

**ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMİNİN AYRINTILI MODELİ
İLE GEÇİCİ KARARLILIK ÇÖZÜMLEMESİ**

**Y.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Y. Cansın EVRENOSOĞLU
504981007**

101383

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 11 Haziran 2001
Tezin Savunulduğu Tarih : 25 Haziran 2001**

**Tez Danışmanı :
Diğer Jüri Üyeleri**

Doç.Dr. Hasan DAĞ

Prof.Dr. Nejat TUNCAY

Doç.Dr. Hasan SAYGIN

Hasan Day

24 Temmuz 2001

H. Saygin

[Signature]

HAZİRAN 2001

ÖNSÖZ

Böyle zevkli bir konuda çalışmamı sağlayan ve beni yönlendiren değerli hocam Sayın Doç.Dr.Hasan DAĞ'a, eğitim hayatım boyunca bana maddi ve manevi destek olan aileme, sevgili arkadaşlarım Y.Müh.Banu ÖZTÜRK UÇAR'a,Y.Müh.Engin YEŞİL'e,Y.Müh. Ekrem GÜRSOY'a, Müh. Hakan ÖZCAN'a ve Müh. Feyza BERBER'e teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Yazım aşamasında kullandığım Latex programı ile ilgili sorunlarımda yardımlarını esirgemeyen Yrd.Doç.Dr. Deniz YILDIRIM'a teşekkürü borç bilirim.

Haziran 2001

Müh.Yaman Cansın EVRENOSOĞLU

İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ	iv
ŞEKİL LİSTESİ	v
SEMBOL LİSTESİ	vi
ÖZET	vii
SUMMARY	viii
1. GİRİŞ	1
1.1. Güç Sistemlerinde Kararlılık	1
1.2. Geçici Kararlılık Çözümlemesi	2
1.3. Çözümlemede Kullanılan Yinelemeli Yöntemler	4
2. KLASİK MODEL İLE GEÇİCİ KARARLILIK ÇÖZÜMLEMESİ	6
2.1. Elektrik Güç Sisteminin Klasik Modeli	6
2.2. Salınım Denkleminin Çözümü	8
2.2.1. Tek Adımlı Yöntemler	9
2.2.2. Doğrusal Çok Adımlı Yöntemler	11
2.3. Klasik Modelin Eksiklikleri	12
2.4. Uygulama	14
3. AYRINTILI MODEL İLE GEÇİCİ KARARLILIK ÇÖZÜMLEMESİ	17
3.1. Giriş	17
3.2. Elektrik Güç Sisteminin Ayrıntılı Modeli	17
3.3. Benzetim Yöntemleri	22
3.3.1. Sayısal İntegrasyon Yöntemi	23
3.3.2. Newton-Raphson Yöntemi	23
3.3.3. Doğrusal Denklem Sisteminin Çözüm Yöntemleri	24

3.4. Uygulama	29
5. SONUÇLAR	31
KAYNAKLAR	32
EKLER	33
ÖZGEÇMİŞ	45



TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Jeneratör Verileri.....	14
Tablo 2.2. Güç Akışı Sonuçları.....	15
Tablo 3.1. Uyarma Regülatörü Veriler.....	29
Tablo 3.2. Tüm Değişkenlerin Başlangıç Değerleri.....	30



ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : 3 jeneratörlü 9 baralı güç sistemi.....	15
Şekil 2.2 : Çözümleme Sonuçları-1.....	16
Şekil 2.3 : Çözümleme Sonuçları-2.....	16
Şekil 3.1 : Senkron Makina.....	19
Şekil 3.2 : IEEE 1. Tip Uyarma Regülatörü.....	19
Şekil 3.3 : Çözümleme Sonuçları-Ayrıntılı Model.....	30



SEMBOL LİSTESİ

i	: Bara veya jeneratör numarası
G_{ij}	: i. bara ile j. bara arasındaki transfer kondüktansı
B_{ij}	: i. bara ile j. bara arasındaki transfer süseptansı
ω_i	: i. jeneratörün açısal hızı
ω_{senk}, ω_s	: Senkron hız
D_i	: i. jeneratörün sönüm katsayısı
$D_i \cdot \omega_i$	: i. jeneratörün sönümlendirici gücü
δ_i	: i. jeneratörün rotor açısı
H_i, M_i	: i. jeneratörün eylemsizlik sabiti
X_d	: i. jeneratörün d-eksen geçici reaktansı
X_q	: i. jeneratörün q-eksen geçici reaktansı
R_s	: i. jeneratörün stator direnci
I_i	: i. jeneratörün stator akımı
I_{di}	: i. jeneratörün d-eksen akımı
I_{qi}	: i. jeneratörün q-eksen akımı
E_i	: i. jeneratörün geçici reaktans gerisindeki gerilimi (emk)
E_{di}	: i. jeneratörün d-eksen uyarma akısının hava aralığı akısına oranı
E'_{qi}	: i. jeneratörün q-eksen sönüm akısının hava aralığı akısına oranı
E_{fdi}	: i. jeneratörün uyarma gerilimi
P_{mi}, T_{mi}	: i. jeneratöre verilen mekanik giriş gücü
P_{ei}, T_{ei}	: i. jeneratöre ait elektriksel çıkış gücü
V_i	: i. baranın geriliminin genliği
θ_i	: i. baranın geriliminin açısı
P_{Li}	: i. baradan sisteme verilen aktif güç
Q_{Li}	: i. baradan sisteme verilen reaktif güç
T_{d0i}	: i. jeneratörün uyarma sargısının zaman sabiti
T_{q0i}	: i. jeneratörün sönüm sargısının zaman sabiti
T_{ei}, T_{ai}, T_{fi}	: Uyarma regülatörünün zaman sabitleri
K_{ei}, K_{ai}, K_{fi}	: Uyarma regülatörünün kazançları
R_{fi}, V_{ri}	: Uyarma regülatörünün durum değişkenleri

ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMİNİN AYRINTILI MODELİ İLE GEÇİCİ KARARLILIK ÇÖZÜMLEMESİ

ÖZET

Bu çalışmada, elektrik güç sistemlerinde geçici kararlılık probleminin çözümlenmesine neden gerek duyulduğu ve çözümlemenin nasıl yapıldığı anlatılmıştır. Elektrik güç sisteminin klasik ve ayrıntılı modelleri ayrı ayrı ele alınmış ve her iki model için de IEEE'nin örnek 3 jeneratörlü 9 baralı sistemi üzerinde geçici kararlılık çözümlemesi yapılmıştır. Klasik modelin yetersizliği nedeniyle ayrıntılı model üzerinde durulmuştur. Ayrıntılı model kullanılarak elde edilen sistemin çözümünde cebrik hale dönüştürülen diferansiyel denklemler ile doğrusal olmayan cebrik denklem sisteminin beraber çözümünde kullanılan Newton-Raphson yönteminde ortaya çıkan doğrusal denklem sisteminin çözümü için yinelemeli çözüm tekniklerinin kullanılabilirliği incelenmiştir. Çözümleme sonuçları jeneratör açılarını ve açı farklarını içeren grafikler olarak ilgili bölümlerinin sonlarına eklenmiştir. Çözümleme için gerekli olan programlar MATLAB ile yazılmıştır.

THE DETAILED MODEL FOR POWER SYSTEM TRANSIENT STABILITY

SUMMARY

This work is about why the problem of Power System Transient Stability Analysis is important and how it is done. Both classical and detailed models of power system are explained separately and the transient stability analysis of the classical 3 generator 9 bus system of IEEE is done for both models. The general classical model is usually inefficient. Thus, in this thesis the detailed model of the power system is used. The Newton-Raphson method is used for the solution of the algebraized differential equations and the nonlinear algebraic equations simultaneously. At the each iteration of the Newton's method, the usability of the iterative methods for the solution of the equations of linear system are investigated. The results of the analysis are appended to the end of the relevant chapters. The transient stability programs are written in MATLAB.

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Günümüzde enterkonekte güç sistemi, elektrik üretim, iletim ve dağıtım şebekelerinden oluşmaktadır. Enterkonekte sistemde esas amaç sistemin güvenilirliğini artırmak ve güç sisteminin daha ekonomik işletilmesini sağlamaktır. Avantajlarının yanı sıra enterkonekte sistemin getirdiği problemler de göz ardı edilemeyecek kadar önemlidir. Bunlardan birisi de sistemin güvenliğinin tahminindeki zorluktur.

1.1 Güç Sistemlerinde Kararlılık

Güç sistemlerinin güvenliği sistemin kararlılığı ile ölçülür. Güç sistemlerinde kararlılık, bir bozucu etkiye maruz kalan sistemin bozucu etki sonrası, önceki çalışma koşullarına veya kararlı bir çalışma konumuna dönme yeteneği anlamındadır. Sistem, sisteme ilişkin giriş ve çıkış enerjileri arasında sürekli bir uyum bulunması halinde kararlı olarak çalışabilir. Burada giriş olarak türbinin senkron jeneratöre verdiği mekanik güç, çıkış olarak da tüketicilerin talep ettiği ve senkron jeneratörün sağladığı elektriksel güç kastedilmektedir. Ani yük değişimleri, hatlarda meydana gelen kısa devreler, hat kopmaları gibi durumlar büyük bozucu etkilere sahiptir. Büyük bozucu etkiyi takip eden bir kaç saniye sistemin kararlılığı için çok önemlidir. Jeneratör(rotor) dinamiği kararlılık çözümlemesinde başlıktır. Sistemin çözümünün karmaşık olması, kararlılık çözümlemesinin sınıflandırılmasını gerektirir. Kararlılık üç ana başlıkta incelenebilir [1].

- Geçici Hal Kararlılığı
- Dinamik Hal Kararlılığı
- Sürekli Hal Kararlılığı

Senkronizmanın ani olarak kaybının söz konusu olduğu ani yük değişimleri, enerji iletim hatlarındaki kısa devreler gibi büyük bozucu etkilere sistemin cevabı “Geçici Hal Kararlılığı” olarak adlandırılır. Geçici hal çözümlemesi ile bozucu etkiden sonraki bir kaç saniyelik süre için sistemin çözümlemesi yapılır. Güç iletim

sistemlerinde meydana gelen büyük bozucu etkiler sonrası sistemin kararlılığını jeneratörlerin rotor açıları belirler ve çözümlemelerde rotor açılarının salınımları izlenir. Sistemin senkronizmada kalma yeteneği, ilk salınımdan sonraki salınımların ilkinden daha küçük olmasıyla belirlenir. Geçici kararlılık çözümlemesinde rotor açısına ait ilk iki salınım elde edilir. Çözümlemenin yapıldığı süre boyunca mekanik regülatörlerin devrede olmadığı varsayılır [1].

Birkaç saniyelik geçici olay süresinden sonra, diğer bir değişle mekanik regülatörlerin de devrede olduğu birkaç dakikalık sürede sistemin bozucu etkiye ya da küçük yük değişimlerine cevabı “Dinamik Hal Kararlılığı” olarak adlandırılır. Sistem dinamik olarak kararlı ise jeneratörlerin rotor açılarının salınımları birkaç salınımdan sonra küçülerek yeni bir çalışma noktasına oturacaktır.

Beklenen yük değişimleri ya da küçük bozucu etkilere karşı sistemin cevabı “Sürekli Hal Kararlılığı” olarak adlandırılır. Sürekli hal çözümlemesinde güç sisteminin anlık davranışı incelenir. Dolayısıyla sürekli hal çözümlemesi zamandan bağımsız olarak yapılır.

Bu çalışmada sistemin kararlılığı açısından büyük öneme sahip olan geçici hal durumu sistemin ayrıntılı modeli esas alınarak incelenecektir. Dinamik ve sürekli hal kararlılık çözümlemeleri hakkında ayrıntılı bilgi için [2] ve [3] numaralı kaynaklara başvurulabilir.

1.2 Geçici Kararlılık Çözümlemesi

Güç sisteminin modeline göre geçici kararlılık çözümlemesinin karmaşıklığı farklı olacaktır. Çok makinalı bir güç sisteminin klasik modelinin geçici kararlılık analizinde 5 adet varsayım yapılır.

- (1) Geçici olay süresince mekanik giriş enerjileri sabittir
- (2) Sönüm sargılarının etkileri ihmal edilir
- (3) Senkron makinalar için klasik model kullanılır
- (4) δ rotor açısı, geçici reaktans gerisindeki gerilimin yani elektromotor kuvvetin açısına eşit olarak alınır
- (5) Sistemdeki yükler pasif empedanslarla modellenir

Bu varsayımlar yapıldıktan sonra sırayla aşağıdaki işlemler gerçekleştirilir:

- Sisteme ait bara gerilimlerinin, jeneratör akımlarının ve jeneratör çıkış güçlerinin belirlenmesi için güç akışı yapılır. Elde edilen gerilim, akım ve güç değerleri başlangıç değerleridir. Jeneratörlere ait mekanik giriş

güçleri elektriksel çıkış güçlerine eşitlenerek çözümleme boyunca değişmeyecek değerler elde edilir. Jeneratörlere ait açısal frekansların ilk değerleri senkron açısal frekansa ayarlanır. Sistemdeki yükler admitans değerleri cinsinden ifade edilir.

- Jeneratörlerin iç gerilimleri ve iç açıları; $\widetilde{E}_i = E_i \angle \delta_i = \widetilde{V}_{Gi} + (jX'_{di})\widetilde{I}_i$, ($i=1,2,\dots,n$) bağıntısıyla hesaplanır. Gerilim genliklerinin (E_n) çözümleme boyunca sabit kaldığı varsayılmıştır. Hesaplanan gerilim açıları ise sayısal yöntemde kullanılacak güç açılarının başlangıç değerleri olarak alınacaktır.
- Tüm jeneratörler için eylemsizlik sabiti (H) ve X'_d geçici reaktanslar belirlenir.
- Sisteme ait bara admitans matrisi oluşturulur ve jeneratör baraları haricindeki baralar denklemlerden yok edilerek indirgenmiş bara admitans matrisi elde edilir.
- Bozucu etkinin yerine ve tipine uygun olarak bara admitans matrisi ve dolayısıyla indirgenmiş bara admitans matrisi güncellenir. Çözümleme için anahtarlama zamanı da belirlenir.
- Klasik modelde kullanılan diferansiyel denklemlere ait veriler artık hazırdır ve bu denklemlerin sayısal yöntemle çözümü yapılır.

Klasik model ele alınarak yapılan geçici kararlılık çözümlemesi gerçek sistemin benzetimi yerine sistem hakkında sadece bir fikir verir. Güç sisteminin gerçeğe yakın benzetimi için ise ayrıntılı model kullanmak gerekir. Güç sisteminin ayrıntılı modeli kullanıldığında jeneratör dinamiğine ait diferansiyel denklemlerle, jeneratöre ve sisteme ait doğrusal olmayan cebrik denklem sistemlerinin çözümü geçici kararlılık problemini oluşturur. Dolayısıyla bu modelde jeneratör dinamiğine ait diferansiyel denklemler sadece salınım denklemleriyle sınırlı değildir. Rotor dinamiği ve uyarma regülatörü dinamiği de hesaba katılarak daha hassas bir yaklaşım elde edilmiştir. Benzetimin gerçeğe yakın olması çözülecek denklemlerin sayılarının artmasına ve dolayısıyla sonuca yakınsama sürelerinin artmasına neden olmaktadır.

Güç sistemi işletiminde *geçici hal kararlılık programının* kullanımında en büyük problem, programın ihtiyaç duyduğu bilgisayar hızı ve bellek kapasitesidir. Sürekli hal kararlılık çözümlemesinde kullanılan bir yük akışı programı, geçici hal kararlılık programı kadar bilgisayar ve hesaplama teknolojisine ihtiyaç duymaz çünkü, geçici hal kararlılık çözümlemesinde kullanılan cebrik denklem sistemi çok daha büyüktür ve sürekli haldekine oranla binlerce kez tekrarlama gerektirir.

Diğer yandan çok makinalı bir güç sisteminin benzetimi; jeneratörlerin dinamiği ve kontrolleri ile güç sisteminin doğrusal olmayan cebrik denklemlerini kapsar. Günümüzde 50 jeneratörlü ve 200 baralı bir sistem için geçici kararlılık programı, 2 saniyelik bir zamanın benzetimi için 1-1.5 saate ihtiyaç duymaktadır. Geçici kararlılık programlarının hızını arttırmak için çeşitli yöntemler araştırılmakta ve çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalar farklı algoritmalar, sayısal teknikler veya güç sisteminin farklı modelleri üzerine olduğu gibi yöntemlerin farklı bilgisayar donanım yapıları üzerinde denenmesiyle de olmaktadır. Bu tip yapılara en güncel örnek çok işlemcili bilgisayarlardır. Çok işlemcili bilgisayarlarda temel; koştur programlama tekniklerinin kullanılması yöntemiyle tek işlemcinin yapacağı işi, birden çok işlemciye dağıtarak çözümlemenin hızını yükseltmeye dayanmaktadır.

1.3 Çözümlemede Kullanılan Yinelemeli Yöntemler

Güç sistemine ait klasik model kullanıldığı zaman geçici kararlılık çözümlemesinde amaç, birinci dereceden iki adet diferansiyel denklemi sayısal yöntemle çözmektir. Bu sayısal yöntem Düzeltilmiş-Euler, Runge-Kutta gibi tek adımlı bir yöntem veya Adam-Bashfort, Adam-Moulton veya Tahmin Etme-Düzeltme gibi doğrusal çok adımlı bir yöntem olabilir. Bu yöntemler arasında seçim yapılırken göz önüne alınan etken, yöntemin yakınsama hızı ve hata mertebesidir. Güç sisteminin ayrıntılı modeli kullanılarak gerçek çözüme yakın çözümler elde edilir ve elde edilen çözümlerden faydalanılarak sistemle ilgili doğru yorumlar yapılabilir. Bu model kullanılarak yapılan geçici kararlılık çözümlemesinde çözüm için çeşitli yaklaşımlar mevcuttur. Tüm yaklaşımların kullandıkları sayısal çözüm yöntemleri ise aynıdır, sadece uygulanış sırasında veya uygulama biçiminde farklılıklar vardır.

Sayısal yöntemler;

- Diferansiyel denklem takımını doğrusal olmayan cebrik bir denklem takımı haline getirmek için kullanılan sayısal yöntemler,
- Doğrusal olmayan cebrik denklem takımını çözmek için kullanılan Newton-Raphson yöntemi,
- Newton-Raphson yönteminin her bir adımında $Ax = b$ gibi doğrusal denklem sistemini çözen LU ayrıştırma yöntemi veya "Conjugate Gradient"(CG), "Generalized Minimal Residual"(GMRES) gibi yinelemeli sayısal yöntemlerdir.

Biraz evvel de bahsettiğimiz gibi geçici kararlılık çözümlemesinde hesaplama hızı çok önemlidir. Tatmin edici hız ya algoritma veya yöntem seçimiyle ya da bilgisayar donanım yapısındaki değişiklikler ile sağlanır. Sayısal yöntemlerin birbir-

lerine göre üstünlükleri, sonuca yakınsama hızlarıyla ve farklı bilgisayar mimarisine sağladıkları uyumla belirlenir. Kararlılık çözümlemesi gibi büyük boyutlarda işlem gerektiren çalışmalarda koşut programlama yaygın olarak tercih edilmektedir. Kullanılacak sayısal yöntem seçilirken bu yöntemin koşut programlamaya uyumu göz önüne alınmalıdır.

Bu çalışmanın 2. bölümünde güç sisteminin klasik modeli tanıtılacak ve kullanılan sayısal çözüm yöntemleri açıklandıktan sonra bir uygulama ile açıklamalar pekiştirilecektir. Bölüm 3'te güç sisteminin ayrıntılı modeli tanıtılacak ve bu model kullanılarak yapılan geçici kararlılık çözümlemesinde kullanılan yöntemler tanıtılarak yöntemlerin birbirlerine olan üstünlüklerine değinilecek ve Bölüm 2'deki örnekte ele alınan sistem ayrıntılı model kullanılarak incelenecektir. Bölüm 4'de ise uygulama sonuçları yorumlanacak ve bu çalışmanın devamında gerçekleştirilmesi planlanan çalışmalar anlatılacak, sayısal yöntemlerin uygulanması bakımından geliştirilebilecek katkılar hakkında tartışma yapılacaktır.



BÖLÜM 2

KLASİK MODEL İLE GEÇİCİ KARARLILIK ÇÖZÜMLEMESİ

2.1 Elektrik Güç Sisteminin Klasik Modeli

Bu bölümde güç sisteminin klasik modelinin geçici kararlılık çözümlemesini yapabilmek için kullanılan farklı sayısal çözüm yöntemleri tanıtılacaktır. Klasik model, jeneratörün [2] numaralı kaynakta verilmiş ayrıntılı modelinden çıkarılır. Jeneratöre ait bu modelde sadece iki adet diferansiyel denklem ve iletim sistemine ait bir adet güç denklemi vardır.

Herbiri jeneratörün klasik modeliyle tanımlanmış n adet makinadan ve iletim sistemine ait sabit empedans yüklerinden oluşan bir güç sistemi düşünelim. Bu sistem, Kron İndirgenmesi [3] yöntemiyle herbiri jeneratör barası olan n adet baraya indirgenebilir. Güç sistemindeki diğer baralar Kron İndirgenmesi'nin bir sonucu olarak yok edilirler.

Bu güç sistemine ait bara admitans matrisi, jeneratör uçlarından bakıldığında aşağıdaki gibi olacaktır;

$$\tilde{I} = \tilde{Y} \tilde{E} \quad (2.1)$$

(2.1) numaralı denklemde $\tilde{Y}$ bara admitans matrisinin köşegen elemanları $\tilde{Y}_{ii}$ ile, köşegen dışı elemanları ise $\tilde{Y}_{ij}$ ile gösterilir. Tanım uyarınca;

$$\begin{aligned} \tilde{Y}_{ii} &= Y_{ii} \angle \theta_{ii} = G_{ii} + jB_{ii}: i \text{ barasına bağlı admitansların toplamı,} \\ \tilde{Y}_{ij} &= Y_{ij} \angle \theta_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}: i. \text{ bara ile } j. \text{ bara arasındaki admitansların toplamının ters işaretlisi,} \\ \tilde{E} &= E \angle \delta \end{aligned}$$

jeneratörün iç gerilimi (elektromotor kuvvet) olmak üzere i . jeneratörün sisteme verdiği güç, $P_i = \text{Re}(\tilde{E}_i \tilde{I}_i^*)$ den hesaplanarak aşağıdaki eşitlikten bulunur;

$$P_{ei} = E_i^2 G_{ii} + \sum_{i=1, i \neq j}^n E_i E_j Y_{ij} \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.2)$$

Jeneratöre ait salınım denklemi ise, P_{mi} jeneratöre verilen mekanik giriş gücü, P_{ei} jeneratörün elektriksel çıkış gücü, H jeneratörün eylemsizlik sabiti ve $i=1,2,\dots,n$ olmak üzere;

$$\left(\frac{2H_i}{\omega_{senk}}\right)\ddot{\delta}_i = P_{mi} - P_{ei} \quad (2.3)$$

olarak ifade edilir. Eğer (2.2) numaralı denklem, (2.3) numaralı denklemde yerine konur ve $\dot{\delta}_i = \omega_i - \omega_{senk}$ ve $\ddot{\delta}_i = \dot{\omega}_i$ olduğu göz önüne alınırsa, ikinci dereceden bir diferansiyel denklem olan (2.3) numaralı salınım denklemi, birinci dereceden iki adet diferansiyel denklem haline gelir;

$$\left(\frac{2H_i}{\omega_{senk}}\right)\dot{\omega}_i = P_{mi} - (E_i^2 G_{ii} + \sum_{i=1, i \neq j}^n E_i E_j Y_{ij} \cos(\theta_{ij} - \delta_i - \delta_j)) \quad (2.4)$$

$$\dot{\delta}_i = \omega_i - \omega_{senk} \quad (2.5)$$

Arıza öncesi durum ($t = 0^-$) için $P_{mi0} = P_{ei0}$ dır;

$$P_{mi0} = E_i^2 G_{ii0} + \sum_{i=1, i \neq j}^n E_i E_j Y_{ij0} \cos(\theta_{ij0} - \delta_{i0} + \delta_{j0}) \quad (2.6)$$

Burada “0” indisi arıza öncesi normal çalışma durumunu göstermektedir. Yukarıdaki denklemlerde kullanılan değişkenlerin listesi aşağıda verilmiştir. Sabit empedans yükleri, G_{ij} ve B_{ij} katsayılarında görülmektedirler. G_{ij} ve B_{ij} değerleri, geçici hal öncesinde, sırasında ve sonrasında farklı değerlere sahiptirler.

Simge	Açıklama	Birim
i	: Bara(düğüm) numarası	-
$D_i \cdot \omega_i$	: Sönümlendirici güç	pu
G_{ij}	: i. bara ile j. bara arasındaki transfer kondüktansı	pu
B_{ij}	: i. bara ile j. bara arasındaki transfer süseptansı	pu
ω_i	: i. jeneratörün açısal hızı	rad/s
ω_{senk}	: Senkron hız	rad/s
δ_i	: i. jeneratörün rotorunun konumu	rad
H_i	: i. jeneratörün eylemsizlik sabiti	pu · s
X'_d	: i. jeneratörün geçici reaktansı	pu
I_i	: i. jeneratörün stator akımı	pu
E_i	: i. jeneratörün geçici reaktansı arkasındaki gerilimi	pu
P_{mi}	: i. jeneratöre verilen giriş gücü	pu

Sisteme ait denklemleri kapalı formda yazalım. x_i , δ_i rotor açılarını ve ω_i

açışal hızlarını içeren bir vektör ve u 'yu da P_{mi} mekanik girişlerini ifade eden bir vektör olarak tanımlayalım;

$$\dot{x} = f^a(x, u) \quad 0 < t \leq t_{tem} \quad (2.7)$$

$$\dot{x} = f^{as}(x, u) \quad t > t_{tem} \quad (2.8)$$

Burada, $f^a(x, u)$ arızalı durumu, $f^{as}(x, u)$ arıza temizlendikten sonraki durumu, t_{tem} ise arızanın temizlendiği anı ifade etmektedir. Arıza temizleme zamanı t_{tem} nin kapalı bir parametre olduğu düşünülürse, yukarıdaki iki denklem aşağıdaki şekilde yazılabilir;

$$\dot{x} = f(x, u), \quad x(0) = x_0, \quad t \geq 0 \quad (2.9)$$

Güç sisteminin geçici kararlılık benzetiminde hesaplama gerektiren iki adım vardır:

- (1) Kron İndirgemesi yöntemiyle (2.4) ve (2.5) numaralı denklemlerle gösterilen, sadece jeneratör baralarını içeren indirgenmiş sistemi elde etmek,
- (2) (2.7) ve (2.8) numaralı denklemleri sayısal yöntem ile çözmek.

Bu çalışmada sadece ikinci adımla ilgilenilecektir.

2.2 Salınım Denkleminin Çözümü

Güç sisteminin klasik modelinde karşımıza çıkan iki adet birinci dereceden diferansiyel denklemi çözme problemi bir *ilk değer* problemidir. Denklemler doğrusal olmadıkları için bu ilk değer problemi sayısal yöntemlerle çözülebilir. Tüm yöntemler, zaman eksenini küçük Δt aralıklarına bölerler ve her bir aralığın sonunda fonksiyonun aldığı değeri hesaplarlar. Bu işlem yapılırken üç ana problem vardır;

- Sayısal yöntemi başlatmak
- Hesaplamanın hızı
- Yapılan hata ve hatanın büyümesi

Bazı yöntemler kendi kendilerine başlayabilirken bazı yöntemlerde böyle bir yapı yoktur. Daha fazla hız ve doğruluk elde edebilmek için, hesaplamaya kendi kendine başlama yeteneği olan bir yöntemle başlayıp, daha sonra diğer bir yönteme geçilebilir. Sayısal yöntemlerde, sonuca yakınsama hızı çok önemlidir

çünkü, bilgisayarların bilinen hızlarına rağmen, güç sistemleri gibi çok büyük sistemlerle ilgili herhangi bir işlem, çok sayıda hesaplamaya gerek duyduğu için zaman açısından pahalıya mal olabilir. Bu zaman kaybı ise güç sisteminde meydana gelen bir arıza sonucu alınacak önlemlerde gecikilmesine ve büyük maddi hasarlara neden olabilir. Örnek olarak, Δt zaman aralığını küçük seçmekle daha fazla doğruluk elde edilebilir ancak bu durumda da yakınsama hızının azalacağı unutulmamalıdır. Bunun yanında en önemli husus Δt nin gereğinden çok küçültülmesinin de doğruluktan uzaklaşmaya neden olacağıdır. Bunun sebebi ise bilgisayarın kesme, yuvarlama hataları ve çıkarma işlemlerinden kaynaklanan birikmiş hatalardır.

Bir ilk değer problemi en genel halde aşağıdaki şekilde veya bizim

$$\dot{y} = f(t, y), \quad y(t_0) = y_0 \quad (2.10)$$

problemimizde (2.9) şeklinde gösterilmektedir ve bu problemi çözmek için kullanılan yöntemler, tek adımlı yöntemler ve doğrusal çok adımlı yöntemler olmak üzere iki ana başlıkta incelenebilir.

2.2.1 Tek Adımlı Yöntemler

Tek adımlı yöntemlerde, (2.10) numaralı problemin çözümü sırasında $t = t_n$ anındaki veriden faydalanarak $t = t_{n+1}$ için bilinmeyen $f(t_{n+1})$ değerine yaklaşık bir $\phi(t_{n+1})$ değeri hesaplanır. Başka bir deyişle herhangi bir t anında hesaplanan ϕ değeri bir önceki t anına bağlıdır. Tek adımlı yöntemler kendi kendilerine başlayabilen yöntemlerdir. Euler, Düzeltilmiş Euler, Runge Kutta yöntemleri tek adımlı yöntemlerin başlıcalarıdır.

Unutulmamalıdır ki tüm sayısal çözüm yöntemleri belli oranda hatayla sonuca yakınsarlar. Bu hata, genel veya yerel kesme hataları ile yuvarlama hatalarından meydana gelir. İlk değer problemi (2.10)'nun çözümü $y = \phi(t)$ ile bu çözümün sayısal olarak karşılığı arasındaki fark τ_n ;

$$\tau_n = \phi(t_n) - y_n \quad (2.11)$$

olarak verilir ve bu hata *genel kesme hatası* olarak adlandırılır. Bu hatanın iki nedeni vardır:

- Her adımda y_{n+1} 'i tayin etmek için yaklaşık bir formül kullanılması,
- Her adımda, bir önceki adımdan hesaplanarak elde edilen veri yaklaşık olarak doğrudur ve bu yüzden $\phi(t_n) = y_n$ 'e eşit değildir. Eğer $\phi(t_n) = y_n$ olarak alınırsa her adımda ortaya çıkacak hatanın nedeni kullanılan yaklaşık formül olur ve *yerel kesme hatası* e_n olarak adlandırılır.

Hataya neden olan diğer bir etken ise; bilgisayarın tüm işlemleri sonlu sayıda basamakla yapmasıdır. Bu da yuvarlama hatası R_n olarak bilinir. $\phi(t_n)$ hesaplanırken yapılan toplam hata, kesme ve yuvarlama hatalarının mutlak değerleri toplamıyla üstten sınırlıdır.

Euler yöntemi, (2.10) problemine aşağıdaki gibi bir yaklaşım getirir:

$$y_{n+1} = y_n + hf(t_n, y_n) \quad (2.12)$$

Burada h , adım uzunluğudur ve (Δt) olarak da düşünülebilir. Euler yönteminin yerel kesme hatası h^2 ile, genel kesme hatası ise h ile orantılıdır ve yeteri kadar doğru çözümler üretmez. Düzeltilmiş Euler yöntemi ise

$$y_{n+1} = y_n + \frac{f_n + f(t_n + h, y_n + hf_n)}{2}h \quad (2.13)$$

şeklinde verilir ve (2.13) formülünde $f_n = f(t_n, y_n)$ dir. Düzeltilmiş Euler yönteminin yerel kesme hatası h^3 ile orantılı iken genel kesme hatası ise h^2 ile orantılıdır ve dolayısıyla bu yöntem 2. dereceden bir yöntemdir. Euler yöntemine kıyasla daha az adımda, çok daha doğru sonuçlar üretir. Elde edilen bu doğruluk, her bir adımda fonksiyonun iki kez değerlendirilmesi ile sağlanırken, yapılan bu işlem hesaplama yükünü arttırmaktadır. Düzeltilmiş Euler yöntemi aynı zamanda açık bir yaklaşımdır yani y_{n+1} değerinin hesabında y_n değerinden faydalanılmaktadır. Kapalı Düzeltilmiş Euler yöntemi ise aşağıdaki gibidir,

$$y_{n+1} = y_n + \frac{f_n + f_{n+1}}{2}h \quad (2.14)$$

Kapalı denmesinin nedeni y_{n+1} değerinin hesabında $(n+1)$. değer de kullanılmasıdır. Eğer $f(t, y)$, y değişkenine değil de sadece t değişkenine bağlı olursa $y' = f(t, y)$ diferansiyel denklemini çözmek, sadece $f(t)$ ' nin integralini alma problemine dönüşür. Bu durumda Düzeltilmiş Euler yöntemi (2.13)

$$y_{n+1} = y_n - \frac{f(t_n) + f(t_n + h)}{2}h \quad (2.15)$$

halini alır. (2.15) numaralı eşitlik de sayısal integrasyon için yamuk kuralıdır. Kapalı yamuk kuralı ise,

$$y_{n+1} = y_n - \frac{f(t_n) + f(t_{n+1})}{2}h \quad (2.16)$$

şeklinde olacaktır.

Dördüncü dereceden 4 aşamalı Runge-Kutta yöntemi ise sadece Runge-Kutta yöntemi olarak anılır, h^5 ile orantılı bir yerel kesme hatasına ve h^4 ile orantılı bir genel kesme hatasına sahiptir. Düzeltilmiş Euler yönteminden 2 kat, Euler yönteminden 3 kat daha doğru sonuç verir. Kullanımı göreceli olarak daha

kolaydır ve birçok problemin çözümünde yeterli doğruluğu sağlayabilmektedir. Runge-Kutta yöntemi, $f(t,y)$ fonksiyonunun $t_n \leq t \leq t_{n+1}$ aralığında farklı noktalarda ağırlıklı ortalamasını içerir. Aşağıdaki şekilde verilir,

$$\begin{aligned} y_{n+1} &= y_n + \frac{k_{n1} + 2k_{n2} + 2k_{n3} + k_{n4}}{6} \cdot h, \\ k_{n1} &= f(t_n, y_n) \\ k_{n2} &= f(t_n + 0.5h, y_n + 0.5hk_{n1}) \\ k_{n3} &= f(t_n + 0.5h, y_n + 0.5hk_{n2}) \\ k_{n4} &= f(t_n + h, y_n + hk_{n3}) \end{aligned} \quad (2.17)$$

Tek Adımlı yöntemler hakkında ayrıntılı bilgi için [4] ve [5] numaralı kaynaklara ve geçici kararlılık çözümlemesinde uygulanmaları için [6] numaralı kaynağa başvurulabilir.

2.2.2 Doğrusal Çok Adımlı Yöntemler

Bir önceki kısımda anlattığımız gibi tek adımlı yöntemlerde fonksiyonun $t=t_n$ anındaki bilinen değerinden faydalanılarak $t=t_{n+1}$ anındaki fonksiyonun değerine yaklaşık bir $\phi(t_{n+1})$ değeri bulunur. Her bir adımda, sadece bir önceki adımda elde edilen veri kullanılır. Fonksiyonun t_1 anındaki değerinin y_1 olarak, t_2 anındaki değerinin y_2 olarak ve böyle devam ederek t_n anındaki değerinin y_n olarak bilindiğini varsayalım. Fonksiyonun $t=t_{n+1}$ anındaki değeri için yaklaşık bir $\phi(t_{n+1})$ değerinin hesabında önce hesaplanmış birden fazla değer ($y_1, y_2, \dots, y_n$) kullanıldığı yöntemlere *çok adımlı yöntemler* denir. Çok adımlı yöntemlerin sonuca yakınsama hızları ve doğruluk dereceleri tek adımlı yöntemlere göre daha fazladır. Fakat çok adımlı yöntemler kendi kendilerine başlayamazlar. Adams-Bashfort ve Adams-Moulton yöntemleri çok adımlı yöntemlerin başlıcalarıdır.

Fonksiyonun $(t_n, y_n), (t_{n-1}, y_{n-1}), (t_{n-2}, y_{n-2}), (t_{n-3}, y_{n-3})$ noktalarının bilinildiğini düşünürsek, 4. dereceden bir Adams-Bashfort yöntemi (2.10) problemine aşağıdaki gibi bir yaklaşım getirir;

$$y_{n+1} = y_n + \frac{(55f_n - 59f_{n-1} + 37f_{n-2} - 9f_{n-3})h}{24} \quad (2.18)$$

Bu yöntem açık bir yöntemdir. Açık olmasının anlamı fonksiyonun $(n+1)$. değerinin tahmini sırasında $n, (n-1), (n-2)$. ve $(n-3)$. değerleri kullanılmasıdır. Yöntem, h^5 ile orantılı bir yerel kesme hatasına sahiptir.

Adam-Moulton yöntemi ise fonksiyonun $(n+1)$. değerine ulaşmak için $n,$

(n-1). ve (n-2). değerleri kullanır. Yaklaşımı aşağıdaki gibidir;

$$y_{n+1} = y_n + \frac{(9f_{n-1} - 19f_n - 5f_{n-1} + f_{n-2})h}{24} \quad (2.19)$$

Bu yöntem, fonksiyonun (n+1). değerinin hesabında (n+1). değeri de kullandığı, yani kendi kendisini yenilediği için *kapalı* bir yöntemdir. Yerel kesme hatası Adams-Bashfort yöntemininki ile aynıdır. Ancak, Adams-Moulton yöntemi-ne kıyasla daha fazla doğrulukla sonuca yakınsar. Böyle bir durumda sorulacak en yerinde soru, açık ve daha hızlı olan Adams-Bashfort yönteminin mi, daha doğru sonuç veren, fakat, kapalı ve daha yavaş olan Adams-Moulton yönteminin mi kullanılacağıdır. Cevap, h adım uzunluğunu küçülterek ve dolayısıyla adım sayısını artırarak sonuca daha fazla doğrulukla yakınsayan yöntemin seçilmesidir.

Sayısal çözümlemede hem basitlik hem doğruluk hem de hız, aynı anda elde edilmek istendiğinden bu iki yöntem birleştirilmiş ve Tahmin Etme-Düzeltilme yöntemi ortaya çıkmıştır. y_n , y_{n-1} , y_{n-2} , y_{n-3} değerlerinin önceden bilindiği varsayılırsa f_n , f_{n-1} , f_{n-2} , f_{n-3} değerli hesaplanır ve Adams-Bashfort(tahmin eden) yönteminde (2.18) ile y_{n+1} için bir ilk değer tahmin edilir. Daha sonra f_{n+1} hesaplanır ve Adams-Moulton(düzeltilen) yöntemi (2.19) kullanılarak y_{n+1} için yeni bir değer elde edilir. Eğer y_{n+1} değerindeki değişim çok büyük ise Adams-Moulton yöntemi ile düzeltme yapmaya devam edilir. Eğer düzeltme yöntemini bir veya iki kezden daha fazla kullanmak gerekiyorsa bu, h adım uzunluğunun fazla büyük olduğu ve küçültülmesi gerektiği anlamına gelir.

Herhangi bir çok adımlı yöntemin kullanılması sırasında, gerekli olan başlangıç değerlerinin, (y_j) , başka bir yöntemle hesaplanması gerekir. Örnek olarak 4.dereceden Adams-Moulton yöntemi y_3 , y_2 , y_1 ve y_0 ile, 4. dereceden Adams-Bashfort yöntemi ise y_4 , y_3 , y_2 ve y_1 değerleri ile başlayabilir. Bu problemi aşmak için bir yol, doğruluk oranı göreceli olarak fazla olan bir tek adımlı yöntemle gerekli başlangıç değerlerini hesaplamaktır. Dördüncü dereceden çok adımlı bir yöntem için 4. dereceden Runge-Kutta yöntemi, başlangıç değerlerini elde etmek için kullanılır.

Çok adımlı yöntemler konusunda ayrıntılı bilgi için [4], [5] ve [7] numaralı kaynaklara başvurulabilir.

2.3 Klasik Modelin Eksiklikleri

Güç sisteminin klasik modeli ile geçici kararlılık çözümlemesi öncesi yapılan varsayımları tekrar gözden geçirelim:

- (1) *Sistemin geçici halde kararlı olup olmadığına ilk salınımda karar verilir.*

Güç sistemleri gibi çok fazla makinanın olduğu büyük sistemlerde, farklı

frekanslara sahip salınımlar meydana gelir. Bara sığaları görece küçük olduğundan bu frekanslar da düşüktür. En kötü salınımın, baraların frekanslarının aynı anda tepe değerlerine ulaştıkları zaman olacağı açıktır. Bu yüzden birçok çalışmada geçici kararlılık süresinin 1 saniyeden daha fazla tutulması gerekir [3].

- (2) *Jeneratör uyarma devresi akısı sabittir.* Bu varsayımın hatası iki başlıkta değerlendirilebilir. Birincisi, önceki maddede açıklanan çözümlemenin gerektirdiği daha fazla süre ve ikincisi ise, günümüzde kullanılan gerilim regülatörlerinin hızıdır. Uyarma devresi zaman sabiti ile, çözümlemede gerekli süre karşılaştırıldığında, uyarma devresi akısındaki değişimin ihmal edilmeyecek değerlerde olabildiği görülür. Sonuç olarak geçici reaktans gerisindeki gerilimin değişmediğini kabul etmek yanlış bir varsayımdır [3].
- (3) *Sönümlendirici güçler ihmal edilir.* Sistemin dinamik performansının en doğru şekilde incelenebilmesi için sistemde sönümlendirici etkisi olan tüm bileşenler modele dahil edilmelidir [2].
- (4) *Mekanik giriş gücü sabittir.* Çözümlemede birkaç saniye veya daha fazlası söz konusu ise mekanik girişin sabit olduğu varsayımı hiç de gerçekçi bir yaklaşım değildir. Türbin-güvernör karakteristikleri modele dahil edilmelidir [3].
- (5) *Yükler sabit pasif empedanslar ile gösterilir.* Bu varsayımı bir örnekle irdeleyelim. V gerilimli bir baradan beslenen ve baradan $P_L + jQ_L$ kadar güç çeken bir yük düşünelim. Yükümüz G_L ve B_L ile ifade edilen sabit admitansla gösterilsin. Burada $G_L = P_L/V^2$ ve $B_L = Q_L/V^2$ olacaktır. Herhangi bir geçici hal süresince gerilimin genliği V ve sistemin frekansı değişecektir. Klasik modelde, frekanstaki herhangi bir değişim yüke ait ne aktif ne de reaktif güce etkimezken, gerilimdeki en ufak bir değişim her ikisine de etkiyecektir. Başka bir ifade ile klasik modelde aktif ve reaktif güç frekanstan bağımsız iken, her ikisi de gerilimin karesiyle doğru orantılıdır. Şimdi bu varsayımın getirdiği yanlışları özetleyelim: İletim sisteminde meydana gelen bir arıza sistemde geçici bir duruma neden olsun. Bu arıza sistemdeki bir çok senkron jeneratörün çıkış güçlerinde azalmaya neden olacaktır. Bunun sonucu olarak da makinalar ivmelenmeye çalışacak ve sistem frekansı artacaktır. Bu arada iletim sisteminde meydana gelen bu arıza, arıza noktasının yakınındaki bara gerilimlerinin düşmesine yol açacaktır. Pasif empedans modelinde, gerilimin düşmesiyle yükün çektiği güç de düşecek fakat frekanstaki artım hiçbir

şekilde gücü etkilemeyecektir. Gerçekte güçteki azalma tam olarak V^2 ile orantılı olmamakla beraber bundan daha az bir değerle orantılıdır. Sistem frekansındaki artış yükün çektiği güçte de bir artışa neden olur. Dolayısıyla bu model, arıza sırasında, beklenenden daha az bir güç (yüke ait) değeri verirken, arıza sonrasında ise beklenenden daha fazla bir güç değeri vermektedir [3].

Buradan sonuçla klasik model, bir saniyeden daha uzun süreli geçici kararlılık çözümlerinde doğru sonuçları vermemekte, sadece kısa bir süre içinde sistem cevabı hakkında faydalı bilgi vermektedir. Üçüncü bölümde ele alınacak ayrıntılı model, birkaç saniyelik sürede gerçeğe yakın sonuçlar verebilecektir.

2.4 Uygulama

Bu uygulamada, Şekil 2.1 de verilmiş, IEEE ye ait 3 jeneratörlü 9 baralı güç sistemi ele alınmıştır. Sistemin geçici kararlılık çözümlemesi, Düzeltilmiş Euler yöntemiyle, h adım uzunluğu 0.005 alınarak gerçekleştirilmiştir. Birinci çözümleme; güç sisteminde 7 numaralı bara yakınlarında iletim sistemi üzerinde bir kysadevre meydana gelmesinin ve 0.083 s sonra ilgili hattın devreden çıkarılma-sının benzetimini, ikinci çözümleme ise 5 numaralı barada 0.5 pu luk bir aktif güç artışının benzetimini içermektedir. Her iki arızanın çözümleme sonuçları sırasıyla Şekil 2.2 de ve Şekil 2.3 de verilmiştir.

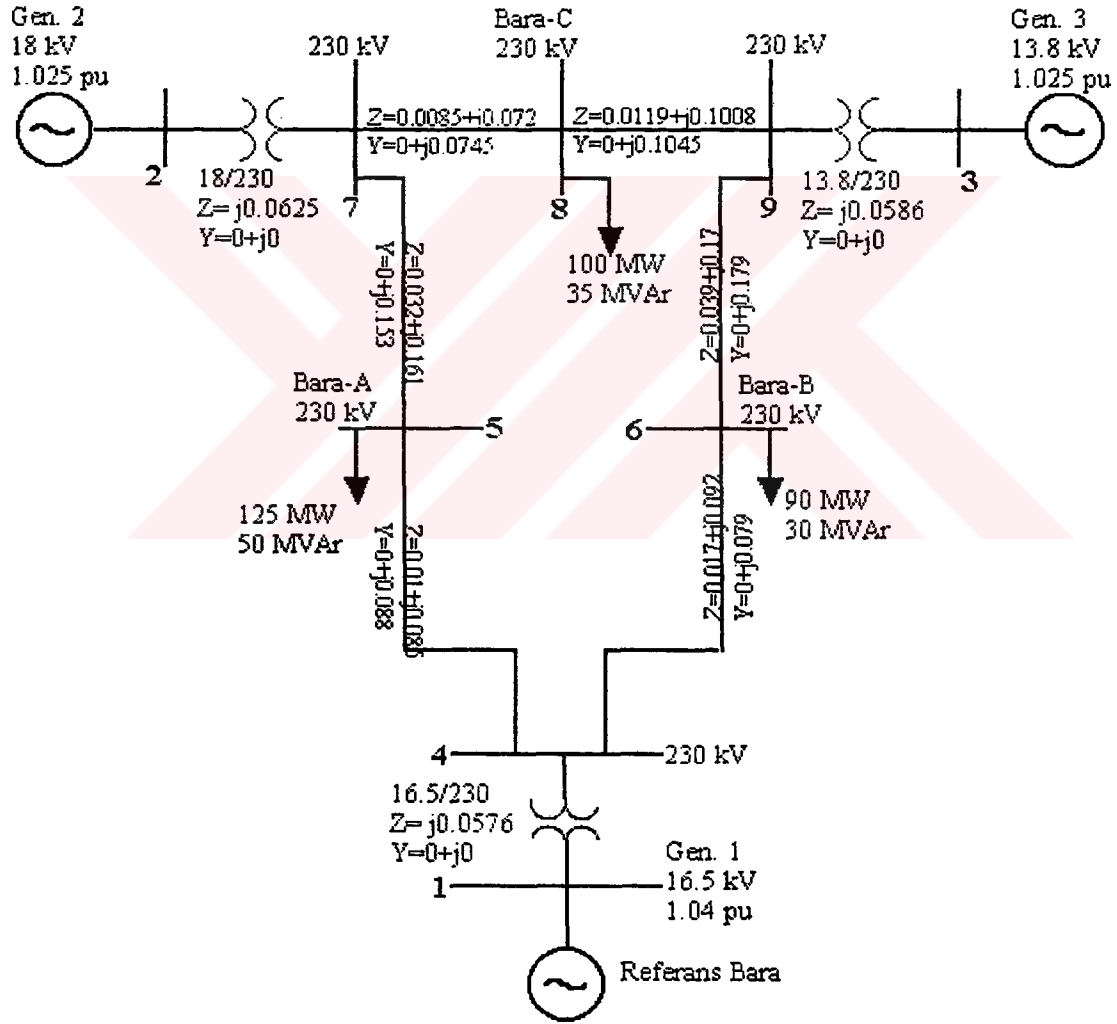
Güç sistemindeki jeneratörlere ait tüm veriler Tablo 2.1'de verilmiştir. Jeneratöre ait tüm reaktans değerleri 100 MVA baz güç üzerinden hesaplanmış pu değerlerdir. Güç sisteminin güç akışı sonuçları ise Tablo 2.2'de verilmiştir. Güç akışı sonuçları arasında verilen tüm gerilim ve güç değerleri pu cinsindendir. Güç sisteminin klasik modeli kullanılarak yapılan geçici kararlılık çözümlemesinin sonuçları olarak jeneratörlerin rotor açıları ve jeneratörlerin açı farkları verilmiştir.

Tablo 2.1: Jeneratör verileri

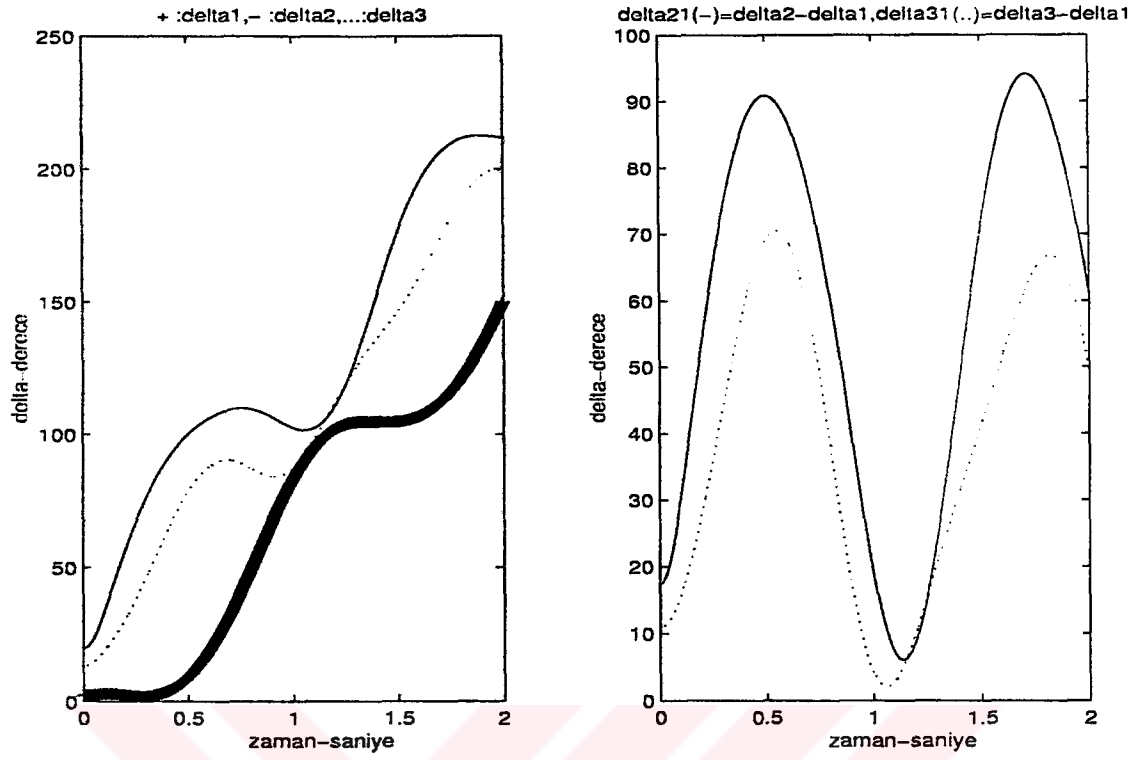
Jeneratör	1	2	3
$H(pu.s)$	23.64	6.4	3.01
X_d	0.146	0.8958	1.3125
X'_d	0.0608	0.1198	0.1813
X_q	0.0969	0.8645	1.2578
X'_q	0.0969	0.1969	0.25
$T'_{d0}(s)$	8.96	6.0	5.89
$T'_{q0}(s)$	0.31	0.535	0.6

Tablo 2.2: Güç Akışı Sonuçları

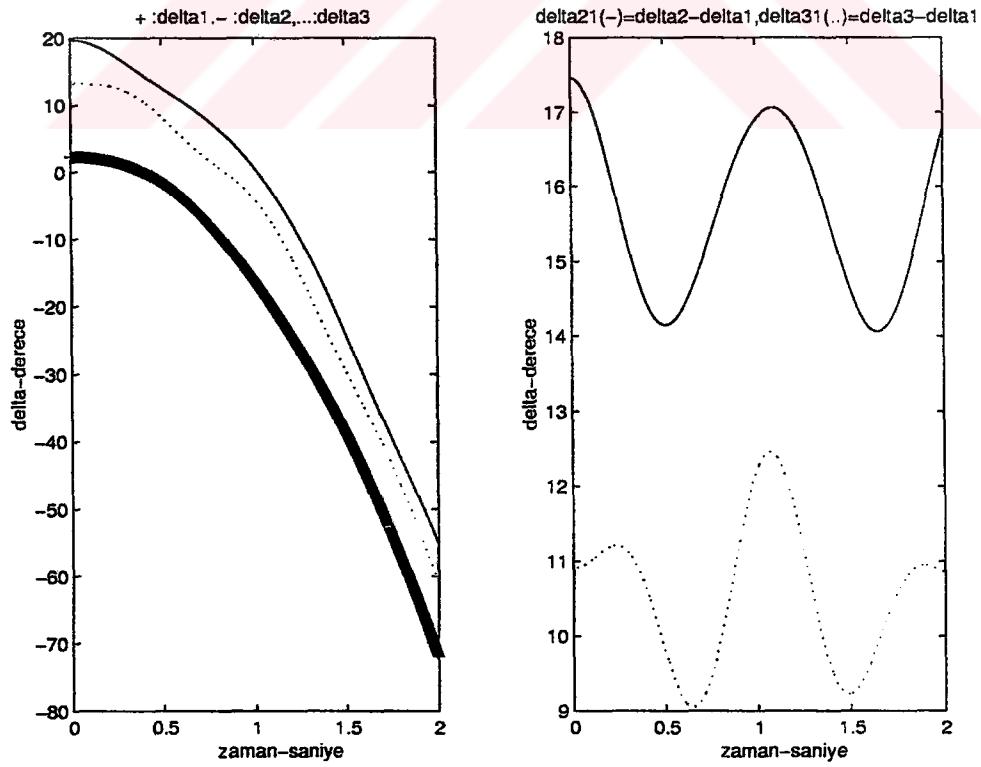
	Bara	Gerilim	P_G	Q_G	$-P_L$	$-Q_L$
1	Salınım	1.04	0.716	0.27	-	-
2	P-V	$1.025 \angle 9.3$	1.63	0.067	-	-
3	P-V	$1.025 \angle -4.7$	0.85	-0.109	-	-
4	P-Q	$1.026 \angle -2.2$	-	-	-	-
5	P-Q	$0.996 \angle -4.0$	-	-	1.25	0.5
6	P-Q	$1.013 \angle -3.7$	-	-	0.9	0.3
7	P-Q	$1.026 \angle 3.7$	-	-	-	-
8	P-Q	$1.016 \angle 0.7$	-	-	1.00	0.35
9	P-Q	$1.032 \angle 2.0$	-	-	-	-



Şekil 2.1: 3 jeneratörlü 9 baralı güç sistemi



Şekil 2.2: Çözümleme Sonuçları-1,7 numaralı bara yakınlarında kısa devre



Şekil 2.3: Çözümleme Sonuçları-2,5 numaralı barada 0.5 pu lik güç artışı

BÖLÜM 3

AYRINTILI MODEL İLE GEÇİCİ KARARLILIK ÇÖZÜMLEMESİ

3.1 Giriş

Bir elektrik güç sistemi; jeneratörlerin, yüklerin, transformatörlerin, iletim hatlarının ve çeşitli kontrol cihazlarının birleşiminden oluşan enterkonnekte bir sistemdir. Dinamik benzetim için sistemi oluşturan tüm cihazların uygun modelleri elde edilmelidir. Bu bölümde güç sisteminin ayrıntılı modeli ve güç sisteminin dinamik cevabını tahmin etmek için çeşitli yöntemler açıklanacaktır.

3.2 Elektrik Güç Sisteminin Ayrıntılı Modeli

Enterkonnekte güç sistemi için çeşitli modeller kullanılabilir. Modelin içeriği ve ayrıntısı, nasıl bir çalışmada kullanılacağı ile ilgilidir. Yıldırım düşmesi veya açma kapama olayları ile ilgili çalışmalar için kullanılacak model ile sistemin sürekli hal davranışının incelenmesinde kullanılacak model birbirinden farklı olacaktır. İlki milisaniyeler mertebeleriyle ilgilenirken, ikincisi birkaç saniyeden bir kaç dakikaya kadar olan zaman dilimiyle ilgilenir. Bu çalışmada ele alınan geçici kararlılık çözümlemesi birkaç saniyelik zaman dilimiyle ilgilenmektedir. Bu yüzden jeneratörlerin ve uyarma regülatörlerinin dinamik modeli yeterlidir. Burada kullanılacak modellerin ayrıntılı çıkarımları [2] numaralı kaynakta verilmiştir. Güç sisteminin ayrıntılı modelinde IEEE 1. tip uyarma regülatörü ile kontrol edilen senkron makinanın d-q eksen modeli kullanılır ve tüketicinin çektiği gücün sabit olduğu varsayılır. Senkron makinanın d-q eksen modeli Şekil 3.1'de gösterilmiştir. "a b c" üç faz sargılarını, "fd" d-eksen uyarma sarımını, "1q" q-ekseni üzerinde sönüm sargısını simgeler. Bu modelde "1d" ve "2q" sarımları ihmal edilmiştir. Park Dönüşümü kullanılarak a,b,c değişkenleri 0-d-q değişkenlerine dönüştürülür [2]. IEEE 1. tip uyarma regülatörüne ait blok diyagramı Şekil 3.2'de verilmiştir. Geçici kararlılık benzetimleri yapılırken jeneratörün türbin-governör dinamikleri ihmal edilir çünkü zaman sabitleri büyüktür ve ilgilenilen zaman dilimi içinde herhangi bir etkileri yoktur. Uyarma dinamiği ise söz konusu zaman dilimi içindedir ve ayrıntılı modele katılmıştır.

Modelde kullanılan tüm değişkenler, birşey belirtilmediği sürece per-unit (pu-

birim değeri) cinsinden olacak ve i , bara numarasını gösterecektir. T_{Mi} mekanik giriş gücü, T_{ei} elektriksel çıkış gücü, V_i bara geriliminin genliği, θ_i radian cinsinden bara geriliminin açısı, G_{ik} i . bara ile k . bara arasındaki transfer kondüktansı, B_{ik} i . bara ile k . bara arasındaki transfer süseptansı, P_{Li} yük için sisteme verilen aktif gücü, Q_{Li} yük için sisteme verilen reaktif gücü gösterir (normal bir yük için P_{Li} ve Q_{Li} negatif olacaktır). Senkron makinanın açısal hızı ω_i , sistemin senkron frekansı ω_s elektriksel olarak rad/s cinsindendir. δ_i radian cinsinde rotorun pozisyonuna karşılık düşen açı, D_i pu · s cinsinden sönüm katsayısı, M_i ise pu · s² cinsinden eylemsizlik sabitidir. E'_{di} ve E'_{qi} , sırasıyla d-eksen uyarma sargıları ile q-eksen sönümlendirici sargıların akıya oranından elde edilen gerilimlerdir. E_{fdi} , uyarma (rotor) sarımlarına uygulanan gerilimdir. T'_{d0i} ve T'_{q0i} , sırasıyla uyarma ve sönüm sargılarının zaman sabitleridir. T_{Ei} , T_{Ai} , T_{Fi} uyarma regülatörünün zaman sabitleri, K_{Ei} , K_{Ai} , K_{Fi} ise uyarma kazançlarıdır. R_{fi} ve V_{Ri} uyarma regülatörünün değişkenleridir. Uyarma regülatörünü standart IEEE 1.tip olarak seçtiğimizde, sistemde m adet jeneratör ve n adet bara olduğunu kabul ederek, i . jeneratörün ($i=1, \dots, m$) dinamik denklemleri aşağıdaki gibi olacaktır;

Rotor açısı dinamiği

$$\dot{\delta}_i = \omega_i - \omega_s \quad (3.1)$$

$$M_i \dot{\omega}_i = T_{Mi} - T_{ei} - D_i(\omega_i - \omega_s) \quad (3.2)$$

Burada $T_{ei} = (E'_{qi} - X'_{di} I_{di}) I_{qi} + (E'_{di} + X'_{qi} I_{qi}) I_{di}$ dir.

Rotora ait elektriksel denklemler

$$T'_{d0i} \dot{E}'_{qi} = -E'_{qi} - (X_{di} - X'_{di}) I_{di} + E_{fdi} \quad (3.3)$$

$$T'_{d0i} \dot{E}'_{di} = -E'_{di} + (X_{qi} - X'_{qi}) I_{qi} \quad (3.4)$$

Uyarma regülatörü denklemleri

$$T_{Ei} \dot{E}_{fdi} = -(K_{Ei} + A_i e^{B_i E_{fdi}}) E_{fdi} + V_{Ri} \quad (3.5)$$

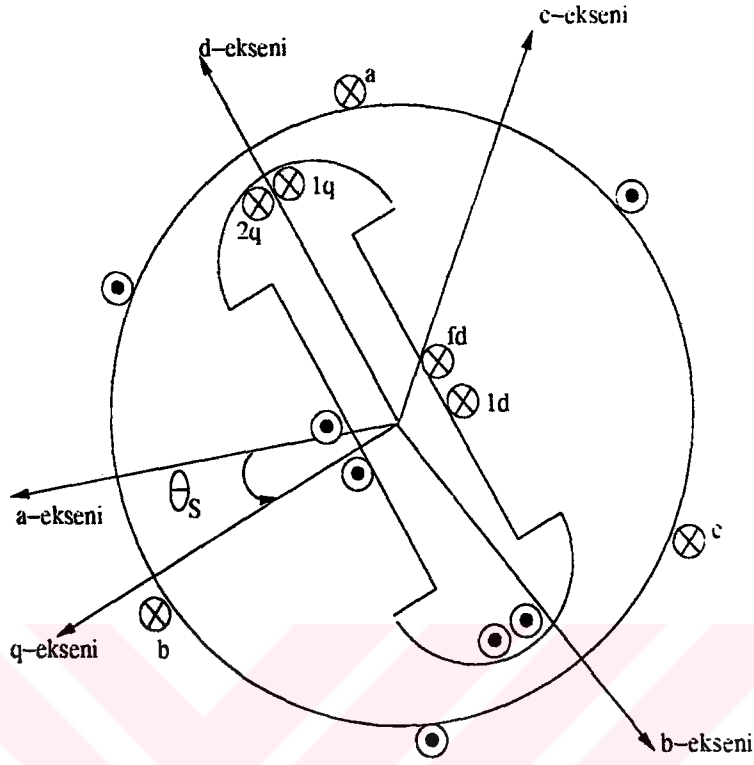
$$T_{Ai} \dot{V}_{Ri} = -V_{Ri} + K_{Ai} R_{fi} - \frac{K_{Ai} K_{Fi}}{T_{Fi}} E_{fdi} + K_{Ai} (V_{REFi} - V_i) \quad (3.6)$$

$$V_{RiMIN} \leq V_{Ri} \leq V_{RiMAX}$$

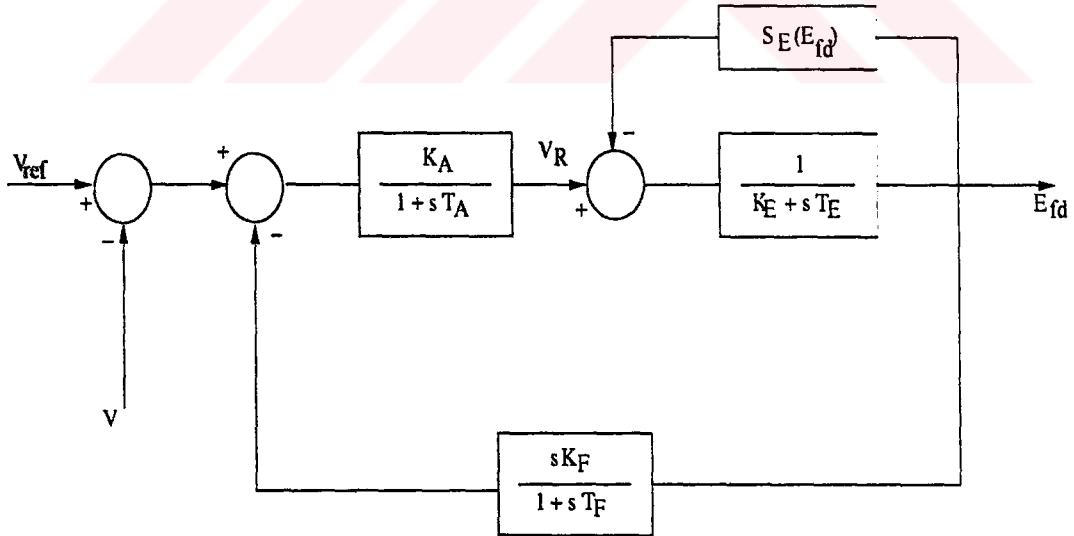
$$T_{Fi} \dot{R}_{fi} = -R_{fi} + \frac{K_{Fi}}{T_{Fi}} E_{fdi} \quad (3.7)$$

Denklem (3.1) ve (3.2) senkron makinanın rotorunun mekanik dinamiğini göstermektedir. Rotorun elektriksel dinamiği ise (3.3) ve (3.4) numaralı denklemler ile ifade edilmiştir. IEEE 1.tip uyarma regülatörü ise (3.5), (3.6) ve (3.7) numaralı denklemler ile modellenmiştir. Bu çalışmada doyma, (3.5) numaralı denklemden de görülebileceği gibi uyarma regülatörü modeline eklenmiştir. Sınırlar

regülatör gerilimi V_{Ri} üzerinde belirlenmiş, T_{ei} elektrik gücü kolay anlaşılması açısından ayrı olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.1: Senkron Makina



Şekil 3.2: IEEE 1. tip Uyarma Regülatörü

Daha önceden bahsedildiği gibi, geçici kararlılık çözümlemesini ilgilendiren süre birkaç saniye mertebesinde. Dolayısıyla statorun ve şebekenin geçici hal durumuna tepkilerini ifade eden geçici hal zaman sabiti çok düşük olduğundan stator ve şebekeye ait dinamikler çözümlemeye dahil edilemez. 60 Hz salınımları

integral manifold teknikleri kullanılarak yok edilmiş ve statora ait dinamik denklemler cebrik denklemlere indirgenmiştir [2]. Benzer bir teknik kullanılarak iletim sistemine ait 60 Hz salınımları yok edilmiş ve bu denklemler cebrik denklemlere indirgenmiştir [8]. Stator cebrik denklemleri;

Stator denklemleri

$$\begin{aligned} E'_{di} - V_i \sin(\delta_i - \theta_i) - R_{si} I_{di} + X'_{qi} I_{qi} &= 0 \\ E'_{qi} - V_i \cos(\delta_i - \theta_i) - R_{si} I_{qi} - X'_{di} I_{di} &= 0 \\ i &= 1, \dots, m \end{aligned} \quad (3.8)$$

Bu modele seri direnç R_{si} dahil edilmiştir ve çıkık kutuplu rotorda $X'_{di} \neq X'_{qi}$ olarak alınmıştır. Şebekeye ait düğüm denklemleri, $I = Y_{bara} V$ (Y_{bara} , bara admitans matrisidir) için güç eşitlikleri yazılmıştır [2]. Bu eşitlikler, jeneratör ve yük baraları için ayrı ayrı yazılırlar.

Jeneratör baraları

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^n V_i V_k (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik}) - \\ V_i [I_{di} \sin(\delta_i - \theta_i) + I_{qi} \cos(\delta_i - \theta_i)] - P_{Li} &= 0 \end{aligned} \quad (3.9)$$

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^n V_i V_k (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik}) - \\ V_i [I_{di} \cos(\delta_i - \theta_i) - I_{qi} \sin(\delta_i - \theta_i)] - Q_{Li} &= 0 \\ i &= 1, \dots, m \end{aligned} \quad (3.10)$$

n baralı bir sistemde jeneratör baraları dışındaki baralar ise;

Yük baraları

$$\sum_{k=1}^n V_i V_k (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik}) - P_{Li} = 0 \quad (3.11)$$

$$\sum_{k=1}^n V_i V_k (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik}) - Q_{Li} = 0 \quad (3.12)$$

$$i = m + 1, \dots, n$$

Yukarıda verilen şebekeye ait denklemler güç eşitlikleri şeklindedir. Genelde şebekeyi formüle ederken $I = Y_{bara} V$ eşitliği kullanılır. Güç eşitliklerinin avantajları ise, doğrusal olmayan yüklerin gösterimindeki kolaylık ve Jakobyen matrisinin açık olarak denklemlerde görülmesidir.

Geçici kararlılık çözümlemesinde, tüm baralar için T_{Mi} , V_{refi} ve ω_s değerleri sabit girişlerdir. P_{Li} ve Q_{Li} sabit güçler olarak kabul edilmişlerdir. Bu kabul, gerilimde aşırı bir düşme olduğu takdirde problemlere yol açabilir. Bu nedenle

yük baralarının gerilimleri izlenir ve gerilimdeki düşüş eşik değeri aşarsa yük, G_{ik} ve B_{ik} değerleri değiştirilerek, sabit empedans formuna getirilir. Eğer gerilimin değeri tekrar artmaya başlar ve bu artış eşik değeri geçerse yük tekrar eski hali olan sabit güç formuna dönüştürülür. Eğer barada herhangi bir yük yoksa P_{Li} ve Q_{Li} değerleri “0” değerini alırlar.

Eğer (3.1) den (3.12) ye kadar olan denklemlere bakılacak olursa bu denklemlerin doğrusal olmayan diferansiyel-cebrik denklem sistemi olduğu görülür. Bu denklemler aşağıdaki formdadırlar;

$$\dot{x} = f(x, y, u), \quad x(0) = x_0 \quad (3.13)$$

$$0 = g(x, y), \quad y(0) = y_0 \quad (3.14)$$

Burada x durum değişkenlerini, y cebrik denklemleri ve u ise sabitleri içerirler ve açık olarak aşağıdaki gibi gösterilirler.

$$\begin{aligned} x^T &= [\delta_i, \omega_i, E'_{qi}, E'_{di}, V_{Ri}, R_{Fi}, E_{fdi}] \\ y^T &= [V_j, \theta_j, I_{di}, I_{qi}] \\ u^T &= [T_{Mi}, V_{REFi}, \omega_s] \\ i &= 1, \dots, m \quad j = 1, \dots, n \end{aligned} \quad (3.15)$$

Denklem (3.14), hem statora hem de şebekeye ait cebrik ifadeleri içermektedir.

Geçici kararlılık çözümlemesinde sistemin, başlangıçta, sürekli hal kararlılığında olduğu varsayılır. Sistemde bir arıza oluşturulur ve bu arıza, bir kontrol mekanizmasına bağlı olarak ya da kendi kendine veya herhangi bir röle mekanizmasıyla, kısa bir süre sonra, t_{cl} anında ortadan kaldırılır veya ortadan kalkar. Sistem (3.13) ve (3.14) denklemleriyle çözülür ve ilgilenilen değişkenler izlenir. Çözümlemeye başlamak için x_0 , y_0 ilk koşulları bulunmalı ve u belirlenmelidir. Bara gerilimleri ve açıları, üretilen aktif ve reaktif güçler güç akışı kullanılarak elde edilir. m adet makina ile ilişkili durumlar, her makina ile I_d ve I_q değerleri (3.1) 'den (3.7) 'ya kadar olan tüm denklemlerdeki zaman göre türevler 0'a eşitlenerek bulunur. Bu denklemler, stator cebrik denklemleri ile beraber kullanılarak, (3.8), x_0 , y_0 ve u nun geri kalan değerleri, [2] numaralı kaynakta ayrıntılı gösterildiği gibi hesaplanır.

Güç sisteminin ayrıntılı modeli kullanılarak çeşitli arızalara ait durumlar gözlemlenebilir. Yük kaybı, P_{Li} ve Q_{Li} nin değerlerinde uygun değişimler yapılarak gerçekleştirilebilir. İletim hatlarındaki kopma, iletim hattının devre dışı kalması veya iletim sistemindeki herhangi bir arıza bara admitans matrisi Y_{bara} da ilgili

elemanlara yapılan uygun değişiklikler ile gerçeklenebilir. rnek olarak, eğer bir empedans üzerinden faz toprak arızası oluşursa, Y_{bara} da arıza noktasına tekabül eden köşegen elemanı değiştirilir. Eğer arıza, iletim hattı devreden çıkarılmadan, arıza anından itibaren kısa bir süre içinde temizlenirse Y_{bara} eski haline geri getirilir. Eğer herhangi bir anahtarlama işlemi söz konusu ise yeni bir Y_{bara} oluşturulur ve kullanılır. Kazanç gibi parametrelerdeki değişimler ilgili değişkenlere yapılan değişiklikler ile benzetilebilir. Bir barada meydana gelebilecek üç faz arızaları, baraya ait iki denklemi ortadan kaldırıp, bara gerilimini sıfır değerinde tutarak benzetilebilir. Çözümlemede ilgilenilen zaman aralığı düşünüldüğünde herhangi bir arıza anında cebrik değişkenlerde ani bir değişimin söz konusu olduğu görülür. Bu nedenle, $7m$ adet durum değişkeni sabit tutulurken (3.8) den (3.12) e kadar olan denklemler $t = 0^+$ anında üzülürler. Bu değişkenlerin yeni değerleri elde edildiği anda özümlemeye tüm değişkenler hesaba katılarak devam edilir. Aynı işlem, yükte veya kontrol kazançlarında meydana gelebilecek değişimler gibi diğer ani değişiklikler için de yapılabilir. Bu tip durumlarda Y_{bara} nın elemanlarında herhangi bir değişiklik olmaz.

3.3 Benzetim Yöntemleri

Geçici kararlılık probleminin üzümünde kullanılan dört temel yöntem vardır. Bunlar; parçalı-açık (Partitioned Explicit, PE), parçalı-kapalı (Partitioned Implicit, PI), eş zamanlı-açık (Simultaneous Explicit, SE), eş zamanlı-kapalı (Simultaneous Implicit, SI) yöntemleridir [9].

Açık bir yöntemde, Runge-Kutta veya doğrusal çok adımlı yöntemler gibi açık integrasyon yöntemleri kullanılır. Kapalı yöntemlerde ise, diferansiyel denklemleri cebrik hale getirmek için iki adımlı yamuk yöntemi ya da kapalı Euler yöntemi gibi kapalı integrasyon yöntemleri kullanılır [9].

Parçalı yaklaşımların her ikisinde de (PE, PI) diferansiyel denklemler, cebrik denklemlerden ayrı olarak üzülür. Bunun anlamı, (3.13), m adet zaman adımında üzülürken (3.14), m adımın sadece bir kaçında üzülür. Cebrik denklemlerin zlmediği zaman adımlarında, gerekli olan y değerleri herhangi bir dış değer biçme (ekstrapolasyon) yöntemiyle belirlenir. Parçalı yöntemlerde hata, kullanılan bu sayısal yöntemden kaynaklanır. Dış değer biçme yönteminden gelen ara birim hatası zme yakınsamada probleme yol açar. Eş zamanlı yöntemlerde ise (3.13) ve (3.14) numaralı denklemler aynı anda zldklerinden ara birim hatası söz konusu olmaz.

Bir SI yönteminin SE yöntemine nazaran, kullanılan sayısal integrasyon yönteminden dolayı, PE yönteminin ise bir PI yöntemine nazaran daha kararlı ve tercih edilir olduğu gösterilmiştir [10]. PE yaklaşımı, SI yaklaşımı kadar sayısal

kararlılığa sahip değildir [2]. Bu nedenlerden dolayı, bu çalışmada yamuk yöntemi kullanılarak eş zamanlı-kapalı (SI) yöntem ele alınmıştır. Yamuk yönteminin seçilmesinin nedeni ise, endüstrideki uygulamalarda çok sık kullanılmasıdır [9].

3.3.1 Sayısal İntegrasyon Yöntemi

Eş zamanlı-kapalı(SI) yaklaşımında ilk adım, (3.13) numaralı denklemleri cebrik hale getirmektir. Eğer, h integrasyon adım aralığı olmak üzere, iki noktalı (kapalı) yamuk kuralı veya bilinen adıyla Kapalı Düzeltilmiş Euler yöntemi (2.14) kullanılırsa; aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$F_1 = x_{n+1} - x_n - \frac{h}{2}[f(x_{n+1}, y_{n+1}) + f(x_n, y_n)] = 0 \quad (3.16)$$

$$F_2 = g(x_{n+1}, y_{n+1}) = 0 \quad (3.17)$$

n . zaman adımındaki değerler bilindiğinden (3.16) ve (3.17) numaralı denklemlerden oluşan cebrik sistem $(n + 1)$. zaman adımında doğrusal olmayan bir denklem sistemidir.

3.3.2 Newton-Raphson Yöntemi

Denklem (3.16) ve (3.17) nin teşkil ettiği doğrusal olmayan denklem sistemini $(n + 1)$. zaman adımında çözmek için Newton-Raphson (NR) yöntemi kullanılır ve aşağıdaki doğrusal denklemler $(n + 1)$. zaman adımı için elde edilir;

$$F^{(k)} = -J_{n+1}^{(k)} \cdot \Delta X_{n+1} \quad (3.18)$$

$$X_{n+1}^{(k+1)} = X_{n+1}^{(k)} + \Delta X_{n+1} \quad (3.19)$$

Burada

$$F = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix}$$

$$X = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

Denklem (3.18) ve (3.19)'de k üstü NR yönteminin yineleme sayısını, $(n+1)$ indisi ise çözümün yapıldığı zaman adımını belirtmektedir. Denklem (3.16) ve (3.17), her zaman adımında NR yöntemi ile çözülmektedir. Sonuç, ΔX_{n+1} veya F^k yeteri kadar küçük olduğu zaman elde edilmiş olur. Bu sınır koşulu kullanıcı tarafından verilir. SI yaklaşımı için NR yönteminin yakınsama koşulu olarak 10^{-3} ile 10^{-2} arasında bir değer kullanılabilir. Her zaman adımında elde edilen X_n değeri bir sonraki zaman adımı için başlangıç değeri olacaktır ($X_{n+1}^{(0)} = X_n$).

Jakobyen matrisi aşağıdaki parçalı şekilde hesaplanabilir:

$$\begin{aligned}
 J &= \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \\
 J_1 &= \frac{\partial F_1}{\partial x} \\
 J_2 &= \frac{\partial F_1}{\partial y} \\
 J_3 &= \frac{\partial F_2}{\partial x} \\
 J_4 &= \frac{\partial F_2}{\partial y}
 \end{aligned} \tag{3.20}$$

Güç iletim sistemlerinde, J matrisinin sıfır olmayan eleman sayısının en fazla %10 mertebesinde olduğu bilinmektedir [9].

Denklem (3.18),

$$Ax = b \tag{3.21}$$

biçimindedir ve bu doğrusal denklem sisteminin çözümü için çok sayıda yöntem mevcuttur. Bu yöntemlerden en önde gelenler *LU ayrıştırması* ve *gradyan yöntemle*-ridir (Konjuge Gradyanlar, Genelleştirilmiş Minimum Kalan) [9].

3.3.3 Doğrusal Denklem Sisteminin Çözüm Yöntemleri

Denklem (3.21) gibi doğrusal denklem sistemlerinin çözümünde bilinen en klasik yöntem LU ayrıştırması yöntemidir. Yinelemeli yöntemler ise noktasal ve noktasal olmayan yöntemler olmak üzere iki başlıkta toplanır. Noktasal olmayan yöntemlerin en önemli avantajı, A matrisinin seyrek (0 olmayan eleman sayısı tüm eleman sayısının yarısından daha az) olduğu durumlarda sonuca çok hızlı yakınsamalarıdır. Bunun yanında kötü durumlu matrisler için sağladıkları çözüm yöntemleri ve çok işlemcili makinalarda, koştur ortamda, uygulamaya elverişli olmaları bu yöntemleri cazip kılan diğer önemli etkenlerdir. N , A matrisinin boyutu olmak üzere, Gauss Eliminasyonu, sonucu bulmak için $O(N^3)$ adet işlem yaparken yinelemeli yöntemler $O(N^2)$ işlemde sonuca yakınsamaktadırlar. Noktasal olmayan yinelemeli yöntemlerden bazıları ise, sonsuz matematiksel hassasiyette işlem yapılırsa, sonuca N adet adımda yakınsamayı garanti etmektedir.

- Noktasal Yöntemler: Jacobi, Gauss-Seidel, Successive Over Relaxation-SOR ve Symetric Successive Over Relaxation-SSOR olarak bilinen yöntemler noktasal yöntemlerdir. Bu çalışmada bu yöntemlerden bahsedilmeyecektir.

- Noktasal Olmayan Yöntemler: Krylov altuzay ailesine ait yöntemler bu başlık altında toplanmıştır. Bu yöntemlerin bazıları, sonsuz kesinlikte matematiksel işlemler yapıldığı varsayımı ile yukarıda da bahsedildiği gibi en fazla N adımda yakınsamayı garanti etmektedirler. Bu yöntemler Conjugate Gradient-CG, BiConjugate Gradient-BiCG, Minimum Residual - MinRES, Generalized Minimum Residual-GMRES olarak bilinir. Bu çalışmada CG ve GMRES yöntemleri ele alınacaktır.

Gradyan Yöntemleri

Bu yöntemlerde (3.21) denkleminde ait kuadratik form üzerinden incelemeler yapılır. Denklem (3.21)'i sağlayan x , (3.22) denkleminin kritik noktasıdır.

$$f(x) = \frac{1}{2}x^T Ax - b^T x + c \quad (3.22)$$

$f(x)$ fonksiyonunun gradyanı, x 'e göre türevidir, gradyan vektörünün yönü fonksiyonun artış yönüdür ve aşağıdaki gibi gösterilir:

$$\nabla f = f'(x) = Ax - b \quad (3.23)$$

Eğer A pozitif tanımlı ve simetrik bir matris ise x , $f(x)$ fonksiyonunun minimum noktasıdır. $f(x)$ kuadratik fonksiyonunun minimum noktasını bulan en bilinen yöntem En Dik İniş (Steepest Descent) yöntemidir.

En Dik İniş Yöntemi

x vektörü için yaklaşık sonucu verecek genel formül:

$$x_{k+1} = x_k + \alpha_k p_k \quad (3.24)$$

şeklinde yazılır. Burada p_k yön vektörü, α_k adım uzunluğudur. Yöntemin her adımında x_{k+1} değerinin hesabı için bir yön vektörü ve adım uzunluğu hesaplanır ve bir önceki değer olan x_k yardımıyla x_{k+1} elde edilir. r vektörü kalan vektörüdür ve $r = b - Ax$ olarak bilinir. Kalan vektörünün yönü (3.23) denkleminde de görüldüğü gibi fonksiyonun türevine ters yönde yani fonksiyonun azalışı yönündedir.

$$\begin{aligned} r &= -\nabla f = -f'(x) \\ p_k &= r_k = b - Ax_k \end{aligned} \quad (3.25)$$

Skaler bir büyüklük olan adım uzunluğu α_k ise, $f(x_{k+1})$ fonksiyonunun α_k ya göre minimumunun aranmasıyla, yani, fonksiyonun α ya göre türevi sıfıra eşitlenerek $(df(x_{k+1})/d\alpha=0)$ sıfıra eşitlenerek elde edilir. Bu aşamada türev

alnırken zincir kuralı uygulanır: $f'(x_{k+1})^T \frac{dx_{k+1}}{d\alpha} = 0$. (3.24) ve (3.25) numaralı denklemlerden $f'(x_{k+1})r_k = 0$ elde edilir. Son elde edilen eşitliğe göre α , k adımındaki kalan vektörünü bir sonraki adımdaki gradyan vektörüne dik yapacak şekilde seçilmelidir.

α büyüklüğünü tayin etmek için $f'(x_{k+1}) = -r_{k+1}$ olduğunu hatırlamak ve aşağıdaki adımları takip etmek yeterlidir ($A=A^T$ olduğu unutulmamalıdır) ;

$$\begin{aligned} r_{k+1}^T r_k &= 0 \\ (b - Ax_{k+1})^T r_k &= 0 \\ (b - A(x_k - \alpha_k r_k))^T r_k &= 0 \\ (b - Ax_k)^T r_k - \alpha_k (Ar_k)^T r_k &= 0 \\ (b - Ax_k)^T r_k &= \alpha_k (Ar_k)^T r_k \\ r_k^T r_k &= \alpha_k r_k^T Ar_k \\ \alpha_k &= \frac{r_k^T r_k}{r_k^T Ar_k} \end{aligned}$$

Dolayısıyla bu yöntem için program akışı, rastgele bir x_0 başlangıç değeri için, aşağıdaki gibidir [11],

$$r_0 = b - Ax_0 \quad (3.26)$$

k=0,1,2... için

$$\alpha_k = \frac{r_k^T r_k}{r_k^T Ar_k} \quad (3.27)$$

$$r_{k+1} = r_k - \alpha_k Ar_k \quad (3.28)$$

$$x_{k+1} = x_k + \alpha_k r_k \quad (3.29)$$

şeklinde verilir.

Konjuge Gradyanlar Yöntemi

Krylov altuzay ailesinin en bilinen yöntemi, simetrik ve pozitif tanımlı A matrisleri için geliştirilmiş Konjuge Gradyanlar Yöntemi (Conjugate Gradients-CG)'dir. Bu yöntemde En Dik İniş Yöntemi'nden farkı p_k yön vektörlerinin A matrisine göre birbirlerine dik olacak şekilde ve r_k kalan vektörleri yardımıyla üretilmeleridir. r_k kalan vektörleri ise birbirlerine diktir; $r_{k+1}^T \cdot r_k = 0$. Dolayısıyla (3.22) kuadratik fonksiyonunun minimum değeri, x_0 ve $p_0, \dots, p_k$ vektörlerinin gerdiği altuzayda aranır. Her yön vektörü p_k 'nın A matrisine göre birbirine dik olması (A-diklik veya konjuge) ise aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$p_i^T A p_j = 0 \quad i \neq j \quad (3.30)$$

Gramm-Schmidt Dikleştirme yönteminde r_k kalan vektörleri kullanılarak ve A -diklik kavramı ile yön vektörleri oluşturulur. Konjuge Gradyanlar Yöntemi için program akış rastgele bir x_0 başlangıç değeri için aşağıdaki gibidir [11]:

$$p_0 = r_0 = b - Ax_0, k=0,1... \text{ için}$$

$$\alpha_k = \frac{r_k^T r_k}{p_k^T A p_k} \quad (3.31)$$

$$x_{k+1} = x_k + \alpha_k p_k \quad (3.32)$$

$$r_{k+1} = r_k - \alpha_k A p_k \quad (3.33)$$

Eğer $\|r_{k+1}\|_2^2 \geq \epsilon$ ise devam et:

$$\beta_{k+1} = \frac{r_{k+1}^T r_{k+1}}{r_k^T r_k} \quad (3.34)$$

$$p_{k+1} = r_{k+1} + \beta_{k+1} r_k \quad (3.35)$$

Konjuge Gradyanlar yönteminin en ilginç özelliği, matematiksel işlemlerin sonsuz kesinlikte gerçekleştirildiği, yani işlemler sırasında hiç hane kaybının olmadığı varsayımıyla çözüme en fazla n adımda yakınsamasıdır. Eğer A matrisi m adet farklı özdeğere sahipse CG yöntemi en fazla m adımda yakınsayacaktır. Yakınsama hızı, kötü durumlu A matrisleri için daha iyi durumlu matrisler kullanılması (iyileştirme-preconditioning) yöntemiyle artırılır. Bu yöntem kullanılarak geliştirilen yöntem İyileştirmeli Konjuge Gradyan Yöntemi'dir (Preconditioned Conjugate Gradient-PCG).

Bu yöntem, simetrik ve pozitif tanımlı matrisler için çok iyi sonuçlar vermesine rağmen ele alınan problemde A matrisini teşkil eden Jakobyen matrisi simetrik değildir. Şimdi CG yönteminin iki önemli özelliğine daha göz atalım:

- Minimum bulma özelliği: Yöntem her k . adımda hata vektörünün A matrisine göre normu $\|e_k\|_A$ 'nın, $x_0, r_0, Ar_0, \dots, A^{k-1}r_0$ vektörlerinin gerdiği $(x_0 + \text{span}(r_0, Ar_0, \dots, A^{k-1}r_0))$ Krylov altuzayı üzerinde minimumunu bulur.
- Denklem (3.35) kısa bir bağıntıdır.

Krylov altuzay ailesine ait diğer yöntemler, yukarıdaki özelliklerden bir tanesinden ödün vererek simetrik olmayan problemleri çözerler. Yaklaşımlarına göre bu problemler üç ana başlıkta incelenebilir [9]:

- Kısa bağıntı özelliğini koruyan yöntemler: Bikonjuge Gradyan Yöntemi (BiCG), Conjugate Gradient Squared (CGS) ve Conjugate Gradient Stabilized (CGST)

- Minimum bulma özelliğini koruyan yöntem: Genelleştirilmiş Minimum Kalan yöntemi (GMRES)
- A' matrisi simetrik ve pozitif tanımlı bir matris olmak üzere, $Ax = b$ doğrusal sistemini $A'x' = b'$ sistemine dönüştürerek çözüme ulaşan yöntemler: CGNE ($A' = AA^T$) ve CGNR ($A' = A^T A$). Bu iki yöntem de normal denklemlerde CG yöntemini kullanırlar. CGNE yöntemi hata vektörünü minimize ederken, CGNR yöntemi kalan vektörünü minimize eder.

Krylov ailesine ait tüm bu yöntemlerin yakınsama oranları A matrisinin durum sayısı ile orantılıdır. Bir A matrisinin durum sayısı, A matrisinin özdeğerleri $\lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \dots \leq \lambda_n$ olmak üzere, $\kappa(A) = \lambda_{maks}/\lambda_{min} = \lambda_n/\lambda_1$ ya da $\kappa(A) = \|A\| \cdot \|A^{-1}\|$ ile hesaplanır. Eğer A matrisi simetrik ve pozitif tanımlı ise tüm özdeğerler reel sayıdır ve pozitifdir. A matrisi simetrik ve/veya pozitif tanımlı değilse $A^T A$ işlemi ile elde edilen matris simetrik ve pozitif tanımlıdır ve bu durumda $\xi_1 \leq \xi_2 \leq \dots \leq \xi_n$ $A^T A$ matrisinin özdeğerleri ise, A matrisinin durum sayısı $\kappa(A) = (\xi_n/\xi_1)^{1/2}$ olacaktır. Bir matrisin durum sayısı bire eşit veya birden büyüktür (birim matrisin durum sayısı birdir) ve durum sayısı bire yakın olan matrislere iyi durumlu matris denir. Durum sayısının birden uzaklaşması, binler, onbinler, milyonlar mertebesinde olması, söz konusu matrisin kötü durumlu olması anlamına gelir.

A matrisi, geçici kararlılık probleminde kötü-durumludur. Örnek olarak boyutu 168 olan Jacobyen matrisine sahip 39-baralı bir güç sisteminin durum sayısı 72,400 ve boyutu 740 olan bir Jakobyen matrisine sahip 145-baralı güç sisteminin durum sayısı yaklaşık olarak 285,000,000 civarındadır [9]. Bu kötü-durumluluktan dolayı Krylov ailesine ait yöntemlerin yakınsama problemi vardır. CGNE ve CGNR doğaları itibarıyla probleme yaklaşımda A matrisinin durum sayısının karesini aldıklarından bu çalışmada bu yöntemlere değinilmemiştir. Bu aileye ait yöntemlerin en kararlısı olan Genelleştirilmiş Minimum Kalan Yöntemi (GMRES) ilgi alanımız olacaktır [12].

Genelleştirilmiş Minimum Kalan Yöntemi

Yukarıda bahsettiğimiz yöntemlerin aksine GMRES yöntemi A matrisinin simetrik-pozitif tanımlı olmasını şart koşmaz ve n matrisin boyutu olmak üzere sonsuz matematiksel kesinlik kullanılarak en fazla n adımda yakınsamayı garanti eder. Bu yöntem, konjuge gradyan yöntemlerinde kullanılan Gram-Schmidt dikleştirme yerine, dik kalan vektörlerinden birbirine A -dik vektörleri oluşturmak için Arnoldi dikleştirme kullanır. Bu yöntemin dezavantajı ise önceden hesaplanan tüm vektörlerin bellekte tutulması gerekliliğidir. Konjuge Gradyan yöntemlerinde

ise bu zorunluluk yoktur. GMRES yönteminin algoritması aşağıda-ki gibidir [12]

x_0 başlangıç koşulu rastgele seçilmek üzere, $r_0 = b - Ax_0$, $v_1 = \frac{r_0}{\|r_0\|}$,
 $k=1,2,\dots$ için

$$\begin{aligned} h_{ik} &= v_i^T A v_k, \quad i = 1, \dots, k \\ \tilde{v}_{k+1} &= A v_k - \sum_{i=1}^k h_{ik} v_i \\ h_{k+1,k} &= \|\tilde{v}_{k+1}\| \\ v_{k+1} &= \frac{\tilde{v}_{k+1}}{h_{k+1,k}} \end{aligned}$$

$H y = \|r_0\| e$ denklem sistemi çözülür. ($e^t = [1 \ 0 \ 0 \dots]$)

$$x_{m+1} = x_0 + y_1 v_1 + y_2 v_2 + \dots + y_m v_m \quad (3.36)$$

3.4 Uygulama

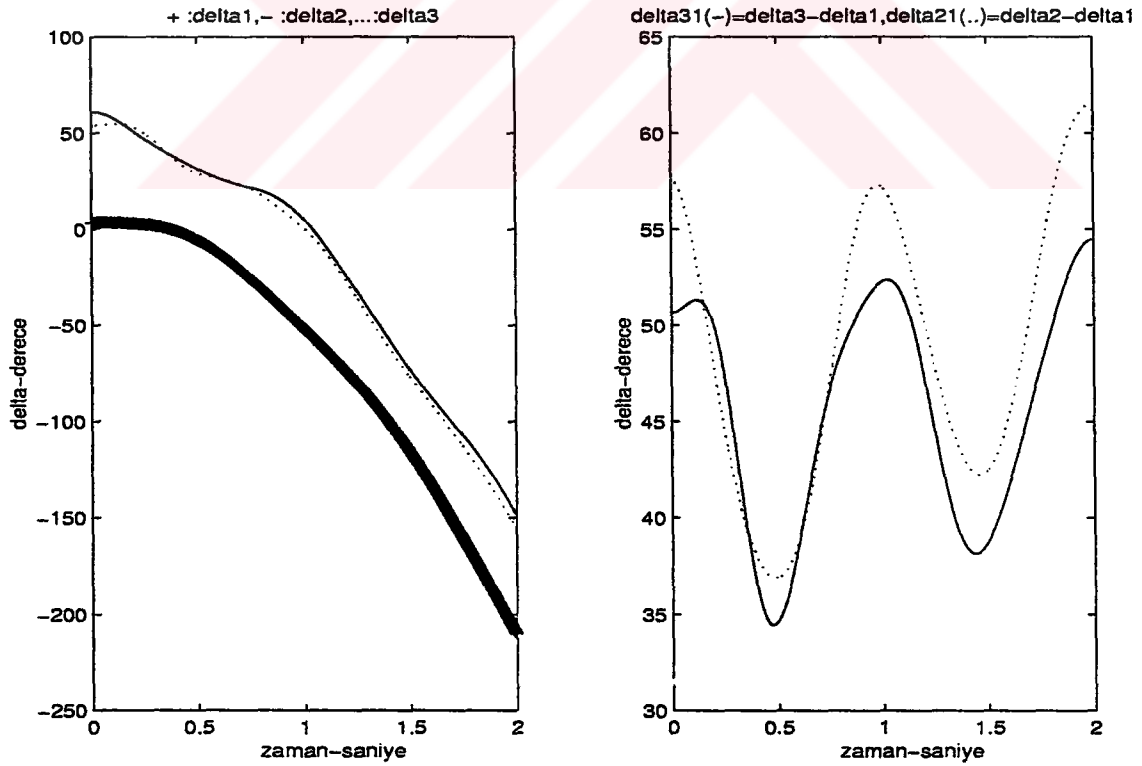
Bölüm 2 de incelenen 3 jeneratörlü 9 baralı güç sisteminin ayrıntılı modeli kullanılarak geçici kararlılık analizi yapılacaktır. Yedinci baradan çekilen aktif güçte 0.5 pu güç artışı olması durumunda jeneratörlerin rotor açılarının salınımı gözlenecektir. Ayrıntılı modelde ihtiyacımız olan uyarma regülatörü verileri aşağıdaki gibidir.

Tablo 3.1: Uyarma Regülatörü Verileri

Regülatör	1	2	3
K_A	20	20	20
$T_A(s)$	0.2	0.2	0.2
K_E	1.0	1.0	1.0
$T_E(s)$	0.314	0.314	0.314
K_F	0.063	0.063	0.063
$T_F(s)$	0.35	0.35	0.35
A_i	0.0039	0.0039	0.0039
B_i	1.555	1.555	1.555

Tablo 3.2: Tüm Değişkenlerin Başlangıç Değerleri

Jeneratör	1	2	3
δ	3.58°	61.1°	54.2°
I_d	0.302	1.29	0.562
I_q	0.671	0.931	0.619
V_d	0.065	0.805	0.779
V_q	1.038	0.634	0.666
E'_d	0	0.622	0.624
E'_q	1.056	0.788	0.768
E_{fd}	1.082	1.789	1.403
R_f	0.195	0.322	0.252
V_R	1.105	1.902	1.453
V_{ref}	1.095	1.12	1.09
T_M	0.716	1.63	0.85



Şekil 3.3: Çözümleme Sonuçları-Ayrıntılı Model

BÖLÜM 4

SONUÇLAR

Elektrik güç sisteminin klasik ve ayrıntılı modeli 3 jeneratörlü 9 baralı güç sistemi üzerine ayrı ayrı uygulanmış ve farklı arıza durumları için geçici kararlılık çözümlemesi yapılmıştır. Klasik model kullanılarak, 2 s için sistemin davranışını inceleyecek çözümleme Pentium III 733 Mhz işlemciye ve 256 MB geçici belleğe sahip bilgisayar üzerinde 8 saniyede sonuçlanmıştır. Elde edilen sonuçlar [2] numaralı kaynakta verilen sonuçlarla uyum göstermektedir. Klasik model kullanılarak yapılan çözümlemenin kısa sürmesi modelin basitliğinden kaynaklanmakta ve çözümleme sonuçları gerçekten uzak kalmaktadır.

Ayrıntılı model kullanılarak , 2 s için sistemin davranışını inceleyecek geçici kararlılık çözümlemesi ise aynı bilgisayar üzerinde 3.5 gün (302400 s) sürmüştür. Çözümleme sonucu alınan sonuçlar [9] numaralı kaynaktaki sonuçlar ile uyum göstermektedir. Hesaplama için gereken süre seri programdaki vektörel işlemlerden kaynaklanmaktadır. Bu kadar uzun sürelerden kurtulabilmek ancak çözümlemeyi koşt ortamda yapmak ile mümkündür. Koşt ortamda problemin çözümü için koşt algoritmalar kullanmak gerekir. Kullanılan yinelemeli yöntemlerin koşt ortamda çalışmaya uygun hale getirilmeleri esastır.

KAYNAKLAR

- [1] Tacer, E. , 1990. Enerji Sistemlerinde Kararlılık, İ.T.Ü Elektrik-Elektronik Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- [2] Pai, M.A. and Sauer, P.W.. 1998. Power System Dynamics and Stability. Prentice-Hall, New Jersey.
- [3] Anderson, P.M. and Fouad, A.A., 1993. Power System Control and Stability. IEEE Press. New York.
- [4] Boyce, W.E. and DiPrima, R.C., 1997. Elementary Differential Equations and Boundary Value Problems. John Wiley and Sons, New York.
- [5] Buchanan, J.L. and Turner. P.R.. 1992. Numerical Methods and Analysis. McGraw-Hill.
- [6] Pavella, M. and Murthy, P.G., 1994. Transient Stability of Power Systems-Theory and Practice. John Wiley and Sons, New York.
- [7] Alcı, M., 1991. Geçici Hal Kararlılık Probleminin Sayısal Çözüm Metodları, *Yüksek Lisans Tezi*. İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [8] Sauer P.W., LaGesse D.J., S.Ahmed-Zaid, Pai M.A., 1987. Reduced order modeling of interconnected multimachine power systems using time-scale decomposition, *IEEE Transactions on Power Systems*, PWRS-2, 310-320.
- [9] Kulkarni, A.Y., 1996. High Speed Dynamic Simulation of Power Systems, *PhD Thesis*. MIT, Cambridge, MA.
- [10] Alto, P. , 1977. Power System Dynamic Analysis Phase 1, *Electrical Power Research Institute Research Project*. CA,EL-484(670).
- [11] Shewchuk. J.R.. 1994. An introduction to the Conjugate Gradient Method without the Agonizing Pain, *Technical Report*, School of Computer Science. Carnegie Mellon University.
- [12] Saad, Y. and Shultz, M.H.. 1986, GMRES: a generalized minimal residual algorithm for solving nonsymmetric linear systems, *SIAM Journal of Scientific and Statistical Computing*, 7, 856-869

EKLER A

Klasik Modele ait Geçici Kararlılık Çözümlemesi Programı

```
clc;
% Amaç: Bu program; çok makinalı bir elektrik güç sisteminin,
% klasik model kullanılarak, Düzeltilmiş Euler yöntemiyle
% geçici kararlılık analizini yapar. %
% h(adım uzunluğu)=0.005 olarak alınmıştır!
%
% Kullanım: cmgk
% 0: Örnek üzerinde deneme yapar
% 1: Dosyadan değer okutur
% 2: Değerler tuş takımından girilir
%=====
% ÖRNEK
% 3 generatorlu 9 baralı örnek (sf:38)
% (Anderson,Fouad; Power System Control and Stability)
%=====
%
% Jeneratör numarası H(eylemsizlik sabiti/pu.s)
% 1 23.64
% 2 6.4
% 3 3.01
% Güç akışı sonrası elde edilen jeneratör gerilimleri(E) ve
% açıları(delta)
% Jeneratör Numarası Gerilim Açısı
% 1 1.0566 2.2717
% 2 1.0502 19.7315
% 3 1.0170 13.1752
% AOIBAM : Arıza Öncesi İndirgenmiş Bara Admitans Matrisi
% ADIBAM : Arızalı Durum İndirgenmiş Bara Admitans Matrisi
% ASIBAM : Arıza Sonrası İndirgenmiş Bara Admitans Matrisi
%
```

```

% Örnekte arıza temizleme zamanı: 0.083 s dir.
% Dolayısıyla deneme analizlerinizin süresi 0.083 s den büyük
% olmalıdır
%=====
% DEĞERLERİ DOSYADAN OKUTACAKSANIZ veya TUŞ TAKIMINDAN
% GİRECEKSENİZ KULLANMANIZ GEREKEN DEĞİŞKENLER
%=====
%
% n : Jeneratör sayısı (skaler sayı)
% r : Jeneratör baraları haricindeki baraların sayısı (skaler sayı)
% H : Jeneratörlerin eylemsizlik sabiti (pu.s) (sütun vektörü)
% Eilk : Güç akışı sonrası elde edilen bara gerilimlerinden,  $E = V + j X I$ 
% yardımıyla hesaplanan generator gerilimleri (sütun vektörü)
% DELTilk : Jeneratör açıları (yük açısı,derece cinsinden) (sütun vektörü)
% Ypref : Arıza öncesi bara admitans matrisi
% arıza : Arızanın meydana geldiği bara
% tcl : Arızanın temizlenme zamanı
%=====
% PROGRAM İÇİNDE ÇAĞRILAN FONKSİYONLAR veya SCRIPTLER
%=====
% acisalhizdeg(guc,hiz,H)
% yukacisideg(hiz)
% gucpu(E,G,teta,genlikY,deltaa,gensay)
% AOIBAM (örneğe ait)
% ADIBAM (örneğe ait)
% ASIBAM (örneğe ait)

help cmgk2
flops(0);
format long;

wsenk=2*pi*60;
secim=input('Değerleri dosyadan okutacaksanız < 1 > i,
tuş takımından girecekseniz < 2 > yi,
örneği kullanacaksanız < 0 > ı tuşlayın\n');

if secim==2
    n = input('Üretim barası sayisini girin\n');
    r = input('Geri kalan bara sayisini girin\n');

```

```

H = input('Generatorlerin eylemsizlik sabitlerini pu.s cinsinden girin\n')
Eilk = input('Guc akisi sonrasi elde edilen gen. gerilimlerinigin\n');
DELTilk = input('Guc akisi sonrasi elde edilen gen. acilarininigin\n');
    Ypref=input('Arıza öncesi bara admitans matrisini girin\n');
ariza=input('Arızanın hangi barada veya hangi bara yakınında olduğunu bara
numarasını girerek belirleyin\n');
tcl=input('Kaçınıcı saniyede arıza temizleniyor?\n');
disp('Programın bu kısmı yapım aşamasında!!');
break;
elseif secim==1
    disp('Programın bu kısmı yapım aşamasında!!');
    break;
else
    n=3;
    r=6;
    H=[23.64;6.4;3.01];
    Eilk=[1.0566;1.0502;1.0170];
    DELTilk=[2.2717;19.7315;13.1752];
    AOIBAM;
    ADIBAM;
    ASIBAM;
end

t=input('Kaç saniye analiz yapmak istiyorsunuz?\n');
iter=1000*t;

G=Gpref;
teta=tetapref;
genlikY=genlikYpref;
delta=DELTilk;
Pm=gucpu(Eilk,G,teta,genlikY,delta,n);

deltayeni=DELTilk;
omegayeni=ones(3,1)*wsenk;

adim=0.005;
T=0.0;
G=Gf;
teta=tetaf;

```

```

genlikY=genlikYf;

for k=1:83
    ddeltayeni=yukacisideg(omegayeni);
    Pe1=gucpu(Eilk,G,teta,genlikY,deltayeni,n);
    Pa1=Pm-Pe1;
    domegayeni=acisalhizdeg(Pa1,omegayeni,H);
    deltaara=deltayeni+ddeltayeni*adim;
    omegaara=omegayeni+domegayeni*adim;
    ddeltaara=yukacisideg(omegaara);
    Pe2=gucpu(Eilk,G,teta,genlikY,deltaara,n);
    Pa2=Pm-Pe2;
    domegaara=acisalhizdeg(Pa2,omegaara,H);
    deltayeni=deltayeni+(ddeltayeni+ddeltaara)*0.5*adim;
    omegayeni=omegayeni+(domegayeni+domegaara)*0.5*adim;
    if T == 0
        delta1=DELTilk(1,1);
        delta2=DELTilk(2,1);
        delta3=DELTilk(3,1);
        zaman=0;
    else
        delta1=[delta1,deltayeni(1,1)];
        delta2=[delta2,deltayeni(2,1)];
        delta3=[delta3,deltayeni(3,1)];
        zaman=[zaman,T];
    end
    T = T + adim;
end
if iter ~= 83
    disp('!!!! t=0.083 s  ARIZA TEMIZLENDI  !!!!');
    G=Gposf;
    teta=tetaposf;
    genlikY=genlikYposf;
    for k=84:iter
        ddeltayeni=yukacisideg(omegayeni);
        Pe1=gucpu(Eilk,G,teta,genlikY,deltayeni,n);
        Pa1=Pm-Pe1;
        domegayeni=acisalhizdeg(Pa1,omegayeni,H);
        deltaara=deltayeni+ddeltayeni*adim;

```

```

    omegaara=omegayeni+domegayeni*adim;
    ddeltaara=yukacisideg(omegaara);
    Pe2=gucpu(Eilk,G,teta,genlikY,deltaara,n);
    Pa2=Pm-Pe2;
    domegaara=acisalhizdeg(Pa2,omegaara,H);
    deltayeni=deltayeni+(ddeltayeni+ddeltaara)*0.5*adim;
    omegayeni=omegayeni+(domegayeni+domegaara)*0.5*adim;
    if T == 0
        delta1=DELTilk(1,1);
        delta2=DELTilk(2,1);
    delta3=DELTilk(3,1);
        zaman=0;
    else
        delta1=[delta1,deltayeni(1,1)];
        delta2=[delta2,deltayeni(2,1)];
    delta3=[delta3,deltayeni(3,1)];
        zaman=[zaman,T];
    end
    T = T + adim;
end
end

```

EKLER B

Ayrıntılı Model ait Geçici Kararlılık Çözümlemesi Programı

```
clc;
% Sauer,Pai,"Power system Dynamics and Stability",
% Multimachine Simulation,pg 170
%
=====
Jacob scripti
=====
glosabit
basdeg
sembolik

F1=[(Equy - Eque - h*0.5*(dEqu(Equy,Efdy,Idy) + dEqu(Eque,Efde,Ide)))
    (Eduy - Edue - h*0.5*(dEdu(Eduy,Iqy) + dEdu(Edue,Iqe)))
    (deltay - deltae - h*0.5*(ddelta(omegay) + ddelta(omegae)))
    (omegay - omegae - h*0.5*(domega(Eduy,Equy,omegay,Idy,Iqy)...
    ...+domega(Edue,Eque,omegae,Ide,Iqe)))
    (Vry - Vre - h*0.5*(dVr(Vry,Efdy,Rfy,Vy)+dVr(Vre,Efde,Rfe,Ve)))
    (Rfy - Rfe - h*0.5*(dRf(Efdy,Rfy) + dRf(Efde,Rfe)))
    (Efdy - Efde - h*0.5*(dEfd(Efdy,Vry) + dEfd(Efde,Vre)))] ;

%disp('Forming the jacobian matrix of F1-generators differential equations')
%J1 = jacobian(F1,ddy) ;
%J2 = jacobian(F1,cd1y) ;
%J3 = jacobian(F1,cd2y) ;

JF1=jacobian(F1,Xy);
```

```

F2=[(Idy - Id(Eduy,Equy,Vy,deltay,tetay))
     (Iqy - Iq(Eduy,Equy,Vy,deltay,tetay))] ;

%disp('Forming the jacobian matrix of F2-generators algebraic equations')
%J4 = jacobian(F2,ddy) ;
J5 = jacobian(F2,cd1y) ;
J6 = jacobian(F2,cd2y) ;

JF2=jacobian(F2,Xy) ;
JF2a=[J5 J6];

F3=[genag(Vy,Idy,Iqy,deltay,tetay,1)
     genag(Vy,Idy,Iqy,deltay,tetay,2)
     genag(Vy,Idy,Iqy,deltay,tetay,3)
     baraag(Vy,tetay,4)
     baraag(Vy,tetay,5)
     baraag(Vy,tetay,6)
     baraag(Vy,tetay,7)
     baraag(Vy,tetay,8)
     baraag(Vy,tetay,9)
     genrg(Vy,Idy,Iqy,deltay,tetay,1)
     genrg(Vy,Idy,Iqy,deltay,tetay,2)
     genrg(Vy,Idy,Iqy,deltay,tetay,3)
     bararg(Vy,tetay,4)
     bararg(Vy,tetay,5)
     bararg(Vy,tetay,6)
     bararg(Vy,tetay,7)
     bararg(Vy,tetay,8)
     bararg(Vy,tetay,9)];

%disp('Forming the jacobian matrix of F3-network algebraic equations')
%J7 = jacobian(F3,ddy) ;
J8 = jacobian(F3,cd1y) ;
J9 = jacobian(F3,cd2y) ;

JF3=jacobian(F3,Xy) ;
JF3a=[J8 J9] ;

```

```
Fs=[F1;F2;F3] ;
Js=[JF1;JF2;JF3] ;
```

```
Fas=[F2;F3];
```

```
=====
simbolik scripti
=====
```

```
syms Equ1y Equ2y Equ3y Edu1y Edu2y Edu3y delta1y delta2y delta3y
omega1y omega2y omega3y
syms Vr1y Vr2y Vr3y Rf1y Rf2y Rf3y Efd1y Efd2y Efd3y
```

```
syms Equ1e Equ2e Equ3e Edu1e Edu2e Edu3e delta1e delta2e delta3e
omega1e omega2e omega3e
syms Vr1e Vr2e Vr3e Rf1e Rf2e Rf3e Efd1e Efd2e Efd3e
```

```
syms V1y V2y V3y V4y V5y V6y V7y V8y V9y
syms V1e V2e V3e V4e V5e V6e V7e V8e V9e
syms teta1y teta2y teta3y teta4y teta5y teta6y teta7y teta8y teta9y
syms teta1e teta2e teta3e teta4e teta5e teta6e teta7e teta8e teta9e
syms Id1y Id2y Id3y Iq1y Iq2y Iq3y
syms Id1e Id2e Id3e Iq1e Iq2e Iq3e
```

```
Vy = [V1y;V2y;V3y;V4y;V5y;V6y;V7y;V8y;V9y];
tetay = [teta1y;teta2y;teta3y;teta4y;teta5y;teta6y;teta7y;teta8y;teta9y];
Ve = [V1e;V2e;V3e;V4e;V5e;V6e;V7e;V8e;V9e];
tetae = [teta1e;teta2e;teta3e;teta4e;teta5e;teta6e;teta7e;teta8e;teta9e];
```

```
Idy = [Id1y;Id2y;Id3y];
Iqy = [Iq1y;Iq2y;Iq3y];
Ide = [Id1e;Id2e;Id3e];
Iqe = [Iq1e;Iq2e;Iq3e];
```

```
Equy = [Equ1y;Equ2y;Equ3y];
Eduy = [Edu1y;Edu2y;Edu3y];
deltay = [delta1y;delta2y;delta3y];
omegay = [omega1y;omega2y;omega3y];
Vry = [Vr1y;Vr2y;Vr3y];
Rfy = [Rf1y;Rf2y;Rf3y];
```

```

Efdy = [Efd1y;Efd2y;Efd3y];

Eque = [Equ1e;Equ2e;Equ3e];
Edue = [Edu1e;Edu2e;Edu3e];
deltae = [delta1e;delta2e;delta3e];
omegae = [omega1e;omega2e;omega3e];
Vre = [Vr1e;Vr2e;Vr3e];
Rfe = [Rf1e;Rf2e;Rf3e];
Efde = [Efd1e;Efd2e;Efd3e];

ddy = [Equy;Eduy;delatay;omegay;Vry;Rfy;Efdy] ;
cd1y = [Idy;Iqy] ;
cd2y = [Vy;tetay] ;
Xddy=ddy;
Xcdy=[cd1y;cd2y] ;
Xy=[Xddy;Xcdy] ;

dde = [Eque;Edue;deltae;omegae;Vre;Rfe;Efde] ;
cd1e = [Ide;Iqe] ;
cd2e = [Ve;tetae] ;
Xdde=dde;
Xcde=[cd1e;cd2e];
Xe=[Xdde;Xcde];

```

```

=====
ariza scripti
=====

```

Jacob

```

for iter=1:10
    if iter==1
        Xyt = transpose(Xy) ;
        Xcdyt = transpose(Xcdy) ;
        Fa = eval(subs(Fas,Xyt,Xilk)) ;
        Ja = eval(subs(Jas,Xyt,Xilk)) ;
        Xa = subs(Xcdy,Xcdyt,Xcdilk) ;
    else

        Xailk=[Xddilk;Xayeni] ;
    end
end

```

```

Xyt = transpose(Xy) ;
Xcdyt = transpose(Xcdy) ;
Fa = eval(subs(Fas,Xyt,Xailk)) ;
Ja = eval(subs(Jas,Xyt,Xailk)) ;
    Xa = subs(Xcdy,Xcdyt,Xayeni) ;
end
X=Xa ;
%disp('Calculation of the inverse of the Jacobian matrix')
iJa=inv(Ja);
%disp('Calculation of deltaX')
farkX=(-1*iJa)*Fa ;
%disp('Calculation of the new X vector')
Xayeni=farkX+X ;
%disp('Calculation of the error vector')
nf=norm(farkX) ;
if(nf<tol)
    iter;
    Xason=[Xddilk;Xayeni];
    %disp('ARIZA BAŞLANGIÇ DEĞERLERİ HESAPLANDI')
    break;
end
%disp('the norm of the error is not smaller than the tolerance so')
%disp('continue to the iteration')
X=Xayeni ;
end

=====
format long;
tic
ariza
%Jacob
sembolik

Xyt      = transpose(Xy)          ;
Xet      = transpose(Xe)          ;
Xdeg     = [Xyt Xet]              ;

T=0;
zaman=0;

```

```

for anaiter=1:25
    if anaiter==2
        sure1=toc;
    end
    if anaiter==5
        sure5=toc;
    end
    if anaiter==25
        sure25=toc;
    end
    for iter=1:10
        if (anaiter==1) & (iter==1)
            Xsadeq = [Xason;Xilk]                ;

            F      = eval(subs(Fs,Xdeg,Xsadeq)) ;
J      = eval(subs(Js,Xdeg,Xsadeq)) ;
            X      = subs(Xy,Xyt,Xason)        ;

            XX=X;

            elseif (anaiter~=1)&(iter==1)
                Xsadeq = [Xanayeni;Xanaeski]    ;

                F      = eval(subs(Fs,Xdeg,Xsadeq)) ;
J      = eval(subs(Js,Xdeg,Xsadeq)) ;
                X      = subs(Xy,Xyt,Xanayeni)    ;

                elseif iter~=1
                    Xsadeq = [Xyeni;Xeski]      ;

                    F      = eval(subs(Fs,Xdeg,Xsadeq)) ;
J      = eval(subs(Js,Xdeg,Xsadeq)) ;
                    X      = subs(Xy,Xyt,Xyeni)    ;
                end
                iJ=inv(J);
                farkX=(-1*iJ)*F;
                Xyeni=farkX+X;
                ndeltax=norm(farkX);
                nF=norm(F);
            end
        end
    end
end

```

```

Xeski=X ;
T=T+h;
if(ndeltax<tol)|(nF<tol)
    anaiter
    %disp('YAKINSAK')
    Xanayeni=Xyeni;
    Xanaeski=Xeski ;
    XX=[XX,Xanayeni];
    zaman=[zaman,T];
    break;
end
end
end
end

```



ÖZGEÇMİŞ

Lise öğrenimini Ankara Yükseliş Özel Lisesi'nde 1994 yılında tamamlayan Yaman Cansın Evrenosoğlu aynı sene İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği bölümüne girdi. 1998 yılında iyi derece ile mezun oldu ve aynı bölümde yüksek lisans programına başladı. Aralık 1998'den bu yana İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği bölümü Elektrik Tesisleri Anabilim Dalı'nda Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.

