

29022

T.C.  
FIRAT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SERİ UYARTIMLI BİR SENKRON MOTORUN TASARIMINA  
YÖNELİK BİLGİSAYAR BENZETİM YÖNTEMİ**

Mehmet ÖZDEMİR

**DOKTORA TEZİ**  
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI

1993  
ELAZIĞ

T.C.  
FIRAT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SERİ UYARTIMLI BİR SENKRON MOTORUN TASARIMINA  
YÖNELİK BİLGİSAYAR BENZETİMİ**

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU  
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

Mehmet ÖZDEMİR

**DOKTORA TEZİ**

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI**

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

(İmza)

(İmza)

(İmza)

**ÖZET**

Doktora Tezi

**SERİ UYARTIMLI BİR SENKRON MOTORUN TASARIMINA  
YÖNELİK BİLGİSAYAR BENZETİMİ**

Mehmet ÖZDEMİR

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

1993, Sayfa: 136

Bilezikli asenkron motorların rotor sargı uçlarının bilezik ve fırçalar yardımı ile dışarıya alınması, sürücü düzenek uygulamalarında kolaylıklar getirebilmektedir. Bu uygulamalardan bir tanesinde bilezikli asenkron motorun senkronlanan asenkron motor olarak çalıştırılmasıdır. Araştırmacılar, senkronlanan bilezikli asenkron motorun tasarım özellikleri ve sürekli durum davranışlarını inceleyebilmek için değişik yaklaşımlar kullanmışlardır. Bu çalışmada ise, seri uyartımlı olarak senkronlanan bilezikli asenkron motorun tasarımının temellerini oluşturmak üzere, sürekli ve dinamik davranışını incelemek için köprü doğrultucu ile birlikte kapsamlı bir model geliştirilmeyi amaçlamıştır.

Dinamik davranış için, asenkron makinanın bilinen faz değişkenleri modeli denklemleri senkronlanan bilezikli asenkron motor ile köprü

doğrultucu kavramlarını içerecek şekilde yeniden biçimlendirilmiş ve magnetik doymalı yaklaşım bu çalışmada uygulanmıştır. Ayrıca, bilezikli asenkron makinanın endüktanslarını hesaplamak için gerekli bağıntılar verilmiştir. Dinamik davranış modelinin katı diferansiyel denklemleri, geri diferansiyel formülüne dayanan "Gear algoritması yöntemi" ile çözülmüştür.

Çalışmada temel kavramlardaki yeni biçimlendirmelerin doğrulaması gerçekleştirilmiştir. Ayrıca geliştirilmiş olan dinamik davranış yazılımının tanıtımı da yapılmıştır.

Yaklaşımların doğruluğunun sınanmasına ilişkin deneysel çalışmalara yer verilmiştir. Elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve konu üzerinde daha ileri aşamadaki çalışmalara yönelik öneriler geliştirilmiştir. Tezin kapsamı, seri uyartımlı bir senkron motor tasarımına yönelik bilgisayarla benzetim altyapısını oluşturmaktadır.

**ABSTRACT**

Ph.D.Thesis

**A COMPUTER SIMULATION AIMED TOWARDS THE DESIGN  
OF A SERIES EXCITED SYNCHRONOUS MOTOR**

Mehmet ÖZDEMİR

Fırat University

Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Electrical and Electronics Engineering

1993, Page:136

Slip ring connections of wound rotor induction machines can offer facilities in electrical drive applications. One of these applications is the synchronous induction motor connection. Researchers have employed different approaches for the design and study of these synchronous induction motors. This study aims at developing a comprehensive model for the steady-state and dynamic behaviour of a series excited slip ring synchronous induction motor, with the ultimate goal of providing a basis for design.

For the dynamics behaviour, the known approach of phase variable model for the induction machine has been reformed to include the series excitation phenomena along with the diode rectifier bridge and an approach

has been adopted to take the saturation into account. On the other hand, the essential relations for calculation of the machine inductances have been provided. The stiff differential equations of the dynamic performance model have been solved by a computer package based on a Gear Algorithm.

The study has undertaken to validate the newly adopted model experimentally. The software developed for the simulation has been described.

Experimental work is included for testing of the validity of the approach. The results have been assessed and proposals for further study have been put forward. The scope and contents of the thesis make up a computer simulation foundation aimed towards the design of a series excited synchronous motor.

## TEŐEKKÖR

Bu tez alıőması ile ilgili temel bilgileri veren, yönlendiren, çalışma süresince ilgi ve yardımlarını esirgemeyen tez yöneticim, Sayın Doç. Dr. Güven nbilgine 'e yapmıő olduğu her türlü yardım ve katkılarından dolayı en içten teőekkürlerimi sunarım.

Çalıőmalarım süresince bana büyük destek sağlayan Sayın Mehmet Cebeciye 'e, Sayın Ahmet Aslan 'a ve Bölümdeki diğer görev arkadaőlarıma sonsuz teőekkr ve Őükranlarımı sunarım.

Trabzondaki çalıőmalarım sırasında mesleki ve Őahsi konularda, değerli arkadaőlarım Arő.Gör. Abdullah Sezgin, Arő.Gör.Dr. Hatice Sezgin, Arő.Gör. İrfan Şenlik ve Sayın Serap nbilgin'in çok yakın ilgi ve yardımlarını daima minnetle anacağım.

Benim bu çalıőmayı yapabilmem için gerekli bilgi seviyesine ıkmamda bana çok Őeyler öğreten ve beni eğiten tüm öğretmenlerime de yürekte teőekkr ederek sağgılarımı sunarım.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	II
<b>ABSTRACT</b> .....	IV
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	VI
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	VII
<b>SİMGELER</b> .....	XII
<b>ŞEKİLLER</b> .....	XY
<b>1. GİRİŞ</b> .....	1
1.1. Bilezikli Asenkron Motorlar .....	2
1.2. Senkron Makinalar .....	3
1.2.1. Yuvarlak Kutuplu Senkron Makinalar .....	3
1.2.2. Çıkık Kutuplu Senkron Makinalar .....	4
1.2.3. Sürekli Mıknatıslı Senkron Makinalar .....	4
1.2.4. Uyartım Düzenegi Türleri .....	5
1.2.5. Kendinden Uyartımlı Şemalar .....	6
1.3. Senkronlanan Bilezikli Asenkron Motor .....	10
1.4. Senkronlanan Bilezikli Asenkron Motor İçin Değişik Rotor Bağlantı Şekilleri .....	11
1.5. Çalışmanın Amacı .....	14
<b>2. SERİ UYARTIMLA SENKRONLANAN BİLEZİKLI ASENKRON MOTORUN SÜREKLİ DURUM MODELİ</b> .....	15
2.1. Giriş .....	15
2.2. Doğrultucu İle Seri Uyartımlı Senkron Motorun Birlikte	



Gösterimi .....	16
2.3. Doymalı Magnetik Devrenin Analizi .....	21
2.4. Doğrusal Magnetik Devrenin Analizi .....	23
2.5. Maksimum Momentin Elde Edilmesi .....	25
2.6. Sürekli Durum İncelemesi İçin Bilgisayar Programı .....	27
2.6.1. Açıklama .....	27
2.6.2. Bilgisayar Programı .....	27
2.6.2.1. Anı Programı .....	28
2.6.3. Örnek Benzetimler .....	30
2.6.4. Değerlendirme .....	38
<b>3. ASENKRON MAKİNALARIN DİNAMİK DAVRANIŞI İÇİN FAZ DEĞİŞKENLERİ MODELİ</b> .....	<b>39</b>
3.1. Giriş .....	39
3.2. Dinamik Davranış İncelemesinin Kapsamı .....	39
3.3. Dinamik Davranışta Modelleme Yaklaşımları .....	40
3.4. Bilezikli Asenkron Makina Denklemlerinin Faz Değişkenleri İle Yazılması .....	41
3.5. Diferansiyel Denklem Sisteminin Elde Edilmesi .....	46
3.6. Bilgisayar Programı .....	48
3.7. Yöntemin Sınanması .....	48
<b>4. TAM DALGA KÖPRÜ DOĞRULTUCU İLE SERİ UYARTIMLI SENKRONLANAN BİLEZİKLİ ASENKRON MOTORUN DİNAMİK MODELİ</b> .....	<b>55</b>
4.1. Giriş .....	55
4.2. Köprü Doğrultucu Devresinin Bilgisayarda Çözülmesi	

İçin Benzetim Yöntemi .....	56
4.3. Diyotların Modellenmesi .....	57
4.4. Senkronlanan Asenkron Motor ile Köprü Doğrultucunun Birlikte Benzetimi .....	59
4.3.1. S Anahtarı Kapalıyken Köprü Doğrultucunun Analizi .....	59
4.4.2. Statora İlişkin Denklemler .....	62
4.4.3. Rotora İlişkin Denklemler .....	66
4.4.4. Durum Denklemleri .....	68
4.4.5. S Anahtarı Açık İken Köprü Doğrultucu Denklemlerinin Elde Edilmesi .....	70
4.4.6. S Anahtarı Açık İken Statora İlişkin Denklemler .....	72
4.3.6. S Anahtarı Açık İken Rotora İlişkin Denklemler .....	73
4.3.7. S Anahtarı Açık İken Durum Denklemleri .....	75
4.4. Faz Değişkenleri Modelinde Magnetik Doyma Sorunu .....	76
4.4.1. Boşta Çalışma Deneyinin İrdelenmesi .....	79
<b>5. ASENKRON MAKİNANIN ENDÜKTANSLARININ BELİRLENMESİ</b>	
5.1. Giriş .....	81
5.2. Endüktansların Belirlenmesi Yöntemi .....	81
5.2. Stator Endüktansları .....	82
5.3. Rotor Endüktansları .....	84
5.4. Rotor-Stator Karşıt Endüktansları .....	86
<b>6. DİNAMİK DAVRANIŞ VE BİLGİSAYAR PROGRAMI</b> .....	88
6.1. Giriş .....	88
6.2. Yaklaşımın Temel İlkeleri .....	88
6.3. Bilgisayar Programı .....	89

6.3.1. Simy Alt Programı .....	90
6.3.2. Fex Alt Programı .....	91
6.3.3. Jex Alt Programı .....	91
6.3.4. Sendük Alt Programı .....	92
6.3.5. Rendük Alt Programı .....	92
6.3.6. Kendük Alt Programı .....	92
<b>7. BİLGİSAYAR MODELİNİN UYGULAMASI</b>	
7.1. Giriş .....	95
7.2. Deney Donanımı .....	95
7.3. Doğrudan Yol Verme .....	96
7.4. Senkronlamaya Geçiş .....	99
7.4.1. Statora Seri Bağlı Oto Transformatör İle Senkronlamaya Geçiş .....	107
<b>8. SONUÇ VE ÖNERİLER</b> .....	110
8.1. Giriş .....	110
8.2. Çalışmanın Belirgin Özellikleri .....	112
8.3. Sonuçların Değerlendirilmesi .....	113
8.4. Modelin Kullanım Alanları .....	114
8.5. Öneriler .....	114
<b>KAYNAKLAR</b> .....	115
<b>EK A. RUNGA-KUTTA-MERSON SAYISAL ÇÖZÜMLEME YÖNTEMİ</b> .....	120
<b>EK B. DENEYLERDE KULLANILAN BİLEZİKLİ ASENKRON MAKİNANIN TANITIMI</b> .....	122

EK C. BİLEZİKLİ ASENKRON MAKİNA DA SÜRTÜNME KAYIPLARI VE EYLEMSİZLİ MOMENTİNİN BULUNMASI .....	123
EK D. KESİRLİ EĞRİ UYDURMA .....	126
EK E. ENDÜKTANS ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ .....	131
E.1. Stator Ortak ve Özendüktansının Ölçümü .....	131
E.2. Stator-Rotor Ortak Endüktansının Ölçümü .....	133
E.3. Dönüştürme Oranın Ölçülmesi .....	134
E.4. Bilgisayardan Elde Edilen Endüktans Değerleri .....	134
EK F. YAPILAN DENEYLERİN BAĞLANTI ŞEMASI .....	136



## SİMGELER

$a = e^{j2\pi/3}$	: 120° Çevirme operatörü.
$d$	: Stator bobin yanları arasındaki elektriksel açı.
$d_1$	: Rotor bobin yanları arasındaki elektriksel açı.
$E$	: Hava aralığında endüklenen gerilim (V).
$i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$	: Stator sargıları akımları (A).
$i_{ra}, i_{rb}, i_{rc}$	: Rotor sargıları akımları (A).
$I_e$	: Rotor akımının stator eşdeğeri (A).
$i_m$	: Miknatıslama akımı (A).
$j$	: Eylemsizlik momenti ( $Wsn^3$ ).
$k$	: Stator-rotor sarım oranı.
$k_{ws}$	: Stator sarım katsayısı.
$k_{wr}$	: Rotor sarım katsayısı.
$k_d$	: Stator sargıları dağılım katsayısı.
$k_{d1}$	: Rotor sargıları dağılım katsayısı.
$k_s$	: Stator kırışlenme katsayısı.
$L$	: Stator uzunluğu (m).
$L_r$	: Rotor senkron öz endüktansı (H).
$L_s$	: Stator senkron öz endüktansı (H).
$L_{ra}, L_{rb}, L_{rc}$	: Rotor sargıları öz endüktansları (H).
$L_{sa}, L_{sb}, L_{sc}$	: Stator sargıları öz endüktansları (H).
$M_{sr}$	: Ortak endüktans (H).
$M_{s,ab}, M_{s,bc}, M_{s,ac}$	: Stator sargıları arasındaki ortak endüktanslar (H).

$M_{r,ab}, M_{r,bc}, M_{r,ac}$	: Rotor sargıları arasındaki ortak endüktanslar (H).
$N_r$	: Rotor faz sargısı sarım sayısı.
$N_s$	: Stator faz sargısı sarım sayısı
$P_g$	: Giriş gücü (W).
$p$	: Kutup çifti sayısı.
$R_{ra}, R_{rb}, R_{rc}$	: Rotor faz sargı dirençleri ( $\Omega$ ).
$R_{sa}, R_{sb}, R_{sc}$	: Stator faz sargı dirençleri ( $\Omega$ ).
$R_F$	: Diyotun iletim direnci ( $\Omega$ ).
$R_T$	: Diyotun tıkama direnci ( $\Omega$ ).
$R_b$	: Doğrultucu köprü direnci ( $\Omega$ ).
$X_b$	: Doğrultucu köprü reaktansı ( $\Omega$ ).
$X_{s\sigma}$	: Stator kaçak reaktansı ( $\Omega$ ).
$R_D$	: Rotor devresinin toplam direnci ( $\Omega$ ).
$q_s$	: Statorda faz ve kutup başına oluk sayısı
$q_r$	: Rotorda faz ve kutup başına oluk sayısı
$t, T$	: Zaman
$T_d$	: Döndürme momenti (Nm.).
$T_y$	: Yük momenti (Nm.).
$U_{sa}, U_{sb}, U_{sc}$	: Stator faz gerilimleri (V).
$U_{ra}, U_{rb}, U_{rc}$	: Rotor faz gerilimleri (V).
$V_{do}$	: Diyot eşik gerilimi (V).
$X_c$	: Aktarım reaktansı ( $\Omega$ ).
$Z_T$	: Senkron motor ile doğrultucunun toplam empedansı ( $\Omega$ ).
$\omega_m$	: Rotor açısal hızı (Rad/sn).

$\Psi_{sa}, \Psi_{sb}, \Psi_{sc}$	: Stator sargı akı-sarımları (wb).
$\Psi_{ra}, \Psi_{rb}, \Psi_{rc}$	: Rotor sargı akı-sarımları (wb).
$\phi$	: Güç katsayısı
$\theta$	: Rotor konum açısı (Rad.).
$\mu_0$	: Havanın magnetik geçirgenliği (h/m).
$\tau_p$	: Kutup adımı (m).
$\delta^*$	: Hava aralığı (m).
$\delta_e$	: Besleme gerilimine göre yük açısı
$\delta_i$	: Giriş akımına göre yük açısı

## ŞEKİLLER VE TABLOLAR

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 : D.C generatör uyarımlı senkron motor .....	5
Şekil 1.2 : Doğrultucu ile uyarılan senkron motor .....	6
Şekil 1.3 : Senkron motorlarda kullanılan kendinden uyarım şeması..	7
Şekil 1.4 : Rotor ve statora ilave sargı şeması .....	8
Şekil 1.5 : (a) Yuvarlak kutuplu senkron makinada rotora iki diyot bağlantı şeması (b) Çıkık kutuplu senkron makinada rotora tek diyot bağlantı şeması .....	9
Şekil 1.6 : Fırçasız senkron makinada rotora iki diyot bağlantı şeması	9
Şekil 1.7 : Rotor sargısı için Danielson bağlantısı .....	11
Şekil 1.8 : Senkron çalışma için rotor faz sargılarının seri bağlantı şeması. (a) Yol verme (b) senkron çalışma .....	12
Şekil 1.9 : Senkron çalışma için kullanılacak diğer rotor sargı bağlantı şekilleri. (a) Bir faz sargısı açık devre (b) Çift yıldız (c) Üçüncü fazı çift sargılı (d) Üçüncü fazı çift sargılı...	16
Şekil 2.1 : Seri uyarımla senkron motorun köprü doğrultucuyla birlikte bağlantı şeması .....	16
Şekil 2.2 : Seri uyarımla senkron motor ile köprü doğrultucunun birlikte gösterimi .....	17
Şekil 2.3 : Seri uyarımlı senkron motor için bir faz eşdeğer devresi	17
Şekil 2.4 : Seri uyarımlı senkron motorun köprü doğrultucu ile birlikte fazör diyagramı .....	18
Şekil 2.5 : (2.6) denkleminin fazör diyagramı .....	19



Şekil 2.6 : k 'nın değişik değerleri için akım yer eğrisi .....	20
Şekil 2.7 : İdeal motor için moment-yük açısı değişimi .....	20
Şekil 2.8 : Köprü doğrultucunun a.c 'deki temel bileşen empedansı.....	25
Şekil 2.9 : Seri uyartımlı senkron motorun sürekli durum modeli akış çizelgesi .....	29
Şekil 2.10 : Senkron moment-yük açısı eğrisinin değişimi.....	30
Şekil 2.11 : Giriş gücü-yük açısı eğrisinin değişimi.....	31
Şekil 2.12 : Güç katsayısı-yük açısı eğrisinin değişimi.....	31
Şekil 2.13 : Giriş akımı-yük açısı eğrisinin değişimi.....	32
Şekil 2.14 : Giriş gücü-senkron moment eğrisinin değişimi.....	32
Şekil 2.15 : Senkron moment-yük açısı eğrisinin değişimi.....	33
Şekil 2.16 : Giriş gücü-yük açısı eğrisinin değişimi.....	33
Şekil 2.17 : Güç katsayısı-yük açısı eğrisinin değişimi.....	34
Şekil 2.18 : Giriş akımı-yük açısı eğrisinin değişimi.....	34
Şekil 2.19 : Giriş gücü-senkron moment eğrisinin değişimi.....	35
Şekil 2.20 : Senkron moment-yük açısı eğrisinin değişimi.....	35
Şekil 2.21 : Giriş gücü-yük açısı eğrisinin değişimi.....	36
Şekil 2.22 : Güç katsayısı-yük açısı eğrisinin değişimi.....	36
Şekil 2.23 : Giriş akımı-yük açısı eğrisinin değişimi.....	37
Şekil 2.24 : Giriş gücü-senkron moment eğrisinin değişimi.....	37
Şekil 3.1 : Bilezikli asenkron makinanın sembolik olarak gösterimi...	42
Şekil 3.2 : Bilezikli asenkron makinanın faz değişkenleri yaklaşımı akış çizelgesi .....	49
Şekil 3.3 : Stator a fazı akımının zamana göre değişimi.....	50
Şekil 3.4 : Rotor a fazı akımının zamana göre değişimi.....	50
Şekil 3.5 : Momentin zamana göre değişimi.....	51
Şekil 3.6 : Hızın zamana göre değişimi .....	51
Şekil 3.7 : Moment - hız eğrisinin değişimi .....	51

Şekil 3.8 : Stator a fazı akımının zamana göre değişimi .....	52
Şekil 3.9 : Rotor a fazı akımının zamana göre değişimi .....	52
Şekil 3.10 : Momentin zamana göre değişimi .....	53
Şekil 3.11 : Hızın zamana göre değişimi .....	53
Şekil 3.12 : Moment - hız eğrisinin değişimi .....	54
Şekil 4.1 : Stator, köprü doğrultucu ve rotordan oluşan dinamik model.	55
Şekil 4.2 : Diyot v-i öz eğrisi .....	57
Şekil 4.3 : Doğrusallaştırma yoluyla diyot yaklaşık öz eğrisi .....	58
Şekil 4.4 : Diyot eşdeğer devresi .....	59
Şekil 4.5 : Seri uyarımla senkronlanan bilezikli asenkron motorun köprü doğrultucuyla gösterimi .....	60
Şekil 4.6 : Magnetik doyma eğrisi ve dinamik reaktans .....	79
Şekil 4.7 : Faz başına sürekli durum eşdeğer devresi .....	80
Şekil 4.8 : Deney makinesinin $L_{sr}-i_m$ eğrisi .....	80
Şekil 6.1 : Seri uyarımla senkronlanan bilezikli asenkron motorun dinamik davranışı için bilgisayar modeli akış çizelgesi .....	94
Şekil 7.1 : Deneysel olarak stator a fazı akımı ile hızın değişimi .....	96
Şekil 7.2 : Hesaplanan stator a fazı akımı .....	97
Şekil 7.3 : Köprü çıkışı kısa devre iken deneysel olarak stator a fazı akımının değişimi .....	97
Şekil 7.4 : Hesaplanan moment ve hızın zamana göre değişimi .....	98
Şekil 7.5 : Hesaplanan rotor a fazı akımı .....	98
Şekil 7.6 : Senkronlama anında deneysel olarak stator akımının değişimi .....	99
Şekil 7.7 : Değişik senkronlama anında deneysel olarak stator akımının değişimi .....	100
Şekil 7.8 : Değişik senkronlama anında deneysel olarak stator akımının değişimi .....	100

Şekil 7.9 : Senkronlama anında Anahtarlama açısı $\gamma=90^\circ$ iken hesaplanan stator akımının değişimi .....	101
Şekil 7.10 : Senkronlama anında Anahtarlama açısı $\gamma=126^\circ$ iken hesaplanan stator akımının değişimi .....	101
Şekil 7.11 : Senkronlama anında Anahtarlama açısı $\gamma=153^\circ$ iken hesaplanan stator akımının değişimi .....	102
Şekil 7.12 : 600 ms ile 700 ms arasında hesaplanan stator akımı değişimi .....	102
Şekil 7.13 : Senkronlama anında deneysel olarak rotor akımı ve hızın değişimi .....	103
Şekil 7.14 : Değişik senkronlama anında deneysel olarak rotor akımının değişimi .....	104
Şekil 7.15 : Değişik senkronlama anında deneysel olarak rotor akımının değişimi .....	104
Şekil 7.16 : Senkronlama anında anahtarlama açısı $\gamma=90^\circ$ iken hesaplanan rotor akımının değişimi .....	105
Şekil 7.17 : Senkronlama anında anahtarlama açısı $\gamma=126^\circ$ iken hesaplanan rotor akımının değişimi .....	105
Şekil 7.18 : Senkronlama anında anahtarlama açısı $\gamma=90^\circ$ iken hesaplanan rotor akımının değişimi .....	106
Şekil 7.19 : Yol alma ve senkronlamaya ilişkin hesaplanan hız eğrisi..	106
Şekil 7.20 : Senkronlama anında hesaplanan hız eğrisinin değişimi ....	107
Şekil 7.21 : Seri bağlı oto transformatörle senkronlamaya geçişte deneysel olarak stator akımının değişimi .....	108
Şekil 7.22 : Oto transformatörle değişik zamanda senkronlamaya geçişte stator akımı değişimi .....	108
Şekil 7.23 : Seri bağlı oto transformatörle senkronlamaya geçişte deneysel olarak rotor akımının değişimi .....	109

Şekil 7.24	: Oto transformatörle değişik zamanda senkronlamaya geçişte rotor akımı değişimi .....	109
Şekil C.1	: Bilezikli asenkron makinanın dinamometre bağlıyken $P_{ste} + P_{fe} = f(V^2)$ grafiği .....	124
Şekil C.2	: Asenkron makina miline dinamometre bağlıyken yavaşlama eğrisinin zamanla değişimi .....	125
Şekil D.1	: Kesir biçimli eğri uydurma yöntemi .....	130
Şekil E.1	: (a) Bir faz sargısı ortak ve özendüktansı ölçmek için deney bağlantı şeması (b) Eşdeğer devre .....	131
Şekil E.2	: Stator-rotor ortak endüktansının ölçülmesi .....	133
Şekil F.1	: Seri uyartımlı senkronlanan bilezikli asenkron motorun bağlantı şeması .....	136
Şekil F.2	: Seri bağlı oto transformatörle seri uyartımlı senkronlanan bilezikli asenkron motorun bağlantı şeması .....	136

## TABLOLAR

Tablo 2.1	: Birinci örnek motorun anma ve parametre değerleri .....	27
Tablo 3.1	: Seçilen bilezikli asenkron makinanın anma değerleri ve parametreleri .....	48

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Endüstride kullanılan elektrik makinelerinden en sağlam olanı en az arıza yapanı, en ucuz olanı ve en çok kullanılanı asenkron makinelerdir. Çalışma ilkesi bakımından bu makinelere indüksiyon makineleri de denir. Bu makineler endüstride genellikle motor olarak çalıştırılırlar; fakat belirli koşulların sağlanması halinde generatör olarak da kullanılabilirler.

Asenkron makinelerin, senkron makinelerden en büyük ayrımlarından biri, dönme hızının sabit olmayışıdır. Bu hız, motor olarak çalışmada, senkron hızdan küçüktür. Makinanın adının, asenkron makina oluşu bu özellikten ileri gelmektedir (Sarıoğlu, 1983).

Asenkron makineler rotor yapısı ve rotor sargılarının yapısına göre iki gruba ayrılırlar.

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

Bilezikli asenkron motorların rotor sargı uçları bilezik ve fırça sistemi ile dışarıya alınması nedeniyle, bu motorların üzerinde değişik çalışma şekilleri araştırılmıştır. Senkronlanan bilezikli asenkron motorla ilgili çalışma şekli bunlardan bir tanesidir. Senkronlanan bilezikli asenkron motor ilk olarak İsveç 'te, asenkron motorun güç katsayısını düzeltmek amacı ile Danielson (1901), tarafından düşünüldü. Motora ilişkin ilk

çalışmaların İsveç 'te yapılmasına karşın, motor İngiltere 'de geliştirildi ve endüstride uygulandı. Bu nedenle dünya literatürün 'de "British Machine" olarak adlandırılır. Motorun tarihsel süreçteki gelişimi şu biçimde özetlenebilir; Rawcliffe (1940), o yıla kadar geliştirilen rotor sargı bağlantılarını içeren bir makale yayınladı. Ayrıca her bir bağlantı biçimi için, uyarma akımının belirlenmesine ilişkin kuramsal bir inceleme yaptı. Griffin (1954), daha önce yapılan bütün çalışmaları, uyarım besleme düzeneklerini de ekleyerek bir kitapta topladı.

Son yıllarda yapılan çalışmalar ise üstün iletkenli senkronlanan bilezikli asenkron motorlar üzerinde yoğunlaştırılmış, bu konuda deneysel ve teorik yayınlar yapılmıştır (Tubbs, 1990).

### **1.1. Bilezikli Asenkron Motor**

Bilezikli ve sincap kafesli asenkron motorların, statorları ile bunun taşıdığı stator sargıları genellikle aynı özellikte yapılıdır. Sincap kafesli motorların rotor sargısı çubuklardan oluşan sincap kafesi biçiminde bir sargıdır. Dış devreye hiç bir uç çıkartılmamıştır. Bilezikli motorlarda ise, rotorda yalıtılmış çok fazlı bir sargı vardır. Bu sargının uçları bilezik-fırça sistemi ile dış devreye bağlantılandırılmıştır. Rotorlarında genellikle üç fazlı sargılar vardır. Sargılar yalıtılarak rotor oluklarına yerleştirilir. Üç fazlı rotor sargısı yıldız olarak bağlanır ve yıldız noktası genellikle dışarıya çıkarılmaz. Mil üzerine bağlı ve milden yalıtılmış üç bilezik, rotor ile birlikte döner. Rotorun üç fazlı sargısının giriş uçları, bu bileziklere bağlanır. Bilezikler üzerinde sabit duran fırçalar yardımı ile rotor sargı sistemine, dış kaynaktan genliği yada frekansı değiştirilebilen gerilim uygulanabildiği gibi, sargılara dışarıdan empedans da bağlanabilir.

Rotor sargıları normal alternatif akım sargıları veya iki tabakalı doğru akım sargısı tipinde olabilir. Bu sargılar, stator sargılarında olduğu gibi, normal iletkenlerden veya çubuk sargılardan oluşur. Rotor sargıları, çoğunlukla bir olukta en azından iki bobin yanı bulunan, iki tabakalı sargılardır. Bir rotor fazı bobinin 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 olunurlar. Bundan başka bağlı olduğu şebekeye çok büyük sığa gösterebilen dinamik sığaç olarak çalışmak üzere yapılabirler. Bütün senkron makinaların enerji dönüşümü yapabilmesi için gerekli ve yeterli koşul, bunların senkron hız denilen sabit bir hızda dönmesidir.

Senkron makinalar rotor ve rotor sargılarının yapılışına göre üç guruba ayrılırlar.

1. Yuvarlak kutuplu senkron makinalar.
2. Çıkık kutuplu senkron makinalar.
3. Sürekli mıknatıslarla uyarılmış senkron makinalar.

### **1.2.1. Yuvarlak kutuplu senkron makinalar**

Bu makinaların hem rotor çevresi ve hemde stator iç çevresi sabit yarıçaplı silindrsel yüzeylerden oluşurlar. Başka bir deyimle, yuvarlak kutuplu senkron makinaların statoru ile rotoru arasında çapsal doğrultuda kalan hava aralığının boyu sabittir. Yuvarlak kutuplu senkron makinalar

genellikle küçük kutup sayısı ve yüksek senkron dönme sayısı için yapılırlar.

Yuvarlak kutuplu senkron makineler, sabit kısım stator, dönen kısım rotor ve bunların taşıdıkları rotor ve stator sargılarından oluşurlar.

### **1.2.2. Çıkık kutuplu senkron makineler**

Çıkık kutuplu senkron makineler stator iç çevresi düzgün olmayan makinelerdir. Rotor ile stator arasında kalan çapsel doğrultudaki hava aralığı her noktada sabit değildir. Çıkık kutuplu senkron motorlar genellikle büyük kutup sayısında ve küçük senkron hızlar için imal edilirler.

Çıkık kutuplu senkron makinelerde sabit kısım stator, dönen kısım rotor ve bunların taşıdıkları rotor ve stator sargılarından oluşur (Sarıoğlu,1980).

### **1.2.3. Sürekli mıknatıslı senkron makineler**

"Bir stator içinde iki motor" adı makine yapımcıları tarafından sürekli mıknatıslarla uyarılmış senkron makinelere verilen isimdir. Stator yapısı döner alan makinelerinin aynıdır. Levha paketinden oluşan statorda döner alan sargısı bulunur. Bu makineleri diğerlerinden ayıran tüm özellikler rotordan gelmektedir (Aldemir,1977).

Rotorda motorun kendiliğinden yol almasını sağlayacak yol verme kafesi bulunur. Rotorda ayrıca sürekli mıknatıslar ve kaçak akı olukları yer almıştır. Sürekli mıknatıslar uyartım işlevini yaparak, makinenin senkron hızda çalışmasını sağlarlar. Kaçak akı olukları ise stator alanlarına yayılma



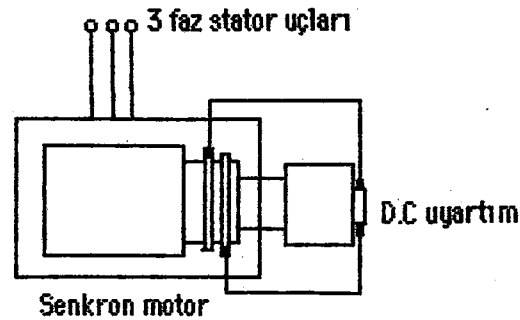
yolu olarak görev yaparlar ve böylece mıknatısları bu alanların mıknatıslanmayı kaldırıcı etkisinden korurlar. Kaçak akı oluklarının makina davranışı üzerindeki etkileri büyüktür. Mil ya magnetik olmayan malzemeden yapılır veya rotor ile mil arasında magnetik olmayan bir tabaka yerleştirilir.

#### 1.2.4. Uyarım düzeneği tipleri

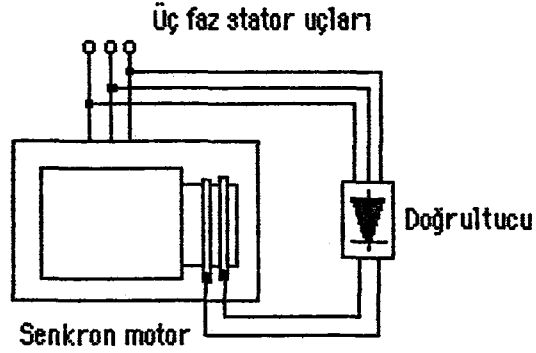
Senkron makinalarda rotor uyarma alanı ve rotor uyarma sargısı doğru gerilimi aşağıdaki düzenekler ile sağlar.

a) Şekil 1.1 'de görüldüğü gibi senkron makinanın mili üzerine bir doğru akım şönt generatörü bağlanır. Bu generatöre senkron makinanın uyarım generatörü denir. Şönt generatörün çıkış gerilimi senkron makinanın uyarma sargısına uygulanır ve böylece rotor uyarma sargısı için doğru gerilimi ve akımı elde edilmiş olur.

b) Senkron makinanın mili üzerinde uyarım generatoru yoktur; makinanın uyarım gerilimi, ya var olan bir doğru akım kaynağından, yada makinanın uçlarına bağlanan veya başka a.c kaynağına bağlanan köprü



Şekil 1.1 D.C generatör uyarımlı senkron motor



Şekil 1.2 Doğrultucu ile uyarılan senkron motor

doğrultucularla a.c gerilim doğrultularak elde edilir ve uyarma sargısına verilir. Uyarım gerilimini Şekil 1.2 'de görüldüğü gibi stator uçlarına bağlanan köprü doğrultucular yardımı ile sağlayan senkron makinaya kendini uyarı makina denir (Shibata ve Fukami, 1986).

c) Senkron makinanın mili üzerine küçük üç fazlı senkron generator bağlanır ve generatordan elde edilen gerilim doğrultularak uyarma sargısına uygulanır.

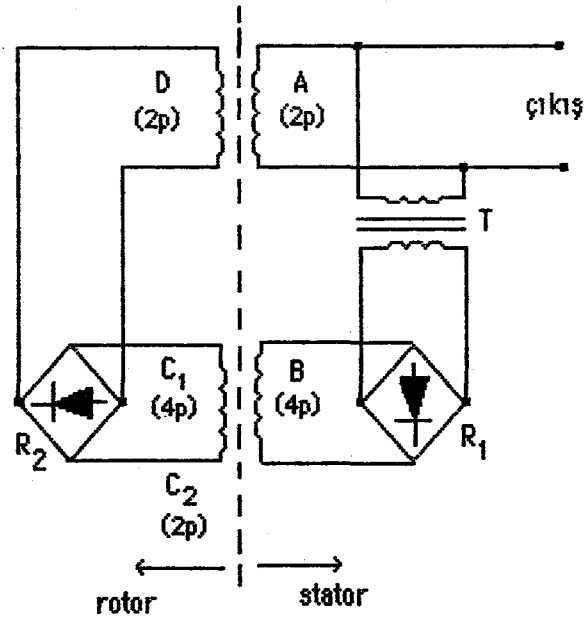
d) Küçük makinaların rotoru sargısız olmak üzere sürekli mıknatıslı yapılır.

### 1.2.5. Kendinden uyarımlı şemalar

Üç fazlı statik kendinden uyarımlı devrelerin büyük çoğunluğunun bağlantı şemaları Şekil 1.3 'de gösterilmiştir. Uyarım akımı, transformatörün sekonder sargıları  $T_1, T_2$  ve  $T_3$  tarafından beslenen köprü doğrultucudan elde edilir. Bu transformatörün iki primer sargısı vardır;

1. Üç kontrol reaktansından hatta yıldız bağlanan gerilim sargısı.





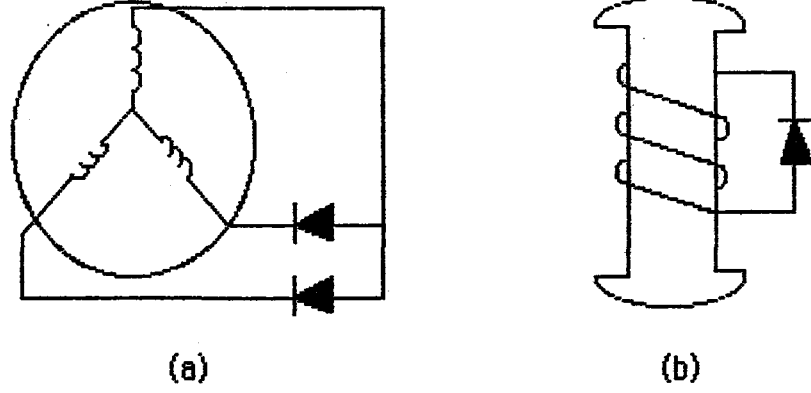
Şekil 1.4 Rotor ve statora ilave sargı şeması

uyartım akımını artırdığı için kullanılır. Bu şemanın dezavantajı az bir artık geriliminin olması ve yalnız tek fazlı senkron makinalara uygulanmasıdır (Smith vd, 1967).

Fırçasız senkron makinaların yeni tasarım şekillerini ortaya çıkarmak için endüksiyon ve doğrultma yoluyla uyartımın elde edileceği gösterilmiştir (Chalmers, Magureanu ve Hindmarsh, 1972). Bu şemada rotor üzerindeki bir sargıda a.c gerilim üretmek için yardımcı bir magnetik devre kullanılır. Endüklenen gerilimle rotor uyarma sargısına gerekli olan d.c uyartım akımını elde etmek için doğrultucu devre kullanılır.

Chalmers vd. (1972), tristörlü inverterin çıkışındaki harmonik gerilimleri üç fazlı yuvarlak rotorlu senkron makinanın d.c uyartımını elde etmek için kullandılar. Chalmers vd. (1974), harmonik gerilimleri ile d.c uyartımı, Şekil 1.5 'de gösterildiği gibi üç fazlı yuvarlak kutuplu yıldız bağlı senkron makinanın rotoruna iki diyot ve çıkık kutuplu senkron rotoruna

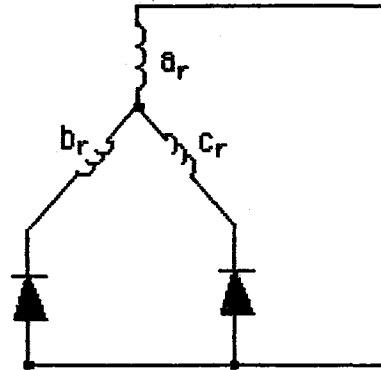
ise tek diyot bağlantısı yaparak elde ettiler.



Şekil 1.5 (a) Yuvarlak kutuplu senkron makinada rotora iki diyot bağlantı şeması

(b) Çıkık kutuplu senkron makinada rotora tek diyot bağlantı şeması

Williamson ve Chalmers (1977), daha sonraki çalışmalarında 3-fazlı rotor sargısına iki diyot bağlanan fırçasız senkron makinada karmaşık bir model geliştirdiler (Şekil 1.6).



Şekil 1.6 Fırçasız senkron makinada rotora iki diyot bağlantı şeması

Ostos (1978) ve Williamson (1980), bilezikli asenkron motoru senkron motor olarak çalıştırmak için rotor faz sargılarını Şekil 1.7 'deki gibi bağladılar. Yıldız bağlı stator sargı uçlarını köprü doğrultucunun girişine, rotor sargı uçlarını da köprünün d.c çıkış uçlarına bağlayarak motorun senkron çalışması için gerekli olan uyarımı , stator akımını doğrultarak elde ettiler (Şekil 2.1).

### 1.3. Senkronlanan Bilezikli 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 birleştirilmiştir. Birleştirilen her iki motorun sakıncaları ise, motorun yapısında değişiklikler yapılarak en aza indirilmeye çalışılır. Yapı olarak bilezikli asenkron motora benzer. Ancak, rotor sargıları genelde bilezikli asenkron motordan farklıdır (İmeryüz ve Çetin, 1991). Senkronlanan asenkron motor, rotor devresine bağlanan yol verme dirençleri üzerinden asenkron olarak yol alır. Makina senkron hız yakınlığında çalışırken rotor sargısına doğru gerilim uygulanarak motor senkronlanır. Senkronlama süresinde yuvarlak rotorlu senkron makina için geliştirilen kuramlar geçerlidir (Cottan, 1925).

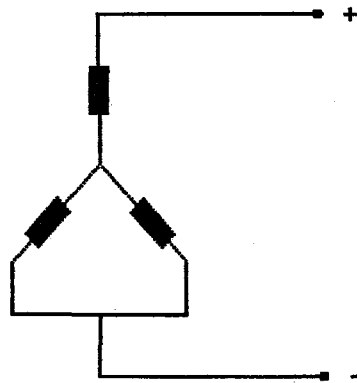
Özel tasarlanmamış, bilezikli asenkron motorda sargı bağlantı değişikliği yapılarak elde edilen senkronlanan asenkron motorların senkron devrilme momenti küçük ve yükleme aralığı sınırlıdır.  $M_N/M_K = 1,5$  civarındadır. Ayrıca uyarım besleme düzeneklerinde sorunlar ortaya çıkar. Uygulamada, motora ortak milde bağlı uyarım generatorü rahatlıkla

kullanılmaz. Genellikle, yük akımına bağlı köprü doğrultuculu uyartım devreleri kullanılır. Özel tasarlanan senkronlanan bilezikli asenkron motorun maliyeti, senkron ve bilezikli asenkron motorların maliyetinden daha fazladır.

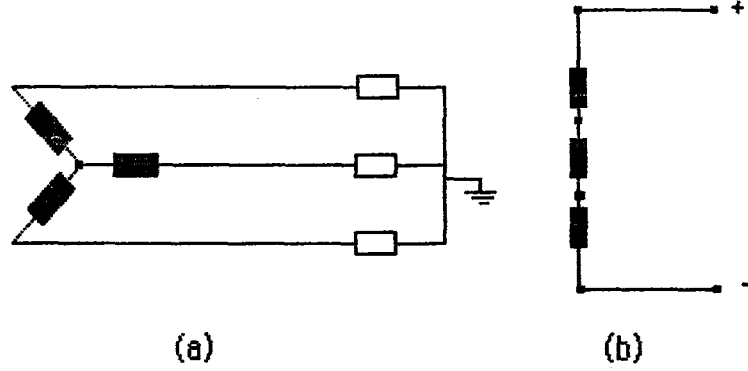
Senkronlanan bilezikli asenkron motor senkron çalışmada şebekeden tepkin güç alabilir ve şebekeye tepkin güç verebilir. Bu özelliği nedeni ile yalnız sistemin güç katsayısını düzeltmekle kalmaz, şebekede oluşan tepkin güç artışlarında bu gücü üzerine alarak sistemin kararlılığını korur ve emniyetini sağlar. Uygun kontrol düzenekleri ile donatılarak, işletmelerde statik VAR sistemlerinin yerine kullanılabilir (İmeryüz ve Çetin, 1991).

### 1.3.1. Senkronlanan Bilezikli Asenkron Motor için Değişik Rotor Bağlantı Şekilleri

Senkronlanan bilezikli asenkron motorda senkron çalışma için pek çok rotor sargı bağlantısı vardır. Bunların bir kısmı ayrı bir tasarım gerektirirken, bir kısmında işletmedeki bilezikli asenkron motora rahatlıkla uygulanabilir.



Şekil 1.7 Rotor sargısı için Danielson bağlantısı



Şekil. 1.8 Senkron çalışma için rotor faz sargılarının seri bağlantı şeması  
 (a) Yol verme  
 (b) Senkron çalışma

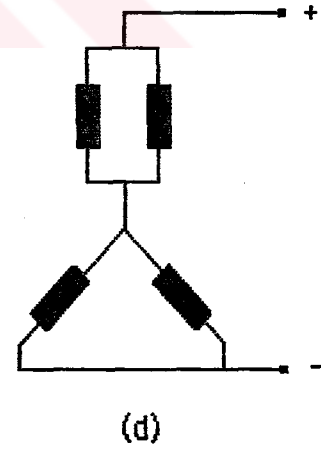
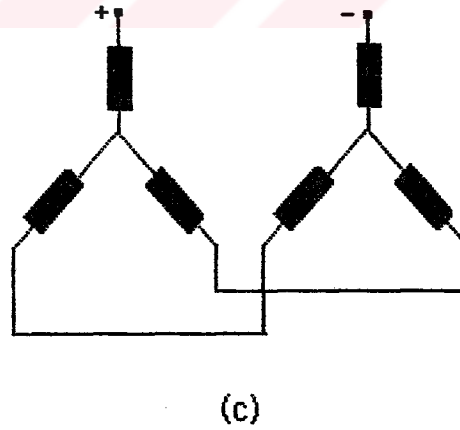
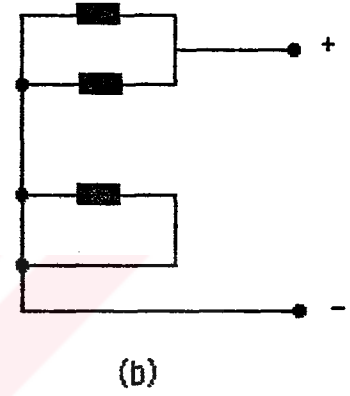
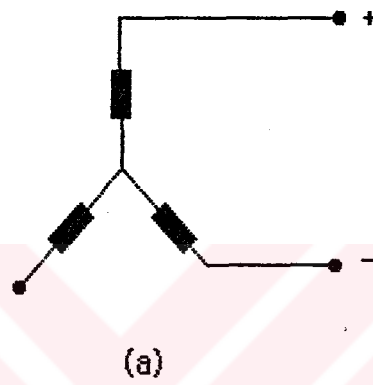
Danielson 'un senkron çalışma için kullandığı Şekil 1.7 'deki rotor sargı bağlantısı hala yaygın olarak kullanılmaktadır.

İmeryüz ve Çetin (1991), senkronlanan asenkron motorun senkron çalışma özelliklerinin iyileştirilmesi için Şekil 1.8 'deki rotor bağlantısını düşünmüştür. Rotor sargısı yol alırken yıldız bağlıdır, senkron çalışmada ise, rotor faz sargıları birbirine seri bağlanarak tek fazlı uyarma sargısı elde edilmiştir. Böylelikle, senkronlanan bilezikli asenkron motorun uyarması, senkron makinada olduğu gibi tek fazlı bir yapıya dönüştürülür ve uyarma sargısının etkinliği artırılır. Ancak, bağlantı bilezikli asenkron motora kolaylıkla uygulanamaz. Motorun sargı bağlantılarında ve mekanik yapısında değişiklik yapmak zorunludur.

Senkronlanan bilezikli asenkron motorda, senkron çalışma için kullanılabilecek diğer rotor sargı bağlantıları Şekil 1.9 'da verilmiştir (Brosan ve Hayden, 1966).



Değişik rotor sargı bağlantılarının tümünde, yol alma anında rotor sargıları üç fazlı ve simetrik olup (Şekil 1.6a), motorun gücüne göre ya rotor sargısına bağlanan yol verme dirençleri üzerinden veya doğrudan yol verilir.



Şekil 1.9 Senkron çalışma için kullanılacak diğer rotor sargı bağlantı şekilleri

(a) Bir faz sargısı açık devre.

(b) Çift V sargılı

(c) çift yıldız

(d) Üçüncü fazı çift sargılı.

#### 1.4. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmanın amacı: bilindiği kadarıyla üzerinde pek fazla çalışma yapılmamış olan seri uyarımlı senkronlanan bilezikli asenkron motorların öprü doğrultucu ile birlikte dinamik davranışı için bir model ve bilgisayar yazılımı geliştirip, bu modelin geçerlilik derecesini deneysel sonuçlarla sınıyarak modelin başarımını belirlemek ve irdelemektir.

Çalışmada dinamik davranış modeli değişkenlerin makinanın fiziksel büyüklüklerini içermesinden dolayı faz değişkenleri yaklaşımına dayandırılacaktır. Bu faz değişkenleri kavramı tanıtılacak, magnetik doyma etkisi üzerine yapılan çalışmalardan daha farklı ve basit bir yaklaşım sunulacaktır. Ayrıca faz değişkenleri modeline temel tasarım büyüklüklerinden sürekli durum parametrelerini üretebilecek biçimde, bir parametre hesap modeli ve bilgisayar yazılımı geliştirilip sınıanacaktır.

## BÖLÜM 2

### SERİ UYARTIMLA SENKRONLANAN BİLEZİKLİ ASENKRON MOTORUN SÜREKLİ DURUM MODELİ

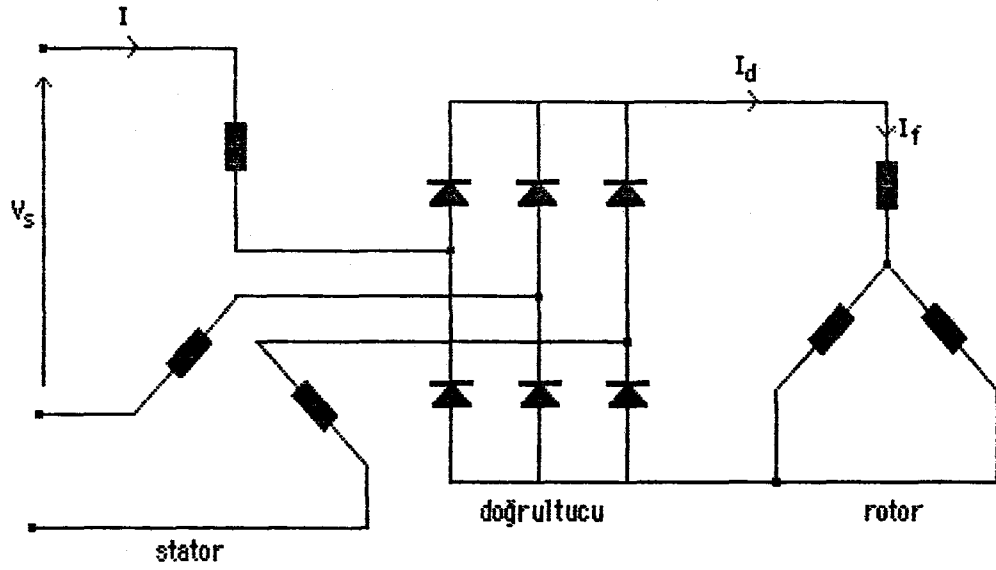
#### 2.1. Giriş

Bu bölümde, seri uyartımlı senkronlanan bilezikli asenkron motor ile köprü doğrultucunun birlikte sürekli durum performansını hesaplayan matematiksel modeli verilmiştir. Şekil 2.1 'de görüldüğü gibi stator sargısının yıldız bağlı alternatif gerilim uçları köprü doğrultucunun girişine, köprü doğru gerilim çıkış uçları ise bilezikler üzerinden rotor sargı uçlarına bağlanmıştır. Bu durumda uyartım veya rotor akımı, seri uyartımdan dolayı stator akımına bağlı olarak değişmektedir (Ostos,1978 ; Williamson, 1980). Bilezikli asenkron motor senkronlandıktan sonra senkron motor olarak çalışacağından, sürekli durum çalışması için bu bölümde seri uyartımlı senkron motor deyimini kullanılacaktır.

#### 2.2. Köprü Doğrultucu İle Seri Uyartımlı Senkron Motorun Birlikte Gösterilişi

Şekil 2.1 'deki devrede köprü doğrultucunun elemanlarının doğrusal olmamasından dolayı, aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır.

1. Seri uyartımlı senkron motorun momenti hesaplanırken, akım ve gerilimin birinci harmoniği alınmıştır.



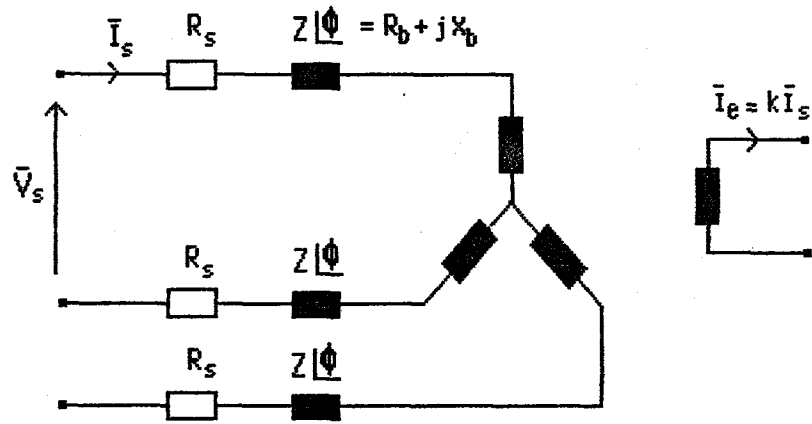
Şekil 2.1 Seri uyarımlı senkron motorun köprü doğrultucuyla birlikte bağlantı şeması

2. Köprü doğrultucunun çıkışındaki doğru gerilim düzgündür.
3. Köprü doğrultucunun giriş uçlarındaki alternatif gerilim sinüzoidaldır.

Köprü doğrultucunun alternatif gerilim uçlarından bakıldığı zaman, köprü doğrultucu bir empedans gibi davrandığı görülmektedir. Bu nedenle, köprü doğrultucu her bir stator fazında eşdeğer empedansı Şekil 2.2' de görüldüğü gibi  $(R_b + jx_b)$  olarak temsil edilmiştir. Bu durumda her bir stator fazında görünen direnç  $R_s + R_b$ , reaktans ise  $x_{so} = x_b$  olmaktadır. Uyarım akımı  $I_f$ 'nin stator eşdeğeri  $I_e$  ile gösterilmiştir. Bir faz için hava aralığında endüklenen gerilim

$$E = j (I_s + I_e) x_m \quad (2.1)$$

dir.



Şekil 2.2 Seri uyarımlı senkron motor ile köprü doğrultucunun birlikte gösterimi

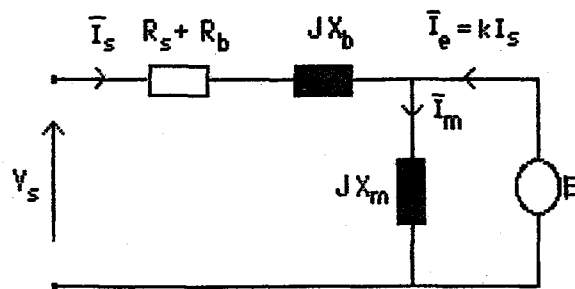
Seri uyarımlı senkron motor için köprü doğrultucu ile birlikte bir faz eşdeğer devresi Şekil 2.3 'de, fazör diyagramını ise Şekil 2.4 ' de verilmiştir.  $R_b$  ve  $X_b$  'nin değerleri biliniyorsa, Şekil 2.4 'den  $I_s$  ile  $I_e$  arasındaki ilişki

$$I_e = k I_s \quad (2.2)$$

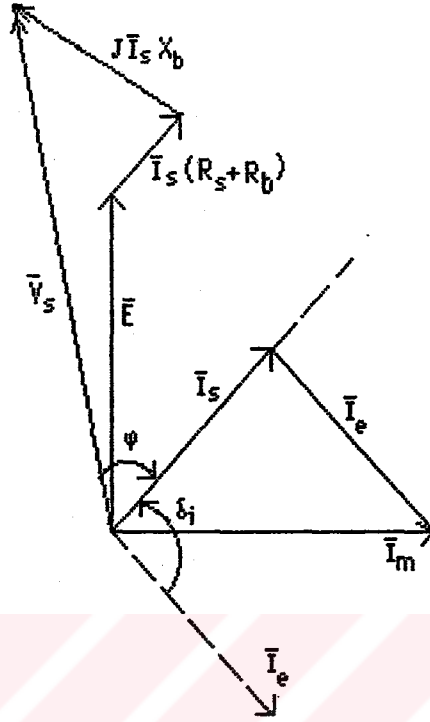
elde edilir. Burada

$$k = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{N_r}{N_s} \frac{I_f}{I_d} \frac{I_d}{I_s} \quad (2.3)$$

dir. Rotor devresinde paralel direnç bulunmadığı durumda  $I_f = I_d$  alınır.



Şekil 2.3 Seri uyarımlı senkron motor için bir faz eşdeğer devresi



Şekil 2.4 Seri uyarımlı senkron motorun köprü doğrultucu ile birlikte fazör diyagramı

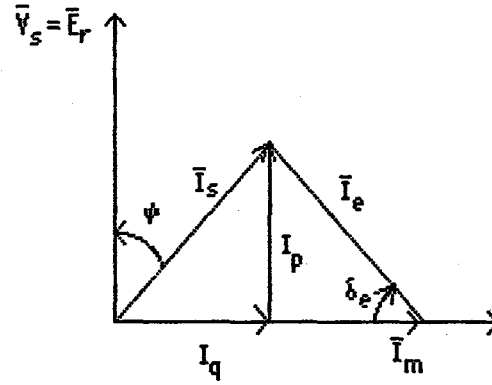
Magnetik devrede doyma yoksa, stator direnci ve kaçak reaktansı ihmal edilir. Bu durumda hava aralığında meydana gelen güç

$$P_a = \frac{V_s E}{X_m} \sin \delta_e \quad (2.4)$$

olur. Kontrolsüz köprü doğrultucu kullanıldığı zaman motor parametreleri yalnız  $k$ 'ya bağlıdır. Bu durumda ideal makina için

$$\bar{E} = j X_m \bar{I}_e \quad (2.5)$$

yazılır. Stator direnci ve kaçak reaktansı ihmal edilirse giriş gerilimi için



Şekil 2.5 (2.6) denkleminin Fazör diyagramı

$$\bar{V}_s = \bar{E} + j (\bar{I}_s + \bar{I}_e) X_m \quad (2.6)$$

elde edilir. (2.6) denklemini Şekil 2.5 'deki fazör diyagramıyla gösterilmiştir.

Giriş gerilimi  $V_s$  reel ise

$$\bar{I}_s = I_p - jI_q \quad (2.7)$$

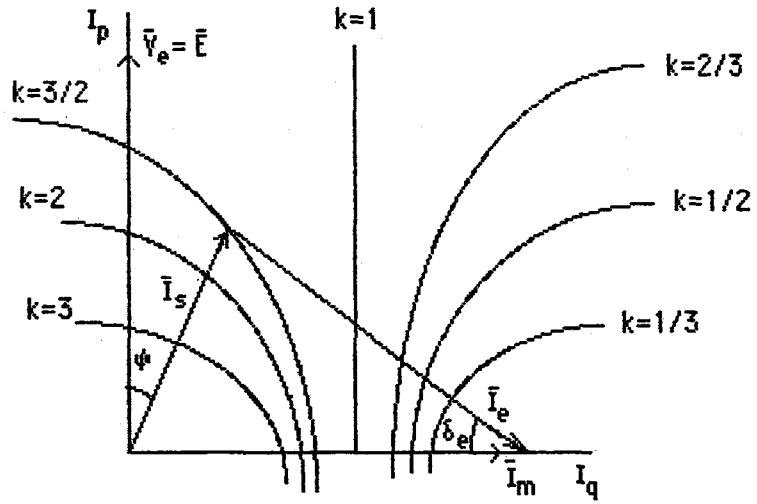
şeklinde yazılır. (2.7) denklemini kolaylıkla

$$I_p^2 + \left[ I_q + \frac{I_m}{(k^2 - 1)} \right]^2 = \left[ \frac{I_m k}{(k^2 - 1)} \right]^2 \quad (2.8)$$

şeklinde gösterilir.  $I_m$  ve  $k$  'nın sabit olmasından dolayı, (2.8) denkleminde  $I_s = I_p - jI_q$  bir dairenin yerini,  $I_m k / k^2 - 1$  yarıçapını ve  $I_p = - I_m / k^2 - 1$  ise merkezini vermektedir. Şekil 2.6 'da  $k$  'nın farklı değerleri için daireler çizilmiştir. Bu durum için moment denklemi

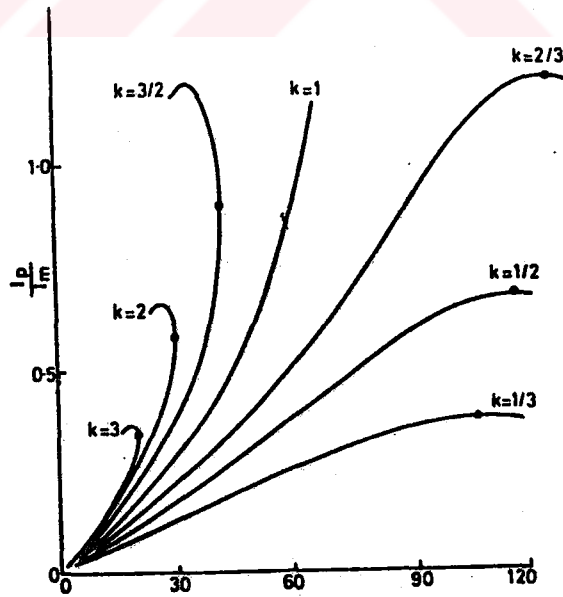
$$T = 3 V_s I_p = 3 I_m^2 X_m \frac{I_p}{I_m} \quad (2.9)$$

şeklinde verilir.



Şekil 2.6  $k$  'nın değişik değerleri için akım yer eğrisi

Şekil 2.7 'de moment-yük açısı grafiğini elde etmek için  $k$  'nın değişik değerlerinde  $I_p/I_m$  oranı yük açısına göre çizilmiştir. Verilen bir moment değerinde,  $k > 1$  için elde edilen güç katsayısı değerlerinin,  $k < 1$  için elde edilen güç katsayısı değerlerinden daha iyi olduğu görülmektedir. (Şekil 2.7).



Şekil 2.7 İdeal motor için moment -yük açısı değişimi



### 2.3. Doymalı Magnetik Devrenin İncelenmesi

Stator empedansından dolayı karmaşıklaşan denklemlerde,  $\delta_1$  'nin parametre olarak alınması uygun olmaktadır. Şekil 2.4 'den görüldüğü gibi stator akımı  $I_s$  reel olabilir, bu nedenle

$$\bar{I}_e = k I_s (\cos\delta_1 - j\sin\delta_1) \quad (2.10)$$

ve

$$\bar{I}_m = \bar{I}_s + \bar{I}_e = I_s [1 + k \cos\delta_1 - j k \sin\delta_1] \quad (2.11)$$

yazılır. Magnetik devrenin doymasından dolayı  $X_m$  ' yük ile değişmektedir. E ile  $I_m$  arasındaki ilişki ise mıknatıslanma karakteristiğinden elde edilir. Böylece

$$\bar{E}_r = j \left[ \frac{E_r}{I_m} \right] \bar{I}_m \quad (2.12)$$

ve

$$I_m = I_s \sqrt{1 + k^2 + 2k \cos\delta_1} \quad (2.13)$$

olarak yazılır. Verilen  $\delta_1$  ve  $k$  değerleri için  $I_s$  ve  $I_m$  'in değerleri hesaplanır, E ise mıknatıslanma eğrisinden bulunur. (2.11) ve (2.13) denklemleri (2.12) denkleminde yerlerine yazılırsa

$$\bar{E} = j E \frac{(1 + k \cos\delta_1 - j k \sin\delta_1)}{\sqrt{1 + k^2 + 2k \cos\delta_1}} \quad (2.14)$$

elde edilir. Şekil 2.3 'den

$$\bar{V}_s = \bar{E} + I_s (R_s + R_b + j X_b) \quad (2.15)$$

yazılır. (2.14) denklemini (2.15) denkleminde yerine yazılırsa

$$\bar{V}_s = \left[ I_s (R_s + R_b) + \frac{E k \sin \delta_i}{\sqrt{1+k^2+2k \cos \delta_i}} \right] + j \left[ I_s X_b + \frac{E(1+k \cos \delta_i)}{\sqrt{1+k^2+2k \cos \delta_i}} \right] \quad (2.16)$$

elde edilir.  $V_s$  gerilimi reel ve imajiner kısımlarına ayrılarak yazılırsa

$$V_r = \left[ I_s (R_s + R_b) + \frac{E k \sin \delta_i}{\sqrt{1+k^2+2k \cos \delta_i}} \right] \quad (2.17)$$

ve

$$V_i = \left[ I_s X_b + \frac{E(1+k \cos \delta_i)}{\sqrt{1+k^2+2k \cos \delta_i}} \right] \quad (2.18)$$

olur.  $V_s$  kaynak gerilimi

$$V_s = \sqrt{V_r^2 + V_i^2} \quad (2.19)$$

dir. Verilen  $k$  ve  $\delta_i$  değerleri için en uygun  $I_s$  akımı bulununcaya kadar yinelemeye devam edilir. Bu durumda

$$\phi = \tan^{-1} \left[ \frac{V_i}{V_r} \right] \quad (2.20)$$

yazılır, eğer  $V_r < 0$  ise  $\phi$ 'nin değeri

$$\phi = 180^\circ + \tan^{-1} \left[ \frac{V_i}{V_r} \right] \quad (2.21)$$

olur.  $\delta_e$  yük açısı ise

$$\delta_e = \phi + \delta_i - 90^\circ \quad (2.22)$$

dir. Giriş gücü için

$$P_g = 3 V_r I_s \quad (2.23)$$

yazılır. Moment ise

$$T = \frac{3}{2 \pi n} I_s [V_r - I_s (R_s + R_b)] \quad (2.25)$$

olarak elde edilir.

#### 2.4. Doğrusal Magnetik Devrenin İncelenmesi

Eğer  $X_m$  sabitse yineleme gerekmez, bu durumda sistemin toplam empedansı

$$\bar{Z}_T = \left[ (R_s + R_b) + \frac{E}{I_s} \frac{k \sin \delta_i}{\sqrt{1+k^2 + 2k \cos \delta_i}} \right] + j \left[ X_b + \frac{E}{I_s} \frac{(1+k \cos \delta_i)}{\sqrt{1+k^2 + 2k \cos \delta_i}} \right] \quad (2.26)$$

olur. (2.13) denkleminde

$$\frac{E}{I_s} = X_m \sqrt{1 + k^2 + 2k \cos \delta_i} \quad (2.27)$$

elde edilir. (2.27) denklemini (2.26) denkleminde yerine yazılırsa

$$Z_T = (R_s + R_b + X_m k \sin \delta_i) + j [X_b + X_m (1 + k \cos \delta_i)] \quad (2.28)$$

olur.  $Z_T$  'nin reel kısmına  $Z_r$  ve imajiner kısmına da  $Z_i$  denirse

$$Z_T = \sqrt{Z_r^2 + Z_i^2} \quad (2.29)$$

olur. Akım ise

$$\bar{I}_s = \frac{\bar{V}_s}{Z_T} \quad (2.30)$$

dir. Giriş gücü için

$$P_g = 3 I_s^2 Z_r \quad (2.31)$$

yazılır. Moment ise

$$T = \frac{3}{2\pi n} I_s^2 X_m k \sin \delta_i \quad (2.32)$$

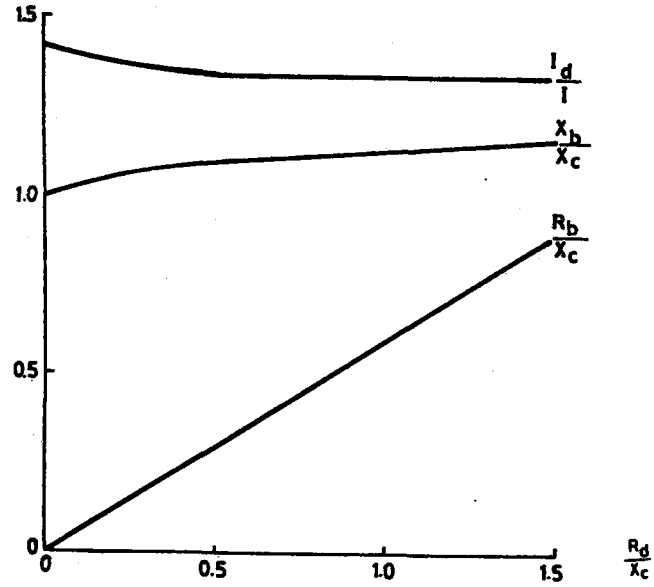
olur. Giriş gücü açısı

$$\phi = \tan^{-1} \left[ \frac{Z_i}{Z_r} \right] \quad (2.33)$$

dir. Bu durumda yük açısı da

$$\delta_e = \phi + \delta_i - \frac{\pi}{2} \quad (2.34)$$

olur.



Şekil 2.8 Köprü doğrultucunun a.c 'deki temel bileşen empedansı

Motor parametrelerinden yararlanarak köprü doğrultucunun temel bileşen empedanslarını bulmak için Şekil 2.8 'den faydalanılır. Şekil 2.8 'de  $X_{so}=X_c$ ,  $R_D=1.5 R_r$  olarak alınır.

## 2.5. Maksimum Momentin Elde Edilmesi

Seri uyarımlı senkron motorda maksimum moment, moment-yük açısı karakteristiğini belirleyen  $k$  katsayısına bağlıdır. Kararlılık durumunun sınırı  $\frac{dT}{d\delta_e} =$  veya  $\frac{d\delta_e}{dT} = 0$  dır. Çözümü kolaylaştırmak için magnetik devredeki doyma ihmal edilmiştir. Bu durumda moment ifadesi için

$$T = \frac{3}{2\pi n} \frac{V_s^2 X_m k \sin\delta_i}{\left[ R_s + R_b + X_m k \sin\delta_i \right]^2 + \left[ X_b + X_m (1 + k \cos\delta_i) \right]^2} \quad (2.35)$$

yazılır. Moment denkleminde

$$(R_s + R_b)^2 + (X_b + X_m)^2 = Q^2 \quad (2.36)$$

yazılıp, bir  $\alpha$  açısı tanımlandığında

$$r_1 + R_b = Q \cos\alpha \quad (2.37)$$

$$X_b + X_m = Q \sin\alpha \quad (2.38)$$

olur. Ayrıca  $q=Q/X_m$  olarak tanımlanıp, (2.37) ve (2.38) denklemleri (2.35) denkleminde yerlerine yazılırsa

$$T = \frac{3}{2\pi n} \frac{V_s^2 k \sin\delta_1}{X_m (q^2 + k^2 + 2 q k \sin(\alpha + \delta_1))} \quad (2.39)$$

elde edilir. Maksimum moment  $dT/d\delta_1=0$  denkleminin çözümüyle elde edileceğinden, bu denklemin türevi

$$\cos\delta_1 = - \frac{2 q k \sin\alpha}{(q^2 + k^2)} \quad (2.40)$$

olur. (2.40) denklemini (2.39) denkleminde yerine yazılırsa

$$\hat{T} = \frac{3 V_s^2}{2\pi n} \frac{1}{2 \left[ (R_s + R_b) + (X_b + X_m) \frac{\sqrt{q^2 + k^2 - 4 q k \sin^2 \alpha}}{2 q k \sin\alpha} \right]} \quad (2.41)$$

olarak maksimum moment elde edilir.

## 2.6. Sürekli Durum İncelemesi İçin Bilgisayar Programı

### 2.6.1. Açıklama

Bu aşırta seri uyarımlı senkron motorun sürekli durum modeli yardımıyla, davranışını incelemek için geliştirilen bilgisayar programı tanıtılacak ve iki örnek motor üzerinde sonuçları verilerek değerlendirme yapılacaktır. Birinci motorun anma ve parametre değerleri tablo 2.1 de (Williamson, 1980), ikinci motorun özellikleri ise Ek. B de verilmiştir.

Tablo 2.1 Birinci örnek motorun anma ve parametre değerleri

$P_N$	$U_N$	$I_N$	$R_s$	$R_r$	$X_m$	$X_{so}$	Sarım oranı
W	V	A	ohm	ohm	ohm	ohm	—
250	200	1.55	3.63	12.1	104	9.5	1.06

### 2.6.2. Bilgisayar programı

Seri uyarımlı senkron motorun sürekli durum davranışının çözümünü sağlayan bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Şekil 2.9 da akış çizelgesi verilen programda magnetik doyma gözönüne alınmıştır.

Senkron motorlarda  $\delta_e$  yük açısı sıfırdan  $\pi$  ye kadar değişik değerler almaktadır.  $\delta_e$  yük açısının  $\pi/2$  den büyük değerler alması halinde, senkron motor kararlı olarak çalışmaz. Bu hesaplamalarda yineleme adımı olarak  $\delta_e$  alınmıştır.

Geliştirilen bilgisayar programı **Anıl** isimli ana program ile **Rfls** ve **Func** isimli altprogramlardan oluşur.

### 2.6.2.1. Anıl programı

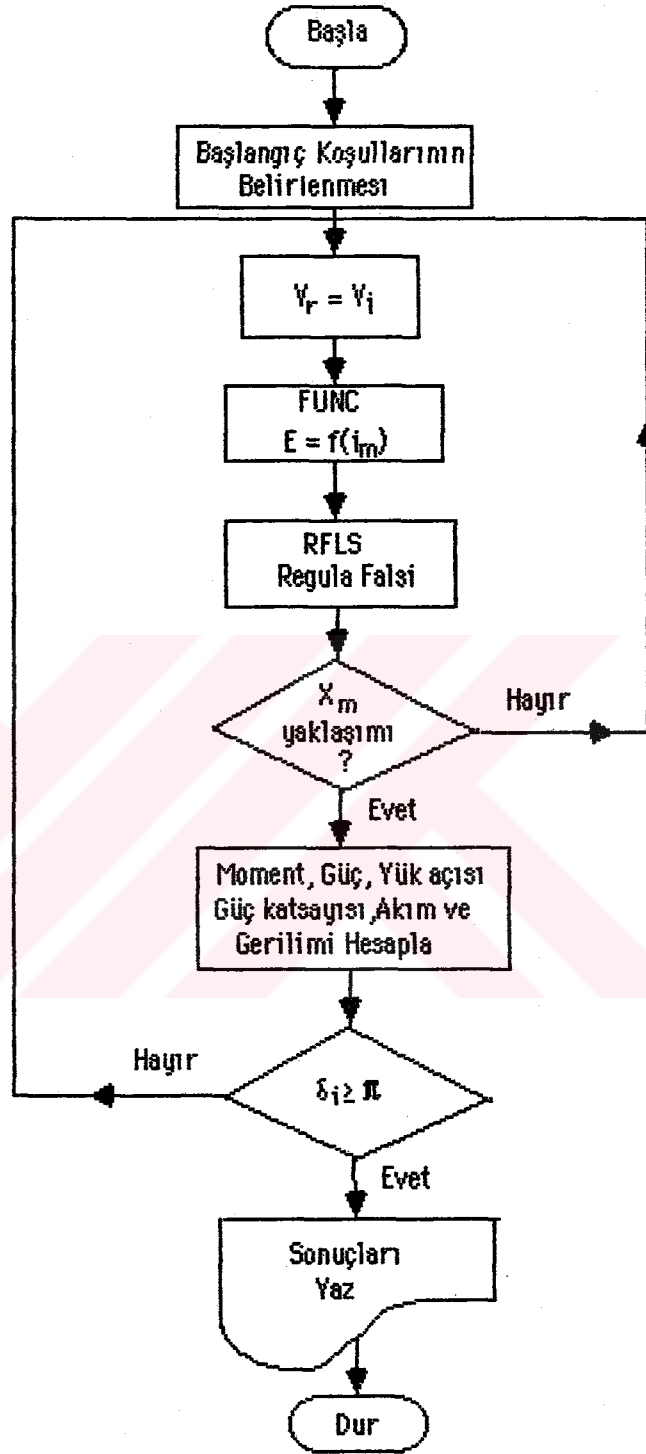
Bu bilgisayar programı verilen seri uyartımlı senkron motorun sürekli çalışma durumunda yük açısı, moment, akım, güç ve güç katsayısını hesaplar. Programın akış çizelgesi Şekil 2.9 da verilmiştir.

"Anıl" a veri olarak

1. Statora uygulanan gerilim (V).
2. Stator-rotor sargıları sarım oranı.
3. Rotor sargısı faz direnci ( $\Omega$ ).
4. Stator sargısı kaçak reaktansı ( $\Omega$ ).
5.  $I_d/I_s$  oranı.
6.  $X_b/X_c$  oranı.
7.  $R_b/X_c$  oranı.
8. Akımın başlangıç değeri (A).

girilmektedir. Program, değişik  $\delta$  değerlerinde hesapladığı moment, güç, güç katsayısı, yük açısı ve gerilim değerlerini ilgili kütüğe saklar. **Func** isimli alt program karmaşık olan E gerilimi ile  $I_m$  akımını hesaplar. **Rfls** alt programı ise  $E = f(I_m)$  fonksiyonundan  $X_m$  'in en iyi değerini bulmak için Regula Falsi çözüm yöntemini kullanır.



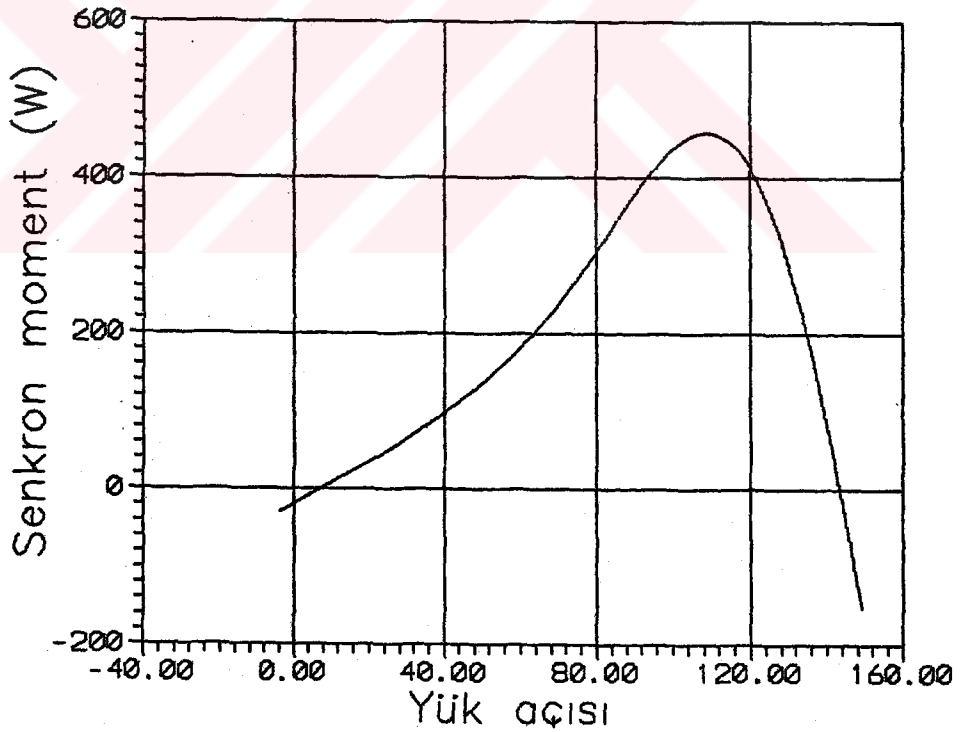


Şekil 2.9. Seri uyarımlı senkron motorun sürekli durum modeli akış çizelgesi

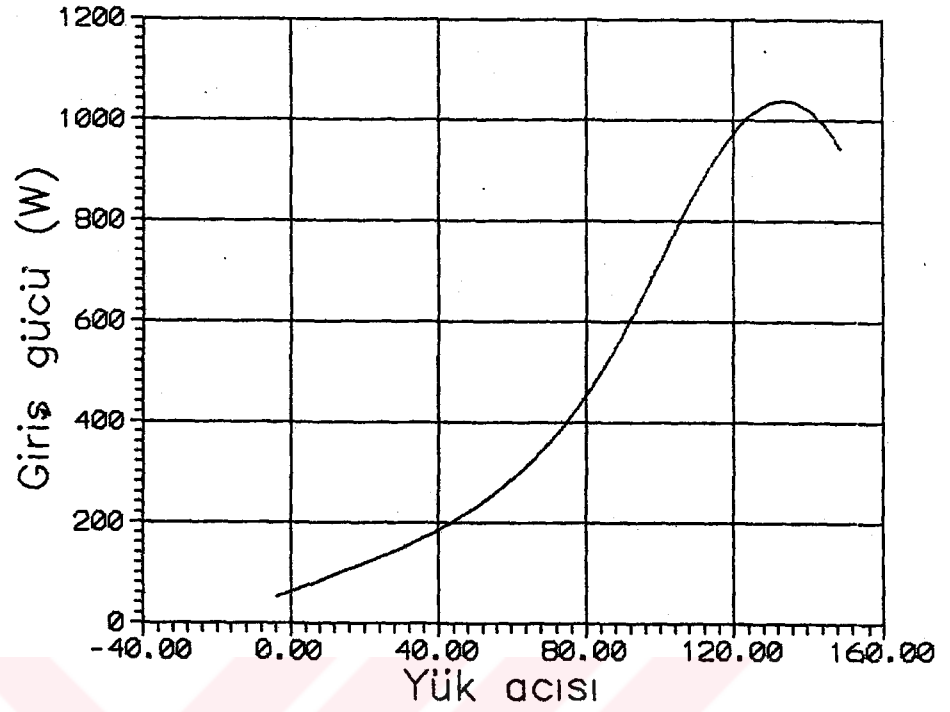
### 2.6.3. Örnek benzetimler

Bu bölümde tanıtilan seri uyarımlı senkron motorun sürekli durum modeli iki örnek motora uygulanarak, elde edilen hesaplama sonuçları her iki motor için ayrı ayrı verilmiştir. Ayrıca ikinci örnek motorun  $k=7.33$  olan stator-rotor sarım oranı  $k=1.25$  alınarak bu durum için de hesaplama elde edilmiştir.

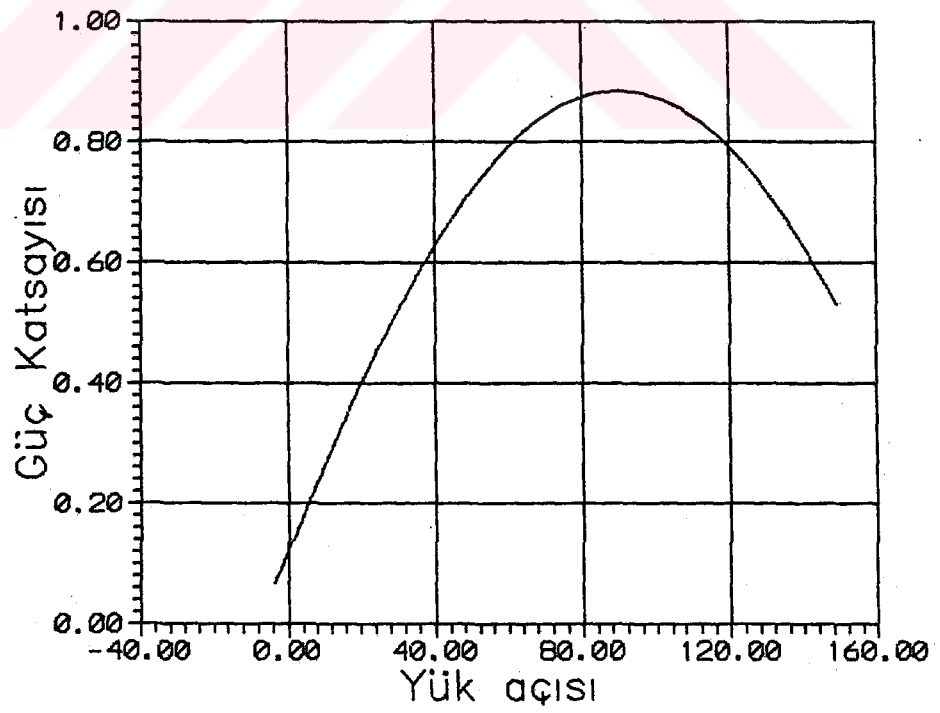
Birinci örnek motor için elde edilen çözümlerin grafikleri Şekil 2.10, Şekil 2.11, Şekil 2.12, Şekil 2.13 ve Şekil 2.14 ile verilmiştir.



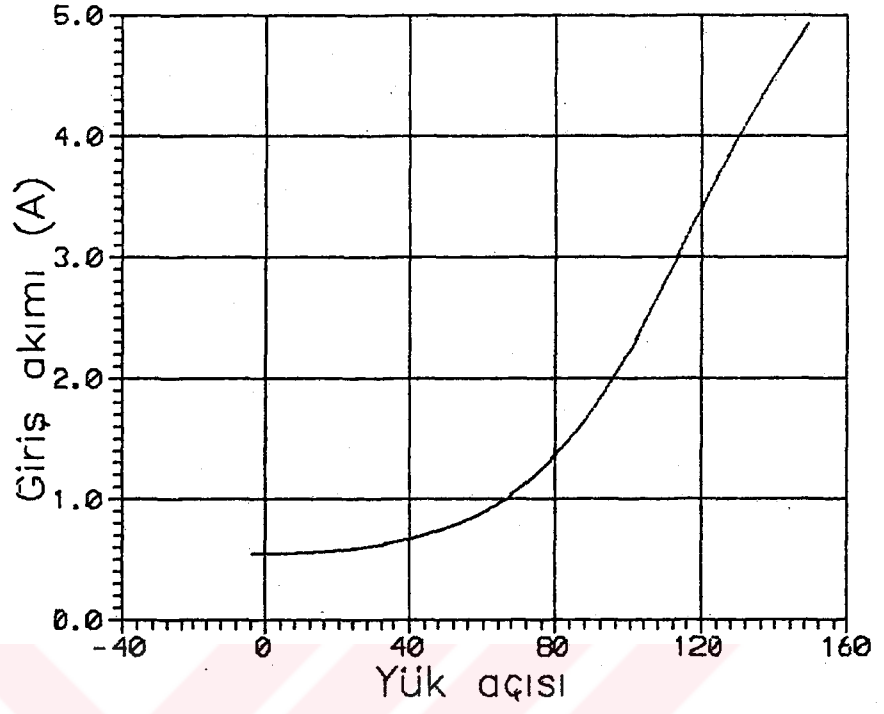
Şekil 2.10 Senkron moment-yük açısı eğrisinin değişimi



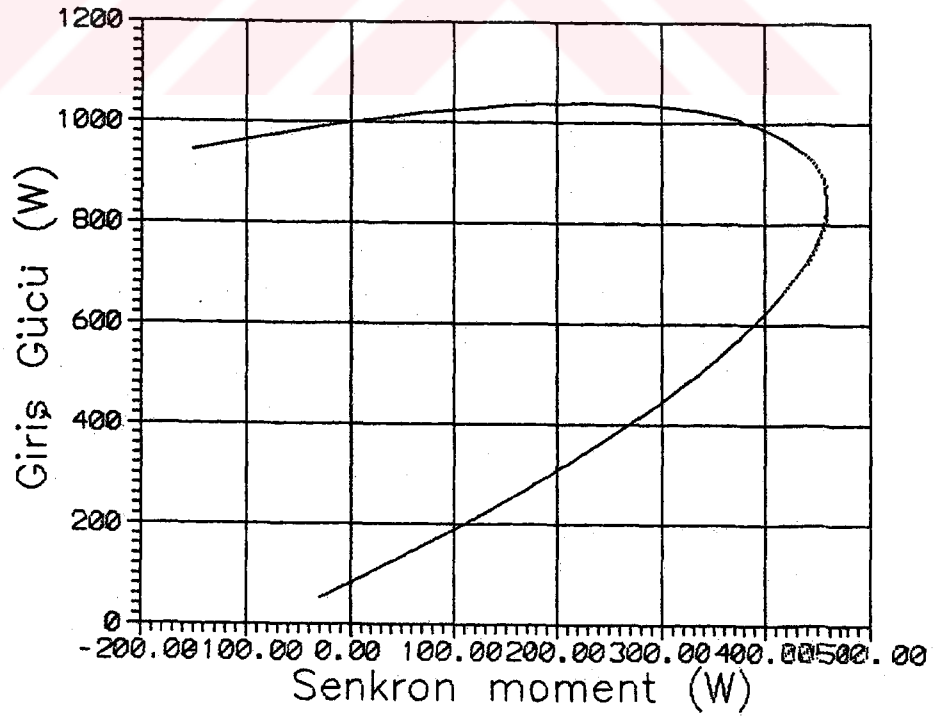
Şekil 2.11 Giriş gücü-yük açısı eğrisinin değişimi



Şekil 2.12 Güç katsayısı-yük açısı eğrisinin değişimi

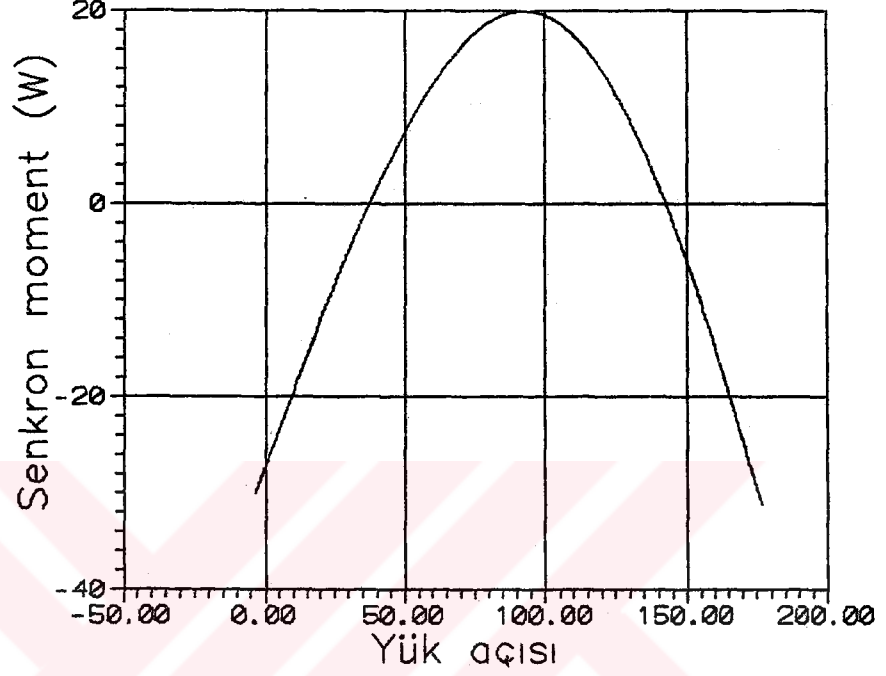


Şekil 2.13 Giriş akımı-yük açısı eğrisinin değişimi

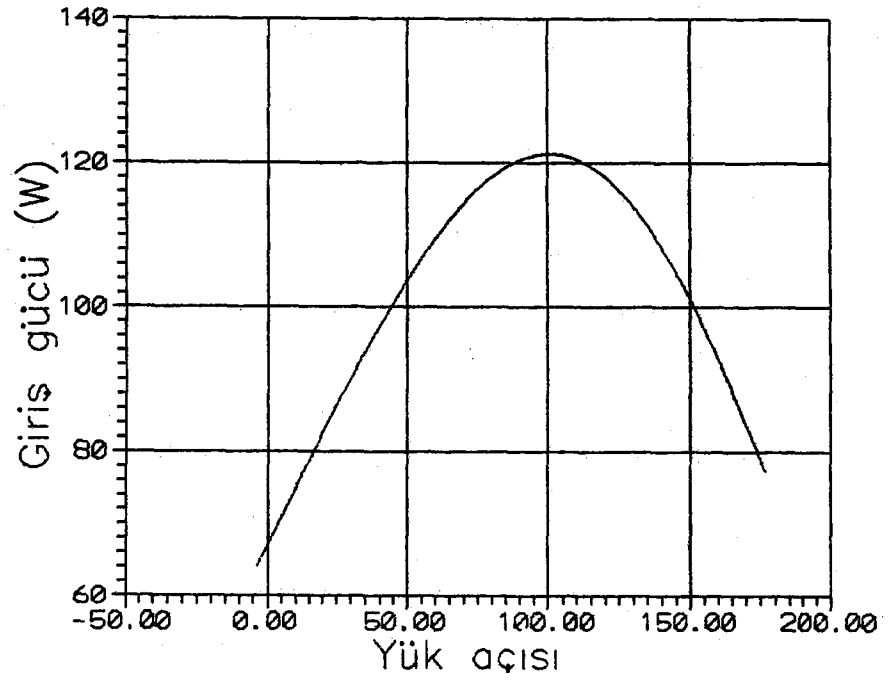


Şekil 2.14 Giriş gücü-senkron moment eğrisinin değişimi

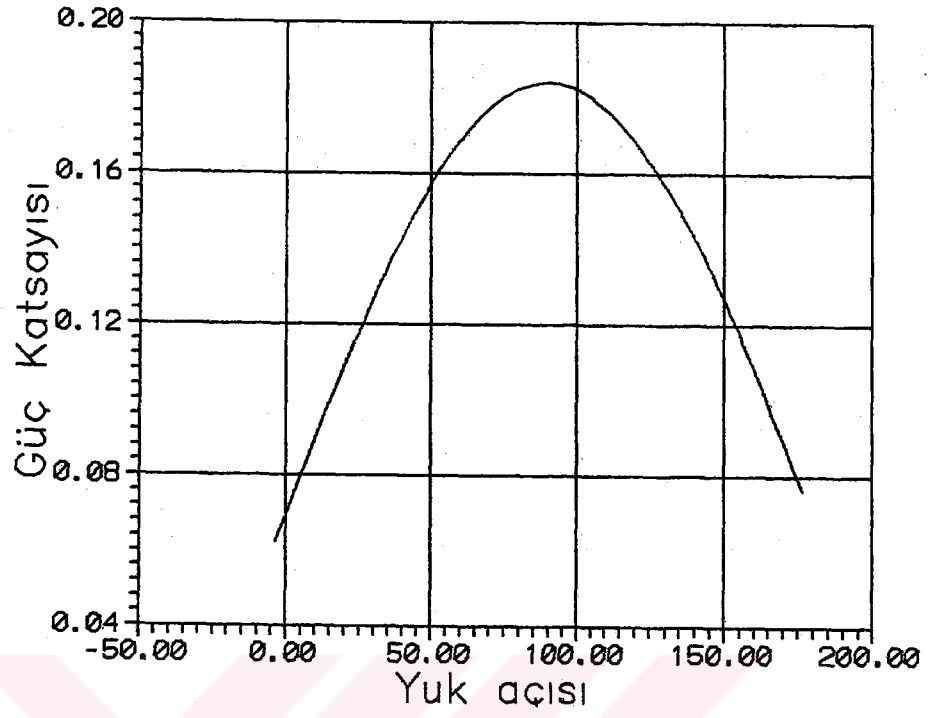
İkinci örnek motor için elde edilen çözümlerin grafikleri Şekil 2.15, Şekil 2.16, Şekil 2.17, Şekil 2.18 ve Şekil 2.19 ile verilmiştir.



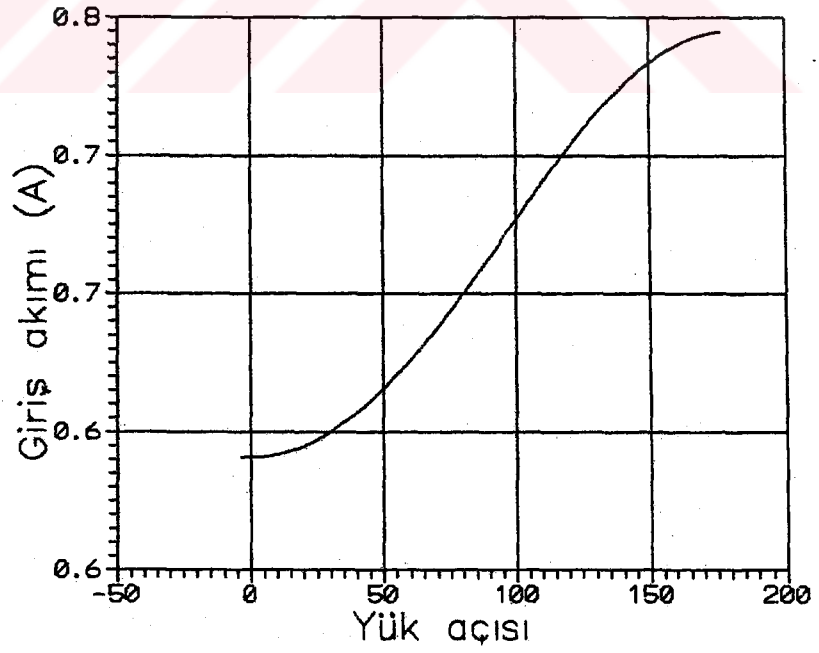
Şekil 2.15 Senkron moment-yük açısı eğrisinin değişimi



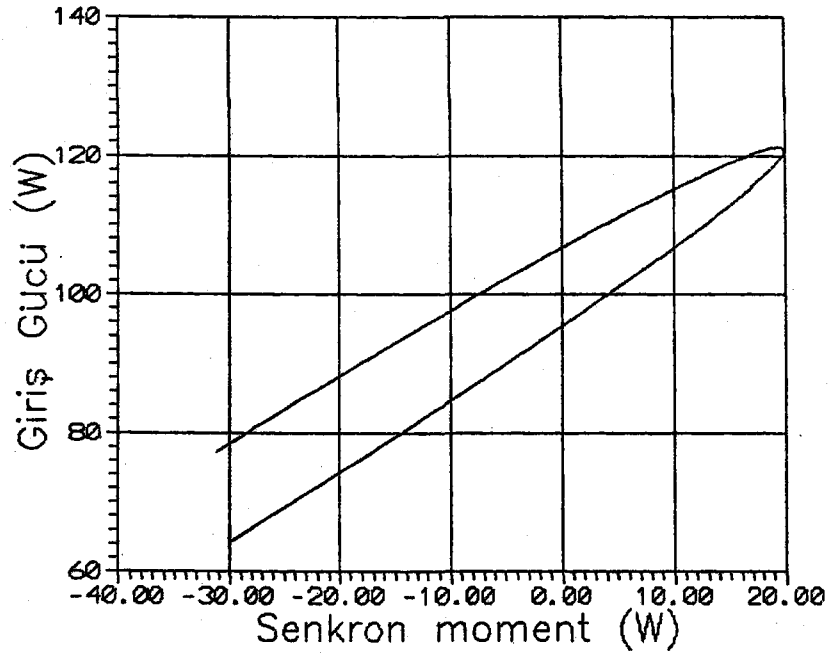
Şekil 2.16 Giriş gücü-yük açısı eğrisinin değişimi



Şekil 2.17 Güç katsayısı-yük açısı eğrisinin değişimi

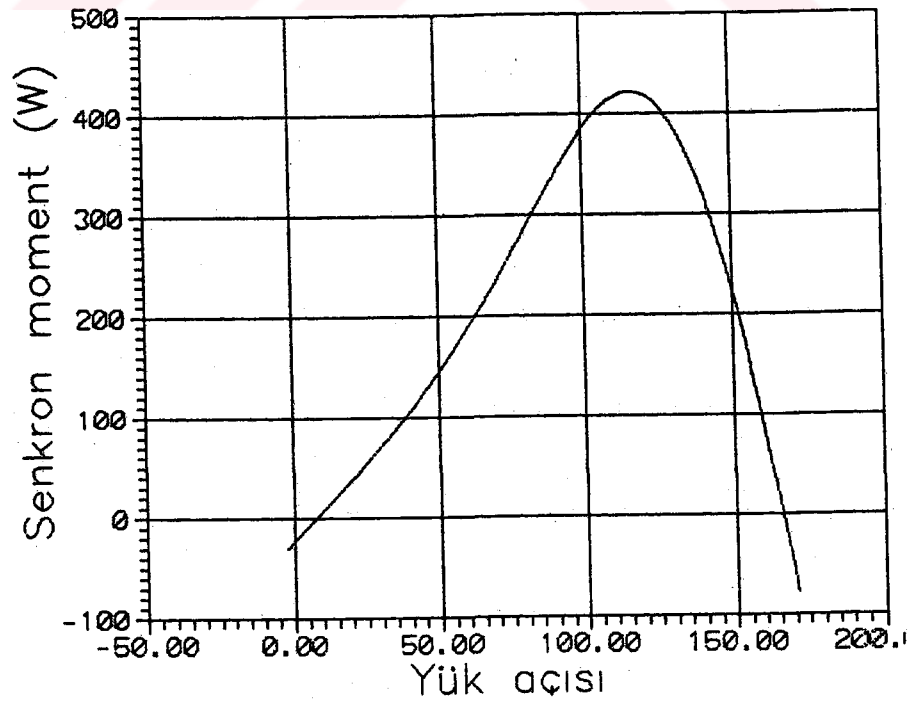


Şekil 2.18 Giriş akımı-yük açısı eğrisinin değişimi

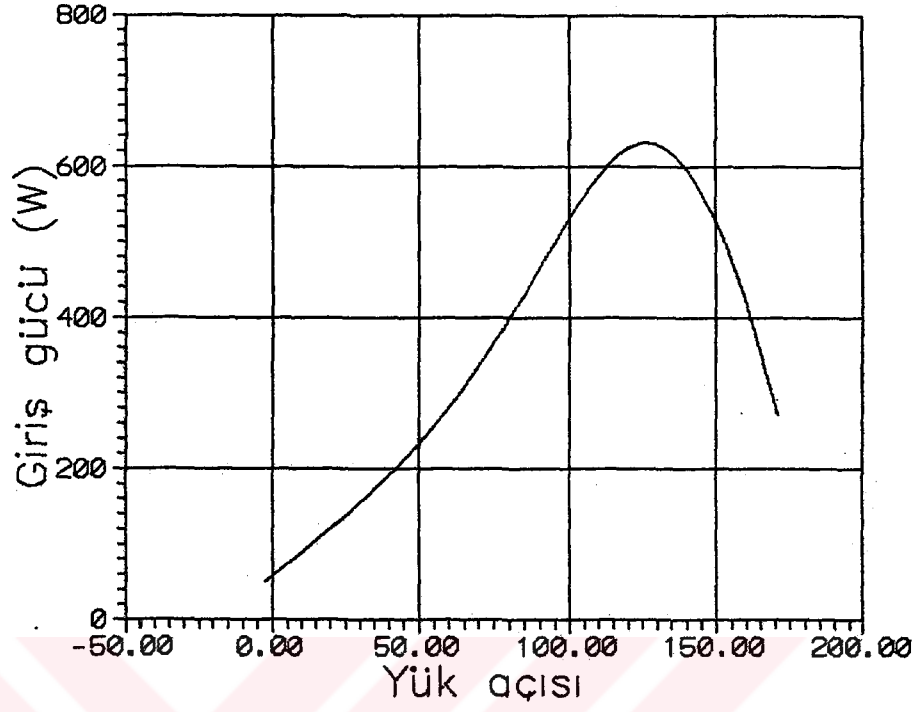


Şekil 2.19 Giriş gücü-senkron moment eğrisinin değişimi

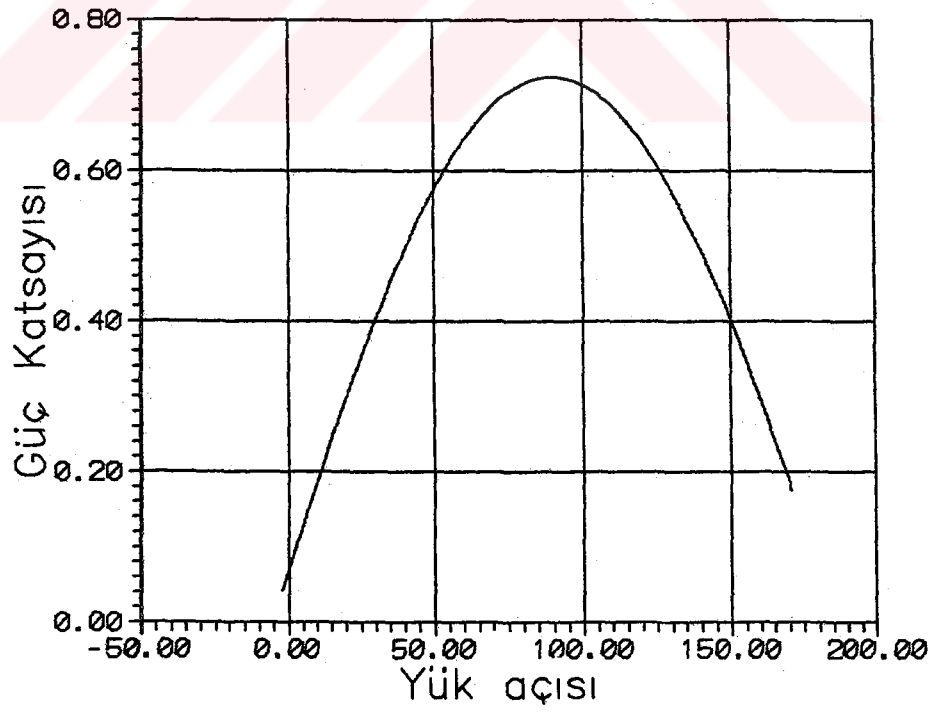
İkinci örnek motorun stator-rotor sarım oranının  $k=1.25$  değeri için elde edilen çözümlerin grafikleri Şekil 2.20, Şekil 2.21, Şekil 2.22, Şekil 2.23 ve Şekil 2.24 ile verilmiştir.



Şekil 2.20 Senkron moment-yük açısı eğrisinin değişimi

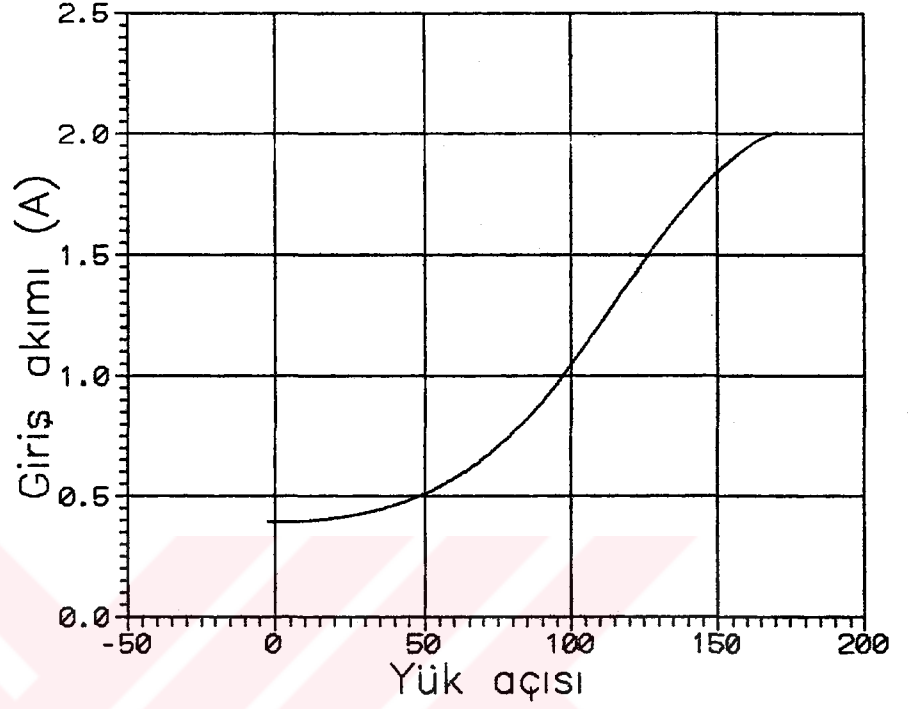


Şekil 2.21 Giriş gücü-yük açısı eğrisinin değişimi

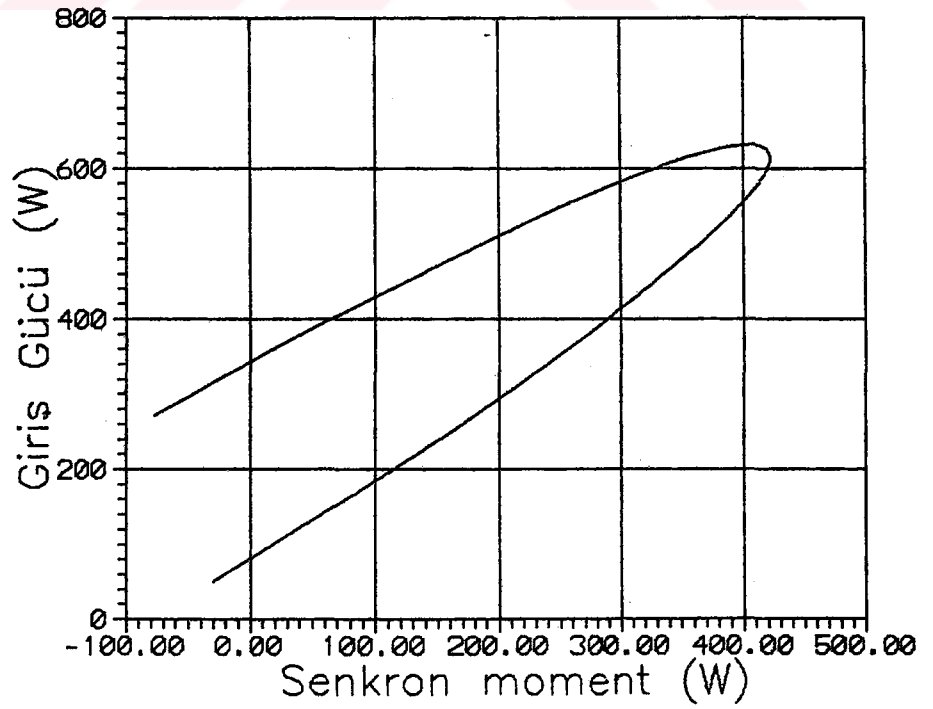


Şekil 2.22 Güç katsayısı-yük açısı eğrisinin değişimi





Şekil 2.23 Giriş akımı-yük açısı eğrisinin değişimi



Şekil 2.24 Giriş gücü-senkron moment eğrisinin değişimi

#### 2.6.4. Değerlendirme

Birinci motor, çözüm grafiklerinden görüldüğü gibi seri uyartımlı senkron motor olarak çalışmaya daha uygundur. Bunun nedeni birinci örnek motorun stator-rotor sarım oranının bire yakın olmasıdır. Çalışmada örnek motor olarak kullanılan ikinci motorun ise, bu tür çalışmaya uygun olmadığı görülmektedir. İkinci motorun stator-rotor sarım oranı çözümde  $k=1.25$  alındığında, elde edilen çözüm grafiklerinin birinci çözüm grafiklerinden daha iyi olduğu görülmektedir.

## BÖLÜM 3

### ASENKRON MAKİNALARIN DİNAMİK DAVRANIŞI İÇİN FAZ DEĞİŞKENLERİ MODELİ

#### 3.1. Giriş

Faz değişkenleri kavramıyla, asenkron makinanın dinamik modellenmesi dönüşüme gerek olmadan yapılabildiğinden, belli kolaylıklar getiren bir yaklaşımdır. Bu bölümde önerilen yaklaşımın temel ilkeleri ve buna dayalı "Dinamik Davranış Modeli" tanıtılacaktır.

#### 3.2. Dinamik Davranış İncelemesinin Kapsamı

Asenkron makinaların dinamik davranışını incelemek aşağıdaki durumlarda gerilim, akım, hız, güç, moment ve benzeri makina büyüklüklerinin zamandaki değişimlerinin birini veya birkaçını elde etmeyi kapsar ( Kovacs, 1984 ; Alexandrovitz ve Katz, 1982 ; Krause, 1987 ).

- a) Asenkron makinaya boşta ve yükte yol verme,
- b) Stator gerilimini arttırarak yol verme,
- c) Yıldız-üçgen bağlantısı ile yol verme,
- d) Besleme gerilimi kesilmesi ve yeniden uygulanması
- e) Faz kopması,
- f) Faz kısa devreleri,
- g) Ani mekanik yük değişimleri,

- h) Değişik frenleme uygulamaları,
- i) Ani besleme gerilimi değişimleri.

Bu değişimler değişik besleme türlerine göre elde edilebilir. Sinüs biçimi dışındaki beslemeleri içeren güç elektroniği devrelerinde, özellikle evirici ile beslemelerde sürekli durumdaki büyüklüklerin zamanla değişimleri de dinamik davranış incelemesi kapsamına girer.

Herhangi bir dinamik davranış modeli geliştirilirken, gerek modelin bilgisayarda uygulanması, gerekse deneysel uygulanması ve yetisinin saptanması yukarıda açıklanan durumlar için yapılan hesaplama sonuçlarına dayanır.

### **3.3. Dinamik Davranışta Modelleme Yaklaşımları**

Dinamik davranış modelleri, makina davranışının, zamanla adım adım hesaplanması üzerine kurulur. Bunun için yaygın olarak bilinen dört değişik model yaklaşımı vardır (Alexandrovitz ve Katz, 1982 ; Adkins ve Harley, 1975 ; Hancock, 1989 ; Krause ve Wasynczuk, 1989 ; Krause, 1987 ; Sarıoğlu, IL 61801).

- a) Faz değişkenleri modeli yaklaşımı,
- b) d-q eksenleri 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, modeller arası dönüşümlerden türetilen parametre

tanımıdır. Modeller için makinada parametre ölçüm yöntemlerini de yaklaşımlar belirler.

Bunlar arasında faz değişkenleri yaklaşımının avantajı, değişkenlerin makinanın fiziksel büyüklüklerini içermesinden dolayı akım, 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 hava aralığının çapsal doğrultudaki boyu sabit olan üç fazlı bilezikli asenkron makinanın şeması gösterilmiştir. Makinanın statorunda duran üç sargı, rotorunda ise rotor ile birlikte hareket eden üç sargı vardır. Stator üç faz akım ve akıları  $i_{sa}$ ,  $i_{sb}$ ,  $i_{sc}$  ve  $\Psi_{sa}$ ,  $\Psi_{sb}$ ,  $\Psi_{sc}$ , rotor üç faz akım ve akıları da  $i_{ra}$ ,  $i_{rb}$ ,  $i_{rc}$  ve  $\Psi_{ra}$ ,  $\Psi_{rb}$ ,  $\Psi_{rc}$  olsun; Bu koşullar altında stator ve rotor sargıları gerilim denklemleri

$$\begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{sa} & 0 & 0 \\ 0 & R_{sb} & 0 \\ 0 & 0 & R_{sc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_{sa} \\ \Psi_{sb} \\ \Psi_{sc} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

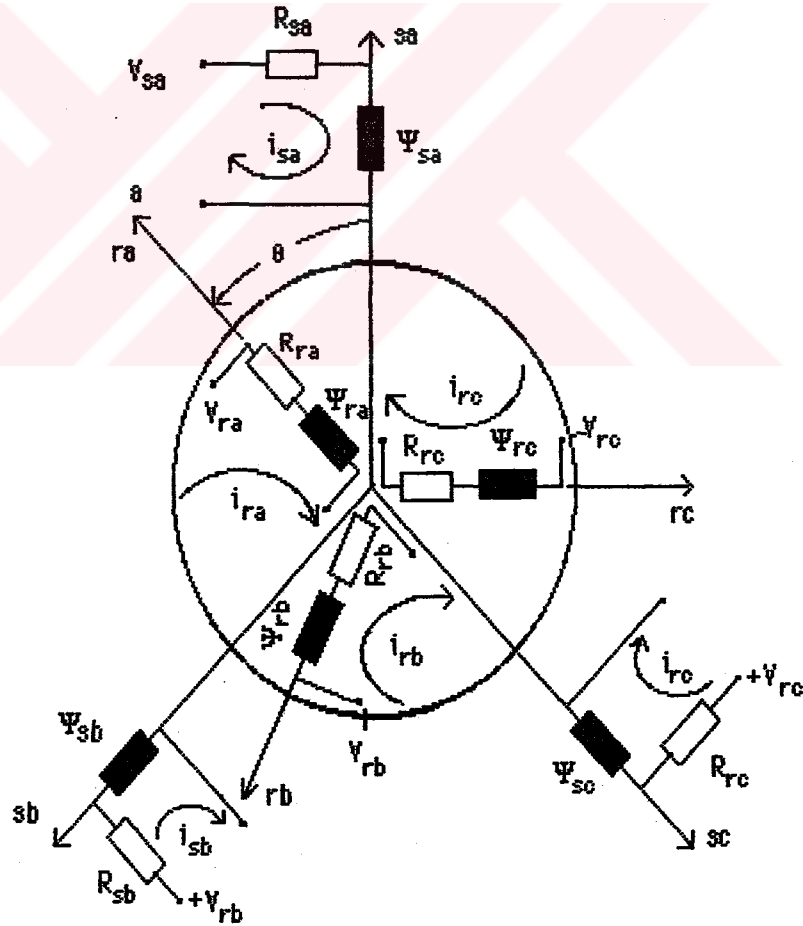
ve

$$\begin{bmatrix} u_{ra} \\ u_{rb} \\ u_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{ra} & 0 & 0 \\ 0 & R_{rb} & 0 \\ 0 & 0 & R_{rc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_{ra} \\ \Psi_{rb} \\ \Psi_{rc} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

şeklindedir. Gerilim denklemlerinin yazılışı kısaltılıp, beraberce yazıldığında

$$\begin{bmatrix} u_s \\ u_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_s \\ \Psi_r \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

olur. Gerilim denklemlerinde görülen akıların  $\Psi_s$ ,  $\Psi_r$  herbiri akım vektörlerinde görülen altı akıma da bağlıdır. Buna göre akılar için



Şekil 3.1 Bilezikli senkron makinanın sembolik gösterimi

$$\begin{bmatrix} \Psi_{sa} \\ \Psi_{sb} \\ \Psi_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{sa} & -M_{sa,b} & -M_{sa,c} \\ -M_{sb,a} & L_{sb} & -M_{sb,c} \\ -M_{sc,a} & -M_{sc,b} & L_{sc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{sa,ra} & M_{sa,rb} & M_{sa,rc} \\ M_{sb,ra} & M_{sb,rb} & M_{sb,rc} \\ M_{sc,ra} & M_{sc,rb} & M_{sc,rc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

ve

$$\begin{bmatrix} \Psi_{ra} \\ \Psi_{rb} \\ \Psi_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{ra,sa} & M_{ra,sb} & M_{ra,sc} \\ M_{rb,sa} & M_{rb,sb} & M_{rb,sc} \\ M_{rc,sa} & M_{rc,sb} & M_{rc,sc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{ra} & -M_{ra,b} & -M_{ra,c} \\ -M_{rb,a} & L_{rb} & -M_{rb,c} \\ -M_{rc,a} & -M_{rc,b} & L_{rc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

yazılır. Akı denklemlerinin yazılışı kısaltılıp, beraberce yazıldığında

$$\begin{bmatrix} \Psi_{sa} \\ \Psi_{sb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss} & L_{sr} \\ L_{rs} & L_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

elde edilir. Bilezikli asenkron makinanın rotor ve stator çevresi düzgün olduğundan, hava aralığı sabit ve bu yüzden de simetrik makinada

$$L_{sa} = L_{sb} = L_{sc} = L_a$$

$$L_{ra} = L_{rb} = L_{rc} = L_b$$

$$M_{sa,b} = M_{sa,c} = M_{sb,c} = M_s$$

$$M_{ra,b} = M_{ra,c} = M_{rb,c} = M_r$$

$$R_{sa} = R_{sb} = R_{sc} = R_s$$

$$R_{ra} = R_{rb} = R_{rc} = R_r \quad (3.7)$$

dir. Aynı zamanda Diğer yandan rotor sargısı stator sargısına göre hareket ettiğinden bunlar arasındaki karşıt endüktans değişecektir. Bu değişim karşıt endüktlemeleri ve sargıların parametreleri eşit olduğundan rotorun

konum açısı  $\theta$  ya göre değişeceğinden

$$M_{sa,ra} = M_{ra,sa} = M_{sb,rb} = M_{rb,sb} = M_{sc,rc} = M_{rc,sc} = M_{sr} \cos\theta$$

$$M_{sa,rb} = M_{rb,sa} = M_{rb,sc} = M_{rc,sb} = M_{sc,ra} = M_{ra,sc} = M_{sr} \cos(\theta + 2\pi/3)$$

$$M_{sa,rc} = M_{rc,sa} = M_{sb,ra} = M_{ra,sb} = M_{sc,rb} = M_{rb,sc} = M_{sr} \cos(\theta - 2\pi/3) \quad (3.8)$$

olur. Stator ve rotorun  $0_s$ ,  $0_r$  nötr noktaları için Kirchhoff' un akım denklemini yazıldığında

$$i_{sa} + i_{sb} + i_{sc} = 0$$

$$i_{ra} + i_{rb} + i_{rc} = 0$$

(3.9)

elde edilir. (3.9) denklemindeki akım bağıntılarını ve (3.8) denklemindeki  $M_{sr}$  eşitliklerini (3.4) ve (3.5) deki akı denklemlerinde yerlerine yazılırsa

$$\begin{bmatrix} \Psi_{sa} \\ \Psi_{sb} \\ \Psi_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 \\ 0 & 0 & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + M_{sr} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

ve

$$\begin{bmatrix} \Psi_{ra} \\ \Psi_{rb} \\ \Psi_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r & 0 & 0 \\ 0 & L_r & 0 \\ 0 & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + M_{sr} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$



elde edilir. Burada  $L_a + M_s = L_s$  stator senkron özendüktansı  $L_b + M_r = L_r$  de rotor senkron özendüktansıdır. (3.10) ve (3.11) deki akı denklemleri (3.1) ve (3.2) deki gerilim denklemlerinde yerlerine yazılırsa

$$\begin{bmatrix} U_{sa} \\ U_{sb} \\ U_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 \\ 0 & 0 & L_s \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix}$$

$$+ M_{sr} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

ve

$$\begin{bmatrix} U_{ra} \\ U_{rb} \\ U_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_r & 0 & 0 \\ 0 & L_r & 0 \\ 0 & 0 & L_r \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix}$$

$$+ M_{sr} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

elde edilir. (3.12) ve (3.13) denklemleri kısaltılarak matrisel olarak

birleştirilirse

$$\begin{bmatrix} u_s \\ u_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{ss} & L_{sr}(\theta) \\ L_{rs}(\theta) & L_{rr} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \frac{\partial L_{sr}(\theta)}{\partial \theta} \\ \frac{\partial L_{rs}(\theta)}{\partial \theta} & 0 \end{bmatrix} \frac{d\theta}{dt} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

biçiminde yazılır.

### 3.5 . Diferansiyel Denklem Sisteminin Elde Edilmesi

(3.14) denkleminde akımların türevleri sol yana ve diğer terimler sağ yana toplanırsa

$$\begin{bmatrix} L_{ss} & L_{sr}(\theta) \\ L_{rs}(\theta) & L_{rr} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_s \\ u_r \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & \frac{\partial L_{sr}(\theta)}{\partial \theta} \\ \frac{\partial L_{rs}(\theta)}{\partial \theta} & 0 \end{bmatrix} \frac{d\theta}{dt} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

olur. Burada  $[i_s]$  ve  $[i_r]$  akımları birbirine bağılı olmayan değişkenlerdir. (3.15) denkleminde birinci türevleri sol yanda bırakmak için, denklemin her iki yanını  $[L^{-1}]$  ile çarpılırsa

$$\frac{d[i_{sr}]}{dt} = [A][u] - [B][i] \quad (3.16)$$

biçiminde akımlar için durum denkleminin elde edilir. Burada  $[A]$  ve  $[B]$  katsayı matrisleridir.

Hareket denklemi ise

$$j \frac{d\omega_m}{dt} = T_d - T_y \quad (3.17)$$

dir. (4.18) denkleminde türevi sol yanda bırakmak için, denklemin her iki yanını  $j$  ye bölünürse

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{j} (T_d - T_y) \quad (3.18)$$

elde edilir. Rotorun konum açısı ise

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (3.19)$$

dir. Endüklenen moment için

$$T_d = -\frac{p}{2} \begin{bmatrix} i_{sa} & i_{sb} & i_{sc} & i_{ra} & i_{rb} & i_{rc} \end{bmatrix} \frac{\partial [L_{sr}]}{\partial \theta} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \\ i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

yazılır. Endüktans matrisinin türevi (3.20) denkleminde yerine yazılıp, gerekli sadeleştirmeler yapılırsa,

$$T_d = -\frac{p}{2} M_{sr} \left( (i_{ra} i_{sa} + i_{rb} i_{sb} + i_{rc} i_{sc}) \sin\theta + (i_{ra} i_{sb} + i_{rb} i_{sc} + i_{rc} i_{sa}) \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + (i_{ra} i_{sc} + i_{rb} i_{sa} + i_{rc} i_{sb}) \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \right) \quad (3.21)$$

elde edilir.

### 3.6. Bilgisayar Programı

Bilezikli asenkron motorun faz değişkenleri sayısal modelinin gerçekleştirilmesi amacıyla Şekil 3.2 deki akış diyagramı hazırlanmış ve bu akış diyagramına uygun, fortran 77 programlama dilinde "Benzetim Programı" yazılmıştır. Bu programla, belirlenen zaman aralığında adım adım ilerleyerek motorun dinamik davranışı hesaplanmaktadır.

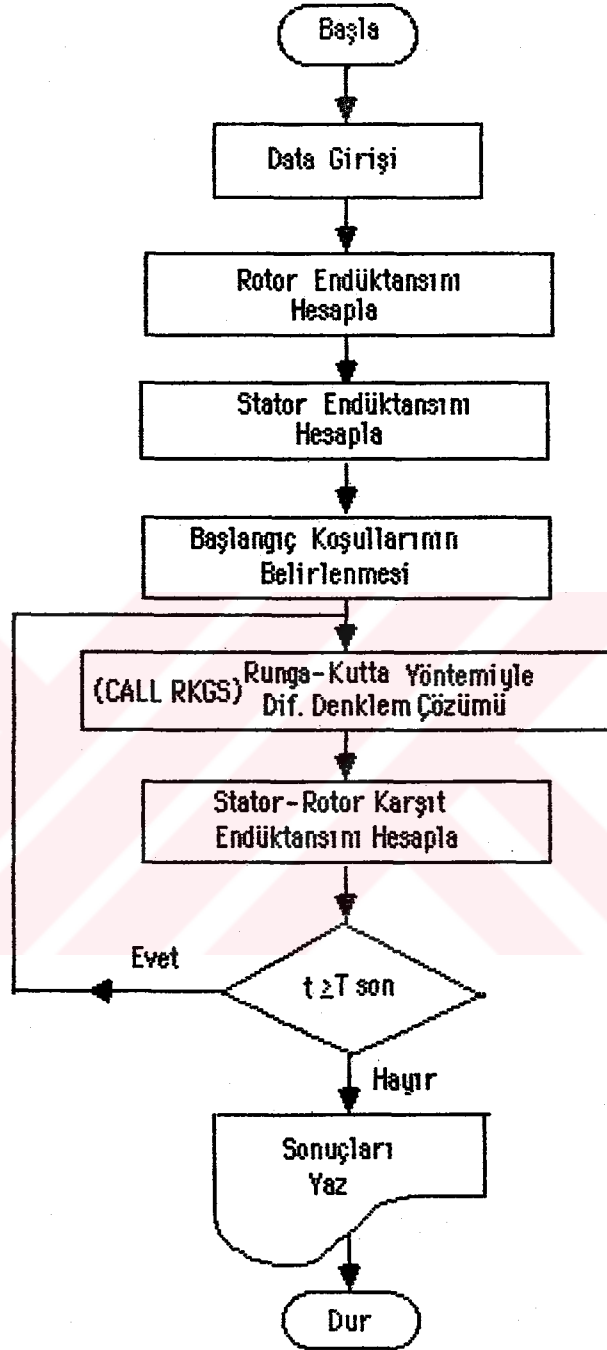
Ayrıt 3.5 de elde edilen diferansiyel denklem sisteminin çözümü için "Runge-Kutta-Merson" sayısal çözüm yöntemi kullanılmıştır. Bu çözüm yöntemi ile ilgili açıklamalar Ek. A da verilmiştir.

### 3.7. Yöntemin Sınanması

Faz değişkenleri yönteminin doğruluğunu kanıtlamak için: daha önce değişik yöntemle dinamik davranışı incelenmiş olan bilezikli asenkron motorun hesaplanmış değerlerinin, faz değişkenleri yöntemiyle çözülmesi ve sonuçların karşılaştırılması düşünülmüştür. Bu nedenle seçilen asenkron motorun anma değerleri ve parametreleri Tablo 3.1 de verilmiştir (Alexandrovitz ve Katz, 1982 ; Sezgin, 1983).

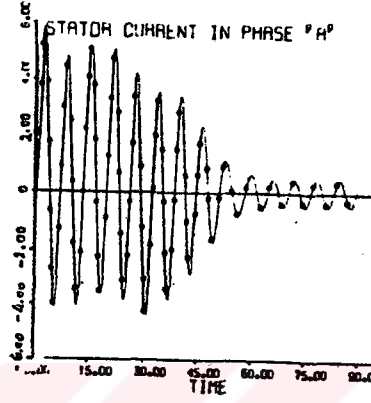
Tablo 3.1 Seçilen bilezikli asenkron makinanın anma değerleri ve parametreleri

$P_N$	$U_N$	$I_N$	$f_N$	$n_N$	$p$	$R_s$	$R_r$	$L_s$	$L_r$	$M_{sr}$	$j$
kW	V	A	Hz	d/d	kutup	ohm	ohm	H	H	H	$Wsn^3$
4	220	8.8	50	1435	2	1.315	1.192	0.227	0.227	0.146	0.047

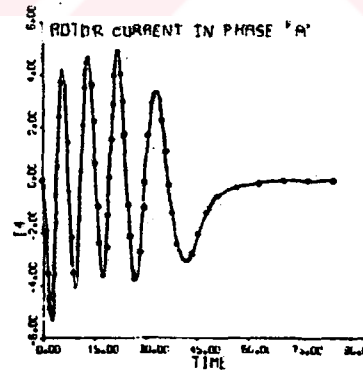


Şekil 3.2 Bilezikli asenkron makinenin faz değişkenleri yaklaşımı akış çizelgesi

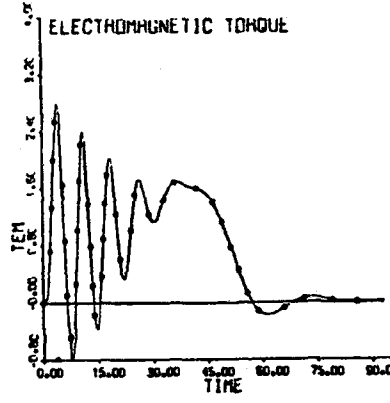
Seçilen motorda yol alma için elde edilen çözümlerin grafikleri Şekil 3.3, Şekil 3.4, Şekil 3.5, Şekil 3.6 ve Şekil 3.7 ile verilmiştir (Sezgin, 1983 ; Alexandrovitz vd. , 1982).



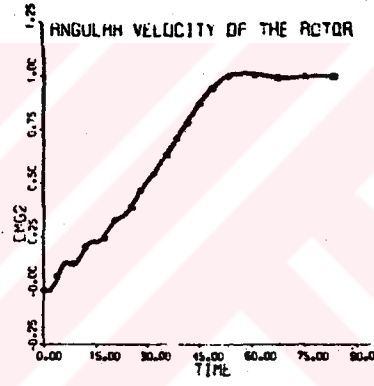
Şekil 3.3 Stator a fazı akımının zamana göre değişimi



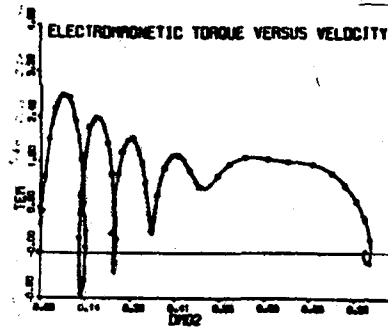
Şekil 3.4 Rotor a fazı akımının zamana göre değişimi



Şekil 3.5 Momentin zamana göre değişimi

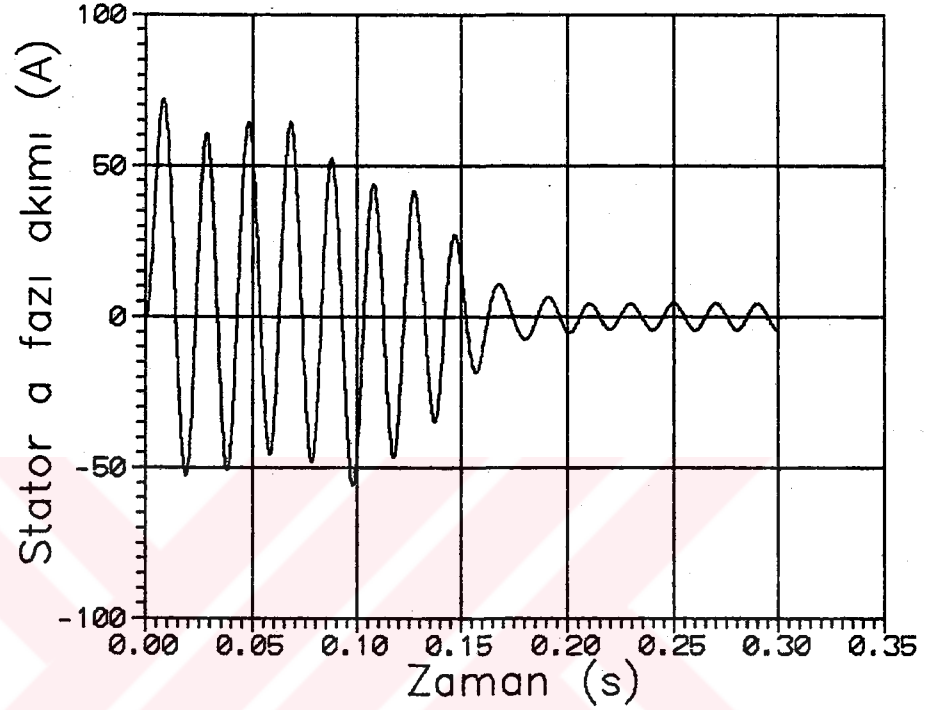


Şekil 3.6 Hızın zamana göre değişimi

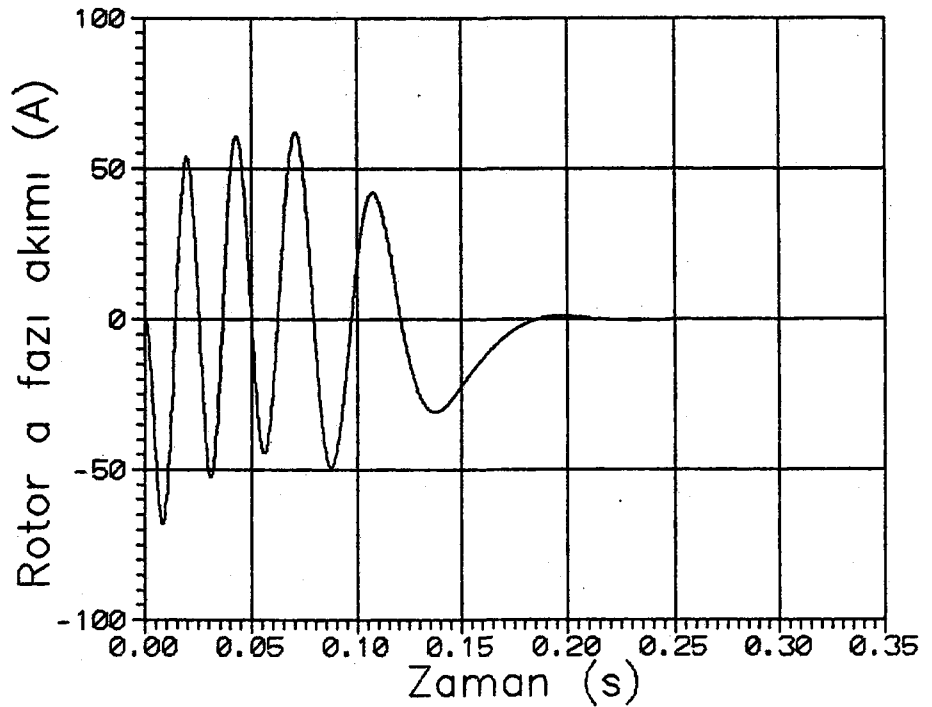


Şekil 3.7 Moment-hız eğrisinin değişimi

Faz değişkenleri yöntemiyle aynı durumlar için yapılan çözümlerin grafikleri Şekil 3.9, Şekil 3.10, Şekil 3.11, Şekil 3.12 ve Şekil 3.13 ile verilmiştir.

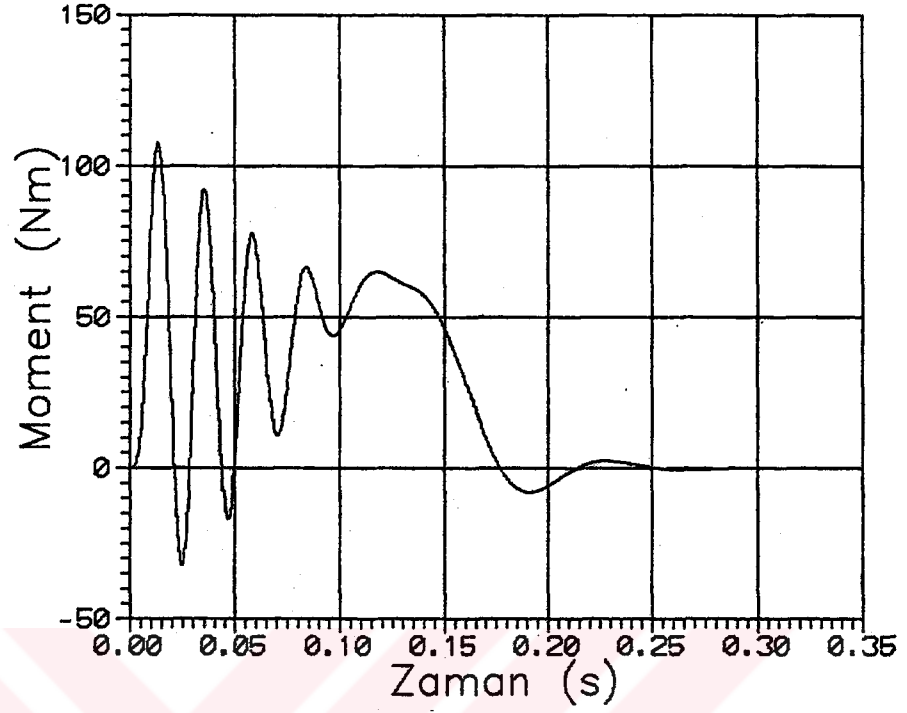


Şekil 3.8 Stator a fazı akımının zamana göre değişimi

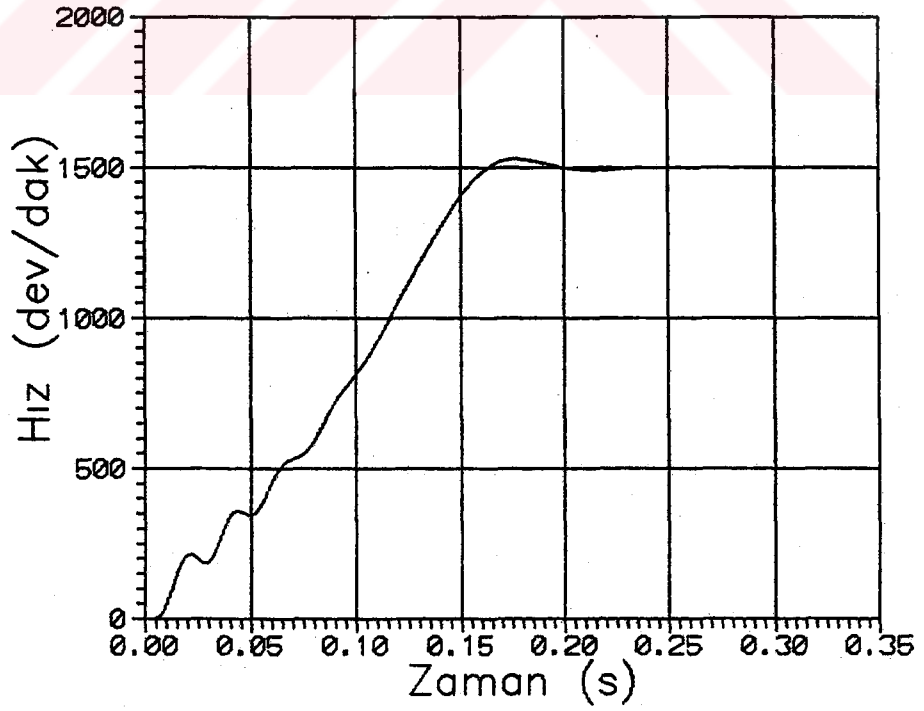


Şekil 3.9 Rotor a fazı akımının zamana göre değişimi

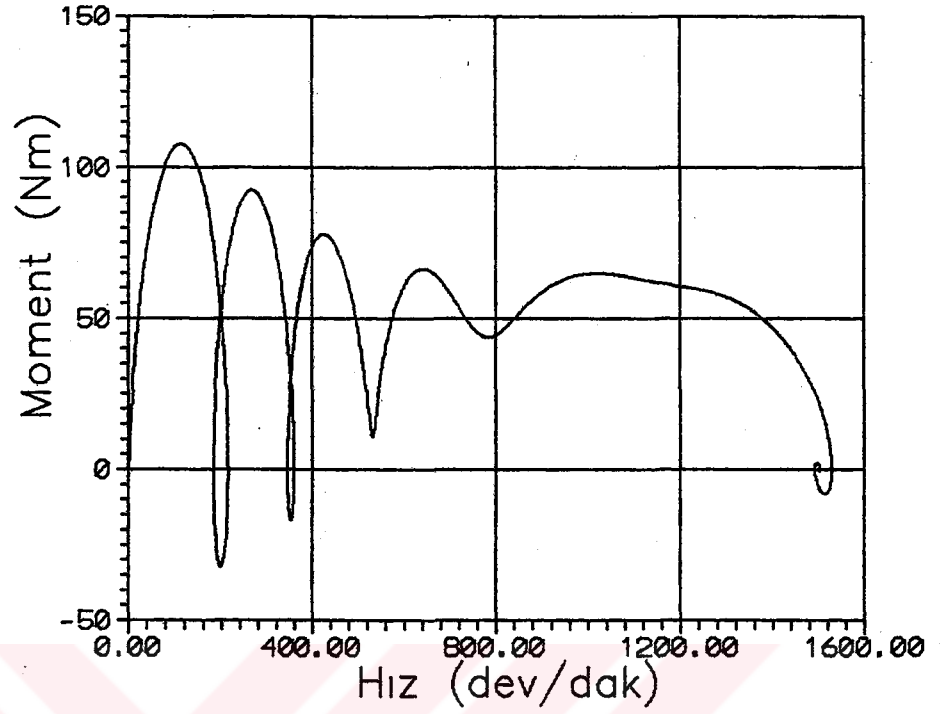




Şekil 3.10 Momentin zamana göre değişimi



Şekil 3.11 Hızın zamana göre değişimi



Şekil 3.12 Moment-hız eğrisinin zamana göre değişimi

### 3.8. Değerlendirme

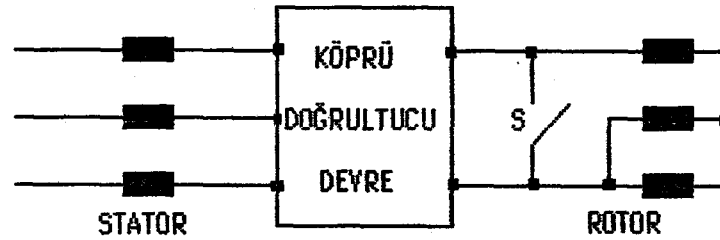
Bu bölümde faz değişkenleri yaklaşımıyla, asenkron makinanın dinamik davranış modeli yaklaşımının temel ilkeleri açıklanmıştır. Yaklaşımın doğruluğu örneklerle kanıtlanmıştır. Ancak doyma sorununa çözüm getirmediğçe model, sabit katsayılı ve aslında doğrusal olmayan fiziksel olguları tam yansıtmayan bir biçimdir.

## BÖLÜM 4

**TAM DALGA KÖPRÜ DOĞRULTUCU İLE SERİ UYARTIMLI  
SENKRONLANAN  
BİLEZİKLİ ASENKRON MOTORUN DİNAMİK MODELİ**

## 4.1. Giriş

Bu bölümde, köprü doğrultucu ile seri uyartımlı olarak senkronlanan bilezikli asenkron motorun faz değişkenleri "dinamik davranış modeli" oluşturulmuştur. Bu nedenle köprü doğrultucu devresindeki diyotlar iletim yönünde küçük değerli direnç, tıkama yönünde ise büyük değerli direnç olarak alınmıştır. Stator, köprü doğrultucu ve rotordan oluşan dinamik model iki aşamalıdır. Birinci aşamada S anahtarı kapalı iken asenkron yol verme yapılır. İkinci aşamada ise motor senkron hız yakınlığında çalışırken S anahtarı açılarak rotor sargısı doğru akımla uyartılır. Bu durumda motor seri uyartımlı senkron motor olarak çalışır (Şekil 4.1). Senkronlama için gerekli olan uyartım akımı, stator akımının doğrultulmasıyla seri uyartım olarak elde edilir.



Şekil 4.1 Stator, köprü doğrultucu ve rotordan oluşan dinamik model

## 4.2. Köprü Doğrultucu Devresinin Bilgisayarda Çözülmesi İçin Benzetim Yöntemi

Elektrik ve elektronik mühendisliğinde yarı-iletken devre elemanları ile güç denetimi yaygınlık kazanmaktadır. Özellikle elektrik makinalarının sürücü düzeneklerinin tasarımıyla ilgili güç elektroniği devrelerinin benzetimi önem taşır. Bu sistemlerin giderek karmaşıklaşması ve bilgisayarda uygulanabilecek sayısal yöntemlerin gelişmesi sonucu bilgisayar destekli çözümlere yaklaşımlarını gündeme getirmiştir.

Güç elektroniği devrelerin çözümlenmesinde birinci sorun: tristör ve diyot gerilim-akım değişimleri doğrusal bir modelle tanımlanamamaktadır. Bu konuda ilk yaklaşımlar diyot ve tristörleri belli koşullarda açılıp kapanan ideal anahtarlar olarak göstermektedir. Yarı-iletken elemanların iletim ve tıkamadaki özelliklerini gözönüne alarak bu elemanları iletim yönünde düşük değerli direnç, tıkama yönünde yüksek değerli direnç olarak alan modeller geliştirildi. Daha sonraları bu modeller tristör ve diyotların kırılım gerilimlerini, iletim tıkama dirençlerini, sayısal çözüm sırasında oluşacak zaman sabitlerini içerecek biçimde geliştirildi (Kutman, 1975).

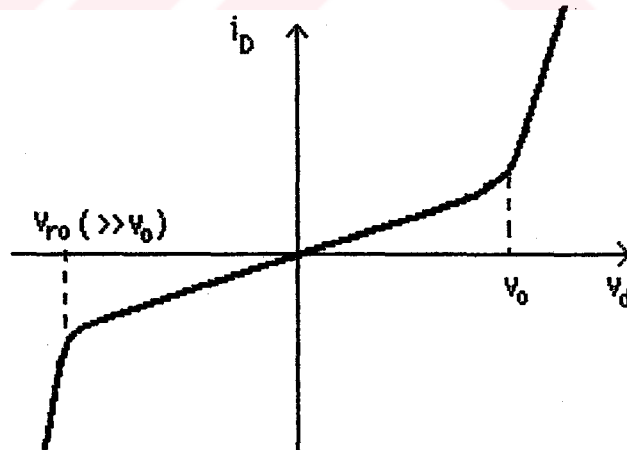
Uygun yarı-iletken modelleri seçildikten sonra gelen sorun devredeki enerji elemanları endüktans ve sığaların matematiksel modellerinden ileri gelen integro-diferansiyel bağıntıların çözümü yöntemi olmuştur. Bu çözüm için yaklaşımlardan biri devrenin değişik yarı-iletkenlerinin iletim durumlarına göre olası tüm biçimlerinin her biçimini ortaya çıkarmak, bunları 'mod'lar olarak tanımlamak ve her modda ortaya çıkacak elektrik devrelerinin çözümü için, çözüm istenen süre

boyunca, geleneksel yöntemlerin uygulanması olarak ortaya çıkmıştır. Daha sonraları kullanılan yöntemler ise devre topolojisinden ve durum denklemlerinden yararlanarak çözüm arama biçiminde görülmektedirler (Önbilgin ve Şenlik, 1986).

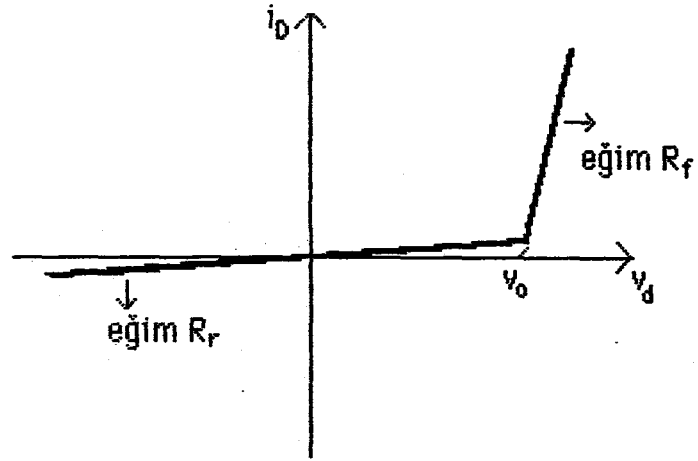
### 4.3. Diyotların Modellenmesi

Diyotların çalışmasını simgeleyen v-i özegrisi Şekil 4.2 'de verilmiştir. Bu özegrili doğrusal parçalara bölerek Şekil 4.3 'deki yaklaşık özegrileri elde etmek ve modellerini oluşturmak mümkün olmaktadır.

Diyotun doğrusal parçalı özegrili yaklaşımı Şekil 4.3 'de verilen eşdeğer devreyi oluşturmanın temelini oluşturur. Bu eşdeğer devrede ana işlev S1, S2, S3 mantık anahtarlarının, bir devrenin çözümünde herhangi bir anda nasıl değerlendirileceğinde kendini gösterir (Tekik, 1983).



Şekil 4.2. Diyot v-i özegrisi



Şekil 4.3 Doğrusallaştırma yoluyla diyot yaklaşık özegrisi

Bu modelde anahtarların değerleri şöyle saptanabilir (Şekil 4.4).

1. Diyot gerilimi

$$v_D > v_0 \text{ ise } SV = 1$$

$$v_D < v_0 \text{ ise } SV = 0 \quad (4.1)$$

2. Diyot akımı

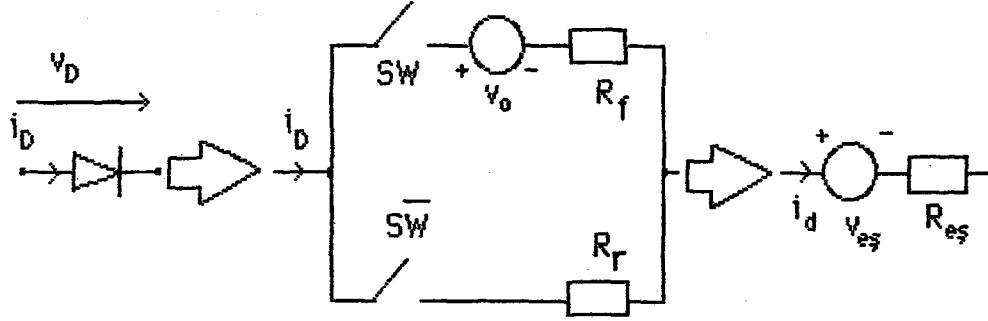
$$i_D > 0 \text{ ise } SI = 1$$

$$i_D < 0 \text{ ise } SI = 0 \quad (4.2)$$

Bu iki test sonunda diyotun durumu

$$SW = SV \cdot OR \cdot SI \quad (4.3)$$

mantıksal işlemleriyle belirlenir.



Şekil 4.4 Diyot eşdeğer devresi

Böylece belli bir zaman aralığı boyunca diyot eşdeğer devresi elemanlarının değerleri, o zaman adımıındaki akım, gerilim ve bir önceki zaman aralığında diyotun iletimde olup olmadığına bağlı olarak saptanabilir. Ayrıca bu modelde  $v_o$  ileri yönde kırılım geriliminin gözardı edilmesi durumunda diyot iletim yönünde çok küçük değerli bir direnç ve tıkama yönünde çok büyük değerli bir direnç ile modellendiği ortaya çıkar.

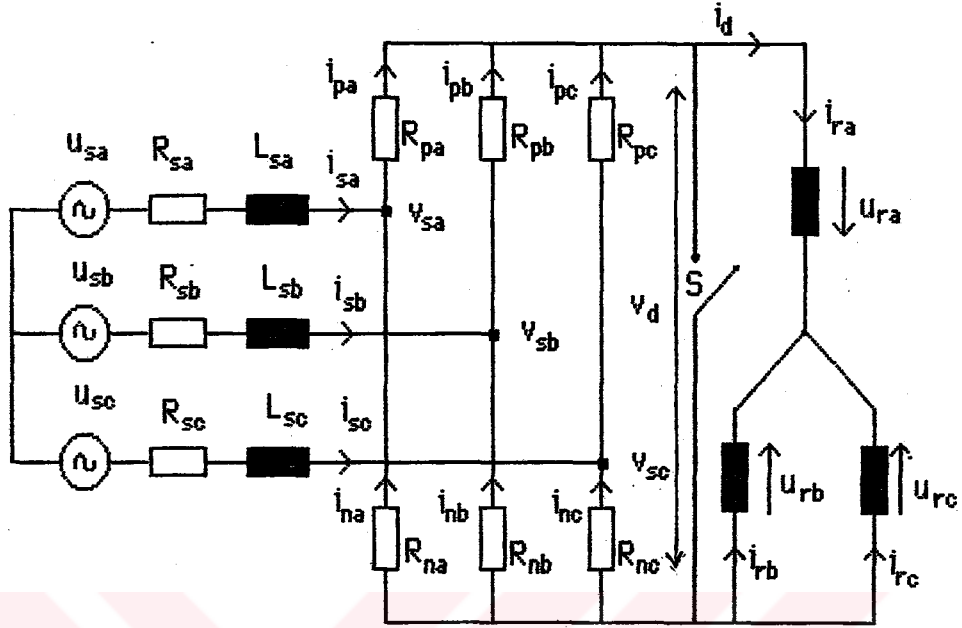
#### 4.4. Senkronlanan Bilezikli Asenkron Makina İle Köprü Doğrultucunun Birlikte Benzetimi

##### 4.4.1. S Anahtarları kapalıyken köprü doğrultucunun analizi

Şekil 4.5 ' de görüldüğü gibi bilezikli asenkron motorun stator fazlarının her birisine köprü şeklinde iki diyot yerleştirilmiştir. Köprü doğrultucuyu besleyen faz-faz arası gerilimler için

$$\begin{bmatrix} v_{ab} \\ v_{bc} \\ v_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

yazılır.



Şekil 4.5 Senkronlanan bilezikli asenkron motorun köprü doğrultucu ile birlikte gösterimi

Gerilim denklemlerinin yazılışını kısaltmak için , katsayı matrisi  $[T_v]$  olarak tanımlanırsa

$$[v_{sl}] = [T_v][v_s] \quad (4.5)$$

olur. Köprü doğrultucuda diyotların yerine direnç modeli yazılırsa

$$[v_{sl}] = [T_v] \begin{bmatrix} R_{pa} & 0 & 0 \\ 0 & R_{pb} & 0 \\ 0 & 0 & R_{pc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{pa} \\ i_{pb} \\ i_{pc} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

veya



$$[v_{SL}] = -[T_v] \begin{bmatrix} R_{na} & 0 & 0 \\ 0 & R_{nb} & 0 \\ 0 & 0 & R_{nc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{na} \\ i_{nb} \\ i_{nc} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

olarak elde edilir. Denklemlerin yazılışını kısalttığımızda

$$[v_{SL}] = [T_v] [R_p] [i_p]$$

ve

$$[v_{SL}] = -[T_v] [R_n] [i_n] \quad (4.8)$$

olur. Köprü doğrultucunun çıkışındaki S anahtarının kapalı olmasından dolayı yük gerilimi sıfırdır. Bu durumda

$$[R_p] [i_p] + [R_n] [i_n] = 0 \quad (4.9)$$

dır. Şekil 4.5 'den akımlar için

$$i_{sa} = i_{pa} - i_{na}$$

$$i_{sb} = i_{pb} - i_{nb} \quad (4.10)$$

$$i_{sc} = i_{pc} - i_{nc}$$

olarak yazılır. Kısalttığımızda

$$[i_s] = [i_p] - [i_n] \quad (4.11)$$

olur. (4.11) denkleminde  $[i_p]$  ve  $[i_n]$  'in değerleri ayrı ayrı (4.9)

denkleminde yerlerine yazılarak

$$[i_n] = - \left[ \frac{R_p}{R_p + R_n} \right] [i_s] \quad (4.12)$$

ve

$$[i_p] = \left[ \frac{R_n}{R_p + R_n} \right] [i_s] \quad (4.13)$$

bulunur. (4.12) denklemi (4.7) denkleminde veya (4.13) denklemi (4.6) denkleminde yerlerine yazılırsa

$$[v_{sL}] = [T_v] \left[ \frac{R_p \ R_n}{R_p + R_n} \right] [i_s] \quad (4.14)$$

elde edilir.

#### 4.4.2. Statora ilişkin denklemler

Şekil 4.5 'deki benzetimde S anahtarı kapalıyken, senkronlanan bilezikli asenkron motor rotoru kısa devre edilmiş asenkron motor gibi yol alır. Senkronlanan bilezikli asenkron motor senkron hıza yaklaşıncaya kadar S anahtarı kapalı durumdadır. Bu durumda benzetimin stator yanına ait gerilim denklemi

$$[v_{sL}] = [u_s] - [R_s] [i_s] - [L_{ss}] \frac{d}{dt} [i_s] - [L_{sr}] \frac{d}{dt} [i_r] - \left[ \frac{\partial L_{sr}}{\partial \theta} \right] \frac{d\theta}{dt} [i_r] \quad (4.15)$$

dir. (4.15) denkleminin üçüncü satırını elimine etmek için katsayı matrisi

$$[\tilde{T}_v] = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

yazılıp, (4.15) denklemini soldan  $[\tilde{T}_v]$  ile çarpılırsa

$$[\tilde{V}_{SL}] = [\tilde{U}_S] - [\tilde{R}_S] [i_S] - [\tilde{L}_{SS}] \frac{d}{dt} [i_S] - [\tilde{L}_{SR}] \frac{d}{dt} [i_R] - \left[ \frac{\partial \tilde{L}_{SR}}{\partial \theta} \right] \frac{d\theta}{dt} [i_R] \quad (4.17)$$

olur. Burada

$$[\tilde{V}_{SL}] = [\tilde{T}_v] [v_{SL}]$$

$$[\tilde{U}_S] = [\tilde{T}_v] [u_S]$$

$$[\tilde{L}_{SS}] = [\tilde{T}_v] [L_{SS}]$$

$$[\tilde{L}_{SR}] = [\tilde{T}_v] [L_{SR}]$$

$$\left[ \frac{\partial \tilde{L}_{SR}}{\partial \theta} \right] = [\tilde{T}_v] \left[ \frac{\partial L_{SR}}{\partial \theta} \right]$$

$$[\tilde{R}_S] = [\tilde{T}_v] [R_S]$$

dır. Nötr iletkeni olmadığından

$$i_{sa} + i_{sb} + i_{sc} = 0$$

$$i_{ra} + i_{rb} + i_{rc} = 0 \quad (4.18)$$

dır. Akımlar için

$$[i_S] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

ve

$$[i_r] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

yazılır.  $i_{sc}$  ve  $i_{rc}$  akımlarını elemek için  $i_{sc} = -i_{sa} - i_{sb}$  ve  $i_{rc} = -i_{ra} - i_{rb}$  eşitlikleri kullanılacak olursa

$$[T_i] [\tilde{i}_s] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

ve

$$[T_i] [\tilde{i}_r] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

elde olunur. (4.21) ve (4.22) denklemlerindeki eşitlikler (4.17) denkleminde yerlerine yazılırsa

$$[\tilde{v}_{sl}] = [\tilde{u}_s] - [\tilde{R}_s] [\tilde{i}_s] - [L_{ss}] \frac{d}{dt} [\tilde{i}_s] - [L_{sr}] \frac{d}{dt} [\tilde{i}_r] - \left[ \frac{\partial L_{sr}}{\partial \theta} \right] \frac{d\theta}{dt} [\tilde{i}_r] \quad (4.23)$$

olur. Burada

$$[\tilde{R}_s] = [R_s] [T_i]$$

$$[\tilde{L}_{ss}] = [\tilde{L}_{ss}] [T_i]$$

$$[\tilde{L}_{sr}] = [\tilde{L}_{sr}] [T_i]$$

$$\left[ \frac{d\tilde{L}_{sr}}{d\theta} \right] = \left[ \frac{d\tilde{L}_{sr}}{d\theta} \right] [T_i]$$

dır. (4.23) denkleminde matris çarpımları yapıldıktan sonra, akımların türevlerinin tümü sol yana ve diğer terimler sağ yana toplanıp, statora ait matris takımı açık olarak yazılırsa

$$\begin{bmatrix} L_s & -L_s \\ L_s & 2L_s \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \end{bmatrix} + 3M_{sr} \begin{bmatrix} -\cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \end{bmatrix} = -$$

$$\begin{bmatrix} U_{sa} - U_{sb} \\ U_{sb} - U_{sc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{\Gamma_{pa}\Gamma_{na} + \Gamma_s}{\Gamma_{pa} + \Gamma_{na}} & \frac{-\Gamma_{pb}\Gamma_{nb} - \Gamma_s}{\Gamma_{pb} + \Gamma_{nb}} \\ \frac{\Gamma_{pc}\Gamma_{nc} + \Gamma_s}{\Gamma_{pc} + \Gamma_{nc}} & \frac{\Gamma_{pb}\Gamma_{nb} + \Gamma_{pc}\Gamma_{nc} + 2\Gamma_s}{\Gamma_{pb} + \Gamma_{nb} \quad \Gamma_{pc} + \Gamma_{nc}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \end{bmatrix} -$$

$$3\omega M_{sr} \begin{bmatrix} \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

olarak elde edilir.

#### 4.4.3. Rotora ilişkin denklemler

Şekil 4.5 ' de S anahtarının kapalı olmasından dolayı rotora uygulanan gerilim sıfırdır. Bu durumda rotora ait gerilim denklemi

$$[0] = [R_r] [i_r] + [L_{rs}] \frac{d}{dt} [i_s] + [L_{rr}] \frac{d}{dt} [i_r] + \left[ \frac{\partial L_{rs}}{\partial \theta} \right] \frac{d\theta}{dt} [i_s] \quad (4.25)$$

dir. (4.25) denklemi soldan  $[\tilde{T}_v]$  ile çarpılırsa

$$[0] = [\tilde{R}_r] [i_r] + [\tilde{L}_{rs}] \frac{d}{dt} [i_s] + [\tilde{L}_{rr}] \frac{d}{dt} [i_r] + \left[ \frac{\partial \tilde{L}_{rs}}{\partial \theta} \right] \frac{d\theta}{dt} [i_s] \quad (4.26)$$

olur. Burada

$$[\tilde{R}_r] = [\tilde{T}_v] [R_r]$$

$$[\tilde{L}_{rs}] = [\tilde{T}_v] [L_{rs}]$$

$$[\tilde{L}_{rr}] = [\tilde{T}_v] [L_{rr}]$$

$$\left[ \frac{\partial \tilde{L}_{rs}}{\partial \theta} \right] = [\tilde{T}_v] \left[ \frac{\partial L_{rs}}{\partial \theta} \right]$$

dir. (4.21) ve (4.22) denklemlerindeki eşitliklerde (4.26) denkleminde yerlerine yazılırsa

$$[0] = [\tilde{\tilde{R}}_r] [i_r] + [\tilde{\tilde{L}}_{rs}] \frac{d}{dt} [i_s] + [\tilde{\tilde{L}}_{rr}] \frac{d}{dt} [i_r] + \left[ \frac{\partial \tilde{\tilde{L}}_{rs}}{\partial \theta} \right] \frac{d\theta}{dt} [i_s] \quad (4.27)$$

olarak bulunur. Burada

$$[\tilde{R}_r] = [\tilde{R}_r] [T_i]$$

$$[\tilde{L}_{rs}] = [\tilde{L}_{rs}] [T_i]$$

$$[\tilde{L}_{rr}] = [\tilde{L}_{rr}] [T_i]$$

$$\left[ \frac{\partial \tilde{L}_{rs}}{\partial \theta} \right] = \left[ \frac{\partial [\tilde{L}_{rs}]}{\partial \theta} \right] [T_i]$$

dır. Statorda olduğu gibi, akımların türevlerinin tümü sol yana ve diğer terimler sağ yana toplanıp, rotora ait matris takımı açık olarak yazılırsa

$$3M_{sr} \begin{bmatrix} -\cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ -\cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_r & -L_r \\ L_r & 2L_r \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} R_r & -R_r \\ R_r & 2R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \end{bmatrix} - 3\omega M_{sr} \begin{bmatrix} \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

olarak elde edilir.

#### 4.4.4. Durum denklemleri

Stator ve Rotor için yazılan (4.24) ve (4.28) denklemleri bir arada yazılırsa

$$\begin{bmatrix} L_s & -L_s & -3M_{sr}\cos(\theta-\frac{2\pi}{3}) & 3M_{sr}\cos(\theta+\frac{2\pi}{3}) \\ L_s & 2L_s & -3M_{sr}\cos(\theta+\frac{2\pi}{3}) & 3M_{sr}\cos\theta \\ -3M_{sr}\cos(\theta+\frac{2\pi}{3}) & 3M_{sr}\cos(\theta-\frac{2\pi}{3}) & L_r & -L_r \\ -3M_{sr}\cos(\theta-\frac{2\pi}{3}) & 3M_{sr}\cos\theta & L_r & 2L_r \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{ra} \\ i_{rb} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} u_{sa} - u_{sb} \\ u_{sb} - u_{sc} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_A & R_B & 0 & 0 \\ R_C & R_D & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & -R_r \\ 0 & 0 & R_r & 2R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{ra} \\ i_{rb} \end{bmatrix} =$$

$$3\omega M_{sr} \begin{bmatrix} 0 & 0 & \sin(\theta-\frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta+\frac{2\pi}{3}) \\ 0 & 0 & \sin(\theta+\frac{2\pi}{3}) & -\sin\theta \\ \sin(\theta+\frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta-\frac{2\pi}{3}) & 0 & 0 \\ \sin(\theta-\frac{2\pi}{3}) & -\sin\theta & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{ra} \\ i_{rb} \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

elde edilir.  $i_{sa}$ ,  $i_{sb}$ ,  $i_{ra}$ ,  $i_{rb}$  birbirine bağlı olmayan değişkenlerdir. Bu



değişkenler durum değişkeni olarak seçilirse , birinci mertebeden türevleri sol yanda bırakmak amacı ile (4.29) denkleminin her iki yanı  $[G]^{-1}$  ile çarpılırsa

$$\left[ \frac{di}{dt} \right] = [G]^{-1} [u] - [G]^{-1} \left[ R + 3 \omega \frac{\partial L}{\partial \theta} \right] [i] \quad (4.30)$$

biçiminde durum denklemleri elde edilmiş olunur.

Endüklenen moment için (3.21) denkleminde  $i_{sc}$  yerine  $-i_{sa} - i_{sb}$  ve  $i_{rc}$  yerine de  $-i_{ra} - i_{rb}$  yazılırsa

$$\begin{aligned} T_{d1} = & -\frac{P}{2} M_{sr} \left( (2 i_{ra} i_{sa} + 2 i_{rb} i_{sb} + i_{ra} i_{sb} + i_{rb} i_{sa}) \sin \theta + \right. \\ & (i_{ra} i_{sb} - 2 i_{rb} i_{sa} - i_{rb} i_{sb} - i_{ra} i_{sa}) \sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) + \\ & \left. (i_{rb} i_{sa} - 2 i_{ra} i_{sb} - i_{rb} i_{sb} - i_{ra} i_{sa}) \sin \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right) \quad (4.31) \end{aligned}$$

elde edilir. (4.31) denklemini (3.18) denkleminde yerine yazılırsa, S anahtarlı kapalı iken hareket denklemini

$$\frac{d\omega_{m1}}{dt} = \frac{1}{J} (T_{d1} - T_y) \quad (4.32)$$

bulunur. Bu durumda rotorun konum açısı

$$\frac{d\theta_1}{dt} = \omega_1 \quad (4.33)$$

olur.

#### 4.4.5. S Anahtarı açık iken köprü doğrultucu denklemlerinin elde edilmesi

Bilezikli asenkron motor yol aldıktan sonra S anahtarı açılırsa, rotor sargısı bilezikler üzerinden doğru akımla uyarılmış olur. Bu durumu senkronlanan bilezikli asenkron motor seri uyarılmış senkron motor olarak çalışacaktır. Şekil 4.5' den yük gerilimi

$$[v_d \downarrow] = -[R_p][i_p] - [R_n][i_n] \quad (4.34)$$

olur. Burada

$$[v_d \downarrow] = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} [v_d]$$

dir. Yük akımı için ise

$$i_{ra} = \frac{1}{2}[1 \ 1 \ 1][i_p] + \frac{1}{2}[1 \ 1 \ 1][i_n] \quad (4.35)$$

yazılır. (4.9) denkleminde  $[i_p]$  ve  $[i_n]$ 'in değerleri ayrı ayrı (4.34) denkleminde yerlerine yazılır

$$[i_n] = -\left[\frac{R_p}{R_p + R_n}\right][i_s] - \left[\frac{1}{R_p + R_n}\right][v_d \downarrow] \quad (4.36)$$

ve

$$[i_p] = -\left[\frac{R_n}{R_p + R_n}\right][i_s] - \left[\frac{1}{R_p + R_n}\right][v_d \downarrow] \quad (4.37)$$

elde edilir. Yük geriliminin değerini bulmak için (4.36), (4.37), (4.21) ve (4.22) denklemleri (4.35) denkleminde yerlerine yazılırsa

$$v_d = \frac{1}{2} \frac{1}{\sum \frac{1}{R_p + R_n}} \begin{bmatrix} \frac{R_{na} - R_{pa}}{R_{na} + R_{pa}} - \frac{R_{nc} - R_{pc}}{R_{nc} + R_{pc}} & \frac{R_{nb} - R_{pb}}{R_{nb} + R_{pb}} - \frac{R_{nc} - R_{pc}}{R_{nc} + R_{pc}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{1}{\sum \frac{1}{R_p + R_n}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \end{bmatrix} \quad (4.38)$$

bulunur. Burada

$$\sum \frac{1}{R_p + R_n} = \frac{1}{R_{pa} + R_{na}} + \frac{1}{R_{pb} + R_{nb}} + \frac{1}{R_{pc} + R_{nc}}$$

dır. S anahtarı açık iken köprü doğrultucuyu besleyen faz-faz arası gerilimler için

$$[v_{SA}] = \frac{1}{2} [T_v] \{ [R_p] [i_p] - [R_n] [i_n] \} \quad (4.39)$$

yazılır. (4.36) ve (4.37) denklemleri (4.39) denkleminde yerlerine yazılırsa

$$[v_{SA}] = [T_v] \left\{ \begin{bmatrix} R_p & R_n \\ R_p + R_n \end{bmatrix} [i_s] + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} R_n - R_p \\ R_n + R_p \end{bmatrix} [v_d \downarrow] \right\} \quad (4.40)$$

elde edilir.

#### 4.4.6.5 anahtarları açık iken statora ilişkin gerilim denklemi

S anahtarları açık iken statora ait gerilim denklemi

$$[v_{SA}] = [u_s] - [R_s] [i_s] - [L_{ss}] \frac{d}{dt} [i_s] - [L_{sr}] \frac{d}{dt} [i_r] - \left[ \frac{\partial L_{sr}}{\partial \theta} \right] \frac{d\theta}{dt} [i_r] \quad (4.41)$$

dır. (4.41) denklemi soldan  $[\tilde{T}_v]$  ile çarpılırsa

$$[\tilde{v}_{SA}] = [\tilde{u}_s] - [\tilde{R}_s] [\tilde{i}_s] - [\tilde{L}_{ss}] \frac{d}{dt} [\tilde{i}_s] - [\tilde{L}_{sr}] \frac{d}{dt} [\tilde{i}_r] - \left[ \frac{\partial \tilde{L}_{sr}}{\partial \theta} \right] \frac{d\theta}{dt} [\tilde{i}_r] \quad (4.42)$$

olur. (4.40) denklemini ve  $i_{sc}$ ,  $i_{rc}$  akımlarını elemek için (4.21) ve (4.22) denklemlerindeki eşitlikler (4.42) denkleminde yerlerine yazılırsa

$$[\tilde{v}_{SA}] = [\tilde{u}_s] - [\tilde{R}_s] [\tilde{i}_s] - [\tilde{L}_{ss}] \frac{d}{dt} [\tilde{i}_s] - [\tilde{L}_{sr}] \frac{d}{dt} [\tilde{i}_r] - \left[ \frac{\partial \tilde{L}_{sr}}{\partial \theta} \right] \frac{d\theta}{dt} [\tilde{i}_r] \quad (4.43)$$

olur. (4.43) denkleminde matris çarpımları yapıldıktan sonra, akımların türevlerinin tümü sol yana ve diğer terimler sağ yana toplanıp, statora ait matris takımı açık olarak yazılırsa

$$\begin{bmatrix} L_s & -L_s \\ L_s & 2L_s \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \end{bmatrix} + 3 M_{sr} \begin{bmatrix} -\cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{sa} - u_{sb} \\ u_{sb} - u_{sc} \end{bmatrix} -$$

$$\begin{bmatrix} R_A & R_B \\ R_C & R_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \end{bmatrix} - 3 \omega M_{sr} \begin{bmatrix} \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \end{bmatrix} \quad (4.44)$$

elde olunur. Burada

$$R_A = \frac{R_{pa} R_{na}}{R_{pa} + R_{na}} + \frac{1}{4} \left[ \frac{R_{na} - R_{pa}}{R_{na} + R_{pa}} - \frac{R_{nb} - R_{pb}}{R_{nb} + R_{pb}} \right] \sum \frac{1}{R_p + R_n} \left[ \frac{R_{na} - R_{pa}}{R_{na} + R_{pa}} - \frac{R_{nc} - R_{pc}}{R_{nc} + R_{pc}} \right] + R_s$$

$$R_B = -\frac{R_{pb} R_{nb}}{R_{pb} + R_{nb}} + \frac{1}{4} \left[ \frac{R_{nb} - R_{pb}}{R_{nb} + R_{pb}} - \frac{R_{nc} - R_{pc}}{R_{nc} + R_{pc}} \right] \sum \frac{1}{R_p + R_n} \left[ \frac{R_{nb} - R_{pb}}{R_{nb} + R_{pb}} - \frac{R_{nc} - R_{pc}}{R_{nc} + R_{pc}} \right] - R_s$$

$$R_C = \frac{R_{pc} R_{nc}}{R_{pc} + R_{nc}} + \frac{1}{4} \left[ \frac{R_{nb} - R_{pb}}{R_{nb} + R_{pb}} - \frac{R_{nc} - R_{pc}}{R_{nc} + R_{pc}} \right] \sum \frac{1}{R_p + R_n} \left[ \frac{R_{na} - R_{pa}}{R_{na} + R_{pa}} - \frac{R_{nc} - R_{pc}}{R_{nc} + R_{pc}} \right] + R_s$$

$$R_D = \frac{R_{pb} R_{nb}}{R_{pb} + R_{nb}} + \frac{R_{pc} R_{nc}}{R_{pc} + R_{nc}} + \frac{1}{4} \left[ \frac{R_{nb} - R_{pb}}{R_{nb} + R_{pb}} - \frac{R_{nc} - R_{pc}}{R_{nc} + R_{pc}} \right] \sum \frac{1}{R_p + R_n} \left[ \frac{R_{nb} - R_{pb}}{R_{nb} + R_{pb}} - \frac{R_{nc} - R_{pc}}{R_{nc} + R_{pc}} \right] + 2R_s$$

dır.

#### 4.4.7. S anahtarını açık iken rotora ilişkin denklemler

S anahtarını açık iken rotor yanına ait gerilim denklemi

$$[v_d] = [R_r] [i_r] + [L_{rs}] \frac{d}{dt} [i_s] + [L_{rr}] \frac{d}{dt} [i_r] + \left[ \frac{\partial L_{rs}}{\partial \theta} \right] \frac{d\theta}{dt} [i_s] \quad (4.45)$$

dir. (4.45) denkleminin üçüncü satırını elemek için soldan  $[\tilde{T}_v]$  matrisi ile çarpılırsa

$$[\tilde{v}_d] = [\tilde{R}_r] [i_r] + [\tilde{L}_{rs}] \frac{d}{dt} [i_s] + [\tilde{L}_{rr}] \frac{d}{dt} [i_r] + \left[ \frac{\partial \tilde{L}_{rs}}{\partial \theta} \right] \frac{d\theta}{dt} [i_s] \quad (4.46)$$

olur.  $i_{sc}$  ve  $i_{rc}$  akımlarını elemek için (4.21) ve (4.22) denklemlerindeki eşitlikler (4.46) denkleminde yerlerine yazılırsa

$$[\tilde{v}_d] = [\tilde{R}_r] [\tilde{i}_r] + [\tilde{L}_{rs}] \frac{d}{dt} [\tilde{i}_s] + [\tilde{L}_{rr}] \frac{d}{dt} [\tilde{i}_r] + \left[ \frac{\partial \tilde{L}_{rs}}{\partial \theta} \right] \frac{d\theta}{dt} [\tilde{i}_s] \quad (4.47)$$

olur. (4.47) denkleminde (4.38) denklemindeki  $[v_d]$  'nin değeri yerine yazılıp, matris çarpımları yapıldıktan sonra, akımların türevlerinin tümü sol yana ve diğer terimler sağ yana toplanıp, rotora ait matris takımı açık olarak yazılırsa

$$\begin{bmatrix} L_r & -L_r \\ L_r & 2L_r \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \end{bmatrix} + 3M_{sr} \begin{bmatrix} -\cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ -\cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} c_1 & -c_2 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \end{bmatrix}$$

$$- \begin{bmatrix} B_1 + R_r & -R_r \\ R_r & 2R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \end{bmatrix} - 3\omega M_{sr} \begin{bmatrix} \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \end{bmatrix} \quad (4.48)$$

elde olunur. Burada

$$c_1 = \frac{1}{2} \left[ \frac{R_{na} - R_{pa}}{R_{na} + R_{pa}} - \frac{R_{nc} - R_{pc}}{R_{nc} + R_{pc}} \right] \left[ \frac{1}{R_{na} + R_{pa}} + \frac{1}{R_{nb} + R_{pb}} + \frac{1}{R_{nc} + R_{pc}} \right]$$

$$c_2 = \frac{1}{2} \left[ \frac{R_{nb} - R_{pb}}{R_{nb} + R_{pb}} - \frac{R_{nc} - R_{pc}}{R_{nc} + R_{pc}} \right] \left[ \frac{1}{R_{na} + R_{pa}} + \frac{1}{R_{nb} + R_{pb}} + \frac{1}{R_{nc} + R_{pc}} \right]$$

$$B_1 = \left[ \frac{1}{R_{na} + R_{pa}} + \frac{1}{R_{nb} + R_{pb}} + \frac{1}{R_{nc} + R_{pc}} \right]$$

dir.

#### 4.4.8. S anahtarı açık iken durum denklemleri

S anahtarı açık iken stator ve rotor için yazılan (4.44) ve (4.48) denklemleri bir arada yazılırsa

$$\begin{bmatrix} L_s & -L_s & -3M_{sr}\cos(\theta-\frac{2\pi}{3}) & 3M_{sr}\cos(\theta+\frac{2\pi}{3}) \\ L_s & 2L_s & -3M_{sr}\cos(\theta+\frac{2\pi}{3}) & 3M_{sr}\cos\theta \\ -3M_{sr}\cos(\theta+\frac{2\pi}{3}) & 3M_{sr}\cos(\theta-\frac{2\pi}{3}) & L_r & -L_r \\ -3M_{sr}\cos(\theta-\frac{2\pi}{3}) & 3M_{sr}\cos\theta & L_r & 2L_r \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{ra} \\ i_{rb} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} U_{sa} - U_{sb} \\ U_{sb} - U_{sc} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_A & R_B & -A_1 B_1 & 0 \\ R_C & R_D & -A_2 B_1 & 0 \\ -C_1 & -C_2 & B_1 + R_r & -R_r \\ 0 & 0 & R_r & 2R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{ra} \\ i_{rb} \end{bmatrix} =$$

$$3\omega M_{sr} \begin{bmatrix} 0 & 0 & \sin(\theta-\frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta+\frac{2\pi}{3}) \\ 0 & 0 & \sin(\theta+\frac{2\pi}{3}) & -\sin\theta \\ \sin(\theta+\frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta-\frac{2\pi}{3}) & 0 & 0 \\ \sin(\theta-\frac{2\pi}{3}) & -\sin\theta & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{ra} \\ i_{rb} \end{bmatrix} \quad (4.49)$$

elde edilir. S anahtarı kapalı durumda olduğu gibi  $i_{sa}$ ,  $i_{sb}$ ,  $i_{ra}$  ve  $i_{rb}$  birbirine bağlı olmayan değişkenlerdir. Bu değişkenler durum değişkeni olarak seçilirse, birinci mertebeden türevleri sol yanda bırakmak amacı ile (4.50) denkleminin her iki yanı  $[G^{-1}]$  ile çarpılırsa

$$\left[ \frac{di}{dt} \right] = [G^{-1}] [u] - [G^{-1}] \left[ R + 3\omega \frac{\partial L}{\partial \theta} \right] [i] \quad (4.50)$$

biçiminde akımlara ait durum denklemleri elde olunmuş olur.

S anahtarı açık durumda iken endüklenen moment, hareket ve rotor konum açısı için (4.31), (4.32) ve (4.33) denklemleri geçerlidir

#### 4.5. Faz Değişkenleri Modelinde Magnetik Doyma Sorunu

S anahtarı açık ve kapalı durumdayken dinamik davranış modelindeki denklemlerde tüm katsayıların değişmez olduğu varsayılmıştır. Ancak asenkron makinada  $M_{sr}$  'nin ana akı yolundaki magnetik doymaya bağlı olarak değiştiği bilinmektedir (Kovacs, 1984).

Daha önceden yapılan benzetim modelinde doyma etkisinin katılması için farklı yaklaşımlar, temelde bir öneriyi getirmektedir. Bu öneride uzay vektörü makina modeli denklemleri, stator temel eksen takımında değil; mıknatıslama akımı uzay vektörüyle çakışık döner eksen takımında ( $w_k = w_m$ ) yazılmaktadır.



Bu ana yaklaşımın belli sakıncaları görülmektedir.

1. Dinamik davranış çözümünün her aşamasında anlık faz değişkenlerine dönüşüm yapılırken; önce mıknatıslama akımı temel ekseninden stator temel eksenine, daha sonra da stator temel ekseninden faz büyüklüklerine dönüşüm gerekmektedir.

2. Makina modeli denklemleri bilinenden değişiktir ve stator temel eksenindeki gibi fiziksel olguları doğrudan simgeleyen biçimden uzaklaşmaktadır.

3. Bu yaklaşımda elektromotor kuvvet uzay vektörü;

$$e = \frac{d}{dt} (M_{sr} i_m) = M_{sr} \frac{d}{dt} i_m + i_m \frac{dM_{sr}}{di_m} \frac{di_m}{dt} \quad (4.51)$$

biçiminde ele alındığında  $M_{sr}$  mıknatıslama endüktansı ve  $M = dM_{sr} / di_m$  dinamik mıknatıslama endüktansı terimleri, kullanılmak zorundadır. Bu ise şekil 4.6 'da gösterildiği gibi iki adet magnetik doyma etkisi eğrisine gereksinim duyulur.

4. Bu yaklaşımda çözüm aşamasında mıknatıslama akımının hızının, bir kapalı bağıntıyla yenilemeli olarak çözülmesi gerekmektedir.

Faz değişkenleri modelinde magnetik doyma göz önüne alındığında;  $t=t_1$  anında  $i_{sa}(t)$ ,  $i_{sb}(t)$ ,  $i_{sc}(t)$  stator faz akımlarının anlık değerleri  $i_{sa}(t_1) = I_{sa}$ ,  $i_{sb}(t_1) = I_{sb}$  ve  $i_{sc}(t_1) = I_{sc}$  ise, bileşke stator akım uzay vektörü;

$$i_s = \frac{2}{3} (I_{sa} + a I_{sb} + a^2 I_{sc}) \quad (4.52)$$

biçiminde hesaplanır.

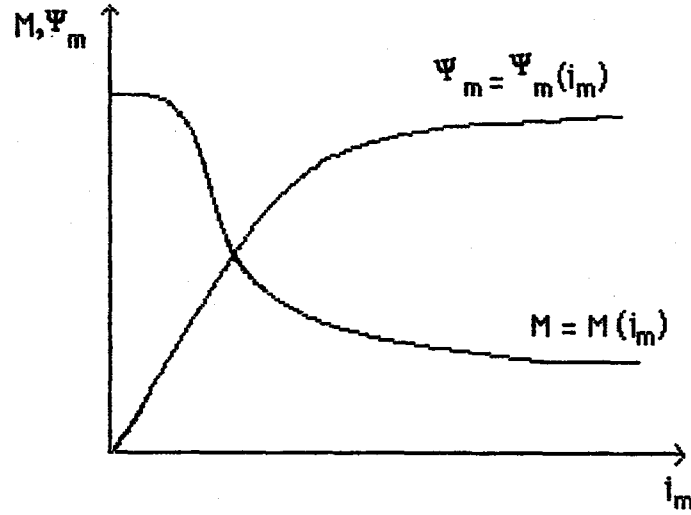
Aynı şekilde  $t = t_1$  anında  $i_{ra}(t)$ ,  $i_{rb}(t)$  ve  $i_{rc}(t)$  rotor faz akımlarının anlık değerleride  $i_{ra}(t_1) = I_{ra}$ ,  $i_{rb}(t_1) = I_{rb}$  ve  $i_{rc}(t_1) = I_{rc}$  ise bileşke rotor akım uzay vektörü;

$$i_r = \frac{2}{3} (I_{ra} + a I_{rb} + a^2 I_{rc}) \quad (4.53)$$

biçiminde hesaplanır. Böylece stator ve rotor faz akımlarından stator ve rotor akımı uzay vektörlerine dönüşüm yapılır. Stator temel eksenindeki ( $\omega_k = 0$ ) makina denklemlerinin çözümünde, her bir zaman adımında; o adımın çözüm değişkenleri başlangıç değerleri değiştirilmeden, adım sonunda elde edilecek stator ve rotor akımı uzay vektörlerinden mıknatıslama akımı uzay vektörü;

$$i_m = i_s + i_r \quad (4.54)$$

eşitliğiyle elde edilir. Mıknatıslama akımı uzay vektörünün genliği  $\sqrt{2}$  'ye bölünerek; boşa çalışma deneyinden elde edilen  $M_{sr}-i_m$  eğrisinden, yeni bir  $M_{sr}$  değeri bulunabilir. Bu  $M_{sr}$  değeri ve değiştirilmemiş olan başlangıç değeriyle o zaman adımı için çözüm yinelenir. Yeniden ortaya çıkan mıknatıslama akımı uzay vektörü boyu ile bir  $M_{sr}$  değeri daha hesaplanabilir.

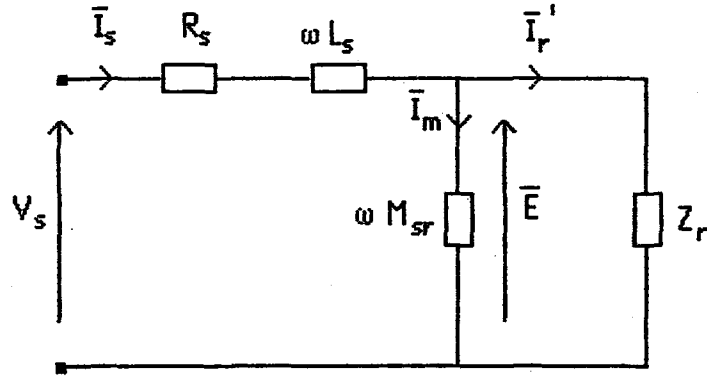


Şekil 4.6 Magnetik doyma eğrisi ve dinamik reaktans

Çözüm zaman adımı içinde bu döngünün  $M_{sr}$  değerleri, belli sınırlar içinde değişmez duruma gelene kadar, yinelenmesi sonucunda o zaman adımındaki magnetik doyma çözümü yakalanmış olur. Böylece; Şekil 3.2 'de verilmiş olan asenkron makinanın faz dinamik davranış modeli akış çizelgesi, Şekil 6.1 'deki gibi belirlenebilir.

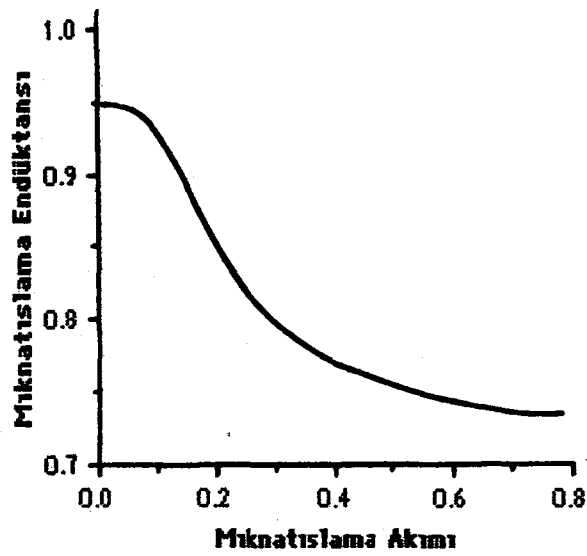
#### 4.4.1. Boşta çalışma deneyinin irdelenmesi

Sürekli durumda mıknatıslama endüktansı  $M_{sr}$  'nin mıknatıslama akımının etkin değerine göre değişimini ölçmek için bilezikli asenkron makinanın mili, senkron hızda döndürülürken; yapılan açık devre deneyinden faydalanılır. Bu durumda elde edilen akım ve gerilimler, bir fazın etkin değerleri olarak varsayılır. Bu durumda etkin değeri bilinen sinüs değişimli faz akım ve gerilimlerinden, diğer fazların akım ve gerilimlerinin zamanla değişimleriyle, tüm fazların akım ve gerilim anlık değerleri elde edilebilir.



Şekil 4.7 Faz başına sürekli durum eşdeğer devresi

Şekil 4.7 'deki faz başına sürekli durum eşdeğer devresi bu durumda geçerlidir. Açık devre deneyinden elde edilen sonuçlar bazında, dalga biçiminin değişik anlarında,  $M_{sr}$  'nin bu deneydeki değişik gerilim değerlerinde elde edilen mıknatıllanma akımının değeri ( $i_m$ ) ile değişimi şekil 4.8 'de verilmiştir.



Şekil 4.8 Deney makinasının  $M_{sr}-i_m$  eğrisi

## BÖLÜM 5

### ASENKRON MAKİNANIN ENDÜKTANSLARININ BELİRLENMESİ

#### 5.1. Giriş

Bu bölümde, asenkron makinanın endüktanslarının belirlenmesi için sayısal bir çözüm yöntemi verilmiştir. Özellikleri Ek. B 'de verilen örnek makinanın endüktanslarının belirlenmesi için yapılan ölçme yöntemleri ve bilgisayar sonuçları ise Ek. E 'de verilmiştir.

#### 5.2. Endüktansların Belirlenmesi Yöntemi

Elektrik makinalarının sistem analizini yapabilmek için sistem parametrelerinin bilinmesi gereklidir. Akı denklemlerinde  $\Psi=LI$  şeklinde karşımıza çıkan endüktansları tam olarak bulmak için magnetik alanın hesaplanması zorunludur. Ancak bazı basitleştirici varsayımlarla magnetik enerji üzerinden giderek endüktansların hesaplanması kolayca mümkündür. Bunun için demirin bağıl geçirgenliğinin sonsuz büyük olduğu ve tüm magnetik enerjinin hava aralığında depolandığı kabul edilir. Demirin etkisi gerçek hava aralığı yerine biraz daha büyük bir hava aralığı ile hesap yaparak göz önünde bulundurulur. Hava aralığına bakan yüzeylerde olukların bulunması halinde bu kısımlarda, olukların etkisini karşılayacak bir hava aralığı düzeltilmesi yapılır. Bu durumda Carter katsayısı kullanılır (Carter, 1954).

Endüktanslar öz, ortak ve kaçak endüktanslar olarak ayrılmaktadır. Öz ve ortak endüktansların, sargıların makina içinde yayılmalırına göre ürettikleri alan eğrisinin harmonik bileşenlere sahip olmasından dolayı harmonik bileşenleri bulunmalıdır. Ancak bazı durumlarda yalnızca ana harmonik endüktansı ile hesap yapmak yeterli olmaktadır.

Kaçak endüktanslar, oluklarda ve sargı başlıklarının bulunduğu bölgelerde yollarını asıl hava aralığından geçmeden tamamlayan alan çizgilerinin karşılığıdır.

Bir sargının öz endüktansı, bu sargı akımının alanının, aynı sargının akı-sarımındaki payını vermektedir.

İki sargının ortak endüktansı ise birinci sargının akımının alanın, ikinci sargının akı-sarımındaki payını vermektedir.

Bu konuda kaynak olabilecek değişik yaklaşımlar vardır (Aldemir, 1981 ; Alger, 1951 ; Sarıoğlu, IL 61801 ; Aykanat, 1980).

### 5.3. Stator Endüktansları

Stator endüktans matrisi ( $L_s$ ) kaçak endüktansları, stator sargıları öz endüktansları

$$L_{sa} = L_{s1} + L_{sv} + S_{snn} \quad (5.1)$$

ve bu sargılar arasındaki ortak endüktansları

$$M_{sa,b} = M_{sv} - \frac{1}{2} L_{s1} \quad (5.2)$$

içermektedir. Bu eşitliklerde

$$L_{s1} = \frac{4 \mu_0 L \tau_p}{\pi^2 p \delta} (N_s k_{ws})^2 \quad (5.3)$$

ile ana endüktans ve

$$L_{sv} = \frac{4 \mu_0 L \tau_p}{\pi^2 p \delta} (N_s k_{ws})^2 \sum_{v=2}^{\infty} \left[ \frac{k_{sv}}{v k_{ws}} \right]^2 \quad (5.4)$$

yüksek harmoniklerin öz endüktansları ve

$$M_{sv} = \frac{4 \mu_0 L \tau_p}{\pi^2 p \delta} (N_s k_{ws})^2 \sum_{v=2}^{\infty} \left[ \frac{k_{sv}}{v k_{ws}} \right]^2 \cos v \frac{2\pi}{3} \quad (5.5)$$

ile de yüksek harmoniklerin ortak endüktansı tanımlanmıştır.  $k_v$  ile sarım katsayıları tanımlanmış ve  $v > 1$  ilede yüksek harmonikler göz önüne alınmıştır. Ayrıca  $\delta$  sabit kabul edilip, oluklarda göz önünde bulundurularak Carter katsayısı ve demirdeki manyetik gerilim düşümü de göz önüne alınıp, sabit bir katsayıyla çarpılarak eşdeğer hava aralığıyla  $\delta''$  hesaplar yapılmıştır. Stator sarım katsayısının

$$k_{ws} = k_d k_s \quad (5.6)$$

dır. (5.6) denkleminde dağılım katsayısı  $k_d$  ve kirlenme katsayısı  $k_s$  için

$$k_d = \frac{\text{Sin}q \frac{d}{2}}{q \text{Sin} \frac{d}{2}} \quad (5.7)$$

ve

$$k_s = p \frac{2\pi}{N_s} \quad (5.8)$$

yazılır. Yayılma katsayısındaki  $d$  ve  $q$  nun değerleri

$$d = p \frac{360}{N_s} \quad (5.9)$$

ve

$$q = \frac{N_s}{2 p m} \quad (5.10)$$

dır.

#### 5.4. Rotor Endüktansları

Rotor Endüktans matrisi ( $L_r$ ) kaçak endüktansları, rotor sargıları öz endüktansları

$$L_{ra} = L_{r1} + L_{rv} + S_{rmn} \quad (5.11)$$

ve bu sargılar arasındaki ortak endüktansları

$$M_{ra,b} = M_{rv} - \frac{1}{2} L_{r1} \quad (5.12)$$



içermektedir. Bu eşitliklerde

$$L_{r1} = \frac{4 \mu_0 L \tau_p}{\pi p \delta} (N_r k_{wr})^2 \quad (5.13)$$

ile ana endüktans ve

$$L_{rv} = \frac{4 \mu_0 L \tau_p}{\pi p \delta} (N_r k_{wr})^2 \sum_{v=2}^{\infty} \left[ \frac{k_{rv}}{v k_{wr}} \right]^2 \quad (5.14)$$

yüksek harmoniklerin öz endüktansları ve

$$M_{rv} = \frac{4 \mu_0 L \tau_p}{\pi p \delta} (N_r k_{wr})^2 \sum_{v=2}^{\infty} \left[ \frac{k_{rv}}{v k_{wr}} \right]^2 \cos v \frac{2\pi}{3} \quad (5.15)$$

ilede yüksek harmoniklerin ortak endüktansı tanımlanmıştır.  $k_v$  ile sarım katsayıları tanımlanmış ve  $v > 1$  ilede yüksek harmonikler göz önüne alınmıştır. Rotor sarım katsayısı için

$$k_{wr} = k_{d1} k_{s1} \quad (5.16)$$

yazılır. Burada

$$k_{d1} = \frac{\text{Sin} q_1 \frac{d_1}{2}}{q_1 \text{Sin} \frac{d_1}{2}} \quad (5.17)$$

ve

$$k_{s1} = p \frac{2\pi}{N_R} \quad (5.18)$$

dir.  $d_1$  ve  $q_1$  için ise

$$d_1 = p \frac{360}{N_R} \quad (5.19)$$

ve

$$q_1 = \frac{N_R}{2pm} \quad (5.20)$$

yazılır.

### 5.5. Rotor- Stator Ortak Endüktansları

Stator ve rotor ortak endüktansları rotorun konum açısına  $\theta$  'ya göre değişmektedir. Bu nedenle hesaplarda stator-rotor ortak endüktanslarının birinci harmoniği ( $v=1$ ) alınmıştır. Şekil 3.1 'de göz önüne alındığında

$$M_{sa,ra} = M_{sr} \cos\theta \quad (5.21)$$

$$M_{sa,rb} = M_{sr} \cos(\theta + 2\pi/3) \quad (5.22)$$

$$M_{sa,rc} = M_{sr} \cos(\theta + 2\pi/3) \quad (5.23)$$

olur. Burada

$$M_{sr} = \frac{4 \mu_0 L \tau_p}{\pi p \delta} N_S k_{ws} N_R k_{wr} \quad (5.24)$$

olarak kısaltılmıştır. Ayrıca

$$M_{sa,ra} = M_{ra,sa} = M_{sb,rb} = M_{rb,sb} = M_{sc,rc} = M_{rc,sc}$$

$$M_{sa,rb} = M_{rb,sa} = M_{sb,rc} = M_{rc,sb} = M_{sc,ra} = M_{ra,sc}$$

$$M_{sa,rc} = M_{rc,sa} = M_{sb,ra} = M_{ra,sb} = M_{sc,rb} = M_{rb,sc}$$

dır.

## BÖLÜM 6

### DİNAMİK DAVRANIŞ MODELİ VE BİLGİSAYAR PROGRAMI

#### 6.1. Giriş

Bu bölümde seri uyarımla senkronlanan bilezikli asenkron motorların köprü doğrultucu ile birlikte ana akı yolundaki doymayıda dikkate alan dinamik davranış modeli ve geliştirilen bilgisayar programı tanıtılacaktır.

#### 6.2. Yaklaşımın Temel İlkeleri

Seri uyarımlı senkronlanan bilezikli asenkron motorun köprü doğrultucu ile birlikte dinamik davranışını incelemek için; bölüm 3 de temel ilkeleri tanıtılan faz değişkenleri yöntemi kullanılmıştır. Yöntemin uygulanmasında magnetik doyma ve stator-rotor ortak endüktansının  $\theta$  'ya göre değişimi göz önüne alınmıştır.

Makinanın ana akı yolundaki magnetik doymaya bağlı olarak değişen  $M_{sr}-i_m$  eğrisi deneysel sonuçlardan elde edilir. Yöntemde herhangi bir zaman adım başlangıcındaki çözüm değişkenleri değerlerinden, (4.52), (4.53) ve (4.54) eşitlikleri kullanılarak elde edilecek mıknatıslama akımı, uzay vektörünün genliği kullanılarak doğrusal interpolasyon yöntemi ile  $M_{sr}$  değeri elde edilir.

Ayrıt 4.7 de açıklanan basitleştirilmiş doyma yöntemine uyularak, bir zaman adımında  $M_{sr}-i_m$  eğrisi üzerinde yineleme yapılır. Bu yineleme,  $M_{sr}$

nin bir zaman adımında başlangıç değeri doymamış değer alınmak ve çözüm değişkeni başlangıç değeri değiştirilmeden her integral adımı sonucunda bulunacak  $M_{sr}$  değerindeki değişme oranı yeteri kadar küçülünceye dek yinelenmek olarak gerçekleştirilir. Faz değişkenleri katı diferansiyel denklem takımının ardışıl çözüm adımlarında bir önceki adımın 'yakınsamış  $M_{sr}$ ' değerini, onu izleyen adımda başlangıç değeri olarak kullanmak çözümü hızlandırmıştır.

### 6.3. Bilgisayar Programı

Senkronlanan bilezikli asenkron motorun değişik senkronlama anlarında, asenkron olarak yol almada ve her iki durumun yükleme koşullarında sistem büyüklüklerinin dinamik davranış çözümünü sağlayan bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Şekil 6.1 de akış çizelgesi verilen programda önceki ayırtta açıklandığı gibi; magnetik doyma göz önüne alınmıştır.

Bu program iki aşamalıdır.

1. Rotoru kısa devre edilen bilezikli asenkron motorun, çıkışı kısa devre edilen köprü doğrultucu ile birlikte asenkron yol alma durumunun dinamik davranışını incelemek olasıdır.

2. Bilezikli asenkron motor senkron hız yakınlığında çalışırken, köprü çıkışındaki kısa devre kaldırılarak herhangi bir zaman aralığında rotor sargısına doğru gerilim uygulanarak motorun senkronlamaya geçiş anındaki dinamik davranışını incelemek olası olmaktadır.

Diyaotların iletim yönünde küçük değerli direnç, tıkama yönünde ise

büyük değerli direnç olarak modellenmesi nedeniyle farklı zaman sabitleri oluşmaktadır. Bu nedenle diferansiyel denklemlerde katılık özelliği görüldüğünden, katı diferansiyel denklemlerin çözümlerinin doğruluk ve kararlılığı için Gear türü diferansiyel denklem çözüm algoritması kullanılmıştır. Bunun için ana programın oluşturulmasında Livermore Laboratuvarı algoritmalarından LSODE paket programı kullanılmıştır (HINDMARSH, 1983).

Geliştirilen bilgisayar programı **Simy** isimli ana program ile, **fex**, **jex**, **sendük**, **kendük** ve **rendük** isimli alt programlardan oluşur.

### 6.3.1. Simy ana programı

Bölüm 4 de açıklanan seri uyartımla senkronlanan bilezikli asenkron motorun asenkron yol alma ve senkronlamaya geçiş anını hesaplayan programın akışı Şekil 6.1 de verilmiştir.

"Simy" ye veri olarak

1. Senkronlamaya geçiş zamanı (ms).
2. Yol alma zamanı ile senkronlama zamanın sonu (ms).
3. Zaman aralığı (ms).
4. Diyotun iletim anındaki direnci (miliohm).
5. Diyotun tıkama anındaki direnci (megaohm).
6. Diyotun eşik gerilimi (Volt).
7. Diyotun tutma akımı (mA).
8. Program doymalımı, doymasızımı çalışsın (E/H).
9. Anahtarlama açısı ( $\gamma$ ).

10. Statora uygulanan gerilim (Volt).

11. Rotorun başlangıç anındaki konumu ( $\theta$ ).

girilmektedir.

Program iç içe iki döngü ile çalışır. Birinci döngüde değişik  $\theta$  ve  $M_{sr}$  değerlerinde ilk önce yol alma için hesapladığı rotor hızını, motorun momentini, konum açısını, stator ve rotor akımlarını ilgili kütüğe saklar. İkinci döngüde ise senkronlamaya geçiş anındaki hesapladığı rotor hızını, motor momentini, stator akımlarını ve doğrultulmuş rotor akımını ilgili kütüğe saklar.

### 6.3.2. Fex alt programı

Fex 'e bölüm 4 'de köprü doğrultucu ile birlikte asenkron yol alma ve senkronlamaya geçiş için elde edilen

$$DY(I) / DT = F(I) = F (I, T, Y(1), Y(2), \dots, Y(6))$$

biçimindeki katı diferansiyel denklem sistemi her iki durum için ayrı ayrı verilir.

### 6.3.3. Jex alt programı

Bölüm 4 'de yol alma ve senkronlamaya geçiş için elde edilen katı diferansiyel denklem sistemlerinin  $Y(I)$  ya göre kısmi türevi alındığında  $aF/aY$  biçiminde jacobian matrisi elde edilir. Jex 'se iki durum için de kısmi türevi alınan katı diferansiyel denklem sisteminin jacobian matrisi verilir.

#### 6.3.4. Sendük alt programı

Bu alt program değişik makina boyutları için stator sargısı endüktansını hesaplar. "Sendük" e veri olarak; stator uzunluğu, kutup adımı, bir fazdaki etkin stator sargısı sarım sayısı, hava aralığı genişliği, stator oluk sayısı ve faz sayısı verilir. Sendük 'le stator endüktansını hesaplayan denklemler ayrıntı 5.3 'de verilmiştir.

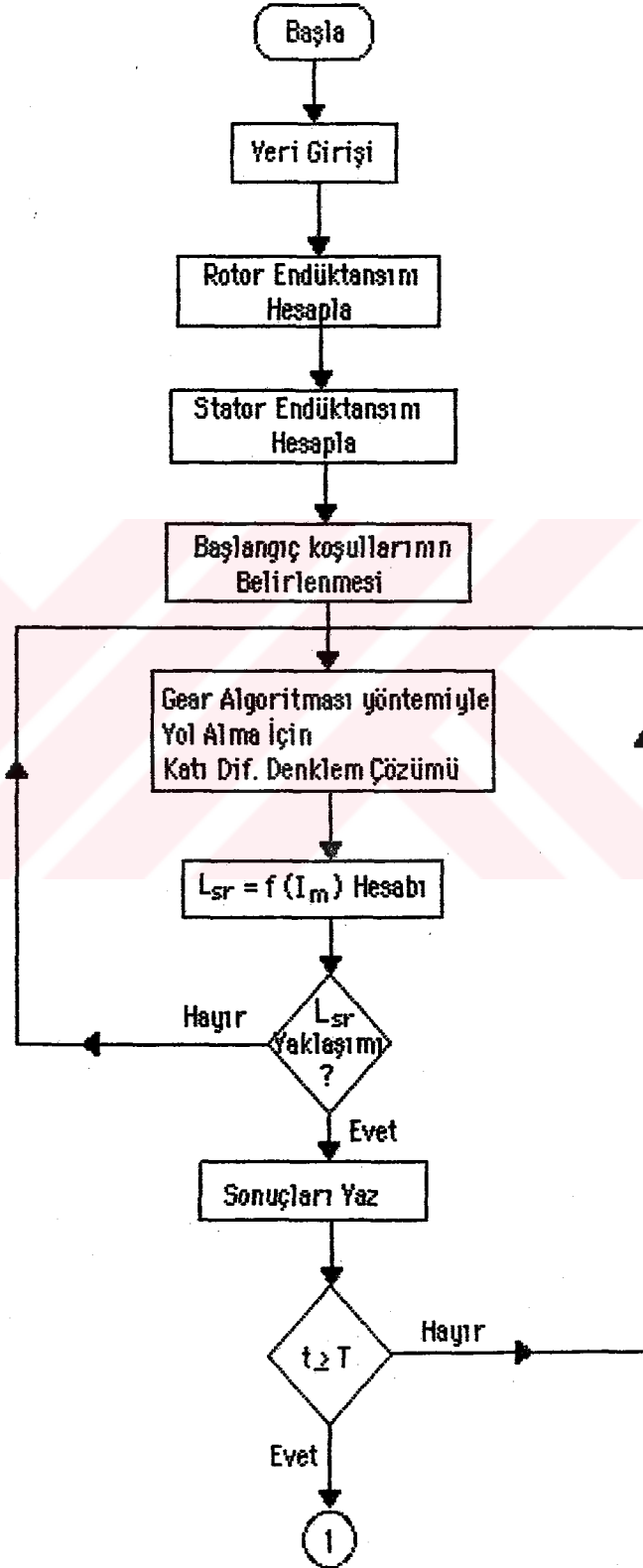
#### 6.3.5. Rendük alt programı

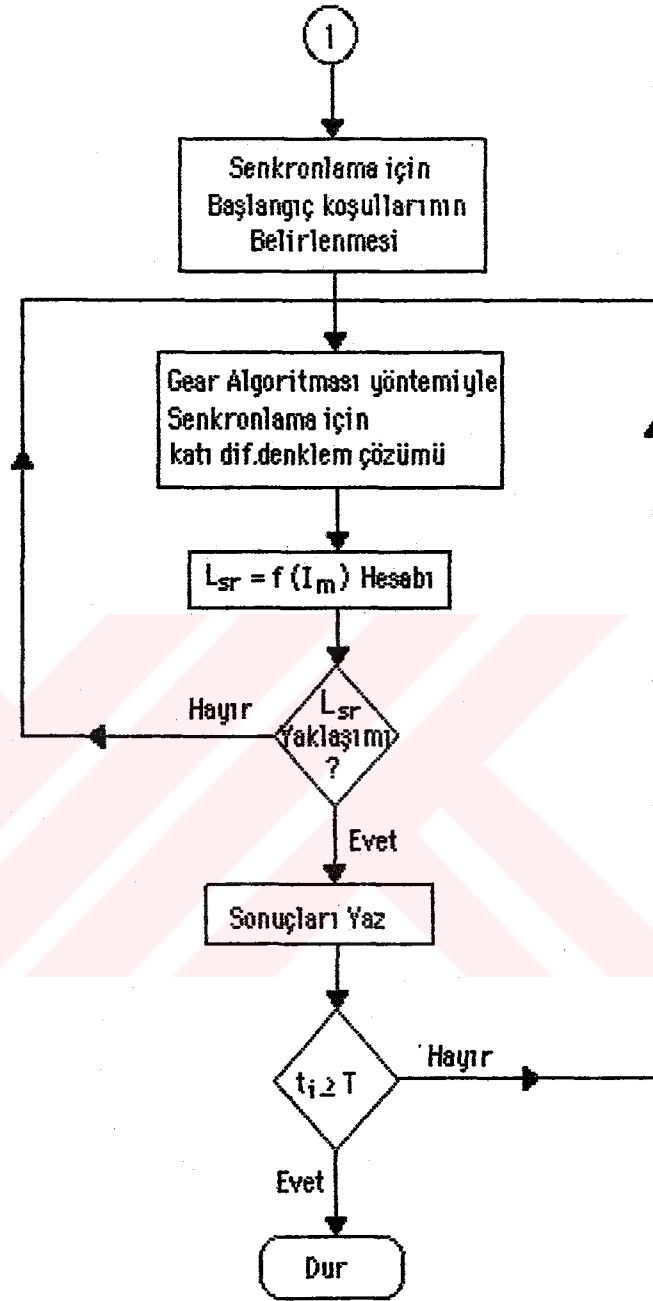
Bu alt program değişik makina boyutları için rotor sargısı endüktansını hesaplar. "Rendük" e veri olarak; stator uzunluğu, kutup adımı, bir fazdaki etkin rotor sargısı sarım sayısı, hava aralığı genişliği, rotor oluk sayısı ve faz sayısı verilir. Rendükle rotor endüktansını hesaplayan denklemler ayrıntı 5.4 'de verilmiştir.

#### 6.3.6. Kendük alt programı

Bu alt program değişik rotor açısı ( $\theta$ ) değerlerinde ortak endüktansı hesaplar. "Kendük" e veri olarak stator uzunluğu, kutup adımı, bir fazdaki etkin stator ve rotor sargıları sarım sayıları, hava aralığı genişliği , faz sayısı , stator ve rotor oluk sayısı verilir. Kendük 'le stator-rotor ortak endüktansını hesaplayan denklem ayrıntı 5.5 'de verilmiştir.







Çizelge 6.1. Seri uyarımla senkronlanan bilezikli asenkron motorun dinamik davranışı için bilgisayar modeli akış çizelgesi

## BÖLÜM 7

### BİLGİSAYAR MODELİNİN UYGULAMASI

#### 7.1. Giriş

Senkronlanan bilezikli asenkron makinanın dinamik davranış incelemesinin kapsamı ayrıntı 4.1 de belirtilmişti. Bu bölümde şu ana kadar değişik yaklaşımları irdeleyerek oluşturulan ve bölüm 6 da bilgisayar programı tanıtımı yapılan modelin uygulamalarına yer verilecektir. Burada aşağıdaki yaklaşım kullanılacaktır.

Yolverme ve senkronlamaya geçiş anındaki akım, gerilim ve hız dalga biçimlerinin ölçümlerini aynı koşul ve verilerle uygulanan bilgisayar programı sonuçlarıyla karşılaştırılarak modelin yeterlilik ve doğruluk düzeyinin sınanması amaçlanacaktır.

#### 7.2. Deney Donanımı

Deneylerde anma değerleri ve parametreleri Ek.B de verilen üç fazlı bilezikli asenkron makina kullanılmıştır. Yapılan deneylerin bağlantı şekilleri ise Ek. F de verilmiştir.

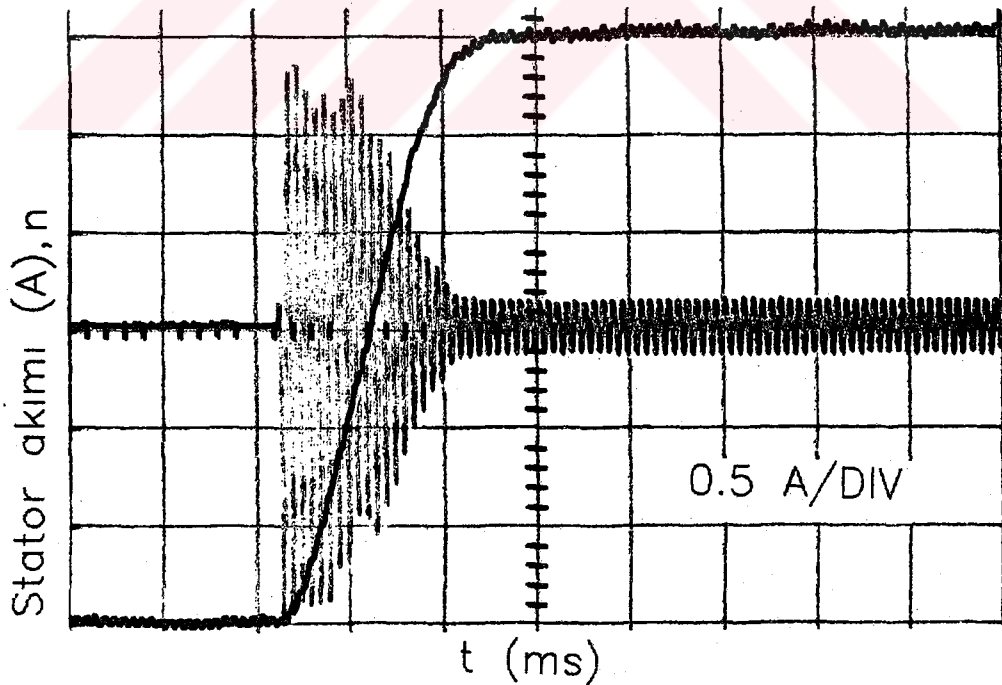
Deneylerde ölçüm düzeneği **ITT Metrix 7520** sayısal bellekli osiloskop ve **HP 7440 A** çizici ile birlikte kullanılmıştır. Anahtarlama anlarını belirleyebilmek için mekanik anahtar kullanılmıştır.

Yapılan deney dizisinden elde edilen sonuçların hepsinin bir dökümünü

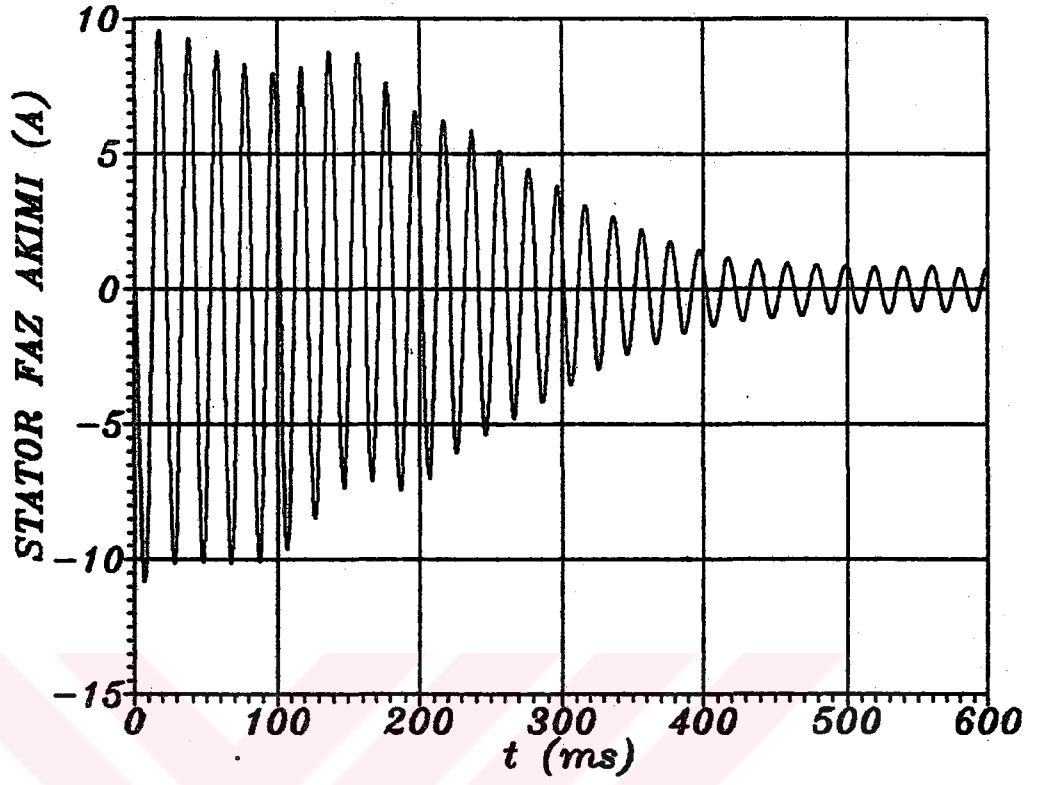
vermek yerine bu çalışmanın amacına yönelik bir anlam sağlayabilecek bir seçim yapılarak sonuçlarda yer verilmiştir.

### 7.3. Doğrudan Yol Verme

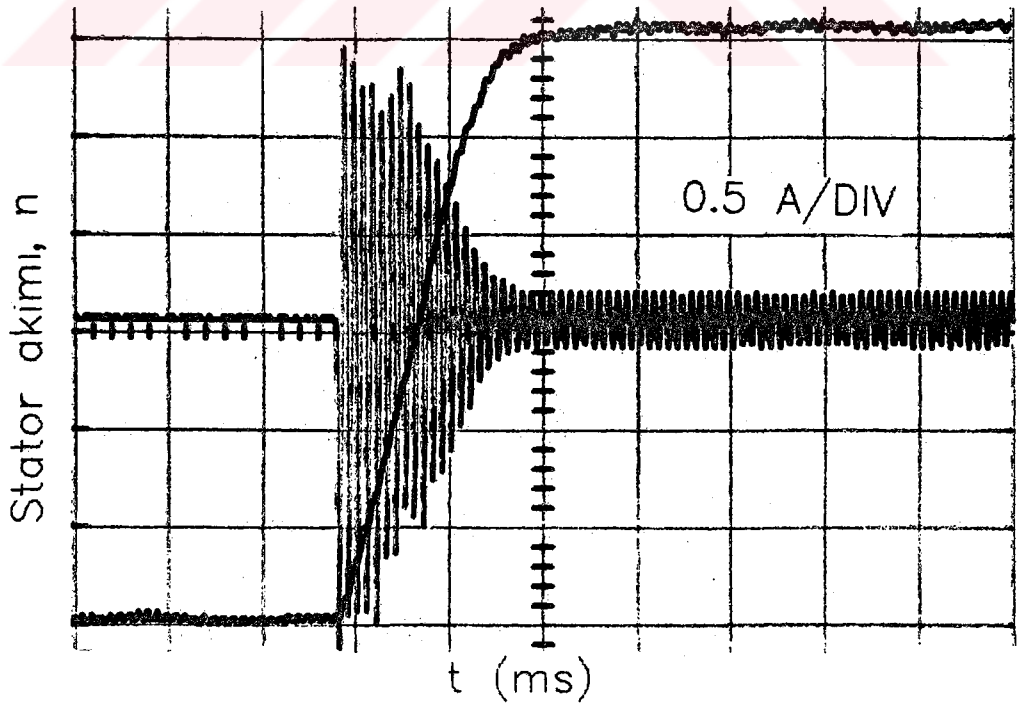
Senkronlanan bilezikli asenkron motorun sinüs biçimli gerilimde devrede doğrultucu köprü olmadan ve doğrultucu köprü çıkışı kısa devre iken boşa asenkron yol almasına ilişkin deneysel sonuçlar 50 Hz frekansı için Şekil 7.1 ve Şekil 7.3 de verilmiştir. Bilgisayar modeliyle aynı koşullarda elde edilen sonuçlar Şekil 7.2 ve Şekil 7.4 verilmiştir. Ayrıca, 50 hz de sinüs biçimli gerilimle köprü çıkışı kısa devre iken boşa yol vermeye ilişkin bilgisayar sonuçlarından elde edilen rotor akımı değişimi 7.5 de, moment değişimi de 7.4 de verilmiştir.



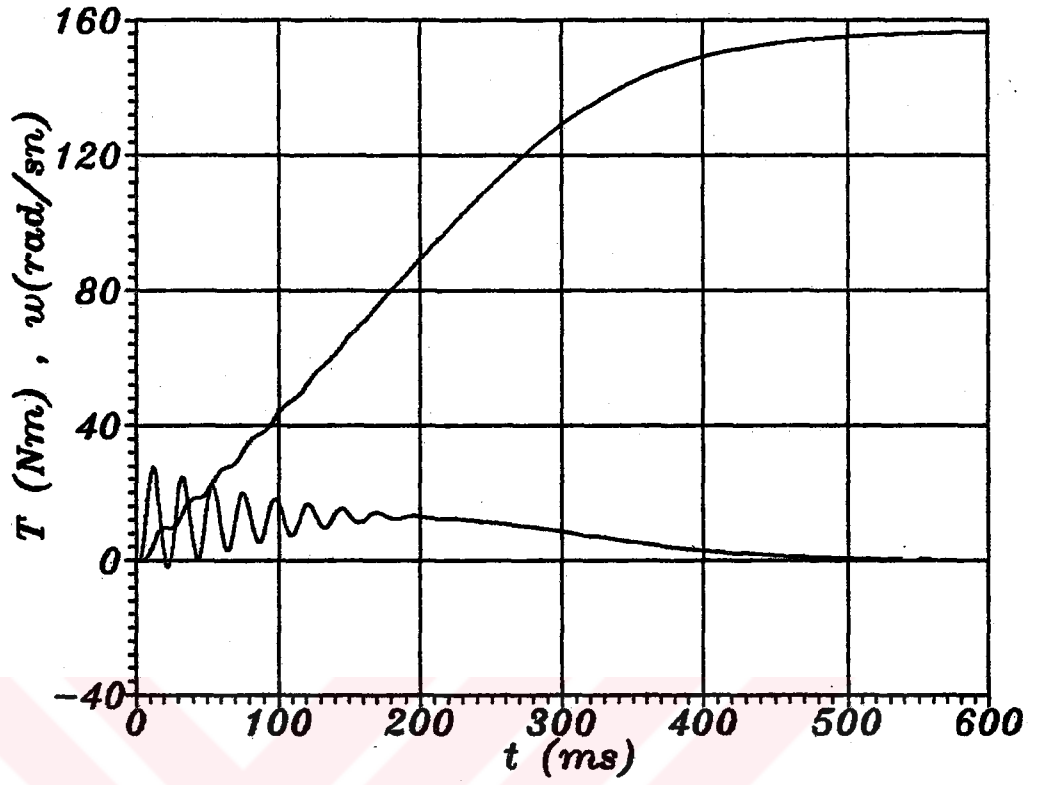
Şekil 7.1 Deneysel olarak stator a fazı akımı ile hızın değişimi



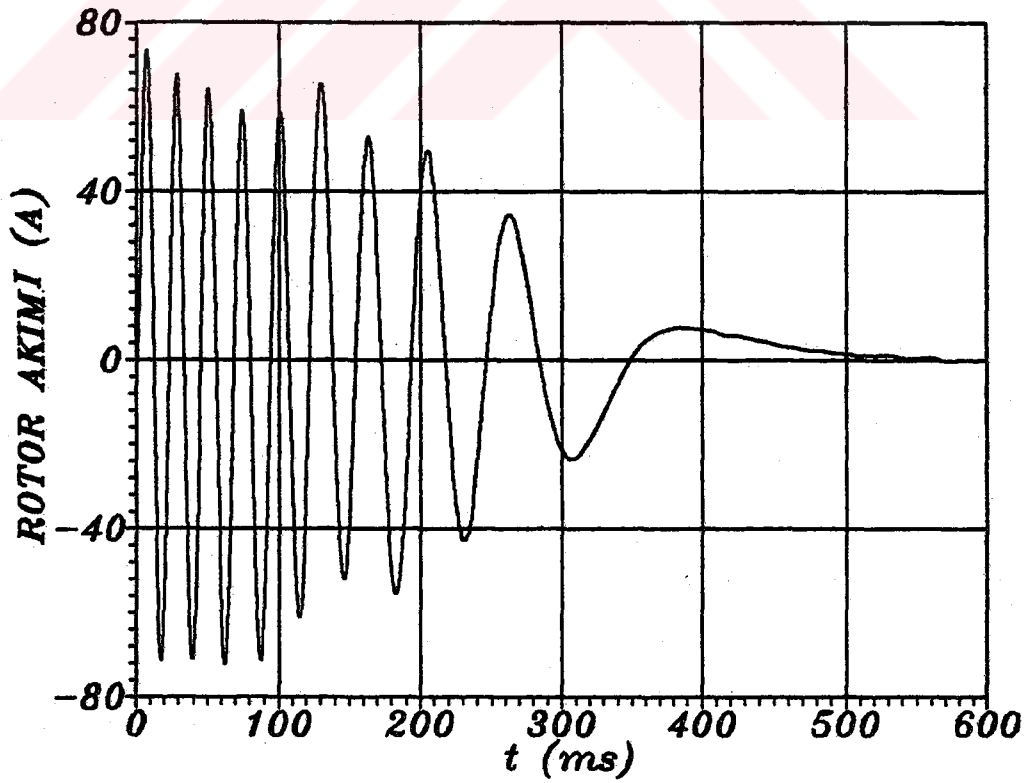
Şekil 7.2 Hesaplanan stator a fazı akımının değişimi



Şekil 7.3 Köprü çıkışı kısa devre iken deneysel olarak stator a fazı akımının değişimi



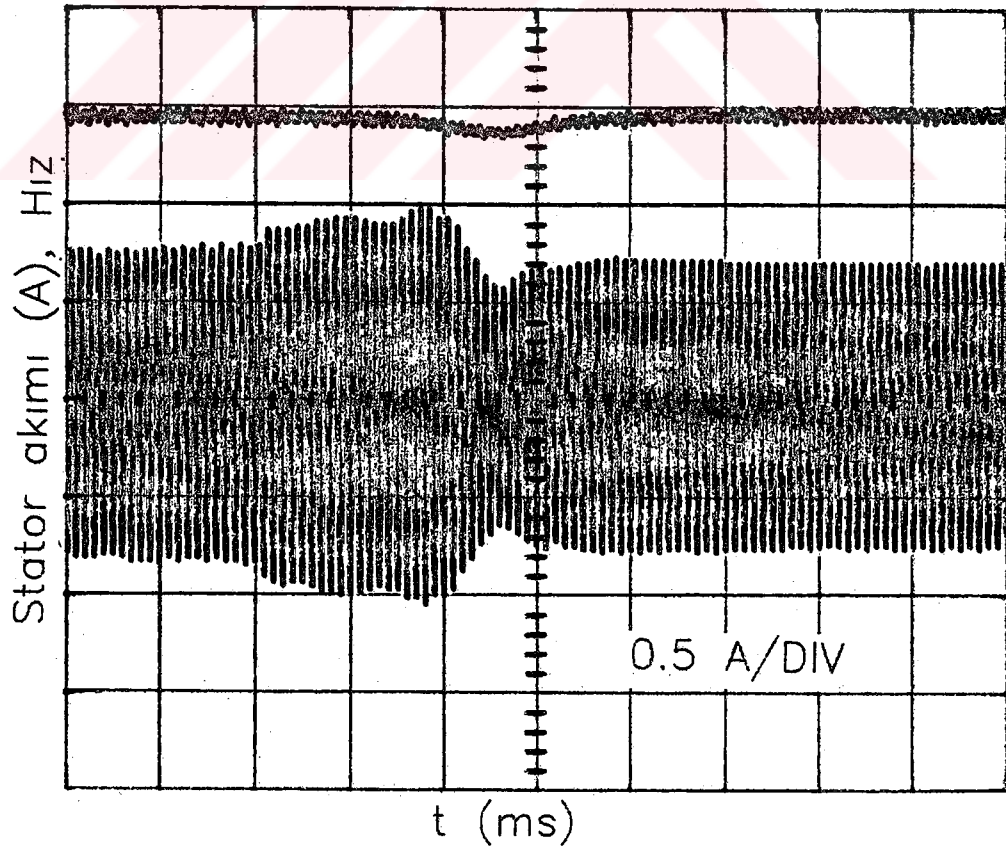
Şekil 7.4 Hesaplanan moment ve hızın zamana göre değişimi



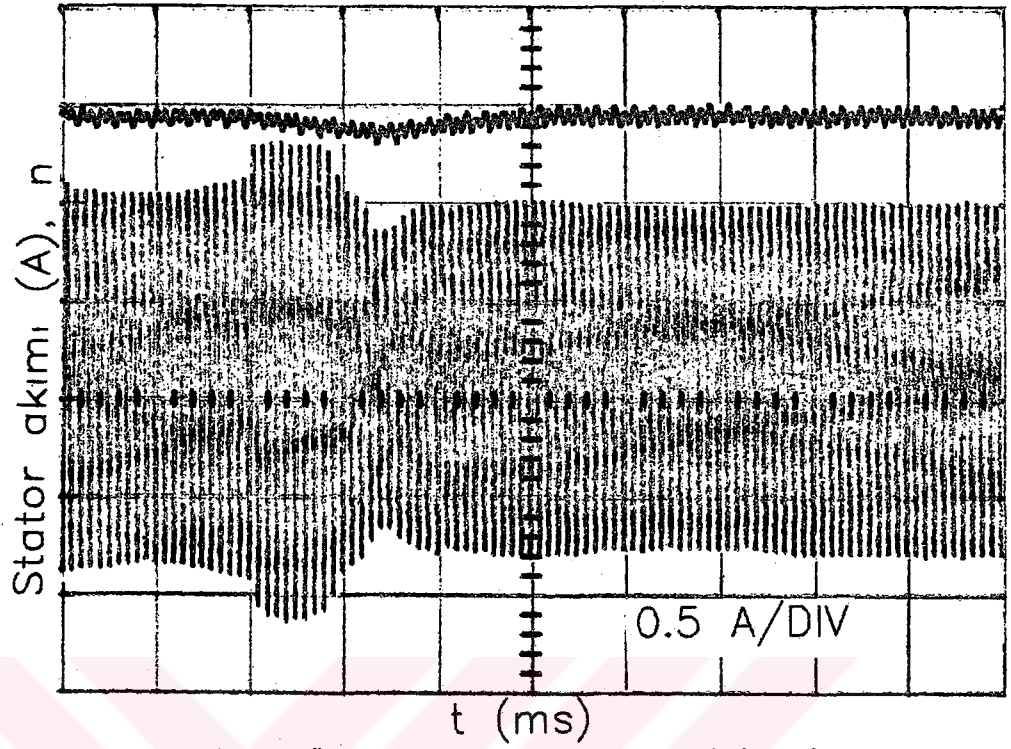
Şekil 7.5 Hesaplanan rotor a fazı akımının değişimi

#### 7.4. Senkronlamaya Geçiş

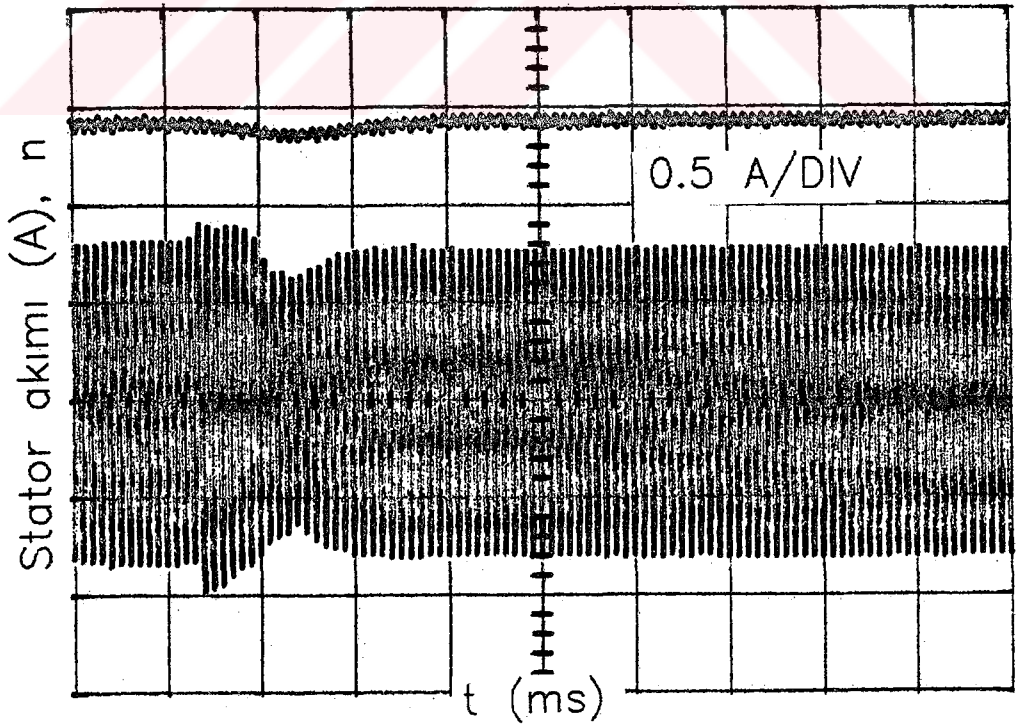
Bu deneyde, senkronlanan bilezikli asenkron motor asenkron yol aldıktan sonra, doğrultucunun çıkışındaki kısa devre kaldırılarak, rotor sargısı uçlarına seri uyartımla elde edilen doğru gerilim uygulanmıştır. Örnek senkronlanan bilezikli asenkron motorun sinüs biçimli gerilimde değişik senkronlamaya geçiş zamanlarına ilişkin stator akımı ve hız deneysel sonuçları şekil 7.6, şekil 7.7, ve şekil 7.8 de verilmiştir. Bilgisayar modeliyle değişik anahtarlama açılarında elde edilen stator akımı sonuçları ise şekil 7.9, şekil 7.10 ve şekil 7.11 de verilmiştir. Sürekli çalışmada 600-700 ms arasında hesaplanan stator akımı ise şekil 7.12 de verilmiştir.



şekil 7.6 Senkronlama anında deneysel olarak stator akımının değişimi

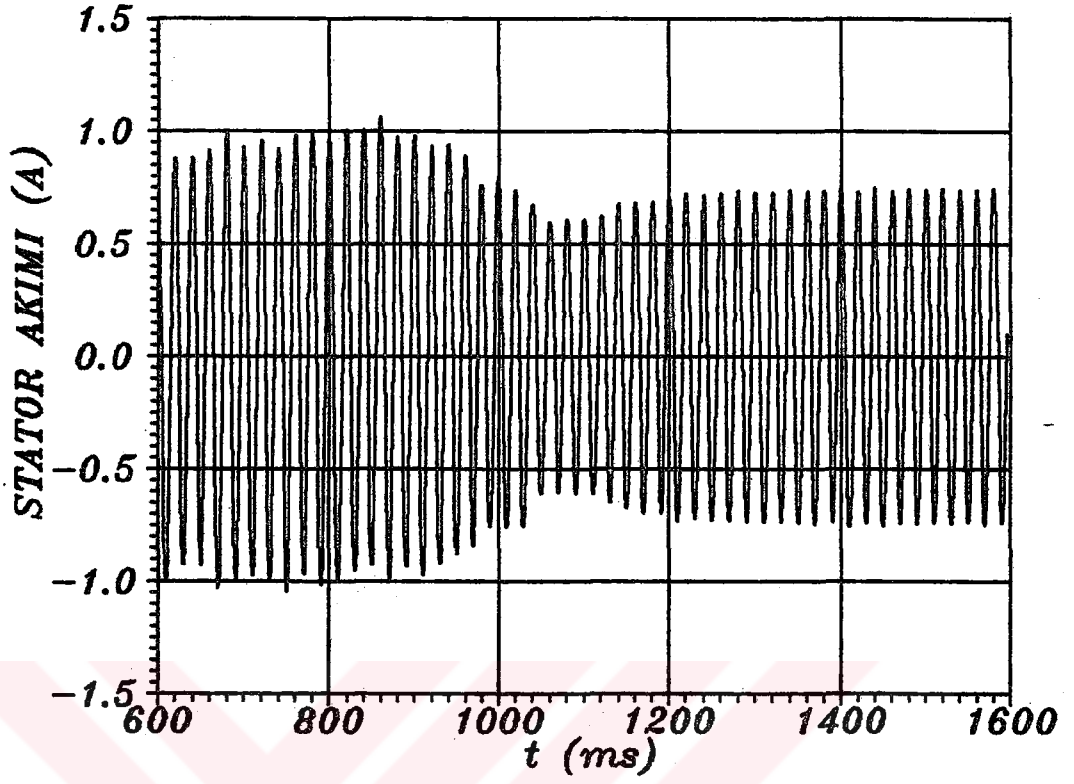


Şekil 7.7 Değişik senkronlama anında stator akımının deneysel olarak değişimi

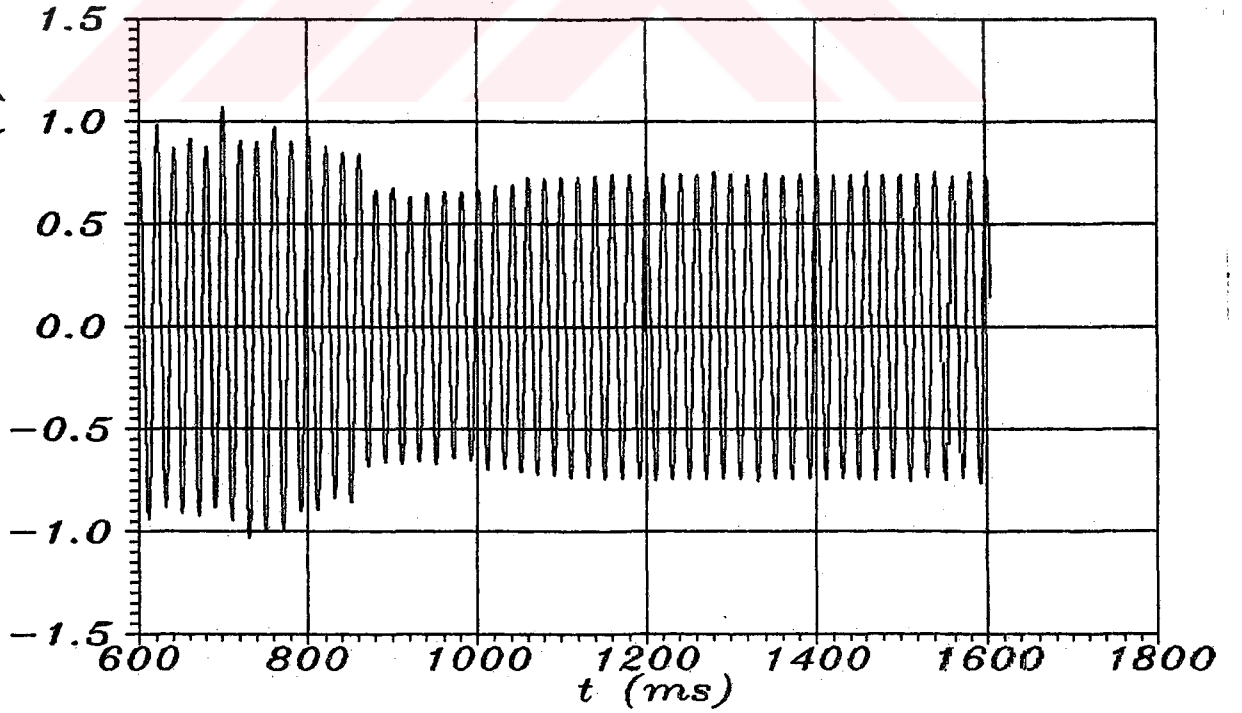


7.8 Değişik senkronlama anında stator akımının deneysel olarak değişimi

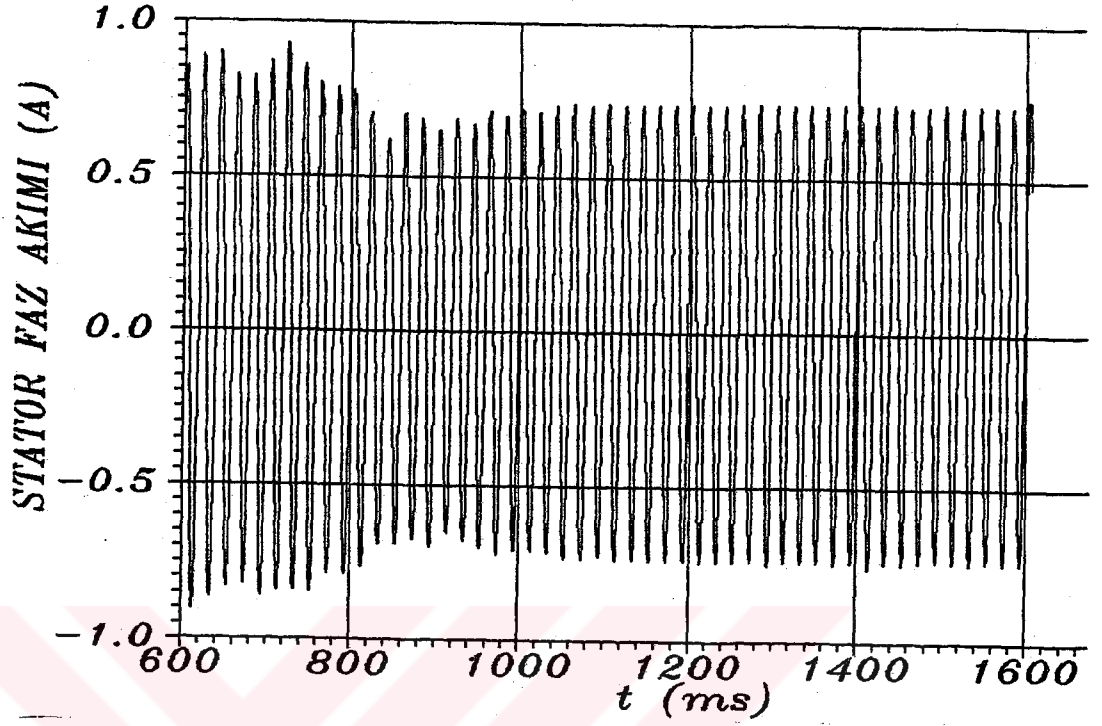




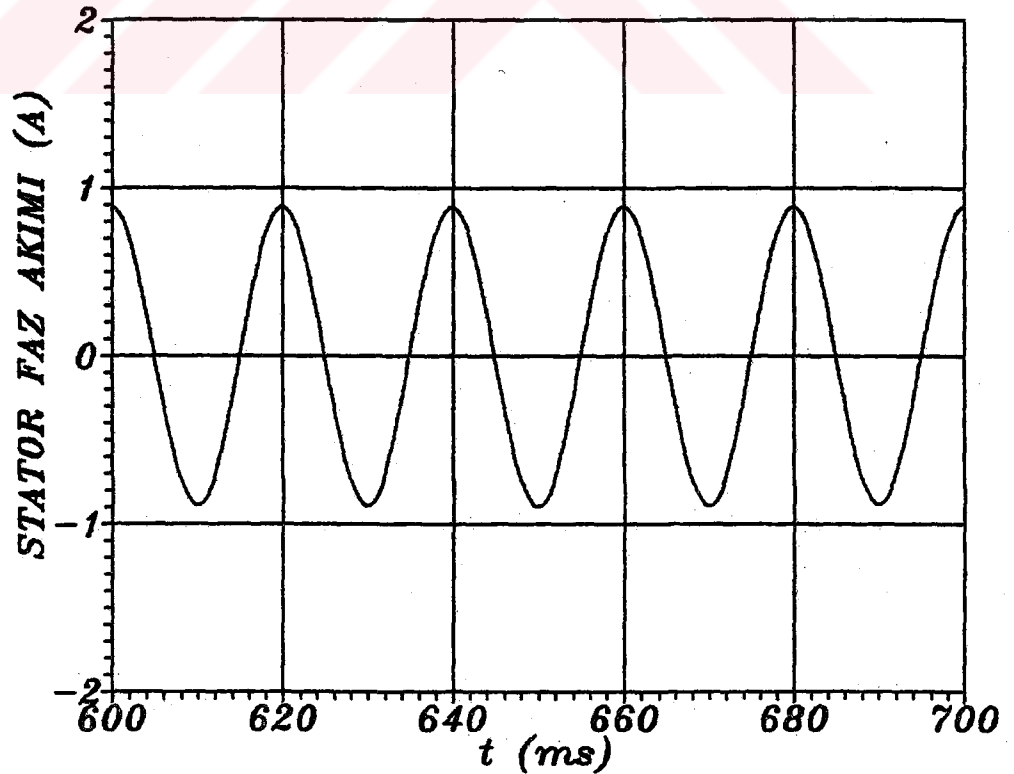
Şekil 7.9 Senkronlama anında Anahtarlama açısı  $\gamma = 90^\circ$  iken hesaplanan stator akımının değişimi



Şekil 7.10 Senkronlama anında Anahtarlama açısı  $\gamma = 126^\circ$  iken hesaplanan stator akımının değişimi

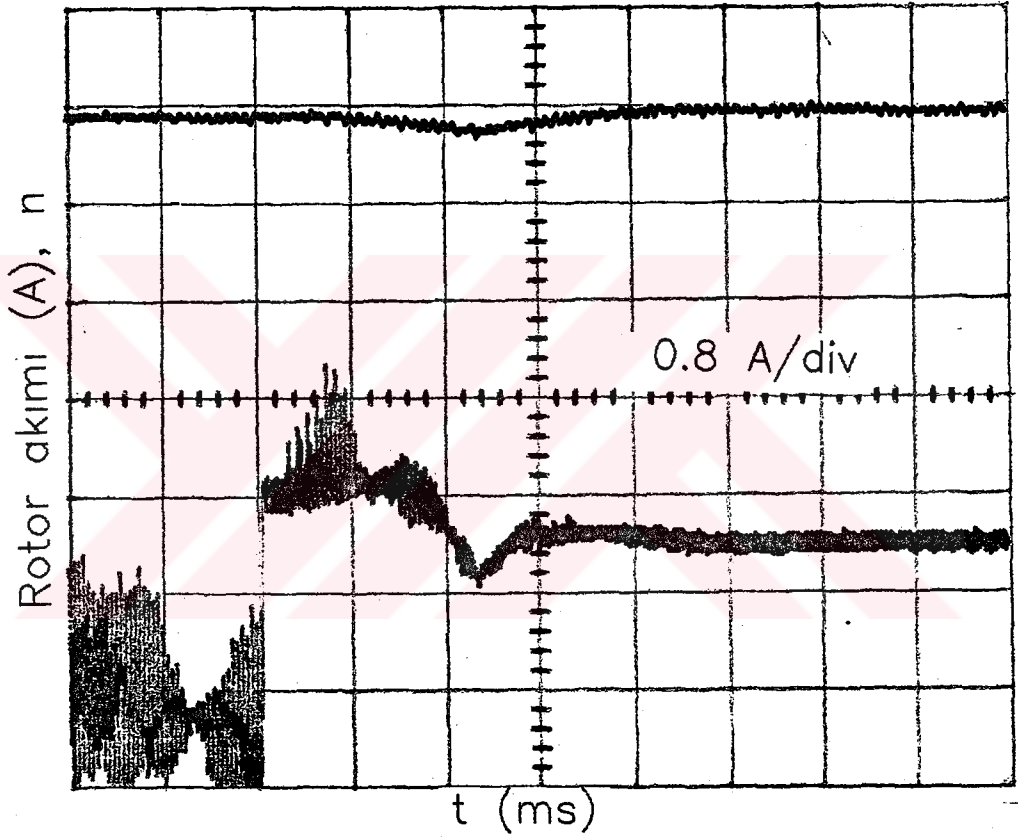


Şekil 7.11 Senkronlama anında Anahtarlama açısı  $\gamma = 153^\circ$  iken hesaplanan stator akımının değişimi

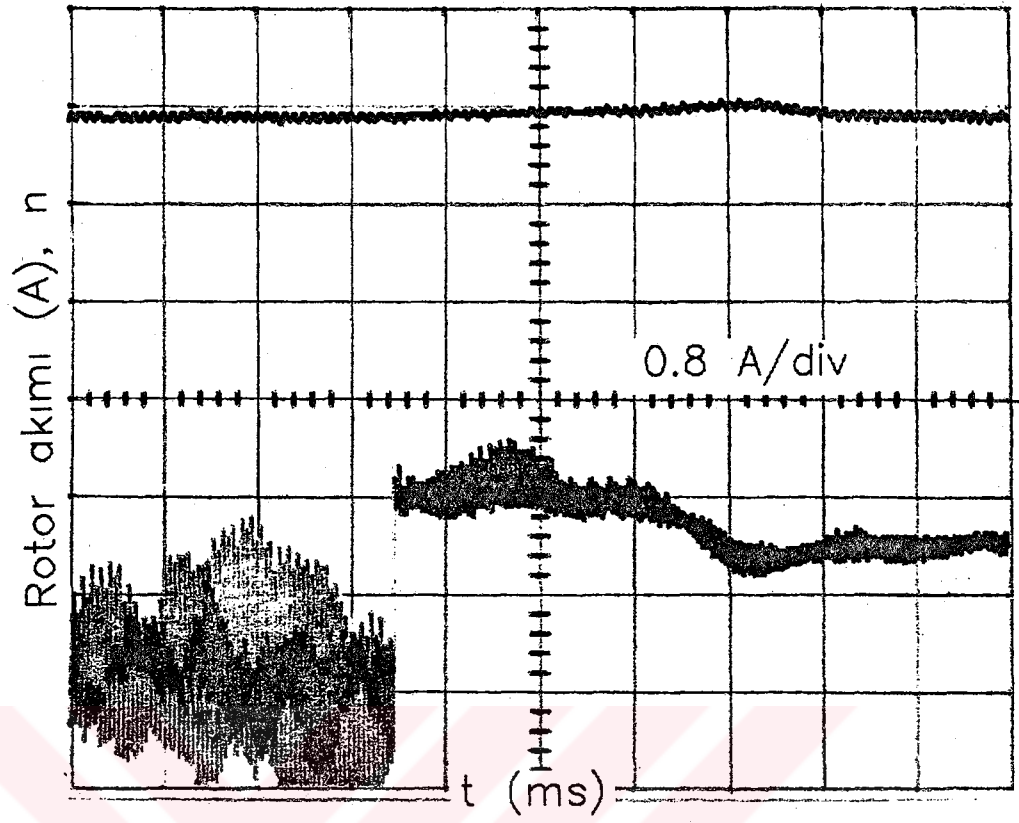


Şekil 7.12 600 ms ile 700 ms arasında hesaplanan stator akımı değişimi

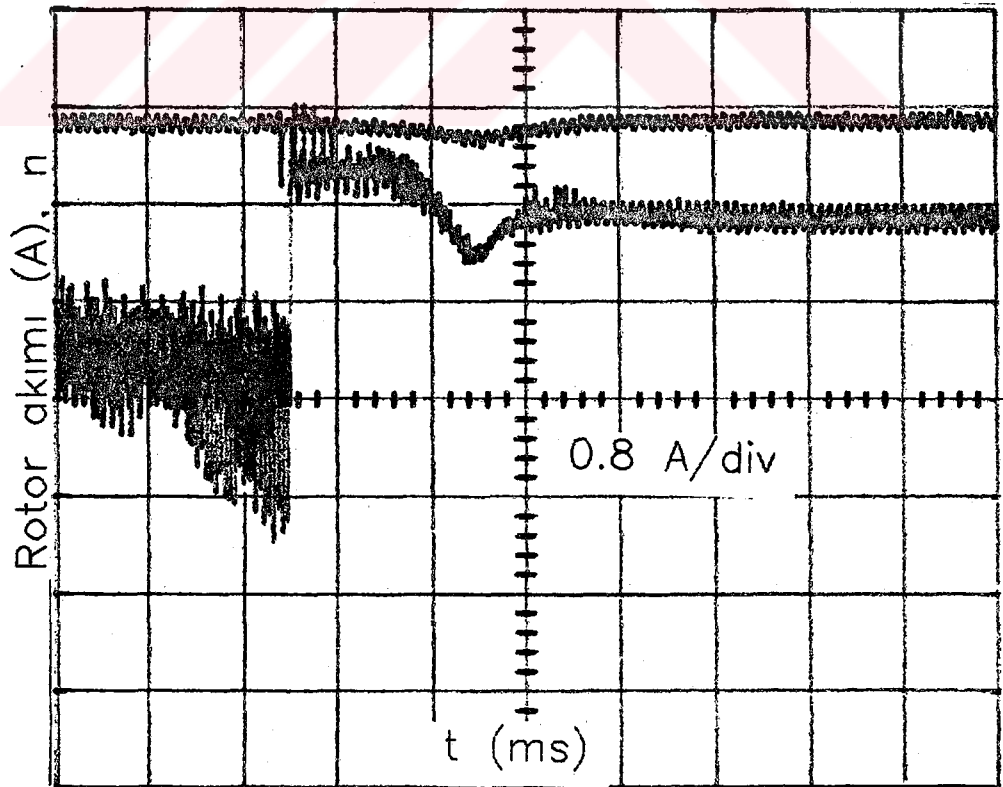
geçiş zamanlarına ilişkin doğrultulmuş rotor akımı ve hızın birlikte deneysel sonuçları Şekil 7.13, Şekil 7.14 ve Şekil 7.15 de verilmiştir. Bilgisayar modeliyle değişik anahtarlama açılarında elde edilen doğrultulmuş rotor akımı sonuçları ise Şekil 7.16, Şekil 7.17 ve Şekil 7.18 de verilmiştir.



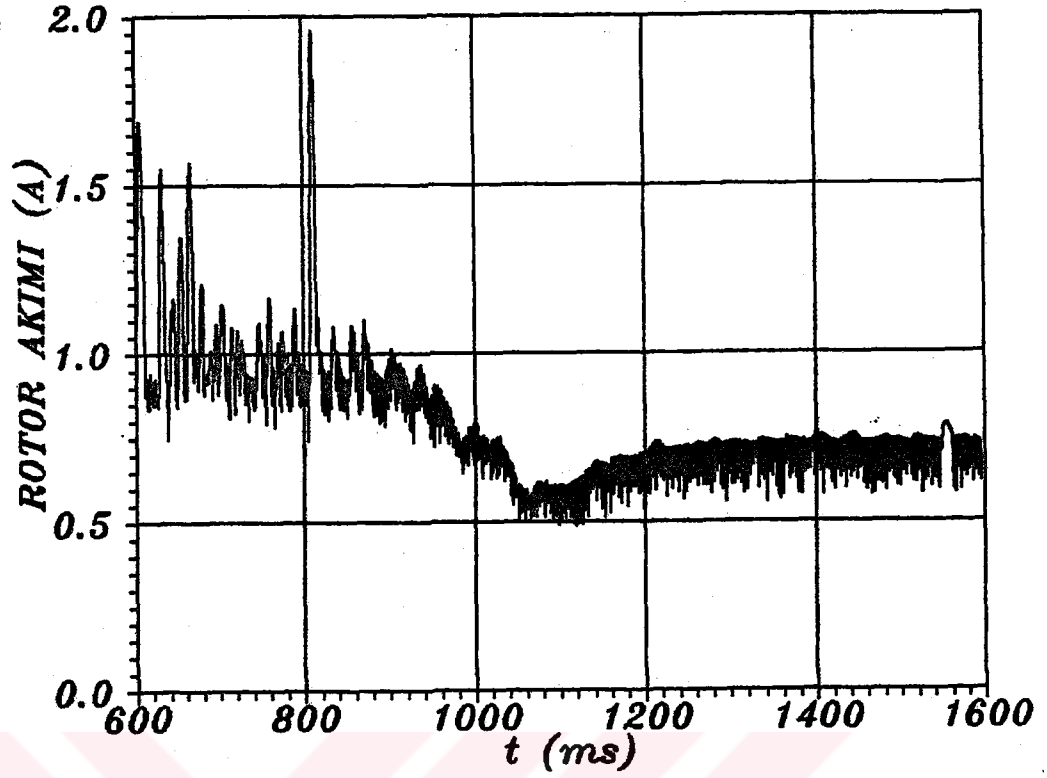
Şekil 7.13 Senkronlama anında deneysel olarak rotor akımı ve hızın değişimi



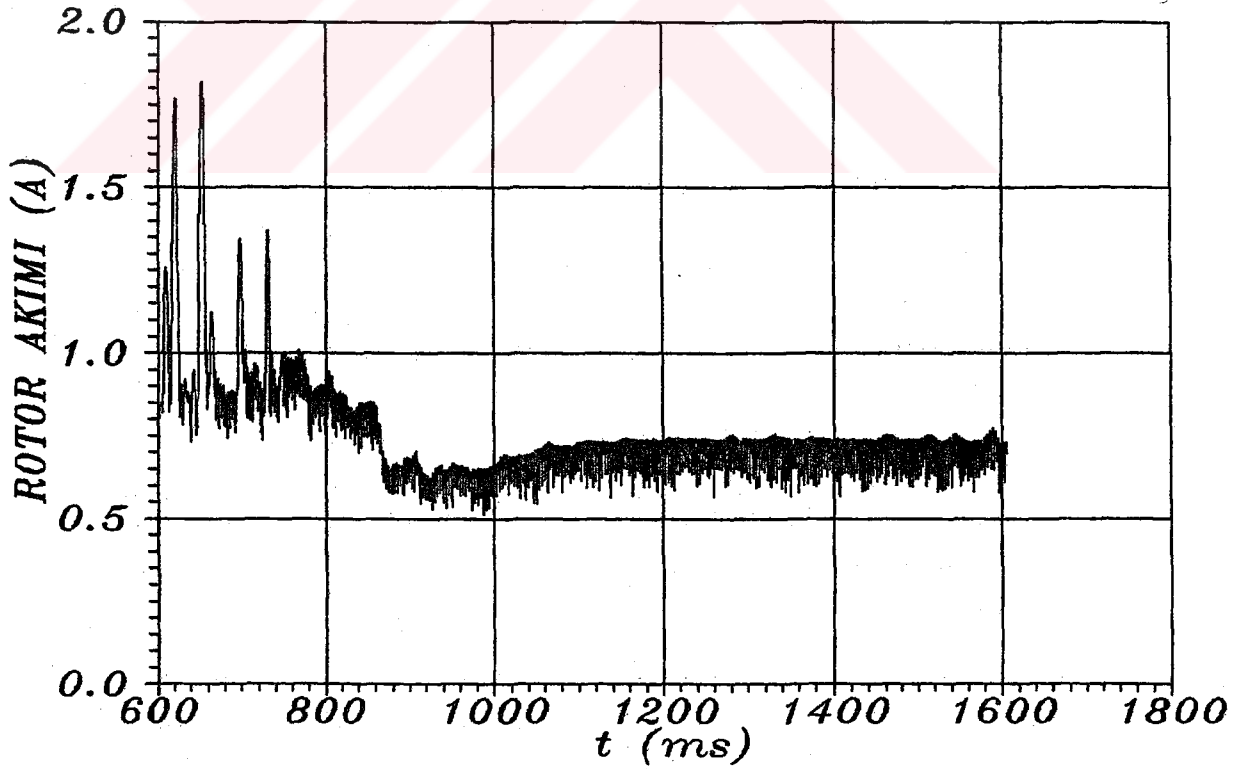
Şekil 7.14 Değişik senkronlama anında deneysel olarak rotör akımı ve hızın değişimi



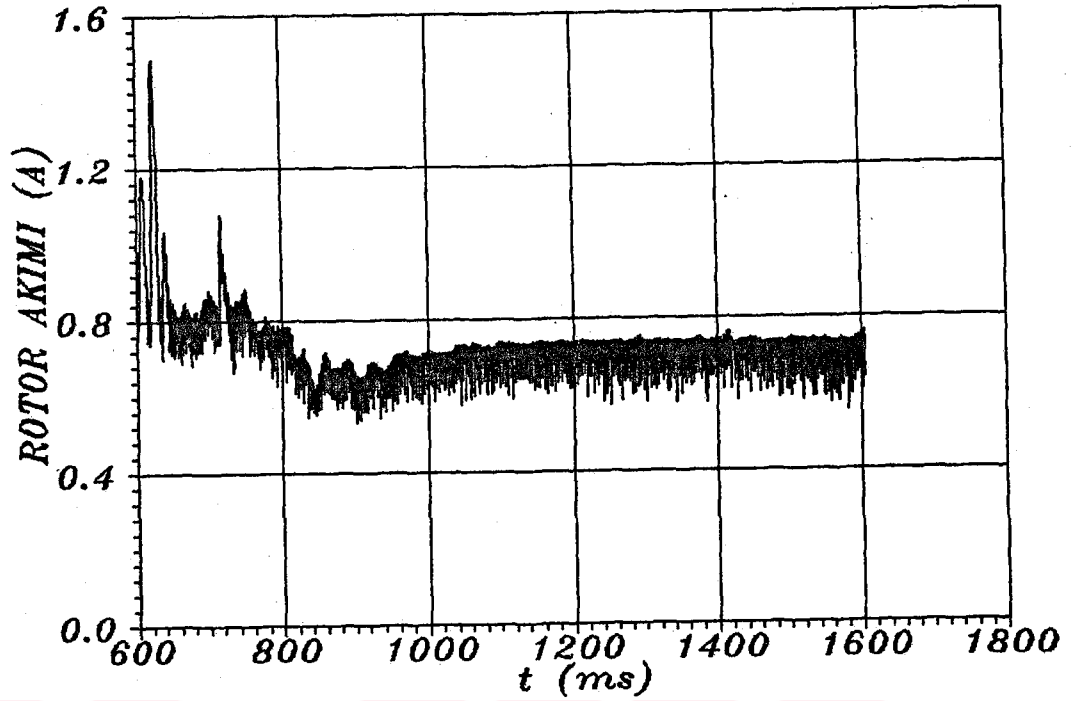
Şekil 7.15 Değişik senkronlama anında deneysel olarak rotör akımı ve hızın değişimi



Şekil 7.16 Senkronlama anında anahtarlama açısı  $\gamma=90^\circ$  iken hesaplanan rotor akımının değişimi

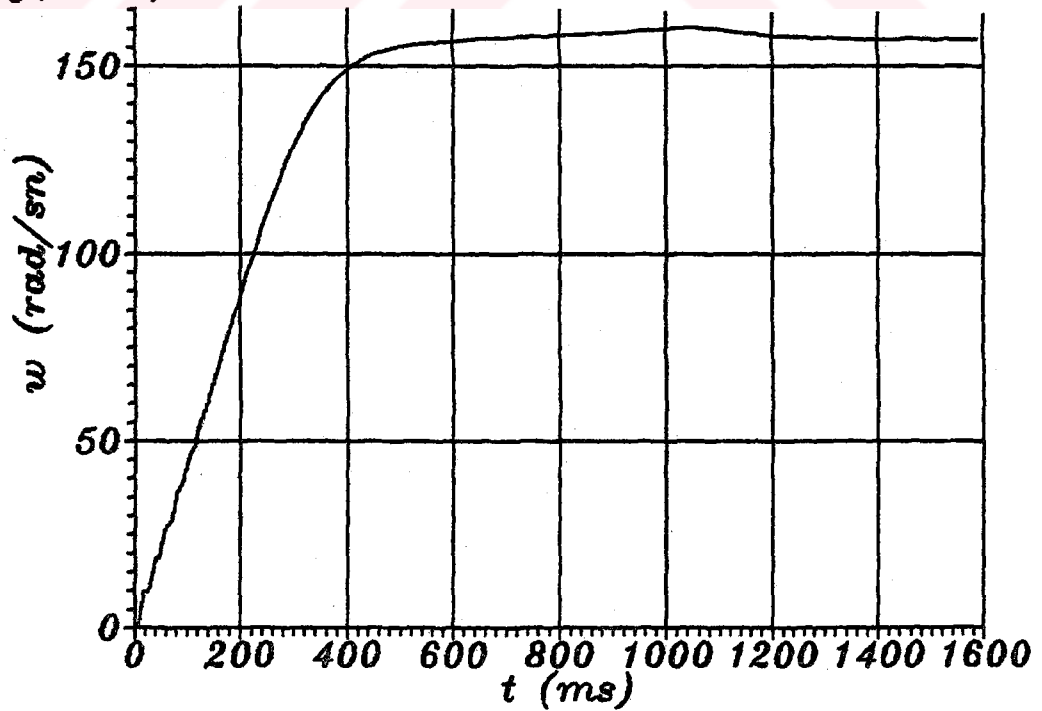


Şekil 7.17 Senkronlama anında anahtarlama açısı  $\gamma=126^\circ$  iken hesaplanan rotor akımının değişimi

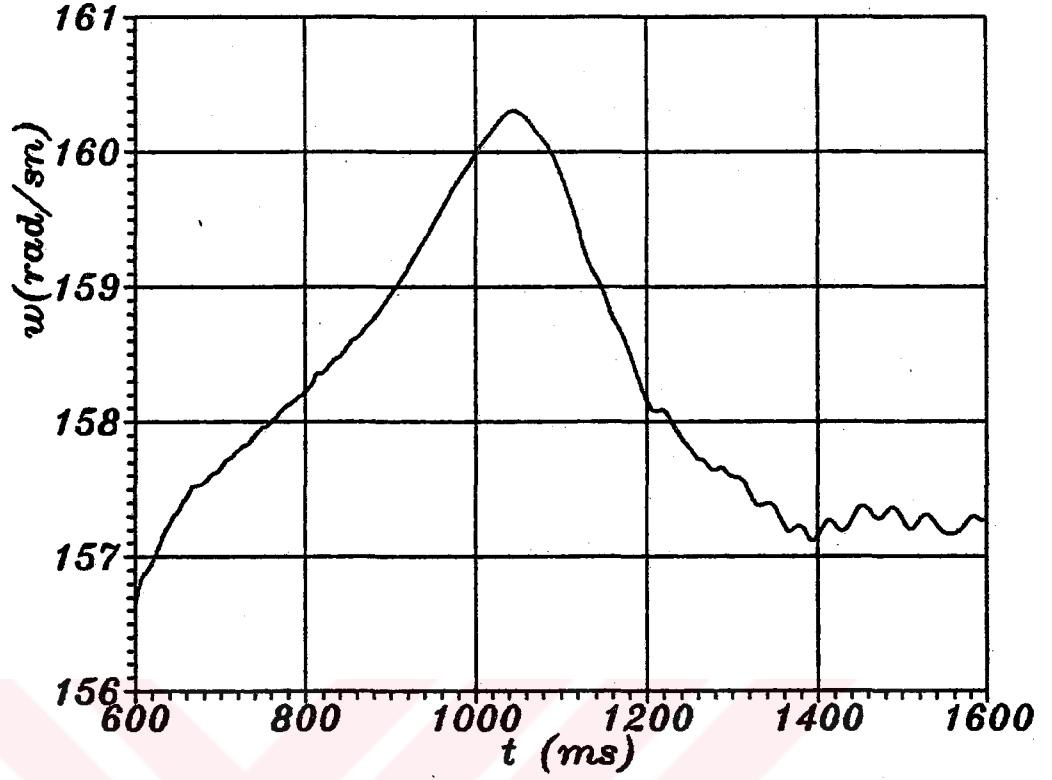


Şekil 7.18 Senkronlama anında anahtarlama açısı  $\gamma=153^\circ$  iken hesaplanan rotor akımının değişimi

Yol alma ve senkronlamaya ilişkin hız eğrisinin birlikte hesaplanan sonuçları şekil 7.19 de, senkronlama anında hesaplanan hız eğrisinin değişimide Şekil 7.20 de verilmiştir.



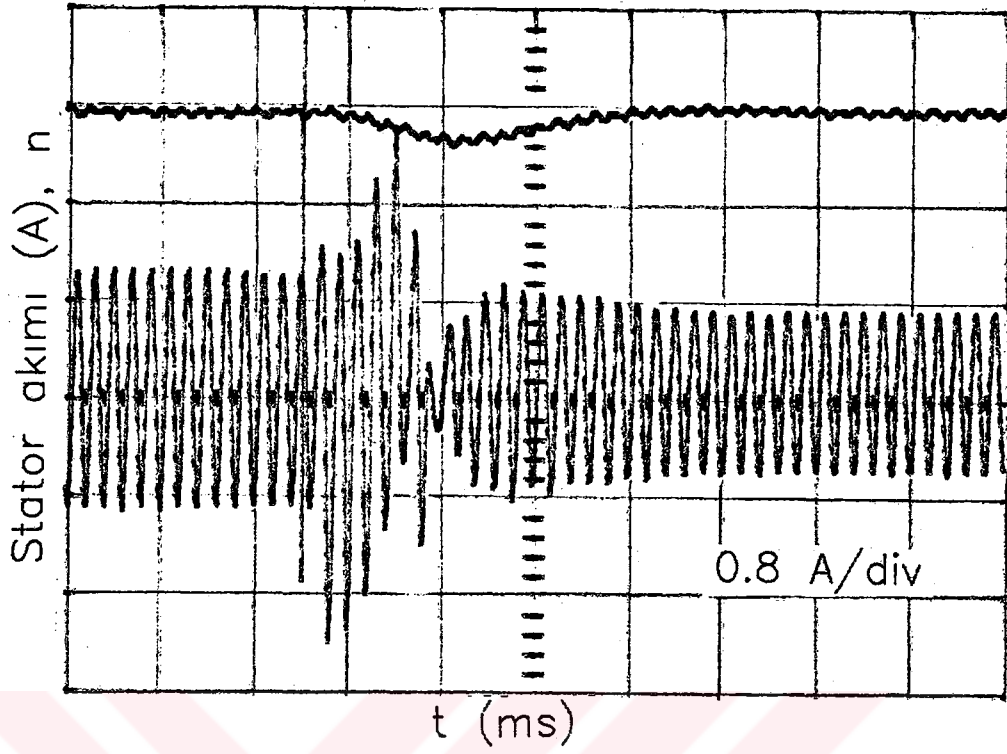
Şekil 7.19 Yol alma ve senkronlamaya ilişkin hesaplanan hız eğrisi



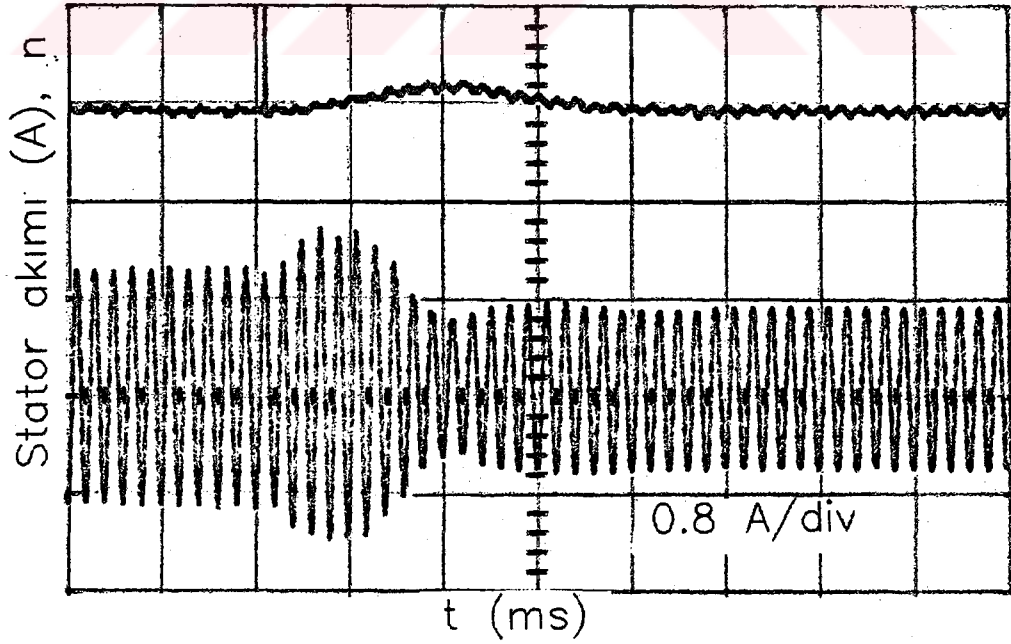
Şekil 7.20 Senkronlama anında hesaplanan hız eğrisinin değişimi

### 7.5.1 Statora seri bağlı oto transformatör ile senkronlamaya geçiş

Statora seri bağlı oto transformatörle senkronlamaya geçiş zamanlarına ilişkin deneysel sonuçlar Şekil 7.17, Şekil 7.18, Şekil 7.19 ve Şekil 20 de verilmiştir. Statora seri bağlanan oto transformatörün stator-rotor sarım oranını etkin olarak değiştirdiği görülmektedir. Bu değişim, stator akımında azalmaya, rotor akımında ise artmaya neden olmaktadır. Seri bağlanan oto transformatör az da olsa  $X_{s0}$ 'yi artırmaktadır.

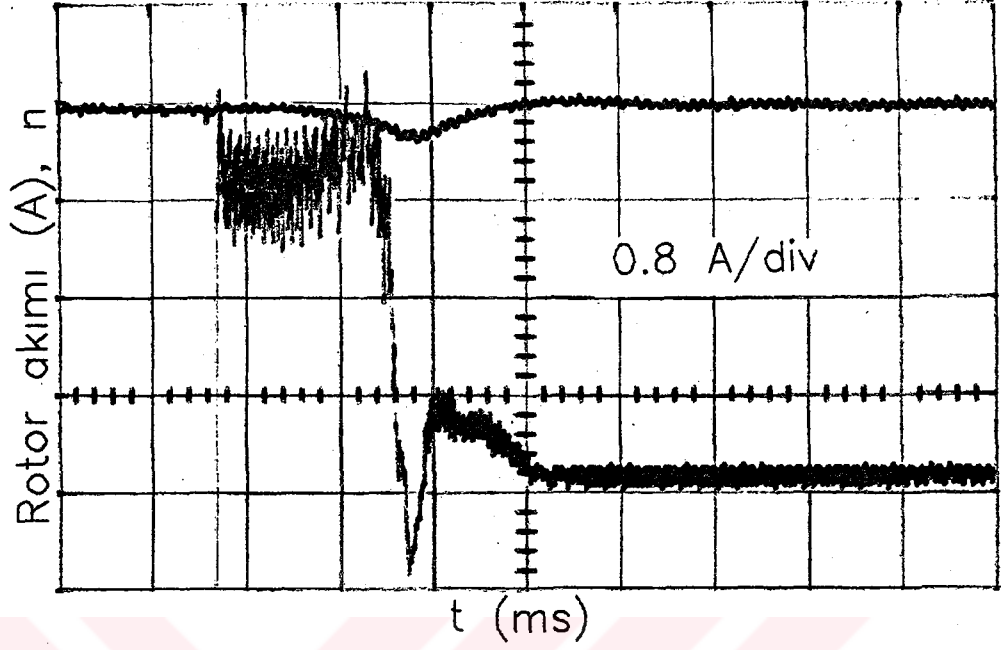


Şekil 7.21 Seri bağlı oto transformatörle senkronlamaya geçişte deneysel olarak stator akımı değişimi

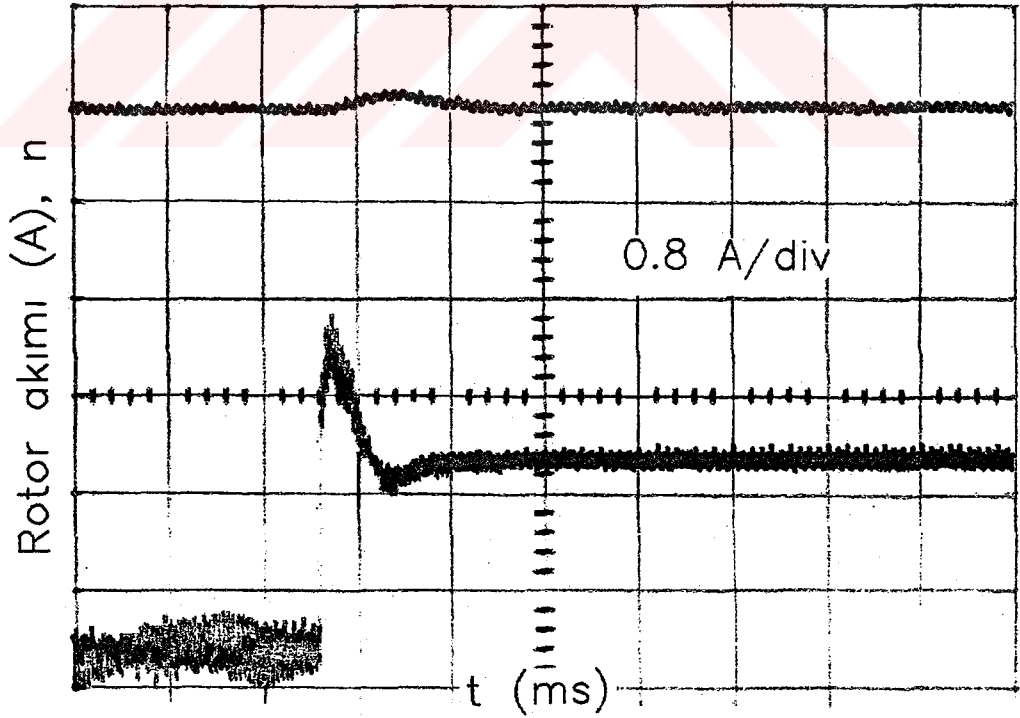


Şekil 7.22 Oto transformatörle değişik zamanda senkronlamaya geçişte stator akımı değişimi





Şekil 7.23 Seri bağlı oto transformatör ile senkronlamaya geçişte deneysel olarak rotor akımı değişimi



Şekil 7.24 Oto transformatörle değişik zamanda senkronlamaya geçişte rotor akımı değişimi

## BÖLÜM 8

### SONUÇ VE ÖNERİLER

#### 8.1. Giriş

Bu bölümde daha önceki bölümlerde açıklanmaya çalışılan yöntemler, kuramsal yaklaşım, oluşturulan bilgisayar modeli ve modelin uygulama sonuçları tartışılıp değerlendirilecek ve konuya ilişkin çalışmaların ilerideki aşamaları için öneriler geliştirilecektir. Öncelikle bu tez kapsamında ortaya konulmaya çalışılan özgün katkılar belirlenecektir.

#### 8.2. Çalışmanın Belirgin Özellikleri

Bu çalışmada aşağıda özetlenen özgün katkıları gerçekleştirmeye çalışılmıştır.

1. Faz değişkenleri modeli yaklaşımı senkronlanan bilezikli asenkron makina ile köprü doğrultucuya birlikte uygulanmıştır.

2. Senkronlanan bilezikli asenkron makinanın doyma özelliklerini veren boşa çalışma deneyini faz değişkenleri yaklaşımıyla ilişkisi eleştirel bir gözle incelenmiş ve bunun sonucunda daha önce önerilen yöntemlerden basit fakat aynı etkinlikte olan yeni bir doyma hesabı yöntemi geliştirilmiştir. Bunun belirgin özelliği boşa çalışma deneyi sonuçlarından başka verilere (akı ve dinamik reaktans ölçümü) gerek kalmadan basit bir yineleme yönteminin kullanılmasıdır.

3. Köprü doğrultucudaki diyotların iletim ve tıkamadaki özellikleri göz önüne alınarak iletim yönünde düşük değerli direnç, tıkama yönünde ise yüksek değerli direnç olarak alınmıştır. Belli bir zaman aralığı boyunca diyot eşdeğer devresi elemanlarının değerleri, o zaman aralığında diyotun iletimde olup olmadığına bağlı olarak saptanmıştır.

4. Diyotların iletim yönünde küçük değerli direnç, tıkama yönünde ise büyük değerli direnç olarak alınmasından farklı zaman sabitleri ortaya çıkmaktadır. Bu durumda differansiyel denklemlerde katılık özelliği görüldüğünden, Gear algoritması ile çözüm yoluna gidilmiştir.

5. Senkronlanan bilezikli asenkron makinanın uyarma gerilimi, giriş uçları stator sargısı uçlarına, çıkış uçlarında rotor sargısı uçlarına bağlanan köprü doğrultucudan seri uyartım olarak elde edilmiştir.

6. Faz değişkenleri modelinin her zaman adımında kullanacağı mıknatıslama endüktansı, doyma ve rotorun dönüş açısı  $\theta$  'ya göre ele alınmıştır.

7. Senkronlanan bilezikli asenkron makinanın endüktansları tasarım büyüklüklerinden ve deneysel olarak elde edilmiştir.

8. Geliştirilen bilgisayar modelinin geçerlilik ve doğruluk derecesiyle yetisi değişik örneklerle gösterilmiştir.

9. Sürekli durum için önerilen yaklaşık bağıntılar kullanılarak, tezde uygulama yapılan makinanın özellikleri vurgulanmaya çalışılmıştır.

Bu kapsamda, daha önce çalışma yapılmamış bir konuda özgün bir modelin geliştirilmesi gerçekleştirilmiştir.

### 8.3. Sonuçların Değerlendirilmesi

Senkronlanan bilezikli asenkron motorun dinamik davranışı için bilgisayar modeli geliştirilirken her aşamada önerilen kuramsal yaklaşım ilişkileri deneysel olarak doğrulanmaya çalışılmıştır. Bölüm 7 de verilen sonuçların bir değerlendirmesi yapılırsa aşağıdaki yargılara varılabilir.

1. Deneysel olarak elde edilen zaman değişimleriyle bilgisayar modelinden elde edilen değişimler genelinde olumlu bir uyum göstermektedirler.

2. Deneysel sonuçlar ile model sonuçları arasındaki farklılıkları motor parametre verilerinin genelinde belli bir yanılğı içeren deneysel verilere dayanmaktadır.

3. Katı differansiyel denklemlerin çözüm metotlarının karşılaştırılmasında en etkili çözümü, geri differansiyele dayanan gear algoritması metodunun verdiği doğrulanmıştır.

4. Deney anında, köprü çıkışı kısa devre yapılan senkronlanan bilezikli asenkron motor, asenkron olarak yol aldıktan sonra senkronlamaya geçiş anında mekanik anahtar kullanıldığı için gecikme olmaktadır.

5. Deneysel olarak elde edilen senkronlama zamanları ile, bilgisayar modelinde kullanılan senkronlama zamanları aynı değildir.

6. Bölüm 7 deki sonuçlarda verilen hesaplanmış dinamik moment- hız eğrilerinin deneysel doğrulanması için bir ölçüm düzeneği oluşturulamamıştır. Ancak akım, hız ve gerilim değişimlerindeki doğrulama bu konuda yeterli sayılır.

#### 8.4. Modelin Kullanım Alanları

Bu çalışmanın geneli göz önüne alındığında bilgisayar modelinin kullanım alanları aşağıdaki gibi özetlenbilir :

1. Makina tasarımı : Değişik makina boyutlarında yol alma akımı, yükte davranışı ve senkronlamaya geçiş anındaki akımların, hızın ve momentin saptanması dinamik davranış açısından, yaklaşık sürekli durum modeli ise, sürekli durumdaki hedef büyüklüklerinin sağlanması açısından yararlıdır.

2. Uygun köprü doğrultucu seçimi : Senkronlanan bilezikli asenkron motorun uyarımı için kullanılacak güç elektroniği düzeneği türünün (kontrollü, kontrolsüz ve yarı kontrollü) dalga biçiminin en büyük moment/amper, en küçük sürekli durum moment dalgalanması, en düşük kayıplar açısından karşılaştırmalı olarak irdelenmesi ve uygun seçeneğin belirlenmesi.

3. Denetim olasılıkları : Senkronlanan bilezikli asenkron motorun önerilecek uygulama ve denetim alanlarına uygun olup olmadığının araştırılması (Örneğin kontrol sistemlerindeki tepkilerin incelenmesi).

#### 8.5. Öneriler

Bu çalışmada geliştirilen bilgisayar modelinin doğruluk ve geçerliliğinin daha üst düzeyde araştırılması ve kullanımı yönünden ileride yapılabilecek çalışmalar şöyle özetlenebilir.

1. Modelde kullanılan katı differansiyel denklem çözmeye ilişkin

sayısal yöntem değişik bir yöntemle yenilenebilir.

2. Senkron çalışmada uyarım sargısının etkinliğinin araştırılması için değişik rotor sargı bağlantı biçimlerinde katı differansiyel denklemler aynı metotla özölabilir.

3. Bilgisayar modelinde kullanılan rotor sargı bağlantısına seri transformatörler ilave ederek, sarım oranının senkron çalışma için etkinliği incelenebilir.

4. Endüktansların hesaplanmasında daha ayrıntılı bir yöntem olan sonlu elemanlarla magnetik alan hesabı sonuçlar hesaplanarak irdelenebilir.

5. Dinamik moment ölçümüne elverişli gelişkin düzeneklerle modelin doğruluk derecesi moment-hız eğrileri temelinde de etkili olarak araştırılabilir.

6. Model, yukarıda belirlenen kullanım alanlarında sınınanarak bu biçimdeki durumuyla gereken geliştirme ve değiştirmeler ortaya konulabilir.

7. Bundan sonraki aşama genelinde, bu tezde verilen, yaklaşık sürekli durum ve dinamik davranış modelleriyle seri uyarımlı senkron motor tasarımında optimizasyon sorununu özölmektir.

**KAYNAKLAR**

- ADKINS, B. ve HARLEY, R.G., 1975. **The General Theory of Alternating Current Machines**. Chapman and Hall, London.
- ALDEMİR, R., 1981. **İleri Elektrik Makinaları Teorisi**. E.D.M.M.A. , Elazığ.
- ALDEMİR, R. , 1977. **Sürekli Mıknatıslarla Uyarılmış Senkron Makinalar Üzerine Bir İnceleme**. Doçentlik Tezi, K.T.Ü. , Trabzon.
- ALEXANDROVITZ, A. ve 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.
- ALGER ,P.L. , 1951. **The Nature of Polyphase Induction Machines**. Chapman, Hall.
- Aykanat, C. ,1980. **A New Approach to Optimezed Design of Induction Motors**. Master Thesis, O.D.T.Ü., Ankara.
- BROSAN, G.S. ve HAYDEN, J.T., 1966. **Advanced Electrical Power and Machines**. Sir Isaac Pitman, London.
- BROWN, J.E., KOVACS, K.P. ve VAS, P., 1983. A Method of Main Flux Path Saturation in the Generalized Equations of AC Machines. **IEEE Trans. on Power Apparatus Systems**, PAS-102(1), 96-103.
- CARTER, G.W. , 1954. **The Electromagnetic Field in its Engineering Aspects**. Longmans, Green.

- CHALMERS, B.J., MAGUREANU, R.M. ve HINDMARSH J.,1972. General Principle for Brushless Synchronous Machines and its Application in an Invertor-Fed Drive. **Proc. IEE**, 119(11): 1641-1642.
- CHALMERS , B.J., MOHAMADEIN, A.L., ve WILLIAMSON , A.C. ,1974. Invertor-Fed Synchronous Motors with Induced Excitation. **Proc. IEE**,121 12): 1505-1512.
- 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.
- GEAR, W.C., 1971. **Numerical Initial Value Problems in Ordinary Differential Equations**. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey.
- 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**. Mc Donald, London.
- HANCOCK, N.N., 1989. **Matrix Analysis of Electrical Machinery**. Second Edition, Pergamon Press.
- HINDMARSH, A.C., 1983. **A Systematized collection of ODE Solver**. North Holland, Amsterdam: 55-64.



- İMERYÜZ, M. ve ÇETİN, İ., 1991. Senkronlanan Asenkron Motor İncelemesi ve Kullanabilirlik Analizi. **Elektrik Mühendisliği 4. Ulusal Kongresi**, DEÜ, İzmir: 13-16.
- JONES , C . V . ,1967 . **The Unified of Theory Electrical Machines**. Butterworth -Co. Ltd.
- KRAUSE, P.C. ve WASYNCZUK, O. , 1989. **Electromechanical Motion Devices**. Mc Graw-Hill Book Company.
- KRAUSE, P.C., 1987. **Analysis of Electric Machinery**. McGraw-Hill Book Company.
- KOVACS, K.P., 1984. **Transient Phenomena in Electrical Machines**. Elsevier Science Publieshers B.V., Amsterdam.
- KOVACS, K.P., 1984. On the Theory of Cylindrical Rotor AC Machines, Including Main Flux Saturation. **IEEE Trans. on Power Apparatus ve Systems**, PAS-103(4): 754-757.
- KUTMAN, T., 1975. "Güç Elektroniği Devrelerinde Genel Bir Analiz Yöntemi ve Küçük Distorsiyonlu Bir İnverter". Doktora Tezi, İ.T.Ü.
- NASAR, S.A. ve UNNEWEHR, L.E., 1979. **Electromechanics and Electric Machines**. John Wiley, New York.
- OSTOS, E.A., 1978. **A Synchronous Motor with Series Excitation**. Master Thesis, Victoria University, Manchester.
- ÖNBİLGİN, G. ve ŞENLİK, İ., 1986. Tristörlü Güç Elektroniği Devrelerinin Çözümlemesi ve Tasarımında Kullanılan iki Benzetim Yönteminin

Karşılaştırılması. **2. Ulusal Bilgisayar Destekli Tasarım Sempozyumu**, 2: 477-488, İzmir.

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

SARIOĞLU, K. , 1980. **Elektrik Makinaların Temelleri 2**. Teknik Üniversite Matbaası, Gümüşsuyu, İstanbul.

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

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

SEZGİN, A., 1983. **Asenkron Makinanın Sayısal Benzetimi**. Yüksek Lisans Tezi, K.Ü., Trabzon.

SHIBATA, F. ve FUKAMI T., 1986. A Brushless and Exciterless Polyphase Synchronous Motor. **IEEE Trans. on Energy Conversion**, EC - 2(3): 460-468.

SMITH, I.R. ve GARRIDO, M.S., 1967. Current- Compounded Self Excitation of Synchronous Motors. **Proc. IEE**, 114(2): 269-276.

SMITH, I.R. ve NASAR, P.A., 1968. Brushless and Self-Excited 3-phase Synchronous Machine. **Proc. IEE**, 115(11): 1655-1660.

SMITH, I.R., RAVEN, J.M. ve TSO, S.K., 1967. Brushless and Self-Excited Single-Phase Alternator. **Proc. IEE**, 114(8): 1089-1098.

TETİK, D., 1983. **Endüksiyonla Isıtma**. Yüksek Lisans Tezi, K.Ü., Trabzon.

TUBBS, S.P., 1990. Superconducting Synchronous Induction Motor Performance. **Proc. IEE**, 137: 120-124.

VAS, P., HALLENIUS, K.E. ve BROWN, J.E., 1986. Cross-Saturation in Smooth Air-Gap Electrical Machines. **IEEE Trans. on Energy Conversion**, EC-1(1):103-109.

WILLIAMSON, A.C. ve CHALMERS, B.J., 1977. New Form of Inverter-Fed Synchronous Motors with Induced Excitation. **Proc. IEE**, 124(3): 213-217.

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

## EK-A

## RUNGA-KUTTA-MERSON SAYISAL ÇÖZÜMLEME YÖNTEMİ

Faz değişkenleri modelinden elde edilen diferansiyel denklem sistemlerinin çözümü için: "Runga-Kutta-Merson" sayısal çözümü yöntemi kullanılmıştır (Williams, 1973). Yöntem 5. mertebededir. Yani hata, hesap adımı (h) nın 5. üssü ile orantılıdır.

$$\frac{d}{dt} X + f(X,t) \quad (A.1)$$

biçimindeki diferansiyel denklemin başlangıç değerleri:  $t=t_0$  da  $X=X_0$  olsun. Bu değerler yardımıyla diferansiyel sistem takımı, aşağıdaki biçimde beş adımda hesaplanır;

$$1. \text{ Adım} \quad K_1 = \frac{h}{3} f(X_0, t_0)$$

$$X_1 = X_0 + K_1$$

$$t_1 = t_0 + \frac{h}{3}$$

$$2. \text{ Adım} \quad K_2 = \frac{h}{3} f(X_1, t_1)$$

$$X_2 = X_0 + \frac{1}{2} K_1 + \frac{1}{2} K_2$$

$$t_2 = t_0 + \frac{h}{3}$$

3. Adım  $K_3 = \frac{h}{3} f(x_2, t_2)$

$$x_3 = x_0 + \frac{3}{8} K_1 + \frac{9}{8} K_3$$

$$t_3 = t_0 + \frac{h}{2}$$

4. Adım  $K_4 = \frac{h}{3} f(x_3, t_3)$

$$x_4 = x_0 + \frac{3}{2} K_1 - \frac{9}{2} K_3 + 6 K_4$$

$$t_4 = t_0 + \frac{h}{2}$$

5. Adım  $K_5 = \frac{h}{3} f(x_4, t_4)$

$$x_5 = x_0 + \frac{1}{2} (K_1 + 4 K_4 + K_5)$$

$$t_5 = t_0 + h$$

## DENEYLERDE KULLANILAN BİLEZİKLİ ASENKRON MAKİNANIN TANITIMI

Kullanılan bilezikli asenkron makinanın anma değerleri; makina özellikleri rotor ve stator boyutları aşağıda verilmiştir.

Makina Modeli :

Anma Değerleri:

$$P_N = 1.6 \text{ kW}$$

$$I_N = 3.7 \text{ A}$$

$$V_N = 380 \text{ V}$$

$$N_N = 1400 \text{ dev/dak}$$

$$f_N = 50 \text{ Hz}$$

$$2p = 4$$

$$\text{Stator bir faz sarım sayısı} \quad N_1 = 210$$

$$\text{Rotor bir faz sarım sayısı} \quad N_2 = 28$$

$$\text{Stator ve rotor uzunluğu} \quad L = 46 \text{ mm.}$$

$$\text{Stator dış çapı} \quad D_d = 102 \text{ mm}$$

$$\text{Stator iç çapı} \quad D_0 = 60 \text{ mm}$$

$$\text{Kutup adımı} \quad \tau_p = 47 \text{ mm}$$

## EK-C

**BİLEZİKLİ ASENKRON MAKİNA DA SÜRTÜNME KAYIPLARI VE  
EYLEMSİZLİK  
MOMENTİNİN ÖLÇÜLMESİ**

Sürücü sistemlerinde yol alma veya durma süresinden yararlanılarak eylemsizlik momenti bulunur. Bunun için ölçü bölgesindeki sürtünme kayıplarının bilinmesi gerekir. Asenkron makina da sürtünme ve demir kayıplarının toplamı ( $P_{ste} + P_{Fe}$ ) statora uygulanan gerilimin karesiyle doğru orantılıdır. Gerilim uygulanmaması durumunda  $P_{Fe} = 0$  dır. Bu noktada ( $V=0$ ) ölçülen kayıplar sürekli sabit olan sürtünme kayıplarını verecektir. Bu özellikten yararlanarak asenkron makinanın mili boşta iken stator gerilimi değiştirilerek (50-380 V) güç ölçümü yapılmıştır. Bu durum için  $P_{ste} + P_{fe} = f(V^2)$  grafiği Şekil C.1 de gösterildiği gibi çizilmiştir. Elde edilen doğrular, uzatılarak  $V=0$  'a karşılık gelen sürtünme kayıpları makina mili boşta iken  $P_{ste} = 16 \text{ W}$  olarak ölçülmüştür.

Bilezikli asenkron makinanın eylemsizlik momentini ( $J$ ) hesaplamak için; makina miline bağlanan takometrenin çıkışları bellekli osiloskobun girişine bağlanır. Makina boşta çalışırken aniden enerjisi kesilirse, makina hızının boşta çalışma hızından sıfıra inişini gösteren hız-zaman eğrisi, Şekil C.2 deki gibi elde edilir. Bu eğrilere çizilecek teğetin eğiminden yararlanarak, eylemsizlik momentinin değeri aşağıdaki

eşitliklerden hesaplanır.

$$M = J 2 \pi \frac{\Delta n}{\Delta t} \quad (C.1)$$

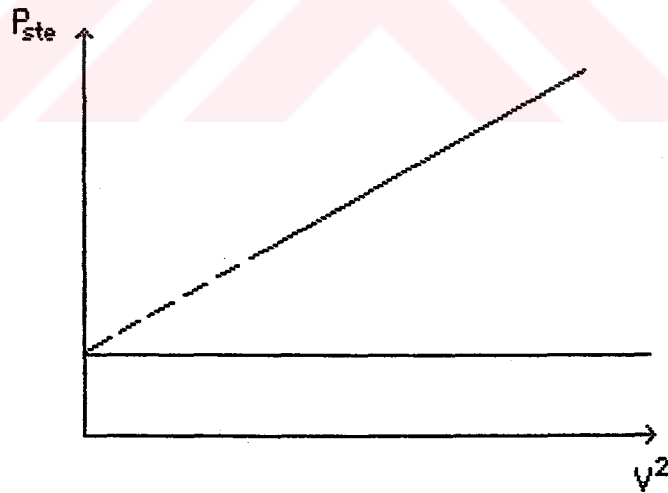
$$M = \frac{P_{ste}}{2 \pi n_0} \quad (C.2)$$

Bu eşitliklerden yararlanarak:

$$J = \frac{P_{ste}}{4 \pi n_0^2} \frac{\Delta t}{\Delta n} \quad (C.3)$$

yazılabilir. Bu eşitlikten eylemsizlik momenti :Makine mili boştaiken

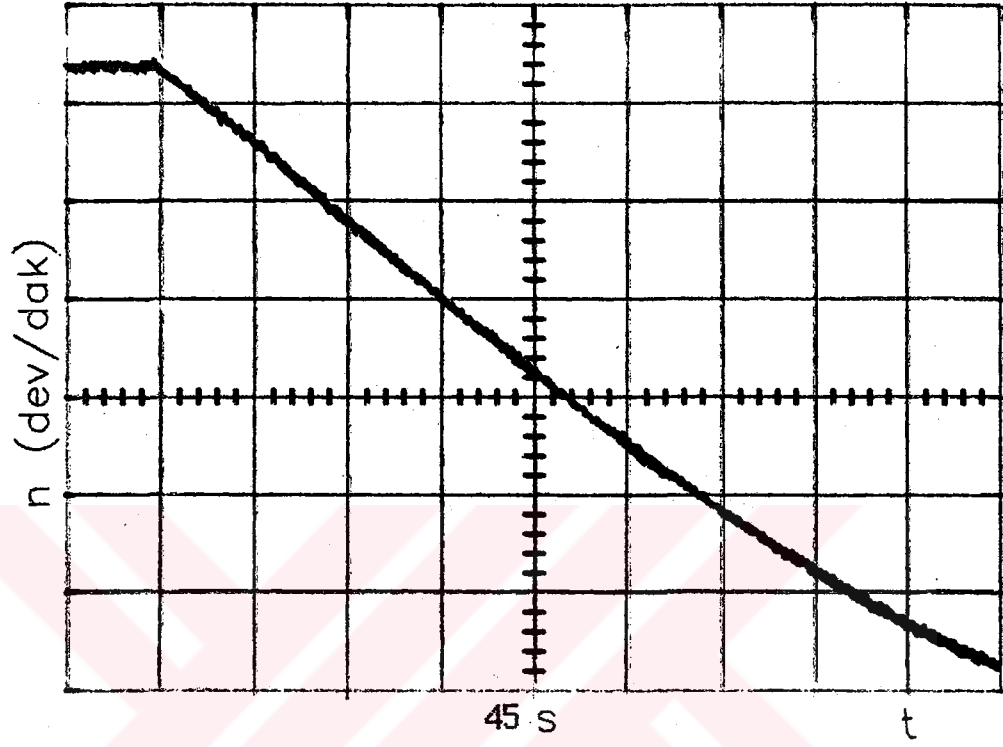
$J = 0.028 \text{ W s}^3$  hesaplandı.



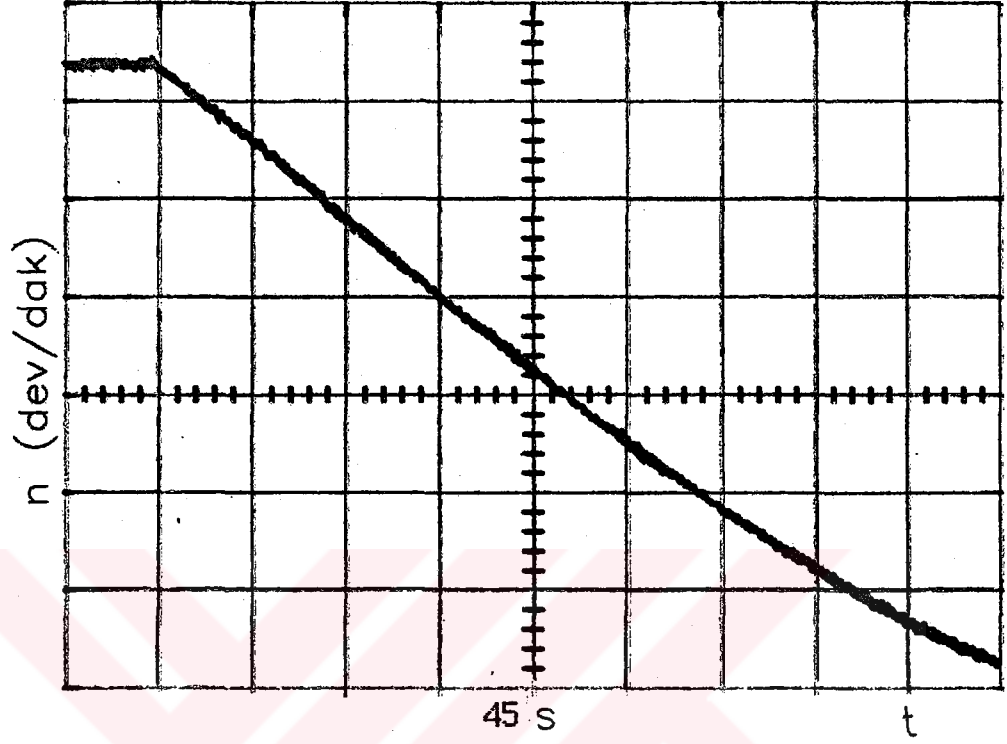
Şekil C.1. Bilezikli asenkron makinanın miline dinamometre bağlıyken

$P_{ste} + P_{fe} = f(v^2)$  grafiği





Şekil C.2 Asenkron makina miline dinamometre bağıyken yavaşlama eğrisinin zamanla değişimi



Şekil C.2 Asenkron makina miline dinamometre bağlıken yavaşlama yavaşlama eğrisinin zamanla değişimi

## EK-D

## KESİRLİ EĞRİ UYDURMA YÖNTEMİ

Yöntem,  $(X_k, Y_k)$  biçimlerinde verilen veri çiftlerine (D.1) de gösterildiği biçimde bir  $G(X_k)$  fonksiyonu uydurulur (Önbilgin, 1981).

$$G(X_k) = \frac{P_0 + P_1 X_k + \dots + P_n X_k^n}{1 + q_1 X_k + \dots + q_m X_k^m} = \frac{P(X_k)}{Q(X_k)} \quad (D.1)$$

Uydurulan  $G(X_k)$  eğrisinin  $X_k$  noktasındaki hatası

$$E_k = G(X_k) - \frac{P(X_k)}{Q(X_k)} \quad (D.2)$$

biçiminde verilir. Sorun, bütün  $(X_k, Y_k)$  noktalarında  $[E_k]^2$  lerin toplamını en küçük yapacak  $P_0, P_1, \dots, P_n, q_1, q_2, \dots, q_m$  katsayılarının belirlenmesidir. Eğer eşitlik (D.2),  $Q(X_k)$  ağırlık fonksiyonu ile çarpılırsa, k noktasındaki ağırlıklı hata

$$E_k Q(X_k) = G(X_k) Q(X_k) - P(X_k) \quad (D.3)$$

bağıntısıyla sağlanır.  $E_k Q(X_k)$ ,  $E_k^1$  ile gösterilirse, polinom katsayıları verilen bütün noktalarda  $[E_k]^2$  lerin toplamını en küçük yaparak belirlenir. Böylelikle sorun

$$[A][X] = [B] \quad (D.4)$$

biçiminde, doğrusal cebirsel eşitliklerin çözülmesine indirgenebilir. Bazı durumlarda, A matrisinin  $X_k$  ve  $Y_k$  'nin küçük değerlerinden etkilenmeyebilir.

Bu durumda, (D.3) eşitliği şu şekilde düzenlenebilir.

$$E = E_k \frac{Q(X_k)_L}{Q(X_k)_{L-1}}$$

$$E = \frac{G(X_k) Q(X_k)_L - P(X_k)_L}{Q(X_k)_{L-1}} \quad (D.5)$$

L alt indisi, tekrarlama sayısı ile ilgilidir.  $Q(X_k)$  'nin başlangıç değeri, 1.0 olarak alınır. (D.5) eşitliğinden;

$$|E|^2 = \frac{|G(X_k) Q(X_k)_L - P(X_k)_L|^2}{|Q(X_k)_{L-1}|^2} \quad (D.6)$$

elde edilir. (D.6) eşitliğinde,

$$W_{kl} = \frac{1}{|Q(X_k)_{L-1}|^2}$$

ifadesi yerine konup, k 'nin bütün değerleri için toplanırsa

$$E = \sum_{k=1}^n |E_k|^2 W_{kl} \quad (D.7)$$

elde edilir.

Burada :

$E_k ; P_0, P_1, \dots, q_1, q_2, \dots, q_m$  'nin fonksiyonudur.

Eğer, (D.7) eşitliği polinomun katsayılarının herbiri için türetilir ve sıfıra eşitlenirse, doğrusal cebirsel eşitlik aşağıdaki biçime dönüşür;

$$\begin{bmatrix} A_1 & A_2 \\ A_3 & A_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} \quad (D.8)$$

Buradaki alt matrisler şu biçimde tanımlanmıştır:

$$A_{1i,j} = \sum_k X_k^{(i-1)} W_{kl} \quad (i=1, \dots, n+1, j=1, \dots, n+1)$$

$$A_{2i,j} = - \sum_k X_k^{(i+j-1)} Y_k W_{kl} \quad (i=1, \dots, n+1, j=1, \dots, m)$$

$$A_{3i,j} = - \sum_k X_k^{(i+j-1)} Y_k W_{kl} \quad (i=1, \dots, m, j=1, \dots, m)$$

$$A_{4i,j} = - \sum_k X_k^{(i+j)} Y_k^2 W_{kl} \quad (i=1, \dots, m, j=1, \dots, m)$$

$$B_{1i} = \sum_k X_k^{(i-1)} Y_k W_{kl} \quad (i=1, \dots, n+1)$$

$$B_{2i} = \sum_k X_k^i Y_k^2 W_{kl} \quad (i=1, \dots, m)$$

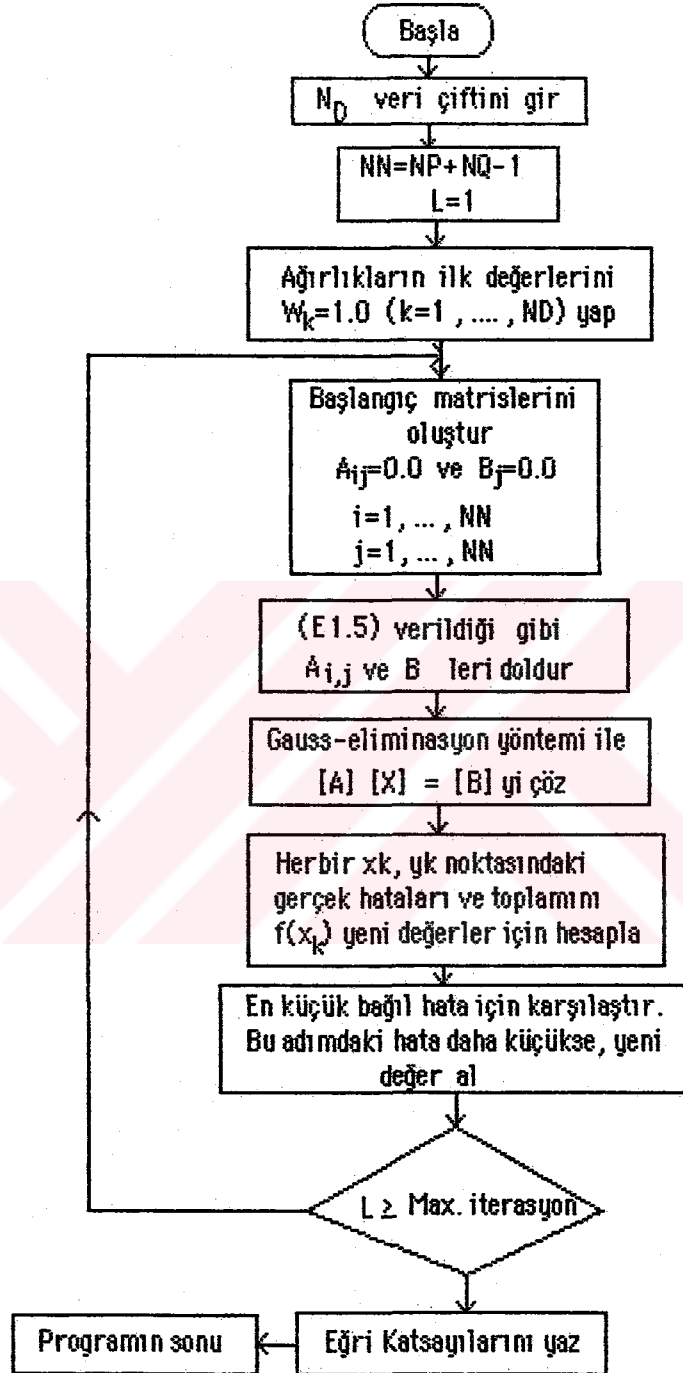
ve

$$X_1 = \begin{bmatrix} P_0 \\ \vdots \\ P_n \end{bmatrix}$$

$$X_2 = \begin{bmatrix} q_1 \\ \vdots \\ q_m \end{bmatrix}$$

Bir sonraki yineleme (L),  $W_{kl}$  'nin değerlendirilmesi için (L-1), yinelemedeki  $P_0, P_1, \dots, P_n, q_1, q_2, \dots, q_m$  bir yinelemede, verilen noktadaki en yüksek olası bağıl hata hesaplanarak, belirli sayıdaki yineleme seçilebilir ve kesir biçimi bağıntı olarak kullanılır.

Yöntemin esnekliği,  $P(X)$  ve  $Q(X)$  'in mertebelerinin istenilen biçimde seçilmesidir.

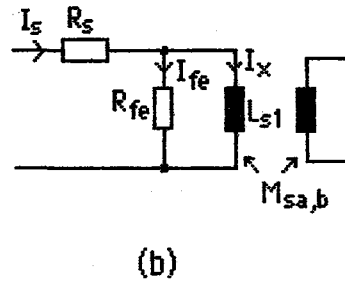
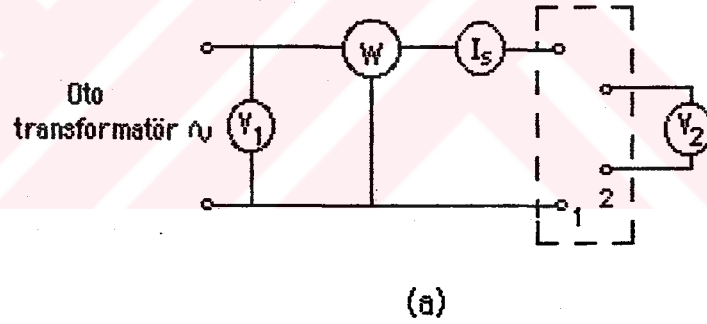


Şekil D.1. Kesir biçimli eğri uydurma yönteminin akış çizelgesi

## ENDÜKTANSLARIN ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ

### E.1. Stator Ortak ve Öz Endüktansının Ölçümü

Bilezikli asenkron makinanın stator faz sargıları arasındaki ortak endüktansları ve stator bir faz sargısı özendüktanslarını ölçmek için Şekil E.1a 'daki deney devresi kullanılmıştır (Jones,1967). Aynı deney devresi rotorun ortak ve özendüktanslarını ölçmek içinde geçerlidir.



Şekil E.1 (a) Bir faz sargısı ortak ve özendüktansı ölçmek için deney bağlantı şeması (b) Eşdeğer devre



Bilezikli asenkron makinan 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 E.1b 'den

$$I_{fe} = \frac{P}{V_1} \quad \text{bağıntısından} \quad I_{fe} \quad (E.1)$$

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

hesaplanır. Stator fazları arasındaki öz endüktans

$$L_{s1} = \frac{V_1}{I_x \omega_1} \quad \text{bağıntısından} \quad (E.3)$$

ve ortak endüktans

$$M_{sa,b} = \frac{V_2}{I_x \omega_1} \quad \text{bağıntısından} \quad (E.3)$$

hesaplanır. Hesaplamalar sonucunda stator ve rotor senkron özendüklemeleri

$$L_s = 0.843 \text{ H}$$

$$L_r = 1.159 \text{ H}$$

olarak bulunmuştur.

## E.2. Stator-Rotor Ortak Endüktansının Ölçümü

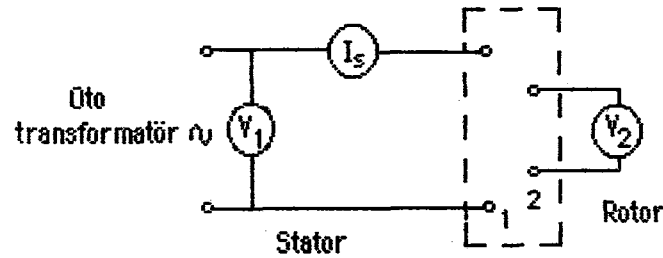
Stator- rotor ortak endüktanslarını ölçmek için Şekil E.2 'deki deney devresi kullanılmıştır. Stator fazlarına ayrı ayrı tek fazlı oto transformatörle değişik besleme gerilimleri uyguluyarak; Gerilim (V) ve akım (I) faz değerleri ölçülür. Bu deneyde  $V_2$  voltmetresi sırasıyla rotorun a-b, b-c, a-c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

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

hesaplanır. Hesaplama sonucunda statora indirgenmiş değeri

$$M_{sr} = 0.76 \text{ H}$$

olarak bulunmuştur.



Şekil E.2 Stator-rotor ortak endüktansının ölçülmesi

### E.3. Dönüştürme Oranın Ölçülmesi

Bilezikli asenkron makinada dönüştürme oranını ölçmek için Şekil E.2 ' deki deney devresi kullanılır. Stator bir fazına tek fazlı oto transformatörle değişik besleme gerilimleri uygulanarak; (V1) ile (V2) faz değerleri ölçülür. Ölçülen bu değerlerden

$$k = \frac{V_1}{V_2} \quad \text{bağıntısından} \quad k \quad (E.5)$$

hesaplanır. Hesaplama sonucunda

$$k = 7.285$$

olarak bulunmuştur.

### E.4. Bilgisayardan Elde Edilen Endüktans Değerleri

Stator özendüktansı için elde edilen değerler:

$$\text{Ana endüktans } L_{s1} = 0.732 \text{ H}$$

$$\text{Yüksek harmoniklerin öz endüktansları } L_{sy} = 0.088 \text{ H}$$

$$\text{Yüksek harmoniklerin karşıt endüktansları } M_{sy} = 0.023 \text{ H}$$

Rotor özendüktansı için elde edilen değerler:

$$\text{Ana endüktans } L_{r1} = 0.97 \text{ H}$$

Yüksek harmoniklerin öz endüktansları  $L_{ry} = 0.154 \text{ H}$

Yüksek harmoniklerin karşıt endüktansları  $M_{sy} = 0.035 \text{ H}$

Stator-rotor ortak endüktansı:

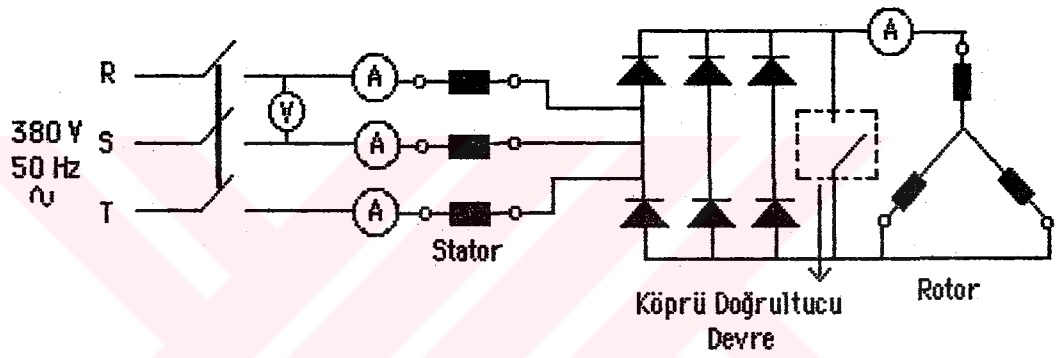
$$M_{sr} = 0.78 \text{ H}$$



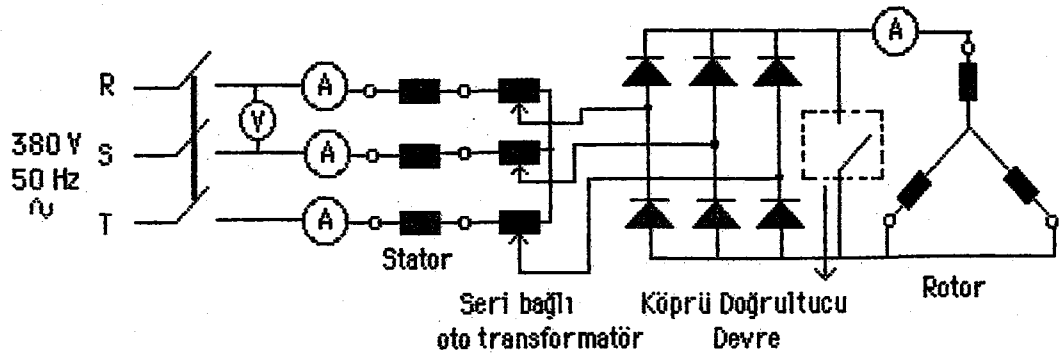
## EK.F

## YAPILAN DENEYLERİN BAĞLANTI ŞEMASI

Bu çalışmada yapılan deneylerin bağlantı şekilleri Şekil F.1 ve Şekil F.2 'de verilmiştir.



Şekil F.1 Seri uyartımlı senkronlanan bilezikli asenkron motorun bağlantı şeması



Şekil F.2 Seri bağlı oto transformatörle seri uyartımlı senkronlanan bilezikli asenkron motorun bağlantı şeması