

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**İNDÜKSİYON MOTORLARINDA ROTOR AKISININ REAKTİF GÜÇ
ÜZERİNDEN YAPAY SİNİR AĞLARI İLE ANLIK AYARLANMASI VE
DOLAYLI ALAN ODAKLI KONTROLÜ**

Haydar Can ACAR

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK - ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

HAZİRAN 2019

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**İNDÜKSİYON MOTORLARINDA ROTOR AKISININ REAKTİF GÜÇ
ÜZERİNDEN YAPAY SİNİR AĞLARI İLE ANLIK AYARLANMASI VE
DOLAYLI ALAN ODAKLI KONTROLÜ**

Haydar Can ACAR

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK – ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZİRAN 2019

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNDÜKSİYON MOTORLARINDA ROTOR AKISININ REAKTİF GÜÇ
ÜZERİNDEN YAPAY SİNİR AĞLARI İLE ANLIK AYARLANMASI VE DOLAYLI
ALAN ODAKLI KONTROLÜ

Haydar Can ACAR
ELEKTRİK – ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 20.06/2019 tarihinde jüri tarafından Oybirliği / Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Şükrü ÖZEN



Dr. Öğr. Üyesi Yavuz ÜSER (Danışman)



Dr. Öğr. Üyesi Sertaç GÖRGÜLÜ



ÖZET

İNDÜKSİYON MOTORLARINDA ROTOR AKISININ REAKTİF GÜÇ ÜZERİNDEN YAPAY SİNİR AĞLARI İLE ANLIK AYARLANMASI VE DOLAYLI ALAN ODAKLI KONTROLÜ

Haydar Can ACAR

Yüksek Lisans Tezi, Elektrik – Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Yavuz ÜSER

Haziran 2019; 38 sayfa

İndüksiyon motorlarının dolaylı alan odaklı kontrolünde rotor akısının tahmininin gerçeğe yakınlığı önemli bir rol oynamaktadır. Rotor akısı stator devresi değişkenlerinden elde edildiğinde stator direnci akı tahminine etki etmektedir. Düşük frekanslarda stator direncinin değişimi akı tahmininde hatalara yol açmakta ve kontrol yapısının performansını negatif yönde etkilemektedir. Bu çalışmada indüksiyon motorunun reaktif gücü ve Yapay Sinir Ağları (YSA) kullanılarak indüksiyon motorunun akı tahmini gerçekleştirilmiştir. Yapay Sinir Ağını eğitmek için ileri beslemeli eğitim algoritması kullanılmıştır. Sonuçların performansını ve verimliliğini göstermek için MRAS (Model Referans Uyarlamalı Sistem) metodu ile karşılaştırılmıştır. Simülasyonlar MATLAB/Simulink platformunda gerçekleştirilmiştir.

ANAHTAR KELİMELEER: Dolaylı Alan Odaklı Kontrol, İndüksiyon Motoru, MATLAB, MRAS, Simulink, Yapay Sinir Ağları

JÜRİ: Prof. Dr. Şükrü ÖZEN

Dr. Öğr. Üyesi Yavuz ÜSER

Dr. Öğr. Üyesi Sertaç GÖRGÜLÜ

ABSTRACT

ROTOR FLUX ESTIMATION USING REACTIVE POWER AND ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS IN INDIRECT FIELD ORIENTED CONTROL FOR INDUCTION MOTOR DRIVES

Haydar Can ACAR

MSc Thesis in Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Yavuz ÜSER

June 2019; 38 pages

In the indirect field-oriented control of induction motors, the proximity of the estimation of rotor flux plays an important role. Stator resistance affects the flux estimation when the rotor flux is derived from the stator circuit variables. The change in stator resistance at low frequencies leads to errors in the flux estimation and affects the performance of the control structure. In this study, the induction motor flux estimation was performed by using the reactive power of induction motor and Artificial Neural Networks (ANN). The feed-forward training algorithm was used to train the Artificial Neural Network for simulations. It was compared with MRAS (Model Reference Adaptive System) method to show the performance and efficiency of the results. Simulations are implemented in MATLAB / Simulink platform.

KEYWORDS: Artificial Neural Network (ANN), İndirect Field Oriented Control, İnduction Motor, MATLAB, MRAS, Simulink

COMMITTEE: Prof. Dr. Şükrü ÖZEN

Asst. Prof. Dr. Yavuz ÜSER

Asst. Prof. Dr. Sertaç GÖRGÜLÜ

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik – Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında hiçbir konuda yardımını esirgemeyen, yaptığı yorumlarla tezime katkıda bulunan, genel hatlarıyla tezimi belirlememde yardımcı olan, mesleki ve kişisel anlamda gelişmeye katkıda bulunan değerli tez danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Yavuz ÜSER’e şükran ve saygılarımı sunarım.

Bu tez çalışmasında yer alan ve önerileri ile katkıda bulunan değerli hocam Prof. Dr. Şükrü Özen’e teşekkür eder ve saygılarımı sunarım.

Eğitim – Öğretim hayatım boyunca maddi – manevi her konuda bana destek olan, hiçbir şeyi esirgemeyen, bana sonuna kadar güvenen ve onların bu güvenlerinin verdiği his sayesinde hayata sıkı sıkıya bağlanmamı sağlayan aileme ve aynı zamanda varlıklarıyla her zaman bana destek olan arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarak bu tez çalışmasını aileme ithaf ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ.....	iii
AKADEMİK BEYAN	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ixi
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK TARAMASI	3
3. MATERYAL VE METOD	6
3.1. Dolaylı Alan Odaklı Kontrol.....	6
3.2. Model Referans Adaptif Sistem.....	9
3.2.1. Model referans adaptif sistem rotor akısı tahmini.....	10
3.3. Yapay Sinir Ağları.....	12
3.3.1. Geri beslemeli yapay sinir ağları.....	13
3.3.2. İleri beslemeli yapay sinir ağları.....	14
3.4. Yapay Sinir Ağları ile Birlikte Reaktif Güç ve Akı Tahmini.....	15
4. BULGULAR.....	17
4.1. Reaktif Güç Kullanılarak MRAS Tabanlı Dolaylı Alan Odaklı Kontrol Yapısının Modellenmesi.....	17
4.2. Reaktif Güç - MRAS Tabanlı Dolaylı Alan Odaklı Kontrol Yapısına Yapay Sinir Ağlarının Eklenmesi.....	22
5. TARTIŞMA	26
6. SONUÇLAR	27
7. KAYNAKLAR	32
8. EKLER.....	35
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “İndüksiyon Motorlarında Rotor Akısının Reaktif Güç Üzerinden Yapay Sinir Ağları ile Anlık Ayarlanması ve Dolaylı Alan Odaklı Kontrolü” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

20 / 06 / 2019

Haydar Can ACAR



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

AC	:Alternatif Akım
AI	:Yapay Zeka (Artificial Intelligence)
ANN	:Yapay Sinir Ağları (Artificial Neural Network)
ASR	:Hız Denetleyici (Anaerobic Speed Reserve)
ATR	:Tork Denetleyici (Anaerobic Torque Reserve)
DC	:Doğrusal Akım
DTC	:Lineer Tork Kontrol (Direct Torque Control)
DTFC	:Lineer Tork ve Akı Kontrol (Direct Torque and Flux Control)
EKF	:Uzatılmış Kalman Filtresi (Extended Kalman Filter)
ELO	:Uzatılmış Lupberger Gözlemleyicisi (Extended Lupberger Observer)
FOC	:Alan Odaklı Kontrol (Filed Oriented Control)
GA	:Genetik Algoritmama (Genetic Algorithm)
IFOC	:Dolaylı Alan Odaklı Kontrol (Indirect Field Oriented Control)
IM	:İndüksiyon Motoru (Induction Motor)
IVC	:Dolaylı Vektör Kontrol(Indirect Vector Control)
MATLAB	:Matrix Laboratory
MRAS	:Model Referans Adaptif Sistem (Model Reference Adaptive Control)
NN	:Sinir Ağı (Neural Network)
Rpm	:Revolution per minute
V/Hz	:Voltage/Hertz
YSA	: Yapay Sinir Ağları

v_{ds}	:d component of the stator voltage vector.
v_{qs}	:q component of the stator voltage vector.
i_{ds}	:d component of the stator current vector.
i_{qs}	:q component of the stator current vector.
Ψ_{dr}	:d component of the rotor flux vector.
ψ_{qr}	:q component of the rotor flux vector.
L_s	:Stator inductance.
L_r	:Rotor inductance.
L_{sl}	:Stator leakage inductance.
L_{rl}	:Rotor leakage inductance.
L_m	:Mutual inductance.
R_s	:Resistance of a stator phase winding.
R_r	:Resistance of a rotor phase winding.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Alan odaklı kontrol yapısı	6
Şekil 3.2. Clarke dönüşümü	6
Şekil 3.3. Parke dönüşümü	6
Şekil 3.4. Dolaylı alan odaklı kontrol yapısı.....	8
Şekil 3.5. Model Referans Uyarlamalı Sistemi genel yapısı.....	9
Şekil 3.6. Model Referans Adaptif Sistem tabanlı rotor akı tahmini bloğu.....	11
Şekil 3.7. Yapay Sinir Ağı ve Geri Yayılımlı Öğrenme Algoritması Genel Yapısı.....	12
Şekil 3.8. Yapay Sinir Ağları ile Reaktif Güç Tabanlı Akı Tahmini Yapısı.....	16
Şekil 4.1. Rotor Akı Tahmin Bloğu.....	18
Şekil 4.2 MRAS ve Reaktif Güç Tabanlı Akı Tahmin Bloğu.....	18
Şekil 4.3. Reaktif Güç ve MRAS Tabanlı Dolaylı Alan Odaklı Kontrol Yapısı.....	19
Şekil 4.4. Reaktif Güç ve MRAS Tabanlı Dolaylı Alan Odaklı Kontrol Yapısının Rotor Akı Tahmini	19
Şekil 4.5. İstenilen Hız Değeri.....	20
Şekil 4.6. Reaktif Güç ve MRAS Tabanlı Dolaylı Alan Odaklı Kontrol Yapısının Hız Cevabı.....	20
Şekil 4.7. İstenilen Tork Değerleri.....	21
Şekil 4.8. Reaktif Güç ve MRAS Tabanlı Dolaylı Alan Odaklı Kontrol Yapısının Tork Cevabı.....	21
Şekil 4.9. Yapay Sinir Ağı Katmanı	22
Şekil 4.10. Güç Hesaplama Bloğu	22
Şekil 4.11. Yapay Sinir Ağlarının Sisteme Eklenmiş Hali.....	23
Şekil 4.12. Yapay Sinir Ağı – Reaktif Güç Mras Tabanlı Kontrol Yapısının Rotor Akı Tahmini.....	24
Şekil 4.13. Yapay Sinir Ağı–Reaktif Güç Mras Tabanlı Yapının Hız Cevabı.....	24
Şekil 4.14. Yapay Sinir Ağı–Reaktif Güç Mras Tabanlı Yapının Tork Cevabı.....	25

Şekil 6.1. Hız Cevaplarını Üst Üste Bindirilmiş Hali.....	27
Şekil 6.2. Çizelge 6.1'in Grafik Üstündeki Görünümü	28
Şekil 6.3. Tork Cevaplarının Üst Üste bindirilmiş Hali.....	29
Şekil 6.4. Çizelge 6.2'in Grafik Üstündeki Görünümü	30
Şekil 6.5. Akı Tahmini Karşılaştırması.....	30
Şekil 6.6. Yüksek Hızlarda Akı Tahmini Hataları.....	31
Şekil 6.7. Düşük Hızlarda Akı Tahmini.....	32
Şekil 8.1. 1000 rad/sec Referans Hızına Ulaşma Değerleri.....	35
Şekil 8.2. 500 nM – 1000nM Tork Değişim Grafiği	36

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 6.1. Hız Cevabı Karşılaştırması	28
Çizelge 6.2. Tork Cevabı Karşılaştırması	29



1. GİRİŞ

Endüstride ve birçok sanayi kuruluşunda tercih edilen alternatif akım (AC) motorlarının kontrolü, günümüzde literatürde sıkça çalışılan bir konu haline gelmiştir. Alternatif akım motorlarının, doğru akım (DC) motorlarına göre avantajları olsada, yapısındaki farklı parametreler nedeniyle kontrol edilmesi doğru akım motorlarına göre daha zordur. Güç elektroniği ve mikroişlemci teknolojisindeki son gelişmeler, gelişmiş kontrol tekniklerinin alternatif akım (AC) motor sistemlerine uygulanmasını mümkün kılmıştır.

Hız kontrolü, vektör kontrolü, tork kontrolü gibi birden fazla çeşidi olan kontrol algoritmaları kullanıcıya istenilen hassasiyet ve verimliliği veremediği için farklı teknikler geliştirilmesi uygun görülmüştür. Bu tekniklerin en başında gelen alan odaklı kontrol, motor akısını, frekans ve gerilim değişimi ile düzenleyerek motorun hızını ve torkunu kontrol eden yapıdır. Alan odaklı kontrolde akının tahmini sensörler aracılığıyla ölçüldüğü için maliyetli ve uygulaması zordur. Hasse ise izlenen rotor açısını motor dinamik denklemleri ile birleştirerek bir kayma frekansı elde etmiş ve akı rotasyonunu bu kayma frekansı üzerinden tahmin etmeyi başarmıştır [6]. Bu metot literatürde dolaylı alan odaklı kontrol olarak tanımlanmıştır. Dolaylı Alan Odaklı Kontrol (IFOC) hızlı tork tepkisi, makine parametre değişikliklerine karşı dayanıklılığı ve sensöre ihtiyaç duyulmadan uygulanabilmesi nedeniyle sürücülerin kontrolü için popüler bir teknik haline gelmiştir.

Hız bilgisinin motor shaftı üzerinden okunmasıyla dijital sinyal işleyicilerde (DSP) kurulan bu teknik, aynı zamanda hız tahmin tekniklerinin kullanılması ile de uygulanabilmektedir. Hız tahmini teknikleri için Kalman filtre yakınsaması, direkt hesaplama metodu, Luenberger gözlemleyicisi gibi birçok metot geliştirilmiş ama içerisinde en çok tercih edileni performansı ve verimliliği ile Model Uyarlamalı Referans Sistemi (MRAS) olmuştur [1-3]. Bu sistem stator akımından veya geri dönen elektro motor kuvvetinden (emf) yararlanarak hız tahmini yapmaktadır. Model Referans Uyarlamalı Sistem (MRAS), her ne kadar hız tahmini tekniği olarak gözüksün de, rotor akısının ayarlanması ilkesini temel almakta fakat özellikle düşük hız aralıklarında doğru ve hızlı akı tahmini ortaya çıkaramamaktadır. Bunun temel nedeni sürüklenme (drifting), düşük frekans bozuklukları ve motor parametrelerine olan bağılılığıdır.

Bu durum tüm model tabanlı tahmin ediciler için olağan bir dezavantajı temsil etmektedir [1]. Model bazlı tahmin bloklarının bu eksikliğini gidermek için yapay sinir ağları ve genetik algoritmalarla teknikleri geliştirilmiştir. Bu teknik lineer olmayan bir fonksiyonu yapay sinir ağının öğrenme mekanizmasıyla yakınsatabilmekte ve parametre bilgisi olmadan çözüm sunabilmektedir [4]. Alan odaklı kontrol sistemlerinde, model referans uyarlamalı sistemin verimsiz sonuçlar verdiği kısımlar yapay sinir ağı (YSA) tahmin blokları ile değiştirilmiş ama düşük hızlarda yapay sinir ağlarının nümerik olmayan değerlerle baş edememesinden dolayı sorunun tam olarak çözülmediği görülmüştür [2].

Yapay sinir ağına tahmin katmanında verilen bilgi doğrudan motor veya akı bilgisi olmadığı için ağı örnekler üzerindeki hatası belirli bir değerin altına indirgenememekte ve ağı eğitimi tamamlanamadığı için istenilen yakınsama değerlerine ulaşılamamaktadır. Bu noktada motorun akım, gerilim ve akı bilgisini içinde barındıran ve aynı zamanda motor yük altındayken veya ısınma ve manyetik doygunluk durumlarında anlık değişen bir kontrol parametresine ihtiyaç duyulmaktadır. Reaktif güç hem anlık değişen hem de kontrol edilmesi kolay bir değişken olduğu için akı tahminini reaktif güç üzerinden elde etmek literatürde sıkça bahsedilen bir konudur. Reaktif güç motor parametrelerinin belirlenmesinde önemli bir rol oynamakta ve tatmin edici sonuçlar vermektedir.

Bu çalışmanın asıl amacı motorun reaktif gücünün motor akısının tahmini üzerindeki etkisini inceleyip ileri beslemeli yapay sinir ağı ile birlikte dolaylı alan odaklı kontrol yapısını Matlab /Simulink platformunda gerçekleştirmektir. Hazırlanan sistemin performans ve verimlilik sonuçlarını gözlemlemek için model referans adaptif sistemi (MRAS) ile arasındaki fark gözlemlenmiş, cevap ve hız eğrileri karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir.

2. KAYNAK TARAMASI

Sharma, Gupta ve Srivastava (2007) dolaylı alan odaklı vektör kontrolü alanında yapay sinir ağlarını kullanarak çalışma voltajını ve frekansını tahmin etmişlerdir. Değişken tork ve hız değişimleri ile sistemin stabil bir şekilde çalıştığını test edip, simülasyonda ve realitede gerçekleştirmişlerdir.

Kumar ve Balaga (2015) indüksiyon motorlarındaki rotor akısını yapay sinir ağları ile tahmin ederek modelden elde edilen rotor akısını ve yapay sinir ağlarından elde edilen rotor akısını karşılaştırmış, yapay sinir ağlarının tahmin algoritmasının doğruluğunu kanıtlamışlardır.

Esuri ve Abonda (2010) indüksiyon motorlarında geri beslemeli yapay sinir ağı modeli ile hız tahmini yapmış ve farklı çalışma koşulları altında yapay sinir ağının cevaplarını incelemiştir.

Gayathri, Himavathi ve Sankaran (2012) rotor akısının reaktif güç ile olan bağlantısı üzerine çalışmış, model referans adaptif sistem ile vektör kontrolü gerçekleştirmiş, indüksiyon motorunda rotor direncini tahmin etmek için karşılaştırmalar yapmıştır.

Aktaş ve Okumuş (2010) indüksiyon motorunun direkt tork kontrolü esnasında yapay sinir ağlarını kullanarak stator direncini tahmin etmiş, TMS320C6711, 32 bit sabit noktalı dijital sinyal işleyicide gerçekleştirmişlerdir.

Birhanu Gizaw (2017) dolaylı alan odaklı kontrol metodu ile ileri beslemeli yapay sinir ağları modelini birlikte kullanarak hız tahmini yapmış, farklı sayıda nöron ve katmanlar ile yapay sinir ağları modelinin kontrol modeli üzerindeki etkisini göstermiştir.

Abbas ve Ali (2015) PI kontrol yapısı ile yapay sinir ağları kontrol yapısını ayrı ayrı ve bir arada kullanarak farklı yük ve tork dağılımları altında hız cevaplarını incelemiştir. Yapay sinir ağlarının yüksek performans ve kontrol kabiliyetini başka kontrol yapıları ile birlikte de sağlayabildiğini göstermişlerdir.

Wang, Shi, Xu ve Lorenz (2015) dolaylı alan odaklı kontrol yapısı ile direkt tork kontrol yapısı arasındaki performans ve verim farkını karşılaştırmalı olarak incelemiş, iki yönteminde parametre değişimlerine karşı hassas olmasından dolayı voltaj limitli kontrol yapısını geliştirmiştir.

Seshubabu ve Jose (2017) yavaş hızlardaki uygulamalarda sensörlü ve sensörsüz vektör kontrollü teknikleri incelemiş ve sensörlü – dolaylı alan odaklı kontrol yapısının sensörsüz yapıya göre daha iyi cevaplar verdiğini göstermiştir.

Fayath, Ibrahim ve Alwan (2005) dolaylı alan odaklı kontrol yapısında başlangıç ve denge durumunda stator akım bileşenlerinin tork ve akı bileşenleri üzerindeki etkisini incelemiş, farklı yük durumları altında davranış biçimlerini incelemiştir.

Razouk, Cheriti, Olivier ve Sicard (1997) alan odaklı kontrol yapısında yapay sinir ağını kullanarak stator akısının tahminini gerçekleştirmişler ve ikinci bir yapay sinir ağı bloğuyla rotor akısının doğrusal olmayan tahminini gözlemlemişlerdir.

Wai, Duan, Lee ve Chang (2003) indüksiyon motorlarının pozisyon bilgisini belirlemek için dalgacık sinir ağı yapısını kullanarak yüksek hassasiyete sahip, adaptif bir gözlemleme sistemi tasarlamışlardır. Tasarlanan bu sistem yüksek örnekleme oranına sahip bir dijital sinyal işlemcisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu metotta kayan kipli kontrol (sliding mode control) yapısı kullanılarak dolaylı alan odaklı kontrol yapısının adaptif tahmin sistemine karşı sağlamlığı artırılmıştır.

Razouk, Cheritt ve Olivier (2002) motor terminal değişkenlerinden (stator voltajı, stator akımı ve frekansı) alan odaklı kontrol yapısı çerçevesinde rotor zaman sabitini tahmin etmeye çalışmışlardır. Tahmin edilen zaman sabiti ile gerçekteki zaman sabiti arasındaki uyumsuzluğun akı ve tork değerleri arasında ayırmaya (decoupling) neden olduğunu gözlemlemişlerdir. Sabitler arasındaki uyumsuzluğun motorun ısınmasından ve motorun mıknatıslanma indüktansının doygunluğa ulaşmasından kaynaklandığını göstermişlerdir.

Chen ve Sheu (2002) PI hız kontrol yapısının sağlamlığını arttırmak için iki adet çift katmanlı sinir ağı yapısını kullanmışlardır. İlk çift katmanlı sinir ağı anlık tahmin bloğunu oluşturmuş, ikinci çift katmanlı sinir ağı ise motor hızı ve tahmin edilen hız arasındaki farkı azaltmak için parametre düzenleyicisi olarak kullanılmıştır.

Lin, Wai, Chou ve Hsu (2002) doğrusal (lineer) indüksiyon motorlarında dolaylı alan odaklı kontrol esnasında oluşan sürtünme kuvveti ve kararsızlığı gidermek için tekrarlayan sinir ağı (Recurrent Neural Network) yapısını kullanmışlardır. Sinir ağının öğrenme kapasitesini arttırmak için gradyan iniş algoritmasını anlık parametre değişikliklerinin tahmininde kullanmışlardır.

Karanayıl, Rahman ve Grantham (2007) stator ve rotor direncinin anlık tahminini elde etmek için yapay sinir ağları ve vektör kontrolü yapısını birlikte kullanmışlardır. Rotor direncinin tahmininde yapay sinir ağının tahmin ettiği rotor akısı ile matematiksel modelden elde edilen rotor akısının arasındaki hata farkından yararlanılarak sinir ağının ağırlıkları ayarlanmıştır. Stator direncinin tahmininde ise ölçülen stator akımı ile sinir ağının tahmin ettiği stator akımının arasındaki hata farkı kullanılmıştır.

Huang, Chen ve Huang (1999) PI kontrol yapısına iki adet çift katmanlı sinir ağı eklemişlerdir. İlk sinir ağı motor parametrelerini tahmin ederek PI kontrolcünün katsayısını ayarlarken, ikinci sinir ağı yükteki değişimleri tahmin ederek hız cevabına katkı sağlamaktadır. Bu sayede kontrolcü yük değişimlerine karşı duyarsız ve daha verimli olmaktadır.

Fodor, Griva ve Profumo (1995) motordaki parametre değişikliklerini telafi etmek için dolaylı alan odaklı kontrol yapısı ile birlikte sinir ağlarını kullanmışlardır. Üç katmanlı sinir ağı, dolaylı alan odaklı kontrol yapısının matematiksel modeline göre tasarlanmış ve eğitilmiş, eğitilmiş sinir ağı kontrol yapısına blok olarak eklenmiştir.

Maiti, Chakraborty, Hori ve Ta (2008) dolaylı alan odaklı kontrol esnasında anlık rotor akı oryantasyonunun ve rotor direncinin belirlenmesinde motorun reaktif gücünden faydalanmışlardır. Reaktif gücün seçimi sistemi stator direncinin değişiminden bağımsız hale getirmiş ve akı tahmini ihtiyacını ortadan kaldırmıştır. Böylece bu sistem sürüklenme (drifting) veya doygunluk (saturation) gibi problemlerden daha az etkilenmektedir.

Peng, Fukao ve Lai (2002) düşük hızlarda indüksiyon motorunun reaktif gücünden yararlanarak sensörsüz hız tahmin yapısını gerçekleştirmişlerdir. Bu yapı ters elektro motor kuvveti ve rotor akısının anlık reaktif gücüne dayanmaktadır. Motor parametre değişikliklerine karşı duyarsız olduğu için hız kontrolü esnasında daha geniş bant aralığı sunmaktadır. Yapılan çalışma 6 kW, 1 kHz çalışma frekansına sahip indüksiyon motoru üzerinde uygulanmış, çalışmanın geçerliliği ve sağlamlığı teoride ve pratikte kanıtlanmıştır.

Kentli (2015) indüksiyon motorlarının aktif ve reaktif gücünün kontrol yapılarındaki fayda ve zararlarını inceleyerek her iki güç bileşeni için farklı kontrol yapıları ortaya çıkarmıştır. Reaktif gücün, aktif gücün aksine parametre bileşenlerinden ve rotor direncinden etkilenmediğini göstermiştir.

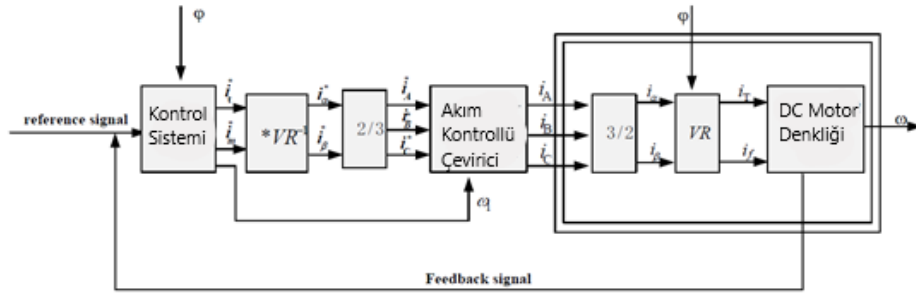
Sedhuraman, Himavathi ve Muthuramalingam (2011) sensörsüz indüksiyon motor sürücülerinde model referans adaptif sisteminin hız tahminini sinir ağı kullanarak reaktif güç ve anlık akı üzerinde gerçekleştirmişlerdir.

Örnek olarak ele alınan dolaylı alan odaklı kontrol yapısında, rotor akı tahmininin reaktif güç ve yapay sinir ağları ile elde edilmesini hedef alan veya bu konuya benzerliğiyle dikkat çeken analitik veya uygulamaya dayalı bir çalışmaya rastlanmamıştır.

3. MATERYAL VE METOT

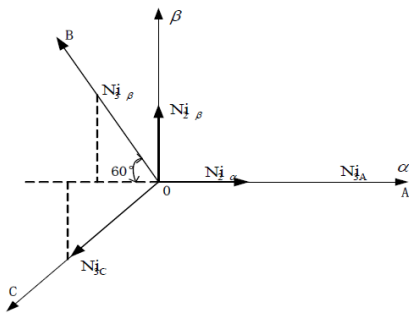
3.1. Dolaylı Alan Odaklı Kontrol

Alan odaklı kontrol (Field Oriented Control) tekniği motorun tork ve akı kontrol bileşenlerinin ayrıştırılarak AC motorunun DC motor modeline benzetimi temeline dayanmaktadır (Şekil 3.1). Bu sayede AC motorun torku ve hızı motorun elektromanyetik durumu ile doğrudan bağlantılı olacak ve DC motor gibi kolayca kontrol edilebilecektir.

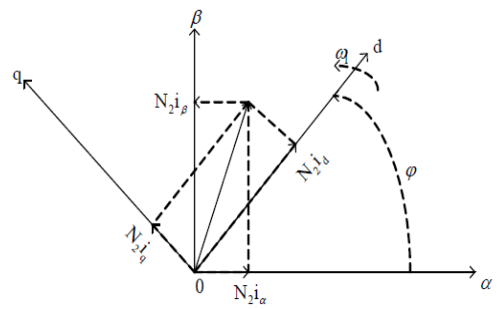


Şekil 3.1. Alan odaklı kontrol yapısı

DC motor performansını yakalayabilmek için Clarke ve Park dönüşümleri uygulanmalıdır. Clarke dönüşümü üç fazlı ABC referansından iki fazlı $\alpha\beta$ referansına (Şekil 3.2), Park dönüşümü ise iki fazlı $\alpha\beta$ referansından döner dq referansına geçişi temsil etmektedir (Şekil 3.3).



Şekil 3.2. Clarke dönüşümü



Şekil 3.3 Parke dönüşümü

Asenkron motorun dq koordinatlarındaki gerilim denklemleri aşağıdaki gibi verilmiştir,

$$u_{ds} = R_s i_{ds} + p \lambda_{ds} - \omega_e \lambda_{qs} \quad (3.1)$$

$$u_{qs} = R_s i_{qs} + p \lambda_{qs} - \omega_e \lambda_{ds} \quad (3.2)$$

$$0 = R_r i_{dr} + p \lambda_{dr} - (\omega_e - \omega_r) \lambda_{qr} \quad (3.3)$$

$$0 = R_r i_{qr} + p \lambda_{qr} - (\omega_e - \omega_r) \lambda_{dr} \quad (3.4)$$

v_{ds} ve v_{qs} d-q koordinatlarındaki stator voltajını, i_{ds} ve i_{qs} d-q koordinatlarındaki stator akımını, i_{dr} ve i_{qr} d-q koordinatlarındaki rotor akımını, R_s ve R_r stator ve rotor dirençlerini, λ_{ds} ve λ_{qs} d-q koordinatlarındaki stator akısını, λ_{dr} ve λ_{qr} d-q koordinatlarındaki rotor akısını, ω_e stator açısal frekansın ve ω_r rotor açısal frekansını temsil etmektedir.

Denklemlerdeki değişken sayısını azaltmak için rotor akısının doğrudan eksen üzerinde olduğu varsayılmaktadır.

$$\lambda_r = \lambda_{dr} \quad (3.5)$$

$$\lambda_{qr} = 0 \quad (3.6)$$

Kayma frekansının (slip frequency) ω_{sl} olarak ifade etmek gerekirse $\omega_{sl} = \omega_e - \omega_r$ bağıntısını kullanarak ve denklem 3.5 ve denklem 3.6'daki değerleri denklem 3.3 ve denklem 3.4'de yerine yazarak denklem 3.7 ve denklem 3.8'deki yeni rotor denklemlerini elde edebiliriz.

$$R_r i_{dr} + p \lambda_r = 0 \quad (3.7)$$

$$R_r i_{qr} + \omega_{sl} \lambda_r = 0 \quad (3.8)$$

Denklem 3.1 ve denklem 3.2'nin denklem 3.7 ve denklem 3.8'e göre türevlerini alırsan denklem 3.9 ve denklem 3.10'daki stator akım denklemlerini elde edebiliriz.

$$i_{ds} = i_f = [1 + \tau_r p] \frac{\lambda_r}{L_m} \quad (3.9)$$

$$i_{qs} = i_T = \frac{\tau_r \lambda_r \omega_{sl}}{L_m} \quad (3.10)$$

τ_r rotor zaman sabitini temsil etmektedir. d-q koordinatlarındaki tork denklemini denklem 3.11'deki gibi yazılabilir.

$$T_e = n_p \frac{L_m}{L_r} (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qr} i_{ds}) \quad (3.11)$$

Ω_p burada indüksiyon motorlarının kutup sayısını temsil etmektedir.

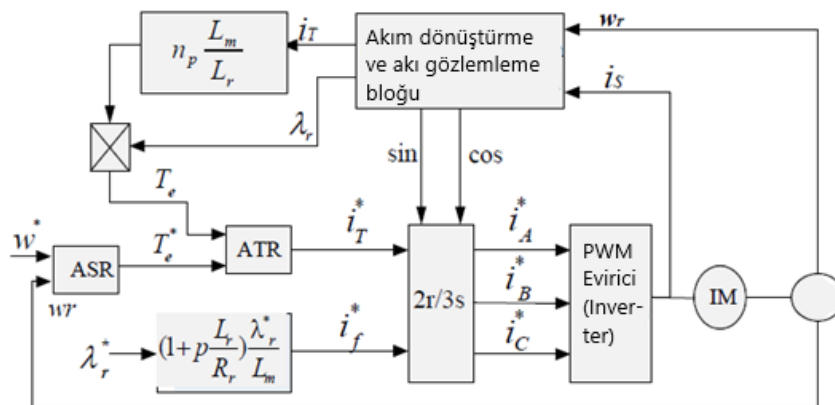
Denklem 3.9 ve denklem 3.10'u denklem 3.11'de yerine yazdığımızda denklem 3.12'deki yeni tork denklemimizi elde edebiliriz.

$$T_e = n_p \frac{L_m}{L_r} \lambda_{dr} i_{qs} = n_p \frac{L_m}{L_r} \lambda_{dr} i_T \quad (3.12)$$

Denklem 3.12’de görüleceği üzere elektromanyetik tork rotor akısı ve q eksenindeki stator akımı ile doğru orantılıdır. Bu ifade DC motorun tork ifadesine benzemektedir. DC motorun torkuda alan akısı ve endüvi akımı ile doğru orantılıdır.

Bu kontrol yapısı üzerine Hasse akı tahmininde sensöre ihtiyaç duyulmadığını öne sürmüş, rotor akısının matematiksel olarak veya motor parametrelerinden tahmin edilerek ölçülebileceği göstermiştir. Bu sayede kontrol yapısının maliyeti azalmış ve uygulama kolaylığı sağlanmıştır.

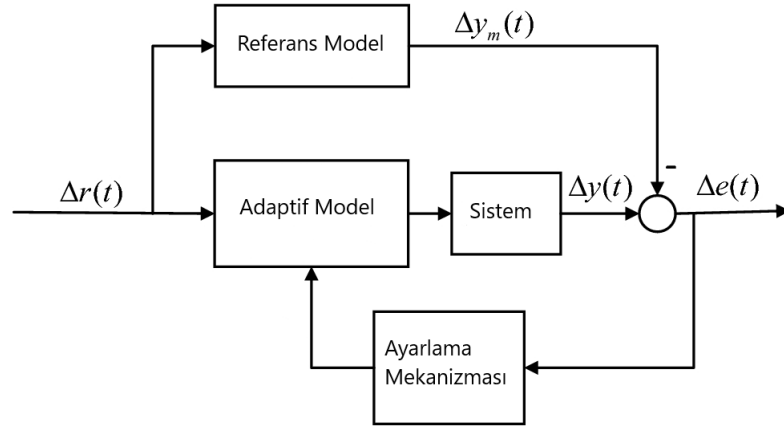
Dolaylı alan odaklı kontrol yapısının indüksiyon motoruna uygulanması şekil 3.4’de gösterilmiştir. ASR ve ATR blokları hız ve tork değişimlerini kontrol eden PI kontrolcülerdir. Tork komutu T_e^* hız hata sinyalinin fonksiyonundan, akım komutu i_T^* ise tork hata sinyalinin fonksiyonundan türetilmektedir.



Şekil 3.4. Dolaylı alan odaklı kontrol yapısı

3.2. Model Referans Adaptif / Uyarlanabilen Sistem (MRAS)

Model referans adaptif sistemde motor hızı, torku veya akısı referans gösterilen motor modelinden ve adaptif olarak kullanılan motor modelinden tahmin edilir. Referans model rotor hızından bağımsız olarak durum değişkenini gerilim veya akım değerlerinden hesaplar. Rotor hızına bağlı adaptif model ise durum değişkenini tahmin eder. Bu durum değişkenleri arasındaki fark daha sonra hız, tork veya akı tahmini üreten bir uyarlama mekanizmasını sürmek için kullanılır. Model Referans Adaptif Sistem'in genel yapısı Şekil 3.5'de gösterilmektedir. Referans model ve adaptif model aynı girişe sahip, x ve $\hat{x}$ ise sırasıyla referans model ve adaptif modeldeki durum değişkenlerini temsil etmektedir. Durum değişkenlerinin fark değeri ise adaptasyon mekanizmasının girişi olarak kullanılmaktadır. Adaptif model değişkeni adaptasyon mekanizması tarafından durum değişkenlerinin farkını sıfıra indirmek için değiştirilmektedir.



Şekil 3.5. Model Referans Uyarlamalı Sistemi genel yapısı

Bu yapıda motorun kendisi referans model, mevcut modelde ayarlama mekanizması olarak kullanılmaktadır. Model referans adaptif sistem sensörsüz bir kontrol yapısı olduğu için motorun döner eksenindeki modeline dayanmaktadır. Stator voltaj denklemleri ve dq koordinatlarındaki akı denklemleri aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$u_d = R i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_r L_q i_q \quad (3.13)$$

$$u_q = R i_q + L_q \frac{di_q}{dt} - \omega_r L_d i_d + \omega_r \psi_r \quad (3.14)$$

Bu denklemlerde u_d ve u_q dq koordinatlarındaki stator voltajını, i_d ve i_q stator akımlarını, L_d ve L_q stator indüktanslarını, R stator direncini ve Ψ_r ise rotor akısını temsil etmektedir.

Stator akım bileşenlerinin zamana göre türevi alındığında denklem 3.15 ve denklem 3.16 elde edilmektedir.

$$\frac{di_d}{dt} = -\frac{R}{L_d} i_d + \frac{\omega_r L_q}{L_d} i_q + \frac{1}{L_d} u_d \quad (3.15)$$

$$\frac{di_q}{dt} = -\frac{\omega_r L_d}{L_q} i_d - \frac{R}{L_q} i_q + \frac{1}{L_q} u_q - \frac{\omega_r \psi_r}{L_q} \quad (3.16)$$

Bu iki denklemi matris formunda yazdığımızda ise denklem 3.17 elde edilmektedir.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d + \frac{\psi_r}{L_d} \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_d} & \omega_r \\ -\omega_r & -\frac{R}{L_d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d + \frac{\psi_r}{L_d} \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d + \frac{R \psi_r}{L_d} \\ u_q \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Böylece sistem modeli durum değişkenleri (i_d' ve i_q') ve kontrol değişkenleri (u_d' ve u_q') kullanılarak sadeleştirilebilmekte ve denklem 3.18'deki yapı elde edilebilmektedir.

$$i_d' = i_d + \frac{\psi_r}{L_d}, i_q' = i_q, u_d' = u_d + \frac{R \psi_r}{L_d}, u_q' = u_q \quad (3.18)$$

Denklem 3.18'de görüleceği üzere tahmin mekanizması motor bilinmeyenleri cinsinden matematiksel olarak ifade edilmiş ve rotor akısı tahmininde kullanılmak üzere sadeleştirilmiştir.

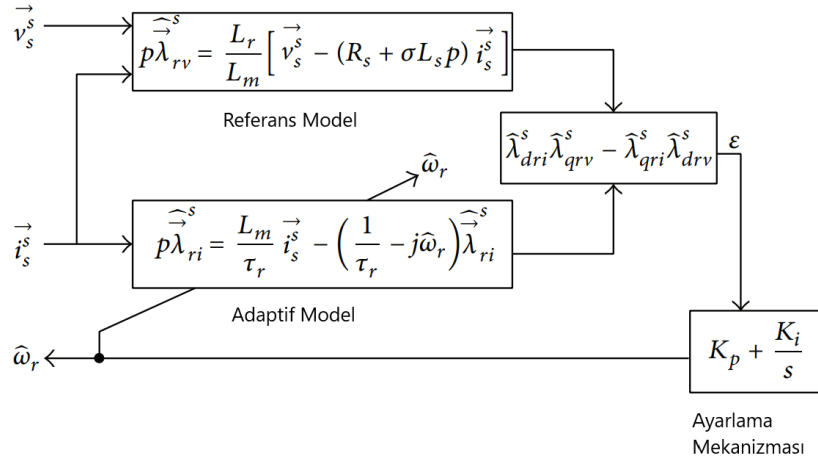
3.2.1. Model referans adaptif sistem rotor akısı tahmini

Model referans adaptif sistem bloğunda rotor akısı (Ψ_r) hız sinaylinin ayarlanmasında kullanılmaktadır. Motor gerilimi ve akımından gelen hesaplanmış rotor akısı ile adaptif modelden elde edilen rotor akısı arasındaki hata fark sinyali akı adaptasyon mekanizmasının girişine uygulandıktan sonra adaptasyon mekanizmasında işlenerek çıkıştan hız değeri olarak sisteme verilir. Uygulanan yeni hız değeri tahmin edilen akı değerini değiştirerek yeni bir fark oluşturur ve adaptasyon mekanizması oluşan bu fark değerine göre tekrar işlem yaparak bir sonraki adım için gereken hız değerini üretir. Bu süreç iteratif yani döngüsel olarak akı tahmini matematiksel modelden elde edilen akı tahminine eşit olana kadar devam etmektedir. Burada hız sinyali sistemim geri besleme (feedback) sinyali olduğu için ilk akı oluşumunda ve akının tahmininde önemli bir role sahiptir. Düşük hızlarda akı tahmin bloğu tam performansını sergileyememekte ve hız tahminine negatif etkide bulunmaktadır. Şekil 3.6'da MRAS yapısı ile rotor akısının tahmini gösterilmektedir.

Durağan haldeki stator gerilimi denklemlerinden referans model denklemleri aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$\dot{\psi}_{dr} = \frac{L_r}{L_m} V_{ds} - \frac{L_r}{L_m} (R_s + \sigma L_s \frac{d}{dt}) i_{ds} \quad (3.19)$$

$$\dot{\psi}_{qr} = \frac{L_r}{L_m} V_{qs} - \frac{L_r}{L_m} (R_s + \sigma L_s \frac{d}{dt}) i_{qs} \quad (3.20)$$



Şekil 3.6. Model Referans Adaptif Sistem tabanlı rotor akı tahmini bloğu (Kumar ve Dubey 2014)

Durağan haldeki stator gerilimi denklemlerinden referans model denklemleri aşağıdaki gibi elde edilebilir.

σ motor kaçak sabitini temsil etmektedir ve $1 - \frac{L_m}{L_{SLr}}$ şeklinde hesaplanmaktadır.

Şekil 3.6. için motor akı denklemleri (adaptif model denklemleri) denklem 3.21 ve denklem 3.22’ de verilmiştir.

$$\hat{\psi}_{dr} = \int \left(\frac{L_m}{T_r} i_{ds} - \omega_r \hat{\psi}_{qr} - \frac{1}{T_r} \hat{\psi}_{dr} \right) \quad (3.21)$$

$$\hat{\psi}_{qr} = \int \left(\frac{L_m}{T_r} i_{qs} - \omega_r \hat{\psi}_{dr} - \frac{1}{T_r} \hat{\psi}_{qr} \right) \quad (3.22)$$

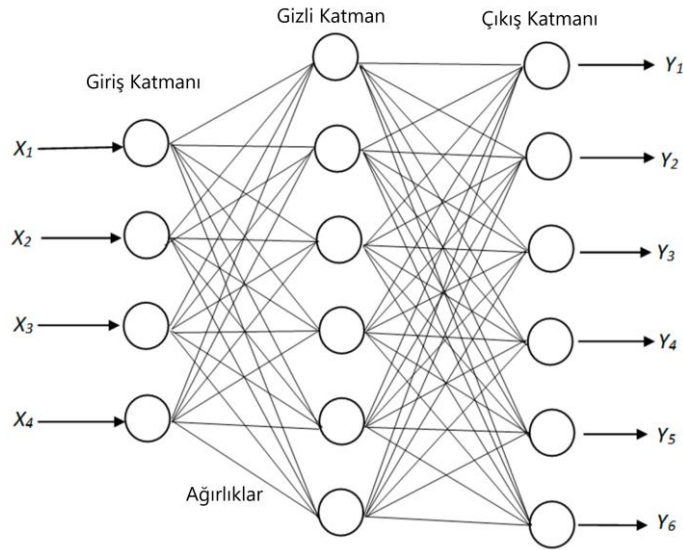
Bu model akıyı girişindeki stator akımından ve hız sinyalinden yararlanarak tespit etmektedir. Referans model denklemlerinden ve adaptif model denklemlerinden gelen akı sinyalleri birbirine eşit olduğunda ise hız tahmini yapılabilmektedir. MRAS tabanlı adaptasyon algoritması tasarlanırken sistemin kararlılığı ve istenilen değere yaklaşmasını olabildiğince hızlı sağlamak önemlidir. Kullanılan akı tahmin algoritmasında akı değerlerini aynı değerde elde edebilmek ya da değerlerin birbirine olabildiğince yakın olması sistemin performansını önemli bir düzeyde etkilemektedir. Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde bu yapıya ek farklı yapılar kullanılarak sistemin performans verimliliği gösterilecek ve karşılaştırmalı olarak simüle edilecektir.

Şekil 3.6’da görüleceği üzere adaptasyon mekanizması PI kontrolcü yapısındadır ve kazanç katsayıları hız tahmini için önemli bir rol oynamaktadır. Bütün model referans adaptif sistem tabanlı çalışmalarda, kazanç katsayıları deneme-yanılma yöntemi veya matematiksel model üzerinden hesaplanarak bulunmaktadır fakat bu yöntem hem zaman alıcı hem de verimsizdir (Barut ve Yalçın,2013). Zaman kaybını ve verimsizliği ortadan kaldırmak için PI denetleyicilerin yerine yapay sinir ağları kullanılabilmektedir. Böylelikle hesaplama işlemi hem kesin sonuçlar vermekte hem de deneme-yanılma yönteminden doğabilecek ve sistemi negatif etkileyecek sonuçlar minimuma indirgenebilmektedir.

3.3. Yapay Sinir Ağları

Sinir ağları insan beynine yola çıkılarak modellenen ve kalıpları tanımak için tasarlanmış bir algoritmalar kümesidir. Verileri makine algısı yöntemiyle yorumlayarak kendini eğitmekte ve bünyesinde şablonlamaktadır. Bu şablonlar nümerik olarak saklanmakta ve vektörler halinde bulunmaktadır. Bu şablonlar gelen veriyi örnek girdiler arasındaki benzerliklere göre gruplandırmaya yardımcı olmakta ve üzerinde çalışılacak etiketli bir veri grubu olduğunda bu grupları kümelemektedir.

Yapay sinir ağları, besledikleri bilgileri anlamak için farklı matematiksel işlem katmanları kullanır. Genellikle, yapay bir sinir ağı, bir dizi katmanda düzenlenmiş düzinelerce ila milyonlarca yapay nörona sahiptir. Giriş katmanı dış dünyadan çeşitli bilgi formlarını alır, ki bu ağın işlemeyi veya öğrenmeyi amaçladığı veridir. Giriş katmanından sonra veriler bir veya daha fazla katmandan geçerek çıkış biriminin kullanabileceği bir veri haline dönüştürülmektedir. Bu katmanlar tamamen birbirine bağlıdır ve her bağlantı bir ağırlık ile temsil edilmektedir. Bir birimin ağırlığı ne kadar fazla ise diğer birimler üzerindeki etkisi de o derece fazladır. Veriler ağın üzerinden geçerken birimler üzerindeki ağırlık değerleri de güncellenmekte ve ağ eğitilmektedir. Yapay sinir ağlarının öğrenebilmesi için eğitim seti adı verilen ve ağın işleyişini belirleyecek olan bilgilerin ağa verilmesi gerekmektedir. Yeterli miktarda veriyle eğitildikten sonra, yeni gelen verileri farklı birimler boyunca öğrendiklerini temel alarak sınıflandırmaya çalışacaktır. Eğitim süresi boyunca makinenin çıktısı, neye uyulması gerektiğini gösteren çıktı ile karşılaştırılır. Eğer iki çıktı aynı ise ağ onaylanır fakat eğer farklılarsa, öğrenimini ayarlamak için geri yayılım tekniğini kullanır ve düzenlenen yeni ağırlıklar ile işlem döngüsel bir şekilde tekrar eder. Şekil 3.7’de yapay sinir ağları ve geri yayımlı öğrenme algoritması gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Yapay Sinir Ağı ve Geri Yayılımlı Öğrenme Algoritması Genel Yapısı

3.3.1. Geri beslemeli yapay sinir ağıları

Karmaşık veri sınıflandırılmasının başında gelen yapay sinir ağı modelleri sırasıyla; ilk olarak Werbos tarafından tasarlanan daha sonra Parker, Rummelhart ve McClelland tarafından üzerine eklemeler yapılan geri yayılım ağı olarak bilinmektedir (Backpropagation Network). Geri beslemeli yapay sinir ağlarındaki bir hücrenin çıkış verisi kendisine ya da diğer hücrelere giriş verisi olarak girilir ve çoğunlukla geri besleme bir geciktirme elemanı vasıtasıyla yapılır. Geri besleme, bir katmanda bulunan hücreler arasında olduğu gibi katmanlar arasında bulunan hücreler ile de gerçekleştirilebilir. Bu yapısı sayesinde geri beslemeli yapay sinir ağları doğrusal olmayan, dinamik bir davranış göstermektedir. Dolayısıyla, geri beslemenin tasarlanma şekline göre farklı yapıda ve davranışta geri beslemeli yapay sinir ağı yapıları elde edilebilir. Yayılma (Propagate) ve uyum gösterme (Adapt) olarak iki aşamada işlemleri gerçekleştiren Standart Geri Besleme Algoritması (SBP), katmanlar arası tam bir bağlantının bulunduğu çok katmanlı, ileri beslemeli ve öğretici olarak eğitilen bir yapay sinir ağı modelidir.

İleri besleme aşamasında, giriş katmanındaki nöronlar veri değerlerini direkt olarak gizli katmana iletir. Gizli katmandaki her bir nöron, kendi giriş değerlerini ağırlıklandırarak toplam değeri hesaplar ve bunları bir aktivasyon fonksiyonu ile işleme sokarak bir sonraki katmana veya doğrudan çıkış katmanına gönderir. Katmanlar arasındaki ağırlıklar başlangıçta rastgele küçük rakamlardan seçilmektedir. Çıkış katmanında bulunan her bir nöron ağırlıklandırılmış değeri hesaplandıktan sonra, bu değer tekrardan aktivasyon fonksiyonu ile karşılaştırılarak mevcut hata olabilecek en küçük değere indirgenmeye çalışılır. Hata değeri belirli bir seviyenin altına ininceye kadar tekrarlama işlemine devam edilir ve böylece ağırlık eğitimi sağlanmış olur. Katmanlar arasındaki bağlantılardaki ağırlıklar eğitimi tamamlanmış ağıdan alınarak deneme aşamasında kullanılmak üzere saklanır. Her ne kadar Geri Besleme (Backpropagation) Algoritması, yapay sinir ağı araştırmaları için önemli bir gelişme olsa da birçok pratik uygulama için çok geri kalmaktadır. Standart Geri Besleme (SBP) algoritmasının en büyük problemi uzun ve fazla data setine ihtiyaç duyan eğitim evresine sahip olmasıdır. Pratik problemlerde temel geri besleme algoritmasının (SBP) kullanılması yapay sinir ağının eğitiminin günlerce hatta haftalarca sürebileceğinden dolayı efektif bulunmamaktadır. Bu sebep ile algoritmada yakınsama ve minimize etme işlemlerini hızlandırmak için bazı teknikler geliştirilmiştir. Öğrenme oranı ve veri seti küçük seçilirse öğrenme yavaşlayacak, büyük seçilir ise de ağırlık değişimleri salınımlı ve kararsız olacaktır. Bu yüzden aynı performans ve kararlılığı sağlayabilmeleri için ileri beslemeli yapay sinir ağları tercih edilmektedir.

3.3.2. İleri beslemeli yapay sinir ağıları

İleri beslemeli yapay sinir ağıları üç çeşit katmandan (layer) oluşmaktadır. Bunlar sırasıyla giriş, gizli ve çıkış katmanları olarak adlandırılmaktadır. Yapay sinir ağına girdi verisi olarak girilen verileri tutan giriş katmanı, ağırlıkların hesaplandığı, işlemlerin yürütüldüğü ve istenilen sonuca göre kendini eğiten gizli katman ve son olarak çıkıştaki değerleri aktaran çıkış katmanıdır. Bir gizli katmanın kaç seviyeden oluşacağı problemin türüne ve yapısına göre belirlenmektedir. Her katman ve seviyede bir veya birden fazla sinir hücresi yani nöron bulunabilir.

Bir ileri beslemeli yapay sinir ağının katmanlarında ne kadar sinir hücresi barındıracağını iki adet temel kural belirlemektedir. İlk olarak giriş katmanında gereken nöron sayısına sistemin girişinde kullanılacak olan verinin sayısına göre kolayca karar verilebilmektedir. Bir örnek verecek olursak sistemimizin öğrenmesini ve daha sonra tahminde bulunmasını istediğimiz verinin (pattern) kaç üniteden oluştuğuna (örneğin bit) göre giriş katmanındaki nöron sayısı belirlenebilmektedir. Yani kısaca özetlemek gerekirse giriş katmanındaki bulunan sinir hücreleri, sonucu değiştirmesi veya etkilemesi istenen bir değişkene karşılık gelmektedir. Bu söylem aynı şekilde çıkış katmanı için de söylenebilmektedir. Bu deyişe göre çıkış değerinin nasıl gösterilmesine karar verildikten sonra bu çıkış için bulunması gereken her parametre için bir sinir hücresi bulundurulması gerekmektedir. Örnek olarak bir sınıflandırma probleminde çıkış katmanında farklı sınıfların gösterilmesini sağlayacak miktarda sinir hücresi bulunması gerekmektedir veya bir filtreleme problemi için giriş ve çıkış katmanlarında bulunan nöron sayıları genelde eşit miktarlarda olmaktadır. Yapay sinir ağının içerisinde herhangi bir gizli katman bulunmuyor ise bundan çıkarılacak sonuç doğrusal yani lineer fonksiyonlar ile ayırım veya karar verme işlemlerini yapabileceğidir. Bu sistemlerde girişlerin bir bölümü çıkış değerlerine direkt bağlıdır ve bu durumda giriş çıkış bağıntısına veya hangi girişin hangi çıkışa bağlı olduğuna göre bir sonuca varılmaktadır. Genellikle problemlerin çoğunda yapay sinir ağımızda tek katman bulunmaktadır ve giriş ve çıkış arasında sonlu bir kümeden sonlu bir kümeye bağlantı bulunduğu durumlarda kullanılır.

Yapay sinir ağlarında bir veya birden fazla katmanın kullanılması durumu çok tercih edilen ve literatürde sıkça rastlanan bir durum değildir. Kesin sonuç beklenmeyen fakat belirli bir değere yakınsaması istenilen problemlerde tercih edilen 2 veya daha fazla katmanlı çözümler, katman sayısı arttıkça sisteme entegrasyonu karmaşılaşmakta ve tasarım ve analizi kısımlarında zorlaşmaktadır.

3.4. Yapay Sinir Ağı ile Birlikte Reaktif Güç ve Akı Tahmini

Reaktif güç alternatif akım (AC) sistemlerinden beslenen indüktif (L) ve kapasitif (C) yüklerin sistemden çektikleri akımı, gerilimden açısız olarak geri ve ileri taşıyan güç olarak tanımlanır. Reaktif gücün tüketicilere genel olarak faydası olmamakla beraber sistemin verimini ve kalitesini azaltmaktadır. Reaktif güç Q ile ifade edilir ve birimi VoltAmper- Reaktif (VAR). Reaktif güç faydalı olmayan güç olarak tarif edilse de elektromanyetik prensibe göre çalışan jeneratör, transformatör, bobin ve motor gibi bütün işletme araçlarının işlevlerini yerine getirebilmesi için gerekli olan manyetik alan, reaktif güç tarafından karşılanır. Motorun harcadığı anlık reaktif güç denklem 3.23’de gösterilmektedir.

$$Q_{ref} = V_{qs}I_{ds} - V_{ds}I_{qs} \quad (3.23)$$

İndüksiyon motorunun akı ve parametrelerini kullanarak reaktif güç denklem 3.24’deki gibi yazılabilir;

$$Q_{est} = \omega_e \sigma L_s (I_{ds}^2 + I_{qs}^2) + \omega_e \frac{L_m}{L_r} (\lambda_{qs}I_{qs} + \lambda_{ds}I_{ds}) \quad (3.24)$$

Dolaylı alan odaklı kontrol yapısında $\lambda_{dr} = L_m I_{ds}$ ve $\lambda_{qr} = 0$ olduğuna göre denklem 3.24, denklem 3.25 ve denklem 3.26’ya dönüştürülebilir.

$$Q_{est} = \sigma L_s \omega_e (I_{ds}^2 + I_{qs}^2) + \omega_e \frac{L_m^2}{L_r} (I_{ds}^2) \quad (3.25)$$

$$Q_{est} = \omega_e \left(\sigma L_s (I_{ds}^2 + I_{qs}^2) + \frac{L_m^2}{L_r} I_{ds}^2 \right) \quad (3.26)$$

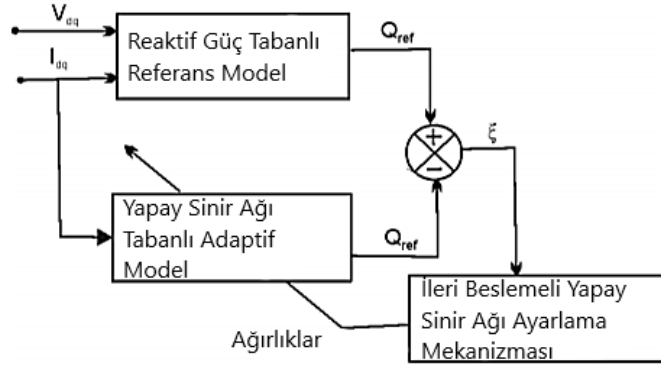
$$Q_{est} = W_1 P \quad (3.27)$$

$$W_1 = \omega_e \quad (3.28)$$

$$P = \sigma L_s (I_{ds}^2 + I_{qs}^2) + \frac{L_m^2}{L_r} I_{ds}^2 \quad (3.29)$$

Akı tahmin algoritması denklem 3.27’e göre kurulabilmektedir. Bu sistemde W_1 sinir ağındaki ağırlıkları, P ise indüksiyon motorunun akım ve parametrelerinin bir fonksiyonunu temsil etmektedir.

Bu model baz alınarak tasarlanan reaktif güç kullanılarak akı tahmini yapan sistem Şekil 3.8’de gösterilmektedir.



Şekil 3.8. Yapay Sinir Ağları ile Reaktif Güç Tabanlı Akı Tahmini Yapısı

Reaktif güç motor üzerindeki manyetizma etkisini hakkında bilgi veren bir güç türüdür. Aktif güç her ne kadar motorun çektiği akım ve gerilim değerlerinin mekanik enerjiye dönüşümünde aktif rol oynasa da motorun manyetik doygunluğu hakkında yeterli bilgiyi verememektedir. Reaktif güç kullanılarak rotor direnci, rotor akısı gibi birçok parametrenin tahmini sıkça bahsedilen bir konu haline gelmiştir (Sankaran 2012). Reaktif gücün bir diğer öne çıktığı nokta ise stator direncinden etkilenmemesidir, yani ısınan veya frekans-gerilim değişiminden doygunluğa ulaşmış bir motorun kontrol-tahmin yapısı reaktif güç üzerinden sağlanabilmektedir. Aktif güç stator direncinin değişmesiyle stator akımında değişime neden olacak ve kararlı sonuçlar veremeyecektir.

Reaktif gücün bu avantajı referans alındığında yapay sinir ağı modeli yakınsamasını daha doğru yaparak istenilen tahmin değerlerinde daha başarılı olması beklenmektedir. Bu sayede istenilen değerlere daha hızlı ulaşacak, motor üzerindeki tüketim, vuruntu, sarsıntı vb. olaylarda iyileştirmelerde bulunacaktır.

4. BULGULAR

4.1. Reaktif Güç Kullanılarak MRAS Tabanlı Dolaylı Alan Odaklı Kontrol Yapısının Modellenmesi

İndüksiyon motorunun $\alpha\beta$ koordinatlarında sabit stator yapısına göre analitik denklemleri denklem 4.1’de gösterilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \bar{v}_s \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & s \frac{M}{L_r} \\ -\frac{M}{T_r} & s + \frac{M}{T_r} - jp\Omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{i}_s \\ \bar{\Phi}_r \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

İndüksiyon motorunun reaktif gücü denklem 4.1’in ikinci satırının kısmi türevi alınarak elde edilebilir ve Q_r Denklem 4.2’de gösterildiği gibi yazılabilir.

$$Q_r = \text{Im}[s\Phi_r \bar{i}_s^c] = \text{Im}\left[\frac{Msi_s \bar{i}_s^c}{1+(s-jp\Omega)T_r}\right] \quad (4.2)$$

Anlık çevrimiçi ayarlanama tekniği kullanıldığında ve zaman domaininde çalışıldığında ($s=j\omega_s$), Q_r denklem 4.3’e indirgenebilir.

$$Q_r = \frac{\omega_s M i_s^2}{1+(\omega_s - p\Omega)^2 T_r^2} \quad (4.3)$$

Denklem 4.3 reaktif güçle rotor zaman sabitini kontrol etmenin mümkün olduğunu açıkça göstermektedir. Bu teknik stator direncinden (R_s) bağımsız bir şekilde torkun (T_r) elde edilmesinde kullanılan pratik bir metottur.

Referans reaktif güç a-b sabit stator ifadesinde denklem 4.4’deki gibi ifade edilmektedir.

$$Q = \text{Im}[\bar{v}_s \bar{i}_s^c] \quad (4.4)$$

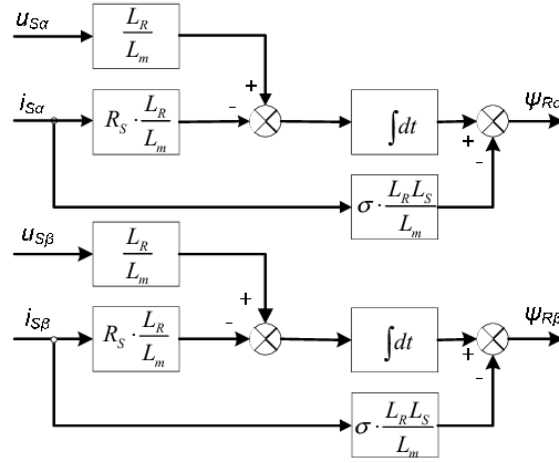
Denklem 4.4’ün sağ tarafında kalan değerler v_{sab} ve i_{sab} ölçülerek elde edilir. İndüksiyon motorunun hiçbir parametresi kullanılmadığı için bu ölçümler her zaman doğru sonuçlar vermektedir. Denklem 4.1’de elde ettiğimiz v_{sab} ’yi denklem 4.4’de yerine yazdığımızda ise denklem 4.5’deki ifade elde edilmektedir.

$$Q = \text{Im}\left[\left(R_s \bar{i}_s^c + \sigma L_s s \bar{i}_s + \frac{M}{L_r} s \bar{\Phi}_s\right) \bar{i}_s^c\right] \quad (4.5)$$

Denklem 4.5’de R_s iptal edilmiş, a-b ifadesinde akılara ihtiyaç duyulmuştur. Bu akılar tork değerini göz önünde bulundurarak Şekil 4.1’deki akı tahmin bloğundan elde

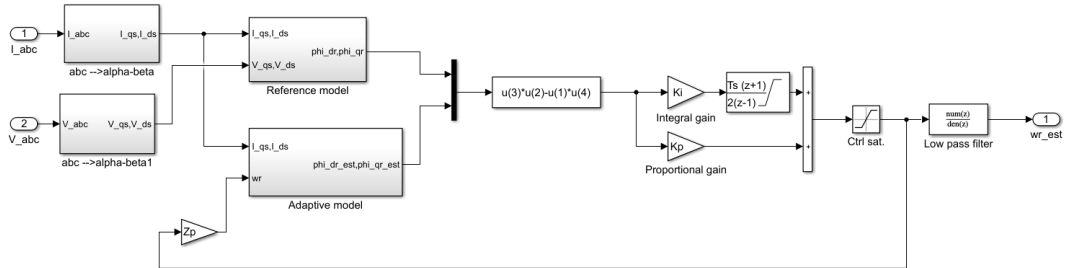
edilmektedir. Böylece Denklem 4.5 elde edilen değerlerle yenilendiğinde denklem 4.6'daki gibi yazılabilmektedir.

$$\hat{Q} = \text{Im}[(I_\sigma s \bar{i}_s + s \overline{\Phi_r}') \bar{i}_s^c] \quad (4.6)$$



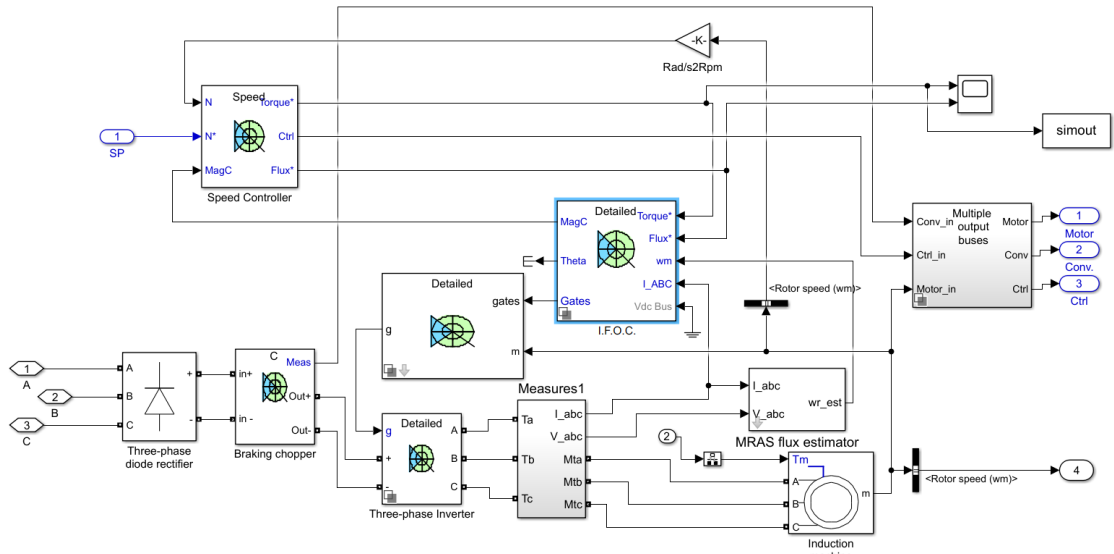
Şekil 4.1. Rotor Akı Tahmin Bloğu

Şekil 4.1'de gösterilen tahmin yapısı $\alpha\beta$ koordinatlarına göre düzenlenerek Şekil 4.2'de gösterilen şekilde Model Referans Adaptif Sistem modeline entegre edilmiş ve MRAS akı tahmin bloğu olarak maskelenmiştir.



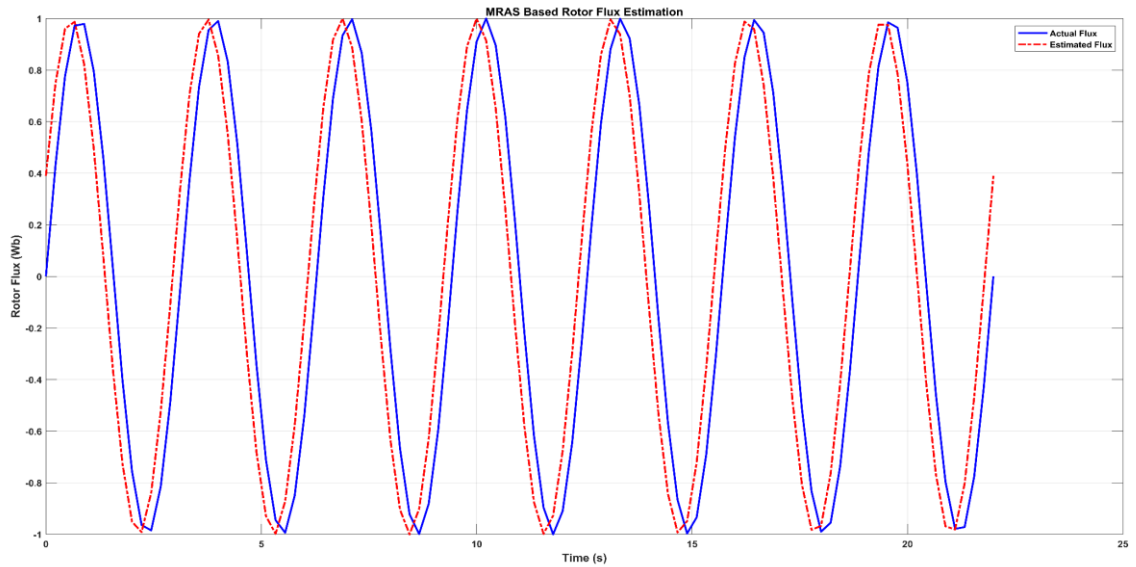
Şekil 4.2. Model Referans Adaptif Sistem ve Reaktif Güç Tabanlı Akı Tahmin Bloğu

Şekil 4.2'de gösterilen MRAS tabanlı rotor akı tahmin bloğu dolaylı alan odaklı kontrol yapısına entegre edilmiştir. Dolaylı alan odaklı kontrolde evirici (inverter) beslemeleri uzay vektör dalga genlik modülsayonu ile tetiklenmektedir. Rotor hızı ve rotor direnci sistemi asimptotik olarak kararlı hale getirmek için Hiper-stabilite (Hyperstability) konseptine dayanarak tasarlanmıştır. Bu konseptte göre rotor hızı yavaşça değiştiği için ve rotor direnci sıcaklığa bağlı olarak küçük adımlarla değiştiği için bu parametreler sabit birer parametre olarak kabul edilmektedir. Dolaylı alan odaklı kontrol ve model referans uyarlamalı sistemin entegre edilmiş hali Şekil 4.3'de gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Reaktif Güç ve MRAS Tabanlı Dolaylı Alan Odaklı Kontrol Yapısı

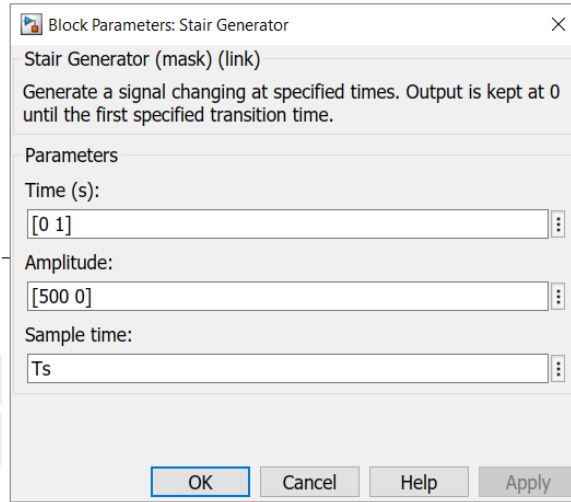
Şekil 4.3’de görüleceği üzere MRAS yapısı, tetiklenme frekansına göre ortaya çıkan akım ve gerilimi baz alarak Şekil 4.1’de görülen bloğun içinde reaktif güç üzerinden akı tahminini ortaya çıkarmaktadır. Sistemin rotor akı tahmini, tork cevabı ve hız cevabı ilerleyen etaplarda sistemin son haliyle karşılaştırılabilmesi için Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’da sırasıyla gösterilmektedir.



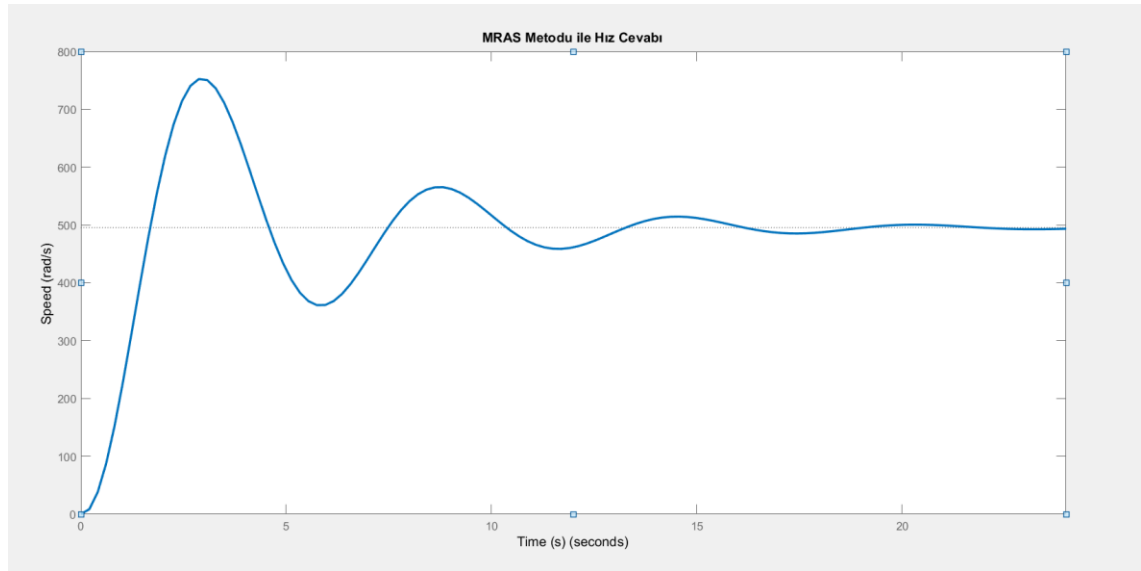
Şekil 4.4. Reaktif Güç ve MRAS Tabanlı Dolaylı Alan Odaklı Kontrol Yapısının Rotor Akı Tahmini

Şekil 4.4’de görüleceği üzere akı tahmini gerçek akı tahminine oldukça yakındır ve gerçek akıdan yaklaşık 0.4 Weber gecikme ile (offsetle) tahmin gerçekleştirilmektedir. Tahmin edilen akı kontrol yapısında kullanılmaya elverişlidir fakat daha yüksek hassasiyet ve daha hızlı cevap gerektiren uygulamalarda yetersiz kalabilmektedir.

Şekil 4.6’de sistemin istenilen hız cevabı incelenmektedir. Sisteme referans olarak 500 rad/saniye olarak tanımlanan hız değeri Şekil 4.5’de gösterilmektedir.

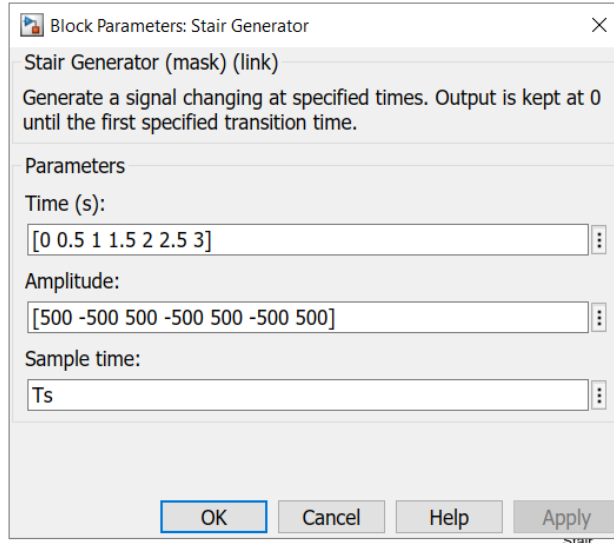


Şekil 4.5. İstenilen Hız Değeri



Şekil 4.6. Reaktif Güç ve MRAS Tabanlı Dolaylı Alan Odaklı Kontrol Yapısının Hız Cevabı

Şekil 4.8’de sistemin tork cevabı incelenmektedir. Sisteme referans olarak tanımlanan tork değeri Şekil 4.7’de gösterilmektedir.



Block Parameters: Stair Generator

Stair Generator (mask) (link)

Generate a signal changing at specified times. Output is kept at 0 until the first specified transition time.

Parameters

Time (s):

[0 0.5 1 1.5 2 2.5 3]

Amplitude:

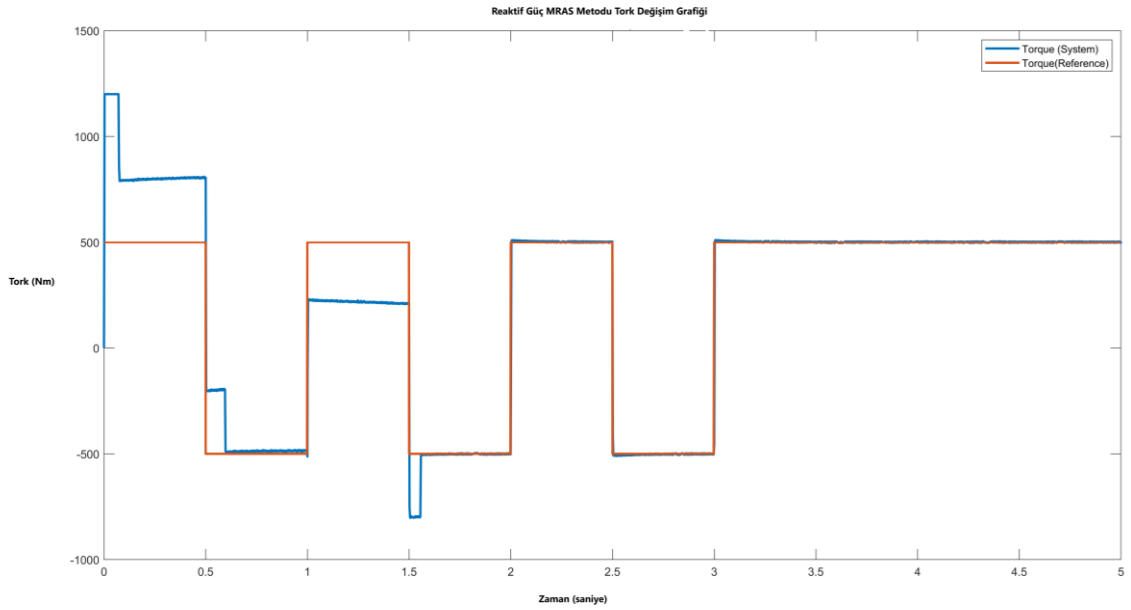
[500 -500 500 -500 500 -500 500]

Sample time:

Ts

OK Cancel Help Apply

Şekil 4.7. İstenilen Tork Değerleri

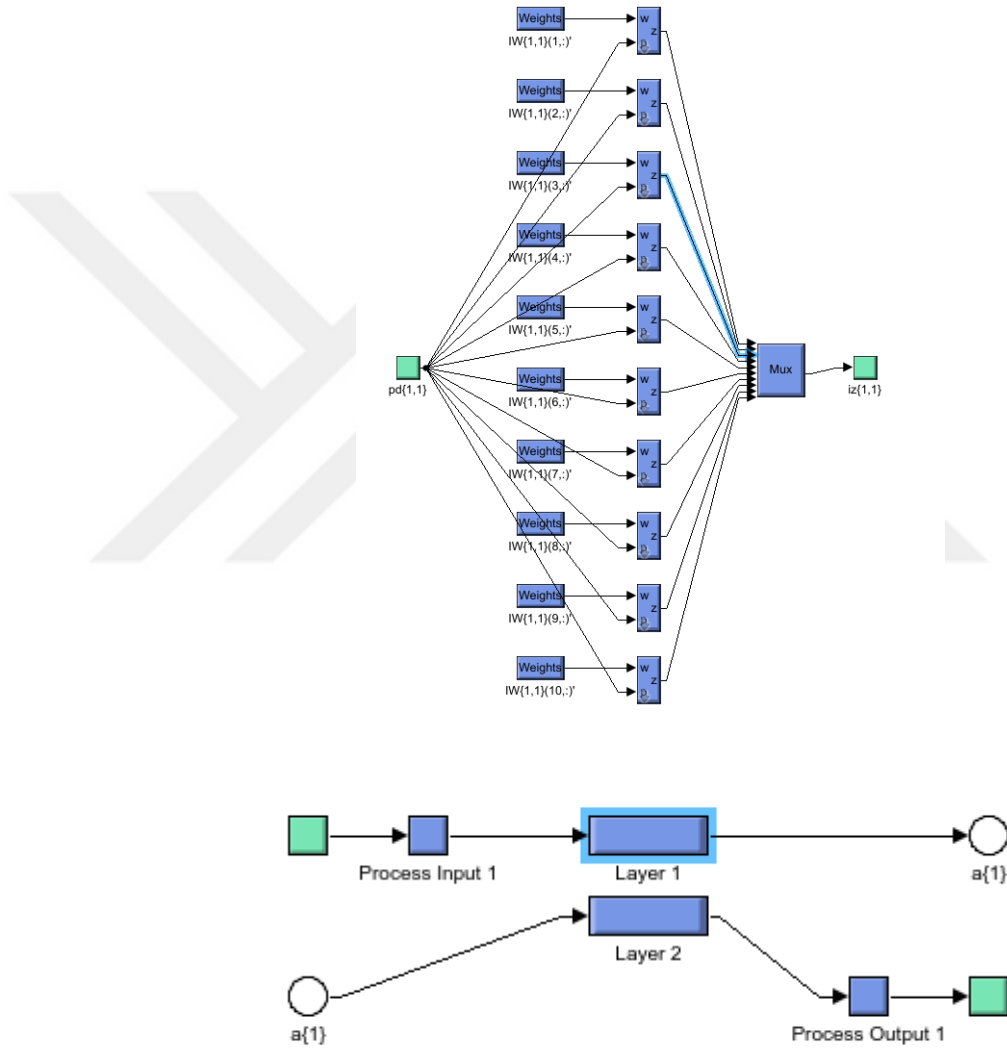


Şekil 4.8. Reaktif Güç ve MRAS Tabanlı Dolaylı Alan Odaklı Kontrol Yapısının Tork Cevabı

Şekil 4.8’de görüleceği üzere tork değerlerinde istenilen değerlere tam oturmama ve sapma durumları gözlenmektedir. Bu tork cevabı yüksek hassasiyet ve verimlilik gerektiren uygulamalarda kabul edilemeyeceği için sisteme yapay sinir ağlarının eklenmesi uygun görülmüştür.

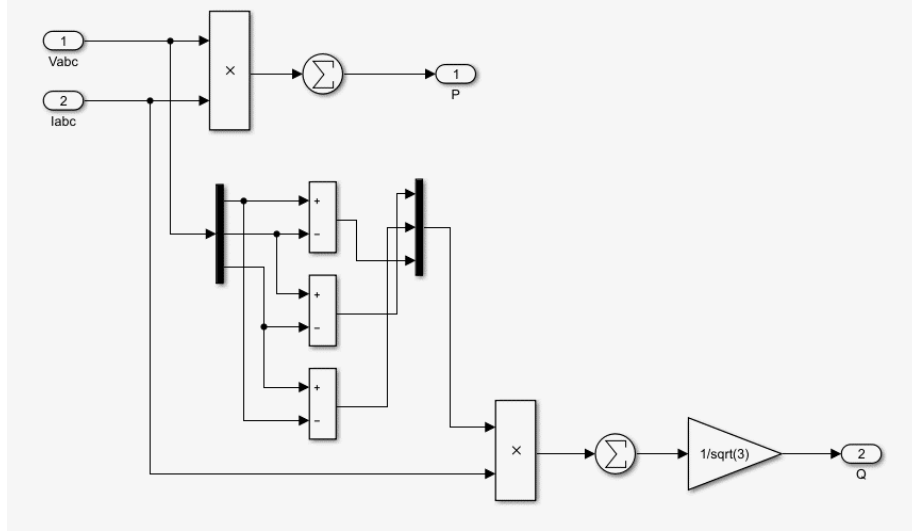
4.2. Reaktif Güç - MRAS Tabanlı Dolaylı Alan Odaklı Kontrol Yapısına Yapay Sinir Ağlarının Eklenmesi

Yapay sinir ağlarını kullanarak indüksiyon motorlarının akı tahmini, çok katmanlı ve ileri beslemeli yapay sinir ağları kullanılarak yapılmaktadır. Çalışmada kullanılan yapay sinir ağı giriş katmanında 10, çıkış katmanında 10 olmak üzere toplamda 20 adet nöron içermektedir. Şekil 4.9'da yapay sinir ağının katmanları ve nöronları temsil eden ağırlıkları gösterilmektedir.



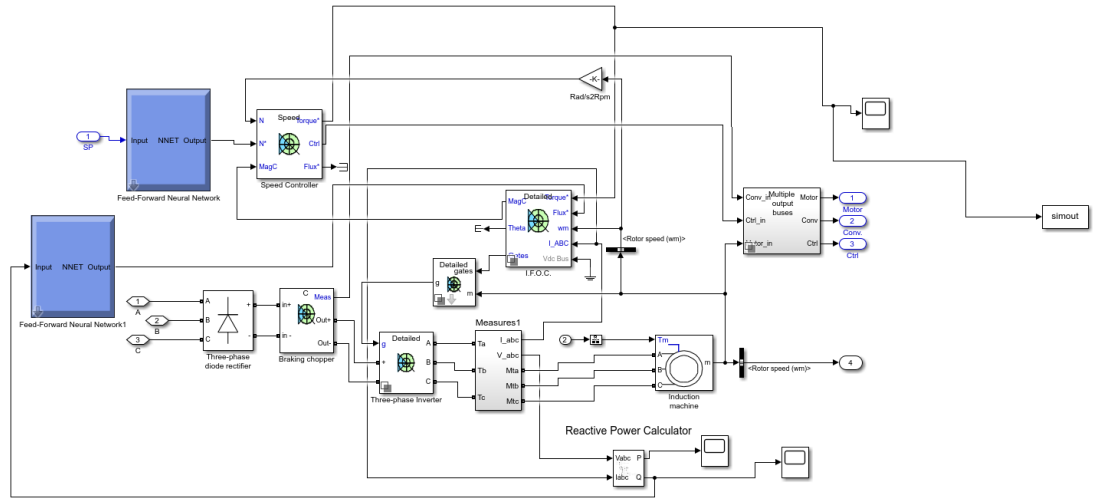
Şekil 4.9. Yapay Sinir Ağı Katmanı

Kullanılan yapay sinir ağının sistemin reaktif gücünden yola çıkarak akı tahmini yapabilmesi için motorun akım ve gerilimlerinden yararlanılarak reaktif güç tahmin bloğu geliştirilmiştir. Şekil 4.10'da güç tahmin bloğu gösterilmektedir. P aktif, Q ise reaktif gücü temsil etmektedir.



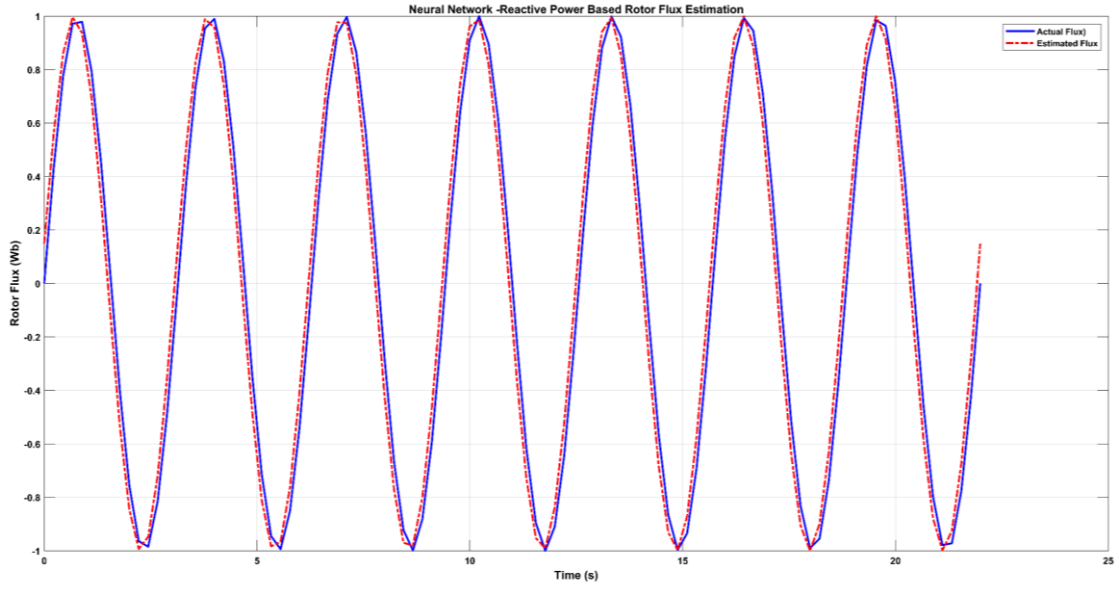
Şekil 4.10. Güç Hesaplama Bloğu

Sistemde reaktif güç yapay sinir ağlarına girdi bilgisi olarak verilmekte ve yapay sinir ağının çıkışında ise akı tahmini elde edilebilmektedir. Referans hız bilgisinin ilk değerini oluşturması ve akı tahmininde kullanılan ağın eğitilmesi için 10 nöron giriş ve 10 nöron çıkışta olmak üzere yine toplamda 20 nörondan oluşan başka bir ileri beslemeli yapay sinir ağında hız kontrolcüsünün girişine verilmiştir. Aldığı referans hız değerini kullanarak çıkışta hız kontrolcüsünün kullanacağı tetikleme açılarını üretmektedir. İki kademeli yapay sinir ağı ve kontrol yapısı Şekil 4.11’de gösterilmiştir.



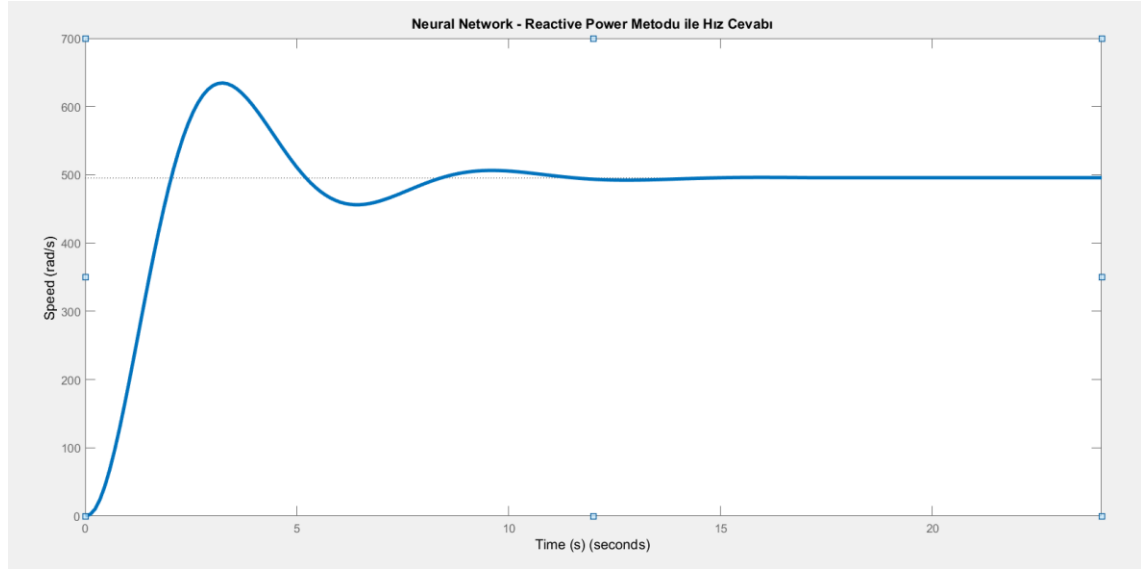
Şekil 4.11. Yapay Sinir Ağlarının Sisteme Eklenmiş Hali

Şekil 4.11’de görüleceği üzere sistem yine aynı referans hız ve referans tork değerleri ile çalıştırılmış, performans ve verimliliklerini ölçebilmek için rotor akısı, hız cevabı ve tork cevabı değerleri incelenmiştir. Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14 sırasıyla akı tahmini, hız cevabı ve tork cevabı grafiklerini göstermektedir.



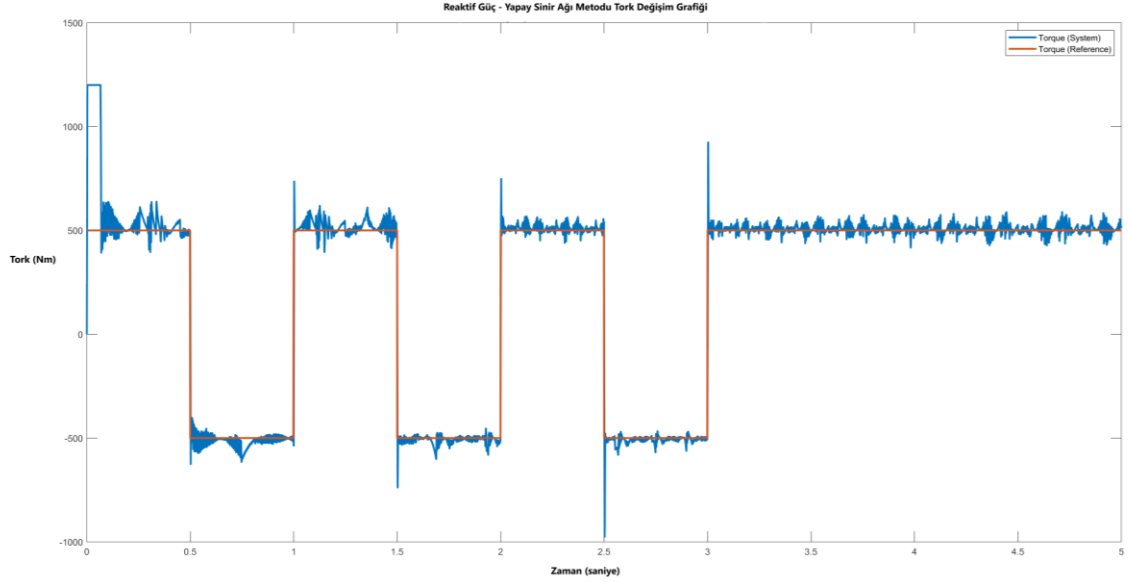
Şekil 4.12. Yapay Sinir Ağı – Reaktif Güç Mras Tabanlı Kontrol Yapısının Rotor Akı Tahmini

Şekil 4.12’de görüleceği üzere rotor akısı tahmini gerçek akıya bir önceki sistemden daha yakındır. Akı tahmini önceki sistemde 0.4 Weber gecikme ile tahmine başlarken, bu sistemde 0.2 Weber gecikme ile tahmine başlamaktadır.



Şekil 4.13. . Yapay Sinir Ağı – Reaktif Güç Mras Tabanlı Kontrol Yapısının Hız Cevabı

Şekil 4.13’de görüleceği üzere yapay sinir ağı eklenen sistem istenilen hız değerine daha az overshoot değeri ile, daha kısa sürede ve daha az salınım yaparak ulaşmaktadır. İlerleyen kısımlarda değerlerin analitik analizi ile iki sistem arasındaki fark çizelge ile gösterilecektir.



Şekil 4.14. Yapay Sinir Ağı – Reaktif Güç Mras Tabanlı Kontrol Yapısının Tork Cevabı

Şekil 4.14’de görüleceği üzere tork cevabı bir önceki sisteme göre daha kararlı ve hızlıdır. Yapay sinir ağının anlık olarak istenilen değere yakınsaması istenilen tork değeri etrafında çok fazla dalgalanmaya neden olmaktadır. Bu durum sistemin negatif bir özelliği olarak görünse de sistemin çok hızlı istenilen değere yakınsamasını göstermektedir. Aynı zamanda Şekil 4.8’de görülen tork değerinden sapmalar azaltılmıştır.

5. TARTIşMA

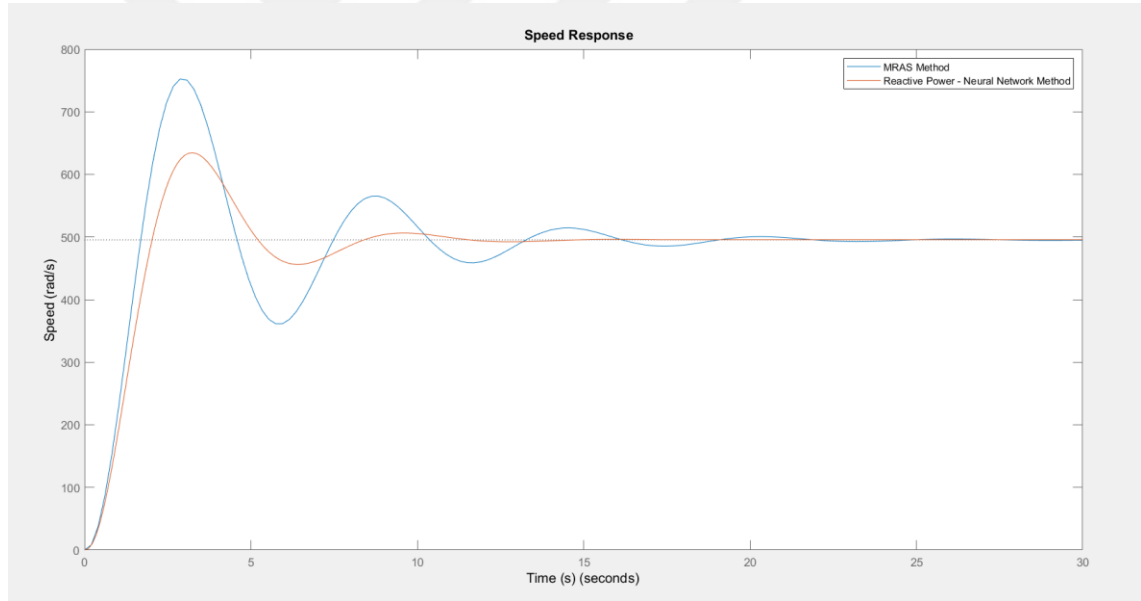
Bu çalışmada elde edilen sonuçlar indüksiyon motorunun matematiksel modelinden yararlanılarak MATLAB / Simulink platformunda gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemde motorun pratikte meydana getirdiği kayma, ısınma vb. gibi doğrusal ötesi durumlar dikkate alınmamıştır. Dolayısıyla bu yöntemde sistem gerçekte olduğuna göre daha kararlı (rijit) davranış gösterebilmektedir. Bu çalışmada elde edilen sonuçların gerçeğe göre bir miktar daha farklı olacağı dikkate alınmalıdır.



6. SONUÇLAR

Bu çalışmada indüksiyon motorlarının farklı kontrol metotları ile matematiksel analizi ve modellenerek farklı senaryolar altında yapısal analizleri ele alınmıştır. Öncelikle indüksiyon motorlarının matematiksel modeli ve modelin uygulanması literatürde araştırılmış, farklı kontrol metotları ve yapıları ile sistem cevapları belirlenmiş, kullanım alanları incelenmiş ve daha iyi sonuç verebilecek modelleme ve analiz metotları üzerine araştırma yapılmıştır. Daha sonra bu bilgi birikimine dayanılarak motor yapısının ve kontrol metotlarının MATLAB / Simulink platformunda modelleri hazırlanmıştır. Modeller üzerinde tork, hız, akı değişkenlerine göre simülasyonlar gerçekleştirilmiş ve bu simülasyonlar sonucunda elde edilen sistem cevaplarına göre kontrol metotlarının davranışları hakkında yorumlar yapılmıştır.

Tasarlanan kontrol yapısının motor parametrelerinden olan bağımsızlığı ve ağırlı eğitildikten sonra daha kararlı yapıda davranışlar sergilemesi, sistemin teorik olarak daha iyi sonuçlar vermesi gerektiğini göstermektedir. Elde edilen sonuçlara göre tasarlanan kontrol yapısı beklenildiği gibi sonuçlar yansıtmaktadır. Şekil 6.1’de iki sistemin hız cevabı grafiksel olarak üst üste bindirilmiş ve performans analizleri incelenmiştir.

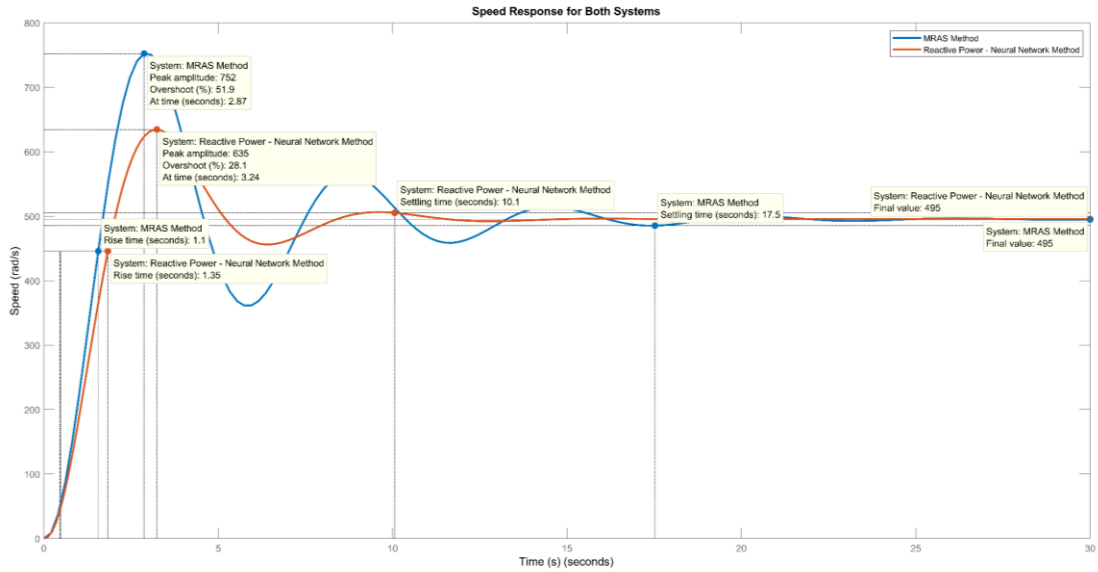


Şekil 6.1. Hız Cevaplarını Üst Üste Bindirilmiş Hali

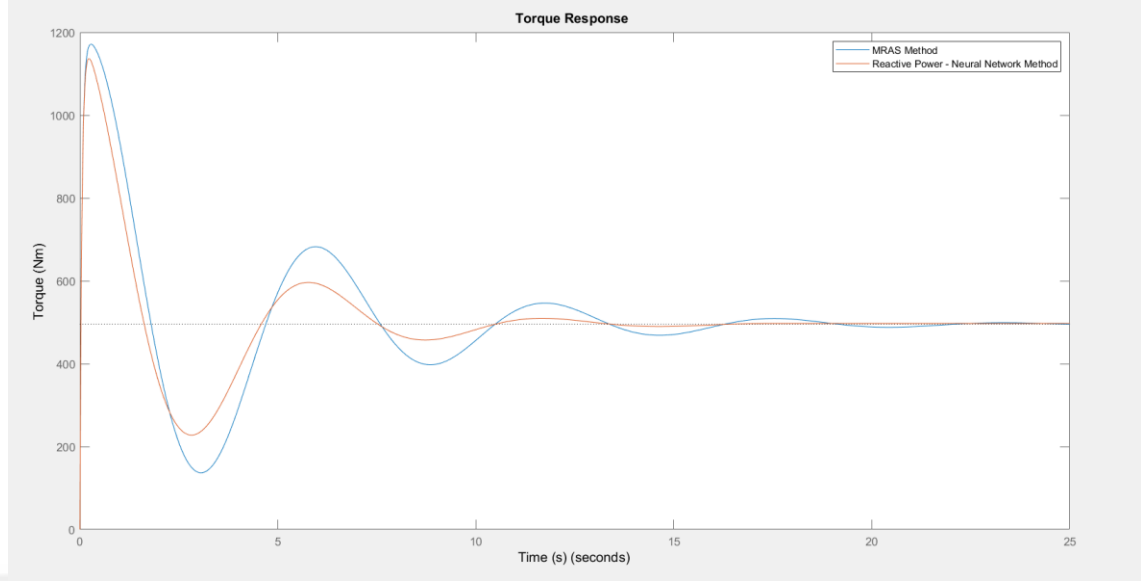
Şekil 6.1’de görülen iki farklı sistemin hız cevapları overshoot, oturma süresi (settling time), yükselme süresi (rising time) ve son değer (final value-steady state error) gibi kıyaslama pariteleri cinsinden karşılaştırılmıştır. Çizelge 6.1’de iki sistemin hız cevabının karşılaştırmalı analizi gösterilmiştir.

Çizelge 6.1. Hız Cevabı Karşılaştırması

	OVERSHOOT (KAYMA)	RISING TIME (YÜKSELME SÜRESİ)	SETTLING TIME (OTURMA SÜRESİ)	FINAL VALUE (STEADY STATE ERROR)
REAKTİF GÜÇ-MRAS TABANLI KONTROL	%51.9 (Tepe Değer: 752)	1.1 saniye	17.5 saniye	495 (%1 hata)
REAKTİF GÜÇ – YAPAY SİNİR AĞI TABANLI KONTROL	% 28.1 (Tepe Değer: 635)	1.35 saniye	10.1 saniye	498 (% 0.4 hata)

**Şekil 6.2.** Çizelge 6.1'in Grafik Üstündeki Görünümü

Aynı karşılaştırma tork değerleri içinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.3'de iki sisteminde istenilen tork değerlerine ulaşmasını gösteren grafik sunulmuştur. Referans torka ulaşma süresini ele alan bu grafik tork grafiklerinden farklı olarak step fonksiyonu olarak değerlendirilmiştir. Tork sinyallerinin referans tork sinyaline olan cevabını göstermektedir.

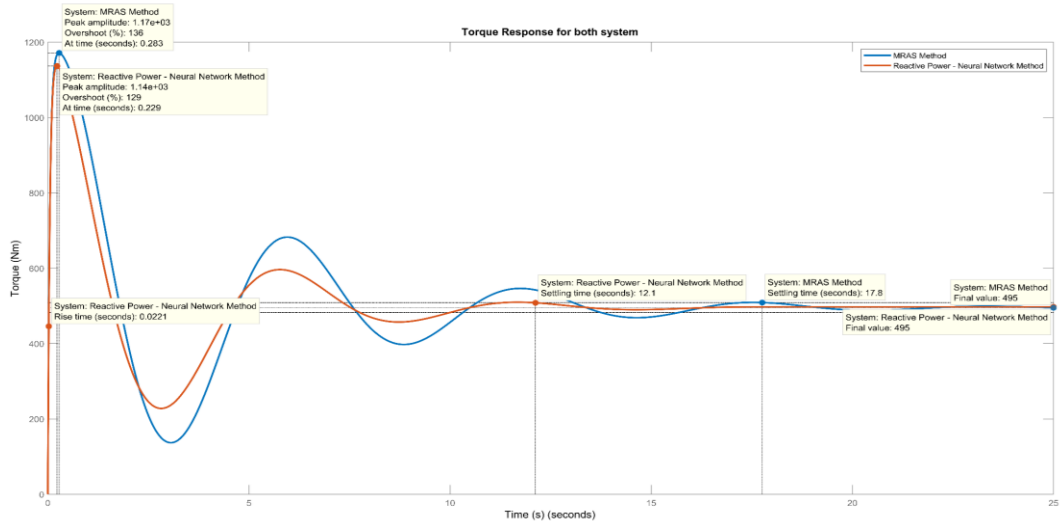


Şekil 6.3. Tork Cevaplarının Üst Üste bindirilmiş Hali

Şekil 6.3’de görülen iki farklı sistemin tork cevapları overshoot, oturma süresi (settling time), yükselme süresi (rising time) ve son değer (final value-steady state error) gibi kıyaslama pariteleri cinsinden karşılaştırılmıştır. Çizelge 6.2’de iki sistemin tork cevabının karşılaştırmalı analizi gösterilmiştir.

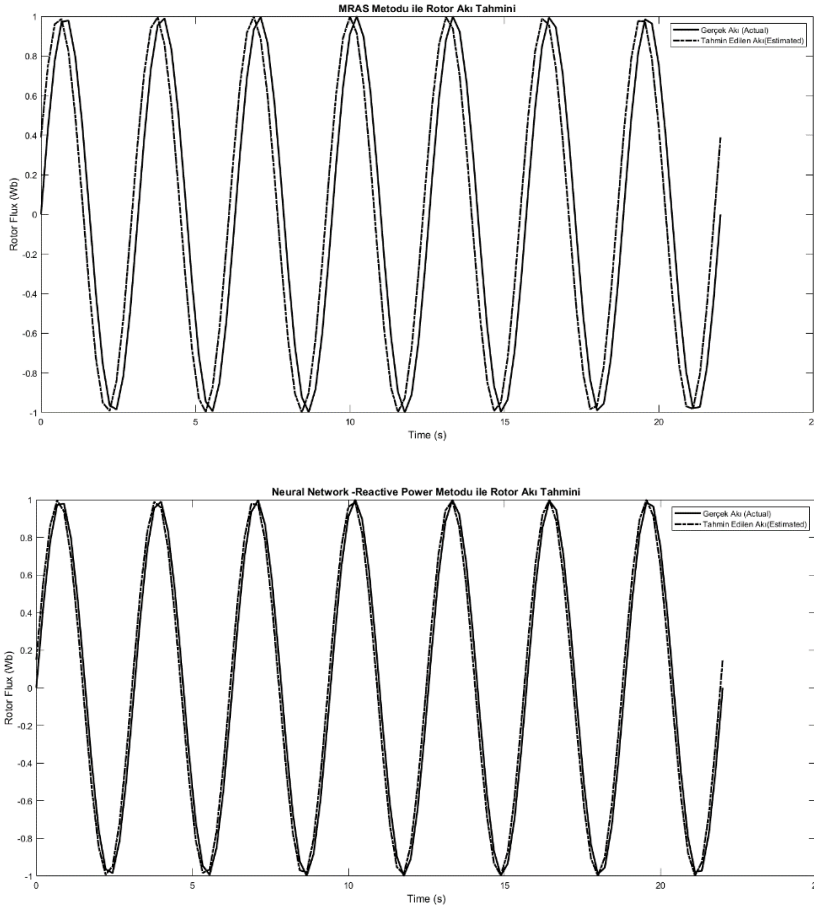
Çizelge 6.2. Tork Cevabı Karşılaştırması

	OVERSHOOT (KAYMA)	RISING TIME (YÜKSELME SÜRESİ)	SETTLING TIME (OTURMA SÜRESİ)	FINAL VALUE (STEADY STATE ERROR)
REAKTİF GÜÇ- MRAS TABANLI KONTROL	%136 (Tepe Değer) 1170)	0.02231 saniye	17.8 saniye	496 Nm (% 0.8 hata)
REAKTİF GÜÇ – YAPAY SİNİR AĞI TABANLI KONTROL	%129 (Tepe Deger) 1140)	0.02221 saniye	12.1 saniye	499 Nm (% 0.2 hata)

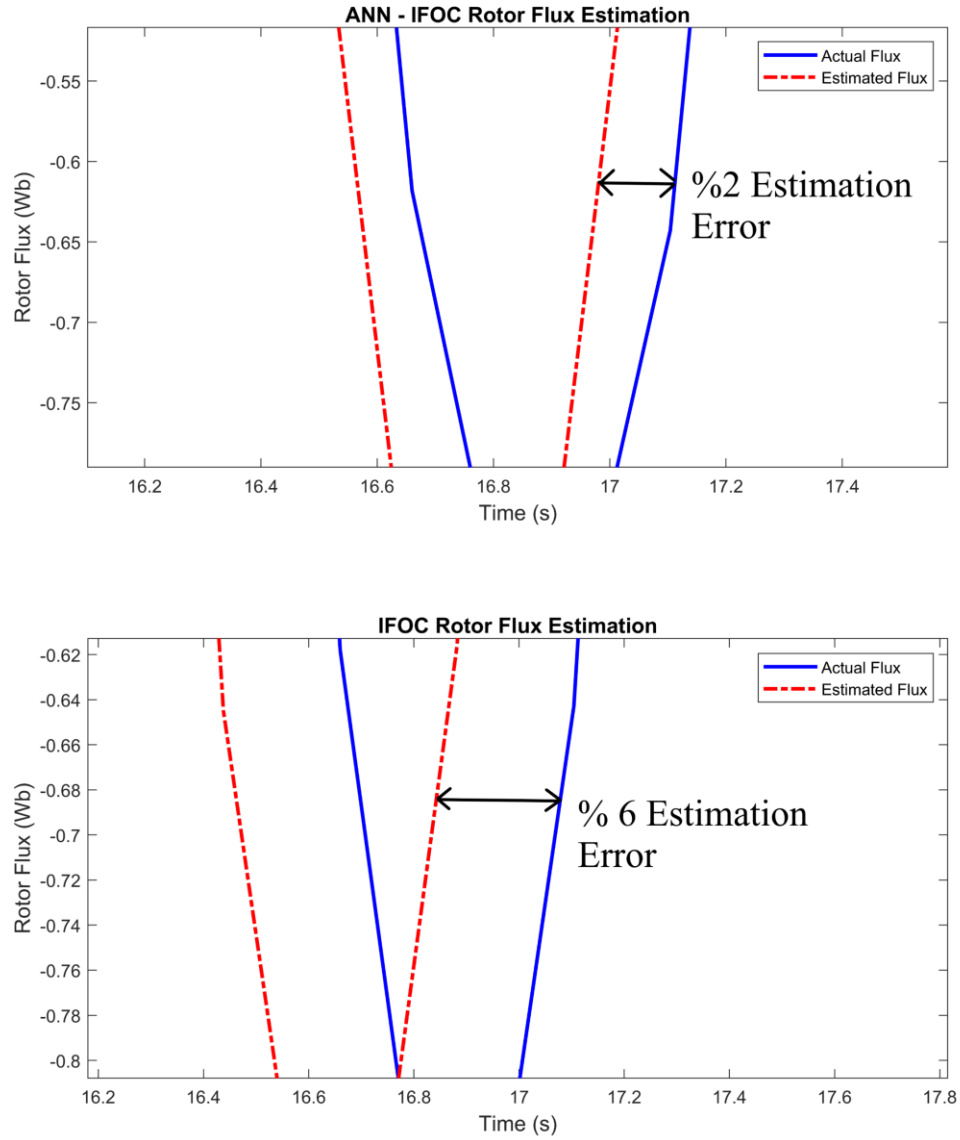


Şekil 6.4. Çizelge 6.2'in Grafik Üstündeki Görünümü

Çizelge 6.1 ve 6.2'den de anlaşılacağı üzere tasarlanan sistem eski sisteme göre istenilen değerlere daha hızlı ve daha kararlı şekilde ulaşmaktadır.



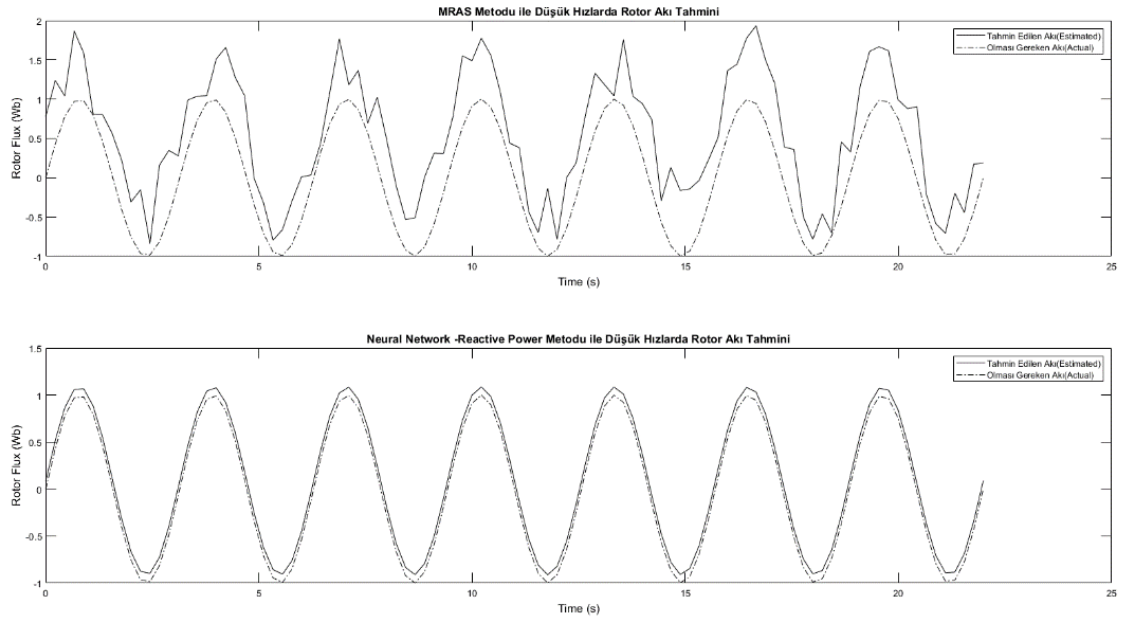
Şekil 6.5. Akı Tahmini Karşılaştırması



Şekil 6.6. Yüksek Hızlarda Akı Tahmini Hataları

Şekil 6.6’da görüleceği üzere yüksek hızlarda akı tahmini tasarlanan metotta daha yakın ve daha düşük bir gecikme toleransı ile tahmin edilmiştir. Aynı şekilde Çizelge 6.1 ve Çizelge 6.2’den de anlaşılacağı üzere yeni tasarlanan sistem eski sisteme göre, istenilen değerlere daha hızlı, daha az salınım yaparak ve daha düşük hata oranlarıyla ulaşmaktadır.

Kontrol yapısı tümüyle değerlendirildiğinde, endüstride ve indüksiyon motoru kullanan çoğu işletmede daha düşük tork dalgalanması ve daha çabuk hızlanması nedeniyle tercih edilmelidir. Bu sayede hem maliyet hemde sistem stabilitesinde pozitif yönde ilerleme kaydedilmiş olur.



Şekil 6.7. Düşük Hızlarda Akı Tahmini

Şekil 6.7’de iki yapının düşük hızlardaki akı tahminleri gösterilmektedir. MRAS yapısının düşük hızlarda yetersiz kaldığı çalışmanın başında belirtilmiş ve bu sorunun kurulan yeni yapı ile giderilmesi planlanmıştır. Şekilden de görüleceği üzere akı aynı yüksek hız bandındaki gibi gerçeğe yakın bir şekilde tahmin edilmiş ve sürücü performansı artırılmıştır. İndüksiyon motorlarında dolaylı alan odaklı kontrolün verimlilik ve hızlı cevap verme açısından en çok tercih edilen yöntemi model referans adaptif sistemdir. Ancak bu yöntem parametre değişikliklerinden kolay etkilenmekte ve anlık ayarlama konusunda zayıf kalmaktadır. Bu çalışmada ele alınan model referans adaptif sisteminin yanı sıra yapay sinir ağı modeli de hazırlanmak istenmiş ve bu konuda bir ön çalışma yürütülmüştür. Yapay sinir ağı modelinde, model referans adaptif sistem modeline göre daha iyi sonuçlar elde edilmiş ve iki model arasında kıyaslama yapılmıştır. Bu iki sistemin tasarımı ve modellenmesi sırasında indüksiyon motorlarının matematiksel modellerinin bilgisayar ortamına aktarılması, kontrol yapılarının simüle edilmesi ve yapay sinir ağlarının entegrasyonu aşamalarında önemli derecede yol alınmış olup okuyucu açısından faydalı olabilecek bilgi birikimi bu alt bölümde paylaşılacak istenmiştir. Farklı hız değerleri ve farklı tork değerlerindeki kıyaslama parametreleri ekler kısmında gösterilmiştir. Reaktif güç ve sinir öğrenme adaptasyonunu kullanan Reaktif güç-ANN tabanlı akı tahmin edicinin, geniş bir çalışma aralığında iyi hassasiyetle iyi performans gösterdiği gösterilmiştir. Daha az karmaşık, sürüklenme problemleri ve parametre (R_s) varyasyonları için önerilen Reaktif güç-ANN tabanlı akı tahmincisi, sensörsüz dolaylı vektör kontrollü indüksiyon motor sürücüler için yaygın olarak kullanılan rotor akısı tabanlı tahmincilerinden daha verimli bir alternatiftir. Anma (demeraj) akımlarında azalma sağlayarak kablo kesitlerinde küçülmeye gidilebilir ve toplam maliyeti azaltılabilmektedir. Akı tahmininden yola çıkılarak aynı şekilde hız ve tork tahminleri için sistemler geliştirilebilir, yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalarda kullanılmak üzere indüksiyon motorlarının kontrolünde üstünlük sağlanabilmektedir.

7. KAYNAKLAR

- Al-Rashidi H.A., Gastli A., Al-Badi A., "Optimization of Variable Speed Induction Motor Efficiency Using Artificial Neural Network".
- Babikar A.E., Rahman F.E, Indirect Field Oriented Control of Induction Motor Drive
- Bose B.K., "Modern Power Electronics and AC Drives".
- Bose Bimal K., Neural Network Applications in Power Electronics and Motor Drives- An Introduction and Perspective, *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, Vol. 54, No. 1, 2007.
- Bose Bimal K., Power Electronics and Motor Drives, Advances and Trends, University of Tennessee Knoxville, Tennessee, 2006.
- Bose Bimal K., Modern Power Electronics and AC Drives, The university of Tennessee, Knoxville, 2002.
- Breathauer D.M., Doughty R.L. and Puckett R.J., "The Impact of Efficiency on the Economics of New Motor Purchases, Motor Repair, and Motor Replacement," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 30, Nov./Dec. 1994, pp. 1525-1537.
- Chan Tze-Fun and Shi Keli, Applied Intelligent Control of Induction Motor Drives, First Edition, 2011.
- Cuibus M., Bostan V.; Ambrosii S., Ilas C., Magureanu R., Luenberger, Kalman and Neural Network Observers for Sensorless Induction Motor Control, Politechnical University of Bucharest, Romania.
- De Doncker Rik W., and Novotny Donald W., The Universal Field Oriented Controller, *IEEE Transactions On Industry Applications*, Vol. 30, No. 1, 1994.
- De Doncker Xingyi Xu Rik and Novomy Donald W., A Stator Flux Oriented Induction Machine Drive, Dept. of Electrical and Computer Engineering, Univ. of Wisconsin-Madison Madison, U.S.A.
- Demuth Howard, Beal Mark, "Neural Network Toolbox For Use With Matlab", User Guide, The Math Work Inc. June 1992
- Dorf Richard C., Bishop Robert H., Modern Control Systems, Twelfth Edition, 2011.
- Fang-Zheng Peng, and Tadashi Fukao, Robust Speed Identification for Speed-Sensorless Vector Control of Induction Motors, *IEEE Transactions On Industry Applications*, Vol. 30, No. 5, September / October 1994.
- Ferkova Zelmira, Comparison of Two-Phase Induction Motor Modeling in ANSYS Maxwell 2D and 3D Program, Technical University of Kosice Kosice, Slovakia.

Fitzgerald A.E. Electrical Machine, sixth edition, Cambridge, MA March 5, 2002.

Fuzzy Controller, *Journal of Engineering and Computer Science (JECS)*, Vol. 16, No. 2, 2015.

Grzesiak L.M., Meganck V., Ufnalski B. and Sobolewski J., Genetic Algorithm for Parameters Optimization of ANN-based Speed Controller, The International Conference on, 2007.

Grzesiak Lech M., Ufnalski Bartłomiej, Design of Speed Estimator for Induction Motor using Principal Component Analysis and Neural Networks. Politechnika Warszawska, Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej.

Gunabalan R., Subbiah V., and Rami Reddy B., Sensorless Control of Induction Motor with Extended Kalman Filter on TMS320F2812 Processor, *International Journal of Recent Trends in Engineering*, Vol 2, No. 5, November 2009.

Hasan K.M., Zhang Li, Singh B., "Neural Network Control of Induction Motor Drives for Energy Efficiency and High Dynamic Performance".

Hasse K. 1969. "Zur Dynamic Drehzahl geregelter Antriebe Mit Stromrichter gespeisten Asynchron-Kuzschlublaufermaschinen", Ph.D. dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, Darmstadt, Germany, 1969. 2-4, 2005 (pp592-597).

Heath Hofmann, Electric Machinery and Drives, Department of Electrical Engineering and Computer Science, the University of Michigan, 2015.

Joachim Holtz, Sensorless Control of Induction Motor Drives, *Proceedings of The IEEE*, Vol. 90, No. 8, August 2002.

Jogendra Singh Thongam, High Performance Sensorless Induction Motor Drive June 2006.

Karuse P.C., Analysis of Electrical Machinery and Drive Systems, Second Edition.

Kim Young-Real, Sul Seung-Ki, and Park Min-Ho, Speed Sensorless Vector Control of Induction Motor Using Extended Kalman Filter, *IEEE Transactions on Industry Applications*, VOL. 30, NO. 5, 1994.

Kioskeridis Iordanis, Margaris Nikos, "Loss Minimization in Induction Motor Adjustable-Speed Drives", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 43, No. 1, February 1996

Kosko Bart, Neural Networks and Fuzzy Systems a Dynamical Systems Approach to Machine Intelligence, University of Southern California.

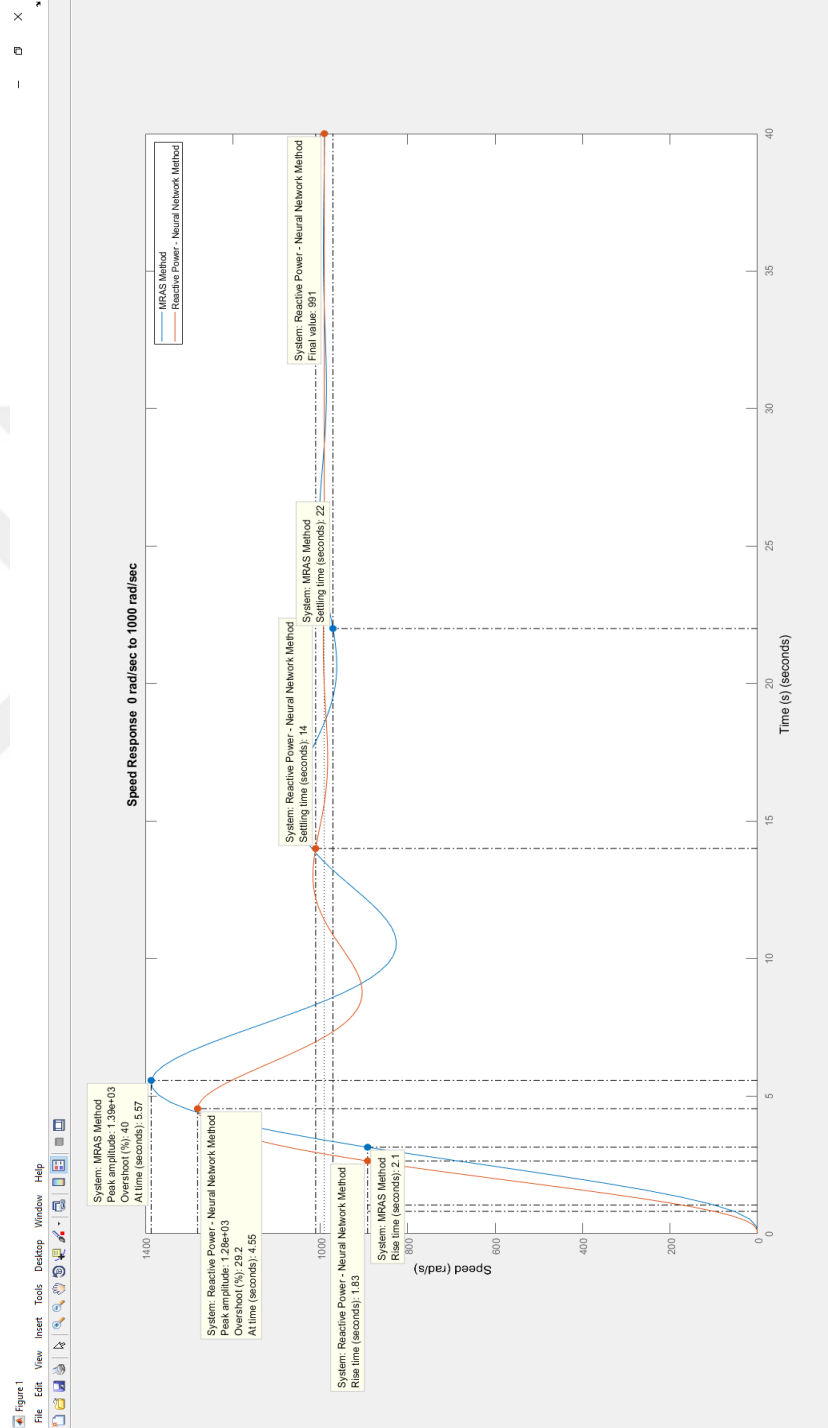
Kusko Alexander, Galler Donald, "Control Means For Minimization of Losses in AC and DC Motor Drives", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. LA-19, No. 4, July/August 1983

- Larabi A., Boucherit M.S. Speed Sensorless Control of Induction Motor Using Model Reference Adaptive System, Process Control Laboratory, Algiers, Algeria.
- Larabi A., Mahmoudi MO., Boucherit M.S., Speed Sensorless Vector Control of Induction Motor Using Adaptive Model Reference Method, International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2008.
- Lee R.J., Pillay P. and Harley R.G., D,Q Reference Frames for the Simulation of Induction Motors, Department of Electrical Engineering, University of Natal, South Africa, 1984.
- Mohan C., Meerimatha G. and Kumar K. Indirect Neural Network Based Speed Estimation of Induction Motor Using Indirect Field Oriented Control Methods, Vol.3, Issue.4, Jul - Aug. 2013 pp-1980-1987.
- Nicolae Patrascioiu, Adrian Tomus, Design of an extended Luenberger observer for sensorless vector control of induction machines using virtual instrument, Automatics, Computers, Electrical and energetics Engineering University of Petrosani, Romania.
- Nola F.J, "Power factor Control System for AC Induction Motor, "U.S.Patent 4 052 648, Oct 4,1977
- Novotny D.W. and Lipo T.A., Vector Control and Dynamics of AC Drives, First Edition.
- Ohm Dal Y., Dynamic Model of Induction Motors For Vector Control, Drivetech, Inc., Blacksburg, Virginia.
- Pană T. and Stoicuța O., Design of an Extended Luenberger Observer for Sensorless Vector Control of Induction Machines under Regenerating Mode. 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, 2010.
- Park R.H, Two-Reaction Theory of Synchronous Machines, University of Waterloo, Canada, October, 2000
- Patterson Dan W., "Introduction to Artificial Intellegence and Expert System".
- Popescu M., Induction Motor Modelling for Vector Control Purposes, Helsinki University of Technology, Laboratory of Electro mechanics, Report, Espoo 2000, 144 p.
- Say M.G., Alternating current Machines, Fourth Edition, Heriot-watt University, Edinburgh.

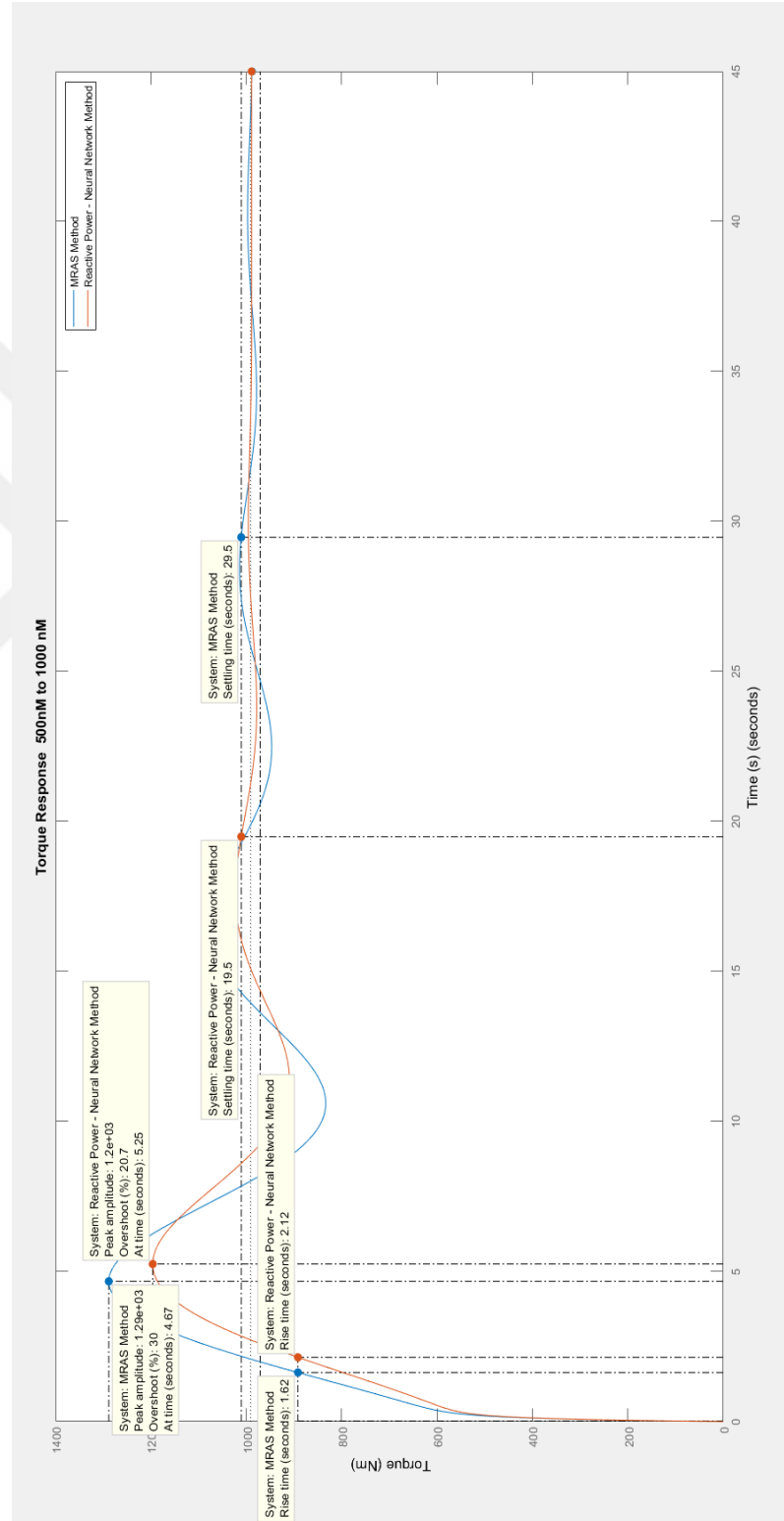
- Seong-Hwan Kim, Tae-Sik Park, and Gwi-Tae Park, Speed-Sensorless Vector Control of an Induction Motor Using Neural Network Speed Estimation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 48, No. 3, June 2001.
- Shah Sifat, Rashid A., Bhatti MKL, Direct Quadrature (D-Q) Modeling of 3-Phase Induction Motor Using MatLab / Simulink, COMSATS Institute of Information and Technology, Abbottabad, Pakistan.
- Sobczuk Dariusz L., Application of ANN for Control of PWM Inverter Fed Induction Motor Drives, Warsaw University of Technology Faculty of Electrical Engineering, 1999.
- Stephen J.Chapman, Electric Machinery Fundamentals, Fifth Edition.
- T.Ali, Y.M.Abbas and A.Osman, Control of Induction Motor Drive using Artificial Neural Network, *SUST Journal of Engineering and Computer Science (JECS)*, Vol. 15, No. 2, 2014.
- Teresa Orłowska-Kowalska, Czesław T.Kowalski, Neural Network Application for Flux and Speed Estimation in the Sensorless Induction Motor Drive, Institute of Electric Machines and Drives, Technical University of Wrocław, Poland.
- Venkatesh S.C., The Development of a Digital Controller for a Three-Phase Induction Motor, M.S.thesis, Massachusetts Institute of Technology, May 1994.
- Wenqiang Yang, Xu Cai, Jianguo Jiang, Speed Sensorless Vector Control of Induction Motor Based On Reduced Order Extended Kalman Filter, Shanghai Jiaotong University Shanghai P.R.China.
- Werner Leonhard, Control of Electrical Drives, Third Edition

8. EKLER

Şekil 8.1 1000 rad/sec Referans Hızına Ulaşma Değerleri



Şekil 8.2. 500 nM – 1000nM Tork Değişim Grafiği



ÖZGEÇMİŞ

HAYDAR CAN ACAR

canacar94@gmail.com



ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans 2017- 2019	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik – Elektronik Mühendisliği Bölümü, Antalya
Yüksek Lisans (ERASMUS) 2018-2019	AGH University of Science and Technology Elektrik – Elektronik Mühendisliği Bölümü Krakow/POLONYA
Lisans 2012-2017	Yeditepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektrik – Elektronik Mühendisliği, İstanbul

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Saha Mühendisi 2017-2018	Sektörel Elektrik – İl Emniyet Müdürlüğü Projesi Antalya
Kontrol ve Sistem Mühendisi 2015-2016	Beckhoff Automation Ataşehir / İSTANBUL

ESERLER

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makale

- 1- ÜSER Y., ACAR H.C. (2019) On-line Rotor Flux Adjustment Using Reactive Power and Artificial Neural Networks. International Conference And Exhibition On Electromechanical And Energy Systems (in progress)

Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler

- 1- ÜSER Y., ACAR H.C., KİTİŞ U. (2018). PID Parametrelerinin Analitik ve Yapay Sinir Ağlarına göre Ayarlama Yöntemleri: DC Motor Modeline Uygulanması ve Karşılaştırmalı Olarak Değerlendirilmesi. 3rd International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC 2018)
- 2- ACAR H.C., ÜSER Y. (2018). Rotor Direncinin Anlık Optimizasyonu ile İndüksiyon Motorlarının Dolaylı Vektör Kontrolü. 4. Uluslararası Mesleki ve Teknik Bilimler Kongresi (UMTEB 2018)