

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**EVİRGEÇ BESLEMELİ SENKRON MOTORLARDA ÇIKIKLIK
VE AMORTİSÖR SARGI ETKİLERİNİN İNCELENMESİ VE
VEKTÖR KONTROLÜ**

Abuzer ÇALIŞKAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ELAZIĞ 2004

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

150768

150168

**EVİRGEÇ BESLEMELİ SENKRON MOTORLARDA ÇIKIKLIK VE AMORTİSÖR
SARGI ETKİLERİNİN İNCELENMESİ VE VEKTÖR KONTROLÜ**

Abuzer ÇALIŞKAN

Yüksek Lisans Tezi
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu tez, 26.08.2004.. tarihinde aşağıda belirtilen jüri tarafından oybirliği /oyçokluğu ile başarılı / başarısız olarak değerlendirilmiştir.

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Ahmet ORHAN

Üye: Doç. Dr. Sedat SÜNER

Üye:

Üye:

Üye:

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 01.09.2004.. tarih ve 35/6 sayılı kararıyla onaylanmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma süresince sürekli desteklerini gördüğüm tez yöneticim Sayın Yrd. Doç. Dr. Ahmet ORHAN'a teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER	I
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	III
EKLER LİSTESİ	VIII
SİMGELER LİSTESİ.....	IX
ÖZET	X
ABSTRACT.....	XII
1.GİRİŞ.....	1
1.1. Genel Bakış.....	1
1.2. Doğru Akım, Asenkron ve Senkron Motorlu Sürücü Düzeneklerin Karşılaştırılması.....	1
2. SENKRON MOTORUN MODELLENMESİ	3
2.1. Senkron Motorun Genel Üç Faz Denklemleri	3
2.2. Rotor Referans Çatıda Senkron Motor Denklemlerinin Elde Edilmesi.....	8
2.3. Senkron Motorun Bilgisayar Benzetim Programı	11
3. SENKRON MOTOR KONTROL YÖNTEMLERİ.....	14
3.1. Açık Çevrim Kontrol İlkesi	14
3.1.1. Senkron Motorun Açık Çevrim Hız Kontrol İlkesine İlişkin Bilgisayar Benzetim Programı	14
3.2. Senkron Motorun Self Kontrolü.....	16
3.2.1. Gerilim Kaynaklı Evirgeçten Beslenen Senkron Motorun Self Kontrolüne İlişkin Bilgisayar Benzetim Programı	17
3.2.2. Akım Kaynaklı Evirgeçten Beslenen Senkron Motorun Self Kontrolüne İlişkin Bilgisayar Benzetim Programı	19
3.3. Senkron Motorun Alan Yönlendirme Kontrolü	21
3.3.1. Senkron Motorda Kullanılan Akı Türüne Göre Alan Yönlendirme Türleri.....	22
4. SELF KONTROLLÜ SENKRON MOTORDA ÇIKIKLIK VE AMORTİSÖR SARGI ETKİLERİ.....	24
4.1. Genel	24
4.2. Gerilim Kaynaklı Evirgeçten Beslenen Self Kontrollü Senkron Motorda Çıkıklık ve Amortisör Sargı Etkileri.....	24
4.3. Akım Kaynaklı Evirgeçten Beslenen Self Kontrollü Senkron Motorda Çıkıklık ve Amortisör Sargı Etkileri.....	34

5. SENKRON MOTORUN STATOR AKISI ALAN YÖNLENDİRME KONTROLÜ 45

5.1. Stator Akısı Yönlendirme İçin Oluşturulan Bilgisayar Benzetim Programı..... 49

6. SONUÇLAR VE SONRAKİ ÇALIŞMALAR İÇİN ÖNERİLER..... 51

6.1. Sonuçlar 51

6.2. Sonraki Çalışmalar İçin Öneriler..... 52

KAYNAKLAR 53



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. 3 Fazlı Senkron Motorun Uzak Fazör Diagramı	4
Şekil 2.2. Senkron Motor d-q Eşdeğer Devresi	10
Şekil 2.3. Senkron Motorun Gerçek Parametrelili Matlab / Simulink Modeli	11
Şekil 2.4. Senkron Motorun Hızının Zamana Göre Değişimi.....	12
Şekil 2.5. Senkron Motorun Momentinin Zamana Göre Değişimi	12
Şekil 2.6. Senkron Motorun Stator Q-eksen Akımının Zamana Göre Değişimi.....	12
Şekil 2.7. Senkron Motorun Stator D-eksen Akımının Zamana Göre Değişimi.....	12
Şekil 2.8. Senkron Motorun Amortisör Sargısı Q-eksen Akımının Zamana Göre Değişimi	13
Şekil 2.8. Senkron Motorun Amortisör Sargısı D-eksen Akımının Zamana Göre Değişimi	13
Şekil 3.1. Açık Çevrim Hız Kontrolüne İlişkin Blok Diagramı.....	14
Şekil 3.2. Senkron Motorun Açık Çevrim Hız Kontrolüne İlişkin Simulink Modeli	15
Şekil 3.3. (a) Altı Adımlı Evirgecin Simulink Modeli (b) Evirgeç Çıkış Dalga Şekilleri.....	15
Şekil 3.4. Açık Çevrim Hız Kontrollü Senkron Motorun Hızının Zamana Göre Değişimi	15
Şekil 3.5. Açık Çevrim Hız Kontrollü Senkron Motorun Momentinin Zamana Göre Değişimi	16
Şekil 3.6. Akım Kaynağı Evirgecinden Beslenen Self Kontrollü Senkron Motor	16
Şekil 3.7. Gerilim Kaynaklı Evirgeçten Beslenen Self Kontrollü Senkron Motorun Simulink Modeli.....	17
Şekil 3.8. Senkron Motorun Hızının Zamana Göre Değişimi.....	18
Şekil 3.9. Senkron Motorun Momentin Zamana Göre Değişimi	18
Şekil 3.10. Senkron Motorun Stator Q-eksen Akımının Zamana Göre Değişimi.....	18
Şekil 3.11. Akım Kaynaklı Evirgeçten Beslenen Self Kontrollü Senkron Motorun Simulink Modeli.....	19
Şekil 3.12. Senkron Motorun Hızının Zamana Göre Değişimi.....	20
Şekil 3.13. Senkron Motorun Momentinin Zamana Göre Değişimi	20
Şekil 3.14. Senkron Motorun Stator Q-eksen Akımının Zamana Göre Değişimi.....	20
Şekil 3.15. Dolaylı Alan Yönlendirme Kontrolüne İlişkin Blok Diagramı	22
Şekil 3.16. Doğrudan Alan Yönlendirme Kontrolüne İlişkin Blok Diagramı	22
Şekil 4.1. VSI-SCSM'un Hızının Değişimi	

a) Çıkık kutuplu amortisör sargılı senkron motor	25
b) Çıkık kutuplu amortisör sargısız senkron motor	25
c) Yuvarlak kutuplu amortisör sargılı senkron motor.....	25
d) Yuvarlak kutuplu amortisör sargısız senkron motor.....	25
Şekil 4.2. VSI-SCSM'un Sürekli Durum Koşullarında Faz Geriliminin Değişimi	26
a) Çıkık kutuplu amortisör sargılı senkron motor	26
b) Çıkık kutuplu amortisör sargısız senkron motor	26
c) Yuvarlak kutuplu amortisör sargılı senkron motor.....	26
d) Yuvarlak kutuplu amortisör sargısız senkron motor.....	26
Şekil 4.3. VSI-SCSM'un Sürekli Durum Koşullarında Faz Akımının Değişimi.....	27
a) Çıkık kutuplu amortisör sargılı senkron motor	27
b) Çıkık kutuplu amortisör sargısız senkron motor	27
c) Yuvarlak kutuplu amortisör sargılı senkron motor.....	27
d) Yuvarlak kutuplu amortisör sargısız senkron motor.....	27
Şekil 4.4. VSI-SCSM'un Sürekli Durum Koşullarında Momentinin Değişimi.....	28
a) Çıkık kutuplu amortisör sargılı senkron motor	28
b) Çıkık kutuplu amortisör sargısız senkron motor	28
c) Yuvarlak kutuplu amortisör sargılı senkron motor.....	28
d) Yuvarlak kutuplu amortisör sargısız senkron motor.....	28
Şekil 4.5. VSI-SCSM'un Sürekli Durum Koşullarında Stator Q-eksen Akımının Değişimi.....	29
a) Çıkık kutuplu amortisör sargılı senkron motor	29
b) Çıkık kutuplu amortisör sargısız senkron motor	29
c) Yuvarlak kutuplu amortisör sargılı senkron motor.....	29
d) Yuvarlak kutuplu amortisör sargısız senkron motor.....	29
Şekil 4.6. VSI-SCSM'un Amortisör Sargı Akımlarının Değişimi.....	30
a) Çıkık kutuplu amortisör sargılı senkron motor	30
b) Yuvarlak kutuplu amortisör sargılı senkron motor.....	30
Şekil 4.7. VSI-SCSM'un Geçici Durum Koşullarında Faz Geriliminin Değişimi.....	31
a) Çıkık kutuplu amortisör sargılı senkron motor	31
b) Çıkık kutuplu amortisör sargısız senkron motor	31
c) Yuvarlak kutuplu amortisör sargılı senkron motor.....	31
d) Yuvarlak kutuplu amortisör sargısız senkron motor.....	31
Şekil 4.8. VSI-SCSM'un Geçici Durum Koşullarında Faz Akımının Değişimi.....	32
a) Çıkık kutuplu amortisör sargılı senkron motor	32

b) Çıkık kutuplu amortisör sargısız senkron motor	32
c) Yuvarlak kutuplu amortisör sargılı senkron motor	32
d) Yuvarlak kutuplu amortisör sargısız senkron motor.....	32
Şekil 4.9. VSI-SCSM'un Geçici Durum Koşullarında Momentinin Değişimi	33
a) Çıkık kutuplu amortisör sargılı senkron motor	33
b) Çıkık kutuplu amortisör sargısız senkron motor	33
c) Yuvarlak kutuplu amortisör sargılı senkron motor.....	33
d) Yuvarlak kutuplu amortisör sargısız senkron motor.....	33
Şekil 4.10. VSI-SCSM'un Geçici Durum Koşullarında Stator Q-eksen Akımının Değişimi	34
a) Çıkık kutuplu amortisör sargılı senkron motor	34
b) Çıkık kutuplu amortisör sargısız senkron motor	34
c) Yuvarlak kutuplu amortisör sargılı senkron motor.....	34
d) Yuvarlak kutuplu amortisör sargısız senkron motor.....	34
Şekil 4.11. CSI-SCSM'un Hızının Değişimi	35
a) Çıkık kutuplu amortisör sargılı senkron motor	35
b) Çıkık kutuplu amortisör sargısız senkron motor	35
c) Yuvarlak kutuplu amortisör sargılı senkron motor.....	35
d) Yuvarlak kutuplu amortisör sargısız senkron motor.....	35
Şekil 4.12. CSI-SCSM'un Sürekli Durum Koşullarında Faz Akımının Değişimi	36
a) Çıkık kutuplu amortisör sargılı senkron motor	36
b) Çıkık kutuplu amortisör sargısız senkron motor	36
c) Yuvarlak kutuplu amortisör sargılı senkron motor.....	36
d) Yuvarlak kutuplu amortisör sargısız senkron motor.....	36
Şekil 4.13. CSI-SCSM'un Sürekli Durum Koşullarında Faz Geriliminin Değişimi	37
a) Çıkık kutuplu amortisör sargılı senkron motor	37
b) Çıkık kutuplu amortisör sargısız senkron motor	37
c) Yuvarlak kutuplu amortisör sargılı senkron motor.....	37
d) Yuvarlak kutuplu amortisör sargısız senkron motor.....	37
Şekil 4.14. CSI-SCSM'un Sürekli Durum Koşullarında Momentinin Değişimi	38
a) Çıkık kutuplu amortisör sargılı senkron motor	38
b) Çıkık kutuplu amortisör sargısız senkron motor	38
c) Yuvarlak kutuplu amortisör sargılı senkron motor.....	38
d) Yuvarlak kutuplu amortisör sargısız senkron motor.....	38
Şekil 4.15. CSI-SCSM'un Sürekli Durum Koşullarında Stator Q-eksen Akımının	

Değişimi.....	39
a) Çıkık kutuplu amortisör sargılı senkron motor	39
b) Çıkık kutuplu amortisör sargısız senkron motor	39
c) Yuvarlak kutuplu amortisör sargılı senkron motor.....	39
d) Yuvarlak kutuplu amortisör sargısız senkron motor.....	39
Şekil 4.16. CSI-SCSM'un Amortisör Sargı Akımlarının Değişimi	40
a) Çıkık kutuplu amortisör sargılı senkron motor	40
b) Yuvarlak kutuplu amortisör sargılı senkron motor.....	40
Şekil 4.17. CSI-SCSM'un Geçici Durum Koşullarında Faz Akımının Değişimi	41
a) Çıkık kutuplu amortisör sargılı senkron motor	41
b) Çıkık kutuplu amortisör sargısız senkron motor	41
c) Yuvarlak kutuplu amortisör sargılı senkron motor.....	41
d) Yuvarlak kutuplu amortisör sargısız senkron motor.....	41
Şekil 4.18. CSI-SCSM'un Geçici Durum Koşullarında Faz Geriliminin Değişimi	42
a) Çıkık kutuplu amortisör sargılı senkron motor	42
b) Çıkık kutuplu amortisör sargısız senkron motor	42
c) Yuvarlak kutuplu amortisör sargılı senkron motor.....	42
d) Yuvarlak kutuplu amortisör sargısız senkron motor.....	42
Şekil 4.19. CSI-SCSM'un Geçici Durum Koşullarında Momentinin Değişimi	43
a) Çıkık kutuplu amortisör sargılı senkron motor	43
b) Çıkık kutuplu amortisör sargısız senkron motor	43
c) Yuvarlak kutuplu amortisör sargılı senkron motor.....	43
d) Yuvarlak kutuplu amortisör sargısız senkron motor.....	43
Şekil 4.20. CSI-SCSM'un Geçici Durum Koşullarında Stator Q-eksen Akımının	
Değişimi.....	44
a) Çıkık kutuplu amortisör sargılı senkron motor	44
b) Çıkık kutuplu amortisör sargısız senkron motor	44
c) Yuvarlak kutuplu amortisör sargılı senkron motor.....	44
d) Yuvarlak kutuplu amortisör sargısız senkron motor.....	44
Şekil 5.1. Stator Akısı Alan Yönlendirme Fazör Diagramı	45
Şekil 5.2. Alan Yönlendirme Akı Hesap Bloğu.....	46
Şekil 5.3. Uyartım Akım Hesabına İlişkin Blok Diagramı.....	47
Şekil 5.4. Stator Akısı Alan Yönlendirmeye İlişkin Blok Diagramı	48
Şekil 5.5. Akım Kaynaklı Altı Adımlı Evirgeçten Beslenen Senkron Motorun	
Stator Akısı Alan Yönlendirmesine İlişkin Matlab/Simulink Modeli	49

Şekil 5.6. Stator Akısı Alan Yönlendirmeli Akım Kaynaklı Evirgeçten Beslenen	
Senkron Motorun Hız, Moment ve Stator Q-eksen Akımının Değişimi.....	50
Şekil 5.7. Stator Akısı Alan Yönlendirmeli Akım Kaynaklı Evirgeçten Beslenen	
Senkron Motorun Faz Gerilimi ve Faz Akımının Değişimi	50



EKLER LİSTESİ

EK1. SENKRON MOTOR PARAMETRELERİ.....	55
--	-----------



SİMGELER LİSTESİ

N	: Sarım Sayısı
I	: Akım
λ	: Akı
δ	: Yük Açısı
θ	: Rotor Açısı
T_e	: Elektriksel Moment
ω	: Açısal Hız
L_q	: Q Eksen Reaktansı
L_d	: D Eksen Reaktansı
K_s^T	: Dönüşüm Matrisi
H	: Atalet Sabiti
k_d	: D Eksen Amortisör Sargısı
k_q	: Q Eksen Amortisör Sargısı
s	: Stator Büyüklükleri
r	: Rotor Büyüklükleri
f_d	: Uyarma Sargısı Büyüklükleri
m_d	: D Eksen Mıknatıslama
m_q	: Q Eksen Mıknatıslama
d	: D Eksen Büyüklükleri
q	: Q Eksen Büyüklükleri

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

EVİRGEÇ BESLEMELİ SENKRON MOTORLARDA ÇIKIKLIK VE AMORTİSÖR SARGI ETKİLERİNİN İNCELENMESİ VE VEKTÖR KONTROLÜ

Abuzer ÇALIŞKAN

Fırat Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği
Anabilim Dalı
2004, Sayfa : 55

Doğru akım motorları yüksek dinamik cevap özelliğine sahiptirler. Ancak doğru akım motorlarının sahip oldukları bakım gereksinimi, yüksek hız sınırı, maliyetleri, tozlu ve patlamalı ortamlarda çalışamama gibi olumsuzlukları değişken hızlı sürücü düzeneklerde alternatif akım motorlu sürücü düzeneklerin kullanımını gerektirir. Verim ve güç faktörünün önemli olduğu uygulamalarda ise senkron motorlu sürücü düzenekler kullanılmalıdır.

Bu çalışmada, öncelikle doğru akım motorlu sürücü düzeneklerle alternatif akım motorlu sürücü düzenekler karşılaştırılmıştır. Buradan özellikle yüksek güçlerde senkron motorların kullanım zorunluluğu neticesine varılmıştır.

Tezin ikinci bölümünde, şebekeden beslenen senkron motorun dinamik ve sürekli durum performansını incelemek üzere makinenin d-q referans çatıdaki matematiksel modeli çıkartılmış ve Matlab / Simulink programı yardımıyla benzetim programı oluşturulmuştur.

Üçüncü bölümde, senkron motor kontrol yöntemleri üzerinde durularak ilk olarak senkron motorun açık çevrim hız kontrolünü incelemek üzere Matlab / Simulink programı ile benzetim programı oluşturulmuştur. Daha sonra self kontrollü senkron motorun dinamik ve sürekli durum performansı incelenmiştir. Bu amaçla hem gerilim kaynaklı altı adımlı evirgeçten beslenen ve hem de akım kaynaklı altı adımlı evirgeçten beslenen self kontrollü

senkron motorun Matlab / Simulink programı ile benzetim programları oluşturulmuştur. Son olarak senkron motorun alan yönlendirme kontrolü detaylı olarak incelenmiştir.

Dördüncü bölümde amortisör sargısı ve çıkıklığın self kontrollü senkron motorun dinamik ve sürekli durum performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu inceleme senkron motorun akım kaynaklı ve gerilim kaynaklı evirgeçten beslenme durumları için ayrı ayrı karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Son olarak senkron motorun güç faktörü kontrolüne olanak sağlayan stator akısı alan yönlendirmesi detaylı olarak incelenmiştir. Daha sonra akım kaynaklı altı adımlı evirgeçten beslenen senkron motorun birim güç faktöründeki stator akısı alan yönlendirmesinin Matlab / Simulink programı ile benzetim programı oluşturulmuştur.

Anahatar Kelimeler : Senkron Motor, Senkron Motorun Alan Yönlendirme Kontrolü, Stator Akısı Alan Yönlendirme.



ABSTRACT

Master Thesis

VECTOR CONTROL AND INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF THE SALIENCY AND THE DAMPER WINDING IN INVERTER-FED SYNCHRONOUS MOTORS

Abuzer ÇALIŞKAN

Firat University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electric and Electronics Engineering

2004, Page: 55

The dc motors have high dynamic response feature. In recent years, however, the desire for low-maintenance, high speed, and studying at adverse conditions, such as dirty air, explosive atmospheres, and inaccessible locations has resulted in an increasing trend in the direction of three-phase ac motors. Of these, the introduction of new magnetic materials such as rare earth elements has made the synchronous motor the system of choice for servo drives. In applications that is important particularly efficiency and power factor, the dc motor has been replaced by the synchronous motor.

Based on these two drive systems, control methodologies are explained and excessive simulation results are discussed. All simulation programs are realized under Matlab/Simulink environment.

In the first section, the dc motor drive systems are compared with the ac motor drive systems. The results form this part show that synchronous motor have to certainly be used at high power levels.

In the second section, mathematical model of synchronous motor at d-q reference frame is derived for evaluating dynamic and steady state performances synchronous motor supplied from the network and a simulation program is developed.

In the third section, the control methods for the synchronous motor are taken into consideration. A simulation program for the open loop speed control of the synchronous motor is first carried out. Then, dynamic and steady state performance of self-controlled synchronous motor are studied. For this purpose, a self-controlled synchronous motor supplied by six-stepped inverter with both current and voltage source is simulated. Finally, field oriented control of synchronous motor is examined in details.

In the fourth section, it is focused on how to affect the dynamic and steady state performances of a self-controlled synchronous motor of the damper winding and saliency. The results are presented comparatively for the cases supplying from the inverter with both current and voltage source.

In the final section, it is discussed in details a stator flux field orientation makes possible controlling the power factor of synchronous motor. A simulation program for the stator flux field orientation at unity power factor of synchronous motor supplied from six-stepped inverter with current source is developed.

Keywords: Synchronous Motor, Field Oriented Control of Synchronous Motor, Stator Flux Field Orientation.

1. GİRİŞ

1.1. Genel Bakış

Modern bir sürücü sistemden genelde; geniş bir güç aralığında frenlemeleri de içeren moment-hız düzleminin dört bölgesinde çalışabilme, yüksek verim ve yüksek dinamik cevap özellikleri aranır.

Yüksek dinamik cevap özelliklerinden dolayı 1970'li yıllara kadar en çok kullanılan makine doğru akım makinesi olmuştur. Günümüzde de hala kullanılmalarına rağmen doğru akım (D.A) motorlarının komütatörleri bu motorların yüksek hızlarda çalışmalarını engeller. Ayrıca; bakım gereksinimi, tozlu ve patlamalı ortamlarda çalışamama olumsuzlukları ve maliyetleri doğru akım motorlarının değişken hızlı sürücü düzeneklerde kullanımlarını sınırlayan etkenlerin başında gelmektedir. Dolayısıyla yüksek hız ve güçlerde alternatif akım motorlarının kullanımı zorunludur [1].

Alternatif akım motorlarının kontrolünde; doğru akım motorlarının dinamik ve sürekli durum performansını yakalayabilecek kontrol düzeneğinin ortaya konması hedeflenir. Son yıllarda yarı iletken teknolojisi ve yazılımla kontrol problemlerinin çözümündeki gelişmeler D.A motor performansını yakalayabilecek sürücü sistemlerin ortaya çıkmasını sağlamıştır.

1.2. Doğru Akım, Asenkron ve Senkron Motorlu Sürücü Düzeneklerin Karşılaştırılması

Güç devreleri faz kontrollü bir doğrultucu veya düşük güçlerde tristörlü bir kıyıcıdan oluşan doğru akım motorları; kontrol ilkeleri ve konverterlerinin basitliğinden dolayı uzun yıllar değişken hızlı sürücü düzenekler için tek alternatif olmuşlardır. Ancak; fırça ve komütatörün getirdiği kısıtlamalar, hem sincap kafesli ve hem de bilezikli asenkron motorlara göre pahalı olmaları değişken hızlı sürücü düzeneklerde alternatif akım motorlarının kullanım zorunluluğunu ortaya çıkarmıştır. Ayrıca alternatif akım motorlu sürücü düzeneklerde toplam maliyetin %70 'i güç elektroniği katına ait iken, doğru akım motorlu sürücü düzeneklerde bu oran %30 dolaylarındadır [2].

Bir alternatif akım motorunun hızı kaynak frekansı ile belirlenir. Değişken frekanslı alternatif gerilim, ya evirgeçle bir doğru gerilim kaynağından ya da doğrudan frekans çevirici ile bir alternatif gerilim kaynağından elde edilir. Sincap kafesli asenkron motorlar hem düşük maliyetli hem de sağlamdırlar. Fakat verim ve güç faktörleri düşüktür. Dolayısıyla verim ve güç

faktörünün önemli olduğu uygulamalarda asenkron motorların alternatifleri senkron motorlardır [2].

Senkron motorlar 1960-70 yılları arasında yarı iletkenlerin değişken hızlı sürücü sistemlerde kullanılmaya başlanmasıyla ilgi çekmeye başlamışlardır. Daha önceki yıllarda; ani yükte senkronizmden çıkmaları, kararlılık problemleri ve devir sayılarının değiştirilememesi nedeniyle değişken hızlı sürücü düzeneklerde doğru akım ve asenkron motorlara alternatif olmaktan uzak kalmışlardır. Ancak, konverter topolojilerindeki değişmelerle birlikte değişken hızlı sürücü düzeneklerde kullanılmaya başlamışlardır.

Senkron motorda moment stator akımıyla ve akı da uyarma akımıyla kontrol edilir. Asenkron motorda ise hem moment hem de akının stator akımıyla değiştirilmesi optimum stator geriliminin belirlenmesini engeller. Ayrıca alan zayıflatma bölgesinde; asenkron motor için gereken gerilim senkron motora göre %30 fazladır. Reaktif güç gereksinimdeki fazlalık ise %70 dolaylarındadır. Kontrol algoritmaları senkron motorun rotor koordinatlarında, asenkron motorun ise alan koordinatlarında yapılması haricinde aynıdır. Dolayısıyla asenkron motorlarda kenetleme çözücü hesaplarını kısalttığından dolayı akı modeline gereksinim duyulur [3].

Senkron motorlu sürücü düzenekler, asenkron ve doğru akım motorlu düzeneklerden daha yüksek moment / atalet oranı, daha az gürültü ve sağlam motor kontrol algoritmasına sahiptirler. Çünkü senkron motorların rotor yarıçapı eşdeğer güçteki asenkron ve doğru akım motorlarından küçüktür. Senkron motorların bakım gereksinimi doğru akım motorların bakım gereksiniminin 1/7 'si kadardır. Ayrıca kayıplar da yaklaşık olarak doğru akım motorlarının yarısı kadardır. Bunun yanında megawatt dolaylarındaki güç seviyeleri ve 6000 d/d 'ya yaklaşan hızlar için senkron motorlar pratik açıdan zorunludurlar. Asenkron motordaki düşük verim ve güç faktörü bu motorların bu güç ve hız seviyelerinde kullanımlarını sınırlar [4].

Günümüzde megawatt dolaylarındaki güç seviyeleri için yük aktarımlı akım kaynağı evirgeç beslemeli senkron motorlu sürücü düzeneklerin en ekonomik değişken hız sistemi olduğu bilinmektedir. Senkron motorların düşük güçlü sürücü düzeneklerde az kullanılma nedenlerinden başında maliyet gelmekte ise de rotordaki sönüm sargılarının getirdiği karmaşık yapı ve kontrol edilebilen bir mıknatıslama kaynağı ihtiyacı da bu tercihi belirlemektedir. Ancak düşük maliyetli bir evirgeç sistemi senkron motorun tercih edilmesinde önemli rol oynayabilecek etkenlerden biri olabilir. Yüksek güçlerde , yük aktarım olanağı (ileri güç faktöründe çalıştırılabilmesi) evirgeç maliyetini düşürdüğünden yukarıda bahsedilen olumsuzluklar dengelenmiş olur [5].

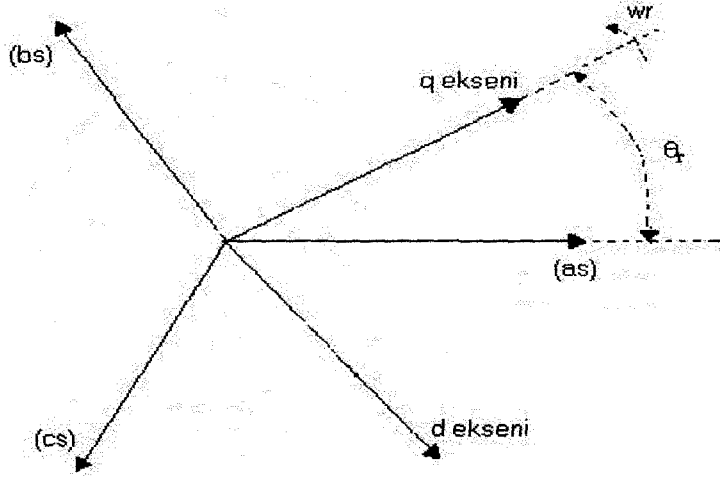
2. SENKRON MOTORUN MODELLENMESİ

2.1. Senkron Motorun Genel Üç Faz Denklemleri

Genelde senkron makinenin elektromekanik ve elektriksel davranışı 3 fazlı çıkık kutuplu senkron makine denklemleri ile incelenir. Çünkü , indüktans matrisindeki L_B değeri sıfır alınır, yuvarlak kutuplu makinenin indüktans matrisi ifadesi elde edilir. Sadece L_B değerinin sıfır alınmasıyla yuvarlak kutuplu senkron makine de analiz edilebildiğinden burada 3 fazlı çıkık kutuplu makine esas alınmıştır.

Bu bölümde senkron makinenin simetrik bir yapıya sahip olması durumunda matematiksel modeli bazı varsayımlar ile çıkartılacaktır. Model çıkartılırken yapılan varsayımlar aşağıdadır.

- Makine manyetik olarak doğrusaldır; yani doyum etkileri dikkate alınmamıştır.
- 2 kutup, 3 fazlı, statoru yıldız bağlı bir senkron makine modeli elde edilmiştir.
- Makinenin rotoru çıkık kutupludur. Sarım sayısı N_{fd} , direnci R_{fd} olan bir alan (uyarma) sargısıyla, iki sönüm sargısına sahiptir.
- Alan sargısıyla aynı manyetik ekseninde olan ve k_d indisi ile gösterilen sönüm sargısının sarım sayısı N_{kd} , sargı direnci R_{kd} 'dir. Bu sargıların manyetik eksenini d -ekseni olarak gösterilmiştir.
- İkinci sönüm sargısının manyetik eksenini d -ekseniyle 90° 'lik bir açıya sahiptir ve k_q indisiyle gösterilir. Bu sönüm sargısının sarım sayısı N_{kq} ve direnci R_{kq} 'dur. Bu sargıların manyetik eksenini q -ekseni olarak adlandırılmıştır.
- Tüm stator ve rotor sargıları, hava aralığında sinüzoidal bir alan dağılımı elde edecek şekilde yerleştirilmişlerdir. Makina sargıları simetrik yapıdadır.
- Stator sargılarının manyetik eksenleri a_s , b_s ve c_s ile gösterilmiştir.
- Histerezis ve Fuko kayıpları ihmal edilmiştir [6].



Şekil 2.1. 3 Fazlı Senkron Motorun Uzak Fazör Diagramı

$$V_{abcs} = R_s \cdot I_{abcs} + p\lambda_{abcs} \quad (2.1)$$

$$V_{qdr} = R_r \cdot I_{qdr} + p\lambda_{qdr} \quad (2.2)$$

Burada (s) indisi statora ve (r) indisi de rotora ait büyüklükleri göstermektedir. R_s ve R_r matrisleri diagonaldir.

$$R_s = \text{diag}[R_s \ R_s \ R_s] \quad (2.3)$$

$$R_r = \text{diag}[R_{kq} \ R_{fd} \ R_{kd}] \quad (2.4)$$

Halkalama akısı denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abcs} \\ \lambda_{qdr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_s] & [L_{sr}] \\ [L_{sr}]^T & [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{abcs} \\ I_{qdr} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Stator sargı indüktans matrisi (2.6) nolu matris ile verilebilir;

$$L_s = \begin{bmatrix} L_{ls} - L_A - L_B \cos 2\theta_r & -\frac{1}{2}L_A - L_B \cdot \cos 2(\theta_r - \frac{\pi}{3}) & -\frac{1}{2}L_A - L_B \cdot \cos 2(\theta_r + \frac{\pi}{3}) \\ -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos 2(\theta_r - \frac{\pi}{3}) & L_{ls} - L_A - L_B \cdot \cos 2(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos 2(\theta_r + \pi) \\ -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos 2(\theta_r + \frac{\pi}{3}) & -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos 2(\theta_r + \pi) & L_{ls} + L_B \cos 2(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad 2.6$$

Stator ve rotor sargısı arasındaki ortak indüktans matrisi (2.7) nolu matris ile verilir.

$$L_{st} = \begin{bmatrix} L_{sq} \cos \theta_r & L_{sfd} \sin \theta_r & L_{skd} \sin \theta_r \\ L_{skq} \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & L_{sfd} \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & L_{skd} \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ L_{skq} \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & L_{sfd} \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & L_{skd} \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Rotor indüktans matrisi ise;

$$L_r = \begin{bmatrix} L_{lkq} + L_{mkq} & 0 & 0 \\ 0 & L_{fld} + L_{mfd} & L_{fdkd} \\ 0 & L_{fdkd} & L_{lkd} + L_{mkd} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

olarak yazılabilir. (2.6) nolu denklemde $L_A > L_B$ 'dir ve yuvarlak kutuplu makinelerde $L_B = 0$ 'dır.

Denklemlerdeki l indisi kaçak indüktanslar ve skq, sfd ve skd indisleri de stator ve rotor sargıları arasındaki ortak indüktanslar için kullanılmıştır.

Mıknatıslama indüktansları ;

$$L_{mq} = \frac{3}{2} (L_A - L_B) \quad (2.9)$$

$$L_{md} = \frac{3}{2} (L_A + L_B) \quad (2.10)$$

olarak tanımlanır. Rotor sargılarına ait akım, gerilim ve akı ifadeleri, statora aşağıdaki gibi indirgenebilir.

$$I_j' = \left(\frac{2}{3} \right) \left(\frac{N_j}{N_s} \right) I_j \quad (2.11)$$

$$V_j' = \left(\frac{N_j}{N_s} \right) V_j \quad (2.12)$$

$$\lambda_j' = \left(\frac{N_j}{N_s} \right) \lambda_j \quad (2.13)$$

Burada j: kq, fd veya kd indislerinden herhangi birini gösterir. İndirgenmiş halkalama akısı denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abcs} \\ \lambda_{qdr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_s] & [L_{sr}] \\ \left(\frac{2}{3}\right)[L_{sr}]^T & [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{abcs} \\ I_{qdr} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

(2.14) nolu denklemdeki $[L_s]$ matrisi 2.8 'de verilmiştir. Stator indüktansları ile indirgenmiş rotor indüktansları arasındaki ortak indüktans matrisi;

$$L_{sr}' = \begin{bmatrix} L_{mq} \cos \theta_r & L_{md} \sin \theta_r & L_{md} \sin \theta_r \\ L_{mq} \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & L_{md} \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & L_{md} \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ L_{mq} \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & L_{md} \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & L_{md} \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

olarak yazılabilir. İndirgenmiş rotor indüktans matrisi ise (2.16) nolu matrisle verilebilir.

$$L_r' = \begin{bmatrix} L_{lkq}' + L_{mq} & 0 & 0 \\ 0 & L_{lfid}' + L_{md} & L_{md} \\ 0 & L_{md} & L_{tkd}' + L_{md} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Buradan gerilim denklemleri ;

$$\begin{bmatrix} V_{abcs} \\ V_{qdr}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & pL_{sr}' \\ \left(\frac{2}{3}\right)pL_{sr}' & R_r' + pL_r' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{abcs} \\ I_{qdr}' \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

olarak yazılabilir. (2.16) ve (2.17) denklemlerinde ;

$$R_j' = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{N_s}{N_j}\right)^2 \cdot R_j \quad (2.18)$$

$$L_{lj}' = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{N_s}{N_j}\right)^2 \cdot L_{lj} \quad (2.19)$$

dir. Burada j; kq , fd veya kd olabilir.

Senkron motorun moment ifadesi makine değişkenlerine bağlı olarak yazıldığında hava aralığında depolanan enerji ifadesinden yararlanılır. Buradan hareketle moment ifadesi;

$$\begin{aligned} T_e = & \left(\frac{p}{2}\right) \left\{ \frac{(L_{md} - L_{mq})}{3} \left[I_{as}^2 - \frac{1}{2} I_{bs}^2 - \frac{1}{2} I_{cs}^2 - I_{as} \cdot I_{bs} - I_{as} \cdot I_{cs} + 2 I_{bs} \cdot I_{cs} \right] \right\} * \\ & \sin 2\theta_r + \frac{\sqrt{3}}{2} \left[(I_{bs}^2 + I_{cs}^2 - 2 I_{as} \cdot I_{bs} + 2 I_{as} \cdot I_{cs}) \cos 2\theta_r \right] - \\ & L_{mq} \cdot I_{kq} \left[\left(I_{as} - \frac{1}{2} I_{bs} - \frac{1}{2} I_{cs} \right) \cdot \sin \theta_r - (I_{bs} - I_{cs}) \cos \theta_r \right] \\ & + L_{md} (I_{fd}' + I_{kq}') \left[\left(I_{as} - \frac{1}{2} I_{bs} - \frac{1}{2} I_{cs} \right) \cdot \cos \theta_r - (I_{bs} - I_{cs}) \sin \theta \right] \end{aligned} \quad (2.20)$$

Hareket denklemi ise

$$T_e = j \cdot \left(\frac{2}{p}\right) p \cdot \omega_r + T_L \quad (2.21)$$

ile verilebilir. Burada j; eylemsizlik katsayısı $(kg \cdot m^2)$ veya $(j \cdot s^2)$ ve T_L yük momentidir.

(2.1)'den (2.21)'e kadar olan denklemler incelendiğinde; bu denklemlerden yararlanılarak elde edilebilecek çıkık kutuplu senkron motor üç faz modelinin hem sürekli ve hem de geçici durum analizlerinde en doğru sonuç veren modellerden biri olduğu görülebilir. Ancak modelde zamanla değişen katsayılar ve doğrusal olmayan bir yapı ortaya çıkmaktadır. Ayrıca bu modelin çözülebilmesi için hesaplarda kullanılan indüktans matrisi ve inversi hesap süresini uzatmaktadır. Hızlı mikroişlemcilerle hesap süresi kısaltılmış olmasına rağmen, hızlı cevap gereken sürücü düzeneklerde bu hesap süresi yine de uzun olmaktadır. Hesap sürelerinin kısaltılması ve bilinen sayısal çözümleme yöntemleriyle çözüm yapmak için gerilim denklemlerindeki zamanla değişen katsayılar ortadan kaldırılmalıdır. Bu amaçla 1920'lerde ilk defa R.H. Park senkron makineler için rotor referans çatı modelini ortaya koymuştur. Park

dönüşümü veya iki eksen dönüşümü olarak adlandırılan bu dönüşümlerle elde edilen model d-q model olarak da bilinir. Şekil 2.1'den görüldüğü gibi bu model, bir d-q eksen sisteminin rotor ile senkron olarak döndürülmesi temeline dayanır. Senkron makinelerin zamanla değişen katsayıları sadece rotora sabitlenmiş referans çatıda ortadan kalkmaktadır. Dolayısıyla senkron makine denklemlerinin rotor referans çatıda ifade edilmesi uygundur.

2.2. Rotor Referans Çatıda Senkron Motor Denklemlerinin Elde Edilmesi

Senkron motorun denklemlerini rotor referans çatıda ifade etmek için stator büyüklükleri R.H Park tarafından bulunan ve ortogonal bir matris olan K_s^r matrisi ile soldan çarpılır.

$$f_{qd0s} = K_s^r \cdot f_{abcs}$$

$$\begin{bmatrix} f_{qd0s} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} f_{qs} & f_{ds} & f_{0s} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

$$\begin{bmatrix} f_{abcs} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} f_{as} & f_{bs} & f_{cs} \end{bmatrix}$$

$$K_s^r = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \sin \theta & \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Buna göre rotor referans çatı gerilim denklemleri ;

$$V_{qd0s} = R_s \cdot I_{qd0s} + \omega_r \lambda_{qds}^r + p \lambda_{qd0s}^r \quad (2.24)$$

$$V_{qdr}^r = R_r \cdot I_{qdr}^r + p \lambda_{qdr}^r \quad (2.25)$$

olarak yazılabilir. Bundan sonra statora indirgenmiş rotor büyüklükleri sürekli kullanılacaklarından indirgenmiş büyüklükleri belirlemek için kullanılan (') üst indisi artık kullanılmayacaktır.

(2.24) ve (2.25) denklemlerinde

$$\begin{bmatrix} I_{dq0s} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} I_{ds} & -I_{qs} & 0 \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

ile verilir. Rotor referans çatıdaki halkalama akı ifadeleri aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} \lambda_{qd0s} \\ \lambda_{qdr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_s^r \cdot L_s \cdot (K_s^r)^{-1} & K_s^r \cdot L_{sr} \\ \left(\frac{2}{3}\right) \cdot (L_{sr})^T \cdot (K_s^r)^{-1} & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{qd0s} \\ I_{qdr} \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

$$K_s^r \cdot L_s \cdot (K_s^r)^{-1} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{mq} & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls} + L_{md} & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

$$K_s^r \cdot L_{sr} = \begin{bmatrix} L_{mq} & 0 & 0 \\ 0 & L_{md} & L_{md} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

$$\left(\frac{2}{3}\right) \cdot (L_{sr})^T \cdot (K_s^r)^{-1} = \begin{bmatrix} L_{mq} & 0 & 0 \\ 0 & L_{md} & 0 \\ 0 & L_{md} & 0 \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

dir. Buradan rotor referans çatıdaki halkalama akı ifadeleri;

$$\lambda_{qs} = L_{ls} \cdot I_{qs} + L_{mq} (I_{qs} + I_{kq}) \quad (2.31)$$

$$\lambda_{ds} = L_{ls} \cdot I_{ds} + L_{md} (I_{ds} + I_{fd} + I_{kd}) \quad (2.32)$$

$$\lambda_{0s} = L_{ls} \cdot I_{0s} \quad (2.33)$$

$$\lambda_{kq} = L_{lkq} \cdot I_{kq} + L_{mq} (I_{qs} + I_{kq}) \quad (2.34)$$

$$\lambda_{fd} = L_{lfd} \cdot I_{fd} + L_{md} (I_{ds} + I_{fd} + I_{kd}) \quad (2.35)$$

$$\lambda_{kd} = L_{lkd} \cdot I_{kd} + L_{md} (I_{ds} + I_{fd} + I_{kd}) \quad (2.36)$$

olarak yazılabilir. Buradan rotor referans çatıdaki gerilim denklemleri ise

$$V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \omega_r \lambda_{ds} + p \lambda_{qs} \quad (2.37)$$

$$V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} - \omega_r \lambda_{qs} + p \lambda_{ds} \quad (2.38)$$

$$V_{0s} = R_s \cdot I_{0s} + p \lambda_{0s} \quad (2.39)$$

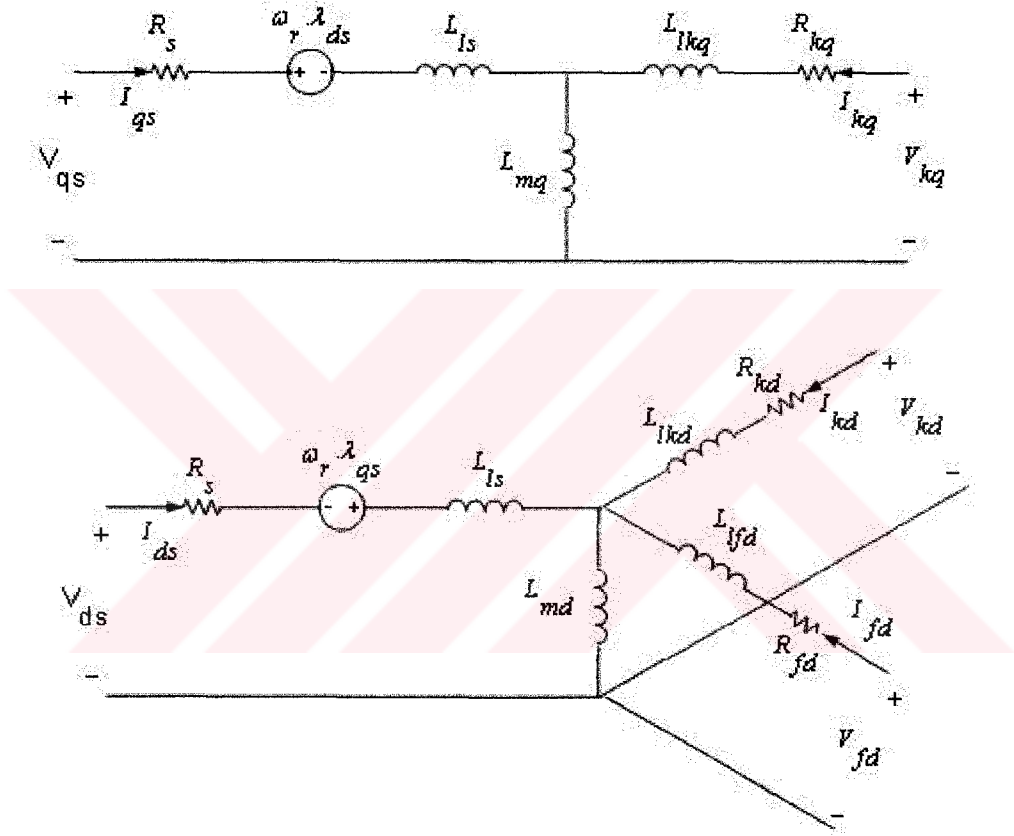
$$V_{kq} = R_{kq} \cdot I_{kq} + p\lambda_{kq} \quad (2.40)$$

$$V_{fd} = R_{fd} \cdot I_{fd} + p\lambda_{fd} \quad (2.41)$$

$$V_{kd} = R_{kd} \cdot I_{kd} + p\lambda_{kd} \quad (2.42)$$

şeklinde yazılabilir.

Buradan rotor referans çatı eşdeğer devresi aşağıdaki gibi çizilebilir;



Şekil 2.2. Senkron Motor d-q Eşdeğer Devresi

$$L_q = L_{ls} + L_{mq} \quad (2.43)$$

$$L_d = L_{ls} + L_{md} \quad (2.44)$$

$$L_{kq} = L_{lkq} + L_{mq} \quad (2.45)$$

$$L_{fd} = L_{lfd} + L_{md} \quad (2.46)$$

$$L_{kd} = L_{lkd} + L_{md} \quad (2.47)$$

dir.

Motor moment ifadesi ise;

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) [L_{md} (I_{ds} + I_{fd} + I_{kd}) I_{qs} - L_{mq} (I_{qs} + I_{kq}) I_{ds}] \quad (2.48)$$

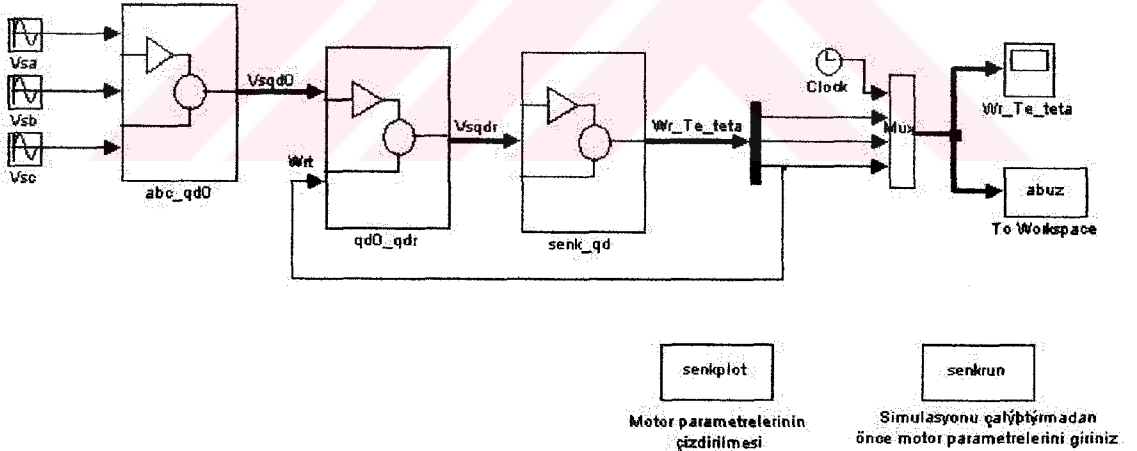
$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} (\lambda_{ds} I_{qs} - \lambda_{qs} I_{ds}) \quad (2.49)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} \frac{1}{\omega_b} (\psi_{ds} I_{qs} - \psi_{qs} I_{ds}) \quad (2.50)$$

olur.

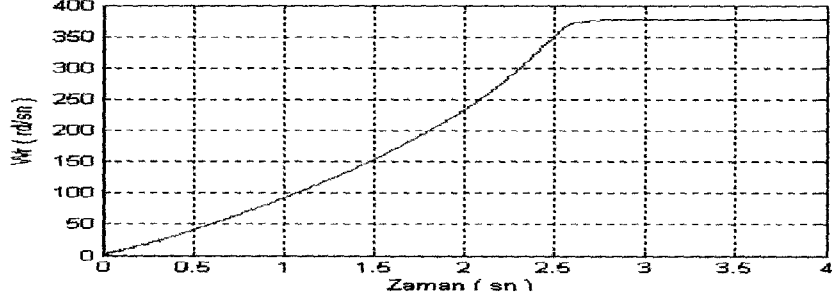
2.3. Senkron Motorun Bilgisayar Benzetim Programı

Şekil 2.3’de senkron motorun Matlab/Simulink programı kullanılarak oluşturulan benzetim programı görülmektedir. Programda hazır simulink toolbox’ı yerine senkron motorun rotor referans çatıdaki matematiksel modelinden yararlanılarak yeni bir toolbox oluşturulmuştur.

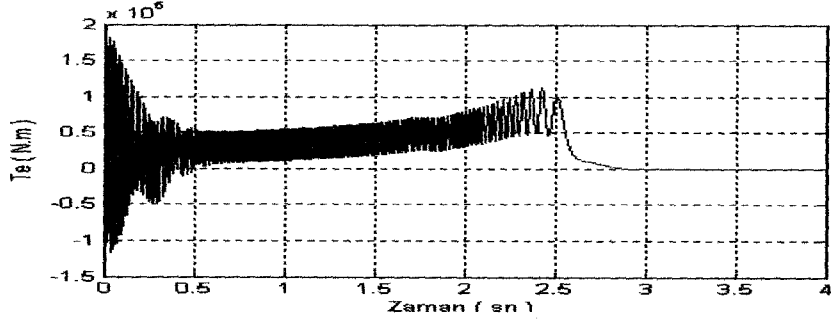


Şekil 2.3. Senkron Motorun Gerçek Parametrelili Matlab / Simulink Modeli

Benzetim programında senkron motora asenkron yol verilmiş olup nominal hıza gelindiğinde uyarma açılarak d.c gerilim uygulanmıştır. Benzetim programının çalıştırılması sonucunda senkron motorun hız ve momentinin değişimleri Şekil 2.4 ve 2.5’deki gibi elde edilmiştir.

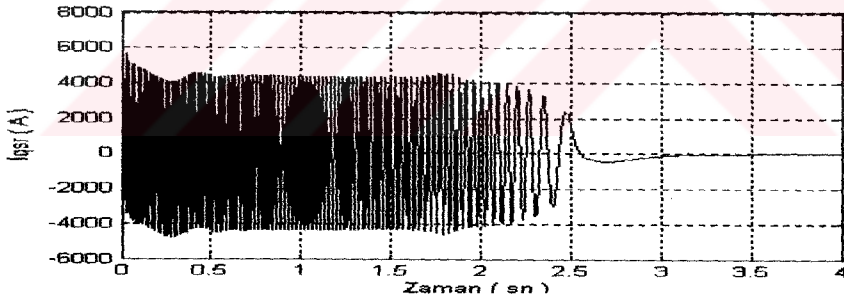


Şekil 2.4. Senkron Motorun Hızının Zamana Göre Değişimi

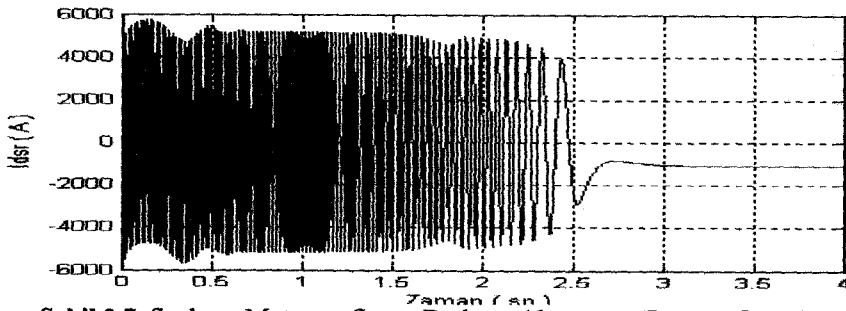


Şekil 2.5. Senkron Motorun Momentinin Zamana Göre Değişimi

Şekil 2.6 ve 2.7’de senkron motorun sırasıyla stator q ve d eksen akımları görülmektedir.

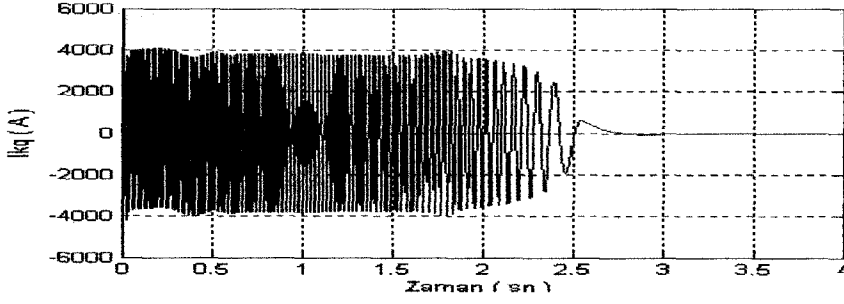


Şekil 2.6. Senkron Motorun Stator Q-eksen Akımının Zamana Göre Değişimi

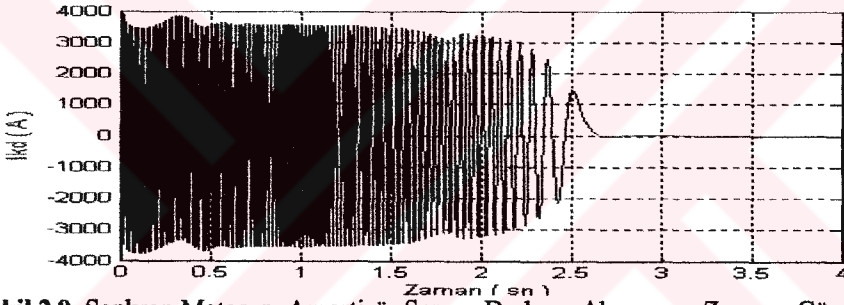


Şekil 2.7. Senkron Motorun Stator D-eksen Akımının Zamana Göre Değişimi

Amortisör sargıları geçici olaylar esnasında oluşabilecek mekanik osilasyonları ve senkron hızdan sapmaları önlemek için senkron makinenin rotoruna bağlanan ve sincap kafesli yapıya benzeyen sargılardır. Geçici olaylar esnasında bu sargılardan sönüm akımları adını verdiğimiz akımlar akar ve bu akımlar makineyi senkronizmde tutacak momentler üretir. Bu durum Şekil 2.8 ve 2.9'da senkron motorun amortisör sargı akımlarının değişiminden de görülmektedir.



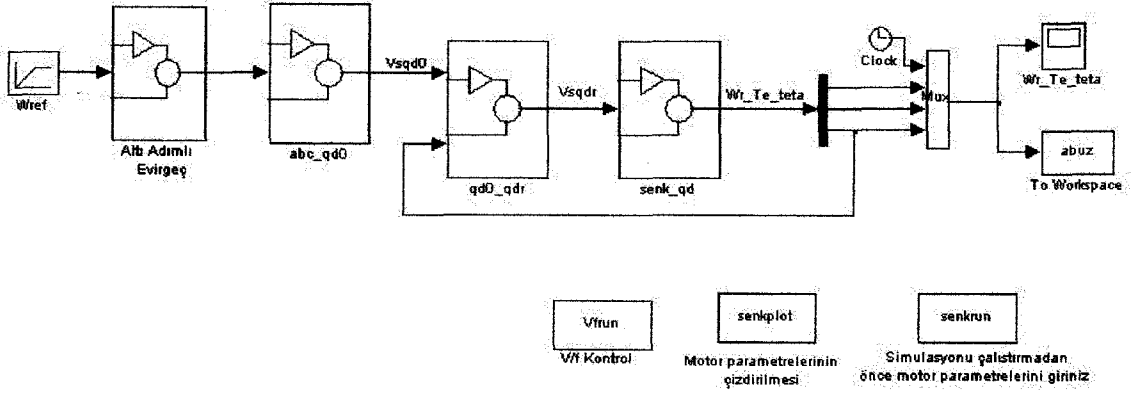
Şekil 2.8. Senkron Motorun Amortisör Sargısı Q-eksen Akımının Zamana Göre Değişimi



Şekil 2.9. Senkron Motorun Amortisör Sargısı D-eksen Akımının Zamana Göre Değişimi

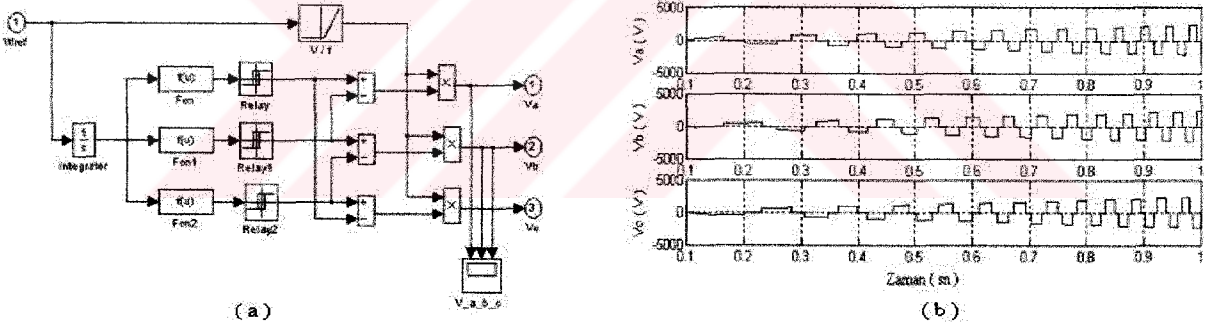
Benzetim programı sonuçlarından elde edilen değişimlerin, klasik nümerik analiz yöntemleri kullanılarak elde edilen benzetim program sonuçlarıyla aynı olduğu neticesine varılmıştır.

üzerinedir. Besleme gerilimi stator frekansı ile orantılı değiştirilirse moment yük açısı karakteristiği frekanstan bağımsız hale gelir. V/f kontrol nominal hızın altında uygulanır. Düşük hızlarda stator direncindeki gerilim düşümünü kompanze edecek şekilde gerilim artırılmalıdır [7].



Şekil 3.2. Senkron Motorun Açık Çevrim Hız Kontrolüne İlişkin Simulink Modeli

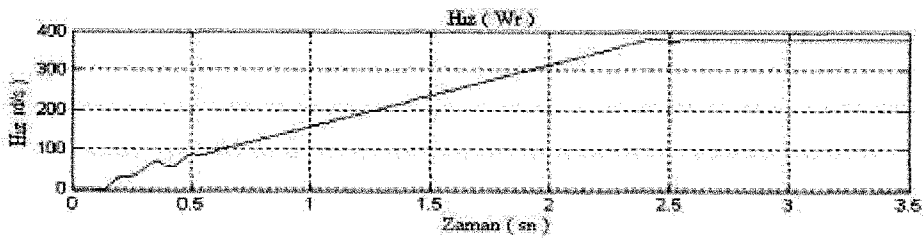
Modelde kullanılan altı adımlı evirgecin açık hali ve evirgeç çıkış sinyalleri Şekil 3.3'de açık olarak verilmiştir.



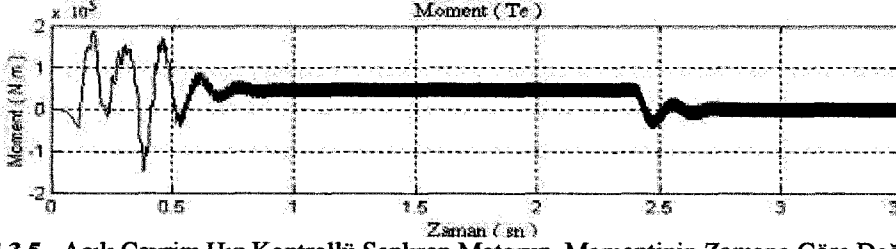
Şekil 3.3. (a) Altı Adımlı Evirgecin Simulink Modeli

(b) Evirgeç Çıkış Dalga Şekilleri

Benzetim programının senkron motorun yüksüz olma durumu için çalıştırılması sonucunda hız ve momentin zamana göre değişimini sırasıyla Şekil 3.4 ve 3.5'deki gibi elde edilmiştir.



Şekil 3.4. Açık Çevrim Hız Kontrollü Senkron Motorun Hızının Zamana Göre Değişimi

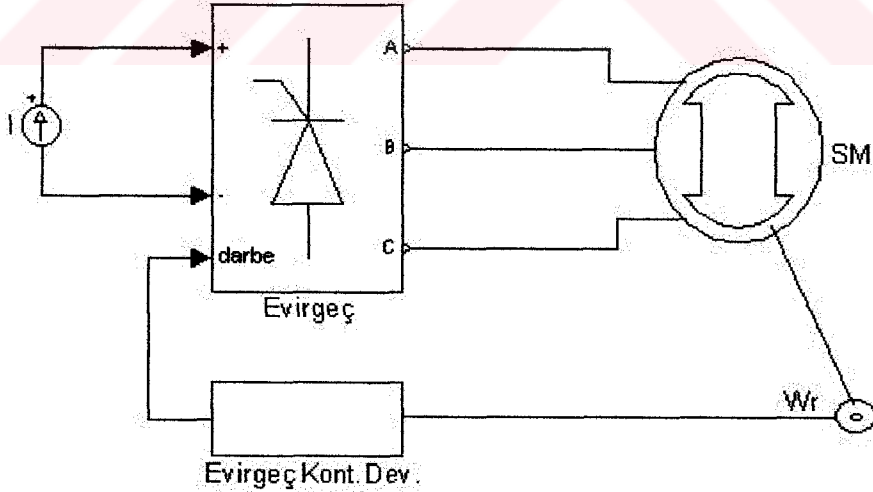


Şekil 3.5. Açık Çevrim Hız Kontrollü Senkron Motorun Momentinin Zamana Göre Değişimi

Moment de görülen dalgalanmalar darbe genişlik modülasyonlu evirgeç kullanma durumunda azaltılabilir.

3.2. Senkron Motorun Self Kontrolü

Senkron motorun stator gerilimlerinin frekansı rotor hızı ile belirleniyorsa bu kontrol şekline self kontrol denilir. Self kontrolde stator gerilimi doğrudan kontrol edilebilir. Senkron motorun bu kontrol şeklinde evirgeç anahtarları motor hızıyla orantılı bir frekansta tetiklenir yani hız ile tetikleme frekansı kilitlenir. Self kontrol tüm çalışma noktaları için stator ve rotor alanlarının tam olarak senkronizmde kalmalarını sağlar. Sonuçta moment açısı kontrol edilebilir. Kontrol parametrelerinin artmış olması motorun kontrol olanaklarını artırır [2]. Şekil 3.6'da akım kaynaklı bir evirgeçten beslenen self kontrollü senkron motorun blok diagramı görülmektedir.



Şekil 3.6. Akım Kaynağı Evirgecinden Beslenen Self Kontrollü Senkron Motor

Senkron motorun self kontrolü gerilim kaynağı evirgeçleri, akım kaynağı evirgeçleri ve doğrudan frekans çeviricilerle gerçekleştirilebilir.

Çıkık kutuplu bir senkron motorun stator ve alan mmk'larının sinüzoidal dağılımlı oldukları kabul edilirse; elde edilen ortalama moment (3.1) denklemi ile verilir.

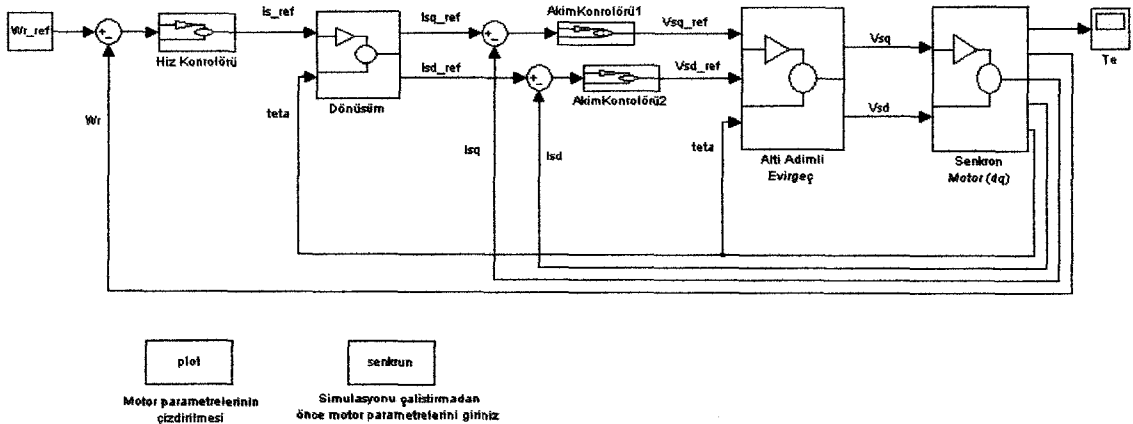
$$T_e = K_1 \cdot I_a I_{fd} \cdot \sin \delta + K_2 \cdot I_a^2 \cdot \sin 2\delta \quad (3.1)$$

Burada; K_1 ve K_2 moment sabitleri, I_a stator akımının genliği, I_{fd} alan (uyarma) akımının genliği ve δ ise stator ve uyarma mmk'ları arasındaki açıdır. (3.1) denkleminde K_2 sabiti sıfır alınırsa yuvarlak kutuplu makineye ait moment denklemi elde edilmiş olur. δ açısı 90° de tutulur, uyarma akımı da sabit bir değere ayarlanırsa; moment stator akımıyla değiştirilebilir. Çıkık kutuplu olmayan motorda kararlı çalışma aralığı $0-90^\circ$ arasında, çıkık kutuplu motorda ise 90° den küçük tutulmalıdır [8].

Senkron motorlu açık çevrim kontrollü bir sürücü düzenekte; ani yük veya frekans değişimi durumunda motorun senkronizmden çıkma tehlikesi vardır. Ani yük ve/veya frekans değişimi durumunda stator gerilimlerinin frekansı rotor hızına kilitlenirse açık çevrim kontrolde oluşan bu olumsuzluklar ortadan kalkar. Motor senkronizmini kaybetmez.

3.2.1. Gerilim Kaynaklı Evirgeçten Beslenen Senkron Motorun Self Kontrolüne İlişkin Bilgisayar Benzetim Programı

Şekil 3.7'de gerilim kaynaklı altı adımlı evirgeçten beslenen çıkık kutuplu amortisör sargılı senkron motorun self kontrolüne ilişkin Matlab / Simulink programı görülmektedir.



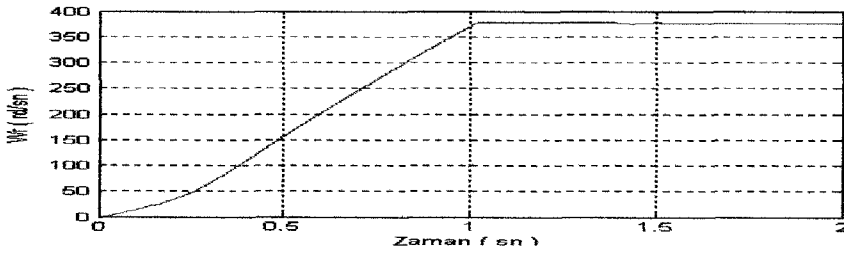
Şekil 3.7. Gerilim Kaynaklı Evirgeçten Beslenen Self Kontrollü Senkron Motorun Simulink Modeli

Motordan alınan hız bilgisi ile referans hız karşılaştırılır ve oluşan hata bir PI kontrolörden geçirilir. PI kontrolör'ün çıkışı referans stator akımını(I_s^*) verir. Bu akım

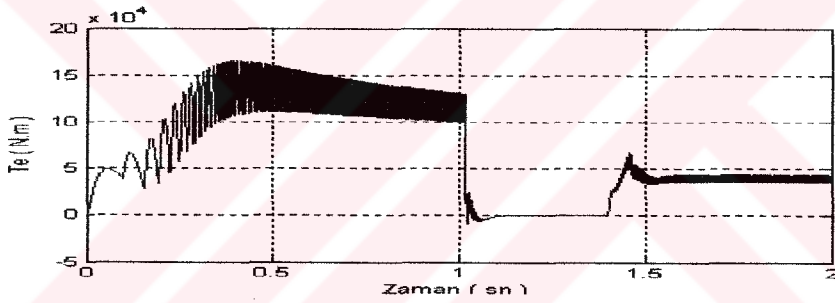
dönüşüm matrisi yardımıyla d-q bileşenlerine ayrılır. Bu akımlar gerçek değerleriyle karşılaştırılır ve oluşan hatalar PI kontrolörden geçirilir sonuçta d-q referans gerilimleri elde edilir.

Benzetim programı ilk önce yüksüz olarak çalıştırılıp, motor sürekli durum hızına ulaştıktan sonra (1.4 s sonra) yük devreye alınmıştır. Bir başka deyişle 0-1.4 s aralığında yüksüz, 1.4-2 s aralığında yüklü olarak çalıştırılmıştır.

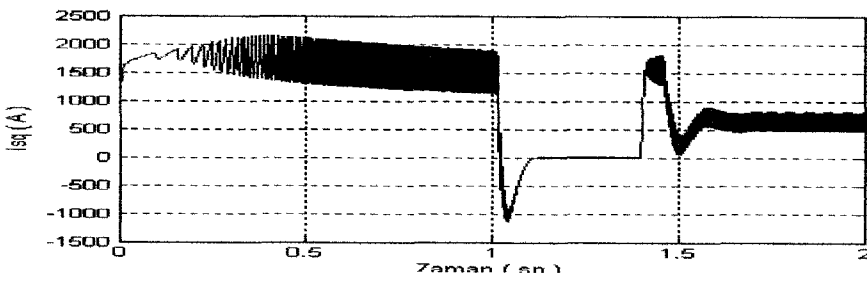
Benzetim programının çalıştırılması sonucunda elde edilen hız, moment ve stator akımı sırasıyla Şekil 3.8 ,3.9 ve 3.10'da görülmektedir.



Şekil 3.8. Senkron Motorun Hızının Zamana Göre Değişimi



Şekil 3.9. Senkron Motorun Momentin Zamana Göre Değişimi

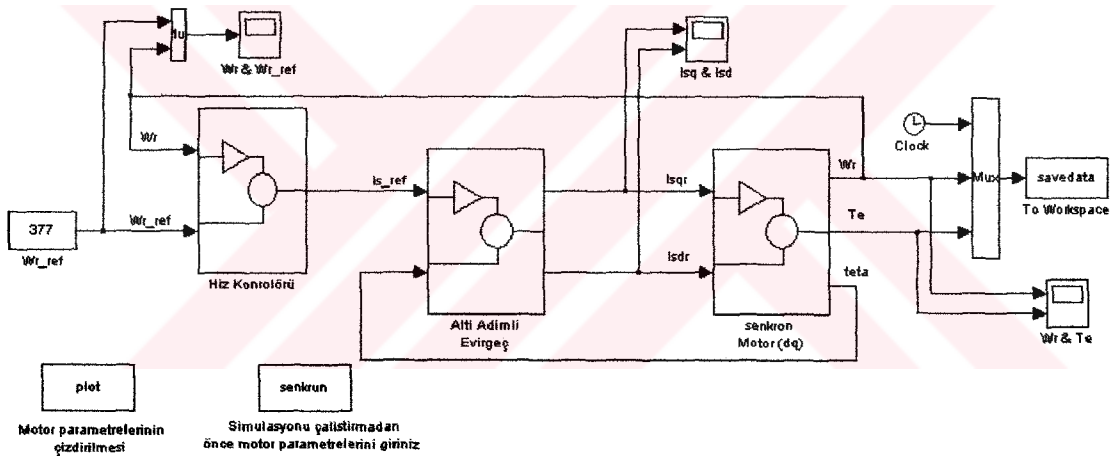


Şekil 3.10. Senkron Motorun Stator Q-eksen Akımının Zamana Göre Değişimi

3.2.2. Akım Kaynaklı Evirgeçten Beslenen Senkron Motorun Self Kontrolüne İlişkin Bilgisayar Benzetim Programı

Senkron motorun self kontrolü literatürde en çok akım kaynağı evirgeçleriyle incelenmiştir. Senkron motorun bir akım kaynağından beslenme avantajı zıt e.m.k'nin evirgeç anahtarlarının aktarımında kullanılabilmesidir. Bu durumda evirgeçte kullanılan anahtarlar tristör ise senkron motorun ileri güç faktöründe çalıştırılabilme özelliğinden dolayı ek komutasyon devrelerine gereksinim duyulmaz. Güç iletim biriminin bu şekilde basitleştirilmesi akım kaynağı evirgeç beslemeli self kontrollü senkron motorları büyük güçlü sürücülerde oldukça popüler hale getirmiştir.

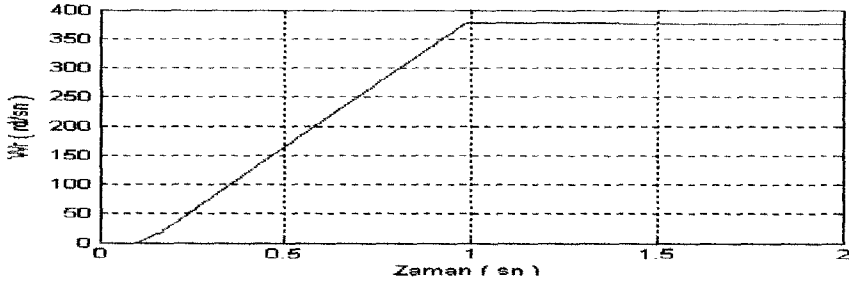
Şekil 3.11'de akım kaynaklı altı adımli evirgeçten beslenen senkron motorun Matlab / Simulink programı kullanılarak oluşturulan bilgisayar benzetim programı görülmektedir. Bu programdaki motorumuz daha önceki bölümlerde bahsedilen motor modelinden farklı olarak akım referanslı olacak şekilde düzenlenmiştir.



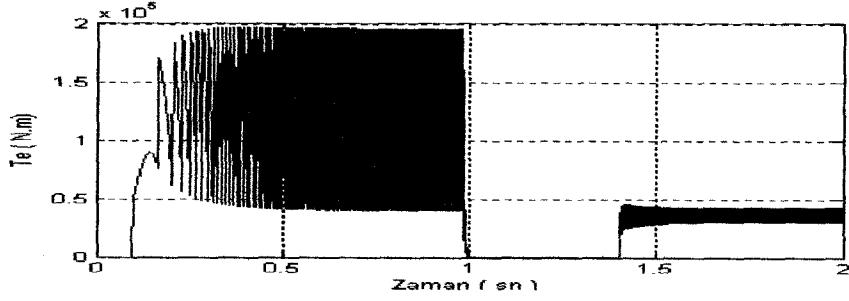
Şekil 3.11. Akım Kaynaklı Evirgeçten Beslenen Self Kontrollü Senkron Motorun Simulink Modeli

Benzetim programı ilk önce yüksüz olarak çalıştırılıp, motor sürekli durum hızına ulaştıktan sonra (1.4 s sonra) yük devreye alınmıştır. Bir başka deyişle 0-1.4 s aralığında yüksüz, 1.4-2 s aralığında yüklü olarak çalıştırılmıştır.

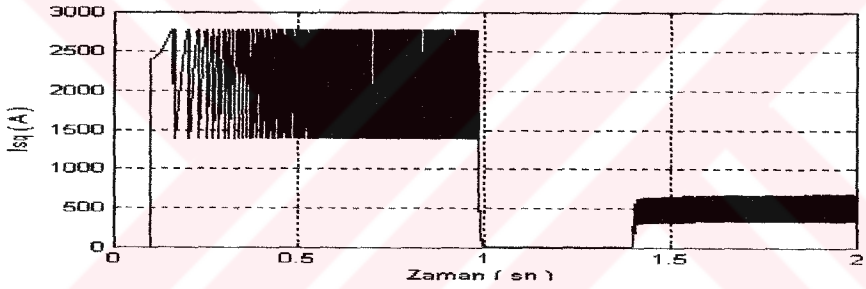
Benzetim programının çalıştırılması sonucunda Şekil 3.12, 3.13 ve 3.14'de sırasıyla hız, moment ve stator q-eksen akımı değişimleri elde edilmiştir.



Şekil 3.12. Senkron Motorun Hızının Zamana Göre Değişimi



Şekil 3.13. Senkron Motorun Momentinin Zamana Göre Değişimi



Şekil 3.14. Senkron Motorun Stator Q-eksen Akımının Zamana Göre Değişimi

Hem self ve hem de sabit v/f gibi skalar kontrol yöntemlerinde stator akımının akı ve moment bileşeni bir doğru akım motorundaki gibi ayrıştırılmış değildir. Senkron motora bakıldığında akının uyarma sargısından sağlanmasından dolayı kenetlemesiz bir yapıya doğal olarak sahip olduğu söylenebilir. Ancak moment kontrolü için stator akımı değiştirildiğinde akıyı sabit tutmak için alan sargı akımının da değiştirilmesi gerekir. Alan sargı akımının geniş sınırlar içerisinde değiştirilme gerekliliği self kontrolün cevabını ağırlaştırır. Akıyı sabit tutmak için uyarma akımının bu geniş sınırlar içerisinde değiştirilmesi yerine, stator akımının akı bileşenini bu iş için kullanmak cevap süresini hızlandırabilir. İşte bu nedenle ya self kontrolün cevap hızını iyileştirecek algoritmalar üzerine çalışmalar yapılmalı ya da stator akımını akı ve moment bileşenlerine ayırarak kontrol etme prensibi üzerine kurulu vektör kontrol kullanılmalıdır. Ayrıca senkron motorda çıkıklık ve amortisör sargı etkilerinin de evirgeç beslemeli sürücü düzeneklerde araştırılmasında yarar vardır.

3.3. Senkron Motorun Alan Yönlendirme Kontrolü

Serbest uyarmalı bir doğru akım motorunun momentı Denk.3.2'den görüleceği üzere uyarma gerilimi ile kontrol edilen bir hava aralığı akısı ve endüvi gerilimi ile kontrol edilen endüvi akımının çarpımından oluşmaktadır. Dolayısıyla bu motorlar hızlı dinamik cevap özelliğine sahiptirler. Ancak doğru akım motorlarının bakım gereksinimi, tozlu ve patlamalı ortamlarda çalışamama, komutatörün getirdiği yüksek hız sınırı, hacim olarak büyük olmaları bu motorların sürücü düzeneklerde kullanımlarını sınırlar. Bu nedenle sürücü düzeneklerde alternatif akım motorlarının kullanım zorunluluğu ortaya çıkar.

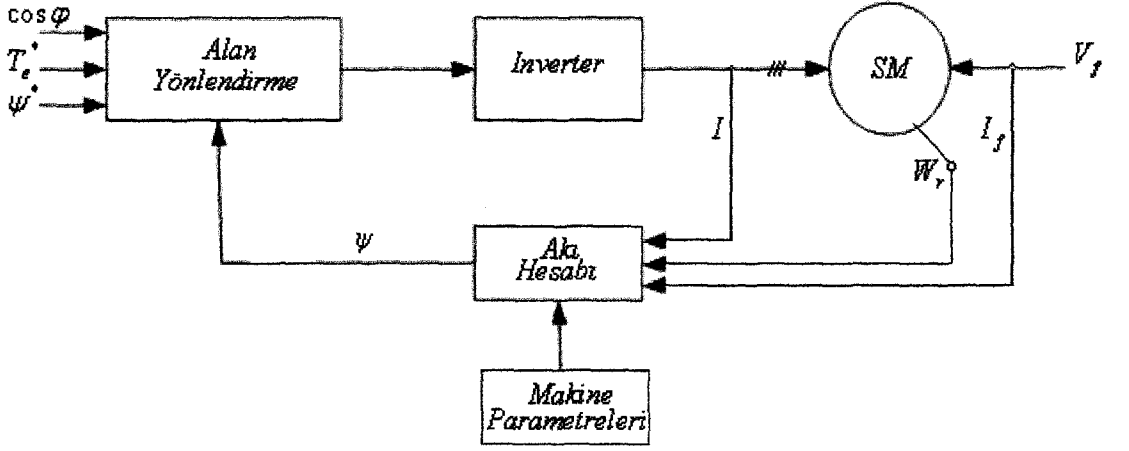
$$T_e = K_{\psi} \cdot I_a \quad (3.2)$$

Alternatif akım motorlarının alan yönlendirme kontrolünde amaç moment ve akının birbirinden bağımsız şekilde kontrolüdür. Böylelikle alternatif akım motorlarından doğru akım motorlarının dinamik ve sürekli durum performansı elde edilebilir. Bu nedenle alan yönlendirme ilkesi genel olarak alternatif akım makineleriyle doğru akım makineleri arasında kurulan benzerliğe dayanır.

Senkron ve asenkron motorların alan yönlendirme kontrolü birbirinden farklıdır. Senkron motorda moment ve akının birbirinden bağımsız bir şekilde bulunduğu kontrol algoritmasını elde etmek oldukça zordur. Çünkü sönüm sargıları ve rotorun çıkık kutuplu olması kontrol dinamiğinde bazı karmaşık problemler ortaya çıkarır.

Alan yönlendirmeli kontrolü gerçekleştirebilmek için yönlendirme akısının genlik ve pozisyonunun bilinmesi gerekir. Yönlendirme akısının genlik ve pozisyon bilgisi ya duyargalar vasıtasıyla doğrudan makine üzerinden ölçülür yada makineden ölçülen büyüklükler yardımıyla dolaylı olarak hesaplanarak bulunur. Dolayısıyla alan yönlendirme kontrolü, doğrudan ve dolaylı alan yönlendirme olarak ikiye ayrılır.

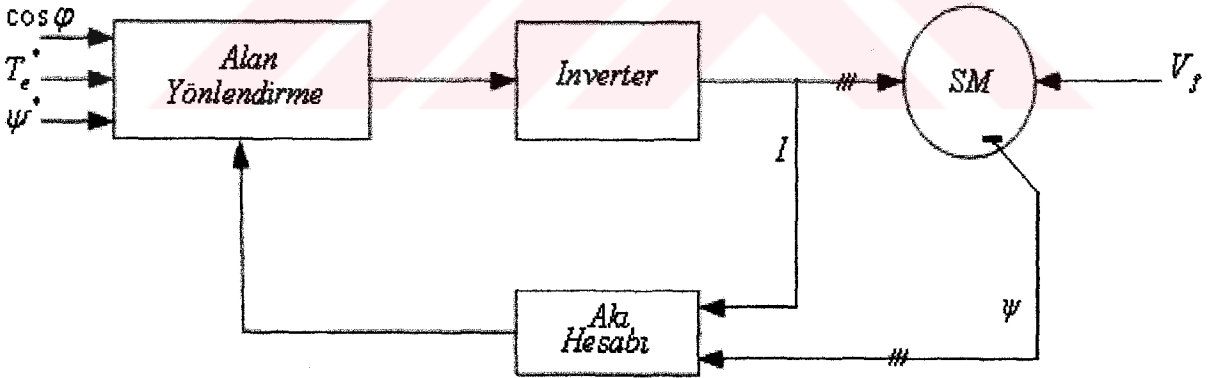
Dolaylı alan yönlendirme kontrolünde, yönlendirme akısının genlik ve pozisyonunun belirlenmesinde rotor açısı ve makine parametrelerine ihtiyaç vardır. Yönlendirme akısının hesabında akım modeli veya gerilim modeli kullanılabilir. Gerilim modelinde akı hesabında integral kullanıldığından dolayı nominal hızın %10'una kadar olan hızlarda integratör istenen cevabı veremeyebilir. Eğer gerilim modeli kullanılacaksa hız bilgisine gerek yoktur. Dolaylı alan yönlendirme kontrolüne ilişkin blok diagram Şekil 3.15'de görülmektedir.



Şekil 3.15. Dolaylı Alan Yönlendirme Kontrolüne İlişkin Blok Diagramı

Bu yöntem , hesap algoritmalarının tükettiği zaman nedeniyle uzun yıllar tercih edilmemişlerdir. Ancak sayısal işaret işleyicilerindeki gelişmelerle, bu problem ortadan kalkmış ve günümüzde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır.

Doğrudan alan yönlendirme kontrolünde ise yönlendirme akısı direkt olarak makine üzerine yerleştirilen duyargalar vasıtasıyla ölçülür. Motorun standart üretim motor olma özelliğini yitiriyor olması, yöntemin uygulanmasını genel olarak laboratuvar çalışmaları ile sınırlandırılmıştır[10]. Doğrudan alan yönlendirme kontrolüne ilişkin blok diagramı Şekil 3.16'da görülmektedir.



Şekil 3.16. Doğrudan Alan Yönlendirme Kontrolüne İlişkin Blok Diagramı

3.3.1. Senkron Motorda Kullanılan Akı Türüne Göre Alan Yönlendirme Yöntemleri

Senkron motorun alan yönlendirme kontrolü kullanılan referans akı büyüklüklerine göre dört ana başlık altında incelenebilir. Bunlar;

- Stator akısı alan yönlendirme
- Hava aralığı akısı alan yönlendirme
- Uyarma akısı alan yönlendirme
- Sönüm sargı akısı alan yönlendirme

Alan yönlendirme kontrolü için, bu akı alan yönlendirme türlerinin birbirlerine göre avantajları ve dezavantajları ortaya konmalıdır.

Oryantasyonun hangi alana göre yapılacağı; stator akım karakterinin kontrolünün gerekli olup olmamasıyla saptanır. Yönlendirme yapılacak akı büyüklüğünün seçimindeki en önemli kriterlerden bir diğeri de güç faktörü kontrolüdür.

Stator akısı alan yönlendirme yöntemi, güç faktörü kontrolüne en uygun yönlendirme yöntemidir. Güç faktörü kontrolü stator değişkenleri içerdiğinden yönlendirme akısı olarak genelde stator akısı kullanılır. Stator akısına yönlendirme yönteminde, yönlendirme akısı hem doğrudan hem de dolaylı akı belirleme yöntemleriyle belirlenebilir. Bu durumda momentin hızlı bir şekilde kontrolü için akı sabit tutulup , moment Is akımı ile ayarlanmalıdır.

Hava aralığı akısı alan yönlendirme güç faktörü kontrolüne tam uygun bir yöntem olmamasına rağmen , kontrol değişken hesabındaki bazı basitliklerden dolayı tercih edilebilen bir kontrol yöntemidir. Yönlendirme akısının referans değeri , mıknatıslanma akımı ile orantılıdır. Stator kaçak akısı büyük olan makinalarda bu yöntem ile elde edilen moment stator akısı alan yönlendirmeye göre daha küçük olur.

Uyarma akısı alan yönlendirme en basit alan yönlendirme yöntemidir. Kontrol kolay ve moment doğrusaldır. Ancak yük arttıkça giriş güç faktörü düşer. Uyarma akısı alan yönlendirme yönteminde moment ve akı arasında tam olarak ayrıştırılmış bir yapı elde edilebilir. Güç faktörü kontrolüne uygun bir yöntem değildir. Sabit uyartımlı makinalar için en uygun yöntemdir. Kalıcı mıknatıs rotorlu (Permanet magnet) ve anahtarlamalı relüktans motoru gibi uyartım sargısı bulunmayan makinalarda kullanılan en yaygın yöntemdir. Genel olarak gerilim kaynağı evirgeçleriyle kullanılır [9].

4. SELF KONTROLLÜ SENKRON MOTORDA ÇIKIKLIK VE AMORTİSÖR SARGI ETKİLERİ

4.1. Genel

Sürücü düzeneğin gücüne bağlı olarak inceleme yapıldığında genel olarak iki başlık ortaya çıkmaktadır. Bunlar orta ve yüksek güç seviyeleridir. Orta ve düşük güç seviyelerinde genel olarak kalıcı mıknatıs rotorlu motorlar ve yuvarlak kutuplu senkron motorlar tercih edilirler. Yüksek güç uygulamaları ise düşük hız ve yüksek hız alt başlıkları altında ele alınabilir. Düşük hız uygulamalarında; çıkık kutuplu senkron motorlar akım kaynağı evirgeci (AKE) ve doğrudan frekans çeviriciler ile çimento sanayindeki döner fırınlarda yaygın olarak kullanılırlar. Yüksek hızlarda ise genelde yuvarlak kutuplu senkron motorlar tercih edilirler [2].

Amortisör sargıları geçici olaylar esnasında oluşabilecek mekanik osilasyonları ve senkron hızdan sapmaları önlemek için senkron makinenin rotoruna bağlanan ve sincap kafesli yapıya benzeyen sargılardır. Geçici olaylar esnasında bu sargılardan sönüm akımları adını verdiğimiz akımlar akar ve bu akımlar makineyi senkronizmde tutacak momentler üretir.

Bu bölümde self kontrollü senkron motordaki çıkıklık ve amortisör sargı etkileri senkron motorun gerilim ve akım kaynaklı evirgeçten beslenme durumları için incelenmiştir. Aynı zamanda çıkıklık ve amortisör sargısının senkron motorun geçici ve sürekli durum performansı üzerindeki etkileri ayrı ayrı karşılaştırmalı olarak ortaya konmuştur. Bu amaçla gerilim ve akım kaynaklı evirgeçten beslenen self kontrollü senkron motorun benzetim programı aşağıdaki dört farklı durum için incelenmiştir;

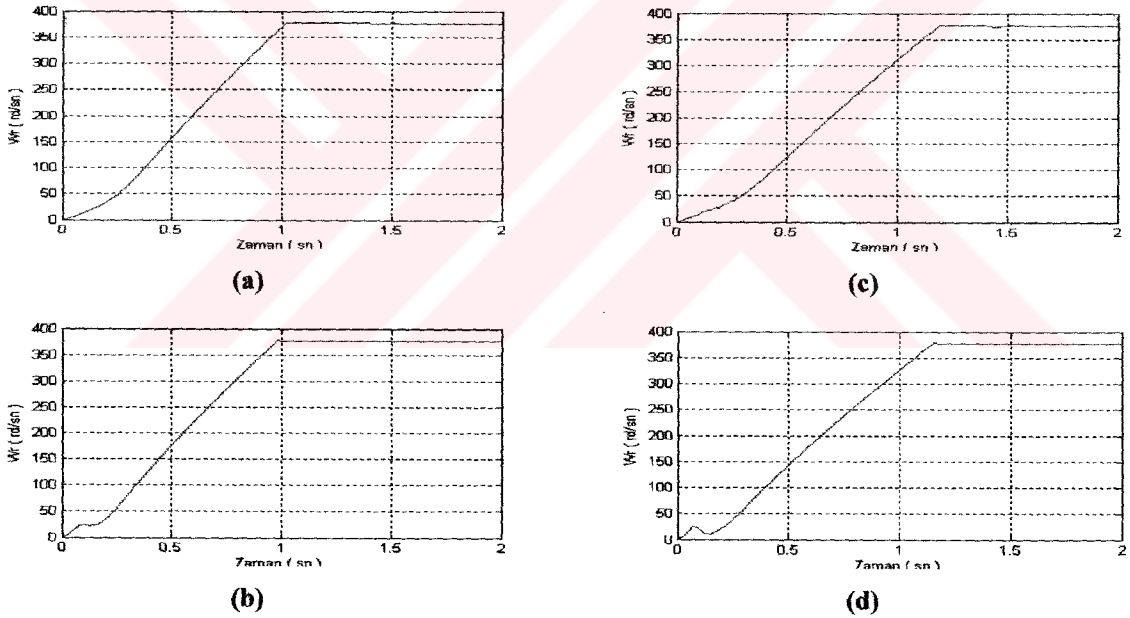
- a) Çıkık kutuplu amortisör sargılı senkron motor
- b) Çıkık kutuplu amortisör sargsız senkron motor
- c) Yuvarlak kutuplu amortisör sargılı senkron motor
- d) Yuvarlak kutuplu amortisör sargsız senkron motor

4.2. Gerilim Kaynaklı Evirgeçten Beslenen Self Kontrollü Senkron Motorda Çıkıklık ve Amortisör Sargı Etkileri

Bu bölümde çıkıklık ve amortisör sargısının senkron motorun performansı üzerindeki etkileri incelenirken daha önce Bölüm 3’de bahsedilen gerilim kaynaklı evirgeçten beslenen self kontrollü senkron motorun Matlab / Simulink modeli esas alınmıştır. Yukarıdaki dört farklı durum için de sonuçları incelemek için ek olarak senkron motorun amortisör sargsız olma durumu için bir senkron motor modeli oluşturulmuştur.

Benzetim programı dört farklı durum için de aynı koşullarda çalıştırılmıştır. Benzetim programı ilk önce yüksüz olarak çalıştırılıp, motor sürekli durum hızına ulaştıktan sonra (1.4 s sonra) yük devreye alınmıştır. Bir başka deyişle 0-1.4 s aralığında yüksüz, 1.4-2 s aralığında yüklü olarak çalıştırılmıştır. Geçici duruma ait sonuçlar 0-0.8 s aralığı, sürekli duruma ait sonuçlar ise 1.8-1.85 s aralığında alınmıştır.

Şekil 4.1'de gerilim kaynaklı altı adımli evirgeçten beslenen self kontrollü senkron motorun (VSI-SCSM) dört farklı durumu için hızının zamana göre değişimi görülmektedir. Burada senkron motorun hem çıkık hem de yuvarlak kutuplu olma durumunda; amortisör sargısız senkron motorun (Şekil 4.1 b ve d) amortisör sargılı senkron motora (Şekil 4.1 a ve c) göre daha kısa sürede sürekli durum hızına ulaştığı görülmüyor. Aynı zamanda senkron motorun çıkık kutuplu olma durumunda (Şekil 4.1 a ve b) yuvarlak kutuplu olma durumuna (Şekil 4.1 c ve d) göre daha kısa sürede sürekli durum hızına ulaştığı görülmüyor. Bu durumun çıkık kutuplu senkron motorun moment değerinin yuvarlak kutuplu senkron motor moment değerinden relüktans momenti kadar fazla olmasından dolayı kaynaklandığını söyleyebiliriz.



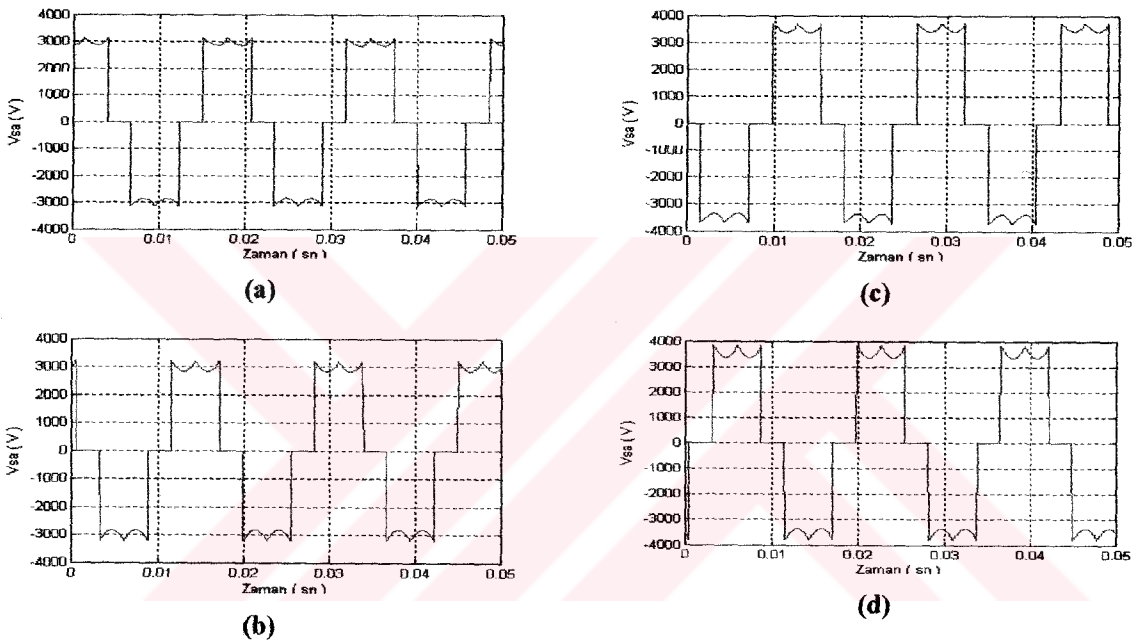
Şekil 4.1. VSI-SCSM'un Hızının Değişimi

- | | |
|---|--|
| a) Çıkık kutuplu amortisör sargılı senkron motor | c) Yuvarlak kutuplu amortisör sargılı senkron motor |
| b) Çıkık kutuplu amortisör sargısız senkron motor | d) Yuvarlak kutuplu amortisör sargısız senkron motor |

Amortisör sargıları, sabit frekanslı sinüsoidal bir gerilim kaynağından beslenen bir senkron makinedeki geçici yük değişimleri durumunda kararlılığı devam ettirmek için

gereklidir. Bu durum Şekil 4.1’de senkron motorun amortisör sargısız olma durumunda düşük hızlardaki dalgalanmalardan da açıkça görülmektedir.

Şekil 4.2’de gerilim kaynaklı altı adımlı evirgeçten beslenen self kontrollü senkron motorun sürekli durumdaki faz geriliminin zamana göre değişimi dört farklı durum için görülmektedir. Sürekli durum için alınan bu sonuçlardan görüleceği üzere senkron motorun çıkık kutuplu olma durumunda (Şekil 4.2. a ve b) faz geriliminin genliği hemen hemen aynıdır. Aynı zamanda senkron motorun yuvarlak kutuplu olma durumunda da (Şekil 4.2. c ve d) faz gerilimlerinin genlikleri eşittir. Burada aynı yük değeri için yuvarlak kutuplu senkron motor için gerekli olan gerilim genliği çıkık kutuplu senkron motora göre daha fazladır.

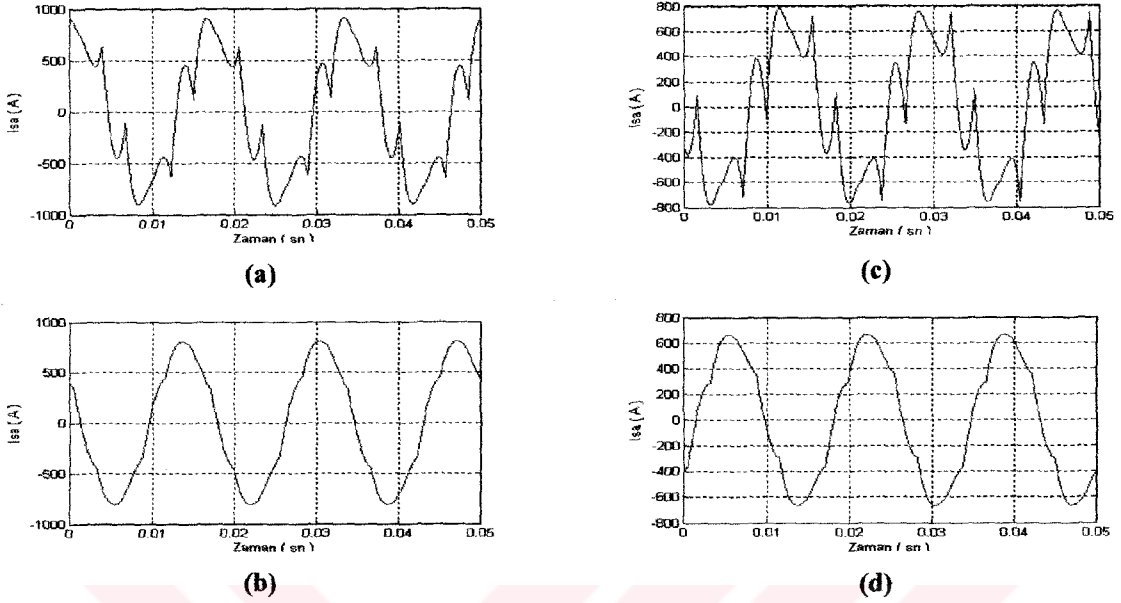


Şekil 4.2. VSI-SCSM’un Sürekli Durum Koşullarında Faz Geriliminin Değişimi

- | | |
|---|--|
| a) Çıkık kutuplu amortisör sargılı senkron motor | c) Yuvarlak kutuplu amortisör sargılı senkron motor |
| b) Çıkık kutuplu amortisör sargısız senkron motor | d) Yuvarlak kutuplu amortisör sargısız senkron motor |

Şekil 4.3’de gerilim kaynaklı altı adımlı evirgeçten beslenen self kontrollü senkron motorun sürekli durumdaki faz akımının zamana göre değişimi dört farklı durum için görülmektedir. Sonuçlardan da görüleceği üzere amortisör sargılı senkron motorun (Şekil 4.3 a ve c) faz akımındaki dalgalanmalar amortisör sargısız senkron motora (Şekil 4.3 b ve d) göre daha fazladır. Ayrıca amortisör sargılı senkron motorun faz akımının tepe genliği amortisör sargısız senkron motora göre daha fazladır. Buna amortisör sargılarının olmaması durumunda gerilim harmonikleri tarafından görünen yüksek empedans sebep olur. Aynı zamanda çıkık

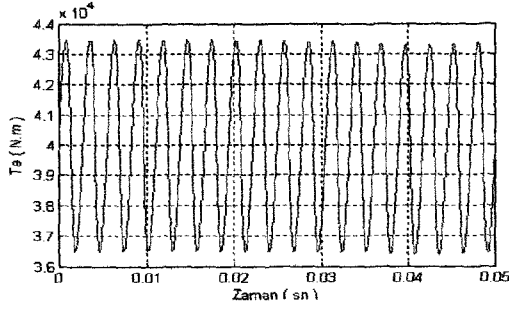
kutuplu senkron motordaki (Şekil 4.3 a ve b) akımın maksimum değeri, yuvarlak kutuplu senkron motora (Şekil 4.3 c ve d) göre daha fazladır.



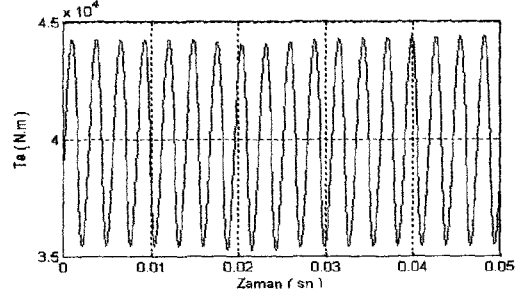
Şekil 4.3. VSI-SCSM'un Sürekli Durum Koşullarında Faz Akımının Değişimi

- | | |
|---|--|
| a) Çıkık kutuplu amortisör sargılı senkron motor | c) Yuvarlak kutuplu amortisör sargılı senkron motor |
| b) Çıkık kutuplu amortisör sargısız senkron motor | d) Yuvarlak kutuplu amortisör sargısız senkron motor |

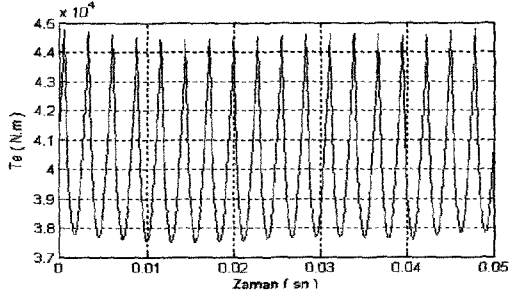
Gerilim kaynaklı altı adımlı evirgeçten beslenen self kontrollü senkron motorun sürekli durumdaki momentinin zamana göre değişimi dört farklı durum için Şekil 4.4'de görülmektedir. Alınan dört farklı durum için de, senkron motor momentinin sürekli durumda esas frekansın altı katı bir frekansta dalgalandığı görülmektedir. Bu durumun senkron motorun altı adımlı bir evirgeçten beslenmesinin bir sonucu olduğunu söyleyebiliriz. Senkron motorun sürekli durumdaki ortalama moment değeri dört farklı durum için de aynıdır. Aynı zamanda yuvarlak kutuplu senkron motordaki (Şekil 4.4 c) moment dalgalanmasının çıkık kutuplu senkron motora (Şekil 4.4 a) göre daha fazladır. Bu durum senkron motorun yuvarlak kutuplu olması durumunda q-eksen reaktansının çıkık kutuplu senkron motora göre artmasının bir sonucudur.



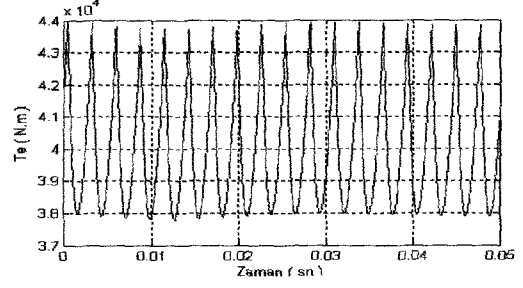
(a)



(c)



(b)



(d)

Şekil 4.4. VSI-SCSM'un Sürekli Durum Koşullarında Momentinin Değişimi

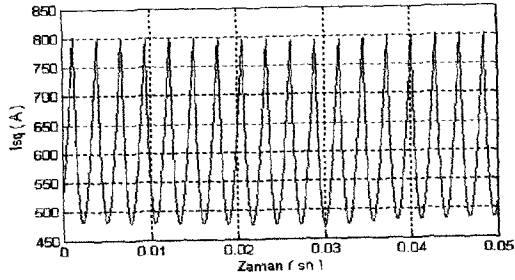
a) Çıkık kutuplu amortisör sargılı senkron motor

c) Yuvarlak kutuplu amortisör sargılı senkron motor

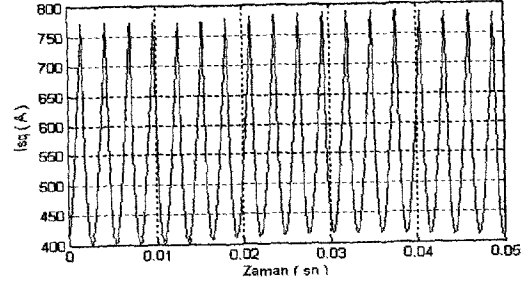
b) Çıkık kutuplu amortisör sargısız senkron motor

d) Yuvarlak kutuplu amortisör sargısız senkron motor

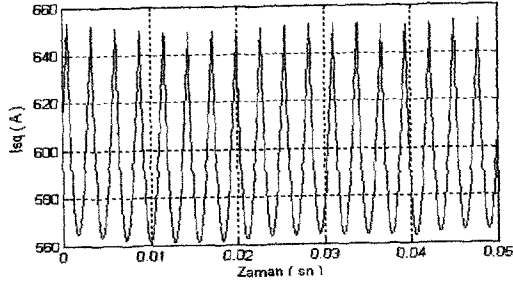
Şekil 4.5'de gerilim kaynaklı altı adımlı evirgeçten beslenen self kontrollü senkron motorun sürekli durum koşullarındaki stator q-eksen akımının zamana göre değişimi dört farklı durum için görülmektedir. Stator q-eksen akımının da tıpkı Şekil 4.4'deki momentteki gibi esas frekansın altı katı bir frekansta dalgalandığı görülüyor. Çıkık kutuplu amortisör sargılı senkron motor (Şekil 4.5 a) ile çıkık kutuplu amortisör sargısız senkron motorun (Şekil 4.5 b) stator q-eksen akımının ortalama değeri hemen hemen aynıdır. Aynı şekilde yuvarlak kutuplu amortisör sargılı senkron motor (Şekil 4.5 c) ile yuvarlak kutuplu amortisör sargısız senkron motorun (Şekil 4.5 d) stator q-eksen akımının ortalama değeri de aynıdır. Yuvarlak kutuplu senkron motorun (Şekil 4.5 c ve d) ortalama stator q-eksen akımı çıkık kutuplu senkron motorunkinden (Şekil 4.5 a ve b) daha düşüktür. Yuvarlak kutuplu amortisör sargılı senkron motorun (Şekil 4.5 b) stator q-eksen akımındaki dalgalanma çıkık kutuplu amortisör sargılı senkron motora (Şekil 4.5 a) göre daha fazladır.



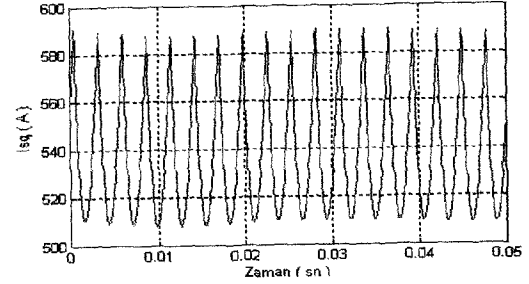
(a)



(c)



(b)



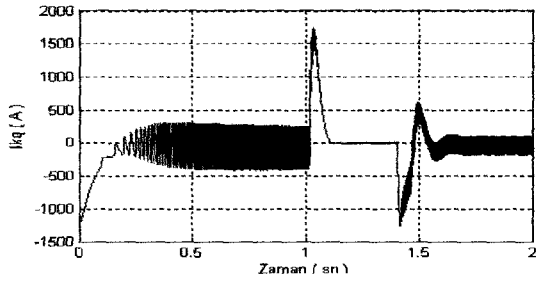
(d)

Şekil 4.5. VSI-SCSM'un Sürekli Durum Koşullarında Stator Q-eksen Akımının Değişimi

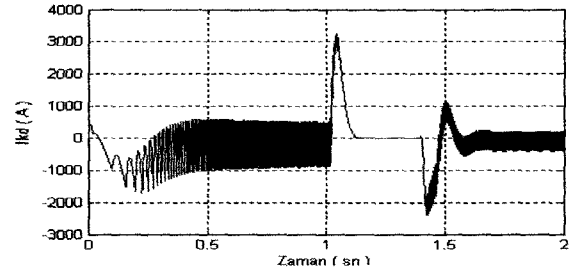
- a) Çıkık kutuplu amortisör sargılı
senkron motor
- b) Çıkık kutuplu amortisör sargısız
senkron motor

- c) Yuvarlak kutuplu amortisör sargılı
senkron motor
- d) Yuvarlak kutuplu amortisör
sargısız senkron motor

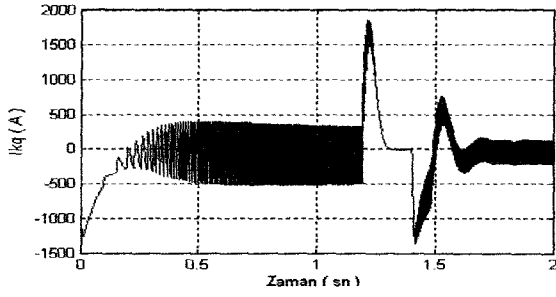
Şekil 4.6'da gerilim kaynaklı altı adımlı evirgeçten beslenen self kontrollü senkron motorun amortisör sargı akımlarının zamana göre değişimleri, senkron motorun yuvarlak ve çıkık kutuplu olduğu iki farklı durum için görülmektedir. Amortisör sargıları geçici olaylar esnasında oluşabilecek mekanik osilasyonları ve senkron hızdan sapmaları önler. Geçici olaylar esnasında bu sargılardan sönüm akımları adını verdiğimiz akımlar akar ve bu akımlar makineyi senkronizmde tutacak momentler üretir. Sonuçlardan da görüleceği üzere sürekli durumda da gerilim harmoniklerinden dolayı amortisör sargılarından akımlar akar. Bu akımlar makinedeki kayıpların artmasına ve ek ısınmalara sebep olur.



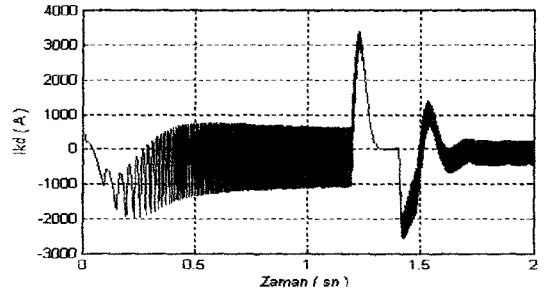
(a)



(a)



(b)



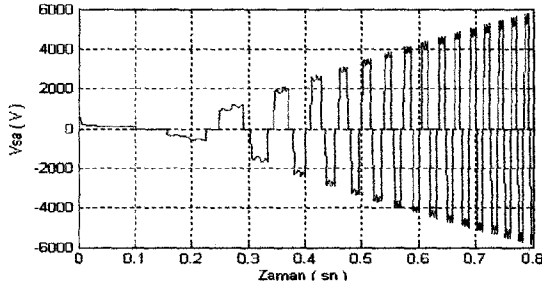
(b)

Şekil 4.6. VSI-SCSM'un Amortisör Sargı Akımlarının Değişimi

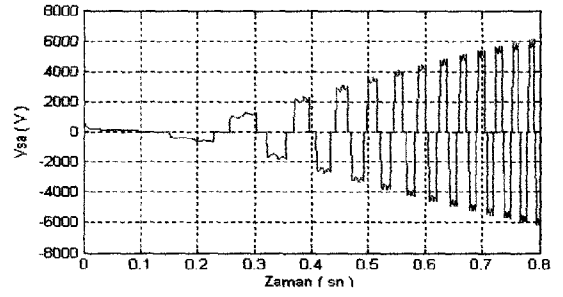
a) Çıkık kutuplu amortisör sargılı
senkron motor

b) Yuvarlak kutuplu amortisör sargılı
senkron motor

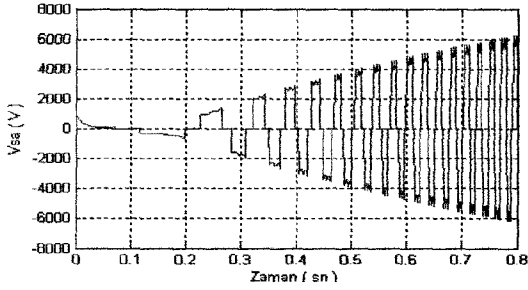
Şekil 4.7' de gerilim kaynaklı altı adımlı evirgeçten beslenen self kontrollü senkron motorun geçici rejimdeki faz gerilimleri dört farklı durum için görülmektedir. Dört farklı durumda da gerilimin genliği frekansla orantılı olarak artmaktadır. Yuvarlak kutuplu senkron motorun geriliminin maksimum değeri çıkık kutuplu senkron motora göre daha büyüktür.



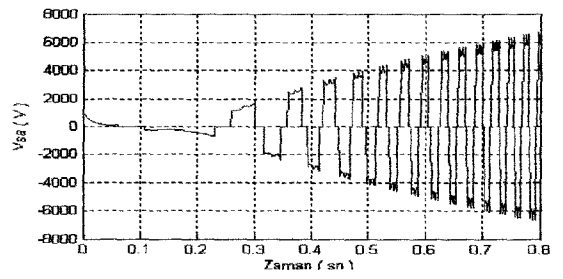
(a)



(c)



(b)

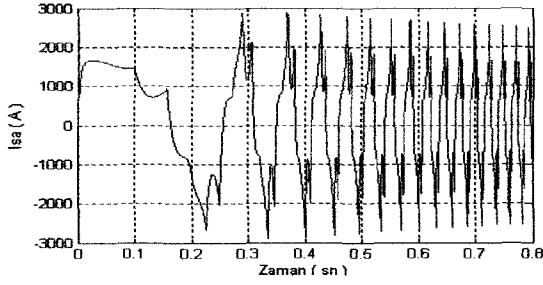


(d)

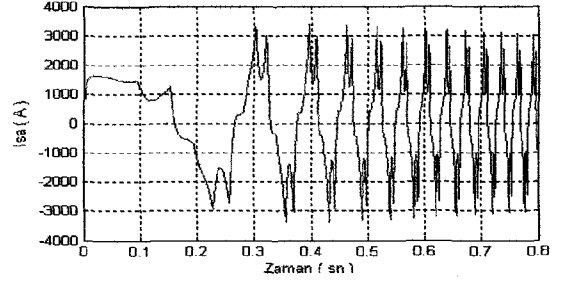
Şekil 4.7. VSI-SCSM'un Geçici Durum Koşullarında Faz Geriliminin Değişimi

- | | |
|---|--|
| a) Çıkık kutuplu amortisör sargılı senkron motor | c) Yuvarlak kutuplu amortisör sargılı senkron motor |
| b) Çıkık kutuplu amortisör sargısız senkron motor | d) Yuvarlak kutuplu amortisör sargısız senkron motor |

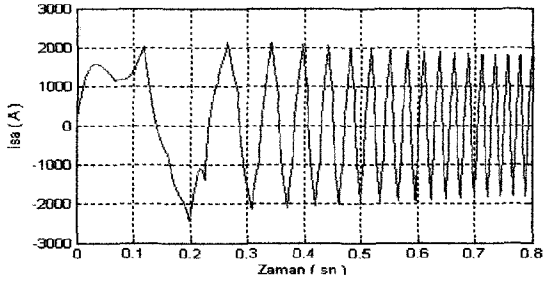
Şekil 4.8'de gerilim kaynağı evirgecinden beslenen self kontrollü senkron motorun geçici rejimdeki faz akımının zamana göre değişimi dört farklı durum için görülmektedir. Yuvarlak kutuplu senkron motorun faz akımının genliği (Şekil 4.8 c ve d), çıkık kutuplu senkron motorunkinden (Şekil 4.8 a ve b) daha büyüktür. Aynı zamanda amortisör sargılı senkron motordaki akımın maksimum değeri amortisör sargısız senkron motorunkinden büyüktür.



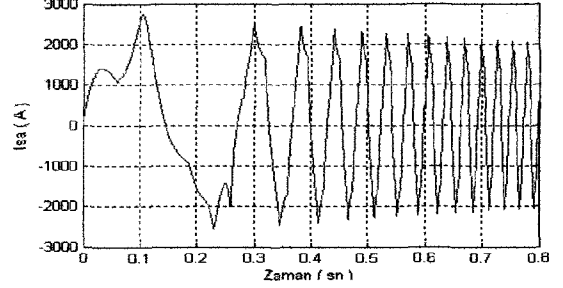
(a)



(c)



(b)

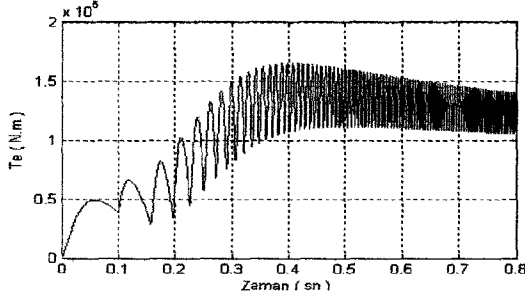


(d)

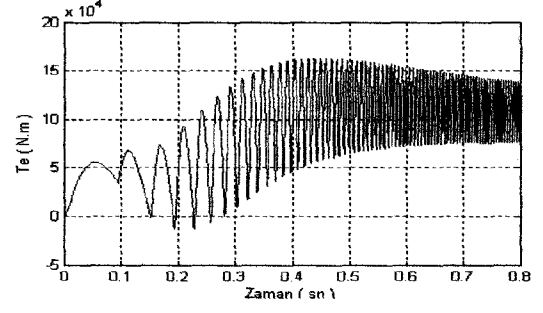
Şekil 4.8. VSI-SCSM'un Geçici Durum Koşullarında Faz Akımının Değişimi

- | | |
|---|--|
| a) Çıkık kutuplu amortisör sargılı senkron motor | c) Yuvarlak kutuplu amortisör sargılı senkron motor |
| b) Çıkık kutuplu amortisör sargısız senkron motor | d) Yuvarlak kutuplu amortisör sargısız senkron motor |

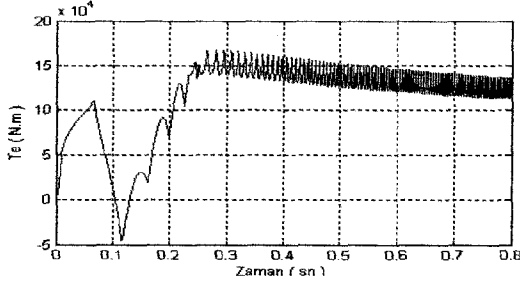
Şekil 4.9'da gerilim kaynağı evirgecinden beslenen self kontrollü senkron motorun geçici rejimdeki momentinin zamana göre değişimi dört farklı durum için görülmektedir. Momentin sürekli rejimde olduğu gibi geçici rejimde de esas frekansının altı katı bir frekansta dalgalandığı görülüyor. Sonuçlardan da görüleceği üzere geçici rejimde amortisör sargılı senkron motorun (Şekil 4.9 a ve c) momentindeki dalgalanmalar amortisör sargısız senkron motorunkinden (Şekil 4.9 b ve d) daha fazladır.



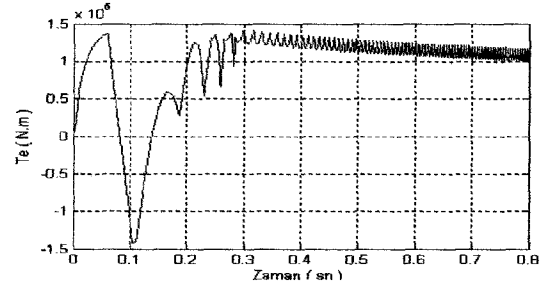
(a)



(c)



(b)

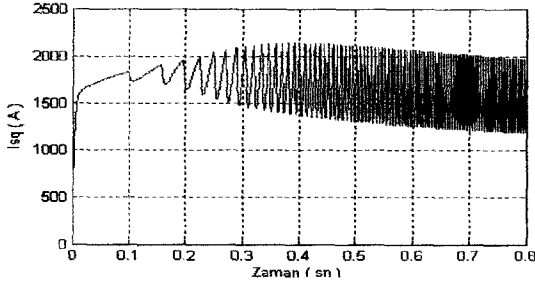


(d)

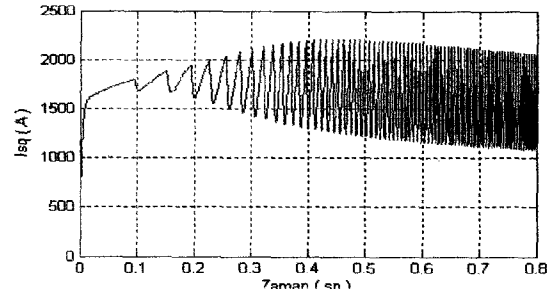
Şekil 4.9. VSI-SCSM'un Geçici Durum Koşullarında Momentin Değişimi

- | | |
|---|--|
| a) Çıkık kutuplu amortisör sargılı senkron motor | c) Yuvarlak kutuplu amortisör sargılı senkron motor |
| b) Çıkık kutuplu amortisör sargısız senkron motor | d) Yuvarlak kutuplu amortisör sargısız senkron motor |

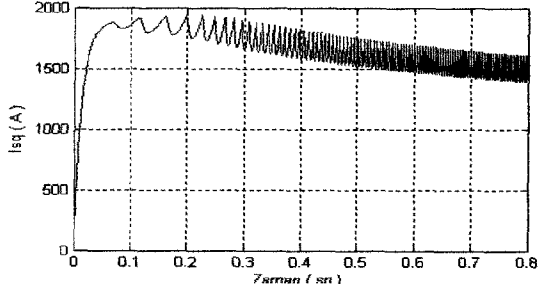
Şekil 4.10'da gerilim kaynaklı altı adımlı evirgeçten beslenen self kontrollü senkron motorun geçici rejimdeki stator q-eksen akımının zamana göre değişimi dört farklı durum için görülmektedir. Senkron motorun stator q-eksen akımının da tıpkı moment gibi esas frekansın altı katı bir frekansta dalgalandığı görülüyor.



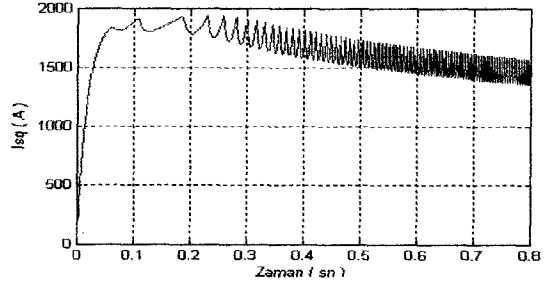
(a)



(c)



(b)



(d)

Şekil 4.10. VSI-SCSM'un Geçici Durum Koşullarında Stator Q-eksen Akımının Değişimi

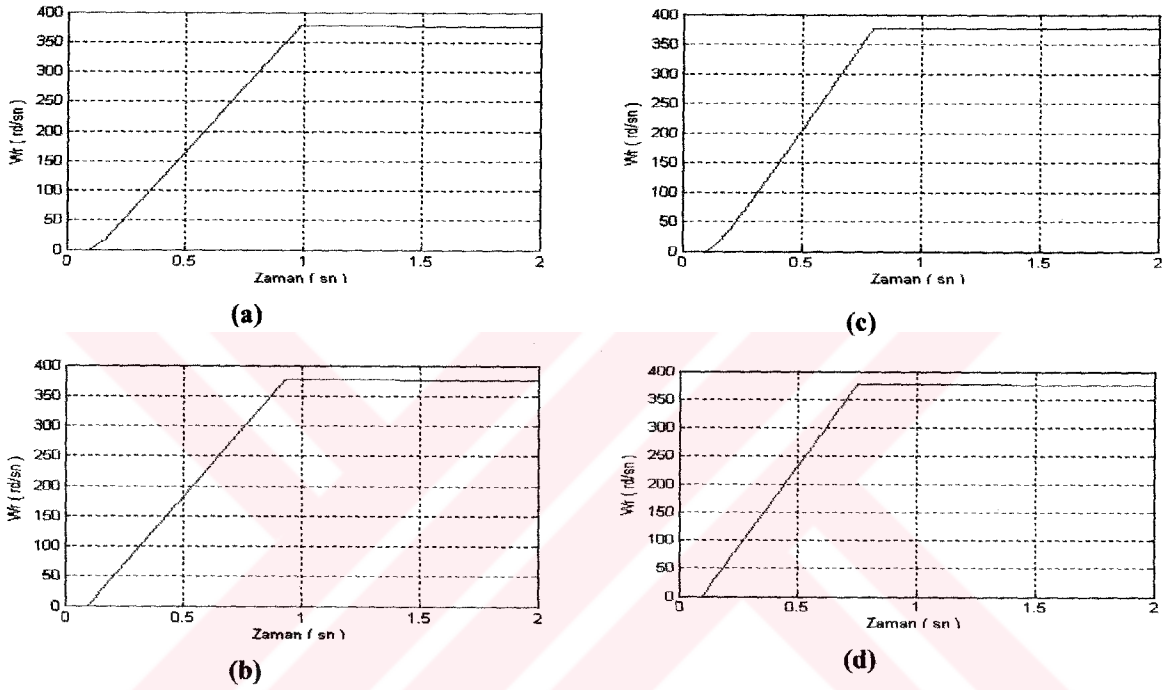
- | | |
|---|--|
| a) Çıkık kutuplu amortisör sargılı senkron motor | c) Yuvarlak kutuplu amortisör sargılı senkron motor |
| b) Çıkık kutuplu amortisör sargısız senkron motor | d) Yuvarlak kutuplu amortisör sargısız senkron motor |

4.3. Akım Kaynaklı Evirgeçten Beslenen Self Kontrollü Senkron Motorda Çıkıklık ve Amortisör Sargı Etkileri

Senkron motorun self kontrolü doğrudan frekans çeviriciler, gerilim kaynağı ve akım kaynağı evirgeçleriyle gerçekleştirilebilir. Bunun yanında literatürde senkron motorun self kontrolü en çok akım kaynaklı evirgeç kullanılarak incelenmiştir.

Akım kaynaklı evirgeçten beslenen self kontrollü senkron motordaki (CSI-SCSM) çıkıklık ve amortisör sargı etkileri incelenirken Bölüm 3'de bahsedilen akım kaynaklı evirgeçten beslenen self kontrollü senkron motorun Matlab / Simulink modeli kullanılmıştır. Akım kaynaklı altı adımlı evirgeçten beslenen self kontrollü senkron motorun benzetim programı çalıştırılırken gerilim kaynaklı altı adımlı evirgeçten beslenen self kontrollü senkron motorun benzetim programından farklı olarak, ilk 0.1 s sadece uyarma gerilimi uygulanıp, daha sonra kaynak akımı motora verilmiştir. Benzetim programı 0-1.4 s aralığında yüksüz, 1.4-2 s aralığında yüklü olarak çalıştırılmıştır. Geçici duruma ait sonuçlar 0.1-0.6 s aralığı, sürekli duruma ait sonuçlar ise 1.8-185 s aralığında alınmıştır.

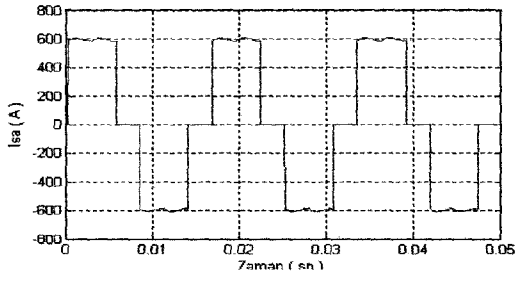
Şekil 4.11'de akım kaynaklı altı adımlı evirgeçten beslenen self kontrollü senkron motorun hızının zamana göre değişimi dört farklı durum için görülmektedir. Sonuçlardan da görüleceği üzere yuvarlak kutuplu senkron motor (Şekil 4.11 c ve d) çıkık kutuplu senkron motora (Şekil 4.11 a ve b) göre daha kısa sürede sürekli durum hızına ulaşmıştır. Buna çıkıklığın olmadığı durumda q-eksen reaktansının artması neden olur. Aynı zamanda amortisör sargısız senkron motorun (Şekil 4.11 b ve d) amortisör sargılı senkron motora (Şekil 4.11 a ve c) göre daha kısa sürede sürekli durum hızına ulaştığı görülmektedir.



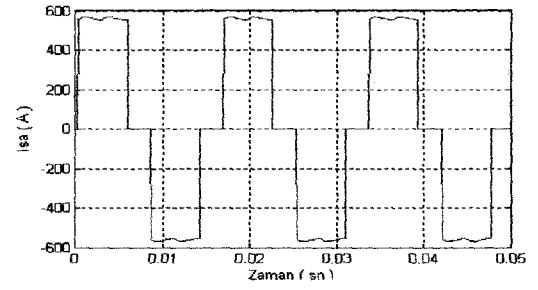
Şekil 4.11. CSI-SCSM'un Hızının Değişimi

- | | |
|---|--|
| a) Çıkık kutuplu amortisör sargılı senkron motor | c) Yuvarlak kutuplu amortisör sargılı senkron motor |
| b) Çıkık kutuplu amortisör sargısız senkron motor | d) Yuvarlak kutuplu amortisör sargısız senkron motor |

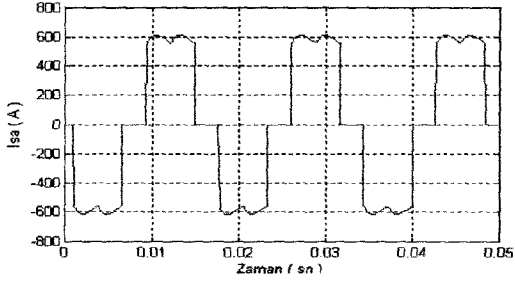
Şekil 4.12'de akım kaynaklı altı adımlı evirgeçten beslenen self kontrollü senkron motorun sürekli durumdaki faz akımının zamana göre değişimi dört farklı durum için görülmektedir. Buradan çıkık kutuplu amortisör sargılı senkron motor (Şekil 4.12 a) ile çıkık kutuplu amortisör sargısız senkron motorun (Şekil 4.12 b) faz akımının genliği aynıdır. Aynı şekilde yuvarlak kutuplu amortisör sargılı senkron motor (Şekil 4.12 c) ile yuvarlak kutuplu amortisör sargısız senkron motorun (Şekil 4.12 d) faz akımının genliğinin de aynı olduğu görülmektedir. Bunun yanında yuvarlak kutuplu senkron motorun (Şekil 4.12 c ve d) faz akımının tepe değeri çıkık kutuplu senkron motora (Şekil 4.12 a ve b) göre daha düşüktür.



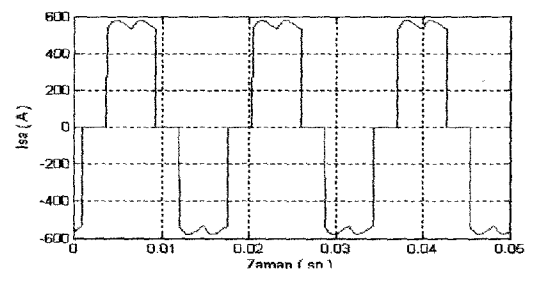
(a)



(c)



(b)

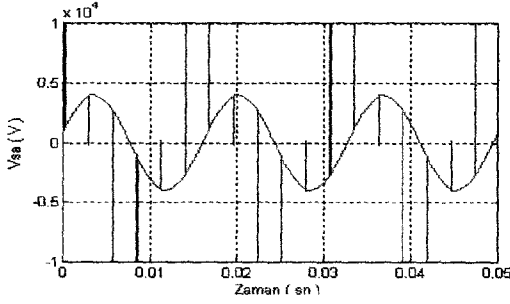


(d)

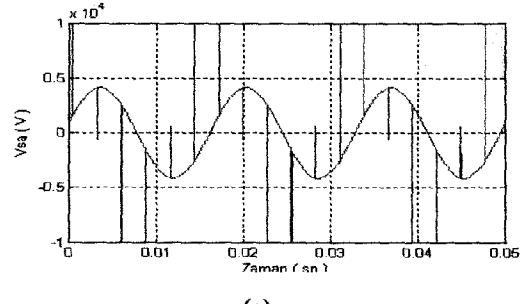
Şekil 4.12. CSI-SCSM'un Sürekli Durum Koşullarında Faz Akımının Değişimi

- | | |
|---|--|
| a) Çıkık kutuplu amortisör sargılı senkron motor | c) Yuvarlak kutuplu amortisör sargılı senkron motor |
| b) Çıkık kutuplu amortisör sargısız senkron motor | d) Yuvarlak kutuplu amortisör sargısız senkron motor |

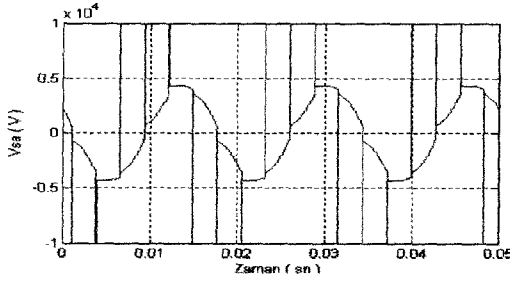
Şekil 4.13'de akım kaynaklı altı adımlı evirgeçten beslenen self kontrollü senkron motorun sürekli durum koşullarındaki faz geriliminin zamana göre değişimi dört farklı durum için görülmektedir. Sonuçlardan, senkron motorun amortisör sargılı olma durumunda (Şekil 4.13 a ve c) faz geriliminin dalga şeklinin amortisör sargısız senkron motora (Şekil 4.13 b ve d) göre daha sinüzoidal olduğu görülmektedir. Yuvarlak kutuplu senkron motorun (Şekil 4.13 c ve d) faz geriliminin genliği çıkık kutuplu senkron motora (Şekil 4.13 a ve b) göre daha büyüktür. Aynı zamanda amortisör sargısız senkron motorun (Şekil 4.13 b ve d) faz gerilim genliği amortisör sargılı senkron motora (Şekil 4.13 a ve c) göre daha büyüktür.



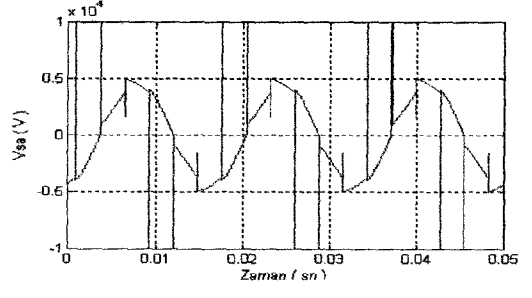
(a)



(c)



(b)

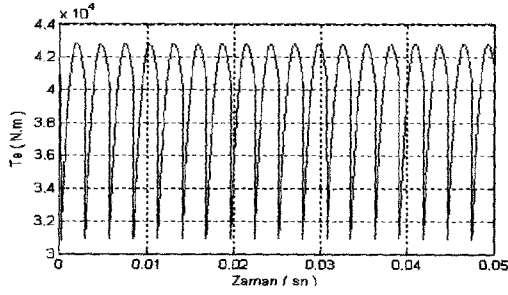


(d)

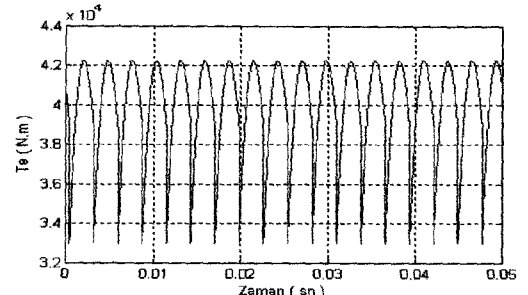
Şekil 4.13. CSI-SCSM'un Sürekli Durum Koşullarında Faz Geriliminin Değişimi

- | | |
|---|--|
| a) Çıkık kutuplu amortisör sargılı senkron motor | c) Yuvarlak kutuplu amortisör sargılı senkron motor |
| b) Çıkık kutuplu amortisör sargısız senkron motor | d) Yuvarlak kutuplu amortisör sargısız senkron motor |

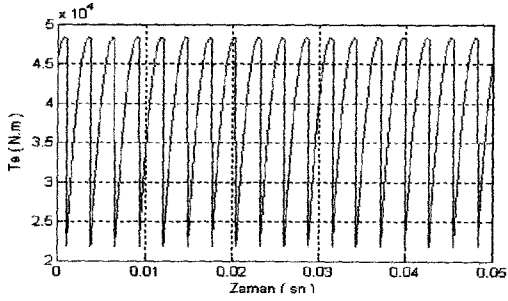
Şekil 4.14'de akım kaynaklı altı adımlı evirgeçten beslenen self kontrollü senkron motorun sürekli durum koşullarındaki momentinin zamana göre değişimi dört farklı durum için görülmektedir. Burada dört farklı durum için de sürekli durumdaki ortalama moment değeri aynıdır. Amortisör sargılı senkron motordaki (Şekil 4.14 a ve c) moment dalgalanması amortisör sargısız senkron motora (Şekil 4.14 b ve d) göre daha azdır. Aynı zamanda yuvarlak kutuplu senkron motordaki (Şekil 4.14 c ve d) moment dalgalanması çıkık kutuplu senkron motora (Şekil 4.14 a ve b) göre daha azdır.



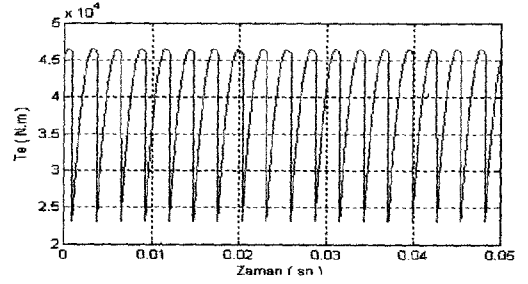
(a)



(c)



(b)

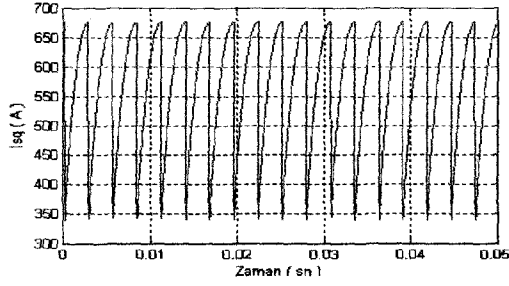


(d)

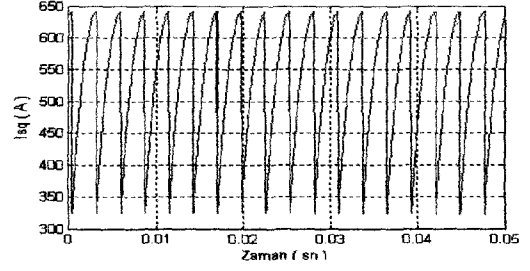
Şekil 4.14. CSI-SCSM'un Sürekli Durum Koşullarında Momentinin Değişimi

- | | |
|---|--|
| a) Çıkık kutuplu amortisör sargılı senkron motor | c) Yuvarlak kutuplu amortisör sargılı senkron motor |
| b) Çıkık kutuplu amortisör sargısız senkron motor | d) Yuvarlak kutuplu amortisör sargısız senkron motor |

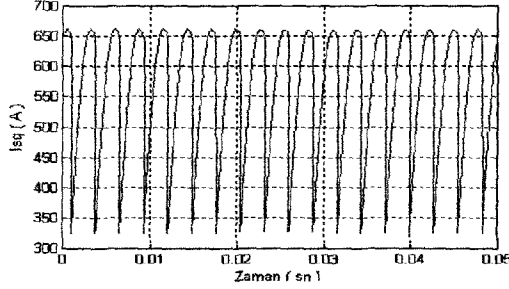
Şekil 4.15'de akım kaynaklı altı adımlı evirgeçten beslenen self kontrollü senkron motorun sürekli durum koşullarındaki stator q-eksen akımının zamana göre değişimi dört farklı durum için görülmektedir. Sonuçların bir önceki moment dalga şekline oldukça benzediği görülmektedir. Burada çıkık kutuplu amortisör sargılı senkron motor (Şekil 4.15 a) ile çıkık kutuplu amortisör sargısız senkron motordaki (Şekil 4.15 b) stator q-eksen akımındaki dalgalanma hemen hemen aynıdır. Aynı şekilde yuvarlak kutuplu amortisör sargılı senkron motor (Şekil 4.15 c) ile yuvarlak kutuplu amortisör sargısız senkron motordaki (Şekil 4.15 d) stator q-eksen akımındaki dalgalanma da hemen hemen aynıdır. Bunun yanında çıkık kutuplu senkron motordaki (Şekil 4.15 a ve b) stator q-eksen akımındaki dalgalanmanın yuvarlak kutuplu senkron motora (Şekil 4.15 c ve d) göre biraz daha fazla olduğu görülmektedir.



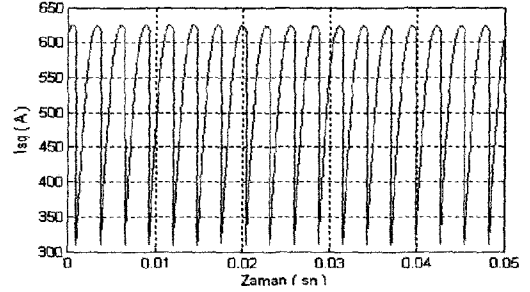
(a)



(c)



(b)



(d)

Şekil 4.15. CSI-SCSM'un Sürekli Durum Koşullarında Stator Q-eksen Akımının Değişimi

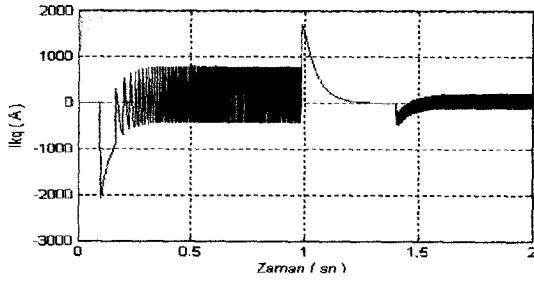
a) Çıkık kutuplu amortisör sargılı senkron motor

c) Yuvarlak kutuplu amortisör sargılı senkron motor

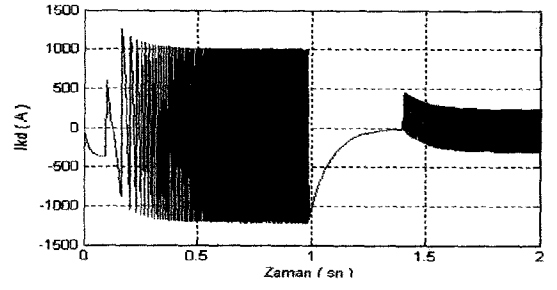
b) Çıkık kutuplu amortisör sargısız senkron motor

d) Yuvarlak kutuplu amortisör sargısız senkron motor

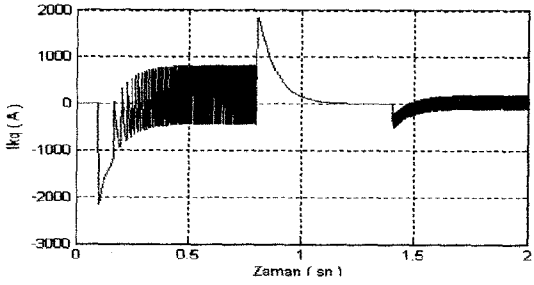
Şekil 4.16'da akım kaynaklı altı adımlı evirgeçten beslenen self kontrollü senkron motorun amortisör sargı akımlarının zamana göre değişimleri, senkron motorun yuvarlak ve çıkık kutuplu olduğu iki farklı durum için görülmektedir. Amortisör sargıları geçici olaylar esnasında oluşabilecek mekanik osilasyonları ve senkron hızdan sapmaları önler. Şekil 4.16'dan da görüldüğü üzere geçici durumlarda amortisör sargılarından önemli akımlar akar. Akan bu akımlar makineyi senkronizmde tutar. Yuvarlak kutuplu senkron motorun amortisör sargı akımlarındaki dalgalanma çıkık kutuplu senkron motordakilerle hemen hemen aynı olduğu görülmektedir.



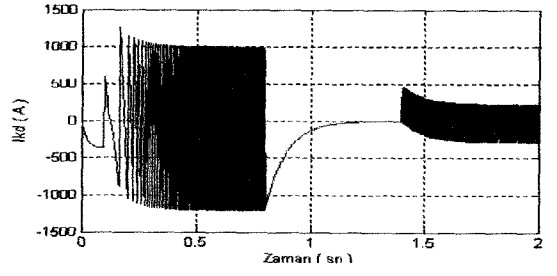
(a)



(a)



(b)



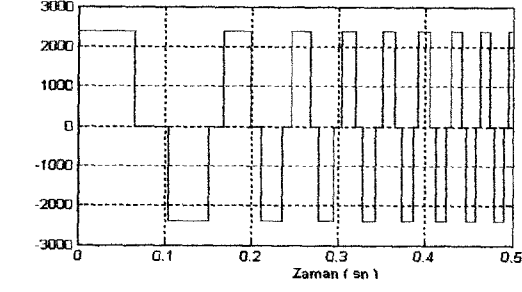
(b)

Şekil 4.16. CSI-SCSM'un Amortisör Sargı Akımlarının Değişimi

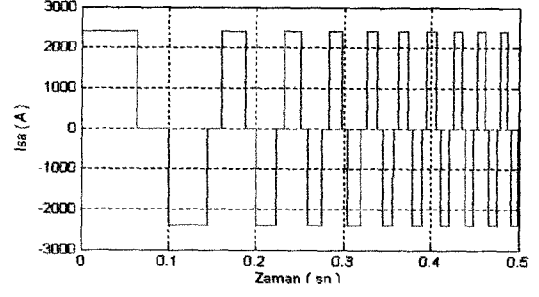
a) Çıkık kutuplu amortisör sargılı senkron motor

b) Yuvarlak kutuplu amortisör sargılı senkron motor

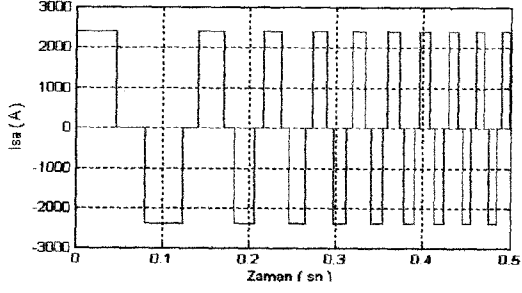
Şekil 4.17'de akım kaynaklı altı adımlı evirgeçten beslenen self kontrollü senkron motorun geçici durum koşullarındaki faz akımının zamana göre değişimi dört farklı durum için görülmektedir. Senkron motorun geçici durumdaki faz akımının genliği dört farklı durum içinde yaklaşık aynıdır.



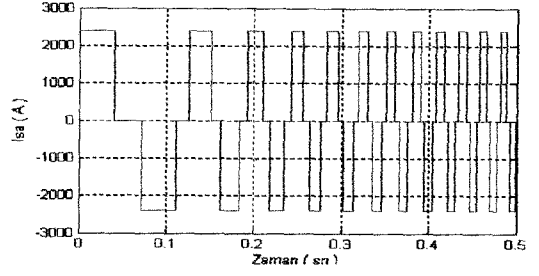
(a)



(c)



(b)

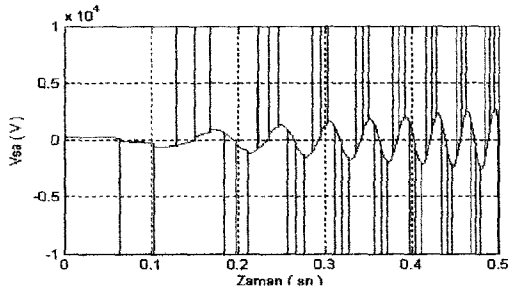


(d)

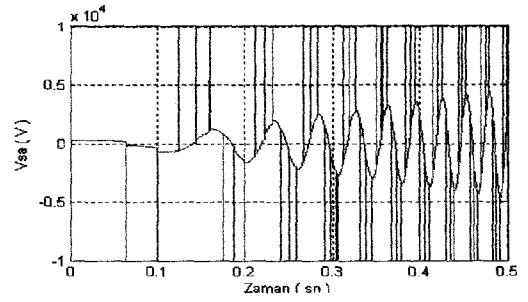
Şekil 4.17. CSI-SCSM'un Geçici Durum Koşullarında Faz Akımının Değişimi

- | | |
|---|--|
| a) Çıkık kutuplu amortisör sargılı senkron motor | c) Yuvarlak kutuplu amortisör sargılı senkron motor |
| b) Çıkık kutuplu amortisör sargısız senkron motor | d) Yuvarlak kutuplu amortisör sargısız senkron motor |

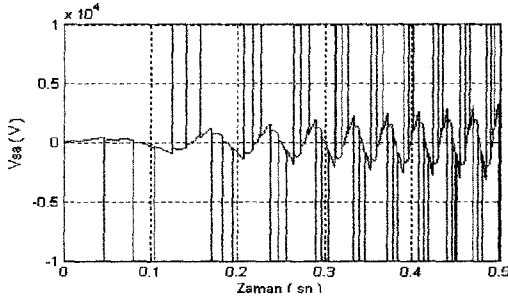
Şekil 4.18'de akım kaynaklı altı adımlı evirgeçten beslenen self kontrollü senkron motorun geçici durum koşullarındaki faz geriliminin zamana göre değişimi dört farklı durum için görülmektedir. Geçici durumda amortisör sargılı senkron motorun faz geriliminin amortisör sargısız senkron motora göre daha sinüzoidal olduğu görülmektedir.



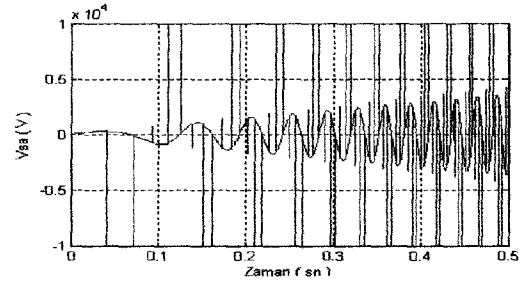
(a)



(c)



(b)

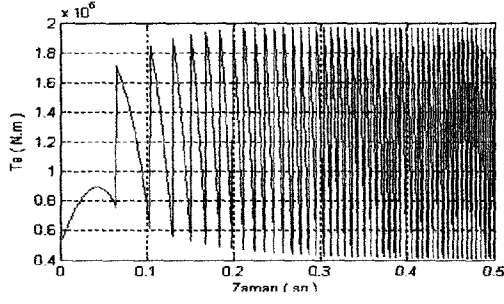


(d)

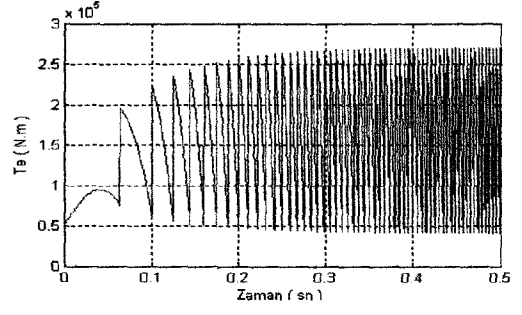
Şekil 4.18. CSI-SCSM'un Geçici Durum Koşullarında Faz Geriliminin Değişimi

- | | |
|---|--|
| a) Çıkık kutuplu amortisör sargılı senkron motor | c) Yuvarlak kutuplu amortisör sargılı senkron motor |
| b) Çıkık kutuplu amortisör sargısız senkron motor | d) Yuvarlak kutuplu amortisör sargısız senkron motor |

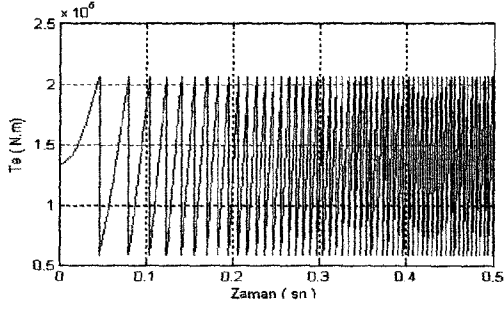
Şekil 4.19'de akım kaynaklı altı adımlı evirgeçten beslenen self kontrollü senkron motorun geçici durum koşullarındaki momentinin zamana göre değişimi dört farklı durum için görülmektedir. Sonuçlardan da görüleceği üzere amortisör sargılı senkron motordaki (Şekil 4.19 a ve c) moment dalgalanması amortisör sargısız senkron motora (Şekil 4.19 b ve d) göre daha fazladır. Aynı zamanda yuvarlak kutuplu senkron motordaki (Şekil 4.19 c ve d) moment dalgalanması da çıkık kutuplu senkron motorunkinden (Şekil 4.19 a ve b) daha fazladır.



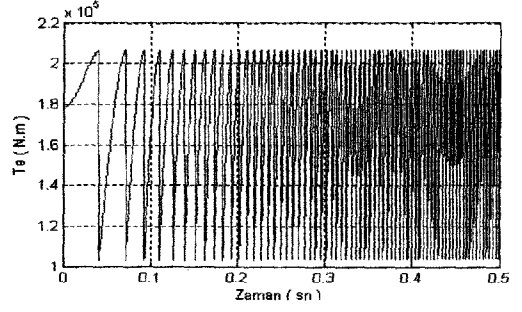
(a)



(c)



(b)

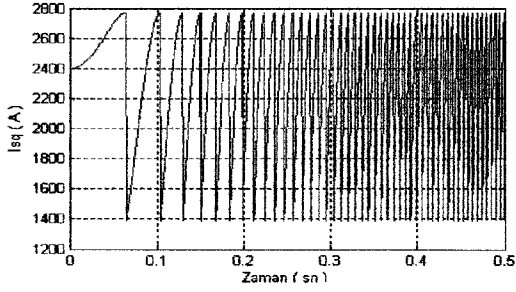


(d)

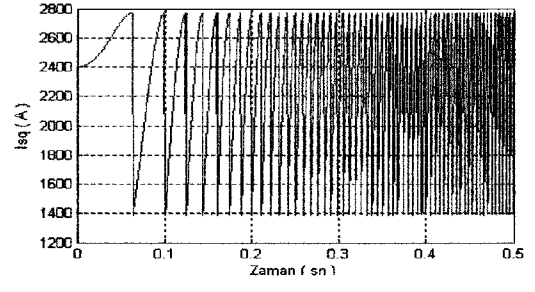
Şekil 4.19. CSI-SCSM'un Geçici Durum Koşullarında Momentinin Değişimi

- | | |
|---|--|
| a) Çıkık kutuplu amortisör sargılı senkron motor | c) Yuvarlak kutuplu amortisör sargılı senkron motor |
| b) Çıkık kutuplu amortisör sargısız senkron motor | d) Yuvarlak kutuplu amortisör sargısız senkron motor |

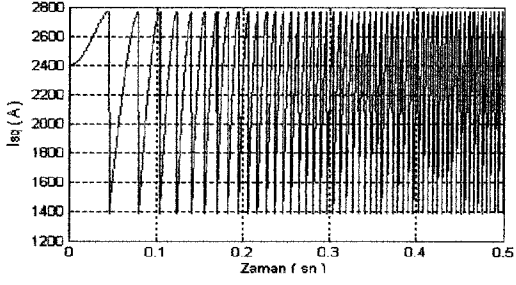
Şekil 4.20'de akım kaynaklı altı adımlı evirgeçten beslenen self kontrollü senkron motorun geçici durum koşullarındaki stator q-eksen akımının zamana göre değişimi dört farklı durum için görülmektedir. Görüldüğü üzere stator q-eksen akımının dalga şekilleri moment dalga şekillerine benzemektedir. Senkron motorun dört farklı durumunda da stator q-eksen akımındaki dalgalanmaların hemen hemen aynı olduğu görülüyor.



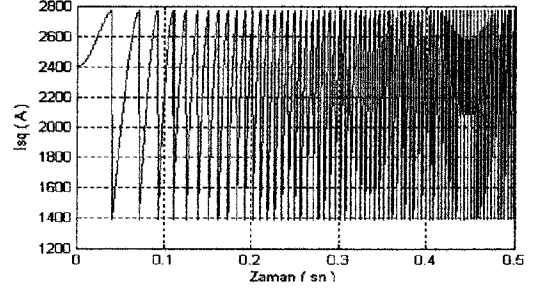
(a)



(c)



(b)



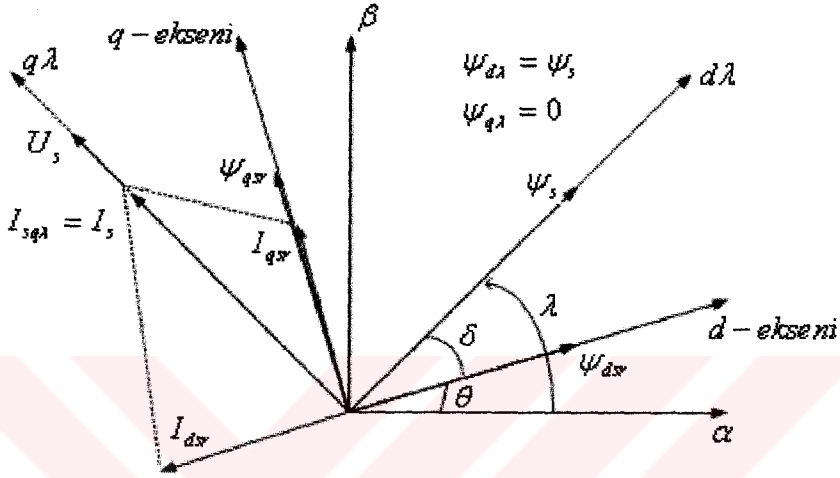
(d)

Şekil 4.20. CSI-SCSM'un Geçici Durum Koşullarında Stator Q-eksen Akımının Değişimi

- | | |
|---|--|
| a) Çıkık kutuplu amortisör sargılı senkron motor | c) Yuvarlak kutuplu amortisör sargılı senkron motor |
| b) Çıkık kutuplu amortisör sargısız senkron motor | d) Yuvarlak kutuplu amortisör sargısız senkron motor |

5. SENKRON MOTORUN STATOR AKISI ALAN YÖNLENDİRME KONTROLÜ

Stator akımı reaktif bileşeni ve güç faktörü kontrolü en basit şekliyle stator akısı alan oryantasyonu ile sağlanır. Birim güç faktörü koşullarında stator gerilimi ve akımı aynı fazda, stator akı fazörü de akım fazörüne diktir. Stator akısı alan yönlendirmeye ilişkin fazör diagramı Şekil 5.1’de görülmektedir.



Şekil 5.1. Stator Akısı Alan Yönlendirme Fazör Diagramı

Stator akım fazörü I_s , stator akı eksenleri $d\lambda s$ ve $q\lambda s$ ’ e göre bileşenlerine ayrılırsa; $I_{sd\lambda s}$ ve $I_{sq\lambda s}$ bileşenleri elde edilir. Burada $I_{sd\lambda s}$ akımın karakterini ve $I_{sq\lambda s}$ momenti belirleyen bileşenlerdir.

$$\underline{I_s} = I_{sd\lambda s} + jI_{sq\lambda s} \quad (5.1)$$

Stator akı oryantasyonlu değişkenlerle senkron makine momenti;

$$T_e = K_m \psi_s \cdot I_{sq\lambda s} \quad (5.2)$$

olur. Burada $K_m = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2}$ $P =$ Kutup sayısı

Stator direnci ihmal edilirse, stator akım ve gerilimi arasındaki faz farkı ϕ olmak üzere;

$$\tan \phi = \frac{I_{sd\lambda s}}{I_{sq\lambda s}} \quad (5.3)$$

olur. ψ_s akısını ve ϕ açısını istenen değerde tutmak için yük momenti değişimine bağlı olarak uyarım akımı ayarına da gereksinim duyulur. Uyarımın ayarlanabilmesi durumunda, sonuç(resultant) akı genliği ve hem de güç faktörü kontrol edilebilir.

Stator alan oryantasyondaki reaktif $I_{sd\lambda s}$ ve $I_{sq\lambda s}$ bileşenleri ile rotor oryantasyonlu akım bileşenleri elde edilir. Stator alan oryantasyonunda; reaktif akım bileşeni referans olarak girilir, aktif bileşen ise Denk. 5.2'den;

$$I_{sq\lambda s} = \frac{T_e}{K_m \psi_s} \quad (5.4)$$

denkleminde elde edilir.

Şekil 5.1'deki uzay fazör diagramından da görüleceği üzere birim güç faktörü koşullarında stator akısı alan yönlendirmede, alan yönlendirme eksen çatısının $d\lambda$ -ekseni üzerindeki stator akım bileşeni sıfırdır. Yani $I_{sd\lambda s}^* = 0$ olarak alınır ise $\cos \varphi = 1$ (birim güç faktörü) koşulu sağlanmış olur.

$$\lambda = \theta + \delta \quad (5.5)$$

$$\tan \delta = \frac{\psi_{qsr}}{\psi_{dsr}} \quad (5.6)$$

Oryantasyon akısının hesabında akım modeli veya gerilim modeli kullanılabilir. Oryantasyon akı hesabı için; stator gerilim modeli kullanıldığında, rotor pozisyonunun bilinmesi gerekli değildir. Sadece motor moment kontrolünde hız bilgisine ihtiyaç vardır.

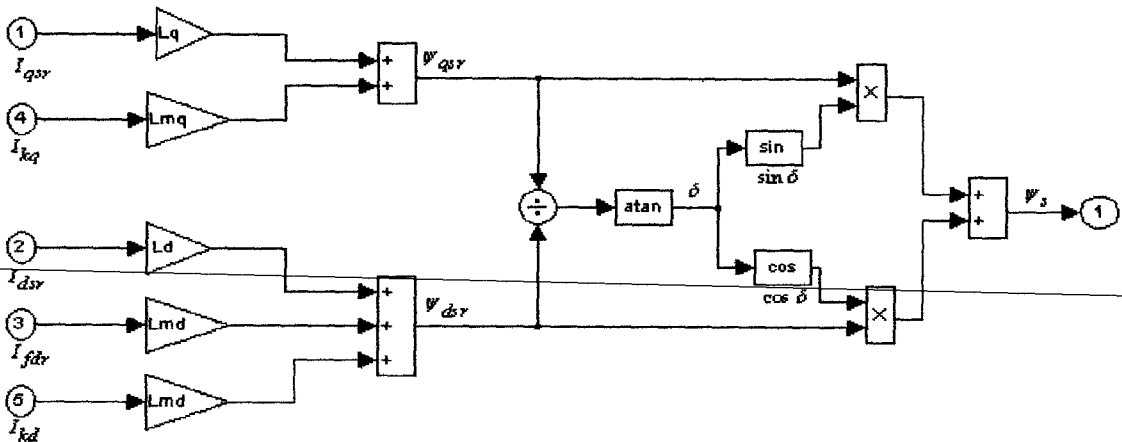
Oryantasyon akısı, rotor referans çatıdaki makine denklemleri kullanılarak hesaplanabilir. Bu durumda yönlendirme akısı;

$$\psi_s = \psi_{sd\lambda} = \psi_{dsr} \cdot \cos(\delta) + \psi_{qsr} \cdot \sin(\delta) \quad (5.7)$$

$$\psi_{dsr} = L_d \cdot I_{qsr} + L_{md} \cdot I_{fdr} + L_{md} \cdot I_{kd} \quad (5.8)$$

$$\psi_{qsr} = L_q \cdot I_{qsr} + L_{mq} \cdot I_{kq} \quad (5.9)$$

denkleminde hesaplanabilir. Buradan yönlendirme akısı hesabının blok diagram olarak gösterimi Şekil 5.2'deki elde edilir.



Şekil 5.2. Alan Yönlendirme Akı Hesap Bloğu

Uyartım akımı hesabı için;

Denklem 5.8 ve 5.9, denklem 5.7’da yerine konursa

$$\psi_s = (L_d \cdot I_{qsr} + L_{md} \cdot I_{fdr} + L_{md} \cdot I_{kd}) \cdot \cos(\delta) + (L_q \cdot I_{qsr} + L_{mq} \cdot I_{kq}) \cdot \sin(\delta) \quad (5.10)$$

Akımın reaktif bileşeni Şekil 5.1’deki fazör diagramından;

$$I_{sd\lambda} = -I_{qsr} \cdot \sin(\delta) - I_{dsr} \cdot \cos(\delta) \quad (5.11)$$

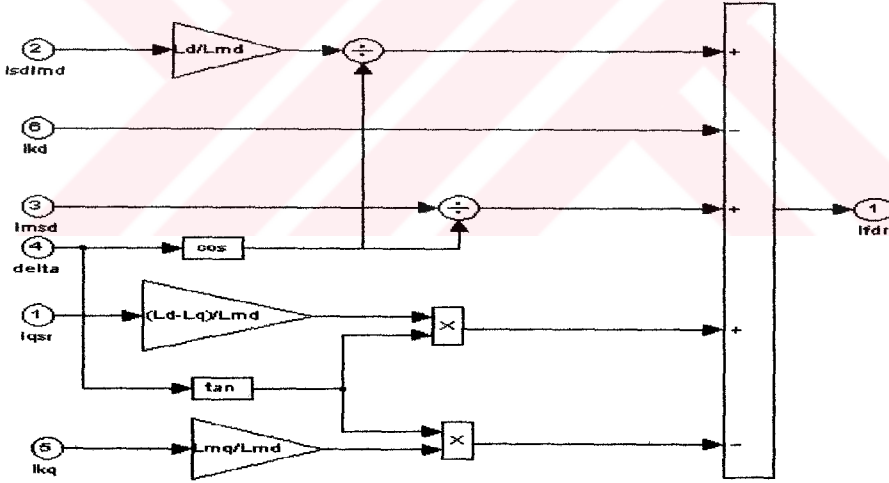
$$I_{fdr} \cdot \cos(\delta) = \frac{\psi_s}{L_{md}} - \frac{L_d}{L_{md}} \cdot I_{dsr} \cdot \cos(\delta) - I_{kd} \cdot \cos(\delta) - \frac{L_q}{L_{md}} \cdot I_{qsr} \cdot \sin(\delta) - \frac{L_{mq}}{L_{md}} \cdot I_{kq} \cdot \sin(\delta)$$

Denklem 5.11 yerine konursa, uyarıma akımı ;

$$I_{fdr} = \frac{I_{msd}}{\cos(\delta)} + \frac{L_d}{L_{md}} \cdot \frac{I_{sd\lambda}}{\cos(\delta)} + \frac{(L_d - L_q)}{L_{md}} \cdot I_{qsr} \cdot \tan(\delta) - I_{kd} - \frac{L_{mq}}{L_{md}} \cdot I_{kq} \cdot \tan(\delta) \quad (5.12)$$

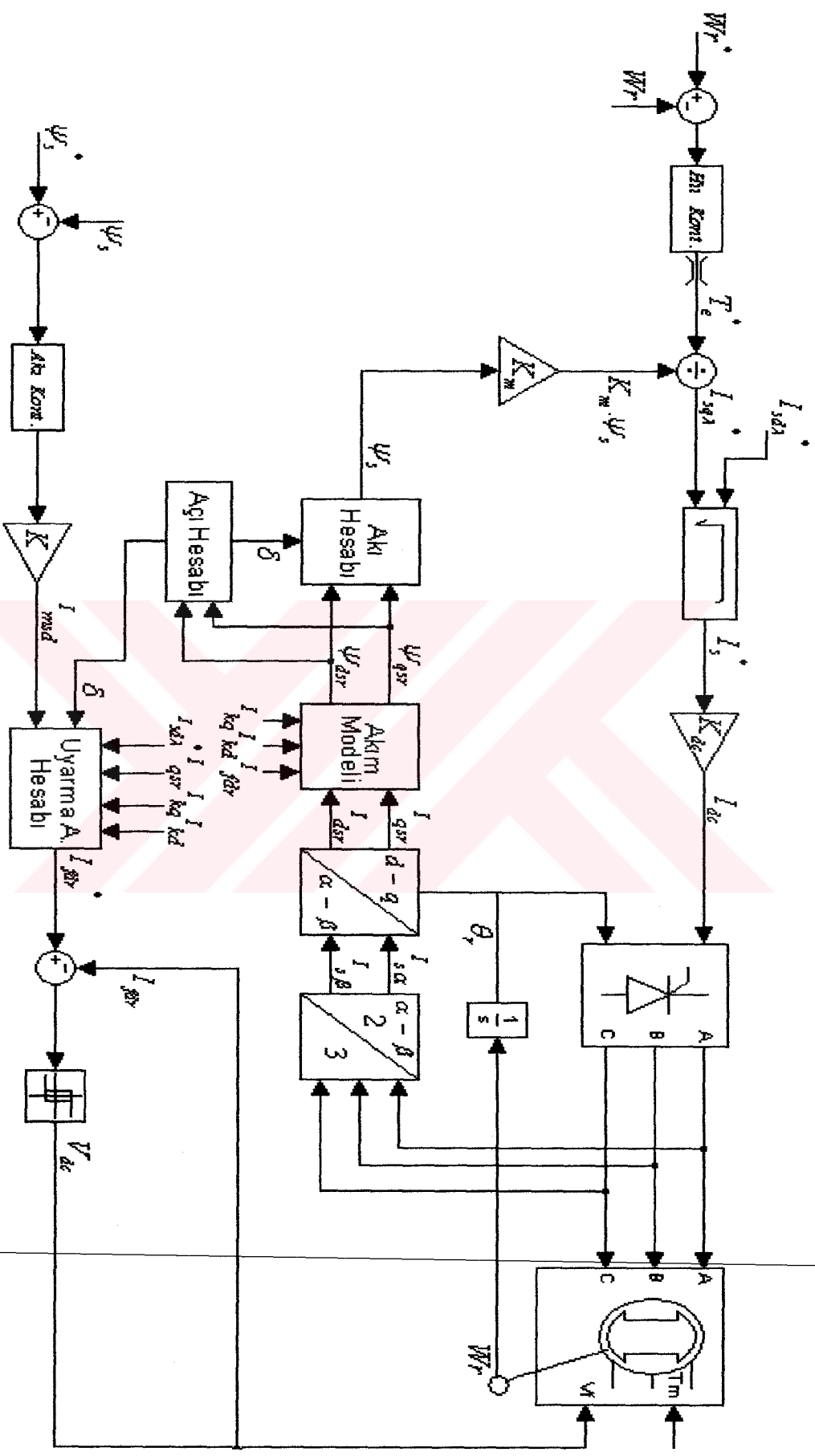
olarak elde edilir. Stator akısını ve güç faktörünü referans değerde tutmak için yük momenti değişimine bağlı olarak uyarım akımı da ayarlanmalıdır. Çünkü moment artışı sadece yük açısını arttırmaz, uyarım akımı da faz farkını sıfırda tutmak için artırılmalıdır.

Denklem 5.12’ blok diagram olarak Şekil 5.3’deki gibi gösterilir.



Şekil 5.3. Uyarım Akım Hesabına İlişkin Blok Diagramı

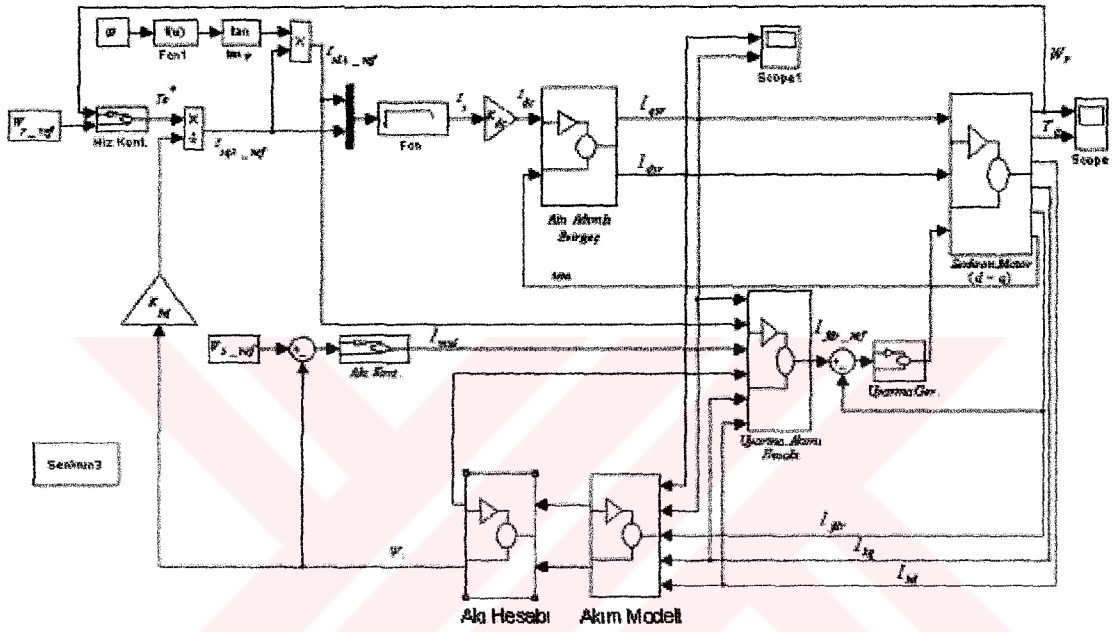
Stator akısına yönlendirme yönteminde , yönlendirme akısı hem doğrudan hem de dolaylı akı belirleme yöntemleriyle belirlenebilir. Bu durumda momentin hızlı bir şekilde kontrolü için akı sabit tutulup , moment I_s akımı ile ayarlanmalıdır. Şekil 5.4’de senkron motorun akım kaynaklı altı adımlı evirgeçten beslenme durumu için stator akısına alan yönlendirme kontrolüne ait blok diagramı görülmektedir.



Şekil 5.4. Stator Akısı Alan Yönlendirmeye İlişkin Blok Diagramı

3.3.3. Stator Akısı Alan Yönlendirme İçin Oluşturulan Bilgisayar Benzetim Programı

Aşağıdaki Şekil 5.5’de senkron motorun altı adımlı akım kaynağı evirgecinden beslenme durumu için ve güç faktörü kontrolüne olanak sağlayan stator akısı alan yönlendirmeye ilişkin Matlab /Simulink modeli görülmektedir.

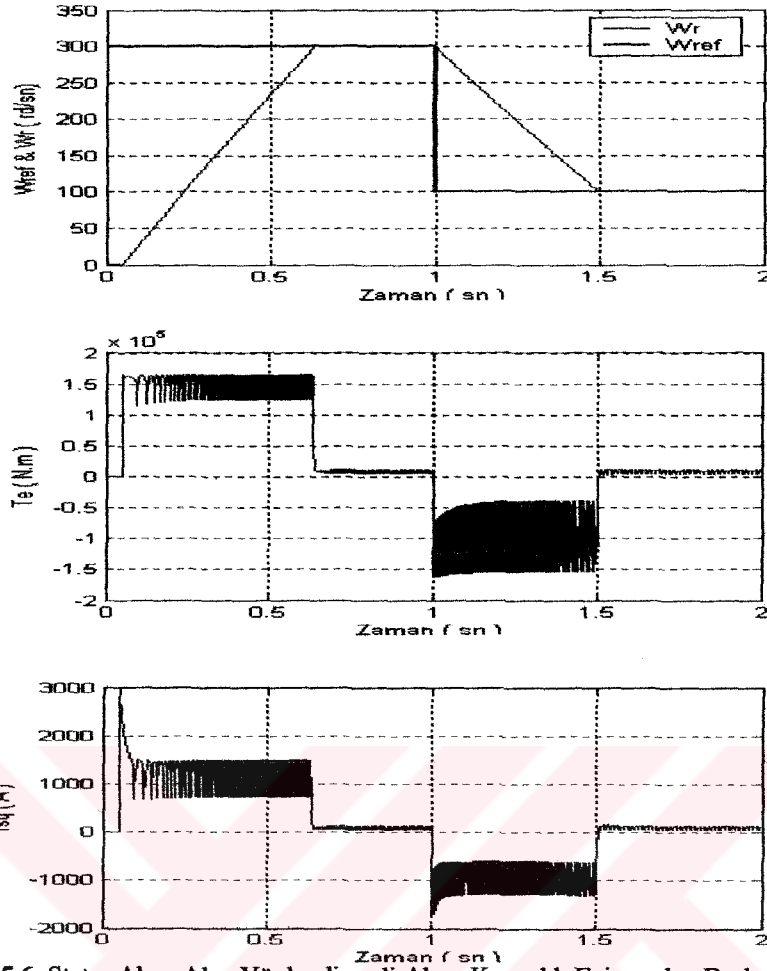


Şekil 5.5. Akım Kaynaklı Altı Adımlı Evirgeçten Beslenen Senkron Motorun Stator Akısı Alan Yönlendirmesine İlişkin Matlab / Simulink Modeli

Yukarıdaki modelde gerçek hız ile referans hız karşılaştırılır ve oluşan hız hatası bir PI (Oransal-Integral Kontrolör) ile işlenir. Bu PI’n çıkışı referans momentini verir. Elde edilen referans momentin Denk.3.7 ve 3.8 bloğundan elde edilen yönlendirme akısı ve K_m çarpımına bölünerek referans olarak stator akımının moment bileşeni elde edilir. Stator akımının akı bileşeni ise referans olarak dışarıdan girilen $\tan \phi$ (ϕ ; U_s ile I_s arasındaki faz farkı) ve stator akımı moment bileşeninin çarpımından elde edilir.

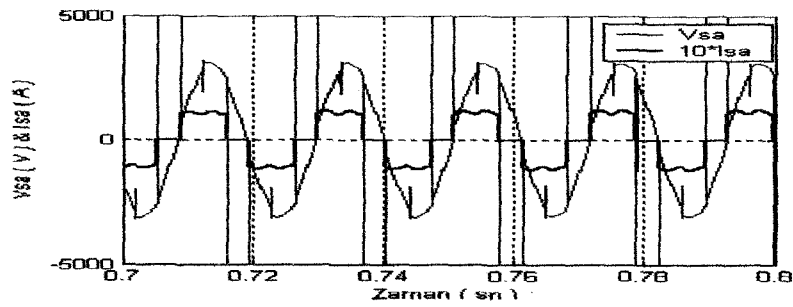
Bu modeldeki evirgeç akım kaynaklı olduğundan dolayı Bölüm 2’de elde edilen rotor referans çatıdaki senkron motor modeli girişi akım referansı olacak şekilde değiştirilmiştir.

Motorun sabit bir yük momentini ile yüklenmesi durumunda benzetim programının çalıştırılması sonucu hız, moment ve stator q-eksen akımının zamana göre değişimi Şekil 5.6’da görülmektedir.



Şekil 5.6. Stator Akısı Alan Yönlendirmeli Akım Kaynaklı Evirgeçten Beslenen Senkron Motorun Hız, Moment ve Stator Q-eksen Akımının Değişimi

Benzetim programında referans ϕ değeri, birim güç faktörünü sağlayacak şekilde sıfır olarak girilmiştir. Bu duruma Şekil 5.7'den de açıkça görülüyor.



Şekil 5.7. Stator Akısı Alan Yönlendirmeli Akım Kaynaklı Evirgeçten Beslenen Senkron Motorun Faz Gerilimi ve Faz Akımının Değişimi

6. SONUÇLAR VE SONRAKİ ÇALIŞMALAR İÇİN ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, öncelikle doğru akım motorlu sürücü düzenekler ile alternatif akım motorlu sürücü düzeneklerin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları ortaya konmuştur. Böylelikle özellikle yüksek güçlerde yani verim ve güç faktörünün önemli olduğu uygulamalarda senkron motor kullanımının zorunlu olduğu neticesine varılmıştır.

Senkron motorların dinamik ve sürekli durum performansını incelemek üzere senkron motorun d-q referans çatıdaki matematiksel modeli elde edilmiştir. Bu matematiksel modelin yardımıyla senkron motorun bilgisayar benzetim programı oluşturulmuştur.

Senkron motorun kontrol yöntemleri detaylı olarak ele alınmıştır. Bu amaçla senkron motorun açık çevrim, self kontrol ve vektör kontrolünün bir karşılaştırılması yapılmıştır. Senkron motorun kontrolünde hızlı dinamik cevap elde etmenin ancak senkron motorun vektör kontrolünün gerçekleştirilmesi ile sağlanabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Sinüzoidal gerilimler veya akımlarla beslenen bir senkron makinenin sürekli durum ve geçici durum performansı fazör diagramları ve eşdeğer devreler kullanılarak incelenebilir. Makinenin dengeli bir sinüzoidal kaynaktan beslenmesi durumunda sürekli durum şartları için amortisör sargısının bir etkisi yoktur. Bununla birlikte bir evirgeçten beslenen senkron makine sinüzoidal olmayan akım ve gerilimlere maruz kalır. Böyle çalışma şartlarında bilinen analiz yöntemleri doğru olmayan sonuçlar verir. Öyle ki senkron motorun hem gerilim kaynaklı hem de akım kaynaklı evirgeç ile beslenmesi durumunda moment dalgalanmalarının ortaya çıktığı senkron motorun kontrol yöntemleri incelenirken görülmüştür.

Bu çalışmada evirgeç beslemeli senkron motorun dinamik ve sürekli durum performansı üzerinde amortisör sargısı ve çıkıklık etkileri oluşturulan benzetim programları ile detaylı olarak ortaya konmuştur. Bu etkiler senkron motorun hem akım kaynaklı hem de gerilim kaynaklı evirgeçten beslenme durumları için ayrı ayrı incelenmiştir. Elde edilen sonuçlardan self kontrollü senkron motordan elde edilen ortalama momentin sürekli durum koşullarında amortisör sargısı ve çıkıklıktan bağımsız olduğu sonucuna varılmıştır.

Senkron motorun alan yönlendirme kontrolü incelendiğinde, güç faktörü kontrolüne olanak sağlayan stator akısı alan yönlendirmenin senkron motor alan yönlendirme kontrolünde en uygun yöntem olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu durum birim güç faktörü kontrolüne olanak sağlayan senkron motorun stator akısı alan yönlendirmesine ilişkin benzetim programı oluşturularak ortaya konmuştur.

6.2. Sonraki Çalışmalar İçin Öneriler

Bu çalışmada senkron motorun hem self hemde vektör kontrolündeki kontrolörlerin tasarımında PI (Oransal-Integral Kontrolör) kontrolörler kullanılmıştır. Burada Fuzzy Kontrol kullanmanın ne gibi artılar getirebileceği sonraki çalışmalarda incelenebilir.

Bu çalışmanın pratik olarak gerçekleştirilmesi de yararlı olacaktır.



KAYNAKLAR

1. JAKUBOWÍCZ, A., PERRET, R., 1980, Simplified Model and Closed Loop Control of a Commutatorless DC Motor, IEEE Trans. on Ind. Appl., Ia-16:2
2. ORHAN, A., 1999, Büyük Güçlü Senkron Motorların Vektör Kontrolü İçin Yeni Bir Yöntem” . Doktora Tezi. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 1999, Elazığ.
3. LEONHARD, W., 1988, Field Orientation for Controlling AC Machines Principle and Application , IEEE Conference Publication, 291 ,London
4. HUY, H.,L., JAKUBOWÍCZ, A., PACAUT, R., 1982, A self Controlled Synchronous Motor Drive Using Terminal Voltage System , IEEE Transactions on Ind.Appl., 18:1
5. TÖRÖK, V., 1987, A Simplified Inverter Fed Synchronous Motor Drive For Low and Medium Power Application. Royal Institute of Tech. Dept of Electric Machines. 100-114
6. KRAUSE, P., C., 1987, Analysis of Electric Machinery, Mc Graw Hill Book Co., Singapore
7. VAS, P., 1990, Vector Control of AC Machine . Oxford Uni. Press. UK
8. SEN, P., C., 1982, Synchronous Motor Propulsion for Transit Systems, IEEE IAS. Ann. Meeting onf. Rec., 264-267
9. KELEMEN, A., 1993, Vector Control of AC Drives, Ecriture Ltd. Budapest
10. AKIN, E., 1994, Stator Akısı Üzerinden Asenkron Motorun Rotor Akısı Alan Yönlendirmesi İçin Bir Yöntem. Doktora Tezi , Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Elazığ

ÖZGEÇMİŞ

1979 yılında İçel’de doğdu.

İlk ve orta öğrenimini Mersin’de tamamladı. 2001 yılında Fırat Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. Aynı yıl Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü ‘nde elektrik makineleri ana bilim dalında yüksek lisansa başladı.

2002 yılında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü’nde araştırma görevlisi olarak göreve başladı ve halen bu görevine devam etmektedir.



EK-1: SENKRON MOTOR PARAMETRELERİ

Benzetim programında kullanılan senkron motor parametreleri aşağıda verilmiştir [6].

$$U_{ff} = 4000 \text{ V}$$

$$P = 5265882 \text{ W}$$

$$f_n = 60 \text{ Hz}$$

$$R_s = 0.03663 \text{ ohm}$$

$$R_{kq} = 0.118 \text{ ohm}$$

$$R_{kd} = 0.0914 \text{ ohm}$$

$$R_{fd} = 0.00438 \text{ ohm}$$

$$X_{ls} = 0.4238 \text{ ohm}$$

$$L_{ls} = 1.24 \cdot 10^{-3} \text{ H}$$

$$X_{lkq} = 0.348 \text{ ohm}$$

$$L_{lkq} = 9.23 \cdot 10^{-4} \text{ H}$$

$$X_{mq} = 2.27 \text{ ohm}$$

$$L_{mq} = 6.02 \cdot 10^{-3} \text{ H}$$

$$X_{md} = 3.118 \text{ ohm}$$

$$L_{md} = 8.27 \cdot 10^{-3} \text{ H}$$

$$X_{lkd} = 0.278 \text{ ohm}$$

$$L_{lkd} = 7.37 \cdot 10^{-4} \text{ H}$$

$$X_{ffd} = 0.808 \text{ ohm}$$

$$L_{ffd} = 2.14 \cdot 10^{-3} \text{ H}$$