

39181

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
DOKÜMANTASYON BÖLÜMÜ

ÇOK MAKİNALI GÜÇ SİSTEMLERİNDE PARAMETRE

ADAPTİF KONTROL YÖNTEMİNİN İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

39181

Y.Müh. Ayşen DEMİRÖREN

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 22 Ekim 1992

Tezin Savunulduğu Tarih : 15 Mart 1993

Tez Danışmanı : Prof. Dr. M. Emin TACER

Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Okyay KAYNAK

: Doç.Dr. Adnan KAYPMAS

MART 1993

ÖNSÖZ

Bana çalışma fırsatı sağlayan, çalışmalarımı destekleyen değerli hocam Prof.Dr.M.Emin TACER'e teşekkürü borç bilirim.

Ayrıca tez çalışmalarında yardımları gördüğüm Doç.Dr.Adnan KAYPMAN'a, yakın ilgi ve yardımlarını gördüğüm Doç.Dr.Fuat GÜRLEYEN'e, manevi destek ve yardımlarını gördüğüm arkadaşım Araş.Görevlisi Lâle ZEYNELGİL'e teşekkürlerimi sunarım. Tezin yazımı sırasında özenli, titiz çalışmasından dolayı Sema ORTABOY'a da teşekkür ederim.

Tezin hazırlanışında bana destek ve manevi güç veren aileme de teşekkür ederim.

22 Ekim 1992

Y.Müh.Ayşen DEMİRÖREN

İÇİNDEKİLER

ÖZET	xii
SUMMARY	xiii
BÖLÜM 1. GİRİŞ	1
1.1. Konu ile ilgili Çalışmalar	5
1.2. Tezde Yapılanlar	21
BÖLÜM 2. ADAPTİF KONTROL	24
2.1. Adaptif Kontrolün Yapısı ve Çeşitleri	24
2.2. ARMA Modeli	30
2.3. Parametre Kestirimi ve Çeşitleri	34
2.3.1. En Küçük Kareler Yöntemi	37
2.3.2. Tekrarlamalı En Küçük Kareler Yöntemi	40
2.3.3. Projeksiyon Algoritması	45
2.3.3.1. Tek Giriş-Tek Çıkışlı (SISO) Sistemler için Projeksiyon Algoritması ve Kontrol Kuralı	48
2.4. En Uygun Öngörücü Tasarımı	52
BÖLÜM 3. ÇOK MAKİNALI GÜÇ SİSTEMLERİNİN MATEMATİKSEL MODELİ	54
3.1. Senkron Makinanın Matematiksel Modeli	55
3.2. Uyarma Sisteminin Modeli	62
3.3. Türbin ve Devir Sayısı Regülatörü Modeli....	63
3.4. Şebekedeki Generatörlere İlişkin İlk Değer Hesaplamaları	65
3.5. Transformator ve Yük Modeli	71
3.6. Şebeke Modeli ve Eksen Dönüşümü	72
3.7. Yük Akışı ve Ç.M.G.S.'de Başlangıç Değer Hesaplamaları	73
3.7.1. Başlangıçtaki Yük Akışı Hesaplamaları	73
3.7.2. Referans Makinanın Seçimi	75
3.8. Şebeke Modelindeki Değişiklikler	77
3.8.1. Bara Empedans Matrisindeki Düzeltmeler (Değişimler)	77
3.8.2. Kısa Devre Hesaplamaları	78
BÖLÜM 4. Ç.M.G.S.'DE KONTROL PROBLEMİ VE ADAPTİF KONTROLUN SİMÜLASYONU	80
4.1. Ç.M.G.S.'de Kontrol Problemi	80
4.2. Simülasyon Çalışması	83
BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	99

KAYNAKLAR	102
EKLER	106
ÖZGEÇMİŞ	121



NOTASYON LİSTESİ

$y_m(t)$	: Referans model çıkışı
$y_p(t)$	: Sistem çıkışı
A_M, B_M	: Referans model durum matrisleri
A_P, B_P	: Sistemin model durum matrisleri
N, M	: ARMA modeli dereceleri
θ	: Parametre matrisi
T	: Örnekleme periyodu
ϕ	: Regression matrisi
q^{-1}	: Geri kayma operatörü
$e(t)$	: Hata
$w(t)$	: Sıfır ortalamalı beyaz gürültü
$y(t)$	: Sistem çıkış büyüklükleri
$u(t)$	: Sistem giriş büyüklükleri
$v(\theta, t)$	: Kayıp fonksiyonu
α, β, γ	: Nitelik katsayıları
E	: Hata vektörü
$K(t)$	: Kazanç matrisi
$P(t)$	: Kovaryans matrisi
λ	: Unutma faktörü
J	: Davranış kriteri
$A(q^{-1})$	: ARMA modelindeki polinomlar
$B(q^{-1})$	: ARMA modelindeki polinomlar
m	: Giriş sayısı (ARMA modeli)
n	: Çıkış sayısı (ARMA modeli)

D	: Örnekleme peryotlarında sistem parametrelerine bağlı zaman gecikmesi.
α_i	: $D \neq 1$ iken ARMA modelindeki polinomların katsayıları
β_i	: $D \neq 1$ iken ARMA modelindeki polinomların katsayıları
$y^x(t)$	: En Uygun Öngörücünün çıkışı
σ	: En Uygun Öngörücünün bağıntısındaki katsayılar
x	: Durum değişkenleri
t	: Zaman
$f(.)$	: Non-lineer fonksiyon
$[V]$	: Gerilim vektörü
$[I]$	: Akım vektörü
$[R]$	: Direnç matrisi
$[\psi]$	: Akı vektörü
V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}	: Stator a,b,c faz gerilimleri
V_{fd}	: Uyarma sargısı gerilimi
I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}	: Stator a,b,c faz akımları
I_{fd}	: Uyarma sargısı akımı
I_{kd}, I_{kq}	: Amortisör sargısı d ve q eksenleri akımları
R_{sa}, R_{sb}, R_{sc}	: Stator a,b,c faz sargısı dirençleri
R_{fd}	: Uyarma sargısı direnci
R_{kd}, R_{kq}	: Amortisör sargısı d ve q bileşeni dirençleri.
L_{sa}, L_{sb}, L_{sc}	: Stator a,b,c faz sargısı endüktansları
L_{fd}	: Uyarma sargısı endüktansı
L_{kd}, L_{kq}	: Amortisör sargısı d ve q bileşeni endüktansları
M	: Ortak endüktanslar

V_d, V_q	: Stator d-q eksenleri sargı gerilimleri
I_d, I_q	: Stator d-q eksenleri sargı akımları
R	: Stator sargısı direnci
ψ_d, ψ_q	: Stator akısı d, q bileşenleri
ψ_{fd}	: Uyarma sargısı akısı
ψ_{kd}, ψ_{kq}	: Amortisör d, q eksenleri akıları
$P=d/dt$	: Türev operatörü
ω	: Açısal hız
ω_o	: Senkron açısal hız
T_M	: Mekanik moment
T_e	: Elektromagnetik moment
J	: Atalet momenti katsayısı
K_d	: Söndürme momenti katsayısı
H	: Enerji sabiti
P_k	: Çift kutup sayısı
δ	: Makinanın yük açısı
L_d, L_q	: Stator d-q eksenleri sargı endüktansları
θ	: Stator a-fazı magnetik eksenini ile rotor d-ekseni arasındaki açı
L_{ad}, L_{aq}	: Boyuna d, enine q eksenini mıknatıslanma özendüklemi
$L_{d\sigma}, L_{q\sigma}$	: Stator d ve q eksenini sargıları kaçak özendüklemi
$L_{fd\sigma}$	: Uyarma sargısı kaçak özendüklemi
$L_{kd\sigma}, L_{kq\sigma}$	: Amortisör d ve q eksenini sargıları kaçak özendüklemi
$\Delta\omega$	: Açısal hızdaki değişim
x_d	: Stator d-eksenini sargı reaktansı
x_q	: Stator q-eksenini sargı reaktansı

x_{fd}	: Uyarma sargı reaktansı
x_{kd}, x_{kq}	: Amortisör d ve q eksenleri sargı reaktansları
x_{ad}, x_{aq}	: d ve q eksenleri mıknatıslanma reaktansları
R_{tr}, x_{tr}	: Transformatör sargı direnci ve reaktansı
V_R	: Uyarma giriş gerilimi
T_{ex}	: Uyarma zaman sabiti
V_{fdmin}, V_{fdmax}	: Uyarma sargısı geriliminin minimum ve maksimum değerleri
G_M	: Vana durumu (ana vana)
G_I	: Vana durumu (ana vana) intercept
U_{GM}	: Ana vanaya ait mekanik regülatöre giriş işareti
U_{GI}	: Ara vanaya ait mekanik regülatöre giriş işareti
T_{GM}	: Vana zaman sabiti (ana vana)
T_{GI}	: Vana zaman sabiti (ara vana)
Y_{HP}	: H.P. safhasındaki buhar akışı
Y_{RH}	: Ara ısıtıcıdaki buhar akışı
Y_{IP}	: I.P. safhasının buhar akışı
Y_{LP}	: L.P. safhasının buhar akışı
T_{HP}	: Türbinin H.P. safhası zaman sabiti
T_{RH}	: Ara ısıtıcı zaman sabiti
T_{IP}	: Türbinin I.P. safhası zaman sabiti
T_{LP}	: Türbinin L.P. safhası zaman sabiti
P_O	: Kazan buhar basıncı
F_{HP}	: Türbinin H.P. safhasının güç bölümü
F_{LP}	: Türbinin L.P. safhasının güç bölümü
F_{IP}	: Türbinin I.P. safhasının güç bölümü
$G_{VMAX}, G_{VMIN}, G_{IMAX}, G_{IMIN}$	: Ana ve ara vanaların maksimum ve minimum durumları

V_{gd}, V_{gq}	: Generatör uç gerilimi d ve q eksenleri bileşenleri
P_g, Q_g	: Generatör gücünün aktif ve reaktif bileşenleri.
$\dot{S}$	: Kompleks bara gücü
$\dot{V}$	: Kompleks bara gerilimleri vektörü
$\dot{I}$	: Kompleks bara akımları vektörü
$\dot{Y}$	: Bara admitans matrisi
$\dot{V}_i$	: Bara gerilimleri
$\dot{I}_i$	: Bara akımları
$\dot{Y}_{ij}$	: Bara admitans matrisi elemanları
x, y	: Reel, imajiner eksenler
V_{xi}, V_{yi}	: i. bara geriliminin reel ve imajiner eksenleri.
I_{xi}, I_{yi}	: i. bara akımının reel ve imajiner eksenleri
k	: Şebekedeki bara sayısı
A_{di}, A_{qi}	: i. generatöre ilişkin d ve q eksenli büyüklükleri
A_{xi}, A_{yi}	: i. generatöre ilişkin x ve y eksenli büyüklükleri
δ_i	: i. generatörün q ve x eksenleri arasındaki açı
P_i, Q_i	: i. baraya gelen aktif ve reaktif güç
h	: İterasyon sayısı
z	: Şebekedeki makina sayısı
$\dot{V}_{gi}$	: i. generatörün uç gerilimi
$\dot{I}_{gi}$	: i. generatörün uç akımı
S_i	: i. baraya ilişkin güç
S_{gi}	: i. baradaki generatörün gücü
S_{Li}	: i. baradaki yük

$\dot{S}_{tri}$	: i. baradaki transformatör kaybı
$(\cdot)$	: Kompleks büyüklükler
$(^*)$	: Konjüge (eşlenik transpoze)
$(\sim)$	: Öngörülen değerler
$\dot{Z}_{tri}$	: i. baradaki transformatörün empedansı
ϵ	: İterasyonda yakınsama ölçütü
P_{ij}	: i ve j baraları arasındaki aktif güç akışı
Q_{ij}	: i ve j baraları arasındaki reaktif güç akışı
$\dot{Y}_{ij}$	: i ve j baraları arasındaki hattın seri admittansları
$\dot{Y}'_{ij}$	: i ve j baraları arasındaki hattın şönt admittansı
T	: Açısal dönüşüm işlemi ya da örnekleme periyodu
δ_{rs}	: Referans makina mili ile gevşek bara arasındaki açı
$\dot{E}_{Qi}$	: i. makinada endüklenen kompleks hareket gerilimi
E_{Qxi}, E_{Qyi}	: i. makinada endüklenen kompleks gerilimin reel ve imajiner bileşenleri
R_i	: i. makinaya ait stator direnci
x_{qi}	: i. makinaya ait stator q eksenli reaktansı
δ_{is}	: i. makinanın mili ve gevşek bara arasındaki açı
$\dot{V}'_i, \dot{I}'_i, \dot{V}'_{gi}, \dot{I}'_{gi}$	: Referans çerçeveye dönüştürülmüş değerler
V_{di}, V_{qi}	: i. makinaya ait uç geriliminin d ve q eksenli bileşenleri
I_{di}, I_{qi}	: i. makinaya ait uç akımının d ve q eksenli bileşenleri
$\dot{Z}$	: Bara empedans matrisi
$\dot{Z}_{ij}$	: Bara empedans matrisinin i. satır j. sütun elemanı

$\dot{z}'$	: Bara empedans matrisinin i. satır j. sütun elemanının değışmiş değeri.
$\dot{z}_{ij}$	: i ve j baraları arasına eklenen veya çıkarılan empedans
$\dot{z}_{io}$	: Kısa devre empedansı
$\dot{I}_F$	: Hatalı baraya ait kısa devre akımı
$\dot{V}_F(0)$	: Hatalı baraya ait hata öncesi gerilimi
$\dot{z}_{FF}$	: Bara empedans matrisinde hatalı baraya ait köşegen üzerindeki eleman
$\dot{z}_{Fi}$	: Hatalı bara ve i barası arasındaki empedans
$\dot{V}_i(0)$	: i. baranın hata öncesi kompleks gerilimi
$\dot{V}_i(F)$	: i. baranın hata sonrası kompleks gerilimi
d, q	: Rotor boyuna ve enine eksenleri
X, Y	: Reel ve imajiner eksenleri
$(..)^T$	: Matris transpozu
$(..)^{-1}$	: Ters (matris ise inversi)

ÖZET

Bu tezde, çok makinalı güç sistemi içindeki turbo-generatörlerin uyarmaları ve mekanik girişlerinin birlikte kontrolu adaptif kontrol tekniği ile simüle edilmiştir. Son yıllarda adaptif kontrol tekniklerinin uyarma kontroluna uygulanması önem kazanmıştır. Bu çalışmada, uyarma ile mekanik regülatör girişlerinin adaptif kontrolu çok giriş-çok çıkışlı biçimde, güç sistemindeki her makina üzerinde uygulanmıştır. Kullanılan Parametre Adaptif Kontrolu modelinde, seçilen kestirim algoritması işlem sayısı daha az olan Projeksiyon II kestirimi olup, hesaplama süresinde kazanç sağlamıştır. Tezdeki çalışmalar beş bölüm altında toplanmışlardır. Bu bölümler kısa başlıklar halinde aşağıdaki gibidir.

Birinci bölümde, adaptif kontrolun güç sistemlerine uygulanması konusunda literatür araştırmaları ve konuya kısa bir giriş yapılmıştır.

İkinci bölümde, adaptif kontrolun en önemli kısımlarından birini oluşturan kestirim algoritmaları tanıtılmış, Projeksiyon II testirimi kullanan ve daha önce tek makinalı sisteme uygulanmış olan adaptif yöntem tek giriş-tek çıkışlı sistemler için tanıtılmıştır.

Üçüncü bölümde, sistemin modeli oluşturulmuştur. Bunun için, önce sistemi oluşturan senkron generator, uyarma, mekanik regülatör, transformatör şebekeye ait modeller kurulmuş ve bunlar için varsa sınırlamalar belirtilmiştir. Aynı bölümün daha sonraki ayrıtlarında, kısa devre durumu ve sonrasındaki şebeke değişimlerinin nasıl modellendiği anlatılmıştır.

Dördüncü bölümde, güç sistemlerinin kontroluna duyulan ihtiyaç ve kullanılan adaptif algoritmanın tezde uygulanan şekilde çok giriş-çok çıkışlı durumu tanıtılmış, simülasyon incelemesinin alt programlara dayanarak gerçekleştirilmesi sunulmuştur. Tezde turbogeneratör birimleri ve şebeke için verilen ilk değerler ile hesaplanan sürekli çalışma büyüklükleri ve simülasyon sonuçlarını gösteren eğriler yine bu bölümde verilmiştir.

Beşinci bölümde, tezde elde edilen sonuçlar verilmiş, gelecekte yapılması önerilen çalışmalardan bahsedilmiştir.

SUMMARY

INVESTIGATION OF PARAMETER ADAPTIVE CONTROL METHOD FOR MMPS

In the thesis, the application of adaptive controller to generators in a multi-machine power system have been investigated.

In everyday language, to "adapt" means to change a behavior to conform to new circumstances. Intuitively, an adaptive controller is a controller that can modify its behavior in response to changes in the dynamics of the process and the disturbances. Because of the complex behavior of adaptive systems it is necessary to consider them from several points of view. Theories of nonlinear systems, stability, system identification, recursive parameter estimation, optimal control and stochastic control all contribute towards the understanding of adaptive systems. Adaptive controller will contain

- i. Control law with adjustable parameters
- ii. Characterization of the closed-loop response
- iii. Design procedure
- iv. Parameter updating based on measurement
- v. Implementation of the control law

These parts are somewhat different for different adaptive schemes but have many common features.

On-line determination of process parameters is a key element in adaptive control. Some of them are recursive least squares algorithm, projection algorithm.

Adaptive control algorithms are separated into two based on identification. Algorithms with Implicit Identification:

A very useful adaptive control technique is to specify a desired performance and measure the actual performance against this performance. Such controllers are commonly known as the Model Reference Adaptive Controllers. A reference model representing the desired behaviour of the closed-loop system is driven by the same input as the controlled system. The regulator parameters are adjusted depending upon the error between the system output and the reference model output.

Model reference adaptive algorithm may be described as below:

- i. Choose a model representing the desired performance

- ii. Compute the error between the outputs of the reference model and the actual system.
- iii. Based on the correlation between this error and the system states, update the feedback gains of the system.

The behaviour of the plant and of the system model be given by n th order state equations

$$\dot{y}_p(t) = A_p y_p(t) + B_p u(t)$$

$$\dot{y}_m(t) = A_m y_m(t) + B_m u(t)$$

where y is output state vector

u is the input control vector

A, B are matrices,

and the subscripts p, m refer to plant and model respectively.

An error function can be formed by writing

$$e(t) = y_m(t) - y_p(t)$$

The aim of the control is to force this error function to zero. This can be done by choosing a Liapunov function.

For a satisfactory application of this technique, the designer must have a good idea of the performance that the system is capable of achieving within the control constraints. Otherwise the control limitation occurs and the system response will be substantially different to that of the reference model.

Algorithms with Explicit Identification:

Another class of adaptive controllers performs an explicit identification of system parameters or system transfer function. A number of identification algorithms have been developed using the discrete domain mathematics. Sampled data design techniques are used to compute control in the following form:

- i. Select a sampling frequency, f , about ten times the normal frequency of oscillation.
- ii. Each sampling interval, $T(=1/f)$, update the system parameters. Several techniques, in recursive form, is usually used to identify the transfer function of the system.
- iii. Use the updated estimates to compute the controller parameters based on the control strategy chosen.

These algorithms is usually known self-tuning regulator.

In the first chapter, it is described adaptive control and presented several types of adaptive control algorithms. Furthermore, the previous studies on adaptive control techniques which is applied power systems have been explained in detail.

In this thesis is used the Parameter adaptive control technique proposed by Goodwin and Long. The used adaptive controller with an optimal predictor possesses the advantages of concise structure, a small number of measured output variables, a simple adaptive control algorithm. The design and operation of the controller do not require any information about the model parameters and persistent excitation of inputs of the turbogenerator are unnecessary. Also, the economical calculations of the adaptive control algorithm avoids problems arising with large sampling intervals.

In the second chapter, it is presented identification techniques and parameter adaptive control technique. The adaptive control scheme which is used, is illustrated in Figure 1.

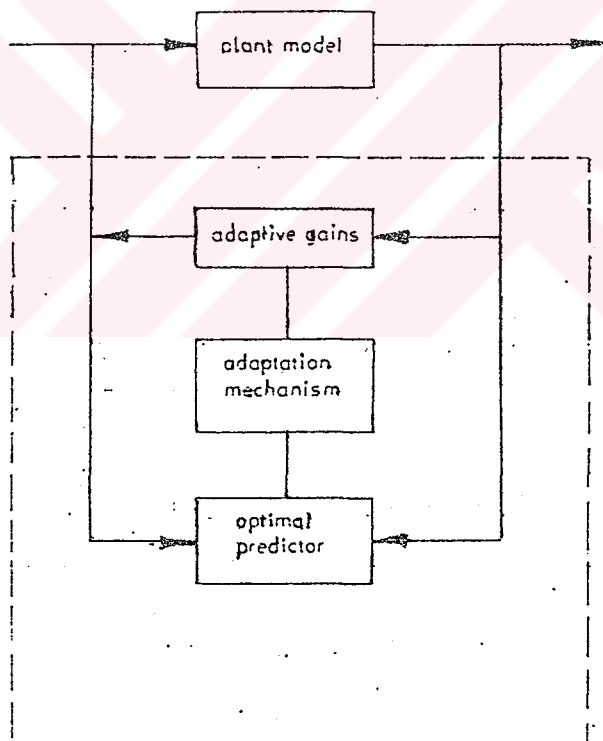


Figure 1. Schematic diagram of adaptive controller.

In recent years, there has been considerable interest in application of adaptive control techniques to design controllers for turbogenerators with the objective of extending the operational margins of stability.

In the third chapter, it is presented all of above calculations in detail.

In the design of controllers, identification of turbogenerator models is based on autoregressive moving-average (ARMA) models. The models are obtained from the data of system inputs and local terminal state variables by using identification techniques. The identified ARMA models, even though obtained from local measurements, include dynamic information from the other machines and the network.

The ARMA model can be written in the following form;

$$y(t+1) = \sum_{i=0}^N A_i y(t-i) + \sum_{j=0}^M B_j u(t-j)$$

where $y \in R^m$ and $u \in R^m$, A_i ($i=0,1,\dots,N$) and B_j ($j=0,1,\dots,M$) are $m \times m$ dimensional real matrices. (m : number of input = number of output)

A highly nonlinear differential equation is used to represent a turbo generator. Instead of this, it is used ARMA models. The outputs and inputs of each turbo-generators are chosen as follows:

$$\begin{aligned} y_k(t) &= [\Delta V_{gk}(t), \Delta \omega_k(t)]^T \\ u_k(t) &= [\Delta V_{Rk}(t), \Delta U_{Gk}(t)]^T \quad k=1,\dots,z \end{aligned}$$

where z is the number of generating units and

$$\begin{aligned} \Delta V_{gk} &= V_{gk} - V_{gok} & \Delta \omega_k &= \omega_k - \omega_o \\ \Delta V_{Rk} &= V_{Rk} - V_{Rok} & \Delta U_{Gk} &= U_{Gk} - U_{Gok} \end{aligned}$$

V_{gok} and ω_o are respectively the set point of terminal voltage of each generation units and the steady state frequency of the power system. V_{Rok} and U_{Gok} are the given values of the exciter input and the governor input of same generating units, respectively. The degree of ARMA models is described by trial and error, so that $N=2$ and $M=0$ were selected to obtain a suitable minimum order model.

In fourth chapter, it is presented the effectiveness co-ordinated control of exciter and governor, and the performance of the parameter adaptive controller in each generating units of the MMPS was evaluated by computer simulation. The multimachine power system which is considered has five buses and four generating units. The

multi-machine power system is illustrated in Figure 2. Transient performance was assessed by simulating a 3-phase short circuit near 5th bus and then switched out transmission line 1-5. Fault duration is 120 ms.

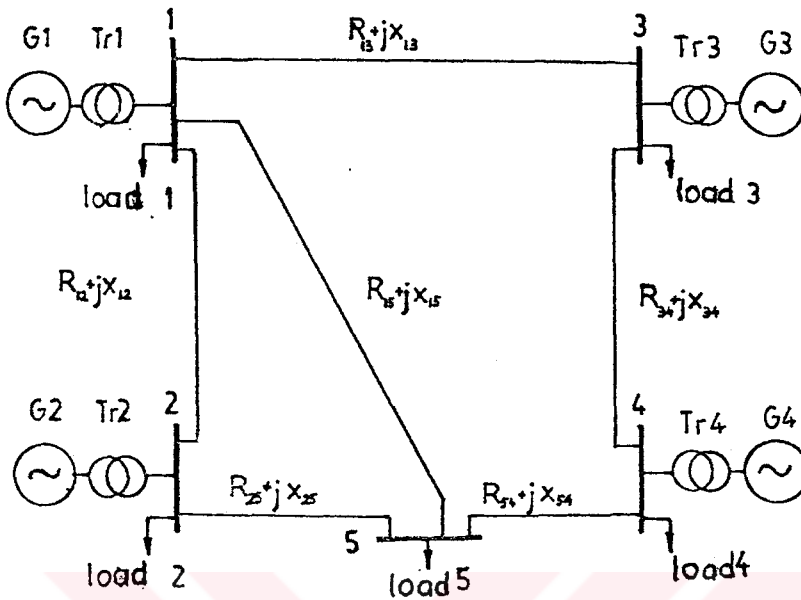


Figure 2. Four-machine power system.

The governor control plays a very important role in power system stabilization. The control of the generating units using separate governor and excitation control loops does not necessarily give the best performance. The operation of one control loop can have ill effects on the operation of the other loop. Use of the adaptive control approach to co-ordinate excitation and governor control is investigated in this thesis. Fig.3 shows a schematic diagram of the generating unit that is controlled using adaptive control.

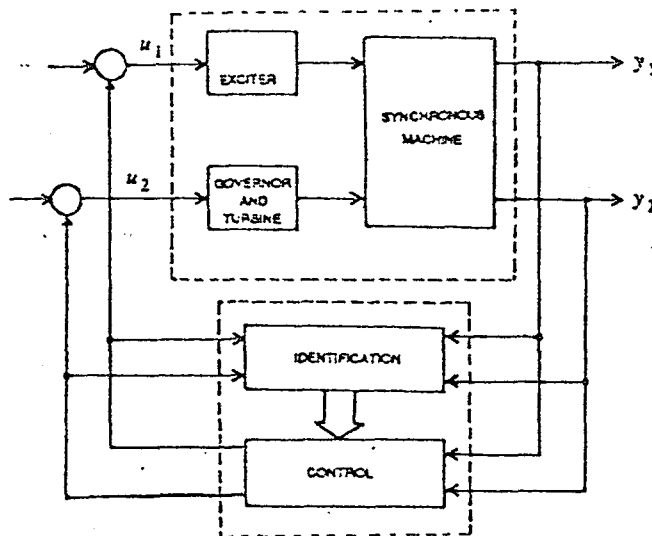


Figure 3. Multi-input multi-output system configuration.

It has been shown in the literature that the adaptive controller can be employed to control turbogenerators, with improvements in system stability. The results obtained by simulation studies and laboratory tests indicate that such controllers may provide substantial improvements in performance during various operating conditions, but almost all the results published so far relate to a single machine connected to an infinite bus.

Investigation of control strategies based on representation of a single machine to infinite bus system is usually regarded as the first step in the study of turbogenerator control. In these studies, interactions between generators are ignored. There is an infinite power source, which can maintain power system states around fixed levels. The stability of the generators only depends on its environment. However, in a multimachine power system (MMPS) without an infinite bus, system stability is decided by the relative movements between the machines. The behaviour of the controlled machine is affected not only by its own controller, but also the external dynamics and controllers on the other machines. That is, the implementation of robust adaptive controllers in a multimachine environment, control is exercised on each generator unit in a large interconnected dynamic system which is highly nonlinear. This thesis is concerned with an evaluation of a adaptive controller applied in a multimachine power system. The evaluation involves the establishment of a detailed multimachine power system model, identification of turbogenerator models, design of the adaptive controller and assessment of performance in the multimachine power system.

The mathematical model of multimachine power system consist of representations of turbogenerator units, transmission networks, system load flow and equivalent loads, and also calculations for initialisation of multimachine power system, modification of nodal impedance matrix, and short circuit voltage and current. Each turbogenerator unit is represented by 14 th-order nonlinear differential equations which include the generator, excitation system, turbine and governor system.

Synchronous generators are by seventh-order nonlinear differential equations including swing equations which are used to determine the angular displacement between the machines of the power system during transient conditions. The representation is based on Park's reference frame, with components along the direct and quadrature axes.

In the rotating exciter system, the exciter itself is represented as a first-order linear system with a large time constant T_{ex} as in this study. The saturation effect is ignored, and allowing a negative value for the field voltage ceiling limit.

A three-stage turbine with reheat is employed to drive the synchronous generator. The steam is produced by a conventional coal-or oil-fired boiler, which is assumed to be a constant steam source. The inertia of steam flow in each stage of the turbine is described by a first-order transfer function, and the outputs from each are weighted according to their contributions to the total shaft torque, and summed. The reheater is also described by a first-order transfer function. The steam flow is controlled by both main and interceptor values, with fast-acting electro-hydraulic governors. The value servo-mechanism is represented by a first-order transfer function, with limits on value travel and rates of movement.

Since the transient behaviour of the electric network is much faster than that of turbogenerators systems, the network may be described by algebraic equations. The network impedance equation is:

$$\dot{\bar{V}} = \dot{\bar{Z}} \dot{\bar{I}}$$

$\dot{\bar{V}}$ is an $n \times 1$ complex vector of nodal voltages measured with respect to the reference node. $\dot{\bar{I}}$ is an $n \times 1$ complex vector, of injected nodal currents where n is number of node. $\dot{\bar{Z}}$ is nodal impedance matrix. $\dot{\bar{Z}}$ is an $n \times n$ complex matrix.

It is known that since relative angular displacements exist between individual machine rotors in a multi-machine power system, the positions of d-q coordinates with respect to the synchronously rotating d-q reference axes of individual machines are different. In order to carry out an integrated calculation of the power system, which includes turbogenerator units and the electric network, common x-y coordinates are used as reference axes, into which the terminal voltages are current of various machines are transformed.

In multimachine power system, the load flow problem results a set of nonlinear equations which can be solved by the Gauss-Siedel iterative method. The load flow calculations are achieved on complex x-y axes.

The network variables obtained by the load flow are based on the reference frame, where the slack node, rather than the reference machine shaft, is chosen as the reference node. An operator of angular transformation is introduced to transfer the reference frame from the slack node to the reference machine shaft.

The nodal impedance matrix can be modified to reflect changes in the network. These changes may be addition of elements, removal of elements, or changes in the impedances of elements.

In the final chapter, it is presented the results which parameter adaptive control algorithm is simulated on MMPS which has multi-input multi-output generating units.



BÖLÜM 1.

GİRİŞ

İlerleyen teknoloji ile birlikte elektrik enerjisi-
ne duyulan gereksinim de hızla artmaktadır. Bu gereksinim;
büyük güçlü üreteçlerin oluşturulmasıyla sağlanırken, bun-
larda üretilen enerjinin de optimum koşullarla tüketicile-
re iletilmesi gerekmektedir. Tüketicilere iyi kalitede ve
istenilen miktarda elektrik enerjisinin iletilmesinde,
hem işletme, hem de kontrol açısından birtakım sorunlarla
karşılaşılmaktadır. Sistemin tamamı göz önüne alındığında
bu sorunlardan en önemlisi, sistemin kararlılığı ile ilgi-
lidir. Öyle ki, başlangıçtan beri konuyla ilgili litera-
tür incelemesi yapıldığında ve bunların sonucu ortaya çı-
kan uygulamadaki problemlere bakıldığında bunların siste-
min kararlılığı üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Bu
yoğunluğun gelecekte de önemini koruyacağı bir gerçektir.

Enerji sistemlerinde kararlılık, bir bozucu etkiye
maruz kalan sistemin bu etki sonrasında, bozucu etki
öncesindeki çalışma koşullarına tekrar dönme yeteneği anla-
mındadır. Başka bir deyişle, sistemde bulunan senkron mak-
inaların birbirleriyle senkronizmada kalması anlamındadır
[1],[2],[3].

Bir güç sistemi, ancak sisteme ilişkin mekaniksel
giriş ve elektriksel çıkış enerjileri arasında sürekli bir
uyumun olması koşulu altında kararlı çalışabilir. Öyle ki,
sistemde bulunan elektriksel yüklerin herhangi birisinde
olabilecek bir değişim, sistemdeki senkron makinalara
ilişkin mekaniksel giriş enerjilerindeki karşı değişimler-
le dengelenmelidir. Bunun sağlanamaması halinde, sistem
gerilim ve frekansı anma değerlerinden saparlar. Kaldı ki,
senkronizmanın ani olarak kaybının söz konusu olduğu kısa

devre, açma kapama olayı ve enerji iletim hatlarında oluşan kapasitif akımlar gibi büyük bozucu etkilerin söz konusu olduğu durumlarda daha büyük sorunlarla karşılaşılır.

Sistemin işleyişinde, en önemli öge olan senkron makinalara ilişkin kontrolün etkinliği ve ayar esnekliği birinci derecede önemlidir. Bu nedenle, sistemde bulunan senkron makinaların kararlılıkları üzerine yapılan çalışmaların geçmişte olduğu gibi gelecekte de güncelliğini sürdüreceği gerçeğinden hareketle çok makinalı sistemlerin adaptif kontrolü tez konusu olarak seçilmiştir.

Adaptif kontrolün güç sistemlerindeki uygulamaları ile ilgili literatür gözlemlendiğinde, konuyla ilgili ilk çalışmaların 1970'li yılların sonlarında olduğu, ancak 1980'li yılların sonlarına doğru incelemelerin daha da yoğunlaştığı görülmektedir. Bilindiği gibi "adapt" kelimesi, yeni durumlara uyum sağlamak için davranışın değiştirilmesi anlamındadır [4]. Adaptif kontrol ise, parametreleri bilinmeyen ya da parametrelerinin zamanla değişimi belirsiz olan sistemlerin denetimi anlamındadır. İlk kez 1961 yılında yapılan bir sempozyumda ortaya konulan adaptif kontrol için, hem geleneksel geri besleme kontrolü, hem de örnekli veri sistemleri hakkında bilgi birikimine gereksinim olduğu ortaya çıkmıştır. Bunun nedeninin bütün adaptif kontrol sistemlerinin sayısal bilgisayarlar yardımıyla gerçekleştirilmesi olduğu söylenebilir [5].

Adaptif kontrol doğası gereği doğrusal olmayan bir kontrol yöntemi olduğundan, doğrusal olmayan sistem teorisi yanında kararlılık teorisi ve parametre kestirimi ile de yakından ilgilidir [5]. Bunların ışığı altında adaptif kontrolün anlamı tekrar ele alındığında, bunun on-line kontrol (her t anında yapılan ayarlama) ile, on-line parametre kestiriminin birleşmesinden oluşan doğrusal olmayan kontrol algoritması olduğu anlaşılır. Başka bir deyişle adaptif kontrol; işletme koşullarına bağlı olarak çalışma büyüklüklerinde bir değişiklik olduğunda, gerekli

duyarlılığı göstererek hem kontrol parametrelerine, hem de kontrol stratejisine uygun olarak gerçek zamanda yapılan ayarlama ile sistem davranışını başlangıçtaki çalışma durumuna getiren kontrol anlamındadır [5].

Adaptif kontrolün amacı, her t anında izlenen sistem davranışının istenen özellikte kalmasını sağlamaktır. Bu amaç, hem kontrol parametrelerinde, hem de kontrol stratejisinde yapılan değişikliklerle sağlanır. Bugüne kadar yapılan çalışmaların çoğu, parametre sapmalarının düzeltilmesi üzerine yoğunlaştırılmıştır. Diğer taraftan, incelemelerde kullanılan modellerin gerçek sisteme daha uyumlu olması için, olası bozucu işaretler de göz önüne alınmıştır.

Adaptif kontrolün uygulanmasında iki temel yaklaşım kullanılmaktadır. Bunlar;

i) Kendi kendini ayarlayan kontrol (self-tuning control)

ii) Referans modele uyumlu adaptif kontrol

Kendi kendini ayarlayan kontrolde (STC), tekrarlamalı en küçük kareler (RLS: recursive least square) yöntemi gibi herhangi bir kestirim yöntemiyle parametreler kestirilir. On-line olarak belirlenen parametre değerleri, sanki sistemin gerçek parametreleriymiş gibi kontrol kuralına katılır. Model referans adaptif kontrol (modele uyumlu adaptif kontrol) yönteminde ise, istenen cevabı gösteren model, kontrol stratejisinde verilir[6]. Bu yöntem, model ile gerçek sistemin arasındaki hatayı sifıra yaklaştırma amacıyla kullanılır. Bu da bir Liapunov fonksiyonu seçerek veya Popov'un 'hyperstability' teorisini kullanarak gerçekleştirilir [7].

Daha önce de belirtildiği gibi bir güç sisteminden beklenen; tüketiciye daima iyi kalitede enerji vermesidir. Bu nedenle, sistemin kontrolundan, sadece belli bir çalışma durumunda değil, her türlü çalışma koşullarında sistem davranışını istenen düzeyde tutması beklenir. Hem kontrol

teorisinde, hem de bilgisayar teknoloji ve programcılığın-
daki gelişmelerin ışığı altında, bu beklentinin karşılan-
masında kullanılan en son kontrol yöntemlerinden birisi
adaptif kontrol yöntemidir. Bundan dolayı, adaptif kont-
rol güç sistemi araştırmacıları için ilgi alanı olmuştur.

Güç sistemi kontrol problemleri, pek çok açıdan
orijinal olarak geliştirilmiş adaptif kontrol problemler-
inden farklıdır. Buna rağmen adaptif kontrolörler güç
sisteminin gereksinimlerini sürekli olarak sağlayabildik-
leri için büyük öneme sahiptirler. Sabit kazançlı kontro-
lörler ayarlandıkları belli bir bölge civarında iyi kont-
rol sağlarlar. Oysa ki, ele alınan sistemin giriş ve çıkı-
şının her an ölçülmesi ve kontrol parametrelerinin her an
yeniden belirlenmesi ile yapılan adaptif ayarlama optimal-
dir. Bundan dolayı, sistem kararlılığı sürekli olarak ko-
runmuş olur.

Aslında bütün büyük güç sistemleri, genellikle öyle
isimlendirilmeseler ya da adaptif olarak gerçekleştirilme-
seler de, adaptif kontrolün bazı özelliklerini içerirler
[5]. Güç sisteminde oluşan hatalara karşı geliştirilen ko-
ruma önlemleri, bir anlamda sistemin yeni bir duruma adap-
tasyonu olarak nitelendirilebilir. Bir iletim hattında ha-
ta meydana gelmesi durumunda, kontrolörler sistemin karar-
lılığını ve sürekliliğini korumak için çalışırlar. Kontrol
hareketi, genellikle, hatanın olduğu yere ve hatanın ti-
pine uygun olarak incelenir. Bu nedenle, sistemin yeni du-
rumuna uyum sağlamaya çalışması adaptif kontrolün temel
düşüncesine çok benzer. Sistemin çalışma noktaları, karar-
lı çalışma bölgesini genişletmek için, sistem kararlılık
incelemelerini esas alarak sık sık değiştirilir. Sonuçta
güç sistemi kontrolünde; kontrolör çevrimlerindeki para-
metre değerleri, iyi durumdaki sistem davranışını muhafaza
etmek için, çalışma noktasının bir fonksiyonu olarak oto-
matik şekilde ayarlanır. Bu tip çalışma, kontrol kazancı
programlaması olarak adlandırılır. Bütün bu açıklamalar,
güç sistemlerinin davranışının bir adaptif sistemdekine

benzer özellikler taşıdığını göstermektedir.

1.1. Konu İle İlgili Çalışmalar

Yukarıda açıklanan görüşlerin ışığı altında adaptif kontrolün güç sistemlerine uygulanması ile ilgili literatür incelemesi yapıldığında; kendi kendini ayarlayan adaptif kontrolün sayısal simülasyon şeklinde ya da mikromakinalı sistem modelleri üzerinde uygulandığı, buna karşın modele uyumlu adaptif kontrolün, teorik çalışmalar yanında, çeşitli ülkelerde gerçek sistemler üzerinde uygulamalarının yapıldığı görülmektedir [8].

Ayrıca, güç sistemlerindeki adaptif kontrolü uygulama alanlarına göre uyarma veya mekanik regülatör kontrolüne ve yük-frekans kontrolüne uygulananlar şeklinde ikiye ayırmak mümkündür. Bu incelemede yapılan literatür taraması birinci gruptan uygulamaları içermektedir.

1979 yılında Ledwich tarafından yapılan araştırmada [9], bir makinalı sistem modeli ele alınmış, üç fazlı bir kısa devre arızasına karşı sistemin davranışı incelenmiştir. Kendi kendini ayarlayan kontrol (STC) yönteminin uygulandığı incelemede, parametreleri kestirmede tekrarlamalı en küçük kareler (RLS) kestirim yöntemi kullanılmıştır. Sonuçta, böyle bir adaptif kontrolün bilinen klasik kontrollara göre daha iyi bir sistem davranışı verdiği gösterilmiştir. Burada kullanılan minimum değişim (varyans) yönteminde belirlenen model, bir adım ileri minimum değişim kontrolünü elde etmek için kullanılmıştır. Doğrusal kontrolün geri besleme kazançları, makinanın uç gerilimi ile onun referans değerleri arasındaki hatayı en aza indirecek şekilde ayarlanmaktadır. Bu problem, aşağıdaki davranış kriterinin minimize edilmesine dönüştürülmüştür;

$$\min_t J_t = \sum_{i=1}^M (y(t+i) - y_{ref})^2 \quad (1.1)$$

Böylece kontrol işlemi K kazancının J davranış kriterini azaltacak şekilde belirlenmesine dönüşmüştür. Büyük senkron makinaların, uyarma kontrollerinin uyarmanın girişinde p.u. (per-unit) olarak çok fazla kontrol işaretine gerek duyacağı, bu durumda makinanın girişine kesin sınırlar getirileceği, fakat bunun da minimum değişim (varyans) kontrolünün sakıncası olacağı incelemede belirtilmiştir. Sonuç olarak, kontrol hareketinin hatalı fazda olabileceğine işaret edilmiştir. Bunu gidermenin bir yolu olarak da, kontrol işaretinin genliğini sınırlamak için aşağıdaki davranış kriteri önerilmiştir;

$$\min_t J_t = \sum_{i=1}^M [(y(t+i)-y_{ref})^2 + Ru_t^2] \quad (1.2)$$

Bu çözümün karışık programlama tekniklerinin kullanılmasına ihtiyaç gösterdiği, bunun da bir sakınca oluşturacağı açıktır.

Walker ve Cheetham 1982 yılında yaptıkları araştırmada [10], gene bir makinalı sistemde geleneksel gerilim regülatörü yerine minimum değişimli kendi kendini ayarlayan regülatör kullanarak, sistemin kararlılığı üzerinde incelemeler yapmışlardır. Bu çalışmada da söz konusu regülatörün bozucu etkiler nedeniyle ortaya çıkan değişimlere uyum sağladığı gösterilmiştir. Burada da yukarıda verilen [9] nolu kaynakta olduğu gibi tekrarlamalı en küçük kareler kestirim yöntemi kullanılarak parametrelerinin kestirildiği ARMA (auto-regressive moving average) modeli kullanılmıştır. Bu çalışmanın farklılığı, gözönüne alınan an ve daha önceki anlardaki çıkışlar ile daha önceki girişler ve kestirilmiş parametreler cinsinden kontrol kuralının çok basit olarak ifade edilmesidir.

Bu şekilde yapılan kontrolün amacı, bozucu etki sonucunda değişen makina uç gerilimini referans değerine yaklaştırmaktır. Diğer taraftan, daha iyi bir sistem davranışı için, makinanın hızından alınan yardımcı kararlı kılıcı

işaretlerin göz önüne alınmasının gerektiği belirtilen çalışmada, kullanılan yöntemin çok makinalı sistemlere de uygulanabileceği belirtilmiştir.

Xia ve Heydt 1983 yılında yayınladıkları makalede [11], sonsuz büyük güçlü bir şebekeye enerji iletim hattı ve transformatör üzerinden bağlı senkron generatörün uyarmasını kendi kendine ayarlayan adaptif kontrolörün tasarımını açıklamışlardır. Burada da, parametre kestiriminde tekrarlamalı en küçük kareler yöntemi kullanılmıştır. [9] nolu kaynakta belirtilen minimum değişimli ST kontrol kuralının her sisteme uygulanabilirliğinin güçlüğü nedeniyle daha kapsamlı ancak daha karmaşık bir kontrol kuralı geliştirilmiştir. Öyle ki, sistem giriş ve çıkışındaki dalgalanmaları içeren bir maliyet fonksiyonu tanımlanarak, bunun en küçük değere indirgenmesi amaçlanmıştır. Kullanılan kontrol kuralında, kontrol işaretine sıfır ortalamalı Gauss işlemi eklenmiştir.

Kanniah, Malik, Hope tarafından 1984'de yayınlanmış [12] nolu kaynakta ise, adaptif regülatörler kullanılarak senkron generatörlerin uyarma kontrolü üzerine elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Bu çalışmada da, gene bir makinalı sistem modeli ile uyarma sisteminin kontrolü incelenmiştir. Kısaca, çalışma koşulları değişirken parametreleri değiştiren ve gerçek zamanda çalışma koşullarını izleyerek kontrol parametrelerini sürekli düzelteren, zamanda ayırık adaptif bir kontrolör olarak da tanıtılabilen, kendi kendini ayarlayan (self-tuning:ST) regülatörlerle uyarmanın kontrolü gerçekleştirilmiştir. Buradaki çalışmada önemle vurgulanan, sistem davranışını izlemek için gerekli olan küçük örnekleme aralığı ile işlemin hesaplayıcısı tarafından ihtiyaç duyulan nispeten büyük hesaplama zamanı arasında ortaya çıkan zıtlıktır. Çift hızlı örnekleme modeli öneren çalışma bu problemin böylece aşılabileceğini göstermektedir. Kendi kendini ayarlayan regülatörlerin uyarma kontrolüne uygulanması yine minimum değişim yöntemiyle sağlanmıştır. Ancak buradaki sakınca, makina

davranışını izlemek için çok büyümeye yönelen örnekleme zamanı ihtiyacının, özellikle mikro bilgisayarlarda, işlem hesaplayıcısına aşırı hesapsal yoğunluk getirmesidir. Bunu önlemek için yukarda da belirtildiği gibi, iki hızlı örnekleme modeli önerilmiştir. İkili hıza sahip adaptif kontrol sistemlerinde, kontrol ve veri örneklemesinin aynı hızda yapılmaması nedeniyle bunların diğer adaptif kontrolörlere oranla daha iyi çalıştığı belirtilmiştir.

1984'de A.Ghost, G.Ledwich ve G.S.Hope'un yayınlandıkları incelemede [13], adaptif kontrol tekniklerinin çeşitli özellikleri ve bu yöntemlerin tek makinalı güç sisteminin uyarma kontroluna uygulanmalarındaki ayrıntılar açıklanmıştır. Bu incelemede adaptif kontrolörler; kapalı tip ve açık tip olmak üzere özelliklerine göre ikiye ayrılırlar denmiştir: Kapalı algoritmaların, sistemden istenen davranışın bir model ile belirlenmesi ve gerçek sistem davranışının da ölçülmesiyle, adaptif kontrolörlerdeki kontrol kazancının bu iki veriden hareketle düzeltilmesi fikrinden ortaya çıktığı belirtilmiştir. Açık algoritmaların tanımlama kısmının daima zamanda ayrık olarak düşünüleceği ve kontrolör parametrelerinin her t anında düzeltilmesi fikriyle ortaya atıldığı açıklanmıştır. Kapalı tip tanımlama algoritması kullanan modele uyumlu adaptif kontrolün (MRAC: model reference adaptive control) nasıl çalıştığı ve özelliklerinden kısaca bahsedilmiştir. Çok makinalı sistemlerin incelenmesinde, modele uyumlu adaptif kontrol yöntemi uygulamalarında model seçiminin henüz önemli bir problem olduğu belirtilmiştir. İncelemede açık tip algoritmalarından, tekrarlamalı en küçük kareler kestirimlerine dayandırılan, Minimum Değişim

Kontrolörü, Optimal Linear Quadratic Kontrolör, Pole Assigned (Kutup atayıcı) Kontrolör ve onun değiştirilmiş şekli olan Pole Shifting (kutup kaydırıcı) kontrolörlerden bahsedilmiş ve birbirlerine göre üstünlükleri ve sakıncaları belirtilmiştir. Bu çalışmada, adaptif kontrolörler arasında yapılan karşılaştırmada açık tip olarak tanımlanan kontrolörlerin güç sistemi uygulamaları

için tercih edildiği belirtilmiştir. Yukarıda bahsedilen yöntemlerden kutup atayıcı ve lineer karesel kontrolörlerin büyük bozucuya gösterdikleri cevaplar ile alışılacalmış kontrolörün aynı bozucuya gösterdiği cevap karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Adaptif kontrolörlerin bozucu etkiye daha iyi cevap verdiği açıklanmıştır. Sistem iyi bilinmediğinde ve ayrıca açık çevrim kutupları kararlı olduğunda lineer karesel ve kutup kaydırıcı kontrolörlerinin en üstün davranışı gösteren kontrolörler olduğu da belirtilmiştir.

1986 yılında M.M.Sharaf, B.W.Hogg, O.H.Abdalla, M.L.El-Sayed'in birlikte yayınladıkları incelemede [14], çok değişkenli adaptif kontrolörün turbogeneratör sistemi için mikro makina çalışmalarıyla nasıl gerçekleştirildiği anlatılmıştır. Araştırmada, yine sonsuz baraya iki iletim hattı ve bir transformatör üzerinden bağlanmış olan bir turbogeneratör sistemi ele alınmıştır. Turbogeneratör modellemesinde, çıkış öngörücü eşitliği ve tekrarlamalı en küçük kareler yöntemi kullanılmıştır. Kontrolör tasarımı, aktif-reaktif güç (P-Q) düzlemindeki çeşitli çalışma koşulları için elde edilen tanımlanmış giriş-çıkış modelleri kullanılmıştır. Optimal kontrolör P-Q düzlemindeki her bir bölge için off-line olarak tasarlanmıştır ve hafızada depolanmıştır. Bilgisayarın generatörün çalışma koşullarını kontrol ettiği ve uygun gelen kontrolörü buna göre seçtiği belirtilmiştir. Bu her örnekleme anında tekrar edilmiştir. Zamanda ayırık kontrolörler, karesel davranış kriteri küçültülecek şekilde, turbogeneratörün her t anında tanımlanmış model parametrelerine dayandırılarak tasarlanmıştır. Sunulan incelemede, çeşitli hata durumları geniş bir çalışma bölgesinde araştırılmıştır. Sonuçta, adaptif kontrolörün sabit kazançlı kontrolöre göre daha üstün bir çalışma gösterdiği belirtilmiştir. Bu inceleminin ilginçliği, araştırmanın turbogeneratörün laboratuvar modeli olan 3 kVA'lık, 3 fazlı, serbest uyarmalı, d.c. motor ile sürülen bir mikromakina üzerinde gerçekleştirilmiş olmasıdır.

Aynı yıl O.P.Malik, G.S.Hope ve arkadaşları tarafından sunulan araştırmada [15] adaptif senkron makina kararlı kılıcısı yeni bir kontrol modeli önerilerek incelenmiştir. İncelemede, turbogeneratörü tanımlayıcı (modelleyici) olarak kullanılan tekrarlamalı en küçük kareler (RLS) yöntemindeki unutma faktörünün değişken yapıda olması önerilmiştir. RLS yöntemindeki kestirimde hatanın kovaryansı hesabında paydada olan unutma faktörü, eski verilerin önemini kaybettirme özelliğinden dolayı önemli bir parametredir. Literatürdeki incelemelerin çoğunda geçici olaylar gibi büyük sapmalar için, birden biraz küçük sabit bir değer olarak alınan unutma faktörünün, çalışma noktasından olan küçük sapmaların incelendiği durumlarda bir alınmasının daha uygun olduğu söylenmiştir. Bu durumdan da anlaşılabilceği gibi, kovaryans matrisindeki sürüklenmeyi önlemek için, unutma faktörünün her örneklem anında belirlenecek bir değişken olarak ele alınmasının gerekliliği belirtilmiştir. Değişken unutma faktörü için bir formül verilmiştir. Diğer yandan, geri besleme kontrolünü içeren kutup kaydırma (pole-shifting) tekniğinde, kapalı çevrim kutupları birim dairenin orijinine doğru kaydırılırken, fazladan bir kontrol çabasına ihtiyaç duyulduğu, oysa kontrol değişkeninin çıkışlarının sınırlı olduğu belirtilmiştir. Bu sınırların aşılması durumunda, kutupları kaydırılarak kararlı hale getirilmek istenen sistemin, tam tersine kararsız duruma geçebileceği vurgulanmıştır. Bu nedenle, kullanılan yöntemdeki kutup kaydırma faktörü α 'nın ideal kapalı çevrim cevabını vermek için değişken olması gerektiği belirtilmiş ve bunun ifadesi verilmiştir. Böylece, hem dinamik, hem de geçici koşullar altında çeşitli modlardaki çalışmalarda bir makinalı sistemin simüle edilmesiyle mükemmel sonuçların elde edildiği belirtilmiştir. Burada kullanılan adaptif algoritmaya kendini araştıran kutup kaydırıcı kontrol modeli denmiştir. Sonuçta, tanımlama (modelleme) algoritmasında değişken unutma faktörünün kullanılmasının, hem geçici hem de dinamik koşullar altında sürekli değişen parametrelerin izlenmesini düzelttiği, kendini araştıran kutup kaydırıcı kontrol tekniğinin güç sistemlerinde

oluşabilen değişik çalışma koşullarına uygulandığında uyum esnekliğini arttırdığı belirtilmiştir. Bu özelliklerin, adaptasyon yapısını çok güçlü kıldığı vurgulanmıştır.

Yine 1986 yılında yayınlanan bir kitapta [7], O.P.Malik tarafından yapılan bir incelemede, adaptif teknikler açık ve kapalı olarak sınıflandırıldıktan sonra bu teknikleri kullanan bazı kontrolörlerin ifadeleri verilmiştir. Kapalı tip adaptif kontrol yöntemini kullanan modeli uyumlu adaptif kontrolde (MRAS), önerilen modelin çok fazla inceleme yapıldıktan sonra belirlense bile, öngörülme-yen dış bozuculara, sistem gibi derhal cevap veremeyeceği, bu nedenle bu davranış farkının sistem kazançlarında istenmeyen adaptasyonlara yol açacağı belirtilmiştir. Bunun önemli bir sakınca olduğu vurgulanmıştır. Açık tip algoritmalar kullanan adaptif kontrol modellerinin bazılarının temel yapıları ve gerçek zamanda yapılan parametre kestirimi de anlatılmıştır. Çalışmada tekrarlama-lı en küçük kareler kestirimi için uygun ilk değer seçimlerinden bahsedilmiştir. Açık tipten algoritmalar-dan minimum değişim, optimal lineer karesel (optimal linear quadratic) ve kutup kaydırıcı (pole-shifting) kontrolörlerden bahsedilmiştir. Bu incelemede, değişken unutm-a faktörlü kendini araştıran kutup kaydırma tekniği (self-searching pole shifting) üzerinde durulmuştur. Ayrıca, adaptif kontrolörlerin gerçek zaman (real-time) uygulamalarına ilişkin yazılım ve donanım yapıları konusunda kısaca bilgi verilmiştir. Adaptif kontrolörün güç sisteminin kararlı kılıcısı olarak tasarlandığı laboratuvar modeli üzerindeki çalışmalar kısaca sunulmuştur.

1986 yılındaki başka bir araştırmada ise, Shi-jie Cheng, O.P.Malik ve G.S.Hope çok makinalı güç sistemleri için, adaptif kutup kaydırıcı, kendini ayarlayan (pole shifting self-tuning) kararlı kılıcıcı önermişlerdir [16]. Bu incelemede, güç sistemlerinde yüksek kazanç ve kısa zaman sabitli otomatik gerilim regülatörlerinin kullanılması-nın sürekli ve dinamik hal kararlılığını ters yönde

etkilediği belirtilmiştir. Bu nedenle, sistem kararlılığını arttırmak için çoğunlukla güç sistemi kararlı kılıcısı (PSS) kullanılır denmiştir. Alışılmış şekildeki kararlı kılıcıların lineerleştirilmiş sabit parametre modeline dayandırıldığı söylenmiştir. Bunun sonucu olarak geleneksel kararlı kılıcıların sistemin çalışma koşullarındaki değişimleri izleyememe gibi sakıncaları olduğu vurgulanmıştır. Bu araştırmada sistemdeki değişimlerin otomatik olarak izlenmesi ve ayrıca her bir makinanın kararlı kılıcısı arasında olumlu bir ilişki olması gerektiği belirtilmiştir. Bu nedenle, çok makinalı güç sistemi (Ç.M.G.S) için kararlı kılıcı tasarlandığında koordinasyonun önemli olduğu ifade edilmiştir. Kendi kendini ayarlayan kontrolörlerin buna çok uygun olduğu belirtilmiştir. Araştırmacılar daha önce tek makinalı sistemde inceledikleri ve olumlu sonuç veren kendini araştıran kutup kaydırmalı tip adaptif kontrolörü [15], burada çok makinalı sisteme uygulamışlardır. Çok makinalı güç sistemlerinde durum uzayı eşitlikleri çözümünün ne kadar güç olduğu belirtilerek, yerinde yönetilen (decentralize) kontrol veya hiyerarşik kontrol uygulamalarının iyi sonuç vereceği belirtilmiştir. Bunlardaki temel fikrin, sistemdeki her bir generatörün giriş-çıkış transfer modelini kullanmak olduğu açıklanmıştır. Bu transfer modelindeki derecenin doğal olarak büyük olacağı söylenmiştir. Bundan dolayı, gerçek sistem yerine her örnekleme anında parametreleri yeniden tanımlanan daha düşük dereceli modellerin koyulmasının yararlı olacağı üzerinde durulmuştur. Tekrarlamalı en küçük kareler yöntemi veya benzer yöntemlerle ve gerçek sistemin giriş-çıkış verilerinden yararlanılarak her örnekleme anında yapılan tanımlamanın zaman içinde model parametrelerini gerçek sistemin özelliklerine uydurduğu kaydedilmiştir. Bunun da, tanımlanmış modelin (ARMA: auto-regressive moving average modelinin) parametreleriyle oluşturulan alt sistemler arasındaki bağıntının temelini sağladığı belirtilmiştir. Sonuç olarak her üretim birimi için yüksek dereceden modeller yerine her t anında hesaplamaya daha uygun olan üçüncü dereceden bir modelin kullanıldığı kaydedilmiştir. Bu çalışmada üçü

Üretim barası olan altı baralı gc sistemi ele alınmıştır. Her bir üretim biriminde basit bir mekanik regülatör, tristörlü uyarma ve ayrıca geçici hal kararlılığını düzeltmek için yüksek kazanç ve kısa zaman sabitine sahip geleneksel otomatik gerilim regülatörü olduğu söylenmiştir. Baraya bağlı senkron makinalar çoğunlukla olduğu gibi yedinci dereceden nonlinear diferansiyel eşitlik grubu ile verilmiştir. Ayrıca, otomatik gerilim regülatörü ve mekanik regülatör de yine transfer fonksiyonlarıyla verilmiştir. Araştırmada iki tip kararlı kılıcı simüle edilmiştir. İlki; alışıla gelmiş gc sistemi kararlı kılıcısı olup, transfer fonksiyonu ile verilmiştir. Diğeri ise, bu çalışmada önerilen kararlı kılıcıdır. Bu tip kendini araştıran kutup kaydırmalı kendini ayarlayan kontrolör olarak bilinir. İncelemeler küçük değişimler ve kısa devre gibi büyük bozucu durumları için, sırayla her makina ya geleneksel kararlı kılıcı, sonra her makina ya önerilen tip kendi kendini ayarlayan (ST) kararlı kılıcı, en sonra makinalardan ikisine önerilen tip kararlı kılıcı diğerine geleneksel gc sistemi kararlı kılıcısı konularak elde edilen sonuçlar incelenmiştir. Kararlılığı düzeltmede nerilen ST kararlı kılıcının klasik olandan daha üstün olduğu, salınım eğrilerindeki yerleşme zamanının büyük ölçüde azaldığı gösterilmiştir. Makinalardan sadece birine nerilen ST kararlı kılıcısı yerleştirilse bile, sistemin bundan yarar sağladığı ama generatörlere olan faydalı etkinin nerilen ST kararlı kılıcının yerleştirildiği yer ile o generatör arasındaki mesafeyle ters orantılı olduğu gözlemlenmiştir. Çalışmada bir makina ya yerleştirilen önerilen tip kararlı kılıcının diğer üretim birimlerindeki geleneksel kararlı kılıcılarla birlikte çalıştığı durum için, kararlı kılıcılar arasında bir uyumazlık olmadığı grlmştir. Yine de en iyi sonuçların sistemdeki bütün makinalara önerilen tip, kendini araştıran kutup kaydırmalı ST kararlı kılıcı yerleştirildiğinde elde edildiği belirtilmiştir.

B.W.Hogg ve Q.H.Wu'nun 1988 yılında sunduğları incelemede [17], transformatör ve paralel iki hat üzerinden

sonsuz baraya bağılı bir makinalı sistemin adaptif uyarma kontrolu sunulmuştur. Burada şimdiye kadar sunulanlardan ayrı olarak, kestirim algoritmasının değiştiği görülmektedir. Kestirim algoritması olarak, hesapsal yoğunluk açısından tekrarlamalı en küçük kareler yönteminden daha az işlem gerektirdiği için projeksiyon algoritması tercih edilmiştir [18]. Adaptif kontrol algoritmasında hesapsal yoğunluktaki azalma, büyük örnekleme aralığı kullanılması sakıncasını ortadan kaldırmıştır. İncelemede, turbogeneratörün modellenmesi için kullanılan ARMA modeli, optimal predictor (öngörücüye) sahip adaptif kontrol modeli, optimal prediktör tasarımı, turbogeneratör üzerinde gerçekleştirilen parametre adaptif kontrolörünün bilgisayar simülasyonu ile ilgili sonuçlar verilmiştir. Bu incelemede kullanılan modelin temel üstünlüğü, az sayıda ölçüm gerektirmesi ve on-line hesaplamalarda minimum düzeyde işlem yükü söz konusu olmasıdır. Böylece, kontrol edilen turbogeneratörün dinamik ve geçici hal kararlılığının daha iyi sağlandığı söylenmiştir.

1988'de A.Chandra, O.P.Malik, G.S.Hope tarafından sunulan bir incelemede [19], çalışma noktası değişimleri ve sistem giriş çıkışını içeren maliyet fonksiyonunu minimize eden adaptif senkron makina kontrolörü ve onun çok makinalı güç sistemine uygulaması sunulmuştur. Sistemdeki her bir üretim birimi yine sıfır ortalamalı keyfi dizi de içeren ARMA modeliyle tanımlanmıştır. [15] nolu kaynakta olduğu gibi, burada da adaptif kontrol yöntemi olarak kendini araştıran kutup kaydırmalı ST algoritması kullanılmıştır. Kestirim tekrarlamalı en küçük kareler yöntemiyle yapılmıştır. Bu incelemenin bir özelliği de senkron makinanın kontrolü için otomatik gerilim regülatörü ve kararlı kılıcının birleştirilmiş olmasıdır. Burada y sistem çıkışı, uç gerilimi V_t ve ek kararlı kılıcı işaretin ağırlıklı toplamıyla oluşturulmuştur. Öyle ki, δ ilave kararlı kılıcı olarak alınmıştır:

$$y = V_t + K_w \delta \quad (1.3)$$

K_w sabiti incelemede 0,5 olarak alınmıştır. Algoritmanın özelliği, sistem salınımlarının azaltılmasıdır. Ayrıca, örnekleme zamanı azalırken yüksek frekanslı salınımlarda önemli düzelmelerin olduğu belirtilmiştir.

1989 yılında C.M.Lim tarafından yapılan çalışmada [20], karesel bir davranış ölçütünü küçültmeye dayandırılan kendi kendini ayarlayan güç sistemi kararlı kılıcısının tasarım metodu geliştirilmiştir. Buradaki kontrol kuralına alışlagelmiş kontrol kuralından farklı olarak sistem çıkışının türevi ilâve edilmiştir. Model parametrelerinin kestirimi için tekrarlamalı en küçük kareler yöntemi kullanılmıştır. Sonuç olarak, önerilen kararlı kılıcı kendi kendini ayarlayan tiptir ve güç sisteminin, ki burada tek makinalı sisteme uygulanmıştır, kararlılığını arttırdığı belirtilmiştir. Simülasyon sonuçları önerilen kararlı kılıcının uyarmaya veya mekanik regülatör çevrimine uygulandığında güç sisteminin sönüm özelliklerini arttırdığını göstermiştir. Ayrıca önerilen ST kontrol modelinin, alışlagelmiş kontrolundan (davranış kriterinde türevli terim içermeyenlerden) ve geleneksel anlamda kontrolden daha üstün olduğu belirtilmiştir.

1989 yılında A.S.İbrahim, B.W.Hogg ve M.M.Sharaf tarafından yapılan araştırmada [21], senkron generatör için minimum değişim, kutup yer değiştirme ve ayarlanmamış minimum değişim algoritmalarına dayandırılan ST gerilim regülatörlerinin pratik olarak gerçekleştirmesi ve bu konudaki gelişmeler açıklanmıştır. Kontrolörler, laboratuvardaki mikromakinalı sistem üzerinde geniş olarak incelenmiş ve iyi davranış gösterdikleri belirlenmiştir. Alışlagelmiş otomatik gerilim regülatörlerinin klâsik kontrol teorisi kullanılarak tasarlandığı, bunun da sistemin bütün çalışma bölgelerinde tatmin edici davranışı vermeyeceği gerçeğinden hareket edilerek, ST gerilim regülatörlerini gerçekleştirmek çalışmanın çıkış noktası olmuştur. Araştırmada kendini ayarlayan regülatörlerin alışlagelmiş otomatik gerilim regülatörleri yerine kullanıldığı, sistemin

çıkışını tanımlamak için ΔV_t ve onunla toplanan ilâve kararlı kılıcı işaretin geri besleme olarak (bu rotor hızı veya elektriksel güçteki değişim olabilir) alındığı belirtilmiştir. Sistemi tanımlamak için, yine keyfi sıfır ortalamalı bozucu dizi içeren ARMA modeli kullanılmıştır. Bu modelde; model dereceleri olarak $N=3$, $M=2$ seçilmiş ve parametrelerin kestirimi için, RLS yöntemi, adaptasyon yöntemi olarak sırasıyla minimum değişim kontrolörü, kutup ayırma kontrolörü, ayarlanmayan minimum değişim kontrolörü kullanılmıştır. Sunulan çalışmada tekrarlamalı en küçük kareler yöntemindeki kovaryans matrisini belli iterasyon sayısı kadar sonra ilk hale döndürmenin (resetlemenin) kestirimin sürüklenmesi açısından önemi üzerinde durulmuştur. Ayrıca, kestirimi durdurmak için ΔV_t ye belli sınırlar getirilmiştir. Bu çalışmada kendi kendini ayarlayan uyarma kontrolörleri; tek makinalı izole sistemdeki paralel iletim hatlarından birinin ucundaki üç fazlı kısa devre durumu ve sonra arızalı hattın devreden çıkarılması durumu için incelenmişlerdir. Kutup yer değiştirme ve ayarlanmamış minimum değişim algoritmalarının daha iyi bir sönüm sağladığı belirtilmiştir.

1990 yılında J.Y.Fan, T.H.Ortmeyer, R.Mukundan tarafından yayınlanan araştırmada, yerinde yönetilen (merkezden ayrılmış) (decentralized) özelliğe sahip ve her bir üretim birimi için bölgesel olarak gerçekleştirilen çok değişkenli adaptif kontrol modeli incelenmiştir [22]. Üretim biriminin modeli ARMA (autoregressive moving average) modeli olarak geliştirilmiştir. Değişken unutmama faktörlü tekrarlamalı en küçük kareler yöntemiyle kestirim yapılmış ve bölgesel kontrolörler genelleştirilmiş minimum değişim kontrol tekniği kullanılarak düşünülmüştür. Minimum değişim kontrolörünün genelleştirilmiş ifadesi davranış kriterindeki ağırlık polinomları uygun seçilebilirse, bütün sistemlere uygulanabileceği için tercih edildiği belirtilmiştir. Adaptif kontrolör RLS yöntemini kullanarak tanımlanmış çok değişkenli ARMA modeli temel alınarak oluşturulmuş ve uyarma kontrolörü vasıtasıyla her bir üretim

biriminde tesis edilmiştir. Uyarma işareti, hem geçici hem de sürekli durum koşullarında doğrudan adaptif kontrolörler vasıtasıyla üretilmiştir ve alışılabilir otomatik gerilim regülatörlerinin kullanılmadığı belirtilmiştir. Bu çalışmada ilgi çekici diğer bir yön, küçük bozucular altında dinamik özellikler iyi bir şekilde düzelişken, büyük bozucular sonrasındaki şiddetli salınımların da söndürülmesinin oldukça tatmin edici olmasıdır. Bu kontrol modelinin yararlılığı 10 makinalı sistem üzerinde incelenmiştir. Sistemdeki makinalardan bir ya da ikisine önerilen tip adaptif kontrolör konulmuş, diğerlerine bilinen güç sistemi kararlı kılıcısı ve bilinen otomatik gerilim regülatörü yerleştirildiğinde, simülasyonun iyi nitelikli davranış gösterdiği, sonuç olarak çalışmada önerilen adaptif kontrolörün diğer kontrolörlerle uyumlu çalıştığı ve her bir generatörde bağımsız olarak tesis edilebileceği kaydedilmiştir. Ayrıca, dokuz generatörün bölgesel adaptif kontrolörleri için kullanılan ağırlık matrislerinin aynı olduğu kaydedilmiştir. Bu da ağırlık matrislerinin seçiminin ne kadar isabetli olduğunu gösterir denmiştir. Bundan dolayı bu matrisleri belirlemede on-line algoritmanın bırakılabileceği de söylenmiştir.

1990 yılının başlarında Q.W.Wu ve B.W.Hogg tarafından yapılan bir incelemede [23], çok makinalı güç sistemlerindeki generatörlerin uyarma kontrolü için ST gerilim regülatörlerinin uygulanması durumu ele alınmıştır. Bu regülatörlerin bütün çalışma koşulları altında etkili çalışmayı sağlayacak şekilde yönetildiği ve davranışlarının ayrıntılı çok makinalı güç sistemi modeli kullanılarak değerlendirildiği belirtilmiştir. Çok makinalı ortamda bir makina kendi kendini ayarlayan ST regülatör, diğer makinalarda geleneksel tip regülatörlerin kullanıldığı durumda geçici durumlar ve sonrasında kararlı kontrolün sağlandığı gösterilmiştir. Bu incelemede kontrolörlerin tasarımı için sistemin dış eşdeğeri fikri kullanılmıştır. Bu çalışmada üretim birimlerinin ARMA modeliyle tanımlandıkları belirtilmiştir. Modellerin RLS tanımlama tekniği kullanılarak,

bölgesel giriş-çıkış verisi ölçümlerinden de faydalanılarak elde edildiği belirtilmiştir. Bu modelin bölgesel ölçümlere dayanılarak verilmiş olmasına rağmen, diğer makinalara ve şebekeye ait dinamik bilgiyi de içerdiği, bunun model özdeğerleri değerlendirilerek gösterilebileceği kaydedilmiştir. Burada ARMA modelindeki $A(q^{-1})$, $B(q^{-1})$ polinomlarının dereceleri sırasıyla üç ve iki olarak alınmıştır. ARMA modeline giriş olarak, uyarma girişi değişimi, çıkış olarak ise makina uç gerilimi değişimi kullanılmıştır. Ayrıca modele sistemi bozan sıfır ortalamalı keyfi sayı dizisi $\xi(t)$ de katılmıştır. İncelemede çok makinalı güç sistemine (ÇMGS) ait bütün dinamik özelliklerin kapsandığı, tanımlanan ARMA modelinin dış işlemlerin ana özelliklerini yansıtabildiği ve Ç.M.G.S'de parametreler değiştiğinde ARMA modelinin sıfırlarının da değiştiği söylenmiştir. Tanımlanan modelin iç ve dış sistemlerin önemli özelliklerini kapsadığı belirtilmiştir. Sunulan incelemede kullanılacak adaptif kontrol stratejisi ve kontrol kuralı karesel davranış kriterini küçültmekten yola çıkılarak bulunmuştur. Burada seçilen davranış kriteri özeldir. Sonuçta, büyük bozucular durumunda kendi kendini ayarlayan regülatörün gösterdiği davranış incelenmiş, sonuçların tatmin edici olduğu belirtilmiştir.

C.M.Lim, Prof.T.Niyama 1990 yılında yayınladıkları incelemede [24], Ç.M.G.S'lerinde kararlılığı artırmak için yerinde yönetilen (decentralized) kendi kendini ayarlayan kontrol modeli geliştirilmiştir. Ç.M.G.S'de her makinanın çalışması, kararlı kılıcı tasarımı sağlayacak şekilde zamanda ayırık model ile tanımlanmıştır. Modelin parametreleri bölgesel makinanın ölçülen giriş-çıkış verilerine dayandırılarak her örnekleme anında bir kere kestirilmiştir. Her bir kararlı kılıcı zamanda ayırık model kullanılarak tasarlanmıştır. İncelemede, girişi bölgesel makinanın ölçülebilen çıkışı olan her bir kendi kendini ayarlayan (ST) kararlı kılıcının çıkışının, o bölgesel makinanın uyarma sistemine uygulandığı belirtilmiştir. Yerinde yönetilen ST kararlı kılıcı tasarımı için, her bir

makinanın dinamikleri, $A(q^{-1})$ ve $B(q^{-1})$ polinomları üçüncü dereceden olacak şekilde ARMA modeliyle tanımlanmıştır. Buradaki parametreler her örnekleme anında RLS algoritması yardımıyla kestirilmiştir. Ayrıca o anda aşırı bir kontrol olmaksızın; çıkışın karesi, girişin karesi ve çıkış işaretinin türevinin karesinden ibaret olan davranış kriterini küçülten kontrol kuralı da uygulanmıştır [25]. İncelemede, Ç.M.G.S'lerin de yük ve hata durumları olduğunda sistem kararlılığı üzerine yoğunlaşmış ve umut verici sonuçlar elde edildiği belirtilmiştir.

1990 yılında O.P.Malik, G.S.Hope ve arkadaşları tarafından yapılan incelemede [26], lineer optimal kontrol teorisine dayandırılan adaptif güç sistemi kararlı kılıcısı geliştirilmiştir. Burada generatör gerçek zamanda tanımlanmış ve üçüncü dereceden ayrık Riccati eşitliğiyle her örnekleme anında çözülmüştür. İncelemede generatörün çıkışı doğrudan geri beslendiği için, kontrolörün, sistemi çok hızlı bir şekilde takip edeceği söylenmiştir. Tek makinalı güç sisteminin fiziksel modeli üzerinde yapılan incelemeler önerilen adaptif kontrolörün etkinliğini göstermiştir.

1991 yılının ortalarında sunulan bir başka incelemede [27], N.C.Pahalauatha, G.S.Hope, O.P.Malik dinamik salınımları söndüren çok giriş-çok çıkışlı adaptif güç sistemi kararlı kılıcısını sunmuşlardır. Çalışmada temel olarak tek giriş-tek çıkışlı kutup kaydırmalı adaptif kontrol algoritması kullanılmıştır. Bu algoritma çok girişli ve çok çıkışlı hale getirilerek, hem uyarmanın hem de mekanik regülatörün kararlı kılıcıya katkıları sağlanmıştır. Araştırmada, ayrıca mekanik regülatörün kontrolunun güç sisteminin kararlı kılınmasında çok önemli bir rol oynadığı belirtilmiştir. Hata sonrasında sistem kararlılığını sağlamak için etkili bir yol olarak, uyarma geriliminin maksimum değerine zorlanması ile birlikte ana buhar vanasının kapatılması önerilmiştir. Sunulan incelemede, çok girişli-çok çıkışlı durum için kendini araştıran kutup kaydırmalı tipli

ST kontrolör geliştirilmiştir. Bu araştırmada güç sistemi modeli olarak iki paralel hat üzerinden sonsuz baraya bağlı bir senkron generatör ele alınmıştır. Güç sisteminin bilgisayar simülasyonu kutup kaydıran güç sistemi kararlı kılıcısının davranışını incelemek için yapılmıştır. Kutup kaydıran güç sistemi kararlı kılıcısı için, güç sistemi dinamikleri için üçüncü dereceden matris polinomuna ve birinci dereceden gürültü dinamiklerine sahip, iki giriş iki çıkışlı sistem modeliyle yaklaşılabileceği varsayılmıştır. Burada, çok girişçok çıkışlı kutup kaydıran adaptif kontrolörler güç sistemi kararlı kılıcısı olarak kullanılmışlardır. Kontrol hareketindeki doyma etkisinin, kendi kendini araştıran kutup kaydırıcı ST algoritmasıyla yenilebileceği belirtilmiştir. Uyarma ve mekanik regülatör sisteminden alınan kontrol hareketlerinin birleştirildiği iki giriş-iki çıkışlı kontrol stratejisinin kullanılmasıyla sistem sönümünün daha iyi düzeltileceği açıklanmıştır.

1992 yılında O.P.Malik, G.S.Hope ve arkadaşları tarafından yapılan incelemede [28], daha önce [26] nolu kaynağına benzer olan adaptif optimal kontrolörler geliştirilmiştir. Yalnız bu defa incelemede, gerçek zamanda kullanılan adaptif optimal uyarma kontrolörlerinin çalışmaları da incelenmiştir. Kendi kendini ayarlayan minimum değişim kontrolörleriyle karşılaştırılmıştır. Bu inceleme de gene tek makinalı sistem üzerinde gerçekleştirilmiştir. Tekrarlamalı en küçük karelere dayandırılarak belirlenen parametrelerle oluşturulan adaptif optimal kontrol modelinde kontrol edilen sistemin daima kararlı kaldığı görülmüştür. Çalışmada önerilen adaptif optimal uyarma ve adaptif optimal güç sistemi kararlı kılıcıların farklı çalışma koşullarında yeteri derecede iyi çalıştığı belirtilmiştir.

1.2. Tezde Yapılanlar

Bir önceki ayırtta da belirtildiği gibi, son yıllarda güç sistemlerinin kontrolunda kullanılan en etkin yöntemlerden birisi adaptif kontrol yöntemidir. Dinamik davranışı nedeniyle bir güç sistemi adaptif sisteme benzer özellikler gösterir. Yeni durumlara sürekli uyum sağlamaya çalışma olarak yorumlanacak adaptasyon (uyum) güç sistemlerinin doğasında vardır. Belirli bir bölge dahilinde kararlılığı sağlayabilen uyarma girişinin ya da mekanik girişin kontrolu bütün çalışma koşulları altında istenilen davranışı sağlayamayabilir. Ayrıca uyarmakontrolu için, eskiden beri önerilen [29] otomatik gerilim regülatörlerinin bazı sakıncaları da vardır. Bundan dolayı, modern kontrol teorisi ile bilgisayar teknolojisinin sürekli gelişimi sonucu ilerleyen adaptif kontrol tekniklerinin güç sisteminin en önemli kısmı olan senkron generatörlerin kontroluna uygulanması giderek önem kazanmaktadır. Bunların uygulanmasıyla alışılacelmiş gerilim regülatörleri ile yapılan kontrolun sakıncaları giderilmiştir. Gene yukardaki ayırtlarda belirtildiği gibi günümüzde adaptif kontrol; ya açık tip ya da kapalı tip olarak gerçekleştirilmektedir. Tanımlama kısmı zamanda ayırık yapıya sahip olan, açık kontrol yöntemlerinde uygulanan ilke şöyledir; sistem parametreleri, her t anında ölçülen sistem giriş ve çıkış büyüklüklerine bağlı olarak herhangi bir kestirim yöntemi ile kestirilir. Böylece, her t anı için kestirilen parametreler belli bir kontrol kuralı ile sistem davranışı için uyumlu yeni işaretleri üretirler. Kapalı kontrol yöntemleri ise, başlangıçta belirlenen sistem modeli ile gerçek sistem davranışı birbirleriyle karşılaştırılarak, adaptif kontrolörlerdeki kontrol kazancının bu karşılaştırmaya göre düzeltilmesiyle çalışırlar. Güç sistemlerindeki adaptif kontrol uygulamaları gözlemlendiğinde, bunlarda daha çok açık adaptif kontrol yöntemlerinin kullanıldığı görülmektedir. Bu konudaki araştırmalar; hem tek hem de çok makinalı şebekelerin kontrolu üzerine yoğunlaşmıştır. Kapalı kontrol yöntemlerinin kullanıldığı araştırmaların tümünde ise, tek makinalı sistem

kullanılmıştır. Bunun nedeni böyle bir sistem için kurulacak referans modelin geliştirilememiş olmasıdır.

Diğer taraftan, açık tanımlamalı algoritmaların çoğunda kullanılan tekrarlamalı en küçük kareler yönteminde kestirim işlemi üç aşamada gerçekleştirilmektedir; Kovaryans matrisi hesaplanır, buradan hareketle kazanç matrisi bunlardan hareketle de parametre kestirimi yapılır. Her t anında gerçekleştirilecek bu üç aşama bilgisayarda işlem süresinin oldukça uzun olmasını ve bilgisayarda daha geniş bir alan işgal edilmesini gerektirir. Ayrıca kovaryans matrisinin sürüklenmesini önlemek için belli aralıklarla ilk durumuna döndürülmesi gerekmektedir. Yine buradaki unutma faktörünün de seçimi önemlidir. Bunlar tekrarlamalı en küçük kareler kestirim algoritmasının sakıncalarıdır. Buna karşın, projeksiyon algoritması ile kestirim yöntemi her t anında yapılacak işlem sayısını azaltarak, hem süre hem de bilgisayarda kapladığı bellek açısından ekonomi sağlar. Ayrıca resetleme, unutma faktörü seçimi gibi sakıncaları da yoktur. Bu nedenle tezde projeksiyon kestirimine dayandırılan parametre adaptif kontrolün simülasyonu yapılmıştır. Ayrıca tezde gene literatürdekinden farklı olarak, projeksiyon kestirim algoritmasının kullanıldığı optimal öngörücülü adaptif kontrol kuralının simülasyonu çok makinalı güç sistemindeki makinalara uygulanmıştır. Adaptif kontrolün güç sistemlerine uygulanması ile ilgili literatüre bakıldığında, ya uyarma ya da mekanik giriş kontrolünün tek başına adaptif olarak gerçekleştirildiği görülmüştür. Tezdeki çalışmada adaptif kontrol simülasyonu, her ikisini de aynı anda koordineli kontrolünü sağlayacak şekilde yapılmıştır.

Yukarıda açıklananların tümünün ışığı altında tezin birinci bölümünde önce konu tanıtılmış, sonra bu konu ile ilgili literatür verilmiş ve son olarak da tezde yapılanlar açıklanmıştır. Tezin ikinci bölümünde, önce adaptif kontrol konusunda genel bilgiler, sonra da tezde

kullanılan adaptif kontrol kuralı verilmiştir. Tezin üçüncü bölümünde, kontrol edilecek sistemin matematiksel modeli verilmiştir. Dördüncü bölümde bir güç sistemi ele alınarak ve daha önceki bilgilere dayanılarak sistemin ve sistemdeki üretim birimlerinin adaptif kontrolünün simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Tezin son bölümünde simülasyon sonucunda elde edilen sonuçlar yorumlanmış, konu hakkında ilerde yapılabilecekler vurgulanmıştır.



BÖLÜM 2.

ADAPTİF KONTROL

Adaptasyon (uyum) kelimesi, kısaca yeni durumlara kolaylıkla uyum sağlamak olarak tanımlanabilir. Adaptif kontrol ise parametreleri bilinmeyen ya da parametrelerinin zamana göre değişiminin bilinmediği sistemlerin kontroluyla uğraşır. Ayrıca kontrolün amacı, sistemlerin işletme koşullarına bağlı olarak çalışma özelliklerini belirleyen koşullarda değişiklik söz konusu olduğunda, bu değişimlere uygun olarak hem kontrol parametreleri, hem de kontrol stratejisinde her t anında yapılan (on-line) ayarlarla sistemin çalışmasını sürekli olarak düzeltmektir. Adaptif kontrolü incelemek için, hem geri besleme kontrolu konusunda, hem de örnekli veri sistemleri konusunda bilgi birikimine ihtiyaç vardır. Gerçekte, adaptif kontrolün her t anında yapılan kontrol ile yine her t anında yapılan parametre kestirimini birleştirilerek çalıştığı söylenebilir. Bu nedenle, parametre kestirim algoritmaları ile de yakından ilgilidir.

2.1. Adaptif Kontrolün Yapısı ve Çeşitleri

Adaptif kontrol, kısaca, sistemin çalışma koşullarındaki değişimlere dayanılarak kontrol parametrelerini değiştirmek olarak tanımlanır [7]. Bu tür kontrolde, sistemin çalışma koşullarındaki değişim kontrolör tarafından fark edildiğinde yeni bir kontrol parametre grubu belirlenir. Bu parametreler ve önceden belirlenmiş olan bir kontrol kuralı yardımıyla, sistemdeki değişime uygun cevaplar üretilir. Sabit parametrelili kontrolörler belli çalışma koşulları altındaki en iyi çalışmayı sağlarlar. Oysa adaptif kontrol tekniği, kontrol parametrelerinin çalışma koşulları için en uygun olduğunu varsayar ve böylece sistem kararlılığını arttırır.

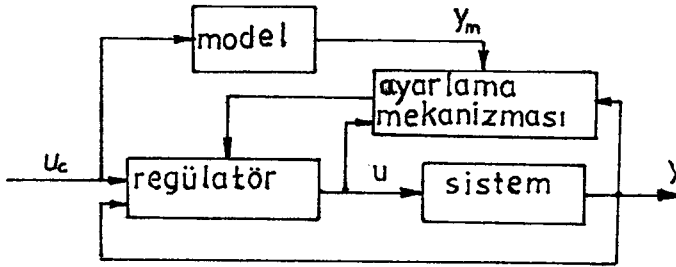
Adaptif kontrol sistemlerinde bulunması gereken temel işlevler aşağıdaki şekilde verilmiştir:

- i) Bilinmeyen parametrelerin belirlenmesi veya davranış kriterindeki sapmanın parametrelerdeki değişimlere göre ifadesi.
- ii) Kontrol stratejisine karar verilmesi,
- iii) Kontrol parametrelerinin her t anında (on-line olarak) düzeltilmesi.

Yukarıdaki işlevlerin nasıl birleştirildiğine bağlı olarak, adaptif kontrolörler için farklı algoritmalar elde edilir. Adaptif kontrolde iki temel yaklaşım ortaya çıkmıştır. Bunlar, öncelikle Implicit (kapalı ya da dolaylı) ve Explicit (açık ya da doğrudan) tanımlamalı algoritmalar olarak ikiye ayrılırlar.

Kapalı Tanımlamalı Algoritmalar

Bu tür kontrolde, sistemden istenen davranışı verecek olan model önceden belirlenir. Bu model ile gerçek sistemin çalışmasını karşılaştırmak algoritmanın temelini oluşturur. Bu kontrol çoğu zaman Modele Uyumlu Adaptif Kontrol [6] (MRAC: Model Reference Adaptive Control) olarak bilinir. Model ile gerçek sistem çıkışları arasındaki hata sifıra götürülecek şekilde kontrol parametreleri düzeltilir. Böylece, gerçek sistem modeli izlemiş olur. Buna ilişkin şema Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Modele Uyumlu Adaptif Kontrolün Şeması.

Modele uyumlu adaptif kontrol sistemleri, sistem çıkışının ideal olarak kumanda işaretine nasıl cevap vermesi gerektiğini anlatan referans model yardımıyla, kontrol problemlerinin çözümünü sağlar. Referans olarak verilecek model çoğunlukla sisteme paralel olarak alınmaktadır [10]. Regülatör iki çevrim içerecek şekilde düşünülebilir; sistemi içeren olağan geri besleme çevrimi olan iç çevrim ve regülatör. Regülatörün parametreleri, sistem çıkışı y_p ve model çıkışı y_m arasındaki e hatasını küçültecek şekilde, dıştaki çevrim ile ayarlanır. Bu çevrim aynı zamanda regülatör çevrimidir. Modele uyumlu adaptif kontrol algoritmasının belirlenmesinde aşağıdaki yol izlenir [7].

- i. İstenen davranışı veren bir model seçilir.
- ii. Referans model ile gerçek sistemin çıkışları arasındaki hata hesaplanır.
- iii. Bu hata ile sistem durumları arasındaki ilişkiye dayanılarak, sistemin geri besleme kazançları ayarlanır.

Sistem ve buna ilişkin modelin durum eşitlikleri

$$\dot{y}_p(t) = A_p(t)y_p(t) + B_p(t)u(t) \quad (2.1)$$

$$\dot{y}_m(t) = A_m(t)y_m(t) + B_m(t)u(t) \quad (2.2)$$

dir. Burada, y_p ve y_m sistemin ve modelin çıkış vektörlerini, u giriş vektörünü, A ve B durum matrislerini göstermektedir. Hata fonksiyonu ise,

$$e(t) = y_m(t) - y_p(t) \quad (2.3)$$

dır. Öyle ki, kontrolün amacı bu hatayı sıfıra götürmeye çalışmaktır. Bu, Liaponov fonksiyonu seçerek veya Popov'un hiperstabilite teorisi kullanılarak sağlanır [7]. Bu yöntemin iyi uygulanabilmesi, tasarlayıcıların kontrol sınırları dahilinde elde edilebilecek sistem davranışı hakkındaki bilgilerine bağlıdır. Aksi halde, kontrol

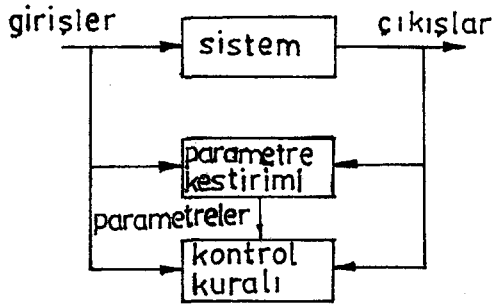
sınırlamaları ortaya çıkar ve sistem cevabı referans modelinden önemli ölçüde farklı olur. Diğer taraftan, gerçek sistem kestirilemeyen dış bozuculara hemen cevap verirken, referans model bunu başaramaz. Çalışmadaki bu uyumsuzluk sistem hatası olarak yorumlanır ve sistemde istenmeyen adaptasyon oluşur. Modele uyumlu adaptif kontrol yönteminin güç sistemlerine uygulamaları geniş olmakla birlikte, çok makinalı güç sistemlerinde modelin seçimi problem olmaktadır.

Açık Tanımlamalı Algoritmalar

Bu tür algoritmalarda, sistem parametreleri açık olarak tanımlanır. Açık algoritmalarda kullanılan parametreye tanımlama yöntemi daima zamanda ayırık şekildedir. Bunun nedeni, kontrol hesaplamalarının örnekli veri tekniği kullanılarak yapılmasıdır. Sistemin transfer fonksiyonunun yerine geçen modelin parametreleri belirlemek için, tekrarlamalı en küçük kareler, projeksiyon yöntemi gibi tanımlama teknikleri kullanılır. Bu tanımlama tekniklerinde, parametre kestirimleri her t anında yapılır. Açık algoritmalarla ilgili pek çok yöntem vardır. Bunların özellikleri daha sonraki bölümde verilecektir. Açık algoritmalar çoğunlukla kendi kendini ayarlayan kontrolörler (STC: self tuning controler) olarak bilinir. Açık algoritmaların çalışma adımları kısaca aşağıdaki gibidir:

- i. Normal salınım frekansının on katı civarında örneklem frekansı seçilir,
- ii. Herbir örneklem aralığında $T(=1/f)$, sistem modeli parametreleri tekrarlamalı bir algortmadan yararlanılarak oluşturulur,
- iii. Seçilen kontrol yöntemine bağlı olarak kontrol parametrelerinin düzeltilmesi sağlanır.

Kendi kendini ayarlayan kontrolörlerin blok gösterimi Şekil 2.2'de verilmiştir.



Şekil 2.2. Kendi kendini ayarlayan adaptif kontrolün şeması.

Kendi kendini ayarlama kontrolunda, tekrarlamalı en küçük kareler veya benzeri bir yöntemle her t anında kestirim yapılarak elde edilen parametre değerleri gerçek sistem parametreleri gibi kontrol kuralına katılır [5]. Bu nedenle, bu tip kontrolün en önemli kısımlarından birini parametre kestirimi oluşturur.

Şekil 2.2'ye dikkat edilecek olursa sisteme bozucular şeklinde bir giriş yapılmamıştır. Bu, incelenen sistemin Deterministik yaklaşımla ele alındığını gösterir. Deterministik olarak adaptif sistem modellenmesinde, gürültüler modelleme hataları yanında nispeten daha az önemli ise uygulanabilen adaptif algoritmaları gösterirler. Deterministikten kast edilen, modelin sistem cevabını tam olarak vermesidir. Bozucular olmadığında ve sistem modeli bilindiğinde uygulanır [30]. Kısaca deterministik durumu ayırt eden özellik, burada olayın sadece geçmiş giriş-çıkış verilerine göre kestirimini yapmaktır. Buna karşın, stokastik durumun farklı özelliği, olayın olasılık teorisine dayandırılarak kestirilmesidir.

Açık ve Kapalı Adaptif Algoritmalar Arasındaki İlişki

Genellikle açık adaptif algoritmaların kendi kendini ayarlayan (self-tuning) yapıdaki kontrolörlerle, kapalı adaptif algoritmaların ise modele uyumlu adaptif kontrolörlerle ilişkili olduğu söylenmesine rağmen, açık kendi

kendini ayarlayan algoritmalar olabileceği gibi kapalı kendi kendini ayarlayan adaptif algoritmalar da mevcuttur.

(Aynı durum modele uyumlu adaptif kontrolörler için de geçerlidir.) Eğer, kestirilen parametrelerin hepsi ya da bazıları kontrol tasarımına ait hesaplamalar olmaksızın kontrol hareketini oluşturmak için kullanılırsa, kendi kendini ayarlayan algoritma kapalı algoritma sınıfında değerlendirilir. Aksine, kestirilmiş parametreler düzeltilecek kontrolör parametrelerini oluşturmak için kontrol tasarımı hesaplamalarıyla birlikte on-line olarak kullanılırsa, kendi kendini ayarlayıcılar açık algoritmalar sınıfında yer alırlar [31]. Başka bir deyişle, kapalı kendi kendini ayarlayan adaptif kontrol algoritmalarında, kontrolör parametreleri giriş-çıkış verilerinden belirlenir. Belirlenen bu parametreler ve giriş-çıkış verilerinden yararlanılarak kontrol hesaplanır. Açık kendi kendini ayarlayan adaptif kontrol algoritmalarında ise, giriş-çıkış verilerinden sistem parametreleri belirlenir, bunlar yardımıyla kontrolör parametreleri hesaplanır. Son olarak, hesaplanan kontrolör parametreleri gerekli kontrolü sağlamak için giriş-çıkış verileriyle birlikte kullanılır [32].

Aström ve Wiltenmark kapalı kendi kendini ayarlama algoritmasını düşünerek, 1970'li yıllarda, minimum değişim yöntemini geliştirmişlerdir. Yine aynı araştırmacılar, 1980'li yıllarda, açık kendi kendini ayarlayan adaptif kontrol prensibini esas alarak, karmaşık bir yapıya sahip kutup yerleştirme yöntemini geliştirmişlerdir [5].

Modele uyumlu adaptif kontrolün nasıl çalıştığını tekrar ifade edecek olursak; istenen çalışmayı gösterecek modelin kontrol stratejisinde verildiği, model ile gerçek sistemin çıkışları arasındaki hatanın sifıra götürülmek istendiği bilinir. Açık modele uyumlu adaptif kontrol deyimi, referans model çıkışıyla sistem çıkışı arasındaki hatayı sifıra götürmeye çalışan kontrol işlemine ait doğrudan belirli ifadenin bulunmadığı durumları anlatmak için kullanılır [5]. Kapalı modele uyumlu adaptif kontrolde ise,

sistem parametrelerinin adaptif kontrol stratejisinin bir parçası olarak belirlendiği söylenir. Bu açıklamanın ışığında, açık modele uyumlu adaptif kontrolün kapalı kendi kendini ayarlayan kontrol ile ve kapalı modele uyumlu adaptif kontrolün da açık kendi kendini ayarlayan kontrol ile ilgisi olduğu söylenecektir.

2.2. ARMA Modeli

Otomatik olarak geriye doğru kayan ortalama model adaptif kontrolün uygulanmasında kullanılan matematiksel bir modeldir. Bu model, literatürde İngilizce adı olan "Autoregressive moving average" in kelimelerinin baş harflerinden oluşan ARMA kelimesi ile adlandırılır. ARMA modeli, sistem modelinin zamanda ayırık biçimi yerine kullanılan ve polinomlarının derecesi küçültülmüş doğrusal bir ifadedir.

ARMA modeli ile sistemin transfer fonksiyonu arasında doğrudan bir ilişki vardır [11]. Bu ilişki aşağıdaki gibi açıklanabilir.

$$\dot{x}(t) = A_s x(t) + B_s u(t) \quad (2.4)$$

$$y(t) = C_s x(t) \quad (2.5)$$

şeklin deki sisteme ait doğrusal durum uzayı modeli, zamanda ayırık ifade edilirse,

$$zx(z) = A_a x(z) + B_a u(z) \quad (2.6)$$

$$y(z) = C_s x(z) \quad (2.7)$$

halini alır. (2.4), (2.5), (2.6), (2.7) eşitliklerinde;

$x(t)$: Durum değişkeni vektörü

$u(t)$: Kontrol değişkeni vektörü

A_s, B_s, C_s : Sistem parametreleri ve çalışma büyüklükleri cinsinden sabit katsayılar matrisleri

$y(t)$: Çıkış değişkenleri vektörü

dur. (2.6) ve (2.7) eşitliklerindeki A_a , B_a matrisleri ise A_s ve B_s matrislerinin zamanda ayırık hale getirilmiş şekilleri olup, bunlar;

$$A_a = I + A_s T + A_s^2 \cdot \frac{T^2}{2!} + \dots + A_s^g \cdot \frac{T^g}{g!} \quad (2.8)$$

$$B_a = \left[I T + A_s \cdot \frac{T^2}{2!} + A_s^2 \cdot \frac{T^3}{3!} + \dots + A_s^{g-1} \cdot \frac{T^g}{g!} \right] B_s \quad (2.9)$$

olarak tanımlanırlar [33]. Burada g serideki eleman sayısını, T örnekleme periyodunu gösterir.

(2.6) ve (2.7) eşitliklerinden sistemin z -domenindeki ayırık transfer fonksiyonu, $u(0) = 0$ koşulu altında;

$$\frac{Y(z)}{U(z)} = C(zI - A_a)^{-1} B_a \quad (2.10)$$

dur. Bu transfer fonksiyonu aslında sistemin giriş ve çıkışlarının geciktirilmiş ifadelerinden oluşan bir modeldir.

(2.8), (2.9), (2.10) eşitlikleri ve bunları elde etmek için yapılacak işlem sayısı, bu işlemlerdeki matris boyutları düşünüldüğünde ve (2.10) ifadesinin karakteristik polinomunun derecesinin büyük olacağı da göz önüne alındığında, sistemi zamanda ayırık modellemenin güçlüğü ortaya çıkar. Bu işlem fazlalığı araştırmacıları, bu modeller yerine daha basit bir model kullanmaya yöneltmiştir. Bu model geçmiş bilgileri kullanan ARMA modelidir. ARMA modeli, kontrolör tasarımı esneklik sağladığı gibi geçmiş zaman bilgilerini kullanarak bir sonraki anda sistem çıkışını belirleyen zamanda ayırık bir transfer fonksiyonu matrisi olarak düşünülebilir. ARMA modelinin, (2.10) ile verilen zamanda ayırık transfer fonksiyonu matrisinden üstünlüğü, gerçek sistemi dahadüşük dereceli polinom matrisiyle ifade edilmesidir. Bu model basit olarak aşağıdaki gibidir;

$$A(q^{-1})y(t) = q^{-D}B(q^{-1})u(t) \quad (2.11)$$

burada q^{-1} geriye kayma operatörünü, t örnekleme anını, $A(q^{-1})$ ve $B(q^{-1})$ modelin polinom matrislerini, D örnekleme periyodlarında sistem parametrelerine bağlı olan zaman gecikmesini gösterir. Güç sistemleri için $D=1$ olarak alınır [17]. Buna göre, (2.11) eşitliği tekrar yazılırsa;

$$y(t+1) = \sum_{i=0}^N A_i y(t-i) + \sum_{j=0}^M B_j u(t-j) \quad (2.12)$$

ifadesi elde edilir. Burada, $y \in R^n$ ve $u \in R^m$ olup, N ve M ARMA modelindeki polinomların derecelerini gösterir. Eğer sistem tek giriş-tek çıkışlı (SISO: single input-single output) ise A_i ($i=0,1,\dots,N$) ve B_j ($j=0,1,\dots,M$) polinomları:

$$A_i = a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_N z^{-N} \quad (2.13)$$

$$B_j = b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_M z^{-M} \quad (2.14)$$

olur. Eğer sistem çok giriş -çok çıkışlı (MIMO: multi input-multi output) ise yukarıdaki (2.13), (2.14) polinomlarının polinom matrislerine dönüşeceği açıktır. (Bu durumda, A_i $n \times n$, B_j $n \times m$ boyutlu matrislerdir; $i=0,1,\dots,N$; $j=0,1,\dots,M$)

Sıfır ortalamalı $\omega(t)$ beyaz gürültü gözönüne alındığında (2.12) eşitliği daha genel olarak;

$$y(t+1) = \sum_{i=0}^N A_i y(t-i) + \sum_{j=0}^M B_j u(t-j) + \omega(t) \quad (2.15)$$

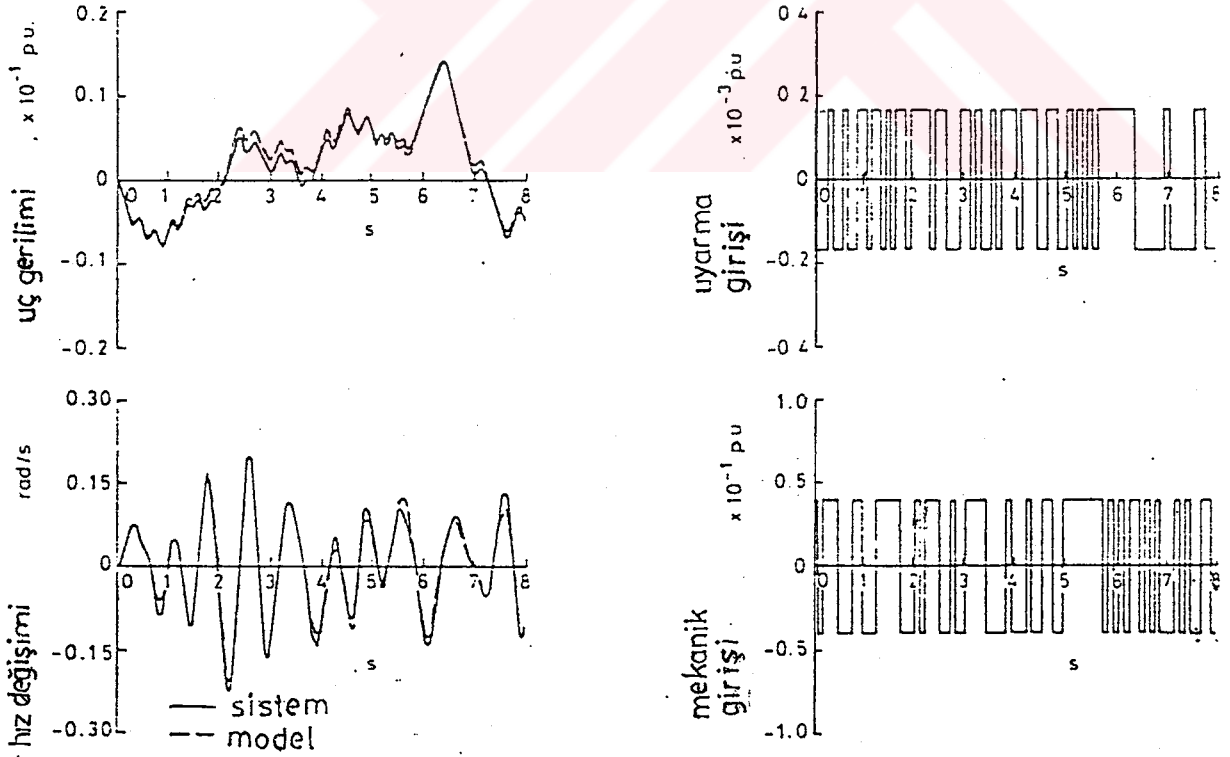
olur. $\omega(t)$ sistemi etkileyen ve önceden belirlenemeyen her türlü bozucuyu gösterir. Bununla beraber, deterministik yorumla yapılan incelemede stokastik işaret olan $\omega(t)$ hesaba katılmaz. Sistemin ARMA modelinin (2.12) eşitliğinde olduğu gibi alınmasının yeterli olduğu varsayılır.

ARMA modelindeki katsayı polinomlarının dereceleri, gerçek sisteme ve onun ARMA modeline aynı girişler (PRSB: pseudo random sequence binary) uygulanarak bu

girişlere karşı sistemden ve modelden elde edilen çıkışlar değerlendirilerek, deneme yanılma yoluyla elde edilir [17]. Aşağıda Şekil 2.3'de gerçekte 14. dereceden modellenen turbogeneratör ile onun ARMA modeli karşılaştırılmıştır. Sonuçta, $N=2$ $M=0$ polinom dereceleri için ARMA modelinin gerçek sistem modeline yakın sonuçlar verdiği görülmektedir [17]. Doğal olarak, ARMA modelinin ve sistem modeli çıkışlarının birbirine uyumu kadar, ARMA modelinin derecesinin küçültülmesi de bu modelin belirlenmesinde önemli faktördür. (2.12) daha açık yazılırsa;

$$y(t+1) - a_0 y(t) - a_1 y(t-1) - a_2 y(t-2) \dots - a_N y(t-N) = b_0 u(t) + b_1 u(t-1) + \dots + b_M u(t-M) \quad (2.16)$$

şekline dönüşür. Burada tek giriş-tek çıkışlı sistemin göz-önüne alındığı, yukardaki ifadenin polinom olarak yazılmasından bellidir. Sisteme belli u girişleri uygulandığında



Şekil 2.3. ARMA modelinin derecesinin belirlenmesi.

ve y çıkışlarının gözlemlendiği düşünülerek (2.16) ifadesi iki vektörün çarpımı şekline dönüştürülebilecektir. Bu vektörlerden parametre vektörü;

$$\theta^T = (a_0, a_1, \dots, a_N, b_0, b_1, \dots, b_M) \quad (2.17)$$

dır. Kayma (regression) vektörü de aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\phi^T(t) = (y(t), \dots, y(t-N), u(t), \dots, u(t-M)) \quad (2.18)$$

Böylece ARMA modeli;

$$y(t+1) = \phi^T(t)\theta \quad (2.19)$$

haline dönüşür. Giriş ve çıkış işaretlerinin regression vektöründe geciktirilmiş özellik göstereceği açıktır. Modelin bu yüzden auto-regression olarak isimlendirildiği söylenebilir. Adaptif kontrol ile ilgilenildiğinde $u(t)$ kontrol kuralı kullanılacağından, çoğu zaman 2.19 ifadesinden $u(t)$ elde edilir. Burada, θ parametre vektörünün elemanları çeşitli şekillerde kestirilebilir.

2.3. Parametre Kestirimi ve Çeşitleri

Doğrusal ya da doğrusal olmayan sistemlerde temelde sistemlerin davranışını belirleyecek modeli tam olarak kurmak için, parametrelerin değerlerinin belirlenmesine gereksinim duyulur. Bazı durumlarda, parametrelerin belirlenmesi fizik, kimya gibi disiplinlerdeki kurallardan elde edilir. Bazı durumlarda ise, bu yolla sistem parametrelerinin tam değerini belirlemek faydalı olmayabilir. Örneğin, uygun deneysel koşullar altında sistem cevabının biçimini gözleyerek parametrelerin, değerlerini belirlemek mümkündür. Bu yöntem parametre kestirimi olarak adlandırılır [12]. Tezde incelenen yöntemlerde, daha önce bahsedildiği gibi, deterministik dinamik sistemlerdeki parametre kestirimi üzerinde durulmuştur. Parametre kestiriminde en önemli kriterler kısaca şunlardır [18];

1. Modelin sınıflaması
2. En iyi uyan kriter
3. Deneysel koşullar
4. Kestirim algoritmaları
5. Önceki bilgilerin kullanımı.

1. Burada problem, model yapılarının uygun sınıfını seçmektir. Çoğu zaman fiziksel olayın tam ifadesi ya faydalı olmaz veya pratik değildir. Böylece modelin karmaşıklığı ile verilen uygulama için tamlığı arasında bir uzlaşmaya gidilir.

2. Modelin uygun yapısının seçiminde, karar verilecek sınıf dahilinde farklı modellerin göreceli davranışlarıyla uygun kriter belirlenir.

3. Farklı modellerin göreceli davranışlarının bağımsız ve çalışma koşullarının geniş olacağı açıktır. Böylece, parametre kestirimi için deneysel koşulların seçimi oldukça önemli olmaktadır.

Örneğin, adaptif kontrolde model normal çalışma koşulları altında ayarlanır.

4. İki temel algoritma vardır: Off-line ve on-line. Off-line durumunda, önceki mevcut verinin hepsi tahmin edilir. Veriye analiz işlemi sırasında, belli bir zaman limiti olmaksızın, bütün blok bilgi olarak bakılabilir. Off-line kestirimin tersine olarak, dizisel veri ile meşgul olan on-line durum, örnekleme periyodu ile sokulan zaman sınırlandırılması dahilinde, parametrelerin tekrarlamalı olarak geliştirilmesine ihtiyaç duyar. Bu nedenle, verilen zaman sınırlandırmasını karşılamak amacıyla nispeten basit bir algoritma kullanmak gereklidir. Farklı kestirim algoritmalarının davranışları çeşitli durumlarda karşılaştırılabilir. Örnek olarak, seçilen model yapısının gerçek sistem yapısına karşı geldiğini varsayarak, aşağıdaki sorular sorulabilmelidir. Modelin çıkışları sistemin çıkışlarına yakınsar mı? Algoritmanın yakınsaması ne hızda olur? v.s.

5. Bu faktör, sistemin daha önceki bilgilerinin kullanımını gerektirir. Çoğunlukla, kestirim algoritması dahilinde mümkün olduğu kadar çok önceki bilginin kullanılması faydalıdır.

On-line kestirim plânı, yeterli örnekler yardımıyla örnekleme periyodu sırasında düzeltilmiş parametre kestirimi üretir. Böylece, algoritmanın basit ve kolay gerçekleştirilmesi istenir. On-line çalışan adaptif kontrol algoritmalarının en önemli kısmı parametre kestirimidir. Kısaca, $\theta(t)$, önceki kestirim $\theta(t-1)$ yardımıyla

$$\theta(t) = f(\theta(t-1), D(t), t) \quad (2.20)$$

olacak şekilde bulunur. Burada $D(t)$, t anında mevcut veriyi ve $f(.,.,.)$ özel algoritmayı belirleyen cebrik fonksiyonun şeklini gösterir. Dinamik sistem durumunda, $D(t)$ normal olarak sistem girişleri ve çıkışlarının şimdiki ve geçmişte ölçülmüş değerleri olarak alınır. $y(t)$ çıkışları, $u(t)$ girişleri gösterir:

$$y(t) \triangleq \{y(t), y(t-1), \dots\} \text{ ve } u(t) \triangleq \{u(t), u(t-1), \dots\} \quad (2.21)$$

(2.20)'nin özel şekli pratikte geniş olarak kullanılan aşağıdaki şekildedir:

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + M(t-1)\phi(t-D)e(t) \quad (2.22)$$

burada;

$\hat{\theta}(t)$: t anındaki parametre kestirimini

$M(t-1)$: algoritma kazancını

$\phi(t-D)$: $y(t-D)$, $u(t-D)$ den seçilmiş elemanların bir çeşit birleşiminin regression vektörü,

$e(t)$: bir çeşit modelleme hatasını gösterir. Başka bir deyişle, $\theta(t-1)$ 'in kullanımından doğan model öngörü hatasıdır.

(2.22) çok basit görüldüğü halde, algoritma gerçekte çok farklı amaç fonksiyonları ile çalıştırılabilecektir. Aynı zamanda, $\hat{\theta}(t)$, $M(t)$, $\phi(t)$ ve $e(t)$ nin tam anlamlarına bağlı olarak, algoritma pek çok farklı şekil alabilir.

Tekrarlı kestiricilerin analizinde en önemli problem, kestiricilerin özelliklerini bulmaktır. Sonuç, kestiriciyi besleyen verinin nasıl üretildiğine önemli ölçüde bağlıdır. Bunun anlamı, deterministik veya stokastik veri olmasıdır [18]. Adaptif kontrolörlerde değişkenler (giriş ve çıkış) gerçek zamanda dizisel olarak elde edildiği için, işlem zamanından tasarruf etmek amacıyla işlemlerin tekrarlı olarak yapılması istenir. Bu nedenle, (t-1) anında elde edilen sonuçlar t anındaki kestirimleri oluşturacak şekilde düzenlenebilir.

2.3.1. En Küçük Kareler Yöntemi

Gauss 18. yy'da bu metodu formüle etmiş ve gezegenlerin yörüngelerini belirlemek için kullanmıştır [18]. Bu metoda göre, modelin bilinmeyen parametrelerinin aşağıdaki şekilde belirlenmesi gerekir;

"Hesaplanan değerler ile gerçek gözlenen değerler arasındaki farkların karelerinin toplamının duyarlılık derecesini ölçen sayılarla çarpımı minimumdur" [30].

Bu prensip çok değişik problemlere uygulanabilir [18], [4]. Özellikle, daha önceki ayrıtta verilmiş aşağıdaki matematiksel model için çok basittir;

$$y(t) = \phi_1(t)\theta_1 + \phi_2(t)\theta_2 + \dots + \phi_n(t)\theta_n = \phi^T(t)\theta \quad (2.22)$$

Burada, y gözlenen değer, $\theta_1, \dots, \theta_n$ bilinmeyen parametreler, $\phi_1, \dots, \phi_n$ bilinen değişkenlere bağlı olabilen, bilinen fonksiyonlardır. Model, çoğunlukla zamanı gösteren t değişkeniyle indekslenir. ϕ_i değişkenleri regression (kayma) değişkenleri olarak isimlendirilir. Problem, (2.22) eşitliğindeki modelden hesaplanan çıkışlar en küçük kareler anlayışıyla ölçülen y(i) değişkenlerine mümkün olduğu kadar yakın olacak şekilde parametreleri belirlemektir. Problemin ifadesi şöyledir;

$$Y(t) = [Y(1), Y(2), \dots, Y(t)]^T \quad E(t) = [\xi(1), \xi(2), \dots, \xi(t)]^T$$

$$\Phi(t) = \begin{bmatrix} \phi^T(1) \\ \vdots \\ \phi^T(t) \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

$$P(t) = [\Phi^T(t)\Phi(t)]^{-1} = \left[\sum_{i=1}^t \phi(i)\phi^T(i) \right]^{-1} \quad (2.24)$$

Burada $\xi(i)$ rezidüleri aşağıdaki şekilde belirlenir:

$$\xi(i) = Y(i) - \hat{Y}(i) = Y(i) - \phi^T(i)\theta \quad (2.25)$$

En küçük kareler hatası

$$v(\theta, t) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^t \xi(i)^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^t [Y(i) - \phi^T(i)\theta]^2 = \frac{1}{2} E^T E = \frac{1}{2} \|E\|^2 \quad (2.26)$$

dır. Burada; $E = Y - \hat{Y} = Y - \phi\theta$ dur. En küçük kareler probleminde çözüm aşağıdaki teoremle verilir [18].

Teorem: En Küçük Kareler Kestirimi: (2.26) eşitliği,

$$\Phi^T \hat{\Phi} \hat{\theta} = \Phi^T Y \quad (2.27)$$

sağlandığında, $\hat{\theta}$ parametreleri için minimaldir. Eğer, $\Phi^T \hat{\Phi}$ matrisi tekil değilse, minimum tekdir ve aşağıdaki ifadeyle verilir [18].

$$\hat{\theta} = (\Phi^T \hat{\Phi})^{-1} \Phi^T Y \quad (2.28)$$

İspat: (2.26) eşitliğindeki kayıp fonksiyonu aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$2v(\theta, t) = E^T E = (Y - \Phi\theta)^T (Y - \Phi\theta) = Y^T Y - Y^T \Phi\theta - \theta^T \Phi^T Y + \theta^T \Phi^T \Phi\theta \quad (2.29)$$

$\Phi^T \hat{\Phi}$ matrisi daima kesin pozitif olduğu için, v fonksiyonunun bir minimumu vardır. Kayıp fonksiyonu θ 'ya göre

kareseldir. Minimum aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\begin{aligned}
 2v(\theta, t) &= Y^T Y - Y^T \Phi \theta - \theta^T \Phi^T Y + \theta^T \Phi^T \Phi \theta + Y^T \Phi (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T Y - Y^T (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T Y \\
 &= Y^T (I - \Phi (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T) Y + (\theta - (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T Y)^T \Phi^T \Phi (\theta - (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T Y)
 \end{aligned}
 \tag{2.30}$$

Sağ taraftaki ilk terim θ 'dan bağımsızdır. İkinci terim da-
ima pozitifdir, bu durumda minimum

$$\theta = \hat{\theta} = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T Y
 \tag{2.31}$$

bağıntısıyla elde edilir ve teorem kanıtlanır.

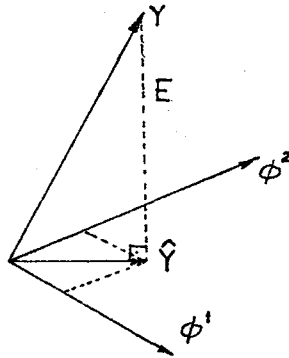
En küçük kareler kestirimi ile ilgili önemli noktalar:

1. (2.27) eşitliği normal eşitlik olarak adlandırılır.
- (2.28) eşitliği aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\theta(t) \left(\sum_{i=1}^t \phi(i) \phi^T(i) \right)^{-1} \left(\sum_{i=1}^t \phi(i) y(i) \right) = P(t) \left(\sum_{i=1}^t \phi(i) y(i) \right)
 \tag{2.32}$$

2. $\Phi^T \Phi$ tersine çevrilebilir ve uyarma koşulu olarak adlandırılır.

Geometrik Yorumu: Bu yöntemin geometrik yorumu kısaca aşağıda anlatılacaktır.



Şekil 2.4. En küçük kareler probleminin geometrik yorumu.

En küçük kareler metodu R^t reel sayılar kümesinde, geometrik olarak yorumlanabilir. Burada, t gözlemleme sayısıdır. (2.25) eşitliği şöyle yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} t(1) \\ \vdots \\ t(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y(1) \\ \vdots \\ y(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \phi_1(1) \\ \vdots \\ \phi_1(t) \end{bmatrix} \cdot \theta_1 - \dots - \begin{bmatrix} \phi_n(1) \\ \vdots \\ \phi_n(t) \end{bmatrix} \cdot \theta_n$$

ya da,

$$E = Y - \phi^1 \theta_1 - \phi^2 \theta_2 - \dots - \phi^n \theta_n \quad (2.33)$$

dir. Burada ϕ^i , Φ matrisinin sütunlarıdır. Böylece en küçük kareler problemi, Y vektörünü $\phi^1, \phi^2, \dots, \phi^n$ vektörlerinin lineer birleşimine mümkün olduğu kadar iyi yaklaştıracak şekilde, $\theta_1, \dots, \theta_n$ parametrelerinin bulunması problemi olarak yorumlanabilir. Y vektörü en iyi yaklaşım olarak $\phi^1, \phi^2, \dots, \phi^n$ uzayında mevcut olsun ve $E = Y - \hat{Y}$ olsun. Şekil 2.4'den görüleceği gibi, E vektörü, bu ϕ^i vektörlerine dik olduğunda en küçüktür [30]. Bunun sonucu

$$(\phi^i)^T (Y - \theta_1 \phi^1 - \theta_2 \phi^2 - \dots - \theta_n \phi^n) = 0 \quad i=1, \dots, n \quad (2.34)$$

eşitliği (2.27) normal eşitliğine özdeştir. θ vektörü, eğer $\phi^1, \phi^2, \dots, \phi^n$ vektörleri lineer bağımsız ise tektir.

2.3.2. Tekrarlamalı En Küçük Kareler Yöntemi

Adaptif kontrolörlerde hesaplama zamanından tasarruf için, hesaplamaların tekrarlamalı olarak yapılması istenir. Böylece, en küçük kareler probleminde (2.28) eşitliğindeki çözüm tekrarlamalı şekilde yeniden yazılabilir. $\Phi^T \Phi$ matrisinin bütün t 'ler için düzenli olduğu varsayılır. $\theta(t-1)$, $(t-1)$ ölçümüne dayandırılan en küçük kareler kestirimini gösterir. Buna göre, $P(t)$ aşağıdaki şekilde tanımlanır;

$$P(t)^{-1} = P(t-1)^{-1} - \phi(t) \phi^T(t) \quad (2.35)$$

$\hat{\theta}(t)$ en küçük kareler kestirimi normal eşitliğiyle (2.32) verilir:

$$\hat{\theta}(t) = P(t) \left(\sum_{i=1}^t \phi(i)y(i) \right) = P(t) \left(\sum_{i=1}^{t-1} \phi(i)y(i) + \phi(t)y(t) \right) \quad (2.36)$$

(2.32) ve (2.35) eşitliklerini kullanarak,

$$\sum_{i=1}^{t-1} \phi(i)y(i) = P(t-1)^{-1} \cdot \hat{\theta}(t-1) = P(t)^{-1} \hat{\theta}(t-1) - \phi(t)\phi^T(t)\hat{\theta}(t-1) \quad (2.37)$$

yazılabilir. Şimdi t anındaki kestirim aşağıdaki gibi yapılacaktır:

$$\begin{aligned} \hat{\theta}(t) &= \hat{\theta}(t-1) - P(t)\phi(t)\phi^T(t)\hat{\theta}(t-1) + P(t)\phi(t)y(t) \\ &= \hat{\theta}(t-1) + P(t)\phi(t) [y(t) - \phi^T(t)\hat{\theta}(t-1)] \\ &= \hat{\theta}(t-1) + K(t) \cdot \zeta(t) \end{aligned} \quad (2.38)$$

burada;

$$K(t) = P(t)\phi(t) \quad (2.39)$$

$$\zeta(t) = y(t) - \phi^T(t)\hat{\theta}(t-1) \quad (2.40)$$

olup, $\zeta(t)$ rezidüsü (artık, kalan) $\hat{\theta}(t-1)$ kestirimine dayandırılan $y(t)$ 'nin öngörü hatası olarak yorumlanabilir. $P(t)$ 'ye matris tersi lemması (Ek-A'da verilmiştir.) uygulanarak ve (2.35) eşitliğini kullanarak aşağıdaki ifade elde edilir;

$$\begin{aligned} P(t) &= [\phi^T(t)\phi(t)]^{-1} = [\phi^T(t-1)\phi(t-1) + \phi(t)\phi^T(t)]^{-1} = (P(t-1)^{-1} + \phi(t)\phi^T(t))^{-1} \\ &= P(t-1) - P(t-1)\phi(t)(I + \phi^T(t)P(t-1)\phi(t))^{-1}\phi^T(t)P(t-1) \end{aligned} \quad (2.41)$$

buradan şu çıkar;

$$K(t) = P(t)\phi(t) = P(t-1)\phi(t) [I + \phi^T(t)P(t-1)\phi(t)]^{-1} \quad (2.42)$$

P yi hesaplamak için matris tersine gerek vardır. Tek giriş-tek çıkışlı sistemler için, tersi alınacak olan bir skalerdir. Yukarıdaki hesaplamalar şu teoremle özetlenebilir [4]:

Teorem: Tekrarlamalı En Küçük Kareler Kestirimi RLS

Her $t > t_0$ için $\phi(t)$ matrisinin tam ranga sahip olduğunu varsayalım. En küçük kareler kestirimi $\hat{\theta}$ tekrarlamalı eşitliklerini sağlar.

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + K(t)(y(t) - \phi^T(t)\hat{\theta}(t-1)) \quad (2.43)$$

$$K(t) = P(t)\phi(t) = P(t-1)\phi(t) [I + \phi^T(t)P(t-1)\phi(t)]^{-1}$$

$$\begin{aligned} P(t) &= P(t-1) - P(t-1)\phi(t) [I + \phi^T(t)P(t-1)\phi(t)]^{-1} \phi^T(t)P(t-1) \\ &= (I - K(t)\phi^T(t))P(t-1) \end{aligned} \quad (2.44)$$

(2.43) eşitliği güçlü bir sezgiye sahiptir. $\hat{\theta}(t)$ kestirimi bir önceki kestirim $\hat{\theta}(t-1)$ 'e düzeltme eklenerek elde edilir. Düzeltme $y(t) - \phi^T(t)\hat{\theta}(t-1)$ ile orantılıdır, burada son terim (2.22) model eşitliği ile t anında öngörülen y değeri olarak yorumlanabilir. Böylece, düzeltme teriminin, parametrelerin ilk kestirimlerine dayanan $y(t)$ öngörüsü ile $y(t)$ 'nin ölçülen değeri arasındaki farkla orantılı olduğu görülür. $K(t)$ vektörünün elemanları düzeltmenin nasıl olacağını gösteren ağırlık faktörleridir.

$$\theta(t-1) = \theta(t) \quad (2.45)$$

$$y(t) = \phi^T(t)\theta(t) + e(t) \quad (2.46)$$

işlemi için en küçük kareler kestirimi Kalman filtresi olarak yorumlanabilir [30]. P matrisinin, $\phi^T(t)\phi(t)$

matrisinin tekil olmadığı zaman belirlenebileceğine dikkat edilmelidir.

$$\Phi^T(t)\Phi(t) = \sum_{i=1}^t \phi(i)\phi^T(i) \quad (2.47)$$

olduğu için, t yeterli derecede küçük olursa, $\Phi^T(t)\Phi(t)$ daima tekil olacaktır. P için başlangıç koşulunu elde etmek amacıyla,

$$P(t_0) = [\Phi^T(t_0)\Phi(t_0)]^{-1} \quad (2.48)$$

$$\hat{\theta}(t_0) = P(t_0)\Phi^T(t_0)Y(t_0) \quad (2.49a)$$

ifadelerini belirlemek ve $\Phi^T(t_0)\Phi(t_0)$ tekil olmayacak şekilde $t=t_0$ 'ı seçmek gerekir. Sonra, tekrarlamalı eşitliklerde $t>t_0$ olarak alınacaktır. Bununla beraber, tekrarlamalı eşitlikleri bütün adımlarda kullanmak uygundur. Eğer, tekrarlamalı eşitlikler

$$P(0) = P_0$$

başlangıç koşulu ile başlatılırsa,

$$P(t) = [P_0^{-1} - \Phi^T(t)\Phi(t)]^{-1} \quad (2.49b)$$

dir, burada P_0 kesin pozitifdir. $P(t)$, P_0 yeterli derecede büyük alınarak $[\Phi^T(t)\Phi(t)]^{-1}$ ne yakın tutulabilecektir [4].

En küçük kareler yönteminde θ_i parametrelerinin sabit olduğu varsayılır. Bazı adaptif problemlerde parametreler zamanla değişirler. Bunun için, en küçük kareler yöntemi basit bir genişletmeyle iki durumu kapsar. Bunlardan birinde parametrelerin aniden fakat nadiren değiştikleri, diğerinde ise parametrelerin yavaşça değiştikleri varsayılır. Parametrelerin aniden değiştikleri durumda, en küçük kareler algoritmasındaki P matrisi periyodik olarak αI değerine geri döndürülmelidir. Burada, α büyük bir sayıdır.

Parametrelerin yavaşça değiştiği durumda ise, nispeten basit bir matematiksel model izlenir. Bir yaklaşım da (2.26) formunu aşağıdaki şekilde basitleştirmektir;

$$v(\theta, t) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^t \lambda^{t-i} (y(i) - \phi^T(i)\theta)^2 \quad (2.50)$$

burada $0 < \lambda < 1$ parametresi unutmaya çarpanı veya azaltma çarpanı olarak adlandırılır. (2.50) eşitliği ile ifade edilen kayıp fonksiyonu, verinin zamanla değişen ağırlığını işe katar. En son veri birim ağırlıkla verilir, fakat veri λ^n ile ağırlıklandırılmış n eski zaman verisidir. Yöntem, bu yüzden üstel unutmaya olarak adlandırılır. Tekrarlamalı en küçük kareler teoremi (2.50) eşitliği ile verilen kayıp fonksiyonu için tekrar yazılırsa, aşağıdaki sonuç elde edilir.

Teorem: Üstel unutmaya faktörlü tekrarlamalı en küçük kareler algoritması

$t \geq t_0$ için $\phi(t)$ matrisinin tam ranklı olduğunu varsayalım. (2.50) eşitliğini minimize eden θ parametresi tekrarlamalı olarak aşağıdaki şekilde verilir:

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + K(t) (y(t) - \phi^T(t) \cdot \hat{\theta}(t-1))$$

$$K(t) = P(t) \phi(t) (P(t-1) \phi(t) (\lambda I + \phi^T(t) P(t-1) \phi(t))^{-1} \quad (2.51)$$

$$P(t) = (I - K(t) \phi^T(t)) P(t-1) / \lambda$$

Bu yöntemin sakıncası verinin, yeni veride bilgi olmasa bile (yani, $P\phi=0$) azaltılmasıdır. Bu durumda, (2.51) eşitliğinde P matrisi λ hızıyla üstel olarak artar. Unutmaya faktörü λ 'nın 0,998 olarak seçilmesinin yeterli olduğu görülmüştür [21].

2.3.3. Projeksiyon Algoritması

RLS algoritması her adımda değiştirilmesi gereken $\hat{\theta}$ ve P olmak üzere iki değişkene sahiptir. $\hat{\theta}$ ve P'nin her adımda düzeltilmesi oldukça yüksek hesaplama maliyeti getirir. Bu nedenle daha basitleştirilmiş birkaç algoritma vardır. Bunlardan biri de Koczarz'ın Projeksiyon Algoritmasıdır [18]. Bu algoritmayı tanımlamak için, R^n 'nin elemanı olarak bilinmeyen parametreler göz önüne alınır. Bir ölçüm

$$y(t) = \phi^T(t)\theta \quad (2.22)$$

parametre vektörü θ 'nin $\phi(t)$ vektörü üzerindeki yansımasını belirler. $y(t)$ ölçümü parametre uzayında sadece $\phi(t)$ yönünde bilgi içerdiği için, kestirimi aşağıdaki şekilde geliştirmek doğaldır [18]:

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + \alpha \phi(t) \quad (2.52)$$

burada α parametresi

$$y(t) = \phi^T(t)\hat{\theta}(t) = \phi^T(t)\hat{\theta}(t-1) + \alpha \phi^T(t)\phi(t) \quad (2.53)$$

olacak şekilde seçilir. Bu, aşağıdaki sonucu verir:

$$\alpha = \frac{1}{\phi^T(t)\phi(t)} [y(t) - \phi^T(t)\hat{\theta}(t-1)] \quad (2.54)$$

Böylece düzeltilen formül aşağıdaki şekli alır.

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + \frac{\phi(t)}{\phi^T(t)\phi(t)} [y(t) - \phi^T(t)\hat{\theta}(t-1)] \quad (2.55)$$

Başlangıç kestirimi $\hat{\theta}(0)$, bellidir.

$$M(t) \triangleq \frac{1}{\phi(t)^T \phi(t)} \quad (2.56)$$

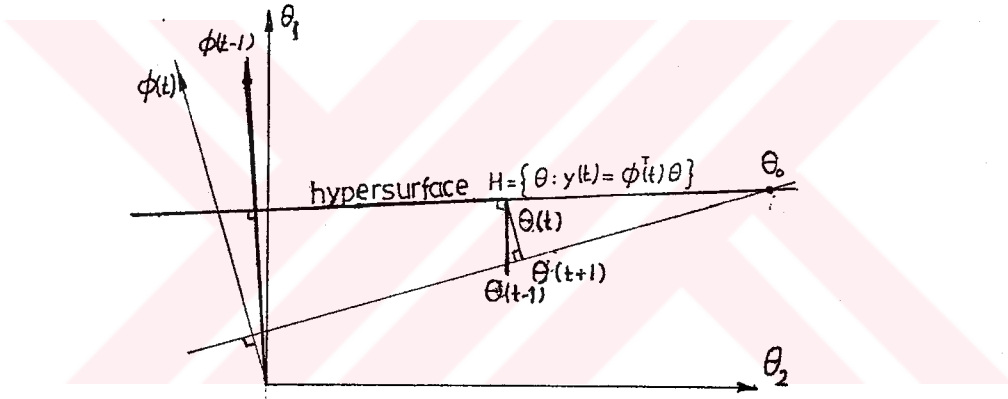
algoritma kazancını gösterir.

$$e(t) = y(t) - \phi(t)^T \hat{\theta}(t) \quad (2.57)$$

model öngörü hatasını gösterir [4].

Algoritma geometrik olarak aşağıdaki gibi yorumlanacaktır. Belli $y(t)$ ve $\phi(t)$ 'ye göre, bütün olası θ_0 parametreleri (2.22) eşitliği ile verilen modeli sağlayan üst yüzey (hypersurface) $H = \{\theta : y(t) = \phi^T(t)\theta\}$ üzerindedir (Şekil 2.5). θ_0 için bütün aday değerler arasında $\hat{\theta}(t-1)$ 'e en yakın $\hat{\theta}(t)$ 'yi gösteren değer seçilir. Böylece, aşağıda verilmiş J davranış kriteriminimize edilir [4]:

$$J = \frac{1}{2} \|\hat{\theta}(t) - \hat{\theta}(t-1)\|^2 \quad (2.58)$$



Şekil 2.5. Projeksiyon algoritmasının geometrik yorumu

Teorem: Projeksiyon algoritması aşağıdaki optimizasyon probleminden çıkar.

$y(t)$ ve $\hat{\theta}(t-1)$ belli iken,

$$y(t) = \phi(t)^T \hat{\theta}(t) \quad (2.22)$$

şartıyla,

$$J = \frac{1}{2} \|\hat{\theta}(t) - \hat{\theta}(t-1)\|^2 \quad (2.58)$$

minimize edilecek şekilde $\hat{\theta}(t)$ belirlenir.

İspat: (2.22) eşitliği ile verilen şart için Lagrange çarpanları hesaba katılarak;

$$J_c = \frac{1}{2} ||\hat{\theta}(t) - \hat{\theta}(t-1)||^2 + \lambda [y(t) - \phi(t)^T \hat{\theta}(t)] \quad (2.59)$$

bulunur. Minimum için gerekli koşullar şunlardır;

$$\frac{\partial J_c}{\partial \hat{\theta}(t)} = 0 \quad (2.60)$$

$$\frac{\partial J_c}{\partial \lambda} = 0 \quad (2.61)$$

$$\hat{\theta}(t) - \hat{\theta}(t-1) - \lambda \phi(t) = 0 \quad (2.62)$$

$$y(t) - \phi(t)^T \hat{\theta}(t) = 0 \quad (2.63)$$

(2.62) eşitliği, (2.63)'te yerine konularak;

$$y(t) - \phi(t)^T [\hat{\theta}(t-1) + \lambda \phi(t)] = 0 \quad (2.64)$$

veya

$$\lambda = \frac{y(t) - \phi(t)^T \hat{\theta}(t-1)}{\phi(t)^T \phi(t)} \quad (2.65)$$

yazılır. Bu, (2.62) eşitliğine yerleştirilecek Projeksiyon algoritması sonucuna varılır;

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + \frac{\phi(t)}{\phi(t)^T \phi(t)} [y(t) - \phi(t)^T \hat{\theta}(t-1)] \quad (2.66)$$

Basit bir algoritma olan projeksiyon algoritmasında sıfıra bölme olasılığı vardır. Bu, (2.66) denkleminin paydasına c gibi küçük bir sabit ilave edilerek kolaylıkla çözülür. Ayrıca, bir üstünlük yaratır ve model, şimdi;

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t) + k \quad (2.67)$$

şeklindeki sistemlere uygulanabilir. Böylece giriş ve çıkış arasındaki keyfi kaymalar (offset) birbirine uydurulur [4], [18]. Bu algoritma Projeksiyon I algoritması olarak bilinir [32].

Sıfıra bölmeyi önleyici c sabitiyle algoritma aşağıdaki şekli alır:

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + \frac{\phi(t)}{c + \phi(t)^T \phi(t)} [y(t) - \phi(t)^T \hat{\theta}(t-1)] \quad (2.68)$$

Bu algoritma normalize en küçük kareler algoritması olarak da bilinir. Ayrıca dikleştirilmiş (ortogonalized) projeksiyon algoritması da vardır. Bu, işlemsel maliyeti daha fazla olan bir algoritmadır (RLS algoritmasına çok benzer).

Bazı araştırmacıların da değindiği gibi, RLS yöntemi, beyaz gürültünün ilave edilmediği durumlarda kutuplanmış kestirimler verebilir [34]. Ayrıca, Projeksiyon algoritmasında hesapsal maliyetin daha düşük olduğu görülmektedir. Bu nedenle bu çalışmada kestirim yöntemi olarak Projeksiyon algoritması kullanılmıştır.

2.3.3.1. Tek Giriş Tek Çıkışlı (SISO) Sistemler için

Projeksiyon Algoritması ve Kontrol Kuralı

$A(q^{-1})$ ve $B(q^{-1})$ polinomlarıyla ve aşağıdaki transfer modeliyle verilen tek giriş tek çıkışlı sistemlerde bazı varsayımlar yapılır:

$$A(q^{-1})y(t) = q^{-1}B(q^{-1})u(t) \quad (2.11)$$

$$A(q^{-1}) = a_0 + a_1 q^{-1} + \dots + a_N q^{-N} \quad (2.13)$$

$$B(q^{-1}) = b_0 + b_1 q^{-1} + \dots + b_M q^{-M} \quad (2.14)$$

a- D'nin bilindiği varsayılır (güç sistemleri için $D=1$ alınır.)

- b- N ve M nin üst sınırlarının bilindiği varsayılır (çoğunlukla deneme yanılmayla)
- c- $B(q^{-1})$ in tüm sıfırları birim daire dışındadır (Bu sınırlı giriş dizisi ile elde edilecek kontrolü sağlamak için gereklidir) [32].

D=1 ise 2.5 eşitliği yerleştirme yapılarak aşağıdaki hale gelir;

$$y(t+D) = \alpha(q^{-1})y(t) + \beta(q^{-1})u(t) \quad (2.69)$$

$$\alpha(q^{-1}) = \alpha_0 + \alpha_1 q^{-1} + \dots + \alpha_{N-1} q^{-N-1} \quad D=1 \quad (2.70)$$

alınabilir.

$$\beta(q^{-1}) = \beta_0 + \beta_1 q^{-1} + \dots + \beta_{M+D-1} q^{-M-D+1}; \quad \beta_0 \neq 0 \quad (2.71)$$

D=1 alındığı için, çalışmada (2.12) ifadesi, ARMA modeli olarak kullanılabilecektir. Kontrolün amacı,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [y(t) - y_{ref}(t)] = 0 \quad (2.72)$$

elde etmektir, burada $y_{ref}(t)$ bundan sonra $\{y^*(t)\}$ ile gösterilecektir. $\{y^*(t)\}$ nin önceden bilindiği varsayılır, ve sınırlıdır:

$$[y^*(t)] < m_1 < \infty \quad \text{bütün } t\text{'ler için}$$

Önceki ayırtta bahsedilen Projeksiyon I algoritmasından farklı olarak kontrol kuralının doğrudan kestirildiği bir algoritma vardır ki buna literatürde Projeksiyon II algoritması denmektedir [32].

Projeksiyon II algoritması, $u(t)$ 'nin katsayısı b_0 değerinin bilindiği varsayılan ve kendi kendini ayarlayan regülatörlerde kullanılan bir yöntemdir. Algoritmanın üstünlüğü, diğer yöntemde girişin hesaplanmasında sıfıra bölmeyi önlemek için gerek duyulan önlemlere fazla ihtiyaç duyulmamasıdır. Özellikle, b_0 parametresinin işaretine ve

genliğinin üst sınırına ihtiyaç duyulur [32]. (2.12) ifadesi b_o parantezine alınarak aşağıdaki şekilde yazılabilir [17], [32], [35]:

$$y(t+1) = b_o (a'_0 y(t) + \dots + a'_{N-1} y(t-N) + u(t) + b'_1 u(t-1) + \dots + b'_M u(t-M)) \quad (2.73)$$

$$a'_i = b_o^{-1} a_i \quad i=0,1,\dots,N \quad (2.74)$$

$$b'_j = b_o^{-1} b_j \quad j=1,2,\dots,M$$

$$\begin{aligned} E(t+1) &= y(t+1) - y^*(t+1) = b_o [u(t) + a'_0 y(t) + \dots + a'_N y(t-N) + b'_1 u(t-1) + \\ &\quad \dots + b'_M u(t-M) - \frac{1}{b_o} y^*(t+1)] \\ &= b_o (u(t) - \theta'_0 \phi(t)) \end{aligned}$$

Burada $\phi(t)$ geri besleme vektörü, $\hat{\theta}(t)$ adaptif geri besleme vektörüdür ve

$$\phi(t) = [y(t), y(t-1), \dots, y(t-N), u(t-1), \dots, u(t-M), y^*(t+1)]^T \quad (2.75)$$

$$\theta'_0 = [-a'_0, -a'_1, \dots, -a'_N, -b'_1, -b'_2, \dots, -b'_M, b_o^{-1}] \quad (2.76)$$

şeklinde verilir. İzleyici hatasının sıfıra özdeş olabilmesi için $u(t)$ 'nin

$$u(t) = \hat{\theta}(t) \cdot \phi(t) \quad (2.77)$$

olarak seçilmesi gerektiği açıktır. Bununla beraber, başlangıçta θ'_0 bilinmediği için kontrol kuralı tekrarlamalı olarak keştilir. θ'_0 yü kestirmek için aşağıdaki yol izlenir [17], [32], [35]:

$$\hat{\theta}(t+1) = \hat{\theta}(t) - \frac{1}{b_0} E(t+1) [1 + \phi^T(t)\phi(t)]^{-1} \phi^T(t) \quad (2.78)$$

$$u(t) = \hat{\theta}(t)\phi(t) \quad (2.79)$$

Burada adaptif geri besleme vektörü olan $\hat{\theta}(t)$ çok giriş-çok çıkışlı durumda bir matris olup, boyutları $m \times [m(N+1+M+1)]$ dir, $\phi(t)$ ise $m(N+1+M+1) \times 1$ boyutludur. Genellikle, giriş sayısı çıkış sayısına eşit alınır (m : giriş sayısı = çıkış sayısı). N ve M deneme yanılma ile bulunan ARMA modeli dereceleridir ve turbogeneratör için $N=2$, $M=0$ seçilir. $\hat{\theta}(0)=0$ olarak seçilir. b_0 $m \times m$ boyutlu sabit bir matris olup,

$$(\hat{b}_0 b_0)^T + (\hat{b}_0 b_0) - (\hat{b}_0 b_0)^T (\hat{b}_0 b_0)$$

Yukarıdaki ifade kesin pozitif olacak şekilde belirlenmesi gerekir.

Teorem: D 'nin bilindiği (çoğu sistemlerde $D=1$ alınıyor) ve $B(q^{-1})$ 'in tüm sıfırlarının birim dairenin dışında olduğu (sınırlı giriş dizisiyle elde edilecek kontrolün sağlandığı) durum için ve $0 < b_0/b_0 < 2$ değeri için, (2.78) ve (2.79) eşitlikleri sisteme uygulanırsa, $\{y(t)\}$ ve $\{u(t)\}$ sınırlı dizilerdir ve

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [y(t) - y^x(t)] = 0 \quad (2.80)$$

dır [32].

Sonuçta, dinamik sistemde zamanla değişen geri besleme kazanç matrisi $\hat{\theta}(t)$, öngörü hatası, geri besleme vektörü ve sabit kazanç matrisi yardımıyla düzeltilir. Adaptif kontrol stratejisi, optimal öngörücü (optimal predictor) ile sistemin gerçek çıkışları arasındaki sapmaları minimize etmektir. (2.79) eşitliği ile verilen kontrol kuralı çok basit olup, az sayıda vektör ve küçük boyutlu matris işlemleri içerdiği için Projeksiyon II algoritması ile birlikte güç sistemleri için de önerilir. Bu çalışmada

kestirimde Projeksiyon II algoritması kullanılmış ve kontrol kuralı olarak (2.79) eşitliği gerçekleştirilmiştir.

Algoritmanın sistemlere uygulanmasında önemli diğer bir nokta da optimal öngörücü tasarımıdır.

2.4. En Uygun Öngörücü Tasarımı

En uygun öngörücü, kontrol edilmesi istenen sistemin bozulmuş çıkış değişkenlerini istenen çalışma noktasına (set-point) adım adım götürecektir şekilde tasarlanır [17]. Başka bir deyişle, t_i anından t_{i+1} anına çıkışların istenen izi, çıkışların şimdiki ve geçmiş zamandaki değerlerine dayandırılır. Genel öngörücü modeli aşağıdaki şekilde verilmiştir [17]:

$$y^*(t+1) = \sum_{i=0}^N A_i^* y(t-i) + \sum_{j=0}^M B_j^* u(t-j) \quad (2.81)$$

Ayrıca, deneme yanılma yöntemiyle bu öngörücü için ve turbogeneratör modeli için projeksiyon algoritmasında $N=2$ $M=0$ derece değerlerinin yeterli olduğu belirtilmiştir. Bu durumda, $B_j^*=0$ olduğu varsayılarak optimal öngörücünün öngörü eşitliği aşağıdaki şekilde elde edilir:

$$y^*(t+1) = a_0^* y(t) + a_1^* y(t-1) + \dots + a_N^* y(t-N) \quad (2.82)$$

burada, a_i^* ($i=0,1,\dots,N$) daima bozulmuş çıkış değişkenlerini istenen sürekli çalışma noktasına doğru götürecektir şekilde seçilir. Başka bir deyişle, optimal öngörücü daima asimptotik kararlıdır. (2.82) eşitliğinde, optimal öngörücünün her bir çıkış değişkeninin, dinamik sistemin bağımsız olarak öngörülen çıkış değişkenlerinin lineer birleşimi olduğu varsayılır. (2.82) eşitliği aynı zamanda aşağıdaki yolla da yazılabilir:

$$y_i^*(t+1) = \alpha_i \hat{y}_{1i}(t+1) + \beta_i \hat{y}_{2i}(t+1) + \dots + \gamma_i \hat{y}_{mi}(t+1) \quad (2.83)$$

burada

$$\hat{y}_i(t+1) = \sigma_{i0}y_i(t) + \sigma_{i1}y_i(t-1) + \dots + \sigma_{iN}y_i(t-N) \quad (2.84)$$

$$i=1,2,\dots,m$$

m: çıkış sayısıdır.

* işareti, optimal öngörücünün çıkış değişkenini ve $\hat{\cdot}$ işareti dinamik sistemin bağımsız olarak öngörülen çıkış değişkenini gösterir. Aşağıdaki eşitliğin polinomun özfonksiyonu olduğu kolaylıkla görülecektir:

$$z^{-\sigma_{i0}} - \sigma_{i1}z^{-1} - \sigma_{i2}z^{-2} - \dots - \sigma_{iN}z^{-N} = 0 \quad (2.85)$$

veya;

$$z^{N+1} - \sigma_{i0}z^N - \sigma_{i1}z^{N-1} - \dots - \sigma_{iN} = (z-s_{i0})(z-s_{i1})\dots(z-s_{iN})=0$$

Eğer, $s_{i0}, s_{i1}, \dots, s_{iN}$ ($i=1,2,\dots,N$) birim daire içinde seçilirlerse (2.83) eşitliği bütünsel olarak asimptotik kararlıdır.

Burada ayrıntılı olarak anlatılmış olan Projeksiyon II, basit olarak verilen kontrol kuralı ve optimal öngörücü tasarımına dayandırılan adaptif kontrol algoritmasının sayısal simülasyonu, dördüncü bölümde verilecek olan güç sisteminin kontrolunda nasıl kullanıldığı yine aynı bölüm içerisinde anlatılacaktır.

En uygun öngörücü tasarımına dayandırılan, basit kontrol kuralı ile çalışan ve kestirim algoritması olarak projeksiyon algoritmasını kullanan bu algoritmaya literatürde Parametre Adaptif Kontrol Yöntemi denir.

BÖLÜM 3.

ÇOK MAKİNALI GÜÇ SİSTEMLERİNİN MATEMATİKSEL MODELİ

Sayısal simülasyon geçici hal kararlılık sorunu analizinde kullanılan yaygın yöntemlerden biridir. Yöntemin uygulanmasında kullanılacak sistem matematiksel modelinin sistemin fiziksel davranışına oldukça uyumlu olması istenir.

Çok makinalı güç sisteminin (Ç.M.G.S.) kapsamlı olarak modellenmesi, sistemde bulunan generatörlerin, uyarma sistemi ve mekanik regülatörlerin, şebeke denklemlerinin ve eksen dönüşümünün, şebekedeki değişimlerin ve hata durumlarının ayrıntılı olarak ifade edilmesini gerektirir. Bunun yanında oluşturulacak sistem modelinde, kontrol açısından aşağıdaki özelliklerin de göz önünde tutulması gerekir:

- i. Turbogeneratörler hem sürekli ve hem de geçici durum davranışı açısından doğrusal olmayan sistemlerdir. Aynı zamanda, mevcut en büyük kazan gücü ve uyarma üst gerilim sınırları gibikesin sınırlamalar şeklinde ek doğrusal olmayan koşullar da vardır. Önerilen kontrol sistemi bu koşullar altında çalışabilmelidir.
- ii. Sistemin bozuculara hızlı olarak cevap vermesi kontrol hareketinin sık olmasını gerektirir. Bu yüzden, kontrol değişkenlerinin yeterince düzeltilmeleri için, gerekli olan kontrol işlemi sayısız sınırlandırılmalıdır.
- iii. Yük talebine göre, generatörün geniş bir güç (çalışma koşulları) bölgesinde çalışabilmesi gerekir. Bu bölgedeki çalışma noktalarının bazıları kararsız açık çevrimler olabilir. Bu nedenle, bir çalışma noktasından diğerine geçerken kontrol

hareketinin sürdürülmesi gerekir.

- iv. Sistem yapısında veya yük durumunda sürekli değişimler söz konusudur. Bunlar, normal hat açma-kapamaları, yükte transformatör kademesi değişimi veya bir hatayı takiben iletim hattının devre dışı kalması gibi olaylardır. Kontrol sistemi, bu durumlarda sistem davranışını olumsuz yönde etkilemeksizin çalışabilmelidir.
- v. İletim şebekesinde kısa devreler gibi büyük geçici olaylar olabilir. Bu durumda, kontrolör senkronizma kaybını önleyecek ve generatörü hata temizlendikten sonra mümkün olduğu kadar çabuk normal çalışma koşullarına döndürecek şekilde hareket etmelidir.

Tezin bu bölümünde daha önceki ayrıtlarda ve yukarıda vurgulanan görüşlerin ışığında sistem modeli oluşturulacaktır. Daha sonra şebekede oluşabilecek hatalar ve bunları izleyen değişimler matematiksel olarak ifade edileceklerdir.

3.1. Senkron Makinanın Matematiksel Modeli

İlk olarak, güç şebekesinde üretim baralarındaki senkron makinelerin oluşturduğu sistemin matematiksel modeli:

$$\dot{x} = f(x, u, t) \quad (3.1)$$

biçiminde oluşturulacaktır. İncelemede göz önüne alınan model bir turbogeneratör modelidir. Şekil 3.1. bu makinanın toplu parametrelili gösterimini verir. Burada a, b, c stator faz sargılarını, fd d eksenindeki uyarma sargısını, kd ve kq sırasıyla d ve q eksenlerinde bulunan, kısa devre edilmiş amortisör sargılarını gösterirler [35].

Tezde kullanılan işaret sistemi [1];

1. Rotorun saat ibrelerinin dönüş yönüne ters yönde döndüğü,

$$[R] = \begin{bmatrix} R_{sa} & 0 & . & . & . & 0 \\ 0 & R_{sb} & 0 & . & . & 0 \\ . & 0 & R_{sc} & 0 & . & . \\ . & . & 0 & R_{fd} & 0 & . \\ . & . & . & 0 & R_{kd} & 0 \\ 0 & 0 & . & . & 0 & R_{kq} \end{bmatrix}$$

(3.3)

$$[\psi] = \begin{bmatrix} L_{sa} & M_{ab} & M_{ac} & M_{afd} & M_{akd} & M_{akq} \\ M_{ba} & L_{sb} & M_{bc} & M_{bfd} & M_{bkd} & M_{bkq} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_{sc} & M_{cfd} & M_{ckd} & M_{ckq} \\ M_{fda} & M_{fdb} & M_{fdc} & L_{fd} & M_{fdkd} & 0 \\ M_{kda} & M_{kdb} & M_{kdc} & M_{kdfd} & L_{kd} & 0 \\ M_{kqa} & M_{kqb} & M_{kqc} & 0 & 0 & L_{kq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -I_{sa} \\ -I_{sb} \\ -I_{sc} \\ I_{fd} \\ I_{kd} \\ I_{kq} \end{bmatrix}$$

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

olarak yazılabilir. Burada V stator ve rotor devresi gerilimlerini, I stator ve rotor devresi akımlarını, R stator faz ve rotor devresi dirençlerini, ψ akıları, L öz endüktansları ve M ortak endüktansları gösterir. (3.2) eşitlikleri katsayıları zamanla değişen diferansiyel denklemler olup, simetrik Park dönüşümlerinin uygulanmasıyla sabit katsayılı diferansiyel denklemler haline dönüştürülür. Bu amaçla, statorda bulunan a, b, c faz sargıları rotorla birlikte dönen biri d eksenini, diğeri q eksenini üzerinde olan

eşdeğer iki sargıya dönüştürülmüş olur. Park eşitlikleri kullanıldığında yapılan varsayımlar kısaca aşağıdaki şekilde sıralanabilir [37]:

- i. Stator sargıları hava aralığı civarında sinüsoidal dağılmaktadır.
- ii. Histerisiz ve Eddy akımı kayıpları ihmal edilmiştir.
- iii. Doymanın etkisi ihmal edilmiştir.
- iv. Stator direkt eksen, uyarma ve sönüm sargıları arasındaki birim ortak reaktansların hepsinin eşit olduğu kabul edilmiştir.
- v. Rotor demirinin biri d, diğeri q eksenine iki ilâve rotor devresiyle ifade edilebileceği kabul edilmiştir.
- vi. Makinaların üç fazlı dengeli yük koşulları altında çalıştığı varsayılmıştır.
- vii. Reaktansların frekans ile değişimlerinin ihmal edildiği kabul edilmiştir.

Simetrik Park dönüşümü uygulanmış makina denklemleri aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

$$V_d = -RI_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega\psi_q$$

$$V_q = -RI_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega\psi_d$$

$$V_{fd} = R_{fd}I_{fd} + \frac{d\psi_{fd}}{dt} \quad (3.4)$$

$$0 = R_{kd} I_{kd} + \frac{d\psi_{kd}}{dt}$$

$$0 = R_{kq} I_{kq} + \frac{d\psi_{kq}}{dt}$$

$$T_M = \frac{J}{P_k} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} + \frac{K_d}{P_k} \cdot \frac{d\delta}{dt} + T_e$$

$$T_e = P_k(\psi_d I_q - \psi_q I_d)$$

burada;

P_k =Çift kutup sayısını ($P_k=1$ alınmıştır.)

T_M =Mekanik momenti

K_d =Söndürme momenti katsayısını

J =Atalet momenti katsayısını

T_e =Elektromagnetik momentini

δ =Makinanın yük açısını gösterir.

Akı ifadeleri de şöyle verilebilir.

$$\psi_d = -L_d I_d + M_{dfd} I_{fd} + M_{dkd} I_{kd}$$

$$\psi_q = -L_q I_q + M_{qkq} I_{kq}$$

$$\psi_{fd} = L_{fd} I_{fd} - M_{fdd} I_d + M_{fdk} I_{kd} \quad (3.5)$$

$$\psi_{kd} = L_{kd} I_{kd} - M_{kdd} I_d + M_{kdfd} I_{fd}$$

$$\psi_{kq} = L_{kq} I_{kq} - M_{kqq} I_q$$

Simetrik Park dönüşümünden bilindiği gibi, rotorun konumunu belirleyen δ açısı, stator a fazı magnetik eksenini ile rotor d eksenini arasındaki θ açısı cinsinden şöyle yazılabilir:

$$\theta = \omega_o t + \delta - \pi/2 \quad (3.6)$$

burada ω_o senkron açısal hızı gösterir. Bu ifadenin türevi alınır ve türev yerine $p=d/dt$ ifadesi de kullanılırsa [1];

$$p\theta = \omega_o + p\delta \quad (3.7)$$

bulunur, burada $p\theta$ yerine ω açısal hızı yazılırsa,

$$p\delta = \omega - \omega_o \quad (3.8)$$

ifadesi elde edilir.

Senkron makinanın birime indirgenmiş değerlerini elde etmek çalışmalarda kolaylık getireceği için tercih edilir. Bunun için aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır [1]:

- i. Stator gerilim ve akımının temel değerleri olarak bunlara ilişkin tepedeğerler alınır.
- ii. Rotor gerilimi temel değerini belirlemek için, stator ve rotor için aynı temel güç kullanılır.
- iii. Boyuna eksen üzerinde bulunan rotor sargılarına ilişkin temel değerlerin seçiminde, bunlardan herbirinin aynı eksen üzerinde bulunan stator sargısının oluşturduğu hava aralığı akısına eşit bir akı oluşturduğu varsayılır. Bu varsayıma göre, birime indirgenmiş sistemde

$$M_{dfd} = M_{dkd} = L_{ad} \quad (3.9)$$

yazılabilir, burada L_{ad} boyuna eksen mıknatıslanma özendüklemdir.

- iv. Enine eksen üzerinde bulunan rotor sargıları için de benzer düşünceyle

$$M_{qkq} = L_{aq} \quad (3.10)$$

yazılır, burada L_{aq} enine eksen mıknatıslanma özendüklemdir. Buna göre, stator ve rotora ait kaçak özendüklemleri için, birime indirgenmiş sistemde,

$$L_{fd\sigma} = L_{fd} - L_{ad}$$

$$L_{d\sigma} = L_d - L_{ad} \quad (3.11)$$

$$L_{q\sigma} = L_q - L_{aq}$$

$$L_{kd\sigma} = L_{kd} - L_{ad}$$

$$L_{kq\sigma} = L_{kq} - L_{aq}$$

yazılır.

v. Birime indirgenmiş sistemde zaman (saniye), açısal yerdeğiştirme radyan (rad.) ve açısal hız (rad/s.) olarak alınmıştır.

(d,q) dönen eksen takımı için yazılmış olan makina denklemleri yukardaki varsayımlar altında, birime indirgenmiş büyüklükler cinsinden, durum denklemleri biçiminde şöyle ifade edilir:

$$p\delta = \omega - \omega_o = \Delta\omega \quad (3.12)$$

$$p\Delta\omega = \omega_o (T_M - T_e - K_d \Delta\omega) / 2H \quad (3.13)$$

$$p\psi_{fd} = \omega_o (V_{fd} - R_{fd} I_{fd}) \quad (3.14)$$

$$p\psi_d = \omega_o (V_d + \psi_q + I_d R) + \psi_q \Delta\omega \quad (3.15)$$

$$p\psi_{kd} = -\omega_o R_{kd} I_{kd} \quad (3.16)$$

$$p\psi_q = \omega_o (V_q - \psi_d + I_q R) - \psi_d \Delta\omega \quad (3.17)$$

$$p\psi_{kq} = -\omega_o R_{kq} I_{kq} \quad (3.18)$$

$$T_e = \psi_d I_q - \psi_q I_d \quad (3.19)$$

$$\psi_{fd} = x_{fd} I_{fd} - x_{ad} I_d + x_{ad} I_{kd} \quad (3.20)$$

$$\psi_d = x_{ad} I_{fd} - x_d I_d + x_{ad} I_{kd} \quad (3.21)$$

$$\psi_{kd} = x_{ad} I_{fd} - x_{ad} I_d + x_{kd} I_{kd} \quad (3.22)$$

$$\psi_q = -x_q I_q + x_{aq} I_{kq} \quad (3.23)$$

$$\psi_{kq} = -x_{aq} I_q + x_{kq} I_{kq} \quad (3.24)$$

burada, H saniye olarak ölçülen enerji zaman sabitidir. Bu eşitliklerde,

$$\psi_{ad} \triangleq x_{ad} (-I_d + I_{fd} + I_{kd}) \quad (3.25)$$

$$\psi_{aq} \triangleq x_{aq} (-I_q + I_{kq}) \quad (3.26)$$

olarak tanımlanır. Böylece, senkron makinanın birime indirgenmiş durum denklemleri elde edilmiş olur. Tezde, bundan sonra bu denklemler birime indirgenmiş şekilde kullanılacaklardır. Bu çalışmada, generatörlere ait yükseltici transformatörlerin de hesaba katılması nedeniyle, stator d ve q eksenli devrelerine ilişkin denklemlerde transformatör direnç ve reaktansların da içerilmesi gerekmektedir. Buna göre (3.15) ve (3.17) eşitlikleri (3.21) ve (3.23) eşitlik gruplarında aşağıdaki değişiklikler yapılır;

$$p\psi_d = \omega_o (V_d + \psi_q + (R + R_{tr}) I_d + \psi_q \Delta\omega) \quad (3.27)$$

$$p\psi_q = \omega_o (V_q - \psi_d + (R + R_{tr}) I_q) - \psi_d \Delta\omega \quad (3.28)$$

$$\psi_d = x_{ad} I_{fd} - (x_d + x_{tr}) I_d + x_{ad} I_{kd} \quad (3.29)$$

$$\psi_q = -(x_q + x_{tr}) I_q + x_{aq} I_{kq} \quad (3.30)$$

3.2. Uyarma Sisteminin Modeli

Bu çalışmada, uyarma devresini ifade etmek için son yıllarda geliştirilmiş olan hızlı cevaplı statik uyarma sistemleri kullanılmıştır. Zaman sabiti (T_{ex}) büyük olan ve birinci dereceden transfer fonksiyonu ile ifade edilecek uyarma sisteminin durum denklemi aşağıda verilmiştir [17]:

$$pV_R = (V_R - V_{fd}) / T_{ex} \quad (3.31)$$

Ayrıca uyarmaya sınırlama getirilmiştir:

$$V_{fdmin} \leq V_{fd} \leq V_{fdmax} \quad (3.32)$$

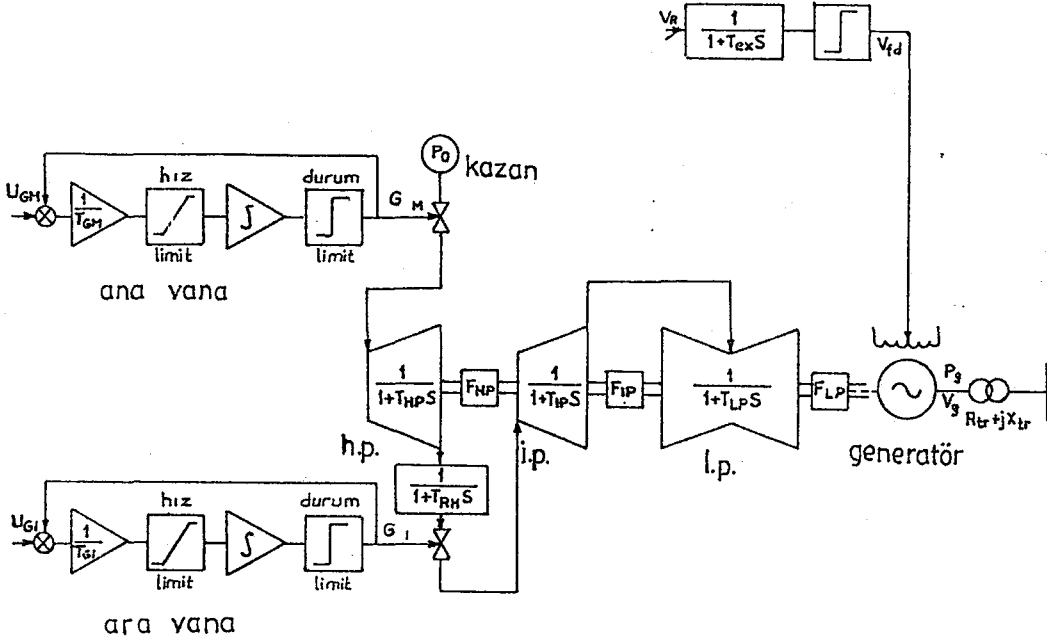
3.3. Türbin ve Devir Sayısı Regülatörü Modeli

Turbogeneratör kontrol sistemine devir sayısı regülatörü ve vana hareketinin dahil edilmesi, daha ayrıntılı türbin ve regülatör modeline ihtiyaç gösterir. Modelin hem sistemin önemli özelliklerini yansıtması, hem de mümkün olan en basit ifadeye sahip olması istenir. Bilgisayar simülasyonlarında çok ayrıntılı türbin ifadeleri kullanabilmek mümkün iken, bu ayrıntılı modelin oluşturulmasıyla elde edilecek kazanç fazla değildir. Bu nedenle tek tek türbin safhalarını ifade etmek için, lineer elemanları birleştiren modeller kontrol vanası hareketlerinde uygun sınırlamaların ilâvesiyle ayarlanabilir. Bu yaklaşım aşağıdaki varsayımlara yol açacaktır [37];

- i. Vana durumları ile buhar kütlesi arasında lineer bir bağıntı vardır,
- ii. Ana vananın yüksek basınç (high pressure: HP) safhasında basınç düşümündeki etkisi ihmal edilir,
- iii. Devir sayısı regülatörlerinde banda önem verilmez,
- iv. Devir sayısı regülatörlerinin türbin vana hareketi özelliğine sahip, elektrohidrolik tip olduğu varsayılır,
- v. Kazan besleme basıncının sabit olduğu varsayılır,
- vi. Türbinin sabit hız ve verimde çalıştığı ve kayıpların ihmal edildiği varsayılır.

Pratikte, vana buhar akışı histerisize benzer eğri olmasına rağmen, bu lineer olarak alınabilir. Ana vanaadaki önemli bir kısılma pratikte H.P. safhası boyunca basınç düşümünü azaltacaktır. Bu nedenle, onun momente katkısı önemli ölçüde azalacaktır. Uygun kompanzasyon ile bu giderilebilir. Ancak, bu H.P. safhasındaki basınç düşümü diğer safhalara göre büyük olduğu için gerekli değildir. Elektrohidrolik tipteki regülatörlerde bulunan ölü band çoğu zaman 20 ms. den daha az olduğu için, iii-varsayımı da akla uygundur. Kısa dönem için v-varsayımı nedeniyle oluşacak geçici inceleme hataları, en kısa zaman sabitleri 20-30 s. civarında olduğundan önemli değildir.

Simülasyonu yapılacak turbogeneratör modeli Şekil 3.2'de verilmektedir.



Şekil 3.2. Turbogeneratör modeli.

Bu diyagramda, her bir safha birinci dereceden transfer fonksiyonlarıyla gösterilir ve herbirinden alınan çıkışlar onların toplam güç çıkışına katkılarına göre ağırlıklıdır. Böylece, toplam mil momentini vermek için toplanırlar. Ön ısıtıcı da diğerlerinde olduğu gibi birinci dereceden transfer fonksiyonu ile ifade edilir. Sınırlamalar, Şekil 3.2. den görülebileceği gibi vanaların durumlarına ve açılma kapanma oranlarına bağlıdır. Mekanik regülatörün eşitlikleri aşağıdaki şekilde verilir:

$$pG_M = (U_{GM} - G_M) / T_{GM} \quad (3.33)$$

$$pG_I = (U_{GI} - G_I) / T_{GI} \quad (3.34)$$

burada G_M ve G_I ana ve ara vana hareketlerini U_{GM} , U_{GI} vana girişlerini, T_{GM} , T_{GI} ise her iki vananın zaman sabitlerini gösterir. Türbin eşitlikleri aşağıdaki gibidir:

$$pY_{HP} = (G_M \cdot P_O - Y_{RH}) / T_{HP} \quad (3.35)$$

$$pY_{RH} = (Y_{HP} - Y_{RH}) / T_{RH} \quad (3.36)$$

$$pY_{IP} = (G_I \cdot Y_{RH} - Y_{IP}) / T_{IP} \quad (3.37)$$

$$pY_{LP} = (Y_{IP} - Y_{LP}) / T_{LP} \quad (3.38)$$

$$T_M = F_{HP} Y_{HP} + F_{IP} + F_{LP} Y_{LP} \quad (3.39)$$

burada $F_{HP} Y_{HP}$, H.P. (yüksek basınç) safhası tarafından mil momentine yapılan katılımdır. Diğer safhaların (alçak basınç (L.P.) ve orta basınç (I.P.)) mil momentine katılımları da benzer şekilde düşünülür. Buhar, bilinen sabit buhar kaynağı olarak varsayılan kömür veya petrol yakıtlı kazanlarda üretilir. Vana mekanizmasındaki konum ve hız sınırları aşağıdaki gibi verilir:

$$0 \leq G_M \leq G_{Mmax} \quad (3.40)$$

$$0 \leq G_I \leq G_{Imax} \quad (3.41)$$

$$pG_{Mmin} \leq pG_M \leq pG_{Mmax} \quad (3.42)$$

$$pG_{Imin} \leq pG_I \leq pG_{Imax} \quad (3.43)$$

Bu incelemede basitlik için paralel ayarlama düzeni ile birlikte hareket eden ana ve ara vanalar (ayar vanaları) seçilmiştir.

3.4. Şebekedeki Generatörlere İlişkin İlk Değer Hesaplamaları

Şebekedeki her bir generatöre ait durum denklemlerinin akılara ya da akımlara bağlı olarak ifade edilecek şekilde düzenlenmesi gerekir. Bu çalışmada, durum denklemleri akılar cinsinden ifade edilmiştir. Sargı reaktansları aşağıdaki şekilde tanımlanabilir [1]:

$$x_{fd} = x_{fd\sigma} + x_{ad}$$

$$x_d = x_{d\sigma} + x_{ad} \quad (3.44)$$

$$x_q = x_{q\sigma} + x_{aq}$$

Burada σ kaçak reaktansları gösterir. x_{ad} ve x_{aq} sırasıyla d ve q eksenli sargılarının ortak reaktanslarıdır. Bu değerler ve (3.25) (3.26) ve (3.29) (3.30) ifadelerinden hareketle, akılara bağlı akım ifadeleri aşağıdaki gibi bulunur:

$$I_d = \frac{\psi_{ad} - \psi_d}{x_{d\sigma} + x_{tr}} , \quad I_q = \frac{\psi_{aq} - \psi_q}{x_{q\sigma} + x_{tr}} \quad (3.45)$$

$$I_{fd} = \frac{\psi_{fd} - \psi_{ad}}{x_{fd\sigma}} , \quad I_{kd} = \frac{\psi_{kd} - \psi_{ad}}{x_{kd\sigma}} , \quad I_{kq} = \frac{\psi_{kq} - \psi_{aq}}{x_{kq\sigma}}$$

Burada, .

$$\psi_{ad} = F_1 \left[\frac{\psi_d}{x_{d\sigma} + x_{tr}} + \frac{\psi_{fd}}{x_{fd\sigma}} + \frac{\psi_{kd}}{x_{kd\sigma}} \right] \quad (3.46)$$

$$\psi_{aq} = F_2 \left[\frac{\psi_q}{x_{q\sigma} + x_{tr}} + \frac{\psi_{kq}}{x_{kq\sigma}} \right] \quad (3.47)$$

şeklinde elde edilirler. Bu ifadelerde, F_1 ve F_2 ifadeleri aşağıdaki şekilde verilirler;

$$\frac{1}{F_1} \triangleq \frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{d\sigma} + x_{tr}} + \frac{1}{x_{fd\sigma}} + \frac{1}{x_{kd\sigma}} \quad (3.48)$$

$$\frac{1}{F_2} \triangleq \frac{1}{x_{aq}} + \frac{1}{x_{q\sigma} + x_{tr}} + \frac{1}{x_{kq\sigma}} \quad (3.49)$$

Sonuç olarak, I_d akımının akılara bağlı ifadesi aşağıdaki gibi verilebilir;

$$I_d = \{F_1 \left[\frac{\psi_d}{x_{d\sigma} + x_{tr}} + \frac{\psi_{fd}}{x_{fd\sigma}} + \frac{\psi_{kd}}{x_{kd\sigma}} \right] - \psi_d\} / (x_{d\sigma} + x_{tr}) \quad (3.50)$$

Kısaca, I_d şöyle ifade edilir;

$$I_d = A_1\psi_d + A_2\psi_{fd} + A_3\psi_{kd} \quad (3.51)$$

Benzer şekilde diğer akımların akılar cinsinden ifadesi aşağıdaki şekilde elde edilir:

$$I_q = B_1\psi_q + B_2\psi_{kq} \quad (3.52)$$

$$I_{fd} = -C_1\psi_{fd} - A_2\psi_d - C_3\psi_{kd} \quad (3.53)$$

$$I_{kd} = -A_3\psi_d - C_3\psi_{fd} - C_4\psi_{kd} \quad (3.54)$$

$$I_{kq} = -B_2\psi_q - B_3\psi_{kq} \quad (3.55)$$

Burada $A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, C_1, C_3, C_4$ değişkenleri kısaltmış değerler olup, açık ifadeleri aşağıdaki şekilde verilebilir:

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{1}{x_{d\sigma} + x_{tr}} \cdot \left[\frac{F_1}{x_{d\sigma} + x_{tr}} - 1 \right], A_2 = \frac{F_1}{(x_{d\sigma} + x_{tr})x_{fd\sigma}} \\ A_3 &= \frac{F_1}{(x_{d\sigma} + x_{tr})x_{kd\sigma}}, B_1 = \frac{1}{x_{q\sigma} + x_{tr}} \left[\frac{F_2}{x_{q\sigma} + x_{tr}} - 1 \right] \\ B_2 &= \frac{F_2}{(x_{q\sigma} + x_{tr})x_{kq\sigma}}, B_3 = \frac{1}{x_{kq\sigma}} \left[\frac{F_2}{x_{kq\sigma}} - 1 \right] \\ C_1 &= \frac{1}{x_{fd\sigma}} \left[\frac{F_1}{x_{fd\sigma}} - 1 \right], C_3 = \frac{F_3}{x_{fd\sigma}x_{kd\sigma}}, C_4 = \left[\frac{F_1}{x_{kd\sigma}} - 1 \right] \frac{1}{x_{kd\sigma}} \end{aligned} \quad (3.56)$$

Sonuç olarak, sistemdeki generatörlere ait, verilen (3.12),(3.13),(3.14),(3.16),(3.18),(3.27),(3.28) diferansiyel denklemlerinde yukardaki ifadelerin yerine konulması ve (3.35), (3.36),(3.37),(3.38) denklemlerinin ilâvesi ile generatöre ait

birinci dereceden nonlinear durum denklemleri akılar cinsinden ifade edilmiş olurlar.

$$\dot{x} = Ax + Bu + F \quad (3.57)$$

şeklindeki nonlinear durum denklemlerinde x durum vektörünü, u da girişi, F ise nonlinear elemanlardan bazılarını içeren vektörü göstermektedir ve her biri aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\begin{aligned} x^T &= (\delta, \Delta\omega, \psi_d, \psi_{fd}, \psi_{kd}, \psi_q, \psi_{kq}, V_{fd}, Y_{HP}, Y_{RH}, Y_{IP}, Y_{LP}, G_M, G_T)_{1 \times 14} \\ u^T &= (V_R, U_{GM})_{1 \times 2} \end{aligned} \quad (3.59)$$

Bu denklemin açık ifadesi (3.58) eşitliği ile verilmiş ve kullanılan parametreler Ek.B'de açıklanmıştır. U_{GM} ve U_{GI} 'nin eşit değiştiği varsayılarak giriş sayısı azaltılmıştır.

Şebekedeki makinaların uç gerilimleri (V_g) ile bağlı oldukları baraların gerilimleri (V) arasındaki bağıntının simetrik Park eşitlikleri uygulanmış hali kısaca aşağıdaki gibidir;

$$V_{gd} = V \sin \delta + R_{tr} I_d - x_{tr} I_q \quad (3.60)$$

$$V_{gq} = V \cos \delta + R_{tr} I_q + x_{tr} I_d \quad (3.61)$$

burada, V_g makinaya ait uç gerilimi, V ise o makinanın bağlı olduğu baranın gerilimidir.

Makina uç gerilimi nonlinear biçimde aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$V_g = \sqrt{V_{gd}^2 + V_{gq}^2} \quad (3.62)$$

Makina uçlarındaki aktif güç ve reaktif güç aşağıdaki gibi verilebilir;

$$P_g = V_{gd} I_d + V_{gq} I_q \quad (3.63)$$

$$Q_g = V_{gq} I_d - V_{gd} I_q \quad (3.64)$$

Yapılan incelemede makina ile ilişkin çıkış uç değerleri ise V_g ve $\Delta\omega$ şeklinde alınmıştır. V_g değeri (3.60) (3.61), (3.62) eşitlikleri yardımıyla oluşturulur. $\Delta\omega$ değeri ise zaten ikinci durum değişkeni olup, sadece rad/sn.den p.u değere çevrilmiştir.

Generatöre ait sürekli çalışma noktası değerlerinin belirlenmesinde, ileride anlatılacak yük akısı hesapları ile bulunan bara gerilim ve akımları esas alınır. Bu değerlerden hareketle generatör uç gerilim ve akımı bulunur. Bu ayarın baş kısmında oluşturulan durum denklemlerinden, sürekli halde türevli terimlerin sıfır alınmasıyla durum değişkenlerinin ilk değerleri elde edilir. Bunlardan sadece mekanik yavaş ve uyarıya ilişkin olanlar gözönüne alınır; sa;

$$V_{fd} = R_{fd} I_{fd} \quad (3.65)$$

$$V_R = V_{fd} \quad (3.66)$$

$$G_M = U_{GM} \quad (3.67)$$

$$G_I = U_{GI} \quad (3.68)$$

$$Y_{HP} = P_O G_M \quad (3.69)$$

$$Y_{RH} = Y_{HP} \quad (3.70)$$

$$Y_{IP} = G_I Y_{RH} \quad (3.71)$$

$$Y_{LP} = Y_{IP} \quad (3.72)$$

$$T_e = T_M = x_{ad} I_{fd} I_q + (x_q - x_d) I_d I_q \quad (3.73)$$

ifadeleri elde edilir. Mekanik momentin çeşitli basınç safhalarına katkılarının toplamı olan ifadede (3.39)'da türbin

ve mekanik regülatöre ait eşitlikler(3.33),(3.34),(3.35) (3.36),(3.37)ve (3.38)eşitliklerinde yerine konulur ve hepsi giriş vana işaretleri cinsinden ifade edilirse, elde edilen moment denklemindeki türevli terimler de sürekli durumda sıfır alınacağından, mekanik momente ilişkin ifade aşağıdaki gibi bulunur;

$$T_M = F_{HP} \cdot P_O \cdot U_{GM} + F_{IP} \cdot P_O \cdot U_{GM} \cdot U_{GI} + F_{LP} \cdot P_O \cdot U_{GI} \cdot U_{GM} \quad (3.74)$$

Daha önce de bahsedildiği gibi, kolaylık için iki vananın eşit ve paralel çalıştığı varsayımıyla $U_{GI} = U_{GM}$ alındığından, yukarıdaki ifade ikinci dereceden bir denklem halini alır;

$$P_O (F_{IP} + F_{LP}) U_{GM}^2 + F_{HP} P_O U_{GM} - T_M = 0 \quad (3.75)$$

Bu denklem çözülürse, vana girişlerinin ilk değerleri:

$$U_{GM} = U_{GI} = \frac{-F_{HP} \cdot P_O + \sqrt{F_{HP}^2 P_O^2 + 4 P_O (F_{IP} + F_{LP}) T_M}}{2 P_O (F_{IP} + F_{LP})} \quad (3.76)$$

biçiminde belirlenmiş olur.

3.5. Transformatör ve Yük Modeli

Şebekede üretim birimi olan her barada generatörlerden sonra bir yükseltici transformatör vardır. Bir transformatöre ait empedans $\dot{Z}_{tri} = R_{tri} + jx_{tri}$ şeklinde gösterilmiştir. Transformatör kayıpları yük akışı incelemesinde her iterasyonda hesaba katılacaktır. i. baraya ilişkin transformatör kaybı kompleks olarak $\dot{S}_{tri}$ ile gösterilmiştir.

Şebekedeki yüklerin sabit olduğu kabul edilmiştir. i. baraya ait yük kompleks $\dot{S}_{Li}$ ile gösterilecektir.

3.6. Şebeke Modeli ve Eksen Dönüşümü

Elektrik şebekesinin geçici davranışı turbogeneratör sistemininkinden çok daha hızlı olduğu için, şebeke cebrik eşitlikler kullanılarak ifade edilebilir. Şebeke admitans eşitliği aşağıdaki şekildedir:

$$\dot{I} = \dot{Y} \cdot \dot{V} \quad (3.77)$$

$$\dot{V}^T = [\dot{V}_1, \dot{V}_2, \dots, \dot{V}_k] \quad \dot{I}^T = [\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dots, \dot{I}_k] \quad (3.78)$$

$$\dot{Y} = \begin{bmatrix} \dot{Y}_{11} & \dots & \dot{Y}_{1k} \\ \vdots & & \vdots \\ \dot{Y}_{k1} & \dots & \dot{Y}_{kk} \end{bmatrix} \quad (3.79)$$

Burada, $\dot{V}$ kxl boyutlu, referans baraya göre ölçülen kompleks bara gerilimleri vektörü ve $\dot{I}$ kxl boyutlu, baraya gelen kompleks akımlar vektörüdür. Her baradaki kompleks gerilim ve akım ifadeleri şöyle verilebilir [23]:

$$\dot{V}_i = V_{xi} + jV_{yi} \quad \dot{I}_i = I_{xi} + jI_{yi} \quad i=1,2,\dots,k \quad (3.80)$$

$\dot{Y}$ bara admitans matrisi kompleks elemanlardan oluşan kxk boyutlu bara admitans matrisini gösterir. Burada k şebeke-deki bara sayısını göstermektedir.

Çalışmada, güç şebekesindeki hatların π eşdeğerleri kullanılarak ifade edilmiş oldukları kabul edilmiştir. π eşdeğeri devresinde $\dot{Y}_{ij}$ 'nin i ve j baraları arasındaki hat-ta ait seri admitansı, $\dot{Y}_{ij}$ 'nin de hat başı ve sonuna indirgenen şönt admitansı ifade ettiği varsayılırsa, ($i=1,2,\dots,k$; $j=1,2,\dots,k$), $\dot{Y}$ bara admitans matrisinin köşegen elemanları $\dot{Y}_{ii}$ ($i=1,2,\dots,k$) i. düğüme bağlı admitansların toplamına (şönt ve seri), köşegen dışı elemanları $\dot{Y}_{ij}$ (i. ile j. düğümler (baralar) arasındaki admitans) ise bu baralara bağlı seri admitansların toplamlarının ters işaretlisine eşittir. $\dot{Y}$ bara admitans matrisi simetrik matristir. $\dot{Y}_{ij} = \dot{Y}_{ji}$ ($i=1,\dots,k$; $j=1,\dots,k$)

Ç.M.G.S'de, her makinanın d-q koordinatlarının senkron hızda dönen d-q referans eksenine göre durumu farklıdır. Turbogeneratör birimleri ve elektrik şebekesinden oluşan güç sisteminin birleşik hesabını gerçekleştirmek için aşağıdaki eşitlikle verilen bağıntıyla ortak X-Y reel-imaşiner eksen takımına dönölür:

$$\begin{bmatrix} A_{qi} \\ A_{di} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta_i & \sin \delta_i \\ \sin \delta_i & -\cos \delta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{xi} \\ A_{yi} \end{bmatrix} \quad i=1, \dots, z \quad (3.81)$$

Burada A_{qi} , A_{di} , A_{xi} ve A_{yi} (A gerilim veya akım olabilir) i. generatörün q, d ve X, Y eksenleri üzerindeki izdüşümleridir. δ_i i. generatörün q ve X eksenleri arasındaki açıdır. Yukarıdaki dik dönüşüm tersine de çevrilebilir. Böylece, akım ve gerilimlere ait q, d bileşenlerinin yerini X, Y (reel, imaşiner) bileşenleri alır.

3.7. Yük Akışı ve Ç.M.G.S.'de Başlangıç Değer Hesaplamaları

Geçici kararlılık çalışmalarında, geçici durum öncesindeki sistem koşullarını elde etmek için, Ç.M.G.S'nin ilk değer hesaplamalarına ihtiyaç duyulur. İlk değerler diferansiyel eşitliklerin çözümüyle elde edilir. ÇMGS'inde, sistemin çalışması sırasında eşdeğer yük admitansları sabit olarak alındığı için, rotor açısının $\delta_i(0)$, uyarma geriliminin $V_{fd}(0)$, mekanik gücün $T_M(0)$, regülatör girişlerinin $U_{GM}(0)$, $U_{GI}(0)$ ilk değerlerinin belirlenmesine ihtiyaç duyulur. Bunun için öncelikle yük akışı hesaplamalarıyla bara gerilimlerinin ilk değerlerinin hesaplanmasına ihtiyaç vardır.

3.7.1. Başlangıçtaki Yük Akışı Hesaplamaları

Şebeke eşitliklerinin admitansa bağılı olarak yazılması aşağıdaki şekilde olur [28];

$$\dot{V}_i = \frac{1}{Y_{ii}} \left(\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} - \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^{j=k} Y_{ij} \dot{V}_j \right) \quad i=1, 2, \dots, k \quad (3.82)$$

burada $\dot{V}_{ij}$, $\dot{V}$ nin, i. satır ve j. sütunundaki elemandır. (*) konjuge (eşlenik transpoze) elemanı gösterir. P_i ve Q_i i barasına gelen aktif ve reaktif gücü gösterir. Yük akışı problemi, böylece Gauss-Siedel veya diğer yük akışı yöntemlerinden biriyle (örneğin Newton-Raphson veya Gauss Yöntemi) doğrusal olmayan eşitlik grubunun çözülmesinden ibarettir. Çalışmada Gauss-Siedel yönteminin Newton-Raphson Yöntemine göre tercih edilmesinin nedenleri, Gauss-Siedel yöntemlerinin dik koordinatlarda, Newton-Raphson Yönteminin kutupsal koordinatlarda programlanması, bara admitans matrisini kullanan Gauss-Siedel Yönteminin bir iterasyonu tamamlamak için en az sayıda aritmetik işleme ihtiyaç duymasıdır. Bunun nedeni, şebeke matrisinin sparslılığı (sıfırı bol oluşu) ve çözüm tekniğinin basitliğidir. Bara admitans matrisini kullanan Newton-Raphson yöntemi de şebeke matrisinin sparslılığı üstünlüğüne sahiptir. Bununla beraber, her iterasyondaki Jacobien elemanlarının hesabı ek bir hesaplama zamanına ihtiyaç gösterir [38]. Her iki yöntemde de, şebekedeki bara sayısı doğrudan bir iterasyondaki hesaplama zamanını arttırır. Bara admitans matrisi tam (dolu) matris olduğu için, çok basit olan Gauss-Siedel Yöntemi bara sayısının karesiyle değişen iterasyon başına harcanan zaman açısından önemli bir zaman artışına neden olur. Yine de, bu yöntemde ivmelendirme faktörünü (çarpanını) uygulayarak (tezde 1,4 alınmıştır), yakınsama hızında önemli artış oluşturabileceği için, tezde Gauss-Siedel yöntemi tercih edilmiştir [28].

Gauss-Siedel iteratif yönteminde, hesaplanan yeni $\dot{V}_i^{(h+1)}$ gerilimi derhal $\dot{V}_i^{(h)}$ ile yer değiştirir ve sonraki eşitliklerin çözümünde kullanılır, burada h iterasyon adımını gösterir. Başlangıç yük akışı hesaplamalarında, gevşek bara (slack bus) hariç, her bir baraya giren kompleks güç iteratif hesaplamalar sırasında düzeltilmelidir. Bunun nedeni, başlangıçtaki transformatör kayıplarının bilinmemesidir. h. iterasyonda düzeltilen kompleks bara gücü şöyle ifade edilebilir:

$$\dot{S}_i^{(h)} = \dot{S}_{gi} - \dot{S}_{Li} - \dot{S}_{tri}^{(h)} \quad i=1, \dots, k-1 \quad (3.83)$$

Burada iteratif hesaplamadan önce verilen $\dot{S}_{gi}$ ve $\dot{S}_{Li}$ i. generatörün kompleks üretim gücü ve i. baradaki kompleks yükü gösterirler. $\dot{S}_{tri}^{(0)}$ 'nin (ilk iterasyonda trafo kaybının) sıfır olduğu varsayılır. i. baraya giren bara akımı da aşağıdaki şekilde düzeltilir.

$$\dot{I}_i^{(h)} = \left(\frac{\dot{S}_i^{(h)}}{\dot{V}_i^{(h)}} \right)^* \quad i=1, 2, \dots, k-1 \quad (3.84)$$

i. generatördeki uç gerilimi ve akımı aşağıdaki şekilde elde edilebilir:

$$\dot{I}_{gi}^{(h+1)} = \dot{I}_i^{(h+1)} + \left(\frac{\dot{S}_{Li}}{\dot{V}_i^{(h+1)}} \right)^* \quad i=1, 2, \dots, k \quad (3.85)$$

$$\dot{V}_{gi}^{(h+1)} = \dot{V}_i^{(h+1)} + \dot{Z}_{tri} \dot{I}_{gi}^{(h+1)} \quad i=1, 2, \dots, k \quad (3.86)$$

h+1 adımında, i. transformatöre ait kaybın iteratif değeri aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$\dot{S}_{tri}^{(h+1)} = \dot{Z}_{tri} \dot{I}_{gi}^{h+1} \dot{I}_{gi}^{*(h+1)} \quad i=1, 2, \dots, k-1 \quad (3.87)$$

Başlangıç yük akışı hesaplamaları tekrarlamalı olarak (3.82) ile (3.87) arasındaki eşitlikleri ivmelendirme uygulanmış Gauss-Siedel yöntemiyle çözerek elde edilir. İşleme, $|\dot{V}_i^{(h+1)} - \dot{V}_i^{(h)}| \leq \epsilon$ ($i=1, \dots, k-1$) oluncaya kadar devam edilir. Tezdeki çalışmada $\epsilon=0,0001$ olarak alınmıştır. İterasyon bittikten sonra gevşek baranın da gücünü belirlemek gerekecektir. Bunun için, iterasyonun sonunda elde edilen bara gerilimleriyle ve hat admitanslarıyla yük akışı hesaplamaları yapılır. i, j baraları arasındaki akış formülü şöyledir [38];

$$P_{ij} - jQ_{ij} = \dot{V}_i^* (\dot{V}_i - \dot{V}_j) \dot{Y}_{ij} + \dot{V}_i^* \dot{V}_i \frac{\dot{Y}_{ij}}{2} \quad i=1, \dots, k \quad (3.88)$$

$$j=1, \dots, k$$

burada, $\dot{Y}_{ij}$ i ve j düğümleri arasındaki seri admitans, $\dot{Y}_{ij}/2$ ise π eşdeğerindeki şönt admitansın hattın iki ucuna indirilen değeridir. Sistem için bütün hatlardaki akış belirlendikten sonra, gevşek baraya ait güç gevşek baraya bağlı hatlardaki akışları toplayarak belirlenir [38].

3.7.2. Referans Makinanın Seçimi

Yük akışı hesaplamalarıyla elde edilen şebeke değişkenleri referans X-Y çerçevesine dayandırılır, burada referans makina milinden ziyade gevşek bara (slack bus) referans bara olarak seçilir. Açısal dönüşüm işlemi referans çerçeveyi gevşek baradan referans makina miline götürmek için gereklidir. Bu işlem şöyle verilebilir [23]:

$$T = 1 / \angle \delta_{rs} = \cos \delta_{rs} + j \sin \delta_{rs} \quad (3.89)$$

δ_{rs} referans makina mili ile gevşek bara arasındaki rotor açısıdır ve aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\dot{E}_{Qi} = \dot{V}_{gi} + \dot{I}_{gi} (R_{i} + jx_{qi}) = E_{Qxi} + jE_{Qyi} \quad (3.90)$$

$$\delta_{is} = \tan^{-1} \frac{E_{Qyi}}{E_{Qxi}} \quad (3.91)$$

burada R_{i} , x_{qi} , $\dot{E}_{Qi}$, E_{Qxi} , E_{Qyi} sırasıyla i. makinaya ait stator direnci, q eksenli reaktansı, kompleks (sanal) iç gerilimi, bu gerilimin reel ve imajiner kısımlarıdır. $i=r$ alınırsa referans makinanın büyüklükleri elde edilmiş olur.

$\dot{V}_i$, $\dot{I}_i$, $\dot{V}_{gi}$, $\dot{I}_{gi}$ ($i=1,2,\dots,k$) gibi şebeke değişkenlerinin yeni referans eksenine dayandırılan değerlerine dönüştürülmesi için, bu değişkenler (3.89) eşitliğiyle verilen dönüşüm elemanı ile çarpılır;

$$\dot{V}'_i = T \cdot \dot{V}_i \quad \dot{I}'_i = T \cdot \dot{I}_i \quad \dot{V}'_{gi} = T \cdot \dot{V}_{gi} \quad \dot{I}'_{gi} = T \cdot \dot{I}_{gi} \quad (3.92)$$

Böylece (') ile gösterilen yeni referans çerçevesindeki büyüklükler elde edilir.

Bütün uç büyüklükleri δ_i , V_{di} , V_{qi} , I_{di} ve I_{qi} (3.89), (3.90), (3.91), (3.92) ve (3.81) eşitliklerini kullanarak çözüldükten sonra, her turbogeneratör birimi için, aynı sonsuz baralı tek makinaya sahip sistemdeki gibi ϕ üretim birimine ait eşitlikler kullanılarak ilk değer hesabı yapılır.

3.8. Şebeke Modelindeki Değişiklikler

3.8.1. Bara Empedans Matrisindeki Düzeltmeler (Değişimler)

Düğüm empedans matrisi $\dot{Z}(=\dot{Y}^{-1})$ şebekedeki değişimleri yansıtmak amacıyla düzeltiler. Bu değişimler eleman ilâve etmek, eleman çıkarmak veya empedans matrisi elemanlarındaki değişimler olabilir.

Kuplajsız olarak iki bara arasından eleman çıkarıldığında, düzeltilmiş yeni bara empedans matrisi aşağıdaki şekilde elde edilir [39]:

$$\dot{Z}'_{ts} = \dot{Z}_{ts} - \frac{(\dot{Z}_{ti} - \dot{Z}_{tj})(\dot{Z}_{si} - \dot{Z}_{sj})}{\dot{Z}_{LL}} \quad \begin{matrix} t=1, \dots, k \\ s=1, \dots, k \end{matrix} \quad (3.93)$$

$$\dot{Z}_{LL} = \dot{Z}_{ii} + \dot{Z}_{jj} - 2\dot{Z}_{ij} + \dot{Z}_{ij} \quad (3.94)$$

burada, $\dot{Z}_{ij}$ i ve j baraları arasından çıkarılan (önündeki işaret -), veya ilâve edilen (önündeki işaret + olur) empedanstır. (') yeni bara empedans matrisini göstermektedir.

i. baradaki bir kısa devreyi simüle etmek için i. bara ile toprak arasına küçük bir empedans eklendiğinde, yukarıdaki eşitlik yerine düzeltilmiş empedans matrisinin elemanları aşağıdaki şekilde bulunacaktır [38]:

$$\dot{Z}'_{ts} = \dot{Z}_{ts} - \frac{\dot{Z}_{ti}\dot{Z}_{si}}{\dot{Z}_{LL}} \quad \begin{matrix} t=1,\dots,k \\ s=1,\dots,k \end{matrix} \quad (3.95)$$

$$\dot{Z}_{LL} = \dot{Z}_{ii} + \dot{Z}_{i0} \quad (3.96)$$

burada $\dot{Z}_{i0}$ genellikle çok küçük bir değer olarak seçilmiş olan kısa devre empedansıdır. Yukarıdaki (3.93) (3.94), (3.95) (3.96) eşitlikleri hatlar arasında kuplaj olmadığı varsayılarak önerilmiştir.

3.8.2. Kısa Devre Hesaplamaları

Baralardan birinde kısa devre olduğu zaman, şebekeye ait tüm baralardaki gerilimler derhal değişir (şebeke geçici durumu ihmal edilmiştir). Elektrik şebekesindeki kısa devre akım ve gerilimleri süperpozisyon teoremine dayandırılan kısa devre hesaplamalarıyla elde edilir [38]. Burada sözü edilen kısa devre simetrik üç fazlı toprak kısa devresidir. En şiddetli kısa devre bu olduğu için, incelemelerde bunun ele alınması yeterli görülmüştür.

Şebekedeki F barasında kısa devre olduğu varsayıl-sın. Bu baraya ait kısa devre akımı aşağıdaki şekilde hesaplanabilecektir [23], [38];

$$\dot{I}_F = - \frac{\dot{V}_F(0)}{\dot{Z}_{FF}} \quad (3.97)$$

burada (0) hemen kısa devre öncesindeki durumu göstermektedir. $\dot{Z}_{FF}$ ise $\dot{Z}$ empedans matrisinde F barasına ait diagonal elemanı gösterir. Kısa devre anında, şebekedeki bütün baraların gerilimleri aşağıdaki şekilde değişecektir:

$$\dot{V}_i(F) = - \frac{\dot{V}_F(0)}{\dot{Z}_{FF}} \dot{Z}_{Fi} \quad i=1,\dots,k \quad (3.98)$$

$$\dot{V}_i = \dot{V}_i(0) + \dot{V}_i(F) \quad i=1,\dots,k \quad (3.99)$$

burada $\dot{Z}_{Fi}$ F ve i baraları arasındaki empedanstır. $\dot{V}_i(F)$, F barasındaki kısa devre akımı I_F tarafından i. barada üretilen gerilimdir. $\dot{V}_i$ 'nin iki bileşeni vardır; bunlar hata öncesi gerilimi ($\dot{V}_i(0)$) ve sadece hata koşulları ve şebeke parametreleriyle ilgili olan hata sonrası gerilimi ($\dot{V}_i(F)$) dir.

Bundan sonraki bölümde, yukarıdaki ayırtılarda tek tek verilen modellerin ve hesaplamaların örnek sistemdeki turbogeneratörlerin adaptif kontrolünü simüle etmek için nasıl kullanılacağı gösterilecektir.

BÖLÜM 4.

Ç.M.G.S.'DE KONTROL PROBLEMİ VE ADAPTİF KONTROLUN SİMÜLASYONU

4.1. Ç.M.G.S.'de Kontrol Problemi

En geniş anlamda, bir güç sisteminin kontrolundan beklenenler;

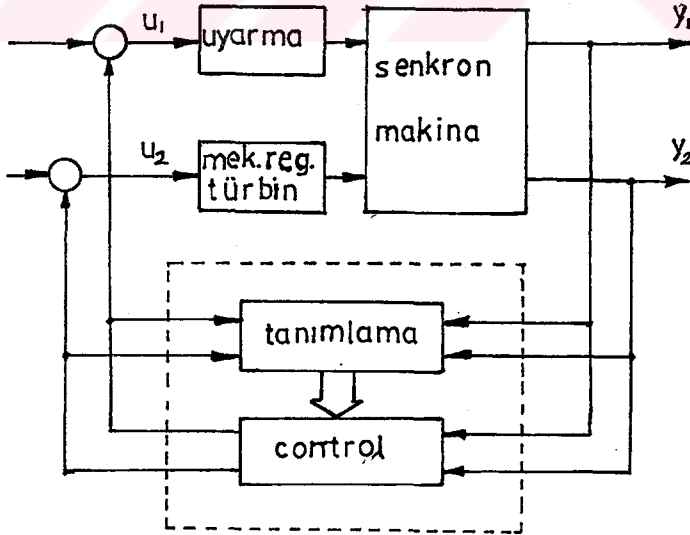
- Sistemde bulunan generatörlerin uyarma akımlarının kontrolu,
- Sistemde bulunan türbine ilişkin buhar giriş büyüklüklerinin kontrolu,
- Sistem frekansının belirli toleranslar içinde kalması için gerekli kontrolu,
- Sistem geriliminin belirli toleranslar içinde kalması için gerekli kontrolu,
- Sistemin kararlı kalması için gerekli kontroldür.

Quazza G. elektrik güç sistemlerinin kontrolu üzerine yaptığı geniş kapsamlı araştırmada, bunları hız açısından sınıflandırmıştır [40]. Bu sınıflandırmaya göre, sistem kararlılığı ve dinamik güvenilirlik nispeten daha hızlı olaylar, sistemin yükü ve frekansındaki değişimler ise daha düşük hızlı olaylar olarak nitelendirilmiştir. Yük-frekans kontrolu pek çok şekilde incelenebilir, bu konuda yapılan araştırmaların en yenileri adaptif kontrollerle gerçekleştirilmiş olanlardır [41], [42].

Elektrik enerjisine duyulan ihtiyacın artmasıyla birlikte büyük güçlü senkron generatörlerin üretilmesi yoluna gidilmiş, bu durum eylemsizlik sabitini azaltmış olduğu için geçici bozulmalar sırasında senkron hızdan uzaklaşma olasılığı artmıştır. Aynı zamanda enerji merkezlerinin yerleşim bölgelerinden uzakta kurulması oldukça uzun enerji iletim hatları kullanılmasına neden olur.

Enerji üretiminin ve dağıtımının büyümesi önemli kontrol ve işletme sorunlarını da birlikte getirmiştir. Bunlardan en önemlisi olan kararlılık sorunu, kısaca bozucu etkiye maruz kalan sistemin bu etki sonrasında tekrar eski çalışma koşuluna dönme yeteneği olarak tanımlanır. Kararlılıkta azalma, kararlılığı yapay olarak gerçekleştirmek için kontrol sistemlerinin kullanımına yol açar [37]. Güç sistemindeki bir bozucu etki sonrasında oluşan yapısal değişim, güç sistemindeki generatörleri etkileyerek onlarda bir ivmelendirme momenti oluşturur. Buna bağlı olarak generatörlerin yük açısı sürekli artar ve generatörlerin senkronizmadan çıkmasıyla tahrik makinasının devreden çıkmasına yol açar. Genellikle herhangi bir sebepten böyle bir ivmelendirme momenti oluştuğunda, makinada oluşan senkronlayıcı kuvvetler makinayı senkronizmada tutarlar. Yine de, şebekede ani kısa devre gibi büyük bozucular durumunda bu kuvvetler yeterli olmayabilir. Senkronizmadan çıkan bir generatör güç sistemindeki gerilim ve akımlarda salınım oluşturur. Oysa şebekede enerjiyi kullanan tüketiciler sabit gerilim ve frekansta enerji talep ederler. Kaliteli enerji üretmede kararlılığın önemi yüzünden, güç sistemlerinde kararlılık incelemeleri üzerinde yoğun şekilde durulur. Bu incelemeler Ç.M.G.S.'lerinde gerçekleştirilirken türbin-generatör eşitlikleri, ile güç sistemi eşitlikleri birlikte ele alınmalıdır. Bu tür kontrolde uyarma gibi çok hızlı değişen olaylar kadar, mekanik güç kontrolü de elektriksel cihazlara oranla daha yavaş bir kontrol hareketi olmasına rağmen önemlidir. Geçici olaylara cevap süresi saniyenin bir kesrinde olan generatör uyarması, sistem kararlılığının korunmasında en önemli konudur. Uyarma, generatörün çıkış gerilimi seviyesine bunun sonucu olarak güç açısına, dolaylı olarak da aktif güç ve sistem frekansına etki eder. Uyarma kontrolünün sağlanması ile şebeke, elektriksel frenlemeden, programlanmamış hat hataları sonucu ortaya çıkan değişimlerden korunmuş olur.

Sabit gerilim regülatörlerinin uyarma kontrolunda geçici olaylar sırasında etkili oldukları, sürekli durumda ise zaman zaman kararsızlık yarattıkları, ayrıca belli çalışma bölgeleri dışında yeterli kontrolü gösteremedikleri bilinir. Mekanik regülatörün kontrolu da güç sisteminin kararlılığında önemli rol oynar. Buhar vanalarının maksimum hızda kapanması ile uyarma gerilimini maksimum değerine götürme olaylarının birleşimi, hata sonrasında sistem kararlılığını tekrar oluşturmada çok etkili bir yöntemdir [37]. Lim C.M. tarafından uyarma ve mekanik regülatör kontrolunun koordinasyonu için optimal kontrol yaklaşımını kullanan adaptif kontrol yöntemi tek makinalı sistem için önerilmiştir [20]. Uyarma ve türbin kontrolunun birlikte çalışmasının kararlılığı arttırmada çok daha etkin olacağı açıktır. Bunun adaptif güç sistemi kararlı kılıcılarıyla gerçekleştirilmesi son derece ilginç bir konudur [27]. Çalışmada bu konu ele alınmış ve parametre adaptif kontrol modeliyle verilen adaptif güç sistemi kararlı kılıcısı güç sistemindeki her makina (çok girişli-çok çıkışlı olarak) uygulanmıştır. Bunun için sistem yapısını gösteren şema Şekil 4.1'de verilmiştir.

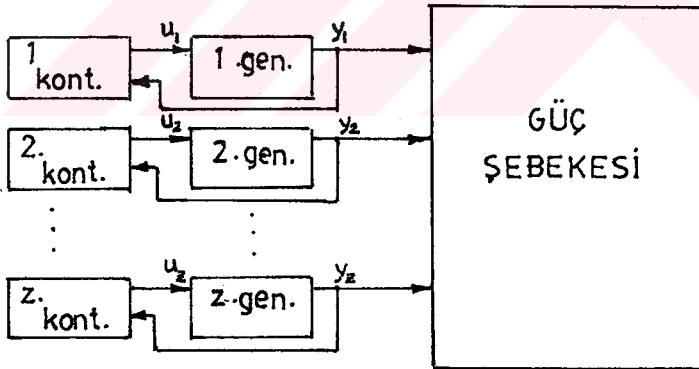


Şekil 4.1. Çok giriş-çok çıkışlı durum için sistem modeli.

Üç fazlı simetrik toprak kısa devresi durumunda makinalara ait uç gerilimi ve açısız hızdaki değışimler in- celenerek sistem kararlılığının korunduğu gözlenmiştir.

4.2. Simölasyon Çalışması

Önceki ayırtta da bahsedildiği gibi güç sistemin- de güvenilirliği sağlamak, sistemde en önemli unsur olan senkron generatörlerin hem uyarma, hem mekanik girişleri- nin kontrolu ile mümkündür. Bu şekildeki çok makinalı bir sistemin genel gösterimi Şekil 4.2'de verilmiştir. Böyle z adet üretim birimine sahip şebekenin durum denklemleri mode- linden hareket ederek birleştirilmiş kontrolunu sağlama- nın güçlüğu, sistemin bütün durum uzayı eşitliğinin, alt sistemlerin durum uzayı eşitliklerinin birleşmiş halinin çok büyük boyutlu olmasıdır. Ancak, bu büyük ölçekli durum denklemleri sistem değışimlerini algılayacaktır. Bununla be- rabere, bu büyük ölçekli merkezi kontrol problemini çözmek daima güçlükler getirir [16]. Diğer yandan, her üretim



Şekil 4.2. Üretim birimleri ile güç şebekesinin gös- terimi.

biriminin çıkışı sistemin çalışma koşullarını yansıtır. Bundan dolayı, bir ölçüde alt sistemler enterkonnekte et- kileri ve diğer birimlerin katkılarını uç büyüklüğü ola- rak algırlarlar. Her bir üretim biriminin giriş ve çıkışını

sürekli belirleyerek oluşturulacak model, bölgesel ölçümlere dayansa da çok makinalı güç sisteminin etkilerini içerir. Böyle bir sistemin üzerinde kontrolü gerçekleştirmek için, önce her üretim biriminin modelini kurmak gerekmektedir [16]. Bu modelin de adaptif kontrolün özelliği olan on-line hesaplamayı sağlayacak şekilde basitleştirilmiş olması istenir. Bu durumda her üretim birimi için, 14. dereceden model yerine basitleştirilmiş, zamanda ayırık hesaplamaya uygun, ama alt sistemin belli önemli özelliklerini sağlayabilen, ARMA modeli kullanılır. Model her örnekleme aralığında tanımlandığı için, kullanılan parametre kestirim teknikleri modelin parametrelerini gerçek giriş-çıkış özelliklerine otomatik olarak uyduracaktır. Bu, alt sistemler arasındaki bağlantının temel özelliğinin tanımlanmış modelin parametreleri tarafından yansıtılmasını garanti eder.

Her üretim birimini tanımlamak ve adaptif kontrolünü sağlamak için kullanılacak ARMA modeli, birinci ağırtta bahsedilen nedenlerden dolayı, Şekil 4.1'de gösterildiği gibi çok girişçok çıkışlı olacaktır. k. üretim birimine ait çıkış ve giriş büyüklükleri aşağıda verilmiştir;

$$\begin{aligned} y_k^T(t) &= [\Delta V_{gk}(t), \Delta \omega_k(t)] \quad k=1, \dots, z \\ u_k^T(t) &= [\Delta V_{Rk}(t), \Delta U_{Gk}(t)] \end{aligned} \quad (4.1)$$

burada

$$\Delta V_{gk} = V_{gk} - V_{gok}, \quad \Delta \omega_k = \omega_k - \omega_o$$

$$\Delta V_{Rk} = V_{Rk} - V_{Rok}, \quad \Delta U_{Gk} = U_{Gk} - U_{Gok}$$

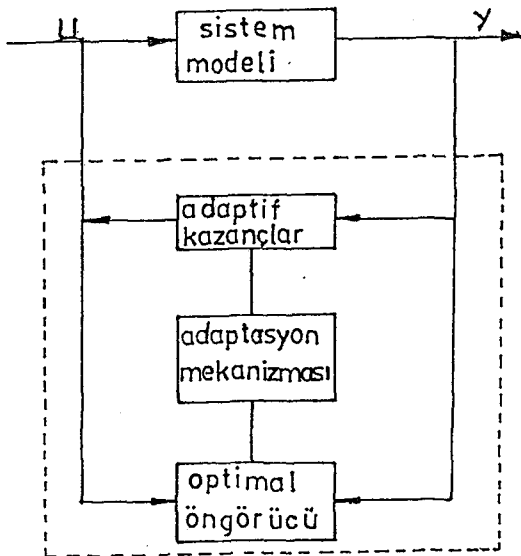
V_{gok} ve ω_o sırasıyla her makinanın uç geriliminin sürekli çalışma değerini ve güç sisteminin sürekli çalışma frekansını, V_{Rok} ve U_{Gok} her üretim birimindeki uyarma ve mekanik regülatör girişlerinin sürekli çalışma değerlerini gösterir. Turbogeneratörlerin geleneksel kararlı kılıcılarında

çoğunlukla sönüm özelliklerini düzeltmek için ilâve yardımcı işaretler kullanılır. Burada kullanılacak bu yardımcı işaret $\Delta\omega_k$ 'nin ilavesiyle elde edilmiştir. ARMA modelinde $Y_{1k} = \Delta V_{gk} + \lambda \Delta\omega_k$, $0 < \lambda < 1$ olacak şekilde her üretim biriminin $k=1, \dots, z$ çıkışının ilk elemanına ek işaret katkısıyla sönüm özelliklerinin daha iyi düzeltilmesi yoluna gidilmiştir. Burada kurulacak ARMA modeli uyarma ve mekanik regülatörün kontrolünü birlikte ifade edeceği için, ikinci bölümde tek giriş-tek çıkışlı sistemler için verilen model, iki giriş-iki çıkışlı hale dönüşmüş olur. ARMA modelindeki katsayılar, $m \times m$ boyutlu katsayı matrisleri olmuştur (m : her üretim biriminin giriş=çıkış sayısıdır):

$$Y_k(t+1) = \sum_{i=0}^N A_{ik} Y_k(t-i) + \sum_{j=0}^M B_{jk} u_k(t-j) \quad (4.2)$$

$k=1, \dots, z$

burada z üretim birimleri gösterir. Yukarıdaki model her üretim birimi için ayrı oluşturulacaktır. Çalışmada kullanılacak Parametre Adaptif Kontrol Yöntemi ikinci bölümde ayrıntılı şekilde anlatılmıştır. Kullanılacak yöntemle ilişkin şema Şekil 4.3'de verilmektedir. Burada öngörülen hata ve adaptif kontrol algoritması, ikinci bölümde



Şekil 4.3. Kullanılan adaptif kontrolörün şematik gösterimi.

tek giriş-tek çıkışlı sistemler için verilenin çok giriş-çok çıkışlı duruma getirilmiş olmasından ibarettir.

$$E_k(t+1) = Y_k(t+1) - Y_k^*(t+1) = B_{ok} [u(t) - \theta_o \phi(k)] \quad (4.3)$$

$$\hat{\theta}_k(t+1) = \hat{\theta}_k(t) - GE_k(t+1) [1 + \phi_k^T(t) \phi_k(t)]^{-1} \phi_k^T(t) \quad (4.4)$$

$$u_k(t) = \hat{\theta}_k(t) \phi_k(t) \quad k=1, \dots, z \quad (4.5)$$

burada,

$$\theta_{ok} = [-A'_{ok}, -A'_{1k}, \dots, -A'_{Nk}, -B'_{1k}, \dots, -B'_{Mk}, B_{ok}^{-1}]$$

$$\phi_k(t) = [Y_k^T(t), Y_k^T(t-1), \dots, Y_k^T(t-N), u_k^T(t-1), \dots, u_k^T(t-M), Y_k^{*T}(t+1)]^T$$

$$\theta_{ok} \text{ mx}[m(N+1+M+1)], \phi_k(t) \text{ m}(N+1+M+1) \times 1$$

boyutludur. m, giriş=çıkış sayısı olup, incelemede her üretim birimi için ikidir, k üretim birimini gösterir, yukarıdaki işlemlerin her üretim birimi için aynı anda ayrı ayrı yapılacağı anlamındadır. Bu duruma A'_{ik} , B'_{jk} mxm boyutlu matrislerdir.

İncelenen yöntemde optimal öngörücünün de çok giriş-çok çıkışlı olacağı açıktır. Bir üretim birimi için optimal öngörücü aşağıdaki şekilde belirlenmelidir [17]. 2. bölümde de ayrıntılı olarak bahsedilen optimal öngörücü tasarımıda kullanılan $\alpha_i, \beta_i, \dots, \gamma_i$ ($i=1,2$) nitelik katsayıları dinamik kararlılıkla ilgili değildirler. Bu katsayılar optimal öngörücünün istenen çıkışları ile dinamik sistemin çıkışları arasındaki ilişkiyi belirtir. Bu değerler, kontrol edilen turbogeneratör sisteminin niteliksel ihtiyaçlarına göre $\alpha_1=1$, $\alpha_2=0$, $0 < \beta_1 < 1$, $\beta_2=1$ olacak şekilde belirlenmişlerdir [17]. Çalışmada ikinci bölümde ARMA modelinin derecesinin $N=2$, $M=0$ olacak şekilde nasıl tespit edildiği ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Buradan hareketle, hem uyarması hem de mekanik girişi kontrol

edilecek her üretim biriminin optimal öngörücüsü iki çıkışlı olarak aşağıdaki şekilde matrissel biçimde ifade edilebilecektir:

$$\begin{bmatrix} y_{i1}^*(t+1) \\ y_{i2}^*(t+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{1\sigma 10} & \beta_{1\sigma 20} \\ \alpha_{2\sigma 10} & \beta_{2\sigma 20} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_{i1}(t) \\ y_{i2}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \alpha_{1\sigma 11} & \beta_{1\sigma 21} \\ \alpha_{2\sigma 11} & \beta_{2\sigma 21} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_{i1}(t-1) \\ y_{i2}(t-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \alpha_{1\sigma 12} & \beta_{1\sigma 22} \\ \alpha_{2\sigma 12} & \beta_{2\sigma 22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_{i1}(t-2) \\ y_{i2}(t-2) \end{bmatrix}$$

$$i=1, \dots, z$$

(4.6)

Tezdeki çalışmada, 2. bölümde anlatılan zamanda değişen geri besleme kazançları ve doğrusal olmayan adaptif algoritma ile her üretim biriminin kontrolü simüle edilmiştir. Bunu sağlayabilmek için adaptif kontrol algoritmasının simülasyonu üç boyutlu matrislerle gerçekleştirilmiştir (üçüncü boyut, yapılan işlemin hangi makineye ait olduğunu gösterir).

Daha önce de bahsedildiği gibi, adaptif algoritma için kullanılan ARMA modeli ve adaptif algoritma, tamamen, her bir üretim birimine ait giriş-çıkış büyüklüklerinin sürekli çalışma değerlerinden olan sapmalarından faydalanılarak oluşturulurlar. Bu durumda, sistemin sürekli değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için, her üretim biriminin 14. dereceden durum denklemlerinden sürekli haldeki çalışma değerlerinin elde edilmesine ihtiyaç vardır.

Çalışmada incelenecek olan güç şebekesi beş baralı olup, baraların dördü üretim barasıdır. Ele alınan şebekenin yapısı Şekil 4.4'de görülmektedir.

Ç.M.G.S.'de geçici kararlılık incelemeleri öncesinde sistem koşullarını elde etmeye ihtiyaç duyulur. Bu başlangıç değerlerini elde etmek için gerekli, şebeke ve turbogeneratörlere ait parametreler aşağıdaki 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6. çizelgelerinde p.u. olarak verilmiştir.

Çizelge 4.1. Şebekedeki Senkron Makina Parametreleri.

	1.Makina	2.Makina	3.Makina	4.Makina
R	0,001	0,005	0,0043	0,0047
R _{kd}	0,0215	0,0078	0,0242	0,0134
R _{kq}	0,024	0,0084	0,025	0,012
R _{fd}	0,0013	0,0015	0,0014	0,0016
X _{fd}	1,745	1,97	1,6	1,79
X _d	1,79	2	1,67	1,78
X _q	1,715	1,91	1,6	1,77
X _{ad}	1,655	1,86	1,52	1,62
X _{aq}	1,58	1,77	1,45	1,61
X _{kd}	1,865	1,94	1,72	1,664
X _{kq}	1,7	1,96	1,507	1,662
H(ş.)	2,93	3,25	2,155	5,433
K _d	0,025	0,025	0,025	0,025
T _{ex}	0,3	0,01	0,3	0,01

Çizelge 4.2. Türbin ve Mekanik Regülatör Parametreleri.

F _{HP}	F _{IP}	F _{LP}	T _{HP}	T _{IP}	T _{LP}	T _{RH}	T _{GM}	T _{GI}
0,24	0,34	0,42	0,3	0,3	0,72	10,	0,1	0,1

Çizelge 4.3. Uyarma ve Mekanik Regülatörler için fiziksel sınırlamalar.

-0,005 < V _{fd} < 0,005
0 < G _M < 1 0 < G _I < 1
-6,7 pu/s. < G _M < 6,7 pu/s. -6,7 < G _I < 6,7 pu/s.

Çizelge 4.4. Ç.M.G.S'deki Şebeke Parametreleri ve Transformator Parametreleri.

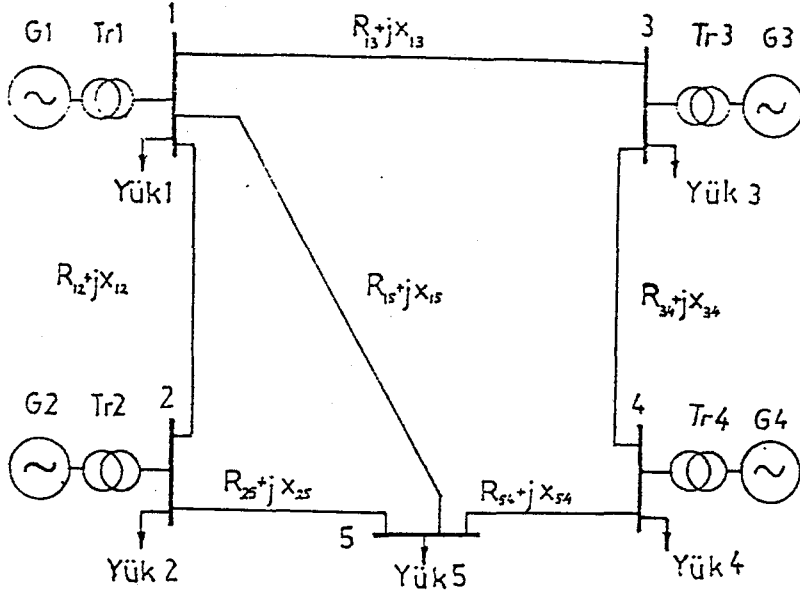
Bağlı oldukları Bara	Seri Empedans	Şönt Admitans
R ₁₂ +jx ₁₂	0,04+j0,4	0+j0,03
R ₁₃ +jx ₁₃	0,05+j0,5	0+j0,025
R ₁₅ +jx ₁₅	0,05+j0,5	0+j0,02
R ₂₅ +jx ₂₅	0,02+j0,3	0+j0,02
R ₃₄ +jx ₃₄	0,06+j0,6	0+j0,015
R ₅₄ +jx ₅₄	0,04+j0,4	0+j0,01
R _{tr} +jx _{tr}	0,038+j0,1	

Çizelge 4.5. Üretilen Aktif ve Reaktif Güç ve başlangıç Gerilimleri.

BARA	1.Mak.	2.Mak.	3.Mak.	4.Mak.
P _g	gevşek	0,8	0,8	0,8
Q _g	bara	0,3	0,3	0,2
V(o)	1,06+j0	1+j0	1+j0	1+j0

Çizelge 4.6. Yükler.

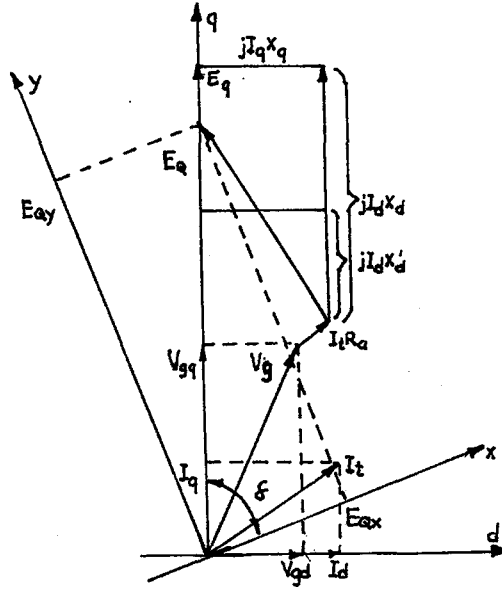
No	1.Bara	2.Bara	3.Bara	4.Bara	5.Bara
P _L	1,5	0,3	0,3	0,2	0,3
Q _L	0,3	0,05	0,05	0,05	0,05



Şekil 4.4. İncelenen Ç.M.G.S.'nin yapısı.

Üçüncü bölümde ayrıntılı olarak bahsedilen Gauss-Siedel yöntemi ile yük akışı yapılarak baralara ait gerilim ve akımlar reel-imaginer referans eksen takımında belirlenir. Çalışmada, 1 nolu bara gevşek bara (slack bus) olarak seçilmiştir. Şebekeye ait tüm işlemlerin kompleks olarak yapıldığı unutulmamalıdır. Bu işlem bilgisayar simülasyonunda AK alt programı ile gerçekleştirilmiştir. Gevşek baranın gücünü hesaplamak için, yük akışı iterasyonu bittikten sonra, baralar arasındaki güç akışından yararlanılmıştır. Şebekede hesaplanan bütün büyüklükler referans baraya göre ifade edilen kompleks büyüklüklerdir. Yük akışında bulunan değerlerin açısal dönüşüm işlemi ile yeni referans olarak seçilen makina miline dönüştürülmesi gerekmektedir. Burada kolaylık açısından referans makina olarak da 1 nolu makina seçilmiştir. Bütün bara gerilimi, akımı, makina uç gerilimi ve akımı değerleri açısal dönüşüm işlemiyle (operatörüyle) üçüncü bölümde anlatıldığı gibi (dönüşüm operatörü, referans olarak seçilen makinanın kompleks iç geriliminden yararlanılarak bulunmuştur) bulunacaktır. Şekil 4.5. bu dönüşüm işlemini açıklar.

Çalışmada bu referans çerçeve dönüşümü TRANS alt programında gerçekleştirilmiştir. Referans olarak seçilen



Şekil 4.5. Ç.M.G.S'deki bir senkron generatörün fazör diyagramı

makinanın iç gerilimi ile reel eksen arasındaki açıdan faydalanarak oluşturulan dönüşüm işlemi bara gerilimi ve akımlarına, generatör uç gerilimi ve akımlarına uygulanmıştır. Dönüşmüş değerler elde edildikten sonra, tersine çevrilebilme özelliğine sahip dik dönüşümden faydalanılarak, her makina için d-q eksenini akım ve gerilimlerini hesaplamak mümkündür. i. makinanın bağlı olduğu bara gerilimi için bu işlem aşağıdaki gibi verilir (aynı işlemler akımlar için, makina uç gerilimi için de yapılabilir);

$$\begin{aligned} V_{qi} &= \cos \delta_i V_{xi} + \sin \delta_i V_{yi} \\ V_{di} &= \sin \delta_i V_{xi} - \cos \delta_i V_{yi} \end{aligned} \quad i=1, \dots, z \quad (4.7)$$

burada x ve y reel-imaşiner eksen, d ve q boyuna ve enine eksen büyüklüklerini göstermektedir. Sonuç olarak, elde edilen değerlerden (dönüşmüş akım, gerilim değerleri) ve her bir makina için üçüncü bölümde verilmiş olan 14. dereceden doğrusal olmayan diferansiyel eşitliklerin

sürekli durum çözümünden faydalanılarak turbogeneratörlerin giriş ve çıkışları ile ilgili ilk değerler (sürekli çalışma değerleri) elde edilirler. Buna ilişkin program çalışmada INITIA alt programında verilmiştir. Bu ilk değerler 4.7 ve 4.8 çizelgelerinde her makina için verilecektir. DURUM alt programında her turbogeneratör birimindeki akı, akım bağıntılarında kullanılacak katsayılar hesaplanmaktadır.

Bulunan Sürekli Çalışma Değerleri.

Çizelge 4.7. Bara Gerilimleri.

No:	Bara Gerilimleri V(p.u)
1	1,06+j0
2	0,8987+j0,707
3	0,8539+j0,809
4	0,8359+j0,849
5	0,9002+j0,683

Çizelge 4.8. Makinanın Sürekli Çalışma Değerleri.

Makina No:	V_g (pu)	I_g (pu)	I_d (pu)	I_q (pu)	I_{fd} (pu)	δ (rad)	V_R (pu)	U_{GM} (pu)
1.	1,054	0,3214	-0,007	0,3213	0,5982	0,5417	0,8375.10 ⁻³	0,4299
2.	1,192	0,7168	0,5973	0,3963	1,2536	0,6766	0,2006.10 ⁻²	0,7933
3.	1,224	0,6978	0,5702	0,4022	1,2285	0,6454	0,1597.10 ⁻²	0,7922
4.	1,231	0,6699	0,5336	0,405	1,091	0,726	0,1636.10 ⁻²	0,7932

Sonuç olarak, elde edilen dönüşmüş değerler kullanılarak her bir makinanın 14. dereceden doğrusal olmayan diferansiyel eşitlikleri, INITIA alt programında elde edilen ilk değerlerden de faydalanılarak FONK alt programı yardımıyla çözülür. Diferansiyel eşitliklerin çözümünde Runge-Kutta 4 yönteminden yararlanılmıştır. (Burada integrasyon adım uzunluğu $h=0,001$ s. olarak seçilmiştir). Çeşitli çevrimlerdeki zaman sabitleri arasında büyük farklar olan turbogeneratörün ayrıntılı simülasyonu için, integrasyon aralığının küçük seçilmesinde fayda vardır. Toplam hesaplama zamanı adım uzunluğuna bağlıdır. Bu denklemlerin çözümü sürekli olarak tekrarlanarak her turbogeneratöre ait çıkış büyüklükleri sürekli olarak

üretirler. FONK alt programı çalışırken gerekli fiziksel sınırlamaların sağlanması için LIMIT alt programına gidilmiştir. OUTPUT alt programında FONK alt programında hesaplanan makinalara ait durum değişkenleri değerlerinden faydalanılarak çıkış büyüklükleri hesaplanır. Üç boyutlu değişkenler kullanılarak her makina için büyüklükler aynı anda hesaplanmıştır.

Ayrıca, yine üçüncü bölümde anlatıldığı şekilde, şebekedeki üç fazlı simetrik kısa devreyi ve arıza sonucu güç anahtarlarının açarak arızalı hattın devre dışı kalması durumu simüle edilmiştir. Arıza 5. bara yakınında oluşmuş, 120 ms. sonra 5-1 hattının her iki ucundaki anahtarların açılması ile hat devre dışı kalarak, güç şebekesinin modeli değişmiştir. Kısa devre anını ve sonrasındaki değişikliği simüle etmek için 3. bölümde verilen şebeke denklemlerinden faydalanılır. Şebekede kısa devreyi simüle etmek, bu anda (120.ms de) kısa devre gerilimlerini ve akımlarını hesaplamak için ve kısa devre sonrasındaki güç şebekesini simüle etmek için kullanılan DEĞİŞ alt programına iki kez gidilmiştir. Hatanın başladığı 1.inci saniyede ve hatanın temizlendiği 1,12.inci saniyelerde DEĞİŞ alt programına gidilir. Burada güç şebekesindeki değişimler generatör girişindeki değerlere yansıtılmış olur.

Çalışmada turbogeneratörün uç değişkenlerinin sürekli durum değerlerinden olan farkları ile çalışan adaptif algoritma 0,02s aralıkla (çalışmada örnekleme periyodu olarak bu seçilmiştir.) çalıştırılmıştır. Bu çalışmada parametre adaptif kontrolün simülasyonu yapılmaktadır. Burada, ADAPT alt programı ile adaptif kontrol her makina için simüle edilir (üç boyutlu matrislerle bu, her makina için aynı anda gerçekleştirilmiş olur).

ADAPT alt programında her bir üretim birimine ait ARMA modelinin parametreleri, FONK daki çıkış değerlerinin normal çalışma koşullarından olan farkından (20 defada 1 kez) faydalanılarak söz konusu t anında kestirilir. Bu

kestirim işleminde daha önce de açıklanan Projeksiyon II yöntemi kullanılmıştır. Parametre adaptif kontrol yöntemi olarak adlandırılan ve basitleştirilmiş, dolayısıyla en hızlı kestirim yöntemine ve optimal öngörücü tasarımına dayandırılan algoritma her t anında (0,2 s. de bir) çalıştırılır. Burada turbogeneratörler için seçilen ARMA modelinin derecesinin $N=2$, $M=0$ olması önemlidir. Bu, turbogeneratör için optimal öngörücünün derecesinin de aynı seçilmesine neden olur. Bu öngörücünün çıkışı sistemin çıkışının sürekli değerlerden olan farklarına dayandırılır. Buradaki bağlantı optimal öngörücü daima asimptotik kararlı kalacak şekilde oluşturulur. Sonuç olarak, her t anında sistemin ARMA modeli ile optimal öngörücünün karşılaştırılması ve bu sağlanırken de sürekli olarak aradaki farkı (hatayı) azaltmaya yönelik kestirimin yapılması için, daha önce de açıklanan basit kestirim yöntemi kullanılır. Aynı t anı için kestirilmiş parametrelerin oluşturduğu θ parametre matrisi ve optimal öngörücü ile sistemin ARMA modelindeki regression matrisinden yararlanılarak çok basit olan kontrol kuralı olarak çalıştırılır ve yeni kontrol değerleri için temel değerler elde edilir. Bütün bu işlemler ADAPT alt programının içinde her t anında (0,02 s.de bir) yapılır, sonra bu yeni değerlerden faydalanılarak, her bir üretim birimini simüle eden doğrusal olmayan durum denklemlerine uyumlu girişler sağlanır. Adaptif kontrolün simülasyonun yapılmasında anlatılan işlemlerin çokluğundan dolayı niçin basit bir kestirim yöntemi ve kontrol kuralının seçildiği sorusu da aydınlanmış olmaktadır. RLS yöntemi her t anında ilave işlemlerin yanısıra, kovaryans matrisini resetleme, unutma faktörünün değişken olması gibi ek zorluklar da getireceği için tercih edilmemiştir.

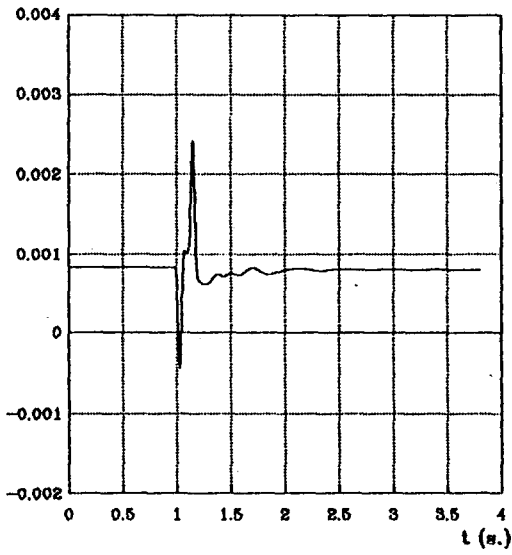
Adaptif kontrolün simülasyonunda kullanılan ve özelliği olan alt programlar yukarıda kısaca verilmiştir. Güç sistemindeki makinelerin uyarma ve mekanik regülatör girişlerini birlikte kontrol etmek için kullanılan adaptif kontrol simülasyonu her makina için aynı anda

gerçekleştirilmiştir. Bunun için, 3. boyut makinanın sayısını gösterecek şekilde tanımlanmış ve tüm programlar bu şekilde çalıştırılmıştır. Simülasyonda kullanılan ana ve alt programlara ait akış diyagramları Ek-C de verilmiştir.

Bu tezde uygulanan 5 baralı bir güç sistemindeki makinalara yapılmış olunan parametre adaptif kontrol yaklaşımının, bir büyük bozucu etki sonrasında makinaların uç büyüklüklerinin bozucu etki öncesi koşullara hızla döndüğü ilgili eğrilerden görülmektedir. Tezde simülasyon için kullanılan bilgisayar dili Fortran 77 dir. Kullanılan, bilgisayar modeli IBM 4381 olup İTÜ Bilgi-İşlem Merkezi'nce işletilmektedir. Bu bilgisayarda toplam ana bellek 16 Mb, kullanıcıya ayrılan bellek 4 Mb dir. 86 nanosaniyelik CPU çevrimi ve disk ünitesi 3380 olan bilgisayarın işletim sistemi VM/CP Version 5 dir. Fortran derleyicisi VS Fortran Version 2.3 kullanılmıştır. Bilgisayardaki disklerin kapasitesi 2x712140 byte dir. Programın çalışma süresi aynı anda pek çok program ve EARN ağıyla dış bağlantı yapıldığı için sağlıklı tespit edilmemekle birlikte 8 dakika 10 saniyedir.

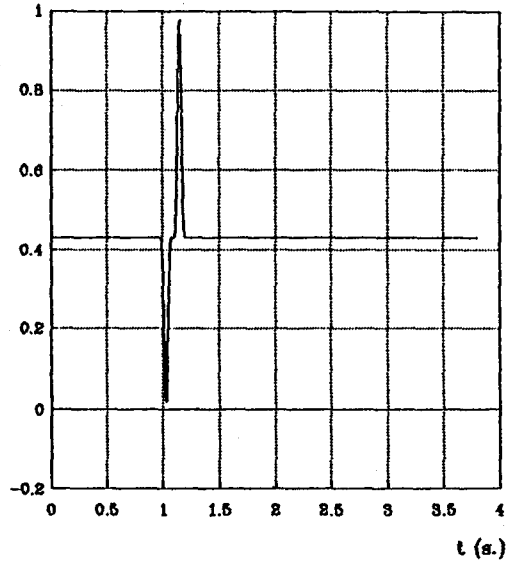
Her makinaaya ait uç büyüklüklerinin değişimi sırasıyla Şekil 4.6, Şekil 4.7, Şekil 4.8, Şekil 4.9 ile verilmiştir. Şekil 4.6a uyarma girişi değişimini, Şekil 4.6b mekanik girişteki değişimi, Şekil 4.6c uç gerilimindeki değişimi ve Şekil 4.6d açısal hızdaki değişimi gösterir. Diğer şekiller için de benzer açıklamalar yapılır.

Vr1 (p.u.)



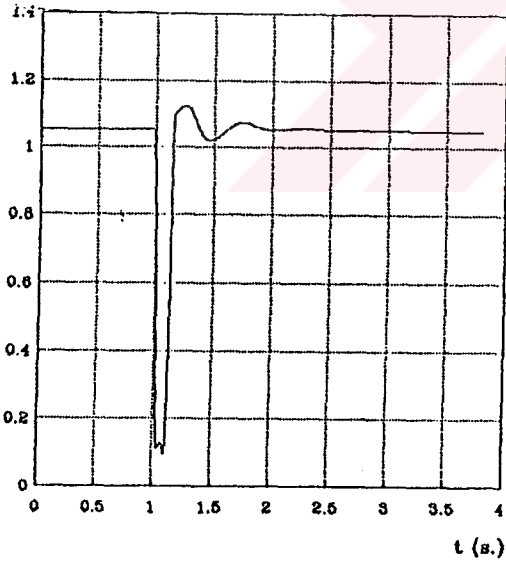
Şekil 4.6a. Uyarma Girişi.

Ugm1 (p.u.)



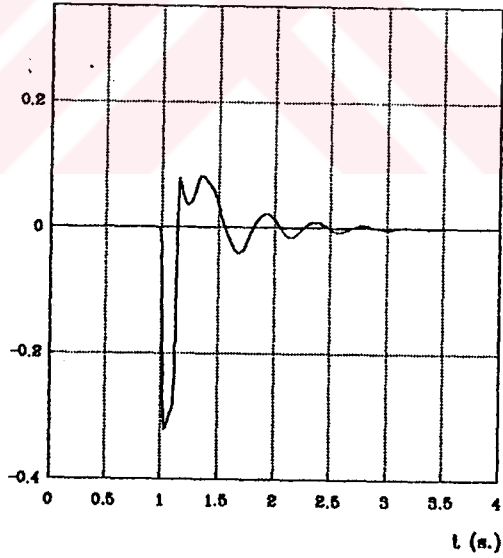
Şekil 4.6b. Mekanik Giriş.

Vl1 (p.u.)



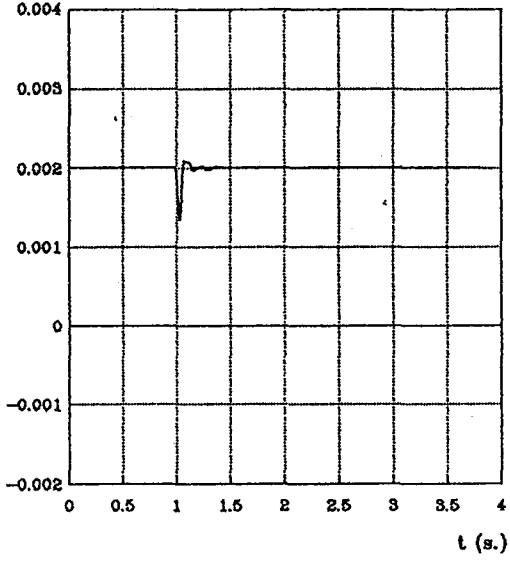
Şekil 4.6c. Uç Gerilimi.

Wr1 (p.u.)



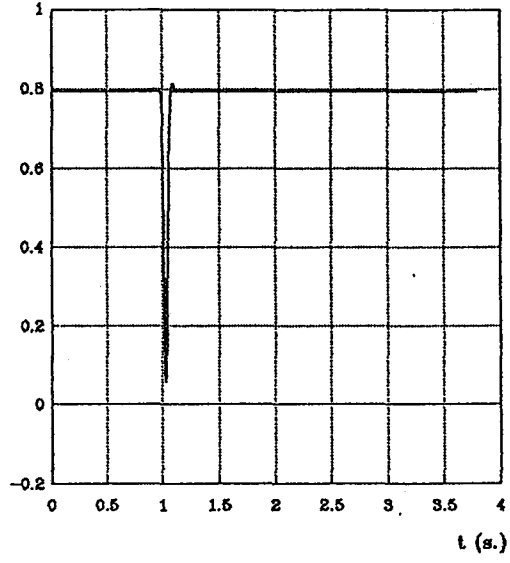
Şekil 4.6d. Açısal hız değişimi

Vr2 (p.u.)



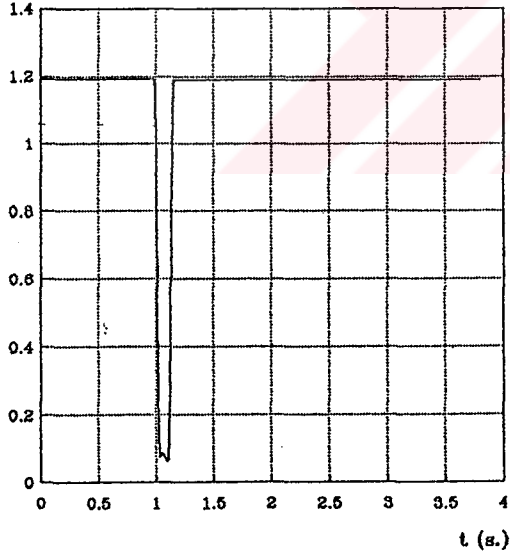
Şekil 4.7a. Uyarma Girişi.

Ugm2 (p.u.)



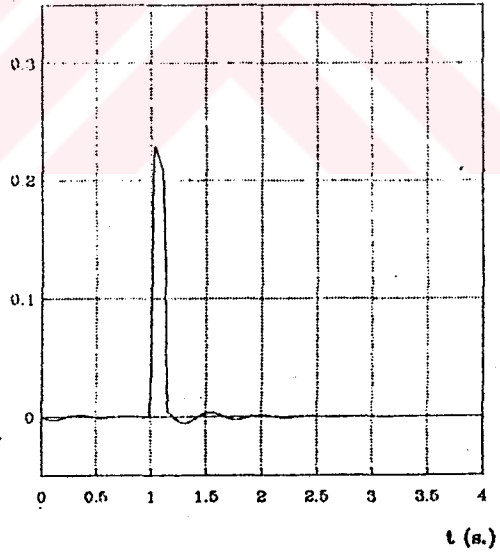
Şekil 4.7b. Mekanik Giriş.

Vt2 (p.u.)



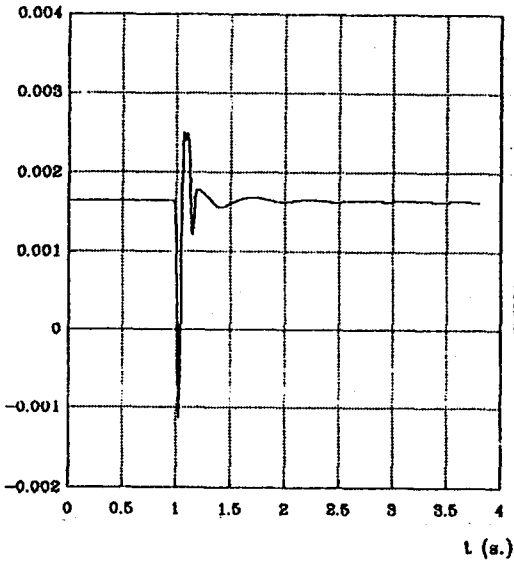
Şekil 4.7c. Uç Gerilimi.

Dw2 (p.u.)



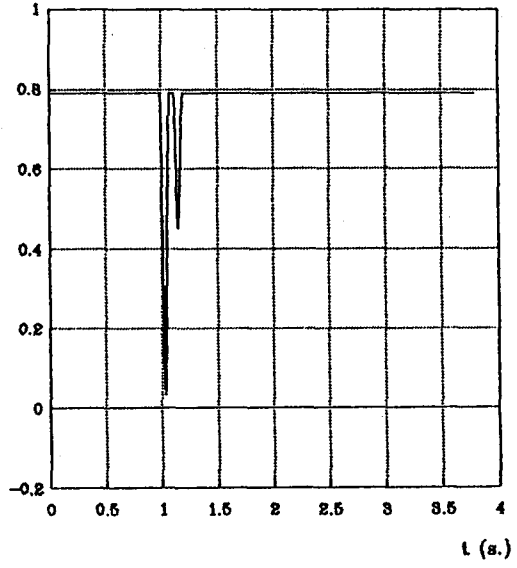
Şekil 4.8c. Açısal hız
değişimi.

Vr3 (p.u.)



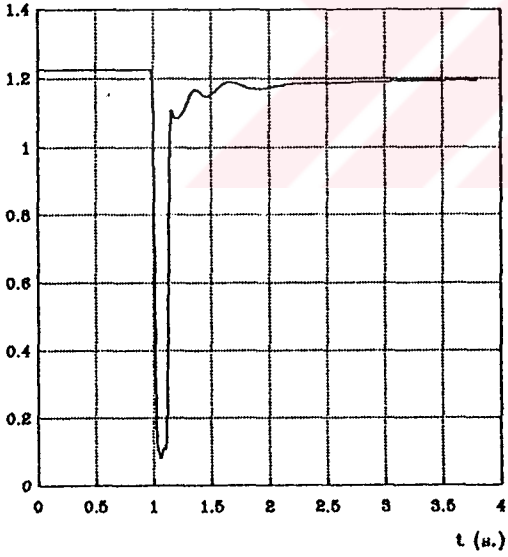
Şekil 4.8a. Uyarma Girişi.

Ugm3 (p.u.)



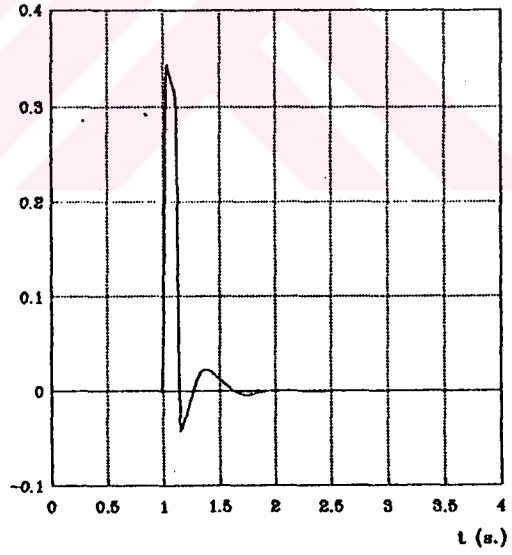
Şekil 4.8b. Mekanik Giriş.

Vl3 (p.u.)



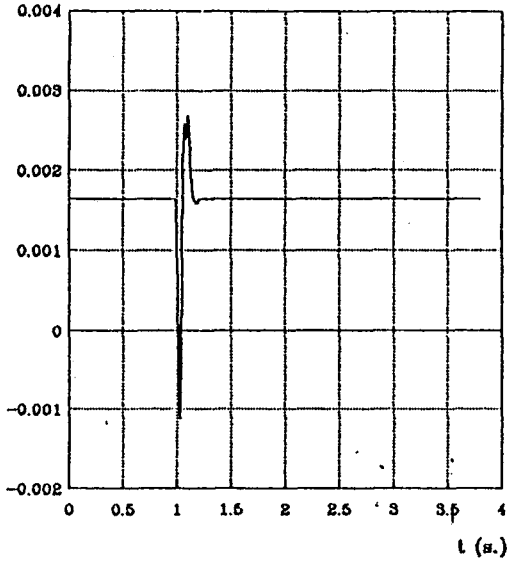
Şekil 4.8c. Uç Gerilimi.

Dw3 (p.u.)



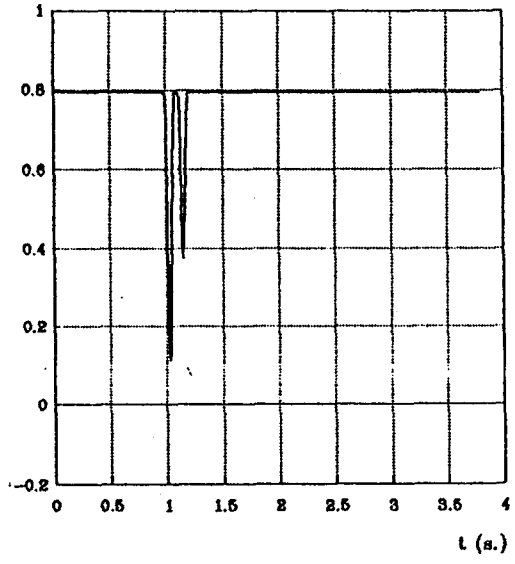
Şekil 4.8d. Açısal Hız değişimi.

V_{r4} (p.u.)



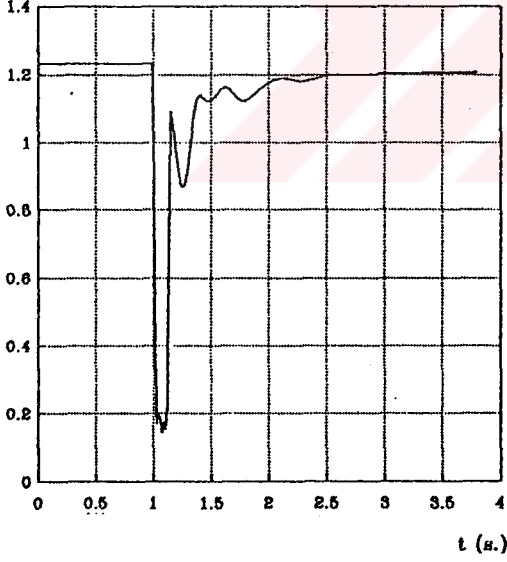
Şekil 4.9a. Uyarma Girişi.

U_{gm4} (p.u.)



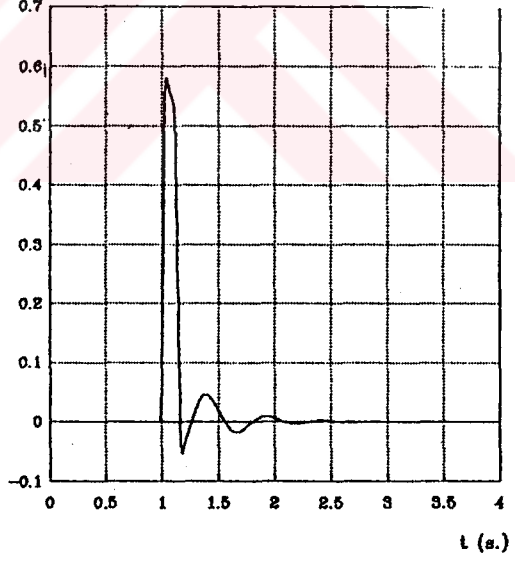
Şekil 4.9b. Mekanik Giriş.

V_{t4} (p.u.)



Şekil 4.9c. Uç Gerilimi.

Dw_4 (p.u.)



Şekil 4.9d. Açısal Hız değişimi.

BÖLÜM 5.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tezde, adaptif kontrol yöntemlerinden biri olan parametre adaptif kontrol yönteminin çok makinalı güç sistemlerine uygulaması yapılmıştır.

Günümüzde kaliteli ve sürekli enerjiye duyulan ihtiyaç, güç sistemlerindeki senkron makinaların kontrolünün en iyi biçimde gerçekleştirilmesini gerektirir. Bu nedenle, konuyla ilgili pek çok araştırma yapılmıştır. Uyarma kontrolünün geçici kararlılık üzerindeki olumlu etkisi, buna karşılık sürekli durum kararlılığındaki olumsuz etkisi bilinmektedir. Bunun mekanik giriş ile uyarma hareketinin birleştirilmesi ile aşılabacağı bilinir. Bu nedenle araştırmacılar, bu iki kontrolü birlikte gerçekleştirmeye yönelik incelemelerin turbogeneratörün bütünsel davranışı üzerindeki olumlu etkiyi arttırması üzerinde durmaktadırlar.

Diğer yandan, her t anında yapılan ölçümlere ve parametre kestirimlerine dayandırılan kontrol olarak da tarif edilen adaptif kontrol yöntemlerinin senkron makinaların kontrolü için kullanılması giderek artan öneme sahip olmaktadır. Birbirlerine göre üstünlükleri ve sakıncaları olan adaptif kontrol yöntemlerinin pekçoğunun güç sistemlerine uygulanması veya simülasyonu araştırmacıların gündemindedir. Bu çalışmalar, daha çok tek makinalı güç sisteminin uyarması ile ilgili kontrol konusunda yoğunlaşmıştır. Son yıllardaki çalışmalarda adaptif kontrol yöntemlerinden biri tek makinalı sistemde hem uyarma girişini, hem de mekanik girişini birlikte kontrol etmeye yöneliktir. Bu yöntemle olumlu sonuçlar elde edildiği gösterilmiştir. Bu nedenle tezdeki çalışmada her iki girişin de

birlikte kontrolu sağlanmıştır.

Yukarıda vurgulananlar ışığında, önce bir güç sistemindeki üretim birimlerinin ARMA modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan bu model simülasyon için, örnek 5 baralı güç sistemindeki dört turbogeneratöre uygulanmıştır. Bozucu etki olarak 5 no'lu barada üç fazlı dengeli bir kısa devre alınmış, bu kısa devre halinin 120 ms sürdüğü ve daha sonra da bunun ortadan kaldırıldığı varsayılarak simülasyon yapılmıştır.

Kullanılan adaptif kontrol stratejisi gereği, yapılan yük akışı ile belirlenen sürekli hal değerleriyle, çalışma sırasında her örnekleme anındaki çıkış değerleri arasındaki fark değerlerle çalışılmaktadır. Turbogeneratörün modellenmesi için kullanılan ARMA modelinde $N=2$, $M=0$ alınması yeterli görülmüştür. Böylece regression vektöründe sadece sistem çıkışları ile optimal öngörücü çıkışı göz önüne alınmıştır.

Çalışmada, hem mekanik giriş büyüklükleri, hem de uyarma giriş büyüklüklerinin adaptif olarak kontrolu yapıldığında bir bozucu etkiye karşı sistem davranışının gerçek sisteme daha uyumlu olduğu görülmüştür.

Endüktif yüklü çalışmada güç sisteminde büyük bir bozucu oluştuğunda, bu hataya cevap olarak makina uç geriliminin azalacağı uyarmanın önce buna uyan hızlı bir iniş yapacağı ve sonra tepe değerine ulaşarak salınıma (daha küçük genlikli) devam edeceği, bu arada hızlı çalışan vanaların kapanmasıyla birlikte mekanik girişte bir azalmanın söz konusu olacağı ve aynı zamanda senkron hızda artma olacağı bilinir. Şimdiye kadar geleneksel kontrol yöntemleriyle yapılan ayarlamalarda, uç büyüklüklerinin önemli salınımlar yaptıktan sonra eski değerlerine oturdukları tespit edilmiştir. Burada kullanılan adaptif yöntem ile simüle edilen kontrol sonuçları gözlemlendiğinde ise, bu salınımların yok denecek kadar azaldığı

görülmüştür.

Dördüncü bölümde verilen eğrilerden görüldüğü gibi, güç sistemindeki makinaların söz konusu büyük bozucuya cevabı hızlı ve iyi söndürülmüştür. Açısal hız farkı ve uç gerilimi optimal öngörücünün çıkışlarına, kontrol algoritmasının etkinliğini gösterecek şekilde yakınsamaktadır. Bozucuya verilen bu cevabın önemli bir özelliği bütün makinalar için uç geriliminin bozucu sonrasında hızla normal değerine dönmesiyle birlikte senkron hıza yeniden ulaşılmasıdır. Bununla beraber, bir nolu üretim biriminde diğerlerine oranla bir salınım söz konusudur. Bunun yorumu, bozucu sonrasında 1-5 hattının devreden çıktığı, bu nedenle bu hattın diğer ucunda bulunan birinci makinanın bozucuya cevabının diğer makinalara oranla biraz daha yavaş olduğu şeklinde yapılabilir.

Sonuç olarak, güç sistemindeki senkron generatörler üzerinde parametre adaptif kontrolün simülasyonu ile şebekedeki üç fazlı simetrik bir kısa devre durumunda, generatörlerin mekanik regülatör ve uyarma girişleri sürekli olarak kontrol edildiği için ve bu kontrolü sağlamak amacıyla uç gerilimi ve dolayısıyla bara gerilimi değerlerinden faydalandığı için, kontrolün en iyi şekilde gerçekleştiği ve makinaların uç büyüklüklerinin çok az salınımla eski değerlerine eriştiği görülmüştür. Güç sistemindeki turbogeneratörlerin kontrolunda kullanılan yöntemin olumlu sonuç verdiğini göstermektedir.

Bu konuda yapılacak önerilerden biri, burada bilgisayar simülasyonu yapılan kontrol yönteminin, güç sistemindeki üretim merkezlerinde gerçek zamanda, gerekli bütün donanımın da sağlanarak uygulanması olacaktır. Ayrıca, hem uyarma hem de mekanik regülatör girişlerinin birlikte kontrolünün, giriş bölümünde bahsedilmiş olan çeşitli adaptif algoritmaları kullanarak incelenmesi önerilir.

KAYNAKLAR

- [1] TACER, M.E., Rotoru Bölmelenmiş Uyarma Sargılı Senkron Makinanın Sayısal Simülasyonu, Doçentlik Tezi, İ.T.Ü., 1981.
- [2] TACER, M.E., Enerji Sistemlerinde Kararlılık, İ.T.Ü., 1990.
- [3] TACER, M.E., İki Uyarmalı Senkron Makinaların Analizi ve Kararlılığı, Doktora Tezi, İ.T.Ü., 1977.
- [4] ANSTRÖM, K.J., WITTENMARK, B., Adaptive Control, Addison-Wesley Publishing Company, 1989.
- [5] PIERRE, D.A., A Perspective on Adaptive Control of Power Systems, IEEE Trans.PWRS.2, No:2, May 1987.
- [6] GÜRLEYEN, F., Modele Uyumlu Optimum Kontrol Sistemlerinin Tasarımında Yeni Bir Yaklaşım, Doktorá Tezi, İ.T.Ü.Mühendislik-Mimarlık Fakóltesi, 1980.
- [7] MALIK, O.P., Adaptive Control of Synchronous Machine Excitation, Microprocessor-Based Control Systems, Chapter-4, N.K.Sinha by D.Reidel Publishing Company, 1986.
- [8] GHANDAKLY, A., IDOWU, P., Design of A Model Reference Adaptive Stabilizer for the Exciter and Governor Loops of Power Generators, IEEE Trans. PWRS Vol:5, August 1990.
- [9] LEDWICH, G., Adaptive Excitation Control, IEE Proc C, Vol:126, March 1979.
- [10] WALKER, P.A.W., CHEETHAM, A Turbogenerator Self-Tuning Voltage Regulators, Int.J.Control Vol:36, p:127, 1982.
- [11] XIA, D., HEYDT, G.T., Self-Tuning Controller for Generator Excitation Control, IEEE PAS-102, June 1983.
- [12] KANNIAH, J., MALIK, O.P., HOPE, G.S., Excitation Control of Synchronous Generators Using Adaptive Regulators, Part I, IEEE PAS-103, No.5, May 1984.

- [13] GHOST, A., LEDWICH, G., MALIK, O.P., HOPE, G.S.,
Power System Stabilizer Based on Adaptive
Control Techniques, IEEE PAS-103, August 1984.
- [14] HOGG, B.W., SHARAF, S.M., ABDALLA, O.H., EL-SAYED M.L.
Multivariable Adaptive Controller for a Turbo-
generator, IEE Proc D, March 1986.
- [15] HOPE, G.S., CHOW, Y.S., MALIK, O.P., CHENG, S.J.,
An Adaptive Synchronous Machine Stabilizer,
IEEE PWRs-1, No.3, August 1986.
- [16] HOPE, G.S., MALIK, O.P., CHENG, S.J., Self-Tuning
Stabilizer for a Multimachine Power System,
IEE Proc-C, No.4, May 1986.
- [17] HOGG, B.W., WU, Q.H., Adaptive Controller for a Tur-
bogenerator System, IEE Proc-D, Vol:135, No.1,
pp.35, January 1988.
- [18] GOODWIN, SIN, Adaptive Filtering Prediction and Cont-
rol, Prentice Hall, 1984.
- [19] MALIK, O.P., HOPE, G.S., CHANDRA, C., A Self-Tuning
Controller for the Control of Multi-Machine
Power Systems, IEEE Trans.Power System Vol:3,
August 1988.
- [20] LIM, C.M., A Self-Tuning Stabilizer for Excitation
or Governor Control of Power Systems, IEEE
Trans.EC Vol:4, June 1989.
- [21] HOGG, B.W., IBRAHIM, A.S., SAHARF M.M., Self-Tuning
Automatic Voltage Regulators for a Synchro-
nous Generator, IEE Proc-D, Vol:136, December
1989.
- [22] FAN, J.Y., ORTMEYER, T.H., MUKUNDAN, R., Power Sys-
tem Stability Improvement with Multivariable
Self-Tuning Control, IEEE Trans.PWRs, Vol:5,
February 1990.
- [23] WU, Q.H., HOGG, B.W., Self-Tuning Control for Turbo-
generators in Multimachine Power Systems, IEE
Proc-C, Vol:137, March 1990.
- [24] LIM, C.M., HIYAMA, T., Self-Tuning Control Scheme
for Stability Enhancement of Multimachine
Power Systems, IEE Proc-C, Vol:137, July 1990.
- [25] LIM, C.M., ELENGOVAN, S., Digital Stabilizer Design
for Optimal Performance of Power Systems,
Electric Power System Research, 25-30, 1988.

- [26] MALIK , O.P., HOPE , G.S., FAN , J., MAO , C.X.,
PRAKASH, K.S., Implementation and Laboratory
Test Results for an Adaptive Power System Sta-
bilizer Based on Lineer Optimal Control, IEEE
EC Vol:5, December 1990.
- [27] HOPE , G.S., MALIK , O.P., PAHALAWATHTHA , N.C., Multi-
variable Self-Tuning Power System Stabilizer
Simulation and Implementation Studies, IEEE
Trans.EC, Vol:6, June 1991.
- [28] MALIK , O.P., HOPE , G.S., PAN , J., MAO , C.X., Studies
of Real-Time Adaptive Optimal Excitation Cont-
roller and Adaptive Optimal Power System Sta-
bilizer, IEEE EC, Vol:7, 1992.
- [29] Comittee Report IEEE, Computer Representation of Ex-
citation Systems, IEEE PAS-87, June 1968.
- [30] ANSTRÖM , K.J., WITTENMARK , B., Computer Controlled
Systems Theory and Design, Prentice-Hall,
1984.
- [31] KANNIAH , J., MALIK , O.P., HOPE , G.S., Excitation
Control of Synchronous Generators Using Adap-
tive Regulators, Part II, IEEE PAS-103, No.5,
May 1984b.
- [32] GOODWIN , G.C., RAMADGE , P.J., CARNES , P.E., Discrete-
Time Multivariable Adaptive Control, IEEE
Trans. A Control, June 1980.
- [33] KUO , B.C., Digital Control Systems, SRL Publishing
Company, 1977.
- [34] WARWICK , K., Self-Tuning Regulators-A State Space
Approach, Int.Journal Control Vol:33, 1981.
- [35] GOODWIN , G.C., LONG , R.S., Generalization of Results
on Multivariable Adaptive Control, IEEE Trans.
A Control, AC-25, December 1980.
- [36] SARIOĞLU , M.K., Elektrik Makinalarının Temelleri II
Senkron Makinalar, 3. Baskı, İ.T.Ü. 1987.
- [37] PULLMAN , T., Co-ordinated Excitation and Governor
Control of Turbogenerators Using State-Space
Techniques, Ph.D.Thesis University of Liver-
pool, 1977.
- [38] STAGG , W.B., ELABIAD , A., Computer Methods in Power
System Analysis, Mc Graw Hill, 1981.
- [39] ELGERD , I., Electric Energy Systems An Introduction
Second Edition, Mc Graw Hill, 1983.

- [40] QUAZZA, G., Large Scale Control Problems in Electric Power Systems, Automatica, Vol:13, Pergamon Press, 1977.
- [41] VAJK, I., VAJTA, M., KEVICZKY, L., HABER, R., HETTHESSY, J., KOVACK, K., Adaptive Load-Frequency Control of the Hungarian Power System, Automatica Vol:21, No.2, 1985.
- [42] KANNIAH, J., MALIK, O.P., HOPE, G.S., Microprocessor-based Adaptive Load-Frequency Control, IEE Proc. Vol:131, Pt.C., July 1984.

EkA-Matris tersi lemması

A, C ve $C^{-1}+DA^{-1}B$ tekil olmayan kare matrisler olsun.

$$(A+BCD)^{-1} = A^{-1}-A^{-1}B(C^{-1}+DA^{-1}B)^{-1}DA^{-1} \text{ dir.}$$

İspat:

$$\begin{aligned} (A+BCD)(A^{-1}-A^{-1}B(C^{-1}+DA^{-1}B)^{-1}DA^{-1}) &= I+BCDA^{-1}B(C^{-1}+DA^{-1}B)^{-1}DA^{-1} \\ &\quad -BCDA^{-1}B(C^{-1}+DA^{-1}B)^{-1}DA^{-1} \\ &= I+BCDA^{-1}-BC(C^{-1}+DA^{-1}B)(C^{-1}+DA^{-1}B)^{-1}DA^{-1}=I+BCDA^{-1}-BCDA^{-1}=I \end{aligned}$$

Ek-B

Ç.M.G.S. indeki bir makinanın doğrusal olmayan
(nonlinear) durum denklemindeki elemanlar.

$$a_{N12} = 1 \quad \text{EkB.1}$$

$$a_{N22} = - \frac{K_d \omega_o}{2.H} \quad \text{EkB.2}$$

$$a_{N23} = \frac{\omega_o \cdot A_1 \cdot \psi_q}{2.H} \quad \text{EkB.3}$$

$$a_{N24} = \frac{\omega_o \cdot A_2 \cdot \psi_q}{2.H} \quad \text{EkB.4}$$

$$a_{N25} = \frac{\omega_o \cdot A_3 \cdot \psi_q}{2.H} \quad \text{EkB.5}$$

$$a_{N26} = - \frac{\omega_o \cdot B_1 \cdot \psi_d}{2.H} \quad \text{EkB.6}$$

$$a_{N27} = - \frac{\omega_o \cdot B_2 \cdot \psi_d}{2.H} \quad \text{EkB.7}$$

$$a_{N29} = \frac{\omega_o \cdot F_{HP}}{2.H} \quad \text{EkB.8}$$

$$a_{N211} = \frac{\omega_o \cdot F_{IP}}{2.H} \quad \text{EkB.9}$$

$$a_{N212} = \frac{\omega_o \cdot F_{LP}}{2.H} \quad \text{EkB.10}$$

$$a_{N32} = \psi_q \quad \text{EkB.11}$$

$$a_{N33} = \omega_o A_1 (R + R_{tr}) \quad \text{EkB.12}$$

$$a_{N34} = \omega_o A_2 (R + R_{tr}) \quad \text{EkB.13}$$

$$a_{N35} = \omega_o A_3 (R + R_{tr}) \quad \text{EkB.14}$$

$$a_{N36} = \omega_o \quad \text{EkB.15}$$

$$a_{N43} = \omega_o A_2 R_{fd} \quad \text{EkB.16}$$

$$a_{N44} = \omega_o C_1 R_{fd} \quad \text{EkB.17}$$

$$a_{N45} = \omega_o C_2 R_{fd} \quad \text{EkB.18}$$

$$a_{N48} = \omega_o \quad \text{EkB.19}$$

$$a_{N53} = \omega_o A_3 R_{kd} \quad \text{EkB.20}$$

$$a_{N54} = \omega_o C_3 R_{kd} \quad \text{EkB.21}$$

$$a_{N55} = \omega_o C_4 R_{kd} \quad \text{EkB.22}$$

$$a_{N62} = -\psi_d \quad \text{EkB.23}$$

$$a_{N63} = -\omega_o \quad \text{EkB.24}$$

$$a_{N66} = \omega_o \cdot B_1 (R + R_{tr}) \quad \text{EkB.25}$$

$$a_{N67} = \omega_o \cdot B_2 (R + R_{tr}) \quad \text{EkB.26}$$

$$a_{N76} = \omega_o B_2 R_{kq} \quad \text{EkB.27}$$

$$a_{N77} = \omega_o B_3 R_{kq} \quad \text{EkB.28}$$

$$a_{N88} = -\frac{1}{T_{ex}} \quad \text{EkB.29}$$

$$a_{N99} = -\frac{1}{T_{HP}} \quad \text{EkB.30}$$

$$a_{N913} = \frac{P_o}{T_{HP}} \quad \text{EkB.31}$$

$$a_{N109} = \frac{1}{T_{RH}} \quad \text{EkB.32}$$

$$a_{N1010} = - \frac{1}{T_{RH}} \quad \text{EkB.33}$$

$$a_{N1110} = \frac{G_{VI}}{T_{IP}} \quad \text{EkB.34}$$

$$a_{N1111} = - \frac{1}{T_{IP}} \quad \text{EkB.35}$$

$$a_{N1211} = \frac{1}{T_{LP}} \quad \text{EkB.36}$$

$$a_{N1212} = - \frac{1}{T_{LP}} \quad \text{EkB.37}$$

$$a_{N1313} = - \frac{1}{T_G} \quad \text{EkB.38}$$

$$a_{N1414} = - \frac{1}{T_G} \quad \text{EkB.39}$$

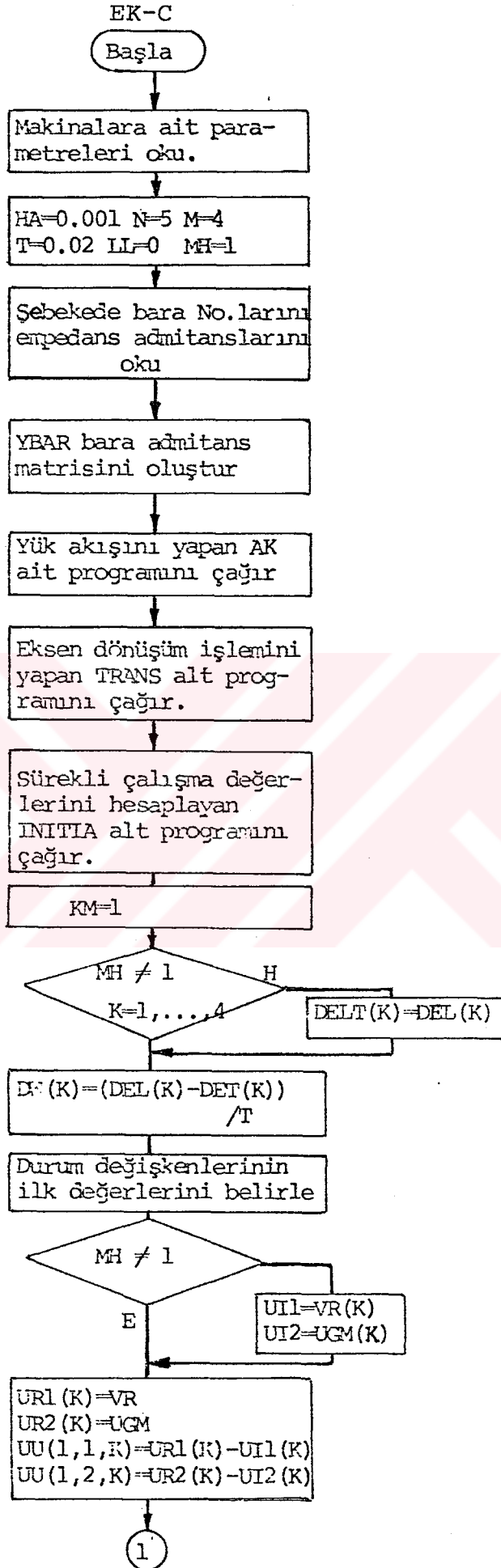
$$b_{N81} = \frac{1}{T_{ex}} \quad \text{EkB.40}$$

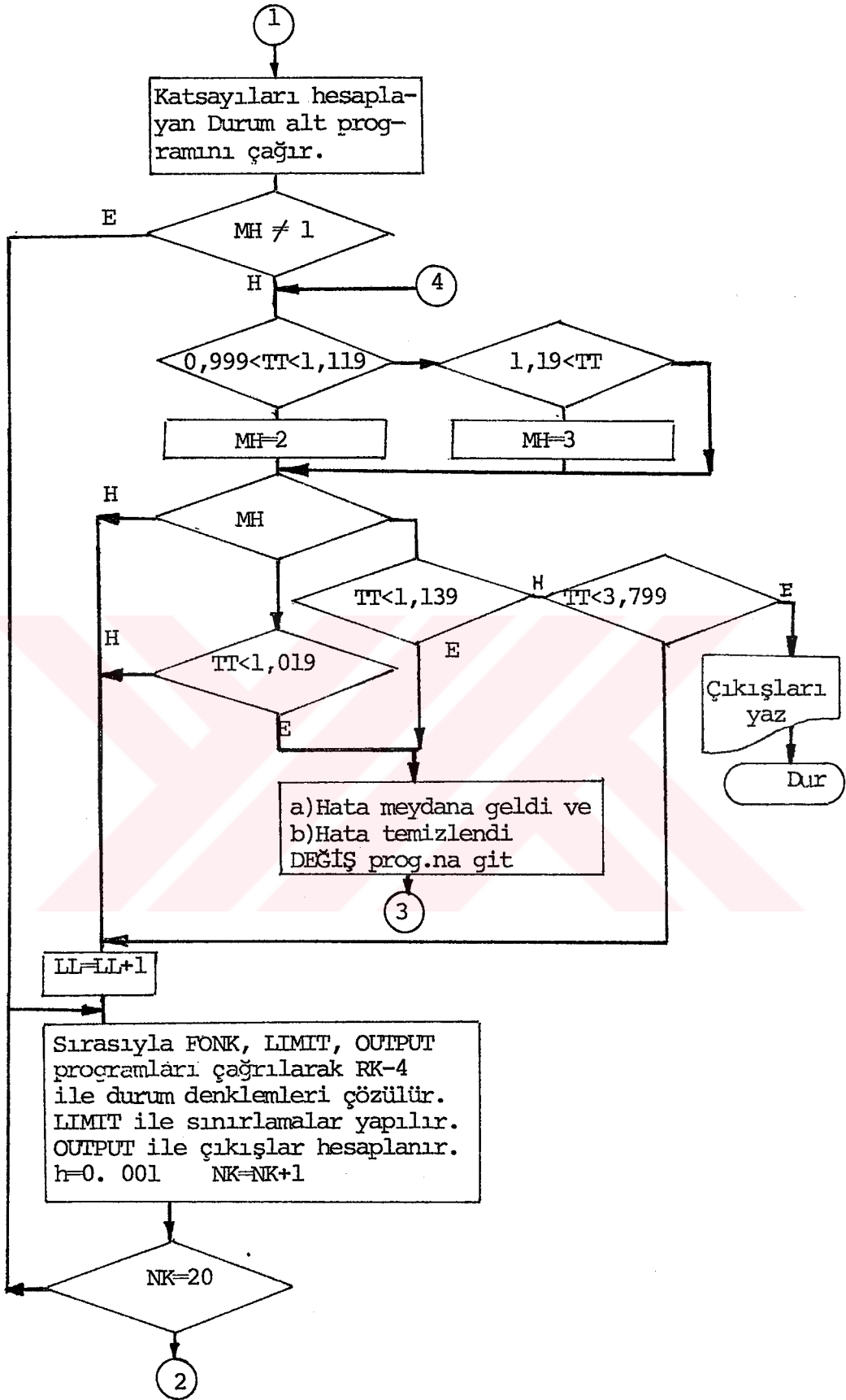
$$b_{N132} = \frac{1}{T_G} \quad \text{EkB.41}$$

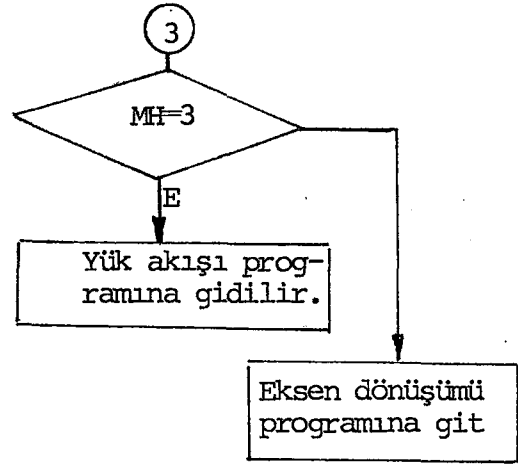
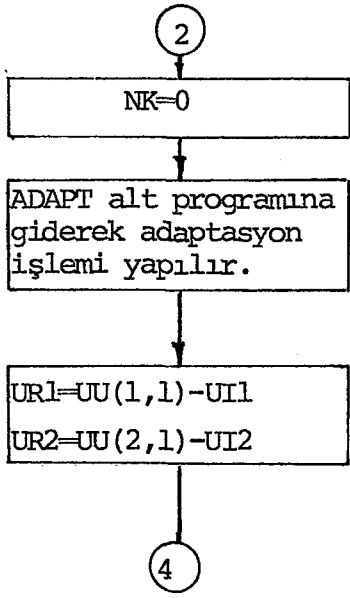
$$b_{N142} = \frac{1}{T_G} \quad \text{EkB.42}$$

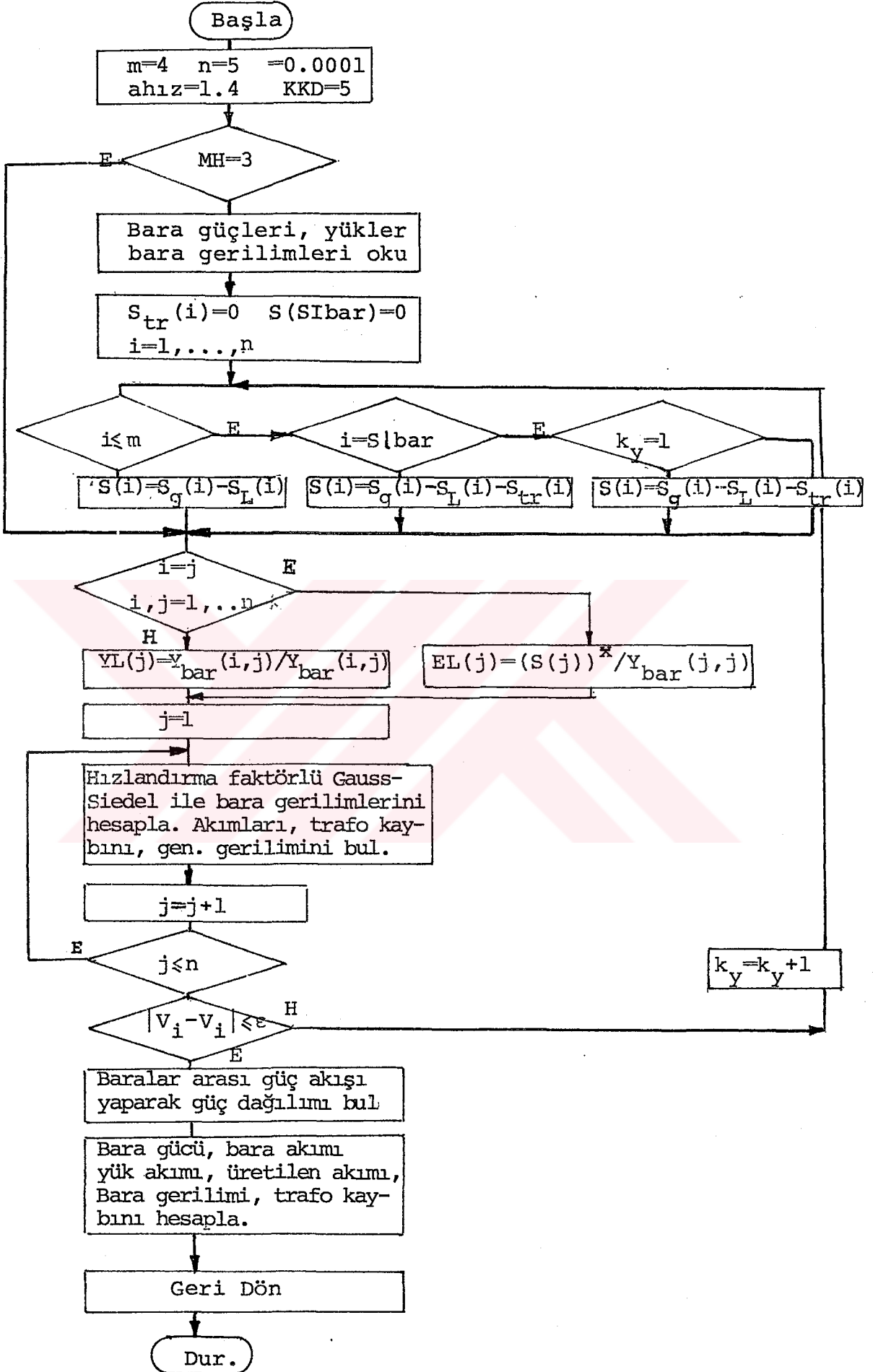
$$f_{N31} = \omega_O [V] \sin \delta \quad \text{EkB.43}$$

$$f_{N61} = \omega_O [V] \cos \delta \quad \text{EkB.44}$$

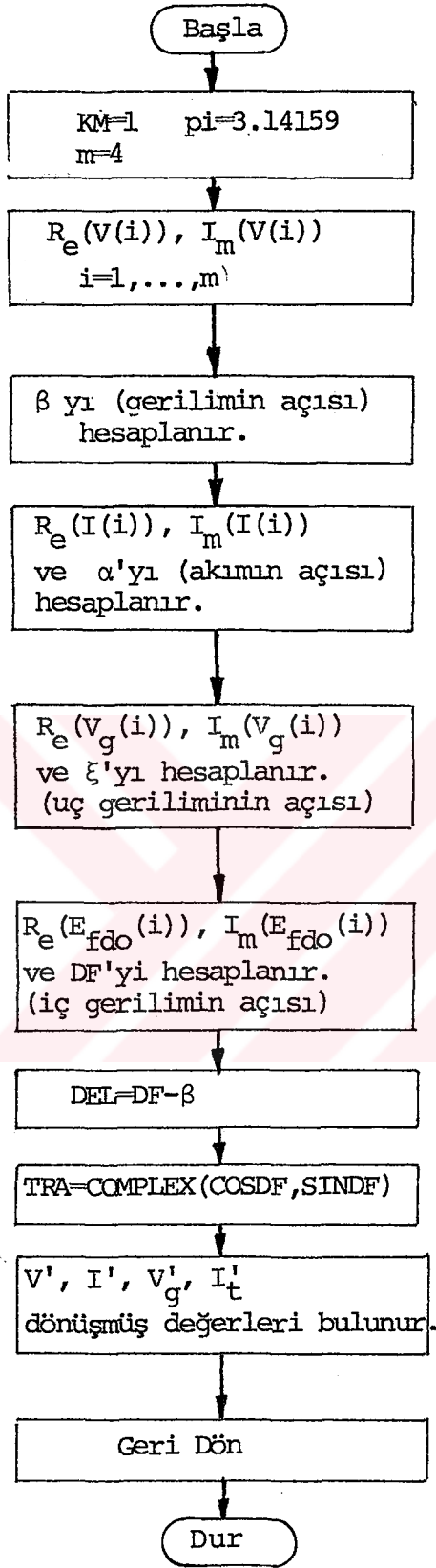


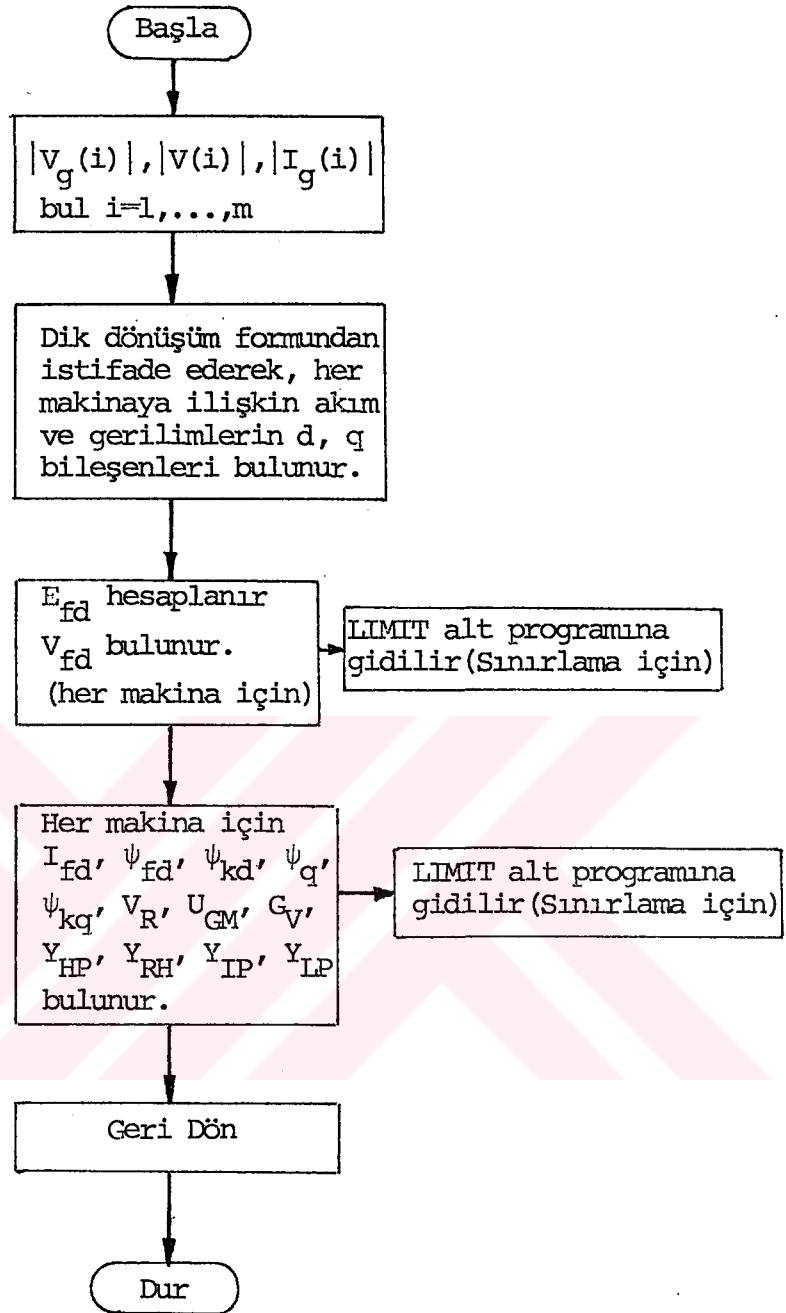




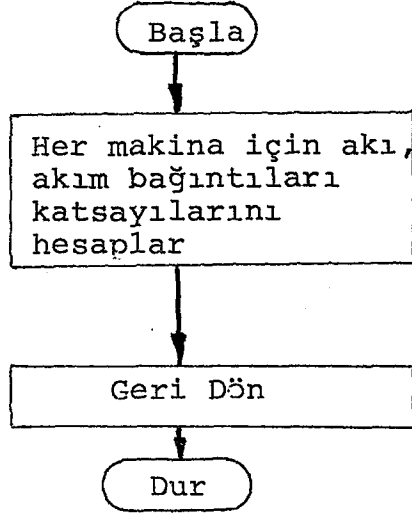


ANS

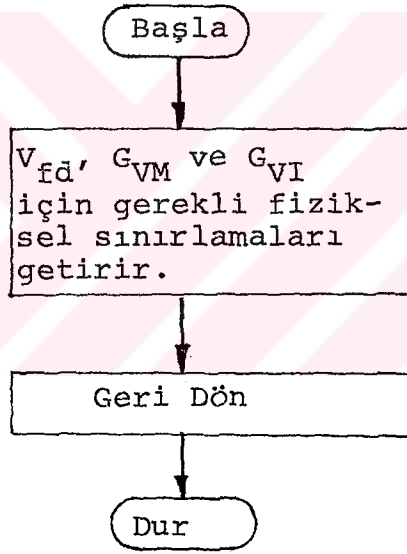


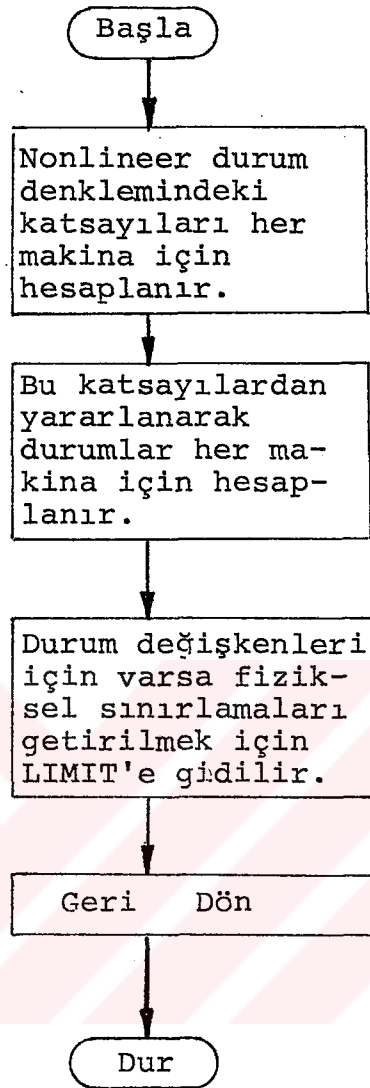


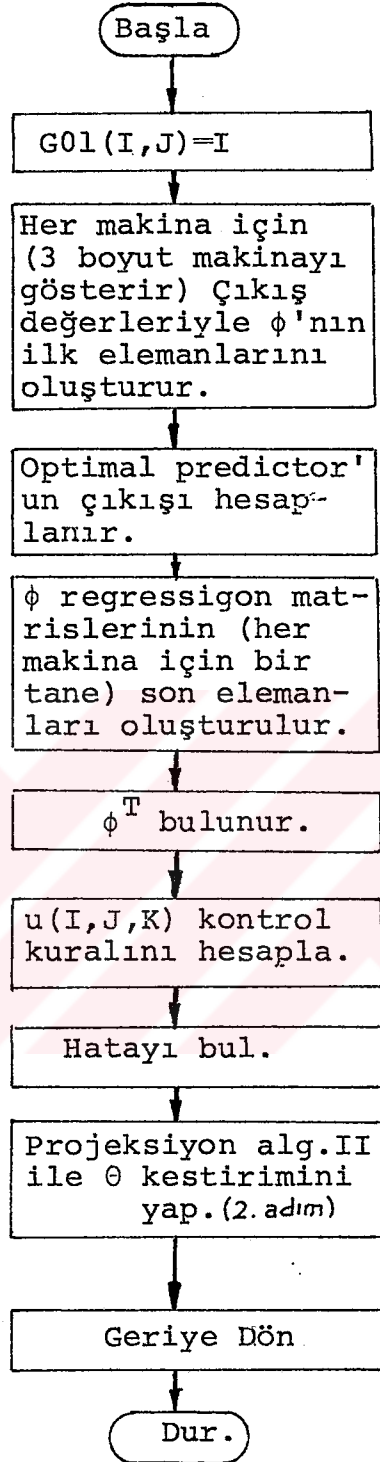
RUM



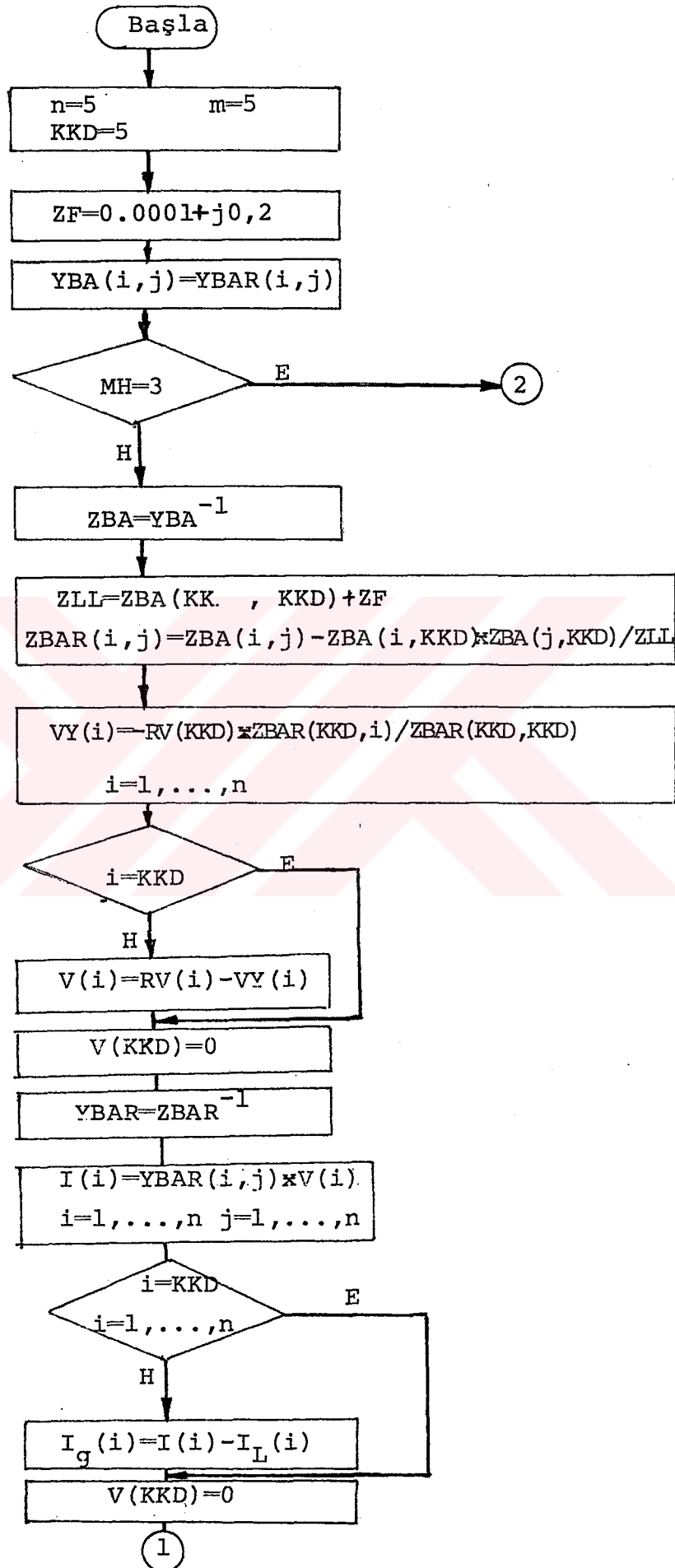
IT

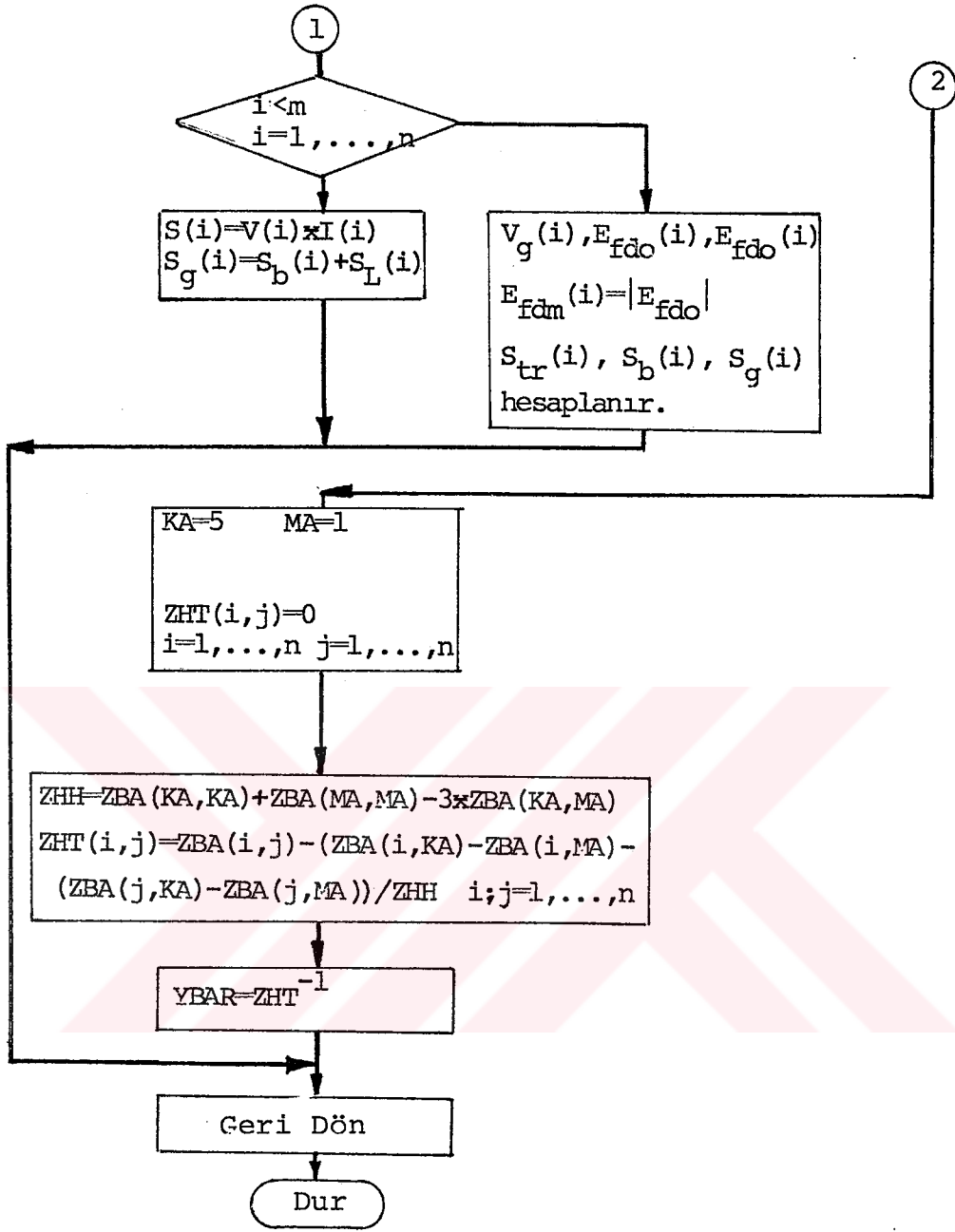






EĞİŞ





ÖZGEÇMİŞ

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANİZASYON MERKEZİ

Ayşen Demirören 1959 yılında Bursa'da doğdu. İlkokulu Bursa Atatürk İlkokulunda, orta ve lise eğitimini Bursa Kız Lisesi'nde tamamladı. 1976-77 öğrenim yılında İ.T.Ü. M.M.F. Elektrik Bölümü'ne girdi. 1982 yılında İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsünde Elektrik Enerji kolunda Yüksek Lisans yapmaya başladı. 1985 yılında aynı Enstitüde Doktora eğitimine başlayan Ayşen Demirören 1982 yılından bu yana İ.T.Ü. Elektrik-Elektronik Fakültesi Elektrik Tesisleri Anabilim Dalı'nda Araştırma Görevlisidir.