

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

50944

**SERİ UYARTIMLI SENKRON MOTORUN DİNAMİK DAVRANIŞ
MODELLEMESİ**

Mehmet İlyas BAYINDIR

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

1996
ELAZIĞ

TÜRKÇE ABSTRAKT (en fazla 250 sözcük) :

(TÜBİTAK/TÜRDOK'un Abstrakt Hazırlama Kılavuzunu kullanınız.)

Sabit ve değişken frekanslı a.a. tahrikleri için bir senkron motor genel olarak tercih edilir. Fakat çoğu durumlarda düşük maliyeti ve daha sade olması sebebiyle indüksiyon motorları kullanılır. Bu durum özellikle, ayrı bir uyarım düzeneğinin pahalı olacağı küçük tahrikler için geçerlidir.

Senkronlanan asenkron motor ise bilezikli asenkron motor ile senkron motorun bir bileşimidir. Böylelikle, bilezikli asenkron motorun üstün kalkış özellikleriyle senkron motorun yüksek verim ve güç katsayısının düzeltilmesi gibi sürekli çalışma özellikleri bir araya getirilir (İmeryüz ve Çetin, 1991). Motorun senkron çalışma için gereken uyarım düzeneğinin daha ucuz ve sade hale getirilmesi amacıyla bazı çalışmalar yapılmıştır.

Seri uyarımlı senkronlanan asenkron motor, yuvarlak kutuplu senkron motor olarak çalışır fakat sabit uyarımlı senkron motordan farklı bir davranış gösterir. Rotor devresi bağlantıları motorun genel performansını oldukça etkiler.

Bu çalışmada uyarım akımının stator akımına bağımlı değişimini doymayı da hesaba katarak çözen bir sürekli durum modeli açıklanmıştır. Rotor bağlantılarının etkisi, oluşacak katsayılara göre genel ifadelerle açıklanmıştır. Sürekli durumda, seri uyarımlı senkron motorun verim, güç faktörü, aşırı yüklenebilme gibi üstünlükleri teorik ve deneysel sonuçlar yardımıyla isbatlanmıştır.

Seri uyarımlı senkron motorda, bağlantı değişikliklerini, güç elektroniği ve kontrol tekniklerini incelemek amacıyla PSPICE 5.4 devre tasarım programıyla dinamik durum benzetimi başarılmıştır. Alınan teorik sonuçlar sayısal osiloskop kayıtlarıyla doğrulanarak sunulmuştur. Benzetimde kullanılan devre şekilleri ve denklemler verilerek benzetim sonuçlarının diğer çalışmalara göre değerlendirmesi yapılmıştır.

For fixed and variable frequency a.c. drives, a synchronous motor is usually preferable, but in many cases induction motors are used because of their relatively low cost and simplicity. This is especially true for smaller drives, where the cost of a separate excitation system would be prohibitive.

Synchronous induction motor is a combination of slip ring induction motor and synchronous motor. Thus, good starting characteristic of slip ring induction motor and more efficiency and improving power factor properties of synchronous in steady state have been combined. The purpose of some investigations is to obtain excitation system having low cost and simplicity.

Series excited synchronous induction motor operates as a round rotor synchronous motor but it differs from a well known fixed excitation synchronous motor in that way it operates in series excitation. The rotor circuit connections affects the general performance characteristics of the motor.

In this study, a steady state model taking into account dependency of field current to stator current and saturation has been explained. The effects of rotor connections has been given by the general expressions in terms of defined coefficients. In steady state case, the series excited synchronous induction motor advantages such as efficiency, power factor and overloading capacity has been verified by using theoretical and experimental results.

The dynamic behaviour simulation of series excited synchronous induction motor was carried out using of PSPICE circuit design program. The aim of this simulation is to investigate the interconnections, power electronics and control techniques of the motor. The results, has been verified using digital oscilloscope records. The command and circuits used in PSPICE simulation was presented and simulation method was compared to other investigations.

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SERİ UYARTIMLI SENKRON MOTORUN DİNAMİK DAVRANIŞ
MODELLEMESİ**

Mehmet İlyas BAYINDIR

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

Bu Tez, Tarihinde Aşağıda Belirtilen Jüri Tarafından
Oybirliği/Oyçokluğu ile Başarılı/Başarısız Olarak Değerlendirilmiştir.

(İmza)
Danışman

(İmza)

(İmza)

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

**SERİ UYARTIMLI SENKRON MOTORUN DİNAMİK DAVRANIŞ
MODELLEMESİ**

Mehmet İlyas BAYINDIR

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

1996, Sayfa: 87

Sabit ve değişken frekanslı a.a. tahrikleri için bir senkron motor genel olarak tercih edilir. Fakat çoğu durumlarda düşük maliyeti ve daha sade olması sebebiyle indüksiyon motorları kullanılır. Bu durum özellikle, ayrı bir uyartım düzeneğinin pahalı olacağı küçük tahrikler için geçerlidir.

Senkronlanan asenkron motor ise bilezikli asenkron motor ile senkron motorun bir bileşimidir. Böylelikle, bilezikli asenkron motorun üstün kalkış özellikleriyle senkron motorun yüksek verim ve güç katsayısının düzeltilmesi gibi sürekli çalışma özellikleri bir araya getirilir (İmeryüz ve Çetin, 1991). Motorun senkron çalışma için gereken uyartım düzeneğinin daha ucuz ve sade hale getirilmesi amacıyla bazı çalışmalar yapılmıştır.

Seri uyartımlı senkronlanan asenkron motor, yuvarlak kutuplu senkron motor olarak çalışır fakat sabit uyartımlı senkron motordan farklı bir davranış gösterir. Rotor devresi bağlantıları motorun genel performansını oldukça etkiler.

Bu çalışmada uyartım akımının stator akımına bağımlı değişimini doymayı da hesaba katarak çözen bir sürekli durum modeli açıklanmıştır. Rotor bağlantılarının etkisi, oluşacak katsayılara göre genel ifadelerle açıklanmıştır. Sürekli durumda, seri uyartımlı senkron motorun verim, güç faktörü, aşırı yüklenebilme gibi üstünlükleri teorik ve deneysel sonuçlar yardımıyla isbatlanmıştır.

Seri uyarımlı senkron motorda, bağlantı değişikliklerini, güç elektroniği ve kontrol tekniklerini incelemek amacıyla PSPICE 5.4 devre tasarım programıyla dinamik durum benzetimi başarılmıştır. Alınan teorik sonuçlar sayısal osiloskop kayıtlarıyla doğrulanarak sunulmuştur. Benzetimde kullanılan devre şekilleri ve denklemler verilerek benzetim sonuçlarının diğer çalışmalara göre değerlendirmesi yapılmıştır.



Anahtar Kelimeler: Seri uyarımlı senkron motor, PSPICE benzetimi.

ABSTRACT

Master Thesis

**DYNAMIC BEHAVIOUR MODELLING OF SERIES EXCITED
SYNCHRONOUS MOTOR**

Mehmet İlyas BAYINDIR

Fırat University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical and Electronics Engineering

1996, Page: 87

For fixed and variable frequency a.c. drives, a synchronous motor is usually preferable, but in many cases induction motors are used because of their relatively low cost and simplicity. This is especially true for smaller drives, where the cost of a separate excitation system would be prohibitive.

Synchronous induction motor is a combination of slip ring induction motor and synchronous motor. Thus, good starting characteristic of slip ring induction motor and more efficiency and improving power factor properties of synchronous in steady state have been combined. The purpose of some investigations is to obtain excitation system having low cost and simplicity.

Series excited synchronous induction motor operates as a round rotor synchronous motor but it differs from a well known fixed excitation synchronous motor in that way it operates in series excitation. The rotor circuit connections affects the general performance characteristics of the motor.

In this study, a steady state model taking into account dependency of field current to stator current and saturation has been explained. The effects of rotor connections has been given by the general expressions in terms of defined coefficients. In steady state case, the series excited synchronous induction motor advantages such as

efficiency, power factor and overloading capacity has been verified by using theoretical and experimental results.

The dynamic behaviour simulation of series excited synchronous induction motor was carried out using of PSPICE circuit design program. The aim of this simulation is to investigate the interconnections, power electronics and control techniques of the motor. The results, has been verified using digital oscilloscope records. The command and circuits used in PSPICE simulation was presented and simulation method was compared to other investigations.

Keywords: Series excited synchronous motor, PSPICE simulation.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma süresince yardımlarını esirgemeyen başta tez hocam Sayın Y.Doç.Dr. Mehmet ÖZDEMİR ve diğer hocalarıma en içten teşekkürlerimi sunarım.

Fırat T.B.M.Y.O Elektrik Programı çalışanlarına, özellikle Sayın Öğr.Gör. Ümit Tamer BAŞARAN, Öğr.Gör. Mehmet SAMAN, Teknisyen Orhan POLAT' a deneysel çalışmalarında yardımlarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, Harran Üniversitesi ŞANLIURFA M.Y.O. idarecilerine, Elektrik ve Makina Programı çalışanlarına gösterdikleri kolaylıklar ve manevi yardımlarından dolayı şükranlarımı sunarım.



İÇİNDEKİLER

ÖZET	III
ABSTRACT	V
TEŞEKKÜR	VII
İÇİNDEKİLER	VIII
SİMGELER	XI
ŞEKİLLER ve TABLOLAR	XII

1. GİRİŞ	1
1.1 Bilezikli Asenkron Motor	2
1.2 Senkron Makinalar	3
1.2.1 Yuvarlak kutuplu senkron makinalar	4
1.2.2 Çıkık kutuplu senkron makinalar	4
1.2.3 Daimi mıknatıslı senkron motorlar	5
1.2.4 Relüktans motorları	5
1.3 Senkron Motorların Genel Değerlendirilmesi	5
1.4 Senkronlanan Asenkron Motor	7
1.4.1 Serbest uyarımlı senkronlanan asenkron motor	8
1.4.2 Seri uyarımlı senkronlanan asenkron motor	8
1.5 Seri Uyarımlı Senkronlanan Asenkron Motor İçin Rotor Bağlantı Şekilleri	9
1.6 Çalışmanın Amacı	11

2. SERİ UYARTIMLA SENKRONLANAN BİLEZİKLİ ASENKRON

MOTORUN SÜREKLİ DURUM MODELİ	12
2.1 Giriş	12
2.2 İncelemede Kabul Edilen Yaklaşımlar	12
2.3 Köprü Doğrultucunun A.A. Uçlarındaki Gerilim ve Eşdeğer Deveresi	12
2.4 Doymalı Magnetik Devre ile Performans Analizi	17
2.5 Uyarma Devresinin Paralel Direnç ile Analizi	19
2.6 Hesaplamalar ve Bilgisayar Programı	22

2.7	Deneysel Sonuçlar	23
2.8	Değerlendirme	39

3. SERİ UYARTIMLI SENKRON MOTORUN DİNAMİK DURUM

İNCELEMESİ	40
3.1. Giriş	40
3.2 Dinamik Davranış İncelemesinin Kapsamı	40
3.3 Dinamik Davranış Modelleme Yöntemleri	41
3.4 Bilezikli Asenkron Makina Denklemlerinin Faz Değişkenleri ile Yazılması	41
3.5 Seri Uyarımlı Senkron Motorun PSPICE Benzetimi	45
3.5.1 Zaman domenli matematiksel modeli	45
3.5.2 Elektriksel devre tanımlamaları	46
3.5.3 İndüklenen gerilim tanımlamaları	46
3.5.4 Ani moment ifadesi ve elektromekanik tanımlamaları	47
3.6 Teorik ve Deneysel Sonuçlar	50
3.7 Değerlendirme	51

4.SONUÇ	66
4.1 Sürekli durum İncelemesinin Sonuçları ve Öneriler	66
4.2 Dinamik Durum İncelemesinin Sonuçları ve Öneriler.....	67
4.3 Senkron Çalışmaya Geçiş Sonuçları ve Öneriler	68

KAYNAKALAR	70
-------------------------	-----------

EK-A SENKRON MOTORDA MIKNATISLANMA EĞRİSİ ve KAYIPLARIN

BULUNMASI	73
A.1.Boşta Çalışma Deneyi ile Miknatıslanma Eğrisi, Sürtünme ve Demir Kayıplarının Bulunması	73
A.2 Kısa Devre Deneyi ve Yük Kayıpları	74
EK-B İNDÜKTANSLARIN ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ	75
B.1 Stator Ortak ve Öz İndüktansının Ölçülmesi	75
B.2 Stator-Rotor Ortak İndüktansının Ölçülmesi	76

B.3 Dönüştürme Oranının Ölçülmesi	77
EK-C ATALET MOMENTİNİN ve DİNAMİK DAVRANIŞ EĞRİLERİNİN ÖLÇÜLMESİ	78
EK-D PSPICE BENZETİMİNDE KULLANILAN DEVRELER VE KOMUT LİSTELERİ	80



SİMGELER

E	:Bileşke akının endüklediği hava aralığı geriliminin değeri (V)
$\bar{E}_f$	:Uyarma akısının endüklediği gerilim fazörü (V)
$\bar{E}_r$	:Bileşke akının endüklediği hava aralığı gerilimi fazörü (V)
E_h	:Hareket gerilimi (V)
E_{tr}	:Transformatör gerilimi (V)
I_d	:Köprü doğrultucu çıkış akımı (A)
I_c	:Uyartım akımının stator eşdeğeri (A)
I_r	:Uyartım akımı (A)
I_m	:Mıknatıslanma akımı (A)
I_s	:Stator akımı (A)
i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}	:Stator faz akımları (A)
i_{ra}, i_{rb}, i_{rc}	:Rotor faz akımları (A)
J	:Atalet momenti (kg.m^2)
k	:Uyartım akımının stator eşdeğerinin stator akımına oranı
k_1	:Uyartım akımının stator eşdeğerinin uyartım akımına oranı
k_2	:Köprü doğrultucu çıkış akımının stator akımına oranı
k_3	:Uyartım akımının köprü doğrultucu çıkış akımına oranı
L_{sa}, L_{sb}, L_{sc}	:Stator fazları öz indüktansları (H)
L_{ra}, L_{rb}, L_{rc}	:Rotor fazları öz indüktansları (H)
M_e	:Endüklenen Moment (N.m)
M_{sr}	:Ortak indüktans (H)
$M_{s,ab}, M_{s,bc}, M_{s,ac}$	:Stator fazları arasındaki ortak indüktanslar (H)
$M_{r,ab}, M_{r,bc}, M_{r,ac}$	:Rotor fazları arasındaki ortak indüktanslar (H)
M_y	:Yük momenti (N.m)
n_s/n_r	:Stator/rotor etkin sarım oranı
P_{gir}	:Giriş gücü (W)
p	:Çift kutup sayısı
R_{sa}, R_{sb}, R_{sc}	:Stator fazları sargı dirençleri (Ω)
R_{ra}, R_{rb}, R_{rc}	:Rotor fazları sargı dirençleri (Ω)

R_b	: Köprü doğrultucunun statordan görülen direnci (Ω)
R_d	: Köprü doğrultucu çıkışından görülen direnç (Ω)
R_f	: Uyarma devresi direnci (Ω)
R_s	: Stator sargı direnci (Ω)
t	: Zaman (Sn)
V_e	: Köprü doğrultucunun girişindeki gerilim (V)
V_s	: Stator giriş gerilimi (V)
V_i	: Stator gerilimin reaktif bileşeni (V)
V_r	: Stator gerilimin aktif bileşeni (V)
V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}	: Stator faz gerilimleri (V)
V_{ra}, V_{rb}, V_{rc}	: Rotor faz gerilimleri (V)
ω	: Açısal hız (rad/sn)
ω_s	: Senkron açısal hız (rad/sn)
X_σ	: Stator kaçak reaktansı (Ω)
X_b	: Köprü doğrultucu seri indüktansı (Ω)
X_c	: Komutasyon reaktansı (Ω)
X_m	: Miknatıslanma reaktansı (Ω)
$\psi_{sa}, \psi_{sb}, \psi_{sc}$	: Stator fazları toplam akıları (Wb)
$\psi_{ra}, \psi_{rb}, \psi_{rc}$	: Rotor fazları toplam akıları (Wb)
ϕ	: Güç faktörü açısı (rad)
θ	: Rotor dönme açısı (rad)
δ_e	: Yük açısı (rad)
δ_i	: Eşdeğer uyarım akımının stator akımına göre açısı (rad)

ŞEKİLLER ve TABLOLAR

Şekil 1.1	: Senkron motorlar ve indüksiyon motorlarının genel kullanım alanları	7
Şekil 1.2	: Rotor sargısı için Danielson Bağlantısı	10
Şekil 1.3	: Senkron çalışma için kullanılabilir diğer rotor bağlantı şekillerine örnekler a) Bir sargı açık bağlantı b) Çift V sargılı c) Çift yıldız d) Üçüncü fazı çift sargılı	11
Şekil 2.1	: Seri uyarımlı senkron motor bağlantı şekli	13
Şekil 2.2	: Köprü doğrultucu giriş uçlarındaki gerilim	14
Şekil 2.3	: Senkron çalışmada rotor bağlantıları ve toplam magnetik alan ve mmk a) Rotoru tek sargılı senkron makina b) Danielson bağlantısı c) Bir sargı açık bağlantı	15
Şekil 2.4	: Seri uyarımlı senkron motorda sürekli durum için a) Akım eşdeğer devresi b) Gerilim eşdeğer devresi c) Fazör diyagramı	17
Şekil 2.5	: Uyarma devresine paralel direnç bağlanarak k katsayısının değiştirilmesi ...	20
Şekil 2.6	: Değişik k değerleri için ideal makinaya ait fazör diyagramı	21
Şekil 2.7	: Değişik k değerleri için ideal makinada moment yük açısı değişimi	21
Şekil 2.8	: Köprü doğrultucunun a.a.'daki temel bileşen empedansı	22
Şekil 2.9	: Seri uyarımlı senkron motorun sürekli durum çözümü için program akış diyagramı	23
Şekil 2.10	: Seri uyarımlı senkron motorun deney bağlantı şeması	25
Şekil 2.11	: Çıkış gücü-yük açısı eğrisinin değişimi ($k=1.1$)	26
Şekil 2.12	: Giriş gücü-yük açısı eğrisinin değişimi ($k=1.1$)	26
Şekil 2.13	: Giriş akımı-yük açısı eğrisinin değişimi ($k=1.1$)	27
Şekil 2.14	: Güç faktörü-yük açısı eğrisinin değişimi ($k=1.1$)	27
Şekil 2.15	: Çıkış gücü-yük açısı eğrisinin değişimi ($k=1.23$)	28
Şekil 2.16	: Giriş gücü-yük açısı eğrisinin değişimi ($k=1.23$)	28
Şekil 2.17	: Giriş akımı-yük açısı eğrisinin değişimi ($k=1.23$)	29
Şekil 2.18	: Güç faktörü-yük açısı eğrisinin değişimi ($k=1.23$)	29
Şekil 2.19	: Çıkış gücü-yük açısı eğrisinin değişimi ($k=1$)	30
Şekil 2.20	: Giriş gücü-yük açısı eğrisinin değişimi ($k=1$)	30
Şekil 2.21	: Giriş akımı-yük açısı eğrisinin değişimi ($k=1$)	31

Şekil 2.22 :Güç faktörü-yük açısı eğrisinin değişimi ($k=1$)	31
Şekil 2.23 :Çıkış gücü-yük açısı eğrisinin değişimi ($k=0.78$)	32
Şekil 2.24 :Giriş gücü-yük açısı eğrisinin değişimi ($k=0.78$)	32
Şekil 2.25 :Giriş akımı-yük açısı eğrisinin değişimi ($k=0.78$)	33
Şekil 2.26 :Güç faktörü-yük açısı eğrisinin değişimi ($k=0.78$)	33
Şekil 2.27 :Asenkron çalışmada çıkış gücü-kayma eğrisinin değişimi	34
Şekil 2.28 :Asenkron çalışmada giriş gücü-kayma eğrisinin değişimi	34
Şekil 2.29 :Asenkron çalışmada giriş akımı-kayma eğrisinin değişimi	35
Şekil 2.30 :Asenkron çalışmada güç faktörü-kayma eğrisinin değişimi	35
Şekil 2.31 :Senkron ve asenkron çalışma şekillerinde aynı makina için giriş gücü-çıkış gücü eğrileri	36
Şekil 2.32 :Senkron ve asenkron çalışma şekillerinde aynı makina için giriş akımı-çıkış gücü eğrileri	36
Şekil 2.33 :Değişik rotor bağlantıları için seri uyartımlı senkron motorun giriş gücü-yük açısı eğrileri	37
Şekil 2.34 :Değişik rotor bağlantıları için seri uyartımlı senkron motorun çıkış gücü-yük açısı eğrileri	37
Şekil 2.35 :Değişik rotor bağlantıları için seri uyartımlı senkron motorun giriş akımı-yük açısı eğrileri	38
Şekil 2.36 :Değişik rotor bağlantıları için seri uyartımlı senkron motorun güç faktörü-yük açısı eğrileri	38
Şekil 3.1 :Üç fazlı $2p=2$ kutuplu bilezikli asenkron makina şeması	42
Şekil 3.2 :Stator veya rotor bir fazına ait tam eşdeğer devre	47
Şekil 3.3 :Türev devresi	48
Şekil 3.4 :İntegral devresi	49
Şekil 3.5 :Üç fazlı asenkron makina direk faz tam eşdeğeri	50
Şekil 3.6 :Stator akımlarının türevlerini alan devreler	50
Şekil 3.7 :Rotor akımlarının türevlerini alan eşdeğer devreler	50
Şekil 3.8 :Elektromekanik tanımlamaları gerçekleyen devreler	51
Şekil 3.9 :Seri uyartımlı senkron çalışmada geçerli olan tam eşdeğer devre	51
Şekil 3.10 :Asenkron yol alma süresince stator akımının ölçülen değişimi	52
Şekil 3.11 :Asenkron yol alma süresince stator akımının hesaplanan değişimi	52

Şekil 3.12	:Asenkron yol alma süresince ölçülen hızlanma eğrisi	53
Şekil 3.13	:Asenkron yol alma süresince hesaplanan hızlanma eğrisi	53
Şekil 3.14	:Asenkron yol alma süresince rotor akımının ölçülen değişimi	54
Şekil 3.15	:Asenkron yol alma süresince rotor akımının hesaplanan değişimi	54
Şekil 3.16	:Senkronlama anında ölçülen hız değişimi	55
Şekil 3.17	:Senkronlama anında hesaplanan hız değişimi	55
Şekil 3.18	:Senkronlama anında stator akımının ölçülen değişimi (Danielson bağlantı)	56
Şekil 3.19	:Senkronlama anında stator akımının hesaplanan değişimi (Danielson bağlantı)	56
Şekil 3.20	:Senkronlama anında stator akımının ölçülen değişimi (Danielson bağlantı)	57
Şekil 3.21	:Senkronlama anında stator akımının hesaplanan değişimi (Danielson bağlantı)	57
Şekil 3.22	:Senkronlama anında rotor akımının ölçülen değişimi (Danielson bağlantı)	58
Şekil 3.23	:Senkronlama anında rotor akımının hesaplanan değişimi (Danielson bağlantı)	58
Şekil 3.24	:Senkronlama anında rotor akımının ölçülen değişimi (Danielson bağlantı)	59
Şekil 3.25	:Senkronlama anında rotor akımının hesaplanan değişimi (Danielson bağlantı)	59
Şekil 3.26	:Senkronlama anında stator akımının ölçülen değişimi (Bir sargı açık bağlantı)	60
Şekil 3.27	:Senkronlama anında stator akımının hesaplanan değişimi (Bir sargı açık bağlantı)	60
Şekil 3.28	:Senkronlama anında rotor akımının ölçülen değişimi (Bir sargı açık bağlantı)	61
Şekil 3.29	:Senkronlama anında rotor akımının hesaplanan değişimi (Bir sargı açık bağlantı)	61
Şekil 3.30	:Senkronlama anında rotor akımının ölçülen değişimi (Danielson bağlantı, 37Ω paralel)	62

Şekil 3.31	:Senkronlama anında rotor akımının hesaplanan değişimi (Danielson bağlantı, 37Ω paralel)	62
Şekil 3.32	:Senkronlama anında rotor akımının ölçülen değişimi (Danielson bağlantı, 37Ω paralel)	63
Şekil 3.33	:Senkronlama anında rotor akımının hesaplanan değişimi (Danielson bağlantı, 37Ω paralel)	63
Şekil 3.34	:Senkronlama anında rotor akımının ölçülen değişimi (Bir sargı açık bağlantı, 60Ω paralel)	64
Şekil 3.35	:Senkronlama anında rotor akımının hesaplanan değişimi (Bir sargı açık bağlantı, 60Ω paralel)	64
Şekil 3.36	:Senkron çalışmaya geçiş süresince rotor akımının hesaplanan değişimi (Danielson bağlantı, 1.5 Nm. yük momenti ile)	65
Şekil 3.37	:Asenkron hızlanma ve senkron çalışma süresince hesaplanan Moment-Devir sayısı değişimi (Danielson bağ., 1.5 Nm. yük mom.)	65
Şekil B.1	:Bir faz sargısı ortak ve öz indüktansını ölçmek için a)Bağlantı şeması b)Eşdeğer devresi	66
Şekil B.2	:Stator-rotor ortak indüktansının ölçülmesi	68
Şekil C.1	:Deney motoruna ait ölçülen yavaşlama eğrisi	70
Şekil D.1	:Asenkron motor PSPICE benzetiminde kullanılan devreler, elemanların isimleri ve düğüm numaraları ile birlikte	80
Şekil D.2	:Seri uyarımlı senkron motor PSPICE benzetiminde kullanılan devreler, elemanların isimleri ve düğüm numaraları ile birlikte.....	81
Tablo 2.1	Deney motoruna ait değerler	24

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Endüstride kullanılan elektrik makinalarının en sağlamı, en az arıza yapanı, en ucuz olanı ve en çok kullanılanı asenkron makinalardır. Çalışma ilkesi bakımından bu makinalara indüksiyon makinaları da denir. Endüstride genellikle motor olarak çalıştırılırlar, fakat belli şartların sağlanması halinde generatör olarak da kullanılabilirler.

Asenkron makinaları senkron makinalardan ayıran farklarından biri, dönme hızının sabit olmayışdır. Bu hız, motor olarak çalışmada senkron hızdan küçüktür ve adının asenkron makina oluşu bu özellikten ileri gelmektedir (Sarioğlu, 1983).

Asenkron makinalar, rotor yapısına ve rotor sargılarına göre iki gruba ayrılırlar.

1. Rotoru sincap kafesli (kısa devre) olan motorlar,
2. Rotoru sargılı ve bilezikli olan motorlar.

Bilezikli asenkron motorların rotor sargı uçları bilezik ve fırça sistemi ile dışarıya alınması sebebiyle, bu motorların üzerinde değişik çalışma şekilleri araştırılmıştır. Senkronlanan bilezikli asenkron motorla ilgili çalışma şekli de bunlardan bir tanesidir. Senkronlanan bilezikli asenkron motor ilk olarak İsveç'te, asenkron motorun güç katsayısını düzeltmek amacıyla Danielson (1901) tarafından düşünüldü. Motora ilişkin ilk çalışmalar İsveç'te yapılmakla beraber, motor İngiltere'de geliştirildi ve endüstride uygulandı. Bu sebeple dünya literatüründe "British Machine" olarak adlandırılır. Motorun tarihsel gelişimi şöylece özetlenebilir: Rawcliffe (1940), o yıla kadar geliştirilen rotor sargı bağlantılarını içeren bir makale yayınladı. Ayrıca herbir bağlantı biçimi için, uyarma akımı belirlenmesine ilişkin teorik bir inceleme yaptı. Griffin (1954), daha önce yapılan bütün çalışmaları, uyartım besleme düzeneklerini de ekleyerek bir kitapta topladı.

Son yıllarda yapılan çalışmalar ise süper iletkenli senkronlanan bilezikli asenkron motorlar üzerinde yoğunlaşmıştır. Tubbs (1989) çalışmasında; Brenchna ve Kronig, De Doncker ve Novonty, Lipo ve Leonhard'ın makalelerine dayanarak varsayımsal bir motor üzerinde incelemelerini yapmıştır. Motorun rotorunda, bir bakır ve bir de süper iletkenli kafes düşünülmüştür. En içte soğutucu sıvı nitrojen kanalları yerleştirilmiştir. Kalkış anında, rotor direncinin kaçak indüktansa oranını büyük tutup kalkış momentini yükseltmek için, yol alma süresi içinde süper iletken kısım süper iletkenlik dışında tutulup

bakır kafes aktif kılınır. Bu süre içinde motor, alışılmış bir indüksiyon motorunun eşdeğer devresiyle temsil edilir ve denklemleri buna göre yazılır. Yol alma süresi sonunda soğutucu akışkan pompalanıp sürekli duruma geçince, süper iletkenlik yer alır ve inceleme senkron motor olarak yapılır. Sürekli durum eşdeğeri sabit uyarımlı senkron motora göre çizilir. İncelemelerde süper iletken olarak, “ T_c ” kritik sıcaklığı yüksek olan bir eleman seçilmiş, soğutma işlemleri 77-100 °K sıcaklıkları arasında düşünülmüştür. Akım yoğunluğu, magnetik akı yoğunluğu, sıcaklık ve frekans göz önüne alınarak varılan sonuçta, gereken kalite ve soğutma yönüyle bu tip bir motorun pahalı ve şimdilik pratik olmadığı ispatlanmıştır.

1.1. Bilezikli Asenkron Motor

Bilezikli ve sincap kafesli asenkron motorlarda, statorlar ile bunların taşıdığı sargılar genellikle aynı özellikte yapılırlar. Yani stator sac paketinin oluklarına yayılmış “simetrik üç fazlı sargılar” diye anılan ve senkron makina statorunda da kullanılan sargılardır. Stator, senkron makinada endüvi görevini, asenkron makinada ise hem endüvi hem de rotordaki uyarım akımının birincil devresi görevini yapar. Senkron makinada uyarım akımının ve yükün durumuna göre stator akımı, uyarıma alanını destekleyebilir veya zayıflatabilir.

Sincap kafesli asenkron motorun rotor sargısı kısa devre edilmiş çubuklardan oluşan kafes şeklinde bir sargıdır ve dış devreye uç çıkarılmamıştır. Bu durum, rotorun elektriksel yönden hiç bakım istememesi anlamına geldiğinden, sincap kafesli asenkron motorlar pratikte çok tercih edilmektedir. Bu yüzden, pratikte kullanılan elektrik motorlarının %80’den fazlasını asenkron motorlar teşkil etmektedir (İlhami Çetin, 1987).

Bilezikli asenkron motorlarda ise, rotorda yalıtılmış çok fazlı sargılar vardır. Bu sargıların uçları bilezik-fırça düzeneği ile dışarıya alınmıştır. Rotor sac paketi, oluklardan meydana gelir ve üç fazlı sargılar oluklara simetrik olarak dağıtılır. Rotor fazlarının giriş uçları içten yıldız bağlanır ve dışarıya çıkarılmaz. Mıle sabitlenmiş ve milden yalıtılmış üç bilezik, rotor ile birlikte dönerler. Rotor fazlarının çıkış uçları bu bileziklere bağlanarak bu bileziklere basan fırçalar yardımı ile dışarıya alınır. Böylece rotor fazlarına, dış kaynaktan genliği ya da frekansı değiştirilebilen gerilim uygulanabildiği gibi, dışardan empedans da bağlanabilir.

Asenkron makinaların genel performansı açısından rotor direncinin sabit bir değer olarak belirlenmesinde bir uzlaşma gerekir. Rotor direncinin, normal çalışma şartlarında yüksek verim için küçük değerli olması; fakat yol alma şartlarında güç faktörü ve momentin yükselmesi için büyük değerli olması istenir. Kafesli rotorda, rotor direnci küçük değerli olduğu için yol alma akımı büyük, momenti de küçük olacaktır. Bu nedenle sargılı rotor kullanımı, uzlaştırmacı bir değer gereğinden kurtulmak için etkin bir yoldur. Yol alma süresince rotor devresine dışarıdan kademeli dirençler bağlayarak, yol alma akımı istendiği kadar düşürülebilir, kalkış momenti de devrilme momentine kadar artırılabilir. Böylece motor tam yük altında kolayca yol alabilir. Daha sonra rotor sargıları kısa devre edilerek sürekli çalışmaya geçilir. Böylece ısı şeklinde açığa çıkan kayıplar da motorun dışına taşınmış olur. Zaten ideal yol verme işleminden beklenen de budur (Fitzgerald, 1983, El-Hawary, 1986). Bu durum bilezikli asenkron motorun önemli bir üstünlüğüdür.

Rotor sargıları, normal alternatif akım sargıları veya iki tabakalı doğru akım sargısı şeklinde olabilir. Bu sargılar, stator sargılarında olduğu gibi normal iletkenlerden ya da çubuk sargılardan oluşabilir. Çoğunlukla rotor sargıları, bir olukta iki bobin yanı bulunan, iki tabakalı sargılardır. Bir rotor fazı bobininin bir yanı oluğun alt tabakasında, diğer yanı ise başka bir oluğun üst tabakasında bulunur.

1.2. Senkron Makinalar

Senkron makinalar generatör ve motor olarak çalışmak üzere imal edilirler. Bundan başka, bağlı olduğu şebekeye çok büyük kapasite gösterebilen dinamik kapasitör olarak çalışmak üzere de yapılabilirler. Bütün senkron makinaların enerji dönüşümü yapabilmesi için gerek ve yeter şart, senkron hız denilen sabit hızda dönmeleridir. Çalışma karakteristiklerinde, yük açısı ve güç faktörü önemli büyüklüklerdir. Senkron makinalar, rotor yapısı ve uyarım şekline göre dört grupta incelenebilir.

1. Yuvarlak kutuplu senkron makinalar,
2. Çıkık kutuplu senkron makinalar,
3. Daimi mıknatıslı senkron motorlar,
4. Relüktans motorları.

1.2.1. Yuvarlak kutuplu senkron makinalar

Bu makinalarda hem rotor çevresi ve hem de stator iç çevresi, sabit yarıçaplı silindirik yüzeylerden oluşurlar. Başka bir deyimle, yuvarlak kutuplu senkron makinaların statoru ile rotoru arasında radyal doğrultuda kalan hava aralığının boyu sabittir. Genellikle kutup sayısı küçük, senkron devir sayıları yüksek olarak yapıldığından buna uygun olarak da rotorlarının çapı küçük ve boyu uzun olarak imal edilirler.

Yuvarlak kutuplu senkron makinalar, sabit kısım stator ve dönen kısım rotordan oluşur. Stator, endüvi görevinde olup simetrik üç fazlı sargıları taşır. Rotor ise uyartım görevinde olup doğru akımla beslenen uyartım sargısını taşır. Rotorun dış çevresi boyunca kısa devre edilmiş çubuklardan oluşan sönüm (amortisman) sargıları, makinanın asenkron olarak yol alabilmesini ve sürekli çalışmada senkronizmdan kopmayı engelleyen asenkron momentler sağlar. Sürekli çalışmada ise akı değişimine maruz kalmadığından akım taşımazlar.

1.2.2. Çıkık kutuplu senkron makinalar

Çıkık kutuplu senkron makinalar, radyal doğrultuda stator ile rotor arasında kalan hava aralığı her noktada sabit olmayan senkron makinalardır. Genellikle büyük kutup sayısında ve küçük senkron hızlar için imal edilirler. Buna uygun olarak da rotor çapı büyük ve boyu kısa olarak imal edilirler.

Çıkık kutuplu senkron makinalarda da yuvarlak kutuplu senkron makinalar gibi, stator ve rotor aynı görevde bulunurlar. Rotorun magnetik devresinin yapısı yuvarlak kutupludan farklı olarak, rotorun dönüş açısı ile değişen bir relüktans ve akı ortaya çıkarır. Böylece makinanın güç ve moment ifadelerine relüktansa bağlı ifadeler eklenir (Sarioğlu, 1994).

1.2.3. Daimi mıknatıslı senkron motorlar

Makina yapımcıları tarafından bu motora “bir stator içinde iki motor” ismi verilmiştir. Stator yapısı yine döner alan makinalarının aynısıdır. Levha paketinden oluşan

statorda döner alan sargısı bulunur. Bu motorları diğerlerinden ayıran tüm özellikler rotorundan gelmektedir (Aldemir, 1977).

Bu makina çıkık kutuplu senkron makinanın sabit uyartımlı şekli olarak düşünülür ve sürekli durum incelemeleri bu kabul altında yapılır. Denklemlerde E_f endüklenen gerilim değeri sabit alınır (Rashid, 1988). Rotorda, motorun kendiliğinden yol alabilmesini sağlayacak yol verme kafesi bulunur. Rotorda ayrıca daimi mıknatıslar ve kaçak akı olukları yer almıştır. Daimi mıknatıslar uyartım görevini yaparak, makinanın senkron hızda çalışmasını sağlarlar. Kaçak akı olukları ise stator alanlarına yayılma yolu olarak görev yaparlar ve böylece mıknatısları bu alanların mıknatıslanmayı giderici etkisinden korurlar. Kaçak akı oluklarının makinanın davranışı üzerindeki etkisi büyüktür. Mil, ya magnetik olmayan malzemeden yapılır ya da rotor ile mil arasına magnetik geçirgenliği kötü olan bir tabaka yerleştirilir.

1.2.4. Relüktans motorları

Bu motorlar, son yıllarda üzerinde çok araştırma yapılan bir senkron motor türüdür. Yapı olarak ve sürekli durum incelemesi için normal bir çıkık kutuplu senkron makinanın uyartım sargılarının çıkarılmış halidir. Endüvi sargıları, senkron hızda dönen hava aralığı akısını üretir. Bu alan, rotorda, minimum relüktans değerini sağlama eğilimiyle yükselen bir magnetik alan ve relüktans momenti endükler (Rashid, 1988).

Rotor kısmı sadece kısa devre çubukları ve demir kısımdan oluştuğundan maliyet ve işletme yönüyle üstünük kazanmaktadır. Güç faktörü ve verim yönüyle kötü olup, gürültülü çalışan motorlardır.

1.3. Senkron Motorların Genel Değerlendirilmesi

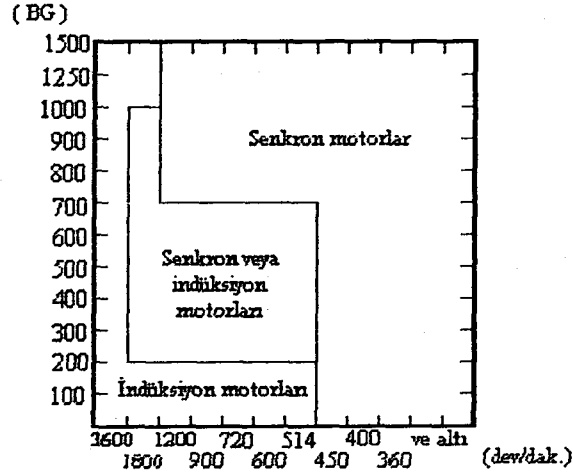
İndüksiyon motorlarının, özellikle sincap kafesli motorların maliyetleri ve arıza yapma oranı diğer motorlara göre daha düşük kalmaktadır fakat bu motorların verimleri ve güç faktörleri düşüktür. Dolayısıyla besleme tarafının görünür gücü yüksek olmak zorundadır. Verimin ve güç faktörünün önem kazandığı uygulamalarda senkron motorların indüksiyon motorlarına büyük bir üstünlüğü vardır. MW'lar mertebesinde güçlerle yapılan tahriklerde senkron motorlar alternatifsizdir. Bunun sebebi, büyük

güçlerde doğru akım makinalarının komutatörleri kullanışsız hale gelmesi, indüksiyon makinasının veriminin daha düşmesidir. Çünkü büyük makinalarda hava aralığı orantılı olarak büyüyecek ve stator indüktif akımının rotorda indükleyeceği gerilimler de küçüleceğinden indüksiyon makinasının verimi düşecektir. Senkron makinalarda ise hava aralığının büyümesi fazla dezavantaj teşkil etmez. Çünkü hava aralığı akısının tamamı stator kaynaklı olmayıp uyarma sargısı da ayrı bir kaynaktan beslenir. Ayrıca hava aralığının büyümesiyle senkron makinada harmonikler azalır. Bunların yanında güç elektroniğinin yakın zamanlarda gösterdiği gelişim de önemlidir. Bu sayede senkron motorun devrinin hiç değişmemesi ve şok yüklerde kararlılığın bozulması problemleri de halledilebilmiştir. Değişik konverter topolojileri, çoğunlukla bir rotor pozisyon algılayıcısı ile yapılan bir kapalı çevrim kontroluyla gerçekleştirilen “Self Kontrollu Senkron Motor” tahrik sistemlerinde kullanılmaya başlanmıştır. Siemens firması 1968’de ilk incelemelerini yapmış, 1969’dan itibaren senkron motor kontrol yöntemlerini kullanmaya başlamıştır.

MW mertebelerindeki güçlerde, senkron motorun güç faktörünün iyileştirilebilmesi sayesinde tristörlerin doğal aktarımının sağlanması mümkündür. Böylece aktarım için gereken ilave devreler kaldırılarak maliyetten, işletme ve bakım yönünden kazanç sağlanabilir. Böylece güç elektroniğinin gerekleri senkron motorun önemini artırmaktadır.

Senkron motorların, indüksiyon motorlarına göre imalat ve kuruluş masrafı daha fazla olduğundan orta hız aralığında 50 BG’in altında nadiren kullanılırlar. Uyarım düzeneği ihtiyaçlarına ilaveten yol verme ve kontrol için kullanılan araçlar daha pahalı (özellikle otomatik çalışmanın gerektiği yerlerde) olmaktadır. Bununla beraber, senkron motorlar çok kesin olan bazı avantajları getirirler. Bunlar; sabit hızlı çalışma, güç kontrolü ve yüksek verimli çalışmadır. Ayrıca, belli bir güç aralığında kuruluş masraflarının dezavantaj olması durumu kalkarak senkron motor avantajlı duruma geçer (Şekil 1.1).

Düşük hız ve yüksek güç istenen yerlerde, indüksiyon motorları artık daha ucuz olamamaktadır. Çünkü, 0.7 T hava aralığı akı yoğunluğunu aşmamak için büyük miktarda demir kullanılması gerekecektir. Diğer taraftan senkron makinada, serbest uyarımdan dolayı bu değer iki katına müsadde edilir. Senkron motorların kullanıldığı düşük hız ve yüksek güç istenen alanlara örnek olarak büyük ve alçak-başlı pompalar, değirmenler,



Şekil 1.1 Senkron motorlar ve indüksiyon motorlarının genel kullanım alanları

kauçuk fabrikaları ve mikserler, kırıcılar, gemiler, kağıt ezme ve sarma makinaları gösterilebilir (Del Toro, 1990).

Senkron motor, aynı güçteki bir doğru akım makinasına göre daha gürültüsüzdür ve ağırlığı daha azdır. Sincap kafesli asenkron makinaya göre ise maliyetçe fazla, hacimce büyük ve bakım ihtiyaçları daha fazladır. Buna karşılık rotoru sargılı ve daimi mıknatıslı senkron motorların verimi ve güç faktörü ise, daha yüksektir. Değişken hızlı tahriklerde, düşük güçlere gidildikçe daimi mıknatıslı senkron motorlar tercih edilmektedir.

Ayrıca relüktans motorları, sabit hız istenen birçok uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu uygulamalara örnek olarak kayıt araçları, zamanlama cihazları, kontrol gereçleri ve regülatörler gösterilebilir (Rosenblatt, 1984).

1.4. Senkronlanan Asenkron Motor

Senkronlanan asenkron motor, bilezikli asenkron motorla senkron motorun bir bileşimidir. Böylelikle asenkron motorun üstün kalkış özellikleri ile senkron motorun yüksek verim ve güç katsayısının düzeltilmesi gibi sürekli çalışma özellikleri bir araya getirilmiştir. Birleştirilen her iki motorun mahzurları ise motorun yapısında yapılacak değişikliklerle en aza indirilmeye çalışılır. Yapı olarak bilezikli asenkron makinaya benzer, ancak rotor sargıları genelde bilezikli asenkron motordan farklıdır (İmeryüz ve Çetin, 1991, Özdemir, 1993).

Senkronlanan asenkron motor, sürekli çalışmada uyarım şekline göre serbest uyarımlı ve seri uyarımlı olmak üzere iki gruba ayrılabilir.

1.4.1. Serbest uyarımlı senkronlanan asenkron motor

Senkronlanan asenkron motor, rotor devresine bağlanan yol verme dirençleri üzerinden asenkron olarak yol alır. Motor, senkron hıza yakın hızlarda çalışırken rotor sargısına doğru gerilim uygulanarak senkronlanır. Senkronlanmış çalışma şeklinde yuvarlak kutuplu senkron makina için yazılan denklemler ve tanımlamalar geçerlidir (Cottan, 1925).

Özel tasarlanmamış, bilezikli asenkron motorun rotor sargısında bağlantı değişikliği yapılarak elde edilen senkronlanan asenkron motorun devrilme momentleri küçük ve yükleme aralıkları sınırlıdır. Uyarım için rotorun doğru akım beslemesi, genellikle yük akımına bağlı köprü doğrultucu devreler ile sağlanır. Özel tasarlanmış senkronlanabilen bilezikli asenkron motorun maliyeti, senkron ve bilezikli asenkron motorlarınkinden daha fazladır. Senkronlanan asenkron motor, senkron çalışmada şebekeden reaktif güç alabilir ve şebekeye reaktif güç verebilir. Bu özelliği sebebiyle yalnız sistemin güç katsayısını düzeltmek ile kalmaz, şebekede oluşan reaktif güç dalgalanmalarında fazla gücü üzerine alarak sistemin karalılığını da korur. Uygun kontrol düzenekleriyle donatılarak, işletmede statik VAR sistemlerinin yerine kullanılabilir (İmeryüz ve Çetin, 1991).

14.2. Seri uyarımlı senkronlanan asenkron motor

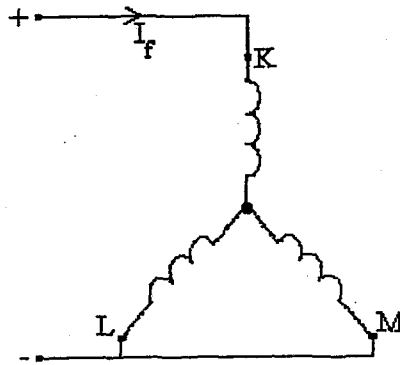
Sabit ve değişken frekanslı a.a. tahrikleri için bir senkron motor genel olarak tercih edilir. Fakat çoğu durumlarda, daha düşük maliyeti ve daha sade olması sebebiyle indüksiyon motorları kullanılır. Bu, özellikle ayrı bir uyarım düzeneğinin pahalı olacağı küçük tahrikler için geçerlidir. Bu yüzden, son zamanlarda relüktans motorları, daimi mıknatısla uyarım ve diğer çalışmalar üzerindeki araştırmalara gerek duyulmuştur. Seri uyarımlı senkron motor bu konuda bir alternatif sunar; her ne kadar bilezikli bir rotor gerekse de, sadece bir köprü doğrultucu ile seri uyarım karakteristiğine sahip bir senkron motor elde edilebilir.

Bölüm 2’de ayrıntılı olarak açıklanan bu motorda, stator sargılarının çıkış uçları yıldız noktası yerine köprü doğrultucunun a.a. uçlarına bağlanır. Doğrultucunun d.a. çıkışı da bilezikler yoluyla rotor sargılarını besler. Bu bağlantı sonucunda rotor veya uyarım akımı, stator akımına bağımlı olarak değiştiğinden seri uyarımlı bir senkron motor elde edilir. Meydana getirilen sistem sayesinde ayrı bir uyarım besleme kaynağı, transformatör veya ilave bir sargıya gerek kalmamaktadır.

Böyle bir motor, yuvarlak kutuplu bir senkron motor olarak çalışır ancak seri uyarımın ortaya çıkardığı sürekli durum çalışması, bilinen sabit uyarımlı senkron motorun davranışından ve incelemesinden farklılık gösterir (Williamson,1980).

1.5. Senkronlanan Asenkron Motor İçin Rotor Bağlantı Şekilleri

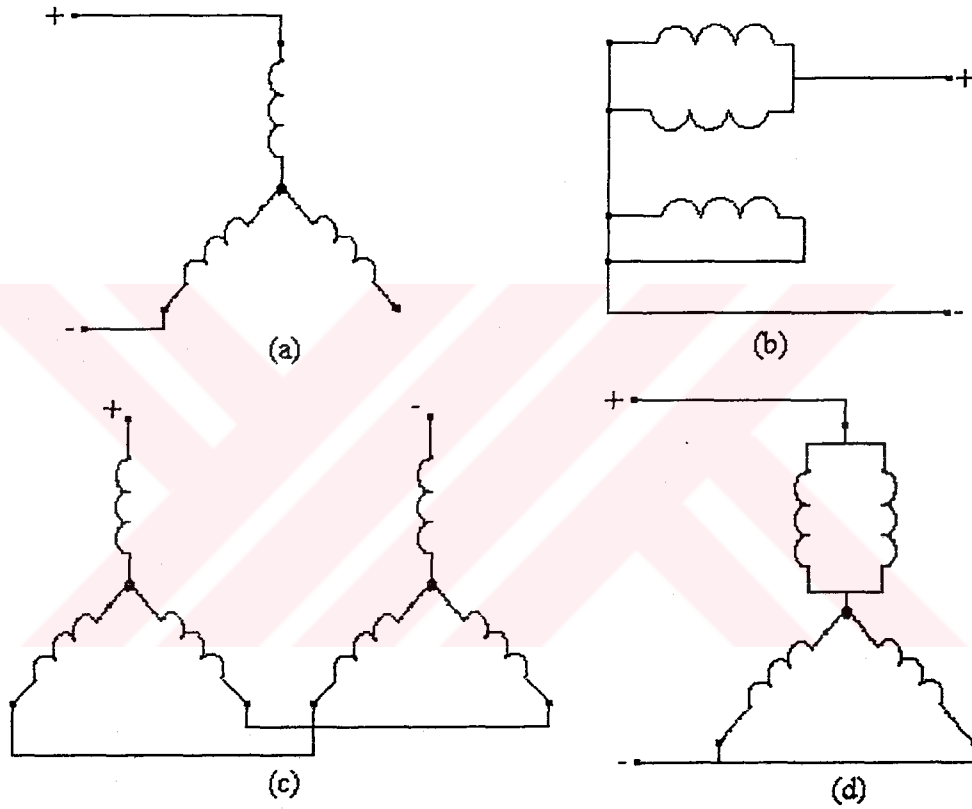
Senkronlanan bilezikli asenkron motorun sürekli durumda senkron çalışması için birçok değişik rotor bağlantıları vardır. Bunların bir kısmı ayrı bir tasarım gerektirirken bir kısmı da bilinen bilezikli asenkron motorlar için kullanılabilir bağlantılardır. Motorun yol alma süresince, asenkron çalışması için rotor bağlantısı genel olarak standart şeklinden farklı olmaz. Rotor çoğu zaman bilezikler yoluyla ayarlı dirençler üzerinden yıldız olarak bağlanır. Danielson’un (1901) senkron çalışma için kullandığı Şekil 1.2’deki rotor sargı bağlantısı hala yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu bağlantı şekli tüm bilezikli asenkron motorlar için kolaylıkla uygulanabilir. Bu bağlantının yanında, yine kolayca uygulanabilen diğer bir bağlantı ise bir sargı açık bağlantıdır. Bu bağlantı için de Şekil 1.2’deki K veya L uçlarından biri açılır. Elde edilen bağlantı ile aynı I_f uyarım akımında



Şekil 1.2 Rotor sargısı için Danielson bağlantısı

%15 daha etkin bir uyarım, yani magneto motor kuvvet elde edilir. Bununla ilgili ayrıntı ve seri uyarımda davranışa etkisi Bölüm 2’de açıklanmaktadır.

Rotor sargısı standart şekilde yıldız noktası içerde iken kolayca yapılabilecek iki bağlantı olur fakat rotorun yıldız noktasından bir sargının ucu yıldız noktası ile beraber çıkarılıp bilezik sayısı artırılarak ya da rotor faz sargılarının “çift V” sargısı, “çift yıldız” sargısı şeklinde bağlanması (Şekil 1.3) gibi tasarım değişikliği yapılarak farklı bağlantılar elde edilebilir (Brosan ve Hayden, 1966).



Şekil 1.3 Senkron çalışma için kullanılabilecek diğer rotor bağlantı şekillerine örnekler

- | | |
|-------------------------------|-----------------------------|
| a. Bir faz sargısı açık devre | b. Çift V sargılı |
| c. Çift yıldız | d. Üçüncü fazı çift sargılı |

1.6. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmada, üzerinde sınırlı sayıda çalışma yapılmış olan seri uyarımlı senkron motorun tüm sürekli ve dinamik durum özelliklerinin deneysel ve sayısal sonuçları karşılaştırarak ortaya konulması amaçlanmıştır. Bu amaçla yapılacak incelemelere ait matematiksel modeller ve bilgisayar çözüm yöntemleri verilecektir.

Sürekli durumda senkron motor olarak inceleme için eşdeğer devre, denklemler ve çözüm yöntemi açıklanacaktır. Dinamik durum için faz değişkenleri matematiksel modeli verilerek, alışlagelmiş diferansiyel denklem sistemlerinin yerine elektriksel eşdeğer devreler ile modelin benzetimi yapılacaktır. Bu inceleme, belli üstünlükleri kazandırdığı için PSPICE 5.4. devre tasarım programına dayandırılacaktır.



BÖLÜM 2

SERİ UYARTIMLA SENKRONLANAN BİLEZİKLİ ASENKRON MOTORUN SÜREKLİ DURUM MODELİ

2.1. Giriş

Bu bölümde seri uyartımlı senkron motorun sürekli durum performansı incelenmiştir. Seri uyartımlı senkron motorun, teorik ve deneysel sonuçlarına dayanarak, bilezikli asenkron motor ile karşılaştırılması yapılmıştır. Seri uyartımlı senkron çalışmada değişik rotor bağlantıları için sürekli durum performansları ve bağlantı şekline göre akımlar arasındaki dönüştürme katsayısının genel performansa etkileri incelenmiştir.

Seri uyartımlı senkron motorun bir matematiksel modeli ve eşdeğer devresi verilerek, köprü doğrultucu ve senkronlanan bilezikli asenkron motor sistemi incelenmiştir. Doymalı magnetik devre hesaba alınarak, sistem denklemlerini çözmek için sayısal bir çözüm yöntemi geliştirilmiştir.

2.2. İncelemede Kabul Edilen Yaklaşımlar

- a. Alternatif gerilimler ve akımlar birinci harmonik dışında bileşen içermezler.
- b. Doğrultucu çıkışındaki akımın değeri sabittir; yani, ortalama değer civarında dalgalanmaz.
- c. Seri uyartımlı senkron motorun momentini hesaplanırken akımın birinci harmoniği alınır ve motor yuvarlak kutuplu olarak kabul edilir.
- d. Hava aralığı akısının belli bir değerine karşılık gelen toplam magnetomotor kuvvet (mmk), yük altında ve açık devrede eşit olduğu kabul edilir.

2.3. Köprü Doğrultucunun Alternatif Akım Uçlarından Görülen Eşdeğer Devre ve Gerilim

Herhangi bir elektromagnetik sistemde olduğu gibi bir senkron makinada, motor veya generator çalışma için gerekli olan bileşke akı, akımın mıknatıslanma bileşeni tarafından oluşturulur. Asenkron çalışma için mıknatıslanma akımı stator alternatif akımı

tarafından, senkron çalışma için uyarma devresindeki doğru akım tarafından veya her ikisi tarafından karşılanır.

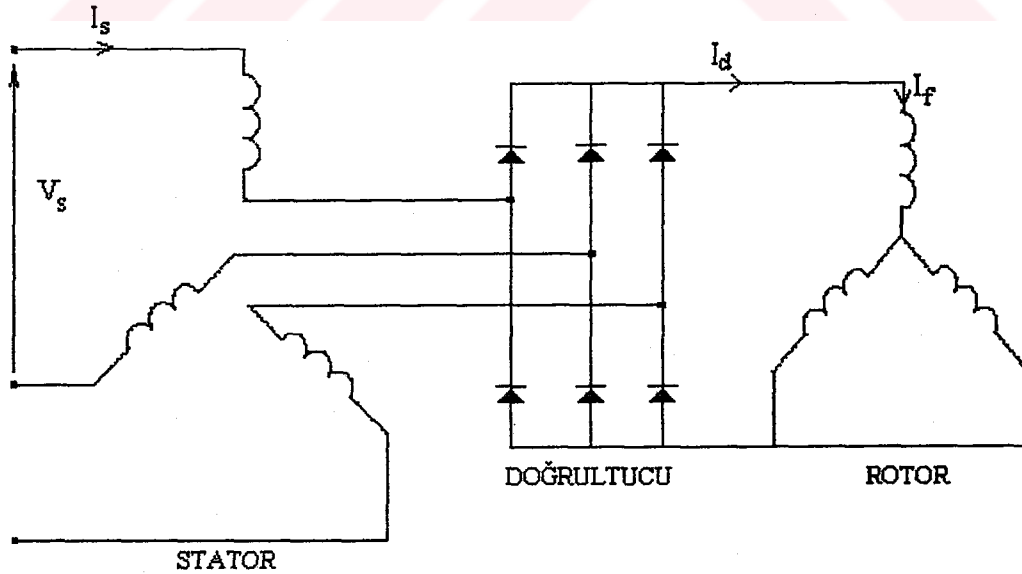
Yuvarlak kutuplu bir senkron makina için, Kısım 2.2.d. maddesinde verilen kabul önemli bir hataya neden olmaz. Buna göre açık devre karakteristiği, hava aralığı gerilimi ile uyarma ve endüvi reaksiyonunun bileşke mmk'sı arasındaki bağıntı olarak yorumlanabilir.

Şekil 2.1.'de incelenen devre bağlantısı gösterilmiştir. Herbir fazda, stator ve uyarma akımlarının beraber hareket etmesiyle üretilen değişken akı halkaları bulunur. Harmonikler ihmal edilirse, hava aralığı akısı veya bileşke akı, hava aralığı gerilimi E_r 'yi indükler. Bir faz için köprü uçlarına gelen gerilim aşağıdaki ifade ile verilir.

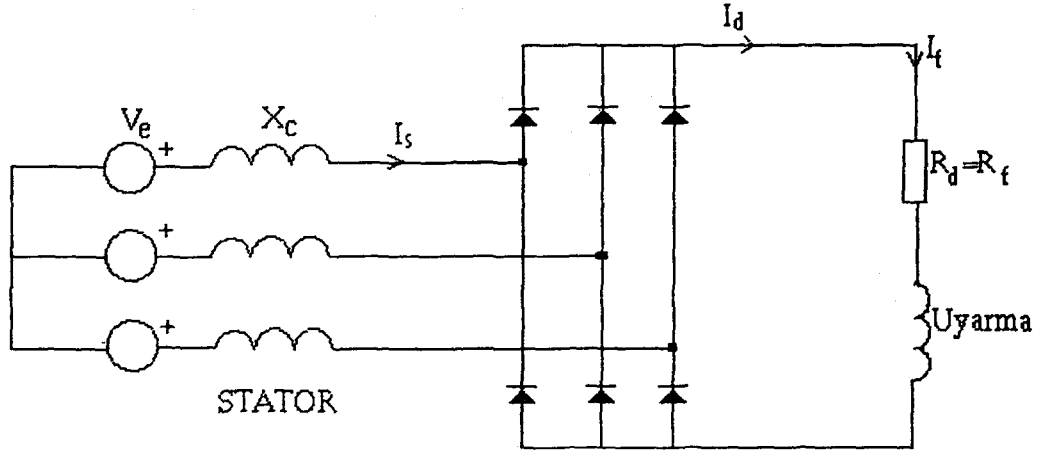
$$\bar{V}_e = \bar{V}_s - \bar{E}_r \quad (2.1)$$

Burada fazör olarak yapılacak işlem için V_s ile E_r arasındaki açı bu noktada bilinmemektedir. Böylece köprü doğrultucu devre Şekil 2.2. deki gibi olur. Şekilde gösterilen X_c komutasyon reaktansı olup, motorun bir fazının kaçak reaktansına eşit alınabilir.

Stator ve rotor akımlarının ürettiği akılar motora ait aynı magnetik devreyi kullandığı için bu akımlar, aynı mmk'i üretecek şekilde eşdeğer bir akımla herbiri diğer tarafa dönüştürülebilir.



Şekil 2.1. Seri uyarımlı senkron motor bağlantı şekli



Şekil 2.2 Köprü doğrultucu giriş uçlarındaki gerilim

Uyarma akımının bir faz etkin eşdeğeri I_e diye belirtilirse, bunun stator akımı I_s ile bileşkesi, mıknatıslanma akımını veya bileşke akımı, yani hava aralığı mmk'ini verir. Böylece, hava aralığı gerilimi

$$E_r = j (I_s + I_e) X_m \quad (2.2)$$

olarak yazılır. Köprü doğrultucunun alternatif gerilim uçlarından bakıldığında, bir empedans gibi davrandığı görülmektedir. I_s akımının birinci harmoniğine karşı köprü doğrultucunun gösterdiği empedans bir faz için $(R_b + jX_b)$ şeklinde temsil edilir. Bu durumda statorun faz başına toplam direnci $(R_s + R_b)$, reaktansı ise $X_s = X_b$ olmaktadır.

Yuvarlak kutuplu senkron makinada uyarma akımının, statorun bir fazındaki etkin değer olarak eşdeğerini bulmak üzere; boşta çalışan makinada uyarma mmk'i, endüvi tarafından stator eşdeğer akımı ile oluşturulması için 'etkin değer' ve 'döner alan' katsayıları ile çarpılmalıdır. Buna göre uyarma akımının stator eşdeğeri

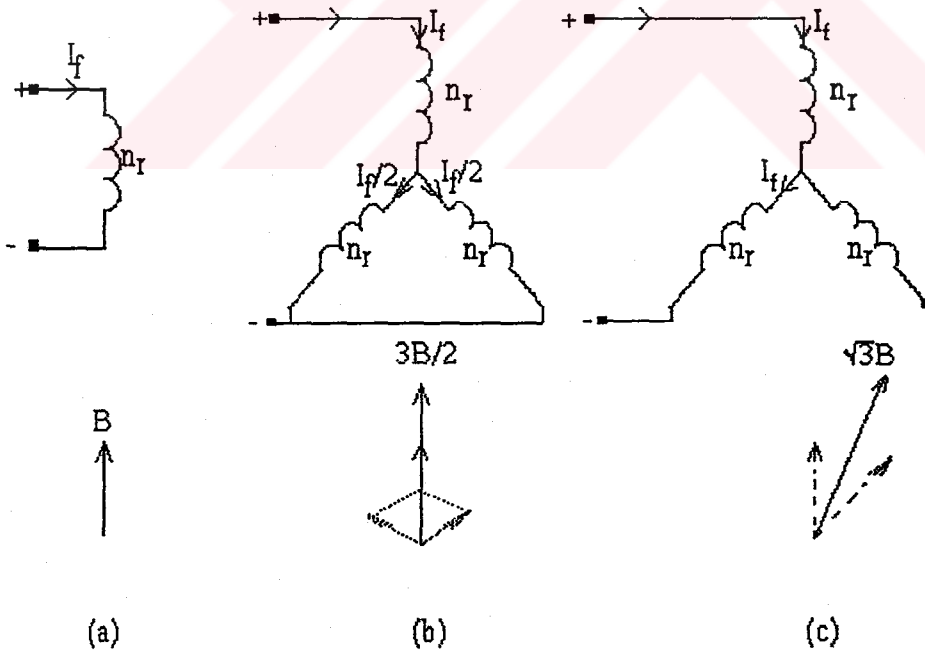
$$I_e = \frac{\sqrt{2}}{3} \frac{n_r}{n_s} I_f \quad (2.3)$$

şeklinde yazılır. Bu eşitlikle n_r sarımlı, I_f uyarma doğru akımını taşıyan rotor mmk'inin; n_s sarımlı üç fazlı endüvide, bir faz etkin değeri I_e olan akımla sağlanması düşünülmüştür.

Senkronlanan bilezikli asenkron makinada rotor devresi üç fazlı olduğundan rotor fazlarının bileşke mmk'ı hesaba alınır. Bileşke magnetik alan ile toplam mmk arasındaki ilişki magnetik geçirgenlik katsayısıyla verilir. Doyma ile magnetik geçirgenlik azalır; doymasız durum için magnetik alan da bağlantı değişikliğinden mmk ile aynı oranda değişim gösterir. Bağlantıların toplam mmk'leri oranlanırsa belirli katsayılar çıkar. Bilezikli rotorda aynı sarım sayısına sahip üç tane sargı bulunup senkron çalışmada uyarım akımının sargılara dağılımı bilinir. Toplam magnetik alan vektörleri, bir faz rotor sargısının alanına bağlı olarak yazılırsa, bağlantı şekline göre belli katsayılar bulunur.

Şekil 2.3.a'da gösterilen yuvarlak kutuplu normal senkron makina için (2.3) denklemi geçerlidir. Danielson bağlantısı için aynı denklem (3/2) ile çarpılarak (2.4) denklemi, bir sargı açık bağlantı için de ($\sqrt{3}$) çarpanı getirilerek (2.5) denklemi elde edilir.

$$I_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{n_r}{n_s} I_f = k_1 I_f \quad (2.4)$$



Şekil 2.3 Senkron çalışmada rotor bağlantıları ve toplam magnetik alan ve mmk
a. Rotoru tek sargılı senkron makina b. Danielson bağlantısı c. Bir sargı açık bağlantı

$$I_e = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{n_r}{n_s} I_f = k_1 I_f \quad (2.5)$$

(2.4) ve (2.5) denklemlerinden, bir sargı açık bağlantının Danielson bağlantıya göre aynı uyartım akımında daha büyük mmk oluşturacağı görülmektedir. Bu, rotor devresinin bir sargı açık bağlantısıyla daha etkin bir uyartım sağlanabileceği anlamına gelir. Bu özellik, serbest uyartımda doğrudan geçerlidir. Seri uyartımda ise davranışın, toplam 'k' katsayısı ile belirleneceği gösterilecektir. Seri bağlantıda uyarma akımının statorun bir fazına dönüştürülmesinde

$$I_e = k I_s \quad (2.6)$$

genel ifadesini elde etmek üzere, doğrultucuya giren faz akımının etkin değeriyle, çıkan doğru akımın ortalama değeri arasındaki ilişki

$$I_f = k_2 I_s \quad (2.7)$$

şeklinde yazılırsa,

$$I_e = k I_s = k_1 k_2 I_s \quad (2.8)$$

bulunur. Yukarıdaki ifadelere ilişkin eşdeğer devreler ve fazör diyagramları Şekil 2.4 'de verilmiştir.

Eşdeğer devreden görüldüğü gibi, uyartım akımı stator akımı ile değişerek seri uyartım özelliği verir. I_e ile I_s akımlarının genlikleri ve aralarındaki açı, yük ile değişir. Şekil 2.4 'de,

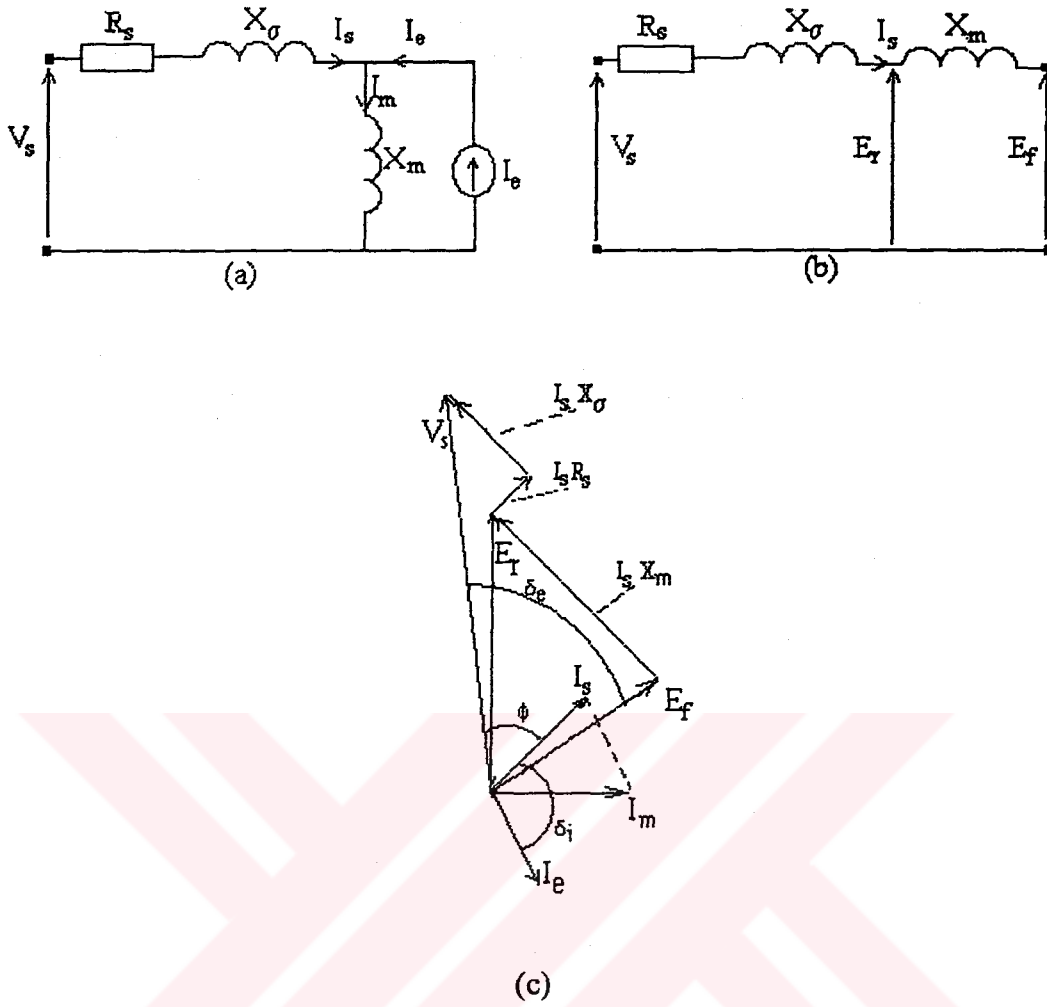
$\delta_i = I_e$ ile I_s arasındaki açı

$\delta_e = V_s$ ile E_f arasındaki açı , deneyde ölçülen yük açısı

ϕ = güç faktörü açısı

$$\delta_e = \delta_i + \phi - 90^\circ$$

dir. Burada δ_e bilinen yük açısı olup I_e ye göre 90° önde olan E_f ile V_s arasındaki açıdır.



Şekil 2.4 Seri uyarımlı senkron motorda sürekli durum için,
a. Akım eşdeğer devresi, b. Gerilim eşdeğer devresi, c. Fazör diyagramı

2.4. Doymalı Magnetik Devre ile Performans Analizi

Seri uyarımlı senkron motorun sürekli durum incelemesi için Şekil 2.4.a.'da görülen akım eşdeğer devresinin kullanılması uygundur. Burada uyarım akımı stator akımına doğrudan bağlıdır. Mıknatıslanma akımı ise iki akımın vektörel toplamıyla bulunur. Eşdeğer devreyi fazör diyagramına göre çözmek amacıyla stator akımı belirli bir değer için referans alınıp reel kabul edilerek, uyarım akımı stator eşdeğerinin açısı δ_i , değişken alınıp mıknatıslanma akımı bulunur. Mıknatıslama eğrisinden indüklenen gerilim bulunup gerilim düşümleriyle toplanarak giriş gerilimine eşit oluncaya kadar yinelemeye devam edilir. İndüklenen gerilimin doğrusal olmayan değişimini hesaba katmak için makinanın boşa çalışma deneyinden uyarma akımıyla değişimini veren $E=f(I_f)$

fonksiyonu elde edilir. Mıknatıslanma akımı rotora dönüştürülerek indüklenen gerilim bulunarak sistem denklemleri kolayca çözülür.

Stator akımı reel alınırsa, uyarım akımının stator eşdeğeri

$$\bar{I}_e = k I_s (\cos \delta_i - j \sin \delta_i) \quad (2.10)$$

ve bileşke akım veya mıknatıslanma akımı

$$\bar{I}_m = \bar{I}_s + \bar{I}_e = I_s (1 + k \cos \delta_i - j k \sin \delta_i) \quad (2.11)$$

$$I_m = I_s \sqrt{1 + k^2 + 2k \cos \delta_i} \quad (2.12)$$

yazılır. I_m 'in değeri rotora dönüştürülüp indüklenen gerilim mıknatıslanma eğrisinden bulunur. Bu gerilim I_m 'e göre 90° ileride olur. Buna göre,

$$\bar{E}_r = jE \frac{1 + k \cos \delta_i - j k \sin \delta_i}{\sqrt{1 + k^2 + 2k \cos \delta_i}} \quad (2.13)$$

olur. Eşdeğer devre ve fazör diyagramından uç gerilimini bulmak için ifadeler birleştirilir.

$$\bar{V} = V_r + j V_i = \bar{E}_r + I_s (R_s + R_b) + j I_s X_b \quad (2.14)$$

$$V_r = I_s (R_s + R_b) + \frac{E k \sin \delta_i}{\sqrt{1 + k^2 + 2k \cos \delta_i}} \quad (2.15)$$

$$V_i = I_s X_b + \frac{E(1 + k \cos \delta_i)}{\sqrt{1 + k^2 + 2k \cos \delta_i}} \quad (2.16)$$

$$V = \sqrt{V_r^2 + V_i^2} \quad (2.17)$$

$$\phi = \tan^{-1} (V_i / V_r) \quad (2.18)$$

eğer $V_r < 0$ ise

$$\phi = 180^\circ + \tan^{-1} (V_i / V_r) \quad (2.19)$$

olur. δ_e yük açısı ise

$$\delta_e = \phi + \delta_i - 90^\circ \quad (2.20)$$

Sabit uç geriliminde çalışma şartlarında, (2.10)-(2.20) denklemleri, I_s 'nin belli bir değeri için δ_i 'yi değiştirip (2.17) ifadesi sağlanıncaya kadar yineleme yapılarak çözülür.

Burada giriş gücü,

$$P_{gir} = 3 V_r I_s \quad (2.21)$$

olur. Bu güce sargı kayıpları ve sabit mekanik kayıplar dahil, demir kayıpları ise dahil değildir. Demir kayıpları, mıknatıslanma akımının parabolik bir fonksiyonudur ve bu eğri deneysel olarak bulunursa, demir kayıplarının değişimi de hesaba katılabilir (Williamson, 1980).

Giriş gücünden bakır kaybı çıkarılarak, indüklenen moment ifadesi

$$M_e = \frac{1}{\omega_s} 3 I_s (V_r - I_s (R_s + R_b)) \quad (2.22)$$

olarak elde edilir.

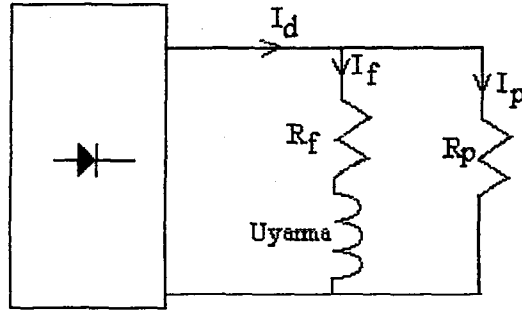
2.5. Uyarma Devresinin Paralel Direnç ile Analizi

Stator akımı ile uyarma arasındaki bağıntıyı, yani "k" katsayısını, makinanın tasarımında değişiklik yapmadan değiştirebilmek için, uyarma devresine bir paralel direnç bağlanabilir (Şekil 2-5). Bu durumda aşağıdaki ifadeler yazılabilir (Ostos, 1978).

$$I_f = I_d \frac{R_p}{R_p + R_f} \quad (2.23)$$

$$k_3 = \frac{R_p}{R_p + R_f} \quad (2.24)$$

$$I_f = k_3 I_d \quad (2.25)$$



Şekil 2.5 Uyarma devresine paralel direnç bağlanarak k katsayısının değiştirilmesi

(2.3-8) denklemleri esas alınarak, eşdeğer uyarma akımı, (2.25) denklemindeki paralel direnç ilavesiyle,

$$I_e = k_1 k_2 k_3 I_s \quad (2.26)$$

olur. Buradan

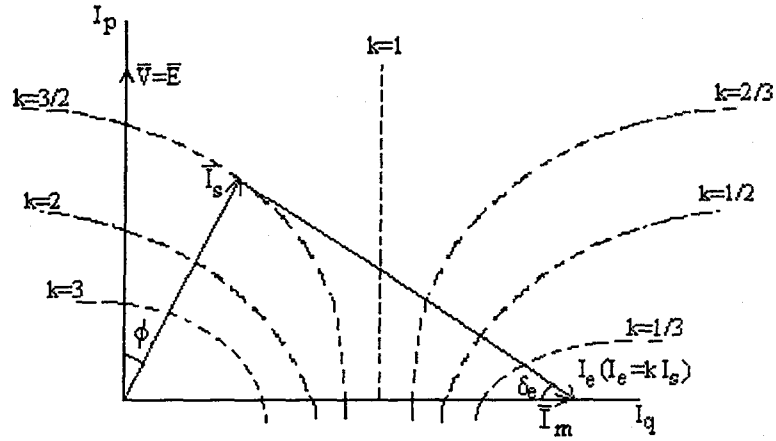
$$k = k_1 k_2 k_3 \quad (2.27)$$

olarak bulunur.

Endüvi akımı ile eşdeğer uyarma akımı arasındaki bağıntıyı veren k katsayısının 1'e yakın değerlerinde performansın iyileştiği isbatlanmıştır (Williamson, 1980).

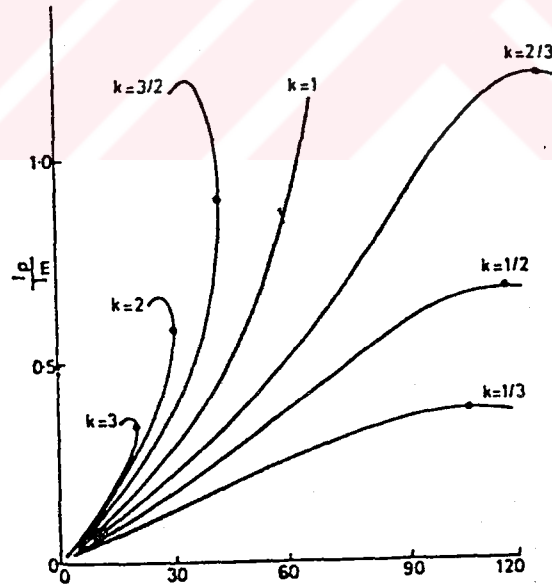
Bu bölümün sonunda rotor devresinin yıldız noktası alışıldığı gibi dışa alınmaması halinde mümkün olan iki bağlantı için k katsayısının değişimi ve performansa etkisi incelenmiştir.

Şekil 2.6'dan görüleceği gibi ideal makina, yani X_m dışındaki parametreler ihmal edilerek verilen fazör diyagramına göre $k > 1$ olduğunda güç faktörü daha iyi olmaktadır. Bununla beraber maksimum moment, kararlılık bozulmadan elde edilememektedir. $k < 1$ için maksimum moment kapasitesi iyileşmekte ve yük açısı 90° oluncaya kadar kararlılık devam etmektedir (Şekil 2.7).

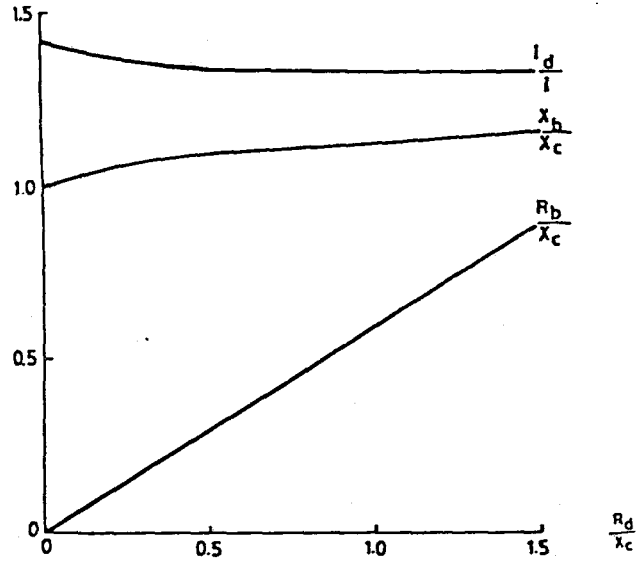


Şekil 2.6 Değişik k değerleri için ideal makinaya ait fazör diyagramı

Köprü doğrultucunun akımın temel bileşenine karşı gösterdiği empedans $(R_b + j X_b)$ alınırsa, R_b / X_c , X_b / X_c , I_d / I_s oranları sadece R_d / X_c 'nin fonksiyonudur (Şekil 2.8). Burada R_d rotor devresi toplam direnci olup, komutasyon reaktansı $X_c = X_\sigma$ alınırsa, R_d değiştirilince $(R_b + j X_b)$ ve $k_2 = I_d / I_s$ bulunur (Williamson, 1980).



Şekil 2.7 Değişik k değerleri için ideal makinada moment-yük açısı değişimi

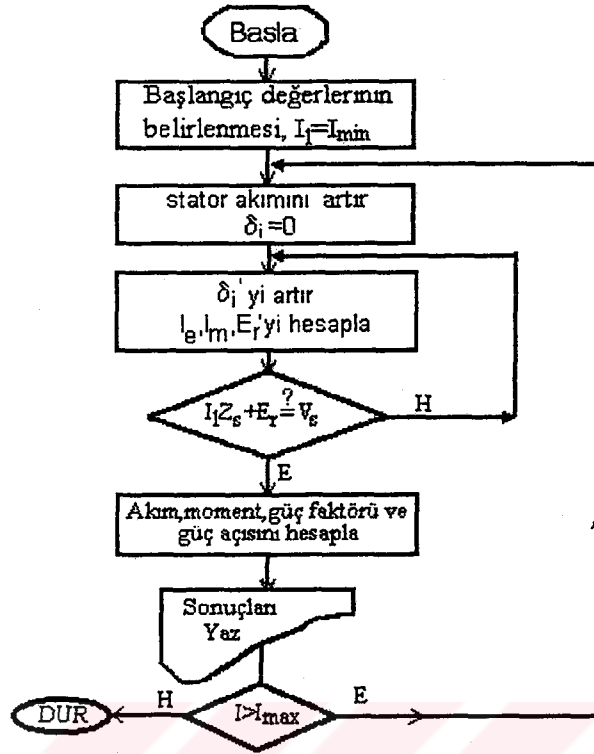


Şekil 2.8 Köprü doğrultucunun a.a.'daki temel bileşen empedansı

2.6. Hesaplamalar ve Bilgisayar Programı

Bu bölümde seri uyarımlı senkron motorun sürekli durum modelinin çözümünde kullanılan hesap yöntemi ve bilgisayar programı tanıtılmıştır. Kullanılan bilgisayar programına ait akış diyagramı Şekil 2.9 'da verilmiştir. Bu programda giriş bilgisi, deneysel olarak bulunan asenkron motor eşdeğer devre parametreleri, aynı makinanın senkron generatör olarak boşa çalıştırılmasıyla elde edilen $E=f(I_m)$ açık devre karakteristiği (mıknatıslanma eğrisi) ve $P_{Fe}=f(I_m)$ demir kayıpları eğrisidir. Motora ait nominal gerilim, kutup sayısı, frekans ve sabit mekanik kayıplar, ayrıca bağlantı şekline göre k_1 , k_2 , k_3 katsayıları da yaklaşık olarak hesaplanıp verilmektedir. Paralel direnç ilavesiyle katsayıların değişimini hesaba katmak için Şekil 2.8 'den yararlanılmıştır.

İşlem basamakları şöyledir: stator akımı reel alınarak, belirli bir değeri için uyarma akımının eşdeğeri hesaplanır. Eşdeğer uyarma akımının stator akımı ile yaptığı açı δ_i değişken alınır ve bileşke mıknatıslanma akımı bulunur. Mıknatıslanma akımı rotora geri dönüştürülerek hava aralığı gerilimi E_r 'nin değeri, mıknatıslanma eğrisinden bulunur. E_r , I_m 'e göre 90° ileride alınıp omik ve indüktif gerilim düşümleriyle toplanarak bulunan gerilim, stator gerilimine eşit oluncaya kadar δ_i değiştirilir. Yineleme sonucunda, seçilen



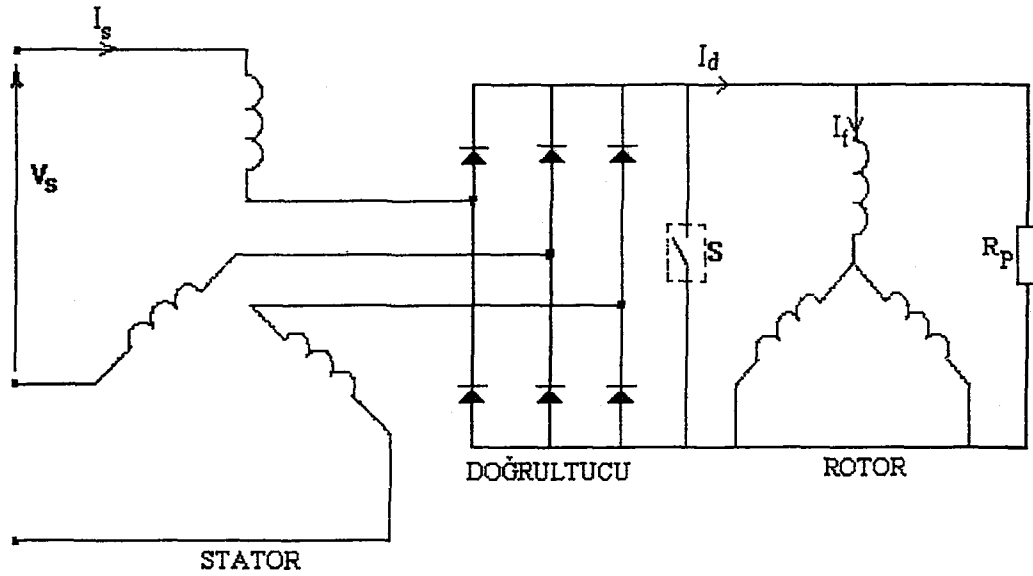
Şekil 2.9 Seri uyarımlı senkron motorun sürekli durum çözümü için program akış diyagramı

stator akımı değeri için (2.14)-(2.22) denklemlerinden güç faktörü, yük açısı, giriş gücü, moment ve verim hesaplanır.

Program iç içe iki döngü içerir. Dış döngü, stator akımını belirli bir aralıkta adım adım artırır. İç döngü ise, her bir stator akımı değeri için δ_i açısının belirli bir aralıkta değiştirilerek yinelemenin devam etmesini sağlar.

2.7. Deneysel Sonuçlar

Nominal değerleri 1.1 kW, 220V, 50Hz, 2.5A, $2p=2$ olan üç fazlı bir bilezikli asenkron motor üzerinde, Şekil 2.10 'daki bağlantı kurularak deneyler yapılmıştır. Şekilde gösterilen 'S' anahtarı pratik olarak köprü doğrultucuyu kaldırmadan asenkron ve senkron çalışma arasında geçiş yapmayı sağlar. 'S' anahtarı kapalı ise asenkron; açık ise senkron çalışma için gerekli bağlantı sağlanmış olur. Çıkış momentini motorun miline bağlanan bir fuko freniyle, yük açısı veya rotorun açısı ise motor miline bağlanan taksimatlı bir diske stroboskopa bakılarak ölçülmüştür.



Şekil 2.10 Seri uyarımlı senkron motorun deney bağlantı şeması

Motorun parametreleri Tablo 2.1’de, deneylerle ilgili ayrıntılar Ek-A’da verilmiştir.

Bölüm 2.5 ’de açıklandığı gibi seri uyarım için en iyi performans k ’nın 1 olduğu değerde alınmıştır. İnceleme yapılan motor için stator/rotor etkin sarım oranı 0.967 olup, k değerinin performansa etkilerini değerlendirmek üzere rotorun yıldız noktası içte iken mümkün olan değişik iki bağlantı için deneyler yapılmıştır.

Tablo 2.1. Deney yapılan motora ait değerler

P_n	U_n	I_n	R_1	R_r	X_m	X_σ	etkin sarım oranı (n_s/n_r)
KW	V	A	Ω	Ω	Ω	Ω	—
1.1	220	2.5	5.2	4.8	164	3.91	0.967

Ayrıca bu bağlantı durumlarında paralel direnç ilave edilerek k katsayısı değiştirilmiş, bunlara ait teorik ve deneysel sonuçlar elde edilmiştir. Köprü doğrultucu rotora doğrudan Danielson bağlantısı ile bağlanınca $k=1.1$, rotorun bir fazı açık bırakılınca $k=1.23$, Danielson bağlantıda 18Ω ’luk paralel direnç ilavesiyle $k=0.78$, bir sargı açık bağlantıda 55Ω ’luk paralel direnç ilavesiyle yaklaşık $k=1$ olarak elde edilmiştir.

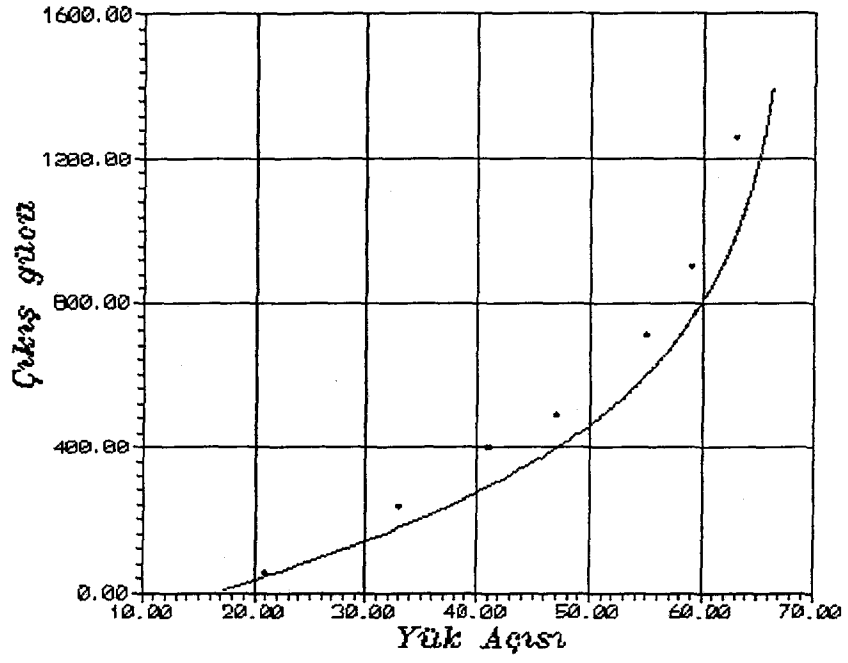
Bölüm 2.4'de açıklanan inceleme yönteminin uygulanması ile hesaplanan değerler, bu şekillerde çizdirilmiş, deneysel noktalar sembollerle gösterilmiştir. Çıkış gücünü bulmak için (2.21) denklemiyle hesaplanan güçten 150 W sabit mekanik kayıplar çıkarılmıştır. Giriş gücünü bulmak için de (2.21) denklemiyle hesaplanan güce demir kayıpları ilave edilmiştir.

Seri uyarımlı senkron motorun çalışma performansını kıyaslayabilmek için, motorun rotor uçları kısa devre edilerek (S anahtarı kapalı) normal asenkron motor olarak da çalıştırılmıştır. Bilinen asenkron motor eşdeğer devresi, boşa çalışma ve kısa devre deneylerinden çıkarılmıştır. Sürekli durumda, bu eşdeğer devreden çıkarılan denklemler kullanılarak yapılan teorik modelleme, bir bilgisayar programı yardımıyla çözdürülerek sonuçlar elde edilmiştir.

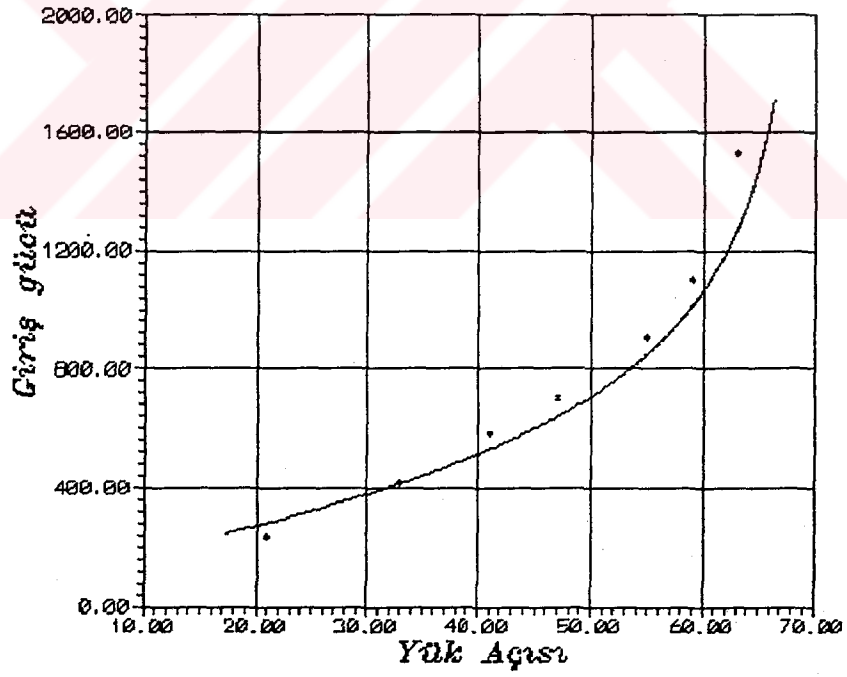
Rotor sargısının, Danielson bağlantı ile paralel dirençsiz $k=1.1$ için performans eğrileri, deneysel ve teorik sonuçlarla Şekil 2.11-14 'te; bir sargı açık bağlantı paralel dirençsiz $k=1.23$ için performans eğrileri, yine deneysel ve teorik sonuçlarla Şekil 2.15-18 'de; bir sargı açık bağlantı $R_p = 55 \Omega$ paralel dirençli yaklaşık $k=1$ için performans eğrileri de deneysel ve teorik sonuçlarla Şekil 2.19-22 'de; Danielson bağlantı ile $R_p = 18 \Omega$ paralel dirençli $k=0.78$ için performans eğrileri, deneysel ve teorik sonuçlarla Şekil 2.23-26 'da verilmiştir. Asenkron çalışma için performans eğrileri ise teorik ve deneysel sonuçlarla Şekil 2.27-30 'da verilmiştir.

Asenkron çalışma ile senkron çalışmanın ve ayrıca seri uyarımın genel performans özelliklerinin daha iyi karşılaştırılabilmesi açısından, makinanın asenkron ve seri uyarımlı senkron çalışmasında aynı çıkış gücünün üretimi için çekilen giriş güçlerinin ve akımların değişimi Şekil 2 31-32 'te verilmiştir.

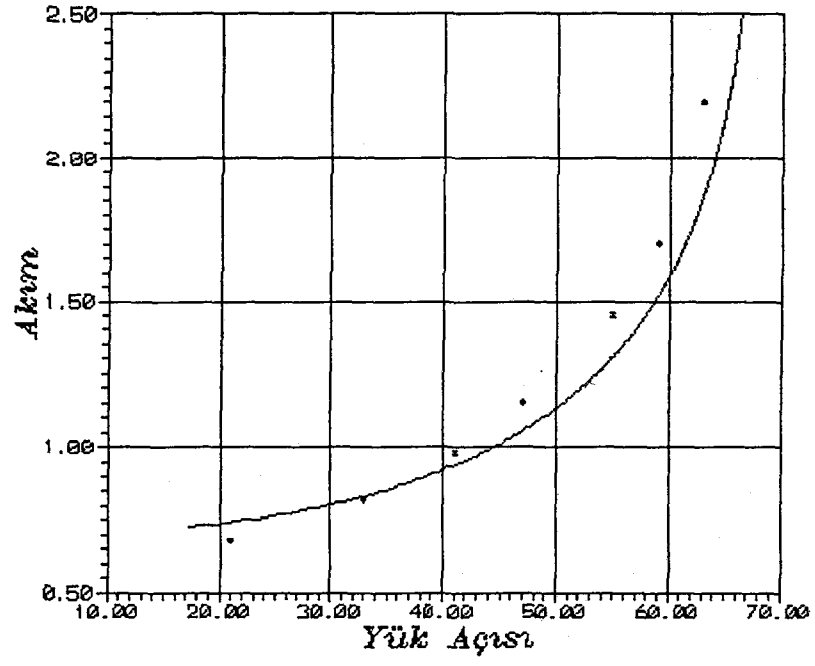
Seri uyarım için açıklanan, çalışma karakteristiklerinde 'k' katsayısının performansa etkilerinin gösterilmesi amacıyla teorik sonuçlara dayanarak performans eğrileri çizdirilmiştir (Şekil 2.33-36).



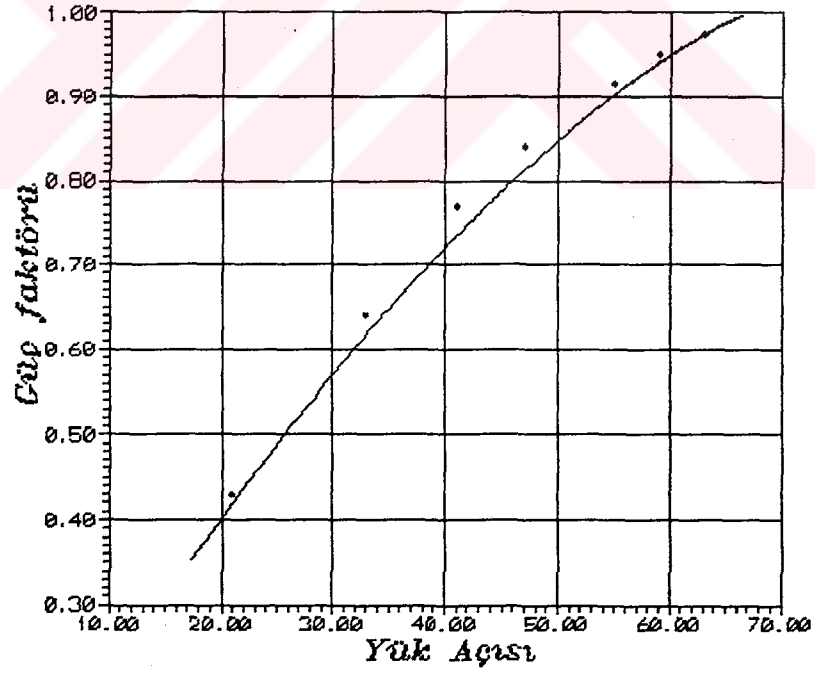
Şekil 2.11 Çıkış gücü-yük açısı eğrisinin değişimi ($k=1.1$)



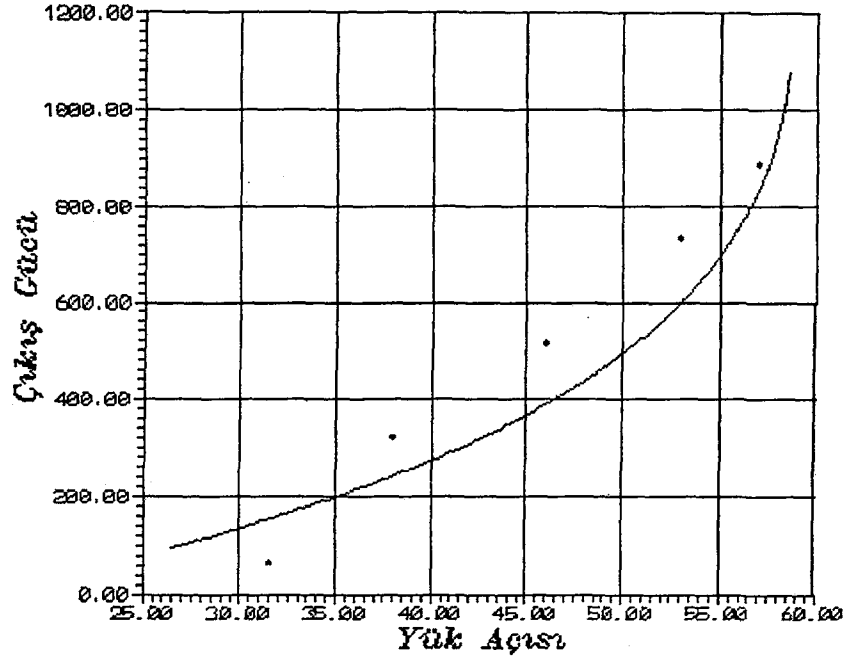
Şekil 2.12 Giriş gücü-yük açısı eğrisinin değişimi ($k=1.1$)



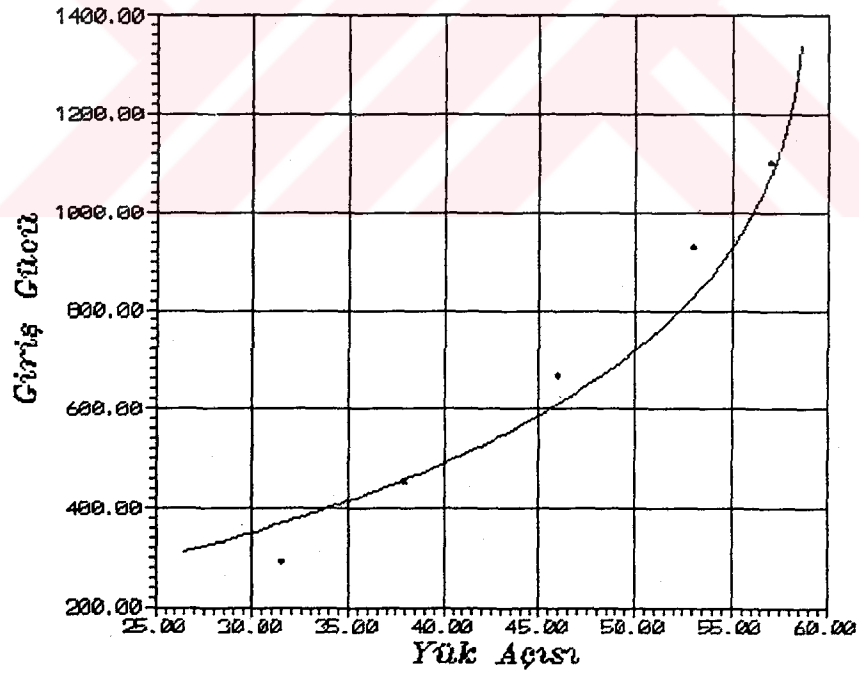
Şekil 2.13 Giriş gücü-yük açısı eğrisinin değişimi ($k=1.1$)



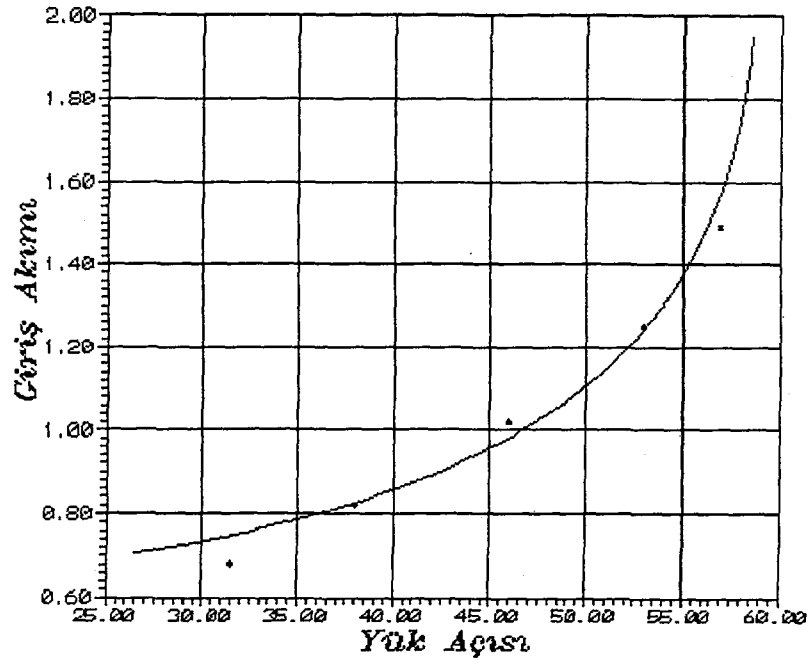
Şekil 2.14 Güç faktörü-yük açısı eğrisinin değişimi ($k=1.1$)



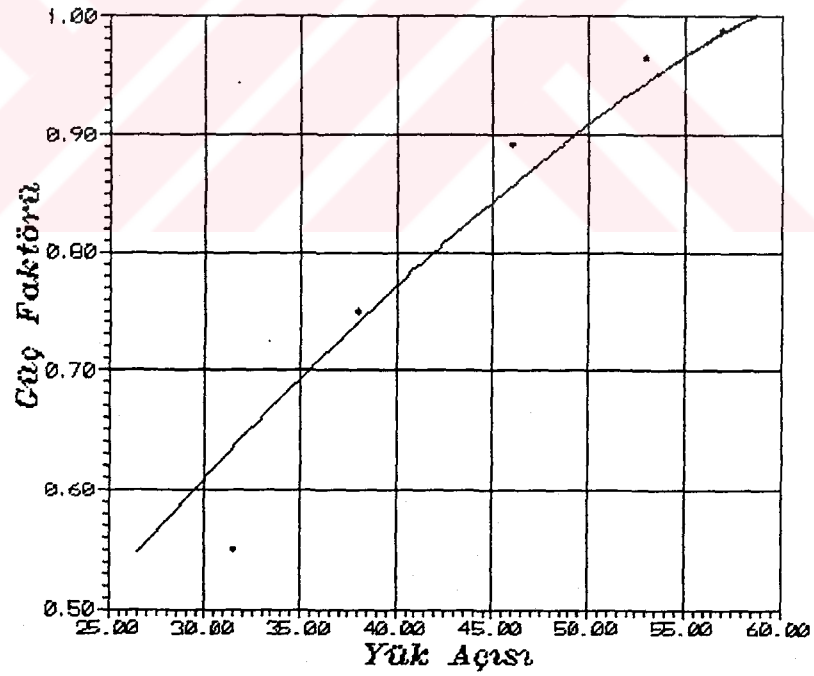
Şekil 2.15 Çıkış gücü-yük açısı eğrisinin değişimi ($k=1.23$)



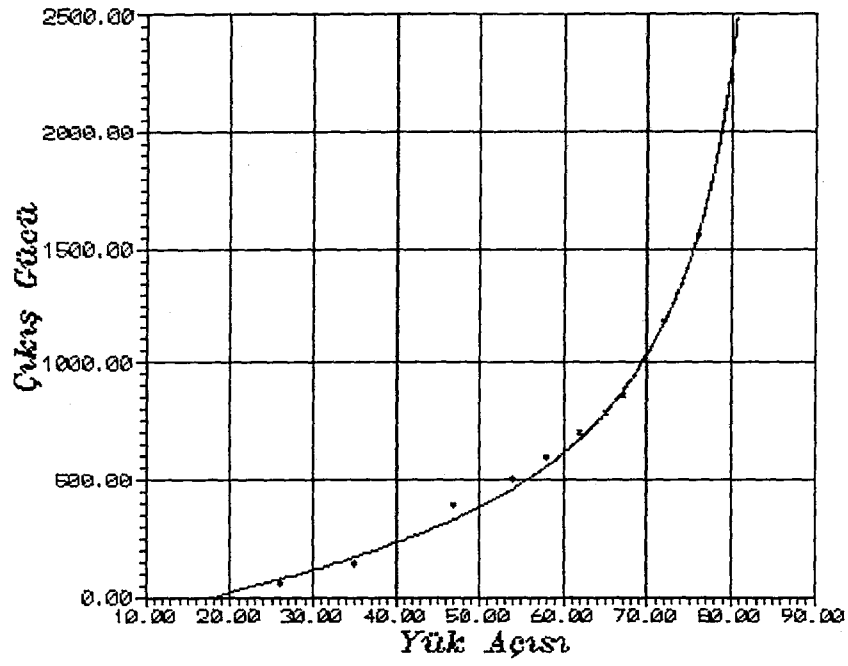
Şekil 2.16 Giriş gücü-yük açısı eğrisinin değişimi ($k=1.23$)



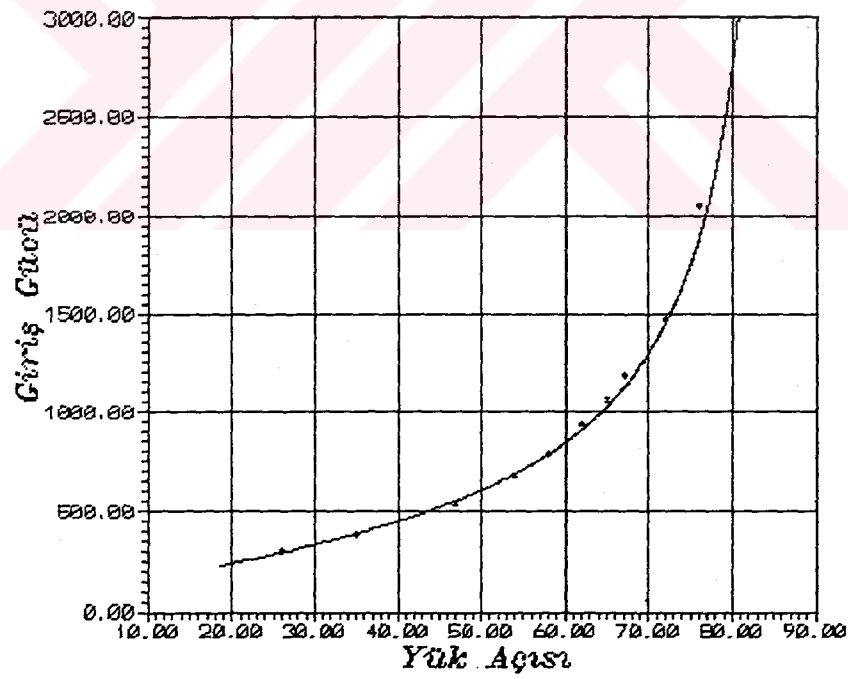
Şekil 2.17 Giriş akımı-yük açısı eğrisinin değişimi ($k=1.23$)



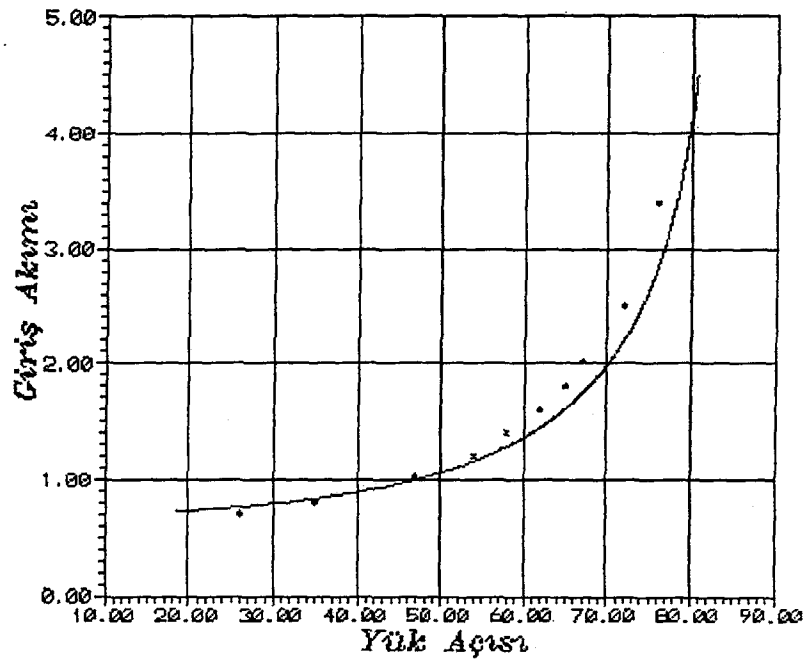
Şekil 2.18 Güç Faktörü-yük açısı eğrisinin değişimi ($k=1.23$)



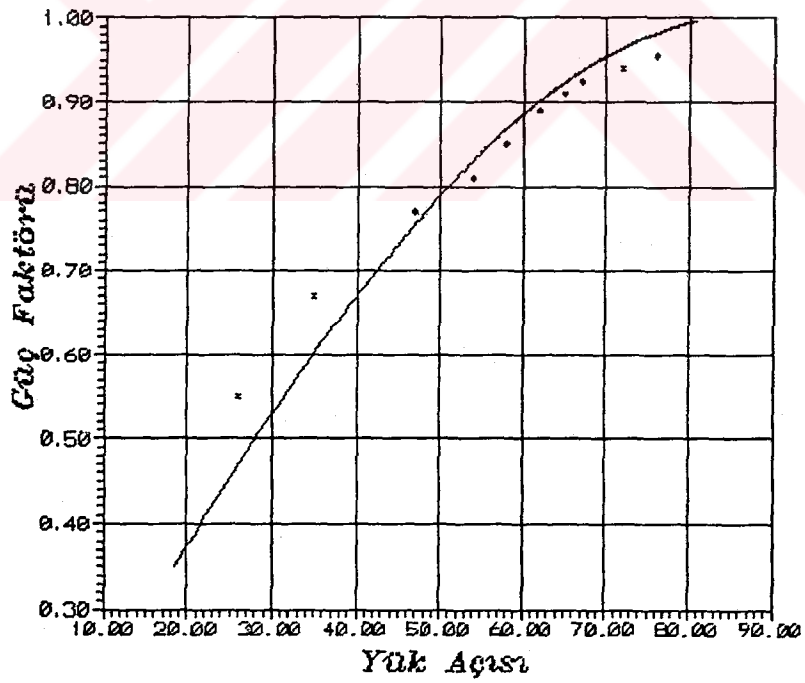
Şekil 2.19 Çıkış gücü-yük açısı eğrisinin değişimi ($k=1$)



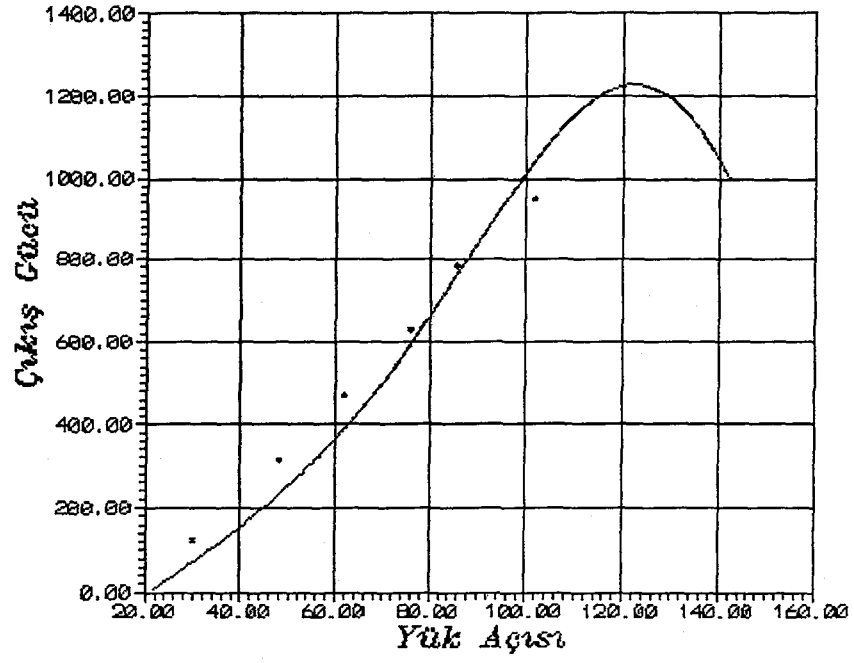
Şekil 2.20 Giriş gücü-yük açısı eğrisinin değişimi ($k=1$)



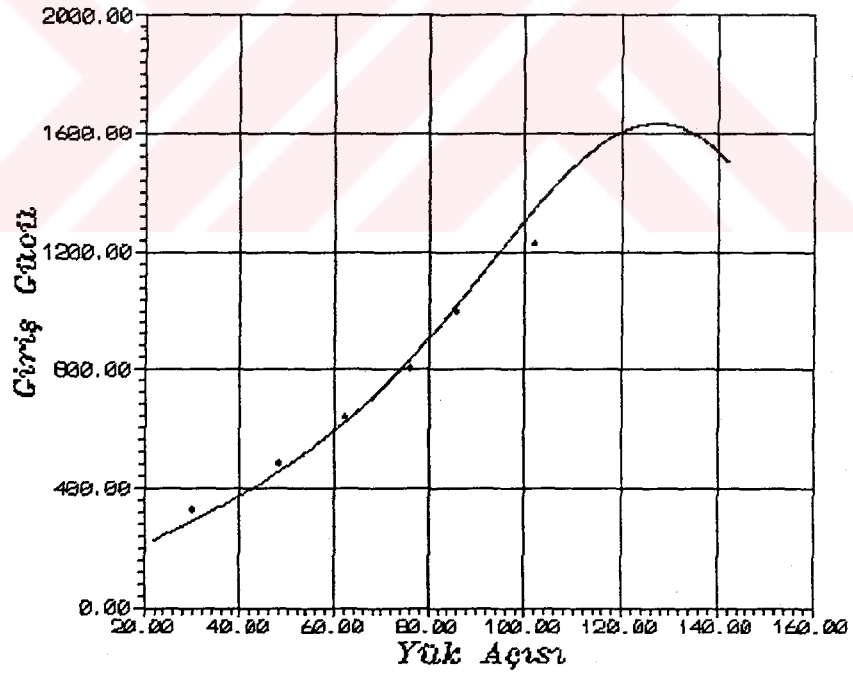
Şekil 2.21 Giriş akımı- yük açısı eğrisi değişimi ($k=1$)



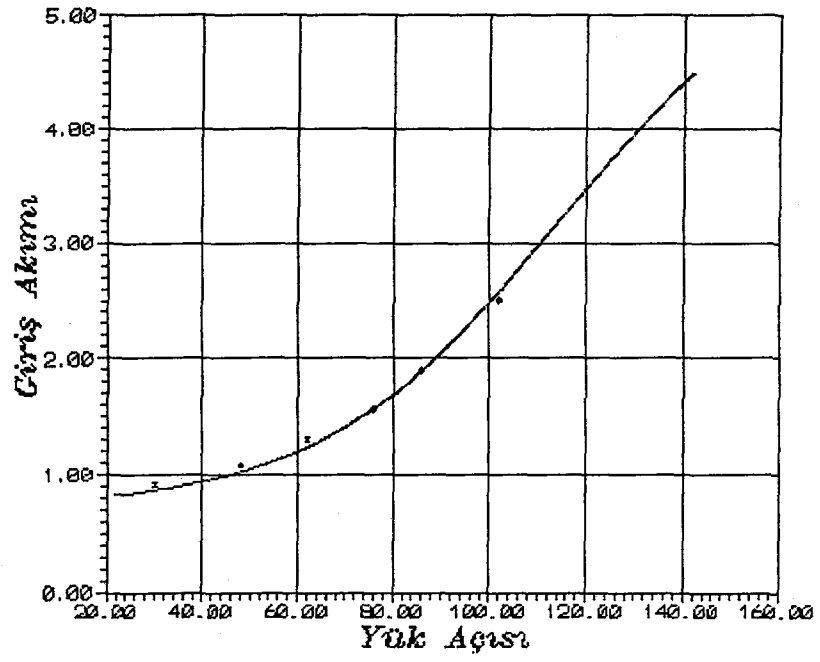
Şekil 2.22 Güç faktörü-yük açısı eğrisinin değişimi ($k=1$)



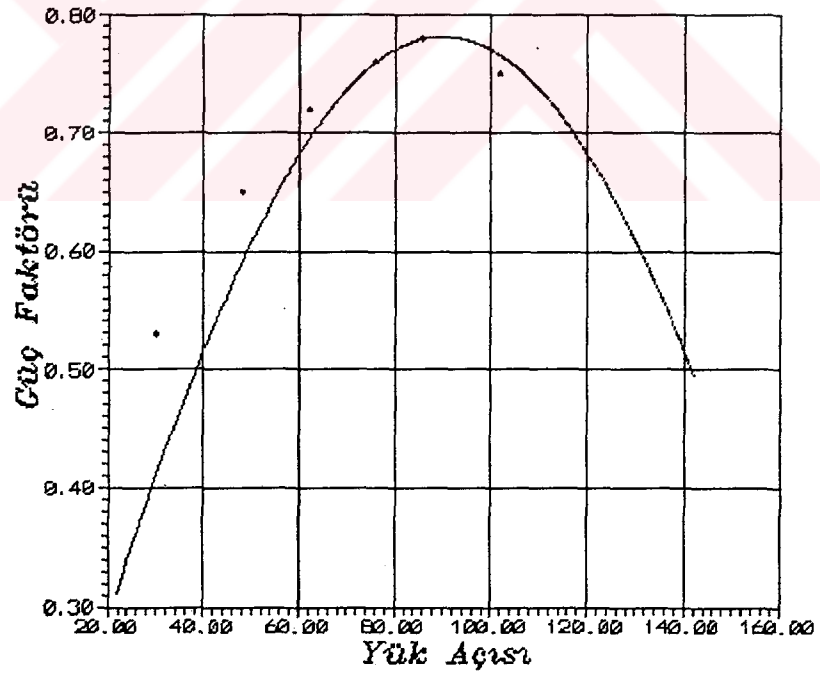
Şekil 2.23 Çıkış gücü-yük açısı eğrisinin değişimi ($k=0.78$)



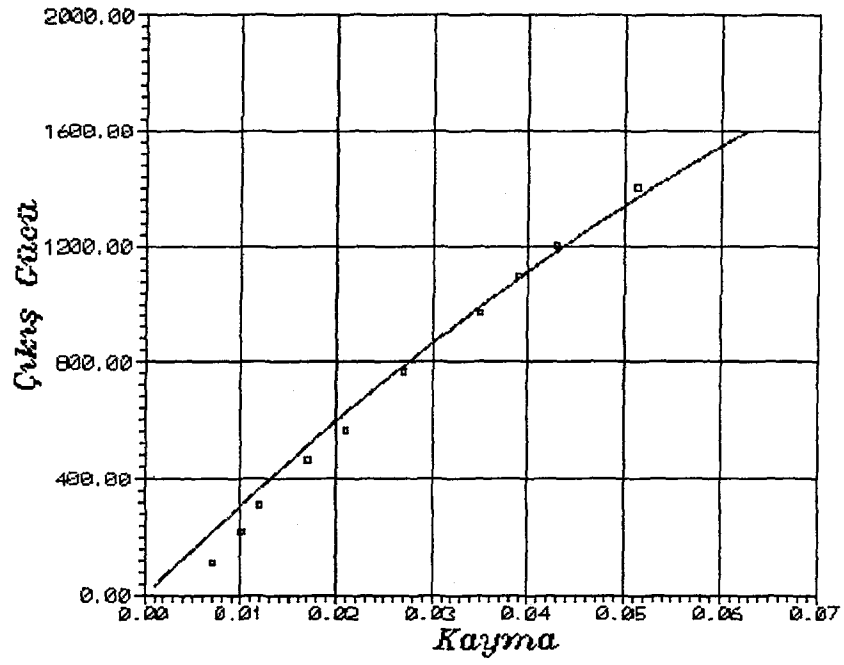
Şekil 2.24 Giriş gücü-yük açısı eğrisinin değişimi ($k=0.78$)



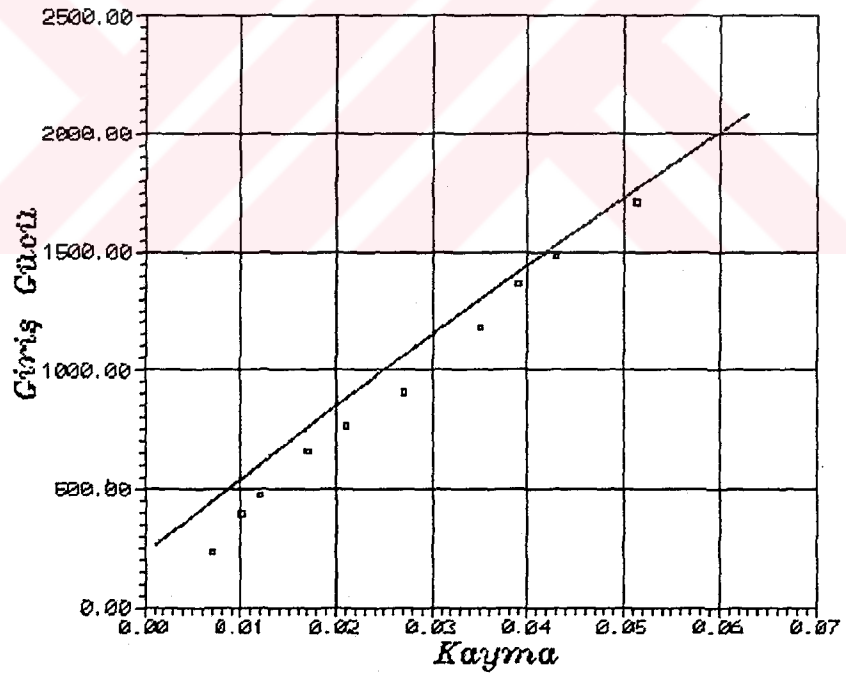
Şekil 2.25 Giriş akımı-yük açısı eğrisinin değişimi ($k=1$)



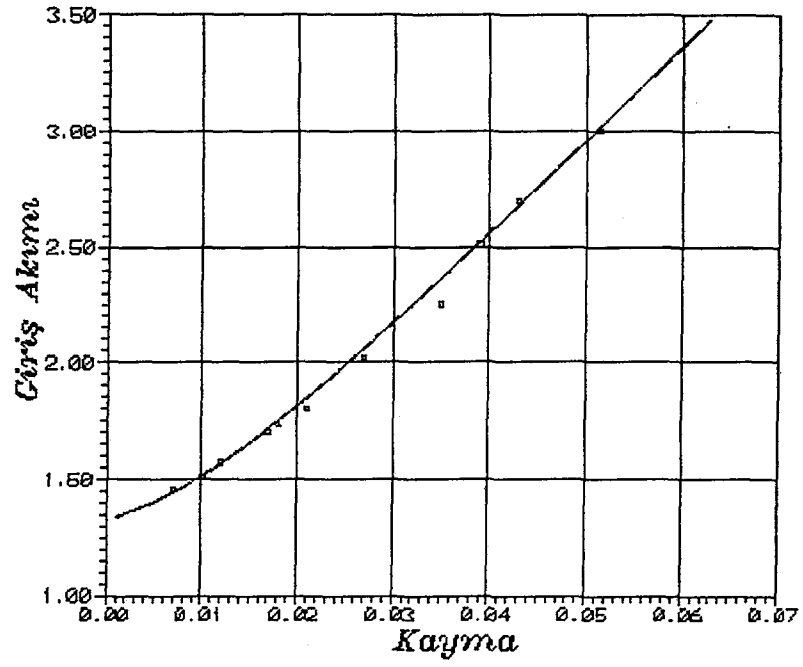
Şekil 2.26 Güç faktörü-yük açısı eğrisinin değişimi ($k=0.78$)



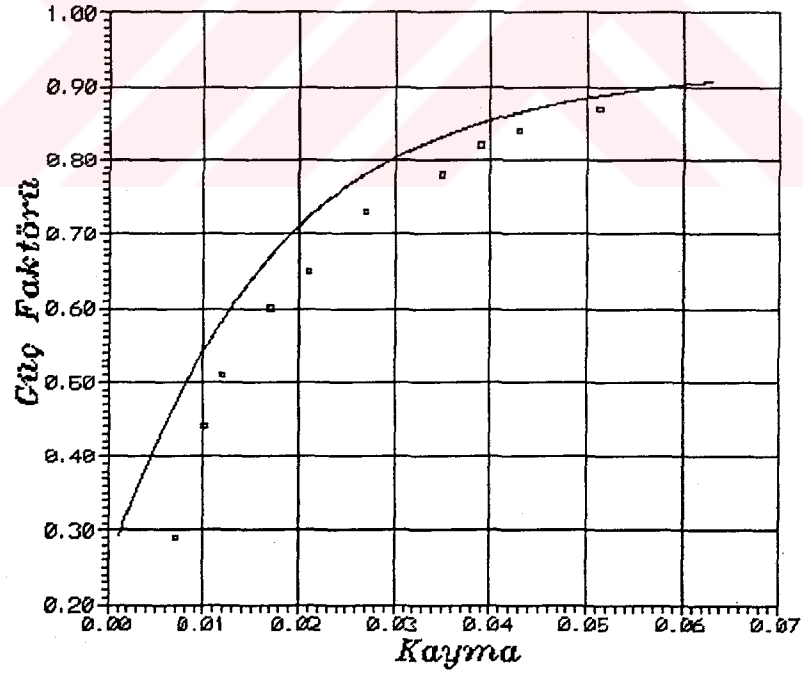
Şekil 2.27 Asenkron çalışmada çıkış gücü-kayma eğrisinin değişimi



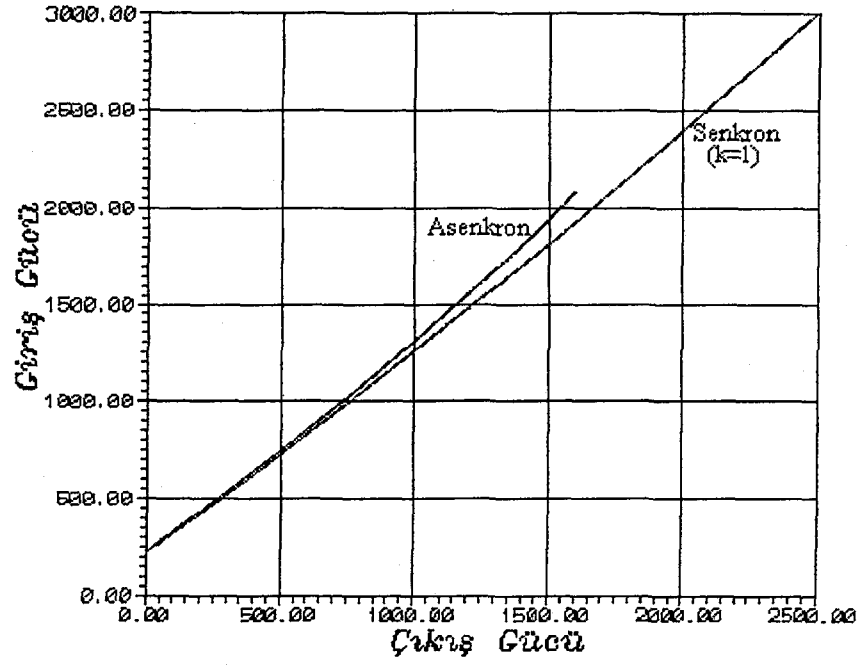
Şekil 2.28 Asenkron çalışmada giriş gücü-kayma eğrisinin değişimi



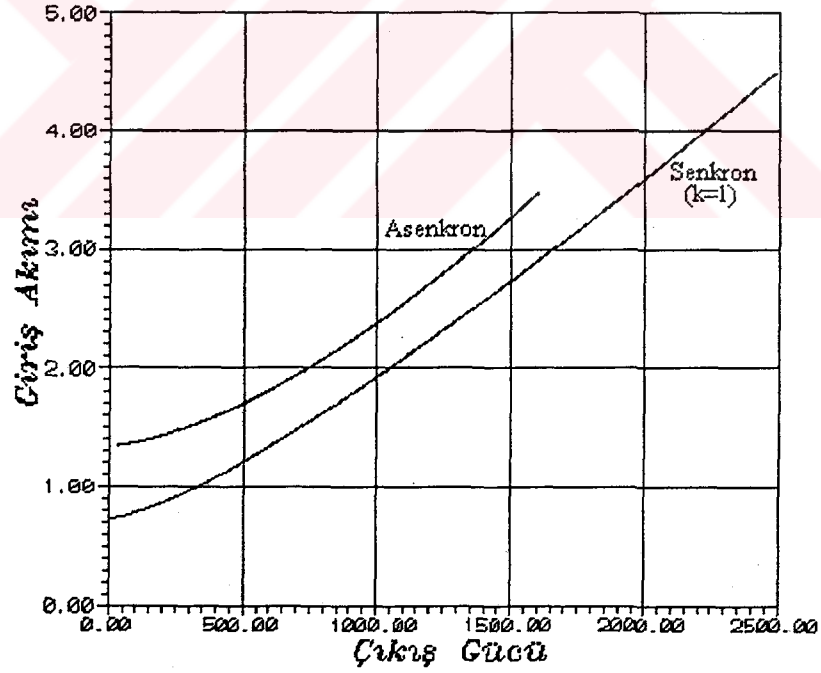
Şekil 2.29 Asenkron çalışmada giriş akımı-kayma eğrisinin değişimi



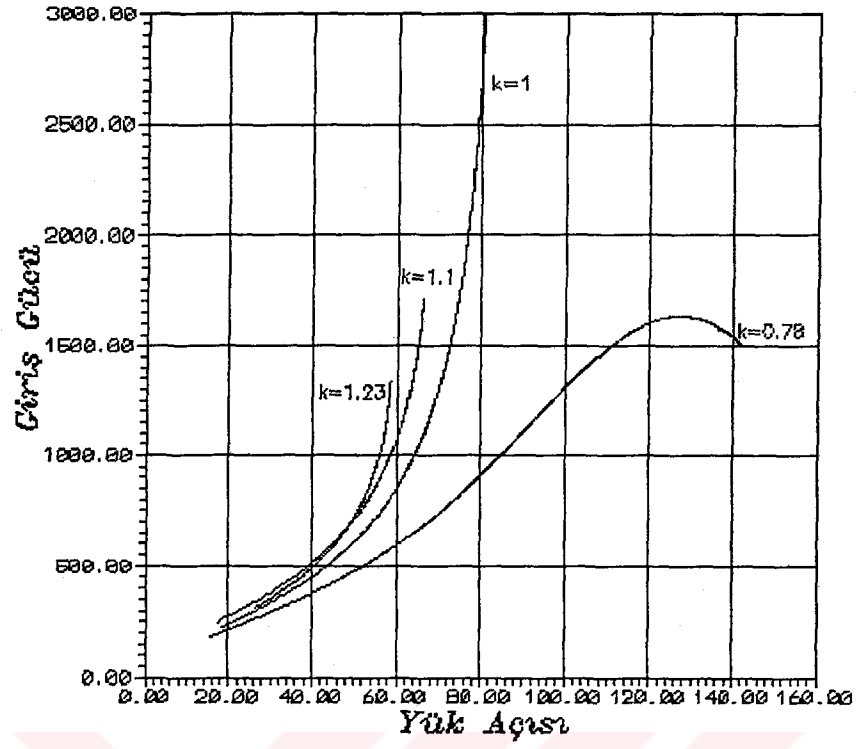
Şekil 2.30 Asenkron çalışmada güç faktörü-kayma eğrisinin değişimi



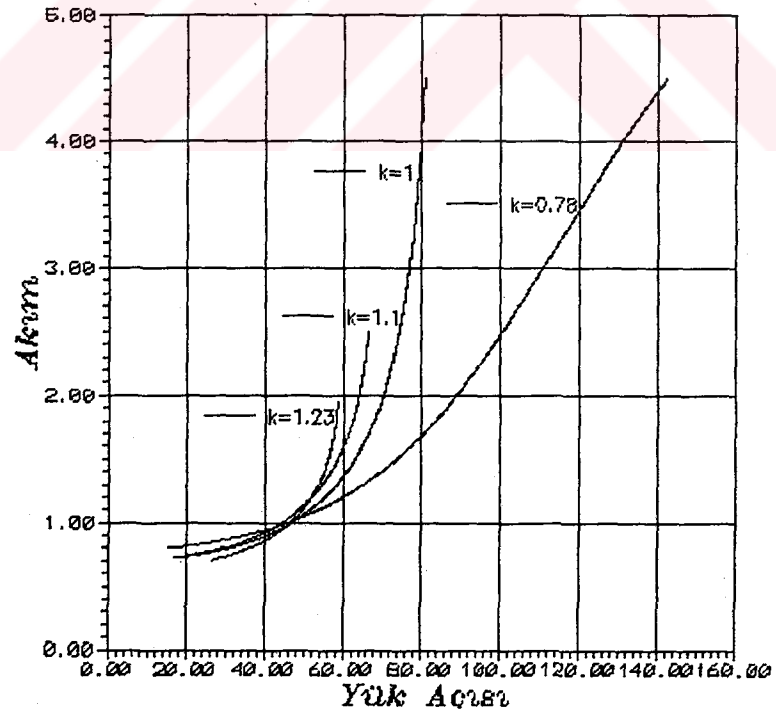
Şekil 2.31 Senkron ve asenkron çalışma şekillerinde aynı makina için giriş gücü-çıkış gücü değişimi



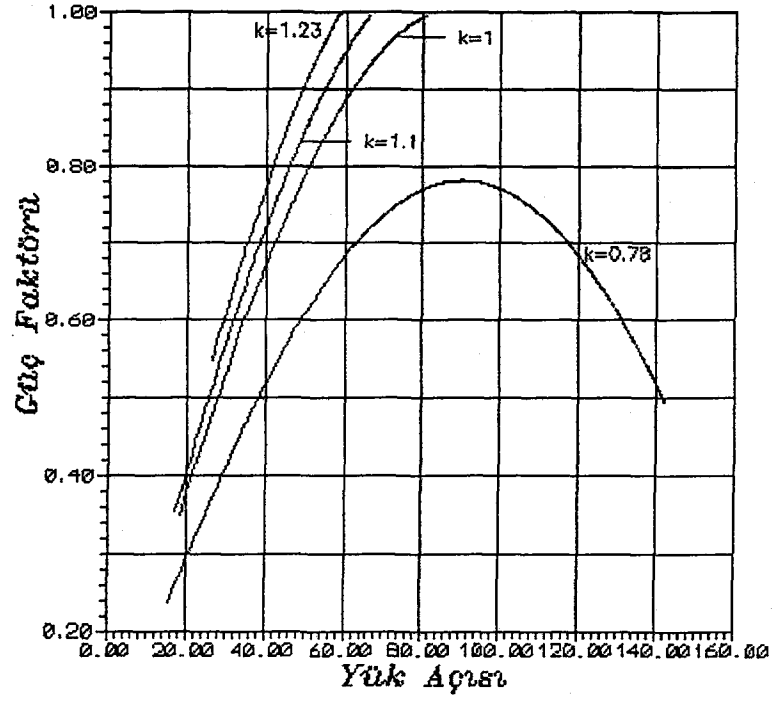
Şekil 2. 32 Senkron ve asenkron çalışma şekillerinde aynı makina için giriş akımı-çıkış gücü değişimi



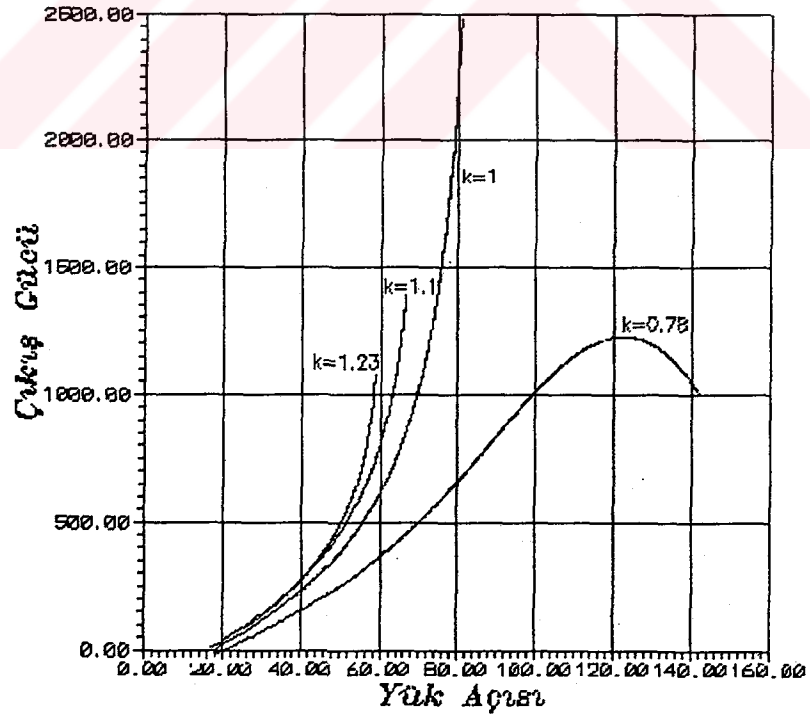
Şekil 2.33 Değişik rotor bağlantıları için seri uyarımlı senkron motorun giriş gücü-yük açısı eğrileri



Şekil 2.34 Değişik rotor bağlantıları için seri uyarımlı senkron motorun giriş akımı-yük açısı eğrileri



Şekil 2.35 Değişik rotor bağlantıları için seri uyarımlı senkron motorun güç faktörü-yük açısı eğrileri



Şekil 2.36 Değişik rotor bağlantıları için seri uyarımlı senkron motorun çıkış gücü-yük açısı eğrileri

2.8. Değerlendirme

Bilezikli bir asenkron motorun, kontrolsüz köprü doğrultucu ile gerçekleştirilen seri uyarımlı senkron motor olarak sürekli durum çalışmasını çözen bir yöntem gösterilmiştir. Kullanılan yöntem sade ve kolay olup motor ile doğrultucu devre bileşiminin davranışını doğrulayan bir çözüm getirmektedir. Bu yöntem, özel bir uygulama için tasarlanacak bir motorun optimum parametre değerlerini bulmak için de kullanılabilir.



BÖLÜM 3

SERİ UYARTIMLI SENKRON MOTORUN DİNAMİK DURUM İNCELEMESİ

3.1 Giriş

Faz değişkenleri kavramıyla asenkron makinanın dinamik davranış modellemesinde dönüşüm yapılmadığından, bazı üstünlüklere sahip bir model elde edilir. Bu bölümde, seri uyarımlı senkron motorun dinamik durum incelemesi amacıyla, asenkron makinanın faz değişkenleriyle bir dinamik davranış modellemesi temel ilkeleriyle birlikte tanıtılmıştır. Bu modele dayanarak PSPICE 5.4 programı ile asenkron motor ve seri uyarımlı senkron motor sistemlerinin dinamik durum benzetimleri verilmiştir.

3.2. Dinamik Davranış İncelemesinin Kapsamı

Asenkron makina ve diğer elektromekanik sistemlerde aşağıdaki durumlar için gerçek zamandaki akım, gerilim, hız, moment, güç, magnetik değişkenler gibi büyüklüklerin bulunabilmesi, dinamik davranış modelinin incelenmesiyle mümkün olur (Kovacs, 1984 ; Alexandrovitz ve Katz , 1982 ; Krause, 1987).

- a) Asenkron makina boşta ve yükte yol verme
- b) Sator gerilimini artırarak yol verme
- c) Yıldız-üçgen bağlantısı ile yol verme
- d) Besleme geriliminin kesilmesi ve yeniden uygulanması
- e) Faz kopması
- f) Faz kısa devreleri
- g) Ani mekanik yük değişimleri
- h) Değişik frenleme uygulamaları
- i) Besleme geriliminde ani değişimler

Bu olaylar değişik besleme kaynaklarına göre incelenebilir. Sinüs biçiminde olmayan beslemeleri sağlayan kapalı veya açık çevrimli güç elektroniği devrelerinde, özellikle evirici ile beslemelerde sürekli durumdaki büyüklüklerin zamanla değişiminin

incelemesi için de dinamik davranış modelleri kullanılır. Bir dinamik davranış modelinin benzetimi ile elde edilen sonuçlar, yukarıda sayılan durumlarda elde edilen deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak, yapılan modellemenin ve benzetimin doğruluğu gösterilir.

3.3. Dinamik Davranış Modelleme Yöntemleri

Dinamik davranış modelleri, makinanın davranışının gerçek zamanda hesaplanmasını gaye edinmiştir. Bunun için en çok kullanılan dört modelleme yöntemi vardır (Alexandrovitz ve Katz , 1982 ; Adkins ve Harley, 1975 ; Hancock 1989 ; Krause, 1987; Sarıoğlu IL 61801).

- a) Faz değişkenleri modeli yaklaşımı
- b) d-q eksen yaklaşımı
- c) Uzay vektörü yaklaşımı
- d) Simetrik bileşenler

Bütün bu yaklaşımlar stator faz sargılarının düzgün sinüs biçimli dağılımını varsayar. Yaklaşımlar arasındaki temel fark, seçilen referans eksen takımları ve modeller arası dönüşümlerden türetilen parametre tanıımıdır. Modeller için makinede parametre ölçüm yöntemlerini de yaklaşımlar belirler.

Faz değişkenleri modelinin üstünlüğü makinaya ait fiziksel büyüklükleri içermesiyle akım ve gerilim ve moment değişimlerinin doğrudan belirlenmesidir. Ayrıca diğer model yaklaşımlarının çözümlerinin her anında veriler ve çıkış sonuçları faz değişkenlerini içermek zorundadır.

3.4. Bilezikli Asenkron Makina Denklemlerinin Faz Değişkenleri İle Yazılması

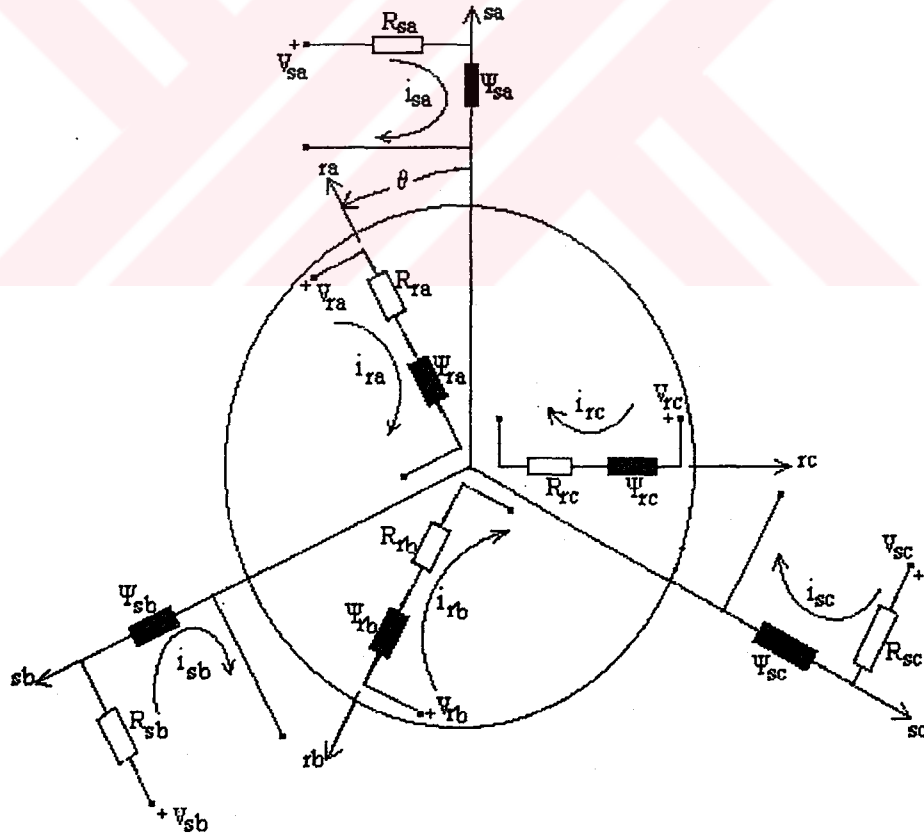
Şekil 3.1’de, radyal doğrultudaki hava aralığı boyu sabit olan üç fazlı bilezikli asenkron makinanın gösterimi verilmiştir. Makinanın statorunda duran üç fazlı simetrik sargılar, rotorunda ise rotorla beraber dönen yine üç fazlı simetrik sargılar vardır. Üç fazlı düzende faz büyüklükleri ‘a’, ‘b’, ‘c’ altsimgeleriyle, stator ‘s’, rotor ‘r’ altsimgeleriyle gösterilmektedir.

Stator ve rotor için toplam gerilim ifadesi (3.1) denklemiyle tanımlanır. Bu ifadeye göre giriş gerilimi, sargı direncindeki gerilim düşümü ve toplam faz akısının değişimi veya indüklenen gerilimden oluşur.

$$V = Ri + \frac{d\psi}{dt} \quad (3.1)$$

Magnetik akı, akım ile üretilen akı arasındaki bağıntıyı kuran indüktans değeriyle akımın çarpımından elde edilir. Bir faz toplam akısı ise fazın öz indüktansı ile kendi akımının çarpımı ile diğer fazların kendi akımlarının bu faza göre karşılıklı indüktanslarıyla çarpımlarının toplamıdır. Stator ve rotor sargılarının kendi aralarında yönlerine göre bu akımların işareti değişik alındığından stator akımları eksi işaretli alınır.

Stator ve rotor fazlarının sargı dirençleri, makineye ait direnç matrisini; toplam akılarla akımlar arasındaki bağıntı, indüktans matrisini ortaya çıkarır.



Şekil 3.1 Üç fazlı 2p=2 kutuplu bilezikli asenkron makinenin gösterimi

$$\begin{bmatrix} R_{sa} \\ R_{sb} \\ R_{sc} \\ R_{ra} \\ R_{rb} \\ R_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{sc} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$\begin{bmatrix} \Psi_{sa} \\ \Psi_{sb} \\ \Psi_{sc} \\ \Psi_{ra} \\ \Psi_{rb} \\ \Psi_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{sa} & -M_{sa,b} & -M_{sa,c} & M_{sa,ra} & M_{sa,rb} & M_{sa,rc} \\ -M_{sb,a} & L_{sb} & -M_{sb,c} & M_{sb,ra} & M_{sb,rb} & M_{sb,rc} \\ -M_{sc,a} & -M_{sc,b} & L_{sc} & M_{sc,ra} & M_{sc,rb} & M_{sc,rc} \\ M_{ra,sa} & M_{ra,sb} & M_{ra,sc} & L_{ra} & -M_{ra,b} & -M_{ra,c} \\ M_{rb,sa} & M_{rb,sb} & M_{rb,sc} & -M_{rb,a} & L_{rb} & -M_{rb,c} \\ M_{rc,sa} & M_{rc,sb} & M_{rc,sc} & -M_{rc,a} & -M_{rc,b} & L_{rc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \\ i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Simetrik makinada sargılar özdeş, stator ve rotor çevresi düzgün, hava aralığı sabit olduğundan aşağıdaki eşitlikler yazılabilir.

$$\begin{aligned} R_{sa} &= R_{sb} = R_{sc} = R_s \\ R_{ra} &= R_{rb} = R_{rc} = R_r \\ L_{sa} &= L_{sb} = L_{sc} = L_a \\ L_{ra} &= L_{rb} = L_{rc} = L_b \\ M_{sa,b} &= M_{sa,c} = M_{sb,c} = M_s \\ M_{ra,b} &= M_{ra,c} = M_{rb,c} = M_r \end{aligned} \quad (3.4)$$

Stator fazları ile rotor fazları arasındaki ortak indüktanslar ise rotorun dönme açısı ile değişir. Fazların eksenleri çakıştığında ortak indüktans en büyük değerinde, eksenleri 90° açı yaptığında sıfır değerdedir. Dolayısıyla üç fazlı bir düzen olarak kosinüs şeklinde değişen bu indüktansların maksimum değeri stator ve rotor fazları için sabit olup M_{sr} şeklinde gösterilir. Dönme açısı ' θ ' ile gösterilirse, elektriksel açı olarak ' $p\theta$ ' olur. Burada ' p ' çift kutup sayısıdır. Aşağıdaki ifadelerde $p=1$ alınmıştır.

$$\begin{aligned} M_{sa,ra} &= M_{ra,sa} = M_{sb,rb} = M_{rb,sb} = M_{sc,rc} = M_{rc,sc} = M_{sr} \cos\theta \\ M_{sa,rb} &= M_{rb,sa} = M_{sb,rc} = M_{rc,sb} = M_{sc,ra} = M_{ra,sc} = M_{sr} \cos(\theta + 2\pi/3) \\ M_{sa,rc} &= M_{rc,sa} = M_{sb,ra} = M_{ra,sb} = M_{sc,rb} = M_{rb,sc} = M_{sr} \cos(\theta - 2\pi/3) \end{aligned} \quad (3.5)$$

Dengeli üç fazlı enerji sisteminin gereği olarak ve 0_s , 0_r yıldız noktaları için yazılacak Kirchhoff'un akım denklemine göre

$$\begin{aligned} i_{sa} + i_{sb} + i_{sc} &= 0 \\ i_{ra} + i_{rb} + i_{rc} &= 0 \end{aligned} \quad (3.6)$$

yazılabilir. (3.3), (3.4) ve (3.6) denklemleri yardımıyla, (3.7) ifadelerinde gösterilen kısaltmalar yapılarak (3.8) denklemi elde edilebilir.

$$\begin{aligned} M_s i_{sa} &= -M_s i_{sb} - M_s i_{sc} \\ M_r i_{ra} &= -M_r i_{rb} - M_r i_{rc} \\ L_s &= L_a + M_s \\ L_r &= L_b + M_r \end{aligned} \quad (3.7)$$

$$\begin{bmatrix} \Psi'_{sa} \\ \Psi'_{sb} \\ \Psi'_{sc} \\ \Psi'_{ra} \\ \Psi'_{rb} \\ \Psi'_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 & M_{sr} \cos \theta & M_{sr} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & M_{sr} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ 0 & L_s & 0 & M_{sr} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & M_{sr} \cos \theta & M_{sr} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ 0 & 0 & L_s & M_{sr} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & M_{sr} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & M_{sr} \cos \theta \\ M_{sr} \cos \theta & M_{sr} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & M_{sr} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & L_r & 0 & 0 \\ M_{sr} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & M_{sr} \cos \theta & M_{sr} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 0 & L_r & 0 \\ M_{sr} \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & M_{sr} \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & M_{sr} \cos \theta & 0 & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \\ i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

(3.1) gerilim denkleminin açık şekli (3.2) ve (3.8) matrislerinin yerine yazılmasıyla bulunur. Gerilim denkleminin kapalı gösterimi aşağıdaki gibi ilerletilir.

$$[\Psi_{s,r}] = [L_{s,r}] [i_{s,r}] \quad (3.9)$$

$$[V_{s,r}] = [R_{s,r}] [i_{s,r}] + [L_{s,r}] \left[\frac{di_{s,r}}{dt} \right] + \left[\frac{dL_{s,r}}{d\theta} \right] [i_{s,r}] \frac{d\theta}{dt} \quad (3.10)$$

Stator ile rotor arasındaki ortak indüktans ifadeleri rotorun konum açısına bağlı olarak değiştiğinden zamana göre türevinden dolayı rotor konum açısının türevi gerilim ifadesine girer. Konum açısının türevi rotorun açısal hızını verir.

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (3.11)$$

(3.9) denklemi, (3.8) denkleminin kısaltılmış kapalı şekli olup indüktans matrisinin açık şeklini içerir. İndüktans matrisinin türevi ise (3.12) denklemiyle verilir.

$$\left[\frac{dL_{s,r}}{d\theta} \right] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -M_{sr}\sin\theta & -M_{sr}\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -M_{sr}\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ 0 & 0 & 0 & -M_{sr}\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -M_{sr}\sin\theta & -M_{sr}\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ 0 & 0 & 0 & -M_{sr}\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -M_{sr}\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -M_{sr}\sin\theta \\ -M_{sr}\sin\theta & -M_{sr}\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -M_{sr}\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 0 & 0 & 0 \\ -M_{sr}\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -M_{sr}\sin\theta & -M_{sr}\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 0 & 0 & 0 \\ -M_{sr}\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -M_{sr}\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -M_{sr}\sin\theta & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

3.5. Seri Uyarımlı Senkron Motorun PSPICE Benzetimi

Bu bölümde seri uyarımlı senkron motorun direk faz modelinin tam eşdeğer devresi ve denklemleri kullanılarak bir benzetimi tanıtılmıştır. PSPICE analog devre çözüm programına dayanan bu model ile makinanın sargıları arasındaki gerçek fiziksel bağlantıların incelenmesi ve kontrol tekniklerinin daha ayrıntılı olarak gösterilmesi amaçlanmıştır.

PSPICE ve benzeri modern devre programları elektrik devrelerinin zaman domeninde geçici rejim çözümlerini yaparak devrenin tasarımında kolaylık sağlarlar (Ghani, 1988). Kurulan model bu analiz yöntemine dayanmaktadır.

3.5.1. Zaman domen matematik modeli

Bölüm 3.4'de açıklanan asenkron makina faz değişkenleri modeli, bilezikli asenkron motorun ve seri uyarımlı senkron motorun PSPICE benzetiminde kullanılmıştır. Bu modele ilave olarak bilinen elektromekanik tanımlamalar ve denklemler de geçerli olduğundan, PSPICE programı tabanına uygun olarak elektriksel devreler yardımıyla, bu denklemlerin benzetimi de yapılmıştır. Seri uyarımlı senkronlanan asenkron motor, bu modele köprü doğrultucunun bağlanmasıyla ortaya çıkarılmıştır.

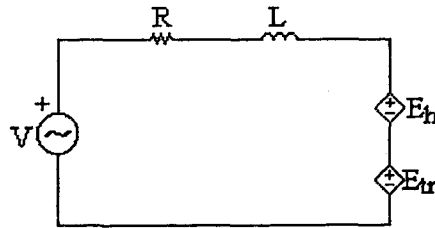
3.5.2. Elektriksel devre tanımlamaları

Bilinen direk faz modeli, stator ve rotora ait üç'er fazın kendi aralarında yıldız veya üçgen bağlantısını ifade eder. Seri uyarımlı senkron çalışma için üçgen bağlı stator mümkün olmayıp yıldız bağlantı ile çalışan motorlara uygulanabilir. Çünkü stator sargılarının girişleri üç fazlı kaynağa, çıkışları ise köprü doğrultucuya bağlanır. Rotor için asenkron çalışmada yıldız bağlantı kullanılmaktadır. Senkron çalışmada ise Bölüm 2'de açıklandığı üzere, yıldız noktası dışarıya alınmadığı takdirde bileziklerin getirdiği sınırlamalarla karşılaşılacaktır.

(3.10) denklemi ile verilen stator ve rotor fazları için toplam gerilim ifadesinde açılmal hız ve indüktansların türevlerine bağımlı olarak yazılan terimlere "hareket gerilimleri", akımların türevlerine bağımlı terimlere ise "transformatör gerilimleri" denilmektedir. Bu tanımlamalara göre, stator veya rotorun bir fazı için geçerli olacak şekilde çizilen eşdeğer devre Şekil 3.2.'de gösterilmiştir. Burada, V giriş gerilimi olup stator için kaynak gerilimi değerinde iken rotor için normalde sıfırdır. R ve L bir fazın sargı direnci ve öz indüktans değerleridir. Endüklenen gerilimler ise, hareket ve transformatör gerilimleri olarak iki bağımlı gerilim kaynağıdır.

3.5.3. Endüklenen gerilim tanımlamaları

Akımların zamana ve indüktansların dönme açısına göre türevlerinin hesaplanması ile belirli bir zaman ve dönme açısı için indüklenen gerilimlerin değerleri bulunabilir. İndüktansların türev fonksiyonları bilinmektedir ve hareket geriliminin belirli



Şekil 3.2. Stator veya rotor bir fazına ait tam eşdeğer devre zaman ve dönme açısı için değeri doğrudan hesaplanabilir. Akımların türevleri ise faz akımlarının değişimi tam bilinmeyeceğinden her zaman dilimi içinde türevi alınarak

transformatör gerilimlerinin değeri hesaplanır. Her iki gerilim ifadeleri de dönme açısını içermektedir.

Akımların türevlerini bulmak için Şekil 3.3'deki devre kullanılmıştır. Türev devresi, girişine gelen gerilimin türevini alarak 'RC' çarpanı ile çarpıp, faz çevirici özelliği ile işaretini değiştirerek çıkış gerilimi 'V₂' değerini verir. Türev devresinin girişindeki bağımlı gerilim kaynağının değeri stator ve rotor faz akımlarının değerleri olarak seçilirse, altı türev devresi ile değişken faz akımlarının gerçek zamandaki türevleri hesaplanır.

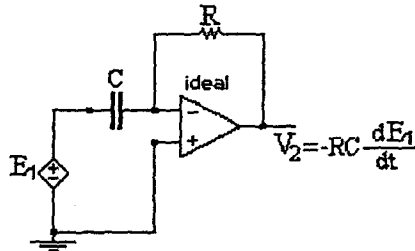
3.5.4. Ani moment ifadesi ve elektromekanik tanımlamalar

İndüklenen moment için aşağıdaki ifade yazılır.

$$M_e = -\frac{p}{2} [i_{s,r}]^t \frac{\partial [L_{s,r}]}{\partial \theta} [i_{s,r}] \quad (3.13)$$

İndüktans matrisinin türevi bu denklemden yazılıp gerekli sadeleştirmeler yapılırsa, (3.14) denklemi elde edilir.

$$M_e = -\frac{p}{2} M_{sr} \left[(i_{ra} i_{sa} + i_{rb} i_{sb} + i_{rc} i_{sc}) \sin \theta + (i_{ra} i_{sb} + i_{rb} i_{sc} + i_{rc} i_{sa}) \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \right] - \frac{p}{2} M_{sr} (i_{ra} i_{sc} + i_{rb} i_{sa} + i_{rc} i_{sb}) \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \quad (3.14)$$



Şekil 3.3 Türev devresi

Hareket denklemi ise

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_e - M_y \quad (3.15)$$

olup, mekanik hızı bulmak için bu denklem aşağıdaki gibi yazılır.

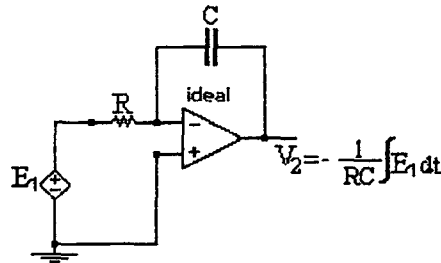
$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (M_e - M_y) \quad (3.16)$$

(3.16) denkleminde hızın integral yoluyla bulunması gerektiği görülür. İntegral sonucunda açısal hız hesaplanınca, (3.11) denklemini gereğince, açısal hızın integrali alınarak dönme açısı bulunur. Bu integral işlemleri için Şekil 3.4 'deki integral devresi kullanılmıştır.

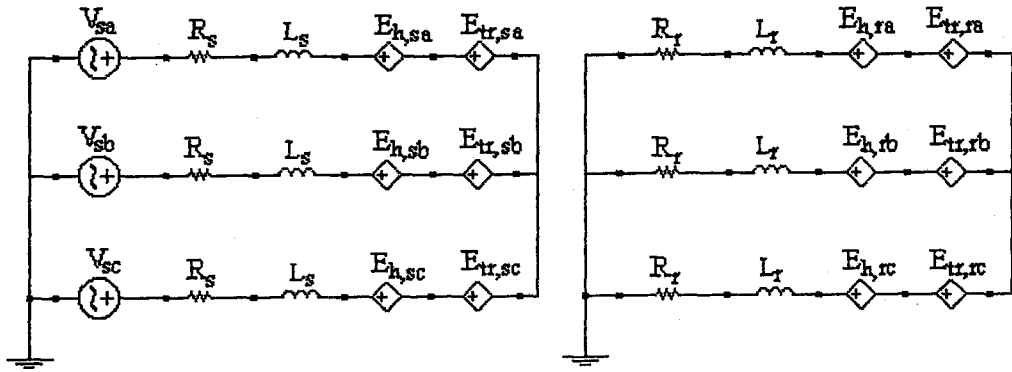
İntegral devresi, girişine gelen gerilimin integralini alarak, $\frac{1}{RC}$ çarpanı ile çarpıp, faz çevirici özelliği ile işaretini değiştirerek çıkış gerilimi V_2 değerini verir. İntegral devresinin girişindeki bağımlı kaynağın değeri, (3.14) denkleminde bulunan indüklenen moment değerine eşit alınırsa, çıkış gerilimi olarak işaret değişikliği ile açısal hız ω bulunur.

Benzer şekilde (3.11) denklemine göre, açısal hızın integrali ile de dönme açısı θ bulunur. θ 'nın bulunması indüklenen gerilim ve moment değerlerinin hesaplanabilmesini sağlar. Böylece tüm sistemin benzetimi sonuçlandırılmış olur.

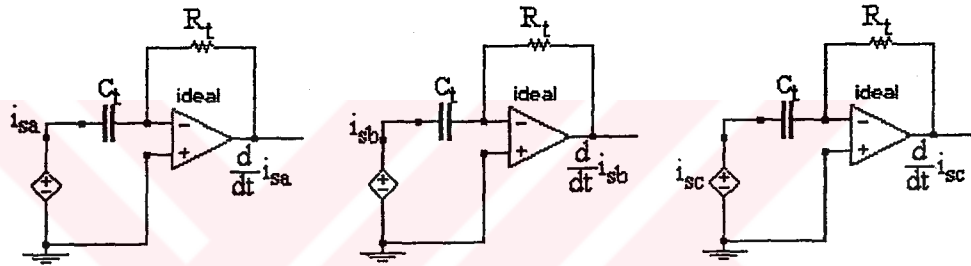
Bu tanımlamaların üç faz için ortaya çıkardığı devreler Şekil 3.5-9 'da verilmiştir.



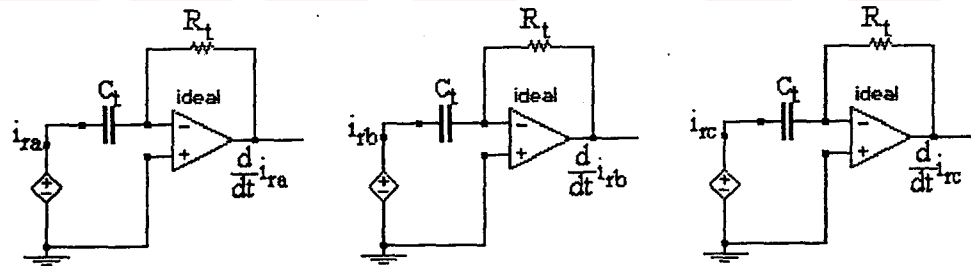
Şekil 3.4 İntegral devresi



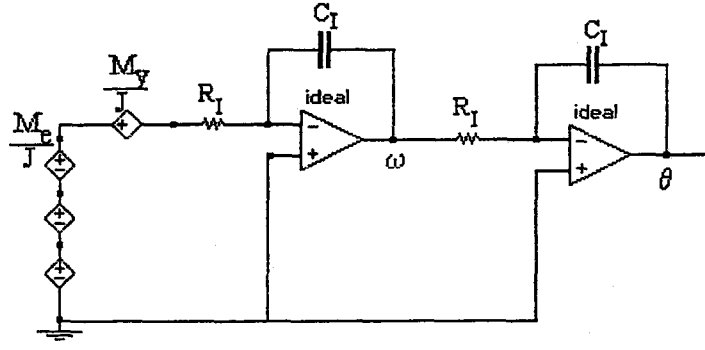
Şekil 3.5 Üç fazlı asenkron makina direk faz tam eşdeğeri



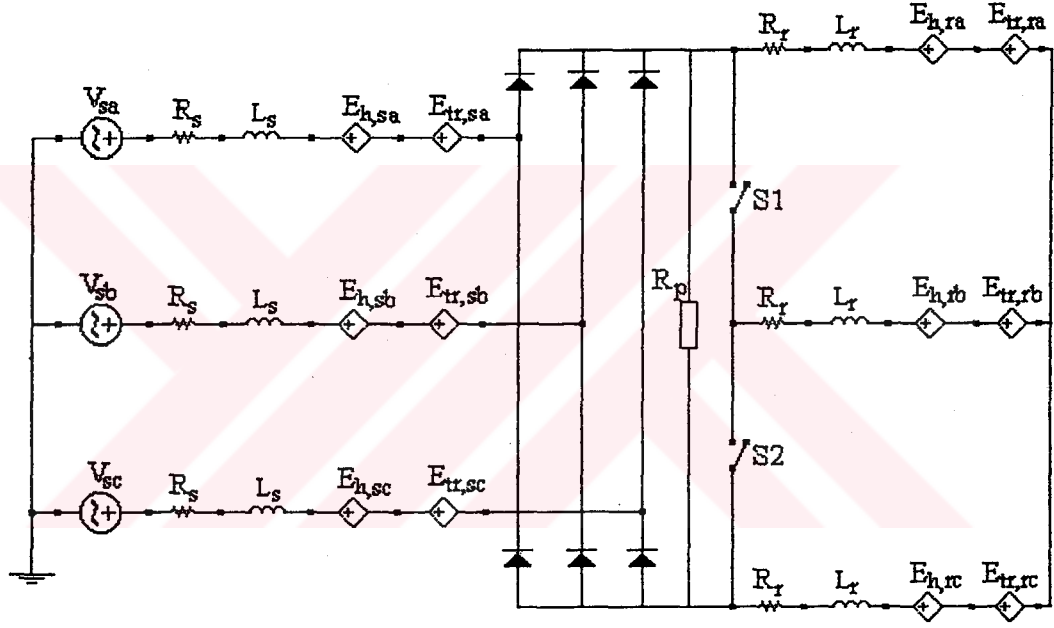
Şekil 3.6. Stator akımlarının türevlerini alan devreler



Şekil 3.7 Rotor akımlarının türevlerini alan devreler



Şekil 3.8 Elektromekanik tanımlamaları gerçekleyen devreler



Şekil 3.9 Seri uyarımlı senkron motor çalışmada geçerli olan eşdeğer devre

3.6 Teorik ve Deneysel Sonuçlar

Bölüm 2' de sürekli durum incelemesi yapılan deney motorunun, dinamik davranış incelemesine örnek olarak, asenkron hızlanma ve senkron çalışmaya geçiş süreleri için elde edilen teorik ve deneysel sonuçlar bu kısım da sunulmuştur. Böylece, motorun dinamik davranışını modelleyen PSPICE benzetiminin doğruluğu ortaya konulmuştur.

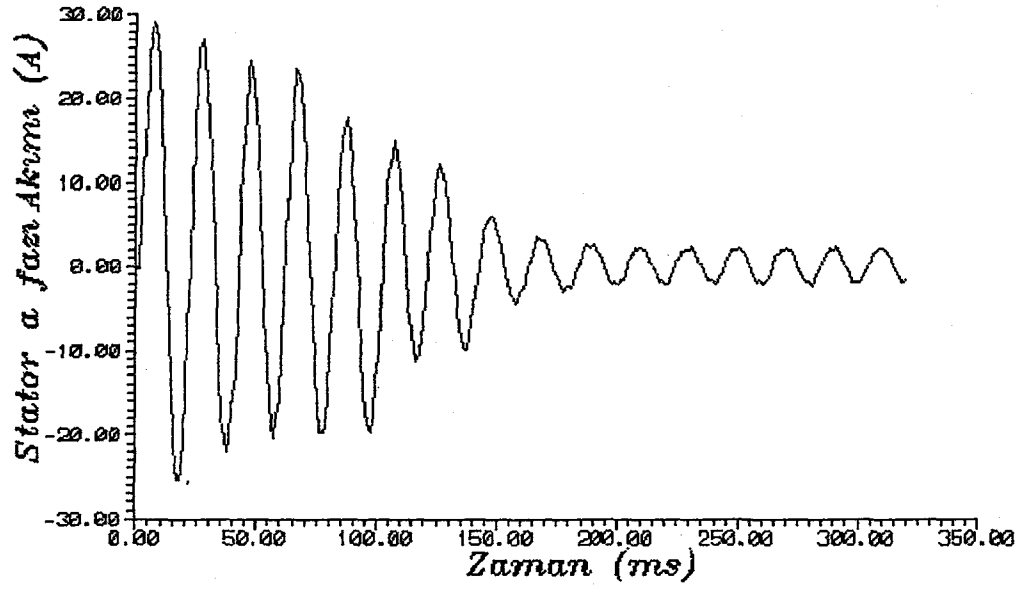
Şekil 3.10-15' te asenkron hızlanma süresince alınan deneysel sonuçlar teorik sonuçlarla birlikte verilmiştir. Değişik rotor bağlantıları ve farklı senkronlama zamanlarında alınan deneysel sonuçlar, Şekil 3.16-35' te teorik sonuçlarla birlikte verilmiştir.

Verilen sonuçlarda, senkronlama anındaki davranışa ve bu davranışı tanıtmak amacıyla özellikle rotor akımına ağırlık verilmiştir. Çünkü rotor akımı, senkronlama anından itibaren, köprü doğrultucudan dolayı, stator akımının tepe değerini izler. Moment ve hız da rotor akımının bu değişimine uygun olarak değişir.

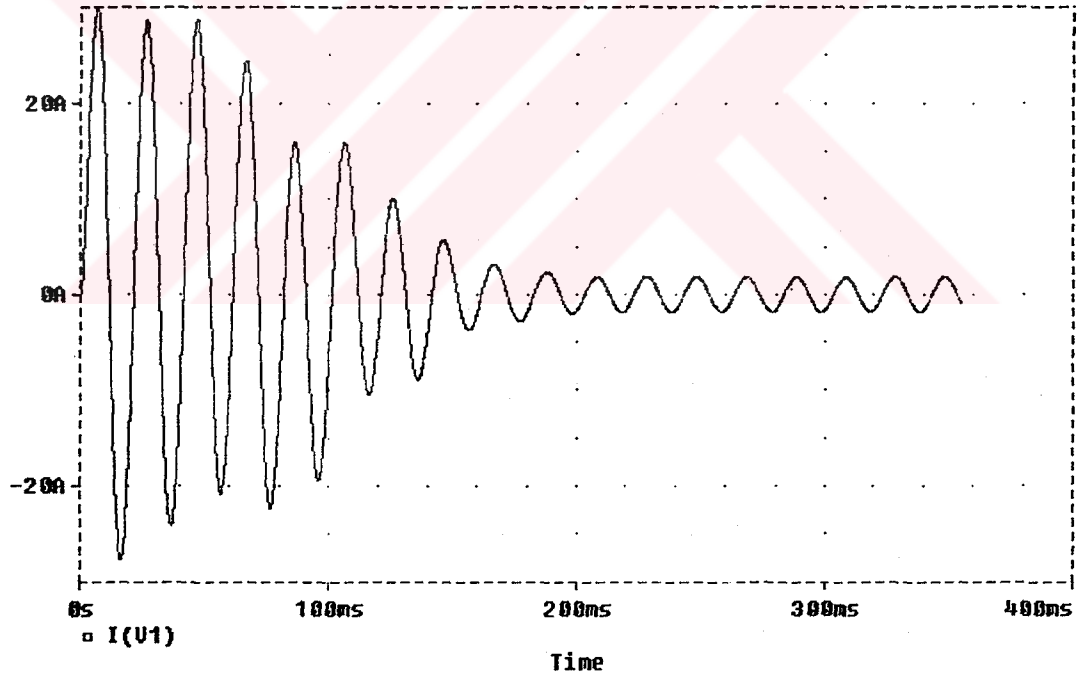
3.6 Değerlendirme

Seri uyartımlı senkronlanan asenkron motorun dinamik performansını incelemek amacıyla indüklenen gerilimler ve elektromekanik tanımlamaların benzetimi, tam devre modeliyle birleştirilerek PSPICE 5.4 programına dayalı bir benzetim elde edilmiştir.

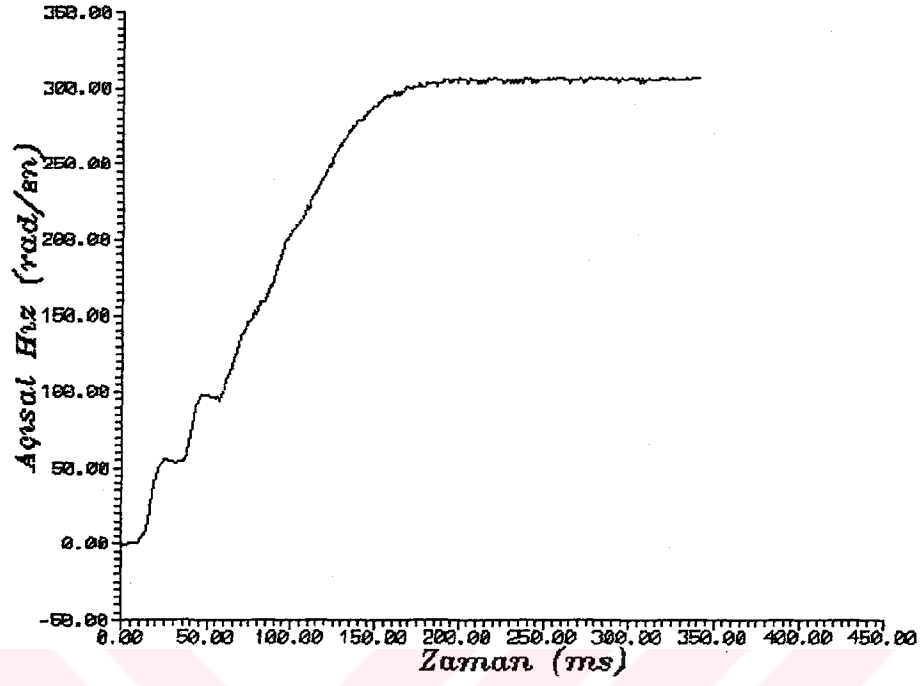
Benzetim sonuçları, sayısal osiloskoplara ölçülen akım ve hız değişimlerine uygun çıkmıştır. Benzetimin doğruluğunu ve hassasiyetini gösteren bu sonuçların daha büyük yaklaşıklık sunması, parametrelerin ölçülmesinde kullanılan yöntemler ve ölçü aletlerinin hassasiyetine bağlıdır. Ayrıca bu modelde magnetik doyum, demir kayıpları ve sıcaklık etkisi hesaba katılmamıştır.



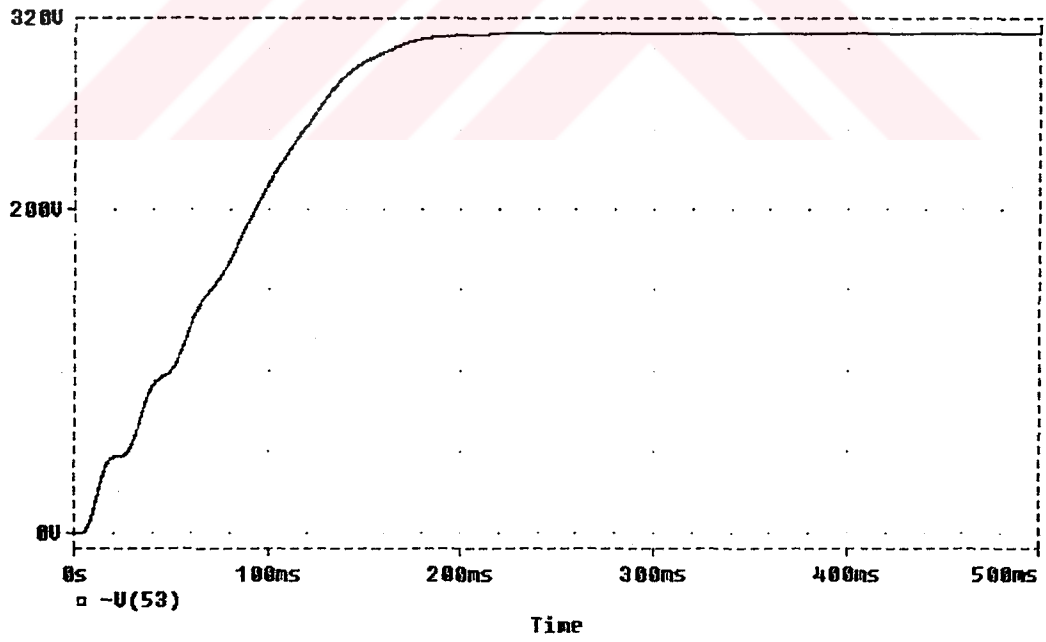
Şekil 3.10 Asenkron yol alma süresince stator akımının ölçülen değişimi



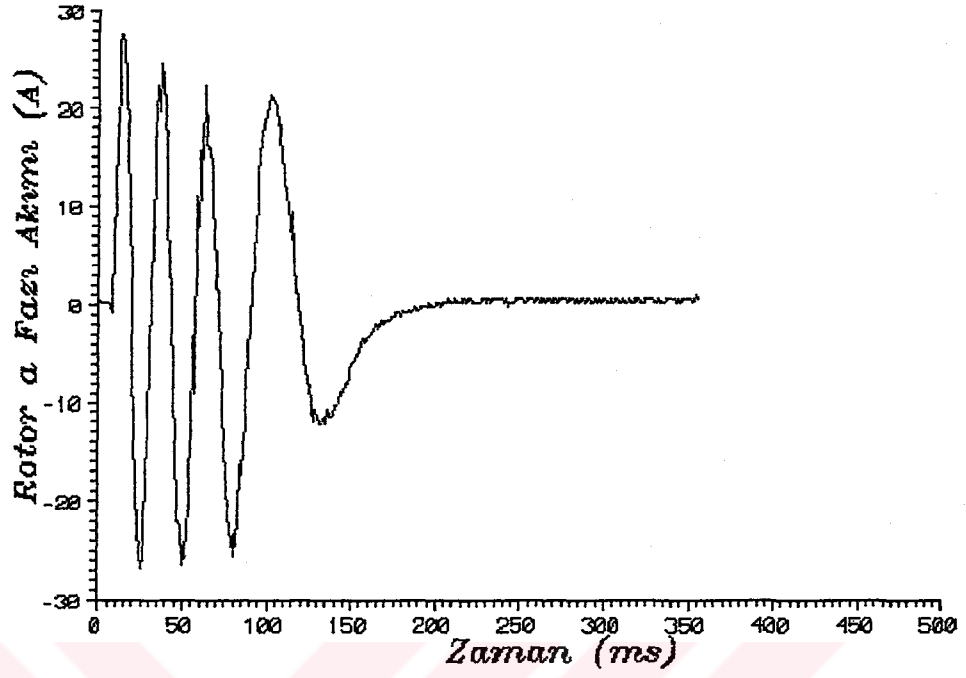
Şekil 3.11 Asenkron yol alma süresince stator akımının hesaplanan değişimi



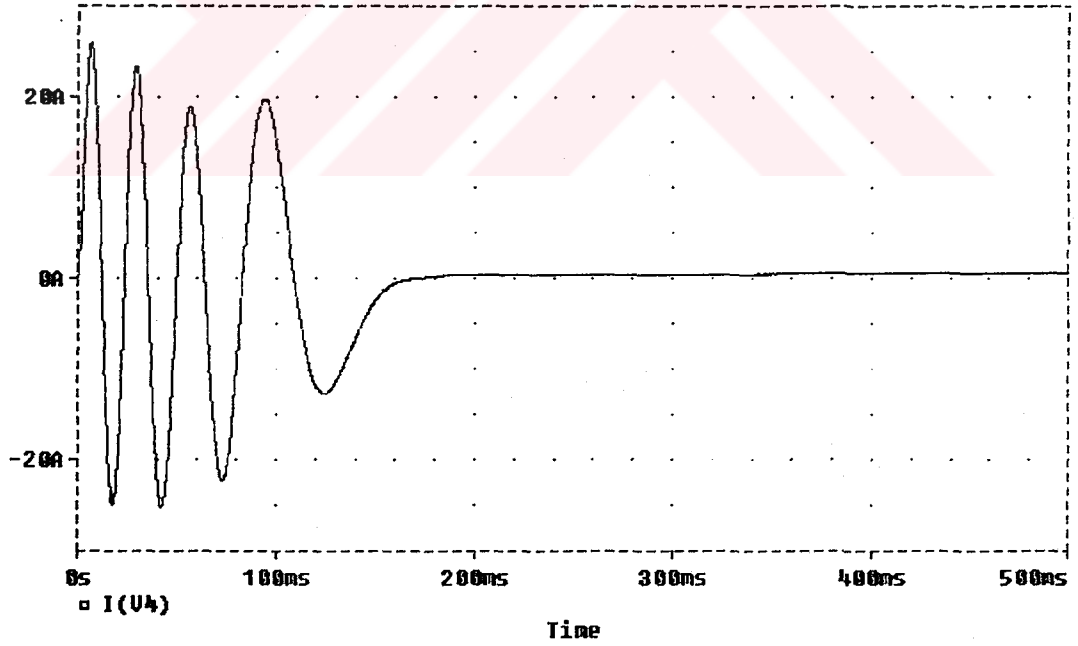
Şekil 3.12 Asenkron yol alma süresince ölçülen hızlanma eğrisi



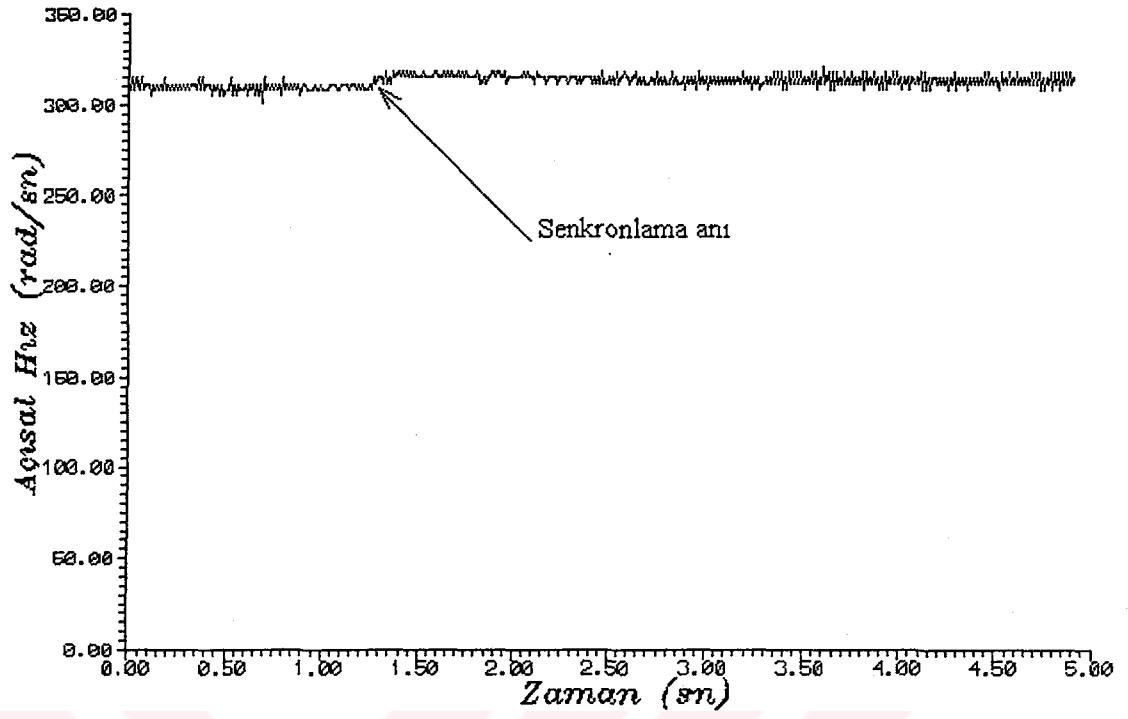
Şekil 3.13 Asenkron yol alma süresince hesaplanan hızlanma eğrisi



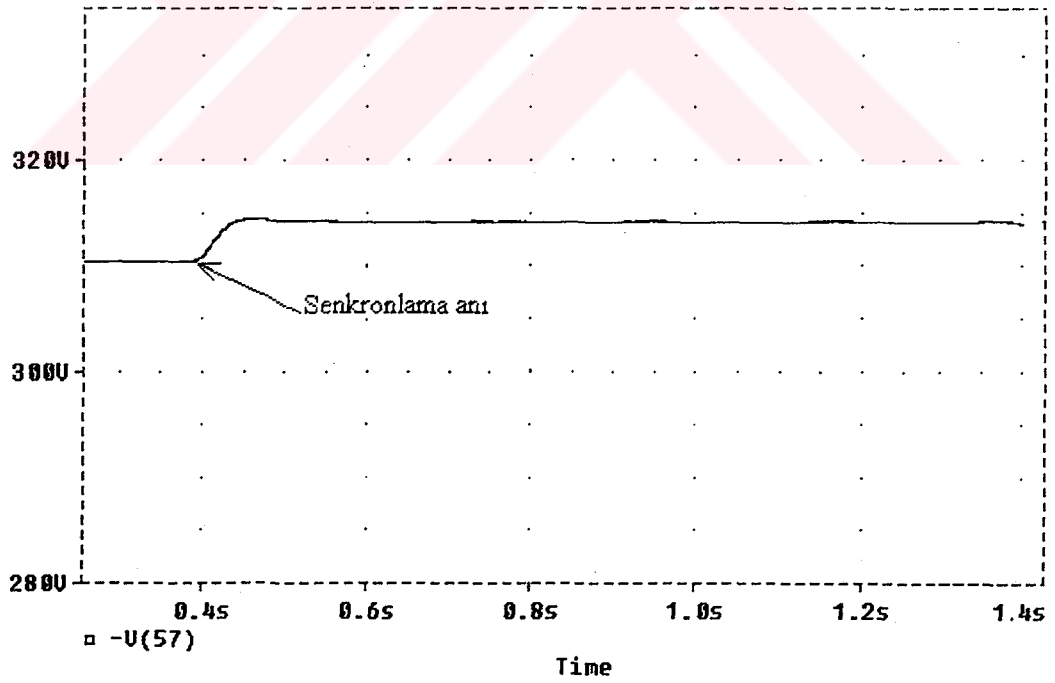
Şekil 3.14 Asenkron yol alma süresince rotor akımının ölçülen değişimi



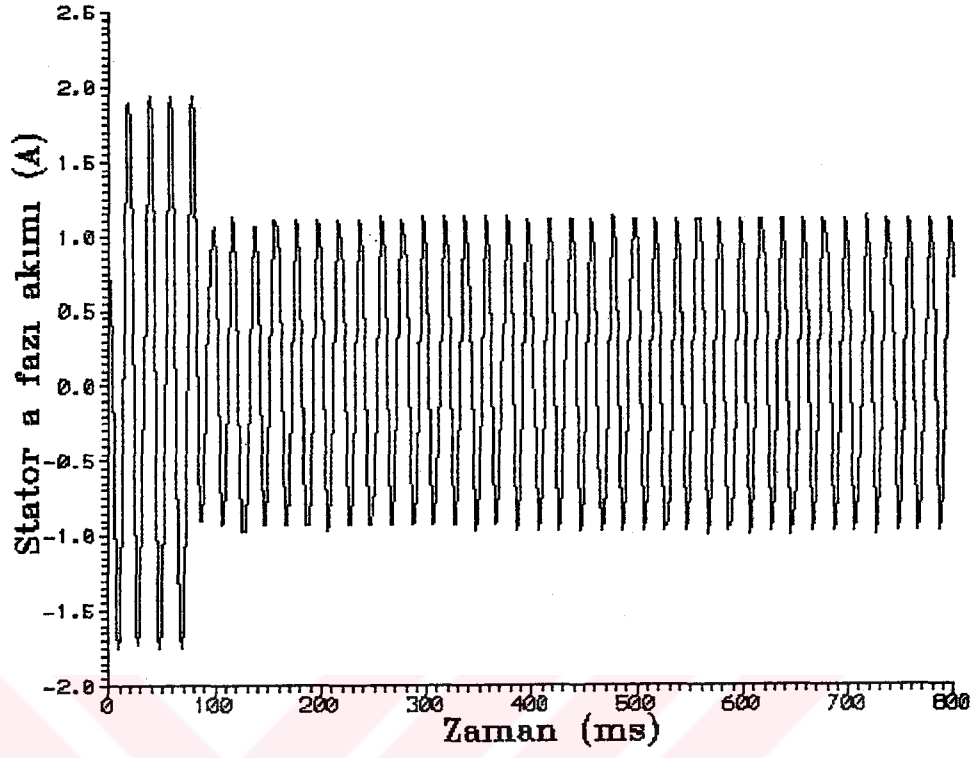
Şekil 3.15 Asenkron yol alma süresince rotor akımının hesaplanan değişimi



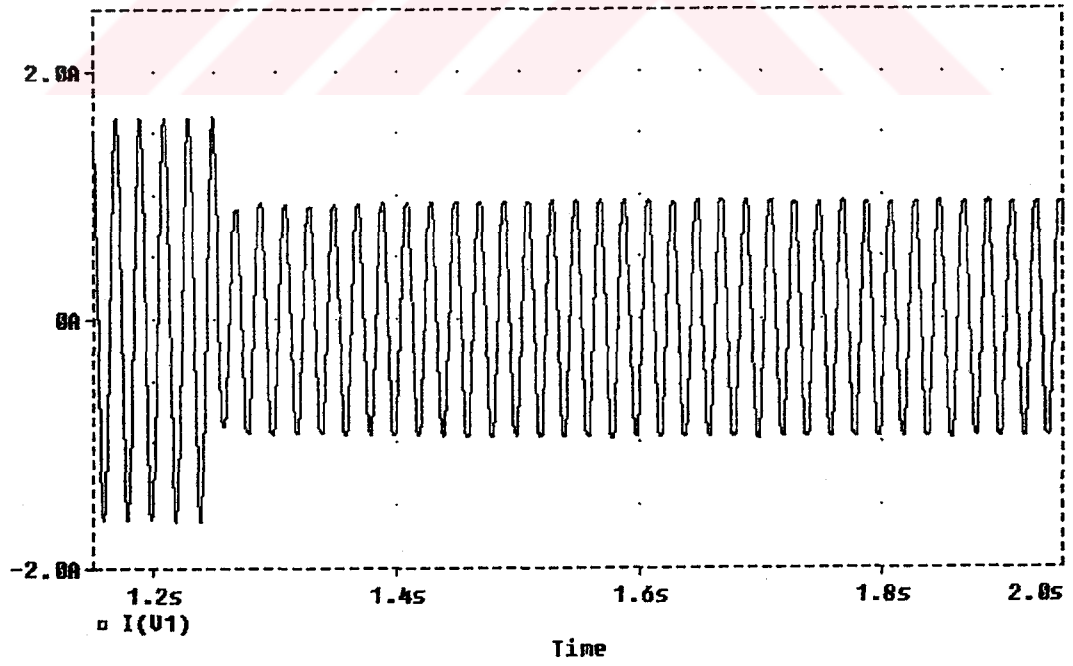
Şekil 3.16 Senkronlama anında ölçülen hız değişimi



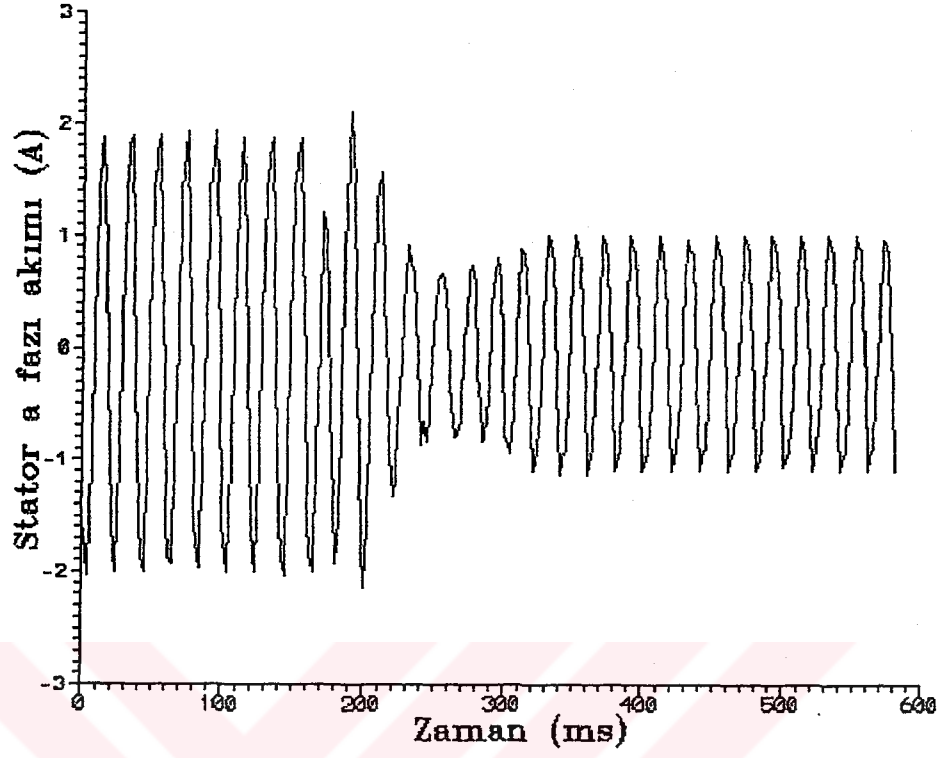
Şekil 3.17 Senkronlama anında hesaplanan hız değişimi



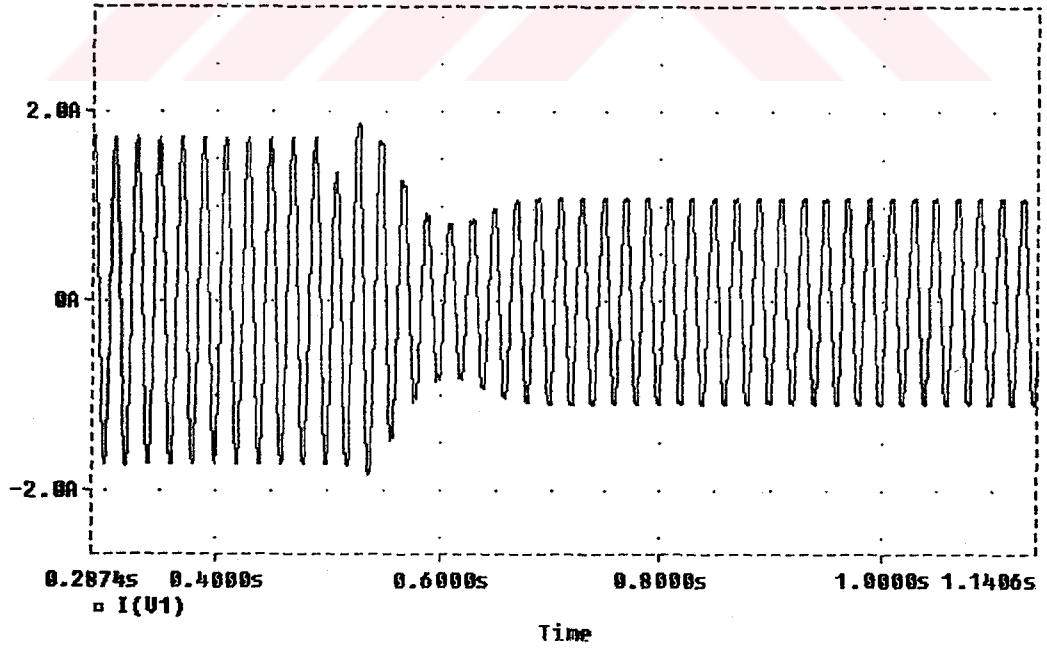
Şekil 3.18 Senkronlama anında stator akımının ölçülen değişimi (Danielson bağlantı)



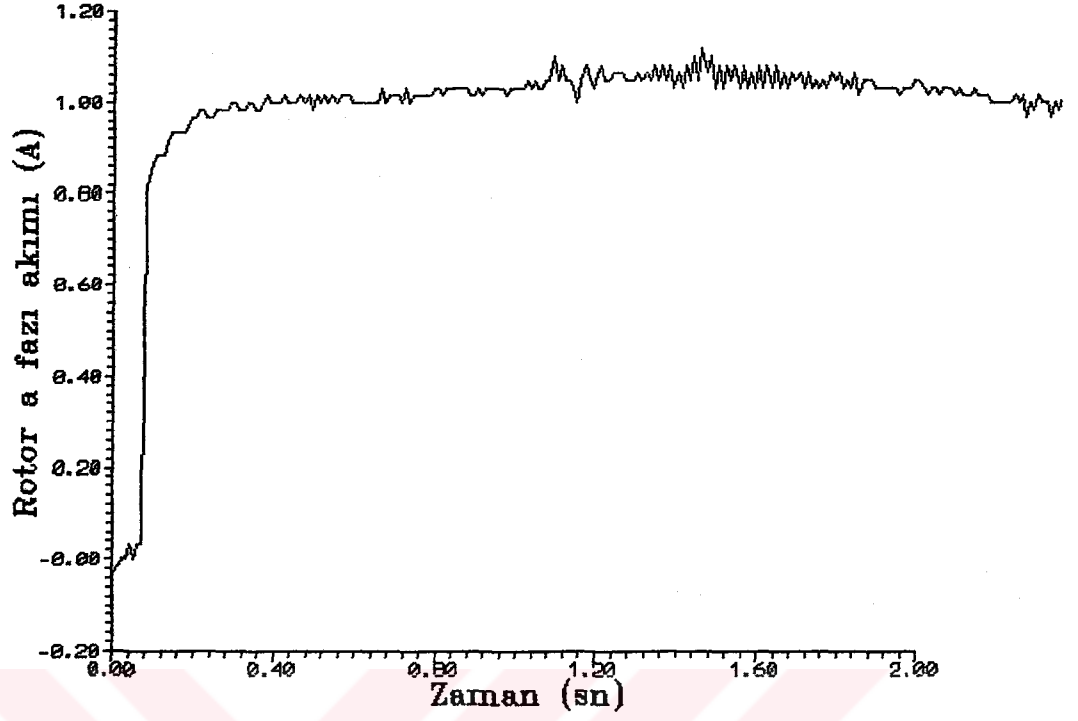
Şekil 3.19 Senkronlama anında stator akımının hesaplanan değişimi (Danielson bağlantı)



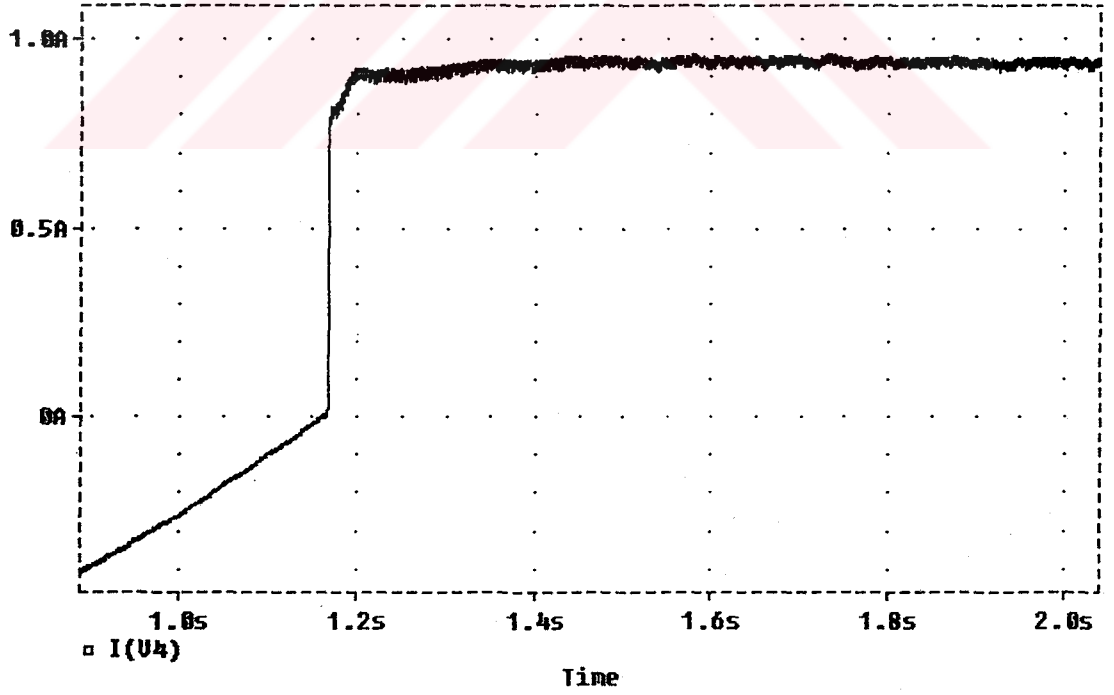
Şekil 3.20 Senkronlama anında stator akımının ölçülen değişimi (Danielson bağlantı)



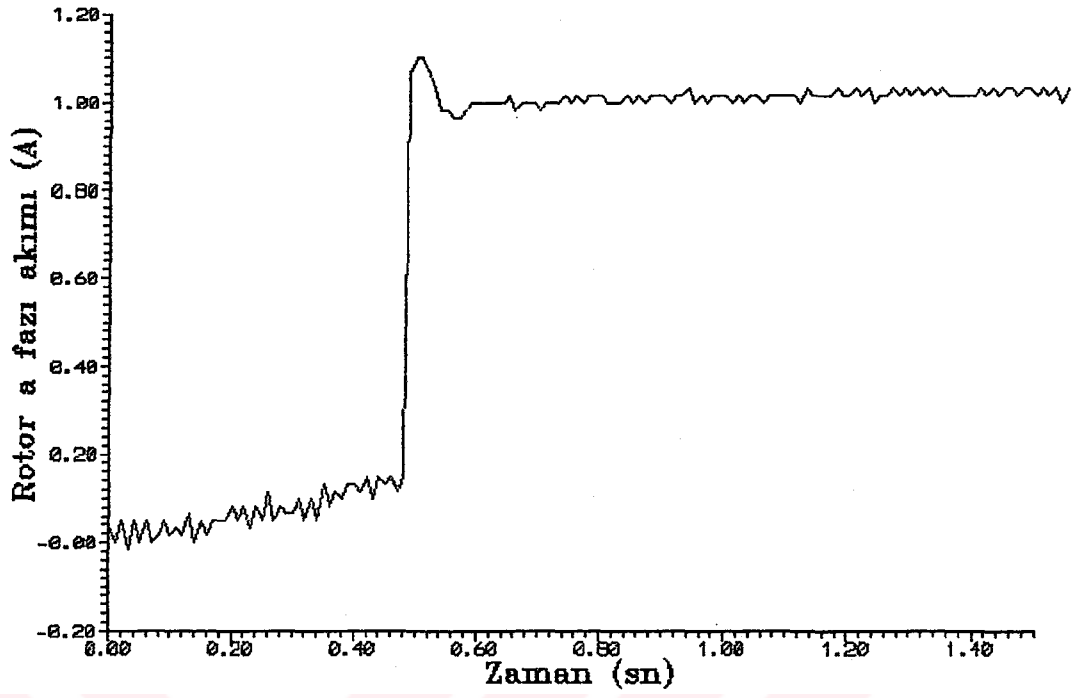
Şekil 3.21 Senkronlama anında stator akımının hesaplanan değişimi (Danielson bağlantı)



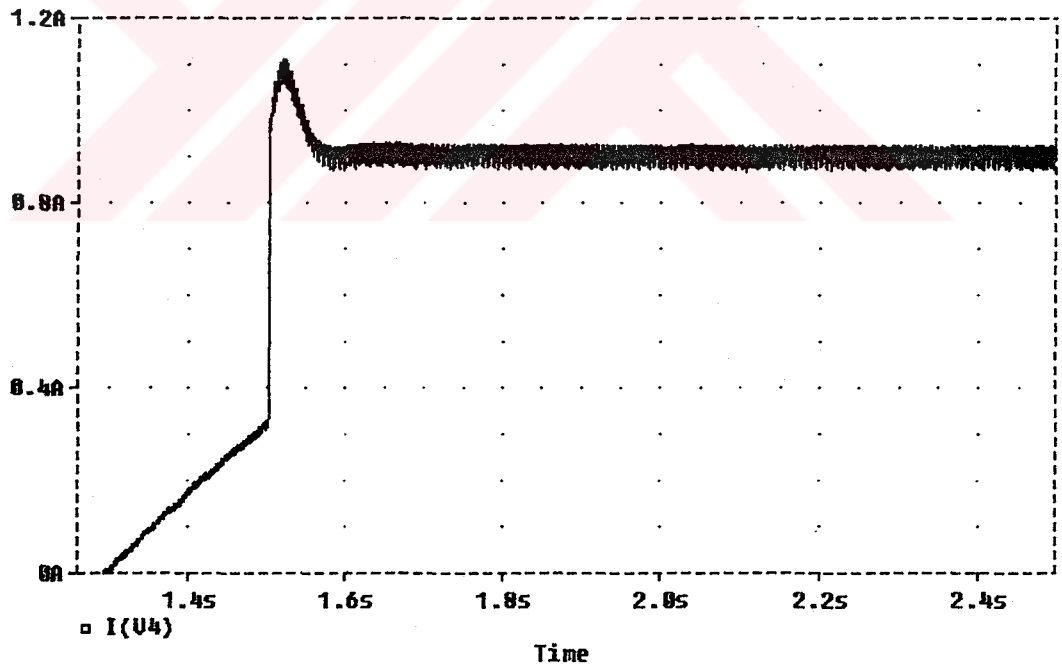
Şekil 3.22 Senkronlama anında rotor akımının ölçülen değişimi (Danielson bağlantı)



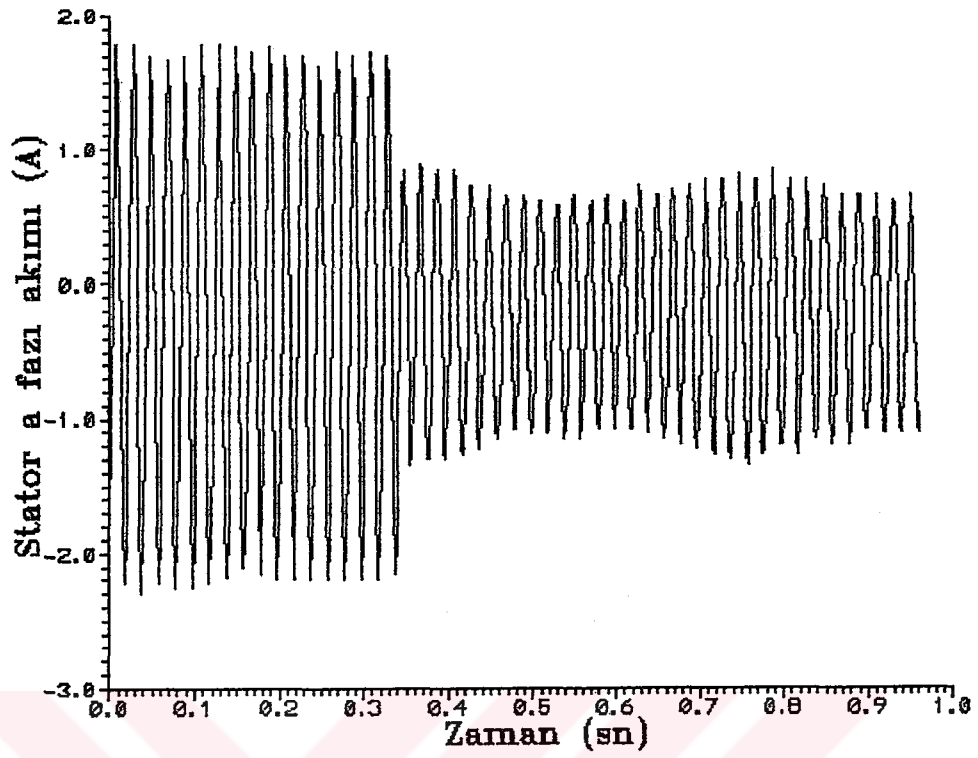
Şekil 3.23 Senkronlama anında rotor akımının hesaplanan değişimi (Danielson bağlantı)



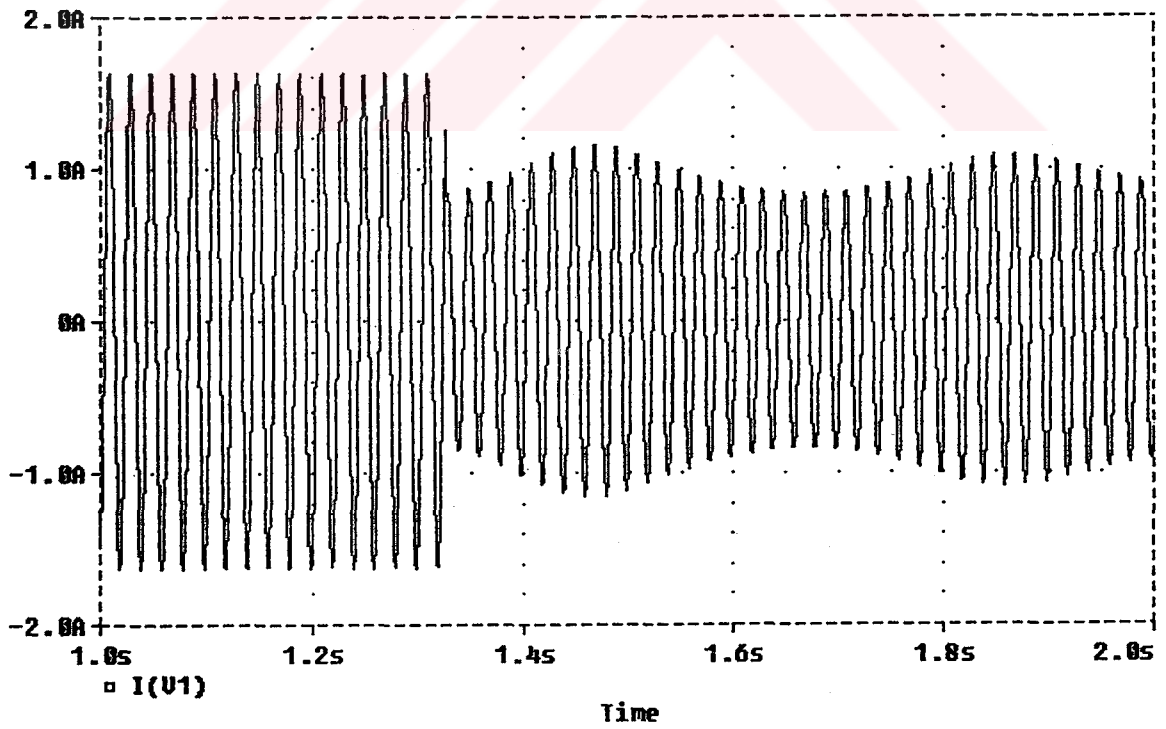
Şekil 3.24 Senkronlama anında rotor akımının ölçülen değişimi (Danielson bağlantı)



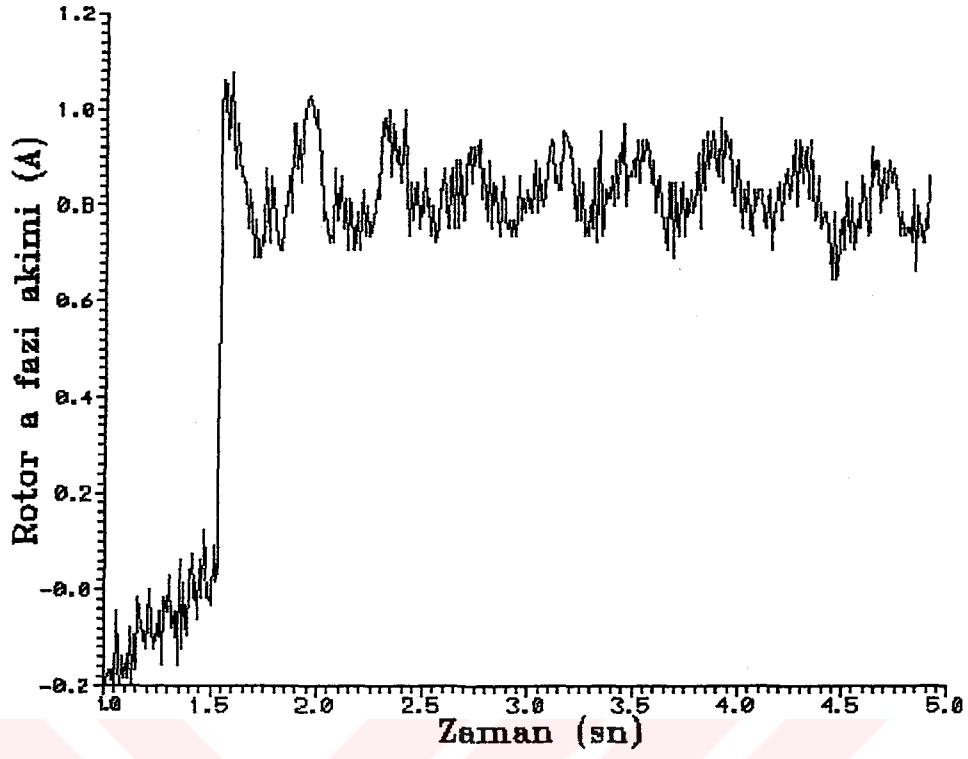
Şekil 3.25 Senkronlama anında rotor akımının hesaplanan değişimi (Danielson bağlantı)



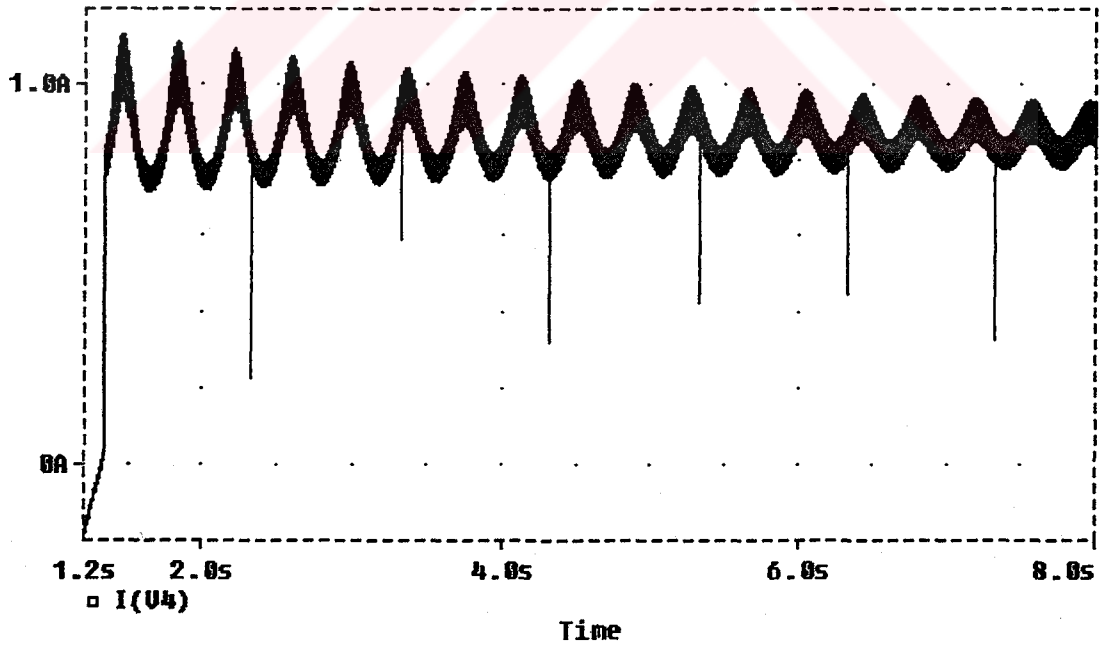
Şekil 2.26 Senkronlama anında stator akımının ölçülen değişimi (bir sargı açık bağlantı)



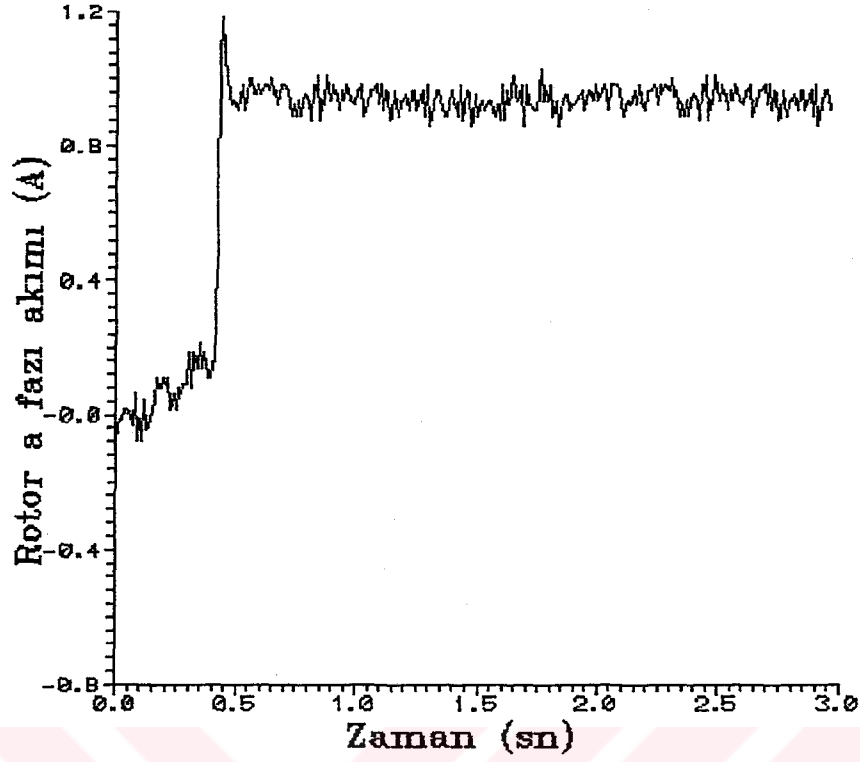
Şekil 3.27 Senkronlama anında stator akımının hesaplanan değişimi (bir sargı açık bağlantı)



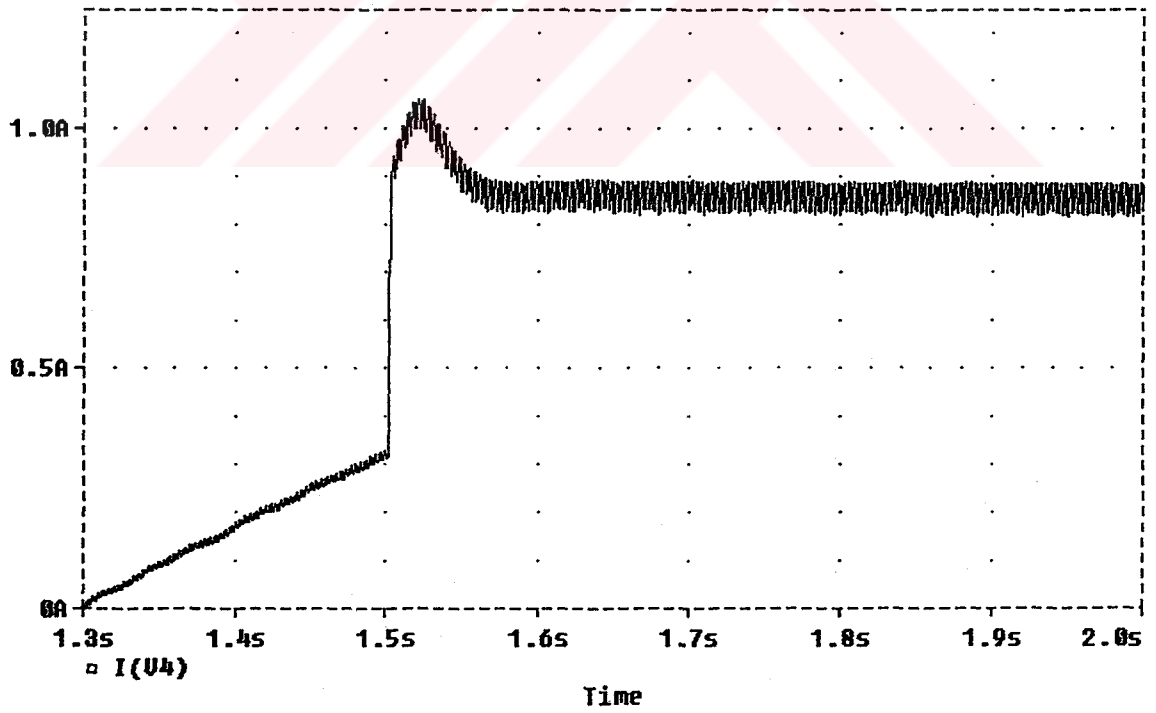
Şekil 2.28 Senkronlama anında rotor akımının ölçülen değişimi (bir sargı açık bağlantı)



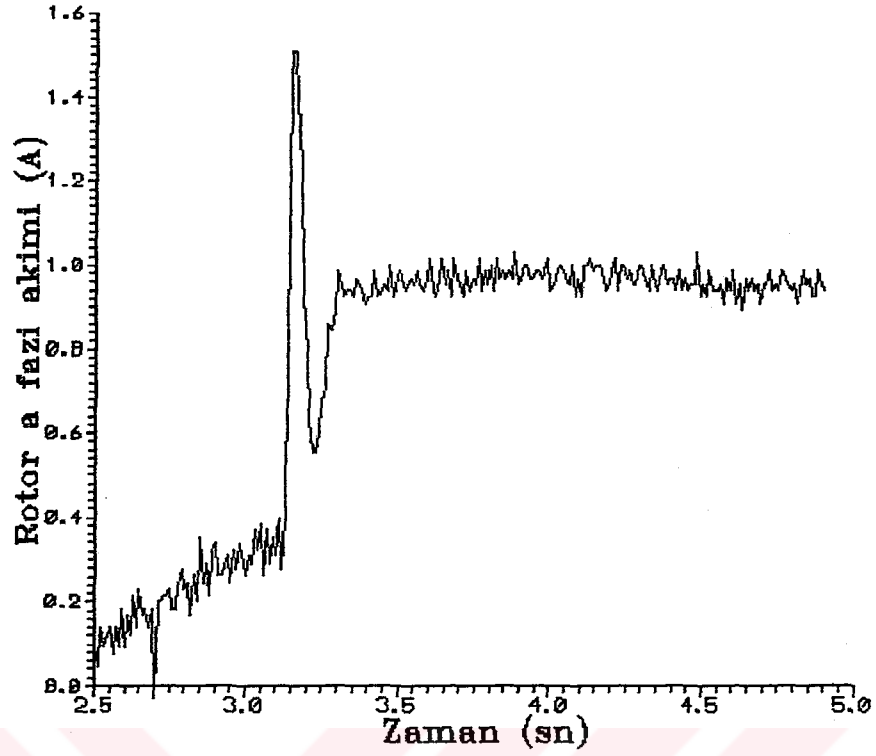
Şekil 3.29 Senkronlama anında stator akımının hesaplanan değişimi (bir sargı açık bağlantı)



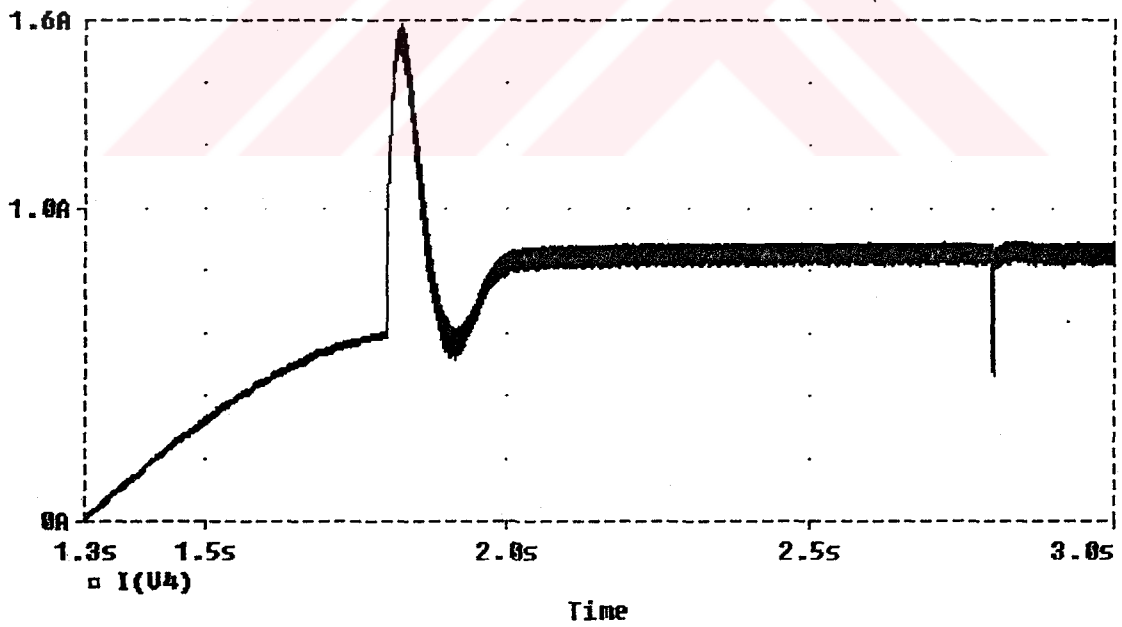
Şekil 3.30 Senkronlama anında rotor akımının ölçülen değişimi (Danielson, 37Ω paralel)



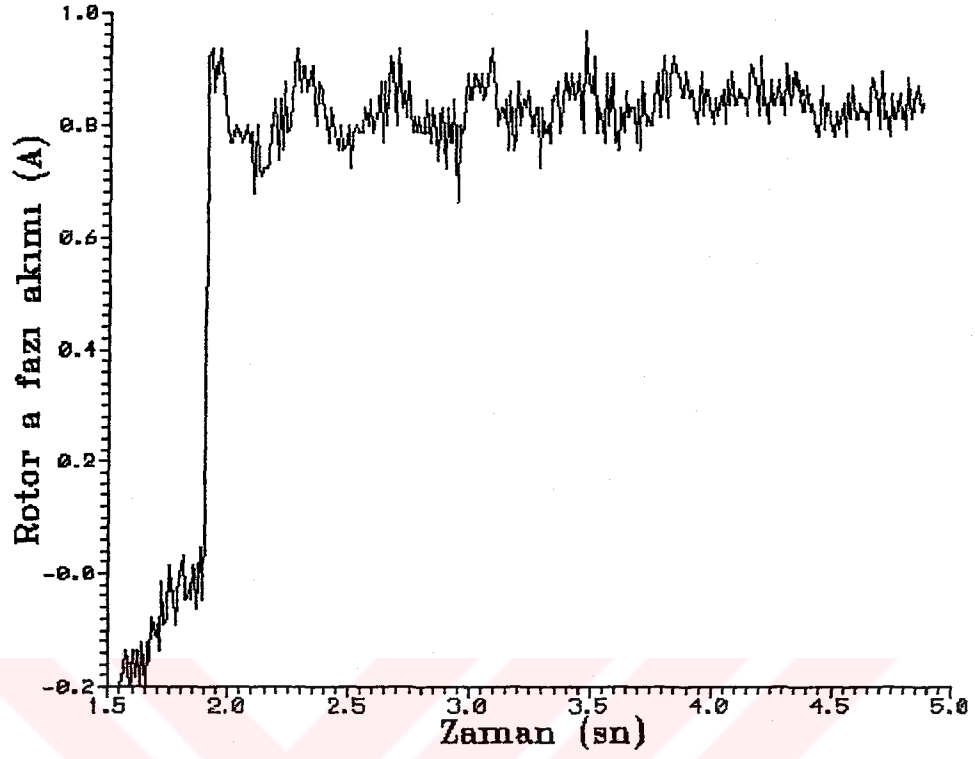
Şekil 3.31 Senkronlama anında rotor akımının hesaplanan değişimi (Danielson, 37Ω paralel)



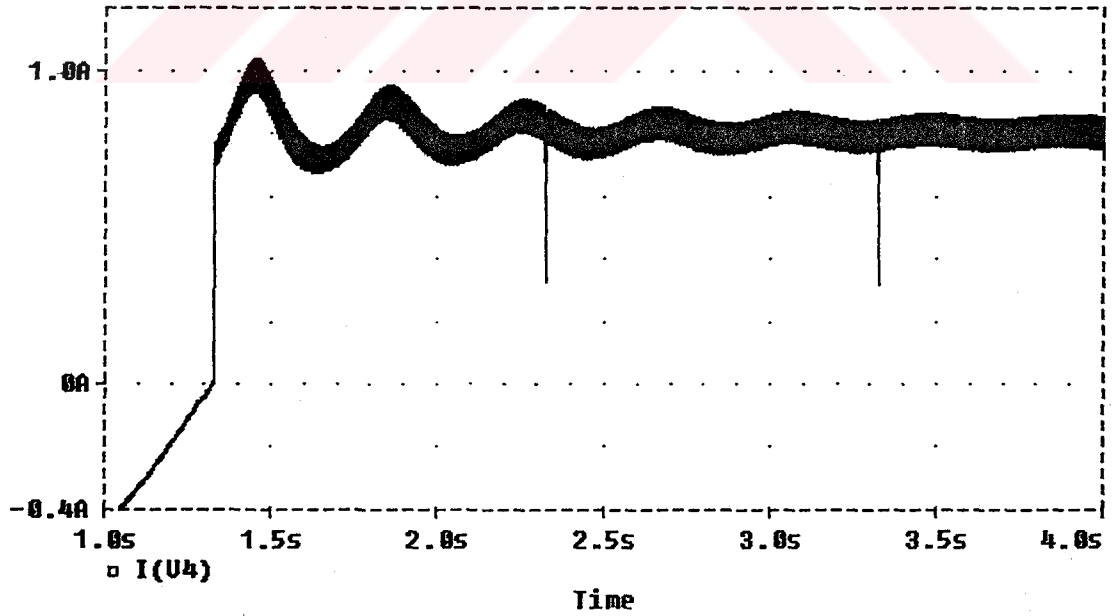
Şekil 3.32 Senkronlama anında rotor akımının ölçülen değişimi (Danielson, 37Ω paralel)



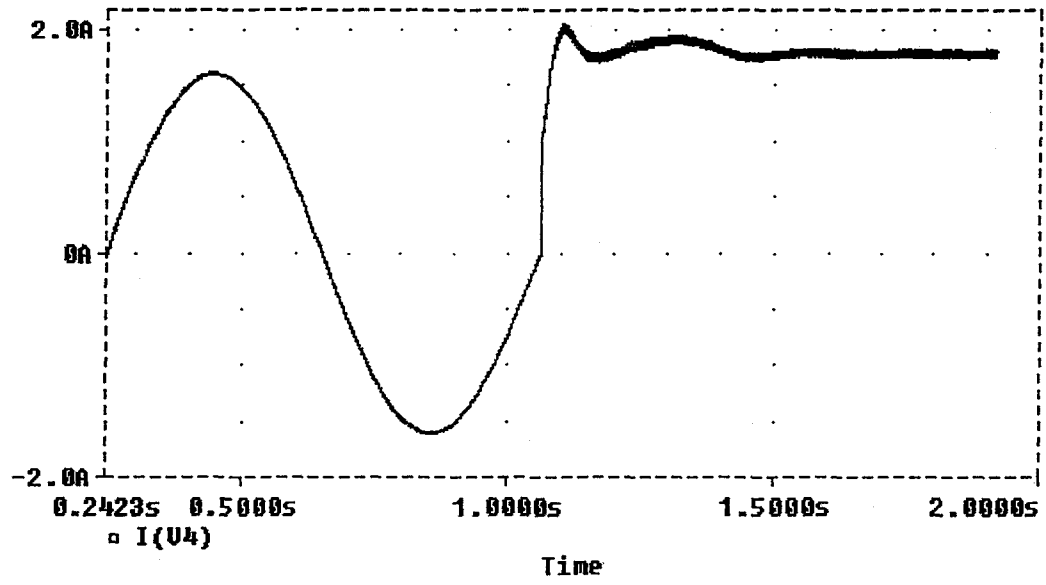
Şekil 3.33 Senkronlama anında rotor akımının hesaplanan değişimi (Danielson, 37Ω paralel)



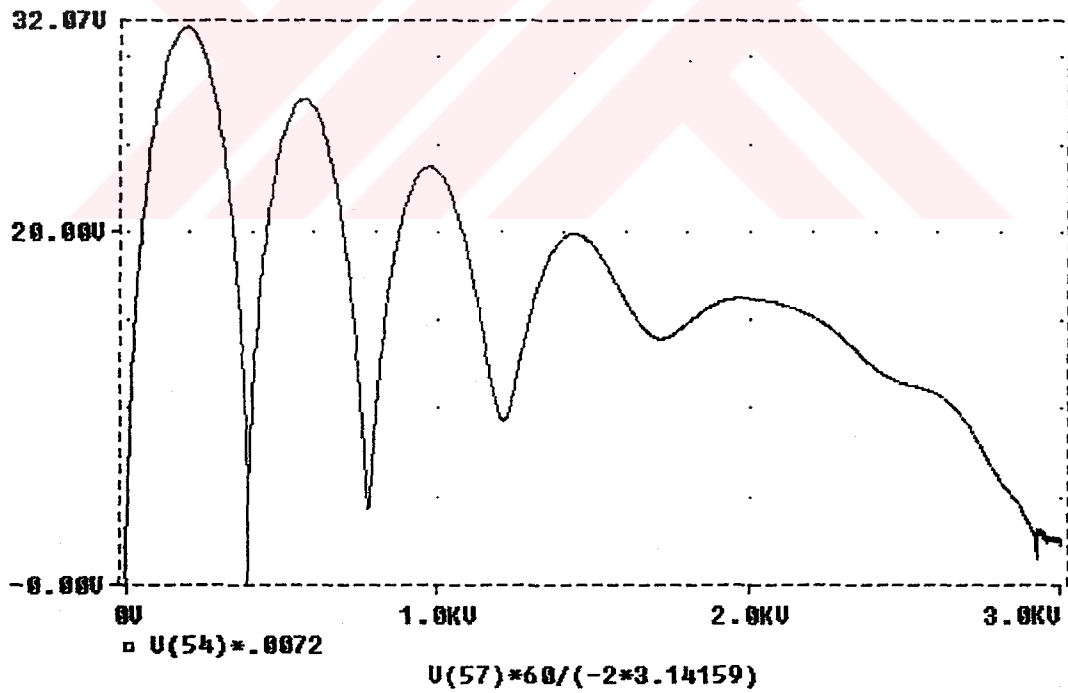
Şekil 3.34 Senkronlama anında rotor akımının ölçülen değişimi (Bir sargı açık, 60Ω paralel)



Şekil 3.35 Senkronlama anında rotor akımının hesaplanan değişimi (Bir sargı açık, 60Ω paralel)



Şekil 3.36 Senkron çalışmaya geçiş süresince rotor akımının hesaplanan değişimi
(Danielson bağlantı, 1.5 Nm. yük momenti altında)



Şekil 3.37 Asenkron hızlanma ve senkron çalışma süresince hesaplanan Moment-Devir sayısı
değişimi (Danielson bağlantı, 1.5 Nm. yük momenti altında)

BÖLÜM 4

SONUÇ

Bu bölümde sürekli ve dinamik durum incelemeleri ve kullanılan yöntemlerden elde edilen sonuçlar değerlendirilecektir. Yapılan modellemelerden faydalanılabilecek yerler ve bunlara ilişkin öneriler sunulacaktır.

4.1 Sürekli Durum İncelemesinin Sonuçları ve Öneriler

Bölüm 2’de verilen sürekli durum modeli ile seri uyarımlı senkron motorun en iyi performans incelemesi yapılabilir. Seri uyarım için, bir bilezikli asenkron motorun ölçümleri yapılarak gereken rotor bağlantısı tesbit edilebilir.

Sürekli durumda hesaplanan değerler ile deneysel sonuçlar arasındaki uygunluk; harmoniklerin ihmalı, köprü doğrultucunun temsil edilmesi, komutasyon reaktansı ve magnetik doyma ile ilgili kabulleri desteklemiş olmaktadır. Böylece, harmoniklerin önemli bir ilave kayıp getirmediği ortaya çıkmıştır.

Burada seri uyarımlı senkron motorun yaklaşık $k=1$ durumunda senkronizmden çıkmaksızın aşırı yüklenebilme özelliğini sergilediği görülmüştür. Asenkron çalışmada mevcut olan bu özellik, sabit uyarımlı senkron motorlarda olmayıp senkronizmden ayrılmayı netice verebilen önemli bir problemdir.

Giriş akımının çıkış gücüne göre değişimini gösteren Şekil 2.14 ’ten görüldüğü gibi, aynı çıkış gücü için senkron çalışmada asenkron çalışmaya göre daha az akım çekilmektedir. Nominal güçte bu fark %30’un üstündedir.

Senkron çalışmanın daha verimli olduğu Şekil 2.15’de aynı çıkış gücünde çekilen giriş güçlerinin değişimiyle isbatlanmıştır. Toplam kayıpların düşmesi, güç faktörünün düzeltilip reaktif mıknaatıslanma akımının azaltılması sebebiyle stator sargı kayıplarının düşmesinden kaynaklanmaktadır.

Fırça-bilezik düzeninin kabul edilebildiği uygulamalar için bu bağlantı ile senkron çalışmanın elde edilmesi, serbest uyarım veya daimi mıknaatısla uyarımdan daha ekonomik bir yol göstermektedir. Relüktans motorlarına göre makina boyutları, kullanımı ve güç faktörü yönünden daha üstün görünmektedir (Williamson, 1980).

4.2 Dinamik Durum İncelemesinin Sonuçları ve Öneriler

Son yıllarda çok sayıda sayısal yöntemler ve eşdeğer devre yaklaşımlarını içeren karmaşık modellemelerle elektrik makinalarının ve tahrik sistemlerinin performans incelemesi yapılmıştır. Bu yöntemlerin çoğu özel programlama tekniklerini gerektiren değişik devre topoljilerine dayanmaktadırlar. Ayrıca doğrusal olmayan diferansiyel denklemlerin çözülmesi gibi matematiksel zorluklar da içerirler.

Devre elemanları ve denklemler tam olarak kullanılıp hem gerçek bağlantılarıyla fiziksel bir model hem de senkronlama anı dahil tüm performans özelliklerini inceleme imkanı elde edilmiştir. Modelde, Kısım 3.4 'te verilen tüm devre elemanları ve bağlantılar mevcut olup herhangi bir yaklaşıklık ve kısaltma yoktur. PSPICE programı ile yarıiletken elemanların tam modelleri kullanılmıştır. Ayrıca makina parametrelerinin sıcaklık ve doymaya göre modellenmesi de mümkündür.

PSPICE 5.4 devre tasarım programına dayanarak yapılan benzetimde direk faz modeli, fiziksel çalışma mantığına uygun, devre elemanları şeklinde verilmiştir. Türev ve integral işlemlerinin benzetimi analog devrelerle yapılmıştır. Bu devrelerin doğru olarak türev ve integral işlemlerini yapması için geçici rejim çözümün de kullanılan hesaplama adımının yeterince küçük verilmesi gerekir. Hesaplama adımının PSPICE programı tarafından otomatik seçilmesi halinde işlemlerde belirli hatalar çıkar. Bu şekildeki benzetim, benzeri bir Fortran programına göre daha fazla zaman alır. Ancak son yıllarda geliştirilen hızlı bilgisayarlar bu süre farkını azaltmıştır.

Gerçekleştirilen model, sistem denklemlerinde değişikliklere yol açan bağlantı farklılıklarını benzeri bir Fortran programına göre daha kolay inceleme imkanı sağlar. Ayrıca doğrusal olmayan yarıiletken devre elemanlarının davranışları PSPICE programı sayesinde daha doğru olarak hesaba katılır.

Sunulan model ile seri uyarımlı senkron motorun dinamik davranışı incelenmiştir. Elde edilen teorik sonuçların deneysel olarak bulunan bazı eğrilerle doğruluğu ispatlanmıştır. Bu benzetim ile değişik rotor bağlantılarının, motora uygulanabilecek güç elektroniği ve kontrol tekniklerinin incelenmesi mümkündür.

Genel olarak bir direk faz modelinden beklenen dengesiz faz empedansları, faz kesilmesi, açık devre ve kısa devre arızalarının modellenmesi daha kolay hale gelmiştir.

Verilen benzetim ile bir veya daha fazla makinanın, geniş ve açık şekilli ara bağlantılı olarak doğrusal olmayan dinamik davranışının incelenmesi mümkündür.

Herhangi bir sayısal yöntem ve programlama diline ihtiyaç duyulmadan yapılan bu benzetimin yapılabilecek diğer devre tasarım programlarına dayalı benzetimlerden farkı, makinanın gerçek devre elemanlarını ve fiziksel bağlantılarını modellemesidir. Asenkron çalışma şeklinden senkron çalışma şekline geçişin görülebilmesi amacıyla burada direk faz modeli kullanılmıştır. Makinanın matematiksel denklemlerini sağlayan eşdeğer devrelerle veya d-q modeli gibi yaklaşımlar ile yapılan benzetimlerde, daha az eleman ile benzetim tamamlanabilmektedir. Bunlardan farklı olarak, senkronlanan asenkron motor için çok önemli olan değişik rotor bağlantıları, gerçekleştirilen benzetim yardımıyla kolaylıkla incelenebilir. Bağlantı değişiklikleri ve arabağlantılara dayalı benzeri dinamik davranış konuları da bu benzetimde faz değişkenleri ile incelenebilir.

PSPICE ve benzeri devre tasarım programları ile benzetim kurmanın en önemli avantajı, güç elektroniği ve kontrol yöntemlerinin modellenmesinde ortaya çıkar. Yarı iletken devre elemanlarının tümünün, gerçek parametrelerle doğrusal olmayan davranışları dinamik incelemeye kolayca katılabilir.

Anlaşılması kolay ve kısa bir benzetim ortaya konulmuştur. Direk faz modeli, denklemleri ve eşdeğer devrelerine türev ve integral devreleri eklenerek PSPICE tabanına uyarlanmıştır.

4.3 Senkron Çalışmaya Geçiş Sonuçları ve Öneriler

Sürekli durum performansı ve üstünlükleri gösterilmiş olan seri uyartımlı senkron motorun en uygun şekilde senkron çalışmaya geçişinin sağlanması için bir araştırma yapılmalıdır. PSPICE tabanında yapılan benzetim bu araştırma için oldukça elverişlidir. Kısım 3.6' da örnekleri verilen senkron çalışmaya geçiş sonuçlarının incelenmesiyle aşağıdaki etkenlerin senkron çalışmaya geçişte dinamik davranışı etkilediği gözlenmiştir.

- a) Senkronlama anı, yani rotor akımının o andaki değişimi ,
- b) Rotor devresinin bağlantı çeşidi
- c) Doğrultucu çıkışına paralel bağlanabilen direnç ve bu direncin değeri
- d) Motor milindeki yük momenti ve toplam eşdeğer atalet momenti.

Bu etkenler göz önüne alınarak, en uygun senkronlama işlemini otomatik şekilde yapmak için kullanılacak bir yöntem ve gereken düzenek, başarılı benzetim yardımıyla kolayca tasarlanabilir.



KAYNAKLAR

- ADKINS, B. ve HARLEY, R.G., (1975). **The General Theory of Alternating Current Machines**. Chapman and Hall, London.
- ALDEMİR, R., (1977). **Sürekli Mıknatıslarla uyarılmış Senkron Makinalar Üzerine Bir İnceleme**. Doçentlik Tezi, K.T.Ü., Trabzon.
- ALEXANDROVITZ, A., KATZ, D., (1982). Analysis of Transients Phenomena in Three Phase Induction Motor Represented in Phase Axes by Digital Simulation. **Electric Machines and Electromechanics** ,7:305-324.
- BROSAN, G.S., HAYDEN, J.T., (1966). **Advanced Electrical Power and Machines**, Sir Isaac Pitman, London.
- COTTAN, H., (1925). Pulling Into Step of a Synchronous Induction Motor. **Journal Inst. Electr. Eng.**, 63:211-230.
- DANIELSON, E., (1901). The Induction Motor as a Synchronous Motor. **The Elektrotechnische zeitschrift**, 22:1065-1066.
- DEL TORO, V., (1990). **Electric Machinery**, Prentice Hall.
- GHANI, S.N., (1988). Digital Computer Simulation of Three-Phase Induction Machine Dynamics - A Generalized Approach. **IEEE Trans. on Industry Applications**, 24(1):106-114.
- GRIFFIN, J., (1954). **Synchronous Induction Motor**. McDonald, London.
- FITZGERALD, A.E., KINGSLEY C. Jr., UMANS, S., (1983). **Electric Machinery**, Fourth Edition, McGraw Hill.

HANCOCK, N.N., (1989). **Matrix Analysis of Electrical Machinery**. Second Edition, Pergamon Press.

İMERYÜZ, M., ÇETİN, İ., (1991). Senkronlanan Asenkron Motor İncelemesi ve Kullanılabilirlik Analizi, **Elektrik Mühendisliği 4. Ulusal Kongresi D.E.Ü.**, İzmir:13-16.

KRAUSE, P.C., (1987). **Analysis of Electric Machinery**. McGraw Hill.

KOVACS, K.P., (1984). **Transient Phenomena in Electric Machines**. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam.

OSTOS, E.A., (1978). **A Synchronous Motor with Series Excitation**. Master Thesis. Victoria University, Manchester.

ÖZDEMİR, M., (1993). **Seri uyartımlı Bir Senkron Motorun Tasarımına Yönelik Bilgisayar Benzetim Yöntemi**, Doktora Tezi, Elazığ.

RASHID, M.H., (1988). **Power Electronics**, Prentice Hall.

RAWCLIFFE, G.H., (1940). Secondary Circuits of Synchronous Induction Motors. **Journal Inst. Electr. Eng.**, 87:282-298.

ROSENBLATT, J. ve FREIDMAN M.H., (1984). **Direct and Alternating Current Machines**, Merril Publishing Co., Ohio.

SARIOĞLU, K., (1983). **Asenkron Makinalar**. Çağlayan Kitabevi, İstanbul.

SARIOĞLU, K., (1994). **Elektrik Makinalarının Temelleri 2**, İ.T.Ü. Yayınları, İstanbul.

SARIOĞLU, K., IL 61801. **Dynamics of Electrical Machines**. Classnotes for EE 497
MKS, Dept. of Electr. Eng. University of Illinois, Urbana.

TUBBS, S: P., (1989). Superconducting Synchronous Induction Motor Performance.
Proc IEE, 137:120-124.

WILLIAMSON, A: C., (1980). A new Connection for Synchronous Motor Excitation.
Proc IEE, 127(3):169-173.



EK - A

SENKRON MOTORDA MIKNATISLANMA EĞRİSİ VE KAYIPLARIN BULUNMASI

A.1. Boşta Çalışma Deneyi İle Mıknatıslanma Eğrisi, Sürtünme ve Demir Kayıplarının Bulunması

Senkron çalışma için incelenen makina, senkron hızda generatör olarak dışardan döndürülürken, uyarma akımı ve endüvi açık devre gerilimi arasındaki değişim ile açık devre karakteristiği veya mıknatıslanma eğrisi elde edilir. Endüvi gerilimi olarak genellikle fazlararası değer alınmakla beraber, bu eğri çoğu zaman birim değerlere göre çizilir. Birim değerler için anma gerilimi ile hava aralığı doğrusundan buna karşılık gelen uyarma akımı değeri alınır. Esas olarak açık devre karakteristiği, mmk kaynağı sadece uyarma sargısı iken magnetik devredeki mmk ile hava aralığı akısının uzay temel bileşeni arasındaki ilişkiyi gösterir.

Bir tahrik kaynağı tarafından, deney makinası senkron hızda döndürülürken bir dizi uyartım akımı değerleri için endüvi açık devre gerilimi değerleri okunur. Makinayı senkron hızda tahrik etmek için gereken mekanik güç deney esnasında ölçülebilirse boştaki dönme kayıpları bulunabilir. Bu kayıplar sürtünme ve vantilasyon, demir kayıplarını kapsar. Sürtünme ve vantilasyon kayıpları sabit iken demir kayıpları uyarma akımının parabolik fonksiyonudur.

Deney makinasında hiç uyartım yok iken makinayı tahrik etmek için kullanılan mekanik güç sürtünme ve vantilasyon kayıplarına karşılık gelir. Uyarma akımının akıtılmasıyla gelen artış ise demir kayıplarını ifade eder. Bunları hesaplamak için tahrik makinasının, örneğin bir elektrik motorunun, yalnız başına çektiği güç P_1 ve deney makinasının bağlanmasıyla çekilen güç P_2 ise, $(P_2 - P_1)$ güç değeri sürtünme ve vantilasyon kayıplarına eşittir. Uyartım akımının belli bir değeri için kullanılan güç değeri P_3 ise, $(P_3 - P_2)$ değeri de, uyartımın belli değerindeki demir kaybına eşittir. Böylece demir kayıplarının değişimini veren $P_{Fe} = f(I_m)$ eğrisi elde edilebilir.

A.2. Kısa Devre Deneyi ve Yük Kayıpları

Senkron hızda, generatör olarak tahrik edilen bir senkron makina, endüvi uçları ampermetreler yoluyla kısa devre edilip uyarma akımı, endüvi akımının güvenilen en büyük değerine ulaşınca kadar artırılmasıyla, endüvi akımı ile uyarma akımı arasında oluşan bağıntıya kısa devre karaktersitiği denilir.

Kısa devre deneyi yapılırken, tahrik makinasının çekeceği güç P_4 ise, $(P_4 - P_2)$ değeri ile endüvi akımının sebep olduğu kayıplar bulunabilir. Bu kayıplara kısa devre yük kayıpları denir. Bu kayıplar endüvi akımına göre parabolik bir değişim gösterir. Kısa devre yük kayıpları; endüvi sargısının $I^2 R$ kayıplarını, endüvi kaçak akısının sebep olduğu yerel demir kayıplarını ve bileşke akının sebep olduğu çok az bir demir kaybını içerir. Gerekirse (A.1) denkleminde sıcaklığın direnç değerine etkisi de hesaba katılarak d.a. direnci için sargı kayıpları bulunabilir. (A.1) denkleminde R_t ve R_T sırasıyla t ve T Celcius derecesindeki direnç değerleridir.

$$\frac{R_T}{R_t} = \frac{234.5 + T}{234.5 + t} \quad (A.1)$$

Böylece d.a. direnci sargı kayıpları; kısa devre yük kayıplarından çıkarıldıktan sonra kalan kayıplar endüvi sargısında deri olayı ve girdap akımlarının varlığından dolayı olan kayıplar ve endüvi kaçak akısının sebep olduğu yerel demir kayıplarından oluşur. Kısa devre deneyinde bileşke akının oluşturacağı demir kayıpları ihmal edilir. Çünkü kısa devre akımı çok indüktif olup yaklaşık 90° faz açısı ile uyarma akısıyla aynı ekseninde fakat ters yönlü akı üretir. D.a. direnci kayıpları gibi ilave yük kayıpları da endüvi akımının fonksiyonu olup endüvi direncinin etkin bir değerini ortaya çıkarır (A.2).

$$R_{a,etkin} = \frac{\text{Kısa devre yük kayıpları}}{(\text{Kısa devre endüvi akımı})^2} \quad (A.2)$$

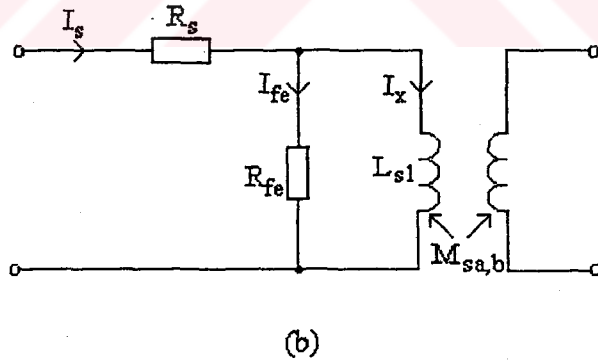
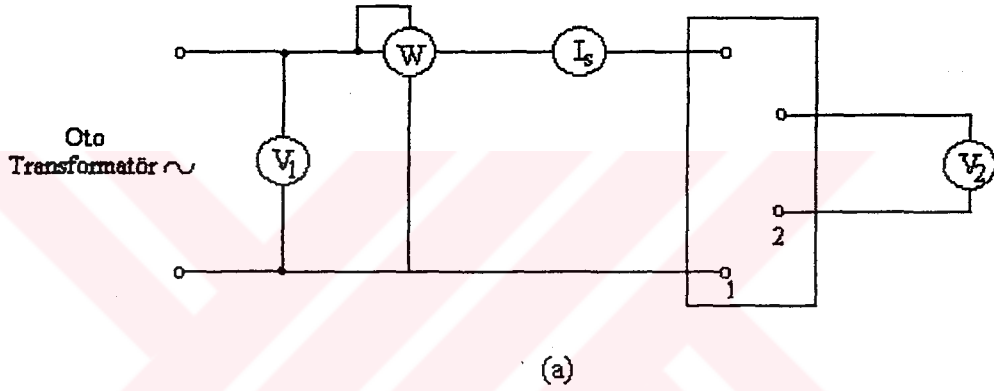
Genellikle bu değer, nominal akım şartlarında bulunarak, sabit değer olarak alınır. İnceleme yapılan motor için stator etkin direnç değeri 5Ω olarak bulundu.

EK - B

İNDÜKTANSLARIN ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ

B.1. Stator Ortak ve Öz İndüktansının Ölçümü

Bilezikli asenkron makinanın stator faz sargıları arasındaki ortak indüktansları ve stator bir faz sargısı öz indüktanslarını ölçmek için Şekil B.1.a 'daki deney devresi kullanılmıştır (Jones, 1967). Aynı deney devresi rotorun ortak ve öz indüktanslarını ölçmek için de geçerlidir.



Şekil B.1 (a) Bir faz sargısı ortak ve özindüktansı ölçmek için deney bağlantı şeması,
(b) eşdeğer devresi

Bilezikli asenkron makina dururken, oto transformatörle stator sargısının bir fazına değişik besleme gerilimleri uygulanarak; güç (P), gerilim (V) ve akım (I) faz değerleri ölçülür. Ölçülen bu değerlerle Şekil B.1.b 'ye göre

$$I_{fe} = \frac{P}{V_1} \quad (B.1)$$

bağıntısından I_{fe} ,

$$I_x = \sqrt{(I_s^2 - I_{fe}^2)} \quad (B.2)$$

bağıntısından I_x hesaplanır. Stator fazları için, öz indüktans

$$L_{sl} = \frac{V_1}{I_x \omega_1} \quad (B.3)$$

ve fazların birbiriyle ortak indüktans değeri

$$M_{sa,b} = \frac{V_2}{I_x \omega_1} \quad (B.4)$$

şeklinde hesaplanır. Hesaplamalar sonucunda stator ve rotor senkron öz indüktansları

$$L_s = 0.650458 \text{ H.}$$

$$L_r = 0.72073 \text{ H.}$$

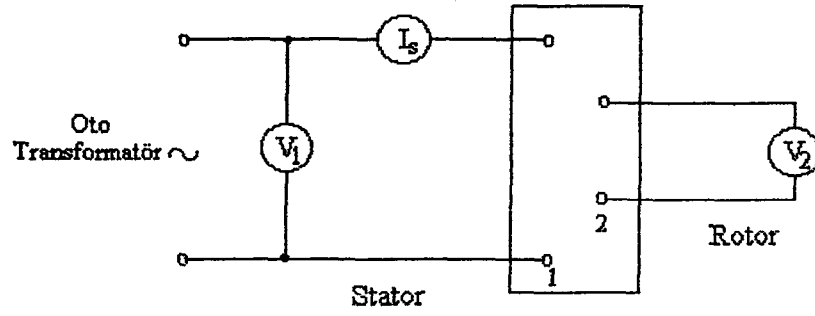
olarak bulunmuştur.

B.2. Stator-Rotor Ortak İndüktansının Ölçümü

Stator-rotor ortak indüktanslarını ölçmek için Şekil B.2'deki deney devresi kullanılmıştır. Stator fazlarına ayrı ayrı tek fazlı oto transformatörle değişik besleme gerilimleri uygulanarak; Gerilim (V) ve akım (I) faz değerleri kaydedilmiştir. Bu deneyde V_2 voltmetresi sırasıyla rotorun a-b, b-c, a-c faz sargıları arasına bağlanarak rotor faz arası gerilimleri de ölçülmüştür. Ölçülen değerlerle stator-rotor ortak indüktansı

$$M_{sr} = \frac{V_2}{\sqrt{3} I_s \omega} \quad (B.4)$$

bağıntısından



Şekil B.2 Stator-rotor ortak indüktansının ölçülmesi

$$M_{sr}=0.449044 \text{ H.}$$

olarak bulunmuştur.

B.3. Dönüştürme Oranının Ölçülmesi

Bilezikli asenkron makinada dönüştürme oranını belirlemek için, Şekil B.2'ye uygun biçimde üç fazlı ototransformatörle değişik besleme gerilimleri uygulanarak; (V_1) ile (V_2) faz değerleri ölçülür ve birbirine oranlanır. Ölçülen değerlerden

$$\frac{n_s}{n_r}=0.967$$

olarak bulunmuştur.

EK-C

ATALET MOMENTİNİN ve DİNAMİK DAVRANIŞ EĞRİLERİNİN ÖLÇÜLMESİ

Atalet momentinin bulunması için yavaşlama eğrisinden faydalanılmıştır. Bu eğri, motorun atalet momentine bağlı olarak depolanan enerjinin sürtünme enerjisine karşı harcanmasını ifade eder. Sürtünme momenti ' M_{st} ' ise, devir sayısının bilindiği boşta çalışma şartlarındaki kayıplardan kolayca bulunur (C.1). Yavaşlama süresince geçerli olan hareket denklemi (C.2) ile verilmektedir. Burada hız değişimi $\frac{d\omega}{dt}$ değerinin deney yoluyla bulunacak değerini, devir sayısının ilk düşüş anlarında almak daha doğru olur. Çünkü, sürtünme momenti yavaşlama süresince fazla değişmese de, devir sayısının ilk düşüş anları için daha kesin bilinir. Bu yüzden eğrinin $t=0$ noktasına çizilen teğetin eğimi $\frac{d\omega}{dt}$ olarak alınır.

$$M_{st} = \frac{P_{st}}{\omega_0} \quad (C.1)$$

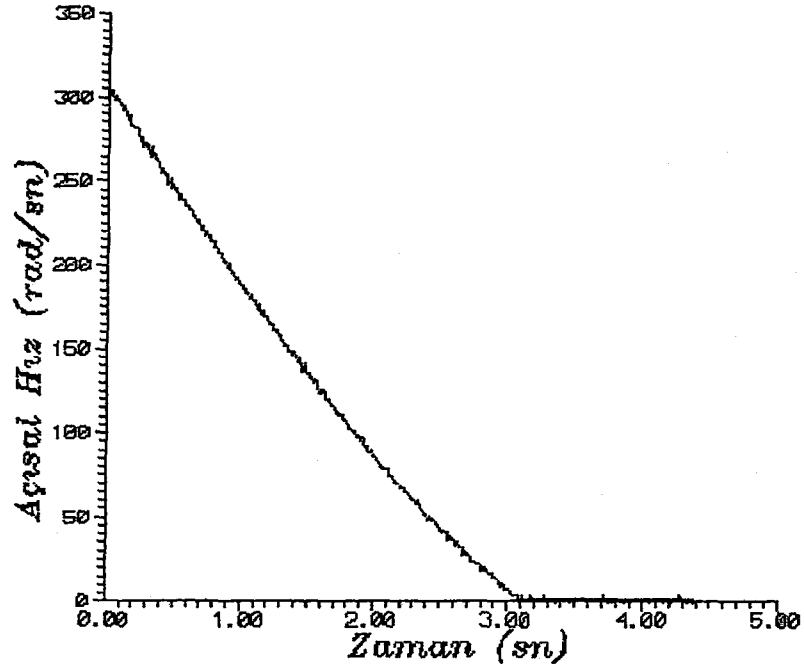
$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{st} \quad (C.2)$$

Deney motorunun miline, boşta çalışma ve kısa deneylerinde tahrik makinası olarak, motor çalışırken de hız ölçmek için serbest uyartımlı bir d.a. motoru bağlanmıştır. Bu bağıntılara uygun olarak iki motorun toplam atalet momenti

$$J=0.0072 \text{ kg.m}^2$$

olarak hesaplanmıştır. Ölçülen yavaşlama eğrisi Şekil C.1 'de verilmiştir.

Dinamik davranış ölçümleri için yapılan deneylerde, stator üç faz beslemesi bir kontaktör (K1) üzerinden motora girilmiştir. Eşdeğer devredeki S1 ve S2 ile gösterilen senkronlama anahtarları ise başka bir kontaktörün (K2) normalde kapalı kontakları ile gerçekleştirilmiştir. Akım bilgileri seri bağlanan küçük değerli dirençler üzerinden, hız bilgisi ise motor miline bağlı serbest uyartımlı bir d.a. motorunun endüvi gerilimi üzerinden alınmıştır.

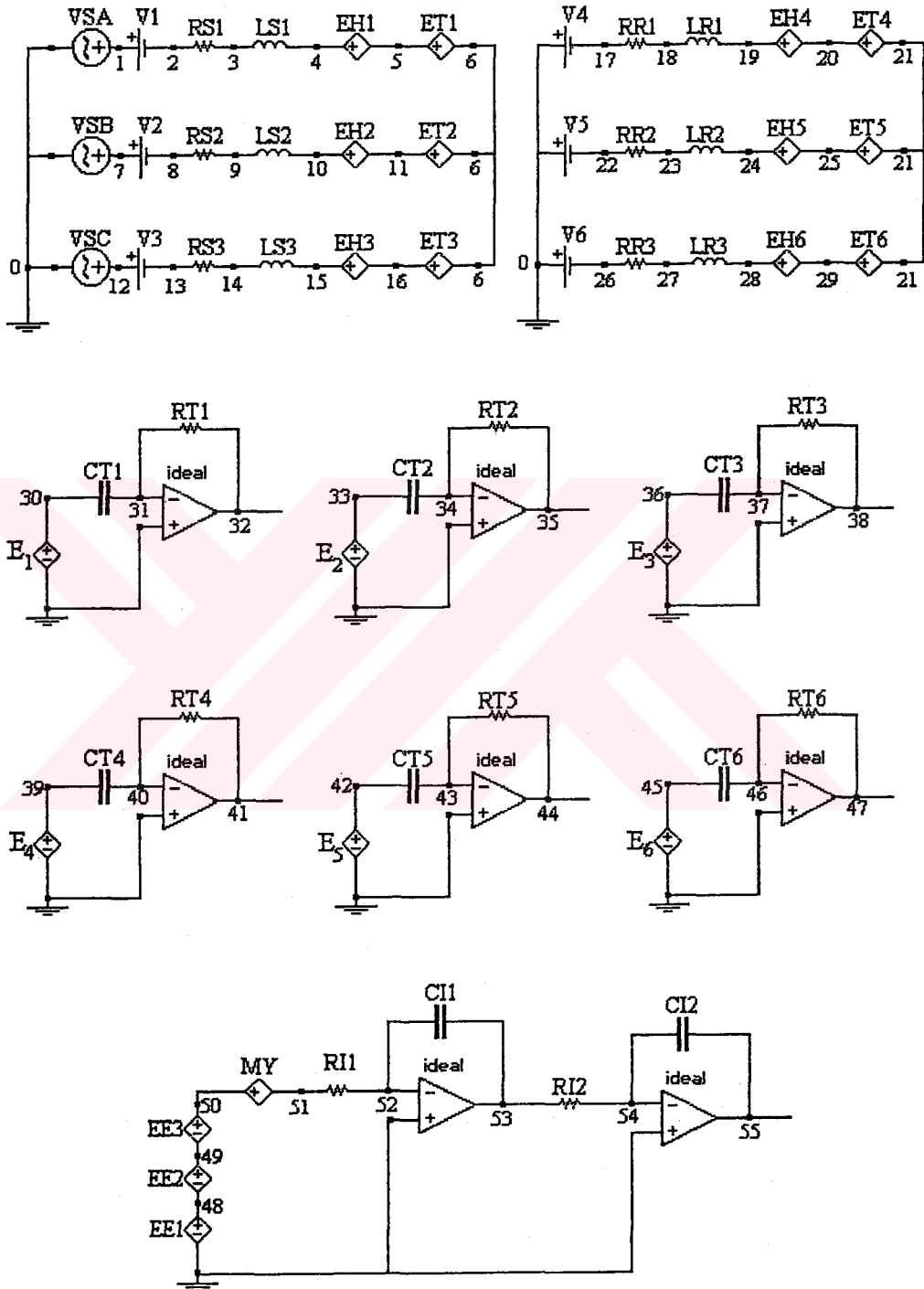


Şekil C.1 Deney motoruna ait ölçülen yavaşlama eğrisi

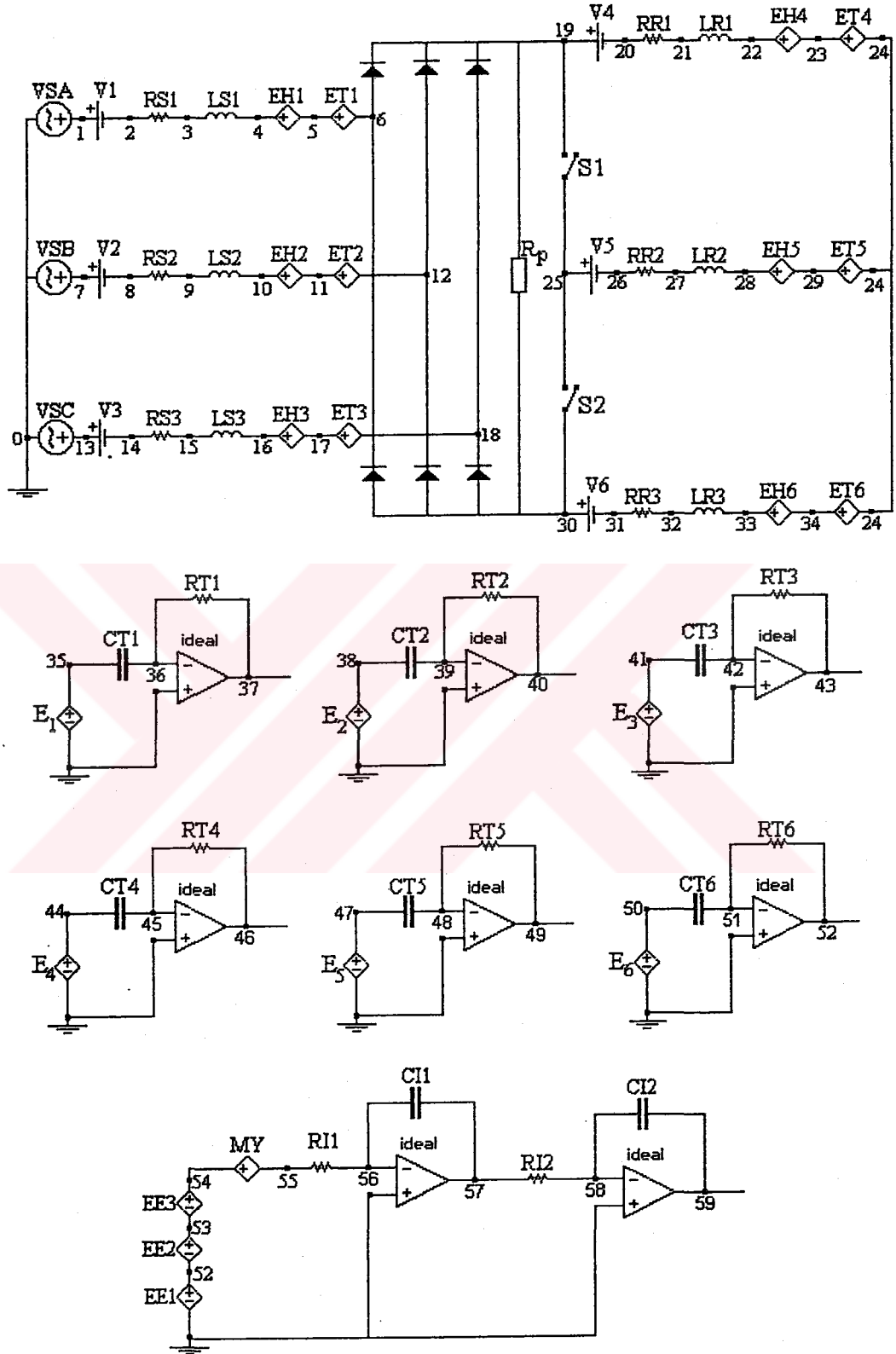
K1 kontaktörü enerjilendirilip asenkron hızlanma için akım ve hız bilgileri; asenkron çalışma esnasında K2 enerjilendirilip senkronlama anındaki stator ve rotor akım bilgileri sayısal osiloskop yardımıyla kaydedildi. Kaydedilen bilgiler, osiloskobun seri çıkışı ile kişisel bir bilgisayarın seri girişinin belirli pin bağlantısı yapılarak bir yazılım yardımıyla veri dosyalarına dönüştürüldü. Bu dosyalardan bir Basic programı ile zaman ve gerilim ölçekleri de okunup gereken katsayılarla oranlayarak yeni veri dosyaları türetilirdi. Grapher programı yardımıyla bu dosyalardan zamana karşılık hızın veya akımların değişimi çizdirildi.

EK-D

**PSPICE BENZETİMİNDE KULLANILAN DEVRELER VE KOMUT
LİSTELERİ**



Şekil D.1 Asenkron motor PSPICE benzetiminde kullanılan devreler, elemanların isimleri ve düğüm numaraları ile birlikte



Şekil D.2 Seri uyarımlı senkron motor PSPICE benzetiminde kullanılan devreler, elemanların isimleri ve düğüm numaraları ile birlikte

ASENKRON MAKİNA PSPICE BENZETİMİNDE KULLANILAN KOMUT LİSTESİ

```

.PARAM M=0.449044,J=0.0072,MJ={M/J}
.PARAM RS=5,LS=0.650458,LR=0.72073,RR=4.85
.PARAM TM=1.225,Y=2.094395,P=1,B=0.00292
VSA 1 0 SIN(0 311.127V 50HZ 0 0)
V1 1 2 DC 0V
RS1 2 3 {RS}
LS1 3 4 {LS}
EH1 4 5 VALUE={-M*V(53)*(SIN(V(56))*I(V4)+SIN(V(56)+Y)*I(V5)+SIN(V(56)-Y)*I(V6))}
ET1 5 6 VALUE={M*(COS(V(56))*V(41)+COS(V(56)+Y)*V(44)+COS(V(56)-Y)*V(47))}
VSB 7 0 SIN(0 311.127V 50HZ 0 0 120DEG)
V2 7 8 DC 0V
RS2 8 9 {RS}
LS2 9 10 {LS}
EH2 10 11 VALUE={-M*V(53)*(SIN(V(56)-Y)*I(V4)+SIN(V(56))*I(V5)+SIN(V(56)+Y)*I(V6))}
ET2 11 6 VALUE={M*(COS(V(56)-Y)*V(41)+COS(V(56))*V(44)+COS(V(56)+Y)*V(47))}
VSC 12 0 SIN(0 311.127V 50HZ 0 0 240deg)
V3 12 13 DC 0V
RS3 13 14 {RS}
LS3 14 15 {LS}
EH3 15 16 VALUE={-M*V(53)*(SIN(V(56)+Y)*I(V4)+SIN(V(56)-Y)*I(V5)+SIN(V(56))*I(V6))}
ET3 16 6 VALUE={M*(COS(V(56)+Y)*V(41)+COS(V(56)-Y)*V(44)+COS(V(56))*V(47))}
V4 0 17 DC 0V
RR1 17 18 {RR}
LR1 18 19 {LR}
EH4 19 20 VALUE={-M*(V(53))*(SIN(V(56))*I(V1)+SIN(V(56)-Y)*I(V2)+SIN(V(56)+Y)*I(V3))}
ET4 20 21 VALUE={M*(COS(V(56))*V(32)+COS(V(56)-Y)*V(35)+COS(V(56)+Y)*V(38))}
V5 0 22 DC 0V
RR2 22 23 {RR}
LR2 23 24 {LR}
EH5 24 25 VALUE={-M*(V(53))*(SIN(V(56)+Y)*I(V1)+SIN(V(56))*I(V2)+SIN(V(56)-Y)*I(V3))}
ET5 25 21 VALUE={M*(COS(V(56)+Y)*V(32)+COS(V(56))*V(35)+COS(V(56)-Y)*V(38))}
V6 0 26 DC 0V
RR3 26 27 {RR}
LR3 27 28 {LR}
EH6 28 29 VALUE={-M*(V(53))*(SIN(V(56)-Y)*I(V1)+SIN(V(56)+Y)*I(V2)+SIN(V(56))*I(V3))}
ET6 29 21 VALUE={M*(COS(V(56)-Y)*V(32)+COS(V(56)+Y)*V(35)+COS(V(56))*V(38))}
E1 0 30 VALUE={I(V1)}

```

CT1 30 31 1UF
 RT1 31 32 1MEG
 XA1 31 0 32 0 OPAMP-DC
 E2 0 33 VALUE={I(V2)}
 CT2 33 34 1UF
 RT2 34 35 1MEG
 XA2 34 0 35 0 OPAMP-DC
 E3 0 36 VALUE={I(V3)}
 CT3 36 37 1UF
 RT3 37 38 1MEG
 XA3 37 0 38 0 OPAMP-DC
 E4 0 39 VALUE={I(V4)}
 CT4 39 40 1UF
 RT4 40 41 1MEG
 XA4 40 0 41 0 OPAMP-DC
 E5 0 42 VALUE={I(V5)}
 CT5 42 43 1UF
 RT5 43 44 1MEG
 XA5 43 0 44 0 OPAMP-DC
 E6 0 45 VALUE={I(V6)}
 CT6 45 46 1UF
 RT6 46 47 1MEG
 XA6 46 0 47 0 OPAMP-DC
 EE1 48 0 VALUE={P*MJ*(I(V4)*I(V1)+I(V5)*I(V2)+I(V6)*I(V3))*SIN(V(56))}
 EE2 49 48 VALUE={P*MJ*(I(V4)*I(V2)+I(V5)*I(V3)+I(V6)*I(V1))*SIN(V(56)-Y)}
 EE3 50 49 VALUE={P*MJ*(I(V4)*I(V3)+I(V5)*I(V1)+I(V6)*I(V2))*SIN(V(56)+Y)}
 EMJ 50 51 VALUE={B*V(53)/J} ; TM/J
 RI1 51 52 1MEG
 CI1 52 53 1UF ; V(53)=W ACISAL HIZ
 RI2 53 54 1MEG
 CI2 54 55 1UF
 XA7 52 0 53 0 OPAMP-DC
 XA8 54 0 55 0 OPAMP-DC
 ESS 56 0 VALUE={-V(55)*P} ; V(56)=TETA
 RSS 0 56 1MEG
 .SUBCKT OPAMP-DC 1 2 3 4
 RIN 1 2 2MEG
 RO 5 3 75

```
EA 5 4 2 1 2E+5  
.ENDS OPAMP-DC  
.TRAN 10MS 1S 0 .1MS UIC  
.PROBE I(V1),I(V4),V(50),V(53)  
.END
```



SERI UYARTIMLI SENKRON MOTOR, PSPICE BENZETİMİ

.PARAM M=0.449044,J=0.0072,MJ={M/J}

.PARAM RS=5,LS=0.650458,LR=0.72073,RR=4.62

.PARAM Y=2.094395,P=1,B=0.00292,RPAR=18

.STEP PARAM RPAR LIST 18 37 60 100 10G * Rotordaki Paralel Direnç Parametrik Analize Giriyor

* ————STATOR 3 FAZ MODELİ———

VSA 1 0 SIN(0 311.127V 50HZ)

V1 1 2 DC 0V

RS1 2 3 {RS}

LS1 3 4 {LS}

EH1 4 5 VALUE={-M*V(58)*(SIN(-V(60))*I(V4)+SIN(-V(60)+Y)*I(V5)+SIN(-V(60)-Y)*I(V6))}

ET1 5 6 VALUE={M*(COS(-V(60))*V(46)+COS(-V(60)+Y)*V(49)+COS(-V(60)-Y)*V(52))}

VSB 7 0 SIN(0 311.127V 50HZ 0 0 120DEG)

V2 7 8 DC 0V

RS2 8 9 {RS}

LS2 9 10 {LS}

EH2 10 11 VALUE={-M*V(58)*(SIN(-V(60)-Y)*I(V4)+SIN(-V(60))*I(V5)+SIN(-V(60)+Y)*I(V6))}

ET2 11 12 VALUE={M*(COS(-V(60)-Y)*V(46)+COS(-V(60))*V(49)+COS(-V(60)+Y)*V(52))}

VSC 13 0 SIN(0 311.127V 50HZ 0 0 240DEG)

V3 13 14 DC 0V

RS3 14 15 {RS}

LS3 15 16 {LS}

EH3 16 17 VALUE={-M*V(58)*(SIN(-V(60)+Y)*I(V4)+SIN(-V(60)-Y)*I(V5)+SIN(-V(60))*I(V6))}

ET3 17 18 VALUE={M*(COS(-V(60)+Y)*V(46)+COS(-V(60)-Y)*V(49)+COS(-V(60))*V(52))}

* ————KOPRU DOGRULTUCU ————

D1 6 19 DMOD

D3 12 19 DMOD

D5 18 19 DMOD

D2 30 18 DMOD

D4 30 6 DMOD

D6 30 12 DMOD

S1 19 25 61 0 SMOD1

S2 25 30 62 0 SMOD2

RPAR 19 30 {RPAR}

* ———— ROTOR MODELİ ————

V4 19 20 DC 0V

RR1 20 21 {RR}; +1 AKIM TMLI ME DRENC

LR1 21 22 {LR}

EH4 22 23 VALUE={-M*(V(58))*(SIN(-V(60))*I(V1)+SIN(-V(60)-Y)*I(V2)+SIN(-V(60)+Y)*I(V3))}
 ET4 23 24 VALUE={M*(COS(-V(60))*V(37)+COS(-V(60)-Y)*V(40)+COS(-V(60)+Y)*V(43))}
 V5 25 26 DC 0V
 RR2 26 27 {RR}
 LR2 27 28 {LR}
 EH5 28 29 VALUE={-M*(V(58))*(SIN(-V(60)+Y)*I(V1)+SIN(-V(60))*I(V2)+SIN(-V(60)-Y)*I(V3))}
 ET5 29 24 VALUE={M*(COS(-V(60)+Y)*V(37)+COS(-V(60))*V(40)+COS(-V(60)-Y)*V(43))}
 V6 30 31 DC 0V
 RR3 31 32 {RR}
 LR3 32 33 {LR}
 EH6 33 34 VALUE={-M*(V(58))*(SIN(-V(60)-Y)*I(V1)+SIN(-V(60)+Y)*I(V2)+SIN(-V(60))*I(V3))}
 ET6 34 24 VALUE={M*(COS(-V(60)-Y)*V(37)+COS(-V(60)+Y)*V(40)+COS(-V(60))*V(43))}
 E1 0 35 VALUE={I(V1)}
 CT1 35 36 1UF IC=0V
 RT1 36 37 1MEG
 XA1 36 0 37 0 OPAMP-DC
 E2 0 38 VALUE={I(V2)}
 CT2 38 39 1UF IC=0V
 RT2 39 40 1MEG
 XA2 39 0 40 0 OPAMP-DC
 E3 0 41 VALUE={I(V3)}
 CT3 41 42 1UF IC=0V
 RT3 42 43 1MEG
 XA3 42 0 43 0 OPAMP-DC
 E4 0 44 VALUE={I(V4)}
 CT4 44 45 1UF IC=0V
 RT4 45 46 1MEG
 XA4 45 0 46 0 OPAMP-DC
 E5 0 47 VALUE={I(V5)}
 CT5 47 48 1UF IC=0V
 RT5 48 49 1MEG
 XA5 48 0 49 0 OPAMP-DC
 E6 0 50 VALUE={I(V6)}
 CT6 50 51 1UF IC=0V
 RT6 51 52 1MEG
 XA6 51 0 52 0 OPAMP-DC
 EE1 53 0 VALUE={P*MJ*(I(V4)*I(V1)+I(V5)*I(V2)+I(V6)*I(V3))*SIN(-V(60))}
 EE2 54 53 VALUE={P*MJ*(I(V4)*I(V2)+I(V5)*I(V3)+I(V6)*I(V1))*SIN(-V(60)-Y)}

```

EE3 55 54 VALUE={P*MJ*(I(V4)*I(V3)+I(V5)*I(V1)+I(V6)*I(V2))*SIN(-V(60)+Y)}
EMJ 55 56 VALUE={-B*V(58)/J}
RI1 56 57 1MEG
CI1 57 58 1UF IC=0V ; V(58)=W ACISAL HIZ
RI2 58 59 1MEG
CI2 59 60 1UF IC=0V
XA7 57 0 58 0 OPAMP-DC
XA8 59 0 60 0 OPAMP-DC ; -V(60) TETA
VP 61 0 PULSE(0 10 .9S 5MS 90MS 1 1)
RSONP 61 0 10G
VP1 62 0 PULSE(0 10 .9S 5MS 90MS 1 1)
RSONP1 62 0 10G
.SUBCKT OPAMP-DC 1 2 3 4
RIN 1 2 100MEG
RO 5 3 1u
EA 5 4 2 1 50E+8
.ENDS OPAMP-DC
.MODEL DMOD D(IS=2.22E-15 BV=1200V IBV=13E-3 CJO=2PF TT=1US)
.MODEL SMOD1 VSWITCH(ROFF=.001M VON=10V VOFF=0.0)
.MODEL SMOD2 VSWITCH(ROFF=.001M VON=10V VOFF=0.0)
.TRAN 2S 3S .5 .15MS UIC
.PROBE I(V1),I(V4),V(58),V(55)
.OPTIONS ABSTOL=1.0M RELTOL=0.1 VNTOL=1.0M ITL4=50
.END

```