ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORUN DENETİMİ

Uğur GÜVENÇ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK EĞİTİMİ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ARALIK 2005
ANKARA

Uğur GÜVENÇ tarafından hazırlanan anahtarlamalı relüktans motorun denetimi adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım

.....

Prof. Dr. Çetin ELMAS

Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından Elektrik Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan :_____

Üye :_____

Üye :_____

Üye :_____

Üye :_____

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur

ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORUN DENETİMİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Uğur GÜVENÇ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ARALIK 2005

ÖZET

Anahtarlamalı Relüktans Motorlar (ARM) değişken hız uygulamalarında gittikçe artan bir ilgiye sahiptirler. ARM'nin dinamik karakteristikleri durum değişikliklerinde farklılık göstermektedir. ARM'lerin en önemli sakıncalarından olan tork dalgalanmaları, manyetik akıya bağlı olarak değişmektedir. Manyetik akı ise faz akım ve rotor konumunun bir işlevidir. Dolayısıyla, ARM'nin modellenmesinde manyetik akı karakteristiklerinin bilinmesi önemli bir gereksinimdir. ARM'nin manyetik akı karakteristiklerinin belirlenmesinde bir çok metot önerilmiştir. ARM doğrusal bir yapıya sahip olmadığından bu yöntemler yetersiz kalmaktadırlar. Bu tezde, ARM'deki tork dalgalanmalarını azaltmak için Yapay Sinir Ağ (YSA) tabanlı bir yaklaşım sunulmuştur. Benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar, akı yoğunluğunun gerçeğe en yakın bir biçimde YSA ile modellenebildiğini göstermiştir ve tork dalgalanmalarında büyük ölçüde azalma olmuştur.

Bilim Kodu **:704**
Anahtar Kelimeler **:Anahtarlamalı relüktans motor, Yapay sinir ağı, Doğrusal olmayan modelleme.**
Sayfa Adedi **:95**
Tez Yöneticisi **:Prof. Dr. Çetin ELMAS**

CONTROL OF A SWITCHED RELUCTANCE MOTOR

(M.Sc. Thesis)

Uğur GÜVENÇ

GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
DECEMBER 2005

ABSTRACT

Switched Reluctance Motors (SRMs) are getting increasing attention in variable speed applications. The SRMs dynamic characteristics vary as condition change. The most important drawback of SRMs is ripples in the torque at low speed. The torque in the SRM is a function of flux-linkage current and rotor position. Therefore, modeling of the flux-linkage characteristics of the SRM is very important to minimize tork ripples. So far, several methods of modeling of the flux-linkage characteristics of the SRMs have been proposed. Due to nonlinear flux-linkage characteristics of the SRM, this cannot be adequately described by these models. In this thesis, simulations results show that an Artificial Neural Network (ANN) based solution minimizes torque ripple in a Switched Reluctance Motor (SRM).

Science Code : 704
Key Words :Switched reluctance motor, Artificial neural network, Nonlinear modelling.
Page number :95
Adviser :Prof. Dr. Çetin ELMAS

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca yardım ve desteğini esirgemeyen ve beni yönlendiren kıymetli hocam Sayın Prof. Dr. Çetin ELMAS' a, tez çalışmalarım boyunca yardımlarını esirgemeyen Öğretim Görevlisi Tuncay YİĞİT, Araştırma Görevlileri Dr. Okan BİNGÖL, Dr. Oğuz ÜSTÜN, Serdar BİROĞUL ve Yusuf ÜSTÜN'e, manevi desteğinden dolayı tüm çalışma arkadaşlarıma ve beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iii

ABSTRACT iv

TEŞEKKÜR v

İÇİNDEKİLER vi

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ x

SİMGELER VE KISALTMALAR xiii

1. GİRİŞ 1

2. ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORLAR 4

2.1 ARM' nin Yapısı ve Çalışması 4

2.2. ARM'de Enerji Dönüşümü 6

2.3 ARM'nin Eşdeğer Devre Modeli ve Dinamik Denklemleri 8

2.4. ARM'de Tork-Hız Karakteristiği 11

2.5. ARM' ler İçin Sürücü Seçimi 12

2.6. ARM'de Komütasyon İşlemi 13

2.7. ARM için Dönüştürücü Devreleri ve Özellikleri 14

2.7.1.Klasik köprü tipi dönüştürücü devresi 15

2.7.2. ARM'lerde kullanılan diğer dönüştürücü devreleri 17

2.8. ARM'nin Endüstrideki Uygulamaları 21

3. YAPAY SİNİR AĞLARI 23

3.1. YSA' ların Üstünlükleri 26

3.2. Yapay Sinir Ağının Oluşumu 27

Sayfa

3.3. YSA' larda Öğrenme 28
3.4. Öğrenme Oranının Ağ Üzerindeki Etkisi 29
3.5. Momentum Teriminin Ağ Üzerindeki Etkisi 29
3.6. Gizli Katman Sinir Sayısının Ağ Üzerindeki Etkisi 30
3.7. Hata Farkı Değişkeninin Ağ Üzerindeki Etkisi 30
3.8. Danışmanlı Geri Yayılımlı Bir YSA Modeli 30
4. SİSTEMİN MODELLENMESİ 37
4.1. Faz Endüktansının Ölçümü 37
4.1.1. YSA yapısı 40
4.1.2. Eğitim algoritması 41
4.1.3. Eğitim veri kümesi 42
4.1.4. YSA' nın eğitilmesi 43
4.2. ARM için PI (oransal+integral) Denetleyici Tasarımı 45
4.3. ARM'nin YSA ile Modellenmesi 47
4.4 Benzetim Sonuçları 51
4.4.1. 500 d/d referans hız ve yüksüz durum 52
4.4.2. 500 d/d referans hız ve yüklü durum 56
4.4.3. 1000 d/d referans hız ve yüksüz durum 60
4.4.4. 1000 d/d referans hız ve yüklü durum 64
4.4.5. 1500 d/d referans hız ve yüksüz durum 68
4.4.6. 1500 d/d referans hız ve yüklü durum 72
4.4.7. 750 d/d referans hız ve değişken yüklü durum 76
4.4.8. Değişken hız referanslı ve yüksüz durum 80

Sayfa

4.4.9. Değişken hız referanslı ve yüklü durum 84

5. SONUÇ VE ÖNERİLER…….....90

KAYNAKLAR 91
ÖZGEÇMİŞ 95

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 4.1. Deneyden alınan gerilim değerleri..... 38

Çizelge 4.2. Deneyden ölçülen değerlerden hesaplanan manyetik akı değerleri..... 39

Çizelge 4.3. Öğrenmede kullanılan parametreler..... 43

Çizelge 4.4. Öğrenmede kullanılan parametreler..... 49

Çizelge 4.5. Benzetimde kullanılan motorun özellikleri..... 52

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. ARM bir faz için uyartım devresi 4

Şekil 2.2. ARM'de kutupların ayrık ve hizalı durumları 5

Şekil 2.3. Bir faz için endüktans, tork ve akım eğrileri 6

Şekil 2.4. Enerji dönüşüm grafiği 7

Şekil 2.5. Sabit Akımda Koenerjinin değişimi ile ani torkun değişimi 7

Şekil 2.6. ARM'nin bir fazı için eşdeğer devresi 9

Şekil 2.7. ARM`nin tork-hız karakteristiği 11

Şekil 2.8. ARM'de komütasyon işlemi ve dalga şekilleri 13

Şekil 2.9. ARM'lerde kullanılan dönüştürücülerin anahtar sayısına göre sınıflandırılması 15

Şekil 2.10. Klasik köprü tipi dönüştürücü devresi 16

Şekil 2.11. Tek ve her iki anahtar için kıyıcı çalışma durumları 16

Şekil 2.12. Faz sayısı+1 dönüştürücü devresi 17

Şekil 2.13. Temel C-dump dönüştürücü devresi 18

Şekil 2.14. Düzenlenmiş C-dump dönüştürücü devresi 19

Şekil 2.15. Bifilar sargılı dönüştürücü devresi 19

Şekil 2.16. Split DA link dönüştürücü devresi 20

Şekil 2.17. Söndürme dirençli dönüştürücü devresi 21

Şekil 3.1. Yapay bir sinir (düğüm) 25

Şekil 3.2. Dört katmanlı bir YSA 28

Şekil 3.3. Tek çıkışlı iki-katmanlı geri yayılmalı YSA 31

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.4. Yerel minimum noktası 36

Şekil 4.1. ARM'nin Manyetik Akı Karakteristiği..... 39

Şekil 4.2. Manyetik Akının YSA ile Modellenmesi 42

Şekil 4.3. YSA yapısının belirlenmesi 43

Şekil 4.4. Sistemin eğitilmesi..... 44

Şekil 4.5. Eğitim yapıldıktan sonraki (%) YSA hataları..... 44

Şekil 4.6. Manyetik akının deneysel düzenekten ve YSA tabanlı modellemeden elde edilen verilerin karşılaştırılması..... 45

Şekil 4.7. ARM'nin kapalı döngü hız denetimi blok şeması 46

Şekil 4.8. ARM'nin PI hız denetleyicili kapalı döngü blok şeması 47

Şekil 4.9. ARM'nin YSA ile hız ve tork denetleyicili kapalı döngü blok şeması 48

Şekil 4.10. ARM'nin YSA ile Modellenmesinin Ağ Yapısı..... 48

Şekil 4.11. YSA yapısının belirlenmesi 49

Şekil 4.12. Sistemin eğitilmesi..... 50

Şekil 4.13. Eğitim yapıldıktan sonraki (%) YSA hataları (Qa1) 50

Şekil 4.14. Eğitim yapıldıktan sonraki (%) YSA hataları (Qa2) 51

Şekil 4.15. ARM'nin PI denetleyici tasarımı ile (0-1) sn zaman aralığında, 500 d/d ve yüksüz durumda, benzetim sonuçları..... 54

Şekil 4.16. ARM'nin YSA modelleme ile (0-1) sn zaman aralığında, 500 d/d ve yüksüz durumda, benzetim sonuçları..... 55

Şekil 4.17. ARM'nin PI denetleyici tasarımı ile (0-1) sn zaman aralığında, 500 d/d ve 5 N-m yüklü durumda, benzetim sonuçları..... 58

Şekil 4.18. ARM'nin YSA modelleme ile (0-1) sn zaman aralığında, 500 d/d ve 5 N-m yüklü durumda, benzetim sonuçları..... 59

Şekil 4.19. ARM'nin PI denetleyici tasarımı ile (0-1) sn zaman aralığında, 1000 d/d ve yüksüz durumda, benzetim sonuçları..... 62

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.20. ARM'nin YSA modelleme ile (0-1) sn zaman aralığında, 1000 d/d ve yüksüz durumda, benzetim sonuçları 63

Şekil 4.21. ARM'nin PI denetleyici tasarımı ile (0-1) sn zaman aralığında, 1000 d/d ve 5 N-m yüklü durumda, benzetim sonuçları 66

Şekil 4.22. ARM'nin YSA modelleme ile (0-1) sn zaman aralığında, 1000 d/d ve 5 N-m yüklü durumda, benzetim sonuçları 67

Şekil 4.23. ARM'nin PI denetleyici tasarımı ile (0-2) sn zaman aralığında, 1500 d/d ve yüksüz durumda, benzetim sonuçları 70

Şekil 4.24. ARM'nin YSA modelleme ile (0-2) sn zaman aralığında, 1500 d/d ve yüksüz durumda, benzetim sonuçları 71

Şekil 4.25. ARM'nin PI denetleyici tasarımı ile (0-2) sn zaman aralığında, 1500 d/d ve 5 N-m yüklü durumda, benzetim sonuçları 74

Şekil 4.26. ARM'nin YSA modelleme ile (0-2) sn zaman aralığında, 1500 d/d ve 5 N-m yüklü durumda, benzetim sonuçları 75

Şekil 4.27. ARM'nin PI denetleyici tasarımı ile (0-1,5) sn zaman aralığında, 750 d/d ve yüksüz-5-yüksüz durumda, benzetim sonuçları 78

Şekil 4.28. ARM'nin YSA modelleme ile (0-1,5) sn zaman aralığında, 750 d/d ve yüksüz-5-yüksüz durumda, benzetim sonuçları 79

Şekil 4.29. ARM'nin PI denetleyici tasarımı ile (0-6) sn zaman aralığında, değişken hız ve yüksüz durumda, benzetim sonuçları 82

Şekil 4.30. ARM'nin YSA modelleme ile (0-6) sn zaman aralığında, değişken hız ve yüksüz durumda, benzetim sonuçları 83

Şekil 4.31. ARM'nin PI denetleyici tasarımı ile (0-2) sn zaman aralığında, değişken hız ve 5 N-m yüklü durumda, benzetim sonuçları 86

Şekil 4.32. ARM'nin YSA modelleme ile (0-2) sn zaman aralığında, değişken hız ve 5 N-m yüklü durumda, benzetim sonuçları 87

Şekil 4.33. ARM'nin YSA modelleme ve PI denetleyici tasarımı ile çeşitli hız ve yük durumlarında büyütülmüş çıkış tork benzetim sonuçları 89

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	**Açıklama**
v	Gerilimin ani değeri (V)
i_r	Referans akım (A)
$i_{a,b,c,d}$	ARM faz akımları (A)
θ	Pozisyon (derece)
W^*	Koenerji (joule)
W_f	Manyetik alanda depo edilen enerji (joule)
R	Direnç (Ω)
L	Endüktans (H)
$L_{a,b,c,d}$	ARM faz endüktansları (H)
ψ	Manyetik akı (Weber)
M	Karşılıklı endüktans (H)
ω	Gerçek hız (rad/s)
ω_r	Referans hız (rad/s)
T_e	Tork (Nm)
T_L	Yük torku (Nm)
j	Atalet momenti (Kg-m^2)
B	Sürtünme momenti (Nms/rad)
N_r	Rotor çıkıntılı kutup sayısı
N_s	Stator çıkıntılı kutup sayısı
y	Gerçek değer
d	İstenilen değer

Simgeler	**Açıklama**
E	Hata ölçütü
μ	Öğrenme katsayısı
δ	Geriye yayılan hata değeri

Kısaltmalar	**Açıklama**
ARM	**A**nahtarlamalı **R**elüktans **M**otor
YSA	**Y**apay **S**inir **A**ğı
PI	Oransal + integral
AA	**A**lternatif **A**kım
DA	**D**oğru **A**kım

1.GİRİŞ

Anahtarlamalı Relüktans Motorlar (ARM), basit ve dayanaklı yapısı, ucuz imalatı, düşük ataleti, yüksek hızı ve verimi ile değişken hız uygulamalarında, diğer motorlara göre güçlü bir aday haline gelmiştir. ARM'de sadece statorda sargı bulunur, rotorda sargı yoktur, böylece rotorda ayrıca bir sargıdan tasarruf edilmektedir. AA veya DA motorlarında sargılar dağınık yapıdadır. ARM'de ise sargılar karşılıklı kutuplara sarılmış ve birbirlerine seri bağlanmıştır. ARM, AA motorları gibi fırçasız bir motordur ve her ortamda kullanılabilir. Rotor da sargı bulunmadığı için yüksek hızlı uygulamalarda kullanmak için elverişlidir. ARM için pek çok güç dönüştürücü konfigürasyonları ile sürülebilir. Güç anahtarları her zaman motor sargılarına seri bağlanır ve bu anahtarların kısa devre olmasını önler. İlk kalkınmada fazla akım çekmeden yüksek tork üretebilmesi ve çok yüksek hızlarda çalışabilmesi, ARM'leri diğer motorlar göre üstün kılmaktadır. Ancak çıkıntılı kutuplu yapılarından dolayı torkta dalgalanmalar meydana gelmektedir (1). ARM'nin yüksek performansa ulaşmaktaki temel sakıncaları tork dalgalanmaları, titreşim ve akustik gürültüdür(2).

ARM ilk defa 1838 yılında Davidson tarafından İskoçya'da Glasgow ile Edinburgh arasındaki tren yolunda çalışan bir lokomotifte kullanılmıştır (3). Relüktans motorun patenti 1840 yılında W.H. Toylar tarafından alınmıştır (4). Ancak komütasyon güçlükleri nedeni ile pek rağbet görmemiştir. 1960'lı yıllardan itibaren elektroniğin ve bilgisayar teknolojilerinin hızlı gelişimi ile ARM'ler kısa sürede ilgi çekmeye başlamıştır.

Günümüzdeki ARM'lerin temel özelliklerini taşıyan ilk ARM patenti 1972 yılında ABD'de Bedford ve Hoft tarafından alınmıştır (5). İlk ARM'ler 1974 yılında Ford Motor şirketinde çalışan Unnewehr ve Koch tarafından üretilmiş, daha sonra ise 1978 yılında Bausch tarafından üretilmiştir (6,7). 1980 yılında, Lawrenson ve arkadaşları ARM'lerin değişken hızlı uygulamalarda kullanılabileceğini göstermişlerdir (8).

ARM'ler üzerinde yapılan çalışmalar motor tasarımı ve motor denetlenebilirliği üzerinedir. Motor tasarımında, performansının iyileştirilmesi için motor geometrisi üzerinde çalışılmıştır. İlk olarak 1980 yılında, Lawrenson ARM'lerin rotor kutup sayısının kutup adım oranının nasıl seçileceğine dair bir çalışma yapmıştır (9). 1988 yılında kutup adım oranının performans üzerindeki etkisini araştıran bir çalışma Arumugan ve arkadaşları tarafından yapılmıştır (10). 1989 yılında ise Pullock ve arkadaşları, motor faz sayısındaki azalmanın motor torkundaki dalgalanmayı artırdığını göstermişlerdir (11).

ARM'nin kapalı döngülü denetimi 1985 yılında Bose ve arkadaşları tarafından yapılmıştır(12). DSP uygulamaları ile ARM'nin çok geniş hız aralığında etkili bir şekilde çalışabildiği Elmas ve De La Para tarafından gösterilmiştir (13).

ARM'nin torku, manyetik akıya bağlı olarak değişmektedir. Manyetik akı ise rotor pozisyonu ve akım genliğinin doğrusal olmayan bir işlevidir. ARM'lerin en önemli karakteristik özelliği, faz akımı ve rotor pozisyonuna bağlı olarak manyetik devresinin doğrusal olmayan yapıda olmasıdır (14). ARM'nin manyetik akısının modellenmesinde, sistem değişkenlerinin kesin olarak bilinmeyeceği için tamamıyla bir modelleme mümkün olmayacaktır.

Son yıllarda yapay sinir ağları, doğrusal olmayan sistemlerin modellenmesinde yoğun bir ilgi görmektedir. Yapay sinir ağları bir programcının geleneksel yeteneklerini gerektirmeyen, kendi kendine öğrenme düzenekleridir. En çok kullanılan yapay sinir ağı, geri yayılımlı yapay sinir ağı olarak bilinendir. Bu tip yapay sinir ağı tahmin ve sınıflandırma işlemlerinde çok iyi sonuçlar vermektedir. Belirsiz, gürültülü ve eksik bilgilerin işlenmesinde yapay sinir ağları başarıyla kullanılmaktadır (15).

Bu tez çalışmasında, ARM'deki tork dalgalanmalarını azaltmak için yapay sinir ağ tabanlı bir yaklaşım sunulmuştur. Motorun benzetim çalışmaları için C Builder 5.0 paket programı kullanılmıştır. Bölüm 2'de ARM'nin genel yapısı ve çalışması anlatılmıştır. Bölüm 3'te yapay sinir ağları hakkında bilgi verilmiştir. Bölüm 4'te

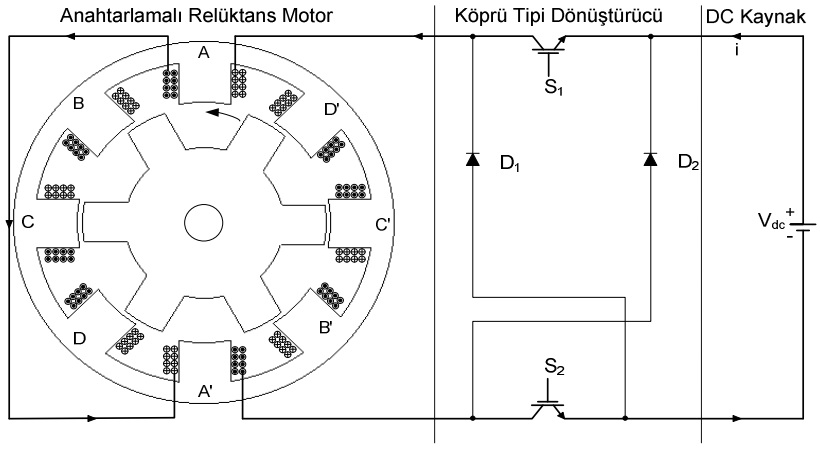
ARM'nin PI denetleyici tasarımı ve YSA ile modellemesi için hazırlanan yazılım hakkında bilgi ve benzetim sonuçları verilmiştir. Sonuç ve öneriler Bölüm 5'de verilerek genel bir değerlendirme yapılmıştır.

2. ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORLAR

2.1. ARM'nin Yapısı ve Çalışması

ARM'ler oldukça basit bir yapıya sahiptirler. Hem rotor hem de stator sıkıştırılmış paket saçlardan çıkıntılı kutuplu olmak üzere imal edilmiştir. Stator ve rotor, birer yüzleri yalıtılmış silisli saçların paketlenmesi ile imal edilmişlerdir. Statorda sargı vardır, rotorda ise sargı yoktur ve stator kutup sargıları karşılıklı olarak birbirine seri bağlanmıştır. Stator kutup sargıları, küçük akım değerlerinde çok sipirli, küçük direnç ve endüktans değerlerinde az sipirli yapılır (16). ARM'ler hem statorda hem de rotorda çıkıntılı kutupları olan ve sargıları tek yönlü uyartılan motorlardır. Stator ve rotor, birer yüzleri yalıtılmış silisli saçların paketlenmesi ile imal edilmişlerdir.

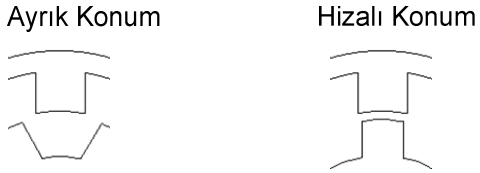
ARM'lerde stator ve rotor kutup sayıları farklı (6/4, 8/6, 12/8, 12/10) sayılarda üretilebilir. Stator ve rotor kutup sayılarının fazla olması durumunda daha az tork dalgalanması olmakta, fakat ortalama tork ve bakır kayıplarından dolayı verim azalmaktadır. ARM'ler stator ve rotor kutup sayıları eşit ve katları (2/2, 4/2) sayılarda üretilmezler, çünkü stator ve rotor kutupları hizalı pozisyona geldiklerinde, kalkınma torku üretmek mümkün olmayacaktır. Şekil 2.1'de 8/6 kutuplu bir ARM ve bir faz için köprü tipi dönüştürücü şeması gösterilmiştir.



Şekil 2.1. ARM bir faz için uyartım devresi

Bir birine seri bağlanmış, karşılıklı A-A', B-B', C-C' ve D-D' stator kutup sargıları fazları oluşturmaktadır. Stator fazlarından elektrik akım geçirildiğinde, bu kutuplar kendine en yakın olan çıkıntılı rotor kutuplarını çekecektir. Bu durumda stator ve rotor arasındaki hava aralığında meydana gelecek manyetik alan ile rotorda bir elektromanyetik kuvvet oluşacaktır.

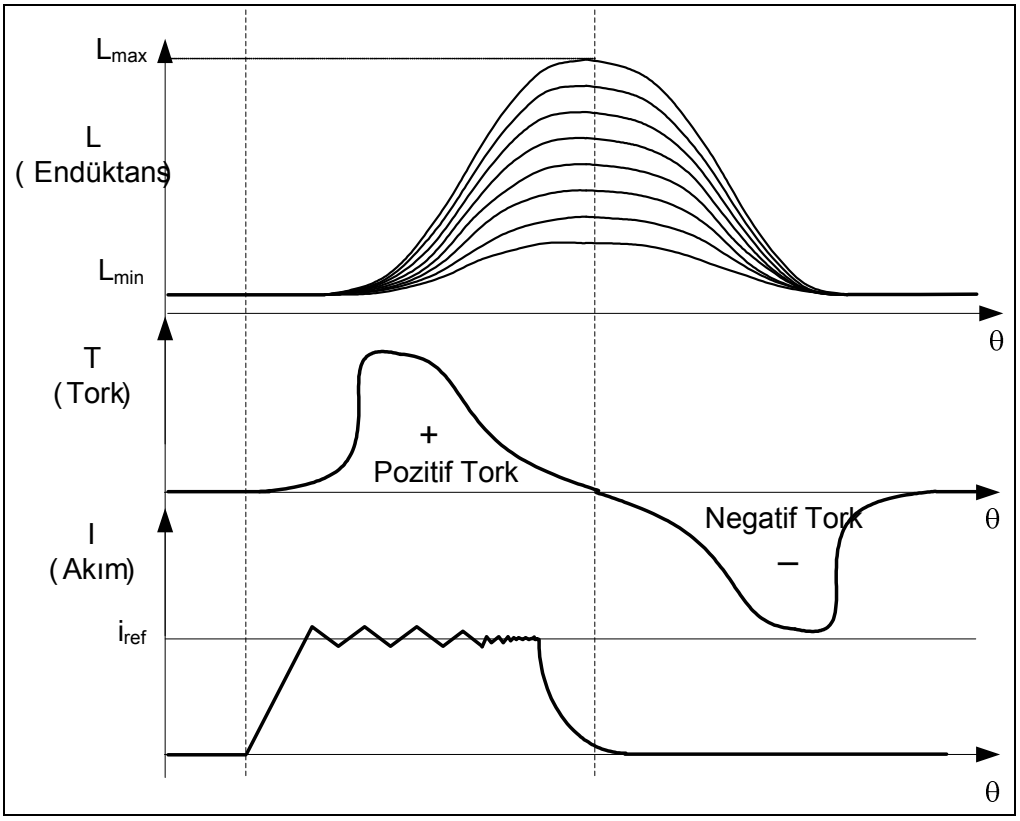
Böylece stator rotor manyetik yolunun manyetik direnci (relüktans) en aza indirilmiş olmaktadır. Bu pozisyon, en büyük endüktans en küçük relüktans pozisyonudur. Stator ve rotorun bu konumuna hizalı konum denir. Manyetik direncin maksimum olduğu konuma ise ayrık konum denir. Şekil 2.2'de kutupların ayrık ve hizalı durumları görülmektedir.



Şekil 2.2. ARM' de kutupların ayrık ve hizalı durumları

Stator fazlarının sıralı olarak enerjilendirilmesi ile her iki yönde sabit ortalama tork üretmek mümkün olmaktadır. Motorun stator yapısı simetrik çıkıntılara sahip olduğundan ve devrenin mıknatıslılığı manyetik akının yönünden bağımsız olduğundan üretilen tork stator kutbundaki akımın yönünden bağımsız olmaktadır.

ARM'nin davranışını manyetik akı (flux), akım ve rotor pozisyonu eğrileri ile açıklamak mümkündür. Tork, endüktansın maksimum olduğu noktaya kadar rotoru hareket ettirir. Nüvede artık mıknatısiyet yok ise akımın yönü önemli değildir. Rotorun yönü daima en yakın hizalı konuma doğru olur. Dolayısı ile pozitif tork sadece rotor ayrık konum ile ileri yönde bir sonraki hizalı konum arasında iken üretilir. Diğer bir deyimle pozitif tork sadece yükselen endüktans bölgesinde üretilir. ARM'de bir faz için, endüktans değişimi, üretilen pozitif, negatif tork ve faz sargısından geçen akım Şekil 2.3'de gösterilmiştir.



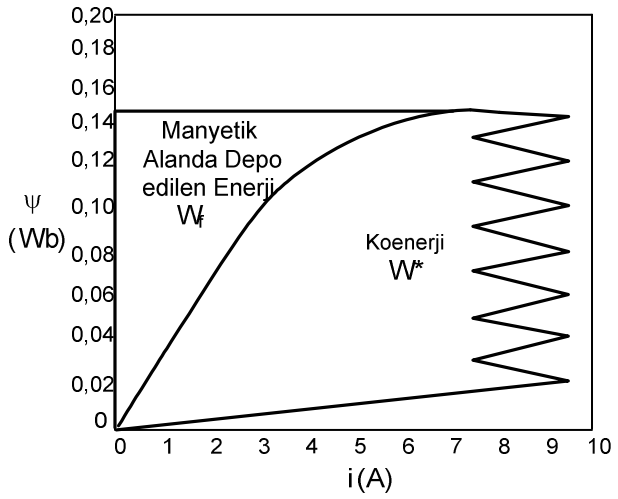
Şekil 2.3. Bir faz için endüktans, tork ve akım eğrileri

2.2. ARM'de Enerji Dönüşümü

ARM'de rotorun herhangi bir konumundan diğerine hareket ettiği zamanki koenerjinin değişimi ile orantılı olan bir faz için ani tork şu şekilde hesaplanır;

$$T_e = \left[\frac{\partial W^*(\theta, i_{a,b,c,d})}{\partial \theta} \right]_{i=sabit} \qquad [2.1]$$

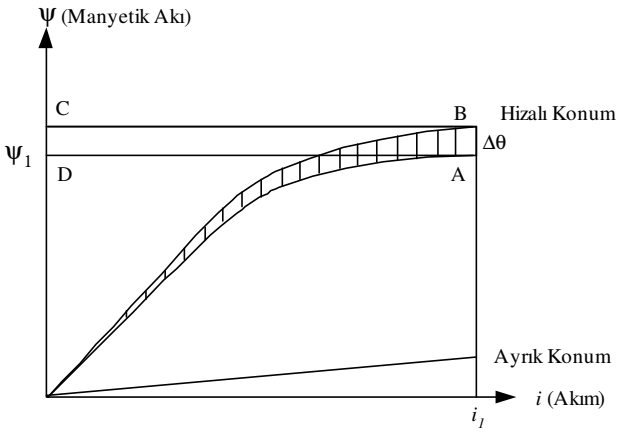
Burada; T_e tork, θ rotor pozisyonu, W^* koenerji ve $i_{a,b,c,d}$ ise faz akımlarıdır. Herhangi bir rotor konumunda, manyetik akı eğrisinin altında kalan alan koenerjiyi verir. Şekil 2.4'de herhangi bir pozisyondaki koenerji gösterilmektedir.



Şekil 2.4. Enerji dönüşüm grafiği

Koenerji, akıma ve konuma bağlı olan manyetik akının (ψ) integrali alınarak aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$W^*(\theta, i) = \int_0^i \psi(\theta.i).di \qquad [2.2]$$



Şekil 2.5. Sabit Akımda Koenerjinin değişimi ile ani torkun değişimi

Şekil 2.5'de sabit akımda rotorun A'dan B'ye doğru bir $\Delta\theta$ aralığında yer değiştirmesindeki manyetik alanda yapılan enerji alışverişi;

$$\Delta W_e = ABCD \qquad [2.3]$$

Manyetik alanda depo edilen enerjisindeki değişiklik ise,

$$\Delta W_f = OBC - OAC \qquad [2.4]$$

olur. Yapılan mekanik iş aşağıdaki gibi olmaktadır;

$$\Delta W_m = T\Delta\theta \qquad [2.5]$$

$$\Delta W_m = \Delta W_e - \Delta W_f \qquad [2.6]$$

$$\Delta W_m = ABCD - (OBC - OAD) \qquad [2.7]$$

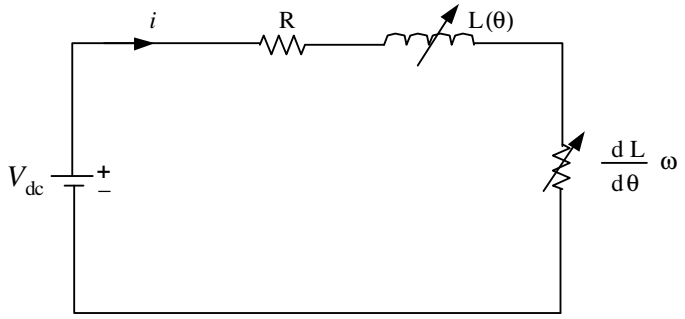
$$\Delta W_m = (ABCD + OAD) - OBC \qquad [2.8]$$

$$\Delta W_m = OAB \qquad [2.9]$$

olur. Kaynaktan elde edilmiş olan enerjinin tamamı mekanik işe dönüşmemektedir. Bunun bir kısmı manyetik alanda depo edilmektedir. Manyetik alanda depo edilen bu enerji A'dan B'ye hareket süresince enerji dönüşümü için kullanılmamaktadır.

2.3 ARM'nin Eşdeğer Devre Modeli ve Dinamik Denklemleri

Şekil 2.6'da bir faz için ARM'nin eşdeğer devresi görülmektedir.



Şekil 2.6. ARM'nin bir fazı için eşdeğer devresi

ARM'de bir faz için gerilim eşitliği;

$$V = R.i + \frac{d\psi(\theta, i)}{dt} - M(\theta)\frac{di'}{dt} \qquad [2.10]$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada; V , DA kaynak gerilimi, R , stator sargı direnci, ψ , manyetik akı, i , faz akımı, $M(\theta)$ karşılıklı endüktans, θ , rotor pozisyon açısı, i' , bir önce uyarılan sargı akımıdır.

Doyum ihmal edildiğinde manyetik akı $\psi = L(\theta).i$ olduğundan Eş. 2.10 yeniden düzenlendiğinde;

$$V = R.i + \frac{d(L(\theta), i)}{dt} - M(\theta)\frac{di'}{dt} \qquad [2.11]$$

olmaktadır. Burada, $L(\theta)$, faz endüktansını göstermektedir. Türevsel ifade parçalara ayrıldığında ise Eş. 2.11;

$$V = R.i + L(\theta)\frac{di}{dt} + i\frac{dL(\theta)}{dt} - M(\theta)\frac{di'}{dt} \qquad [2.12]$$

şeklini alacaktır. Karşılıklı endüktans değeri minimum endüktanstan daha küçüktür. Bu nedenle karşılıklı endüktans ihmal edildiğinde;

$$V = R.i + L(\theta)\frac{di}{dt} + i\frac{dL(\theta)}{dt} \qquad [2.13]$$

olmaktadır. Aynı zamanda,

$$\frac{dL(\theta,i)}{dt} = \frac{dL(\theta,i)}{d\theta}.\omega \qquad [2.14]$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{di}{d\theta}.\omega \qquad [2.15]$$

dir. Burada, ω, açısal hızdır. Bu durum kararlı çalışma durumunda geçerlidir. Böylece, Eş. 2.13 yeniden düzenlenirse;

$$V = R.i + L(\theta)\frac{di}{d\theta}.\omega + i\frac{dL(\theta)}{d\theta}.\omega \qquad [2.16]$$

olur.

ARM'nin dinamik davranışını tanımlayan eşitlik Eş. 2.17'deki gibi ifade edilebilir.

$$T_e = J\frac{d\theta^2}{d^2t} + B\frac{d\theta}{dt} + T_L \qquad [2.17]$$

Rotor konumunun türevi alırsak, açısal hıza bağlı eşitlik;

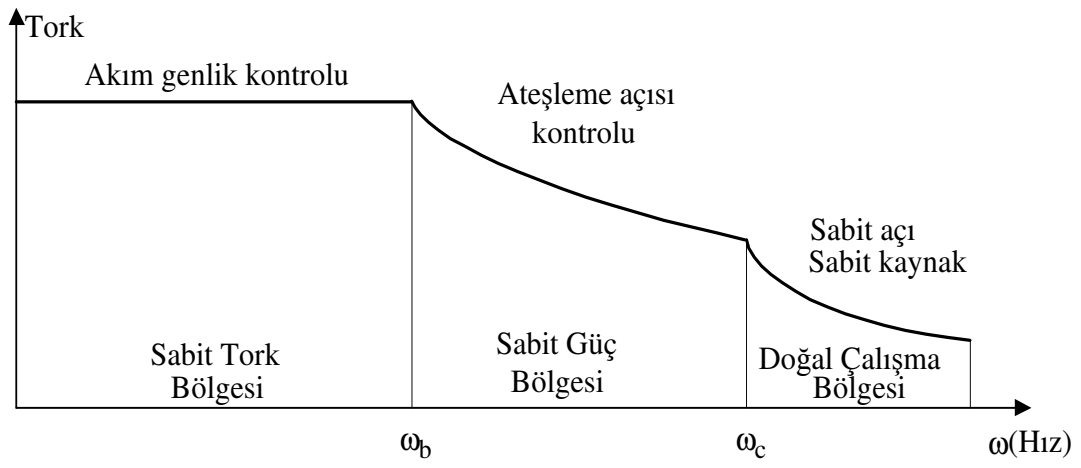
$$T_e = J\frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_L \qquad [2.18]$$

olmaktadır. Burada ; T_e, motor torku, J, toplam atalet momenti, B, sürtünme katsayısı ve T_L ise yük torkudur.

Bu denklemlerin doğrululuğu motor endüktansının ne kadar doğru şekilde modellenmesine bağlıdır (17).

2.4. ARM'de Tork-Hız Karakteristiği

ARM'lerin tork-hız eğrilerinin üretici firma tarafından belirlenmemiştir. Motora uygulanan denetim şeklinde göre tork-hız eğrileri oldukça geniş bir yelpazeye sahiptir. Bir ARM için çalışma şartları Şekil 2.7'de görüldüğü gibi motor hızına göre sabit tork bölgesi, sabit güç bölgesi ve doğal çalışma bölgesi olarak üç farklı bölgeye ayrılmaktadır.



Şekil 2.7. ARM`nin tork-hız karakteristiği

Sabit Tork Bölgesi, taban hız ω_b'nin altındaki hızlar için, konverter tetikleme açısı sabit bir değerde tutulmakta ve böylece motor torku en az dalgalanma ile en büyük

değere çıkarılmaktadır. Motor faz akımları ayarlanarak motor ortalama torku denetlenmektedir. Motor stator fazları sıralı bir şekilde enerjilendirilmektedir ve böylece bir anda sadece bir faz aktif olmaktadır. İki fazında geçici olarak aktif olduğu komütasyon periyotları bunun dışındadır. Tork denetimli çalışmada, aktif fazdaki akım bir akım regülatörü tarafından kontrol edilmektedir.

Sabit Güç Bölgesi, taban hız ω_b'nin üzerindeki hızlar için akım regülatörü etkili olmamaktadır. Çünkü bu çalışma bölgesinde zıt emk yükselmekte ve zorlama voltajı sabit akım sağlamak içi yeterli olmamaktadır. Konvertör ateşleme açısı, hızın bir fonksiyonu olarak artırılarak, motor hızı artırılabilmekte ve böylece $T.\omega$ değeri sabit hale getirilebilmektedir.

Doğal Çalışma Bölgesi, motor hızı ω_c hızından büyük olduğu zaman, dönüştürücü tetikleme açısı en büyük değerine getirilebilmektedir. ARM böylece doğal tork–hız karakteristiği ile çalışabilmektedir. Yani $T.\omega^2$ değeri seri DA motordaki gibi yaklaşık sabit olmaktadır (17,18).

2.5. ARM' ler İçin Sürücü Seçimi

ARM`lerde tork, faz akımının yönüne bağlı olmadığından tek yönlüdür ve tek kutuplu denetim devresi kullanılabilir. Bu da AA ile çalışan aynı sürücü devrelere göre bazı avantajlara sahip olduğunu gösterir. Histerisiz kayıplarının azalmasına olan etkisi, akımın tek yönlü olmasının ikinci bir avantajıdır.

ARM için konvertör tasarımında karşılaşılan en önemli sorunlar ise şunlardır:

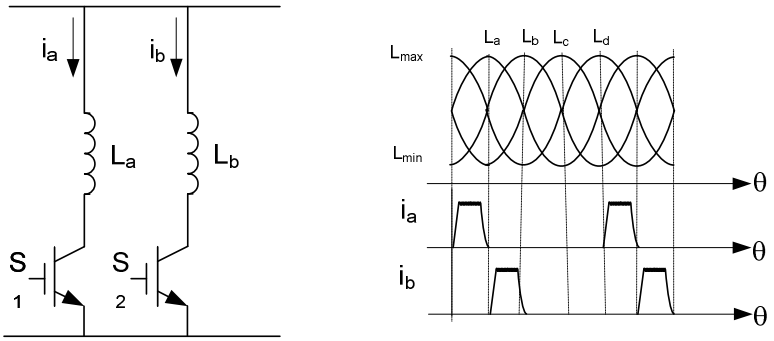
- Motor stator faz akımlarının komütasyonunda gerekli olan yüksek seviyeli enerji.
- Motor stator faz akımlarının denetimindeki zorluk.

Bu sorunlar motor endüktanslarının yüksek olması ve bu değerlerin rotor pozisyonu ile geniş bir aralıkta değişmesinden kaynaklanmaktadır.

İdeal durumda, düşük dalgalanmalı tork üretmek için konvertörün motor sargılarına kare dalga akım uygulanması gerekmektedir. Bu durum bir sargıdan diğerine hızlı bir komütasyonu gerektirmekte ve akımın iletim periyodu boyunca regüle edilmesini zorunlu kılmaktadır. Motor sargılarında depolanan enerji seviyesi yüksek olduğu zaman, komütasyon zamanını düşürmek için güç anahtarları üzerindeki gerilim baskısının artırılması gerekmektedir. Diğer bir deyişle, yüksek değerli ve değişken endüktanstan dolayı motor sargılarındaki akımın regülasyonunda bazı problemler meydana gelmektedir. Akım regülatörünün yüksek hızlarda motor sargı endüktansındaki hızlı değişmeye cevap vermesi için yeteri kadar hızlı olması gerekmektedir. Aynı zamanda, sistem parametreleri değişken olduğu için sabit parametreli denetleyiciler uygun olmayabilmektedir. Bu yüzden motor faz akımlarının kontrolü bir adaptif denetleyiciyi gerektirmektedir (19).

2.6. ARM'de Komütasyon İşlemi

ARM'de bir sargıdan diğerine komütasyon işlemi, depo edilmiş ve tahliye edilmesi gereken yüksek seviye enerjili bir akım komütasyonudur. Şekil 2.8'de *A* fazından *B* fazına komütasyon işlemi gösterilmiştir.



Şekil 2.8. ARM'de komütasyon işlemi ve dalga şekilleri

Pozitif tork üretmek için, A sargısı fazı, endüktansının yükselmeye başladığı zaman enerjilendirilmektedir. S_1 anahtarı θ_{on} konumunda iletime geçirilmekte ve θ_{off} konumunda kesime götürülmektedir. Bu anda, S_2 anahtarı B sargısına enerji sağlamak için iletime geçirilmektedir. θ_{off} anında S_1 anahtarı kesime getirildiği zaman, A sargısındaki faz akımı i_0 ve endüktansı ise $L_{\max}$ yada $L_{\max}$'a yakın olmaktadır. A sargısında depo edilen enerji ;

$$W = \frac{1}{2} L_{\max} . i_0^2 \qquad [2.19]$$

olmaktadır. Negatif tork üretmekten kaçınmak için akım düşme zamanını azaltmak gerekmektedir. Bunun içinde depo edilen bu enerjinin hızlı bir şekilde boşaltılması veya yok edilmesi gerekmektedir. Bu işlem için birçok çözüm şekli önerilmekte olup, bunlar üzerine çalışmalar yapılmaktadır (20).

- Pozitif toparlama: Depolanmış enerji bir direnç veya zener diyotta yok edilmektedir (21,22).
- Aktif toparlama: C-dump devresinde olduğu gibi depolanmış enerji güç kaynağına döndürülmekte veya yüksek gerilim kaynağı devresinde saklanmaktadır (23).
- Depolanmış enerji geçici olarak bir kapasitörde saklanmakta ve takip eden faz sargısına gönderilmektedir (24).
- Akım beslemeli dönüştürücüde, depolanmış enerji komütasyon kondansatöründe saklanmaktadır (25).

2.7. ARM için Dönüştürücü Devreleri ve Özellikleri

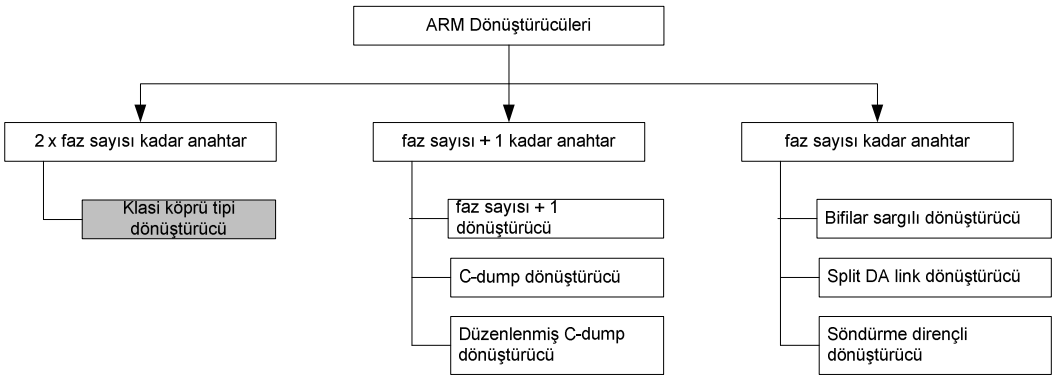
ARM'lerde kullanılacak dönüştürücüler iki temel özelliği karşılamalıdır.

1. ARM'de her faz diğerinden bağımsız olarak iletime geçmelidir.
2. ARM motor olarak çalışırken, generatör çalışma bölgesine geçmemelidir.

Bunların yanı sıra ARM'nin toplam performansını arttırmak için kullanılacak olan dönüştürücü ek olarak aşağıdaki özellikleri de sağlamalıdır.

- ❖ Fazlardan biri tamamen kesime gitmeden diğer faz iletime geçirilmeli
- ❖ Dönüştürücü, kesime götürülen faz sargısında depo edilen enerjiyi kaynağa yada iletime geçirilecek bir sonraki faza aktarabilmeli
- ❖ Komütasyon süresini kısa tutabilmeli
- ❖ Kıyıcı olarak çalışma esnasında anahtarlama serbest dolaşım sağlayabilmelidir.

ARM'lerde kullanılan dönüştürücü devrelerini kullanılan anahtar sayısına göre sınıflandırabiliriz (16). Şekil 2.9'de bu sınıflandırma gösterilmektedir.

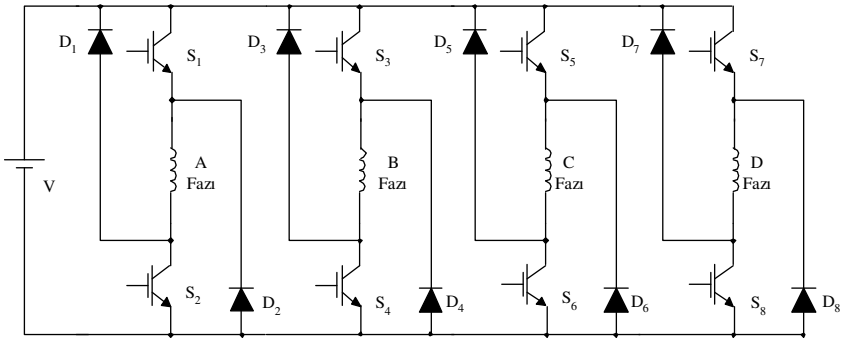


Şekil 2.9. ARM'lerde kullanılan dönüştürücülerin anahtar sayısına göre sınıflandırılması

2.7.1.Klasik köprü tipi dönüştürücü devresi

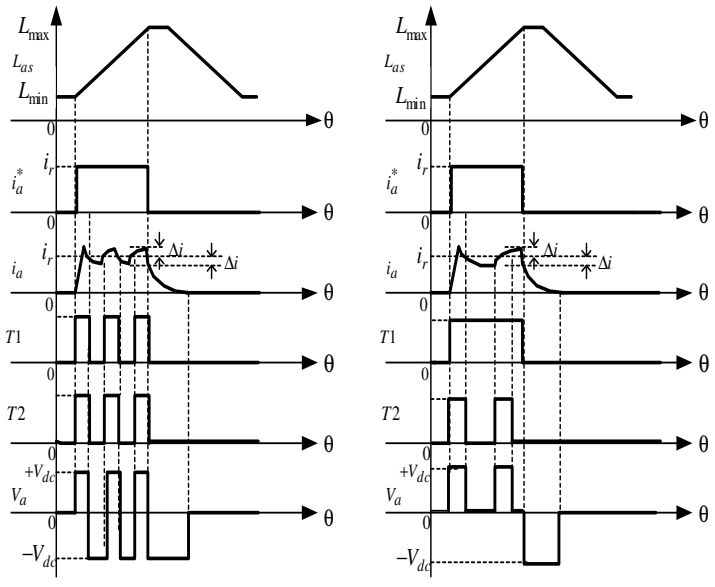
Bu dönüştürücüde stator faz sayısının iki katı kadar güç diyotu ve güç anahtarı kullanılmaktadır. Fazlar birbiriyle bağımsız olduğu için her fazın ayrı kontrol edilebilmesi mümkün olmaktadır. Bu özellikleriyle ARM sürücüleri AA eviricilerinden farklıdırlar. Çünkü AA eviricilerinde faz sargıları invertör ayaklarının ortasından beslenmektedir. ARM dönüştürücülerinde ise sargılar güç anahtarları ile seri bağlıdır. AA eviricilerde sargıların alt ve üst uçlarındaki anahtarların aynı anda açılmasından sakınılmalıdır. Aksi taktirde DA kaynak kısa devre olmaktadır. Bu

durumu önlemek için ilave denetim devreleri eklemek gerekmektedir. ARM denetiminde böyle bir duruma gerek yoktur. Şekil 2.10'de klasik köprü tipi dönüştürücü devresi gösterilmiştir.



Şekil 2.10. Klasik köprü tipi dönüştürücü devresi

Sargıların alt ve üst kısımlarındaki güç anahtarları her iletim periyodu ve tork vuruşu başlangıcında birlikte iletime geçirilmekte ve komütasyon noktası ise birlikte kesime geçirilmektedir. Kontrol stratejisinin tipine göre anahtarlardan biri veya her ikisi birden kıyma işlemi yapabilirler. Her iki durum için anahtarlama durumları ve akım gerilim eğrileri Şekil 2.11'de gösterilmiştir.



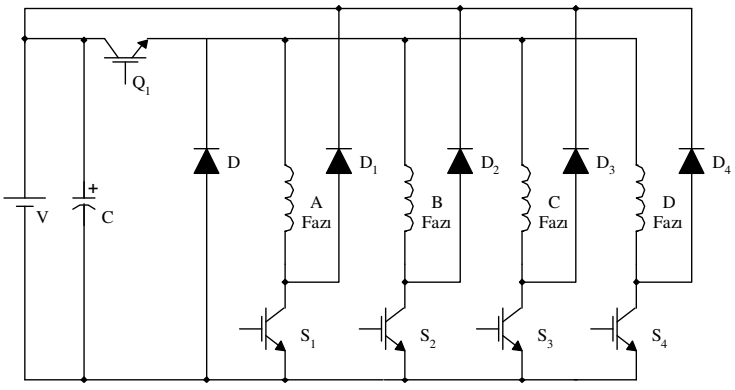
(a) Her iki anahtarın kıyıcı olduğu durum (b)Tek anahtarın kıyıcı durum

Şekil 2.11. Tek ve her iki anahtar için kıyıcı çalışma durumları

Kıyma işlemi, akımın belirtilen denetim bandı içerisinde kalması sağlanmaktadır. Bu çalışma modu motorun zıt emk'sının kaynak voltajına göre küçük olduğu düşük hızlarda kullanılmaktadır. Yüksek hızlarda ise her iki anahtar da iletimde olmakta ve böylece akımın dalga şekli hız ve torka bağlı olarak doğal halini almaktadır. Bir iletim periyodu sonunda her iki anahtar da birden kesime geldiğinde, sargıda depo edilen manyetik enerji hızlı diyotlar üzerinden kaynağa döndürülmektedir. Diyotlar ileri yönlü kutuplandırıldığı zaman, sargı uçlarına kaynak voltajı ters uygulanmış olacaktır. Enerji kesildiğinde ise sargıdaki polarite ters yönlü olmaktadır.

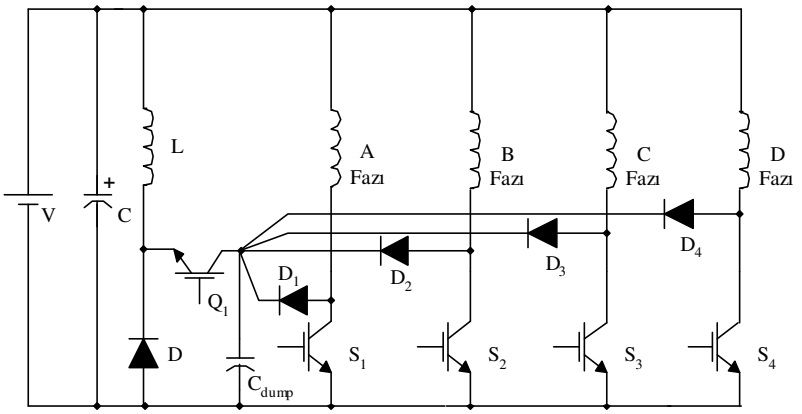
2.7.2. ARM'lerde kullanılan diğer dönüştürücü devreleri

Düşük hızlı sürücülerde bütünün hız aralığı boyunca darbe genişlik modülasyonu denetim kullanılmaktadır. Bu denetim için yapılan araştırmalar sonucu faz sayısının bir fazlası anahtar kullanılmış ve dönüştürücü devresi Şekil 2.12'de gösterilmiştir. Dönüştürücü devresinde fazlara bağlı anahtarlar iletim durumunda iken kıyma işlemi Q_1 anahtarı tarafından yapılmaktadır. Bu devrenin temel dezavantajı yüksek hızlarda fazlar arasında üst üste binmenin meydana gelmesidir. Yüksek hızlarda sargılar diyotlar üzerinden yeteri kadar hızlı deşarj olamamaktadırlar. Çünkü denetim anahtarı iletim pozisyonunda uzun bir süre kalmaktadır (16). Faz sayısı + 1 dönüştürücü devresi genellikle torktaki vuruntuların önemli olmadığı durumlarda, yüksek gerilim uygulamalarında ve performansın önemli olmadığı sistemler için uygundur (17).



Şekil 2.12. Faz sayısı+1 dönüştürücü devresi

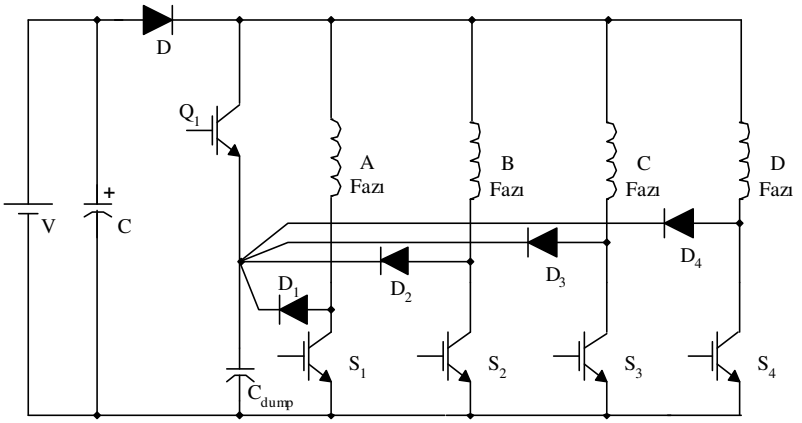
Şekil 2.13'de C-dump dönüştürücü devresi görülmektedir. Depolanmış enerjiyi boşaltmak için bir kapasitör bağlanmıştır. Ortalama kondansatör gerili, komütasyondan sonra hızlı boşalmaya (dev-fluxing) izin vermek için kaynak gerilinden yüksek tutulur. Bu devrenin verimi yüksektir. Ancak, ilave elemanlar gerektirir ve denetimi karmaşıktır. Enerji deşarj devresindeki bir denetim hatası boşaltma kondansatöründe hızlı bir şarj oluşumuna yol açmakta ve eğer koruyucu tedbirler alınmaz ise bütün dönüştürücü elemanları yüksek gerilimden dolayı bozulabilmektedir. Bu nedenle kullanılan elemanların gerilimi değerlerinin klasik köprü tipi dönüştürücü devresinde kullanılan elamanlara oranla iki kat daha yüksek değerli seçilmesi gerekmektedir.



Şekil 2.13. Temel C-dump dönüştürücü devresi

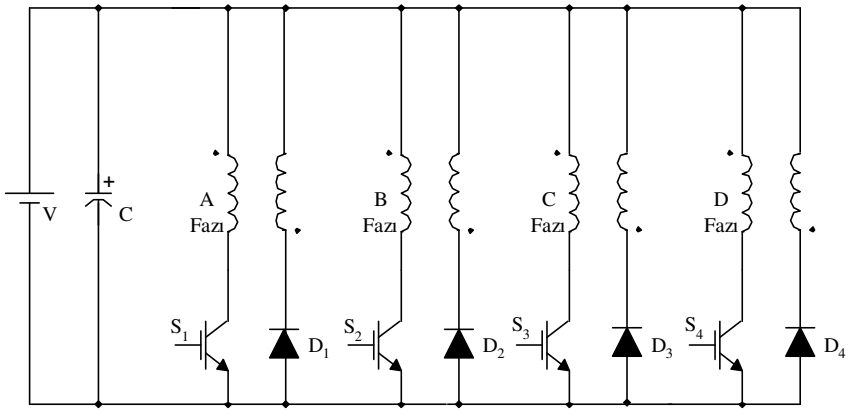
Eğer motor faz sayısı 3'ten fazlaysa her faz için eleman sayısında önemli azalma sağlanmaktadır. Şekil 2.14'de düzenlenmiş C-dump dönüştürücü devresi görülmektedir. Bu devrede C-dump devresindeki L bobini kaldırılmıştır. C-dump dönüştürücü devresi ile aradaki diğer fark ise, faz sargısında depo edilen enerjinin bir sonra iletime geçirilecek olan faz sargısına aktarılmasıdır. Bu dönüştürücüde komütasyon anında faz sargılarındaki gerilimin değeri kondansatör gerilimi ile kaynak gerilimi arasındaki fark olduğundan kondansatör gerilim değeri, hızlı boşalma anında ani olarak yükselmektedir. Bu durumda kullanılan kondansatör, anahtar ve diyot değerlerinin uygun değerde, diğer bir ifadeyle klasik dönüştürücü devresinde kullanılan değerlere oranla iki kat yüksek değerde seçilmesi gereklidir.

Bu dönüştürücü yapısı ile C-dump dönüştürücü devresinde kullanılan bobinin kaldırılması dönüştürücü maliyetini azaltıyor gibi görünse de, kullanılan elemanların değerleri dolayısıyla maliyeti artacağından gerçekte pek fazla bir maliyet üstünlüğü ortaya çıkmamaktadır. Dolayısı ile bu dönüştürücüler sadece düşük gerilim uygulamaları için uygun olabilen dönüştürücülerdir.



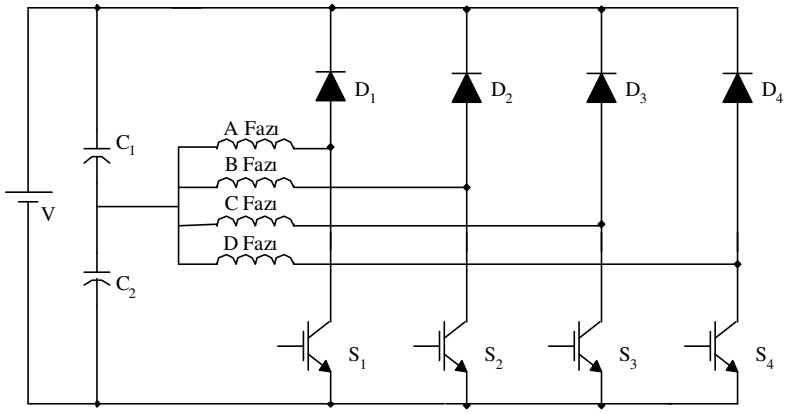
Şekil 2.14. Düzenlenmiş C-dump dönüştürücü devresi

Tek kutuplu sürme devresi kullanmanın bütün avantajlarından faydalanmak için anahtar sayısını faz sayısına indirmeye yönelik başka devreler de geliştirilmiştir. Şekil 2.15'daki bifilar sargı bağlantı sayısını ikiye katlamakta ve bakırın verimsiz kullanımına yol açmaktadır. Faz sargılar arasındaki eşit olmayan etkileşimden doğan gerilim sıçramaları (spike) sebebiyle problemler çıkabilmektedir.



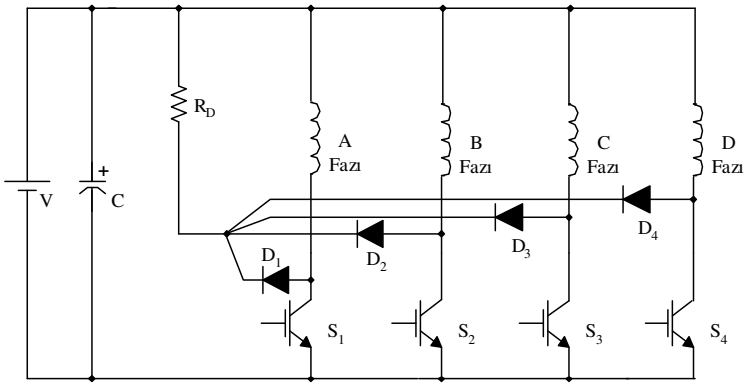
Şekil 2.15. Bifilar sargılı dönüştürücü devresi

Şekil 2.16'deki split DA link devresi Tasc Drives Ltd. tarafından 4-8 kW sürücü aralığında GTO kullanılarak başarı ile gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, eleman sayısı faz başına bir elemana indirildiğinde fazladan pasif elemanlar gerekmekte veya denetim sınırlamalarından dolayı bazı problemler ortaya çıkmaktadır (20).



Şekil 2.16. Split DA link dönüştürücü devresi

Şekil 2.17'de dönüştürücü düzenekleri içerisinde en ekonomik olanı söndürme dirençli dönüştürücü devresidir (supression resistor circuit). Bu devre düşük performanslı düşük maliyet istenilen uygulamalar için iyi bir seçenek olup denetimi basittir. Dönüştürücü her bir faz için bir diyot ve bir anahtar gerektirir. Depolanan enerji serbest dönüşüm esnasında R_D direnci üzerinde harcanır. R_D direncinin değerinin tespiti önemlidir. Direncin küçük değerli olması durumunda; hız yüksek iken kuyruk akımının (tail current) uzun olmasına dolayısıyla bozucu moment üretimine sebep olur böylece verim de düşer Direncin büyük değerli seçilmesi durumunda ise; komütasyondaki faza bağlı anahtarda yarı iletken elemanlar için tehlike olan büyük değerli gerilim sıçramaları oluşur .



Şekil 2.17. Söndürme dirençli dönüştürücü devresi

2.8. ARM'nin Endüstrideki Uygulamaları

ARM'nin endüstrideki bazı uygulamaları ve kullanılan motor tipleri aşağıda verilmiştir (26).

Düşük güçlü uygulamalar

- Hewlett-Packard firması, 8/6kutup oranında, 0,1275 N-m tork, 4000 d/dk hız ve 53W gücünde bir ARM'yi çizim makinesinde kullanmıştır.
- A.O.Smith firması, büyük marketler için, el kurutma cihazında, 0,5 HP güce sahip bir ARM kullanmıştır.
- Radio Energie firması, el forklift cihazında 1,8 KW gücünde ve 1500 d/dk hıza sahip bir ARM kullanmıştır.
- Besam firması, otomatik kapı sistemlerinde 3 fazlı 12/8 kutuplu, 5 N-m tork üreten, 300 d/dk hıza sahip bir ARM kullanmıştır.
- Çamaşır makinesi, elektrik süpürgesi gibi ev cihazlarında iki firma ekonomikliği yüzünden ARM kullanmaya başlamışlardır.

Orta güçlü uygulamalar

- Endüstriyel amaçlı pek çok uygulamada 140 HP ve üzeri güçte ARM'ler kullanmaktadırlar.

- Normalair Garrett firması, trenlerde havalandırma sistemleri için 40 KW gücünde 30.000 d/dk hıza sahip, 3 fazlı, 6/4 kutuplu ARM kullanmaktadır.
- British Jeffrey Diamond firması, madencilik endüstrisinde 150 ve 300 KW lık 1500 d/dk hıza sahip 3 fazlı 12/8 kutuplu ARM kullanmaktadırlar.

Yüksek güçlü ve yüksek hızlı uygulamalar

- 1000 HP gücünde ARM'ler pompa ve havalandırma sistemlerinde kullanılma çalışmaları vardır ama endüstriye aktarılmamıştır.
- CompAir BroowWade firması, vidalama kompresörü olarak 2 fazlı 8/4 kutup oranında 75 kW gücünde ve 4500 d/dk hıza sahip ARM kullanmaktadır.
- Beckman Instruments firması, tıp uygulamaları için pompalama sistemlerinde kullanılmak üzere 3 fazlı, 6/4 kutuplu, 2,5 KW ve 30000 hıza sahip ARM kullanmıştır.
- Uzay uygulamalarında jet motorunu ateşlemek üzere başlangıç motoru olarak ARM ler kullanılmaktadır. Bunun için hız oranı 27000 d/dk ile 50000 d/dk arasında hızlara sahip ARM ler kullanılmaktadır.

3. YAPAY SİNİR AĞLARI

Yapay sinir ağları (YSA), insan beynin fizyolojisinden esinlenerek geliştirilmiş bilgisayar programlarıdır. Programcının geleneksel yeteneklerini gerektirmeyen ve kendi kendine öğrenme düzenekleri olan YSA, öğrenmenin yanı sıra, ezberleme ve bilgiler arasında ilişkiler oluşturma yeteneğine de sahiptir. Bir sinir ağının en temel bileşeninin beyinin fizyolojik yapısından esinlenerek geliştirilmelerine karşın, tüm özellikleri beyinle aynı değildir. Bazı özelliklerinin ise beyinde biyolojik karşılığı yoktur.

YSA genel olarak model seçimi ve sınıflandırılması, işlev tahmini, en uygun değeri bulma ve veri sınıflandırılması gibi işlerde başarılıdır. Geleneksel bilgisayarlar ise özellikle model seçme işinde verimsizdir ve sadece algoritmaya dayalı hesaplama işlemleri ile kesin aritmetik işlemlerde hızlıdırlar (15).

Bağlantı ağırlıkları öğrenme algoritmalarıyla belirlenmektedir. Öğrenme algoritmalarında genel olarak geri yayılmalı öğrenme ve çabuk yayılmalı veya esnek yayılmalı öğrenme kullanılmaktadır (27).

YSA üzerine ilk çalışma 1943 yılında, Arren McCulloch ile Walter Pitts (28) tarafından gerçekleştirilmiştir. McCulloch ve Pitts, insan beyninin hesaplama yeteneğinden esinlenerek, mantık devreleriyle basit bir sinir ağını modellemişlerdir. Bu modelde bir düğümdeki işlem elemanı diğer düğümlerden aldığı giriş değerlerinin toplamını hesaplayarak belirlenen eşik değerle karşılaştırmaktadır (29). Eğer sonuç eşik değerden küçükse 0, büyükse 1 çıkışını üretmektedir. Böylece bu düğümler kullanılarak her türlü klasik mantık fonksiyonunun çözülebileceği ileri sürülmüştür.

1948 yılında Wiener sinirlerin çalışması ve davranış özelliklerine değindiği "Cybernetics" isimli bir kitap yayınladı. 1949 da Hebb (30) "Organization of Behavior" isimli kitabında, öğrenme ile ilgili temel teoriyi ele aldı. Hebb'in

yayınladığı kitapta öğrenebilen ve uyum sağlayabilen sinir ağları modeli için temel oluşturacak Hebb Kuralı'nı ortaya koymuştur.

Yapay sinir ağlarının ilk bilgisayar benzetimi 1956 yılında Rochester tarafından sunulmuştur (31). Frank Rosentblatt'ın (32) 1957 yılında Perceptron'u gerçekleştirmesinden sonra YSA alanındaki gelişmeler hızlanmıştır. Perceptron, beyin işlevlerini modelleyebilmek amacıyla yapılan çalışmalar neticesinde ortaya çıkan tek katmanlı eğitilebilen ve tek çıkışa sahip olan YSA'dır (33).

1959 yılında, Bernand Widrow ve Marcian Hoff (34) geliştirdikleri ağ model, telefon hatlarında oluşan yankıları yok eden bir uyarlanabilir süzgeç olarak kullanılmış, gerçek dünya sorunlarına uygulanmış olan ilk sinir ağıdır ve hala kullanımda bulunmaktadır (35).

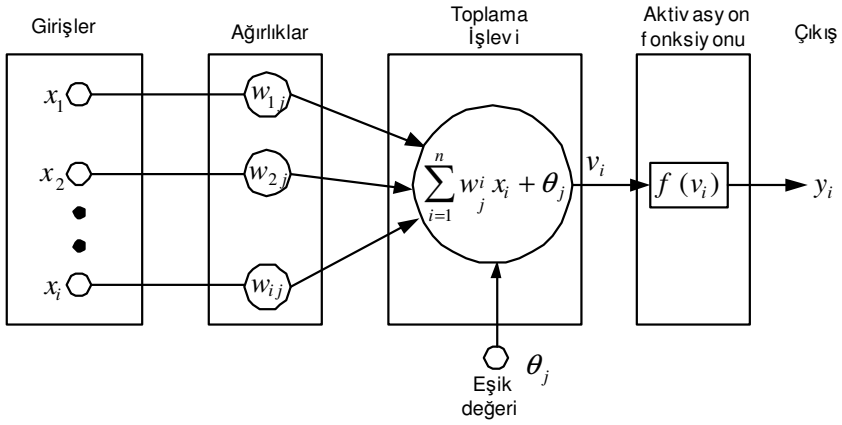
1969 yılında Minsky ve Papert (36) Perceptron'un XOR problemini çözemediğini ispatlamışlardır ve iki katmanlı ileri beslemeli ağların kullanılabileceğini ileri sürmüşlerdir. Fakat gizli katmanların ağırlıklarının nasıl değiştirileceği konusunda bir yöntem önerememişlerdir. Bu soruna Rumelhart (37) ve arkadaşları geri yayılımlı YSA yöntemi ile bir çözüm getirmişlerdir.

1970'li yıllarda yapay sinir ağları hakkında Grossberg ve Kohonen önemli ilerlemeler kaydettiler. Grossberg (38) biyolojik sinir sistemlerinin temel prensiplerinden yararlanarak kendine ait uyarlanabilir rezonans teorisini (ART) geliştirmiştir ve ağın dinamik yapısıyla birinci dereceden diferansiyel denklemleri modellemiştir.

Werbos (39) 1970 yılında geri yayılımlı YSA algoritmasını gelişmiştir. Onun ilk uygulaması dinamik model tahmini olmuştur. 1980' li yılların başında Hopfield geriye yayılımlı ağların eğitmeleri için Hopfield modelini ortaya koymuştur (40,41). Sonraları Kosko, Hopfield ve Grosbeerg'e ait fikirlerinin bazılarından yararlanarak uyarlanabilir iki yönlü ilişkili hafıza (BAM) modeli gelişmiştir (42). Diğer önemli modeller daha sonraki yıllarda bulunmuştur.

YSA, birbirine bağlı çok sayıda işlem elemanlarından oluşmuş, genellikle paralel işleyen yapılar olarak adlandırılabilir. YSA'daki işlem elemanları (düğümler) basit sinirler olarak adlandırılır. Bir YSA, birbirleriyle bağlantılı, çok sayıda düğümlerinden oluşur. YSA, insan beyni gibi, öğrenme hatırlama ve genelleme yeteneği ne sahiptirler (33).

YSA'lar insan beyninin modellenmesine dayanır ve herbiri ağırlık bağlantıları ile birbirine bağlı çok sayıda yapay sinir hücresine sahiptir. Şekil 3.1'de bir yapay sinir görülmektedir.



Şekil 3.1. Yapay bir sinir (düğüm)

Girişler $(x_1, x_2, ..., x_i)$ önceki sinirlerden veya dış dünyadan aldığı bilgiyi sinire getirir. Bir sinir genellikle gelişi güzel bir çok girdileri alır. Ağırlıklar $(w_{1j}, w_{2j}, ..., w_{i1}, w_{i2}, ...w_{ij})$ yapay sinir tarafından alınan girişlerin sinir üzerindeki etkisini belirleyen uygun katsayılardır. Her bir giriş kendine ait bir ağırlığa sahiptir. Bir ağırlığın değerinin büyük olması, o girişin yapay sinire güçlü bağlanması ya da önemli olması, küçük olması zayıf bağlanması ya da önemli olmaması anlamına gelmektedir. Toplama işlevi v_i, sinirde her bir girişin kendi ağırlıkları ile çarpımının toplamlarını eşik θ_j değeri ile toplayarak etkinlik işlevine gönderir.

Toplama işlevinin sonucu, etkinlik işlevinden geçirilip çıkışa iletilir. Etkinlik işlevinin kullanım amacı, zaman söz konusu olduğunda toplama işlevinin çıkışının değişmesine izin vermektir.

3.1. YSA' ların Üstünlükleri

YSA'nın klasik sistemlere göre üstünlükleri aşağıda açıklanmıştır (43).

- Doğrusal olmama: YSA bu özeliğinden dolayı doğadaki hemen hemen her probleme uygulanabilmesini sağlamaktadır.
- Öğrenme: YSA'larını diğer yaklaşımlardan ayıran temel bir özelliktir. YSA'ları bir problemi öğrenebilmesi için problemin giriş ve çıkış verilerine karşılık gelen çıkış verilerinin veya sadece verilerinin sağlanması gerekir.
- Genelleme yapma: Eğitim sürecinin ardından YSA eğitim kümesi dışındaki veriler için de çıkışlar üretir. YSA'nın ürettiği çıkışların kabul edilebilir düzeyde olup olmadığı, test verilerinin bilinen sistem çıkışı ile YSA'nın çıkış değerleri karşılaştırılarak yapılabilir. Bu uygulama genellemenin testi olarak bilinir.
- Adaptasyon: YSA tanımı yada parametreleri değişen probleme veya sisteme uygun çözümler sağlamak için tekrar tekrar eğitilebilir. Eğitim gerçek zamanda gerçekleştirilir.
- Veri İşleme: Biyolojik sistemlerde veri dağınık yapıda saklanır. YSA'da ise, ağırlıklar üzerine paralel olarak dağıtılmış şekilde temsil edilmekte, korunmakta ve işlenmektedir. Ağırlıklar herhangi bir anda YSA'nın problemle ilgili olarak sahip olduğu bilgiyi ifade eder.
- Hataya ve gürültüye karşı duyarlılık ve tolerans: YSA'nın genelleme yeteneği gerçekleştirilen testlerle sınanır. Genelleme, yeterli seviyede ise giriş vektörünü tanımlayan parametrelerden bazılarının verilmemesi veya sağlanmaması durumunda yada ağırlıklarından bazılarının bozulmaması veya kullanılamaz duruma gelmesi halinde de giriş vektörünü karşılayan çıkış verilerinin YSA tarafından kabul edilebilir doğrulukta üretebilmesidir.

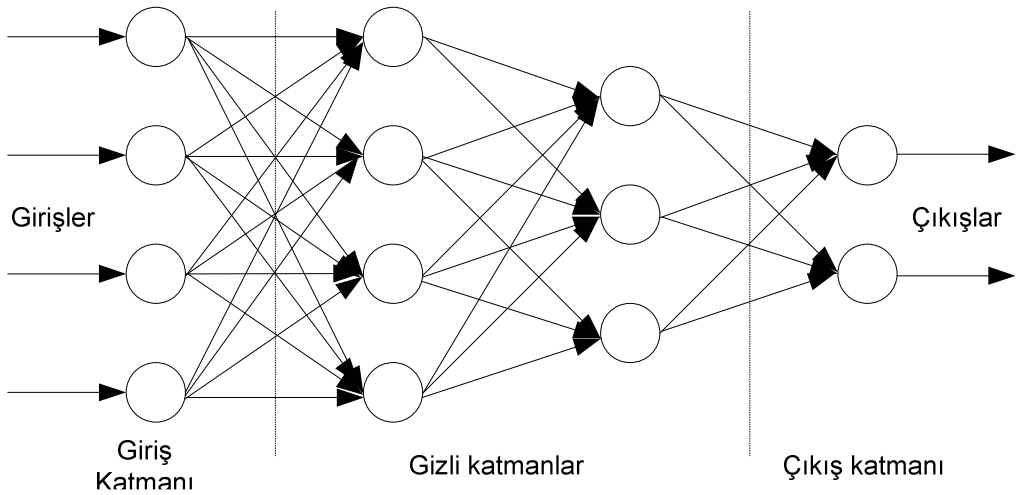
- Donanım: YSA'lar paralel yapısı nedeniyle büyük ölçekli entegre devre (VLSI) teknolojisi ile gerçeklenebilir. Bu özellik, YSA'nın hızlı bilgi işleme yeteneğini ve örnek tanıma, işaret işleme, sistem kimliklendirme ve denetim gibi gerçek zaman uygulamalarında kullanımı artırır.

3.2. Yapay Sinir Ağının Oluşumu

YSA, sinir olarak adlandırılan çok sayıdaki işlem elemanının bir araya gelmesinden oluşur. Frank Rosentblatt'ın 1958 yılında öğrenme yeteneğine sahip olan bir örnek tanıma aygıtını ortaya çıkarmış olduğundan bu yana, hiyerarşik sinir ağı en çok üzerinde çalışılmış olan bir ağ yapısı olmuştur. Bu sinir ağı, düğümlerin sıralı bir şekilde art arda bağlanmasından oluşur.Bu ağların özelliği sahip oldukları basit dinamikleridir. Giriş katmanına bir işaret gittiğinde, bu işaret sinirler arasındaki bağlantılar yoluyla diğer katmana iletilir. Giriş katmanının düğümleri tarafından diğer katmana iletilmeden önce bu işaret üzerinde basit bir işlem yerine getirilir. Bu süreç son katman olan çıkış katmanına erişinceye kadar tekrar edilir. Verilen bilgiyi alan ilk katmandaki giriş ağ içinde ileriye doğru yayılır. Her bir katmandaki düğümlere sadece önceki katmandaki düğümlerden gelen girişlere izin verilir. Bir düğüm kendinden sonraki her hangi bir düğüme bağlanabilirken kendisine asla bağlanmaz. Son katmana ulaşan bilgiler ağın çıkışıdır.

Geri beslemeli ve tekrarlanan ağlarda en azından bir düğümün geriye yayıldığı bir dönüş bağlantısı vardır. Tekrarlanan ağlar da tamamen veya parçalı olarak geri besleme yollarına sahiptirler. Bu tür ağların tasarımları ve davranışları oldukça karmaşıktır (33).

Gizli katmanları olmayan, sadece giriş ve çıkış katmanı olan ağlar, karmaşık işlevleri hesaplama yeteneğinden yoksundur. Bu nedenle karmaşık hesaplamalar için oluşturulan ağlarda en az bir ara katman olmalıdır. Burada her bir sinir doğrusal olmayan bir etkinlik işlevini hesaplayabilmektedir. Şekil 3.2'de iki gizli katmana sahip dört katmanlı bir YSA görülmektedir.



Şekil 3.2. Dört katmanlı bir YSA

Bu ağda bir katmandaki her sinir, bir sonraki katmanın bütün sinirleri ile bağlantılıdır. Aynı katmandaki sinirler arasında veya geri-besleme şeklinde bağlantıları yoktur.

Giriş katmanından alınan bilgiler, giriş katmanı ve gizli katman arasında bulunan bağlantı ağırlıkları ile çarpılıp gizli katmana iletilmektedir. Gizli katmandaki sinirlere gelen girişler toplanarak bir etkinlik işlevinden geçirilip gizli katman ile çıkış katmanı arasındaki bağlantı ağırlıkları ile çarpılarak çıkış katmanına iletilir. Çıkış katmanındaki sinirler de kendisine gelen bu girişleri toplayarak buna uygun bir çıkış üretirler. Burada giriş katmanından çıkış katmanına doğru, gizli katmanlar üzerinden tek yönlü bir iletişim vardır.

3.3. YSA'larda Öğrenme

Sinir ağlarında istenen sonucun elde edilmesi için ağın uyarlanabilir olması gerekir. Bunu sağlamak için uygun değerli ağırlıklar ve doğru bağlantılar seçilmelidir. Ağ bu şartları karşılayabilmek için sistemin davranışlarını öğrenmeli ya da kendi kendini örgütlemelidir. Öğrenme kalıcı yenilenmeler için gözlemleme veya eğitim faaliyetlerinden çıkan sonuçlar olarak tanımlanabilir. Öğrenme yapay sinir ağının ayrılmaz bir parçasıdır. Öğrenme; giriş değerlerine veya bu girişlerin çıkışlarına bağlı

olarak ağın bağlantı ağırlıklarını değiştiren veya ayarlayan öğrenme kuralı ile gerçekleştirilir.

YSA'da bilgi, ağdaki düğümleri birbirine bağlayan bağlantıların ağrılıklarında depolanır. Bir ağda öğrenme, istenen bir işlevi yerine getirecek şekilde ağırlıkların ayarlanması sürecidir. YSA'da öğrenme, ağırlıkların değiştirilmesi ile gerçekleşmektedir. Buna göre sinirler arası bağlantılar üzerindeki ağırlıkların, belirli bir yöntem (öğrenme kuralları) uyarınca dinamik olarak değiştirilebilen ağlar eğitilebilir. Eğitilebilen ağlar, yeni şekilleri tanıyabilir veya verilen bir girişin hangi sınıfa ait olduğuna karar verebilir.

3.4. Öğrenme Oranının Ağ Üzerindeki Etkisi

Öğrenme oranı ağ performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Küçük öğrenme oranı değerlerleri için eğitme işlemi uzun zaman alırken bu değerin büyütülmesi ile eğitme işlemi daha kısa zamanda gerçekleşmektedir. Öğrenme oranının arttırılması durumunda öğrenme için gerekli adım sayısında azalma meydana gelmektedir. Öğrenme oranının arttırılması ağın toplam hatası üzerinde bir iyileştirme meydana getirmektedir. Fakat öğrenme oranına çok büyük değerlerin verilmesi durumunda pek bir yakınsama olayı meydana gelmemektedir.

3.5. Momentum Teriminin Ağ Üzerindeki Etkisi

Hesaplamalara momentum teriminin ilave edilmesi ağ performansı üzerinde etkili olduğu gözlenmiştir. Momentum teriminin hesaplamaya katılması adım sayısında ve toplam ağ hatasında bir düşüş meydana getirmektedir. Momentum katsayısı yüksek alındığında ağdaki toplam hatanın sıfıra doğru daha fazla bir eğilimle yaklaştığı görülmektedir.

3.6. Gizli Katman Sinir Sayısının Ağ Üzerindeki Etkisi

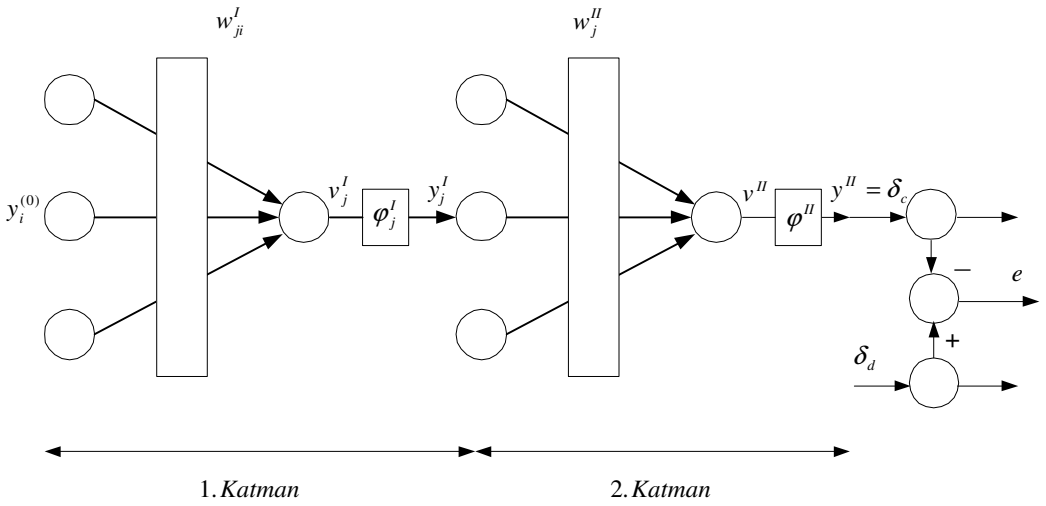
Gizli katmandaki sinir sayılarının arttırılması simülasyon sırasında hem hafıza hem de CPU'nun yükünü artırmaktadır. Fakat öğrenme işlemi daha hassas tamamlanmaktadır. Gizli katman sinir sayısının az miktarda alınması ağın hatırlama yeteneğini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu yüzden bu çalışmada ara katman sinir sayısı, giriş katmanındaki ve çıkış katmanındaki sinir sayıları da gözetilerek deneme yanılma yöntemi ile belirlenmiştir.

3.7. Hata Farkı Değişkeninin Ağ Üzerindeki Etkisi

Hata farkı değişken değeri ya da tolerans, sonuçta istenilen toplam çıkış hatasındaki hassasiyetle ilgilidir. Küçük tolerans değerleri ağdaki toplam çıkış hatasını daha fazla sıfıra doğru yaklaştırarak bağlantı ağırlıklarındaki hassasiyeti de aynı oranda artırmaktadır. Aynı zamanda tolerans değerinin küçülmesi eğitim süresini ve adım sayısını arttırmaktadır.

3.8. Danışmanlı Geri Yayılımlı Bir YSA Modeli

Geri yayılım tekniği, sinir ağlarının ağırlıklarının ayarlanmasında çok güçlü bir metottur. Şekil 3.3'de tek çıkışlı iki-katmanlı geri yayılımlı bir YSA modeli görülmektedir. Tek çıkışlı iki katmanlı sinir ağlarındaki ağırlıkların aşağıdaki eşitliklere göre her adımında güncelleştirilir (15).



Şekil 3.3. Tek çıkışlı iki-katmanlı geri yayılmalı YSA

I. katmandaki ağırlık değerinin bulunması Eş. 3.1'de verilmiştir.

$$w_{ji}^{I}(k) = w_{ji}^{I}(k-1) + \Delta w_{ji}^{I}(k) \qquad [3.1]$$

II. katmandaki ağırlık değerinin bulunması Eş. 3.2'de verilmiştir.

$$w_{j}^{II}(k) = w_{j}^{II}(k-1) + \Delta w_{j}^{II}(k) \qquad [3.2]$$

Eş. 3.1 ve Eş. 3.2'deki $\Delta w_{ji}^{I}(k)$ ve $\Delta w_{j}^{II}(k)$ ağırlık değişimlerinin bulunması için gerekli hesaplamalar aşağıdaki gibi gerçekleştirilir.

Hata $e = e(+)$ istenen çıkış değeri $\delta_d = \delta_d(t)$ ile gerçek çıkış değeri $\delta_c = \delta_c(t)$ arasındaki farktır. Buradan hata Eş. 3.3'de olduğu gibi hesaplanır.

$$e(t) = \delta_d(t) - \delta_c(t) \qquad [3.3]$$

Performans veya performans indeksi (E), hatanın (e) karesinin yarısı olarak Eş.3.4'de ki gibi ifade edilir.

$$E = \frac{1}{2}e^2 = \frac{1}{2}(\delta_d - \delta_c)^2 \qquad [3.4]$$

Hatanın geriye yayılım algoritmasında, performans indeksinin (E) minimize edilmesine çalışılır. Şekil 3.3' da iki-katmanlı sinir ağının genel gösterimi verilmektedir. $y^{II} = \delta_c$ ifadesi ikinci katmanın çıkışıdır yani sinir ağının çıkışıdır. y_j^I ise birinci katmandaki sinirin çıkışıdır. Bu çıkış ikinci katmanın girişidir. Çıkış katmanından itibaren performans indeksini Eş. 3.5' deki ifade edilir.

$$\frac{\partial E}{\partial w_j^{II}} = \frac{\partial E}{\partial e}\frac{\partial e}{\partial y^{II}}\frac{\partial y^{II}}{\partial v^{II}}\frac{\partial v^{II}}{\partial w_j^{II}} \qquad [3.5]$$

$y_j^I = \dfrac{\partial v^{II}}{\partial w_j^{II}}$ ifadesi Eş. 3.5'de yerine konularak Eş. 3.6 elde edilir.

$$\frac{\partial E}{\partial w_j^{II}} = \frac{\partial E}{\partial e}\frac{\partial e}{\partial y^{II}}\frac{\partial y^{II}}{\partial v^{u}}.y_j^I \qquad [3.6]$$

Eş. 3.6'nın sağ tarafındaki türevli kısmı δ^{II} gibi bir değişkenle ifade edilirse Eş. 3.7 elde edilir.

$$\delta^{II} = \frac{\partial E}{\partial e}\frac{\partial e}{\partial y^{II}}\frac{\partial y^{II}}{\partial v^{II}} \qquad [3.7]$$

Buradan Eş. 3.6 yeniden düzenlenirse Eş. 3.8 elde edilir.

$$\frac{\partial E}{\partial w_j^{II}} = \delta^{II} y_j^I \qquad [3.8]$$

Eş. 3.7'deki her bir türevin bileşeninin açılımı aşağıdaki gibi yapılır. Eş. 3.9 performans indeksi ile hata arasındaki türevin sonucudur.

$$\frac{\partial E}{\partial e} = e \qquad [3.9]$$

Eş. 3.10'da hata ile II. katmanın çıkışı (ağın gerçek çıkışı) arasındaki türevin sonucu verilmiştir.

$$\frac{\partial e}{\partial y^{II}} = -1 \qquad [3.10]$$

Elde edilen bu değerler Eş. 3.7' de yerine konulursa Eş. 3.11 elde edilir.

$$\delta^{II} = -e\varphi^{'II}(v^{II}) \qquad [3.11]$$

$$\varphi^{'II}(v^{II}) = \frac{\partial y^{II}}{\partial v^{II}} \qquad [3.12]$$

II. katmanın ağırlık değişimi (Δw_j^{II}), öğrenme katsayısı (λ^{II}) ile orantılıdır.

$$\Delta w_j^{II}(k) = \lambda^{II} \frac{\partial E}{\partial w_j^{II}}(k) \qquad [3.13]$$

$$\Delta w_j^{II}(k) = \lambda^{II} \delta^{II}(k) y_j^{I}(k) \qquad [3.14]$$

Eş. 3.14'de elde edilen ağırlık değişimi Eş. 3.2'de yerine konularak II. Katmanın ağırlık değerleri yenilenir.

II. katman için yapılan tüm ağırlık ayarlanmaları I. Katman içinde yapılacaktır.

$$\frac{\partial E}{\partial w_{ji}^{I}} = \frac{\partial E}{\partial y_{j}^{I}} \frac{\partial y_{j}^{I}}{\partial v_{j}^{I}} \frac{\partial v_{j}^{I}}{\partial w_{ji}^{I}} \qquad [3.15]$$

Eş. 3.15'in en sağ tarafındaki türevli kısım (p_i) gibi bir değişkenle ifade edilirse Eş.3.16 elde edilir.

$$p_i = \frac{\partial v_{j}^{I}}{\partial w_{ji}^{I}} \qquad [3.16]$$

Eş. 3.16, Eş. 3.15'de yerine konulursa Eş. 3.17 elde edilir.

$$\frac{\partial E}{\partial w_{ji}^{I}} = \frac{\partial E}{\partial y_{j}^{I}} \frac{\partial y_{j}^{I}}{\partial v_{j}^{I}} p_i \qquad [3.17]$$

Eş. 3.17' ün sağ tarafındaki türevli kısımlar (δ_j^I) gibi bir değişkenle ifade edilirse Eş. 3.18 elde edilir.

$$\delta_j^I = \frac{\partial E}{\partial y_{j}^{I}} \frac{\partial y_{j}^{I}}{\partial v_{j}^{I}} \qquad [3.18]$$

Eş. 3.18 tekrar yazılacak olursa Eş. 3.19 elde edilir.

$$\frac{\partial E}{\partial w_{ji}^{I}} = \delta_j^I p_i \qquad [3.19]$$

I. katman içinde delta kuralı (Δ) uygulanırsa ağırlık değişim değerleri,

$$\Delta w_{ji}^{I} = \lambda^I \frac{\partial E}{\partial w_{ji}^{I}} \qquad [3.20]$$

veya

$$\Delta w_{ji}^{I} = \lambda^{I} \delta_{j}^{I} p_{i} \qquad [3.21]$$

Eş. 3.21, Eş 3.14'de olduğu II. Katman için yapılan ağırlık ayarlamasına benzerdir. Burada λ^{I} değişkeni I. katman için kullanılan öğrenme sabitidir. Eş. 3.22'deki türevli kısım δ_{j}^{I} gibi bir değişkenle gösterilirse,

$$\delta_{j}^{I} = \frac{\partial E}{\partial y_{j}^{I}} \frac{\partial y_{j}^{I}}{\partial v_{j}^{\iota}} = \left[\delta^{II} \;\; w_{j}^{II}\right]\left[\varphi^{'I} \;\; (v_{j}^{I})\right] \qquad [3.22]$$

Burada Eş. 3.22'in sağ tarafındaki ifadeler Eş. 3.23 ve Eş. 3.24'de verilmiştir.

$$\frac{\partial y_{j}^{I}}{\partial v_{j}^{I}} = \varphi^{'I}(v_{j}^{I}) \qquad [3.23]$$

$$\frac{\partial E}{\partial y_{j}^{I}} = \delta^{II} w_{j}^{II} \qquad [3.24]$$

$$\frac{\partial E}{\partial y_{j}^{I}} = \frac{\partial E}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial y^{II}} \frac{\partial y^{II}}{\partial v^{II}} \frac{\partial v^{II}}{\partial y_{j}^{I}} = \delta^{II} w_{j}^{II} \qquad [3.25]$$

Burada Eş. 3.25'in sağ tarafındaki ifadeler Eş. 3.26 ve Eş. 3.27'de verilmiştir

$$\delta^{II} = \frac{\partial E}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial y^{II}} \frac{\partial y^{II}}{\partial v^{II}} \qquad [3.26]$$

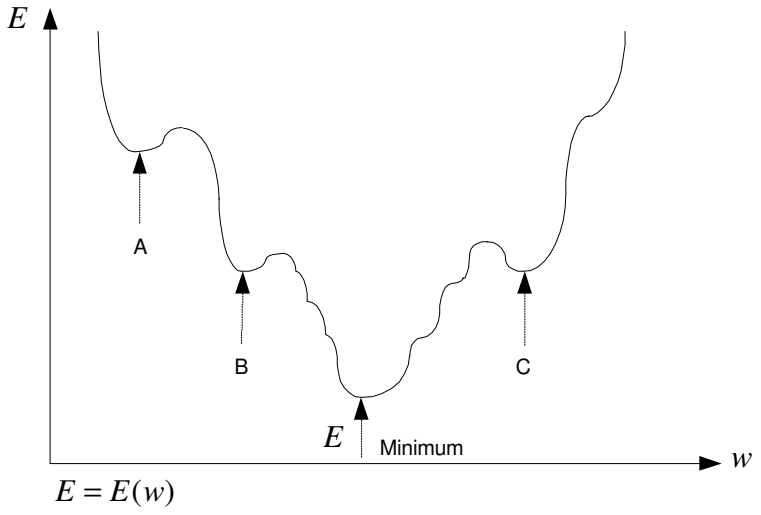
$$w_{j}^{II} = \frac{\partial v^{II}}{\partial y_{j}^{I}} \qquad [3.27]$$

Her bir katmandaki λ^I ve λ^{II} öğrenme katsayıları değişkendir. Ayrıca yerel minimum noktasını yakalamak içinde momentum katsayısı μ değişkeni kullanılır. Bu değişken $0 < \mu < 1$ aralığında seçilmelidir. Her bir katmanın ağırlık ayarlamaları için momentum katsayısı Eş. 3.28 ve Eş 3.29'daki gibi kullanılır.

$$w_{ji}^{I}(k+1) = w_{ji}^{I}(k) + \mu^{I}\left[w_{ji}^{I}(k) - w_{ji}^{I}(k-1)\right] \qquad [3.28]$$

$$w_{j}^{II}(k+1) = w_{j}^{II}(k) + \mu^{II}\left[w_{j}^{II}(k) - w_{j}^{II}(k-1)\right] \qquad [3.29]$$

Ağırlık vektörü ile performans indeksi arasındaki değişim Şekil 3.4'de gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi değişik yerel minimum noktalar (A, B, C) vardır. Öğrenme ve momentum katsayıları öyle ayarlanmalıdır ki gerçek minimum noktası elde edilebilsin.



Şekil 3.4. Yerel minimum noktası

4. SİSTEMİN MODELLENMESİ

4.1. Faz Endüktansının Ölçümü

ARM'nin torku, manyetik akıya bağlı olarak değişmektedir. Manyetik akı ise rotor pozisyonu ve akım genliğinin doğrusal olmayan bir fonksiyonudur. ARM'lerin en önemli karakteristik özelliği, faz akımı ve rotor pozisyonuna bağlı olarak manyetik devresinin doğrusal olmayan yapıda olmasıdır (14). Bu yüzden manyetik akının gerçeğe en yakın şekilde modellenmesi, motorun tork tahmininde daha gerçekci olacaktır.

Ani rotor konumunda manyetik akı ile akım arasındaki ilişki, manyetik doyma olmayan bir motorda doğrusal olur ve eğimi de endüktansı verir. Böylece manyetik akı;

$$\psi = L.i \qquad [4.1]$$

olur. Burada L, herhangi bir rotor konumunda faz endüktansıdır. Bu nedenle manyetik akının modellenmesinde endüktans dalga formunun matematik denkleminin belirlenmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada, deneysel olarak faz endüktansının belirlenmesinde faz empedansının ölçümüne dayalı bir ölçme metodu kullanılmıştır (19). Bütün ölçümler 8 stator kutbu ve 6 rotor kutbuna sahip olan motor üzerinde yapılmıştır.Deneysel ölçüm metodu kullanılırken ampermetre ve voltmetre ile sargı akım ve gerilimleri her bir 3 derecelik rotor pozisyonunda ölçülerek sargı empedansı hesaplanmaktadır. Sargı akımını sabit tutmak için 50 Hz frekanslı ayarlı bir AA kaynak kullanılmıştır.

ARM'de dört fazda simetrik olduğundan sadece bir faz için ölçümler alınmıştır. Deneyden alınan değerler Çizelge 4.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Deneyden alınan gerilim değerleri (V)

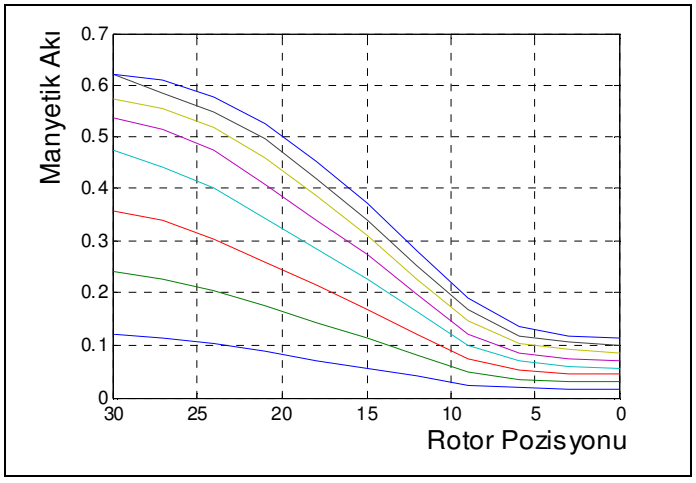
		Akım (Amper)							
		1 A	**2 A**	**3 A**	**4 A**	**5 A**	**6 A**	**7 A**	**8 A**
Açı (Derece)	**0°**	38,2	75,78	112,47	148,6	168	179,4	187,7	195
	3°	35,9	71,17	106,05	139,2	162	174,7	184,1	191,3
	6°	32,37	64,6	96	125,7	148,5	162,7	173,1	181,5
	9°	27,85	55,1	82,12	108,5	129	144,4	156	166
	12°	22,45	44,88	67,2	89,5	107,7	121,8	132,5	142,8
	15°	18,01	35,92	53,67	71,2	84,6	97,5	107,8	116,9
	18°	12,94	25,79	35,58	51,4	62,8	72,1	80,5	89,1
	21°	7,88	15,73	23,6	31,3	39,1	46,4	53,7	60,7
	24°	5,45	10,89	16,3	21,72	27,15	32,55	37,9	43,32
	27°	4,85	9,69	14,54	19,38	24,2	29	33,8	38,4
	30°	4,64	9,28	13,92	18,55	23,16	27,78	32,4	37

Deney sonuçlarından alınan değerler yardımıyla her akım ve rotor pozisyonunda manyetik akı değerleri bulunmuştur ve Çizelge 4.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Deneyden ölçülen değerlerden hesaplanan manyetik akı değerleri

		Akım (Amper)							
		1 A	**2 A**	**3 A**	**4 A**	**5 A**	**6 A**	**7 A**	**8 A**
Açı (Derece)	**0°**	0,12187	0,24114	0,35787	0,47284	0,5345	0,57072	0,59703	0,62016
	3°	0,11423	0,22644	0,33744	0,44292	0,5154	0,55572	0,58555	0,60832
	6°	0,10301	0,20552	0,3054	0,39992	0,4724	0,5175	0,55055	0,57712
	9°	0,08861	0,17526	0,26121	0,34512	0,4103	0,45942	0,49609	0,52776
	12°	0,07141	0,14274	0,21369	0,2846	0,34245	0,38718	0,42112	0,45376
	15°	0,05727	0,11418	0,16818	0,22628	0,27455	0,30972	0,34237	0,3712
	18°	0,04108	0,08186	0,12243	0,16312	0,19925	0,22866	0,25529	0,2824
	21°	0,02491	0,04968	0,07449	0,0988	0,1234	0,1464	0,16947	0,19152
	24°	0,01708	0,0341	0,051	0,06796	0,0849	0,10182	0,11865	0,13552
	27°	0,0151	0,0302	0,0453	0,06036	0,0754	0,0903	0,10528	0,11952
	30°	0,01443	0,02886	0,04329	0,05768	0,072	0,08634	0,10066	0,11496

Deney sonuçlarından elde edilen değerler kullanılarak çizilen manyetik akının pozisyona göre değişim eğrileri Şekil 4.1'de görülmektedir.



Şekil 4.1. ARM'nin Manyetik Akı Karakteristiği

Elde edilen bu manyetik akı değerlerini benzetim çalışmalarında kullanabilmek için matematiksel olarak ifade edilmesi gerekmektedir. ARM'nin bu basit yapısına rağmen, makinenin manyetik akı davranışını matematiksel model kullanarak elde edilmesi çok zordur. Bunun için birçok yöntem vardır ve en yaygın kullanılanları ise kosinüs metodu ve sonlu element analiz yöntemidir (46,47). Bu tezde, ARM'deki manyetik akı davranışını belirlemek için YSA tabanlı bir yaklaşım sunulmuştur.

4.1.1. YSA yapısı

Bir YSA tasarımında temel amaç, YSA sisteminin mümkün olduğunca basit bir yapıda tasarlanmasına dikkat etmektir. Bu karmaşıklığın artması öğrenme sürecini doğrudan arttırmakta ve yapının performansını olumsuz yönde etkileyebilmektedir.

YSA'nın en uygun değişkenlerle tasarlanması durumunda YSA sürekli olarak kararlı veya istikrarlı sonuçlar üretebilecek ve bu sayede gürbüz bir sistem tasarımı gerçekleştirilebilecektir. Ayrıca sistemin tepki süresinin yeterince kısa olabilmesi içinde ağ büyüklüğünün yeterince küçük olması gerekir. İhtiyaç duyulan toplam hesaplama da bu sayede sağlanmış olacaktır. Bunun için uygun olan yaklaşımı belirlemek YSA uygulama başarısını arttıracaktır. Gereğinden fazla sayıda işlemci eleman içeren ağ yapılarında, daha düşük genelleme kabiliyetleriyle karşılaşılacağı unutulmamalıdır. Bunun yanında belirli sayıların üzerinde sinir kullanmak da YSA performansını çoğu zaman yükseltmemektedir.

YSA uygulamalarında, en uygun sayıdaki katman ve katmanlardaki sinir sayısını bulmak için her hangi bir kural yoktur. Genellikle sistemin karmaşıklığı, gizli katmanların ve gizli katmanlardaki sinirlerin sayısının artmasıyla giderilir. Çalışmanın başında sinir ağı bir giriş katmanı, bir gizli katmanı ve bir çıkış katmanı olarak üç katmanlı seçilmiştir. Deneme ve yanılma yoluyla bu sistem için en uygun ağ yapısı bir giriş katmanı, iki gizli katman ve bir çıkış katmanıdır. Sırasıyla her bir katmandaki düğüm sayıları ise iki, altı, altı ve bir olarak yeterli bulunmuştur.

Her bir sinirin çıkışı ağırlıklar üzerinden bir sonraki katmandaki sinirin girişi olarak bağlanmıştır. Aynı zamanda her sinire bir eşik değeri ekleyerek ağın daha hızlı öğrenmesini ve öğrenme kapasitesinin arttırılması sağlanmıştır. Her bir katmandaki sinirin çıkışına etkinlik işlevi olarak hiperbolik tanjant sigmoid etkinlik işlevi kullanılmıştır.

4.1.2. Eğitim algoritması

YSA'ların az veriyle öğrenebilmeleri veya genelleme yapabilmeleri YSA'ları bir çok probleme uygulanması için cazip kılmaktadır. Bunun sebebi ise deneysel olarak fazlaca veri elde etmenin maliyeti arttırmasıdır. ARM'nin manyetik akısının YSA ile belirlenmesinde deneysel düzeneklerden alınan veriler kullanıldığı için ağların eğitimi için kullanılan öğrenme kuralları olarak danışmanlı öğrenme kuralı seçilmiştir. Bu öğrenme kuralında, gerçek çıkış istenen çıkışla kıyaslanır. Rasgele değişen ağırlıklar ağ tarafından öyle ayarlanır ki, bir sonraki döngüde gerçek ile istenen çıkış arasında daha yakın karşılaştırma üretebilsin.

Öğrenme yöntemi, işleme elemanlarının anlık hatalarını en aza indirmeye çalışır. Bu hata azaltma işlemi, kabul edilebilir doğruluğa ulaşana kadar ağırlıklar devamlı olarak güncellenir. Delta kuralı, ağırlıkları değiştiren eşitlik ağın toplam karesel hatasını en aza indirmek için tasarlanmıştır. Hata olabilecek en küçük bir değere düştüğünde eğitme durdurulmuştur. Çünkü gereğinden fazla eğitme yaptırmak ağda ezberlemeye gitmekte ve doğru sonuç vermemektedir. Sinir ağı eğitiminde çevrim dışı eğitme kullanılmıştır.

Hesaplamalara momentum teriminin ilave edilmesi ağ performansı üzerinde etkili olduğu gözlenmiştir. Momentum teriminin hesaplamaya katılması adım sayısında ve toplam ağ hatasında bir düşüş meydana getirmektedir. Öğrenme katsayısı ağ performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Küçük öğrenme katsayısı değerlerleri için eğitme işlemi uzun zaman alırken bu değerin büyütülmesi ile eğitme işlemi daha kısa zamanda gerçekleşmektedir. Öğrenme katsayısı arttırılması durumunda öğrenme için gerekli adım sayısında azalma meydana gelmektedir.

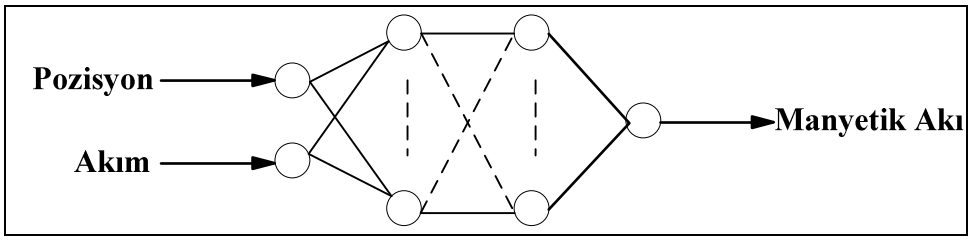
Öğrenme katsayısı arttırılması ağın toplam hatası üzerinde bir iyileştirme meydana getirmektedir. Fakat öğrenme katsayısına çok büyük değerlerin verilmesi durumunda pek bir yakınsama olayı meydana gelmemektedir.

Geri yayılımlı öğrenme algoritmasında öğrenme katsayısı ve momentum katsayıları; çeşitli denemeler sonucunda 0,01 olarak elde edilmiştir.

4.1.3. Eğitim veri kümesi

Giriş eğitim veri kümesi eğitim işleminin en önemli kısmıdır. Çünkü eğitim veri kümesi sinir ağının eğitiminde kullanacağı tek bilgi kaynağıdır. Bu çalışmada, motorun manyetik akının karakteristiklerinin modellenmesinde, deneysel düzenekten aldığımız verileri referans alınmıştır.

Seçilen YSA yapısında, girişlerimiz rotor pozisyonu/faz akımı (θ / i) ve çıkışımız manyetik akı (ψ) kullanılmıştır. Şekil 4.2'de ARM'nin manyetik akının modellenmesi için kullanılan YSA modeli verilmiştir.



Şekil 4.2. Manyetik Akının YSA ile Modellenmesi

YSA'ların eğitilmesinde basitliği ve birçok alanda uygulanmış sebebiyle, GY algoritması kullanılmış ve iyi sonuçlar alınmıştır. Bu algoritmada kullanılan değişkenler Çizelge 4.3'de verilmiştir. Verilen bu değişkenler bir çok denemeden sonra bulunmuş en iyi değerlerdir.

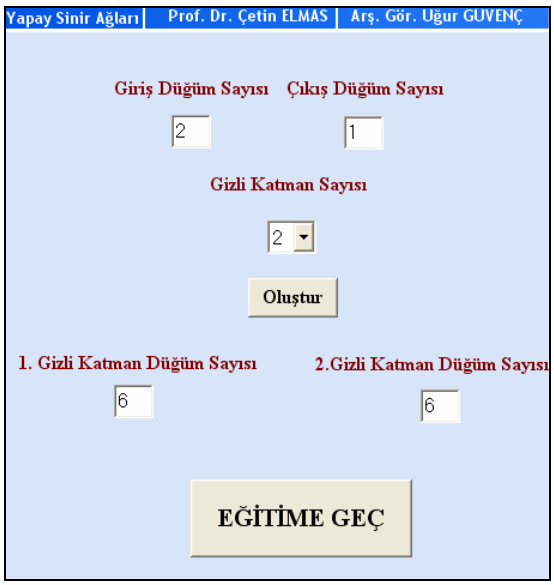
Çizelge 4.3. Öğrenmede kullanılan değişkenler

Çıkış	Girişler	Ağ Yapısı
Manyetik Akı (ψ)	Rotor Pozisyonu (θ) Faz Akımı (i)	2 x 6 x 6 x 1

4.1.4. YSA'nın eğitilmesi

YSA'nın eğitilmesi için C Builder programı kullanarak, giriş katmanı maksimum on beş giriş, çıkış katmanı ise maksimum on çıkış olacak sistemlerin eğitilmesinde kullanılabilecek bir paket program hazırlanmıştır. Hazırlanan paket programda bir giriş katmanı, dört gizli katmana ve bir çıkış katmana izin verilmektedir.

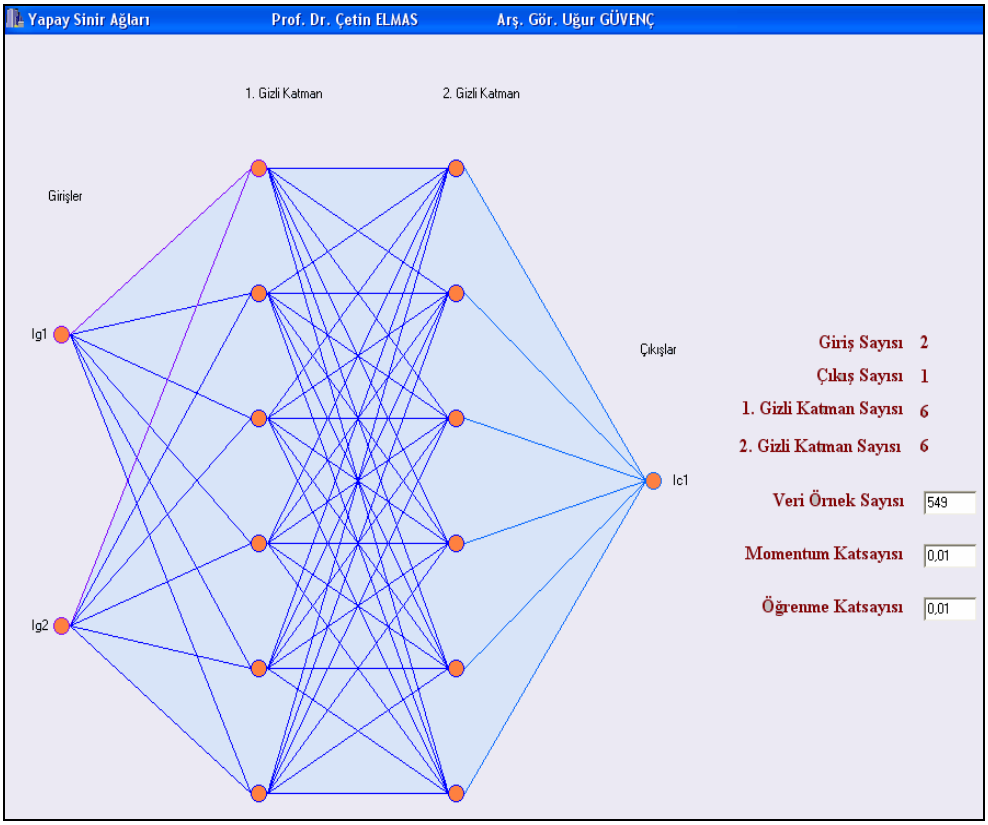
Bu çalışmada kullanılan ağ yapısı Şekil 4.3 de görülmektedir.



Şekil 4.3. YSA yapısının belirlenmesi

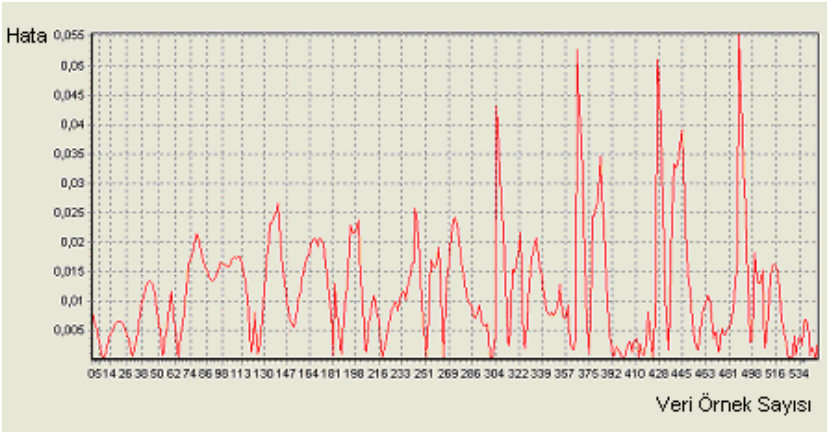
Sistemin ağ yapısı belirlendikten sonra eğitimde kullanılacak öğrenme katsayısı, momentum katsayılarının belirlenmesi ve veri örnek sayısının girilmesi ile ağ

eğitilmeye başlar. Şekil 4.4'de hazırlanan paket programda sistemin eğitilmesi görülmektedir.



Şekil 4.4. Sistemin eğitilmesi

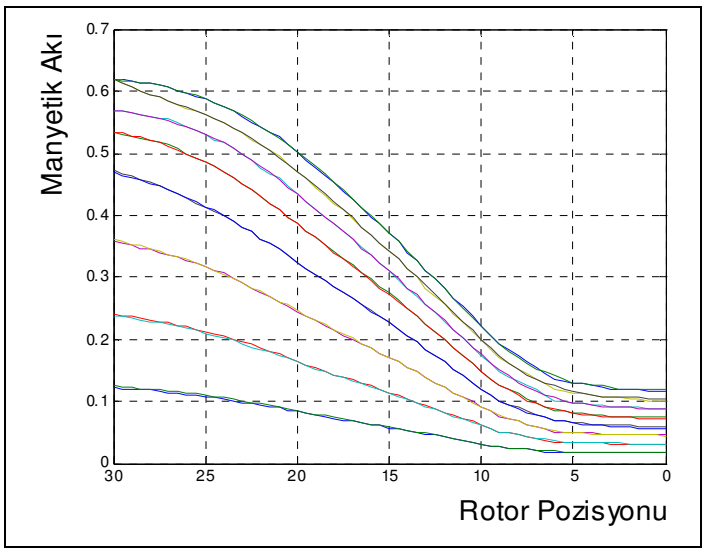
Şekil 4.5' de motorun manyetik akısına (ψ) ait YSA hatası verilmiştir.



Şekil 4.5. Eğitim yapıldıktan sonraki (%) YSA hataları

Benzetim çalışmalarında, deneysel düzenekten aldığımız veri kümelerinin eğitme süresi Pentium 4-3.06 MHz işlemciye ait bir bilgisayarda yaklaşık olarak 3 saat sürmüştür.

YSA tabanlı manyetik akı modelinin başarımını görmek için deneysel düzenekten alınan veri eğrileri ile YSA eğitim sonrası elde edilen eğriler Şekil 4.6'de görüldüğü gibi karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.6. Manyetik akının deneysel düzenekten ve YSA tabanlı modellemeden elde edilen verilerin karşılaştırılması

4.2. ARM için PI (oransal+integral) Denetleyici Tasarımı

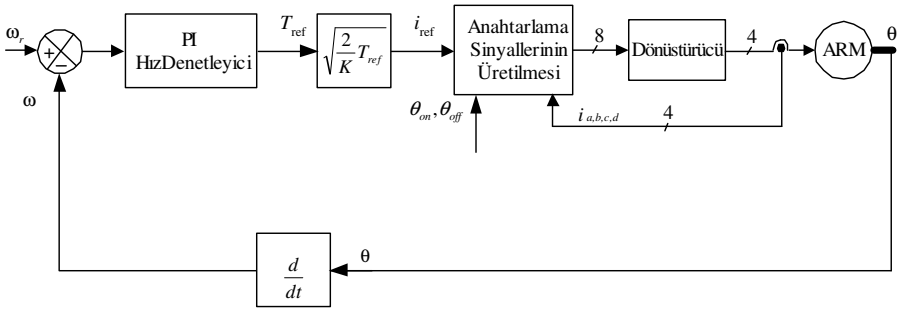
PI denetleyicisi kapalı döngülü bir sistem ile birleştirildiğinde, hata sıfır olana kadar denetim etkisinin değişimine neden olacaktır. ARM'de ortalama tork, ya sargı akımının genliği ile veya komütasyon açısının (θ_d)değişimi ile denetlenebilir. Akım genliği 0 ile i_s arasında değişirken komütasyon açısı 0-β_s aralığını geçmeyecek şekilde ayarlanabilir. Buna göre en büyük iletim aralığı:

$$\theta_{off} - \theta_{on} = \frac{\alpha_r}{q} \qquad [4.2]$$

değerini aşmayacak şekilde ayarlanmalıdır. Böylece iki bitişik fazın birlikte iletimi önlenmiş olacaktır.

Akım θ_{on} konumunda faz sargısına uygulanmakta ve θ_{off} konumunda ise kesilmektedir. θ_{on} ve θ_{off} arasındaki açısal değer bir faz için komütasyon açısı θ_d'yi vermektedir.

ARM'nin kapalı döngü denetim sistemi blok şeması Şekil 4.7'de gösterilmiştir. Akımın dinamik davranışı, sürücü sistemin benzetimi için bir kolaylık sağlamaktadır. ARM'nin dinamik denklemi ikinci dereceden bir denklem yazarak kolayca analiz edilebilir. Denetimin ileri yolunda denetleyici çıkışı için anlık faz akımlarının yerine bir referans tork (T_{ref}) verilebilir. Böylece sistemin ileri yol denetimi bir tork-akım dönüşüm bloğundan ve anahtarlama sinyallerinin üretimi için bir komütasyon bloğundan meydana gelmiştir.

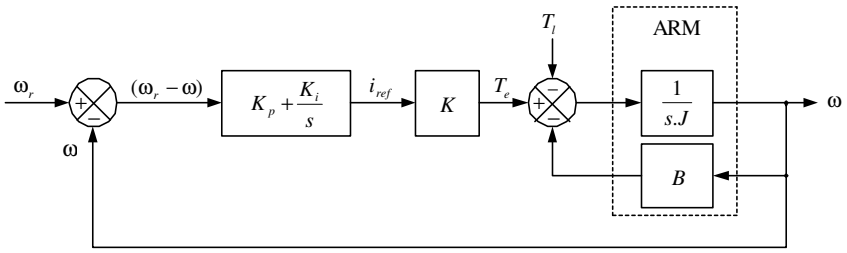


Şekil 4.7. ARM'nin kapalı döngü hız denetimi blok şeması

Kapalı halka hız denetimi için ileri yola eklenen PI denetleyici transfer fonksiyonu;

$$G_s(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \qquad [4.3]$$

olmaktadır. ARM'nin PI hız denetleyicili kapalı döngü blok şeması Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



Şekil 4.8. ARM'nin PI hız denetleyicili kapalı döngü blok şeması

4.3. ARM'nin YSA ile Modellenmesi

ARM'nin yapay sinir ağı ile modellenmesi için öncelikle giriş ve çıkış değişkenlerinin belirlenmesi gerekmektedir.

ARM'nin e_w hız hata değişkeni,

$$e_w = \omega_{ref} - \omega \qquad [4.4]$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Burada ω_e hız hatası, ω_{ref} referans hız değerini ifade etmektedir. ARM'nin dinamik denkleminden ikinci dereceden diferansiyel denklemi yazılacak olursa:

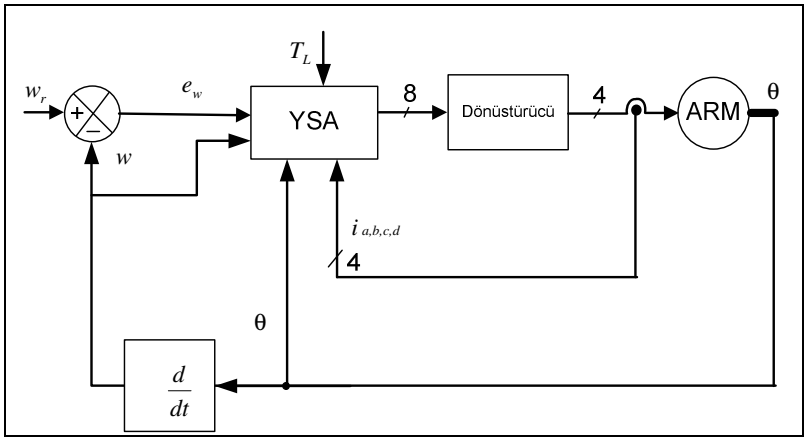
$$J\frac{d\omega}{dt} + B\omega = T_{ref} - T_l \qquad [4.5]$$

olarak ifade edilebilir. Bu denklemden hız kontrolü yapılırken elde edilecek T_{ref} torku için;

$$T_{ref} = T_l + J\frac{d\omega}{dt} + B\omega \qquad [4.6]$$

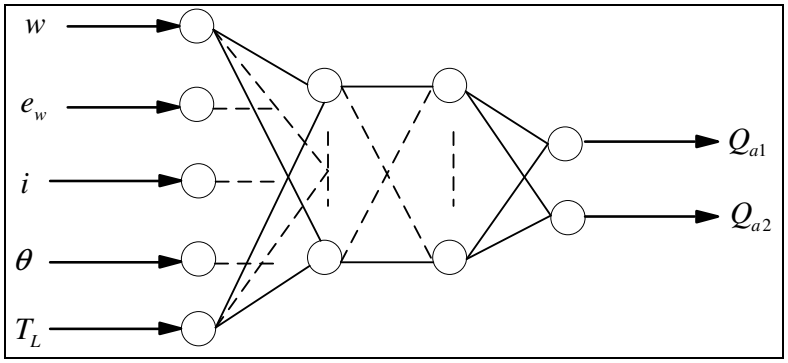
olur. Motorun çıkış torku ile elde edilen T_{ref} arasındaki fark e_T tork hata değişkeni ile motorun çıkış torku denetlenebilir.

ARM'nin hız ve tork kontrolü için referans hıza göre hız hatası, gerçek hız, akım, pozisyon ve yük tork değerleri giriş, dönüştürücüye gidecek sinyaller ise çıkış değişkeni olarak alınmıştır. ARM'nin kapalı döngü denetim sistemi blok şeması Şekil 4.9'da gösterilmiştir.



Şekil 4.9. ARM'nin YSA ile hız ve tork denetleyicili kapalı döngü blok şeması

Şekil 4.10'da ARM'nin YSA ile modellenmesinin ağ yapısı verilmiştir.



Şekil 4.10. ARM'nin YSA ile Modellenmesinin Ağ Yapısı

YSA'ların eğitilmesinde basitliği ve birçok alanda uygulanmış sebebiyle, GY algoritması kullanılmış ve iyi sonuçlar alınmıştır. Bu algoritmada kullanılan değişkenler Çizelge 4.4'de verilmiştir. Verilen bu değişkenler bir çok denemeden sonra bulunmuş en iyi değerlerdir.

Çizelge 4.4. Öğrenmede kullanılan değişkenler

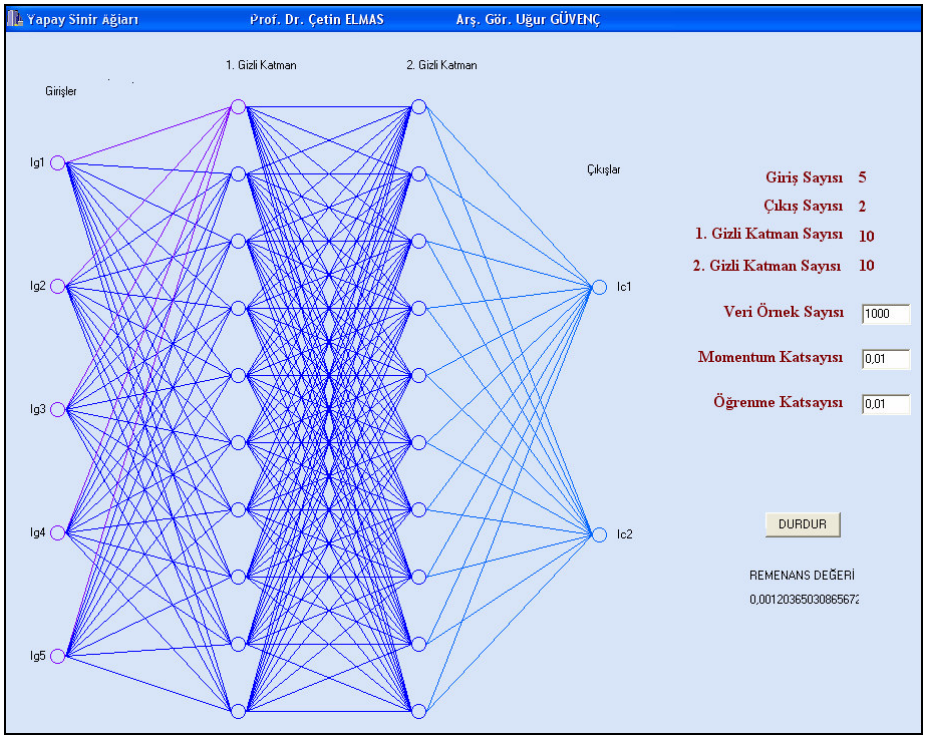
Çıkış	Girişler	Ağ Yapısı
PWM sinyalleri (Q_{a1}, Q_{a2})	Rotor Pozisyonu (θ) Faz Akımı (i) Gerçek Hız (w) Hız hatası (e_w) Yük Torku (T_L)	5 x 10 x 10 x 2

YSA'nın eğitilmesi için C Builder programı kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan ağ yapısı Şekil 4.11'de görülmektedir.



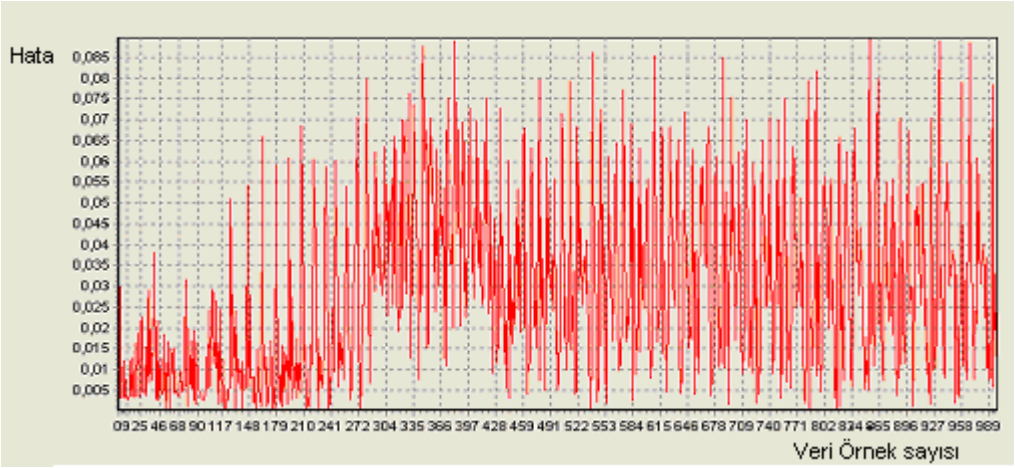
Şekil 4.11. YSA yapısının belirlenmesi

Sistemin ağ yapısı belirlendikten sonra eğitimde kullanılacak öğrenme katsayısı, momentum katsayılarının belirlenmesi ve veri örnek sayısının girilmesi ile ağ eğitilmeye başlar. Şekil 4.12'de hazırlanan paket programda sistemin eğitilmesi görülmektedir.

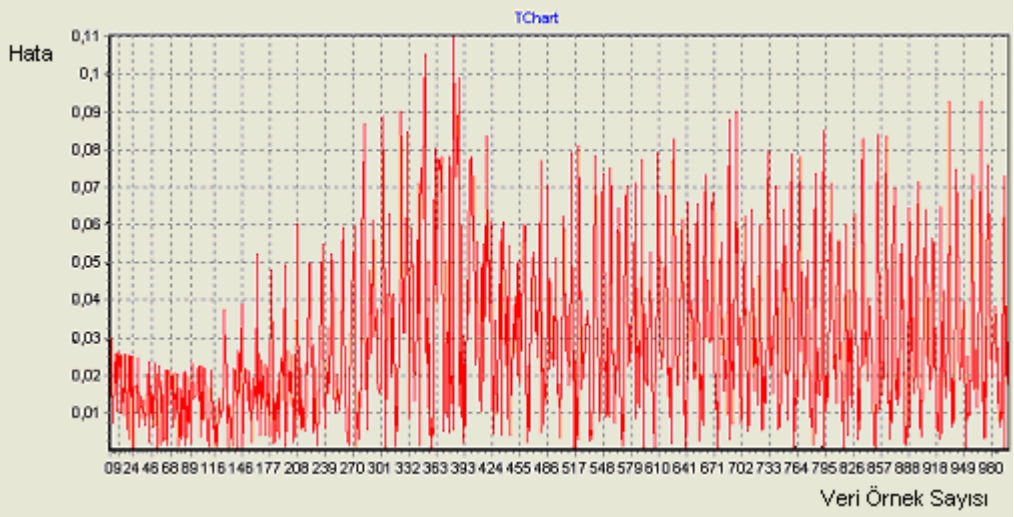


Şekil 4.12. Sistemin eğitilmesi

Şekil 4.13 ve Şekil 4.14’ de PWM sinyallerinin YSA hatası verilmiştir.



Şekil 4.13. Eğitim yapıldıktan sonraki (%) YSA hataları (Qa1)



Şekil 4.14. Eğitim yapıldıktan sonraki (%) YSA hataları (Qa2)

Benzetim çalışmalarında, deneysel düzenekten aldığımız veri kümelerinin eğitme süresi Pentium 4-3,06 MHz işlemciye ait bir bilgisayarda yaklaşık olarak 6 saat sürmüştür.

4.4. Benzetim Sonuçları

ARM' deki tork dalgalanmalarını azaltmak için YSA tabanlı bir yaklaşım sunulmuştur. YSA'nın performansını test edilmesi için benzetim ve uygulama çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışmalarında C++ ve C++ Builder 5,0 programı kullanılmıştır. Motorun farklı hız değerleri durumları için klasik PI denetleyici ile YSA tabanlı modelleme benzetim sonuçları alınmış ve karşılaştırılmıştır.

Benzetim çalışmalarında kullanılan ARM'nin değişkenleri Çizelge 4.5'de verilmiştir.

Çizelge 4.5. Benzetimde kullanılan motorun özellikleri

Değişken	**Değer**
Rotor kutup sayısı(N_r)	6
Stator kutup sayısı(N_s)	8
Faz sayısı	4
Güç (P)	5,5 HP
Maksimum hız	1500 d/d
Maksimum akım(I_{max})	9 A
Maksimum kaynak gerilimi(V_{dc})	400 V
Faz direnci (R)	0,96 Ω
Maksimum endüktans (L_{max})	120 mH
Minimum endüktans (L_{min})	14 mH
Motor sürtünme katsayısı (B)	0,008 Nm.sn.rad^{-1}
Atalet momenti (J)	0,053 kgm^2

Benzetim çalışmalarında, PI denetleyici için denetleyici kazançları sabit olup oransal kazanç 5 A/rad/s ve integral kazanç ise 500 A/rad olarak seçilmiştir.

Motorun farklı hız, yüklü ve yüksüz durumlarda çalışması 500 d/d, 1000 d/d, 1500 d/d ve değişken referans hız durumları için gözlemlenmiştir. Her bir çalışma durumunda, motorun hız, faz akımı, faz gerilimi ve çıkış torku eğrileri elde edilmiştir.

4.4.1. 500 d/d referans hız ve yüksüz durum

ARM, Çizelge 4.5 deki değişken değerlerinde çalıştırılmış ve motor 500 d/d referans hız ve yüksüz durumda, elde edilen benzetim sonuçları 0-1 sn aralığı için Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da verilmiştir. Bu çalışmada, motorun 0-1 sn zaman aralığında Şekil 4.15 (a)'da hız tepki eğrisi, Şekil 4.15 (b)'de faz akımı eğrisi, Şekil 4.15 (c)'de faz gerilimi eğrisi, Şekil 4.15 (d)'de motor çıkış tork eğrisi PI denetleyici tasarımı ile, Şekil 4.16 (a)'da hız tepki eğrisi, Şekil 4.16 (b)'de faz akımı eğrisi, Şekil 4.16 (c)'de faz gerilimi eğrisi, Şekil 4.16 (d)'de motor çıkış tork eğrisi YSA modelleme ile elde edilen eğrileridir.

PI denetleyici tasarım

Benzetim sonuçlarına göre motor 0 d/d' dan 500 d/d' ya 222 ms' de yükselmektedir. Hız eğrisinde aşım 5 d/d olmakta ve salınım ise referans hıza ulaştıktan yaklaşık 60 ms sonra kararlı duruma ulaşıp referans hızı izlediği görülmektedir.

Motor referans hıza ulaştıktan sonra çekilen akım azalmaktadır. Benzetim sonuçlarına göre motor kalkınması esnasında faz akımı maksimum değeri 9 A de iken, kararlı durumda 2,2 A değerine düşmüştür. Hız arttıkça akımın periyodunun düşmekte ve frekansının artmakta olduğu görülmektedir.

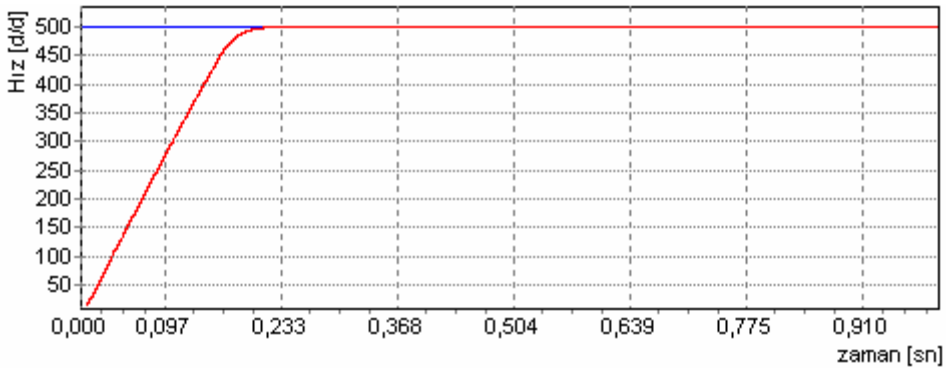
Motor kalkınma anında çekilen yüksek akımdan dolayı motor çıkış torku 18 N.m, kararlı duruma ulaştıktan sonra maksimum 0,95 N.m seviyesindedir.

YSA modelleme

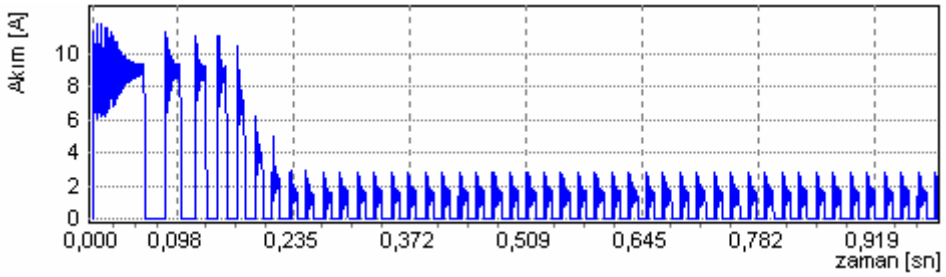
Benzetim sonuçlarına göre motor 0 d/d' dan 500 d/d' ya 360 ms' de yükselmektedir. Hız eğrisinde aşım 0.2 d/d olmakta ve salınım ise referans hıza ulaştıktan yaklaşık 5 ms sonra kararlı duruma ulaşıp referans hızı izlediği görülmektedir.

Motor referans hıza ulaştıktan sonra çekilen akım azalmaktadır. Benzetim sonuçlarına göre motor kalkınması esnasında faz akımı maksimum değeri 9 A de iken, kararlı durumda 1,85 A değerine düşmüştür. Hız arttıkça akımın periyodunun düşmekte ve frekansının artmakta olduğu görülmektedir.

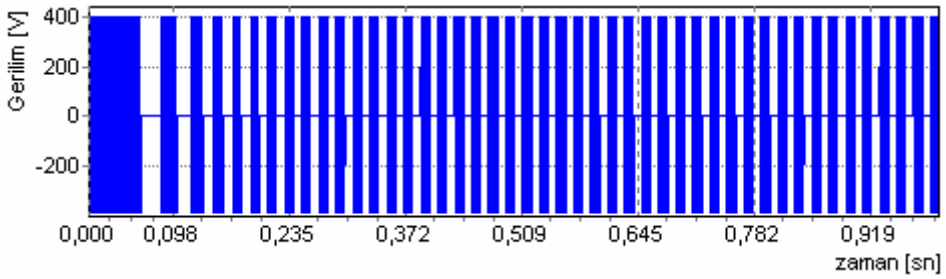
Motor kalkınma anında çekilen yüksek akımdan dolayı motor çıkış torku 18 N.m, kararlı duruma ulaştıktan sonra maksimum 0,46 N.m seviyesindedir.



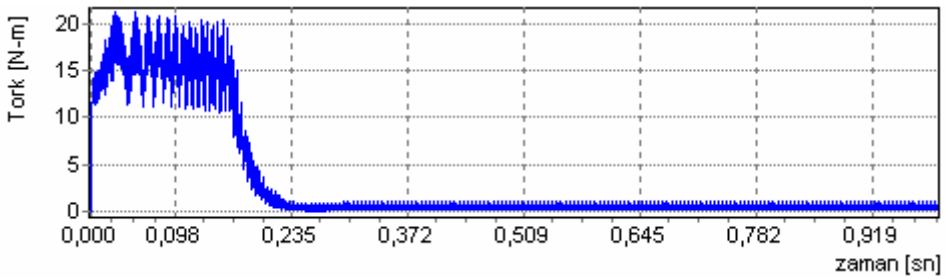
(a)Hız eğrisi



(b) Faz akımı

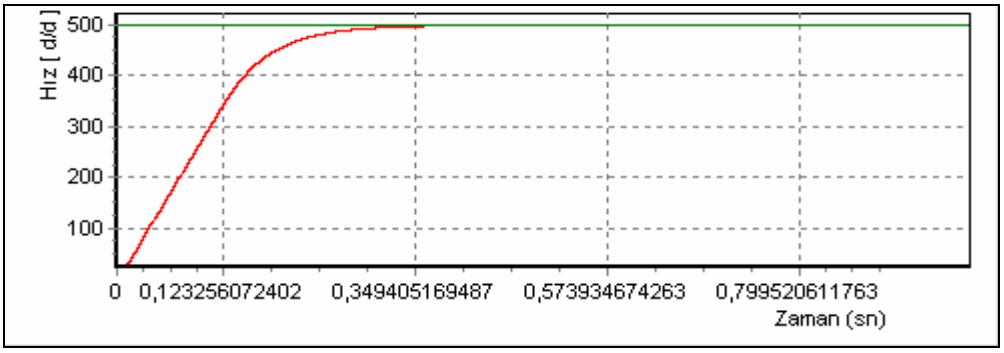


(c) Faz gerilimi

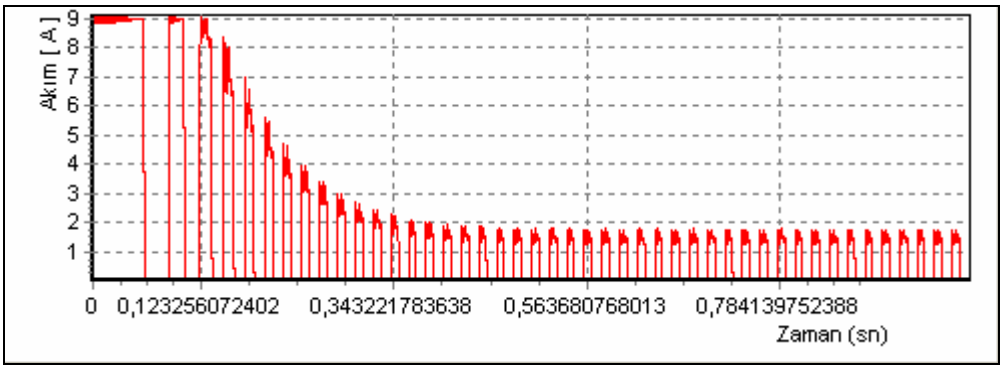


(d)Motor çıkış torku

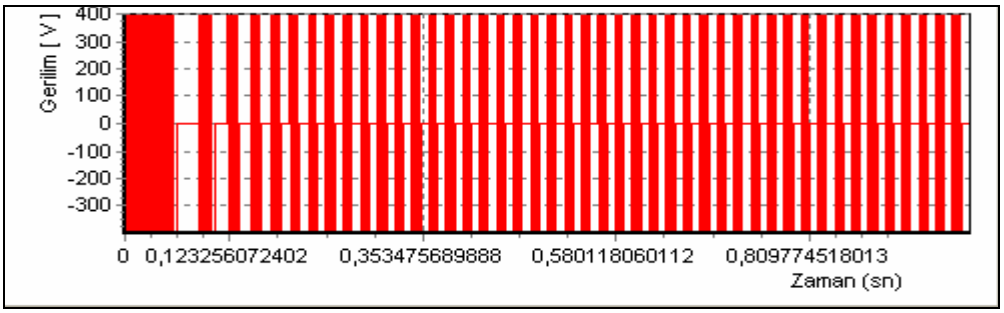
Şekil 4.15. ARM'nin PI denetleyici tasarımı ile (0-1) sn zaman aralığında, 500 d/d ve yüksüz durumda, benzetim sonuçları



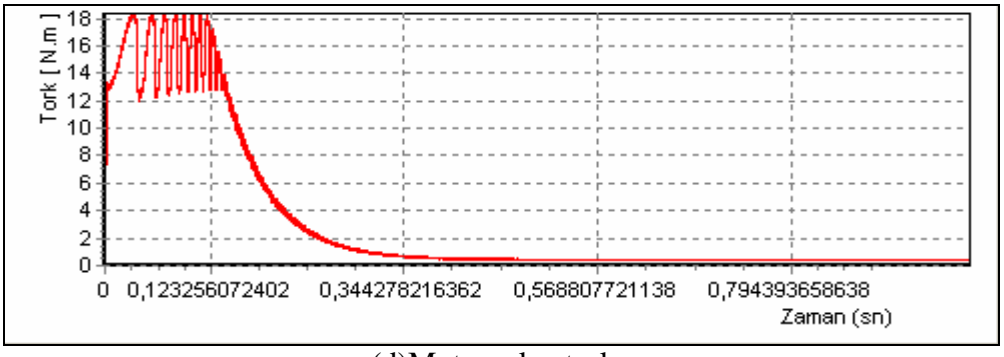
(a)Hız eğrisi



(b) Faz akımı



(c) Faz gerilimi



(d)Motor çıkış torku

Şekil 4.16. ARM'nin YSA modelleme ile (0-1) sn zaman aralığında, 500 d/d ve yüksüz durumda, benzetim sonuçları

4.4.2. 500 d/d referans hız ve yüklü durum

ARM, Çizelge 4.5 deki değişken değerlerinde çalıştırılmış ve motor 500 d/d referans hız ve 5 N.m yüklü durumda, elde edilen benzetim sonuçları 0-1 sn aralığı için Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'de verilmiştir. Bu çalışmada, motorun 0-1 sn zaman aralığında Şekil 4.17 (a)'da hız tepki eğrisi, Şekil 4.17 (b)'de faz akımı eğrisi, Şekil 4.17 (c)'de faz gerilimi eğrisi, Şekil 4.17 (d)'de motor çıkış tork eğrisi PI denetleyici tasarımı ile, Şekil 4.18 (a)'da hız tepki eğrisi, Şekil 4.18 (b)'de faz akımı eğrisi, Şekil 4.18 (c)'de faz gerilimi eğrisi, Şekil 4.18 (d)'de motor çıkış tork eğrisi YSA modelleme ile elde edilen eğrileridir.

PI denetleyici tasarım

Benzetim sonuçlarına göre motor 0 d/d' dan 500 d/d' ya 332 ms' de yükselmektedir. Hız eğrisinde aşım 1 d/d olmakta ve salınım ise referans hıza ulaştıktan 30 ms sonra kararlı duruma ulaşıp referans hızı izlediği görülmektedir.

Motor referans hıza ulaştıktan sonra çekilen akım azalmaktadır. Benzetim sonuçlarına göre motor kalkınması esnasında faz akımı maksimum değeri 9 A de iken, kararlı durumda 6 A değerine düşmüştür. Ayrıca hız arttıkça faz akımının periyodunun düşmekte ve frekansının artmakta olduğu görülmektedir.

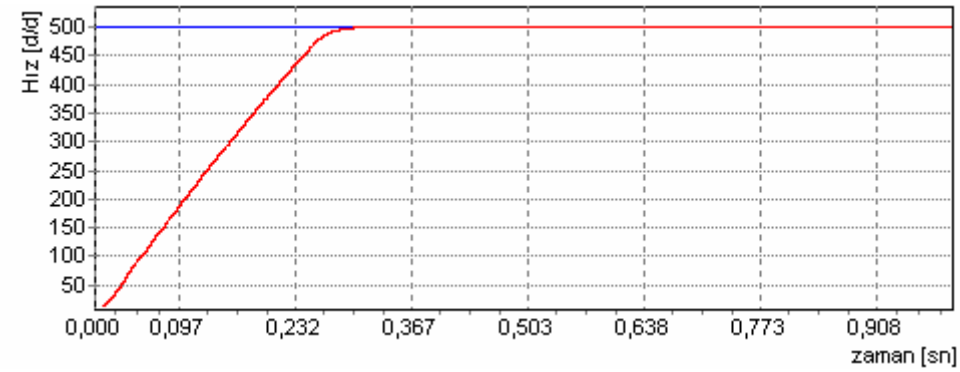
Kalkınma anında çekilen yüksek akımdan dolayı motor çıkış torku 16 N.m, kararlı duruma ulaştıktan sonra motorda üretilen tork maksimum 7,85 N.m seviyesinde olmaktadır.

YSA modelleme

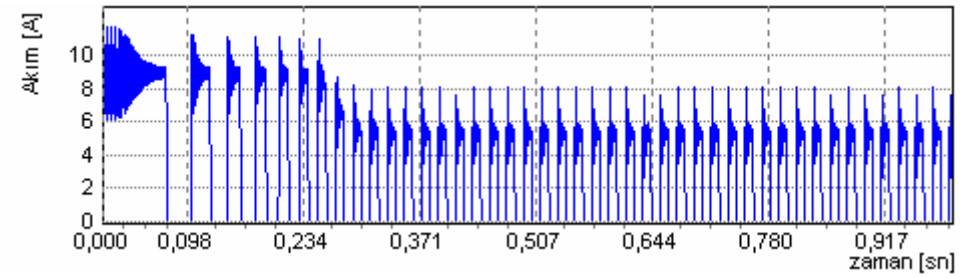
Benzetim sonuçlarına göre motor 0 d/d' dan 500 d/d' ya 450 ms' de yükselmektedir. Hız eğrisinde aşım 1 d/d olmakta ve salınım ise referans hıza ulaştıktan 5 ms sonra kararlı duruma ulaşıp referans hızı izlediği görülmektedir.

Motor referans hıza ulaştıktan sonra çekilen akım azalmaktadır. Benzetim sonuçlarına göre motor kalkınması esnasında faz akımı maksimum değeri 9 A de iken, kararlı durumda 6 A değerine düşmüştür. Ayrıca hız arttıkça faz akımının periyodunun düşmekte ve frekansının artmakta olduğu görülmektedir.

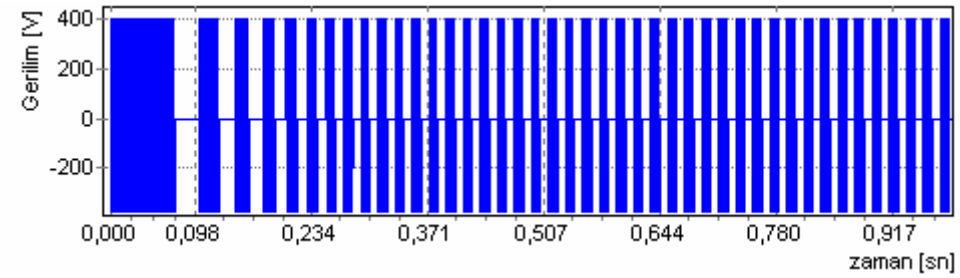
Kalkınma anında çekilen yüksek akımdan dolayı motor çıkış torku 16 N.m, kararlı duruma ulaştıktan sonra motorda üretilen tork 5,8 N.m seviyesinde olmaktadır.



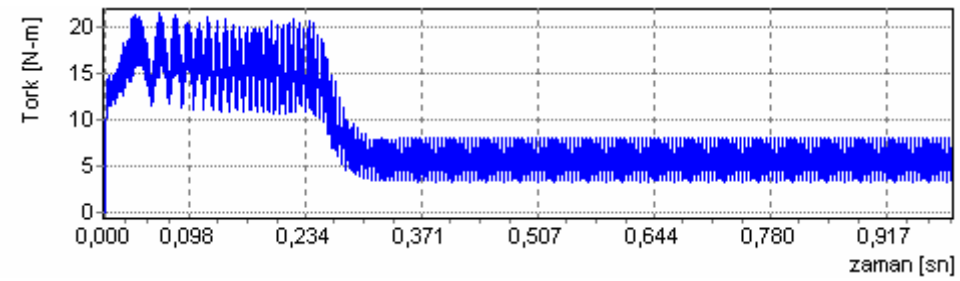
(a)Hız eğrisi



(b) Faz akımı

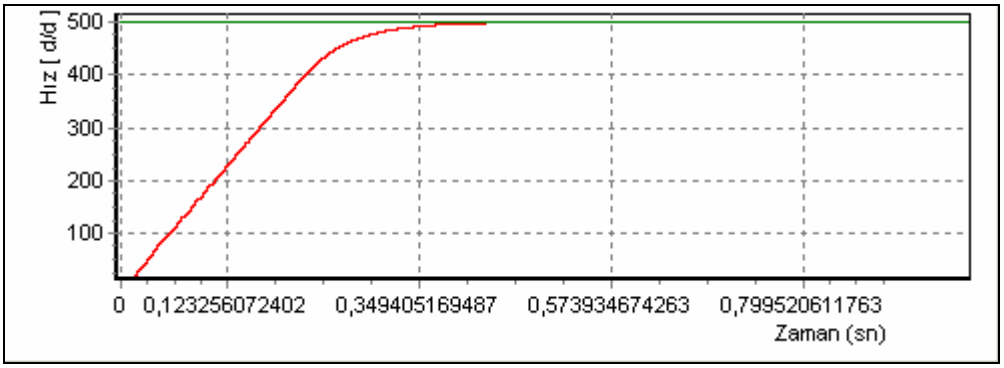


(c) Faz gerilimi

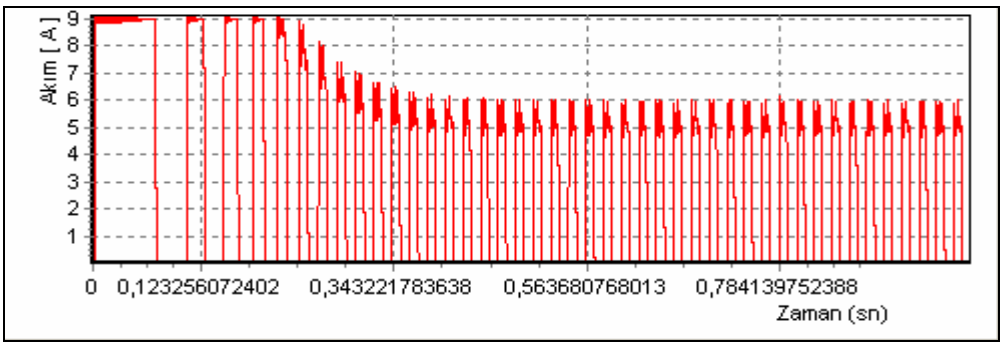


(d)Motor çıkış torku

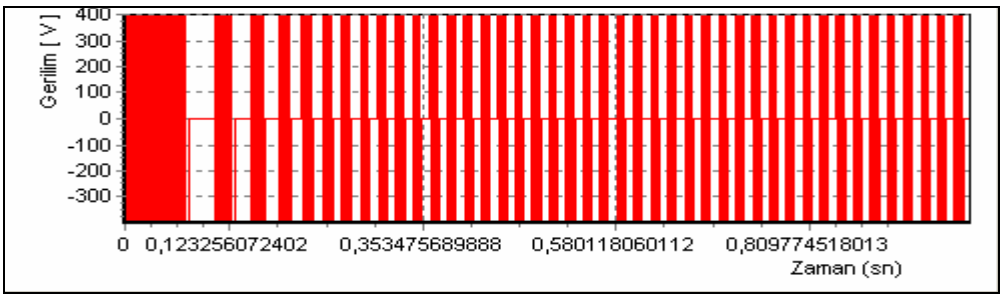
Şekil 4.17. ARM'nin PI denetleyici tasarımı ile (0-1) sn zaman aralığında, 500 d/d ve 5 N-m yüklü durumda, benzetim sonuçları



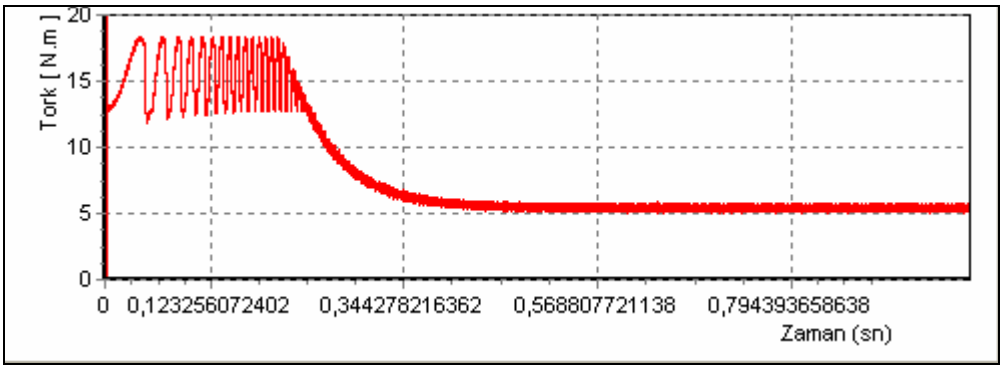
(a)Hız eğrisi



(b) Faz akımı



(c) Faz gerilimi



(d)Motor çıkış torku

Şekil 4.18. ARM'nin YSA modelleme ile (0-1) sn zaman aralığında, 500 d/d ve 5 N-m yüklü durumda, benzetim sonuçları

4.4.3. 1000 d/d referans hız ve yüksüz durum

ARM, Çizelge 4.5 deki değişken değerlerinde çalıştırılmış ve motor 1000 d/d referans hız ve yüksüz durumda, elde edilen benzetim sonuçları 0-1 sn aralığı için Şekil 4.19 ve Şekil 4.20'de verilmiştir. Bu çalışmada, motorun 0-1 sn zaman aralığında Şekil 4.19 (a)'da hız tepki eğrisi, Şekil 4.19 (b)'de faz akımı eğrisi, Şekil 4.19 (c)'de faz gerilimi eğrisi, Şekil 4.19 (d)'de motor çıkış tork eğrisi PI denetleyici tasarımı ile, Şekil 4.20 (a)'da hız tepki eğrisi, Şekil 4.20 (b)'de faz akımı eğrisi, Şekil 4.20 (c)'de faz gerilimi eğrisi, Şekil 4.20 (d)'de motor çıkış tork eğrisi YSA modelleme ile elde edilen eğrileridir.

PI denetleyici tasarım

Benzetim sonuçlarına göre motor 0 d/d' dan 1000 d/d' ya 390 ms' de yükselmektedir. Hız eğrisinde aşım 4 d/d olmakta ve salınım ise referans hıza ulaştıktan yaklaşık 50 ms sonra kararlı duruma ulaşıp referans hızı izlediği görülmektedir.

Motor referans hıza ulaştıktan sonra çekilen akım azalmaktadır. Benzetim sonuçlarına göre motor kalkınması esnasında faz akımı maksimum değeri 9 A de iken, kararlı durumda 2,5 A değerine düşmüştür. Hız arttıkça akımın periyodunun düşmekte ve frekansının artmakta olduğu görülmektedir.

Motor kalkınma anında çekilen yüksek akımdan dolayı motor çıkış torku 18 N.m, kararlı duruma ulaştıktan sonra maksimum 1,7 N.m seviyesindedir.

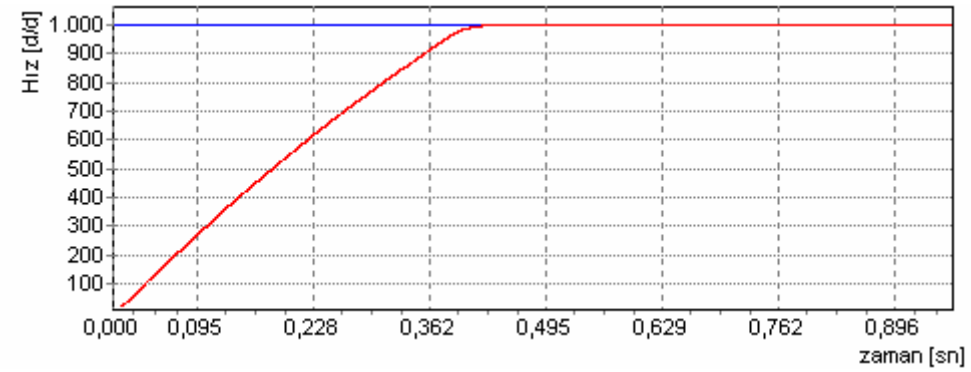
YSA modelleme

Benzetim sonuçlarına göre motor 0 d/d' dan 1000 d/d' ya 481 ms' de yükselmektedir. Hız eğrisinde aşım 1 d/d olmakta ve salınım ise referans hıza ulaştıktan yaklaşık 5 ms sonra kararlı duruma ulaşıp referans hızı izlediği görülmektedir.

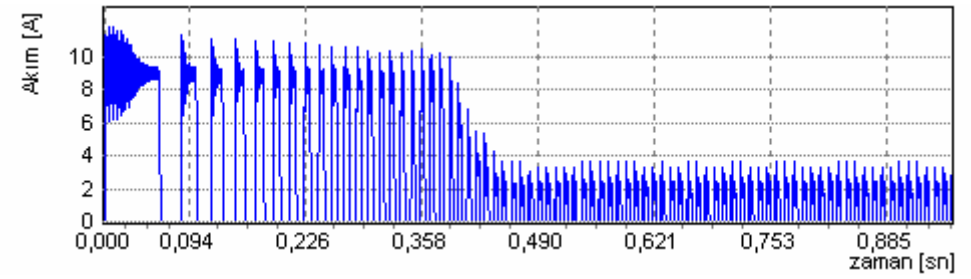
Motor referans hıza ulaştıktan sonra çekilen akım azalmaktadır. Benzetim

sonuçlarına göre motor kalkınması esnasında faz akımı maksimum değeri 9 A de iken, kararlı durumda 2,4 A değerine düşmüştür. Hız arttıkça akımın periyodunun düşmekte ve frekansının artmakta olduğu görülmektedir.

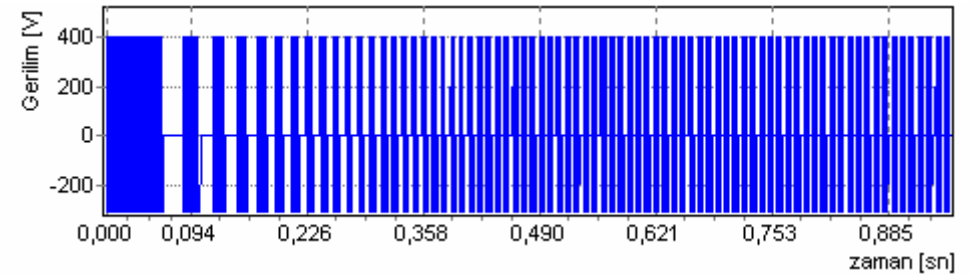
Motor kalkınma anında çekilen yüksek akımdan dolayı motor çıkış torku 18 N.m, kararlı duruma ulaştıktan sonra 0,89 N.m seviyesindedir.



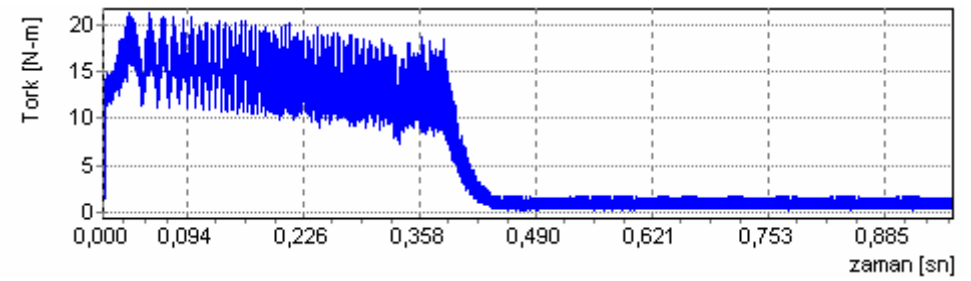
(a)Hız eğrisi



(b) Faz akımı

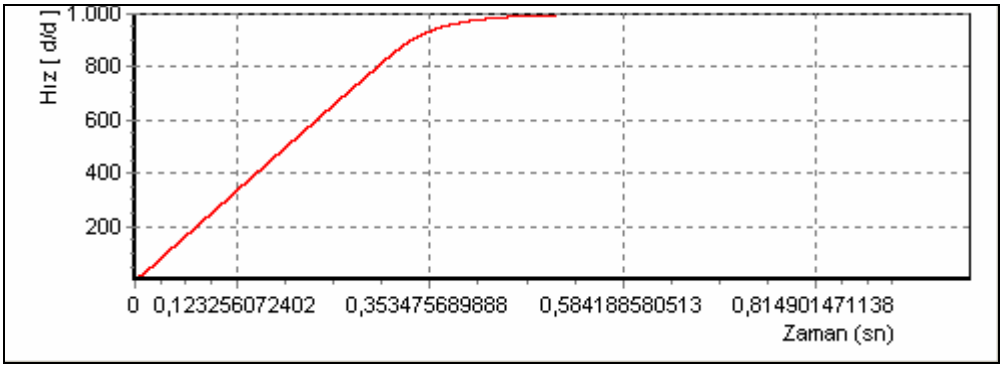


(c) Faz gerilimi

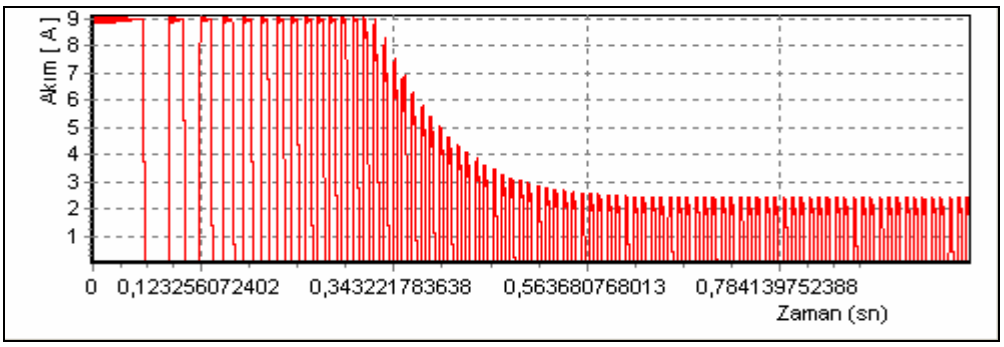


(d)Motor çıkış torku

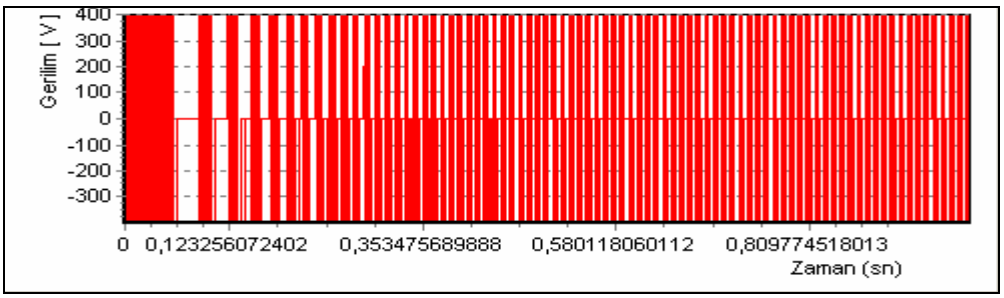
Şekil 4.19. ARM'nin PI denetleyici tasarımı ile (0-1) sn zaman aralığında, 1000 d/d ve yüksüz durumda, benzetim sonuçları



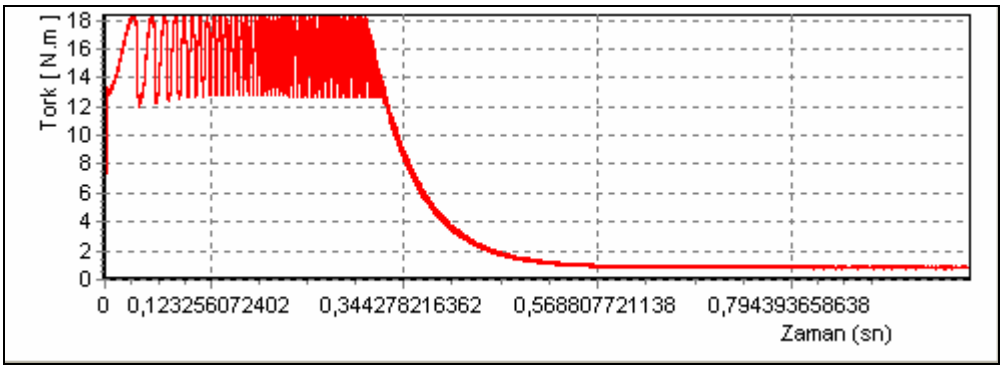
(a)Hız eğrisi



(b) Faz akımı



(c) Faz gerilimi



(d)Motor çıkış torku

Şekil 4.20. ARM'nin YSA modelleme ile (0-1) sn zaman aralığında, 1000 d/d ve yüksüz durumda, benzetim sonuçları

4.4.4. 1000 d/d referans hız ve yüklü durum

ARM, Çizelge 4.5'deki değişken değerlerinde çalıştırılmış ve motor 1000 d/d referans hız ve 5 N.m yüklü durumda, elde edilen benzetim sonuçları 0- 1 sn aralığı için Şekil 4.21 ve Şekil 4.22'de verilmiştir. Bu çalışmada, motorun 0-1 sn zaman aralığında Şekil 4.21 (a)'da hız tepki eğrisi, Şekil 4.21 (b)'de faz akımı eğrisi, Şekil 4.21 (c)'de faz gerilimi eğrisi, Şekil 4.21 (d)'de motor çıkış tork eğrisi PI denetleyici tasarımı ile, Şekil 4.22 (a)'da hız tepki eğrisi, Şekil 4.22 (b)'de faz akımı eğrisi, Şekil 4.22 (c)'de faz gerilimi eğrisi, Şekil 4.22 (d)'de motor çıkış tork eğrisi YSA modelleme ile elde edilen eğrileridir.

PI denetleyici tasarım

Benzetim sonuçlarına göre motor 0 d/d' dan 1000 d/d' ya 630 ms' de yükselmektedir. Hız eğrisinde aşım 3 d/d olmakta ve salınım ise referans hıza ulaştıktan 15 ms sonra kararlı duruma ulaşıp referans hızı izlediği görülmektedir.

Motor referans hıza ulaştıktan sonra çekilen akım azalmaktadır. Benzetim sonuçlarına göre motor kalkınması esnasında faz akımı maksimum değeri 9 A de iken, kararlı durumda 7 A değerine düşmüştür. Ayrıca hız arttıkça faz akımının periyodunun düşmekte ve frekansının artmakta olduğu görülmektedir.

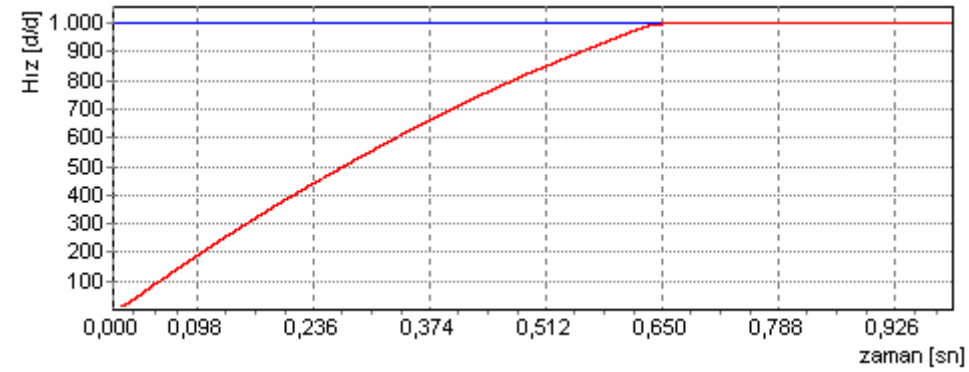
Kalkınma anında çekilen yüksek akımdan dolayı motor çıkış torku 16 N.m, kararlı duruma ulaştıktan sonra motorda üretilen tork maksimum 8,3 N.m seviyesinde olmaktadır.

YSA modelleme

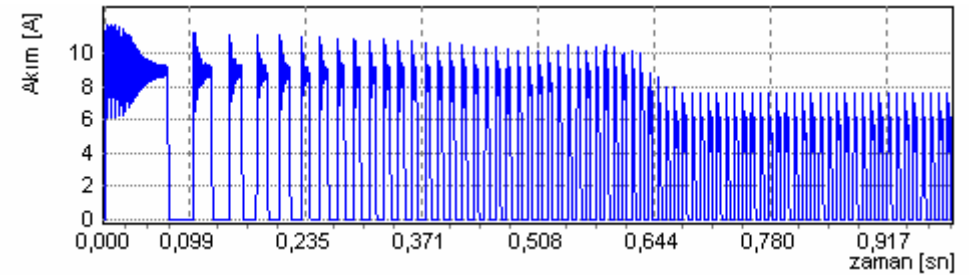
Benzetim sonuçlarına göre motor 0 d/d' dan 1000 d/d' ya 690 ms' de yükselmektedir. Hız eğrisinde aşım 1 d/d olmakta ve salınım ise referans hıza ulaştıktan 1 ms sonra kararlı duruma ulaşıp referans hızı izlediği görülmektedir.

Motor referans hıza ulaştıktan sonra çekilen akım azalmaktadır. Benzetim sonuçlarına göre motor kalkınması esnasında faz akımı maksimum değeri 9 A de iken, kararlı durumda 6,1 A değerine düşmüştür. Ayrıca hız arttıkça faz akımının periyodunun düşmekte ve frekansının artmakta olduğu görülmektedir.

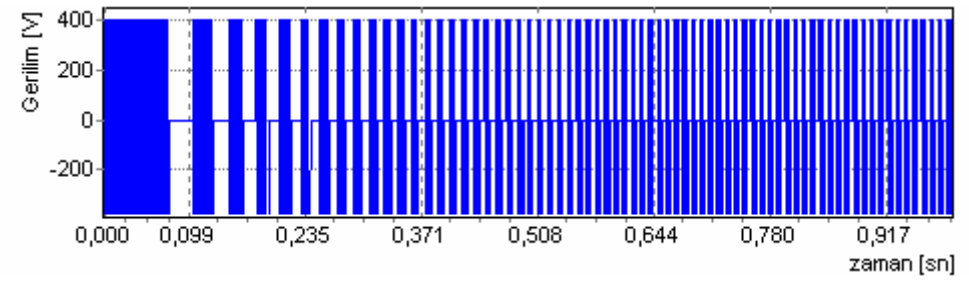
Kalkınma anında çekilen yüksek akımdan dolayı motor çıkış torku 16 N.m, kararlı duruma ulaştıktan sonra motorda üretilen tork 6,2 N.m seviyesinde olmaktadır.



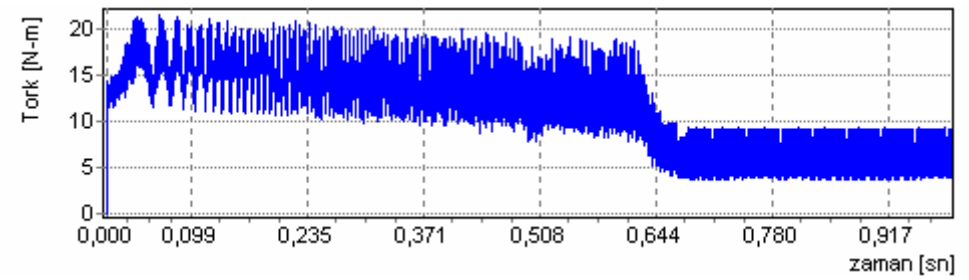
(a)Hız eğrisi



(b) Faz akımı

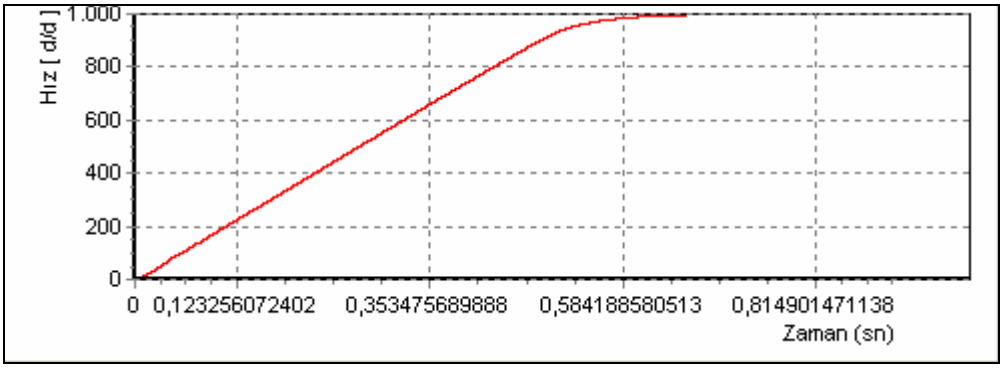


(c) Faz gerilimi

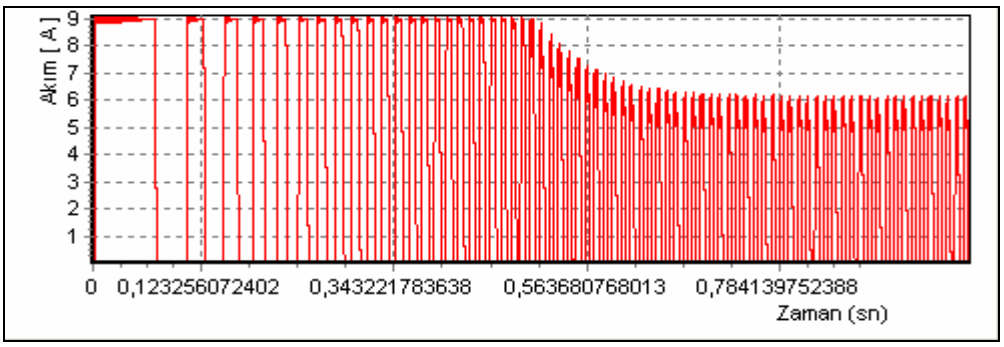


(d)Motor çıkış torku

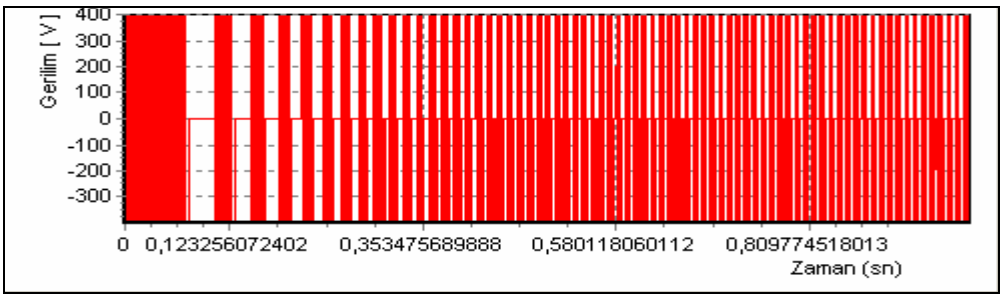
Şekil 4.21. ARM'nin PI denetleyici tasarımı ile (0-1) sn zaman aralığında, 1000 d/d ve 5 N-m yüklü durumda, benzetim sonuçları



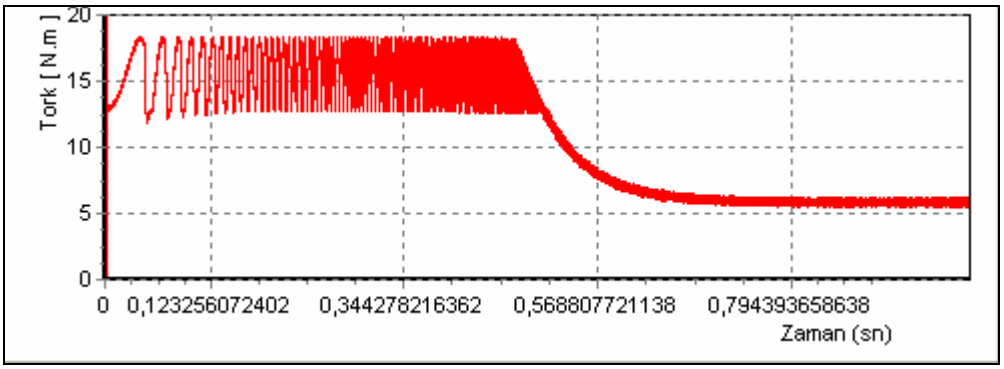
(a)Hız eğrisi



(b) Faz akımı



(c) Faz gerilimi



(d)Motor çıkış torku

Şekil 4.22. ARM'nin YSA modelleme ile (0-1) sn zaman aralığında, 1000 d/d ve 5 N-m yüklü durumda, benzetim sonuçları

4.4.5. 1500 d/d referans hız ve yüksüz durum

ARM, Çizelge 4.5'deki değişken değerlerinde çalıştırılmış ve motor 1500 d/d referans hız ve yüksüz durumda, elde edilen benzetim sonuçları 0-2 sn aralığı için Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'de verilmiştir. Bu çalışmada, motorun 0-2 sn zaman aralığında Şekil 4.23 (a)'da hız tepki eğrisi, Şekil 4.23 (b)'de faz akımı eğrisi, Şekil 4.23 (c)'de faz gerilimi eğrisi, Şekil 4.23 (d)'de motor çıkış tork eğrisi PI denetleyici tasarımı ile, Şekil 4.24 (a)'da hız tepki eğrisi, Şekil 4.24 (b)'de faz akımı eğrisi, Şekil 4.24 (c)'de faz gerilimi eğrisi, Şekil 4.24 (d)'de motor çıkış tork eğrisi YSA modelleme ile elde edilen eğrileridir.

PI denetleyici tasarım

Benzetim sonuçlarına göre motor 0 d/d' dan 1500 d/d' ya 680 ms' de yükselmektedir. Hız eğrisinde aşım 4 d/d olmakta ve salınım ise referans hıza ulaştıktan yaklaşık 15 ms soma kararlı duruma ulaşıp referans hızı izlediği görülmektedir.

Motor referans hıza ulaştıktan soma çekilen akım azalmaktadır. Benzetim sonuçlarına göre motor kalkınması esnasında faz akımı maksimum değeri 9 A de iken, kararlı durumda 4 A değerine düşmüştür. Hız arttıkça akımın periyodunun düşmekte ve frekansının artmakta olduğu görülmektedir.

Motor kalkınma anında çekilen yüksek akımdan dolayı motor çıkış torku 18 N.m, kararlı duruma ulaştıktan sonra maksimum 2,34 N.m seviyesindedir.

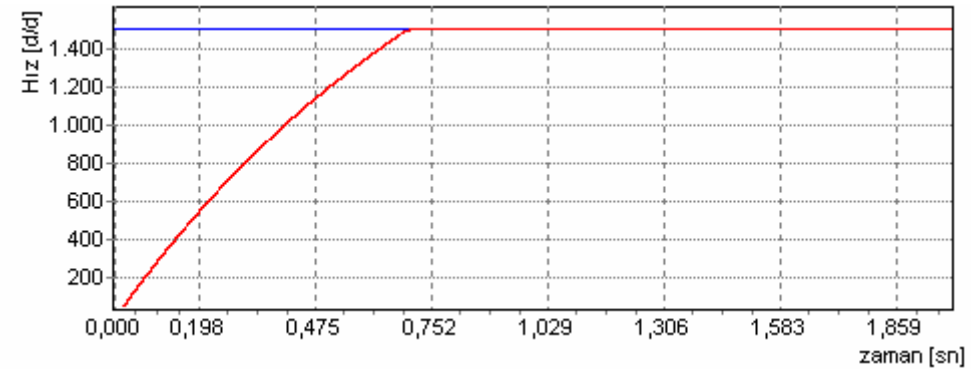
YSA modelleme

Benzetim sonuçlarına göre motor 0 d/d' dan 1500 d/d' ya 700 ms' de yükselmektedir. Hız eğrisinde aşım 1 d/d olmakta ve salınım ise referans hıza ulaştıktan yaklaşık 3 ms soma kararlı duruma ulaşıp referans hızı izlediği görülmektedir.

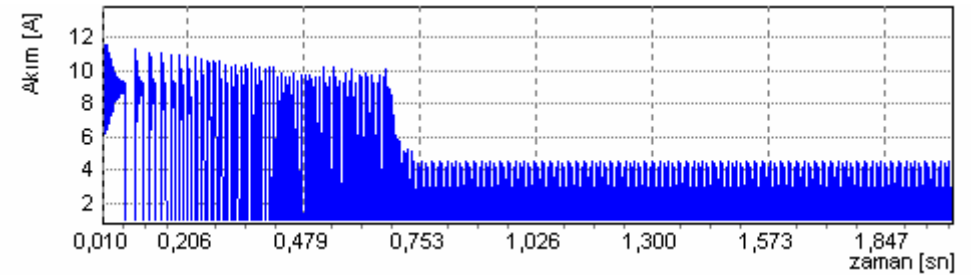
Motor referans hıza ulaştıktan soma çekilen akım azalmaktadır. Benzetim

sonuçlarına göre motor kalkınması esnasında faz akımı maksimum değeri 9 A de iken, kararlı durumda 3 A değerine düşmüştür. Hız arttıkça akımın periyodunun düşmekte ve frekansının artmakta olduğu görülmektedir.

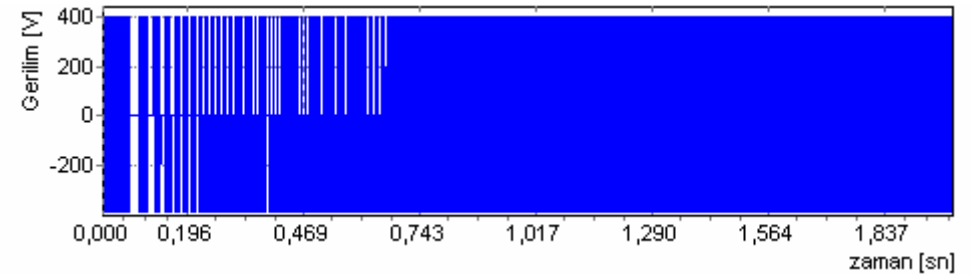
Motor kalkınma anında çekilen yüksek akımdan dolayı motor çıkış torku 18 N.m, kararlı duruma ulaştıktan sonra 1,36 N.m seviyesindedir.



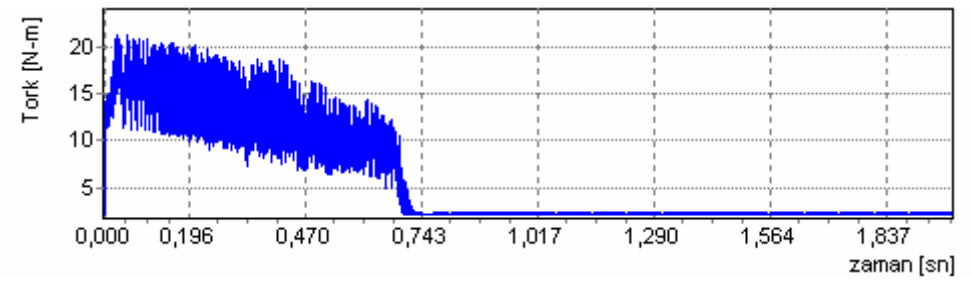
(a)Hız eğrisi



(b) Faz akımı

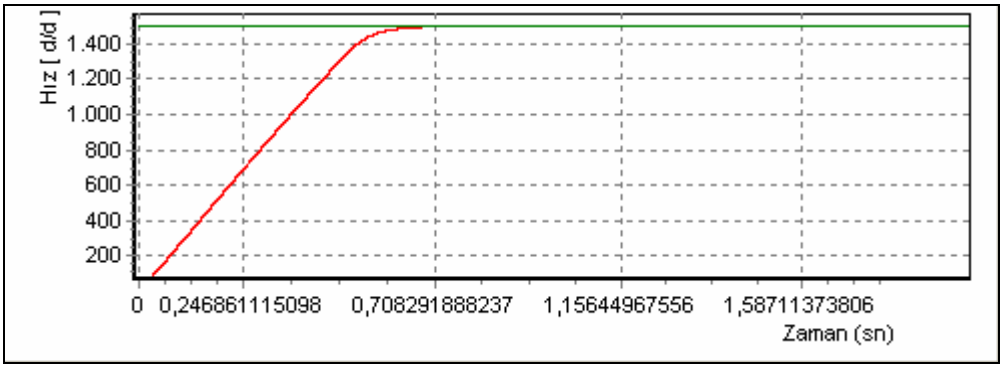


(c) Faz gerilimi

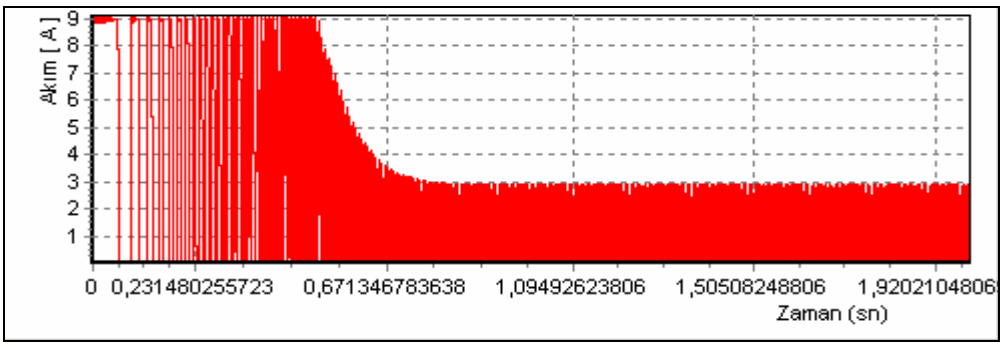


(d)Motor çıkış torku

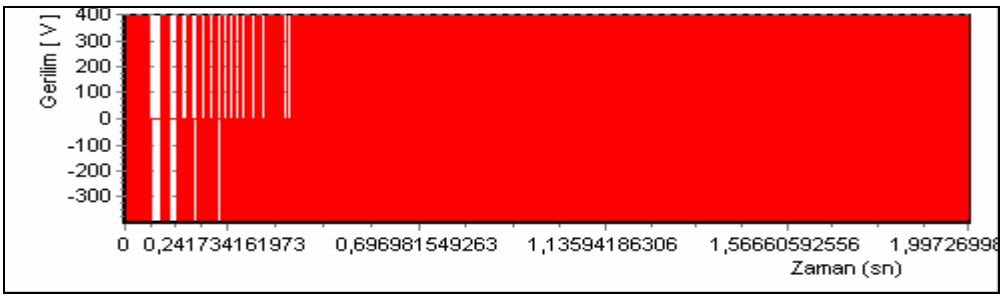
Şekil 4.23. ARM'nin PI denetleyici tasarımı ile (0-2) sn zaman aralığında, 1500 d/d ve yüksüz durumda, benzetim sonuçları



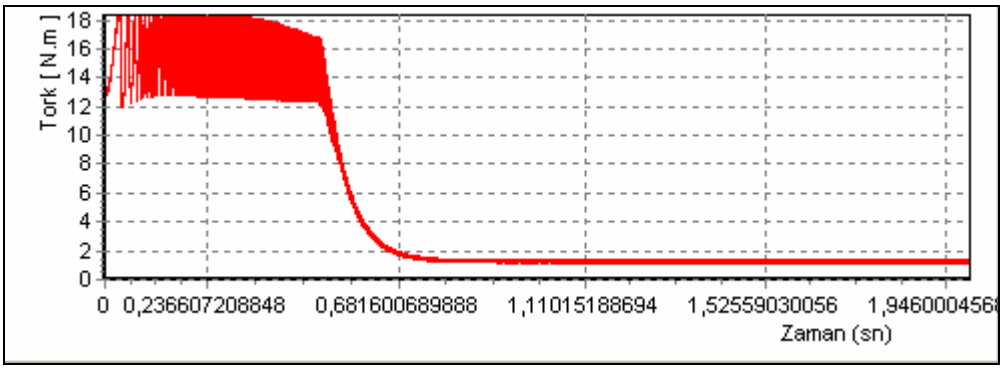
(a)Hız eğrisi



(b) Faz akımı



(c) Faz gerilimi



(d)Motor çıkış torku

Şekil 4.24. ARM'nin YSA modelleme ile (0-2) sn zaman aralığında, 1500 d/d ve yüksüz durumda, benzetim sonuçları

4.4.6. 1500 d/d referans hız ve yüklü durum

ARM, Çizelge 4.5'deki değişken değerlerinde çalıştırılmış ve motor 1500 d/d referans hız ve 5 N.m yüklü durumda, elde edilen benzetim sonuçları 0-2 sn aralığı için Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'da verilmiştir. Bu çalışmada, motorun 0-2 sn zaman aralığında Şekil 4.25 (a)'da hız tepki eğrisi, Şekil 4.25 (b)'de faz akımı eğrisi, Şekil 4.25 (c)'de faz gerilimi eğrisi, Şekil 4.25 (d)'de motor çıkış tork eğrisi PI denetleyici tasarımı ile, Şekil 4.26 (a)'da hız tepki eğrisi, Şekil 4.26 (b)'de faz akımı eğrisi, Şekil 4.26 (c)'de faz gerilimi eğrisi, Şekil 4.26 (d)'de motor çıkış tork eğrisi YSA modelleme ile elde edilen eğrileridir.

PI denetleyici tasarım

Benzetim sonuçlarına göre motor 0 d/d' dan 1500 d/d' ya 1250 ms' de yükselmektedir. Hız eğrisinde aşım 2 d/d olmakta ve salınım ise referans hıza ulaştıktan 10 ms sonra kararlı duruma ulaşıp referans hızı izlediği görülmektedir.

Motor referans hıza ulaştıktan sonra çekilen akım azalmaktadır. Benzetim sonuçlarına göre motor kalkınması esnasında faz akımı maksimum değeri 9 A de iken, kararlı durumda 7,5 A değerine düşmüştür. Ayrıca hız arttıkça faz akımının periyodunun düşmekte ve frekansının artmakta olduğu görülmektedir.

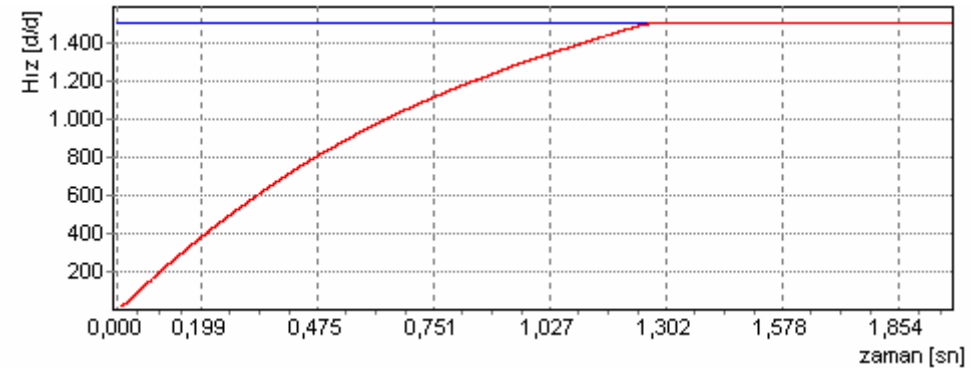
Kalkınma anında çekilen yüksek akımdan dolayı motor çıkış torku 14 N.m, kararlı duruma ulaştıktan sonra motorda üretilen tork maksimum 8,7 N.m seviyesinde olmaktadır.

YSA modelleme

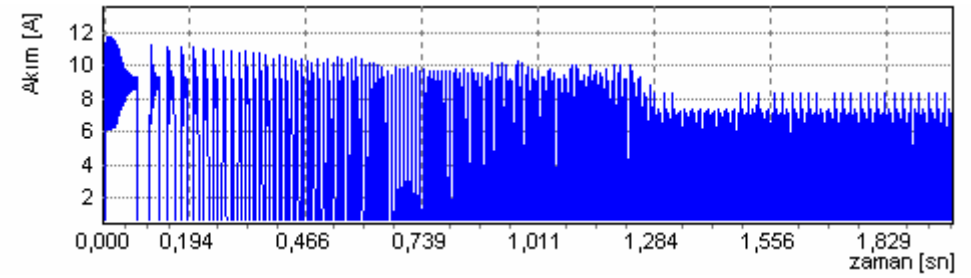
Benzetim sonuçlarına göre motor 0 d/d' dan 1500 d/d' ya 1000 ms' de yükselmektedir. Hız eğrisinde aşım 1 d/d olmakta ve salınım ise referans hıza ulaştıktan 3 ms sonra kararlı duruma ulaşıp referans hızı izlediği görülmektedir.

Motor referans hıza ulaştıktan sonra çekilen akım azalmaktadır. Benzetim sonuçlarına göre motor kalkınması esnasında faz akımı maksimum değeri 9 A de iken, kararlı durumda 6,5 A değerine düşmüştür. Ayrıca hız arttıkça faz akımının periyodunun düşmekte ve frekansının artmakta olduğu görülmektedir.

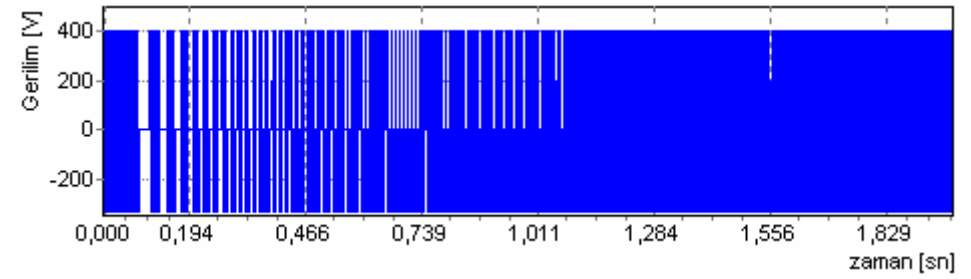
Kalkınma anında çekilen yüksek akımdan dolayı motor çıkış torku 14 N.m, kararlı duruma ulaştıktan sonra motorda üretilen tork 6,6 N.m seviyesinde olmaktadır.



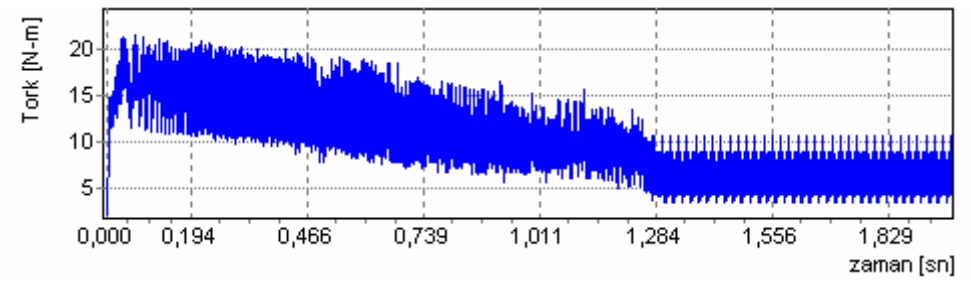
(a) Hız eğrisi



(b) Faz akımı

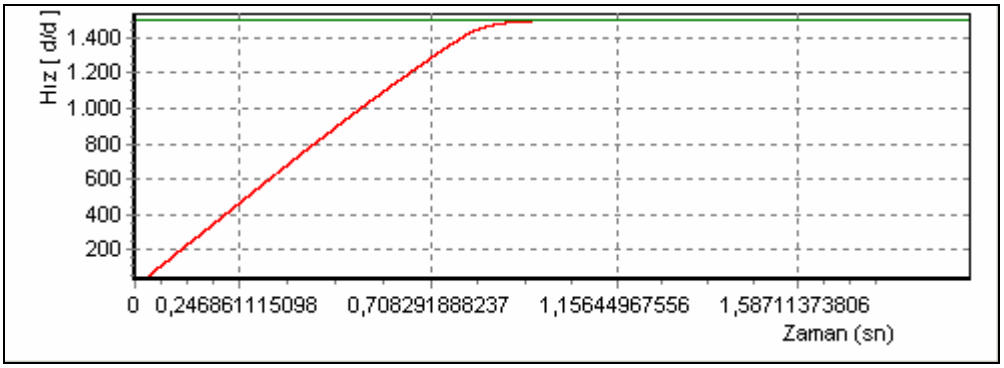


(c) Faz gerilimi

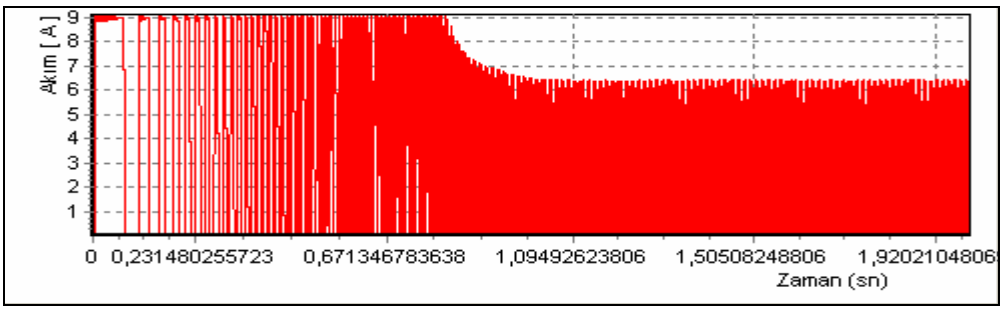


(d) Motor çıkış torku

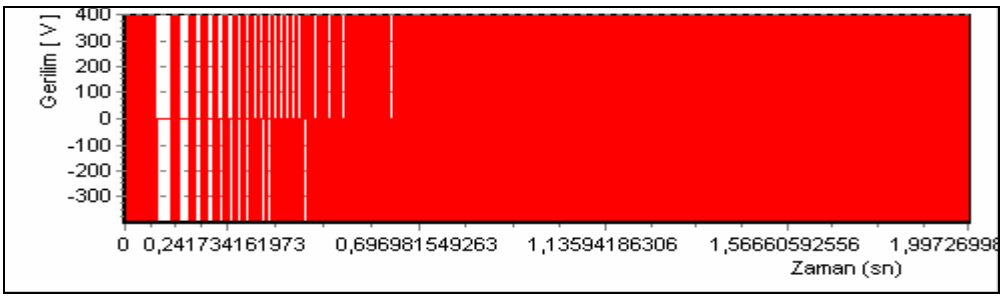
Şekil 4.25. ARM'nin PI denetleyici tasarımı ile (0-2) sn zaman aralığında, 1500 d/d ve 5 N-m yüklü durumda, benzetim sonuçları



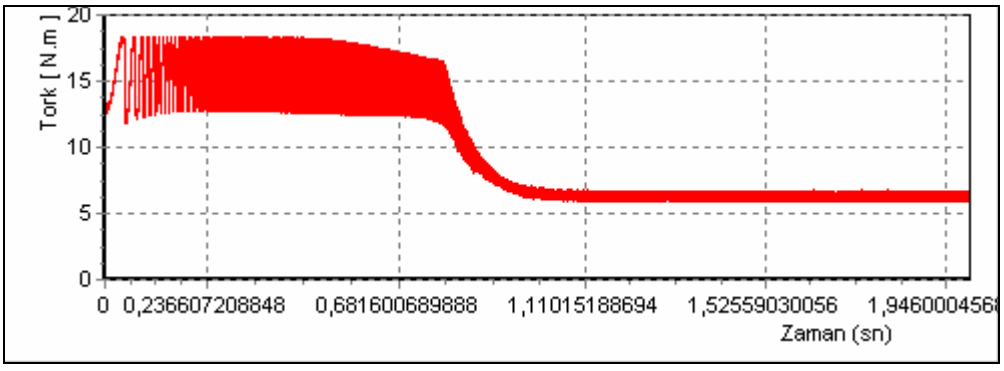
(a)Hız eğrisi



(b) Faz akımı



(c) Faz gerilimi



(d)Motor çıkış torku

Şekil 4.26. ARM'nin YSA modelleme ile (0-2) sn zaman aralığında, 1500 d/d ve 5 N-m yüklü durumda, benzetim sonuçları

4.4.7. 750 d/d referans hız ve değişken yüklü durum

ARM, Çizelge 4.5'deki değişken değerlerinde ve motor 750 d/d sabit hızda ve 0 sn ile 0,5 sn zaman aralığında yüksüz, 0,5 sn ile 1 sn zaman aralığında 5 N.m yük bindirilerek, 1 ile 1,5 sn zaman aralığında yüksüz çalıştırılmış ve elde edilen benzetim sonuçları, 0-1,5 sn zaman aralığı için Şekil 4.27 ve Şekil 4.28'da verilmiştir. Bu çalışmada, motorun 0-1,5 sn zaman aralığında Şekil 4.27 (a)'da hız tepki eğrisi, Şekil 4.27 (b)'de faz akımı eğrisi, Şekil 4.27 (c)'de faz gerilimi eğrisi, Şekil 4.27 (d)'de motor çıkış tork eğrisi PI denetleyici tasarımı ile, Şekil 4.28 (a)'da hız tepki eğrisi, Şekil 4.28 (b)'de faz akımı eğrisi, Şekil 4.28 (c)'de faz gerilimi eğrisi, Şekil 4.28 (d)'de motor çıkış tork eğrisi YSA modelleme ile elde edilen eğrileridir.

PI denetleyici tasarım

Benzetim sonuçlarına göre, motor 0 d/d' dan 750 d/d' ya 332 ms' de yükselmektedir. Hız eğrisinde aşım 2 d/d olmakta ve salınım ise referans hıza ulaştıktan yaklaşık 80 ms sonra kararlı duruma ulaşıp referans hızı izlediği görülmektedir.

Motor kalkınmaya başladıktan 500 sn sonra bindirilen 5 N.m yük ile hızda 4 d/d salınım olduğu ve yaklaşık 90 ms sonra kararlı duruma ulaşıp referans hızı izlediği görülmektedir. Yük bindirildikten 500 sn sonra 5 N.m yük kaldırılmış ve +4 d/d ve 1 d/d salınım olduğu, yaklaşık 200 ms sonra kararlı duruma ulaşıp referans hızı izlediği görülmektedir.

Motor kalkınması esnasında faz akımı maksimum değeri 9 A de iken, kararlı durumda 2 A değerine düşmüştür. Motor yüklendiği durumda faz akımı 5 N.m yükü karşılamak için 8 A' e çıktığı, yük kaldırıldığında tekrar 2 A değerine düştüğü görülmektedir.

Motor kalkınma anında motor çıkış torku 18 N.m seviyesindedir. Yüksüz durumda sürtünme atalet torkundan dolayı çıkış torku maksimum 1,4 N.m seviyesinde, yüklü durumda maksimum 8 N.m değerinde olduğu görülmektedir.

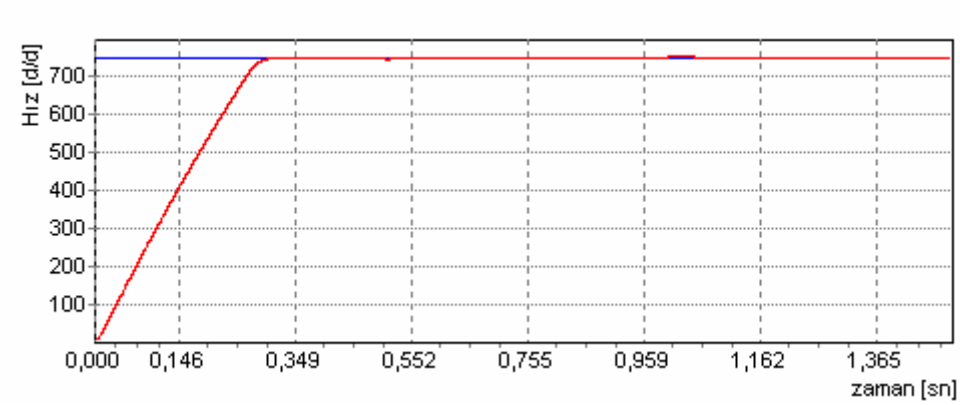
YSA modelleme

Benzetim sonuçlarına göre, motor 0 d/d' dan 750 d/d' ya 481 ms' de yükselmektedir. Hız eğrisinde aşım 1 d/d olmakta ve salınım ise referans hıza ulaştıktan yaklaşık 3 ms sonra kararlı duruma ulaşıp referans hızı izlediği görülmektedir.

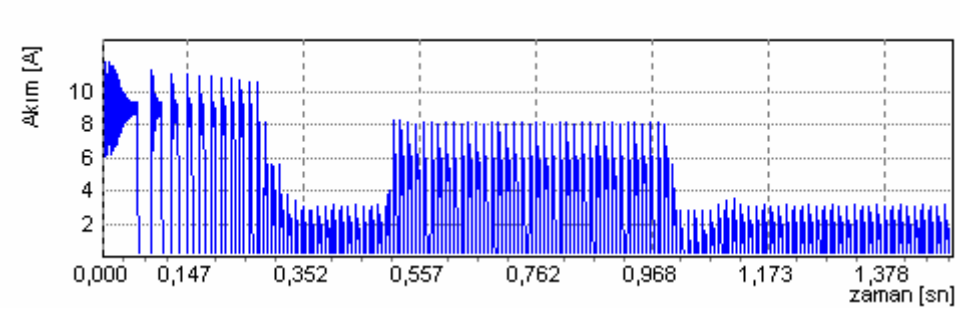
Motor kalkınmaya başladıktan 500 sn sonra bindirilen 5 N.m yük ile hızda 0,5 d/d salınım olduğu ve yaklaşık 2 ms sonra kararlı duruma ulaşıp referans hızı izlediği görülmektedir. Yük bindirildikten 500 sn sonra 5 N.m yük kaldırılmış ve 0,5 d/d salınım olduğu, yaklaşık 2 ms sonra kararlı duruma ulaşıp referans hızı izlediği görülmektedir.

Motor kalkınması esnasında faz akımı maksimum değeri 9 A de iken, kararlı durumda 2 A değerine düşmüştür. Motor yüklendiği durumda faz akımı 5 N.m yükü karşılamak için 6 A' e çıktığı, yük kaldırıldığında tekrar 2 A değerine düştüğü görülmektedir.

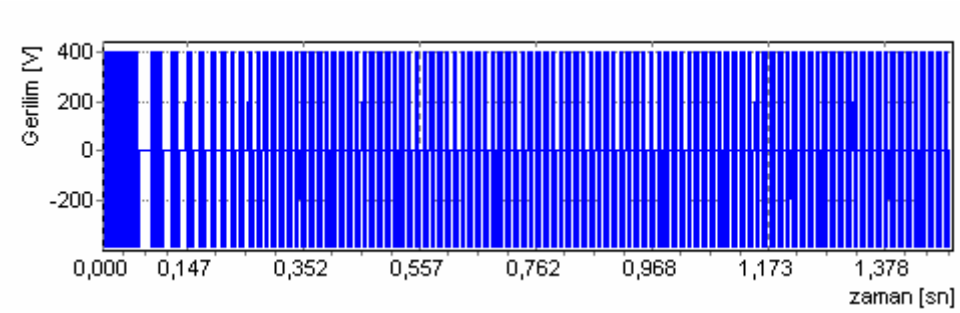
Motor kalkınma anında motor çıkış torku 18 N.m seviyesindedir. Yüksüz durumda sürtünme atalet torkundan dolayı çıkış torku 0,67 N.m seviyesinde, yüklü durumda 6 N.m değerinde olduğu görülmektedir.



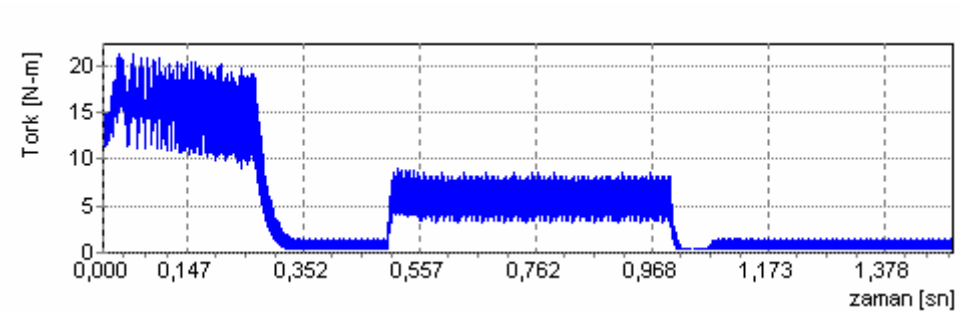
(a)Hız eğrisi



(b) Faz akımı

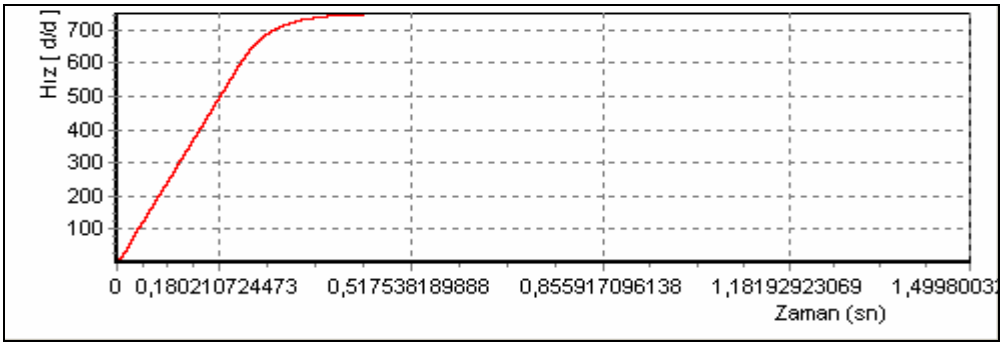


(c) Faz gerilimi

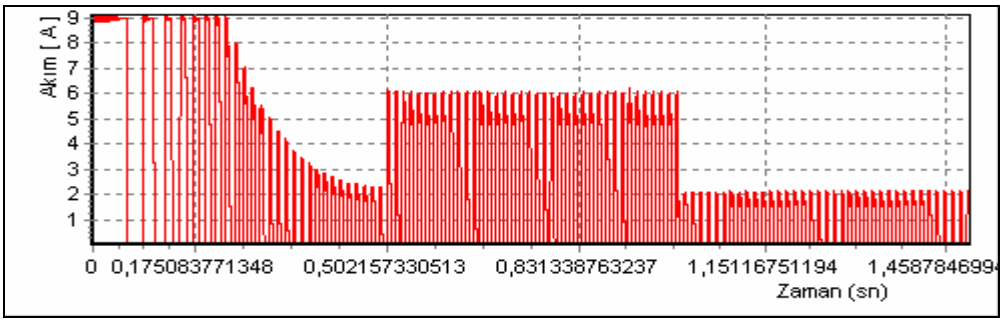


(d)Motor çıkış torku

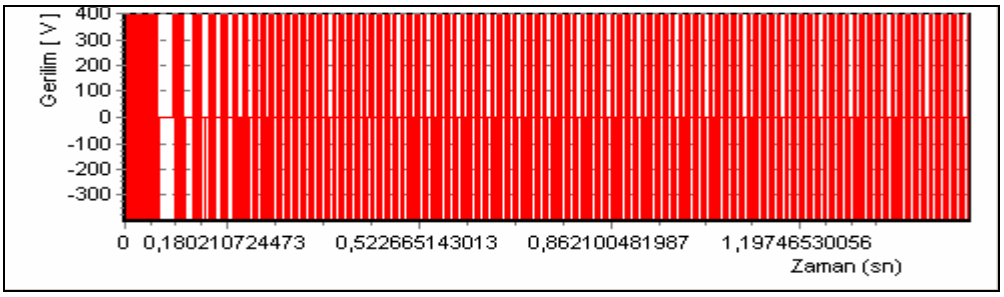
Şekil 4.27. ARM'nin PI denetleyici tasarımı ile (0-1.5) sn zaman aralığında, 750 d/d ve yüksüz-5-yüksüz durumda, benzetim sonuçları



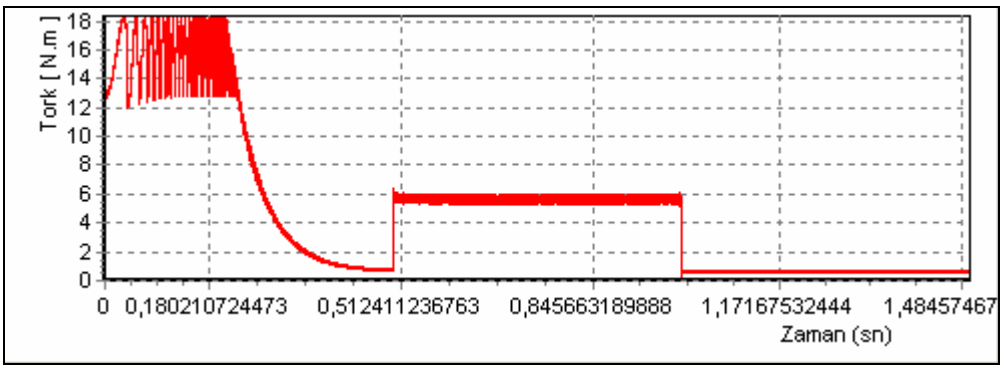
(a)Hız eğrisi



(b) Faz akımı



(c) Faz gerilimi



(d)Motor çıkış torku

Şekil 4.28. ARM'nin YSA modelleme ile (0-1.5) sn zaman aralığında, 750 d/d ve yüksüz-5 N.m-yüksüz durumda, benzetim sonuçları

4.4.8. Değişken hız referanslı ve yüksüz durum

ARM, Çizelge 4.5'deki değişken değerlerinde ve 0 ile 0,5 sn zaman aralığında 500 d/d ve 6 sn zaman aralığında 250 d/d referans hız ve yüksüz durumda çalıştırılmış ve elde edilen benzetim sonuçları, 0-6 sn zaman aralığı için Şekil 4.29 ve Şekil 4.30'da verilmiştir. Bu çalışmada, motorun 0-6 sn zaman aralığında Şekil 4.29 (a)'da hız tepki eğrisi, Şekil 4.29 (b)'de faz akımı eğrisi, Şekil 4.29 (c)'de faz gerilimi eğrisi, Şekil 4.29 (d)'de motor çıkış tork eğrisi PI denetleyici tasarımı ile, Şekil 4.30 (a)'da hız tepki eğrisi, Şekil 4.30 (b)'de faz akımı eğrisi, Şekil 4.30 (c)'de faz gerilimi eğrisi, Şekil 4.30 (d)'de motor çıkış tork eğrisi YSA modelleme ile elde edilen eğrileridir.

PI denetleyici tasarım

Benzetim sonuçlarına göre motor 0 d/d' dan 500 d/d' ya 222 ms' de ulaşmıştır ve 500 d/d' dan 250 d/d' ya 4750 ms' de düşmüştür. Motor 250 d/d' ya ulaştığında - 5 d/d salınım yaptığı, referans hıza ulaştıktan 50 ms sonra kararlı duruma ulaşıp referans hızı izlediği görülmektedir.

Motor kalkınması esnasında faz akımı maksimum değeri 9 A, hız değişimleri esnasında 500 d/d'da 2 A ve 250 d/d'da 1,8 A olduğu görülmektedir. Değişken referans hızda elde edilen faz akımının farklı olmasının nedeni sürtünme ve atalet torkunun hızla orantılı olarak değişmesidir.

Motor kalkınma anında çekilen yüksek akımdan dolayı motor çıkış torku 18 N.m, 500 d/d referans hızda kararlı duruma ulaştıktan sonra maksimum 0,95 N.m, 250 d/d'da 0,6 N-m seviyesinde olduğu görülmektedir.

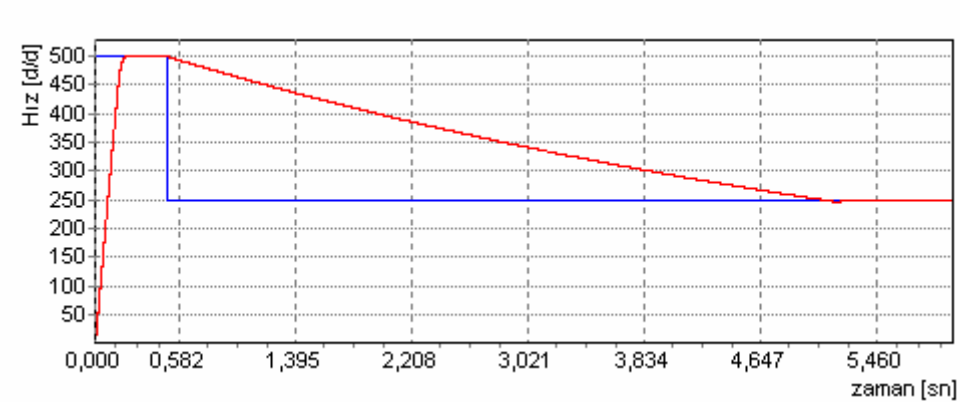
YSA modelleme

Benzetim sonuçlarına göre motor 0 d/d' dan 500 d/d' ya 360 ms' de ulaşmıştır ve 500 d/d' dan 250 d/d' ya 4750 ms' de düşmüştür. Motor 250 d/d' ya ulaştığında – 0,5 d/d salınım yaptığı, referans hıza ulaştıktan 2 ms sonra kararlı duruma ulaşıp referans

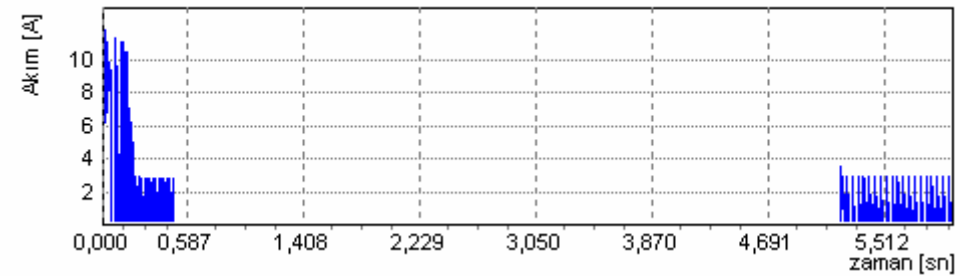
hızı izlediği görülmektedir.

Motor kalkınması esnasında faz akımı maksimum değeri 9 A, hız değişimleri esnasında 500 d/d'da 1,85 A ve 250 d/d'da 1,4 A olduğu görülmektedir. Değişken referans hızda elde edilen faz akımının farklı olmasının nedeni sürtünme ve atalet torkunun hızla orantılı olarak değişmesidir.

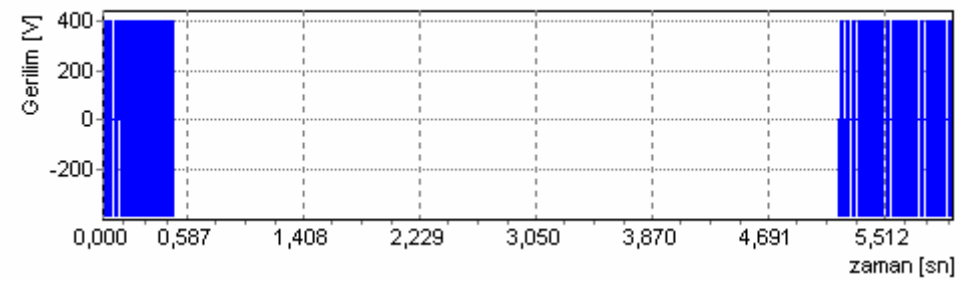
Motor kalkınma anında çekilen yüksek akımdan dolayı motor çıkış torku 18 N.m, 500 d/d referans hızda kararlı duruma ulaştıktan sonra 0,46 N.m, 250 d/d' da 0,3 N-m seviyesinde olduğu görülmektedir.



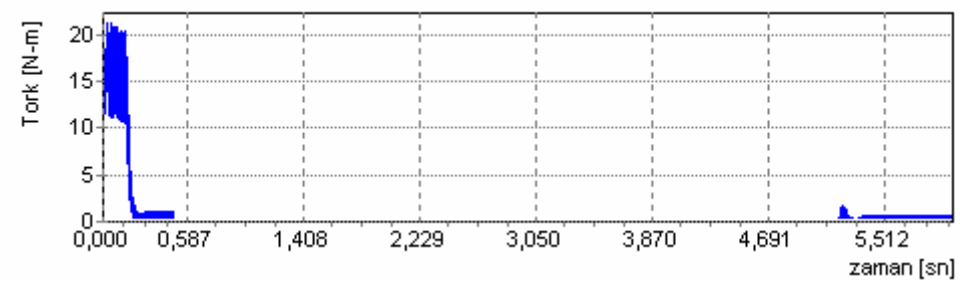
(a)Hız eğrisi



(b) Faz akımı

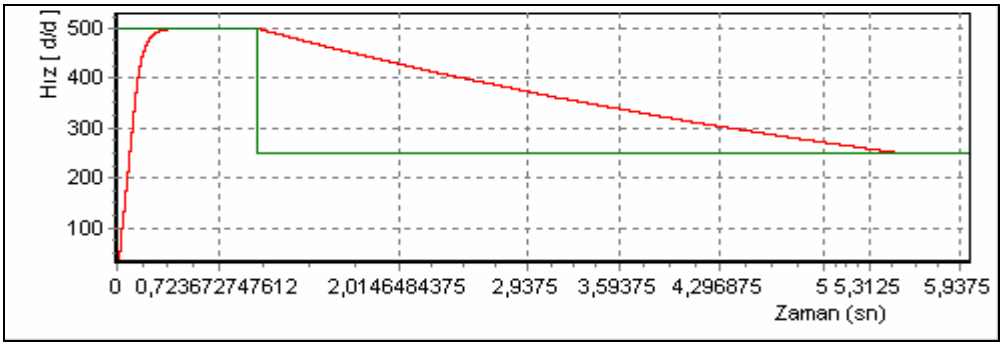


(c) Faz gerilimi

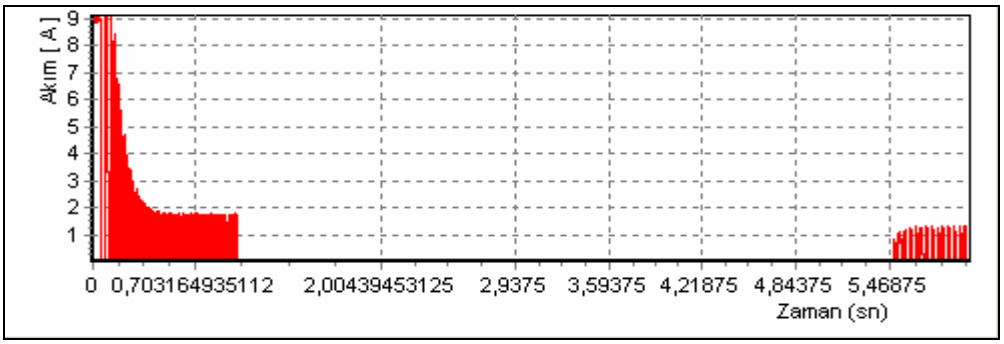


(d)Motor çıkış torku

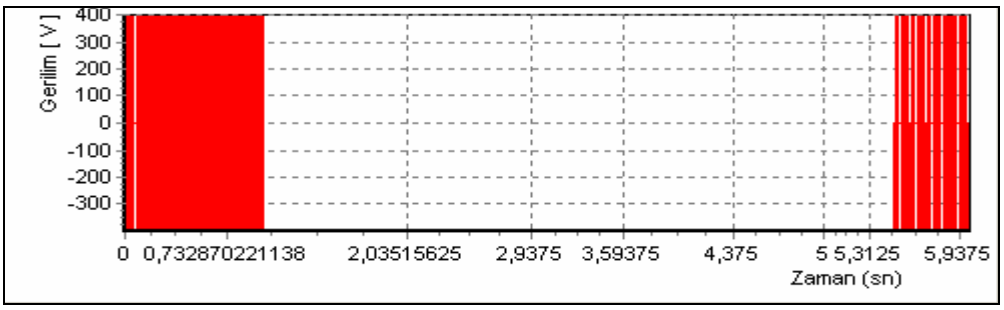
Şekil 4.29. ARM'nin PI denetleyici tasarımı ile (0-6) sn zaman aralığında, değişken hız ve yüksüz durumda, benzetim sonuçları



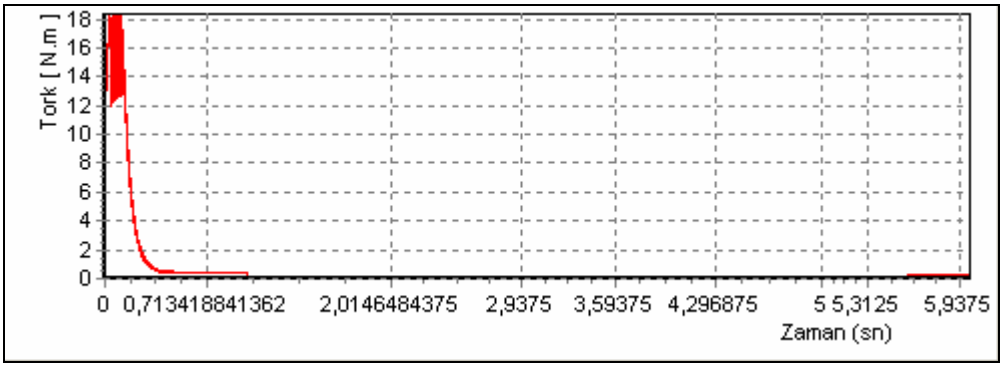
(a)Hız eğrisi



(b) Faz akımı



(c) Faz gerilimi



(d)Motor çıkış torku

Şekil 4.30. ARM'nin YSA modelleme ile (0-6) sn zaman aralığında, değişken hız ve yüksüz durumda, benzetim sonuçları

4.4.9. Değişken hız referanslı ve yüklü durum

ARM, Çizelge 4.5'deki değişken değerlerinde ve 0 ile 0,5 sn zaman aralığında 500 d/d, 0,5 ile 1 sn zaman aralığında 250 d/d ve 1 sn ile 2 sn zaman aralığında 1000 d/d referans hız ve 5 N.m yüklü durumda çalıştırılmış ve elde edilen benzetim sonuçları, 0-2 sn zaman aralığı için Şekil 4.31 ve Şekil 4.32'de verilmiştir. Bu çalışmada, motorun 0-2 sn zaman aralığında Şekil 4.31 (a)'da hız tepki eğrisi, Şekil 4.31 (b)'de faz akımı eğrisi, Şekil 4.31 (c)'de faz gerilimi eğrisi, Şekil 4.31 (d)'de motor çıkış tork eğrisi PI denetleyici tasarımı ile, Şekil 4.32 (a)'da hız tepki eğrisi, Şekil 4.32 (b)'de faz akımı eğrisi, Şekil 4.32 (c)'de faz gerilimi eğrisi, Şekil 4.32 (d)'de motor çıkış tork eğrisi YSA modelleme ile elde edilen eğrileridir.

PI denetleyici tasarım

Benzetim sonuçlarına göre motor 0 d/d' dan 500 d/d' ya 360 ms' de, 500 d/d' dan 250 d/d' ya 300 ms' de ve 250 d/d' dan 1000 d/d' ya 640 ms' de ulaşmıştır. Kararlı durumda hız eğrisinde gerçek hızın referans hızı izlediği görülmektedir.

Motor kalkınması esnasında faz akımı maksimum değeri 9 A, hız değişimleri esnasında 500 d/d' da 6 A, 250 d/d' da 4,5 A ve 1000 d/d' da 7 A olduğu görülmektedir. Değişken referans hızda elde edilen faz akımının farklı olmasının nedeni sürtünme ve atalet torkunun hızla orantılı olarak değişmesidir.

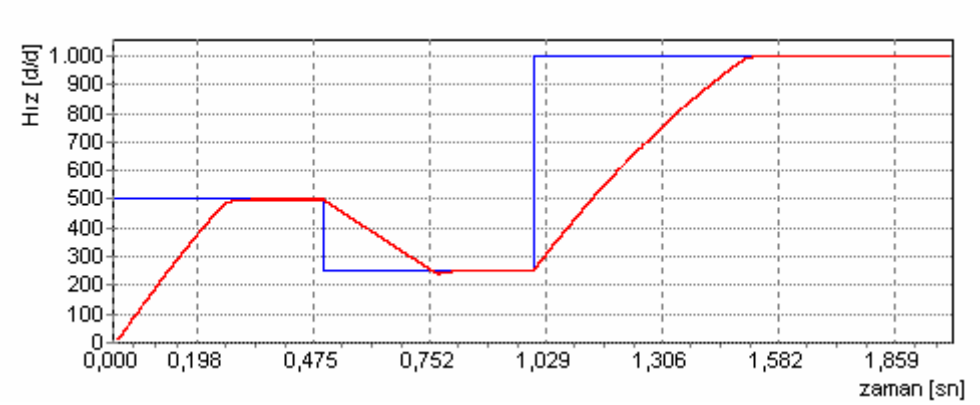
Motor çıkış torku, hız değişimleri esnasında 16 N-m seviyesindedir. Kararlı durumda, 500 d/d' da maksimum 7,85 N-m, 250 d/d' da maksimum 5 N-m ve 1000 d/d' da maksimum 8,3 N-m seviyesine olduğu görülmektedir.

YSA modelleme

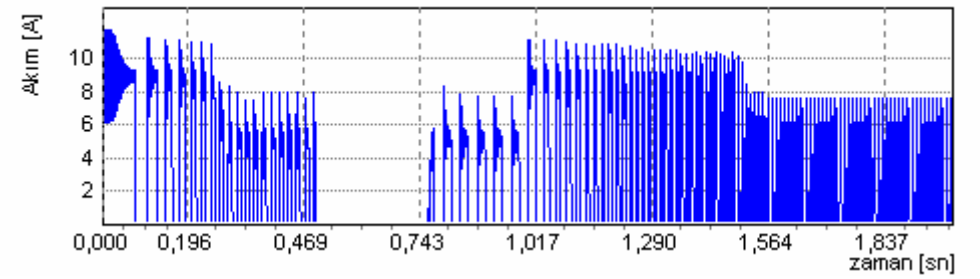
Benzetim sonuçlarına göre motor 0 d/d' dan 500 d/d' ya 332 ms' de, 500 d/d' dan 250 d/d' ya 300 ms' de ve 250 d/d' dan 1000 d/d' ya 560 ms' de ulaşmıştır. Kararlı durumda hız eğrisinde gerçek hızın referans hızı izlediği görülmektedir.

Motor kalkınması esnasında faz akımı maksimum değeri 9 A, hız değişimleri esnasında 500 d/d' da 6 A, 250 d/d' da 4,5 A ve 1000 d/d' da 6,1 A olduğu görülmektedir. Değişken referans hızda elde edilen faz akımının farklı olmasının nedeni sürtünme ve atalet torkunun hızla orantılı olarak değişmesidir.

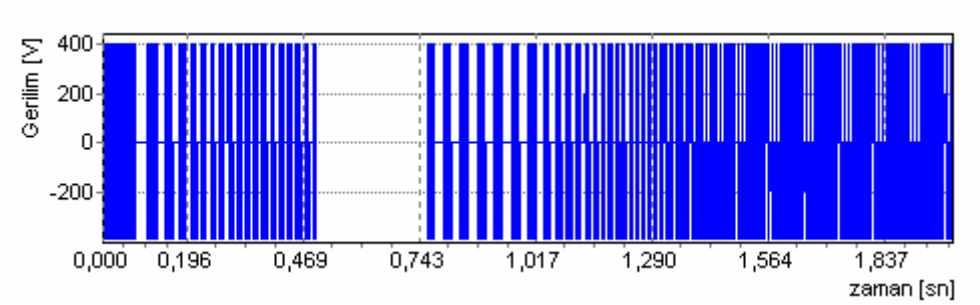
Motor çıkış torku, hız değişimleri esnasında 16 N-m seviyesindedir. Kararlı durumda, 500 d/d' da 5,8 N-m, 250 d/d' da 5,2 N-m ve 1000 d/d' da 6,2 N-m seviyesine olduğu görülmektedir.



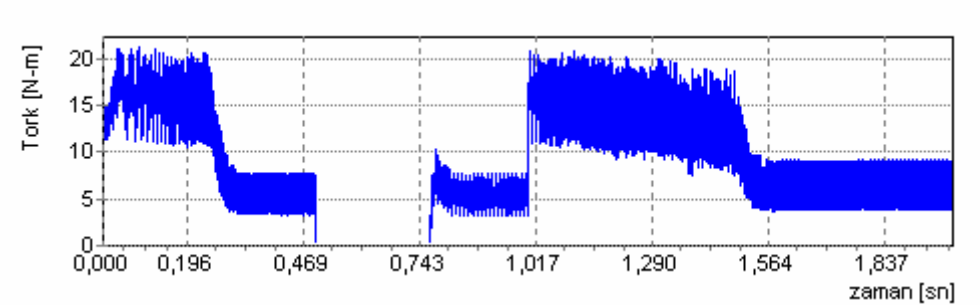
(a)Hız eğrisi



(b) Faz akımı

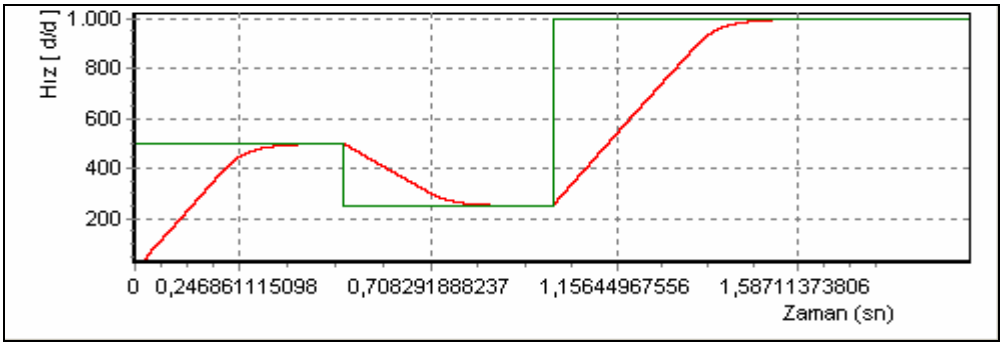


(c) Faz gerilimi

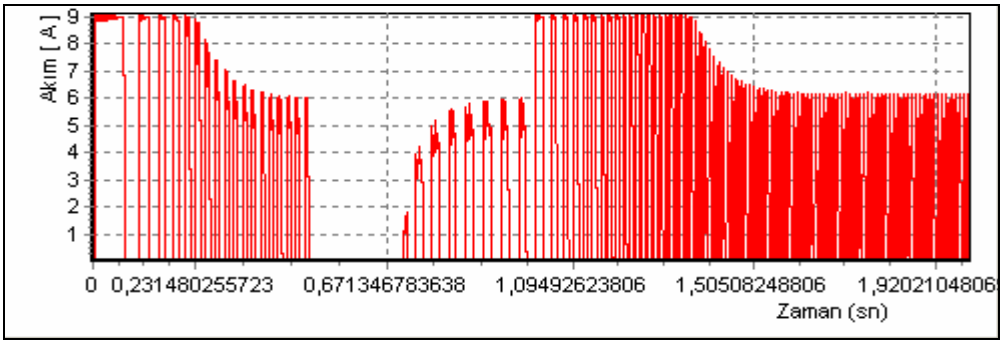


(d)Motor çıkış torku

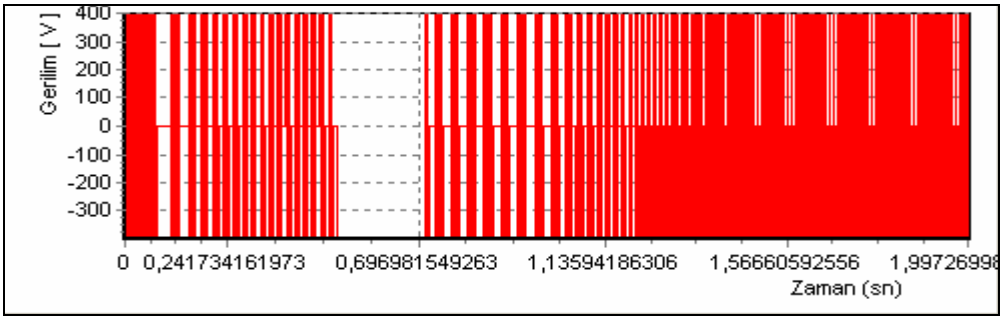
Şekil 4.31. ARM'nin PI denetleyici tasarımı ile (0-2) sn zaman aralığında, değişken hız ve 5 N-m yüklü durumda, benzetim sonuçları



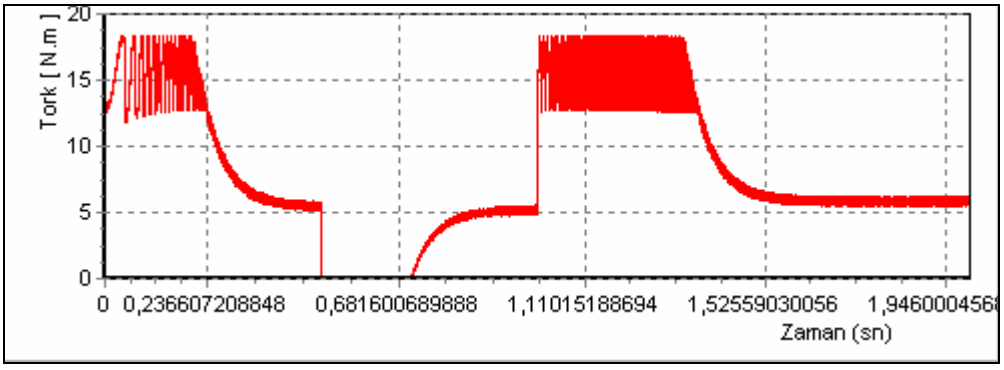
(a)Hız eğrisi



(b) Faz akımı



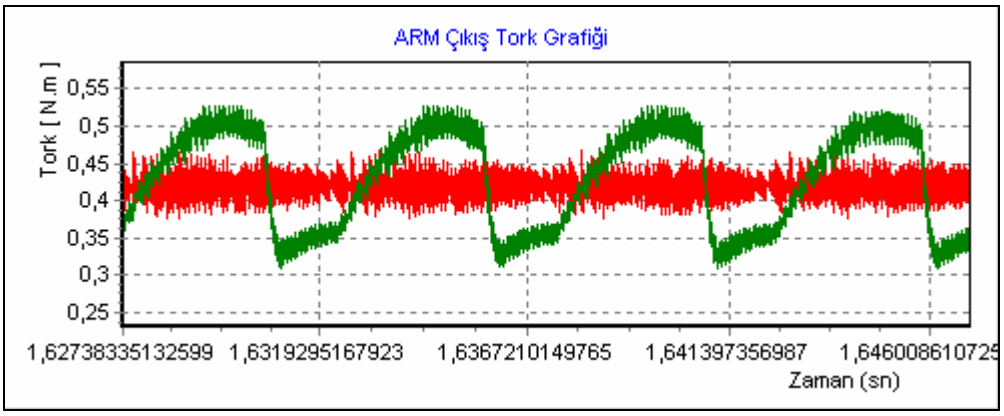
(c) Faz gerilimi



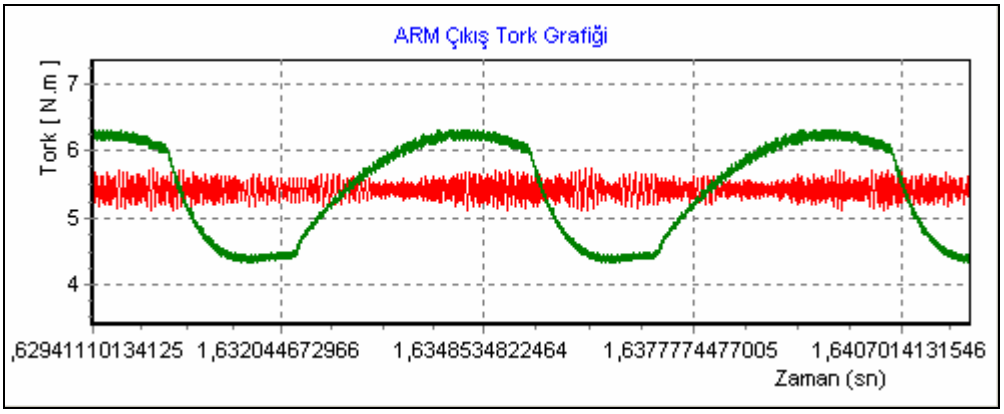
(d)Motor çıkış torku

Şekil 4.32. ARM'nin YSA modelleme ile (0-2) sn zaman aralığında, değişken hız ve 5 N-m yüklü durumda, benzetim sonuçları

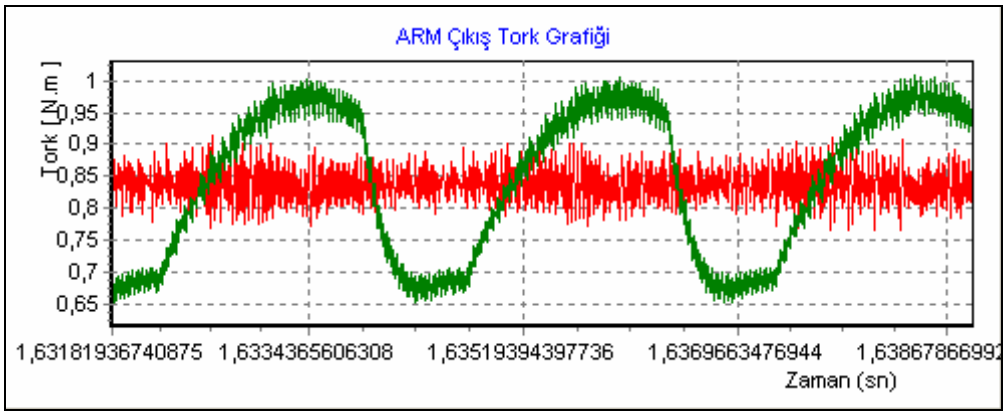
ARM'nin YSA modelleme ve PI denetleyici tasarımı ile çeşitli hız ve yük durumlarımda büyütülmüş çıkış tork benzetim sonuçları Şekil 4.33'de birlikte gösterilmiştir



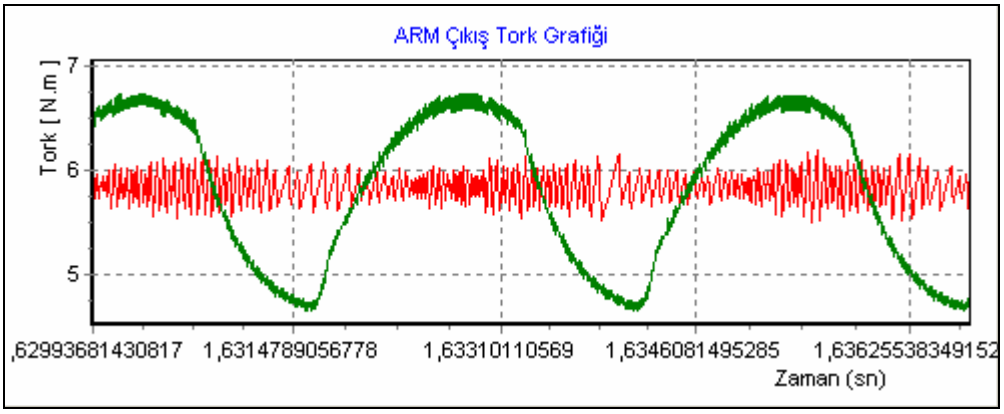
(a) Motorun 500 d/d ve yüksüz durumu



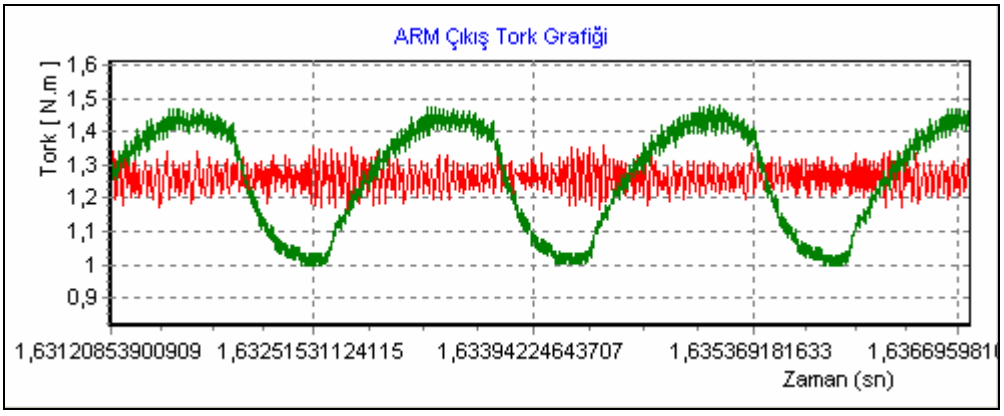
(b) Motorun 500 d/d ve 5 N-m yüklü durumu



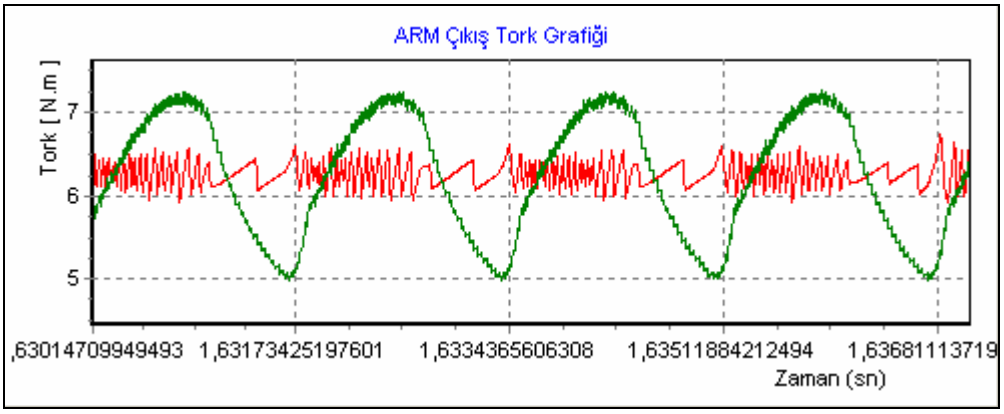
(c) Motorun 1000 d/d ve yüksüz durumu



(d) Motorun 1000 d/d ve 5 N-m yüklü durumu



(e) Motorun 1500 d/d ve yüksüz durumu



(f) Motorun 1500 d/d ve 5 N-m yüklü durumu

Şekil 4.33. ARM'nin YSA modelleme ve PI denetleyici tasarımı ile çeşitli hız ve yük durumlarımda büyütülmüş çıkış tork benzetim sonuçları

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında ARM' nin hız ve tork denetimi için yeni bir YSA modeli tasarlanmıştır. Tasarlanan bu YSA modeliyle, diğer denetim yöntemlerinden kaynaklanan, denetleyici karmaşıklığı, motor parametre değişimleri etkisinin azaltılması ve sürücünün performansının geliştirmesi gibi iyileştirme durumları amaçlanmıştır.

ARM'deki doğrusal olmayan manyetik akı karakteristiklerinin belirlenmesinde YSA tabanlı bir modelleme kullanılmıştır. Tasarlanan bu YSA modeliyle, ARM'nin manyetik akısının en doğru şekilde belirlenmesi amaçlanmıştır. YSA tabanlı manyetik akı modelinin başarımını görmek için deneysel düzenekten alınmış veri eğrileri ile YSA eğitim sonrası elde edilen eğriler karşılaştırılmıştır. Benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar, akı yoğunluğunun gerçeğe en yakın bir biçimde YSA ile modellenebildiğini göstermiştir.

ARM'nin hız ve tork denetimi için YSA modelleme ve PI denetleyici tasarımı yapılmıştır. Benzetim çalışmasında C++ Builder programlama dili kullanılmıştır. Hazırlanan simulatör ile her iki modelleme içinde benzetim aşamasında motor 500 d/d, 1000 d/d ve 1500 d/d hız referanslarında yüklü ve yüksüz durumda, değişken referans hız yüklü ve yüksüz durumda, sabit referans hız ve değişken yük durumunda çalıştırılmıştır. Bu çalışmalarda motor hızı, faz akımları, faz gerilimleri, çıkış torku, geçici ve kararlı durumdaki grafikleri elde edilmiştir. Bu grafiklerin analizi yapıldığında, YSA ile modelleme PI denetleyiciden daha iyi tepki verdiği gözlenmiştir.

KAYNAKLAR

1 Lawrenson, P.J., Stephenson, J.M., Blenkipsop, P.T., Corda, J., Fulton, N.N., "Variable-Speed Switched Reluctance Motors", ***IEE Proc.***, USA, 253-265, (1980).

2 Rodrigues, M., Branco, P.J.C., Suemitsu, W., "Fuzzy Logic Torque Ripple Reduction by Turn-Off Angle Compensation for Switched Reluctance Motors", ***IEEE Transactions of Industrial Electronics***, USA, 711-714, (2001).

3 Miller, T.J.E., "Switched Reluctance Motors and their control", ***Magna Physics Publishing and Clarendon Press***, Oxford, 1-199 (1993).

4 Polloc, C. and Williams, B. W., "Power Converter Circuits for Switched Reluctance Motors with the Minimum Number of Switches***", IEE Proccedings*** ,B, 137(6):374-384, (1990).

5 Bedford, B.D., US patent no 3678352 and 3679953, 1972.

6 Unnewehr, L.E. and Koch, W.H., "An Axial Air-Gap Reluctance Motor for Veriable Speed Applications, ***IEEE Trans. on Power Apparatus and systems, PAS-93***, 367-376, (1974).

7 Bausch, H. and Reike B., "Speed and Torque Control of Thyristor-Fed Reluctance Motors", ***Proccedings ICEM***, Vienna, 128.1-128.10, (1978).

8 Lawrenson, P.J., Stephenson, J.M., Blenkinsop, P.T., Corda, J. and Fulton N.N., "Variable speed switched reluctance motors", ***IEE Proccedings Electrical Power Applications***, B,127(4): 253-265, (1980).

9 Lawrenson, P.J., "Switched reluctance motor drives: A perspective, ***Proceedings of ICEM'92 Conference***, Manchester, UK, 1:12-22, (1992).

10 Arumugam, R., Lindsay, J.F. and R.Krishnan, "Sensitivity of pole arc/pole pitch ratio on switched reluctance motor performance", ***IEEE IAS Annual Meeting***, Pittsburgh, USA, 50-54, (1988).

11 Pollock, C. and Williams, B.H., "The Design Performance of Multiphase Switched Reluctance Drive", ***EPE'89***,Aachen, Germany 29-34,(1989).

12 Bose, B.K., Miller, T.J.E., Szczesny, P.M. and Bicknell,W.H., "Microcomputer control of switched reluctance motors", ***IEEE Transactions on Industrial Applications***, 253-265, (1985).

13 Elmas, Ç. and De La Parra, H.Z., "A DSP controlled switched reluctance drive system for wide range of operating speeds", ***IEEE PESC'92***, Toledo, Spain, 844-850, (1992).

14 Elmas, Ç., Yiğit, T., "Genetıc PI Controller For A Switched Reluctance Motor Drive", ***International XII. Turkish Symposium on Artificial Intelligence and Neural Networks – TAINN 2003***, pp. 330-332, Çanakkale, (2003).

15 Bingöl, O., "Yapay Sinir Ağı ile Modellenen Alan Yönlendirmeli bir Asenkron Motorun Üç Seviyeli Evirici ile Hız Denetimi", Doktora Tezi, ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,*** 1-100 Ankara, (2005).

16 Yiğit, T., "Genetik Uyarlamalı Denetleyici İle Anahtarlamalı Reluktans Motorun Hız Denetiminin Gerçekleştirilmesi", Doktora Tezi, ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,*** Ankara, 1-100 (2005).

17 Elmas, Ç., Position Sensorless Operation of A Switched Reluctance Motor Drive Based on A Non-Linear Observer, PhD. Thesis, ***School Of Electronic & Electrical Engineering, University of Birmingham***, 1-100, (1993).

18 Miller, T.J.E., "Electronic Control of Switched Reluctance Machines", ***Newnes Power Engineering Series***, Oxford, 1-266 (2001).

19 Bay, Ö.F., "Anahtarlamalı Relüktans Motorun Bulanık Mantık Tabanlı Modellenmesi ve Kontrolu", Doktora Tezi, ***Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Kayseri, 1-100 (1996).

20 Sefa, İ., "Sliding Mode Yaklaşımı ile Anahtarlamalı Relüktans Motorun Hız Denetimi", Doktora Tezi, ***Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Kayseri, 13-14, (1997).

21 Sugden D.M., Webster, P.D. and Stephenson, J.M., "The Control of SRM Drives: Review and current states", ***Proceedings of the International Conference on European Power Electronics EPE'89***, Aachen, Germany, 35-40, (1989).

22 Davis R.M., Ray, W.F. and Blake, R.J., "Inverter Drive for Switched Reluctance Motor: Circuits and Component Rating", ***IEE Proceddings B,*** 128(2):126-136, (1981).

23 Mehrdad E., Bass, J.T., Miller, T.J.E. and Steigerwald, R.L., "Development of a Unipolar Converter for Variable Reluctance Motor Drives", ***IEEE Transactions on Industrial Applications***, 23(3): 545-553, (1987).

24 Huy, H.L. ve diğerleri, "Unipolar Converters for Switched Reluctance Motors", ***IEEE IAS Annual Meeting,*** San Diego, USA, 551-560, (1989).

25 Huy, H.L., Viarouge, P, and Francoeur, B., "A Novel Unipolar Converters for Switched Reluctance Motor", ***IEEE Transactions on Power Electronics***, 5(4):469-475, (1990).

26 Krishnan, R., "Switched Reluctance Motor Drives", ***CRC Pres***, 1-398, (2001).

27 Zell, Z.,, "Simulation Neuronaler Netze", ***Addision-Wesley***, Bonn, (1994).

28 McCulloch, W. and Pitts, W., "A Logical Calculus Of The Ideas Immanenet in Nervous Activity", ***Bulletin Mathematical Biophysics***, (5): 115-137, (1943).

29 Elmas, Ç. ve Coşkun, İ., "Yapay Sinir Ağları Kullanılarak Asenkron Motorun Statör Akımlarının Adaptiv Kontrolü", ***Elektrik mühendisliği 6. Ulusal Kongresi***, Bursa, 442-445 (1995).

30 Hebb, D., "The Organization Of Behavior: A Neuropsychological Theory", ***Wiley & Sons,*** New York, 1-368, (1949).

31 Patterson, D.W., "Artificial Neural Networks", ***Prentice Hall***, Tokyo, 9, (1995).

32 Rosenblatt, F., "The Perceptron: A Probabilistic Model For Information Storage & Organization in The Brain", ***Psychological Rewiew,*** (65): 386-408 (1958).

33 Elmas, Ç., "Yapay Sinir Ağları (Kuram, Mimari, Eğitim, Uygulama)", ***Seçkin Yayıncılık,*** Ankara, 22-37, (2003).

34 Widrow, B. and Hoff, M. E., "Adaptive Switching Circuits", ***IRE Western Electric Show and Convention Record,*** (4): 96-104 (1960).

35 Widrow, B. and Lehr, M. A., "30 Years of Adaptive Neural Networks: Perceptron, Madaline and Backpropagation", ***Proceedings The IEEE,*** 78 (9): 1415-1442 (1990).

36 Minsky, M. and Papert, S., "Perceptrons: an Introduction to Computational Geometry", ***MIT Press***, Cambridge, 1-275 (1969).

37 Rumelhart, D. E. and McClelland, J. L., "Paralel Distributed Processing: Explorations in The Microstructure of Cognition**",** ***MIT Press***, Cambridge, 1-1208 (1986).

38 Fukuda, T. and Shibata, T., "Theory and Applications Neural Networks for Industrial Control Systems", ***IEEE Transactions on Industrial Electronic***, 39 (6): 472-489 (1992).

39 Werbos, P., "Beyond Regression: New Tools For Prediction And Analysis in The Behavioral Sciences*",* ***Ph.D. Dissertation, Harvard University***, Cambridge, MA, (1974).

40 Hopfield, J. J., "Neural Network And Physical Systems With Emergent Collective Computational Abilities", ***Proc. Natl. Acad. Sci****.,* 79: 2554-2558 (1982).

41 Hopfield, J. J., "Neurons With Graded Response Have Collective Computational Properties Like Those Of Two- State Neurons", ***Proc. Natl. Acad. Sci.,*** 81: 3088-3092 (1984).

42 Kosko, B., "Adaptive Bidirectional Associative Memories", ***Appl. Optics***, 26: 4947-4960 (1987).

43 Sağıroğlu, Ş., Beşdok, E. ve Erler, M., "Mühendislikte Yapay Zeka Uygulamaları-I, Yapay Sinir Ağları", ***Ufuk Yayıncılık***, Kayseri, 40-42 (2003).

ÖZGEÇMİŞ

Uğur GÜVENÇ, 1980 yılında Zile' de doğdu. İlk, orta, ve lise öğrenimini Zile'de tamamladı. 2002 yılında Abant İzzet Baysal Düzce Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi Bölümünden mezun oldu. 2002 Ekim ayında Abant İzzet Baysal Düzce Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi Bölümüne Araştırma Görevlisi olarak atandı. G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsünde Araştırma Görevlisi olarak görevine devam etmektedir.