



BİLECİK ŞEYH EDEBALI  
ÜNİVERSİTESİ

**BİLECİK  
ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ**

**Fen Bilimleri Enstitüsü  
Enerji Sistemleri Mühendisliği Ana Bilim Dalı**

**ELEKTRİK ENERJİ SİSTEMLERİNDE BİLGİSAYAR  
DESTEKLİ KARARLILIK ANALİZİ VE UYGULAMASI**

**Okan ÖRS  
Yüksek Lisans Tezi**

**Tez Danışmanı  
Prof. Dr. Mehmet KURBAN**

**BİLECİK, 2019  
Ref. No: 10272731**



BİLECİK ŞEYH EDEBALI  
ÜNİVERSİTESİ

**BİLECİK  
ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ**

**Fen Bilimleri Enstitüsü  
Enerji Sistemleri Mühendisliği Ana Bilim Dalı**

**ELEKTRİK ENERJİ SİSTEMLERİNDE BİLGİSAYAR  
DESTEKLİ KARARLILIK ANALİZİ VE UYGULAMASI**

**Okan ÖRS  
Yüksek Lisans Tezi**

**Tez Danışmanı  
Prof. Dr. Mehmet KURBAN**

**BİLECİK, 2019**



BİLECİK ŞEYH EDEBALI  
ÜNİVERSİTESİ

**BİLECİK**

**SEYH EDEBALI UNIVERSITY**

**Graduate School of Science  
Department of Energy System Engineering**

**COMPUTER AIDED STABILITY ANALYSIS OF  
ELECTRICAL ENERGY SYSTEMS AND APPLICATION**

**Okan ÖRS  
Thesis of Master Degree**

**Thesis Advisor  
Prof. Dr. Mehmet KURBAN**

**BİLECİK, 2019**



## BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ

### FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

#### YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunun 20.06.2019 tarih ve 32/01 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 08.07.2019 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Okan ÖRS'ün “**Elektrik Enerji Sistemlerinde Bilgisayar Destekli Kararlılık Analizi ve Uygulaması**” başlıklı tez çalışması Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak oy birliği ile kabul edilmiştir.

#### JÜRİ

ÜYE (Danışman) : Prof. Dr. Mehmet KURBAN

ÜYE: Dr. Öğr. Üyesi Emrah DOKUR

ÜYE: Dr. Öğr. Üyesi Şener AĞALAR

#### ONAY

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun .../.../..... tarih ve ...../..... sayılı kararı.

İMZA / MÜHÜR

## TEŐEKKÖR

Çalıőmalarım süresince emek vererek katkıda bulunan ve desteğini esirgemeyen tez danıőmanım Prof. Dr. Mehmet KURBAN' a sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Ayrıca çalıőmalarım süresince her türlü desteği ve anlayıőı gösteren Alaattin TOPSAKAL, Fuat KARACA, Melih YILMAZ, Melih Can KOLSAL, Oğuz GÖKHASAN' a teşekkür ederim.

## **BEYANNAME**

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kılavuzu'na uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada, tez içindeki tüm verileri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun olarak sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu Üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmada kullanılmadığını beyan ederim.

...../...../ 2019

**Okan ÖRS**

# ELEKTRİK ENERJİ SİSTEMLERİNDE BİLGİSAYAR DESTEKLİ KARARLILIK ANALİZİ VE UYGULAMASI

## ÖZET

Günümüzde enerjiye olan talebin artması, buna bağlı olarak da büyük sistemlerin gerekliliği ve teknolojinin ilerlemesi ile tüketim noktaları yeterli, daha kaliteli ve güvenilir bir enerji talep etmektedir. Bu nitelikteki kaliteli bir enerjiyi oluşturan etmenlerin başında sabit gerilim ve frekans gelmektedir. Gerilim ve frekans değerlerinin uygun değerde sabit olmasını sağlamaya çalışmak elektrik güç sistemlerinin kararlılığını oluşturmaktadır. Sistem kararlılığı bir bozucu etki sonrasında sistemin tekrar bozucu etki öncesi çalışma koşullarına dönme yeteneği olarak tanımlanır. Sistem ancak mekaniksel giriş ve elektriksel çıkış arasındaki uyumun oluşması koşulu ile kararlı çalışabilir. Bu tez çalışmasında kararlılık analizinin önemi, çeşitleri, kullanılan yöntemler açısından detaylı olarak ele alınacak ve çok makinalı sistemler için kararlılık analizi çeşitlerinden birisi olan geçici hal kararlılığının bilgisayar destekli analizi ve güç sistemlerinde meydana gelebilecek faz-toprak, iki faz-toprak, üç faz-toprak ve iki faz kısa devresi gibi çeşitli arızalar sonucunda sistemin kararlılığının analizi gerçekleştirilecektir. Uygulama olarak 14 baralı IEEE test sistemi kullanılarak MATLAB programı yardımıyla sistem kararlılık analizi yapılacaktır. Bu tür analizlerde kullanılan Power System Simulator for Engineering (PSS/E), Power System Simulator (Simpow), DigSilent, EuroStag, NEPLAN ve PowerWorld gibi paket programlara ek olarak bu çalışma ile alternatif bir kararlılık analiz programı ele alınmıştır. Bu tür bir çalışma ile kararlılık analizinin hatasız ve hızlı bir şekilde yapılmasının, güç sistemlerindeki öneminin yanında mühendislere ve mühendislik alanında çalışanlara maliyet, zaman, bilgi ve daha birçok alanda fayda sağlayacağı öngörülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Enerji Sistemleri, Kararlılık Analizi, Geçici Hal Kararlılığı, Çok Makinalı Sistem, MATLAB.

## COMPUTER AIDED STABILITY ANALYSIS OF ELECTRICAL ENERGY SYSTEMS AND APPLICATION

### ABSTRACT

Nowadays consumption points demand a better quality and reliable energy because of increase in demand for energy, the necessity of large systems and progress of technology. Constant voltage and frequency come from at the beginning of the factors that constitute a quality energy. Trying to provide that the voltage and frequency values are constant at the appropriate value is the stability of electrical power systems. System stability is defined as the ability of the system to return to pre-disturbing operating conditions after a disturbing effect. The system can only be operated if there is a conformity between the mechanical input and the electrical output. In this thesis, the importance of stability analysis, types, methods used in detail will be discussed and the stability analysis of the system will be carried out as a result of various failures such as phase-earth, two-phase-earth, three-phase-earth and two-phase short circuit, which may occur in the computer aided analysis and power systems of the transient stability of a type of stability analysis for multi-machine systems. In addition to package programs such as Power System Simulator for Engineering (PSS/e), Power System Simulator (Simpow), DigSilent, Eurostar, NEPLAN and PowerWorld, an alternative stability analysis program has been discussed. With this kind of work it will be beneficial for engineers and people who works in engineering area and materiality, time, knowledge and many other fields to make the determination of stability analysis in an error free and fast way will be useful for them in terms of power systems.

**Keywords:** Power Systems, Stability Analysis, Transient Stability, Multi-Mechanical System, MATLAB

## İÇİNDEKİLER

Sayfa No

<b>TEŞEKKÜR .....</b>	
<b>BEYANNAME .....</b>	
<b>ÖZET.....</b>	<b>I</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>II</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ .....</b>	<b>IV</b>
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ .....</b>	<b>IV</b>
<b>SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....</b>	<b>VI</b>
<b>1.GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1. Literatür Çalışmaları.....	2
1.2. Çalışmanın Amacı ve İçeriği .....	3
<b>2. KARARLILIK ANALİZİ .....</b>	<b>5</b>
2.1. Güç Akışı Analizi .....	10
2.1.1 Güç akışı yöntemleri.....	11
2.2 Geçici Hal Kararlılığı Arızaları ve Hesaplamaları.....	13
2.2.1 Üç faz-toprak kısa devre hesaplamaları.....	14
2.2.2 İki fazlı kısa devre hesaplamaları .....	15
2.2.3 İki-faz toprak kısa devre hesaplamaları .....	16
2.2.4 Bir-faz toprak kısa devre hesaplamaları .....	19
<b>3. KARARLILIK ANALİZİNDE KULLANILAN YÖNTEMLER.....</b>	<b>21</b>
3.1 Eşit Alan Kriteri .....	21
3.2 Adım Adım Yöntemi .....	23
3.3 Euler Yöntemi .....	26
3.4 Düzeltilmiş Euler Yöntemi .....	27
3.5 Runge-Kutta Yöntemi .....	28
3.6 Diğer.....	29
<b>4. BİLGİSAYAR DESTEKLİ KARARLILIK ANALİZİ.....</b>	<b>30</b>
<b>5. UYGULAMA.....</b>	<b>38</b>
<b>6. SONUÇ.....</b>	<b>46</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>48</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>49</b>
<b>ÖZ GEÇMİŞ.....</b>	

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa No</b>
Şekil 2.1. İki makineli bir sistemin güç iletim modeli ve fazör diyagramı.....	7
Şekil 2.2. İletim hattında üç fazlı kısa devre gösterimi.....	14
Şekil 2.3. Üç fazlı arızada bileşen devre bağlantıları.....	14
Şekil 2.4. İletim hattında iki fazlı kısa devre gösterimi .....	15
Şekil 2.5. İki fazlı arızada bileşen devre bağlantıları.....	16
Şekil 2.6. İletim hattında iki faz-toprak kısa devre gösterimi.....	17
Şekil 2.7. İki faz-toprak kısa devresinde bileşen devre bağlantıları .....	18
Şekil 2.8. Bir faz-toprak kısa devresi.....	19
Şekil 2.9. Bir faz-toprak kısa devresi bileşen devre gösterimi .....	20
Şekil 3.1. Eşit alan kriteri yöntemiyle kararsız bir sistemin gösterimi. ....	22
Şekil 3.2. Eşit alan kriteri yöntemiyle kararlı bir sistemin gösterimi .....	22
Şekil 3.3. Adım adım yöntemi grafiksel anlatım. ....	24
Şekil 3.4. Euler yöntemi grafiksel anlatım .....	26
Şekil 4.1. 5 baralı 2 generatörlü bir sistem .....	32
Şekil 4.2. Açık verilerinin grafik hali .....	37
Şekil 4.3. Açık hız verilerinin grafik hali .....	37
Şekil 5.1. 14 baralı test sisteminin blok diyagramı .....	38
Şekil 5.2. 3 Faz-toprak kısa devresi sonucunda generatör verileri .....	41
Şekil 5.3. 1 Faz-toprak kısa devresi sonucunda generatör verileri .....	42
Şekil 5.4. Faz-faz kısa devresi sonucunda generatör verileri.....	43
Şekil 5.5. 2 Faz-toprak kısa devresi sonucunda generatör verileri .....	44

**ÇİZELGELER DİZİNİ**

	<b>Sayfa No</b>
<b>Çizelge 4.1.</b> Sistem Verileri .....	<b>32</b>
<b>Çizelge 4.2.</b> Sistem Verileri .....	32
<b>Çizelge 4.3.</b> Güç Akışı Sonrası Sistem Verileri.....	33
<b>Çizelge 4.4.</b> Arıza Süresince Gerilim Açısı Değerleri.....	35
<b>Çizelge 4.5.</b> Arıza Süresince Rotor Hız Değerleri .....	35
<b>Çizelge 4.6.</b> Arıza Sonrasında Gerilim Açısı Değerleri .....	36
<b>Çizelge 4.7.</b> Arıza Sonrasında Rotor Hız Değerleri.....	36
<b>Çizelge 5.1.</b> Genaratör verileri.....	39
<b>Çizelge 5.2.</b> Bara verileri .....	39
<b>Çizelge 5.3.</b> Hat verileri .....	40

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

B	:Suseptans
e	: Birim gerilim fazörü
H	: Generatör atalet momenti
i	: Birim akım fazörü
$V_0$	: Sıfır bileşen devre gerilim fazörü
$V_1$	: Doğru bileşen devre gerilim fazörü
$V_2$	: Ters bileşen devre gerilim fazörü
P	: Aktif güç
$P_e$	: Generatör elektrik gücü
$P_m$	: Generatör mekanik gücü
$p_g$	: Generatör tarafından üretilen birim aktif güç
$P_{gl}$	: Salınım barasından hatta verilen aktif güç değeri
$p_y$	: Yük tarafından çekilen birim aktif güç
$p_{hat}$	: Hatta verilen birim aktif güç
p	: Birim aktif güç
Q	: Reaktif güç
q	: Birim reaktif güç
$q_g$	: Generatör tarafından üretilen birim aktif güç
$q_{hat}$	: Hatta verilen birim reaktif güç
$q_y$	: Yük tarafından çekilen birim reaktif güç
$q_c$	: Kapasite tarafından üretilen birim reaktif güç
R	: Direnç elemanı
S	: Görünür güç
X	: Reaktans genlik değeri
$X_d$	: Senkron reaktans
$X'_d$	: (Transiyent) geçici reaktans
$X''_d$	: (Subtransiyent) alt geçici reaktans
$V_{th}$	: Thevenin eşdeğer gerilimi
$\omega$	: Açısız hız
y	: Birim admitans fazör çarpanı

$Y$	: Admitans genlik değeri
$[Y_{\text{bara}}]$	: Bara admitans matrisi
$Z$	: Enpedans genlik değeri
$Z_{\text{th}}$	: Thevenin eşdeğer enpedansı
$[Z_{\text{bara}}]$	: Bara enpedans matrisi

## 1.GİRİŞ

Günümüzde teknolojinin ilerlemesi ile tüketim noktaları daha kaliteli ve güvenilir bir enerji talep etmektedir. Bu nitelikte ki enerjiyi oluşturan etmenler ise özetlenecek olursa sabit gerilim ve frekanstır. Gerilim ve frekans değerlerinin sabit olmasını sağlamaya çalışmak elektrik güç sistemlerinin kararlılığını oluşturmaktadır (Öztürk vd., 2011).

Elektrik enerjisi senkron generatörler tarafından üretilip tüketiciye sunulmaktadır. Elektrifikasyon şekli olarak enterkonnekte şebeke kullanılmasından dolayı sistemin elektrik enerjisini karşılamakta olan senkron generatörlerin aynı senkronizmada çalışması elektrik güç sistemleri kararlılığının en büyük etmenidir. Sistemde oluşacak bozucu etkiler sonrasında senkron generatörlerin açılma hızlarında ve rotor açılarında salınımlar ortaya çıkmaktadır. Bu salınımların sönümlenmesini sağlamak için elektrik güç sistemlerinde otomatik gerilim regülatörü ve güç sistemi kararlı kılıcısı gibi denetleyiciler kullanılmaktadır (Öztürk vd., 2011).

Güç sistemlerinde kararlılık özet olarak; normal koşullar altında çalışan bir elektrik güç sisteminin bozucu etkiler sonucunda tekrardan kararlı hale gelme durumu olarak tanımlanabilir. Genel anlamda kararlılık problemi; senkron çalışmayı sürdürme yeteneği olmalıdır (Öztürk vd., 2011).

Kararlılığın değerlendirmesi geçici bir bozulma olduğunda güç sisteminin davranışı ile ilgilidir. Bozulma küçük veya büyük olabilir. Yük değişimleri ile oluşan küçük bozunumlar sürekli olarak gerçekleşmekte ve değişim koşullarına göre sistem kendisini ayarlayabilmektedir. Sistem bu koşullar altında uygun şekilde çalışabilmeli ve maksimum miktarda yükü yeterli bir şekilde besleyebilmelidir. Bu aynı zamanda bir iletim hattı üzerindeki kısa devre, büyük bir generatör, yük kaybı ve ya iki alt sistem arasındaki bağlantının kaybolması gibi sayısız bozulmalara dayanabilme yeteneği olmalıdır (Öztürk vd., 2011).

Kararlılık zıt kuvvetler arasındaki denge koşulu olup, enterkonnekte bir güç sisteminde senkron makineleri birbiriyle senkronizmada tutan mekanizma diğer makinelere göre bir yada daha fazla makineyi hızlandıran veya yavaşlatan kuvvetler oluştuğunda ortaya çıkan düzeltici kuvvetlerden yola çıkılarak sağlanır. Sürekli durumda her bir makinenin elektriksel çıkış momenti ve mekanik giriş momenti arasında bir denge olup hız sabittir. Sistem bozulmuşsa bu denge durumu bozulur, makinelerin rotorlarının

hızlanması ya da yavaşlaması dönen cismin hareket kurallarına bağlıdır. Bir generatör sürekli olarak diğerinden daha hızlı gidiyorsa, yavaş giden makineye göre onun rotorunun açısal durumu ileri olacaktır. Sonuçta ortaya çıkan açısal fark yükün bir kısmını yavaş makineden hızlı makineye, güç açısı bağıntısına bağlı olarak aktarmaktadır. Bu yönelim hız farkını ve açısal farkı azalacaktır. Güç açısı bağıntısı yüksek dereceden doğrusal olmayan olup belli sınırların ötesinde, açısal sapmadaki bir artış güç iletiminde bir azalmaya eşlik eder. Bu açısal sapmayı arttırır ve kararsızlığa neden olur. Herhangi bir durumda, sistemin kararlılığı rotorların açısal durumlarındaki sapmaların yeterli düzelme momentlerini oluşturup oluşturmadıklarına bağlıdır (Öztürk vd., 2011).

Güç sistemlerinin kararlılık analizi için hazırlanmış olan; Power System Simulator for Engineering (PSS/E), Power System Simulator (Simpow), DigSilent, EuroStag, NEPLAN ve PowerWorld gibi paket programların ücretli oluşu maddi açıdan her kullanıcıya hitap etmemektedir. Bu çalışmada güç sistemlerinde meydana gelebilecek büyük arızalar sonucu sisteme bağlı generatör ya da generatörlerin açısal kararlılığı MATLAB demo sürümü yardımı ile analiz edilmesi amaçlanmıştır. Bu şekilde kompleks yapıda olan ya da olmayan güç sistemlerinin açısal kararlılık analizinin hatasız ve hızlı bir şekilde yapılması, mühendislere ve mühendislik alanında çalışan insanlara maddiyat, zaman, bilgi ve daha birçok alanda fayda sağlanması öngörülmüştür (Öztürk vd., 2011).

Geçtiğimiz yıllarda MODELICA, MATHEMATICA, MATLAB ve benzeri yüksek seviye bilgisayar yazılım programları eğitim ve araştırma sebepleri için sıkça kullanılmaya başlandı. Bu programlar güç sistem analizi alanlarında güzel ve doğru sonuçlar verebilirler. Bu programların içinde MATLAB programı diğer programlara göre üstünlüğü fazladır. Bu programın en iyi özellikleri ise üstün çizim kapasitesinin çok iyi olması, matris odaklı programlanması ve kontrol şeması dizaynını oldukça kolaylaştırıp, basitleştiren Simulink programına sahip olmasıdır. Bu sebeplerden ötürü çalışmada MATLAB programı tercih edilmiştir (Ekinci ve Hekimoğlu, 2018).

### **1.1. Literatür Çalışmaları**

Elektrik güç sistemlerinde tüketiciye sunulan elektrik enerjisinin daha kaliteli ve güvenilir olması için yapılan kararlılık analizlerinin hızlı ve güvenilir bir şekilde yapılması büyük önem taşımaktadır. Bu sebeple;

Serdar E. MATLAB / SIMULINK programında yapmış olduğu modelleme ile 9 baralı ve 2 makinalı bir sistemde 3 fazlı kısa devre ve hat açması arıza durumlarının

gerçekleşmesi durumunda sistemin geçici hal kararlılığı analizini güvenli ve hızlı bir şekilde analizini yapabilmiştir (Ekinci, 2015).

Tuğba G. ve Hakan H. kararlık analizinin yapılabilmesi için gerekli olan yük akışı analizini MATLAB programında oluşturdukları ara yüz programı ile yapmış olup kullanıcıların daha kolay bir şekilde analiz yapabilmesi ve veri girişlerinde hatalara sebebiyet vermemesi adına görsel alanda geliştirmişlerdir (Gözel ve Hocoğlu, 2006).

Serdar E. MATLAB GUI aracı ile PowSysGUI adında üretmiş olduğu paket program ile güç akışı analizi, geçici hal kararlılığı analizi, küçük işaret kararlılığı analizi, PSS(güç sistem kararlı kılıcısı) tasarımı olmak üzere 4 işlemi yapabilmektedir. Yapılan paket program yardımıyla bahse konu analizlerin kolay bir şekilde yapılması ve paket program kodlarının açık kaynak olmasından dolayı gerek Serdar E gerekse kullanıcılar tarafından geliştirilebilir olması daha çok eğitim alanında fayda sağlanması amaçlanmıştır (Ekinci vd., 2017).

Tha'er O. S. ve arkadaşları 5 baralı 2 generatörlü bir sistemde 3 fazlı kısa devre olması durumunda sistemin geçici hal kararlılığını MATLAB programı yardımıyla analiz etmişlerdir (Athay vd., 1979).

Nihat P. Sakarya İli iletim sistemini MATLAB / SIMULINK yardımı ile modellemiş, sistemin güç akışı analizini yapmış ve sistemde 3 fazlı kısa devre meydana gelmesi durumunda oluşabilecek olayları incelemiştir (Pamuk, 2011).

Serdar E. ve arkadaşı MATLAB / SIMULINK yardımı ile tek generatörlü, sonsuz baralı bir elektrik güç sisteminde oluşacak büyük ve ya küçük arızalar sonucunda sistemin sürekli ve geçici hal kararlılık analizi yapan paket programını üretmiş olup eğitim alanında fayda sağlamayı amaçlamışlardır (Ekinci ve Hekimoğlu, 2018).

## **1.2. Çalışmanın Amacı ve İçeriği**

Yapılan araştırmalar sonucunda;

Elektrik güç sistemlerinde meydana gelebilecek arızalar sonucunda sistemin tekrar eski çalışma durumuna gelmesi kararlılık olarak adlandırılmaktadır. Bu arızalar büyük ya da küçük olabilmektedir. Sistemin normal çalışması, arıza dönemi ve arıza sonrasındaki durumlarını tespit etmek kararlılık analizi olarak adlandırılabilir. Bu çalışmada maksimum olarak sonsuz generatör ve baraya sahip olan bir elektrik güç sisteminin büyük bozucu etkiler sonucunda rotor açısı bakımından geçici hal kararlılığını MATLAB yardımı ile hazırlanacak bir paket program yardımı ile analiz etmek

istenilmektedir. Yapılacak olan program kullanımının kolaylığı ve MATLAB demo ile her kullanıcıya hitap edecektir. Ayrıca bilgisayar destekli analiz sayesinde yapılan kararlılık analizleri hızlı ve güvenilir bir şekilde olacaktır.

Bu tezin birinci bölümünde kararlılığın önemi, kararlılık analizinin hangi bilgisayar programları ile yapıldığı, kararlılık analizi hakkında yapılan çalışmalar, tezin amacı ve tez bölümlerinde neler anlatıldığı; ikinci bölümünde kararlılık analizi hakkında detaylı bilgi, kararlılık analizi çeşitleri, geçici hal kararlılığı denklemleri; kararlılık analizi yapılabilmesi için hangi işlemlerin gerçekleştirileceği ve bu işlemlerin çeşitleri ile matematiksel denklemleri; üçüncü bölümde kararlılık analizinde kullanılan nümerik çözüm yöntemlerinin neler olduğu ve bu yöntemlerin matematiksel denklemleri; dördüncü bölümde kararlılık analizi için bilgisayar programlarının faydası ve bir örnek ile kararlılık analizinin nasıl yapıldığının gösterimi; beşinci bölümde IEEE' nin 14 baralı test sistemi için kararlılık analizinin MATLAB programında yazılan kararlılık analizi yazılımı ile yapılması; altıncı bölümde bu çalışmanın değerlendirilmesi yer almaktadır.

## 2. KARARLILIK ANALİZİ

Enerji güç sistemlerinin normal çalışma standartları altında olağan dengesini koruması ve bozucu etkiyle karşılaştıktan sonra yeniden kabul edilebilen bir denge durumunu kazanması, enerji sistemlerinin kararlılığını özetler.

Enerji güç sistemlerinde sistem yapısı ve çalışma moduna göre oluşan durumlarda kararsızlık ortaya çıkabilir. Kararlılık genel olarak senkron çalışmasının korunması olarak da ifade edilebilir. Elektriksel gücün üretimi sırasında güç sistemleri senkron makinelere bağımlı olduğu için sistemin kararlı çalışmasını sağlamak için gereken şart, tüm senkron makinelerin senkronizmada kalmasıdır. Generatör rotor açılarına ait dinamik ve güç-açı bağlantıları bu kararlılık düşüncesini tanımlayabilir.

Kararsızlık durumu senkronizma kaybı olmaksızın da ortaya çıkabilir. Örnek olarak, bir iletim hattı üzerinden bir indüksiyon motorunu besleyen senkron generatörden oluşan bir sistem, yük geriliminin çökmesi yüzünden kararsız olabilir. Bu gibi bir durumda senkronizmanın korunması yerine gerilim kararlılığı ve gerilimin kontrolü üzerinde durulur.

Geçici bir bozucu etkiye uğrayan enerji sisteminin yapmış olduğu davranış kararlılık hesaplamalarında incelenen bir hadisedir. Bozucu etki büyük ya da küçük olabilir. Yük değişimleri biçiminde küçük bozucu etkiler sürekli olarak gerçekleşir ve sistem değişen şartlara göre kendini ayarlar. Bu şartlar altında sistem problemsiz çalışabilmeli ve en yüksek yükü başarılı bir şekilde besleyebilmelidir. Bir iletim hattında oluşan kısa devre, büyük generatör ya da yüklerin kaybı veya iki alt sistem arasındaki bağın kaybolması gibi büyük bozucu etkilere de sistem yeterli olabilmelidir.

Bir enerji güç sisteminde çalışan tüm senkron makinelerin senkronizmada kalma kabiliyeti rotor açısı kararlılığıdır. Kararlılık problemi, güç sistemlerinin yapısında olmayan elektromekanik titreşimlerin incelenmesini içerir. Senkron makinelerin çıkış güçlerinin rotorlarının titreşimleri ile değişmesi olayı sorunun ana sebebidir. İki ya da daha fazla senkron makine birlikte çalışırken, tüm makinelerin stator gerilimleri ve akımları aynı frekansa sahip ve her rotorun mekanik hızı bu frekansa uyumlu olmalıdır. Bu şekilde birlikte çalışan tüm senkron makineler senkronizmada kalmaktadır.

Senkron makinelerin rotorlarının açıl konumları ile güç alışverişi arasındaki bağıntı enerji güç sistem kararlılığında önemli olan karakteristiktir. Şekil 2.1(a) da gösterildiği gibi, direnci ve kapasitansı ihmal edilmiş yalnız endüktif  $X_h$  reaktansına sahip

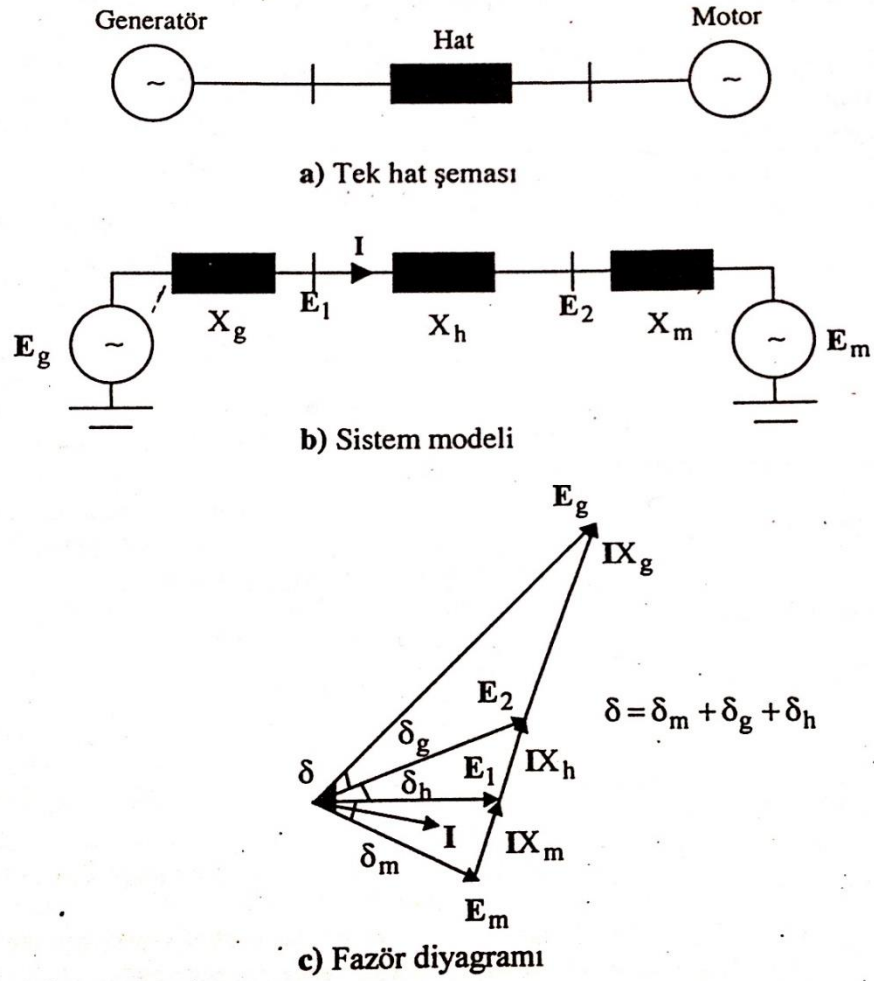
olan bir iletim hattı ile birbirlerine bağlı iki senkron makineden meydana gelen basit bir sistem incelenerek konu açıklanabilir. Senkron motora güç generatör ile sağlanmaktadır. Generatörden motora iletilen güç değeri, iki makinenin rotorları arasındaki  $\delta$  açısal farkın fonksiyonu ile değişir. Bu açı farkı üç bileşenden oluşur; generatör iç açısı  $\delta_g$ , generatör ve motorun uç gerilimleri arasındaki açı farkı  $\delta_h$  ve motorun iç açısı  $\delta_m$ . Güç ile açı arasındaki bağıntıyı belirlemek için kullanılabilen sistem modeli şekil 2.1(b)'de, generatör ve motor gerilimleri arasındaki bağıntıyı açıklayan fazör diyagramı da şekil 2.1(c)'de gösterilmiştir.

Gücün açıya göre değişimi sinüs biçiminde olup, daha ayrıntılı senkron makine modellerinde bu şekildeki sapmalar da dikkate alınabilir. Bununla beraber, genel olarak  $p(\delta)$  değişiminin sinüs formundan fazla ayrılmadığı söylenebilir.  $X_T = X_g + X_h + X_m$ ; generatör ile rotor arasındaki toplam seri empedans,  $E_g$ ; generatör iç elektromotor kuvveti,  $E_m$ ; motor iç elektromotor kuvveti olmak üzere generatörden motora iletilen güç;

$$P_e = E_g E_m \sin(\delta) / X_T \quad (2.1)$$

olur.

Sürekli hal şartları altında büyük bir enerji güç sistemindeki bütün makinelerin mekanik giriş momenti ile elektriksel çıkış momenti arasında bir balans olup, hız sabit kalır. Sistem bir bozucu etkiyle karşılaşır, denge bozulur ve makinenin rotorları hızlanır ya da yavaşlar. Bir generatör geçici olarak diğerlerinde daha hızlı hareket ederse, bu makinenin rotorunun açısal durumu daha yavaş olan makinenin açısal durumuna göre ileriye kayar. Bir makine ile sistemin geri kalanı ya da makine grupları arasında senkronizma kaybı oluşabilir.



**Şekil 2.1.** İki makineli bir sistemin güç iletim modeli ve fazör diyagramı (Arifoğlu, 2002).

Kararlılık rotor açısının konumuna bağlı olduğundan, bunu üç sınıfa ayırarak incelemek daha sağlıklıdır.

Küçük işaret veya sürekli hal kararlılığı, küçük bozucu etkiler altında enerji güç sisteminin senkronizmayı koruma yeteneğidir. Yükler ve üretimdeki küçük değişimlerden dolayı, sistem üzerinde sürekli olarak böyle bozucu etkiler oluşmaktadır (Arifoğlu, 2002).

Geçici hal kararlılığı, faz-toprak, faz-faz-toprak ve üç faz kısa devresi gibi şiddetli geçici bir bozucu etkiye maruz kaldığında güç sisteminin senkronizmayı koruyabilmesidir. Bu bozucu etkiler sonucunda generatör rotor açılarında büyük titreşimler meydana gelir. Arızaların genellikle iletim hatları üzerinde oluştuğu düşünülmekle beraber, bazen bara ve transformatör arızaları da göz önüne alınır.

Kararlılık, sistemin başlangıçtaki çalışma durumuna, bozucu etkinin yerine, cinsine ve şiddetine bağlıdır. Geçici hal kararlılık incelemelerinde inceleme süresi, küçük sistemlerde bozucu etkiyi izleyen 3 veya 5 saniye ile sınırlı olmakla beraber, çok büyük sistemler için yaklaşık 10 saniyeye kadar genişleyebilmektedir (Arifoğlu, 2002).

Geçici hal kararlılığı analizi diğer hal kararlılıklarından farklı bir şekilde analiz edilir. Diğer hal kararlılıklarında kullanılan analiz yöntemlerindeki denklemler lineerdir. Ancak geçici hal kararlılığı analizi lineer değildir. Analiz 2 bölüme ayrılır. Bunlar hata öncesi ve hata sonrası olarak adlandırılabilir. Bunun sebebi oluşacak arızalar sistemin bara admitans matrisini değiştirecek olması ve buna bağlı olarak analizin hata öncesi ve hata sonrası olarak değerlendirilmesidir. Bu durum özetlenecek olursa;

$$\left[ \frac{dx}{dt} \right] = [f_1(x)] \quad 0^+ < t < t_t \quad (2.2)$$

$$\left[ \frac{dx}{dt} \right] = [f_2(x)] \quad t > t_t \quad (2.3)$$

$[f_1(x)]$  hatanın oluştuğu hal,  $[f_2(x)]$  hatanın kaldırıldığı hal,  $t = t_t$  arızanın temizlendiği hal ve  $t = 0$  anı arızanın olduğu anı belirtmektedir.

Bir sistemin kararlı kısımlarının davranışını gösteren matematiksel modele sistemin salınım denklemi (swing eşitliği) denilmektedir. Bu denklemlerde  $W_{kei}$  MW cinsinden kinetik enerjiyi,  $P_{sei}$  MW cinsinden söndürme gücünü,  $P_{ei}$  MW cinsinden elektriksel çıkış gücünü,  $P_{mi}$  MW cinsinden mekanik giriş gücünü,  $f_i$  frekans değerini belirtmekte olup;

$$\frac{d}{dt} (W_{kei}) + P_{si} = P_{mi} + P_{ei} \quad (2.4)$$

$$W_{kei} = W_{kei}^0 \left( \frac{f_i}{f_0} \right)^2 \quad (2.5)$$

$$f_i = f_0 + \Delta f_i \quad (2.6)$$

$$W_{kei} = W_{kei}^0 \frac{(f_0 + f_i)^2}{f_0^2} = W_{kei}^0 \left( 1 + \frac{2\Delta f_i}{f_0} \right) \quad (2.7)$$

$$\frac{d}{dt} (W_{kei}) = \frac{2W_{kei}^0}{f_0} \frac{d}{dt} \Delta f_i \quad (2.8)$$

$$\delta_i = \theta_i - W_0 t \quad (2.9)$$

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \frac{d\theta_i}{dt} - w_0 = w_i - w_0 = 2\pi(f_i - f_0) = 2\pi\Delta f_i \quad (2.10)$$

$$\Delta f_i = \frac{1}{2\pi} \frac{d\delta_i}{dt} \quad (2.11)$$

$$\frac{d}{dt} \Delta f_i = \frac{1}{2\pi} \frac{d^2\delta_i}{dt^2} \quad (2.12)$$

$$\frac{d}{dt} (W_{kei}) = \frac{W_{kei}^0}{\pi f_0} \frac{d^2\delta_i}{dt^2} \quad (2.13)$$

$$\frac{h_i}{\pi f_0} \frac{d^2\delta_i}{dt^2} + d_i \frac{d\delta_i}{dt} = P_{mi} - P_{ei} \quad (2.14)$$

dir. Kararlılık analizinin yapılabilmesi için sistemi analinizi oluşturan başlıca denklemler şunlardır;

$$P_{mi} = e_i^2 y_{ii} \cos\theta_{ii} + \sum_{j=1, j \neq i}^{ng} e_i e_j y_{ij} \cos(\theta_{ij} - \delta_{ij}) \quad (2.15)$$

$$P_{ei} = e_i^2 y_{ii} \cos\theta_{ii} + \sum_{j=1, j \neq i}^{ng} e_i e_j y_{ij} \cos(\theta_{ij} - \delta_{ij}) \quad (2.16)$$

$$y_{ij} = g_{ij} + j b_{ij} = y_{ij} \angle \theta_{ij} \quad (2.17)$$

$$e_i = V_i + j X'_{di} \left( \frac{P_{gi} - j q_{gi}}{V_i^*} \right) = e_i \angle \delta_i \quad (2.18)$$

$$I_i = \frac{S_i^*}{V_i^*} = \frac{P_i - j q_i}{V_i^*} \quad (2.19)$$

$$y_{yi} = \left( \frac{P_{yi} - j q_{yi}}{V_i^2} \right) \quad (2.20)$$

olup  $P_{mi}$  generatör mekanik gücü,  $P_{ei}$  generatörün elektriksel gücü,  $e_i$  generatör gerilim fazörü,  $I_i$  akım,  $y_{yi}$  yük barası olan baralarda oluşacak admitans değeridir. Kararlılık analizi 2 farklı yöntem ile yapılabilir. Bunlar; birincisi art arda metot, ikincisi direkt metottur. Art arda metotta sistemin kararlılık analizi adım adım çözülürken direkt metotta salınım denklemini nümerik olarak çözülür. Bu sebepten dolayı direkt metot art arda metoda göre daha hızlıdır. Ancak art arda metotta analiz süresince generatör

gerilim değerleri izlenebilirken direkt metotta böyle bir durum söz konusu değildir. Bu çalışmada art arda metot kullanılmıştır.

Dinamik hal kararlılığı, birkaç saniyelik geçici olay sresinden mekanik regülatörlerin de devrede olduğu birkaç dakikalık sürede sistemin bozucu etkiye verdiği cevap olarak tanımlanır.

Güç sistemlerinde geçici hal kararlılığı analizi yapılabilmesi için izlenmesi gereken yol aşağıda sırasıyla belirtilmiştir.

1. Sistem modelinin ve parametrelerin belirlenmesi
2. Güç akışı analizi
3. Sistemde meydana gelen arıza türüne göre arıza analizi
4. Nümerik yöntemler yardımıyla swing eşitliğinin çözümlenmesi ve g aı eşitliklerinin bulunması
5. Yapılan zmlenmeler soncunda elde edilen gerilim aı ve rotor açısal hız değerlerinin incelenmesi

## 2.1. Güç Akışı Analizi

Güç akışı analizi güç sistemlerinin temel analizlerinden biri olan ve sistemde oluşabilecek olayların planlanması açısından büyük önem taşımaktadır. Güç akışı analizi gerilim değerleri bilinmeyen baralardaki tahmini gerilim değerleri ile verilmiş olan reaktif ve aktif gler ile beraber yeni gerilim değerleri elde etme olarak ta söylenilebilir. Güç akışı analizinde mevcut sistemi oluşturan hat, trafo, generatör, hat şönt admitans değerlerinin bulunduğu  $Y_{BARA}$  admitans matrisi kullanılmaktadır. Güç akışı analizinde 3 çeşit bara tipi bulunmaktadır. Bunlar; salınım(slack) barası, gerilim baraları, yk baralarıdır. Salınım barası üretim barası olarak ta tanımlanabilir. Salınım baralarında gerilim ve gerilimin açı değeri verilmektedir. Salınım barasının aktif gücü değişebilmekle birlikte aktif güç değeri yüklerin toplam kayıp değerleri ile yüklere ait aktif güç değerleri arasındaki farka eşittir. Güç akışı analizi boyunca salınım barası gerilim değeri sabit tutulmaktadır. Gerilim baraları generatörlerin bulunduğu baralardır ve gerilim değerleri sabit tutulur. Yük baraları ise sistemden çekilen aktif ve reaktif glerin olduğu baralardır.

Güç akışı analizinin yapılması belli bir algoritma ile yapılmakta olup bu algoritmaların sweep temelli oluşu ve hızlı yakınsama yapabilmesi sebebiyle kolaylıkla uygulanabilmektedir (İnan, 2008).

### 2.1.1 Güç akışı yöntemleri

Güç akışı analizinin kolaylıkla uygulanabildiği ve en çok tercih edilen güç akışı yöntemleri aşağıda verilmiştir. Bunlar;

- Newton-Raphson,
- Gauss-Seidel,
- Fast Decoupled Load Flow

#### *Gauss-Seidel metodu*

Denklem (2.21) yardımıyla n baralı bir sistemde her iterasyonda elde edilen gerilim değerleri ile bir sonra ki adımda elde edilen gerilim değerleri arasındaki farkın başta seçilen bir sabitten küçük olma durumu ele alınır ve bu durumun olması ile iterasyon sonlandırılır.

$$V_k = \frac{1}{Y_{kk}} \left( \frac{P_k - jQ_k}{v_k^*} - \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \right) \quad (2.21)$$

2.21 denkleminde yer alan Y değerleri sistemde bulunan hatların admitans değerlerini belirtmektedir. Bu yöntemde generatör ve yük admitans değerleri Y admitans matrisine ilave edilmez.

#### *Newton-Raphson Metodu*

Newton-Raphson yöntemi iteratif bir biçimde çalışan, en yaygın güç akışı çözüm yöntemlerinden biridir. Bu yöntem Taylor serisi açılımına dayanan ve kısa sürede çözüme iyi derecede yaklaşan klasik bir yöntemdir. Bu sebeple bu çalışmada Newton-Raphson yöntemi kullanılmıştır. Bara değişkenleri; n toplam bara sayısı, i ve j bara numaraları olarak belirtilmektedir (Yamaçlı ve Abacı, 2013).

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad (2.22)$$

Aktif ve reaktif güç denklemleri ise 2.23 ve 2.24 numaralı eşitliklerde;  $\theta_{ij}$ ,  $\delta_i$  ve  $\delta_j$  sırasıyla  $Y_{ij}$ ,  $V_i$  ve  $V_j$  sistem değişkenlerinin açısı olarak belirtilir.

$$P_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_i| |V_j| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.23)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_i| |V_j| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.24)$$

Newton-Raphson iteratif yöntemi ile işlenen ve kullanılan temel denklem sistemi ise 2.25 ile verilen,  $B=J \times X$  denklemdir.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

Burada  $J_1, J_2, J_3$  ve  $J_4$  Jacobian matrisinin alt matrisleridir.  $B, \Delta P$  ve  $\Delta Q$ 'nun;  $X$  ise  $\Delta \delta$  ve  $\Delta V$ 'nin matrisleridir. Jacobian matrisinin köşegen ve köşegen olmayan elemanları

$$J_{1d} = \sum_{j \neq 1}^n |Y_{ij}| |V_i| |V_j| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.26)$$

$$J_{1\text{off-d}} = -|Y_{ij}| |V_i| |V_j| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \quad (2.27)$$

$$J_{2d} = 2|V_i| |Y_{ii}| \cos \theta_{ii} \sum_{j \neq 1}^n |Y_{ij}| |V_j| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.28)$$

$$J_{2\text{off-d}} = -|V_i| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \quad (2.29)$$

$$J_{3d} = \sum_{j \neq 1}^n |Y_{ij}| |V_i| |V_j| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.30)$$

$$J_{3\text{off-d}} = -|Y_{ij}| |V_i| |V_j| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \quad (2.31)$$

$$J_{4d} = -2|V_i| |Y_{ii}| \cos \theta_{ii} \sum_{j \neq 1}^n |Y_{ij}| |V_j| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.32)$$

$$J_{4\text{off-d}} = -|V_i| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \quad (2.33)$$

$B$  ve  $X$  matrislerinin elemanları ise,

$$\Delta P_i^{(k+1)} = P_i^{(k+1)} - P_i^k \quad (2.34)$$

$$\Delta Q_i^{(k+1)} = Q_i^{(k+1)} - Q_i^k \quad (2.35)$$

$$\Delta \delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k+1)} - \delta_i^k \quad (2.36)$$

$$\Delta V_i^{(k+1)} = V_i^{(k+1)} - V_i^k \quad (2.37)$$

olarak belirlenir.

$\Delta\delta$  ve  $\Delta V$ 'nin başlangıç değerleri genellikle kullanıcı tarafından belirlenerek sırasıyla 0 ve 1 olarak atanır. Newton- Raphson algoritması 2.25 ile verilen eşitlikteki  $\Delta P$  ve  $\Delta Q$  elemanlarının belirlenen bir hata değerine yaklaşmasına kadar devam eder. Hata değeri genellikle 0,000001 olarak seçilmektedir.

Başka bir metot ta Fast-Decoupled Power Flow' dur. Newton-Raphson çözümünde oluşturulan Jacobien matrisinde bazı varsayımların yapılması ile çözümlenmektedir. Bu yöntemde yüklerin aktif gücü faz açılarıyla ve reaktif gücün gerilimler ile çok değişmesi sebebiyle, Jacobian matriste, Denklem (2.25)'de, aktif gücün gerilime ( $J_2$ ) ve reaktif gücün faz açısına bağlılığı ( $J_3$ ) ihmal edilerek güç akışı hesabı yapılmaktadır. Bu durumda denklem sistemi

$$J_{1(i)} \Delta\delta_{(i)} = \Delta P_{(i)} \quad (2.38)$$

$$J_{4(i)} \Delta V_{(i)} = \Delta Q_{(i)} \quad (2.39)$$

şeklinde bilinmeyen değerler hesaplanır. Çözümlemenin daha hızlı çalışabilmesi için Jacobian matrisi başlangıca göre, ( $V_k=1pu$ ), oluşmasından sonra hesaplama anında sabit tutulmaktadır. Bu şekilde çözümlenmeye sabit Jacobian'lı Fast-Decoupled Power Flow metodu denilmektedir.

## 2.2 Geçici Hal Kararlılığı Arızaları ve Hesaplamaları

Bu çalışmada geçici hal kararlılığı durumu ele alınmıştır. Geçici hal kararlılığı analizi, enerji iletim hatlarında meydana gelen 3 faz-toprak, 1 faz-toprak, 2 faz-toprak, 2 fazlı kısa devre durumları için yapılmaktadır. Sistem elemanlarının seçilmesi ve oluşabilecek arızanın en kısa sürede sistemden izole edilebilmesi için, kısa devre hesaplarının sağlıklı bir şekilde yapılması gerekmektedir. Bu amaçla hesaplar yapılırken;

— Kısa devre olayı esnasında, kısa devreye dâhil devrede bir değişiklik olmadığı yani üç fazlı kısa devre ise üç fazlı, faz-toprak kısa devresi ise faz-toprak kısa devresi olarak devam ettiği gibi,

— Transformatörlerin ana kademelerinde olduğu,

— Ark dirençlerinin hesaba dâhil edilmediği,

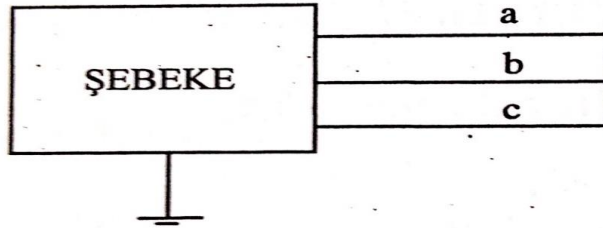
— Kısa devrenin olduğu noktada eşdeğer bir gerilim kaynağının olduğu,

— Tesisat elemanlarının doğru, ters ve sıfır bileşen empedanslarının belirlenebildiği,

— Eşdeğer empedans diyagramının gerekiyorsa dönüşümlerden yararlanarak hesaplar için basitleştirilebildiği, kabulleri yapılır.

### 2.2.1 Üç faz-toprak kısa devre hesaplamaları

Şebekenin bir noktasında üç fazlı bir kısa devrenin oluşması durumunda a, b ve c fazlarına sahip gerçek sistemin nötr gerilim değerleri; formda yazılırsa;



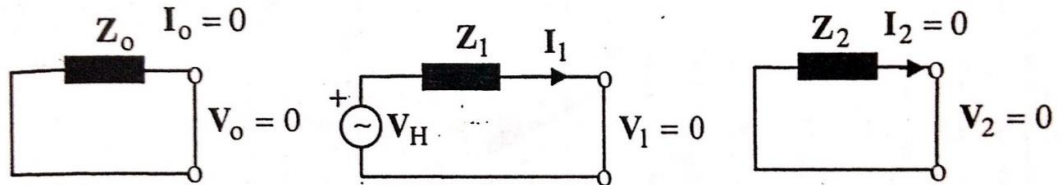
Şekil 2.2. İletim hattında üç fazlı kısa devre gösterimi (Arifoğlu, 2002).

$$V_a = 0, V_b = 0, V_c = 0 \quad (2.40)$$

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ Volt} \quad (2.41)$$

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ V_H \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \text{ Volt} \quad (2.42)$$

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ V_H/Z_1 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ A} \quad (2.43)$$



Şekil 2.3. Üç fazlı arızada bileşen devre bağlantıları (Arifoğlu, 2002).

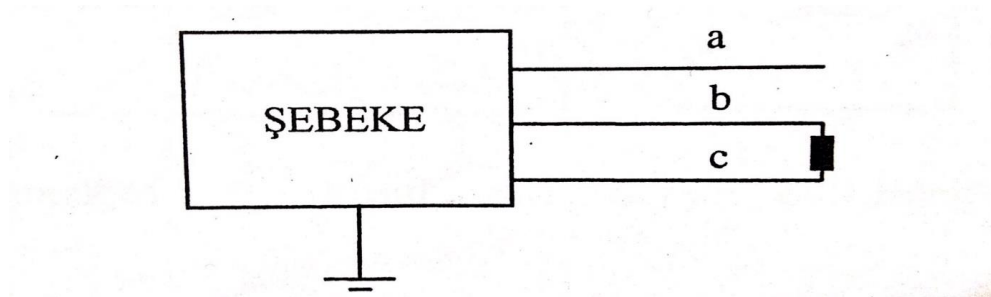
$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_H/Z_1 \\ a^2 V_H/Z_1 \\ a V_H/Z_1 \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

Son eşitlikte  $V_H$ , kısa devre barasına ilişkin hata öncesi kısa devre noktasındaki gerilim vektörü,  $Z_1$  ise hatalı baradan devreye bakıldığında görülen Thevenin empedans değeridir.

### 2.2.2 İki fazlı kısa devre hesaplamaları

Şebekenin bir noktasında  $Z_H$  direnci üzerinden iki fazlı bir kısa devrenin oluşması durumunda a, b ve c fazlarına sahip gerçek sistemin faz-nötr gerilim değerleri ve hat akımları;

$$V_b - V_c = Z_H I_b, I_a = 0, I_c = -I_b \quad (2.45)$$



Şekil 2.4. İletim hattında iki fazlı kısa devre gösterimi (Arifoğlu, 2002).

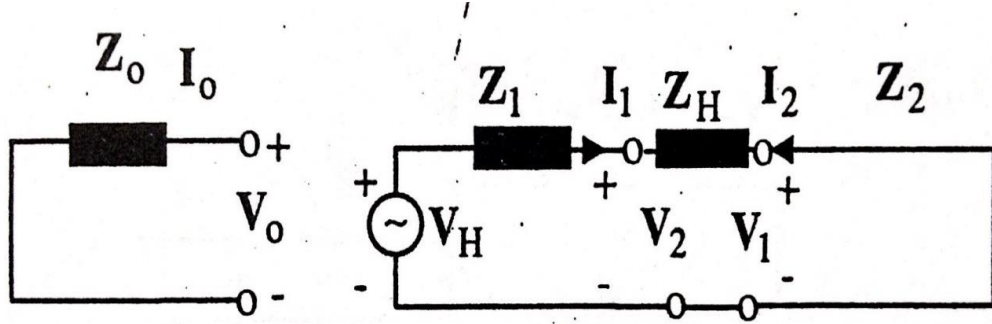
$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ I_b \\ -I_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{3} (a - a^2) I_b \\ \frac{1}{3} (a^2 - a) I_b \end{bmatrix} \text{ Amper} \quad (2.46)$$

$$(V_0 + a^2 V_1 + a V_2) - (V_0 + a V_1 + a^2 V_2) = Z_H (I_0 + a^2 I_1 + a I_2) \quad (2.47)$$

bulunur.

$$I_0 = 0, I_2 = -I_1 \quad (2.48)$$

elde edilir. 2.47 ve 2.48 eşitlikleri iki fazlı kısa devrenin hata koşullarıdır. Bu koşullardan elde edilen bileşen devre gösterimleri şekil 2.5'te verilmiştir.



Şekil 2.5. İki fazlı arızada bileşen devre bağlantıları (Arifoğlu, 2002).

Şekil 2.5'ten;

$$I_1 = -I_2 = \frac{V_H}{Z_1 + Z_2 + Z_H}, I_0 = 0 \quad (2.49)$$

elde edilir. 2.49 eşitliği 2.44 eşitliğinde kullanılırsa;

$$I_b = I_0 + a^2 I_1 + a I_2 = (a^2 - a) I_1 \quad (2.50)$$

$$I_b = \frac{-j\sqrt{3} V_H}{(Z_1 + Z_2 + Z_H)} \quad (2.51)$$

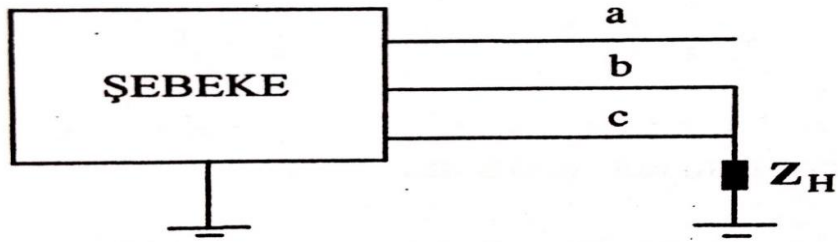
$$I_c = I_0 + a I_1 + a^2 I_2 = (a - a^2) I_1 = -I_b \quad (2.52)$$

bulunur. Bileşen devrelere ilişkin gerilim değerleri ise (2.49) eşitliği ile verilen bileşen devre akımlarının (2.44) eşitliğinde yerine konulması ile elde edilir.

### 2.2.3 İki-faz toprak kısa devre hesaplamaları

Şebekenin bir noktasında iki fazın  $Z_H$  direnci üzerinden bir kısa devre oluşturması durumunda, a, b ve c fazlarına sahip gerçek sistemin faz-nötr gerilim değerleri ve hat akımları arasında;

$$V_{bt} = V_{ct} = Z_H(I_b + I_c), I_a = 0 \quad (2.53)$$



Şekil 2.6. İletim hattında iki faz-toprak kısa devre gösterimi (Arifoğlu, 2002).

$$I_0 + I_1 + I_2 = 0 \quad (2.54)$$

$$(V_0 + aV_1 + a^2V_2) = (V_0 + a^2V_1 + aV_2) \quad (2.55)$$

elde edilir. Bu ifadeler kısaltılırsa;

$$V_2 = V_1 \quad (2.56)$$

bulunur.

$$(V_0 + a^2V_1 + aV_2) = Z_H(I_0 + a^2I_1 + aI_2 + I_0 + aI_1 + a^2I_2) \quad (2.57)$$

elde edilir. Son ifadede 2.56 eşitliği kullanılırsa;

$$(V_0 - V_1) = Z_H(2I_0 - I_1 - I_2) \quad (2.58)$$

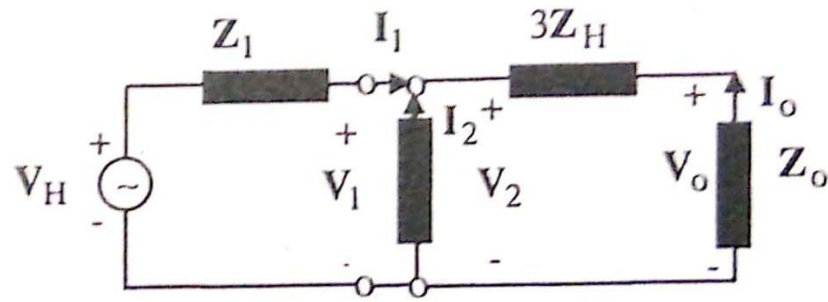
bulunur. 2.58 eşitliğinde 2.54 ifadesi kullanılırsa;

$$(V_0 - V_1) = 3Z_H I_0 \quad (2.59)$$

elde edilir.

2.54, 2.56, 2.59 eşitlikleri birlikte ele alınırsa Şekil 2.7' de verilen bileşen devre modeli elde edilmiş olup doğru bileşen devre akımı;

$$I_1 = \frac{V_H}{Z_1 + [Z_2 // (Z_0 + 3Z_H)]} = \frac{V_H}{Z_1 + \frac{Z_2(Z_0 + 3Z_H)}{Z_2 + Z_0 + 3Z_H}} \quad (2.60)$$



Şekil 2.7. İki faz-toprak kısa devresinde bileşen devre bağlantıları (Arifoğlu, 2002).

bulunur. Akım bölücü formülü yardımı ile ters ve sıfır bileşen devre akımları;

$$I_2 = (-I_1) \left( \frac{Z_0 + 3Z_H}{Z_2 + Z_0 + 3Z_H} \right) \quad (2.61)$$

$$I_0 = (-I_1) \left( \frac{Z_2}{Z_2 + Z_0 + 3Z_H} \right) \quad (2.62)$$

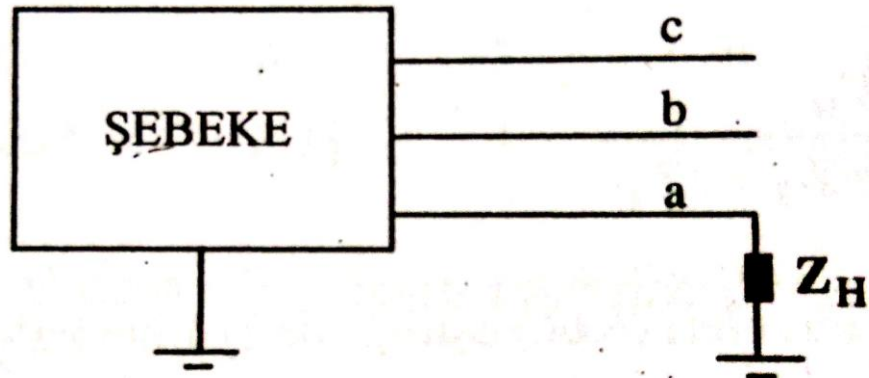
$$I_a = I_0 + I_1 + I_2 \quad (2.63)$$

$$I_c = I_0 + aI_1 + a^2I_2 \quad (2.64)$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (2.65)$$

eşitlikleri kullanılarak elde edilir. Gerçek sisteme ilişkin akım değerleri ise 2.60 ve 2.62 eşitliklerinin 2.63 ve 2.64 ifadelerinde yerine konulması ile bulunur. Bileşen devre gerilimleri ise devre akımlarının 2.42 eşitliğinde yerine konulmaları ile elde edilirler. Bileşen devre gerilim değerleri bulunduktan sonra 2.65 eşitliği yardımı ile gerçek sisteme ilişkin gerilim değerleri hesaplanır.

### 2.2.4 Bir-faz toprak kısa devre hesaplamaları



Şekil 2.8. Bir faz-toprak kısa devresi (Arifoğlu, 2002).

Şebekenin bir noktasında şekil 2.8’ de gösterildiği gibi bir fazın  $Z_H$  direnci üzerinden bir kısa devre oluşturulması durumunda a, b, ve c fazlarına sahip gerçek sistemin faz-nötr gerilim değerleri ve hat akımları arasında;

$$V_{at} = Z_H I_a, \quad I_a = 0, \quad I_b = 0 \quad (2.66)$$

ilişkisi vardır. Bileşen devre akım değerleri ise;

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} I_a \\ I_a \\ I_a \end{bmatrix} \text{ Amper} \quad (2.67)$$

eşitliği ile bulunur. 2.65 matris eşitliğinin ilk satırı ve 2.67 eşitliği 2.66 ifadesinde kullanılırsa;

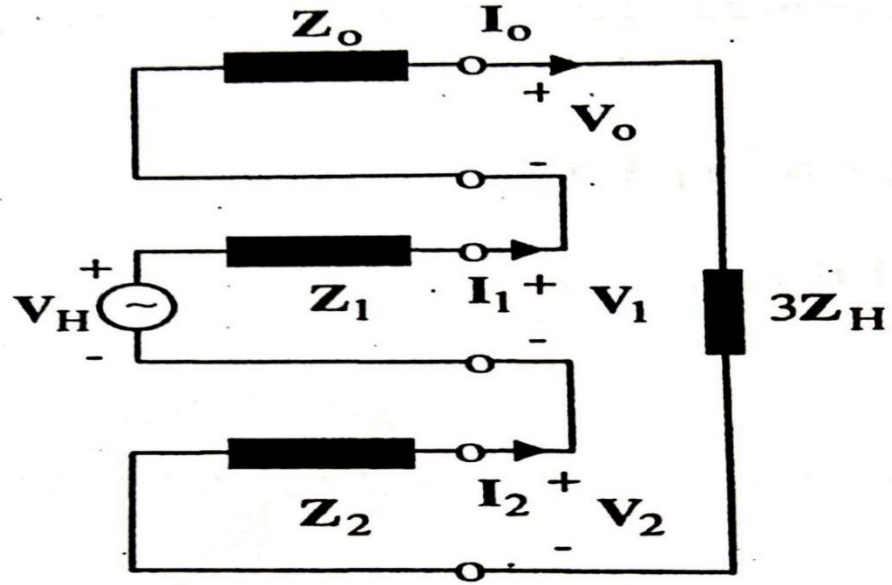
$$(V_0 + V_1 + V_2) = Z_H (I_0 + I_1 + I_2) \quad (2.68)$$

elde edilir. Son iki eşitlikten;

$$I_0 = I_1 = I_2 \quad (2.69)$$

$$(V_0 + V_1 + V_2) = 3Z_H I_1 \quad (2.70)$$

bulunur. 2.69 ve 2.70 eşitlikleri yardımı elde edilen ve bir faz-toprak kısa devresini temsil eden bileşen devrelere ilişkin bağlantılar şekil 2.9' da görülmektedir. Şekil 2.9' dan bileşen devre akımları için;



Şekil 2.9. Bir faz-toprak kısa devresi bileşen devre gösterimi (Arifoğlu, 2002).

$$I_0 = I_1 = I_2 = \frac{V_H}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3Z_H} \quad (2.71)$$

elde edilir. 2.63 -2.65 ifadeleri 2.71 eşitliği ile birlikte kullanılırsa;

$$I_a = \frac{3V_H}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3Z_H} \quad (2.72)$$

$$I_b = 0 \quad (2.73)$$

$$I_c = 0 \quad (2.74)$$

bulunur. Bileşen devre gerilimleri ise bulunan bileşen devre akımlarının 2.42 eşitliğinde yerlerine konulmaları ile elde edilirler. Bileşen devre gerilim değerleri bulunduktan sonra 2.65 eşitliği yardımı ile gerçek sisteme ilişkin gerilim değerleri hesaplanır.

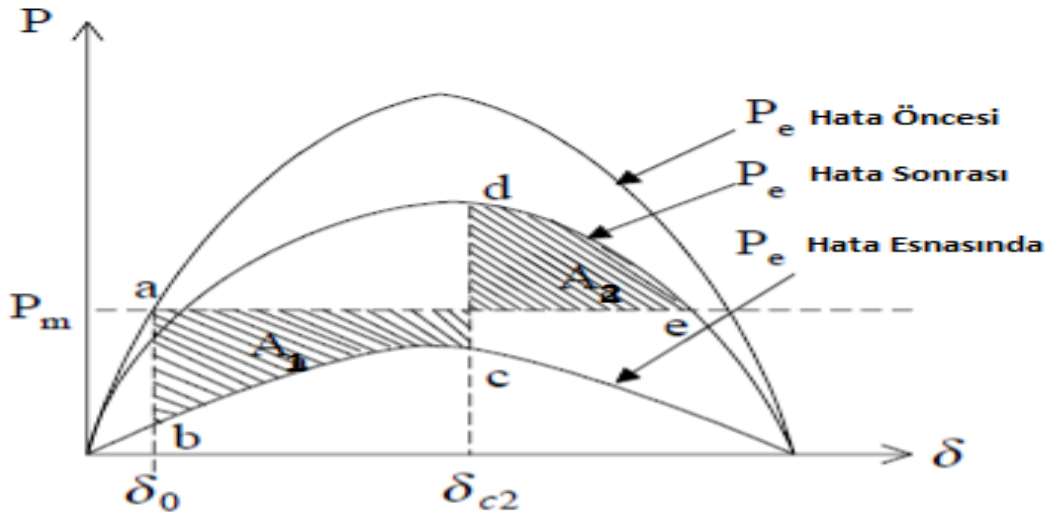
### 3. KARARLILIK ANALİZİNDE KULLANILAN YÖNTEMLER

Elektrik güç sistemlerinin büyük bozucu etkilere maruz kalması geçici hal kararlılığını kapsamaktadır. Geçici hal kararlılığının analizlerinde doğrusal olmayan diferansiyel denklemler mevcut olmasından dolayı analizde kullanılacak yöntemler aşağıda verilmiştir.

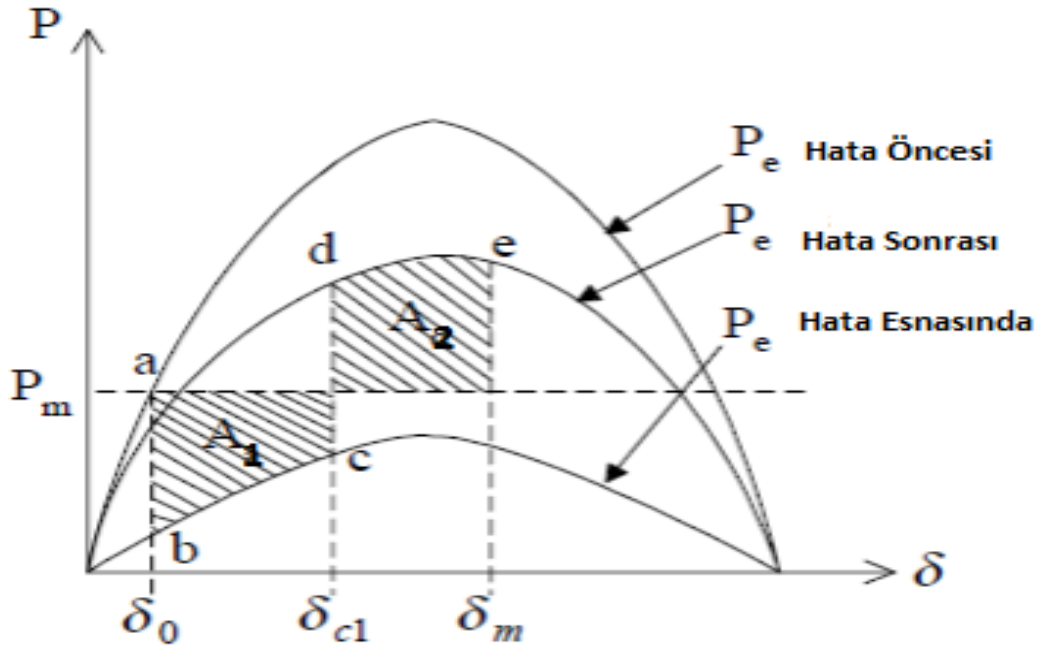
- 1.Eşit Alan Kriteri
- 2.Adım Adım Yöntemi
- 3.Euler Yöntemi
- 4.Düzeltilmiş Euler Yöntemi
- 5.Runge-Kutta Yöntemi
- 6.Diğer

#### 3.1 Eşit Alan Kriteri

Sonsuz büyük güçlü şebekeye göre salınım yapan makinanın bulunduğu sistemde, belli bir çalışma noktası etrafında salınımı gerçekleştirip gerçekleştirmediği ya da makine rotor açısının belirsiz şekilde büyüyüp büyüyemediğini; farklı bir söyleyişle makinanın senkronizma dışı olup olmadığını tespit etmek için salınım denklemini çözüp ve rotor açısının zamana göre değişimini veren salınım eğrisinin çizimine gerek yoktur. Kararlı bir sistemde salınım denkleminin çözümü, stator açısının belli bir çalışma yani denge noktası çevresinde eşit bir genlikte salınım yaptığını gösterir. Eşit alan kriteri ise salınım denklemini çözmeden sistemin kararlı olup olmadığını veren yöntemdir. Eşit alan kriteri yöntemi bir veya belli bir uyumda olan iki makineli sistemlerde uygulanır. Çok makineli sistemlerde uygulanamamasına rağmen herhangi bir sistemin geçici hal kararlılığının belli etkenlerden nasıl etkilendiğini gösterir (Shafeeg, 2012).



Şekil 3.1. Eşit alan kriteri yöntemiyle kararsız bir sistemin gösterimi (Shafeeg, 2012).



Şekil 3.2. Eşit alan kriteri yöntemiyle kararlı bir sistemin gösterimi (Shafeeg, 2012).

$$P_e = P_{\max} \sin \delta \quad (3.1)$$

$$P_e = \frac{|E'| |V|}{X_{12}} \sin \delta \quad (3.2)$$

$$t_c = \sqrt{\frac{2H(\delta_c - \delta_0)}{\pi f_0 P_m}} \quad (3.3)$$

$$\cos\delta_c = \frac{P_m}{P_{max}} (\delta_{max} - \delta_0) + \cos\delta_{max} \quad (3.4)$$

Sistemin kararlı olabilmesi için hatanın belli bir zamanda giderilmesi gerekmektedir. 3.3 formülünde belirtilen  $t_c$  bu zamanı belirtmektedir. Şekil 3.1 ve Şekil 3.2' ye bakılarak hata  $t_{c1}$  anında gideriliyorsa sistem kararlı  $t_{c2}$  anında gideriliyorsa sistem kararsızdır.  $A_1 > A_2$  durumu sistemin kararsız,  $A_1 < A_2$  ve  $A_1 = A_2$  durumu sistemin kararlı olduğunu göstermektedir. Şekil 3.1' de kararsız Şekil 3.2'de ise kararlı bir sistemin grafiksel gösterimi ele alınmıştır.

### 3.2 Adım Adım Yöntemi

İki makineli sistemlerin analizinde eşit alan kriteri yöntemi yararlı olmakla beraber kritik temizleme zamanının hesabında  $\delta$ 'nın  $t$ 'nin bir fonksiyonu olarak bulunması gerekir. Büyük sistemlerde bütün makineler için  $\delta$ 'yı  $t$ 'ye bağlı olarak tayin eden bilgisayarlardan yararlanılır ve makinenin salınım eğrisi  $\delta = f(t)$  grafiği çizilerek elde edilir.

Zamanın fonksiyonu olarak  $\delta$  açısının hesaplanması için seçilecek zaman aralığı  $\delta$ 'nın sınırsız arttığı veya bir maksimumdan geçtikten sonra azalmaya başladığı durumu gösterecek yeterli uzunlukta olmalıdır. Bu sonuç genellikle kararlılığı göstermesine rağmen birçok değişkenlerin hesaba katıldığı gerçek bir sistemde söz konusu zaman aralığının küçük bir değere dönmeksizin yeniden artmayacağına emin olunacak ve yeterli uzunlukta seçilmek suretiyle  $\delta = f(t)$  eğrisini çizilecektir. Arıza temizlenmeden önce izin verilen zaman uzunluğu, değişik temizleme zamanlarına ait salınım eğrileri çizilerek bulunabilir.

Devre kesicileri ve yardımcı rölelerin standart kesme zamanları bir arıza meydana geldikten 8, 5, 3 veya 2 saykıl sonradır. Bundan yararlanılarak kesici hızları bulunabilir. Hesaplar, makineden en az güç transferine müsaade edecek bir pozisyondaki arıza ve kararlılık kaybına karşı koruma yapılmış en büyük arıza tipi için yapılmalıdır.

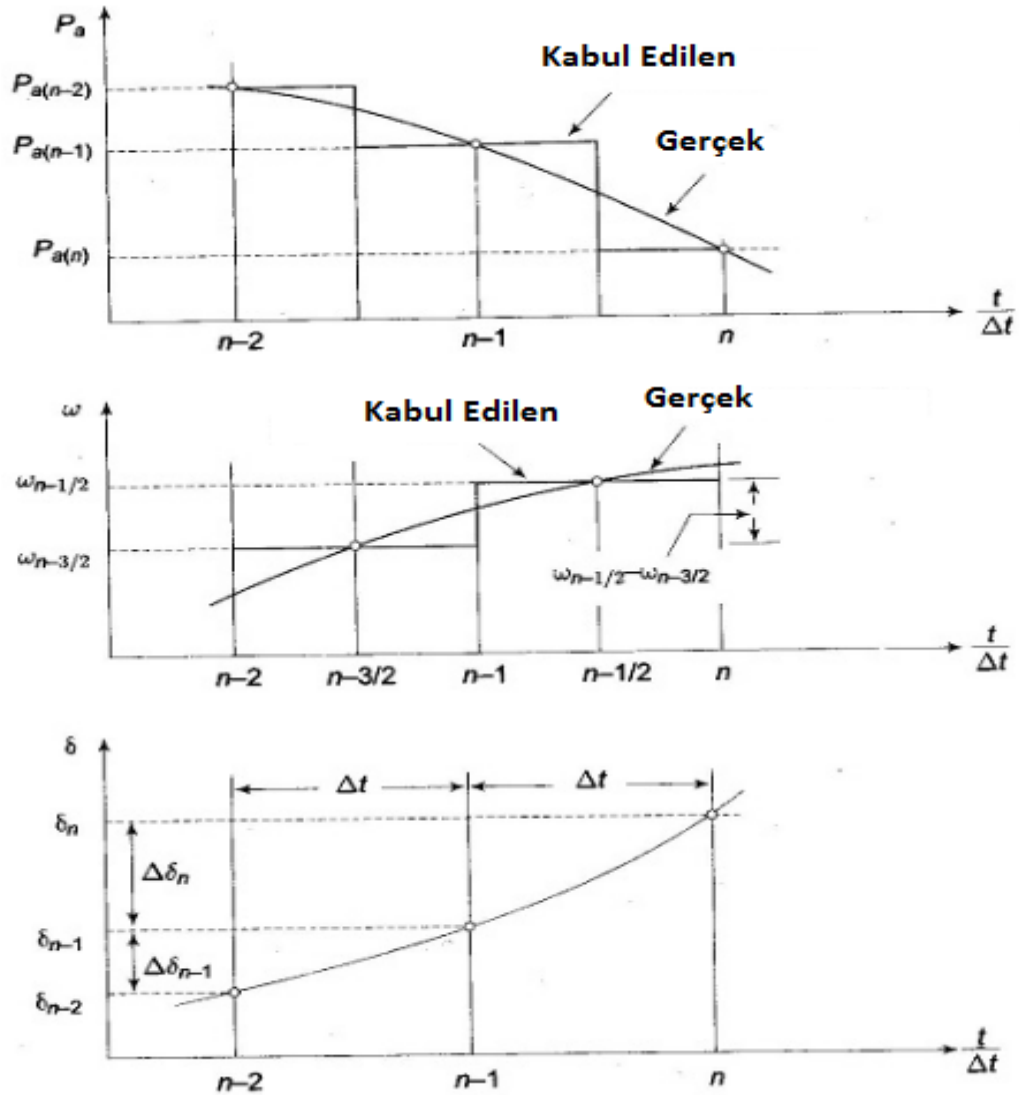
İkinci dereceden diferansiyel denklemlerin sayısal çözümlerinde çok sayıda farklı yöntemler vardır. Bu geliştirilmiş yöntemlerin çoğu, ancak bilgisayar kullanılması halinde pratik bir değere sahiptir. El ile yapılan hesaplarda kullanılan adım-adım metodu bilgisayarlar için tavsiye edilen metotların bazılarında daha basittir, el ile hesap

metodunda kısa bir zaman aralığı esnasında rotorun açısal konumunun değişimi aşağıdaki kabuller yapılarak hesaplanır;

1. İvmelendirme güçleri, zaman aralıklarının başlangıçlarında hesaplanır ve bu gücün göz önüne alınan zaman aralığından ortasından göz önüne alınan zaman aralığı ortasına kadar sabit kaldığı kabul edilir.

2. Açısal hızlar, göz önüne alınan zaman aralıkları ortasında hesaplanır ve bu zaman aralığı boyunca sabit kaldığı kabul edilir.  $P_a$  ve  $W$ 'ın her ikisi de  $\delta$ 'ya bağlı ve  $\delta$ 'da sürekli değiştiğinden şüphesiz bu kabullerin hiçbiri gerçek değildir.

Şekil 3.3 bu kabullerin anlaşılmasına yardımcı olur. İvmelendirme gücü  $n-2$ ,  $n-1$  ve  $n$  aralıklarının sonlarına konan daire içerisindeki noktalar için hesaplanır.



Şekil 3.3. Adım adım yöntemi grafiksel anlatım (Tacer, 1990).

Şekil 3.3' de  $n-1$ ,  $n$  ve  $n+1$  aralıklarının başlangıçlarıdır. Şekildeki  $P_a$  adım eğrisi, aralıklarının orta noktaları arasında  $P_a$  sabit kabul edilerek elde edilmiştir. Benzer şekilde  $W$  açısal hızının  $W_s$  senkron açısal hızından artan değeri olan  $W$  orta nokta için hesaplanmış ve bu aralık boyunca kaldığı kabul edilerek bir adım eğrisi şeklinde gösterilmiştir.

$n - \frac{3}{2}$  ve  $n - \frac{1}{2}$  ordinatları arasında sabit ivmelendirme gücünün sebep olduğu bir hız değişimi vardır. Bu hız değişimi ivme ile zaman aralığının çarpımıdır ve böylece,

$$W_{\frac{n-1}{2}}^1 - W_{\frac{n-3}{2}}^1 = \frac{d^2\delta}{dt^2} \Delta t = \frac{P_a(n-1)}{M} \Delta t \quad (3.5)$$

Olur. Herhangi bir zaman aralığı boyunca  $\delta$  daki değişim bu zaman aralığına ait  $W^1$  ile zaman aralığının çarpımına eşittir. Böylece  $n-1$  zaman aralığı süresince  $\delta$ 'daki değişim,

$$\Delta\delta_{n-1} = \delta_{n-1} - \delta_{n-2} = \Delta t W_{\frac{n-3}{2}}^1 \quad (3.6)$$

Ve  $n$ 'inci aralık süresince,

$$\Delta\delta_n = \delta_n - \delta_{n-1} = \Delta t W_{\frac{n-1}{2}}^1 \quad (3.7)$$

Olur. 3.5, 3.6, 3.7 denkleminin birleştirilmesiyle,

$$\Delta\delta_n = \Delta\delta_{n-1} + \frac{P_a(n-1)}{M} (\Delta t^2) \quad (3.8)$$

Elde edilir. Bu denklem salınım denkleminin yapılan kabuller ile adım-adım çözümü için önemli bir denklemdir. Bir önceki zaman aralığına ait  $\delta$  da ki değişim ve ilgili zaman aralığı için ivmelendirme gücü bilindiğinde zaman aralığı süresince  $\delta$  'da ki değişimin nasıl hesaplanacağını gösterir.

Denklem belirtilen kabuller altında verilen bir zaman aralığı süresince moment açısındaki değişim = Bir önceki zaman aralığı süresince moment açısındaki değişim + zaman aralığının başındaki ivmelendirme gücü  $\times \frac{(\Delta t)}{M}$  olduğunu gösterir. Her yeni zaman aralığının başında ivmelendirme gücü hesaplanır. Yeterli sayıda aralıklar için devam eden çözüm salınım eğrisini çizmeye yarayacak noktaları verir. Zaman aralıklarının süresi küçültüldükçe hassasiyet (duyarlılık) artar. Genellikle 0,05 saniyelik bir zaman aralığı

yeterlidir. Bir arıza meydana geldiğinde arızadan önce sıfır arızadan hemen sonra belirli bir değer alan P ivmelendirme gücünde bir süreksizlik meydana gelir. Süreksizlik  $t = 0^a$  iken, zaman aralığının başında meydana gelir. Bu hesap metodunda bir zaman aralığının başında hesaplanan ivmelendirme gücünün, bir evvelki aralığın ortasından itibaren göz önüne alınan aralığın ortasına kadar sabit kabul edildiğini gösterir. Arıza meydana geldiğinde aralığın başında iki değişik  $P_a$  değeri hesaplanır. Bu iki değerın ortalaması sabit ivmelendirme gücü olarak alınır.

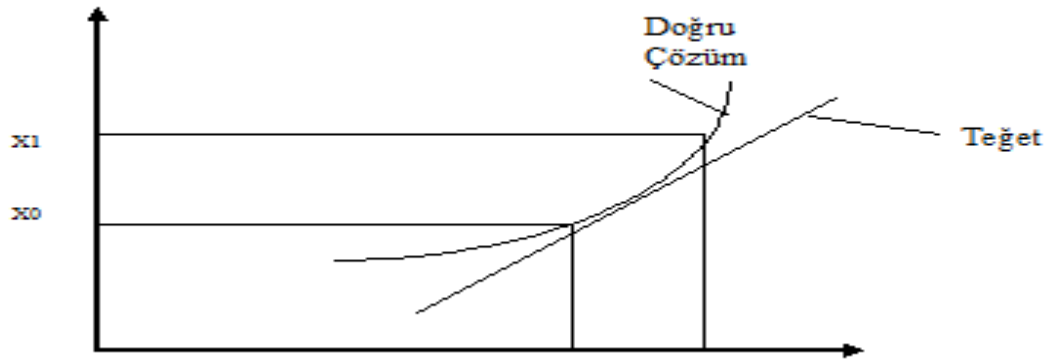
### 3.3 Euler Yöntemi

Birinci dereceden diferansiyel denklem olarak düşünülürse,

$$\frac{dx}{dt} = f(x, t) \quad (3.9)$$

$$x = x_0, t = t_0 \quad (3.10)$$

Şekil 3.2 ' de Euler yönteminin uygulama prensibi gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Euler yöntemi grafiksel anlatım.

$$x = x_0, t = t_0 \quad (3.11)$$

$$\frac{dx}{dt} = f(x_0, t_0) \quad (3.12)$$

$$\Delta x = \frac{dx}{dt} \Delta t \quad (3.13)$$

$$x_1 = x_0 + \Delta x = x_0 + \frac{dx}{dt} \Delta t \quad (3.14)$$

Taylor serisinin  $(x_0, t_0)$  noktasında euler yöntemi kullanılarak açılması sonucunda,

$$x_1 = x_0 + \Delta t(x_0) + \frac{\Delta t^2}{2!} (x_0) + \frac{\Delta t^3}{3!} (x_0) + \dots \quad (3.15)$$

Euler yöntemi kullanılarak  $x=x_1$  belirlenir.  $t_2=t_1+\Delta t$

$$x_2 = x_0 + \frac{dx}{dt} \Delta t \quad (3.16)$$

Bu yöntem birkaç tane birinci derece türevden oluştuğu için birinci derece yöntem olarak adlandırılır.

### 3.4 Düzeltilmiş Euler Yöntemi

Euler yönteminin hassas olmayışından dolayı düzeltilmiş euler yöntemi daha iyidir. Bu sebeple bu çalışmada Düzeltilmiş Euler Yöntemi kullanılmıştır.  $n$  makinalı bir sistem için, birinci dereceden  $(2n)$  adet denklemin çözümü gerekmektedir (Tacer, 1990). Bu denklemler;

$$\frac{dw_i}{dt} = \frac{\pi f}{H_i} [P_{mi} - P_{ei}(t)] \quad (3.17)$$

$$\frac{d\delta_i}{dt} = w_i(t) - w_0 = w_i(t) - 2\pi f \quad i=1,2,3,\dots,n \quad (3.18)$$

$$x = f(x) \quad (3.19)$$

$$t = t_Y \quad \text{için} \quad x_Y = \frac{\Delta x_Y}{\Delta t_Y} = f(x_Y) \quad (3.20)$$

$$t = t_0 \quad \text{ve} \quad x = x_0 \quad \text{için} \quad \Delta x_0 = f(x_0) \Delta t \quad (3.21)$$

$$t = t_1 \quad \text{için} \quad \text{yeni durum değişkeni} \quad x_1 = x_0 - \Delta x_0 \quad (3.22)$$

$x_1$  belli olmasından dolayı  $f(x_1)$  hesaplanabilir.

$$f(x_0)_{ort} = \frac{1}{2} [f(x_1) + f(x_0)] \quad (3.23)$$

$$x_1 = x_0 + f(x_0)_{ort}\Delta t \quad (3.24)$$

Her t zaman aralığı için bu işlem devam ederse,  $t = t_v$  için genel bağlantılar;

$$x_{(v+1)} = x_v + f(x_v)\Delta t \quad (3.25)$$

$$x_{(v+1)} = x_v + f(x_v)_{ort}\Delta t \quad (3.26)$$

$$f(x_v)_{ort} = \frac{1}{2}[f(x_v) + f(x_{v-1})] \quad (3.27)$$

$$x_{i(v+1)} = x_{iv} + f(x_{iv})\Delta t \quad (3.28)$$

$$x_{i(v+1)} = x_{iv} + f(x_{iv})_{ort}\Delta t \quad (3.29)$$

$$f(x_{iv})_{ort} = \frac{1}{2}[f(x_{iv}) + f(x_{i(v+1)})] \quad (3.30)$$

$$\delta_{i(v+1)} = \delta_{iv} + \left. \frac{d\delta_i}{dt} \right|_{t=t_v} \Delta t \quad (3.31)$$

$$\omega_{i(v+1)} = \omega_{iv} + \left. \frac{d\omega_i}{dt} \right|_{t=t_v} \Delta t \quad (3.32)$$

$$\omega_{i(v+1)} = \omega_i + \frac{1}{2} \left\{ \left. \frac{d\omega_i}{dt} \right|_{t=t_v} + \left. \frac{d\omega_i}{dt} \right|_{t=t_{v-1}} \right\} \Delta t \quad (3.33)$$

### 3.5 Runge-Kutta Yöntemi

Doğrusal olmayan denklemlerin çözümlenmesinde kullanılan yöntemlerden biri de Runge-Kutta yöntemidir. 2. ve 4. Dereceden çözüm yöntemleri yaygın kullanılanlar arasındadır. Mertebenin artması elde edilen sonuçların doğruluğunu arttırmaktadır (Tacer, 1990). 4. Dereceden Runge-Kutta yöntemini açısız hız ve rotor ya da yük açısında olacak değişimler için formüle edilirse;

$$\Delta\delta_{i(v+1)} = \frac{1}{6}\{k_{1i} + 2k_{2i} + 2k_{3i} + k_{4i}\} \quad (3.34)$$

$$\Delta\omega_{i(v+1)} = \frac{1}{6}\{l_{1i} + 2l_{2i} + 2l_{3i} + l_{4i}\} \quad (3.35)$$

$k_i$  açı,  $l_i$  hızdaki değişiklikleri ifade etmektedir.

$$\delta_{i(v+1)} = \delta_{iv} + \Delta\delta_{i(v+1)} \quad (3.36)$$

$$\omega_{i(v+1)} = \delta_{iv} + \Delta\omega_{i(v+1)} \quad (3.37)$$

$$k_{1i} = [\omega_{i(v)} - 2\pi f]\Delta t \quad (3.38)$$

$$l_{1i} = \frac{\pi f}{H_i} [P_{mi} - P_{eiv}]\Delta t \quad (3.39)$$

olup,  $\omega_{i(v)}$  ve  $P_{eiv}$ ,  $t = t_v$  anındaki değerlerdir.

$$k_{2i} = \left\{ \left( \omega_{iv} + \frac{l_{1i}}{2} \right) - 2\pi f \right\} \Delta t \quad (3.40)$$

$$l_{2i} = \frac{\pi f}{H_i} (P_{mi} - P_{ei} |_{\delta_i=\delta_i}) \Delta t + \frac{k_{1i}}{2} \quad (3.41)$$

$$k_{3i} = \left\{ \left( \omega_{iv} + \frac{l_{2i}}{2} \right) - 2\pi f \right\} \Delta t \quad (3.42)$$

$$l_{3i} = \frac{\pi f}{H_i} (P_{mi} - P_{ei} |_{\delta_i=\delta_i}) \Delta t_{(v)} + \frac{k_{2i}}{2} \quad (3.43)$$

$$k_{4i} = \left\{ (\omega_{iv} + l_{3i}) - 2\pi f \right\} \Delta t \quad (3.44)$$

$$l_{4i} = \frac{\pi f}{H_i} (P_{mi} - P_{ei} |_{\delta_i=\delta_i}) \Delta t_{(v)} + k_{3i} \quad (3.45)$$

yapılarak sistemin salınım denklemi çözümlenmiş olur.

### 3.6 Diğer

Eşit Alan Kriteri, Euler, Düzeltilmiş Euler, Runge-Kutta, Adım Adım Çözüm yöntemleri temel yöntemler olup sıkça kullanılmaktadır. Ancak bu yöntemlerin dışında Trapez, Özyineli İzdüşüm, Lyapunov'un Doğrudan yöntemleri kararlılık analizinin yapılması için kullanılan analiz yöntemlerindedir.

#### 4. BİLGİSAYAR DESTEKLİ KARARLILIK ANALİZİ

Güç sistemlerinde kararlılık analizi büyük önem taşımaktadır. Kararlılığın tiplerinden birisi olan geçici hal kararlılığının manuel yöntemlerle analizi hem kullanıcının hata yapmasına hem de zaman kaybına sebep olabilir. Bu sebeple geçici hal kararlılığının analizi bilgisayar destekli olması durumunda kullanıcıya büyük bir fayda sağlayacaktır.

Güç sistemlerinin bilgisayar destekli kararlılık analizi programlar aracılığı ile yapılabilmektedir. Bunu sağlayan başlıca programlar Power System Simulator for Engineering (PSS/E), Power System Simulator (Simpow), DigSilent, EuroStag, NEPLAN ve PowerWorld'tür. Ancak bu programların ücretli oluşu maddi açıdan her kullanıcıya hitap etmemektedir. Geçtiğimiz yıllarda MODELICA, MATHEMATICA, MATLAB ve benzeri yüksek seviye bilgisayar yazılım programları eğitim ve araştırma sebepleri için sıkça kullanılmaya başlandı. Bu programlar güç sistem analizi alanlarında güzel ve doğru sonuçlar verebilirler. Bu programların içinde MATLAB programı diğer programlara göre üstünlüğü fazladır. Bu programın en iyi özellikleri ise üstün çizim kapasitesinin çok iyi olması, matris odaklı programlanması ve kontrol şeması dizaynını oldukça kolaylaştırıp, basitleştiren Simulink programına sahip olmasıdır. Bu sebeplerden ötürü çalışmada MATLAB programı tercih edilmiştir.

Geçici hal kararlılığı analizinde öncelikle sistemin  $Z_{BARA}$  empedans matrisi oluşturulur. Daha sonra elde edilen  $Z_{BARA}$  matrisinin tersi alınarak  $Y_{BARA}$  olan sistemin admitans matrisi oluşturulur. Bulunan  $Y_{BARA}$  admitans matrisi güç akışı analizinde kullanılır. Güç akışı analizi sayesinde sistemi oluşturan salınım barası, yük(P-Q) baraları, gerilim kontrollü(P-V) baralarda ki gerilimler(V) ve gerilim açısı değerleri( $\delta$ ) bulunur. Elde edilen gerilimler ve gerilim açısı değerleri ile sistem öncesi generatörlere ait gerilim fazörleri bulunur. Sistemde bulunan P-Q baralarında bulunan yükler admitans olarak dönüştürülür ve yük hangi baraya aitse  $Y_{BARA}$  admitans matrisinin o numaralı köşegenine eklenir. Daha sonra  $Y_{BARA}$  admitans matrisi genişletilir. Generatör sayısı  $n_g$ , bara sayısı  $n_b$  olarak tanımlanırsa bu işlem;

$$[Y_{BARAGELİŞMİŞ}] = \begin{bmatrix} [Y_A]_{n_g \times n_g} & [Y_B]_{n_g \times n_b} \\ [Y_B]^T_{n_b \times n_g} & [Y_{BARA}]_{n_b \times n_b} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Şeklinde olur. Hangi barada hata oluşmuş ise genişletilmiş olan  $Y_{\text{BARAGENİŞLETİLMİŞ}}$  matrisinin hata bara numarası artı generatör sayısı satır ve sütunları silinerek hata esnasındaki  $Y_{\text{HATAESNASI}}$  matrisi oluşturulur. Örneğin; 8 baralı ve 3 generatörlü bir sistemin 6. barasında hata meydana gelmiş olsun.  $Y_{\text{BARAGENİŞLETİLMİŞ}}$  matris boyutu 11\*11 olacak olup  $Y_{\text{HATAESNASI}}$  matrisi 9. Satır ve 9. Sütunun silinmesi şeklinde olacaktır. Daha sonra  $Y_{\text{HATAESNASI}}$  matrisi denklem 4.3’ de generatöre ait iç baralar kalacak şekilde indirgenir.

$$[Y_{\text{BARAHATAESNASI}}] = \begin{bmatrix} [Y_A]_{ng*ng} & [Y_C]_{ng*(nb-1)} \\ [Y_C]_{(nb-1)*ng}^T & [Y_D]_{(nb-1)*(nb-1)} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

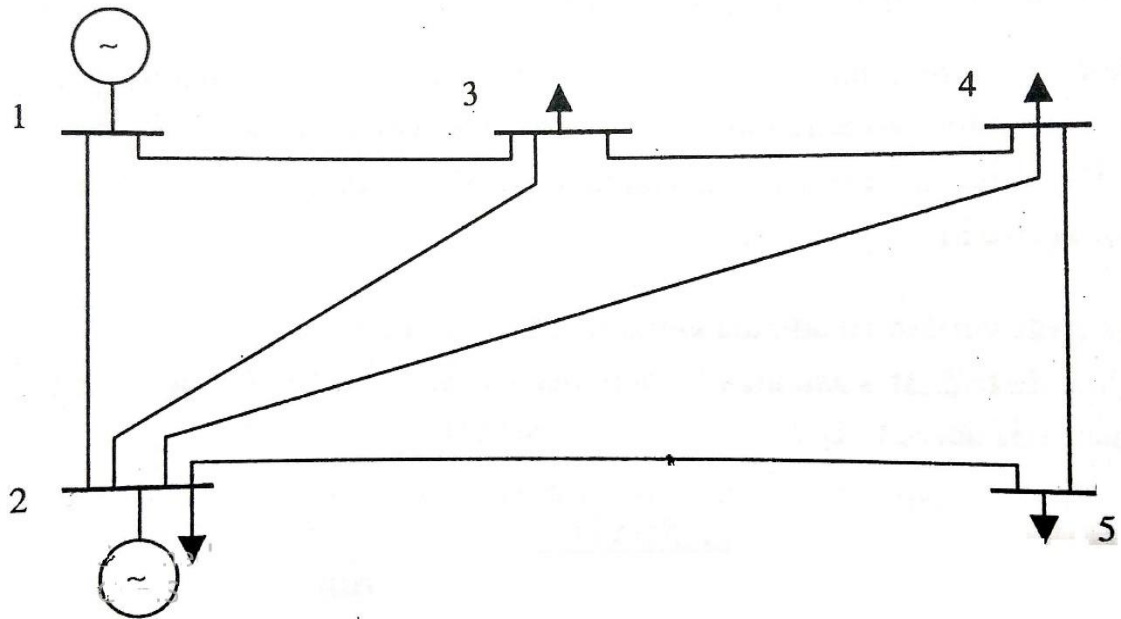
$$[Y_{\text{BARAİNDİRGENMİŞ}}] = [Y_A] - [Y_C][Y_D]^{-1}[Y_C]^T \quad (4.3)$$

Elde edilmiş  $Y_{\text{BARAİNDİRGENMİŞ}}$  matrisinin reel(g) ve imajinel(b) elemanları ile denklem 4.4’ de bulunan her generatöre ait elektriksel güç hesap edilir.

$$P_{ei}(\Delta t) = e_{ii}^2 g_{ii} + \sum_{j=1, j \neq i}^{ng} e_i e_j b_{ij} \sin(\delta_i(\Delta t) - \delta_j(\Delta t)) \quad (4.4)$$

$\Delta t$  adım aralığını belirtmekte olup swing eşitliğinin nümerik analizlerinde kullanılmaktadır. Hata sistem  $\Delta t$  aralığı ile hatanın kaldırıldığı ana kadar çözümlenir. Hatanın kaldırılması ile sistemin admitans matrisi yani  $Y_{\text{BARAHATASONRASI}} = Y_{\text{BARAGENİŞLETİLMİŞ}}$  haline gelir.  $Y_{\text{BARAHATASONRASI}}$  MATRİSİ denklem 4.3’ de olduğu gibi indirgenir. İndirgenmiş matrisin reel(g) ve imajinel(b) elemanları ile hata sonrası elektriksel güç bulunur ve swing eşitliğinin nümerik analizleri  $\Delta t$  adımlarıyla tekrar çözümlenerek gerilim açısı ve rotor hız değerleri bulunur. Bu süreç zarfında generatörlerin mekanik gücü hata öncesi değerlerini alır ve analiz boyunca sabit tutulur. Elde edilen generatör gerilim açısı ve rotor hız değerlerinin zamana göre farkları grafiksel olarak incelendiğinde açısı ve hız değerleri farkı belli bir zamandan sonra azalıyorsa sistemin kararlı oldu değilse sistemin kararsız olduğunu anlatmaktadır. Yukarıda anlatılmış olan çözüm yöntemi direkt metot olarak adlandırılır. Bu çözüm yönteminin sayısal olarak gösterilmesi örnek 4.1 ‘ de verilmiştir.

Örnek:



Şekil 4.1. 5 baralı 2 generatörlü bir sistem (Arifoğlu, 2002).

Çizelge 4.1. Sistem verileri.

Bara Numaraları	Hat Empedansları	Hatların Şönt Admintans Değerleri
1-2	$0.02+0.06i$	$0.03i$
1-3	$0.08+0.24i$	$0.025i$
2-3	$0.06+0.18i$	$0.02i$
2-4	$0.06+0.18i$	$0.02i$
2-5	$0.04+0.12i$	$0.015i$
3-4	$0.01+0.03i$	$0.01i$
4-5	$0.08+0.24i$	$0.025i$

Çizelge 4.2. Sistem verileri.

Generatör Numarası	H(saniye)	$x'_d$
1	50	$0.25i$
2	1	$1.5i$

Şekil 4.1' de verilen sistemin 2 numaralı barasında  $t=0$  anında 3 faz-toprak kısa devresi meydana gelmiş olup arıza 0.1 saniye sonunda sona ermiştir. Adım aralığı ( $\Delta t$ )

0.02 saniye, toplam analiz süresinin 0.3 saniyedir. Çözüm yöntemleri olarak düzeltilmiş euler ve direkt metot kullanarak sistemin açı ve hız kararlılığı analizi yapılacak olursa;

**Çizelge 4.3.** Güç akışı sonrası sistem verileri.

Bara Numarası	Gerilim	Gerilim Açısı	Generatör Aktif Güç	Generatör Reaktif Güç	Aktif Güç	Reaktif Güç
1	1.06	0	1.29	-0.0748	0	0
2	1.0474	-2.806	0.4	0.3	0.2	0.1
3	1.0242	-5	0	0	0.45	0.15
4	1.0235	-5.328	0	0	0.4	0.05
5	1.018	-6.15	0	0	0.6	0.1

Sistemin güç akışı analizi sonucunda baralara ait veriler Çizelge 4.3' de verilmiştir. Çizelge 4.3' de verilen verilerle her generatöre ait gerilim fazörü 2.17 denklemi ile bulunur. 1 ve 2 lu generatörlere ait gerilim fazörleri 4.5 ve 4.6 eşitliğinde verilmiştir. Daha sonra yük baralarına bağlı yükler admitansa dönüştürülerek hangi baraya aitse sistemin  $Y_{BARA}$  admitans matrisinin o numara köşegenine eklenir. Yüklerinde eklenmiş olduğu admitans matrisi 4.7 eşitliğinde verilmiştir. 4.8 eşitliğinde genişletilmiş olan  $Y_{BARAGENİŞLETİLMİŞ}$ , 4.9 eşitliğinde 2. barada olan hatadan dolayı  $Y_{BARAGENİŞLETİLMİŞ}$  matrisinin 4. satır ve sütunun silinmiş hali  $Y_{HATAESNASI}$  matrisi ve 4.10 eşitliğinde  $Y_{HATAESNASI}$  matrisinin indirgenmiş hali olan  $Y_{BARAİNDİRGENMİŞ}$  verilmiştir.

$$e_1 = 1.0865 \angle 16.336^\circ \quad \delta_1(0) = 16.336^\circ \quad (4.5)$$

$$e_2 = 1.582 \angle 18.391^\circ \quad \delta_2(0) = 18.391^\circ \quad (4.6)$$

$$Y_{BARA} = \begin{bmatrix} 6.25 - 22.695i & -5 + 15i & -1.254 + 3.75i & 0 & 0 \\ -5 + 15i & 11.015 - 33.173i & -1.67 + 5i & -1.67 + 5i & -2.5 + 7.5i \\ -1.254 + 3.75i & -1.67 + 5i & 13.346 - 38.84i & -10 + 30i & 0 \\ 0 & -1.67 + 5i & -10 + 30i & 13.298 - 38.74i & -1.25 + 3.75i \\ 0 & -2.5 + 7.5i & 0 & -1.25 + 3.75i & 4.32 - 11.306i \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

$$Y_{\text{BARAGENİŞLETİLMİŞ}} = \begin{bmatrix} 0-4i & 0 & 0+4i & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0-0.67i & 0 & 0+0.67i & 0 & 0 & 0 \\ 0+4i & 0 & 6.25-22.95i & -5+15i & -1.254+3.75i & 0 & 0 \\ 0 & 0+0.67i & -5+15i & 11.015-33.173i & -1.67+5i & -1.67+5i & -2.5+7.5i \\ 0 & 0 & -1.254+3.75i & -1.67+5i & 13.346-38.84i & -10+30i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1.67+5i & -10+30i & 13.298-38.74i & -1.25+3.75i \\ 0 & 0 & 0 & -2.5+7.5i & 0 & -1.25+3.75i & 4.32-11.306i \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

$$Y_{\text{BARAHATAESNASI}} = \begin{bmatrix} 0-4i & 0 & 0+4i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0-0.67i & 0 & 0+0.67i & 0 & 0 \\ 0+4i & 0 & 6.25-22.95i & -1.254+3.75i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1.254+3.75i & 13.346-38.84i & -10+30i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -10+30i & 13.298-38.74i & -1.25+3.75i \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1.25+3.75i & 4.32-11.306i \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

$$Y_{\text{BARAİNDİRGENMİŞ}} = \begin{bmatrix} 0.1879 & -3.316i & 0 \\ 0 & 0 & 0-0.67i \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

$Y_{\text{BARAİNDİRGENMİŞ}}$  matrisindeki generatörlere ait admitansların reel, imajinel kısımları ve güç akışı sonucu elde edilen gerilim fazörleri yardımıyla generatörlere ait elektriksel güç eşitlikleri 4.11 ve 4.12 de verilmiş olup arızanın 2. barada gerçekleşmesi sebebiyle  $P_{e2} = 0$  eşittir. Ayrıca generatörlere ait mekanik güç ( $P_m$ ), güç akışı analizi sonunda generatörlerin aktif gücü olan değerler olup analiz boyunca sabit tutulur. Generatörlere ait mekanik güç değerleri 4.13 ve 4.14 eşitliklerinde verilmiştir.

$$P_{e1}(0) = 0.22192 \quad (4.11)$$

$$P_{e2}(0) = 0 \quad (4.12)$$

$$P_{m1} = 1.29565 \quad (4.13)$$

$$P_{m2} = 0.4 \quad (4.14)$$

Elde edilen veriler sayesinde swing eşitliği düzeltilmiş euler yöntemi ve 0.02 aralıklarıyla hatanın sonlandırıldığı  $t=0.1$  saniyesine kadar çözümlenerek açı ve hız değerleri bulunur. Hata anına kadar olan açı değerleri çizelge 4.4, hız değerleri çizelge 4.5' de verilmiştir. Çizelge 4.4' de verilen değerler radyan cinsindedir.

**Çizelge 4.4.** Arıza süresince gerilim açısı değerleri.

Aralık(0.02 saniye)	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_2 - \delta_1$
t=0	0.28512	0.321	0.03588
t=0.02	0.285801	0.3339183	0.0481
t=0.04	0.287837	0.371622	0.08378
t=0.06	0.291216	0.434458	0.14324
t=0.08	0.295944	0.522427	0.226482
t=1	0.3020227	0.635528	0.33350

**Çizelge 4.5.** Arıza süresince rotor hız değerleri.

Aralık(0.02 saniye)	$\omega_1$	$\omega_2$	$\omega_2 - \omega_1$
t=0	0	0	0
t=0.02	314.2267	315.406	1.189148
t=0.04	314.2942	316.6725	2.3782
t=0.06	314.3617	317.9291	3.56744
t=0.08	314.4292	319.1858	4.7565
t=1	314.4966	320.442	5.94574

Hata anına kadar olan analiz yapıldıktan sonra sistemin admitans matrisi yani  $Y_{\text{BARAHATASONRASI}}$  matrisi indirgenerek 0.3 ‘üçü saniyeye kadar açı ve hız değerleri tekrar analiz edilir.  $Y_{\text{BARAHATASONRASI}}$  matrisi  $Y_{\text{BARAGENİŞLETİLMİŞ}}$  matrisine eşit olup indirgenmiş matris 4.15 eşitliğinde verilmiştir.

$$Y_{\text{BARAHATASONRASIİNDİRGENMİŞ}} = \begin{bmatrix} 0.8865 - 0.94792i & 0.161986 + 0.46977i \\ 0.161986 + 0.46977i & 0.036841 - 0.57368i \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

Hata sonrası elde edilen indirgenmiş admitans matrisi ile 4.11 denklemden tekrar başlanarak 0.3 saniyesine kadar açı ve hız değerleri analiz edilmiş olup açı değerleri çizelge 4.6’ te, hız değerleri çizelge 4.7’ da verilmiştir.

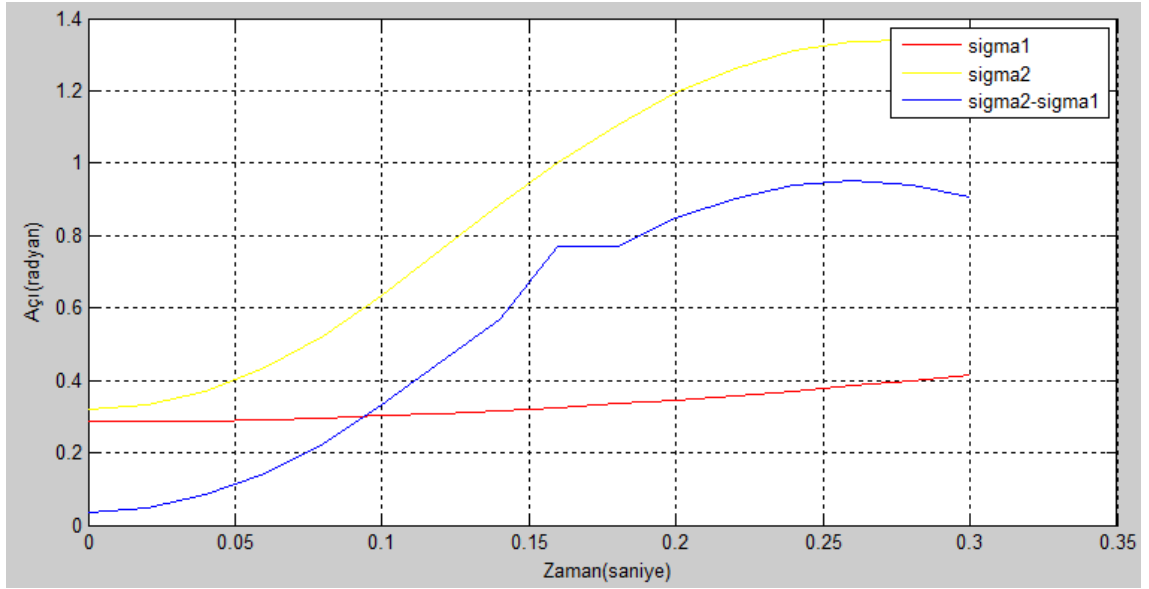
**Çizelge 4.6.** Arıza sonrasında gerilim açı değerleri.

Aralık(0.02 saniye)	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_2 - \delta_1$
t=0.12	0.309097	0.762553	0.4534551
t=0.14	0.3169299	0.886694	0.56976
t=0.16	0.325623	1.002745	0.7709649
t=0.18	0.335267	1.106233	0.770966
t=0.20	0.345934	1.193556	0.8476214
t=0.22	0.3576779	1.26201	0.9043316
t=0.24	0.3705352	1.309739	0.939203
t=0.26	0.3844282	1.3356667	0.951138
t=0.28	0.3996637	1.339435	0.939770
t=0.3	0.415935	1.321373	0.9054378

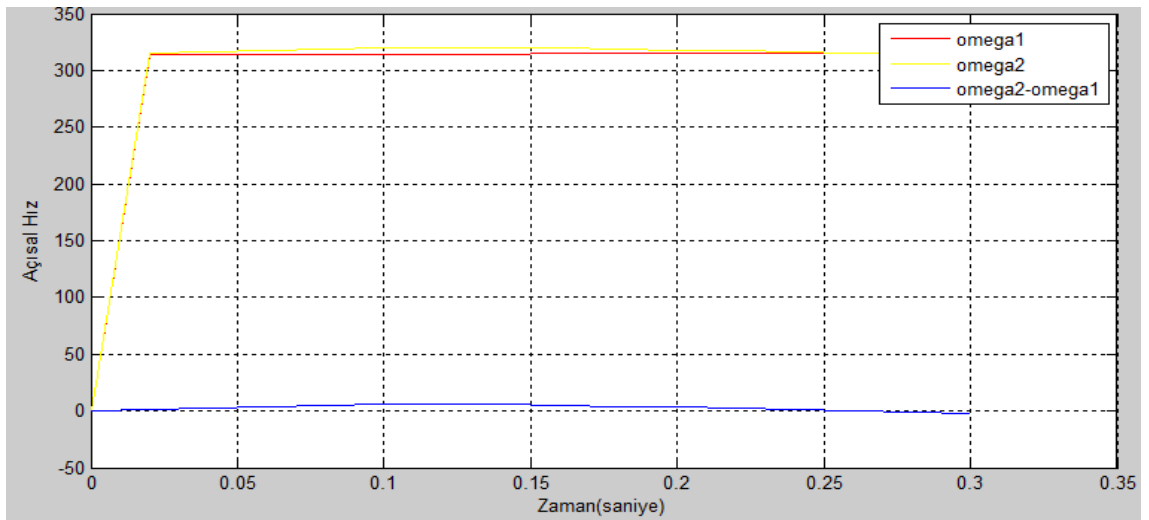
**Çizelge 4.7.** Arıza sonrasında rotor hız değerleri.

Aralık(0.02 saniye)	$\omega_1$	$\omega_2$	$\omega_2 - \omega_1$
t=0.12	314.5317	320.4388	5.907
t=0.14	314.572	320.1628	5.906
t=0.16	314.6175	319.6453	5.02277
t=0.18	314.6668	318.926	4.2594
t=0.20	314.7193	318.0499	3.330536
t=0.22	314.7741	317.0597	2.2856
t=0.24	314.8304	315.9964	1.1660
t=0.26	314.8873	314.8972	0.0099
t=0.28	314.9443	313.7974	-1.146
t=0.3	315	312.732	-2.268585

Elde edilen açı ve hız değerleri grafik şeklinde sunulacak olursa şekil 4.2' de açı, şekil 4.3' te hız değerlerinin grafiksel hali verilmiştir.



Şekil 4.2. Açı verilerinin grafik hali.



Şekil 4.3. Açısal hız verilerinin grafik hali.

Çözümlerler sonucunda generatörlerin gerilim açıları ve rotor açıları arasındaki fark zamanla azaldığı için sistemin kararlı olduğu analiz edilmiştir.



Çizelge 5.1. Genaratör verileri.

Genaratör bara no.	1	2	3	4	5
MVA	615	60	60	25	25
$x_l$ (p.u.)	0.2396	0.00	0.00	0.134	0.134
$r_a$ (p.u.)	0.00	0.0031	0.0031	0.0014	0.0041
$x_d$ (p.u.)	0.25	0.25	1.5	1.5	1.5
$x_d'$ (p.u.)	0.25	0.25	1.5	1.5	1.5
$x_d''$ (p.u.)	0.005	0.005	0.1	0.1	0.1
$T_{do}'$	7.4	6.1	6.1	4.75	4.75
$T_{do}''$	0.03	0.04	0.04	0.06	0.06
$x_q$ (p.u.)	0.646	0.98	0.98	1.22	1.22
$x_q'$ (p.u.)	0.646	0.36	0.36	0.715	0.715
$x_q''$ (p.u.)	0.4	0.13	0.13	0.12	0.12
$T_{qo}'$	0.0	0.3	0.3	1.5	1.5
$T_{qo}''$	0.033	0.099	0.099	0.21	0.21
H	50	50	10	10	10
D	2	2	2	2	2

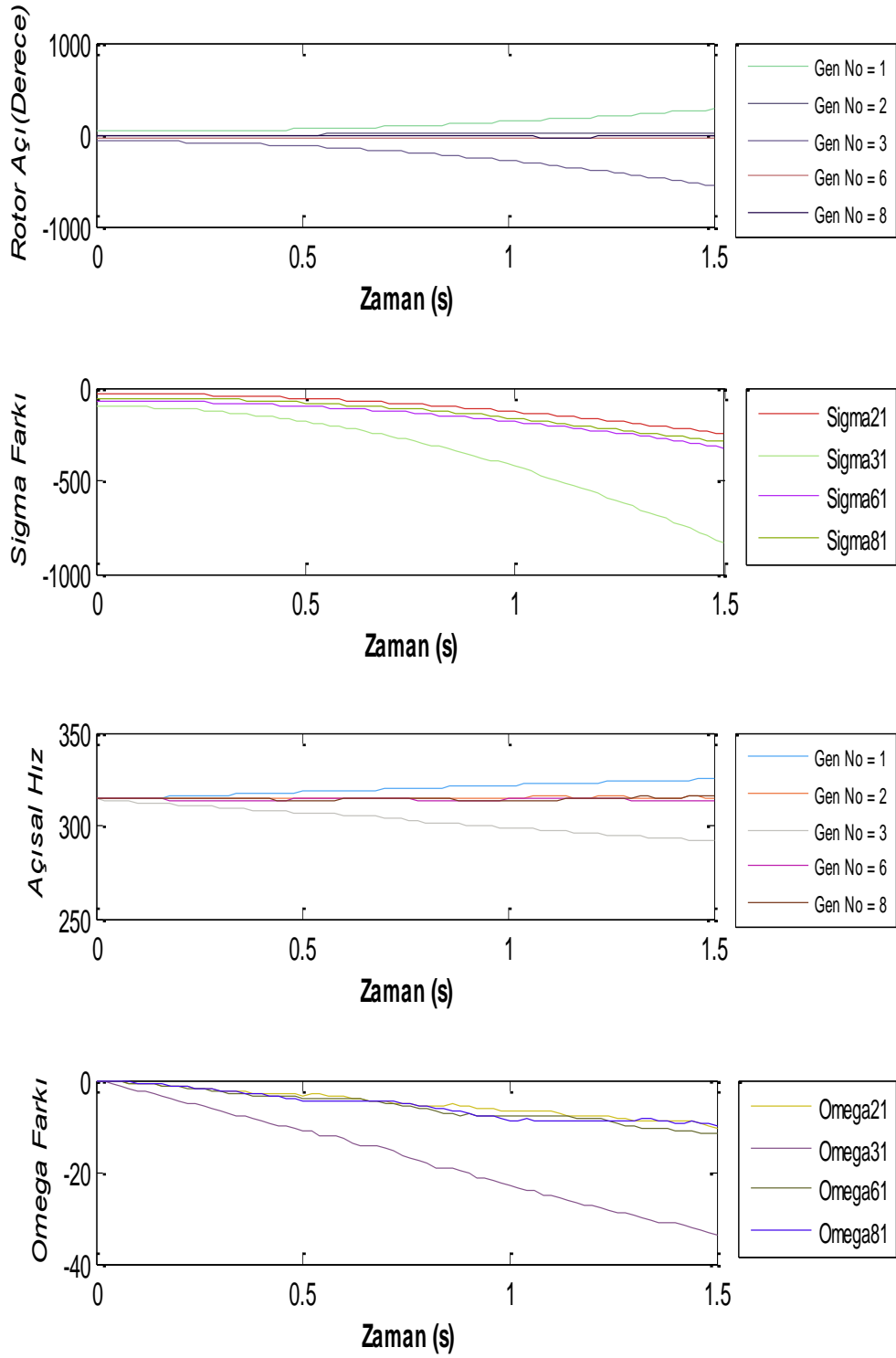
Çizelge 5.2. Bara verileri.

Bara No	P Genaratör (p.u.)	Q Genaratör (p.u.)	P Yük (p.u.)	Q Yük (p.u.)	Bara Tipi	P Genaratör max.(p.u.)	Q Genaratör max.(p.u.)
1	2.32	0.00	0.00	0.00	2	10.0	-10.0
2	0.4	-0.424	0.2170	0.1270	1	0.5	-0.4
3	0.00	0.00	0.9420	0.1900	2	0.4	0.00
4	0.00	0.00	0.4780	0.00	3	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.0760	0.0160	3	0.00	0.00
6	0.00	0.00	0.1120	0.0750	2	0.24	-0.06
7	0.00	0.00	0.00	0.00	3	0.00	0.00
8	0.00	0.00	0.00	0.00	2	0.24	-0.06
9	0.00	0.00	0.2950	0.1660	3	0.00	0.00
10	0.00	0.00	0.0900	0.0580	3	0.00	0.00
11	0.00	0.00	0.0350	0.0180	3	0.00	0.00
12	0.00	0.00	0.0610	0.0160	3	0.00	0.00
13	0.00	0.00	0.1350	0.0580	3	0.00	0.00
14	0.00	0.00	0.1490	0.0500	3	0.00	0.00

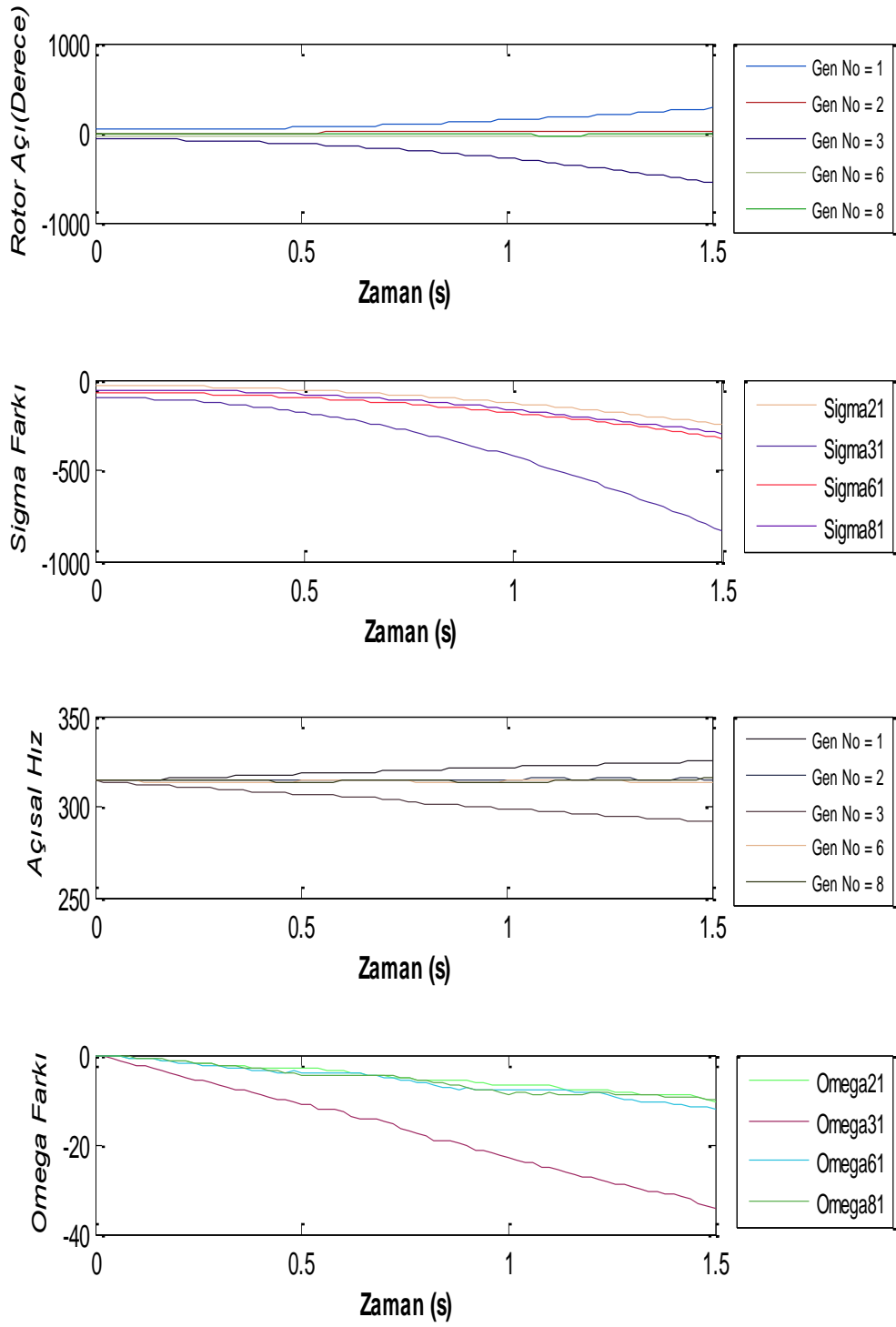
**Çizelge 5.3.** Hat verileri.

Baradan	Baraya	Direnç (p.u.)	Reaktans (p.u.)	Hat Şönt Admitanz Değeri (p.u.)	Trafo Oranı
1	2	0.01938	0.05917	0.0528	1
1	5	0.05403	0.22304	0.0492	1
2	3	0.04699	0.19797	0.0438	1
2	4	0.05811	0.17632	0.0374	1
2	5	0.05695	0.17388	0.034	1
3	4	0.06701	0.17103	0.0346	1
4	5	0.01335	0.04211	0.0128	1
4	7	0.00	0.20912	0.00	0.978
4	9	0.00	0.55618	0.00	0.969
5	6	0.00	0.25202	0.00	0.932
6	11	0.09498	0.1989	0.00	1
6	12	0.12291	0.25581	0.00	1
6	13	0.06615	0.13027	0.00	1
7	8	0.00	0.17615	0.00	1
7	9	0.00	0.11001	0.00	1
9	10	0.03181	0.08450	0.00	1
9	14	0.12711	0.27038	0.00	1
10	11	0.08205	0.19207	0.00	1
12	13	0.22092	0.19988	0.00	1
13	14	0.17093	0.34802	0.00	1

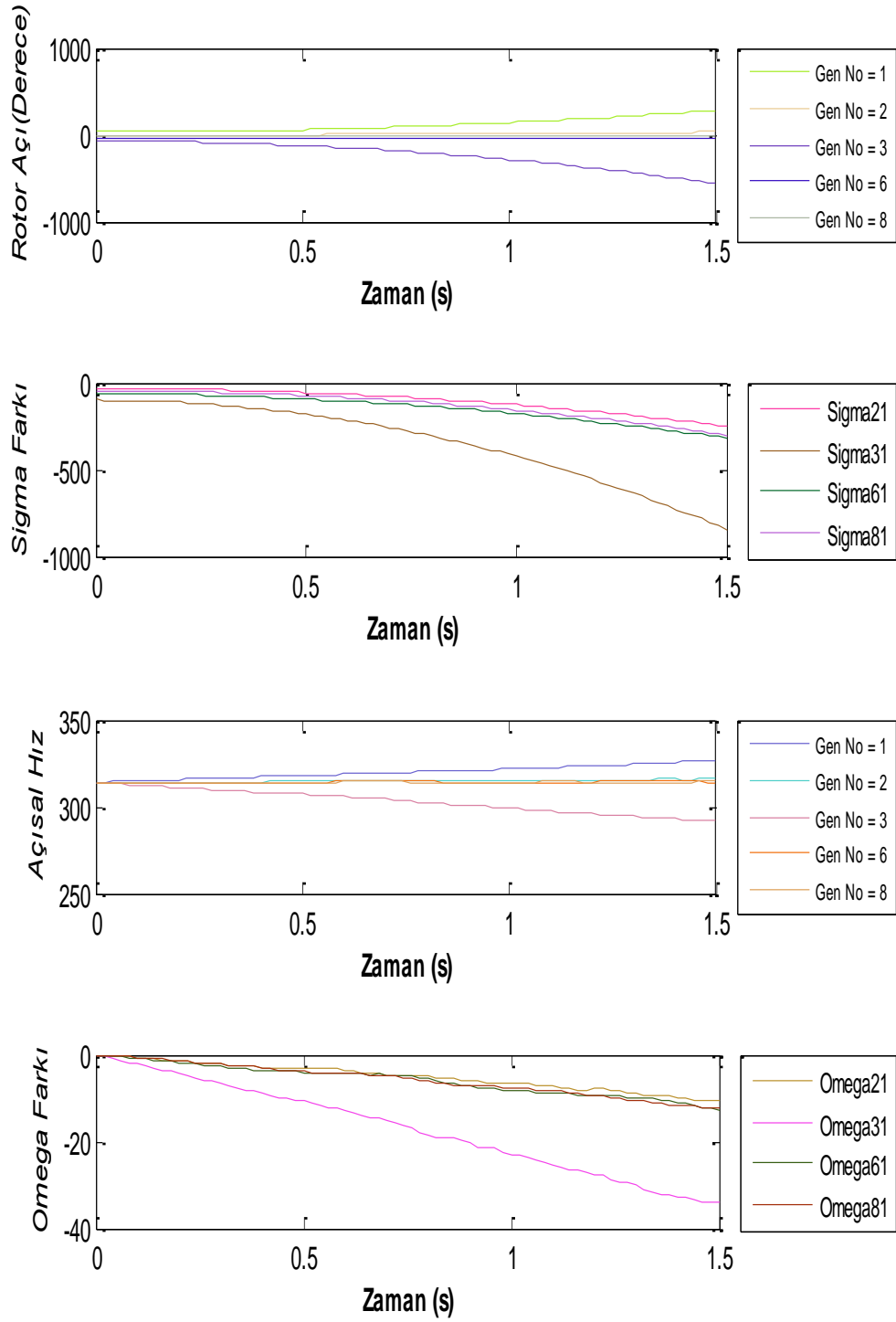
IEEE'nin 14 baralı test sisteminin 3 faz-toprak, 1 faz-toprak, faz-faz(iki fazlı), 2 faz-toprak kısa devreleri sonucunda sistemin kararlı olup olmadığı incelenmiştir. Analizlerde hat empedansı değeri olan  $Z_f$  0.1i olarak alınmış olup hatalı bara olarak 5 numaralı bara seçilmiştir. Hata süresi 0.4 saniye, tüm geçen zaman 1.5 saniye, nümerik analiz yöntemi için adım aralığı olan  $\Delta t$  0.02 saniye olarak belirlenmiştir. Şekil 5.2'de 3 faz-toprak, Şekil 5.3'de 1 faz-toprak, Şekil 5.4'de faz-faz(iki fazlı), Şekil 5.5'de 2 faz-toprak arızaları sonucunda sistemde bulunan generatörlerin yukarıdan aşağıya olacak şekilde gerilim açısı değerleri, gerilim açısı değerleri farkı, açısal hız değerleri ve açısal hız değerleri farkı verilerinin zamana göre grafiği yer almaktadır. Gerilim açısı değerleri farkı ve açısal hız farkı, her bir generatörün salınım barası ile arasında ki fark olarak hesaplanmaktadır.



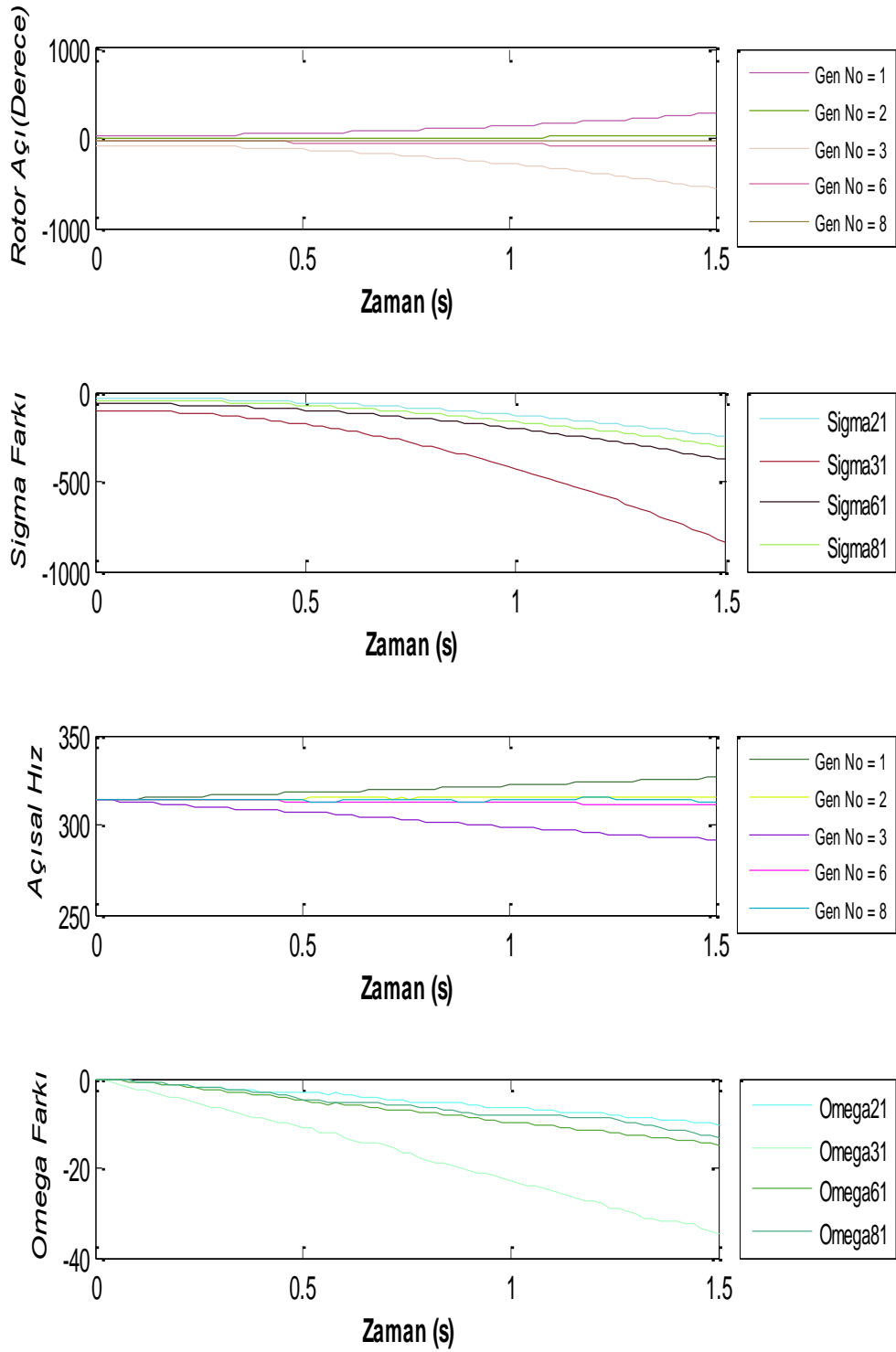
Şekil 5.2. 3 Faz-toprak kısa devresi sonucunda generatör verileri.



Şekil 5.3. 1 Faz-toprak kısa devresi sonucunda generatör verileri.



Şekil 5.4. Faz-faz kısa devresi sonucunda generatör verileri.



Şekil 5.5. 2 Faz-toprak kısa devresi sonucunda generatör verileri.

Yapılan analizler sonucunda; 5 numaralı barada gerçekleşen 3 faz-toprak, 1 faz-toprak, faz-faz(iki fazlı), 2 faz-toprak arızalarının meydana gelmesinden dolayı generatörlere ait rotor açısı(sigma farkı) ve açısal hız(omega farkı) değerleri farklı sifira

yaklaşmadığı görülmüş ve sistemin kararsız olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca aynı değerler ile diğer baralarda 3 faz-toprak, 1 faz-toprak, faz-faz(iki fazlı), 2 faz-toprak arızaları meydana gelmesi sonucunda sistemin kararsız olduğu görülmüştür. Kararlılık analizini yapan yazılım Ek 1, Ek 2, Ek 3, Ek 4 kısmında verilmiştir. Ek 1' de sisteme ait veriler ve sisteme ilişkin bara admitans matrislerinin oluşturulması, Ek 2' de güç akışı analizi, Ek 3' de kısa devre hesaplamaları, Ek 4' de kararlılık analizi yer almaktadır.

## 6. SONUÇ

Günümüzde enerjiye olan talebin artması, buna bağlı olarak da büyük sistemlerin gerekliliği ve teknolojinin ilerlemesi ile tüketim noktaları yeterli, daha kaliteli ve güvenilir bir enerji talep etmektedir. Bu nitelikteki kaliteli bir enerjiyi oluşturan etmenlerin başında sabit gerilim ve frekans gelmektedir. Gerilim ve frekans değerlerinin uygun değerde sabit olmasını sağlamaya çalışmak elektrik güç sistemlerinin kararlılığını oluşturmaktadır. Sistem kararlılığı bir bozucu etki sonrasında sistemin tekrar bozucu etki öncesi çalışma koşullarına dönme yeteneği olarak tanımlanır. Sistem ancak mekaniksel giriş ve elektriksel çıkış arasındaki uyumun oluşması koşulu ile kararlı çalışabilmektedir.

Kararlılık analizi sürekli, dinamik, geçici hal kararlılıkları olmak üzere 3 başlık altında toplanabilir. Bunlardan geçici hal kararlılığı büyük bozucu etkileri kapsamaktadır. Bu büyük bozucu etkiler 3 faz-toprak, 1 faz-toprak, faz-faz(iki fazlı),2 faz-toprak arızalarından meydana gelmektedir. Bir sistemin kararlılık tasarımında kötü bölgede meydana gelecek 3 faz-toprak arızası durumu ele alınmaktadır. Bu sebeple geçici hal kararlılığı güç sistemlerinin kararlılığında büyük önem taşımaktadır.

Bir sistemin kararlılık analizi, kullanıcı tarafından bara, hat, generatör verileri ile güç akışı analizi yapılması, güç akışı analizi sonucunda elde edilen bara gerilimleri yardımıyla generatörlere ait gerilim fazörlerinin bulunması, arıza olan baraya ilişkin arızalı bara geriliminin kısa devre hesaplamaları ile bulunması, elde edilen generatör gerilim fazörleri ve arızalı baraya ait hata gerilimi yardımıyla generatörlere ilişkin akım değerlerinin bulunması, elde edilen akım değerleri ve hata anında hesaplanan indirgenmiş admitans matrisi ile generatörlere ait elektriksel gücün bulunması, elde edilen veriler ile nümerik analiz yöntemlerinin itere edilmesiyle hata süresince generatörlere ait gerilim açılarının ve açıl hız değerlerinin bulunması, arıza giderilmesi sonucunda eski haline dönmüş admitans matrisinin tekrar indirgenerek generatörlere ait elektriksel güçlerin bulunması, tekrar nümerik analiz yöntemleri ile generatörlere ait gerilim açısı ve açıl hız değerlerinin bulunması ve elde edilen değerlerin analizi şeklinde sıralanmaktadır. Hesaplamalar yapılırken gerilim fazörleri ve generatör mekanik güçleri sabit kalmaktadır.

Bir önceki paragrafta güç sistemlerinde kararlılık analizinin nasıl yapıldığı anlatılmıştır. Çok büyük ve çok makinalı sistemlerde kararlılık analizinin bu şekilde yapılması hem zaman kaybına hem de hatalara sebebiyet verebilir. Bu sebeple kararlılık analizin bilgisayar destekli yapılması daha fayda sağlayacaktır. Günümüzde güç

sistemlerinin kararlılığını analiz eden programlar(Power System Simulator (Simpow), NEPLAN, PowerWorld, Power System Simulator for Engineering (PSS/E) ), DigSilent, EuroStag) mevcuttur. Ancak bu programların maliyetli oluşu ve programlara yazılımsal anlamda müdahale edilememesi sebebiyle bu alanda çalışan insanları kısıtlamaktadır. Bu sebeple bu çalışmada demo MATLAB programında özgün yazılım ile kararlılık analizinin hatasız, hızlı, maliyetsiz bir şekilde yapılması, güç sistemlerindeki öneminin yanında mühendislere ve mühendislik alanında çalışanlara maddiyat, zaman, bilgi ve daha birçok alanda fayda sağlayacaktır. Ayrıca kullanıcılar bu program sayesinde güç sistemlerinin temellerini oluşturan güç akışı analizi, arıza analizi yapabilir, arıza analizine bağlı olan 0,1,2 sistemlerinin admitans, empedans, gerilim, akım değerlerini bulanabilmektedir.

Yapılan çalışmalar sonucunda IEEE' nin 14 baralı test sisteminde 3 faz-toprak, 1 faz-toprak, faz-faz(iki fazlı),2 faz-toprak arızalarının meydana gelmesi durumunda sistemin kararsız olduğu tespit edilmiştir.

Teknolojinin ilerlemesiyle yazılımsal anlamda geliştirme yapılacak olunursa sistem verilerinin sistemin birimlerine uygun ölçüm cihazlarından veriler alınarak modem yardımıyla bilgisayarlara anlık verilerin gelmesi ve analizlerin yapılması daha sağlıklı bir analiz sağlaması düşünülebilir.

## KAYNAKLAR

- Arifoğlu, U. (2002). Güç sistemlerinin bilgisayar destekli analizi (problem çözümlü), Alfa, İstanbul, 464.
- Athay, T., Podmore, R., & Virmani, S. (1979). A practical method for the direct analysis of transient stability. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, (2), 573-584.
- Ekinci, S., & Hekimoğlu, B. (2018). MATLAB/Simulink ile tek-makinalı sonsuz-baralı bir güç sisteminin kararlılık analizi. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 20(1), 450-470.
- Ekinci, S. (2015). SIMULINK Kullanarak Güç Sistem Geçici Hal Kararlılık Analizi. *Sakarya University Journal of Science*, 19 (3), 313-320. Retrieved from <http://www.saujs.sakarya.edu.tr/issue/20705/221182>.
- Ekinci, S., Demiroren, A., & Zeynelgil, H. L. (2017). PowSysGUI: A new educational software package for power system stability studies using MATLAB/Simulink. *International Journal of Electrical Engineering Education*, 54(4), 283-298.
- Gözel, T., Hocaoglu, M. H. (2006). : “An Educational Graphic User Interface for Power Systems Analysis”, 3rd International Conference on Technical and Physical Problems in Power Engineering, pp. 293-297, Gazi University, Ankara, Turkey.
- İnan A. (2008). [www.yildiz.edu.tr/~inan/LU\\_Hesap/Yuk\\_Akisi\\_Genel\\_Bilgi.doc](http://www.yildiz.edu.tr/~inan/LU_Hesap/Yuk_Akisi_Genel_Bilgi.doc), (07.05.2019).
- Öztürk, S. D. A. & Tutkun, N. (2011). Güç Sistemi Kararlı Kılıcısı için Diferansiyel EvrimAlgoritması Kullanarak PID Kontrolör Parametrelerinin Belirlenmesi, 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), Elazığ.
- Pamuk, N. (2011). Sakarya ili elektrik iletim şebekesinin matlab/simulink programı kullanılarak modellenmesi ve analiz edilmesi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 27(1), 19-39.
- Shafeeq, Z. A. (2012). Bir güç sistemi için geçici kararlılık çalışması (Master's thesis, ESOGÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Tacer, M. E. (1990). *Enerji sistemlerinde kararlılık*, İTÜ Kütüphanesi, İstanbul, 182.
- Yamaçlı, V.; Abacı, K., (2013). İletim Sistemlerindeki Aktif Güç Kaybınınin Sezgisel Yöntemlerle Minimizasyonu. 3. Elektrik Tesisat Ulusal Kongresi, 2013-11-21, 2013-11-24, İzmir, Türkiye.

## EK 1

```

%      BARA NO V   Theta Pg  Qg  P1  Q1  Qmax Qmin Type
busdata= [ 1  1.060 0  0  0  0  0  0  0  1;
           2  1.045 0 40.0 45.41 21.7 12.7 -40 502;
           3  1.010 0  0 25.28 94.2 19.0  0 40  2;
           4  1.000 0  0  0 47.8 -3.9  0  0  3;
           5  1.000 0  0  0  7.6  1.6  0  0  3;
           6  1.070 0  0 13.62 11.2  7.5 -6.0 24  3;
           7  1.000 0  0  0  0  0  0  0  3;
           8  1.090 0  0 18.24 0  0 -6.0 24  3;
           9  1.000 0  0  0 29.5 16.6  0  0  3;
          10  1.000 0  0  0  9.0  5.8  0  0  3;
          11  1.000 0  0  0  3.5  1.8  0  0  3;
          12  1.000 0  0  0  6.1  1.6  0  0  3;
          13  1.000 0  0  0 13.5  5.8  0  0  3;
          14  1.000 0  0  0 14.9  5.0  0  0  3];

```

```

Shuntdata=[0 0 0 0 0 0 0 0 sqrt(-1)*0.190 0 0 0 0 0]';

```

```

%      Line No From to  R12   X12   R0   X0   B/2   T FROMT1 TOT2
linedata= [ 1  1  2  0.01938 0.05917 0.03876 0.11834 0.02640 1 0 0;
           2  2  3  0.04699 0.19797 0.09398 0.39594 0.02190 1 0 0;
           3  2  4  0.05811 0.17632 0.11622 0.35264 0.01870 1 0 0;
           4  1  5  0.05403 0.22304 0.10806 0.44608 0.02460 1 0 0;
           5  2  5  0.05695 0.17388 0.11390 0.34776 0.01700 1 0 0;
           6  3  4  0.06701 0.17103 0.13402 0.34206 0.01730 1 0 0;
           7  4  5  0.01335 0.04211 0.0267 0.08422 0.00640 1 0 0;
           8  5  6  0.00000 0.25202 0.00000 0.25202 0.00000 0.932 2 2;
           9  4  7  0.00000 0.20912 0.00000 0.20912 0.00000 0.978 2 2;
          10  7  8  0.00000 0.17615 0.00000 0.35230 0.00000 1 0 0;
          11  4  9  0.00000 0.55618 0.00000 0.55618 0.00000 0.969 2 2;
          12  7  9  0.00000 0.11001 0.00000 0.22002 0.00000 1 0 0;
          13  9 10  0.03181 0.08450 0.06362 0.16900 0.00000 1 0 0;
          14  6 11  0.09498 0.19890 0.18996 0.39780 0.00000 1 0 0;
          15  6 12  0.12291 0.25581 0.24582 0.51162 0.00000 1 0 0;
          16  6 13  0.06615 0.13027 0.13230 0.26054 0.00000 1 0 0;
          17  9 14  0.12711 0.27038 0.25422 0.54076 0.00000 1 0 0;

```

```

18  10 11 0.08205 0.19207 0.16410 0.38414 0.00000 1 0 0;
19  12 13 0.22092 0.19988 0.44184 0.39976 0.00000 1 0 0;
20  13 14 0.17093 0.34802 0.34186 0.69604 0.00000 1 0 0];

```

```

% BaraNumarsı Zn rd'12 Xd12' Rd'0 Xd0' rzn0 xzn0 H
Generatordata=[ 1 0 0.0 0.25 0.0 0.005 0 0 50
                2 0 0.0 0.25 0.0 0.005 0 0 50
                3 0 0.0 1.5 0.0 0.1 0 0 10
                6 0 0.0 1.5 0.0 0.1 0 0 10
                8 0 0.0 1.5 0.0 0.1 0 0 10];

```

```
fb = linedata(:,2);
```

```
tb = linedata(:,3);
```

```
R12 = linedata(:,4);
```

```
X12 = linedata(:,5);
```

```
R0=linedata(:,6);
```

```
X0=linedata(:,7);
```

```
B = linedata(:,8);
```

```
T = linedata(:,9);
```

```
geneno=Generatordata(:,1);
```

```
genbus=size(Generatordata);
```

```
Rgene12=Generatordata(:,3);
```

```
Xgene12=Generatordata(:,4);
```

```
Rgene0=Generatordata(:,5);
```

```
Xgene0=Generatordata(:,6);
```

```
Rgenezn0=Generatordata(:,7);
```

```
Xgenezn0=Generatordata(:,8);
```

```
zgeneZN0=Rgenezn0+sqrt(-1)*Xgenezn0;
```

```
zgeneZN0=3*zgeneZN0;
```

```
z12 = R12+sqrt(-1)*X12;
```

```
zgene12=Rgene12+sqrt(-1)*Xgene12;
```

```
zgene0=Rgene0+sqrt(-1)*Xgene0;
```

```
z0=R0+sqrt(-1)*X0;
```

```
zgeneznli0=zgeneZN0+zgene0;
```

```

y12 = 1./z12;
ygene12=1./zgene12;
ygene0=1./zgene0;
y0 = 1./z0;
ygeneznli0=1./zgeneznli0;
b= sqrt(-1)*B;
nbus = max(max(fb),max(tb)); % no of bus
nbranch = length(fb); % no of branch
Y12 = zeros(nbus,nbus); % initialise Ybus
Y0 = zeros(nbus,nbus);
%formation of offdiagonal element
for k=1: nbranch
    Y12(fb(k),tb(k))= Y12(fb(k),tb(k))-y12(k)/T(k);
    Y12(tb(k),fb(k))=Y12(fb(k),tb(k));
end
%formation of diagonal element
for m=1 : nbus
    for n = 1:nbranch
        if fb(n)== m
            Y12(m,m)= Y12(m,m)+(y12(n)/(T(k)^2))+b(n);
        elseif tb(n)== m
            Y12(m,m)= Y12(m,m)+y12(n)+b(n);
        end
    end
end
end

for i = 1:nbus
    Y12(i,i)= Y12(i,i)+ Shuntdata(i);
end
%z0
%için

```

---

```

for kr=1: nbranch
    if (linedata(kr,10)==0 && linedata(kr,11)==0) || (linedata(kr,10)==2 &&
linedata(kr,11)==2) %trafo yoksa
        Y0(fb(kr),tb(kr))= Y0(fb(kr),tb(kr))-y0(kr)/T(kr);
        Y0(tb(kr),fb(kr))=Y0(fb(kr),tb(kr));
    elseif (linedata(kr,10)~=0 && linedata(kr,11)~=0) && (linedata(kr,10)~=2 &&
linedata(kr,11)~=2)
        Y0(fb(kr),tb(kr))=0;
        Y0(tb(kr),fb(kr))=0;
    end
end
for mr=1 : nbus
    for nr = 1:nbranch
        if (linedata(nr,10)==0 && linedata(nr,11)==0) || (linedata(nr,10)==2 &&
linedata(nr,11)==2)
            if fb(nr)== mr
                Y0(mr,mr)= Y0(mr,mr)+(y0(nr)/(T(kr)^2))+b(nr);
            elseif tb(nr)== mr
                Y0(mr,mr)= Y0(mr,mr)+y0(nr)+b(nr);
            end
        end
    end
end
end
for ttr=1:nbranch
    if (linedata(ttr,10)==2 && linedata(ttr,11)==1 )
        Y0(linedata(ttr,2),linedata(ttr,2))= Y0(linedata(ttr,2),linedata(ttr,2))+y0(ttr);
    end
    if (linedata(ttr,10)==2 && linedata(ttr,11)==3 )
        Y0(linedata(ttr,2),linedata(ttr,2))= Y0(linedata(ttr,2),linedata(ttr,2))+y0(ttr);
    end
end

```

```

end

if (linedata(ttr,10)==1 && linedata(ttr,11)==2 )
Y0(linedata(ttr,3),linedata(ttr,3))= Y0(linedata(ttr,3),linedata(ttr,3))+y0(ttr);
end

if (linedata(ttr,10)==1 && linedata(ttr,11)==3 )
Y0(linedata(ttr,2),linedata(ttr,2))= Y0(linedata(ttr,2),linedata(ttr,2))+y0(ttr);
end

if (linedata(ttr,10)==3 && linedata(ttr,11)==1 )
Y0(linedata(ttr,3),linedata(ttr,3))= Y0(linedata(ttr,3),linedata(ttr,3))+y0(ttr);
end

if (linedata(ttr,10)==3 && linedata(ttr,11)==2 )
Y0(linedata(ttr,3),linedata(ttr,3))= Y0(linedata(ttr,3),linedata(ttr,3))+y0(ttr);
end

end

for ir = 1:nbus
    Y0(ir,ir)= Y0(ir,ir)+ Shuntdata(ir);

end

for sr=1:genbus(1,1)
    for fr = 1:nbus
        if fr==geneno(sr,1)
            Y0(fr,fr)= Y0(fr,fr)+ygeneznli0(sr,1);
        end
    end
end
end

```

## EK 2

```

TEZDATA;      % sistem verisi
busd = busdata;  % bara verileri
BASEMva = 100;    % baz değer
bus = busdata(:,1);  % bara numrası
type = busd(:,10);  % bara tipi 1-salınım, 2-gerilim, 3-yük..
V = busd(:,2);    % gerilim
del = busd(:,3);  % gerilim açısı
Pg = busd(:,4)/BASEMva;  % generatör aktif güç
Qg = busd(:,5)/BASEMva;  % generatör reaktif güç
Pl = busd(:,6)/BASEMva;  % aktif güç
Ql = busd(:,7)/BASEMva;  % reaktif güç
Qmin = busd(:,8)/BASEMva;  % raktif güç minimum değeri
Qmax = busd(:,9)/BASEMva;  % raktif güç maksium değeri
P = Pg - Pl;
Q = Qg - Ql;
Psp = P;        %
Qsp = Q;        %
G = real(Y12);    % admitans gerçek kısım
B = imag(Y12);    % admitans imajenel kısım
pv = find(type == 2 | type == 1);
pq = find(type == 3);
npv = length(pv);
npq = length(pq);
Tolarans = 1;
Iterasyon = 1;
while (Tolarans > 0.00001)
    P = zeros(nbus,1);
    Q = zeros(nbus,1);
    for kr = 1:nbus
        for lr = 1:nbus

```

```

    P(kr) = P(kr) + V(kr)* V(lr)*(G(kr,lr)*cos(del(kr)-del(lr)) +
B(kr,lr)*sin(del(kr)-del(lr)));

```

```

    Q(kr) = Q(kr) + V(kr)* V(lr)*(G(kr,lr)*sin(del(kr)-del(lr)) -
B(kr,lr)*cos(del(kr)-del(lr)));

```

```

    end

```

```

end

```

```

if Iterasyon <= 9999 && Iterasyon > 2

```

```

    for mr = 2:nbus

```

```

        if type(mr) == 2

```

```

            QG = Q(mr)+Ql(mr);

```

```

            if QG < Qmin(mr)

```

```

                V(mr) = V(mr) + 0.01;

```

```

            elseif QG > Qmax(mr)

```

```

                V(mr) = V(mr) - 0.01;

```

```

            end

```

```

        end

```

```

    end

```

```

end

```

```

dPa = Psp-P;

```

```

dQa = Qsp-Q;

```

```

lr = 1;

```

```

dQ = zeros(npq,1);

```

```

for kr = 1:nbus

```

```

    if type(kr) == 3

```

```

        dQ(lr,1) = dQa(kr);

```

```

        lr = lr+1;

```

```

    end

```

```

end

```

```

dP = dPa(2:nbus);

```

```

M = [dP; dQ];
J1 = zeros(nbus-1,nbus-1);
for kr = 1:(nbus-1)
    nn = kr+1;
    for lr = 1:(nbus-1)
        mr = lr+1;
        if mr == nn
            for mr = 1:nbus
                J1(kr,lr) = J1(kr,lr) + V(nn)* V(mr)*(-G(nn,mr)*sin(del(nn)-del(mr)) +
B(nn,mr)*cos(del(nn)-del(mr)));
            end
            J1(kr,lr) = J1(kr,lr) - V(nn)^2*B(nn,nn);
        else
            J1(kr,lr) = V(nn)* V(mr)*(G(nn,mr)*sin(del(nn)-del(mr)) -
B(nn,mr)*cos(del(nn)-del(mr)));
        end
    end
end
J2 = zeros(nbus-1,npq);
for kr = 1:(nbus-1)
    nn = kr+1;
    for lr = 1:npq
        mr = pq(lr);
        if mr == nn
            for mr = 1:nbus
                J2(kr,lr) = J2(kr,lr) + V(mr)*(G(nn,mr)*cos(del(nn)-del(mr)) +
B(nn,mr)*sin(del(nn)-del(mr)));
            end
            J2(kr,lr) = J2(kr,lr) + V(nn)*G(nn,nn);
        else
            J2(kr,lr) = V(nn)*(G(nn,mr)*cos(del(nn)-del(mr)) +
B(nn,mr)*sin(del(nn)-del(mr)));

```

```

        end
    end
end
J3 = zeros(npq,nbus-1);
for kr = 1:npq
    nn = pq(kr);
    for lr = 1:(nbus-1)
        mr = lr+1;
        if mr == nn
            for mr = 1:nbus
                J3(kr,lr) = J3(kr,lr) + V(nn)* V(mr)*(G(nn,mr)*cos(del(nn)-del(mr)) +
B(nn,mr)*sin(del(nn)-del(mr)));
            end
            J3(kr,lr) = J3(kr,lr) - V(nn)^2*G(nn,nn);
        else
            J3(kr,lr) = V(nn)* V(mr)*(-G(nn,mr)*cos(del(nn)-del(mr)) -
B(nn,mr)*sin(del(nn)-del(mr)));
        end
    end
end
J4 = zeros(npq,npq);
for kr = 1:npq
    nn = pq(kr);
    for lr = 1:npq
        mr = pq(lr);
        if mr == nn
            for mr = 1:nbus
                J4(kr,lr) = J4(kr,lr) + V(mr)*(G(nn,mr)*sin(del(nn)-del(mr)) -
B(nn,mr)*cos(del(nn)-del(mr)));
            end
            J4(kr,lr) = J4(kr,lr) - V(nn)*B(nn,nn);
        else

```

```

        J4(kr,lr) = V(nn)*(G(nn,mr)*sin(del(nn)-del(mr)) - B(nn,mr)*cos(del(nn)-
del(mr)));
    end
    end
end

J = [J1 J2; J3 J4];
Xxxx = inv(J)*M;
dTh = Xxxx(1:nbus-1);
dV = Xxxx(nbus:end);
del(2:nbus) = dTh + del(2:nbus);
lr = 1;
for kr = 2:nbus
    if type(kr) == 3
        V(kr) = dV(lr) + V(kr);
        lr = lr+1;
    end
end
Iterasyon = Iterasyon + 1;
Tolarans = max(abs(M));
end
for s=1:genbus(1,1)
    for f = 1:nbus
        if f==geneno(s,1)
            Y12(f,f)= Y12(f,f)+ygene12(s,1);
        end
    end
end
end
end

```

## EK 3

```

TEZDATA;
NR14;
hatasayisi=1;
hatalibarano=11;
zf=0; % hata empedansı
hatakodu=1;
% 1-Üçfazlı kısa devre+
% 2-Birfaz-toprak+
% 3-İkifaz-toprak+
% 4-iki-fazlı kısa devre+
ISIFIR=0;
IBIR=0;
IHKI=0;
a=(1*cos(120))+(1*sin(120)*sqrt(-1));
a2=(1*cos(240))+(1*sin(240)*sqrt(-1));
AAA=[1 1 1;1 a2 a;1 a a2];
for cc=1:nbus
VACILI(cc,1)=(V(cc,1)*cos(del(cc,1)))+(V(cc,1)*sin(del(cc,1))*sqrt(-1));
end
Z12=inv(Y12);
Z0=inv(Y0);
z0thevenin=Z0(hatalibarano,hatalibarano);
z1thevenin=Z12(hatalibarano,hatalibarano);
z2thevenin=Z12(hatalibarano,hatalibarano);
simetrimatrisi=[z0thevenin 0 0;0 z1thevenin 0;0 0 z2thevenin];
if hatakodu==1 % 1-Üçfazlı kısa devre+
ISIFIR=0;
IHKI=0;
IBIR=VACILI(hatalibarano,1)/(z1thevenin+zf);
hatagerilimmmucfaz=IBIR*zf;
hatagerilimmm=IBIR*zf;

```

```

%gerilimhataoncesi=[0;VACILI(hatalibarano,1);0];
%akimsimetri=[ISIFIR;IBIR;IIKI];
%gerilimsimetri=gerilimhataoncesi-(simetrimatrisi*akimsimetri);
%gerilimucafaz=AAA*gerilimsimetri;

end

if hatakodu==2 % 2-Birfaz-toprak+
    ISIFIR=VACILI(hatalibarano,1)/(z1thevenin+z2thevenin+z0thevenin+(zf*3));
    IIKI=VACILI(hatalibarano,1)/(z1thevenin+z2thevenin+z0thevenin+(zf*3));
    IBIR=VACILI(hatalibarano,1)/(z1thevenin+z2thevenin+z0thevenin+(zf*3));
    hatagerilimmbirfaztop=3*zf*ISIFIR;
    hatagerilimmm=3*zf*ISIFIR;
    %gerilimhataoncesi=[0;VACILI(hatalibarano,1);0];
    %akimsimetri=[ISIFIR;IBIR;IIKI];
    %gerilimsimetri=gerilimhataoncesi-(simetrimatrisi*akimsimetri);
    %gerilimucafaz=AAA*gerilimsimetri;

end

if hatakodu==3 % 3-İkifaz-toprak+
    IBIR=VACILI(hatalibarano,1)/(z1thevenin)+((z2thevenin*(z0thevenin+(3*zf)))/(z
    2thevenin+z0thevenin+(3*zf)));
    ISIFIR=(-1*IBIR)*(z2thevenin)/(z2thevenin+z0thevenin+(3*zf));
    IIKI=(-1*IBIR)*((z2thevenin)+(3*zf))/(z2thevenin+z0thevenin+(3*zf));
    hatagerilimikifaztoprak=3*zf*ISIFIR;
    hatagerilimmm=3*zf*ISIFIR;
    %gerilimhataoncesi=[0;VACILI(hatalibarano,1);0];
    %akimsimetri=[ISIFIR;IBIR;IIKI];
    %gerilimsimetri=gerilimhataoncesi-(simetrimatrisi*akimsimetri);
    %gerilimucafaz=AAA*gerilimsimetri;

end

```

```

if hata kodu==4 % 4-iki-fazlı kısa devre+
  IBIR=VACILI(hatalibarano,1)./(z1thevenin+z2thevenin+zf);
  ISIFIR=0;
  IIKI=(-1*VACILI(hatalibarano,1))./(z1thevenin+z2thevenin+zf);
  hatagerilimmikifaz=((a2*IBIR)+(a*IIKI))*zf;
  hatagerilimmm=((a2*IBIR)+(a*IIKI))*zf;
  %gerilimhataoncesi=[0;VACILI(hatalibarano,1);0];
  %akimsimetri=[ISIFIR;IBIR;IIKI];
  %gerilimsimetri=gerilimhataoncesi-(simetrimatrisi*akimsimetri);
  %gerilimucafaz=AAA*gerilimsimetri;
end

```

## EK 4

```

TEZDATA;
NR14;
kisadevrealiz;
% yük admitans hesabı
YukAdmi=zeros(nbus,1);
Y12yuklu=Y12;
for vf=1:nbus
    if busdata(vf,10)==3
        YukAdmi(vf)=(P(vf)-(sqrt(-1)*Q(vf)))/(VACILI(vf).^2);
    elseif busdata(vf,10)~=3
        YukAdmi(vf)=0;
    end
    Y12yuklu(vf,vf)=Y12(vf,vf)+YukAdmi(vf,1);
end

genisletilmis1=zeros(genbus(1,1),genbus(1,1));
genisletilmis2=zeros(genbus(1,1),nbus);
genisletilmis3=zeros(nbus,genbus(1,1));
genisletilmis4=Y12yuklu;

for vg=1:genbus(1,1)
    genisletilmis1(vg,vg)=genisletilmis1(vg,vg)+ygene12(vg,1);
    genisletilmis2(vg,vg)=genisletilmis2(vg,vg)+(-1*ygene12(vg,1));
    genisletilmis3(vg,vg)=genisletilmis3(vg,vg)+(-1*ygene12(vg,1));
end

Y12genisletilmis=[genisletilmis1,genisletilmis2,genisletilmis3,genisletilmis4];

Y12hataaninda=Y12genisletilmis;
if zf==0
Y12hataaninda((genbus(1,1)+hatalibarano),:)=[];

```

```

Y12hataaninda(:,(genbus(1,1)+hatalibarano))=[ ];
end

if zf~=0
Y12hataaninda((genbus(1,1)+hatalibarano),:)=0;
Y12hataaninda(:,(genbus(1,1)+hatalibarano))=0;
Y12hataaninda((genbus(1,1)+hatalibarano),(genbus(1,1)+hatalibarano))=inv(zf);
end

hataliboyut=size(Y12hataaninda);
htbyt=hataliboyut(1,1);
gensayyyy=genbus(1,1);
Yaaa=Y12hataaninda(1:gensayyyy,1:gensayyyy);
Yccc=Y12hataaninda(1:gensayyyy,(gensayyyy+1):htbyt);
Yddd=Y12hataaninda((gensayyyy+1):htbyt,(gensayyyy+1):htbyt);
Yhataliindirigenmis=Yaaa-(Yccc*inv(Yddd)*Yccc');
Yhasonrasiindirigenmis=genisletilmis1-
(genisletilmis2*inv(genisletilmis4)*genisletilmis3);

VACILIESLENIK=conj(VACILI);
generatortoplu=[geneno,zgene12];
ei=zeros(genbus(1,1),1);
for ttt=1:genbus(1,1)
for f = 1:nbus
if f==generatortoplu(ttt,1)
generatortoplu(ttt,3)=VACILI(f,1);
generatortoplu(ttt,4)=VACILIESLENIK(f,1);
generatortoplu(ttt,5)=del(f,1);
generatortoplu(ttt,6)=P(f,1);
generatortoplu(ttt,7)=Q(f,1);
end
end
end

```

```

ei(ttt,1)=generatortoplu(ttt,3)+((generatortoplu(ttt,6)-(sqrt(-
1)*generatortoplu(ttt,7)))*generatortoplu(ttt,2)/generatortoplu(ttt,4));
if ei(ttt,1)==inf
    ei(ttt,1)=0;
end
ei(ttt,2)=abs(ei(ttt,1));
ei(ttt,3)=angle(ei(ttt,1));
end

```

```

eidizilmis=zeros(nbus,2);
for nps=1:gensayyyy
    eidizilmis(geneno(nps,1),1)=ei(nps,1);
    eidizilmis(geneno(nps,1),2)=generatortoplu(nps,2);
end
eiiiiii=ei(:,1);
eiyi=genisletilmis3*eiiiiii;
eiyi=eiyi*(-1);

Y12hatttttalii=genisletilmis4;
Y12hatttttalii(:,hatalibarano)=genisletilmis4(:,hatalibarano)*hatagerilimmm;
eiyi(:,1)=eiyi(:,1)-Y12hatttttalii(:,hatalibarano);
Y12hattttttali=Y12hatttttalii;
Y12hattttttali(:,(hatalibarano))=[];
hataligerilimlerrr=linsolve(Y12hattttttali,eiyi);

HATALLIBARAGERILIMLERI=zeros(nbus,1);
kls=1;
for kld=1:nbus
    if kld==hatalibarano
        HATALLIBARAGERILIMLERI(kld,1)=hatagerilimmm;
    end
end

```

```

end
if kld~=hatalibarano
HATALLIBARAGERILIMLERI(kld,1)=hataligerilimlerrr(kls,1);
kls=kls+1;
end
end

generatorhatagerilim=zeros(genbus(1,1),1);
for bkl=1:genbus(1,1)
    for klo=1:nbus
        if klo==geneno(bkl,1)
            generatorhatagerilim(bkl,1)=HATALLIBARAGERILIMLERI(klo,1);
        end
    end
end
end
akim1=genisletilmis1*eiiiiii;
akim2=genisletilmis2*HATALLIBARAGERILIMLERI;
akimmmm=akim1+akim2;
generatorxd=generatortoplu(:,2);
eison=generatorhatagerilim+(akimmmm.*generatorxd);
eisonabs=abs(eison);
eisonangle=angle(eison);

Pmekanik=zeros(genbus(1,1),1);
for kyr=1:genbus(1,1)
    for kyt=1:nbus
        if kyt==geneno(kyr,1)
            Pmekanik(kyr,1)=P(kyt,1);
        end
    end
end
end
sigmadegerleri=eisonangle;

```

```

sigmadegerleri=sigmadegerleri.*180/pi;
omegadegerleri=zeros(genbus(1,1),1);
omegadegerleri(:,1)=2*pi*50;
ikipif=zeros(genbus(1,1),1);
ikipif(:,1)=2*pi*50;
aciomegafarklari=zeros(genbus(1,1),1);
duzeltilmemssigma=zeros(genbus(1,1),1);
duzeltilmemsomega=zeros(genbus(1,1),1);
swingdenaci=zeros(genbus(1,1),1);
duzeltmeyolundasisigmaicnomega=zeros(genbus(1,1),1);
duzeltilmissigma=zeros(genbus(1,1),1);
duzeltilmisomega=zeros(genbus(1,1),1);
sigmalar(:,1)=sigmadegerleri(:,1);
omegalar(:,1)=omegadegerleri(:,1);

adimaraligi=0.02;
hatauresi=0.1;
hatasonrsisure=0.3;
hatauresitamsayi=hatauresi/adimaraligi;
hatasonrasisuretamsayi=hatasonrsisure/adimaraligi;
% Pelektriksel=zeros(genbus(1,1),1);
for adm=1:hatasonrasisuretamsayi
    if adm*adimaraligi<=hatauresi
        Pelektriksel=zeros(genbus(1,1),1);
        for kkk=1:genbus(1,1)
            for lll=1:genbus(1,1)
                if kkk~=lll

                Pelektriksel(kkk,1)=Pelektriksel(kkk,1)+(eisonabs(kkk,1)*eisonabs(lll,1)*imag(Yh
                ataliindrigenmis(kkk,lll))*(sin(sigmadegerleri(kkk,1)-sin(sigmadegerleri(lll,1)))));
            end
        end
    end

```

```

Pelektriksel(kkk,1)=Pelektriksel(kkk,1)+((eisonabs(kkk,1)^2)*real(Yhataliindri-
n-
nmis(kkk,kkk)));
    end
    end

    if adm*adimaraligi>hatasuresi
    Pelektriksel=zeros(genbus(1,1),1);
    for kkk=1:genbus(1,1)
        for lll=1:genbus(1,1)
            if kkk~=lll

Pelektriksel(kkk,1)=Pelektriksel(kkk,1)+(eisonabs(kkk,1)*eisonabs(lll,1)*imag(Yh
atasonrasiindirgenmis(kkk,lll))*(sin(sigmadegerleri(kkk,1)-
sin(sigmadegerleri(lll,1)))));
                end
            end

Pelektriksel(kkk,1)=Pelektriksel(kkk,1)+((eisonabs(kkk,1)^2)*real(Yhatasonrasiin-
dirgenmis(kkk,kkk)));
    end
    end

    for hhh=1:genbus(1,1)
        aciomegafarklari(hhh,1)=omegadegerleri(hhh,1)-ikipif(hhh,1);
    end

    for www=1:genbus(1,1)
        swingdenaci(www,1)=(Pmekanik(www,1)-
Pelektriksel(www,1))*pi*50/Generatordata(www,9);
    end

```

```

%duzeltilmemis sigma sabit kaliyor 0*deltate
%duzeltilmemssigma=sigmadegerleri.*180/pi;
for ppp=1:genbus(1,1)

duzeltilmesomega(ppp,1)=omegadegerleri(ppp,1)+(swingdenaci(ppp,1)*(adimaraligi));
end

for eee=1:genbus(1,1)
duzeltmeyolundasiswaicnomega(eee,1)=duzeltilmesomega(eee,1)-(2*pi*50);
end

for drt=1:genbus(1,1)

duzeltilmissigma(drt,1)=sigmadegerleri(drt,1)+((duzeltmeyolundasiswaicnomega(drt,1)*(180/pi))*0.5*adimaraligi);
end

for fgy=1:genbus(1,1)

duzeltilmisomega(fgy,1)=omegadegerleri(fgy,1)+((swingdenaci(fgy,1)+swingdenaci(fgy,1))*0.5*adimaraligi);
end

sigmalar(:,adm+1)=duzeltilmissigma(:,1);
omegalar(:,adm+1)=duzeltilmisomega(:,1);
sigmadegerleri(:,1)=duzeltilmissigma(:,1);
omegadegerleri(:,1)=duzeltilmisomega(:,1);

end

%_____grafik_____
warning('off')

```

```

zamantablosu=zeros(1,adm+1);
for kokoo=0:adm
    zamantablosu(1,kokoo+1)=kokoo*adimaraligi;
end
for dfhk=1:genbus(1,1)
subplot(4,1,1);plot(zamantablosu(1,:),(sigmalar(dfhk,:)),'color',rand(1,3));
legendInfo{dfhk}=['Generator No = ' num2str(geneno(dfhk,1))];
legend(legendInfo)
hold on
xlabel('\bf Zaman (s)')
ylabel('\it Gerilim Açığı(Derece)')
end
for tytt=1:genbus(1,1)
subplot(4,1,3);plot(zamantablosu(1,:),(omegalar(tytt,:)),'color',rand(1,3));
legendInfo{tytt}=['Generator No = ' num2str(geneno(tytt,1))];
legend(legendInfo)
hold on
xlabel('\bf Zaman (s)')
ylabel('\it Açısal Hız')
end
sigmasalinimagorefark=zeros(genbus(1,1)-1,adm+1);
for ouy=2:genbus(1,1)
    sigmasalinimagorefark(ouy-1,:)=sigmalar(ouy,:)-sigmalar(1,:);
    subplot(4,1,2);plot(zamantablosu(1,:),(sigmasalinimagorefark(ouy-
1,:)),'color',rand(1,3));
    oko=[' ' num2str(geneno(ouy,1))];
    soko=['Sigma' num2str(oko)];
    loko=[' ' num2str(geneno(1,1))];
    legendInfo{ouy-1}=[soko num2str(loko)];
    legend(legendInfo)
hold on
xlabel('\bf Zaman (s)')

```

```

    ylabel('\it Sigma Farkı')
end
omegasalinimagorefark=zeros(genbus(1,1)-1,adm+1);
for koye=2:genbus(1,1)
    omegasalinimagorefark(koye-1,:)=omegalar(koye,:)-omegalar(1,:);
    subplot(4,1,4);plot(zamantablosu(1,:),(omegasalinimagorefark(koye-
1,:)),'color',rand(1,3));
    xoko=[' ' num2str(geneno(koye,1))];
    xsoko=['Omega' num2str(xoko)];
    xloko=[' ' num2str(geneno(1,1))];
    legendInfo{koye-1}=[xsoko num2str(xloko)];
    legend(legendInfo)
    hold on
    xlabel('\bf Zaman (s)')
    ylabel('\it Omega Farkı')
end

```

## ÖZ GEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Okan ÖRS  
Doğum Yeri ve Tarihi : Eskişehir 15.07.1992



### Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi : Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği  
Bildiği Yabancı Diller : İngilizce, Rusça  
Bilimsel Faaliyetleri : Ulaşım Sistemlerinde Titreşim Tabanlı Elektrik Üretimi /Tübitak

### İş Deneyimi

Stajlar : Estram(2012), Arçelik(2013)  
Çalıştığı Kurumlar : Osmangazi Elektrik Dağıtım A.Ş.(2016-...)

### İletişim

Adres : Gültepe Mah. Meltem Sok. No:8/4 Odunpazarı/ESKİŞEHİR  
E-Posta Adresi : okanors26@gmail.com

### Akademik Çalışmaları

- Ulaşım Sistemlerinde Titreşim Tabanlı Enerji Hasadı Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Türkiye. Cilt 1, Sayı 1

**Tarih: 08.07.2019**