

160098

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ (SEY) İLE ANALİZİ
YAPILMIŞ YÜKSEK GÜÇLÜ ANAHTARLAMALI RELÜKTANS
MOTORUN YENİ BİR BULANIK MANTIK ALGORİTMASI
KULLANILARAK HIZ DENETİMİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Serkan SEZEN

Anabilim Dalı: Elektrik Eğitimi

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Ercüment KARAKAŞ

NİSAN 2006

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ (SEY) İLE ANALİZİ
YAPILMIŞ YÜKSEK GÜÇLÜ ANAHTARLAMALI RELÜKTANS
MOTORUN YENİ BİR BULANIK MANTIK ALGORİTMASI
KULLANILARAK HIZ DENETİMİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Serkan SEZEN

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 16.02.2006

Tezin Savunulduğu Tarih : 04.04.2006

Tez Danışmanı

Yrd.Doç.Dr. Ercüment KARAKAŞ



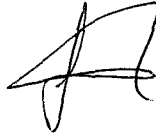
Üye

Yrd.Doç.Dr. Metin DEMİRTAŞ



Üye

Prof. Dr. Feriha ERFAN KUYUMCU



NİSAN 2006

SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ (SEY) İLE ANALİZİ YAPILMIŞ YÜKSEK GÜÇLÜ ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORUN YENİ BİR BULANIK MANTIK ALGORİTMASI KULLANILARAK HIZ DENETİMİ

Serkan SEZEN

Anahtar Kelimeler: Anahtarlamaalı Relüktans Motor (ARM), Bulanık Mantık Denetim, Hız Denetimi, Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY).

Özet: Anahtarlamaalı Relüktans Motorlar (ARM) basit yapılı ve çok yönlü denetim imkanlarına sahip motorlardır. Son yıllarda, bu avantajlarından dolayı AR motorları ayarlı hız sistemlerinde geniş uygulama alanlarına sahip olmaktadır.

Bu çalışmada, yüksek güçlü bir klasik AR Motorun modellenmesi ve yeni bir Bulanık Mantık algoritması kullanılarak hızının denetlenmesi detaylı olarak ele alınmaktadır. Çalışma temel olarak iki kısımdan oluşmaktadır. Çalışmanın ilk kısmında Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) tabanlı paket yazılım programı olan Maxwell 2D ile ARM' nun manyetostatik analizleri yapılarak çalışma karakteristikleri elde edilmekte ve analiz sonucunda elde edilen veriler Matlab/Simulink ortamına aktarılarak ARM' nun dinamik modeli oluşturulmaktadır. Çalışmanın 2. kısmında, ARM' nun hız denetimi için Klasik PID, Bulanık Mantık PI ve Yeni Bulanık Mantık Denetleyici olmak üzere üç farklı denetleyici yapısı kullanılmaktadır. Denetleyici performansları Matlab/Simulink ortamında gerçekleştirilen simülasyonlarla değerlendirilmektedir. Gerçekleştirilen denetim analizlerine bakıldığında kalıcı durum hatası, yükselme zamanı, maksimum aşma miktarı açısından Yeni Bulanık Mantık Denetleyici, Klasik PID denetleyici ve Bulanık Mantık PI (BMPI) denetleyiciye göre daha iyi bir performans göstermektedir.

FINITE ELEMENT METHOD (FEM) ANALYZED HIGH POWER SWITCHED RELUCTANCE MOTOR SPEED CONTROL USING A NEW FUZZY LOGIC ALGORITHM

Serkan SEZEN

Keywords: Switched Reluctance Motor (SRM), Fuzzy Logic Control, Speed Control, Finite Element Method (FEM).

Abstract: Switched Reluctance Motors are simple constructed machines and have versatile control possibility. In recent years, because of these advantages SRMs get wide application areas in adjustable speed control systems.

In this work, a high power classic SRM modeling and SRM speed control using new fuzzy logic algorithm issues are examined in detail. This work can be separated into two parts basically. In first part of work, Magnetostatik analyses of SRM is done using FEM based analysis software named Maxwell 2D and then, data achieved from analysis is transferred Matlab/Simulink environment. In this way, SRM dynamic model is constituted. In second part of work, three kinds of controller: Classical PID, Fuzzy Logic PI and New Fuzzy Logic Controllers are used for SRM's speed control. Controller performances are evaluated with simulations performed in Matlab/Simulink environment. According to simulation results, New Fuzzy Logic Controller gets better performance respect to PID Controller and Fuzzy Logic PI Controller in point of steady state error, rise time and overshoot criterions.

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Mevcut endüstri tesislerinde elektrik motorlarının kullanım alanları sürekli artmaktadır. Gelişen teknolojinin bir ürünü olarak ortaya çıkan mikroişlemciler ve gelişmiş güç elektroniği elemanları sayesinde, otomasyonda karmaşık denetim tekniklerinin uygulanabilirliği gün geçtikçe daha da artmaktadır. Bunun sonucunda, çalışması için sürücü devreye gereksinim duyan ve denetimi güç olan motorlar otomasyonda yeni bir alternatif olarak ortaya çıkmaktadır. Anahtarlamalı Relüktans Motorlar bu süreçte önem kazanan motorlara iyi bir örnek olarak sunulabilir.

Anahtarlamalı Relüktans Motorlar (ARM), değişken hızlı sürücülerde yapısal basitlik, yüksek güvenilirlik ve düşük maliyet gibi avantajları nedeniyle diğer elektrik makineleri içinde cazip bir seçenek haline gelmektedir. Bunun sonucunda motor hız denetimi için çeşitli denetim yöntemleri kullanılarak denetim yönteminin performansına göre denetim kalitesinin ve buna bağlı olarak motorun kullanım alanlarının artacağı açıktır.

Yapılan çalışma ile Anahtarlamalı Relüktans Motorun modellenmesi, Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılarak çalışma karakteristiklerinin elde edilmesi ve hız denetimi için kullanılan denetleyicilerin performans açısından hangisinin daha iyi olduğu konularında katkı sağlanması hedeflenmiştir.

Tez çalışmalarım süresince, çalışmalarına yön veren ve desteğini esirgemeyen danışmanım Yrd. Doç. Dr. Ercüment KARAKAŞ'a, ARM'nun Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılarak analiz edilmesi kısmında yapmış olduğu katkılarından dolayı Öğr. Gör. Dr. Kadir YILMAZ'a, ARM'nun Matlab modelinin oluşturulması kısmındaki katkılarından dolayı arkadaşım Fuat KILIÇ'a ve çalışmalarımda sürekli bana destek olan sözlüm Seda AYDEMİR'e teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	iv
İÇİNDEKİLER	v
SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLolar DİZİNİ	xx
BÖLÜM 1. GİRİŞ	1
BÖLÜM 2. ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORLAR (ARM)	6
2.1. Giriş	6
2.2. Tanımı ve Genel Yapısı.....	7
2.3. Temel Çalışma İlkesi.....	9
2.4. ARM' nun Matematiksel Modeli	11
2.4.1. ARM'nun matematiksel denklemleri	11
2.4.1.1. Moment denklemi	11
2.4.1.2. Model denklemleri.....	15
2.5. ARM' nun Akı, Endüktans ve Moment Karakteristiği	16
2.6. ARM' nun Denetimi.....	21
2.6.1. Giriş	21
2.6.2. Denetim prensibi	22
2.6.3. Kapalı çevrim hız denetimli ARM sürücü devresi	24
BÖLÜM 3. ARM' NUN MANYETOSTATİK ANALİZİ VE DİNAMİK MODELİNİN OLUŞTURULMASI	26
3.1. Giriş	26
3.2. Manyetostatik Analiz	28

3.2.1. Kullanılan motorun özellikleri	28
3.2.2. Sonlu elemanlar modelinin oluşturulması	31
3.2.3. ARM' nun çalışma karakteristiklerinin elde edilişi.....	35
3.3. Motor Parametrelerinin Belirlenmesi	40
3.3.1. Atalet momentinin hesaplanması	40
3.3.2. Faz direncinin hesaplanması	43
3.4. ARM' nun Doğrusal Olmayan Dinamik Modelinin Oluşturulması.....	45
3.4.1. Moment ve akım tabloları (Look-up tables).....	45
3.4.2. Dinamik model	47
3.5. Sürücü Devresi ve Modellenmesi.....	50
3.4.1. ARM sürücü devresi.....	50
3.4.2. ARM sürücü devrenin modellenmesi	52
BÖLÜM 4. BULANIK MANTIK (FUZZY LOGIC)	55
4.1. Giriş.....	55
4.2. Bulanık Mantığın Tarihçesi	56
3.4.2. Bulanık mantığının gelişmesindeki tarihi aşamalar	57
4.3. Bulanık Kümeler	58
4.4. Üyelik Fonksiyonları.....	59
4.5. Bulanık Küme İşlemleri... ..	61
4.5.1. Birleşim özelliği	61
4.5.3. Kesişim özelliği.....	62
4.5.3. Tamlayan özelliği	62
4.6. Bulanık Mantığın Denetim Sistemlerinde Kullanılması... ..	63
4.6.1. Bulanıklaştırıcı (Fuzzifier)	64
4.6.3. Bilgi Tabanı	66
4.6.3. Çıkarım Ünitesi (Inference Engine)	66
4.6.4. Durulaştırma (Defuzzification)	67
4.7. Bulanık Mantık Denetleyicisini Tasarlarken İzlenecek Adımlar	68
BÖLÜM 5. ARM' NUN HIZ DENETİMİ	70
5.1. Giriş	70
5.2. Denetim Sisteminin Elemanları	70

5.3. ARM' nun Klasik PID Denetleyici ile Hız Denetimi	72
5.3.1. PID denetleyici	72
5.3.2. PID denetim modeli	74
5.3.3. Simülasyon sonuçları	75
5.4. ARM' nun Bulanık Mantık PI Denetleyici ile Hız Denetimi	86
5.4.1. Bulanık Mantık PI denetleyici	86
5.4.1.1. Sistemin giriş-çıkış değişkenlerinin tanımlanması	86
5.4.1.2. Üyelik fonksiyonları ve kuralların tanımlanması	87
5.4.2. Bulanık Mantık PI denetim modeli	90
5.4.3. Simülasyon sonuçları	91
5.5. ARM' nun Yeni Bulanık Mantık Denetleyici ile Hız Denetimi	96
5.5.1. Yeni Bulanık Mantık denetleyici	96
5.5.1.1. Yeni Bulanık Mantık denetleyiciye ilişkin temel unsurlar ve prensipler	97
5.5.2. Yeni Bulanık Mantık denetim modeli	103
5.5.3. Simülasyon sonuçları	105
BÖLÜM 6. DENETLEYİCİ PERFORMANSLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	111
6.1. Yüksüz Çalışma Durumu	112
6.2. Yüklü Çalışma Durumu	117
6.3. Ani Yüklenme Durumu	122
6.4. Sinüs Yükleme Durumu	131
6.5. Referans Hız Takibi	135
6.6. Değişken Atalet Momenti	138
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	143
KAYNAKLAR	147
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	150
ÖZGEÇMİŞ	151

SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

λ	: Motor akısı
θ	: Rotor konumu
ω	: Açısal hız
ω_m	: Motor hızı
ω_{ref}	: Referans hız
θ_d	: İletim (dwell) açısı
θ_a	: Ateşleme (advance) açısı
θ_{co}	: Komütasyon açısı
β_s	: Stator kutup açısı
β_r	: Rotor kutup açısı
ρ	: İletkenin öz direnci
μ	: Üyelik derecesi
B_m	: Rotor viskoz sürtünme katsayısı
B	: Manyetik akı yoğunluğu
ce, CE	: Hata değişimi
d_r	: Rotor kutup yüksekliği
d_s	: Stator kutup yüksekliği
e, E	: Hata
H	: Manyetik alan şiddeti
i	: Faz akımı
i_{ref}	: Referans akım komutu
i_j	: j' inci faz akımı
J	: Rotor atalet momenti
J_{HS}	: Halka silindirin atalet momenti
J_K	: Bir rotor kutup ataleti
K_t	: Moment sabiti
K_p	: Oransal kazanç
K_i	: İntegral kazancı

K_d	: Türev kazancı
L_e	: Sargı uçlarından alınan dıştan dışa uzunluk
L_{stk}	: Paketleme uzunluğu
L_{oh}	: Sargıların sarkmasından dolayı her iki uçtaki sarkma uzunluğu
L_{su}	: Motorun bir fazının sargı uzunluğu
L	: Sargı endüktansı
L_a	: Karşılıklı konumdaki faz endüktansı
L_u	: Ortalanmış konumdaki faz endüktansı
M	: Motor momentini
M_j	: j ' inci fazın ürettiği moment
M^*	: Moment komutu
M_L	: Yük momentini
m	: Faz sayısı
m_d	: Motor derinliği
m_{HS}	: Halka silindirin kütlesi
m_K	: Bir rotor kutup kütlesi
N_s	: Stator kutup sayısı
N_r	: Rotor kutup sayısı
n_s	: Aynı faza ait sargılardan birinin siper sayısı
R	: Omik direnç
R_a	: Faz direnci
r_0	: Rotor boyunduruk yarıçapı
r_1	: Rotor kutup yarıçapı
r_2	: Stator iç boyunduruk yarıçapı
r_3	: Stator dış boyunduruk yarıçapı
r_{sh}	: Mil yarıçapı
S	: İletken kesiti
$s(k)$: Normalleştirilmiş ivme
t_s	: Stator kutup genişliği
V_a, V_b, V_c	: a, b, c fazı gerilimleri
W'	: Ko-enerji
W_f	: Manyetik alanda depolanan enerji

y_s	: Stator boyunduruk kalınlığı
y_r	: Rotor boyunduruk kalınlığı
O_s	: Yüksüz çalışmada yüzde aşma miktarı
e_{ss}	: Yüksüz çalışmada kalıcı durum hatası
t_r	: Yüksüz çalışmada yükselme zamanı
M_d	: Yüksüz çalışmada yüzde moment dalgalılığı
ω_d	: Yüksüz çalışmada yüzde hız dalgalılığı
O_{sy}	: Yüklü çalışmada yüzde aşma miktarı
e_{ssy}	: Yüklü çalışmada kalıcı durum hatası
t_r	: Yüklü çalışmada yükselme zamanı
M_{dy}	: Yüklü çalışmada yüzde moment dalgalılığı
ω_{dy}	: Yüklü çalışmada yüzde hız dalgalılığı
Δt_{ri}	: Ani yük uygulandıktan sonra hızın tekrar referans değere ulaşma süresi
$\Delta \omega_i$: Ani yük uygulandıktan sonra hızda meydana gelen çökme miktarı
e_{ssi}	: Ani yük uygulandıktan sonra hızda meydana gelen kalıcı durum hatası
O_{si}	: Ani yük uygulandıktan sonra meydana gelen yüzde aşma miktarı
t_{rs}	: Sinüs yüklü durumda yükselme zamanı
ω_{ds}	: Sinüs yüklü durumda yüzde hız dalgalılığı
t_{dr}	: Referans hızın değişiminden itibaren motor hızının yeni referans hız değerine ulaşma süresi
e_{ssdr}	: Yeni referans hız değerindeki kalıcı durum hatası
O_{sdr}	: Referans hız geçişlerinde meydana gelen yüzde aşma miktarı
t_{dam}	: Değişken atalet momenti durumunda hızın referans değere ulaşma süresi
e_{ssdam}	: Değişken atalet momenti durumunda meydana gelen kalıcı durum hatası
O_{sdam}	: Değişken atalet momenti durumunda meydana gelen yüzde aşma miktarı

AA	: Alternatif Akım
AR	: Anahtarlama Relüktans
ARM	: Anahtarlama Relüktans Motor
BMD	: Bulanık Mantık Denetleyici
BMPI	: Bulanık Mantık PI
BUB	: Bulanık Uzaklaşma Bloğu
BYB	: Bulanık Yaklaşım Bloğu
CAD	: Computer Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)
DA	: Doğru Akım
NB	: Negatif Büyük
NO	: Negatif Orta
NK	: Negatif Küçük
PB	: Pozitif Büyük
PID	: Proportional-Integral-Derivative (Oransal-İntegral-Türevsel)
PK	: Pozitif Küçük
PO	: Pozitif Orta
SEY	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
SF	: Sıfır
YBM	: Yeni Bulanık Mantık

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Anahtarlamalı Relüktans Motor (ARM)	7
Şekil 2.2. Çeşitli Anahtarlamalı Relüktans Motor Yapıları	8
Şekil 2.3. Üç fazlı 6/4 kutuplu AR Motorun kesit görünümü	9
Şekil 2.4. ARM'nun çalışması	10
a) c fazı karşılıklı	
b) a fazı karşılıklı	
Şekil 2.5. Bir Fazlı ARM	12
Şekil 2.6. ARM'nun akı-akım ilişkisi	13
Şekil 2.7. Sabit akımda ko-enerji değişimi	13
Şekil 2.8. Rotor konumları	17
a) Karşılıklı konum	
b) Ortalanmış konum	
a) Ara konum	
Şekil 2.9. ARM'nun mıknatıslanma eğrileri	19
Şekil 2.10. ARM'nun değişik rotor konumlarına ait endüktans değişimi	20
Şekil 2.11. AR Motorunda rotor konumuna göre moment değişimi	20
Şekil 2.12. Anahtarlamalı relüktans makinenin motor ve jeneratör olarak çalışması	22
Şekil 2.13. ARM sürücüsünde akım denetimi.....	23
Şekil 2.14. ARM' de farklı hızlar için tipik akım dalga şekilleri ve 8/6 ARM için ateşleme açıları	24
Şekil 2.15. Kapalı çevrim ARM sürücü sistemi	25
Şekil 3.1. Elektromanyetik analiz yöntemleri.....	26
Şekil 3.2. ARM'nun kesit görünüşü ve boyutları	29
Şekil 3.3. Motorda kullanılan malzeme için B-H eğrisi	31
Şekil 3.4. Program akış şeması	32
Şekil 3.5. ARM'nun SEY ile modellenmiş hali	34
Şekil 3.6. Hava aralığı ve kullanılan elemanlar	34
Şekil 3.7. ARM'nun halkalanma akısı-akım eğrisi.....	35

Şekil 3.8. ARM bir faz öz endüktans eğrisi (165A)	36
Şekil 3.9. ARM üç fazlı öz endüktans değişimi	37
Şekil 3.10. ARM akı haritası (karşılıklı konum, 90 °).....	37
Şekil 3.11. ARM akı haritası (ara konum, 22.5 °)	38
Şekil 3.12. ARM akı haritası (ortalanmış konum, 45 °)	39
Şekil 3.13. ARM statik moment eğrileri.....	40
Şekil 3.14. Rotor geometrisi	41
Şekil 3.15. Halka biçimli silindir	42
Şekil 3.16. Rotor kutbu geometrisi	43
Şekil 3.17. ARM' nun muhafaza boyutları.....	44
Şekil 3.18. Halkalama akısı verilerinin matrissel dönüşümü için Simulink modeli...46	46
Şekil 3.19. Moment ve Akım Tabloları	47
Şekil 3.20. ARM'nun akı modeli.....	47
Şekil 3.21. ARM'nun bir faz dinamik modeli (A fazı).....	48
Şekil 3.22. Mekanik model.....	48
Şekil 3.23. Üç fazlı ARM' nun dinamik modeli.....	49
Şekil 3.24. ARM için klasik sürücü devresi	51
Şekil 3.25. ARM sürücü için kontrol devresi modeli	52
Şekil 3.26. ARM sürücü için güç devresi modeli	53
Şekil 4.1. Orta yaş kavramı için aitlik eğrisi	59
Şekil 4.2. Bulanık Kümeler (Üyelik Fonksiyonları).....	59
Şekil 4.3. Üyelik fonksiyonu tipleri.....	60
Şekil 4.4. Üyelik fonksiyonları ve dilsel etiketleri	60
Şekil 4.5. Bulanık Mantık Denetleyici yapısı	63
Şekil 4.6. Algılayıcı okuyucu x_0 ile üyelik fonksiyonu $\mu(x)$ 'in $\mu(x_0)$ ' a gelmesi	65
a) Keskin algılayıcı okuyucu	
b) Bulanık algılayıcı okuyucu	
Şekil 4.7. VE tipi bulanık çıkarım	67
Şekil 4.8. Ağırlık merkezi yöntemi	68
Şekil 5.1. ARM hız denetim sisteminin yapısı	71
Şekil 5.2. Histerisiz akım denetleyicinin blok gösterimi	72
Şekil 5.3. Kapalı çevrim sistem denetimi	72
Şekil 5.4. ARM' nun PID denetim modeli	74

Şekil 5.5. PID Denetleyici modeli ve belirlenen kazanç değerleri	75
Şekil 5.6. ARM'nun faz sargılarına uygulanan gerilimlerin değişimi.....	76
Şekil 5.7. ARM'nun , PID denetleyici kullanılarak yüksüz kalkınma ve nominal yükte ani yüklenme durumunda elde edilen referans akımın değişimi.....	77
Şekil 5.8. a) ARM'nun, PID denetleyici kullanılarak yüksüz kalkınma ve nominal yükte ani yüklenme durumunda elde edilen A fazına ait halkalama akısı değişimi	78
b) ARM'nun, PID denetleyici kullanılarak yüksüz çalışma durumunda elde edilen A fazına ait halkalama akısı değişimi (Kararlı durum).....	78
c) ARM'nun, PID denetleyici kullanılarak nominal yükte çalışma durumunda elde edilen A fazına ait halkalama akısı değişimi (Kararlı durum)	79
Şekil 5.9. a) ARM'nun, PID denetleyici kullanılarak yüksüz kalkınma durumunda elde edilen faz akımlarının değişimi	80
b) ARM'nun, PID denetleyici kullanılarak nominal yükte çalışma durumunda elde edilen A fazına ait akım değişimi (Kararlı durum).....	81
Şekil 5.10. a) ARM'nun, PID denetleyici kullanılarak yüksüz kalkınma ve nominal yükte ani yüklenme durumunda elde edilen faz momentlerinin değişimi	81
b) ARM'nun, PID denetleyici kullanılarak yüksüz kalkınma anında elde edilen faz momentlerinin değişimi	82
c) ARM'nun, PID denetleyici kullanılarak yüksüz çalışma durumunda elde edilen faz momentlerinin değişimi (Kararlı durum)	82
d) ARM'nun, PID denetleyici kullanılarak nominal yükte çalışma durumunda elde edilen faz momentlerinin değişimi (Kararlı durum)	83
Şekil 5.11. a) ARM'nun, PID denetleyici kullanılarak yüksüz kalkınma ve nominal yükte ani yüklenme durumunda elde edilen mil momentinin değişimi	83
b) ARM'nun, PID denetleyici kullanılarak nominal yüklü durumda elde edilen mil momentindeki dalgalanma (Kararlı durum).....	84

Şekil 5.12. a) Durumunda, PID denetleyici kullanılarak yüksüz kalkınma ve nominal yükte ani yüklenme durumunda elde edilen açısız hızın değişimi.....	84
b) ARM'nun, PID denetleyici kullanılarak nominal yükte ani yüklenmesi anında elde edilen açısız hızın değişimi	85
Şekil. 5.13. ARM'nun, PID denetleyici kullanılarak elde edilen A fazına ait açısız konumun zamana göre değişimi	85
Şekil 5.14. Bulanık Mantık PI Denetleyici yapısı	87
Şekil 5.15. Dinamik işaret analizi	89
Şekil 5.16. E, CE ve ΔI_{ref} için üyelik fonksiyonları	89
Şekil 5.17. Bulanık Mantık PI denetim modeli	90
Şekil 5.18. Bulanık Mantık PI denetleyici modeli.....	90
Şekil 5.19. BMPI denetleyici parametreleri	91
Şekil 5.20. ARM'nun, Bulanık Mantık PI denetleyici kullanılarak yüksüz kalkınma ve 90 Nm yükte ani yüklenme durumunda elde edilen referans akımının değişimi	92
Şekil 5.21. a) ARM'nun, Bulanık Mantık PI denetleyici kullanılarak yüksüz kalkınma ve 90 Nm yükte ani yüklenme durumunda elde edilen faz akımlarının değişimi	92
b) ARM'nun, Bulanık Mantık PI denetleyici kullanılarak 90 Nm yükte çalışma durumunda elde edilen faz akımlarının değişimi.....	93
Şekil 5.22. a) ARM'nun, Bulanık Mantık PI denetleyici kullanılarak yüksüz kalkınma ve nominal yükte ani yüklenme durumunda elde edilen faz momentlerinin değişimi	93
b) ARM'nun, Bulanık Mantık PI denetleyici kullanılarak 90 Nm yükte çalışma durumunda elde edilen faz momentlerinin değişimi (Kararlı durum)	94
Şekil 5.23. a) ARM'nun, Bulanık Mantık PI denetleyici kullanılarak yüksüz kalkınma ve 90 Nm yükte ani yüklenme durumunda elde edilen mil momentinin değişimi	94
b) ARM'nun, Bulanık Mantık PI denetleyici kullanılarak 90 Nm yüklü durumda elde edilen mil momentindeki dalgalanma (Kararlı durum)	95

Şekil 5.24. a) ARM'nun, Bulanık Mantık PI denetleyici kullanılarak yüksüz kalkınma ve 90 Nm yükü ani yüklenme durumunda elde edilen açısal hızın değişimi.....	95
b) ARM'nun, Bulanık Mantık PI denetleyici kullanılarak 90 Nm yükü ani yüklenmesi anında elde edilen açısal hızın değişimi	96
Şekil 5.25. Yeni Bulanık Mantık Denetleyicinin iç yapısı	97
Şekil 5.26. Basamak girişine bağlı olarak elde edilen sistem cevaplarına ilişkin bağlı hızlar	98
Şekil 5.27. Sistem cevabındaki dalgacık	99
Şekil 5.28. BYB ve BUB için hata (e) ve çıkışa (I_{ref}) ait üyelik fonksiyonları	102
Şekil 5.29. BYB ve BUB için normalleştirilmiş ivmeye ait üyelik fonksiyonları....	103
Şekil 5.30. Yeni Bulanık Mantık denetleyici modeli	104
Şekil 5.31. YBM Denetleyici parametreleri	105
Şekil 5.32. a) ARM'nun, YBM denetleyici kullanılarak yüksüz kalkınma ve 20 Nm yükü ani yüklenme durumunda elde edilen referans akım	106
b) ARM'nun, YBM denetleyici kullanılarak 20 Nm yükü ani yüklenme anında elde edilen referans akımın değişimi.....	106
Şekil 5.33. a) ARM'nun, YBM denetleyici kullanılarak yüksüz kalkınma ve 20 Nm yükü ani yüklenme durumunda elde edilen faz akımları	107
b) ARM'nun, YBM denetleyici kullanılarak 20 Nm yükü çalışma durumunda elde edilen faz akımlarının değişimi (Kararlı durum)	107
Şekil 5.34. a) ARM'nun, YBM denetleyici kullanılarak 20 Nm yükü ani yüklenme anında elde edilen faz momentlerinin değişimi	108
b) ARM'nun, YBM denetleyici kullanılarak 20 Nm yükü çalışma durumunda elde edilen faz momentlerinin değişimi (Kararlı durum) ...	108
Şekil 5.35. a) ARM'nun, YBM denetleyici kullanılarak yüksüz kalkınma ve 20 Nm yükü ani yüklenme durumunda elde edilen mil momentinin değişimi.....	109
b) ARM'nun, YBM denetleyici kullanılarak 20 Nm yüklü durumda elde edilen mil momentindeki dalgalanma (Kararlı durum).....	109
Şekil 5.36. a) ARM'nun, YBM denetleyici kullanılarak yüksüz kalkınma ve 20 Nm yükü ani yüklenme durumunda elde edilen açısal hız	110

b) ARM'nun, YBM denetleyici kullanılarak 20 Nm yükü ani yüklenmesi anında elde edilen açısal hızın değişimi.....	110
Şekil 6.1. PID, BMPI ve YBM denetleyiciler ile hız denetimi yapılan ARM' nun yüksüz durumdaki hız cevapları.....	113
Şekil 6.2. BMPI ve YBM denetleyiciler ile hız denetimi yapılan ARM' nun yüksüz çalışma durumunda elde edilen hız cevapları.....	113
Şekil 6.3. PID Denetleyici ile hız denetimi yapılan ARM' nun yüksüz çalışma durumunda meydana gelen moment dalgalılığı	114
Şekil 6.4. BMPI ile hız denetimi yapılan ARM' nun yüksüz çalışma durumunda meydana gelen moment dalgalılığı.....	114
Şekil 6.5. YBM denetleyici ile hız denetimi yapılan ARM' nun yüksüz çalışma durumunda meydana gelen moment dalgalılığı	115
Şekil 6.6. ARM' nun, PID denetleyici kullanılarak yüksüz çalışma durumunda elde edilen referans akımının değişimi	115
Şekil 6.7. ARM' nun, BMPI denetleyici kullanılarak yüksüz çalışma durumunda elde edilen referans akımının değişimi	116
Şekil 6.8. ARM' nun, YBM denetleyici kullanılarak yüksüz çalışma durumunda elde edilen referans akımının değişimi	116
Şekil 6.9. PID, BMPI ve YBM denetleyiciler ile hız denetimi yapılan ARM' nun nominal yüklü çalışma durumunda elde edilen hız cevapları	118
Şekil 6.10. BMPI ve YBM denetleyiciler ile hız denetimi yapılan ARM' nun nominal yüklü çalışma durumunda elde edilen hız cevapları.....	118
Şekil 6.11. PID Denetleyici ile hız denetimi yapılan ARM' nun nominal yükle (183 Nm) çalışma durumunda meydana gelen moment dalgalılığı	119
Şekil 6.12. BMPI ile hız denetimi yapılan ARM' nun nominal yükü (183 Nm) çalışma durumunda meydana gelen moment dalgalılığı.....	119
Şekil 6.13. YBM denetleyici ile hız denetimi yapılan ARM' nun nominal yükle (183 Nm) çalışma durumunda meydana gelen moment dalgalılığı	120
Şekil 6.14. ARM' nun, PID denetleyici kullanılarak nominal yüklü çalışma durumunda elde edilen referans akımının değişimi.....	120
Şekil 6.15. ARM' nun, BMPI denetleyici kullanılarak nominal yüklü çalışma durumunda elde edilen referans akımının değişimi.....	121

Şekil 6.16. ARM' nun, YBM denetleyici kullanılarak nominal yüklü çalışma durumunda elde edilen referans akımın değişimi.....	121
Şekil 6.17. PID ve BMPI ile hız denetimi yapılan ARM' nun 20 Nm ani yüklenme durumunda elde edilen hız cevapları	123
Şekil 6.18. YBMD ile hız denetimi yapılan ARM' nun 20 Nm ani yüklenme durumunda elde edilen hız cevabı.....	123
Şekil 6.19. PID ve BMPI denetleyici ile hız denetimi yapılan ARM' nun 90 Nm ani yüklenme durumunda elde edilen hız cevapları.....	124
Şekil 6.20. YBM denetleyici ile hız denetimi yapılan ARM' nun 90 Nm ani yüklenme durumunda elde edilen hız cevabı.....	124
Şekil 6.21. PID ve BMPI denetleyici ile hız denetimi yapılan ARM' nun 183 Nm ani yüklenme durumunda elde edilen hız cevapları	125
Şekil 6.22. YBM denetleyici ile hız denetimi yapılan ARM' nun 183 Nm ani yüklenme durumunda elde edilen hız cevapları	125
Şekil 6.23. PID denetleyici ile hız denetimi yapılan ARM' nun 20 Nm ani yüklenme durumunda elde edilen referans akım değişimi	126
Şekil 6.24. BMPI denetleyici ile hız denetimi yapılan ARM' nun 20 Nm ani yüklenme durumunda elde edilen referans akım değişimi	126
Şekil 6.25. YBM denetleyici ile hız denetimi yapılan ARM' nun 20 Nm ani yüklenme durumunda elde edilen referans akım değişimi	127
Şekil 6.26. PID denetleyici ile hız denetimi yapılan ARM' nun 90 Nm ani yüklenme durumunda elde edilen referans akım değişimi	127
Şekil 6.27. BMPI denetleyici ile hız denetimi yapılan ARM' nun 90 Nm ani yüklenme durumunda elde edilen referans akım değişimi	128
Şekil 6.28. YBM denetleyici ile hız denetimi yapılan ARM' nun 90 Nm ani yüklenme durumunda elde edilen referans akım değişimi	128
Şekil 6.29. PID denetleyici ile hız denetimi yapılan ARM' nun 183 Nm ani yüklenme durumunda elde edilen referans akım değişimi	129
Şekil 6.30. BMPI denetleyici ile hız denetimi yapılan ARM' nun 183 Nm ani yüklenme durumunda elde edilen referans akım değişimi	129

Şekil 6.31. a) PID denetleyici ile hız denetimi yapılan ARM' nun 183 Nm ani yüklenme durumunda elde edilen referans akım değişimi	130
b) YBM denetleyici ile hız denetimi yapılan ARM' nun 183 Nm ani yüklenme durumunda elde edilen referans akım değişimi	130
Şekil 6.32. Motora uygulanan sinüs yükün zamana göre değişimi	132
Şekil 6.33. PID ve BMPI ve YBM denetleyiciler ile hız denetimi yapılan ARM' nun sinüs yükü çalışma durumunda elde edilen hız cevapları ...	133
Şekil 6.34. PID denetleyici ile hız denetimi yapılan ARM' nun sinüs yükü çalışma durumunda elde edilen referans akım değişimi	134
Şekil 6.35. BMPI denetleyici ile hız denetimi yapılan ARM' nun sinüs yükü çalışma durumunda elde edilen referans akım değişimi	134
Şekil 6.36. YBM denetleyici ile hız denetimi yapılan ARM' nun sinüs yükü çalışma durumunda elde edilen referans akım değişimi	135
Şekil 6.37. PID denetleyici ile hız denetimi yapılan ARM' nun değişken referans hız durumunda elde edilen hız grafiği	137
Şekil 6.38. BMPI ve YBM denetleyiciler ile hız denetimi yapılan ARM' nun değişken referans hız durumunda elde edilen hız grafikleri	137
Şekil 6.39. PID denetleyici ile hız denetimi yapılan ARM' nun değişken atalet momenti durumunda elde edilen hız grafikleri	140
Şekil 6.40. BMPI denetleyici ile hız denetimi yapılan ARM' nun değişken atalet momenti durumunda elde edilen hız grafikleri	140
Şekil 6.41. YBM denetleyici ile hız denetimi yapılan ARM' nun değişken atalet momenti durumunda elde edilen hız grafikleri hız grafiği.....	141
Şekil 6.42. PID, BMPI ve YBM denetleyiciler ile hız denetimi yapılan ARM' nun atalet momentinin 5 kat artması durumunda elde edilen hız grafikleri.....	141

TABLolar DİZİNİ

Tablo 3.1. Kullanılan ARM'nun geometrik boyutları	30
Tablo 3.2. Kullanılan ARM'nun etiket değerleri.....	30
Tablo 3.3. Rotorla ilişkin fiziksel büyüklükler ve hesaplanan değerler	41
Tablo 4.1. Kural tabanı	66
Tablo 5.1. PID katsayılarının sisteme cevabına olan etkileri	74
Tablo 5.2. Bulanık Mantık PI hız denetimi için kurallar	88
Tablo 5.3. Sistem cevabı, $d_e(k)$ ve $d_{de}(k)$ arasındaki ilişki.....	99
Tablo 5.4. BYB için Denetim kuralları.....	101
Tablo 5.5. BUB için Denetim kuralları.....	101
Tablo 6.1. ARM yüksüz durumda iken denetleyici performansları	112
Tablo 6.2. ARM nominal yüklü durumda iken denetleyici performansları.....	117
Tablo 6.3. ARM ani yüklü durumda iken denetleyici performansları	122
Tablo 6.4. ARM sinüs yükle yüklü durumda iken denetleyici performansları.....	131
Tablo 6.5. Değişken referans hız durumunda denetleyici performansları.....	136
Tablo 6.6. Değişken atalet momenti durumunda denetleyici performansları.....	139
Tablo 6.7. Değişken atalet momenti durumunda değerlendirme ölçütlerine ve zaman dilimlerine göre en iyi performansları gösteren denetleyiciler	139
Tablo 7.1. ARM' nun yüksüz çalışma durumunda YBM denetleyicinin t_r , e_{ss} ve O_s ltleri açısından diğer denetleyicilere göre yüzdesel olarak stnlğ.....	144
Tablo 7.2. ARM' nun yüklü çalışma durumunda YBM denetleyicinin e_{ssy} , O_{sy} ve ω_{dy} ltleri açısından diğer denetleyicilere göre yüzdesel olarak stnlğ.....	144
Tablo 7.3. ARM ARM' nun 183 Nm yükle ani yüklenme durumunda YBM denetleyicinin e_{ssy} , O_{sy} ve ω_{dy} ltleri açısından diğer denetleyicilere göre yüzdesel olarak stnlğ.....	145
Tablo 7.4. ARM' nun sinüs yükle yüklenme durumunda YBM denetleyicinin ω_{ds} ölçütü açısından diğer denetleyicilere göre yüzdesel stnlğ.....	145
Tablo 7.5. ARM' nun değişken referans hız durumunda YBM denetleyicinin t_{dr} , e_{ssdr} ve O_{sdr} ltleri açısından diğer denetleyicilere göre yüzdesel stnlğ.....	145

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Anahtarlamalı Relüktans Motorlar (ARM), değişken hızlı sürücülerde yapısal basitlik, yüksek güvenilirlik ve düşük maliyet gibi avantajları nedeniyle diğer elektrik makineleri içinde cazip bir seçenek haline gelmektedir [3].

Bir Relüktans Motor hareketli parçasını (rotor) uyarım sargısının endüktansının minimum olduğu yere hareket ettirme eğilimi ile moment üreten bir elektrik motorudur [13]. AR motoru basit yapılıdır ve dönen bir elektrik makinesi olarak hem motor hem de jeneratör olarak çalışabilmektedir. ARM'leri diğer elektrik makinelerinden ayıran önemli farklardan birisi çalışmak için sürekli olarak bir güç elektroniği devresine ihtiyaç duymasıdır. ARM ve bu tür elektronik denetimli elektrik makinelerinin geniş kullanım alanı bulabilmesi için basit, ucuz ve güvenilir denetim devreleri gerekmektedir.

Son yıllarda üzerinde birçok çalışmalar yapılan AR Motoru, hem yapısının hem de sürücü devresinin basitliği nedeniyle diğer elektronik kontrollü motorları geride bırakmaktadır. AR Motorun çalışma prensibi ilk kez 1840 yılında Wheatsone ve Davidson tarafından tanımlanmıştır. Ancak 1960'lı yılların sonlarına kadar çok küçük güçlerde imal edilen ve üzerinde pek durulmayan bu motor, yarıiletken teknolojisindeki gelişmelere bağlı olarak tekrar gündeme gelmiştir (Ray et al 1979, David et al 1980). 1960'lar öncesinde yarıiletken doğrultucu ve güç anahtarlama teknolojisindeki gelişmeler bunların değişken hız sürücülerinde hızlı ve başarılı bir şekilde kullanılmasına neden olmuştur. Prensipinde bu sürme sistemlerinin pek azı yeniydi fakat motor-jeneratör düzenekleri, cıva açılı dönüştürücüleri, manyetik yükselteçler gibi bazı sistem bileşenlerinin yerini günümüzde artık aynı işlevi daha ucuz ve güvenilir biçimde yapan katı-hal elektroniği almıştır. Aynı zamanda katı-hal güç anahtarlama teknolojisinin varlığı imkan dahilindeki alternatif motor/denetim düzeneklerinde, ki o zamana dek pek beğeni bulmayan ARM bunlardan biridir, ilgi uyandırmıştır [1].

ARM çift çıkıntılı (doubly salient) ve tek yönlü uyarımlı (single excited) bir motordur. Yani stator ve rotorda çıkıntılı kutuplar bulunmakta ve bunların

oluşturulmasında birer yüzleri yalıtılmış ve levha haline getirilmiş silisli saçlar kullanılmaktadır. Sadece stator sargıları bulunmaktadır. Her bir karşılıklı stator kutup çiftinde seri bağlı tek sargı bulunmaktadır. Motor denetimi bu sargılardan geçen akımın denetimi ile sağlanmaktadır. Rotor paketlenmiş saçlardan meydana gelmektedir. Üzerinde herhangi bir sargı kafes veya sabit mıknatıs yoktur.

Anahtarlamalı Relüktans Motor eşsiz mekanik yapısı ve basit güç elektroniği sürme gereksinimleri sebebiyle birçok ticari amaçlı ayarlanabilir hız denetimi uygulamalarında kullanılmaktadır. Kendine özgü basitliği ve düzeni onu diğer elektrik makineleri içinde daha üstün nitelikli yapmaktadır [6]. Relüktans Motorların diğer motor türlerine göre üstünlükleri kısaca aşağıdaki şekilde özetlenebilir;

- Rotorda sargı, mıknatıs veya kısa devre halkası bulunmaması ve stator sargısının basitliği nedeniyle maliyetinin düşük olması,
- Rotorun sargısız ve fırçasız oluşu nedeniyle çok yüksek hızlarda çalışmaya uygun oluşu,
- Rotor eylemsizlik momentinin düşük olması nedeniyle cevap süresinin küçük olması,
- Motor sargısının yarı iletken anahtarlara seri bağlı olması nedeniyle kısa devre tehlikesinin olmaması,
- Stator üzerinde sargıların çok basit oluşu ve aralarında bir elektriksel bağlantının olmaması,
- Motor fazlarının birbirinden bağımsız çalışabilmesinden dolayı herhangi bir fazın arızalanması halinde bile motorun dönebilmesi.

Bütün bu üstünlüklerine karşın bu motorun kullanışlı olmamasının bazı nedenleri şöyle sıralanabilir;

- Stator sargı endüktansının büyük oluşu ve anahtarlama esnasında sargı endüktansının uçlarında büyük gerilim oluşmaktadır,
- Özellikle düşük hız uygulamalarında momentte büyük genlikli dalgalanmalar oluşmakta ve motor gürültülü çalışmaktadır.

- Motorun dönebilmesi için belli bir anda hangi faza gerilim uygulanması gerektiğinin bilinmesi zorunludur. Bu amaçla mile bağlı bir algılayıcı ile rotor konum bilgisi alınarak, ARM sürücü devresinin kontrol edilmesi gerekmektedir.

Denetim teknikleri geliştikçe ARM'lerin birçok uygulama alanları ortaya çıkmıştır [15]. Bunlar;

- Genel amaçlı endüstriyel sürücüler
- Özel sürücü uygulamaları: kompresörler, fanlar, pompalar, santrifüj makineleri
- Ev ile ilgili sürücü uygulamaları: mutfak araçları, çamaşır makinesi, elektrik süpürgesi
- Elektrikli araç uygulamaları
- Uçaklar ile ilgili uygulamalar
- Servo sürücüler

1960'ların ortasında bulanık mantık (fuzzy logic) veya bulanık küme teorisi (fuzzy set theory) adı altında bir teori Azeri Türk asıllı bir profesör olan Lütü A. Zadeh tarafından (1965 Kaliforniya Üniversitesi Berkeley) ortaya atılmıştır [8]. Zadeh'in iddiasına göre insan düşüncesinin büyük çoğunluğu bulanık veya kesin olmayan tarzdadır. Bu düşünce işlemini 0 ve 1 ile temsil edilen Boolean mantık teorisi yeterli bir şekilde ifade edememektedir. Aynı çalışmada Zadeh yine insanların kontrol alanında mevcut makinelerden daha iyi olduklarını ve kesin olmayan sözel bilgilere bağlı olarak etkili kararlar alabildiklerini iddia etmektedir. Böylece kesin olmayan bilgiler karşısında insanın düşüncelerini modelleyerek elektro-mekanik denetleyicilerin performansını geliştirmek mümkün olmaktadır [9].

Son yıllarda bulanık mantık, modeli bilinmeyen veya iyi tanımlanmamış bir sistemi tanımlama ve kontrol etmede önemli bir yapay zeka (artificial intelligence) gereci olarak ortaya çıkmıştır. Bulanık mantık; işlem kontrolü, tahmin, tanımlama, teşhis, askeri bilim vb. konularda geniş bir şekilde uygulanmaktadır.

Geleneksel olarak bir kontrol sisteminin hassas tasarımını onun matematik modelinin ve parametrelerinin kesin tanımlanmasına bağlı olmaktadır. Çoğu zaman model ve parametreler iyi bilinmekte veya tanımlanamamakta yada, sistem doğrusal olmayan (nonlinear) ve parametre değişkenliği problemleri ile karmaşık olabilmektedir. Yapay zeka gereçlerindeki son gelişmelerin yanında güçlü kişisel bilgisayarlar, mikro denetleyiciler ve sayısal sinyal işlemciler güç elektroniği ve hareket kontrol sistemlerinin yüksek performanslı denetimi mümkün kılmaktadır [10].

Bulanık mantık denetleyicileri 1980'den beri endüstriyel uygulamalarda başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Bu zamana kadarki uygulamaların alanları oldukça geniştir. Bunlardan bazıları; çimento sanayisinde değirmen (cement-kiln) sıcaklığının kontrolü, robot kontrolü, görüntü işleme, motor kontrolü, otomatik tren operasyonu, küçük kamera otomatik odaklaması, servo kontrol, vinç kontrolü, uçak kontrolü ve uzay mekiği pozisyonlaması olarak sayılabilir. Endüstride yeni uygulama çalışmaları devam etmektedir [16].

Bir sistemin tamamıyla modellendiği bir simülasyon analizini gerçekleştirmek günümüz koşullarında oldukça kolay hale gelmiştir ve yapılan bu analizler birçok alanda fayda sağlamaktadır. Bir sistemin simülasyonu, tasarım ve deneysel sonuçların daha önceden ortaya çıkarılması açısından önemlidir.

Anahtarlamalı Relüktans Motorun dinamik olarak modellenmesine ilişkin birçok çalışma ya C, Fortran gibi programlama dillerinde yada diferansiyel denklem tabanlı (ACSL gibi) diller aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Bu teknikler kullanışlı olmalarına karşılık, modelde yer alacak yeni bir öge söz konusu olduğunda yeterince esnek olmadıklarından dolayı programlama için harcanan çabanın artmasına ve dolayısı ile maliyetin artmasına neden olmaktadır. Diğer yandan Spice, Simulink, Matrix, Tutsim, Vissim ve Mathcad gibi devre tabanlı diller ile AR motora ilişkin çok fazla simülasyon çalışması yapılmamıştır. Görülen ilk simülasyon Spice yazılımı ile gerçekleştirilmiştir ancak bu çalışma, Spice yazılımının özellikle elektronik devre simülasyonları için geliştirilmiş olma özelliğinden dolayı teknik bir üstünlüğe sahip değildi. Son zamanlarda, bir simülasyon yazılımı olan Matlab/Simulink'te elektrik makinesine ve kısmen ARM'lere yüksek derecede esnek bir modelleme ortamı

sağlayan dikkate değer gelişmeler olmuştur [17]. Bu gelişmeler temel olarak şöyle sıralanabilir;

- Simülasyon için harcanan zamanda azalma olması
- Birkaç nümerik çözüm metodu arasından seçim yapılabilmesi
- Bulanık Mantık Denetim, Yapay Sinir Ağları ve Sinyal İşleme gibi farklı alanlar için kütüphanelerin geliştirilmesi

Bu tez çalışmasında Anahtarlamalı Relüktans Motorunun sonlu elemanlar yöntemi (SEY) analizi, modellenmesi ve farklı denetleyiciler kullanılarak hız denetiminin gerçekleştirilmesi konuları detaylı olarak ele alınmaktadır.

Çalışmanın ikinci bölümünde, ARM' nun genel yapısı, temel çalışma ilkesi, matematiksel modelinin elde edilişi, akı-endüktans-moment karakteristikleri ve denetim prensibi konuları ele alınmaktadır.

Çalışmanın üçüncü bölümünde, ARM' nun Maxwell 2D paket programı ile manyetostatik analizi gerçekleştirilmektedir. Analiz sonucunda elde edilen motora ait akı, endüktans ve moment karakteristikleri sunulmaktadır. Daha sonra analiz sonuçlarının Matlab/Simulink ortamına aktarılması ve doğrusal olmayan (nonlinear) motor modelin oluşturulması konuları ele alınmaktadır.

Çalışmanın dördüncü bölümünde, Bulanık Mantığın tarihçesi, kullanım alanları, bulanık kümeler ve bulanık mantık denetleyici sistemler hakkında bilgiler verilmektedir.

Çalışmanın beşinci bölümünde, ARM' nun hız denetimi üç farklı denetleyici sistem kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Denetleyici sistemlerin performansları çeşitli çalışma koşulları altında değerlendirilmekte ve denetim sonuçlarına ilişkin grafikler sunulmaktadır.

Çalışmanın altıncı ve son bölümünde, denetleyici performansları birbirleri ile kıyaslanmakta ve sonuçlar detaylı bir biçimde değerlendirilmektedir.

BÖLÜM 2. ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORLAR

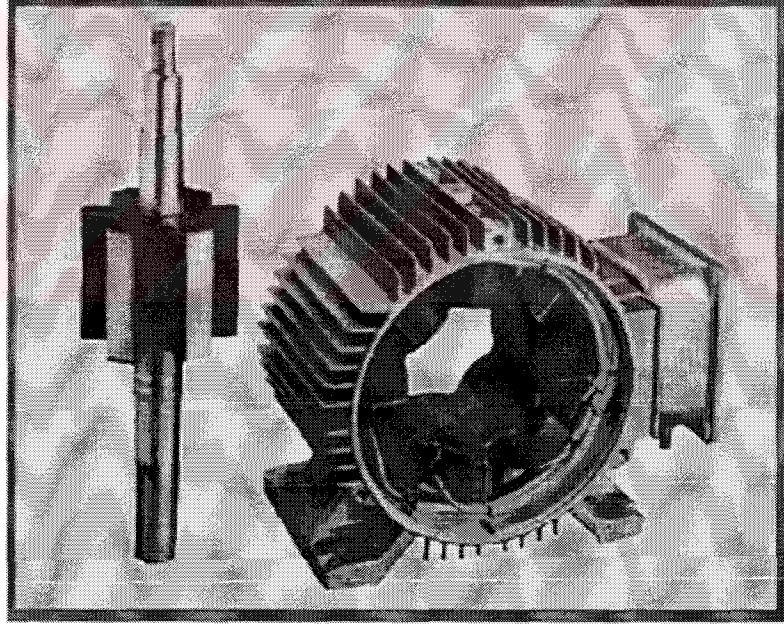
2.1. Giriş

1969'dan beri değişken relüktanslı motorlar ayarlanabilir hız uygulamaları için üretilmektedir. ARM 'nun ilk çıkışı 1842'ye dayandırılabilir ancak motorun yeniden doğuşu yüksek güçlü ve ucuz anahtarlama elemanlarının ortaya çıkışı ile mümkün olmuştur [10].

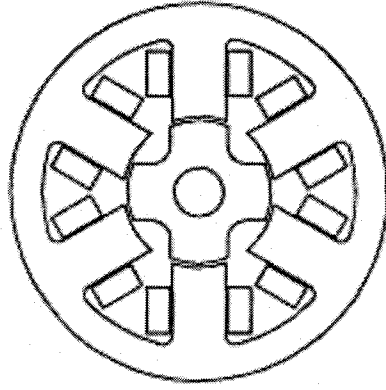
Günümüzde akademik ve ticari olarak yoğun bir şekilde üzerinde çalışılan Anahtarlı Relüktans Motorunun çalışma yapısı Wheatstone ve Davidson tarafından ilk kez 1840'lı yıllarda tanımlanmıştır. Çalışma ilkesinin yaklaşık 140 yılı aşan bir süredir bilinmesine rağmen bir anlamda relüktans motorunun yeniden keşfi 1980'li yılların başında Leeds Üniversitesinden Prof. Lawrenson tarafından yapılmıştır. Bu motorlara 1980 yılından önceki çalışmalarda, makinanın yapısında kaynaklanan faz endüktanslarının değişken olmasından dolayı Değişken Relüktanslı Motorlar (Variable Reluctance Motor) denmekteydi. Fakat, denetim tekniği ve yarı iletken teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak uyarmanın doğru gerilim ile anahtarlama sureti ile yapılmasından dolayı motor, İngiltere'de Leeds ve Nottingham Üniversitelerinde bulunan araştırmacılar tarafından, Anahtarlı Relüktans Motoru (Switched Reluctance Motor) olarak isimlendirilmiştir. Anahtarlı Relüktans Motorlarının endüstride işlerlik kazanması, gücünün birkaç watt değerinden yüzlerce kilowatt'a kadar ulaşması ile sağlanmıştır. Motorun, ticari amaçlı ilk üretimini ve güç elektroniği ile birleştirilmiş tasarımını, 1983 yılında Oulton Switched Reluctance Drives Ltd. lisansı ile, Tasc Drives firması tarafından yapılmıştır [24].

2.2. ARM' nun Tanımı ve Genel Yapısı

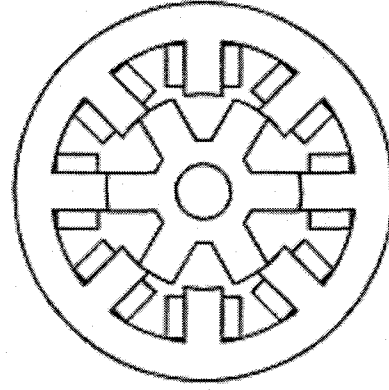
ARM bir senkron makine olmasına karşılık kendine özgü özelliklere sahiptir. ARM çift çıkıntılı (doubly salient) ve tek yönlü uyarımlı (single excited) bir motordur. Yani stator ve rotor çıkıntılı bir yapıya sahiptir. Şekil 2.1' de ARM' nin bu yapısı gösterilmektedir. Stator ve rotorun oluşturulmasında birer yüzleri yalıtılmış ve levha haline getirilmiş silisli saçlar kullanılmaktadır. Sadece statorda sargılar bulunmaktadır. Her bir karşılıklı stator kutup çiftinde seri bağlı tek sargı bulunmaktadır. Motor akımı bu sargılardan geçen akımın denetimi ile sağlanmaktadır. Rotor paketlenmiş saçlardan meydana gelmektedir ve üzerinde herhangi bir sargı, kafes veya mıknatis bulunmamaktadır. Gerçekte bu, ARM' nun diğer motor tiplerine göre en büyük avantajıdır.



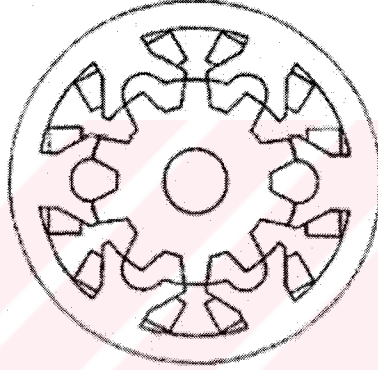
Şekil 2.1. Anahtarlamalı Relüktans Motor (ARM)



a) 6/4 Kutuplu



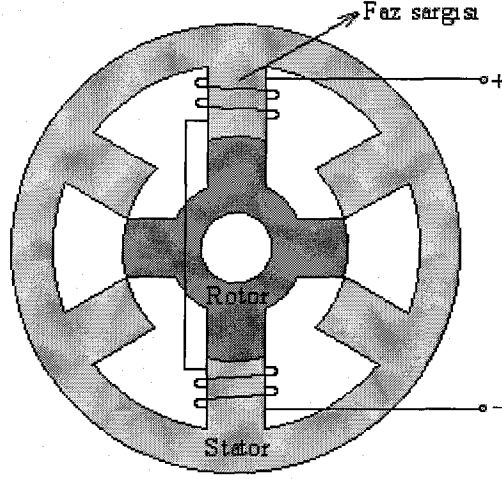
b) 8/6 Kutuplu



c) 12/10 Kutuplu

Şekil 2.2. Çeşitli Anahtarlamalı Relüktans Motor Yapıları

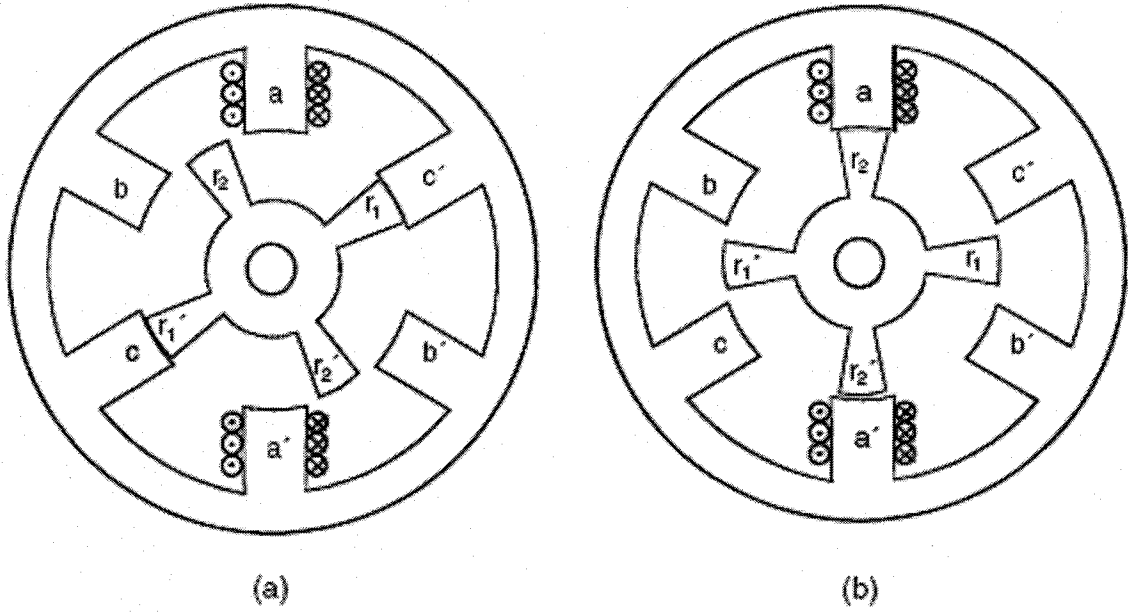
Şekil 2.2 'de çeşitli ARM yapıları görülmektedir. Hem stator hem de rotor çıkıntılı kutba sahiptir ve makine bu yüzden çift çıkıntılı makine olarak anılır. Şekil 2.2.c' de kutup başına iki dişli gelecek şekilde yapılandırılmış makine biçimi (12/10 kutuplu) yer almaktadır. Şekilden de görüldüğü gibi, ARM' nun yapısı adım motorunun yapısını andırmaktadır. Manyetik devre adım motorlarında olduğu gibi çift taraflı çıkık kutuplu bir yapıya sahiptir. Stator kutup sayısı, rotor kutup sayısına eşit değildir. Bunun nedeni, stator kutup sargıları belirli bir sıra ile enerjilendiğinde, rotorun sürekli dönüşünü sağlamaktır. ARM faz sargıları karşılıklı iki stator kutbu üzerindeki sargıların seri bağlanması ile oluşturulur. Şekil 2.3' de gösterim basitliği sağlanması açısından sadece bir faza ait sargılar gösterilmektedir. Diğer sargıları oluşturan stator kutupları üzerinde benzer sargılar vardır [19].



Şekil 2.3. Üç fazlı 6/4 kutuplu AR Motorun kesit görünümü

2.3. Temel Çalışma İlkesi

Karşılıklı stator kutupları uyarıldığında stator ve rotor kutupları aynı hizaya gelir. Bunun nedeni manyetik bir devrede hareketli parçanın minimum relüktansa girmek istemesidir. Stator ve rotor kutuplarının tam olarak karşı karşıya geldiği bu durum karşılıklı (aligned) konum olarak adlandırılmaktadır. İki rotor kutbu, iki stator kutbu ile aynı hizaya gelirken başka bir rotor kutbu çifti bir stator çiftinden ayrılır. Bu durum rotor kutbunun diğer bir kutup altına girmesine dek sürer. Sonra stator ve rotor kutuplarını aynı hizaya getirmek için uygun faz uyarılır. Rotor hareketi, dolayısıyla moment ve gücün üretimi relüktansın değiştiği aralıkta stator sargılarındaki akımın anahtarlanması ile sağlanır.



Şekil 2.4. ARM'nun çalışması

- a) c fazı karşılıklı
- b) a fazı karşılıklı

Rotor kutupları r_1 ve r_1' ile stator kutupları c ve c' karşılıklı olduğu durumu ele alalım. Şekil 2.4.a' da gösterildiği gibi a fazına bir akım uygulandığında, stator kutupları sayesinde r_2 ve r_2' 'nü a fazına doğru çeken bir akı meydana getirir. Kutuplar aynı hizaya geldiklerinde a fazının akımı kesilir. Bu durum Şekil 2.4.b' de gösterilmektedir. Statordaki b fazı uyarıldığı takdirde r_1 ve r_1' sırasıyla b ve b' 'ne doğru saat yönünde çekilir. Aynı şekilde c fazı enerjilendirilir ise r_2 ve r_2' , c ve c' ile aynı hizaya gelir. Bundan dolayı üç faz sıra ile enerjilendirildiğinde rotor 90 derece hareket eder ve rotorun bir devir yapması için her fazın rotor kutup sayısı kadar uyarılması gerekir. Sırasıyla a, b, ve c fazlarının anahtarlanması Şekil 2.4 yardımıyla görüleceği gibi anahtarlama yönüne ters yönde rotor hareketi meydana getirir.

2.4. ARM'nun Matematiksel Modeli

Relüktans motorda moment, relüktanstaki değişimin etkisi ile elde edilir. Relüktanstaki bu değişim rotor pozisyonu ile ilişkilidir. Bu bakımdan relüktans motorları DA makinesi, senkron makine veya asenkron makine gibi diğer tip elektrik makinelerinden farklıdır [33].

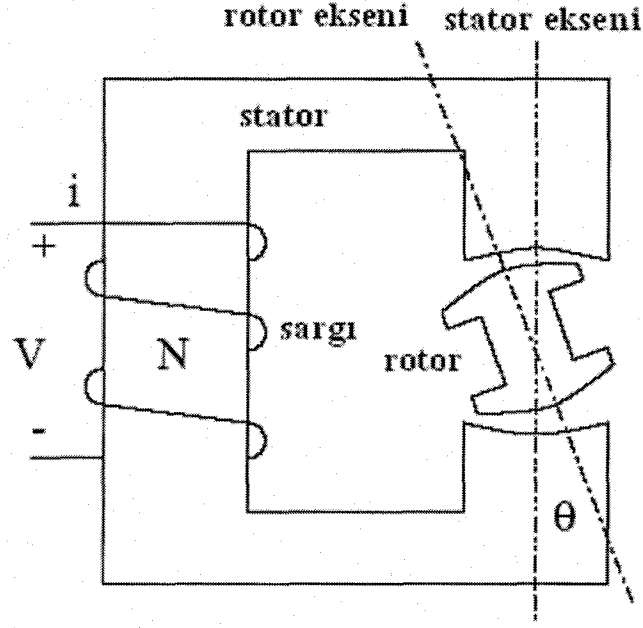
Klasik relüktans makinelerin teorisi, iyi bilinen Park denklemlerine dayalı olarak, 20. yüzyılın öncesinde geliştirilmiş olan senkron makine teorisinden geliştirilmiştir. ARM' nun teorisi 20. yüzyılın ikinci yarısında basit devre teorisi yaklaşımı kullanılarak elde edilmiştir. Relüktans makinelerde üretilen temel moment veya kuvvet rotor pozisyonun bir fonksiyonu olarak depo edilen manyetik enerjideki değişimin bir sonucudur. Bu ilişki aynı zamanda birçok elektromanyetik röleler, selenoid valflar ve gücün iki manyetik yüzey arasında üretildiği çıkıntılı yapıya sahip diğer tüm makineler için de geçerlidir [40].

2.4.1. ARM'nun matematiksel denklemleri

2.4.1.1. Moment denklemi

Tüm makinelerin çalışma prensibini anlamamanın en iyi yolu, temel prensiplerden yola çıkılarak elde edilen moment ifadesini anlamaktır. Makinenin çalışması ve genel karakteristikleri bu ifadeye bakılarak anlaşılabilir [10].

ARM'nun temel moment denklemini elde etmek için Şekil 2.5' de gösterilen basit relüktans makineyi ele alalım. Makine tek fazlıdır ve makinenin statoru üzerine sarılmış sadece bir sargı bulunmaktadır. Rotor serbest olarak dönebilecek bir yapıya sahiptir.



Şekil 2.5. Bir Fazlı ARM

Lineer modelde faz sargısından geçen akım motorda oluşan akı arasındaki ilişki doğrusal olduğundan bu ilişki denklem (2.1)' deki gibi yazılabilir;

$$\lambda = L(\theta).i \quad (2.1)$$

burada i bağımsız giriş değişkenidir. Motor doğrusal olarak çalıştığı için L stator sargı endüktansı, rotor konumunun veya t zamanının bir fonksiyonu olabilir ancak akımın fonksiyonu olamaz.

Genel moment ifadesi denklem (2.2)' deki eşitlikle verilir;

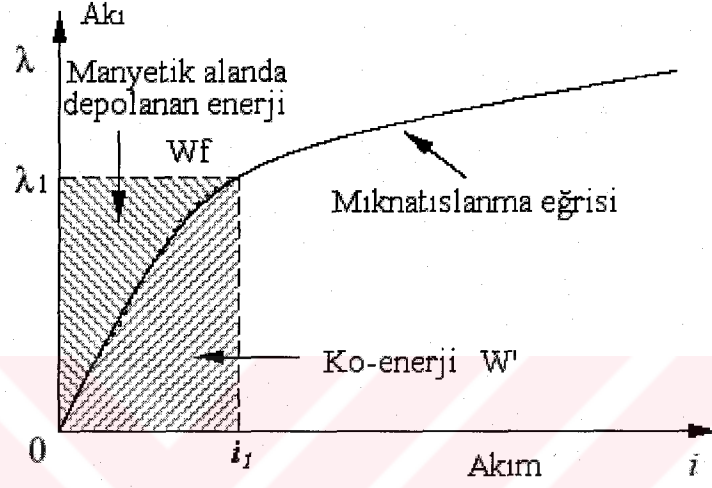
$$M = \left[\frac{\partial W'}{\partial \theta} \right]_{i=\text{sabit}} \quad (2.2)$$

burada W' Ko-enerjidir. Herhangi bir konumda Ko-enerji Şekil 2.6' da gösterilen mıknatıslanma eğrisinin altında kalan alandır. Başka bir biçimde Ko-enerji;

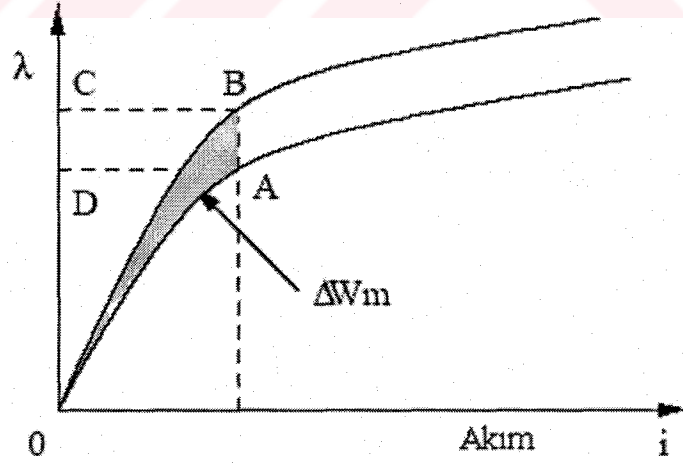
$$W' = \int_0^{i_1} \lambda(\theta, i) di \quad (2.3)$$

sınırlı integrali ile ifade edilebilir. Denklem (2.3)' den hareketle motora ait moment ifadesi denklem (2.4)' deki gibi yazılır;

$$M = \int_0^{i_1} \frac{\lambda(\theta, i)}{\partial \theta} di \quad (2.4)$$



Şekil 2.6. ARM'nun akı-akım ilişkisi



Şekil 2.7. Sabit akımda ko-enerji değişimi

Eğer sargı akımını sabit tutup rotoru $\Delta\theta$ kadar yer değiştirirsek ΔW_m miktarında enerji değişimi olur. Bu durum Şekil 2.7 ' de gösterilmektedir.

Buradan hareketle anlık moment denklem (2.5)' deki gibi yazılabilir;

$$M = \frac{\Delta W_m}{\Delta \theta} \quad (2.5)$$

Böyle bir değişim süresince güç kaynağından çekilen enerji ile birlikte depolanan enerjide de bir değişim meydana gelir. Sabit akım koşulu altında ko-enerjideki değişim miktarı yapılan mekanik işe eşittir. Bu durum aşağıdaki gibi ispatlanabilir:

Rotorun Şekil 2.7 ' de gösterilen A noktasından B nokrasına $\Delta\theta$ dönüş hareketi ile birlikte besleme ile yapılan enerji dönüşümü ifadesi denklem (2.6)' daki gibidir;

$$\Delta W_e = (\text{Alan})_{ABCD} \quad (2.6)$$

Manyetik alanda depolanan enerjideki değişim miktarı denklem (2.7)' deki eşitlikle verilmektedir.

$$\Delta W_f = (\text{Alan})_{OBC} - (\text{Alan})_{OAD} \quad (2.7)$$

Yapılan mekanik iş miktarı denklem (2.8), (2.9), (2.10), (2.11) ve (2.12)' de verilen eşitliklerle ifade edilebilir;

$$\Delta W_m = M \cdot \Delta\theta \quad (2.8)$$

$$\Delta W_m = \Delta W_e - \Delta W_f \quad (2.9)$$

$$\Delta W_m = (\text{Alan})_{ABCD} - ((\text{Alan})_{OBC} - (\text{Alan})_{OAD}) \quad (2.10)$$

$$\Delta W_m = ((\text{Alan})_{ABCD} + (\text{Alan})_{OAD} - (\text{Alan})_{OBC}) \quad (2.11)$$

$$\Delta W_m = (\text{Alan})_{OAB} = \Delta W' \quad (2.12)$$

Besleme kaynağından elde edilen enerjinin tamamı mekanik işe çevrilmez ve enerjinin bir kısmı manyetik alanda depolanır. Manyetik alanda depolanan enerji

boşa harcanmaz, fakat A'dan B'ye yapılan hareket sırasında enerji dönüşümü yapılmaz.

Eğer manyetik bir doyum yoksa mıknatıslanma eğrisi doğrusal olur. Bu durumda, herhangi bir rotor pozisyonu için, manyetik alanda depolanan enerji ve ko-enerji denklem (2.13)' de ifade edildiği gibi birbirine eşit olur.

$$W_f = W' = \frac{1}{2} L(\theta).i^2 \quad (2.13)$$

Buradan anlık moment, denklem (2.14)' deki gibi elde edilir ;

$$M = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L}{\partial \theta} \quad (2.14)$$

ARM'nun çok fazlı olması durumunda moment ifadesi denklem (2.15)' deki gibi faz momentlerinin toplamı şeklinde ifade edilebilir. Bu durumda moment ifadesi aşağıdaki halini alır;

$$M = \sum_{j=1}^m M_j \quad (2.15)$$

burada M_j j ' inci fazın ürettiği momenti, m ise toplam faz sayısını ifade eder.

2.4.1.2. Model denklemleri

ARM'nun dinamik modeline ilişkin genel denklemler, denklem (2.16), (2.17), (2.18) ve (2.19) gibidir:

$$J \frac{\partial \omega}{\partial t} = M - B_m \cdot \omega - M_L \quad (2.16)$$

$$M = \sum_{j=1}^m M_j \quad (2.17)$$

$$M_j = \int_0^{i_j} \frac{\partial \lambda_j}{\partial \theta} di_j \quad (2.18)$$

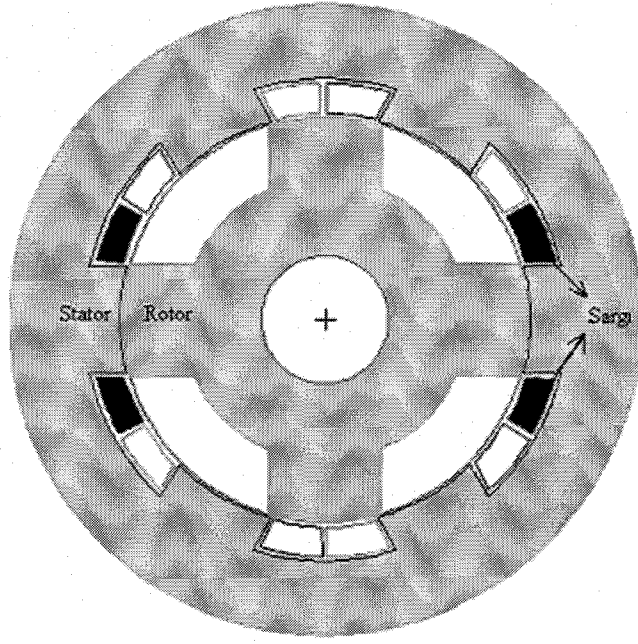
$$\theta_j = N_r \theta - \frac{2\pi(j-1)}{m} \quad (2.19)$$

Bu denklemlerde J rotor atalet momentini, B_m rotor viskoz sürtünme katsayısını, M_L yük momentini, ω rotorun açısal hızını, N_r rotor kutup sayısını, θ başlangıç konumuna göre rotor konumunu, θ_j j 'inci faza göre rotor pozisyonunu, i_j j 'inci faz akımını ifade eder.

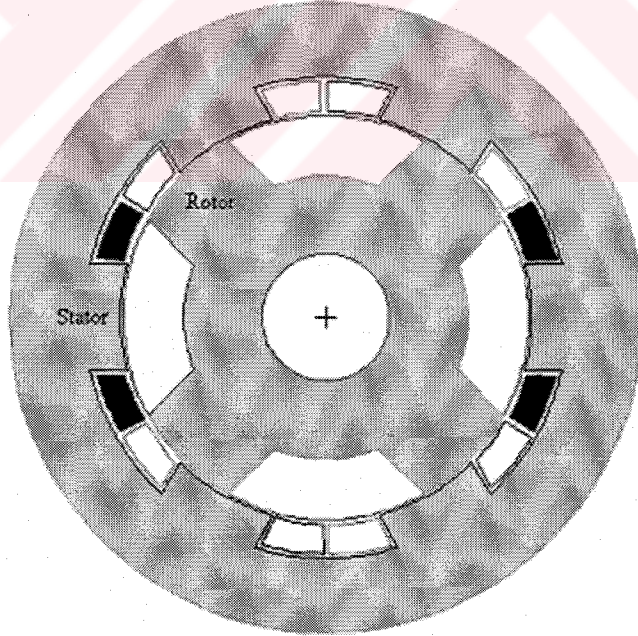
2.5. ARM' nun Akı, Endüktans ve Moment Karakteristiği

AR motorunun çift çıkıntılı yapısı, yüksek derecede doğrusal olmayan karakteristiklere sahip olmasına neden olmaktadır ve bu durum tamamen motorun akı karakteristiğine de yansımaktadır. Diğer elektrik makineleri ile karşılaştırıldığında, ARM'nun elektriksel moment ve stator sargı akımları arasındaki ilişkinin daha karmaşık olduğu görülmektedir. Motor akısının doğrusal olarak değiştiği bölgede bile elektriksel moment, stator sargı akımının doğrusal bir fonksiyonu değildir. Bu durum ARM denetimini zorlaştıran ana sebeptir [15].

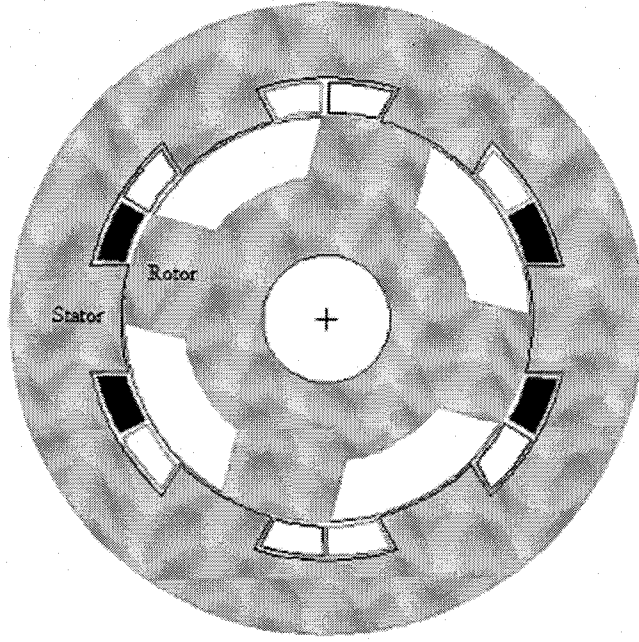
AR motorunda rotorun bir faz stator kutbuna göre üç temel konumu söz konusudur. Birincisi, stator kutup eksenini ile rotor kutup ekseninin üst üste olduğu karşılıklı (aligned) rotor konumu, ikincisi, stator kutup eksenini ile rotor kutup eksenlerinin orta noktasının üst üste olduğu ortalanmış (unaligned) rotor konumu ve karşılıklı konumdan ortalanmış konuma gelinceye kadarki olan ara konumlarıdır. Şekil 2.8 a, b ve c' de rotorun bu konumları gösterilmektedir.



Şekil 2.8.a. Karşılıklı konum

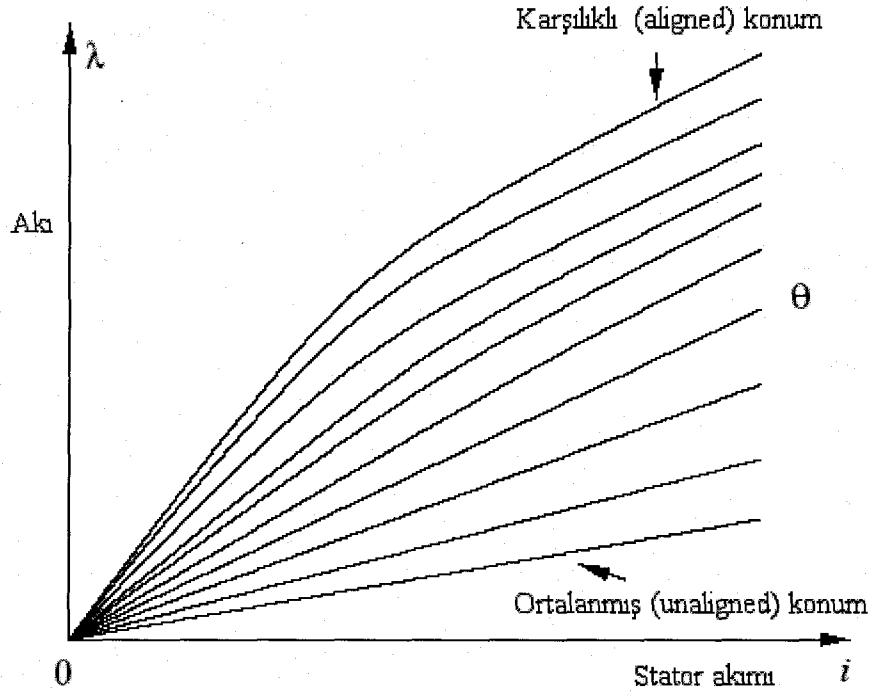


Şekil 2.8.b. Ortalanmış konum



Şekil 2.8.c. Ara konum

ARM’nda akı, stator akımının ve rotor konumunun bir fonksiyonudur. Sabit bir rotor konumu için akı, sadece doyma etkisinin olmadığı durumda stator akımının doğrusal bir fonksiyonudur. Genel olarak stator akımının belirli bir değerine kadar akı ve akım arasındaki ilişkinin doğrusal olduğu görülür ki bu bölge doğrusal akı bölgesi olarak adlandırılmaktadır. Stator akımı arttıkça doyma meydana gelir ve bu durumda akı, akımın doğrusal bir fonksiyonu olmaktan çıkar. Şekil 2.9’ da karşılıklı ve ortalanan rotor konumları arasındaki mıknatıslanma eğrileri gösterilmektedir.



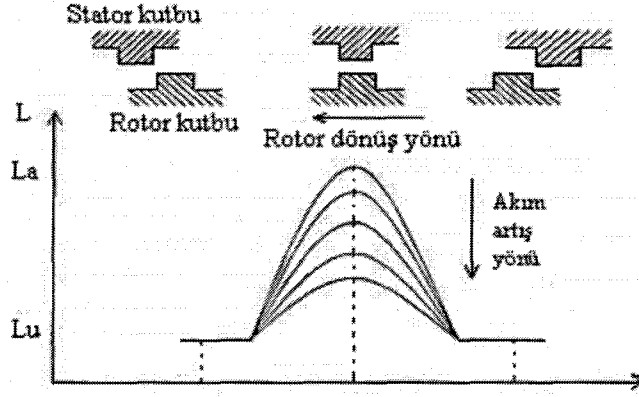
Şekil 2.9. ARM'nun mıknatıslanma eğrileri

Sabit bir stator akımı için akı, rotor konumunun periyodik bir fonksiyonudur. Bu periyot denklem (2.20) ile bulunur;

$$\text{periyot} = \frac{2\pi}{Nr} \quad (2.20)$$

Burada Nr rotor kutup sayısıdır.

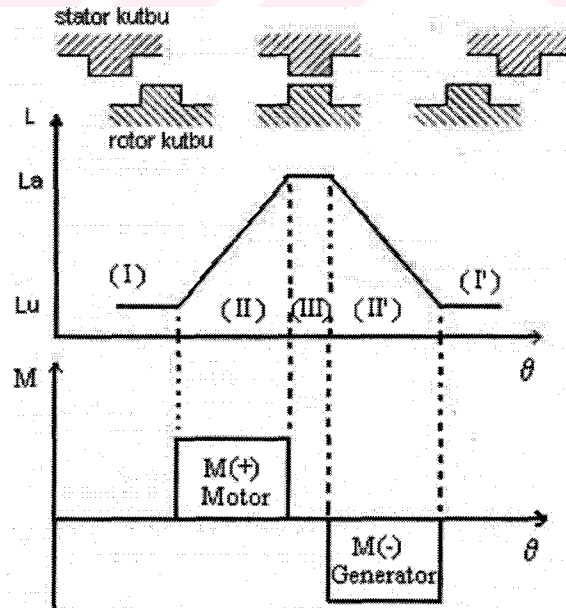
Şekil 2.10' da rotor konumuna göre endüktans değişimi gösterilmektedir. Görüldüğü gibi sargı endüktansı en büyük değerini rotor kutbunun karşılıklı konumunda, en küçük değerini ise rotor kutbunun ortalanmış konumunda almaktadır. Karşılıklı konumdaki endüktans L_a ile gösterilir ve doymuş endüktans olarak adlandırılır. Ortalanmış konumdaki endüktans L_u ile gösterilir ve doymamış endüktans olarak adlandırılır.



Şekil 2.10. ARM'nun değişik rotor konumlarına ait endüktans değişimi

$$M = \frac{1}{2} I_a^2 \frac{\partial L_a}{\partial \theta} + \frac{1}{2} I_b^2 \frac{\partial L_b}{\partial \theta} + \frac{1}{2} I_c^2 \frac{\partial L_c}{\partial \theta} \quad (2.21)$$

Denklem (2.21)' de verilen genel moment ifadesine göre AR motorunda döndürme momenti uyarma akımının yönüne bağlı değildir. Üretilen moment akımın karesi ve sargı endüktansının rotor konumuna göre değişim hızı ile orantılıdır. Dolayısı ile sargı endüktansının alabileceği en büyük ve en küçük değerlerin oranı (L_a / L_u) üretilen moment açısından çok önemlidir.



Şekil 2.11. AR Motorunda rotor konumuna göre moment değişimi

Şekil 2.11' de verilen bir faza ait endüktans – rotor konumu grafiği çeşitli bölgelere ayrılmaktadır. Bölge I ve Bölge III ve Bölge I' de endüktans eğrisi sabit olduğundan bu bölgelerde moment üretilmemektedir. Bölge II de endüktans arttığı için pozitif moment üretilmektedir. Bölge II' de ise endüktans azaldığı için negatif moment üretilmektedir.

2.6. ARM' nun Denetimi

2.6.1. Giriş

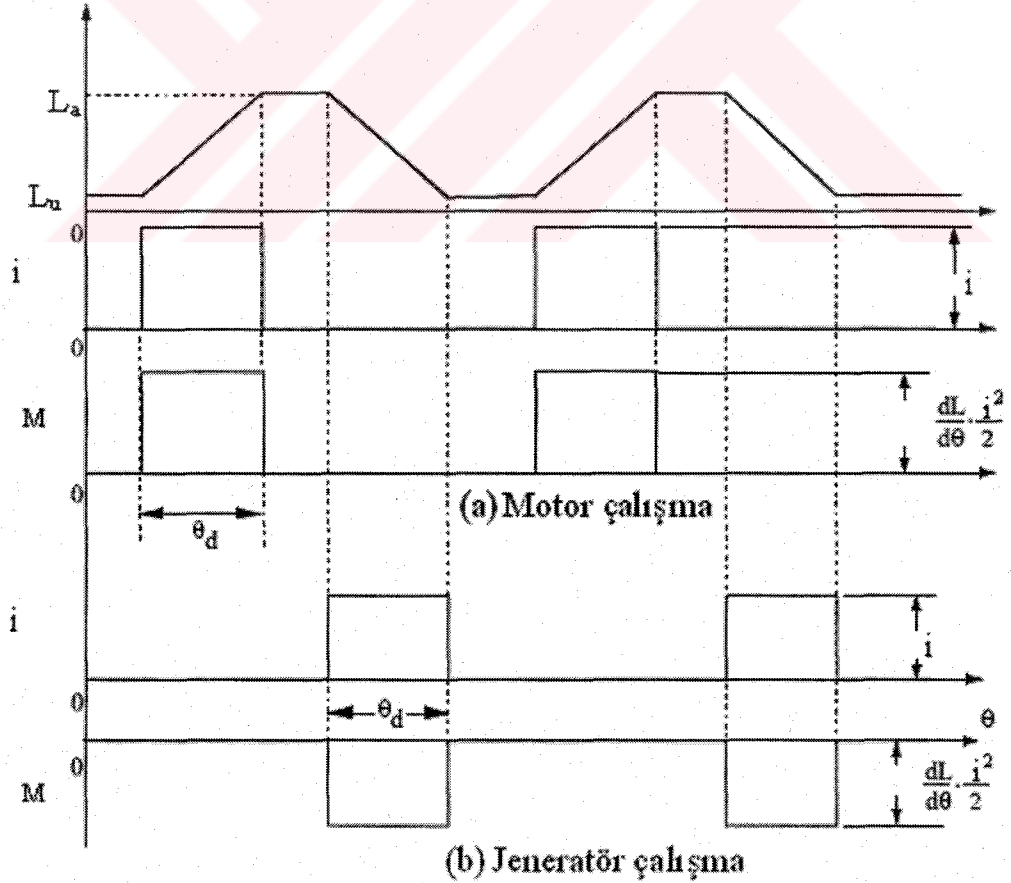
Anahtarlamalı relüktans makineler önemli ölçüde seri uyarımlı DA makinelere ve senkron relüktans makinelere benzemektedir. Fakat kontrol açısından bu makinelerden oldukça farklıdır. Bundan dolayı bu makinelerinkine benzer bir denetim stratejisini relüktans motora uygulamak mümkün değildir. Makine endüktansının sadece rotorun değil uyarma akımının da fonksiyonu oluşu ARM sürücü sisteminin denetimini oldukça karmaşık hale getirmektedir. Aksine, diğer tüm elektrik makineleri için denetim stratejileri, uyarım aralığının büyük bir kısmı için motor parametrelerinin sabit olması gerçeğine dayanmaktadır. Bu durum başlangıçta ARM'nun denetimi için sürücü tasarımını karmakarışık bir hale sokabilir fakat kontrol gereksinimlerini moment dalgalanmalarına ve cevap hızına göre düşük ve yüksek performanslı şekilde sınıflandığında, uygulamaların büyük bir çoğunluğunun düşük performans kategorisinde yer aldığı görülebilir.

Herhangi bir motor kontrol sisteminin kalbi akım denetimidir. ARM için genel olarak iki çeşit akım denetleyicisinden bahsedilebilir. Bunlardan birincisi orta derecede bir performans sağlayan ARM' nun lineer modeline dayalı akım denetleyicisidir. Diğeri ise lineerleştirmeye dayalı yüksek performans sağlayan akım denetleyicisidir. Yüksek performanslı akım denetleyici tasarımı için fazların karşılıklı kuplajı ve sistemin doğrusal olmayışı gibi faktörler dikkate alınmalıdır. DA sürücülerin çoğunda moment denetimi akım denetimi ile eş anlamlıdır. ARM ise doğrusal olmayan yapısından dolayı bu bakımdan oldukça farklıdır. Moment dalgalanmalarını azaltmak ve hızlı cevap veren bir moment performansı elde etmek

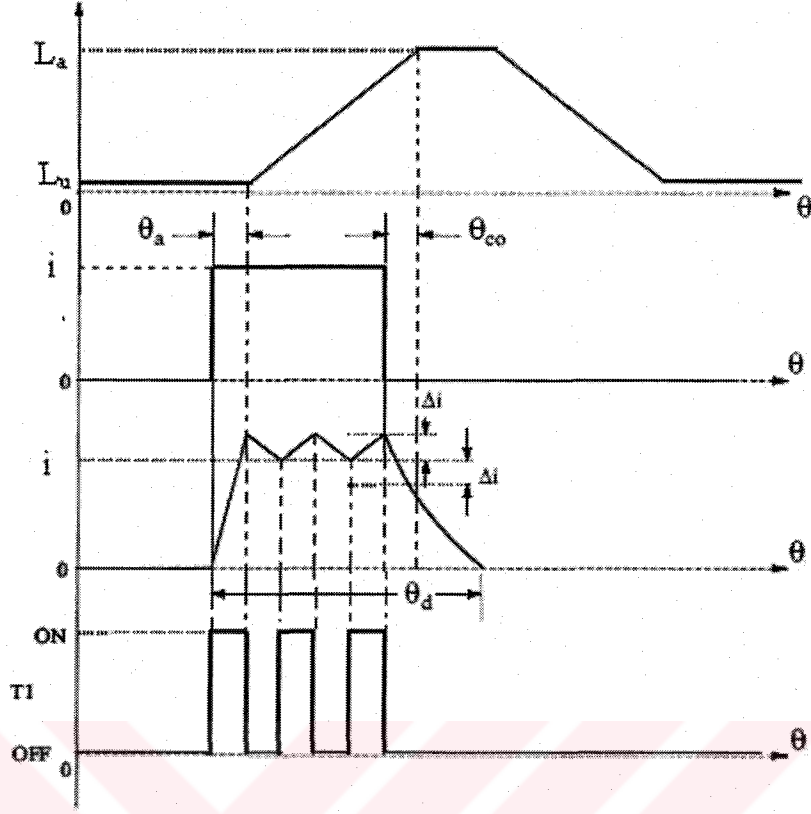
için çok fazlı anahtarlama (multiphase switching) gereklidir. Moment ve hız denetimi bu sayede basit bir iş haline gelmektedir [10].

2.6.2. Denetim prensibi

Şekil 2.12' de motor çalışma için verilen endüktans profilinde faz sargıları artan endüktansın başlangıcında uyarılmaktadır. Motor çalışma ve geri kazanım (regeneration) için moment üretimi de Şekil 2.12' de gösterilmektedir. Momentler sadece bir faz için gösterilmiştir. Ortalama moment, makine fazlarına ait anlık elektromanyetik moment darbelerinin birleşiminden meydana gelmektedir. Makine ayrık zamanlı (discrete) bir moment üretmekle birlikte uygun bir endüktans profili örtüşümü sağlanarak sürekli bir moment elde etmek mümkündür. Ancak bu durum ARM sürücüsünün denetimini zorlaştırmak ile birlikte motorun güç yoğunluğunun azalmasına neden olacaktır.



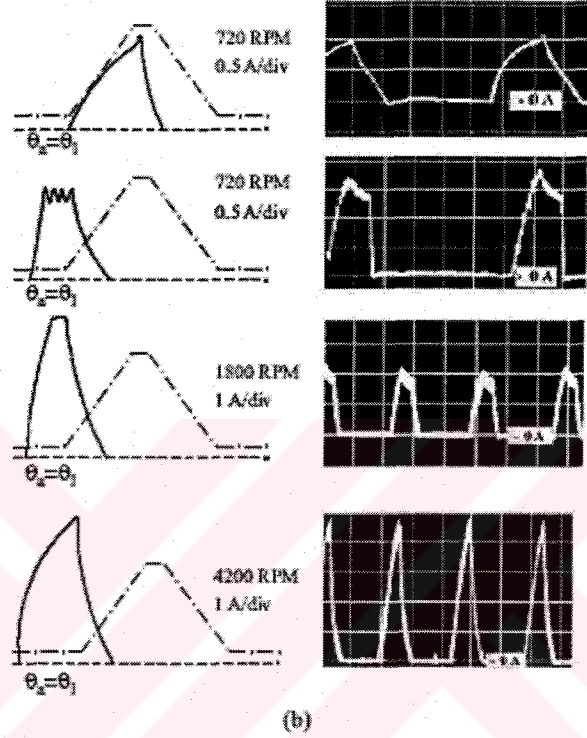
Şekil 2.12. Anahtarlama relüktans makinenin motor ve jeneratör olarak çalışması



Şekil 2.13. ARM sürücüde akım denetimi

Şekil 2.13' den, ortalama momentin sargı akımının (i) büyüklüğünü ayarlayarak veya iletim açısını (dwell angle) değiştirerek kontrol edilebileceği görülmektedir. Moment dalgalanmalarını azaltmak için iletim açısının (θ_d) sabit tutulması ve sargı akımının genliğinin değiştirilmesi önerilir. Bu kontrol yaklaşımını gerçekleştirmek için motor sürücüsünde güvenli bir çalışma olanağı sağlayan bir akım denetleyicisine ihtiyaç vardır. Anlık moment üretimi sağlamak için arzulanan akımın endüktansın arttığı anda uygulanması gereklidir. Gerçekte akım bir R-L devresinde anlık olarak artamaz veya düşemez. Bu durum, akımı başlatmak için ileri bir gerilim uygulamasını ve endüktans profilinde negatif eğime geçmeden önce akımı sıfıra çekmek için ileri bir komütasyonu zorunlu kılar. Bundan dolayı gerçek akım dalga şekilleri Şekil 2.14' de gösterildiği gibidir. Faz sargılarına gerilim θ_a derece kadar önce uygulanır ve faz akımının kesilmesi θ_{co} kadar önceden başlatılır. Dikkat etmek gerekir ki θ_a ve θ_{co} açıları sargı akımının tepe değerinin genliğine (i) ve rotor hızına bağlıdır. Akım, anahtarların iletime sokulması veya çıkarılması ile i değerinde tutulmaktadır. Gerçek akımda $\pm \Delta i$ kadar sapmalar meydana gelir ve bu değişim aralığı minimum

anahtarlama ve minimum iletim ve kesim kayıpları için uygun bir aralıkta ayarlanır. Şekil 2.14, çeşitli ateşleme (advance) açıları ve iletim (dwell) açıları için tipik akım dalga şekillerini göstermektedir. Bu dalga şekilleri 8/6 bir ARM için deneysel dalga şekilleridir.

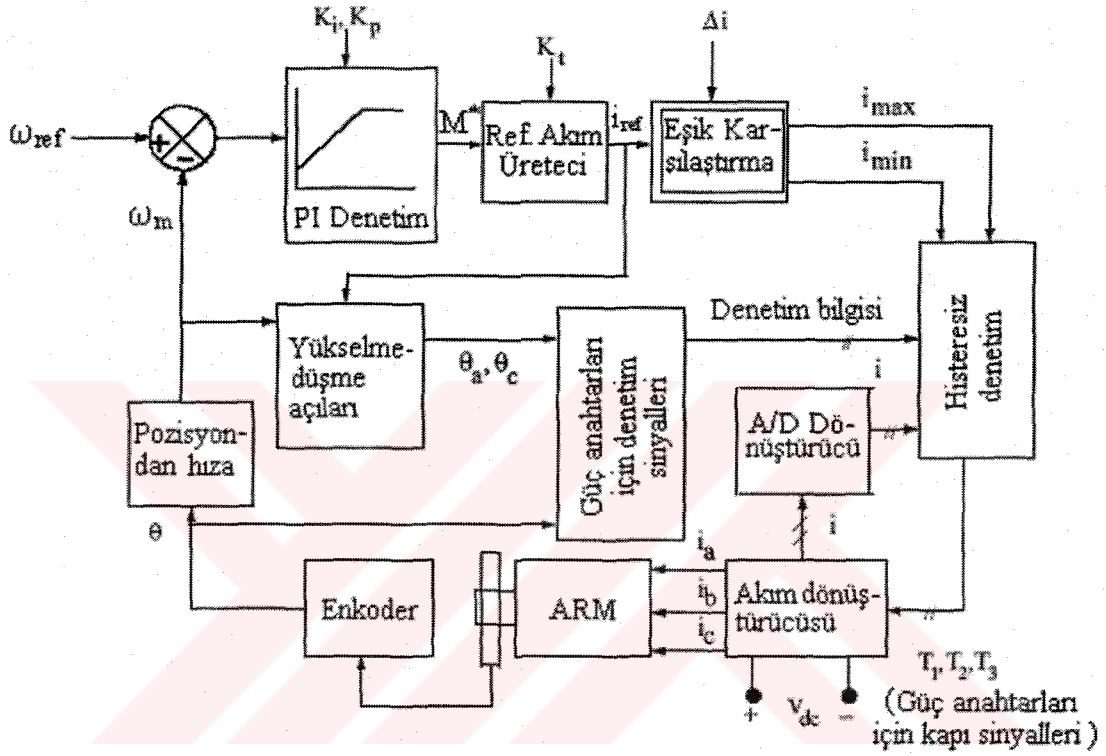


Şekil 2.14. ARM' de farklı hızlar için tipik akım dalga şekilleri ve 8/6 ARM için ateşleme açıları

2.6.3. Kapalı çevrim hız denetimli ARM sürücü devresi

Şekil 2.15' de kapalı çevrim, hız denetimli ARM sürücü devresi gösterilmektedir. Hız hatası PI denetleyicide işlenmektedir ve çıkışında M^* moment komutu elde edilmektedir. Moment sabiti (K_t) kullanılarak moment komutundan akım komutu (i_{ref}) elde edilir. Moment sabiti, akımın belirli bir değeri için endüktans-rotor konumu karakteristiklerini doğrusallaştırmak için kullanılır. Faz anahtarlama ve herhangi bir dönüştürücünün ana anahtarlarını belirleyen i_{max} ve i_{min} değerlerini belirlemek için akım komutu, histerisiz bandı aralığı ile bir toplanır bir çıkarılır. Akımlar pozisyon tahmin sisteminden (estimator), kod çözücünden (resolver) veya

kodlayıcıdan (enkoder) elde edilen pozisyon bilgisine göre kendi fazlarına uygulanır. Yükselme ve düşme açıları stator akımının genliğinden, rotor hızından ve minimum ve maksimum endüktans değerlerinden hesaplanır. Yükselme ve düşme açıları blok diyagramda, anahtar kontrol sinyal üreticindeki (switch control signal generator) rotor pozisyonu bilgisine bağlanmıştır.

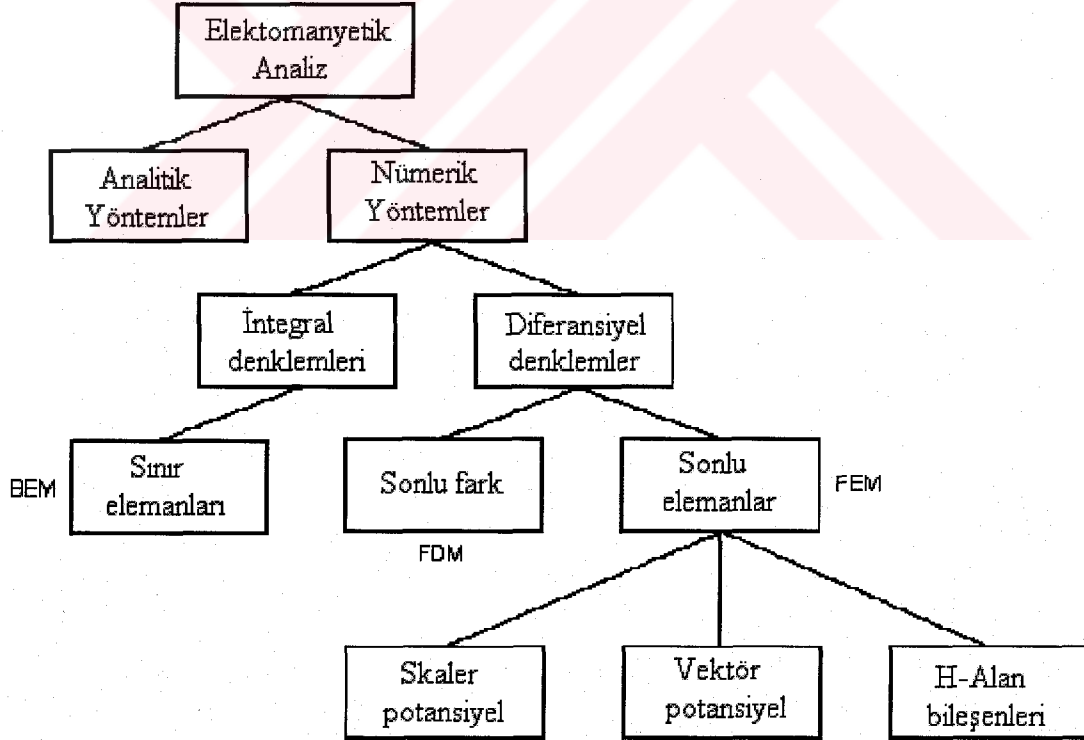


Şekil 2.15. Kapalı çevrim ARM sürücü sistemi

BÖLÜM 3. ARM' NUN MANYETOSTATİK ANALİZİ VE DİNAMİK MODELİNİN OLUŞTURULMASI

3.1. Giriş

Elektrik mühendisliğinde transformatör, motor, jeneratör gibi elektrik makinelerinde manyetik alan dağılımının ve manyetik alana ilişkin büyüklüklerin belirlenmesi için analog veya sayısal yöntemler kullanılabilir. Analog yöntemlerin zorlukları ve yetersizlikleri sayısal yöntemlerle aşılabılır. Manyetik alan problemlerinin çözümünde farklı sayısal yöntemlerden yararlanır. Bunlardan bazıları; Sonlu Farklar Yöntemi, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Monte Carlo Yöntemi, Sınır Elemanları Yöntemi, Yük Benzetim Yöntemidir. En fazla kullanılan sayısal yöntemlerden birisi de Sonlu Elemanlar Yöntemidir (SEY). Şekil 3.1' de Elektromanyetik analiz yöntemleri gösterilmektedir [39].



Şekil 3.1. Elektromanyetik analiz yöntemleri

Sonlu Elemanlar Yöntemi, fiziksel matematiğin sınır değer problemlerine yaklaşık çözümler üretmek için kullanılan bir sayısal yöntemdir. Yöntem yaklaşık kırk yıllık bir geçmişe sahiptir. İlk olarak 1940' lı yıllarda önerilmiş 1950 'li yıllarda uçak tasarımında kullanılmaya başlanmıştır. Bundan sonra, yöntem geliştirilmiş ve yapı analizi ile ilgili problemlere çok yaygın olarak, diğer alanlardaki problemlere de daha az yaygın olarak uygulanmıştır. Günümüzde Sonlu Elemanlar Yöntemi, mühendislik ve matematik problemlerinin çözümünde geniş uygulama alanına sahip genel bir yöntem olarak tanınmaktadır. Yöntemin elektromanyetik alan problemlerine uygulanması ilk olarak 1968 yılında gerçekleştirilmiştir [12].

Yüksek derecede özellik arz eden motor sürücülerini düşük gürültü, yüksek güç yoğunluğu ve yüksek performans özellikleri bakımından en iyi hale getirmek pahalı tasarımlar ve yoğun çalışmalar gerekmektedir. Bu zorluğu aşmak güvenilir, doğru ve pratik simülasyon metotları sayesinde oldukça kolaylaşmıştır. İyi bir simülasyon çalışması ile istenilen performans karakteristikleri ve buna karlılık gelen tasarım şekilleri gerçek prototip üretilmeden belirlenebilmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi (SEY), karmaşık geometriye, manyetik doymaya ve deri etkisine sahip dönen elektrik makinelerinin modellenmesinde başarı ile uygulanmaktadır [29].

ARM gibi karmaşık elektrik sistemlerinin dinamik davranışına ilişkin simülasyon çalışmaları daima dikkate değer bir öneme sahiptir. Tasarımcı bu simülasyonlar aracılığıyla sistemin davranışını geniş çalışma sınırları içinde tahmin edebilmektedir. Sistem performansını en iyi hale getirmek için denetim parametreleri herhangi bir anda kolayca ayarlanabilmektedir.

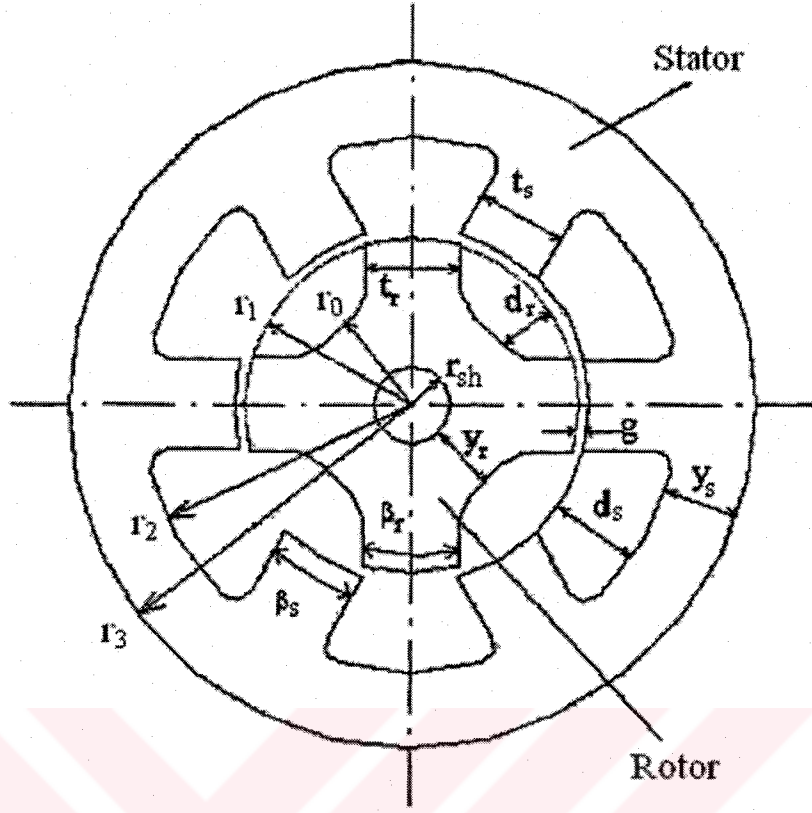
Anahtarlamalı Relüktans Motorda rotor konumuna ve uyarma akımına bağlı olarak değişen faz endüktansı, makinenin dinamik performansını belirlemektedir [28]. Bu çalışmada motorun dinamik performansını belirleyen çalışma karakteristikleri sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile tahmin edilmiştir.

3.2. Manyetostatik Analiz

Bu bölümde sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile kısa kutup adımlı sargı yapısına sahip anahtarlı relüktans motorunun tüm çalışma karakteristikleri elde edilmektedir. Sonlu Elemanlar Yöntemini ARM'na uygulamak amacıyla ANSOFT şirketi tarafından ticari bir yazılım olarak hazırlanan Maxwell 2D sonlu elemanlar analiz programı kullanılmıştır. Bu program Maxwell denklemlerini kullanarak manyetik analizleri gerçekleştirmektedir. Manyetik analiz yazılımı iki boyutlu manyetostatik çözüm yapmakta ve doğrudan sargının halkaladığı akıyı hesaplayabilmektedir. Rotor pozitif moment bölgesi içerisinde, karşılıklı konumdan ortalanmış konuma kadar farklı ara konumlarda sabit tutulmakta ve her bir konumda farklı akım değerleri için manyetik analiz hesaplamalarıyla $\lambda(i,\theta)$ değişimi belirlenmektedir. Örneğin, üç fazlı (6/4) motor için ($0^\circ \dots 45^\circ$) aralığında 10 adet rotor konumu ve (15A...255A) aralığında 17 adet akım değeri için toplam 170 adet farklı hesaplama ile motora ilişkin $\lambda(i,\theta)$ değişimi belirlenmektedir. Yapılan analizler iki boyutludur ve gerçek motorda sargı başlarında oluşan kaçak akıları hesaba katmamaktadır. Dolayısıyla iki boyutlu alan analiziyle elde edilen halkalama akısı sonuçlarıyla gerçek motordaki halkalama akısı arasındaki farkın bilinmesi önemlidir (Krishnan et al 1988, Lawrenson et al 1980).

3.2.1. Kullanılan motorun özellikleri

Çalışmada kullanılan 6 stator 4 rotor kutup yapısına sahip kısa kutup adımlı sargı yapısına sahip klasik ARM'na ait boyutlar ve motorun kesit görünüşü Şekil 3.2' de gösterilmektedir (Shyam 2001).



Şekil 3.2. ARM'nun kesit görünüşü ve boyutları

Kullanılan ARM'nun geometrik boyutları ve bu boyutların değerleri SI birim sistemi kullanılarak Tablo 3.1'de verilmiştir. Ayrıca motorun plaka değerleri Tablo 3.2' de verilmektedir.

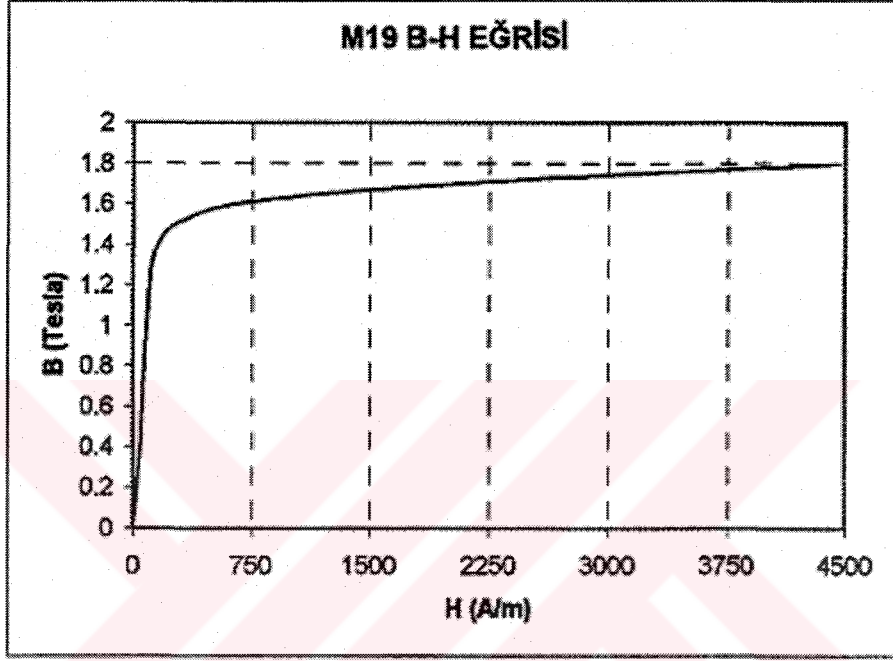
Tablo 3.1. Kullanılan ARM'nun geometrik boyutları

Parametre Adı	Sembolü	Değeri
Stator kutup yüksekliği	d_s	0,0265
Rotor kutup yüksekliği	d_r	0,0447
Motor derinliği	m_d	0,2981
Hava Aralığı	g	0,0020
Stator kutup genişliği	t_s	0,07816
Rotor kutup genişliği	t_r	0,08214
Stator kutup sayısı	N_s	6
Rotor kutup sayısı	N_r	4
Stator boyunduruk kalınlığı	y_s	0,0546
Rotor boyunduruk kalınlığı	y_r	0,0575
Rotor boyunduruk yarıçapı	r_0	0,1043
Rotor kutup yarıçapı	r_1	0,1490
Stator iç boyunduruk yarıçapı	r_2	0,1775
Stator dış boyunduruk yarıçapı	r_3	0,2321
Mil yarıçapı	r_{sh}	0,0468
Stator kutup açısı	β_s	30
Rotor kutup açısı	β_r	32

Tablo 3.2. Kullanılan ARM'nun etiket değerleri

Parametre	Değeri
Maksimum güç (P_{max})	34 KW
Sürekli güç (P_c)	23 KW
D.A. gerilim (V_{da})	300 V
Nominal hız (V_{nom})	1200 d/dk
Maksimum hız (V_{max})	6000 d/dk

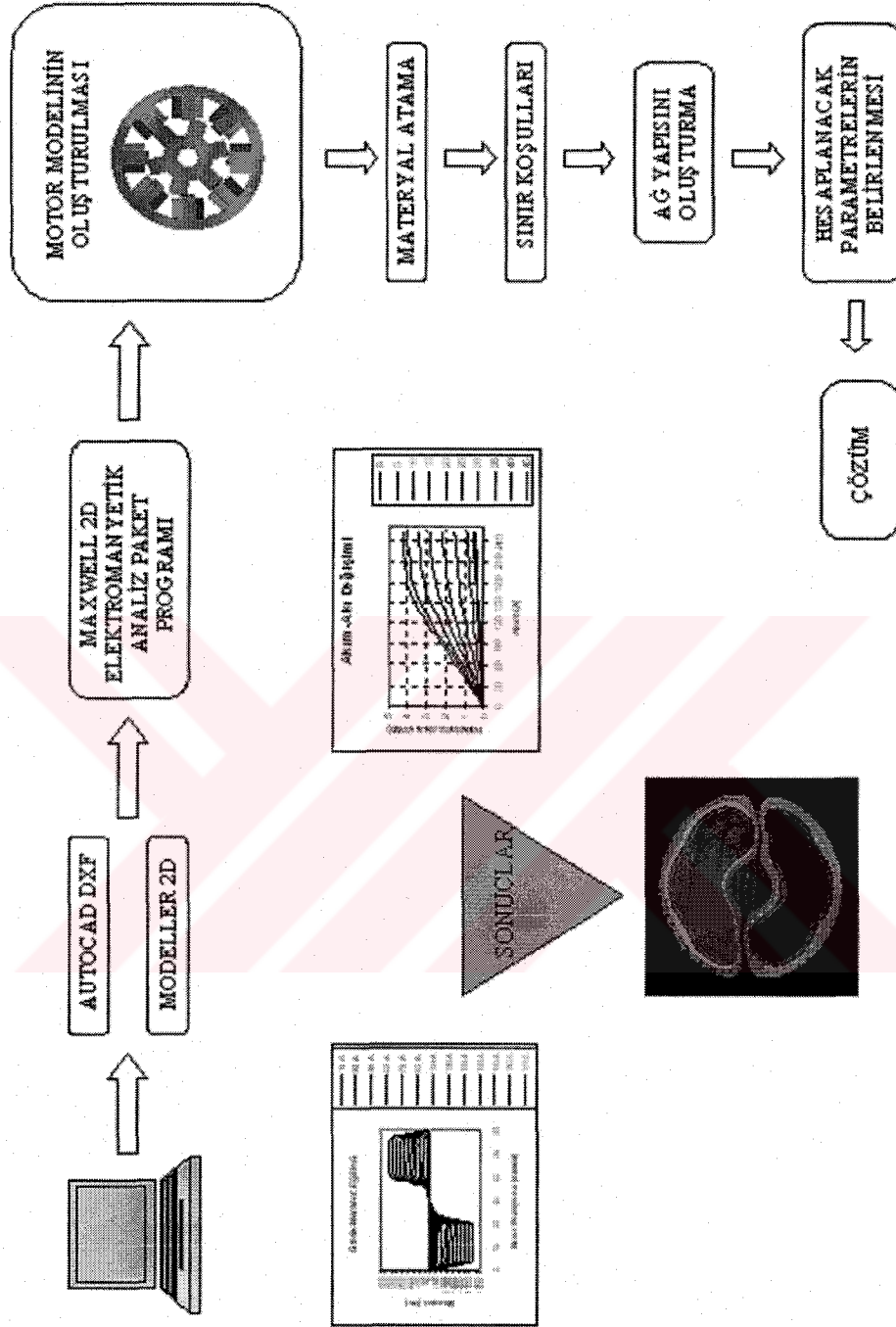
Rotor ve Stator gövdesi doymuş saç malzemededen (M19) yapılmış olup malzemenin B-H eğrisi Şekil 3.3' de gösterilmektedir. Eğri incelendiğinde ARM'nun lineer olmayan bir malzeme karakteristiğine sahip olduğu görülmektedir. Bu karakteristiğin hatasız olarak tanımlanması, ilerleyen kısımlarda motorun davranışlarını doğru bir şekilde elde etmek için son derece önemlidir.



Şekil 3.3. Motorda kullanılan malzeme için B-H eğrisi

3.2.2. Sonlu elemanlar modelinin oluşturulması

Elektromanyetik alan problemleri çözümlenirken farklı aşamalardaki işlemler gerçekleştirilerek bir bütün halinde model oluşturulur. Bu aşamalar Şekil 3.4' de gösterilmektedir.

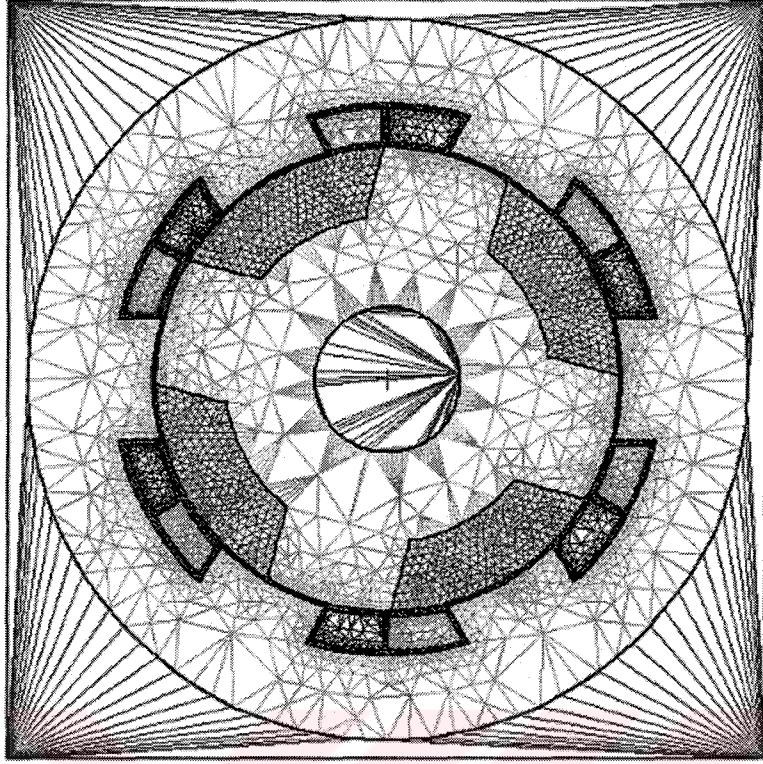


Şekil 3.4. Program akış şeması

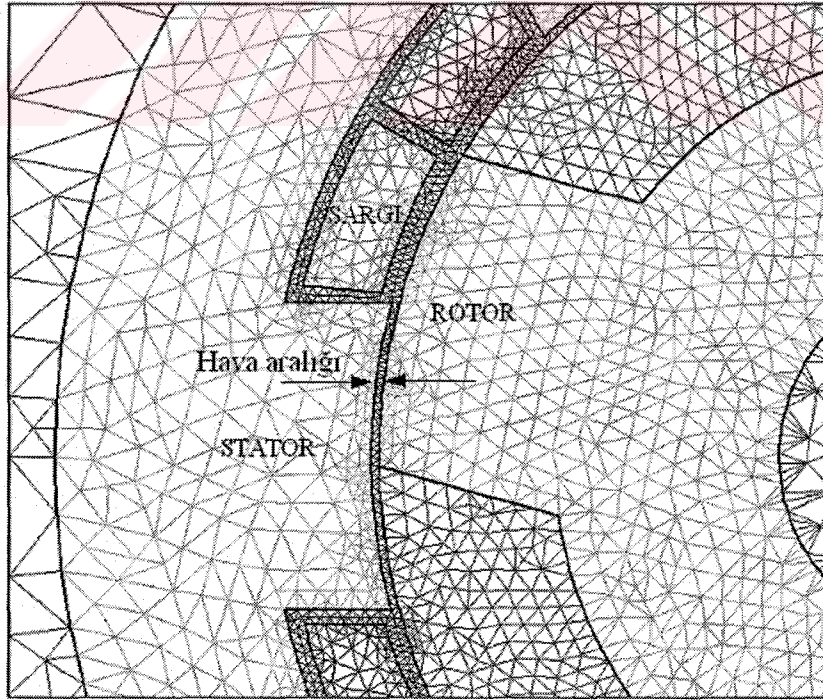
Geometrinin modellenmesi aşamasında motorun geometrisi ölçülerine uygun olarak oluşturulmuştur. Maxwell 2D programının bir alt programı olan 2D Modeler bu iş için kullanılmaktadır. Ayrıca Maxwell 2D herhangi bir CAD programı ile çizilen IGES/DXF uzantılı dosyaları da tanımaktadır. Model geometrisi çizildikten sonra modelde kullanılan malzeme tipleri tanımlanmalıdır. Bunun için programın içinde yer alan kütüphaneden tanımlanacak malzeme seçilerek materyal atama işlemi gerçekleştirilir. Eğer atanacak materyal kütüphane içinde yoksa, malzemenin B-H karakteristiği tanımlanarak program kütüphanesine ilave materyal eklenebilmektedir.

Şekil 3.5 ve Şekil 3.6' dan görüldüğü gibi (Model oluşturulurken) gerek sargılarda gerekse stator ve rotor kutuplarında stator ve rotor kutup uçlarına göre, daha seyrek elemanlar kullanılmaktadır. Kutup uçlarına doğru gittikçe daha sıklaşan elemanlar stator ve rotor kutup uçlarına gelindiğinde en sık ve en yoğun halini almaktadır. Çünkü bu noktalar yüksek hassasiyet gerektiren noktalardır. Sonuçların en iyi şekilde elde edilmesi için akı çizgilerinin yoğun olduğu bölgelerin çok iyi modellenmesi gerekmektedir. Bilhassa stator ve rotor kutup uçlarında ve hava aralığında çok sayıda eleman sıklıkla kullanılarak modelin hassasiyeti artırılmalıdır [5].

Çözümün her aşamasında rotor 5 derece döndürülmüştür ve bu konumda sabit akım altında motor parametreleri belirlenmiştir. Manyetik alan çözümlerinden genel olarak kuvvet, moment, kayıplar, endüktans ve akı parametrelerini hesaplamak mümkündür. Bunların dışında akı yoğunluğu, akı çizgileri, manyetik alan şiddeti gibi dağılımlar da model üzerinde görülebilmektedir.



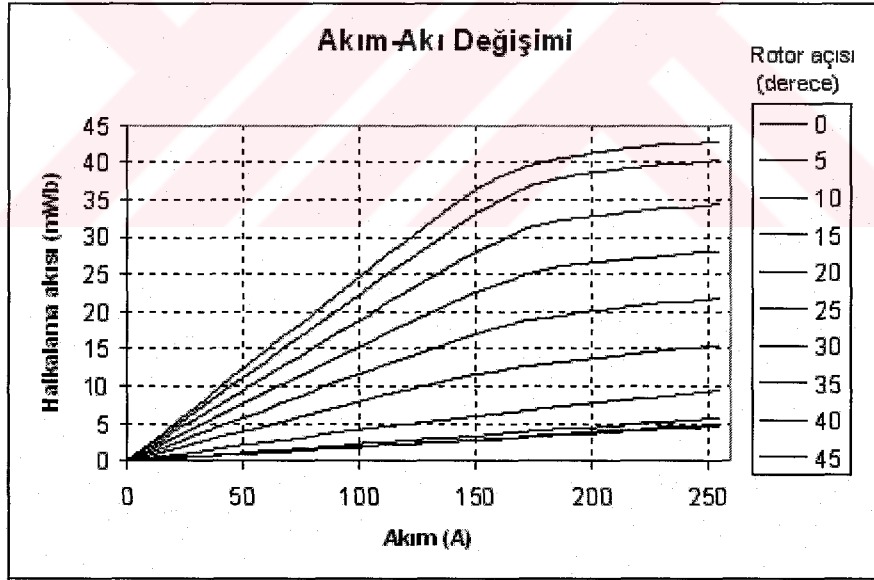
Şekil 3.5. ARM'nun SEY ile modellenmiş hali



Şekil 3.6. Hava aralığı ve kullanılan elemanlar

3.2.3. ARM' nun çalışma karakteristiklerinin elde edilişi

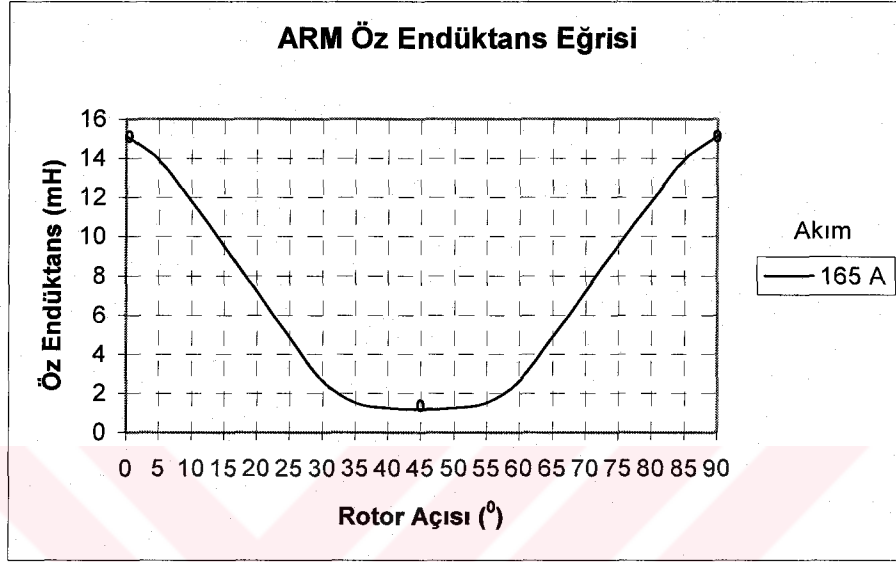
Çalışma karakteristiklerinden ilk önce akı karakteristiği incelenmiştir. Daha sonra AR motorunun endüktans ve moment karakteristiği incelenmektedir. Motorun karakteristikler elde edilirken nominal çalışma akımı olan 165 A' in altındaki ve üstündeki akım değerleri için çözümler yapılarak doymanın olduğu ve olmadığı durumlarda motor karakteristikleri incelenmektedir. Şekil 3.7' de AR motoruna ait halkalanma akısı-akım değişimi gösterilmektedir. Analiz yapılırken motorun faz akımı 0-255 amper arasında 15' er amperlik artımlarla artırılmıştır ve bu akımlara karşılık gelen halkalama akılarına bakılmıştır. 0°- 45° arasındaki akı verileri 45°-90° arasındaki veriler dikey eksene göre simetrik olduğundan analizlerin 0°- 45° arasında yapılması yeterli olmaktadır. Şekil 3.7' den doymanın 165 A civarında başladığı görülmektedir. Akı karşılıklı konumda en büyük değerini almaktadır.



Şekil 3.7. ARM'nun halkalanma akısı-akım eğrisi

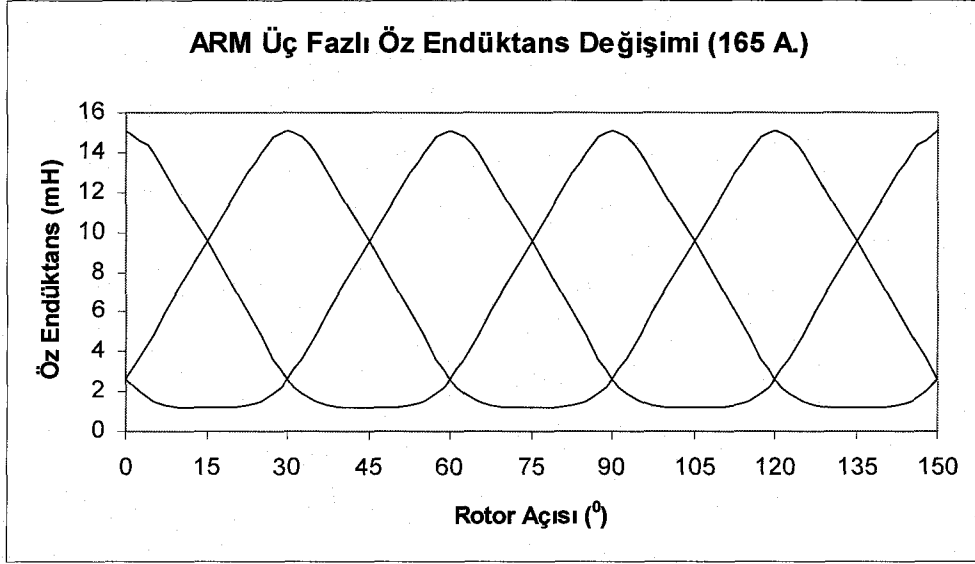
Şekil 3.8' de ARM'nun öz endüktans eğrisi gösterilmektedir. Endüktans eğrisi en büyük değerini karşılıklı konumda, en küçük değerini ise ortalanmış konumda

almaktadır. Motorun pozitif moment ürettiği artan endüktans bölgesi yaklaşık 55° ile 90° arasındaki bölgedir. Eğer bu bölgenin sonunda fazın enerjisi kesilmezse motor negatif moment üretir.

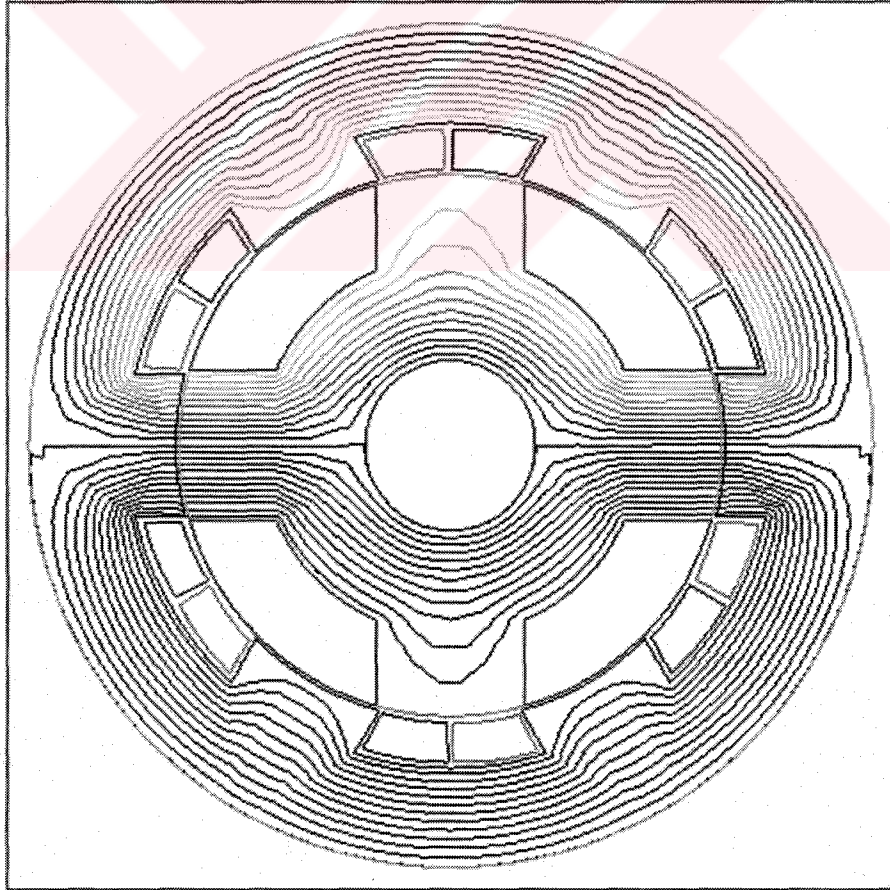


Şekil 3.8. ARM bir faz öz endüktans eğrisi (165A)

6/4 kutuplu AR motorunun her 30°' lik dönüşünde (adım açısı) bir rotor kutup çifti ile stator kutup çifti karşılıklı duruma geldiğinden fazların öz endüktans eğrileri arasında 30° faz farkı vardır. Bu durum Şekil 3.9' de görülmektedir.

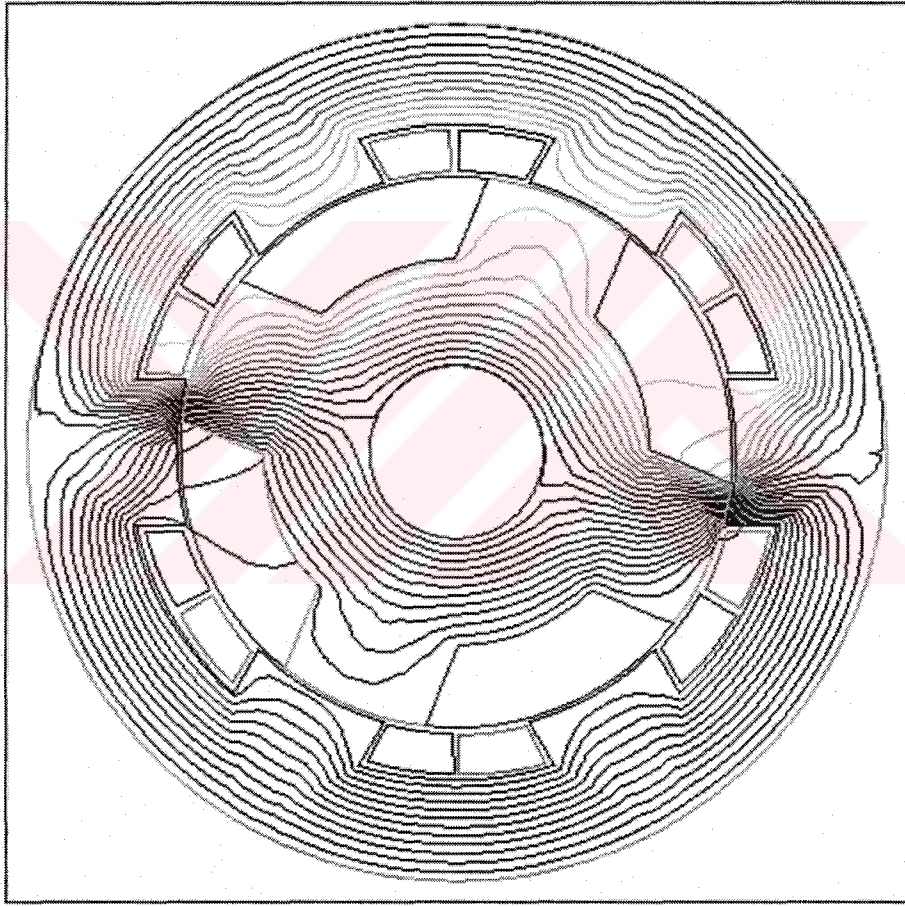


Şekil 3.9. ARM üç fazlı öz endüktans değişimi

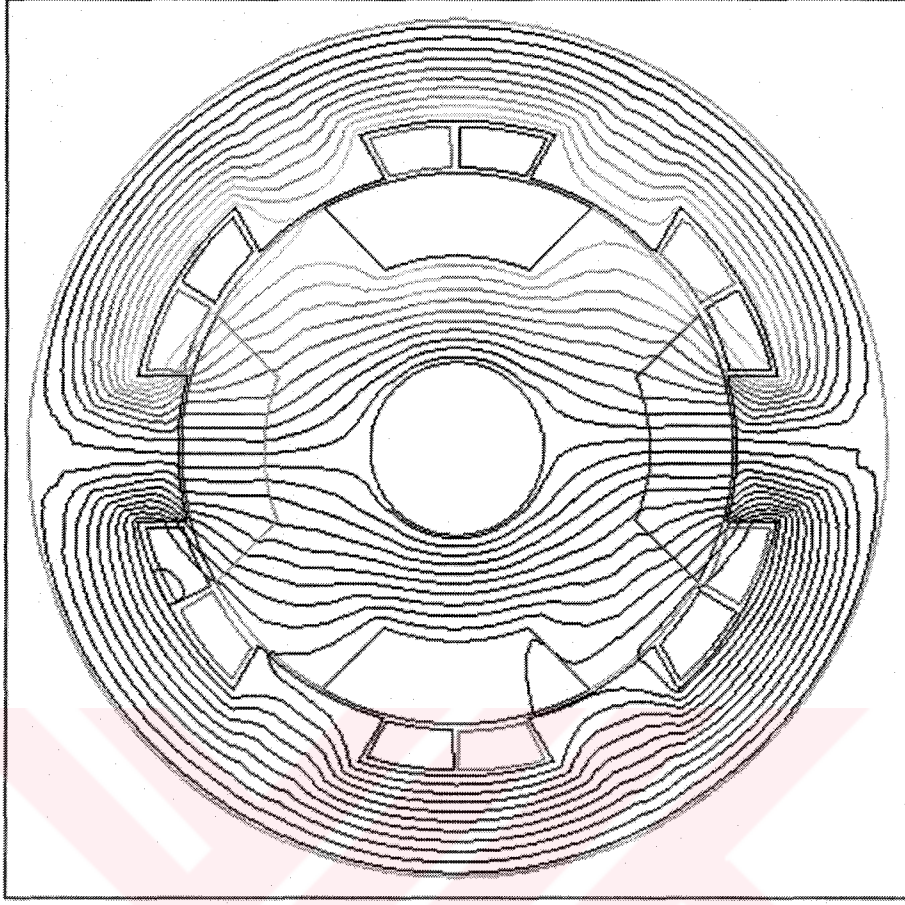


Şekil 3.10. ARM akı haritası (karşılıklı konum, 90 °)

Stator ve rotor konumuna bağı olarak endüktansla birlikte akı yolu da değışmektedir. Bu durum makinenin tasarım kısmında dikkate alınan önemli göstergelerden biridir. Bilindiğı gibi karşılıklı konumda öz endüktans değıeri en büyük değıerine ulaşmaktadır. Şekil 3.10' da karşılıklı konuma ait akı haritası gösterilmiştir. Akının tamamının rotor ve stator kutup uçlarından, rotor ve stator boyunduruklarından geçerek düzgün bir şekilde devresini tamamladığı görülmektedir.



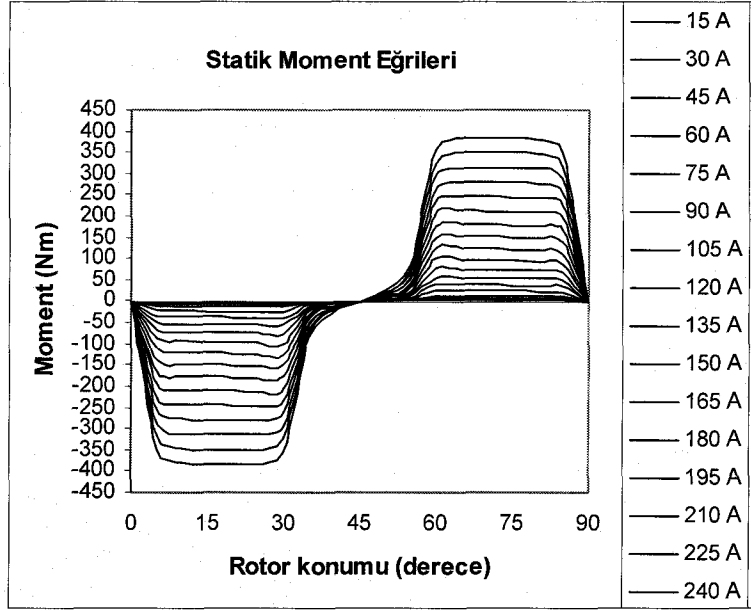
Şekil 3.11. ARM akı haritası (ara konum, 22.5 °)



Şekil 3.12. ARM akı haritası (ortalanmış konum, 45°)

Şekil 3.11' de rotor konumunun karşılıklı konumdan ayrılırken ara konumuna ait akı haritası gösterilmektedir. Bu akı haritasında, akının artık kutup köşelerine yığıldığı ve akı düzeninin kısmen bozulduğu görülmektedir. Öz endüktans değeri düşmeye başlamıştır. Şekil 3.12' de ortalanmış konuma yani endüktansın en küçük olduğu konuma ait akı çizgileri verilmektedir. Dikkat edilirse akı çizgileri son derece dağınık durumdadır. Bu durum aynı zamanda akı yolunun en düzensiz olduğu konumdur.

Analizler sonucunda elde edilen bir faza ait statik moment eğrileri Şekil 3.13' de gösterilmektedir. Daha önceden belirtildiği üzere öz endüktansın değişim oranı ve akımın karesi moment ifadesini oluşturan bileşenlerdir. Moment eğrilerinin, stator ve rotor kutuplarının karşılıklı olduğu (0° ve 90°) konumda ve ortalanmış konumda (45°) yön değiştirdiği görülmektedir.



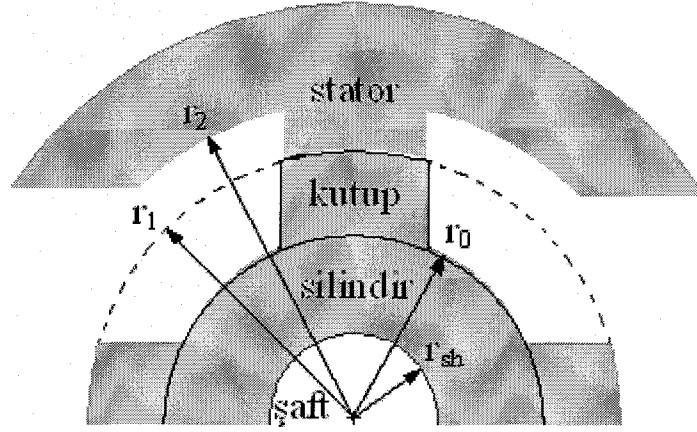
Şekil 3.13. ARM statik moment eğrileri

3.3. Motor Parametrelerinin Belirlenmesi

3.3.1. Atalet momentinin hesaplanması

Bu kısımda Maxwell programının alan hesaplama özelliğinden yararlanarak motorun atalet momentinin hesaplanması ele alınmaktadır. Elde edilen alan değeri ile model derinliği (model depth) çarpılarak hacim hesabı yapılmaktadır. Hesaplamalar sırasında çeliğin özağırlığı 7860 kg/m^3 alınmıştır. Rotor atalet momentinin bulunuşuna ilişkin işlem basamakları aşağıda sıralanmaktadır ;

1. Rotor alanının hassas olarak Maxwell programı ile hesaplanması
2. Rotor hacminin hesaplanması
3. Rotor kütesinin hesaplanması
4. Rotorun geometrisine göre atalet momentinin hesaplanması



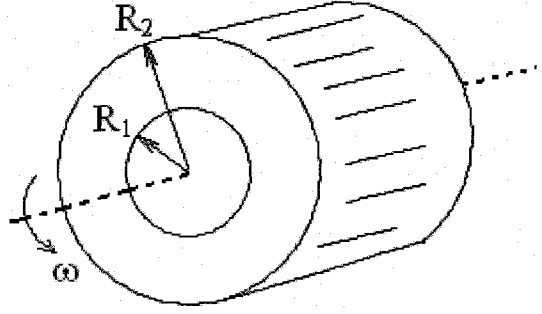
Şekil 3.14. Rotor geometrisi

Maxwell programı kullanılarak hesaplanan rotor alanları Tablo 3.3' de gösterilmektedir.

Tablo 3.3. Rotora ilişkin fiziksel büyüklükler ve hesaplanan değerler

	Alan (m^2)	Hacim (m^3)	Ağırlık (Kg)
Şaft	$6,877.10^{-3}$	$2,050.10^{-3}$	-
Kutup	$3,744.10^{-3}$	$1,1161.10^{-3}$	8,77
Silindir	$27,28.10^{-3}$	$8,132.10^{-3}$	63,919
Toplam rotor	$4,225.10^{-2}$	$12,59.10^{-3}$	99,012

Rotorun atalet momentinin hesaplanması için rotor geometrisi Şekil 3.14' de gösterildiği gibi iki ayrı geometrik şekle ayrılmıştır. Bunlardan birincisi rotordan kutupların çıkarılmasıyla elde edilen içi boş silindirdir. Diğeri ise rotor kutbuna ait geometrik şekildir.



Şekil 3.15. Halka biçimli silindir

Şekil 3.15' de gösterilen içi boş halka silindirin atalet momenti denklem (3.1)' deki gibi hesaplanmaktadır [23].

$$J_{HS} = \frac{1}{2} m_{HS} (R_1^2 + R_2^2) \quad (3.1)$$

Burada;

J_{HS} : Halka silindirin atalet momenti (kg.m^2)

m_{HS} : Halka silindirin kütlesi (kg)

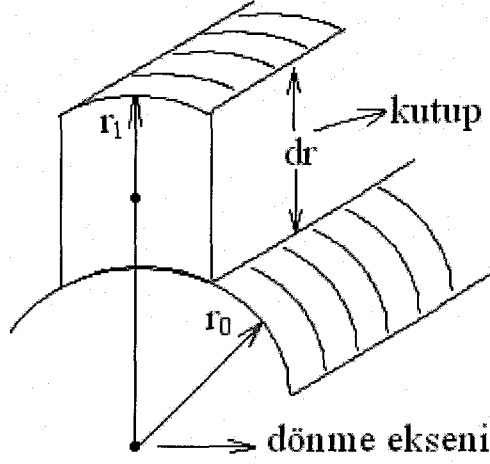
R_1, R_2 : Halka silindire ait sırasıyla iç ve dış yarıçaplar (m)

Denklem (3.1)' den halka silindirin atalet momenti aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$J_{HS} = \frac{1}{2} m_{HS} (r_{sh}^2 + r_0^2) = \frac{1}{2} (63,919) [(0,0468)^2 + (0,1043)^2]$$

$$J_{HS} = 0,417 \text{ Kg.m}^2$$

Şekil 3.16 'da rotor kutuplarından biri gösterilmektedir. Kutup ataleti bulunurken, rotor kutbunun geometrik şekli dikdörtgenler prizmasına benzetilmektedir ve prizmanın ağırlık merkezi bulunduktan sonra kutbun tüm ağırlığının bu noktada toplandığı düşünülerek noktasal atalet ilkesine göre atalet hesabı yapılmaktadır.



Şekil 3.16. Rotor kutbu geometrisi

Ağırlığı m , dönme ekseninden uzaklığı R olan noktasal cismin ataleti denklem (3.2)' den bulunabilir [23].

$$J_K = m_K \cdot R^2 \quad (3.2)$$

Buradan bir kutbun ataleti ;

$$J_K = m_K \left(r_0 + \frac{dr}{2} \right)^2 = 8,77 \cdot (0,1266)^2 = 0,14 \text{ Kg.m}^2$$

Toplam rotor ataleti, içi boş silindir ataleti (J_{HS}) ve 4 adet kutbun meydana getirdiği ataletin toplamına eşittir. Buna göre toplam atalet momenti aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$J = J_{HS} + 4 \cdot J_K = 0,417 + 4 \cdot (0,14) = 0,977 \text{ Kg.m}^2$$

3.3.2. Faz direncinin hesaplanması

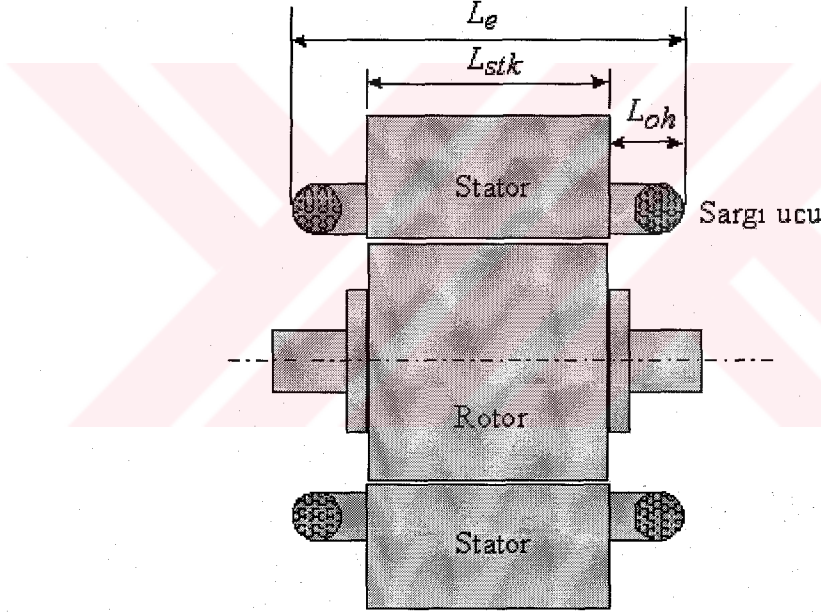
Şekil 3.17' de AR motorunun tasarımında dikkate alınan stator, rotor ve sargı ebatları gösterilmektedir. Sargı uçlarından alınan dıştan dışa uzunluk (L_e) paketleme

uzunluğu (L_{stk}) artı her iki taraftaki sargının iki sarkması ile denklem (3.3)' de ifade edildiği şekilde elde edilir:

$$L_e = L_{stk} + 2L_{oh} \quad (3.3)$$

L_e muhafazanın bir boyutudur. Sargıların sarkmasından dolayı her iki uçtaki sarkma uzunluğu (L_{oh}) kabaca $1,2 t_s$ olarak tahmin edilebilir [13], burada t_s stator kutup genişliğidir. Buna göre denklem (3.4)' deki ifade elde edilir:

$$L_e \approx L_{stk} + 2,4t_s \quad (3.4)$$



Şekil 3.17. ARM' nun muhafaza boyutları

Motorun bir fazının sargı uzunluğu (L_{su}) denklem (3.5)' deki gibi hesaplanmaktadır:

$$L_{su} = L_e \cdot 2 \cdot n_s \cdot 2 = 4 \cdot L_e \cdot n_s = 4 \cdot (L_{stk} + 2,4t_s) \cdot n_s$$

burada n_s , aynı faza ait sargılardan birinin sipir sayısıdır ve bu çalışmadaki motor için 16 dır.

$$L_{su} = 4.(0,2981 + 2,4.0,07816).16 = 31,0837 \text{ m}$$

Literatürde ARM için iletken seçiminde akım yoğunluğu 7 Amper/mm² alınmaktadır (Mese 2005). Buradan hareketle 165 A nominal motor akımı için uygun iletken kesiti,

$$S = \frac{165 \text{ A}}{7 \text{ A/mm}^2} = 23,571 \text{ mm}^2$$

olarak bulunmaktadır.

Özdirenci, uzunluğu ve kesiti bilinen bir iletkenin direncinin bulunuşuna ilişkin ifade denklem (3.6)' da gösterilmektedir. Burada ρ iletkenin özdirenci ($\Omega\text{mm}^2/\text{m}$), L iletkenin uzunluğu (m), S ise iletkenin kesitidir (mm^2).

$$R = \frac{\rho.L}{S} \quad (3.6)$$

Denklem (3.6)' dan faz direnci aşağıdaki gibi bulunmaktadır.

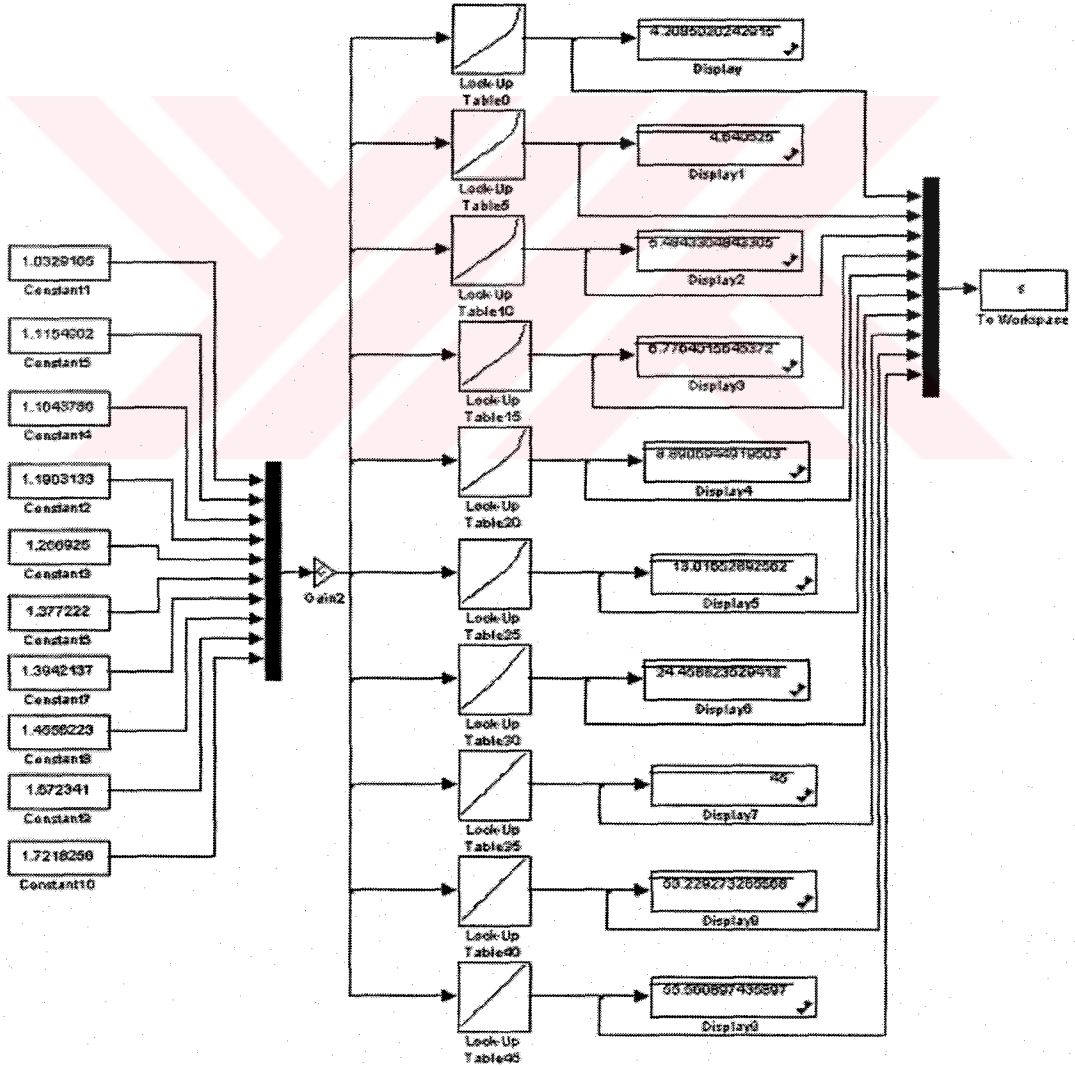
$$R_a = \frac{0,017857.31,0837}{23,571} = 0,0235 \Omega$$

3.4. ARM' nun Doğrusal Olmayan (nonlinear) Dinamik Modelinin Oluşturulması

3.4.1. Moment ve akım tabloları (Look-Up Tables)

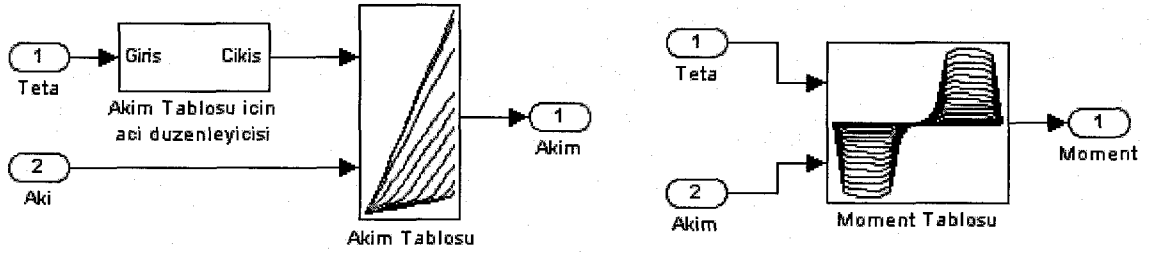
Bu kısımda sonlu elemanlar yöntemi (SEY) kullanılarak elde edilen statik analiz verileri kullanılarak motorun dinamik modeli Matlab/Simulink ortamında oluşturulmaktadır. Motorun temel karakteristiklerini oluşturan halkalama akısı ve momente ilişkin SEY analizi verileri Matlab/Simulink ortamına taşımak için iki boyutlu Tablolar (Look-Up Table) kullanılmıştır.

Şekil 3.13’ de gösterilen statik moment karakteristiğine ait veriler matrissel formatta (19 rotor konumu \times 18 akım değeri) Simulink’ in iki boyutlu tablolama (Look-Up Table 2D) bloğuna direkt olarak aktarılmıştır. Ancak halkalama akısına ait veri matrisi direkt olarak tabloya aktarılabacak biçimde değildir. Çünkü analiz sonucunda elde edilen matris akı verilerinden oluşmaktadır. Hâlbuki motor modelinde kullanılacak Akım Tablosuna aktarılabacak matrisin akım verilerinden oluşması gerekmektedir. Bu amaçla bir boyutlu (1D) tablolar kullanılarak matris verileri motor akımı olacak şekilde yeniden düzenlenmiştir ve motor modelinde kullanılan akım tablosu elde edilmiştir. Bunun için oluşturulan Simulink modeli Şekil 3.18’ de gösterilmektedir.



Şekil 3.18. Halkalama akısı verilerinin matrissel dönüşümü için Simulink modeli

Şekil 3.19' da oluşturulan Akım ve Moment Tabloları gösterilmektedir.



Şekil 3.19. Moment ve Akım Tabloları

3.4.2. Dinamik model

ARM'nun dinamik modeli faz akımlarını ve momentlerini tahmin etmek için SEY analizi sonuçlarına göre oluşturulan tabloları (Look-Up Table) kullanmaktadır. Şekil 3.21, ARM'nun bir faz dinamik modelini göstermektedir. Akım tablosunun girişlerinden birisi olan akı, denklem (3.7)' den bulunmaktadır [31]. Şekil 3.20' de akı hesabına ilişkin Matlab/Simulink modeli gösterilmektedir.

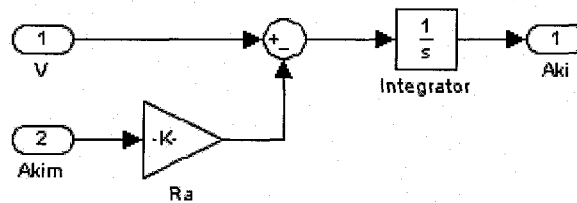
$$\lambda_n = \int (V_n - R_n \times i_n). dt \quad (3.7)$$

λ_n : Motorun n. fazının akısı (Wb)

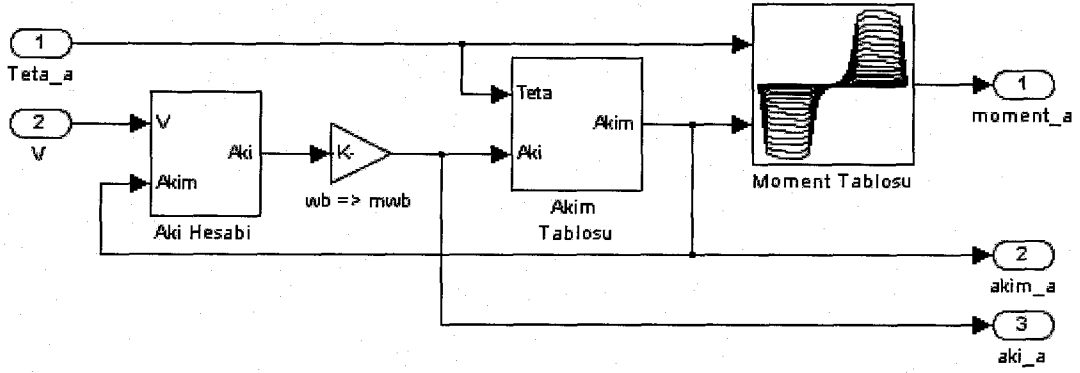
V_n : Motorun n. fazının gerilimi (V)

R_n : Motorun n. fazının omik direnci (Ω)

i_n : Motorun n. fazının akımı (A)

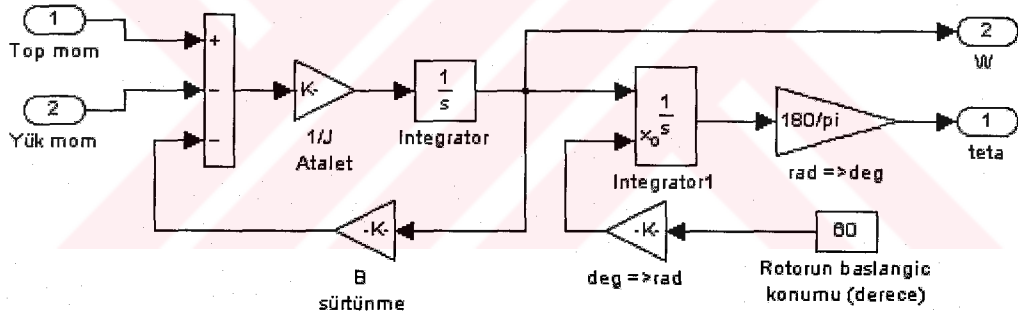


Şekil 3.20. ARM'nun akı modeli

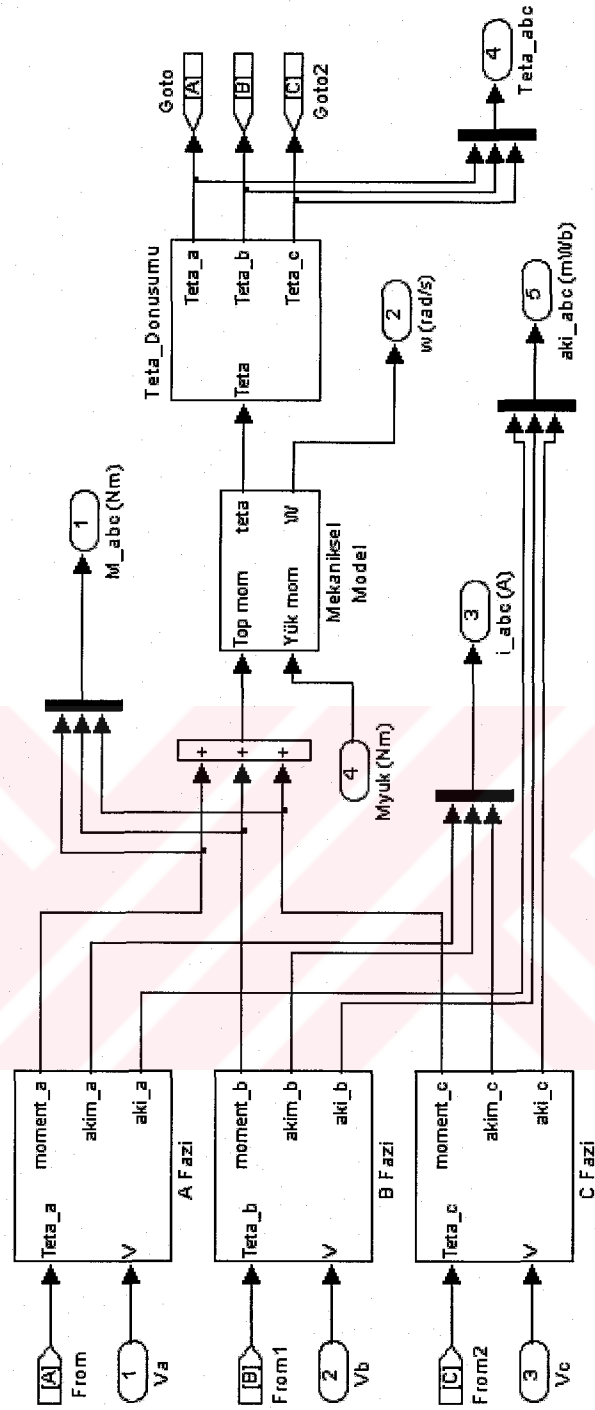


Şekil 3.21. ARM'nun bir faz dinamik modeli (A fazı)

Motorun her üç fazının modeli Şekil 3.22' de gösterilen mekanik model ile birleştirildiğinde AR motorunun tam dinamik modeli elde edilmektedir. Tam model Şekil 3.23' de gösterilmektedir. Modelde yer alan 'Teta Dönüşümü' bloğu, rotor konumuna göre motor fazlarında kullanılan tablolara uygun konum açılarını göndermek amacıyla kullanılmaktadır.



Şekil 3.22. Mekanik model



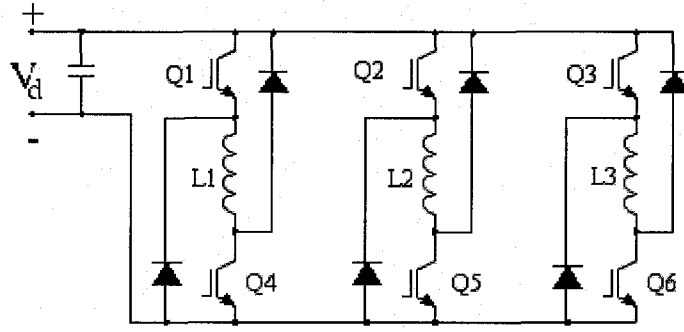
Şekil 3.23. Üç fazlı ARM'ın dinamik modeli

3.5. Sürücü Devresi ve Modellenmesi

ARM motorlar konusunda yapılan araştırmaların temel konularından biri sürücü devresi tasarımıdır. AR motorun verimi ve maliyeti sürücü devre performansından oldukça etkilenir. AR motorunda fazların bağımsız olması ve tek yönlü akım gereksinimi sürücü devre yapılarında çeşitlilik meydana getirmiştir. Son yıllarda yapılan araştırmalar sayesinde daha az anahtar içeren ve daha hızlı anahtarlama yapabilen sürücü devreleri geliştirilmiştir [25]. Bu kısımda, ARM modelinde kullanılan sürücü devresi tanıtılmakta ve nasıl modellendiği anlatılmaktadır.

3.5.1. ARM sürücü devresi

Çok yönlü olması bakımından ARM sürücü devreleri arasında en yaygın kullanılanlardan birisi faz başına iki anahtar ve iki diyotu olan klasik köprü dönüştürücü devresidir. Bu dönüştürücü yapısı en çok gerilim düşümünün önemli olmadığı sürücü uygulamalarında kullanılır. Şekil 3.24' de klasik köprü dönüştürücü devresi gösterilmektedir [25]. Sürücü devrenin çalışması dört çalışma durumu ile ifade edilebilir. L_1 fazının iletim periyodu boyunca Q_1 ve Q_4 faz anahtarları iletimdedir. DA gerilim kaynağı fazı enerjiler. Fazın mıknatıslandırılması genellikle stator ve rotor kutuplarının karşılıklı hale gelmesinden önce başlatılır. Bu sayede faz akımı faz endüktansı artmaya başlamadan önce referans değerine ulaşır. Bu moment dalgalanmalarının azaltılması bakımından önemlidir. Akım referans değerine ulaştığında sürücü devre akım ayarlama işlemini gerçekleştirir. Bu çalışma biçiminde akım, faz anahtarlarından biri anahtarlanarak referans değerinde tutulur. Bu esnada diğ er faz anahtarı fazın enerjisinin kesilmesine dek iletimde kalır.



Şekil 3.24. ARM için klasik sürücü devresi

Faz enerjisi kesileceği zaman (commutation), her iki faz anahtarı da (Q_1 ve Q_4) kesime girer. Faz sargısı diyotlar üzerinden mıknatıslığını kaybeder (demagnetization) ve enerji motor fazında DA kaynağına aktarılır. Fazın enerjisi kesilirken sargı üzerinde $-V_{dc}$ gerilimi meydana gelir. Fazlardan birinin enerjisi kesilirken başka bir faz enerjilendirilebilir.

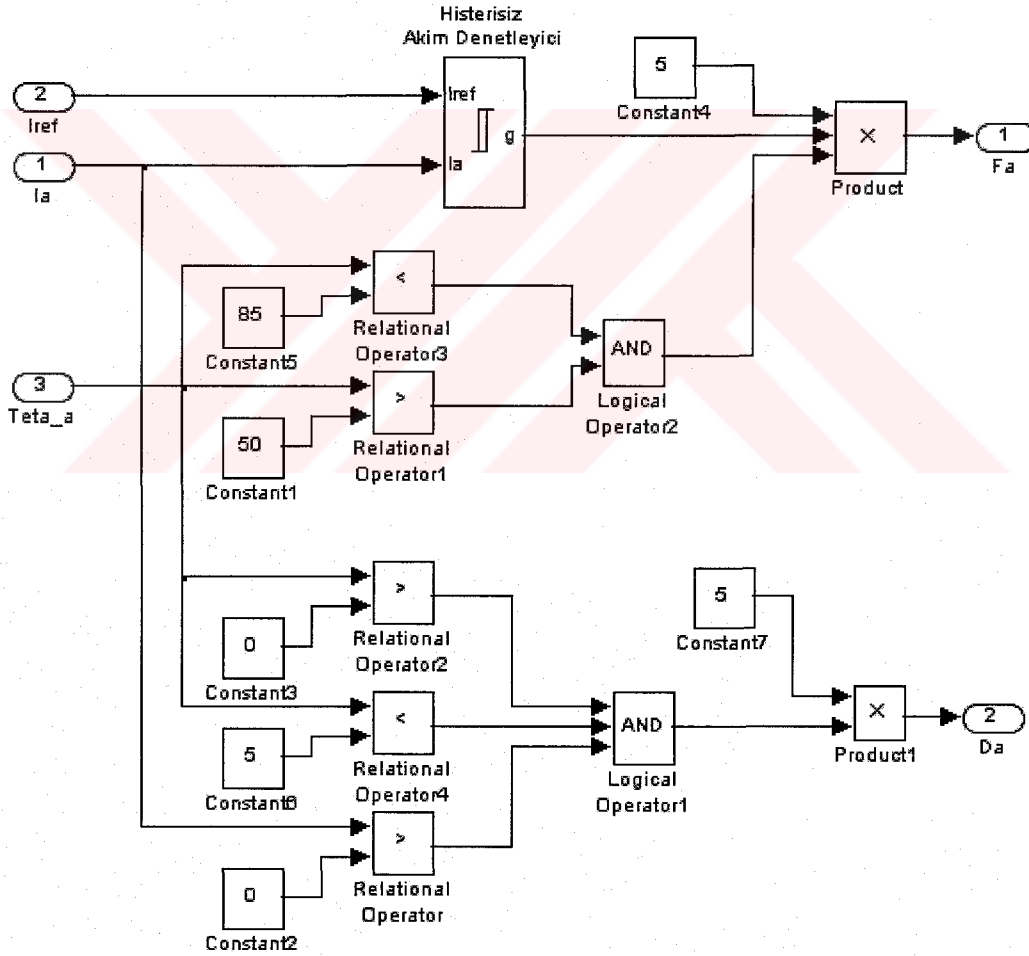
Bu sürücü yapısının avantajları şöyle sıralanabilir:

- Her bir fazın denetimi diğer fazlardan tamamen bağımsızdır.
- Tüm anahtarlama elemanlarının ve diyotların tepe gerilim sınırları V_{dc} gerilimi kadardır. Bu değer diğer sürücü devrelerle karşılaştırıldığında düşüktür.
- Sürücü devre motor düşük hızlarda çalışırken kıyma periyodu boyunca enerji geri kazanımı sağlanabilir. Bu durum anahtarlama frekansını azaltarak anahtarlama kayıplarının azalmasını sağlar.
- Kesime giren fazın enerjisi DA kaynağına aktarılarak enerjinin verimli kullanılması sağlanır.

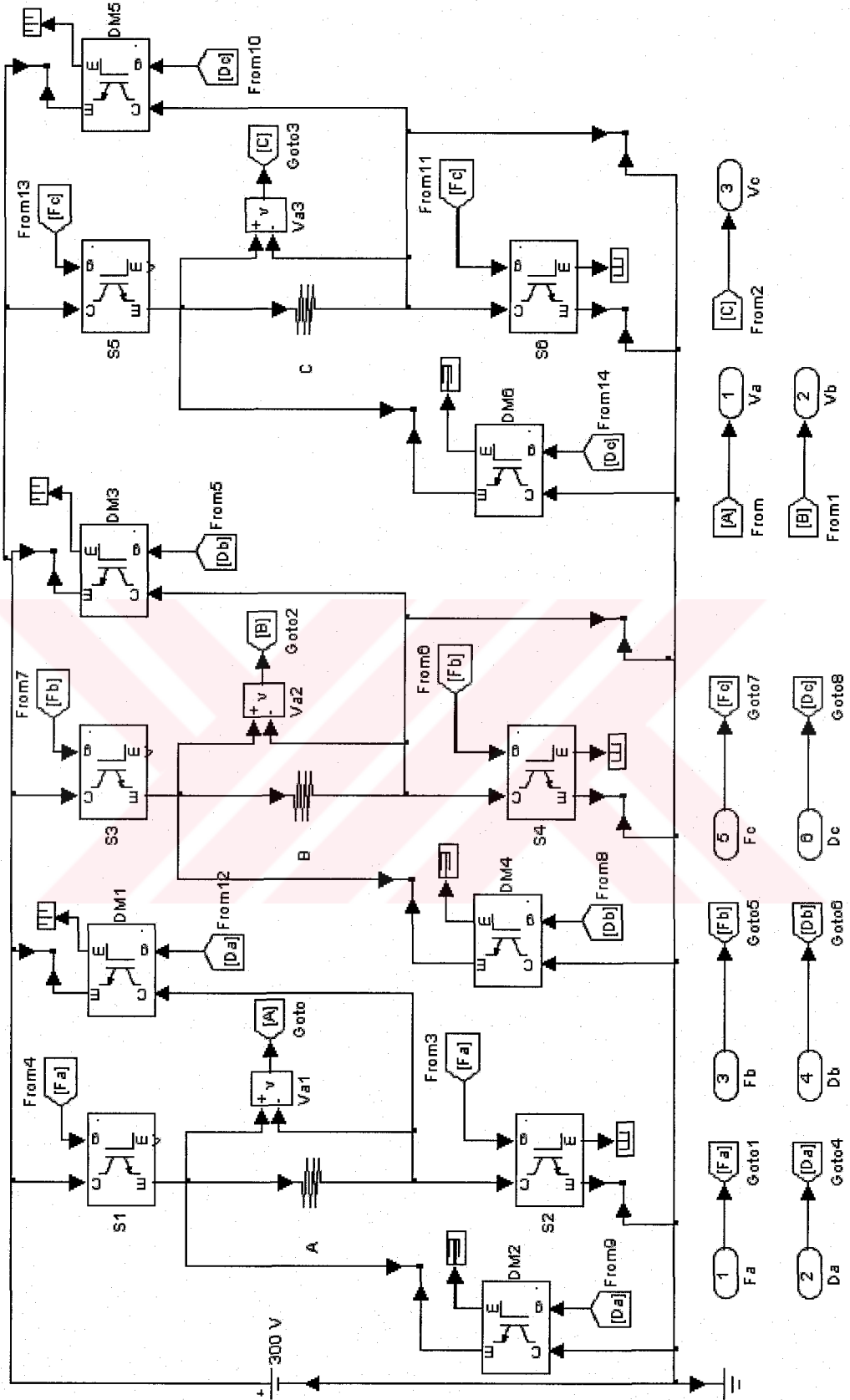
Bu sürücü devrenin en büyük dezavantajı her faz için çok sayıda anahtarın gerekmesidir ki bu sürücü devreyi pahalı yapar. Aynı zamanda düşük gerilim uygulamalarında fazı anahtarlayan iki anahtar üzerinde meydana gelen ileri yöndeki gerilim düşümü Kaynak gerilimi ile kıyaslandığında önemli bir değerde olabilir.

3.5.2. ARM Sürücü devrenin modellenmesi

Bir önceki bölümde anlatılan sürücü devre yapısının Matlab/Simulink modeli Şekil 3.26' da gösterilmektedir. Sürücü devresi, kontrol devresi modeli ve güç devresi modeli olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Kontrol devresi modelinde, güç devresinde yer alan anahtarlama elemanlarını için uygun kapı sinyalleri üretilmektedir. Güç devresi modeli ise temel olarak anahtarlama elemanları olarak kullanılan IGBT' leri ve DA gerilim kaynağını içermektedir. Güç devresinin modellenmesinde Simulink' in güç elektroniği (SimPower Systems) kütüphanesinde yer alan model elemanları kullanılmıştır.



Şekil 3.25. ARM sürücü için kontrol devresi modeli



Şekil 3.26. ARM sürücü için güç devresi modeli

Şekil 3.25' de ARM sürücünün kontrol devresi modelinde A fazına ait anahtarlama elemanları için denetim sinyalleri üreten kontrol devresi modeli gösterilmektedir. Bu model diğer fazlar için de aynıdır. Modelde yer alan histerisiz akım denetleyici faz akımı ile referans akımı karşılaştırarak faz akımının referans değerde tutmak için gerekli çıkış sinyalini (0 veya 1) üretmektedir. Modelin girişlerinden birisi rotor konumu bilgisidir. Rotorun A fazına göre olan konumuna bakılarak kapı sinyalinin üretilip üretilmeyeceği belirlenmektedir. Rotor konumu, 50° olarak belirlenen iletim açısı değerine geldiğinde A fazı enerjilenmesi için gerekli kapı sinyalleri üretilmektedir. Bu durum faz enerjisinin tamamen kesileceği kesim açısına (85°) kadar devam eder.



BÖLÜM 4. BULANIK MANTIK (FUZZY LOGIC)

4.1. Giriş

Bilgisayarlar insan beyni gibi akıl yürütemezler. Bilgisayarlarda sıfır ve bir dizilerine indirgenmiş kesin gerçekler ve doğru yada yanlış olan önermeler kullanılır. İnsan beyni ise, “serin hava”, “yüksek hız”, “genç kız” gibi belirsizlik yada değer yargılarını içeren bulanık anlatım ve iddiaların üstesinden gelebilecek biçimde akıl yürütebilir. Ayrıca insan, bilgisayarlardan farklı olarak, hemen her şeyin ancak kısmen doğru olduğu bir dünyada akıl yürütmek için sağduyusunu kullanır.

Bulanık mantık, belirsiz bir dünyanın gri, sağduyulu resimlerini üretmeleri için bilgisayarlara yardımcı olan bir makine zekası biçimidir. Bulanık mantığın kilit kavramını mantıkçılar ilk olarak 1920’lerde “Her şey bir derecelendirme sorunudur” diyerek ortaya attılar.

Bulanık mantık, “sıcak” ya da “hâlâ kirli” gibi kavramlar kullanır ve bu sayede, hangi hızla çalışacağına ya da programlandığı bir aşamadan diğerine ne zaman geçeceğine kendisi karar veren havalandırma, çamaşır makinesi ve benzeri aygıtları yapabilmeleri için mühendislere yardımcı olur. Matematikçilerin elinde bir sistemin girdilerine yanıt verecek özel algoritmalar bulunmadığında, bulanık mantık belirsiz niceliklere başvuran “sağduyulu kurallar” kullanarak sistemi denetleyebilir ve betimleyebilir. Bilinen hiçbir matematiksel model bir kamyonun yükleme yerinden park yerine gidişini, kamyonun hareket noktası rasgele seçilebiliyorsa yönetemez. Oysa gerek insan, gerekse bulanık mantık sistemleri “Kamyon biraz sola dönerse sende biraz sağa çevir” gibi pratik, ancak kesinlik taşımayan kurallar kullanarak bu doğrusal olmayan (nonlinear) kılavuzluk işlemini gerçekleştirebilir.

Bulanık mantığın uygulama alanları denetim sistemlerinin de ötesine uzanmaktadır. Geliştirilen son teoremler bulanık mantığın ilke olarak , ister mühendislik, ister fizik, ister biyoloji ya da ekonomi olsun, her türlü konuda sürekli sistemleri modellemek üzere kullanılabileceğini göstermektedir. Çoğu alanda, bulanık mantıklı sağduyu modellerinin standart matematik modellerinden daha yararlı ya da kesin sonuçlar

verdiği görülmektedir. Bulanık Teorinin sahip olduğu avantaj ve dezavantajlar aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

Bulanık Teorinin Avantajları;

1. İnsan düşünme tarzına yakın olması,
2. Uygulanışının matematiksel modele ihtiyaç duymaması,
3. Yazılımın basit olması dolayısıyla ucuza mal olması

Bulanık Teorinin Dezavantajları;

1. Uygulamada kullanılan kuralların oluşturulmasının uzmana bağlılığı,
2. Üyelik fonksiyonlarının deneme-yanılma yolu ile bulunmasından dolayı uzun zaman alabilmesi,
3. Kararlılık analizinin yapılışının zorluğu (benzetim yapılabilir).

4.2. Bulanık Mantığın Tarihi

Geliştirilmesi imkânsız matematik modellere dayalı sistemler 1960 yılı ortalarında araştırmacılara artan bir hızda gelmeye başladı. 1965 yılında Kaliforniya Üniversitesi'nden Prof. Lotfi A. Zadeh ilk defa bulanık küme kuramının temel taşı olan “ Yumuşak ” yaklaşım ile sistem tanıma ve tasarımını gerçekleştirdi. 1966'da Bulanık Mantık, Bell laboratuvarlarında Dr. Peter Marinos tarafından oluşturuldu. 1972 yılında Londra Üniversitesi'nden Prof. E. H. Mamdani bulanık mantık temelli uzman sistemle bir buhar türbinin hızının ve performansının çok başarılı bir şekilde denetlenebileceğini gösterdi. Bulanık mantık kuramının ilk önemli endüstriyel uygulaması 1980 yılında Danimarka'daki bir çimento fabrikasında (F. L. Smidth) gerçekleştirilmiş, değirmen (clement klin) içinde çok hassas bit denge ile oranlanması gereken sıcaklık ve oksijen ayarı en uygun biçimde yapılmıştır. Bundan sonra bir başka dikkate değer uygulama ise Hitachi firması tarafından 1987 yılında Sendai Metro'sunda (JAPONYA) gerçekleştirilmiştir. Bu sayede trenin istenen konumda durması üç kat daha geliştirilmiş kullanılan enerji ise yüzde 10 azaltılmıştır. Bunun üzerine Hitachi firmasına benzeri bir sistemin Tokyo Metro'suna da kurulması için istek gelmiştir. 1988'de ise Yamaichi Securities'in geliştirdiği Bulanık Mantık temelli uzman sistem 1988 yılının Ekim ayında “Kara Pazar” adı

verilen çöküşün sinyallerini on sekiz gün önceden haber vermiştir. 1988 yılından beri portföyündeki hisse senetlerinin değerleri Nikkei ortalamasından sürekli olarak yüzde 20 ve genelde yüzde 40 daha fazla olmuştur. Bu kadar başarılı uygulamanın ardından Bulanık Mantığa olan ilgi artmış, uluslararası bir çalışma ortamı oluşturabilmek amacıyla 1989 yılında aralarında SGS - Thomson, Omron, Hitachi, NCR, IBM, Toshiba ve Matsuhita gibi Dünya devlerinin de aralarında bulunduğu 51 firma tarafından LIFE (Laboratory for Interchange Fuzzy Engineering) laboratuvarları kurulmuştur. Son yıllarda giderek artan yapay zekâ ile ilgili çalışmalarda, Bulanık sınıflandırıcıların kullanımı ile Bulanık Kontrol'e yeni bir bakış açısı getirmişlerdir [35].

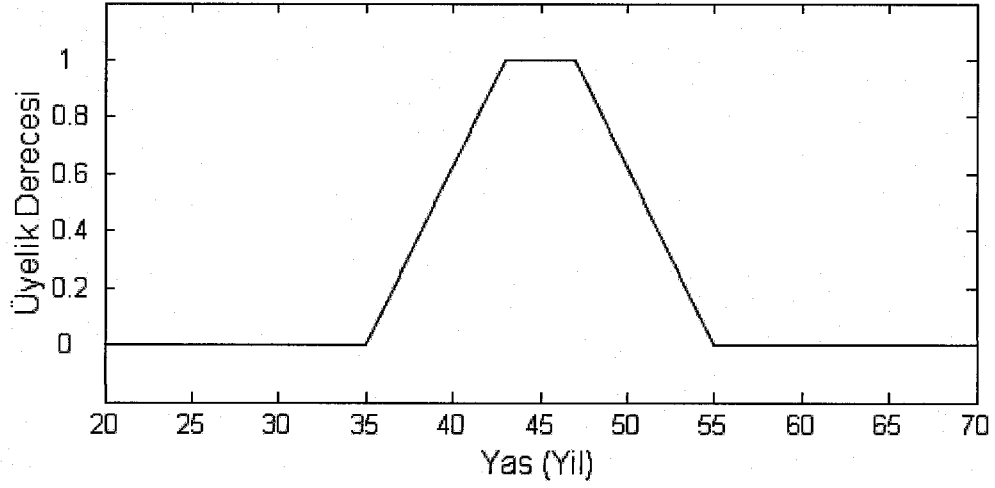
4.2.1. Bulanık mantığının gelişmesindeki tarihi aşamalar

- 1965** L.A. ZADEH tarafından ilk makalenin yazılması
- 1972** ZADEH tarafından Endüstriyel denetime Bulanık Mantığı uygulama üzerine çalışmalar
- 1973** ZADEH tarafından Linguistic üzerine çalışmalar yapılması
- 1974** MAMDANI ve ASSILIAN tarafından gerçekleştirilen buhar makinası kontrolü
- 1975** ZADEH tarafından Bulanık Mantık ile uzman sistemlerin gerçekleştirilmesi
- 1976** Rutherford denetim algoritmalarının analizi üzerine çalışmalar
- 1977** Ostergoard'ın ısı değiştiricisi ve çimento fırını kontrolünü gerçekleştirilmesi
- 1979** Komolow tarafından gerçekleştirilen otomasyon sistemi
- 1980** Tong tarafından atık suyu kazandırma işlemlerinin gerçekleştirilmesi
- 1980** Fukoni, Mizumoto tarafından Bulanık şartsal çıkarıcının gerçekleştirilmesi
- 1983** Hirota ve Pedrycz tarafından probabilistik Bulanık denetim kurallarının türetilmesi
- 1983** Takogi ve Sugeno tarafından Bulanık denetim kurallarının türetilmesi
- 1983** Yausnobo ve Miyamoto'nun önceden tahmin edici Bulanık denetimi

- 1984** Sugena ve Murakami tarafından bir araba modelinin park etme denetiminin gerçekleştirilmesi
- 1985** Kiszka ve Gupta tarafından Bulanık sistem kararlılığının incelenmesi
- 1985** Togai ve Watorebe tarafından ilk Bulanık çipinin yapılması
- 1986** Yemakova tarafından Bulanık denetleyici donanım sisteminin gerçekleştirilmesi
- 1988** Omron tarafından Bulanık çiplerinin ticari şekle dönüştürülmesi
- 1989** Japonya’da Bulanık denetimli ev aletlerinin (çamaşır, bulaşık, fırın) satılmaya başlanması
- 1989** Japonya’da 48 en üst firmanın bir (LIFE) şirketler birliği kurması
- 1993** Arthur D. Little Cambridge ile Mass. Danışmanlık firması ile Gas Research Institute işbirliğiyle Bulanık Denetim’li fırın yapılması

4.3. Bulanık Kümeler

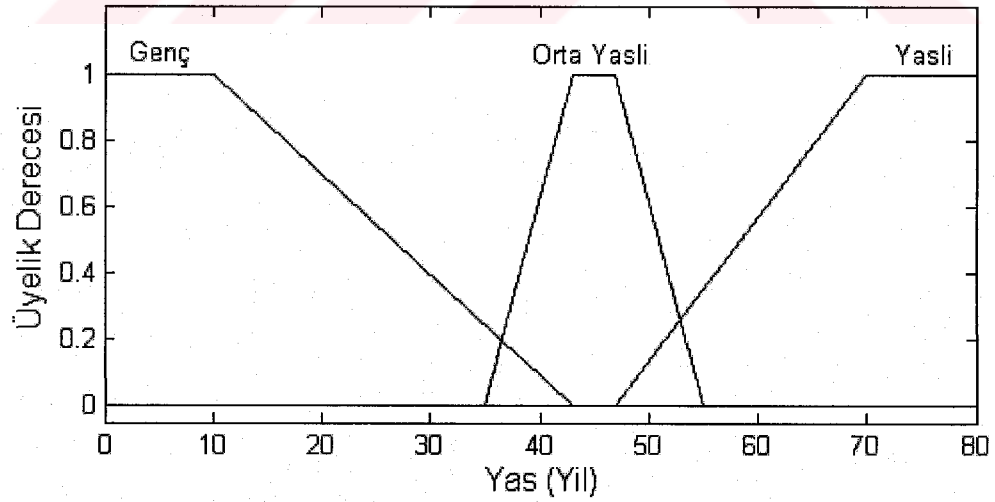
Bulanık teorinin merkez kavramı bulanık kümelerdir. Küme kavramı kulağa biraz matematiksel gelebilir ama aslında anlaşılması çok kolaydır. Örneğin “orta yaş” kavramını yakından inceleyerek yapıyı anlamaya çalışalım. “Orta yaş” denildiğinde her insanın kafasında bir şey canlanır ama kavramın sınırları belirsizdir, Ahmet Bey’e göre 40 yaşını aşmış bir insan orta yaşlıdır, Mehmet Bey’e göre ise bu sınır 45’ dir. Kesin sınırlar söz konusu olmadığı için kavramı matematiksel olarak kolayca formüleştiremeyiz. Ama genel olarak 35–55 yaşları orta yaşlılık kavramının sınırları kabul edilir. Bu yapıyı grafik olarak ifade etmek istediğimizde karşımıza Şekil 4.1’ deki gibi bir eğri çıkacaktır. Bu eğriye “aitlik eğrisi” adı verilir ve kavram içinde hangi değer hangi ağırlıkta olduğunu gösterir.



Şekil 4.1. Orta yaş kavramı için aitlik eğrisi

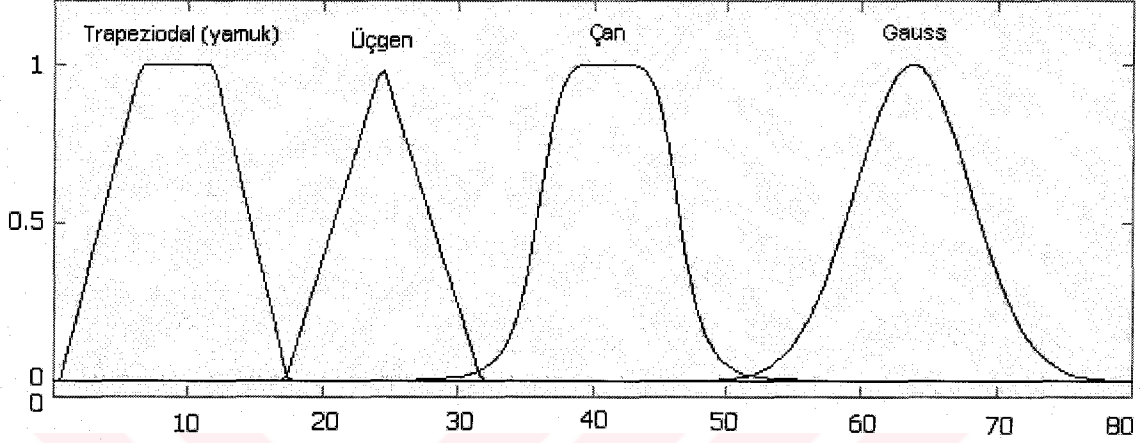
4.4. Üyelik Fonksiyonları

Şimdi bir önceki bölümde anlattığımız orta yaş kavramının yanına genç ve yaşlı kavramlarını da ekleyelim, Şekil 4.2 de kullanılan eğriler üyelik fonksiyonu olarak bilinir ve bu fonksiyonların değer kümesi $[0,1]$ kapalı aralığındadır.



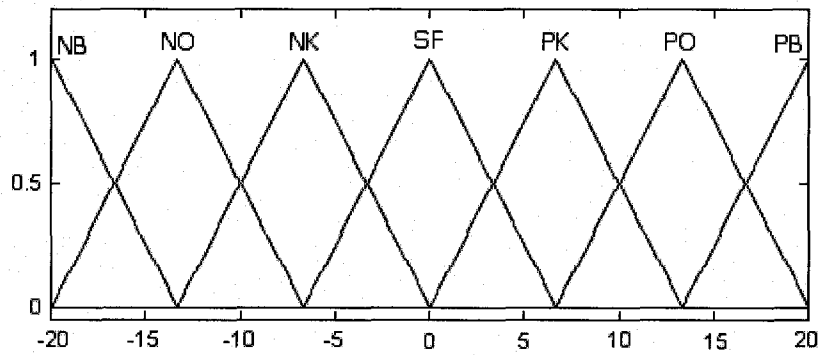
Şekil 4.2. Bulanık Kümeler (Üyelik Fonksiyonları)

Üyelik ağırlıkları, belirli bir değerin bir bulanık küme içerisinde yer almasının güvenilirliğini gösteren bir işarettir. Üyelik fonksiyonları şekil olarak değişik biçimlerde olabilir. Şekil 4.3’ de çeşitli üyelik fonksiyonu tipleri gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Üyelik fonksiyonu tipleri

Üyelik fonksiyonlarında kullanılacak dilsel etiket sayısı kullanıcıya bağlıdır. Şekil 4.4’ de üyelik fonksiyonlarının ve fonksiyonlara ait dilsel etiketlerin kullanımına ilişkin bir örnek sunulmaktadır.



Şekil 4.4. Üyelik fonksiyonları ve dilsel etiketleri

Şekil 4.4’ de gösterilen üyelik fonksiyonlarına ait dilsel etiketler ve anlamları şu şekildedir:

NB: Negatif Büyük

SF: Sıfır (0)

PB: Pozitif Büyük

NO: Negatif Orta

PO: Pozitif Orta

NK: Negatif Küçük

PK: Pozitif Küçük

Üyelik fonksiyonu kavramı matematiksel olarak şu şekilde ifade edilebilir; A olarak adlandıracağımız bir bulanık kümeyi ele alalım ve bu A kümesinin, daha büyük bir E kümesinin (A'nın tanım uzayı) alt kümesi olduğunu düşünelim. A bulanık kümesi, her biri iki elemandan oluşan sıralı eleman çiftlerinden oluşur. Bu eleman çiftlerinin birincisi E'nin bir elemanı olan x' in A içerisindeki üyelik ağırlığı olarak bilinir. E'nin elemanları ile bunların A içerisindeki üyelik ağırlıkları arasındaki ilişki üyelik fonksiyonu olarak bilinir. Bulanık kümeler üyelik fonksiyonları ile tanımlanır.

Bir E evrensel kümesi;

$E = [X_1, X_2, X_3, X_4]$ şeklinde tanımlanmaktadır.

$A = \left\{ \frac{0.1}{X_1} + \frac{0.5}{X_2} + \frac{0.7}{X_3} + \frac{0}{X_4} \right\}$ kümesi E evrensel kümesinin alt kümesidir ve sadece

ağırlıkları ile gösterilebilir. Buna göre

$$\mu_A = [0.1, 0.5, 0.7, 0]$$

ifadesine A'nın üyelik fonksiyonu denir.

4.5. Bulanık Küme İşlemleri

A ve B , X çalışma evrenli iki bulanık küme olsun ve $\mu_A(x)$ ve $\mu_B(x)$ üyelik fonksiyonlarıyla gösterelim. Burada $x \in X$ 'dir.

Bulanık kümelere göre temel işlemler aşağıda

4.5.1. Birleşim Özelliği

Her $x \in X$ için A \cup B birleşiminin $\mu_{A \cup B}(x)$ üyelik fonksiyonu denklem (4.1)' de ifade edilmektedir.

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \quad (4.1)$$

4.5.2. Kesişim Özelliği

Her $x \in X$ için $A \cap B$ kesişiminin $\mu_{A \cap B}(x)$ üyelik fonksiyonu denklem (4.2)' de gösterilmektedir.

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \quad (4.2)$$

4.5.3. Tamlayan Özelliği

Her $x \in X$ için A bulanık kümesinin tamlayanı olan $\mu_{A'}(x)$ üyelik fonksiyonu denklem (4.3)' de gösterilmektedir.

$$\mu_{A'}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (4.3)$$

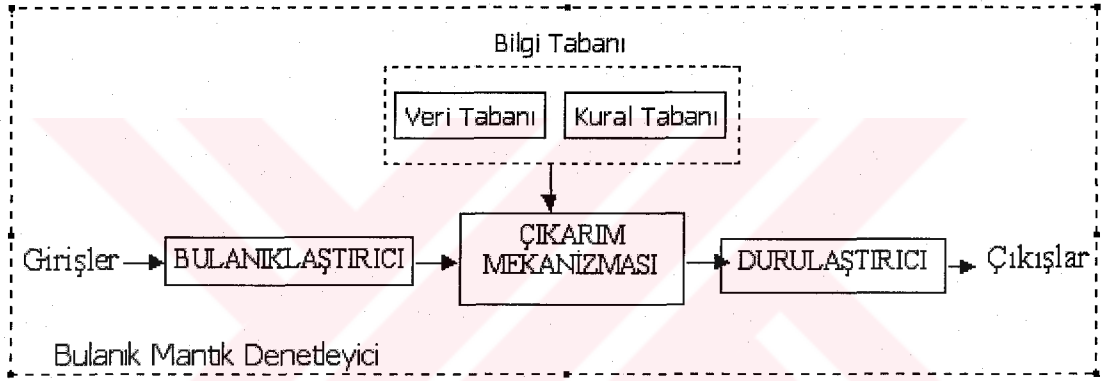
Birleşim, kesişim ve tamlayan bulanık küme işlemleri Boolean Cebirindeki OR, AND ve NOT işlemlerine karşılık gelirler. Sıkça kullanılan bir diğer birleşim ve kesişim işlemi denklem (4.4) ve denklem (4.5)' de gösterildiği gibidir.

$$\mu_{A \cup B}(x) = \min\{1, \mu_A(x) + \mu_B(x)\} \quad (4.4)$$

$$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(x) \quad (4.5)$$

4.6. Bulanık Mantığın Denetim Sistemlerinde Kullanılması

Bulanık denetim sistemlerinin dayandığı temel nokta, uzman bir sistem operatörünün bilgi, deneyim, sezgi ve denetim stratejisini, denetleyici tasarımında bilgi tabanı olarak oluşturmasıdır. Denetim işlemleri, karmaşık ve klasik denetim algoritmalarıyla değil de bilgi ve deneyime dayanan sözel kurallarla gerçekleştirilir. Örneğin bir uzman sistem için gerekli denetim davranışlarını küçük, hızlı, yavaş gibi sözel bulanık terimlerini içeren komut kümesi ile temsil eder. Bu komut kümeleri “Eğer-İse (If-Then)” kuralları yardımıyla oluşturulur. Bir bulanık mantık denetleyicinin temel kısımları Şekil 4.5’ de gösterilmektedir [34].



Şekil 4.5. Bulanık Mantık Denetleyici yapısı

Bulanık Mantık Denetleyici beş ana kısımdan oluşur. Bunlar;

1. Birçok denetim kuralından oluşan bir “kural tabanı”
2. Kural tabanında kullanılan sözel terimlerin üyelik fonksiyonlarını tanımlayan bir “veri tabanı”
3. Bulanık denetim kurallarını değerlendiren “çıkarım ünitesi”
4. Algılayıcılardan alınan kesin sistem bilgilerini bulanık bilgiye dönüştüren “bulanıklaştırma (Fuzzification) birimi”
5. Bulanık denetim işaretini sayısal değere çevirerek sisteme uygulayan “durulaştırma (Defuzzification) birimi”

Bulanık kontrol tasarımında ilk olarak kontrol edilecek sistemin giriş ve çıkış değişkenleri belirlenir. Bu değişkenler bulanık kümeler şeklinde tanımlanır. Sistemin bütün olası durumları için kontrol tabanı oluşturulur. Giriş değişkenlerine göre bulanık kontrol çıkışını elde edebilmek için kontrol değerlendirme algoritmaları belirlenir. Elde edilen bulanık kontrol çıkışı sayısal değere çevrilerek sisteme uygulanır. Bu tanımlamayı açıklarsak; Bulanık Denetimin temelinde ayrıntılı olarak hedeflenen amaç, sebep-sonuç ilişkisinin ayrıntılı bir şekilde incelenmesi, yöntem-uygulama durumlarıyla kontrol kurallarının tanımlanmasıdır. Bulanık Mantık'ta tanımlanan yöntemler üç temel kavram üzerine kurulur.

1. Bulanıklaştırma
2. Çıkarım Ünitesi
3. Durulaştırma

- a) Bulanık ölçme, değiştirme, gerçek sayılarla konuşma diline yakın dilsel tanımlamalarla yapılabilir.
- b) Çıkarım ünitesi, yöntemin incelenmesi ve işlem fonksiyonları için kural tanımlama yapar. Çıkarım ünitesinde, Bulanık Denetim giriş değişkenlerinin ayarlarını yapar.
- c) Durulaştırmada önceki bulanık değerler kullanılarak, hesaplamalar yapılır.

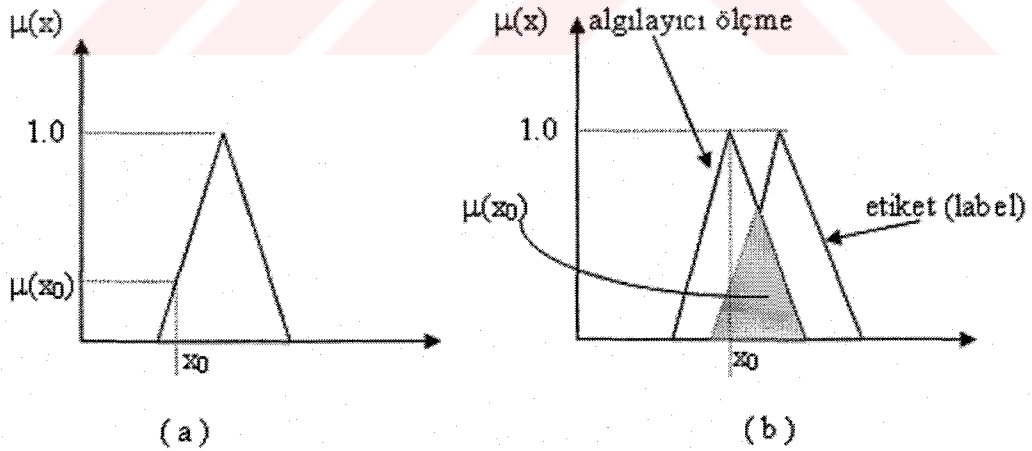
4.6.1. Bulanıklaştırıcı (Fuzzifier)

Fiziksel giriş bilgilerinin, dilsel niteleyicilerle ifade edebileceğimiz bulanık mantık bilgileri şekline çevirme işlemine bulanıklaştırma (fuzzification) adı verilir. Ancak bu bilgilerin tamamının mutlaka kesin bilgiler olması söz konusu değildir. Bulanıklaştırma işlemi önemli ölçüde kesin olmayan bilgiyi de içine alır ve bulanıklaştırır. Bulanıklaştırma sonucu elde edilen değişkenlere dilsel değişkenler (linguistic variables) denir ve işlemle birlikte tüm giriş değişkenlerinin değerleri, üyelik derecesi olarak buraya atanır.

Eğer algılayıcı kesin bir değer olursa, o zaman Şekil 4.6.a' da görüldüğü gibi bulanıklaştırma aşamasında dilsel etiketin üyelik fonksiyonuyla algılayıcı ölçme

karşılaştırılması gerektirir. Eğer algılayıcı okuyucusunda gürültü var ise, üçgenin tepesi, algılayıcı ölçülerinin veri kümesinin değeri anlamında başvuru üyeli fonksiyonu kullanılarak modellenmiş olabilir ve bilgi tabanı standart sapma fonksiyonuna başvurur. Bu örnek, bulanıklaştırma üyeli fonksiyonunun etiketinin kesişme noktasının araştırılıp öğrenmesine başvurur ve Şekil 4.6.b’ de görüldüğü gibi anlamlandırılmış veri için dağıtır. Bununla beraber geniş çapta kullanılan bulanıklaştırılma metodu algılayıcı okuyucunun kesin olduğu örnektir.

Bulanıklaştırma işlemi göreceli olarak bu kadar kolay olmasına karşın, daha önce de değinildiği gibi uzman sistem kalıplarından dolayı bu işlemlerin yapılması büyük ölçüde deneyime dayanmaktadır. Operatörün sistemde çalışırken gösterdiği davranışlar, sistemin matematiksel modelinden daha önemlidir. Dolayısıyla bulanıklaştırma aşamasına gelinebilmesi için gerekli süre bazen çok uzun olabilir. Bununla birlikte kesin olmayan bilgileri kullanılabilmesi, sürecin matematiksel bir modeline gereksinim duyulmaması ve uygulamaya çabucak geçilebilmesi, bütün bunlardan sonra da yüksek derecede verim alınabilmesi bulanık mantığın önemini açıkça ortaya koymaktadır. [6]



Şekil 4.6. Algılayıcı okuyucu x_0 ile üyeli fonksiyonu $\mu(x)$ 'in $\mu(x_0)$ ' a gelmesi
a) Keskin algılayıcı okuyucu b) Bulanık algılayıcı okuyucu

4.6.2. Bilgi Tabanı

Bilgi tabanı, Bulanıklaştırıcının kural tabanının da kullanıldığı bilgileri aldığı veri tabanı (data base) ve denetim amaçlarına uygun dilsel denetim kurallarının bulunduğu kural tabanı (rule base) olmak üzere iki kısma ayrılabilir.

Bulanık denetleyicinin kural tabanında uzmanın dilsel tanımlamalarıyla elde edilmiş bir EĞER-İSE (IF-THEN) bulanık kümesi bulunur. Bu kuralların oluşturulmasında diğer bütün parçalar etkin bir şekilde kullanıldığından kural tabanına Bulanık denetleyicinin kalbi denilebilir. Girişler ve çıkışlar arasındaki bağıntılar, kural tabanındaki kurallar kullanılarak sağlanır. X ve Y girişler, Z ise çıkış değişkeni olan bir sistem için,

EĞER $X = A$ ve $Y = B$ ise O HALDE $Z = C$,

şeklindeki bir kural X ve Y' nin aldığı değere göre Z çıkışının bulanık değerini belirlemektedir. Tablo 4.1' de 25 kural içeren bir kural tabanı görülmektedir.

Tablo 4.1. Kural tabanı

ce (Hata değişimi)

U	NB	NK	S	PK	PB
NB	NB	NB	NO	NK	S
NK	NB	NO	NK	S	PK
S	NO	NK	S	PK	PO
PK	NK	S	PK	PO	PB
PB	S	PK	PO	PB	PB

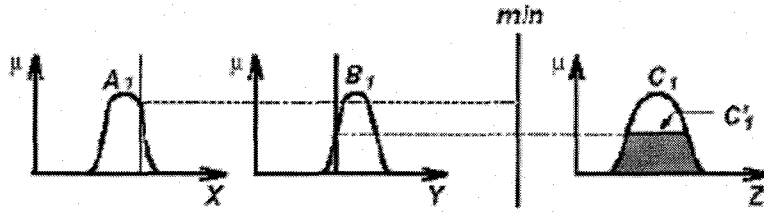
4.6.3. Çıkarım Ünitesi (Inference Engine)

Çıkarım ünitesi, bulanıklaştırma ünitesinden gelen bulanık değerleri, kural tabanındaki kurallar üzerinde uygulayarak sonuca varır. Çıkarım ünitesi tarafından yapılan bu işe "çıkarım" denmektedir.

Bulanık sistemlerde girişler, hızlı, sıcak gibi dilsel değişkenlerden oluştuğu için girişler hakkında karar verme EĞER – O HALDE şeklindeki kuralların kullanılması ile çıkış değeri belirlenmektedir.

Bu çalışmada çıkarım işlemi VE tipi çıkarım yapısı kullanılmaktadır. VE tipi bulanık çıkarım aşağıda verilen örnek kural için Şekil 4.7’ deki gibi yapılmaktadır.

Kural: EĞER $X = A_1$ VE $Y = B_1$ ise $Z = C_1$



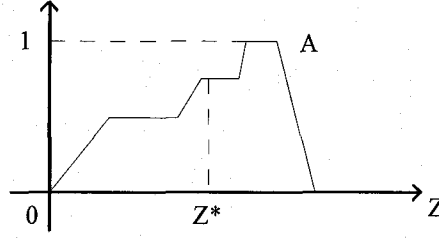
Şekil 4.7. VE tipi bulanık çıkarım

4.6.4. Durulaştırma (Defuzzification)

Çıkarım işlemi sonucunda elde edilen bulanık kontrol işaretinin, kontrol edilecek sisteme uygulanabilmesi için kontrol işaretinin sayısal değere dönüştürülmesi gerekir. Bu dönüştürme işlemine “Durulaştırma” denir. Durulaştırma işlemi için bulanıklaştırma yapılan sistemin özelliği önemlidir. Çeşitli durumlara göre durulma yöntemleri geliştirilmiştir. Bu çalışmada Durulaştırma yöntemi olarak “Ağırlık Merkezi” yöntemi kullanılmaktadır. Ağırlık merkezi yöntemi kullanılarak sayısal değer elde edilmesi Şekil 4.8’ de gösterilmektedir.

Alan merkezi (center of area) ya da ağırlık merkezi (center of gravity) de denilen bu yöntem, durulma yöntemi olarak en çok kullanılan yöntemlerden biridir ve ağırlık merkezi denklem (4.6)’ dan hesaplanarak yapılır.

$$Z^* = \frac{\int \mu(z) \cdot z dz}{\int \mu(z) dz} \quad (4.6)$$



Şekil 4.8. Ağırlık merkezi yöntemi

Ağırlık merkezi yöntemi, uygulamalarda yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Burada, aktif olan kuralların bulanık çıkışlarına ilişkin üyelik fonksiyon değerlerinin toplamına bölünmesiyle sayısal kontrol işareti bulunur, n kural sayısı olarak Ağırlık Merkezi Yöntemi denklem (4.7)' deki gibi ifade edilir.

$$U = \frac{\sum_{i=1}^n W_i \cdot \mu(W_i)}{\sum_{i=1}^n \mu(W_i)} \quad (4.7)$$

Burada $\mu(W_i)$ üyelik fonksiyonu, n kural sayısını temsil etmektedir.

4.7. Bulanık Mantık Denetleyicisini Tasarlarken İzlenecek Adımlar

Bulanık Mantık Denetleyici beş ana kısımdan oluşur. Bunlar;

1. Giriş ve çıkış büyüklüklerinin değer sınırlarını belirle (Dilsel değişkenlerin ölçeklenmesi)
2. Dilsel terimleri ve bütün dilsel değişkenler için üyelik fonksiyonlarını tanımla
3. Kural tabanını oluştur
4. Çıkarım mekanizmasını belirle (operatörler, çıkartım yöntemi, veri tipi, berraklaştırma yöntemi)
5. Eğer düzen yolunun modeli gerekli ise düzen çemberinin benzetimini yap. Bu model tam bir matematiksel model olmamalıdır, bir bulanık mantık sistemi ile sözsel olarak tanımlanabilmeli
6. Optimizasyon

7. Çevrimdışı (offline) veya çevrimiçi (online) testleri veya matematiksel yöntemler ile karalılık analizi.

Bulanık mantık hakkında sonuç olarak şunları söyleyebiliriz:

Bulanık denetimin en iyi uygulama alanları, doğrusal olmayan iyi tanımlanmamış ve parametreleri zamanla değişen sistemlerdir. Bu tür sistemlerin matematiksel modellerini çıkarmak oldukça zor ve bazen imkansızdır. Bu gibi durumlarda, bulanık denetleyicilerin kullanılması büyük avantaj sağlar, fakat kullanım sırasında aşağıdaki güçlüklerle karşılaşabiliriz:

- Bulanık denetimde kullanılan kurallar tecrübeye çok bağlıdır. Eğer önceden sistem hakkında bilgi yoksa kuralların belirlenmesi güç olur.
- Üyelik fonksiyonlarının seçilmesinde belirli bir yöntem yoktur, genellikle en uygun fonksiyon deneme yanılma yöntemiyle bulunur. Bu da oldukça uzun zaman alabilir.
- Denetim edilen sistemin karalılık analizi yapılamaz, sistemin nasıl cevap vereceği önceden kestirilemez. Yapılacak tek iş benzetim çalışmasıdır.

BÖLÜM 5. ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORUN HIZ DENETİMİ

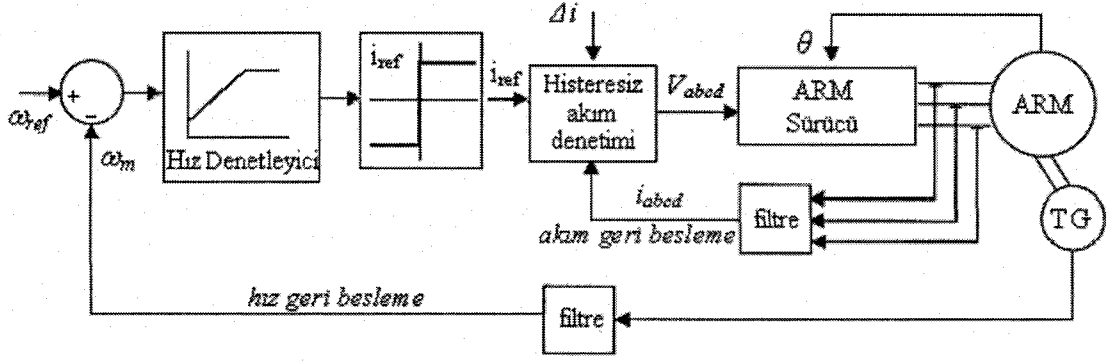
5.1. Giriş

Anahtarlamaalı relüktans motorlar (ARM), yüksek akım olmaksızın yüksek kalkınma momenti, daha yüksek verimlilik, oldukça yüksek hız ve daha iyi moment/atalet oranı, basit yapıları düşük üretim ve bakım maliyetleri gibi üstün özellikleri nedeniyle endüstriyel ve ev uygulamalarında ayarlı hız sürücülerini olarak gittikçe artan bir ilgiye sahip olmaktadır. Ancak doğrusal olmayan manyetik yapıları nedeniyle bu motorların çalışma şartları değiştiğinde dinamik karakteristikleri de değişmekte ve performansları bu değişimden etkilenmektedir. Bu durum ARM denetleyicinin performansını daha da önemini yapmaktadır [35].

Bu bölümde ARM'nin hız denetimi Klasik PID, Bulanık Mantık PI ve Yeni Bulanık Mantık Denetleyici olmak üzere üç farklı denetleyici kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bu kısımda denetleyici yapıları ve denetim prensipleri de verilmektedir.

5.2. Denetim Sisteminin Elemanları

Şekil 5.1' de anahtarlamaalı relüktans motorunun kapalı döngü hız denetimine ait blok diyagram görülmektedir. Denetleyicinin yapısı AA ve DA sürücülerinkine benzemektedir. Anahtarlamaalı relüktans motor girişi akım ve çıkışı moment olan bir sistem olarak düşünülebilir. Akım bütün faz akımlarını içermekte ve dalga biçimi saf DA veya AA olmadığından ve hem hız ve hem de yükü değiştiğinden genliği ile beraber dalga biçiminin de denetiminin yapılması gerekmektedir. Bazı uygulamalarda moment dalgacığının en aza indirilmesi için önceden belirlenmiş tam bir davranışla akımın dalga biçiminin denetimi gerekebilir [13].



Şekil 5.1. ARM hız denetim sisteminin yapısı

Hız denetim sistemi, akım ve hız geri beslemesiyle oluşan iki kapalı döngü içermektedir. Motor milindeki gerçek hız ile referans hız karşılaştırılarak hız hatası elde edilir. Hız hatası istenilen (referans) hız ile gerçek hız arasındaki farktır; gerçek hız bilgisi yüke veya motora bağlı bir hız dönüştürücüsünden alınabilir. Hız dönüştürücüsü olarak optik, Hall etkili veya diğer algılayıcı tipleri kullanılabilir. Anahtarlama relüktans sürücünde anahtarlama işlemi motor konumuna göre yapıldığından özellikle yüksek hızlı uygulamalarda konum algılamının hassasiyeti çok önem taşır. Böyle uygulamalarda $0,5^\circ$ ve hatta $0,25^\circ$ 'lik hassasiyet istenilir.

Meydana gelen hız hatasına göre hız denetleyicisi referans akım sinyali üretmektedir. Bu sinyal histerisiz akım denetleyicinin girişinde faz akımı ile karşılaştırılarak akım hatası elde edilmektedir. Faz akımı referans değerine ulaştığında histerisiz denetleyici anahtarlama sürecini başlatarak faz akımı referans seviyesinde tutmaktadır [26]. Şekil 5.2' de şematik gösterimi verilen histerisiz denetleyicinin anahtarlama mantığı denklem 5.1' de özetlenmektedir:

$$\text{Eğer } (i_{ref\ a} - i_a) \geq \Delta i \text{ ise } V_a = V_{dc}$$

$$\text{Eğer } (i_{ref\ a} - i_a) \leq -\Delta i \text{ ve } i_{ref\ a} > 0 \text{ ise } V_a = 0 \quad (5.1)$$

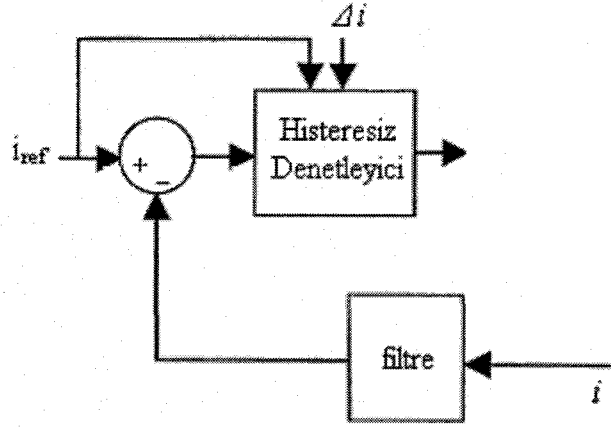
$$\text{Eğer } (i_{ref\ a} - i_a) \leq -\Delta i \text{ ve } i_{ref\ a} \leq 0 \text{ ise } V_a = -V_{dc}$$

i_a : Faz akımı

$i_{ref\ a}$: Referans faz akım değeri

Δi : Histerisiz bant

V_{dc} : DA kaynak gerilimi

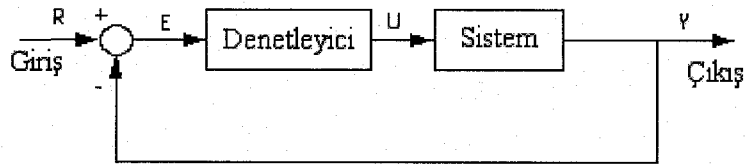


Şekil 5.2. Histerisiz akım denetleyicinin blok gösterimi

Uygulanan gerilim 0 veya $-V_{dc}$ olması sürücü devresinin yapısına ve anahtarlama stratejisine bağlıdır. Histerisiz bandının genişliği anahtarlama kayıpları ve gerilim düşümleri dikkate alınarak belirlenmelidir.

5.3. ARM' nın Klasik PID Denetleyici ile Hız Denetimi

5.3.1. PID Denetleyici



Şekil 5.3. Kapalı çevrim sistem denetimi

PID denetleyiciye ait transfer fonksiyonu denklem (5.2)' de verildiği gibidir:

$$K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s = \frac{K_D s^2 + K_P s + K_i}{s} \quad (5.2)$$

K_p = Orantı kazancı

K_i = İntegral kazancı

K_d = Türev kazancı

Şekil 5.3' de kapalı çevrim denetime ilişkin prensip bir blok gösterim yer almaktadır. Burada E değişkeni, giriş değeri (R) ve gerçek değer (Y) arasındaki farktır. Bu hata sinyali (E), PID denetleyiciye gönderilir ve denetleyici bu hata sinyalinin türevini ve integralini hesaplar. PID denetleyici çıkışındaki sinyal (U) ile hata sinyali arasındaki bağıntı denklem 5.3' deki gibidir:

$$U = K_p e + K_i \int e dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (5.3)$$

U sinyali kontrol edilecek sisteme (plant) gönderilir ve yeni çıkış (Y) meydana gelir. Bu yeni çıkış (Y) tekrar karşılaştırma birimine gönderilerek yeni hata sinyali nin (E) oluşması sağlanır ve bu durum sistem cevabı referans değerine ulaşincaya kadar devam eder.

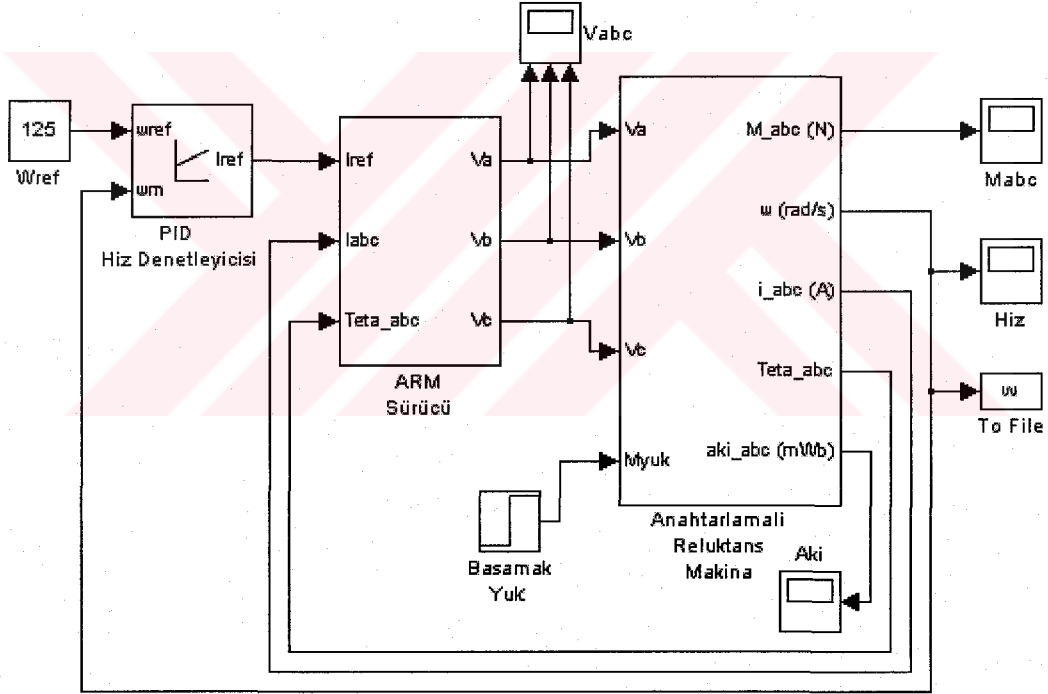
Orantı kazancı (K_p), integral kazancı (K_i) ve türev kazancının (K_d) denetlenen sistemin cevabı üzerinde çeşitli etkileri vardır. Her bir denetleyici parametresinin kapalı çevrim çalışan bir sisteme etkileri tablo 5.1' de verilmiştir [36].

Tablo 5.1. PID katsayılarının sistem cevabına olan etkileri

KONTROL DEĞİŞKENİ	YÜKSELME ZAMANI	TAŞMA (OVERSHOOT)	OTURMA ZAMANI	KALICI D. HATASI
K_p	Azalır	Artar	Çok az değişir	Azalır
K_i	Azalır	Artar	Artar	Eler
K_d	Çok az değişir	Azalır	Azalır	Çok az değişir

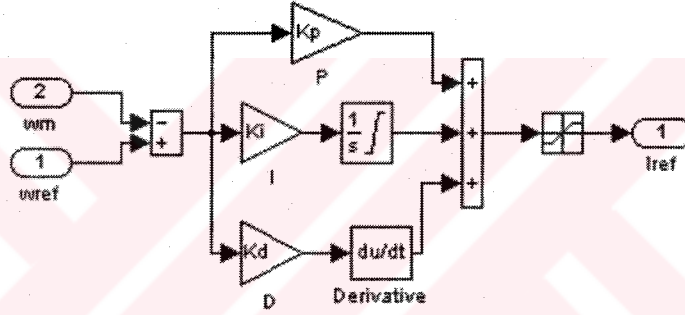
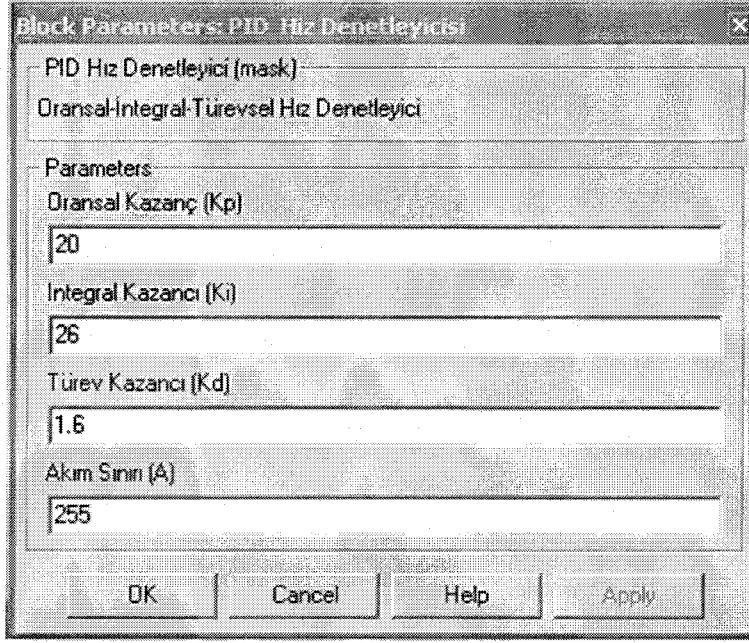
5.3.2. PID denetim Modeli

Klasik PID denetleyiciye ilişkin denetim modeli Şekil 5.4' de gösterilmektedir.



Şekil 5.4. ARM' nun PID denetim modeli

PID denetleyici modeli ve denetleyiciye ait kazanç değerleri (K_p , K_i , K_d) Şekil 5.5' de gösterilmektedir. Oransal, integral ve türev katsayıları birçok deneme sonucunda en iyi sonuç verecek şekilde belirlenmiştir.

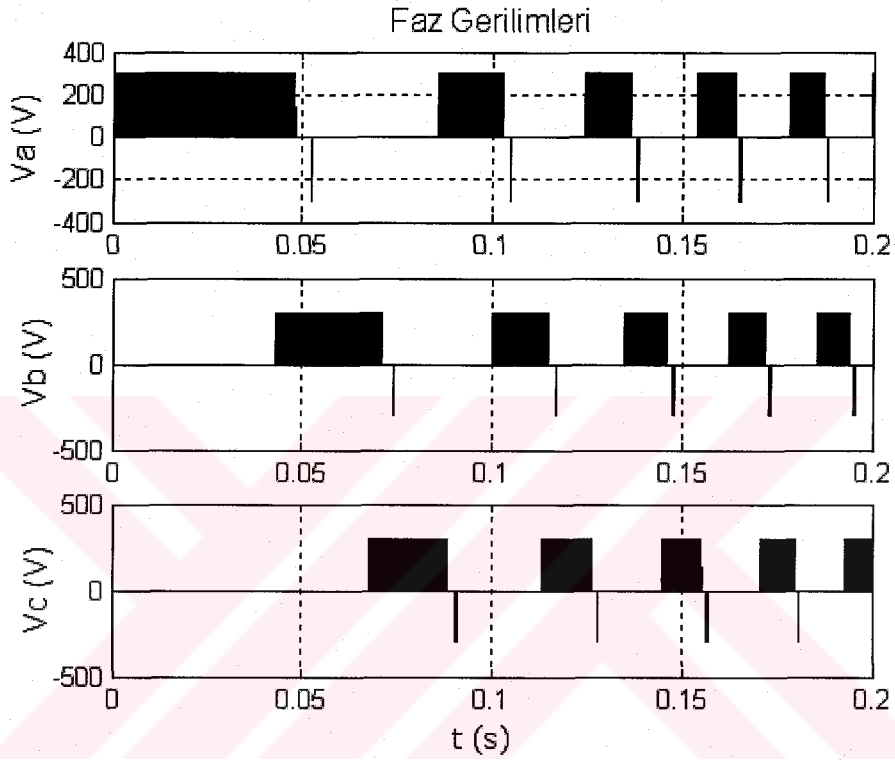


Şekil 5.5. PID Denetleyici modeli ve belirlenen kazanç değerleri

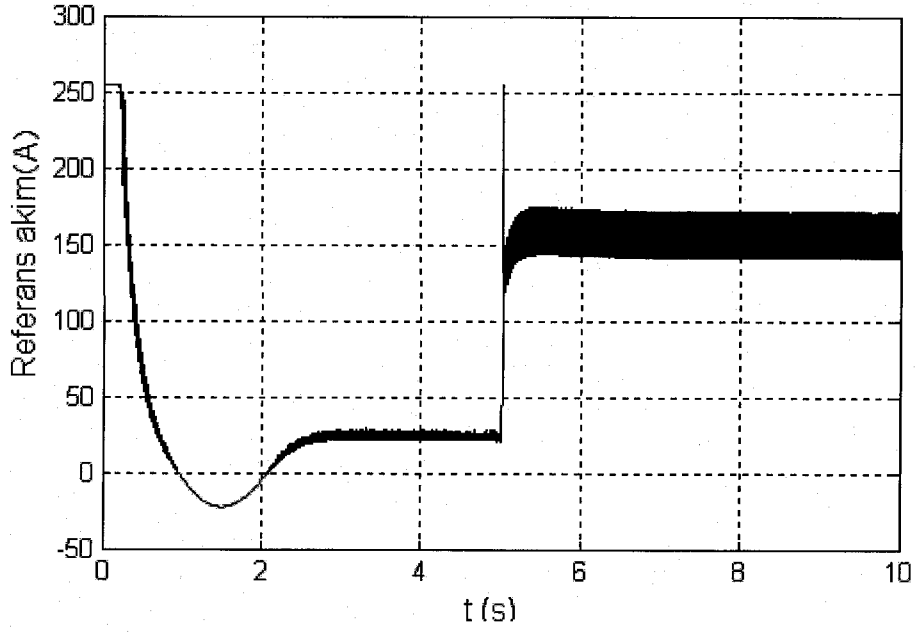
5.3.3. Simülasyon sonuçları

Bu kısımda gösterilen tüm grafikler motorun yüksüz olarak yol almasının ardından 5. saniyede nominal motor yükü olan 183 Nm yüküyle yüklendiği durum için elde edilmektedir. Şekil 5.6' da motor fazlarına uygulanan gerilimler gösterilmektedir. 300 V DA gerilimi Şekil 5.6' da gösterildiği gibi belirli bir frekans ile anahtarlanarak motor fazlarına uygulanmaktadır. Bunun nedeni motor akımını, denetleyici tarafından belirlenen referans akım seviyesinde tutmaktır. Denetleyici sistem tarafından üretilen bu referans akım sinyali Şekil 5.7.a ve Şekil 5.7.b' de gösterilmektedir. Şekil 5.8.a, Şekil 5.8.b ve Şekil 5.8.c' de motora ait halkalama akısı, Şekil 5.9.a ve Şekil 5.9.b' de faz akımları, Şekil 5.10.a, Şekil 5.10.b, Şekil 5.10.c ve Şekil 5.10.d' de faz momentleri, Şekil 5.11.a ve Şekil 5.11.b' de motor

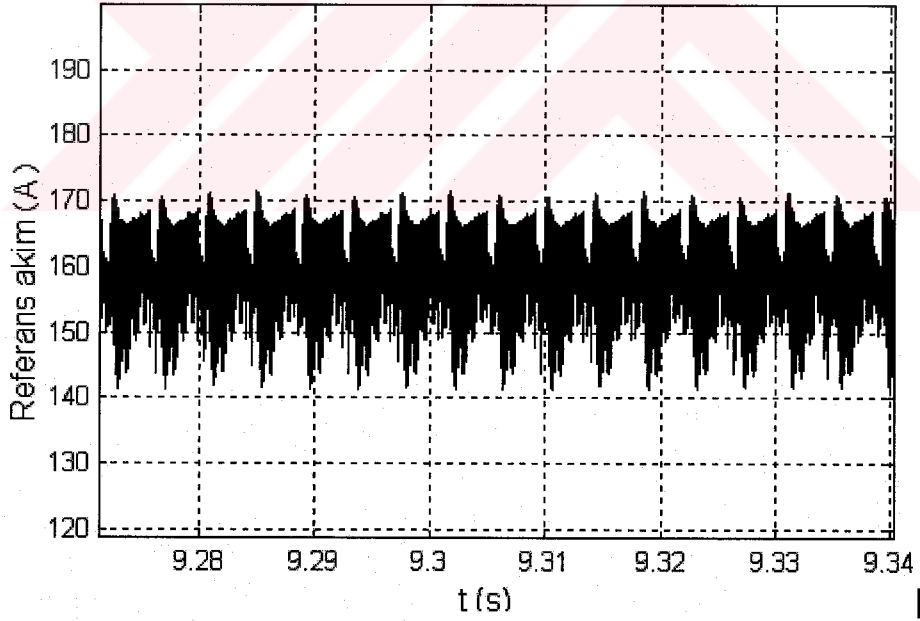
momentleri, Şekil 5.12.a ve Şekil 5.12.b' de açısal hız grafiği motorun çeşitli çalışma koşulları için gösterilmektedir. Şekil 5.11.b' de ARM' nun en büyük dezavantajlarından birisi olan dalgali moment oluşumu belirgin bir şekilde görülmektedir. Şekil 5.13' de ise motor açısal konumunun zamana göre değişimi gösterilmektedir.



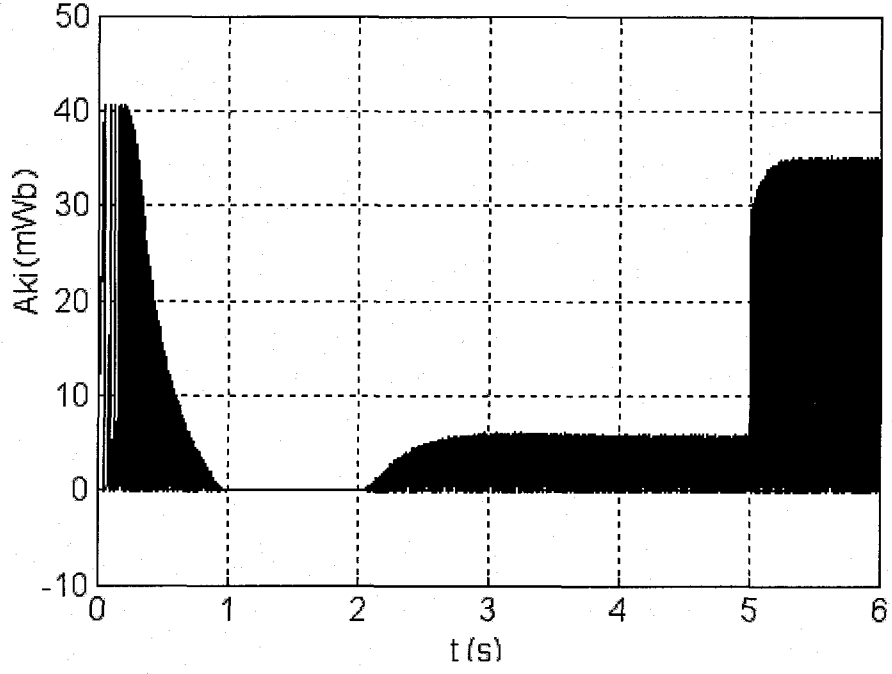
Şekil 5.6. ARM'nun faz sargılarına uygulanan gerilimlerin değişimi



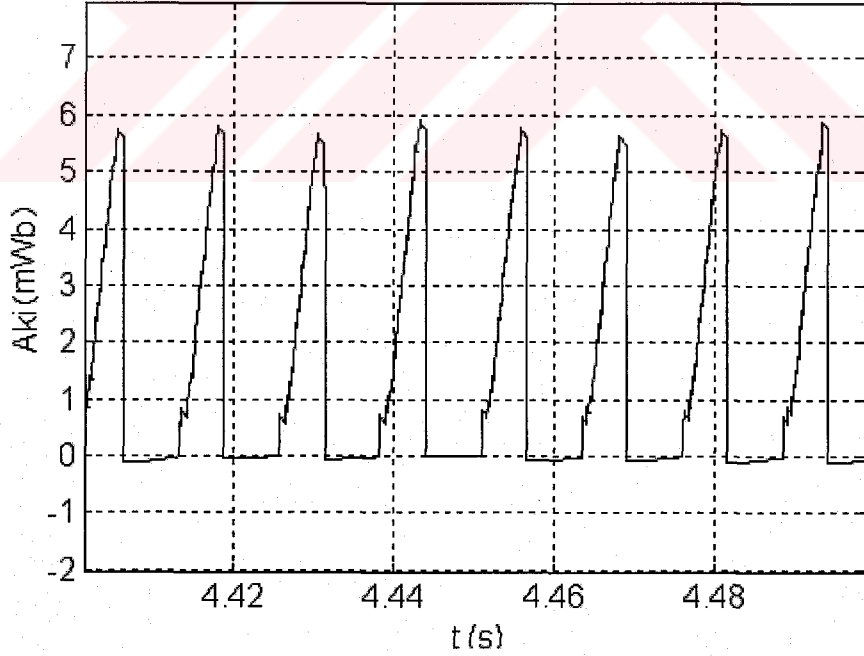
Şekil 5.7.a. ARM'nun , PID denetleyici kullanılarak yüksüz kalkınma ve nominal yükte ani yüklenme durumunda elde edilen referans akımın değişimi



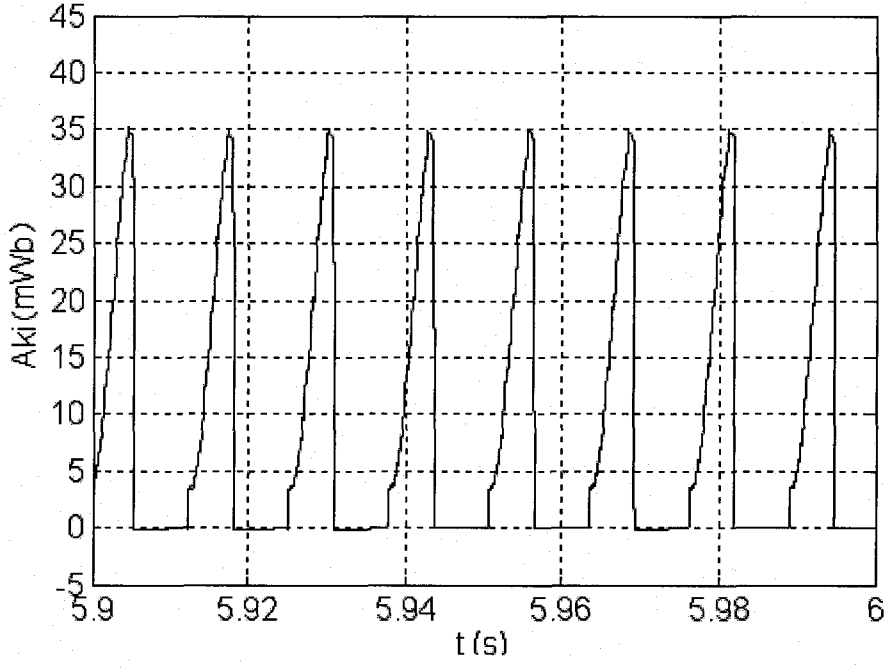
Şekil 5.7.b. ARM'nun PID denetleyici kullanılarak nominal yükte çalışma durumunda elde edilen referans akımın değişimi (Kararlı durum)



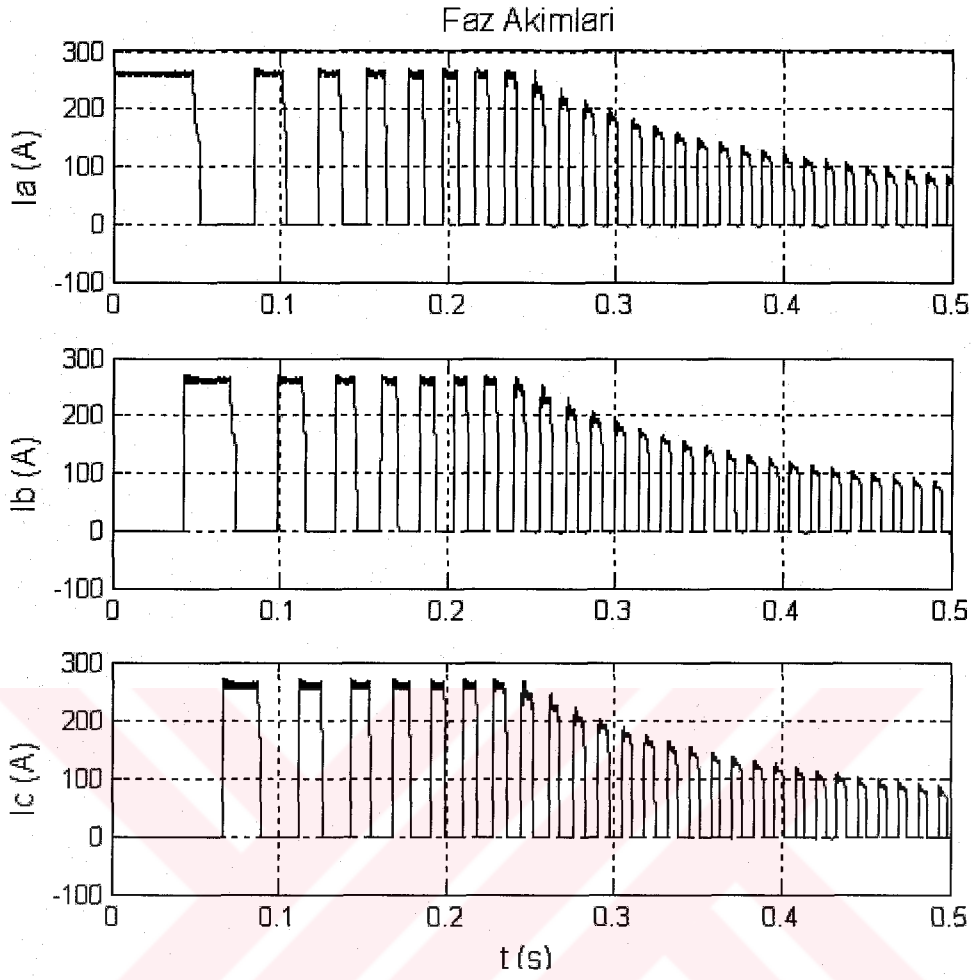
Şekil 5.8.a. ARM'nun, PID denetleyici kullanılarak yüksüz kalkınma ve nominal yükte ani yüklenme durumunda elde edilen A fazına ait halkalama akısı değişimi



Şekil 5.8.b. ARM'nun, PID denetleyici kullanılarak yüksüz çalışma durumunda elde edilen A fazına ait halkalama akısı değişimi (Kararlı durum)

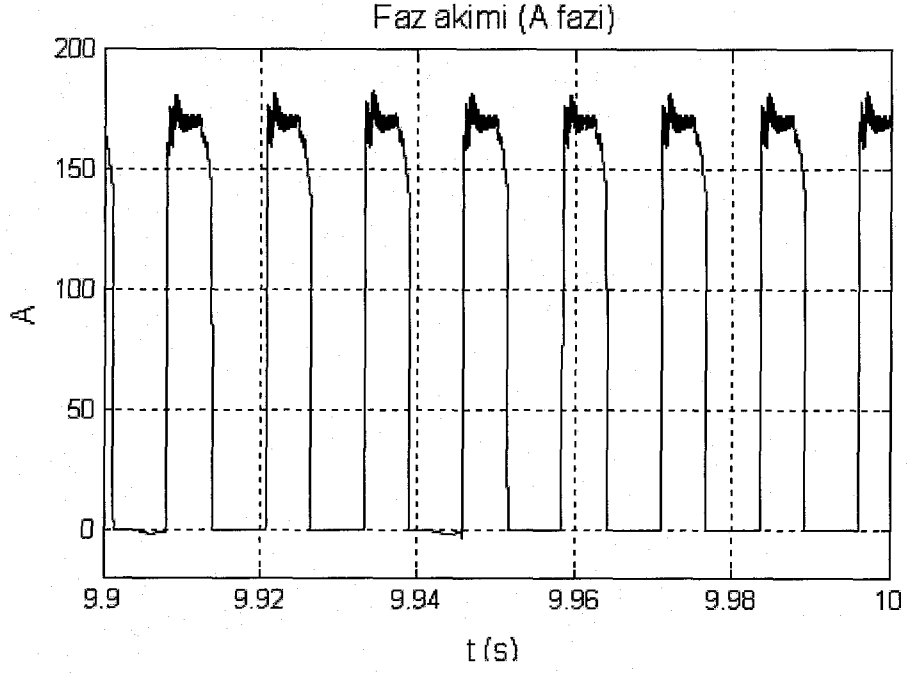


Şekil 5.8.c. ARM'nun, PID denetleyici kullanılarak nominal yükte çalışma durumunda elde edilen A fazına ait halkalama akısı değişimi (Kararlı durum)

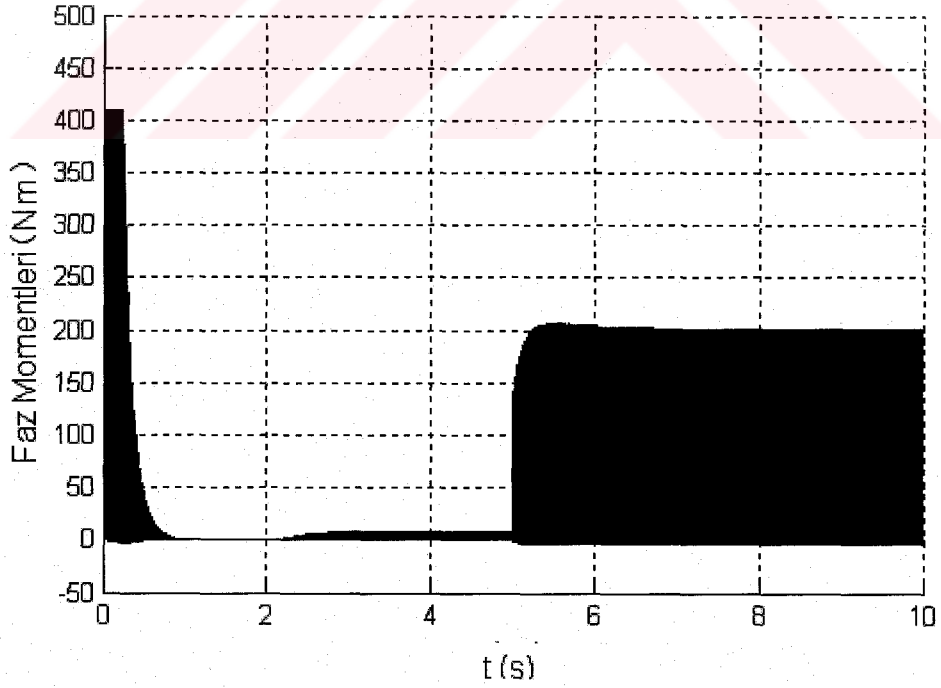


Şekil 5.9.a. ARM'nun, PID denetleyici kullanılarak yüksüz kalkınma durumunda elde edilen faz akımlarının değişimi

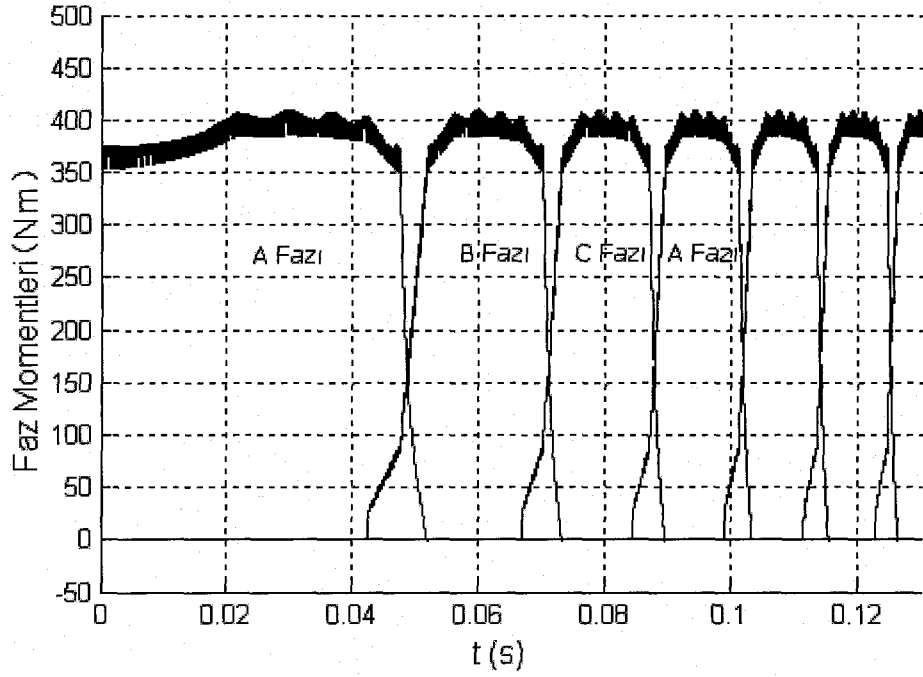
Motorun şebekeden çekeceği maksimum akım değeri denetleyici tarafından 255 A değerinde sınırlandırılmıştır. Bu nedenle kalkınma anında çekilen faz akımları bir müddet 255 A değerinde sınırlı kaldıktan sonra Şekil 5.9.a' da görüldüğü gibi boş çalışma akımı değerine düşmektedir.



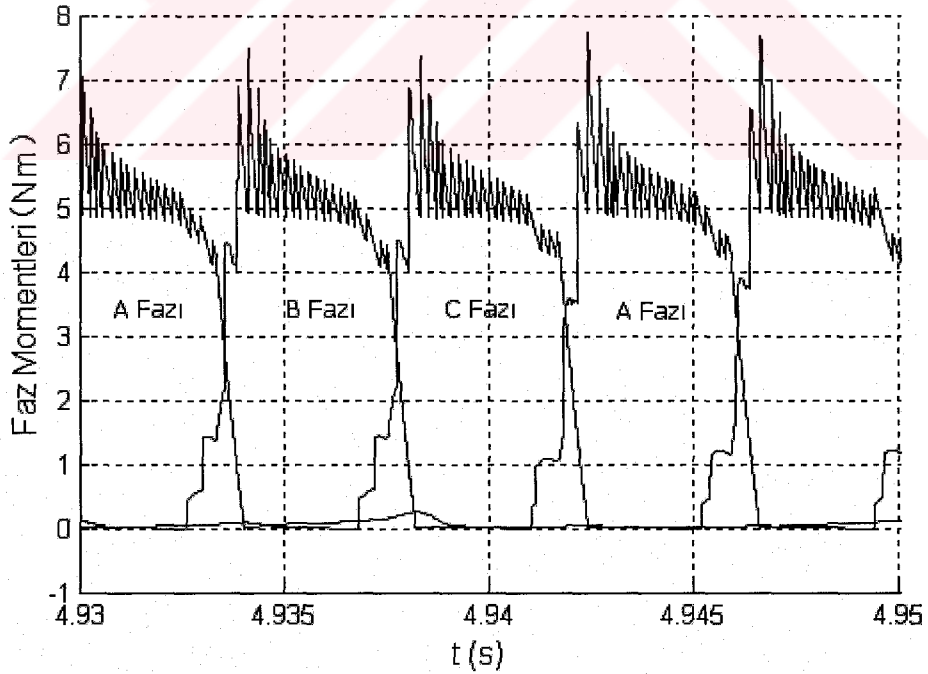
Şekil 5.9.b. ARM'nun, PID denetleyici kullanılarak nominal yükte çalışma durumunda elde edilen A fazına ait akım değişimi (Karalı durum)



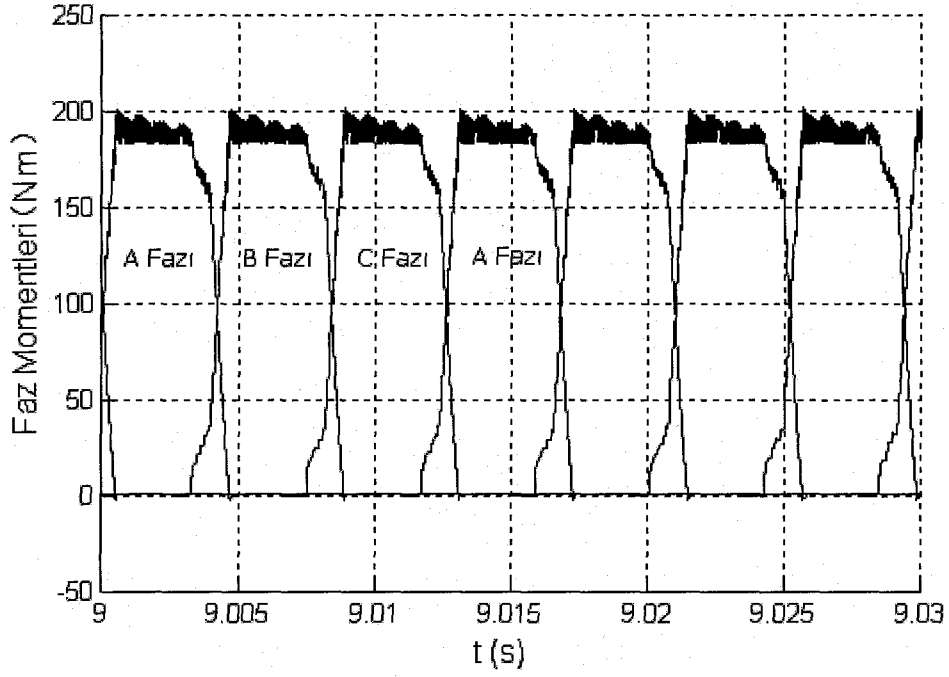
Şekil 5.10.a. ARM'nun, PID denetleyici kullanılarak yüksüz kalkınma ve nominal yükte ani yüklenme durumunda elde edilen faz momentlerinin değişimi



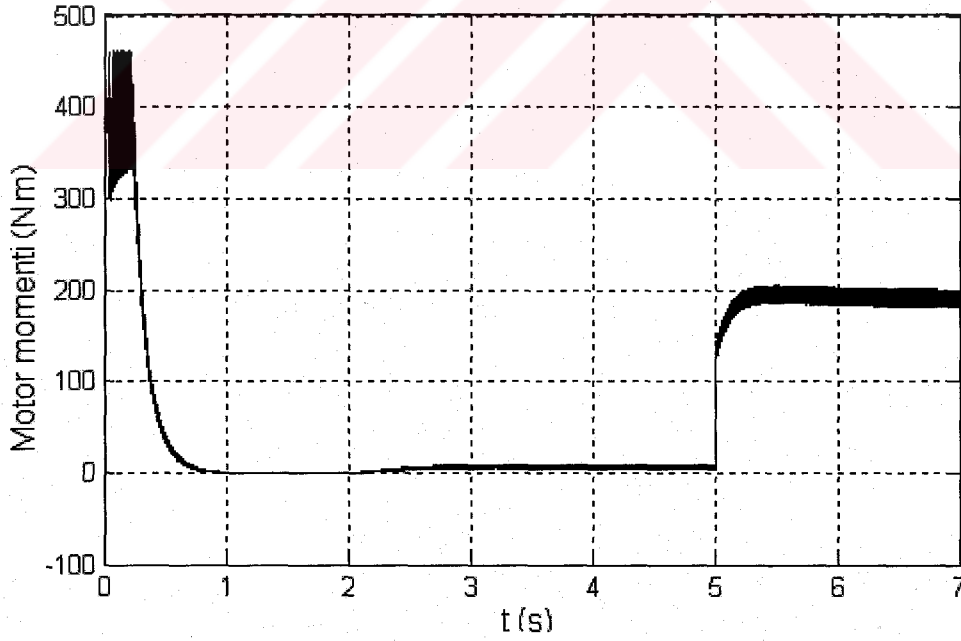
Şekil 5.10.b. ARM'nun, PID denetleyici kullanılarak yüksüz kalkınma anında elde edilen faz momentlerinin değişimi



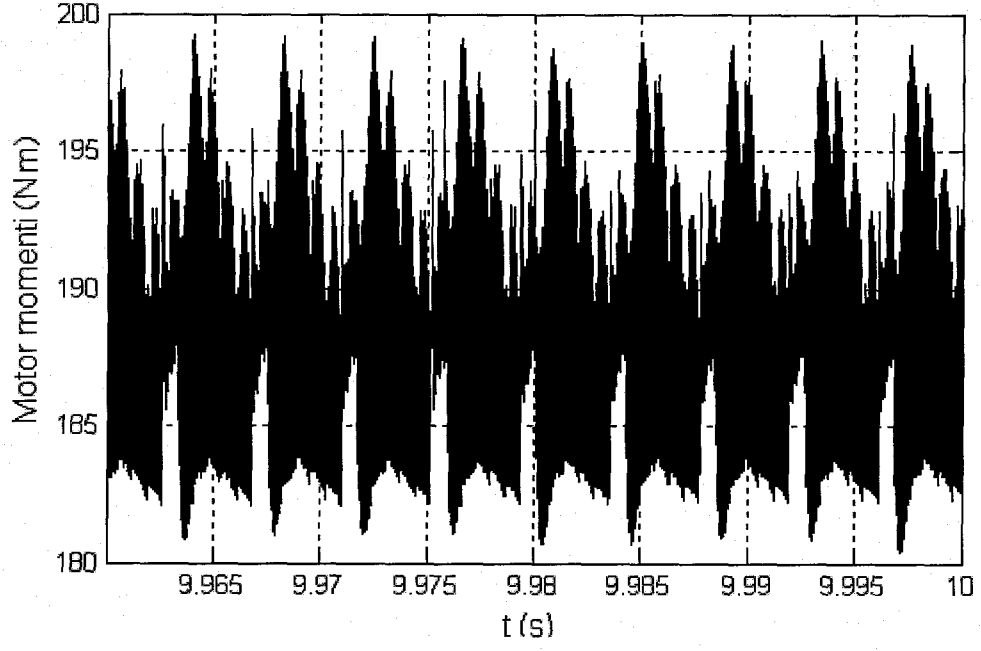
Şekil 5.10.c. ARM'nun, PID denetleyici kullanılarak yüksüz çalışma durumunda elde edilen faz momentlerinin değişimi (Kararlı durum)



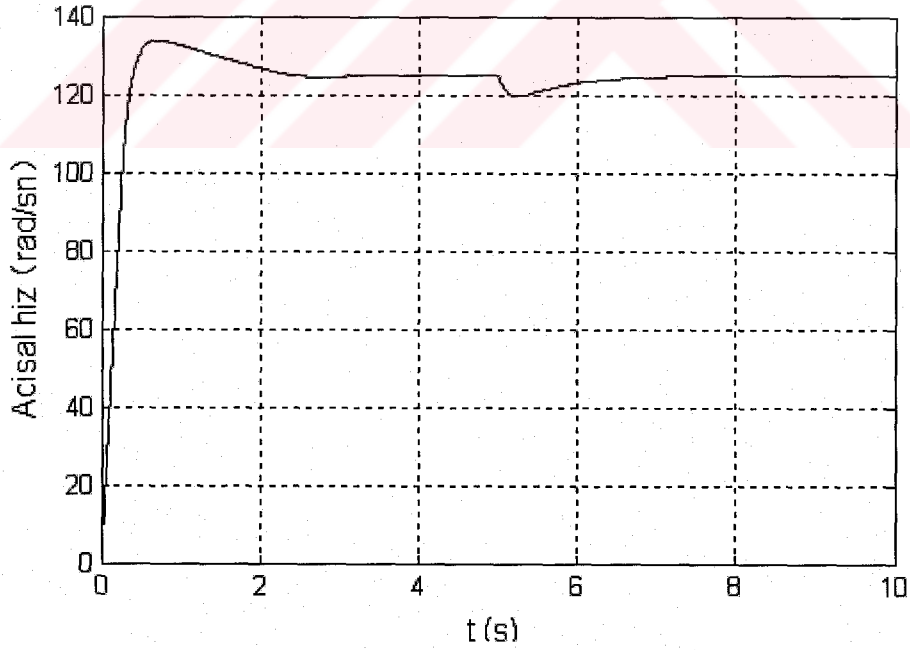
Şekil 5.10.d. ARM'nun, PID denetleyici kullanılarak nominal yükte çalışma durumunda elde edilen faz momentlerinin değişimi (Kararlı durum)



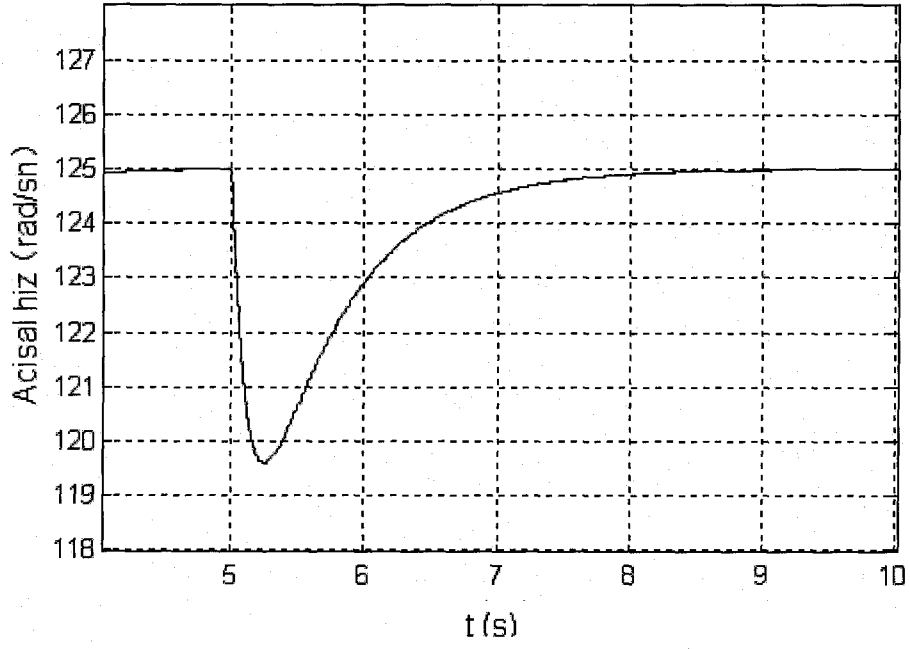
Şekil 5.11.a. ARM'nun, PID denetleyici kullanılarak yüksüz kalkınma ve nominal yükte ani yüklenme durumunda elde edilen mil momentinin değişimi



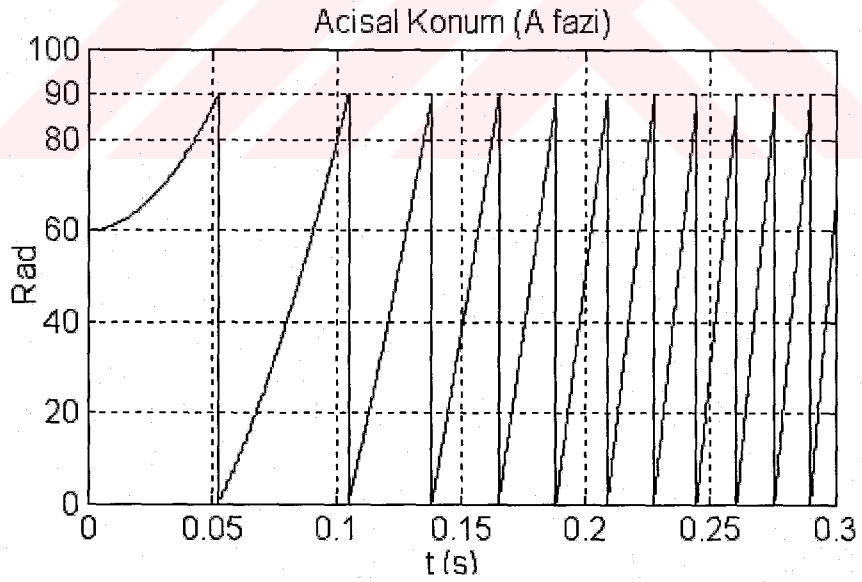
Şekil 5.11.b. ARM'nun, PID denetleyici kullanılarak nominal yüklü durumda elde edilen mil momentindeki dalgalanma (Kararlı durum)



Şekil 5.12.a. ARM'nun PID denetleyici kullanılarak yüksüz kalkınma ve nominal yükle ani yüklenme durumunda elde edilen açısız hızın değişimi



Şekil 5.12.b. ARM'nun, PID denetleyici kullanılarak nominal yükte ani yüklenmesi anında elde edilen açısal hızın değişimi



Şekil 5.13. ARM'nun, PID denetleyici kullanılarak elde edilen A fazına ait açısal konumun zamana göre değişimi

5.4. ARM' nun Bulanık Mantık PI Denetleyici ile Hız Denetimi

5.4.1. Bulanık mantık PI (BMPI) denetleyici

ARM yüksek derecede doğrusal olmayan (nonlinear) karakteristiklere sahip olduğundan bu motorun denetiminde Bulanık Mantığın ve Yapay sinir ağlarının kullanılması daha uygun olmaktadır [38]. Klasik denetleyiciler sistem modeline ve parametrelerinin doğruluğuna bağlıyken BMD, ARM'nun hızını kontrol etmek için farklı bir yaklaşım kullanır. Sistem modelinin kullanılması yerine bir BMD işlemi geçmiş deneyimlere ve dilsel tanımlamalara dayanır. BMD tasarımı için sistem modelinin tam olarak bilinmesine gerek yoktur. Denetim süreci hakkında yeterli bilgi yoksa BMD ile iyi bir sonuç sağlanamayabilir [37].

5.4.1.1. Sistemin giriş ve çıkış değişkenlerinin tanımlanması

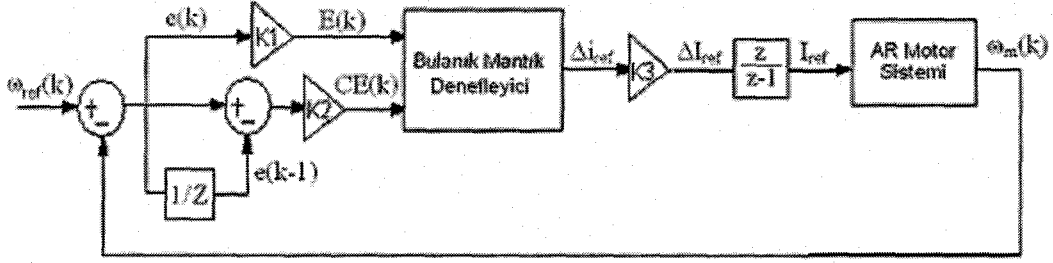
Tasarlamakta olduğumuz bulanık hız denetleyicide denetimin amacı hız hatasını en aza indirmektir. Hata ne kadar büyük ise denetim girişinin o kadar büyük olması beklenir. Bununla birlikte denetim girişinin belirlenmesinde hatanın değişim oranı da oldukça büyük rol oynar. Dolayısıyla da denetim kurallarından oluşacak dilsel değişkenler olarak hata (e) ve hata değişimi (ce) değerleri kullanılır. Çıkış değişkeni ARM sürücünün denetim değişkenindeki değişim miktarıdır (ΔI_{ref}). Şekil 5.14' de giriş ve çıkış değişkenleri gösterilmektedir. Denklem 5.4 gerekli sistem eşitliklerini göstermektedir.

$$E(k) = e(k) \times K1 = [\omega_{ref}(k) - \omega_m(k)] \times K1$$

$$CE(k) = ce(k) \times K2 = [e(k) - e(k-1)] \times K2 \quad (5.4)$$

$$\Delta I_{ref}(k) = \Delta iref(k) \times K3$$

Burada K1, K2 ve K3 birer kazanç katsayısıdır ve ölçeklendirme faktörü olarak isimlendirilir. 'k' ise zaman indeksidir.



Şekil 5.14. Bulanık Mantık PI Denetleyici yapısı

Hata (e) en küçük değerini motor hızı nominal değerine (125 Rad/s) ulaştığında almaktadır. Bu değeri ters çevirirsek hata aralığının -125 ile 125 arasında tanımlanabilir. Hız denetimini optimize etmek için bu sınır değerlerinde bazı değişiklikler yapılarak aşağıdaki aralıklar bulunmuştur:

$$e\omega : -125 \text{ ve } +125 \text{ rad/sn}$$

$$ce\omega : -722 \text{ ve } +722 \text{ rad/sn/sn}$$

$$\Delta I_{ref} : -150.10^3 \text{ ve } +150.10^3 \text{ A/sn}$$

Belirlenen bu aralıklara göre simülasyon modelinde kazanç değerleri $K1 = 1/125$, $K2 = 722$ ve $K3 = 150.10^3$ şeklinde belirlenmektedir.

5.4.1.2. Üyelik fonksiyonları ve kuralların tanımlanması

BMD, sistemin hızını referans hız değerinde tutmak için giriş değişkenlerine göre uygun çıkış sinyalini üretmektedir. Bu işlem yazılan denetim kuralları doğrultusunda gerçekleşmektedir. Tablo 5.2 Bulanık Mantık PI denetleyici için denetim kurallarını göstermektedir.

Tablo 5.2. Bulanık Mantık PI hız denetimi için kurallar

$\begin{matrix} ce \\ e \end{matrix}$	NB	NO	NK	S	PK	PO	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NO	S	S
NO	NB	NB	NB	NO	NK	S	S
NK	NB	NO	NK	NK	NK	S	S
S	NB	NO	NK	S	PK	PO	PB
PK	S	S	PO	PK	PK	PO	PB
PO	NB	S	PK	PO	PB	PB	PB
PB	S	S	PO	PO	PO	PB	PB

Tabloda kullanılan dilsel değişkenler anlam olarak aşağıdaki gibi ifade edilir;

NB : {Negatif Büyük}

PB : {Pozitif Büyük}

S : {Sıfır}

NO : {Negatif Orta}

PO : { Pozitif Orta}

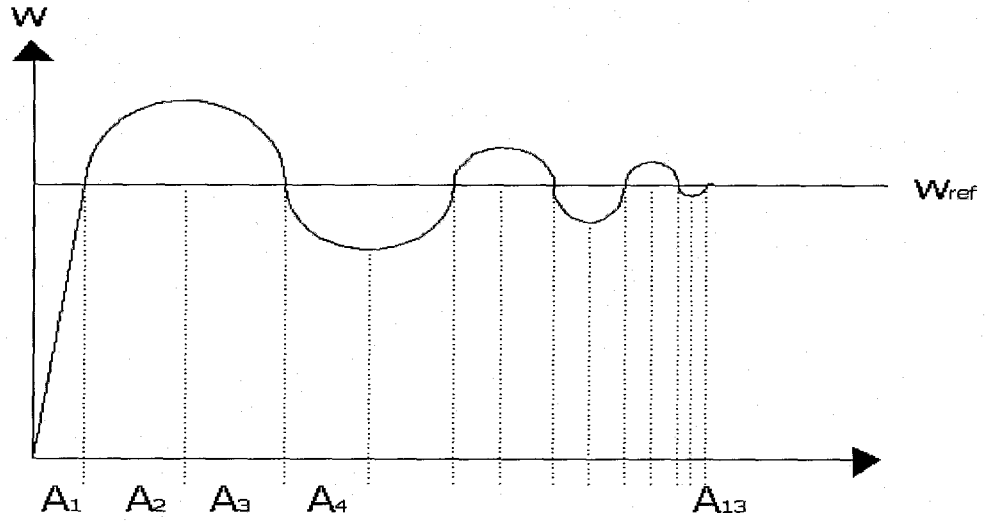
NK : { Negatif Küçük}

PK : { Pozitif Küçük}

Kuralların nasıl yazıldığını anlamak için Tablo 5.2' de görülen birinci kuralı ele alalım;

“Eğer hata NB ise ve hata değişimi NB ise çıkış NB olsun.”

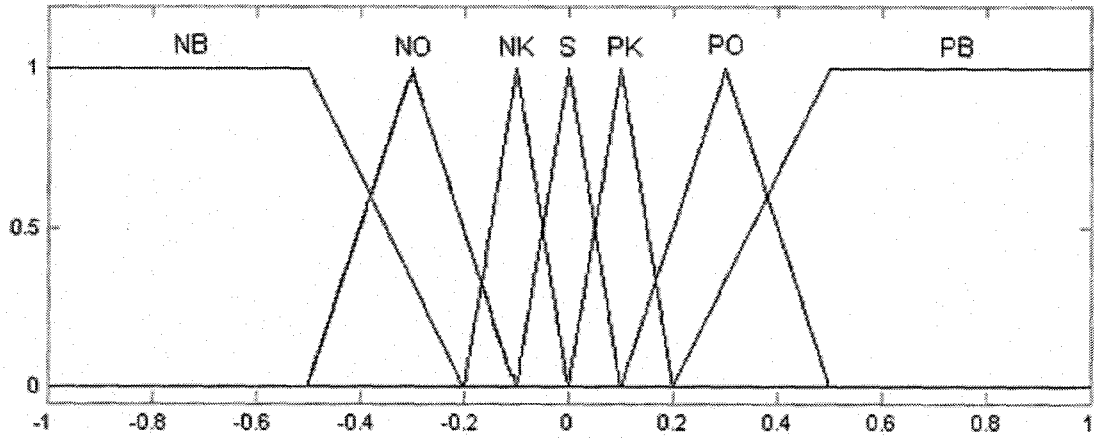
Bu kurala göre, hata değeri negatif büyük ve hata değişimi değeri negatif büyük olduğunda denetleyici çıkışı ($\Delta_{i_{ref}}$) negatif büyük olacaktır. Bu durum Şekil 5.15' de gösterilen A_2 bölgesine karşılık gelir. Bu bölgede motor hızı referans hızdan daha büyüktür ve hala kuvvetli bir şekilde artma eğilimindedir. Bu durum denetim süreci içinde karşılaşılabilecek en kötü durumlardan biridir. Denetleyici çıkışı $\Delta_{i_{ref}}$ olması gerektiğinden büyük olduğu için çıkışa NB verilerek $\Delta_{i_{ref}}$ azaltılmaktadır. Denetim sürecindeki tüm olası durumlar Şekil 5.15' de gösterilmektedir.



	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇	A ₈	A ₉	A ₁₀
e_w	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-
ce_w	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-

Şekil 5.15. Dinamik işaret analizi

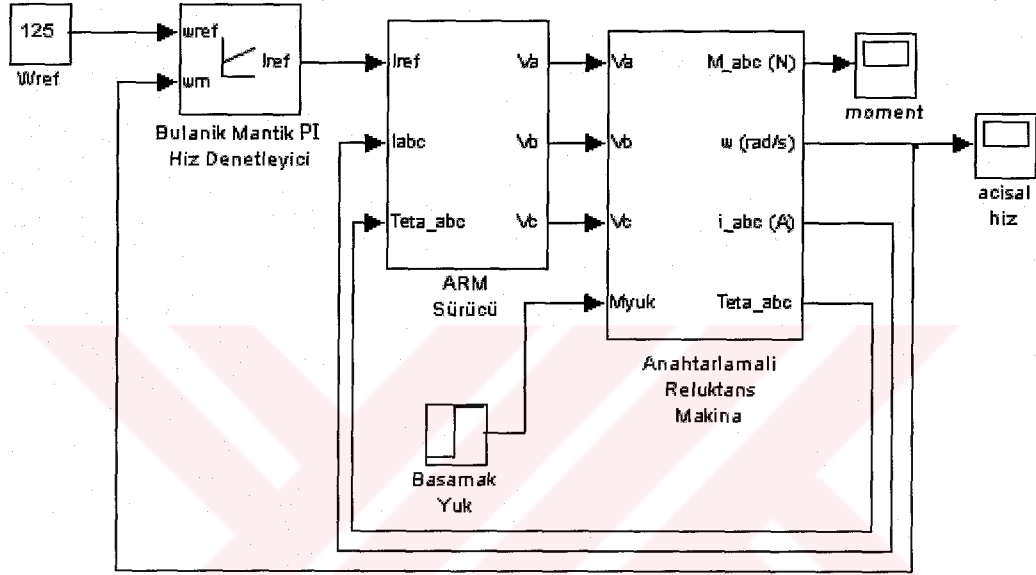
Tüm üyelik fonksiyonları birim değer aralığında (Per unit) tanımlanmıştır. Bulanık denetleyici girişlerinde bulunan K1 ve K2 ve çıkışında bulunan K3 ölçeklendirme faktörleri sayesinde giriş ve çıkış değişkenleri birim aralıkta ölçeklenmektedir. Girişlere ve çıkışa ait dilsel değişkenler Şekil 5.16' da gösterilen 7 adet üçgen üyelik fonksiyonu ile temsil edilmiştir.



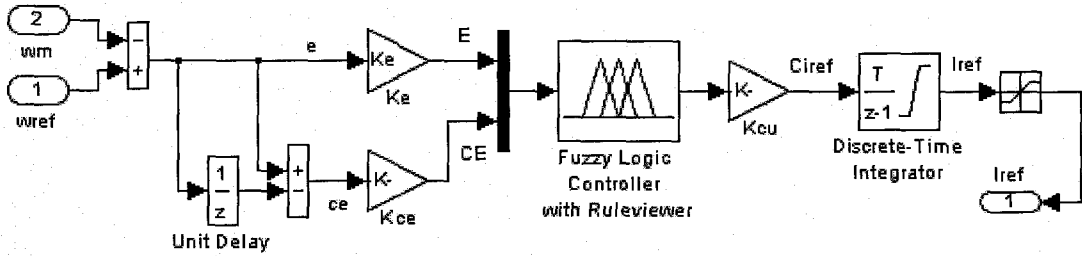
Şekil 5.16. E, CE ve ΔI_{ref} için üyelik fonksiyonları

5.4.2. Bulanık mantık PI denetim modeli

Şekil 5.17' de ARM' nun Bulanık Mantık PI denetim modeli gösterilmektedir. Modelin PID denetim modelinden tek farkı denetleyici sistem olarak Bulanık Mantık PI denetleyici modelinin kullanılmış olmasıdır. Şekil 5.18' de Bulanık Mantık PI denetleyici modeli gösterilmektedir.

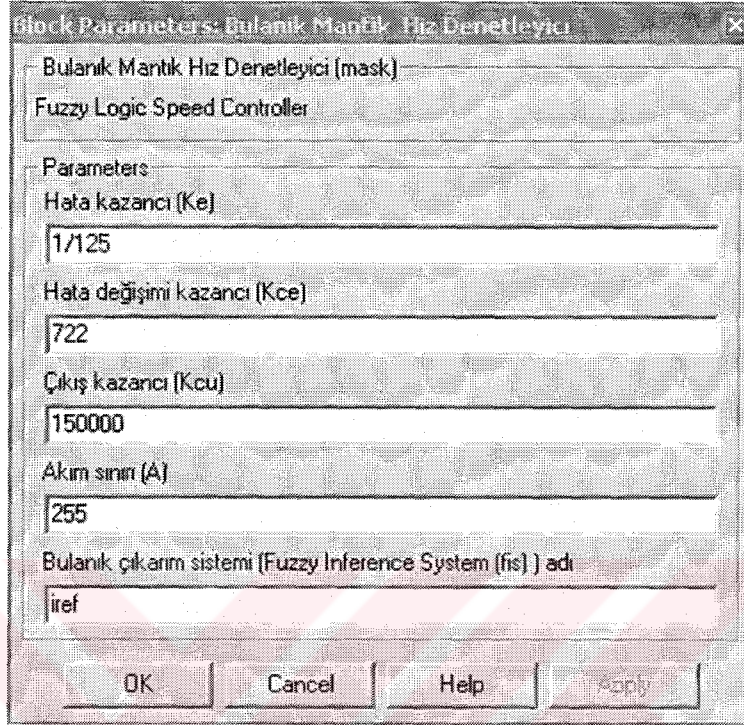


Şekil 5.17. Bulanık Mantık PI denetim modeli



Şekil 5.18. Bulanık Mantık PI denetleyici modeli

Şekil 5.19' da Bulanık Mantık PI denetleyici modeli için belirlenen parametreler gösterilmektedir.



Block Parameters: Bulanık Mantık Hız Denetleyici

Bulanık Mantık Hız Denetleyici (mask)
Fuzzy Logic Speed Controller

Parameters

Hata kazancı (Ke)
1/125

Hata değişimi kazancı (Kce)
722

Çıkış kazancı (Kcu)
150000

Akım sınırı (A)
255

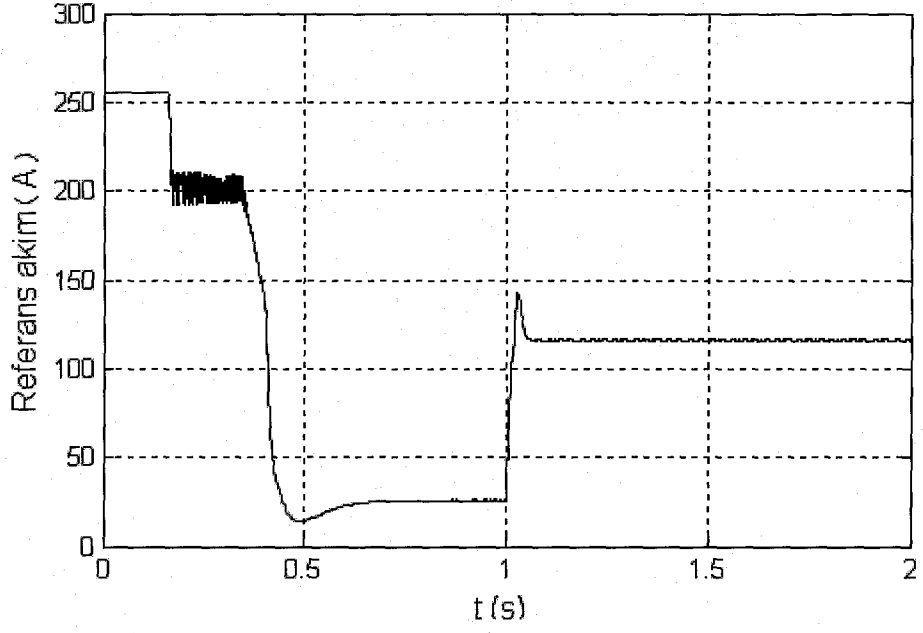
Bulanık çıkarım sistemi (Fuzzy Inference System (fis)) adı
iref

OK Cancel Help Apply

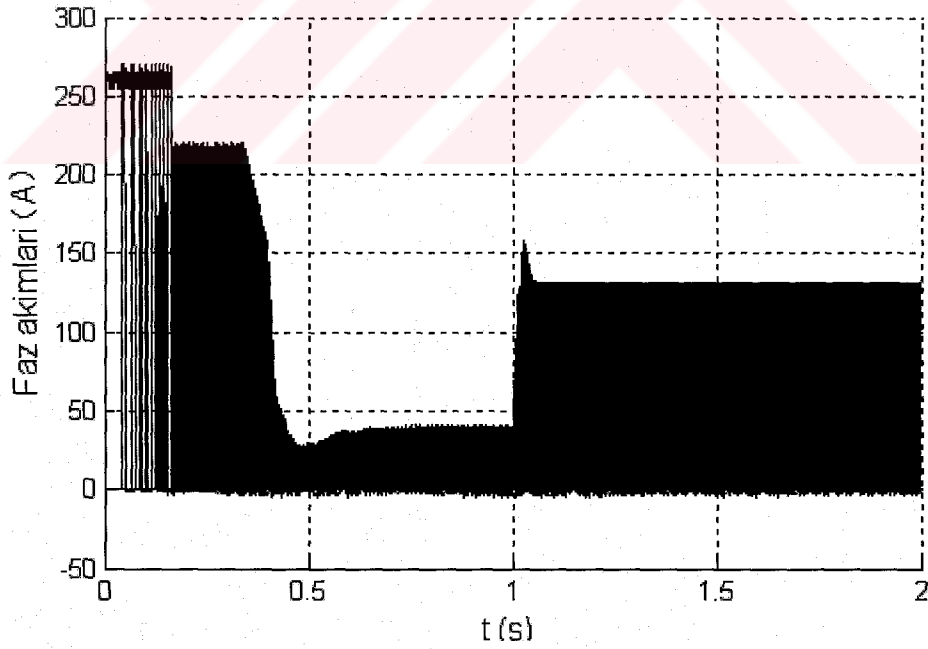
Şekil 5.19. BMPI denetleyici parametreleri

5.4.3. Simülasyon sonuçları

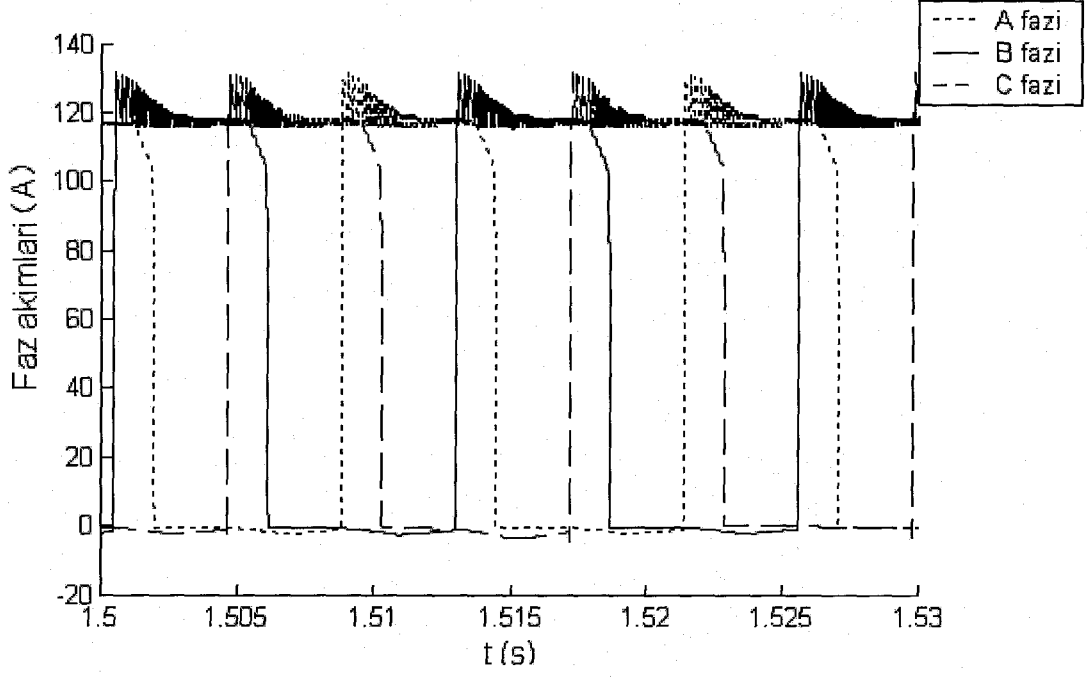
Bu kısımda gösterilen tüm grafikler motorun yüksüz olarak yol almasının ardından 1. saniyede nominal motor yükünün yarısı olan 90 Nm yükü ani olarak yüklendiği durum için elde edilmektedir. PID denetleyici kısmında tüm grafikler detaylı olarak gösterildiği için bu kısımda sadece önemli olanları gösterilmektedir. Denetleyici sistem tarafından üretilen referans akım sinyali Şekil 5.20' de gösterilmektedir. Şekil 5.21.a ve Şekil 5.21.b' de faz akımları, Şekil 5.22.a, Şekil 5.22.b' de faz momentleri, Şekil 5.23.a ve Şekil 5.23.b' de motor momentleri, Şekil 5.23.a ve Şekil 5.23.b' de açısal hız grafiği motorun çeşitli çalışma koşulları için gösterilmektedir.



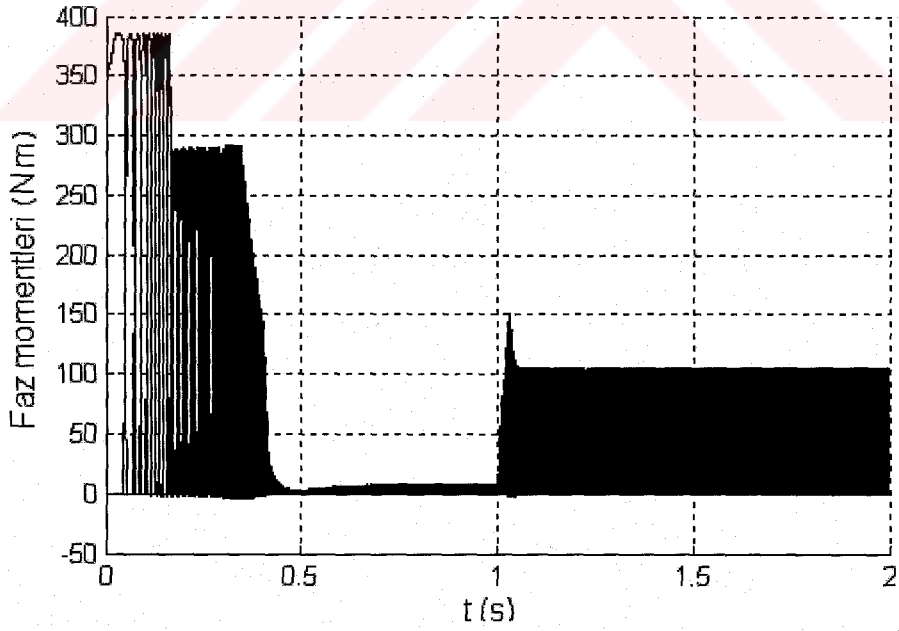
Şekil 5.20. ARM'nun, Bulanık Mantık PI denetleyici kullanılarak yüksüz kalkınma ve 90 Nm yükte ani yüklenme durumunda elde edilen referans akımın değişimi



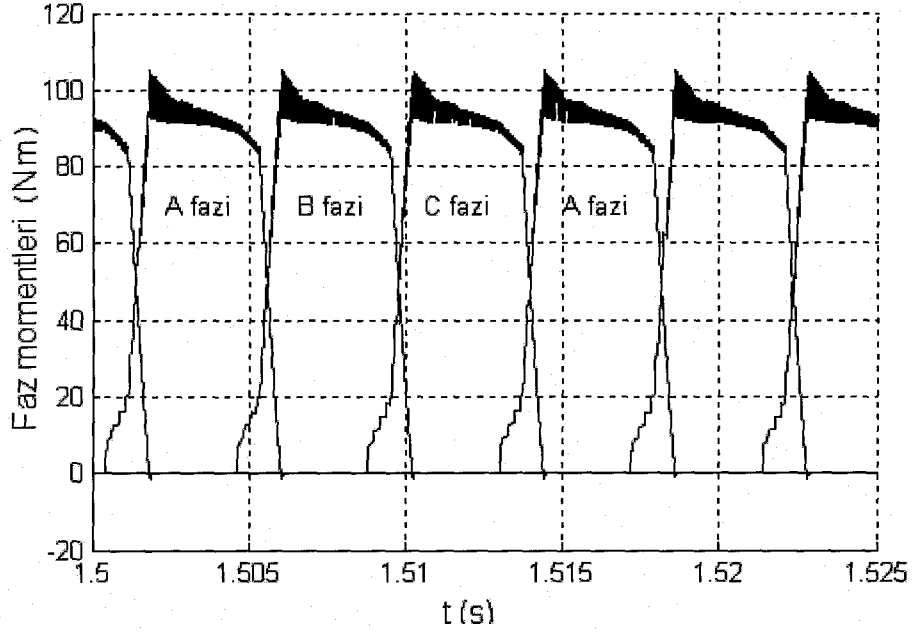
Şekil 5.21.a. ARM'nun, Bulanık Mantık PI denetleyici kullanılarak yüksüz kalkınma ve 90 Nm yükte ani yüklenme durumunda elde edilen faz akımlarının değişimi



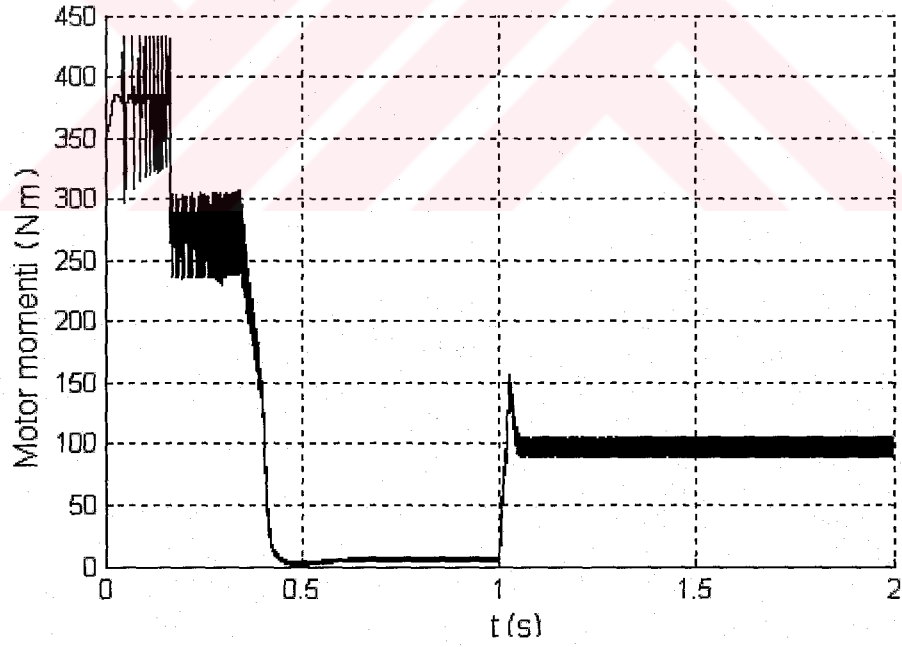
Şekil 5.21.b. ARM'nun, Bulanık Mantık PI denetleyici kullanılarak 90 Nm yükte çalışma durumunda elde edilen faz akımlarının değişimi (Kararlı durum)



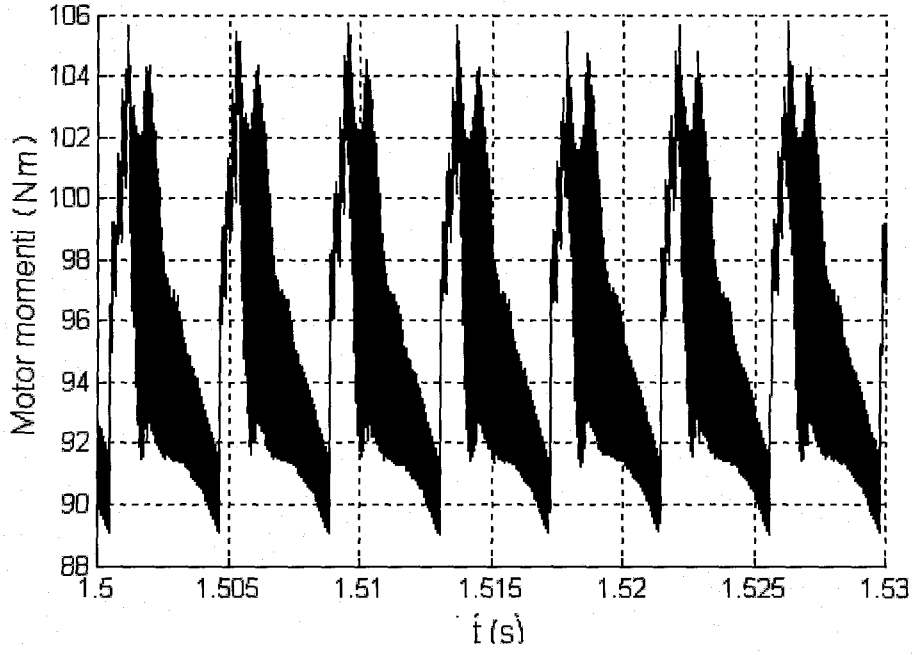
Şekil 5.22.a. ARM'nun, Bulanık Mantık PI denetleyici kullanılarak yüksüz kalkınma ve nominal yükte ani yüklenme durumunda elde edilen faz momentlerinin değişimi



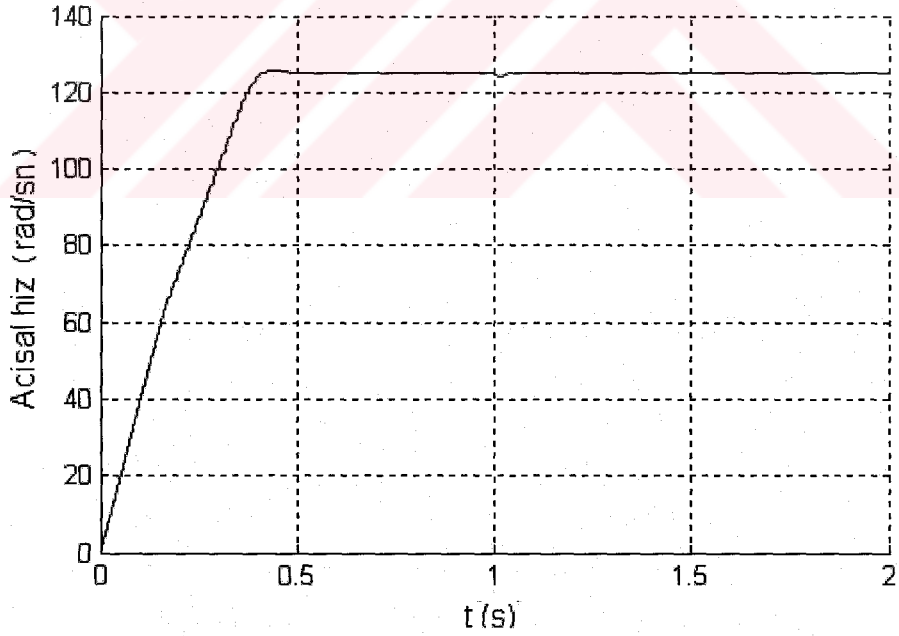
Şekil 5.22.b. ARM'nun, Bulanık Mantık PI denetleyici kullanılarak 90 Nm yükle çalışma durumunda elde edilen faz momentlerinin değişimi (Kararlı durum)



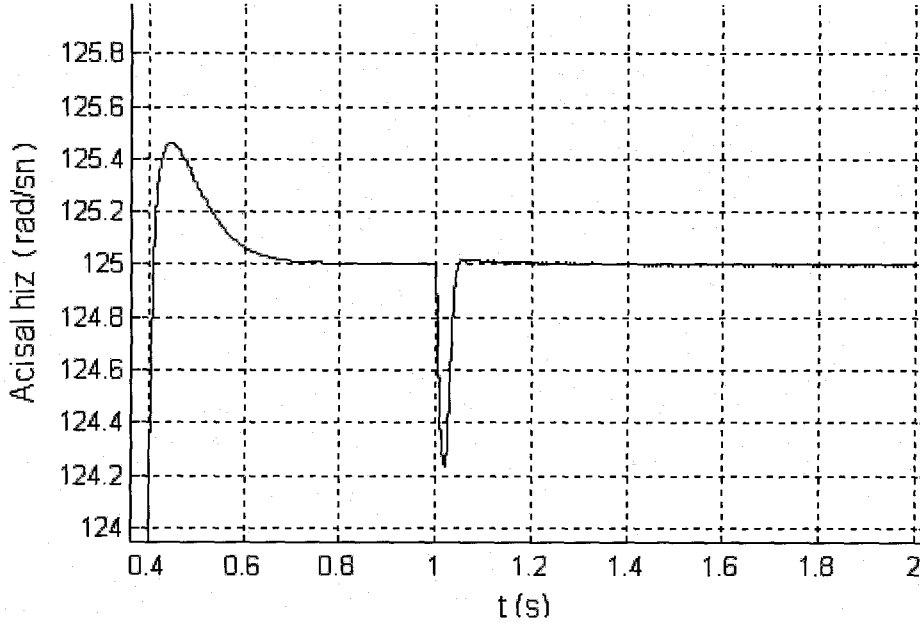
Şekil 5.23.a. ARM'nun, Bulanık Mantık PI denetleyici kullanılarak yüksüz kalkınma ve 90 Nm yükle ani yüklenme durumunda elde edilen mil momentinin değişimi



Şekil 5.23.b. ARM'nun, Bulanık Mantık PI denetleyici kullanılarak 90 Nm yüklü durumda elde edilen mil momentindeki dalgalanma (Kararlı durum)



Şekil 5.24.a. ARM'nun, Bulanık Mantık PI denetleyici kullanılarak yüksüz kalkınma ve 90 Nm yükle ani yüklenme durumunda elde edilen açısal hızın değişimi



Şekil 5.24.b. ARM'nun, Bulanık Mantık PI denetleyici kullanılarak 90 Nm yükü ani yüklenmesi anında elde edilen açısal hızın değişimi

5.5. ARM' nun Yeni Bulanık Mantık (YBM) Denetleyici ile Hız Denetimi

5.5.1. Yeni Bulanık Mantık denetleyici

Bu denetleyicide yeni bir yöntem sunulmaktadır. Bu yenilik BMD' nin kural tabanının üretilmesi aşamasında gerçekleştirilmektedir. Bu BMD, iki adet farklı kural tabanına sahip bulanık denetleyiciden ve aralarındaki mantıksal (logic) bir anahtarlama mekanizmasından meydana gelmektedir. Bulanık denetleyici blokları iki adet giriş değişkenine sahiptir. Bunlardan biri "normalleştirilmiş ivme" değişkeni diğeri ise klasik "hata" değişkenidir. Normalleştirilmiş ivme değişkeni (s) hatanın birinci ve ikinci türevleri kullanılarak elde edilmektedir ve sistem cevabının "hızlılık" veya "yavaşlık" durumu hakkında bağıl bir değer vermektedir. Bulanık denetleyici blokları sistem cevabının referans değere yaklaştığı ve uzaklaştığı bölgeler için tasarlanmaktadır ve sırasıyla Bulanık Yaklaşım Bloğu (BYB) ve Bulanık Uzaklaşma Bloğu (BUB) olarak isimlendirilmektedir.

5.5.1.1. Yeni Bulanık Mantık Denetleyiciye ilişkin temel unsurlar ve prensipler

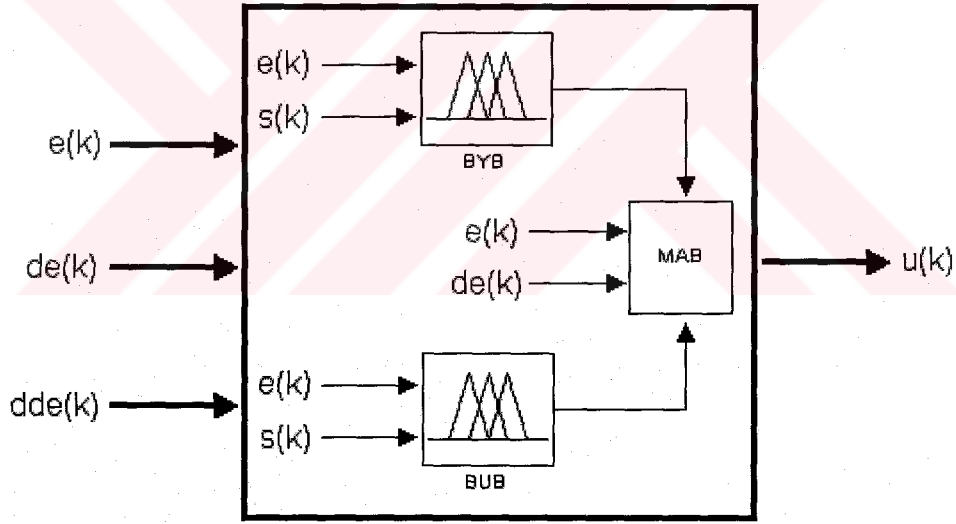
Ayrık zamanlı kapalı çevrim bir denetim sistemi için k ' ıncı zaman indeksinde hata sinyali denklem (5.5)' deki gibi tanımlanır:

$$e(k) = r(k) - y(k) \quad (5.5)$$

burada $r(k)$ referans noktası ve $y(k)$ sistem çıkışıdır. Hata değişimi ve hatanın ivmesi sırasıyla denklem 5.6 ve denklem 5.7' de ifade edilmektedir.

$$de(k) = e(k) - e(k-1) \quad (5.6)$$

$$dde(k) = de(k) - de(k-1) \quad (5.7)$$



Şekil 5.25. Yeni Bulanık Mantık Denetleyicinin iç yapısı

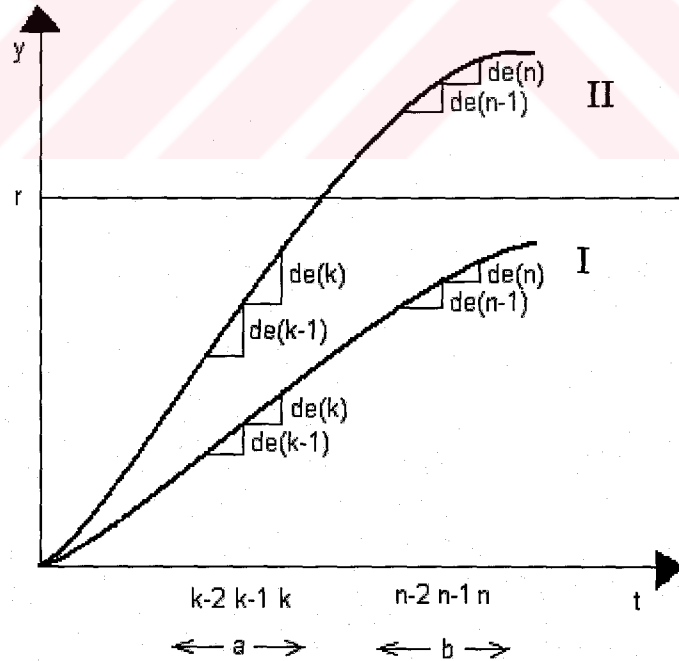
Yeni BMD Şekil 5.25' de gösterilen üç adet değişkeni kullanmaktadır. Şekilden görüldüğü gibi Yeni BMD, BYB ve BUB olmak üzere iki denetleyici bloğu ve aralarındaki Mantıksal Anahtarlama Bloğundan (MAB) meydana gelmektedir. Her denetleyici bloğu giriş değişkeni olarak hata $e(k)$ ve $s(k)$ 'yi kullanmaktadır. $s(k)$ değişkeninin matematiksel ifadesi denklem 5.8' de verilmektedir.

$$s(k) = \frac{de(k) - de(k-1)}{de(\cdot)} = \frac{dde(k)}{de(\cdot)} \quad (5.8)$$

burada $de(\cdot)$ denklem (5.9)'daki gibi ifade edilmektedir:

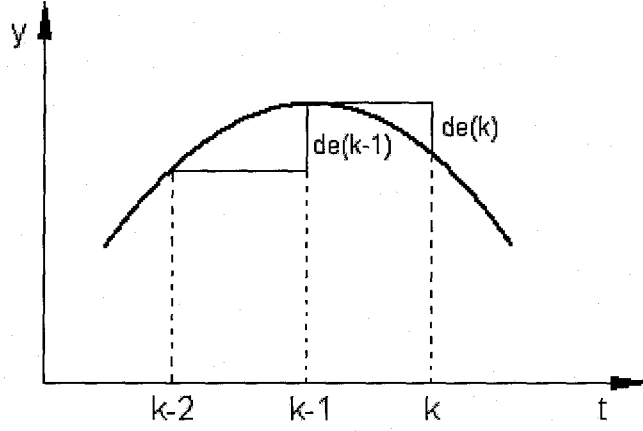
$$de(\cdot) = \begin{cases} de(k), & \text{eğer } |de(k)| \geq |de(k-1)| \\ de(k-1), & \text{eğer } |de(k)| < |de(k-1)| \end{cases} \quad (5.9)$$

Sistem cevabı yumuşak ve değişmeyen bir artış veya azalış gösterdiğinde $de(k) \times de(k-1)$ çarpımı pozitif olmaktadır. Sistem cevabının hızlığı veya yavaşlığı bu $s(k)$ değeri kullanılarak anlaşılabilir. $s(k)$ teriminin ilginç bir özelliği; farklı zaman sabitlerine sahip olan iki sistem cevabı eğrilerinin aynı $s(k)$ değerine sahip olabilmeleridir. Bu durum Şekil 5.26'de gösterilmektedir. Böylece normalleştirilmiş ivme $s(k)$ sistemin zaman sabitesinden bağımsız olmaktadır ve bu açıdan bağımsız bir değişken olarak ele alınabilir.



Şekil 5.26. Basamak girişine bağlı olarak elde edilen sistem cevaplarına ilişkin bağıl hızlar

$de(k) \times de(k-1)$ çarpımı negatif olduğunda sistem cevabı yön değiştirmektedir. Bu durum Şekil 5.27’ de gösterilmektedir. Bu durumda sistem hızı ile ilgili bir yargıda bulunmak mümkün değildir.



Şekil 5.27. Sistem cevabındaki dalgacık

Şekil 5.26’den görüldüğü gibi hata değişiminin mutlak değeri $|de(k)|$ bir önceki değerinin mutlak değerinden $|de(k-1)|$ büyükse bu sistem cevabının hızlı bir şekilde artmakta veya azalmakta olduğunu göstermektedir. Denklem 5.7, $de(.)$ fonksiyonu ile birlikte dikkate alındığında Tablo 5.3 elde edilmektedir. Tablo 5.3, $dde(k)$ ve $de(.)$ değişkenine bağlı olarak sistem cevabının hızını göstermektedir. Böylece ivme ifadesi $dde(k)$ ’yı normalleştirmek için denklem (5.8) oluşturulmaktadır.

Tablo 5.3. Sistem cevabı, $de(k)$ ve $dde(k)$ arasındaki ilişki

$de(k-1)$ veya $de(k)$	$dde(k)$	Sistem cevabı
Pozitif	Pozitif	Hızlı
Pozitif	Negatif	Yavaş
Negatif	Pozitif	Yavaş
Negatif	Negatif	Hızlı

Denklem 5.9 ve tablo 5.3' de sistem cevabının “hızlı” olduğu satırlar dikkate alındığında $de(k) \gg de(k-1)$ koşulu altında denklem (5.10) elde edilmektedir.

$$s(k) = \frac{de(k) - de(k-1)}{de(k)} = 1 - \frac{de(k-1)}{de(k)} \rightarrow 1 \quad (5.10)$$

Denklem 5 ve tablo 5.3' de sistem cevabının “yavaş” olduğu satırlar dikkate alındığında $de(k-1) \gg de(k)$ koşulu altında denklem (5.11) elde edilmektedir.

$$s(k) = \frac{de(k) - de(k-1)}{de(k-1)} = \frac{de(k)}{de(k-1)} - 1 \rightarrow -1 \quad (5.11)$$

$|de(k)| = |de(k-1)|$ olduğunda normalleştirilmiş ivme $s(k)$ sifıra yaklaşır. Bu durum Şekil 5.26'nın a bölgesine karşılık gelir. Bunun anlamı sistem cevabının sabit bir oranla artması yada azalmasıdır. Sistem cevabının bu hızı “hızlı” ile “yavaş” arasında “orta” olarak nitelendirilebilir. Bu sayede $s(k)$, $[-1,1]$ aralığında sistem cevabının hızı ile ilgili olarak bilgi vermektedir.

Tipik bir kapalı çevrim sistem cevabı Şekil 5.15' de gösterilmektedir. Şekilden görüldüğü gibi sistem cevabı A_1 ve A_3 bölgelerinde referans değere yaklaşmakta, A_2 ve A_4 bölgelerinde referans değerden uzaklaşmaktadır. $e(k) \times de(k)$ çarpımı A_1 ve A_3 bölgeleri için negatifken A_2 ve A_4 bölgeleri için pozitiftir. Bu durumdan yararlanılarak yaklaşma ve uzaklaşma bölgeleri birbirinden ayırt edilebilir. $e(k) \times de(k) \leq 0$ olduğunda BYB (Bulanık Yaklaşım Bloğu) aktif olmakta, $e(k) \times de(k) > 0$ olduğu durumda ise BUB (Bulanık Uzaklaşma Bloğu) aktif olmaktadır. Bu sayede denetim süreci boyunca tüm kural tabanının sadece yarısı aktif olmaktadır. Bu ise bulanık hesaplama (fuzzy computation) süresini azaltarak denetleyiciyi daha hızlı yapmaktadır.

Tablo 5.4. BYB için Denetim kuralları

$\begin{matrix} e \\ s \end{matrix}$	NB	NO	NK	NS	PS	PK	PO	PB
NB	NB	NB	NB	NO	PO	PB	PB	PB
NK	NB	NB	NO	NK	PK	PO	PB	PB
PK	NB	NO	NK	NS	PS	PK	PO	PB
PB	NO	NK	NS	PS	NS	PS	PK	PO

Tablo 5.5. BUB için Denetim kuralları

$\begin{matrix} e \\ s \end{matrix}$	NB	NO	NK	NS	PS	PK	PO	PB
NB	NB	NO	NK	NS	PS	PK	PO	PB
NK	NB	NB	NO	NK	PK	PO	PB	PB
PK	NB	NB	NB	NO	PO	PB	PB	PB
PB	NB	NB	NB	NB	PB	PB	PB	PB

BYB ve BUB bloklarına ait kural tabloları sırasıyla Tablo 5.4 ve Tablo 5.5' de gösterilmektedir. Denetleyicinin giriş değişkeni hata (e) ve çıkış değişkenine (u) ait bulanık kümeler sekiz seviyede nicelendirilirken giriş değişkeni normalleştirilmiş ivme (s) dört seviyede nicelendirilmiştir. Nicelik seviyeleri aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

NB : {Negatif Büyük}

PB : {Pozitif Büyük}

NO : {Negatif Orta}

PO : { Pozitif Orta}

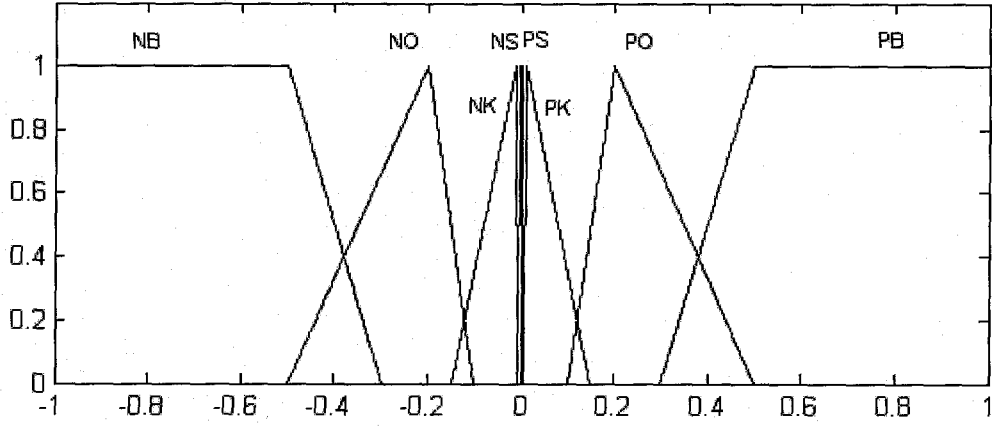
NK : { Negatif Küçük}

PK : { Pozitif Küçük}

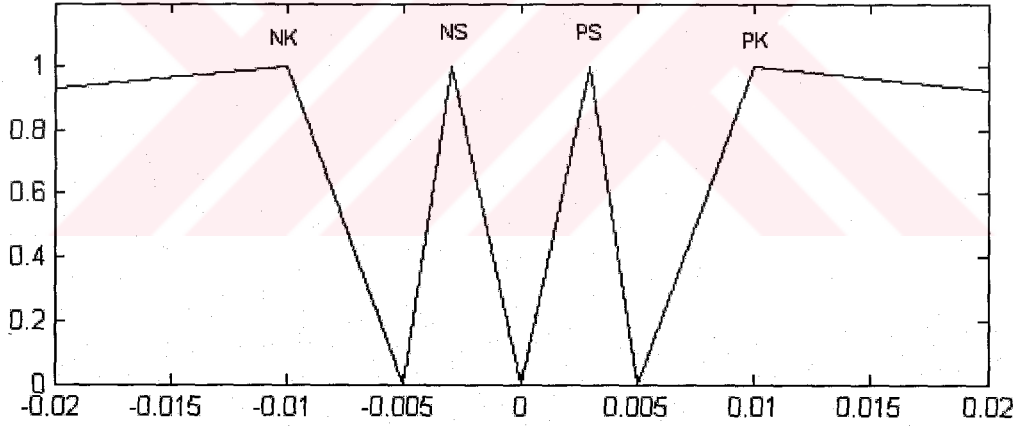
NS : { Negatif Sıfır}

PS : { Pozitif Sıfır}

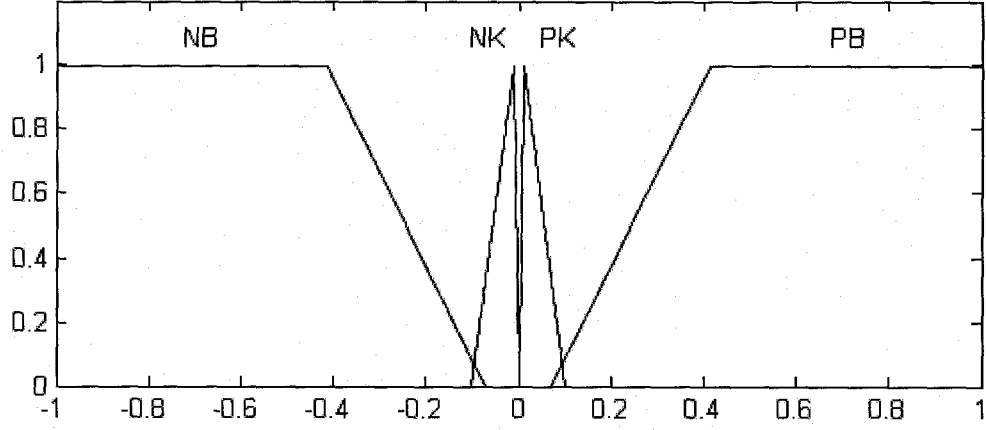
Şekil 5.28.a ve Şekil 5.28.b' de hata ve I_{ref} değişkenlerine ilişkin üyelik fonksiyonları, Şekil 5.29' da ise s değişkenine ilişkin üyelik fonksiyonları gösterilmektedir. BYB ve BUB için üyelik fonksiyonları aynıdır.



Şekil 5.28.a. BYB ve BUB için hata (e) ve çıkışa (I_{ref}) ilişkin üyelik fonksiyonları



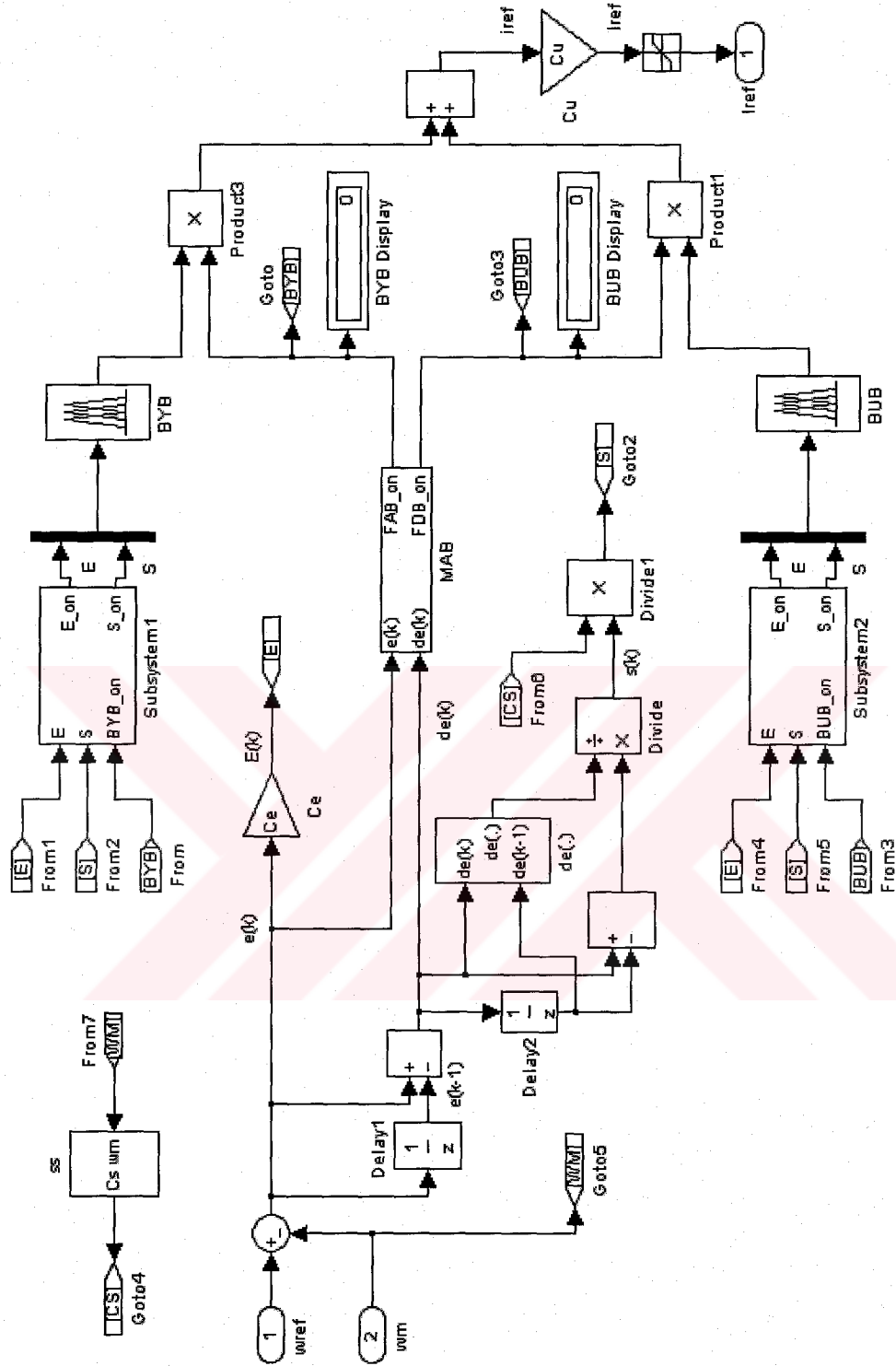
Şekil 5.28.b. BYB ve BUB için hata (e) ve çıkışa (I_{ref}) ilişkin üyelik fonksiyonları



Şekil 5.29. BYB ve BUB için normalleştirilmiş ivmeye ilişkin üyelik fonksiyonları

5.5.2. Yeni Bulanık Mantık Denetim Modeli

Şekil 5.30' da Yeni Bulanık Mantık denetleyici modeli ve Şekil 5.31' de bu denetleyiciye ait parametreler gösterilmektedir. Simülasyon çalışmalarında bulanık çıkarım yöntemi olarak "Min-Max", durulama yöntemi olarak "ağırlık merkezi" yöntemi kullanılmaktadır.



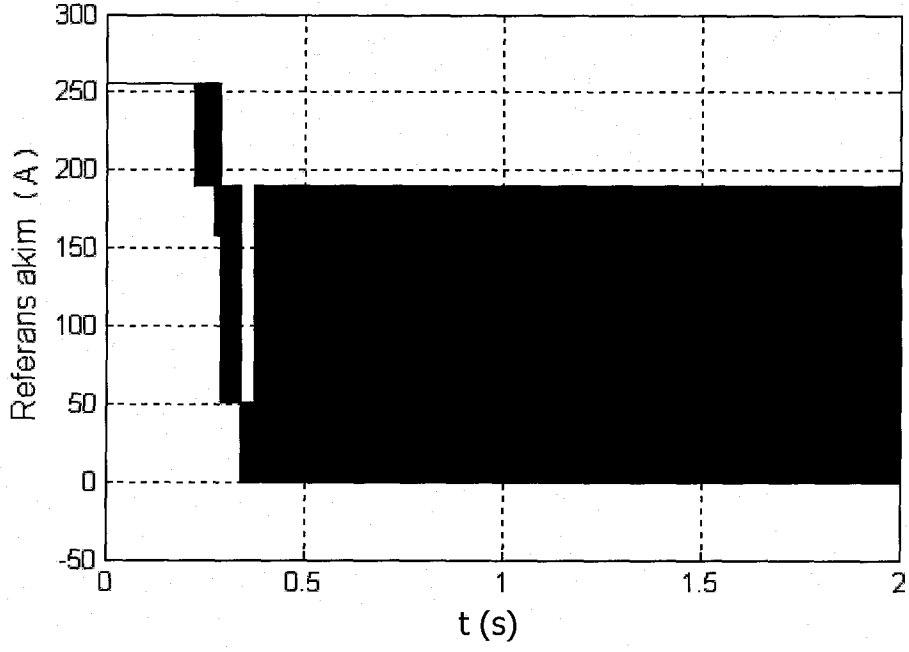
Şekil 5.30. Yeni Bulanık Mantık denetleyici modeli



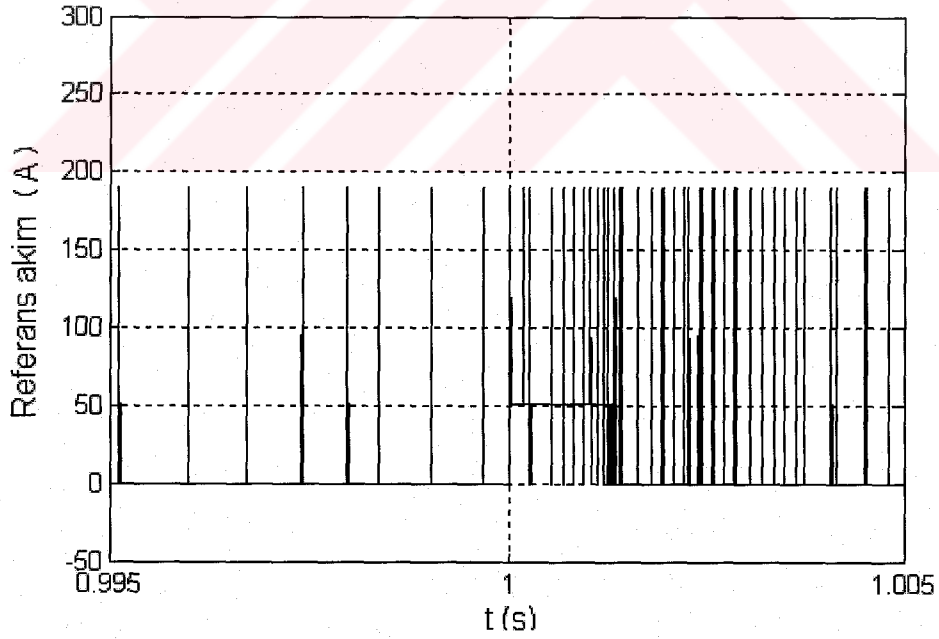
Şekil 5.31. YBM Denetleyici parametreleri

5.5.3. Simülasyon sonuçları

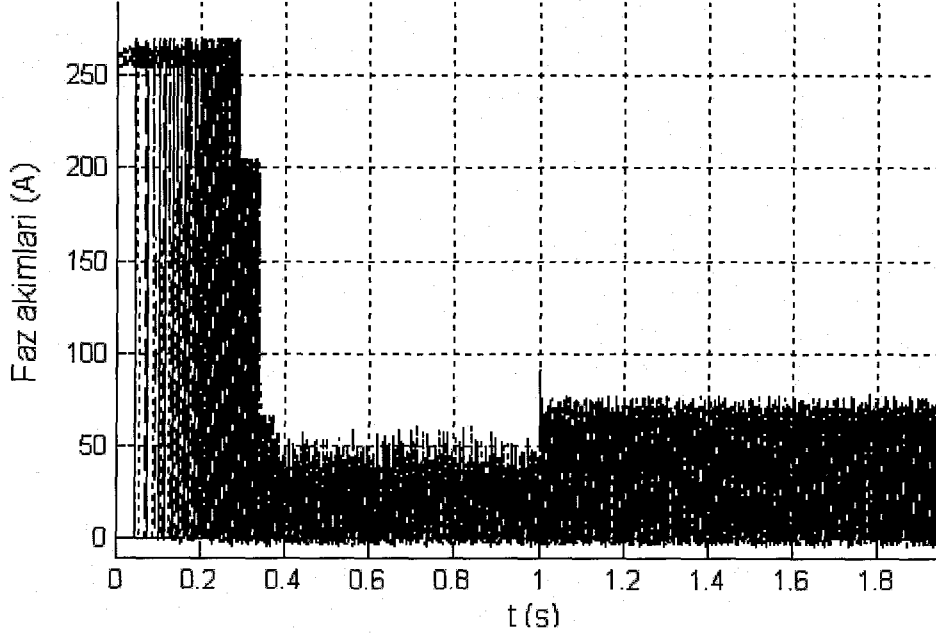
Bu kısımda gösterilen tüm grafikler motorun yüksüz olarak yol almasının ardından 1. saniyede nominal motor yükünün yaklaşık %10' u olan 20 Nm yükü ani olarak yüklediği durum için elde edilmektedir. Denetleyici sistem tarafından üretilen referans akım sinyali Şekil 5.32.a ve Şekil 5.32.b' de gösterilmektedir. Şekil 5.33.a ve Şekil 5.33.b' de faz akımları, Şekil 5.34.a, Şekil 5.34.b' de faz momentleri, Şekil 5.35.a ve Şekil 5.35.b' de motor momentleri, Şekil 5.36.a ve Şekil 5.36.b' de açısal hız grafiği motorun çeşitli çalışma koşulları için gösterilmektedir.



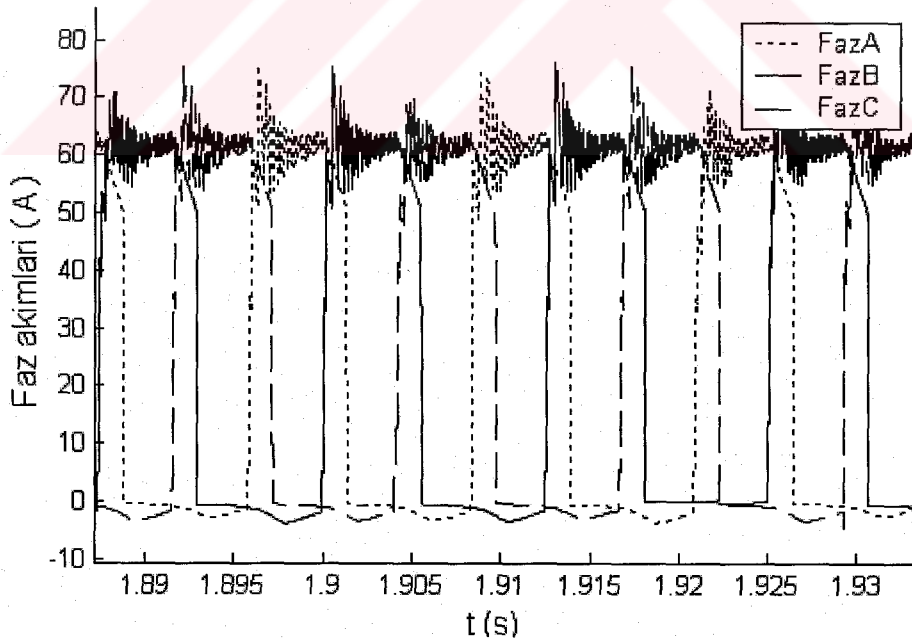
Şekil 5.32.a. ARM'nun, YBM denetleyici kullanılarak yüksüz kalkınma ve 20 Nm yükü ani yüklenme durumunda elde edilen referans akımın değişimi



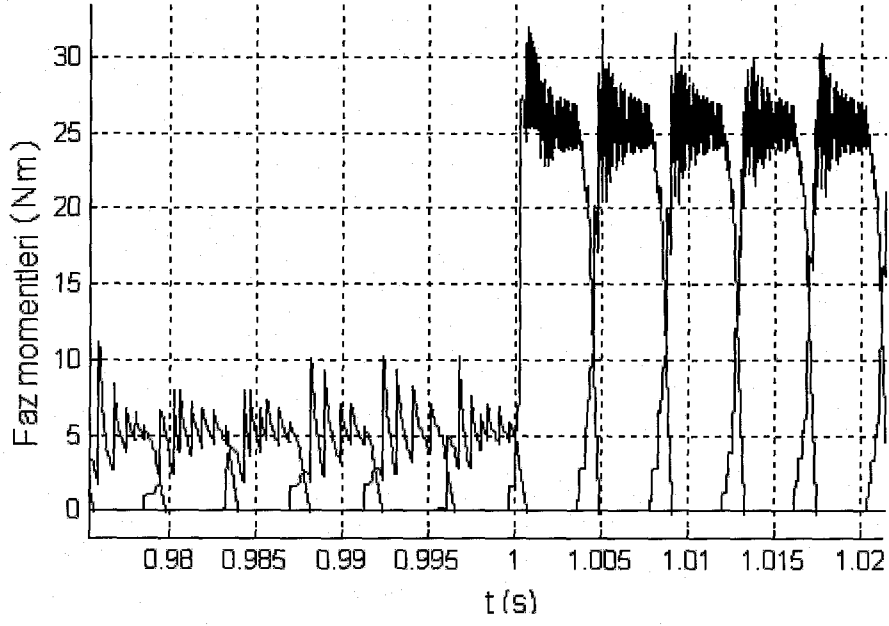
Şekil 5.32.b. ARM'nun, YBM denetleyici kullanılarak 20 Nm yükü ani yüklenme anında elde edilen referans akımın değişimi



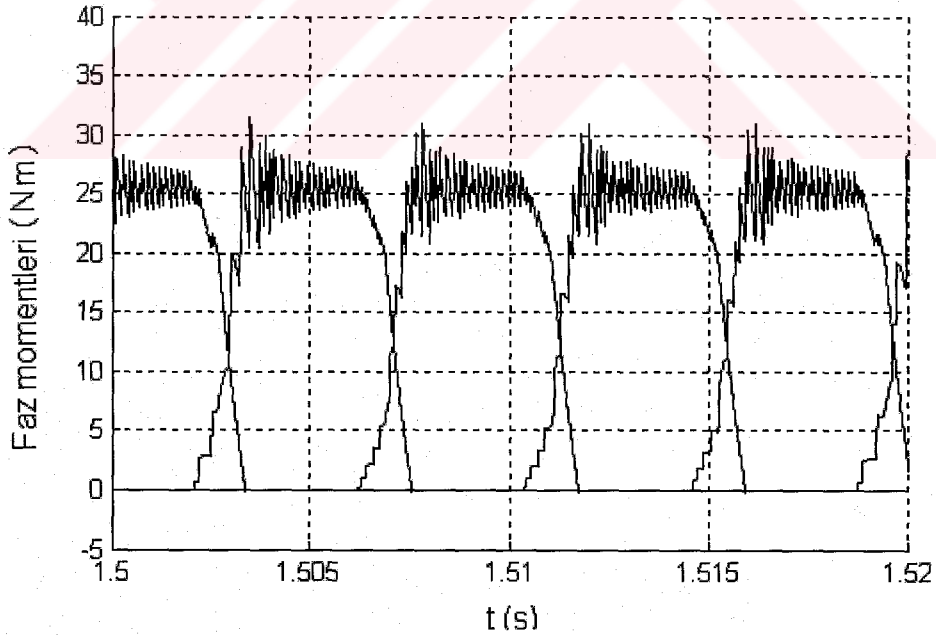
Şekil 5.33.a. ARM'nun, YBM denetleyici kullanılarak yüksüz kalkınma ve 20 Nm yükle ani yüklenme durumunda elde edilen faz akımlarının değişimi



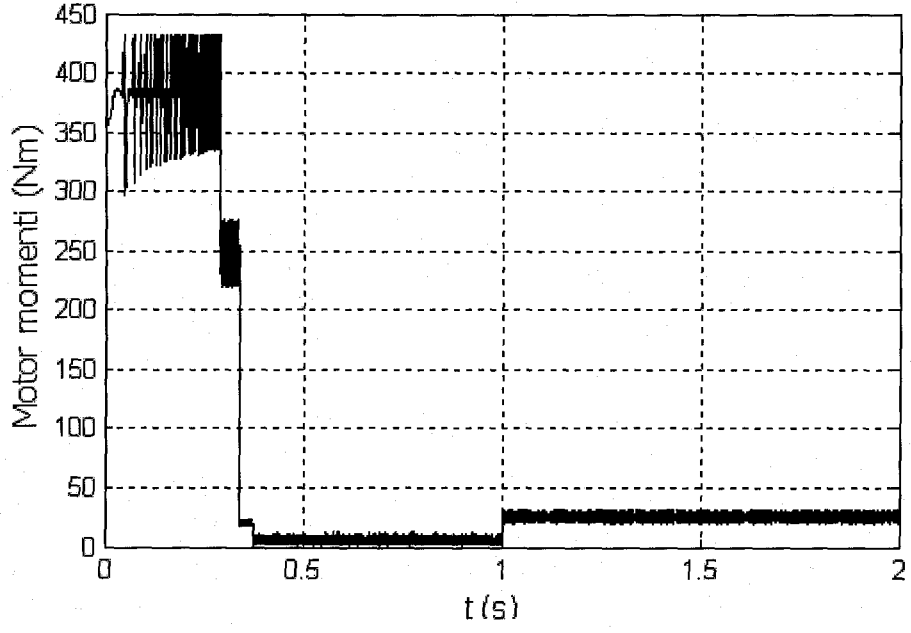
Şekil 5.33.b. ARM'nun, YBM denetleyici kullanılarak 20 Nm yükle çalışma durumunda elde edilen faz akımlarının değişimi (Kararlı durum)



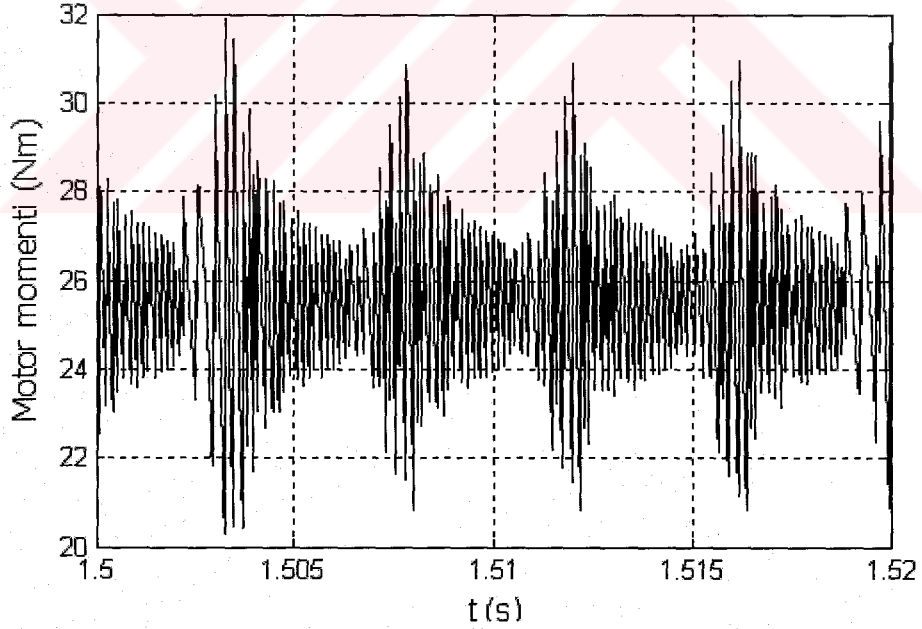
Şekil 5.34.a. ARM'nun, YBM denetleyici kullanılarak 20 Nm yükü ani yüklenme anında elde edilen faz momentlerinin değişimi



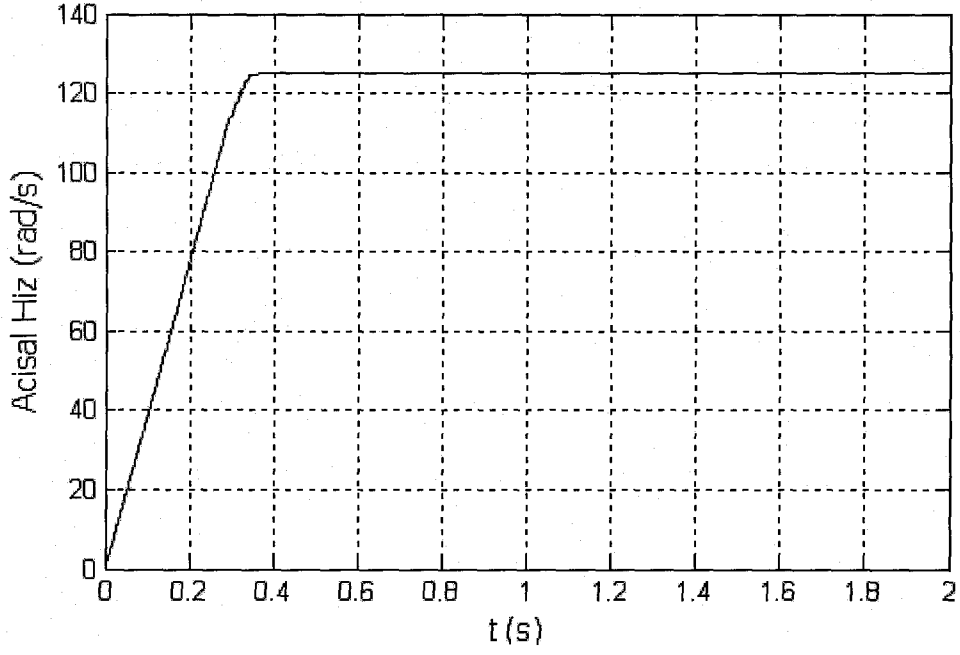
Şekil 5.34.b. ARM'nun, YBM denetleyici kullanılarak 20 Nm yükü çalışma durumunda elde edilen faz momentlerinin değişimi (Kararlı durum)



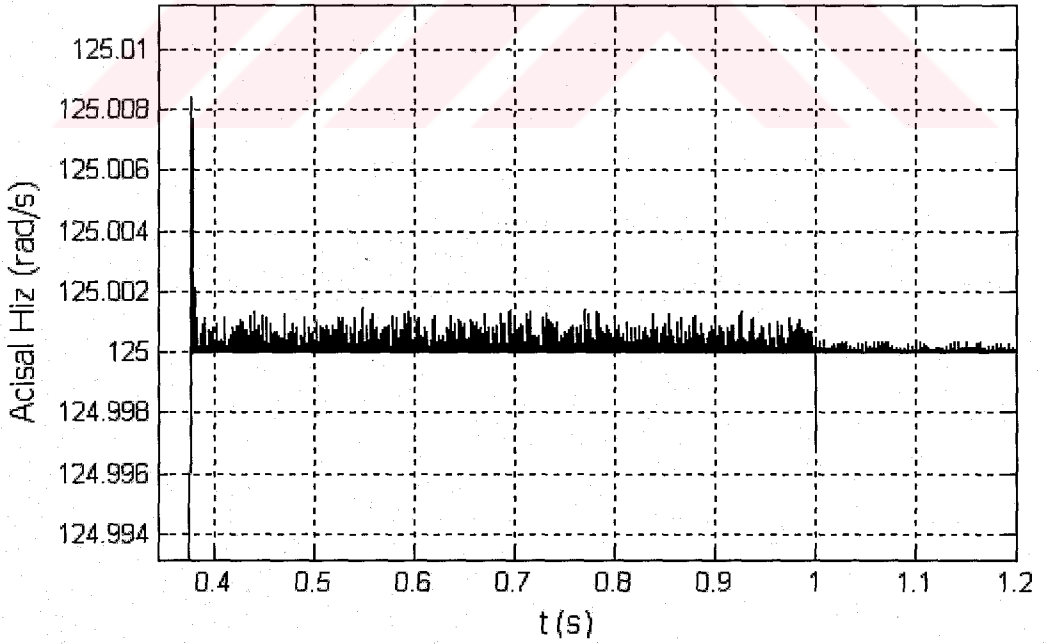
Şekil 5.35.a. ARM'nun, YBM denetleyici kullanılarak yüksüz kalkınma ve 20 Nm yükle ani yüklenme durumunda elde edilen mil momentinin değişimi



Şekil 5.35.b. ARM'nun, YBM denetleyici kullanılarak 20 Nm yüklü durumda elde edilen mil momentindeki dalgalanma (Kararlı durum)



Şekil 5.36.a. ARM'nun, YBM denetleyici kullanılarak yüksüz kalkınma ve 20 Nm yükle ani yüklenme durumunda elde edilen açısal hızın değişimi



Şekil 5.36.b. ARM'nun, YBM denetleyici kullanılarak 20 Nm yükle ani yüklenmesi anında elde edilen açısal hızın değişimi

BÖLÜM 6. DENEYLEYİCİ PERFORMANSLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu kısımda, Klasik PID, Bulanık Mantık PI (BMPI) ve Yeni Bulanık Mantık (YBM) Denetleyici olmak üzere üç farklı yapıdaki denetleyicilerin performans analizi yapılmaktadır. Analizler AR motorunun farklı çalışma koşulları için gerçekleştirilmektedir. Elde edilen hız cevapları, yükselme zamanı (t_r), kalıcı durum hatası (e_{ss}), maksimum yüzde aşma (O_s) ölçütleri açısından değerlendirilmektedir. Ayrıca herhangi bir moment denetimi yapılmaksızın gerçekleştirilen hız denetiminin, moment dalgalılığı üzerindeki etkisini görmek için denetleyici performansları değerlendirilirken yüzde moment dalgalılığı (M_d) ölçütü de dikkate alınarak ayrıntılı grafiklerle gösterilmektedir. Denklem (6.1), (6.2), (6.3), (6.4) ve (6.5)' de bu değerlendirme ölçütlerine ilişkin matematiksel tanımlamalar verilmektedir.

Maksimum yüzde aşma (O_s)

$$O_s = \frac{\omega_m(t)_{maks} - \omega_m(\infty)}{\omega_m(\infty)} \times 100 \quad (6.1)$$

Yükselme zamanı (t_r)

$$t_r = \min\{t \mid \omega_m(t) = \omega_{ref}\} \quad (6.2)$$

Kalıcı durum hatası (e_{ss})

$$e_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} (\omega_{ref} - \omega_m(t)) \quad (6.3)$$

Yüzde moment dalgalanması (M_d)

$$M_d = \frac{M_{maks} - M_{min}}{M_{maks} + M_{min}} \times 100 \quad (6.4)$$

Yüzde hız dalgalanması (ω_d)

$$\omega_d = \frac{\omega_m(t)_{maks} - \omega_m(t)_{min}}{\omega_m(t)_{maks} + \omega_m(t)_{min}} \times 100 \quad (6.5)$$

Burada t zamanı, ω_m motorun açısal hızını, ω_{ref} referans hız değerini ve M motorun ürettiği momenti ifade etmektedir. Maks ve min alt indisleri, ilgili büyüklüğün sırasıyla maksimum ve minimum değerlerini ifade etmektedir.

6.1. Yüksüz Çalışma Durumu

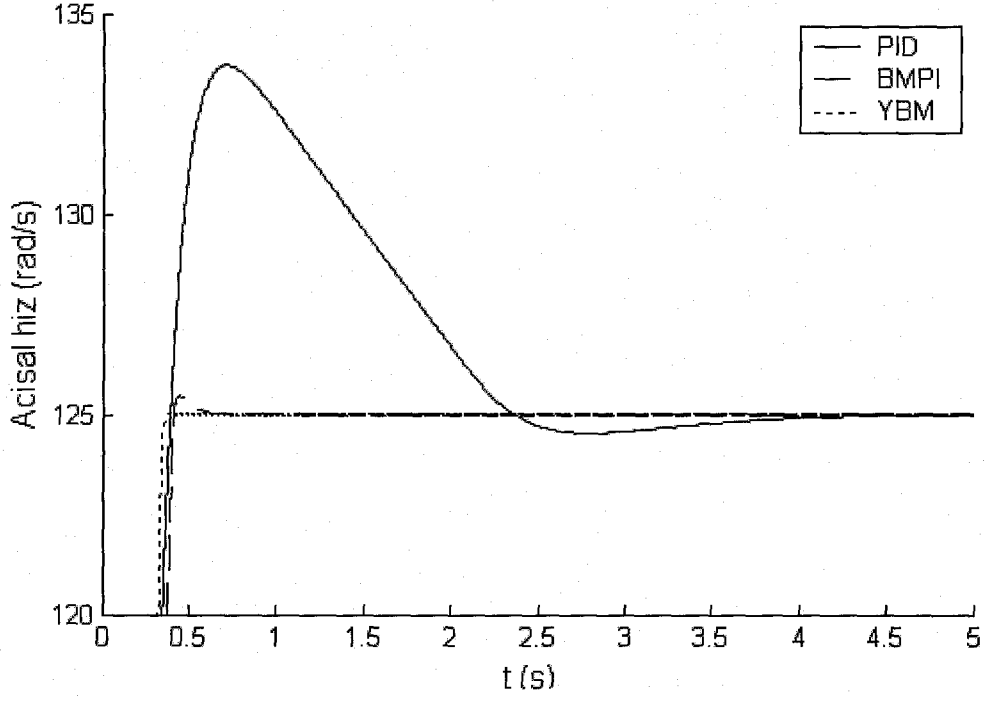
Bu çalışma koşulunda denetim sistemi motor mili yüksüz durumda iken çalıştırılmaktadır. Tüm grafikler 125 rad/s referans hız için elde edilmektedir.

Tablo 6.1' de yükselme zamanı (t_r), kalıcı durum hatası (e_{ss}), maksimum yüzde aşma (O_s), yüzde hız dalgalılığı (ω_d) ve yüzde moment dalgalılığı (M_d) ölçütleri açısından elde edilen sonuçlar verilmektedir. Buna göre; yükselme zamanı ve maksimum yüzde aşma ölçütü bakımından YBM, kalıcı durum hatası ölçütü bakımından BMPI ve YBM, yüzde hız dalgalılığı ve yüzde moment dalgalılığı ölçütü bakımından PID denetleyici diğerlerine göre daha iyi performans göstermektedir.

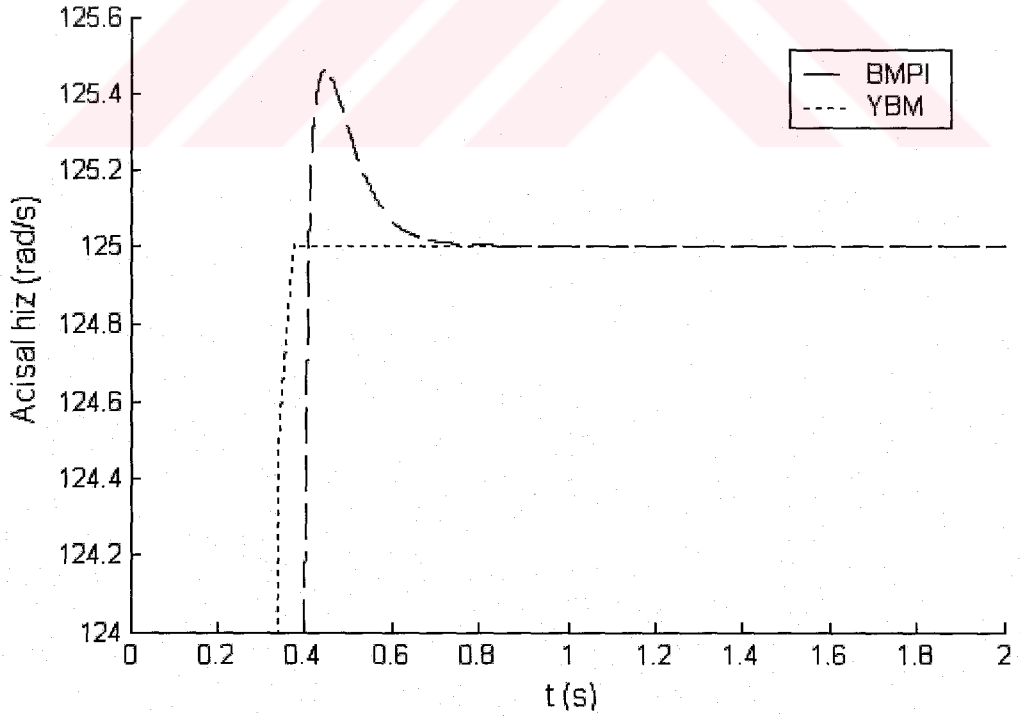
Şekil 6.1 ve Şekil 6.2' de hız denetimi sonucunda elde edilen hız grafikleri gösterilmektedir. Şekil 6.3, Şekil 6.4 ve Şekil 6.5' de yüksüz durumda motorun ürettiği momentteki dalgalanmalar gösterilmektedir. Şekil 6.6, Şekil 6.7 ve Şekil 6.8' de ise denetim sinyali olan referans akımdaki değişimler gösterilmektedir.

Tablo 6.1. ARM yüksüz durumda iken denetleyici performansları

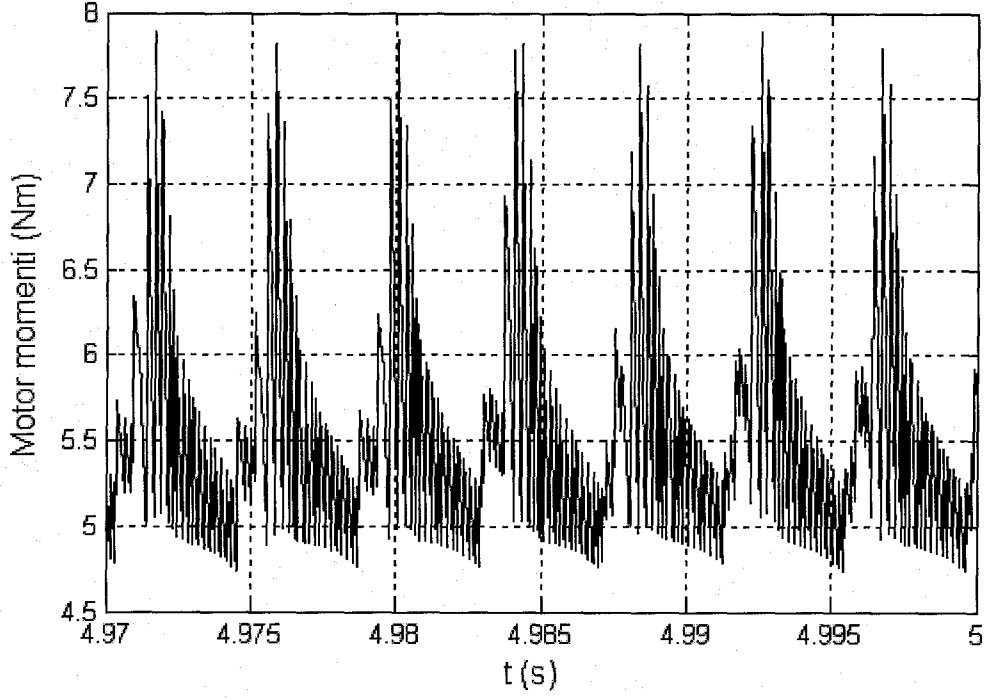
Ölçüt	Denetleyici tipi		
	PID	BMPI	YBM
t_r (s)	0,389	0,4095	0,3748
e_{ss}	0,0075	- 0,0004	- 0,0004
O_s	6,9752	0,3691	0,0063
ω_d	$3,0401 \cdot 10^{-4}$	$3,5999 \cdot 10^{-4}$	$5,1999 \cdot 10^{-4}$
M_d	24,9722	25,4428	77,5932



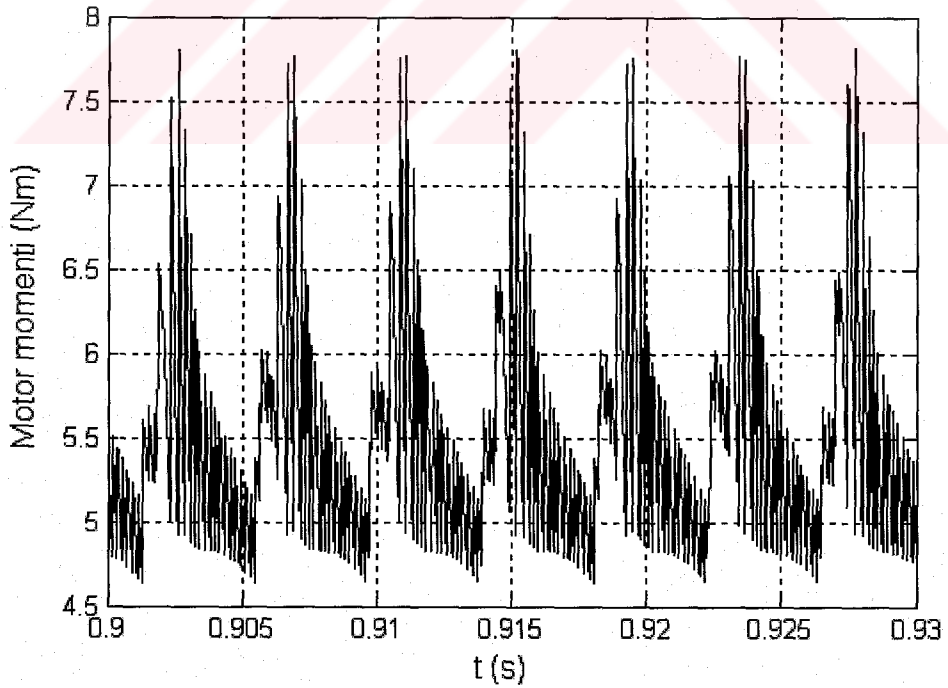
Şekil 6.1. PID, BMPI ve YBM denetleyiciler ile hız denetimi yapılan ARM' nun yüksüz durumdaki hız cevapları



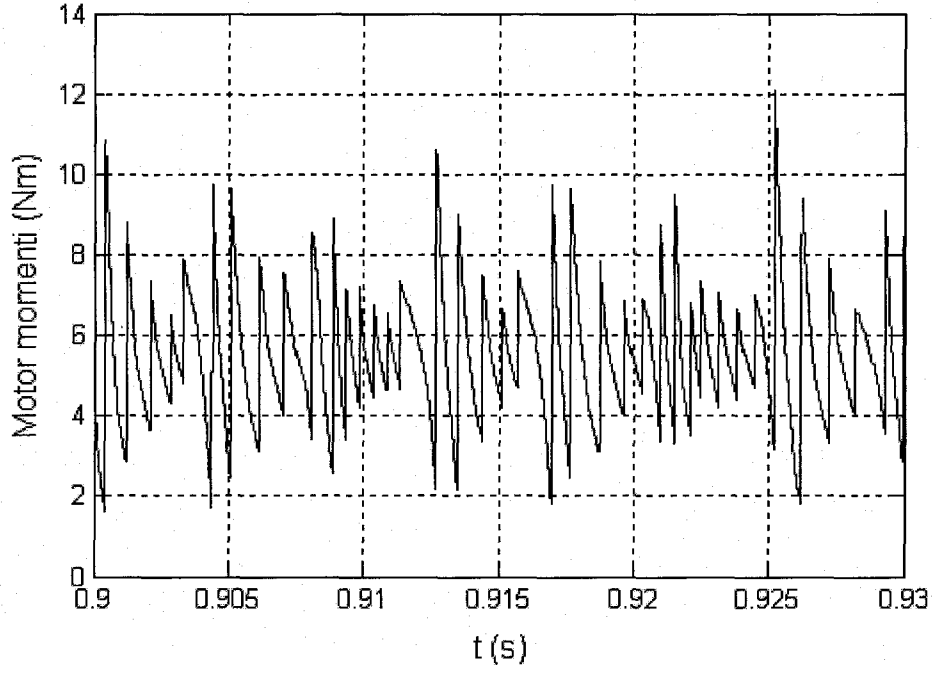
Şekil 6.2. BMPI ve YBM denetleyiciler ile hız denetimi yapılan ARM' nun yüksüz çalışma durumunda elde edilen hız cevapları



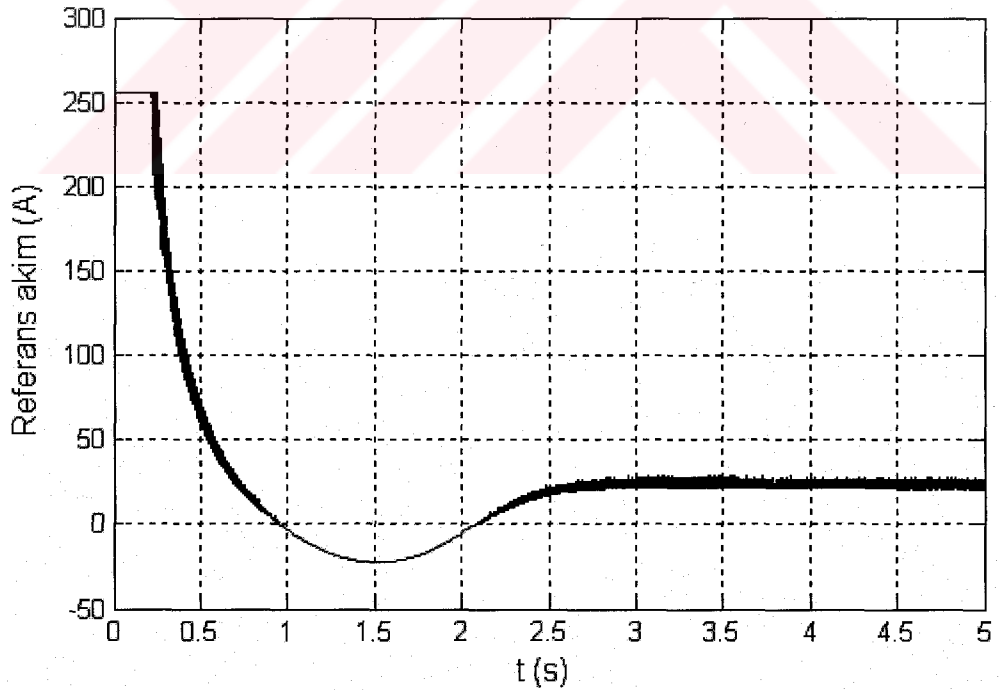
Şekil 6.3. PID Denetleyici ile hız denetimi yapılan ARM' nun yüksüz çalışma durumunda meydana gelen moment dalgalılığı



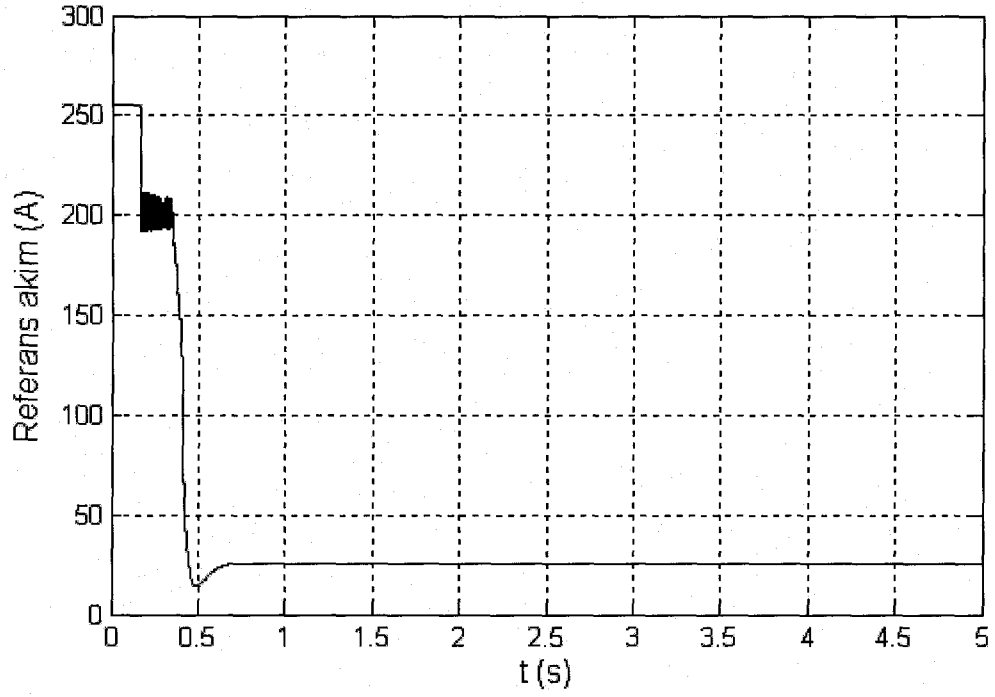
Şekil 6.4. BMPI ile hız denetimi yapılan ARM' nun yüksüz çalışma durumunda meydana gelen moment dalgalılığı



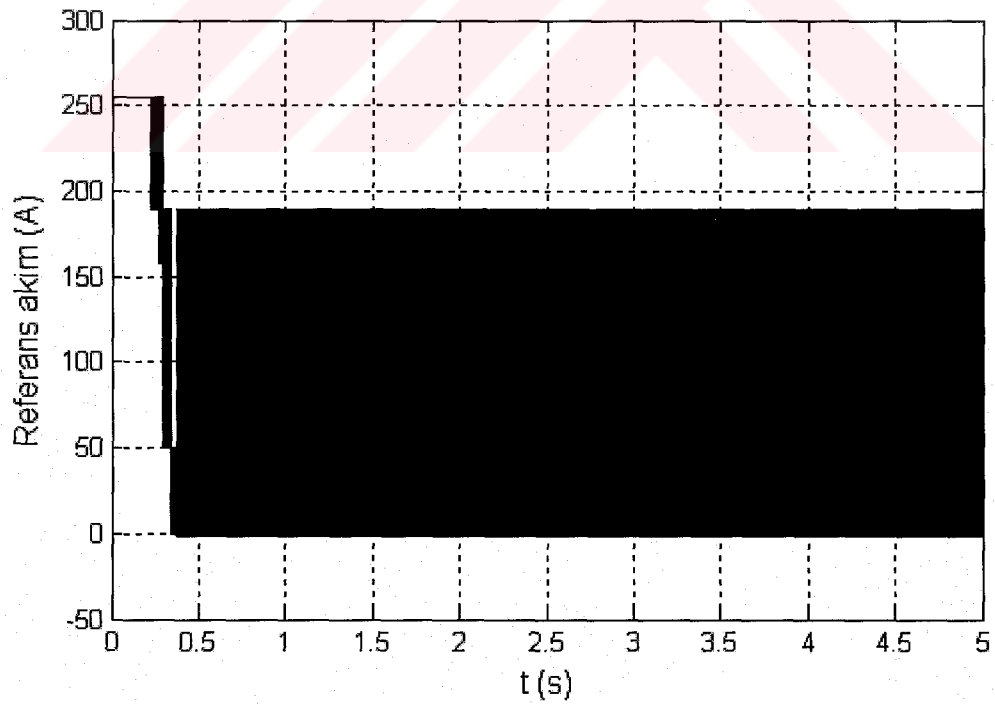
Şekil 6.5. YBM denetleyici ile hız denetimi yapılan ARM' nun yüksüz çalışma durumunda meydana gelen moment dalgalılığı



Şekil 6.6. ARM' nun, PID denetleyici kullanılarak yüksüz çalışma durumunda elde edilen referans akımın değişimi



Şekil 6.7. ARM' nun, BMPI denetleyici kullanılarak yüksüz çalışma durumunda elde edilen referans akımın değişimi



Şekil 6.8. ARM' nun, YBM denetleyici kullanılarak yüksüz çalışma durumunda elde edilen referans akımın değişimi

6.2. Yüklü Çalışma Durumu

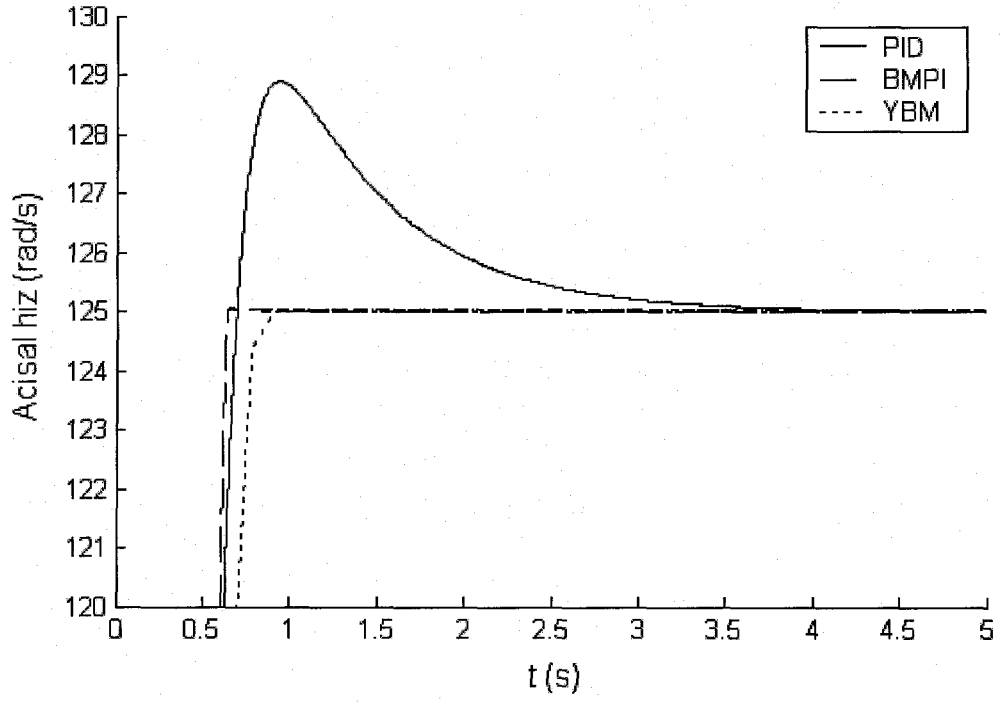
Bu çalışma koşulunda denetim sistemi, motor nominal yükünde (183 Nm) iken çalıştırılmaktadır. Tüm grafikler 125 rad/s referans hız için elde edilmektedir.

Tablo 6.2' de yükselme zamanı (t_{ry}), kalıcı durum hatası (e_{ssy}), maksimum yüzde aşma (O_{sy}), yüzde hız dalgalılığı (ω_{dy}) ve yüzde moment dalgalılığı (M_{dy}) ölçütleri açısından elde edilen sonuçlar verilmektedir. Buna göre; yükselme zamanı ölçütü bakımından BMPI, maksimum yüzde aşma, kalıcı durum hatası ve yüzde hız dalgalılığı ölçütü bakımından YBM, yüzde moment dalgalılığı ölçütü bakımından ise PID denetleyici diğerlerine göre daha iyi performans göstermektedir

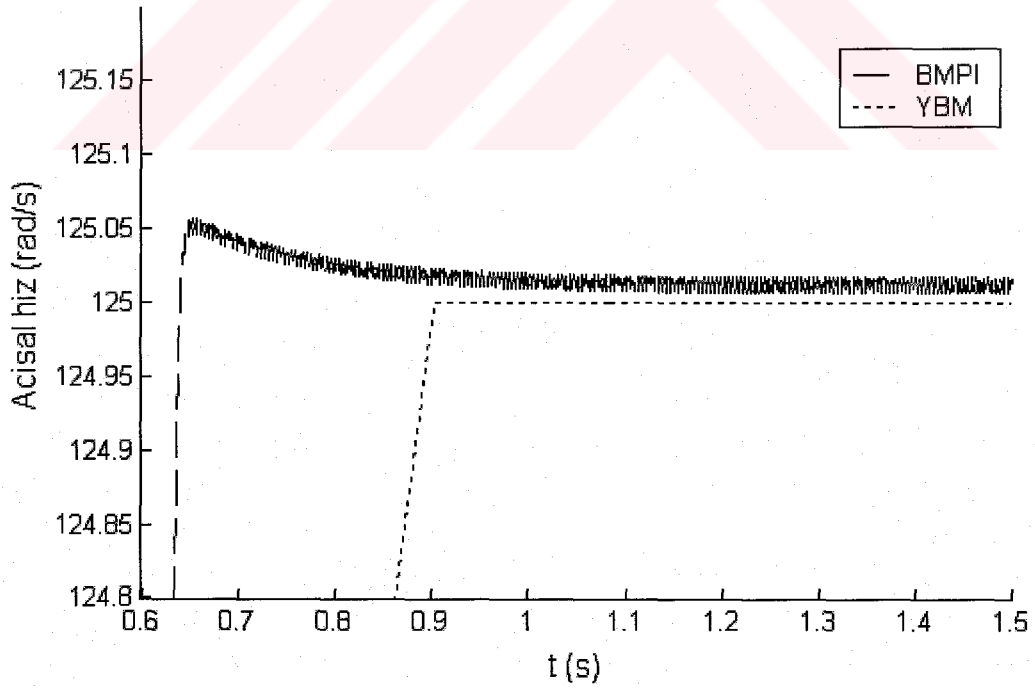
Şekil 6.9 ve Şekil 6.10' da denetimi sonucunda elde edilen hız grafikleri gösterilmektedir. Şekil 6.11, Şekil 6.12 ve Şekil 6.13' de motorun 183 Nm yüklü olduğu durumda motor mil momentinde meydana gelen dalgalanmalar gösterilmektedir. Şekil 6.14, Şekil 6.15 ve Şekil 6.16' da denetim sinyali olan referans akımdaki değişimler gösterilmektedir.

Tablo 6.2. ARM nominal yüklü (183 Nm) durumda iken denetleyici performansları

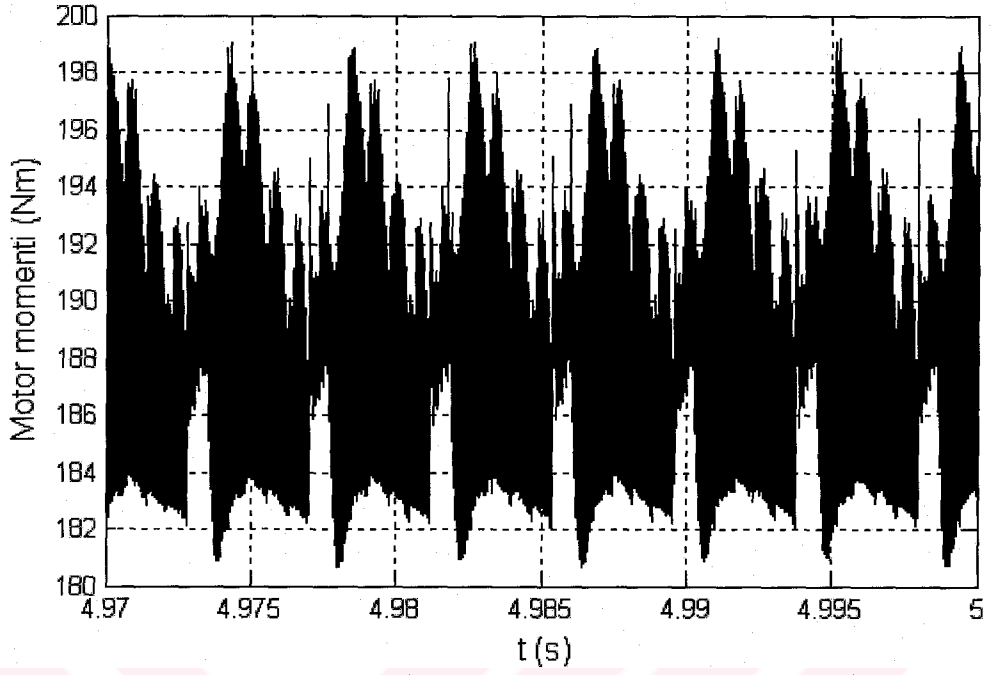
Ölçüt	Denetleyici tipi		
	PID	BMPI	YBM
t_{ry} (s)	0,694	0,6402	0,9025
e_{ssy} (rad/s)	- 0,0075	- 0,013	- 0,0002
O_{sy}	3,1081	0,0352	0,00023
ω_{dy}	83.10^{-5}	419.10^{-5}	15.10^{-5}
M_{dy}	4,9735	8,9934	9,0774



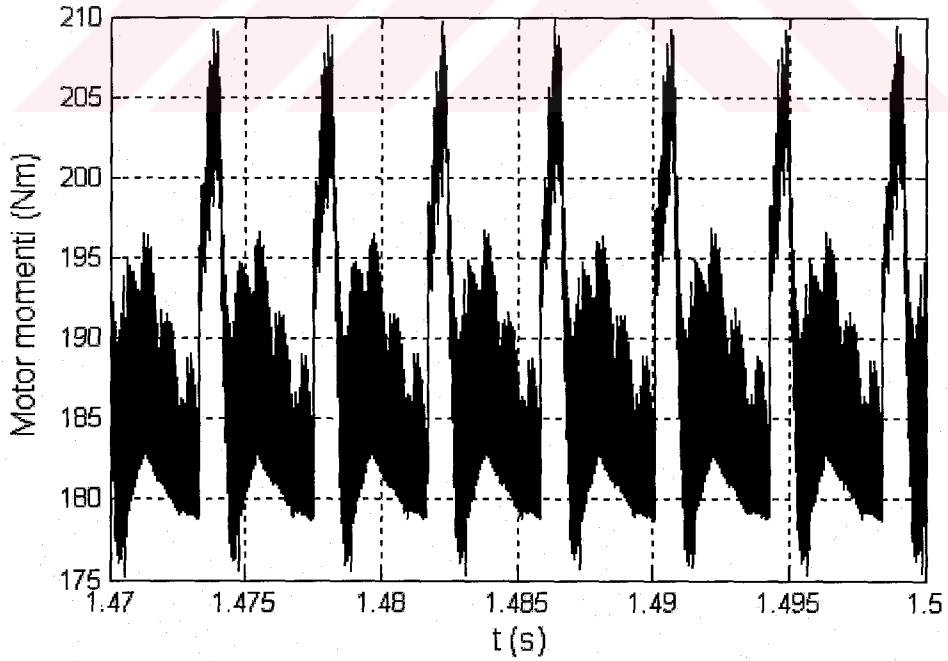
Şekil 6.9. PID, BMPI ve YBM denetleyiciler ile hız denetimi yapılan ARM' nun nominal yüklü çalışma durumunda elde edilen hız cevapları



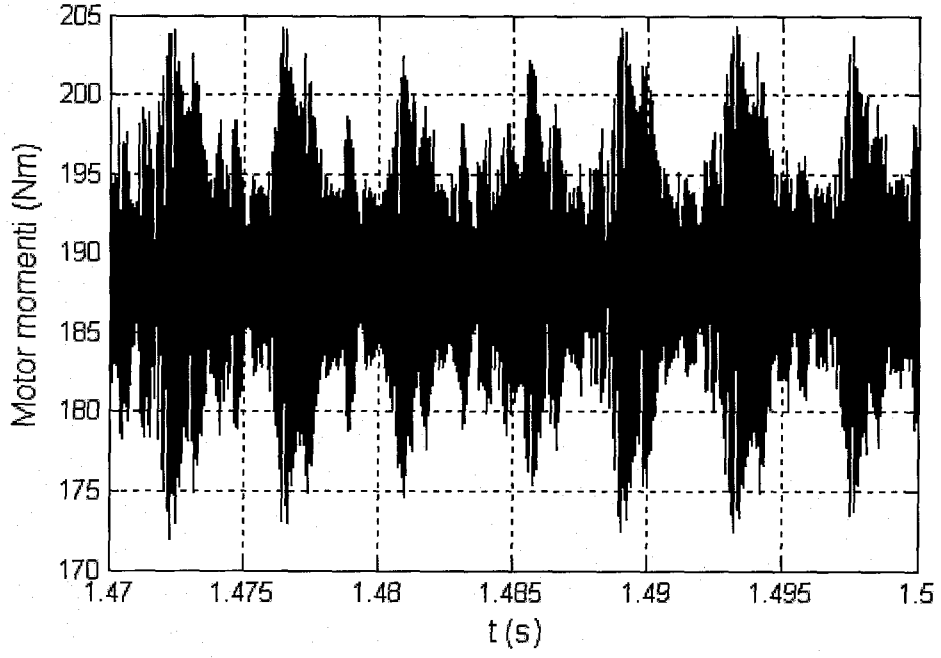
Şekil 6.10. BMPI ve YBM denetleyiciler ile hız denetimi yapılan ARM' nun nominal yüklü çalışma durumunda elde edilen hız cevapları



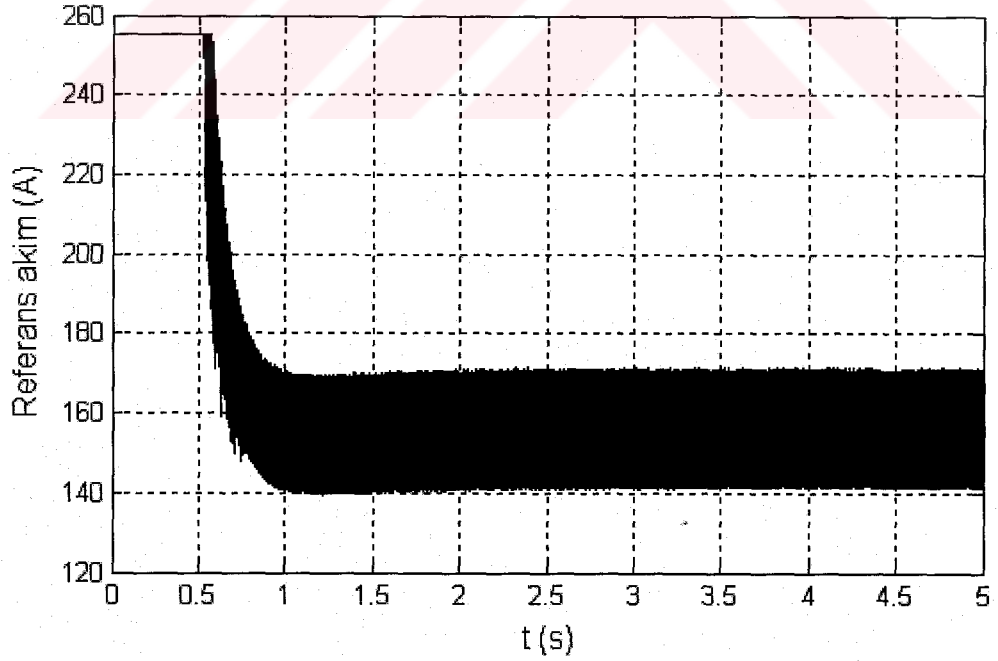
Şekil 6.11. PID Denetleyici ile hız denetimi yapılan ARM' nun nominal yükte (183 Nm) çalışma durumunda meydana gelen moment dalgalılığı



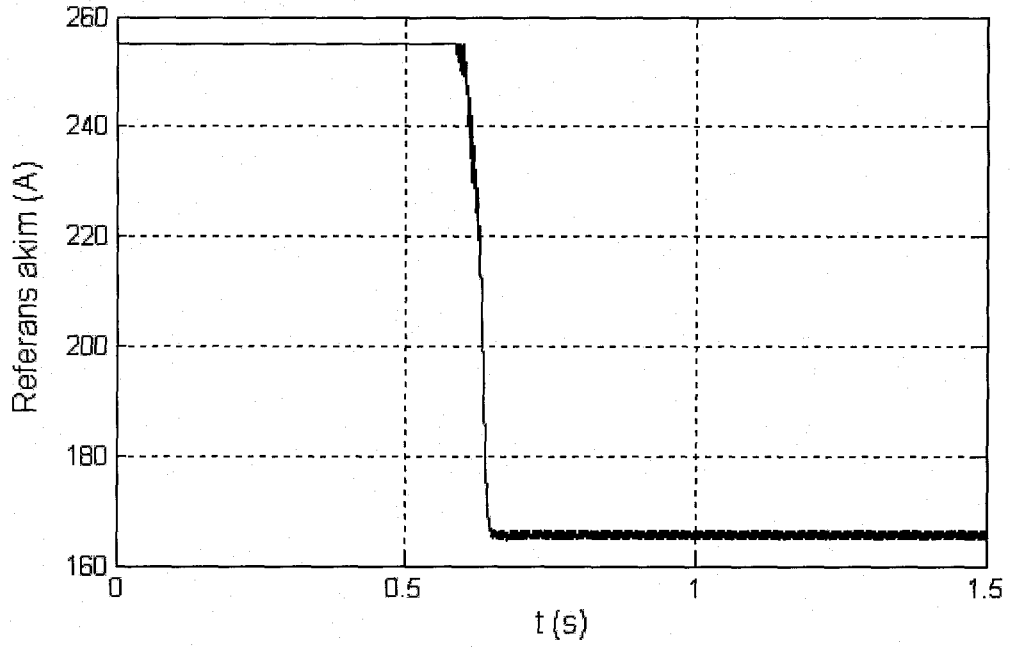
Şekil 6.12. BMPI ile hız denetimi yapılan ARM' nun nominal yükte (183 Nm) çalışma durumunda meydana gelen moment dalgalılığı



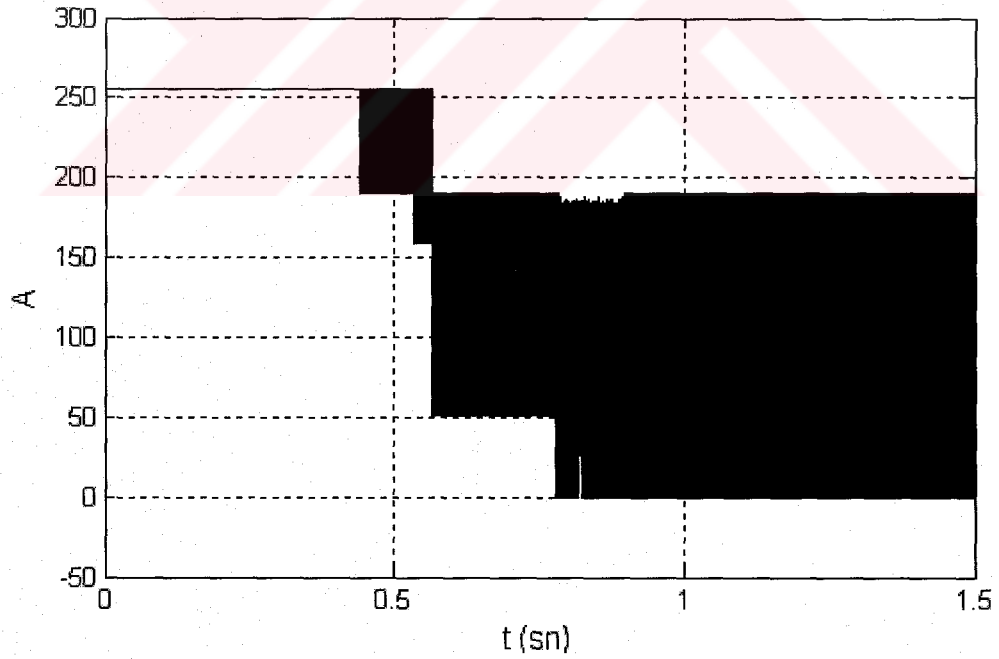
Şekil 6.13. YBM denetleyici ile hız denetimi yapılan ARM' nun nominal yükte (183 Nm) çalışma durumunda meydana gelen moment dalgalılığı



Şekil 6.14. ARM' nun, PID denetleyici kullanılarak nominal yüklü çalışma durumunda elde edilen referans akımın değişimi



Şekil 6.15. ARM' nun, BMPI denetleyici kullanılarak nominal yüklü çalışma durumunda elde edilen referans akımın değişimi



Şekil 6.16. ARM' nun, YBM denetleyici kullanılarak nominal yüklü çalışma durumunda elde edilen referans akımın değişimi

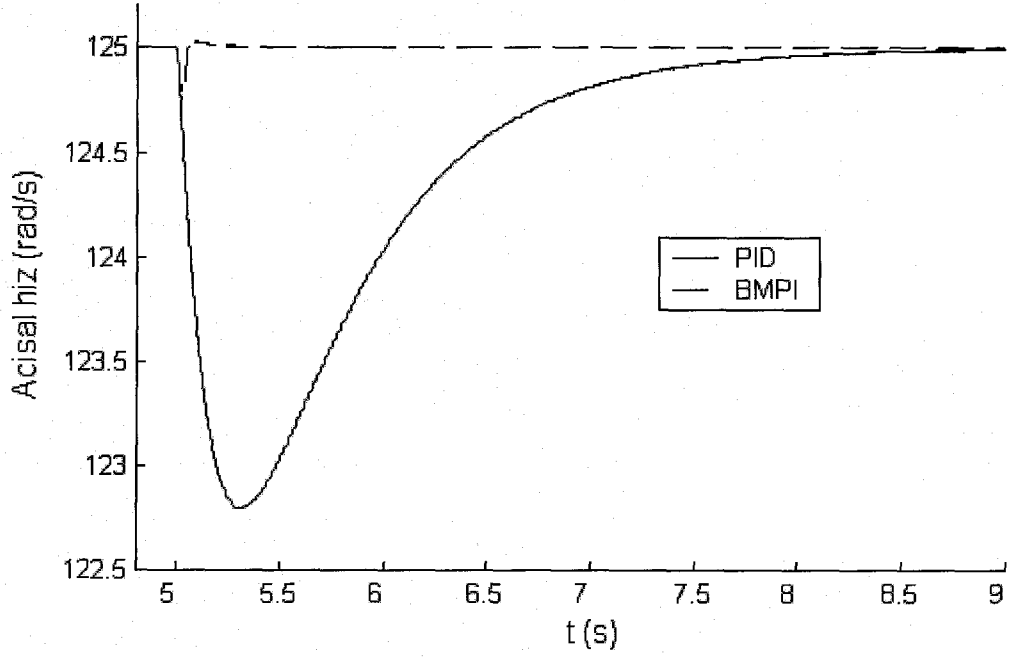
6.3. Ani Yükleme Durumu

Bu çalışma koşulunda, motor yüksüz olarak kalkındıktan sonra motora 5. saniyede ani olarak yük uygulanmaktadır. Uygulanan ani yük değerleri olarak nominal motor yükünün %10'u, %50'si ve %100'ü seçilmiştir. Tablo 6.3' de, Δt_{ri} ; yük uygulandıktan sonra hızın tekrar referans değere ulaşma süresini, $\Delta \omega_i$; yük uygulandıktan sonra hızda meydana gelen çökme miktarını, e_{ssi} ; yük uygulandıktan sonra meydana gelen kalıcı durum hatasını ve O_{si} ; yük uygulandıktan sonra meydana gelen maksimum yüzde aşma miktarını ifade etmektedir. Buna göre yük uygulandıktan sonra; hızın tekrar referans değere ulaşma süresi, meydana gelen kalıcı durum hatası ve hızda meydana gelen azalma miktarı bakımından YBM diğerlerine göre daha iyi performans göstermektedir. Maksimum yüzde aşma miktarı açısından ise YBM ve PID denetleyiciler eşit ve BMPI denetleyiciye göre daha iyi bir performans göstermektedir.

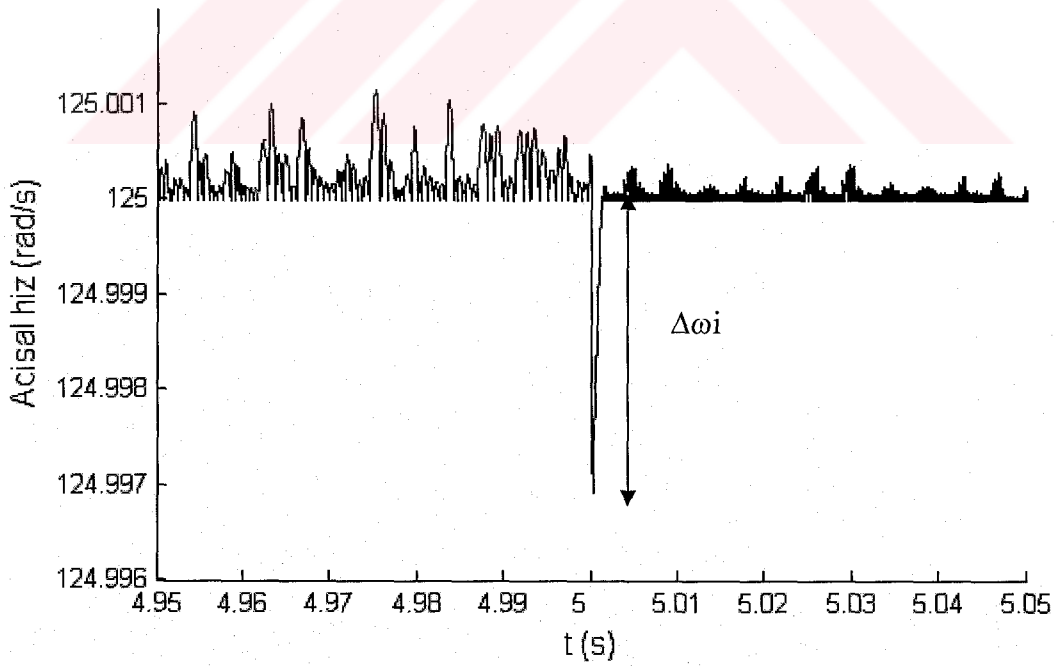
Şekil 6.17 ve Şekil 6.18' de 125 rad/s referans hız için 20 Nm ani yükleme durumunda elde edilen hız grafikleri gösterilmektedir. Şekil 6.19 ve Şekil 6.20' de 125 rad/s referans hız için 90 Nm ani yükleme durumunda elde edilen hız grafikleri gösterilmektedir. Şekil 6.21 ve Şekil 6.22' de 125 rad/s referans hız için 183 Nm ani yükleme durumunda elde edilen hız grafikleri gösterilmektedir. Şekil 6.23' den Şekil 6.31' e kadar olan grafiklerde ise yukarıda belirtilen yük değerleri için referans akımdaki değişim gösterilmektedir.

Tablo 6.3. ARM ani yüklü durumda iken denetleyici performansları

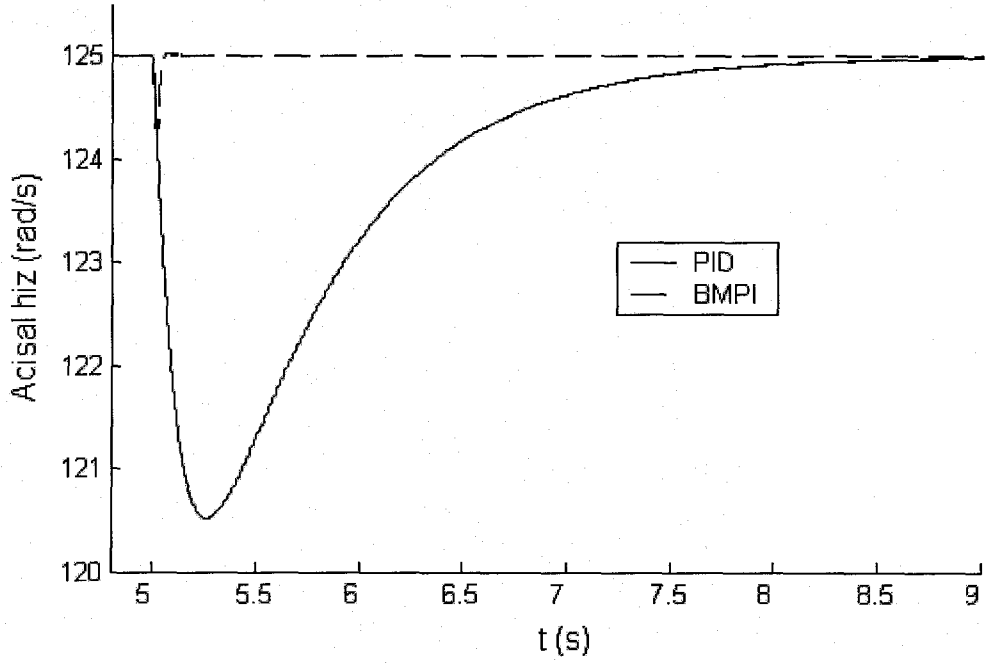
	Denetleyici tipi								
	PID			BMPI			YBM		
YÜK(Nm)	20	90	183	20	90	183	20	90	183
Δt_{ri} (s)	2,8	3,266	3,5191	0,0534	0,0465	0,0444	0,0013	0,0063	0,011
$\Delta \omega_i$ (rad/s)	2,202	4,4807	6,4052	0,2196	0,7604	1,0629	0,0031	0,0196	0,0543
e_{ssi} (rad/s)	0,0075	0,003	0,006	-0,0017	-0,0032	-0,0125	-0,0001	-0,0001	-0,0001
O_{si}	$\cong 0$	$\cong 0$	$\cong 0$	0,0223	0,0138	0,0037	$\cong 0$	$\cong 0$	$\cong 0$



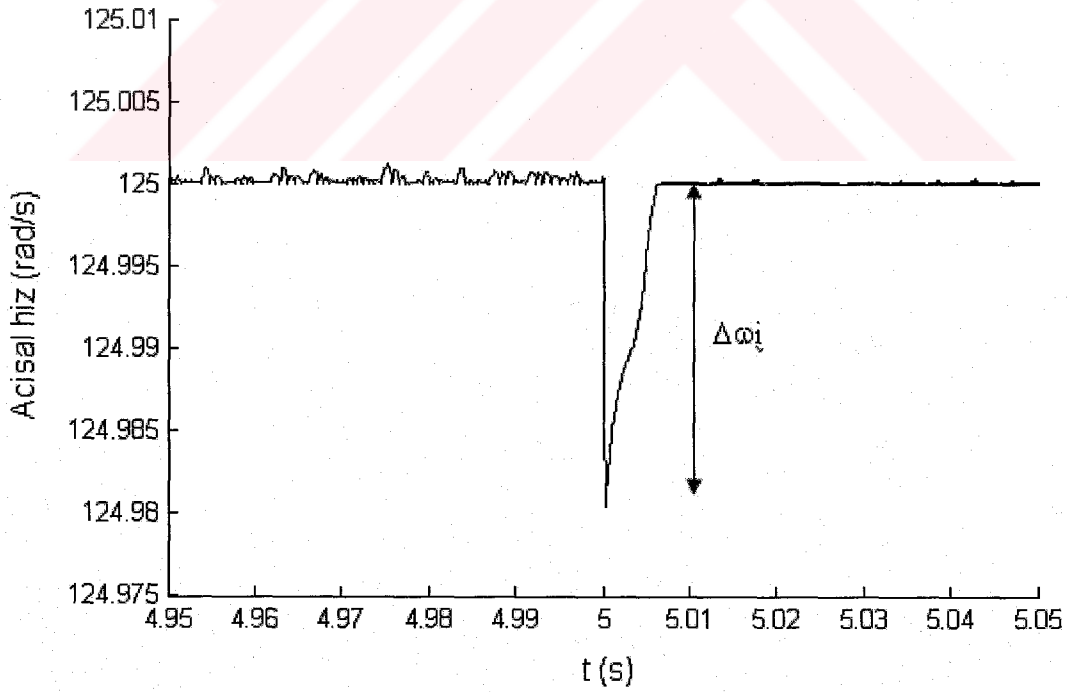
Şekil 6.17. PID ve BMPI ile hız denetimi yapılan ARM' nun 20 Nm ani yüklenme durumunda elde edilen hız cevapları



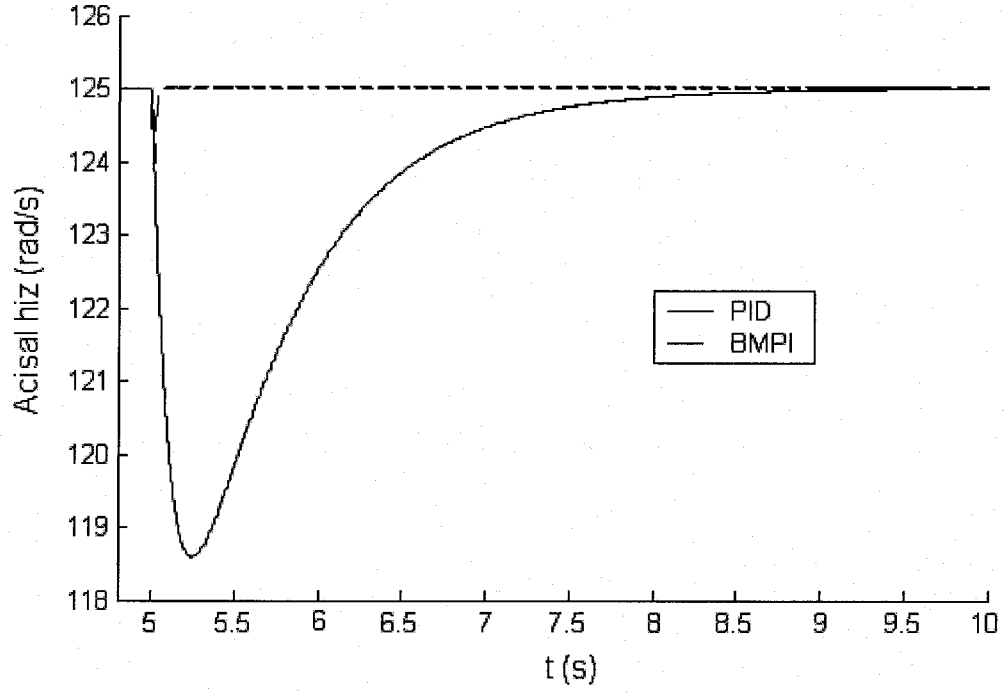
Şekil 6.18. YBMD ile hız denetimi yapılan ARM' nun 20 Nm ani yüklenme durumunda elde edilen hız cevabı



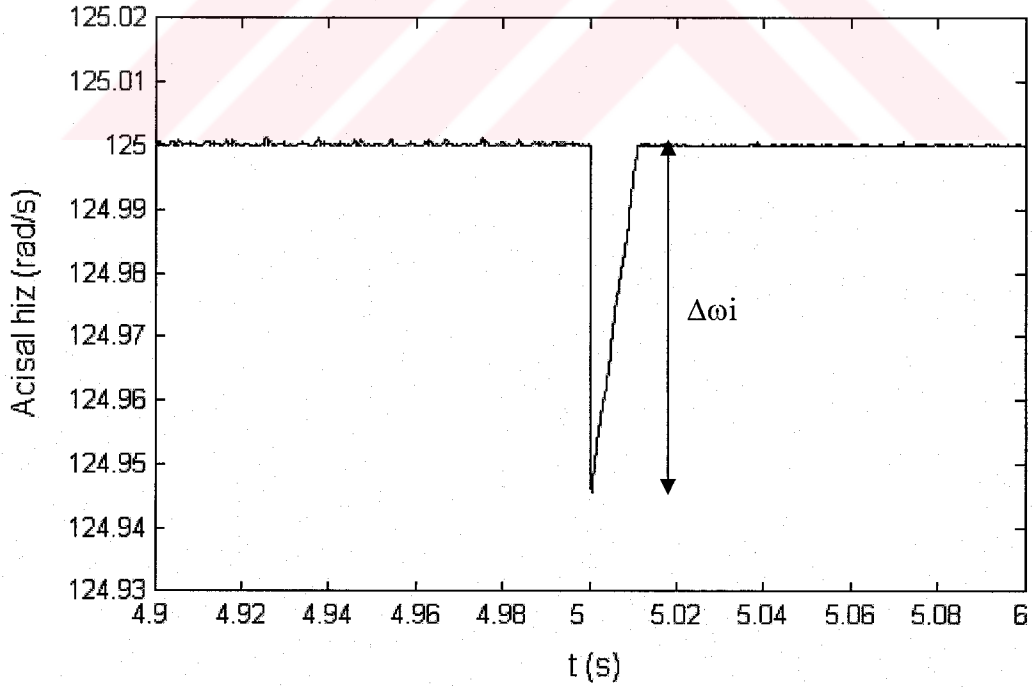
Şekil 6.19. PID ve BMPI denetleyici ile hız denetimi yapılan ARM' nun 90 Nm ani yüklenme durumunda elde edilen hız cevapları



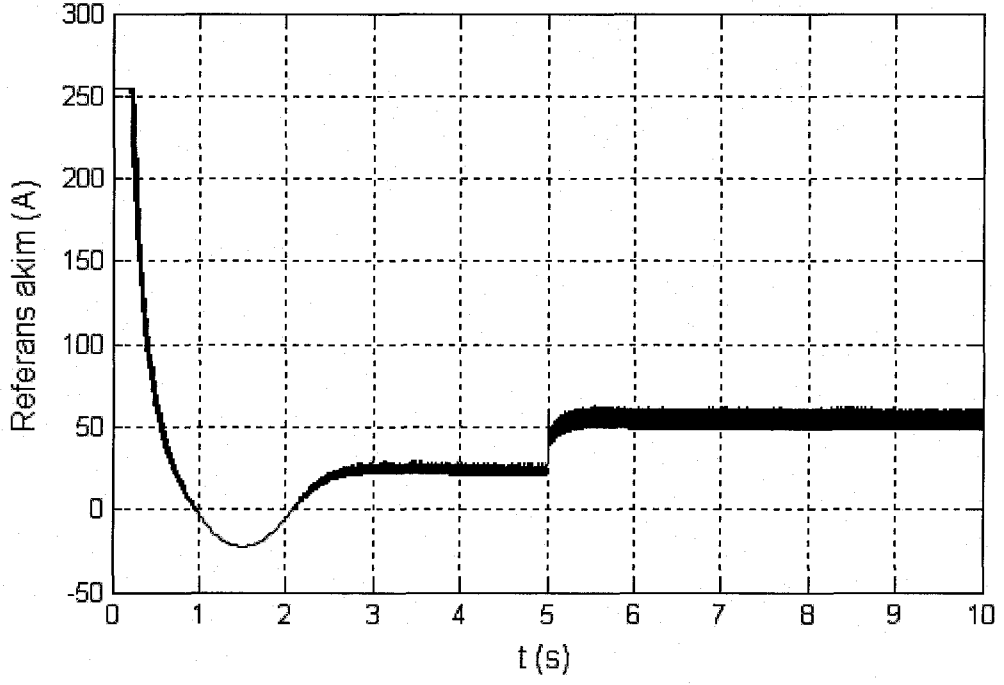
Şekil 6.20. YBM denetleyici ile hız denetimi yapılan ARM' nun 90 Nm ani yüklenme durumunda elde edilen hız cevabı



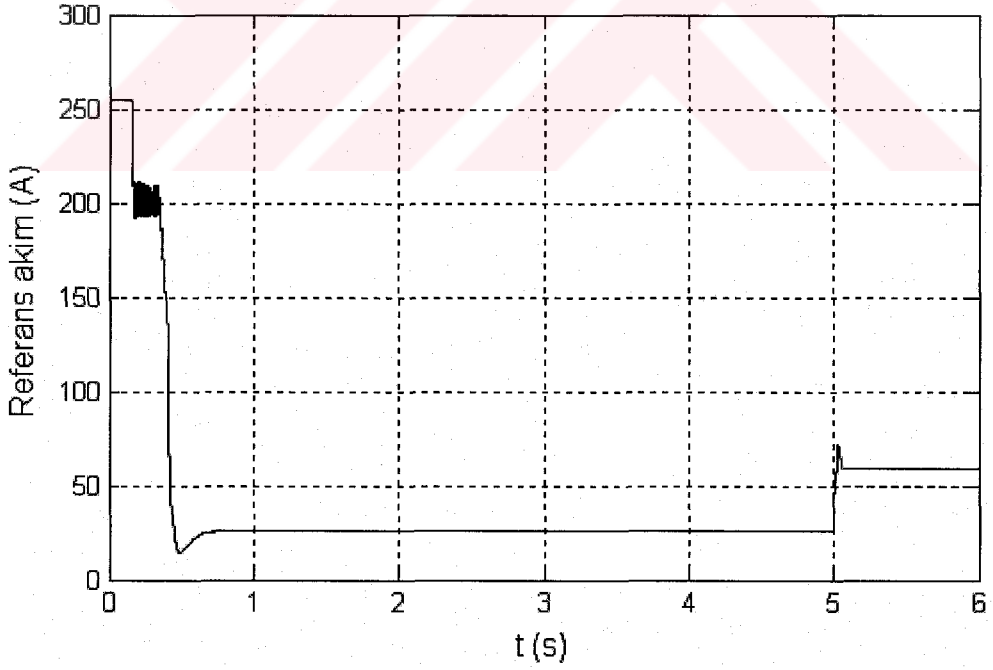
Şekil 6.21. PID ve BMPI denetleyici ile hız denetimi yapılan ARM' nun 183 Nm ani yüklenme durumunda elde edilen hız cevapları



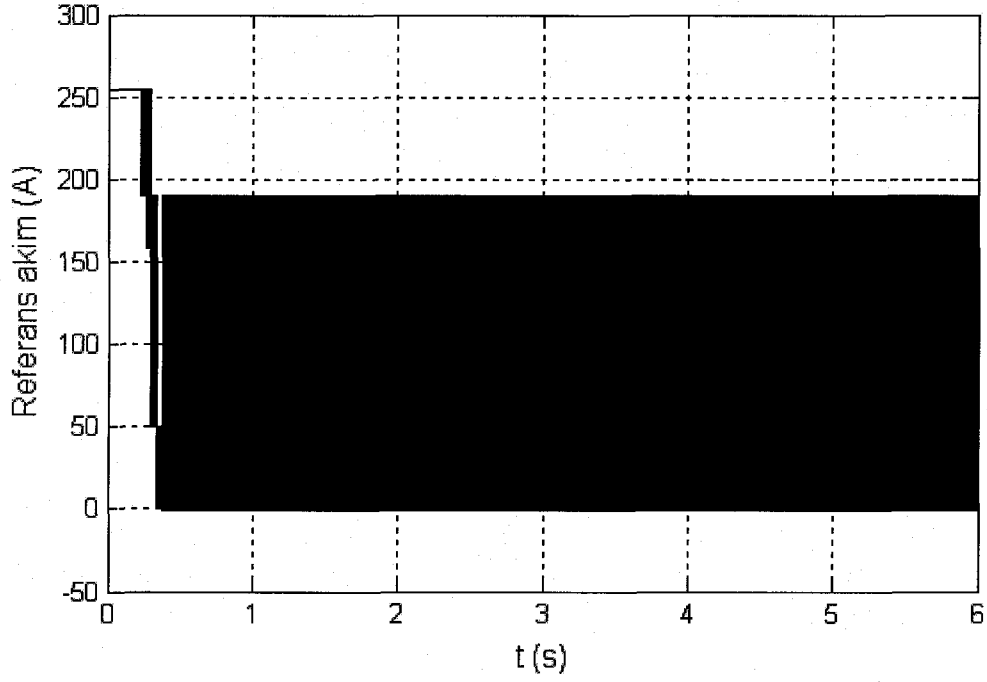
Şekil 6.22. YBM denetleyici ile hız denetimi yapılan ARM' nun 183 Nm ani yüklenme durumunda elde edilen hız cevapları



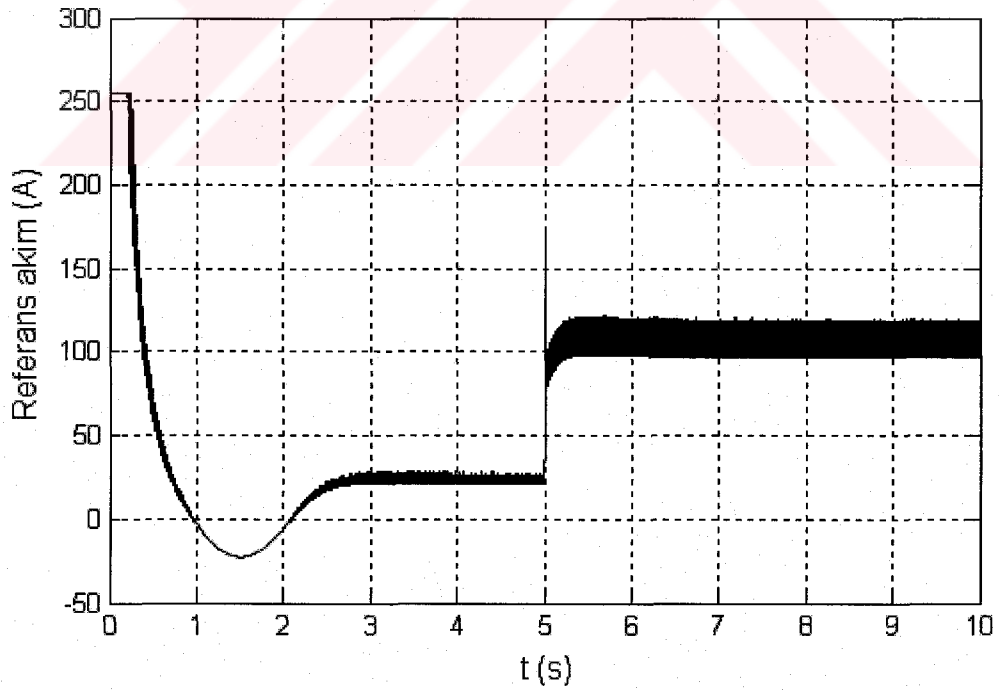
Şekil 6.23. PID denetleyici ile hız denetimi yapılan ARM' nun 20 Nm ani yüklenme durumunda elde edilen referans akım değişimi



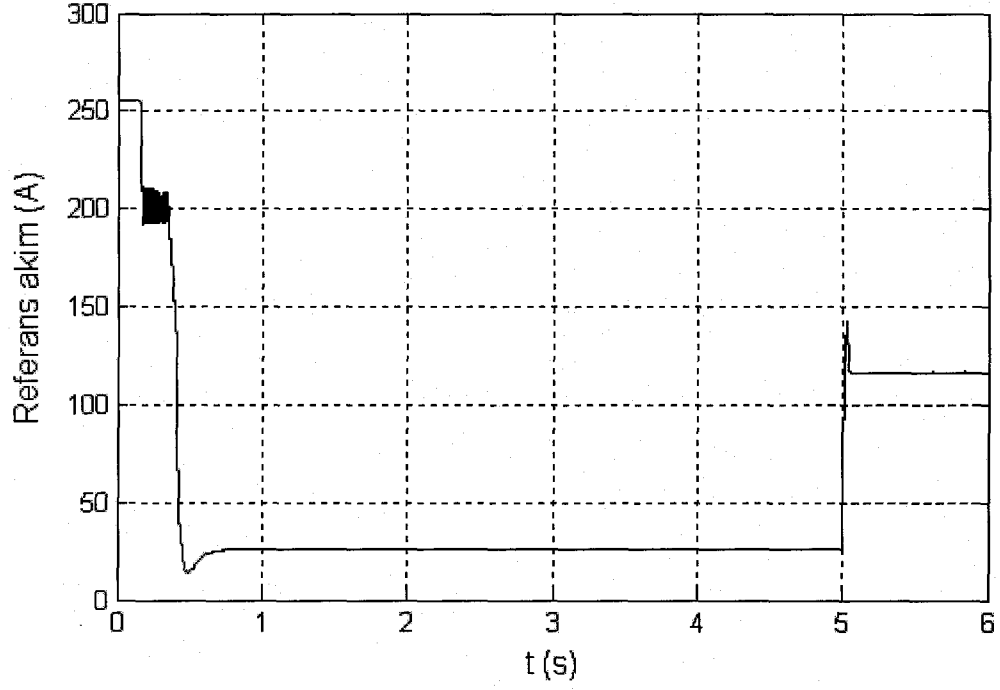
Şekil 6.24. BMPI denetleyici ile hız denetimi yapılan ARM' nun 20 Nm ani yüklenme durumunda elde edilen referans akım değişimi



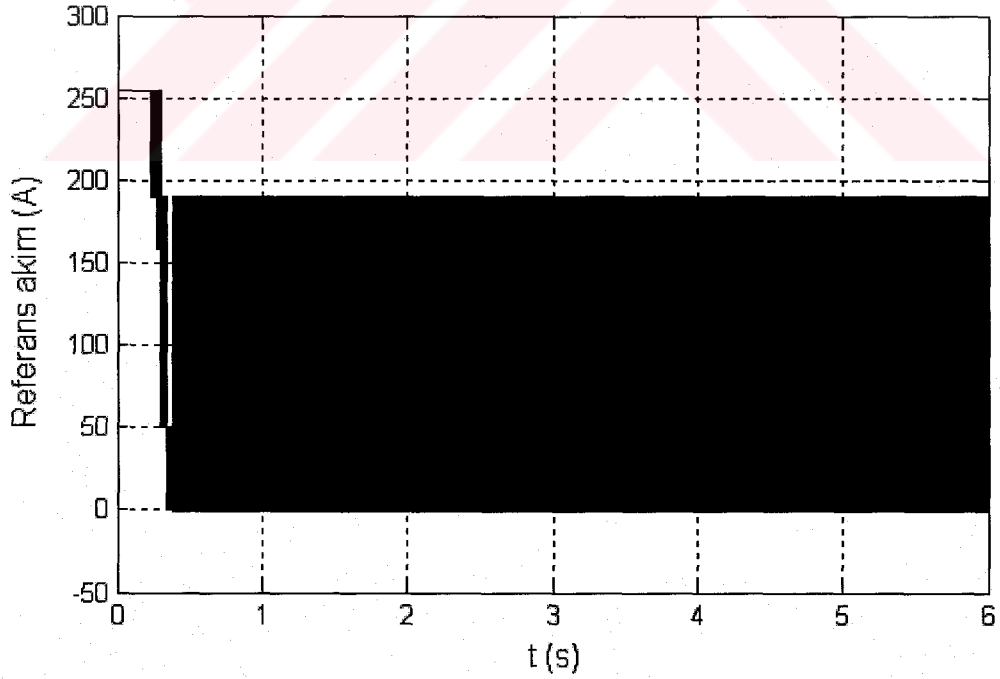
Şekil 6.25. YBM denetleyici ile hız denetimi yapılan ARM' nun 20 Nm ani yüklenme durumunda elde edilen referans akım değişimi



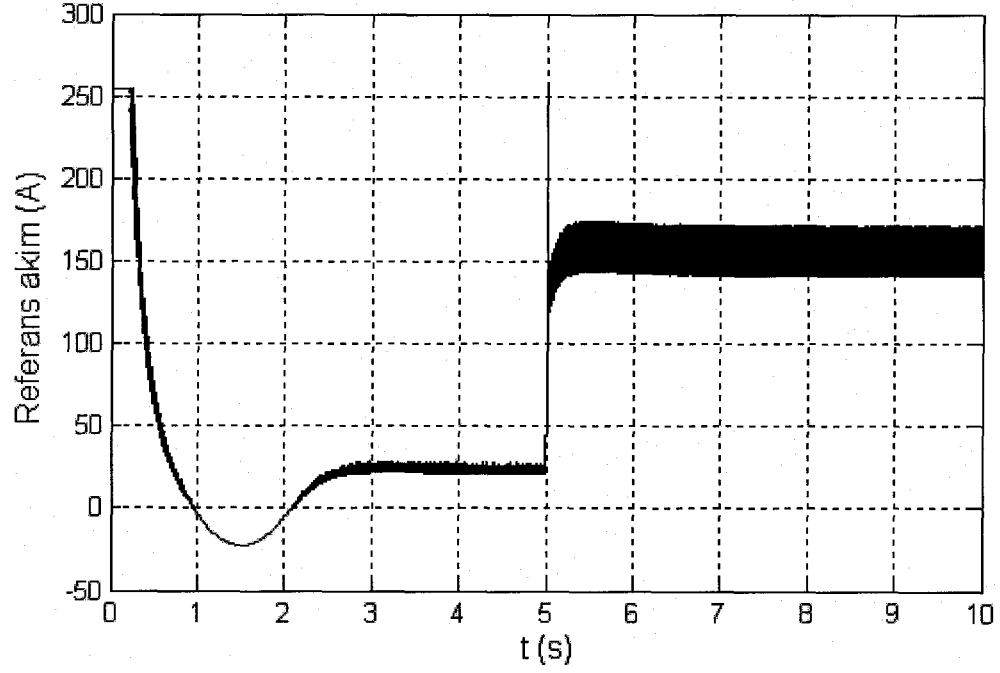
Şekil 6.26. PID denetleyici ile hız denetimi yapılan ARM' nun 90 Nm ani yüklenme durumunda elde edilen referans akım değişimi



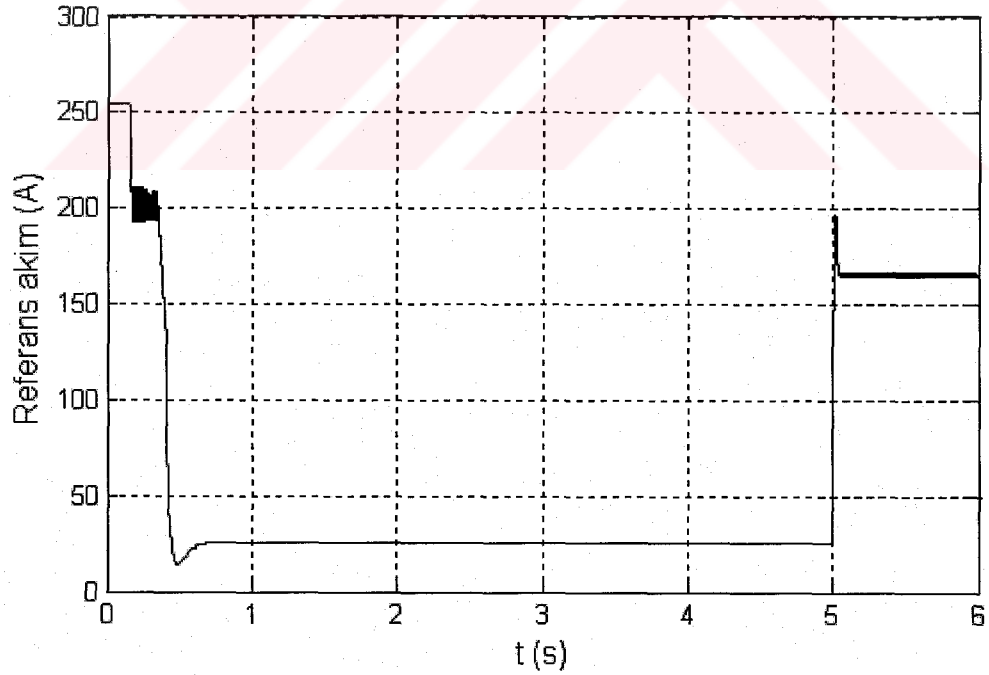
Şekil 6.27. BMPI denetleyici ile hız denetimi yapılan ARM' nun 90 Nm ani yüklenme durumunda elde edilen referans akım değişimi



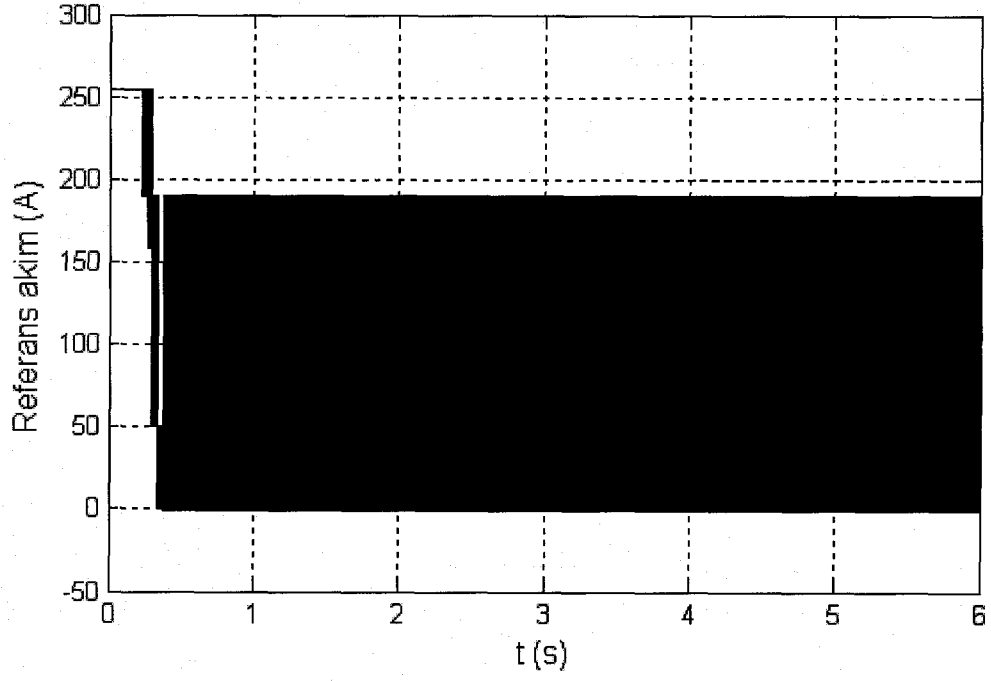
Şekil 6.28. YBM denetleyici ile hız denetimi yapılan ARM' nun 90 Nm ani yüklenme durumunda elde edilen referans akım değişimi



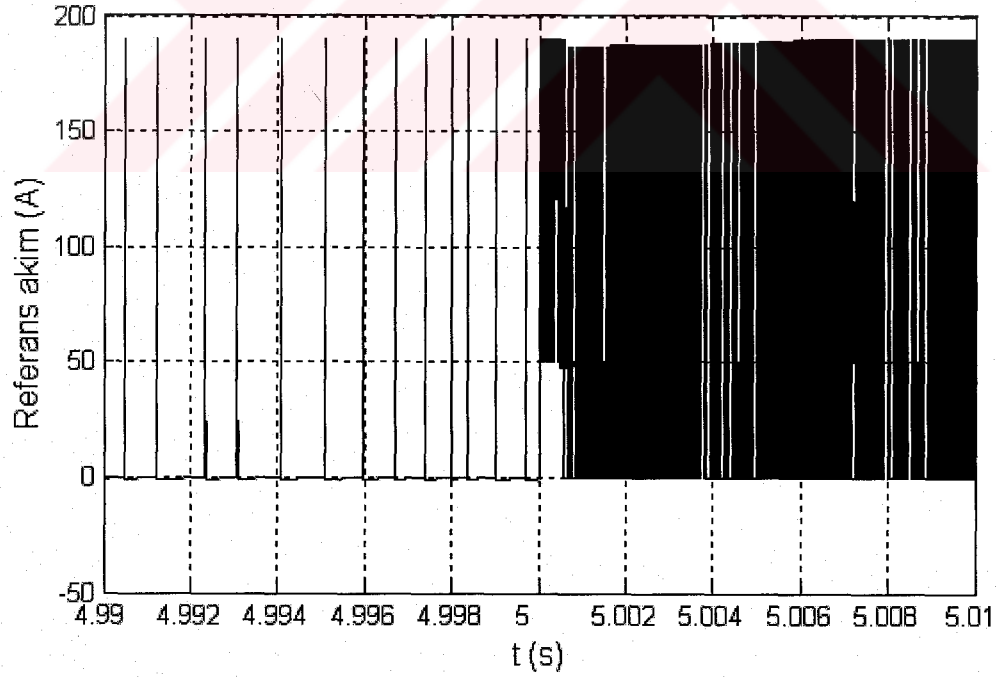
Şekil 6.29. PID denetleyici ile hız denetimi yapılan ARM' nun 183 Nm ani yüklenme durumunda elde edilen referans akım değişimi



Şekil 6.30. BMPI denetleyici ile hız denetimi yapılan ARM' nun 183 Nm ani yüklenme durumunda elde edilen referans akım değişimi



Şekil 6.31.a. YBM denetleyici ile hız denetimi yapılan ARM' nun 183 Nm ani yüklenme durumunda elde edilen referans akım değişimi



Şekil 6.31.b. YBM denetleyici ile hız denetimi yapılan ARM' nun 183 Nm ani yüklenme durumunda elde edilen referans akım değişimi

6.4. Sinüs Yükle Yüklenme Durumu

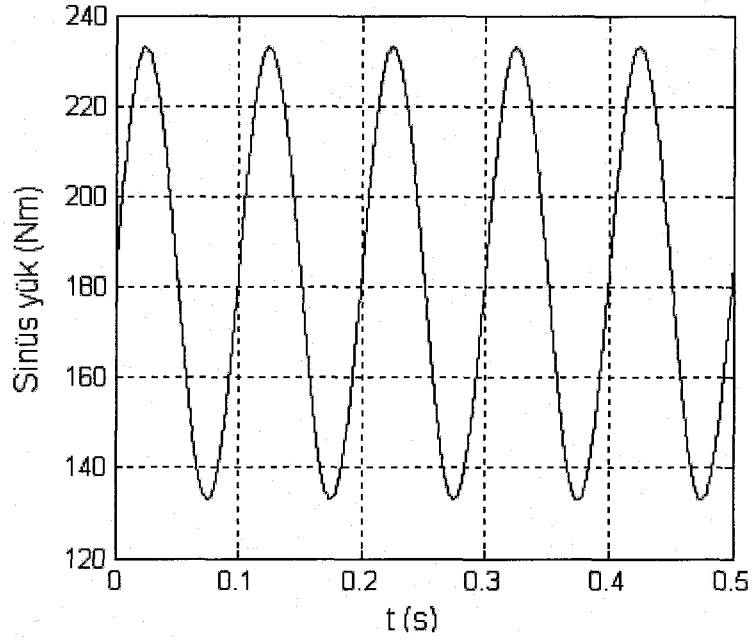
Bu çalışma koşulunda denetim sistemi, motor mili, nominal motor yükünün (183 Nm) 50 Nm üzerinde ve 50 Nm altında salınan 10 Hz frekanslı bir sinüs yükle yüklü durumda iken çalıştırılmaktadır. Şekil 6.32' de motora uygulanan sinüs yükün zamana göre değişimi gösterilmektedir. Tüm grafikler 125 rad/s referans hız için elde edilmektedir.

Tablo 6.4' de motor sinüs yüklü durumda iken yükselme zamanı (t_{rs}) ve yüzde hız dalgalılığı (ω_{ds}) ölçütleri açısından elde edilen sonuçlar verilmektedir. Buna göre; yükselme zamanı ölçütü bakımından BMPI ve yüzde hız dalgalılığı ölçütü açısından YBM denetleyici diğerlerine göre daha iyi bir performans göstermektedir.

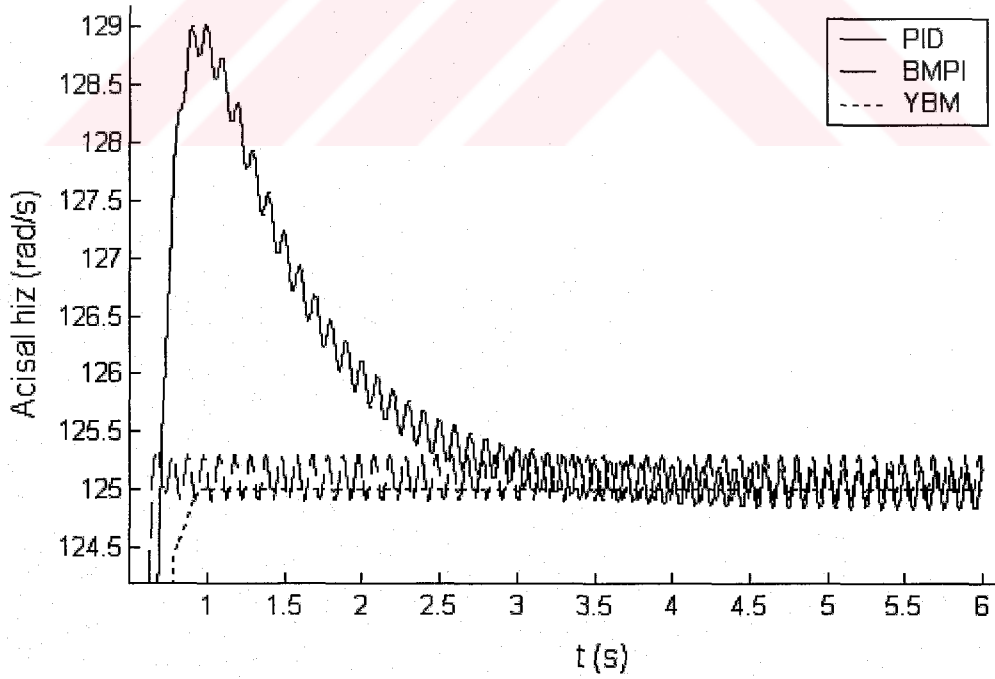
Şekil 6.33.a ve Şekil 6.33.b' de denetim sonucunda elde edilen hız grafikleri gösterilmektedir. Şekil 6.34, Şekil 6.35 ve Şekil 6.36' da denetim sinyali olan referans akımdaki değişimler gösterilmektedir.

Tablo 6.4. ARM sinüs yükle yüklü durumda iken denetleyici performansları

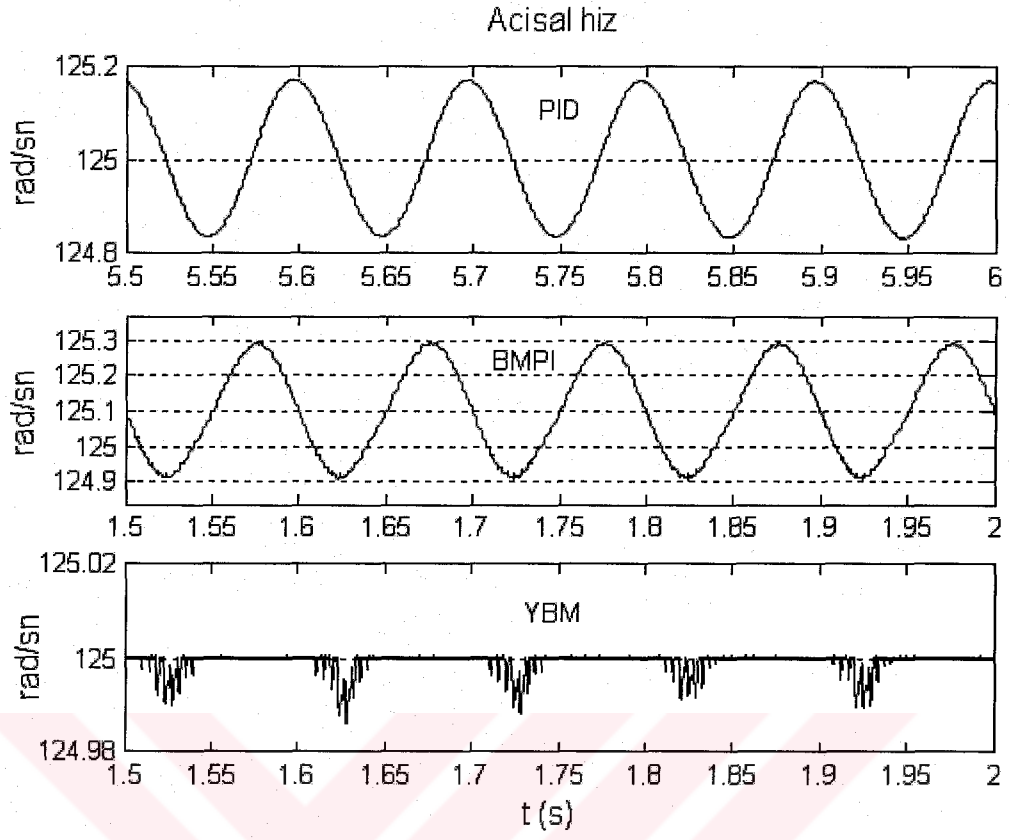
Ölçüt	Denetleyici tipi		
	PID	BMPI	YBM
t_{rs}	0,6972	0,6405	0,9433
ω_{ds}	0,1353	0,1535	$1,5999.10^{-4}$



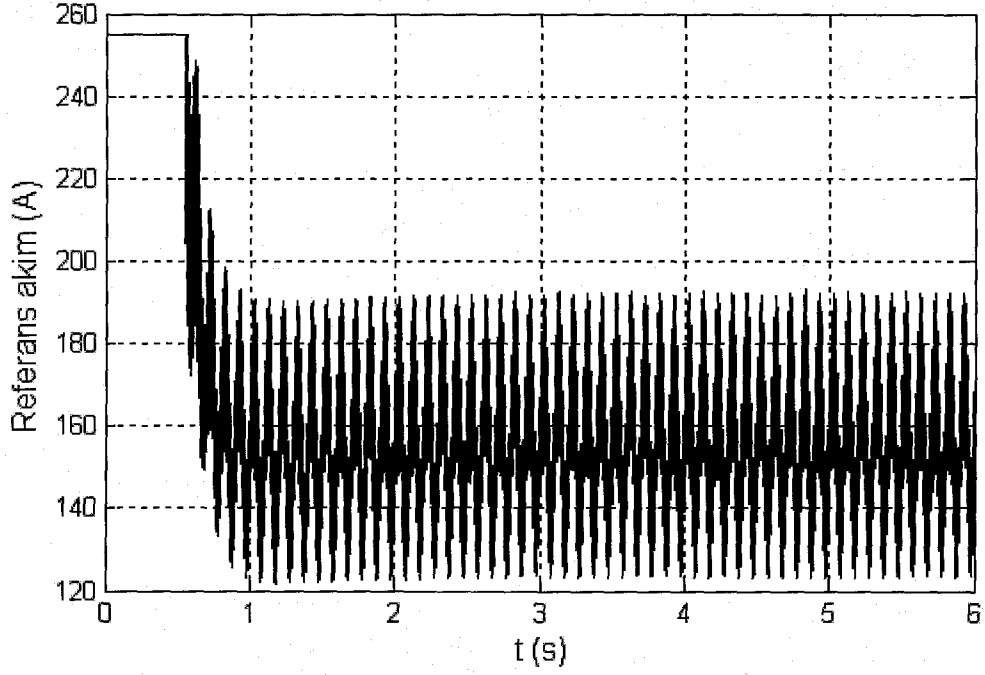
Şekil 6.32. Motora uygulanan sinüs yükün zamana göre değişimi



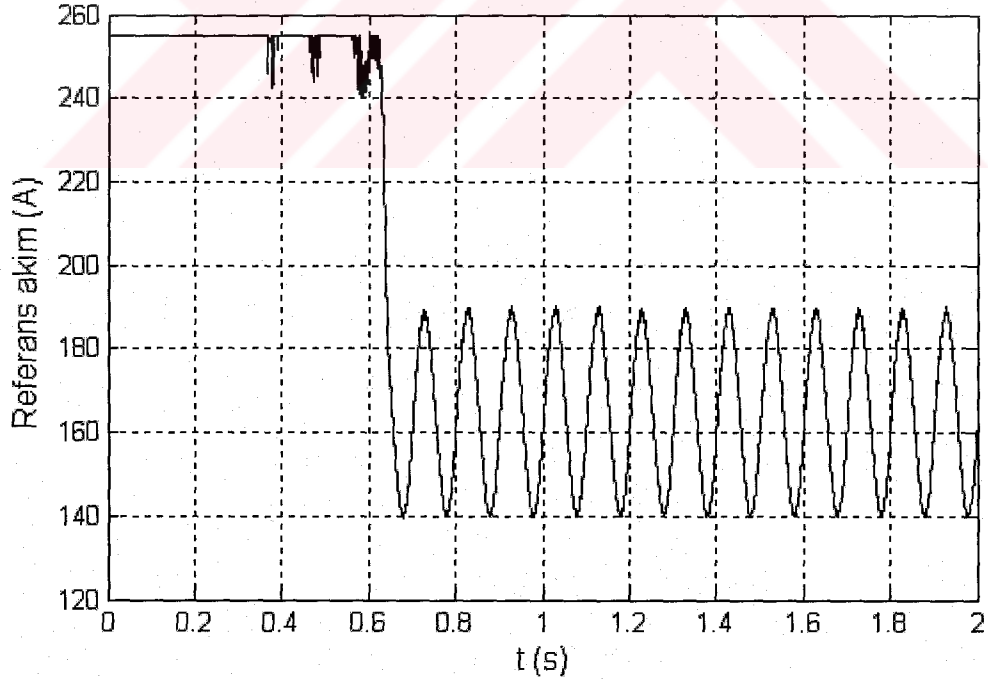
Şekil 6.33.a. PID ve BMPI ve YBM denetleyiciler ile hız denetimi yapılan ARM'nun sinüs yükü çalışma durumunda elde edilen hız cevapları



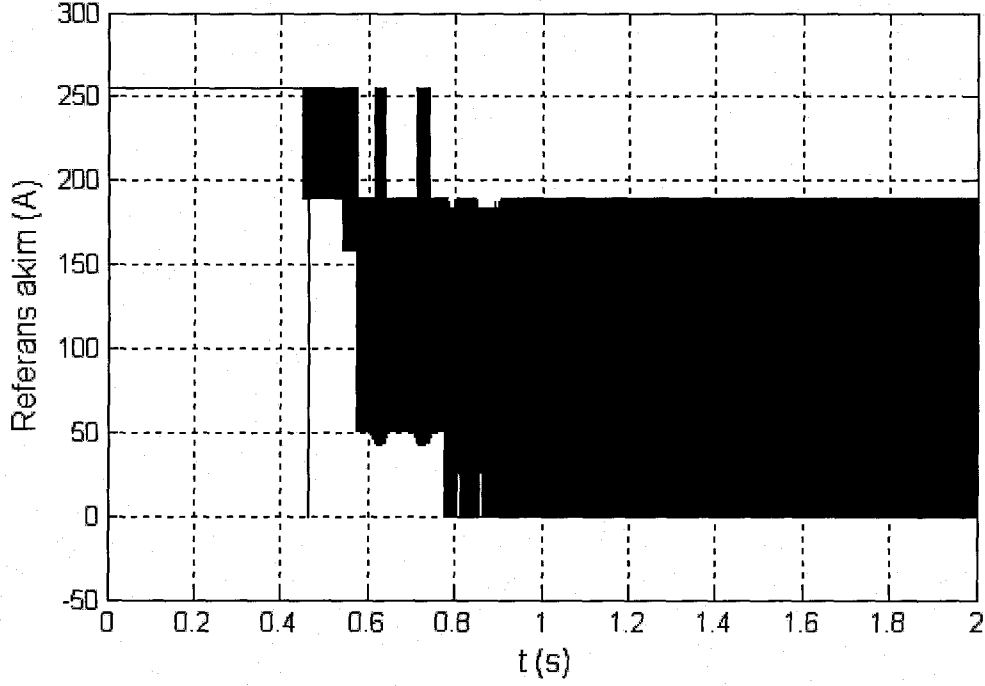
Şekil 6.33.b. PID ve BMPI ve YBM denetleyiciler ile hız denetimi yapılan ARM' nun sinüs yükü çalışma durumunda elde edilen hız cevapları



Şekil 6.34. PID denetleyici ile hız denetimi yapılan ARM' nun sinüs yükü çalışma durumunda elde edilen referans akım değişimi



Şekil 6.35. BMPI denetleyici ile hız denetimi yapılan ARM' nun sinüs yükü çalışma durumunda elde edilen referans akım değişimi



Şekil 6.36. YBM denetleyici ile hız denetimi yapılan ARM' nun sinüs yükü altında çalıştırılarak elde edilen referans akım değişimi

6.5. Referans Hız Takibi

Bu çalışma koşullarında, motor nominal yüklü durumda iken kalkındıktan sonra referans hız değiştirilmekte ve bu durumda denetleyicilerin performansları incelenmektedir. PID denetleyici ile gerçekleştirilen denetimde 125 rad/s olan referans hız 5. saniyede 100 rad/s' ye indirilmekte ve 10. saniyede 150 rad/s' ye çıkarılmaktadır. BMPI ve YBM denetleyici ile gerçekleştirilen denetimlerde 125 rad/s olan referans hız 2. saniyede 100 rad/s' ye indirilmekte ve 4. saniyede 150 rad/s' ye çıkarılmaktadır.

Tablo 6.5' de değişken referans hız durumunda denetleyici performansları gösterilmektedir. Tabloda yer alan 1. zaman dilimi; PID denetleyici için 5 ile 10. saniyeler arası, BMPI ve YBM denetleyiciler için 2 ile 4. saniyeler arasıdır. 2. zaman dilimi; PID denetleyici için 10 ile 15. saniyeler arası, BMPI ve YBM denetleyiciler için 4 ile 6. saniyeler arasıdır. Motor hızının sıfırdan artarak 125 rad/s referans hızına

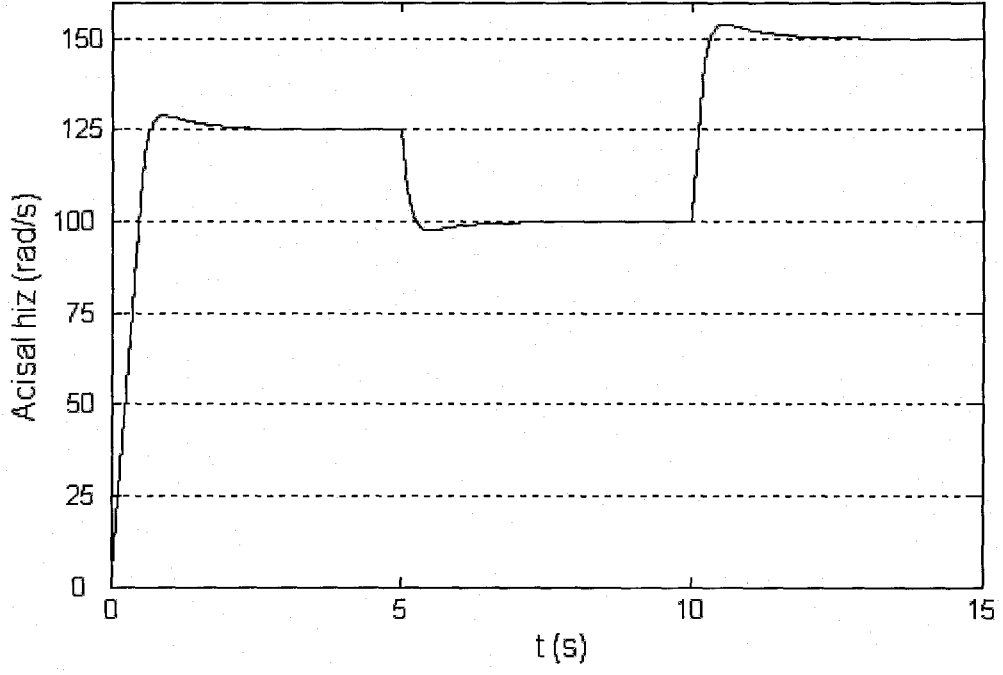
ulaştığı zaman dilimi, daha önceden yüklü çalışma durumunda ele alındığı için burada tekrar incelenmemiştir. (Bkz. Tablo 6.2)

Tabloda yer alan t_{dr} ; referans hızın değişiminden itibaren motor hızının yeni referans hız değerine ulaşma süresini, e_{ssdr} ; yeni referans hız değerindeki kalıcı durum hatasını ve O_{sdr} ; referans hız geçişlerinde meydana gelen yüzde (%) aşma miktarını ifade etmektedir. Buna göre; t_{dr} ölçütü bakımından 1. zaman diliminde YBM, 2. zaman diliminde BMPI en iyi performansı göstermektedir. e_{ssdr} ölçütü bakımından 1. ve 2. zaman diliminde YBM en iyi performansı göstermektedir. O_{sdr} ölçütü bakımından 1. zaman diliminde BMPI, 2. zaman diliminde YBM en iyi performansı göstermektedir.

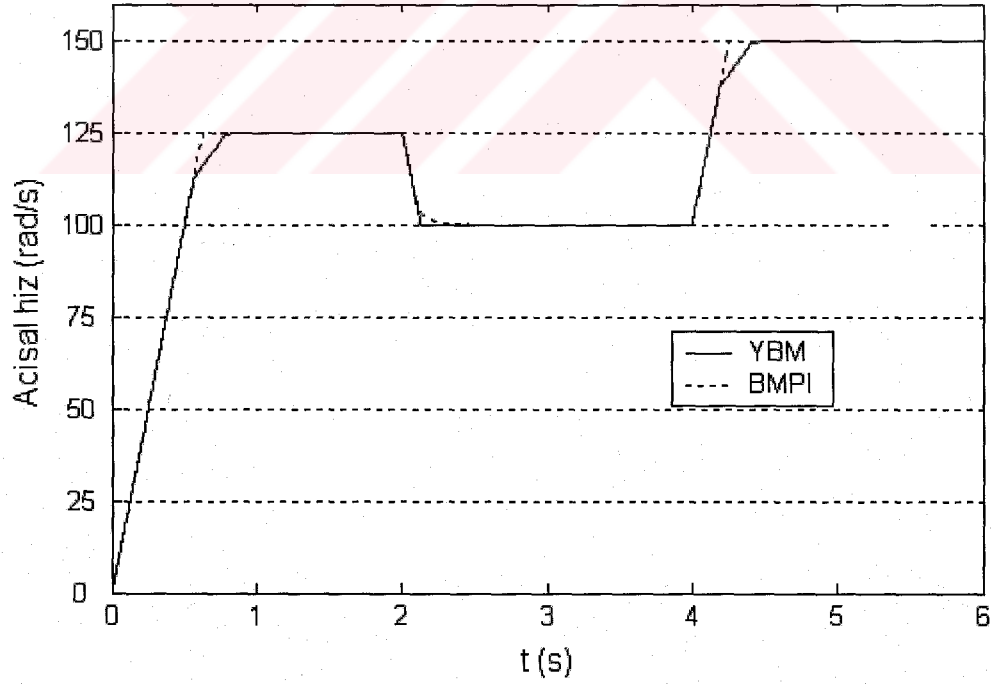
Şekil 6.37' de PID denetleyici ile hız denetimi yapılan ARM' nun değişken referans hız durumunda elde edilen hız grafikleri gösterilmektedir. Şekil 6.38' de BMPI ve YBM denetleyiciler ile hız denetimi yapılan ARM' nun değişken referans hız durumunda elde edilen hız grafikleri gösterilmektedir.

Tablo 6.5. Değişken referans hız durumunda denetleyici performansları

Ölçüt	Denetleyici tipi					
	PID		BMPI		YBM	
	1. zaman dilimi	2. zaman dilimi	1. zaman dilimi	2. zaman dilimi	1. zaman dilimi	2. zaman dilimi
t_{dr} (s)	0,2543	0,3102	0,6	0,2647	0,1306	0,5316
e_{ssdr} (rad/s)	0,003	-0,004	-0,014	-0,014	-0,0002	-0,0002
O_{sdr}	2,2996	2,5773	$\cong 0$	0,0287	0,0075	$\cong 0$



Şekil 6.37. PID denetleyici ile hız denetimi yapılan ARM' nun değişken referans hız durumunda elde edilen hız grafiği



Şekil 6.38. BMPI ve YBM denetleyiciler ile hız denetimi yapılan ARM' nun değişken referans hız durumunda elde edilen hız grafikleri

6.6. Değişken Atalet Momenti

Bu çalışma koşulunda, bir önceki başlıkta ele alınan değişken referans hız durumu, motorun farklı atalet momentleri için tekrar ele alınarak atalet momentinin denetleyici performanslarına etkisi incelenmektedir. Analizler, ARM nominal yükünün %50' si olan 90 Nm yükle yüklü durumda çalışırken gerçekleştirilmektedir. Motorun atalet momenti normal atalet momentinin 3 katına (3j) ve 5 katına (5j) çıkarılmakta ve bu durumda denetleyici performansları analiz edilmektedir.

PID denetleyici ile gerçekleştirilen denetimde 125 rad/s olan referans hız 6. saniyede 175 rad/s' ye çıkarılmaktadır. BMPI ve YBM denetleyici ile gerçekleştirilen denetimlerde 125 rad/s olan referans hız 3. saniyede 175 rad/s' ye çıkarılmaktadır.

Tablo 6.6' da değişken atalet momenti durumunda denetleyici performansları gösterilmektedir. Tabloda yer alan t_{dam} ; değişken atalet momenti durumunda hızın referans değere ulaşma süresini, e_{ssdam} ; değişken atalet momenti durumunda meydana gelen kalıcı durum hatasını ve O_{sdam} ; değişken atalet momenti durumunda meydana gelen yüzde aşma miktarını ifade etmektedir. Yine tabloda yer alan 1. zaman dilimi; PID denetleyici için 0 ile 6. saniyeler arası, BMPI ve YBM denetleyiciler için 0 ile 3. saniyeler arasıdır. 2. zaman dilimi; PID denetleyici için 6 ile 10. saniyeler arası, BMPI ve YBM denetleyiciler için 3 ile 5. saniyeler arasıdır. Buna göre; ele alınan değerlendirme ölçütlerine ve zaman dilimlerine göre en iyi performansı gösteren denetleyiciler Tablo 6.7' de gösterilmektedir.

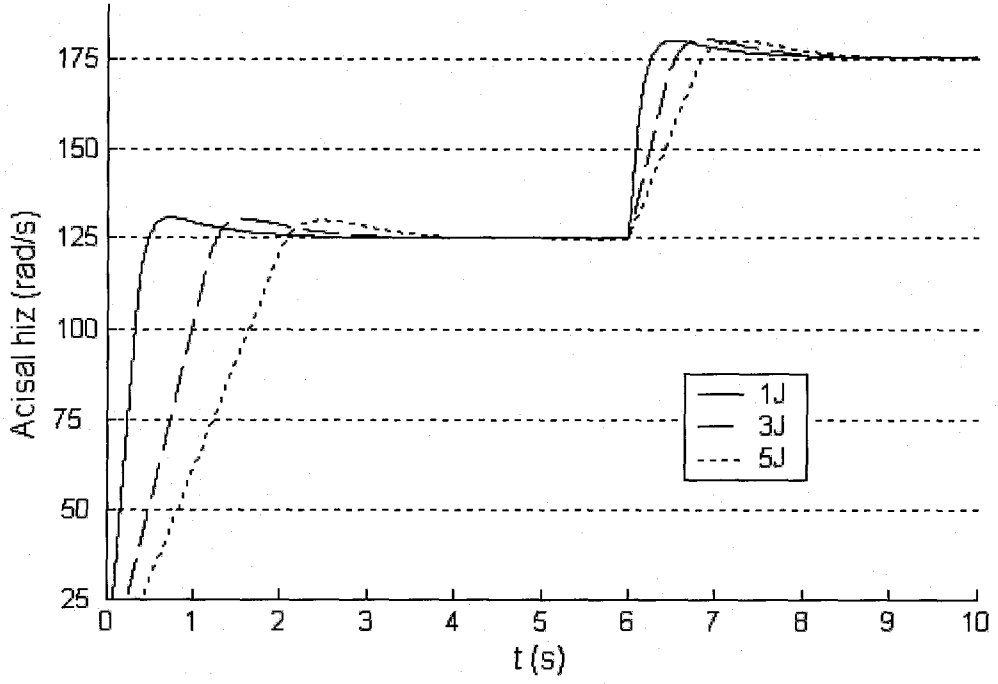
Şekil 6.39' de PID, Şekil 6.40' de BMPI ve Şekil 6.41' de YBM denetleyici ile hız denetimi yapılan ARM' nun, farklı atalet momentleri için elde edilen hız grafikleri gösterilmektedir. Şekil 6.42' de, atalet momentinin 5 kat artırılması durumunda PID, BMPI ve YBM denetleyicilerle yapılan denetim sonucunda elde edilen hız grafikleri gösterilmektedir.

Tablo 6.6. Değişken atalet momenti durumunda denetleyici performansları

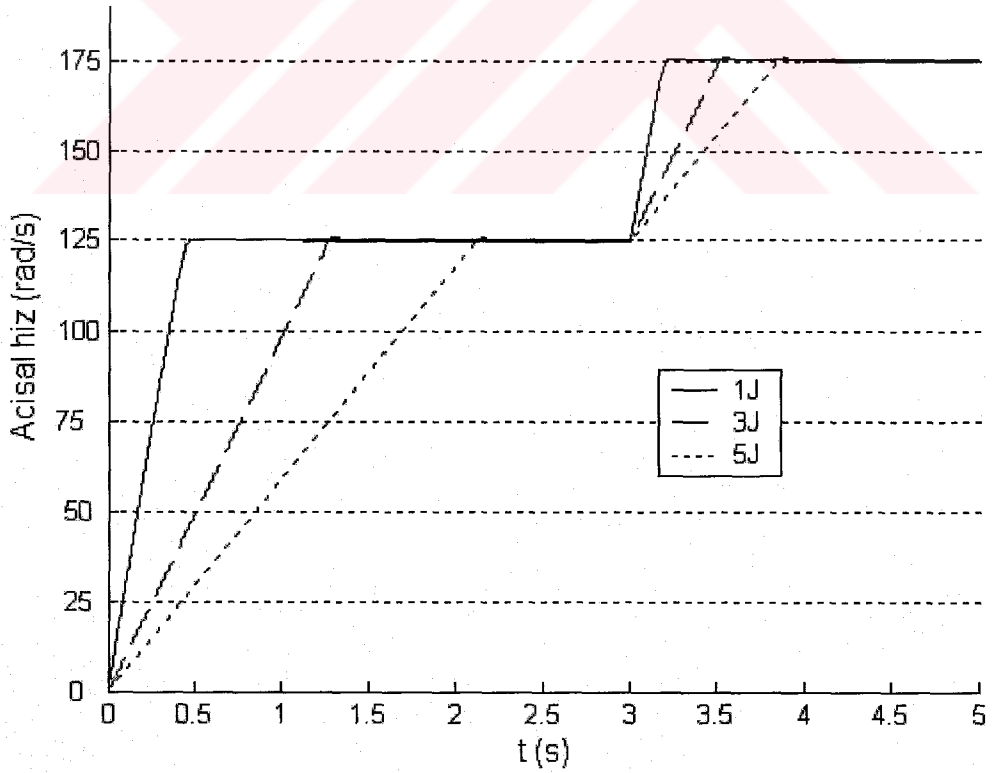
Ölçüt		Denetleyici tipi					
		PID		BMPI		YBM	
		1. zaman dilimi	2. zaman dilimi	1. zaman dilimi	2. zaman dilimi	1. zaman dilimi	2. zaman dilimi
t_{dam} (s)	1j	0,4842	0,2567	0,4651	0,2089	0,6587	0,4156
	3j	1,2677	0,5306	1,2735	0,5136	2,0286	1,2651
	5j	2,0779	0,8493	2,1218	0,8539	3,3801	2,1066
e_{ssdam} rad/s	1j	-0,0022	-0,0265	-0,0032	-0,0026	-0,0001	-0,0001
	3j	-0,0019	-0,0225	-0,001	-0,0005	$\cong 0$	$\cong 0$
	5j	0,0058	0,004	-0,0005	-0,0003	$\cong 0$	$\cong 0$
O_{sdam}	1j	4,5767	2,7692	0,1043	0,072	$\cong 0$	$\cong 0$
	3j	4,2322	2,9824	0,577	0,4069	$\cong 0$	$\cong 0$
	5j	4,0305	2,8514	0,5821	0,411	$\cong 0$	$\cong 0$

Tablo 6.7. Değişken atalet momenti durumunda değerlendirme ölçütlerine ve zaman dilimlerine göre en iyi performansları gösteren denetleyiciler

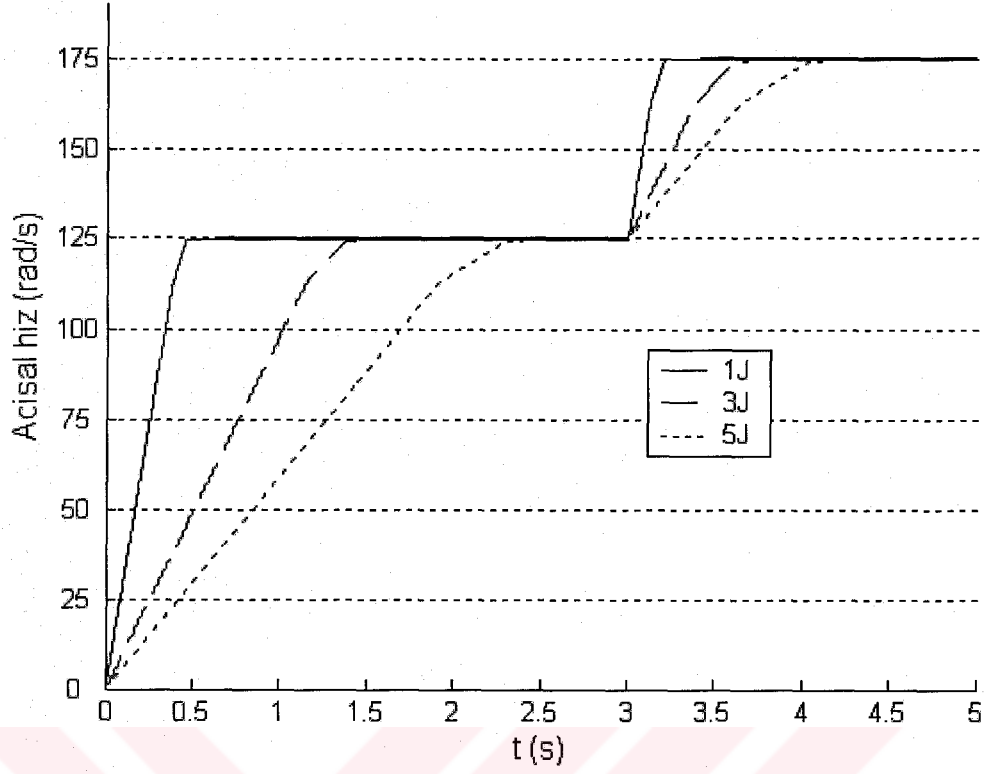
1. Zaman Dilimi			
Ölçüt	Atalet Momenti		
	1J	3J	5J
t_{dam}	BMPI	PID	PID
e_{ssdam}	YBM	YBM	YBM
O_{sdam}	YBM	YBM	YBM
2. Zaman Dilimi			
Ölçüt	Atalet Momenti		
	1J	3J	5J
t_{dam}	BMPI	BMPI	PID
e_{ssdam}	YBM	YBM	YBM
O_{sdam}	YBM	YBM	YBM



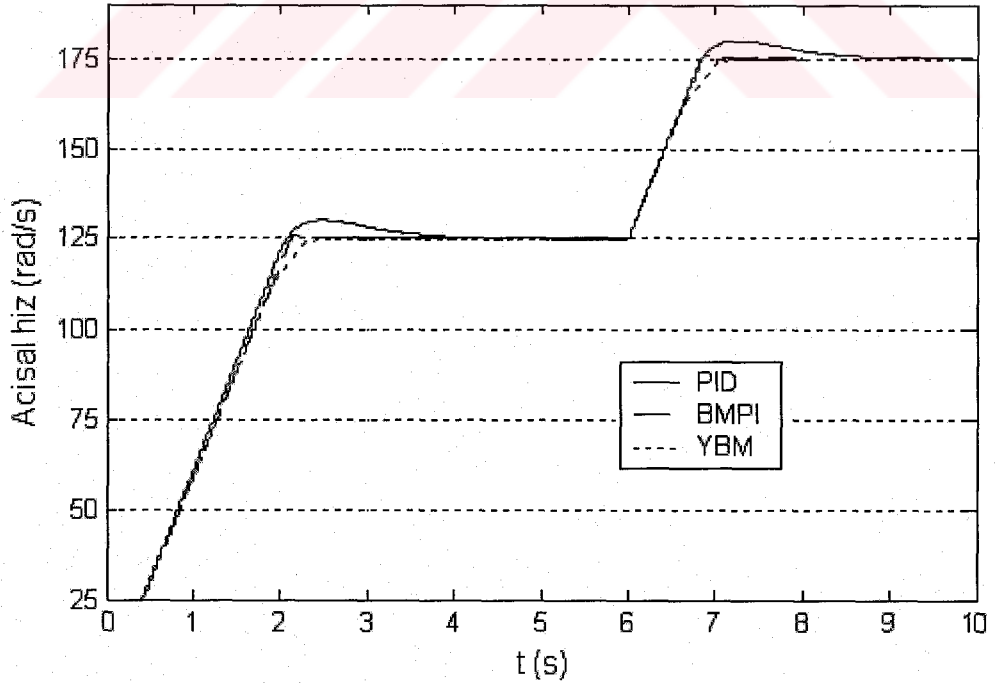
Şekil 6.39. PID denetleyici ile hız denetimi yapılan ARM' nun değişken atalet momenti durumunda elde edilen hız grafikleri



Şekil 6.40. BMPI denetleyici ile hız denetimi yapılan ARM' nun değişken atalet momenti durumunda elde edilen hız grafikleri



Şekil 6.41. YBM denetleyici ile hız denetimi yapılan ARM' nun değişken atalet momenti durumunda elde edilen hız grafikleri



Şekil 6.42. PID, BMPI ve YBM denetleyiciler ile hız denetimi yapılan ARM' nun atalet momentinin 5 kat artması durumunda elde edilen hız grafikleri

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Günümüzde elektrik motorlarının kullanıma alanları oldukça geniştir. Kullanım alanının bu kadar geniş olması, araştırmacıları elektrik motorlarının daha verimli ve denetim yöntemlerinin daha üstün performansta olması için çeşitli çalışmalara yöneltmektedir.

Bugüne kadar yapılmış olan çalışmalar incelendiğinde, Anahtarlamalı Relüktans Motorunun performansını arttırmaya yönelik birçok çalışma görülmektedir. Literatürde, ARM' nun performansını arttırmaya yönelik genel olarak iki yöntemin kullanıldığı görülmektedir; Bunlardan ilki motorun manyetik devresinin tasarımını esas alan yöntem, ikincisi ise motorun kontrol devresini esas alan yöntemdir. Bu çalışmada ikinci yöntem kullanılarak, motorun hız denetimi için yeni bir bulanık mantık algoritması kullanılmaktadır.

Buradan hareketle; Yeni Bulanık Mantık denetleyici ARM' nun hız denetimi için tasarlanarak motorun denetim performansının artırılması hedeflenmiştir.

Bu amaç doğrultusunda gerçekleştirilen işlemleri aşağıdaki gibi sıralayabiliriz;

- ARM' nun Maxwell 2D paket programı ile manyetostatik analizi gerçekleştirilmektedir. Analiz sonucunda elde edilen motora ait akı, endüktans ve moment karakteristikleri sunulmaktadır. Daha sonra analiz sonuçlarının Matlab/Simulink ortamına aktarılmakta ve doğrusal olmayan (nonlinear) dinamik motor modeli oluşturulmaktadır.
- ARM' nun hız denetimi için PID, BMPI ve YBM denetleyiciler kullanılarak yükselme zamanı, aşma miktarı, kalıcı durum hatası, yüzde hız dalgalılığı ve yüzde moment dalgalılığı ölçütleri açısından hangi denetim yönteminin daha iyi performans sağladığı belirlenmektedir.

- Denetleyicilerin performansları ARM' nun değişik yüklerle yüklenmesi, referans hız takibi yaptırılması ve atalet momentinin artırılması koşulları altında değerlendirilmektedir.

Karşılaştırmalar sonucunda;

ARM' nun yüksüz çalışma durumunda yükselme zamanı, kalıcı durum hatası ve maksimum yüzde aşma ölçütü bakımından en iyi performansı YBM denetleyici vermektedir. Tablo 7.1' de YBM denetleyicinin yüksüz çalışma durumunda diğer denetleyicilere göre yüzdesel olarak üstünlüğü gösterilmektedir. Yine Tablo 7.2, Tablo 7.3, Tablo 7.4 ve Tablo 7.5' de YBM denetleyicinin incelenen diğer çalışma koşulları altında, diğer denetleyicilere göre yüzdesel olarak üstünlüğü gösterilmektedir.

Tablo 7.1. ARM' nun yüksüz çalışma durumunda YBM denetleyicinin t_r , e_{ss} ve O_s ölçütleri açısından diğer denetleyicilere göre yüzdesel olarak üstünlüğü

Denetleyici	t_r (%)	e_{ss} (%)	O_s (%)
PID	1,859	89,873	1,26
BMPI	4,424	Aynı performans	96,643

Tablo 7.2. ARM' nun yüklü çalışma durumunda YBM denetleyicinin e_{ssy} , O_{sy} ve ω_{dy} ölçütleri açısından diğer denetleyicilere göre yüzdesel olarak üstünlüğü

Denetleyici	e_{ssy} (%)	O_{sy} (%)	ω_{dy} (%)
PID	94,805	99,983	69,387
BMPI	96,969	98,701	93,087

Tablo 7.3. ARM' nun 183 Nm yükü ani yüklenme durumunda YBM denetleyicinin e_{ssy} , O_{sy} ve ω_{dy} ölçütleri açısından diğer denetleyicilere göre yüzdesel olarak üstünlüğü

183 Nm ani yük		
	PID	BMPI
Δt_{ri} (%)	99,376	60,288
$\Delta \omega_i$ (%)	98,318	90,279
e_{ssi} (%)	96,721	98,412
O_{si} (%)	Aynı performans	100

Tablo 7.4. ARM' nun sinüs yükü yüklenme durumunda YBM denetleyicinin ω_{ds} ölçütü açısından diğer denetleyicilere göre yüzdesel olarak üstünlüğü

Denetleyici	ω_{ds} (%)
PID	99,763
BMPI	99,791

Tablo 7.5. ARM' nun değişken referans hız durumunda YBM denetleyicinin t_{dr} , e_{ssdr} ve O_{sdr} ölçütleri açısından diğer denetleyicilere göre yüzdesel olarak üstünlüğü

Ölçüt	PID		BMPI	
	1. zaman dilimi	2. zaman dilimi	1. zaman dilimi	2. zaman dilimi
t_{dr} (%)	32,138	-	64,248	-
e_{ssdr} (%)	87,5	90,476	97,183	97,183
O_{sdr} (%)	99,349	100	-	100

YBM denetleyici ARM'nun değişken atalet momenti durumunda e_{ssdam} ve O_{sdam} ölçütleri açısından yine en iyi performansı göstermektedir (Bkz. Tablo 6.6). Genel olarak sonuçlara bakıldığında, YBM denetleyicinin diğer denetleyicilere göre Anahtarlamalı Relüktans Motor için en iyi performansı gösterdiği sonucuna varılmaktadır.

ARM'nun yüksüz çalışma durumunda gerçekleştirilen simülasyonlar taban alındığında 1 saniye simülasyon süresi için gerçekte geçen süre; PID denetleyicide 19 saniye, BMPI denetleyicide 16 dakika 59 saniye, YBM denetleyicide ise 3 dakika 33 saniye olmaktadır. Simülasyonlar Intel(R) Pentium(R) M 1.70 GHz işlemci ve 752 MB RAM' e sahip bir dizüstü bilgisayar ile gerçekleştirilmiştir ve tüm denetleyici yapıları için aynı simülasyon parametreleri kullanılmıştır. Buna göre daha fazla kural tabanına sahip olmasına rağmen (64 kural) YBM denetleyicinin bulanık hesap (fuzzy computation) süreci, BMPI denetleyiciye (49 kural) göre daha kısa sürmektedir. Bu durum ise gerçek bir uygulama için önemli bir avantaj olarak öne çıkmaktadır.

KAYNAKLAR

1. MILLER, T. J. E., 2001. *Electronic Control of Switched Reluctance Machines*. Oxford University Press, Oxford.
2. RODRIGUES, M. G., SUEMITSU, W. I., BRANCO, P., DENTE, J. A. and ROLIM, L. G. B., 1997. Fuzzy Logic Control of Switched Reluctance Motor. ISIE'97 Conference Guimaraes, Portugal, pp. 527-531.
3. DE AZEVEDO, H.R., BORGES, T.T., JUNIOR, N.S. and TEIXEIRA E.P., 1995. Reluctance Motor Drive Based on Fuzzy Logic. Proceedings of the third Australian and New Zealand Conference on Intelligent Information Systems, pp. 226-231.
4. EKSİN, İ., GÜZELKAYA, M. and GÜRLEYEN, F., 2001. A new methodology for deriving the rule-base of a fuzzy logic controller with a new internal structure. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, pp. 617-628.
5. YILMAZ, K., 2004. Anahtarlamaalı Relüktans Motorunun Sargı Yapısı Değiştirilerek Moment Performansının İyileştirilmesi. Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi.
6. WANG, X., 2001. Modeling and Implementation of Controller for Switched Reluctance Motor with AC Small Signal Model. Master Thesis, State University.
7. ANSOFT CORP., Maxwell 2D Application Notes, A Rotational Actuator Problem, AP063-9911.
8. FANG, W., KNORR, U. and STANTON, S. A., 2000. Complete Solution for Electromechanical System Design. Ansoft Corporation.
9. MESE, E., 2000. Sensorless Position Estimation For Switched Reluctance Motors Using Artificial Neural Networks. PhD Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute.
10. KRISHNAN, R., 2001. *Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design And Applications*. CRC Press, Industrial Electronics Series.
11. ANSOFT CORP., 1988-2004. Maxwell 2D Ver.10 Online Help System.
12. GARİP, M., 2002. Tam Kutup Adımlı Anahtarlamaalı Relüktans Motorun Kutup Başlarını şekillendirerek Moment Dalgalılığının İyileştirilmesi. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi.
13. GÜRDAL, O., 2001. Elektrik makinelerinin Tasarımı: Anahtarlamaalı Relüktans Motorun (ARM) Tasarımı. Gazi Üniversitesi, Ankara.

14. KARAKAYA, A., 2005. Daimi Mıknatıslı Senkron Motorun Modellenmesi ve Modern Denetim Yöntemleri ile Hız Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi.
15. GAO, Y., 2000. Speed Control of Switched Reluctance Motors. Master Thesis, Hong Kong University.
16. BAY, Ö. F., 1996. Anahtarlmalı Relüktans Motorun Bulanık Mantık Tabanlı Modellenmesi ve Kontrolü. Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi.
17. SOARES, F. and COSTA BRANCO, P.J., 2001. Simulation of a 6/4 Switched Reluctance Motor Based on Matlab/Simulink Environment. Laboratorio de Mecatronica, Instituto Superior Tecnico, Portugal.
18. ŞAHİN, K., 1995. Anahtarlı Relüktans Motorların Matematik Modelinin Elde Edilmesi ve Simülasyonu. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
19. DURMUŞ, O., 1994. Anahtarlı Relüktans Motorunun Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
20. OSMAN, O., 1998. Anahtarlmalı Relüktans Motorunun Sayısal Benzetimi ve TMS370 Mikrokontrolör ile Kontrolü. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
21. DERDİYOK, A., 1997. Anahtarlmalı Relüktans Motorun Doyma Modelinde Ortak Endüktans Etkilerinin İncelenmesi ve Bulanık ve Kayan Kipli Denetleyicilerle Moment Dalgalanmasının Azaltılması. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi.
22. PASSINO, Kevin M., YURKOVIC, S., 1998. Fuzzy Control. Addition-Wesley Longman, Inc., California.
23. SEARS, R., ZEMANSKY, W., 1989. Modern Üniversite Fiziği. Çağlayan Kitabevi, İstanbul.
24. ERFAN, F., 1992. Anahtarlı Relüktans Motrunun Statik ve Dinamik Davranışı ile Ulaşımında Kullanılabilirliğinin Analizi. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi.
25. MIR, S., 2000. Classification of SRM Converter Topologies for Automotive Applications. SAE Technical Paper Series, SAE 2000 World Congress Detroit, Michigan.
26. GALLEGOS-LOPEZ, G., WALTERS, J. and RAJASHEKARA, K., 2001. Switched Reluctance Machine Control Strategies for Automotive Applications. SAE Technical Paper Series, SAE 2001 World Congress Detroit, Michigan, 2001-01-0955.

27. BOLOGNANI, S. and ZIGLIOTTO, M., 1996. Fuzzy Logic Control of a Switched Reluctance Motor Drive. *IEEE Trans. on Indus. Appl.*, Vol. 32, No. 5, pp. 1063-1068.
28. SRINIVAS, K.N. and ARUMUGAM, R., 2002. Finite Element Analysis Combined Circuit Simulation of Dynamic Performances of Switched Reluctance Motors. *Electric Power Components and Systems*, pp. 1033-1045.
29. ZHOU, P., STANTON, S. and ZOLTAN, J. C. Dynamic Modeling of Electric Machines. Ansoft Corporation, Pittsburg.
30. HUSAIN, I., 2002. Minimization of Torque Ripple in SRM Drives. *IEEE Trans. on Indus. Electronics.*, Vol. 49, No. 1, pp. 28-39.
31. CHANCHAROENSOOK, P. and RAHMAN, M. F., 2002. Dynamic Modeling of a Four-Phase 8/6 Switched Reluctance Motor Using Current and Torque Look-Up Tables. *Proceedings of the 28th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), Sevilla, SPAIN, vol.1*, pp. 491-496.
32. PIVONKA, P., 2002. Comparative Analysis of Fuzzy PI/PD/PID Controller Based on Classical PID Controller Approach. *Proc. of the 2002 IEEE World Congress on Computational Intelligence, USA*, pp. 541-546.
33. SÖZER, Y., TORREY, D. A. and MEŞE, E., 2002. Automatic Control of Excitation Parameters for Switched Reluctance Motor Drives. *Advanced Energy Conversion (APEC) Conference*.
34. AYDEMİR, S., SEZEN, S. and ERTUNÇ, H. M., 2004. Fuzzy Logic Speed Control of a DC Motor. *The 4th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC 2004), Xian, China*, pp. 766-771.
35. ELMAS Ç., 2003. *Bulanık Mantık Denetleyiciler*, Seçkin Yayıncılık, Ankara.
36. *Matlab Control Tutorial*, 1997. Regents of the University of Michigan.
37. TIPSUWAN, Y. And MO-YUEN C., 1999. Fuzzy Logic Microcontroller Implementation for DC Motor Speed Control. *Proc. IEEE IECON '99 San Jose, CA*, pp. 1271-1276.
38. HENRIQUES, L., ROLIM, L., SUEMITSU, W., COSTA BRANCO, P. J. and DENTE, J. A., 2000. Torque Ripple Minimization in a Switched Reluctance Drive by Neuro-Fuzzy Compensation. *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 36, No. 5, pp. 3592-3594.
39. ANSOFT CORP., 2001. *Introduction to the Finite Element Method. Training Seminar for Maxwell 2D/3D and EMSS*.
40. ERSAK, A. and ERMIŞ, M., 1984. *Notes on Principles of Electromechanical Energy Conversion*, Middle East Technical University Press, Ankara.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

AYDEMİR, S., SEZEN, S. and ERTUNÇ, H. M., 2004. Fuzzy Logic Speed Control of a DC Motor. The 4th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC 2004), Xian, China, pp. 766-771.



ÖZGEÇMİŞ

1981 yılında Kocaeli' de doğdu. İlk ve orta öğrenimini Kocaeli' de tamamladı. 1999 yılında Kocaeli Sabancı Anadolu Teknik Lisesi Elektrik Bölümü'nden mezun oldu. 2003 yılında Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi Bölümünü bitirdi. Aynı yıl içinde Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Eğitimi A.B.D.'da Yüksek Lisans eğitimine başladı. 2004 yılında Kocaeli Üniversitesi Gebze Meslek Yüksekokulu Endüstriyel Elektronik Programında dışarıdan görevlendirme şeklinde öğretim görevlisi olarak göreve başladı.

Halen Kocaeli Üniversitesi Gebze Meslek Yüksekokulu'nda görevine devam etmektedir.