



T.C.

NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ASENKRON MOTOR PARAMETRELERİNİN
ÇOK AMAÇLI-GENETİK ALGORİTMA İLE BELİRLENMESİ

Seda KAYALI

Temmuz 2019

T.C.
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ASENKRON MOTOR PARAMETRELERİNİN
ÇOK AMAÇLI-GENETİK ALGORİTMA İLE BELİRLENMESİ

Seda KAYALI

Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Doç. Dr. Murat BARUT

Temmuz 2019

Seda KAYALI tarafından **Doç. Dr. Murat BARUT** danışmanlığında hazırlanan “**Asenkron Motor Parametrelerinin Çok Amaçlı-Genetik Algoritma ile Belirlenmesi**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Elektrik-Elektronik Mühendisliği** Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Aytekin BAĞIŞ



Üye : Doç. Dr. Murat BARUT



Üye : Dr. Öğr. Üyesi Emrah ZERDALI



ONAY:

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından/.../20.... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu'nun/.../20.... tarih ve sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../20...

Doç. Dr. Murat BARUT
MÜDÜR

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

SEDA KAYALI



ÖZET

ASENKRON MOTOR PARAMETRELERİNİN ÇOK AMAÇLI-GENETİK ALGORİTMA İLE BELİRLENMESİ

KAYALI, Seda

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman

:Doç. Dr. Murat BARUT

Temmuz 2019, 83 Sayfa

Asenkron motorların (ASM) dinamik model parametreleri, hız-algılayıcısız vektör kontrolünün gerçekleştirilebilmesi için doğru bilinmesi gerekir. Geleneksel yaklaşımlarda, ASM'nin sistemden ayrılarak test edilmesi ve parametreleri belirlendikten sonra, sisteme dahil edilmesi gerekmektedir. Ayrıca, büyük güçlü ASM'lerin rotor kilitleme deneyinin gerçekleştirilmesinin zor olması ve harici donanımlara ihtiyaç duyulması geleneksel yöntemin zorluğunu oluşturmaktadır. Bu tez kapsamında dinamik model parametrelerini belirlemek için ASM sistemden ayrılmadan parametrelerin nasıl belirlenebileceğine dair araştırmalar yapılmış ve literatürdeki yapay zeka ile çeşitli eniyileme algoritmaları kullanılarak yapılan çalışmalar incelenmiş ve son olarak bu tez kapsamında önerilen yöntem ile bu parametreler belirlenmiştir. Böylece, geleneksel yaklaşımın gerçekleştirilmesindeki maliyet artışı ve zaman kaybı gibi olumsuz etkiler azaltılmıştır.

Anahtar sözcükler: Asenkron motor, vektörel kontrol, parametre, optimizasyon, çok amaçlı genetik algoritma

SUMMARY

PARAMETER IDENTIFICATION OF INDUCTION MOTOR USING MULTI-OBJECTIVE GENETIC ALGORITHM

KAYALI, Seda

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical Electronics Engineering

Supervisor :Associate Professor Murat BARUT

July 2019, 83 Pages

The dynamic model parameters of induction motors (IMs) must be correctly known for speed-sensorless vector control. In traditional methods, IMs should be separated from the system and determined the parameters by testing. Later it should be included in the system. In addition, the difficulty of performing the rotor locking test of high power IMs and the need for external equipments are a challenge for the traditional method. In this thesis, in order to determine the dynamic model parameters, researches are made on how to determine the parameters without leaving the IM from system and the studies using artificial intelligence and various optimization algorithms are examined in the literature. Finally, these parameters are determined by the proposed method in the scope of this thesis. Thus, The negative impacts of the traditional approach, such as cost increases and loss of time are reduced.

Keywords: Induction motors, vector control, parameter identification, optimization, multi-objective genetic algorithm

TEŐEKKÜR

Bu tez çalıőmasının yapılması sürecinde beni yönlendiren, teşvik eden gerek teknik bilgi gerekse de kaynak konusunda desteğini esirgemeyen değerli danıőmanım Sayın Doç. Dr. Murat BARUT' a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması boyunca bana teknik bilgi ve doküman anlamında yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen Dr. Öğretim Üyesi Emrah ZERDALI'ye teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca maddi ve manevi destekleri ile her zaman yanımda olan aileme teşekkürlerimi sunarım.

ÖN SÖZ

Bu yüksek lisans çalışmasında, endüstride sıklıkla kullanılan ASM'lerin, hız algılayıcı kontrol tasarımında kullanılan, parametrelerini belirlemek adına gerçekleştirilen çalışmalar incelenmiş ve düşük maliyet ile en uygun yapay zekâ algoritması belirlenmeye çalışılmıştır. Geleneksel yöntemler ile sistem içerisinde çalışan ASM'ler sistemden ayrılarak parametre testleri yapılmaktadır. Yapılan bu testler ile ASM parametrelerini belirlemek hem uzun sürelerle, hem yüksek maliyetlere neden olabilmektedir. Bu tez çalışması ile günümüzde yaygınlaşan yapay zeka ile çeşitli optimizasyon (eniyeleme) algoritmaları incelenip, hız algılayıcı kontrol tasarımında kullanılan parametrelerin elde edilmesi sağlanmıştır. Bu sayede, geleneksel yöntemlerle karşılaşılan maliyet artışı ve zaman kaybı gibi olumsuz etkiler azaltılmaktadır.

Yüksek lisans tez çalışmamın yürütülmesi esnasında, çalışmalarına yön veren, bilgi ve yardımlarını esirgemeyen ve bana her türlü desteği sağlayan danışman hocam, Sayın Doç. Dr. Murat BARUT'a ve Dr. Öğretim Üyesi Emrah ZERDALI'ye en içten teşekkürlerimi sunarım. Yüksek lisans tez çalışmam esnasında tecrübelerine başvurduğum Arş. Gör. Recep YILDIZ'a ve Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyelerine müteşekkir olduğumu ifade etmek isterim.

Bu tezi, sadece bu çalışmam boyunca değil, tüm öğrenim ve çalışma hayatım boyunca maddi ve manevi koruyucum ve destekçim babam İbrahim KAYALI'ya, annem Hatice KAYALI'ya ve Kardeşlerime ithaf ediyorum.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	IV
SUMMARY	V
ÖN SÖZ	VII
İÇİNDEKİLER	VIII
ÇİZELGELER DİZİNİ	X
ŞEKİLLER DİZİNİ	XII
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XV
BÖLÜM I GİRİŞ	1
1.1 Amaç ve Kapsam	1
1.2 Literatürdeki Çalışmalar	2
1.3 Yapılması Amaçlanan Çalışmalar	5
BÖLÜM II ASENKRON MOTORLAR	7
2.1 ASM'nin Dinamik Modeli	8
2.2 ASM'nin Eşdeğer İki Faz Eksen Takımına Dönüşümü	12
2.2.1 ASM'nin $\alpha\beta$ eksen takımındaki dinamik modeli	12
2.2.2 ASM'nin dq eksen takımında dinamik modeli	15
2.2.2.1 Stator eksen dönüşümleri	15
2.2.2.2 Rotor eksen dönüşümleri	17
2.3 Motorun Mekanik Denklemleri	19
BÖLÜM III GENETİK ALGORİTMA	22
3.1 Genetik Algoritma Temel Kavramları	23
3.1.1 Gen:	23
3.1.2 Kromozom:	23
3.1.3 Popülasyon (Topluluk):	24
3.1.4 Çaprazlama	25
3.1.5 Mutasyon	26
3.2 GA Başarımını Etkileyen Etkenler	28
3.3 Matlab Toolbox Kullanarak Eniyileme	29
BÖLÜM IV BENZETİM SONUÇLARI	33
4.1 ASM'nin Simulink Modeli	33

4.1.1 ASM'nin Simulink modeli	34
4.1.2 ASM'nin S-Function Builder ile Simulink modeli.....	36
4.2 ASM Modelinin Eniyileme Çalışmaları	40
4.2.1 Yöntem-I: Akım hataları için benzetim sonuçları	42
4.2.2 Yöntem-II: Hız hataları için benzetim sonuçları	43
4.2.3 Yöntem-III: Akım ve hız hataları için benzetim sonuçları.....	44
BÖLÜM V DENEY SONUÇLARI.....	45
5.1 ASM Modelinin Elektriksel Parametrelerinin Geleneksel Yöntem ile Elde Edilmesi	45
5.2 ASM Modelinin Elektriksel Parametrelerinin Eniyileme Yöntemi ile Elde Edilmesi	47
5.2.1 Eniyileme işlemi genetik algoritma parametreleri seçimi	48
5.2.2 ASM parametrelerinin akım hataları ile eniyilemesi.....	50
5.2.3 ASM parametrelerinin hız hataları ile eniyilemesi	52
5.2.4 ASM parametrelerinin akım ve hız hatalarının birlikte eniyilenmesi	54
5.2.4.1 ÇA algoritmada akım hatasının en düşük olduğu nokta	55
5.2.4.2 ÇA algoritmada hız hatasının en düşük olduğu nokta.....	56
5.2.4.3 ÇA algoritmada euclid minimum mesafe hatası	58
5.3 ASM Modeli Parametrelerine İlişkin Doğrulama Algoritmasının Gerçek Zamanlı Testleri	60
5.3.1 Donanım düzeneği	61
5.3.2 ASM' nin gerçek-zamanlı deneylerle doğrulanması	63
5.3.2.1 Senaryo I: yüksek hızda stator akım bileşenleri ve hız değerlerinin karşılaştırılması.....	63
5.3.2.2 Senaryo II: yüksek hızda ve yüklü iken stator akım bileşenleri ve hız değerlerinin karşılaştırılması	66
5.3.2.3 Senaryo III: yüksek, orta, düşük hızlarda stator akım bileşenleri ve hız değerlerinin karşılaştırılması	68
BÖLÜM VI SONUÇLAR	73
KAYNAKLAR	76
EKLER.....	80
ÖZ GEÇMİŞ	83

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. İki bitlik tek noktada çaprazlama örneği	25
Çizelge 3.2. Çift noktada çaprazlama	26
Çizelge 3.3. Sıralı çaprazlama örneği	26
Çizelge 3.4. Mutasyon değişim örneği	27
Çizelge 4.1. Benzetim testlerinde kullanılan SKASM'nin anma değerleri	36
Çizelge 4.2. S-Function Builder port değişkenleri	39
Çizelge 4.3. 50 popülasyonda 200 nesil parametreleri	43
Çizelge 4.4. 50 popülasyonda 200 nesil parametreleri	44
Çizelge 4.5. 50 popülasyonda 200 nesil parametreleri	44
Çizelge 5.1. SKASM için D.A test sonuçları	46
Çizelge 5.2. SKASM için boşa çalışma testi sonuçları	47
Çizelge 5.3. SKASM için kilitli rotor testi sonuçları.....	47
Çizelge 5.4. SKASM modelindeki elektriksel parametrelerin anma değerleri.....	47
Çizelge 5.5. GA parametre testleri.....	48
Çizelge 5.6. GA seçilen parametre değerleri	49
Çizelge 5.7. Parametre testleri sonucu yapılan ASM deneyi sonuçları	49
Çizelge 5.8. ASM'nin akım hataları ile eniyileme sonucu elde edilen.....	51
Çizelge 5.9. ASM'nin hız hataları ile eniyileme sonucu elde edilen.....	53
Çizelge 5.10. ASM'nin ÇA-akım hataları ile eniyileme sonucu elde edilen.....	55
Çizelge 5.11. ASM'nin ÇA-hız hataları ile eniyileme sonucu elde edilen.....	57
Çizelge 5.12. ASM'nin ÇA-Euclid hataları ile eniyileme sonucu elde edilen	59
Çizelge 5.13. Senaryo I test sonucunda elde edilen akım hata değerleri.....	65
Çizelge 5.14. Senaryo I test sonucunda elde edilen hız hata değerleri.....	65
Çizelge 5.15. Senaryo II test sonucunda elde edilen akım hata değerleri	66
Çizelge 5.16. Senaryo II test sonucunda elde edilen hız hata değerleri.....	67
Çizelge 5.17. Senaryo III yüksek hız test sonucunda elde edilen akım hata değerleri...	69
Çizelge 5.18. Senaryo III testi orta hız sonucunda elde edilen akım hata değerleri.....	69
Çizelge 5.19. Senaryo III testi düşük hız sonucunda elde edilen Akım hata değerleri ..	70
Çizelge 5.20. Senaryo III testi yüksek hız sonucunda elde edilen hız hata değerleri.....	71
Çizelge 5.21. Senaryo III testi orta hız sonucunda elde edilen hız hata değerleri	71

Çizelge 5.22. Senaryo III testi düşük hız sonucunda elde edilen hız hata değerleri..... 76



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Tez Kapsamında gerçekleştirilmesi amaçlanan çalışmalar	5
Şekil 2.1. SKASM'nin şematik gösterim.....	7
Şekil 2.2. SKASM hareketsiz-durum tek-faz eşdeğer devresi.....	7
Şekil 2.3. Üç fazlı ASM'nin şematik gösterilişi	8
Şekil 2.4. Duran $\alpha\beta$ ve dönen dq eksenlerinin stator ve rotor vektörleri konumu	12
Şekil 2.5. Üç faz değişkenlerinden (abc) duran eksenlerine ($\alpha\beta$) dönüşümü	12
Şekil 2.6. Üç fazlı motorun eşdeğer dönen eksen ($dq0$) iki faz vektörleri	15
Şekil 2.7. Motorun dinamik dq eşdeğer devresi	18
Şekil 3.1. Genetik seçim algoritması	24
Şekil 3.2. Eniyileme Toolbox Arayüzü 1	29
Şekil 3.3. Eniyileme Toolbox Arayüzü 2	31
Şekil 3.4. Eniyileme Toolbox Arayüzü 3	32
Şekil 4.1. ASM fonksiyon blokları ile modeli (alt blok)	35
Şekil 4.2. ASM fonksiyon blokları ile modeli	35
Şekil 4.3. ASM'nin S-Function Builder ile modeli	36
Şekil 4.4. S-Function Builder ile ASM modeli yapılandırmaları-1	37
Şekil 4.5. S-Function Builder ile ASM modeli yapılandırmaları-2	38
Şekil 4.6. S-Function Builder ile ASM modeli yapılandırmaları-3	39
Şekil 4.7. S-Function Builder ile ASM modeli yapılandırmaları-4	40
Şekil 4.8. Eniyileme süreci akış diyagramı.....	42
Şekil 5.1. ASM'nin statora indirgenmiş bir faz eşdeğer devresi	45
Şekil 5.2. D.A testine ilişkin deney düzeneği	46
Şekil 5.3. Boşta çalışma ve kilitli rotor testi için deney düzeneği	46
Şekil 5.4. Parametre testleri sonucu yapılan ASM deneyi sonuçları; Stator akımının α -bileşeni ($i_{s\alpha}$) (a), Stator akımının β -bileşeni ($i_{s\beta}$) (b) ve Rotor hızı değişimleri (c)	50
Şekil 5.5. Akım hataları ile gerçekleştirilen eniyileme sonucu elde edilen sonuçlar ve gerçek verilerin karşılaştırılması; Stator akımının α -bileşeni ($i_{s\alpha}$) (a), Stator akımının β -bileşeni ($i_{s\beta}$) (b) ve Rotor hızı değişimleri (c)	52

Şekil 5.6. Hız hataları ile gerçekleştirilen eniyileme sonucu elde edilen sonuçlar ve gerçek verilerin karşılaştırması	53
Şekil 5.7. ÇA'dan elde edilen hata değerleri	54
Şekil 5.8. ÇA-GA ile gerçekleştirilen, akım hatalarının en düşük olduğu noktadaki elde edilen sonuçlar ve gerçek verilerin karşılaştırması; Stator akımının α -bileşeni ($i_{s\alpha}$) (a), Stator akımının β -bileşeni ($i_{s\beta}$) (b) ve Rotor hızı değişimleri (c)...	56
Şekil 5.9. ÇA-GA ile gerçekleştirilen, hız hatalarının en düşük olduğu noktadaki elde edilen sonuçlar ve gerçek verilerin karşılaştırması; Stator akımının α -bileşeni ($i_{s\alpha}$) (a), Stator akımının β -bileşeni ($i_{s\beta}$) (b) ve Rotor hızı değişimleri (c)...	57
Şekil 5.10. ÇA-GA ile elde edilen hata değerleri	58
Şekil 5.11. ÇA-GA ile gerçekleştirilen, Euclid noktasında elde edilen ve gerçek verilerin karşılaştırması; Stator akımının α -bileşeni ($i_{s\alpha}$) (a), Stator akımının β -bileşeni ($i_{s\beta}$) (b) ve Rotor hızı değişimleri (c)	59
Şekil 5.12. Gerçek zamanlı testler için oluşturulan ASM modeli	64
Şekil 5.13. ASM model ve parametrelerin gerçek zamanlı doğrulanmasına ilişkin deney düzeneği	62
Şekil 5.14. Senaryo I motor sürme işlemleri	64
Şekil 5.15. Senaryo I test sonuçları; Stator akımının α -bileşeni ($i_{s\alpha}$) (a), Stator akımının β -bileşeni ($i_{s\beta}$) (b) ve Rotor hızı değişimleri (c)	64
Şekil 5.16. Senaryo II test sonuçları; Stator akımının α -bileşeni ($i_{s\alpha}$) (a), Stator akımının β -bileşeni ($i_{s\beta}$) (b) ve Rotor hızı değişimleri (c)	70
Şekil 5.17 Senaryo II motor sürme işlemleri.	71
Şekil 5.18. Senaryo III $is\alpha$ test sonuçları; Stator akımının α -bileşeni ($i_{s\alpha}$) (a), Stator akımının β -bileşeni ($i_{s\beta}$) (b) ve Rotor hızı değişimleri (c).....	68
Şekil 5.19. Senaryo III nm test sonuçları; Stator akımının α -bileşeni ($i_{s\alpha}$) (a), Stator akımının β -bileşeni ($i_{s\beta}$) (b) ve Rotor hızı değişimleri (c).....	70

FOTOĞRAFLAR VB. MALZEME DİZİNİ

Fotoğraf 5.1. Gerçek zamanlı deney/ test düzeneği..... 61

Fotoğraf 5.2. Deney/test düzeneği ve numaralandırılmış makine-teçhizatlar 61



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
L_s	Stator sargı endüktansı
L_r	Rotor çevre endüktansı
R_s	Stator faz sargı direnci
$\psi_{sa}, \psi_{sb}, \psi_{sc}$	Stator a, b ve c fazlarına ilişkin halkalama akıları
ψ_{r1}	Rotorun 1. fazına ilişkin halkalama akısı
θ	Rotorun, stator a fazı manyetik eksenine göre elektriksel konumu
v_{sa}, v_{sb}, v_{sc}	Stator faz gerilimlerinin ani değerleri
i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}	Stator faz akımlarının ani değerleri
$i_{r1}, i_{r2}, i_{r3} \dots$	Rotor çevre akımlarının ani değerleri
$i_1, i_2, i_3 \dots$	Rotor faz akımlarının ani değerleri
θ_m	Rotorun, stator a -fazı magnetik eksenine göre mekanik konumu
k	Rotor faz sayısı
p_p	Kutup çifti sayısı
$w_s = \theta_s$	Senkron hız
$w_r = \theta_r$	Kayma hızı
$w_m = \theta_m$	Rotor milinin mekanik hızı
$\omega = \theta$	Rotor milinin elektriksel hızı
M_m	Rotor ve stator arasındaki karşıt endüktansın maksimum değeri
$\alpha\beta$	Stator a -fazı referanslı duran eksen takımı
dq	Senkron hızla (ya da genel) dönen eksen takımı
t_L	Yük (bozucu) momenti
j_L	Motor ve yük'ün toplam eylemsizliği
B_L	Motor ve yük'ün toplam viskoz sürtünme katsayısı
t_e	Motorda endüklenen elektriksel (elektromanyetik) moment
ψ_{sdq}, ψ_{rdq}	dq – eksenindeki stator ve rotor akılarına ilişkin uzay vektörleri
i_{sdq}, i_{rdq}	eksenindeki stator ve rotor akımlarına ilişkin uzay vektörleri
R_s, L_s	Stator direnç ve öz endüktansı

L_m	Mıknatıslanma endüktansı (karşılıklı endüktans)
i_{sd}, i_{sq}	Stator akımlarının d ve q bileşenleri
ψ_{rd}, ψ_{rq}	Halkalanan rotor akısının d ve q bileşenleri,
L_σ	Stator geçici endüktansı
σ	Kaçak faktörü
s	Laplace operatörü

Kısaltmalar

Açıklama

ASM	Asenkron Motor
SKASM	Sincap Kafesli Asenkron Motor
RSASM	Rotoru Sargılı Asenkron Motor
ÇA-GA	Çok Amaçlı Genetik Algoritma
GA	Genetik Algoritma
PSO	Parçacık Sürü Optimizasyonu
HGA	Hibrit Genetik Algoritmaları
HGAPSO	Hibrit Genetik Algoritma Parçacık Sürü Optimizasyonu
BBAOA	Bakteriyel Besin Arama
BBO	Biyocoğrafya Tabanlı Optimizasyon
CSS	Değişen Sistem Araması
DEA	Diferansiyel Evrim Algoritması
DEAS	Dinamik Kodlama Optimizasyon
VKY	Vektör Kontrol Yöntemi
DMK	Doğrudan Moment Kontrol
DA	Doğru Akım

BÖLÜM I

GİRİŞ

1.1 Amaç ve Kapsam

Mühendislik alanında gelişen teknolojiyle birlikte, bilgisayarların işlem gücünün artması, genellikle konveyörler, elektrik makineleri ve algılayıcılardan oluşan endüstriyel otomasyon sistemlerinin verimliliklerinin artmasını sağlamış buna bağlı olarak bu sistemlerdeki rekabeti de arttırmıştır. Otomasyon sistemlerinin ana unsuru, uygulama kolaylığı ve sağlamlığı nedeniyle fabrikalarda yaygın olarak kullanılan Asenkron motorlardır (ASM'lerdir). Bu motorlara uygulanan vektör kontrolü, sıcaklığa bağlı olarak değişen, deri etkisi ve doyumun neden olduğu doğrusal olmayan motor parametrelerini kullanan standart bir araç haline gelmiştir. Bu nedenle, motor parametrelerinin yüksek doğruluklu olması ve kolaylıkla elde edilmesi oldukça önemlidir.

Geleneksel yaklaşımlarda, ASM'nin parametrelerini belirlemek için sistemden ayrılarak test edilmesi ve parametreleri belirlendikten sonra, sisteme dâhil edilmesi gerekmektedir. Ayrıca, büyük güçlü ASM'lerin rotor kilitleme deneyinin gerçekleştirilmesinin zor olması ve harici donanımlara ihtiyaç duyulması geleneksel yöntemin zorluğunu oluşturmaktadır.

ASM'nin parametreleri belirlenirken geleneksel yaklaşımın zorluklarından dolayı geliştirilen, literatürde de birçok örneği bulunan optimizasyon (eniyileme) yöntemi ile stator ve rotor üzerindeki dirençler ve endüktanslar gibi parametrelerinin doğru bir şekilde belirlenmesi gerçekleştirilmektedir. Eniyileme yaklaşım, kapalı çevrimli sürücü beslemeli motorun hız eniyilemesinde, güç tüketiminin yönetilmesinde, elektrik kurulumunun tasarlanmasında ve ASM arızalarının öngörülmesinde çok yararlı olduğu tespit edilmiştir.

ASM'nin davranışını öngörmek için ASM parametrelerinin bilinmesi gerekir. Motor parametrelerini tanımlayabilmek için kullanılan test yöntemleri, tesis dışı, tesis içi, çevrimiçi ve çevrimdışı yöntemler olmak üzere sınıflandırılabilir. Tesis içi ve tesis dışı

durumlarda, motorlar hali hazırda endüstride çalışır durumda ve bir güç dönüştürücüsü tarafından beslenirken test edilmektedir.

Tez kapsamında incelenen yöntem ile ASM sistemden ayrılmadan, bu parametrelerin belirlenmesi mümkün olacaktır. Böylece, geleneksel yaklaşımın gerçekleştirilmesindeki maliyet artışı ve zaman kaybı gibi olumsuz etkiler azaltılacaktır.

1.2 Literatürdeki Çalışmalar

Literatürde ASM'ler çeşitli yapay zekâ algoritmaları kullanılarak parametre belirleme üzerine birçok çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalardan bazıları ASM'nin sürekli sinüsoidal hal eşdeğer devre modeli ile bazıları ise ASM dinamik modeli kullanılarak yapılmıştır.

Literatürde gerçekleştirilen çalışmalardan biri olan sinüsoidal hal modeli kullanılarak yapılan çalışmada (Akhavan and Mohammadi, 2014) Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), Hibrit Genetik Algoritma (HGA) kullanılarak 3 fazlı ASM için sürekli hal devre modelinde parametre (stator direnci R_s , rotor direnci R_r , mıknatıslanma endüktansı L_m , stator endüktansı L_s , rotor endüktansı L_r) tahmini yapılmıştır. Ayrıca Hibrit Genetik Parçacık Sürü Optimizasyonu (HGAPSO) yöntemi önerilmiş ve bu yöntem 5 HP ASM modeli MATLAB üzerinde hesaplanmış ve parametre tahmininde HGAPSO'nun HGA ve PSO ye göre daha iyi sonuçlar verdiği belirlenmiştir.

Yapılan diğer bir çalışma da (Abu-Siada vd., 2016) yine farklı algoritmalarından olan Bakteriyel Besin Arama Algoritması (Bacterial Foraging Optimization Algorithm, BBAOA) ve Genetik Algoritma (Genetic Algorithm, GA) optimizasyonu kullanılarak 3 farklı tür ASM'de 2 HP Sincap kafesli asenkron motor (SKASM), 50 HP SKASM, 9 HP rotorlu sargılı asenkron motor (RSASM) elektrik devre parametreleri (L_s, L_m, R_r, L_r, R_s) tahmini yapılmıştır ve çalışma sonucunda gerçek devre parametreleri ile karşılaştırıldığında yüksek derecede doğruluk göstermiştir.

ASM'nin rotor parametrelerinin (L_s, R_s, L_m, R_s, L_r) tahmini için sinüsoidal hal modeli kullanılarak yapılan diğer bir çalışma (Duman vd., 2013) farklı eniyileme

yöntemlerinden olan Biyocoğrafya Tabanlı Optimizasyon (Biogeography-Based Optimization, BBO) ile gerçekleştirilmiştir.

Literatürde bulunan diğer bir çalışmada (Çanakoğlu vd., 2014) ise 2 farklı ASM (30-kW RSASM ve 37-kW SKASM) kullanılarak Şarj Edilmiş Sistem Araması (Charged System Search, CSS) Diferansiyel Evrim Algoritması (DEA), GA ve PSO algoritmaları ile parametre (R_s, R_r, L_m, L_s) tahmini yapılmıştır. Elde edilen eniyileme yöntemleri sonuçları karşılaştırıldığında CSS algoritmasının DEA ile elverişli olduğu ve üretici değerlerine uygun olduğu belirlenmiştir.

Yapılan bir tez çalışmasında da (Mutluer, 2007), ASM sinüsoidal eşdeğer devresinden yararlanılarak elde edilen maliyet fonksiyonları (motor moment eşitlikleri) HGA da kullanılarak parametre $(R_s, R_r, L_m, L_r, \text{ anma moment } t_w, \text{ kalkınma momenti } t_{kalkınma}, \text{ devrilme momenti } t_{devrilme})$ belirlenmesi gerçekleştirilmiştir. HGA ile elde edilen ASM parametre değerleri incelenmiş ve geleneksel GA kullanılarak elde edilen parametre değerleriyle karşılaştırılmıştır. HGA'nın, GA'ya göre başarımlarının daha iyi olduğu ve yüksek maliyet değerlerini daha fazla koşul sayısında sağladığı gösterilmiştir.

Farklı algoritma kullanılarak yapılan diğer bir çalışmada (Haque, 1997) ise Newton–Raphson optimizasyonu ve GA kullanılarak farklı birçok motorda devre parametreleri $(R_s, R_r, L_m, L_r, \text{ anma momenti } t_w, \text{ kilitli rotor momenti } t_{lr}, \text{ devrilme momenti } t_{bd})$ hesaplanıp sonuçlar karşılaştırılmıştır. Kilitli rotor, arıza, anma momenti eşitlikleri Çok Amaçlı (Multi-Objective, ÇA) optimizasyon da kullanılmıştır.

Kapalı-çevrimli hareket kontrol uygulamalarında ASM'lerin yüksek başarılı kontrolünü sağlamak için geçici haldeki davranışının da hesaba katılması gerektiğinden ASM'nin dinamik modeli tercih edilmektedir. Literatürde dinamik model kullanılarak gerçekleştirilen birçok çalışma bulunmaktadır.

PSO kullanılarak ASM'nin dinamik model parametrelerinin (R_r, R_s) kestirimine bir örnek olarak Acarnley vd., (2006) gerçekleştirdiği çalışma verilebilir. Bu çalışmada geçici durum sırasında elde edilen terminal ve rotor konum verilerinden makine durumu izleme ve hata tanımlama için yeni bir teknik açıklanmaktadır.

Dinamik motor parametrelerinin elde edilmesine ilişkin bir diğer çalışma Jin, vd. 'nin (2009) çalışmasıdır. Bu çalışmada, GA kullanarak 4kW 4 kutuplu bir elektrikli ASM'nin parametrelerinin değerlendirilmesi için doğru ve hızlı bir yöntem sunulmaktadır.

Diğer bir dinamik model kullanılarak yapılan çalışmada ise (Bouchard vd., 2015) GA kullanılarak motor parametrelerinden dokuz tanesinin ($R_s, R_r, L_{ls}, L_{lr}, L_m$, viskoz sürtünme katsayısı (B_T), yük ve motorun toplam eylemsizliği (J_L) kestirimi yapılmıştır.

Huang vd.,'nin (2002) çalışmasında ASM'nin dinamik modelinin parametrelerinin (R_s, R_r, L_m, L_r) belirleme işlemi yine GA kullanılarak yapılmıştır.

Literatürde bulunan başka bir çalışmada (Bahgat vd., 2008), motorun altı parametresini ($R_s, R_r, L_{ls} + L_{lr}, L_m, J_L$) tanımlamak için farklı PSO sürümleri kullanılmıştır. Cheng, vd., (2010) ve Huynh, vd., (2010)'nin çalışmaları da çeşitli parametre (R_s, R_r, L_m, L_r) kestiriminin yapıldığı farklı PSO yaklaşımlarına örnek olarak verilebilir.

Li, vd.,'nin 2013'deki çalışmasında ise üç fazlı ASM'nin rotor parametrelerinin tahmini için uygun yeni bir hibrid çevrimiçi yöntem önerilmiştir.

Bouchard vd., (2015)'nin gerçekleştirdiği çalışmada ise ASM devre parametrelerini (R_s, R_r, L_m, L_r) etkili şekilde hangi algoritma ile tahmin edileceği incelenmiştir. İlk kez θ -Newton-Raphson Evrim III Algoritması (Newton-Raphson Evolutionary Algorithms θ -NSGA III) kullanarak parametre hesaplama gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bu makalede GA'nın PSO algoritmasından daha iyi olduğu gösterilmiştir ve en iyi tahmini θ -NSGA III algoritmasının gerçekleştirdiği gösterilmiştir.

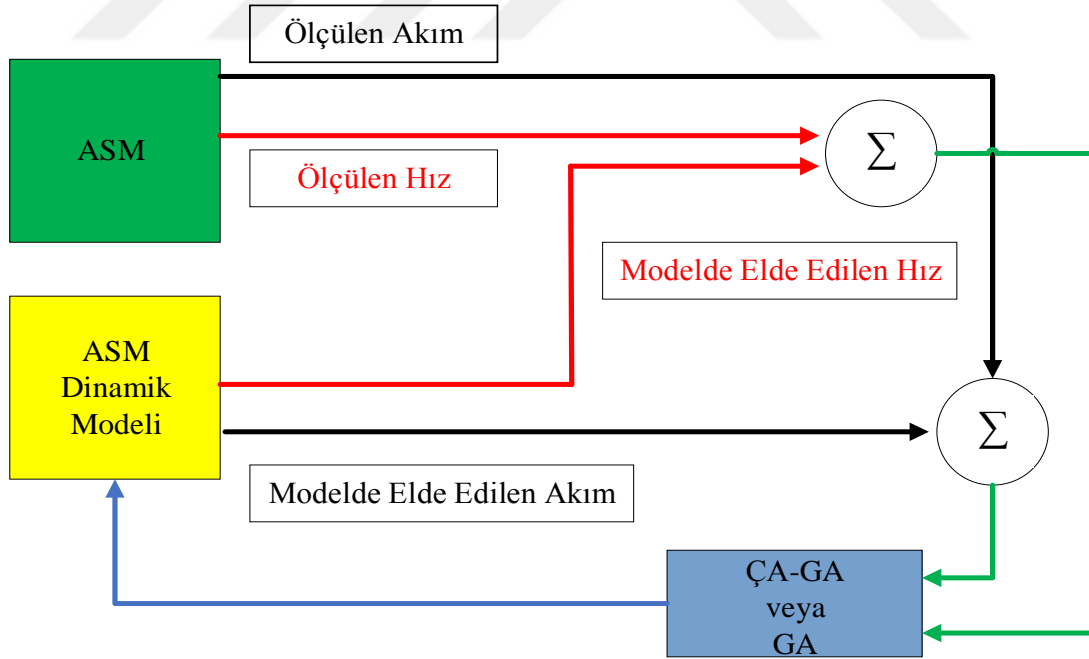
Farklı algoritma türlerinden olan Edge optimizasyonu kullanılarak yapılan diğer bir çalışma da (Delgado, 2010) parametre ($R_s, L_s, R_r, L_r, L_m, J_L, B_T$) tahmini yapılmış ve ayrıca bu yeni algoritma türünün doğrusal bağımlı model parametreleri sayesinde farklı elektrik motorlarından olan senkron motor ve fırçasız doğru akım motorlarında da parametre belirlemede kullanılabileceği belirtilmiştir. Kim'in (2005) çalışmasında da

yeni algoritma türlerinden olan Dinamik Kodlama Optimizasyon (Dynamic Encoding Algorithm for Searches, DEAS) algoritması kullanılarak parametre ($R_s, L_{ls}, R_r, L_{lr}, L_m$, Rotor dönen eksen akısları ψ_{dr}, ψ_{qr}) belirleme işlemi gerçekleştirilmiştir.

Parametre eniyileme üzerine yapılan diğer bir çalışmada (Abdou, 2016) ise ASM'nin dinamik modeli ile doğrudan moment kontrol (DMK) eşitlikleri ve GA kullanılarak parametre ($R_s, L_s, R_r, L_r, L_m, J_L$) tahmini gerçekleştirilmiştir.

1.3 Yapılması Amaçlanan Çalışmalar

Bu tez kapsamında literatürde incelenen çalışmalarda ASM dinamik modeli ile yalnız hız ya da yalnız akım hataları kullanılarak, eniyileme çalışmaları yapıldığı gözlenmiştir. Tez kapsamında ÇA-GA'nın ASM dinamik model parametrelerinin belirlenmesinde kullanılmasının hem hız hem de akım hatalarının eşzamanlı eniyilenmesini gerçekleştirmek için kullanılmasına karar verilmiştir.



Şekil 1.1. Tez kapsamında gerçekleştirilmesi amaçlanan çalışmalar

ASM'nin $R_s, R_r, L_m, L_{ls}, L_{lr}, J_T, B_T$ parametreleri GA ile belirlenecektir. Şekil 1.1'de de ifade edildiği gibi, ölçülen rotor hızı ile iki-faz akım ve gerilimler bilgisayara kayıt

edilir. Kaydedilen gerilimler bilgisayar ortamında ASM'nin dinamik modeline uygulanarak, dinamik modelin çektiği akımlar ile ölçülen akımlar arasındaki hata veya dinamik modelin rotor hızı ile ölçülen rotor hızı arasında hata dinamik modeldeki parametreler eniyilenecek şekilde sıfırlanmaya çalışılır. Bu kısımdaki çalışmalar, tek-amaçlı eniyileme yöntemlerini içerir.

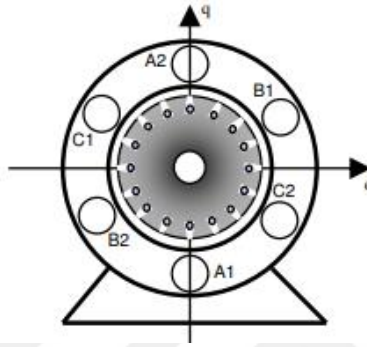
Akım veya hız hatalarına göre gerçekleştirilen eniyileme işlemi, diğer bir basamakta hem hız hem de akım hatalarının eşzamanlı eniyileme ile gerçekleştirilerek, dinamik modele ait parametreler belirlenecektir. Daha sonra geleneksel yaklaşımla elde edilen ASM parametreleri gerçek-zamanlı deney çalışmaları ile karşılaştırılacaktır.



BÖLÜM II

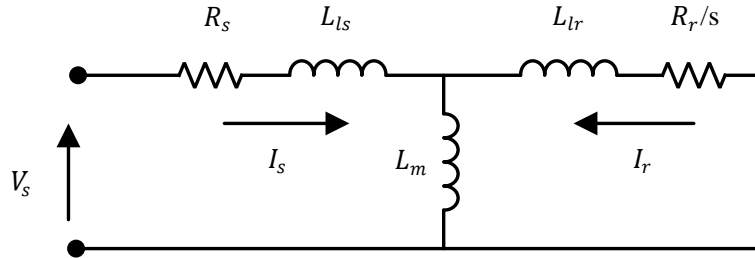
ASENKRON MOTORLAR

ASM'ler bir alternatif akım makinesidir. ASM'ler, SKASM ve RSASM'ler olmak üzere iki tipi vardır. Uygulamalarda en ucuz ve en yaygın kullanılan türü ise SKASM'lerdir. Bu tez çalışmasında kullanılan motor da üç-fazlı bir SKASM'dir. SKASM'nin basitleştirilmiş yapısı Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. SKASM'nin şematik gösterimi

SKASM Şekil 2.1'de de görüldüğü gibi, iki temel parçası olan hareketli kısım stator ve hareketli kısım olan rotordan oluşur. Stator, birbirlerine 120° aralıklarla silindirik motor gövdesi içerisindeki oluklara göre yerleştirilmiş üç adet sargıdan oluşur. Rotor ise uçları birer iletken halka ile kısa devre edilmiş sincap kafesine benzeyen bakır çubuklardan oluşur.



Şekil 2.2. SKASM hareketsiz-durum tek-faz eşdeğer devresi

Hem elektriksel, hem de mekanik bileşenlere sahip olan ASM'ler uygulamalarında analiz ve tasarım için Şekil 2.2'de verilen tek-faz eşdeğer devreleri kullanılır. Tek-faz

- Hava aralığında akı sinüsoidal biçimdedir,
- Stator sargıları yıldız bağlı, simetrik ve nötr noktaları yalıtılmıştır,
- Doyma, diş ve oluk etkileri ihmal edilmiştir,
- Manyetik kısımların geçirgenliği sonsuz varsayılmıştır,
- Histerezis ve fuko kayıpları ihmal edilmiştir,
- Akım yığılması (deri olayı) ihmal edilmiştir,
- Dirençler ve endüktansların sıcaklıktan bağımsız oldukları varsayılmıştır.

Buradaki stator ve rotor devrelerine ilişkin parametreler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

L_S : Stator sargı endüktansı [H].

L_R : Rotor çevre endüktansı [H].

L_{lS} : Stator kaçak endüktansı [H].

L_{lR} : Rotor kaçak endüktansı [H].

L_σ : Stator geçici endüktansı [H].

R_S : Stator faz sargı direnci [Ω].

R_r : Rotor faz sargı direnci [Ω].

R_ζ : Çubuk direnci [Ω].

R_h : İki çubuk arasındaki halka parçası direnci [Ω].

ψ_S^{abc} : Stator a , b ve c -fazlarına ilişkin halkalama akıları [Wb].

ψ_r^{abc} : Rotorun a , b ve c -fazlarına ilişkin halkalama akıları [Wb].

V_{sa}, V_{sb}, V_{sc} : Stator faz gerilimlerinin ani değerleri [V].

i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} : Stator faz akımlarının ani değerleri [A].

i_{ra}, i_{rb}, i_{rc} : Rotor faz akımlarının ani değerleri [A].

θ : Açısal rotor pozisyonu [rad].

θ_m : İki çubuk arasındaki halka parçası direnci [rad].

w_m : Mekanik açısal hızı [rad/s].

w_r :Rotor açışsal hızı [rad/s].

w_{sl} :Kayma açışsal hızı [rad/s].

t_l : Yük momentini [$N.m$].

J : Eylemsizlik sabitini [$kg.m^2$].

B_L : Sürtünme katsayısını [$N.m/(rad / s)$].

P_p : Kutup ifti sayısı.

 fazlı ASM'nin akı ve gerilim arasındaki bağıntılar Eşitlik 2.1a,-,2.1d ve Eşitlik 2.2a,-,2.2d'de verilen denklemlerle gösterilebilir (Barut, 2005).

Stator gerilim denklemleri:

$$V_{s,abc} = R_{s,abc}i_{s,abc} + \frac{d}{dt}\psi_{s,abc} \quad (2.1a)$$

$$V_{sa} = R_s i_{sa} + \frac{d}{dt}\psi_{sa} \quad (2.1b)$$

$$V_{sb} = R_s i_{sb} + \frac{d}{dt}\psi_{sb} \quad (2.1c)$$

$$V_{sc} = R_s i_{sc} + \frac{d}{dt}\psi_{sc} \quad (2.1d)$$

Rotor gerilim denklemleri:

$$0 = R_{r,12\dots k}i_{r,12\dots k} + \frac{d}{dt}\psi_{r,12\dots k} \quad (2.2a)$$

$$0 = R_{r1}i_{r1} + \frac{d}{dt}\psi_{r1} \quad (2.2b)$$

$$0 = R_{r2}i_{r2} + \frac{d}{dt}\psi_{r2} \quad (2.2c)$$

⋮

$$0 = R_{rk}i_{rk} + \frac{d}{dt}\psi_{rk} \quad (2.2d)$$

 fazlı ASM'nin akı ve akımları arasındaki bağıntılar ise Eşitlik 2.3 ve 2.4'deki denklemlerle gösterilebilir (Barut, 2005).

$$\psi_{s,abc} = L_{s,abc}i_{s,abc} + M_{sr,abc}(\theta_m)i_{r,12\dots k} \quad (2.3)$$

$$\psi_{r,12\dots k} = L_{r,12\dots k}i_{r,12\dots k} + M_{rs,12\dots k}(\theta_m)i_{s,abc} \quad (2.4)$$

Eşitlik 2.3 ve 2.4'deki denklemlerin uygun boyutlu matrisleri aşağıda göstermektedir.

$$\psi_{s,abc} = \begin{bmatrix} \psi_{sa} \\ \psi_{sb} \\ \psi_{sc} \end{bmatrix}; \psi_{r,12\dots k} = \begin{bmatrix} \psi_{r1} \\ \psi_{r2} \\ \vdots \\ \psi_{rk} \end{bmatrix}_{rxk}; L_{s,abc} = \begin{bmatrix} L_{sa} \\ L_{sb} \\ L_{sc} \end{bmatrix}; L_{r,12\dots k} = \begin{bmatrix} L_{r1} \\ L_{r2} \\ \vdots \\ L_{rk} \end{bmatrix}_{rxk}$$

$$i_{s,abc} = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix}; i_{r,12\dots k} = \begin{bmatrix} i_{r1} \\ i_{r2} \\ \vdots \\ i_{rk} \end{bmatrix}_{rxk}$$

$$R_{r,12\dots k} = \begin{bmatrix} 2(R_h + R_\zeta) & -R_\zeta & 0 & 0 & \dots & 0 & -R_\zeta \\ -R_\zeta & 2(R_h + R_\zeta) & -R_\zeta & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -R_\zeta & 0 & 0 & 0 & \dots & -R_\zeta & 2(R_h + R_\zeta) \end{bmatrix}_{kxk}$$

$$L_{s,abc} = \begin{bmatrix} L_s & M_{ss} & M_{ss} \\ M_{ss} & L_s & M_{ss} \\ M_{ss} & M_{ss} & L_s \end{bmatrix}_{3x3}; L_{r,12\dots k} = \begin{bmatrix} L_R & M_{rr} & M_{rr} & \dots & M_{rr} & M_{rr} \\ M_{rr} & L_R & M_{rr} & \dots & M_{rr} & M_{rr} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ M_{rr} & M_{rr} & M_{rr} & \dots & M_{rr} & L_R \end{bmatrix}_{kxk}$$

$$M_{sr,abc}(\theta_m) = M_m \begin{bmatrix} \cos P_p \theta_m & \cos \left(P_p \theta_m + \frac{2\pi}{k} \right) & \dots & \cos \left(P_p \theta_m - \frac{2(k-1)\pi}{k} \right) \\ \cos \left(P_p \theta_m - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(P_p \theta_m - \frac{2\pi}{3} + \frac{2\pi}{k} \right) & \dots & \cos \left(P_p \theta_m - \frac{2\pi}{3} + \frac{2(k-1)\pi}{k} \right) \\ \cos \left(P_p \theta_m + \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(P_p \theta_m + \frac{2\pi}{3} + \frac{2\pi}{k} \right) & \dots & \cos \left(P_p \theta_m + \frac{2\pi}{3} + \frac{2(k-1)\pi}{k} \right) \end{bmatrix}_{3xk}$$

$$M_{rs,12\dots k}(\theta_m) = M_{sr,abc}^T(\theta_m)$$

M_{ss} : Stator faz sargıları arası karşit endüktans $[H]$.

M_{rr} : Rotor çubukları arası karşit endüktans $[H]$.

M_m : Rotor ve stator arasındaki karşit endüktansın maksimum değeri $(N_s N_r \mu_0 A / g)$ $[H]$.

$M_{rs,12\dots k}(\theta_m) = M_{sr,abc}^T(\theta_m)$: Açısal konumuna bağlı olarak sırasıyla, rotorun statora ve statorun rotora endüklemediği karşit endüktans matrisleridir $[H]$.

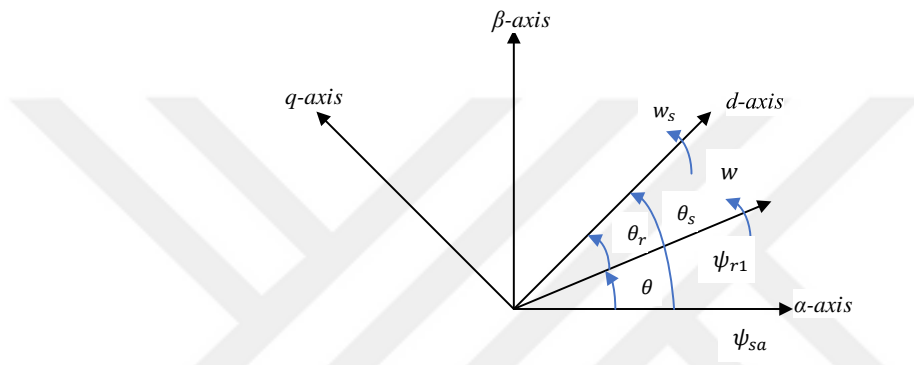
Eşitlik 2.3 ve 2.4'deki ifade Eşitlik 2.1 ve 2.2'de yerine yazılırsa Eşitlik 2.5 ve 2.6 elde edilmektedir: (Barut, 2005)

$$V_{s,abc} = R_{s,abc} i_{s,abc} + \frac{d}{dt} (L_{s,abc} i_{s,abc} + M_{sr,abc}(\theta_m) i_{r,12\dots k}) \quad (2.5)$$

$$0 = R_{r,12\dots k} i_{r,12\dots k} + \frac{d}{dt} (L_{r,12\dots k} i_{r,12\dots k} + M_{rs,12\dots k}(\theta_m) i_{s,abc}) \quad (2.6)$$

2.2 ASM'nin Eşdeğer İki Faz Eksen Takımına Dönüşümü

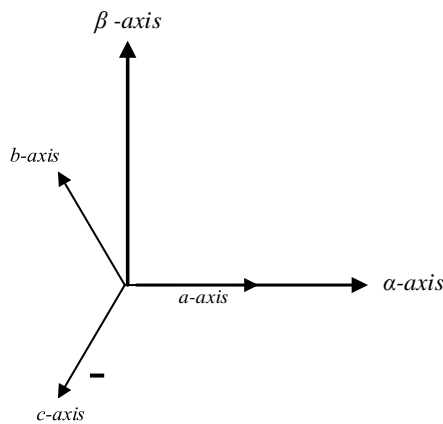
Eksen dönüşümleri sonucunda ASM'nin dinamik davranışının modellendiği vektör dönüşümleri ortaya çıkmış ve yüksek başarımlı hız sürücülerinin denetiminde kullanılan vektör denetim yöntemlerinin temelini oluşturmuştur. Şekil 2.4'de görüldüğü gibi duran $\alpha\beta$ ve dönen dq eksenlerine dönüştürülmüş stator ve rotor vektörleri gösterilmektedir.



Şekil 2.4. Duran $\alpha\beta$ ve dönen dq eksenlerinin stator ve rotor vektörleri konumu (Barut, 2005).

2.2.1 ASM'nin $\alpha\beta$ eksen takımındaki dinamik modeli

Üç fazlı bir ASM'nin duran eksenlerine dönüşüm Şekil 2.5'de görüldüğü gibi elde edilebilir. Duran eksen takımına dönüşüm eşitlikleri aşağıdaki gibi elde edilir:



Şekil 2.5. Üç faz değişkenlerinden (abc) duran eksenlerine ($\alpha\beta$) dönüşümü

Üç fazlı bir ASM'nin duran eksenlerine dönüşüm denklemleri,

$$i_{s,\alpha\beta 0} = i_{sa} + ai_{sb} + a^2i_{sc} \quad (2.7a)$$

$$\left[\left(a = \cos \frac{2\pi}{3} + j \sin \frac{2\pi}{3} \right), \left(a^2 = \cos \frac{4\pi}{3} + j \sin \frac{4\pi}{3} \right) \right] \quad (2.7b)$$

$$\left[\cos \frac{2\pi}{3} = \frac{1}{2}, j \sin \frac{2\pi}{3} = j \frac{\sqrt{3}}{2}, \cos \frac{4\pi}{3} = -\frac{1}{2}, j \sin \frac{4\pi}{3} = -j \frac{\sqrt{3}}{2} \right] \quad (2.7c)$$

Eşitlik 2.7a'daki denkleme Eşitlik 2.7b ve 2.7c'de bulunan açık halleri yerine yazıldığında Eşitlik 2.8a elde edilmektedir.

$$i_{s,\alpha\beta 0} = i_{sa} - \frac{1}{2}i_{sb} - \frac{1}{2}i_{sc} + \frac{\sqrt{3}}{2}(i_{sb} - i_{sc}) \quad (2.8a)$$

$$i_{s,\alpha\beta 0} = i_{sa} + \frac{1}{2}i_{sa} - \frac{1}{2}i_{sa} - \frac{1}{2}i_{sb} - \frac{1}{2}i_{sc} + \frac{\sqrt{3}}{2}(i_{sb} - i_{sc}) \quad (2.8b)$$

$$i_{s,\alpha\beta 0} = \frac{3}{2}i_{sa} - \frac{1}{2}(i_{sa} + i_{sb} + i_{sc}) + \frac{\sqrt{3}}{2}(i_{sb} - i_{sc}) \quad (2.8c)$$

$$i_{sa} + i_{sb} + i_{sc} = 0 \quad (2.8d)$$

$$i_{sa} = I_m \cos w_t \quad (2.8e)$$

$$i_{sb} = I_m \cos \left(w_t - \frac{2\pi}{3} \right) \quad (2.8f)$$

$$i_{sc} = I_m \cos \left(w_t + \frac{2\pi}{3} \right) \quad (2.8g)$$

Eşitlik 2.8a ifadesine Eşitlik 2.8b,-,2.8g'de bulunan ifadeler yerine koyulup düzenlendiğinde,

$$i_{s,\alpha\beta 0} = \frac{3}{2}I_m \cos w_t + \frac{\sqrt{3}}{2} \left(I_m \cos \left(w_t - \frac{2\pi}{3} \right) - I_m \cos \left(w_t + \frac{2\pi}{3} \right) \right) \quad (2.9a)$$

$$i_{s,\alpha\beta 0} = \frac{3}{2}I_m \cos w_t + I_m \left(\cos w_t \cos \frac{2\pi}{3} + \sin w_t \sin \frac{2\pi}{3} - \cos w_t \cos \frac{2\pi}{3} + \sin w_t \sin \frac{2\pi}{3} \right) \quad (2.9b)$$

$$i_{s,\alpha\beta 0} = \frac{3}{2}I_m \cos w_t + I_m \left(2 \sin w_t \sin \frac{2\pi}{3} \right) \quad (2.9c)$$

$$i_{s,\alpha\beta 0} = \frac{3}{2}I_m (\cos w_t + j \sin w_t) \quad (2.9d)$$

İfadeleri elde edilir.

ASM 'nin abc fazlarının $\alpha\beta 0$ eksen takımına dönüşümü matris olarak göstermek gerekirse de akım denklemleri (Barut, 2005):

$$\begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{s0} \end{bmatrix} \quad (2.10a)$$

$$T_{\alpha\beta} \rightarrow abc = T_{abc}^{-1} \rightarrow \alpha\beta 0 \quad (2.10b)$$

$$\begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{s0} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad (2.10c)$$

$$i_{s\alpha} = \frac{2}{3} \left(i_{sa} - \frac{1}{2} i_{sb} - \frac{1}{2} i_{sc} \right) \quad (2.10d)$$

$$i_{s\beta} = \frac{2}{3} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} i_{sb} - \frac{\sqrt{3}}{2} i_{sc} \right) \quad (2.10e)$$

$$i_{s0} = \frac{2}{3} \frac{1}{2} (i_{sa} + i_{sb} + i_{sc}) \quad (2.10f)$$

İfadeleri elde edilir.

Gerilim denklemleri ise;

$$V_{sa} = V_m \cos w_t \quad (2.11a)$$

$$V_{sb} = V_m \left(w_t - \frac{2\pi}{3} \right) \quad (2.11b)$$

$$V_{sc} = V_m \left(w_t - \frac{2\pi}{3} \right) \quad (2.11c)$$

$$V_{s\alpha} = \frac{2}{3} \left(V_{sa} - \frac{1}{2} V_{sb} - \frac{1}{2} V_{sc} \right) \quad (2.11d)$$

$$V_{s\beta} = \frac{2}{3} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} V_{sb} - \frac{\sqrt{3}}{2} V_{sc} \right) \quad (2.11e)$$

$$V_{s0} = \frac{2}{3} \frac{1}{2} (V_{sa} + V_{sb} + V_{sc}) \quad (2.11f)$$

Eşitliklerindeki ilişkilerinden SKASM'nin durum uzay modeli Eşitlik 2.12'deki gibi ifade edilebilir (Barut, 2005).

$$\dot{x}(t) = f((x), u(t)) + w_L t_L = A(x)x + B(x)u + w_L t_L \quad (2.12)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{s\alpha} \\ \dot{i}_{s\beta} \\ \dot{\psi}_{r\alpha} \\ \dot{\psi}_{r\beta} \\ \dot{\omega}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{R_s}{L_\sigma} + \frac{L_m R_r'}{L_\sigma L_r'^2}\right) & 0 & \frac{L_m R_r'}{L_\sigma L_r'^2} & \frac{L_m}{L_\sigma L_r'} p_p \omega_m & 0 & 0 \\ 0 & -\left(\frac{R_s}{L_\sigma} + \frac{L_m R_r'}{L_\sigma L_r'^2}\right) & \frac{L_m}{L_\sigma L_r'} p_p \omega_m & \frac{L_m R_r'}{L_\sigma L_r'^2} & 0 & 0 \\ \frac{R_r'}{L_r'} L_m & 0 & -\frac{R_r'}{L_r'} & -p_p \omega_m & 0 & 0 \\ 0 & \frac{R_r'}{L_r'} L_m & p_p \omega_m & -\frac{R_r'}{L_r'} & 0 & 0 \\ -\frac{3}{2} \frac{p_p L_m}{J_L L_r'} \psi_{r\beta} & \frac{3}{2} \frac{p_p L_m}{J_L L_r'} \psi_{r\alpha} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{J_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ \psi_{r\alpha} \\ \psi_{r\beta} \\ \omega_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_\sigma} 0 \\ 0 \frac{1}{L_\sigma} \\ 0 0 \\ 0 0 \\ 0 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{J_r} \end{bmatrix} t_L \quad (2.13)$$

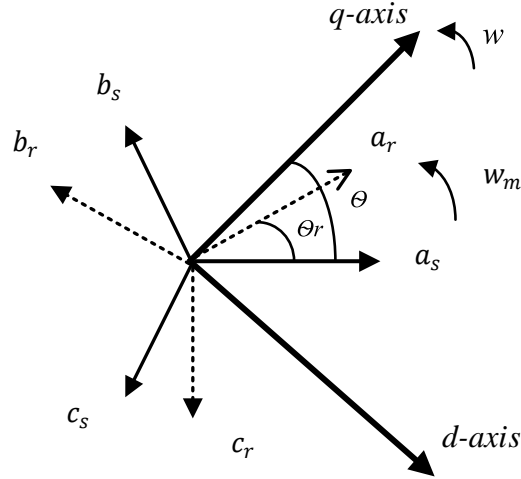
$L_s = L_m + L_{ls}$ ve $L_r = L_m + L_{lr}$ ifade etmektedir.

Burada, $L_\sigma = \sigma L_s = (L_s - \frac{L_m^2}{L_r'})$ stator geçici endüktansdır. σ kaçak faktörüdür.

Daha önce söz edildiği gibi bir ASM modeli 5 adet doğrusal olmayan denklemden oluşmaktadır. Bu özellikler göz önüne alınarak kontrol açısından bakıldığında oldukça karmaşık ve zor bir sistem ortaya çıkmaktadır. Bu sistemin kontrolünü sağlamak için doğrusal olmayan kontrol kurallarının geliştirilmesine gerek vardır.

2.2.2 ASM'nin dq eksen takımında dinamik modeli

Üç fazlı bir ASM senkron dönen eksenlerine dönüşüm Şekil 2.6'de görüldüğü gibi elde edilebilir.



Şekil 2.6. Üç fazlı motorun eşdeğer dönen eksen ($dq0$) iki faz vektörleri (Barut, 2005)

2.2.2.1 Stator eksen dönüşümleri

Statorun denklem dönüşüm bağıntıları aşağıdaki şekilde gerçekleşir (Barut, 2005).

$$[f_s^{dq0}] = [T_{dq0}(\theta)][f_s^{abc}] \quad (2.11a)$$

$$[f_s^{abc}] = [T_{dq0}(\theta)]^{-1}[f_s^{dq0}] \quad (2.11b)$$

$$[T_{dq0}(\theta)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin \theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.11c)$$

$$[T_{dq0}(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (2.11d)$$

Burada θ eksen dönüştürme açısıdır ve $\theta = \omega t + \theta_0$ dir.

ASM'nin statorunda üç faza ait büyüklükleri abc referans eksen sisteminden $qd0$ sistemine aşağıdaki gibi dönüştürülebilir. Eşitlik 2.1 yeniden yazılırsa,

$$[V_s^{abc}] = [R_s^{abc}][i_s^{abc}] + \frac{d}{dt}[\psi_s^{abc}]$$

$$[V_s^{abc}] = [T_{dq0}(\theta)]^{-1}[V_s^{dq0}] \quad (2.12)$$

$$[i_s^{abc}] = [T_{dq0}(\theta)]^{-1}[i_s^{dq0}] \quad (2.13)$$

$$[\psi_s^{abc}] = [T_{dq0}(\theta)]^{-1}[\psi_s^{dq0}] \quad (2.14)$$

Bu durumda Eşitlik 2.12,-,2.14 kullanılarak Eşitlik 2.1'de yerine yazılırsa;

$$[T_{dq0}(\theta)]^{-1}[V_s^{dq0}] = [R_s^{abc}][T_{dq0}(\theta)]^{-1}[i_s^{dq0}] + \frac{d}{dt}([T_{dq0}(\theta)]^{-1}[\psi_s^{dq0}]) \quad (2.15)$$

Olarak bulunur. Burada

$$[R_s^{abc}] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} = R_s[I] \text{ dir.}$$

Eşitlik 2.15'in her iki tarafı $[T_{dq0}(\theta)]$ ile çarpılırsa bu denklem aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir.

$$[V_s^{dq0}] = [R_s^{abc}][i_s^{dq0}] + \frac{d}{dt}[\psi_s^{dq0}] + [T_{dq0}(\theta)] \frac{d}{dt} [T_{dq0}(\theta)]^{-1} [\psi_s^{dq0}] \quad (2.16)$$

Burada

$$\frac{d}{dt} [T_{dq0}(\theta)]^{-1} = \frac{d}{dt} [T_{dq0}(\theta)]^{-1} \frac{d\theta}{dt} \quad (2.17a)$$

$$\frac{d}{dt} [T_{dq0}(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 0 \\ -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 0 \end{bmatrix} \quad (2.17b)$$

dır.

$$[T_{dq0}(\theta)] \frac{d}{dt} [T_{dq0}(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = w$$

Bu denklemler Eşitlik 2.16'de yerine yazılarak Eşitlik 2.19, aşağıdaki gibi yeniden düzenlenebilir.

$$[V_s^{dq0}] = [R_s^{abc}][i_s^{dq0}] + \frac{d}{dt}[\psi_s^{dq0}] + w \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [\psi_s^{dq0}] \quad (2.19)$$

2.2.2.2 Rotor eksen dönüşümleri

Rotorun denklem dönüşüm bağıntıları aşağıdaki şekilde olur.

$$[f_r^{dq0}] = [T_{dq0}(\theta - \theta_r)][f_r^{abc}] \quad (2.20a)$$

$$[f_r^{abc}] = [T_{dq0}(\theta - \theta_r)]^{-1} [f_r^{dq0}] \quad (2.20b)$$

$$[T_{dq0}(\theta - \theta_r)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \theta_r) & \cos(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta - \theta_r) & \sin(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.20c)$$

Dönüşümünde ASM'nin rotorunda üç faza ait büyüklükleri abc referans eksen sisteminden $qd0$ sistemine taşınır. Eşitlik 2.4,-,2.6 yeniden yazılırsa

$$[V_r^{abc}] = [R_r^{abc}][i_r^{abc}] + \frac{d}{dt}[\psi_r^{abc}] \quad (2.31)$$

Olarak elde edilir.

$$[V_r^{abc}] = [T_{dq0}(\theta - \theta_r)]^{-1}[V_r^{dq0}] \quad (2.32)$$

$$[i_r^{abc}] = [T_{dq0}(\theta - \theta_r)]^{-1}[i_r^{dq0}] \quad (2.33)$$

$$[\psi_r^{abc}] = [T_{dq0}(\theta - \theta_r)]^{-1}[\psi_r^{dq0}] \quad (2.34)$$

Bu durumda Eşitlik 2.32,-,2.34, Eşitlik 2.31'de yerine yazılırsa;

$$[T_{dq0}(\theta - \theta_r)]^{-1}[V_r^{dq0}] = [R_r^{abc}][T_{dq0}(\theta - \theta_r)]^{-1}[i_r^{dq0}] + \frac{d}{dt}([T_{dq0}(\theta - \theta_r)]^{-1}[\psi_r^{dq0}]) \quad (2.35)$$

Olarak bulunur.

Rotor denklemlerin de ise benzer şekilde dönüşümleri yapılırsa,

$$[V_r^{dq0}] = [R_r^{abc}][i_r^{dq0}] + \frac{d}{dt}[\psi_r^{dq0}] + (w - w_r) \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [\psi_r^{dq0}] \quad (2.36)$$

Elde edilir.

Yukarıda çıkarılan Eşitlikler 2.27 ve 2.36, düzenlenirse ASM'nin elektriksel devresinin modeli Eşitlik 2.37'deki gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} V_{sq} \\ V_{sd} \\ V_{s0} \\ V_{rq} \\ V_{rd} \\ V_{r0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sq} \\ i_{sd} \\ i_{s0} \\ i_{rq} \\ i_{rd} \\ i_{r0} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{sq} \\ \psi_{sd} \\ \psi_{s0} \\ \psi_{rq} \\ \psi_{rd} \\ \psi_{r0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & w & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -w & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (w - w_r) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -(w - w_r) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{qs} \\ \psi_{sd} \\ \psi_{s0} \\ \psi_{rq} \\ \psi_{rd} \\ \psi_{r0} \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

Stator ve rotor akı halkalanmaları akımlara bağlı olarak matris şeklinde aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{bmatrix} \psi_{sq} \\ \psi_{sd} \\ \psi_{s0} \\ \psi_{rq} \\ \psi_{rd} \\ \psi_{r0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss} & 0 & 0 & L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_{ss} & 0 & 0 & L_m & 0 \\ L_m & 0 & L_{ts} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_{rr} & 0 & 0 \\ 0 & L_m & 0 & 0 & L_{rr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{tr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sq} \\ i_{sd} \\ i_{s0} \\ i_{rq} \\ i_{rd} \\ i_{r0} \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

Burada L_{ss} L_{rr} , aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$L_{ss} = L_m + L_{ls} \quad (2.39)$$

$$L_{rr} = L_m + L_{lr} \quad (2.40)$$

Dengeli sistemlerde $V_{s0} = 0$ ve $V_{r0} = 0$ değerlerindedir. SKASM için $V_{rq} = 0$ ve $V_{rd} = 0$ 'dır. Eşitlik 2.37'den sıfır gerilim bileşenleri ihmal edilirse ASM'nin elektriksel devresinin modeli Eşitlik 2.41,-,2.44'deki gibi yazılabilir.

Stator dq gerilim denklemleri;

$$V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d}{dt} \psi_{sd} - w \psi_{sq} \quad (2.41)$$

$$V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d}{dt} \psi_{sq} + w \psi_{sd} \quad (2.42)$$

Rotor dq gerilim denklemleri;

$$0 = R_r i_{rd} + \frac{d}{dt} \psi_{rd} - (w - w_r) \psi_{rq} \quad (2.43)$$

$$0 = R_r i_{rq} + \frac{d}{dt} \psi_{rq} + (w - w_r) \psi_{rd} \quad (2.44)$$

2.3 Motorun Mekanik Denklemi

SKASM'nin mekanik denklemini elde etmek için, Newton'nun ikinci kanunu olan Eşitlik 2.49'dan yararlanılmaktadır.

$$t_e - t_L = J_L \frac{dw_m}{dt} + B_L w_m \quad (2.45)$$

t_e =Motorda endüklenen elektriksel (elektromagnetik) momentdir.

t_L =Yük (bozucu) momenti [N.m]

J_L = Motor + yük'ün eylemsizliği [kg.m²]

B_L =Motor + yük'ün sürtünme katsayısıdır [N.m/(rad/s)]

t_e ifadesini elde etmek için Eşitlik 2.50'de bulunan toplam ani giriş gücünden yararlanılabilir.

$$P_{in} = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{r1} \\ V_{r2} \\ \vdots \\ V_{rk} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} i_{r1} \\ i_{r2} \\ \vdots \\ i_{rk} \end{bmatrix} = V_{s,abc}^T i_{s,abc} + V_{r,12\dots k}^T i_{r,12\dots k} \quad (2.46a)$$

Eşitlik 2.46'deki ifade RSASM'de aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$P_{in} = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} = V_{s,abc}^T i_{s,abc} + V_{r,abc}^T i_{r,abc} \quad (2.47a)$$

Eşitlik 2.51'deki ifadeyi dq eksen dönüşümü ile yazılırsa,

$$\kappa(\theta) \equiv \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (2.47b)$$

$$\kappa^{-1}(\theta) \equiv \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 - \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (2.47c)$$

$$V_{s,abc} \equiv \kappa^{-1}(\theta_s) V_{s,dq0} \quad (2.47d)$$

$$i_{s,abc} \equiv \kappa^{-1}(\theta_s) i_{s,dq0} \quad (2.47e)$$

$$V_{r,abc} \equiv \kappa^{-1}(\theta_r) V_{r,dq0} \quad (2.47f)$$

$$i_{r,abc} \equiv \kappa^{-1}(\theta_r) i_{r,dq0} \quad (2.47g)$$

Eşitlik 2.52 elde edilir.

$$\begin{aligned} P_{in} &= \{\kappa^{-1}(\theta_s) V_{s,dq0}\}^T \kappa^{-1}(\theta_s) i_{s,dq0} + \{\kappa^{-1}(\theta_r) V_{r,dq0}\}^T \kappa^{-1}(\theta_r) i_{r,dq0} \\ &= (V_{sd} i_{sd} + V_{sq} i_{sq} + V_{rd} i_{rd} + V_{rq} i_{rq} + 2V_{r0} i_{r0}) \end{aligned} \quad (2.48)$$

Dengeli motora dengeli gerilimler uygulandığı zaman sıfırcı bileşenler oluşmayacağı için Eşitlik 2.52 düzenlenirse,

$$P_{in} = (V_{sd}i_{sd} + V_{sq}i_{sq} + V_{rd}i_{rd} + V_{rq}i_{rq}) \quad (2.49)$$

ifadesi elde edilir.

$$P_{in} = \frac{3}{2} \left\{ (i_{sd}^2 + i_{sq}^2)R_s + (i_{rd}^2 + i_{rq}^2)R_r' + i_{sd} \frac{d\psi_{sd}}{dt} + i_{sq} \frac{d\psi_{sq}}{dt} + i_{rd} \frac{d\psi_{rd}}{dt} + i_{rq} \frac{d\psi_{rq}}{dt} + w_s(\psi_{sd}i_{sq} - \psi_{sq}i_{sd}) + w_r(\psi_{rd}i_{rq} - \psi_{rq}i_{rd}) \right\} \quad (2.50)$$

Eşitlik 2.50 ifadesinde bulunan i^2R bakır kayıplarını, $i \frac{d\psi}{dt}$ hava-aralığında depolanan manyetik alan enerjisinin değişim oranını (hava-aralığı gücünü) ve $\omega\psi i$ ise mekanik işe dönüştürülen enerji oranını (mekanik çıkış gücünü) temsil etmektedir (Ong, 1998; Vas, 1990). Ayrıca t_e , mekanik çıkış gücünü temsil eden $\omega\psi i$ 'li terimler toplamının, mekanik hıza bölümüyle aşağıdaki gibi türetilebilir (Ong, 1998).

$$t_e = \frac{3}{2} \left\{ \frac{w_s(\psi_{sd}i_{sq} - \psi_{sq}i_{sd}) + w_r(\psi_{rd}i_{rq} - \psi_{rq}i_{rd})}{w_m} \right\} \quad (2.51)$$

2.45a, 2.45b ve 2.47a, 2.47b Eşitlikleri ile Eşitlik 2.55 ilişkilendirildiğinde,

$$\psi_{sd}i_{sq} - \psi_{sq}i_{sd} = -(\psi_{rd}i_{rq} - \psi_{rq}i_{rd}) = \frac{L_m}{L_r} (\psi_{rd}i_{sq} - \psi_{rq}i_{sd}) \quad (2.52)$$

t_e Eşitlik 2.57'deki gibi çok farklı biçimlerde elde edilmiş olur (Barut, 2005).

$$t_e = \frac{3}{2} P_p (\psi_{rd}i_{rq} - \psi_{rq}i_{rd}) \quad (2.53a)$$

$$t_e = \frac{3}{2} P_p (\psi_{sd}i_{sq} - \psi_{sq}i_{sd}) \quad (2.53b)$$

$$t_e = \frac{3}{2} P_p \frac{L_m}{L_r} (\psi_{rd}i_{sq} - \psi_{rq}i_{sd}) \quad (2.53c)$$

BÖLÜM III

GENETİK ALGORİTMA

GA yaklaşımının ortaya çıkışı 1970'lerin başında John Holland'ın makina öğrenmesi üzerine çalışmalar yapması ile başlamıştır. Bu çalışmalarda canlıların evrimden ve değişimden etkilendiği ve bu durumların sonucu olarak genetik evrim sürecinin meydana gelmesini, bilgisayar ortamına aktarmıştır. Yalnız bir mekanik yapının öğrenme yeteneğini geliştirmek yerine, çok sayıdaki “çiftleşme, çoğalma, değişim...” gibi genetik süreçler sonunda yeni bireylerin elde edileceğini gösteren bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada geliştirdiği yöntemin adını ise ‘Genetik Algoritma’ olarak tanımlamıştır.

GA'lar problemlere tek çözüm üretmek yerine, farklı birçok çözümler üretir. Bu sayede arama uzayında aynı anda birden fazla nokta değerlendirilmekte ve sonuçta bütünsel çözüme ulaşma olasılığı yükselmektedir. İşlem sonunda elde edilen çözümler birbirinden tamamen bağımsızdır. Her biri çok boyutlu uzay üzerinde bir vektördür.

Problemin bireyler içindeki gösterimi problemden probleme değişiklik gösterir. GA'ların problemin çözümündeki başarısı hakkında karar vermede en öncelikli faktör, çözümü temsil eden bireylerin gösterimidir. İşlem sonunda elde edilen nüfusun içindeki, her bireyin problem çözümüne en uygun çözüm olduğunu belirleyen bir maliyet fonksiyonu vardır. Maliyet fonksiyonundan dönen değere göre yüksek değere sahip olan bireylere, nüfustaki diğer bireyler ile çoğalmaları için fırsat verilir. Bu bireylerde çaprazlama işlemi sonucunda çocuk adı verilen yeni bireyler meydana getirirler. Yeni birey kendisini meydana getiren ebeveynlerin (anne, baba) özelliklerini taşır. Düşük maliyet değerine sahip bireyler ise daha az seçileceğinden bir süre sonra nüfus dışında bırakılırlar. Yeni oluşan nüfus, bir önceki nüfusta yer alan maliyet değeri yüksek olan bireylerin bir araya gelmesi ile oluşur ve yeni nüfus bir önceki nüfus da seçilen ebeveynlerin (anne, baba) özelliklerini büyük bir kısmını taşır. Böylelikle oluşan her yeni nesilde iyi özellikler nüfus içerisinde yayılırlar ve her nüfusta gerçekleşen çaprazlama ile diğer iyi özelliklerle birleşirler. Yeni bireyler meydana gelirken, maliyet değeri yüksek olan ne kadar çok birey bir araya gelirse o kadar iyi bir çalışma meydana gelir.

Probleme ait en iyi çözümün bulunabilmesi için;

- Bireylerin doğru bir şekilde gösterimi,
- Maliyet fonksiyonu etkin bir şekilde oluşturulması,
- En uygun genetik operatörler seçilmeli.

Bu durumlar gözetildiğinde çözüm kümesi problem için bir noktada birleşecektir.

GA'lar problemlerin çözümünü gerçekleştirmek için evrimsel süreci bilgisayar ortamında taklit ederler. Bu işlemi gerçekleştirirken diğer eniyileme yöntemlerinde de olduğu gibi, tek bir yapının geliştirilmesi yerine, böyle yapılardan meydana gelen bir küme oluştururlar. Oluşan bu olası çözüm kümesine, GA terminolojisinde nüfus adı verilir. Nüfuslar vektör, kromozom veya birey adı verilen sayı dizilerinden oluşur. Evrimsel süreç içinde nüfus bireyleri GA operatörleri tarafından belirlenirler (Karasoy ve Ballı, 2016).

3.1 Genetik Algoritma Temel Kavramları

GA ile ilgili temel kavramlar aşağıda sırası ile açıklanmaktadır:

3.1.1 Gen:

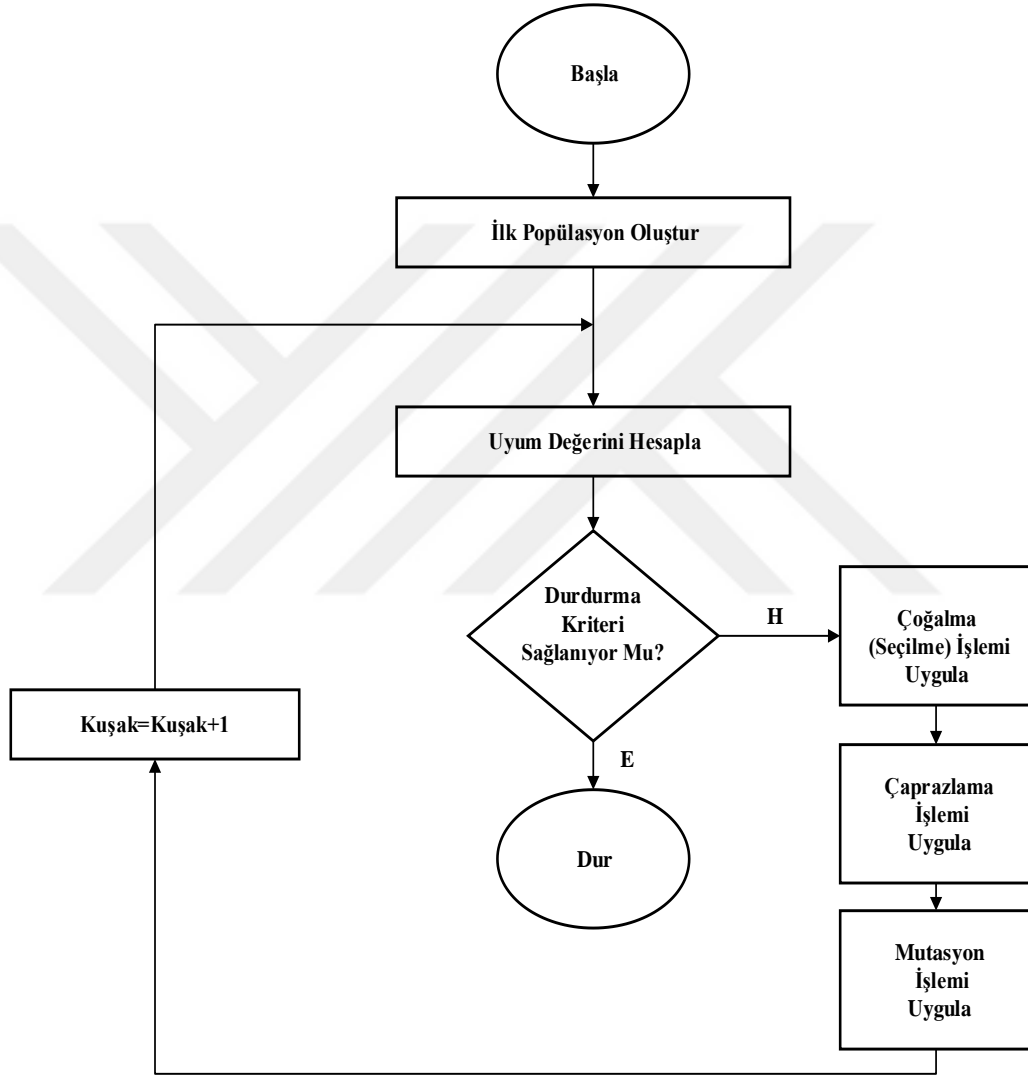
En küçük genetik birim olan gen, kendi başına anlamlı ve genetik bilgi taşıyan yapıdır. Bir gen bir bit veya bit dizisi olabileceği gibi, A,B gibi bir karakter olarak da ifade edilebilirler. Örneğin bir cismin yükseklik bilgisini gösteren bir gen ikilik düzende 101 şeklinde ifade edilebilir.

3.1.2 Kromozom:

Kısmi bilgi taşıyan genleri araya gelerek tüm bilgileri içeren kromozomları meydana getirirler. Kromozomlar probleme ait tüm bilgileri içerirler. Kromozomlar toplumdaki bireyler ya da üyelere karşılık gelirler. Problemlerde alternatif bir çözüm olasılığına karşılık gelir.

3.1.3 Popülasyon (Topluluk):

Popülasyon üzerinde durulan problem için olası çözümler kümesidir. Kromozomlar veya bireyler meydana gelirler. Popülasyonlarda birey sayısı sabit ve probleme göre kullanıcı tarafından belirlenir. Popülasyon içerisinde meydana gelen genetik yenilemeler sayesinde probleme daha uygun bireyler bulunabilmektedir.



Şekil 3.1. Genetik seçilim algoritması

Popülasyonlarda yeni topluluk oluşturulurken mevcut topluluktan çaprazlama ve mutasyon işlemine tabi tutulacak bireylerin seçilmesi gerekir. Teorinin işleyişine göre, iyi olan bireyler yaşamını devam ettirmeli ve bu bireylerden yeni bireyler oluşturulmalıdır.

Tüm seçim yöntemlerinde maliyet değeri fazla olan bireylerin seçilme olasılığı daha yüksektir. En bilinen seçim yöntemleri aşağıda açıklandığı gibi Rulet Seçilimi (Roulette), Turnuva Seçilimi (Tournament) ve Sıralı Seçilimdir (Uniform).

Rulet Seçilimi: Topluluktaki tüm bireylerin uygunluk değerleri toplanır ve her bireyin seçilme olasılığı, uygunluk değerinin bu toplam değere oranı kadardır.

Turnuva Seçilimi: Topluluk içerisinde rastgele k adet (3,5,7..) birey alınır. Bu bireylerin içerisinde uygunluk değeri en iyi olan birey seçilir.

Sıralı Seçilim: En kötü uygunlukta olan kromozoma 1 değeri verilir, ondan daha iyi olana 2, daha iyisine 3 değeri verilerek devam edilir.

3.1.4 Çaprazlama

GA'da çaprazlama ebeveyn kromozomlarının yerlerini değiştirerek çocuk kromozomlar üretmek ve böylelikle uygunluk değeri daha yüksek olan çocuk kromozomlar üretmektir.

Tek noktalı çaprazlama :

Çizelge 3.1'de ifade edildiği gibi tek noktada çaprazlama ile ebeveyn kromozomların belirli bir noktadan genlerin değişimi gerçekleşerek yeni nesiller meydana gelmektedir.

Çizelge 3.1'de ebeveyn kromozomları olan kromozom 1 ve kromozom 2 belirli tek noktadan çaprazlama gerçekleştirilerek iki yeni birey meydana getirmiştir.

Çizelge 3.1. İki bitlik tek noktada çaprazlama örneği

Kromozom-1	100110 0010
Kromozom-2	110111 0111
Çocuk-1	100110 0111
Çocuk-2	110111 0010

Çift noktalı Çaprazlama:

Çizelge 3.2’de ifade edildiği gibi ebeveyn kromozomların belirli iki farklı noktasından gen değişimleri gerçekleşerek yeni nesiller meydana gelmektedir.

Çizelge 3.2. Çift noktada çaprazlama

Kromozom-1	11000 00100 110110
Kromozom-2	11011 11000 011110
Çocuk-1	11000 11000 110110
Çocuk-2	11011 00100 011110

Sıralı Çaprazlama:

Çizelge 3.3’de sıralı çaprazlama örneği verilmektedir. Bu çaprazlama tekniğinde ise ebeveyn kromozomları belirli noktalardan sıralı birden fazla gen değişimi meydana gelerek yeni nesiller meydana gelmektedir.

Çizelge 3.3. Sıralı çaprazlama örneği

A	9 8 4 5 6 7 1 3 2 10
B	8 7 1 2 3 10 9 5 4 6
A	9 8 4 2 3 10 1 H H H
B	8 H 1 5 6 7 9 H 4 H
AI	9 8 4 2 3 10 1 5 6 7
BI	8 2 1 5 6 7 9 3 4 10

3.1.5 Mutasyon

Mutasyon, kromozomların genlerinin veya genleri oluşturan küçük birimlerde değişiklik yapılmasını sağlayan işlemdir. Mutasyon ile sağlatılan katkı, problemin çözüm alanını araştırmada yön değişikliklerini yaparak araştırmanın kısır döngüye girmesini önlemektir.

Pozisyona göre değişim: Rasgele seçilen genlerin yerleri değiştirilerek.

Sıraya göre değişim: Kromozomun rasgele seçilen iki karakterinden ikincisinin, birincinin önüne getirilmesiyle olur.

Çizelge 3.4’de farklı mutasyon değişim örnekleri verilmektedir.

Çizelge 3.4. Mutasyon değişim örneği

	Önce	Sonra
Pozisyona göre değişim	A B C D E F	E B C D A F
Sıraya göre değişim	A B C D E F	F A B C D E
Kromozom (Rast)	1 1 0 1 0 1 1 0	1 1 0 1 0 1 0 0

GA’lar büyük arama uzayına sahip olduğu için diğer eniyileme yöntemleri kullanılırken büyük zorluklarla karşılaşılan problemlerin çözümünde başarı göstermektedir. Bir problemin bütünsel en iyi çözümüne ulaşmasa da, problemlere makul bir süre içinde, kabul edilebilir, iyi çözümler bulabilmektedirler. GA’ların asıl amacı, hiçbir çözüm tekniği bulunmayan problemlere çözüm aramaktır. Kendilerine has çözüm teknikleri olan özel problemlerin çözümü için mutlak sonucun hızı ve kesinliği açısından GA’lar kullanılmazlar. GA’lar ancak;

- Arama uzayının büyük ve karmaşık olduğu,
- Mevcut bilgiyle sınırlı arama uzayında çözümün zor olduğu,
- Problemin belirli bir matematiksel modelle ifade edilemediği,
- Geleneksel eniyileme yöntemlerinden istenen sonucun alınmadığı alanlarda

etkili ve kullanışlıdır.

GA’lar parametre ve sistem tanımlama, mühendislik tasarımları, robot uygulamaları, görüntü ve ses tanıma, planlama, kontrol sistemleri, yapay zeka uygulamaları, yol bulma problemleri, uzman sistemler, fonksiyon ve kombinasyonel eniyileme problemleri aę tasarım problemleri, sosyal ve ekonomik planlama problemleri için diğer eniyileme yöntemlerine göre daha başarılı sonuçlar verebilmektedir. Diğer yöntemlerden farkı,

- GA'lar problemlerin çözümünü gerçekleştirirken parametrelerin değerini değil, bu parametreleri belirlemek için kodlarıyla arama yaparlar. Parametreler kodlanabildiği sürece çözüm üretilebilir. Bu nedenle GA'lar problem çözümü için ne yaptığı konusunda bilgi içermeden, nasıl yaptığını bilir.
- GA'lar çözüm sürecinde tek bir noktadan değil, noktalar kümesinden aramaya başlar. Bu sebeple yerel en iyi çözümde sıkışıp kalmazlar.
- GA'lar türev yerine maliyet fonksiyonunun değerini kullanır. Bu değer kullanılması ile yardımcı bir bilginin kullanılmasını gerektirmez.
- GA'lar gerekirci kurallar ile değil olasılıksal kurallar ile çalışırlar (Karasoy ve Ballı, 2016).

3.2 GA Başarımını Etkileyen Etkenler

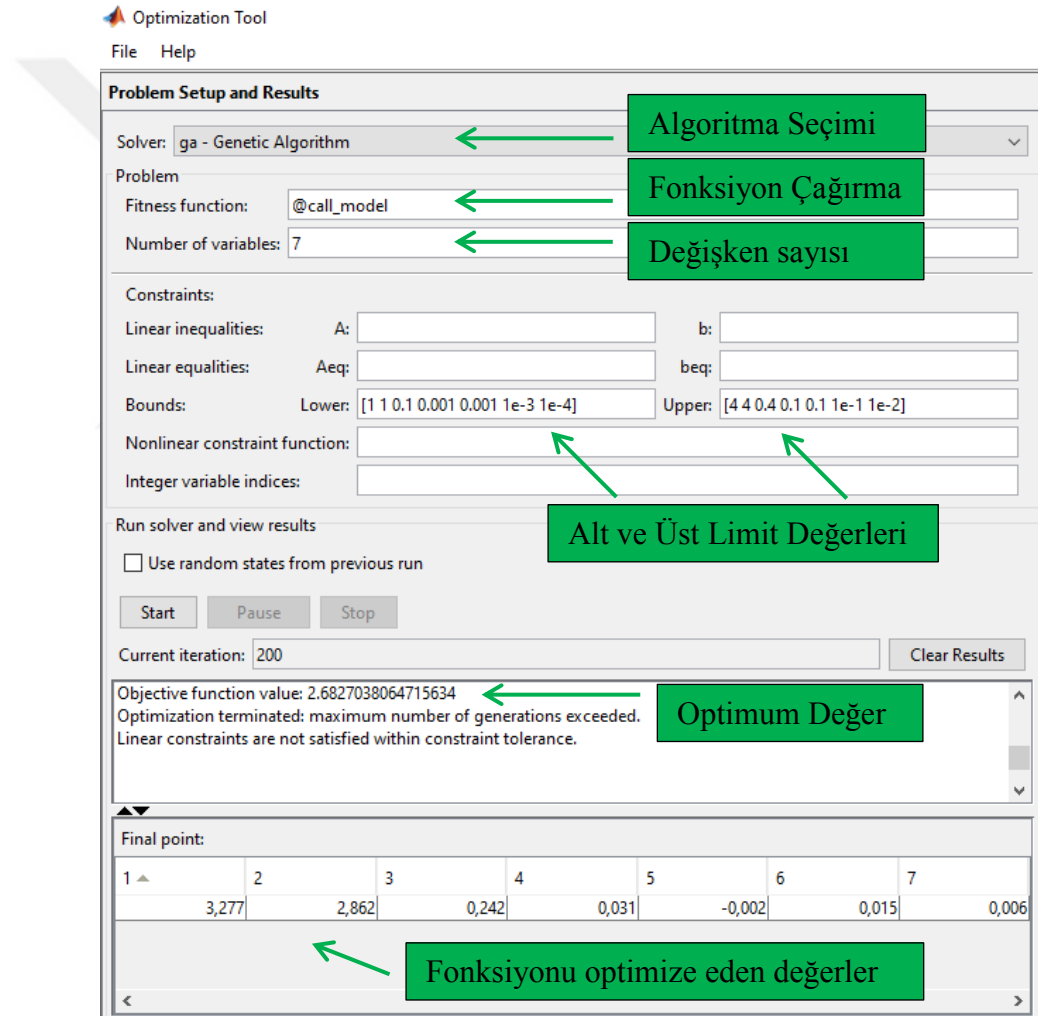
GA başarımını etkileyen faktörler aşağıda listelenmiştir.

- Popülasyon büyüklüğü / Kromozom sayısı: Kromozom sayısını arttırmak çalışma zamanını artırır fakat kromozom sayısını azaltmak da kromozom çeşitliliğini yok eder.
- Mutasyon oranı: Eniyileme işlemi sırasında kromozomlar birbirine benzemeye başladığında, elde edilen sonuçlar çözüm noktalarının uzağında bulunuyorsa mutasyon işlemi GA'nın sıkıştığı yerden çıkarıp yeni sonuçlar üretebilmesinin tek yoludur. Ancak mutasyon oranını yüksek bir değerde tutmak GA'nın kararlı bir noktaya ulaşmasını engelleyecektir.
- Kaç noktalı çaprazlama yapılacağı: GA'da çaprazlama genellikle tek noktada gerçekleştirilmekle birlikte, çok noktalı çaprazlamanın yapılan araştırmalar bazı problemlerde çok yararlı olduğunu göstermiştir.
- Çaprazlamanın sonucu elde edilen bireylerin nasıl değerlendirileceği: Elde edilen iki bireyin birden kullanılıp kullanılmayacağı bazen önemli olmaktadır.

- Başarı değerlendirmesinin nasıl yapıldığı: Doğru şekilde yazılmamış bir değerlendirme işlevi, çalışma zamanını uzatıp, çözüme hiçbir zaman ulaşılmasına da neden olabilir (Karasoy ve Ballı, 2016).

3.3 Matlab Toolbox Kullanarak Eniyileme

Bu bölümde Matlab Eniyileme Toolbox uygulaması tanıtılarak bu tez çalışmasında çalışmamızda gerçekleştirilen durdurma ölçütleri ve çıktı seçenekleri gibi birçok alternatif tercihin bulunduğu önemli parametreler tanıtılacaktır.



Şekil 3.2. Eniyileme Toolbox arayüzü 1

Şekil 3.2'de Toolbox uygulaması menülerinde bulunan;

“**Solver**” seçeneği ile, fonksiyonu eniyilemek için kullanılacak optimizasyon yöntemi seçilmektedir. Bu tezde GA ve ÇA-GA testleri gerçekleştirmek için öncelikle Solver seçeneği GA daha sonra ÇA-GA seçilmiştir.

“**Fitness function**” bölümünde daha önce oluşturulan maliyet fonksiyonu çağrılmaktadır. Tez kapsamında kullanılan Fitness function m.file dosyası Ek-A’da verilmiştir.

“**Number of variable**” bölümüne maliyet fonksiyonu için sabit parametre dâhil olmak üzere modelde tahmin edilecek parametre sayısı girilmelidir. Bu tezde belirlemek istenilen değişken sayısı yedi olduğu için Number of variable seçeneği yedi olarak seçilmiştir.

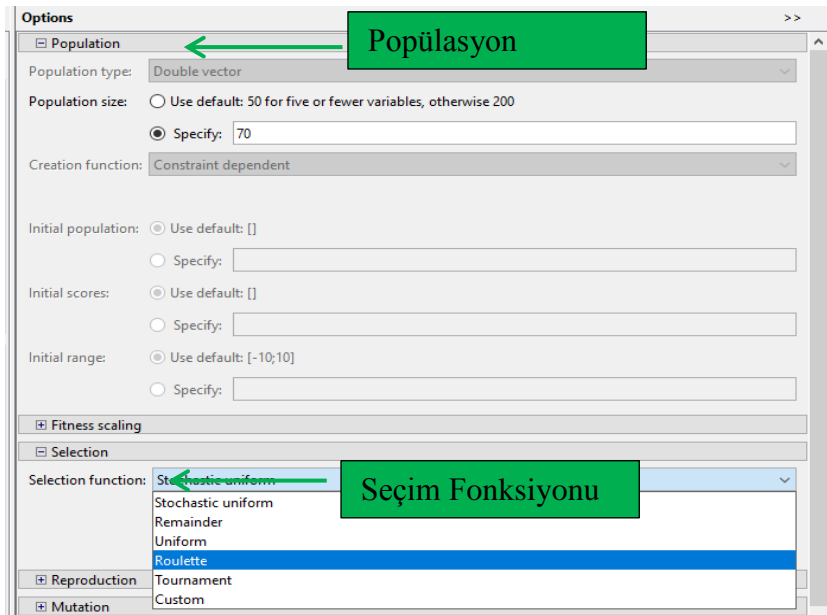
“**Constraints**” bölümü kısıtlı eniyileme problemleri için kullanılmaktadır.

“**Bound**” bölümü modelde tahmin edilecek parametrelerin üst ve alt sınırlarının belirlendiği bölümdür

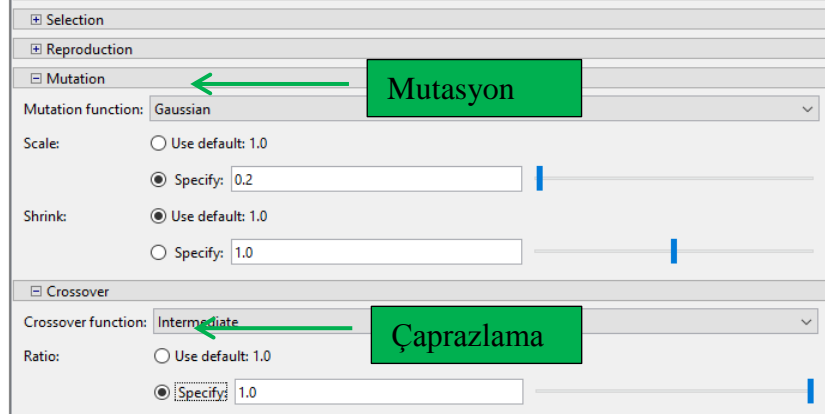
“**Start**” seçeneği seçildiğinde sağ tarafta “options” bölümünde seçilen tercihlere göre fonksiyon optimize edilmekte ve “Final point” kısmında parametre tahmin sonuçları bulunmaktadır.

“**Objective function value**” ile maliyet fonksiyonunun en uygun değeri sonucu verilmektedir.

“**Final Point**” bölümünde iterasyonlar sonucunda eniyileme yapılmış olan değişkenlerin son değerleri verilmektedir.



a



b

Şekil 3.3. Eniyileme Toolbox arayüzü 2
Popülasyon/Seçim Fonk.(a) ve Mutasyon, Çaprazlama(b)

Şekil 3.3.'de de gösterildiği gibi Optimizasyon Toolbox uygulamasının sağ bölümünde GA operatörleri, durdurma kriterleri ve çıktı seçenekleri gibi birçok alternatif tercihin bulunduğu “Options” bölümünün önemli operatörleri aşağıda tanıtılmıştır.

“**Population**” bölümünde algorithma kullanılacak nüfus sayısı belirlenmektedir. Bu tezde belirlenmek istenilen değişken katsayısının on katı yetmiş olarak belirlenerek testlere başlanmıştır.

“**Selection**”, yani Seçim fonksiyonu için altı farklı seçenek bulunmaktadır. Bu tezde literatürde yaygın olarak kullanılan Roulette fonksiyonu seçilmiştir.

Şekil 3.3.b'de ise mutasyon ve çaprazlama fonksiyonları gösterilmiştir. Mutasyon fonksiyonu için bu bölümde beş, çaprazlama fonksiyonu için yedi farklı seçenek bulunmaktadır. Şekilde de görüldüğü üzere literatürde de yaygın olarak kullanılan en uygun GA parametreleri olarak mutasyon oranı 0.2, mutasyon küçültme oranı 1.0 ve çaprazlama oranı 1.0 olarak belirlenmiştir. Daha hassas değerler için mutasyon oranı (scale) ve çaprazlama oranı (ratio) değerleri değiştirilebilmektedir.

Şekil 3.4'ün sol tarafındaki menüde optimizasyon için durdurma kriterleri gösterilmiştir. Bu menüde yedi farklı seçenek bulunmaktadır. Ayrıca daha hassas değerler için bu menüde fonksiyon ve doğrusal olmayan kısıt toleransı için $1e-7$, $1e8$ veya daha fazla değerler tercihe bağlı olarak seçilebilir.

Stopping criteria ← Durdurma Kriterleri

Generations: Use default: 100*numberOfVariables
 Specify: 200

Time limit: Use default: Inf
 Specify:

Fitness limit: Use default: -Inf
 Specify:

Stall generations: Use default: 50
 Specify:

Stall time limit: Use default: Inf
 Specify:

Stall test: average change

Function tolerance: Use default: 1e-6
 Specify:

Constraint tolerance: Use default: 1e-3
 Specify:

a

Plot functions ← Grafik Seçenekleri

Plot interval: 1

Best fitness Best individual Distance
 Expectation Genealogy Range
 Score diversity Scores Selection
 Stopping Max constraint
 Custom function:

Output function

Display to command window

User function evaluation

b

Şekil 3.4. Eniyileme Toolbox arayüzü 3
Durdurma Kriterleri (a), Grafik Seçenekleri (b)

Grafik seçenekleri bölümünde “Best fitness” seçeneği ile optimum sonuca ulaşırken oluşturulan nesiller ve fonksiyon değerlerinin gösterildiği grafik çizdirilebilmektedir.

BÖLÜM IV

BENZETİM SONUÇLARI

Bu bölümde amaç ASM'nin $\alpha\beta$ modeline göre simulink modelini oluşturmak, daha sonra bu model kullanılarak ASM'nin vektör kontrolünün benzetimini gerçekleştirmek ve son olarak benzetimde ASM parametrelerini eniyileme algoritmaları kullanarak elde etmektir.

4.1 ASM'nin Simulink Modeli

ASM'nin $\alpha\beta$ referans sistemine göre durum uzay modeli ikinci bölümde Eşitlik 2.67'de elde edilmişti. Bu Eşitlikler aşağıdaki gibi düzenlenirse;

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{s\alpha} \\ \dot{i}_{s\beta} \\ \dot{\psi}_{r\alpha} \\ \dot{\psi}_{r\beta} \\ \dot{\omega}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{R_s}{L_\sigma} + \frac{L_m^2 R_r'}{L_\sigma L_r'^2}\right) & 0 & \frac{L_m R_r'}{L_\sigma L_r'^2} & \frac{L_m}{L_\sigma L_r'} p_p \omega_m & 0 & 0 \\ 0 & -\left(\frac{R_s}{L_\sigma} + \frac{L_m^2 R_r'}{L_\sigma L_r'^2}\right) & \frac{L_m R_r'}{L_\sigma L_r'^2} & \frac{L_m}{L_\sigma L_r'} p_p \omega_m & 0 & 0 \\ \frac{R_r'}{L_r'} L_m & 0 & -\frac{R_r'}{L_r'} & -p_p \omega_m & 0 & 0 \\ 0 & \frac{R_r'}{L_r'} L_m & p_p \omega_m & -\frac{R_r'}{L_r'} & 0 & 0 \\ -\frac{3}{2} \frac{p_p L_m}{J_L L_r'} \psi_{r\beta} & \frac{3}{2} \frac{p_p L_m}{J_L L_r'} \psi_{r\alpha} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{J_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ \psi_{r\alpha} \\ \psi_{r\beta} \\ \omega_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_\sigma} 0 \\ 0 \frac{1}{L_\sigma} \\ 0 0 \\ 0 0 \\ 0 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{J_r} \end{bmatrix} t_L$$

$\frac{di_{s\alpha}(t)}{dt}$ ifadesi ;

$$\frac{i_{s\alpha}(k+1) - i_{s\alpha}(k)}{T[0]} = -\left(\frac{R_s}{L_\sigma} + \frac{L_m^2 R_r'}{L_\sigma L_r'^2}\right) \cdot i_{s\alpha} + \left(\frac{L_m R_r'}{L_\sigma L_r'^2}\right) \cdot \psi_{r\alpha} + \left(\frac{L_m}{L_\sigma L_r'} p_p \omega_m\right) \cdot \psi_{r\beta} + \frac{1}{L_\sigma} \cdot v_{s\alpha} \quad (4.1)$$

$$F1 = i_{s\alpha}(k+1) = \left(1 - \left(\frac{R_s}{L_\sigma} + \frac{L_m^2 R_r'}{L_\sigma L_r'^2}\right) \cdot T[0]\right) \cdot i_{s\alpha} + \left(\frac{L_m R_r'}{L_\sigma L_r'^2}\right) \cdot T[0] \cdot \psi_{r\alpha} + \left(\frac{L_m}{L_\sigma L_r'} p_p \omega_m\right) \cdot T[0] \cdot \psi_{r\beta} + \left(\frac{1}{L_\sigma} \cdot T[0]\right) \cdot v_{s\alpha} \quad (4.2)$$

$\frac{di_{s\beta}(t)}{dt}$ ifadesi;

$$\frac{i_{s\beta}(k+1) - i_{s\beta}(k)}{T[0]} = -\left(\frac{R_s}{L_\sigma} + \frac{L_m^2 R_r'}{L_\sigma L_r'^2}\right) i_{s\beta} + \left(\frac{L_m R_r'}{L_\sigma L_r'^2}\right) \psi_{r\beta} + \left(\frac{L_m}{L_\sigma L_r'} p_p \omega_m\right) \psi_{r\alpha} + \frac{1}{L_\sigma} v_{s\beta} \quad (4.3)$$

$$F2 = i_{s\beta}(k+1) = \left(1 - \left(\frac{R_s}{L_\sigma} + \frac{L_m^2 R_r'}{L_\sigma L_r'^2}\right) \cdot T[0]\right) \cdot i_{s\beta} + \left(\frac{L_m R_r'}{L_\sigma L_r'^2}\right) \cdot T[0] \cdot \psi_{r\beta} + \left(\frac{L_m}{L_\sigma L_r'} p_p \omega_m\right) \cdot T[0] \cdot \psi_{r\alpha} + \left(\frac{1}{L_\sigma} \cdot T[0]\right) \cdot v_{s\beta} \quad (4.4)$$

$\frac{d\psi_{r\alpha}(t)}{dt}$ ifadesi;

$$\frac{\psi_{r\alpha}(k+1)-\psi_{r\alpha}(k)}{T[0]} = \left(\frac{R_r'}{L_r'} L_m\right) \cdot i_{s\alpha} + \left(-\frac{R_r'}{L_r'}\right) \cdot \psi_{r\alpha} + p_p \omega_m \psi_{r\beta} \quad (4.5)$$

$$F3=\psi_{r\alpha}(k+1)=\left(\frac{R_r'}{L_r'} L_m\right) \cdot T[0] \cdot i_{s\alpha} + \left(1 - \frac{R_r'}{L_r'}\right) \cdot T[0] \cdot \psi_{r\alpha} - \left(p_p \omega_m\right) \cdot T[0] \cdot \psi_{r\beta} \quad (4.6)$$

$\frac{d\psi_{r\beta}(t)}{dt}$ ifadesi;

$$\frac{\psi_{r\beta}(k+1)-\psi_{r\beta}(k)}{T[0]} = \left(\frac{R_r'}{L_r'} L_m\right) \cdot i_{s\beta} + \left(-\frac{R_r'}{L_r'}\right) \cdot \psi_{r\beta} + p_p \omega_m \psi_{r\alpha} \quad (4.7)$$

$$F4=\psi_{r\beta}(k+1)=\left(\frac{R_r'}{L_r'} L_m\right) \cdot T[0] \cdot i_{s\beta} + \left(1 - \frac{R_r'}{L_r'}\right) \cdot T[0] \cdot \psi_{r\beta} - \left(p_p \omega_m\right) \cdot T[0] \cdot \psi_{r\alpha} \quad (4.8)$$

$\frac{d\omega_m(t)}{dt}$ ifadesi;

$$\frac{\omega_m(k+1)-\omega_m(k)}{T[0]} = \left(-\frac{3 p_p L_m}{2 J_L L_r'} \psi_{r\beta}\right) \cdot i_{s\alpha} + \left(\frac{3 p_p L_m}{2 J_L L_r'} \psi_{r\alpha}\right) \cdot i_{s\beta} + \left(-\frac{B}{J_r}\right) \cdot \omega_m + \frac{1}{J_r} T_L \quad (4.9)$$

$$F5=\omega_m(k+1)=\left(-\frac{3 p_p L_m}{2 J_L L_r'} \psi_{r\beta}\right) \cdot T[0] \cdot i_{s\alpha} + \left(\frac{3 p_p L_m}{2 J_L L_r'} \psi_{r\alpha}\right) \cdot T[0] \cdot i_{s\beta} + \left(1 - \frac{B}{J_r}\right) \cdot T[0] \cdot \omega_m - \frac{T[0]}{J_r} \cdot T_L \quad (4.10)$$

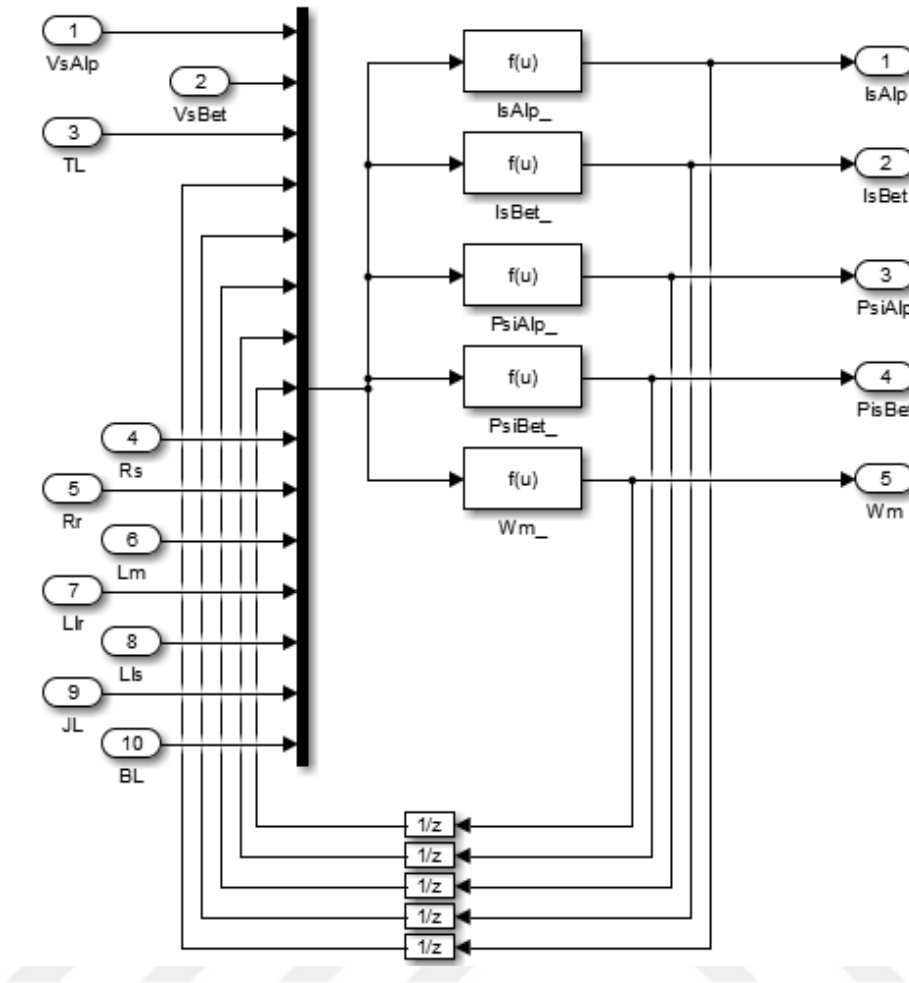
Şeklinde elde edilmektedir.

Bu eşitlikler yardımı ile ASM'nin Matlab Simulink modeli oluşturulmuştur. Bu modelde Matlab Simulink'in fonksiyon blokları kullanılarak ASM modeli test edilmiştir.

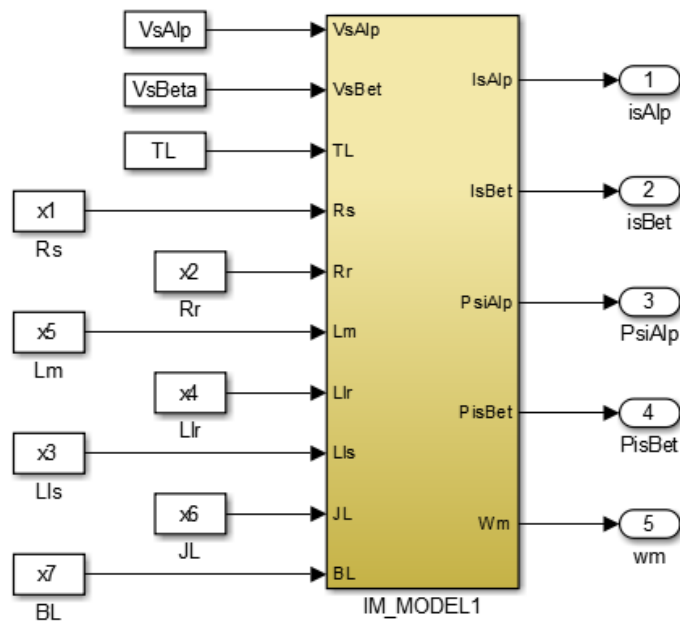
4.1.1 ASM'nin Simulink modeli

ASM modeli Eşitlik 4.2, 4.4, 4.6, 4.8, 4.10 kullanılarak Şekil 4.1'deki alt blok oluşturulup, Şekil 4.2'deki gibi tek blokta olacak şekilde düzenlenebilir.

ASM modeline elde etmek için Şekil 4.1'de görüldüğü gibi; yük momenti, rotor direnci, rotor kaçak endüktansı, stator direnci, stator kaçak endüktansı, mıknatıslanma endüktansı, eylemsizlik ve viskoz sürtünme katsayısı ($T_L, R_r, L_{lr}, R_s, L_{ls}, L_m, J_L, B_L$) dışarıdan giriş olarak uygulanmıştır.



Şekil 4.1. ASM'nin Simulink modeli-1



Şekil 4.2. ASM'nin Simulink modeli-2

Matlab Simulink ile ASM dinamik modelinin $T_L, R_r, L_{lr}, R_s, L_{ls}, L_m, J_L, B_L$ değerlerini Eşitlik 4.2, 4.4, 4.6, 4.8 ve 4.10'da yerine koyarak $\dot{i}_{s\alpha}, \dot{i}_{s\beta}, \psi_{r\alpha}, \psi_{r\beta}, \dot{\omega}_m$ ifadeleri elde edilmiştir. Test işlemlerinin gerçekleştirmek için Çizelge 4.1'de verilen anma değerlerine sahip SKASM'den yararlanılmıştır.

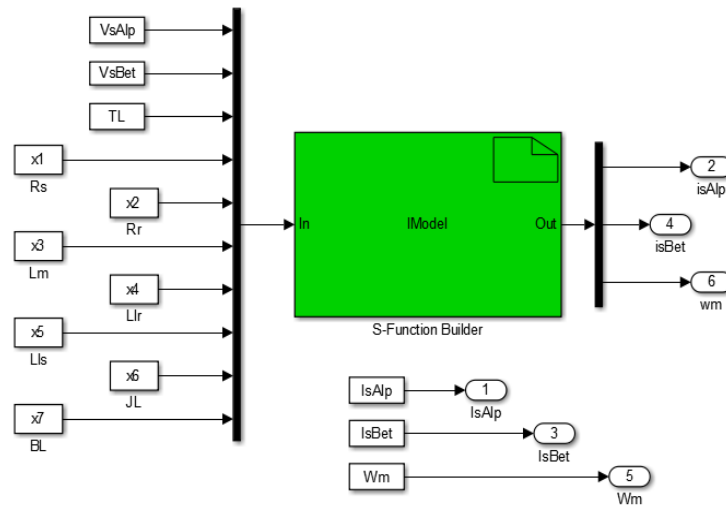
Çizelge 4.1. Benzetim testlerinde kullanılan SKASM'nin anma değerleri (Barut, 2005)

P [kW]	f [Hz]	J_L [kg.m ²]	B_L [Nm/(rad/s)]	P_p	V [V]	I [A]
3	50	0.005	0.001	2	380	6.9
R_s [Ω]	R_r [Ω]	L_s [H]	L_r [H]	L_m [H]	N_m [rpm]	t_L [N m]
2.283	2.133	0.231	0.231	0.22	1430	20

Çizelge 4.1 verilen parametre değerleri ile motor modeli benzetim çalışmaları yapılmıştır. Daha sonra bu benzetim sonuçları, parametre eniyileme sırasında maliyet fonksiyonunda hata değerleri hesaplanırken kullanılmak üzere mat dosyası olarak kaydedilmiştir.

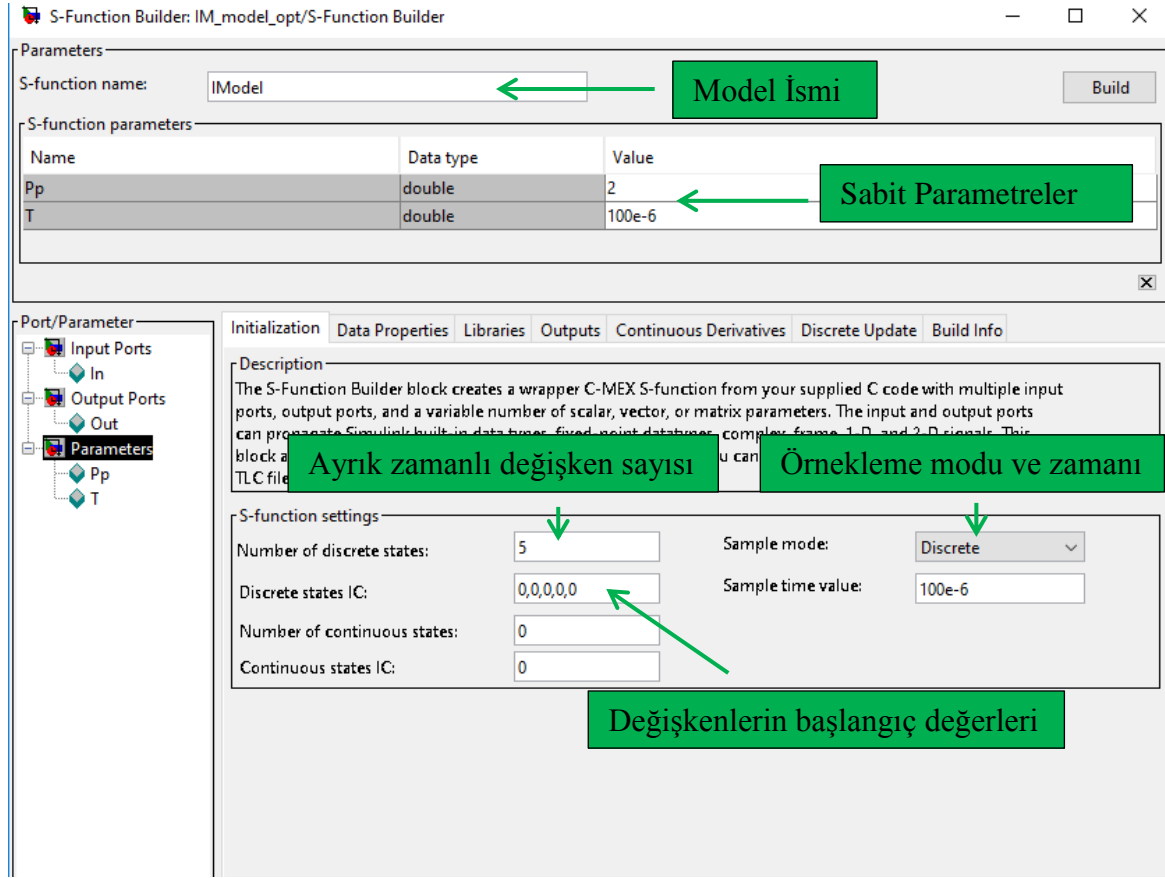
4.1.2 ASM'nin S-Function Builder ile Simulink modeli

ASM modelini S-Function builder ile oluşturulurken bir giriş (input) ve bir çıkış (output) olarak tasarlayıp giriş ve çıkış parametrelerini aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.



Şekil 4.3. ASM'nin S-Function Builder ile modeli

Şekil 4.3’de bulunan, S-Function builder ile ASM modeli elde etmek için Şekil 4.4’de gösterildiği gibi bazı yapılandırma ayarları yapılmıştır.



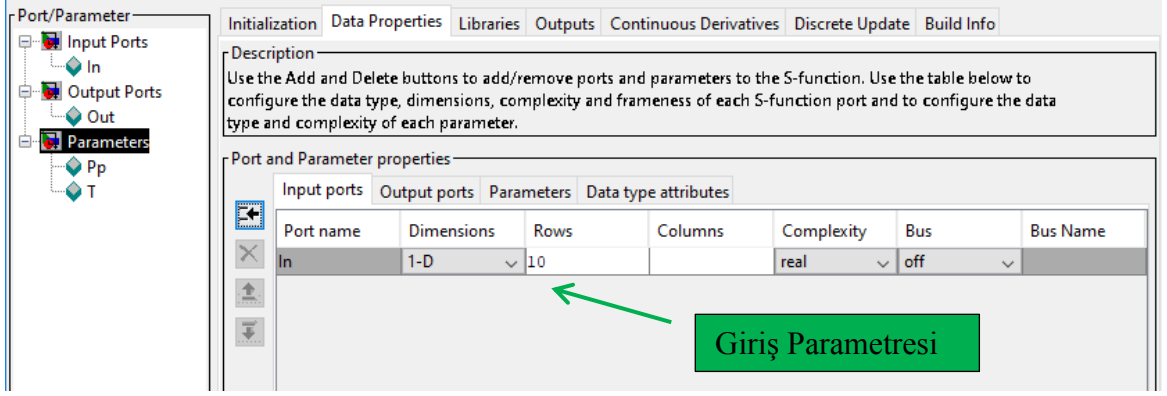
Şekil 4.4. S-Function Builder ile ASM modeli yapılandırmaları-1

‘**Initialization**’ bölümünde modelin başlatma koşulları ile ilgili bazı ayarlamalar yapılmıştır.

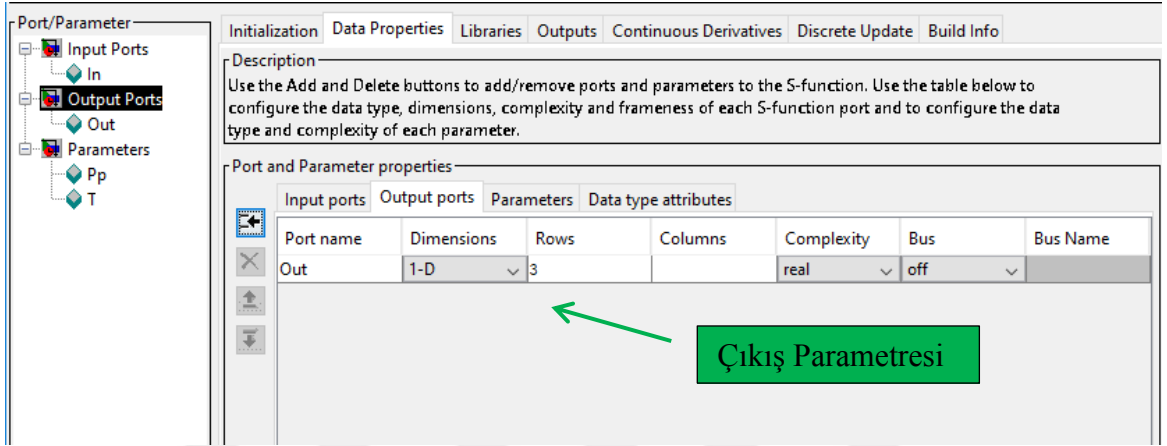
‘**Number of Discrete States**’ değişkeni ile modelde kullanılacak olan ayrık zamanlı değişken sayısı belirlenmiştir. Bu tez çalışmasında ASM modelinin $i_{s\alpha}$ $i_{s\beta}$ $\psi_{r\alpha}$ $\psi_{r\beta}$ ω_m değişkenlerini elde etmek istenildiği için bu bölüme beş değeri girilmiştir.

‘**Discrete State IC**’ bölümünde ayrık zamanlı değişkenlerin başlangıç değerleri tanımlanmıştır. Bu tez çalışmasında değişken başlangıç değerlerinin tamamı sıfır olarak belirlenmiştir.

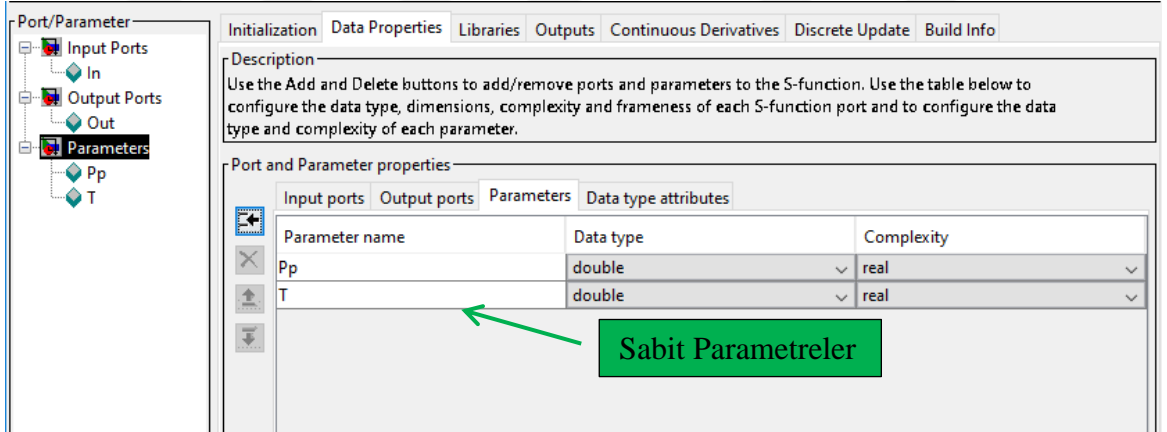
‘**Sample Mode**’ ve ‘**Sample Time Value**’ değişkenleri ile modelin örnekleme modu ve zamanı belirlenmektedir. Bu tez çalışmasında Sample mode Discrete seçilip, Sample time value 100e-6 olarak belirlenmiştir.



a



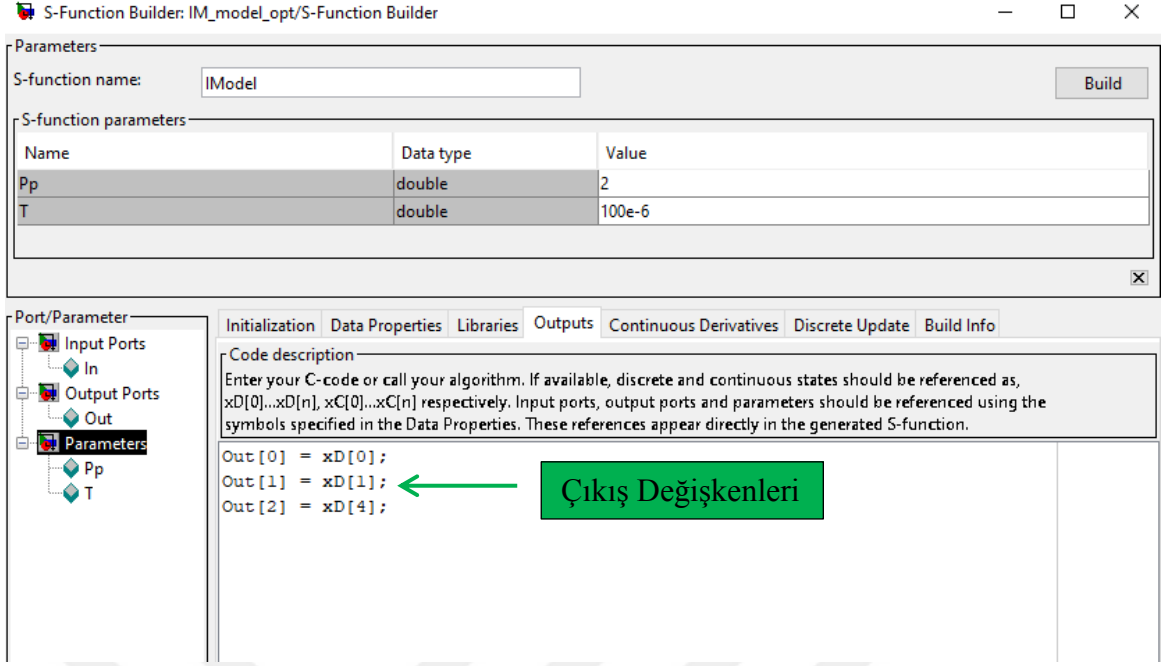
b



c

Şekil 4.5. S-Function Builder ile ASM modeli yapılandırılmaları-2 giriş parametreleri (a), çıkış parametreleri (b) ve sabit parametreler (c)

Şekil 4.5’de bulunan ‘Data Properties’ bölümde model giriş, çıkış ve model içinde kullanılacak sabit parametreler belirlenmiştir.



Şekil 4.6. S-Function Builder ile ASM modeli yapılandırılmaları-3

ASM modelinde bir giriş portu, on sütun ve bir çıkış portu da üç sütun olmak üzere değişkenler Çizelge 4.2 gibi belirlenmiştir.

Çizelge 4.2. S-Function Builder port değişkenleri

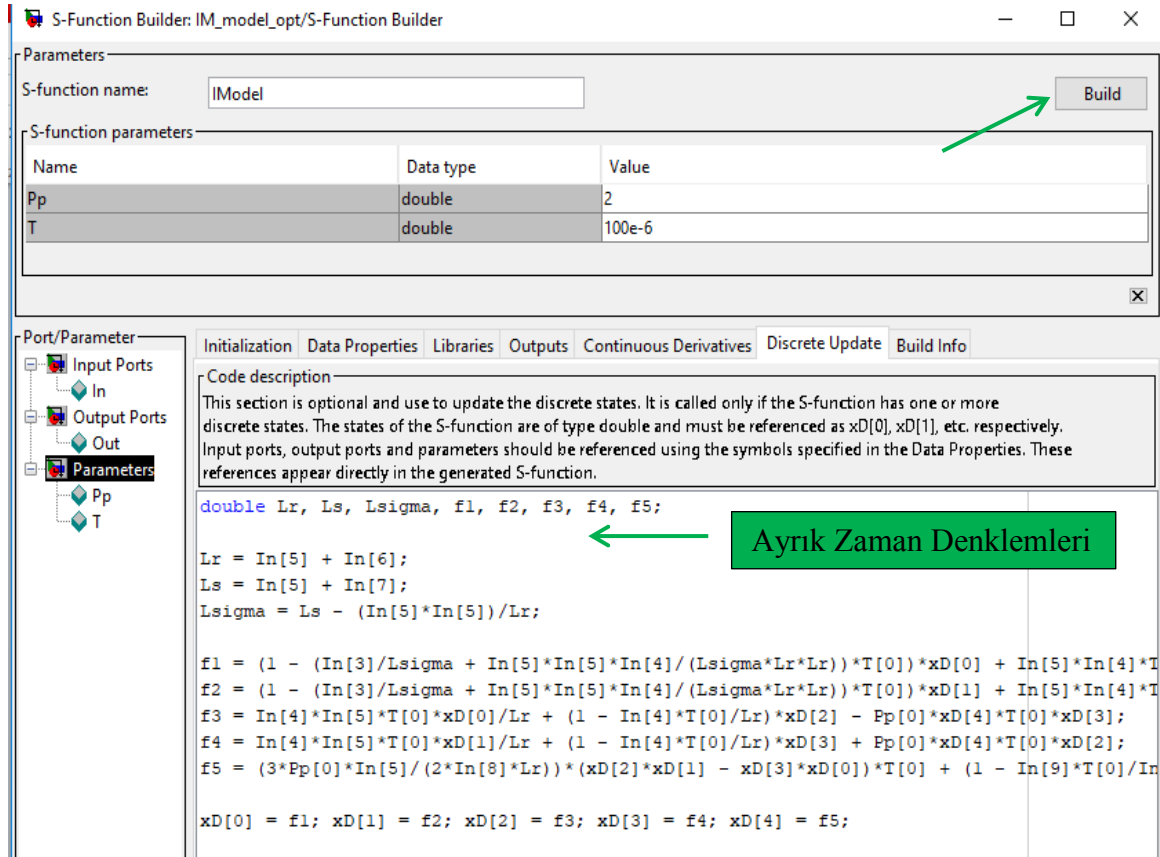
(a) Giriş portu

In[0]	In[1]	In[2]	In[3]	In[4]	In[5]	In[6]	In[7]	In[8]	In[9]
$V_{s\alpha}$	$V_{s\beta}$	T_L	R_s	R_r	L_m	L_{lr}	L_{ls}	J_L	B_L

(b) Çıkış portu

Out[0]	Out[1]	Out[2]
$\dot{i}_{s\alpha}$	$\dot{i}_{s\beta}$	$\dot{\omega}_m$

Şekil 4.6’da bulunan ‘**Output**’ bölümünde model çıkış değişkenlerinin düzenlendiği bölümdür. ASM modelinde çıkışlar aynı zamanda ayrık zamanda hangi değişkenlerde eşit olduğu belirtilmiştir.



Şekil 4.7. S-Function Builder ile ASM modeli yapılandırılmaları-4

Şekil 4.7’de bulunan ‘Discrete Update’ bölümde modelde hesaplanması istediğimiz ayrık zamanlı denklemlerin yazıldığı bölümdür.

ASM modelinde Eşitlik 4.2, 4.4, 4.6, 4.8, 4.10 ifadeleri aşağıdaki gibi tanımlanarak modeli build işlemi seçilerek modeli oluşturulmuştur.

S-Function Builder ile ayrık zamanlı denklemler bölümüne $i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$, $\psi_{r\alpha}$, $\psi_{r\beta}$, w_m ifadelerini Ek B’deki gibi elde edilmektedir.

4.2 ASM Modelinin Eniyileme Çalışmaları

Önerilen yöntemleri doğrulamak ve başarımlarını test etmek için, ASM dinamik model parametrelerini belirlemede aşağıdaki adımlar izlenerek en düşük hata değerli ve ASM modeline en uygun tepkileri veren motor modeli parametreleri elde edilmeye çalışılmıştır.

1- Akım hataları (GA)

$$n = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left((i_{s\alpha} - \hat{i}_{s\alpha})^2 + (i_{s\beta} - \hat{i}_{s\beta})^2 \right) \quad (4.11)$$

2- Hız hataları (GA)

$$e = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N ((w_m - \hat{w}_m)^2) \quad (4.12)$$

3- Hem hız hem de akım hataları (ÇA-GA)

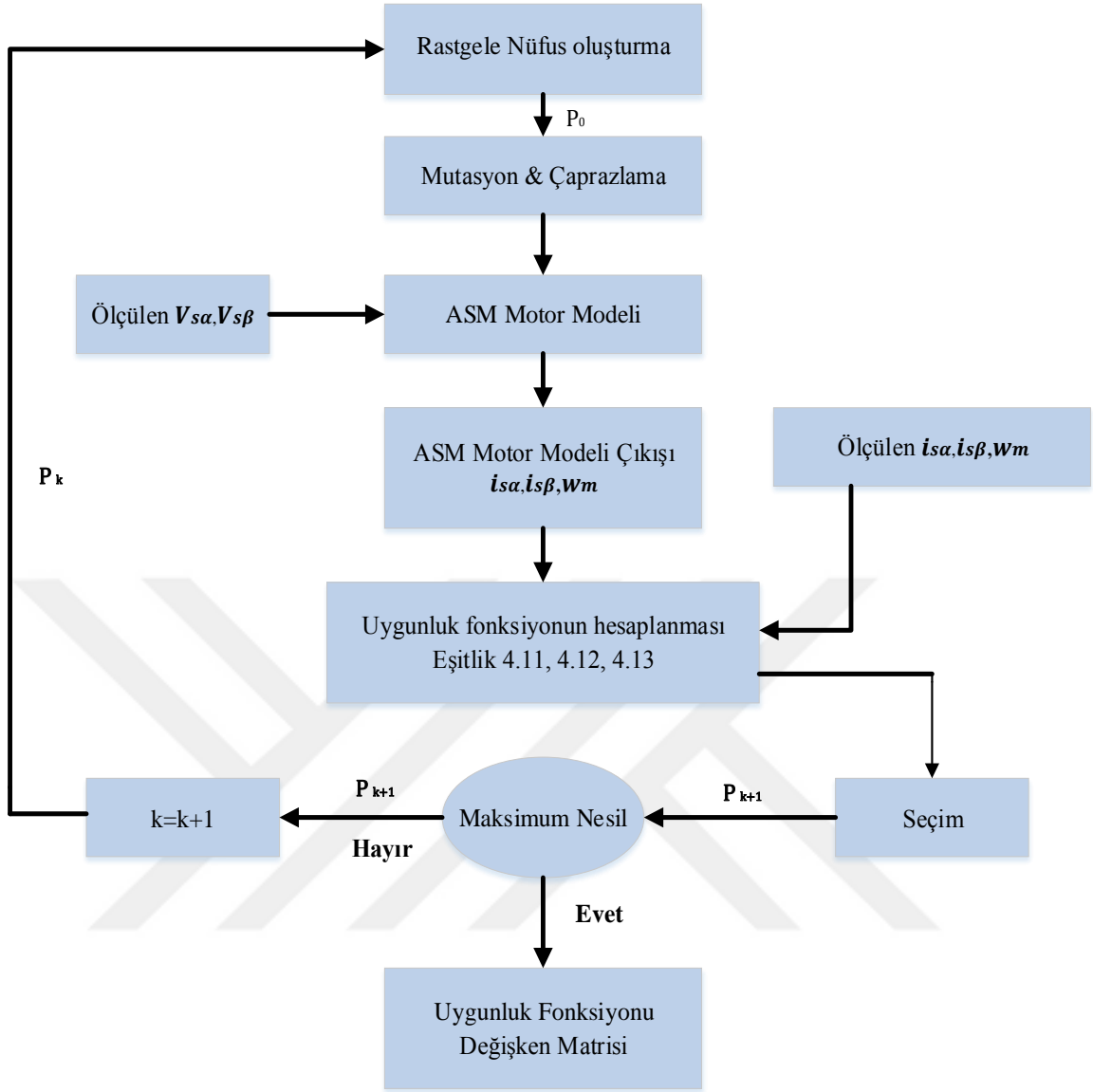
$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left((i_{s\alpha} - \hat{i}_{s\alpha})^2 + (i_{s\beta} - \hat{i}_{s\beta})^2 \right) \\ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N ((w_m - \hat{w}_m)^2) \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

kullanılarak eniyileme işlemi gerçekleştirilmiş ve dinamik modele ait parametreleri akış diyagramı Şekil 4.8'de belirlenmiştir.

Şekil 4.8'de hazırlanan bu akış diyagramı ile bölüm 4.2.1'deki simulink dosyası simule edilmiş ve Eşitlik 4.11,-,4.13 belirtildiği gibi üç farklı maliyet fonksiyonu kullanılarak hata değerleri hesaplanmıştır.

Akış diyagramında belirlenen işlemleri gerçekleştirmek üzere hazırlanan Ek-A'da verilmiş olan m-file dosyasında üç farklı hata değerleri de hesaplanabilecek şekilde hazırlanmış olup, Yöntem-I'de akım hataları kullanılarak, Yöntem-II'de hız hataları, Yöntem-III'de ise hem akım hem hız hataları birlikte kullanılarak eniyileme işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Ek-A'da m-file dosyası Eşitlik 4.11-4.12 denklemler kullanılarak hazırlanmış olup, eniyileme çalışmaları gerçekleştirilir iken gerekli eşitlik kullanılıp diğer eşitlikler pasif halde tutulmuştur.



Şekil 4.8. Eniyileme süreci akış diyagramı

4.2.1 Yöntem-I: Akım Hataları İçin Benzetim Sonuçları

Sistemde GA ile akım hataları kullanılarak çeşitli popülasyon ve nesil sayılarında sistem test edilmiştir. Yöntem-I'de kullanılan maliyet fonksiyonunu Eşitlik 4.11'de tekrar yazmak gerekirse

$$n = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left((i_{s\alpha} - \hat{i}_{s\alpha})^2 + (i_{s\beta} - \hat{i}_{s\beta})^2 \right) \quad (4.11)$$

Eşitlik 4.11’de gerçek ASM modelinden elde edilen $\alpha\beta$ eksenindeki akım değerleri ile bilgisayar ortamında oluşturulan ASM’nin $\alpha\beta$ eksenindeki akım değerleri, maliyet fonksiyonunda kullanılarak ASM parametreleri elde edilmiştir.

50 popülasyonda 200 nesil sonucu elde edilen ASM parametreleri Çizelge 4.3’de verilmiştir.

Çizelge 4.3. 50 popülasyonda 200 nesil parametreleri

	Min. Değer	Max. Değer	Eniyileme Sonucu Değer	Test Motor Parametresi
R_s	1	4	2.192526588128341	2.283
R_r	1	4	2.171480936874495	2.133
L_m	0.1	0.4	0.220400591505000	0.22
L_{lr}	0.001	0.1	0.015901072096448	0.011
L_{ls}	0.001	0.1	0.006768636635357	0.011
J_L	1e-3	1e-1	0.018191889229356	0.005
B_L	1e-3	1e-1	0.001325573818354	0.001

4.2.2 Yöntem-II: Hız Hataları İçin Benzetim Sonuçları

Sistemde GA ile hız hataları kullanılarak çeşitli popülasyon ve nesil sayılarında sistem test edilmiştir. Yöntem-II’de kullanılan maliyet fonksiyonunu Eşitlik 4.12’de tekrar yazılmıştır.

$$e = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N ((w_m - \hat{w}_m)^2) \quad (4.12)$$

Eşitlik 4.12’de gerçek ASM modelinden elde edilen rotor mekanik hızı değerleri ile bilgisayar ortamında oluşturulan ASM modeli rotor mekanik hızı değerleri, maliyet fonksiyonunda kullanılarak ASM parametreleri elde edilmiştir

Yöntem-II Testi

50 popülasyonda 200 nesil sonucu elde edilen ASM parametrelerini Çizelge 4.4’te verilmiştir.

Çizelge 4.4. 50 popülasyonda 200 nesil parametreleri

	Min. Değer	Max. Değer	Eniyileme Sonucu Değer	Test Motor Parametresi
R_s	1	4	2.190027727436800	2.283
R_r	1	4	1.739464353700924	2.133
L_m	0.1	0.4	0.362747987430804	0.22
L_{lr}	0.001	0.1	0.001861025929972	0.011
L_{ls}	0.001	0.1	0.016052456328628	0.011
J_L	1e-3	1e-1	0.022204097311128	0.005
B_L	1e-3	1e-1	0.001097915945575	0.001

4.2.3 Yöntem-III: Akım ve Hız Hataları İçin Benzetim Sonuçları

Sistemde GA ile akım ve hız hataları kullanılarak çeşitli popülasyon ve nesil sayılarında sistem test edilmiştir. Yöntem-III'te kullanılan maliyet fonksiyonunu Eşitlik 4.13'de tekrar yazılmıştır.

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left((i_{s\alpha} - \hat{i}_{s\alpha})^2 + (i_{s\beta} - \hat{i}_{s\beta})^2 \right) \\ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left((w_m - \hat{w}_m)^2 \right) \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Eşitlik 4.13'de gerçek ASM modelinden elde edilen duran eksen ($\alpha\beta$) takımı akım değerleri ve rotor mili mekanik hızı değerleri ile bilgisayar ortamında oluşturulan ASM modelinin duran eksen ($\alpha\beta$) takımı akım değerleri ve rotor mili mekanik hızı değerleri, birlikte kullanılarak maliyet fonksiyonunu elde edilmiştir. ASM parametreleri iki maliyet fonksiyonu birlikte ÇA-GA kullanılarak elde edilmiştir.

50 popülasyonda 200 nesil sonucu elde edilen ASM parametrelerini aşağıdaki gibidir.

Çizelge 4.5. 50 popülasyonda 200 nesil parametreleri

	Min. Değer	Max. Değer	Eniyileme Sonucu Değer	Test Motor Parametresi
R_s	1	4	2.400062867225612	2.283
R_r	1	4	2.689793258483598	2.133
L_m	0.1	0.4	0.257263430206730	0.22
L_{lr}	0.001	0.1	0.017611477059364	0.011
L_{ls}	0.001	0.1	0.007844083496250	0.011
J_L	1e-3	1e-1	0.016990003252712	0.005
B_L	1e-3	1e-1	0.002820307326398	0.001

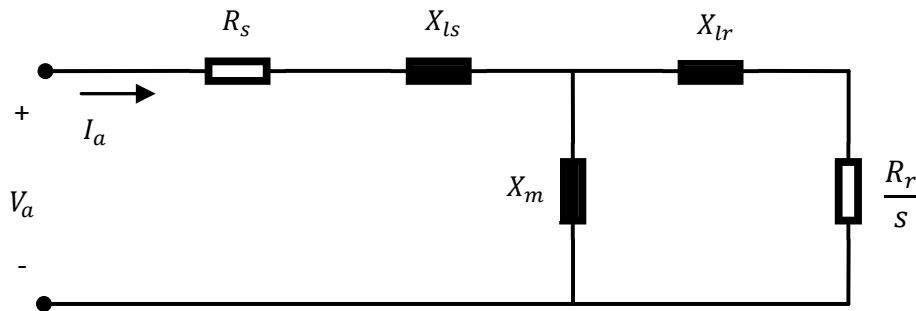
BÖLÜM V

DENEY SONUÇLARI

Bu bölümde, ASM dinamik modelindeki elektriksel parametreleri; IEEE standart 112 ile uyumlu Doğru Akım (DA) testi, boşa çalışma ve kilitli rotor deneylerinden hesaplanmıştır (IEEE Standard-112, 1996). Mekanik parametrelerin belirlenmesinde mekanik hareket eşitliğinden yararlanılmıştır. Daha sonra en uygun GA parametrelerini belirlemek adına testler gerçekleştirip, ASM parametrelerini ilk olarak Akım, daha sonra hız hatalarına göre eniyileme işlemi, diğer bir basamakta hem hız hem de akım hatalarının eşzamanlı eniyileme ile gerçekleştirilerek, dinamik modele ait parametreler belirlenmiştir. En son adımda ise, geleneksel yöntemlerle elde edilen parametreler ile eniyileme sonucu elde edilen parametreler karşılaştırılarak modelin doğrulaması gerçek-zamanlı olarak gerçekleştirilmiştir.

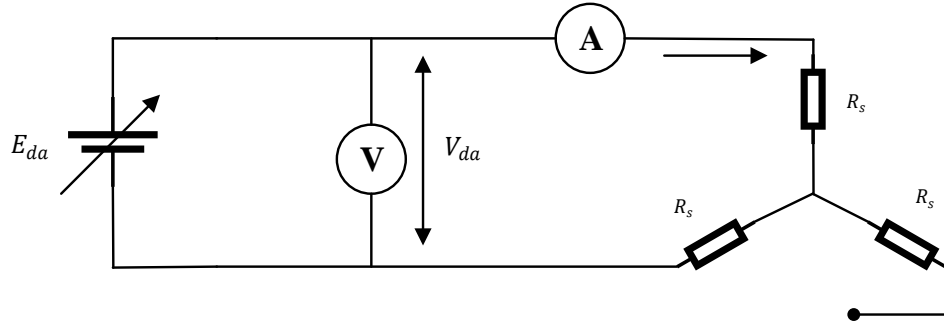
5.1 ASM Modelinin Elektriksel Parametrelerinin Geleneksel Yöntem ile Elde Edilmesi

ASM modelinin elektriksel parametrelerinin hesaplanması için, ASM'nin statora indirgenmiş bir faz sinüsoidal haldeki Şekil 5.1'deki eşdeğer devresinden yararlanılır.



Şekil 5.1. ASM'nin statora indirgenmiş bir faz eşdeğer devresi

Şekil 5.1'de görülen eşdeğer devre kullanılarak, IEEE standart 112'de açıklanan D.A testi, boşa çalışma ve kilitli rotor deneyleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen deneylerle ilişkin deney düzenekleri sırasıyla Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'te gösterilmiştir.



Şekil 5.2. D.A testine ilişkin deney düzeneği

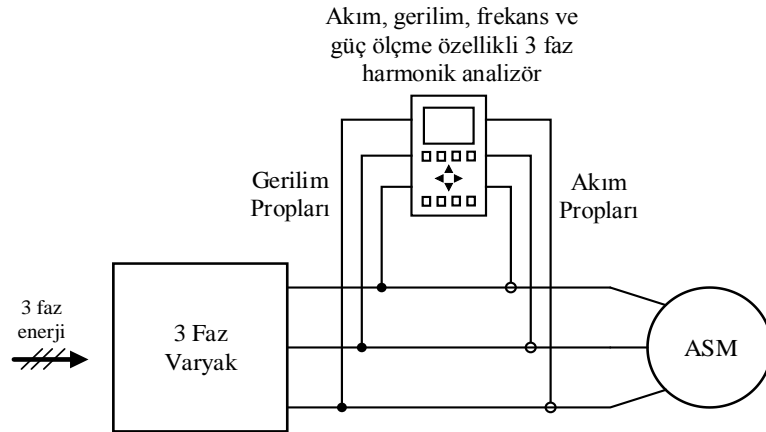
Burada R_s ; yıldız bağlı ASM' nin bir fazına ilişkin faz direncidir. E_{da} ; değeri ayarlanabilir DA kaynağıdır. V; DA voltmetresidir. A; DA ampermetresidir. V_{da} ve I_{da} ise DA ölçü aletlerinden okunan değerleri temsil etmektedir (Demir, 2011).

Şekil 5.2'deki DA deney düzeneğinden SKASM için alınan ölçümler Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. SKASM için D.A test sonuçları

SKASM için	
V_s [V]	I_s [A]
35.8	5.9

Şekil 5.3'deki deney düzeneğine göre yapılan boşa çalışma ve kilitli rotor deneyleri sonucunda SKASM için alınan ölçümler Çizelge 5.2 ve 5.3'te verilmiştir (Demir, 2011).



Şekil 5.3. Boşa çalışma ve kilitli rotor testi için deney düzeneği

Çizelge 5.2. SKASM için boşa çalışma testi sonuçları

SKASM için		
V_a [V]	I_a [A]	P_a [W]
$\frac{380.1}{\sqrt{3}}$	3.52	$\frac{304}{3}$

Çizelge 5.3. SKASM için kilitli rotor testi sonuçları

SKASM için		
V_a [V]	I_a [A]	P_a [W]
$\frac{117.03}{\sqrt{3}}$	5.93	$\frac{624}{3}$

Çizelge 5.2 ve 5.3'teki V_a , I_a ve P_a , sırasıyla faz gerilimi, akımı ve gücünü temsil etmektedir.

SKASM için yukarıdaki ölçüm sonuçları kullanılarak, IEEE standart 112 ve Shi (2001), rotor direncini hesaplama yöntemine göre belirlenmiş elektriksel parametreleri sırasıyla Çizelge 5.4'de özetlenmiştir (Demir, 2011).

Çizelge 5.4. SKASM modelindeki elektriksel parametrelerin anma değerleri

SKASM için				
R_s [Ω]	R_r [Ω]	L_{ls} [H]	L_{lr} [H]	L_m [H]
3.03	2.53	0.0116	0.0174	0.135

5.2 ASM Modelinin Elektriksel Parametrelerinin Eniyileme Yöntemi ile Elde Edilmesi

Eniyileme çalışmalarının başlangıcında en uygun GA parametrelerini belirlemek adına testler yapılmış ve eniyileme çalışmasında kullanılmak üzere testlerden elde edilen GA parametreleri belirlenmiştir. Daha sonra en uygun GA parametreleriyle ilk olarak akım, daha sonra hız, diğer bir basamakta hem hız hem de akım hatalarını kullanarak ÇA-GA

ile eş zamanlı eniyileme gerçekleştirilerek, dinamik modele ait parametreler belirlenmiştir.

5.2.1 Eniyileme işlemi genetik algoritma parametreleri seçimi

Parametre eniyileme işlemlerini gerçekleştirilirken, uygun nüfus sayısı ile bazı genetik süreçler (mutasyon, çaprazlama) ile ilişkili parametrelerin belirlenmesi, en uygun sonuca ulaşmada önemli bir faktördür. Matlab Toolbox ile gerçekleştirilen işlemlerde en uygun sonuca ulaşmak için aynı GA parametreleri ile on kez tekrarlayarak ortalama hataları elde edildi. Bunun için Optimization Toolbox da bulunan Generate Code seçeneği ile oluşturulan algoritmanın bir m-file dosyası oluşturuldu. Ek C’de belirtildiği gibi oluşturulan Generate Code for döngüsü ile on kez tekrarlanıp, save komutu ile her eniyileme sonucu kaydedilip sonuçların karşılaştırmasının yapılabilmesi sağlandı. Farklı popülasyon sayılarında (35, 70, 140, 280), farklı çaprazlama oran katsayılarında (0.3, 0.6, 0.9), farklı mutasyon oran katsayılarında (0.1, 0.4, 0.8) algoritma hazırlanan Generate Code ile on kez, her bir ifade Eşitlik 4.11’de verilen akım hataları kullanılarak test edilmiştir. Elde edilen sonuçların maliyet değerlerinin ortalama ve standart sapma değerleri en düşük olan ifadeler seçilerek GA bu parametreler ile çalıştırılarak en doğru ASM parametre değerleri elde edilmeye çalışılmıştır.

GA parametreleri ile ilgili testler yapılırken ilgili diğer parametreler Toolbox bölümünde Default olarak atanmış değerler seçilmiştir. Örneğin popülasyon sayısı ile ilgili testler sırasında mutasyon katsayısı Gaussian Default değeri ve Çaprazlama katsayısı ile ilgili seçim yapılırken Intermediate seçeneğinin Default değeri seçilmiştir.

Çizelge 5.5. GA parametre testleri

(a) Popülasyon büyüklüğü

Popülasyon Büyüklüğü (np)	Ortalama	Standart Sapma
35 (5xD)	1,072646076	0,017316652
70 (10xD)	1,060944659	0,011679724
140 (20xD)	1,057727489	0,016212973
280 (40xD)	1,057727489	0,011172706

(a) Mutasyon

Mutasyon (f)	Ortalama	Standart Sapma
0.1	1,056996897	0,007560084
0.4	1,05818111	0,011654491
0.8	1,060305621	0,005719085

(b) Çaprazlama

Çaprazlama (cp)	Ortalama	Standart Sapma
0.3	1,075780474	0,026200994
0.6	1,066733974	0,024389344
0.9	1,067821775	0,024093162

Elde edilen maliyet değerleri karşılaştırılarak Çizelge 5.6'da belirtilen parametre değerleri seçilmiştir. Popülasyon Büyüklüğü ifadesi için (40xD) boyutu en düşük ortalamaya sahip olsa da işlem yükü çok fazla olduğu ve (10xD) popülasyon boyutu standart sapma değeri düşük olduğu için, (10xD) popülasyon boyutu seçilmiştir.

Çizelge 5.6. GA seçilen parametre değerleri

Popülasyon Büyüklüğü (np)	70 (10xD)
Mutasyon(f)	0.1
Çaprazlama(cp)	0.9

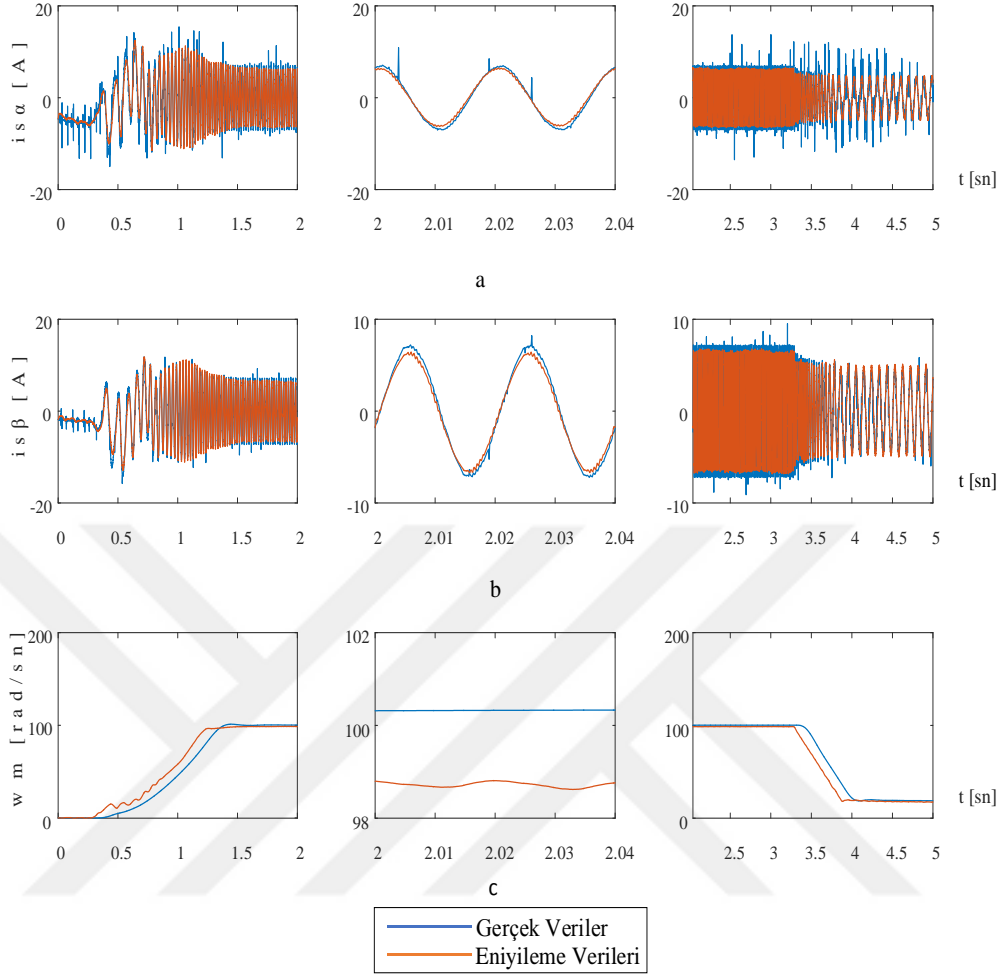
Çizelge 5.7. Parametre testleri sonucu yapılan ASM deneyi sonuçları

(a) Elektriksel ve mekanik parametreleri

R_s	R_r	L_m	L_{lr}	L_{ls}	J_L	B_L
2.77712	3.42170	0.20105	0.03357	0.00980	0.03454	0.00754

(b) Hata değerleri

Akım Hata Değeri	Hız Hata Değeri
1.0306	66.2618



Şekil 5.4. Parametre testleri sonucu yapılan ASM deneyi sonuçları, Stator akımının α -bileşeni ($i_{s\alpha}$) (a); Stator akımının β -bileşeni ($i_{s\beta}$) (b) ve Rotor hızı değişimleri (c)

Parametre testleri sonucu Çizelge 5.6’da seçilen Popülasyon Büyüklüğü (np), Mutasyon(f) ve Çaprazlama (cp) değerleri ile algoritma çalışmaları tekrarlanmıştır. Elde edilen parametre sonuçları Çizelge 5.7’de verilmiştir. Eniyileme sonucu Çizelge 5.7’de verilen ASM elektriksel ve mekanik parametreleri ASM modelinde yerine yazılıp gerçek veriler ile ASM modeli test edilmiştir. Test sonucu elde edilen akım ve hız verileri Şekil 5.4’de verildiği gibi karşılaştırılmıştır.

5.2.2 ASM parametrelerinin akım hataları ile eniyilemesi

ASM dinamik model parametreleri elde etmek için tasarlanan algoritma ilk adımda akım hataları kullanılarak test edilmiştir. Benzetim sonucu elde edilen ASM elektriksel

ve mekanik parametreleri Çizelge 5.8a'da da ifade edildiği gibi ($R_r, L_{lr}, R_s, L_{ls}, L_m, J_L, B_L$) ASM modelinde yerine koyularak gerçek veriler ile Şekil 5.5'de gösterildiği gibi akım ve hız ifadeleri karşılaştırılmıştır.

Çizelge 5.8. ASM'nin akım hataları ile eniyileme sonucu elde edilen

(a) Elektriksel ve mekanik parametreleri

R_s	R_r	L_m	L_{lr}	L_{ls}	J_L	B_L
2.78168	2.86899	0.17846	0.01204	0.02353	0.03836	0.00974

(b) Hata değerleri

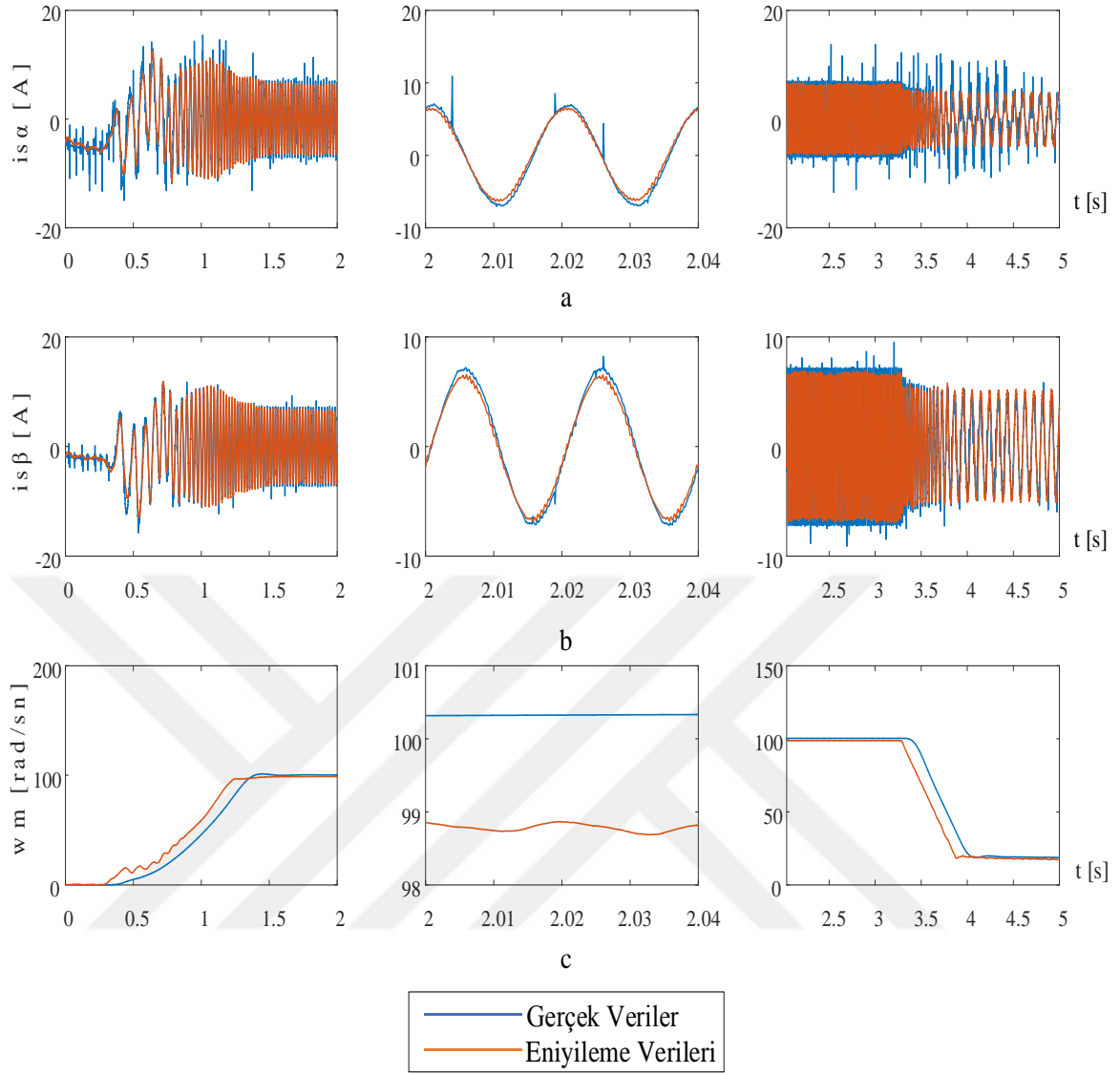
Akım Hata Değeri	Hız Hata Değeri
0.9927	67.0497

Çizelge 5.8b'de ifade edildiği gibi akım hataları ile gerçekleştirilen eniyileme çalışmaları sonucunda akım hata değeri, hız hata değerine göre çok daha küçüktür.

Akım hataları sonucu elde edilen motor parametreleri Matlab simulink modelinde uygun yerlere yazılıp, dinamik modelin çektiği akım ve hız verileri kaydedilmiştir. Bu veriler Şekil 5.5'de de görüldüğü üzere gerçek motor modeli arasında karşılaştırma yapıldığında akım verileri ile yakınsamada daha başarılı olduğu gözlenmiştir.

Akım hataları sonucu elde edilen motor modeli ile gerçek motor modeli arasında hız verileri karşılaştırıldığında ise Çizelge 5.8b'de verildiği gibi akım hata değerine göre daha yüksek hata değeri elde edilmiştir.

Şekil 5.5'de mavi renk ile ifade edilen gerçek motor modeli verilerinde meydana gelen bazı ani yükselişler deney düzeneğinde sürücü çıkışından verilerin kaydedilmesinden dolayı olup değerlendirme sırasında dikkate alınmamıştır.



Şekil 5.5. Akım hataları ile gerçekleştirilen eniyileme sonucu elde edilen sonuçlar ve gerçek verilerin karşılaştırılması; Stator akımının α -bileşeni ($i_{s\alpha}$) (a), Stator akımının β -bileşeni ($i_{s\beta}$) (b) ve Rotor hızı değişimleri (c)

5.2.3 ASM parametrelerinin hız hataları ile eniyilemesi

ASM dinamik model parametreleri elde etmek için tasarlanan algoritma ikinci adımda hız hataları kullanılarak test edilmiştir. Benzetim sonucu elde edilen ASM elektriksel ve mekanik parametreleri Çizelge 5.9a'da da ifade edildiği gibi ($R_r, L_{lr}, R_s, L_{ls}, L_m, J_L, B_L$) ASM modelinde yerine koyularak gerçek veriler ile Şekil 5.6'da gösterildiği gibi akım ve hız ifadeleri karşılaştırılmıştır.

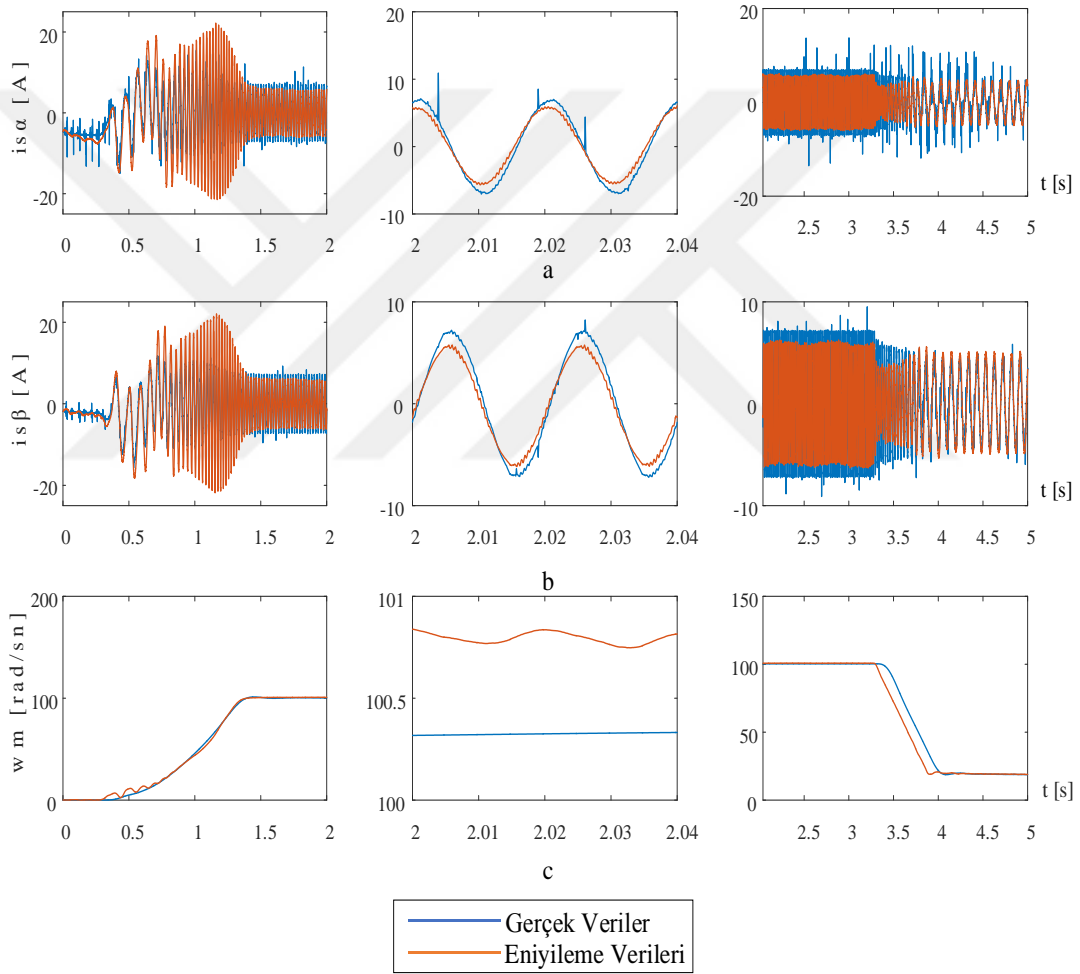
Çizelge 5.9. ASM'nin hız hataları ile eniyileme sonucu elde edilen

(a) Elektriksel ve mekanik parametreleri

R_s	R_r	L_m	L_{lr}	L_{ls}	J_L	B_L
2.08771	2.28703	0.19460	0.02050	0.01702	0.09742	0.00326

(b) Hata değerleri

Akım Hata Değeri	Hız Hata Değeri
13.6016	29.7914



Şekil 5.6. Hız hataları ile gerçekleştirilen eniyileme sonucu elde edilen sonuçlar ve gerçek verilerin karşılaştırması; Stator akımının α -bileşeni ($i_{s\alpha}$) (a), Stator akımının β -bileşeni ($i_{s\beta}$) (b) ve Rotor hızı değişimleri (c)

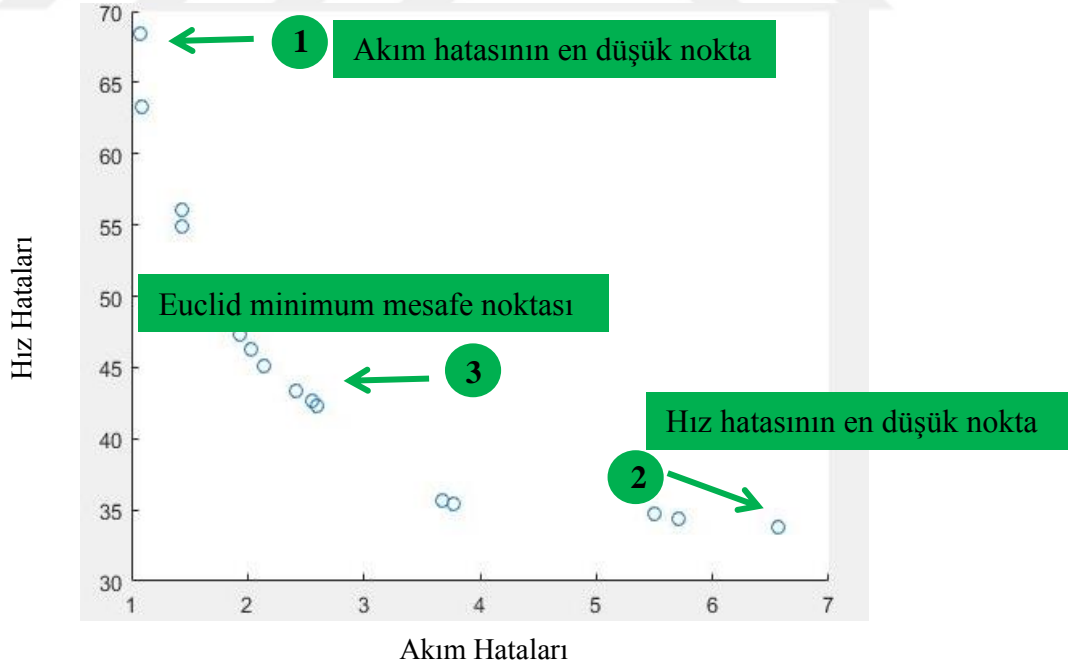
Çizelge 5.9a'da verilen hız hataları sonucu elde edilen motor parametreleri, Matlab simulink modelinde uygun yerlere yazılıp, dinamik modelin çektiği akım ve hız verileri

kaydedilmiştir. Bu veriler Şekil 5.6'da görüldüğü üzere gerçek motor modeli arasında karşılaştırma yapıldığında akım verileri ile yakınsamada farklılıklar görülse de hız verilerinde yakınsamada daha başarılı olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 5.9b'de verilen akım hata değeri ise, yalnız akım hatası ile yapılan eniyileme çalışmasına Çizelge 5.8b'de de görüldüğü üzere göre daha yüksek hata değerleri elde edilmiştir. Hız hata değerinde ise fark edilir bir düşüş gerçekleşerek Hız verilerinde daha başarılı sonuçlar elde edildiği tespit edilmiştir.

5.2.4 ASM parametrelerinin akım ve hız hatalarının birlikte eniyilenmesi

ASM dinamik model parametrelerini elde etmek için tasarlanan algoritmanın bu adımında ise hem akım hem de hız hataları kullanılmıştır. Benzetim sonucu elde edilen sonuçlar incelendiğinde en doğru sonuca ulaşmak için, eniyileme sonucundan elde edilen hata değerleri için Şekil 5.7'de gösterildiği gibi üç farklı noktadan elde edilen parametreler karşılaştırılmış ve iyi sonucun elde edildiği noktalar Şekil 5.7'de gösterilmiştir.



Şekil 5.7. ÇA'dan elde edilen hata değerleri

5.2.4.1 ÇA algoritmada akım hatasının en düşük olduğu nokta

ASM parametrelerinin eniyilenmesi için oluşturulan algoritma ÇA olarak çalıştırıldığında, Şekil 5.7’de bulunan bir numaralı noktadan alınan motor parametreleri ÇA eniyileme çalışmasında akım değerlerinin yakınsamasında daha başarılı olduğu motor parametrelerini içermektedir. Bir numaralı noktadan alınan akım hatasının en küçük olduğu yerde elde edilen ASM parametreleri Çizelge 5.10a’daki gibidir. Çizelge 5.10a’da verilen ÇA-akım hataları sonucu elde edilen motor parametreleri, Matlab simulink modelinde uygun yerlere yazılıp, dinamik modelin çektiği akım ve hız verileri kaydedilmiştir.

Çizelge 5.10. ASM’nin ÇA-Akım hataları ile eniyileme sonucu elde edilen

(a) Elektriksel ve mekanik parametreleri

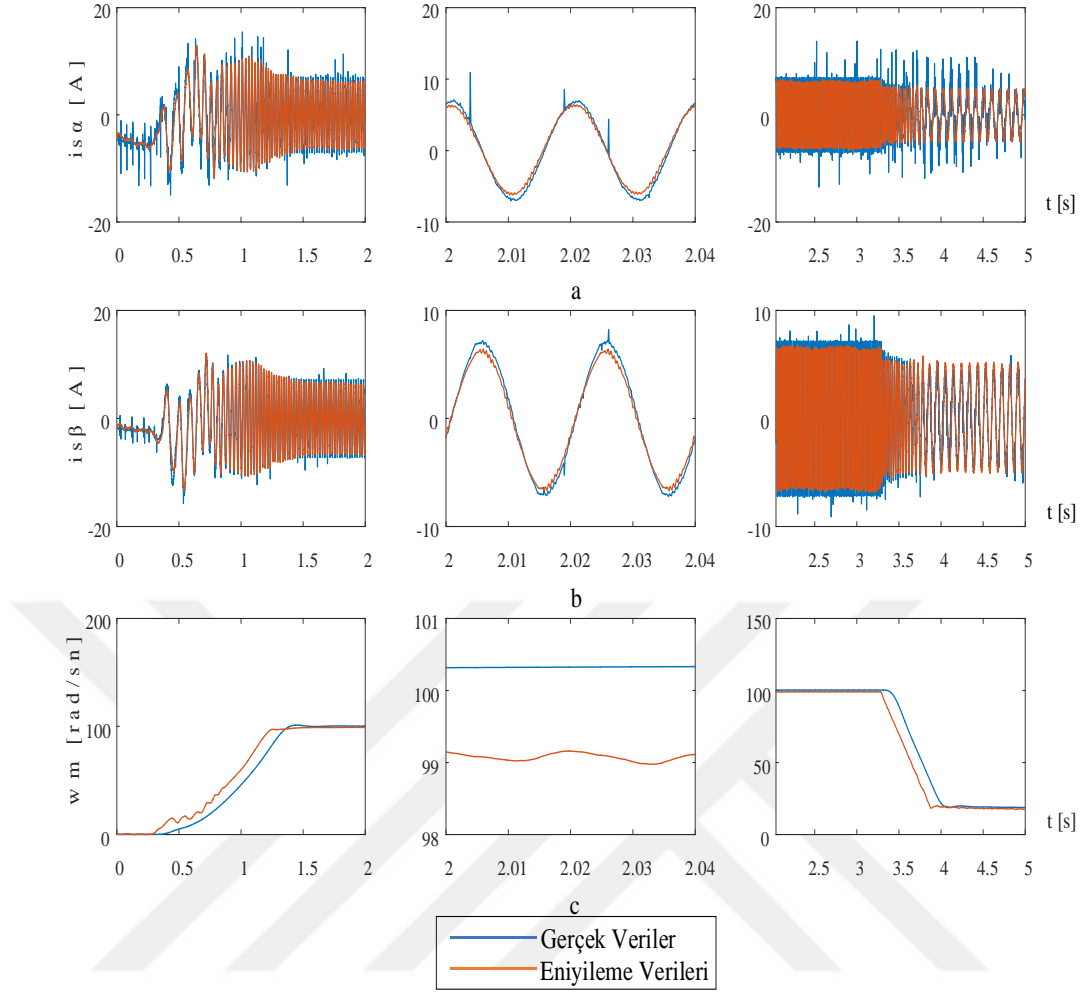
R_s	R_r	L_m	L_{lr}	L_{ls}	J_L	B_L
2.70805	3.04374	0.18666	0.02034	0.01577	0.03824	0.00653

(b) Hata değerleri

Akım Hata Değeri	Hız Hata Değeri
1.0415	68.3756

Gerçek motor modelinden alınan veriler ile dinamik modelden elde edilen veriler Şekil 5.8’de gösterildiği gibi akım ve hız ifadeleri karşılaştırılmıştır. Bu veriler Şekil 5.8’de görüldüğü üzere gerçek motor modeli arasında akım ve hız verileri karşılaştırıldığında daha başarılı yakınsamalar gerçekleştirdiği gözlenmiştir.

Çizelge 5.10b’de ifade edilen hata değerleri incelendiğinde akım hata değerlerinin 1.0415, hız hata değerinin ise 68.3756 elde edilmiştir. Hata değerleri görüldüğü üzere bir numaralı noktadan alınan motor parametrelerinin akım verilerinde daha başarılı yakınsamalar elde etmektedir. Hız verilerinde ise hata değeri, akım hata değerine göre daha büyükmekte ve yakınsamada başarı oranı daha da düşmektedir



Şekil 5.8. ÇA-GA ile gerçekleştirilen, akım hatalarının en düşük olduğu noktadaki elde edilen sonuçlar ve gerçek verilerin karşılaştırması; Stator akımının α -bileşeni ($i_{s\alpha}$) (a), Stator akımının β -bileşeni ($i_{s\beta}$) (b) ve Rotor hızı değişimleri (c)

5.2.4.2 ÇA algoritmada hız hatasının en düşük olduğu nokta

ASM parametrelerinin eniyilemesi için oluşturulan algoritma ÇA olarak çalıştırıldığında elde edilen hata değerlerinin, hız hatasının en küçük olduğu yerde elde edilen ASM parametreleri Çizelge 5.11'deki gibidir. Elde edilen sonuçlar ASM modelinde yerine koyularak gerçek veriler ile Şekil 5.9'da gösterildiği gibi akım ve hız ifadeleri karşılaştırılmıştır.

Gerçek motor modelinden alınan veriler ile dinamik modelden elde edilen veriler Şekil 5.9'da gösterildiği gibi akım ve hız ifadeleri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma işlemi sonrasında elde edilen hata değerlerinin belirtildiği Çizelge 5.11b'den de görüldüğü

üzere, hız hata değeri ÇA-Akım eniyileme çalışmasında elde edilen verilere göre daha düşük fakat akım hata değerinde daha yüksektir.

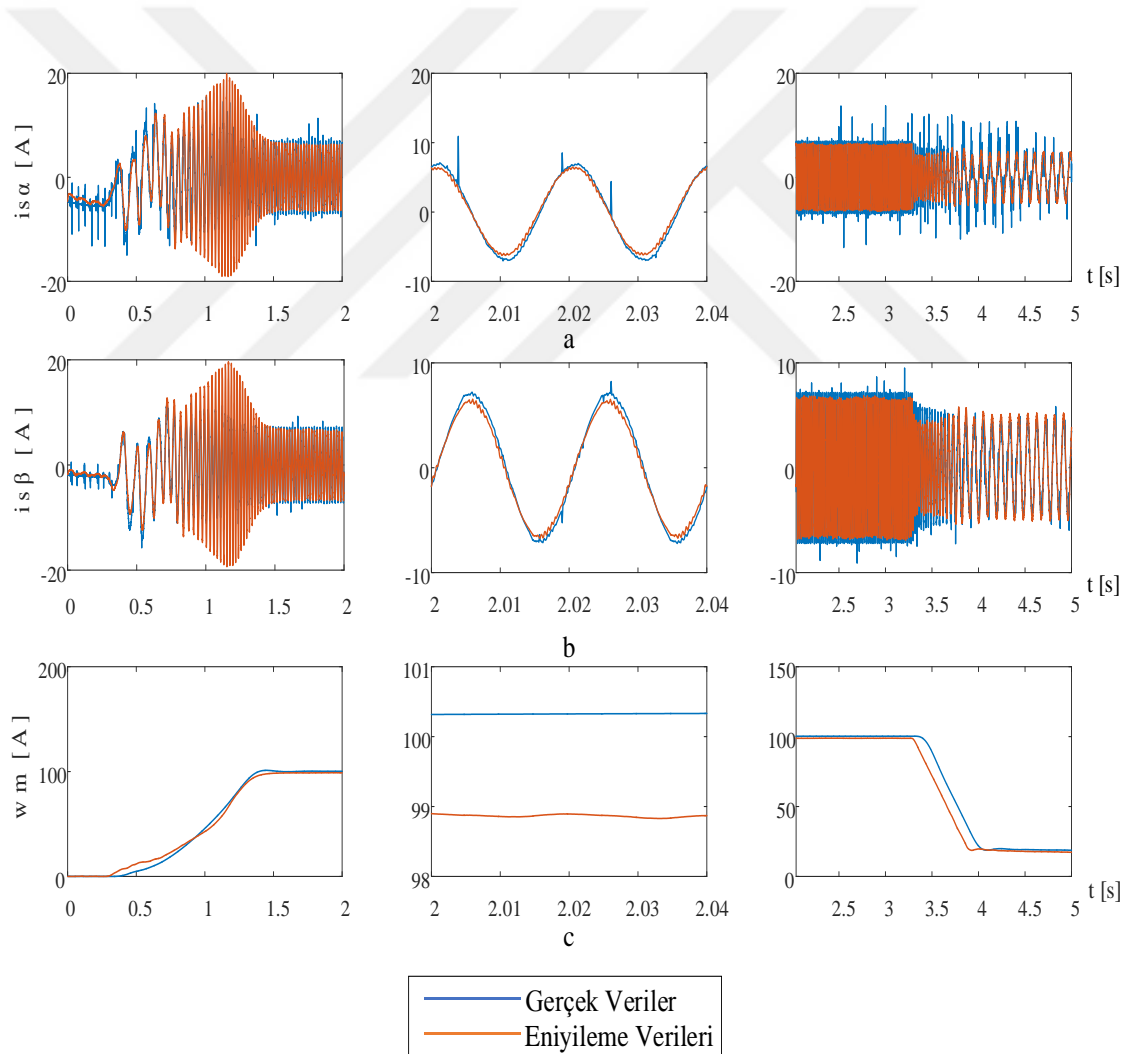
Çizelge 5.11. ASM'nin ÇA-Hız hataları ile eniyileme sonucu elde edilen

(a) Elektriksel ve mekanik parametreleri

R_s	R_r	L_m	L_{lr}	L_{ls}	J_L	B_L
3.15508	3.11079	0.18417	0.02003	0.01527	0.09987	0.00656

(b) Hata değerleri

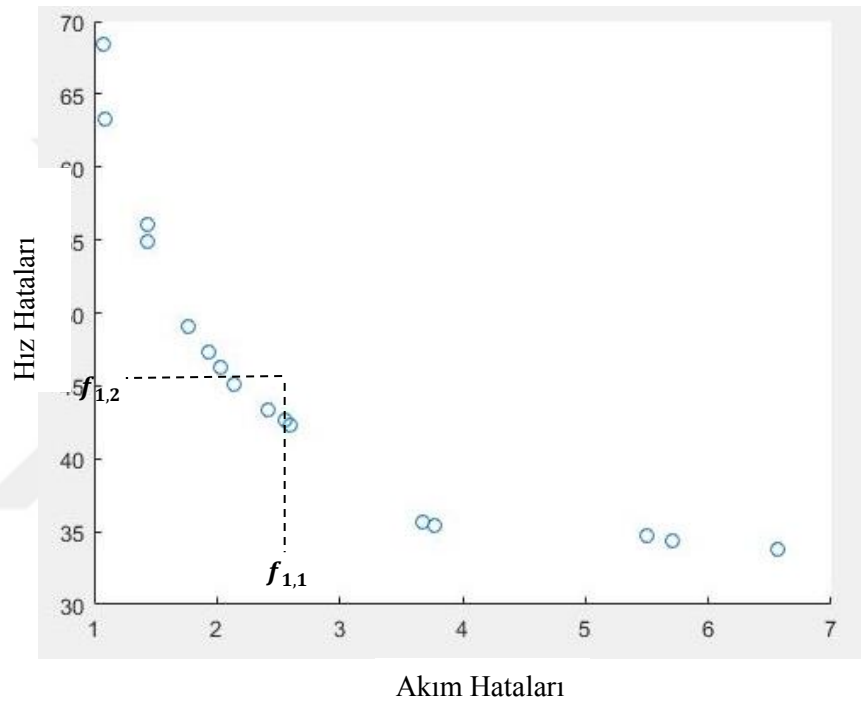
Akım Hata Değeri	Hız Hata Değeri
6.5354	33.8081



Şekil 5.9. ÇA-GA ile gerçekleştirilen, hız hatalarının en düşük olduğu noktadaki elde edilen sonuçlar ve gerçek verilerin karşılaştırması; Stator akımının α -bileşeni ($i_{s\alpha}$) (a), Stator akımının β -bileşeni ($i_{s\beta}$) (b) ve Rotor hızı değişimleri (c)

5.2.4.3 ÇA algoritmada euclid minimum mesafe hatası

ASM parametrelerinin eniyilenmesi için oluşturulan algoritma ÇA olarak çalıştırıldığı da elde edilen hata değerleri Şekil 5.10'daki gibi elde edilmektedir. Bu hata ifadelerinden orta noktada bulunan hata değerleri akım ve hızın ikisinin birlikte olabilecek en küçük hata değerlerini ifade etmektedir. Bu orta noktada bulunan hata değerlerinin en küçüğünü en doğru şekilde belirlemek için ise Eşitlik 5.1 ve Eşitlik 5.2'de ifade edilen Euclid Minimum Mesafe kuralından yararlanılmıştır.



Şekil 5.10. ÇA-GA ile elde edilen hata değerleri

$$d_x = (P_x, 0) = \sqrt{(f_{1,1})_x^2 + (f_{1,2})_x^2}, x = 1, 2, \dots, np \quad (5.1)$$

$$d_{min} = \min(d_1, d_2, \dots, d_{np}) \quad (5.2)$$

Euclid kuralından elde edilen en küçük hata değerinin elde edildiği noktadaki ASM parametreleri Çizelge 5.12'deki gibidir. Elde edilen sonuçlar ASM modelinde yerine koyularak gerçek veriler ile Şekil 5.11'de gösterildiği gibi akım ve hız ifadeleri karşılaştırılmıştır.

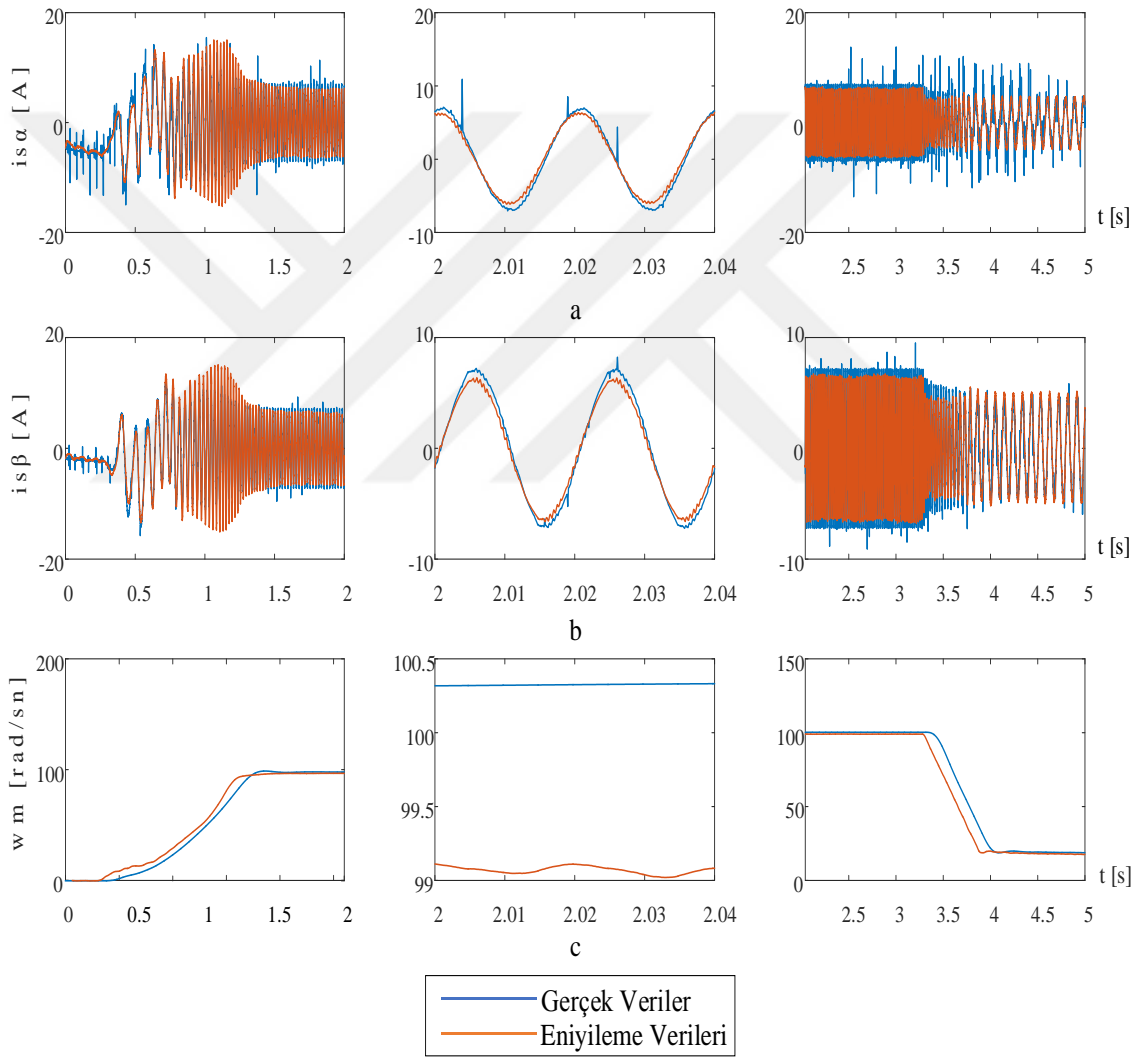
Çizelge 5.12. ASM'nin ÇA-Euclid hataları ile eniyileme sonucu elde edilen

(a) Elektriksel ve mekanik parametreleri

R_s	R_r	L_m	L_{lr}	L_{ls}	J_L	B_L
2.79474	3.06421	0.19135	0.02091	0.01542	0.07656	0.00651

(b) Hata değerleri

Akım Hata Değeri	Hız Hata Değeri
2.4112	42.9851



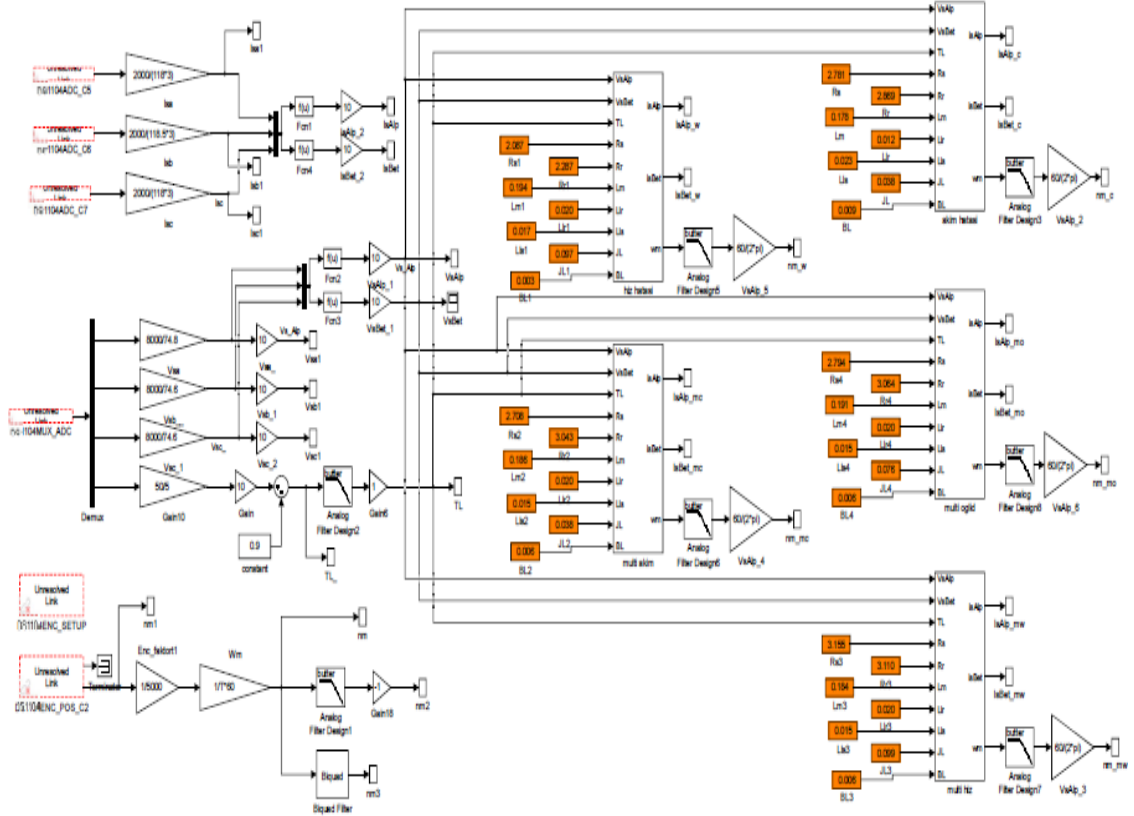
Şekil 5.11. ÇA-GA ile gerçekleştirilen, Euclid noktasında elde edilen ve gerçek verilerin karşılaştırması; Stator akımının α -bileşeni ($i_{s\alpha}$) (a), Stator akımının β -bileşeni ($i_{s\beta}$) (b) ve Rotor hızı değişimleri (c)

5.3 ASM Modeli Parametrelerine İlişkin Doğrulama Algoritmasının Gerçek Zamanlı Testleri

ASM modeli parametrelerine doğrulama amaçla geliştirilen Simulink'te oluşturulmuş doğrulama algoritması Şekil 5.12'de görülmektedir. Şekil 5.12'deki,

- DS1104ADC (kanal çoğullamalı tip –4 adet), DS1104ADC_C5 ve DS1104ADC_C6 olmak üzere toplam 6 adet analog-dijital çevirici (ADC)'ler, 3 faz gerilim ve akımların ölçümü için
- DS1104ADC_C7 ADC'si, yük momenti ölçümü için
- DS1104_ENC_SETUP + DS1104_ENC_POS_C2 artımsal kodlayıcı blokları, rotor açısız hızı ölçümü için kullanılmıştır (Demir, 2011).

DS1104'e ait bu bloklar, ControlDesk arayüz yazılımı kurulurken otomatik olarak simulink'te oluşturulmaktadır. Burada görülen ASM modeli, Şekil 4.3'deki algoritmadır.



Şekil 5.12. Gerçek zamanlı testler için oluşturulan ASM modeli

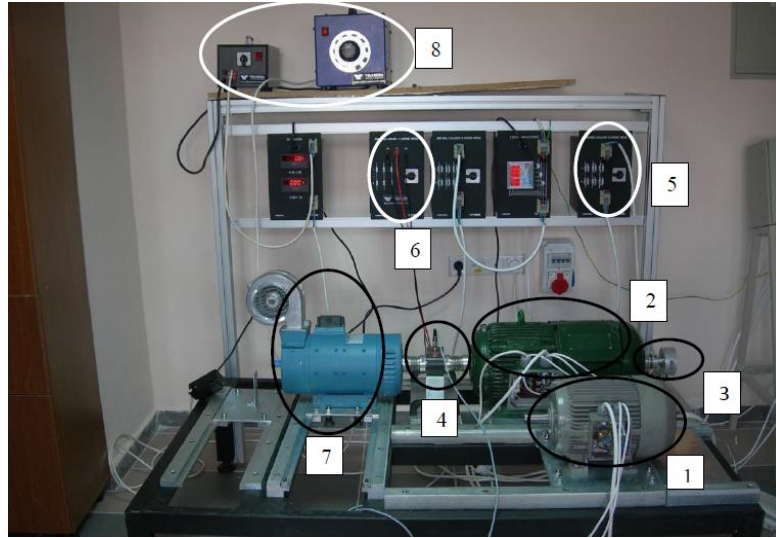
Böylelikle aynı anda beş farklı eniyileme sonucu karşılaştırılarak en doğru sonuç belirlenmeye çalışılmıştır.

5.3.1 Donanım düzeneği

ASM model ve parametrelerinin doğrulanması için hazırlanan deney düzeneği Fotoğraf 5.1 ve Fotoğraf 5.2’de verilmiştir. Ayrıca deney düzeneğinin açık şeması Şekil 5.13’de görülmektedir.



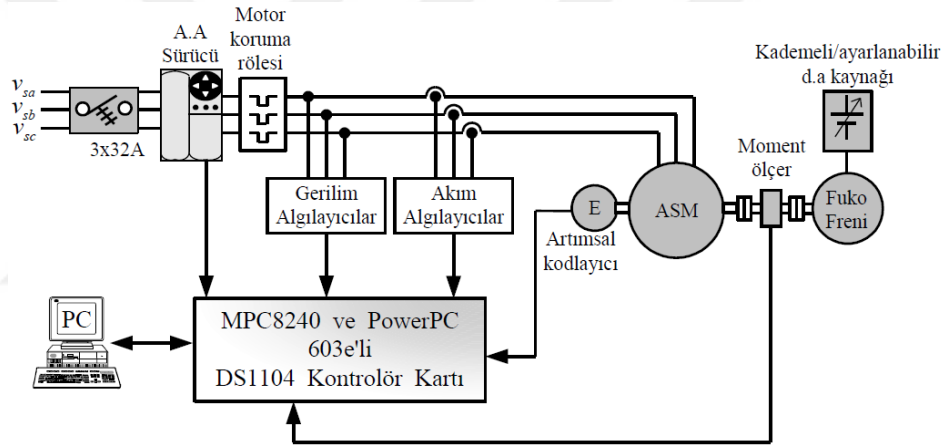
Fotoğraf 5.1. Gerçek Zamanlı test/deney düzeneği



Fotoğraf 5.2. Gerçek zamanlı deney/test düzeneği ve numaralandırılmış makine ve teçhizatlar

Fotoğraf 5.2’de numaralandırılmış olan makine-teçhizatlar ile ilgili açıklamalar aşağıda sunulmuştur:

1. Kafesli tip ASM
2. Bilezikli tip ASM
3. Artırımlı kodlayıcı (encoder)
4. 50 Nm’lik moment ölçer
5. Seri bağlı 0.5[Ω] 22[W] beş kademeli stator direnç kutusu
6. Seri bağlı 0.1[Ω] 11[W] beş kademeli rotor direnç kutusu
7. Dinamometre (fuko freni)
8. Dinamometre tahrik düzeneği



Şekil 5.13. ASM model ve parametrelerin gerçek zamanlı doğrulanmasına ilişkin deney düzeneği

Burada;

- Rotor açısız hızı ve yük momentine ilişkin gerçek değerleri elde etmek için ETH’in DBRK-50 serisi 50 [N. m]’lik moment ölçeri ve Heidenhain’nın ERN120 serisi 5000 *dilimlik* artımsal kodlayıcısı,
- ASM’ye sinüsoidal yerine vektör kontrollü altında elde edilmiş darbe genişlik modülasyonlu (DGM’li) besleme gerilimi uygulamak için Control Techniques’in 7.5 [kW]’lık Unidrive’ı,
- Üç faz gerilim ve akımlarını ölçmek için sırasıyla LEM’in 400[V]/50[mA] çevirme oranlı LV100-400 ve LA55-P/SP1 algılayıcıları,

- Motor olarak EMTAŞ'ın 2.2 [kW]/935[d/d]'lık rotoru sargılı ASM'si ya da ABANA'nın 2.2[kW]/940[d/d]'lık kafesli tip ASM'si,
- Farklı yük koşullarını oluşturmak için, FEMSAN'nın 30 [N. m]'lik fuko freni
- Simulink ortamında oluşturulan algoritmaları gerçeklemek ve alınan sonuçlarını değerlendirmek için, ControlDesk arayüz yazılımlı DS1104 kontrol kartı ve kişisel bilgisayar

kullanılmıştır (Demir, 2011).

5.3.2 ASM' nin gerçek-zamanlı deneylerle doğrulanması

Bu kısımda $i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$ ve w_m durum değişkenli ASM modeli üç farklı senaryoya göre doğrulanmaktadır. Bu senaryolarda ASM modeline, sinüsoidal beslemeler yerine daha gerçekçi doğrulama için, alternatif akım sürücüsü üzerinden darbe genişlik modülasyonlu anahtarlamalarla elde edilmiş gerilimler, uygulanmaktadır.

5.3.2.1 Senaryo I: yüksek hızda stator akım bileşenleri ve hız değerlerinin karşılaştırılması

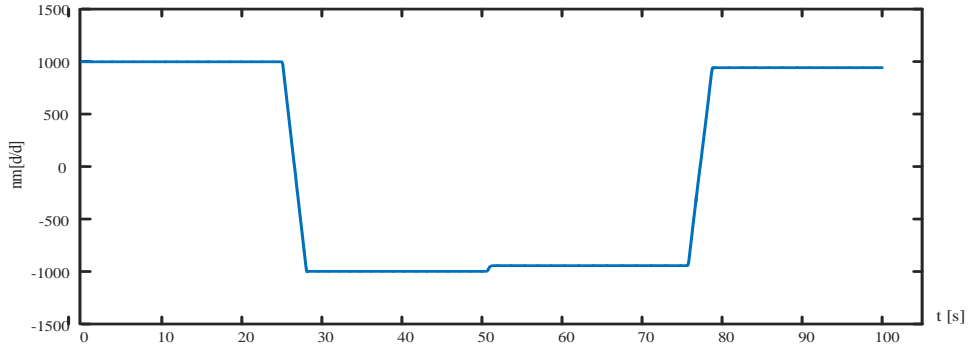
Senaryo I' de eniyileme sonucu elde edilen parametreler Şekil 5.12'de gösterildiği gibi

- Model 1: Akım Hataları
- Model 2: Hız Hataları
- Model 3: ÇA-GA Akım Hataları
- Model 4: ÇA-GA Hız Hataları
- Model 5: ÇA-GA Euclid Noktası Hataları

Beş farklı ASM modelinden elde edilen elektriksel ve mekanik parametreler yerlerine konulmuştur.

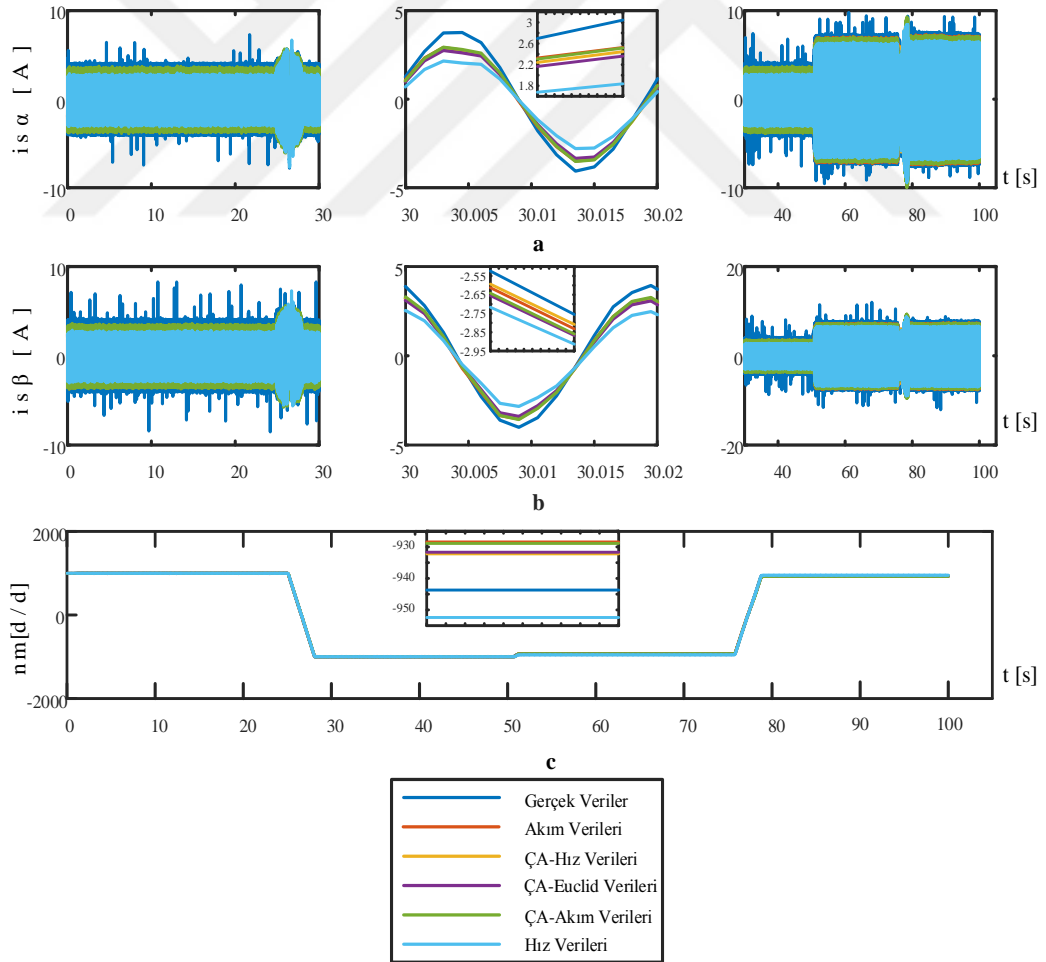
Bu senaryoda öncelikle motor yüksek hızda test edilmeye başlanmış, test süresinin %25 tamamlandıktan sonra motor ters yönde sürülmüş, test süresinin %50'sinden sonra motor 20 N.m yük momenti ile daha sonra %75'inde motor yüklü halde tekrar yön

değiştirilerek test edilmiştir. Şekil 5.14'deki Senaryo I' de gerçekleştirilen motor sürme işlemleri gösterilmektedir.



Şekil 5.14. Senaryo I motor sürme işlemleri

Sistem Senaryo I' e göre test edildiğinde elde edilen sonuçlar Şekil 5.15' de verilmiştir.



Şekil 5.15. Senaryo I test sonuçları; Stator akımının α -bileşeni ($i_{s\alpha}$) (a) , Stator akımının β -bileşeni ($i_{s\beta}$) (b) ve Rotor hızı değişimleri (c)

Çizelge 5.13. Senaryo I test sonucunda elde edilen akım hata değerleri

Model	Hata Değeri
Model 1: Akım Hataları	0.5024
Model 4: ÇA-GA Hız Hataları	0.6051
Model 3: ÇA-GA Akım Hataları	0.6294
Model 5: ÇA-GA Euclid Noktası Hataları	0.7926
Model 2: Hız Hataları	1.9796

Senaryo I test sonuçları Şekil 5.15’de görüldüğü ve Çizelge 5.13’de belirtilen hata değerleri ile gösterilmektedir. Test sonuçlarına göre akım bileşenlerinde, gerçek verilere en iyi yaklaşan Model 1 (Akım Hataları), daha sonra en iyi yaklaşan Modeller Model 4 (ÇA-GA Hız Hataları) ve Model 3 (ÇA-GA Akım Hataları)’dür. Daha sonra en iyi yaklaşan sonuçlar sırası ile Model 5 (ÇA-GA Euclid Noktası Hataları), Model 2 (Hız Hataları) olmuştur.

Çizelge 5.14. Senaryo I test sonucunda elde edilen hız hata değerleri

Model	Hata Değeri
Model 2: Hız Hataları	48.8892
Model 3: ÇA-GA Akım Hataları	59.5584
Model 5: ÇA-GA Euclid Noktası Hataları	72.5854
Model 4: ÇA-GA Hız Hataları	106.6642
Model 1: Akım Hataları	118.6293

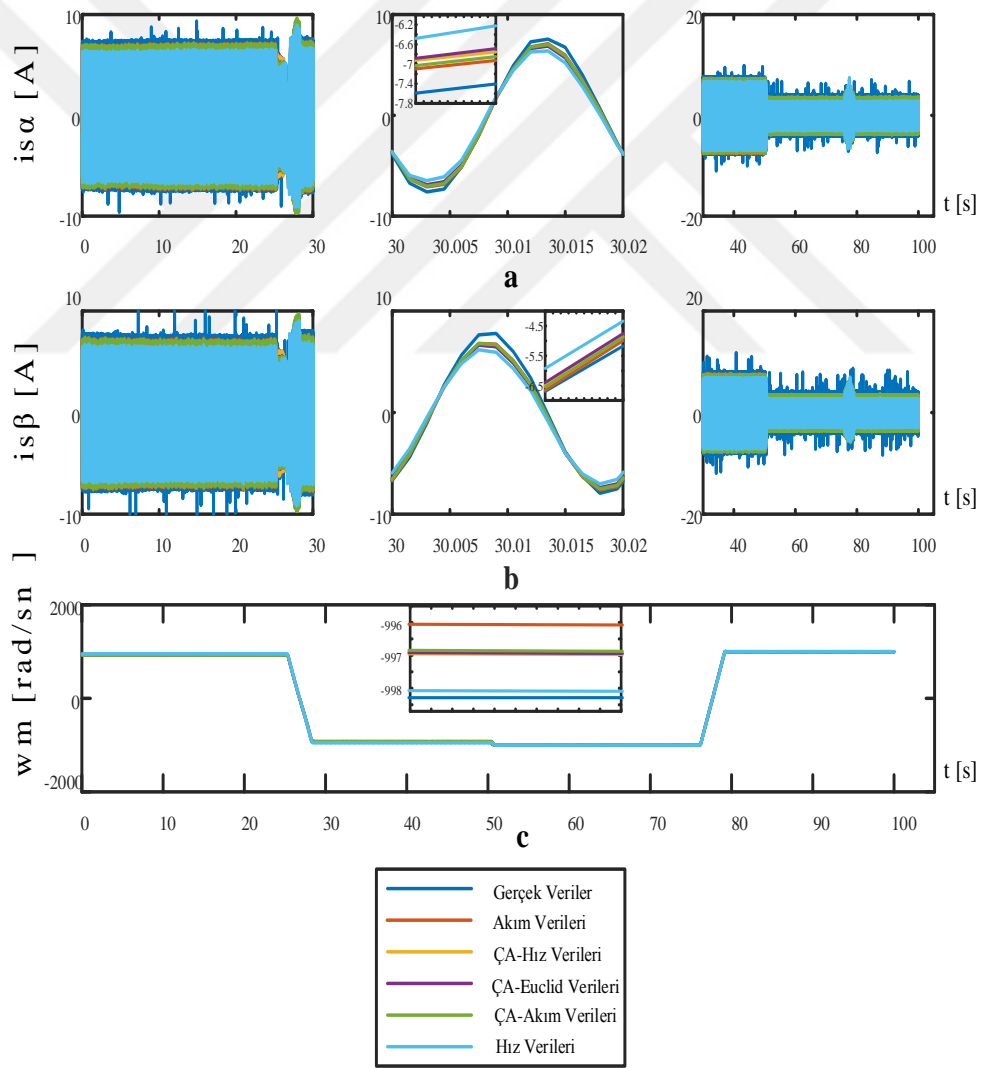
Çizelge 5.14’de verilen hız hataları incelendiğinde ise gerçek verilere en iyi yaklaşan Model 2 (Hız Hataları), daha sonra yakın değerler ile Model 3 (ÇA-GA Akım Hataları) ve Model 5 (ÇA-GA Euclid Noktası Hataları) olmuştur. Daha sonra ise sırasıyla Model 4 (ÇA-GA Hız Hataları), Model 1 (Akım Hataları) olmuştur.

Senaryo I sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde akım hatalarında en başarılı model Model 1 Akım Hataları olup, hız hatalarında en başarılı model Model 2 Hız Hataları olarak belirlenmiştir.

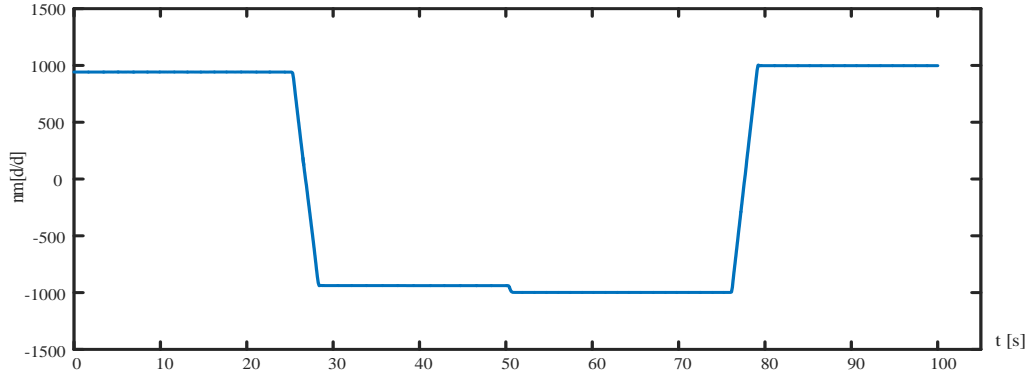
5.3.2.2 Senaryo II: yüksek hızda ve yüklü iken stator akım bileşenleri ve hız değerlerinin karşılaştırılması

Senaryo II' de ise Şekil 5.8' de gösterilen beş farklı ASM modeli motor 20 *N.m* yük momenti ile test edilmeye başlanmıştır, test süresinin %25 tamamlandıktan sonra motor ters yönde sürülmüştür, test süresinin %50'sinden sonra motora uygulanan yük kaldırılmış, daha sonra %75'in de motor yüksüz halde tekrar yön değiştirilerek test edilmiştir. Şekil 5.16'de Senaryo II' de gerçekleştirilen motor sürme işlemleri gösterilmektedir.

Sistem Senaryo II' e göre test edildiğinde elde edilen sonuçlar Şekil 5.16' da verilmiştir.



Şekil 5.16. Senaryo II test sonuçları; Stator akımının α -bileşeni ($i_{s\alpha}$) (a) , Stator akımının β -bileşeni ($i_{s\beta}$) (b) ve Rotor hızı değişimleri (c)



Şekil 5.17. Senaryo II motor sürme işlemleri

Çizelge 5.15. Senaryo II test sonucunda elde edilen akım hata değerleri

Model	Hata Değeri
Model 1: Akım Hataları	0.4963
Model 4: ÇA-GA Hız Hataları	0.5997
Model 3: ÇA-GA Akım Hataları	0.6267
Model 5: ÇA-GA Euclid Noktası Hataları	0.7865
Model 2: Hız Hataları	1.9661

Senaryo II test sonuçları incelendiğinde Şekil 5.16' da ve Çizelge 5.15'de görüldüğü üzere akım bileşenlerinde, gerçek verilere en iyi yaklaşan Model 1 (Akım Hataları), daha sonra en iyi yaklaşan Model 4 (ÇA-GA Hız Hataları)' dür. Daha sonra en iyi yaklaşan sonuçlar sırası ile Model 3 (ÇA-GA Akım Hataları), Model 5 (ÇA-GA Euclid Noktası Hataları), ve Model 2 (Hız Hataları) olmuştur.

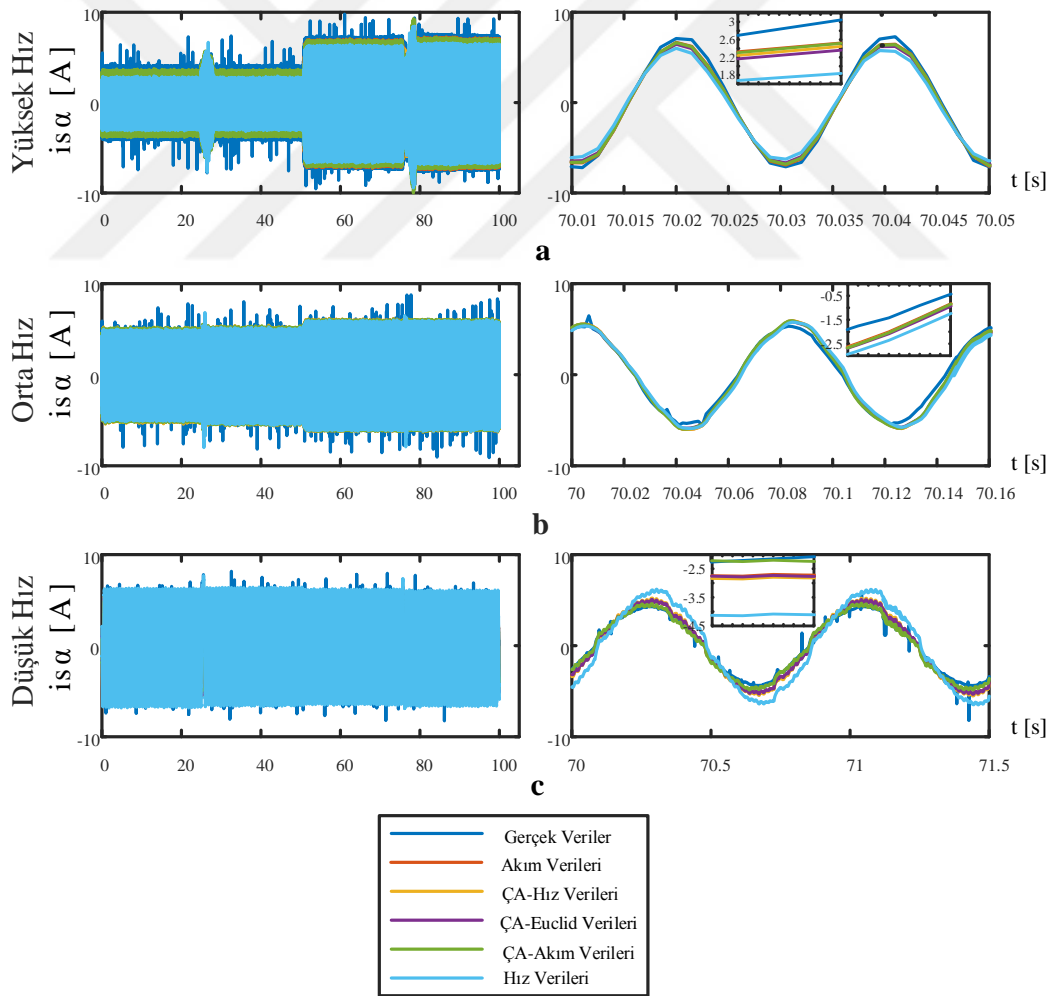
Çizelge 5.16. Senaryo II test sonucunda elde edilen hız hata değerleri

Model	Hata Değeri
Model 2: Hız Hataları	59.5599
Model 3: ÇA-GA Akım Hataları	59.5659
Model 5: ÇA-GA Euclid Noktası Hataları	73.2244
Model 1: Akım Hataları	109.4631
Model 4: ÇA-GA Hız Hataları	122.4407

Şekil 5.16' da ve Çizelge 5.16'de gösterilen hız hataları incelendiğinde ise gerçek verilere en iyi yaklaşan Model 2 (Hız Hataları) daha sonra, Model 3 (ÇA-GA Akım Hataları) olmuştur. Daha sonra ise sırasıyla Model 5 (ÇA-GA Euclid Noktası Hataları) Model 1 (Akım Hataları), Model 4 (ÇA-GA Hız Hataları) olmuştur.

5.3.2.3 Senaryo III: yüksek, orta, düşük hızlarda stator akım bileşenleri ve hız değerlerinin karşılaştırılması

Senaryo III'de ise sistem farklı hızlarda kararlılığı test edilmiştir. Şekil 5.12'de gösterilen beş farklı ASM modeli birebir aynı sürelerde yük ve yön değişimi işlemleri gerçekleştirilmiş fakat motor farklı hızlarda sürülerek sistemin aynı kararlılığı gösterip göstermediği test edilmiştir.



Şekil 5.18. Senaryo III $i_{s\alpha}$ test sonuçları; Stator akımının α -bileşeni ($i_{s\alpha}$) (a) , Stator akımının β -bileşeni ($i_{s\beta}$) (b) ve Rotor hızı değişimleri (c)

Şekil 5.18 ve Şekil 5.19’da farklı hızlarda motor modellerinin akım ve hız değişkenlerinin, karşılaştırılmalarının yapıldığı test sonuçları gösterilmektedir.

Yüksek hızda sırası ile gerçek verilere en yakın sonuçları Çizelge 5.17’de verilmiş olan hata değerleri incelendiğinde sırası ile Model 1, Model 4, Model 3, Model 5 ve Model 2 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 5.17. Senaryo III testi yüksek hız test sonucunda elde edilen akım hata değerleri

Model	Hata Değeri
Model 1: Akım Hataları	0.5024
Model 4: ÇA-GA Hız Hataları	0.6051
Model 3: ÇA-GA Akım Hataları	0.6294
Model 5: ÇA-GA Euclid Noktası Hataları	0.7926
Model 2: Hız Hataları	1.9796

Orta hızda sırası ile gerçek verilere en yakın sonuçları Çizelge 5.18’de de verilmiş olan hata değerleri incelendiğinde sırası ile Model 5, Model 4, Model 1, Model 3 ve Model 2 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 5.18. Senaryo III testi orta hız sonucunda elde edilen akım hata değerleri

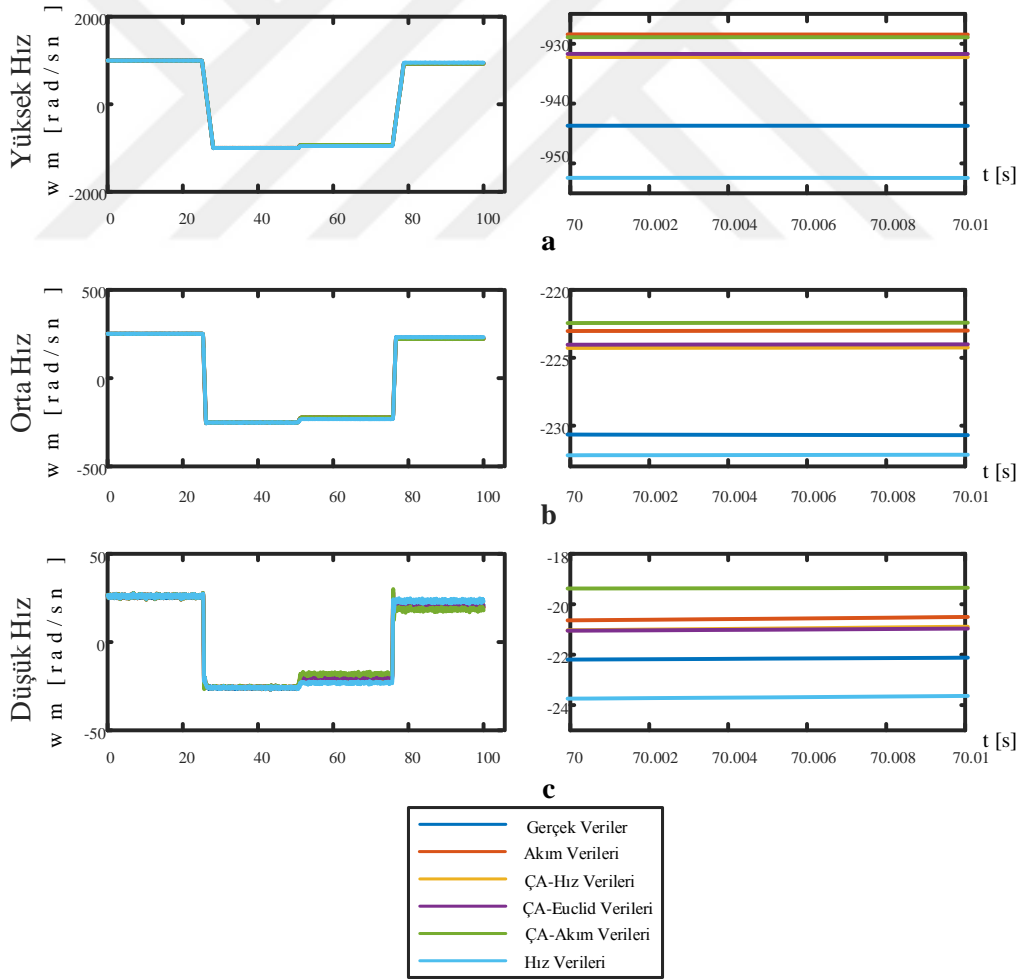
Model	Hata Değeri
Model 5: ÇA-GA Euclid Noktası Hataları	0.4804
Model 4: ÇA-GA Hız Hataları	0.5216
Model 1: Akım Hataları	0.5751
Model 3: ÇA-GA Akım Hataları	0.6065
Model 2: Hız Hataları	0.7402

Düşük hızda sırası ile gerçek verilere en yakın sonuçları Çizelge 5.19’da verilmiş olan hata değerleri incelendiğinde sırası ile Model 4, Model 5, Model 1, Model 3 ve Model 2 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 5.19. Senaryo III testi düşük hız sonucunda elde edilen akım hata değerleri

Model	Hata Değeri
Model 4: ÇA-GA Hız Hataları	0.2977
Model 5: ÇA-GA Euclid Noktası Hataları	0.6406
Model 1: Akım Hataları	0.6777
Model 3: ÇA-GA Akım Hataları	0.8472
Model 2: Hız Hataları	4.0066

Şekil 5.19' da ise yüksek, orta ve düşük hızlarda ASM hız değerleri gösterilmektedir. Senaryo III ile ilgili sonuçlar incelendiğinde yüksek hızda sırası ile elde edilen hız hata değerleri Çizelge 5.20'de gösterilmektedir.



Şekil 5.19. Senaryo III n_m test sonuçları; yüksek hız testleri (a), orta hız testleri (b) ve düşük hız testleri (c)

Yüksek hızda sırası ile gerçek verilere en yakın sonuçlar Çizelge 5.20’de de verilmiş olan hata değerleri incelendiğinde sırası ile Model 2, Model 3, Model 5, Model 1 ve Model 1 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 5.20. Senaryo III testi yüksek hız sonucunda elde edilen hız hata değerleri

Model	Hata Değeri
Model 2: Hız Hataları	48.8892
Model 3: ÇA-GA Akım Hataları	59.5584
Model 5: ÇA-GA Euclid Noktası Hataları	72.5854
Model 4: ÇA-GA Hız Hataları	106.6642
Model 1: Akım Hataları	118.6293

Orta hızda sırası ile gerçek verilere en yakın sonuçlar Çizelge 5.21’de de verilmiş olan hata değerleri incelendiğinde sırası ile Model 2, Model 3, Model 5, Model 1 ve Model 4 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 5.21. Senaryo III testi orta hız sonucunda elde edilen hız hata değerleri

Model	Hata Değeri
Model 2: Hız Hataları	2.7132
Model 3: ÇA-GA Akım Hataları	20.2162
Model 5: ÇA-GA Euclid Noktası Hataları	22.6012
Model 1: Akım Hataları	28.7734
Model 4: ÇA-GA Hız Hataları	36.1082

Düşük hızda sırası ile gerçek verilere en yakın sonuçlar Çizelge 5.22’de verilmiş olan hata değerleri incelendiğinde sırası ile Model 3, Model 5, Model 1, Model 2 ve Model 4 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 5.22. Senaryo III testi düşük hız sonucunda elde edilen hız hata değerleri

Model	Hata Değeri
Model 3: ÇA-GA Akım Hataları	1.0679
Model 5: ÇA-GA Euclid Noktası Hataları	1.2582
Model 1: Akım Hataları	1.7102
Model 2: Hız Hataları	1.8183
Model 4: ÇA-GA Hız Hataları	5.5121

Şeklinde sonuçlanmıştır. Senaryo III işlemleri sonuçlandırıldığında ASM modellerinden akım parametreleri karşılaştırıldığında başarı ortalamalarına göre, Model 4 (ÇA-GA Hız Hataları) olduğu, hız ifadesinin de ise en gerçek verilere yakın sonuçlara ulaşan modelin ise Model 2 (Hız Hataları) olduğu belirlenmiştir.

BÖLÜM VI

SONUÇLAR

Bu tez çalışması kapsamında geleneksel yöntemler ile ASM parametrelerini belirlemede karşılaşılan problemleri gidermek ve daha az maliyet ile daha kolay yoldan ASM parametrelerini belirlemek için çeşitli eniyileme işlemleri gerçekleştirilmiştir. En iyi sonucu bulmak için üç farklı algoritma test edilmiştir. Test işlemleri sırasında gerçek verilere en yakın eniyilemeyi hangi algoritmanın daha başarılı şekilde elde ettiği belirlenmiştir.

Bölüm IV' de Matlab® simulink ortamında ASM modeli oluşturulmuş ve farklı nüfus ve iterasyon sayılarında motor modeli;

1. Akım Hataları (GA)
2. Hız Hataları (GA)
3. Akım ve Hız Hataları (ÇA-GA)

kullanılarak test edilmiştir.

Benzetim sonuçları incelendiğinde elektriksel parametreleri belirlemede Akım hataları ile yapılan eniyileme yönteminin daha başarılı olduğu, mekaniksel parametreleri belirlemede hız hataları kullanılarak yapılan eniyileme yönteminin daha iyi olduğu belirlenmiştir.

Bölüm V' de ise ilk olarak geleneksel yöntemler ile motor modeli parametreleri belirlenmiş ve daha sonra tez çalışmasında önerilen eniyileme işlemleri test edilmiştir. Eniyileme yöntemleri test edilirken, birinci aşamada yapılan testler sonucu en uygun Popülasyon Büyüklüğü, Mutasyon ve Çaprazlama katsayıları belirlenerek algoritmanın en uygun sonuca ulaşması sağlanmıştır.

Daha sonra, ikinci aşamada ASM modeli gerçek zamanlı testleri gerçekleştirilerek elde edilen akım ve hız verileri kaydedilip; bu veriler ile Matlab® simulink ortamında eniyileme algoritmaları çalıştırılmıştır.

Eniyileme işlemleri öncelikle akım hataları ile GA, daha sonra hız hataları ile GA ve en son olarak da hem akım hem hız hataları ile ÇA-GA kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar motor modelinde yerine konularak gerçek veriler ile doğrulamaları yapılmıştır.

Akım hataları kullanılan eniyileme işlemi sonuçları incelendiğinde, eniyileme sonucunun gerçek akım verilerine yakınsamada başarılı olduğu fakat hız verilerinde daha hatalı sonuçların elde edildiği gözlemlenmiştir. Böylece akım hataları kullanılarak yapılan eniyileme işleminin elektriksel parametrelerini belirlemede başarılı olmasına rağmen mekaniksel parametrelerini belirlemede yeterli olmadığı belirlenmiştir.

Hız hataları kullanılan eniyileme işlemi sonuçları incelendiğinde ise eniyileme sonucunun gerçek hız verilerine yakınsamada başarılı ama akım verilerinde hatalı sonuçlara yol açtığı anlaşılmıştır. Bu eniyileme algoritmasının da ASM'nin mekaniksel parametrelerini belirlemede başarılı, elektriksel parametrelerini belirlemede ise yeterli olmadığı saptanmıştır.

Son olarak ÇA-GA ile yapılan eniyileme işlemleri üç alt bölümde gerçekleştirilmiştir. ÇA-GA ile gerçekleştirilen en başarılı eniyileme işlemi sonrası hata değerlerinden Şekil 5.7'de gösterildiği gibi üç farklı nokta (Akım hatasını en düşük olduğu nokta, Hız hatasını en düşük olduğu nokta, Euclid minimum mesafe noktası) belirlenerek bu noktalarda elde edilen ASM parametreleri motor modeline uygulanmıştır. ÇA-GA Akım ve Euclid minimum mesafe noktasından alınan parametrelerde, akım hataları değerlerinin hız hatalarına göre, daha başarılı değerler elde ettiği gözlenmiştir. ÇA-GA Hız hatalarının alındığı noktadaki parametrelerin akım ve hız gerçek verileri ile kıyaslandığında ise, hız hatalarının daha düşük bir değer ile diğer ÇA algoritmalarından daha başarılı olduğu gözlenmiştir.

Gerçek zamanlı ikinci aşamadaki testlerde ise ilk olarak eniyilemelerin bulunduğu parametre değerleri beş farklı modelde (Akım Hataları, Hız Hataları, ÇA-GA Akım Hataları, ÇA-GA Hız Hataları, ÇA-GA Euclid Minimum Mesafe Hata) yerine konularak, Şekil 5.8'de gösterilen Matlab® simulink dosyası oluşturulmuştur. ControlDesk isimli arayüz yazılımı ile testler gerçekleştirilerek hangi algoritmanın daha başarılı olduğu belirlenmiştir.

Son olarak ASM modeli ve beş farklı model parametreleri, üç farklı senaryoya göre gerçek-zamanlı deneylerle doğrulanmıştır. ControlDesk isimli arayüz yazılımı ile, Matlab® simulink'te oluşturulmuş algoritmaların DS1104 için gerekli gerçek-zamanlı kodları hızlı bir şekilde üretilmekte, algoritmanın değişkenleri gerçek-zamanlı olarak izlenebilmekte ve izlenen bu değişkenler “.mat” ya da “.xls” gibi farklı formatlarda kayıt edilebilmektedir. Kayıt edilen bu veriler incelendiğinde, ÇA-GA ve GA ile yapılan test işlemlerinin akım verileri incelendiğinde Model 1 (Akım Hataları) daha başarılı fakat mekaniksel parametrelerini belirlemede başarısız, hız verilerinde ise Model 2 (Hız Hataları) daha başarılı fakat elektriksel parametrelerini belirlemede başarısız olduğu gözlenmiştir.

Gerçek akım verileri ile ÇA algoritmaları arasında karşılaştırma yapıldığında sırası ile ÇA-GA Hız, ÇA-GA Akım ve ÇA-GA Euclid noktalarından belirlenen parametrelerin başarılı olduğu gözlenmiştir. Gerçek hız verileri ile ÇA algoritmaları arasında karşılaştırma yapıldığında ise, ÇA-GA Akım, ÇA-GA Euclid ve ÇA-GA hız başarılı olduğu gözlenmiştir.

Sonuç olarak tez çalışması kapsamında önerilen ÇA-GA ile hem elektriksel hem de mekanik parametrelerin birlikte belirlemede, diğer tek amaçlı GA algoritmalarına göre daha başarılı olduğu yapılan testler ile ortaya konulmuştur.

KAYNAKLAR

Abu-Siada A., Azab M. and Mossad M., “A Novel Evolutionary Technique to Estimate Induction Machine Parameters from Name Plate Data”, *XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Lausanne, Switzerland, 4-7 Sept. 2016.

Abdou L., Alaoui L. C., Chaouch S. and Drid S., “Optimized Torque Control via Backstepping Using Genetic Algorithm of Induction Motor”, *Online ISSN 1848-3380*, Print ISSN 0005-1144 *ATKAF 57(2)*, 379–386, 2016

Acarney P. P., Ethny S. A., Giaouris D. and Zahawi B., “ Induction Machine Fault Identification using Particle Swarm Algorithms”, *Power Electronics, Drives and Energy Systems*, 12-15 Dec. 2006.

Akhavan A., Mohammadi H. Z., “Parameter Estimation of Three-Phase Induction Motor Using Hybrid of Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization”, *Journal of Engineering* Volume 2014 ,Article ID 148204, 2014.

Bahgat A., Elshamy W. and Emara H.M. “ Parameter Identification of Induction Motor Using Modified Particle Swarm Optimization Algorithm”, *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 30 June-2 July 2008.

Barut M. “Sincap Kafesli Asenkron Motorların Algılayıcısız Yüksek Başarılı Kontrolüne Yönelik Genişletilmiş Kalman Filtresi Tasarım Ve Uygulaması”, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 2005

Beasley, D., Bull, D.R., and Martin, R.R., “An Overview of Genetic Algorithms Part 1”, *Fundamentals University Computing UK*, Vol.15(2), pp. 58-69, 1993a.

Beasley, D., Bull, D.R., and Martin, R.R., “An Overview of Genetic Algorithms Part 2”, *Research Topics .University Computing UK*, Vol.15(4), pp. 170-181, 1993b.

Bingul, Z., Sekmen, A.S. And Zein, S., “An Application of Multi-Dimensional Optimization Problems Using Genetic Algorithms”, *Proceedings of the IASTED International Conference Intelligent Systems and Control Santa Barbara, CA*, 1999.

Bingul, Z., Sekmen, A.S. And Zein, S., “Genetic Algorithms Applied to Real Time Multi-objective Optimization Problems”, *IEEE SoutheastCon Conference, Nashville, TN, USA*, 2000.

Bouchard B., Bouzouane A., Gaboury S. and Maitre J., “An Effective Identification of the Induction Machine Parameters using a Classic Genetic Algorithm NSGA II and θ -NSGA III”, *6th International Conference on Information, Intelligence, Systems and Applications (IISA)* , Corfu, Greece ,6-8 July 2015.

Bouchard B., Bouzouane A., Gaboury S. and Maitre J., “9 Parameters Estimation of an Extended Induction Machine Model Using Genetic Algorithms”, *International Conference on Electrical and Electronics Engineering*”, 26-28 Nov. 2015.

Cheng, R., Gen, M., and Oren, S.S., “Network Design Techniques Using Adapted Genetic Algorithms”, *Advances in Engineering Software*, Vol. 32, pp. 731-744, 2001.

Cheng Y., Lee W-J., Huang S.H. and Adams J., “A Hybrid Method for the Dynamic Parameter Identification of generators via On-line Measurements”, *IEEE Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference*, 9-13 May 2010.

Çanakoğlu A. İ., Temurtaş H., Turan M. ve Yetgin A. G., “Induction motor parameter estimation using metaheuristic methods” ,*Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences* ,22(5):1177-1192, January 2014.

Delgado C., Santana A. and Trejo E., “Edge optimisation for parameter identification of induction motors”, *IET Electric Power Applications*, 11th August 2010.

Demir R. “Asenkron Motorlar İçin Genişletilmiş Kalman Filtresitabanlı Hız-Algılayıcısız Kestirim Uygulamaları”, Yüksek Lisans Tezi, *Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Niğde, 2011

Duman S., Dursun M., Güvenç U., Poyraz G. ve Saraçoğlu B., “Biyocoğrafya Tabanlı Optimizasyon Metodu Kullanılarak Asenkron Motor Parametre Tahmini”, *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi* Cilt 2, Sayı 1, 46-54, 2013.

Goldberg D.E., “Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning”, *Addison-Wesley Publishing Company*, Inc.ISBN:0-201-15767-5, 1989.

Haque T., Nolan R. and Pillay P.,” Application of Genetic Algorithms to Motor Parameter Determination for Transient Torque Calculations”, *IEEE Transactions on Industry Applications* ,Volume: 33, Issue: 5, Sep/Oct 1997.

Holland, J.H., “Adaption in Natural and Artificial Systems”, *University of Michigan Pres*, Ann Arbor, MI, 1975.

Huang K. S., Turner D. R. and Wu Q. H., “Effective Identification of Induction Motor Parameters Based on Fewer Measurements”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Volume: 17, Issue: 1, 07 August 2002.

Huynh D.C. and Dunnigan M.W., “Parameter Estimation of an Induction Machine using a Dynamic Particle Swarm Optimization Algorithm”, *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*”, 4-7 July 2010.

IEEE Standard-112, “IEEE standard test procedure for polyphase induction motors and generators”, *The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc*, New York, 1996.

Kim J. W., and Kim S. W., “Parameter Identification of Induction Motors Using Dynamic Encoding Algorithm for Searches (DEAS)”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, VOL. 20, No. 1, March 2005.

Kwong, S., Man, K.F. and Tang, K.S. “Genetic Algorithms: Concepts and Applications”. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 43, No. 5, pp. 519-533,1996.

Langdon, W. B., Mcphee, N. F. and Polı, R., “A Field Guide to Genetic Programming”, *University of Minnesota Morris Digital Well*, 2008.

Li H., Su Y., Hong M. And Long F., “A Hybrid Method for Online Rotor Parameters Estimation, ” *International Conference on Intelligent Control and Information Processing (ICICIP)*, 9-11 June 2013.

Mutluer M., Asenkron Motor Elektriksel Eşdeğer Devre parametrelerinin Hibrit GA yöntemiyle belirlenmesi , Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 2007.

Shi K.L., “Intelligent control for an induction motor,”, PhD Thesis, *PhD Hong Kong Polytechnic University*, 286, China, 2001

EK A

```
function out = asmmulti(x)
assignin('base','x1',x(1));
assignin('base','x2',x(2));
assignin('base','x3',x(3));
assignin('base','x4',x(4));
assignin('base','x5',x(5));
assignin('base','x6',x(6));
assignin('base','x7',x(7));

simOut = sim('Multiobj','StopTime','2'); %Multiobj simule edilir.
yout = simOut.get('yout'); %Simulasyon sonucu yout değişkenine alınır.

%% Akım hataları kullanılarak eniyileme
n = size(yout,1);
%Hata1 = yout(:,1) - yout(:,2);
%Hata2 = yout(:,3) - yout(:,4);
%out = (Hata1'* Hata1 + Hata2'* Hata2)/n;

%% Hız hataları kullanılarak eniyileme
n = size(yout,1);
%Hata = yout(:,5) - yout(:,6);
%out = (Hata'* Hata)/n;

%% Akım + Hız hataları kullanılarak eniyileme
n = size(yout,1);
Hata1 = yout(:,1) - yout(:,2);
Hata2 = yout(:,3) - yout(:,4);
out(1) = (Hata 1'* Hata 1 + Hata 2'* Hata2)/n;

Hata3 = yout(:,5) - yout(:,6);
out(2) = (Hata3'* Hata3)/n;

return
```

EK B

```
double Lr, Ls, Lsigma, f1, f2, f3, f4, f5;

Lr = In[5] + In[6];
Ls = In[5] + In[7];
Lsigma = Ls - (In[5]*In[5])/Lr;

f1 = (1 - (In[3]/Lsigma +
In[5]*In[5]*In[4]/(Lsigma*Lr*Lr))*T[0])*xD[0] +
In[5]*In[4]*T[0]*xD[2]/(Lsigma*Lr*Lr) +
In[5]*Pp[0]*xD[4]*T[0]*xD[3]/(Lsigma*Lr) + T[0]*In[0]/Lsigma;

f2 = (1 - (In[3]/Lsigma +
In[5]*In[5]*In[4]/(Lsigma*Lr*Lr))*T[0])*xD[1] +
In[5]*In[4]*T[0]*xD[3]/(Lsigma*Lr*Lr) -
In[5]*Pp[0]*xD[4]*T[0]*xD[2]/(Lsigma*Lr) + T[0]*In[1]/Lsigma;

f3 = In[4]*In[5]*T[0]*xD[0]/Lr + (1 - In[4]*T[0]/Lr)*xD[2] -
Pp[0]*xD[4]*T[0]*xD[3];

f4 = In[4]*In[5]*T[0]*xD[1]/Lr + (1 - In[4]*T[0]/Lr)*xD[3] +
Pp[0]*xD[4]*T[0]*xD[2];

f5 = (3*Pp[0]*In[5]/(2*In[8]*Lr))*(xD[2]*xD[1] - xD[3]*xD[0])*T[0] +
(1 - In[9]*T[0]/In[8])*xD[4] - In[2]*T[0]/In[8];

xD[0] = f1; xD[1] = f2; xD[2] = f3; xD[3] = f4; xD[4] = f5;
```

EK C

```
for i =1:10      %For döngüsü ile Generate Code 20 kez tekrarlandı.
clear;clc;
run m_file;     %Generate Code da kullanılan m_file dosyası çağırıldı.
load reall;     %reall isimli mat dosyası çağırıldı.

PopulationSize_Data= 50; %Eniyileme popülasyon sayısı
Generations_Data = 200; %Eniyileme jenerasyon sayısı
nvars = 7;      %Eniyilemede tahmin edilecek parametre sayısı
lb = [1 1 0.1 0.001 0.001 1e-3 1e-4]; %Parametrelerin alt sınırları
ub = [4 4 0.4 0.1 0.1 1e-1 1e-2];   %Parametrelerin üst sınırları

% Start with the default options
options = gaoptimset;
% Modify options setting
options = gaoptimset(options,'Generations', Generations_Data);
options = gaoptimset(options,'CreationFcn', @gacreationuniform);
options = gaoptimset(options,'SelectionFcn', @selectionroulette);
options = gaoptimset(options,'CrossoverFcn', @crossoversinglepoint);
options = gaoptimset(options,'MutationFcn', @mutationadaptfeasible);
options = gaoptimset(options,'Display', 'iter');
options = gaoptimset(options,'PlotFcns', { @gaplotbestf
@gaplotbestindiv });
[x,fval,exitflag,output,population,score] = ...
ga(@call_model,nvars,[],[],[],[],lb,ub,[],[],options);

a = round(50*rand(1));
save(sprintf('AkimData%02d',a));

%Döngü her tamamlandığında Workspacedeki sonuçların kaydedilmesini
sağlar. Sprintf komutu ile AkimData dosyasını yanına random sayı
eklenerek her döngü sonucu elde edilen datalar ayrı ayrı kaydedildi.

end
```

ÖZ GEÇMİŞ

Seda Kayalı 13.10.1993 tarihinde Kayseri’de doğdu. İlk orta ve lise öğretimini Kayseri’de tamamladı. 2011 yılında girdiği Niğde Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü’nden Haziran 2016’da mezun oldu. 2016-2017 Öğretim yılında Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesinde yüksek lisans öğrenimine başladı. 2017-2018 yılları arasında Kayseri Envest yazılım şirketinde donanım mühendisi olarak çalıştı. 2018-2019 yılında Kayseri Mete Elektrik Elektronik Otomasyon Sistemleri isimli şirkette yazılım mühendisi olarak başladı halen aynı şirkette çalışmakta ve öğrenimine devam etmektedir. Bilim dalındaki ilgi alanı elektrik makinaları kontrol ve yazılımlarıdır.

