablo 3.1. ASM'lerde Arızaların yüzdesi istatistiksel.

Arıza bileşenleri	IEEE(IAS)	EPRI
Rulman arızaları	%44	%41
Stator Sargı arızaları	%26	%36
Rotor arızaları	%8	%9
Diğer arızalar	%22	%14

3.1. Arızalara Neden Olan Faktörler

Stator, rotor ve rulmanlara dayalı arızalar genelde elektriksel, mekaniksel, termal ve manyetiksel zorlanmalar sonucunda meydana gelmektekilere [32].

1. Elektriksel zorlanmalar: dengesiz gerilim ve akım dalgaları, aşırı gerilimler ve akımlar, sargıların dengesiz dağılımı, izolasyon malzemesinin içine istenmeyen malzeme karışması ve sargıların açık veya kapalı devre sonucunda oluşan zorlanmalar.
2. Mekaniksel zorlanmalar: Rotor yataklarının yıpranması ve çatlaması, izolasyonda genişlemelerin ve daralmaların meydana gelmesi ve merkezkaç kuvveti etkisi nedeniyle oluşan zorlanmalar.

3. Termal zorlanmalar: aşırı yükleme, yetersiz soğutma, kısa aralıktaki motorun tekrar çalıştırılması ve yüksek ortam sıcaklığından kaynaklanan sıcaklıktaki artış.
4. Manyetik zorlanmalar: hava aralığının dengesiz olmasından kaynaklanan dengesiz manyetik kuvvetten dolayı oluşan zorlanmalar.

3.2. Arızaların Motor Performansı Üzerindeki Etkiler

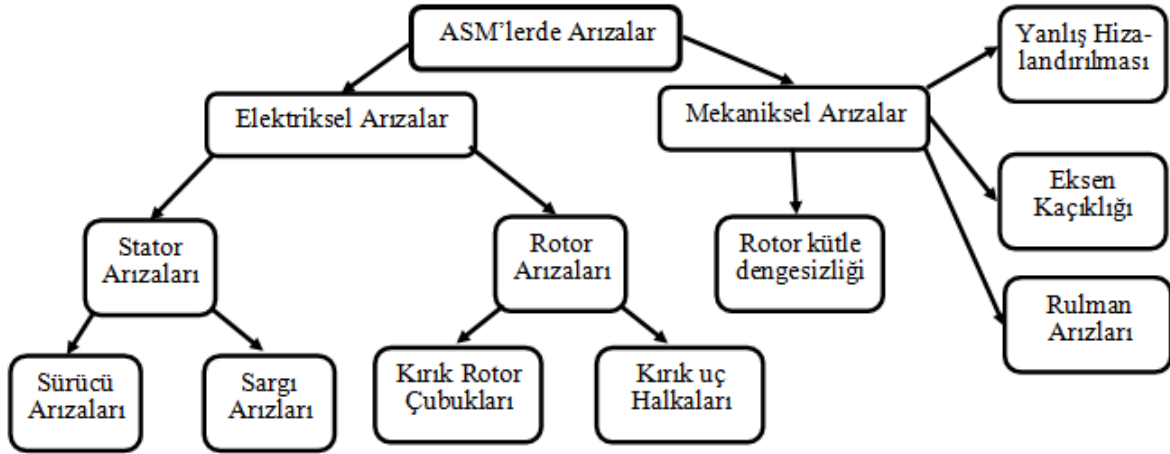
ASM'un matematiksel modeli tüm parametrelerin birbirine bağlı olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla motorda meydana gelen herhangi bir arıza var olan hatayı arttırmak ile kalmayıp arızanın ileri boyutlara gitmesi durumlarda diğer arızaların oluşumuna da neden olmaktadır. Arızaların motor üzerindeki yaygın etkiler aşağıdadır

1. Rotor kaynaklı arızalar durumlarında rotor çubuklarının veya halkalarının kırılmasından rotorun sağlam barlarından akan akım yükselmektedir. Dolayısıyla kayıp artmaktadır
2. Stator kaynaklı arızalar durumlarında izolasyon bozulmasından motor uçlarında gerilim sıçramaları ve düşmeler ve aşırı ısı meydana gelmektedir.
3. Rulman arızalarına dayalı dengesiz manyetik kuvvetlerden dolayı stator ve rotorun birbirine sürtünmesi, hava aralığının değişken olmasından ortak endüktansların dalgalanması ve mekanik titreşimlerin oluşması.

3.3. ASM'larda Arızaların Sınıflandırılması

Genel olarak ASM'larda arızalar iki kategoride toplanabilir [33].

- a. Elektriksel arızalar: stator sargılarının açık veya kısa devre olması, dengesiz akımlar ve gerilimler, düşük veya aşırı akımlar ve gerilimler, toprak arızaları, sargı-sargı arası arızalar, güç invertörlerde meydana gelen tek anahtar kısa devre, tek anahtar açık devre ve tek faz açık devre ve rotor arızaları.
- b. Mekaniksel arızalar: eksen kaçıklığı, rulman arızaları, kütle dengesizliği ve kurulum hataları.



Şekil 3.1 ASM'lerde arızaların sınıflandırılması.

3.3.1. Elektriksel Arızalar

Elektriksel arızalar ASM'lerde toplam arızaların %48'ini oluşturmaktadır. Elektriksel kısımlarda en sık görülen arızalar stator ve rotor arızalarından oluşmaktadır.

3.3.1.1. Stator sargılarında meydana gelen arızalar

ASM'ların elektriksel kısmında görülen arızaların %35-40'ı stator sargılarından kaynaklanan arızalardan oluşmaktadır [34]. Genel olarak stator sargı arızaları stator sargılarının kısa devre olması veya açık devre olması şeklinde görülmektedir. Stator sargı arızaları aynı fazda bulunan iki komşu sarım arası yalıtım hatası ile başlar, sarım-sarım arası oluşan kısa devre durumunda sargılardan akan akım değerleri yükselecek, dolayısıyla makinede aşırı ısı yüklemeye olayı ve döner manyetik alanda dengesizlik meydana gelecek. Artan ısı değerlerinin sargıların yalıtımını ortadan kaldıracak değerlerine ulaşması durumunda motorda faz arızaları, faz-faz arası arızalar ve faz-toprak arası arızaların oluşumuna sebep olacak.

Stator arızaları genel anlamda üç grup altında toplanabilir [34].

- Çekirdek sıcaklığı ve çekirdek gevşemesi gibi laminasyolara dayalı arızalar.
- Titreşim, Eddy akım, soğutma kaybı ve toprak arızaları kaynaklı gövde arızaları.
- Stator sargılarının arızaları: stator sargılarında meydana gelen arızaların en yaygın olarak son sargı kısmında (yalıtım bozulması, izolasyonun yağ nem veya kir ile bulaşmış olması, yalıtım çatlaması ve yalıtım erozyonu) veya oluk kısmında (yalıtkanın bozulması veya yalıtım aşınması) oluşmaktadır [35].

ASM’larda ısısal, elektriksel, mekaniksel ve çevresel zorlamalar statorda arızaların oluşumuna yol açmaktadır [34,35]

a. Isısal Zorlamalar:

Stator sargılarında ısısal zorlamalar, termal yaşlanmalar, aşırı ısı yükleme ve çevrimden kaynaklanmaktadır. Genel bir kural olarak sıcaklıktaki her 10C’lik bir artış termal yaşlanmadan dolayı sargı yalıtım ömrünü %50 oranında azaltmaktadır [31]. Stator sargıların yalıtım sıcaklığı çok yüksek olmadığı zaman motor çalışma esnasında termal yaşlanmaya maruz kalabilmektedir. Sargı yalıtım direncinin zayıf olması, motorun normal çalışma durumunda bile mekaniksel ve çevresel hatalara neden olabilmektedir. Sıcaklığın termal yaşlanma üzerindeki etkisi minimuma indirilebilmesi, çalışma sıcaklığının azaltılması veya yalıtım direnci yüksek olan malzemelerin kullanılmasıyla mumken olur [34,36].

Termal aşırı ısı yüklenmesi, stator sargılarına uygulanan üç faz gerilimdeki dalgalanmalar, faz gerilim dengesizlikleri ve yük dengesizliklerinden kaynaklanmaktadır. NEMA (MG-12-43) standartlarına uygun olarak tasarlanmış ASM’ların, gerilim değişiminin ± 10 dışında çalıştırılması motorun ömrünü önemli ölçüde azaltmaktadır. Bunun yanında yapılan çalışmalarda faz başına her %3,5 voltaj dengesizliği akım değeri en yüksek olan sargıda %25 oranında sargı sıcaklığının artırılmasına sebep olur [36].

Uygulanan yüke bağlı olarak başlatma anında nominal akım değerinin 8-10 katından fazla akım çektiği için ASM’lar çevrimler sırasında termal zorlamaya maruz kalmaktadır. Motorlarda yol verme zamanının uzun tutulması veya motorun kısa bir süre içinde tekrar başlatması sargı sıcaklığının hızlı bir şekilde artırılmasına ve sargılarda izolasyon kasılmasına yol açmaktadır.

b. Mekaniksel zorlamalar

ASM’larda mekaniksel zorlamalar genelde stator sargı hareketlenmelerinden ve rotorun statora temaslı olmasından kaynaklanmaktadır [34].

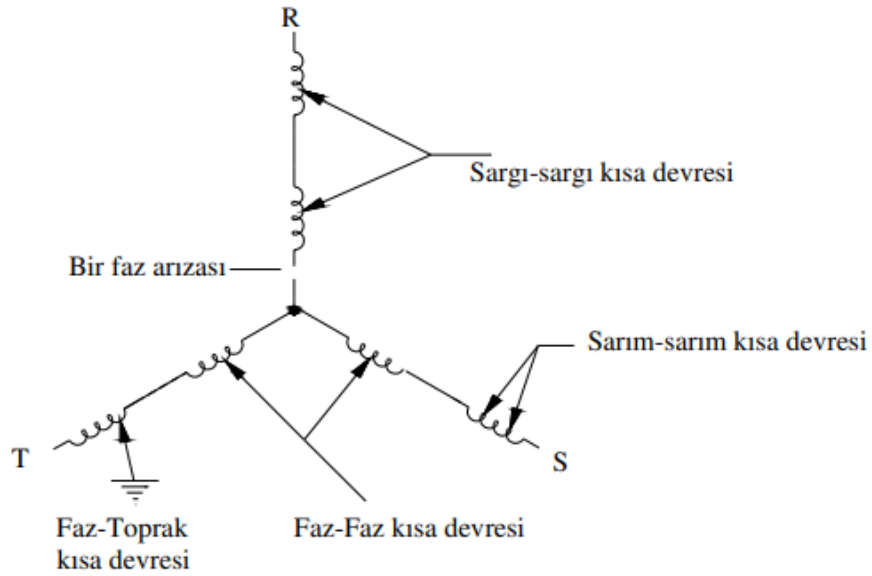
Motorun ilk başlatma esnasında stator sargılarından geçen yüksek akımlardan dolayı sargı üzerinde oluşan yüksek kuvvet, sargıların hem radyal ve hem de teğetsel yönde hat akım frekansının iki kat frekansında titreşim yapmasına yol açmaktadır. Söz konusu titreşimler sargılarda izolasyonu ortadan kaldırabilir ve bakır iletkenlere zarar verebilir [36].

Rotor, yatak arızaları, şaft sapması ve rotordan statora yanlış hizalamanın bir sonucu olarak stator ile temas halinde olmasından dolayı sargılar zarar görebilir. Rotorun stator ile sürtünmesi motorun geçici rejim bölgesinde meydana gelirse rotorun kuvveti stator laminasyonlarının sargı yalıtımının delmesine ve sargı topraklanmasına neden olmaktadır. Motorun tam hızda çalışma durumunda rotorun statora çarpması sonucunda temas noktasında aşırı ısı yüklemeyen dolayı sargının stator oluklarında erken topraklanmasına neden olur [34,36]

c. Elektriksel zorlamalar

Genel olarak dielektrik, korona, aşırı akımlar ve gerilimler ve geçici gerilimler gibi elektriksel zorlamalar stator sargılarında sarım-sarım ve sargı- faz kısa devresi gibi arızalara yol açmaktadır.

ASM'lerde stator arızaları sarım-sarım kısa devresi, sargı-sargı kısa devresi, faz-faz kısa devresi ve faz-toprak kısa devresi şeklinde görülür.



Şekil 3.2. Stator sargılarının arıza tipleri[19]

3.3.1.2. Rotor arızaları

ASM'lardaki rotor arızaları, toplam arızaların %5-10'unu oluşturur [37]. Rotor arızaları, esas olarak rotor çubuklarının veya uç halkalarının çatlaması veya kırılması sonucunda oluşur. Genelde düşük sınıflı Sincap kafesli ASM'un kısa devre çubuklu rotor yapımında kalıp düküm teknikleri kullanılmaktadır. Bazen kalıp düküm sırasında düküm malzemesinin düzensiz dağılımı veya çubukların ve uç halkaların erimesi, rotor yapısında asimetriklerle sebep olmaktadır. Bunlara ilaveten rotorda arıza oluşmasına neden olan ana etkenler aşağıdaki gibi sıralanabilir [8,38,39].

- Rotor düküm malzemesinde meydana gelen arklı akım, homojen olmayan ve aşırı termal yüklemelerden kaynaklanan termal zorlamalar.
- Elektromanyetik gürültüler, simetrik ve simetrik olmayan elektromanyetik kuvvetler ve elektromanyetik kuvvetlerdeki titreşimlerden kaynaklanan manyetik zorlamalar.
- Ağır uç halkalardan kaynaklanan merkezkaç kuvvetleri, salınımsal kuvvetler ve mildeki yük momentinden kaynaklanan dinamiksel zorlamalar.
- Çevresel olumsuz faktörler.
- Üretim hataları.
- Motor parçalarının eskimesi (metal yorulması), rulman arızası ve rotorun statora sürtünmesinden meydana gelen mekaniksel zorlamalar.

Yukarıdaki etkenlerden dolayı rotorda rotor çubuklarının kırılması, kısa devre halkalarda kırılma, rotor merkez kaçlığı ve milde eğilme meydana gelebilir.

Rotor çubuğu kırılması: Rotorda arızalar genelde rotor çubuğundaki direnci yüksek olan bölgeden başlar. Rotor çubuklarının herhangi birisinde kırılma oluştuğunda komşu çubuklardan akan akım değerleri yükselecek, dolayısıyla aşırı akımdan dolayı arızalar komşu çubuklara da sıçramış olacak. Böylece arızaya karşı erken aşamada müdahale edilmediği takdirde daha fazla sayıda çubukların kırılmasına sebep olacaktır. Rotor çubuklarının kırık olması rotorda akım dengesizliğe ve moment salınımlarına, dolayısıyla ortalama torkun azalmasına neden olmaktadır [38,39].

Kısa devre halkalarında kırılma: kısa devre halkaları, rotor çubukları her iki tarafta kısa devre etmektedir. Herhangi bir sebeple oluşan kuvvetler sonucunda kısa devre halkalarında meydana gelen kırılma, rotorun eşdeğer devre direncinin değişmesine neden olur. Değişen

eşdeğer direnç nedeniyle rotorda kısa devre akımlar artar, bu nedenle aşırı akım nedeniyle motorun belirli bölgelerinde aşırı ısı oluşur. Özellikle motorun ilk kalkış süresinin uzun tutulması veya sıkça çalıştırılma gerektiğinde bu arızanın boyutu daha ilerler [8,39].

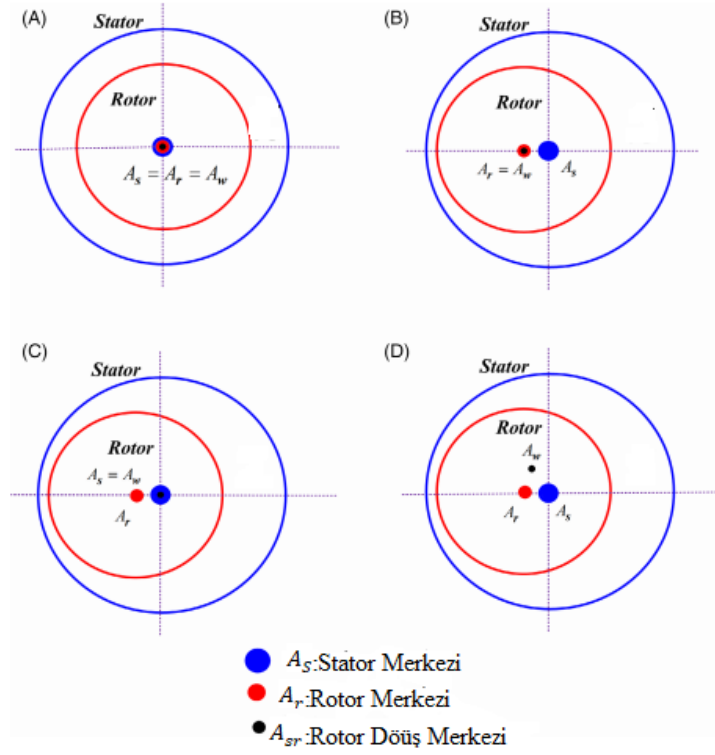
3.3.2. Mekaniksel arızaları

ASM’larda mekaniksel kısmında en çok görülen arızaları eksen kaçıklığı ve rulman arızalarından oluşmaktadır.

3.3.2.1.Eksen kaçıklığı

ASM’ların nominal güç değerleri göz önünde bulundurularak en iyi elektromanyetik performansı elde etmek için hava aralığının olabildiği kadar küçük boyutlarda olması gerekmektedir. Dolayısıyla üretim aşamasında veya motorun çalışma sırasında hava aralığında meydana gelebilecek en ufak bir kayma motorda manyetiksel ve mekaniksel sorunlara neden olmaktadır. Hava aralığının sapma sonucunda ASM’lerde en çok görülen hatalar ise Eksen kaçıklığıdır.

Eksen kaçıklığı, stator ile rotor arasında olan hava aralığının homojen olmayan bir şekilde dağılımından ortaya çıkmaktadır. Hava aralığının düzgün olmayışı makinelerde stator ve rotorun ortak eksen sapmasına sebep olmaktadır. Genel olarak dönen makinelerde stator eksen, rotor eksen ve rotorun dönen eksen olmak üzere üç eksen bulunmaktadır, sağlam ve ideal bir ASM’da bu üç eksenler birbirine çakışık vaziyette yer almaktadır. Eksen kaçıklığı bu üç eksenlerin birinin diğerinden veya tüm eksenlerin birbirinden ayrılma sonucunda meydana gelmektedir [40,41].



Şekil 3.3. Eksen Kaçıklığı durumunda stator, rotor ve rotor dönüş merkezlerinin yer değişimi[40].

Eksen kaçıklığı genelde aşağıda sıralanan nedenlerden kaynaklanmaktadır [40,41,42].

- Yük eksenini ve rotor milinin yanlış hizalanması,
- Üretim aşamasında rotorun stator merkezine düzgün bir şekilde yataklanmaması,
- Dengesiz yük ve milin eğilmesi,
- Kritik hızda mekanik gürültüler,
- Mekanik parçaların aşınması,
- Üretim aşamasında bilyeli rulmanların yanlış yerleştirilmesi,
- Rotor veya stator yüzeyinin oval şeklinde olması,
- Kötü üretim toleransları.

Eksen kaçıklığı makinelerde dengesiz manyetik kuvvetlerin oluşmasına neden olur, eksen kaçıklığı büyümesi durumunda dengesiz manyetik kuvvetler kartopu gibi etkisi daha da artma sonucunda stator rotora sürünecek ve bu da stator ve rotorda hasarın ortaya çıkmasına neden olacaktır. Temel olarak eksen kaçıklığı aşağıdaki sorunlara sebep olmaktadır [43].

- Hava aralığının akısının, gerilimlerin ve hat akımının dengesizliği,
- Hız ve moment darbelerinde artış,
- Ortalama momentte azalma,
- Kayıpların artışı ve verimde azalma,
- Termal aşırı ısı yüklenmesi.

Genelde ASM’larda Eksen kaçıklığı statik eksen kaçıklığı (SEK), dinamik eksen kaçıklığı (DEK) ve ikisi de bir arada bulunan karma eksen kaçıklığı ((KEK) olmak üzere üç şekilde ortaya çıkmaktadır [44].

Statik eksen kaçıklığı: SEK stator ekseninin rotor ekseninden sabit bir kayma pozisyonunda yer alması durumunda meydana gelmektedir. Statik eksen kaçıklığı durumunda hava boşluğunun en yüksek ve en küçük kısımlarında rotorun kendi eksenini etrafında dönmesi nedeniyle stator perspektifinden bakıldığında sabit kalmaktadır [33]. Statik eksen kaçıklığı statorun oval şeklinde olmasından veya statorun ve rotorun yanlış yataklanmasından kaynaklanmaktadır.

Dinamik eksen kaçıklığı: DEK rotor merkezinin rotor dönüş merkezinden ayrılma sonucu olarak meydana gelir. Dinamik eksen kaçıklığı durumunda, stator eksenini ile rotor eksenini arasında dinamik bir kayma meydana gelir. Rotor, stator dönüş eksenini etrafında dönerken, hava boşluğu rotorun dönüşüyle değişir ve küçük hava boşluğunun konumu da rotor dönüşüyle birlikte döner. Dinamik eksen kaçıklığı, motorlarda rotor mildeki eğiklik, rulmanların aşınması ve mekanik gürültüler gibi nedenlerden meydana gelmektedir [40,44].

Karma eksen kaçıklığı: KEK durumunda stator merkezi, rotor merkezi ve rotor dönüş ekseninin birbirinden ayrılma sonucunda ortaya çıkar. Aslında ASM’larda dengesiz manyetik kuvvetinden dolayı statik ve dinamik eksen kaçıklığının bir arada bulunma olasılığı daha yüksektir [44].

3.3.2.2.Rulman arızaları

Rulmanlar motorlarda tek başına arızaların %41’ni oluşturmaktadır. Rulman, milin her iki ucunda bulunan dış ve iç halkalardan ve bu iki halka arasına yayılmış bilyelerden oluşur. Rulmanlar rotoru yerinde tutar ve sürtünmeyi azaltarak serbestçe dönmesine yardımcı olur. ASM’lar dinamik ve dengesiz yükler altında çalıştırıldığında rulmanlarda yorulma meydana

gelir, bunun bir sonucu olarak rulmanların iç ve dış halkalarında yıpranma oluşmaktadır. Böylece yıpranmış rulmanlarda gürültü ve titreşimin devam etme ve artma sonucunda halkalardan veya bilyelerden küçük parçalar kopar. Kopan parçalar yağ ile iç kısımlara dağılacak. Sonuçta halkalar ve bilyeler arası oluşan sürtünme rulmanların bozulmasına yol açacak. [33,44]

Özet olarak rulman arızalarına sebep olan etken şöyle sıralanabilir [33].

- Aşırı yükler ve aşırı sıcaklar: bu iki etken rulmanların bileziklerine ve bilyelere zarar verebilir, yükler rulmanların elastik sınırını aştığında rulmanlarda aşınma meydana gelir, aşırı ısınma rulman yağında ve dolayısıyla rulmanlarda arızaya yol açmaktadır.
- Yorulma arızaları: rulmanların uzun süre çalışma, halkaların ve bilyelerin yüzeylerinden küçük parçaların ayrılmasına yol açmaktadır, bu tip arızaların ilerlemesiyle beraber motorda gürültülerin ve darbelerin seviyeleri yükselmektedir.
- Rulmanların yanlış yataklanmaları: bunun sonucunda rulmanların yüzeylerinde aşınma oluşur ve bu da rulmanların sıcaklığının artmasına neden olmaktadır.
- Kirlenme: Rulman arızalarının en önde gelen etkenlerdir, ortamda bulunan kirler ve parçacıkların rulman halkaları arasına ulaşması veya yıpranmış bilyelerin parçaların yağlayıcı madde ile kirlenme sonucunda rulmanların daha kısa sürede bozulmasına yol açmaktadır.

3.4. ASM’larda Arıza Tespiti ve Durum İzleme Yöntemleri

ASM’larda öngörülemeyen ve kontrol edilemeyen arızalar büyük ekonomik kayıplara neden olabilir, motor performansını düşürebilir ve arıza çevreye ve insan sağlığına ciddi şekilde zarar verebilir. Bu bakımdan arızaların tespiti ve kontrolü makinelerde ele alınması gereken konulardır. ASM’ların çalışma boyunca sağlık durumunun değerlendirilme süreci, durum izleme olarak adlandırılır. Durum izleme yöntemlerinde, kısa süreler içerisinde motordan alınan bilgilerin değerlendirilmesi sonucunda arıza tespiti yapılır. Böylece fazla zaman kaybı olmadan arızalar erken evrede tespit edilir, sağlıklı motor bilgilerini kullanarak yaklaşan arızalar hakkında erken uyarı alınabilir. Ayrıca motor durum izleme sayesinde mevcut olan periyodik bakımlar azaltılabilir ve yaklaşan arıza için gereken bakım ihtiyaçlarına dair ön

bilgi elde edilebilir, böylece arıza kesinti süresi azaltılabilir ve optimum bakım programları sonucunda plansız ve aniden gelen arızalar önlenabilmektedir [45,46].

Durum izleme ASM'lerde aşağıda sıralanan avantajlardan dolayı uygulamalarda önem taşımaktadır [29]

- Bakım maliyetini düşürmek
- Ekipman arızasını tahmin etmek
- Ekipman ve bileşen güvenilirliğini geliştirmek için
- Ekipman performansını optimize etmek ve Arıza tahmininde doğruluğu artırmak.

ASM'lerde durum izleme ve arıza teşhisi süreci şekil 3.4'te gösterildiği gibi 4 aşamadan oluşmaktadır [8,49].



Şekil 3.4. Durum izleme ve arıza teşhisi süreci.

ASM'larda oluşan herhangi bir arıza, stator sargı akımlarında asimetrikliğe ve stator ile rotor arasında döner manyetik alanının bozulmasına neden olmaktadır, bunlar hava aralığının harmoniklerin dağılmasına sebep olmaktadır. Genel olarak arızlar sonucunda motorlarda oluşan etkiler şunlardır [44,46].

- Dengesiz döner manyetik alanın oluşması,

- Ortalama momentte düşüş ve titreşimler,
- Kayıpların artması ve verim azalması
- Ortak endüktanslarının değişimi,
- Hat akımında harmoniklerin oluşumu,
- Isı artışı.

ASM’larda durum izlemesi için birçok yöntemler kullanılmıştır bunlardan bazıları aşağıdaki gibiler.

3.4.1. Termal izlemeler

ASM’larda arızalar belirli bölgelerde ısı ölçümüyle veya parametrelerin tahmin yöntemiyle kolay bir şekilde tespit edilebilir. Arızaların yeri veya tipi, stator veya rotor arızalarından kaynaklanan aşırı akım ve gerilimlerin veya rulman arızalarının sonucunda oluşan sıcaklıktaki değişimi sargılara monte edilmiş veya izolasyon malzemelerinin içerisine gömülmüş sensorlar yardımıyla tespit edilebilir. Bunun yanında açık havalandırma sağlandığında ve soğutma ve çevre sıcaklık etkisi dikkat alınarak Sonlu eleman analizi tabanlı model ve Toplu Parametrelili Termal Modeller ısı tahmin yöntemleri kullanılarak ısı değişimi izlenebilir [29,36].

3.4.2. Moment izleme

Genellikle ASM’larda arızaların tümü indüklenen momentin özel frekanslarında yan bantlar üretir. Moment izleme motorda stator kısa devre arızalarının ve kırık rotor çubuğu arızalarının teşhisi için kullanılabilir, ancak indüklenen momentin doğrudan ölçümü zor olduğu için motora ait matematiksel model kullanılarak tahmin yolu elde edilen momentlerdeki fark rotor ve stator arızaları için bir fikir verebilir [34].

ASM’larda stator ileri yöndeki momenti ile geri yönde kalan rotor momenti arasında etkileşim sonucunda harmonik moment oluşur, sağlıklı ASM’lerde bu harmonikler sıfır frekans içeriyor, arızalı durumda ise harmoniklerde yan bantlar oluşur, dolayısıyla bu iki momentlerin izlenmesi ile motorda arıza teşhisi yapılabilmektedir.

3.4.3. Gürültü izlenme

ASM’larda gürültüler genelde hava aralığının motorun dönen parçalar ile etkileşimi sonucunda ve elektromanyetik kuvvetlerden kaynaklanan titreşimler sonucunda oluşmaktadır. Buna ek olarak gürültülerin en önemli kaynağı akustik gürültülerdir.

Gürültü izleme ile ASM’larda rotor veya rulman arızalarının nedeniyle meydana gelen merkez kaçlığı sonucunda oluşan akustik gürültülerin spektrumu ölçülerek ve analiz edilerek yapılır. Ancak, endüstriyel sistemlerde, ASM’un etrafındaki diğer makinelerden gelen gürültü, gürültü izleme yönteminin doğruluğunu ve pratik kullanımını azaltır [47].

3.4.4. Titreşim izleme

Tüm elektrik motorlar çalışma sırasında belirli seviyelerde titreşim üretmektedir. Elektrik motorlarda titreşim genelde manyetik, mekanik ve erodinamik kuvvetlerden meydana gelmektedir. Elektrik makinelerde titreşimin en önemli kaynağı ise hava boşluğunda oluşan radyal kuvvetlerdir. Hava boşluğundaki manyetik akı yoğunluğu elektromanyetik kuvvete bağlı olduğundan ve elektromanyetik kuvvetler stator ve rotor akımlarının bir fonksiyonu olduğu için stator veya rotor akımlarından gelen dengesizlik hava aralığının akı yoğunluğunu doğrudan etkilemektedir. İdeal bir ASM’da güç kaynağında az da olsa bile dengesizlik hava aralığının dağılımında belirli seviyelerde titreşim üretir, ancak herhangi bir arızadan dolayı var olan titreşim seviyeleri yükselecek, dolayısıyla titreşim sinyali analiz edilerek motorda oluşan, eksen kaçıklığı, dişili hataları, rulman arızaları ve stator veya rotorda oluşan dengesizlikleri kolay bir şekilde tespit edilebilir [8].

Titreşim izleme yöntemi, ASM’larda arıza tespiti için etkili bir yöntem olsa da titreşimi ölçmek için kullanılan piezoelektrik dönüştürücülerin yüksek maliyeti nedeniyle bu yöntem sınırlı uygulamalarda tercih edilmektedir [33,45]

3.4.5. Ani açısal hız izleme

ASM’lardaki arızaların dinamik davranışı, rotor anlık hızı analiz edilerek teşhis edilebilir. Rotor anlık açısal hızı, rotorun bir shaft dönüşünden kaynaklanan açısal hız değişimini göster. Dengesiz besleme gerilimlerinden veya stator sargı arızalarından kaynaklanan titreşim sinyallerinin frekans spektrumu incelendiğinde, kaynak frekansın iki katı frekansa sahip

bileşenler içerdği görülmektedir. Bu tür arızalar, açısal anlık hız yöntemleri kullanılarak titreşim sinyallerinin izlenmesiyle teşhis edilebilir. [38]

3.4.5. İndüklenen gerilim izlenmesi

Stator sargılarına uygulanan besleme geriliminin kesilmesi nedeniyle stator sargılarından akan akımın sıfır olduğu durumlarda veya stator sargılarındaki yalıtım arızası sonucunda rotor akımları stator sargılarında ve şaft boyunca gerilim indüksiyonu meydana getirir. Genelde küçük arızaların sonucunda milde indüklenen gerilimlerin seviyeleri düşüktür, ancak stator sargılarında büyük hasar meydana geldiğinde indüklenen gerilim ölçülebilir hale gelir, dolayısıyla indüklenen gerilim izleme yönteminin arıza teşhisi için kullanılması yaygın değildir [34,48].

3.4.6. Kısmi boşalma izlenmesi

Kısmi deşarj olayı, yalıtım bozulma sonucunda motorda meydana gelen küçük elektriksel boşalmalardır. Bozulmuş bir sargı yalıtımının sağlam durumdakine göre 30 kat veya daha fazla kısmi boşalmaya sahip olma özelliğinden yararlanarak, stator sargı arızaları ve sargı yalıtım ömrü hakkında fikir elde edilebilir. Bunun sonucu olarak stator sargı bakımı çevrimiçi bir deşarj test ile kolay bir şekilde izlenebilir [34,36]

3.4.7. Anlık elektriksel güç izleme

ASM'lerde anlık elektriksel güç, senkron hızdan bağımsız olarak, arıza durumlarında bozucunun frekansı ile doğrudan ani güç spektral bileşeninde gözüktüğünden güvenebilir bir arıza tespit yöntemidir [19].

3.4.8. Akım izleme yöntemi

Akım izleme yönteminde stator akımı analiz edilerek hata tespiti kolay bir şekilde yapılır. Akım izleme yöntemi, diğer izleme yöntemlerinin aksine, sensörlerin ve diğer donanımların kullanmasına gerek kalmadan, aşırı akım ve toprak akımı için kullanılan koruyucu aygıtlardan alınan akım bilgilerini incelenerek arıza tespiti yapılabilmektedir.

ASM'larda stator sargı arızası, rotor arızaları ve eksen kaçıklığı doğrudan stator akımlarını etkilemektedir, stator arızası, rotor hataları, eksen kaçıklığı ve diğer dengesizlikler hava boşluğunun düzensiz olmasına ve dolayısıyla motordaki akı yoğunluğunun değişmesine

neden olur. Düzensiz akı yoğunluğu, endüktansların değişmesine yol açar. Endüktansların değişimi stator akımlarında harmonikler oluşturmaktadır, dolayısıyla oluşan harmonik bileşenleri analiz edilerek oluşan arızanın tipi tespit edilebilir [19,33].

Akım izleme yöntemi veya MCSA (MOTOR CURRENT SIGNATURE ANALYSIS) motor durum izlemesi için en etkili ve pratik bir yöntemdir. MCSA veri toplama, özellik çıkartma ve arıza değerlendirilme olmak üzere üç aşamadan oluşmaktadır. Veri toplama aşamasında üç faz veya bir fazın akım verileri yakalanır, daha sonra yakalanan verilerden, istenmeyen frekans bileşenlerinin ortadan kaldırılması için filtrelenecek örneklenmiş veriler elde edilir. Özellik çıkartma aşamasında, depolanan veriler, sayısal sinyal işlenmeye tabi tutularak sayısallaştırılır. Sayısallaştırılmış verilerden frekans veya zaman uzayında, hızlı fourier dönüşümü (FFT), ayrık fourier dönüşümü (DFT), kısa süreli fourier dönüşümü (STFT), dalgacık dönüşümü (WT), özellik çıkartma metodu (EPEM), sinir ağı (NN) ve park vektör (PV) gibi teknikler kullanılarak motor arızadan dolayı oluşan harmonik bileşenlerinin varlığı tespit edilir. Arıza değerlendirilme aşamasında, arızalı ve sağlam motorun frekans spektrumu birbiriyle karşılaştırılıp arıza tipi belirlenir [33].

3.4.8.1. Fourier Dönüşümü (FD)

Fourier dönüşümüyle zaman domenindeki sinyal örneklenip sayısal hale getirilerek frekans domenine çevrilir. Aynı şekilde frekans domenindeki sinyal de ters FD ile zaman domenine taşınır.

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (3.1)$$

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f)e^{j2\pi ft} df \quad (3.2)$$

Burada X : zaman fonksiyonu f , frekans ve $J = \sqrt{-1}$

Yukardaki fonksiyonlar sürekli ve kesintisiz olduklarından sonsuz uzunlukta bir dizi için tanımlı olduklarından dolayı uygulamalar için geçerli bir durum oluşturamazlar, çünkü MATLAB kullanırken dizileri sınırlandırmamız ve sınırlı sayıda nokta için değerlendirme

yapmamız gerekir. Ayırık Fourier Dönüşümü (AFD) bu problemleri gidermektedir. Uygulamalar için AFD kullanılmaktadır [49].

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{\frac{-2j\pi nk}{N}} \quad (3.3)$$

Ve ters DFT

$$X_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_k e^{\frac{-2j\pi nk}{N}} \quad (3.4)$$

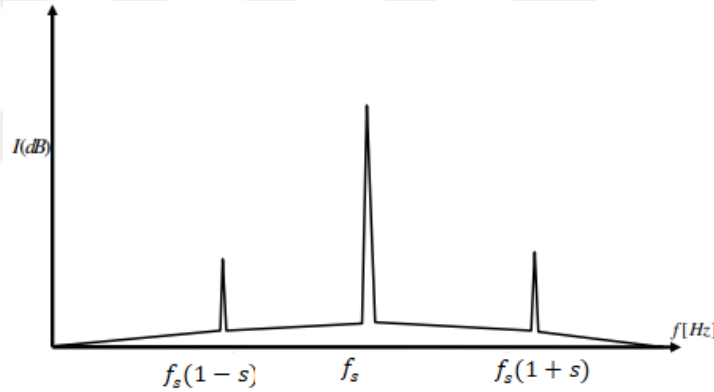
Burada N: örnek sayıları X sinyalin uzunluğunu göstermektedir.

AFD ile örneklenmiş sinyal, gerçek sinyalin gösterimini tam olarak ifade edemez. Bunu için sinyalin örnekleme işlemi birbirini takip eden örneklerin sayılarının artması gerekmektedir. Ancak örnek sayıları artıkça gerekli sayıların hesaplanmasında AFD verimsiz kalır. Bu sorunun üstesinden gelebilmek için FFT (hızlı fourier dönüşüm HFD) algoritma kullanılıyor. HFD ile AFD' etkin bir şekilde hesaplanır. AFD'de hesaplama sayısı N^2 iken FFT'de ise bu hesaplama sayıları $20 \log(2N)$ 'e indirilmektedir. Dolayısıyla HFD uzun veri kümeleri daha hızlı bir şekilde örnekleyp sayısal hale getirmektedir.

HFD, ASM'ların yeterince yükleme ve kararlı çalışma durumlarında arıza frekanslarının tespiti için etkin bir yöntemdir. Ancak HFD'nün akım izleme analizinde bazı uygulamalar için sınırlamaları var, bunlardan birisi; HFD uygulanması için örnekleme frekansının analiz edilecek sinyal frekansının iki katından daha büyük olması gerekir bununla birlikte veri penceresinin uzunluğu kaynak frekansının tam sayı katında olması lazım, aksi takdirde HFD yanlış dalga formu frekansı ve veri penceresinde sızıntı etkileri oluşacak. İkinci ise motorun yeterince yüklenmediği zaman kayma değerleri düşük olmasından dolayı yan banttaki arıza frekansları kaynak frekansına yaklaşacak ve arıza frekansları kaynak frekansı tarafında maskelenecek, dolayısıyla motorun arızalı olup olmadığını anlaşılmayacak [50].

3.4.8.2. MCSA-HFD yöntemi kullanılarak arıza teşhisine yönelik teorik yaklaşım

Simetrik bir ASM'un stator sargılarına uygulanan dengeli üç fazlı gerilim, stator sargılarının etrafında senkron hız ile pozitif yönde dönen bir döner manyetik alan oluşturmaktadır. Pozitif yönde dönen bu manyetik alanın yanında motorda negatif yönde dönen ek bir manyetik alan da meydana gelmektedir. Simetrik bir ASM'da negatif yönde olan manyetik alanların toplamı sıfıra eşittir. Ancak motorda meydana gelen herhangi bir arıza döner manyetik alanın negatif yöndeki alanın etkisinin artmasına neden olmaktadır [51]. Negatif yöndeki döner manyetik alan motorun döner manyetik alanı bozmaktadır. Söz konusu bozucu etkiler akım frekans spektrumunda arıza tipine bağlı olarak farklı yan bantlarda arıza frekanslarının oluşmasına sebep olur.



Şekil 3.5. Akım frekans Spektrumu[9]

Stator sargıları kısa devre arızaları, stator faz sarım sayısının azalmasına ve fazlarda dengesiz akımların akmasına neden olmaktadır. Kısa devre sargılardan akan akım negatif yönde mmk oluşturur. Söz konusu mmk fazın net mmk'ni azaltır ve dolayısıyla net mmk bozulması hava aralığının manyetik akı şeklini etkiler ve stator akımlarında harmonikleri indükler. Stator akımlarının frekans spektrumunda oluşan arıza frekans bileşenleri aşağıdaki denklemler ile belirlenir [44,52].

$$f_{sa} = f_s \left[\frac{m}{p} (1 - s) \pm k \right] \quad (3.5)$$

Burada f_{sa} :arıza frekansı, f_s :kaynak frekansı, P : çift kutup sayısı $m \in N..$ ve $k = 1,3,5, \dots$ ASM'lerde stator kısa devre arızasından dolayı akım sıfır bileşenleri ortaya çıktığı için akım dalgalarında üçüncü harmonikler oluşmaktadır. Dolayısıyla akım frekans spektrumunda üçüncü harmoniklerin görülmesi $f_{sa} = 3f_s$ stator kısa devre arızası tespiti için kullanılabilir [49].

Stator akımlarının frekans spektrumunda arıza frekans bileşenlerinin belirlenmesi için rotor manyetik alanı veya akımı ele alınır. Rotor akımları tarafından oluşan mmk, kaynak frekansında olmayıp $f_r = sf_s$ frekans ile dönmektedir. Stator sargılarında olduğu gibi rotordan akan akımlar rotor etrafında sf_s ile dönen ve stator kutupları ile eşit sayıdaki kutuplu mmk'ni üretmektedir. Rotor simetrik olduğu zaman sadece pozitif yönde ilerleyen mmk yer almaktadır. Kırık rotor çubuğu Arızası durumundaysa pozitif yönde ilerleyen mmk göre kayma frekansında negatif yönde ilerleyen mmk meydana çıkmaktadır. [50]. Geri yönde ilerleyen mmk rotora göre hız ve frekansı analitik olarak aşağıdaki gibi bulunur.

$$n_s = \frac{120f_s}{P} \quad (3.6)$$

Burada n_s :senkron hız ile ilerleyen manyetik alan hızı, P : kutup sayısı, f_s :kaynak frekansı.

$$n_r = n_s(1 - s) , \quad n_k = n_s - n_r \quad (3.7)$$

Burada n_k :kayma hızı ve n_r :rotor hızı.

Kırık rotor çubuğu (KRC) arızasından dolayı geri yönde ilerleyen manyetik alan hızı n_{kr} rotor göre aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$n_{kr} = n_s(1 - s) - sn_s = n_s(1 - 2s) \quad (3.8)$$

Denklem (3.8) Frekans cinsinden aşağıdaki gibi yazılır

$$f_k = f_s(1 - 2s) \quad (3.9)$$

Denklem (3.10)'da görüldüğü gibi KRÇ arızasından dolayı kaynak frekansı etrafında iki kat kayma frekansında yan bantları oluşur. KRÇ'ların artması, yan bant sayılarının artmasına neden olur. KRÇ arızası durumunda stator faz akımının spektrumundaki arıza frekans bileşenlerinin yan bantları aşağıdaki formuyla verilir [6,38,44,52].

$$f_k = f_s(1 \pm 2s) \quad (3.10)$$

Eksen kaçıklığı hava aralığının düzgün olmayan şeklinde dağılımına neden olur. Dolayısıyla hava aralığının düzensizliği, motor akımlarının sinüzoidal şeklinde dağılımını bozmaktadır. Bu bozucu etkiler kendileri stator ve rotor akımlarında göstermektedir. Eksen kaçıklığı stator akımlarının frekans spektrumunun düşük ve yüksek frekanslarında arıza frekans bileşenlerinin ortaya çıkmasına neden olur. Düşük ve yüksek frekanslarda arıza frekansları yan bantları aşağıdaki denklemler ile verilir [44,52].

$$f_{yek} = f_s \left\{ (RB + n_d) \left(\frac{1-s}{p} \right) \pm v \right\} \quad (3.11)$$

$$f_{dek} = (f_s \pm k f_r) \quad (3.12)$$

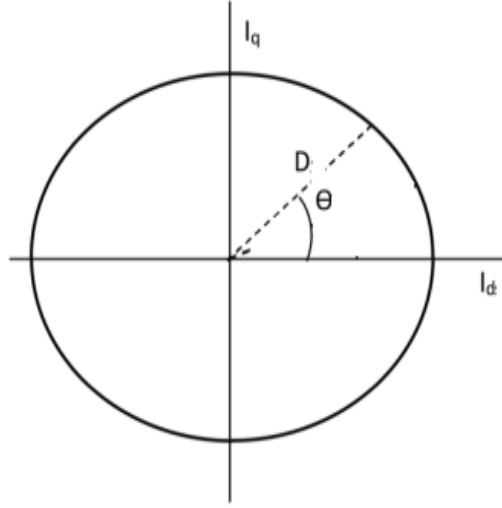
$$f_r = \frac{1-s}{p} f_s \quad (3.13)$$

Burada RB :rotor çubuk sayısı, n_d :eksen kaçıklığı derecesi, v :harmonik derecesi, f_r :rotor frekansı ve f_{yek} ve f_{dek} düşük ve yüksek frekanslarında arıza frekansın yan bant bileşenleri.

3.4.8.3.Akım park vektörü yöntemi (APV)

Park vektörü ASM'larda arızaların tespiti için uygulanabilir bir yöntemdir. Yıldız bağlı üç fazlı ASM'larda akım sıfır bileşenleri içermediği için 3 fazlı akımların iki boyutlu temsili park vektörü ile basit bir şekilde yapılır. Sağlıklı 3 fazlı ASM'un kararlı hali için elde edilen park vektörü, koordinat merkezine sabitlenmiş dairesel taslak şeklinde görülür. Motorda

meydana gelen herhangi bir arıza stator akımlarını etkilediği için park vektörünün dairesel modülünü bozar. Dolayısıyla park vektöründe oluşan değişiklikleri izleyerek hata tespiti yapılabilir.



Şekil 3.6. ASM'un Sağlam durumu için APV modülü

Park vektörü uzunluğu ve konumu denklem (3.14) ve denklem (3.15) ile verilir.

$$APV = |i_d + j i_q| = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \quad (3.14)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{i_q}{i_d}\right) \quad (3.15)$$

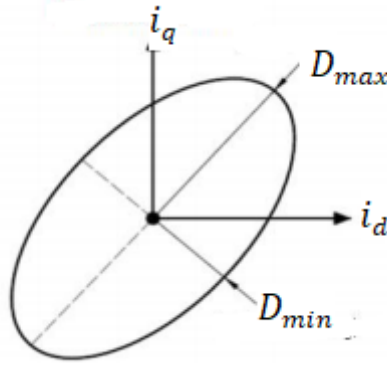
Park vektörün $\dot{i}_q$ ve $\dot{i}_d$ akım bileşenleri 3 faz akımlar cinsinden denklem (3.16) ve denklem (3.17)'deki gibi yazılır [6].

$$\dot{i}_q = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(\dot{i}_a(t) - \frac{1}{\sqrt{2}} \dot{i}_b(t) - \frac{1}{\sqrt{2}} \dot{i}_c(t) \right) \quad (3.16)$$

$$\dot{i}_d = \frac{1}{\sqrt{2}} (\dot{i}_b(t) - \dot{i}_c(t)) \quad (3.17)$$

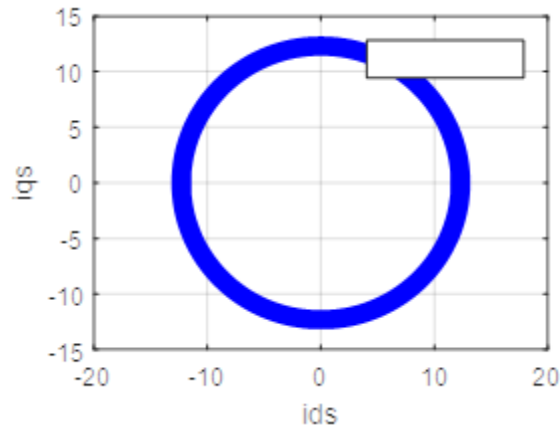
Akım park vektörü yöntemi ile arıza tespiti için birçok deneysel olarak yapılan çalışmalar var. Stator arızaları durumunda park vektörü modülünün şeklinde elipsel bozulmalar oluştuğunu görülmüş [6]. Park vektörünün elipsel şeklindeki eksantrikliği dikkate alarak hata şiddeti rapor edilebilir. Bunun en basit yolu farklı hatlar için denklem (3.18)'de elipsin majör eksenini ile minör eksenini oranındaki değişimin kullanılmasıdır.

$$\Delta D = \frac{D_{\max}}{D_{\min}} \quad (3.18)$$



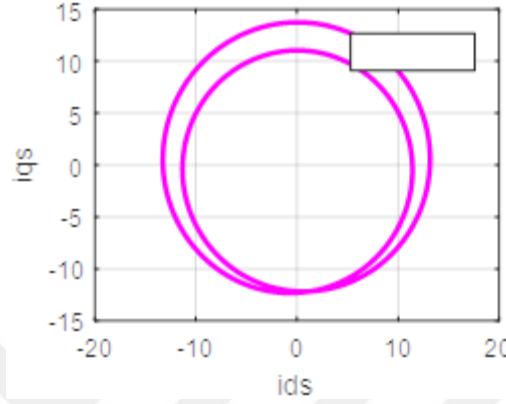
Şekil 3.7. Stator arızası için APV temsili.

Rotor Arıza durumları için elde edilen akım park vektörü bir halka şeklinde olduğu ve bu halka kalınlığı arızayla birlikte arttığı görülmüş [53,54]. Arıza şiddeti halkanın kalınlığı dikkate alınarak belirlenebilir.



Şekil 3.8. Rotor arızası için APV temsili.

Eksen kaçıklığı arıza için elde edilen park vektörü iki farklı yarı çaplara sahip dairelerden oluşmaktadır [54]. Burada arıza şiddetini belirtmek için farklı eksen kaçıklığı senaryolar için çizdirilmiş dairelerin alan hesaplamasıyla gerçekleştirilebilir.



Şekil 3 9.Eksen kaçıklığı Arızası için APV temsili.

3.5.Arızalı ASM'un $qd0$ Referans Düzleminde Modellenmesi.

Yukarıda bahsedilen ASM arızalarından stator sargıları kısa devre arızası, kırık rotor çubuğu arızası ve eksen kaçıklığı arızaları ele alınarak matematiksel modelleri her üç arıza için ayrı ayrı duran $qd0$ referans düzleminde elde edilmiş. Stator sargıları kısa devre arızası için her üç fazda arıza mevcut olması durumu için genel matematiksel model elde edilmiş. Tek fazda arızanın incelenmesi istendiğinde diğer fazlardaki arızayı sıfıra eşitleyerek tek fazda meydana gelen arıza şiddetleri incelenebilir. Burada Arızadan dolayı hem dirençlerin ve hem endüktansların değişimlerini dikkate alınmış. Kırık rotor çubuğu arızasının modellenmesinde endüktansların değişimi ihmal edilmiş. Eksen kaçıklığı arızası modellenmesinde ise sadece lm mıknatıslanma endüktansının hava aralığı ile değişimi dikkate alınarak yapılmış. Her arıza için elde edilen matematiksel denklemleri eğitim amaçlı kullanılabilir ve anlaşılabilir hale getirebilmek için adım adım anlatılmıştır.

3.5.1. Statorda oluşan kısa devre arızası modellenmesi

ASM'un stator değişkenlerinin değişimi doğrudan a , b ve c fazların sargı sarım sayısına bağlıdır. Genelde yapısal olarak dengeli ASM'un stator a , b ve c faz sargılarının sarım sayısı birbirine eşit olacak şekilde tasarlanır. Ancak stator faz sargılarında oluşan kısa devreler

mevcut fazın sarım sayısının azalmasına neden olur. Stator faz sargılarının eşit olmaması motorun doğrusal olmayışına ve dengesiz olmasına yol açar [55,56].

Statorda meydana gelen kısa devreden dolayı stator sargılarının dirençleri ve endüktansları değişiyor. Dolayısıyla tasarlanacak yeni matematiksel modelin, stator faz dirençlerinin ve endüktanslarının değişimini içinde bulunduracak şekilde olması gerekir. Stator a, b ve c fazlarında meydana gelen kısa devre oranının yüzdesi K_{sa}^* , K_{sb}^* ve K_{sc}^* olarak tanımlandığımızda motor için kısa devre katsayısı yüzdesini aşağıdaki gibi yazabiliriz [55,56].

$$\begin{aligned} K_a &= 1 - K_a^* \\ K_b &= 1 - K_b^* \\ K_c &= 1 - K_c^* \end{aligned} \quad (3.19)$$

Burada K_{sa}^* , K_{sb}^* ve K_{sc}^* sırasıyla a, b ve c fazlarında kısa devre arızasının yüzde olarak değerini gösterir. $K_{sa}^* > 0$, $K_{sb}^* = 0$ ve $K_{sc}^* = 0$ olması a fazda arıza oluşması ve b ve c fazların sağlam olması durumunu gösterir. Dolayısıyla eğer tek a fazında arıza değeri incelenmek istenirse K_{sb}^* ve K_{sc}^* sıfır olarak alınır. Stator faz sargılarında kısa devre olduğunda stator sargılarının dirençlerin diyagonal matrisi, kısa devre katsayıları kullanılarak yeniden (3.20) gibi tanımlanabilir.

$$R_s^* = \begin{bmatrix} K_{sa}R_s & 0 & 0 \\ 0 & K_{sb}R_s & 0 \\ 0 & 0 & K_{sc}R_s \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Aynı şekilde stator faz sargılarının öz endüktansları ve stator-rotor arası ortak endüktansları kısa devre etkisini kapsayacak şekilde yeniden denklem (3.21)'deki gibi düzenlenebilir.

$$L_s^{abs*} = \begin{bmatrix} K_{sa}^2(L_{1s} + L_m) & K_{sa}K_{sb}L_m & K_{sa}K_{sc}L_m \\ K_{sa}K_{sb}L_m & K_{sb}^2(L_{1s} + L_m) & K_{sb}K_{sc}L_m \\ K_{sa}K_{sc}L_m & K_{sc}K_{sb}L_m & K_{sc}^2(L_{1s} + L_m) \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Stator-rotor ve rotor-stator arası ortak endüktansları denklem (3.22)'deki gibi yazılır.

$$L_{sr}^{abs*} = L_{sr}^{abc} \begin{bmatrix} K_{sa}\cos(\theta_r) & K_{sa}\cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & K_{sa}\cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ K_{sb}\cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & K_{sb}\cos(\theta_r) & K_{sb}\cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ K_{sc}\cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & K_{sc}\cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & K_{sc}\cos(\theta_r) \end{bmatrix} \text{ ve } [L_{rs}^{abs*}] = [L_{sr}^{abs*}]^T \quad (3.22)$$

Son olarak, stator kısa devre arızalı motorun rotor direnç matrisleri doğrusal olmadığı için üç fazlı düzleminden qd0 referans düzlemine aktarılmalıdır. Stator ile rotor arası ortak endüktanslar iki eksen arasındaki bağıl konuma göre değişmektedir, dolayısıyla stator sargıları arızasından kaynaklanan dirençlerin ve endüktansların rotor pozisyonuna bağlı değişimi ortadan kaldırılmak için makineye ait matematiksel modelin duran dq0 düzleminde oluşturması daha avantajlıdır.

$$R_s^{*qd0} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{sa}R_s & 0 & 0 \\ 0 & K_{sb}R_s & 0 \\ 0 & 0 & K_{sc}R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} R_{s11} & R_{s12} & R_{s13} \\ R_{s21} & R_{s22} & R_{s23} \\ R_{s31} & R_{s32} & R_{s33} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{6}R_s(4K_{sa} + K_{sb} + K_{sc}) & \frac{1}{2\sqrt{3}}R_s(K_{sb} - K_{sc}) & \frac{1}{3}R_s(2K_{sa} - K_{sb} - K_{sc}) \\ \frac{1}{2\sqrt{3}}R_s(K_{sb} - K_{sc}) & \frac{1}{2}R_s(K_{sb} + K_{sc}) & \frac{1}{\sqrt{3}}R_s(K_{sc} - K_{sb}) \\ \frac{1}{6}R_s(2K_{sa} - K_{sb} - K_{sc}) & \frac{1}{2\sqrt{3}}R_s(K_{sb} - K_{sc}) & \frac{1}{3}R_s(K_{sa} + K_{sb} + K_{sc}) \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Burada R_s^{*qd0} qd0 referans çerçevesine aktarılmış stator dirençlerin matrisini gösterir. Aynı şekilde stator endüktansları ve stator-rotor arası endüktansları denklem (3.24), denklem (3.25) ve denklem (3.26) gibi qd0 referans düzlemine taşınmış olur.

$$L_s^{qd0*} = [T(\theta = 0)][L_s^{abs*}][T(\theta = 0)]^{-1} = \begin{bmatrix} L_{s11} & L_{s12} & L_{s13} \\ L_{s21} & L_{s22} & L_{s23} \\ L_{s31} & L_{s32} & L_{s33} \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

$$L_{sr}^{qd0*} = [T(\theta = 0)][L_{sr}^{abs*}][T(\beta)]^{-1} = \begin{bmatrix} L_{sr11} & L_{sr12} & L_{sr13} \\ L_{sr21} & L_{sr22} & L_{sr23} \\ L_{sr31} & L_{sr32} & L_{sr33} \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

$$L_{rs}^{qd0*} = [T(\beta)][L_{rs}^{abs}][T(\theta = 0)]^{-1} = \begin{bmatrix} L_{rs11} & L_{rs12} & L_{rs13} \\ L_{rs21} & L_{rs22} & L_{rs23} \\ L_{rs31} & L_{rs32} & L_{rs33} \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Burada L_s^{qd0*} , L_{sr}^{qd0*} ve L_{rs}^{qd0*} sırasıyla qd0 düzlemine taşımış stator endüktansları, stator-rotor arası ve rotor-stator arası ortak endüktansları olup çıkarımları **EK A-3**'te verilmiş. Bütün elde edilmiş bu yeni endüktans matrislerini kullanarak stator sargıları kısa devre arızalı ASM'un qd0 düzleminde akı matrisi denklem (3.27)'deki gibi düzenlenebilir.

$$\begin{bmatrix} \lambda_s^q \\ \lambda_s^d \\ \lambda_s^0 \\ \lambda_r^q \\ \lambda_r^d \\ \lambda_r^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{s11} & L_{s12} & L_{s13} & L_{sr11} & L_{sr12} & L_{sr13} \\ L_{s21} & L_{s22} & L_{s23} & L_{sr21} & L_{sr22} & L_{sr23} \\ L_{s31} & L_{s32} & L_{s33} & L_{sr31} & L_{sr32} & L_{sr33} \\ L_{rs11} & L_{rs12} & L_{rs13} & L_{1r} + L_m & 0 & 0 \\ L_{rs21} & L_{rs22} & L_{rs23} & 0 & L_{1r} + L_m & 0 \\ L_{rs31} & L_{rs32} & L_{rs33} & 0 & 0 & L_{1r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s^q \\ i_s^d \\ i_s^0 \\ i_r^q \\ i_r^d \\ i_r^0 \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Duran referans düzleminde stator sargıları kısa devre arızası için stator ve rotor gerilim matrisleri denklem (3.28) ve denklem (3.29) gibi yazılır.

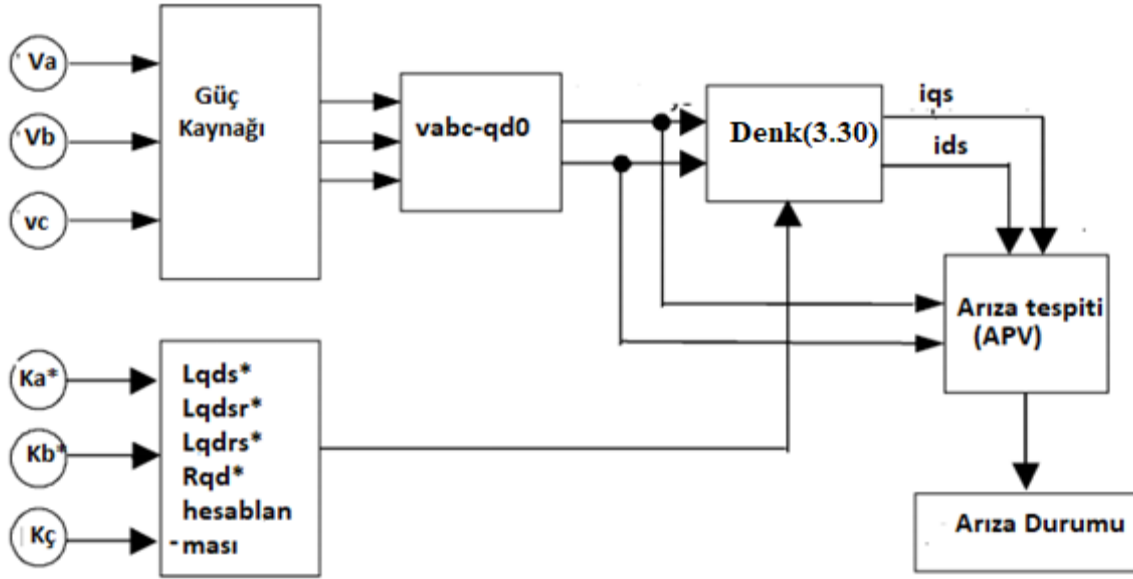
$$\begin{bmatrix} v_s^q \\ v_s^d \\ v_s^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{s11} & R_{s12} & R_{s13} \\ R_{s21} & R_{s22} & R_{s23} \\ R_{s31} & R_{s32} & R_{s33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s^q \\ i_s^d \\ i_s^0 \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_s^q \\ \lambda_s^d \\ \lambda_s^0 \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

$$\begin{bmatrix} v_r^q \\ v_r^d \\ v_r^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_r^q \\ i_r^d \\ i_r^0 \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_r^q \\ \lambda_r^d \\ \lambda_r^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_r^q \\ \lambda_r^d \\ \lambda_r^0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & -\omega_r & 0 \\ \omega_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

Denklem (3.27) matris denklemlerden akı denklemleri denklem (3.28) ve denklem (3.29)'da yerleştirildiğinde denklem (3.30)'da stator sargıları kısa devre arızası için genel gerilim matrisi elde edilir.

$$(3.30) \quad \begin{bmatrix} v_q^s \\ v_s^s \\ v_0^s \\ v_d^r \\ v_d^r \\ v_0^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} + \frac{d}{dt}L_{ss11} & R_{12} + \frac{d}{dt}L_{ss12} & R_{13} + \frac{d}{dt}L_{ss13} & \frac{d}{dt}L_{sr11} & \frac{d}{dt}L_{sr12} & \frac{d}{dt}L_{sr13} \\ R_{21} + \frac{d}{dt}L_{ss21} & R_{22} + \frac{d}{dt}L_{ss22} & R_{23} + \frac{d}{dt}L_{ss23} & \frac{d}{dt}L_{sr21} & \frac{d}{dt}L_{sr22} & \frac{d}{dt}L_{sr23} \\ R_{31} + \frac{d}{dt}L_{ss31} & R_{32} + \frac{d}{dt}L_{ss32} & R_{33} + \frac{d}{dt}L_{ss33} & \frac{d}{dt}L_{sr31} & \frac{d}{dt}L_{sr32} & \frac{d}{dt}L_{sr33} \\ \frac{d}{dt}L_{rs11} - \omega_r L_{rs21} & \frac{d}{dt}L_{rs12} - \omega_r L_{rs22} & \frac{d}{dt}L_{rs13} - \omega_r L_{rs23} & R_r + (L_{1r} + L_m) & -\omega_r (L_{1r} + L_m) & 0 \\ \frac{d}{dt}L_{rs21} + \omega_r L_{rs11} & \frac{d}{dt}L_{rs22} + \omega_r L_{rs12} & \frac{d}{dt}L_{rs23} + \omega_r L_{rs13} & \omega_r (L_{1r} + L_m) & R_r + (L_{1r} + L_m) & 0 \\ L_{rs31} & L_{rs32} & L_{rs33} & 0 & 0 & L_{1r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q^s \\ i_s^s \\ i_0^s \\ i_d^r \\ i_d^r \\ i_0^r \end{bmatrix}$$

Stator sargıları kısa devre arızalı ASM'un matematiksel modelinin simülasyon programlarında uygulanması şekil 3.10'da gösterilmiş. Burada model tasarlanmasında ilk önce stator dirençleri ve endüktansları denklem (3.24)'ten denklem (3.26)'ya kadar kullanılarak qd0 referans düzlemine taşınmaktadır. Denklem (3.30) kullanılarak stator ve rotor akım bileşenleri bulunur. Daha sonra bu akımlar üzerine analiz yapılarak arıza tespit ve motor durum izlenme işlemi yapılabilir.



Şekil 3.10. Stator sargıları kısa devre arızalı ASM için qd0 referans düzleminde matematiksel denklemlerin simülasyon akış diyagramı.

3.5.2. Kırık rotor çubuklu ASM'un modellenmesi

ASM'lar doğrusal bir elektromanyetik sistem olup fiziksel yapısından kaynaklanan herhangi bir hata ve dengesizlik motorda asimetrikliğe yol açar. Rotor çubuklarının kırık olması rotor faz dirençlerinin ve endüktanslarının değişimine neden olur. Böylece kırık çubukların olduğu fazlarda akım azalırken diğer sağlam fazlardan akan akım yükselecek, dolayısıyla bu durum rotor sargılarından akan akımın asimetrikliğine neden olur. Rotor akımının lineersizliği stator ile rotor arasında döner manyetik alanın doğrusal olmayışına yol açar ki bu durum stator akımlarında frekans harmoniklerinin indüklenmesine sebep olur [7,57].

Rotor empedans eşitsizliği, genel olarak rotor çubuklarının kırılmasından kaynaklandığı için rotor faz dirençlerine ve endüktanslarına kırık çubuktan meydana gelen empedans değişim oranının eklenmesiyle modellenebilir. Rotor endüktanslarının değişim etkisi rotor dirençlerinin etkisinin yanında ihmal edilebilir düzeyde olduğu için dikkate alınmayabilir. Bunun yanında asimetrik rotor faz dirençleri ile motorun matematiksel modeli oluşturulurken modelin karmaşıklığı azaltma adına rotor uç halka katkısı ihmal edilmesi ve stator faz empedanslarının değişmemesi, varsayımları kullanılmaktadır [57].

Sağlam ve simetrik ASM rotor fazlarına ait dirençlerin diyagonal matrisi (abc) referans düzleminde aşağıdaki gibi yazılır.

$$R_r = \begin{bmatrix} R_{1r} & 0 & 0 \\ 0 & R_{1r} & 0 \\ 0 & 0 & R_{1r} \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

Dengesiz rotor direnç etkisi motorun matematiksel modelinde rotor faz dirençlerine ek bir direncin eklenmesiyle simüle edilebilir.

$$R_r^* = \begin{bmatrix} R_{1r} + \Delta R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_{1r} + \Delta R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_{1r} + \Delta R_c \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

Burada ΔR_a , ΔR_b ve ΔR_c Kırık çubukların etkisi sonucunda a , b ve c fazlarda meydana gelen direnç değişimini gösterir. Bu çalışmada Kırık çubuklu rotoru olan bir ASM'un modellenmesi kırık rotor çubuklarının sürekli olması, uç halka dirençleri ve mıknatıslanma akımı hesaba katılmaması varsayımlar ile yapılmıştır. Sağlam bir ASM için rotor fazın eşdeğer direnç ifadesi aşağıdaki gibidir [7,58].

$$R_r = \frac{(2N_s)^2}{\frac{N_r}{3}} R_b \quad (3.33)$$

Burada R_b rotor çubuğu direnci N_r ve N_s rotor çubuk sayıları ve stator eşdeğer sarım sayılarını ifade eder. Kırık çubuklar durumunda rotor eşdeğer direnci aşağıdaki şekilde bulunur [7,58].

$$R_r^* = \frac{(2N_s)^2}{\frac{N_r}{3} - n_{bb}} R_b \quad (3.34)$$

Burada n_{bb} Kırık rotor çubuklarının sayılarını gösterir. Rotor faz dirençlerinde meydana gelen değişim aşağıdaki bulunur [58].

$$\Delta R_{abc} = R_r * -R_r = \frac{3n_{bb}}{N_r - 3n_{bb}} R_r \quad (3.35)$$

Makineyi $qd0$ referans düzleminde incelemek istediğimiz için rotor direnç değişimini $qd0$ referans çerçevesine taşımamız gerekiyor. Bu işlem rotor dirençlerindeki değişimi rotor dönüşüm matrisi ile çarpması sonucunda elde edilir.

$$R_r^{qd0*} = [T(\beta)][R_r^{abs*}][T(\beta)]^{-1} = \begin{bmatrix} R_{r11} + R_r & R_{r12} & R_{r13} \\ R_{r21} & R_{r22} + R_r & R_{r23} \\ R_{r31} & R_{r32} & R_{r33} + R_r \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

Burada R_r^{qd0*} $qd0$ referans düzleminde KRÇ arızalı ASM'un rotor direncini ifade eder, çıkarımı ise **EK A-4**'te verilmiştir. Rotor direnç değişiminden kaynaklanan rotor faz dirençlerinin doğrusal olmayışı, motorun matematiksel modelini temsil eden $qd0$ düzlemindeki rotor denklemleri de değişecek. KRÇ arızasını ifade eden qdo gerilim denklemleri gene den aşağıdaki gibi yazılır.

$$\begin{bmatrix} v_s^q \\ v_s^d \\ v_s^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s^q \\ i_s^d \\ i_s^0 \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_s^q \\ \lambda_s^d \\ \lambda_s^0 \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

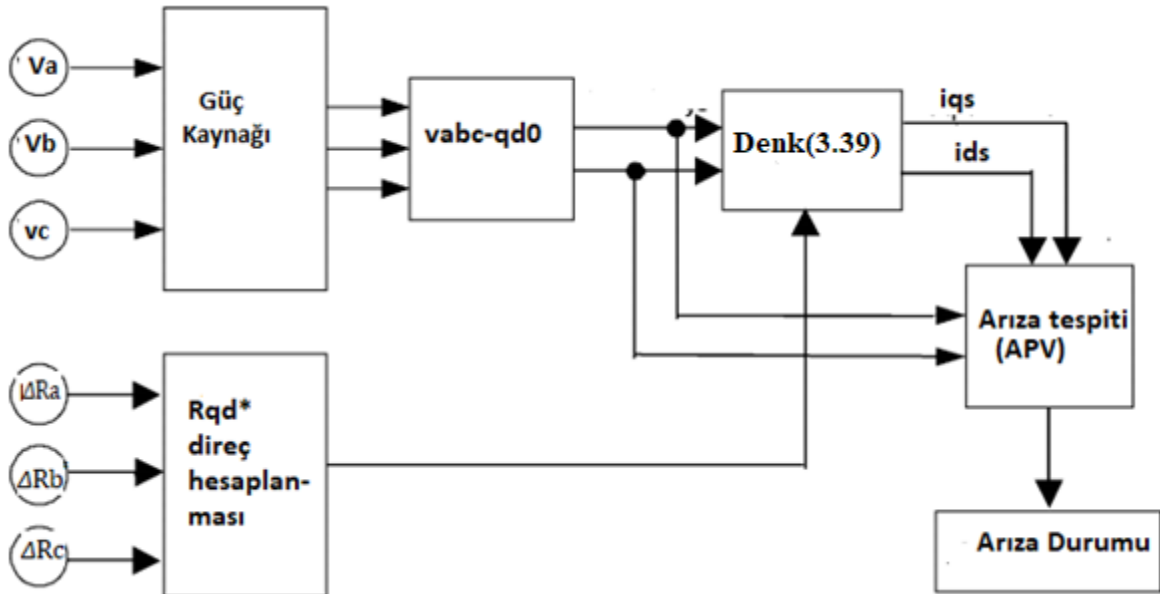
$$\begin{bmatrix} v_r^q \\ v_r^d \\ v_r^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_r^q \\ i_r^d \\ i_r^0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{r11} + R_r & R_{r12} & R_{r13} \\ R_{r21} & R_{r22} + R_r & R_{r23} \\ R_{r31} & R_{r32} & R_{r33} + R_r \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_r^q \\ \lambda_r^d \\ \lambda_r^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_s^q \\ \lambda_s^d \\ \lambda_s^0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & -\omega & 0 \\ \omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

Denklem(3.37) ve denklem(3.38) akımlar cinsinden düzenlendiğinde denklem(2.39)'da KRÇ arızası için genel gerilim matrisi elde edilir.

$$\begin{bmatrix} v_s^q \\ v_s^d \\ v_s^0 \\ v_r^q \\ v_r^d \\ v_r^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + \frac{d}{dt}(L_{1s} + L_m) & 0 & 0 & \frac{d}{dt}L_m & 0 & 0 \\ 0 & R_s + \frac{d}{dt}(L_{1s} + L_m) & 0 & 0 & \frac{d}{dt}L_m & 0 \\ 0 & 0 & R_s + \frac{d}{dt}L_{1s} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{d}{dt}L_m & -\omega_r L_m & 0 & R_{r11} + R_r + \frac{d}{dt}(L_{1r} + L_m) & R_{r12} - \omega_r(L_{1r} + L_m) & R_{r13} \\ \omega_r L_m & \frac{d}{dt}L_m & 0 & R_{r21} + \omega_r(L_{1r} + L_m) & R_{r22} + R_r + \frac{d}{dt}(L_{1r} + L_m) & R_{r23} \\ 0 & 0 & 0 & R_{r31} & R_{r32} & R_r + \frac{d}{dt}L_{1s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s^q \\ i_s^d \\ i_s^0 \\ i_r^q \\ i_r^d \\ i_r^0 \end{bmatrix}$$

(3.39)

KRÇ arızalı ASM'un matematiksel modelinin simülasyon programlarında uygulanması şekil 3.11'de gösterilmiş. Burada model tasarlanmasında ilk önce rotor dirençleri denklem (3.36) kullanılarak qd0 referans düzlemine taşınmaktadır. Denklem (3.39) kullanılarak stator ve rotor akım bileşenleri bulunur. Daha sonra bu akımlar üzerine analiz yapılarak arıza tespit ve motor durum izlenme işlemi yapılabilir.



Şekil 3.11. KRÇ arızalı ASM için qd0 referans düzleminde matematiksel denklemlerin simülasyon akış diyagramı.

3.5.3. Düzensiz hava aralığının modellenmesi

ASM’larda eksen kaçıklığı sonucunda stator ile rotor arası hava boşluğunda dengesizlik meydana gelmektedir. Eksen kaçıklığı durumlarında toplam hava aralığının hacmi aynı kalmaktadır, fakat hava aralığının hacmi rotorun dönüşüyle birlikte dar ve geniş bölgelerde değişim göstermektedir. Denklem (3.40)’tan denklem (3.42)’ye kadar denklemlerde gördürüldüğü gibi eksen kaçıklığı durumunda stator ve rotor öz endüktansları ve ortak endüktansları hava aralığının değişimi ile birlikte değişmektedir [59].

$$eL_{ms} = eL_{asas} = -\frac{1}{2}eL_{asbs} = -\frac{1}{2}eL_{ascs} = \frac{\pi\mu_0 l r N_s^2}{g0(1-\rho\cos(\theta_r))} \Rightarrow eL_{ss} = \begin{bmatrix} eL_{asas} & eL_{asbs} & eL_{ascs} \\ eL_{asas} & eL_{bsbs} & eL_{bscs} \\ eL_{csas} & eL_{csbs} & eL_{csac} \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

$$eL_{mr} = eL_{arar} = -\frac{1}{2}eL_{arbr} = -\frac{1}{2}eL_{arcr} = \frac{\pi\mu_0 l r N_s^2}{g0(1-\rho\cos(\theta_r))} \Rightarrow eL_{rr} = \begin{bmatrix} eL_{arar} & eL_{arbr} & eL_{arcr} \\ eL_{bras} & eL_{brbr} & eL_{rscr} \\ eL_{crar} & eL_{crbr} & eL_{crar} \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

$$eL_{sr} = [eL_{rs}]^T = \frac{\pi\mu_0 l r N_s N_r}{g0(1-\rho\cos(\theta_r))} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

Yukarıdaki denklemlerde görüldüğü gibi eksen kaçıklığı durumlarında L_{sr} ve L_{rs} ’ye ek olarak L_{ss} ve L_{rr} da sağlam motorun aksine, rotor konumuna bağlı olarak değişmektedirler. Yukarıdaki matematiksel model karmaşık bir model olduğundan $qd0$ referans düzlemine taşınması için uygulanabilir bir model değildir. Dolayısıyla bu modelde stator faz-faz arası ve rotor faz-faz arası ortak endüktanslarının rotor konumu ile değişmemesi varsayımı kullanılarak sadece mıknatıslanma endüktanslarının rotor pozisyonuna bağlı değişimini ele alarak $qd0$ referans düzleminde modellenmesi daha uygundur.

Sağlam bir ASM’da ortak endüktans denklem (3.43)’teki gibi hesaplanır.

$$L_m = \left(\frac{N_{s,r}}{2}\right)^2 \frac{\pi\mu_0 l_r}{l_{g_0}} \quad (2.43)$$

Burada l_{g_0} sağlam ve simetrik ASM'da hava aralığının etkin uzunluğunu ifade eder. Eksen kaçıklığı durumunda hava aralığı rotor konumuna bağlı olarak değişim gösterir, dolayısıyla hava aralığının düzensizliği, L_m mıknatıslanma endüktansının değişimi dikkate alınarak modellenenir [60].

$$L_m(\theta_m) = L_m \left(\frac{l_g}{l_g(\theta_m)} \right) \quad (2.44)$$

Burada $l_g(\theta_m)$ eksen kaçıklığı sonucunda oluşan hava aralığının uzunluğunu göstermektedir, statik eksen kaçıklığı (SEK) durumunda şekil 3.12(a) daki gibi rotor merkezi rotor dönüş merkezinden "e" kayması ile yer almaktadır ve denklem 3.36'daki gibi geometriksel olarak modellenir [59]

$$l_g(\theta_m) = R - \sqrt{((e + r \cos(\theta_m))^2 + (r \sin(\theta_m))^2)} \quad (3.45)$$

Burada R stator yarıçapı r rotor yarıçapı ve θ_m hava aralığının herhangi bir noktasındaki mekaniksel konumdur.

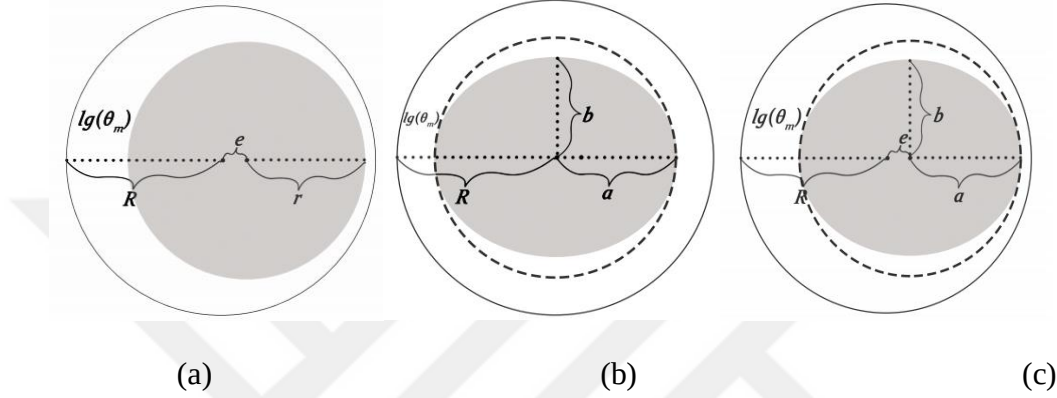
DEK arızası durumunda hava aralığının değişimi şekil 3.12 (b)'deki gibi rotor şeklinde elipsel bozulmayı dikkate alarak modellenenir [60]

$$l(\theta_m) = R - \frac{ab}{\sqrt{b^2 \cos^2(\theta_m) + a^2 \sin^2(\theta_m)}} \quad (3.46)$$

Burada R stator yarıçapıdır, a ve b , sırasıyla elipsin ana ve küçük eksenleridir ve $l_g(\theta_m)$, stator rotor arasındaki mesafedir.

KEK arızasının etkisi şekil 3.12(c) de olduğu gibi, rotor yapısı elips şeklinde olup rotor dönüş merkezinden 'e' kayma ile yer alması ile simüle edilebilir.

$$lg(\theta_m) = R - \frac{\sqrt{(2b^2 e \cos(\theta_m) + 2b^2 e \cos(\theta_m))^2 + 4(2b^2 \cos(\theta_m))^2 + a^2 \sin(\theta_m))(e^2 b^2 - a^2 b^2)}}{2(b^2 \cos(\theta_m) + a^2 \sin(\theta_m))} \quad (3.47)$$



Şekil 3.12. Eksen kaçıklığı durumunda (a)SEK geometrisi, (b) DEK geometrisi, (c) KEK geometrisi[60,61].

3.6.ASM'un MATLAB/SIMULINK Uygulaması

Sağlam ve arızalı ASM için elde etmiş olduğumuz denklemlerin MATLAB/SIMULINK ile çözülebilir hale getirilmesi için yeniden düzeltmemiz gerekir.

Bölüm 2’de sağlam ASM için keyfi referans düzleminde elde ettiğimiz denklem (2.71) matris formundaki gerilim denklemlerini akımlar cinsinden düzenlediğimizde denklem (3.48)’den denklem (3.53)’e kadar Simulink ile çözülebilen entegrasyon denklemlerini elde etmiş oluruz.

$$i_s^q = \frac{1}{(L_{1s} + L_m)} \left(\int [V_s^q - i_s^q R_s - \omega(L_{1s} + L_m)i_s^d - L_m i_r^d \omega] dt - L_m i_r^q \right) \quad (3.48)$$

$$i_s^d = \frac{1}{(L_{1s} + L_m)} \left[\int (V_s^d - i_s^d R_s + \omega(L_{1s} + L_m)i_s^q + \omega L_m i_r^q) dt - L_m i_r^d \right] \quad (3.49)$$

$$i_s^0 = \frac{1}{L_{1s}} \left[\int (V_s^0 - R_s i_s^0) dt \right] \quad (3.50)$$

$$i_r^q = \frac{1}{(L_{1r} + L_m)} \left(\int [V_r^q - i_r^q R_r - (\omega - \omega_r)(L_{1r} + L_m)i_r^d - (\omega - \omega_r)L_m i_s^d] dt - L_m i_s^q \right) \quad (3.51)$$

$$i_r^d = \frac{1}{(L_{1r} + L_m)} \left[\int (V_r^d - i_r^d R_r + (\omega - \omega_r)(L_{1r} + L_m)i_r^q + (\omega - \omega_r)L_m i_s^q) dt - L_m i_s^d \right] \quad (3.52)$$

$$i_r^0 = \frac{1}{L_{1r}} \left[\int (V_r^0 - R_r i_r^0) dt \right] \quad (3.53)$$

Stator sargıları kısa devre arızası için denklem (3.30)'da gerilim matrisi akımlar cinsinden düzelttiğimizde aşağıdaki gibi MATLAB/SIMULINK'te uygulanabilir denklemler hale gelir.

$$i_s^q = \frac{1}{L_{s11}} \left[\int (V_s^q - i_s^q R_{s11} - i_s^d R_{s12} - i_s^0 R_{s13}) dt - (i_s^d L_{s12} + i_s^0 L_{s13} + i_r^q L_{sr11} + i_r^d L_{sr12} + i_r^0 L_{sr13}) \right] \quad (3.54)$$

$$i_s^d = \frac{1}{L_{s22}} \left[\int (V_s^d - i_s^q R_{s21} - i_s^d R_{s22} - i_s^0 R_{s23}) dt - (i_s^q L_{s21} + i_s^0 L_{s23} + i_r^q L_{sr21} + i_r^d L_{sr22} + i_r^0 L_{sr23}) \right] \quad (3.55)$$

$$i_s^0 = \frac{1}{L_{s33}} \left[\int (V_s^0 - i_s^q R_{s31} - i_s^d R_{s32} - i_s^0 R_{s33}) dt - (i_s^q L_{s31} + i_s^d L_{s32} + i_r^q L_{sr31} + i_r^d L_{sr32} + i_r^0 L_{sr33}) \right] \quad (3.56)$$

$$i_r^q = \frac{1}{L_{1r} + L_m} \left[\int (V_r^q - i_r^q R_r + \omega_r (i_s^q L_{rs21} + i_s^d L_{rs22} + i_s^0 L_{rs23} + i_r^d (L_{1r} + L_m))) dt - (i_s^q L_{rs11} + i_s^d L_{rs12} + i_s^0 L_{rs13}) \right] \quad (3.57)$$

$$i_r^d = \frac{1}{L_{1r} + L_m} \left[\int (V_r^d - i_r^d R_r - \omega_r (i_s^q L_{rs11} + i_s^d L_{rs12} + i_s^0 L_{rs13} + i_r^q (L_{1r} + L_m))) dt - (i_r^q L_{rs21} + i_s^d L_{rs22} + i_s^0 L_{rs23}) \right] \quad (3.58)$$

$$i_r^0 = \frac{1}{L_{1r}} \left[\int (V_r^0 - i_r^0 R_r) dt - (i_s^q L_{rs31} + i_s^d L_{rs32} + i_s^0 L_{rs33}) \right] \quad (3.59)$$

Aynı şekilde kırık rotor çubukları arızası için denklem (3.39)'da gerilim matrisi akımlar cinsinden düzelttiğimizde denklem(3.60)'ten denklem(3.96)'a kadar simulinkte uygulanabilir entegrasyon denklemleri elde edilmiş olur.

$$i_s^q = \frac{1}{(L_{1s}+L_m)} [\int (V_s^q - i_s^q R_s) dt - L_m i_r^q] \quad (3.60)$$

$$i_s^d = \frac{1}{(L_{1s}+L_m)} [\int (V_s^d - i_s^d R_s) dt - L_m i_r^d] \quad (3.61)$$

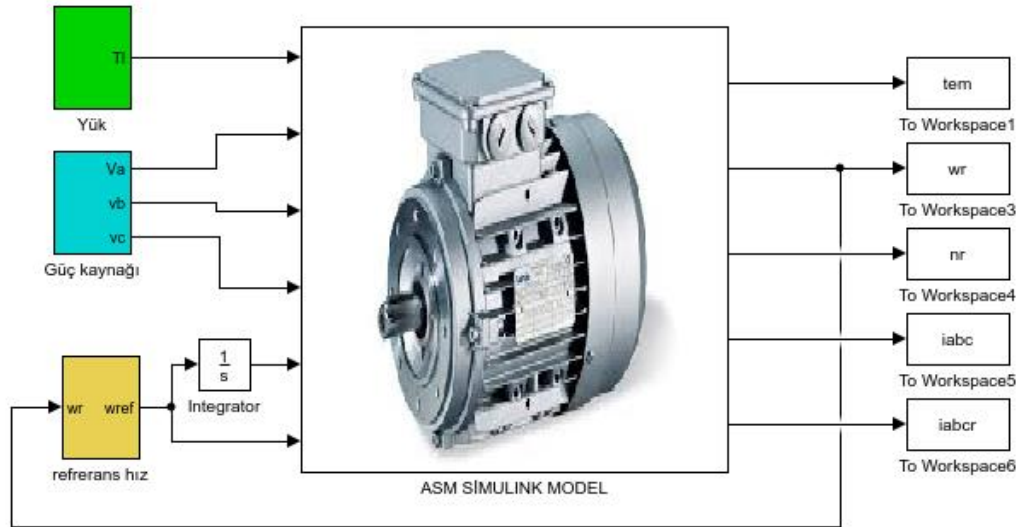
$$i_s^0 = \frac{1}{L_{1s}} [\int (V_s^0 - R_s i_s^0) dt] \quad (3.62)$$

$$i_r^q = \frac{1}{(L_{1r}+L_m)} [\int (V_r^q - i_r^q (R_r + R_{11}) + i_r^d (\omega_r (L_{1r} + L_m) - R_{21}) + \omega_r L_m i_s^d - i_r^0 R_{23}) dt - \frac{d}{dt} L_m i_s^q] \quad (3.63)$$

$$i_r^d = \frac{1}{(L_{1r}+L_m)} [\int (V_r^d - i_r^d (R_r + R_{22}) - (\omega_r (L_{1r} + L_m) + R_{12}) i_r^q + \omega_r L_m i_r^d - i_r^0 R_{32}) dt - L_m i_s^d] \quad (3.64)$$

$$i_r^0 = \frac{1}{L_{1r}} [\int (V_r^0 - (R_r + R_{33}) i_r^0 - i_r^q R_{31} - i_r^d R_{23}) dt] \quad (3.65)$$

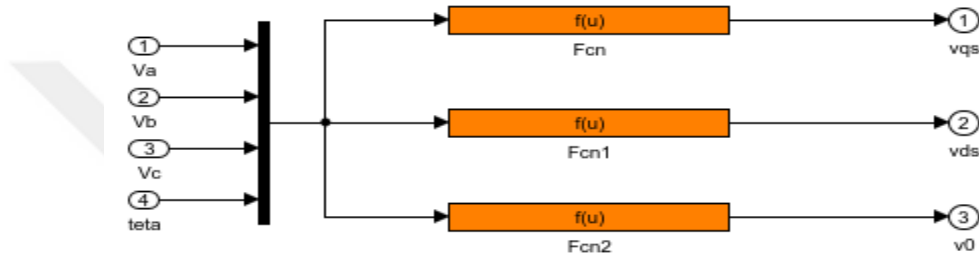
Simulink ortamında yukarıdaki denklemleri hesaplayan blokları oluşturmada önce modelin giriş ve çıkışlarını ayarlamamız gerekir. Motor girişleri, stator sargılarına uygulanan üç faz gerilimler, yük momenti ve modeli incelemek istediğimiz referans hızı (arızasız ASM için) içermektedir, çıkışları ise $qd0$ stator ve rotor akım bileşenleri, üç faz stator ve rotor akımları, rotor hızı ve rotorda indüklenen momentten ibarettir.



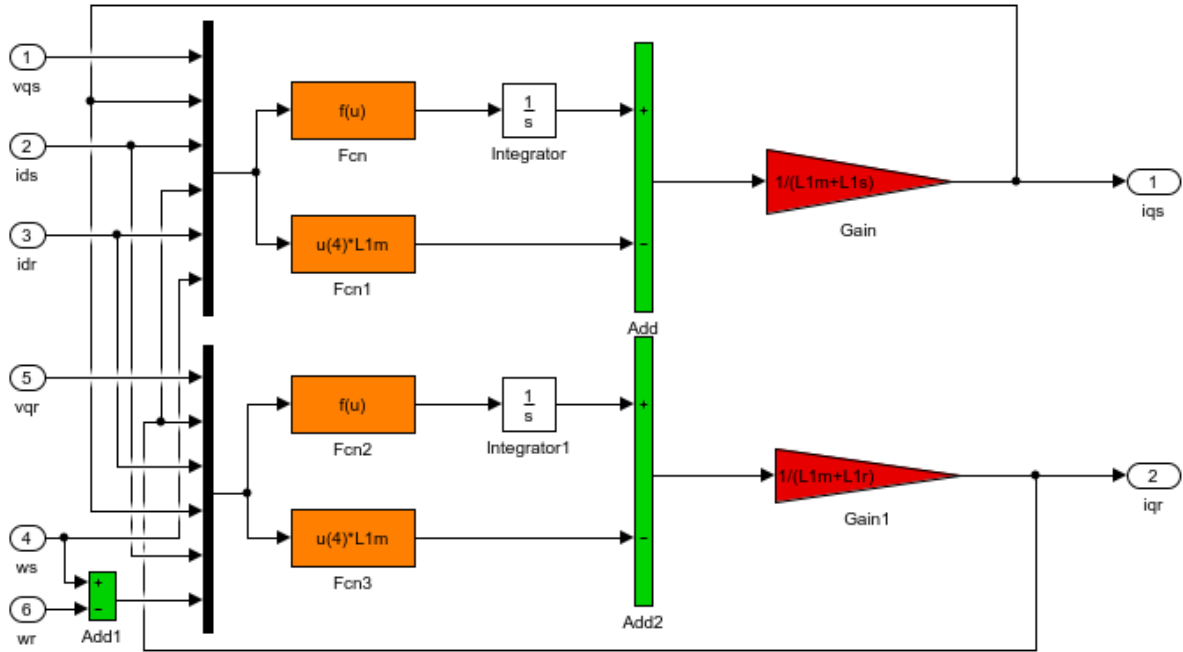
Şekil 3.13. Arızasız ASM'un keyfi referans düzleminde genel SIMULINK modeli.

V_a , v_b ve v_c gerilimleri v_q , v_d ve v_0 bileşenlere dönüştürülmek için denklem (2.38) dönüşüm matrisi kullanılarak Şekil 3.14 (a)'daki gibi abc-qd0 dönüşüm bloğu elde edilir. ,

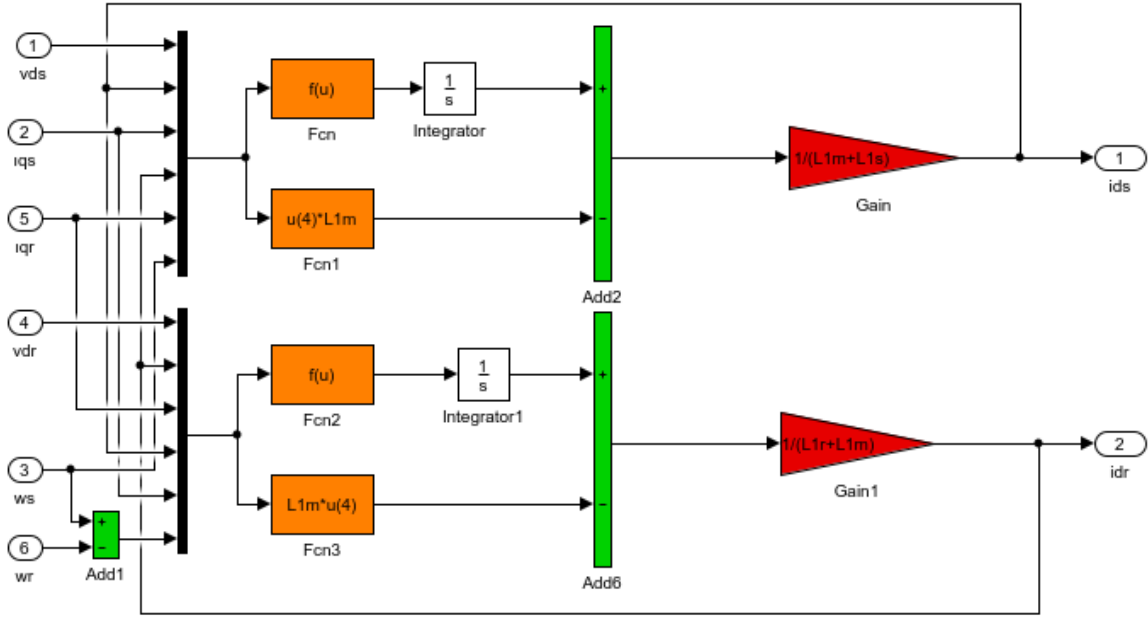
abc-qd0 dönüşüm bloğu girdileri stator üç faz gerilimleri ve referans konumu, çıktıları ise qd0 eksenli gerilim bileşenleridir. Arızasız ASM için $qd0$ Akımlarını hesaplayan blokları oluşturmak için denklem (3.48)' den denklem (3.53)'e kadar kullanılarak Şekil 3.14'teki gibi elde edilmiş. qd blokların girdileri vq, vd ve $v0$ dır çıktıları ise q ve d eksenli stator ve rotor akım bileşenleridir.



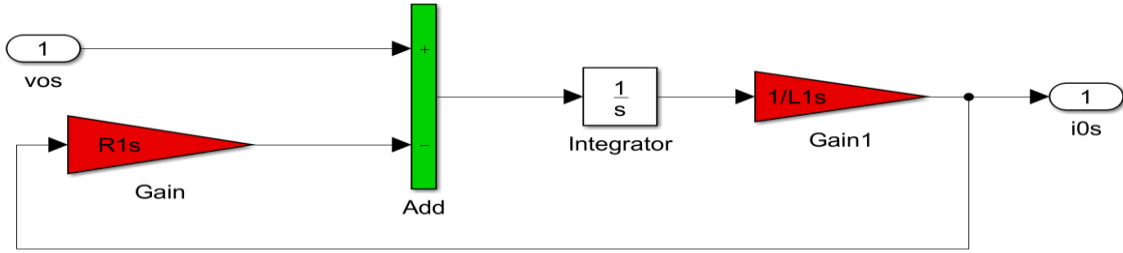
(a)



(b)



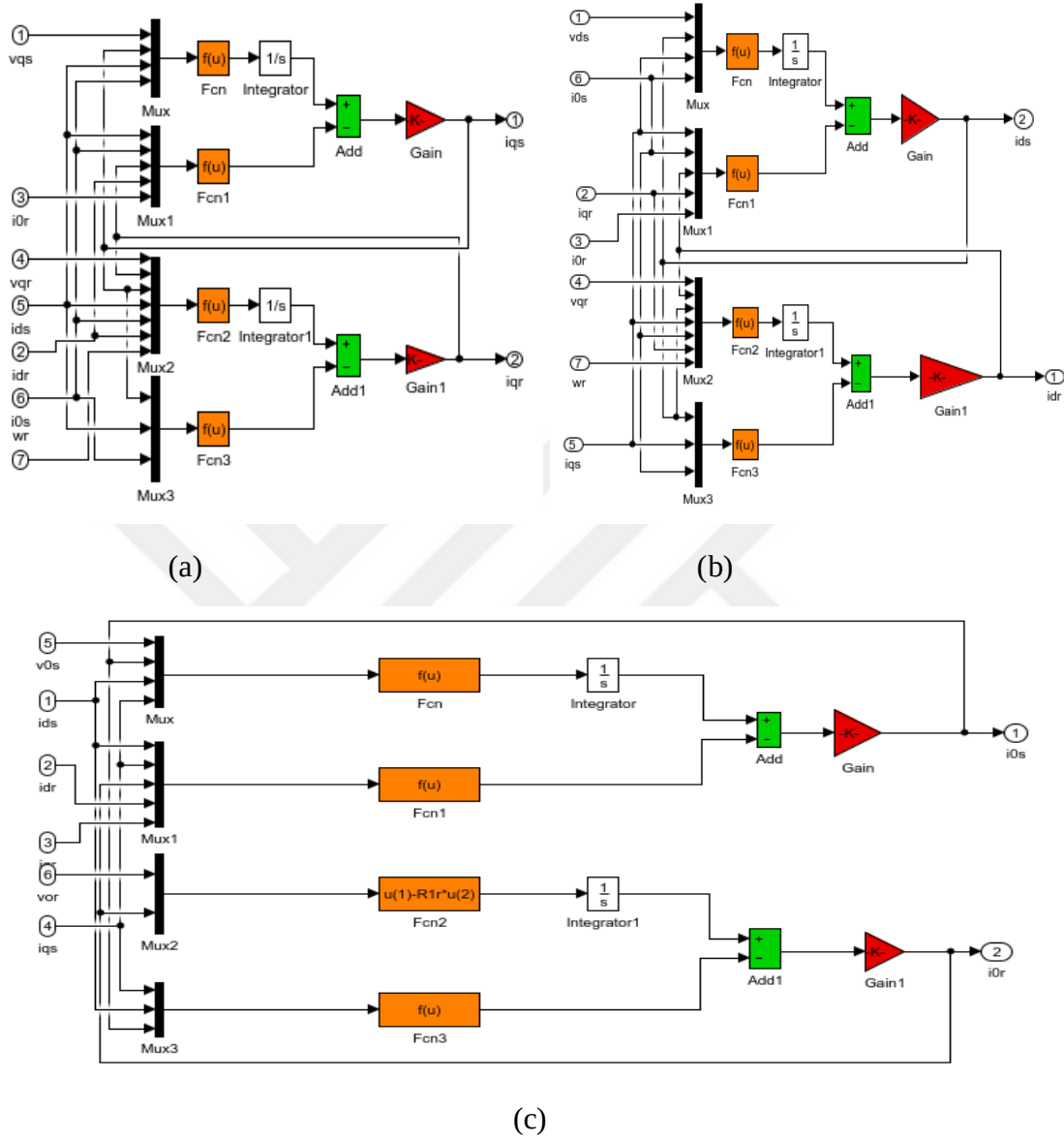
(c)



(d)

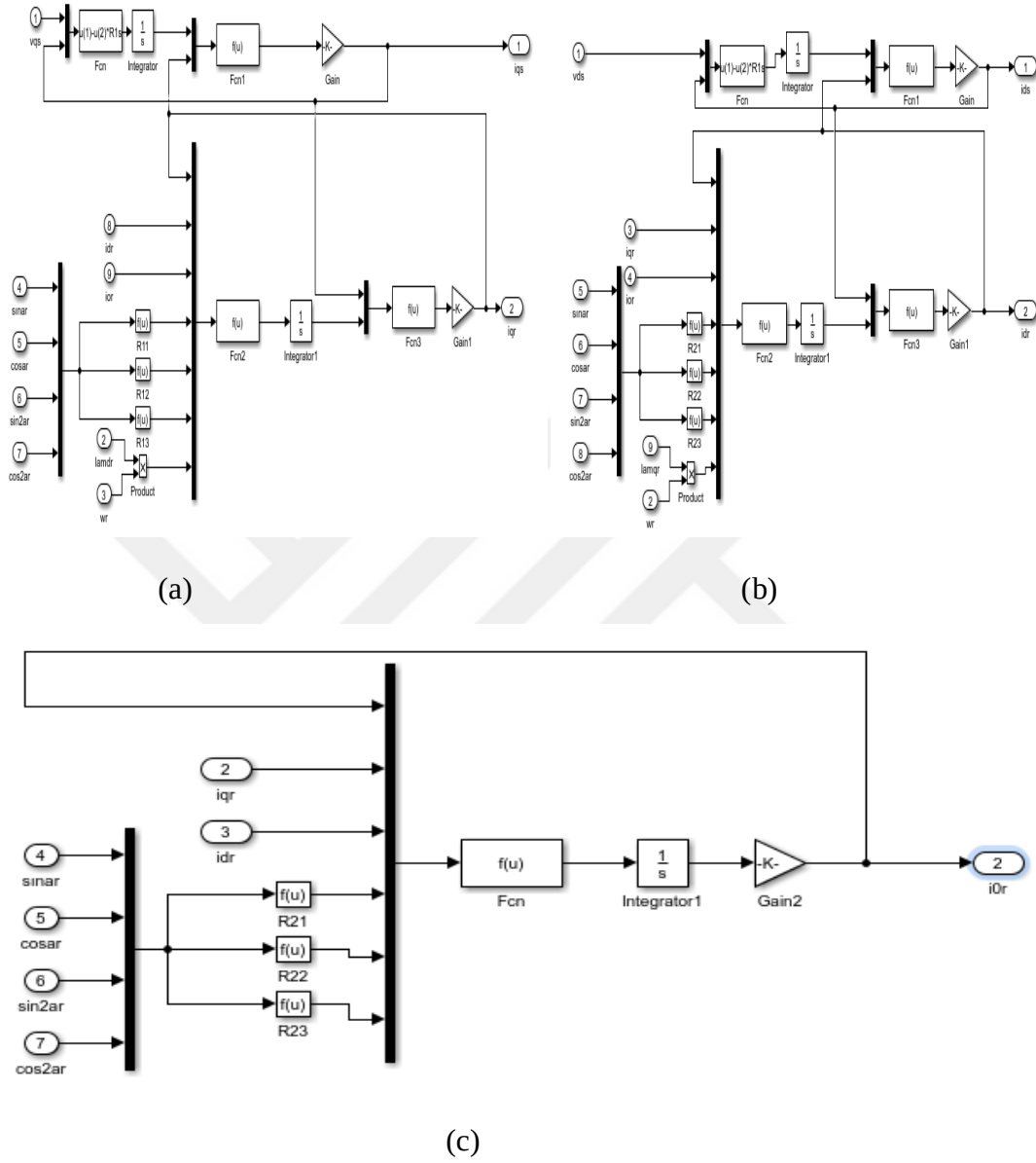
Şekil 3. 14. Arızasız ASM için (a) stator gerilim dönüşüm bloğu (b) q eksenli akımlarını hesaplayan blok, (c) d eksenli akımlarını hesaplayan blok, (c) sıfır akım bileşeni hesaplayan bloklar.

Aynı şekilde stator sağları kısa devre arızalı ASM için $qd0$ Akımlarını hesaplayan blokları oluşturmak için denklem (3.54)'ten denklem (3.59)'a kadar kullanılarak Şekil 3.15'te gibi elde edilmiş. $qd0$ blokların girdileri vq , vd ve $v0$ dir çıktıları ise $qd0$ eksenli stator ve rotor akım bileşenleridir.



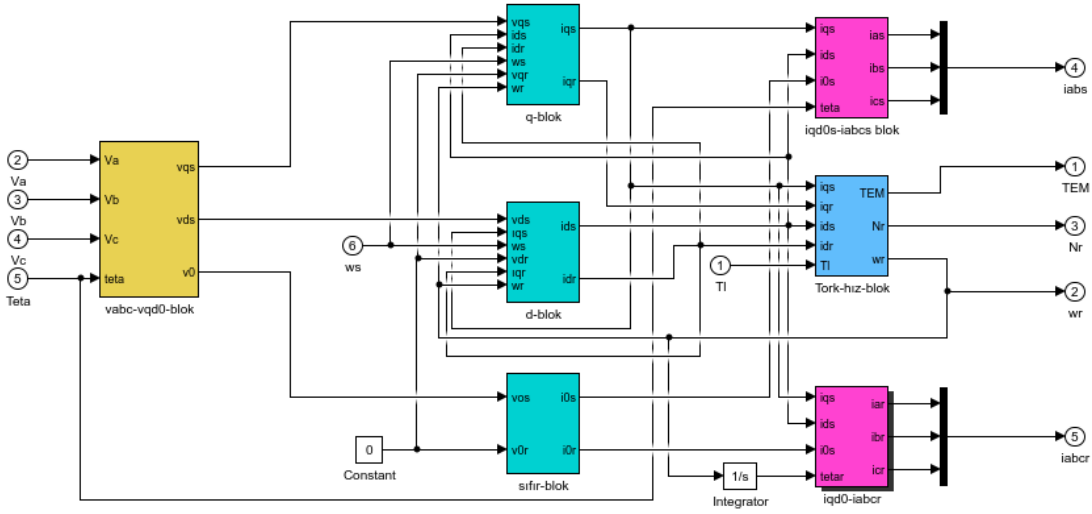
Şekil 3.15. Sator sargıları kısa devre arızalı ASM için (a) q eksenî akımlarını hesaplayan blok ,(b) d eksenî akımlarını hesaplayan blok,(c) sıfır akım bileşenlerini hesaplayan bloklar.

KRÇ arızalı ASM için $qd0$ Akımlarını hesaplayan blokları oluşturmak için denklem (3.60)'tan denklem(3.65)'e kadar kullanılarak Şekil 3.16'daki gibi elde edilmiş. $qd0$ blokların girdileri vq , vd ve $v0$ dır çıktıları ise $qd0$ eksenini stator ve rotor akım bileşenleridir.



Şekil 3.16. RKÇ arızalı ASM için (a) q eksen akımlarını hesaplayan blok, (b) d eksen akımlarını hesaplayan blok, (c) sıfır akım bileşenlerini hesaplayan simulink blokları.

Şekil 3.17’de motor torkunu ve hızını hesaplayan blok gösterilmektedir. Bu bloğun girdileri. qd0 eksen stator ve rotor akım bileşenleridir ve çıktılar ise rotorda indüklenen tork ve rotor hızdır.



Şekil 3.19. ASM'un MATLAB/SIMULINK Modelini oluşturan bloklar.

3.7.MATLAB/GUI Uygulanması

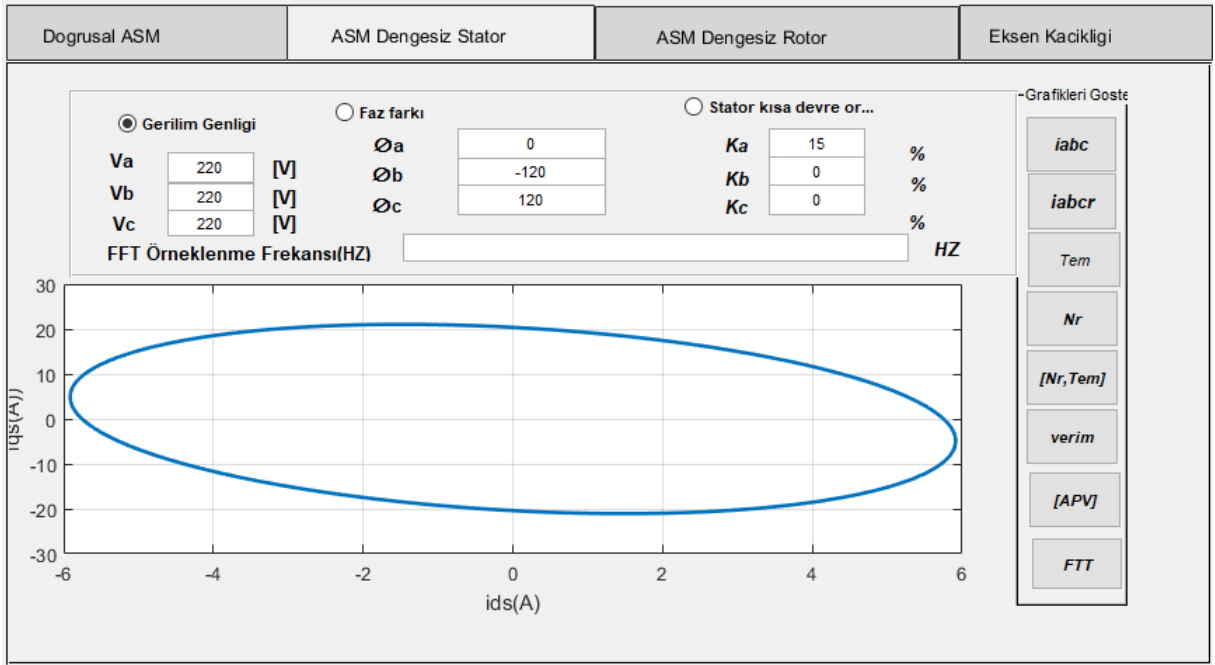
Şekil 3.20'de MATLAB/SIMULINK modeline verileri ve diğer ayarları tanıtmamız için tasarladığımız MATLAB/GUI uygulaması gösterilmektedir. Geliştirdiğimiz matlab ara yüzü ASM için elde ettiğimiz modellerin aynı platform üzerine incelememize kolaylık sağlamaktadır. Söz konusu matlab ara yüzü 'Doğrusal ASM', 'ASM Dengesiz stator', 'ASM Dengesiz Rotor' ve 'Eksen Kaçıklığı' sayfalarından oluşmaktadır.

- 'Doğrusal ASM' sayfası 'parametreler paneli', 'güç kaynağı paneli', 'yük paneli' 'referans seç paneli' ve 'Grafikler göster' panellerden oluşmaktadır. Söz konusu paneller ile farklı güçteki motorların veya aynı güçteki motor parametrelerinin veya yük değişimin motor üzerindeki etkisi kolay bir şekilde incelenebilir. Bununla birlikte referans seç bölümünden senkron referansı, rotor referans ve sabit referans hızı seçebilir ve söz konusu referans hızlarda motorun $qd0$ referans düzlemindeki bileşenlerinin davranışlarını görebiliriz. 'Doğrusal ASM' ana sayfasından girilen motor parametreleri ve simülasyon süresi 'ASM dengesiz stator', 'ASM dengesiz rotor' ve 'Eksen kaçıklığı' sayfalar ile çalıştırılan modeller için de geçerli

Dogrusal ASM	ASM Dengesiz Stator	ASM Dengesiz Rotor	Eksen Kacikligi
Baglanti sekli ☒ ucgeb bali ☐ Yildiz bagli ☒ Dengeli goc kay... ☐ Dengesiz goc kay... Vpp 220 [V] Va 0 [V] f 50 [Hz] Vb 0 [V] Vc 0 [V] Yuk ☐ Sabit yuk M 10 [Nm] t 10 [sec] ☐ Adim yuk M 0 [Nm] t 0 [sec]			
Motor parametreler Rs 0.435 ohm Lr 0.0024 [H] J 0.089 [Kgm^2] Mn 10 [Nm] Rr 0.816 oh Ls 0.0024 [H] B 0 [Kgm^2] W [rpm] Lm 0.0695772 [H] P 4 W 10 [KW] In [A]			
Referans sec ☒ Stator referans ☐ Rotor referansı ☐ senkron referans Grafikleri Goster Vabc/Vqd stator dq bi... Rotor dq bil... Vabc/Vqd Stator Roto... Tork Hiz guc kayma Verim yukle Default Model Kapat			
Simulasyon süresi 5 sec			

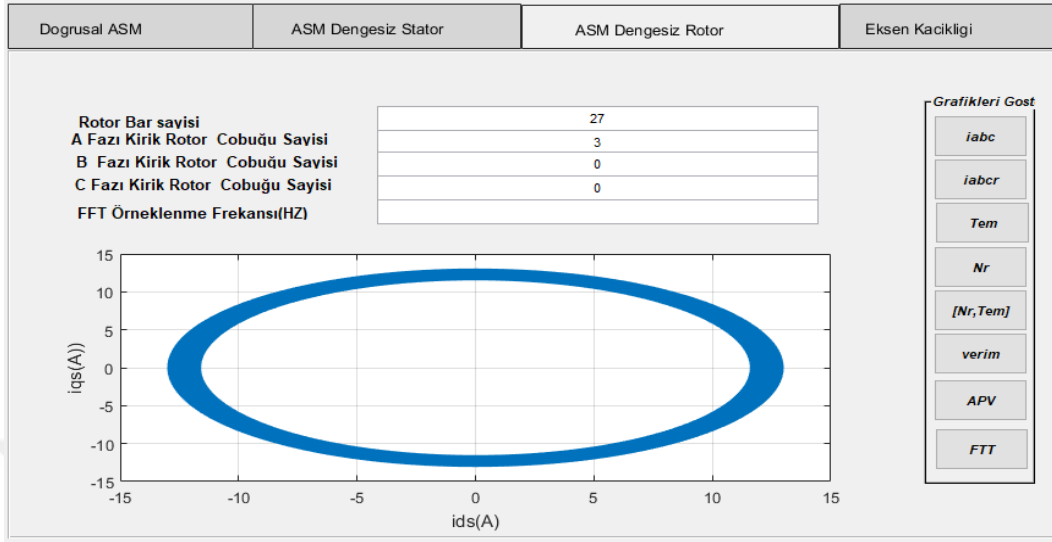
Şekil 3.20. ‘Doğrusal ASM’ ana sayfası.

- ‘ASM dengersiz stator’ sayfasından Stator gerilim dengersizliği, faz açısı değişimi ve stator kısa devre arızaları ayrı ayrı veya her üç arızaların aynı anda incelenebilir. Burada arızalar ‘Grafikleri göster’ panelinden zaman domeninde, a faz akımının frekans spektrumunda ve APV modülü şeklinde görsel olarak incelenebilir. Bununla birlikte bu ara yüzü sayfası stator tek fazında veya her üç fazında oluşan arızaların incelmemize zemin sağlamaktadır.



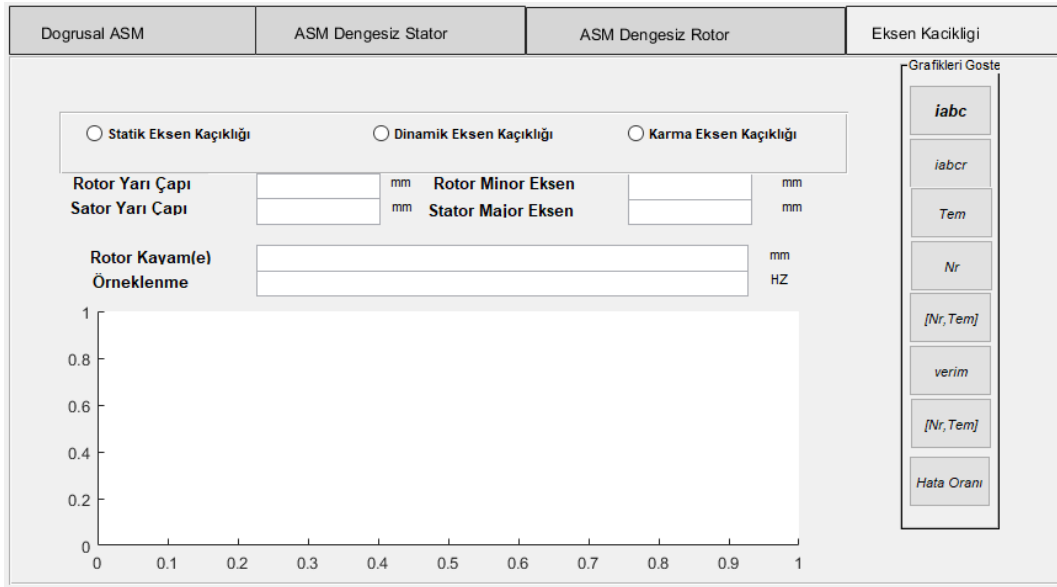
Şekil 3.21. ‘ASM Dengesiz stator’ ana sayfası

- Şekil 3.22, KRÇ arızalı model için geliştirdiğimiz ‘ASM dengersiz rotor’ ara yüzü sayfasını göstermektedir. Bu gui sayfasıyla ile KRÇ arızası hem zaman domeninde ve hem de frekans uzayında HFD Yöntemiyle incelenebilir. Bununla birlikte arıza tespiti için kullanılan APV yöntemi ‘APV’ tuşuna basılarak i_{qs} ve i_{ds} akımları ara yüzü alt kodlama ile motorun kararlı haldeki verileri alınarak görsel olarak görülebilir. Bu gui sayfası ile KRÇ sayısındaki değişimi ve farklı fazda oluşan arızayı kolay bir şekilde incelenebilir.



Şekil 3.22. ASM Dengesiz Rotor 'ana sayfası

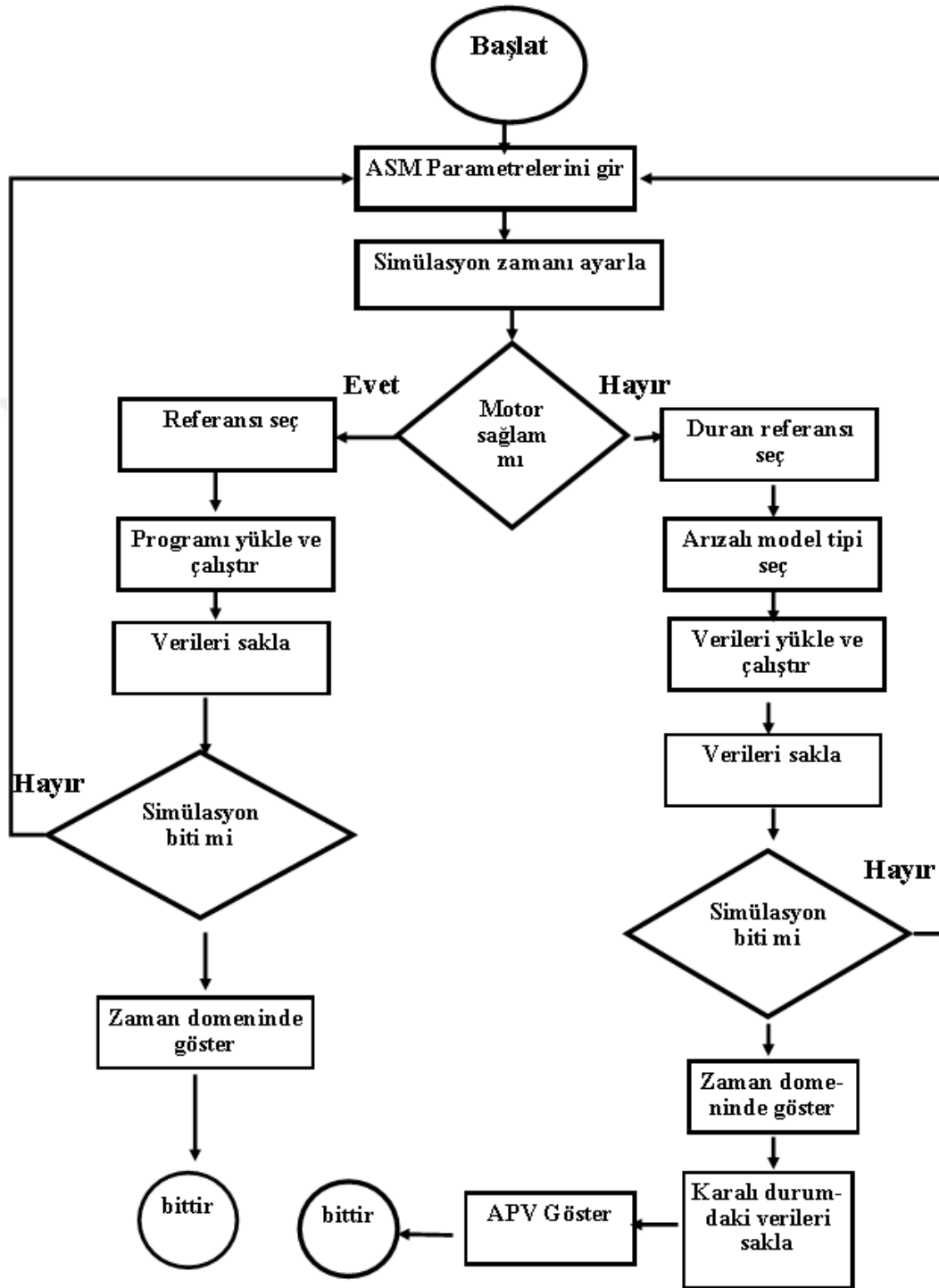
- Şekil 3.23'te Eksen kaçıklığı model için geliştirdiğimiz Ara yüzü sayfası görülmektedir 'Eksen kaçıklığı' ana sayfası kullanılarak SEK, DEK ve KEK hem zaman düzleminde ve hem frekans spektrumunda ayrı ayrı şekilde incelenebilir. Arıza etkilerini görmek için 'grafik göster 'panelindeki botunlar ile zaman düzleminde motor davranışları görülebilir bununla birlikte FFT botun ile arızadan dolayı oluşan arıza frekansları ve genliklerini incelenebilir.



Şekil 3.23. Eksen Kaçıklığı' ana sayfası

Sağlam ve arızalı ASM için geliştirdiğimiz MATLAB/GUI akış şeması Şekil 3.24'te gösterilmektedir. Oluşturduğumuz diyagramda görüldüğü gibi ilk önce doğrusal ASM sayfasında motor parametreleri, statora uygulanan gerilim ve frekansı, motora uygulanan yük momenti ve simülasyon zamanı default veya manuel olarak girilir. Daha sonra motor davranışlarının arızasız durumlarını görmek istendiğinde referans seç panelinden istenen referans hızı seçilir. 'Yükle' botuna bastığımızda yaptığımız ayarlamalar ve girdiğimiz veriler Simulink modellere tanıtılmış oluruz. 'Grafikler göster' panelinden üç faz düzleminde stator ve rotor akımları, indüklenen moment, rotor hızı ve motor verimi grafiksel olarak ilgili botunlar basılarak görülebilir. Bununla birlikte stator ve rotor $qd0$ akım bileşenleri değişimi de ilgili botunlar ile zaman domeninde izlenebilir.

Arızalı ASM için ise önce arızalı model ait MATLAB/GUI açılıyor daha sonra arıza verileri modele tanıtılıp simülasyonu başlatılıyor, zaman domeninde değişkenlerin değişim ilgili botunlar ile grafikleri çizdiriliyor. MAC-HFD ve APV yöntemler ile arıza durum analizi için simülasyondan elde edilen i_s^q ve i_s^d akımlarının karalı haldeki verileri çıkartılıyor i_s^q akımın frekans spektrumu çizdiriliyor, i_s^q ve i_s^d verileri kullanılarak APV modülü elde ediliyor. daha sonra APV zaman uzayında açılıyor ve HFD ile elde edilen APV modülünün frekans spektrumuu incelenebilir.



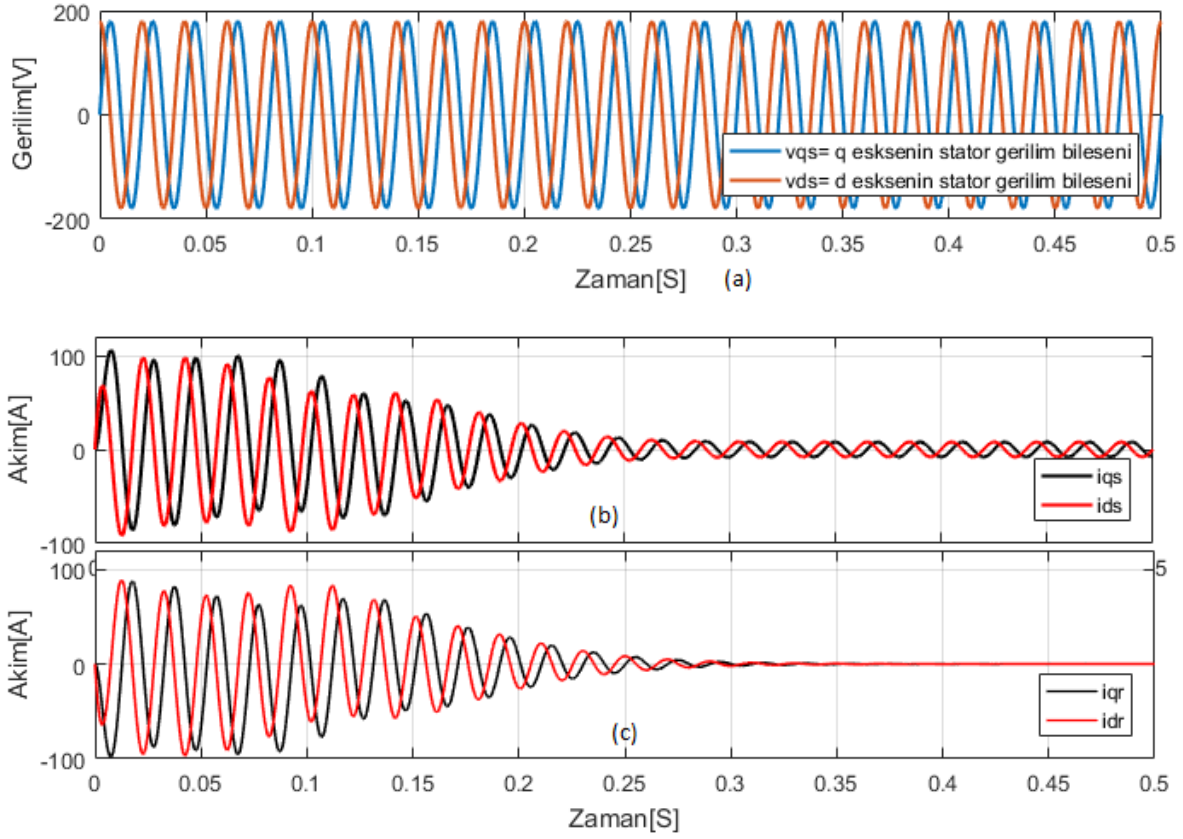
Şekil 3.24. MATLAB/GUI çalışma akışı

4. SİMÜLASYON SONUÇLARI VE BULGULAR

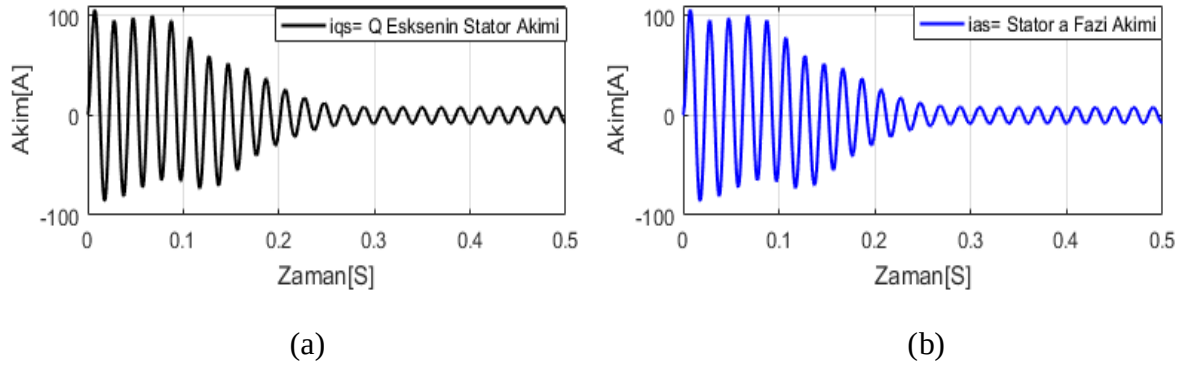
Bu bölümde sağlam ve arızalı ASM için tasarladığımız modellerin simülasyon sonuçları geliştirdiğimiz MATLAB/GUI'yı kullanarak elde edilmesi anlatılacaktır. İlk olarak arızasız ASM'un boşa çalışma durumu için $qd0$ referans çerçevesinin bileşenleri duran referans, rotor referans ve senkron referans hızları seçilerek incelenmiştir. Daha sonra duran referans hızını dikkate alarak stator sargıları kısa devre arızaları, KRÇ arızası ve eksen kaçıklığı arızaları gibi farklı arıza senaryolarında motor değişkenlerinin değişimi grafiksel olarak zaman domeninde gösterilmiştir. Arıza durumu analizi amaçlı MCSA-HFD, APV ve APV-HFD yöntemleri kullanılmış. Bunun için i_s^q ve i_s^d akımlarının motorun kararlı halindeki verileri elde edilmiş MCSA- HFD yöntemi ile i_s^q akımının frekans spektrumları incelenmiştir. APV- HFD için ise motorun kararlı hali için i_s^q ve i_s^d akımlar verileri kullanılarak APV modülleri çizdirilmiş ve son olarak APV modülü üzerine söz konusu arızaların mevcut olması durumlarında APV- HFD analizi yapılarak APV modüllerinin frekans spektrumları incelenmiştir.

4.1.Sağlam ASM

Şekil 4.1'(a),(b) ve(c)'de sırasıyla sabit referans çerçevesinde motorun boşa çalışma (serbest çalışma) durumu için q ve d eksen stator gerilimleri, stator ve rotor akım bileşenlerin değişimleri görülmektedir. Şekil 4.2' de ise duran referans düzleminde akımı i_s^q ile motorun doğal referans düzlemindeki stator a faz akım değişimleri görülmektedir. Duran referans çevresinde q eksen a faz eksen ile denk geldiği için i_s^q akımı i_s^a akımı ile aynı davranışları sergilemektedir. Dolayısıyla arızalı ASM için arıza analizi stator a faz akımı izlenme yöntemi ile yapmak istendiğinde i_s^q akımı üç faz düzlemine dönüştürmeden MCSA yönetiminde a faz stator akımı olarak kullanılabilir.



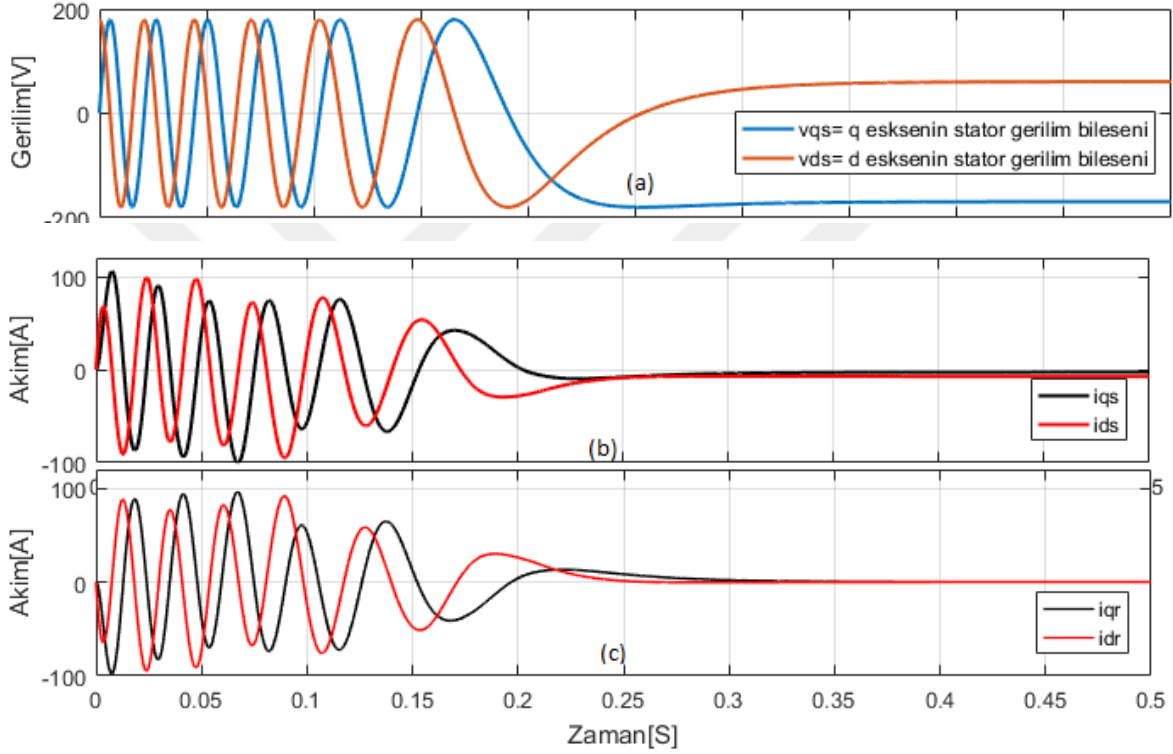
Şekil 4.1. (a),(b),(c) Sabit referans çerçevesinde qd eksenli sırasıyla stator gerilimleri, akımları ve rotor akımlarıdır.



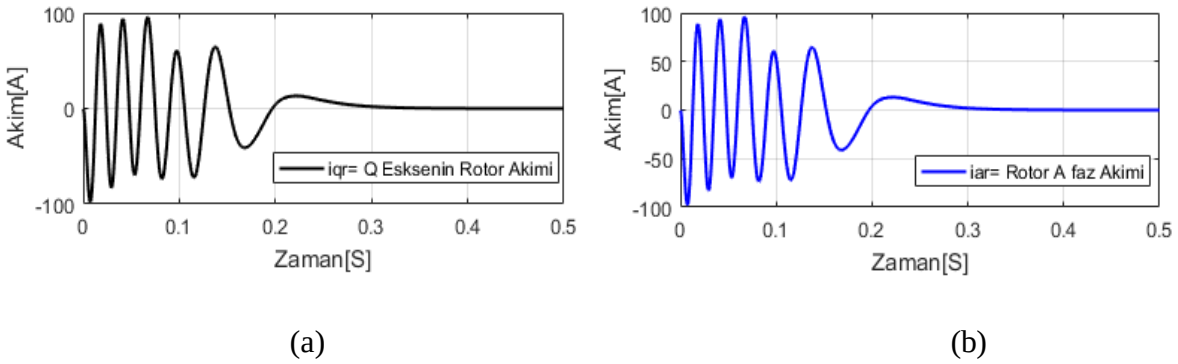
Şekil 4 2. (a),(b) sırasıyla, sabit referans çerçevesinde stator q eksenli akımı ve 3 faz düzleminde statorun a faz akımı.

Şekil 4.3'(a), (b), (c)'de sırasıyla rotor referans çerçevesinde motorun boşa çalışma durumu için q ve d eksenli stator gerilimleri, stator ve rotor akım bileşenlerinin değişimleri

görülmektedir. Şekil 4.4' te ise rotor referans düzleminde i_r^q akımı ile motorun doğal referans düzlemindeki rotor a faz akım değişimleri görülmektedir. Rotor referans çevresinde rotorun q eksenini ile rotorun a fazı arasında açısal konumu farkı sıfır olduğu için i_r^q akımı i_r^a akımı ile aynı dalga formuna sahiptirler.

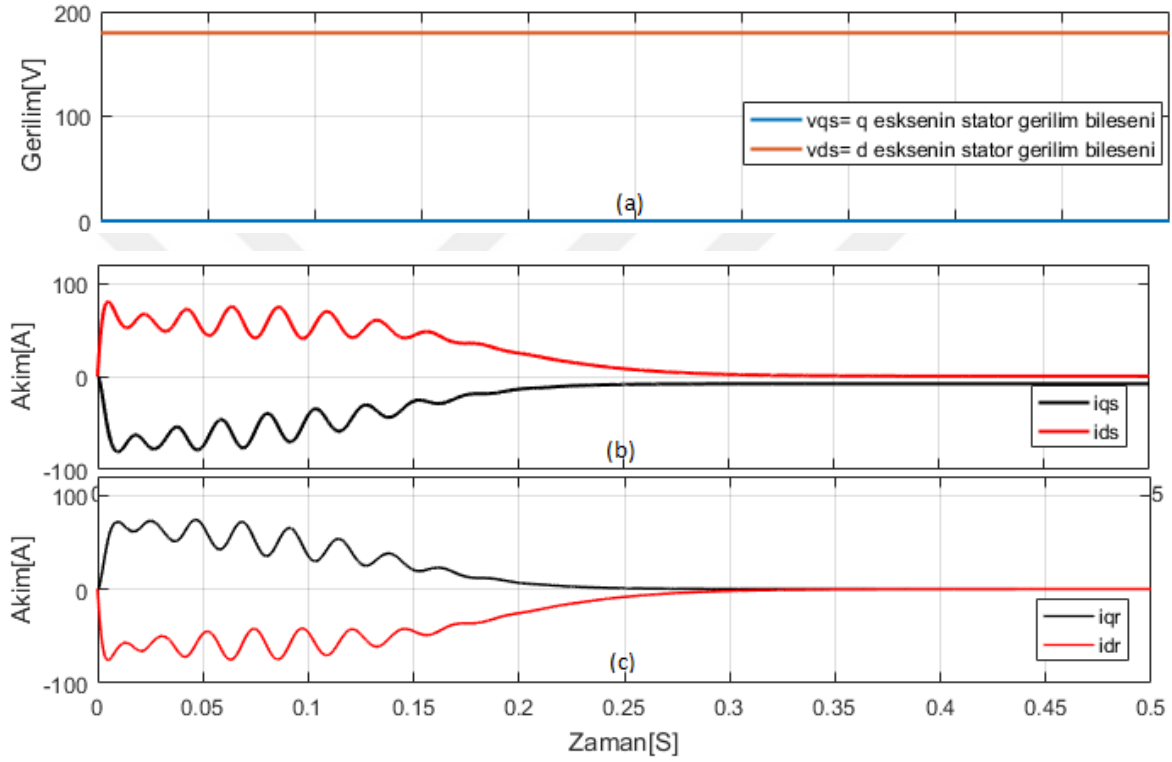


Şekil 4.3. (a),(b),(c) sırasıyla rotor referans çerçevesinde qd eksenini Stator gerilimi, akımı ve rotor akımıdır.



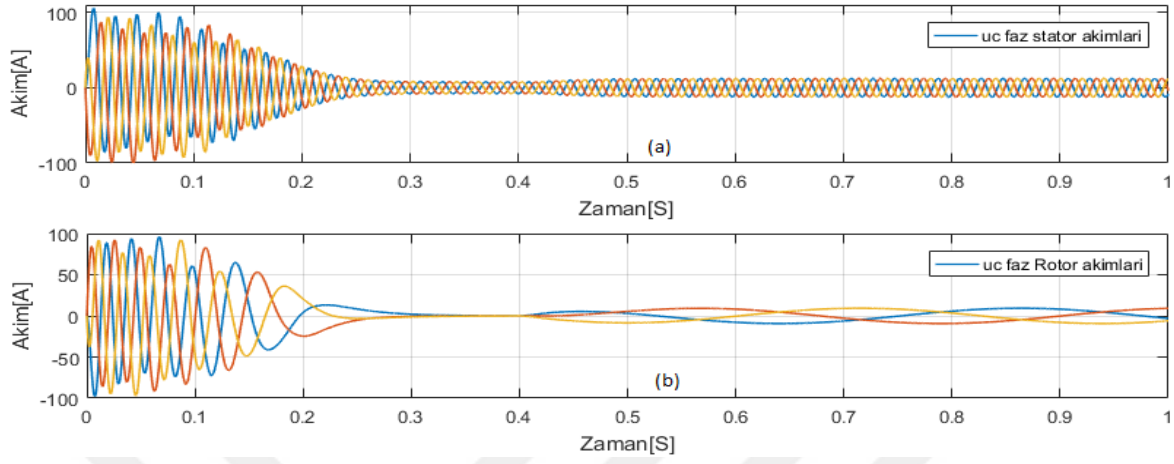
Şekil 4.4. (a),(b) sırasıyla rotor referans çerçevesinde rotor q eksenini akımı ve üç faz düzleminde rotor a faz akımı.

Şekil 4.5’’te senkron referans çerçevesinde boştta çalışan motor için elde edilen q ve d eksen stator gerilimleri, stator ve rotor akım bileşenlerinin değişimleri görülmektedir, burada $v_{qs}=0$ iken v_{ds} ise DC dalga formunda olduğu görülmektedir, stator ve rotor akımları da motor kalıcı hale geldikten sonra tam DC dalga şeklinde oldukları görülür.

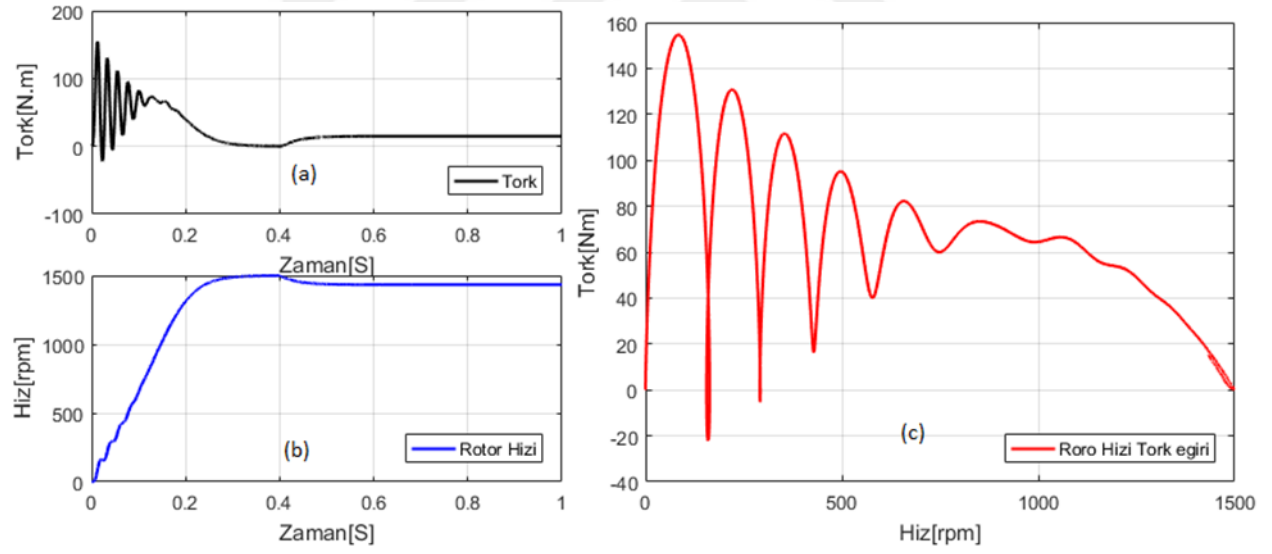


Şekil 4.5. (a),(b),(c) sırasıyla senkron referans çerçevesinde qd eksen stator gerilimi, akımı ve rotor akımı.

Şekil 4.6 ve şekil 4.7’de 3 faz düzleminde stator ve rotor 3 faz akımlarının, indüklenen torkun, rotor hızının ve hız-tork değişimi görülmektedir, ASM endüktif yük olduğunda geçici rejim bölgesinde nominal akımın 10 katından fazla akım çektiği görülmektedir. Motor 0.27sn’den sonra kararlı hale gelmiş ve 0.4sn’den sonra tam yük altında çalıştırılmıştır.



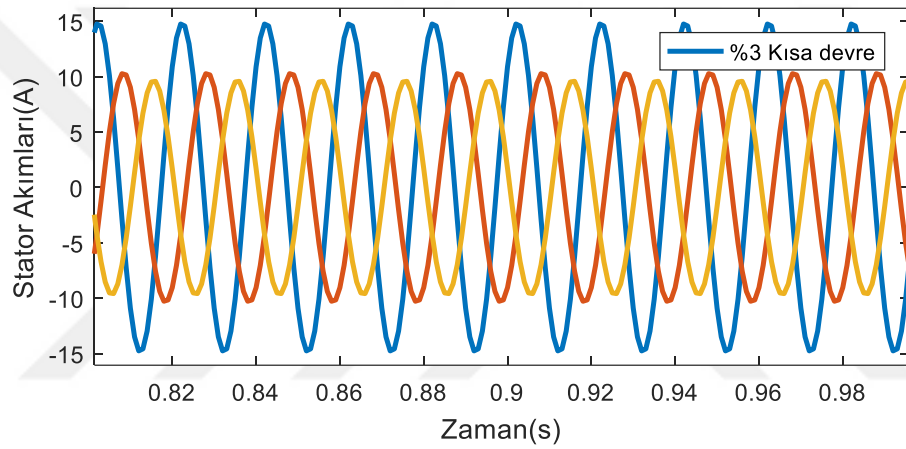
Şekil 4.6. (a),(b)sırasıyla 0.4sn'den sonra tam yüklü çalışma için sator ve rotor üç faz akımları.



Şekil 4.7. (a),(b),(c) 0.4sn'den sonara tam yük altında rotorda indüklenen moment, rotor hızı ,hız -moment değişimi

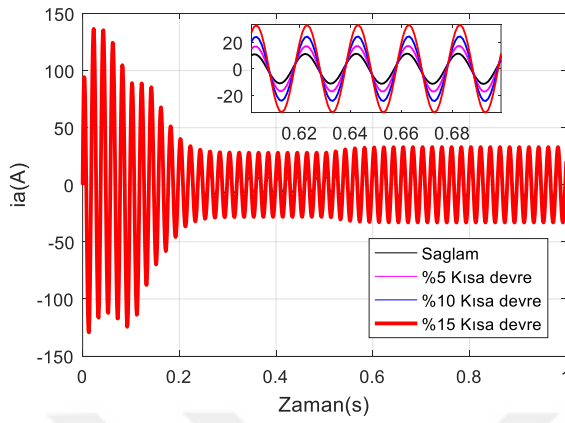
4.2.Stator Sargıları Kısa Devre Arızası

Tezin bu kısmında, bölüm 3'te stator sargıları kısa devre olan motor için geliştirilmiş MATLAB/SIMULINK modeli kullanılarak **EK A-5**'te verilen motor için simülasyon sonuçları elde edilmiş. Çalışma [55,56]'da deneysel çalışmalar için kullanılmış motoru, geliştirdiğimiz model üzerine test edilmiş, deneysel sonuçlar ile simülasyon sonuçları birbirine yakın olduğunu görülmüş. Şekil.4.8'de *a* fazında %3 kısa devre olduğunda arızalı olan fazda akım yükselişi açık bir şekilde görülmektedir.

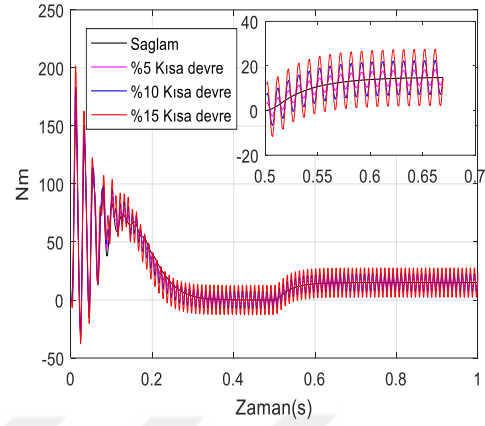


Şekil 4.8. a fazında %3 kısa devre arızası için stator faz akımlarının simülasyon çıkışı.

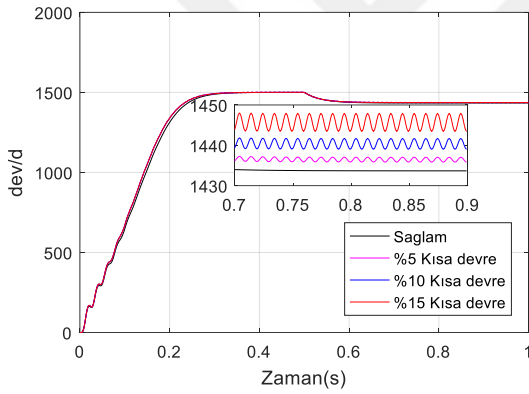
Şekil 4.9(a), (b), (c), (d) sırasıyla sağlam, a fazında %5, %10 ve %15 kısa devre arızası durumlarında akım asimetriğinden dolayı motoru pozitif ve negatif yönde döndürmeye zorlayan alan oluşmasından tork, hız ve hız- tork dalgalarında salınımlar ortaya çıktığı ve arıza artışıyla birlikte salınımların genliklerindeki yükseliş görülmektedir.



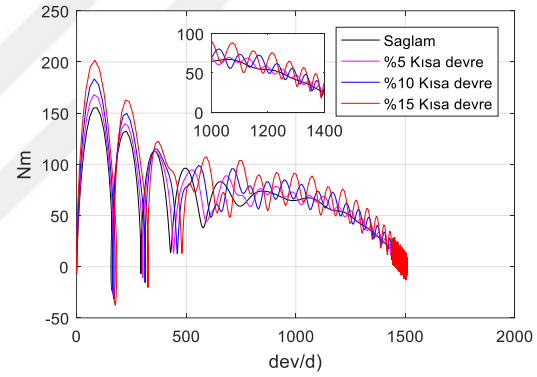
(a)



(b)



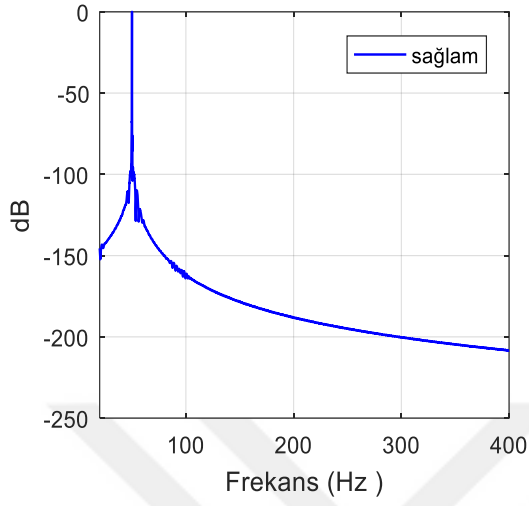
(c)



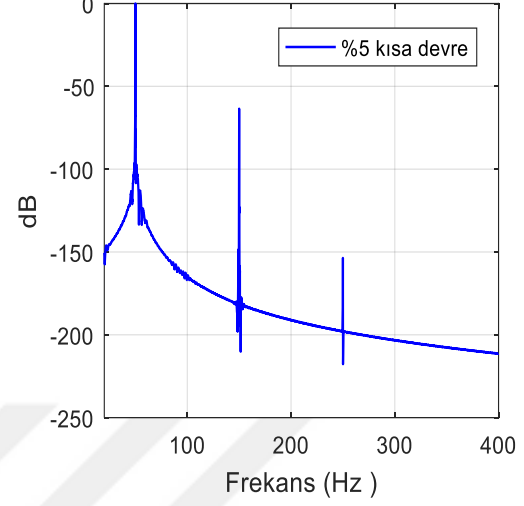
(d)

Şekil 4.9. Sağlam, a fazda %5, %10 ve %15 kısa devre arızası durumlarında 0.5sn'den sonra tam yük altında, (a)a faz akımı, (b)moment, (c)hız, (d) hız moment için elde edilen simülasyon sonuçları.

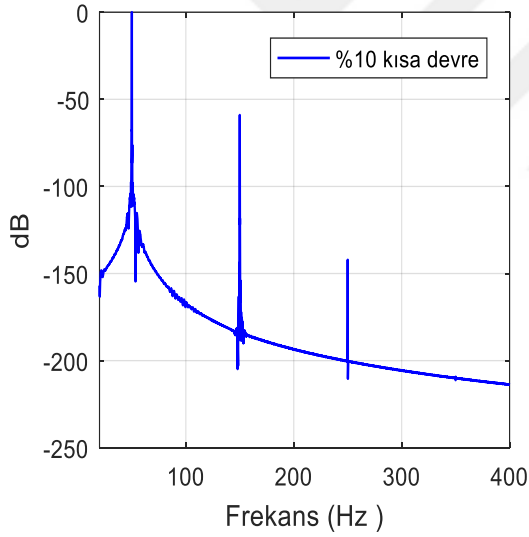
Zaman uzayındaki sinyaller incelenerek stator sargılarının kısa devre arızasının diğer arızalardan ayrılması oldukça zordur. Dolayısıyla arızanın hangi harmoniklerde olduğu akım sinyallerinin kararlı hale geldikten sonraki değerleri örneklenerek, frekans uzayında incelenmesiyle kolay bir şekilde belirlenmiş olur. Şekil 4.10'da sağlam, a fazında %5, %10 ve %15 kısa devre arızası için a fazı akımının frekans spektrumu görülmektedir. Arızadan dolayı frekans spektrumunda $3f$, $5f$ ve $7f$ 'da harmonikler oluştuğu ve bu harmoniklerin genliklerinin arıza artışına bağlı olarak daha belirgin hale geldikleri görülmektedir. Tablo.4.1 'de oluşan harmoniklerin genlikleri özetlenmiştir.



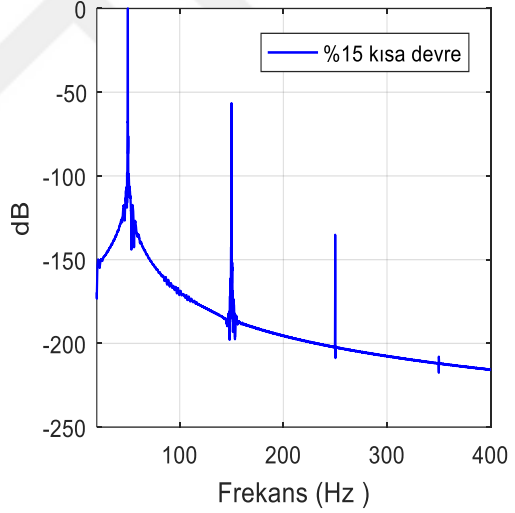
(a)



(b)



(a)



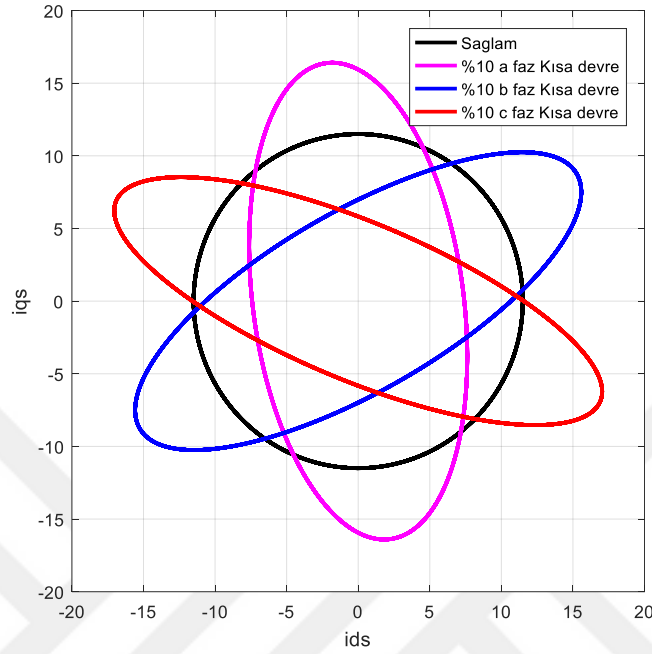
(b)

Şekil 4.10. a fazında (a)sağlam (b)%5, (c)%10 ve (d)%15 kısa devre arızası durumları için a faz akımının frekans spektrumları. Model ode45 solver-variable step- step size e-4 ile çözülmüştür simülasyon süresi 60sn olarak ayarlanmıştır.

Tablo 4.1. stator sargıları Kısa devre arızası için a faz akımının frekans spektrumları ve genlikleri.

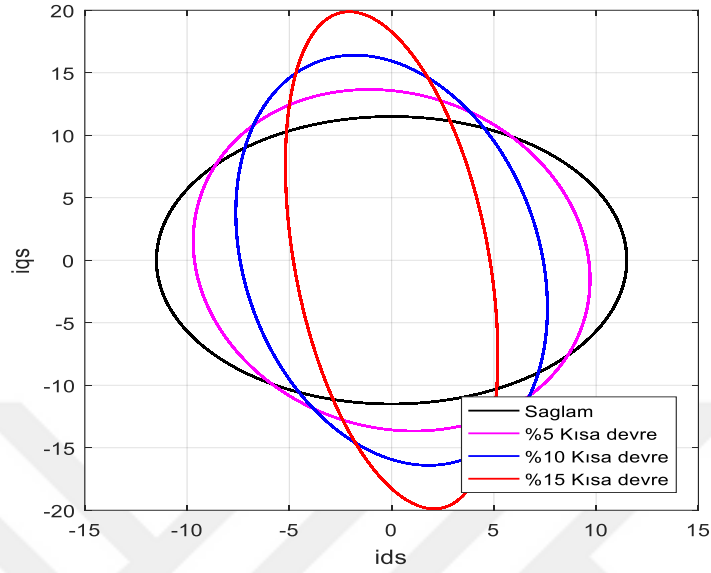
Arıza Durumu <i>a</i> Fazı	Şekil (4.10)	$3f_s$		$5f_s$		$7f_s$		Maksimum <i>a</i> faz akımı(A)
		Hz	db	Hz	db	Hz	db	
%5 kısa devre	(b)	150	-64	250	-153	350		17
%10 kısa devre	(c)	150	-59	250	-142	350		24
%15 kısa devre	(d)	150	-56	250	-135	350	-208	31

Stator kısa devre sargı arızasını tespit etmek için en etkili yöntem ise APV yöntemidir. Şekil 4.11’de sağlam, *a* fazında %10 kısa devre arızası, *b* fazında %10 kısa devre arızası ve *c* fazında %10 kısa devre arızası durumları için ayrı ayrı çizdirilmiş APV modülleri gösterilmektedir. Arızasız durumda i_s^q ve i_s^d akımları dengeli olduklarından ve arasında 90° faz farkı olmasından dolayı ortaya çıkan APV modülü dairesel şekilde olduğu görülmektedir. Arızalı durumda ise APV şeklinde elipsel bozulma meydana geldiği, elipsin ana ekseninin eğimi *y* eksenine göre değiştiği ve elipsin ana ekseninin *y* eksenine ile eğimi *a* fazı, *b* fazı ve *c* fazı için farklı açılarda yer aldıkları görülmektedir.

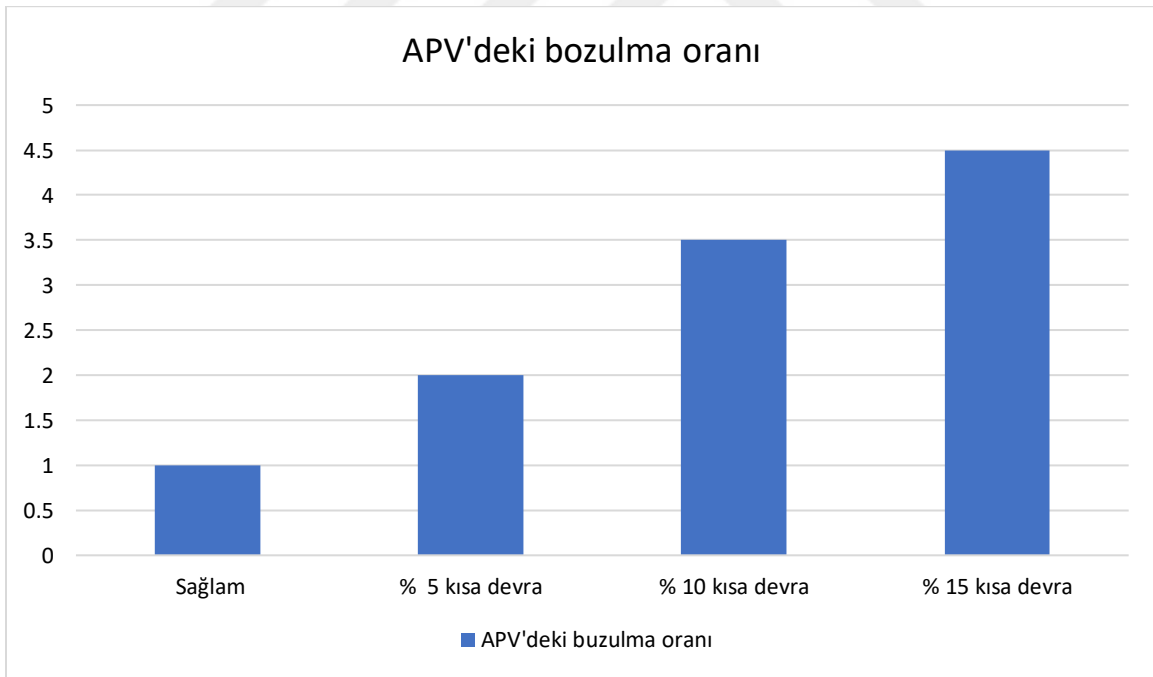


Şekil 4.11. Sağlam, a,b,c fazlarda %10 stator sargıları Kısa devreli motor için APV modülleri.

Şekil 4.12 (a)'da sağlam, stator a fazında %5, %10 ve %15 kısa devre arızası için elde edilen APV modülleri gösterilmektedir, Arıza artışı, elipsin majör yarı çapında yükselişe sebep olurken minör yarıçapında ise azalışa yol açmaktadır. Arızasız durumda APV modülü 11.5 birim yarı çapı ile koordinat merkezine sabitlenmiş dairesel şekildedir. %5 arıza için elde edilen elipsel şeklindeki APV modülünün majör eksenin uzunluğu 13.4 birim ve minör eksenin uzunluğu 9.5 birim olup y eksenini ile 5° açı ile yer almaktadır. %10 kısa devre için elde edilen elipsin majör eksenin uzunluğu 16.4 birim ve minör eksenin uzunluğu 7.3 birim olup y eksenini ile 6° açı ile yer almaktadır. %15 hata durumundaysa elipsin majör eksen uzunluğu 19.5 birim ve minör eksen uzunluğu 4.78 birim olup y eksen ile 8° açı ile yer almaktadır. Şekil 4.12(b) 'de sağlam %5, %10, %15 kısa devre arızası durumları için elde edilen elipsel şeklindeki APV modüllerinin majör eksenini ile minör eksenini aralarındaki oran değişimleri dikkate alınarak arıza şiddetinin bir göstergesi olarak APV modülünde meydana gelen bozulama oranı görülmektedir.



(a)

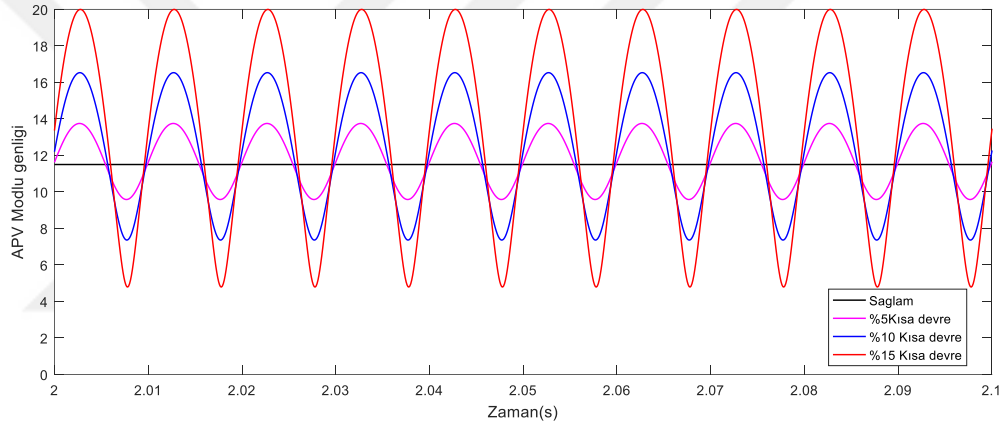


(b)

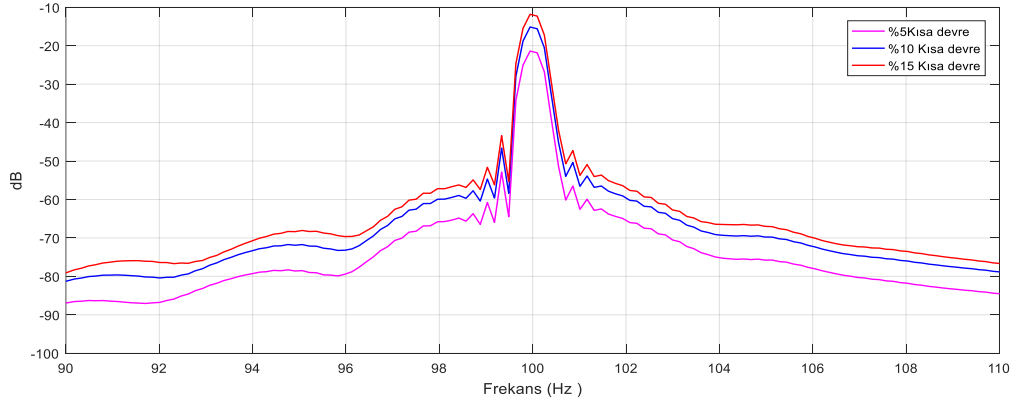
Şekil 4.12. a faz akımının (a)sağlam, (b) %5, (c) %10, (d) %15 kısa devre arızası durumları için çizdirilmiş APV modülleri (b)APV Modülerinde bozulma oranı

Şekil 4.13(a)'da APV'ün zaman domeninde açılımı gösterilmektedir. Sağlam durum için dairenin yarı çapı sabit olduğunda zaman ile değişimi de sabittir. Arıza durumunda ise alınan elipsel şeklindeki APV örnekleri zaman ile değişim göstermektedir. Bir periyot boyunca alınan sinyalleri incelediğimizde arıza artışıyla birlikte sinyalin tepe değerlerinde yükselişi açık bir şekilde görülmektedir.

Şekil 4.13(b)'de APV modül üzerine HFT yöntemi kullandığımızda arızalı frekans bileşenleri $2fs$ de görülmüştür. %5 kısa devre için frekans genliği -21db, %10 kısa devre arızası için -15db ve %15 kısa devre için -11db olarak belirlendi.



(a)

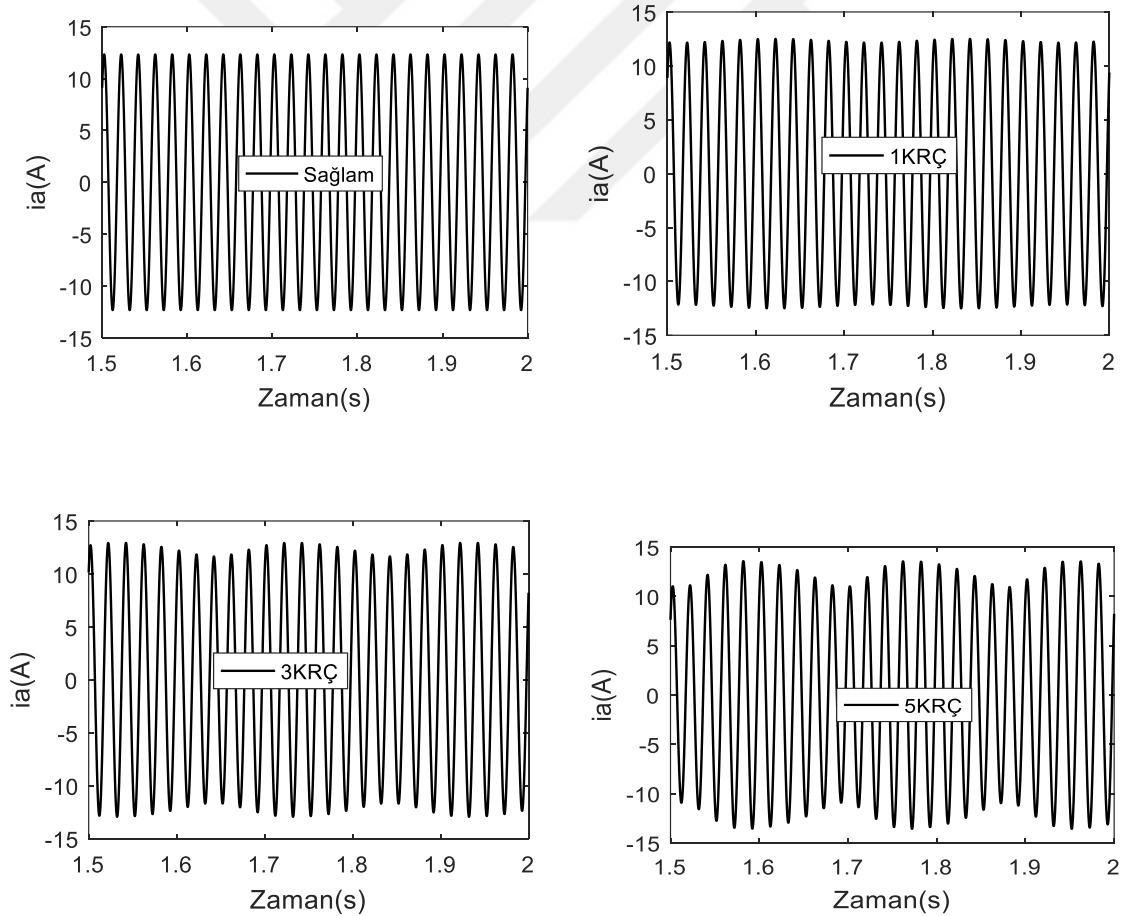


(b)

Şekil 4.13. Sağlam, %5, %10 ve %15 kısa devre arızası durumlar için APV modülerinin zaman dizisinde açılımları, (b) APV Modülerinin frekans spektrumları.

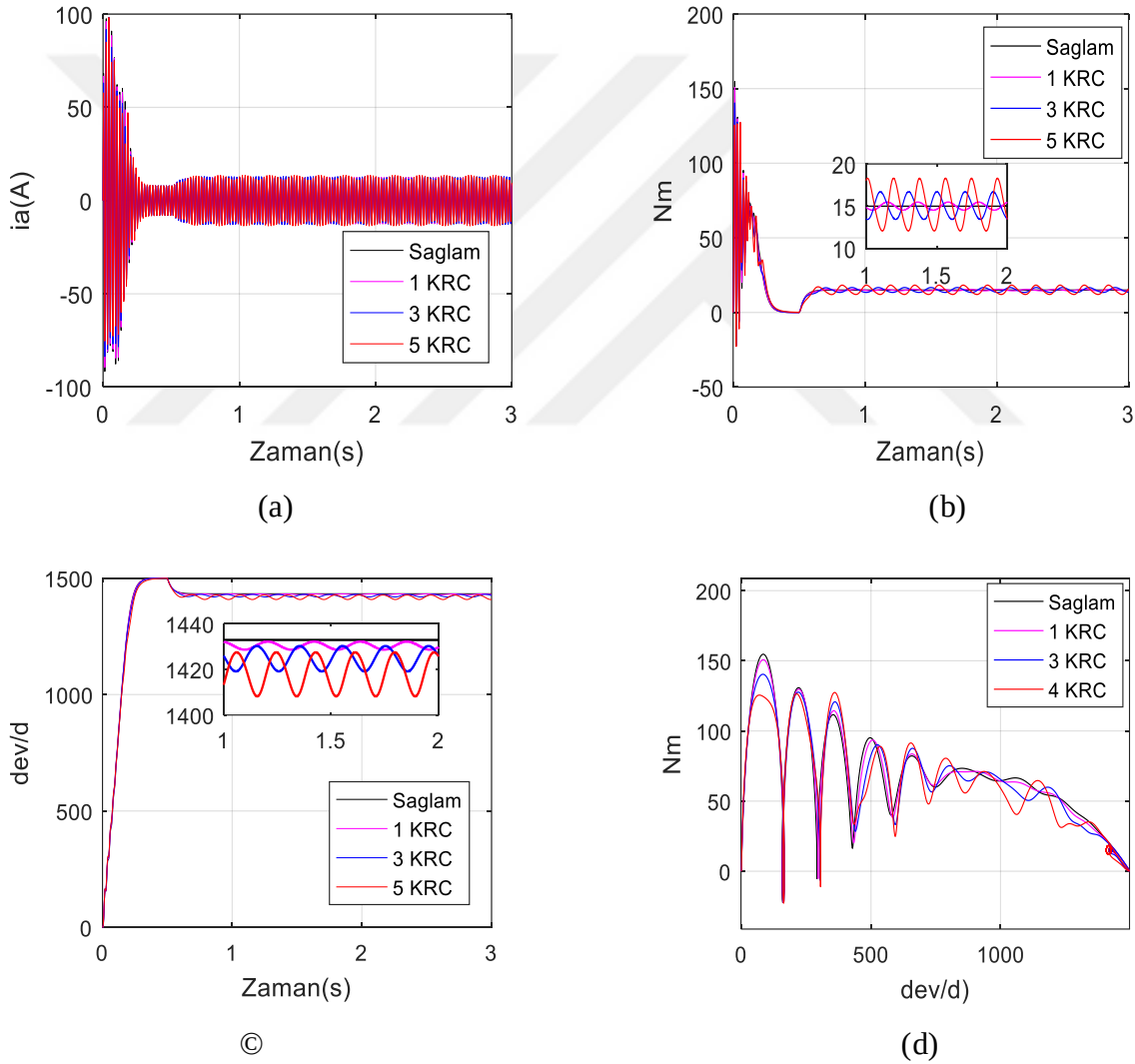
4.3.Kırık Rotor Çubukları

KRÇ'ların motor performansı üzerindeki etkisi incelenmesi için **EK A-5**'te verilen motor parametreleri kullanılarak bölüm üçte KRÇ için geliştirilmiş Simulink model üzerine test edilmiştir. Benzetim sonuçları zaman uzayında 1KRÇ, 3 KRÇ ve 5 KRÇ arıza mevcut olması durumları için elde edilmiştir. Motorda rotor çubuğu kırık olması durumunda kırık rotor çubukları üzerine akım dolaşmadığından stator ile rotor arası manyetik alanda simetrisizlik meydana gelmektedir. Dolayısıyla stator ve rotor akımlarında bozulma ortaya çıkmaktadır. Şekil 4.14'te sağlam, 1KRÇ, 3 KRÇ ve 5 KRÇ arıza durumlarında stator a faz akım dalgaları gösterilmektedir. Arızadan dolayı akım sinyal şeklinde bozulma meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 4.14. Stator a faz akımı için sağlam 1KRÇ, 3KRÇ ve 5KRÇ arızaların durumlarında simülasyon çıkışı.

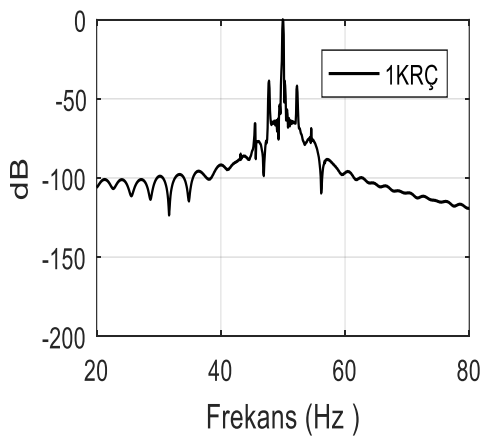
Şekil 4.15'te sağlam, 1KRÇ, 3KRÇ ve 5KRÇ arıza durumlarında 0.5sn'den sonra tam yük altında moment ve hız dalgalarının geçici ve kararlı haldeki davranışları görülmektedir. KRÇ arızası artışıyla birlikte geçici ve kararlı bölgelerdeki moment ve hız değerlerinde sağlam durumun aksine dalgalanma meydana geldiği görülmektedir. Bununla birlikte KRÇ sayısı artmasıyla birlikte ortalama hız değerlerinde düşüş ortaya çıktığı gözlenmiştir.



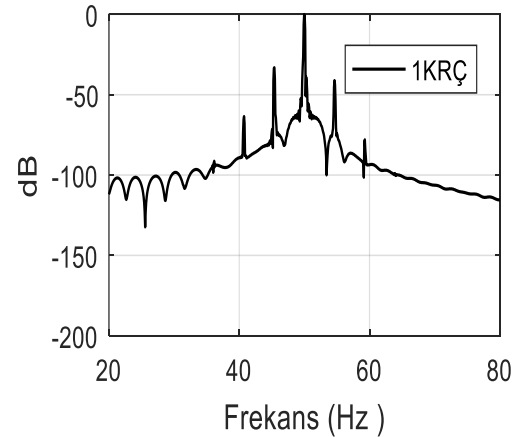
Şekil 4.15. Sağlam, 1KRÇ, 3KRÇ ve 5KRÇ arızası durumlarında 0.5sn'den sonra tam yük altında, (a)a faz akımı, (b)moment, (c)hız, (d) hız moment için simülasyon sonuçları.

KRÇ arızası stator akımının frekans spektrumunda kaynak frekansı etrafında kayma frekansının iki katı olan yan bantlarda arıza frekans bileşenlerinin görünmesine neden olur. Kayma değeri rotor hızına bağlı olduğu için motor hızındaki azalma kaymanın artmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla hızın düşmesiyle birlikte yan frekans bant aralıklarında genişleme meydana gelmektedir. Buna ilaveten KRÇ sayılarının artmasıyla birlikte motorun hızı düştüğü için yan frekans bantlardaki frekans bileşenleri de kayma frekansına göre kaymak frekansından uzaklaşmaktadır.

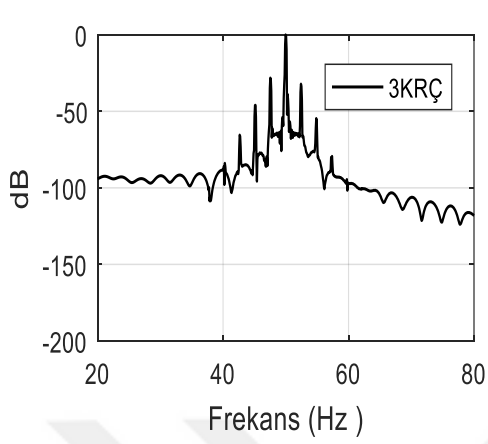
Şekil 4.16 (a), (b), (c), (d), (e), (f) yarı yükleme ve tam yükleme koşulları altında ve 1KRÇ, 3RKÇ ve 5RKÇ arıza olması durumlarında stator a faz akımının frekans spektrumlarını göstermektedir. Şekil 4.16 (a), da 1 RKÇ olması durumunda ve motorun yarı yükleme altında çalıştığı için kayma frekansı düşük olduğundan yan bantlardaki frekans bileşenleri kaynak frekansına yakın olduğu görülmektedir. Şekil 4.16, (a), (c), (e) yarı yükleme durumunda akım frekans spektrumunda 1 KRÇ, 3RKÇ ve 5RKÇ arızalardan dolayı oluşan frekans bileşenleri kırık rotor çubuklarının artmasıyla beraber kaynak frekansından uzaklaşma ve hata frekanslarının genliklerinde yükselme meydana geldiğini göstermektedir. Aynı şekilde Şekil 4.16 (b), (d), (f) tam yükleme koşullarında ve 1KRÇ, 3RKÇ ve 5RKÇ arızası mevcut olması durumlarında stator a faz akımının frekans spektrumlarını göstermektedir. Eşit KRÇ arızasının mevcut olması halinde motorun tam yükte çalıştırılması sonucunda akım frekans spektrumunda arıza frekansının genliğinde yarı yük durumuna göre yükselme ve yan bant aralığında genişleme meydana geldiği gözlemlendi.



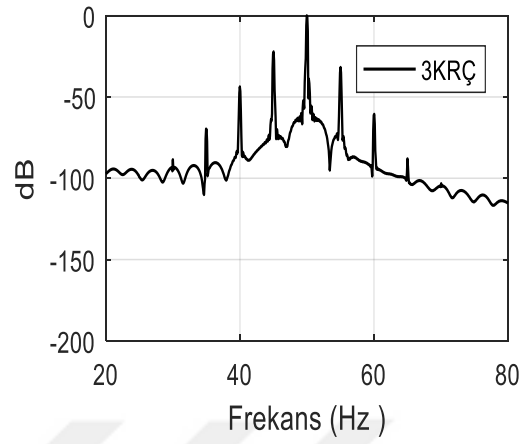
(a)



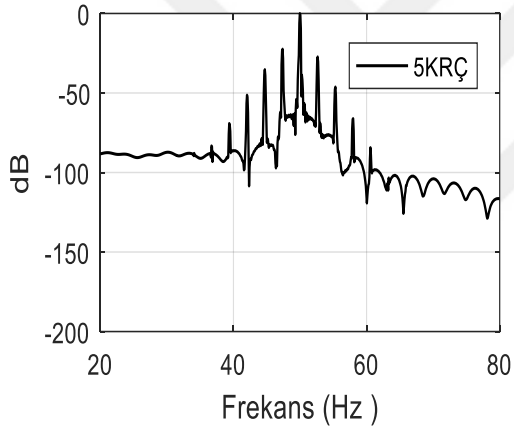
(b)



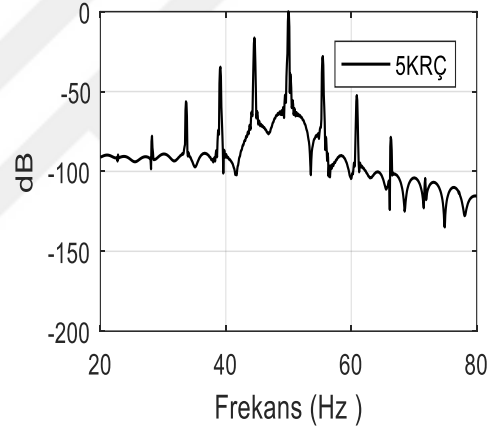
(c)



(d)



(e)



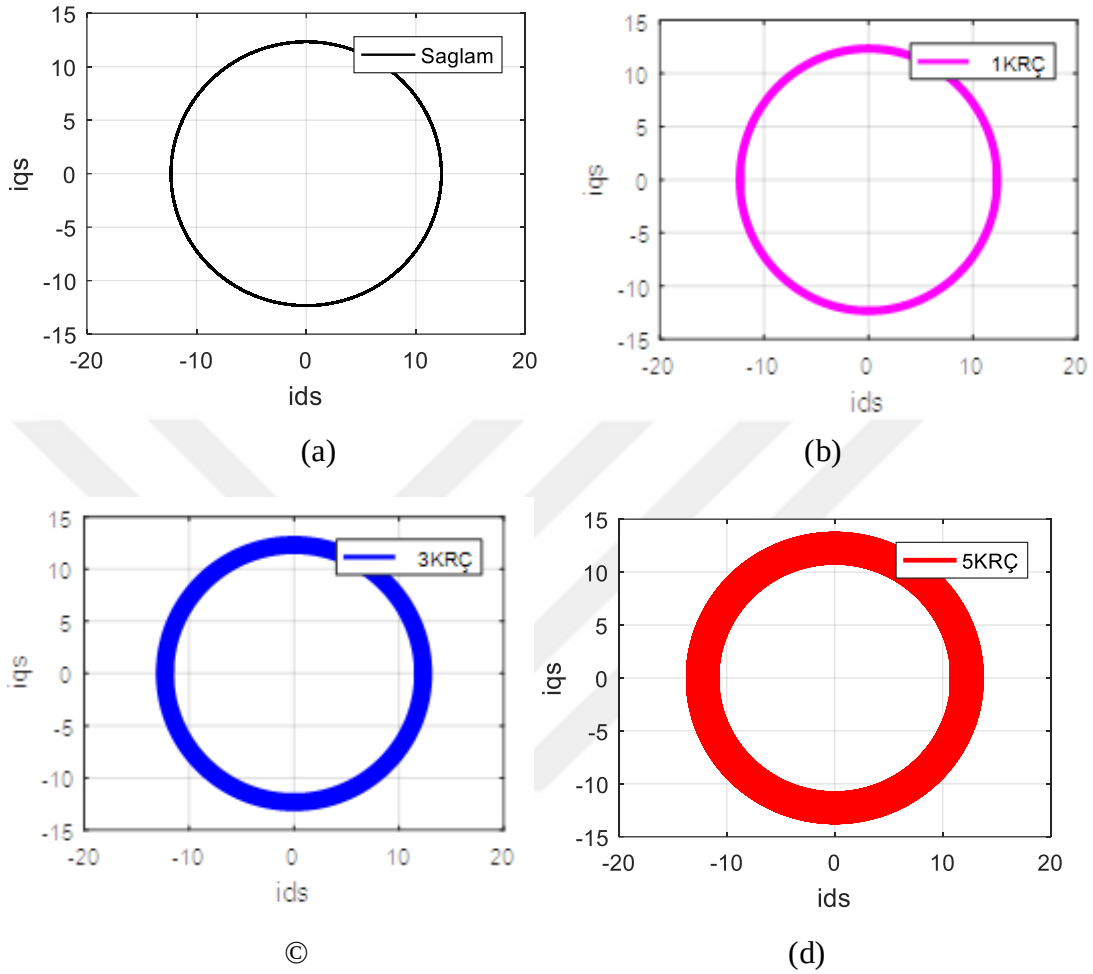
(f)

Şekil 4.16. 1KRÇ, 3KRÇ ve 5KRÇ arızası için (a), (c) ,(e) %50yükleme ve (b), (d), (f) tam yükleme durumunda stator a faz akımının frekans spektrumları.

Tablo 4.2. %50 yükleme ve tam yükleme koşullarında 1KRÇ, 3KRÇ ve 5KRÇ için simülasyon sonuçları.

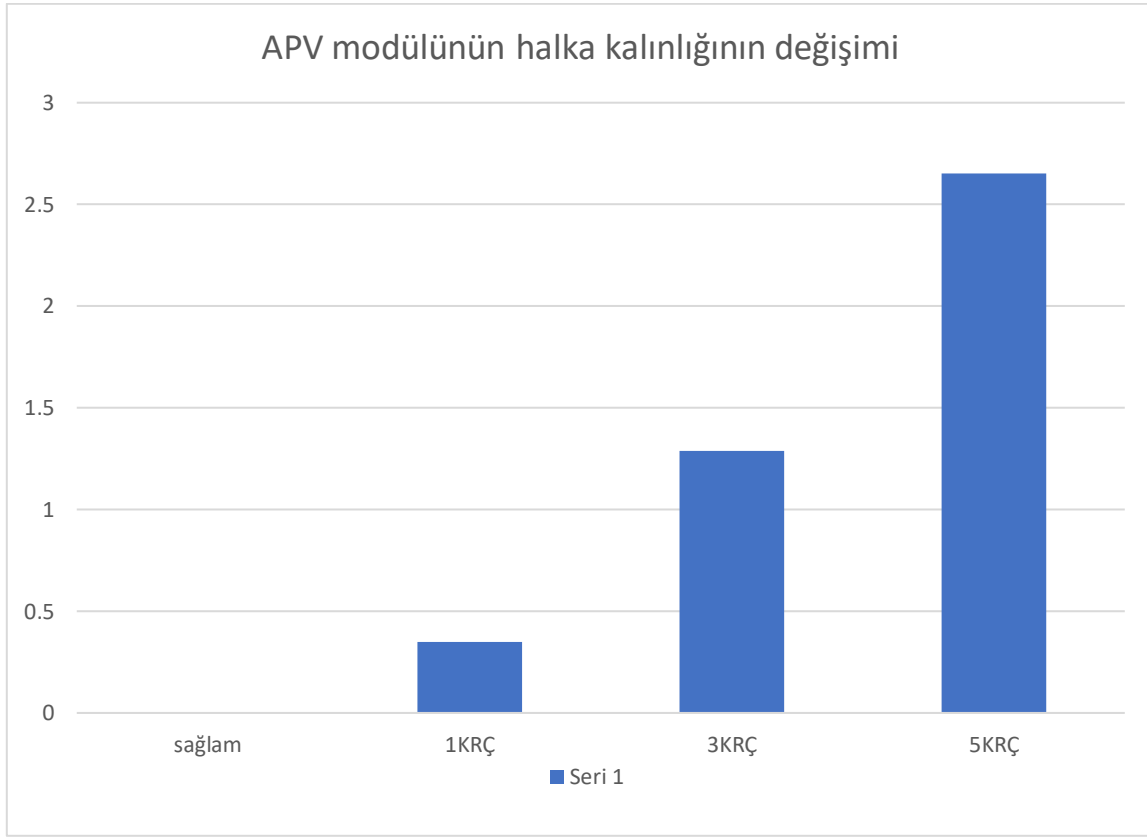
Arıza durumu	Yük Durumu	Şekil	Hız (D/D)	N=1			
				AYB $(1 - 2s)f_s$		YYB $(1 + 2s)f_s$	
				Hz	db	Hz	db
1.KRÇ	%50yük	a	1469	47.84	-40	52.1	-42
	Tam yük	b	1435	45.65	-35	54.63	-41
3 KRÇ	%50yük	c	1465	47.61	-29	52.41	-32
	Tam yük	d	1428	45	-25	55	-31
5 KRÇ	%50yük	e	1459	47.38	-22	52.64	-27
	Tam yük	f	1417	44.56	-16	55.47	-28.9

Şekil 4.17’de sağlam, 1KRÇ, 3 KRÇ ve RKÇ arızaları durumlarında motorun kalıcı durumu için i_s^q ve i_s^d akım verileri kullanılarak elde edilen APV modülleri gösterilmektedir. Sağlam ASM için elde edilen APV modülü tam bir daire şeklindedir. 1KRÇ, 3KRÇ ve 5KRÇ için elde edilen APV modülleri bir halka şeklinde olup halkanın kalınlığında arıza şiddetiyle birlikte artış meydana geldiği görülmektedir. Bununla birlikte silindirik kesit şeklinde olan halkaların iç yarı çapı ve dış yarı çapının uzunluğu açıyla değişimi sabittir.



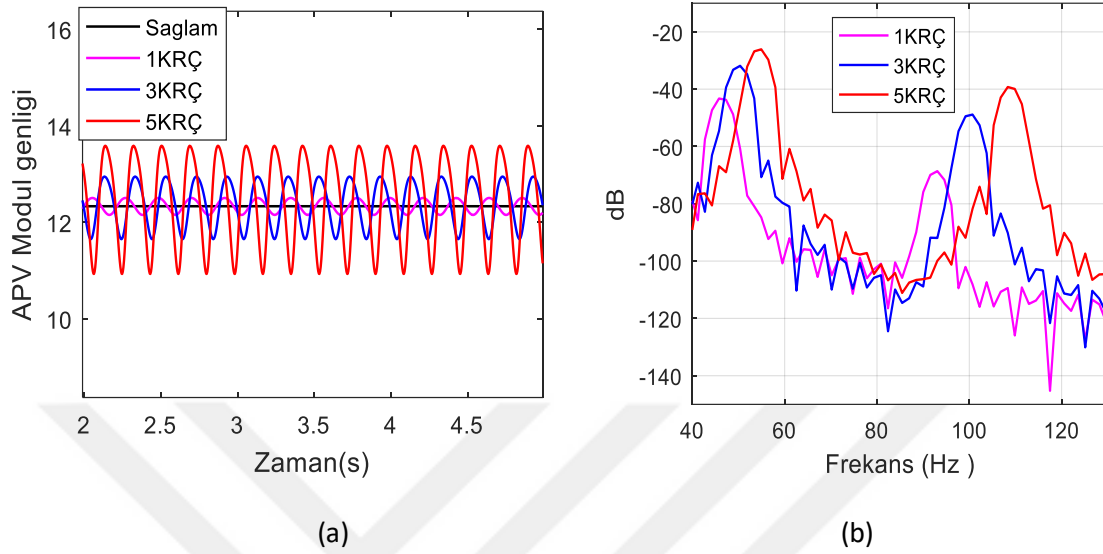
Şekil 4.17. Sağlam, 1KRÇ, 3KRÇ ve 5KRÇ arızası durumlarında APV modülleri
(a)Sağlam, (b)1KRÇ, (c) 3KRÇ, (d) 5KRÇ.

Şekil 4.18’de APV modülünün halka kalınlığındaki değişimi kullanılarak arıza şiddetinin değişimi görülmektedir. Burada sağlam durumda dairenin yarı çapının farklı açılardaki değişimi sabit olduğundan farkı sıfır olması motorun sağlam olduğunu göstermektedir. 1KRÇ arızası için halkanın kalınlığı 0.35 birim olup farklı açılardaki değişimi sabittir. Aynı şekilde 3KRÇ arıza için APV modülünün halka kalınlığı 1.29 birim olup 5KRÇ arızası mevcut olması için bu halka kalınlığı 2.65 birime yükselmektedir



Şekil 4.18. Sağlam, 1KRÇ,3KRÇ ve 5KRÇ için APV modülünün halka kalınlığındaki değişimi.

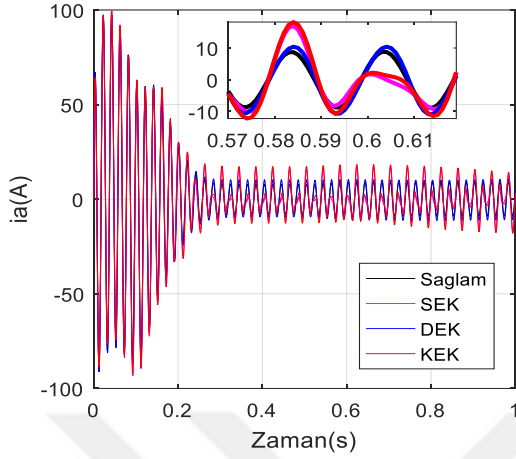
Şekil 4.19(a)'da sağlam ,1KRÇ,3KRÇ ve 5KRÇ durumları için elde edilen APV'lerin eşit zaman dizisinde açılımı görülmektedir. Burada arızasız motor için APV modülünün zaman ile değişimi sabit olduğu görülmektedir. KRÇ'ın sayısı artmasıyla beraber APV modülünün zaman ile değişimine baktığımızda arıza artışıyla birlikte sinyallerin tepe değerlerinde yükseliş ve faz farklarında kayma görülmektedir. Şekil 4.19 (b)'de ise 1KRÇ, 3KRÇ ve 5KRÇ arızası için elde edilen APV frekans spektrumunu göstermektedir. Burada arıza artmasıyla birlikte hem arıza frekans bileşenlerinde ve hem de bu frekansların genliklerinde farklılık görülmektedir. 1KRÇ arızasında PVK frekans spektrumundaki arıza frekans bileşeni 45HZ olup genliği -55db, 3KRÇ için 51HZ olup genliği-30db dir. 5KRÇ için ise frekans değeri 54HZ olup genliği ise -26db'dir.



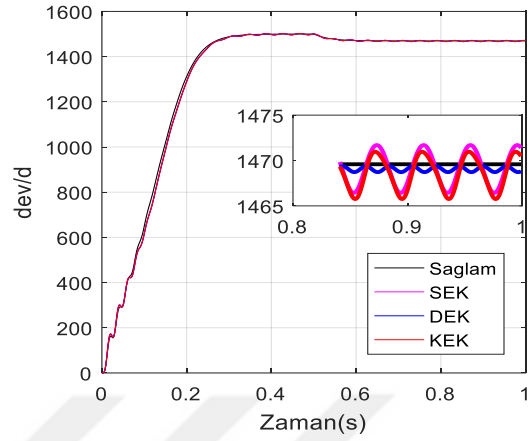
Şekil 4.19. Sağlam, 1KRÇ, 3KRÇ ve 5KRÇ durumları için APV modülerinin zaman dizisinde açılımları, (b) APV Modüllerinin frekans spektrumları.

4.4. Eksen Kaçıklığı Arızası

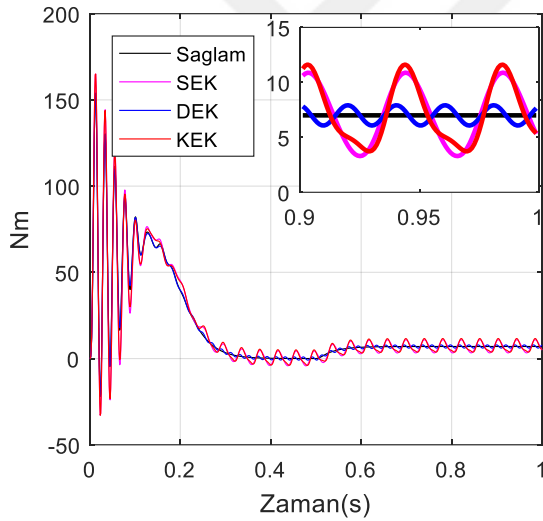
Tezin bu kısmında Bölüm 3'te SEK, DEK ve KEK için hava aralığının uzunluğunu hesaplayan formüller kullanılarak mıknatıslanma endüktansları MATLAB/SIMULINK'te geliştirilen modele tanıtılarak simülasyon sonuçları her üç arıza durumu için elde edilmiştir. SEK durumu için rotor kayması $0.1e^{-3}$ mm olarak seçilmiştir. Dinamik eksen kaçıklığı için rotor elipsel şeklinin majör ile minör eksenleri arasındaki farkı $(a-b)=4$ mm olarak ayarlanmış ve KEK için ise kayma $0.1e^{-3}$ mm ve $a-b=4$ mm olarak seçilmiştir. Şekil 4.20'de 0.5 sn'den sonra tam yük altında çalışan motorun geçici ve kararlı halindeki akım, hız ve moment değişimleri görülmektedir. Eksen kaçıklığı arızasından dolayı hava aralığında bozulma meydana geldiği için değişkenlerde hem geçici ve hem de kararlı halde darbeler olduğu görülmektedir. DEK arızası durumunda dalgalarda oluşan salınımların sayısı fazla ve genlikleri ise düşüktür. SEK ve KEK durumları için ise bu salınımların sayıları az, ama genliklerinde DEK'a göre yükseliş görülmektedir.



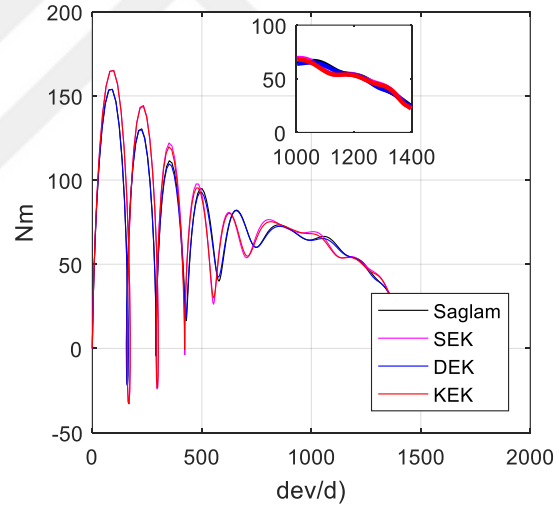
(a)



(b)



(c)



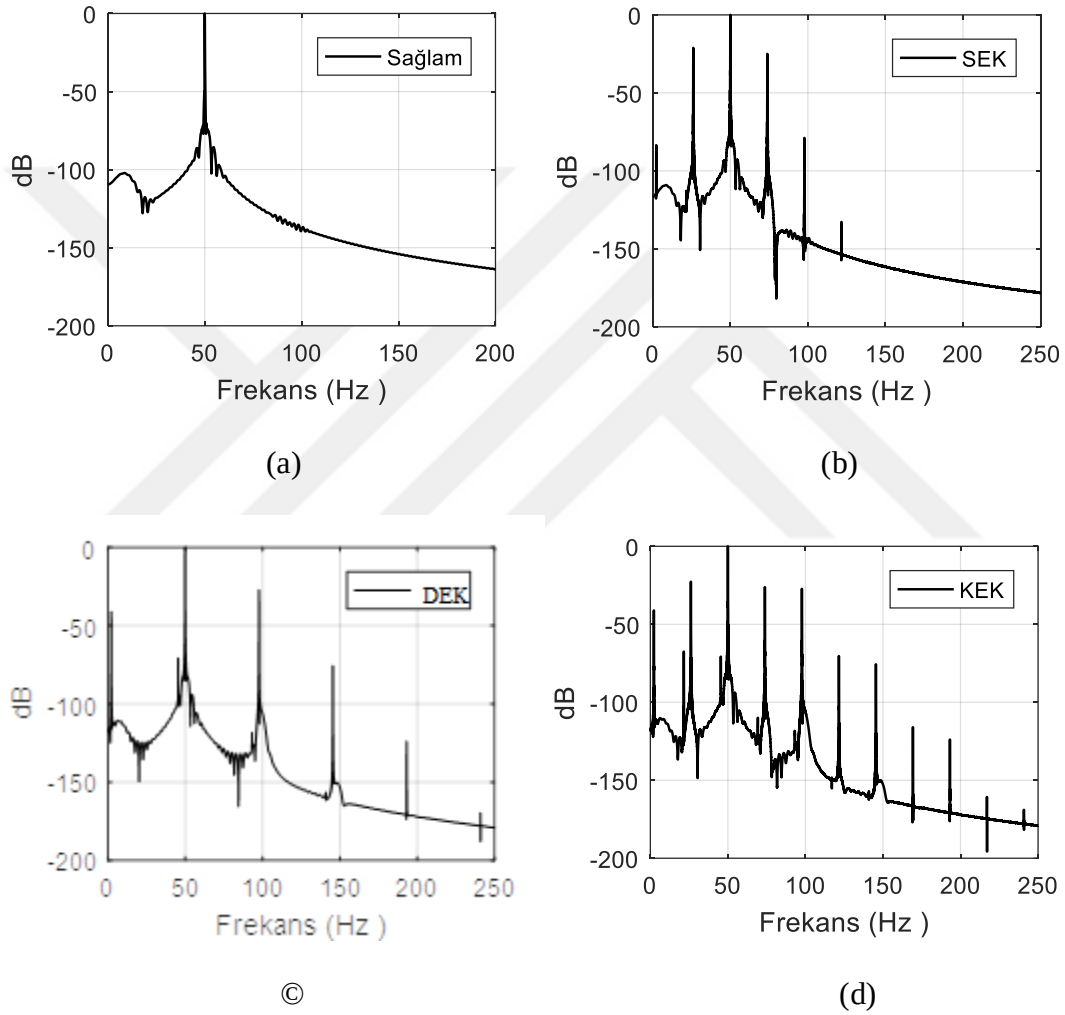
(d)

Şekil 4.20. Sağlam, SEK, DEK ve KEK arızası durumlarında 0.5sn'den sonra tam yük altında, (a) a faz akımı, (b) hız, (c) moment, (d) hız moment davranışları.

Şekil 4.21'de Sağlam SEK, DEK ve KEK arızaları için a fazı akımının frekans spektrumları görülmektedir. SEK arızası durumu için elde edilen a fazı akımının frekans spektrumunda $f_s \pm f_r$ yan bantlarda arıza frekansları ortaya çıktığı görülmektedir. DEK arızası durumunda a fazı frekans spektrumunda $f_s \pm f_r$ arıza bileşenleri görülmediği ve arıza frekansları ise $f_s \pm 2f_r$ bantlarında gözlemlenmiştir. KEK arızası durumu için a faz akım

frekansı spektrumunda hem $f_s \pm f_r$ ve hem $f_s \pm 2f_r$ yan banlarda arıza frekansları görülmüştür.

Tablo 4.21’de SEK, DEK ve KEK arızalı ASM motorun tam yük altında çalışma koşullarında arıza frekanslarının genlikleri özetlenmiştir.



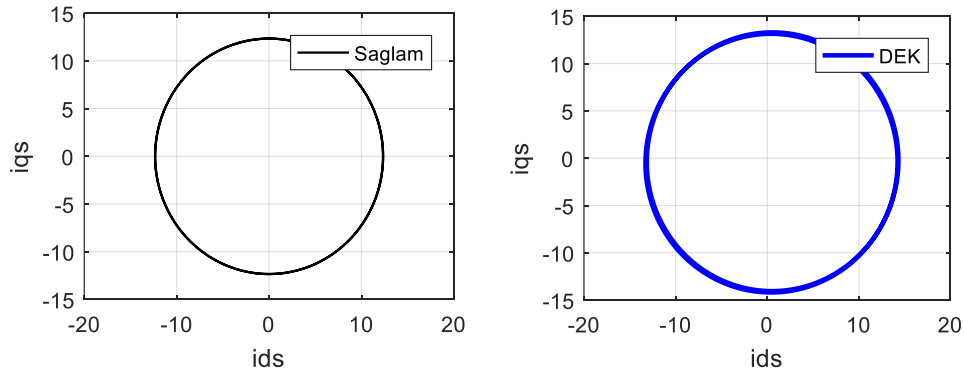
Şekil 4.21. Sağlam, (b) SEK, (c) DEK, (d) KEK arızası durumlarında stator a faz akımının frekans spektrumları.

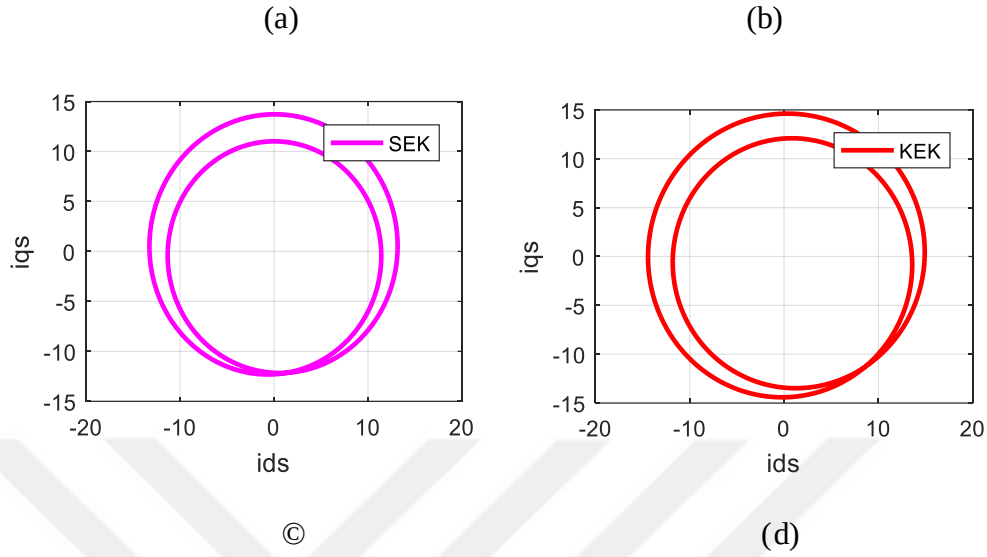
Tablo 4.3. Tam yük koşullarında SEK, DEK ve EK arızası durumlarında A faz akımı frekans spektrumunları.

HATA DURUMU	Karakteristik frekans bileşenleri (Hz)					
	$f_s - 2f_r$	$f_s - f_r$	$f_s + f_r$	$f_s + 2f_r$	$f_s + 4f_r$	$f_s + 6f_r$
	2	26	74	98	122	146
	Stator a faz akımı spektral büyüklüklerin normalleştirilmiş(db)					
SEK	-83	-21	-25	-78	-132	-111
DEK	-41	----- -	----- ---	-28	----- -	-75
KEK	-43	-21	-16	-28	-70	-75

Şekil 4.22’de sağlam, SEK, DEK ve KEK arıza durumları için motorun kalıcı durumundaki i_s^q ve i_s^d akım bileşenlerinin verileri kullanılarak elde edilmiş APV modülleri görülmektedir. SEK arızası için elde edilen APK modülü iki farklı yarı çaplara sahip dairelerden oluştuğu görülmüştür. DEK arızası durumu için ise APV bir halka şeklindedir. KEK arızası durumu için elde edilen APV modülü SEK arızasına benzer şekilde iki farklı yarı çapa sahip dairelerden oluştuğu görülmektedir.

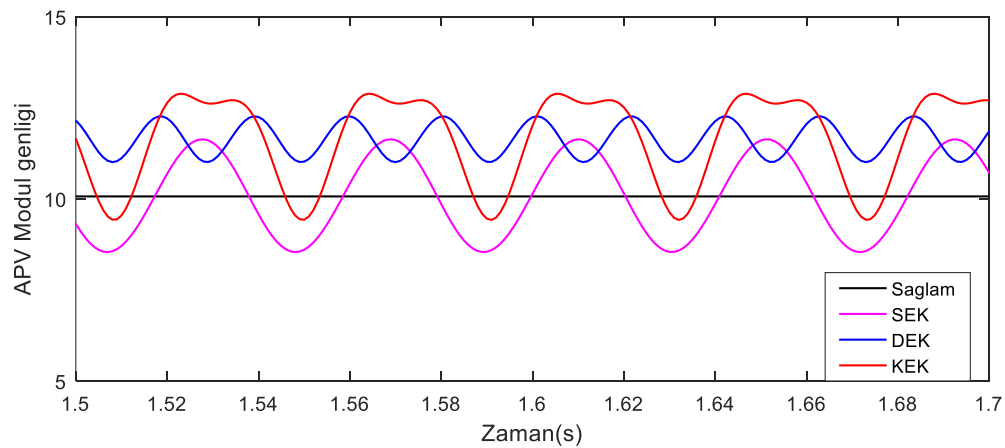
Burada daire şeklindeki APV modülleri merkezleri koordinat merkezinden sağ tarafa doğru kaymış şeklinde yer almaktadır.





Şekil 4.22. APV modüller (a)Sağlam, (b)DEK, (c)SEK, (d) KEK

APV yöntemi kullanılarak rotor kırık çubuklarının arızası ve DEK arızası için elde edilen APV modülü halka şeklinde olduğu görülmektedir. Bu iki arızanın APV yöntemi ile birbirinden ayrılması zordur. Aynı şekilde SEK ve KEK arızası durumları için çizdirilen APV modülleri birbirine benzerlik göstermektedir. Dolayısıyla APV yöntemi ile bu arızaların birbirinden ayrılması için APV modülünün zaman uzayında incelenmesi veya APV modülünün frekans spektrumlarının incelenmesi gerekmektedir. Şekil 2.23'te sağlam, DEK, SEK ve KEK arızalı ASM eşit zaman dizisinde açılımları görülmektedir.



Şekil 4.23. DEK, SEK, KEK arıza durumlarında APV modüllerinin zamand dizisinde açılımları

5. SONUÇLAR ve TARTIŞMALAR

Bu tez çalışmasında öncelikle qd0 dönüşümleri; duran(sabit), senkron ve rotor referans sisteminde (çerçevesinde) matematiksel modelleri açık bir şekilde verilerek detaylı olarak incelenmiştir. Daha sonra bu bilgilerin ışığında, arızasız ve arızalı ASM'un qd0 referans düzleminde modelleri oluşturularak davranışları MATLAB/SIMULINK ile çalışılmıştır. Bu çalışmalar incelendiğinde qd0 referans düzlemindeki modelin arızasız ASM'un davranışlarını etkin bir şekilde yansıttığı gözlemlenmiştir. Duran referans düzleminde i_{qs} akımı ile a faz akımının aynı davranışları gösterdikleri görülmüştür. Rotor referans düzleminde ise i_{qr} akımı ile rotor a faz akımının aynı dalga formunda oldukları görülmüştür. Rotor referans düzleminde motorun boşa çalışma durumunda rotor hızı senkron hıza yakın olduğu için kalıcı durumdaki qd0 bileşenler DC dalga şekline yakın oldukları gözlemlendi. Senkron referans düzleminde qd0 bileşenlerinin değişimi zaman ile sabit oldukları görüldü. qd0 referans düzlemindeki bileşenlerin değişimi referans çerçevesinin hızı ile değişim gösterirken motorun gerçek değişkenlerin değişimi ise qd0 referans hızdan bağımsız olarak aynı davranışları sergiledikleri görülmüştür.

Stator sargıları kısa devre arızası durumunda stator a faz akımının frekans spektrumunda $3f_s$ frekansında harmoniklerin oluştuğu görüldü. Arıza artışıyla birlikte $3f_s$ frekans genliğinde yükseliş ve arıza artışına bağlı olarak $5f_s$ ve $7f_s$ 'da da harmonikler ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Bunun yanında Matlab simülasyonda MCSA-HFD analizi için kullandığımız Hanning veri penceresinde örnekleme frekansı sabit tutulduğunda ve simülasyon süresinin uzun olması durumunda $3f_s$, $5f_s$ ve $7f_s$ 'daki harmoniklerin daha belirgin hale geldiği görülmüştür. Bundan dolayı MCSA-HFT analizinde veri penceresinin çözünürlüğünün artması örnekleme frekansının sabit ve simülasyon süresinin uzun tutulması ile elde edilir.

Stator sargıları kısa devre arızası analizi için kullandığımız APV yöntemi her üç fazda oluşan arıza için ayrı ayrı ele alınarak uygulanmış. Her fazdaki arıza için APV modülünde elipsel şekilde bozulma meydana geldiği görülmüştür. Arızanın hangi fazda mevcut olması elipsin

majör ekseninin y eksenini ile yaptığı açı dikkate alınarak belirlenmiştir. Tek a fazında farklı arıza şiddet senaryolarında elde ettiğimiz APV modüllerinde arıza artışıyla birlikte APV modülünün majör eksenini y eksenini ile farklı açılarda yer aldıkları gözlemlenmiştir. Buna ek olarak arıza artışıyla birlikte elipsin majör eksen uzunluğunda arızaya bağlı olarak artış meydana gelirken minör ekseninde ise azalış görüldü. APV frekans spektrumunda stator kısa devre arızasından dolayı $2f_s$ 'da frekans bileşenleri görüldü. Bu bileşenin genliğinde arıza artışı ile birlikte yükselme gözlemlenmiştir.

Kırık rotor çubuklarının arızası durumunda kırık çubuklarının artması ile birlikte motor hızında sağlam durumu ile kıyasla düşüş meydana geldiği görülmüştür. Rotor kırık çubuklarının arızası tespiti için stator a faz akımının frekans spektrumunda $(1 \pm 2s)f_s$ yan bantlarda harmoniklerin ortaya çıktığı görülmüştür. Kırık rotor çubuklarının artması ile birlikte yan bantlarda oluşan arıza frekanslarının genliklerinde yükseliş ve yan bant aralığında genişleme meydana geldiği gözlemlenmiştir. Aynı şekilde motora uygulanan yükün artışı ile birlikte söz konusu frekans bileşenlerinin daha belirgin hale geldikleri ve kaynak frekansından yük artışına bağlı olarak uzaklaştığı gözlemlenmiştir. Stator sargılarındaki arızalarda olduğu gibi burada da simülasyon süresinin uzun olması ve örnekleme frekansının sabit tutulması halinde yan bantlarda oluşan arıza frekanslarının sayılarında artış meydana geldiği gözlemlenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar yaptığımız çalışmanın aksine rotor kırık çubuklarının artması halinde rotor hızında bir değişiklik olmadığını göstermiştir. Bu durum rotor kırık çubukları arızalı motor için kullandığımız matematiksel modelde sadece rotor direnç değişimi dikkate aldığımızdan ve endüktansların değişimi ihmal ettiğimizden kaynaklı olabileceğini sonucunu vermektedir. Bu çıkarım; direnç değişiminin yanında ortak endüktansların değişiminin de matematiksel modele dahil edilmesi halinde kırık rotor çubuklarının modellenmesinde yeni bir çalışma olarak ele alınıp incelenebilir.

KRÇ arıza durum analizi amacıyla kullandığımız APV modülünde KRÇ arızasından dolayı halka şekli oluştuğu görüldü ve arıza artışı ile birlikte halkanın kalınlığında artış meydana geldiği görülmüştür. APV modülünün zaman dizisinde açılımı yapıldığında arıza artışa ile birlikte APV sinyali tepe değerlerinde yükseliş ve fazında kayma meydana geldiği görüldü.

Eksen kaçıklığı arızası SEK, DEK ve KEK olarak tek bir arıza senaryo durumu için incelendi. DEK arıza durumunda momentte sayıları fazla ve genlikleri düşük darbeler görüldü. SEK ve KEK arızalarında ise salınımların genlikleri yüksek ve sayıları düşük olarak tespit edildi. Arıza durum analizi amaçlı kullandığımız a faz akımının frekans spektrumunda SEK arıza durumunda $f_s \pm f_r$ arızalı frekanslar görüldü. DEK'ında ise $f_s \pm 2f_r$ bantta harmonikler gözlemlendi. KEK'ında ise hem $f_s \pm f_r$ ve hem $f_s \pm 2f_r$ yan bantlarda arıza frekansları görüldü. Deneysel çalışmalarda eksen kaçıklığı arızası durumunda belirtilen yüksek frekans bileşenleri yaptığımız simülasyon çalışmasında gözlemlenmedi. Yaptığımız çalışmada sadece mıknatıslanma endüktansların değişimi dikkate aldığımızdan kaynaklı olabilir. Bunun için hava aralığı ile değişen ortak endüktansların değişimini matematiksel modele dahil ederek yeniden bir çalışma konusu olarak ele alınabilir.

Eksen kaçıklığı arızasını APV yöntemi ile incelediğimizde SEK ve KEK arıza durumları için koordinat merkezinden kayma ile yer alan iki farklı yarı çaplara sahip daireler şeklinde modüller görüldü. DEK için ise APV modülünün bir halka şeklinde olup KRÇ'nın aksine koordinat merkezinden kaymış şekilde yer almaktadır.

Sağlam ve arızalı asenkron motor için geliştirdiğimiz modellerin eğitim amaçlı kullanılabilir hale getirilmesi için MATLAB/SIMULINK'te nasıl uygulanabilirliği adım adım anlatılmıştır. MATLAB/SIMULINK ortamında oluşturduğumuz modellerin aynı platform üzerinden çalıştırılması için geliştirdiğimiz modeller tasarladığımız MATLAB/GUI uygulaması ile entegre edilmiştir. Söz konusu MATLAB ara yüzü kullanılarak sağlam ve arızalı ASM'un dinamik davranışları daha basit bir şekilde grafiksel olarak incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Sarioğlu, M.K., Gökaşan, M. ve Boğosyan, S. (2003) Asenkron Makinalar ve Kontrolü, Birsen Yayınevi.
- [2] Vas, P. (1992) Electrical Machines and Drives", Oxford University Press, Oxford
- [3] Çolak, İ., "Asenkron Motorlar", (2001) Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, 141-159
- [4] Rahmatullah, R., Demir, M. F and Serteller, N. F. O. (2020) Asenkron Motorların DQ Eksende Üç Referans Çerçevesinde Matlab/Simulink ile İncelenmesi. Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU), Istanbul, Turkey, pp. 1-6, doi: 10.1109/ASYU50717.2020.9259879
- [5] Cardoso, A.J.M., Cruz S. M. A and Fonseca, D. S. B. (1999) Inter-turn stator winding fault diagnosis in three-phase induction motors, by Park's vector approach, in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 14, no. 3, pp. 595-598.
- [6] Toliyat, H. A., Arefeen, M. S., Parlos, A. G. (1996) A method for dynamic simulation of air-gap eccentricity in induction machines. IEEE Transactions on Industry Applications, 32(4), 910–918. doi:10.1109/28.511649.
- [7] Chen, S. (2008) Induction machine broken rotor bar diagnostics using prony analysis. Master's Thesis School of Electrical & Electronic Engineering, University of, Adelaide, Australia.
- [8] Mehala, N. (2010) Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Induction. Motor Using Motor Current Signature Analysis .Ph.D. Thesis, Electrical. Engineering Department, NIT Kurukshetra.
- [9] Tufan, D. (2012) Evirici İle Sürülen Asenkron Motorlarda Rotor Çubuğu Kırık Arızasının Tespiti. Yüksel Lisan Tezi, Gaziosmanpaşa Üniversitesi.
- [10] Hegde, Vishwanath & G S, Maruthi. (2012) Experimental investigation on detection of air gap eccentricity in induction motors by current and vibration signature analysis using non-invasive sensors. Energy Procedia. 14. 1047-1052. 10.1016/j.egypro.2011.12.1053.

- [11] Küçüker, A., Bayrak, M. (2015) Detection of stator winding fault in induction motor using instantaneous power signature analysis" . Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Science 23 1263-1271
- [12] Chawla, R., Akhil Vinayak, B and Jagadanand , G. (2018) Modelling and Detection of Stator Incipient Open Circuit Fault in Three-Phase Induction Motor. IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), Chennai, India, pp. 1-6, doi: 10.1109/PEDES.2018.8707681
- [13] Maraaba, L., Al-Hamouz, Z., Abido, M. (2018) An Efficient Stator Inter-Turn Fault Diagnosis Tool for Induction Motors. Energies, 11, 653
- [14] Ojaghi, M., & Mohammadi, M. (2018). Unified Modeling Technique for Axially Uniform and Nonuniform Eccentricity Faults in Three-Phase Squirrel Cage Induction Motors. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 65(7), 5292–5301. doi:10.1109/tie.2017.2760280
- [15] Ünsal, A .,Güçlü, S. (2019) Asenkron Motor Eksenel Kaçıklık Arızalarının Shannon Entropisi ile Analizi. Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering , 24 (3) , 199-210 . DOI: 10.17482/uumfd.516620
- [16] Cherif, H., Benakcha, A., Laib, I., Chehaidia, S. E., Menacer, A., Soudan, B., & Olabi, A. G. (2020). Early detection and localization of stator inter-turn faults based on discrete wavelet energy ratio and neural networks in induction motor. Energy, 118684. doi:10.1016/j.energy.18684
- [17] MUSTAFA TURAN. Elektrik Makineleri , II Asenkron Makineler.Ders Notları
- [18] Ion Boldea Syed A. Nasar.(2010)The Induction Machines Design Handbook.2nd Edition.Taylor and Francis Group.
- [19] Doğan, Z. (2012) Ayırıklaştırma Yöntemleri ve Yapay Sinir Ağı Kullanarak Asenkron Motorlarda Arıza Teşhisi.Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye

- [20] Serteller, N. F. O. (2004) Time harmonic effects for rotor slot design considering deep bar squirrel cage induction motors," 9th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment , Brasov, Romania, pp.141-144,
- [21] Serteller, N. F. O. (2020) Elektrik Makinelerin modellenmesi, Yüksek lisans Ders Notları
- [22] <https://www.exportersindia.com/indo-swiss-electricals/slip-ring-ac-motor-3698410>.
- [23] Serteller, N. F. O. (2019) Elektrik Makinelerin TasarlanmasıYüksek lisans Ders Notları
- [24] Parekh, R.(2003) AC Induction Motor Fundamentals.Microchip Technology Inc, Arizona, US, Rep. DS00887A, 2003, pp. 1-24.
- [25] P. C. Sen. Principles of Electric Machines and Power Electronics. John Wiley and Sons(WIE), 03 1989. ISBN 9780471617174
- [26] Krishnan, R. (2001). Electric Motor Drives: Modeling, Analysis, and Control.Prentice HallISBN: 0-13-0910147
- [27] P.C. Krause, O. Wasynczuk, S.D. Sudhoff. Analysisof electric machinery and drive systems. Wiley-IEEE Press, Third edition, 2013. ISBN 978-1-118-02429-4.
- [28] C.M. Ong. Dynamic Simulation of Electric Machinery: Using MATLAB/SIMULINK. Prentice Hall PTR, 1998. ISBN 9780137237852.
- [29] Saad, N,. Irfan, M., Ibrahim, R.(2018) Electrical Signature Analysis and Faults Diagnosis of Induction Motors. 1st Edition ,Taylor & Francis Group. ISBN9781351172561
- [30] Singh, G.K. and Al Kazzaz, S.A.S. (2003) Induction Machine Drive Condition Monitoring and Diagnostic Research— A Survey. Electric Power Systems Research, 64, 145-158. [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7796\(02\)00172-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7796(02)00172-4)
- [31] Albrecht, P. F., Appiarius, J. C., McCoy, R. M., Owen, E. L., Sharma, D. K.(1986) Assessment of the Reliability of Motors in Utility Applications - Updated," in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. EC-1, no. 1, pp. 39-46,doi: 10.1109/TAC.1986.4765668.

- [32] Polat, A. (2013) Asenkron Motorda Eksen Kaçıklığının Analizi.Yüksek Lisans Tezi,İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [33] Karmakar, S., Chattopadhyay, S., Mitra, M., Sengupta, S.(2016)Induction Motor Fault Diagnosis. 1st Edition, Springer Science+Business Media Singapore.
- [34] Afrat, S., Yadava, G., Bhim, S.(2005) A Review of Stator Fault Monitoring Techniques of Induction Motors, in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 20, no. 1, pp. 106-114, doi: 10.1109/TEC.2004.837304
- [35] Mustafa, O.M. (2015) On Fault Detection, Diagnosis and Monitoring for Induction Motors. Ph.D. Thesis, Luleå University of Technology, Department of Computer Science, Electrical and Space Engineering, Signals and Systems, Sweden
- [36] Bonnett, A. H. and Soukup, G. C. (1992) Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 28, no. 4, pp. 921-937, doi: 10.1109/28.148460
- [37] Hajiaghajani, M., Madani , S. M.. (2005) A new method for analysis of rotor broken bar fault in induction machines," IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, San Antonio, TX, 2005, pp. 1669-1674, doi: 10.1109/IEMDC.2005.195944.
- [38] Mehrjou, M. R., Mariun, N., Marhaban, M. H., Misron, N. (2011) Rotor fault condition monitoring techniques for squirrel-cage induction machine—A review, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 25, 2827-2848
- [39] Nandi, S., Bharadwaj, R., Toliyat, H.A., Parlos, A.G. (1999) Study of Three Phase Induction Motors with Incipient Rotor cage Faults Under Different Supply Conditions, in: Proceeding IEEE Industry Applications Conference, 34th IAS Annual Meeting, 1999, pp. 1922-1928
- [40] Bagheri, A, Ojaghi, M. (2020) Air-gap eccentricity fault diagnosis and estimation in induction motors using unscented Kalman filter. Int Trans Electr Energ Syst. <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12450>

- [41] Hyun, D., Lee, S., Hong, J., Bin Lee, S and Nandi,S. (2012) Detection of Airgap Eccentricity for Induction Motors Using the Single-Phase Rotation Test," in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 27, no. 3, pp. 689-696, doi: 10.1109/TEC.2012.2198218.
- [42] Özelgin,İ. (2008). Analysis of Magnetic Flux Density for Airgap Eccentricity and Bearing Faults, International Journal of Systems Applications, Engineering & Development, Vol. 2, 162–169
- [43] Faiz,J., Ojaghi, M. (2009) Different indexes for eccentricity faults diagnosis in three-phase squirrel-cage induction motors: A review, Mechatronics, Volume 19, Pages 2-13,ISSN 0957-4158.
- [44] Nandi, S., Toliyat, H.A, Xiaodong, Li. (2005) Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors – a review. IEEE Trans Energy Conver 2005;20(4):719–29.
- [45] P.J. Tavner, L. Ran, J. Pennman, and H. Sedding “Condition monitoring of rotating electrical machines,” Letchworth: Research Studies Press Ltd., 2008.
- [46] Zhongming Y., Bin, W. (2000) A Review on Induction Motor Online Fault Diagnosis. Power Electronics and Motion Control Conference, Vol. 3, 1353 – 1358
- [47] Belahcen, A., Arkkio, A., Klinge, P., Linjama, J., Voutilainen and V., Westerlund, J.(1999)Radial forces calculation in a synchronous generator for noise analysis. Proceeding of the Third Chinese International Conference on Electrical Machines, Xi'an, China, pp. 199-122
- [48] Elkasabgy, N.M., Eastham, A. R., Dawson, G. E. (1992) Detection of broken bars in the cage rotor on an induction machine”, IEEE Trans. Industrial Applications, Vol. IA-22, No. 6, 165-171.
- [49] W. T. Cochran et al., "What is the fast Fourier transform?," in Proceedings of the IEEE, vol. 55, no. 10, pp. 1664-1674, Oct. 1967, doi: 10.1109/PROC.1967.5957
- [50] Bradley, W.J.(2015) Current Based Fault Detection and Diagnosis of Induction Motors. Adaptive Mixed-Residual Approach for Fault Detection and Diagnosis of Rotor, Stator,

Bearing and Air-Gap Faults in Induction Motors Using a Fuzzy Logic Classifier with Voltage and Current Measurement only. Ph.D Thesis, University of Bradford

[51] Jha, C. S., & Sreenivasa Murthy, S. (1973) Generalised rotating-field theory of wound-rotor induction machines having asymmetry in stator and/or rotor windings. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 120(8), 867. doi:10.1049/piee.1973.0190

[52] Thomson, W. T., & Fenger, M. (2001). Current signature analysis to detect induction motor faults. IEEE Industry Applications Magazine, 7(4), 26–34. doi:10.1109/2943.930988

[53] Marques Cardoso, A. J., Cruz, S. M. A., Carvalho, J. F. S. and Saraiva, E. S. (1995) Rotor cage fault diagnosis in three-phase induction motors, by Park's vector approach," IAS '95. Conference Record of the IEEE Industry Applications Conference Thirtieth IAS Annual Meeting, Orlando, FL, USA, 1995, pp. 642-646 vol.1, doi: 10.1109/IAS.1995.530360.

[54] Verucchi, C. J., Acosta, G. G. and Benger, F. A. (2008) A Review On Fault Diagnosis Of Induction Machines," Latin American Applied Research, vol. 38, no. 5, pp. 113-121,

[55] Chen, S. and Živanović, R. (2010), Modelling and simulation of stator and rotor fault conditions in induction machines for testing fault diagnostic techniques. Euro. Trans. Electr. Power, 20: 611-629. <https://doi.org/10.1002/etep.342>

[56] Chang, X., Cocquempot, V., Christoph, C. (2003) A model of asynchronous machines for stator fault detection and isolation. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 50:578–584. DOI: 10.1109/TIE.2003.812471

[57] Santos, P. M. (2006) A simplified induction machine model to study rotor broken bar effects and for detection," 2006 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference, Jeju, 2006, pp. 1-7, doi: 10.1109/1712154.

[58] Bellini, A., Filippetti F., Franceschini, Tassoni G. C. and Kliman, G. B. (2001) Quantitative evaluation of induction motor broken bars by means of electrical signature analysis," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 37, no. 5, pp. 1248-1255, doi: 10.1109/28.952499.

- [59] Olalowo, S., Olaleye, S., Christopher, O., Ahiakwo, C., Idoniboyeolu, O., Orike, S. (2020) Modeling of Eccentricity and Performance of ThreePhase Induction Motors. Newviews in Engineering and Technology (JNET) Vol 2, Issue 1, March, 2020
- [60] Bindu, S., Thomas, V.V. (2015) Characteristic signature identification of air-gap eccentricity faults using extended d-q model for three phase induction motor. In International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems (CATCON), pages 157–162
- [61] Askvik, A. (2018) Dynamic Modelling of Squirrel Cage Induction Motors for Studying Motor Current Signature Analysis. Master Thesis in Energy Specialization in Energy Technology Electrical Power engineering, The University of Bergen

EK A-1:

A.1 v_s^{qd0} çıkarımı

$$[v_s^{qd0}] = [R_s^{qd0}][i_s^{qd0}] + ([T_{qd0s}(\theta)]\rho[T_{qd0s}(\theta)]^{-1})[\lambda_s^{qd0}]$$

Burada

$$[T_{qd0s}(\theta)] \frac{d\theta}{dt} [T_{qd0s}(\theta)]^{-1} [\lambda_s^{qd0}]$$

$$\frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 0 \\ -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 0 \end{bmatrix} \frac{d\theta}{dt} [\lambda_s^{qd0}]$$

$$+ \rho [\lambda_s^{qd0}]$$

Bu denklem basitleştirildiğinde

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \frac{d\theta}{dt} [\lambda_s^{qd0}] + \rho [\lambda_s^{qd0}] \text{ elde edilir.}$$

Qd0 çerçevesine taşınmış stator direnç matrisi aşağıdaki gibi elde edilir

$$R_s^{qd0} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$$

$$\times \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$$

EK A-2 v_r^{qd0} çıkarımı

$$[v_r^{qd0}] = [R_r^{qd0}][i_r^{qd0}] + ([T_{qd0(\beta)}]\rho[T_{qd0(\beta)}]^{-1})[\lambda_r^{qd0}]$$

Burada

$$\begin{aligned} & [T_{qd0(\beta)}]\rho[T_{qd0(\beta)}]^{-1}[\lambda_r^{qd0}] \\ &= \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\beta) & \cos(\beta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\beta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\beta) & \sin(\beta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\beta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\sin(\beta) & \cos(\beta) & 0 \\ -\sin(\beta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\beta - \frac{2\pi}{3}) & 0 \\ -\sin(\beta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\beta + \frac{2\pi}{3}) & 0 \end{bmatrix} \frac{d\beta}{dt} [\lambda_r^{qd0}] \\ &+ \rho[\lambda_r^{qd0}] \end{aligned}$$

Bu denklem basitleştirildiğinde

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \frac{d\beta}{dt} [\lambda_r^{qd0}] + \rho[\lambda_r^{qd0}]$$

Elde edilir. Qd0 çerçevesine taşınmış rotor direnç matrisi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{aligned} R_r^{qd0} &= \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\beta) & \cos(\beta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\beta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\beta) & \sin(\beta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\beta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \\ &\times \begin{bmatrix} \cos(\beta) & \sin(\beta) & 1 \\ \cos(\beta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\beta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\beta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\beta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \end{aligned}$$

EK A-3 L_s^{qd0*} , L_{rs}^{qd0*} ve L_{sr}^{qd0*} Çıkarımları

$$L_s^{qd0*} = [T(\theta=0)][L_s^{abs*}][T(\theta=0)]^{-1}$$

Bu denklem duran referans düzleminde aşağıdaki gibi yazılır

$$\begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 1 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_a^2(L_{1s}+L_m) & K_a K_{sb} L_m & K_{sa} K_{sc} L_m \\ K_a K_{sb} L_m & K_b^2(L_{1s}+L_m) & K_{sb} K_{sc} L_m \\ K_a K_{sc} L_m & K_{sc} K_{sb} L_m & K_{sc}^2(L_{1s}+L_m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} L_{s11} & L_{s12} & L_{s13} \\ L_{s21} & L_{s22} & L_{s23} \\ L_{s31} & L_{s32} & L_{s33} \end{bmatrix}$$

Bu denklem basitleştirildiğinde

$$\begin{aligned} L_{s11} &= \frac{1}{6} l_{1s} (4K_a^2 + K_b^2 + K_c^2) + \frac{1}{9} l_m (4K_a^2 + K_b^2 + K_c^2 + 2K_a K_b + 2K_a K_{cc} - K_b K_c) \\ L_{s12} &= \frac{\sqrt{3}}{6} l_{1s} (K_b^2 - K_c^2) + \frac{\sqrt{3}}{9} l_m (K_b^2 - K_c^2) \\ L_{s13} &= \frac{1}{3} l_{1s} (4K_a^2 - K_b^2 - K_c^2) + \frac{1}{9} l_{ms} (4K_a^2 - 2K_b^2 - 2K_c^2 - 2K_a K_b - K_a K_{cc} + 2K_b K_c) \\ L_{s21} &= \frac{\sqrt{3}}{6} l_{1s} (K_b^2 - K_c^2) + \frac{\sqrt{3}}{9} l_m (K_b^2 - K_c^2) \\ L_{s22} &= \frac{1}{2} l_{1s} (K_a^2 + K_b^2) + \frac{1}{3} l_m (K_a^2 + K_b^2 + K_c^2 + K_b K_c) \\ L_{s32} &= \frac{\sqrt{3}}{6} l_{1s} (K_c^2 - K_b^2) + \frac{\sqrt{3}}{6} l_m (2K_c^2 - 2K_b^2 + K_a K_b - 2K_a K_c) \\ L_{s31} &= \frac{1}{6} l_{1s} (2K_a^2 - K_b^2 - K_c^2) + \frac{1}{18} l_m (4K_a^2 - 2K_b^2 - 2K_c^2 - 2K_a K_b - K_a K_{cc} + 2K_b K_c) \\ L_{s32} &= \frac{\sqrt{3}}{6} l_{1s} (K_b^2 - K_c^2) + \frac{\sqrt{3}}{18} l_m (2K_c^2 - 2K_b^2 + K_a K_b - K_a K_c) \\ L_{s33} &= \frac{1}{3} l_{1s} (K_a^2 + K_b^2 + K_c^2) + \frac{2}{9} l_m (K_a^2 + K_b^2 + K_c^2 - 2K_a K_b - 2K_a K_{cc} - K_b K_c) \text{ elde edilir.} \end{aligned}$$

$$L_{sr}^{qdo*} = [T(\theta = 0)][L_{sr}^{abs*}][T(-\theta_r)]^{-1}$$

Bu denklem duran referans düzleminde aşağıdaki gibi yazılır

$$\frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 1 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} L_{sr}^{abc} \begin{bmatrix} K_a \cos(\theta_r) & K_a \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & K_a \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ K_b \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & K_b \cos(\theta_r) & K_b \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ K_c \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & K_c \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & K_c \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \\ \times \begin{bmatrix} \cos(-\theta_r) & \sin(-\theta_r) & 1 \\ \cos(-\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \sin(-\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(-\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \sin(-\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{sr11} & L_{sr12} & L_{sr13} \\ L_{sr21} & L_{sr22} & L_{sr23} \\ L_{sr31} & L_{sr32} & L_{sr33} \end{bmatrix}$$

Bu denklem basitleştirildiğinde

$$L_{sr11} = \frac{1}{6} l_m (4K_a + K_b + K_c)$$

$$L_{sr12} = \frac{\sqrt{3}}{6} l_m (K_b - K_c)$$

$$L_{sr13} = 0$$

$$L_{sr21} = \frac{\sqrt{3}}{6} l_m (K_b - K_c)$$

$$L_{sr22} = \frac{1}{2} l_m (K_b + K_c)$$

$$L_{sr23} = 0$$

$$L_{sr31} = \frac{1}{6} l_m (2K_a - K_b - K_c)$$

$$L_{sr32} = \frac{\sqrt{3}}{6} l_m (K_{cc} - K_b)$$

$$L_{sr33} = 0$$

Elde edilir.

$$L_{rs}^{qd0*} = [T(-\theta_r)][L_{rs}^{abs}][T(\theta = 0)]^{-1}$$

Bu denklem duran referans düzleminde aşağıdaki gibi yazılır

$$\begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(-\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(-\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin(-\theta_r) & \sin\left(-\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(-\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} L_{rs}^{abs} \begin{bmatrix} K_a \cos(\theta_r) & K_b \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & K_c \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ K_a \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & K_b \cos(\theta_r) & K_c \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ K_a \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & K_b \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & K_c \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \\
\times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{rs11} & L_{rs12} & L_{rs13} \\ L_{rs21} & L_{rs22} & L_{rs23} \\ L_{rs31} & L_{rs32} & L_{rs33} \end{bmatrix}$$

Bu matrisler basitleştirildiğinde

$$L_{rs11} = \frac{1}{6} l_m (4K_a + K_b + K_c)$$

$$L_{rs12} = \frac{\sqrt{3}}{6} l_m (K_b - K_c)$$

$$L_{rs13} = \frac{1}{6} l_m (2K_a - K_b - K_c)$$

$$L_{rs21} = \frac{\sqrt{3}}{6} l_m (K_b - K_c)$$

$$L_{rs22} = \frac{1}{2} l_m (K_b + K_c)$$

$$L_{rs23} = \frac{\sqrt{3}}{6} l_m (K_c - K_b)$$

$$L_{rs13} = L_{rs33} = L_{rs33} = 0,$$

elde edilir.

EK A-4:

$$R_{r11} = \frac{1}{3} (\Delta R_a + \Delta R_b + \Delta R_c) + \frac{1}{6} (2\Delta R_a - \Delta R_b - \Delta R_c) \cos(2\theta_m) + \frac{\sqrt{3}}{6} (\Delta R_b - \Delta R_c) \sin(2\theta_m)$$

$$R_{r12} = -\frac{1}{6} (2\Delta R_a - \Delta R_b - \Delta R_c) \sin(2\theta_m) + \frac{\sqrt{3}}{6} (\Delta R_b - \Delta R_c) \cos(2\theta_m)$$

$$R_{r13} = \frac{1}{3} (2\Delta R_a - \Delta R_b - \Delta R_c) \cos(\theta_m) - \frac{\sqrt{3}}{3} (\Delta R_b - \Delta R_c) \sin(\theta_m)$$

$$R_{r21} = R_{r12}$$

$$R_{r22} = \frac{1}{3}(\Delta R_a + \Delta R_b + \Delta R_c) - \frac{1}{6}(2\Delta R_a - \Delta R_b - \Delta R_c) \cos(2\theta_m) + \frac{\sqrt{3}}{6}(\Delta R_b - \Delta R_c) \sin(2\theta_m)$$

$$R_{23} = -\frac{1}{3}(2\Delta R_a - \Delta R_b - \Delta R_c) \sin(\theta_m) - \frac{\sqrt{3}}{3}(\Delta R_b - \Delta R_c) \cos(\theta_m)$$

$$R_{r31} = \frac{1}{2}R_{r13}$$

$$R_{32} = \frac{1}{2}R_{r23}$$

$$R_{r33} = \frac{1}{3}(\Delta R_a + \frac{1}{3}(\Delta R_a + \Delta R_b + \Delta R_c))$$

EK A-5: Motor Parametreleri.

Nominal Güç	3hp
Nominal Gerilim	220v
Nominal Akım	9A
Rotor Direnci	0.816 Ω
Stator Direnci	0.435 Ω
Mıknatıslanma Endüktansı	0.0695H
Stator Endüktansı	0.0024H
Rotor Endüktansı	0.0024H
Stator iç yarıçapı	48.1 mm
Rotor yarıçapı	47.0mm
Atalet Momenti	0.089 kgm^2
Yük Momenti	15Nm

ÖZGEÇMİŞ

Rohullah RAHMATULLAH; İlkokulunu, Ortaokulunu ve Lise öğrenimini Ghazi Gul Ahmad Khan Lisesi'nde tamamlamıştır. 2011 yılında Türkiye Burslarını kazanarak Türkiye'ye gelmiş. Lisans eğitimini Atatürk Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği bölümünde 2017 yılında tamamlayıp aynı yıl Marmara Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği bölümünde Yüksek Lisansa başlamış.

