

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÜÇ JENERATÖRLERİNİN
YAPAY SİNİR AĞLARIYLA DENETİMİ

129127

DOKTORA TEZİ

Elektrik Yük. T. Öğr. Ahmet ONDUK

Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜH.
Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRİK MÜH.

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Cemil ÖZ

128127
T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTEASYON MERKEZİ

Bu tez 11/07/2002 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.


Prof. Dr. Hüseyin ÇAKIR (YTÜ)
Jüri Başkanı


Prof. Dr. Halit PASTACI (YTÜ)
Jüri Üyesi


Y. Doç. Dr. Cemil ÖZ (SAÜ)
Jüri Üyesi


Doç. Dr. M. Ali YALÇIN (SAÜ)
Jüri Üyesi


Doç. Dr. Ertan YANIKOĞLU (SAÜ)
Jüri Üyesi

ÖNSÖZ

Günümüzde giderek artan elektrik enerjisi ihtiyacı ve her on yılda ikiye katlanan tüketim talebi, enerji üretim artışını zorunlu bir hedef haline getirmiştir. Yoğunlaşan enerji talepleri ise, ulusal enterkonnekte şebekelerin oluşumuna öncülük etmiştir. Bu büyümeye paralel, kısıntısız-kesintisiz, sabit frekans ve genlikte gerilimi tüketicilere ulaştırma çabaları, sistem denetiminde yeni tekniklerin kullanımını gerekli kılmıştır.

Bu çalışmada, Güç Sistem Kararlayıcılarına alternatif bir metot olarak, gelişmiş ve modern bir yöntem olan Yapay Sinir Ağları kullanılarak geliştirilen denetim algoritması tanımlanmış ve gerçek-zamanlı denetim tasarımları geliştirilmiştir.

Bu tezin hazırlanması ve çalışmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen tez danışmanı hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Cemil ÖZ' e teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, çalışmalarım sırasında her türlü teşvik, yönlendirme ve desteği ile bana yardımcı olan değerli hocam Sayın Prof. Dr. Osman ÇEREZCİ' ye ve Kocaeli Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi hocam Sayın Doç. Dr. Nurettin ABUT' a şükranlarımı ifade etmek isterim.

Çalışmalarına değerli katkılarından dolayı Kocaeli Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Yrd. Doç. Dr. Zeki BİLGİN' e, teknik doküman temininde yardımlarını esirgemeyen değerli dostum Yük. Müh. Naim BAYDAR' a ve çalışmalarım esnasında her türlü teknik ve moral desteğini esirgemeyen değerli hocam sayın Yrd. Doç. Dr. Ömer MORGÜL' e en içten teşekkürlerimi sunarım.

İlgi ve desteklerinden dolayı bütün aile fertlerime en içten şükran ve minnetlerimle...

Haziran 2002

Ahmet ONDUK

Elektrik - Elektronik Yük. T. Öğr.

İÇİNDEKİLER

SİMGELER VE KISALTMALAR	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
SUMMARY	xiii

BÖLÜM 1. GİRİŞ

1.1 Konunun Tanıtımı	1
1.2 Güç Kontrol Sistemlerinin Gelişimi	4
1.3 Alternatif Kontrolör Teklifi	6

BÖLÜM 2. GÜÇ SİSTEMLERİNDE KARARLILIK

2.1 Elektrik Enerji Sistemleri	9
2.1.1 Elektrik enerji sistemi elemanları	9
2.1.2 Güç sistemi kararlayıcıları	12
2.2 Enerji Sistemlerinde Temel Kavramlar	12
2.2.1 Rotor açısı kararlılığı	13
2.2.2 Gerilim kararlılığı	18
2.3 Güç Sistemlerinin Dinamik Analizi ve Modeli	19
2.3.1 Türbinler ve hız regülatörleri	20
2.3.2 Uyarma sistemi ve gerilim regülatörleri	21
2.4 Güç Sistem Kararlayıcıları	22
2.4.1 Güç sistemlerinin GSK ile kontrolü	22
2.4.2 GSK bileşenleri	23
2.4.3 GSK uygulama esasları	24
2.4.4 GSK çeşitleri	24

BÖLÜM 3. GÜÇ SİSTEMİNİN MODELLENMESİ

3.1 Sistemin Yapısı	28
3.2 DA Motor (tahrik ünitesi)	29
3.2.1 Serbest uyarmalı da motor parametreleri	31
3.2.2 Döndürme momenti ve rotor hızı	31
3.3 Senkron Jeneratör (güç üretici)	34
3.3.1 SJ' ün yapısı	34
3.3.2 SJ' de indüksiyon emk'i	35
3.3.3 SJ uç geriliminin değişimi	37
3.4 YSA Kontrolör Algoritması	40
3.5 Kontrol Devresi	40
3.6 Ölçme Devresi	42

BÖLÜM 4. YAPAY SINIR AĞLARI

4.1 Yapay Sinir Ağları (YSA)	44
4.2 YSA' nın Tarihi Gelişimi	44
4.3 YSA' nın Tanımı ve Modeli	45
4.4 YSA' nın Özellikleri	46
4.4.1 Paralellik ve hata toleransı	46
4.4.2 Öğrenebilirlik ve adaptasyon	47
4.4.3 Eşik (transfer/aktivasyon) fonksiyonu	47
4.5 YSA Modelleri	48
4.5.1 Perceptron (İdrak-almaç)	49
4.5.2 Çok katmanlı perceptron	50
4.6 Geri Yayınım Yoluyla Öğrenme	51
4.7 Eğitim Algoritması	52
4.7.1 Çıkış katmanı öğrenmesi	52
4.7.2 Gizli katman öğrenmesi	55
4.8 Nöron' a Besleme Eklenmesi	57
4.9 Geri Yayınım Momentum	57
4.10 Seri YSA Denetim Yapısı	58
4.10.1 Off-line seri denetim yapısı	59

BÖLÜM 5. GÜÇ JENERATÖRLERİNİN YSA İLE DENETİMİ

5.1 Sistem YSA Denetim Yapısı	61
5.2 Sistemin Bilgisayar Simülasyonu	62
5.2.1 Simülasyon için matematiksel modelleme	63
5.2.2 Simülasyon verilerinin elde edilmesi	63
5.2.3 YSA ile SJ' ün modellenmesi	65
5.2.4 YSA ile denetleyicinin modellenmesi	68
5.2.5 Matlab/Simulink ile SJ ve denetleyici YSA modellerinin testi ...	71
5.2.6 SJ ve denetleyici YSA modellerinin test sonuçları	72
5.3 DeneySEL eğitme verileri deney düzeneği	74
5.3.1 Test yük bankaları	74
5.3.2 Deney seti bağlantı şeması	77
5.3.3 Deney Sonuçları	78
5.4 SJ modelinin deneySEL verilerle eğitimi	83
5.5 Denetleyicinin deneySEL verilerle eğitimi	84

BÖLÜM 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1 Değerlendirme	87
6.2 Sonuç ve Öneriler	89

KAYNAKLAR	91
-----------------	----

EKLER

EK-A. A/D Op-Amp Devresi	94
EK-B. Uyarma Sargıları Op-Amp Devresi	95
EK-C. Ara-yüz Kartı	96
EK-D. YSA Eğitme Algoritması	97
EK-E. Eğitimde Kullanılan Simülasyon ve Deney Verileri	99

ÖZGEÇMİŞ	103
----------------	-----

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

B	: hava aralığı akı yoğunluğu	[T]
e	: hata fonksiyonu	
E _e	: bir faz endüi gerilimi	[V]
E _J	: senkron jeneratör iç gerilimi	[V]
E _M	: motor reaktans öntü gerilimi	[V]
f _{ref}	: SJ referans frekans değeri	[Hz]
F	: da motor döndürme momenti	[Nm]
I _e	: endüi akımı	[A]
I _a	: uyarma sargı akımı	[A]
I _m	: mıknatıslama akımı	[A]
K _A	: otomatik gerilim regülatörü kazancı	
K _E	: uyarma sistemi kazancı	
K _F	: uyarma geri besleme kazancı	
K _{GSK}	: kararlayıcı kazancı	
M	: SJ mıknatıslama-endüi sargısı kuplaj endüktansı	
N _f	: SJ faz sargısı sarım sayısı	
P _e	: SJ çıkış gücü	[W]
P _m	: SJ mekanik giriş gücü	[W]
S	: türev operatörü	
S _E	: doyma fonksiyonu	
S _i	: aktivasyon fonksiyonu girişi	
R _e	: SJ endüi etkin direnci	[Ω]
T _A	: otomatik gerilim regülatörü zaman sabiti	
T _D	: sönümleyici moment katsayısı	
T _e	: elektromanyetik moment	[Nm]
T _E	: uyarma sistemi zaman sabiti	
T _F	: uyarma geri besleme zaman sabiti	

T_R	: uç gerilim dönüştürücü zaman sabiti	
T_Y	: yük momenti	[Nm]
U_{GSK}	: güç sistem kararlayıcı çıkışı	[V]
U_e	: endüi gerilimi	[V]
U_m	: SJ mıknatıslama gerilimi	[V]
U_R	: SJ etkin direnç gerilim düşümü	[V]
U_X	: SJ senkron reaktans gerilim düşümü	[V]
V_{Rmak}	: gerilim sınırlayıcı üst sınırı	[V]
V_{Rmin}	: gerilim sınırlayıcı alt sınırı	[V]
U_{ref}	: SJ referans uç gerilimi (220 V)	[V]
U_t, U_e	: SJ uç gerilimi	[V]
Ψ_{rot}	: rotor mıknatıslama akısı	[Wb]
Ψ_S	: hava aralığı mıknatıslama akısı	[Wb]
X_d	: SJ endüi reaktansı x bileşeni	[Ω]
X_q	: SJ endüi reaktansı y bileşeni	[Ω]
X_J	: SJ senkron reaktansı	[Ω]
X_H	: iletim hattı reaktansı	[Ω]
$X_{\sigma e}$	: SJ kaçak reaktansı	[Ω]
X_M	: yük motor reaktansı	[Ω]
X_T	: ideal modelde transfer reaktansı	[Ω]
w_n	: YSA n. nöron girişi ağırlık değeri	
ω_S	: senkron açısal hız	[rad/s]
ϕ_{mak}	: kutup akısı maksimum değeri	[Wb]
ϑ	: SJ iç gerilim-uç gerilimi arası açı farkı	
α	: SJ uç gerilimi-endüi akımı arası açı	
δ	: güç açısı	
δ_J	: SJ rotor-stator döner alanı arası açı farkı	[rad]
δ_H	: SJ stator alanının motora göre açı farkı	[rad]
δ_M	: motor rotoru-stator döner alanı arası açı farkı	[rad]
τ_a	: atalet momenti sabiti	
τ_A	: zaman sabiti	
τ_s	: senkronlayıcı moment katsayısı	

τ_{ω}	: rotor hızı zaman sabiti
$\Delta\delta$	: senkronlayıcı moment farkı
ΔE_U	: senkron jeneratör uyarma gerilimi farkı
ΔE_e	: senkron jeneratör uyarma gerilimi farkı
ΔP_C	: başlatma kontrol girişi farkı
ΔP_e	: elektrik çıkış gücü değişimi
ΔP_M	: mekanik giriş gücü değişimi
ΔP_V	: vana çıkışı farkı
ΔV_A	: uyarma girişi farkı
ΔV_F	: geri besleme çıkışı farkı
ΔV_R	: gerilim regülatörü çıkışı farkı
ΔV_t	: SJ uç gerilimi farkı
ΔT_e	: SJ elektrik moment değişimi
Δw	: ağırlık değişim farkı
$\Delta\omega$	: rotor açısal hız farkı
$\Delta\omega_e$	: eşdeğer hız sapma işareti farkı
$\Delta\omega_r$	: açısal hız referans değer farkı

Kısaltmalar Listesi

aa	: alternatif akım
da	: doğru akım
ADC	: Analog Dijital Dönüştürücü
DAC	: Dijital Analog Dönüştürücü
EE	: Elektrik Enerjisi
GR	: Gerilim Regülatörü
GSK	: Güç Sistem Kararlayıcısı
OGR	: Otomatik Gerilim Regülatörü
SGB	: Sonsuz Güçlü Bara
IEC	: International Electrotechnical Commission
IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1 Elektrik Güç Sistemi Modeli	3
Şekil 2.1 Basit bir uyarma ve gerilim regülatörü modeli	12
Şekil 2.2 Basit bir güç besleme sistemi	14
Şekil 2.3 Sistemin küçük bozucu etkilere karşı kararlılık bileşenleri	17
Şekil 2.4 Güç sistemleri kararlılık sınıflaması	19
Şekil 2.5 Bir buhar santrali blok diyagramı	20
Şekil 2.6 Bir su santrali için mekanik-hidrolik hız regülatörü blok şeması	21
Şekil 2.7 Sürekli etkili uyarımlı gerilim regülatörü blok şeması	21
Şekil 2.8 GSK' lı bir sistem kontrolünün blok şeması	22
Şekil 2.9 OGR ve GSK bulunan bir uyarma sisteminin blok diyagramı	24
Şekil 2.10 Delta-P-omega kararlayıcı blok diyagramı	26
Şekil 3.1 Model bir güç sistemi blok diyagramı	28
Şekil 3.2 Serbest uyarımlı da motor yapısı	29
Şekil 3.3 Serbest uyarımlı da motor eşdeğer blok diyagramı	31
Şekil 3.4 Senkron jeneratör yapısı	34
Şekil 3.5 Bir senkron jeneratörün eşdeğer devresi	37
Şekil 3.6 Yük güç katsayısının SJ uç gerilimine etkisi ($P=V.I.\cos\theta = \text{sabit}$)	39
Şekil 3.7 Kontrol devresi	41
Şekil 3.8 Ölçme devresi blok diyagramı	42
Şekil 4.1 Basit bir işlemci (nöron) yapısı	45
Şekil 4.2 Sigmoid fonksiyon eğrisi	48
Şekil 4.3 Bir YSA katmanı	49
Şekil 4.4 Çok katmanlı bir YSA yapısı	50
Şekil 4.5 Genel seri denetim yapısı	58
Şekil 4.6 Off-line seri öğrenme ve denetim yapısı	60
Şekil 5.1 Model YSA denetleyici-gerçek sistem blok şeması	61
Şekil 5.2 SJ' e ait iki gizli katmanlı model YSA yapısı.....	62

Şekil 5.3 Simülasyon sonuçları (I. Grup)	64
Şekil 5.4 Simülasyon sonuçları (II. Grup)	64
Şekil 5.5 Gerçek sistem YSA eğitme modeli	65
Şekil 5.6 YSA model SJ öğrenme-iterasyon değişim grafiği (I.Grup)	66
Şekil 5.7 YSA model SJ öğrenme-iterasyon değişim grafiği (II.Grup)	66
Şekil 5.8 SJ YSA modelin çıkış parametrelerini öğrenme sonucu (I.Grup)	67
Şekil 5.9 SJ YSA modelin çıkış parametrelerini öğrenme sonucu (II.Grup)	67
Şekil 5.10 Denetleyici YSA eğitme modeli	68
Şekil 5.11 Denetleyici YSA modeli öğrenme-iterasyon değişim grafiği (I.Grup)	69
Şekil 5.12 Denetleyici YSA modeli öğrenme-iterasyon değişim grafiği (II.Grup)	69
Şekil 5.13 YSA denetleyici modelin çıkış parametrelerini öğrenme sonucu (I.Grup)	70
Şekil 5.14 YSA denetleyici modelin çıkış parametrelerini öğrenme sonucu (II.Grup)	70
Şekil 5.15 SJ ve denetleyici YSA modelleri test düzeneği	71
Şekil 5.16 SJ ve denetleyici YSA modellerin öğrenme test sonuçları (I.Grup)	72
Şekil 5.17 SJ ve denetleyici YSA modellerin öğrenme test sonuçları (II.Grup)	73
Şekil 5.18 Sistemde kullanılan omik, indüktif ve kapasitif yük bankaları	75
Şekil 5.19 Test amaçlı da motor-senkron jeneratör - yük bağlantı şeması	77
Şekil 5.20 Omik yük için SJ uç parametreleri değişim grafikleri	79
Şekil 5.21 İndüktif yük için SJ uç parametreleri değişim grafikleri	79
Şekil 5.22 Kapasitif yük için SJ uç parametreleri değişim grafikleri	79
Şekil 5.23 Omik-indüktif yük için SJ uç parametreleri değişim grafikleri	81
Şekil 5.24 Omik-kapasitif yük için SJ uç parametreleri değişim grafikleri	81
Şekil 5.25 YSA model SJ öğrenme-iterasyon değişim grafiği (deney)	83
Şekil 5.26 SJ YSA modelin çıkış büyüklüklerini öğrenme sonucu (I.Grup)	84
Şekil 5.27 Denetleyici YSA modeli öğrenme-iterasyon değişim grafiği (deney)	85
Şekil 5.28 Denetleyici YSA modelin çıkış büyüklüklerini öğrenme sonucu (deney)..	85
Şekil 5.29 SJ ve denetleyici YSA modellerin öğrenme test sonuçları (deney)	86

TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 5.1 Seçilen ağ parametreleri	62
Tablo 5.2 SJ parametreleri	63
Tablo 5.3 Saf omik, indüktif ve kapasitif yük değerlerinde SJ uç parametreleri	78
Tablo 5.4 Omik-indüktif ve omik-kapasitif yük değerlerinde SJ parametreleri	80
Tablo 5.5 Değişik yük değerleri için $\cos \varphi$, P_g ve U_m değerlerinin değişimi	82



ÖZET

Anahtar kelimeler: Senkron Jeneratörler, Güç Sistem Kararlılığı, Kararlayıcılar, Yapay Sinir Ağları, YSA ile denetim.

Son iki yüzyıldır bütün dünyada yaşanan sanayileşme süreci, elektrik enerjisi talebinde patlamalara yol açmış, dolayısıyla günümüzün milyonlarca watt gücünde yüzlerce jeneratör, transformatör ve baraların birbirine bağlandığı büyük güçte enterkonnekte şebekeleri kaçınılmaz kılmıştır.

Artan güç miktarlarına bağlı olarak geliştirilen büyük güçlü senkron jeneratörler ve diğer sistem elemanlarının birlikte çalıştırıldığı bu şebekelerde, güç arz ve talebinde oluşan sürekli değişimlere bağlı olarak senkronizasyon, sabit frekans ve genlikte kesintisiz gerilim sağlama ihtiyacı, denetim ve koruma problemlerini öne çıkarmıştır.

Elektrik çıkış gücünün yük ve çeşitli etkenlerle sürekli ve farklı genliklerde değişimler göstermesi, güç üreteçleri olan senkron jeneratörlerin çıkış gerilim genliği ve frekansında salınımlara neden olur. Bu salınımların, güç sistem kararlayıcıları yardımıyla regüle edilip sönümlenmesi gerekir. Kararlayıcılar, hız veya çıkış gücüne bağlı gerilim değişimlerini, geri besleme denetimli olarak sönümlendirmeye çalışırlar.

Tez konusunu klasik yöntemlere bir alternatif olarak geliştirilen, güç sistem kararlılığını artırıcı, pahalı donanımlara ve karmaşık denetim algoritmalarına gerek duymayan Yapay Sinir Ağları tabanında gerçek-zamanlı bir denetleyici uygulaması oluşturmaktadır.

Birinci bölümde, güç sistem kararlayıcıları tanımlanarak çeşitleri hakkında bilgiler verilmiş ve tezin amacı tanımlanmıştır.

İkinci bölümde, elektrik enerji sistemi elemanları, modellemeleri ve kararlılık problemi tanımlanarak klasik güç sistem kararlayıcı çeşitleri açıklanmıştır.

Üçüncü bölümde, güç sistemine ait bir modelleme gerçekleştirilerek, bunu oluşturan temel elemanlar ve gerekli algoritmik yapı açıklanmıştır.

Dördüncü ve beşinci bölümlerde, denetleyici tabanı olarak kullanılan Yapay Sinir Ağları tanımlanarak, senkron jeneratörlerin Yapay Sinir Ağları ile denetimi için gerekli olan denetleyici modeli açıklanmıştır. Senkron jeneratörün ölçülen uç gerilim ve frekansına bağlı olarak bulunan değerler uygun dönüşümler yoluyla ağa uygulanmıştır. Denetleyicinin performansı, senkron jeneratör üzerinde değişik yük durumları için test edilerek, sonuçları verilmiştir.

Altıncı bölümde, model YSA denetimli sistem kararlayıcıdan elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve performans geliştirilmesine yönelik öneriler sunulmuştur.

CONTROL OF POWER GENERATORS USING ANN

SUMMARY

Keywords: Synchronous Generators, Power System Stability and Stabilisers, Artificial Neural Network, Adaptive Control.

A rapid growing need of electrical energy and an almost doubling of energy consumption on every decade, has made most of the utility companies (generating companies) to generate more electrical energy to meet this demand. Initially, an electrical network was simple and sufficient to meet relatively small demand, but over the years energy consumption has increased very fast. The initial network has gradually evolved and expanded and eventually became a very large interconnected network. In parallel with this rapid expansion some problems such as synchronisation, supplying uninterrupted voltage with constant amplitude and Frequency, controlling and protection have emerged.

In traditional approach, stability of power system is achieved by power system stabiliser. In this research, Artificial Neural Network (ANN) based stabiliser is proposed. Neural network algorithm was developed and implemented in real time application and computer-aided real time controller design was also investigated.

In the first chapter, some knowledge has been given about the power system stabilisers and their kinds and then the aim of the thesis has been explained.

In the second chapter, the types of classic power system stabilisers has been defined by explaining electrical energy system equipments, models and stability problem.

Thirdly, the control aimed power system has been modified. Basic parts of the system and its algorithmic structure has been explained.

In the fourth and fifth sections, Artificial Neural Network (ANN) which is used as the base of control has been defined. The control of synchronous generators using ANN which is chosen for controlling the model structure has been explained.

The values which have been obtained by measuring synchronous generator's line voltage and frequency have been applied on the control network by using suitable transformations. The performance of the controller has tested by different load consumptions for synchronous generator and the results have been given.

In the last chapter, the results obtained from the ANN controlled power system model have been checked and some offers about performance developing have been given.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

1.1 Konunun Tanıtımı

Günümüzün en yaygın ve temiz kullanıma sahip, kontrolü en kolay ve hızlı enerji türü olan elektrik enerjisinin (EE), tüketicilere kaliteli olarak sunulması esastır. Kaliteli enerjiden amaç, kısıntısız-kesintisiz olarak sabit frekans ve genlikte gerilimi tüketicilere ulaştırmaktır. Çünkü gerilim ve frekanstaki değişimler, tüketicilerde çeşitli aksamalara ve zararlara neden olur.

Alternatif akım güç sistemlerinde, EE' nin üretim, iletim ve dağıtımının belirli gerilim seviyelerinde tek ve sabit frekansta yapılması istenir. Bu şartların sağlanamaması halinde ise, tüketici tarafındaki teçhizatların yanlış çalışması veya bozulmasıyla sonuçlanan çeşitli zararlar görülür. Gerilim genliği ve frekansta ortaya çıkan bu tür olumsuzluklar, güç kalitesi problemi olarak algılanır. Güç kalitesi kavramı çoğu durumda, gerilim kalitesi olarak da tanımlanır. Bu kavrama dair standartlar (IEEE P1159, IEC 1000-2-1 gibi), kaynak gerilimini belirli sınırlar dahilinde tutmayı hedefler.

Alternatif akım güç sistemleri, belli bir frekans değerinde ve gerilim genlik değişimi sinüs formu olarak çalışmak üzere tasarlanır. Gerilim genliği, frekans ve dalga formunun orijinalligindeki her hangi bir sapma, muhtemel bir güç kalitesi problemi olarak görülür.

Son iki yüzyıl boyunca, yaygınlaşan sanayileşme ile birlikte giderek artan EE kullanımı, büyük güç kaynakları olan senkron jeneratör (SJ), transformatör ve baraların yoğun olarak birleştirildiği enterkonnekte şebekeleri ortaya çıkarmıştır. EE tüketimindeki bu artış büyük güçlü SJ ve diğer sistem elemanlarının geliştirilmesini zorunlu kılmış, bu ise enerji sistemlerinde koruma ve kontrol problemlerini ortaya çıkarmıştır.

EE sistemlerinden beklenen temel görev, ihtiyaç duyulan her yere sabit frekans ve gerilim genliğinde yeterli miktarda enerjiyi sağlamaktır. Sabit frekans ve gerilim genliğinde kısıntısız-kesintisiz enerji sunumu yani, kaliteli enerji güç sistemlerinin denetimi ile mümkündür. Sistem kararlılığı ve denetimi, elektrik tesisleri planlamasında önemli bir ölçütü oluşturur. Günümüzün gelişen teknolojisi, EE kalite limitlerini daraltmış ana şebekeden istenilen standartta enerji sağlanmasının önemini özellikle kağıt, tekstil ve demir-çelik gibi endüstriyel tesislerde artırmıştır.

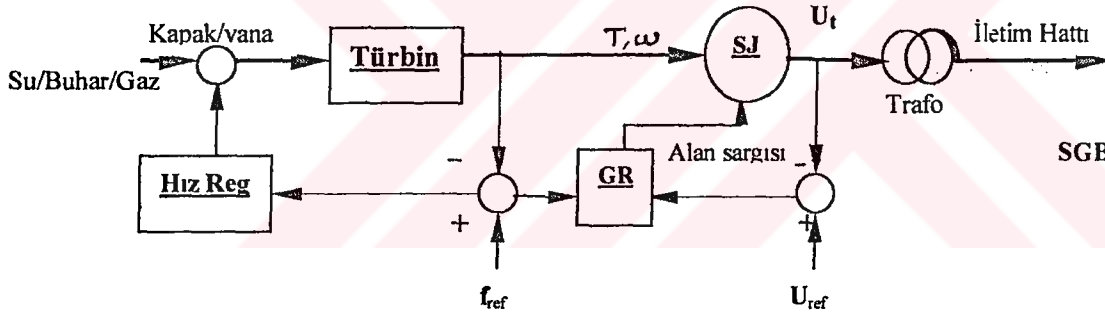
Kritik işlemlerde pahalı üretim kayıplarına neden olan EE kalitesindeki problemler, hem tüketici hem de şebeke tarafında çözümü zor durumlar ortaya çıkarır. Ana şebekenin yükümlülüğü, tüketicinin kabul edebileceği standartta EE' ni sunmaktır. Endüstriyel ve ticari amaçlı tüketimlerde, şebekeden temin edilen enerji kalitesi ne kadar artırılırsa o derece tercih nedenidir. Günümüzde lineer olmayan yükleri besleyen elektronik kontrollü ekipmanların çoğalması, bunların kaliteli EE' ne olan ihtiyaçlarını belirgin hale getirmiştir.

Ani voltaj düşmeleri, büyük yüklerin devreye girmesi veya komşu fiderlerdeki kısa devreler sonucu meydana gelir. Bu ise endüstride döner makinelerde, moment ve hızda problemler meydana gelmesine ve daha kötüsü koruma elemanlarını devreye alarak bütün yüklerin devre dışı kalmasına neden olmaktadır. Hassas yüklü tüketiciler için, problemsiz çalışmayı sağlayacak kaliteli enerji seviyesine ulaşmak esastır. Bu amaçla, EE sistemleri kontrol ve denetiminin esas olarak üretim merkezlerinde yapılması gerekir. EE üretim merkezleri olan elektrik santralleri ise türbin, hız regülatörü, SJ ve diğer donanımlardan meydana gelir. Senkron makinede rotor, daima döner alanla aynı hızda döndüğü için bunlara SJ denir.

SJ' ler elektrik santrallerinin temelini oluşturur. SJ bir kuvvet makinesinden aldığı mekanik enerjiyi, elektrik enerjisine dönüştürme işlemini görür. SJ' in tahrikinde en fazla buhar, su ve gaz türbinleri kullanılır. Küçük güç değerlerinde ise dizel motorlardan da yararlanılır. EE ülkemiz elektrik santrallerinde, 50 Hz frekans değerinde üç fazlı SJ ile üretilir. Büyük güçlü elektrik makinelerinin daha ekonomik ve yüksek verimli olarak

yapılabilmesi ve on yılda yaklaşık iki katına çıkan EE tüketimini, teknik ve ekonomik şartlarda karşılayabilmek için jeneratör güçleri sürekli artırılmıştır. Günümüzün en büyük elektrik makineleri SJ' dir ve çok büyük güçte olanları nükleer elektrik santrallerinde kullanılmaktadır [1].

Bilindiği üzere EE sistemleri, birbirine göre hareketli elemanların birleşiminden meydana gelir. Bunlar; tahrik sistemi, SJ, transformatör, iletim-dağıtım hatları ve yük merkezleri olmak üzere, enerjinin üretim, iletim-dağıtım ve tüketiminden sorumlu elemanlar ile koruma ve kumanda elemanlarıdır. Tahrik sistemine ait hız regülatörleri (mekanik regülatörler), SJ' ün uyarma devresinde yer alan gerilim regülatörleri, röleler ve açma-kapama elemanları kumanda ve koruma grubunun bileşenlerini oluşturur. Yani EE sistemleri, elektrik ve mekanik elemanların birlikte çalıştığı elektro-mekanik bir yapıya sahiptir [2]. Şekil 1.1' de bileşenleriyle birlikte bir güç sistemi modeli görülmüyor.



Şekil 1.1 Elektrik Güç Sistemi Modeli

Bir çok SJ' ün birlikte çalıştığı enterkonnekte sistemlerde, güç arz ve talebinde oluşan sürekli değişimler, senkronizasyon problemlerini ortaya çıkarmıştır. SJ çıkış gücünün sürekli ve farklı genliklerde değişimler göstermesi, çıkış frekansı ve gerilim genliğinde salınımlar oluşmasına neden olur. Bu ise, özellikle endüstriyel tüketimde üretim kaybı, elektronik kontrol donanımlarının zarar görmesi, hız ve moment değişimleri sonucu ortaya çıkan hasarlar gibi çeşitli zararlara neden olduğu için enerji kalitesini düşüren ve giderilmesi mutlak gerekli olan bir kontrol problemi olarak görülür.

1.2 Güç Kontrol Sistemlerinin Gelişimi

EE sistemlerinde söz konusu salınımları önlemek ve sistem kararlılığı için, optimal kontrolün sağlanması amacıyla, bu bileşenlerin her birine ait modellerinin çıkarılması gereklidir. Burada modellemeyi amaç, sistemin fiziki davranışının analitik olarak tanımlanıp gösterilmesidir. Her hangi bir sistem kontrolü için, klasik sistemde bu tür bir modellemenin yapılması ön şarttır.

Bilgisayarların gelişimine paralel olarak, büyük enerji sistemlerinin modellenmesi ve kontrolü üzerine çeşitli araştırmalar yapılmaktadır [3][4]. Y. N. Yu ve P. M. Anderson'ın eserleri, güç sistem mühendisliği için önemli birer referans niteliği taşır [5][6].

Güç sistemlerinde, klasik olarak kullanılan kararlayıcı çeşitlerini şu dört başlık altında toplamak mümkündür [7].

a) *Delta-omega kararlayıcılar*; genelde hidrolik santrallerde kullanılmakta olan bu tip kararlayıcılar, mil hızının doğrudan ölçümüne dayalı bir metotla çalışır. Kararlayıcı rotorda meydana gelen salınımları söndürmeye çalışırken, burulma frekanslarında salınımlara yol açabildiğinden istenilen kararlayıcı aralığında burulma bileşenlerini azaltmak üzere elektronik filtre devrelerine ihtiyaç gösterir. Bu ise kararlayıcı kazancını sınırladığı için, sistem salınımlarını söndürmedeki etkisini azaltıcı yönde etkir.

b) *Delta-P-omega kararlayıcılar*; tahrik gücünden, rotor hız sapmalarıyla orantılı olarak eşdeğer hız sapma işaretlerinin elde edilmesine dayalı kararlayıcı çeşididir. Mekanik giriş gücünün değişimiyle orantılı olarak türetilen işaretler, burulma frekansları içerdiğinden ek filtre devresine ihtiyaç gösterir. Delta-omega kararlayıcılara göre daha üstün söndürme özelliklerine sahip oldukları için tercih edilirler.

c) *Frekans tabanlı kararlayıcılar*; genelde buhar türbinli santrallerde kullanılan bu tip kararlayıcılar, SJ uç gerilim ve akımından türetilen frekans işaretlerini giriş olarak kullanır. Burulma frekanslarının filtrelenebilmesine ihtiyaç gösterirler. Bölgeler arası büyük

salınım frekanslarına daha duyarlı oldukları için, bunların sönümlenmesinde mil hızını giriş işareti olarak kullanan kararlayıcılara göre daha iyi sonuç verirler.

d) Dijital kararlayıcılar; a, b ve c' de tanımlanan kararlayıcı türlerinin dijital elektronik devre elemanları yardımıyla tasarlanmasına dayanır. Uyarma devrelerinin dijital olarak kontrol edilebilir olması, işlemi daha ziyade bilgisayarda programlamaya dönüştürür.

Güç sistemlerinin kontrol dinamiğindeki gelişmeler, ileri-geri, güçlü ve otomatik-ayarlı Güç Sistem Kararlayıcılarının (GSK) kullanımıyla elde edilmektedir. İleri-geri GSK, basitliği nedeniyle güç sistemlerinde en yaygın kullanılan kontrol sistemidir. Bu sistemin temelini, sabitlenmiş bir kazanç kontrolü ve sabit çalışma şartlarına uyarlama oluşturur.

Yükteki devamlı değişimler ve/veya parametre sürüklenmelerinin bir sonucu olarak, güç sistemlerinin çalışma noktası sürekli olarak değiştiği için, güçlü ve otomatik-ayarlı GSK ile kontrol daha avantajlıdır. Adaptif GSK ile kontrolün performansı, sabit parametrelili GSK' dan çok daha iyi olmasına rağmen güçlü bilgisayar kullanımı gerektirmesi, maliyeti önemli ölçüde artırır. Gerçek-zamanlı modellemede, bu donanımlara ihtiyaç vardır. Güç sistemlerinde, alternatif GSK kontrol çalışmalarıyla ilgili olarak yapılmış araştırmalar son yıllarda literatürlere girmiştir [8]. Bunların bir kısmı güçlü ve otomatik-ayarlı GSK' nın dizayn ve uygulamalarını basitleştirmede oldukça yardımcı olacak niteliktedir [9].

Lineer olmayan dinamik sistemlere ait kontrol teorilerindeki gelişmelerden yararlanılmak üzere tanımlanmış bu tip bir sistem örneği, SJ' in sabit frekans ve genlikte gerilim üretmelerini sağlama konusudur. İhtiyaç duyulan hassas tahrik kontrolüne, sistemin elektro-mekanik yapısında varolan lineersizlik, tam olarak modellenemeyen dinamiği ve gerçek-durum çalışmasına ait parametrik belirsizlikler engel olur. Çalışma şartlarının sabit olmayan yapısı ve tahrik sistemlerinin değişken parametrelere bağlı olarak lineer olmayan kontrolü nedeniyle daha güçlü metotlara gerek duyulmaktadır. Bu yüzden, yüksek performans uygulamalarında SJ' in arzu edilen karakteristik özelliklerini sağlamak üzere, kontrol tekniklerinde güçlü metotların geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

1.3 Alternatif Kontrolör Teklifi

Sistem tanımlama metotları deneye dayalı gözlem temelleri üzerinde, etkin sistem karakteristiklerinin çıkarılmasına dayanır. Özel bir sistemin kontrolü amacıyla kullanıldığında sistem tanımlama, bir kontrol stratejisi geliştirip dizayn etmek için belirsizlikleri gidermek üzere, gözlenen sistemin matematik bir modelinin kurulması işlemidir. Sonraki işlem, genel olarak iki farklı adıma ayrıştırılabilir; modelleme ve hesaplama işlemi. Modelleme, uygun bir yapı belirlemeyi yani sistemi temsil edebilecek kapasitede bir yapı sınıflamasını gerektirir. Hesaplama işlemi ise, temel kriterleri gözlem tanımına uygun bir hale getirmek üzere modellemeyi sağlayacak parametrelerin seçimini gerektirir.

Kontrol amaçlı sistem tasarımının hedefi, statik veya dinamik bir sistemi sentezlemektir. Dinamik sistem tasarımından amaç, tanımlanan biçimde davranmaya neden olacak şekilde sistemi harekete geçirici sinyaller üreten düzeneği kurmaktır. Sonuç olarak kontrolör, sentezi arzu edilen sistemle karşılaştırmalı olarak sistem davranışı üzerine oturtulan belli bir uygunlukta sistem tanımlamanın gerçekleştirilmesidir. Bu yüzden sistem tanımlama, lineer olmayan sistemlerin adaptif kontrolü için geliştirilmiş uygun tekniklerin belirlenip kullanılması olarak düşünülebilir.

Bölüm 4 ve Bölüm 5’ de ayrıntılı olarak açıklanacağı üzere Yapay Sinir Ağları (YSA), uygulandığı karmaşık ve lineer olmayan sistemlerin algoritmik sistem modellemelerine ihtiyaç göstermeksizin, adaptif GSK dizaynına imkan sağlar. Buradaki adaptif kararlayıcı kavramı, çalışma noktasındaki değişimlerden bağımsız olması anlamındadır. Bunun yanı sıra, gerçek-zamanlı analitik modelleme yapıları kullanılmadığı için, pahalı donanımlara ihtiyaç duyulmaz.

Bu çalışmada, güç sistemlerinin besleme kaynakları olan SJ’ in gerçek-zamanlı kontrolü için YSA tabanlı adaptif bir GSK tasarımı yapılarak, güç sistemlerinin farklı yük değişimlerindeki kararlılığı artırılmaya çalışılmıştır (10^{-6} yaklaşık).

Gerçekleştirdiğimiz kontrolör uygulamasında, SJ çıkış uçlarından ölçülen frekans ve gerilim değerleri, uygun dönüşümler yoluyla bir YSA algoritması tarafından işlenir. Değişken yük durumlarında oluşan salınımları sönmölemek üzere YSA çıkışı, gerçek-zamanlı olarak sistemi kararlı hale getirmeye çalışır. Bu amaçla, YSA tabanında geliştirilen bir algoritma yardımıyla, sistem modellemesinde kullanılan iki adet elektrik makinesinin uyarma alan gerilimi ile giriş gücünün adaptif kontrolü çalışması yapılmıştır. Böylece, lineer olmayan dinamik bir sistemin kontrol problemi, yapısı gereği oldukça zor bir çözüm içermesine rağmen, bir tanımlama işlemiyle ifade edilebilmektedir.

Lineer olmayan sistemlerin adaptif kontrolü alanındaki araştırmalarla elde edilen pek çok yeni gelişme, YSA' nı ilgi çekici bir saha haline getirmiştir. Bu tür çalışmalar, sınırlayıcı durumları azaltmayı ve lineer olmayan sistemlerin daha geniş alanlarına bu teknikleri genellemeyi hedefler [10].

Adaptif kontrol alanında dinamik lineer sistemlerin analiz ve kontrolü amacıyla geliştirilen güçlü teknikler, pahalı araştırmalar yapılmasına neden olmuştur. Bu yüzden benzer metotların, belirgin lineersizlik veya değişkenlik sergileyen dinamik sistemler için uygulanması henüz geliştirilememiştir [11].

Lineer olmayan sistem kontrol problemlerinde, yeni yaklaşımlarla uygun bir durum dönüşümüne gidilir. Böylece lineersizliği silerek, kontrol amaçlı olarak düzenlenmiş bir lineer davranış oluşturulmaya çalışılır. Bunu gerçekleştirmekteki temel problem, uygun tempoda her an lineersizliğin kesin modellemesinin bilinmesine ihtiyaç olmasıdır. Ayrıca lineersizliğin tamamının bilinmesinin yanı sıra, sistemin dinamik yapısı üzerinde gerekli uyarıcı sinyalleri sağlayan adaptif parametrelerin ve kontrol yapısının tespiti aynı derecede zor bir problemdir. Bu ise, lineer olmayan sistemlerin tanımı ve kontrol teorisinde belirgin gelişmelere ihtiyaç olduğunu gösterir [12].

Lineer olmayan kontrol problemlerinin çözümüne katkıda bulunmak üzere, ümit verici bir teknoloji olarak YSA ortaya çıkmıştır. YSA' nın temel avantajı, paralel yapısı ve tanımında varolan lineersizlik nedeniyle uygun olarak seçilen parametreler yardımıyla

göreceli bir doğruluk derecesinde, dinamik lineer olmayan bir yapıyı modelleyebilme yeteneğidir. Lineer olmayan sistemleri tanımlama ve kontrol problemlerinde tanımlayıcı haritalamalar için, ileri beslemeli (feed forward) YSA' nın uygunluğu kabul edilmiştir. Bazı araştırmacılar, tanımlama modeli ve kontrol yapıları içine YSA ilave ederek bu alana ait orijinal sonuçlar elde etmişlerdir [13].

Güç jeneratörlerinin kontrol problemi konusunda bazı araştırmacılar gelişmeler kaydetmişlerdir [14]. Gelişmiş kontrol tekniklerinde, lineer olmayan sistem dinamiğini karakterize edici negatif geri beslemeli lineerleştirme metotları da kullanılmaktadır [15]. Bu teknikler laboratuvar ortamında test edilmesine rağmen, gerçek işletme şartlarında henüz uygulanmamıştır. YSA teknolojisi yardımıyla, güç jeneratörlerinin kontrolünü içeren hiçbir çalışmayla karşılaşılmamıştır.

Bu tez çalışmasında, Yapay Sinir Ağları kullanılarak geliştirilen yeni bir algoritma yardımıyla değişken yük durumlarında Senkron Jeneratörlerin çıkış büyüklüklerini oluşturan uç gerilimi ve frekansını minimum hata oranıyla referans değerlerinde tutmak üzere denetleyici yapısı hedeflenmiştir.

BÖLÜM 2. GÜÇ SİSTEMLERİNDE KARARLILIK

2.1 Elektrik Enerji Sistemleri

Elektrik Enerji (EE) sistemleri, enerji dönüşüm ve iletiminin yapıldığı fiziki bir sistemdir. Temel bileşenlerini üretim merkezleri, dağıtım sistemleri ve bunları birbirine bağlayan iletim hatları oluşturur. Yük merkezlerini besleyen dağıtım sistemleri, üretim merkezlerinden gelen enerjiyi tüketicilere iletir [3].

Dünyanın her köşesinde, özellikle son yarım yüzyıl boyunca, güç sistemlerinin boyutlarında ve karmaşıklığında belirgin artışlar görülmüştür. Elektrik santrallerinin tesisinde, ihtiyaç duyulan mekanik enerji için en uygun ve en ekonomik olan yerler seçilir. Bu yerlerin genelde, enerjinin yoğun olarak tüketildiği büyük şehir ve sanayi bölgelerinden uzakta olması, enerjinin çok uzak mesafelere iletimini zorunlu kılmıştır. Enerji üretim ve dağıtımında maksimum talebi karşılamak amacıyla, her bir eleman ve alt sistemler arasındaki bağlantılar artırılarak, yüklerin enerji ihtiyacını karşılamadaki güvenilirlik oranı yükseltilmiştir. Bu amaçla tesis edilen enterkonnekte sistemlerin önemli bir bölümünü, iletim hatları ve senkron jeneratörler (SJ) oluşturur. Büyük sistemlerde onlarca, hatta yüzlerce SJ işletmede birlikte çalışır. Böyle bir sistemde, aktif ve reaktif güç ve diğer parametrelerin düzenlenmesi amacıyla bir kontrol düzeneğine ihtiyaç duyulur. Bu ise, çok büyük ve kompleks bir yapıyı ortaya çıkarır.

2.1.1 Elektrik enerji sistemi elemanları

Elektrik enerji sistemlerinin dinamik davranışlarını anlayabilmek için, elektrik güç santrallerini ve sistemlerini tanımak gerekir. Türbinler, hız regülatörleri, SJ, uyarma ve gerilim regülatörleri gibi, güç sistemlerini oluşturan yardımcı elemanların her biri sistemin dinamik yapısına etki eder [5]. Konunun daha iyi anlaşılması açısından, bu elemanların kısaca tanımlanmasında yarar vardır.

Buhar Türbinleri; kömür, doğal gaz, nükleer enerji gibi yakıtlar yardımıyla elde edilen buhar enerjisini, dönme şeklinde hareket enerjisine dönüştüren elemanlardır. Bu enerji ise, bir mil aracılığıyla SJ' ün tahrikini sağlar [3]. İçinde bulunduğu ünite boyuna ve buhar şartlarına göre iki değişik tipte imal edilirler. Genelde iki yada daha fazla türbin bloğundan veya seri silindir bağlantılarından oluşur. Her bir türbin bloğu, bir dizi sabit vana ve rotora bağlı bir grup hareketli pervaneden meydana gelmiştir. Sabit vanalar yardımıyla ivmelendirilen yüksek hızlı buharın, kinetik enerjisi, pervaneler yardımıyla mil momentine dönüştürülür. Türbinler genel olarak, seri (3000 d/d) ve çapraz bağlı (1500 d/d) olmak üzere iki kısımda incelenirler [15].

SJ rotorunun tahriki ile, statorda bir döner alan oluşturularak indüksiyon emk' i elde edilir. Yani bir enerji dönüşümü gerçekleştirilmiş olur. Buhar santral ve türbinleri, su türbinlerine göre daha hızlı bir sistem cevabına sahiptir [3][5].

Su Türbinleri; aksiyon ve reaksiyon türbini olmak üzere iki temel tipte yapılırlar. Aksiyon türbini (Pelton çarkı) yüksek düşülerde, reaksiyon türbinleri ise orta ve düşük düşülerde kullanılır. Sırasıyla, Francis (360 m) ve Kaplan (45 m) türbinleri bunlara örnek olarak gösterilebilir [15]. Genelde su santralleri ve türbinlerinde, büyük güçlü jeneratörler tahrik edildiği için, sistem cevabı ataletinin yüksekliği nedeniyle buhar santrallerine göre yavaştır.

Hız Regülatörleri; sistem hızını sabit bir değerde tutma görevini üstlenirler. Bu işlem, türbin-jeneratör çiftinin senkron hızda dönmesini sağlar. SJ çıkış gücünün (P_e) değişmesi veya salınımlar göstermesi halinde, sistemin mekanik giriş gücünü (P_m) ayarlamak suretiyle, sistem kararlılığı için $P_m = P_e$ eşitliğini sağlamaya çalışırlar. Sistemin giriş gücü (su / buhar gibi) ise, kumanda ettiği vanaları açıp-kapayarak düzenlenir [5]. Mekanik ve hidrolik olmak üzere buhar ve su türbinleri için iki tip hız regülatörü bulunur [3].

Senkron Jeneratörler (SJ); mekanik enerjiyi, elektrik enerjisine dönüştüren en büyük boyutlu üreteç olan jeneratörler, rotor ve stator olmak üzere iki temel parçadan oluşan bir elektrik makinesidir.

Türbin tarafından tahrik edilen SJ rotoru döner manyetik alanı oluşturarak, endüksiyon yoluyla uyarılan stator sargılarında 120° faz farklı üç fazlı sinüzoidal bir emk indüklenmesine neden olur. Böylece, stator sargılarından üç fazlı elektrik enerjisi elde edilir. Rotorları yuvarlak ve çıkık kutuplu olmak üzere, iki tip SJ imal edilir. SJ'ün dinamik davranışı çeşitli modeller kurularak incelenebilir. Dinamik analiz için gerekli SJ durum denklemleri Denklem 2.1 ve Denklem 2.2' de verilmiştir.

$$P_e = 3 \cdot \frac{E_a \cdot U_a}{X_d} \cdot \sin \delta + 3 \cdot \frac{X_d - X_q}{2 \cdot X_d \cdot X_q} \cdot U_a^2 \cdot \sin 2\delta \quad [W] \quad (2.1)$$

$$E_a = U_a + I_a \cdot R_a + j I_a \cdot X_q + j I_d \cdot (X_d - X_q) \quad [V] \quad (2.2)$$

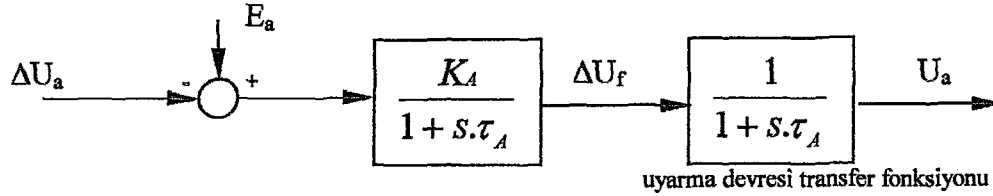
Burada; U_a : bir faz uç gerilimi, X_d : endüi reaktansı x eksen bileşeni
 E_a : bir faz endüi gerilimi, X_q : endüi reaktansı y eksen bileşeni
 δ : güç açısı, I_a, I_d : endüi akımı ve endüi akımı x eksen bileşeni

Uyarma sistemi ve gerilim regülatörleri; SJ uç geriliminin düşmesi veya yükselmesi durumunda, rotor mıknatıslama gerilimini değiştirerek, uç gerilimini kararlı hale getirmeye çalışmak temel görevini oluşturur. Bu işlem ise, SJ'ün sistemde bulunan diğer jeneratörlerle senkronize olarak çalışmasını sağlar [5].

Güç sistemlerinde meydana gelen bozucu etkiler, SJ rotor açılarının değişmesine ve bazen sistemin kararsızlığa gitmesine yol açar. Güç sistemlerindeki kararsızlığı ve sistemde oluşan düşük frekanslı salınımları önlemek üzere, son otuz yıldan bu yana uyarma ek kontrol teknikleri tasarlanmaktadır. Mil hızından veya tahrik gücünden alınan sinyaller yardımıyla elde edilen ilave kararlayıcı işaretler, uyarma geriliminin denetlenmesi ve bu sayede sistem kararlılığını sağlamada kullanılmaktadır [16][17].

Enterkonnekte sistemlerde yoğun olarak oluşan küçük şiddetli bozucu etkiler olumsuz yönde etkimesine rağmen, sistemin salınım yapmadan ve kararsızlığa gitmeden çalışması istenir. SJ arasında oluşan düşük frekanslı bu salınımlar, yerel ve bölgeler arası olmak üzere iki grupta toplanabilir. 1s ile 40s arasında süren bu salınımlar, klasik sistemlerin dinamik analizinin yapılmasında kullanılır. Yerel salınımlar 0.8 - 2.0 Hz, bölgeler arası salınımlar ise 0.1 - 0.8 Hz arası değişen frekans değerlerine sahiptir [18].

Uyarma sistemlerinin incelenmesinde önemli kolaylıklar sağlamak üzere, yeni sistem tasarımlarında gerekli sabitlerin kolayca belirlenebilmesi için, farklı uyarma ve gerilim regülatörü bilgisayar modelleri önerilir [19]. Çalışmaların hızlandırılmasında oldukça yardımcı olan bu modellerden birisi Şekil 2.1’ de görülmektedir.



K_A : regülatör kazancı, τ_A : zaman sabiti.

Şekil 2.1 Basit bir uyarma ve gerilim regülatörü modeli

2.1.2 Güç sistemi kararlayıcıları

Güç Sistem Kararlayıcılarının (GSK) temel fonksiyonu, SJ’ ün rotor salınımlarını söndürmektir. Bunu kararlı kılıcı ilave sinyaller yardımıyla, uyarma devresini kontrol ederek yani, bozucu etkinin özelliğine göre uyarma gerilimini arttırıp-azaltarak gerçekleştirir. Rotor salınımlarını söndürmek için, hızdaki sapmalarla aynı fazda dönme momenti elektrik bileşeni üretilir. Bu amaçla kullanılan kararlayıcılar Bölüm 2.4.4’ de detaylı olarak açıklandığı üzere; delta-omega, delta-P-omega, frekans tabanlı ve dijital kararlayıcılar olmak üzere dört grupta toplanabilir [15].

2.2 Enerji Sistemlerinde Temel Kavramlar

Bozucu bir etkiyle karşılaşan güç sisteminin, bu etki sonrasında kabul edilebilir dengeli bir çalışma noktasına dönebilme yeteneği güç sistemleri kararlılığı olarak tanımlanır. Kararsızlığın tanımında ise, sisteme ait farklı değişkenler referans olarak alınabilmektedir. Genel kabuldeki tanımlamaya göre kararsızlık, enterkonnekte güç sisteminin tamamen veya kısmen senkronizma dışı kalması sonucu, enerji üretimi ile dağıtımının sağlanamaması halidir [15].

EE’ si üretiminde SJ temel eleman olması nedeniyle, sistemde paralel çalışan bütün jeneratörlerin senkronizma şartlarını yani, aynı frekansta ve birbirlerine göre kararlı

rotor açılarında çalışmayı sağlamaları istenir. Yani, kararlılık için senkronizmanın sağlanması bunun için ise rotor açısının kabul edilebilir sınırlar içinde olması gerekir. Genelde, bu açının 90° nin altındaki kritik bir değeri aşmaması istenir, çünkü üstündeki değerlerde açının kararlılık sınırlarına getirilmesi mümkün olamamaktadır. Kararsızlık sadece senkronizmadan ayrılma veya sistem düzeninin bozulması şeklinde de tanımlanmayabilir. Ayrıca, yük geriliminin kabul edilebilir sınırlar dışına çıkması da, gerilim kararsızlığı olarak tanımlanır. Buna göre kararlılık, büyük güçlü bir sistemin beslediği geniş bir bölgede yük gerilim genliğinin korunması olarak veya gerilim kararlılığı olarak da ifade edilebilir.

Kararlılıkta esas konu, geçici bir küçük veya büyük boyutlu, kısa veya uzun süreli bozucu etkiye maruz kalan güç sisteminin göstereceği davranıştır. Maksimum yüzde 10 luk yük değişimleri şeklindeki, küçük bozucu etkiler sık-sık meydana gelir ve sistemin bu değişimlere ayak uydurması veya bir şekilde bu salınımları bastırması istenir. Ayrıca, iletim hattı veya baralarda oluşan kısa devrelerde, büyük bir yük veya jeneratörün devre dışı kalması sonucu oluşan ve sistemin büyük bir kısmını etkileyen salınımlar şeklindeki büyük bozucu etkiler karşısında, sistemin en az kayıpla kararlılığını koruyabilmesi de istenir [15].

2.2.1 Rotor açısı kararlılığı

Bu tanım, sistem kararlılığında rotor açısının referans olarak alınması ile ortaya çıkmıştır. Özellikle gerilim kararlılığı araştırmaları, literatürlere rotor açısı kararlılığını da ilave etmiştir. Kararlılık tanımında, sistemin bozucu etki sonrası kabul edilebilir bir çalışma noktasına gelmesinin yanı sıra, rotor açısının da kritik değerin altında kalması istenir. Özellikle fazla sayıda SJ bulunan sistemlerde, jeneratörler arası açı farklılıkları önem taşır [20].

Enerji sistemlerinde karşılaşılan yük değişimleri, sistemdeki dinamik değişkenlerin salınım yapmalarına neden olabilir. Bunlardan biri olan rotor açısında da salınımlar meydana gelebilir. Bu salınımlar ise, sistemi bazen kararsızlığa götürür. Rotor açısı kararlılığının analizi için, sistem yapısında bulunan elektromanyetik osilasyonların

incelenmesi gerekir. Küçük bozucu etki sayılan düşük frekanslı salınımlar, SJ' ün rotor açısında düşük frekanslı değişimlere yol açtığından, doğrudan çıkış gücüne etkir.

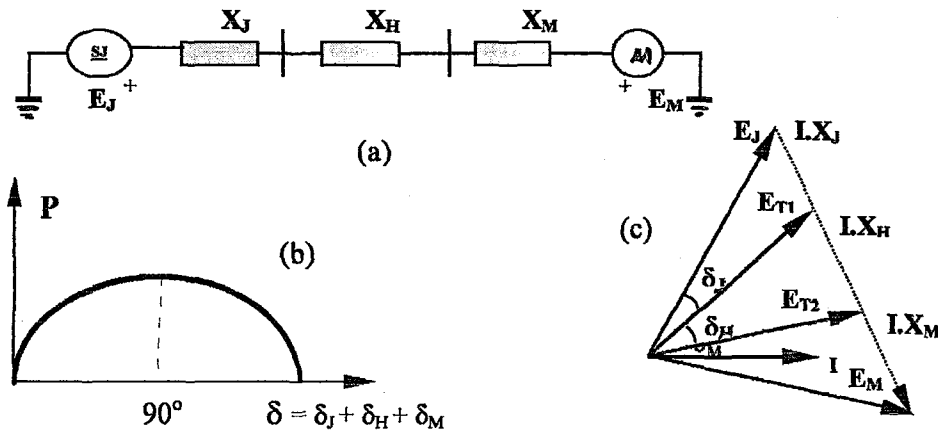
Rotor açısı kararlılığı analizlerinde, açı ile elektrik çıkış gücü arasındaki ilişkinin ve SJ parametrelerinin bu ilişkiye etkisinin bilinmesi gerekir.

SJ' de bulunan mıknatıslama (alan) ve indüksiyon sargıları, sırasıyla rotor ve statorda bulunur. Rotor mili, bağlı haldeki tahrik elemanı tarafından döndürüldüğünde, stator sargılarında indüksiyon yoluyla döner manyetik alan oluşur. Bunun için ise, alan sargılarının uyarılması gerekir. Bu döner manyetik alan sonucu, stator sargılarında emk indüklenir. İndüklenen bu aa gerilimin frekansı Denklem 2.3' de görüldüğü gibi, rotor hızına ve kutup sayısına bağlıdır. SJ' in paralel çalışmada sisteme güç verebilmeleri için, frekans ve faz açılarının aynı olması gerekir. SJ uç frekansını belirleyen bağıntı;

$$f = \frac{n \cdot p}{60} \quad [\text{Hz}] \quad (2.3)$$

şeklindeir. Burada; n: devir sayısı (d/d), p: çift kutup sayısıdır.

SJ elektrik çıkış gücü, sadece tahrik gücü tarafından rotora iletilen mekanik güç yardımıyla değiştirilebilir. Mekanik gücün bu değişimi, stator döner manyetik alanı ile rotor arasındaki açı farkını artırıp-azaltacak yönde etkir. Sürekli çalışma durumunda, stator döner manyetik alanı ile rotor aynı hızda döner. Güç sistemlerinin kararlılık tanımında önemli olan, güç ile yük açısı arasındaki lineer olmayan ilişkidir. Şekil 2.2 de verilen örnek bir sistem üzerinde bu ilişki tanımlanabilir.



Şekil 2.2 Basit bir güç besleme sistemi;

a) idealleştirilmiş model b) Güç-yük açısı değişim eğrisi c) fazör diyagramı

Şekil 2.2.a' daki sistem, iki makine ve bunları birleştiren iletim hattından oluşmaktadır. İletim hattı seri direnci ve şönt admitansı ihmal edilebilir. SJ' den motora aktarılan güç, iki makinenin rotor açıları arasındaki farkın bir fonksiyonudur. Bu açı farkı şu üç bileşenden oluşur; SJ iç açısı (δ_J : SJ rotorunun, stator döner alanına göre açı farkı), SJ ve motor uç gerilimleri arası açı farkı (δ_H : SJ stator alanının motora göre açı farkı) ve motor iç açısı (δ_M : motor rotoru ile, stator döner alanı arası açı farkı). Miknatıslama gerilimi ile iç gerilim (E_J) aynı fazdadır. SJ' den motora iletilen güç:

$$P = \frac{E_J E_M}{X_T} \cdot \sin(\delta) \quad [W] \quad (2.4)$$

şeklinde tanımlanır. Burada; X_T : sistemin toplam reaktansı, δ : toplam güç açısıdır.

Bu bağıntının grafik ifadesi Şekil 2.2.b' de görülmüyor. Dinamik kararlılık analizlerinde, regülatörlerin devreye girmesi ile bu eğri sinüs formundan çıkar [12].

Kararlılık, zıt kuvvetler arasındaki bir denge durumudur. Birbirine paralel bağlı SJ, ancak yardımcı ekipmanların düzenleyici kuvveti sayesinde senkronize çalışmalarını sürdürürler. Sürekli durumda, mekanik giriş gücü (veya momenti) ile çıkış elektrik gücü (veya momenti) birbirine eşit olduğundan hız da sabit olur.

Herhangi bir nedenle, sistemin denge durumu bozulursa, SJ hızlanır veya yavaşlar. Bir SJ, geçici bozucu etki sonucu (talep gücünün artması gibi), dinamik elemanların devreye girmesiyle diğerlerine göre tahrik hızı artırılırsa rotorun açı farkı, hızı yavaş olan diğer SJ' e göre daha ileride olur. Bu açı farkı ile güç-açı değişim eğrisine bağlı olarak, yavaş dönen SJ' den hızlı olan SJ' e yükün bir kısmı aktarılır. Hızlı olan SJ, yükü daha fazla üzerine alır. Bu transfer işlemi, hız ve açı farkını azaltır.

Yük açısı 90° ye ulaştığında maksimum güç iletimi sağlanırken, SJ de çok fazla hızlanmış olur (Bkz. Şekil 2.2.b). Sonuçta SJ senkronizmadan ayrılarak, koruma elemanları devreye girer. Herhangi bir durumda sistem kararlılığı, rotor açısındaki sapmalar ile yeterli düzenleyici momente bağlıdır.

Senkronizma kaybı, bir SJ ile sistem arasında veya diğer SJ arasında oluşabilir. İkinci durumda, diğerlerinden ayrıldıktan sonra her grup kendi içinde senkronizmayı

sürdürebilir. Bir SJ' ün elektrik momentine ait değişim bağıntısı;

$$\Delta T_e = T_s \cdot \Delta \delta + T_D \cdot \Delta \omega \quad [\text{Nm}] \quad (2.5)$$

şeklindedir. Burada;

$T_s \cdot \Delta \delta$: rotor açısı değişimi ile aynı fazda olan moment değişimi (senkronlayıcı moment) bileşeni,
 T_s : senkronlayıcı moment katsayısı,
 $T_D \cdot \Delta \omega$: hızdaki sapmalarla aynı fazda oluşan sönümleyici moment bileşeni,
 T_D : sönümleyici moment katsayısı.

Sistem kararlılığı, her bir SJ' ün söz konusu moment bileşenlerinin yeterli olmasına bağlıdır. Yeterli senkronlayıcı momentin olmaması, rotor açısında periyodik olmayan salınımlara neden olur, yani sönümleyici momentin yeterli olmayışı osilasyonlu kararsızlığa yol açar. Analiz kolaylığı sağlamak amacıyla, kararlılık olayları iki başlık altında incelenir. Bunlar;

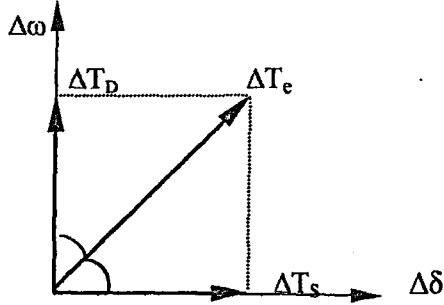
- a) Küçük işaret (bozucu etki) kararlılığı
- b) Geçici hal kararlılığı.

Küçük işaret kararlılığı, güç sistemlerinin yükteki küçük değişimler nedeniyle sürekli olarak oluşan küçük bozucu etkilere karşı, senkronizmayı sürdürebilme yeteneği olarak tanımlanır. Düşük frekans (0.2 Hz ~ 2 Hz) ve uzun süreli (1s ~ 40s) olan bu bozucu etkilerde sisteme ait mekanik elemanların harekete geçerek cevap vermesi, analizlerde klasik yol ve modellerin kullanılmasını engeller. Dinamik karakterli regülatörler de, sistemin dinamik yapısına katkıda bulunulur. Sistem analizlerinde, lineerleştirilmiş denklemler kullanılır. Güç sistemlerinde kararsızlık şu iki şekilde ortaya çıkar;

- i. Yeterli miktarda senkronlayıcı momentin olmaması halinde, rotor açısında sürekli bir artış meydana gelir.
- ii. Sönümleyici momentin yetersiz kalması nedeniyle de, artan genlikte rotor osilasyonları oluşur.

Sistemin küçük etkilere cevabı, iletim sistemine ve SJ' ün uyarma denetimine bağlıdır. Büyük bir sisteme bağlı SJ' de, otomatik gerilim regülatörlerinin olmaması durumunda yani alan gerilimlerinin sabit kalması halinde, yeterli senkronlayıcı momentin oluşamaması nedeniyle kararsızlık meydana gelir. Otomatik gerilim regülatörlerinin sürekli çalışması halinde ise, küçük işaret kararlılığı sistem

salınımlarının kısa sürede sönümlenememesi şeklinde ortaya çıkar. Kararsızlık ise, salınım genliğinin giderek artması şeklinde oluşur. Otomatik gerilim regülatörleri yardımıyla SJ' in pozitif kararlılık cevabını veren grafik Şekil 2.3' te verilmiştir.



Şekil 2.3 Sistemin küçük bozucu etkilere karşı kararlılık bileşenleri

Geçici hal kararlılığı ise, şiddetli kısa devreler ve çok büyük miktarda yük değişimleri gibi sistemde önemli dalgalanmalara yol açan büyük şiddetli ani bozucu etkiler karşısında, sistemin kararlılığını sürdürürebilme yeteneği olarak tanımlanır. Bu etkiler 1 saniyeden daha kısa sürede meydana geldiklerinden, koruma elemanları ve mekanik regülatörler bunlara yeterince hızlı cevap veremezler, bu yüzden rotor açısında büyük salınımlar oluşur. Kısa devre şeklindeki bu tür bozucu etkiler, kesicilerin arıza bölgesini şebekeden tamamen ayırması ile giderilebilir.

Şiddetli bir bozucu etkiyle karşılaşan büyük sistemlerde rotor açısının ilk salınımı, kararlılık hakkında ipucu verir. İlk salınımlarda açı kritik değeri aşıyorsa, kesicilerin arızalı bölgeyi şebekeden ayırması bile SJ' ün aşırı hızlanmasını önleyemez. Buna göre, arıza oluşumunu takiben birkaç saniye içinde sistemin durumu belli olur. Rotor açısı, ilk salınımdan sonra giderek küçülüyorsa, SJ bir süre sonra kararlı hale gelir.

Yeteri kadar senkronlayıcı moment olmadığı için, açı salınım yapmadan kısa sürede büyük bir ivme kazanıyorsa, senkronizmadan ayrılma meydana gelir. İlk salınımda kararlı gibi görünmesine rağmen, eğer giderek artan genlikte salınımlar meydana geliyorsa geçici hal süresi sonrasında sistem kararsızlığa gider. Bu gibi durumlarla, küçük işaret kararlılığı olaylarında sıkça karşılaşılır [12].

Yine geçici hal kararlılığı analizlerinde, SJ' ün mekanik giriş gücü ve momentinin

değişmediği kabul edilir. Çünkü olayın meydana geliş süresi 3-5 saniye ile sınırlı olduğundan, bu süre içinde mekanik regülatörler devreye giremezler.

Küçük işaret kararlılığı ile aynı anlamda algılanan dinamik kararlılık, üzerinde tartışılan bir kavramdır. Otomatik gerilim regülatörleri, mekanik regülatörlere göre daha kısa sürede cevap vermeleri nedeniyle, sürekli hal incelemelerinden farklı olarak düşünülür [12].

2.2.2 Gerilim kararlılığı

Bir enerji sisteminde yük baralarının gerek sürekli hal gerekse geçici olaylar esnasında, gerilim genliğini belirli işletme limitleri içinde tutabilme yeteneği gerilim kararlılığı olarak tanımlanabilir.

Gerilim kararlılığını bozan birinci neden olarak, anormal sistem davranışları ve kontrolör yardımıyla yük taleplerini karşılamaya çalışan sistem baralarına yeterli reaktif gücün verilemeyişi. Bu durum bir bölgede gerilimin ardışıl olarak düşmesi (gerilim çığı) sonucu, bütün sistemde gerilim çökmesine neden olacak şekilde sistem içinde yayılması olarak tanımlanır [12][18].

Gerilim kararlılığını etkileyen faktörler, öncelik sırasına göre;

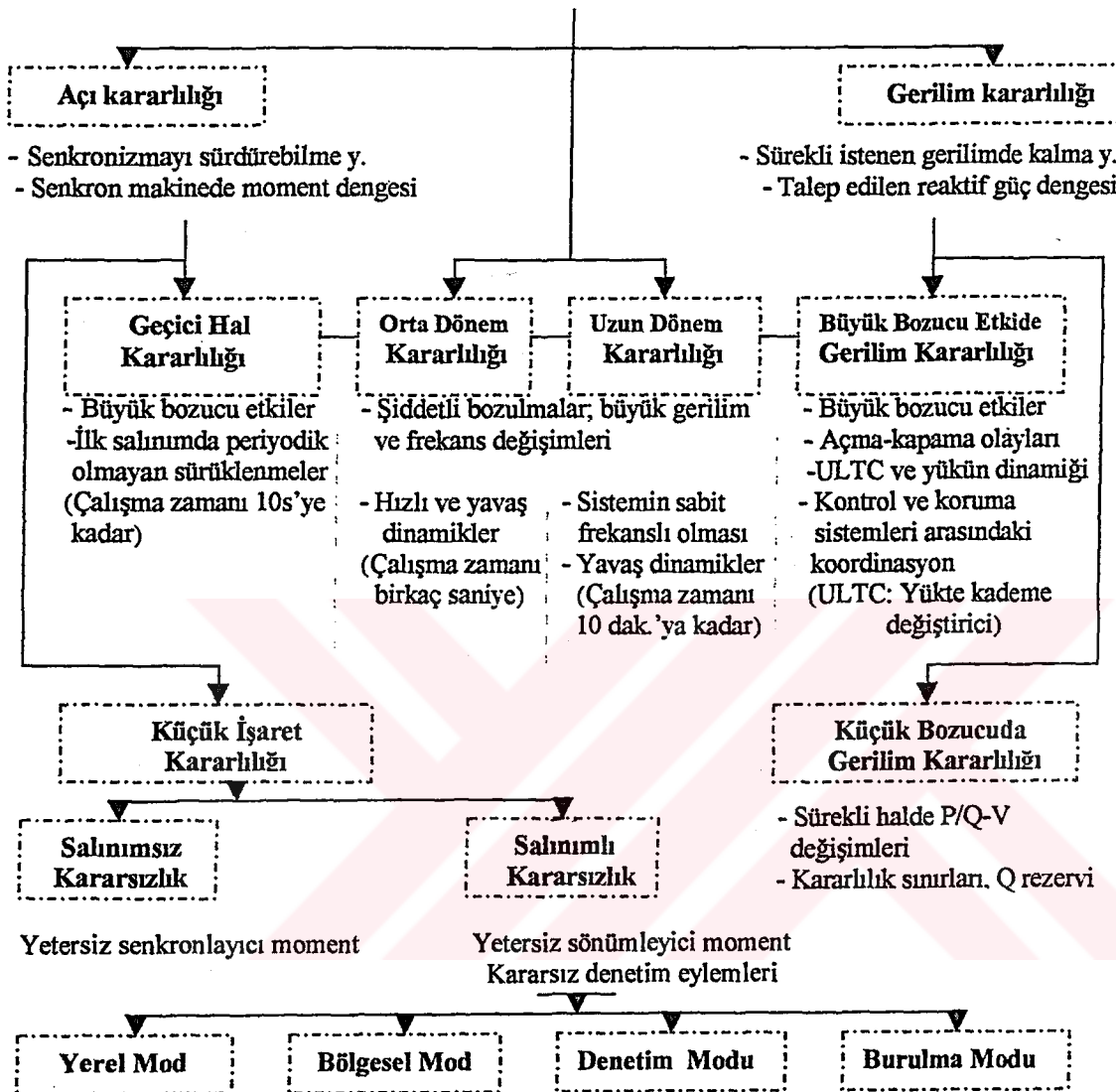
- i. yüklerin yapısı ve karakteristikleri
- ii. kontrol ekipmanlarının dinamik cevapları
- iii. iletim hatlarının işletme biçimleri
- iv. SJ olarak sıralanabilir [18].

Gerilim kararlılığı incelemelerinde dinamik, küçük ve büyük bozucu etkiler gibi sınıflandırmalara gidilir [12].

Uluslararası literatürlerde genel kabul gören, Güç Sistem Kararlılığına ait kavramların sınıflandırması Şekil 2.4' de verilmiştir.

Güç Sistem Kararlılığı

- Dengeli bir çalışma noktasında kalma yeteneği
- Zıt kuvvetler arasında dengeyi sağlama yeteneği



Şekil 2.4 Güç sistemleri kararlılık sınıflaması

2.3 Güç Sistemlerinin Dinamik Analizi ve Modeli

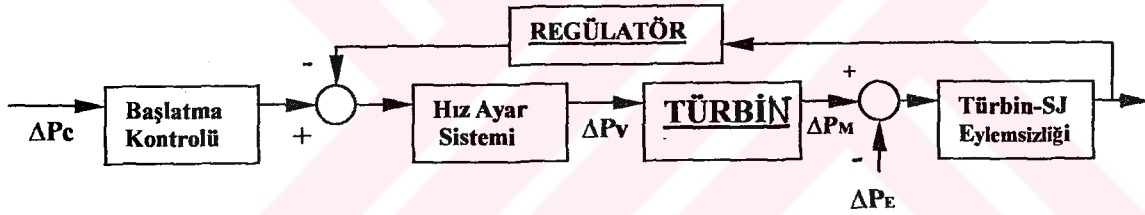
Güç sistemleri, yapısı ve bileşenleri gereği lineer olmayan dinamik bir karakteristiğe sahiptir. Bu yüzden sistem analizlerinde, elde dilen n tane birinci merteben lineer olmayan adi diferansiyel denklem şeklindeki durum denklemlerinin lineerleştirilmesi gerekir. Güç sistem bileşenleri; türbinler ve hız regülatörleri, uyarma sistemi ve gerilim regülatörleri ve güç sistem kararlayıcıları olarak sıralanabilir.

2.3.1 Türbinler ve hız regülatörleri

Buhar Türbinleri ve Hız Regülatörleri; buhar türbinleri temel fonksiyonları gereği türbinlere giden buhar giriş enerjisini kontrol ederek tahrik hız sabitliğini sağlayıcı, kesici ve buhar kontrol vanaları yardımıyla da güç sistemlerinin kararlılığını artırıcı eleman olarak kullanılırlar [12].

Hız regülatörleri, tahrik mekanizmasına kumanda ederek sisteme giren mekanik gücü (su, buhar vb.) kontrol eder. Amaç giriş - çıkış gücü arasındaki dengeyi sağlayarak SJ' ün sabit hızda dönmesini sağlamaktır [5].

Çıkış gücündeki bir artma veya azalma durumunda, SJ hızında da artma veya azalma olacağından, hız regülatörü türbin giriş mekanik gücünü ayarlar. Hız regülatörü, SJ kararlılığını arttıran bir kontrol elemanıdır [19].

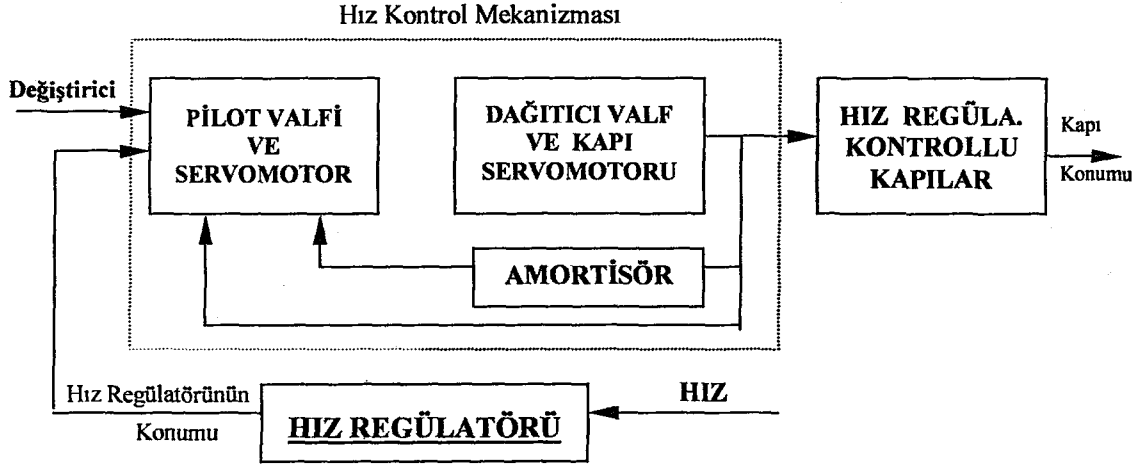


Şekil 2.5 Buhar santrali blok diyagramı

Su Türbinleri ve Hız Regülatörleri; en eski ve en önemli tahrik elemanı olan su türbinlerinin en önemlileri Kaplan, Francis ve Pelton türbinleridir. Düşük, orta ve yüksek düşülerde kullanılan su türbinleri yardımıyla, Mega Watt [MW] düzeyinde güç üretimleri mümkün olmaktadır. Su santralleri, genellikle enterkonnekte sistemde temel yük santralleri olarak kullanılır.

Hidrolik hız regülatörlerinin zaman cevabı, yerel elektro-mekanik salınımların frekansına göre oldukça yavaştır, bu yüzden yerel mod kararlılığında daha az etkilidir. Yerel salınımları söndürmede yeterli olmamalarına karşılık, bölgeler arası salınımların frekansı daha düşük olması nedeniyle, bunların sönmülmesinde daha etkin rol alırlar [5].

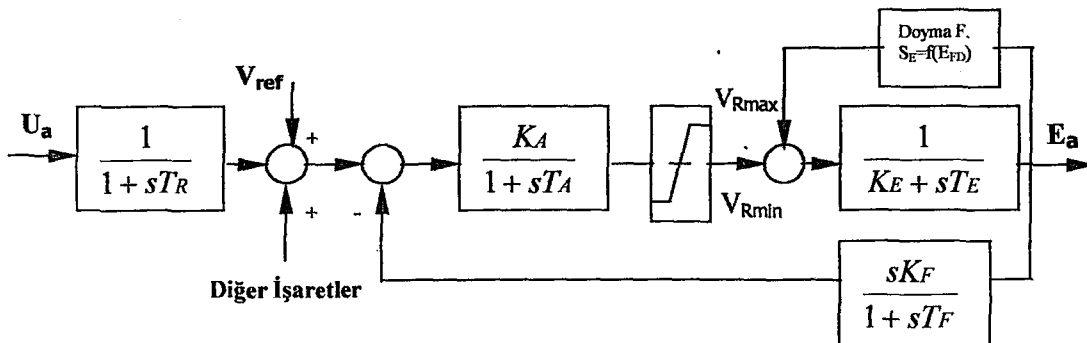
Mekanik-hidrolik hız regülatörlerinde; regülatör kumanda bölümü, pilot vana, servomotor, dağıtıcı vana ve kapı servomotoru bulunur. Buna ait bir prensip şema Şekil 2.6' da verilmiştir.



Şekil 2.6 Bir su santrali için mekanik-hidrolik hız regülatörü blok şeması

2.3.2. Uyarma sistemi ve gerilim regülatörleri

Statik ve dinamik olmak üzere, iki grup altında toplanabilen uyarma sistemlerinin IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) standardı Tip-1 adı altında tanımlanan ve günümüzde en yaygın kullanılanı Şekil 2.7' de görülmektedir [20]. Bu model bilgisayar destekli çalışmalarda tercih edilmektedir. İlk toplama noktasında şekilde görüldüğü gibi, V_{ref} yanı sıra filtre edilmiş uç gerilimi ve diğer kontrolörlerden gelen kararlastırıcı işaretler karşılaştırılır. İkinci toplama noktasında ise, gerilim hata girişi ile uyarmadan alınan geri besleme işareti karşılaştırılır. Kompleks uyarmalı modellerinde, doyma da dikkate alındığı için durum denklemleri çoğalır.



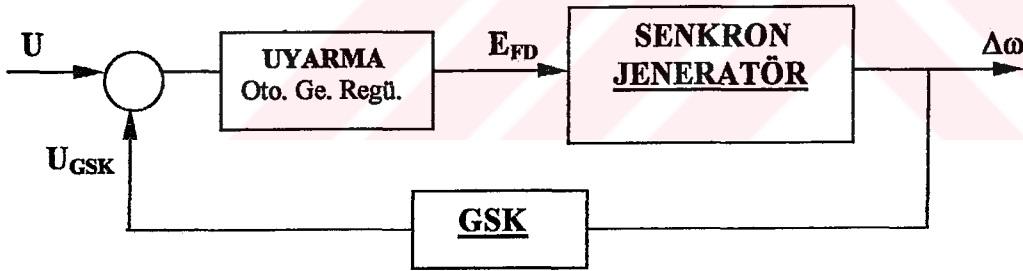
Şekil 2.7 Sürekli etkili uyarmalı gerilim regülatörü blok şeması

2.4 Güç Sistem Kararlayıcıları

Güç Sistem Kararlayıcıları (GSK), yardımcı kontrol elemanlarıdır. Başlangıçta (1960) enerji sistemlerinde sadece gerilim regülatörleri kullanılmaktaydı. Bunlar sistemin dinamik kararlılığını artırmada önemli rol oynuyorlardı.

Enerji sistemlerinde oluşan küçük genlikli ve düşük frekanslı salınımlar, uzun süre devam ederek güç transferini olumsuz yönde etkilediklerinden, bazı durumlarda sistemi senkronizma dışına çekebilirler. Bu salınımlar, SJ mil hızında sapma ve burulmalara yol açma ve yük açısında sürekli değişimler oluşturma gibi olumsuzluklara da neden olurlar.

Geri beslemeli ilk sistem kontrolü, mil sapmalarından uyarma devresine bir gerilim işareti iletilmesiyle uyarma geriliminin denetlenmesi fikrinden yola çıkılarak geliştirilmiştir. Sistem hız sapmalarından ($\Delta\omega$) elde edilen lojik işaretler yardımıyla, SJ uyarma devresi kontrol edilir. Buna ait şema Şekil 2.8' de verilmiştir.



Şekil 2.8 GSK' lı bir sistem kontrolünün blok şeması

2.4.1 Güç sistemlerinin GSK ile kontrolü

Yapısında GSK, SJ, otomatik gerilim ve hız regülatörleri bulunan güç sistemlerinin kontrolü için, öncelikle durum değişkenleri ve giriş vektörleri yardımıyla lineerleştirilmiş durum denklem matrislerinin elde edilmesi gerekir. Genel olarak, Şekil 1.1' de gösterilen sistem değişkenleri için sonsuz güçlü barayı bir hat üzerinden besleyen SJ modeli tercih edilir. Güç sistemlerinin lineer durum denklemleri bulunup

blok diyagramlarının çiziminden sonra, bilgisayarda bu modellerin simülasyonuna geçilir. Bunun için farklı işletme şartlarında sonuçlar elde edilmesine ihtiyaç vardır.

Simülasyonlarda, gerçek sistemde oluşan küçük şiddet ve düşük frekanslı bozucu etkiler, elektrik çıkış gücüne değişik genlik ve genişlikte basamak işaretleri uygulanarak benzetilmeye çalışılır. Elektrik gücüne uygulanan bu işaretler sonucu, rotor hızında ve açısında salınımlar ortaya çıkacağından bunların sistemdeki denetim elemanları tarafından kontrolüne çalışılır ve sistemin yeniden kararlı bir çalışma noktasına gelmesi istenir. Bu etkilerin kaldırılması halinde, sistemin ilk çalışma noktasına dönmesi beklenir. GSK ile salınımların sönümlenmesine çalışılır.

2.4.2 GSK bileşenleri

Faz İlerletici Bileşeni; GSK rotor salınımlarını sönümleyebilmek için, rotor hız sapmalarıyla aynı fazda elektrik moment bileşeni üretmek zorundadır. Dolayısıyla, uyarma girişi ile elektrik momentindeki faz gecikmesini kompanze edecek faz ilerletici devreye ihtiyaç duyar. Eğer faz kompanzasyonunun derecesi küçük istenirse, birinci dereceden tek bir blok yeterli olur. Boyuna eksen açık devre zaman sabiti küçük olan hidro-jeneratörlerde, küçük faz kompanzasyonu istenir. Faz ilerleticiye gerek kalmaz. Yerel ve bölgesel salınımlarda sönümleme yapması istendiği için, GSK' ın faz kompanzasyonu Şekil 2.9' da görüldüğü gibi geniş bir frekans aralığında çalışacak şekilde tasarlanır.

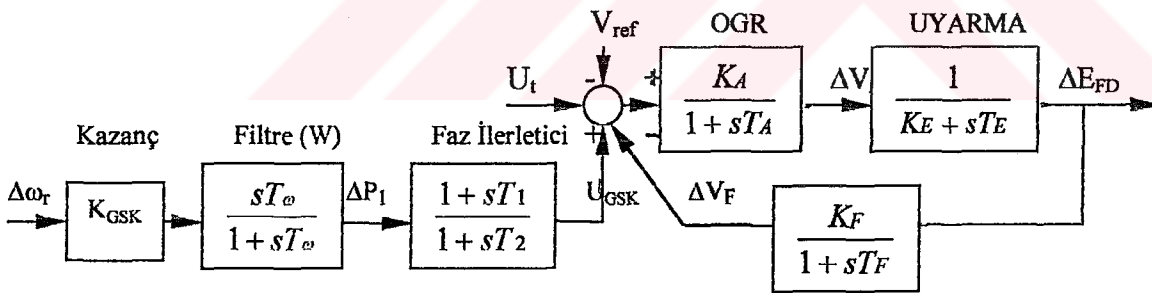
Kararlayıcı İşaret Filtresi; uyarma gerilimi ayarlanırken hızda meydana gelen sürekli değişimleri önleyici bir filtre olup, τ_ω zaman sabitinin rotor hızından kaynaklanan salınımları değiştirmeden geçirmesi istenir. τ_ω değeri 1s ~ 20s arasında seçilirken, istenilen frekanstaki işaretleri değiştirmeyecek kadar büyük, fakat yalıtılmış sistem şartlarında kararlayıcının çalışması nedeniyle, SJ geriliminde istenmeyen değişimlere yol açmayacak kadar da küçük olmasına dikkat edilir. GSK bütün sistemdeki frekans değişimlerine cevap veremez. 0.8~2.0 Hz'lik yerel mod salınımları için 1.5 s' lik τ_ω değeri yeterliyken, düşük frekanslı bölgesel salınımlarda 10 s üstünde olması gerekir, çünkü küçük τ_ω değerleri, düşük frekanslarda büyük faz ilerlemesine neden olur.

Kararlayıcı Kazancı (K_{GSK}); rotor salınımlarını sönümlemede büyük bir etkiye sahiptir K_{GSK} değeri belirlenirken geniş bir aralıktaki etkileri dikkate alınır ve maksimum sönümleme sağlayacak şekilde ayarlanır. K_{GSK} artıka bir noktaya kadar sönümleme iyileşirken, daha çok artırılırsa sönümlemede düşme gözlenir.

Kararlayıcı Limitleri; kararlayıcı pozitif çıkış limiti, büyük bir bağıl değer olan 0.1-0.2 p.u aralığında ayarlanır. Bu GSK' ın büyük salınımlara, yüksek düzeyde etki etmesini sağlar. Büyük değerli kararlayıcı çıkış limitleriyle, SJ uç gerilimi 1.12 - 1.15 p.u. aralığında tutulabilir. Bu amaçla, uç gerilimi sınırlayıcısı da kullanılabilir. Negatif yönde ise, -0.05 - -0.1 p.u. limitleri uygun olup, dinamik cevap için yeterli kontrol aralığı sağlar.

2.4.3 GSK uygulama esasları

GSK' ın belli bir frekans aralığındaki rotor salınımlarını sönümlemesi istenir. Bu amaçla günümüz GSK parametrelerinde, adaptif kontrol teknikleri uygulanır [12]. Şekil 2.9' da IEEE standardında 1nolu uyarma tipi GSK modeli görülüyor.



Şekil 2.9 OGR (Otomatik GR) ve GSK bulunan bir uyarma sisteminin blok diyagramı

2.4.4 GSK çeşitleri

Güç sistemlerinde kullanılan klasik güç sistem kararlayıcılarını dört başlık altında toplayarak incelemek mümkündür.

Delta-omega GSK; hidrolik santrallerde uzun süredir kullanılmakta olan bu tip kararlayıcılarda karşılaşılan en önemli problem, hız sapmalarını ölçecek alet

tasarımında mil kaçması gibi etkenlerden kaynaklanan gürültünün en aza indirilebilmesidir. Kabul edilebilirlik düzeyi gürültü frekansına bağlı olup, 5 Hz' in altındaki gürültülerin oranı % 0,2' den çok olmamalıdır. Zira alan gerilimindeki düşük frekanslı salınımlar, uç geriliminde önemli değişimlere neden olur. Mil dönme hızı frekansı ve mil kaçması, burada en önemli gürültü bileşenlerini oluşturur. Bu tip düşük frekanslı gürültü hareketleri klasik elektrik filtreleriyle sönümlenemez. Bu hızı ölçme, yani mil etrafındaki birkaç turdan alınan sonuçların toplanmasıyla çözülebilir.

Mil hızına dayalı olan bu tür kararlayıcıların, ısıl birimlere uygulanmasında burulma salınımlarının dikkate alınması gerekir. Kararlayıcı rotor osilasyonlarını sönümlerken burulma modlarında kararsızlığına yol açabileceğinden, hız mil üstünde kritik burulma modu noktalarına yakın bir yerde ölçülmelidir. Kararlayıcı aralığında burulma bileşenlerini azaltmak için, elektronik bir filtre devresine ihtiyaç duyulur.

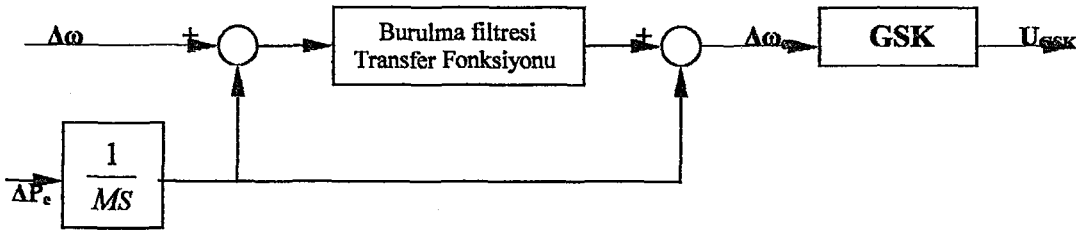
Termal ünitelerin çoğunda, bazı sınırlamaları olmasına rağmen mil hızının doğrudan ölçülmesine dayanan kararlayıcılar kullanılır. Burulma filtresine ihtiyaç göstermeleri başlıca dezavantajlarıdır. Kararlayıcı işaretlerin burulma bileşenlerini azaltmak üzere kullanılan bu filtre, düşük frekanslarda fazın geri kalmasını sağlayarak, kabul edilebilir kararlayıcı kazancını sınırlandırır. Genelde bu çok sınırlayıcı olduğundan, kararlayıcının sistem salınımlarını sönümlemedeki etkisini azaltır. Delta-P-omega kararlayıcılarla bu sınırlama giderilmiştir [12].

Delta-P-omega GSK; Bu tip kararlayıcılarda rotor hız sapmalarıyla orantılı işaret, tahrik gücünden türetilir. Temeli burulma modlarını içermeyen $\Delta\omega_e$ eşdeğer hız sapma işaretinin elde edilmesidir. Elektrik çıkış gücündeki değişimi veren, ΔP_e işaretinin entegrali alınarak burulma bileşenleri azaltılabildiği için, işlem bu bileşenlerden bağımsız olan ΔP_m mekanik giriş gücü değişiminin ölçülmesiyle gerçekleştirilir. Kararlayıcı işaret olarak, sadece ΔP_e ' nin kullanılması halinde uç geriliminde ve reaktif güçte salınımlar meydana geldiği görülür. (τ_a : atalet momenti sabiti)

$$\Delta\omega_e = \frac{1}{2\tau_a} \cdot \int (\Delta P_m - \Delta P_e) \cdot dt \quad [\text{rad/s}] \quad (2.6)$$

Bir delta-p-omega kararlayıcı, mekanik giriş gücündeki değişim miktarının entegraliyle orantılı olarak işaret üretir. Hızlı vana hareketlerine bağlı olarak mekanik güç değişiminin bağlı olarak yavaş olması nedeniyle, mevcut mekanik gücü temsil için türetilen sinyal işaretinin entegrali burulma frekansları içerdiğinden, alçak geçiren bir filtreden geçirilmesi gerekir.

$$\int \Delta P_m dt = T \cdot \Delta \omega_e + \int \Delta P_e dt \quad [W] \quad (2.7)$$



Şekil 2.10 Delta-P-omega kararlayıcı blok diyagramı

Delta-p-omega kararlayıcının üstünlükleri;

a) ΔP_e elektrik çıkış gücü değişim işaretinin içerdiği yüksek frekanslı burulmalar azaldığından, ana kararlayıcı alanda burulma filtresine gerek kalmaması uyarma modu kararlılık problemlerini giderir. Bu sayede sistem salınımları daha iyi sönümlenebilir.

b) ΔP_m mekanik güç işareti üretmek için, mil sonunda hız ölçer bir eleman basit bir burulma filtresi içeren elektrik devresiyle birlikte kullanılabilir. Bu, bütün birimlerde burulma karakteristiklerine bakılmaksızın standart bir tasarım kullanımı sağlar [12].

Frekans Tabanlı GSK; bazı uygulamalarda kararlayıcı işaret olarak, uç frekansı doğrudan kararlayıcı girişine uygulanır. Bu frekansın türetilmesi için, uç gerilim ve akımı kullanılır.

Bu tip kararlayıcıların, buhar türbinli sistemlerde kullanılabilmesi için burulma frekanslarının filtrelenmesi gerekir. İletim hatlarının zayıflaması sonucu, frekanstaki düşme eğilimleri frekans işaretinin rotor salınımlarına olan duyarlılığını artırır. Böyle bir sistemden kaynaklanan kazanç düşümü, kararlayıcı çıkışından elde edilen elektrik

momenti ile denkleştirilmeye çalışılır [21]. Bu yüzden frekans tabanlı kararlayıcıların kazancı, zayıf aa iletim hatları için en iyi performansı verecek şekilde ayarlanmalıdır.

Frekans işareti yerel salınım modlarına göre, bölgeler arası büyük salınım modlarına daha duyarlı olduğu için bölgeler arası salınımların sönümlemede, giriş işareti olarak mil hızının kullanılmasından daha iyi sonuç verir.

Bu tip karalayıcıların bazı dezavantajları ise;

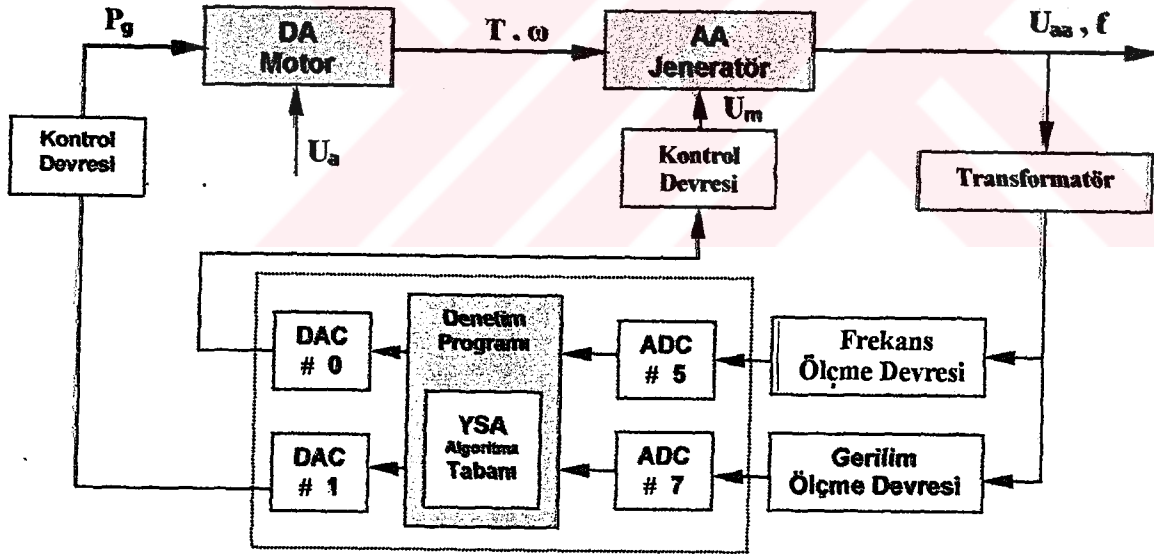
- i. Geçici rejimlerde, uç frekans işaretinde ani faz kaymaları görüldüğünden, SJ çıkış büyüklüklerinden etkilenen bölge gerilimlerinde tepeler oluşmasına neden olur.
- ii. Ark fırını benzeri endüstriyel yükler barındıran güç sistemlerinde, frekans işareti harmonikler içerir. Bu ise, giriş işareti olarak frekans kullanımını zorlaştırır.
- iii. Delta-omega karalayıcılarda olduğu gibi, burulma salınımları filtrelenmelidir.

Dijital GSK; tanımlanan üç karalayıcı çeşidinin, mikro işlemcilerin kullanımıyla gerçekleştirilmiş şeklidir. Özellikle uyarma sistemlerinin de dijital olarak kontrol edilmesi sonucu, bu tip karalayıcılar sadece bilgisayar yazılımları haline gelmiştir [12].

BÖLÜM 3. GÜÇ SİSTEMİNİN MODELLENMESİ

3.1 Sistemin Yapısı

Güç sistemini modellemek üzere, tahrik ünitesi ve güç üreticinden oluşan iki elektrik makinesi seçilmiştir. Birincisi, tahrik ünitesi olarak döner hareketi sağlayan ve jeneratör miline bağlı haldeki serbest uyarmalı bir da motor, diğeri ise uçlarından üç fazlı aa gerilimin elde edildiği senkron jeneratör/alternatördür. Bu modellemeyi amaç, sistemi mümkün mertebe bir enerji üretim istasyonuna benzetmektir. Şekil 3.1 de böyle bir güç sistemine ait örnek blok diyagram görülüyor [25].



Şekil 3.1 Model güç sistemi blok diyagramı

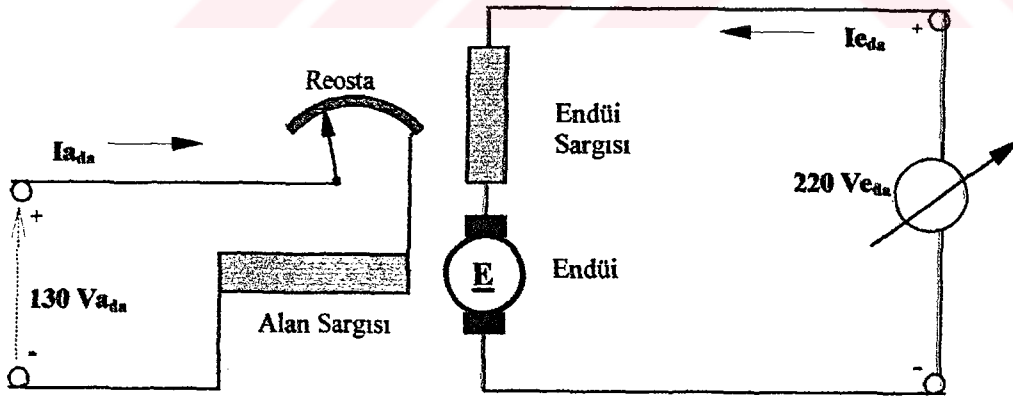
Şekildeki güç üretim istasyonunu oluşturan üniteler sırasıyla;

- 1- Serbest uyarmalı da motor (ana tahrik ünitesi, çevirici)
- 2- Senkron jeneratör (3 fazlı, çıkık kutuplu)
- 3- YSA Kontrolör Algoritması
- 4- Kontrol ve Ölçme Devreleri.

3.2 DA Motor (tahrik ünitesi)

Enerji üretiminde, senkron jeneratör (SJ) milinin döndürülmesini sağlayan sistem gerçekte Bölüm 2' de açıklandığı gibi bir türbindir (buhar, su, gaz türbini). Bu türbin ünitesi ana tahrik ünitesi olarak tanımlanır. Suyun buharlaştırılması petrol, kömür, doğal gaz gibi fosil yakıtlar veya nükleer santrallerden elde edilen ısıyla sağlanır. Yakıt cinsi, yörede bulunan ve/veya kullanılabilecek en ekonomik enerji türüdür. Enerji üretim istasyonları ile büyük güç tüketim merkezleri arasında, uzun mesafelerin ortaya çıkması nedeniyle SJ, yüksek gerilim hatları üzerinden yük merkezlerine bağlanır.

Gerçek bir güç sistemini modellemek amacıyla, bir da motor ana çevirici olarak seçilmiştir. Şekil 3.2' de görüldüğü gibi, . . da motor serbest uyarmalı alan sargılarına (statora yerleştirilmiş) ve endüi sargılarına (rotora yerleştirilmiş) sahip olup, endüi ve alan sargıları birbirinden bağımsız olarak beslenmektedir. Serbest uyarmalı da motor, gerçek bir tahrik ünitesine en yakın kontrol şartlarını sağlaması nedeniyle seçilmiştir. Sistemdeki da motoru çalıştırmak üzere, endüi sargılarına $0 \sim 220V_{dq}$ arası, alan sargılarına ise $130V_{dq}$ gerilim uygulanmaktadır.



Şekil 3.2 Serbest uyarmalı DA motor yapısı

Döner bir elektrik makinesi olan da motorda, sisteme verilen elektrik enerjisi mekanik enerjiye çevrilir. Bu enerji dönüşümü, magnetik enerjide meydana gelen değişimle sağlanır. Bu dönüşüm sırasında, fuko, histerezis, bakır ve sürtünme gibi nedenlerle enerji kayıpları oluşur. Enerjinin sakınımı prensibine göre, enerji dönüşümünü

gerçekleştiren bütün sistemlerde geçerli olan bağıntı şöyledir;

$$\text{Giriş Enerjisi} = \text{Çıkış enerjisi} + \text{Depo edilen enerji} + \text{Kayıp enerji}$$

Genel olarak elektrik makineleri (dolayısıyla da motor), doyma ve histerezis özelliği olan demir çekirdek ve rotordan meydana geldiği için, lineer olmayan sistemlerdir.

Makinenin esas kutuplarından geçen ve sargı alanı yönündeki eksene, da makinenin boyuna ekseni denir. Esas kutuplar üzerinde, kontrol sargısının yerleştirildiği bu eksen doğrultusunda kontrol alanı meydana gelir. Serbest uyarmalı olarak seçilen kontrol sargısının görevi, boyuna eksen üzerinde manyetik alan meydana getirerek, endüiyi döndürecek bir moment indüklemektir. Fırça, yardımcı kutuplar ve varsa kompanzasyon sargıları ortasından geçen eksene ise, enine eksen denir ve bu eksen üzerindeki sargı, endüi alanına ters yönde bir alan meydana getirir. DA makinelerde endüi, alan yönü enine ekseni üzerinde ve yardımcı kutupların alan yönüne ters bir bobin olarak görülebilir.

Elektrik enerjisini mekanik enerjiye çeviren bir güç makinesi olarak da motor, kontrol sistemlerinde zamana göre değişen giriş büyüklükleri ile çalışır. Giriş ve karşılığı çıkış büyüklükleri zamanın fonksiyonu olarak değişir. Tahrik amacıyla kullanılan güç sistemimizdeki da motor, zamana göre değişen giriş büyüklüğü (endüi gerilimi-akımı) ile çalışır. Giriş büyüklüğü değiştiğinde, çıkış büyüklükleri (hız, moment) de değişir ve motor geçici rejimde çalışır. Geçici rejimde ise, motorun çıkış büyüklüğü değişimlerini bulmak için geçici rejim analizlerinin yapılması gerekir.

DA motorlar işletme özellikleri nedeniyle eşdeğer devreler için, lineer olmayan bir diferansiyel denklem sistemi oluştururlar. Bu denklemlerin lineerleştirilmesi gerekir.

DA motora zamana bağlı olarak değişen bir giriş büyüklüğü uygulandığında, çıkış büyüklüklerinin zamana bağlı değişimlerini bulmak amacıyla, geçici rejim analizlerinin yapılması gereklidir. Örnek olarak, da motorda elektro-manyetik moment bağıntısı;

$$T_e = T_y + f \frac{d\omega}{dt} \quad [\text{Nm}] \quad (3.1)$$

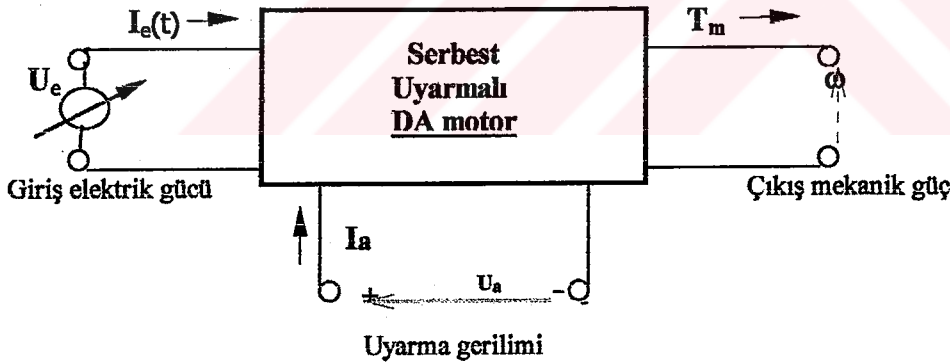
şeklindedir.

Laplace dönüşümleri, giriş ve çıkış büyüklükleri yardımıyla sistemin transfer fonksiyonunu bulma metodlarından birisidir. Analizler yardımıyla lineerleştirilen bir sistem fonksiyonu, zaman domeninde lineer bir diferansiyel denklem yardımıyla temsil edilir. Bu yüzden, geçici rejim analizinde sistem fonksiyonlarını tanımlamak üzere, da motor lineer fizikî bir sistem olarak kabul edilir. Buna göre, giriş ve çıkış büyüklükleri arasındaki bağıntılar tanımlanır.

Sistemde kontrol amacıyla YSA' nın kullanılıyor olması, yukarıda açıklanan etütleri zorunlu kılan analitik yaklaşımlardan uzak kalmayı sağlar.

3.2.1 Serbest uyarmalı da motor parametreleri

Tez çalışmasında kullanılan sistem modelinde da motor kontrol parametrelerini, U_e endüi alan uyarma gerilimi ile ω açısal hızı oluşturmaktadır. Yani, giriş büyüklüğünü $U_e(t)$, çıkış büyüklüğünü ise $\omega(t)$ açısal hızı oluşturur. U_e ; endüiye uygulanan gerilim, E_e ; endüide dönmeyle indüklenen zıt emk, I_e endüi akımıdır. DA motorda; $U_e > E_e$ dir.



Şekil 3.3 Serbest uyarmalı DA motor eşdeğer blok diyagramı

3.2.2 Döndürme momenti ve rotor hızı

DA motorun endüi ve alan iletkenlerine gerilim uygulanmasıyla, bu sargılardan geçen akım değerine bağlı olarak manyetik akılar oluşur. Biort-Sawart kuralına göre endüiye etkiyerek dönmesini sağlayan kuvvet değerini veren bağıntı Denklem 3.2' de verilmiştir.

$$F = B \cdot \ell \cdot I_a \quad [N] \quad (3.2)$$

sargısının ürettiği akı ile, aynı sargının amper-sarımları arasındaki mıknatıslanma eğrisini veren fonksiyon ifadesi;

$$\phi_d = f(N_d, I_d) \quad [\text{Wb}] \quad (3.3)$$

şeklinde olup, lineer olmayan bir karakteristik özelliğe sahiptir. DA motorun eşdeğer bağıntıları, mıknatıslanma eğrisinin lineer, kalıcı mıknatıslıyetin ise olmadığı kabulü, Histerezis ve Fuko kayıpları ile yardımcı kutup bobinlerinin oluşturduğu boyuna eksen akısı ihmal edilerek yazılmıştır. Yardımcı kutup bobinlerinin, enine eksen üzerinde bir alan oluşturduğu ve endüi alanını sadece fırçalar üzerinde yok ettiği kabul edilir. Endüi ile seri bağlı ve oluşturduğu alan enine eksen üzerinde endüi esas alanına zıt olan ve buna ait enine eksen bileşenlerini tesirsiz kılan kompanzasyon sargıları ise dikkate alınmayacaktır.

Momentin analitik ifadesi, enerji dönüşümünden yararlanılarak bulunur. Burada söz konusu olan elektro-manyetik moment (T_e), motorun miline bağlı yükü (T_y) döndüren moment değeridir. E_e endüide indüklenen emk değeri ters kutuplu hayali bir batarya olarak kabul edilebilir. Kutupların doyması nedeniyle oluşan endüi reaksiyonu emk' i (ΔE_e) ise ihmal edilecektir. U_e fırçalara uygulanan endüi giriş gerilimi, I_e şebekeden çekilen akım değeridir [1].

Motor çalışmada $U_e > E_e$ olduğundan, endüi eşdeğer devresi için gerilim bağıntısı;

$$U_e = E_e + R_e \cdot I_e, \quad E_e = k \cdot \phi_d \cdot n \quad [\text{V}] \quad (3.4)$$

şeklindedir. Her iki taraf, I_e ile çarpılarak genişletilirse;

$$\underbrace{U_e \cdot I_e}_1 = \underbrace{E_e \cdot I_e}_2 + \underbrace{R_e \cdot I_e^2}_3 \quad [\text{W}] \quad (3.5)$$

1; motorun şebekeden çektiği gücü, 2; motorun dönüştürdüğü güç değerini, 3; endüide oluşan Jule (bakır) kayıplarını ifade eder.

Uyarma devresi için gerilim bağıntısı ise;

$$U_a = R_a \cdot I_a \quad [\text{V}] \quad (3.6)$$

olarak tanımlanabilir. Burada; U_a : alan gerilimi, R_a : uyarma sargı direncidir. ω ; açısal

hız değeri olmak üzere, dönmeyi sağlayan elektro-manyetik moment;

$$T_e = \frac{E_e}{\omega} \cdot I_e \quad [\text{Nm}] \quad (3.7.a)$$

dir. Burada, $\omega = \frac{2\pi n}{60}$, E_e ifadesi açılarak yerine konulacak olursa;

$$T_e = k_m \cdot \phi_d \cdot I_e \quad [\text{Nm}] \quad (3.7.b)$$

$$k_m = \frac{Z \cdot p}{2\pi \cdot a} \quad (3.7.c)$$

moment sabitini ifade eder (Z : iletken, p : çift kutup, a : endüi çift paralel kol sayısı).

Denklem 3.7.b' den anlaşılacağı üzere, yüke bağlı moment değişimini sağlayan büyüklük I_e endüi akımının yanı sıra ϕ_d uyarma sargısının oluşturduğu alandır. Sürekli rejimde elektro-manyetik moment bağıntısının Denklem 3.8' deki eşitliği sağlaması gerekir;

$$\Sigma T_e = \Sigma \text{Direnç momenti}$$

veya,

$$T_e = T_Y + f \frac{d\omega}{dt} \quad (3.8)$$

DA motor açısal hızını veren bağıntı;

$$\omega \cong k_e \cdot E_e \cdot \phi_d^{-1} \quad [\text{rad/s}] \quad (3.9)$$

bağıntıda, $k_e = k_m^{-1}$ olup, sürekli rejimde etkisiz olan mil toplam atalet momenti (J) ve hızla orantılı olarak değişen viskoz sürtünme katsayısı (f) dikkate alınmamıştır.

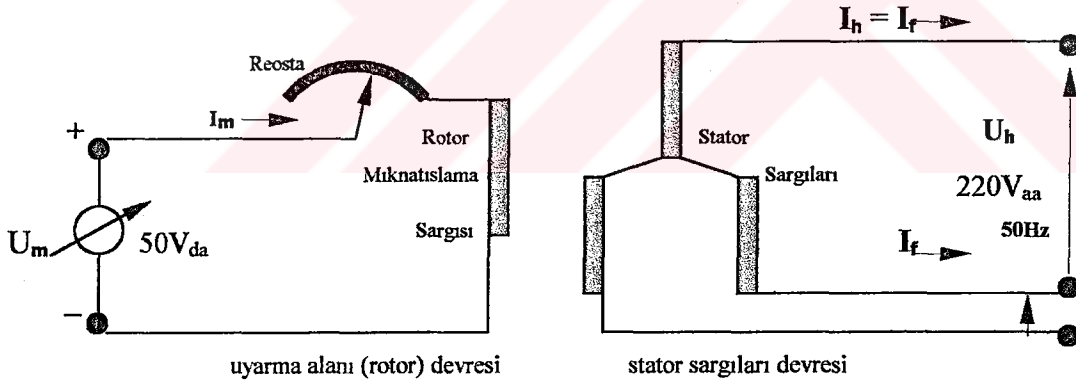
Denklem 3.9' dan anlaşılacağı üzere, motor açısal hızı ω , alan sargılarında oluşan manyetik alan ϕ_d ile ters orantılı olarak değişir. Bu yüzden, istenirse motor devir sayısı uyarma devresine yerleştirilen ayarlı direnç yardımıyla değiştirilebilir.

Alan sargısından geçen akım, dolayısıyla manyetik alan değeri değiştirilerek motor devir sayısı istenilen değerde tutulabilir.

3.2.3 Senkron Jeneratör (güç üretici)

Enerji üretim istasyonlarında çok büyük güçlü (milyar watt güç değerlerinde) üç fazlı senkron jeneratörler, baralar, enerji iletim hatları ve trafolar üzerinden tüketim merkezlerine bağlanır. Genellikle çok kutuplu olarak yapılırlar ve faz gerilimleri arasında 120° açı bulunur. EE' nin taşınmasında gerekli yüksek gerilimleri elde etmek için, güç transformatörleri kullanılır. SJ' in üretebileceği gerilim değeri, güç-akım parametrelerine bağlıdır. Buna karşılık, enterkonnekte bir şebekeyi beslemek üzere paralel çalıştırılan SJ' in ortak karakteristiği, çıkış frekanslarının eşit olmasıdır. Bir şebekeyi senkronize olarak beslemede, gerek şart olan bu frekans değeri çok önemli olup, enerji üretim sistemlerinin en önemli kontrol işlemini oluşturur.

Kontrol sistemimizde, 1.5kVA, üç faz 220Vac uç gerilimli senkron makine jeneratör olarak seçilmiştir. Ana çevirici motor tarafından çevrilen rotoru ve dışarıdan da bir kaynak tarafından sağlanan mıknatıslama akımı sayesinde, SJ' ün stator sargılarından 3 fazlı çıkış gerilimi elde edilir. Buna ait şema Şekil 3.4' de görülmektedir.



Şekil 3.4 Senkron jeneratör yapısı

3.3.1. SJ' in yapısı

Üç fazlı alternatif akım sargıları statora yerleştirilen güç jeneratörlerinin, rotorları elektromıknatıslı olup sabit bir hızla döndürülmesi gereklidir. Günümüzde, güç jeneratörleri 2000 MVA' i aşan güçlerde yapılabilmektedir. Statorda indüklenen gerilim değerleri ise 25-30kV' lar mertebesine ulaşmıştır [1].

Rotor yapılarına göre, yuvarlak kutuplu veya çıkık kutuplu SJ olarak adlandırılır. Rotor senkron hızlarını şu bağıntı belirler;

$$\omega_s = \frac{2\pi \cdot f}{p} \quad [\text{rad/s}] \quad (3.10)$$

burada; f: istenen uç gerilimi frekans değerini, p: rotordaki çift kutup sayısını ifade eder.

Kutup sayıları 2, 4, 6, ..., 72' ye kadar yapılabilmektedir. Senkron rotor hızları yüksek, bu yüzden rotor çapları küçük olan turbo-jeneratörlerin kutup sayıları az buna karşılık rotorları uzundur, bunlara yuvarlak rotorlu SJ de denir. Çıkık kutuplu SJ' in kutup sayıları fazla, rotor çapları büyük buna karşılık rotor uzunlukları kısa olup bunlara hidro-jeneratörler de denir. Çıkık kutuplu jeneratörlerde çevresel hız 80m/s' ye kadar, yuvarlak kutuplu jeneratörlerde bu değer 200m/s' ye kadar yükselir.

Rotor, doğru akımla beslenen ve mıknatıslama manyetik alanını oluşturan sargıları taşır. Statorda üç fazlı alternatif akım sargıları bulunduğundan, Fuko ve Histerezis kayıplarını azaltmak için stator 0,5 mm kalınlığında çelik saçlardan imal edilir. Çok büyük güçlerde ise manyetik akının geçtiği bölge saçlardan, dış kısımları ise dökme çelikten yapılır. Saçların birer yüzleri yalıtılarak preslenmiştir. İndüksiyon emk' nin değeri yükseldikçe stator olukları ağzı açık tipte yapılır. Rotor olukları ise dolaylı ve doğrudan soğutmalı tipte ve çok çeşitlidir.

Çıkık kutuplu SJ' de ise, da bobinlerini taşıyan kutuplar rotor gövdesine çeşitli konstrüksiyonlarla bağlanır. Büyük güçlü SJ' de, kutup başlarına açılmış oluklara, genelde dikdörtgen kesitli iletkenlerden yapılan kompanzasyon sargıları yerleştirilir. Bu iletkenler rotorun her iki tarafındaki, kutup tekerleği çevresinde bir halkayla kısa devre edilir. Bu sargı, dengesiz yüklerde oluşan ters döner alan bileşenini ve paralel çalışmada gerilim salınımlarını sönümler [1].

3.3.2. SJ' de indüksiyon emk' i

Hem Faraday hem de Biot-Sawart yasasına göre. SJ uç geriliminin indüklenmesinde

ve formunda hava aralığı akı yoğunluğu (B) birinci etkendir. Yani, çevre boyunca x eksenini üzerinde $B = f(x)$ şekli nasılsa, statorda indüklenen emk de aynı formdadır.

$$e = (\mathbf{v} \wedge \mathbf{B}) \cdot \mathbf{l} \quad [V] \quad (3.11)$$

burada; e : indüksiyon emk, v : döner alan hızını, l : iletken uzunluğunu, $\wedge$: manyetik iletkenliği ifade eder.

Çıkık kutuplu SJ' de hava aralığının her yerde aynı olmayıp, kutup ortasında küçük iki kutup arasında büyük olması indüksiyon alan şeklini sinüs formuna benzetir. Kutup başlarına uygun şekiller verilerek ve imalâta yönelik farklı teknikler kullanılarak bu alan şekli sinüs formuna daha da yaklaştırılır [26].

SJ endüi sargılarında manyetik kuplaj oluşması, ve bunun rotor konumuna bağlı olarak değişmesi nedeniyle, SJ matematik modeli Denklem 2.1 ve 2.2' deki gibi zamanla değişen katsayılı lineer olmayan diferansiyel denklemlerden oluşur. SJ' e ait rotor mıknatıslama sargısı ve stator faz sargılarına ait zamana göre değişimli matris denklemleri çıkartılarak, gerekli dönüşümler (park dönüşümleri) yapılır. Böylece, zamanla değişen bir sistemi oluşturan gerçek SJ yerine, katsayıları zamana bağlı olarak değişmeyen yani sabit katsayılı lineer denklemler biçimine dönüştürülmüş daha basit çözümlere elverişli bir makine modeli elde edilir [22].

Yapılan modellerde, sargı reaktansları özellikle dinamik analizler için gereklidir. SJ ün yüksek dereceli denklem ve durum modelleri de kullanılabilir. Bu modellerde, akı ve akımların da değişken olarak ilave edilmesi halinde durum değişkenlerinin sayısı artacaktır [3][5][6].

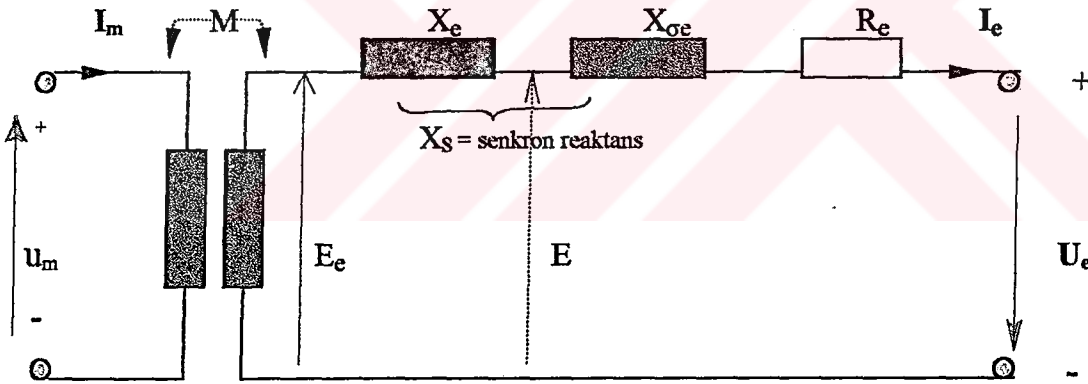
SJ' de kutup tekerleği de denilen rotor oluklarına yerleştirilmiş olan sargılar, da akımla beslenir. Rotor, senkron hızla bir tahrik makinesi ile döndürülür. DA akımla beslenen rotor bobinlerinin senkron hızla döndürülmeleri sonucu, bir döner alan meydana gelir. Bu alan ise, stator sargılarında alternatif gerilimlerin indüklenmesine neden olur. Bu indüklenen alternatif gerilimlerin frekansı, denk. 3.7.b' den;

$$f = \frac{1}{2\pi} \cdot \omega_s \quad [Hz] \quad (3.12)$$

şeklinde bulunur. Ülkemizde ve pek çok Avrupa ülkesinde standart frekans değeri 50Hz' dir. 3 fazlı aa gerilimin üretildiği sargılar stator oluklarına aralarında elektriksel olarak 120° açılı (γ_{elk}) farkı olacak şekilde yerleştirilirler.

SJ' de kutup tekerleği döner alanı, stator döner alanını beraberinde sürükler. Yani kutup tekerleği döner alanı, stator döner alanından ileridedir. Bu iki döner alan arasındaki açı, makinenin etkin gücüne bağlıdır. SJ' ün verdiği elektrik gücü, tüketici tarafından zorlanırsa açı en büyük değerine kadar artar. Tahrik makinesi, SJ' ün yükü arttıkça daha çok zorlanır, yani açı büyür. Yük aşırı artacak olursa, SJ senkronizmadan çıkarak açısal hızı senkron üstü yüksek değerlere ulaşır ve enerji üretiminden kopar.

SJ' de, kutup tekerleği alanı ile stator alanının oluşturduğu bileşke alan etkindir [1]. SJ eşdeğer devresinde, I_m ; mıknatıslama ve I_f ; bir faza ait stator akımını, X_e ; endüi reaktansını ve X_{oe} ; endüi kaçak reaktansını, R_e ; endüi omik direncini, E_g rotor döner alanının statorda indüklediği, E ; bileşke emk' i ifade eder.



Şekil 3.5 Bir senkron jeneratör eşdeğer devresi.

3.3.3 SJ uç geriliminin değişimi

Rotor bobinleri da akımla beslenen ve tahrik makinesi tarafından ω_s senkron açısal hızıyla döndürülen SJ' ün bir fazı için uç gerilimi bağıntısı;

$$U_e = E_e - I_e \cdot (R_e + jX_S) \cong E_e - jI_e \cdot X_S \quad (3.13.)$$

şeklinde olur. Şekil 3.7' de U_e fazörü y ekseninde referans olarak alınmıştır. $J I_e X_s$ gerilimi I akımından 90° ileride olduğundan, E_e iç gerilim değeri U_f ve $J I_e X_s$ gerilimlerinin fazörel toplamına eşittir. E_e ile U_e büyüklükleri arasındaki θ açısı değeri, rotor mıknatıslama akısı Ψ_{rot} ile hava aralığı manyetik akısı Ψ_s arasındaki açığa eşittir. Ψ_s stator iletkenlerinde indüksiyon emk' ini oluşturan akı değeridir.

Kutup tekerleği mmk' nin, stator sargılarında indüklendiği E_e emk' nin SJ uçlarına taşıdığı U_e gerilimi ile statordan çekilen akım I_e arasındaki açı, omik yük halinde; $\alpha = 0$ indüktif ve kapasitif yüklerde ise $\alpha \neq 0$ olur.

Kapasitif yük halinde, I_e akım fazörü U_e uç geriliminden α açısı kadar ilerdedir. SJ ün kapasitif bir yükü beslemesi, yani şebekeye kapasitif akım vermesi durumunda stator alanı mıknatıslama alanını desteklediğinden, uç gerilim değeri U_e , iç gerilim değerinden daha büyük olur.

İndüktif yük durumunda, yani SJ' den indüktif akım çekilmesi halinde, şebeke tarafından çekilen I_e akımı, stator iletkenlerinde indüklenen E_e emk den geri fazda olduğu için uç gerilimi U_e ' nin değeri E_e dan oldukça küçük olur. Yani, SJ' ün indüktif akım vermesi durumunda stator alanının mıknatıslama alanını zayıflatma miktarı artar. Saf indüktif yük durumunda stator alanının mıknatıslama alanını zayıflatması maksimumdur.

SJ' de stator alanın, mıknatıslama alanı üzerine olumsuz etkisine endüi reaksiyonu denir. Bunların işletmedeki belirtileri şu şekilde özetlenebilir.

1- Tek başına çalışan SJ' de, uyarma akımı sabit olmak şartıyla;

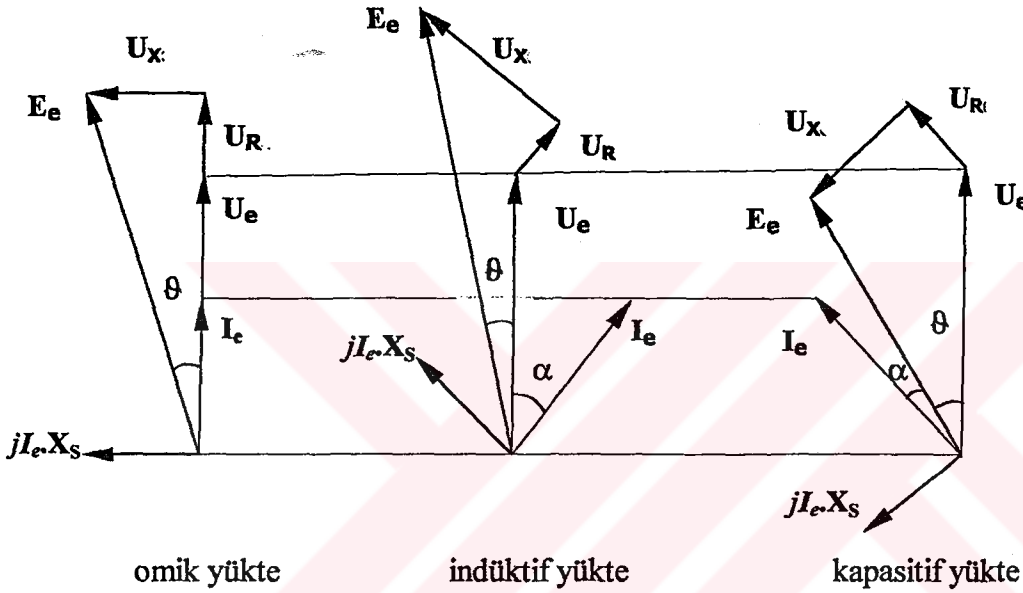
- a) Omik yükte, hafif bir gerilim dönüşümü olur.
- b) Kapasitif yükte, uç gerilimi yükseltir.
- c) İndüktif yükte, uç gerilimi kuvvetli olarak düşer.

2- SJ sabit bir şebeke ile paralel çalışıyorsa;

Bu durumda indüklenen U_e uç geriliminin sabit olması gerekir. Bu amaçla, değişken yük durumlarına göre SJ' ün şebekeye omik, indüktif ve kapasitif akım verecek

şekilde mıknatıslama akımının sürekli olarak ayarlanması gerekir. Yani, SJ şebeke talep gücüne bağlı olarak omik, indüktif ve kapasitif çalışmaya geçer.

Çıkık kutuplu SJ' de hava ağırlığı her yerde aynı olmadığı için, hava aralığı manyetik direnci (relüktans) değişir. Bu nedenle hesaplama ve fazör diyagramında iki bileşene ihtiyaç duyulur. Gerilim, akım, direnç, güç gibi elektrik büyüklüklerinin per-unit değerler cinsinden ifade edilmesi sayesinde, ifade edilen büyüklüklerle çeşitli makineler rahatlıkla birbirleriyle karşılaştırılabilmektedir.



Şekil 3.6 Yük güç katsayısının SJ uç gerilimine etkisi ($P = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos \alpha = \text{sabit}$).

DA motorunkine benzer şekilde, mıknatıslanma akımındaki değişimler, SJ' ün çıkış karakteristiğini etkiler. Ana çevirici motorun devir hızı, aynı zamanda jeneratörün rotor devir sayısı olduğundan doğrudan çıkış frekansını belirler. Ayrıca, da uyarma alan akımı I_m de, SJ' ün ürettiği gerilim değerini doğrudan etkiler. Sargı kayıplarına ait küçük fark dikkate alınmaksızın, stator sargılarında indüklenen gerilim bağıntısı;

$$E_e = \frac{\omega_s \cdot N_f}{\sqrt{2}} \cdot \phi_{\text{mak}} \quad [\text{V}] \quad (3.14)$$

veya,

$$E_e = \frac{\omega_s \cdot M}{\sqrt{2}} \cdot I_m \quad [\text{V}] \quad (3.15)$$

şeklindedir. Burada; E_e ; bir faza ait stator sargılarında üretilen emk, N_f ; bir faz sarım

sayısı, ϕ_{mak} ; faydalı akı, I_m ; mıknatıslama akımını, M ; rotor sargısı ile bir faz stator sargısı arasındaki karşılıklı indüktans değerini, ω_s ; ise senkron açısal hızı ifade eder.

3.4 YSA Kontrolör Algoritması

Kontrolör sistemin kalbi konumundadır. Jeneratörün giriş/çıkış parametrelerine bağlı olarak gerekli kararları alır. Şekil 3.1' de görüldüğü üzere, jeneratör çıkışı ölçme devreleri ve analog-dijital dönüştürücüler (ADC) üzerinden bilgisayara girilir, jeneratör parametreleri ise dijital-analog dönüştürücü (DAC) ve kontrol devreleri üzerinden kontrol edilir (Bkz. EK-A, B). Görüleceği üzere YSA algoritmik bir program olup (Bkz. EK-D), görevi SJ çıkışını 50Hz ve 220V_{ac} gerilim değerinde tutmaktır.

Dikkat edilecek husus, sistemin tek başına ayakta durmasıdır. Bu nedenle, YSA sistem çıkışının bir parçasıymış gibi davranır. Sabit bir şebeke tarafından etkilenmesi söz konusu olmayan YSA kontrolör, herhangi bir yük değişimi halinde hem çıkış frekansı, hem de uç gerilimi değişeceğinden fazlasıyla etkilenir.

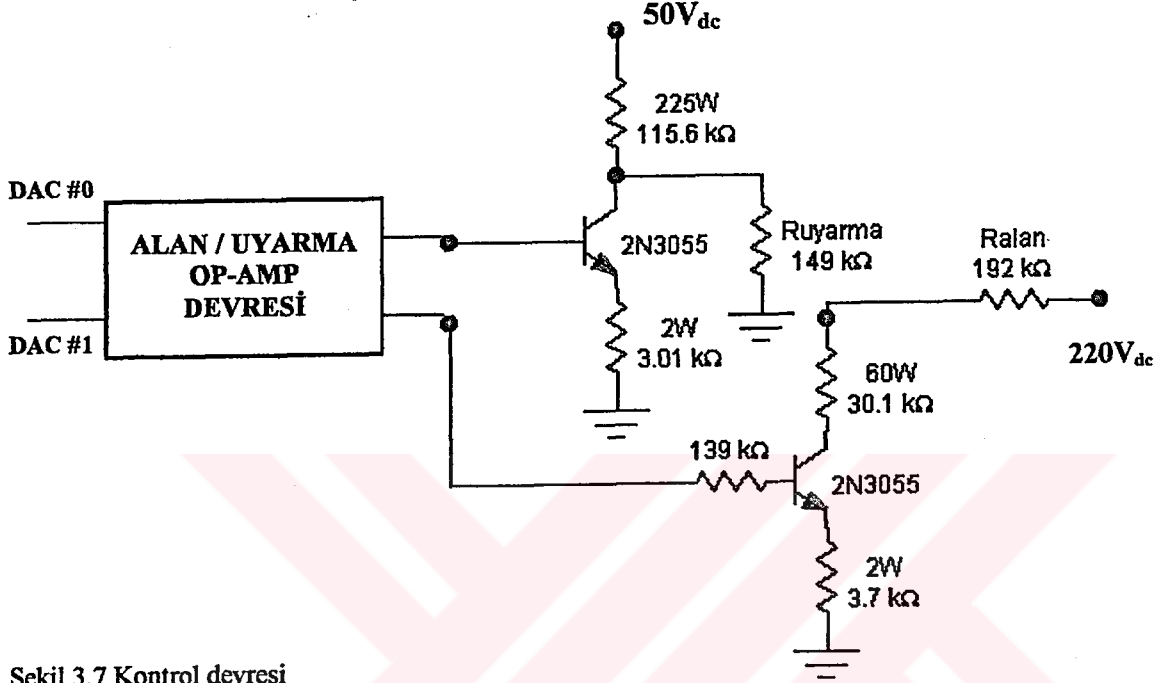
Bu yüzden YSA, jeneratörün mıknatıslama gerilimini ve da motorun giriş gücünü değiştirerek, SJ çıkışını mümkün olduğunca istenilen değerinde tutmaya çalışır.

3.5 Kontrol Devresi

DA motor – SJ çiftinin kontrolü, YSA tabanlı bir algoritmanın denetlediği elektronik devreler yardımıyla gerçekleştirilebilir. Bunlar, SJ çıkışından alınan sinyalleri YSA na ve YSA' dan elde edilen kontrol sinyallerini de uyarma alan sargılarına taşıyan ara devrelerden meydana gelir.

SJ çıkış gerilim ve frekans değerlerinin kontrolünde, SJ mıknatıslama ve da motor endüi sargıları kullanıldığı için, bunları besleyen elektronik devrelerin yeteri kadar yüksek akım ve güç değerlerini taşıyabilecek kapasitede olmasına dikkat edilmelidir.

Ayrıca, uzun süreli çalışma periyotlarında lineer olmayan değişimlerinden etkilenmemek için, iyi bir ısı dağılım karakteristiği gösteren elemanlar seçilmelidir. ADC giriş gerilimi, 0-5V_{dc} arası olduğu için, jeneratör çıkış geriliminin bir transformatör yardımıyla bilgisayarda kullanılabilecek bir değere düşürülmesi gerekir.



Şekil 3.7 Kontrol devresi

Şekil 3.2' de görülen 0 ~ 220 V_{dc} ayarlı kaynağın yerini, kontrol devresinde basit bir NPN tipi transistor almıştır. Transistor kolektör akımı, base gerilim değeriyle lineer olarak değişen base akımı yardımıyla hassas olarak kontrol edilebilir. Bunu veren bağıntı;

$$I_{\text{kolektör}} = \beta \cdot I_{\text{base}} \quad (3.16)$$

şeklindedir.

β transistor kazancının değeri ise, sıcaklığın bir fonksiyonu olarak değişebileceğinden, uygun bir ısı soğurucunun belirli sürelerle devreye girmesi yararlı olacaktır. Kuşkusuz, gerçek transistor kazancından tamamen bağımsız ve daha etkin olan değişik akım kontrol devreleri tasarlanabilir.

Base gerilimi, dolayısıyla base akımı EK-B' de şekli verilen op-amp devresi ve DAC#1 yardımıyla değiştirilir. Eğer, DAC#1' de bir gerilim artışına bağlı olarak transistor akımı (Şekil 3.2' deki I_e endüi akımı) artırılsa, bununla orantılı olarak ana

çeviricinin giriş gücü de artacaktır. DAC#1 çıkış geriliminin azalması ise, tersi bir duruma neden olur (Bkz. denklem 3.8).

Böylece ilk tahrikte, base akımı minimumdan başlayarak yükseltilmeli, rotor hızı arttıkça kararlı hal değerine erişilmelidir. Rotor hızının kontrolü amacıyla, kolektör akımı pozitif ve negatif yönde değiştirilmelidir.

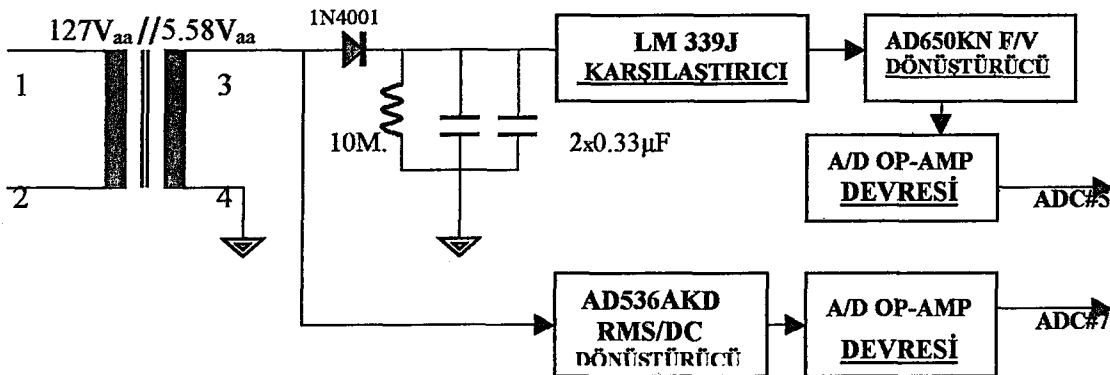
SJ rotor manyetik alanı için de, benzer bir NPN transistor devresi yukarıda açıklanan şekliyle kullanılmıştır. Tek farkı, kolektör gerilim değerini 20-50 V_{dc} arasında kontrol için DAC#0' ın kullanılmasıdır.

Şekil 3.7' deki bu devre ise, Şekil 3.4' de görülen reosta ile yer değiştirebilir. DAC#0 ın çıkışı artırılmak suretiyle transistor akımı artırılır, bu ise kolektör gerilim değerini düşüreceğinden sonuçta jeneratör çıkış gerilimi azaltılmış olur (Bkz. Denklem 3.15).

3.6 Ölçme Devresi

ADC' ye (0-5V_{da}) istenilen giriş değerlerini sağlamak için, alternatör çıkış gerilimi olan 220V_h, 5.58V_{etk} değerine bir transformatör yardımıyla düşürülür. Gerilim ölçüm devresi için, transformatör çıkış gerilimi RMS/DC dönüştürücüye uygulanır ve çıkışı bir op-amp devresinden geçirilerek istenilen değere ayarlanır (Bkz. EK-A).

Böylece, $220 \pm 10/\sqrt{3} V_{aa}$ değerindeki jeneratör uç gerilimi, bilgisayara girişte kullanılan 0.172 - 4.816 V_{da}' ye dönüştürülmüş olur. Şekil 3.8' de buna ait ölçme devresi diyagramı görülmektedir [25].



Şekil 3.8 Ölçme devresi blok diyagramı

Frekans ölçüm devresi için, transformatör çıkış gerilimi doğrultularak filtre edilir ve bir karşılaştırıcı (comparator) yardımıyla aynı frekansta bir kare-puls jeneratör çıkışı olarak elde edilir. Bu kare-puls, gerilim dönüştürücüye bir frekans olarak uygulanır ve dönüştürücünün DA çıkış gerilimi, bir op-amp devresi yardımıyla bilgisayar girişine uygun hale getirilir (Bkz. EK-A). Böylece, 40-55 Hz aralığındaki jeneratör frekansı ölçme devresi yardımıyla bilgisayar girişi için gerekli olan $0.172 - 4.816V_{dc}$ ye dönüştürülmüş olur.



BÖLÜM 4. YAPAY SİNİR AĞLARI

4.1 Yapay Sinir Ağları (YSA)

Yapay Sinir Ağları (YSA), insan beynindeki çalışma sisteminin yapay olarak benzetimi çalışmalarının bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır. Genel anlamda YSA, beyin fizyolojik yapısında varolan bir çok nöronun (sinir hücresi) model işlemciler yoluyla ve bunların birbirine değişik etki seviyelerinde bağlanmasıyla oluşturulan karmaşık bir sistem olarak düşünebilir. Günümüzde YSA, sınıflandırma, kontrol, işaret işleme ve arıza teşhisi gibi endüstrinin bir çok alanında başarıyla uygulanabilir hale gelmiştir. Bunun en önemli nedeni, klasik tekniklerle çözümü zor olan lineer olmayan karmaşık problemler için etkin bir alternatif oluşturmasıdır.

4.2 YSA' nın Tarihi Gelişimi

YSA teknolojisi, canlı sistemlerin biyolojik yapılarından esinlenen ve bunların fonksiyonlarını benzer şekilde gerçeklemeye dayalı hesaplama tabanında bir modelleme sistemidir. Bu sistem, adapte olabilme, paralel işleme koyma, hata toleransı, kompleks modelleme ve kontrolü içine alır [27][28].

YSA' nın temeli, Mc. Culloch tarafından 1943' de yayınlanan bir makaleye dayandırılır [29]. Bu makalede basit sinir ağlarının, hesaplama yeteneği tanımlanmıştır. 1949'da Hebb ilk defa deneye dayalı, klasik-fizyolojik şartları kullanarak, sinir sinaps (bir hücrenin girişi ile diğer bir hücrenin çıkışı birleştiren nokta) larını ayarlama yoluyla öğrenme kuralını açıklamış, 1950' lerde ise Rosenblatt örnek tanımlamaya yönelik bir nörocomputer uygulamasını ilk kez başarmıştır [30].

Bununla birlikte 1980'lerde Hopfield ve Rumelhart gibi araştırmacılar tarafından geliştirilen öğrenme algoritmasının ortaya konmasına kadar, YSA' nın kullanımı

yaygınlaşmamıştır [31][32]. Bu alandaki ilgi sürecine bağlı olarak, başarılı uygulamalar ve parlama görülmüş ve literatürlere konu edilmiştir [33].

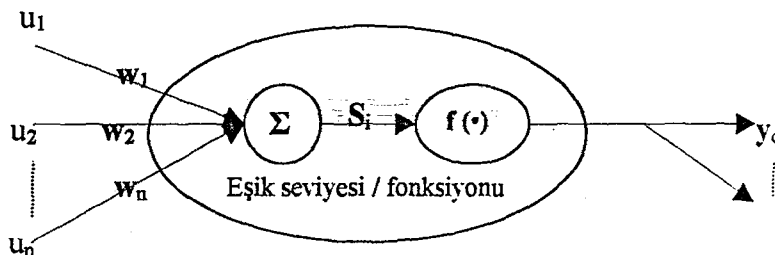
Yakın geçmişte, sistem tanımlama ve kontrol alanında çalışan araştırmacılar, lineer olmayan dinamik sistemlerin tanımlanması ve kontrolü için, bu teknolojiyi kullanmaya başlamışlardır [34][35]. Tanımlama ve kontrol alanlarındaki YSA uygulamaları, canlı biyolojisindeki genel özellikleri gibi zincirleme bir gelişme oluşturmuştur. Fonksiyonel biyolojik sistemin adaptif ve güçlü motor kontrolü, teknolojik kopyalarında da uygun uyarlamalar yoluyla geliştirilmeye çalışılmaktadır.

Günümüz teknolojisiyle, paralel işlem yapabilen çok büyük boyutlu entegre devrelerin yapılabilir olması, YSA' nı endüstrinin bir çok alanında uygulanabilir hale getirmiştir [36]. Günümüzde nöro-chip' ler üzerindeki çalışmalar hızlı bir şekilde sürdürülmektedir. Bu gelişmelere paralel olarak, lineer olmayan dinamik sistemlerin eş-zamanlı kontrollerinin kolaylıkla gerçekleştirilmeleri mümkün olacaktır.

4.3 YSA' nın Tanımı ve Modeli

YSA' nın insan beyninin çalışmasına benzeyen iki temel özelliği; paralel çalışabilmesi ve öğrenebilmesidir. Beynin temel işlem birimi olan her bir nöron, çevresindeki yaklaşık 10000 nöronla bağıntılı olarak çalışır [37].

Yapay nöron modeli, biyolojik örneğinin karakteristiklerini gerçekleştirmek üzere tasarlanmıştır. Bu nörona uygulanan her bir giriş, diğer nöronların çıkışlarıdır. Sinaptik dayanımı temsil etmek üzere, her bir nöron girişi bir ağırlık (w) değeriyle çarpılır. Bu şekilde girişler, nöron eşik seviyesini belirlemek üzere bir toplama noktasında birleştirilir [38]. Buna ait bir model Şekil 4.1' de görülmüyor.



Şekil 4.1 Basit bir işlemci (nöron) yapısı

Bu model, YSA için genel nöron modelidir. $u_1, u_2, \dots, u_n$ nöron girişleri, $w_1, w_2, \dots, w_n$ her bir girişe ait ağırlık çarpanlarıdır. Toplam girişler U , ağırlıklar da W vektörü ile temsil edilirse, fonksiyon girişi S_i bağıntısı;

$$S_i = u_1 \cdot w_1 + u_2 \cdot w_2 + \dots + u_n \cdot w_n$$

$$= \sum_{j=1}^n u_j \cdot w_j \quad (4.1)$$

$$S_i = U \cdot W \quad (4.2)$$

şeklindedir.

4.4 YSA' nın Özellikleri

YSA eğitime-öğrenme fazından sonra, bağıl doğruluk oranı içerisinde karar verebilme yeteneği kazanır. Buradaki öğrenme, ağırlık aynı veya benzeri işlemlerle karşılaştığında, onu eğitime fazından daha etkin ve verimli olarak gerçekleştirebilecek bir potansiyele erişmesi olarak tanımlanır. Buna göre YSA bir bilgi işleme metodu olup, birbirine paralel bağlı işlemci birimlerinden (nöronlardan) ve bunların hiyerarşik organizasyonundan meydana gelir [39]. YSA, lineer olmayan sistemlerin modellenmesi ve kontrolünde büyük kolaylıklar sağlar.

YSA lineer olmayan yapıları gereği, karmaşık problemlerin çözümünde lineer tekniklerden daha doğru sonuç verirler. Analitik çözümün zor olduğu lineer olmayan fonksiyonlar, YSA ile çok daha kolay hissedilip, algılanabilir ve öğrenilebilir. Paralellığe sahip yapıları gereği YSA, birbirinden bağımsız işlemleri aynı anda ve çok hızlı olarak yürütebilirler. Paralel kontrol ekipmanları, alternatiflerine göre YSA' na daha bir uygunluk arz ederler [40].

4.4.1 Paralellik ve hata toleransı

Beyin biyolojik yapısında olduğu gibi, YSA da paralel bir yapıya sahiptir. Yani ağa gelen girişler, diğer katmanlar boyunca paralel olarak işlenir. Aynı katmandaki nöronlar arasında zaman bağımlılığı, yani ardışık seri işlemlere mecbur kalınmadığından işlem hızı artmaktadır [41].

YSA, giriş bilgisini ağ içindeki her bir nöronun sahip olduğu yerel belleğe dağıtır. Nöronlar arası bağlantı ağırlıkları, ağın o andaki bilgi durumunu temsil eder ve ağın bu şekilde bilgiyi saklaması en önemli özelliğinden birini oluşturur. Bu şekildeki yapıları gereği YSA, eksik veya gürültülü giriş değerlerinde bile mantıklı çıkış üretir. YSA tam doğru olmayan eğitime kümesinden, tam doğruyu bulabilir. Yani, ağ eğitime işleminin özünü bulup saklamaktadır. YSA, bünyesinde bulunan her bir işlem elemanı diğer nöronlarda yapılan işlemlerden bağımsız ve kendi kendine yeterli olduğundan hata toleranslı olarak çalışır. Herhangi bir işlem elemanının zarar görmesi halinde, YSA performansında düşme gözlenebilir de fonksiyonel çalışmasını sürdürür. Bu bilginin yerel belleklere dağıtılmasının bir sonucudur. Oysa, klasik sistemlerde seri işlem elemanlarından birisinin fonksiyonu yitirmesi halinde komple sistem çöker [42].

4.4.2 Öğrenebilirlik ve adaptasyon

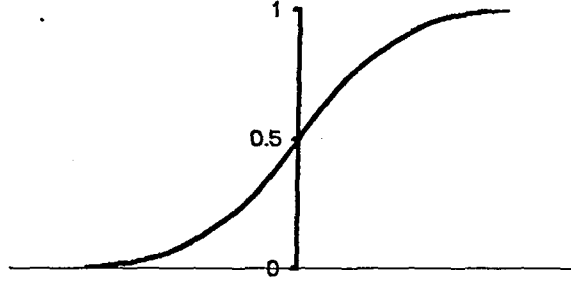
YSA çok karmaşık fonksiyonları, basit işlemlerle gerçekleştirir. Her bir nöron, çözülecek problemin sadece bir kısmıyla ilgilenir. Bunlar çok basit işlemler olmasına rağmen, görev paylaşımı nedeniyle çok zor ve karmaşık problemler bile kolaylıkla çözümlenir [43].

YSA, bir sistemin normal çalışmasından elde edilen verilerle eğitildiğinden, ağ sistemin normal çalışmasını öğrenir. Bu eğitime-öğrenme safhasından sonra YSA, bu aşamada verilmeyen giriş değerlerine de uygun cevaplar vermektedir. YSA' da öğrenme ağırlıklarla (w) gerçekleştirilir. Bir çok girişten, uygun çıkışlar üretebilme özelliğinden dolayı, YSA çok değişkenli sistemlere kolaylıkla uygulanabilir [44][45].

4.4.3 Eşik (transfer/aktivasyon) fonksiyonu

Bu fonksiyona, yapay bir nöronun lineer olmayan kazancı olarak bakılabilir. Bu kazanç değeri, S_i deki küçük değişimin y_o ' da oluşturduğu değişiklik miktarından hesaplanır [38]. Bu değer, eğrinin özel bir uyarım noktasındaki eğimini verir. Nöron

modelini, eşik değeri ve kullanılan lineer olmayan fonksiyonun türü belirler. Yaygın kullanımdaki eşik fonksiyonları rampa, basamak ve sigmoid fonksiyonlardır. Bu çalışmada, kontrol amaçlı uygulamalara elverişliliği nedeniyle sigmoid fonksiyon seçilmiştir. Şekil 4.2' de sigmoid fonksiyon eğrisi görülüyor.



Şekil 4.2 Sigmoid fonksiyon eğrisi

Grossberg, bir ağın küçük ve büyük sinyalleri birlikte işleyebilme yeteneğinin, eşik fonksiyonunun lineer olmayan bu karakteristiği ile açıklanabileceğini ifade etmiştir [38]. Eşik fonksiyonu, ortasında bulunan yüksek kazanç bölgesi ile küçük sinyalleri, uçlarında bulunan düşük kazançlı bölgeler ile de büyük sinyalleri işlediğinden, bir YSA geniş giriş yelpazesindeki sinyalleri, kazanç uydurma yoluyla işleyebilir.

YSA' nın giriş verileri ikili sistemde veya sürekli (analog) değerler olabilir. Analog girişlerde, değerler normalize edilmelidir.

4.5 YSA Modelleri

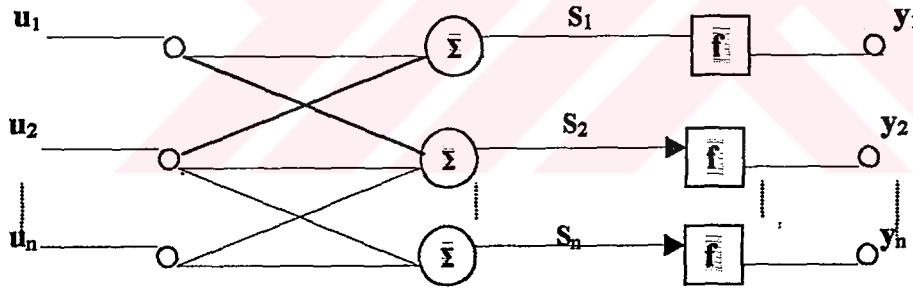
YSA modellerinin geliştirilmesinde beyin sinir sisteminin biyolojik yapısından ve mühendisliğin imkanlarından yararlanılmaktadır. Yaygın kullanımdaki YSA modelleri Perceptron, Madaline, Hopfield ve Geri Yayınım ağı olarak sıralanabilir. Genel olarak, adaptif ve otomatik kontrol alanında geniş bir uygulama alanı bulan ağ modeli, ileri beslemeli (feed forward) ve çıkış hatası geri yayınlı (back propagation) olanıdır. İleri beslemeli YSA örüntü tanıma (pattern recognition), geri yayınlı YSA ise daha çok kontrol-optimizasyon problemlerinde kullanılmaktadır.

İleri beslemeli YSA' da her bir katmandaki (layer) nöron, bir önceki nöron çıkışını giriş olarak aldığından sinyal girişten çıkışa doğru tek yönlü olarak iletilir [38].

Geri yayılım ağı ise, çok katmanlı YSA' lar için sistematik bir metod olup, güçlü bir matematik yapıya sahiptir. Geriye yayılım ağı, karesi alınmış çıkış hata fonksiyonunu minimize eden kodlu bir algoritma olup, çok katmanlı ağa göre uyarlanmış olan genelleştirilmiş delta kuralını eğitime amaçlı kullanır. Geri yayılım ağında eğitime şu üç aşamada gerçekleştirilir;

- i. giriş eğitime örneklerinin ileri yayılması
- ii. hesaplama ve ilgili hataların geriye yayılımı ve
- iii. ağırlıkların ayarlanması.

Eğitime işleminden sonra, sadece ileri besleme fazı kullanılır. Eğitime işlemi yavaş olsa da, eğitilmiş ağın işlem hızı çok yüksektir. Genelde bir gizli katman yeterli olmaktadır. Eğitime işlemi, bağıl olarak kolay olan çıkış katmanı eğitiminden elde edilen hata işaretlerinin iç katmanlara doğru yayılımı sağlanarak yürütülür [46].



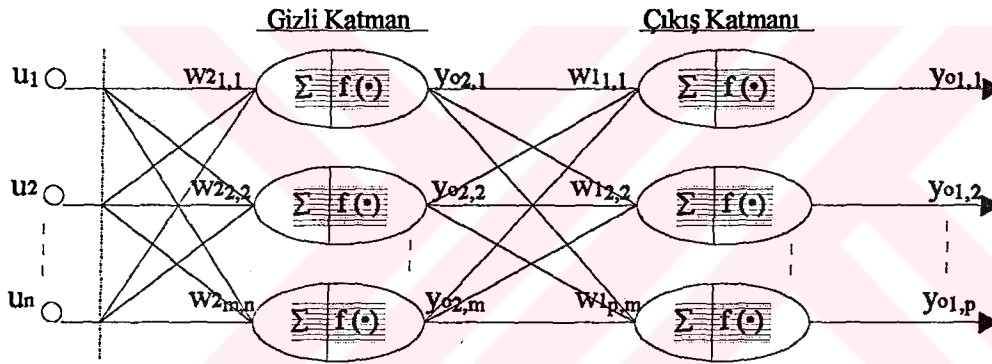
Şekil 4.3 Bir YSA katmanı

4.5.1 Perceptron (İdrak-almaç)

En basit YSA modeli olup, giriş bilgisinin mevcut iki sınıftan hangisine eşit olabileceğini bulacak şekilde eğitilen bir perceptron yapısıdır. Üç veya daha fazla sınıfa ihtiyaç duyulan problemleri çözememesi nedeniyle, YSA' na yeni katmanların eklenmesine ihtiyaç duyuldu. Tek katmanlı perceptron uygulamalarında, her bir eğitim seti modelinin en önemli özelliği lineer biçimde dağılmak zorunda olmasıdır.

4.5.2 Çok katmanlı perceptron

Tek katmanlı perceptron yapısı, basit sistem tanımlamalarında başarıyla kullanılabilmesine rağmen lineer olmayan karmaşık sistemlerde yetersiz kalmıştır. Bu amaçla geliştirilen, çok katmanlı ardışık perceptron yapılarının, uygun ağırlıklarla desteklenerek birleştirildiğinde gayet iyi performans sergiledikleri görülmüştür. Yaygın olarak kullanılan geri yayılım algoritması, Rumelhart ve Parker gibi araştırmacılar tarafından 1985 yılında geliştirilmiştir. Çok Katmanlı sinir ağının, geri yayılım veya benzeri algoritmalar yardımıyla lineer olmayan karmaşık bir fonksiyonu yüksek bağıl doğruluk oranlarında öğrenebildiği görülmüştür [47]. Çok katmanlı ileri beslemeli bir YSA, sistem tanımlama ve kontrol problemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Çok katmanlı bir perceptron örneği Şekil 4.4' de verilmiştir.;



Şekil 4.4 Çok katmanlı bir YSA yapısı

Şekil 4.4' deki YSA' ın geri yayılım algoritması ile eğitiminde izlenecek aşamalar şu şekildedir;

- Ağırlık ve eşik değerleri olarak başlangıçta, rasgele değerler atanır.
- Giriş $[u = (u_1, u_2, \dots, u_n)]$ ve istenilen çıkış değerleri $[y_{oi} = (y_{oi1}, y_{oi2}, \dots, y_{oin})]$ ağa uygulanır.
- Gerçek çıkış değerleri hesaplanır.
- Çıkış katmanından itibaren hata değerleri göz önüne alınarak ağırlıklar düzeltilir.

Bu işlem basamaklarına ait bağıntılar şu şekildedir;

$$y_{o2j} = f_j \left[\sum u_i \cdot w_{2ji} \right] , j = 1, 2, \dots, m \quad (4.3)$$

$$y_{o1k} = f_k \left[\sum y_{o2j} \cdot w_{1kj} \right] , k = 1, 2, \dots, p \quad (4.4)$$

$$\delta_{1k} = (y_{oi1k} - y_{o1k}) \cdot (1 - y_{o1k}) \cdot y_{o1k} \quad (4.5.a)$$

$$\Delta w_{1kj} = \eta \cdot \delta_{1k} \cdot y_{o2j} \quad (4.5.b)$$

$$w_{1kj}(t+1) = w_{1kj}(t) + \Delta w_{1kj} \quad (4.5.c)$$

Aynı adaptasyon işlemi, gizli katmanlar için de tekrarlanırsa;

$$\Delta w_{2ji} = \eta \cdot \left[\sum \delta_{1k} \cdot w_{1kj} \right] \cdot (1 - y_{o2j}) \cdot y_{o2j} \cdot u_i \quad (4.6)$$

$$w_{2ji}(t+1) = w_{2ji}(t) + \Delta w_{2ji} \quad (4.7)$$

elde edilir. Burada; t iterasyon sayısı, η öğrenme katsayısı olup, küçük değerde sabit bir sayıdır ($0 \leq \eta \leq 1$).

4.6 Geri Yayınım Yoluyla Öğrenme

Çok katmanlı YSA' nı, teorik olarak destekleyen ağırlık adaptasyon algoritmasının olmaması nedeniyle, geri yayılım algoritması YSA' nın gelişimi üzerinde etkili olmuştur. Bu algoritma, Werbos, Parkers ve Rumelhart gibi araştırmacıların yaptıkları bağımsız çalışmalarda ortaya konulmuştur [48].

Bir YSA' ın eğitiminden amaç, özel bir fonksiyon için bir giriş setine vereceği istenilen çıkışları elde etmek üzere ağırlıkların ayarlanmasıdır. Eğitim fazı için, giriş vektörü ve istenilen çıkış vektörüne ait bir eğitim çiftleri kümesi oluşturulur. Geri yayılım ağındaki öğrenme, şu üç basamaktan oluşur;

- Kümeden bir sonraki eğitim çiftleri seçilir ve ağa giriş vektörü olarak uygulanır.
- Ağ çıkışı bulunur ve bu değer ile hedef vektör arasındaki hata hesaplanır.
- Hata değeri azaltılacak yönde, ağ ağırlıkları değiştirilir.

Bu işlemler, YSA arzu edilen bağıl doğruluk değerine erişinceye kadar tekrarlanır. Bu işlem sonucu ağ, hedef modellemeyi öğrenmiş olur. Bu aşamada elde edilen ağırlık değerleri, sabitlenerek kaydedilir. YSA, işlem fazında bu ağırlık değerlerini kullanır.

4.7 Eğitim Algoritması

Aşağıda tanımlanan bağlantılarda, Şekil 4.3' deki semboller kullanılmıştır. Basit bir nöron tanımından yola çıkarak, çok katmanlı ileri beslemeli YSA ile, geri yayılım algoritması detaylarıyla açıklanacaktır. Her bir katmandaki çıkışlar ayrı ayrı incelenirse, gizli katman için;

$$s_{2j} = \sum_{i=1}^n u_i \cdot w_{2ji} \quad (4.1)$$

$$y_{o2j} = f_j [s_{2j}] \quad , j = 1, 2, \dots, m \quad (4.8)$$

Çıkış katmanı ise;

$$s_{1k} = \sum_{j=1}^m y_{o2j} \cdot w_{1kj}$$

$$y_{o1k} = f_k [s_{1k}] \quad , k = 1, 2, \dots, p \quad (4.9)$$

4.3, 4.4, 4.8 ve 4.9' daki bağıntılarda kullanılan $f(s_i)$ eşik fonksiyonu sigmoid bir fonksiyon olup, denklemi şöyledir;

$$f(s_i) = \frac{1}{1 + e^{-s_i}} \quad (4.10)$$

4.7.1 Çıkış katmanı öğrenmesi

Ağırlıkların diferansiyel artış değerleri, bir referans ağırlık değerine göre mevcut hatanın gradyanı hesaplanarak bulunur.

$$\Delta w_{1kj} = -\eta \cdot \frac{\partial e}{\partial w_{1k,j}} \quad (4.11)$$

Diferansiyeldeki zincir kuralı bir önceki bağıntıya uygulanırsa;

$$\Delta w_{1kj} = -\eta \cdot \frac{\partial e}{\partial s_{1,k}} \cdot \frac{\partial s_{1,k}}{\partial w_{1k,j}} \quad (4.12)$$

$$\delta_{1k} = -\frac{\partial e}{\partial y_{o1,k}} \cdot \frac{\partial y_{o1,k}}{\partial s_{1,k}} \quad (4.13)$$

elde edilir.

δ_{1k} bağıntısını elde etmek için zincir kuralı yinelenmiştir. Buna göre ağırlıklardaki değişim miktarını veren bağıntı ise;

$$\Delta w_{1kj} = -\eta \cdot \delta_{1k} \cdot \frac{\partial s_{1,k}}{\partial w_{1k,j}} \quad (4.14)$$

olarak bulunur.

Yukarıdaki bağıntı üç adet parçalı türev yoluyla hesaplanır. İlk ikisi, δ_{1k} teriminde ve üçüncüsü de s_{1k} 'nin w_{1kj} 'ye göre parçalı türevidir. Bu türevler, sigmoid fonksiyon ve hatayı $y_{o1,k}$ değerine bağlayan bir hata fonksiyonu (e) tanımlayarak hesaplanabilir. Buna ait bağıntı ise;

$$e = f_e = \frac{1}{2} \cdot \sum_{k=1}^p (y_{o1,k} - y_{o1k})^2 \quad (4.15)$$

Ayrıca eşik fonksiyonunun eğim açısını ayarlayan momentum (α) değeri, 1 olarak verilirse denk. 4.10 elde edilir.

Δw_{1kj} bağıntısı; türev içermeyecek şekilde açılabilirse, algoritmanın uygulanabilirliği kolaylaşır. Denklem 4.13' deki ilk parçalı türev, denk. 4.15' deki hata fonksiyonu kullanılarak şu şekilde açılabilir [49];

$$\begin{aligned} \frac{\partial e}{\partial y_{o1,k}} &= \frac{\partial}{\partial y_{o1,k}} \cdot \left(\frac{1}{2} \sum_{k=1}^p (y_{o1k} - y_{o1k})^2 \right) \\ &= (-1) \cdot (y_{o1k} - y_{o1k}) \end{aligned} \quad (4.16)$$

Bu şekilde ilk türev ifadesi için, bilinen değerler cinsinden basit bir eşitlik elde edilir.

Denklem 4.13' deki ikinci türev ifadesinde bulunan eşik fonksiyonunun türevi alınarak aşağıdaki bağıntı elde edilir.

$$\frac{df[x]}{dx} = f[x](1 - f[x]) \quad (4.17)$$

Bu bağıntı, denklem 4.13' deki ikinci parçalı türev için kullanılırsa;

$$\begin{aligned} \frac{\partial y_{oi,k}}{\partial s_{1,k}} &= \frac{\partial}{\partial s_{1,k}} (f[s_{1k}]) = f[s_{1k}] \cdot (1 - f[s_{1k}]) \\ &= y_{oi,k} \cdot (1 - y_{oi,k}) \end{aligned} \quad (4.18)$$

Denklemler 4.16 ve 4.18 kullanılarak, 4.13 eşitliği yeniden düzenlenirse;

$$\delta_{1k} = -(-1) \cdot (y_{oi1k} - y_{oi1k}) \cdot (1 - y_{oi1k}) \cdot y_{oi1k} \quad (4.19.a)$$

elde edilir. Buradan, δ_{1k} bilinen terimler cinsinden yazılırsa şu bağıntı elde edilir;

$$\delta_{1k} = (y_{oi1k} - y_{oi1k}) \cdot (1 - y_{oi1k}) \cdot y_{oi1k} \quad (4.19.b)$$

Bu şekilde, denklem 4.13' deki δ_{1k} ifadesinde bulunan iki diferansiyel terim, sadece çıkış terimlerine bağlı olarak ifade edilmiş olur. Çıkış terimi ise, Denk. 4.9' ile kolaylıkla bulunabilir. İleri beslemeli YSA' nın icrası esnasında da bu değer hesaplanmaktadır. Bunun için, geri yayılım aşamasında bu bilgi kullanılabilir. Denklem 4.14' de görülen türev ifadesi, 4.9' daki bağıntı dikkate alarak işlenirse;

$$\frac{\partial s_{1,k}}{\partial w_{1k,j}} = \frac{\partial}{\partial w_{1k,j}} \left(\sum w_{1k,j} \cdot y_{oi,j} \right) \quad (4.20)$$

Eğer eşitlikler 4.19.b ve 4.20, 4.14 bağıntısında yerine konulursa, ağırlık değişim ifadesi aşağıdaki gibi basitleştirilerek elde edilmiş olur.

$$\Delta w_{1kj} = \eta \cdot (y_{oi1k} - y_{oi1k}) \cdot (1 - y_{oi1k}) \cdot y_{oi1k} \cdot y_{oi,j} \quad (4.21)$$

Çıkış katmanı için Δw ağırlık değerleri hesaplandığında yani öğrenme işlemi tamamlandığında, gizli katman nöronlarının eğitimine geçilir.

4.7.2 Gizli katman öğrenmesi

Çıkış katmanında ağırlıkların sabitlenmesinden sonra, sıra gizli katmandaki ağırlıkların ayarlanmasına gelir. YSA' nın gizli katmanındaki nöronların eğitilmesinde, çıkış katmanındaki eğitim sürecinde elde edilen ağırlık değişim bilgileri geri transfer edilerek kullanılır. Ağırlık değişimlerinin hesabı, çıkış katmanındaki gibi yapılır.

$$\Delta w_{2ji} = -\eta \cdot \frac{\partial e}{\partial w_{2ji}} \quad (4.22)$$

Zincir kuralı kullanılarak, denklem 4.22' deki bağıntıdan;

$$\Delta w_{2ji} = -\eta \cdot \frac{\partial e}{\partial s_{2,j}} \cdot \frac{\partial s_{2,j}}{\partial w_{2ji}} \quad (4.23)$$

Çıkış katmanındakine benzer şekilde, δ_{2j} bağıntısı şu şekilde yazılabilir;

$$\delta_{2j} = - \frac{\partial e}{\partial y_{o2,j}} \frac{\partial y_{o2,j}}{\partial s_{2,j}} \quad (4.24)$$

Buna göre, diferansiyel ağırlık artış bağıntısı;

$$\Delta w_{2ji} = \eta \cdot \delta_{2j} \frac{\partial s_{2,j}}{\partial w_{2ji}} \quad (4.25)$$

biçimindedir.

Denklemler 4.24 ve 4.25' deki üç türev ifadesi işlenirse, kullanılır hale getirilebilir.

$$\frac{\partial e}{\partial y_{o2,j}} = - \sum_{k=1}^p - \frac{\partial e}{\partial y_{o1,k}} \frac{\partial y_{o1,k}}{\partial s_{1,k}} \frac{\partial s_{1,k}}{\partial y_{o2,j}} \quad (4.26)$$

bulunur. Buradaki (-) işareti, çıkış katmanındaki öğrenme fazına benzetmek amacıyla kullanılmıştır. Gerçekte bu değer δ_{1k} dir. Bu yüzden Denk.4.26, denklem 4.27' de görüldüğü şekilde sadeleştirilebilir;

$$\frac{\partial e}{\partial y_{o2,j}} = - \sum_{k=1}^p \delta_{1k} \cdot \frac{\partial s_{1,k}}{\partial y_{o2,j}} \quad (4.27)$$

Denklem 4.9 kullanılarak, yukarıdaki bağıntıda yer alan toplama ifadesinin ikinci terimi;

$$\frac{\partial s_{1,k}}{\partial y_{02,j}} = \frac{\partial}{\partial y_{02,j}} \cdot \left(\sum_{j=1}^m w_{1kj} \cdot y_{02j} \right) = w_{1kj} \quad (4.28)$$

Yine denklem 4.17 kullanılarak, 4.24' deki bağıntının ikinci diferansiyel terimi şu şekilde düzenlenebilir;

$$\begin{aligned} \frac{\partial y_{02,j}}{\partial s_{2,j}} &= \frac{\partial}{\partial s_{2,j}} \cdot (f[s_{2j}]) \\ &= f[s_{2j}] \cdot (1 - f[s_{2j}]) \\ &= y_{02j} \cdot (1 - y_{02j}) \end{aligned} \quad (4.29)$$

Denklem 4.24 ile birlikte 4.27, 4.28 ve 4.29 bağıntıları kullanılarak δ_{2j} ifadesi daha açık olarak şu şekilde yazılabilir;

$$\delta_{2j} = - \left(- \sum \delta_{1k} \cdot w_{1kj} \right) \cdot y_{02j} \cdot (1 - y_{02j}) \quad (4.30.a)$$

Bu eşitlik düzenlenirse;

$$\delta_{2j} = \left(\sum \delta_{1k} \cdot w_{1kj} \right) \cdot (1 - y_{02j}) \cdot y_{02j} \quad (4.30.b)$$

bağıntısı elde edilir. Denklem 4.25' deki son diferansiyel terim de hesaplanırsa;

$$\frac{\partial s_{2j}}{\partial w_{2j,i}} = \frac{\partial}{\partial w_{2j,i}} \cdot \eta \cdot \left(\sum_{i=1}^p u_i \cdot w_{2ji} \right) = u_i \quad (4.31)$$

Denklemler 4.30b ve 4.31' deki ifadeler, 4.25' deki bağıntıda toplanacak olursa;

$$\Delta w_{2ji} = \eta \cdot \left(\sum_{k=1}^p \delta_{1k} \cdot w_{1kj} \right) \cdot (1 - y_{02j}) \cdot y_{02j} \cdot u_i \quad (4.32)$$

Geri yayımlı YSA' nın temelini; hata fonksiyonu ile eşik fonksiyonunun farklı seçimleri sonucu hedef modellemeyi öğrenmek üzere, ileri-geri işlemler yaptırarak algoritma oluşturur. Bu çıkarımdan, şu standart geri yayılım eğitme algoritması elde edilir;

- 1- Bağıntılar 4.8, 4.9 ve 4.10 kullanılarak y_{02j} ve y_{01k} değerleri hesaplanır.
- 2- Bağıntılar 4.19b, 4.21 ve 4.32 kullanılarak Δw_{1kj} ve Δw_{2ji} değerleri hesaplanır.
- 3- Bir önceki aşamada hesaplanan, ağırlık değişimleri kullanılarak YSA' nın yeni ağırlık değerleri hesaplanır.

$$w_{1kj}(t+1) = w_{1kj}(t) + \Delta w_{1kj} \quad (4.33)$$

$$w_{2ji}(t+1) = w_{2ji}(t) + \Delta w_{2ji} \quad (4.34)$$

Bu işlemler, öğrenme istenilen bağıl doğruluk değerine ulaşana dek tekrarlanır [38].

4.8 Nöron' a Besleme Eklenmesi

Bir nörona besleme girişinin eklenmesi önem taşır. Şöyle ki, YSA' daki her bir işlemcinin girişlerinden N-boyutlu bir uzay oluşur. Her bir işlemci, bir yanı I diğer yanı 0 olan bir hiper düzlem meydana getirir. Bu çalışmada, türevi alınabilen bir fonksiyon olması ve kontrol amaçlı kullanıma uygunluğu nedeniyle, her bir işlemci eşik fonksiyonu sigmoid seçildiği için oluşacak düzlemler genel olarak tanımlanan formda meydana gelir. Giriş uzayının, bu hiper düzlemin neresinde bulunduğunu ağırlık değerleri belirler.

Her hangi bir besleme girişi olmaması halinde bu tanımlayıcı düzlem, giriş uzayı tarafından belirlenen hiper düzlemin orijininden geçer. Bu durum bazı uygulamalar için kabul edilebilirken, pek çok problemde bu düzlemin başka bir yerde bulunması daha uygundur. Bir katmanda birden çok işlemci olduğu durumda, hepsi aynı giriş uzayını paylaşır ve besleme girişi elemanı olmaması halinde ise hepsi orijinden geçer. Yani bazı hallerde, YSA' da besleme girişi mutlak gereklidir.

4.9 Geri Yayınımında Momentum

Yüksek hassasiyet gerektiren çok katmanlı pratik perceptron uygulamalarında YSA

ın öğrenme hızı kısıtlayıcı bir faktör olarak devreye girer. Buna sistem tanımlama, lineer olmayan modelleme ve robotik uygulamalar örnek olarak verilebilir. Rummelhart' ın önerdiği öğrenme algoritması, sadece $\partial e/\partial w$ ile orantılı bir ağırlık değişimini öngörür. Doğru bir diferansiyel işlem için, ağırlıkların diferansiyel seviyede değişimlere sahip olması gerekir. Standart olan bu algorithmada orantı sabiti, öğrenme katsayısını (learning rate) oluşturur. Bu katsayının değeri ise, ağırlıkların değişim miktarını belirler. Pratik uygulamalarda, osilasyona neden olmayacak seviyede en büyük öğrenme katsayısının seçilmesi hızlı bir öğrenme için gerek şarttır. Bunun bir yolu ise, genelleştirilmiş delta kuralına bir momentum terimi eklemektir. Buna ait bağıntı;

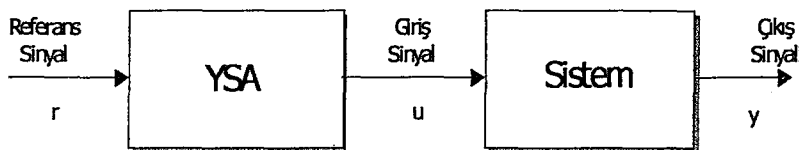
$$\Delta w_{ji}(t+1) = \eta \cdot (\delta_{ij} \cdot y_{oi}) + \alpha \cdot \Delta w_{ji}(t) \quad (4.35)$$

burada, t ; iterasyon sayısı, η ; öğrenme katsayısı, α ; önceki ağırlık değişimlerinin, ağırlık uzayındaki hareket yönüne o andaki etkisini ifade eden momentum katsayısı. Önceki ağırlık değişimlerinin delta kuralı içerisine alınmasıyla, ağırlık uzayında bulunan hata düzlemindeki yüksek frekanslı değişimler süzülür. Öğrenme katsayısı 0.01 ile 10 arasında, momentum katsayısı ise 0 ile 1 arasında değişir.

Bu metot, hata düzlemini minimuma indirgeyen keskin inişler sağlar. Burada gerçekleştirilen ilerleme hızı, minimum düzeyde de olsa osilasyona neden olabilir. Bu istenmez ise küçük adımlarla ilerlenir, bu ise iniş sürecinde işlemin çok yavaşlamasına neden olur. Yani, momentum terimi eklemek suretiyle o bölgedeki iniş keskinliği süzülerek, ağırlıkların değiştirilmesine hız kazandırılmış olur.

4.10 Seri YSA Denetleyici Yapısı

Tez çalışmasında esas alınan seri YSA denetim yapısı Şekil 4.5' de gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Genel seri denetim yapısı.

Seri YSA denetleyiciler, YSA' nın eğitilme yapısına göre ikiye ayrılırlar. Her iki yapının da denetim mantığı aynıdır. Buna göre sistemi denetleyecek denetim sinyali sistemin ters matematiksel modeli kullanılarak üretilir. Bu tür YSA denetleyici klasik ters denetleyici gibi çalışır. Yani, denetim işareti sistemin ters fonksiyonundan türetilir. Seri tip YSA denetiminde ise YSA' ya sistemin ters modeli öğretilerek denetim işareti buradan türetilir. Şekil 4.5' e göre sistemin u girişine göre çıkışı;

$$y = f_s(u) \quad (4.36)$$

şeklinde olur. Burada $f_s(u)$ sistemi tanımlayan modeldir. Aynı şekilde u ise, sistemin ters modelinden;

$$u = f_s^{-1}(y) \quad (4.37)$$

şeklinde bulunabilir. Burada $f_s^{-1}(u)$ sistemin ters modelidir. Denetim sinyali u, YSA tarafından üretileceğinden YSA $f_s^{-1}(u)$ fonksiyonunu öğrenmiş olmalıdır. Yani;

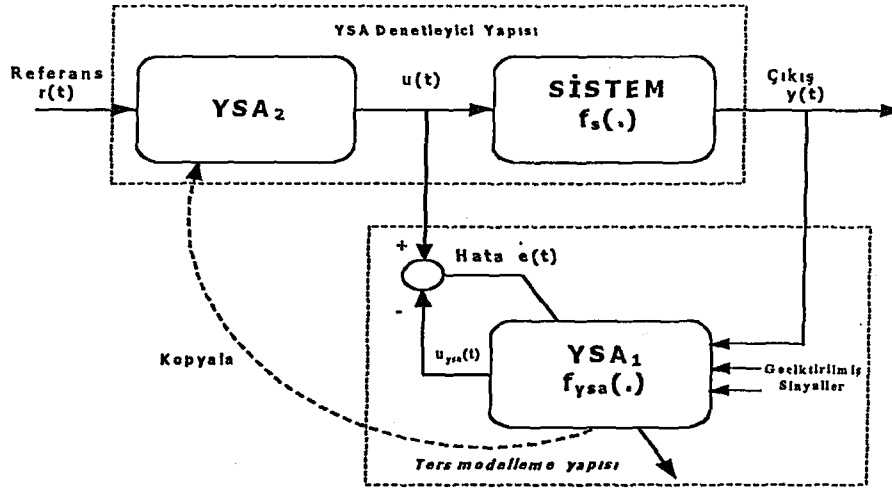
$$u = f_s^{-1}(y) = f_{ysa}(r) \quad (4.18)$$

olmalıdır. Bu durumda sistem denetlenebilir. Seri denetim yapısı 2 farklı şekilde gerçekleştirilebilir. Bunlardan birisi off-line, diğeri ise on-line öğrenme yaparak sistemi denetler. Bu iki yapı arasındaki farklılık sadece sistemin ters modelini öğrenme işleminde birinin off-line diğerrinin on-line öğrenme yapmasındadır.

4.10.1 Off-line seri denetim yapısı

Bu tip denetim yapısı Şekil 4.6' da gösterilmiştir (Omatu 1996). Burada YSA₂ denetleyici olarak kullanılmaktadır. YSA₂' nin sistemi denetleyebilmesi için sistemin ters modelini önceden öğrenmiş olması gereklidir.

Bunun için Şekil 4.6' daki YSA₁' e önce sistemin ters dinamiği off-line olarak öğretilir. Sonra bu sistemin önüne YSA₂ denetleyici olarak bağlanır ve denetim işlevini yerine getirir.



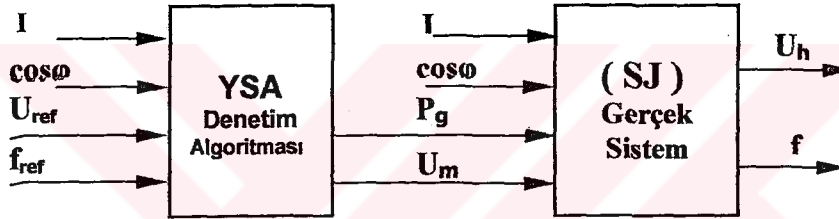
Şekil 4.6. Off-line seri öğrenme ve denetim yapısı.

Bu denetim yapısında, öğrenme işleminde Bölüm 4.10' daki öğrenme yapısı ve tanımlanan öğrenme algoritması kullanılmıştır. Bu denetim yapısı açık çevrim çalışır ve sistem çıkışına bakmaksızın çıkışta olabilecek değişikliklerden sistem etkilenmez.

BÖLÜM 5. GÜÇ JENERATÖRLERİNİN YSA İLE DENETİMİ

5.1 Sistem YSA Denetim Yapısı

Güç üreteçleri olarak kullanılan senkron jeneratörlerin, değişken yük durumları için çıkış parametreleri olan uç gerilim genliği ve frekansın istenilen sınır değerleri arasında tutulabilmesi amacıyla, geliştirilen YSA tabanlı alternatif denetleyici modeli Şekil 5.1’ de verilmiştir.



Şekil 5. 1 Model YSA denetleyici - gerçek sistem blok şeması

Bu tez çalışmada klasik GSK’ na alternatif bir model geliştirilmiş daha sonra bu model simülasyon ve deneysel olarak elde edilen veriler yardımıyla test edilmiştir. Alınan sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. YSA algoritmalı bu kararlayıcı uygulamasında temel ihtiyaç, SJ giriş ve çıkış değerlerinin gerçek zamanlı olarak okunmasıdır. Ayrıca, bilgisayar simülasyonu ile sıklığı farklı iki veri grubu alınarak, YSA denetleyicinin öğrenme sonuçları karşılaştırılmıştır.

Güç sisteminin modellenmesinde kullanılan her iki elektrik makinesinin lineer olmayan dinamik yapısı nedeniyle, sistemin bütününe ait analitik modelleme oldukça güçtür. Bunun yerine, sistemden gerçek zamanlı olarak giriş-çıkış verileri okunarak çalışan ve istenilen çıkış büyüklüklerini hassas olarak sağlayan bir yapı önerilmiştir. YSA tabanlı bu algoritma yardımıyla, öğrenme esası üzerine kurulu bir denetleyici tasarlanmıştır. Model YSA denetleyicinin eğitimi sonucu, ağırlıklı lineer olmayan sistem yapısını kontrol altına alabildiği gözlemlenmiştir. Bu şekilde, oldukça karmaşık olan analitik modellemenin güçlüklerinden de kaçınılmış olmaktadır.

5.2 Sistemin Bilgisayar Simülasyonu

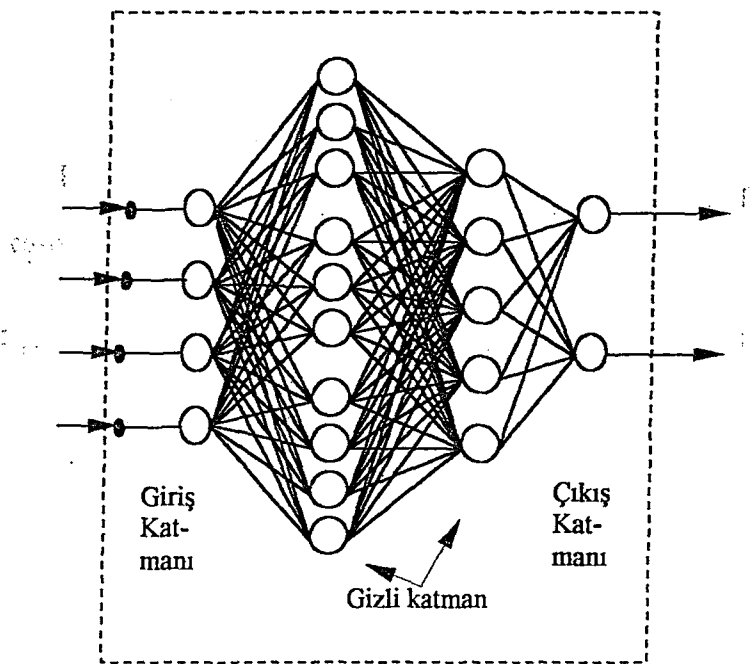
İlk olarak SJ ve denetleyici YSA modelleri oluşturularak, bunların simülasyon sonucu elde edilen veriler yardımıyla eğitilmesi sağlanmıştır. Simülasyon verileri sık ve seyrek olmak üzere iki grup olarak elde edilmiş ve her iki grup için gerçekleştirilen eğitime sonuçları, SJ ve denetleyici YSA modellerinde sırasıyla test edilmiştir. Eğitim ve test işleminde, normalize edilmiş değerler kullanılmıştır.

PC’ de modelleme Matlab6.0 / Simulink paket programıyla gerçekleştirilmiştir. Bölüm 4’ de açıklandığı üzere YSA eğitimi uzun bir süreç olup, bir dizi işlemler gerektirir. Eğitime-öğrenme işleminin performansında birden çok parametrenin etkisi söz konusudur. Bu çalışmada kullanılan parametre büyüklükleri, Tablo 5.1’ de verilmiştir.

Tablo 5.1 Seçilen ağ parametreleri

Parametre	Değer
Hata toleransı	10^{-8}
Giriş katman sayısı	4
Gizli katman sayısı	10
Aktivasyon fonksiyonu	Sigmoid
Back propagation modeli	Levenberg Marquadt

SJ ve denetleyici için aynı YSA yapısı kullanılmıştır. SJ’ e ait ağ giriş parametreleri I , $\cos\phi$, P_g , U_m ve çıkışta f , U_h , denetleyici için giriş parametreleri I , $\cos\phi$, U_{ref} , f_{ref} ve çıkışta P_g , U_m olarak tanımlanmıştır. Şekil 5.2’ de kullanılan ağ yapısı görülmüyor.



Şekil 5.2 SJ’ e ait iki gizli katmanlı model YSA yapısı

5.2.1 Simülasyon için matematiksel modelleme

SJ' e ait simülasyon değerlerinin elde edilmesinde kullanılan matematiksel model Denklem 5.1.b' de verilmiştir.

$$U = E - I_e \angle \varphi \cdot Z_s \angle \varphi \quad [V] \quad (5.1.a)$$

$$U = E - I_e(\cos\varphi + j\sin\varphi) \cdot (R_e + jX_s) \quad [V] \quad (5.1.b)$$

burada; U: faz gerilimi, E: bir faz iç gerilimi, I_e : endüi akımı, Z_s : bir faz senkron empedans değeridir.

Denklem 5.1.b' den 220V referans uç gerilim değerini elde etmek için, yük cins ve büyüklüğüne bağlı olarak gerekli olan SJ mıknatıslama gerilim bağıntısı;

$$U_m = [220 + I_e(\cos\varphi + j\sin\varphi) \cdot (R_e + jX_s)] / (k_f \cdot \omega) \quad [V] \quad (5.2)$$

şeklindedir. Burada; k_f : E - U_m arası bağlantı katsayısı (0.075), ω : açısal hız değeri (157.08).

SJ giriş gücü, çıkış gücüne toplam kayıpların eklenmesiyle bulunabilir. Bağıntısı ise;

$$P_g = P_a + P_{Cu} + P_{sr} + P_{Fe} \quad [W] \quad (5.3.a)$$

$$P_g = P_a + 3 \cdot R_e \cdot I_e^2 + P_{sr} + P_{Fe} \quad [W] \quad (5.3.b)$$

$$P_a = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_e \cdot \cos\varphi \quad [W] \quad (5.3.c)$$

şeklindedir. Burada; P_a : alınan güç ve P_{Cu} : yük bakır, P_{sr} : sürtünme-rüzgar, P_{Fe} : demir kayıplarıdır

Denklem 5.2' ye göre simülasyon verilerinin ve deneysel sonuçların alındığı SJ temel büyüklükleri Tablo 5.2' de verilmiştir.

Tablo 5.2 SJ parametreleri

Çıkık Kutuplu SJ Parametresi	Değeri
Etkin direnç R_e	0,25 Ω
Senkron reaktans X_s	4.5 Ω
Sabit kayıplar $(P_{Fe} + P_{sr})$	200 W

5.2.2 Simülasyon verilerinin bulunması

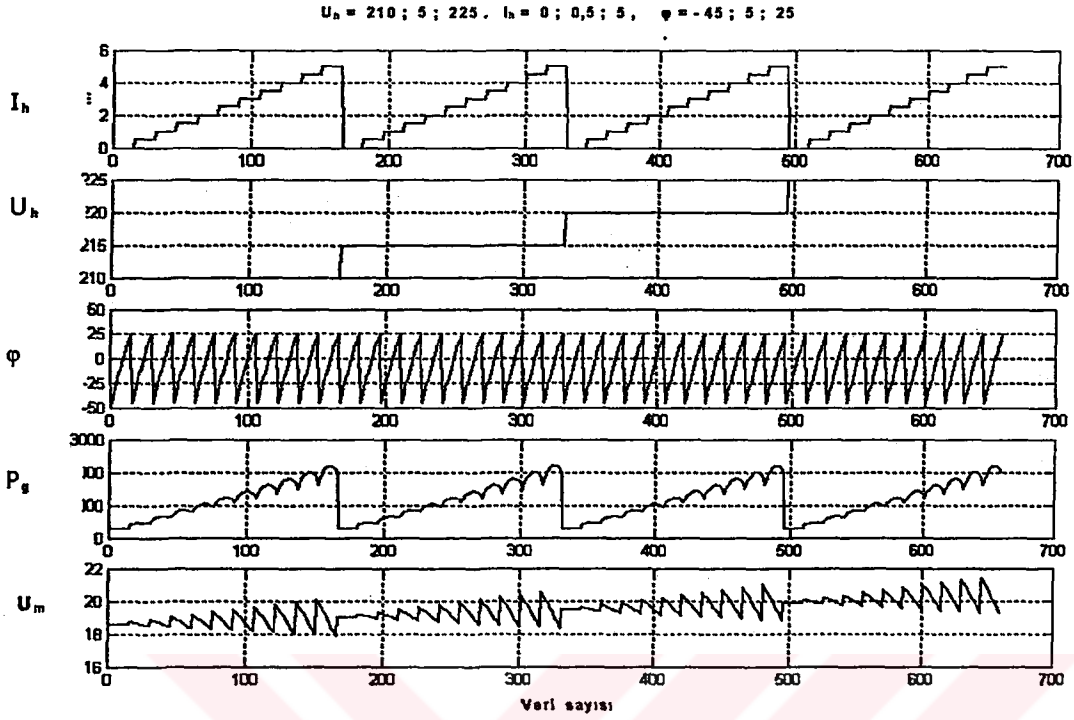
SJ ve denetleyici YSA modellerinin eğitiminde kullanılmak üzere gerekli olan simülasyon verilerini oluşturan U, I, $\cos\varphi$, P_g ve U_m değerleri Matlab6.0' da;

$$(I.) \quad \begin{aligned} &\text{for } U = 210; 5; 225; \\ &\quad \text{for } I = 0; 0.5; 5; \\ &\quad \quad \text{for } \varphi = -45; 5; 25; \end{aligned}$$

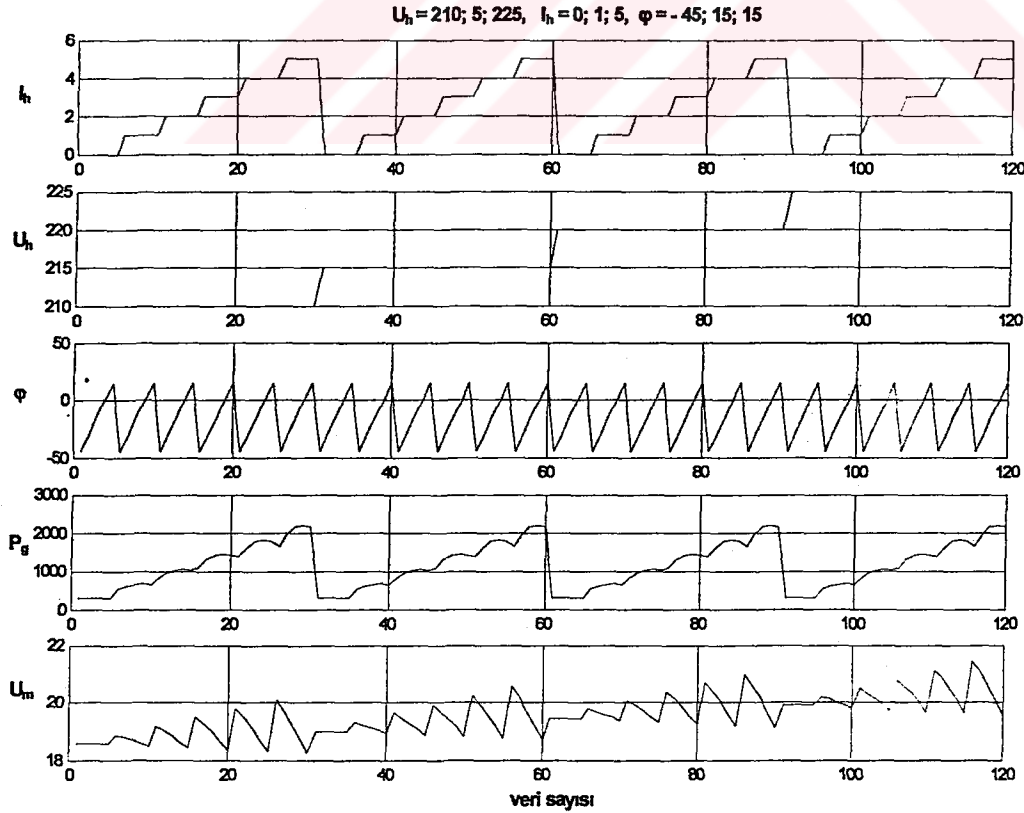
$$(II.) \quad \begin{aligned} &\text{for } U = 210; 5; 225; \\ &\quad \text{for } I = 0; 1; 5; \\ &\quad \quad \text{for } \varphi = -45; 15; 15; \end{aligned}$$

algoritması kullanılarak iki farklı sıklıkta veri kümesi oluşturularak elde edilmiştir.

Birinci grup değerler Şekil 5.3' te, ikinci grup değerler ise Şekil 5.4' te verilmiştir.



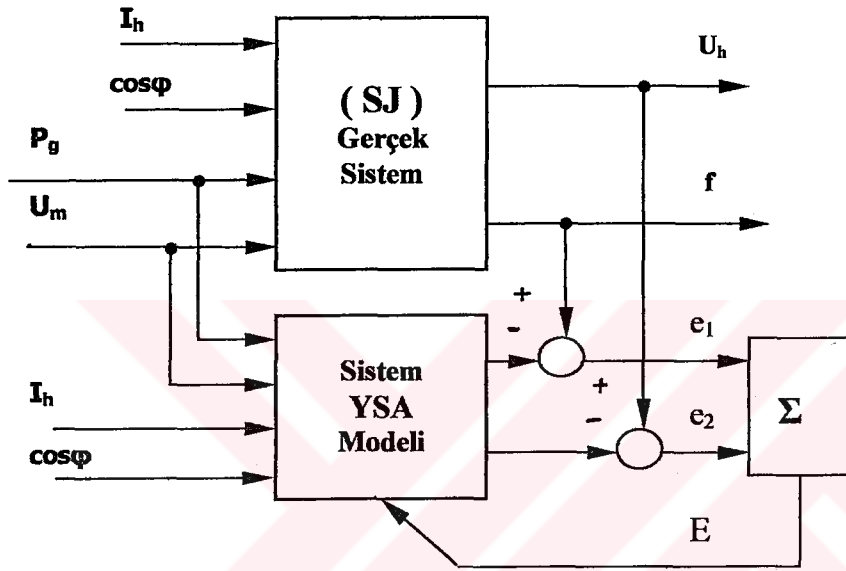
Şekil 5.3 Simülasyon sonuçları (I. Grup)



Şekil 5.4 Simülasyon sonuçları (II. Grup)

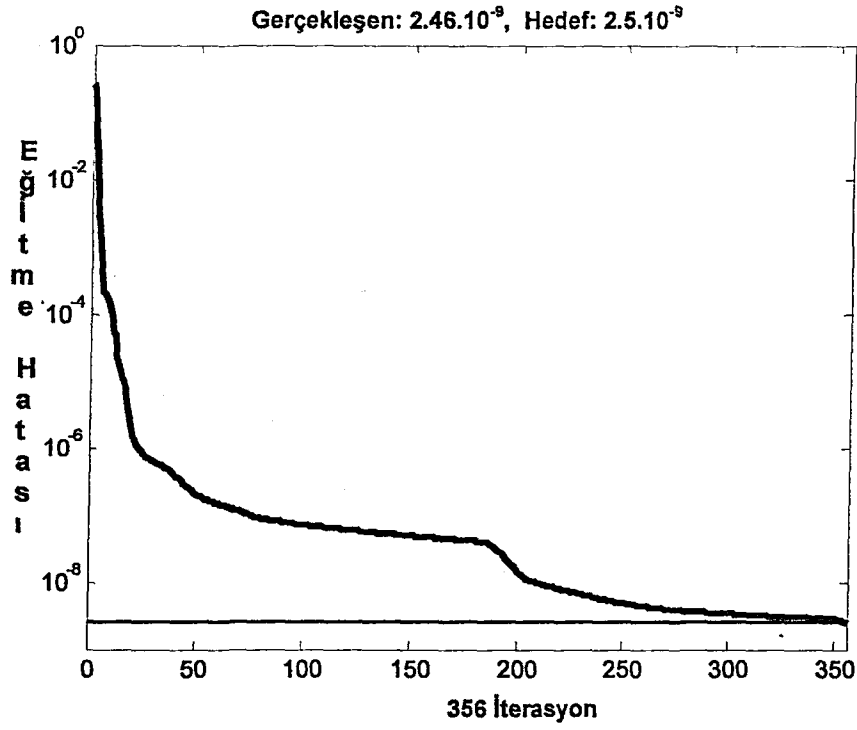
5.2.3 YSA ile SJ' ün modellenmesi

Simülasyon sonucu elde edilen SJ yük akımı ve uç gerilimine bağlı olarak değişen giriş gücü ve mıknatıslama gerilim değerlerine ait grafikler Şekil 5.3 ve Şekil 5.4' de verilmiştir. SJ modelinin YSA ile eğitilmesinde bu iki farklı veri grubu ayrı ayrı kullanılmış olup, ilk grupta 660 ikinci grupta ise 120 farklı değer kümesi oluşturulmuştur.

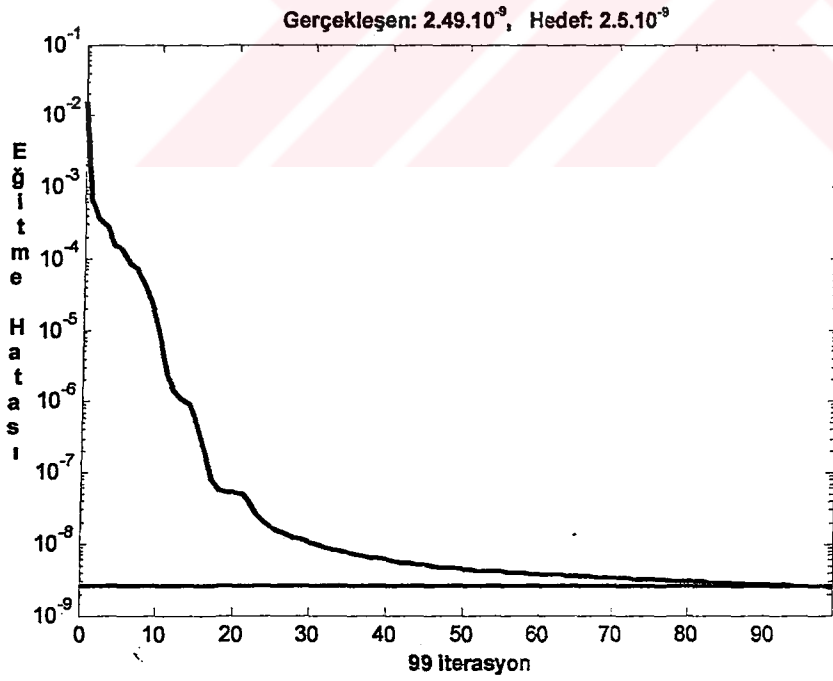


Şekil 5.5 Gerçek sistem YSA eğitme modeli

Şekil 5.5' de verilen off-line YSA eğitme modeli kullanılarak gerçekleştirilen SJ eğitme işleminde hata toleransı $2,5 \cdot 10^{-9}$ olarak seçilmiş, I. grup için 356 iterasyonda II. grup için 99 iterasyonda ağırlık SJ modelini tamamıyla öğrendiği görülmüştür. Bunlara ait değişim grafikleri Şekil 5.6 ve Şekil 5.7' de verilmiştir.

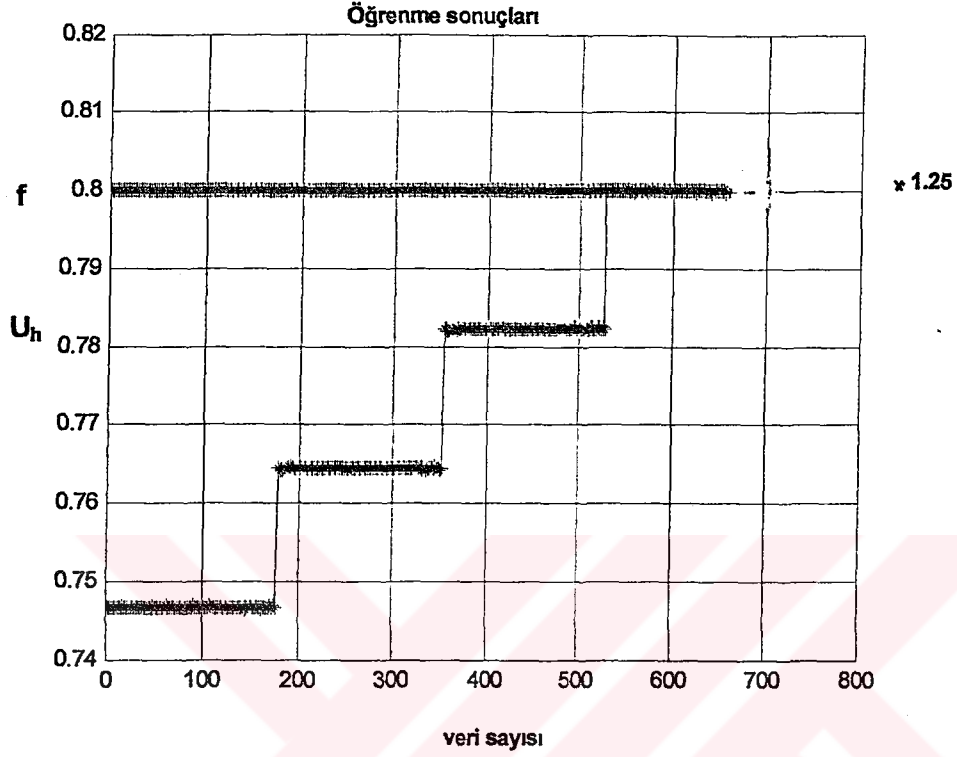


Şekil 5.6 YSA model SJ öğrenme-iterasyon değişim grafiği (I. Grup)

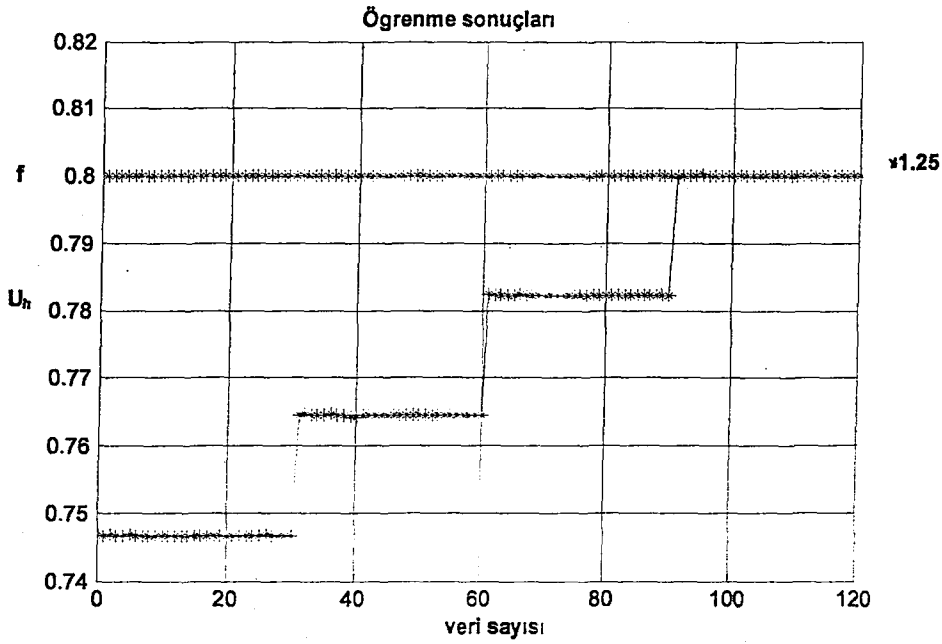


Şekil 5.7 YSA model SJ öğrenme-iterasyon değişim grafiği (II. Grup)

SJ çıkış parametrelerini oluşturan U_h ve f değerlerinin YSA modelinde veri sayısı - öğrenme değişim grafikleri her iki grup için Şekil 5.8 ve Şekil 5.9' da verilmiştir.



Şekil 5.8 SJ YSA modelin çıkış parametrelerini öğrenme sonucu (I.Grup)



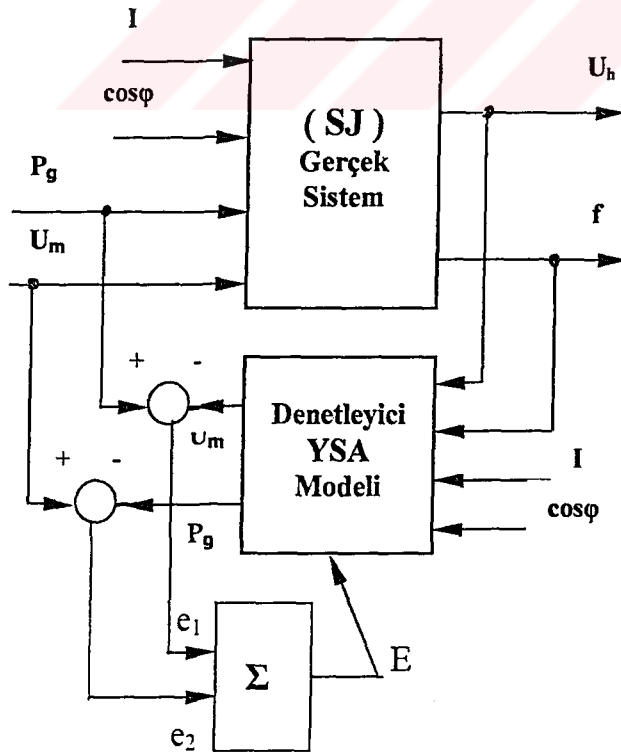
Şekil 5.9 SJ YSA modeli çıkış parametrelerini öğrenme sonucu (II.Grup)

5.2.4 YSA ile denetleyicinin modellenmesi

İkinci aşamada, SJ' e ait kontrol girdileri olan p_g ve U_m değerlerini gerçek-zamanlı olarak ayarlayan YSA denetleyici model tanımı yapılmıştır. Amaç, değişken yük durumlarında senkron jeneratör çıkış parametrelerini oluşturan f ve U_h değerlerini referans değerleri civarında tutmaktır. Simülasyon verileriyle eğitilmesi sağlanan denetleyicinin çıkış değerlerini ise, SJ' in giriş değerleri olan P_g ve U_m oluşturur.

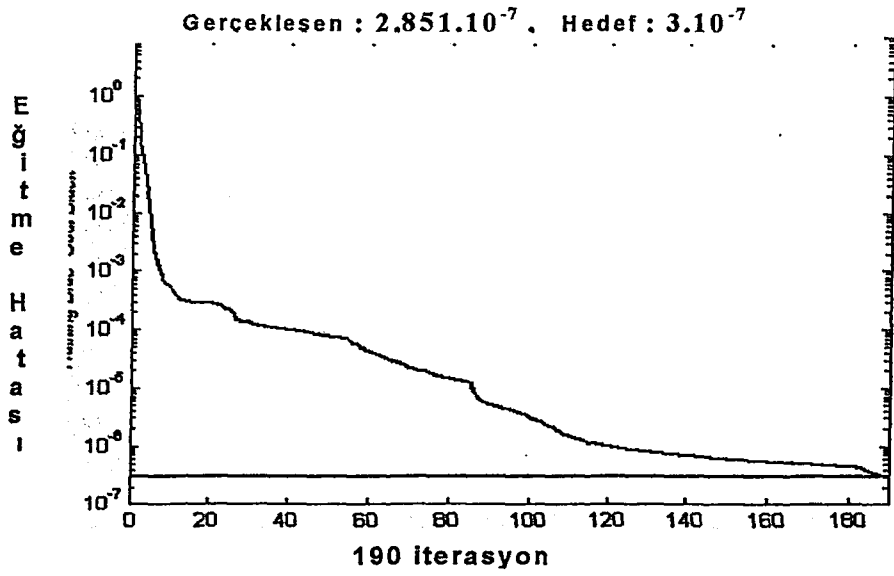
Denetleyici, yük değişimine bağlı olarak düşen senkron jeneratör devir sayısı-frekans değerine göre da motor endüi gerilimi olan U_e değerini ve değişen uç gerilimine bağlı olarak senkron jeneratör mıknatıslama gerilimi olan U_m değerini gerçek-zamanlı olarak ayarlamak üzere eğitilmiş ve öğrenme durumu test edilmiştir.

Şekil 5.2' deki iki gizli katmanlı ağ yapısı denetleyici için de kullanılmıştır. Şekil 5.10 da verilen off-line eğitime yapısı kullanılarak gerçekleştirilen YSA denetleyici eğitiminde, hata toleransı 3.10^{-7} seçilmiştir. I. grup verilerle 190 iterasyonda, II. grup verilerle ise 151 iterasyonda YSA modelin denetim yapısını öğrendiği görülmüştür.

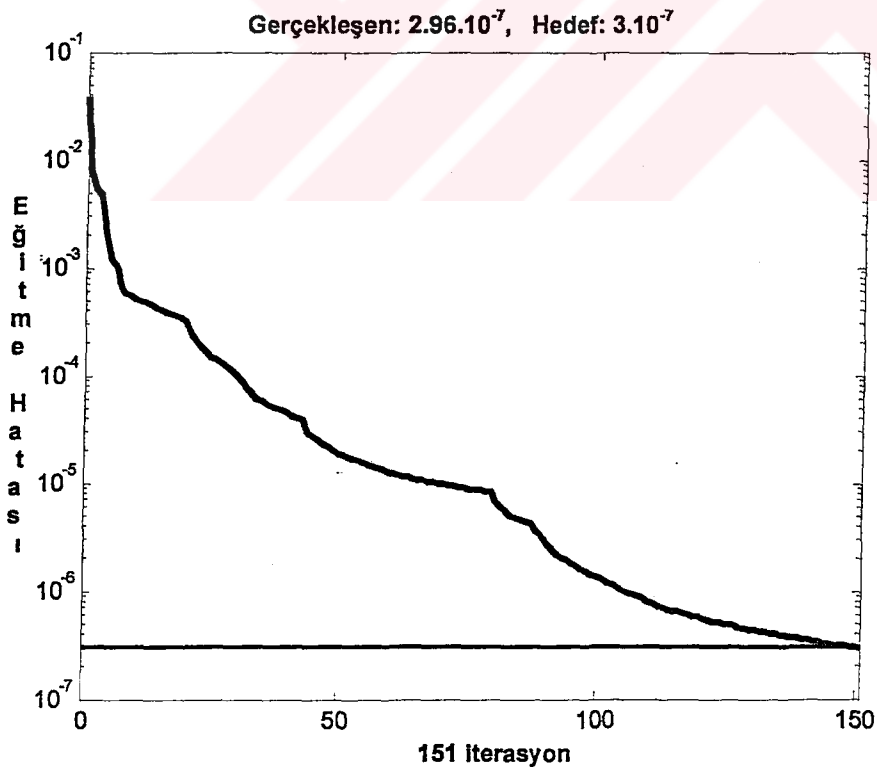


Şekil 5.10 Denetleyici YSA eğitime modeli

Bunlara ait değişim grafikleri Şekil 5.11 ve Şekil 5.12' de verilmiştir.

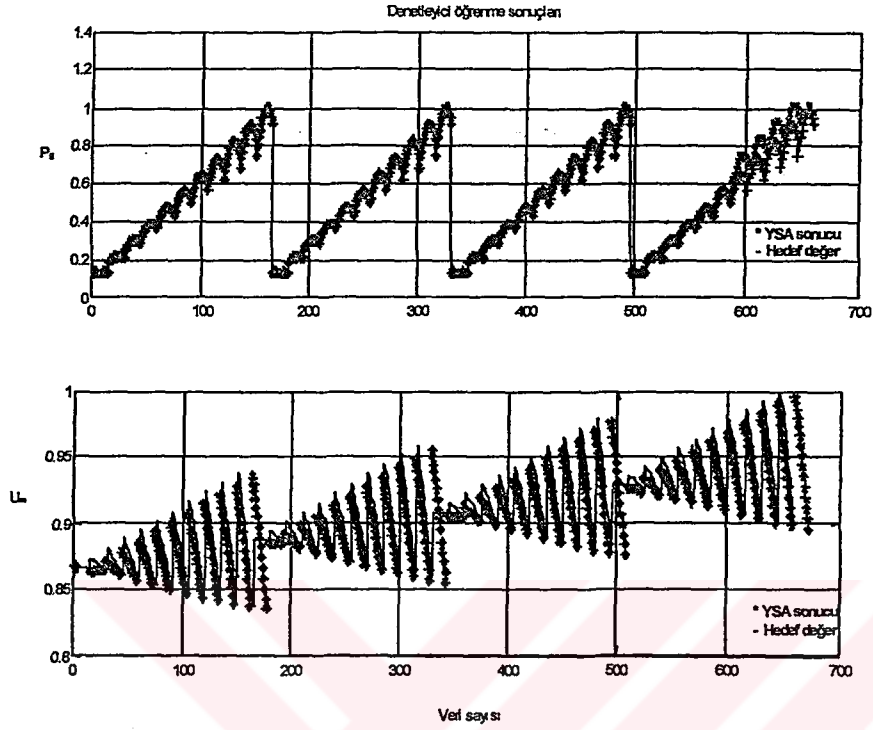


Şekil 5.11 Denetleyici YSA modeli öğrenme-iterasyon değişim grafiği (I Grup)

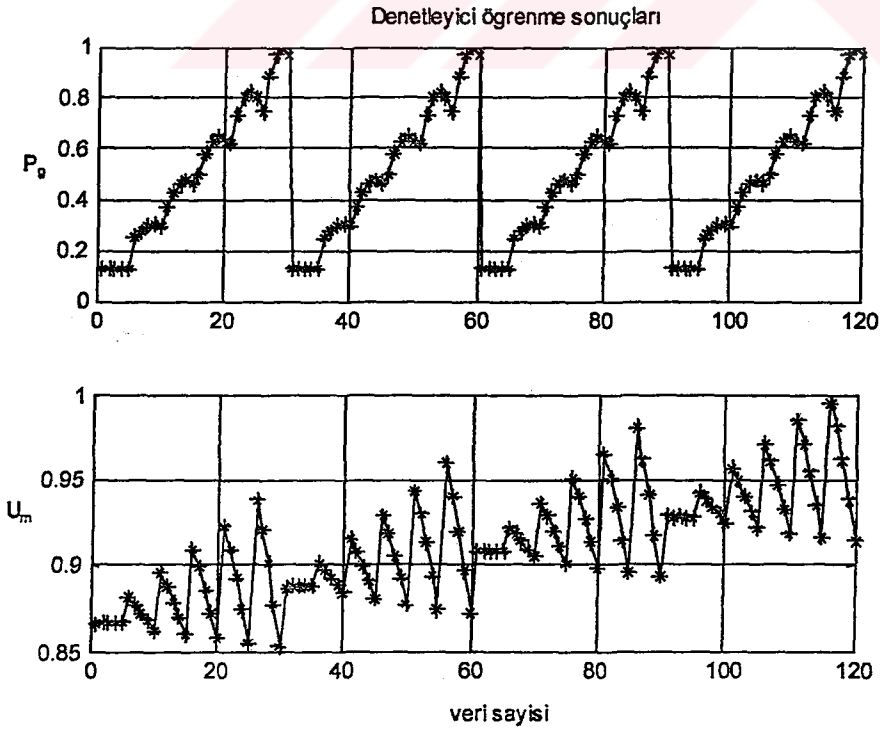


Şekil 5.12 Denetleyici YSA modeli öğrenme-iterasyon değişim grafiği (II Grup)

Eğitime işlemi sonucu YSA denetleyici modelin çıkış parametrelerini oluşturan P_g ve U_m değerlerini öğrenme sonuçları sırasıyla Şekil 5.12 ve Şekil 5.13' de verilmiştir.



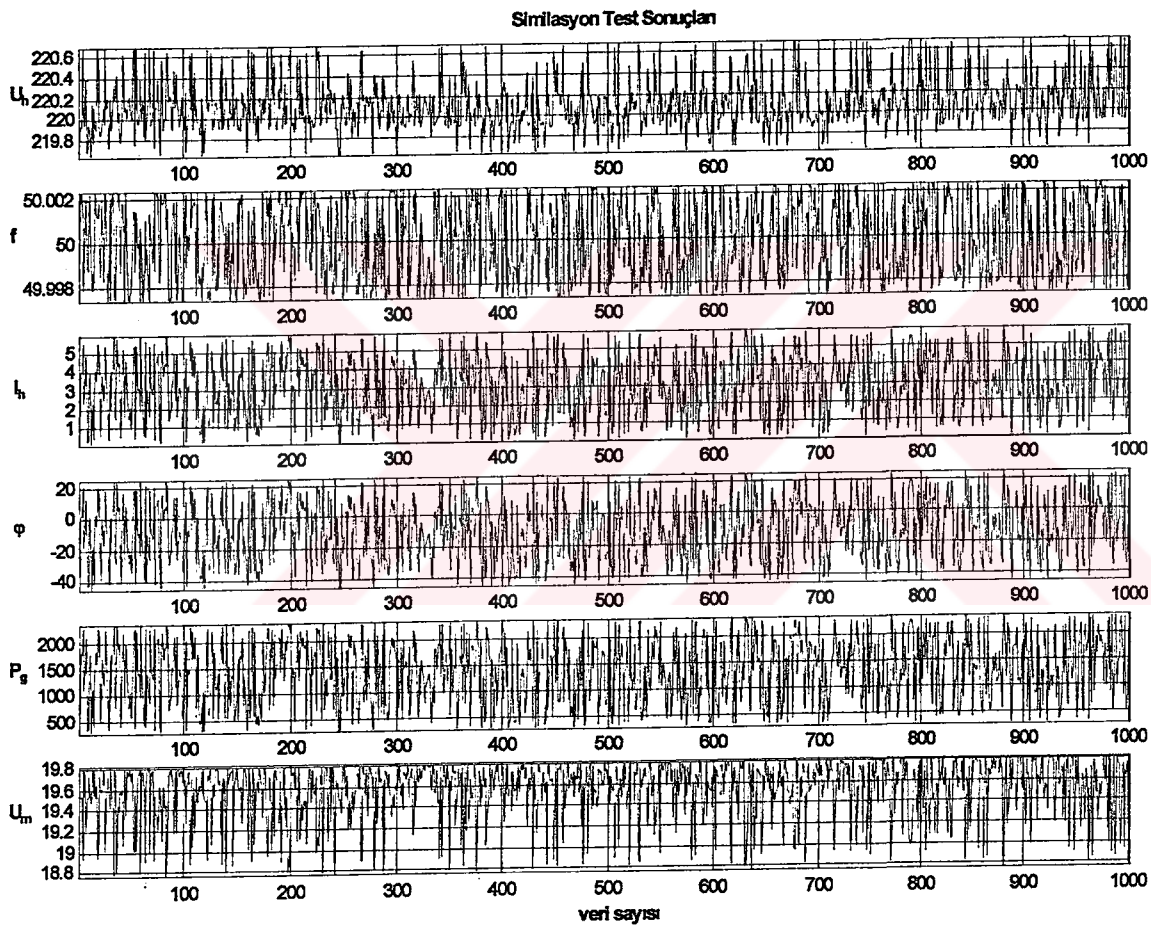
Şekil 5.13 YSA denetleyici modelin çıkış parametrelerini öğrenme sonucu (I. Grup)



Şekil 5.14 YSA denetleyici modelin çıkış parametrelerini öğrenme sonucu (II. Grup)

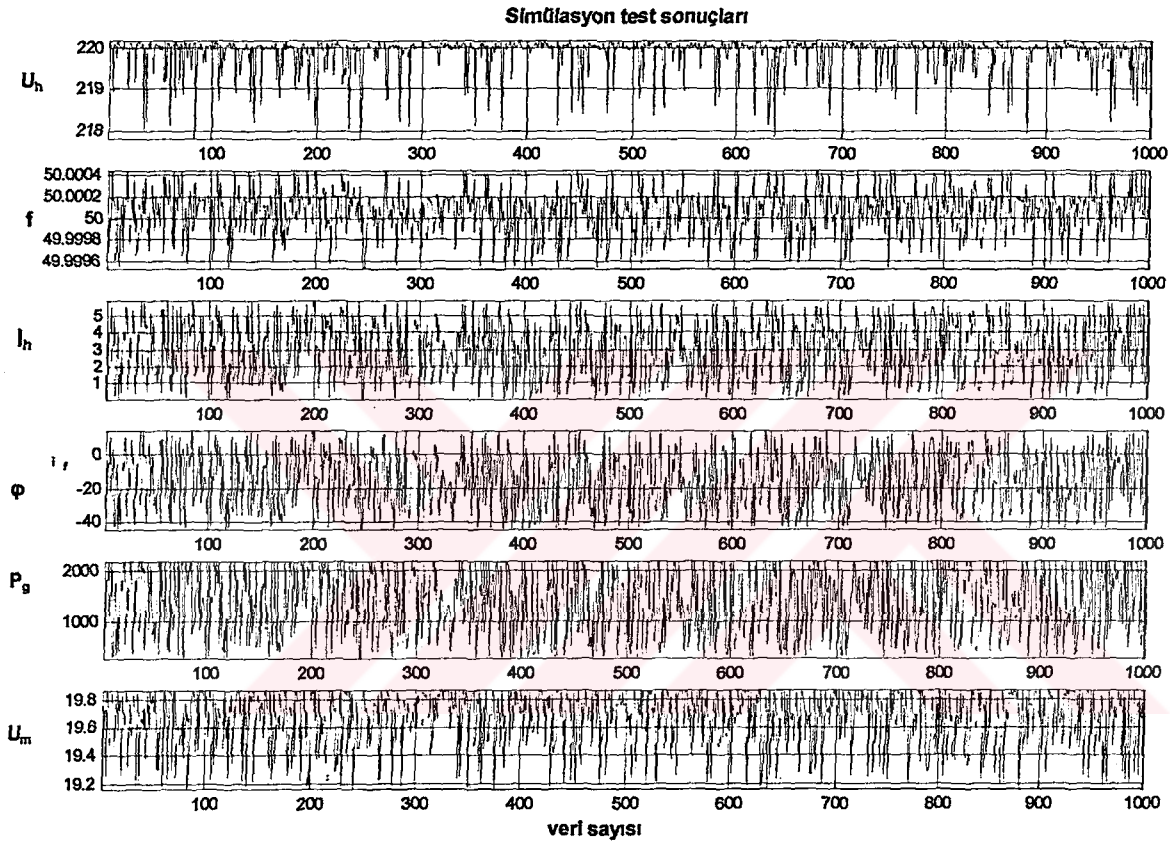
5.2.6 SJ ve denetleyici YSA modellerinin test sonuçları

Şekil 5.15' de verildiği üzere 666 farklı simülasyon değerinin kullanıldığı I. Grupta eğitime işlemi sonucu, YSA model yapısı kurulan SJ ve denetleyicinin 1000 farklı veri kombinezonuyla gerçekleştirilen test işleminde oldukça yüksek bir doğruluk oranı elde edilmiştir. Testlerde uç frekansı yaklaşık 50Hz' de sabit tutulurken, uç geriliminde ise % 0.4' ün altında bir dalgalanma miktarı gözlenmiştir.



Şekil 5.16 SJ ve denetleyici YSA modellerinin öğrenme test sonuçları (I. Grup)

Şekil 5.16' da verilen II. Grupta ise, 120 farklı simülasyon değeri kullanılmıştır. Eğitime işlemi sonucu, YSA model yapısı kurulan SJ ve denetleyici yine 1000 farklı veri kombinasyonu ile test edilmiştir. Bu grupta da, elde edilen sonuçlarda oldukça yüksek bir doğruluk oranına ulaşılmıştır. Testlerde uç frekansı yine yaklaşık 50Hz' de sabit tutulurken, uç geriliminde ise % 1' in altında gerçekleşen bir dalgalanma oranı gözlenmiştir.



Şekil 5.17 SJ ve denetleyici YSA modellerinin öğrenme test sonuçları (II. Grup)

5.3 Deneysel Eğitim Verileri Deney Düzenegi

Güç jeneratörlerinin değişken yük durumlarında çıkış kararlılığının sağlanması esastır. Klasik GSK' na alternatif olarak geliştirilen, model YSA kontrol algoritmasının ve SJ modelinin eğitiminde kullanılmak üzere, gerekli giriş-çıkış veri çiftlerinin elde edilmesi için kullanılan deney düzenegi tanımlanmış ve sonuçları verilmiştir. Bölüm 3'te tanımlanan sistem modelindeki her bir eleman ve bunlara ait etiket değerleri şöyledir;

DC motor :

THRIGE- SCOTT DC MOTOR

Model: LAK 112 - B , Pure - DC

Model No: 3372171 – 9522

Endüi voltajı: 220 V_{dc} , Endüi akımı: 8.5 A_{dc}

Alan voltajı: 130 V_{dc} , Alan akımı: 0.5 A_{dc}

Devir sayısı: 1400 – 1800 min⁻¹

Senkron jeneratör:

SALIENT POLE GENERATOR

Tec Quipment Ltd. Mécalté SPA. Model: NET 010/N2956/10

Type: BTA3 = SA/4 , PD2 0.14 IP.23

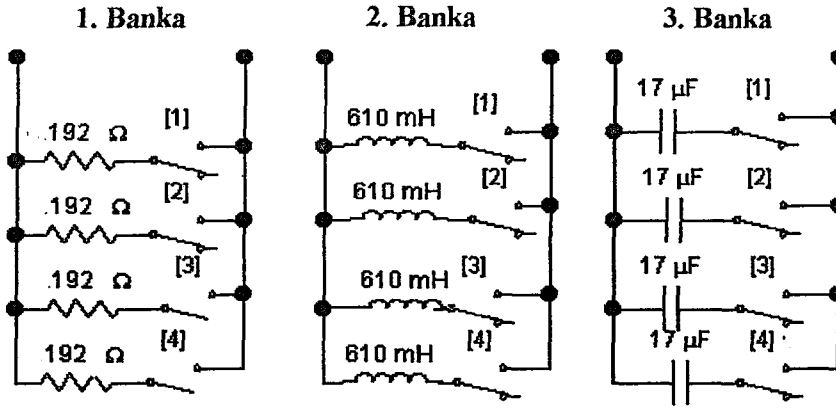
Terminal voltajı: 220/127 V_{ac} , Akımı: 5 A_{ac}

Uyarma voltajı: 50 V_{dc} , Akımı: 8.15 A_{dc}

Frekans: 50Hz , 3Ø , cos φ = 0.8 , Devir: 1500 min⁻¹

5.3.1 Test yük bankaları

Sistem modellenmesinde kullanılmak üzere, deney sonuçlarının eş zamanlı olarak okunması büyük önem taşır. SJ' ü değişik yük durumlarında test etmek üzere, üç farklı yük bankası jeneratör çıkışına farklı gruplar oluşturacak şekilde bağlanmıştır. Her bir yük bankası, sırasıyla omik direnç, indüktif veya kapasitif reaktans olmak üzere bir birine paralel olarak devreye giren dört adet eşdeğer elemandan oluşur ve her bir eleman, kendine ait anahtar yardımıyla el ile devreye alınıp çıkarılır. Şekil 5.2' de deneyde kullanılan üç farklı türde test yük bankası ve bunlara ait değerler verilmiştir.



Şekil 5.18 Sistemde kullanılan omik, indüktif ve kapasitif yük bankaları

Omik yük bankasındaki her bir direncin değeri 192 ohm' dur. Reaktans yük bankalarındaki her bir indüktansın değeri 610 mH ve kapasitenin değeri ise 17 μF dır. İndüktif ve kapasitif reaktans değerlerini bulmak için, kullanılan bağıntılar şu şekildedir ($\omega = 2\pi f$);

$$X_L = \omega \cdot L \quad (5.1)$$

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} \quad (5.2)$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot 50 = 314.16 \text{ rad/s} \quad (5.3)$$

ye eşit olup, her bir elemanın reaktans değeri;

$$X_L = \omega \cdot L = 314.16 \cdot 610 \cdot 10^{-3} = 191.64 \, \Omega$$

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{314.16 \cdot 17 \cdot 10^{-6}} = 187.24 \, \Omega$$

olarak hesaplanır.

SJ uçlarına bağlanan her bir ilâve eleman, yük bankası eşdeğer direnç/reaktans değerini düşürdüğünden jeneratörden çekilen güç değeri artar. Eşdeğer omik direnç değerini veren bağıntılar sırasıyla şöyledir;

$$R_e = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}} \quad [\Omega] \quad (5.4.a)$$

$$X_{Le} = \frac{1}{\frac{1}{X_{L1}} + \frac{1}{X_{L2}} + \frac{1}{X_{L3}} + \frac{1}{X_{L4}}} \quad [\Omega] \quad (5.4.b)$$

$$X_{Ce} = \frac{1}{\frac{1}{X_{C1}} + \frac{1}{X_{C2}} + \frac{1}{X_{C3}} + \frac{1}{X_{C4}}} \quad [\Omega] \quad (5.4.c)$$

Yüklerin paralel olarak devreye girmeleri durumunda, eşdeğer omik direnç ve indüktif / kapasitif reaktans değerleri denklemler 5.4.a, b, c' den sırasıyla;

$$R_{1e} = 192.00 \, \Omega, R_{2e} = 96.00 \, \Omega, R_{3e} = 64.00 \, \Omega, R_{4e} = 48.00 \, \Omega$$

$$X_{L1e} = 191.64 \, \Omega, X_{L2e} = 95.82 \, \Omega, X_{L3e} = 63.88 \, \Omega, X_{L4e} = 47.91 \, \Omega$$

$$X_{C1e} = 187.24 \, \Omega, X_{C2e} = 93.62 \, \Omega, X_{C3e} = 62.41 \, \Omega, X_{C4e} = 46.81 \, \Omega$$

olarak hesaplanır. Güç değerleri ise;

$$P = \sqrt{3} \cdot \frac{U_h^2}{Z} \cdot \cos \varphi \quad (5.5)$$

denkleminde sırasıyla ($U_h = 220V$);

$$P_{1e} = 436.62 \, W, P_{2e} = 873.24 \, W, P_{3e} = 1309.86 \, W, P_{4e} = 1746.49 \, W$$

$$P_{L1e} = 336.83 \, W, P_{L2e} = 673.66 \, W, P_{L3e} = 1010.49 \, W, P_{L4e} = 1347.32 \, W$$

$$P_{C1e} = 201.48 \, W, P_{C2e} = 402.95 \, W, P_{C3e} = 604.46 \, W, P_{C4e} = 805.90 \, W$$

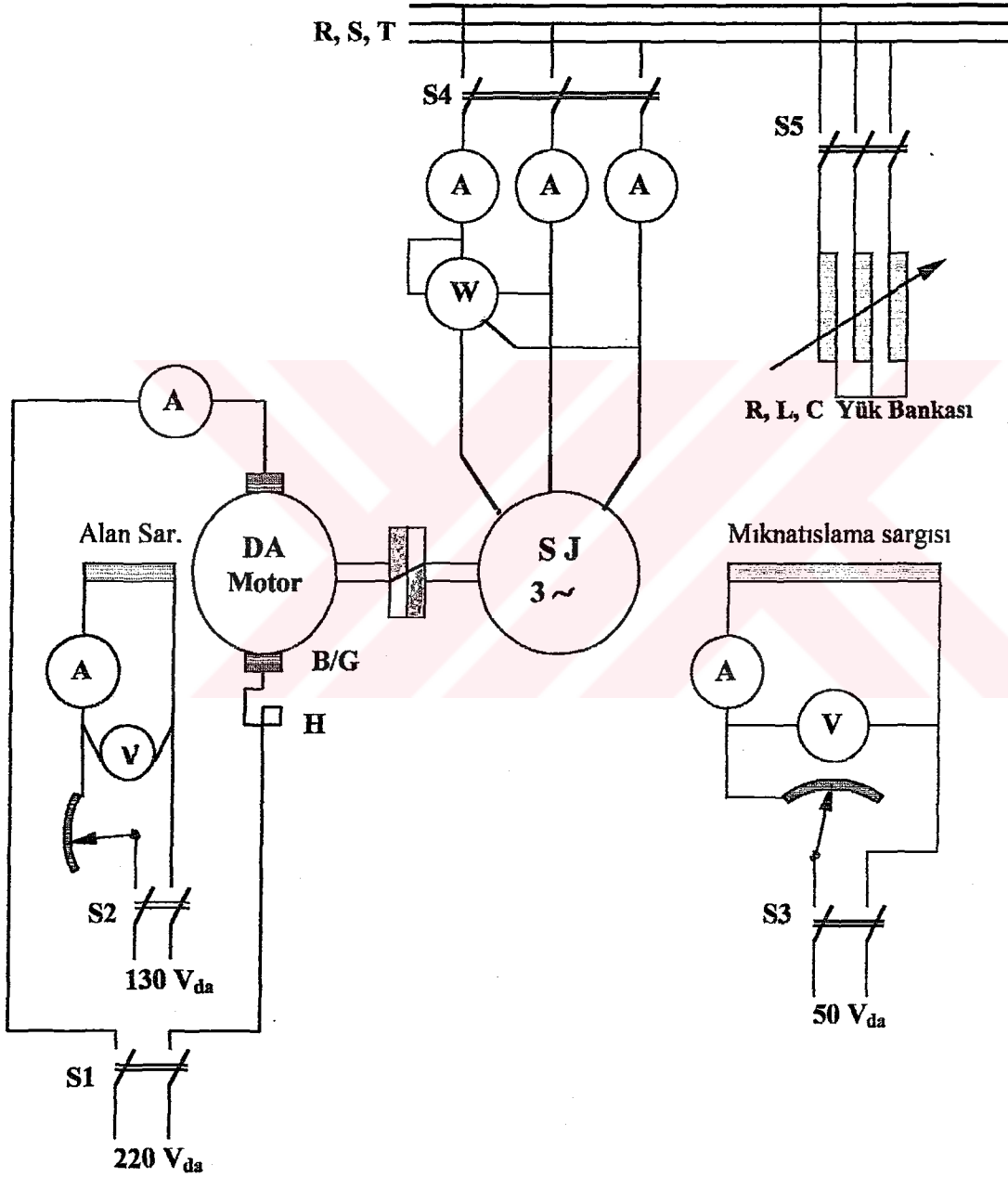
olarak bulunur.

(omik yükte $\cos \varphi = 1$, indüktif yükte $\cos \varphi \cong 0.77$, kapasitif yükte $\cos \varphi \cong 0.45$ olarak alınmıştır.)

Yük bankasındaki her bir elemanın devreye alınmasıyla SJ' ün çıkış gücü artar. Bu ise da motorundan SJ' e iletilen mekanik güç değerinin artışı gerektirir. Yükteki bu değişimlere bağlı olarak, SJ uç gerilimi ve frekansında da değişimler görülür. Bunları anma değerlerinde tutabilmek için, da motor endü ve SJ mıknatıslama sargılarından geçen akımın, dolayısıyla bu sargılara uygulanan gerilim değerlerinin denetlenmesi gerekir. DA motor endü gerilimiyle SJ devir sayısı/giriş gücü, mıknatıslama gerilimiyle ise SJ uç gerilimi kontrol edilir. Yük cins ve değerine bağlı olan her hangi bir değişim, tanımlanan giriş parametrelerinin de eş zamanlı olarak denetimini gerekli kılar.

5.3.2 Deney seti bağlantı şeması

Değişken yük durumlarında, senkron jeneratör çıkış ve kontrol parametrelerini elde etmek üzere yapılan deney çalışmalarında Şekil 5.19' da şeması verilen bağlantı şekli kullanılmıştır.



Şekil 5.19 Test amaçlı da motor-senkron jeneratör - yük bağlantı şeması

5.3.3 Deney sonuçları

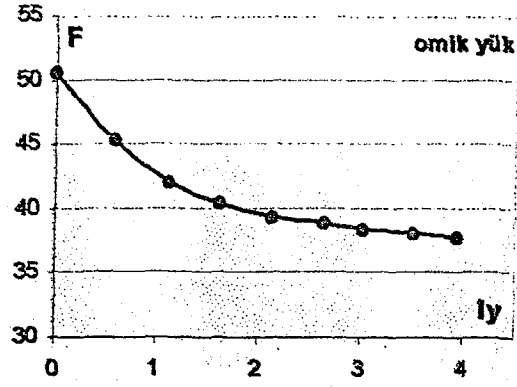
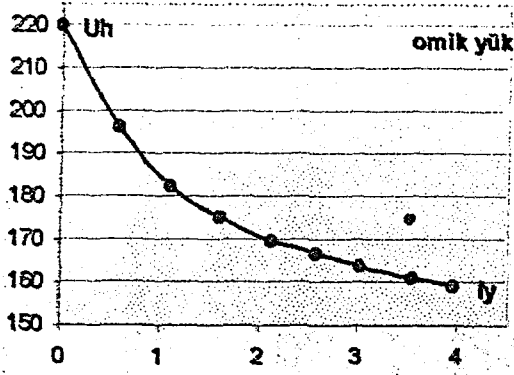
Deney işlemleri, senkron jeneratör yük akımı nominal değerinin yüzde 15 üzerine kadar kademe-kademe artırılarak gerçekleştirilmiştir. Kademeler sırasıyla omik, indüktif ve kapasitif yüklerin senkron jeneratör ucuna bağlanmasıyla gerçekleştirilmiş ve elde edilen uç gerilimi - frekans değerleri kaydedilmiştir. Yükler, üç faz için eş zamanlı olarak devreye alınmıştır.

Her bir kademedeki senkron jeneratör yük akımı, uç gerilimi, güç katsayısı ve frekans değerleri $\frac{x}{x_{\max}}$ bağıntısıyla normalize edilerek Tablo 5.3' de verilmiştir.

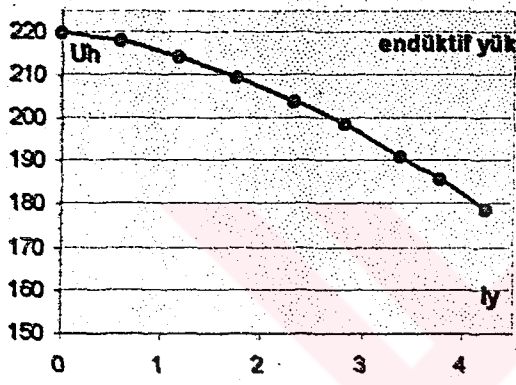
Tablo 5.3 Saf omik, indüktif ve kapasitif yük değerlerinde SJ uç parametreleri

YÜK		Senkron Jeneratör Çıkış Büyüklükleri			
Kademeler		$I_{h\max} = 5,68 \text{ A}$	$U_{h\max} = 232 \text{ V}$	$\cos\varphi_{\max} = 1$	$f_{\max} = 50,9 \text{ Hz}$
OMİK	Boşta	0	0,948276	0	0,994106
	1 R	0,105634	0,844828	1	0,88998
	2 R	0,197183	0,784483	1	0,823183
	3 R	0,286972	0,75431	1	0,805501
	4 R	0,378521	0,737069	1	0,789784
	5 R	0,457746	0,724138	1	0,777996
	6 R	0,535211	0,715517	1	0,764244
	7 R	0,625	0,698276	1	0,75442
	8 R	0,698944	0,685345	1	0,742633
İN DÜK TİF	1 XL	0,105986	0,939655	0,15	0,988212
	2 XL	0,207746	0,913793	0,12	0,982318
	3 XL	0,308099	0,892241	0,11	0,978389
	4 XL	0,408451	0,87931	0,11	0,966601
	5 XL	0,498239	0,853448	0,11	0,960707
	6 XL	0,582746	0,818966	0,1	0,948919
	7 XL	0,667254	0,801724	0,12	0,943026
	8 XL	0,746479	0,780172	0,11	0,939096
KAPA SİTİF	1 Xc	0,172535	0,974138	0,62	1
	2 Xc	0,276408	0,987069	0,29	0,994106
	3 Xc	0,403169	0,991379	0,25	0,986248
	4 Xc	0,551056	0,99569	0,46	0,978389
	5 Xc	0,698944	1	0,6	0,960707
	6 Xc	0,901408	0,99569	0,62	0,946955
	7 Xc	1	0,99569	0,6	0,937132

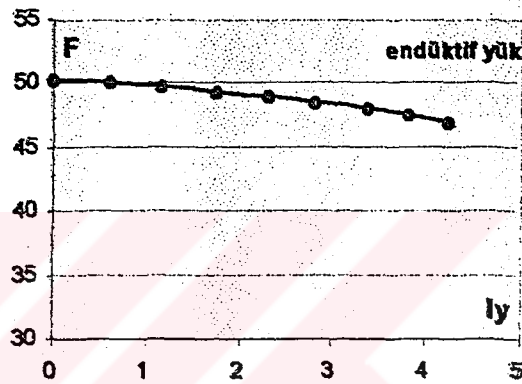
Deneyden elde edilen sonuçlara göre, yük akımı- senkron jeneratör uç gerilimi ve yük akımı- frekans değişimini veren eğriler omik, indüktif ve kapasitif yükler için sırasıyla çizilmiştir.



Şekil 5.20 Omik yük için SJ parametreleri, (a) yük akımı-uç gerilimi, (b) yük akımı-frekans eğrisi

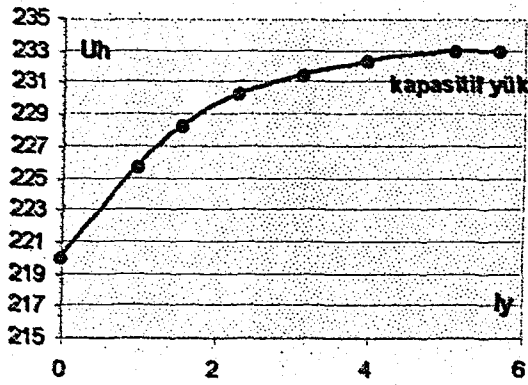


(a)

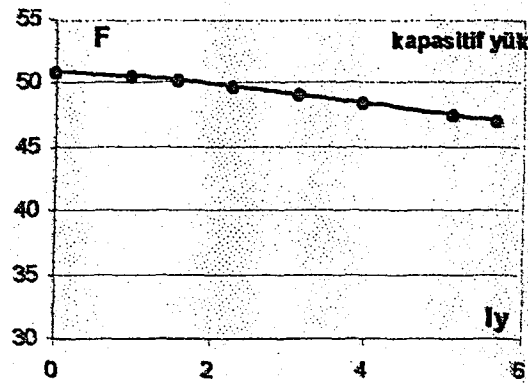


(b)

Şekil 5.21 İndüktif yük için SJ parametreleri, (a) yük akımı-uç gerilimi, (b) yük akımı-frekans eğrisi



(a)



(b)

Şekil 5.22 Kapasitif yük için SJ parametreleri, (a) yük akımı-uç gerilimi, (b) yük akımı-frekans eğrisi

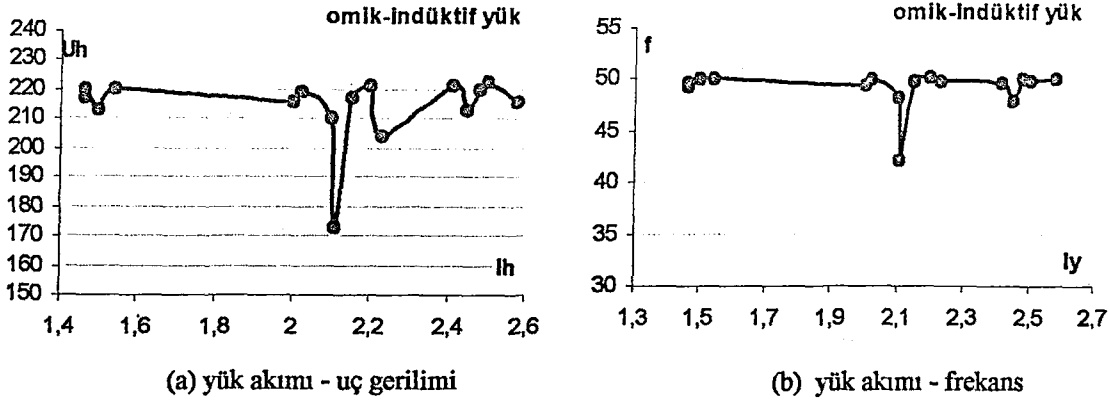
Tablo 5.3' de verilen değerler model YSA' nın eğitilmesinde kullanılmış. Ayrıca bunlardan farklı olarak seçilen karışık (omik - indüktif ve omik - kapasitif) yük durumlarında SJ uçlarından elde edilen yük/hat akımı, uç gerilimi, güç katsayısı ve

frekans değerleri Tablo 5.4' de verilmiştir. İşletmelerde genel olarak saf omik, saf indüktif veya saf kapasitif yüklerle göre, akım - gerilim arası faz açısının “ $\pm$ ” geniş bir yelpazede değiştiği yükler bulunması nedeniyle bu tür deney sonuçlarının alınması yeğlenmiş ve bu değerler YSA modelinin eğitilmesinin yanı sıra ağı test amacıyla da kullanılmıştır. Bu şekilde, model ağ eğitim ve test işlemlerinin geniş yük bandında gerçekleşmesi sağlanmıştır.

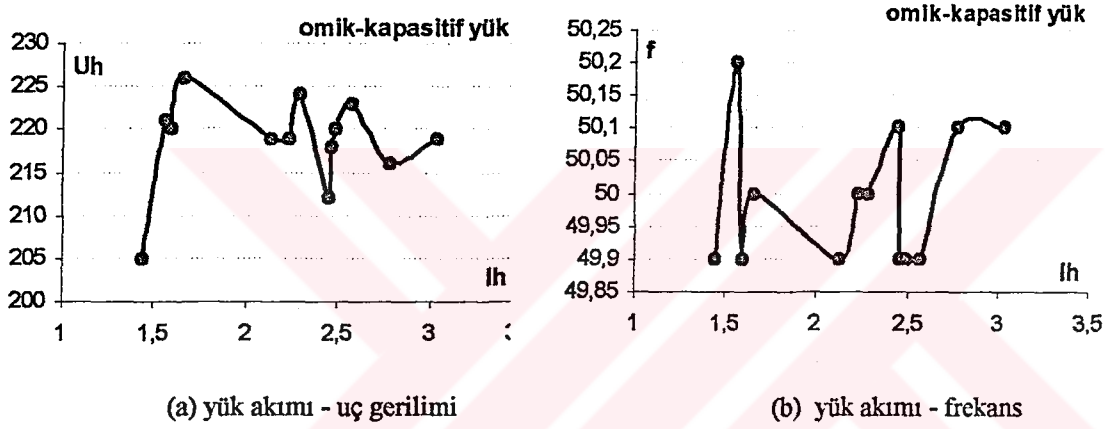
Tablo 5.4 Omik-indüktif ve omik-kapasitif yük değerlerinde SJ çıkış parametreleri

YÜK		Senkron Jeneratör Çıkış Büyüklükleri			
Kademeler		$I_{hmax} = 3,04 \text{ A}$	$U_{hmax} = 226 \text{ V}$	$\cos\phi_{max} = 0,97$	$f_{max} = 50,2 \text{ Hz}$
OMİK İN DÜK TİF	2R-XL	0,581395	0,955157	0,958333	0,998004
	R-2XL	0,565891	0,973094	0,552083	0,982036
	R-3XL	0,775194	0,96861	0,447917	0,988024
	R-4XL	1	0,96861	0,364583	1
	2R-3XL	0,817829	0,775785	0,625	0,842315
	3R-2XL	0,949612	0,955157	0,895833	0,958084
	2R-XL	0,596899	0,986547	0,958333	1
	3R-XL	0,813953	0,941704	1	0,964072
	3R-XL	0,833333	0,973094	1	0,996008
	3R-XL	0,852713	0,991031	1	1,001996
	R-2XL	0,565891	0,986547	0,5625	0,992016
	R-3XL	0,782946	0,982063	0,447917	1
	2R-3XL	0,864341	0,914798	0,677083	0,994012
	2R-3XL	0,934109	0,991031	0,666667	0,992016
	3R-2XL	0,968992	1	0,90625	0,996008
	3R-2XL	0,96124	0,986547	0,90625	0,998004
OMİK KAPA SİTİF	2R-Xc	0,473684	0,90708	0,927835	0,994024
	2R-Xc	0,513158	0,977876	0,927835	1
	3R-Xc	0,700658	0,969027	0,979381	0,994024
	4R-Xc	0,914474	0,955752	1	0,998008
	R-2Xc	0,546053	1	0,56701	0,996016
	R-2Xc	0,526316	0,973451	0,556701	0,994024
	R-3Xc	0,753289	0,99115	0,443299	0,996016
	R-3Xc	0,733553	0,969027	0,443299	0,996016
	R-4Xc	1	0,969027	0,515464	0,998008
	2R-3Xc	0,805921	0,938053	0,618557	0,998008
	2R-3Xc	0,845395	0,986726	0,618557	0,994024
	3R-2Xc	0,809211	0,964602	0,85567	0,994024
	3R-2Xc	0,819079	0,973451	0,865979	0,994024

Eğitme işlemi sonucu kontrol algoritmasını 10^{-8} yaklaşıklıkla öğrenen model YSA kontrolör, Tablo 5.4' de verilen omik - indüktif ve omik - kapasitif yükleri içeren deney sonuçları ile test edilmiştir. Bu değerlere göre, yük akımı - SJ uç gerilimi ve yük akımı - frekans değişimini veren eğriler her bir yük grubu için sırasıyla çizilmiştir.



Şekil 5.23 Omik - indüktif yük için SJ uç parametreleri değişim eğrileri



Şekil 5.24 Omik - kapasitif yük için SJ uç parametreleri değişim eğrileri,

Model YSA' nı eğitime ve test amacıyla gerçekleştirilen, değişik yük durumları için senkron jeneratör uç gerilimi ve frekans değişim eğrileri Şekil 5.20 ile Şekil 5.24 arasında verilmiştir. Şekillerden anlaşılacağı üzere, senkron jeneratör çıkış parametreleri olan uç gerilimi (U_h) ve frekans (f) değerleri yükün değerine ve türüne bağlı olarak lineer olmayan bir değişim göstermektedir. Bu parametreleri optimal değerleri civarında kararlı halde tutulabilmek için, da motor endüj gerilimi (U_e) ile SJ mıknatıslama alan geriliminin (U_m) yük cinsine göre, gerçek-zamanlı olarak kontrol edilmeleri gerekir.

Gerçek-zamanlı kontrolde SJ çıkış büyüklüklerinin değişim aralığını, kontrol algoritmasının hassasiyeti ve ara-yüz kartının işlem hızı belirler.

Tablo 5.5 Değişik yük değerleri için $\cos\phi$, P_g ve U_m değerlerinin değişimi ($U_h = 220$ V, $f = 50$ Hz)

YÜK		SJ yük akımı	güç katsayısı	Mıknatıslama gerilimi	Giriş gücü
Kademeler		$I_{hmax} = 4,81$ A	$\cos\phi_{max} = 1$	$U_{mmax} = 26,95$ V	$P_{gmax} = 3424,344$ W
OMİK	Boşta	0	1	(18 V _{dc})	(534,07 W)
	R	0,138877	1	0,676067	0,293578
	2R	0,280665	1	0,724304	0,431193
	3R	0,419958	1	0,719481	0,568807
	4R	0,561331	1	0,731725	0,688073
İN DÜK TİF	XL	0,12578	0,18	0,723562	0,165138
	2XL	0,255717	0,11	0,790724	0,174312
	3XL	0,384615	0,11	0,81039	0,183486
	4XL	0,517672	0,11	0,860853	0,201835
	5XL	0,648649	0,1	0,903525	0,220183
	6XL	0,777547	0,09	0,957699	0,229358
	7XL	0,91684	0,09	1	0,247706
KAPA SİTİF	Xc	0,187526	0,62	0,608905	0,146789
	2Xc	0,303534	0,28	0,596289	0,155963
	3Xc	0,446985	0,27	0,561039	0,155963
	4Xc	0,623701	0,5	0,509462	0,165138
	5Xc	0,864865	0,61	0,451948	0,174312
İN DÜK TİF	R-XL	0,31185	0,92	0,728757	0,431193
		0,629938	0,91	0,826716	0,724771
		0,442827	0,96	0,735436	0,559633
		0,575884	0,98	0,76141	0,706422
		0,295218	0,54	0,743599	0,302752
		0,596674	0,54	0,863451	0,46789
		0,902287	0,54	0,976994	0,633028
		0,411642	0,43	0,807792	0,321101
		0,831601	0,41	0,936178	0,504587
		0,948025	0,96	0,857885	0,990826
		0,962578	0,65	0,993692	0,770642
		0,303534	0,63	0,776252	0,311927
İN DÜK TİF	R-Xc	0,218295	0,76	0,634137	0,284404
		0,316008	0,9	0,66679	0,422018
		0,642412	0,9	0,664935	0,697248
		0,931393	0,9	0,661596	0,981651
		0,449064	0,95	0,667161	0,550459
		0,923077	0,95	0,731725	1
		0,582121	0,97	0,683859	0,688073
		0,334719	0,53	0,616698	0,284404
		0,671518	0,53	0,53321	0,431193
		1	0,6	0,466048	0,587156
		0,467775	0,44	0,573284	0,293578
		0,970894	0,58	0,464564	0,458716

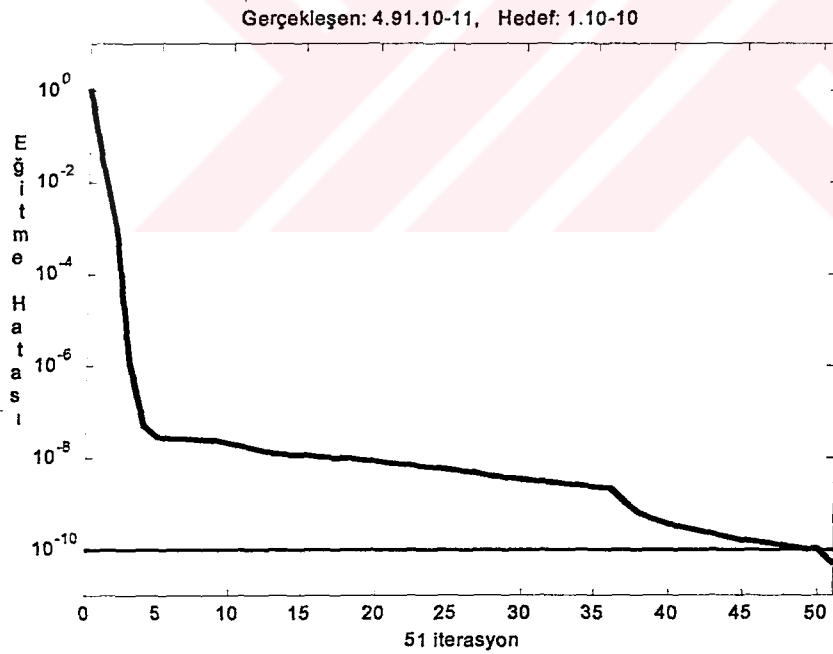
Tablo 5.5' de eğitme ve test veri çiftlerini elde etmek üzere deneyde kullanılan değişik yük değerlerine bağlı olarak, senkron jeneratör uç gerilimi ve frekansını, referans değerleri olan sırasıyla 220 V_{ac} ve 50 Hz' de tutabilmek için her kademede gerekli olan P_g ve U_m değişimleri yük akımı ve güç katsayısıyla birlikte verilmiştir.

5.4 SJ Modelinin Deneysel Verilerle Eğitimi

Elektrik makineleri laboratuvarında Bölüm 5.3' te tanımlanan deney seti kullanılarak gerçekleştirilen SJ yüklü çalışma deney sonuçları Tablo 5.3 ve Tablo 5.4' te ve SJ yük cinsine bağlı olarak elde edilen yük akımı - uç gerilimi değişim grafikleri Şekil 5.19 ile Şekil 5.23 arasında verilmiştir.

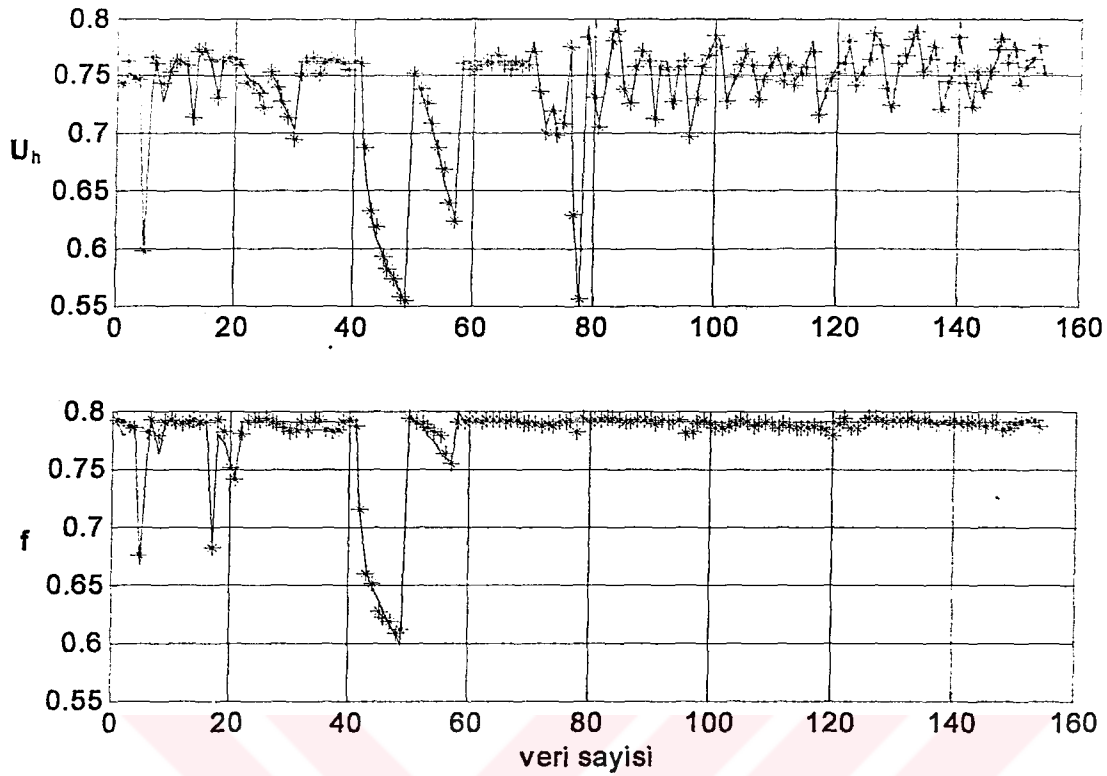
SJ ve denetleyici modellerinin YSA ile eğitiminde deneysel olarak elde edilen 154 farklı değer kümesi kullanılmıştır. YSA eğitme işleminde Şekil 5.2' de tanımlanan ağ yapısı 15, 10, 15, 2 olacak şekilde değiştirilerek kullanılmıştır.

Bölüm 5.2.3' te tanımlanan off-line YSA eğitme yapısı burada da kullanılmış olup, eğitme işleminde model SJ için hata toleransı 1.10^{-10} olarak seçilmiştir. YSA modelin 51 iterasyonda SJ sistem modelini başarıyla öğrendiği gözlenmiştir. Buna ait değişim grafiği Şekil 5.25' te verilmiştir.



Şekil 5.25 YSA model SJ öğrenme-iterasyon değişim grafiği

SJ çıkış parametrelerini oluşturan U_n ve f değerlerinin, model YSA yapısında veri sayısına bağlı olarak öğrenme değişim grafiği Şekil 5.26' da verilmiştir.

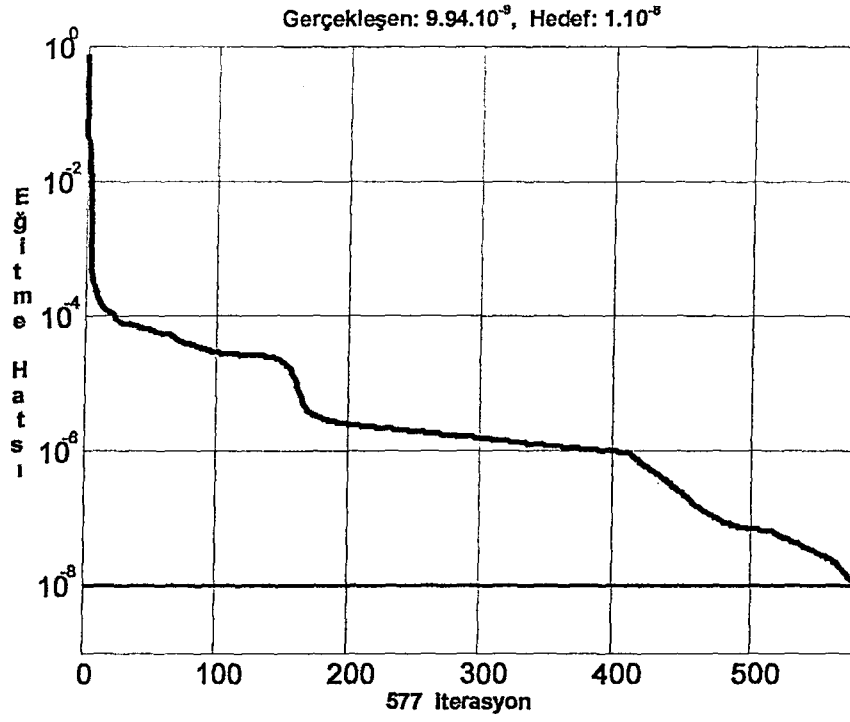


Şekil 5.26 SJ YSA modelin çıkış büyüklüklerini öğrenme sonucu

5.5 Denetleyici Modelinin Deneysel Verilerle Eğitimi

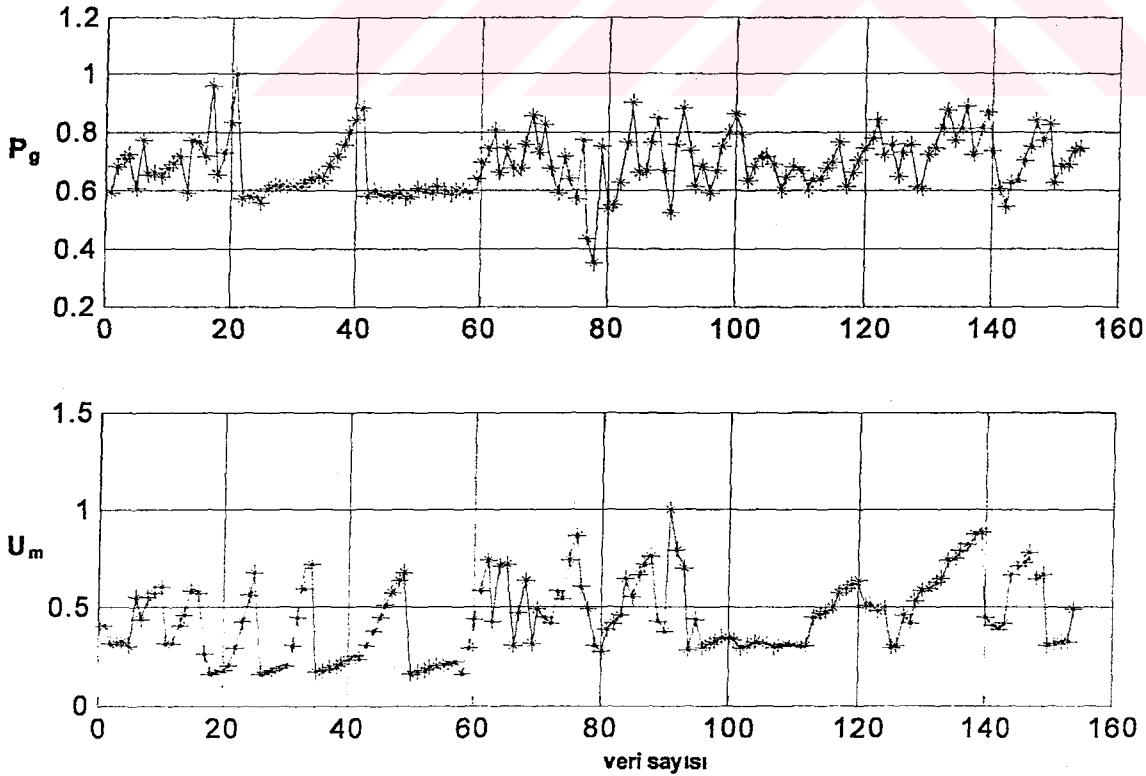
SJ giriş büyüklüklerini oluşturan P_g ve U_m değerlerinin, gerçek zamanlı olarak denetimini gerçekleştirmek üzere YSA denetleyici modeli oluşturulmuştur. Burada amaç değişken yük durumlarında, SJ çıkış büyüklükleri olan frekans ve uç gerilimini referans değerleri civarında tutmaktır. Deneysel olarak elde edilmiş olan 154 farklı veri kümesiyle eğitimi gerçekleştirilen denetleyici modeli için Şekil 5.2' deki ağ yapısı kullanılmıştır.

Şekil 5.10' da verilen off-line eğitime yapı modeli kullanılarak gerçekleştirilen YSA denetleyici eğitiminde hata toleransı 1.10-8 olarak seçilmiştir. 577 iterasyonda YSA modelin denetleyici yapısını başarıyla öğrendiği görülmüştür. Buna ait değişim grafiği Şekil 5.26' da verilmiştir.



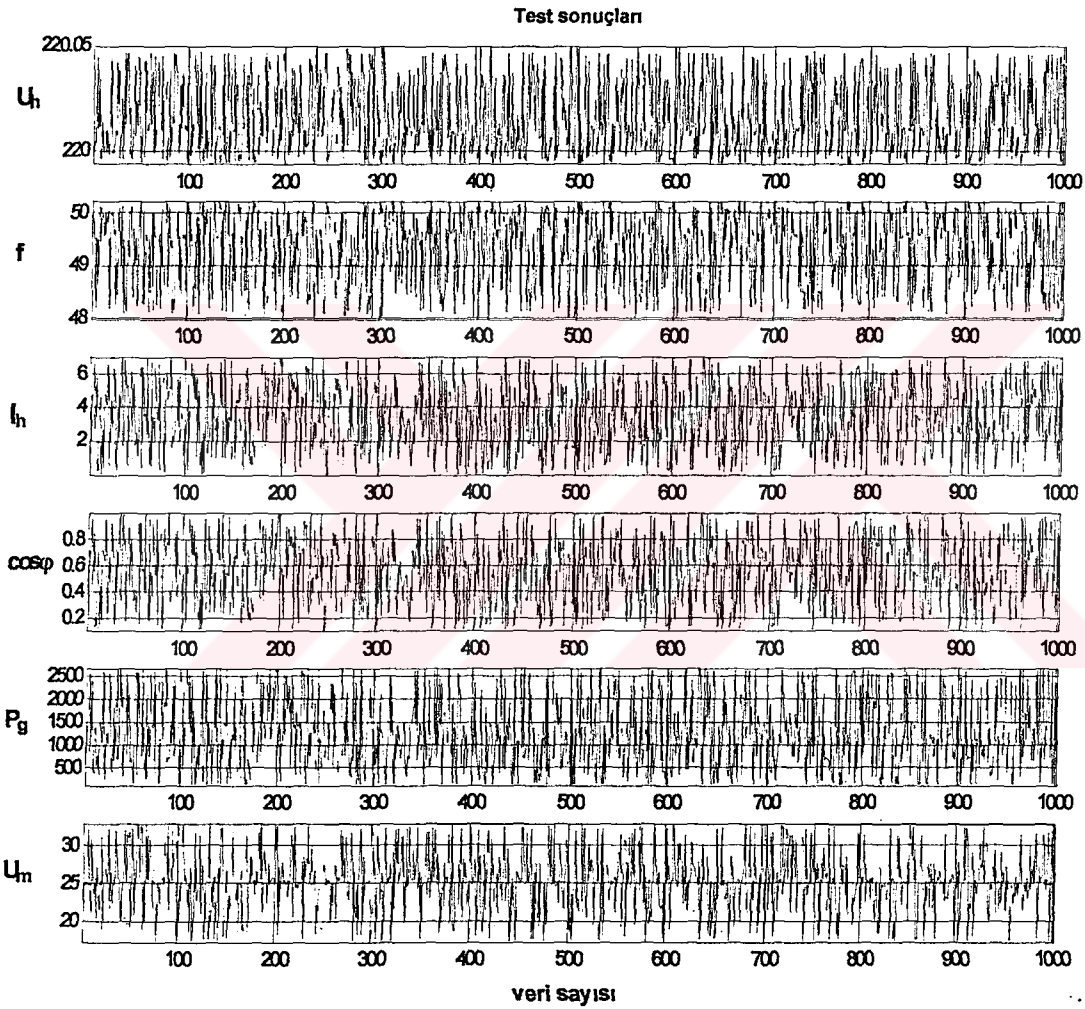
Şekil 5.27 Denetleyici YSA modeli öğrenme-iterasyon değişim grafiği

YSA denetleyici modelin çıkış büyüklüklerini oluşturan P_g ve U_m değerlerini öğrenme sonuçları Şekil 5.27' de verilmiştir.



Şekil 5.28 Denetleyici YSA modelin çıkış büyüklüklerini öğrenme sonucu

Deneyisel verilerle eğitime işlemi sonucunda, YSA modeli oluşturulan SJ ve denetleyici yapıları Bölüm 5.2.5’ de verilen Matlab/Simulink programıyla rast gele olarak üretilen 1000 farklı veri kombinezonuyla test edilmiştir. Elde edilen sonuçlarda oldukça yüksek doğruluk oranlarına ulaşılmıştır. Testlerde uç gerilimi yaklaşık 220 V referans değerinde sabit tutulurken, frekans değerinde ise % 4’ ün altında gerçekleşen bir dalgalanma oranı gözlenmiştir. Şekil 5.29’ da test işleminde elde edilen uç gerilimi ve frekans değişim grafikleri görülmüyor.



Şekil 5.29 SJ ve denetleyici YSA modellerinin deneyisel verilerle öğrenme test sonuçları

BÖLÜM 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1 Değerlendirme

Bu tez çalışmasında güç üreteçleri olarak kullanılan SJ' in, özgün olarak geliştirilen bir model YSA denetim algoritması yardımıyla, değişken yük durumlarında sabit gerilim genliği ve frekansta çıkış vermelerinin sağlanması konusu araştırılmıştır. Geliştirilen model YSA denetim algoritması farklı sayıda sistem giriş çıkış verileriyle eğitilmiş, daha sonra rast gele üretilen giriş verileriyle test edilmiştir. Test işlemi için SJ' ün YSA modeli kullanılmış ve YSA denetleyicinin SJ' ün tam modelini öğrenmesi sağlanmıştır. Geliştirilen YSA denetleyici yapısı, SJ' ün çıkış büyüklüklerini oluşturan uç gerilim genliği ve frekansın denetimine uygulanmış ve başarılı sonuçlar alınmıştır.

YSA' ı kısmen adaptif denetim algoritmalarının özelliklerini içerirler. Sistemden alınan örneklemeler yoluyla eğitilebilmeleri ve karmaşık matematiksel bağıntılar gerektirmemeleri, denetim konusunda geniş bir uygulama alanı bulmalarına neden olmuştur. Klasik denetim algoritmalarına göre, YSA tabanlı denetleyici uygulamaları yüksek performans değerlerinde çok daha basit, hızlı ve ekonomik yapı ve donanımlar içerirler. Bu durum en büyük avantajlarını oluşturur.

Literatürdeki mevcut uygulamalarda ileri beslemeli YSA, bilinmeyen ve lineer olmayan haritalamayı kolaylaştıran bir kara kutu tanımlama modeli olarak kullanılmıştır. İleri beslemeli YSA algoritmasına sahip denetleyici yardımıyla SJ çıkış büyüklüklerinin denetiminde başarılı sonuçların alınması, bu çalışmanın önemli ve özgün noktasını oluşturmaktadır.

Enterkonnekte sistemlerin, birbirleriyle olan etkileşimleri ve sistemde hem üretim hem de tüketim tarafında oluşan sürekli değişimler, uç gerilim ve frekansında sürekli dalgalanmalara neden olur. Küçük veya büyük şiddette bozucu etkiler olarak sınıflandırılan bu salınımlardan küçük şiddetli olanları, sistemde çok sık olarak

meydana gelir ve küçük boyutta ve düşük frekansta dalgalanmalara neden olarak senkronizasyonu olumsuz yönde etkiler ve hatta sistemde bazı bölgelerin devre dışı kalmasına yol açabilirler. Bu nedenle, bu salınımların önlenmesi önemli bir problem olarak görülür.

Türbin-jeneratör sistemlerinde meydana gelen yük dalgalanmaları, rotor mil hızında değişimlere yol açması nedeniyle üretilen güce de etki eder. İvmelendirme gücünün bozucu etkilerle değişmesi, elektrik-mekanik güç dengesinin sarsılmasına neden olur.

Türbin-jeneratör sistemlerinde mevcut olan, hız regülatörleri ve uyarmayı denetleyen gerilim regülatörleri tanımlanan çıkış büyüklüklerindeki değişimleri bir ölçüde sönümleyebilmektedir. Ancak pratikte bunun yeterli olmadığı görülür. Özellikle hız regülatörlerinin gecikme ile devreye girmesi önemli bir eksikliktir. Gerilim regülatörleri ise, sadece uç gerilim değişimlerinde bu gerilimi iyileştirmeye yönelik çalıştığından, rotor hızı değişimlerinde pek etkili olamamaktadır. Bu durumda devreye çabuk giren ve hız sapmalarına göre uyarma gerilimini daha etkili değiştiren bir geri besleme elemanına ihtiyaç vardır. Çıkış işaretlerinin girişe iletilmesi amacını taşıyan geri besleme sistemlerinin, denetim teorisinde daima kararlılığı artırıcı yönde etki yaptıkları kabul edilir. Çalışmada kullanılan ileri beslemeli YSA denetleyici yukarıda tanımlanan geri besleme denetimin bütün üstünlüklerini sağlamaktadır. Modelde tanımlanan lineer olmayan iki makinelı güç sisteminin denetimi bu yapı kullanılarak başarıyla gerçekleştirilmiştir.

Çıkışta görülen frekans ve uç gerilim değişimleri, geliştirilen YSA denetleyici yardımıyla başarılı bir şekilde giderilmiştir. Tez çalışmasında, ters kontrol yapısı kullanılarak SJ' ün ileri beslemeli YSA modeli tanımlanmış ve güç sistem kararlayıcısı olarak kullanılmıştır. Çalışmada sunulan önermeler, sistem modelinin kapasitesiyle gerçekçi olarak bağlantılı olup, yapısı gereği oldukça zor bir problem olan dinamik ve lineer olmayan sistem denetimi, eğitime işlemiyle gerçekleştirilmiştir.

YSA öğrenme setindeki veri sayısı ve yapısının, öğrenme performansını etkilediği görülmüştür. Eğitim verilerinin çokluğu öğrenme oranını artırmakta, buna karşılık öğrenme performansını ise olumsuz yönde etkilemektedir. Eğitim işlemi sonucu,

sistem tanımlamada gerek simülasyon verilerinde gerekse deneysel yolla elde edilen verilerle % 99.9' un üzerinde, test işlemlerinde ise simülasyonda % 1' in altında deneysel verilerde yaklaşık % 96 oranında bir doğruluk oranı elde edilmiştir. Kullanılan deneysel veri sayısı artırılarak bu oranın yükseltilebileceği görülmüştür. Şekil 5.15, Şekil 5.16 ve Şekil 5.29' da bu değişimler görülebilir.

6.2 Sonuç ve Öneriler

Simülasyon çalışmasında ileri beslemeli YSA denetim algoritması kullanılmış olup, elde edilen sonuçlar oldukça tatmin edicidir. YSA denetim tekniğiyle klasik GSK' na göre daha iyi sonuçlara ulaşılabileceği, hatta büyük yük değişimlerine karşı da SJ' ün başarılı bir şekilde korunabileceği görülmüştür. Bu tezde yapılanları ilerletmek için yeni teknikler önerilebilir. Modern denetim teorisinin bütün teknikleri, güç sistemlerinin denetimine de başarılı bir şekilde uygulanabilir. Kullanılan modelin lineerliğinin zorunlu olmaması, çalışmalardaki kısıtlamayı önemli ölçüde aşmaya imkan tanımaktadır. Eğer SJ' ün YSA' daki gibi lineer olmayan bir modeli ile çalışılırsa her türlü durum için jeneratörün kontrolü sağlanabilir. Lineer bölgede incelenmeyecek durumlarda da başarılı bir denetim yapılabilir olması önerilen bu yapının önemli bir avantajıdır. Ayrıca, her türlü güç sisteminin denetiminde, bu denetleyiciler kolaylıkla kullanılabilir ve dinamik sistemlerin kontrolünde önemli kazanımlar sağlanabilir.

Bu çalışmada görülmüştür ki, YSA güç sistemlerinin kararlılık denetiminde etkin olarak kullanılabilir. Bu metot karmaşık eş-zamanlı modelleme ve pahalı donanımlar kullanmaksızın, lineer olmayan bu tür sistemler için denetleyici tasarımına basit bir çözüm sunmaktadır. Bu denetim yapısına ait gelecek çalışmalar, yeni güç sistem modelleri geliştirmek ve incelenen denetim metodunu farklı YSA denetleyici algoritmaları ve YSA dışı diğer denetim metodlarıyla karşılaştırmalı olarak test etmek olabilir.

Yeni metotlar yardımıyla, lineer olmayan sistemlerin tanımlanması ve denetimi gibi genel uygulamaların yanı sıra, zaman eksenli lineersizliği izleyip öğrenebilme yeteneği sağlayan YSA' ı da geliştirilerek tam dinamik modellemeye uygulanabilir.

Yapılan modellemelerde, Bölüm 5' te görüldüğü gibi oldukça başarılı sonuçlar alınmıştır. Daha çok sayıda deneysel verinin elde edilmesiyle, daha iyileştirilmiş sonuçların elde edileceği görülmüştür. Ayrıca, şebeke güç katsayısının iyileştirilmesi de bundan sonraki çalışmalar için önerilebilir. Bunun yanı sıra, SJ uç gerilimi ve frekansı ile tahrik sistemindeki türbin girişi su, gaz vb. değişkenlere ait kapak veya vanalarının konumu arasındaki ilişki de farklı bir çalışma konusu olabilir.

Sonuç olarak, lineer olmayan tanımlama model yapıları içinde YSA ile bütünleşen yeni metotlar geliştirilmeli, yeni teknikler yardımıyla zaman değişimli lineersizliği izleyip öğrenebilme yeteneği kazandırılmış YSA' ı gerçekleştirilmelidir.

Güç jeneratörlerinin YSA' ı yardımıyla denetimi işleminde farklı olarak, çıkışta istenebilecek ek fonksiyonlar tanımlanabilir, ayrıca daha basit ve hızlı denetleyici yapılarının elde edilmesine çalışılabilir.

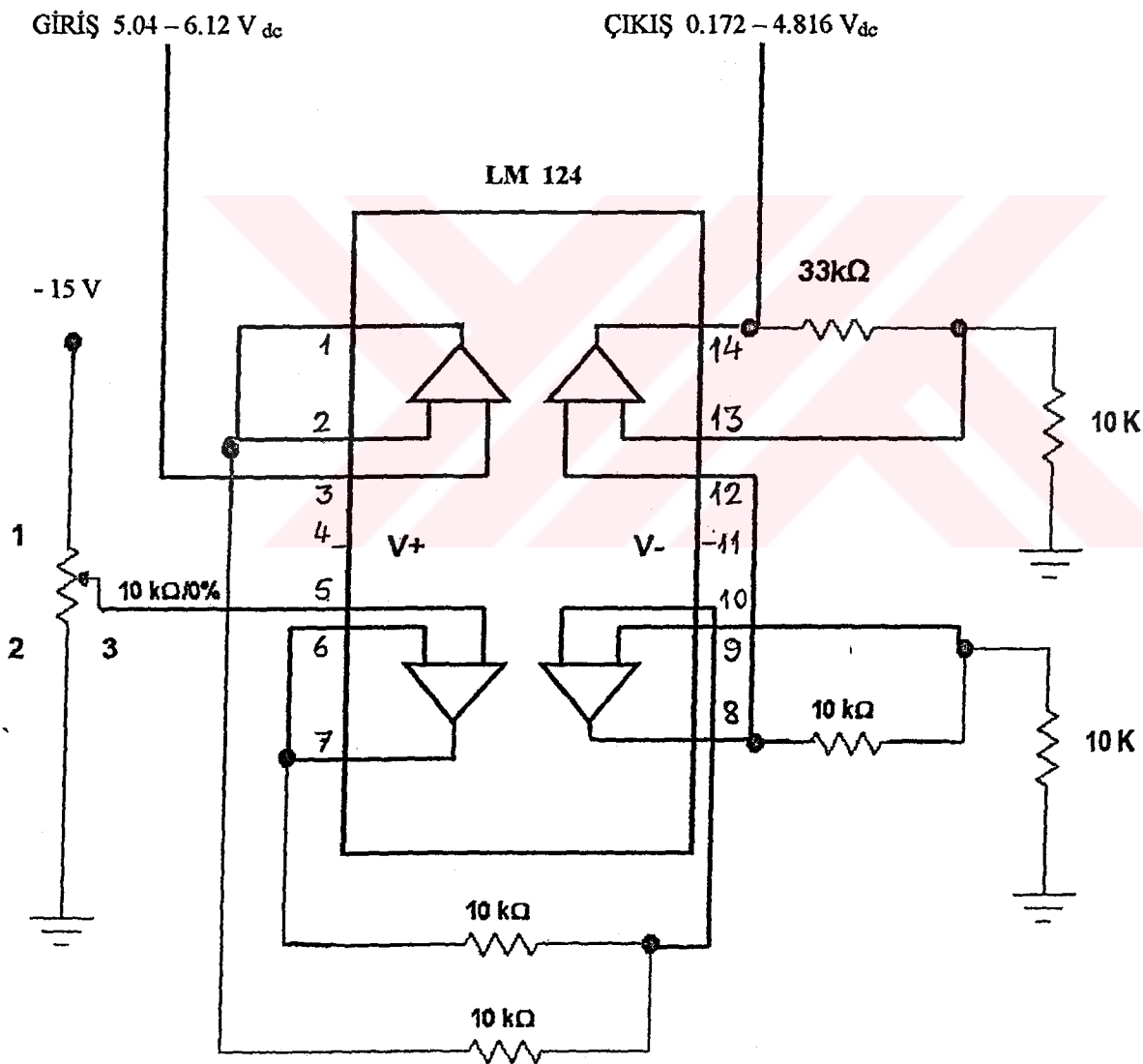
KAYNAKLAR

- [1] GÜZELBEYOĞLU, Prof. Dr. N., “Elektrik Makineleri I, II”, sayı:1493, İTÜ Kütüphanesi, sayfa no: 87-165, Gümüşsuyu, 1992
- [2] ÇAKIR, Prof. Dr. H., “Elektrik Güç Sistemleri Analizi”, İstanbul, 1986
- [3] BİLİR, B., “Optimal Control Approach for Large Power System Dynamic Stability”, Msc. Thesis, İTÜ, Elektrik, February, 1990
- [4] HEYDT, G., T., “ Computer Analysis Methods for Power Systems” , Mac Millian Publishing Company, New York, 1986
- [5] YU, Y., N., “ Electric Power System Dynamics”, Academic Press, New York, 1983
- [6] ANDERSON, P., M., & FOUAD, A., A., “Power System Control and Stability”, IEEE Press, Piscataway, 1984
- [7] LARSEN, E. V. & SWAN, D. A., “Applying Power System Stabilizers”, Parts I,II and III”, IEEE Trans. on Power Appar. Sys., vol.PAS-100, pp.3017-3046, June 1981
- [8] ANTSAKLIS, P. J., “Neural Networks in Control Systems”, IEEE Control Systems Magazine, pp.8-10, April 1990
- [9] L., B., Almeida,: “Backpropagation in perceptrons with feedback”, Neural Computers, NATO ASI series, pp.199-208, Berlin: Spinger-Verlag, 1988
- [10] L., B., Almeida,: “A Learning rule for asynchronous perceptrons with feedback in a combinational environment”, Proc. of IEEE, 1st Conf. On Neural Net. II, pp. 609-618, 1987
- [11] YOUSEF, H. & SIMAAN, A., “Model Reference Adaptive Control of Large Scale Systems with Application to Power System”, IEE Proc.-D, vol.138, pp.321-326, July 1991
- [12] ASTROM, K., J., “ Theory and applications of adaptive control- survey”, Automatica vol. 19, no. 5, September, 1983
- [13] ABULAFYA, N., “Neural Networks for System Identification and Control”, Msc Thesis, University of London, 1995
- [14] RUCHTI, Timothy, “Identification of Nonlinear Systems Using Artificial Neural Networks With Elecromechanical Applications”, PhD Thesis, Marquette University, May’ 95
- [15] KUNDUR, P., “Power System Stability and Control”, EPRI PSE Series, McGraw –Hill, New York, 1994
- [16] GRONDIN, R., “An Approach to PSS Design For Transient Stability Improvement through Supplementary Damping of The Common Low-Frequency”, IEEE Trans. On Power Systems, vol.8, no.3, pp. 954-963, August, 1993

- [17] YANG, X., FELIACHI, A., "Stabilisation of Inter-Area Oscillation Modes through Excitation Systems", IEEE Trans. On Power Systems, vol.9, no.1, pp.494-502, February' 94
- [18] ROGERS, G., J., "Control for Stability in Interconnected Power System", IEEE Control Systems Magazine, vol.9, no.1, pp.19-22, January 1989
- [19] TACER, M., E., "Enerji Sistemlerinde Kararlılık", İTÜ Kütüphanesi, Sayı:1407, İstanbul 1990
- [20] YILMAZ, A., S., "Güç Sistem Kararlayıcıları ve Uygulamaları", Yüksek Lisans T., SAÜ F.B.E., Ocak. 1997
- [21] YALÇIN, M., A., "Enerji Sistemlerinde Gerilim Kararlılığının Yeni Bir Yaklaşımla İncelenmesi", Doktora Tezi, İTÜ, Şubat 1995
- [22] TUNÇ, A., "Çıkık Kutuplu Senkron Generatörün Adaptif Kontrolü", Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Şubat 1988
- [23] IEEE Committee Report, "Computer Representatin of Excitation Systems", IEEE Trans. on Power Appar. Sys. Vol.PAS-87, no.6, pp.1460-1464, June 1986
- [24] LARSEN, E. V., & SWAN, D.A., " Applying Power System Stabilizers I, II and III", IEEE Trans. on Power Appar. Sys. Vol. PAS-100, pp.3017-3046, June 1981
- [25] BARAK, D., "Use of Fuzzy Logic in Electrical Power Generation", University of Mexico, 1993.
- [26] SAY, M. G., "Alternating Current Machines", Longman Scientific & Technical, pp.461-476, London 1983
- [27] BAVARIAN, B., "Artificial Neural Networks for Motion Control", Motion Control, pp.40-44, January 1991
- [28] LEVIN, R. & INBAR, G., "Neural Network Architecture for Adaptive System Modeling and Control", Neural Networks, vol.4, pp.185-191, 1991
- [29] PITTS, W., "A Logical Calculus of the ideas İmminenet in Nervous Activity", Bulletin of Mathematical Biophysics, vol.5, pp.115-133, 1943
- [30] ROSENBLATT, F., "Principles of Neurodynamics", East Lansing, MI: Spartan Books,1962
- [31] HOPFIELD. J., "Neural Networks and Physical Systems with Emergent Collective Computational Abilities", Proc.Natl.Acad. Sci., vol.79, pp.2554-2558, 1982
- [32] RUMELHART, D. & HINTON, G., " Learning Internal Representation by Error Propagation", Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition", vol.1, MA: MIT Press, pp.318-362, 1986
- [33] ARBIB,K., J., "Brains, Machines and Mathematics", 2nd ed. Springer Verlag 1987
- [34] CHU, S., "Neural Networks for System Identification", IEEE Control Systems Magazine, pp.31-35, April 1990

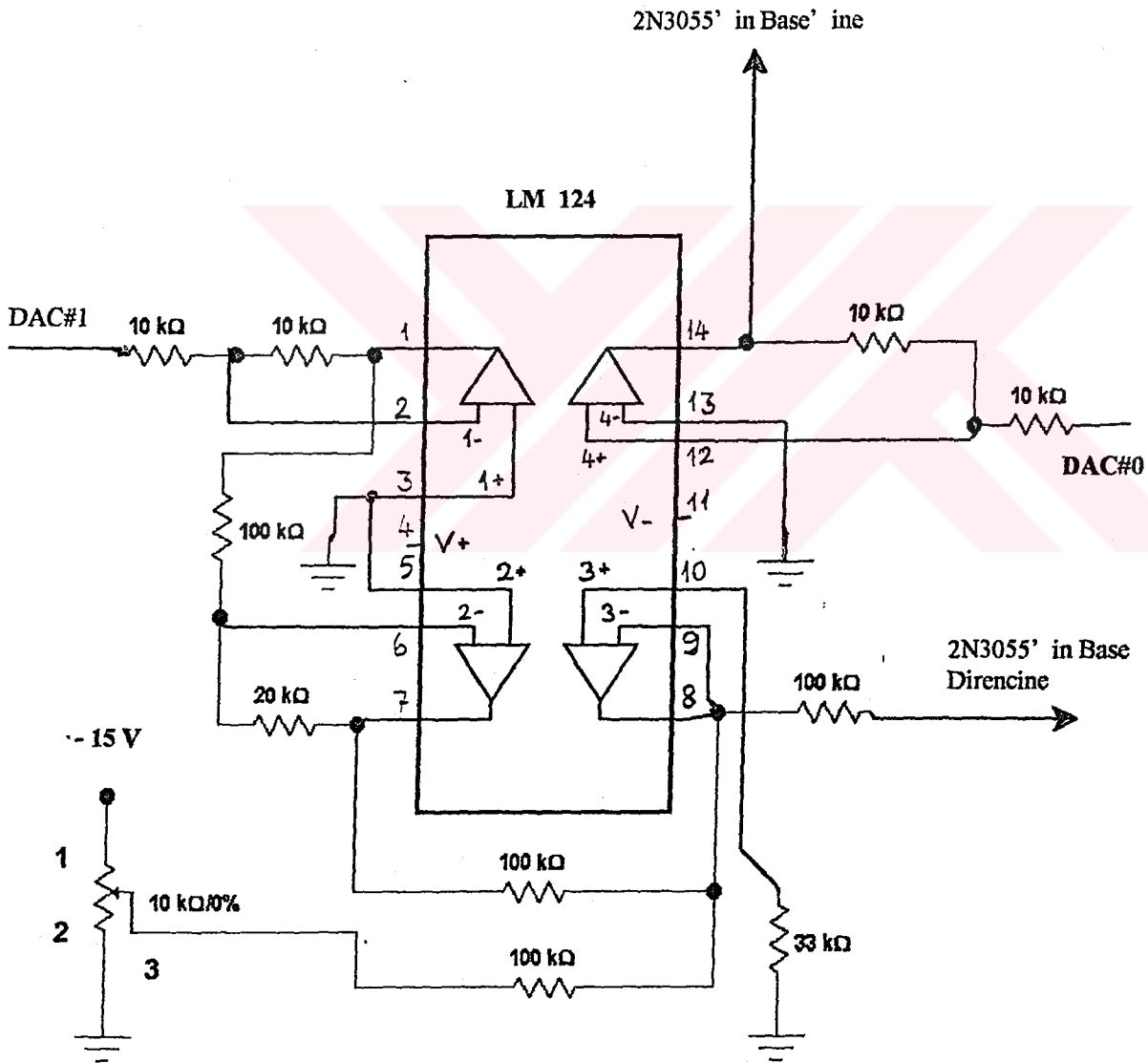
- [35] GOMI, H. & KAWATO, M., "Learning Control for a Closed Loop System Using Feedback-Error-Learning", Proc. CDC., pp. 3289-3294, December 1990
- [36] ALEXANDER, I. & MORTON, H., "An Introduction to Neural Computing", London 1990
- [37] KARLIK, B., "Çok Fonksiyonlu Protezler için Yapay Sinir Ağları Kullanarak Miyoelektrik Kontrol" Doktora Tezi, YTÜ, F.B.E., sn.22-40, Mart 1994
- [38] CHAND, S. & LAN, M., "Neural Network Augmented Control for Nonlinear Systems", Proc. of the 29th Conf. CDC., Honolulu, HI, pp.1732-1734, Dec. 1990
- [39] BROWN, R. & RUCHITI, T., "On Identification of Partially Known Dynamic Nonlinear Systems with Neural Networks", Proc. 8th IEEE International Symposium on Intelligent Control, Chicago, pp.499-504, Aug. 1993
- [40] ÖZ, Cemil., "Üç Eklemlili Bir Robot Kolunun YSA ile Eklem Esaslı Yörünge Kontrolü", Doktora Tezi, sn. 73-107, SAÜ Eylül 1998
- [41] BROWN, R. & RUCHITI, T., "Artificial Neural Network Identification of Partially Known Dynamic Systems", Proc.32nd IEEE Conf. On Decision and Control, San Antonio, pp.3694-3699, Dec. 1993
- [42] CHEN, S. & COWAN, C., "Parallel Recursive Prediction Error Algorithm for Training Layered Neural Networks", Int. J. Control, vol. 51, no.8, pp.1215-1228, 1990
- [43] BUHMANN, J. & SCHULTEN, K., "Storing Sequences of Patterns in Neural Network with Stochastic Dynamics", Neural Computers, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1987
- [44] RUMELHART, D. & HINTON, G., "Learning Internal Representations by Error Propagation", Parallel Distributed Processing, vol.1, pp.318-362, MIT Press, 1992
- [45] YUMUŞAK, N., "Güç Sistemi Devre Elemanlarının Elektriksel Özelliklerinin Elde Edilmesinde Yapay Sinir Ağı Tabanlı Algoritmaların Kullanılması", Doktora Tezi, SAÜ' 98
- [46] ONDUK, A., ÖZ, C., UYAROĞLU, Y., "The Fault Detection Of Asynchronous Motors Using Artificial Neural Networks", ICEM'98
- [47] MONTAGUE, G. A., MORRIS, A. J., "Artificial Neural Network Based Multivariable Predictive Control", 2nd Int. Conference on ANN, pp.119-123, 1991
- [48] CHEN, F. & KHALIL, H., "Adaptive Control of Nonlinear Systems Using Neural Networks", Proc. 29th Conf. On Decision and Control, pp.1707-1712, Dec. 1990
- [49] BARTO, G., "Connectionist Learning for Control" 3rd printing, MIT, pp.29-46, 1992
- [50] GURU, Bhag S., HIZIROĞLU, Hüseyin R., "Electric Machinery and Transformers" 3rd edition, Oxford University, pp.352-464, 2001

EK A A/D Op - Amp Devresi



Şekil A Ölçme devresi sinyallerinin, YSA denetim algoritması girişi için kullanılan ADC # 5 ve ADC # 7 kodlu op-amp devresi

EK B A/D Op - Amp Devresi



Şekil B YSA denetleyici çıkışı sinyallerinin, uyarma alan sargısı ve motor endüli sargısı gerilimlerine uyarlamak için kullanılan DAC#0 ve DAC#1 kodlu op-amp devresi

EK C PCL – 812PG Ara Yüz Kartı Özellikleri

Çok fonksiyonlu analog-dijital I/O ara yüz kartı. Geniş spektrumlu ölçüm ve denetim özelliklerine sahip. PC uyumlu sistemler için A/D ve D/A dönüştürme, dijital giriş çıkış, sayıcı ve zamanlayıcı özellikli.

16 adet 12-bit analog giriş, 2 adet 12-bit analog çıkış yolu,

16 adet dijital giriş ve 16 adet dijital çıkış kanalı.

Programlanabilir sayıcı ve zamanlayıcı özellikli.

Analog giriş ve çıkış değerleri, program yardımıyla PC' de ayarlanabilme özelliği (DIP switch' ler yerine).

Her bir giriş ve çıkış kanalı için farklı kazanç değerleri seçebilme özellikli.

Özellikle endüstriyel uygulamalar için önerilen bir ara yüz kartı.

Özellikleri:

C/C++, Pascal, Basic' te programlama imkanı

A/D dönüştürücü: 12-bit 25µs dönüşüm hızı

1 bit okuma doğruluk oranı: $\pm \% 0,01$

İnput aralığı: $\pm 10, \pm 5, \pm 2,5, \pm 1,25, \pm 0,625, \pm 0,3125$

Tetik modu: software, pacer/ sürücü, dahili tetikleyici

Data transferi: program kontrollü, kesme 2-7,9-12, 14-15 veya DMA tek kanal

Giriş empedansı: $> 10 M\Omega$

Aşırı voltaj: $\pm 30 V_{DC}$ maksimum sürekli

Analog çıkış durulma süresi: 30 µs

Analog çıkış akımı: $\pm 5 mA$ maksimum

Dijital giriş çıkış kanalları: 16, TTL uyumlu

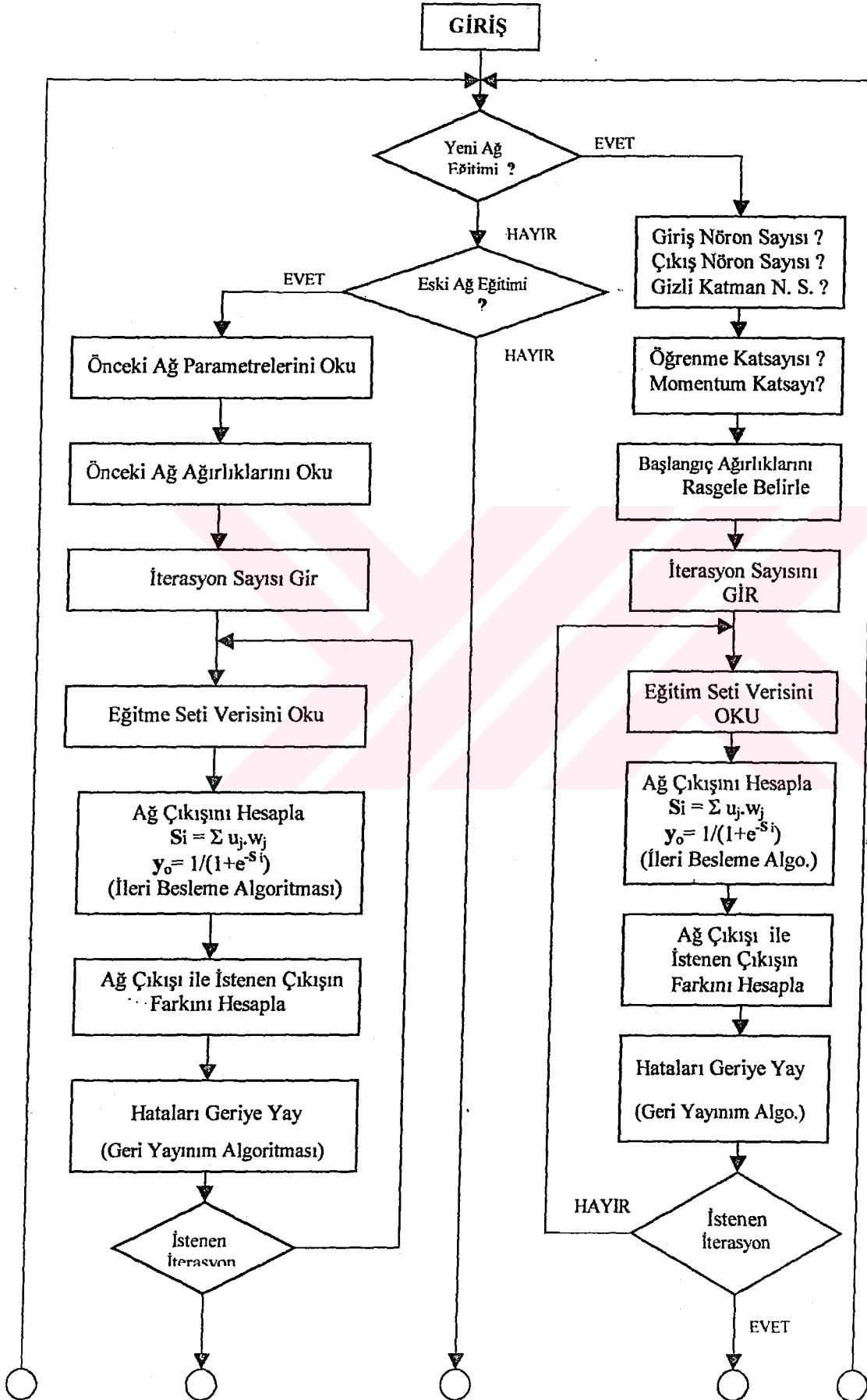
A/D sürücü: (8253), 32-bit zamanlayıcı, 2 MHz zaman tabanlı

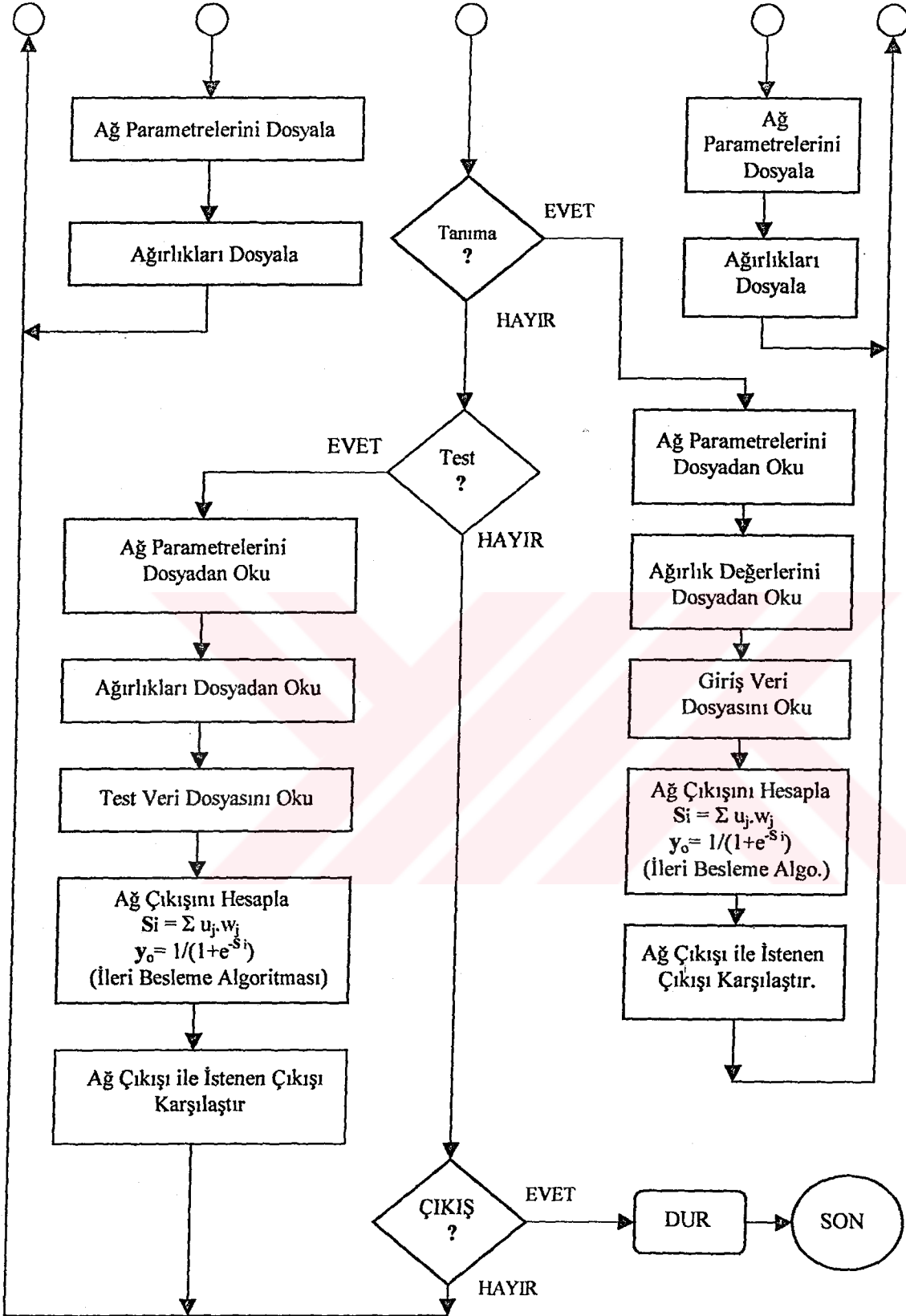
Güç sarfiyatı: + 5V; 500 mA, + 12V; 50 mA, - 12V; 14 mA

Çalışma sıcaklığı: 0-50 °C

Boyut: 185x100 mm

EK D YSA Eğitim Algoritması





EK E SJ ve Denetleyici Simülasyon Eğitim Verileri

V.Sayı	I_h (A)	U_h (V)	ϕ	P_g (W)	U_m (V)	V.Sayı	I_h (A)	U_h (V)	ϕ	P_g (W)	U_m (V)
1	0	210	-45	280	18,5681	71	0	220	-45	280	19,4523
2	0	210	-30	280	18,5681	72	0	220	-30	280	19,4523
3	0	210	-15	280	18,5681	73	0	220	-15	280	19,4523
4	0	210	0	280	18,5681	74	0	220	0	280	19,4523
5	0	210	15	280	18,5681	75	0	220	15	280	19,4523
6	0	210	30	280	18,5681	76	0	220	30	280	19,4523
7	0	210	45	280	18,5681	77	0	220	45	280	19,4523
8	1,25	210	-45	618	18,9422	78	1,25	220	-45	618	19,8263
9	1,25	210	-30	693,7	18,8453	79	1,25	220	-30	693,7	19,7293
10	1,25	210	-15	741,3	18,7295	80	1,25	220	-15	741,3	19,6134
11	1,25	210	0	757,5	18,6024	81	1,25	220	0	757,5	19,4863
12	1,25	210	15	741,3	18,4725	82	1,25	220	15	741,3	19,3564
13	1,25	210	30	693,7	18,3487	83	1,25	220	30	693,7	19,2327
14	1,25	210	45	618	18,2397	84	1,25	220	45	618	19,1237
15	2,5	210	-45	958,3	19,3219	85	2,5	220	-45	958,3	20,2056
16	2,5	210	-30	1109,7	19,1315	86	2,5	220	-30	1109,7	20,0149
17	2,5	210	-15	1204,9	18,9026	87	2,5	220	-15	1204,9	19,7858
18	2,5	210	0	1237,3	18,6499	88	2,5	220	0	1237,3	19,5329
19	2,5	210	15	1204,9	18,3899	89	2,5	220	15	1204,9	19,2729
20	2,5	210	30	1109,7	18,1404	90	2,5	220	30	1109,7	19,0236
21	2,5	210	45	958,3	17,9192	91	2,5	220	45	958,3	18,8026
22	3,75	210	-45	1301	19,707	92	3,75	220	-45	1301	20,5901
23	3,75	210	-30	1528	19,4262	93	3,75	220	-30	1528	20,3086
24	3,75	210	-15	1670,8	19,0872	94	3,75	220	-15	1670,8	19,9691
25	3,75	210	0	1719,5	18,7106	95	3,75	220	0	1719,5	19,5921
26	3,75	210	15	1670,8	18,3205	96	3,75	220	15	1670,8	19,202
27	3,75	210	30	1528	17,9435	97	3,75	220	30	1528	18,8253
28	3,75	210	45	1301	17,6069	98	3,75	220	45	1301	18,4894
29	5	210	-45	1646	20,0969	99	5	220	-45	1646	20,9793
30	5	210	-30	1948,8	19,7291	100	5	220	-30	1948,8	20,6103
31	5	210	-15	2139,1	19,2829	101	5	220	-15	2139,1	20,163
32	5	210	0	2204	18,7842	102	5	220	0	2204	19,6637
33	5	210	15	2139,1	18,2644	103	5	220	15	2139,1	19,1437
34	5	210	30	1948,8	17,7583	104	5	220	30	1948,8	18,6383
35	5	210	45	1646	17,3033	105	5	220	45	1646	18,1844
36	0	215	-45	280	19,0102	106	0	225	-45	280	19,8944
37	0	215	-30	280	19,0102	107	0	225	-30	280	19,8944
38	0	215	-15	280	19,0102	108	0	225	-15	280	19,8944
39	0	215	0	280	19,0102	109	0	225	0	280	19,8944
40	0	215	15	280	19,0102	110	0	225	15	280	19,8944
41	0	215	30	280	19,0102	111	0	225	30	280	19,8944
42	0	215	45	280	19,0102	112	0	225	45	280	19,8944
43	1,25	215	-45	618	19,3842	113	1,25	225	-45	618	20,2683

44	1,25	215	-30	693,7	19,2873	114	1,25	225	-30	693,7	20,1713
45	1,25	215	-15	741,3	19,1714	115	1,25	225	-15	741,3	20,0554
46	1,25	215	0	757,5	19,0443	116	1,25	225	0	757,5	19,9282
47	1,25	215	15	741,3	18,9144	117	1,25	225	15	741,3	19,7983
48	1,25	215	30	693,7	18,7907	118	1,25	225	30	693,7	19,6746
49	1,25	215	45	618	18,6817	119	1,25	225	45	618	19,5657
50	2,5	215	-45	958,3	19,7638	120	2,5	225	-45	958,3	20,6475
51	2,5	215	-30	1109,7	19,5732	121	2,5	225	-30	1109,7	20,4566
52	2,5	215	-15	1204,9	19,3442	122	2,5	225	-15	1204,9	20,2274
53	2,5	215	0	1237,3	19,0914	123	2,5	225	0	1237,3	19,9744
54	2,5	215	15	1204,9	18,8314	124	2,5	225	15	1204,9	19,7144
55	2,5	215	30	1109,7	18,582	125	2,5	225	30	1109,7	19,4652
56	2,5	215	45	958,3	18,3609	126	2,5	225	45	958,3	19,2444
57	3,75	215	-45	1301	20,1485	127	3,75	225	-45	1301	21,0317
58	3,75	215	-30	1528	19,8674	128	3,75	225	-30	1528	20,7499
59	3,75	215	-15	1670,8	19,5281	129	3,75	225	-15	1670,8	20,4101
60	3,75	215	0	1719,5	19,1513	130	3,75	225	0	1719,5	20,0329
61	3,75	215	15	1670,8	18,7612	131	3,75	225	15	1670,8	19,6428
62	3,75	215	30	1528	18,3844	132	3,75	225	30	1528	19,2663
63	3,75	215	45	1301	18,0481	133	3,75	225	45	1301	18,9307
64	5	215	-45	1646	20,5381	134	5	225	-45	1646	21,4205
65	5	215	-30	1948,8	20,1697	135	5	225	-30	1948,8	21,051
66	5	215	-15	2139,1	19,7229	136	5	225	-15	2139,1	20,6032
67	5	215	0	2204	19,2239	137	5	225	0	2204	20,1036
68	5	215	15	2139,1	18,704	138	5	225	15	2139,1	19,5836
69	5	215	30	1948,8	18,1983	139	5	225	30	1948,8	19,0784
70	5	215	45	1646	17,7438	140	5	225	45	1646	18,6251

EK F SJ ve Denetleyici Deneyisel Eğitim Verileri

v. s.	I _h (A)	U _h (V)	f (Hz)	cosφ	U _m (V)	P _g (W)	v. s.	I _h (A)	U _h (V)	f (Hz)	cosφ	U _m (V)	P _g (W)
1	1.50	213	50	0.92	18.15	706.50	78	2.77	220	50	0.98	20.52	1208.90
2	1.46	217	49.2	0.53	21.04	525.26	79	1.42	220	50	0.54	20.04	518.10
3	2.00	216	49.5	0.43	21.01	528.46	80	2.87	220	50	0.54	23.27	800.70
4	2.58	216	50.1	0.35	21.87	566.33	81	4.34	220	50	0.54	26.33	1083.30
5	2.11	173	42.2	0.6	18.36	516.78	82	1.98	220	50	0.43	21.77	549.50
6	2.45	213	48	0.86	23.46	949.54	83	2.93	225	50	0.54	25.08	832.10
7	1.54	220	50.1	0.92	20.02	739.38	84	2.76	213	50	0.54	20.58	753.60
8	2.10	210	48.3	0.96	19.96	894.81	85	2.62	204	50	0.54	17.93	706.50
9	2.15	217	49.9	0.96	19.87	955.78	86	4.10	209	50	0.54	21.87	989.10
10	2.20	221	50.2	0.96	20.68	993.06	87	3.93	201	50	0.54	19.64	926.30
11	1.46	220	49.7	0.54	21.03	530.60	88	3.36	204	50	0.94	17.45	1271.70
12	2.02	219	50.1	0.43	21.86	550.60	89	3.69	222	50	0.94	23.56	1491.50
13	2.23	204	49.8	0.65	18.2	703.67	90	3.00	182	50	0.94	13.34	1036.20
14	2.41	221	49.7	0.64	23.52	795.90	91	2.66	159	50	0.94	10.68	832.10
15	2.50	223	49.9	0.87	23.4	1002.79	92	0.96	229	50	0.78	22.25	533.80
16	2.48	220	50	0.87	21.98	989.10	93	0.87	209	50	0.78	16.39	471.00
17	0.64	211	43.3	1	29.44	448.67	94	1.71	205	50	0.78	16.4	659.40
18	0.62	220	49.4	0.18	19.9	279.21	95	1.80	214	50	0.77	19.7	722.20
19	1.27	220	48.8	0.12	21.77	291.14	96	1.92	226	50	0.77	23.54	785.00
20	1.94	219	47.7	0.09	25.92	314.53	97	2.92	231	50	0.77	26.95	1083.30
21	2.69	220	46.8	0.09	30.5	337.99	98	2.73	213	50	0.77	19.93	942.00
22	0.66	216	50	1	17.6	486.70	99	3.53	209	50	0.77	19.94	1130.40
23	1.32	215	50	1	17.54	706.50	100	3.71	217	50	0.77	23.42	1240.30
24	1.97	214	50	1	17.42	926.30	101	3.80	223	50	0.77	25.95	1303.10
25	2.62	212	50	1	17.23	1130.40	102	1.49	221	50	0.92	19.88	737.90
26	0.60	217	50	0.18	18.79	266.90	103	1.39	205	50	0.92	15.65	659.40
27	1.19	214	50	0.12	18.78	282.60	104	4.50	220	50	0.96	23.12	1695.60
28	1.76	210	50	0.12	18.77	298.30	105	4.63	220	50	0.65	26.78	1318.80
29	2.32	207	50	0.11	18.75	314.00	106	4.43	208	50	0.65	22.68	1208.90
30	2.84	203	50	0.1	18.77	329.70	107	0.92	217	50	0.79	18.99	486.70
31	0.67	220	50	1	18.22	502.40	108	1.89	219	50	0.78	21.2	737.90
32	1.35	220	50	1	19.52	737.90	109	2.39	202	50	0.37	18.02	502.40
33	2.02	220	50	1	19.39	1177.50	110	2.50	211	50	0.36	20.54	533.80
34	2.70	220	50	1	19.72	1177.50	111	2.61	218	50	0.35	23.23	565.20
35	0.61	220	50	0.18	19.5	282.60	112	2.64	222	50	0.36	24.35	565.20
36	1.23	220	50	0.11	21.31	298.30	113	2.69	226	50	0.35	26.16	580.90
37	1.85	220	50	0.11	21.84	314.00	114	2.05	225	50	0.42	24.9	565.20
38	2.49	220	50	0.11	23.2	345.40	115	1.92	210	50	0.44	19.2	502.40
39	3.12	220	50	0.1	24.35	376.80	116	1.97	215	50	0.43	21.06	518.10
40	3.74	220	50	0.09	25.81	392.50	117	2.00	218	50	0.44	22.24	533.80
41	4.41	220	50	0.09	26.95	423.90	118	1.49	222	50	0.62	22.24	549.50
42	0.60	196	45.3	1	18.05	412.50	119	1.46	220	50	0.63	20.92	533.80
43	1.12	182	41.9	1	18.03	513.11	120	1.40	211	50	0.63	18.22	502.40
44	1.63	175	41	1	17.96	643.70	121	1.43	216	50	0.63	19.7	518.10

45	2.15	171	40.2	1	17.9	757.37	122	1.45	219	50	0.63	20.71	533.80
46	2.60	168	39.6	1	17.85	870.41	123	1.02	222	50	0.84	20.68	518.10
47	3.04	166	38.9	1	17.79	977.17	124	0.99	216	50	0.85	18.48	502.40
48	3.55	162	38.4	1	17.72	1061.07	125	1.01	219	50	0.84	19.55	518.10
49	3.97	159	37.8	1	17.63	1151.31	126	1.96	215	50	0.85	19.53	769.30
50	0.60	218	50.3	0.15	18.18	284.30	127	2.00	218	50	0.85	20.8	785.00
51	1.18	212	50	0.12	18.24	298.30	128	2.03	220	50	0.85	21.51	800.70
52	1.75	207	49.8	0.11	18.22	312.74	129	2.07	225	50	0.85	23.11	832.10
53	2.32	204	49.2	0.11	18.2	324.42	130	2.81	207	50	0.84	18.43	973.40
54	2.83	198	48.9	0.11	18.18	337.80	131	2.89	212	50	0.84	20.31	1020.50
55	3.31	190	48.3	0.1	18.2	348.82	132	2.96	216	50	0.84	21.52	1051.90
56	3.79	186	48	0.12	18.29	361.73	133	3.00	219	50	0.84	22.73	1067.60
57	4.24	181	47.8	0.11	18.27	375.23	134	2.97	220	50	0.63	23.72	847.80
58	0.00	220	50.6	0	18.09	270.10	135	3.02	224	50	0.62	25.73	879.20
59	0.92	220	50	0.8	18.57	502.40	136	2.90	215	50	0.63	21.82	816.40
60	1.88	220	50	0.77	20.27	753.60	137	2.95	218	50	0.63	23.08	832.10
61	2.82	220	50	0.77	2.03	1004.80	138	0.94	220	50	0.79	19.9	486.70
62	3.79	220	50	0.77	24.48	1287.40	139	0.97	227	50	0.78	22.87	518.10
63	1.50	220	50	0.92	19.64	737.90	140	1.94	225	50	0.78	22.95	769.30
64	3.03	220	50	0.91	22.28	1240.30	141	1.83	212	50	0.78	18.85	706.50
65	2.66	207	50	0.78	18.83	910.60	142	1.45	208	50	0.92	16.74	659.40
66	2.83	218	50	0.77	22.34	989.10	143	1.50	217	50	0.92	19.31	706.50
67	2.87	220	50	0.77	23.35	1004.80	144	2.92	211	50	0.92	19.32	1130.40
68	2.93	225	50	0.77	25.53	1051.90	145	3.04	217	50	0.92	21.44	1177.50
69	2.98	229	50	0.77	27.1	1083.30	146	3.08	221	50	0.92	23.49	1240.30
70	3.81	217	50	0.77	23.68	1240.30	147	3.17	227	50	0.92	25.58	1287.40
71	3.85	220	50	0.77	25.31	1271.70	148	3.04	221	50	0.84	23.5	1099.00
72	3.95	225	50	0.77	27.34	1318.80	149	3.10	225	50	0.83	25.1	1130.40
73	4.54	207	50	0.78	21.57	1350.20	150	1.43	214	50	0.64	19.27	518.10
74	4.72	214	50	0.77	24.65	1460.10	151	1.46	219	50	0.64	20.75	533.80
75	4.63	219	50	0.77	26.89	1538.60	152	1.47	220	50	0.64	21.29	549.50
76	1.56	226	50	0.92	23.41	769.30	153	1.49	224	50	0.63	22.86	565.20
77	1.48	215	50	0.92	18.46	690.80	154	2.93	217	50	0.63	22.84	832.10

ÖZGEÇMİŞ

İZMİR' in Tire ilçesinde 1963 yılında doğdu. İlk, Orta ve Endüstri Meslek Lisesi elektrik bölümünü aynı ilçede okudu. Tire Endüstri Meslek Lisesi Elektrik Bölümünü 1981 yılında bitirdi. 1985 yılında MÜ Elektrik-Elektronik Öğretmenliği Bölümünden mezun oldu.

Aralık 1990' da MÜ Fen Bilimleri Enstitüsünde, Lineer Asenkron Motorların Teorik İncelenmesi üzerine yaptığı çalışmayla Yüksek Lisans programını bitirdi.

Mayıs 1988 tarihinde, DEÜ İzmir Meslek Yüksekokulunda Öğretim Görevlisi olarak çalışmaya başladı.

1994-95 Öğretim Yılı Şubat döneminde SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsünde Doktora Programına kayda hak kazandı. 1995-96 öğretim yılından bu yana SAÜ Hendek Meslek Yüksekokulunda Öğretim Görevlisi olarak çalışmaktadır.

Evli ve bir çocuk babasıdır.