

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DOKTORA TEZİ**

**E-ÇEKİRDEK ÇAPRAZ AKI MAKİNASININ YAPAY SINIR AĞI  
TABANLI MODELLENMESİ VE DENEYSEL ROTOR  
POZİSYONU KESTİRİMİ**

**ÇİĞDEM GÜNDOĞAN TÜRKER**

**KOCAELİ 2013**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DOKTORA TEZİ**

**E-ÇEKİRDEK ÇAPRAZ AKI MAKİNASININ YAPAY SİNİR AĞI**  
**TABANLI MODELLENMESİ VE DENEYSEL ROTOR**  
**POZİSYONU KESTİRİMİ**

**ÇİĞDEM GÜNDOĞAN TÜRKER**

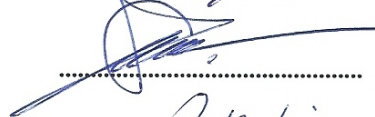

**Prof. Dr. Feriha ERFAN KUYUMCU**  
Danışman, Kocaeli Üniv.

**Prof.Dr. Bekir ÇAKIR**  
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

**Prof.Dr. Hakan TEMELTAŞ**  
Jüri Üyesi, İstanbul Teknik Üniv.

**Prof.Dr. Oruç BİLGİÇ**  
Jüri Üyesi, İstanbul Kültür Üniv.

**Prof.Dr. Nurettin ABUT**  
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.



**Tezin Savunulduğu Tarih: 20.06.2013**

## **ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR**

Bu tez çalışması süresince fikirleriyle, sabır ve anlayışıyla bana yol gösteren değerli bir danışman, sıkıntılı zamanlarımda yanımda olan bir dost ve çok özel bir insan olan sevgili hocam Prof.Dr. Feriha ERFAN KUYUMCU'ya teşekkür ve şükranlarımı sunarım.

Tez rapor dönemlerimde değerli yorumları ve fikirleriyle katkıda bulunan sayın hocalarım Prof.Dr. Hakan TEMELTAŞ ve Prof.Dr. Bekir ÇAKIR'a teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Tez çalışmamda kullandığım E-Çekirdek Çapraz Akı Makinası'nın patent sahibi olan ve Danimarka'da çalışmalarına danışmanlık yapan Aalborg Üniversite'sinden sayın hocam Peter Omand RASMUSSEN'e samimiyeti ve yardımseverliği için teşekkürü bir borç bilirim. Danimarka'da bulunduğum dönemde bana maddi destek sağlayan, çalışmalarına Türkiye'de devam edebilmem için makineyi hibe eden 'ePower Technology' firmasına ve teknik destek istediğim her zaman sorularımı yanıtız bırakmayan sayın Anders Headeger PEDERSEN'e de teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamla ilgili 109E299 no'lu projemizi destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na teşekkür ederim.

Dijital Sinyal İşlemcilerle ilgili yardımlarını aldığım Mekatronik Mühendisi Serkan AYDIN'a ve kendilerine ait olan DSpace 1104 işlemcisini deneysel çalışmalarım süresince kullanmamı sağlayan Arş.Gör.Ersin YOLAÇAN'a yardımlarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Doktora yaptığım süreçte yanımda olan ve yardımlarını hiç esirgemeyen değerli arkadaşlarım Yrd.Doç.Dr.Mehlika ŞENGÜL'e, Yrd.Doç.Dr.M.Aytaç ÇINAR'a, canım dostum Yrd.Doç.Dr. Gülşen AYDIN KESKİN'e, sevgili kardeşim Yrd.Doç.Dr. N.TÜRKER TOKAN'a, iş arkadaşlarıma ve hocalarıma çok teşekkür ederim.

Bu zor süreç boyunca sabır ve hoşgörü ile bana sürekli destek olan sevgili eşim Turhan TÜRKER'e, moral kaynağım ve her şeyim olan çocuklarım Eda ve Tuğçe'ye sonsuz sevgi ve minnetlerimi sunarım. İyi kötü her anımda yanımda olacaklarını bildiğim sevgili kardeşlerime, Havva annem ve Dursun babama, nazımı çeken, her zaman yardımına koşan canım annem Kadriye GÜNDOĞAN'a, en büyük destekçim canım babam Hasan GÜNDOĞAN'a sonsuz sevgilerimi sunarım.

Haziran - 2013

Çiğdem GÜNDOĞAN TÜRKER

## İÇİNDEKİLER

|  |      |
|--|------|
| ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....   | i    |
| İÇİNDEKİLER .....  | ii   |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....   | iv   |
| TABLolar DİZİNİ .....  | vii  |
| SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR.....  | viii |
| ÖZET .....   | x    |
| ABSTRACT.....  | xi   |
| GİRİŞ .....  | 1    |
| 1. ELEKTRİK MAKİNALARINDA AKI TOPOLOJİLERİ .....   | 5    |
| 1.1. Radyal Akılı Makinalar .....  | 5    |
| 1.2. Eksenel Akılı Makinalar.....  | 6    |
| 1.3. Çapraz Akılı Makinalar .....  | 8    |
| 1.4. Literatür Taraması.....   | 9    |
| 1.4.1. Çapraz akı makinalarının tarihsel gelişimi .....  | 10   |
| 1.4.2. Elektrik makinalarında pozisyon tahmin yöntemleri.....  | 15   |
| 2. E-ÇEKİRDEK ÇAPRAZ AKI MAKİNASI VE MODELİ .....  | 17   |
| 2.1. E-Çekirdek Çapraz Akı Makinasının Çalışma Şekli.....  | 20   |
| 2.2. E-Çekirdek Çapraz Akı Makinasının Manyetik Karakteristiklerinin Elde Edilmesi .....                       | 23   |
| 2.2.1. Deneysel ölçüm metodu ile manyetik karakteristiklerin elde edilmesi .....                               | 24   |
| 2.2.2. Lineer olmayan endüktans modelinin analitik olarak elde edilmesi .....                                  | 29   |
| 2.3. Yapay Sinir Ağları (YSA) ve ETFM'nin Manyetik Karakteristiklerinin Elde Edilmesi .....                    | 32   |
| 2.3.1. YSA yapısı.....   | 32   |
| 2.3.2. YSA modellerinin tasarımı .....   | 38   |
| 2.3.3. YSA uygulama modelleri .....  | 39   |
| 2.4. Destek Vektör Regresyon Makineleri (DVRM) Yöntemi ile Manyetik Karakteristiklerin Elde Edilmesi.....      | 42   |
| 2.4.1. DVRM uygulama modelleri .....   | 45   |
| 2.5. YSA ve DVRM Modellerinin Hata Analizi.....  | 47   |
| 3. E-ÇEKİRDEK ÇAPRAZ AKI MAKİNASININ EGZERSİZ BİSİKLETİ UYGULAMASI İÇİN SİMÜLASYONU ve DENEYSEL ÇALIŞMASI..... | 50   |
| 3.1. E-Çekirdek Çapraz Akı Makinası (ETFM) Sisteminin Simülasyonu.....   | 50   |
| 3.1.1. Sürücü ve anahtarlama devresi .....   | 50   |
| 3.1.2. Akım kontrolü.....  | 52   |
| 3.1.3. ETFM'nin elektriksel devresi .....  | 54   |
| 3.2. ETFM'nin Uygulama Örneği ve Deneysel Sistem .....   | 55   |
| 3.3. ETFM Sisteminin Simülasyon ve Deneysel Sonuçlarının Karşılaştırılması .....                               | 57   |

|  |     |
|--|-----|
| 4. E-ÇEKİRDEK ÇAPRAZ AKI MAKİNASININ YAPAY SİNİR AĞLARI (YSA) GÖZLEMCİSİ İLE ROTOR POZİSYONU TAHMİNİ ..... | 68  |
| 4.1. YSA Kestirim Algoritmasının Simülasyonu .....   | 70  |
| 4.2. YSA Kestirim Algoritmasının Deneysel Sistemi .....  | 75  |
| 4.2.1 DSpace ile YSA kestirim algoritmasının uygulanması .....   | 76  |
| 4.2.2 ETFM'nin akı kestirimi .....   | 78  |
| 4.2.3. YSA algoritmasının deneysel uygulanması .....   | 81  |
| 4.3. Rotor Pozisyonu Tahmini Deney Sonuçları .....   | 83  |
| 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....  | 88  |
| KAYNAKLAR .....  | 93  |
| EKLER .....  | 101 |
| KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER .....   | 114 |
| ÖZGEÇMİŞ .....   | 115 |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| Şekil 1.1.  | Radyal akı makinaları tasarım örnekleri .....  | 5  |
| Şekil 1.2.  | Eksenel akı ve radyal akı topolojisi.....  | 6  |
| Şekil 1.3.  | Eksenel akılı makinalar tasarım örnekleri.....   | 7  |
| Şekil 1.4.  | a) Radyal akı makinasında stator laminasyonu, b) eksenel akı makinasında stator laminasyonu .....  | 7  |
| Şekil 1.5.  | a) Klasik radyal akılı elektrik makinasının, b) Çapraz akılı elektrik makinasının sargı ve kutup yapısı.....   | 8  |
| Şekil 1.6.  | Çapraz akı makinaları tasarım örnekleri .....  | 8  |
| Şekil 1.7.  | C-çekirdekli ve çift taraflı C-çekirdekli makina yapıları .....  | 10 |
| Şekil 1.8.  | Çapraz akı relüktans motorunun bir fazına ait kesiti.....  | 11 |
| Şekil 1.9.  | Statorunda E-şeklindeki çekirdek, rotorunda ise mıknatıs kutup başlarının bulunduğu bir çapraz akı makinası tasarımı.....  | 12 |
| Şekil 1.10. | a) U-şekilli stator kutup yapısı, b) pençe kutup yapısı.....   | 13 |
| Şekil 1.11. | Bir fazlı çapraz akı makinası örneği.....  | 13 |
| Şekil 1.12. | E-çekirdek çapraz akı makinası .....   | 14 |
| Şekil 2.1.  | E-Çekirdek Çapraz Akı Makinasının a) üç boyutlu görüntüsü, b) bir E-Çekirdek stator kutbu ve rotor kutbu .....   | 17 |
| Şekil 2.2.  | E-Çekirdek Çapraz Akı Makinasının stator ve rotorundan görüntüler .....  | 18 |
| Şekil 2.3.  | E-Çekirdek Çapraz Akı Makinasının stator ve rotor kutup yapıları.....  | 19 |
| Şekil 2.4.  | E-Çekirdek çapraz akı makinasının bir stator kutbu ve tek bir rotor kutbunun a) çakışık, b) çakışık olmayan pozisyonlarında manyetik akı dağılımlarına ilişkin sonlu elemanlar analizi sonuçları ..... | 21 |
| Şekil 2.5.  | Bir faz için çakışık pozisyondan çakışık olmayan pozisyona sonlu elemanlar analizi ile elde edilen manyetik akı dağılımı .....   | 22 |
| Şekil 2.6.  | E-Çekirdek Çapraz Akı Makinasının bir fazına ilişkin manyetik eşdeğer devresi .....  | 23 |
| Şekil 2.7.  | Karakteristikleri belirlemek için kullanılan test sisteminin a) blok şeması, b) gerçek sistemin görüntüsü .....  | 25 |
| Şekil 2.8.  | E-Çekirdek çapraz akı makinasının moment karakteristiği .....  | 26 |
| Şekil 2.9.  | E-Çekirdek çapraz akı makinasının akı karakteristiği .....   | 29 |
| Şekil 2.10. | a) Çakışık konumda ( $L_a(18^\circ, i)$ ), b) ara konumdaki ( $L_m(27^\circ, i)$ ) endüktans değerleri .....   | 31 |
| Şekil 2.11. | Bir faz için $0-36^\circ$ rotor pozisyonu aralığında farklı akım değerleri için endüktans değişimi.....  | 31 |
| Şekil 2.12. | Bir yapay sinir ağı hücresi.....   | 32 |
| Şekil 2.13. | Geriye yayımlı yapay sinir ağları algoritması.....   | 35 |
| Şekil 2.14. | Karakteristikleri tahmin etmek için kullanılan YSA yapısı .....  | 39 |
| Şekil 2.15. | Levenberg Marquardt Algoritması.....   | 41 |

|  |    |
|--|----|
| Şekil 2.16. Moment-Rotor konumu karakteristiğinin sabit akı değerleri için YSA ile deneysel ölçümlerinin karşılaştırılması.....  | 42 |
| Şekil 2.17. Akı karakteristiğinin YSA ile deneysel ölçümlerinin karşılaştırılması .....  | 42 |
| Şekil 2.18. Akı ve Moment tahmini için DVRM modelleri.....   | 46 |
| Şekil 2.19. Hedef ve DVRM tahmin sonuçlarının a) akı karakteristiği için karşılaştırma eğrileri.....   | 46 |
| Şekil 2.20. Hedef ve DVRM tahmin sonuçlarının moment karakteristiği için karşılaştırma eğrileri.....   | 46 |
| Şekil 3.1. E-Çekirdek çapraz akı makinası sürücü devresinin resmi .....  | 51 |
| Şekil 3.2. Makinanın bir fazı için sürücü devresi.....   | 52 |
| Şekil 3.3. E-Çekirdek çapraz akı makinasının akım kontrol modeli.....  | 53 |
| Şekil 3.4. PI kontrol blokları .....   | 54 |
| Şekil 3.5. E-Çekirdek Çapraz Akı Makinasının YSA modelleri ile simülasyonuna ilişkin bir faz elektriksel blok şeması.....  | 55 |
| Şekil 3.6. E-Çekirdek Çapraz Akı Makinasının kullanıldığı egzersiz bisikleti.....  | 55 |
| Şekil 3.7. Deneysel sistemin a) şematik gösterilimi b) gerçek sistem görüntüsü.....  | 56 |
| Şekil 3.8. Egzersiz bisikleti uygulaması için kullanılan arayüz programı .....   | 57 |
| Şekil 3.9. E-Çekirdek Çapraz Akı Makinasının generatör çalışma sisteminin kontrol yapısı .....   | 57 |
| Şekil 3.10. E-Çekirdek Çapraz Akı Makinasının ve egzersiz bisikleti uygulaması için simülasyon blokları.....   | 58 |
| Şekil 3.11. Dişli=4, seviye=7, $\omega=504.39$ d/dk değerleri için üç faza ait a) akım, b) akı, c) moment dalga şekilleri.....   | 60 |
| Şekil 3.12. Dişli=4, seviye=7, $\omega=504.39$ d/dk için, a) simülasyon, b)gerçek sistem akım ve gerilim dalga şekilleri, c) akım dalga şekillerinin karşılaştırılması .....                               | 61 |
| Şekil 3.13. Dişli=5, seviye=4, $\omega=497.08$ d/dk üç faza ait a akım, b) akı, c) moment dalga şekilleri.....   | 62 |
| Şekil 3.14. Dişli=5, seviye=4, $\omega=497.08$ d/dk, a) simülasyon, b) gerçek sistem bir faz akım ve gerilim dalga şekilleri, c) bir faz akım dalga şekillerinin karşılaştırılması.....                    | 63 |
| Şekil 3.15. Dişli=6, seviye=5, $\omega=372.81$ d/dk değerleri için üç faza ait a) akım, b) akı, c) moment dalga şekilleri.....   | 64 |
| Şekil 3.16. Dişli=6, seviye=5, $\omega=372.81$ d/dk değerleri için a) simülasyon, b) gerçek sistem bir faza ait akım ve gerilim dalga şekilleri, c) bir faz akım dalga şekillerinin karşılaştırılması..... | 65 |
| Şekil 3.17. Dişli=10, seviye=6, $\omega=358.68$ d/dk değerleri için, a) akım, b) akı, c) moment dalga şekilleri .....  | 66 |
| Şekil 3.18. Dişli=10, seviye=6, $\omega=358.68$ d/dk, a) simülasyon, b) gerçek sistem bir faz akım ve gerilim dalga şekilleri, c) bir faz akım dalga şekillerinin karşılaştırılması.....                   | 67 |
| Şekil 4.1. Rotor pozisyonu tahmin yöntemleri.....  | 69 |
| Şekil 4.2. Rotor pozisyonu tahmin edicisi için temel YSA kara kutu modeli.....   | 71 |
| Şekil 4.3. YSA Rotor Pozisyonu Kestirimi Simülasyon Modeli .....   | 73 |

|  |    |
|--|----|
| Şekil 4.4. Akı ve rotor pozisyonu kestirimini içeren algoritmanın simülasyon modeli .....  | 74 |
| Şekil 4.5. Deneysel sistemin görüntüsü .....   | 75 |
| Şekil 4.6. Artımsal kodlayıcısının çalışma mantığı .....   | 76 |
| Şekil 4.7. DSpace1104 kontrol kartı .....  | 77 |
| Şekil 4.8. DSpace 1104 konnektör-led paneli .....  | 77 |
| Şekil 4.9. Pozisyon kestirim uygulamasının DS1104 denetleyici kartı içerisinde gerçekleştirilen kısmına ait blok diyagramı .....                                     | 78 |
| Şekil 4.10. Gerilim Bölücü Devre .....   | 80 |
| Şekil 4.11. LA55-P Akım algılayıcısı uygulama devresi .....  | 80 |
| Şekil 4.12. YSA algoritması blokları .....   | 81 |
| Şekil 4.13. Simulink'te oluşturulan ve DSpace işlemcisinde yürütülen uygulama modeli .....   | 82 |
| Şekil 4.14. "Control Desk Developer" programında gözlemci algoritmalarının çıktıları .....   | 83 |
| Şekil 4.15. Dişli=4, Seviye=7, $\omega=375$ d/dk yükleme koşullarında test sistemi deney akım ve gerilim dalga şekilleri .....                                       | 84 |
| Şekil 4.16. Dişli=4, seviye=7, $\omega=375$ d/dk yükleme koşullarında akı tahmincisi için simülasyon ve deneysel çalışma sonuçlarının karşılaştırılması .....        | 84 |
| Şekil 4.17. Dişli=4, seviye=7, $\omega=375$ d/dk yükleme koşullarında açı tahmincisi deney ve simülasyon sonuçları ile gerçek konum açısının karşılaştırılması ..... | 84 |
| Şekil 4.18. Dişli=5, seviye=8, $\omega=375$ d/dk yükleme koşullarında test sistemi deney akım ve gerilim dalga şekilleri .....                                       | 85 |
| Şekil 4.19. Dişli=5, seviye=8, $\omega=375$ d/dk yükleme koşullarında akı tahmincisi için simülasyon ve deneysel çalışma sonuçlarının karşılaştırılması .....        | 85 |
| Şekil 4.20. Dişli=5, seviye=8, $\omega=375$ d/dk yükleme koşullarında açı tahmincisi deney ve simülasyon sonuçları ile gerçek konum açısının karşılaştırılması ..... | 86 |
| Şekil 4.21. Dişli=5, seviye=8, $\omega=290$ d/dk yükleme koşullarında test sistemi deney akım ve gerilim dalga şekilleri .....                                       | 86 |
| Şekil 4.22. Dişli=5, seviye=8, $\omega=290$ d/dk yükleme koşullarında akı tahmincisi için simülasyon ve deneysel çalışma sonuçlarının karşılaştırılması .....        | 87 |
| Şekil 4.23. Dişli=5, seviye=8, $\omega=290$ d/dk yükleme koşullarında açı tahmincisi deney ve simülasyon sonuçları ile gerçek konum açısının karşılaştırılması ..... | 87 |



## TABLULAR DİZİNİ

|  |    |
|--|----|
| Tablo 2.1. ETFM'nin Parametreleri .....  | 24 |
| Tablo 2.2. Farklı öğrenme algoritmalarının yapıları .....  | 38 |
| Tablo 2.3. ETFM akı ve moment modelleri için yapay sinir ağları parametreleri .....  | 40 |
| Tablo 2.4. Farklı açı değerleri için 0-32A akım aralığında deneysel, YSA ve DVRM yöntemlerinden tahmin edilen akı sonuçlarının karşılaştırılması ..... | 47 |
| Tablo 2.5. YSA ve DVRM akı tahmini için hata analizi.....  | 48 |
| Tablo 2.6. Farklı akım değerleri için 0-18° açı aralığında deney, YSA ve DVRM yöntemlerinden tahmin edilen moment değerlerinin karşılaştırılması ..... | 48 |
| Tablo 2.7. YSA ve SVRM moment tahmininde hata analizi .....  | 49 |
| Tablo 4.1. Rotor Pozisyonu tahmininde oluşturulan YSA modelinin ağ özellikleri.....  | 71 |

## SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

|                    |   |
|--------------------|---|
| $e(t)$             | : Hata  |
| $f$                | : Frekans (Hz)  |
| $F$                | : Stator sargısı magnetomotor kuvveti (A sarım)           |
| $H$                | : Hava aralığındaki manyetik alan şiddeti (A/m)           |
| $I_{ref}$          | : Referans akım, (A)                                      |
| $I_{faz}$          | : Makinanın faz akımı, (A)                                |
| $i(t)$             | : $t$ anında ölçülen hat akımı değeri, (A)                |
| $i$                | : Faz akımı, (A)  |
| $L_a$              | : Çakışık pozisyondaki endüktans değeri, (H)              |
| $L_m$              | : Ortadaki bir açı değerinde alınan endüktans değeri, (H) |
| $L_u$              | : Çakışık olmayan pozisyonda endüktans değeri, (H)        |
| $L$                | : Endüktans (H)   |
| $l$                | : Manyetik yolun uzunluğu (m)                             |
| $N$                | : Faza ilişkin sarım sayısı                               |
| $N_r$              | : Rotor kutup sayısı                                      |
| $N_s$              | : Stator kutup sayısı                                     |
| $R$                | : Faz direnci, ( $\Omega$ )                               |
| $S$                | : Manyetik yolun kesit alanı ( $m^2$ )                    |
| $T$                | : Örnekleme zamanı (sn)                                   |
| $t$                | : zaman, (sn)   |
| $T_e$              | : Statik moment, (Nm)                                     |
| $u(t)$             | : $t$ anında ölçülen uç gerilimi değeri, (V)              |
| $V$                | : Şebeke gerilimi, (V)                                    |
| $W_c$              | : Koenerji, (J)   |
| $\lambda_{faz}$    | : Aktif fazın toplam halkalanma akısı (Wb)                |
| $\mu_0$            | : Boşluğun geçirgenliği (H/m)                             |
| $\mu_r$            | : Malzeme geçirgenliği (H/m)                              |
| $\theta_u$         | : Çakışık olmayan pozisyon, ( $^\circ$ )                  |
| $\emptyset$        | : Akı, (Wb) (1/H)   |
| $\theta$           | : Açı, ( $^\circ$ )                                       |
| $\lambda$          | : Toplam halkalanma akısı değeri (Wb)                     |
| $\lambda(0)$       | : $t=0$ anındaki akı değeri (Wb)                          |
| $\mu$              | : Manyetik geçirgenlik (H/m)                              |
| $\mathcal{R}_g$    | : Hava aralığı relüktansı (1/H)                           |
| $\mathcal{R}_{rp}$ | : Rotor kutbu relüktansı (1/H)                            |
| $\mathcal{R}_{sp}$ | : Stator kutbu relüktansı (1/H)                           |
| $\mathcal{R}_{sy}$ | : Stator boyunduruğu relüktansı (1/H)                     |
| $\mathcal{R}$      | : Manyetik relüktans (1/H)                                |

## **Kısaltmalar**

|      |   |
|------|---|
| AA   | : Alternatif Akım   |
| ADC  | : Analog Digital Converter (Analog-Dijital Çevirici)              |
| CDD  | : “Control Desk Developer” programı                               |
| DA   | : Doğru Akım  |
| DAC  | : Digital Analog Converter (Dijital-Analog Çevirici)              |
| DSP  | : Digital Signal Processor (Dijital Sinyal İşlemciler)            |
| DVM  | : Destek Vektör Makineleri  |
| DVRM | : Destek Vektör Regresyon Makineleri                              |
| EMK  | : Elektromotor kuvveti, (V)                                       |
| ETFM | : E-Core Transverse Flux Machine (E-Çekirdek Çapraz Akı Makinası) |
| RTI  | : Real Time Interface (Gerçek zamanlı arayüz yazılımı)            |
| YSA  | : Yapay Sinir Ağları  |

## **E-ÇEKİRDEK ÇAPRAZ AKI MAKİNASININ YAPAY SİNİR AĞI TABANLI MODELLENMESİ VE DENEYSEL ROTOR POZİSYONU KESTİRİMİ**

### **ÖZET**

Farklı tasarımı ve yapısıyla elektrik makinaları arasında dikkat çekici avantajları olan E-Çekirdek Çapraz Akı Makinası (ETFM), çapraz akı ve relüktans prensibini birleştiren bir çalışma şekline sahiptir. ETFM'in rotor pozisyonu ve faz akımının lineer olmayan fonksiyonları olan manyetik akı, endüktans ve moment karakteristiklerinin, makinanın modellenmesi için doğru belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, ETFM'in manyetik karakteristiklerinin elde edilmesi için literatürde ilk kez Destek Vektör Regresyon Makinaları (DVRM) kullanılmakta ve Yapay Sinir Ağları (YSA) yöntemi modelleri ile karşılaştırılmaktadır. DVRM ve YSA'nın eğitim ve test verileri laboratuarda test sisteminde yapılan deneysel ölçümlerden elde edilmektedir.

ETFM'nin bir egzersiz bisikleti uygulaması için kontrol yapısı ve test sisteminin uygulaması tezde sunulmaktadır. Tüm sistemin modellenmesi ve simülasyonu Matlab/Simulink'te uygulanmakta ve farklı koşullar altında test sisteminden alınan dalga şekilleri ile karşılaştırılarak doğrulanmaktadır.

ETFM'i optimum performansta çalıştırabilmek için, manyetik durumuna göre fazların uygun pozisyonda enerjilendirilmesi rotor konumu algılanarak yapılmaktadır. Bu tez çalışmasında, ETFM'in rotor pozisyonunun tahmini için YSA tabanlı bir gözlemci yapısı kullanılmaktadır. YSA tahmincisinin girişleri için akı tahmini yapılmakta ve faz akım bilgisi algılanmaktadır. DSpace işlemcisi kullanılarak gözlemci algoritması test sistemine uygulanmakta ve rotor pozisyonu tahmin sonuçları elde edilmektedir. Önerilen gözlemci modelinde akı tahmini ve rotor konum açısı tahmini için deneysel ve simülasyon sonuçları karşılaştırılmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Algılayıcısız Rotor Pozisyonu Kestirimi, Destek Vektör Regresyon Makineleri, DSpace, E-Çekirdek Çapraz Akı Makinası, Yapay Sinir Ağları.

## **MODELLING AND ARTIFICIAL NEURAL NETWORK BASED ROTOR POSITION ESTIMATION FOR E-CORE TRANSVERSE FLUX MACHINE**

### **ABSTRACT**

The E-core Transverse Flux Machine (ETFM) has major advantages with its different and unique structure in conventional electrical machines. It is a combination of transverse flux and reluctance principle. However, the magnetic characteristics such as flux linkage, phase inductance and electromagnetic torque are highly nonlinear functions of the rotor position and phase current which makes difficult to model the ETFM due to the special structure.

In this work, support vector regression machines (SVRM) are used to obtain the magnetic characteristic parameters of the ETFM for the first time and compared with its artificial neural network (ANN) models. Data required in training and testing of SVRM and ANN is directly obtained from experimental measurement done in the actual machine with the laboratory test system.

The ETFM is applied for an exercise bike. The control structure and application of the test system is presented in this thesis. The complete modelling and the simulation of the whole system, considering the nonlinear characteristic of the drive, are implemented by Matlab/Simulink and verified the waveforms with the real system results under different conditions.

Optimal performance is achieved by proper positioning of the current pulse with respect to the magnetic status of the machine. In this thesis, the sensorless observer of the ETFM rotor position is implemented based on artificial neural network. The rotor position observer is tested in the real test system using a DSpace. The results of the proposed method are compared for the experimental, simulation and real system.

**Keywords:** Sensorless Estimation of Rotor Position, Support Vector Regression Machine, DSpace, E-Core Transverse Flux Machine, Artificial Neural Network.

## **GİRİŞ**

Bu tez çalışmasında, çok yeni ve farklı tasarımıyla özgün bir makina olan E-Çekirdek Çapraz Akı makinasının (ETFM-E-Core Transverse Flux Machine) daha önce literatürde uygulaması hiç yapılmamış olan rotor pozisyonu tahmini için YSA'nın yönteminin kullanılması amaçlanmaktadır.

ETFM'nin modelinin doğru bir şekilde oluşturulabilmesi ve ayrıca makinanın elektriksel ve mekaniksel davranışlarının belirlenebilmesi için makinanın karakteristiklerinin doğru tanımlanması gerekmektedir. Makinanın manyetik karakteristikleri olan akı dağılımı, endüktans ve moment, rotor pozisyonu ile faz akımının lineer olmayan fonksiyonlarıdır. Manyetik karakteristiklerinin elde edilebilmesi için kullanılan farklı yöntemler bulunmaktadır. Makina tasarımı ve performans tahminleri için en sıkça kullanılan yöntemlerin başında sonlu elemanlar analizi gelmektedir. Ancak, bir çapraz akı makinasının analizinde üç boyutlu sonlu elemanlar analizinin kullanılması gereklidir. Kullanılabilecek bir diğer yöntem ise doğrudan veya dolaylı yoldan deneysel olarak yapılan ölçümlerle karakteristiklerin elde edilmesidir ki bu işlem çok uzun süren ve zahmetli bir süreçtir. Doğruluğun artırılmasında çok fazla sayıda verinin alınabilmesi için modellemede bazı tablolar kullanılmaktadır. Bu tablolarda kullanılan interpolasyon yöntemleri ise, ETFM gibi lineer olmayan sistemlerde manyetik doymadan dolayı doğru ve uygun olmamaktadır. Bu tez çalışmasında da kullanılması uygun görülen yöntem ise, lineer olmayan sistemlerde çözüm ve karşılaşmadığı giriş verileri için de genelleme yeteneği olan yapay sinir ağları ile deneysel yöntemlerle elde edilen karakteristik verilerinin modellenmesi olmaktadır

İnsan davranışlarını taklit etmek amacıyla geliştirilen yapay zekâ uygulamalarının bir alt dalı olan yapay sinir ağları (YSA), ortaya çıkışından günümüze kadar birçok aşamalardan geçmiş ve son yıllardaki teknolojik gelişimi çok hızlı bir şekilde devam etmektedir. YSA'nın, çözümü karmaşık ve güç olan birçok alanda başarılı bir şekilde kullanılmış olup uygulama alanları çok geniş bir yelpazede değişmektedir.

Yapay sinir ağı modelleri ölçülen ve/veya simülasyon sonucunda elde edilen veri ile ağı eğitilmesi sonucunda oluşturulmaktadır. Ancak, doğruluğu yüksek bir YSA modellemesi için, yüksek doğruluğa sahip veri temini, hesaplama maliyeti ve insan zamanının etkin kullanılması problemleri efektif çözümler beklemektedir. Buna karşın, YSA ile elde edilen karakteristiklerin doğruluğunun karşılaştırılması için bilgi tabanlı yeni bir lineer olmayan öğrenme makinesi olan destek vektör makineleri (DVM) önerilmektedir. Son on yılda DVM, YSA'ya rakip öğrenen makineler olarak sınıflandırma ve regresyon problemlerine başarıyla uygulanmaktadır.

DVM, genelleme ve optimizasyon teorilerini birbirine bağlayan sağlam matematiksel temellere dayandırılmış, hızlı bir öğrenen makinedir. DVM esas olarak yüksek derecede doğrusal olmayan fonksiyonlar ile regresyon yapabilme potansiyelinde makinalardır. Çünkü bu doğrusal olmayan fonksiyonlar uygun bir öznitelik uzayında oluşturulup, doğrusal bir fonksiyon olarak işlem görmektedirler. Tez çalışmasında, ETFM'nin deneysel ölçüm yöntemleri ile elde edilen manyetik karakteristikleri DVRM yöntemi ile bir kez daha bulunarak YSA sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve doğruluk analizi yapılmıştır.

Teorik ya da gerçek fiziksel bir sisteme ait geçici hal davranışlarının farklı koşullar altında analiz edilebilmesi ve çalışma performansının izlenebilmesi için sistemin matematiksel modeli oluşturularak simülasyonu gerçekleştirilmektedir. Sistemlerin tasarımı, yenilenmesi ve geliştirilmesi aşamalarında bilgisayar destekli simülasyon yazılımlarının kullanılması önemli avantajlar sağlamaktadır. ETFM'nin ileriki uygulamalarının deneysel çalışmaya geçmeden önce daha kısa sürede ve düşük maliyetlerle denenebilmesi için öncelikle Matlab/Simulink yazılımından faydalanılarak simülasyonu yapılmıştır. Makinanın egzersiz bisikleti uygulaması için tüm kontrol algoritmalarını içeren, YSA tabanlı karakteristiklerin kullanılarak gerçekleştirildiği benzetim, yine gerçek sistemdeki farklı yük koşulları altında alınan uygulama sonuçları ile karşılaştırılarak doğrulanmaktadır.

Makinanın farklı uygulamalardaki güvenilirliğini arttırabilmek için tez çalışmasında, rotor pozisyonu tahmininin algılayıcı kullanılmadan yapılması önerilmektedir. Bu amaçla, akı ve açı tahmincisinden oluşan bir gözlemci modeli oluşturulmaktadır. ETFM benzetiminde algoritmaları gerçekleştirilen ve sonuçları başarılı görülen

tahmincilerin gerçekte sistemde sonuçlarının gözlemlenebilmesi için ileri teknoloji mikroşlemci ürünü olan dSPACE kullanılmaktadır. Analog algılayıcı devreleri ile gerçekte sistemden alınan akım ve gerilim örneklemeleri DSpace ADC girişlerinden alınarak akı tahmin edicisine iletilmektedir. Açık tahmini için ise, akı karakteristiğinden yararlanılarak YSA modeli oluşturulmakta ve yazılımı C-programlama dili ile yapılarak mikroşlemciye gömülmektedir. Tezin amacı olan ETFM rotor pozisyonu tahmincisinin başarısı, deney tezgahında entegre edilen enkoder çıkışı ile hız ve açı bilgileri kıyaslanarak yapılmaktadır.

Tezin ana hatları ile genel yapısı aşağıda sunulmaktadır:

Bölüm 1: Genel bilgiler bölümünde öncelikle farklı akı topolojilerine sahip makineler radyal akı, aksiyal akı ve çapraz akı olmak üzere sınıflandırılmakta ve özellikleri tanıtılmaktadır. Tezde kullanılan E-Çekirdek Çapraz Akı makinasının yapısını oluşturan çapraz akı prensibinin elektrik makineleri alanındaki tarihsel gelişimi verilmektedir. Ayrıca, literatürde benzer elektrik makinelerinde uygulanan algılayıcısız rotor pozisyonu yöntemlerinden bahsedilmektedir.

Bölüm 2: Bu bölümde E-Çekirdek Çapraz Akı Makinasının (ETFM) özellikleri ve çalışma şekli hakkında genel bilgi verildikten sonra manyetik karakteristiklerinin ve endüktans profilinin elde edilmesi için kullanılan deneysel yöntemler ve sonuçlarından bahsedilmektedir. Ayrıca, ETFM'nin manyetik karakteristiklerinin YSA ve DVM ile belirlenmesi ve bu iki yöntemin kıyaslanması ile YSA'nın bu makine üzerindeki uygulamalarda doğruluğu da analiz edilmektedir. Öncelikle YSA'nın yapısı tasarımı ve uygulanması hakkında özet bir bilgi verilmektedir. DVM yöntemi ve uygulanması da kısaca anlatılmaktadır.

Bölüm 3: ETFM'nin Matlab/Simulink ortamında oluşturulan simülasyon blokları tanıtılmakta ve dalga şekilleri gerçekte sistemde deneysel olarak farklı yüklerde alınan sonuçlar ile karşılaştırılmaktadır. ETFM, egzersiz bisikleti uygulaması için laboratuvar ortamında hazırlanan deneysel bir sistem düzeneğinde test edilmektedir. Uygulama ve gerçekleştirilen deneysel çalışma için detaylar bu bölümde sunulmaktadır.



Bölüm 4: ETFM'nin rotor pozisyonu tahmini için önerilen YSA tabanlı gözlemci modelinin simülasyon ve deneysel çalışması hakkında detaylı bilgi bu bölümde paylaşmakta ve önerilen yöntemin deneysel uygulama sonuçları sunulmaktadır.

Bölüm 5: Tez çalışmasında yapılanlar, elde edilen sonuçlar ve yorumlar bu son bölümde verilmektedir. Ayrıca, gelecekte yapılabilecek çalışmalar da önerilmektedir.

## 1. ELEKTRİK MAKİNALARINDA AKI TOPOLOJİLERİ

Elektrik makinaları elektromanyetik enerji dönüşümü yapan cihazlardır ve akı çizgileri aksenal veya radyal doğrultuda dağılmaktadır. Bu nedenle, iletkenlerdeki akımın yönü de çevresel kuvvet vektörlerinin oluşması için aksenal veya radyal doğrultuda olmak zorundadır.

Elektrik makinaları akı dağılımına göre radyal akılı, aksenal akılı ve çapraz akılı makinalar olmak üzere üç ana başlıkta gruplandırılabilir.

### 1.1. Radyal Akılı Makinalar

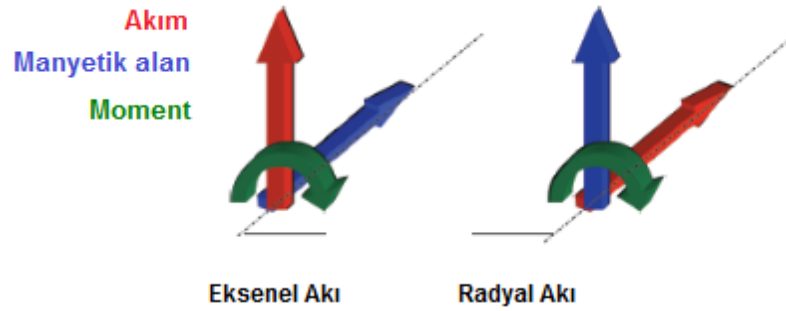
Günümüzde farklı uygulama alanlarında yaygın olarak kullanılmakta olan sargılı DA, sargılı AA (senkron, asenkron), sürekli mıknatıslı senkron, sürekli mıknatıslı DA ve relüktans makinaları radyal akı prensibi ile çalışmaktadır. Bu yapıda, akım aksenal yönde akarken, akı çizgileri radyal düzlemde dağılmaktadır. Stator uzunluğu ve hava aralığı çapı birbirinden bağımsız olarak seçilebilmekte, küçük çaplı uzun statorlu makina tasarımı oldukça kolay yapılabilmektedir [1]. Şekil 1.1.'de farklı alanlarda kullanılan radyal akı makinalarının tasarımlarına ilişkin örnekler verilmektedir.



Şekil 1.1. Radyal akı makinaları tasarım örnekleri

## 1.2. Eksenel Akılı Makinalar

Elektrik makinalarının tarihçesi incelendiğinde Michael Faraday tarafından geliştirilen ilk örneklerin eksenel akılı oldukları görülmektedir. Bunun ardından radyal akılı makina tipleri 1837 yılından itibaren hayata geçirilmiştir. 1900'lü yıllardan sonra malzeme ve üretim teknikleri geliştikçe eksenel akılı makinaların düşük hızlardaki çalışmaları tekrar literatürde yer almıştır.



Şekil 1.2. Eksenel akı ve radyal akı topolojisi

Eksenel akılı makinalarda sargıların yerleşiminden dolayı akım radyal doğrultuda akmakta iken, akı çizgileri hava aralığını eksenel yönde keserler. Şekil 1.2'de eksenel akılı ve radyal akılı topolojide akım, manyetik alan ve moment (kuvvet) vektör yönleri gösterilmektedir. Genel olarak eksenel akılı makinaların statoru halka sargıları taşımakta, rotorda ise disk yapısı tercih edilmektedir. Disk tipi yapısı eksenel akılı makinaların değişken tasarımlarda ve farklı uygulamalarda kullanılmasına olanak sağlar. Düşük güçlü eksenel akılı senkron makinalar ise oluksuz yapıda sargılı biçimde ve kalıcı mıknatıslar kullanılarak tasarlanabilmektedirler [2,3].

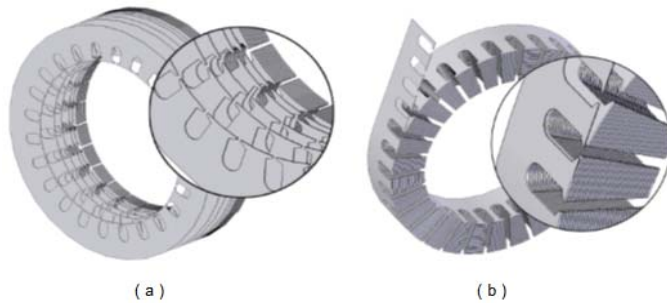
Eksenel akılı motorların en önemli özellikleri düşük hızlarda sağladıkları yüksek moment ve yüksek güç yoğunluğudur. Makinanın moment üreten aktif kısmı olan statorun iç çapından dış çapına kadar olan radyal uzunluk değiştirilmeden eksenel akılı bir makinada kutup sayısı artırılabilir. Böylece eksenel uzaklık azalır ve güç yoğunluğu artar. Bu nedenle eksenel akılı motorlar özellikle elektrikli araçlarda geniş kullanım alanı bulmaktadır. Motor uygulamaları özellikle elektrikli araçlar, pompalar, fanlar, vana kontrolleri, santrifüjler, makina elemanları, robotlar ve endüstriyel ekipmanlar için uygundur. Eksenel akılı sürekli mıknatıslı senkron

makinalar küçük ölçekli güç üretimi için de kullanılabilir. Çok kutuplu yapılabilmelerinden dolayı rüzgar türbinleri gibi düşük devirli uygulamalarda da tercih edilmektedir. Şekil 1.3’de aksel akılı makinalar için tasarım örnekleri görülmektedir.



Şekil 1.3. Aksel akılı makinalar tasarım örnekleri

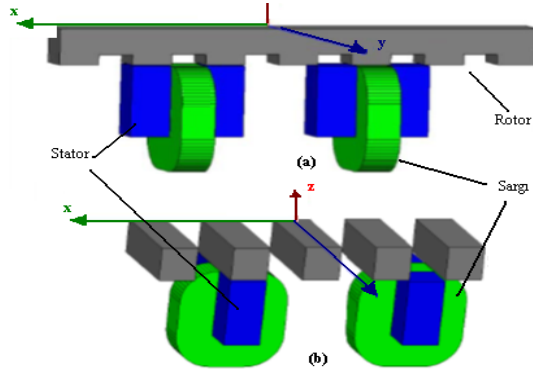
Eksenel akılı makinalar radyal makinalarla kıyaslandığında basit sargı yapısı, kısa akı yolları, moment yoğunluğunun daha yüksek olması gibi avantajlara sahiptir. Bunun yanında daha büyük dış çapı ve daha ağır bir kütlesi bulunmaktadır. Şekil 1.4 (a)’da radyal akılı bir sürekli mıknatıslı makinanın statoruna ilişkin sac lamelleri ile paketlenmiş yapısı, (b)’de ise uzun yapıda şekillendirilmiş sac levhanın dairesel forma getirilmesiyle oluşturulan aksel akılı makinanın stator gövdesi gösterilmektedir [4]. Karmaşık yapısı nedeniyle, radyal akılı makinalara kıyasla daha zor ve pahalı bir üretime sahip olması da dezavantajları arasında sayılabilmektedir.



Şekil 1.4. a) Radyal akı makinasında stator laminasyonu, b) aksel akı makinasında stator laminasyonu

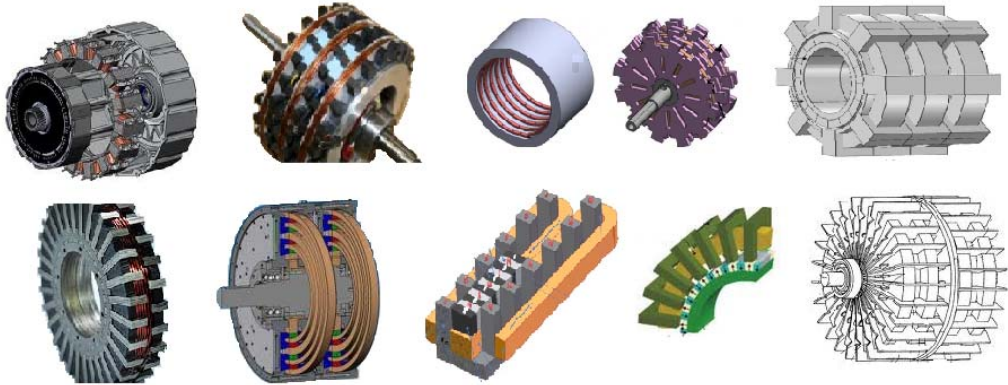
### 1.3. Çapraz Akılı Makinalar

Çapraz akı makinalarında, akım yüzeyi hareket yönü ile çakışık olup manyetik akı bu alanlara dik doğrultuda akmaktadır. Çapraz akılı makinalarda akı statordan rotora dik veya çapraz bir şekilde hareket eder, stator çekirdeği boyunca da hem radyal hem de aksenal olarak devam eder [5]. Şekil 1.5 (a)'da radyal akılı, (b) çapraz akılı makinanın rotor, stator kutup ve sargılarının yerleştirilmesi görülmektedir [6].



Şekil 1.5. a) Klasik radyal akılı elektrik makinasının, b) Çapraz akılı elektrik makinasının sargı ve kutup yapısı

Çapraz akı makinaları diğer makinalara oranla çok küçük kutup adımları ile tasarlanabilmektedir. Verilen boyutlar ve akım değerleri değiştirilmeden kutup sayısı artırılarak moment yoğunluğu daha yüksek değerlere çıkartılabilmektedir [7,8,9]. Şekil 1.6'da literatürde rastlanan çapraz akı makinalarına örnekler verilmektedir.



Şekil 1.6. Çapraz akı makinaları tasarım örnekleri

#### 1.4. Literatür Taraması

Modern kontrol yöntemleri ve güç elektroniğinin gelişmesi ile Çapraz Akı Makinaları, yüksek moment yoğunluğu gerektiren uygulamalarda veya çok kutuplu makinaların kullanıldığı farklı alanlarda tercih edilmektedir. Bu alanlara örnek olarak rüzgar türbinleri, hibrid ve elektrikli araçlar ve gemi sistemleri gibi alanlar ile servo sistemler gibi uygulamalarda, motor veya generatör işletme durumlarında kullanılabilirlerdir.

Günümüze kadar literatürde yer alan yayınlar ve patentler incelendiğinde, çapraz akılı elektrik makinaları üç farklı tasarımda sınıflandırılabilirlerdir [10].

➤ Sürekli Mıknatıslarla Uyarmalı Çapraz Akı Makinaları

Aktif Rotorlu: Sürekli mıknatısların rotoruna yerleştirildiği aktif rotorlu

Pasif Rotorlu: Sürekli mıknatısların statoruna yerleştirildiği pasif rotorlu

➤ Elektriksel Uyarmalı Çapraz Akı Makinaları

Pasif Rotorlu: Rotorunda veya Statorunda hiç mıknatısın olmadığı elektriksel uyarmalı relüktans makinaları

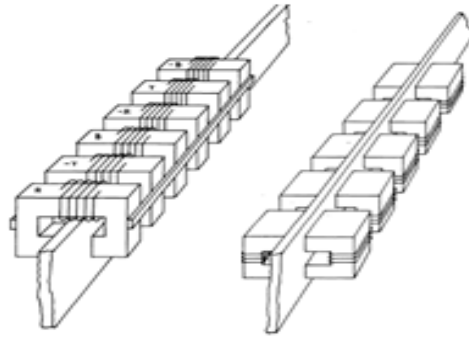
Makina yapısında sürekli mıknatıslar kullanılıyorsa, ortaya çıkan makina çapraz akılı sürekli mıknatıslı makina olarak, mıknatısın olmadığı ve relüktans prensibi ile çalışan makina yapısı ise çapraz akılı relüktans makinası olarak adlandırılmaktadır. Sürekli mıknatıslı makinaların, karmaşık ve çok parçalı yapıları nedeniyle maliyetleri yüksek olmaktadır. Relüktans makinaları ise üretimleri daha basit, düşük maliyetli makinalardır ve daha iyi elektriksel karakteristiklere sahiptir.

Bu tez çalışmasında kullanılan E-Çekirdek Çapraz Akı Makinası (E-Core Transverse Flux Machine-ETFM) farklı tasarımı ve özgün özellikleri ile diğer çapraz akı makinalarından ayrı ve çok yakın zamanda üzerinde çalışılmaya başlanan bir makinedir. Çapraz akı ve relüktans prensibini birleştiren çalışma mantığı ile rotor pozisyonuna bağlı olarak bir fazdan diğerine akım geçişini sağlamak için, ETFM'nin rotor pozisyonunun algılanması gerekmektedir. Mil üzerine yerleştirilen enkoder veya resolver ile rotor pozisyonu algılanabileceği gibi, dolaylı yoldan algılamaya yönelik yöntemler de kullanılabilirlerdir.

ETFM makinalarının gelişimine dikkat çekebilmek için öncelikle çapraz akı makinalarının tarihsel gelişimi ve uygulamaları incelenmektedir. Henüz sadece egzersiz bisikleti uygulamasında kullanılan ETFM'nin algılayıcısız yöntemler kullanılarak yapılan bir uygulaması halen bulunmamaktadır. Bu nedenle, çalışma mantığı ile benzerlik gösteren anahtarlı relüktans ve sürekli mıknatıslı senkron makinaları dikkate alınarak literatürde kullanılan algılayıcısız pozisyon tahmin yöntemleri incelenmektedir.

#### 1.4.1. Çapraz akı makinalarının tarihsel gelişimi

Elektrik makinalarının en son yeniliklerinden olan çapraz akı makinalarının aslında oldukça uzun bir hikâyesi bulunmaktadır. 1971 yılında motorlu araç uygulaması için Laitwaite'in yayınları çapraz akı prensibinin lineer makinalarda kullanılması yönündeki çalışmalara başlangıç olmuştur [11,12]. Şekil 1.7'de görüldüğü gibi C-çekirdekli veya E-çekirdekli farklı tipte lineer stator kutup yapılarıyla çapraz akı prensibini birleştiren makina tasarımları deneysel olarak incelenmektedir.



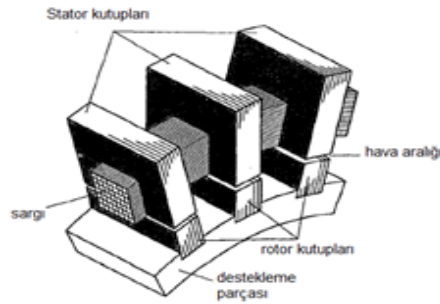
Şekil 1.7. C-çekirdekli ve çift taraflı C-çekirdekli makina yapıları

Ardından 1980'li yıllarda çapraz akı yapısı ilk kez klasik dönen makina tiplerinde uygulanmaya başlanmıştır [13-15]. Bu yapı üzerine gerçekleştirilen çalışmaların günümüze kadar artarak sürmesinin ilk adımları ise, çapraz akı yapısının sürekli mıknatıslı elektrik motorlarına [16,17] ve lineer relüktans motorlarına [18,19] uygulandığı çalışmalardır.

Tarihsel gelişimine bakıldığında, doksanlı yıllardan sonra çapraz akı alternatif makina tasarımlarının dikkat çekmeye ve üzerinde çalışılmaya başlandığı görülmektedir. 1993'de Cheng Liu, çapraz akı bir homopolar lineer makina

prototipi geliştirmiş olup üç boyutlu sonlu elemanlar analizleri ile çapraz akı prensibini senkron ve relüktans makinalar ile birleştirerek geliştirdiği modellerin kıyaslamasına yer veren yayınlar sunmaktadır [20-22]. Liu, dinamik hareketini birçok kuvvetin etkilediği lineer makina sistemlerinde daha iyi çalışma performansı elde edebilmek için farklı tasarımlarda prototipler denemiştir. Avantajları yönünden oldukça popüler olan anahtarlı relüktans makina yapısını lineer makinalar ile birleştirerek geliştirdiği çapraz akılı lineer anahtarlı relüktans makinasının 3 boyutlu sonlu elemanlar analizi ile manyetik karakteristiğini incelemiştir. 1996'da çapraz akılı lineer anahtarlı relüktans makinalarının prototip tasarımlarının sonlu elemanlar analizi ile elektromanyetik akı dağılımı, kuvvet karakteristikleri gibi çalışma performansları ve bu tip makinaların mikroşlemci tabanlı kontrolleri üzerine çalışmalar yayınlamıştır [23,24].

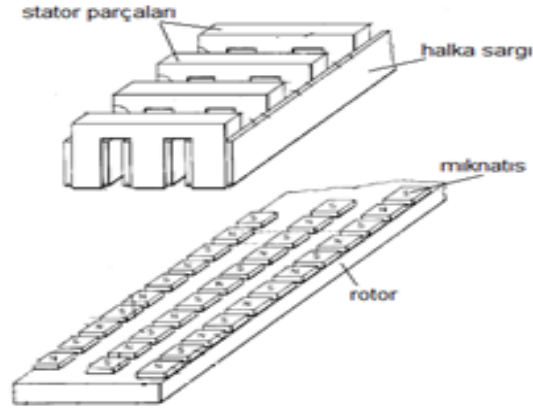
Kruse, 1998'de servo sürücülü uygulamalar için mıknatıs malzemenin bulunmadığı çapraz akı relüktans motorunun modellemesi ve moment dalgalılığını düzeltmek için akım kontrolüne yönelik çalışmalar yapmıştır [25]. şekil 1.8'de Kruse'un incelediği çapraz akı relüktans motorunun bir fazına ait bir kesit görölmektedir. Bu makinanın statorunda iki bacak ve bir boyunduruğun bulunduğu C-çekirdek yapısı ve ortasından geöen dairesel yerleştirilmiş bir sargı bulunmaktadır. Rotorda sargı veya mıknatıs bulunmayıp, statoru kutup sayısı kadar çıkık kutup yapısından oluşmaktadır.



şekil 1.8. Çapraz akı relüktans motorunun bir fazına ait kesiti

Nolle'nin 1998'de patentini aldığı makinanın, stator ve rotor elemanları şekil 1.9'da görölmektedir. Makinanın stator yapısı aksenal yönde yerleştirilmiş E şeklindeki çekirdek ve her bir bacağına sarılan halka sargıdan oluşmaktadır. Faz sayısı arttıkça bacak sayısı da arttırılabilmektedir. Rotorunda ise, stator kutup başlarına karşılık gelecek şekilde ayrı ayrı yerleştirilmiş mıknatıs parçaları bulunmaktadır [26].





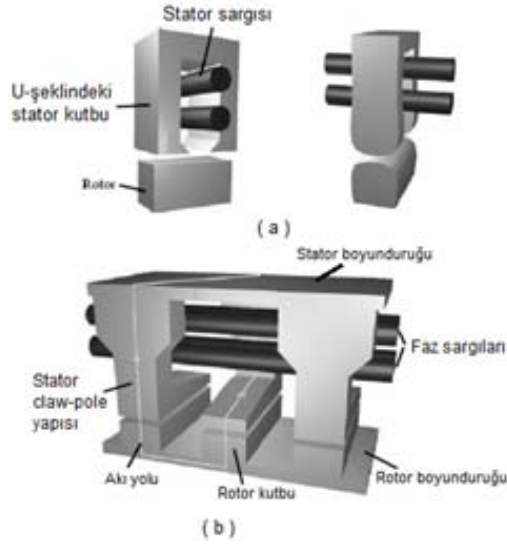
Şekil 1.9. Statorunda E-şeklindeki çekirdek, rotorunda ise mıknatıs kutup başlarının bulunduğu bir çapraz akı makinası tasarımı

Henneberger de aynı yıllarda, yeni bir çapraz akı prensibi ve sürekli mıknatıslı elektrik motorunu birleştiren tasarımını tanıtan yayınlar paylaşmaktadır [27]. Dişli sistemi olmadan, yüksek moment sağlama avantajından dolayı, elektrikli araçlarda tekerlek içi uygulama için uygun olduğunu öneren çalışmaları bulunmaktadır.

Jeong'un 2001'de, statorunda sürekli mıknatıs levhaların yerleştirildiği halka sargılı, değişken relüktanslı çapraz akı makinalarının tasarım ve analizine yönelik bir çalışması bulunmaktadır [28].

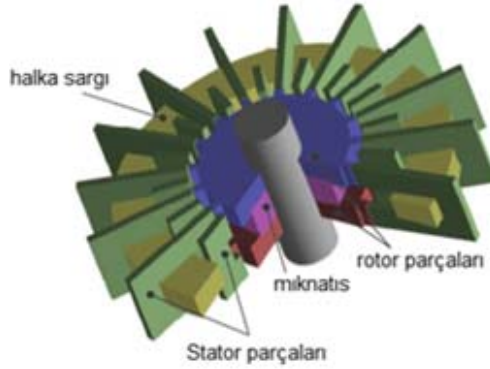
Popan 2002'de, çapraz akı makinalarında statorunda sargı ile birlikte mıknatıs da bulunan pasif rotorlu veya rotorunda mıknatısların yerleştirildiği aktif rotorlu tasarımları için sonlu elemanlar analizi sonuçlarını vermektedir [29].

Viorel ve ekibinin de çapraz akı makinaların analitik ve matematiksel modellerini içeren çalışmaları bulunmaktadır [30,31]. Çalıştıkları tasarımlarda her faz için aksel yönde yerleştirilmiş, Şekil 1.10'da resmedildiği gibi U veya literatürde pençe kutup (claw-pole) denilen bir kutup yapısında olan, halka tipinde faz sargısına sahip stator yapısı bulunmaktadır. Viorel'in düşük hızlarda uygulamalar için sunduğu çapraz akı relüktans makina tiplerinin statik ve dinamik performansları ve sürücü sistemleri üzerine yapılan çalışmaları [32] numaralı kaynak ile sunulmaktadır.



Şekil 1.10. a) U-şekli stator kutup yapısı, b) pençe kutup yapısı

Kastinger 2003 yılında, her faz için ayrı stator ve rotor yapısı bulunan modüler bir çapraz akılı relüktans makinası için patent almıştır. Şekil 1.11’de bir fazı gösterilen makinanın, U şeklindeki çekirdek yapı içerisinde halka şeklinde yerleştirilmiş sargısı bulunan stator yapısı ve çıkık kutuplu iki rotor halkası bulunmaktadır. Makinanın, sonlu elemanlar analizi ve simülasyonu da literatürde yer almaktadır [33,34].

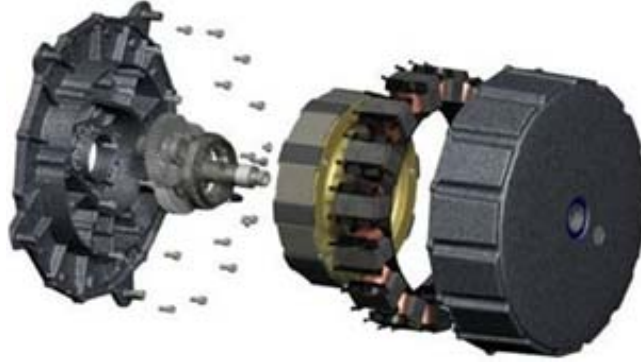


Şekil 1.11. Bir fazlı çapraz akı makinası örneği

2004 ve sonrasında farklı tasarım ve özelliklerde çapraz akı makinalarının endüstriyel uygulamalarda örnekleri yoğunlaşmaktadır. Arsgah serbest-piston generatöründe [35], Jungham ürün transfer konveyör sisteminde [36], Nozaki temassız çelik yüzeyli konveyör sisteminde [37], Polinder okyanus dalga enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren bir sistemde [38], Schmidt elektrikli araçlarda doğrudan tahrik uygulamaları için [39], Ouddes rüzgâr enerjisinden güç üretilmesi

gibi farklı uygulama alanlarında, çapraz akı makinalarının değişik tasarımlarını kullanılmaktadır [40]. Çapraz akı makinalarının rüzgâr enerjisi türbinlerinde, elektrikli araçlarda ve farklı sürücü uygulamalarında motor ve generatör olarak çalışmalarına da rastlanmaktadır [41-45].

Çapraz akılı relüktans makinalarının dezavantajlarını gidermek, düşük veya yüksek hızlarda çalışma verimliliğini ve diğer makinalara göre avantajlarını arttırmak, moment dalgalılığını azaltmak için, kutup veya oluk geometrisinin düzeltilmesi, mıknatısların yerleşiminin düzeltilmesi ve mıknatıs malzemelerinin iyileştirilmeleri konularında günümüze kadar artan bir hızla çok sayıda çalışmanın yapıldığı gözlenmektedir.



Şekil 1.12. E-çekirdek çapraz akı makinası

Rasmussen 2007’de relüktans makinası ile çapraz akı prensibini birleştiren ve aksel yönde E-şeklinde kutup sac yapısında statora sahip çapraz akı makinasının patentini almıştır [46]. Makina, çok dişli stator kutup yapısıyla E-Çekirdek Çapraz Akı Makinası adı ile tanımlanmaktadır. Statorunda tek fazlı mantel tip transformatörlere benzeyen E şeklindeki çekirdek yapı kullanılmaktadır. E çekirdeklerin orta bacağına sarılmış bobin sargısı çapraz akı prensibini oluşturacak şekilde rotor eksenine paralel olarak monte edilmektedir. E-Çekirdek çapraz akı makinasının, stator ve rotoru sac lamellerden oluşmakta olup rotorunda sargı veya mıknatıs bulunmamaktadır. Şekil 1.12’de E-Çekirdek Çapraz Akı Makinasının tüm gövdesinin demonte edilmiş hali görülmektedir [47].

### 1.4.2. Elektrik makinalarında pozisyon tahmin yöntemleri

ETFM'ne en yakın çalışma karakteristiğine sahip anahtarlı relüktans makinalarının algılayıcısız rotor pozisyonu tahmini için kullanılan yöntemler literatürde taranmıştır. İlk çalışmalarda çoğunlukla endüktans değerini kullanan yöntemlerin sıklıkla uygulandığı görülmektedir [48-50]. Buradan, endüktans değerinin çakışık ve çakışık olmayan kutup bölgelerindeki değişiminin ne kadar önemli olduğu orataya çıkmaktadır. Ehsani, endüktans ölçümüne ilişkin yöntemler geliştirerek pozisyon tahmini için çalışmalar yapmıştır [51]. Daha sonraki yıllarda, Acarnley, ilk kez anahtarlı relüktans makinalarında akım dalga şeklini görüntüleyerek rotor pozisyonunu tahmin etmek için bir yöntem önermiştir [52]. Enerjili veya enerjisiz fazda endüktans ölçümü ve akım dalga şeklini görüntüleme işini en hassas şekilde yapabilmek için çeşitli çalışmalar yapılmış ve yayınlanmıştır.

Rotor pozisyonu tahmini için gözlemci tabanlı yöntemlerin de elektrik makinalarında çok kullanıldığı görülmektedir. Elmas, Luenberger Gözlemcisi ile anahtarlı relüktans motorların rotor pozisyonu tahmini için bir çalışma yayınlamıştır [53]. Zhan, Khalil, Islam gibi araştırmacıların kayan mod yöntemi ile gözlemci modelini pozisyon tahmini için kullandığı yayınlara rastlanmaktadır.[54-56]. Bu çalışmalarda, hata değişkenleri ile sistem ve gözlemci eşitliklerini yerine koyarak sistemin hata dinamikleri bulunmakta ve uygulamak için yazılım kullanmaya gereksinim duyulmamaktadır. Ayrıca, başlangıç zamanında gözlemcinin relüktans çalışma için doğru pozisyonun algılanması ve yakınsaması için biraz zaman alması gerekmektedir. Bu kapsamda iyileştirme çalışmaları devam ettirilmiştir.

Çok daha farklı bir yaklaşım olan Kalman filtresi yöntemi ise ilk defa Kalman tarafından 1960'da ortaya atılan bir yöntem olup doğrusal dinamik sistemlerin durum uzay yöntemi ile modellenmesini sağlamaktadır. Sistem içerisinde ve ölçme esnasında oluşan gürültülerin optimal filtrelemesini de sağlayan Kalman filtresine dayanan özel bir gözlemci Brosse tarafından anahtarlı relüktans makinalarda denenmiştir [57].

Ayrıca, akıllı kontrol yöntemlerinden yapay sinir ağları (YSA), bulanık mantık yöntemleri de elektrik makinalarında rotor pozisyonu tahmininde başarılı bir şekilde uygulanmaktadır. Cheok, bulanık mantık rotor pozisyonu tahmincisi geliştirmiştir

[58]. Meşe yapay sinir ağlarını kullanarak değişken relüktanslı bir makinada pozisyon tahmini yaparak yayınlamış daha sonraki yıllarda ise anahtarlı relüktans makinası için benzer bir çalışma gerçekleştirmiştir [59,60]. Ancak, YSA'nın anahtarlı relüktans makinaları için kullanıldığı ilk yayınların Reay ve Bellini'nin çalışmaları olduğu görülmektedir [61,62].

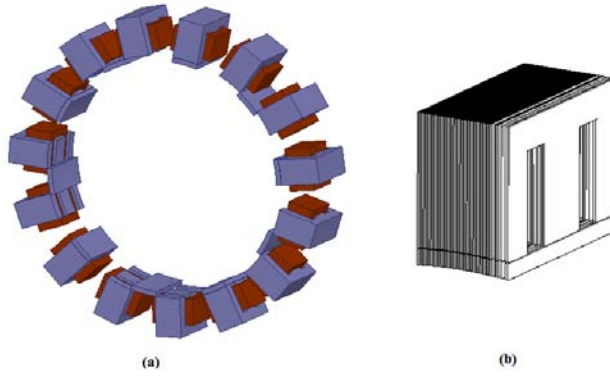
Parametre tahmini, sistem modelleme, moment dalgalılığını azaltma, akım kontrolü gibi birçok çalışmada başarılı bir şekilde kullanılan YSA'nın rotor pozisyonu tahmininde de günümüze kadar sıklıkla çalışıldığı literatürdeki yayınlardan gözlenmektedir [63-66]. Ancak, ölçülen akım-gerilim değerlerindeki hatalar, kaydırma değerleri, stator direncinin sıcaklığa bağlı değişiminden kaynaklanan hatalardan dolayı rotor konumu tahmininin doğruluğu etkilenmektedir.

Radyal tipteki klasik makinalarda pozisyon tahminine ilişkin çokça kaynağa ulaşılmasına rağmen eksenel ve çapraz akılı tipteki makinalarda yapılan çalışmaların çok az olduğu görülmektedir. Wisniewski ve Nguyen'in eksenel akılı sürekli mıknatıslı tipte makinalar için akım ve endüktans tabanlı yaptıkları algılayıcısız pozisyon tahmini çalışmaları bulunmaktadır [67,68]. Çapraz akılı makinalar için literatür araştırmasında ise Zhongsong'un 2007'de çapraz akılı lineer anahtarlı relüktans makinaları için yaptığı çalışmaya rastlanmaktadır [69]. Ancak, yapılan literatür taramalarında eksenel akılı ve çapraz akılı makinalarda özellikle akıllı kontrol yöntemleri ve gözlemci tabanlı yöntemler ile pozisyon tahmini çalışmalarına rastlanamamıştır.

Tez çalışmasında, kullanılan Destek Vektör Regresyon Makineleri (DVRM) yöntemi elektrik makinaları alanında kullanılması oldukça yeni ve az rastlanan bir çalışmadır. Son birkaç yıl içerisinde relüktans tipi makinalarda uygulanmasına ilişkin çalışmalar araştırıldığında [70, 71] yayınlarında rotor pozisyonu tahmini için ve [72, 73] yayınlarında ise relüktans tipi makinaların kontrol ve optimizasyonu için destek vektör makineleri yönteminin uygulandığı görülmektedir. 2011'de Bingni tarafından ise anahtarlı relüktans makinasında modelleme için DVM yönteminin kullanıldığı görülmektedir [74]. Eksenel akılı veya çapraz akılı makinalarda ise DVM yönteminin kullanımına ilişkin bir literatüre rastlanmamaktadır.

## 2. E -ÇEKİRDEK ÇAPRAZ AKI MAKİNASI VE MODELİ

E-Çekirdek Çapraz Akı Makinası (E-Core Transverse Flux Machine-ETFM), klasik anahtarlı relüktans makinası ile çapraz akı prensibinin birleştirildiği bir yapıya sahiptir. Parçalı stator tasarımı, tek fazlı transformatörler için kullanılan klasik E-seklindeki çekirdek yapıya benzemektedirken, rotor kutupları I-şeklindeki laminasyonlardan oluşmaktadır. Statorda rotor eksenine paralel yerleştirilmiş olan her bir bağımsız E-modülün orta bacağına sarılmış bobin sargıları homopolar tiptedir. ETFM'nin stator ve rotoru aksel lamine edilmiş saclardan oluşmakta ve rotorunda sargı ve mıknatıs bulunmamaktadır.



Şekil 2.1. E-Çekirdek Çapraz Akı Makinasının  
a) üç boyutlu görüntüsü, b) bir E-Çekirdek  
stator kutbu ve rotor kutbu

ETFM, çapraz akılı makinelerin tasarım açısından en kolay topolojisidir. Çalışma prensibi bakımından relüktans makineleri ile benzer özelliklere sahiptir. Şekil 2.1'de 15/10 stator/rotor kutbu bulunan ETFM üç boyutlu olarak görülmektedir. Klasik bir relüktans makinası ile karşılaştırıldığında E-Çekirdek Çapraz Akı Makinasının avantajları ve dezavantajları aşağıdaki gibidir:

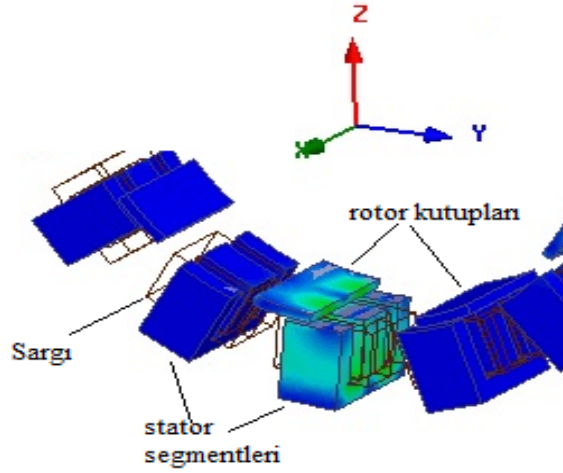
- Manyetik akı yolları klasik bir makinada olduğundan daha kısadır. Elektriksel eşdeğer devre yapısı ile manyetik devre yapısı geometrik olarak bağımsızdır [75]. Çapraz akı makinelerinin dikkat çekici özelliklerinden birisi de akım ve manyetik yüklemesinin birbirinden bağımsız olarak sağlanabilmesidir. Makina çap genişliği yük akımını ayarlarken, kutup aksel uzunluğu da manyetik yüklemeyi

ayarlar. Manyetik devre ile endüvi sargıları aynı yüzeyde olmadığından, çapraz akı makinasının bu özelliği çok daha tercih edilebilir bir yapının oluşmasını sağlamaktadır. Şekil 2.2.'de ETFM'nin stator ve rotoruna ilişkin resimler verilmektedir.



Şekil 2.2. E-Çekirdek Çapraz Akı Makinasının stator ve rotorundan görüntüler

- ETFM'de manyetik olarak her faz birbirinden bağımsızdır. Bu özellik karşılıklı kuplaj etkisini yok ettiğinden makinanın kontrolünde kolaylık sağlamaktadır. Bir fazda oluşabilecek bir arıza diğer fazları etkilemeyecektir. Arıza durumunda faz sargılarının tek tek üretimi maliyeti açısından da avantajlı olmaktadır.
- Ortak boyunduruk olmadan kapalı bir manyetik sistem oluşturan yapıda çekirdek kayıpları da daha küçük olmaktadır.
- Verilen bir endüvi akımı için, eğer aynı akı değişimi daha kısa mesafede yer değiştirilerek elde edilebilirse, manyetik alan enerji değişimi ile oluşturulan moment de artmış olur. Diğer bir deyişle, aynı endüvi akımı için kutup sayısındaki artış, momenti de önemli ölçüde arttırmaktadır. Bu prensiple, daha yüksek moment yoğunluğu için çok dişli kutup başı tasarımı gerçekleştirilebilir. Şekil 2.3'de ETFM aksenal görüntüsünden stator ve rotor kutup başlarına ait bir kesit verilmektedir. Klasik bir makina dizaynında kısıtlı bir alanda kutup sayısını arttırmak ve çok dişli kutup yapısını uygulamak imkânsızdır. Bu nedenle çapraz akı yapısını kullanmak iyi bir seçenektir [76-78].



Şekil 2.3. E-Çekirdek Çapraz Akı Makinasının stator ve rotor kutup yapıları

- ETFM'nin segmentli yapısı kutup sayısını belirlemede serbestlik sağlamaktadır. Üç fazlı bir klasik anahtarlı relüktans makinasında 6/4, 12/18, 8/12 gibi belirli kutup tasarımları kullanılmaktadır. ETFM ise, akı yollarından dolayı, klasik bir kutup yapısının yanında, 15/10 gibi sıradışı kutup sayılarında tasarıma da olanak sağlamaktadır. Bu serbestlik farklı uygulama alanları için makina tasarımını kolaylaştırmaktadır.
- Tasarım açısından incelendiğinde, sargılar klasik makinada olduğundan daha kısa dönüş uzunluğunda olduğu için bakır kaybı azalır ve sargı sonu olmadığı için cephe bağlantısı kayıpları da bulunmaz. Statorda sargı sonu etkisinin ortadan kalkması da makina yapısının başlıca avantajlarından birisi olup, bakır kayıplarının azalması dolayısıyla verimin artması anlamına gelmektedir.
- Manyetik akı geometrisi ve bobin kısmındaki değişimler makinanın boyutlarını etkilememektedir.
- Ancak, çıkık kutup yapısından kaynaklanan dalgalı moment şekli en önemli olumsuzluklarından [79].
- Ayrıca, fazları manyetik olarak ve elektriksel olarak birbirinden bağımsız tutabilmek gerektiğinden karkas yapısının üretiminde zorlukları vardır. Bu karmaşık yapı daha pahalı olabilmektedir.
- Üçüncü boyutta akı yolunu oluşturan yüksek kaçak akıdan dolayı, çapraz akı makinasının statorunda yumuşak manyetik kompozit malzeme kullanılır, bu sebepten dolayı maliyeti de artabilmektedir.

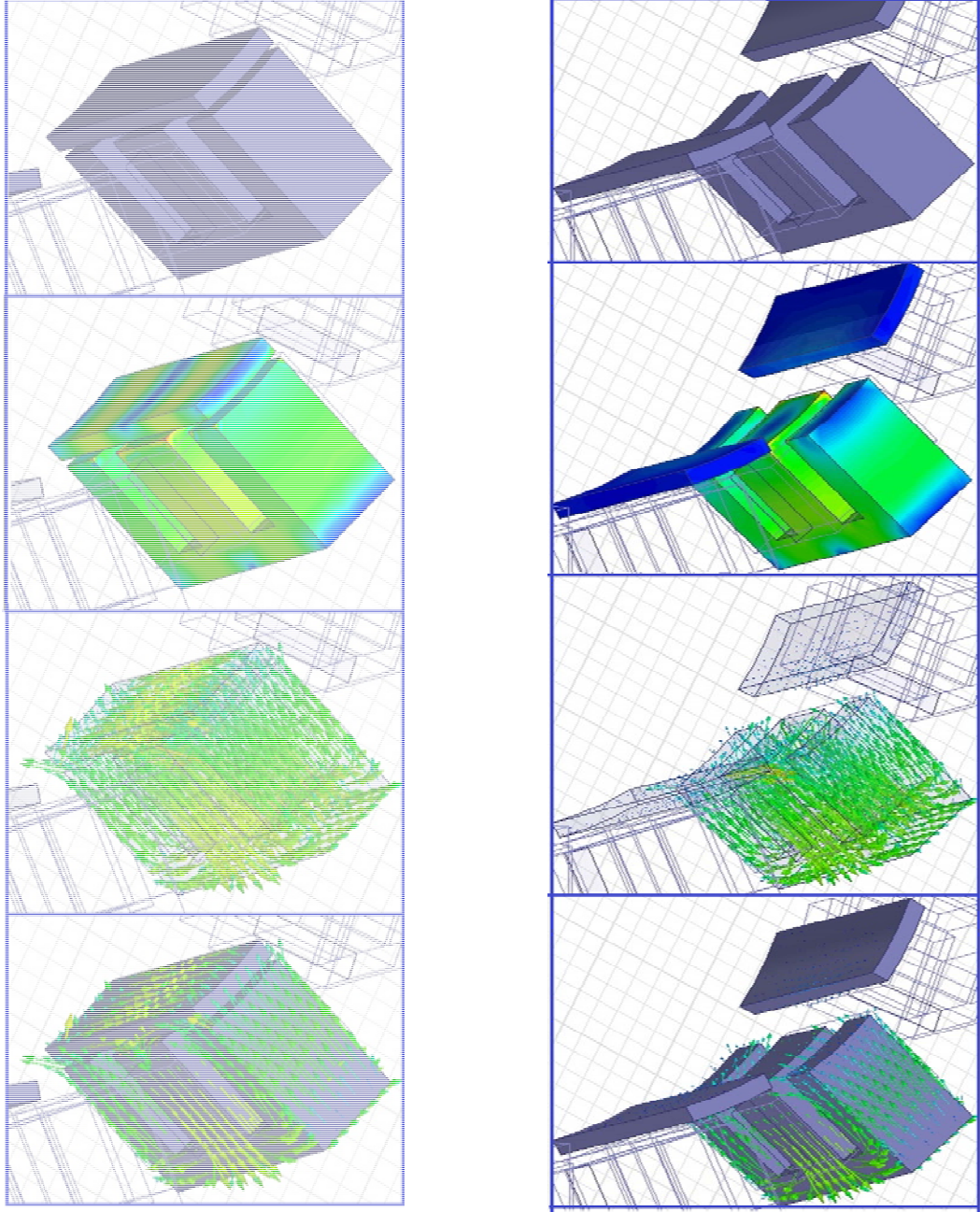


## 2.1. E-Çekirdek Çapraz Akı Makinasının Çalışma Şekli

ETF makinasında hareket, rotor ve stator arasında bulunan hava aralığında oluşan relüktansın rotor açısına bağlı olarak değişmesi sonucu meydana gelmektedir. Relüktans, manyetik akının dolaşımına karşı zorluk gösteren manyetik bir direnç olarak düşünülebilir. Bir stator fazı enerjilendirildiğinde, oluşan manyetik akı kendisine en az direnç gösteren, başka bir deyişle en küçük relüktanslı yolu seçecektir. Buna relüktans prensibi denilmektedir. Manyetik direnci azaltma eğilimi ile oluşan moment, rotor kutuplarını stator kutupları ile aynı hizaya getirir. Bu duruma çakışık konum denir. Bu pozisyon en büyük endüktans en küçük relüktans durumudur. Endüktansta değişimin olmamasına bağlı olarak, çakışık konumda herhangi bir moment üretilmez. Rotor bu konuma geldiğinde faz sargısı hala enerjili ise sabitlenecek ve dönme hareketi sona erecektir. Bu nedenle yapılması gereken, o faz sargısını kaynaktan ayırarak bir sonraki fazın enerjilendirilmesidir. Rotor konumuna bağlı olarak fazların sırayla anahtarlanarak hareketin devam etmesi için bir güç elektroniği düzeneğine ihtiyaç duyulmaktadır [80].

Rotor kutbu, stator kutbu ile çakışık pozisyonundan çakışık olmayan pozisyona doğru hareket ederken, stator sargısının endüktansı maksimum değerden minimum değere azalır,  $dL/d\theta < 0$ . Eğer her faz bu bölgede enerjilendirilirse, ETFM generatör modunda çalışır. Akım darbelerinin, hangi endüktans değişim bölgelerinde uygulanacağını tespit edilmesi ve bu bölgelere ait rotor konumunun bilinmesi gerekmektedir. Bu nedenle rotor pozisyonu bilgisinin elde edilebilmesi için optik yada alan etkili algılayıcıların kullanımı veya dolaylı yoldan algılayıcısız konum tahmin yöntemlerinin kullanılması gerekmektedir [81,82].

15/10 stator/rotor kutup sayısına sahip ETFM’de beş bağımsız stator segmentinin sargıları seri bağlanarak bir fazı oluşturmaktadır. ETFM’nin fazlarından birisi kaynağa bağlandığında manyetik alan meydana gelir. Üretilen manyetik akı devresini E-çekirdek stator kutbunun bacaklarından boyunduruğuna, orta bacadan da hava aralığı ve rotor kutbu üzerinden tamamlamaktadır. ETFM’nin sonlu elemanlar analizi yapılarak bir stator kutbu ile bir rotor kutbunun çakışık ve çakışık olmayan pozisyonları için halkalanma akı çizgilerinin izlediği radyal ve aksel akı yolları Şekil 2.4’de gözlemlenebilmektedir.

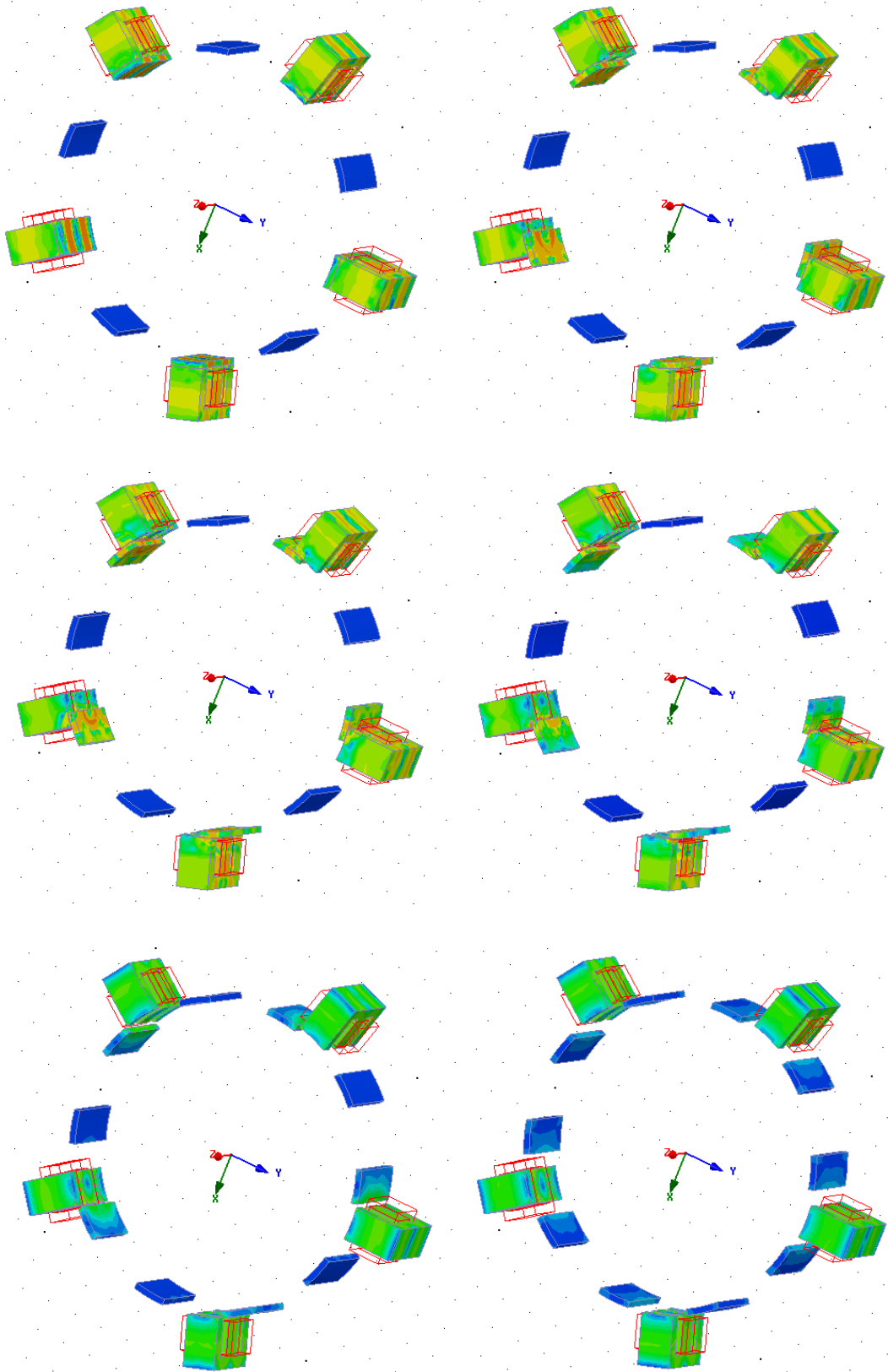


(a)

(b)

Şekil 2.4. E-Çekirdek çapraz akı makinasının bir stator kutbu ve tek bir rotor kutbunun a) çakışık, b) çakışık olmayan pozisyonlarında manyetik akı dağılımlarına ilişkin sonlu elemanlar analizi sonuçları

Şekil 2.5.'de ETFM'nin bir faz stator sargısının enerjilendirilmesiyle, rotor kutuplarının çakışık pozisyonundan çakışık olmayan pozisyona doğru saat yönünün tersine dönüşü için Sonlu Elemanlar Analizi ile elde edilen manyetik akı yoğunluğu dağılımı görülmektedir.



Şekil 2.5. Bir faz için çakışık pozisyondan çakışık olmayan pozisyona sonlu elemanlar analizi ile elde edilen manyetik akı dağılımı

Rotor konumuna göre halkalanma akılarının izlediği yol değişmekte ve bu da manyetik devredeki relüktansın değişimine neden olmaktadır. Buna göre relüktans;

$$R = F/\phi = NI/BS = l/\mu S \quad (2.1)$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (2.2)$$

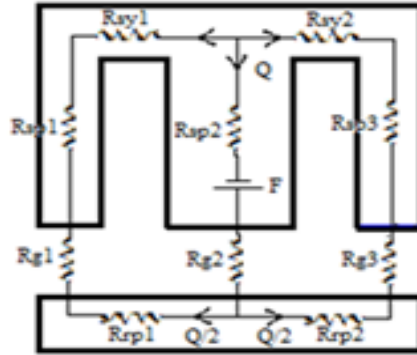
şeklinde ifade edilmektedir. Endüktans ifadesinin relüktans ile ilişkisi ise;

$$L = \lambda/i = N\phi/i = N^2/R \quad (2.3)$$

denklemleri ile verilebilir. Eşdeğer devre için endüktansın rotor konumuna göre lineer değiştiği ve doymanın ihmal edildiği kabul edilirse moment manyetik devre relüktansı ile aşağıdaki gibi ilişkilendirilebilir;

$$T_e(i, \theta) = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta)}{d\theta} = \frac{1}{2} i^2 \frac{d}{d\theta} \left[ \frac{N^2}{R} \right] \quad (2.4)$$

Şekil 2.6.'da ETFM'nin bir fazına ilişkin manyetik eşdeğer devresi verilmektedir.



Şekil 2.6. E-Çekirdek Çapraz Akı Makinasının bir fazına ilişkin manyetik eşdeğer devresi

## 2.2. E-Çekirdek Çapraz Akı Makinasının Manyetik Karakteristiklerinin Elde Edilmesi

Tablo 2.1.'de tasarım özellikleri verilen ETFM'nin modelinin doğru bir şekilde oluşturulabilmesi ve ayrıca makinanın elektriksel ve mekanik davranışlarının belirlenebilmesi için, makinanın karakteristiklerinin doğru tanımlanması

gerekmektedir. Makinanın akı dağılımı, endüktans ve moment manyetik karakteristikleri, rotor pozisyonu ve faz akımının lineer olmayan fonksiyonlarıdır.

Tablo 2.1. ETFM'nin Parametreleri

|                               |          |
|-------------------------------|----------|
| $N_s$ (Stator kutup sayısı)   | 15       |
| $N_r$ (Rotor kutup sayısı)    | 10       |
| Faz sayısı                    | 3        |
| R ( Bir faz sargı direnci)    | 0.09 ohm |
| $I_n$ (nominal akım)          | 40 A     |
| $L_{min}$ (minimum endüktans) | 0,9543mH |

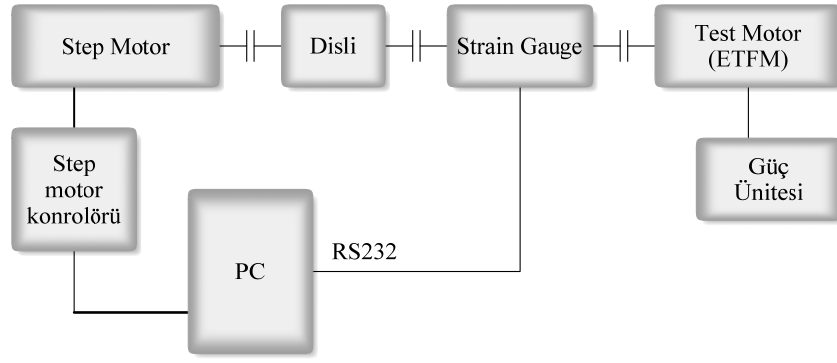
Elektrik makinalarında manyetik karakteristikleri elde edebilmek için kullanılan çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Makinanın manyetik karakteristikleri; a) Geometrisi biliniyorsa sonlu elemanlar analizi ile, b) Gerçek makinada yapılan deneysel ölçüm ile, c) Ölçüm parametrelerini kullanarak analitik fonksiyonlar ile elde edilebilir. Bu çalışmada, ETF makinasının laboratuvar ortamında deneysel ölçüm yöntemleri kullanılarak manyetik karakteristikleri elde edilmektedir.

### 2.2.1. Deneysel ölçüm metodu ile manyetik karakteristiklerin elde edilmesi

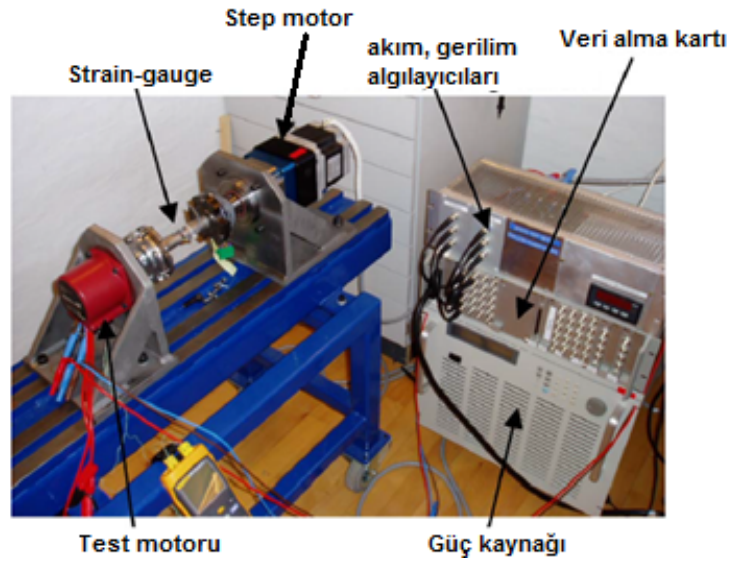
Laboratuvar çalışmasında bilgisayar kontrollü bir test sistemi kullanılarak ETFM'nin manyetik karakteristiklerinin elde edilmesi için ölçümler yapılmıştır. Şekil 2.7 a'da test sisteminin blok şeması b'de ise gerçek sistemin görüntüsü verilmektedir [83]. Makinanın rotor konum açısı, bilgisayardan kontrol edilen step motoru ile değiştirilmektedir. Adım motoru ve test makinası arasında bir dişli ve bir transdüser yer almaktadır. Güç ünitesinden istenen gerilim uygulanabilir ya da akım kontrol modunda da yararlanılabilmektedir.

#### ➤ Moment Karakteristiği

Moment karakteristiğinin ölçülebilmesi için, ETFM'nin rotoru step motoru ile istenilen pozisyona getirilerek kilitlenir. Bu konumda ETFM'nin ölçüm yapılacak sargısına güç kaynağı ile doğru gerilim uygulanarak statik moment değeri strain gauge moment dönüştürücüsü ile ölçülmektedir. Böylelikle, farklı rotor konumları için faz akımı, gerilimi ve moment değerleri elde edilerek kaydedilmektedir. Statik moment ölçümü için, sistemdeki sürtünme etkisi ve diğer mekanik kayıplar ihmal edilmektedir.



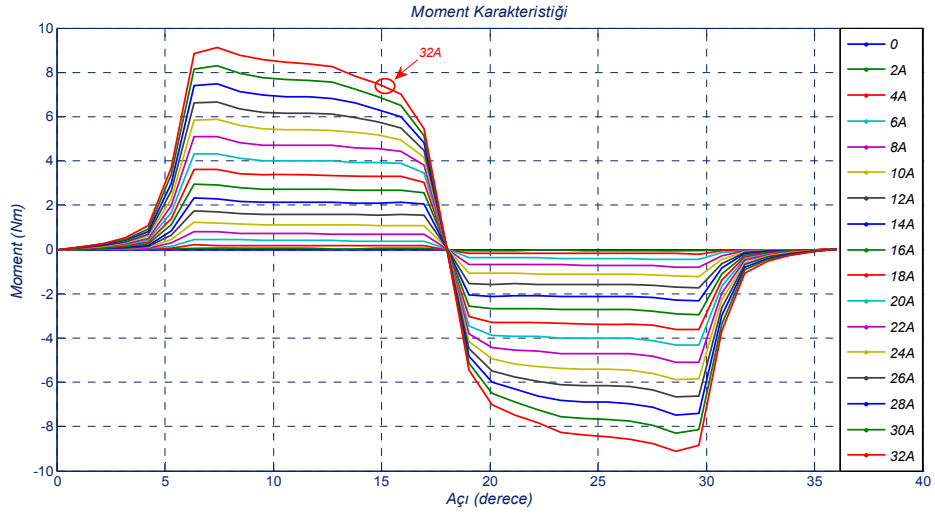
(a)



(b)

Şekil 2.7. Karakteristikleri belirlemek için kullanılan test sisteminin a) blok şeması, b) gerçek sistemin görüntüsü

Makinada statora ait herhangi bir faz uyarıldığında rotor ekseninin stator üzerindeki belirli bir eksene göre hareket ettiği mesafe rotor konum açısı ( $\theta$ ) olarak tanımlanmaktadır. 15/10 stator/rotor kutuplu bir ETFM için elektriksel periyod  $36^\circ$  ( $360^\circ/N_r$ ) olmaktadır. Dolayısıyla,  $\theta$  açısı referans olarak çakışık olmayan pozisyonda  $0^\circ$ , çakışık pozisyonda ise  $18^\circ$  olarak kabul edildiğinde pozitif moment eğrileri  $0^\circ - 18^\circ$ , negatif moment eğrileri ise  $18^\circ - 36^\circ$  aralığında elde edilmektedir.



Şekil 2.8. E-Çekirdek çapraz akı makinasının moment karakteristiği

Makinanın statik moment deneysel ölçümleri esnasında rotorun ilgili faz sargısı enerjilendirilerek çakışık pozisyona ( $18^\circ$ ) getirilmekte ve birer derece aralıklarla rotor hareket ettirilip kilitlenerek ölçüm işlemi gerçekleştirilmektedir. Çakışık olmayan pozisyona ( $36^\circ$ ) kadar ikişer amper aralıklarla 0-32 A aralığında ölçülen akım değerleri için tüm statik moment değerleri ayrı ayrı kaydedilmektedir. Şekil 2.8.'de, ölçülen farklı akım değerleri için, açıya karşılık moment karakteristiği verilmektedir.  $0^\circ$ - $18^\circ$  arasında rotor açı değerlerine karşılık gelen pozitif moment eğrileri de ölçüm yapılan bölgenin simetriği olacaktır.

➤ Akı karakteristiği

Relüktans prensibi ile çalışan makinalarda, uygulanan elektriksel enerjinin büyük bir kısmı mekanik enerjiye dönüşür, diğer kalan kısmı ise manyetik enerji (koenerji) olarak saklanır;

$$dW_c(\theta,i)=T_e(\theta,i)d\theta+\lambda(\theta,i)di \quad (2.5)$$

Ko-enerji sabit bir akımda ( $di=0$ ) momentin integrali alınarak hesaplanmaktadır;

$$W_c=W_c(\theta_0,i)+\int_{\theta_0}^{\theta} T_e(\theta,i)d\theta \quad (2.6)$$

Çakışık olmayan pozisyonda, manyetik doyma olmadığından ko-enerjinin hesaplanması daha kolay olmaktadır;

$$W_c(\theta_u, i) = \frac{1}{2} L_u i^2 \quad (2.7)$$

Çakışık olmayan pozisyondaki endüktans değeri, kayıpların çok etkili olmayacağı yeterince küçük bir akımda deneysel olarak ölçülebilmektedir. Akı değeri ise sabit bir rotor pozisyonunda faz akımına göre değişen koenerjinin türevi alınarak;

$$\lambda(\theta, i) = \frac{\partial W_c(\theta, i)}{\partial i} \quad (2.8)$$

Denklemlerle hesaplanmaktadır. Bu şekilde, makinanın çakışık olmayan pozisyonundan çakışık pozisyonuna kadar farklı konumlarda iken  $(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N)$ , akımın da sıfırdan maksimum değerine kadar farklı değerlerinde  $(i_1, i_2, \dots, i_N)$  deneysel ölçümlerle alınan moment değerleri kullanılarak akı karakteristiği çıkartılabilmektedir.  $i_1=0$  ve  $\theta_1$  ise çakışık olmayan pozisyon değeri alındığında;

$$W_c(\theta_k, i_j) + \sum_{n=2}^k [T_e(\theta_n, i_j)(\theta_n - \theta_{n-1})] \quad (2.9)$$

$$(k=2, 3 \dots N_\theta, \quad j=1, 2 \dots N_i)$$

$$\lambda(\theta_k, i_j) = \frac{W_c(\theta_k, i_j) - W_c(\theta_k, i_{j-1})}{i_j - i_{j-1}} \quad (2.10)$$

şeklinde yeniden düzenlenebilir. Koenerjinin başlangıç değeri ise Denklem (2.7) ile hesaplanmaktadır. Başlangıç durumunda akım ve akı değeri de sıfır olacaktır;

$$\lambda(\theta_k, i_1) = 0 \quad i_1 = 0 \quad (2.11)$$

Akı karakteristiğini elde etmek için enerjinin korunumu kanunu kullanılarak deneysel olarak ölçümle elde edilen statik moment değerlerinden dolayı yoldan akı karakteristiği elde edilebilir. Ancak, akımın direkt deneysel ölçümle elde edildiği klasik yöntemler kullanılabilir. Akı ölçme yöntemleri ETFM'nin gerilim eşitliğinden çıkartılan integral bağıntısına dayanmaktadır.

Makinanın bir fazına ilişkin gerilim ifadesi;

$$V = Ri + d\lambda(\theta, i)/dt \quad (2.12)$$



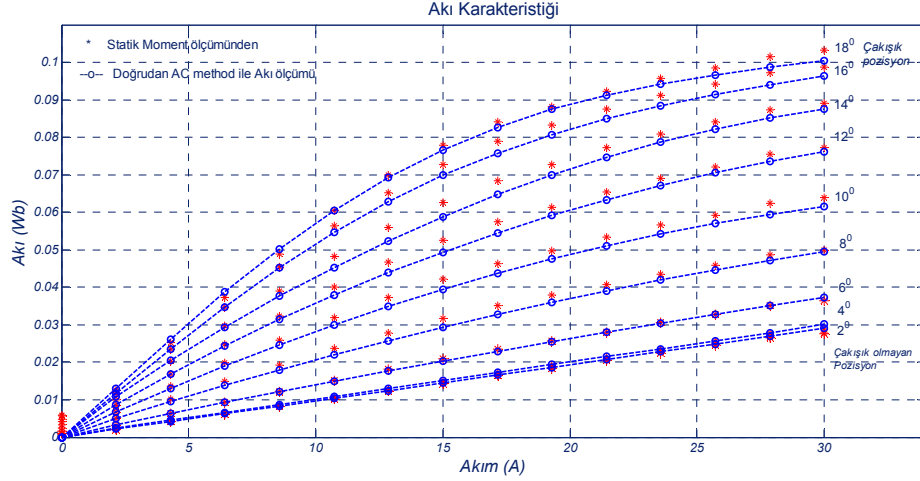
şeklindedir. Buradan akı, uç gerilimi ile stator direncindeki gerilim düşümü farkının integraline eşit olmaktadır;

$$\lambda = \int_0^t [V(t) - Ri(t)] dt + \lambda(0) \quad (2.13)$$

ETFM'in akı karakteristiğini doğrudan ölçmek için öncelikle faz sargısının direnci ölçülmektedir. Test sisteminde rotor kilitli haldeyken faz sargısına gerilim uygulanarak kısa devre akımı farklı zamanlarda ölçülür, eğri uydurma yöntemi ile sıcaklığa bağlı direnç değeri hesaplanır. İstenilen pozisyonlarda rotor sabitlenerek, diğer fazlar açık devre iken statorun ölçüm yapılacak fazına gerilim uygulanmakta ve o andaki faz sargısı uç gerilimi ve uç akımdeğerleri kaydedilmektedir. O andaki akı değeri, rotor pozisyonunun her bir konumu için anlık olarak kaydedilen değerlerden hesaplanmaktadır.

Bunun ardından, ölçülen sinyallerin integralini alan devreler yerine bilgisayar yazılımı ile sayısal hesaplaması yapılmaktadır. Bunun nedeni, donanımsal yöntemlerin sıcaklık, integrasyon zamanı ve sapma gibi çevresel faktörlerden çok fazla etkilenmesidir. Durağan halde (steady state) motorun eşdeğer devresinden endüktansını hesaplamak da kolay olmaktadır.

Şekil 2.9.'da statik moment ölçümünden ve direkt klasik yöntemle elde edilen akı karakteristikleri, rotor konumuna ve akıma bağlı olarak verilmektedir. Pratikte, sargı gerilimi kaynağın salınımından dolayı ölçüm boyunca sabit kalmadığından ötürü, akı değerleri için eğri uydurma (curve fitting) yöntemi uygulanmıştır. İki yöntemde de sonuçlar benzerdir ancak ölçme hataları ve kayıplardan dolayı küçük farklılıklar oluşabilmektedir. Akı ölçümü için kullanılan yöntemler ile ilgili daha detaylı bilgi [84-86] referanslarında bulunmaktadır.



Şekil 2.9. E-Çekirdek çapraz akı makinasının akı karakteristiği

### 2.2.2. Linear olmayan endüktans modelinin analitik olarak elde edilmesi

Endüktansın değişimi motorun çıkıntılı yapısından dolayı lineer değildir. ETFM'nin lineer olmayan yapısından dolayı, basit bir eşdeğer devre geliştirmek de mümkün değildir. Çakışık olmayan ile çakışık konum arasında makinada relüktans maksimum değerden minimum değere doğru değişirken endüktans değeri de bunun tersine minimum değerden maksimum değere doğru değişmektedir.

ETFm'de diğer tüm relüktans tipi makinalarda olduğu gibi momentin oluşması için endüktans değişimi önem taşımaktadır. Akım sabit alındığında ve manyetik doymanın yaşanmadığı durumda makinanın bir faz endüktansı sadece rotor konumuna bağlı değişmektedir. Endüktans, çakışık olmayan konumda en küçük değerdedir. Rotor kutbu ile stator kutbunun çakıştığı konumda ise endüktans en büyük değerini alır.

Makinanın bir fazı uyarıldığında endüktans eğiminin pozitif olduğu bölgede pozitif moment, negatif olduğu bölgede ise negatif moment üretilir. Endüktansın değişmediği durumlarda ise moment üretilmez.

Faz sargısının öz endüktansı, rotor pozisyonu ve faz akımı arasındaki ilişkiyi ifade etmekte olup, analitiksel model Fourier serileri ile hesaplanabilmektedir. Akım sabit alındığında ve manyetik doymanın olmadığı durumda makinanın bir faz endüktansı sadece rotor konumuna bağlı olarak değişmektedir.

Fourier serisindeki katsayılar üç farklı rotor pozisyonunda alınan endüktans değerleri ile belirlenmektedir. Burada,  $L_a$  (çakışık pozisyondaki endüktans),  $L_u$  (çakışık olmayan pozisyondaki endüktans),  $L_m$  (çakışık ve çakışık olmayan pozisyonlar arasında ortada bir pozisyon için endüktans) parametreleri tanımlanmaktadır [87,88]. Faz endüktansı;

$$L(\theta,i)=L_0(i)+L_1(i)\cos N_r\theta+L_2(i)\cos 2N_r\theta \quad (2.14)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır. Burada,  $N_r$ ; rotor kutup sayısıdır. Buna göre;

$$L_0=\frac{1}{2}\left[\frac{1}{2}(L_a+L_u)+L_m\right] \quad (2.15)$$

$$L_1=\frac{1}{2}(L_a-L_u) \quad (2.16)$$

$$L_2=\frac{1}{2}\left[\frac{1}{2}(L_a+L_u)-L_m\right] \quad (2.17)$$

Deneysel ölçme sonuçlarından elde edilen karakteristiklerden sadece üç farklı pozisyonda farklı akım değerleri için bulunan  $L_a(i)(\theta=18^\circ)$ ,  $L_m(i)(\theta=27^\circ)$  ve  $L_u(i)(\theta=36^\circ)$  öz endüktans eğrilerine faz endüktansını hesaplamak için ihtiyaç duyulmaktadır. Eğri uydurma yöntemi uygulanan  $L_a$  ve  $L_m$  öz endüktans eğrilerinin polinom fonksiyonları aşağıda verilmektedir;

$$L_a=\sum_{n=0}^k a_n i^n \quad (2.18)$$

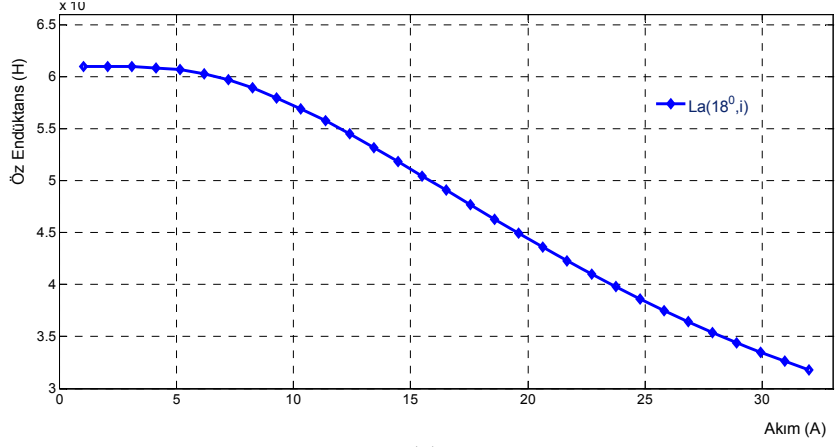
$$L_a(i)=-5.21\times 10^{-9}i^4+5.34\times 10^{-7}i^3-1.8\times 10^{-5}i^2+0.12\times 10^{-3}i+0.58\times 10^{-2} \quad (2.19)$$

$$L_m=\sum_{n=0}^k b_n i^n \quad (2.20)$$

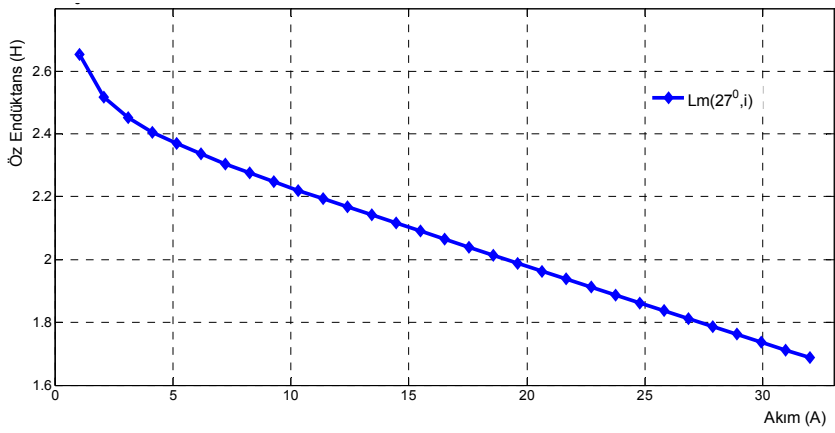
$$L_m=-2.26\times 10^{-12}i^7+2.88\times 10^{-10}i^6-1.49\times 10^{-8}i^5+4.07\times 10^{-7}i^4-6.24\times 10^{-6}i^3+5.36\times 10^{-5}i^2-0.26\times 10^{-3}i+0.25\times 10^{-2} \quad (2.21)$$

$$L_u=0.000956 \text{ H}$$

Çakışık konumda ( $L_a(\theta,i)$ ) ve ara konumda ( $L_m(\theta,i)$ ) elde edilen öz endüktans eğrileri Şekil 2.10'da verilmektedir.



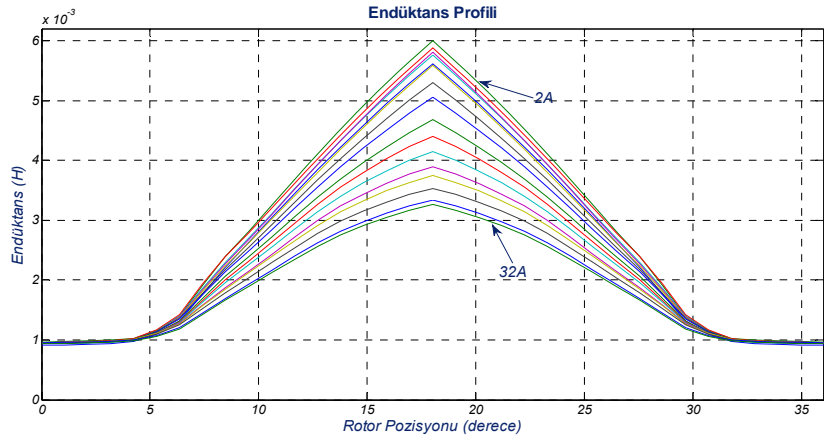
(a)



(b)

Şekil 2.10. a) Çakışık konumda ( $L_a(18^\circ, i)$ ), b) ara konumdaki ( $L_m(27^\circ, i)$ ) endüktans değerleri

Şekil 2.11’de bir faz için  $0-36^\circ$  rotor pozisyonu aralığında farklı akım değerleri için analitik olarak hesaplanarak elde edilen endüktans profili verilmektedir.



Şekil 2.11. Bir faz için  $0-36^\circ$  rotor pozisyonu aralığında farklı akım değerleri için endüktans değişimi

### 2.3. Yapay Sinir Ağları (YSA) ve ETFM'nin Manyetik Karakteristiklerinin Elde Edilmesi

İnsan davranışlarını taklit etmek amacıyla geliştirilen yapay zeka uygulamalarının bir alt dalı olan YSA, ortaya çıkışından günümüze değin bir çok aşamalardan geçmiş olup, son yıllardaki teknolojik gelişimi çok hızlı bir şekilde devam etmektedir. YSA, çok geniş bir yelpazede değişen birçok uygulama alanında başarılı bir şekilde kullanılmaktadır.

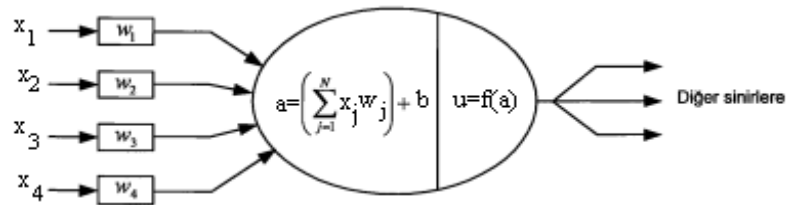
Paralel dağılmış yapısı, öğrenilme ve genelleme yapma yeteneği gibi özellikleri nedeni ile YSA karmaşık ve çözülmesi zor problemleri çözebilme yeteneğine sahiptir. Örüntü tanıma, sınıflandırma, işaret işleme, sistem tanımlama, sistem kontrolü gibi birçok alanda başarılı şekilde uygulanmaktadır [89].

Bu bölümde, YSA yapısı, tasarımı ve algoritmaları hakkında bilgi verilmekte ve YSA modelleri ile ETFM'nin manyetik karakteristiklerinin elde edilmesi sunulmaktadır.

#### 2.3.1. YSA yapısı

YSA'da genel olarak 3 katmanlı bir çalışma şeklinden bahsedilmektedir.

- Giriş katmanında, giriş elemanları sistemin giriş bilgilerini alarak ara katmanlara iletmektedir.
- Ara katmanlarda, giriş katmanından gelen bilgiler işlenerek çıkış katmanına iletilmektedir.
- Çıkış katmanında, çıkış elemanları ara katmanlardan gelen bilgileri işleyerek, ağa giriş olarak sunulan veriler için çıkış değerlerini üretmektedirler.



Şekil 2.12. Bir yapay sinir ağı hücresi

Şekil 2.12’de bir yapay sinir hücresi verilmektedir [90]. Burada girişler  $x$ , ağırlıklar  $w$  vektörleriyle gösterilmektedir. Birleştirme fonksiyonu hücreye gelen bilgileri ağırlık değerleriyle birleştirerek net girişi ( $a$ ) hesaplar ve transfer fonksiyonuna ( $f(a)$ ) iletir. Net giriş genellikle gelen bilgilerin bağlantıların ağırlıkları ile çarpılıp toplanması ile belirlenir. Aktivasyon (Transfer) fonksiyonu, birleştirme fonksiyonu tarafından belirlenen net girişi alarak yorumlar ve çıkış değerini belirler. Genel olarak türevi alınabilen bir fonksiyon olması tercih edilir. En çok kullanılan aktivasyon fonksiyonları lineer, rampa, basamak ve sigmoid fonksiyonlarıdır. Sigmoid fonksiyonu ve türevi;

$$s(x) = \frac{1}{1+e^{-x}} \quad (2.22)$$

$$s'(x) = s(x)[1-s(x)] \quad (2.23)$$

eşitlikleri ile verilmektedir.

Sinir hücresinin çıkışı, transfer fonksiyonunun sonucunun diğer hücreye gönderilmesini sağlamaktadır. Bir hücrenin tek bir çıkışı vardır ve çok sayıda hücreye bağlı olabilir. YSA kendisine sunulan giriş verisini, beklenen ya da önceden bilinmeyen bir çıkış verisine dönüştürmektedir. Bunun için ağırlık kendisine sunulan girdiler için eğitilmesi gerekmektedir. Ağa sunulacak sayısal örnekler öncelikle bir vektör haline getirilmektedir. Bu vektör ağa sunulmakta ve gerekli çıktı vektörü üretilmektedir. YSA’ nın parametre değerleri doğru çıkışı üretecek şekilde düzenlenmektedir. Giriş ve çıkış vektörlerinin tasarımı ağı geliştirilen kişi tarafından belirlenmekte ve örnekler belirlenen formata dönüştürülerek eğitim sırasında ağa gösterilmektedir.

Bir YSA’nın eğitilmesi, ağı ait elemanların bağlantı ağırlıklarının belirlenmesi anlamına gelmektedir. Başlangıçta ağırlık değerleri rastgele atanmaktadır. YSA’ya girişler sunuldukça ağırlık değerleri güncellenmektedir. Amaç, ağı gösterilen örnekler için doğru çıkışları üretecek ağırlık değerlerini bulmaktır. Ağı doğru ağırlık değerlerine ulaşması örneklerin temsil ettiği olay hakkında genellemeler yapabilme yeteneğine kavuşması demektir. Bu genelleştirme özelliğine kavuşması

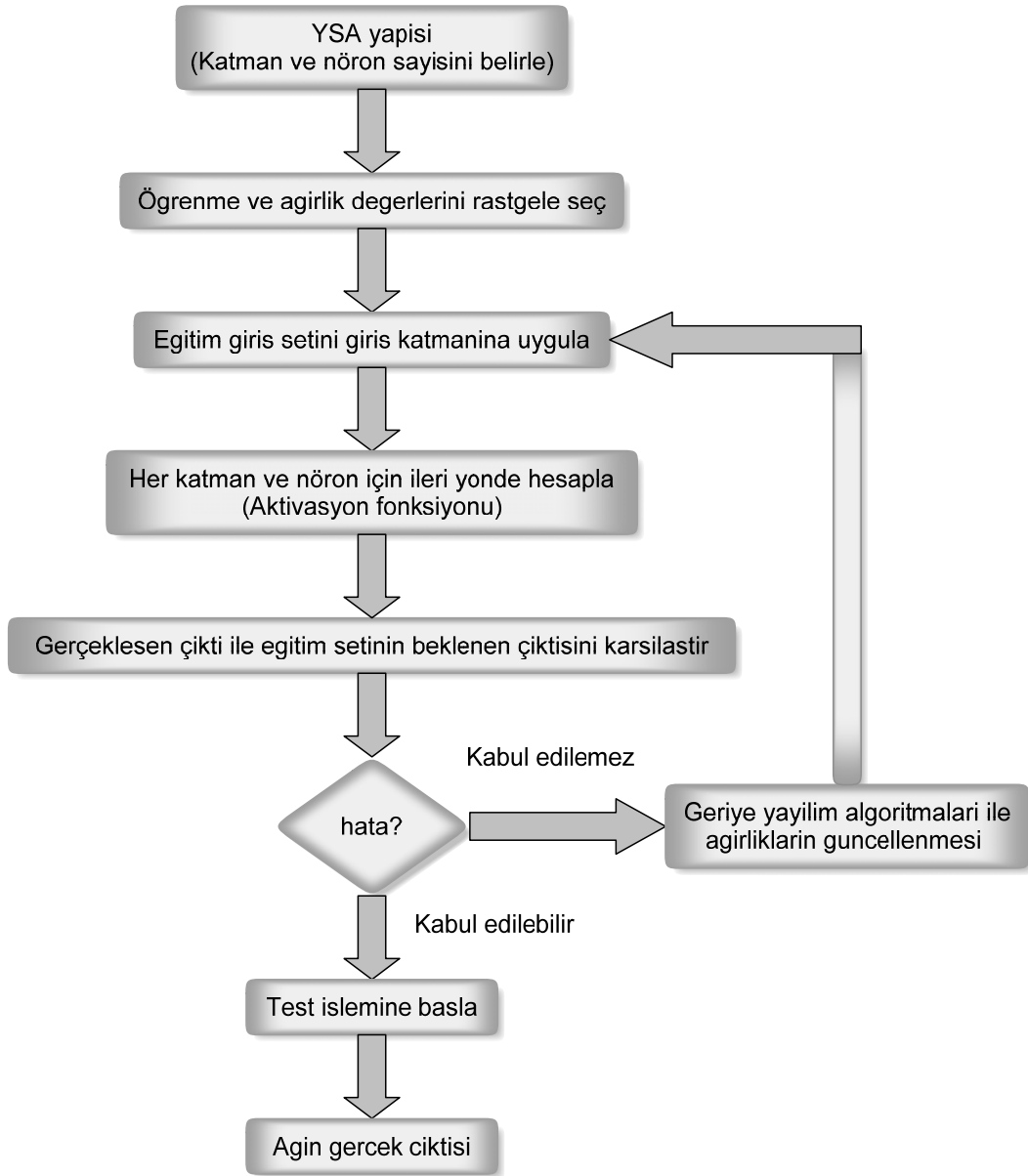
işlemine ağıın öğrenmesi denir. Ağırlıkların değerlerinin değışmesi belirli kurallara göre yürütölmektedir. Bu kurallara YSA' nın öğrenme kuralları denir.

Ağıın eğitimi tamamlandıktan sonraki aşama, ağıın test edilmesidir. Test sürecinde ağa daha önceden gösterilmemiş olan veriler sunulmaktadır. Bu aşamada ağırlık güncellemeleri yani ağıın öğrenmesi işlemleri gerçekleştirilmemektedir. Eğitim sırasında belirlenen bağlantı ağırlıkları yardımı ile daha önce karşılaşmadığı örnekler için çıkışlar üretilir. Beklenen çıkış değerleri elde edildiğı oranda ağıın öğrenmesi başarılıdır. Eğitim için kullanılan veri kümesine eğitim kümesi, test için kullanılan veri kümesine test kümesi denir. YSA' ların bu şekilde bilinen örneklerden belirli bilgileri çıkartarak bilinmeyen örnekler hakkında yorum yapabilme yeteneğine adaptif öğrenme denir.

Öğrenme sürecinde ağırlıkların güncelleştirilmesi için genellikle matematiksel tabanlı öğrenme yaklaşımları kullanılmaktadır. Böylece YSA, bu öğrenme algoritmaları ile öğrenme sürecinden geçtikten sonra bilgiyi toplama, hücreler arasındaki bağlantı ağırlıkları ile bu bilgiyi saklama ve genelleme yeteneğine sahip olurlar. Yapay sinir ağının mimarisinde, karşılaşılan sorunun niteliğine göre en yaygın kullanılan basit ve iyi bir öğrenme kapasitesine sahip olan geriye yayılım algoritmasıdır.

➤ Geriye yayılım algoritması:

Geriye yayılım öğrenme algoritması, çok katmanlı ağıları (ÇKA) eğitmede en çok kullanılan temel öğrenme algoritmasıdır. Şekil 2.13'de geriye yayılım öğrenme algoritmasının akış algoritması verilmektedir. İlk olarak, giriş örnekleri ve hedef çıkış değerleri ağa öğretilmektedir. İleri beslemeli bir YSA için hedef çıkış değeri ile ağ çıkışı arasındaki fark (hata), çıkıştan girişe doğru geri yansıtılır. Bunun için, hatanın ağıın her bir ağırlığına göre eğimi hesaplanarak, ilgili ağırlığa uygulanacak değışim miktarı bulunur.



Şekil 2.13. Geriye yayımlı yapay sinir ağı algoritması

Geriye yayılım algoritması gerçek çıkış  $y$  ile istenen çıkış  $d$  arasındaki hatanın karelerinin ortalamasını (performans fonksiyonu) minimum yapmak için bir öğrenme algoritması kullanılmakta olup performans fonksiyonu ise;

$$E(w) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K (d_k - y_k)^T (d_k - y_k) \quad (2.24)$$

olarak tanımlanmaktadır.  $K$ ; örnek sayısını,  $d$ ; istenen çıkışı,  $y$ ; hedef çıkışı göstermektedir. Denklem ağırlık vektörüne bağlı çıkış hatasına göre tekrar yazıldığında;



$$E(w) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K e_k(w)^T e_k(w) \quad (2.25)$$

denklemini elde edilmektedir. Hataların karelerinin eğimine göre, her bir eğitim örneğinin uygulanışında ağırlıklar yenilenirse örneksel öğrenme kuralı elde edilir. Toplam amaç ölçütünün eğimine göre, N adet eğitim örneğinin uygulanışından sonra ağırlıklar yenilenirse toplu öğrenme kuralı elde edilir.

Geriye yayılım algoritmasına ait adımlar özetle şu şekildedir;

1.adım:  $w_{ij}$  ağırlıkları ve  $\eta > 0$  öğrenme oranı, başlangıç olarak rastgele küçük değerlere atanır.

2.adım:  $x^q$  örnekleri giriş katmanında ağa uygulanır ve böylece eğitim bu adımda başlar. Tüm hücrelerin çıkışları hesaplanır;

$$z_j = f_j \left( \sum_{i=0}^p w_{ji} x_i + b_j^1 \right) \quad (2.26)$$

$$y = f \left( \sum_{j=0}^m w_j z_j + b \right) \quad (2.27)$$

3.adım: Çıkış katmanında hata E hesaplanır;

$$E(k) = \frac{1}{2} (d^k - y^k)^2 \quad (2.28)$$

4.adım: Çıkış katmanının hata işaret vektörleri hesaplanır;

$$\delta_j = f'_j \left( \sum_{j=0}^m w_j z_j + b \right) (d^k - y^k) \quad (2.29)$$

5.adım: Geriye doğru  $\delta$  değerleri yayılarak saklı katmanların  $\delta$  hata vektörleri hesaplanır;

$$\delta_i = f'_i \left( \sum_{i=0}^n w_{ji} x_i + b_j \right) \sum_{j=1}^m w_j \delta_j \quad (2.30)$$

6.adım: Çıkış katmanının ağırlıkları ve eşik değerleri güncellenir;

$$w_j = w_j + \Delta w_j \quad \Delta w_j = -\eta \delta_j z_j \quad (2.31)$$

$$b = b + \Delta b \quad \Delta b = -\eta \delta_j \quad (2.32)$$

Saklı katmanın ağırlıkları ve eşik değerleri ayarlanır;

$$w_{ji}=w_{ji}+\Delta w_{ji} \quad \Delta w_{ji}=-\eta\delta_j x_i \quad (2.33)$$

$$b_j=b_j+\Delta b_j \quad \Delta b_j=-\eta\delta_j \quad (2.34)$$

7.adım:  $q \rightarrow q+1$ , 2. adıma geri dönülür.

Geriye yayılım eğitim algoritmasının en önemli dezavantajı, hedef hataya yavaş yakınsamaktadır. Global minimuma yakın noktalarda, ağırlık vektöründeki değişim küçük değerlere sahip olacaktır. Bu nedenle, işlemin zaman içindeki değişim hızı logaritmik olarak azalacaktır. Bu dezavantajdan kurtulmak için en faydalı yöntem, Denklem (2.35)'deki gibi adaptif bir öğrenme oranı kullanmaktır;

$$\Delta\eta = \begin{cases} +\gamma & \Delta E < 0 \\ -\beta\eta & \Delta E > 0 \\ 0 & \text{diğer} \end{cases} \quad (2.35)$$

Her döngü için amaç fonksiyonunun aldığı değer hesaplanır ve son değerle bir önceki değer karşılaştırılır. Bu karşılaştırma sonucuna göre öğrenme oranına bir değişim verilerek ağırlıkların adaptasyonu sağlanır. Amaç fonksiyonunun değerindeki azalma, ağırlık vektöründeki değişimin yavaşladığını gösterir.

Çalışma hızını artırmak için basit bir  $\gamma$  sabiti eklenmesiyle öğrenme oranı arttırılır. Eğer geçmiş birkaç döngüde, ağırlıkların yenilenmesiyle amaç fonksiyonunun değeri artıyorsa, yörüngeyi belirleyen öğrenme oranı çok büyük demektir. Daha küçük adımlara ihtiyaç vardır ve öğrenme oranı  $(1-\beta)$  ile azaltılmalıdır. Problemin karmaşıklığı, eğitim setindeki veri sayısı, ağırdaki ağırlıkların sayısı, hedef hata ve uygulamanın şeklini de içeren birçok faktöre bağlı olarak değişen uygulamaya göre eğitim algoritması seçilmektedir.

Bazı farklı öğrenme algoritmalarının özelliklerinin karşılaştırılması aşağıdaki Tablo 2.2'de verilmektedir.

Tablo 2.2. Farklı öğrenme algoritmalarının yapıları

| Algoritmalar | Güncelleme Kuralları                               | Yakınsaması     | Hesaplama Şekli    |
|--------------|--|-----------------|--------------------|
| EBP          | $w_{k+1} = w_k - \alpha g_k$                       | Kararlı, yavaş  | Gradyan            |
| Newton       | $w_{k+1} = w_k - H_k^{-1} g_k$                     | Kararsız, hızlı | Gradyan ve Hessian |
| Gauss-Newton | $w_{k+1} = w_k - (J_k^T J_k)^{-1} J_k e_k$         | Kararsız, hızlı | Jacobian           |
| LM           | $w_{k+1} = w_k - (J_k^T J_k + \mu I)^{-1} J_k e_k$ | Kararlı, hızlı  | Jacobian           |
| NBN          | $w_{k+1} = w_k - Q_k^{-1} g_k$                     | Kararlı, hızlı  | Quasi Hessian      |

### 2.3.2. YSA modellerinin tasarımı

YSA uygulamalarının başarısı, kullanılacak olan yaklaşımlar ve deneyimler ile ilişkilidir. YSA'nın geliştirilmesi sürecinde ağın yapısına ve işleyişine ilişkin aşağıda tanımlanan bazı temel kararların verilmesi ve uygulanması gerekmektedir.

➤ Ağ mimarisinin seçilmesi ve yapı özelliklerinin belirlenmesi (katman sayısı, nöron sayısı): Giriş çıkış katmanlarının sayısı, problemin yapısına göre değişir. Katman sayısını belirlemenin en iyi yolu, birkaç deneme yaparak en uygun yapının ne olduğuna karar vermektir. Ayrıca, ara katman sayısının artmasından dolayı işlemler artacağı için çalışma hızı da düşmektedir. Katmandaki nöron sayısının tespitinde genellikle deneme yanılma yöntemi kullanılır. Bunun için izlenecek yol; başlangıçtaki nöron sayısını istenilen performansa ulaşıncaya kadar arttırmak veya bu durumun tersine istenen performansın altına inmeden azaltmaktır. Bir katmandaki nöron sayısı olabildiğince az olmalıdır. Nöron sayısının az olması yapay sinir ağının genelleme yeteneğini arttırırken, gereğinden fazla olması ağın verileri ezberlemesine neden olur. Ancak gereğinden az nöron kullanılması verilerdeki örüntünün ağ tarafından öğrenilememesi gibi bir sorun yaratabilir. Saklı katmandaki nöron sayısının fazla seçilmesi halinde de ağırlık taşması denilen, ağın öğrenmiş gibi görüldüğü halde öğrenememe durumunu ortaya çıkarabilmektedir.

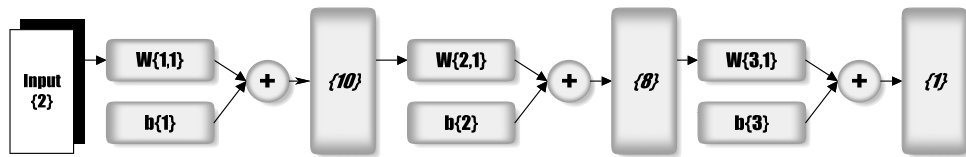
➤ Öğrenme algoritmasının seçilmesi ve parametrelerinin belirlenmesi: YSA'nın yapısının seçiminden sonra uygulama başarısını belirleyen en önemli faktör öğrenme algoritmasıdır. Genellikle ağ yapısı öğrenme algoritmasının seçiminde belirleyicidir. Yapay sinir ağının geliştirilmesinde kullanılacak çok sayıda öğrenme algoritması

bulunmaktadır. Bunların içinde bazı algoritmaların belirli tip uygulamalar için daha uygun olduğu bilinmektedir.

➤ Eğitim ve test verisinin oluşturulması: Giriş ve çıkış verilerinin normalizasyonu, yakınsama ve öğrenme işlemi açısından oldukça önemlidir. Sigmoid fonksiyonu kullanılıyorsa özelliğinden dolayı, ağın çıkışı 0-1 arasında olmalıdır. Bununla birlikte, giriş değişkenleri, sigmoid fonksiyonunun doymaya girmemesi için yeterince küçük tutulmalıdır. Dolayısıyla, giriş ve çıkış verilerinin, ağ eğitilmeden önce normalize edilmesi gerekir. Bunun için giriş ve çıkış nöronları tek tek, o nörondaki en büyük değere bölünür. Normalizasyon işleminin sonunda, giriş ve çıkış vektörleri 0-1 arasında değer alır.

### 2.3.3. YSA uygulama modelleri

Akı ve moment karakteristiğinin YSA modelinin oluşturulması için öncelikle eğitim ve test verilerinin düzenlenmesi gerekmektedir. Deneysel yöntemlerle elde edilen karakteristik tablolarından elde edilen eğitim verileri normalize edilerek giriş ve çıkış vektörü olarak düzenlenmektedir. Rotor konum açısı ve akım, giriş verisi olarak akı da çıkış olarak atanmaktadır. İki girişi bir çıkışı olan çok katmanlı ağ modeli için öncelikle katman ve nöron sayısı belirlenir. Akı karakteristiği için düzenlenen ağın yapısı şekil 2.14’de görülmektedir.



Şekil 2.14. Karakteristikleri tahmin etmek için kullanılan YSA yapısı

İki katmanlı ve her bir katmanında 10-8 nöron bulunan ağın, ilk ağırlık ve eşik değerleri rastgele seçilmektedir. İleri yönde hesaplamada aktivasyon fonksiyonu olarak tansig (tangent signum) fonksiyonu kullanılmaktadır. Tüm giriş vektörleri ağda ileri yönde hesaplandıktan sonra hatanın performansı bulunup Levenberg Marquardt algoritmasındaki öğrenme kuralına göre ağırlıkların güncellenmesi yapılmaktadır. Güncelleme kuralına göre, hata bir öncekine göre azalıyorsa öğrenme katsayısı, eğim düşme (gradyan descent) etkisini azaltmak için küçültülür. Eğer hata son hataya göre artıyorsa, öğrenme katsayısı artırılır.

Moment karakteristiği de iki giriş, bir çıkış ile on ve sekiz nöronlu iki saklı katmandan oluşan YSA yapısındadır. Rotor pozisyonu ve faz akımı normalizasyonu yapıldıktan sonra ağa giriş vektörü olarak, moment de çıkış vektörü olarak atanmaktadır. İleri yönde hesaplamada tansig aktivasyon fonksiyonu, öğrenme kuralı olarak da Levenberg Marquardt Algoritması kullanılmaktadır. Oluşturulan ağ modellerinin özellikleri Tablo 2.3’de verilmektedir.

Tablo 2.3. ETFM akı ve moment modelleri için yapay sinir ağı parametreleri

|                                       |                    |
|---------------------------------------|--------------------|
| Giriş sayısı                          | 2                  |
| Çıkış sayısı                          | 1                  |
| Saklı katman sayısı                   | 2                  |
| Birinci saklı katmandaki nöron sayısı | 10                 |
| İkinci saklı katmandaki nöron sayısı  | 8                  |
| Aktivasyon fonksiyonu                 | Tansig             |
| Öğrenme algoritması                   | LM backpropagation |
| Eğitim amacı                          | 0                  |
| Epoch                                 | 1000               |
| Ortalama hata                         | 2.45E-06           |

➤ Levenberg Marquardt Algoritması:

Levenberg Marquardt Algoritması Hessian matrisini aşağıdaki denklem ile bulmaktadır;

$$H \approx J^T J + \mu I \quad (2.36)$$

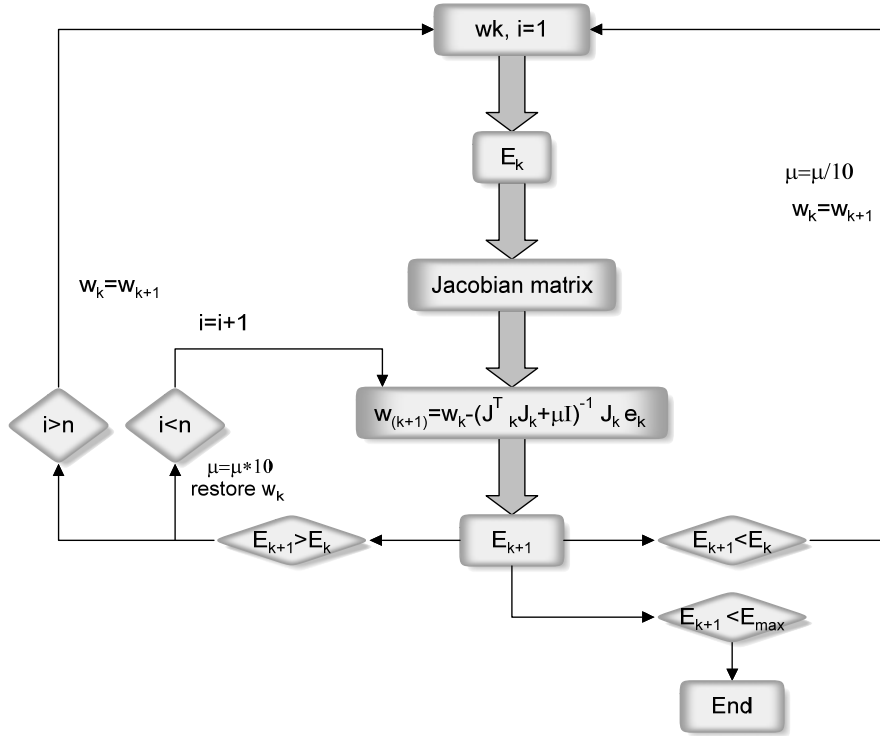
$\mu$  ; her zaman pozitif bir katsayıdır. I; birim matrisidir.

Böylelikle, Hessian matrisinin diagonal eksenini sıfırdan daha büyük bir değer olacaktır. Ağırlıkların güncellenmesi için;

$$w_{k+1} = w_k - (J_k^T J_k + \mu I)^{-1} J_k e_k \quad (2.37)$$

denklemini kullanılmaktadır. Levenberg Marquardt Algoritması azalan adımlı (Steepest Descent) ve Gauss Newton algoritmalarının kombinasyonudur. Kombinasyon katsayısı  $\mu$  çok küçük ise, algoritma Gauss Newton algoritmasına benzemektedir, çok büyükse de azalan adımlı algoritmaya dönüşmektedir.

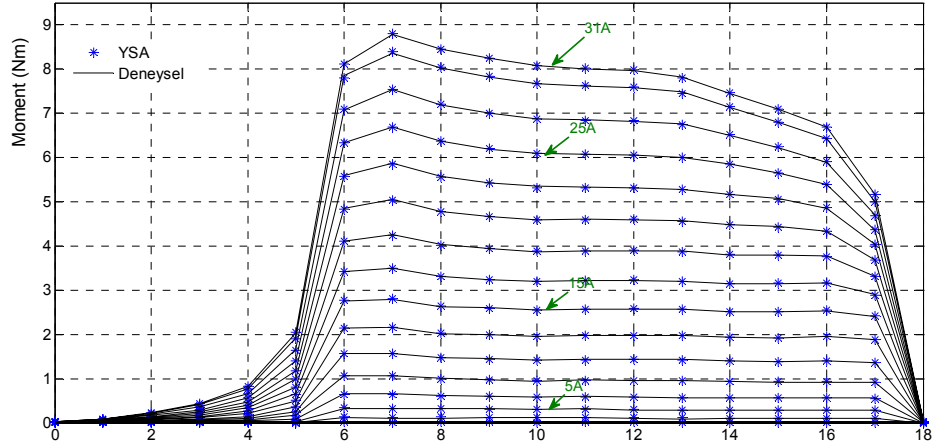
Levenberg Marquardt Algoritmasını kullanarak ağırlıkların güncellenmesini gösteren akış şeması Şekil 2.15’de verilmektedir.



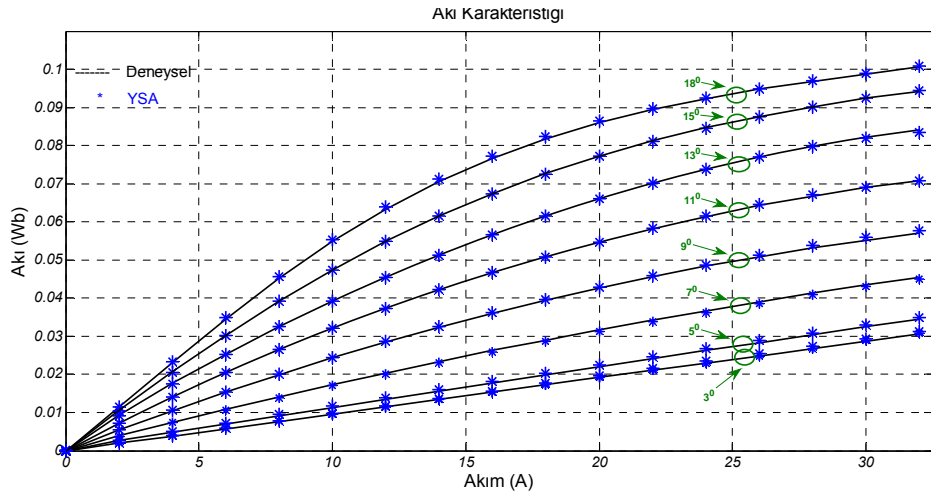
Şekil 2.15. Levenberg Marquardt Algoritması

Farklı akım değerleri için açığa göre moment karakteristiğinin YSA ve deneysel sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 2.16’da verilmektedir. Rotor konum açısı, çakışık olmayan pozisyondan çakışık pozisyona kadar  $0^\circ$  ile  $18^\circ$  aralığında değişmektedir.

YSA modelini doğrulamak için deneysel ölçümlerle elde edilen akı karakteristiği ile karşılaştırması yapılmaktadır. Çakışık olmayan pozisyondan çakışık pozisyona kadar farklı rotor açıları için verilen akı karakteristiğinin deneysel sonuçlar ile YSA sonuçlarının karşılaştırılması ise Şekil 2.17’de verilmektedir.



Şekil 2.16. Moment-Rotor konumu karakteristiğinin sabit akı değerleri için YSA ile deneysel ölçümlerinin karşılaştırılması



Şekil 2.17. Akı karakteristiğinin YSA ile deneysel ölçümlerinin karşılaştırılması

#### 2.4. Destek Vektör Regresyon Makineleri (DVRM) Yöntemi ile Manyetik Karakteristiklerin Elde Edilmesi

Destek Vektör Makineleri (DVM), doğrusal öğrenme makinelerini, genelleme teorisi ve optimizasyon teorisini uygulayarak, Kernel'e bağlı öznitelik uzayında verimli bir şekilde eğitmek için geliştirilen bir sistemdir. DVM'in pratik uygulamasında ve analizinde Karush-Kuhn-Tucker (KKT) durumları kullanılmaktadır [91]. Vapnik ve ekibi tarafından geliştirilen bu öğrenme stratejisi, disiplinli ve çok kuvvetli bir metot olarak son yıllarda birçok uygulamada iyi performansı ile diğer öğrenen sistemleri geride bırakmıştır. Uygulama alanlarının başında mühendislik dalları ve ekonomi gelmekte ayrıca, sınıflandırma, regresyon ve kestirim problemlerine çözüm metodu

olarak kullanılmaktadır. DVM öğrenme teorisi, sonsuz sayıda örnekleme yerine, küçük sayıda örnekleme prensibine dayandırılmıştır ve bu nedenle hesaplama maliyeti oldukça düşüktür. Optimizasyon işleminde dışbükey amaç fonksiyonunun kullanılması nedeni ile evrensel minimum garanti edilir. Ayrıca, DVM optimizasyon işleminde, YSA gibi ampirik risk değil, yaklaşım fonksiyonunun katsayıları da (yapısal risk) minimize edilir. Bu durum, öğrenen bir makina için, tam risk minimizasyonu oluşturmaktadır[92]. Bütün bu ana çalışma prensipleri ile DVM, diğer metotlara göre kesin üstünlükler getirmektedir.

Bu bölümde amaç, YSA'nın doğruluğunu rakip bir örüntü tanıma sistemi olan DVM yöntemi ile kıyaslamaktır. Karşılaştırmanın sağlıklı yapılabilmesi için, DVM'nin eğitim ve test işlemlerinde YSA'da kullanılan ve deneysel olarak elde edilmiş olan veri vektörünün aynısı kullanılmaktadır. Bu aşamada DVM, ETFM'nin akı ve moment karakteristiklerinin belirlenmesi için, regresyon amaçlı kullanılmaktadır. Bu tip uygulamalarda DVM, Destek Vektör Regresyonu (DVR) olarak adlandırılabilir.

Akı ve moment karakteristiklerinin tahminine ilişkin regresyon problemleri şu şekilde özetlenebilir. Eğitim aşamasında, giriş değişken vektörü 'x' ve çıkış da 'F' fonksiyonu olarak alınırsa L eğitim çifti  $\{(x^0, F^0), (x^1, F^1), \dots, (x^{L-1}, F^{L-1})\}$  şeklinde üretilir. F'nin çeşitli giriş-çıkış örneklerinden başlayarak, amaç  $\tilde{F}$  fonksiyonunu bulmaktır. DVR ile  $\tilde{F}$  şu şekilde ifade edilir:

$$\tilde{F}(x) = \langle w, \varphi(x) \rangle + b \quad (2.38)$$

Burada  $\langle \cdot, \cdot \rangle$  ifadesi w ve b arasındaki iç çarpımı,  $\varphi$  ise giriş vektörünü çok boyutlu bir uzaya dönüştüren doğrusal olmayan bir eşleme vektörüdür. w ve b sırası ile ağırlık vektörü ve eşik (bias) olup birincil dış bükey amaç (Regresyon Risk) fonksiyonu minimize edilerek şu şekilde bulunur [93];

$$R_{\text{reg}} = \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=0}^{L-1} L^e(x, F_i, \tilde{F}_i) \quad (2.39)$$

Burada C; düzenleme sabiti,  $L^e(x, F)$ ; genel kayıp fonksiyonudur. Denklem (2.39)'da verilen amaç fonksiyonunun yerel minimumunun olmaması ve evrensel minimumu garantilemesi DVM'nin YSA gibi diğer örüntü tanıma yöntemlerine karşı



üstün özelliğidir. Bu çalışmada Vapnik tarafından geliştirilen  $\varepsilon$ -duyarsız kayıp fonksiyonu kullanılmaktadır;

$$L^\varepsilon(x, F, \tilde{F}) = \begin{cases} 0, & |F^i - \tilde{F}(x^i)| \leq \varepsilon \\ |F^i - \tilde{F}(x^i)| - \varepsilon, & |F^i - \tilde{F}(x^i)| > \varepsilon \end{cases} \quad (2.40)$$

Bu fonksiyon  $\varepsilon$ -tüpünü ifade eder. Eğer tahmin edilen değer tüpün dışında ise kayıp tahmin edilen değer ile tüpün  $\varepsilon$  yarıçapının farkı olur. Eğer tüpün içinde ise de kayıp sıfır olacaktır. Vapnik'e göre, regresyon riskinin minimizasyonunu çift optimizasyon problemi olarak yeniden düzenlemek mümkündür. Çift optimizasyon probleminde,  $w$  vektörü  $x$  giriş verisi cinsinden aşağıdaki şekilde yazılabilir;

$$w = \sum_{i=0}^{L-1} (\alpha_i - \alpha'_i) \varphi(x^i) \quad (2.41)$$

Burada  $\alpha_i$  ve  $\alpha'_i$ ; bilinmeyen Lagrange çarpanlarıdır. Denklem (2.41), Denklem (2.38)'e yerleştirilirse,  $\tilde{F}$  aşağıdaki şekilde yazılabilir;

$$\begin{aligned} \tilde{F}(x) &= \sum_{i=0}^{L-1} (\alpha_i - \alpha'_i) \langle \varphi(x^i), \varphi(x) \rangle + b \\ &= \sum_{i=0}^{L-1} (\alpha_i - \alpha'_i) K(x^i, x) + b \end{aligned} \quad (2.42)$$

$\alpha_i, \alpha'_i$  çarpanları ve  $b$ , problemde regresyon riskini minimize edecek şekilde seçilmelidir. Denklem (2.42)'de verilen,

$$K(x^i, x) = \langle \varphi(x^i), \varphi(x) \rangle \quad (2.43)$$

ifadesi Kernel fonksiyonudur. Polinom ve radyal Kerneller sıklıkla kullanılan Kernel tipleridir. Lagrange çarpım tekniğini uygulayarak çift uzay amaç fonksiyonunun aşağıda yer alan eşdeğer maksimizasyon haline gelmesi sağlanır.

$$W(\alpha, \alpha') = -\varepsilon \sum_{i=0}^{L-1} (\alpha_i + \alpha'_i) + \sum_{i=0}^{L-1} F_1^i(\alpha_i - \alpha'_i) - \frac{1}{2} \sum_{j=0}^{L-1} (\alpha_i - \alpha'_i) (\alpha_i + \alpha'_i) K(x^i, x) \quad (2.44)$$

Bu ifadenin kısıtlamaları şu şekildedir;

$$0 \leq \alpha_i, \alpha'_i \leq C \quad (2.45a)$$

$$\sum_{i=0}^{L-1} (\alpha_i - \alpha'_i) = 0 \quad (2.45b)$$

Denklem (2.45.a), (2.45.b) ile verilen kısıtlamalara bağlı olarak Denklem (2.44)'ü maksimize etmek için KKT durumlarını kullanarak  $\alpha_i, \alpha_i'$  çift değişkenleri ve b hesaplanır. KKT durumlarından, sadece  $|\tilde{F}(x^i) - F^i| \geq \varepsilon$  için Lagrange çarpanlarının sıfırdan farklı olduğu görülmektedir. Diğer bir deyişle  $\varepsilon$  - tüpün içindeki tüm örneklerde, çarpanlar yok olmaktadır. Böylece, w'nın  $x^i$  cinsinden seyrek dağılımı elde edilir. Yok olmayan çarpanlarla gelen örnekler Destek Vektörleri'dir. Eğitim aşamasında, eğitim verilerinin azaltılmış sayıda olması hesaplamada önemli avantajlar sağlar. Azaltılmış sayıda sıfır olmayan parametre ve garantilenmiş evrensel minimum DVM' ye alternatif yöntemlere göre üstünlük sağlamaktadır. DVM'nin detaylı matematiksel teorisi ve literatürü [94-96]'da yer almaktadır. F fonksiyonunu doğru bir şekilde belirlemek için, akı karakteristiğinin eğitim aşamasında ETFM'nin deneysel ölçümlerden elde edilen  $\{(x^0, F^0), (x^1, F^1), \dots, (x^{L-1}, F^{L-1})\}$  formundaki L adet giriş (akım, açı) veri çifti kullanılır. Eğitim aşamasından sonra, test aşamasında eğitim kümesinde yer almayan yeni akım ve açı değerleri için F tahmin edilmektedir. Benzer olarak destek vektör yöntemi, moment karakteristiğinin regresyonuna da uyarlanır.

#### 2.4.1. DVRM uygulama modelleri

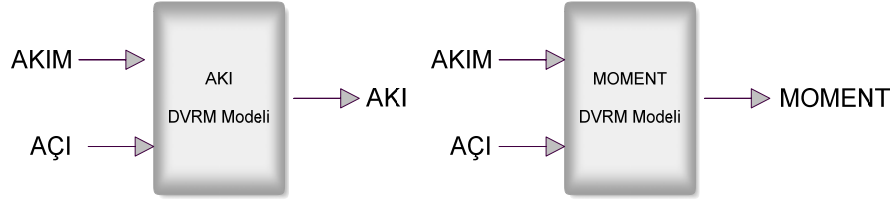
Bu çalışmada, karakteristiklerin DVR ile tahmini için parametreleri birçok deneme yapılarak seçilmektedir. Düzenleme parametresi C, karakteristik tahminindeki yaklaşım başarısını ifade etmede kullanılan bir parametredir. Akı karakteristiği için DVRM modelinde, genişlik parametresi  $\gamma=5$  olan radyal tabanlı Kernel fonksiyon kullanılmıştır.

$$K(x^*, x) = \exp(-\gamma \|x - x^i\|^2) \quad (2.46)$$

Benzer olarak optimal performans için düzenleme parametresi C=100 ve  $\varepsilon=0.001$  olarak alınmaktadır. Akı karakteristiğinin eğitiminde 323 örnekleme verisinden 134'ü destek vektörü olarak hesaba katılmaktadır.

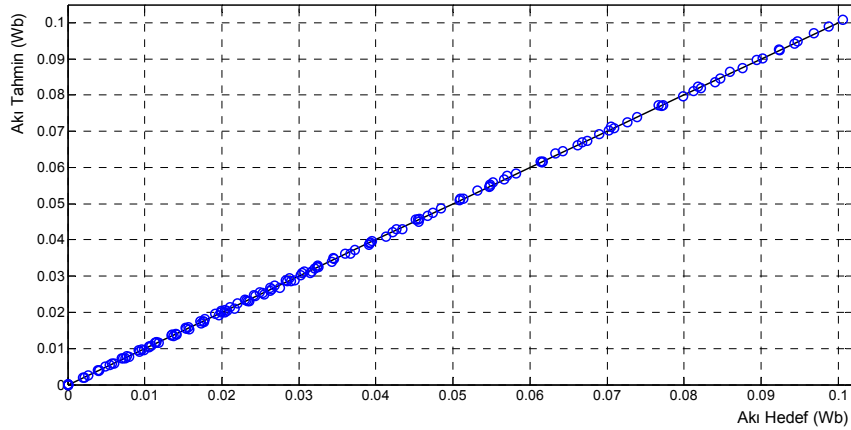
Moment karakteristiğinin DVRM modelinde ise,  $\gamma=50$  ve C=1000 parametreleri ile en yüksek doğruluk elde edilmektedir. Moment karakteristiğinin DVRM modelinin

eğitiminde 627 veriden 320'si destek vektörü olarak hesaplanmaktadır. Şekil 2.18'de akı ve moment tahmini DVRM problemlerinin kara kutu gösterimi verilmektedir.

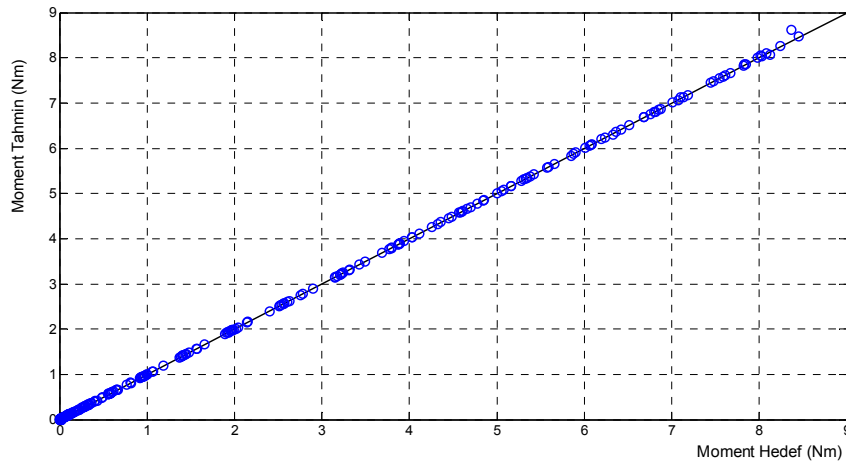


Şekil 2.18. Akı ve Moment tahmini için DVRM modelleri

DVRM yönteminde eğitim aşamasından sonra, moment karakteristiği için test aşamasında yeni akım ve açı değerleri için 304 moment test çıkış verisi ve akı karakteristiği için ise 153 test çıkış verisinin, tahmin sonuçları ile karşılaştırılmasıyla oluşan dağılım eğrileri Şekil 2.19'da gösterilmektedir.



Şekil 2.19. Hedef ve DVRM tahmin sonuçlarının a) akı karakteristiği için karşılaştırma eğrileri



Şekil 2.20. Hedef ve DVRM tahmin sonuçlarının moment karakteristiği için karşılaştırma eğrileri

## 2.5. YSA ve DVRM Modellerinin Hata Analizi

Hedef verisi ile olan uyumluluğu hesaplamak ve DVRM ve YSA modellerinin performansını karşılaştırabilmek için aşağıdaki eşitlikleri kullanarak hata analizleri yapılmaktadır.

$$E_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \frac{|x_i^k - \hat{x}_i^k|}{x_i^k} \quad (2.47)$$

$x_i^k, \hat{x}_i^k$ ; akı karakteristiğinin  $k=1,2,\dots,l$  adet açılış değerlerine göre sırasıyla  $i=1,2,\dots,n$  adet örnek veri için sırasıyla hedef ve tahmin edilen akı değerleridir. Akı ve moment eğrileri için doğruluk ise;

$$\text{dogruluk} = 1 - \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k E_j \quad (2.48)$$

eşitliği ile bulunmaktadır. Tablo 2.4’de, 18°, 11°, 2° açılış değeri için alınan akı eğrilerinden 0-32A aralığındaki akım değerleri için deneysel ölçüm sonuçları ile YSA ve DVRM yöntemlerinden elde edilen sonuçların karşılaştırılması verilmektedir. Denklem (2.47)’e göre,  $l=9$  farklı açılış değeri için alınan her bir akı eğrisinden 0-32A arasındaki  $n=17$  adet akım değeri için iki farklı yöntemden tahmin edilen akı değerleri için hata analizi yapılmış ve Denklem (2.48) kullanılarak hataların toplamlarından doğruluk analizi hesaplanmaktadır.

Tablo 2.4. Farklı açılış değerleri için 0-32A akım aralığında deneysel, YSA ve DVRM yöntemlerinden tahmin edilen akı sonuçlarının karşılaştırılması

| Akım (A) | 18 derece |        |        | 11 derece |        |        | 2 derece |        |        |
|----------|-----------|--------|--------|-----------|--------|--------|----------|--------|--------|
|          | Deney     | YSA    | DVRM   | Deney     | YSA    | DVRM   | Deney    | YSA    | DVRM   |
| 0        | 0         | 0,0113 | 0,0015 | 0         | 0,0027 | 0,0004 | 0        | 0,0004 | 0,0009 |
| 2        | 0,0761    | 0,0707 | 0,0766 | 0,0480    | 0,0457 | 0,0485 | 0,0143   | 0,0159 | 0,0131 |
| 4        | 0,1543    | 0,1521 | 0,1556 | 0,0935    | 0,0925 | 0,0942 | 0,0272   | 0,0300 | 0,0264 |
| 6        | 0,2303    | 0,2288 | 0,2322 | 0,1362    | 0,1371 | 0,1367 | 0,0401   | 0,0433 | 0,0391 |
| 8        | 0,3013    | 0,2988 | 0,3038 | 0,1762    | 0,1789 | 0,1764 | 0,0530   | 0,0559 | 0,0517 |
| 10       | 0,3655    | 0,3614 | 0,3686 | 0,2137    | 0,2175 | 0,2136 | 0,0660   | 0,0677 | 0,0641 |
| 12       | 0,4219    | 0,4168 | 0,4256 | 0,2486    | 0,2527 | 0,2485 | 0,0789   | 0,0792 | 0,0767 |
| 14       | 0,4703    | 0,4651 | 0,4744 | 0,2812    | 0,2848 | 0,2812 | 0,0919   | 0,0909 | 0,0894 |
| 16       | 0,5112    | 0,5065 | 0,5152 | 0,3113    | 0,3141 | 0,3114 | 0,1049   | 0,1032 | 0,1021 |
| 18       | 0,5452    | 0,5416 | 0,5488 | 0,3391    | 0,3411 | 0,3393 | 0,1179   | 0,1161 | 0,1149 |
| 20       | 0,5732    | 0,5713 | 0,5762 | 0,3647    | 0,3659 | 0,3649 | 0,1310   | 0,1292 | 0,1277 |
| 22       | 0,5963    | 0,5968 | 0,5986 | 0,3881    | 0,3888 | 0,3886 | 0,1440   | 0,1424 | 0,1404 |
| 24       | 0,6154    | 0,6186 | 0,6171 | 0,4093    | 0,4097 | 0,4103 | 0,1571   | 0,1556 | 0,1532 |
| 26       | 0,6316    | 0,6369 | 0,6328 | 0,4283    | 0,4286 | 0,4299 | 0,1703   | 0,1688 | 0,1660 |
| 28       | 0,6458    | 0,6522 | 0,6467 | 0,4451    | 0,4451 | 0,4469 | 0,1834   | 0,1819 | 0,1789 |
| 30       | 0,6586    | 0,6649 | 0,6596 | 0,4599    | 0,4588 | 0,4610 | 0,1966   | 0,1951 | 0,1921 |
| 32       | 0,6709    | 0,6762 | 0,6720 | 0,4725    | 0,4694 | 0,4718 | 0,2098   | 0,2083 | 0,2054 |

Akı tahmini için, deneysel, YSA ve DVRM yöntemlerinin hata ve doğruluk analiz sonuçları Tablo 2.5’de verilmektedir.

Tablo 2.5. YSA ve DVRM akı tahmini için hata analizi

|                     | YSA                | DVRM               |
|---------------------|--------------------|--------------------|
| <b>Açı</b>          | <b>Hata</b>        |                    |
| 1°                  | 0,011457562        | 0,005414622        |
| 3°                  | 0,013033656        | 0,002518011        |
| 5°                  | 0,008921297        | 0,003757087        |
| 7°                  | 0,009356167        | 0,002419386        |
| 9°                  | 0,007726156        | 0,006528174        |
| 11°                 | 0,012239434        | 0,013477708        |
| 13°                 | 0,024245817        | 0,020152875        |
| 15°                 | 0,028661428        | 0,027484747        |
| 17°                 | 0,02422929         | 0,02138142         |
| <b>Toplam hata</b>  | <b>0,012849057</b> | <b>0,009083623</b> |
| <b>Doğruluk (%)</b> | <b>0,987150943</b> | <b>0,990916377</b> |

Benzer olarak, Tablo 2.6’da, 13A, 21A, 30A akım değerlerinde alınan moment eğrilerinden 0-18<sup>0</sup> aralığında farklı açı değerleri için deneysel, YSA ve DVRM yöntemlerinden elde edilen sonuçların karşılaştırılması verilmektedir.

Tablo 2.6. Farklı akım değerleri için 0-18° açı aralığında deney, YSA ve DVRM yöntemlerinden tahmin edilen moment değerlerinin karşılaştırılması

| Açı             | 13A     |         |         | 21A     |         |         | 30A      |          |          |
|-----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|
|                 | Hedef   | YSA     | DVRM    | Hedef   | YSA     | DVRM    | Hedef    | YSA      | DVRM     |
| 0 <sup>0</sup>  | 0,00083 | 0,00098 | 0,00017 | 0,00083 | 0,00196 | 0,00149 | 0,001667 | 0,001882 | 0,000375 |
| 1 <sup>0</sup>  | 0,00238 | 0,00162 | 0,00236 | 0,00403 | 0,00417 | 0,00409 | 0,006929 | 0,007225 | 0,005801 |
| 2 <sup>0</sup>  | 0,00383 | 0,00328 | 0,00334 | 0,00984 | 0,00906 | 0,00992 | 0,019543 | 0,019204 | 0,017773 |
| 3 <sup>0</sup>  | 0,00693 | 0,00724 | 0,00688 | 0,01779 | 0,01889 | 0,01781 | 0,036137 | 0,036324 | 0,035074 |
| 4 <sup>0</sup>  | 0,01199 | 0,01245 | 0,01199 | 0,03328 | 0,03359 | 0,03346 | 0,068498 | 0,068655 | 0,066535 |
| 5 <sup>0</sup>  | 0,03051 | 0,03076 | 0,03019 | 0,08250 | 0,08236 | 0,08258 | 0,169894 | 0,170123 | 0,170043 |
| 6 <sup>0</sup>  | 0,17856 | 0,17875 | 0,17909 | 0,40371 | 0,40303 | 0,40354 | 0,677029 | 0,677242 | 0,672621 |
| 7 <sup>0</sup>  | 0,17953 | 0,17959 | 0,18020 | 0,42105 | 0,41945 | 0,42089 | 0,732465 | 0,733441 | 0,759603 |
| 8 <sup>0</sup>  | 0,16804 | 0,16876 | 0,16737 | 0,39832 | 0,39771 | 0,39822 | 0,704432 | 0,704709 | 0,706611 |
| 9 <sup>0</sup>  | 0,16622 | 0,16597 | 0,16620 | 0,38862 | 0,38849 | 0,38880 | 0,68677  | 0,6867   | 0,688376 |
| 10 <sup>0</sup> | 0,16245 | 0,16328 | 0,16272 | 0,38203 | 0,38229 | 0,38148 | 0,673417 | 0,673569 | 0,674856 |
| 11 <sup>0</sup> | 0,16482 | 0,16409 | 0,16518 | 0,38388 | 0,38305 | 0,38429 | 0,667948 | 0,669286 | 0,670434 |
| 12 <sup>0</sup> | 0,16485 | 0,16537 | 0,16445 | 0,38319 | 0,38347 | 0,38271 | 0,664808 | 0,665352 | 0,666963 |
| 13 <sup>0</sup> | 0,16423 | 0,16425 | 0,16466 | 0,38089 | 0,37956 | 0,38138 | 0,652224 | 0,65055  | 0,654875 |
| 14 <sup>0</sup> | 0,16114 | 0,16088 | 0,16080 | 0,37350 | 0,37408 | 0,37301 | 0,620078 | 0,622794 | 0,620718 |
| 15 <sup>0</sup> | 0,16071 | 0,16034 | 0,16109 | 0,37084 | 0,36942 | 0,37097 | 0,591658 | 0,590784 | 0,5936   |
| 16 <sup>0</sup> | 0,16337 | 0,16276 | 0,16415 | 0,36051 | 0,36058 | 0,36015 | 0,556782 | 0,556767 | 0,55783  |
| 17 <sup>0</sup> | 0,15768 | 0,15750 | 0,15773 | 0,30709 | 0,30718 | 0,30739 | 0,430048 | 0,430386 | 0,430873 |
| 18 <sup>0</sup> | 0,00083 | 0,00120 | 0,00117 | 0,00083 | 0,00140 | 0,00177 | 0,001667 | 0,001888 | -0,00019 |

Tablo 2.7. YSA ve SVRM moment tahmininde hata analizi

|                     | YSA            | DVRM           |
|---------------------|----------------|----------------|
| Akım (A)            | Hata           |                |
| 3                   | 0.13429        | 0.08205        |
| 5                   | 0.02601        | 0.01439        |
| 7                   | 0.01709        | 0.00806        |
| 9                   | 0.01093        | 0.00529        |
| 11                  | 0.00580        | 0.00462        |
| 13                  | 0.00371        | 0.00331        |
| 15                  | 0.00487        | 0.00245        |
| 17                  | 0.00290        | 0.00242        |
| 19                  | 0.00300        | 0.00157        |
| 21                  | 0.00257        | 0.00124        |
| 23                  | 0.00268        | 0.00117        |
| 25                  | 0.00172        | 0.00149        |
| 27                  | 0.00197        | 0.00096        |
| 29                  | 0.00250        | 0.00386        |
| 31                  | 0.00136        | 0.00725        |
| <b>Toplam hata</b>  | <b>0.01476</b> | <b>0.00934</b> |
| <b>Doğruluk (%)</b> | <b>98.524</b>  | <b>99.066</b>  |

Tablo 2.7’de ise  $l=15$  farklı akım değeri için alınan her bir moment eğrisinden  $0-18^0$  aralığındaki  $n=17$  adet aç değeri için iki farklı yöntemin sonuçları için yapılan hata ve doğruluk analizi sunulmaktadır.

Yapılan analizlerden DVRM yönteminin akı karakteristiği için doğruluğunun 99.092% ve moment karakteristiği için ise 99.066% olduğu görülmektedir. DVRM yönteminin nonlinear regresyon yapabilme yeteneğinin ETFM’in akı ve moment karakteristiklerinin elde edilmesinde oldukça başarılı sonuçlar verdiği görülmektedir. Gelecekteki çalışmalarda daha fazla doğruluk istenen uygulamalarda DVRM’in ANN yöntemi yerine kullanılabileceği görülmektedir.

### **3. E-ÇEKİRDEK ÇAPRAZ AKI MAKİNASININ EGZERSİZ BİSİKLETİ UYGULAMASI İÇİN SİMÜLASYONU ve DENEYSEL ÇALIŞMASI**

Simülasyon, farklı koşullar altında teorik ya da gerçek fiziksel bir sisteme ait geçici hal davranışlarının analiz edilebilmesi ve çalışma performansının izlenebilmesi için kullanılan bir modelleme tekniğidir. Sistemlerin tasarımı, yenilenmesi ve geliştirilmesi aşamalarında bilgisayar destekli simülasyon yazılımlarının kullanılması önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu sayede, uzun ve yüksek maliyetli deneysel çalışmalar yardımıyla ulaşılabilecek sonuçlar daha kısa sürede ve düşük maliyetle elde edilmektedir.

Bu bölümde, bir egzersiz bisikleti uygulamasında kullanılan E-Çekirdek Çapraz Akı Makinasının (ETFM) sistemin tüm kontrol algoritmasını ve referans tablolarını da içeren simülasyonuna yer verilmektedir. ETFM'in generatör olarak çalıştırıldığı egzersiz bisikleti uygulaması için laboratuvar ortamında hazırlanan deney düzeneğinden bahsedilmektedir. Deneysel çalışmadan elde edilen akım ve gerilim dalga şekilleri simülasyon sonuçları ile karşılaştırılarak yapılan çalışma doğrulanmaktadır.

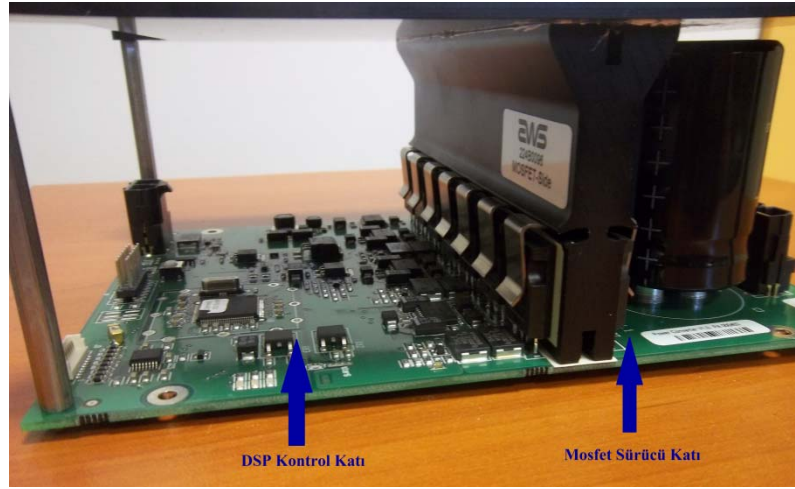
#### **3.1. E-Çekirdek Çapraz Akı Makinası (ETFM) Sisteminin Simülasyonu**

Simülasyon Matlab/Simulink ortamında gerçekleştirilmektedir. Simülasyon egzersiz bisikleti uygulamasında dişli ve seviye seçimine göre biniciye uygulanacak referans moment, referans akım ve faz enerjilendirme açısı tablolarını içermektedir. Ayrıca, PI akım kontrolörü, ETFM akım ve moment yapay sinir ağı blokları, elektriksel devresi, sürücü ve anahtarlama devrelerini de içeren simülasyon modelleri ayrıntılı olarak bu bölümde verilmektedir.

##### **3.1.1. Sürücü ve anahtarlama devresi**

ETFM'nin en ideal performansta çalışma şartlarını sağlayabilmek için güç elektroniği devresine ihtiyaç duyulmaktadır. Çalışma prensibine göre, rotor konumunun izlenmesi ile elde edilen konum bilgilerine bağlı olarak uygun stator

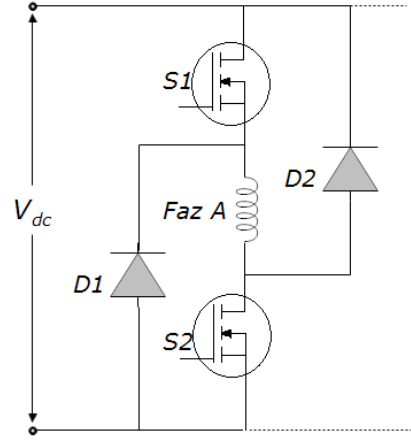
fazının sürücü devre elemanları ile kaynağa bağlanarak enerjilendirilmesi ve uygun zamanda da güç anahtarlarının kesime sokulması gerekmektedir. Bu çalışmada ETFM uygulamasında, bir faz sargısı için iki yarı iletken güç anahtarlama elemanının bulunduğu bir sürücü devresi kullanılmaktadır. Sürücü devresindeki anahtarların tetiklenmesi ise bir DSP (TMS320C2x) tabanlı kontrol devresi tarafından yapılmaktadır. Şekil 3.1’de gerçek sistem uygulamasında kullanılan ETFM sürücü ve kontrol devresi gösterilmektedir.



Şekil 3.1. E-Çekirdek çapraz akı makinası sürücü devresinin resmi

Şekil 3.2’de gösterildiği gibi sürücü devresinde her faz için iki adet MOSFET ve iki adet diyot bulunmaktadır. Sürücü devresinde enerji verilecek olan fazın iletim açısında ( $\theta_{on}$ ), faz sargısına seri bağlı anahtarlama elemanları S1 ve S2 MOSFET’lerinin her ikisi de iletime sokulur. Böylece doğru gerilim kaynağı, faz sargısını enerjilendirir ve faz akımı yükselmeye başlar. Referans akım değerine ulaştığında, akımı sabit tutmak için kıyılma moduna geçilir. S1 ve S2 anahtarının her ikisi de iletimde olduğunda diyotlar üzerinden herhangi bir akım akmaz ve faza +24V gerilim uygulanır. Anahtarlar kesimde iken akım, D1 diyodu ve D2 diyodu üzerinden devam eder. Böylece faz sargısına -24V gerilim uygulanmış olur. Uygun açıda, ilgili fazın enerjisi kesilmek istendiğinde her iki MOSFET’in de aynı anda kesime girmesi sağlanır. Kesime sokulan faz sargısı mıknatıslığı gidene kadar -24V gerilim görür ve faz akımı da sıfıra doğru azalır.





Şekil 3.2. Makinanın bir fazı için sürücü devresi

Anlaşıldığı üzere faz akımı, iletim ( $\theta_{on}$ ) ve kesim açıları ( $\theta_{off}$ ) ile doğrudan ilişkilidir. Her çalışma noktasında, en uygun açma ve kapatma açısı yükün elektriksel güç ihtiyacına göre veya basit formüllerle hesap edilerek ayarlanır. Uygulama sisteminde referans moment ve referans hız çalışma değerlerine göre değişen enerjilendirme açısı değeri kontrol devresinde tablo haline getirilmiş olup simülasyonda ise look-up tablolarından sağlanmaktadır. Faz iletim süresi tüm çalışma durumlarında sabit olacak şekilde kesim açısı ayarlanmaktadır.

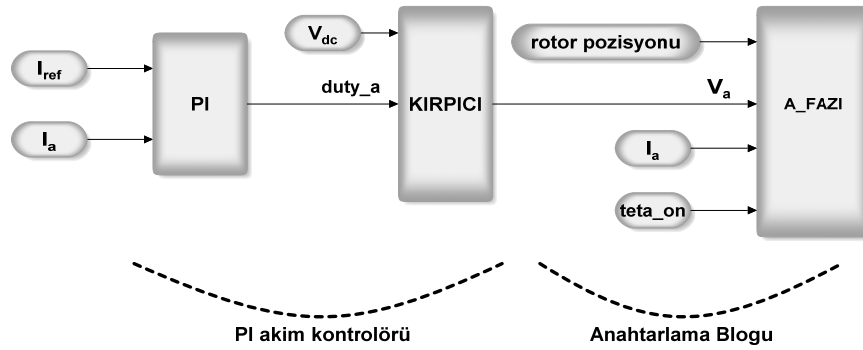
### 3.1.2. Akım kontrolü

ETFM'ni uygulamada istenen momentte çalıştırabilmek için verilen referans akım değerinde çalışmasını sağlamak gerekmektedir. Lineer olmayan sistemlerin akım kontrolünde, basit yapısı, yüksek güvenilirliği ve sisteme kolay uyarlanabilmesi gibi pek çok avantajları bulunan PID kontrol yöntemi sıkça kullanılmaktadır. Gürültüyü azaltmak için diferansiyel kontrol kullanılmamaktadır ve PI kontrol ETFM egzersiz bisikleti kontrol sistemine adapte edilmektedir.

PI kontrol ile uygulanan kaynak gerilimi kırılarak faz akımı referans değerine ayarlanmaktadır. Referans akım değeri, rotor hızına ve yükün moment gereksinimine göre değişmektedir. Kontrol algoritmasında referans akım ile makinanın çalışma akımı karşılaştırılarak, bir hata akımı oluşturulmaktadır. PI kontrolör çıkışında bir değer üretmektedir. Bir modülatör ile bu değer 0-100 aralığında bir çevrim aralığı değerine dönüştürülerek, bir üçgen dalga ile karşılaştırılır. Karşılaştırma sonucunda üretilen 0 ve 1 çıkış değerlerine göre

anahtarlama sürücü devresi ile gerilim regüle edilerek faz akımı istenen değerde tutulmaya çalışılmaktadır. ETFM'nin egzersiz bisikleti uygulamasında akım kontrolünü sağlamak için sürücü devresinin anahtarlama frekansı 20KHz ile yapılmaktadır.

Gerilimi  $\pm 24V$ 'da regüle eden kırpıcı, kırpıcının görev çevrim aralığını belirleyen PI kontrol ve faz anahtarlama bloğunu içeren kontrol algoritması Şekil 3.3'de resmedilmektedir.



Şekil 3.3. E-Çekirdek çapraz akı makinasının akım kontrol modeli

PID kontrolör sürekli zaman formunda şu şekilde gösterilmektedir;

$$u(t) = K \left( I_{ref}(t) - I_{faz}(t) \right) + \frac{K}{T_i} \int_{-\infty}^t (I_{ref}(\tau) - I_{faz}(\tau)) d\tau \quad (3.1)$$

$$u(t) = K \left\{ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_{-\infty}^t e(\tau) d\tau \right\} \quad (3.2)$$

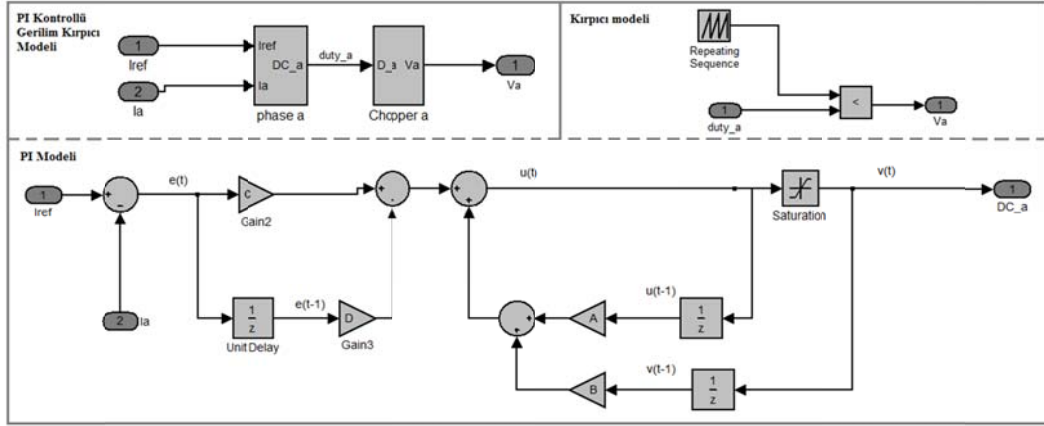
Eşitlik ayrık zaman formunda yeniden düzenlenerek;

$$u(t) = u(t-h) + K \left\{ e(t) - \left( 1 - \frac{h}{T_i} \right) e(t-h) \right\} \quad (3.3)$$

şeklinde ifade edilebilir [97]. Sistemin PI kontrolörünün denklemlerdeki katsayıları düzenlendiğinde ayrık zaman formunda tekrar yazılarak;

$$\vartheta_n(t) = A\vartheta_n(t-h) + Bu_n(t-h) + Ce(t) - De(t-h) \quad (3.4)$$

denkleminde göre simülasyon modeli oluşturulmaktadır. Şekil 3.4'de sistemin PI kontrol algoritmasının simülasyon bloğu verilmektedir.



Şekil 3.4. PI kontrol blokları

### 3.1.3. ETFM'nin elektriksel devresi

Bilindiği gibi, ETFM'nin elektriksel eşitliklerinden elde edilen faz başına akı değişimi;

$$\lambda_{faz}(\theta, i) = \int (V_{faz} - R i_{faz}) dt \quad (3.5)$$

denklemleriyle ifade edilebilmektedir. Faz başına akı büyüklüğü, faz gerilimi ile sargı direnci üzerindeki gerilim düşümünün farkının  $[0, t]$  zaman aralığındaki integrali ile orantılıdır. Stator ve rotor kutup sayıları 15/10 olan ETFM için,

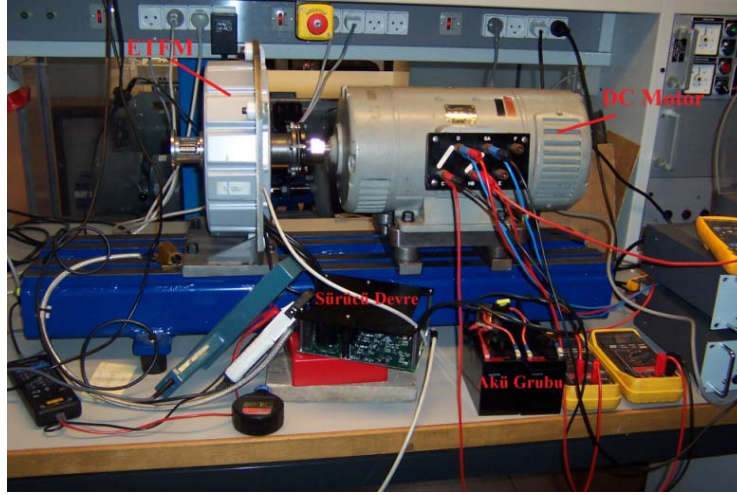
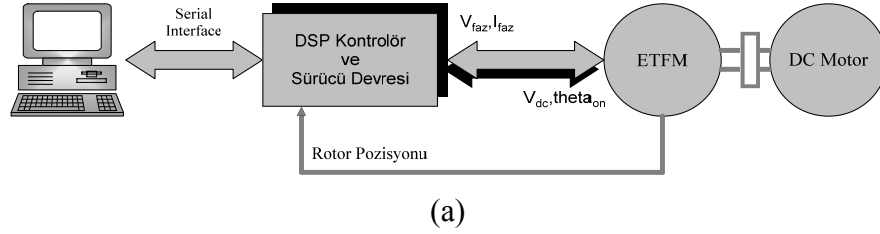
$$\theta_r = 360 / N_r \quad (3.6)$$

eşitliği ile hesaplandığında 36 derecelik elektriksel periyot tanımlanır. ETFM'nin simülasyonu için hazırlanan elektriksel eşdeğer devre bloğunda faz akımı ve momentinin elde edilebilmesi için, makinanın manyetik karakteristiklerinin tanımlanması gerekmektedir. Bu karakteristik değerlerinin doğru olarak elde edilmesi ve kullanılması, simülasyonun doğruluğunu da doğrudan etkileyeceğinden büyük önem taşımaktadır. Önceki bölümde yapay sinir ağları yöntemi kullanılarak başarılı şekilde elde edilmiş olan faz akımı ve moment modellerinden ETFM'nin her bir fazının benzetimi için de faydalanılmaktadır.

Akım YSA modülü, her bir fazın akı ve rotor pozisyonuna göre akım değerini tahmin etmek için kullanılmaktadır. Moment YSA modülü ise, akım ve rotor pozisyonundan moment değerini tahmin etmek için kullanılmaktadır. Şekil 3.5'de ETFM'nin YSA modelleri ile simülasyonuna ilişkin elektriksel blok şeması verilmektedir.



elektronik sistem için enerji üretmekte ve generatöre ilk enerjiyi veren aküleri doldurmaktadır.



(b)

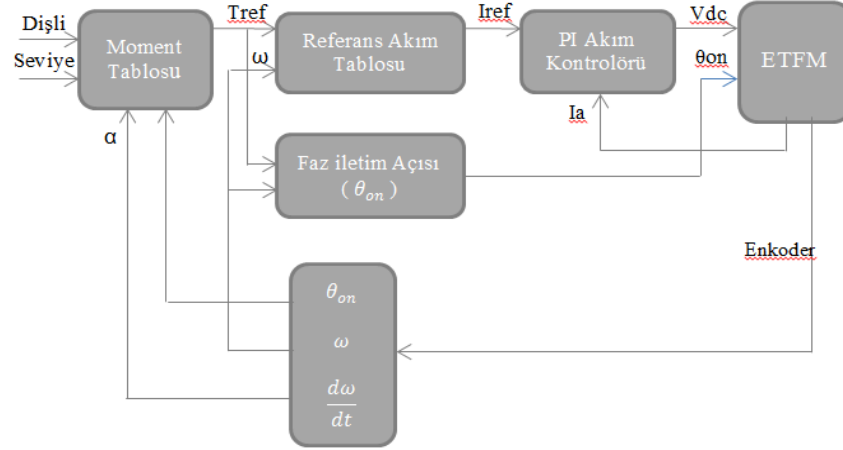
Şekil 3.7. Deneysel sistemin a) şematik gösterilimi b) gerçek sistem görüntüsü

Çalışmaya başlamadan önce sistemin kontrol programı sürücü kartında bulunan DSP işlemcisine yüklenmektedir. Daha sonra basit bir arayüz programı ile dişli (Dişli) ve seviye (seviye) değerleri ayarlanarak ETFM'nin egzersiz bisikletinde uygulanan yük durumu laboratuvar çalışmasında da gerçekleştirilmektedir. Şekil 3.8'de arayüz programı gösterilmektedir.

Ayarlanan değerlere göre sistem referans momentini üretilmektedir. Referans moment ve pozisyona göre referans akım değeri PI kontrolörde akım kontrolörüne iletilmektedir. Farklı yük durumları ve hız değerleri için değişen iletim açısı da sisteme iletilmektedir. Şekil 3.9.'da ise sistemin kontrol yapısı görülmektedir.



Şekil 3.8. Egzersiz bisikleti uygulaması için kullanılan arayüz programı



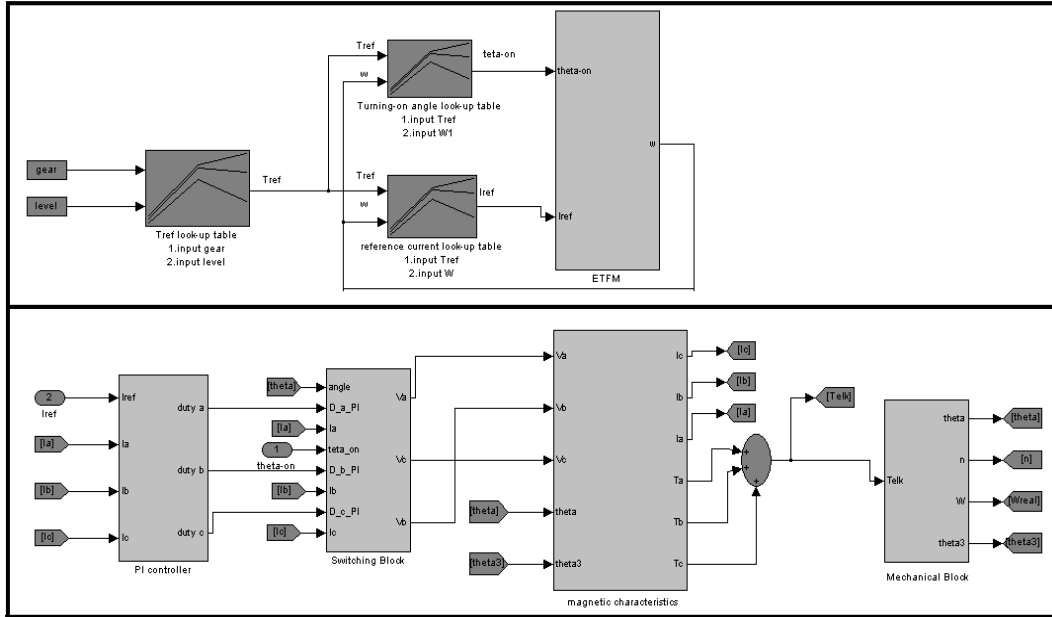
Şekil 3.9. E-Çekirdek Çapraz Akı Makinasının generator çalışma sisteminin kontrol yapısı

### 3.3. ETFM Sisteminin Simülasyon ve Deneysel Sonuçlarının Karşılaştırılması

Simülasyonun giriş parametreleri dişli, seviye ve referans hız değerleri olmaktadır. Verilen dişli ve seviye değerlerine göre çalışma hızında istenen referans akım ve faz iletim açısı kontrol algoritmasından elde edilmektedir. Akım kontrolörü ile her faz 12'şer derecelik aralıklarla sürücü devresi ile enerjilendirilmektedir. Her fazın aktif olma süresi iletim açısından sonra 13 derece ile sabitlenmektedir. Sistemin manyetik karakteristikleri yapay sinir ağları ile oluşturulan modellerle sağlanmakta ve elektrik devrelerinin simülasyonu yapılabilmektedir. Fazların elektriksel açı aralıkları da 36 derecelik periyodlarla ayarlanmaktadır. Simülasyonun çıkışında her bir faz için akı,

akım ve moment bilgileri elde edilmektedir. Bu bölümde simülasyon çıktıları ve test sisteminden alınan akım ve gerilim dalga şekilleri verilmektedir.

Şekil 3.10'da ETFM sisteminin ve egzersiz bisikleti uygulamasının kontrol yapısını da içeren ve Matlab/Simulink ortamında gerçekleştirilen simülasyon modeli görülmektedir.



Şekil 3.10. E-Çekirdek Çapraz Akı Makinasının ve egzersiz bisikleti uygulaması için simülasyon blokları

Şekil 3.11'de dişli=4, seviye=7,  $\omega=504.39$  d/dk giriş değerleri için üç faza ait akım, akı ve moment değişimlerini gösteren simülasyon sonuçları verilmektedir. Kontrol algoritmasında verilen giriş değerlerine göre faz iletim açısı  $\theta_{on}=16.86$  derece ve istenen moment değerini sağlamak için referans akım değeri 12.3A olmaktadır.

Şekil 3.12'de, dişli=4, seviye=7,  $\omega=504.39$  d/dk bir faz için simülasyondan ve gerçek sistemden deneysel olarak elde edilen gerilim ve akım dalga şekilleri verilmektedir. Ayrıca, simülasyonun doğruluğunu kanıtlamak için bir faza ait akım dalga şeklinin gerçek sistemden osiloskopta alınan akım dalga şekli ile karşılaştırılması da sunulmaktadır.

Şekil 3.13'de dişli=5, seviye=4,  $\omega=497.08$  d/dk giriş değerleri için simülasyondan elde edilen üç faza ait akım, akı ve moment dalga şekilleri gösterilmektedir. Çalışma şartlarındaki akım referans  $I_{ref}=6.38A$  ve faz iletim açısı  $\theta_{on}=16.1^\circ$  uygulanmaktadır.

Şekil 3.14’de ise dişli=5, seviye=4,  $\omega=497.08$  d/dk çalışma durumundaki simülasyon ve gerçek sistemden alınan akım ve gerilim dalga şekilleri verilmektedir. Bir faz akımına ait gerçek sistem ve simülasyon dalga şekillerinin karşılaştırılması yapılmaktadır.

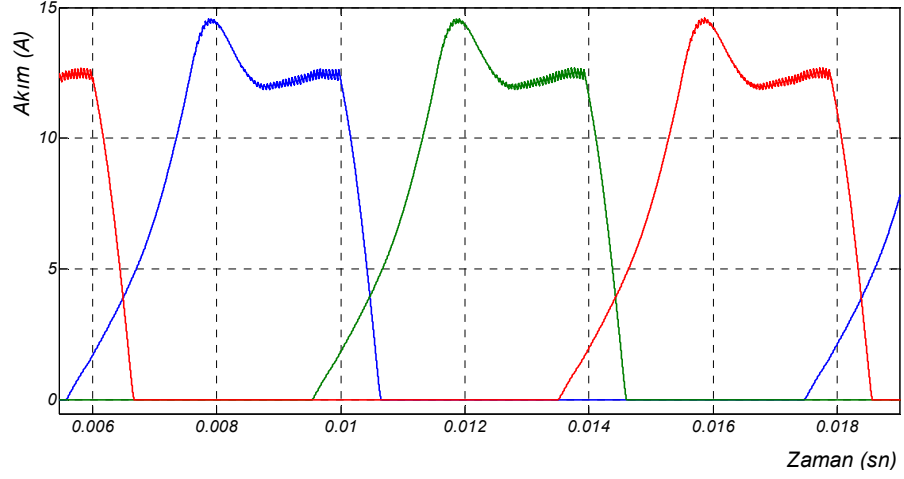
Şekil 3.15’de dişli=6, seviye=5,  $\omega=372.81$  d/dk giriş değerleri ve  $I_{ref}=9.81A$ ,  $\theta_{on}=16.33^\circ$  için üç faza ait akım, akı ve moment simülasyon dalga şekilleri verilmektedir.

Şekil 3.16’da ise dişli=6, seviye=5,  $\omega=372.81$  d/dk çalışma durumundaki simülasyon ve gerçek sistemden alınan akım ve gerilim dalga şekilleri verilmektedir. Bir faz akımına ait gerçek sistem ve simülasyon dalga şekillerinin karşılaştırılması yapılmaktadır.

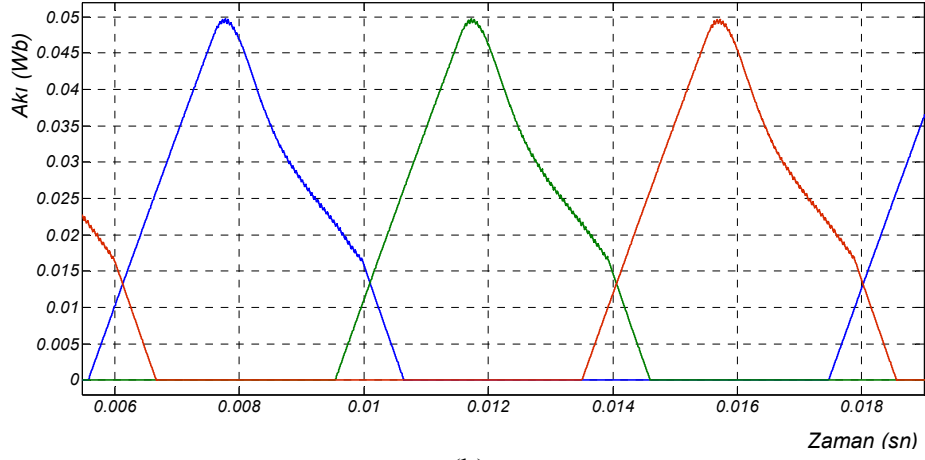
Şekil 3.17’de dişli=10, seviye=6,  $\omega=358.68$  d/dk giriş değerleri için simülasyondan elde edilen üç faza ait akım, akı ve moment dalga şekilleri gösterilmektedir. Çalışma şartlarındaki akımın referans değeri  $I_{ref}=14.3A$  ve faz iletim açısı  $\theta_{on}=16.2^\circ$  olarak uygulanmaktadır.

Şekil 3.18’de ise dişli=10, seviye=6,  $\omega=358.68$  d/dk çalışma durumundaki simülasyon ve gerçek sistemden alınan akım ve gerilim dalga şekilleri verilmektedir. Test sistemi ve simülasyon sonuçlarından elde edilen bir faz akım dalga şekillerinin karşılaştırılması yapılmaktadır.

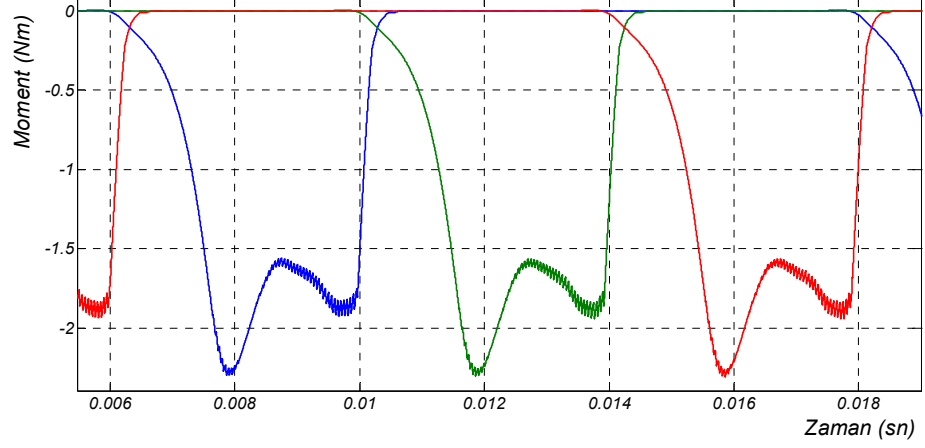




(a)

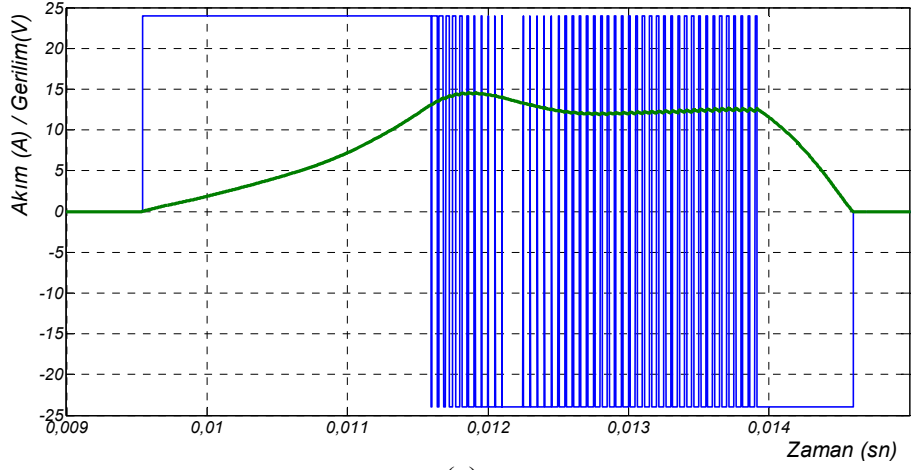


(b)

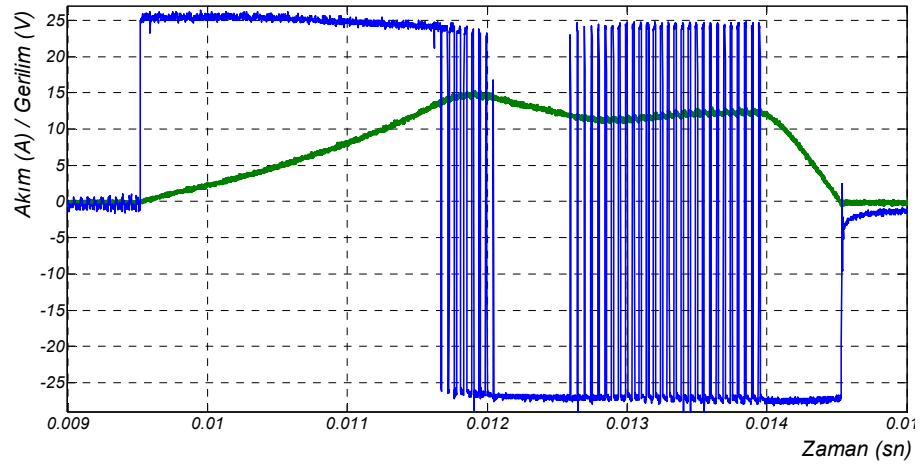


(c)

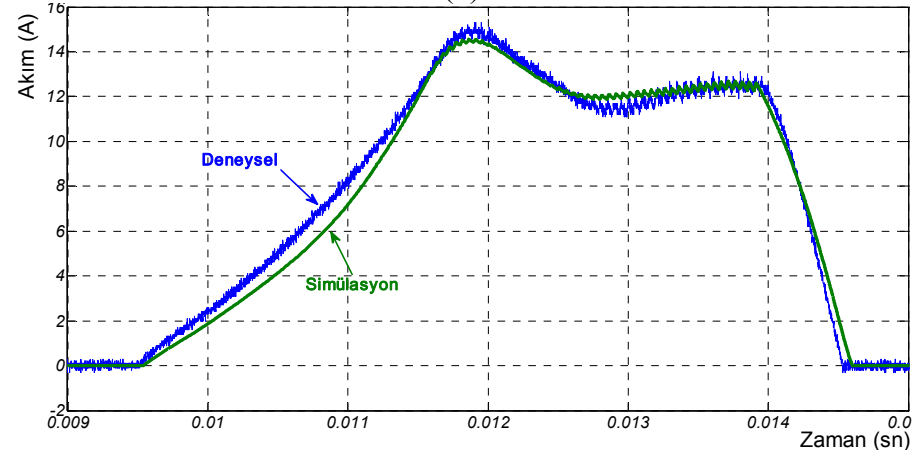
Şekil 3.11. Dişli=4, seviye=7,  $\omega=504.39$  d/dk değerleri için üç faza ait a) akım, b) akı, c) moment dalga şekilleri



(a)

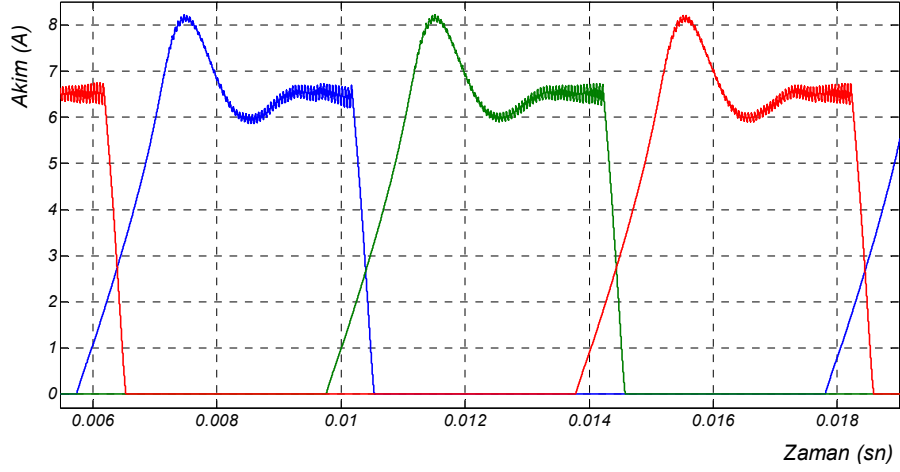


(b)

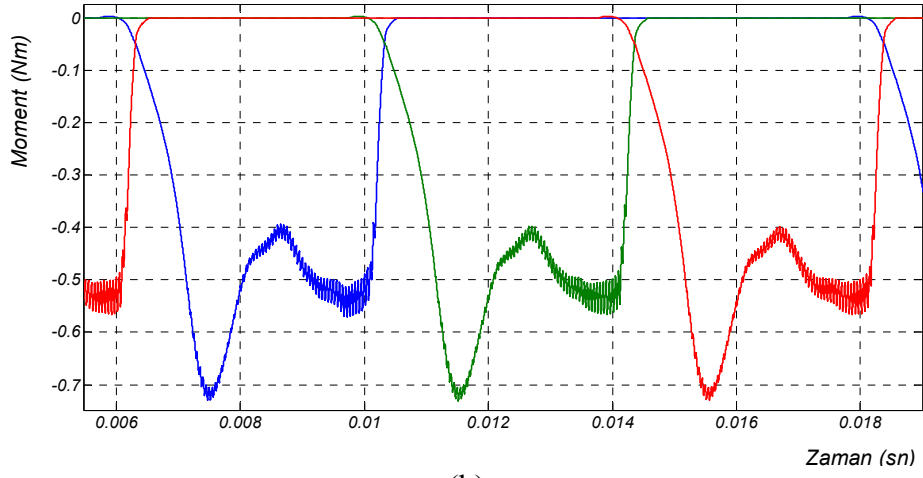


(c)

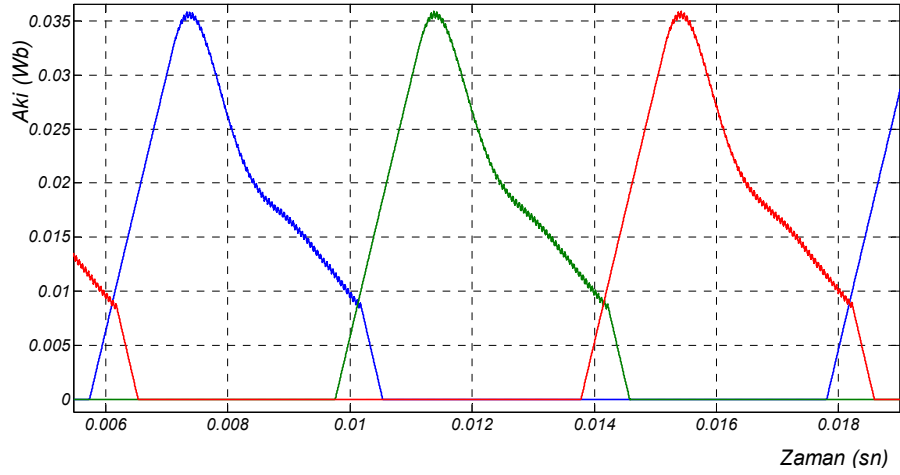
Şekil 3.12. Dişli=4, seviye=7,  $\omega=504.39$  d/dk için, a) simülasyon, b)gerçek sistem akım ve gerilim dalga şekilleri, c) akım dalga şekillerinin karşılaştırılması



(a)

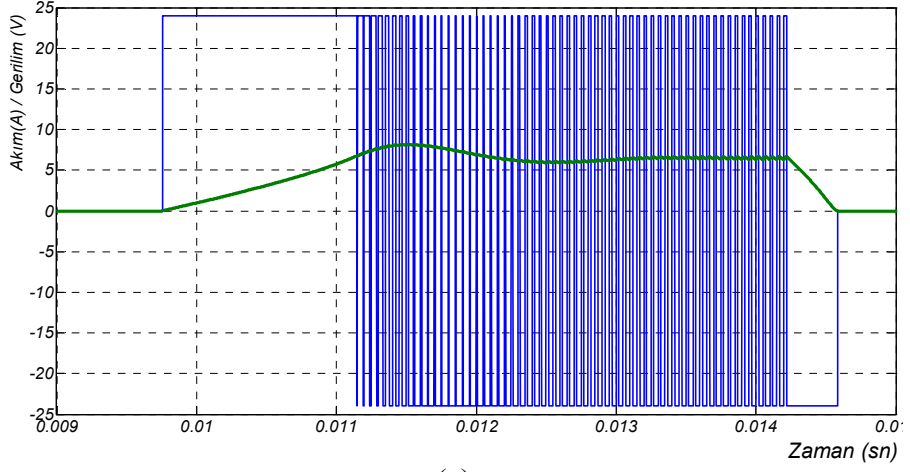


(b)

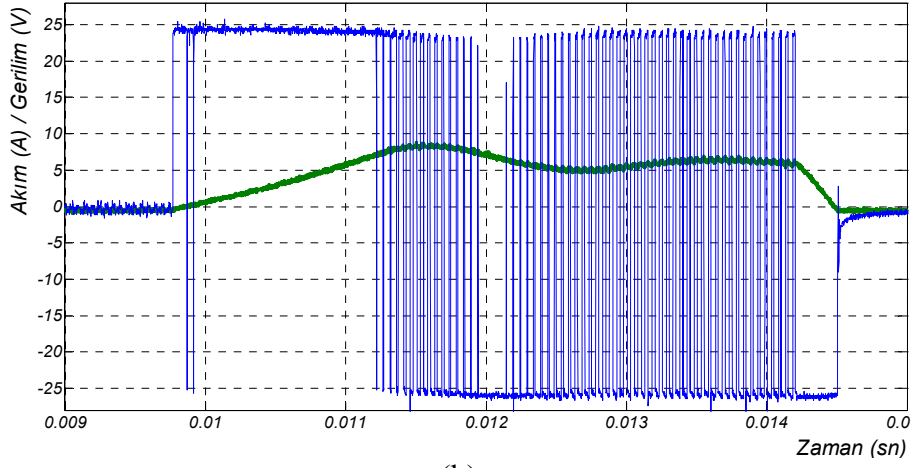


(c)

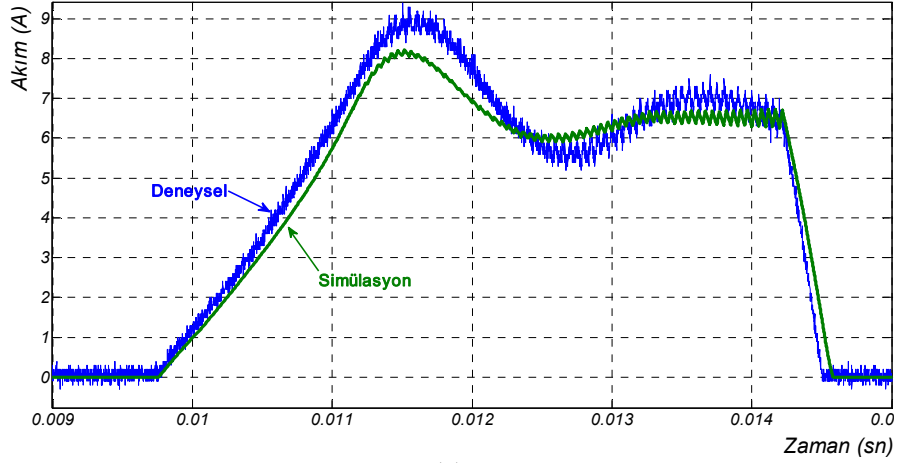
Şekil 3.13. Dişli=5, seviye=4,  $\omega=497.08$  d/dk üç faza ait a akım, b) akı, c) moment dalga şekilleri



(a)

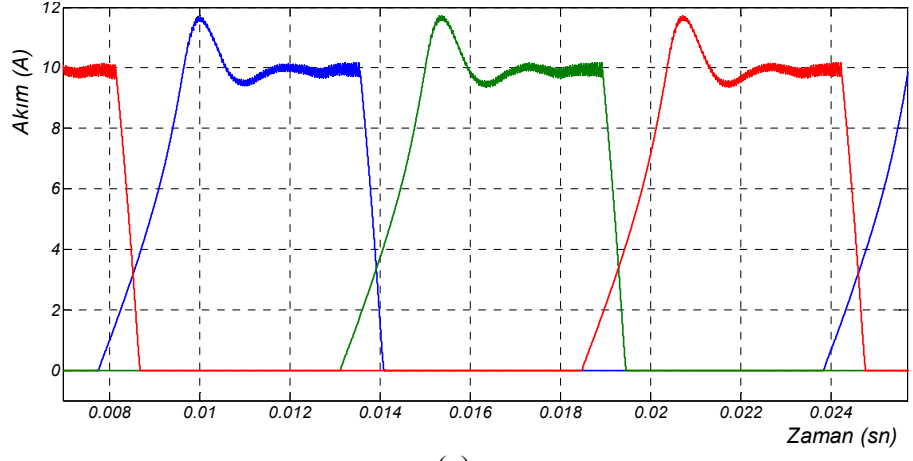


(b)

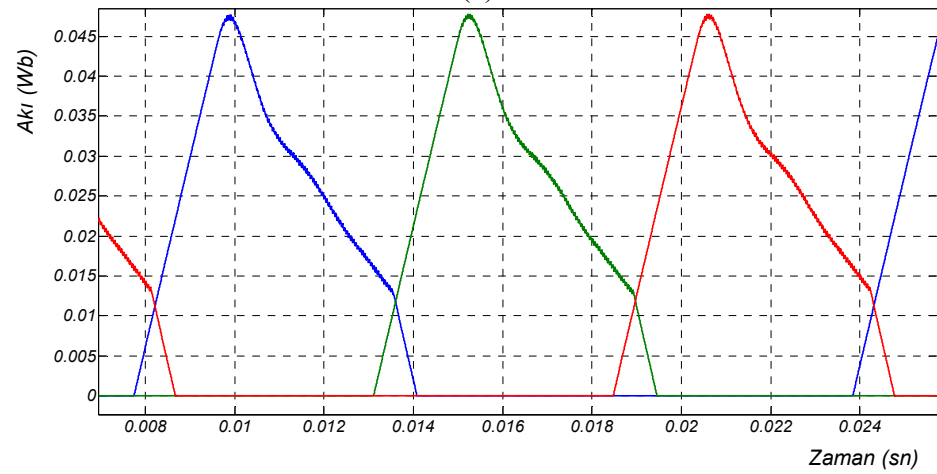


(c)

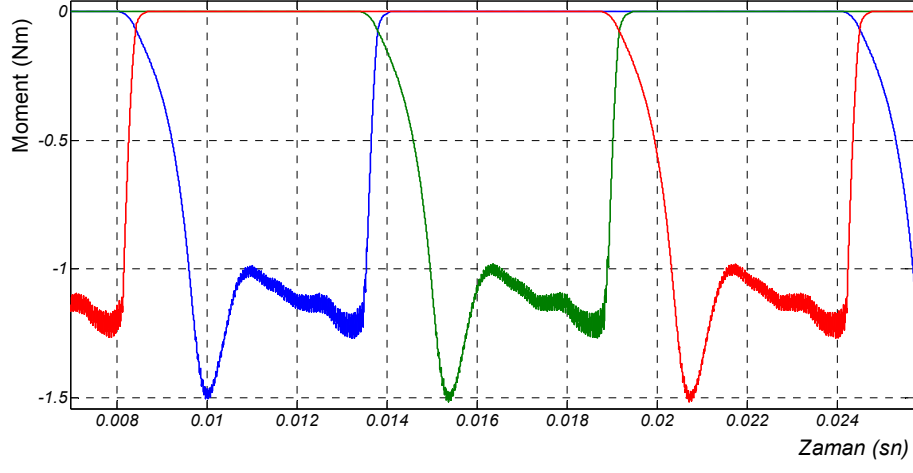
Şekil 3.14. Dişli=5, seviye=4,  $\omega=497.08$  d/dk, a) simülasyon, b) gerçek sistem bir faz akım ve gerilim dalga şekilleri, c) bir faz akım dalga şekillerinin karşılaştırılması



(a)

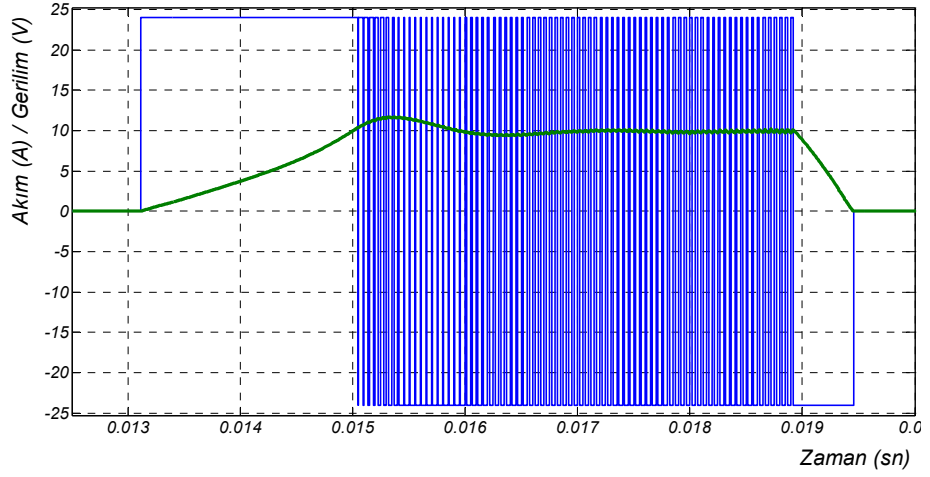


(b)

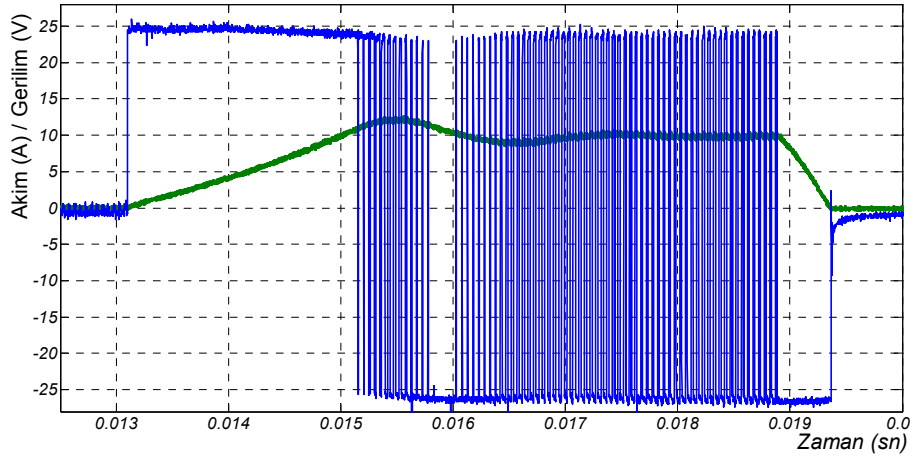


(c)

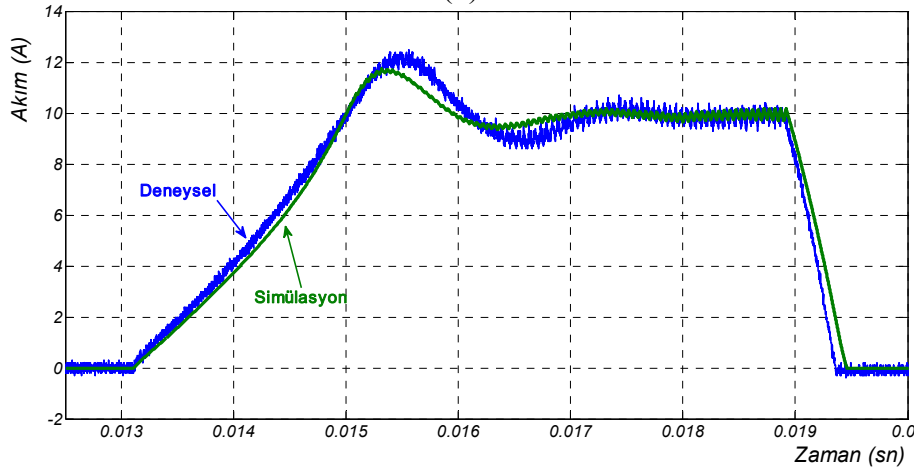
Şekil 3.15. Dişli=6, seviye=5,  $\omega=372.81$  d/dk değerleri için üç faza ait a) akım, b) akı, c) moment dalga şekilleri



(a)

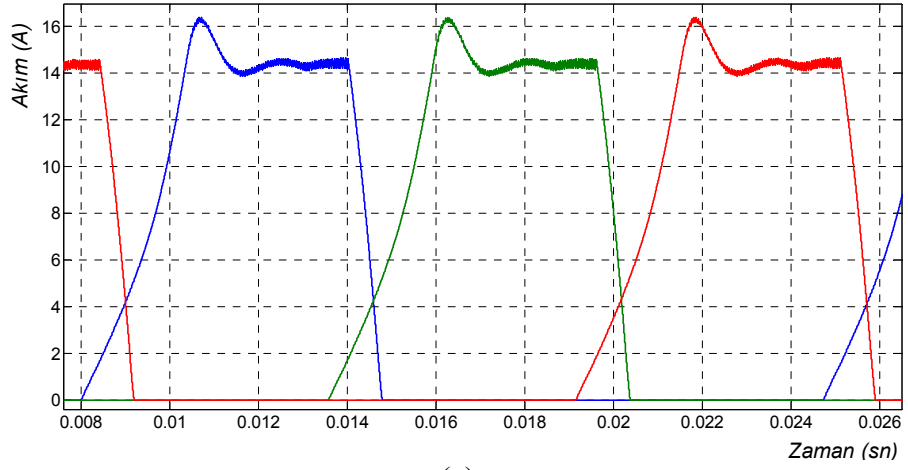


(b)

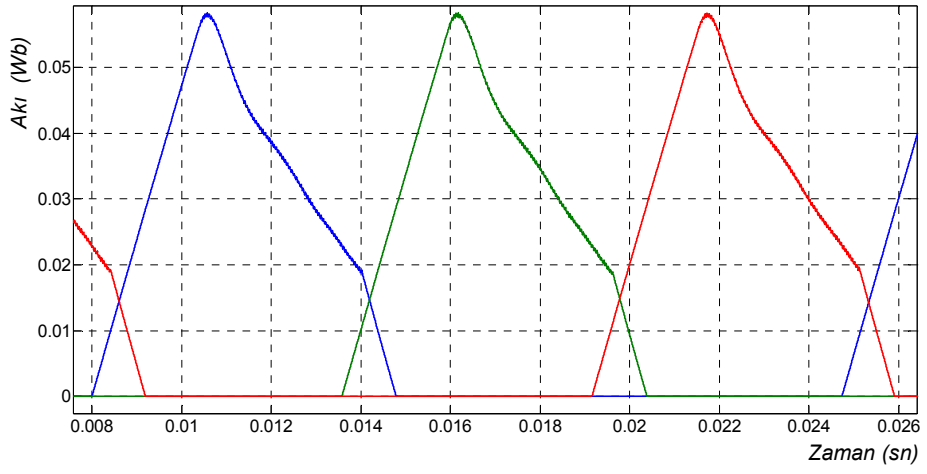


(c)

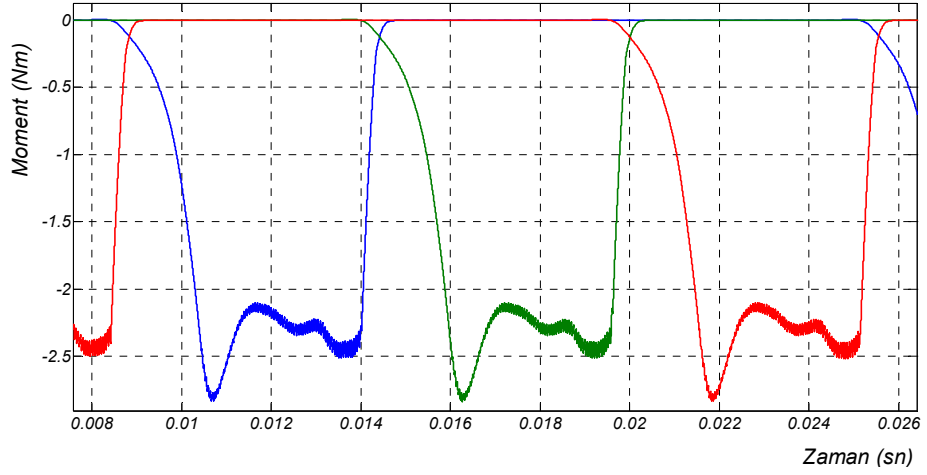
Şekil 3.16. Dişli=6, seviye=5,  $\omega=372.81$  d/dk değerleri için  
a) simülasyon, b) gerçek sistem bir faza ait akım ve gerilim dalga şekilleri, c) bir faz akım dalga şekillerinin karşılaştırılması



(a)

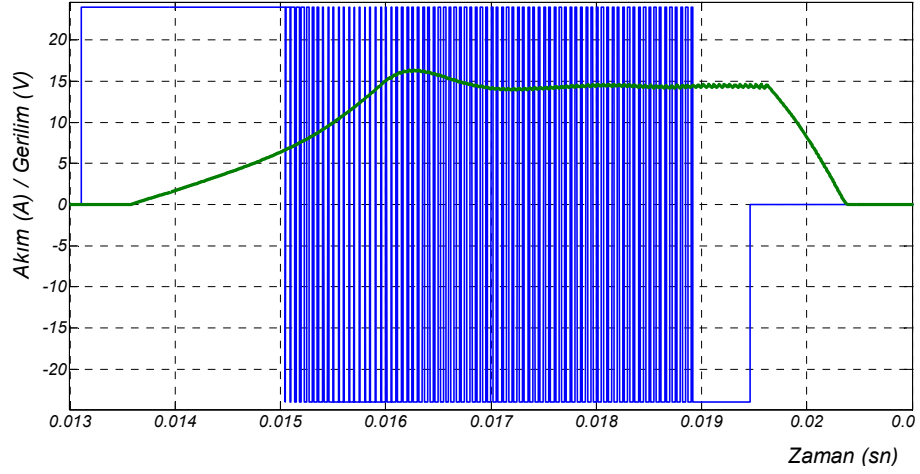


(b)

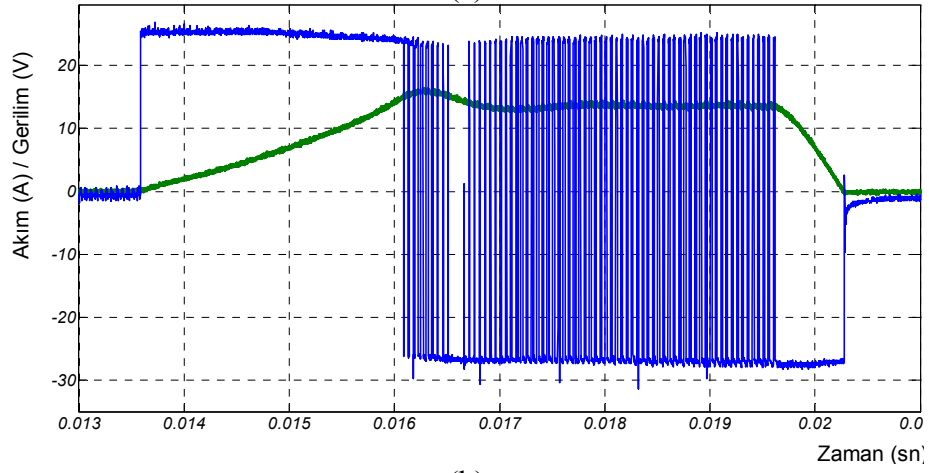


(c)

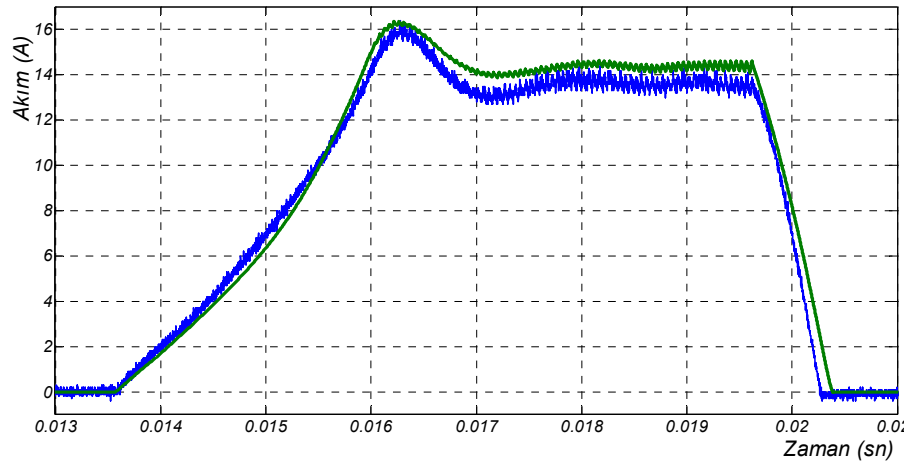
Şekil 3.17. Dişli=10, seviye=6,  $\omega=358.68$  d/dk değerleri için, a) akım, b) akı, c) moment dalga şekilleri



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.18. Dişli=10, seviye=6,  $\omega=358.68$  d/dk, a) simülasyon, b) gerçek sistem bir faz akım ve gerilim dalga şekilleri, c) bir faz akım dalga şekillerinin karşılaştırılması



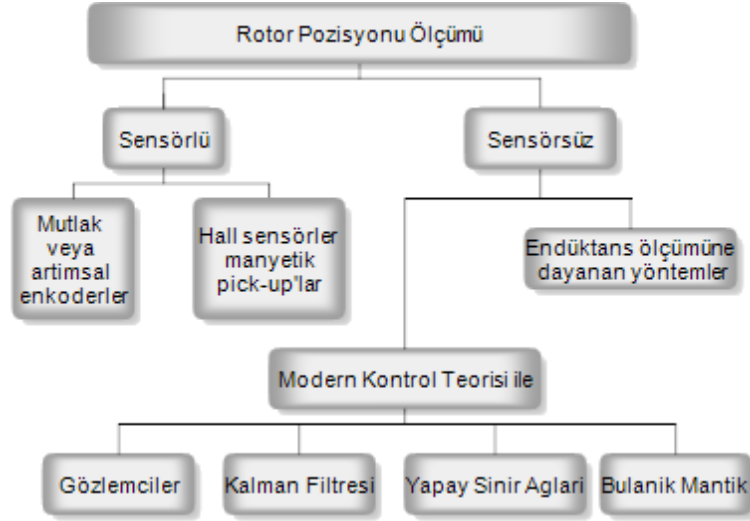
#### **4. E-ÇEKİRDEK ÇAPRAZ AKI MAKİNASININ YAPAY SİNİR AĞLARI (YSA) GÖZLEMCİSİ İLE ROTOR POZİSYONU TAHMİNİ**

ETFM'nin relüktans makinası çalışma mantığına göre, bir fazdan diğerine akım geçişini sağlamak için rotorun stator eksenine göre konumunun algılanması gerekmektedir. Mil üzerine yerleştirilen hall sensörü, enkoder veya resolver gibi mekanik elemanlarla rotor pozisyonu bulunabilir veya algılayıcısız yöntemler kullanılabilir.

Makina ve kontrol sistemleri arasındaki bağlantıların fazla olması, sıcaklık, nem, titreşim gibi çevresel faktörlerin algılayıcıların doğruluğunu olumsuz etkilemesi, özellikle küçük güçlü motorlarda ilave sistem maliyeti, elemanların motora yerleştirilmesinde yaşanan sorunlar gibi nedenlerle uygulamalarda algılayıcısız pozisyon tahmini yöntemleri üzerinde uzun süreden beri çalışılmaktadır.

Algılayıcı kullanmadan pozisyon ve hız tahminini kullanılan yöntemler uygulamalarda; donanım karmaşıklığı ve maliyetini azaltmak, mekanik güvenilirliği arttırmak, elverişsiz ortamlarda çalışabilme, daha yüksek güvenilirlik, bakım ihtiyaçlarını azaltmak, gürültü bağışıklığını artırmak, makinanın ataletini olumsuz etkilememesi gibi avantajları da beraberinde getirmektedir.

Rotor pozisyonuna bağlı olarak kontrol edilmesi gereken elektrik makinalarında algılayıcısız açı ve hız tahmini için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu konuda yapılan bilimsel çalışmalar incelendiğinde, elektrik makinalarında kullanılan rotor pozisyonunu tahmin etme yöntemleri Şekil 4.1'deki gibi gruplandırılabilir. Algılayıcısız yöntemlerin çoğu, hız ve konum tahminleri için faz akımlarına ve uygulanan gerilim değerlerine ihtiyaç duymaktadırlar. Akım algılanması maliyetli değildir, ancak yüksek bant aralıklı gerilim algılayıcıları yüksek maliyetli olmaktadır. Alternatif olarak kontrol kademesi, izole edilen kapı tetikleme sinyalleri ve doğru gerilim kaynağı kullanılarak düşük maliyetli bir gerilim algılayıcısı ve tahmin edicisi gerçekleştirilebilir.



Şekil 4.1. Rotor pozisyonu tahmin yöntemleri

Rotor hızına bağlı olmaksızın bir kutup adımında bir fazın her akım değeri için, endüktans ve rotor pozisyonu arasındaki ilişkisi diğer bir deyişle endüktans karakteristiği kullanılarak relüktans makinalarında pozisyon tahmini yapılabilmektedir. Ayrıca, aktif fazda ölçülen akımın yükselme ve düşme zamanlarının faz endüktansı ile ilişkisi kullanılarak da rotor pozisyonu tahmin edilebilmektedir. Ancak, deri etkisi, sıcaklık gibi nedenlerden omik gerilim düşümü ve endüklenen EMK'nın kestirimi mümkün olmamaktadır. Fazların karşılıklı kuplaj etkileri, anahtarlama gürültüsü, manyetik kayıplar ve yüksek hızda pozisyon tahmininin doğruluğunu olumsuz etkilemektedirler. Ayrıca, aktif olmayan, diğer bir deyişle moment üretmeyen fazda akım veya gerilim uygulanmasıyla da endüktans ve rotor pozisyonu tahmini yapılabilmektedir. Aktif olmayan faza uygulanan akım darbelerinden akım yükselme ve düşme zamanları rotor pozisyon tahmini için ölçülmektedir. Diğer bir yöntem olarak, faz akımı önceden belirlenen bir akıma eşit olduğunda örneklenmekte ve akı karakteristiğine göre rotor pozisyonu tahmin edilmektedir.

Gözlemci tabanlı yöntemlerde ise temel olarak, rotor pozisyonunu elde etmek için; rotor ivmesi ve sürtünme katsayıları ile mekaniksel sistemde hava aralığı momentini de birleştiren elektromekaniksel eşitlikten oluşturulan rotor hızı dinamiklerine gerek duyulur. Makina sisteminin eşitliklerinin gerçek zamanlı çözümü akım, hız ve rotor pozisyonu tahminlerini vermektedir. Örneğin, hata akımı sadece tüm değişkenler ve tahminleri eşit olduğunda sıfırdır. Bu tahmin edilen pozisyonun gerçek rotor

pozisyonuna eşit olduğu durumla ilgilidir. Hata değişkenleri kullanılarak, sistem ve gözlemci eşitlikleri yerine konulduğunda sistemin hata dinamikleri bulunabilir. Bu metodun uygulanması için yazılım kullanılması gerekmektedir. Bu yöntem ile ilgili problem, başlangıç zamanında relüktans çalışma için doğru pozisyonun sağlanması ve yakınsaması için biraz zaman almasıdır.

Doğrusal dinamik sistemlerin durum uzay yöntemi ile modellenmesine yol açan Kalman Filtresi yöntemi ise, sistem içerisinde ve ölçme esnasında oluşan gürültülerin optimal filtrelemesini de sağlayan özel bir algılama yöntemidir. Ardışık çözüm yani durumun güncellenen kestirimi ise, önceki durum kestirimi ve yeni giriş verileri kullanılarak hesaplanmaktadır.

İnsan davranışlarını taklit etmek amacıyla geliştirilen yapay zeka uygulamalarının bir alt dalı olan yapay sinir ağları yöntemi, çözümü karmaşık ve güç olan birçok alanda uygulanmakta olup, genelde başarılı sonuçlar alınmaktadır. Elektrik makinaları alanında YSA, parametre tahmini, sistem modelleme, moment dalgalılığını azaltma, akım kontrolü ve rotor pozisyonu tahmini gibi birçok çalışmada başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Ancak, ölçülen akım-gerilim değerlerindeki hatalar, kaydırma değerleri, stator direncinin sıcaklığa bağlı değişiminden kaynaklanan hatalardan dolayı rotor konumu tahmininin doğruluğunu olumsuz etkileyebilmektedir.

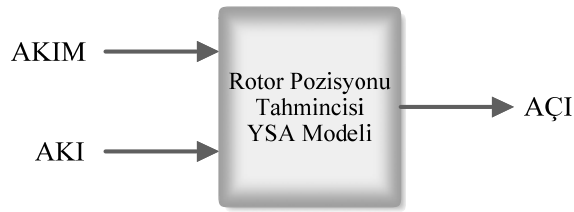
Bu tez çalışmasında, ETFM’de başarılı sonuçlar veren ve öğrenmeli bir sistem olan YSA ile rotor pozisyonunu tahmin eden bir gözlemleyici sistemi tasarlanarak, sonuçları sunulmakta ve halihazırda ticari olarak egzersiz bisikleti uygulamasında kullanılan pozisyon algılayıcısının elimine edilmesi amaçlanmaktadır. Bu bölümde, ETFM’na ilişkin uygulanan akı ve pozisyon tahmini algoritmalarının simülasyon ve deneysel sistem çalışma değerleri birlikte verilmektedir.

#### **4.1. YSA Kestirim Algoritmasının Simülasyonu**

Tez çalışmasında ETFM’nin rotor pozisyonunun algılanması için kullanılan algılayıcıyı uygulamadan kaldırabilmek için, YSA tabanlı bir gözlemci algoritması ile rotor pozisyonunun tahmin edilmesi amaçlanmaktadır. YSA rotor pozisyonu tahmincisinin girişleri faz akısı ve akım bilgisi, çıkışı ise rotor açısı olmaktadır. YSA eğitim seti, ETFM’nin manyetik karakteristiklerinin deneysel ölçüm değerlerinden

hazırlanmaktadır. Yeterince geniş aralıkta ve sayıda hazırlanan eğitim veri seti ile YSA için uygun ağ yapısı kurulmaktadır. Off-line olarak Matlab m-file’da yazılan bir program ile eğitilen yapı, test için hazırlanan verilerle de tekrar hesaplanarak doğruluğu saptanmaktadır.

Yapay sinir ağları modelinin katman ve nöron sayıları deneme yanılma ile belirlenmektedir. Geriye yayılım yapay sinir ağı modelinde, girişler ağa sokulmakta ve çıkış katmanına kadar belirlenen aktivasyon fonksiyonu ile her katman hesaplanmaktadır. Ağ çıkışında tahmin edilen rotor pozisyonu ile istenilen rotor pozisyonunun farkından elde edilen hata sinyali katmanlardan geriye doğru yayılmakta ve ağırlıklar yeniden belirlenmektedir. Hata, istenen performans kriterinin altına düştüğünde eğitim durdurulup ağırlıklar kaydedilmektedir.



Şekil 4.2. Rotor pozisyonu tahmin edicisi için temel YSA kara kutu modeli

Şekil 4.2’de rotor pozisyonu tahmini için oluşturulan YSA kara kutu modeli, Tablo 4.1’de ise ağ özellikleri verilmektedir.

Tablo 4.1. Rotor Pozisyonu tahmininde oluşturulan YSA modelinin ağ özellikleri

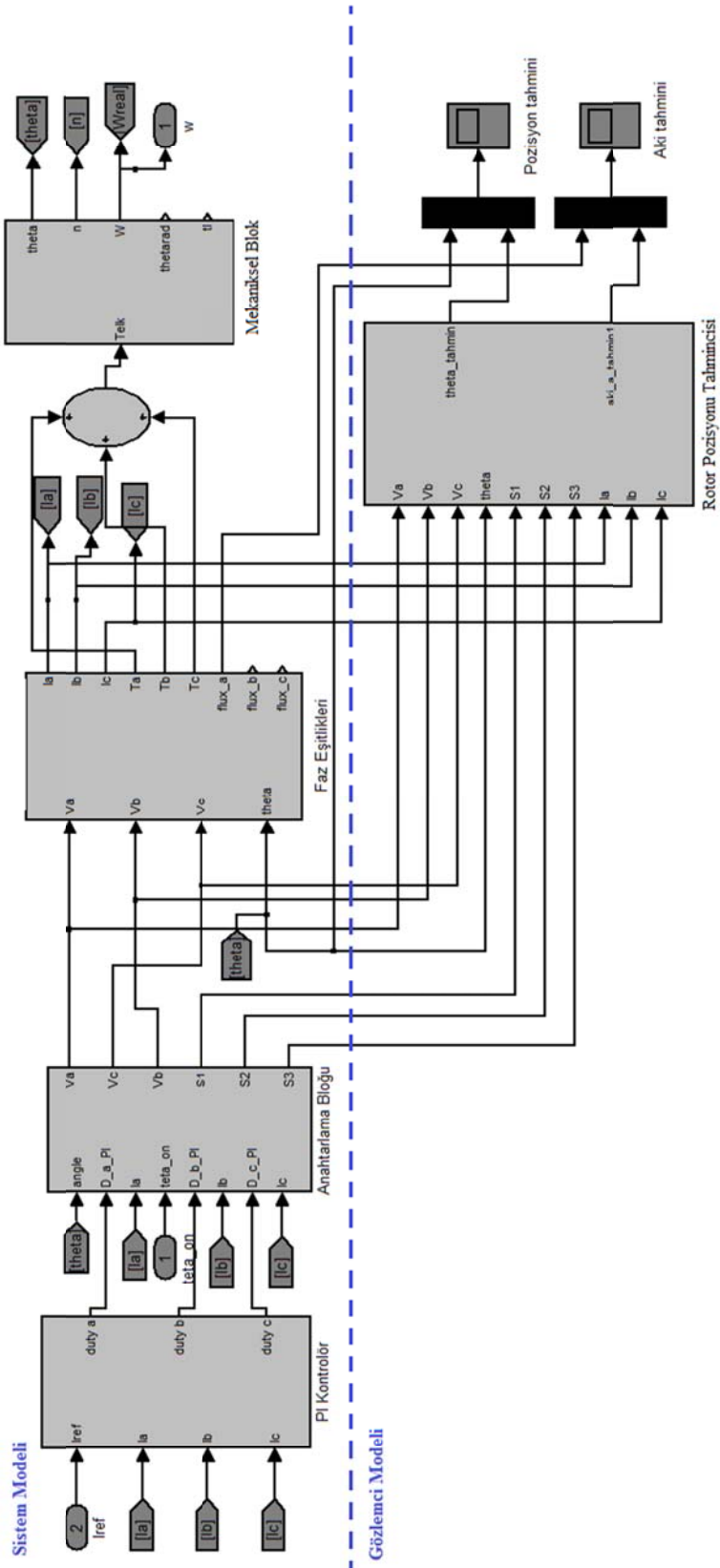
|                                       |                    |
|---------------------------------------|--------------------|
| Giriş sayısı                          | 2                  |
| Çıkış sayısı                          | 1                  |
| Saklı katman sayısı                   | 3                  |
| Birinci saklı katmandaki nöron sayısı | 10                 |
| İkinci saklı katmandaki nöron sayısı  | 10                 |
| Üçüncü saklı katmandaki nöron sayısı  | 8                  |
| Aktivasyon fonksiyonu                 | Tansig             |
| Öğrenme algoritması                   | LM backpropagation |
| Eğitim amacı                          | 0                  |
| Epoch                                 | 1000               |
| Ortalama hata                         | 0,000453           |

Ağ modeli, iki giriş ve bir çıkıştan oluşmaktadır. Üç saklı katman ve bir çıkış katmanından oluşan ağın nöron sayısı sırası ile 10-10-8-1 şeklindedir. Bu çalışmada, Levenberg Marquardt Geriye Yayılım Algoritması ile öğrenme tamamlanmakta ve test edilerek gerçek çıktılar elde edilmektedir. Aktivasyon fonksiyonu olarak tanjant-signum fonksiyonu kullanılmaktadır. Öğrenme ve momentum oranları ve iterasyon sayısı deneme yanılma yapılarak en kabul edilebilir hata değeri elde edilene kadar çalışma tekrarlanmaktadır. Hata kabul edilebilir bir düzeye geldiğinde güncellenen en son ağırlık değerleri ile test işlemi ileri yönde hesaplama ile yapılmaktadır. Oluşturulan YSA'nın test giriş verilerine verdiği cevaplar beklenen çıkışlar ile karşılaştırılarak ağın öğrenip öğrenmediği tekrar test edilmektedir.

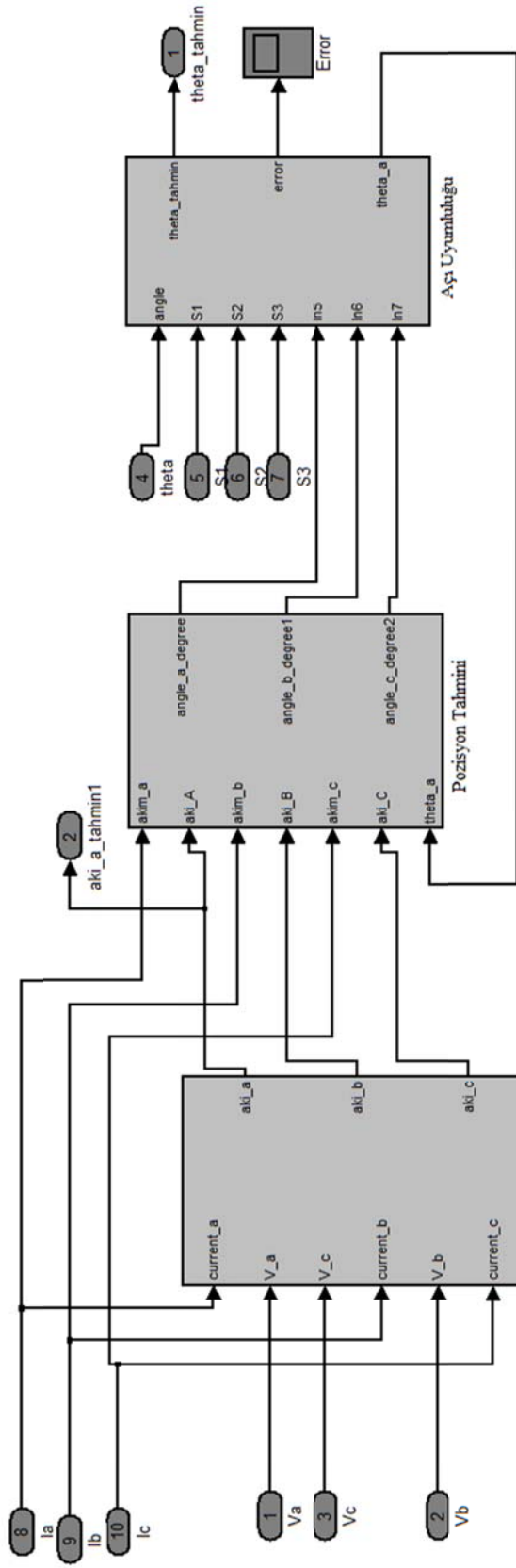
Rotor pozisyonu kestirimi için oluşturulan YSA modeli Matlab/Simulink kütüphanesinden bulunan blok içerisinde ağ modeli tanımlanarak ETFM'nin rotor pozisyonu tahmincisi için oluşturulan simülasyon modeli farklı yükleme şartlarında test edilebilmektedir. Böylelikle gerçek sistemde denenmeden önce tahmincinin istenen performansı gösterip göstermediği anlaşılmaktadır.

#### ➤ Simülasyon modeli

Simülasyon modelinde YSA modelinin girişine gelen akı ve akım bilgisiyle çıkışında rotor açısı tahmin edilmekte ve gerçek sistemin değerleri ile karşılaştırılmaktadır. ETFM Sistemi için oluşturulan algılayıcısız rotor pozisyonu tahmin sisteminin Şekil 4.3'de, akı kestirimi ve YSA pozisyon tahminine Şekil 4.4'de verilen simülasyon blokları ile Matlab/Simulink'te gerçekleştirilmektedir.



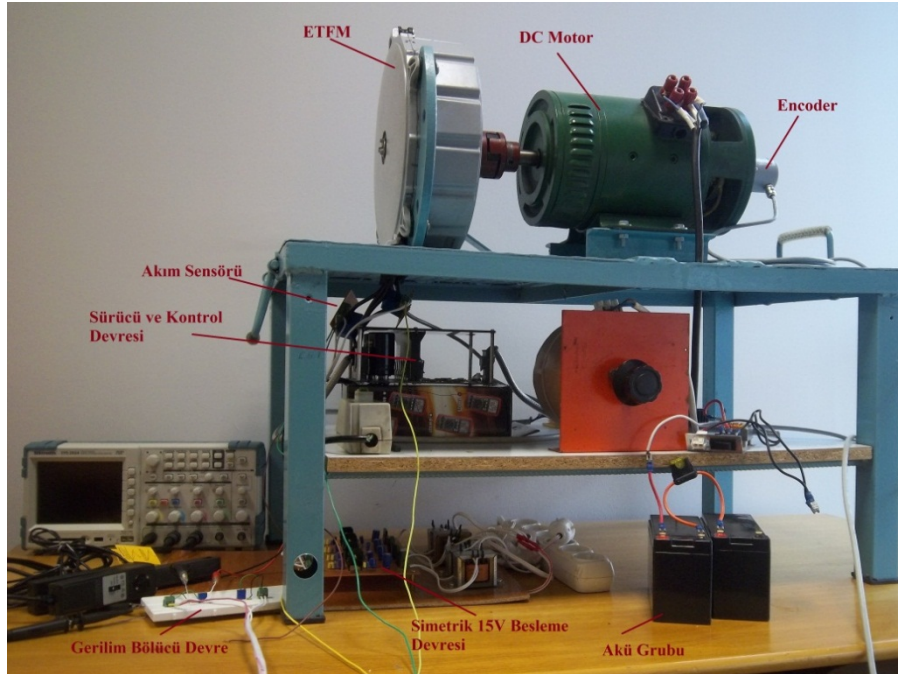
Şekil 4.3. YSA Rotor Pozisyonu Kestirimi Simülasyon Modeli



Şekil 4.4. Akı ve rotor pozisyonu kestirimini içeren algoritmanın simülasyon modeli

#### 4.2. YSA Kestirim Algoritmasının Deneysel Sistemi

Deneysel sistemde algılayıcısız rotor pozisyonu tahmini için oluşturulan YSA ağ modelinin işletildiği bir işleme ihtiyacı duyulmaktadır. Bu iş için DSpace firmasının DS1104 denetleyici kartı kullanılmaktadır. Akı kestirimi ve pozisyon tahmini algoritmalarında giriş bilgisi olan ETFM faz akımı ve gerilimi algılama devreleri ile sistemden alınmakta ve denetleyici kartın ADC girişlerinden sisteme dahil edilmektedir. Şekil 4.5.'de deney sisteminin görüntüsü verilmektedir.



Şekil 4.5. Deney sisteminin görüntüsü

Motorun açısal konumunu algılamak için miline bağlanan artımsal konum kodlayıcısının (enkoder) uçları DSpace DS1104 kartının sayısal enkoder girişlerine uygulanmaktadır. Böylece ETFM'in egzersiz bisikleti uygulamasında farklı yükleme durumlarında açısal hız ve konum açısı bilgisi ölçülerek, YSA ile tasarlanan modelin çıkışındaki açı kestirimi ile deneysel karşılaştırılması yapılabilmektedir. Enkoder ile ölçülen hız ve açı bilgisi, ETFM sisteminde kontrol amacı ile kullanılmamaktadır.

Artımsal kodlayıcı döndüğü zaman Şekil 4.6'da görüldüğü gibi, aralarında  $90^\circ$  açısı farkı bulunan iki sinyal üretilmektedir. Ayrıca bir tur tamamlandığında index denilen







Şekil 4.7. DSpace1104 kontrol kartı



Şekil 4.8. DSpace 1104 konnektör-led paneli

DS1104 kontrol kartı ve kontrol panelinin özellikleri;

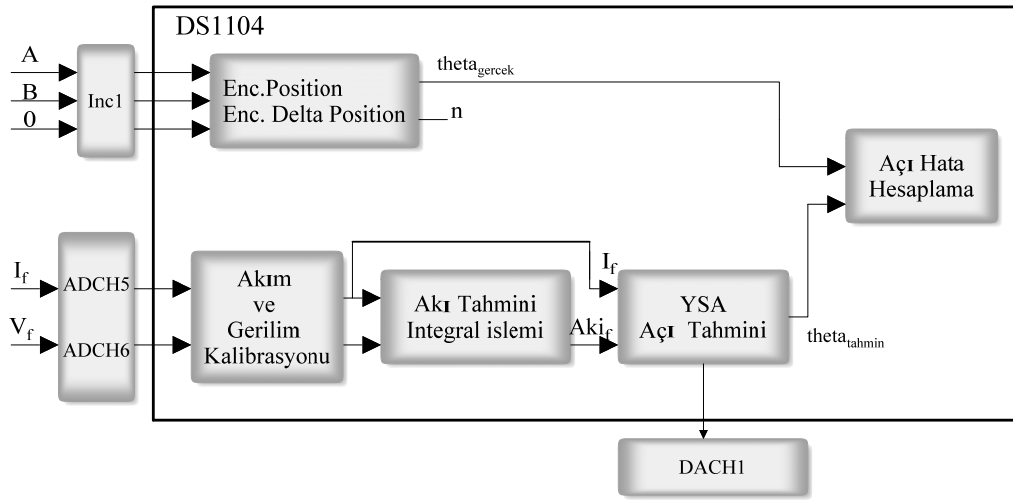
- 8 adet ADC kanalı (4 adet 16 bit ve 4 adet 12 bit)
- 8 adet DAC kanalı
- 2 adet enkoder girişi
- 1 adet RS232 seri haberleşme portu
- 1 adet RS485, RS422 haberleşme portu
- 1 adet D-Sub konnektörlü 32 pin dijital I/O ünitesi
- 1 adet D-sub konnektörlü 32 pin Slave I/O, PWM ünitesi
- 250Mhz çalışma frekansı

Deneysel çalışmalarda denetim yapısının gerçekleştirilmesi için MATLAB/Simulink ortamında uygulamanın modelleri oluşturulmaktadır. Oluşturulan bu modeller, Simulink Real-Time Workshop ve DSpace' in Real Time Interface (RTI) yazılımları sayesinde gerçek zamanlı kodlara dönüştürülerek DS1104 PPC kartının program hafızasına yüklenir. RTI yazılımı, I/O blokları içeren alt kütüphanelerden (DSpace RTI1104) oluşmaktadır. Bu kütüphanelerde Simulink ile gerçek zaman donanımı arasında bağlantı kurulmasını sağlayan DAC birimleri (Digital Analog Converter), ADC birimleri (Analog Digital Converter), artırılmış enkoder arayüzleri ve çeşitli

üreteçler gibi ek bloklar bulunmaktadır. Real Time Interface yazılımı ile Simulink blok kütüphanesine DSpace' in blokları eklenmektedir.

Simulink'te oluşturulan model dosyalarının DSpace çalışmasını oluşturmak için DSpace tarafından geliştirilen Control Desk Developer (CDD) yazılımı, deneysel çalışmanın gerçek zamanlı olarak yürütülmesi için değişkenlerin yazılım denetleyicilerine atanmasını ve bir kullanıcı arayüzü oluşturulmasını sağlar. Böylece değişkenlerin gerçek zamanlı olarak denetimi ve gözlemlenmesi etkileşimli olarak sağlanır.

ETFM'nin yapay sinir ağları tabanlı gözlemleyici ile rotor pozisyonu tahminine ilişkin DS1104 denetleyici kartı işlemcisinde uygulanacak olan algoritmaların blok diyagramı Şekil 4.9'da gösterilmektedir.



Şekil 4.9. Pozisyon kestirim uygulamasının DS1104 denetleyici kartı içerisinde gerçekleştirilen kısmına ait blok diyagramı

#### 4.2.2 ETFM'nin akı kestirimi

Benzetim ve deneysel çalışmalar için oluşturulan modellerde sabit adım aralıklı Euler integral çözüm metodu kullanılmış ve örnekleme zamanı 0.00002 sn olarak alınmıştır. Örneklemenin daha iyi yapılabilmesi için bu sürenin mümkün olduğunca küçük seçilmesi gerekmektedir. Burada örnekleme zamanı deneysel modelin çalışma koşullarına göre belirlenmektedir. Benzetim modelinin daha düşük örnekleme aralığında çalıştırılabilmesine karşın daha doğru bir kıyaslama yapılabilmesi

açısından, deneysel modeldeki sürücü ve kontrol devresinin aynı çalışma frekansında benzetim modeli çalıştırılarak sonuçlar alınmaktadır.

Moment üreten fazın akısını hesaplamak için daha önceki bölümde verilen ATFM elektriksel eşitliği olan Denklem (3.5) kullanılmaktadır. Buna göre faz akısı, ölçülen faz geriliminden sargı direnci üzerine düşen gerilim farkının integraline eşittir. Sayısal sinyal işlemcisinde hesaplamak için denklem ayrık zamanlar formunda yeniden yazılırsa;

$$\lambda_{faz}=(V_{faz}-i_{faz}R_{faz})T+\lambda_{faz} \quad (4.1)$$

denklemini elde edilir. Sayısal hesaplama yaptırılırken, aktif fazdaki akım her sıfıra düştüğünde integratör devresinin de sıfırlanması gerekmektedir. Çünkü akım sıfır olduğunda, faz akısı da sıfırdır ve moment üretilmez. Aktif fazın akısı, her elektriksel çevrimde hesaplanmalıdır ve kestirim algoritmasının her örnekleme anında YSA girişinde akı hesabı kullanılmaktadır.

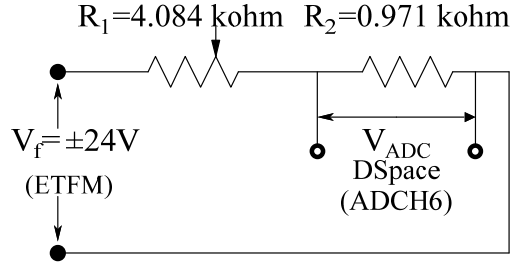
Uygulamada bir faz akısının hesaplanabilmesi için ETFM'nin akım ve gerilim bilgileri DS1104 kontrol kartının kontrol paneli üzerindeki ADC kanallarından alınmaktadır. Kontrol panelinde görülen 12 bit çözünürlüğe sahip ADCH5---ADCH8 girişlerinden herhangi ikisinin kullanılması yeterli olacaktır. ADC kanallarının giriş gerilim seviyesi  $\pm 10V$  aralığındadır. Bu durumda, akı tahmini algoritmasının işlemcide yapılabilmesi için akım ve gerilim ölçümlerinin DSpace ADC girişlerine uygun gerilim aralığında algılayacak ölçüm devrelerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Denklem (4.2)'deki gerilim bölücü devre kullanılarak ETFM'nin  $\mp 24V$  aralığında kırılan faz gerilimi, en fazla  $\mp 5V$  aralığına dönüştürülerek ölçülebilmektedir. Gerilim bölücü devrenin şeması Şekil 4.10'da gösterilmektedir.

$$V_{ADC}=\frac{V_f R_2}{R_1+R_2} \quad (4.2)$$

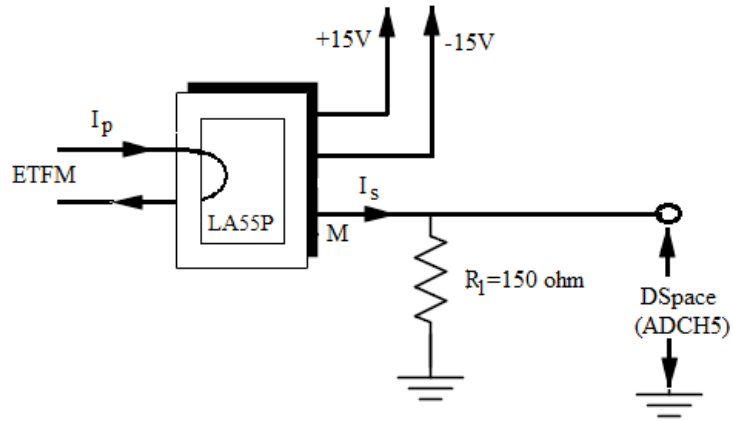
ETFM'nin ölçülmek istenen fazına bir LEM LA-55P akım algılayıcı modül bağlanmaktadır. Akım algılayıcısının besleme gerilimi için simetrik  $\mp 15V$  doğru gerilim devresi tasarlanmıştır. Sensörün dönüştürme oranı 1:1000 olmaktadır. Bu

durumda akım sensörünün primerinden 50 A geçtiğinde sekonderinden geçen nominal akım 50 mA olacaktır.



Şekil 4.10. Gerilim Bölücü Devre

Şekil 4.11’de akım sensörünün uygulama devresi verilmektedir. ETFM sisteminin egzersiz bisikleti uygulaması için maksimum çalışma akımı 30 A’in üzerine çıkmayacağı göz önüne alındığında sekonder çıkış akımı da maksimum 30 mA olacaktır. Sekonder çıkışına 150 ohm direnç bağlandığında dSpace girişine aktarılacak maksimum gerilim de 5V olmaktadır. LA55-P akım algılayıcısının teknik dökümanı EK3’de sunulmaktadır.

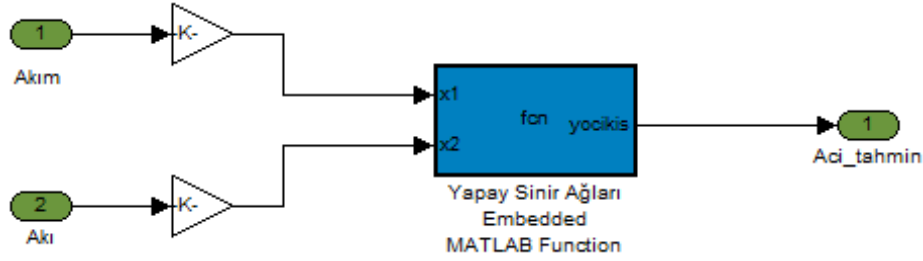


Şekil 4.11. LA55-P Akım algılayıcısı uygulama devresi

DSpace ADC girişinden alınan akım örnekleme için ayrıca alçak geçiren bir filtre uygulayarak gürültüler azaltılmaktadır. Pratik uygulamalarda bir filtre uygulamak gerçek zamanda hesaplanacak matematik rutinlerini içeren çok karmaşık bir problem olmaktadır. Ancak dSpace’de simulink kütüphanesi kullanılarak bu işlem rahatlıkla yürütülebilmektedir.

### 4.2.3. YSA algoritmasının deneysel uygulanması

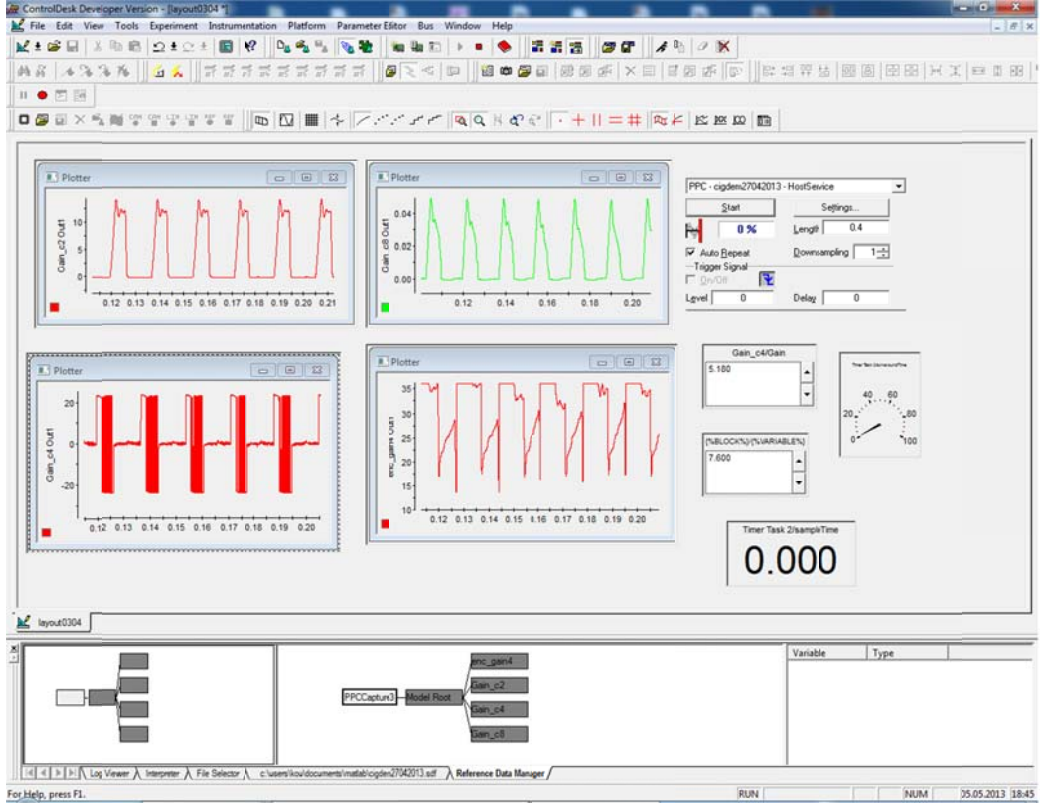
Rotor pozisyonu kestiriminde YSA modelini oluşturmak için yapılan eğitim ve test işlemleri sonucunda, hata kabul edilebilir bir değere ulaşıldıktan sonra, en son elde edilen ağırlık değerleri kaydedilmektedir. Oluşturulan YSA modelinin pozisyon tahmininde kullanılabilmesi için, katman sayısı, nöron sayısı ve ağırlık değerlerini içeren bir YSA programı yazmak gerekmektedir. Yazılan YSA programını dSpace’de yürütmek için simulink kütüphanesindeki “embedded function block” elemanı kullanılmaktadır. 0.0002 sn örnekleme zamanı ile akım ve akı giriş bilgileri alınarak çıkışta açı değeri elde edilmektedir. Şekil 4.12’de YSA yazılımının dSpace’e yürütülebilmesi için Simulink’te oluşturulan model gösterilmektedir. Embedded function block içerisinde oluşturulan YSA algoritmasının yazılımı Ek 1’de verilmektedir.



Şekil 4.12. YSA algoritması blokları

Deneysel sonuçların gerçek zamanlı olarak elde edilebilmesi için, Şekil 4.13’de görülen şekilde simulinkte oluşturulan modelde RTI kütüphanesinden alınan ADCH5 ve ADCH6 analog girişleri ile akım ve gerilim ölçümleri örneklenebilmekte, encoder giriş bloğundan ise ETFM’in hız bilgisi alınmakta ve rotor konumu hesaplanabilmektedir. Gerçekleştirilen denetim yapısının CDD yazılımı ile oluşturulan arayüzüne ilişkin görüntü Şekil 4.14’ de gösterilmektedir.



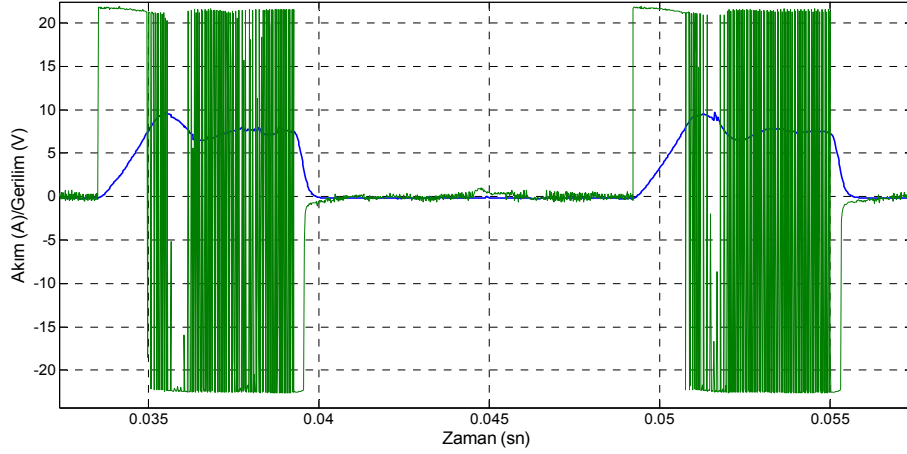


Şekil 4.14. “Control Desk Developer” programında gözlemci algoritmalarının çıktıları

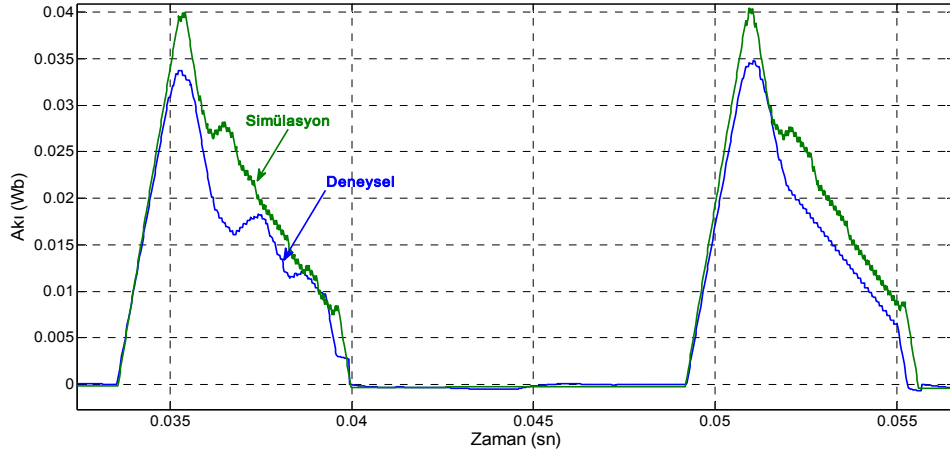
### 4.3. Rotor Pozisyonu Tahmini Deney Sonuçları

Dişli=4, seviye=7,  $\omega=375$  d/dk yükleme koşullarında test sisteminden deneysel olarak elde edilen akım ve gerilim dalga şekilleri Şekil 4.15’de verilmektedir. Test sisteminde DSpace işlemcisinde yürütülen akı tahmini için elde edilen ve simülasyonda yapılan akı tahmininin karşılaştırması Şekil 4.16’da verilmektedir. ETFM makinasının generatör olarak çalışmasında bir faz için rotor konum açısı tahmini  $[18^\circ-36^\circ]$  değer aralığında yapılmaktadır. Bu aralıktaki sensörlü sistemden enkoder ile algılanan açı bilgisi ile, YSA tabanlı gözlemci algoritmasının ile tahmin edilen açı değerlerinin simülasyon ve deneysel sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 4.17’de verilmektedir.

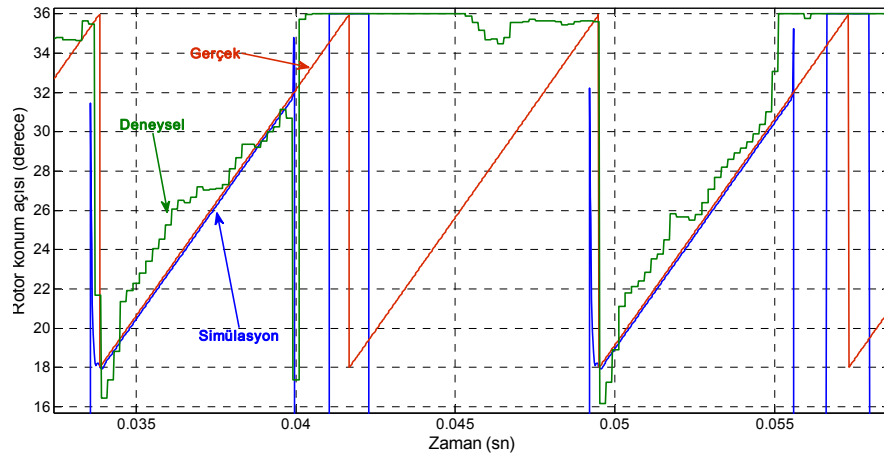




Şekil 4.15. Dişli=4, Seviye=7,  $\omega=375$  d/dk yüklem koşullarında test sistemi deney akım ve gerilim dalga şekilleri

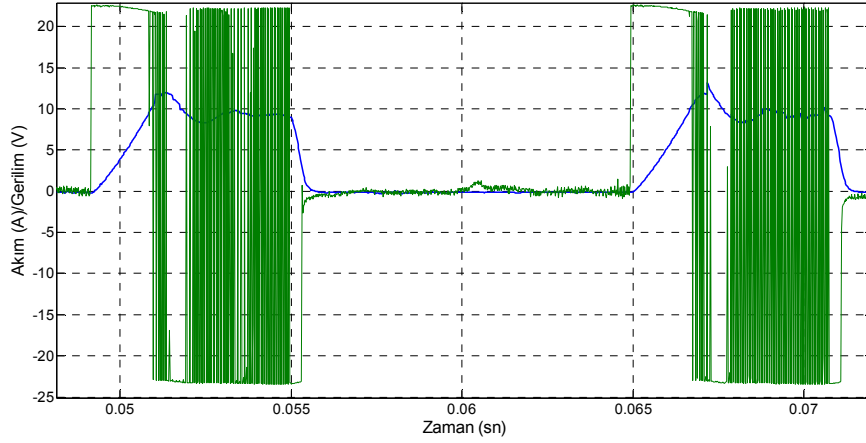


Şekil 4.16. Dişli=4, seviye=7,  $\omega=375$  d/dk yüklem koşullarında akı tahmincisi için simülasyon ve deneysel çalışma sonuçlarının karşılaştırılması

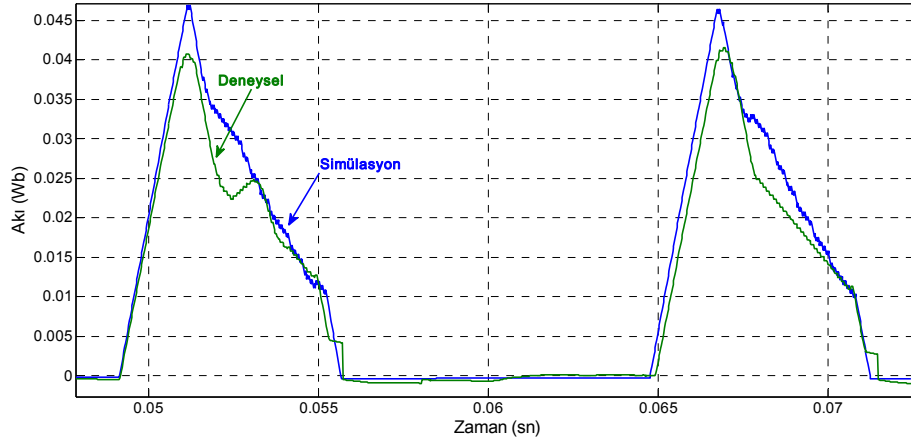


Şekil 4.17. Dişli=4, seviye=7,  $\omega=375$  d/dk yüklem koşullarında açı tahmincisi deney ve simülasyon sonuçları ile gerçek konum açısının karşılaştırılması

Dişli=5, seviye=8,  $\omega = 375$  d/dk yükleme koşulları için Şekil 4.18’de akım ve gerilim dalga şekilleri, Şekil 4.19’da simülasyon ve deneysel akı tahmini çalışması sonuçlarının karşılaştırılması verilmektedir. Şekil 4.20’de ise açı tahmininin deney ve simülasyon sonuçlarının gerçek rotor konum açısı değeri ile karşılaştırılması gösterilmektedir.



Şekil 4.18. Dişli=5, seviye=8,  $\omega=375$  d/dk yükleme koşullarında test sistemi deney akım ve gerilim dalga şekilleri

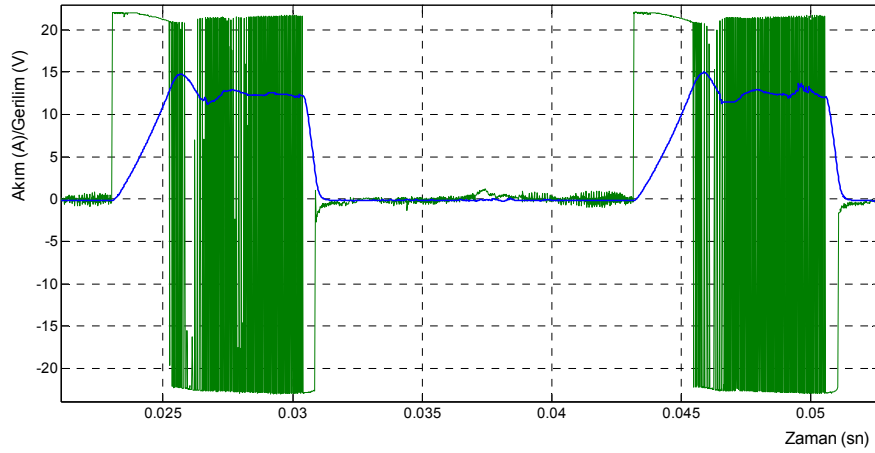


Şekil 4.19. Dişli=5, seviye=8,  $\omega=375$  d/dk yükleme koşullarında akı tahminçisi için simülasyon ve deneysel çalışma sonuçlarının karşılaştırılması

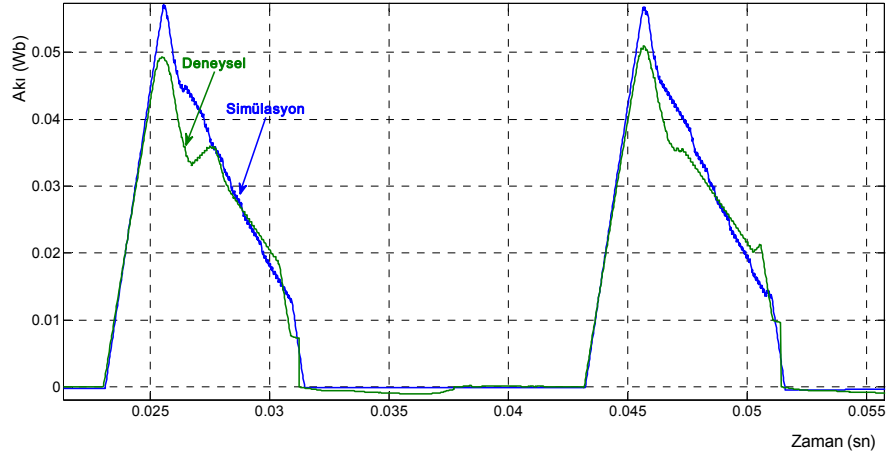


Şekil 4.20. Dişli=5, seviye=8,  $\omega=375$  d/dk yükleme koşullarında açı tahmincisi deney ve simülasyon sonuçları ile gerçek konum açısının karşılaştırılması

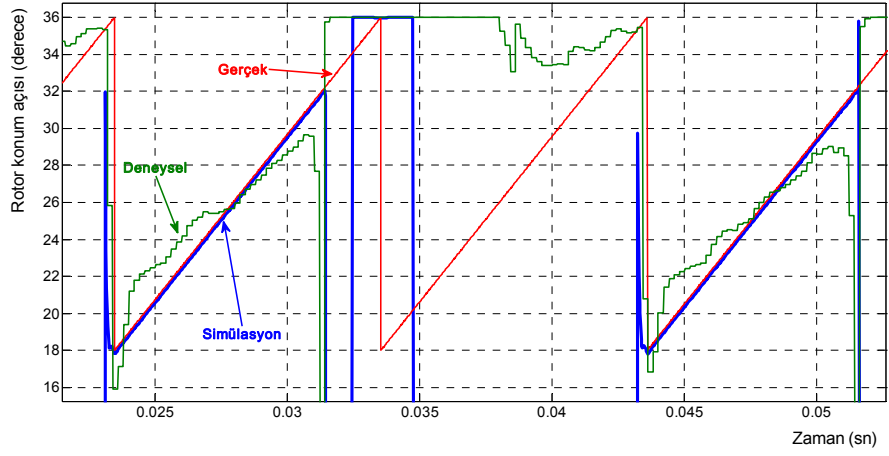
Dişli=5, seviye=8,  $\omega = 290$  d/dk yükleme koşulları için Şekil 4.21'de akım ve gerilim dalga şekilleri, Şekil 4.22'de simülasyon ve deneysel akı tahmini çalışması sonuçlarının karşılaştırılması verilmektedir. Şekil 4.23'de ise açı tahmininin deney ve simülasyon sonuçlarının gerçek rotor konum açısı değeri ile karşılaştırılması gösterilmektedir.



Şekil 4.21. Dişli=5, seviye=8,  $\omega=290$  d/dk yükleme koşullarında test sistemi deney akım ve gerilim dalga şekilleri



Şekil 4.22. Dişli=5, seviye=8,  $\omega=290$  d/dk yükleme koşullarında akı tahmincisi için simülasyon ve deneysel çalışma sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 4.23. Dişli=5, seviye=8,  $\omega=290$  d/dk yükleme koşullarında açı tahmincisi deney ve simülasyon sonuçları ile gerçek konum açısının karşılaştırılması

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Günümüzde endüstriyel ve çevresel faktörler dikkate alındığında, elektrik makinalarının verim değerlerinin artırılması, dezavantajlarının minimuma indirilmesi yönünde yapılan çalışmaların sonucunda aksel akılı ve çapraz akılı makinalar ön plana çıkmaktadır. Modern kontrol teknolojileri ve güç elektroniği uygulamalarının da gelişmesiyle çapraz akılı makinaların kullanım alanlarının endüstri uygulamalarında artması beklenmektedir.

➤ 2007 yılında ticari olarak bir egzersiz bisikletinde kullanılmaya başlanan E-Çekirdek çapraz akı makinasının (ETFM) farklı sargı ve kutup tasarımı ile yapısal olarak diğer elektrik makinalarının yanında dikkati çeken avantajları bulunmaktadır. Detaylı tasarım ve çalışma özellikleri verilen bu makinanın farklı uygulama alanlarında da motor veya generatör işletme durumlarında yüksek moment yoğunluğu ve yüksek verimle çalışabileceği öngörülmektedir. ETFM ile ilgili çalışmalar Aalborg Üniversite'sinde başlamış ve ileriye dönük uygulamalar için, makinanın bazı araştırma geliştirme çalışmaları da, bilhassa bu kapsamda generatör işletmesinde çalışan makinanın algılayıcısız kontrol uygulaması ile katkı sağlanmaktadır.

➤ Doğru bir ETFM modelinin oluşturulması ve makinanın elektriksel ve mekaniksel davranışlarının belirlenebilmesi için, makinanın performans karakteristiklerinin doğru elde edilmesi büyük önem taşımaktadır. ETFM'nin lineer olmayan manyetik karakteristiklerini elde edebilmek için, makina üzerinde laboratuvar ortamında yapılan deneysel ölçüm yöntemleri tercih edilmiştir. Makinanın rotor konum açısı değiştirilerek test edilecek fazın farklı akım değerlerinde enerjilendirilmesi yoluyla statik moment değerleri strain gauge modülü ile kaydedilmektedir. Akı karakteristiği, öncelikle statik moment değerinden enerjinin korunumu kanunu kullanılarak hesapsal olarak dolaylı yoldan elde edilmektedir.

Ancak, bu yöntemle akı hesabı koenerji profilinden çıkartılmakta ve sistemin diğer kayıpları ve moment değerleri ilave edilmemektedir. Test düzeneğinin kayıpsız ve sürtünme olmadan çalıştırılması mümkün değildir. Yüksek moment değerlerinde bu mekaniksel kayıpların yarattığı moment offseti ihmal edilebilir ancak, küçük moment değerlerinde bu yöntem akı tahmininde büyük hatalara sebep olabilmektedir. Bu nedenle, akı karakteristiği için de deneysel ölçüm yöntemi ile farklı akım ve açı değerlerinde uygulanarak uç gerilimi ve akım kaydedilmiş olup, bilgisayarda yazılan bir entegrasyon işlemi ile akı karakteristikleri çıkartılmaktadır. Makinanın faz endüktans profili de üç farklı açı değerinde çıkartılan öz endüktans eğrisi kullanılarak, analitik hesaplama yöntemi ile elde edilmektedir. Rotorun istenilen pozisyonda kilitlenebilmesi için bir test düzeneği kullanılmaktadır. Ölçüm işlemi çakışık konum 18 dereceden, çakışık olmayan konum olan 36 dereceye kadar küçük pozisyon adımlarıyla, nominal akıma kadar farklı akım değerleri için manuel olarak alındığından ölçüm işlemi uzun ve zahmetli bir süreç olmaktadır. Elde edilen karakteristik eğrilerinden ölçümlerin oldukça başarılı bir şekilde yapıldığı görülmektedir.

➤ Bilindiği gibi deneysel ölçüm yöntemlerinde rotor konumu ve akım değerlerinin sınırlı aralıklarla ayar edilmesi çok uzun zaman almakta ve bu nedenle elde edilen manyetik veriler modellemelerde genellikle look-up tablolarında kullanılarak aralık sayısı arttırılmaktadır. Ancak bu veriler interpolasyon yöntemlerini kullandığı için karakteristiklerin manyetik doyma bölgelerinde doğru ve uygun sonuçları üretemediği gözlenmektedir. Analitik yöntemler ise lineer olmayan fonksiyonlar için oldukça karmaşık ve hassas olmamaktadır. Diğer bir yöntem ise, sonlu elemanlar analizi için çapraz akı prensibi ile çalışan bir makina için makina boyutlandırması ve 3 boyutlu analizinin yapılması gerekmektedir, ancak bu işlem uzun zaman almaktadır. Yine de bu çalışmada yapısı ve akı dağılımını doğru anlamaya yardımcı olması bakımından 3 boyutlu manyetik alan analizi sonuçlarına da yer verilmektedir. Bu tez çalışmasında önerilen yöntem ise, mühendislik uygulamalarında lineer olmayan sistemlerin tanımlanmasında ve gerçek zamanlı kontrolünde başarılı ve yaygın bir yöntem olan Yapay Sinir Ağları metodu kullanılmaktadır. Elektrik makinaları alanında modellemede ve tasarım problemlerinde farklı ve alternatif bir metod olarak başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Ayrıca YSA sonuçları kullanılarak

algılayıcısız pozisyon tahmini uygulamasında dSPA CE işlemcisine veri aktarılmaktadır.

YSA'nın eğitimi ve test verileri için deneysel ölçüm yöntemi ile elde edilen verilerden faydalanılmaktadır. Akı ve moment karakteristikleri için ağ modelinin tasarım çalışmasında, çok kez tekrarlanan denemeler yapılarak testlerde mümkün olan en az hata ile sonuçlar elde edilmektedir. Geriye yayımlı "Levenberg Marquart" öğrenme yöntemi ve "tansig aktivasyon" fonksiyonu kullanılmaktadır.

➤ Tez çalışmasında, YSA ile elde edilen sonuçların doğruluğu rakip bir örüntü tanıma sistemi olan Destek Vektör Makinaları ile kıyaslanmaktadır. Yüksek derecede doğrusal olmayan fonksiyonlar ile regresyon yapabilme potansiyelinde makinalar olan DVRM, mühendislik uygulama alanlarında iyi performansı ile diğer öğrenen sistemlerin yerini hızla almaktadır. Hata ve doğruluk analizi yapıldığında akı karakteristikleri için YSA sonuçlarında %98.71 doğruluk görülmekteyken DVRM yönteminde %99.09 doğruluk elde edilmektedir. Benzer şekilde moment karakteristiği için yapılan hata analizinden YSA'nın %98.52, DVRM'in de %99.06 oranında doğrulukla sonuçlandığı gözlenmektedir.

Bu çalışmanın DVRM yönteminin elektrik makinaları alanında oldukça az uygulaması olduğu göz önüne alındığında, literatüre katkısı önemli olmaktadır. Bir çapraz akı makinasında ise ilk kez YSA ve DVRM yöntemleri modelleme amaçlı kullanılmaktadır ve destek vektör regresyon makinaları yöntemi ETFM sistemine doğru bir şekilde adapte edilmekte ve performansı incelenebilmektedir. Lineer olmayan regresyon yapabilme yeteneği ve yüksek doğruluğu ile gelecekteki çalışmalarda YSA yerine kullanılabileceği de öngörülmektedir.

➤ ETFM'nin egzersiz bisikleti uygulaması için farklı yükleme koşullarındaki davranışlarının ve çalışma performansının izlenebilmesi için Matlab/Simulink'te simülasyon modeli oluşturulmaktadır. Egzersiz bisikleti uygulamasında farklı dişli ve seviye ayarlarına göre referans moment, referans akım ve faz enerjilendirme açısı tablolarını, ayrıca PI akım kontrolörünü ve sürücü devre yapısını da içeren tüm ETFM sisteminin simülasyonu yapılmakta ve sonuçları sunulmaktadır. Uygulama sisteminin deneysel test düzeneğinde egzersiz bisikletindeki gibi farklı yük koşullarını sağlayabilmek için doğru akım makinası ile tahrik edilerek kurulmaktadır.

Bisiklet uygulamasına ilişkin yükleme koşullarını sağlayabilmek için bilgisayardan seri haberleşme ara yüz programı kullanılmaktadır. Ölçme aletlerinin temini ve test düzeneğinin kurulması için maddi destek TÜBİTAK projesi ile sağlanmıştır. Test düzeneğinde uygulama için farklı yükleme koşullarında alınan akım ve gerilim dalga şekilleri simülasyon modelinden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılarak yapılan çalışmanın doğruluğu ispatlanmaktadır.

➤ Çapraz akı ve relüktans prensibi ile çalışan ETFM’de rotor pozisyonuna bağlı olarak fazların enerjilendirilmesini sağlamak için, rotor pozisyonunun algılanması gerekmektedir. Bu tez çalışmasında, makinanın rotor pozisyonunun algılayıcısız olarak belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bu çalışmadaki en temel ve dikkat çekici sonuçlardan birisi de, bu çalışmanın literatürde ilk kez yapılmasıdır. ETFM sistemi için, YSA tabanlı rotor pozisyonu gözlemcisi deneysel ve simülasyon modelleri oluşturulmaktadır. Deneysel sistemde gözlemci algoritmasını test edebilmek için yeni nesil dijital sinyal işlemcilerden DSpace 1104 kullanılmaktadır. YSA gözlemci modelinin girişleri faz akımı ve faz akısı, çıkışı ise rotor konum açısı olmaktadır. Bu nedenle, ETFM elektriksel denklemine göre faz akımı ve geriliminden faz akısı tahmin etmek mümkündür. Faz akımını DSpace ADC girişlerinden uygun aralıkta ölçeklendirerek algılamak için bir akım algılama devresi hazırlanmaktadır.  $\mp 24V$  arasında tam kırpma ile akım kontrolü yapılan makinanın gerilimini algılamak ve işlemci ADC’sinin uygun giriş değeri aralığına ( $\mp 10V$ ) dönüştürmek için ise bir gerilim bölücü devre kullanılmaktadır.

Test sisteminden DSpace ile alınan akım ve gerilim örnekleme için örnekleme zamanı 0.00002sn olarak ayarlanarak 50 kHz’lik bir çalışma hızı belirlenmiştir. Daha düşük frekanslarda, 12 kHz anahtarlama ile tam kırpma (hard chopping) uygulanan gerilim dalga şekli yeterli doğrulukta örneklenememektedir. Daha yüksek frekansta ise daha iyi sonuç elde edilebileceği bilinmesine rağmen, yürütülen YSA algoritması ve akı tahmini entegrasyon işlemlerinin çevrim süresi nedeniyle DSpace’de kullanılabilen en yüksek frekans 50 kHz değerinde olmaktadır. ETFM test sisteminde gözlemci algoritması denenerak elde edilen akı tahmini ve rotor konum açısı tahmini sonuçları simülasyon sonuçları ile kıyaslanmaktadır. Ayrıca test düzeneğinde konum açısı bilgisini ne kadar takip ettiğini görebilmek için makina miline ilave bir enkoder bağlantısı yapılmaktadır. DSpace’de gözlemci modelinin çalışması CDD arayüz



programı ile takip edilmektedir. Üç fazlı bir ETFM için iki faz arasında 12 derecelik bir faz kayması bulunmaktadır. Her fazın pozisyon tahmini  $[18^{\circ}-36^{\circ}]$  aralığında yapılabilmektedir. Bu da her fazdan bir diğer faza tahmini  $\theta_{sc}=30^{\circ}$  de aktarmak gerektiğini göstermektedir. Faz enerjilendirme açısı, faz geçiş açısı ve faz kapatma açısı önemli tahmin değerleri olmaktadır. Tek faz için elde edilen deneysel akı değişimi ile algılayıcısız simülasyon akı tahmin eğrileri kıyaslandığında genelde eğrilerin çakıştığı ve uygulamanın başarılı olduğu gözlenmektedir. Sadece düşük akım değerlerinde düşük bir sapma olduğu söylenebilir.

ETFM ile ilgili gelecekte yapılması öngörülen çalışmalar

- ETFM makinası ilk kez ticari ürün olarak egzersiz bisikleti olarak uygulanmış olup bu tez çalışmasında önerilen algılayıcısız pozisyon tahmini ile farklı uygulama alanlarında da kullanılabilir. Örneğin, yüksek moment ve yüksek güç üretme özelliği, makina karakteristiği ve yapısal boyutları ile bir elektrikli araçta tekerlek içi uygulaması projelenebilir.
- ETFM makinasının rotor yüzeyinde veya kutup başlarına uygun şekillerde mıknatıslar yerleştirilerek, uygulanması öngörülen alan için tasarımı ve imalatının yeniden yapılması planlanmaktadır.
- ETFM makinasının akım kontrolü için kullanılan PI kontrolörün katsayılarının otomatik ayarlanması için Ziegler-Nichols yöntemi veya bulanık mantık, genetik algoritma gibi yöntemler uygulanabilir. Böylelikle, akım kontrolündeki salınımlar bu sayede azaltılarak moment dalgalılığının optimize edilebilmesi düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] Kikushi T., Kenjo T., A Unique desktop electrical machinery laboratory for the mechatronics age, *IEEE Transactions on Education*, 1997, **40**(4), 294-295.
- [2] Profumo F., Zhang Z., Tenconi A., Axial flux machines drives: A new viable solution for electric cars, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1997, **44**(1),39-45.
- [3] Parviainen A., Design of Axial-fux permanent magnet low speed machines and performance comparison between radial flux and axial flux machines, Phd Thesis, Lappeenranta University of Technology, Finland, 2005.
- [4] Kinnunen J., Direct-on-line axial flux permanent magnet synchronous generator static and dynamic performance, Phd Thesis, Lappeenranta University of Technology, Finland, 2007.
- [5] Maddison C. P. , Transverse flux machines for high torque applications, Phd Thesis, Newcastle University, England, 1999.
- [6] Darabi S., Mohammadi A., Hemati S. H., Advantages of longitudinal flux linear switched reluctance motor compared to transverse flux linear switched reluctance motor for levitation purposes, *IEEE 24th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, Niagara Falls, Canada, 8-11 May 2011.
- [7] Gerald Z., Kastinger G, Transverse Flux Machine, in particular a unipolar transverse flux machine, patent no: US 6924576, 2005.
- [8] Hasarten H. M., Muyeen S. M., Tamura S., Speed control of permanent magnet excitation transverse flux machine linear motor by using adaptive neuro fuzzy controller, *Energy Conversion and Management*, 2010, **51**(12), 2762-2768.
- [9] Guo Y. G., Zhu J. G., Study of permanent magnet transverse flux motors with soft magnetic composite core, *Australasian Universities Power Engineering Conference*, Brisbane, Australia, 26-29 September 2004.
- [10] Hasubek B. E., Analysis and design of passive rotor transverse flux machines with permanent magnets on the stator, Phd Thesis, University of Calgary, Canada, 2000.
- [11] Laitwaite E. R., Easham J. F., Bolton H. R., Fellows T. G., Linear motors with transverse flux, *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 1971, **118**(12), 1761-1767.

- [12] Bolton H. R., Fellows T., Laithwate E. R., Needham E. F., Linear induction motor, United States Patent, June 15,1971, patent no:US3585423.
- [13] Weh H., May H., Permanent magnet synchronous machine with transverse flux paths, Germany patent no:, DE3602687, 06 August 1987.
- [14] Hoffman H., Weh H., Landrath J., New permanent magnet excited synchronous machine with high efficiency at low speeds, *International Conference on Electrical Machines*, Pisa, Italy,12-14 September 1988.
- [15] Weh H., Low-Vibration configuration of transverse flux machines, Germany, Patents no: DE3827450, February 1990.
- [16] Henneberger G., Bork M., Development of a new transverse flux motor, *IEE Collegium on New Topologies for Permanent Magnet Machines*, London, England, 18 June 1997.
- [17] Weh H., Transverse flux machines in drive and generator applications, *IEEE International Symposium on Electric Power Engineering*, Stockholm, Sweden, 1998.
- [18] Liu C. T., Kuo J. K., Experimental investigation and 3D modeling of linear variable-reluctance machine with magnetic flux decoupled windings, *IEEE Transactions on Magnetics*, 1994, **30**(6), 4937-4739.
- [19] Liu C. T., Kuo J. K., Improvements on transient characteristics of transverse flux homopolar linear machines using artificial knowledge based strategy, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1995, **10**(2), 275-285.
- [20] Eastham J., Williamson S., Experiments on the lateral stabilisation and levitation of linear induction motors, *IEEE Transactions on Magnetics*, 1974, **10**(3), 470-473.
- [21] Liu C. T., Kuo J. L., A Generalized 3-D dynamic modelling for transverse flux homopolar linear machines based on statistical saliency-effect superposition method, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1993, **8**(4), 739-749.
- [22] Liu C. T., Kuo J. L.,Chen L. F., Chen Y. N., Lee Y. J., Leu C. T., Fast 3-D magnetics field analysis of transverse flux linear reluctance propulsion machine by fourier projection method, *IEEE Transactions on Magnetics*, 1995, **31**(6), 4223-4225.
- [23] Liu C. T., Kuo J. L.,Chen L. F., Chen Y. N., Lee Y. J., Leu C. T., Microcomputer control implementation of transverse flux linear switched reluctance machine with rule-based compensator, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1996, **11**(1), 70-75.
- [24] Liu C. T., Kuo J. L.,Chen L. F., Chen Y. N., Lee Y. J., Leu C. T., Interaction force analysis of transverse flux linear switched reluctance machine by fourier projection method, *IEEE Trans. on Energy Conversion*, 1996, **11**(1), 62-69.

- [25] Kruse R., Pfaff G., Pfeiffer C., Transverse flux reluctance motor for direct servo drive applications, *IEEE Industry Applications Conference*, St.Louis, USA, 12-15 October 1998.
- [26] Nolle E., Multiphase transverse magnetic flux machine, Patent no: 5,854,521, Germany, 29 Dec 1998.
- [27] Henneberger G., Bork M., Development of a new transverse flux motor, *IEE Collegium on New Topologies for Permanent Magnet Machines*, London, England, 18 June 1997.
- [28] Jeong Y. H., Kang D. H., Kim J. M., Jang S. M., A Design of transverse flux motor with permanent magnet shield, *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, Busan, South Korea, 12-16 June 2001.
- [29] Popan A. D., Viorel I. A., Blissenbach R., A passive rotor transverse flux machine, *Workshop on variable reluctance electrical machines*, Technical University of Chij-Napoca, Romania, 17 September 2002.
- [30] Viorel I. A., Henneberger G., Blissenbach R., Lowenstein L., *Transverse flux machines, their behavior, design, control and applications*, Mediamira Publishing House, Romania, 2003.
- [31] Viorel I. A., Transverse flux machine mathematical model, *Rev. Roum. Sci. Tech., Electrotechn. Energy*, 2003, **48**(2), 369-379.
- [32] Viorel I. A., Crivii M., Lowenstein L., Szabo L., Gutman M., Direct Drive Systems with Transverse Flux Reluctance Motors, *Acta Electrotechnica*, 2004, **45**(3), 33-40.
- [33] Kastinger G., Unipolar transverse flux machine, US 6,657,329,132, 2 December 2003.
- [34] Kastinger G., Schumacher A., Reducing torque ripple of transverse flux machines by structural designs, *International Conference Of Power Electronics, Machines and Drives*, Bath, UK, 16-18 April 2002.
- [35] Arshad W. M., Thelin P., Backstrom T., Sadarangani C., Use of transverse-flux machines in a free-piston generator, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2004, **40**(4), 1092-1100.
- [36] Junghwan C., Kang D., Lee J., Hong J., Development of transverse flux linear motor with permanent-magnet excitation for direct drive applications., *IEEE Transactions on Magnetics*, 2005, **41**(5), 1936-1939.
- [37] Nozaki Y, Babu J., Shotoh K., Masada E., Improvement of transverse flux linear induction motors performances with third order harmonics current injection. *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, 2004, **14**(2), 1846-1849.

- [38] Polinder H., Mecrow B. C., Jack A. G., Dickinson, P. G., Mueller, M. A., Conventional and TFPM linear generators for direct-drive wave energy conversion *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2005, **20**(2), 260-267.
- [39] Schmidt E., Finite element analysis of a novel design of a three phase transverse flux machine with an external rotor, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2011, **47**(5), 982-985.
- [40] Quddes M. R., Sekino M., Ohsaki H., Kashima N., Nagaya S., Electromagnetic design study of transverse flux enhanced type superconducting wind turbine generators, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2011, **2**(3), 1101-1104.
- [41] Bang D., Polinder H., Shrestha G., Ferreira J.A., Review of generator systems for direct drive wind turbines, *Europes Premier Wind Energy Event*, Brussels, Belgium, 2 April 2008.
- [42] Hsu Y. S., Tsai M. C., Development of a novel transverse flux wheel motor, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2011, **47**(10), 3677-3680.
- [43] Rahman Z., Evaluating radial, axial and transverse flux topologies for in wheel motors, *Power electronics in Transportation*, Novi, USA, 21-22 Oct. 2004.
- [44] Kang D. H., Chun Y. H., Weh H., Analysis and optimal design of transverse flux linear motor with PM excitation for railway traction, *IEEE Proceedings on Electric Power Applications*, 2003, **15**(4), 493-499.
- [45] Swechkorenko D., On Design and analysis of a novel transverse flux generator for direct-driven wind application, Phd Thesis, KTH University, Sweden, 2010.
- [46] Rasmussen P. O., Transverse flux machine with Stator Made of E-shaped laminations”, Patent no: US7312549, United States, 2007.
- [47] Rasmussen P. O, Runolfsson G, Thorsdottir T. A, Jakobsen U, Pedersen A. H., E-core transverse flux machine with integrated fault detection system, *International Conference on Electrical Machines and Systems*, Beijing, China, 2011.
- [48] Bass J. T., Ehsani M., Miller T. J. E, Robust torque control of switched reluctance motors without a shaft position sensor, *IEEE Trans. Ind. Electron*, 1986, **IE33**, 212-216.
- [49] Macmin S. R., Szensny P. M., Rzeson W. J., Jahns T. M., Application of sensor integration techniques to switched reluctance motor drives, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1992, **28**(6), 1339 - 1344.
- [50] Lumsdaine A., Lang J. H., Balas M. J., A state observer for variable reluctance motors: analysis and experiments, *Nineteenth Asilomar Conference on Circuits, Systems and Computers*, Pacific Grove, USA, 6-8 November 1985.

- [51] Ehsani M., Husain I., Elimination of discrete position sensors and current in switched reluctance motor drives, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1992, **28**,128-135.
- [52] Acarnley P. P., Hill R. J., Hooper C. W., Detection of rotor position in stepping and switched reluctance motors by monitorin of current waveforms, *IEEE Trans. Ind. Electron*, 1985, **IE32**, 215-222.
- [53] Elmas C., Selaya-De-La Parra H., Application of a full order extended Luenberger observer for a position sensorless operation of a switched reluctance motor drive, *IEEE Proc. Control Theory and Applications*, 1996, **143**(5), 401-408.
- [54] Zhan Y. J., Chan C. C., Chau K. T., A Novel sliding mode observer for indirect position sensing of switched reluctance motor drives, *IEEE Transactions On Industrials Electronics*, 1999, **46**(2), 390-397.
- [55] Khalil A., Undervood S., Husain I., Four quadrant pulse injection and sliding mode observer based sensorless operation of a switched reluctance machine over entire speed range including zero speed, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2007, **43**, 714-723.
- [56] Islam N. S., Husain I.,Veilette R. J., Design and performance analysis of sliding mode observers for sensorless operation of switched reluctance motors, *IEEE Trans. Cont. Syst. Technology*, 2003, **11**, 383-389.
- [57] Brosse A., Henneberger G., Different models of the SRM in state space format for the sensorless control using a Kalman Filter, *International Conference On Power Electronics and Variable Speed Drives*, London, England, 21-23 September 1998.
- [58] Cheok A. D., Wong Z., Fuzzy logic rotor position estimation based switched reluctance motor DSP drive with accuracy enhancement, *IEEE Trans. Power Electron*, 2005, **20**, 908-921.
- [59] Meşe E., Torrey D. A., Sensorless estimation for variable reluctance machines using artificial neural networks, *IEEE Industry Applications Conference*, New Orleans LA, USA, 05-09 October 1997.
- [60] Meşe E., Torrey D. A., An Approach for sensorless position estimation for switched reluctance motors using artificial neural networks, *IEEE Trans. Power Electron*, 2002, **17**, 66-75.
- [61] Reay D. S., Williams B. W., Sensorless position detection using neural networks for the control of switched reluctance motors, *IEEE International Conf. on Control Applications*, Kohala Coast, Hawaii, 22-27 August 1999.
- [62] Bellini A., Flipetti F., Franceschini G., Tassoni, Vas P., Position sensorless control of SRM drive using ANN techniques, *IEEE Industry Applications Conference*, St.Louis, USA, 12-15 October 1998.

- [63] Lachman T., Mohamad T. R., Teo S. F., Sensorless position estimation of switched reluctance motors using artificial neural networks, *Int. Conf. on Robotics, Intelligent Systems And Signal Processing*, Changsha, China, 8-13 October 2003.
- [64] Paramasiyam S., Vilayan S., Vasudeyen M., Krishnan R, Real time verification of AI based rotor position estimation techniques for a 6/4 pole switched reluctance motor drives, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2007, **43**, 3209-3214.
- [65] Echerique E., Dixon J., Cadenas R., Pera R., Sensorless control for a switched reluctance wind generatör based on current slopes and neural networks, *IEEE Trans. Industrial Electronics*, 2009, **56**(3), 817-825.
- [66] Hudson C. A., Lobo N. S., Krishnan R., Sensorless control of switch-based switched reluctance motor drive using neural network, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2008, **55**(1), 321-329.
- [67] Wisnewski J., Pole position identification of permanent magnet axial flux motor using PIPCRRM sensorless method, *European Conf. On Power Electronics and Applications*, Aalborg, Denmark, 2-5 September 2007.
- [68] Nguyen T. D., Foo G., Tseng K. J., Vialthgamuwa D.M., Modeling and sensorless direct torque and flux control of a dual-airgap axial flux permanent magnet machine with field weakening, *IEEE Trans. On Mechatronics (ASME)*, 2013, **99**, 1-11.
- [69] Zhongsong C., Baoming G., Aribal T., Neural network based position sensorless control for transverse flux linear SRM, *Advances in Neural Network, Lecture Notes in Computer Science*, 2007, **4493**, 73-79.
- [70] He Z., Xia C., Shou Y., Xie X., Rotor position estimation for switched reluctance motor using support vector machine, *IEEE Int. Conf. On Control and Automation*, Guangzhou, China, 30 May-1 June 2007.
- [71] Zhou J., Li H., Sun Y., Variable speed control in switched reluctance drive based on least-square support vector machine, *IEEE International Conference on Maechatronics and Automation*, Takamatsu, Japan, 5-8 August 2008.
- [72] Hualei Z., Xiaoyan D., Huangqiu Z., Dehong Z., Decoupling control of bearingless synchronous reluctance motor based on support vector machine inverse system, *Control Conference*, Beijing, China, 29-31 July 2010.
- [73] Xiang Q., Sun Y., Zhang X., Optimization design of the bearingless switched reluctance motor based on SVM and GA, *Control Conference*, Yantai, China, 22-24 July 2011.
- [74] Qu B., Song J., Jia H., Jin Z., Nonlinear modeling of switched reluctance machine, *International Conference on Electrical Machines and Systems*, Beijing, China, 20-23 August 2011.

- [75] Yang H., Gu C., Analytical design and modeling of transverse flux switched reluctance machine, *International Conference on Electrical Machines and Systems*, Wuhan, China, 17-20 October 2008.
- [76] Lu K., Richie E., Preliminary Comparison Study of Drive Motor for Electric Vehicle Application, *International Conference on Electrical Machines and Systems*, Shenyang, China, 18-20 August 2001.
- [77] Cosic A., Lee C., Krishnan R., Lobo N. S., Novel two-phase switched reluctance machine using common-pole E-core structure: concept, analysis, and experimental verification, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2009, **45** (2), 703-711.
- [78] Anpalaham P., Design of transverse flux machines using analytical calculations and finite element analysis, Phd Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2001.
- [79] Amreiz H. M., Comparison Between Transverse Flux and Conventional Switched Reluctance Machines, *International Conference on Electrical Machines*, Rome, Italy, 6-8 September 2010.
- [80] Zhang J., Eliminating the position sensor in a switched reluctance motor drive actuator application, Phd Thesis, University of Kentucky, Lexington, United States, 2005.
- [81] Kioskeridis I., Mademlis C., Optimal Efficiency Control of Switched Reluctance Generators, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2006, **21**(4), 1062-1072.
- [82] Torrey D. A., Switched reluctance generators and their control, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2002, **49**(1), 3-14.
- [83] Rasmussen P. O., Andersen G., Helle L., Pedersen J. K., Blaabjerg F., Fully automatic characterization system for switched reluctance machines, *Int. Conf. On Electrical Machines*, Istanbul, Turkey, 2-4 September 1998.
- [84] Krishnan R., Materu P., Measurement and instrumentation of a switched reluctance motor, *Industry Applications Society Annual Meeting*, San Diego, USA, 1-5 October 1989.
- [85] Ray W. F., Erfan F., A New method of flux or inductance measurement for switched reluctance motors, *International Conference on Power Electronics and Variable Speed Drives*, London, England, 26-28 October 1994.
- [86] Lu K., Rasmussen P. O., Ritchie A. E., Investigation of flux linkage profile measurement methods for switched reluctance motors and permanent magnet motors, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **58**(9), 2009, 3191-3198.



- [87] Lu W., Keyhani A., Sensorless control of switched reluctance motors using sliding mode observers, *IEEE International Electric Machines and Drives Conference*, Cambridge, England, 17-20 June 2001.
- [88] Gao H., Salmasi F. R., Ehsani M., Inductance model-based Sensorless control of the switched reluctance motor drive at low speed, *IEEE Transactions on Power Electronics*, November 2004, **19**(6), 1568-1573.
- [89] İlhan S., Küme merkezlerinin belirlenmesinde yeni bir yöntem (IFART), Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2009, 259494.
- [90] Akçayol M. A., Bir anahtarlama relüktans motorun sinirsel-bulanık denetimi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2001, 114823.
- [91] Kuhn H., ve Tucker A., Nonlinear programming, *In Proceedings of 2nd Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probabilistics*, University of California Press, 1951.
- [92] Vapnik V., *The Nature of statistical learning theory*, Springer-Verlag, New York, 1995.
- [93] Cristianini N., Shawe-Taylor J., *An Introduction to support vector machines (and Other Kernel-Based Learning Methods)*, 1st edition, Cambridge University Press, United Kingdom, 2000.
- [94] Günes F, Tokan T. N, Gürgen F., A knowledge-based support vector synthesis of the transmission lines for use in microwave integrated circuits, *Expert Systems with Applications*, 2010, **37**(4), 3302–3309.
- [95] Günes F, Tokan T. N, Gürgen F., Support vector design of the micro strip lines, *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2008, **18**, 326–336.
- [96] Tokan T. N., Destek vektör makinelerinin mikrodalga teori ve tekniğindeki uygulamaları, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2009, 243846.
- [97] Rasmussen H., *Automatic tuning of PID regulators*, Lecture Notes, Dept. Of Control Engineering, Aalborg University, Denmark, 2002.
- [98] Rasmussen P. O., Madsen T. F., Shajarati O., Advanced Exercise Bike with an E-Core Transverse Flux Machine, *KIPE*, Daejeon, Korea, 22 November 2003.

## **EKLER**

## EK A

### Rotor Pozisyonu Kestirimi Yapay Sinir Ağları Yazılımı

```
function yocikis=ileriyondeYSA(u1,u2)
```

```
% u1; akım,u2; akı girişi  
% normalizasyon
```

```
x1=u1/32;  
x2=u2/0.15;
```

```
% katmanlarda toplam ve aktivasyon fonksiyonu çıkışlarının tanımlanması
```

```
ynet1=[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0];  
yo1=[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0];  
ynet2=[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0];  
ynet22=[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0];  
yo2=[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0];  
ynet3=[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0];  
ynet33=[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0];  
yo3=[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0];  
ycikis=0;
```

```
% Rotor pozisyonu tahmini için eğitilen yapay sinir ağlarının ağırlık değerleri
```

```
w1=[16.478293371958888      8.8327720205239544;      -10.377946281269807  
11.67657388518140; 0.34249083937923802 -7.7072941211511896;  
3.1628964182829549 6.1588191538391657; -5.0442975468669946  
-5.3941031502903476; 5.4702720068839747 0.40144926079167104;  
-4.9673372956952804 24.699314659014373; -1.6753137436003505  
-8.4274281642253115; -16.201480390784447 2.6935304377911486;  
-0.97400777810420169 24.851149517009127];
```

```
wb1=[-18.993184009480633; 6.9805600693961392; 5.2815310555709685;  
-4.4090520389992074; 3.851264617852697; -2.0331467959820015;  
-0.35620126222054732; 1.5757681958503553; 0.94124436123347444;  
0.26315825247901742];
```

```
w2=[-2.8459693609463064 2.4683604534909236 2.0565930556179342  
13.921332399092007 6.8935565132945706 8.7183482257149656 4.9549826126161287  
2.6096597687445988 3.7896282120144971 4.7771496913790443;  
-0.16106867776278277 -11.377884717416475 1.1404587307207339  
0.26978117191175893 0.95767081397460618 1.1575410018972718 3.69038111933635  
3.4429817806873451 -5.0677925849509418 -4.888047677744128;  
0.16804854347595621 7.4220385832695426 -1.658383490899618 1.7719394403356394 -  
1.1339026757865054 -3.8915858912078174 -1.198819162884416 -0.59436424084993367  
1.8184730159825506 5.6622811530607251;  
4.7462614966279766 2.6186710911361271 -6.4785596115433419 0.32392337080903666  
3.4180221107760582 3.6019692483285528 -0.66529996042966411 -2.1771132176183432  
3.5366958023329969 9.3096280116313803;  
0.15513707175158784 13.209308431891465 -1.8982519771660307 0.71027669287087514  
-2.698721777775445 12.529292320780451 0.61961855167031643 14.999724236016728  
-0.75268874855020551 -10.407934341596045; 0.4712212698262519
```

-0.092983496764919529 -1.3180749180855753 -0.67482358703883527 -  
0.85515107255105038 -3.0898053741269798 0.4795586814311481 3.1322337062295462  
-7.3517633781744829 7.5234778810609164;  
6.438686741209767 2.8982452721239693 -0.72801046614767406 -0.48350202398844588  
-0.86755408489267971 -1.0773264347760956 -0.59782304815621379  
-0.94461453802882267 0.083451816958538122 16.632354757606482;  
1.3599951430014268 -0.03223138290442349 -3.4092433453862965 -3.3440653921498691  
3.5653342392766811 -9.9493671325698649 18.468262279871638 -8.7059011936917443  
-1.2523717179350911 -11.6879200278848; -0.20971854837071377 0.62640881773405566  
-3.3078998175602834 0.65967971004057824 0.95491888760263355  
-2.9665433011019395 3.8783588564657716 -3.0551722125882139 0.17631634729855655  
-2.3073346714398411; -1.2106397245377261 23.449846492836166 -2.2441811003374599  
1.2923935349252282 -3.0773482728108883 -0.84702111368890032 -6.3692568792607833  
0.10450857420740962 0.59352556136789203 3.0357696426189191];

wb2=[4.0312602863634579; 11.165000778322636; -10.362189172627346;  
1.4559718871454375; -5.2466610112050027; -8.4937756268536102;  
-11.722523050657214; 7.8078956281178957; 4.7652077438202989;  
-22.416577265257008];

w3=[0.19079902194120768 -10.656781833714247 0.10714608566203736  
0.7578676876547692 -8.1488562780858924 7.6956094701960733 1.8263895807033377  
-33.824654589250336 24.466217314316189 6.3784536148329334;  
-0.32982407886016535 0.088215302889654304 0.44896563673814194  
-0.37762004574606473 -1.8642180994786737 -0.30464404376813914  
0.34455221345271991 2.4752125306912913 3.4998328132246312 1.3290244602781547;  
-0.31782572427536088 -0.44493952684320937 12.85229572287435  
-0.21314268544620937 -6.8575436382457156 0.23206169984038705  
-0.050954957569977824 1.186932625271744 1.1942269719487308 -1.7146839242614795;  
-33.773669747538833 -2.4606088986038883 0.852687568572284 30.55818921991019  
-7.5327083648307278 30.513883676935169 -16.632988065544986 51.107292472139463  
50.43230050118941 17.836622105139295;  
12.336137900592226 -5.4518433900793308 -18.187185629830637  
0.084471369651542422 7.623216513770906 -0.59145071690565698  
0.013124450886971763 -46.254696947959104 48.048013661163324 1.7067358937296644;  
-4.8356096529877153 -4.9146110650625925 -2.9864404946489773 -1.2530462261121189  
4.8491790039348786 1.3922158967798184 -0.55552128307402537 29.007969720036719  
0.083950904907468746 3.5700919401569005;  
7.7006188546952545 8.0844521006493437 8.5871745854197457 0.56187565428590225  
-10.291265546352832 -1.7950557120905466 1.0428379137679564 36.125153084219527  
-28.666612509270248 18.185076680972159;  
-0.58016826216116235 -0.31596630638489043 -0.18325828403595043  
-0.23921709006305925 0.35472977678065171 -0.14647536932548405  
-0.36214752831552222 1.3216322004556194 1.2934333248874874  
-0.013930261182343159];

wb3=[4.3768390794776098; -7.8037674710466503; 5.4148803629961382;  
-4.6471488101383045; -20.631618845674467; -15.779540301281436;  
-1.2884125041069077; 1.3986107724546071];

w4=[-20.12732166752215; -4.8347328144984978; -52.800496574595272;  
-48.568729018482749; -47.915639778850199; 0.043901258435719154;  
-19.528881145952848; 33.818183323476127];  
wb4=15.453250425085805;

*% 1.katman, iki giriş, 10 sinir hücresi*

```
for i=1:10;
    ynet1(i)=x1*w1(1,i)+x2*w1(2,i)+1*wb1(i); % toplama işlemi
    yo1(i)=(2/(1+exp(-2*ynet1(i))))-1; % tansig aktivasyon fonksiyonu
end
```

*% ikinci katman 10 sinir hücresi*

```
for j=1:10
    for i=1:10

        ynet2(j)=ynet2(j)+(yo1(i)*w2(i,j));

    end
    ynet22(j)=ynet2(j)+wb2(j);
    yo2(j)=(2/(1+exp(-2*ynet22(j))))-1;

end
```

*% üçüncü katman, 8 sinir hücresi*

```
for j=1:8
    for i=1:10

        ynet3(j)=ynet3(j)+(yo2(i)*w3(i,j));

    end
    ynet33(j)=ynet3(j)+wb3(j);
    yo3(j)=(2/(1+exp(-2*ynet33(j))))-1;

end
```

*% Çıkış katmanı, tek çıkış*

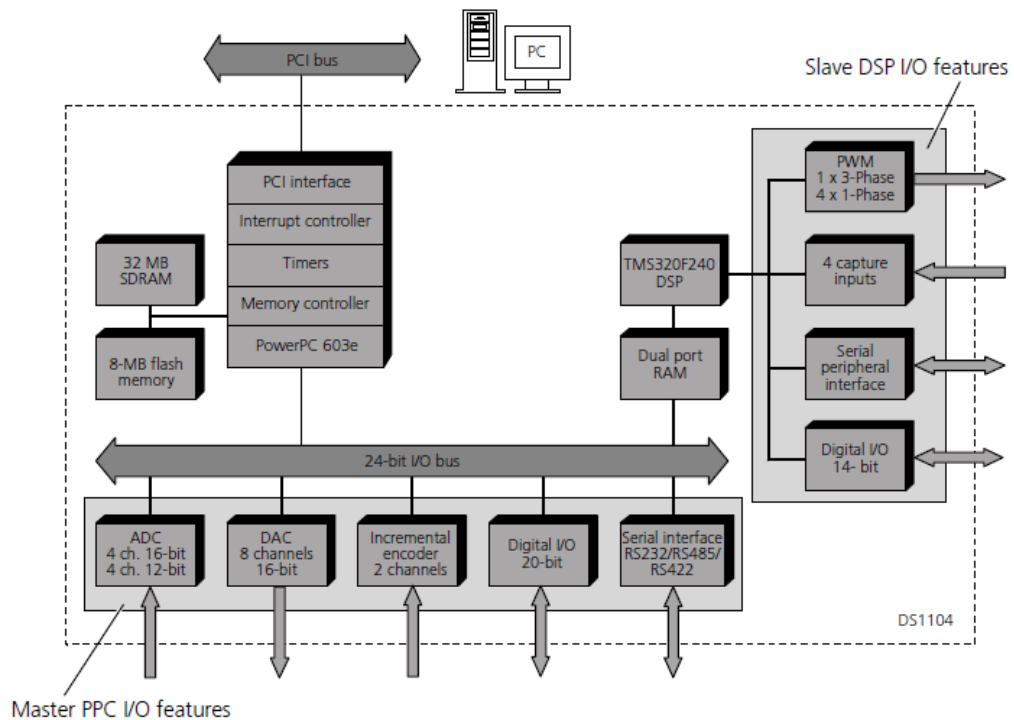
```
for j=1:8;
    ycikis=ycikis+(yo3(j)*w4(j));
end
yycikis=ycikis+wb4;
yocikis=(2/(1+exp(-2*yycikis)))-1;
```

## EK B

## DSPACE

### Board Architecture

The following illustration gives overview of the architecture and the functional units of the DS1104:



### Features Provided by the Masters PPI:

The DS1104's main processing unit, MPC8240, consists of

- A PowerPC 603e microprocessor (master PPC) on which your models will be implemented
  - Running at 250 MHz (CPU clock)
  - Containing a 16-KByte L1 data cache
  - Containing a 16-KByte L1 instruction cache
- An interrupt controller
- A synchronous DRAM controller
- Several timers

- A PCI Interface (5V, 32 bit, 33MHz)

## **ADC UNIT**

The master PPC on the DS1104 controls an ADC unit featuring two different types of A/D converters:

- 1 A/D converter (ADC1) multiplexed to four channels (signals ADCH1---ADCH4). The input signals of the converter are selected by a 4:1 input multiplexer.

The A/D converters have the following characteristics:

- 16-bit resolution
- $\pm 10V$  input voltage range
- $\pm 5$  mV offset error
- $\pm 0.25\%$  gain error
- $> 80dB$  (at 10 kHz) signal-to-noise ratio (SNR)
- 4 parallel A/D converters (ADC2...ADC5) with one channel each (signals ADCH5...ADCH8). The A/D converters have the following characteristics:

- 12-bit resolution
- $\pm 10V$  input voltage range
- $\pm 5$  mV offset error
- $\pm 0.5\%$  gain error
- $> 70dB$  (at 10 kHz) signal-to-noise ratio (SNR)

## **DAC UNIT**

The master PPC on the DS1104 controls a D/A converter. It has the following characteristics:

- 8 parallel DAC channels (signals DACH1...DACH8)
- 16-bit resolution
- $\pm 10V$  output voltage range
- $\pm 1mV$  offset error,  $10\mu V/K$  offset drift
- $\pm 0.1\%$  gain error,  $25ppm/K$  gain drift
- $> 80dB$  (at 10kHz) signal-to-noise ratio (SNR)
- Transparent and latched mode

## **BIT I/O UNIT**

The master PPC on the DS1104 controls a bit I/O unit with the following characteristics:

- 20-bit digital I/O
- Direction selectable for each channel individually
- $\pm 5\text{mA}$  maximum output current
- TTL voltage range for input and output

## **Incremental Encoder Interface**

The master PPC on the DS1104 controls an incremental encoder interface. It has the following characteristics:

- Input channels for two digital incremental encoders
- Support of single-ended TTL and differential RS422 signals
- 24-bit position counter
- 1.65 MHz maximum encoder line count frequency
- Line termination for differential inputs
- Power supply for incremental encoders (5V and 0.1A)

## **Overview of RTI1104**

The Real-Time Interface (RTI) board library for the DS1104 R&D Controller Board- the rtilib 1104- provides the RTI blocks that implement the I/O capabilities of the DS1104 in Simulink models. These RTI blocks are designed to specify the hardware setup for real-time applications. Furthermore, the rtilin 1104 provides additional RTI blocks, demo models, and useful information.

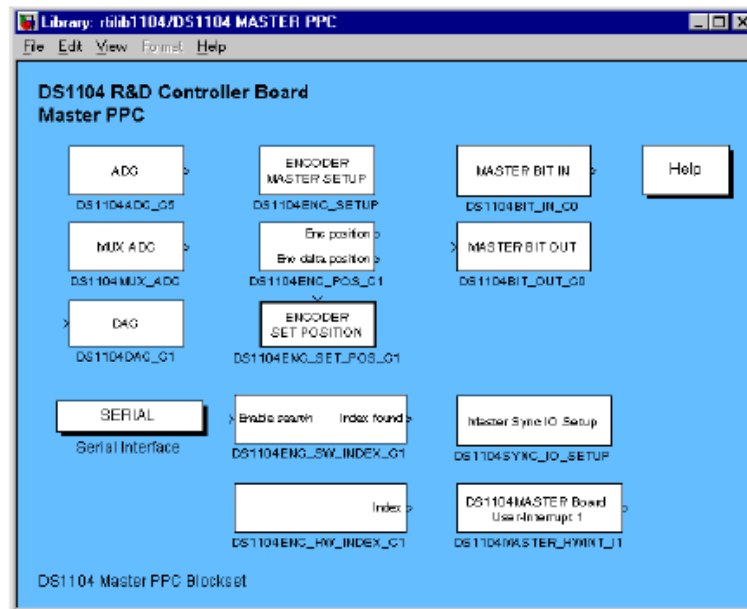


## RTI blockset

When entering rtilib1104 in the MATLAB Command Window, the RTI board library for the DS1104 is displayed.



After you click the Master PPC button in the Library: rtilib1104 window, the Library: rtilib1104/DS1104 MASTER PPC window is displayed. It contains the I/O blocks served by the Power PC processor.



## DS1104 Data Sheet

### Technical data

The following table shows the data sheet of the DS1104 R&D Controller Board.

| Parameter                      | Characteristics   |
|--------------------------------|---|
| Processor                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ MPC8240 processor with PPC603e core and on-chip peripherals</li> <li>■ 64-bit floating-point processor</li> <li>■ 250 MHz CPU</li> <li>■ 2 x 16 KB cache; on-chip</li> <li>■ On-chip PCI bridge (33 MHz)</li> </ul>  |
| Memory                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Global memory: 32 MB SDRAM</li> <li>■ Flash memory: 8 MB</li> </ul>  |
| Timer                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 1 sample rate timer (decrementer):<br/>32-bit down counter, reload by software, 40 ns resolution</li> <li>■ 4 general purpose timer:<br/>32-bit down counter, reload by hardware, 80 ns resolution</li> <li>■ 1 time base counter:<br/>64-bit up counter, 40 ns resolution, range 23400 years</li> </ul>   |
| Interrupt controller           | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 5 timer interrupts</li> <li>■ 2 incremental encoder index line interrupts</li> <li>■ 1 UART interrupt</li> <li>■ 1 slave DSP interrupt</li> <li>■ 1 slave DSP PWM interrupt</li> <li>■ 5 ADC end of conversion interrupts</li> <li>■ 1 host interrupt</li> <li>■ 4 user interrupts from the I/O connector</li> </ul>   |
| ADC<br>1 x 16-bit ADC with mux | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 4 muxed channels equipped with one 16-bit sample &amp; hold ADC</li> <li>■ Note: 5 ADC channels (1 x 16-bit + 4 x 12-bit) can be sampled simultaneous</li> <li>■ 16-bit resolution</li> <li>■ <math>\pm 10</math> V input voltage range</li> <li>■ 2 <math>\mu</math>s conversion time</li> <li>■ <math>\pm 5</math> mV offset error</li> <li>■ <math>\pm 0.25</math> % gain error</li> <li>■ 4 ppm/K offset drift</li> <li>■ 25 ppm/K gain drift</li> <li>■ <math>&gt;80</math> dB signal-to-noise ratio (SNR)</li> </ul> |

| Parameter   | Characteristics   |
|---|---|
| ADC<br>4 x 12-bit ADC                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 4 channels each equipped with one 12-bit sample &amp; hold ADC<br/>Note: 5 ADC channels (1 x 16-bit + 4 x 12-bit) can be sampled simultaneous</li> <li>■ 12-bit resolution</li> <li>■ <math>\pm 10</math> V input voltage range</li> <li>■ 800 ns conversion time</li> <li>■ <math>\pm 5</math> mV offset error</li> <li>■ <math>\pm 0.5</math> % gain error</li> <li>■ 4 ppm/K offset drift</li> <li>■ 25 ppm/K gain drift</li> <li>■ <math>&gt;65</math> dB signal-to-noise ratio (SNR)</li> </ul> |
| DACs<br>8 x 16-bit DAC                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 16-bit resolution</li> <li>■ <math>\pm 10</math> V output voltage range</li> <li>■ <math>\pm 5</math> mA maximum output current</li> <li>■ Max. 10 <math>\mu</math>s settling time (full scale, accuracy 1/2 LSB)</li> <li>■ <math>\pm 1</math> mV offset error</li> <li>■ <math>\pm 0.1</math> % gain error</li> <li>■ 13 ppm/K offset drift</li> <li>■ 25 ppm/K gain drift</li> <li>■ <math>&gt;80</math> dB signal-to-noise ratio (SNR)</li> </ul>  |
| Digital I/O   | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 20-bit parallel I/O</li> <li>■ Single bit selectable for input or output</li> <li>■ <math>\pm 5</math> mA maximum output current</li> <li>■ TTL output/input levels</li> </ul>   |
| Digital Incremental Encoder Interface<br>(2 x 24 bit) | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 2 channels</li> <li>■ Selectable single-ended (TTL) or differential (RS422) input</li> <li>■ Fourfold line subdivision</li> <li>■ Max. 1.65 MHz input frequency, i.e. fourfold pulse counts up to 6.6 MHz</li> <li>■ 24-bit loadable position counter</li> <li>■ Reset on index</li> <li>■ 5 V/0.5 A sensor supply voltage</li> </ul>  |
| Serial interface                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 1 serial UART (universal asynchronous receiver and transmitter)</li> <li>■ Selectable transceiver mode: RS232/RS422/RS485</li> <li>■ Max. baudrate RS232: 115.2 kBaud</li> <li>■ Max. baudrate RS422/RS485: 1 MBaud</li> </ul>   |

| Parameter           | Characteristics   |
|---------------------|---|
| Slave DSP subsystem | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Texas Instruments TMS320F240 DSP</li> <li>■ 16-bit fixed-point processor</li> <li>■ 20 MHz clock frequency</li> <li>■ 64 K x 16 external program memory</li> <li>■ 28 K x 16 external data memory</li> <li>■ 4 K x 16 dual-port memory for communication</li> <li>■ 16 K x 16 flash memory</li> <li>■ 1 x 3-phase PWM output</li> <li>■ 4 x 1-phase PWM output</li> <li>■ 4 capture inputs</li> <li>■ SPI (serial peripheral interface)</li> <li>■ Max. 14-bit digital I/O</li> <li>■ TTL output/input levels for all digital I/O pins</li> <li>■ ±13 mA maximum output current</li> </ul> |
| Host interface      | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 32-bit PCI host interface</li> <li>■ 5 V PCI slot</li> <li>■ 33 MHz ±5 %</li> </ul>  |
| Physical size       | PCI 185 x 106.68 mm (7.28 x 4.2 in)   |
| Ambient temperature | 0 ... 55 °C (32 ... 131 °F)   |
| Cooling             | Active cooling by fan   |
| Power supply        | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ +5 V ±5 %, 2.5 A</li> <li>■ +12 V ±5 %, 0.3 A</li> <li>■ -12 V ±5 %, 0.2 A</li> </ul>  |
| Power consumption   | 18.5 W  |



## Current Transducer LA 55-P

For the electronic measurement of currents : DC, AC, pulsed..., with a galvanic isolation between the primary circuit (high power) and the secondary circuit (electronic circuit).

$$I_{PN} = 50 \text{ A}$$



| Electrical data         |   |                                    |  |   |  |
|-------------------------|---|------------------------------------|--|---|--|
| $I_{PN}$                | Primary nominal r.m.s. current                    | 50                                 | A  |   |  |
| $I_p$                   | Primary current, measuring range                  | 0 .. $\pm 70$                      | A  |   |  |
| $R_M$                   | Measuring resistance @                            | $T_A = 70^\circ\text{C}$           | $T_A = 85^\circ\text{C}$                       |   |  |
|                         |   |                                    |  | $R_{Mmin}$   $R_{Mmax}$   $R_{Mmin}$   $R_{Mmax}$ |  |
|                         |   | with $\pm 12 \text{ V}$            | @ $\pm 50 \text{ A}_{max}$                     | 10   100  | 60   95 $\Omega$                             |
|                         |   |                                    | @ $\pm 70 \text{ A}_{max}$                     | 10   50   | 60 <sup>1)</sup>   60 <sup>1)</sup> $\Omega$ |
| with $\pm 15 \text{ V}$ | @ $\pm 50 \text{ A}_{max}$                        | 50   160                           | 135   155 $\Omega$                             |   |  |
|                         | @ $\pm 70 \text{ A}_{max}$                        | 50   90                            | 135 <sup>2)</sup>   135 <sup>2)</sup> $\Omega$ |   |  |
| $I_{SN}$                | Secondary nominal r.m.s. current                  | 50                                 | mA   |   |  |
| $K_N$                   | Conversion ratio                                  | 1 : 1000                           |  |   |  |
| $V_C$                   | Supply voltage ( $\pm 5 \%$ )                     | $\pm 12 \dots 15$                  | V  |   |  |
| $I_C$                   | Current consumption                               | 10 (@ $\pm 15 \text{ V}$ ) + $I_S$ | mA   |   |  |
| $V_d$                   | R.m.s. voltage for AC isolation test, 50 Hz, 1 mn | 2.5                                | kV   |   |  |

### Features

- Closed loop (compensated) current transducer using the Hall effect
- Printed circuit board mounting
- Insulated plastic case recognized according to UL 94-V0.

### Advantages

- Excellent accuracy
- Very good linearity
- Low temperature drift
- Optimized response time
- Wide frequency bandwidth
- No insertion losses
- High immunity to external interference
- Current overload capability.

### Applications

- AC variable speed drives and servo motor drives
- Static converters for DC motor drives
- Battery supplied applications
- Uninterruptible Power Supplies (UPS)
- Switched Mode Power Supplies (SMPS)
- Power supplies for welding applications.

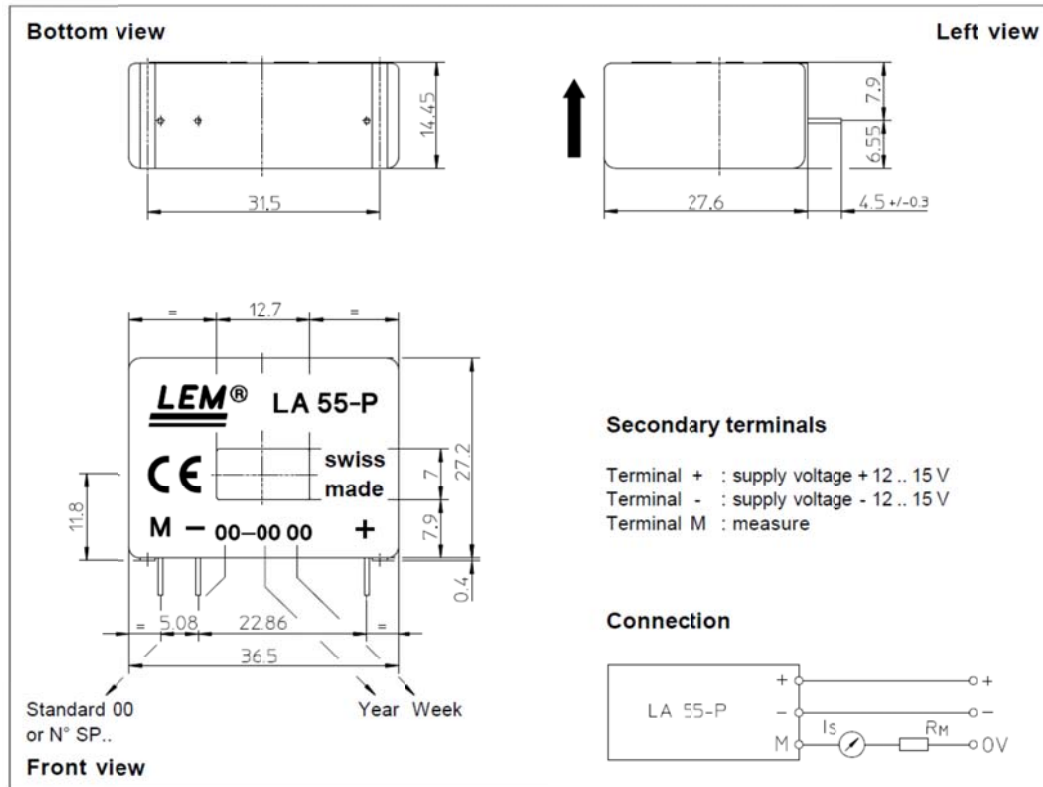
| Accuracy - Dynamic performance data |   |  |                        |
|-------------------------------------|---|--|------------------------|
| X                                   | Accuracy @ $I_{PN}$ , $T_A = 25^\circ\text{C}$                                      | @ $\pm 15 \text{ V}$ ( $\pm 5 \%$ )          | $\pm 0.65$ %           |
|                                     |   | @ $\pm 12 \dots 15 \text{ V}$ ( $\pm 5 \%$ ) | $\pm 0.90$ %           |
| $\epsilon_L$                        | Linearity   |  | < 0.15 %               |
| $I_O$                               | Offset current @ $I_p = 0$ , $T_A = 25^\circ\text{C}$                               | Typ  | Max                    |
| $I_{OM}$                            | Residual current <sup>3)</sup> @ $I_p = 0$ , after an overload of $3 \times I_{PN}$ |  | $\pm 0.2$ mA           |
| $I_{OT}$                            | Thermal drift of $I_O$  | 0°C .. + 70°C                                | $\pm 0.1$ mA           |
|                                     |   | - 25°C .. + 85°C                             | $\pm 0.1$ mA           |
| $t_{ra}$                            | Reaction time @ 10 % of $I_{pmax}$  |  | < 500 ns               |
| $t_r$                               | Response time @ 90 % of $I_{pmax}$  |  | < 1 $\mu\text{s}$      |
| $di/dt$                             | di/dt accurately followed   |  | > 200 A/ $\mu\text{s}$ |
| f                                   | Frequency bandwidth (- 1 dB)  |  | DC .. 200 kHz          |

| General data |                               |                          |             |
|--------------|-------------------------------|--------------------------|-------------|
| $T_A$        | Ambient operating temperature | - 25 .. + 85             | °C          |
| $T_S$        | Ambient storage temperature   | - 40 .. + 90             | °C          |
| $R_S$        | Secondary coil resistance @   | $T_A = 70^\circ\text{C}$ | 80 $\Omega$ |
|              |                               | $T_A = 85^\circ\text{C}$ | 85 $\Omega$ |
| m            | Mass                          | 18                       | g           |
|              | Standards <sup>4)</sup>       | EN 50178                 |             |

Notes : <sup>1)</sup> Measuring range limited to  $\pm 60 \text{ A}_{max}$   
<sup>2)</sup> Measuring range limited to  $\pm 55 \text{ A}_{max}$   
<sup>3)</sup> Result of the coercive field of the magnetic circuit  
<sup>4)</sup> A list of corresponding tests is available

980706/8

**Dimensions LA 55-P** (in mm. 1 mm = 0.0394 inch)



**Mechanical characteristics**

- General tolerance  $\pm 0.2$  mm
  - Primary through-hole 12.7 x 7 mm
  - Fastening & connection of secondary 3 pins
- Recommended PCB hole 0.83 x 0.56mm  
0.9 mm

**Remarks**

- $I_s$  is positive when  $I_p$  flows in the direction of the arrow.
- Temperature of the primary conductor should not exceed 90°C.
- Dynamic performances (di/dt and response time) are best with a single bar completely filling the primary hole.
- In order to achieve the best magnetic coupling, the primary windings have to be wound over the top edge of the device.
- This is a standard model. For different versions (supply voltages, turns ratios, unidirectional measurements...), please contact us.

LEM reserves the right to carry out modifications on its transducers, in order to improve them, without previous notice.

## KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] **Gündoğan Türker Ç.**, Erfan Kuyumcu F., Türker Tokan N., Performance Of Support Vector Regression Machines On Determining The Magnetic Characteristics Of The E-Core Transverse Flux Machine, *Turkish Journal of Electrical and Computer Engineering*, Tübitak, DOI: 10.3906/elk-1301-84.
- [2] **Gündoğan Türker Ç.**, Erfan Kuyumcu F., The Modelling of The E-Core Transverse Flux Machine Based on Neural Network, *International Review of Electrical Engineering*, 2010, **5**(4), 1477-1487.
- [3] **Gündoğan Türker Ç.**, Erfan Kuyumcu F., Türker Tokan N., Comparison of the ANN with SVRM Method on Determining the Magnetic Characteristics of the E-Core Transverse Flux Machine, *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, Cape Town, South Africa, 25-28 February 2013.
- [4] **Gündoğan Türker Ç.**, Erfan Kuyumcu F., Determining of The Magnetic Characteristics of The E-Core Transverse Flux Machine Based On Neural Network, *International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications (INISTA)*, Istanbul, Turkey, 15-18 June 2011.
- [5] **Gündoğan Türker Ç.**, Erfan Kuyumcu F., The Modelling and The Simulation of the Switched Reluctance Generator, *34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics (IECON)*, Orlando, USA, 10-13 November 2008.

## ÖZGEÇMİŞ

1979 yılında İstanbul'da doğdu. İlk, orta, lise eğitimini İstanbul'da tamamladı. 1996 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği bölümünden 2001'de mezun oldu. 2001-2004 tarihleri arasında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı. Mayıs/2007-Şubat/2008 tarihleri arasında Erasmus ve AWS-Danimarka firmasından maddi destek alarak misafir araştırmacı olarak Danimarka Aalborg Üniversitesi'nde bulundu.

Ocak/2002-Temmuz/2012 tarihleri arasında Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak görev yaptı.