

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Enerji Sistemlerinin Analizinde
Bilgisayar Yöntemleri

Hüseyin Çakır

Doktora Tezi

11001C
YILDIZ UNIVERSITESI * FEN BILIMLERI ENSTITUSU

ENERJİ SİSTEMLERİNİN ANALİZİNDE
BİLGİSAYAR
YÖNTEMLERİNİN İNCELENMESİ

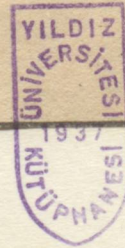
DOKTORA TEZİ

Yük. Muh. Hüseyin ÇAKIR

İstanbul-1985

YILDIZ ÜNİVERSİTESİ
GENEL KİTAPLIĞI

Kot : R 152
Alındığı Yer : Fen Bil. Ens. 29
Tarih : 3.3.1987
Fatura :
Fiatı : 1200 TL
Ayniyat No : 1/1
Kayıt No : 44765
UDC : 001.64
Ek : 373.242



YILDIZ UNIVERSITESI * FEN BILIMLERI ENSTITUSU

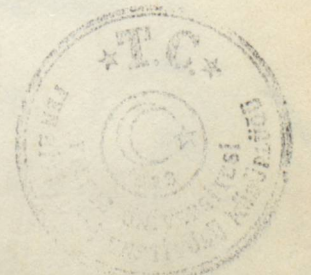
Comp

ENERJİ SİSTEMLERİNİN ANALİZİNDE
BİLGİSAYAR
YÖNTEMLERİNİN İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Yuk.Muh.Huseyin ÇAKIR

Istanbul-1985



İÇİNDEKİLER

ÖZET

SUMMARY

BÖLÜM I - GİRİŞ

BÖLÜM II - ENERJİ SİSTEMLERİNİN BİLGİSAYARLA MODELLENMESİ

2.1.	GİRİŞ	1
2.1.1.	Graf	1
2.1.2.	Bağlantı Matrisleri	5
2.1.2.1.	Eleman-Düğüm Bağlantı Matrisi $\hat{A}$	5
2.1.2.2.	Bara Bağlantı Matrisi A	6
2.1.2.3.	Temel Kesitleme Matrisi B	7
2.1.2.4.	Temel Çevre Matrisi C	8
2.2.	ENERJİ SİSTEMİNİN UÇLARINDAN UYARILARAK MODELLENMESİ	9
2.2.1.	Primitif Empedans Matrisi	9
2.2.2.	Temel Çevre Denklemleri	11
2.2.3.	Temel Kesitleme Denklemleri	12
2.2.4.	Bara Empedans Matrisinin Elde Edilmesi	13
2.2.5.	Bara Admitans Matrisinin Elde Edilmesi	16
	ÖRNEK PROBLEM	17
2.3.	MODELLEME YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI	26

BÖLÜM III -YÜK AKIŞ ANALİZİ ÇÖZÜM YÖNTEMLERİ

3.1.	GİRİŞ	28
3.2.	YÜK AKIŞININ TANITILMASI	28
3.3.	ENERJİ SİSTEM DENKLEMLERİ	29
3.3.1.	Şebeke Tanım Denklemleri	29
3.3.2.	Bara Yük Denklemleri	30
3.3.3.	Hat Akış Denklemleri	30
3.4.	YÜK AKIŞ ANALİZİ ÇÖZÜM YÖNTEMLERİ	31
3.4.1.	Y_{BARA} kullanılan Gauss Yöntemi	31
3.4.2.	Y_{BARA} kullanılan Gauss-Siedel Yöntemi	33
3.4.3.	Y_{BARA} kullanılan Newton-Raphson Yöntemi	34
3.5.	YÜK AKIŞ ANALİZİ ÇÖZÜM YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI	39
	ÖRNEK PROBLEM	46
3.6.	GAUSS-SEİDEL YÖNTEMİ İÇİN BİLGİSAYAR PROGRAMI, VE ÇIKIŞLAR	48

3.7.	NEWTON-RAPHSON YÖNTEMİ İÇİN BİLGİSAYAR PROGRAMI VE ÇIKIŞLAR	52
------	---	----

BÖLÜM IV - TRANSİENT-STABİLİTE ÇÖZÜM YÖNTEMLERİ

4.1.	GİRİŞ	57
4.2.	ENERJİ SİSTEMLERİ	57
4.3.	ENERJİ SİSTEMLERİNDE STABİLİTE	58
4.3.1.	TRANSİENT-STABİLİTE	59
4.3.2.	TRANSİENT-STABİLİTE SİMÜLASYON YÖNTEMLERİ	60
	ÖRNEK PROBLEM	61
4.4.	SALINIM DENKLEMLERİ	62
4.5.	BAŞLANGIÇ HESAPLARI	67
4.6.	EULER YÖNTEMİ İLE ÇÖZÜM	70
4.6.1.	Bilgisayar Programı	73
4.6.2.	Bilgisayar Çıktıları	77
4.6.3.	Açısal Hız ve Faz Açısının Zamana Göre Değişim Eğrileri	79
4.7.	DÜZELTİLMİŞ EULER YÖNTEMİ İLE ÇÖZÜM	81
4.7.1.	Bilgisayar Programı	82
4.7.2.	Bilgisayar Çıktıları	86
4.7.3.	Açısal Hız ve Faz Açısının Zamana Göre Değişim Eğrileri	88
4.8.	RUNGE-KUTTA YÖNTEMİ İLE ÇÖZÜM	90
4.8.1.	Bilgisayar Programı	92
4.8.2.	Bilgisayar Çıktıları	97
4.8.3.	Açısal Hız ve Faz Açısının Zamana Göre Değişim Eğrileri	99
4.9.	SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI	101

BÖLÜM V - SONUÇLAR	102
--------------------	-----

KAYNAKLAR

TEŞEKKÜR

ÖZGEÇMİŞ



ÖZET

Bu tezde, elektrik enerji sistemlerinde kullanılan modelleme yük akış ve transient-stabilite çözüm yöntemleri incelenmiştir. Yöntemler enerji sistemlerine uygulanarak bilgisayarda incelenmiş ve sonuçlar karşılaştırılarak irdelenmiştir. Çalışma beş bölüm halinde toplanmıştır.

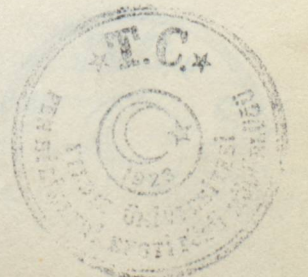
Birinci bölümde, konunun kısa tanıtılması yapıldıktan sonra konu ile ilgili genel bilgiler verilmiştir.

İkinci bölümde, uçlarından kaynaklarla uyarılarak ve bara bağlantı matrisi kullanılarak modellenen enerji sistemi gözönüne alınmıştır. Her iki yöntem bilgisayar işlem süresi açısından karşılaştırılmak üzere sistemde bara sayısı sabit, eleman sayısı değişken alınarak farklı modlarla Z_{BARA} ve Y_{BARA} matrisleri oluşturulmuştur. Her bir mod için bilgisayarda Z_{BARA} ve Y_{BARA} matrislerinin oluşturulmasında toplam işlem sayıları tespit edilmiştir. Optimum çözüm getiren yöntemi belirlemek üzere müşterek bir grafik üzerinde sonuçlar gösterilmiştir.

Üçüncü bölümde, elektrik enerji sistemlerinin önemli problemlerinden biri olan yük akış analizi tanıtılmış ve çözüm yöntemleri özetlenmiştir. Bu yöntemlerin incelenmesinde test şebekelere yapılan uygulamalar ile elde edilen sonuçlar yöntemlerin karşılaştırılmasında kullanılmıştır. Y_{BARA} kullanılan Gauss-Seidel ve Newton-Raphson yöntemleri ile yük akış analizi yapılmak üzere bilgisayar programları hazırlanmış ve enerji sistemine uygulanarak sonuçlar elde edilmiştir.

Dördüncü bölümde, enerji sistemlerinin çok önemli bir diğer problemi olan transient-stabilite tanıtılmış ve çözüm yöntemleri bilgisayar üzerinde araştırılarak incelenmiştir. Ele alınan her üç yöntem için faz açısı ve açısal hızın zamana göre değişim eğrileri bilgisayarda elde edilmiş ve bu eğriler müşterek bir grafik üzerinde optimum yöntemi belirlemek üzere gösterilmiştir.

Beşinci bölümde ise, kullanılan yöntemlerin genel bir değerlendirilmesi yapılarak bu inceleme ile elde edilen sonuçlar irdelenmiştir.



SUMMARY

In the present thesis, modelling used in electrical power systems, load flow and transient-stability solution techniques have been investigated. Methods currently used in the power systems are analysed by using the computer and the results are compared from several points of view. The work is presented in five chapters.

Chapter 1 presents, as a brief description of power systems and covers the basic principles.

In chapter 2, the power system modelling is used; bus incidence matrix and injecting from the buses has been considered. Both methods are compared in respect to computation time, having taken the number of buses are constant and the number of elements are variable; Z_{BUS} and Y_{BUS} matrix with the different mode are formed. Total computer execution number has been determined in Z_{BUS} and Y_{BUS} matrix formation for each mode. The results are presented on the graph in order to determine the method which gives optimum solution.

In the third chapter, the load flow analysis which is one of the important problems in the electrical power systems has been presented and the solution methods have been summarized test network applications and the results obtained are used for comparing the methods which are under investigation. Gauss-Seidel method using the bus admittance matrix and Newton-Raphson method using the bus admittance matrix are employed in preparation computer programs for load flow analysis and the results have been obtained by applying power systems.

In chapter 4, the transient-stability which is a very important problem in the power system has been introduced and the solution methods are investigated by using a computer. Phase angle and angular velocity are plotted, versus time, by the computer for three methods on the same graph for determining the optimum methods.

In chapter 5, the methods used are evaluated in general and the results obtained in the present work are discussed.



BÖLÜM II

ENERJİ SİSTEMLERİNİN BİLGİSAYARLA MODELLENMESİ

BÖLÜM I

G İ R İ Ş

Elektrik enerjisi ihtiyacı, çağımızdaki gelişmeler ve artan dünya nüfusu ile bağıntılı olarak hızla artmaktadır. Günümüzde bu ihtiyaç nominal ünite güçleri daha büyük değerlere ulaşan ve teknik özellikleri geliştirilen senkron generatörlerle sağlanmaktadır. Bunun yanında enerji üretim merkezlerinin eskilerde olduğunun tersine yerleşim bölgelerinden uzaklarda kurulma gerekliliği, oldukça uzun yüksek gerilim taşıma hatlarının kullanılması zorunluluğunu doğurmuştur. Örneğin, Amerika'da ve Avrupa'da birbirinden binlerce kilometre uzaklıktaki üretim merkezleri birbirleri ile paralel çalıştırılmaktadır. Enerji üretimindeki bu artışlara paralel olarak taşıma ve dağıtım hatlarının büyümesi önemli işletme ve kontrol sorunlarını da birlikte getirmiştir. Bu şekilde meydana gelen çok büyük enerji sistemlerinin dizaynlarının oluşturulabilmesi ve çalışma koşullarının kontrol edilebilmesi için olanaklı bilgisayar analiz araçlarının kullanılması gerekir.

Gelişmekte olan memleketimizde de teknolojik ilerlemeler ve modern toplumun hızlı değişen ihtiyaçlarına paralel olarak artan enerji ihtiyacı, son yıllarda yapılan istatistiklere göre yaklaşık olarak her 7 yılda bir iki katına çıkacaktır. Enerji ihtiyacının bu hızlı artışı yeni üretim merkezlerinin kurulmasını ve mevcut enerji sisteminin süratle büyütülmesini gerektirecektir. Elde edilecek büyük enerji sistemlerinde, yeni ve süratli kontrol cihazlarının kullanılması, sistem analizlerinin de daha sıhhatli yapılmasını gerektirmektedir. Bunun için eski yaklaşımların ve görüşlerin yeniden gözden geçirilmesine ve bu sahada yeni gelişmelere ihtiyaç duyulmuştur.

1960'lı yıllarda bilgisayarlardaki hızlı gelişmelerin sonucu olarak eski kullanılan analiz yöntemleri yerlerini bilgisayar analiz yöntemlerine bırakmak zorunda kalmıştır. Bilgisayarların sürati, güvenilirliği ve yüksek hassasiyeti, kısa zamanda enerji sistemlerinin analizinde en fazla kullanılan bir araç haline gelmelerine sebep olmuştur. Bilgisayarların enerji sistemleri analizinde kullanılmaya başlaması ile beraber nümerik analiz yöntemleri de ön plana çıkmıştır. Bu sayede bir çok nümerik analiz yöntemleri geliştirilmiş ve enerji sistemlerinin önemli problemlerinin çözümünde kullanılmıştır. Bu araştırmalara halen devam edilmektedir.

Bu tezde, bilgisayar zamanını optimum olarak kullanabilmek üzere enerji sistemleri analiz yöntemleri bilgisayarda incelenerek bazı yeni yorumlar getirilmiştir.



BÖLÜM II

ENERJİ SİSTEMLERİNİN BİLGİSAYARLA MODELLENMESİ

2.1. GİRİŞ

Bir elektrik şebekesinde ilk adım uygun matematiksel modellerin elde edilmesidir. Bu model şebeke elemanlarının özelliklerini tanımlamakla beraber bu elemanlar arasındaki elektriksel bağlantıları da tanımlamalıdır.

Bir şebeke matrisinin elemanları akım veya gerilim gibi bağımsız değişkenlerin seçimine bağlıdır. Buna karşılık şebeke matrisinin elemanları empedanslar veya admitanslar olacaktır. Herbir devre elemanının elektriksel tanımı uygun bir primitif matrisle ifade edilebilir. Bu matris her elemanın karakteristiğini tanımlar fakat bağlantılarıyla ilgili bilgi vermez. Bu sebeple şebeke bağlantılarının özelliklerini de tanımlamak için primitif matrisi şebeke matrisine dönüştürmemiz gereklidir.

Şebeke bağlantılarını temsil eden denklemlerde kullanılan matrislerin şekli seçilen referansa bağlıdır. Meselâ bir bara veya çevre referansına göre değişir. Bir barayı referans aldığımızda değişkenler düğüm gerilimleri ve düğüm akımlarıdır. Bir çevre referans alındığında değişkenler çevre gerilimleri ve akımlarıdır.

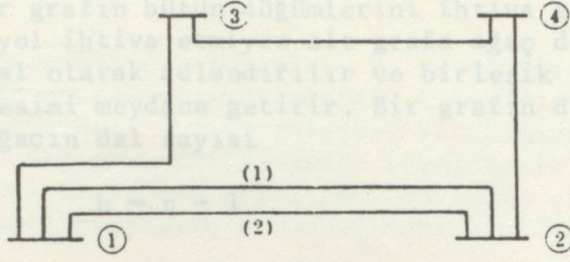
Enerji sistemi problemlerinin bilgisayarla çözümünde en önemli bir husus uygun bağlantı matrisleriyle şebeke matrislerinin kurulmasıdır.

2.1.1. Graf

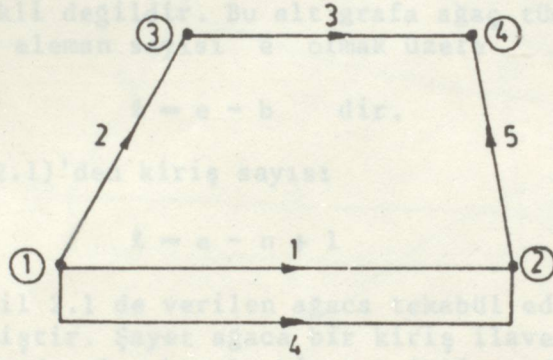
Bir devrenin geometrik yapısını tanımlayabilmek için şebeke elemanlarını, karakteristiğine bakmaksızın bir çizgi parçasıyla temsil etmek yeterlidir. Bu çizgi parçaları, elemanlar, bağlantı uçları da düğümler olarak adlandırılır. Şayet düğüm elemanın ucu ise düğüm ve eleman birbirine bağlıdır. Bir düğüme birden fazla eleman bağlı olabilir.

Bir graf bir şebekenin elemanlarının bağlantılarını gösterir. Alt graf, graf elemanlarının herhangi bir kısmıdır. Bir yol herhangi birdüğüme bağlı, ikiden fazla olmayan birleşik elemanların bir altgrafıdır. Bir graf ancak ve ancak her iki düğüm çifti arasında bir yol varsa birleşiktir. Elemanları bileştirilmiş grafın her elemanına bir yön verilmişse o zaman graf yönlendirilmiştir denir. Aşağıda bir güç sistemi ve onu temsil eden yönlendirilmiş graf gösterilmiştir.





(a) Ağaçta bulunmayan birleşik grafın elemanları kırıgılar olarak adlandırılır ve bir alt graf meydana getirirler. Birleşik olmayanları gerekli değil. Bu alt grafa ağaç diyenir. Kiriş sayısı l ve eleman sayısı n dir.

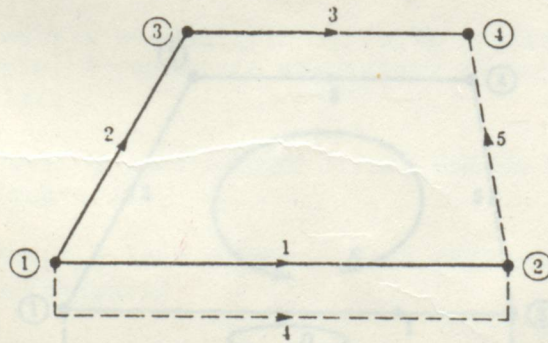


(b)

ŞEKİL 2.1- Bir güç sisteminin

a) Pozitif sequence (doğru bileşen) devre diyagramı

b) Yönlendirilmiş grafı



$$\begin{aligned} e &= 5 \\ n &= 4 \\ b &= 3 \\ l &= 2 \end{aligned}$$

— dal
--- kırış

ŞEKİL 2.2- Şekil 2.1 deki şebeke için ağaç ve tümleyen



Bir grafin bütün düğümlerini ihtiva eden fakat dallardan kapalı bir yol ihtiva etmiyen alt grafa ağaç denir. Bir ağacın elemanları dal olarak adlandırılır ve birleşik grafin elemanlarının bir alt kümesini meydana getirir. Bir grafin düğüm sayısı n olmak üzere bir ağacın dal sayısı

$$b = n - 1 \quad (2.1)$$

dir.

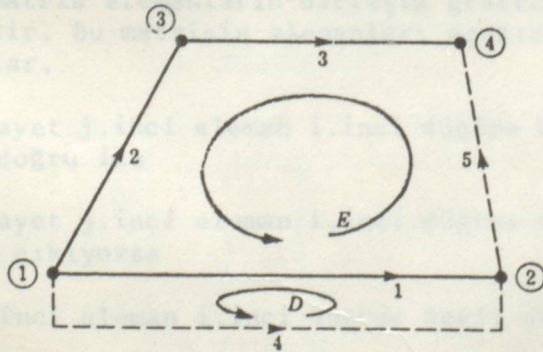
Ağaçta bulunmayan birleşik grafin elemanları girişler olarak adlandırılır ve bir alt graf meydana getirirler. Birleşik olmaları gerekli değildir. Bu alt grafa ağaç tümleyeni denir. Giriş sayısı l ve eleman sayısı e olmak üzere

$$l = e - b \quad \text{dir.}$$

Denklem (2.1)'den giriş sayısı

$$l = e - n + 1 \quad (2.2)$$

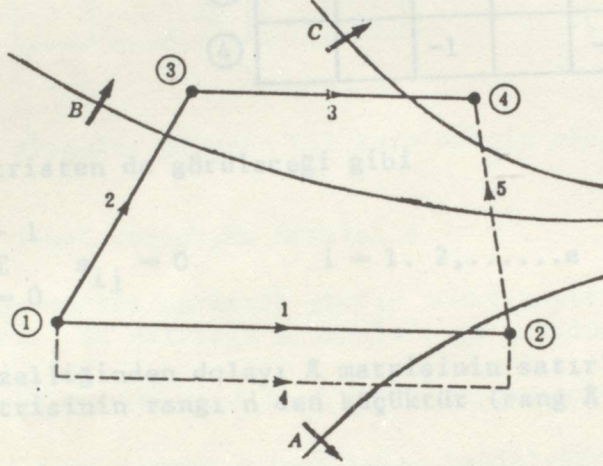
olur. Şekil 2.1 de verilen ağaca tekabül eden tümleyen Şekil 2.2 de gösterilmiştir. Şayet ağaca bir giriş ilave edilirse graf çevre olarak adlandırılan kapalı bir yol ihtiva eder. İlave edilen herbir giriş bir veya daha fazla çevreler meydana getirir. Sadece bir giriş ihtiva eden çevreler bağımsızdır ve temel çevreler olarak adlandırılırlar. Temel çevrelerin sayısı giriş sayısına eşittir ve bu da denklem (2.2) deki gibidir. Temel çevrenin yönü onun girişinin yönü olarak seçilir. Şekil 2.2 deki grafin temel çevreleri Şekil 2.3 te gösterilmiştir.



ŞEKİL 2.3- Birleşik grafin temel çevreleri



Bir kesitleme, elemanları kaldırıldığında birleşik grafi iki alt grafa ayıran elemanların bir kümesidir. Şayet herbir kesitleme sadece bir dalı ihtiva ediyorsa bir bağımsız kesitleme grubu seçilebilir. Bağımsız kesitlemeler temel kesitlemeler olarak adlandırılır. Temel kesitleme sayısı dal sayısına eşittir. Şekil 2.2 deki grafin temel kesitlemeleri aşağıdaki gibidir.



ŞEKİL 2.4- Birleşik grafin temel kesitlemeleri

2.1.2. Bağlantı Matrisleri

2.1.2.1. Eleman-Düğüm Bağlantı Matrisi $\hat{A}$

Bu matris elemanların birleşik grafta bağlandıkları düğümleri gösterir. Bu matrisin elemanları aşağıda gösterildiği şekilde bulunurlar.

$a_{ij} = -1$ Şayet j.inci eleman i.inci düğüme bağlı ve yönü bu düğüme doğru ise

$a_{ij} = +1$ Şayet j.inci eleman i.inci düğüme bağlı ve yönü bu düğümden çıkıyorsa

$a_{ij} = 0$ j.inci eleman i.inci düğüme bağlı değilse

Bu matrisin boyutu $n \times e$ dir. Şekil 2.2 deki graf için eleman-düğüm matrisi $\hat{A}$ aşağıda verilmiştir.



n \ e	1	2	3	4	5
①	1	1		1	
②	-1			-1	1
③		-1	1		
④			-1		-1

Matristen de görüleceği gibi

$$\sum_{j=0}^{n-1} a_{ij} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, e$$

dir. Bu özelliğinden dolayı $\hat{A}$ matrisinin satırları lineer bağımlıdır. $\hat{A}$ matrisinin rangı n den küçüktür ($\text{rang } \hat{A} < n$)

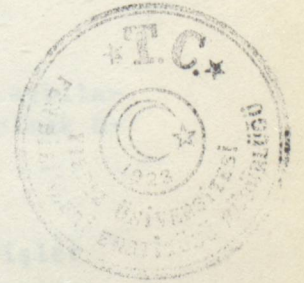
2.1.2.2. Bara Bağlantı Matrisi A

Birleşik grafın herhangi bir düğümü referans düğümü olarak alınabilir. Baralar olarak adlandırılan diğer düğümlerin değişkenleri referans noktasına göre ölçülebilir. Referans düğümüne tekabül eden satırın $\hat{A}$ dan çıkarılmasıyla elde edilen eleman-düğüm bağlantı matrisi, bara bağlantı matrisi olarak adlandırılır ve A ile gösterilmiştir. Bu matrisin boyutu $(n-1) \times e$ ve $\text{rank } A = n-1 = b$ dir. Şekil 2.2 deki graf'ın (1) düğümü referans seçilirse A matrisi aşağıdaki gibi olur.

Elemanlar						
Bara	1	2	3	4	5	
(2)	-1			-1	1	
(3)		-1	1			
(4)			-1		-1	

Bu matris dikdörtgen olduğundan singülerdir

A matrisinin satırları aşağıdaki gibi özel bir şekilde ayarlanmışsa bu matrisi şekildeki gibi iki kısmî matrise ayırabiliriz. A_b sütunları dallardan A_ℓ sütunları kirişlerden meydana gelmiştir. A_b 'nin boyutu $(n-1) \times b$ ve A_ℓ nin boyutu ise $(n-1) \times \ell$ dir.



		Elemanlar							Dallar	Kirişler
Bara		1	2	3	4	5	Bara			
(2)	-1				-1	1				
(3)		-1	1							
(4)			-1			-1				

$A =$

$=$

A_b	A_ℓ
-------	----------

A_b singüler olmayan bir kare matris olup $\text{rank } A_d = (n-1)$ dir.

2.1.2.3. Temel Kesitleme Matrisi B

Bu matris birleşik grafin temel kesitlemelere göre durumunu gösterir. Bu matrisin elemanları şu şekilde bulunur.

$b_{ij} = 1$ j.inci eleman i.inci temel kesitlemeye giriyorsa

$b_{ij} = -1$ j.inci eleman i.inci temel kesitlemeden çıkıyorsa

$b_{ij} = 0$ j.inci eleman i.inci temel kesitlemeye bağlı değilse

Bu matrisin boyutu $b \times e$ dir. Şekil 2.4 deki graf için B matrisi aşağıdaki gibi olur.

		Temel Elemanlar				
		Kesitlemeler				
		1	2	3	4	5
A	1	1			1	-1
B = B			1			1
C				1		1

Bu B matrisi U_b ve B_ℓ gibi iki alt matrise ayrılabilir. B_ℓ nin sütunları kirişler, U_b nin sütunları dallar olmak üzere aşağıdaki gibi ayrılmıştır.

		1	2	3	4	5		
		Dallar					Kirişler	
A	1	1			1	-1		
B = B			1			1		
C				1		1		

$=$

U_b	B_ℓ
-------	----------

U_b birim matrisi dallar ve temel kesitlemeler arasında bire-bir eşleme gösterir. B_ℓ aıt matrisi bara çakışım matrisi A' dan da elde edilebilir. Kirişlerin baralara bağlantısını A_ℓ ve dalların baralara bağlantısını A_b gösterir. Dallar ve temel kesitlemeler arasında bire-bir eşleme olduğundan $B_\ell^t A_b^t$ çarpımı kirişlerin baralara bağlantısını gösterir. Yani

$$B_\ell^t A_b^t = A^t$$

buradan da

$$B_\ell^t = A_\ell^t (A_b^t)^{-1}$$

dir.

2.1.2.4. Temel Çevre Matrisi C

Birleşik grafin temel çevrelerindeki elemanların konumu temel çevre matrisi C ile gösterilir. Bu matrisin elemanları şu şekilde bulunur.

$c_{ij} = 1$ j.inci eleman i.inci temel çevrede ve aynı yönde ise

$c_{ij} = -1$ j.inci eleman i.inci temel çevrede fakat ters yönde ise

$c_{ij} = 0$ j.inci eleman i.inci temel çevrede değilse

Temel çevre matrisinin boyutu $\ell \times e$ dir. Şekil 1.3 deki graf için temel çevre matrisi C aşağıda gösterilmiştir.

		Elemanlar						
Temel Çevreler		1	2	3	4	5	Dallar	Kirişler
C =	D	-1			1		C_b	U_ℓ
	E	1	-1	-1		1		

Bu C matrisini C_b ve U_ℓ gibi iki alt matrise ayırabiliriz. C_b nin sütunlarını dallar, U_ℓ nin sütunlarını da kirişler meydana getirmektedir. U_ℓ matrisi kirişlerin temel çevrelere bire-bir eşlemesini gösterir.

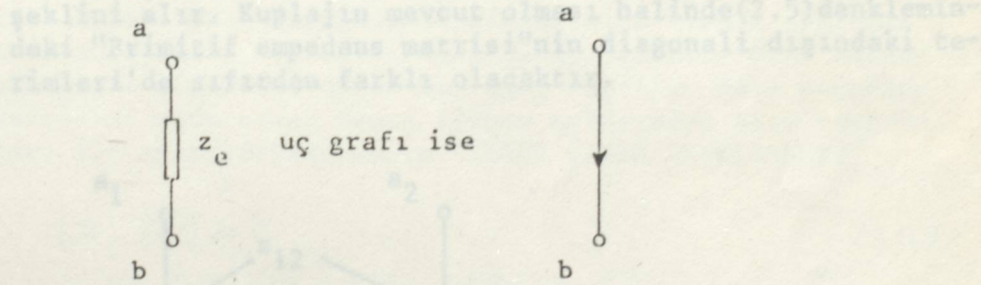


2.2. ENERJİ SİSTEMİNİN UÇLARINDAN KAYNAKLARLA UYARILARAK MODELLENMESİ

Bu bölümde elektrik enerji sisteminin matematiksel modeli sistem uçlarından kaynaklarla uyarılarak graf teorisiyle çıkarılmıştır. Bunun için primitif şebeke tanım denklemleri iki uçlu kavramlarından hareketle çıkarılmış sonra temel kesitleme ve temel çevre denklemleri kullanılarak bara empedans ve admitans matrisleri elde edilmiştir. Bölümün sonunda bu modelleme için bilgisayar programı ve akış diyagramı verilmiştir.

2.2.1. Primitif Empedans Matrisi

Şebekeyi meydana getiren elemanların her birinin iki uçlu olduğu düşünülerek "TANIM DENKLEMLERİ" aşağıdaki gibi yazılabilir.



ŞEKİL :(2.5) İki uçlu eleman ve uç grafı

Şekil(2.5)'de gösterilen iki uçlu elemanın matematiksel modeli;

$$e_e = z_e \cdot i_e \quad (2.3)$$

n eleman için(2.3) denklemi matrisyel formda aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$[e_e] = [z_p] [i_e] \quad (2.4)$$

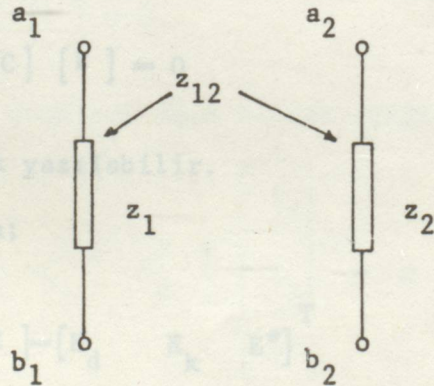


(2.4)denklemindeki Z katsayılar matrisi "Primitif empedans matrisi" olarak Z^p adlandırılır.

Şebeke elemanları arasında kuplaj mevcut değilse, Z^p "Primitif empedans matrisi" diagonal bir matris olur. Yani;

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & z_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_n \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

şeklini alır. Kuplajın mevcut olması halinde (2.5) denklemindeki "Primitif empedans matrisi"nin diagonalı dışındaki terimleri'de sıfırdan farklı olacaktır.



ŞEKİL : (2.6) İki eleman arasında kuplajın gösterilmesi.

z_1 ve z_2 iki uçlu elemanlar için karşılıklı kuplajı düşünerek matematiksel modeli aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$



Bu denklem n elemanı için ise aşağıdaki gibi olur.

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \dots & z_{1n} \\ z_{21} & z_{22} & \dots & z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{n1} & z_{n2} & \dots & z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_n \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

2.2.2. Temel Çevre Denklemleri

Enerji sisteminin matematiksel modeli sistem uçlarından (Baralardan) kaynaklar ile uyarılarak elde edilebilir. Bu uyarda gerilim ve akım kaynaklarından biri kullanılabilir. Ancak, bara empedans matrisini elde etmede sistemin akım kaynakları ile uyarılması daha uygundur. Önce sistemin grafi çizilerek uygun bir ağaç seçilir. Bara empedans matrisini elde etmek üzere sistem uçlarından akım kaynakları ile uyarıldıktan sonra "TEMEL ÇEVRE DENKLEMLERİ"

$$[C] [E] = 0 \quad (2.8)$$

olarak yazılabilir.

Burada;

$$[E] = [E_d \quad E_k \quad E^*]^T \quad (2.9)$$

şeklinde üç kısımdan meydana gelen bir vektördür. (2.9) denkleminde;

E_d : Dal gerilimlerini

E_k : Kiriş gerilimlerini

E^* : Kaynak gerilimlerini

gösterir. (2.8) denklemini açık olarak aşağıdaki gibi tekrar yazılabilir.



$$\begin{bmatrix} C_1 & U & 0 \\ \hline C_2 & 0 & U \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_d \\ E_k \\ E^* \end{bmatrix} = 0 \quad (2.10)$$

Buradan,

$$\begin{bmatrix} 0 \\ U \end{bmatrix} E^* + \begin{bmatrix} C_1 & U \\ C_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_d \\ E_k \end{bmatrix} = 0 \quad (2.11)$$

elde edilir.

2.2.3. Temel Kesitleme Denklemleri

Yukarıda seçtiğimiz aynı ağaç için "TEMEL KESİTLEME DENKLEMLERİ" aşağıdaki gibidir.

$$[E] [I] = 0 \quad (2.12)$$

(2.12) denklemi açık olarak aşağıdaki gibi tekrar yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} U & -C_1^t & -C_2^t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_k \\ I^* \end{bmatrix} = 0 \quad (2.13)$$

(2.13) denkleminde matrisyel işlem yapılırsa;

$$[U] [I_d] = [C_1^t \quad C_2^t] \begin{bmatrix} I_k \\ I^* \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

elde edilir. Ayrıca,

$$[U] [I_k] = [U \quad 0] \begin{bmatrix} I_k \\ I^* \end{bmatrix} \quad (2.15)$$



(2.15)denklemini dikkate alınarak(2.14)ve(2.15)denklemleri bi-
tişik yazılırsa;

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1^t & C_2^t \\ U & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_k \\ I^* \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

elde edilir.

2.2.4. Bara Empedans Matrisinin Elde Edilmesi

Bara empedans matrisini elde etmek üzere(2.7)denklemini
(2.11)denkleminde yerine konursa;

$$\begin{bmatrix} 0 \\ U \end{bmatrix} E^* + \begin{bmatrix} C_1 & U \\ C_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \dots z_{1n} \\ z_{21} & z_{22} \dots z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{n1} & z_{n2} \dots z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_k \end{bmatrix} = 0 \quad (2.17)$$

elde edilir.

$$[Z_p] = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \dots z_{1n} \\ z_{21} & z_{22} \dots z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{n1} & z_{n2} \dots z_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

şeklinde kısmi matrislere ayrılırsa(2.17)denklemini yeniden
aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} 0 \\ U \end{bmatrix} E^* + \begin{bmatrix} C_1 & U \\ C_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_k \end{bmatrix} = 0 \quad (2.19)$$

(2.16) denklemini (2.19)denkleminde yerine konur ve düzenlenir-
se



$$\begin{bmatrix} 0 \\ U \end{bmatrix} E^* + \begin{bmatrix} C_1 & U \\ C_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1^t & C_2^t \\ U & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_k \\ I^* \end{bmatrix} = 0$$

ve

$$\begin{bmatrix} 0 \\ U \end{bmatrix} E^* + \begin{bmatrix} z_1 & z_2 \\ z_3 & z_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_k \\ I^* \end{bmatrix} = 0 \quad (2.20)$$

elde edilir. Burada;

$$z_1 = C_1 z_{11} C_1^t + z_{21} C_1^t + C_1 z_{12} + z_{22}$$

$$z_2 = -C_1 z_{11} C_2^t - z_{21} C_2^t$$

$$z_3 = -C_2 z_{11} C_1^t - C_2 z_{12}$$

$$z_4 = C_2 z_{11} C_2^t$$

dir.

$$\begin{bmatrix} C_1 & U \\ C_2 & 0 \end{bmatrix}^t = \begin{bmatrix} C_1^t & C_2^t \\ U & 0 \end{bmatrix}$$

olduğu göz önüne alınarak

$$\begin{bmatrix} z_1 & z_2 \\ z_3 & z_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 & U \\ C_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1^t & U \\ C_2^t & 0 \end{bmatrix}^t \quad (2.21)$$

elde edilir.

(2.20) denklemini aşağıdaki gibi tekrar yazılır ve işlemler yapılır

$$\begin{bmatrix} z_1 & z_2 \\ z_3 & z_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_k \\ I^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -U \end{bmatrix} E^*$$

$$Z_1 I_k + Z_2 I^* = 0 \quad (2.22)$$

$$Z_3 I_k + Z_4 I^* = -E^* \quad (2.23)$$

(2.22) denkleminde

$$I_k = -Z_1^{-1} \cdot Z_2 \cdot I^*$$

olur. Bu sonucu (2.23) de yerine koyarsak

$$[Z_4 - Z_3 Z_1^{-1} Z_2] I^* = -[E^*] \quad (2.24)$$

elde edilir. Uyarma kaynakları ile gerçek değerler arasında

$$E = V^*$$

ve

$$I = -I^*$$

Bağıntıları olduğu dikkate alınır (2.24) denklemini

$$[E] = [Z_4 - Z_3 Z_1^{-1} Z_2] [I] \quad (2.25)$$

olur. Buradaki,

$$[Z_4 - Z_3 Z_1^{-1} Z_2]$$

BARA EMPEDANS MATRİSİ " Z_{BARA} " dır. Yani şebeke;

$$[E] = [Z_{BARA}] [I] \quad (2.26)$$

şeklinde modellenmiş olmaktadır.

$$[Z_{BARA}] = [Z_4 - Z_3 Z_1^{-1} Z_2] \quad (2.27)$$



dir. Ayrıca BARA ADMİTANS MATRİSİ :

$$[Y_{BARA}] = [Z_{BARA}]^{-1} \quad (2.28)$$

denkleminde hesaplanabilir.

2.2.5. Bara Admitans Matrisinin Elde Edilmesi

Bu matrisi elde etmek üzere sistemin gerilim kaynakları ile uyarılması daha uygundur. Sistem uçlarından (Baralar-dan) gerilim kaynakları ile uyarıldığında grafın dalları sadece bu gerilim kaynaklarından meydana gelecektir. Buna göre TEMEL ÇEVRE DENKLEMLERİ

$$[C \mid U] \begin{bmatrix} E^* \\ E_k \end{bmatrix} = 0 \quad (2.29)$$

Temel kesitleme denklemleri

$$[U \mid -C^t] \begin{bmatrix} I^* \\ I_k \end{bmatrix} = 0 \quad (2.30)$$

olur.(1.29) den,

$$[E_k] = -[C] [E^*] \quad (2.31)$$

(2.30) denkleminde,

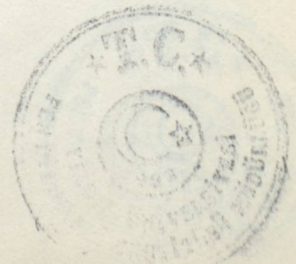
$$[I^*] = [C^t] [I_k] \quad (2.32)$$

Diğer taraftan(2.5) denkleminde

$$[I_k] = [Y_p] [E_k] \quad (2.33)$$

yazılabilir. Burada,

$$[Y_p] = [Z_p]^{-1}$$



"primitif admitans matrisi" olarak adlandırılır.

(2.31)ve(2.33)denklemleri(2.32)denkleminde yerine konursa,

$$[I^*] - [C^t] [Y_p] [E_k] = [-C^t] [Y_p] [C] [E^*] \quad (2.34)$$

Kaynaklardan gerçek değerlere geçerse,

$$[I] = [C^t] [Y_p] [C] [E] \quad (2.35)$$

elde edilir. Sistem :

$$[I] = [Y_{BARA}] [E] \quad (2.36)$$

şeklinde modellenmiş olur.

$$[Y_{BARA}] = [C^t] [Y_p] [C]$$

şeklindedir. Buradan da "Bara Empedans Matrisi"

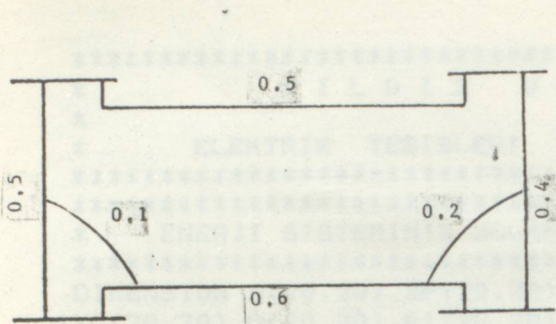
$$[Z_{BARA}] = [Y_{BARA}]^{-1} \quad (2.37)$$

eşitliğinden hesaplanabilir.

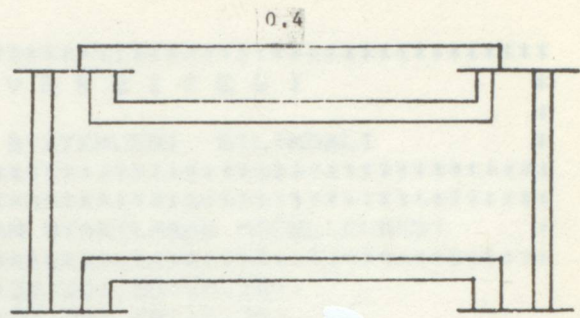
ÖRNEK PROBLEM

Aşağıda tek hat diyagramları verilen enerji sistemlerinde bara sayısı sabit, eleman sayısı değişken alınarak elde edilen farklı modlar için Y_{BARA} ve Z_{BARA} matrislerini, uçlarından kaynaklarla uyararak ve bara bağlantı matrisini kullanarak bilgisayarda modelliyelim. Her iki yöntemi bilgisayar işlem süresi yönünden karşılaştırmak üzere elde edilen sonuçları aynı bir grafik üzerinde gösterelim.

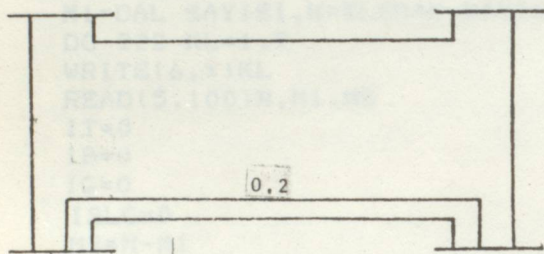




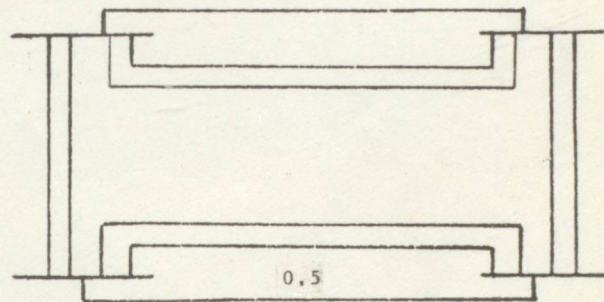
Mod. 1



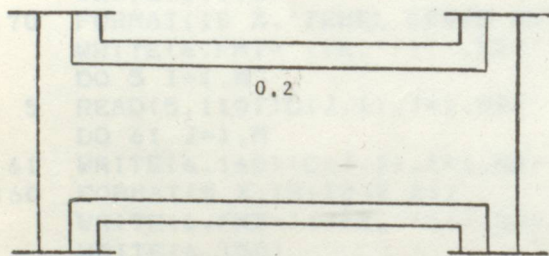
Mod. 6



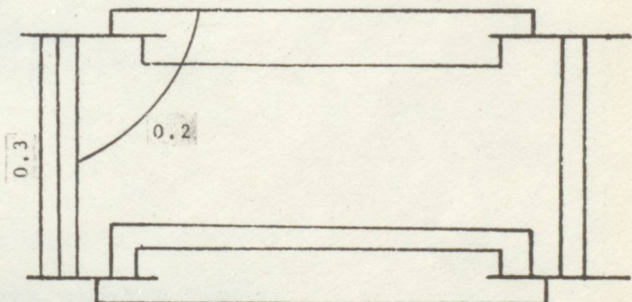
Mod. 2



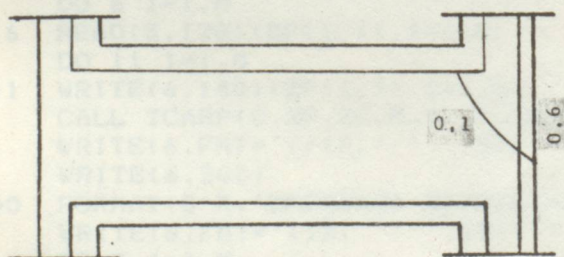
Mod. 7



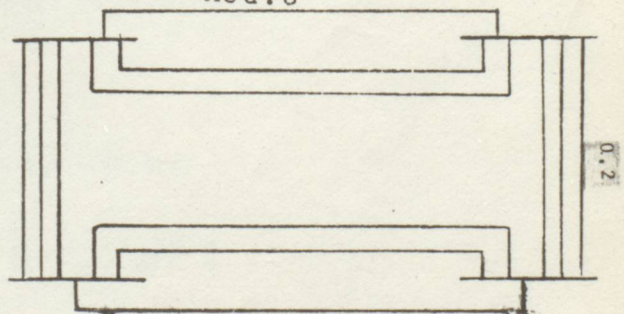
Mod. 3



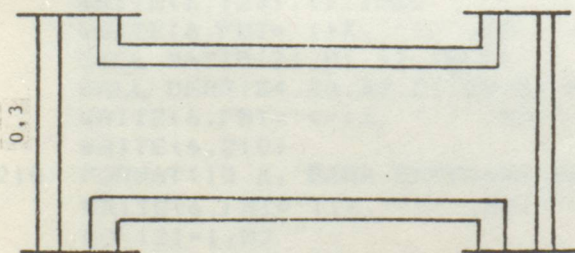
Mod. 8



Mod. 4



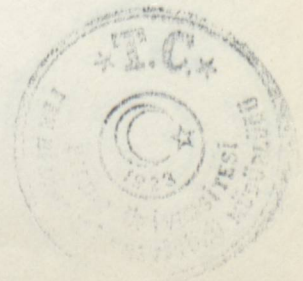
Mod. 9



Mod. 5



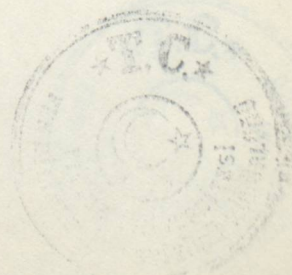

```
*****
*           Y I L D I Z   U N I V E R S I T E S I           *
*
*           ELEKTRİK TESİSLERİ VE SİSTEMLERİ BİLİMDALI       *
*****
*           ENERJİ SİSTEMİNİN UCLARINDAN UYARILARAK MODELLENMESİ *
*****
DIMENSION A(20,20),ZP(20,20),C1(20,20),ZC(20,20),
*YC(20,20),C(20,20),K1(20,20),YP(20,20),YB(20,20),
*Z1(20,20),Z2(20,20),Z3(20,20),Z4(20,20),Z(20,20),
*A1(20,20),A2(20,20),ZB(20,20)
INTEGER C
M1=DAL SAYISI,N=ELEMAN SAYISI
DO 222 KL=1,9
WRITE(6,*)KL
READ(5,100)N,M1,M8
IT=0
IB=0
IG=0
ISLC=0
M2=N-M1
M=N
WRITE(6,FMT='(/1X, ''!'',52(''-'''), ''!'')')
WRITE(6,170)
170 FORMAT(10 X, 'TEMEL CEVRE MATRİSİ=C')
WRITE(6,FMT='(1X, ''!'',52(''-'''), ''!'',/))')
DO 5 I=1,M
5 READ(5,110)(C(J,I),J=1,M8)
DO 61 J=1,M
61 WRITE(6,160)(C(J,I),I=1,M8)
160 FORMAT(5 X,18(I2,2 X))
WRITE(6,FMT='(/1X, ''!'',52(''-'''), ''!'')')
WRITE(6,150)
150 FORMAT(10 X, 'PRİMİTİ VE EMPEDANS MATRİSİ=ZP')
WRITE(6,FMT='(1X, ''!'',52(''-'''), ''!'',/))')
DO 6 I=1,M
6 READ(5,120)(ZP(I,J),J=1,M)
DO 11 I=1,M
11 WRITE(6,140)(ZP(I,J),J=1,M)
CALL TCARP(C,ZP,ZC,M,N,IT,ISLC)
WRITE(6,FMT='(/1X, ''!'',52(''-'''), ''!'')')
WRITE(6,200)
200 FORMAT(8 X, 'EMPEDANS MATRİSİ=Z')
WRITE(6,FMT='(1X, ''!'',52(''-'''), ''!'',/))')
DO 8 I=1,M
8 WRITE(6,130)(ZC(I,J),J=1,N)
CALL DONUS(ZC,Z1,Z2,Z3,Z4,M1,N)
WRITE(6,FMT='(/1X, ''!'',52(''-'''), ''!'')')
WRITE(6,123),IT,ISLC
WRITE(6,FMT='(1X, ''!'',52(''-'''), ''!'',/))')
CALL MATIN(Z1,M1,IT,ISLC)
CALL DERS(Z4,Z3,Z2,Z1,ZB,M1,M2,IT,ISLC)
WRITE(6,FMT='(/1X, ''!'',52(''-'''), ''!'')')
WRITE(6,210)
210 FORMAT(10 X, 'BARA EMPEDANS MATRİSİ=ZB')
WRITE(6,FMT='(1X, ''!'',52(''-'''), ''!'',/))')
DO 12 I=1,M2
12 WRITE(6,130)(ZB(I,J),J=1,M2)
100 FORMAT(3 I2)
```



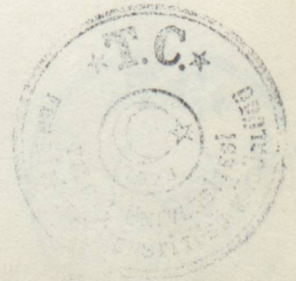

```

110 FORMAT(30 I2)
120 FORMAT(13(F3.1))
130 FORMAT(5 X,8(F8.3,2 X))
140 FORMAT(5 X,13(F3.1,2 X))
    WRITE(6,FMT='(/1X,'''',52(''-'''),''''')')
    WRITE(6,123),IT,ISLC
    WRITE(6,FMT='(1X,'''',52(''-'''),''''',/))')
    CALL MATIN(ZB,M2,IT,ISLC)
    WRITE(6,211)
211 FORMAT(10 X,'BARA ADMITANS MATRISI=YB')
    WRITE(6,FMT='(1X,'''',52(''-'''),''''',/))')
    DO 16 I=1,M2
16  WRITE(6,130)(ZB(I,J),J=1,M2)
    WRITE(6,FMT='(/1X,'''',52(''-'''),''''')')
222 WRITE(6,123),IT,ISLC
    WRITE(6,FMT='(1X,'''',52(''-'''),''''',/))')
123 FORMAT(10 X,'PROGRAM BOYUNCA YAPILAN ISLEM SAYILARI',
*/10 X,'TOPLAMA SAYISI',10X,'CARPMA SAYISI',/18X,15,14X,15)
*/8 X,'TOPLAMA SAYISI',2X,'CARPMA SAYISI',2X,'BOLME SAYISI',
*/2 X,'TOP. ISLEM SAYISI',/10X,15,14X,15,13X,15)
    STOP
    END
    SUBROUTINE TCARP(K1,YP,YB,M,N,IT,ISLC)
    DIMENSION K1(20,20),YP(20,20),YB(20,20)
    DO 5 I=1,N
    DO 5 J=1,M
    C1(I,J)=0
    DO 55 L=1,M
    PRINT*, 'A=',K1(L,J), ' YP=',YP(L,J)
    PRINT*, 'A(',L,',',I,')=',K1(L,I), ' YP(',L,',',J,')=',YP(L,J)
    IT=IT+1
    ISLC=ISLC+1
55  C1(I,J)=C1(I,J)+K1(L,I)*YP(L,J)
    PRINT*, 'C1(',I,',',J,')=',C1(I,J)
CONTINUE
    WRITE(6,*) 'C1 MATRISI'
    DO 10 I=1,N
10  WRITE(6,135)(C1(I,J),J=1,M)
135 FORMAT(5 X,8(F6.3,2 X))
    DO 6 I=1,N
    DO 6 J=1,N
    YB(I,J)=0
    DO 6 L=1,M
    ISLC=ISLC+1
    IT=IT+1
6  YB(I,J)=YB(I,J)+C1(I,L)*K1(L,J)
    RETURN
    END
    SUBROUTINE MATIN(A,N,IT,ISLC)
    DIMENSION A(20,20)
    DO 50 K=1,N
    DO 20 I=1,N
    DO 20 J=1,N
    IF(I.EQ.K.OR.J.EQ.K) GOTO 20
    ISLC=ISLC+1
    IT=IT+1
    A(I,J)=A(I,J)-A(I,K)*A(K,J)/A(K,K)
20  CONTINUE
    A(K,K)=-1 O/A(K,K)
    DO 30 I=1,N
    IF(I.EQ.K) GOTO 30

```




```
ISLC=ISLC+1
A(I,K)=A(I,K)*A(K,K)
30 CONTINUE
DO 40 J=1,N
IF(J.EQ.K) GOTO 40
A(K,J)=A(K,J)*A(K,K)
40 CONTINUE
50 CONTINUE
DO 60 I=1,N
DO 60 J=1,N
ISLC=ISLC+1
A(I,J)=-A(I,J)
60 CONTINUE
RETURN
END
SUBROUTINE DONUS(Z,Z1,Z2,Z3,Z4,N,K)
DIMENSION Z(20,20),Z1(20,20),Z2(20,20),Z3(20,20),Z4(20,20)
N1=N+1
DO 5 I=1,N
DO 5 J=1,N
5 Z1(I,J)=Z(I,J)
DO 6 I=1,N
DO 6 J=N1,K
K1=J-N
6 Z2(I,K1)=Z(I,J)
DO 7 I=N1,K
K1=I-N
DO 7 J=1,N
7 Z3(K1,J)=Z(I,J)
DO 8 I=N1,K
K1=I-N
DO 8 J=N1,K
K2=J-N
8 Z4(K1,K2)=Z(I,J)
RETURN
END
SUBROUTINE DERS(Z1,Z2,Z3,Z4,ZD,M2,M1,IT,ISLC)
DIMENSION Z1(20,20),Z2(20,20),Z3(20,20),Z4(20,20),
11 *A1(20,20),A2(20,20),ZD(20,20)
DO 1 I=1,M1
DO 1 J=1,M2
A1(I,J)=0
130 DO 1 K=1,M2
ISLC=ISLC+1
IT=IT+1
10 A1(I,J)=A1(I,J)+Z2(I,K)*Z4(K,J)
DO 2 I=1,N1
DO 2 J=1,N1
A2(I,J)=0
DO 2 K=1,M2
ISLC=ISLC+1
IT=IT+1
2 A2(I,J)=A2(I,J)+A1(I,K)*Z3(K,J)
DO 3 I=1,M1
DO 3 J=1,M1
IT=IT+1
3 ZD(I,J)=Z1(I,J)-A2(I,J)
RETURN
END
```



CALL MATIN(YB,N,IT,ISLC)

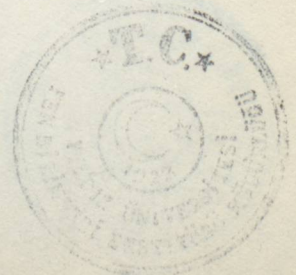
WRITE(6,FMT='(/1X,'!',52(''-'),',',/))

WRITE(6,200)

```

*****
*           Y I L D I Z   U N I V E R S I T E S I           *
*
*       ELEKTRİK TESİSLERİ VE SİSTEMLERİ BİLİMDALİ       *
*****
*****
*       BARA BAĞLANTI MATRİSİNİ KULLANARAK ENERJİ       *
*       SİSTEMİNİN MODELLENMESİ                         *
*****
DIMENSION A(20,20),ZP(20,20),C1(20,20),YB(20,20),
*ZP1(20,20),B(20,20),K1(20,20)
INTEGER B
DO 222 KL=1,9
WRITE(6,*)KL
IT=0
IB=0
ISLC=0
READ(5,100) N,M
WRITE(6,FMT='(/1X,'!',52(''-'),',',/))
WRITE(6,170)
170 FORMAT(10 X,'BARA BAĞLANTI MATRİSİ=A')
WRITE(6,FMT='(1X,'!',52(''-'),',',/))
DO 5 I=1,M
5 READ(5,110)(B(I,J),J=1,N)
DO 51 J=1,N
51 WRITE(6,160)(B(I,J),I=1,M)
160 FORMAT(5 X,18(I2,2 X))
WRITE(6,FMT='(/1X,'!',52(''-'),',',/))
WRITE(6,150)
150 FORMAT(10 X,'PRIMITIVE EMPEDANS MATRİSİ=ZP')
WRITE(6,FMT='(1X,'!',52(''-'),',',/))
DO 6 I=1,M
6 READ(5,120)(ZP(I,J),J=1,M)
DO 11 I=1,M
11 WRITE(6,140)(ZP(I,J),J=1,M)
CALL MATIN(ZP,M,IT,ISLC)
WRITE(6,FMT='(/1X,'!',52(''-'),',',/))
WRITE(6,180)
180 FORMAT(10 X,'PRIMITIVE ADMİTANS MATRİSİ=YP')
WRITE(6,FMT='(1X,'!',52(''-'),',',/))
DO 10 I=1,M
10 WRITE(6,130)(ZP(I,J),J=1,M)
WRITE(6,FMT='(/1X,'!',52(''-'),',',/))
CALL TRACP(B,ZP,YB,M,N,IT,ISLC)
WRITE(6,FMT='(/1X,'!',52(''-'),',',/))
WRITE(6,190)
190 FORMAT(10 X,'BARA ADMİTANS MATRİSİ=YB')
WRITE(6,FMT='(1X,'!',52(''-'),',',/))
DO 8 I=1,N
8 WRITE(6,130)(YB(I,J),J=1,N)
WRITE(6,FMT='(1X,'!',52(''-'),',',/))
WRITE(6,123),IT,ISLC
WRITE(6,FMT='(1X,'!',52(''-'),',',/))
100 FORMAT(2 I2)
110 FORMAT(30 I2)
120 FORMAT(13(F3.1))
130 FORMAT(5 X,8(F8.3,2 X))
140 FORMAT(5 X,13(F3.1,2 X))

```




```

CALL MATIN(YB,N,IT,ISLC)
WRITE(6,FMT='(/1X,'!'',52(''-''),'!'')')
WRITE(6,200)
200 FORMAT(10 X,'BARA EMPEDANS MATRISI=2B')
WRITE(6,FMT='(1X,'!'',52(''-''),'!'',/))')
DO 7 I=1,N
7 WRITE(6,130)(YB(I,J),J=1,N)
WRITE(6,FMT='(1X,'!'',52(''-''),'!'')')
222 WRITE(6,123)IT,ISLC
WRITE(6,FMT='(1X,'!'',52(''-''),'!'',/))')
123 FORMAT(10 X,'PROGRAM BOYUNCA YAPILAN ISLEM SAYILARI',
*/10 X,'TOPLAMA SAYISI',10X,'CARPMA SAYISI',/18X,15,14X,15)
123 FORMAT(/10 X,'PROGRAMDA BURAYA KADAR YAPILAN ISLEM SAYILARI'
*/8 X,'TOPLAMA SAYISI',2X,' CARPMA SAYISI',2X,'BOLME SAYISI',
*2 X,'TOP. ISLEM SAYISI',/10X,15,14X,15,8X,15,13X,15)
STOP
END
SUBROUTINE TCARP(K1,YP,YB,M,N,IT,ISLC)
DIMENSION K1(20,20),YP(20,20),C1(20,20),YB(20,20)
DO 5 I=1,N
DO 5 J=1,M
C1(I,J)=0
DO 55 L=1,M
PRINT*, 'A=',K1(L,J), ' YP=',YP(L,J)
PRINT*, 'A('',L,'','',I,'')=',K1(L,I), ' YP('',L,'','',J,'')=',YP(L,J)
IT=IT+1
ISLC=ISLC+1
55 C1(I,J)=C1(I,J)+K1(L,I)*YP(L,J)
PRINT*, 'C1('',I,'','',J,'')=',C1(I,J)
CONTINUE
WRITE(6,*) 'C1 MATRISI'
DO 10 I=1,N
10 WRITE(6,135)(C1(I,J),J=1,M)
135 FORMAT(5 X,8(F6.3,2 X))
DO 6 I=1,N
DO 6 J=1,N
YB(I,J)=0
DO 6 L=1,M
ISLC=ISLC+1
IT=IT+1
6 YB(I,J)=YB(I,J)+C1(I,L)*K1(L,J)
RETURN
END
SUBROUTINE MATIN(A,N,IT,ISLC)
DIMENSION A(20,20)
DO 50 K=1,N
DO 20 I=1,N
DO 20 J=1,N
IF(I.EQ.K.OR.J.EQ.K) GOTO 20
ISLC=ISLC+1
IT=IT+1
A(I,J)=A(I,J)-A(I,K)*A(K,J)/A(K,K)
20 CONTINUE
A(K,K)=-1 O/A(K,K)
DO 30 I=1,N
IF(I.EQ.K) GOTO 30
ISLC=ISLC+1
A(I,K)=A(I,K)*A(K,K)
30 CONTINUE

```




```
DO 40 J=1,N
IF(J.EQ.K) GOTO 40
A(K,J)=A(K,J)*A(K,K)
40 CONTINUE
50 CONTINUE
DO 60 I=1,N
DO 60 J=1,N
ISLC=ISLC+1
A(I,J)=-A(I,J)
60 CONTINUE
RETURN
END
SUBROUTINE DONUS(Z,Z1,Z2,Z3,Z4,N,K)
DIMENSION Z(20,20),Z1(20,20),Z2(20,20),Z3(20,20),Z4(20,20)
N1=N+1
DO 5 I=1,N
DO 5 J=1,N
5 Z1(I,J)=Z(I,J)
DO 6 I=1,N
DO 6 J=N1,K
K1=J-N
6 Z2(I,K1)=Z(I,J)
DO 7 I=N1,K
K1=I-N
DO 7 J=1,N
7 Z3(K1,J)=Z(I,J)
DO 8 I=N1,K
K1=I-N
DO 8 J=N1,K
K2=J-N
8 Z4(K1,K2)=Z(I,J)
RETURN
END
SUBROUTINE DERS(Z1,Z2,Z3,Z4,ZD,M2,M1,IT,ISLC)
DIMENSION Z1(20,20),Z2(20,20),Z3(20,20),Z4(20,20),
*A1(20,20),A2(20,20),ZD(20,20)
DO 1 I=1,M1
DO 1 J=1,M2
A1(I,J)=0
DO 1 K=1,M2
ISLC=ISLC+1
IT=IT+1
A1(I,J)=A1(I,J)+Z2(I,K)*Z4(K,J)
DO 2 I=1,N1
DO 2 J=1,N1
A2(I,J)=0
DO 2 K=1,M2
ISLC=ISLC+1
IT=IT+1
2 A2(I,J)=A2(I,J)+A1(I,K)*Z3(K,J)
DO 3 I=1,M1
DO 3 J=1,M1
IT=IT+1
3 ZD(I,J)=Z1(I,J)-A2(I,J)
RETURN
END
```

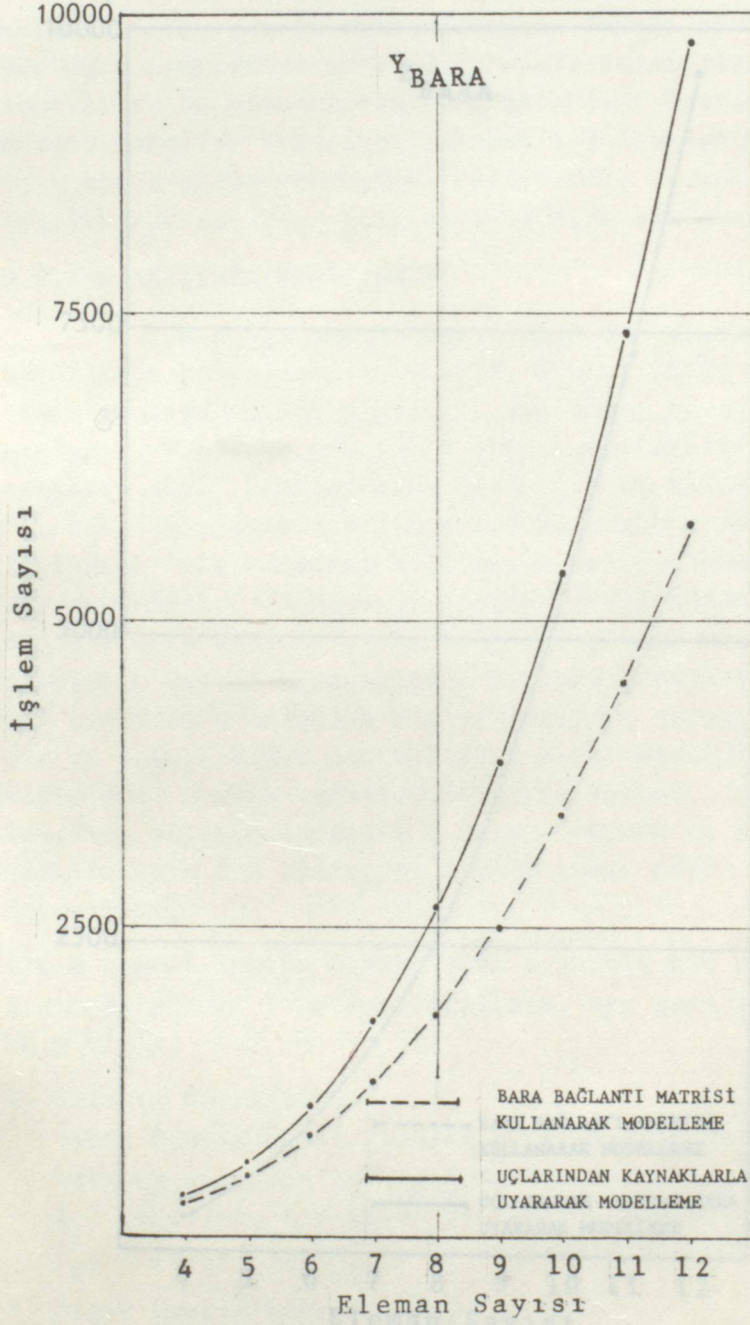

2.3. MODELLEME YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI:

BİLGİSAYAR ÇIKIŞLARI

MOD NUMARASI	İSLEM	BARA BAĞLANTI MATRİSİNİ KULLANARAK SİSTEMİN MODELLENMESİ		UCLARINDAN KAYNAKLARLA UYARILARAK SİSTEMİN MODELLENMESİ	
		YBARA	ZBARA	YBARA	ZBARA
1	T	120	132	161	149
	C	148	175	168	141
	B	40	55	16	1
	GT	308	362	345	291
2	T	200	212	303	291
	C	245	272	315	288
	B	85	100	19	4
	GT	530	584	637	583
3	T	312	324	519	507
	C	378	405	540	513
	B	156	171	30	15
	GT	846	900	1089	1035
4	T	462	474	827	815
	C	553	580	861	834
	B	259	274	55	40
	GT	1274	1328	1743	1689
5	T	656	668	1245	1233
	C	776	803	1296	1269
	B	400	415	100	85
	GT	1832	1886	2641	2587
6	T	900	912	1791	1779
	C	1053	1080	1863	1836
	B	585	600	171	156
	GT	2538	2592	3825	3771
7	T	1200	1212	2483	2471
	C	1390	1417	2580	2553
	B	820	835	274	259
	GT	3410	3464	5337	5283
8	T	1562	1574	3339	3327
	C	1793	1820	3465	3438
	B	1111	1126	415	400
	GT	4466	4520	7219	7165
9	T	1992	2004	4377	4365
	C	2268	2295	4536	4509
	B	1464	1479	600	585
	GT	5724	5778	9513	9459



2.3. MODELLEME YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI:



BÖLÜM III

YÜK AKIŞ ANALİZİ ÇÖZÜM YÖNTEMLERİ

3.1. GİRİŞ

Bu bölümde, bundan önceki bölümde elde edilen şebeke modeli kullanılarak, enerji sistemlerinin önemli problemlerinden biri olan yük akış analizinin elde edilmesinde kullanılan çözüm yöntemleri özetlenmiştir. Bu yöntemlerin test şebekeler üzerine uygulanmasından elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak irdelenmiştir. Yük akış analizi için uygun çözüm yöntemleri belirlenmiş ve ele alınan örnek probleme uygulanarak sonuçlar bilgisayarla elde edilmiştir.

3.2. YÜK AKIŞININ TANITILMASI

Yük akışı analizinde, şebekede bulunan her bir barada dört büyüklüğün hesaplanması istenir. Bunlar aktif ve reaktif güçler, gerilimin genliği ve faz açısıdır. Yük akışı hesaplarında üç tip bara tanımlanır. Pratikte çok yakın tahmin edilebilse de şebekedeki bütün santrallerin aktif üretimlerini kesin olarak bilmek imkansızdır. Bunun nedeni, hat kayıplarının bilinmemesidir. Bundan dolayı devredeki aktif bara güçlerinden bir tanesini bilinmeyen seçerek bunu çözümün sonunda elde etmek gereklidir. Bu nedenle üretim baralarından birinde aktif güç bilinmeyen olarak seçilir ki bu baraya "salınım barası" denir. Salınım barası olarak üretim baralarından birinin seçilmesi mecburi olmamakla beraber çözüm için kolaylık sağlar. Salınım barasının aktif gücü değişkendir ve değeri diğer santrallerin aktif üretimi ve aktif yüklerle aktif kayıpların toplamı arasındaki farka eşittir. Şebekedeki baralar numaralanırken salınım barasına 1 numara vermek ve baradaki gerilimi diğer gerilimlerin faz referansı olarak almak çözüm için mecburi olmasa da faydalıdır.

İlk m tanesi üretim barası olan n baralı bir şebeke ele alınır ve salınım barasına 1 numara verilirse, her bara için değişkenler aşağıdaki gibidir.

1- Salınım Barasında,

Bütün üretim baralarındaki gerilimlerin genlikleri bilindiği ve bu baranın sistemde referans barası olarak alınması dolayısı ile

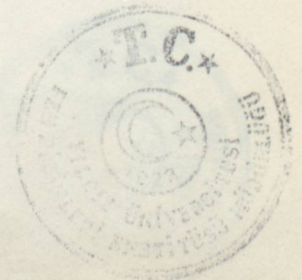
E_1 gerilimi, faz açısı ve genliği ile bilinir.

I_1 , dolayısı ile P_1 ve Q_1 değişkendir.

2- Diğer üretim baralarında,

$p = 2, \dots, m$ için E_p ve P_p bilinir

Gerilim açısı, I_p ve Q_p değişkendir.



3- Bütün Yük baralarında,

$p = (m+1), \dots, n$ için P_p ve Q_p bilinir.

E_p ve I_p değişkendir.

Etkili bilgisayar programlarında iki hususa dikkat etmek gerekir. Bunlar şebekenin matematiksel modelinin kolayca formülleştirilmesi ve eşitlikleri çözerken uygun sayısal yöntemlerin kullanılmasıdır. Şebekeler büyüdükçe nonlineer denklemlerin çözümü zorlaşır. Bu nedenle enerji sistemi denklemlerinin çözümünde nümerik çözüm yöntemleri tercih edilir.

Yük akış analizi için veriler, şebekedeki yük tevzii merkezlerinden elde edilir. Yük baralarındaki aktif ve reaktif güç ihtiyacının santraller arasında nasıl paylaştırıldığı ve santrallerin gerilimlerinin genlikleri yük tevzii merkezince bilinir. Geriye kalanlar ise, her baradaki karmaşık gerilim, santrallerin reaktif üretimleri ve çekilen gücün hatlar arasında nasıl dağıldığıdır. Bunlarda bu problemin bilinmeyenlerini meydana getirir.

Yük akış analizinde Z_{BARA} veya Y_{BARA} matrisleri kullanılabilirse de Z_{BARA} matrisi daha ziyade kısa devre analizi Y_{BARA} matrisi ise yük analizi için daha uygundur. Y_{BARA} matrisi sistemin tek hat diyagramından hareketle ve taşıma hatlarının seri empedansı ve şönt admittansı da dikkate alınarak hesaplanır.

3.3.ENERJİ SİSTEM DENKLEMLERİ

3.3.1.Şebeke Tanım Denklemleri

Bara empedans matrisini kullanan şebeke tanım denklemi,

$$E = Z_{BARA} \cdot I \quad (3.1)$$

veya admitans formunda,

$$I = Y_{BARA} \cdot E \quad (3.2)$$

dir.

Bara çevre matrisini kullanan şebeke tanım denklemi ise,

$$E = Z_{ÇEVRE} \cdot I$$

veya admitans formunda,

$$I = Y_{ÇEVRE} \cdot E$$

şeklindedir.



3.3.2 Bara Yük Denklemleri

Herhangi bir p barasında aktif ve reaktif güç :

$$P_p - jQ_p = E_p^* I_p$$

ve akım,

$$I_p = \frac{P_p - jQ_p}{E_p^*} \quad (3.3)$$

Burada, I_p sisteme aktığında pozitifdir.

Şebeke denklemi formülünde topırağa göre şönt elemanlar matris parametrelerine dahil edilirse, (3.3) denklemindeki akım baradaki toplam akımdır. Diğer taraftan, şönt elemanlar matris parametrelerine dahil edilmezse, p barasındaki toplam akım

$$I_p = \frac{P_p - jQ_p}{E_p^*} - y_p E_p$$

Burada y_p , baradaki toplam şönt admitans ve $y_p E_p$ ise p barasından topırağa akan şönt akımdır.

3.3.3 Hat Akış Denklemleri :

Bara gerilimlerinin iteratif çözümü tamamlandıktan sonra hat akışları hesaplanır. p ve q barasını bağlayan hatta p barasındaki akım;

$$i_{pq} = (E_p - E_q)y_{pq} + E_p \frac{y'_{pq}}{2}$$

Burada y_{pq} = Hattın admitansı

$$y'_{pq} = \text{Toplam hattın şönt admitansı (şarj admitansı)}$$

$$E_p \frac{y'_{pq}}{2} = \text{Hat şarjının } p \text{ barasında meydana getirdiği akım.}$$

Aktif ve reaktif yük akışı ise;

$$P_{pq} - jQ_{pq} = E_p^* i_{pq}$$

veya

$$P_{pq} - jQ_{pq} = E_p^* (E_p - E_q)y_{pq} + E_p^* E_p \frac{y'_{pq}}{2} \quad (3.4)$$

Burada p barasından q barasına aktif güç akışı P_{pq} ve reaktif güç akışı ise Q_{pq} dur. Benzer şekilde q barasından p barasına güç akışı;

$$P_{qp} - jQ_{qp} = E_q^* (E_q - E_p)y_{pq} + E_q^* E_q \frac{y'_{pq}}{2} \quad (3.5)$$

p - q hattında güç kaybı (3.4) ve (3.5) denklemlerinden hesaplanan yük



akışlarının cebirsel toplamıdır.

3.4. YÜK AKIŞ ANALİZİ ÇÖZÜM YÖNTEMLERİ

Yük akış analizinde kullanılan belli başlı çözüm yöntemlerini kısaca aşağıdaki gibi sıralayabiliriz.

- 1- Y_{BARA} kullanılan Gauss yöntemi
- 2- Y_{BARA} kullanılan Gauss-Seidel yöntemi
- 3- Y_{BARA} kullanılan Relaxation yöntemi
- 4- Y_{BARA} kullanılan Newton-Raphson yöntemi
- 5- Z_{BARA} kullanılan Gauss-Seidel yöntemi
- 6- $Y_{\text{ÇEVRE}}$ kullanılan Gauss yöntemi

3.4.1. Y_{BARA} kullanılan Gauss Yöntemi :

Gerilimin belirli bir değerde sabit kaldığı salınım barası hariç diğer bütün baralar için gerilim değerleri kabul edilerek yük akış probleminin çözümüne başlanır. Daha sonra bara yükleme denklemlerinden s salınım barası hariç bütün baralar için akımlar hesaplanır.

$$I_p = \frac{P_p - jQ_p}{E_p^*} \quad \begin{matrix} p = 1, 2, \dots, n \\ p \neq s \end{matrix} \quad (3.6)$$

Burada, n : şebekedeki bara sayısıdır. Şebeke tanım denklemi (3.7) işe aşağıdaki gibidir.

$$I = Y_{\text{BARA}} E \quad (3.7)$$

Toprak referans barası olarak seçilirse $n - 1$ adet eş zamanlı denklem (3.8)'deki gibi yazılabilir.

$$E_p = \frac{1}{Y_{pp}} \left(I_p - \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n Y_{pq} E_q \right) \quad \begin{matrix} p = 1, 2, \dots, n \\ p \neq s \end{matrix} \quad (3.8)$$

(3.6) denkleminde bara akımları hesaplanmıştır. Salınım barası gerilimi ve tahmini bara gerilimleri (3.8) denkleminde konarak yeni bir bara gerilim denklemi elde edilir. (3.8) denklemini çözmek üzere bara akımlarını hesaplamak için (3.6) denkleminde yeni gerilimler kullanılır. Bu işleme bütün bara gerilimlerindeki değişimler (sapmalar) ihmal edilebilecek bir değere ininceye kadar devam edilir. Gerilim çözümü elde edildikten sonra salınım barasındaki güç ve hat akışları hesaplanır. Şebeke tanım denklemi (3.8) ve bara yükleme denklemi (3.6) birleştirilerek sadece bara gerilimlerinin değişken olduğu (3.9) denklemi elde edilir.



Bara q		1	2	3	4	5	6
Bara p	1	Y_{11}	Y_{12}	Y_{13}	Y_{14}		
	2	Y_{21}	Y_{22}			Y_{25}	Y_{26}
	3	Y_{31}		Y_{33}		Y_{35}	
	4	Y_{41}			Y_{44}		Y_{46}
	5		Y_{52}	Y_{53}		Y_{55}	
	6		Y_{62}		Y_{64}		Y_{66}

Şekil-3.1 Bir enerji sisteminin tek hat diyagramı ve bara admitans matrisi.

$$E_1^{k+1} = \frac{KL_1}{(E_1^k)^*} - Y_{L12}E_2 - Y_{L13}E_3^k - Y_{L14}E_4^k \quad (3.12)$$

E_2 = Belirli sabit değer

$$E_3^{k+1} = \frac{KL_3}{(E_3^k)^*} - Y_{L31}E_1^k - Y_{L35}E_5^k \quad (3.13)$$

$$E_4^{k+1} = \frac{KL_4}{(E_4^k)^*} - Y_{L41}E_1^k - Y_{L46}E_6^k \quad (3.14)$$

$$E_5^{k+1} = \frac{KL_5}{(E_5^k)^*} - Y_{L52}E_2 - Y_{L53}E_3^k \quad (3.15)$$

$$E_6^{k+1} = \frac{KL_6}{(E_6^k)^*} - Y_{L62}E_2 - Y_{L64}E_4^k \quad (3.16)$$

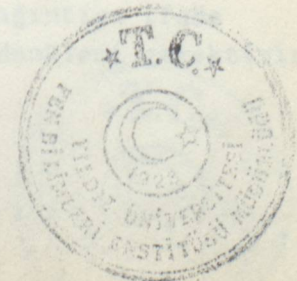
Burada, üst indis k iterasyon sayısını gösterir.

3.4.2. Y_{BARA} kullanılan Gauss-Seidel Yöntemi :

(3.11) bara gerilim denklemi Gauss-Seidel yöntemi ile de çözülebilir. Bu yöntemde yeni hesaplanan gerilim E^{k+1} yerine E_p^k konur ve bundan sonraki denklemin çözümünde kullanılır. Şekil-3.1'de gösterilen sistem için bu yöntemdeki denklemler aşağıdaki gibidir.

$$E_1^{k+1} = \frac{KL_1}{(E_1^k)^*} - Y_{L12}E_2 - Y_{L13}E_3^k - Y_{L14}E_4^k$$

E_2 = Belirli sabit değer



$$\begin{aligned} E_3^{k+1} &= \frac{KL_3}{(E_3^k)^*} - Y_{L_{31}}E_1^{k+1} - Y_{L_{35}}E_5^k \\ E_4^{k+1} &= \frac{KL_4}{(E_4^k)^*} - Y_{L_{41}}E_1^{k+1} - Y_{L_{46}}E_6^k \\ E_5^{k+1} &= \frac{KL_5}{(E_5^k)^*} - Y_{L_{52}}E_2 - Y_{L_{53}}E_3^{k+1} \\ E_6^{k+1} &= \frac{KL_6}{(E_6^k)^*} - Y_{L_{62}}E_2 - Y_{L_{64}}E_4^{k+1} \end{aligned}$$

3.4.3. Y_{BARA} kullanılan Newton-Raphson Yöntemi :

Bara gerilimleri açısından belirli aktif ve reaktif güçleri ifade eden nonlinear denklem takımı kullanılarak Newton-Raphson yöntemi ile yük akış analizi yapılabilir. p barasındaki yük (3.12) 'deki gibidir.

$$P_p - jQ_p = E_p^* I_p \quad (3.12)$$

(3.12) deki I_p için (3.7) şebeke tanım denklemindeki değeri yerine konarak (3.13) elde edilir.

$$P_p - jQ_p = E_p^* \sum_{q=1}^n Y_{pq} E_q \quad (3.13)$$

$E_p = e_p + jf_p$ ve $Y_{pq} = G_{pq} - jB_{pq}$ olduğundan (3.13) denklemi,

$$P_p - jQ_p = (e_p - jf_p) \sum_{q=1}^n (G_{pq} - jB_{pq})(e_q + jf_q)$$

olur. Reel ve imajiner kısımları ayrıldığında (3.14) denklemi elde edilir.

$$\begin{aligned} P_p &= \sum_{q=1}^n \{e_p(e_q G_{pq} + f_q B_{pq}) + f_p(f_q G_{pq} - e_q B_{pq})\} \\ Q_p &= \sum_{q=1}^n \{f_p(e_q G_{pq} + f_q B_{pq}) - e_p(f_q G_{pq} - e_q B_{pq})\} \end{aligned} \quad (3.14)$$

Bu formülasyon bir takım nonlinear eşzamanlı denklemleri verir. Bunlar sistemin her bir barası için iki tanedir. Aktif ve reaktif güçlerin değerleri P_p ve Q_p bilinmektedir. Gerilimin belirli ve sabit bir değerde olduğu salınım barası hariç diğer bütün baralarda gerilimin reel ve imajiner bileşenleri olan e_p ve f_p bilinmemektedir. Dolayısı ile yük akış probleminin çözümünde $2(n-1)$ adet denklem çözülür.

Aktif ve reaktif güç değişimleri arasındaki bağıntıyı ifade etmek için Newton-Raphson yöntemi bir takım lineer denklemi gerektirir



ve bara gerilim bileşenleri aşağıdaki gibidir.

$$\begin{array}{|c|} \hline \Delta P_1 \\ \hline \dots \\ \hline \Delta P_{n-1} \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|} \hline \frac{\partial P_1}{\partial e_1} \dots \frac{\partial P_1}{\partial e_{n-1}} & \frac{\partial P_1}{\partial f_1} \dots \frac{\partial P_1}{\partial f_{n-1}} \\ \hline \dots & \dots \\ \hline \frac{\partial P_{n-1}}{\partial e_1} \dots \frac{\partial P_{n-1}}{\partial e_{n-1}} & \frac{\partial P_{n-1}}{\partial f_1} \dots \frac{\partial P_{n-1}}{\partial f_{n-1}} \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline \Delta e_1 \\ \hline \dots \\ \hline \Delta e_{n-1} \\ \hline \end{array} \quad (3.15)$$

$$\begin{array}{|c|} \hline \Delta Q_1 \\ \hline \dots \\ \hline \Delta Q_{n-1} \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|} \hline \frac{\partial Q_1}{\partial e_1} \dots \frac{\partial Q_1}{\partial e_{n-1}} & \frac{\partial Q_1}{\partial f_1} \dots \frac{\partial Q_1}{\partial f_{n-1}} \\ \hline \dots & \dots \\ \hline \frac{\partial Q_{n-1}}{\partial e_1} \dots \frac{\partial Q_{n-1}}{\partial e_{n-1}} & \frac{\partial Q_{n-1}}{\partial f_1} \dots \frac{\partial Q_{n-1}}{\partial f_{n-1}} \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline \Delta f_1 \\ \hline \dots \\ \hline \Delta f_{n-1} \\ \hline \end{array}$$

Burada katsayılar matrisi Jakobien ve n. bara salınım barasıdır. (3.15) denklemi matris formunda aşağıdaki gibi yazılır.

$$\begin{array}{|c|} \hline \Delta P \\ \hline \Delta Q \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|} \hline J_1 & J_2 \\ \hline J_3 & J_4 \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline \Delta e \\ \hline \Delta f \\ \hline \end{array}$$

Bu yazılıştaki Jakobien elemanlarını belirliyen denklemler bara güç denklemlerinden elde edilebilir. (3.14) denkleminde aktif güç aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned} P_p &= e_p(e_p G_{pp} + f_p B_{pp}) + f_p(f_p G_{pp} - e_p B_{pp}) \\ &+ \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n \{e_p(e_q G_{pq} + f_q B_{pq}) + f_p(f_q G_{pq} - e_q B_{pq})\} \\ p &= 1, 2, \dots, n-1 \end{aligned} \quad (3.21)$$

J_1 'in köşegen dışındaki elemanlarının diferansiyeli,

$$\frac{\partial P_p}{\partial e_q} = e_p G_{pq} - f_p B_{pq} \quad q \neq p$$

olur. J_1 'in diagonal üzerindeki elemanları ise,

$$\frac{\partial P_p}{\partial e_p} = 2e_p G_{pp} + f_p B_{pp} - f_p B_{pp} + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n (e_q G_{pq} + f_q B_{pq}) \quad (3.17)$$

dir. Bununla beraber p barasındaki akım denklemi,

$$I_p = c_p + j d_p = (G_{pp} - j B_{pp})(e_p + j f_p) + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n (G_{pq} - j B_{pq})(e_q + j f_q) \quad (3.22)$$

dir. Bu denklem reel ve imajiner kısımlarına ayrılırsa,



$$\begin{aligned}
 c_p &= e_p G_{pp} + f_p B_{pp} + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n (e_q G_{pq} + f_q B_{pq}) \\
 d_p &= f_p G_{pp} - e_p B_{pp} + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n (f_q G_{pq} - e_q B_{pq})
 \end{aligned} \tag{3.18}$$

$p = 1, 2, \dots, n-1$

olur. (3.17) denkleminde akımın reel bileşeni C_p yerine konarak J_1 köşegen üzerindeki elemanları basitleştirilebilir. Buradan,

$$\frac{\partial P_p}{\partial e_p} = e_p G_{pp} - f_p B_{pp} + c_p$$

denklemini elde edilir. (3.16) denkleminde J_2 'nin diagonal dışındaki elemanları,

$$\frac{\partial P_p}{\partial f_q} = e_p B_{pq} + f_p G_{pq} \quad q \neq p$$

ve J_2 'nin diagonal üzerindeki elemanları ise,

$$\frac{\partial P_p}{\partial f_p} = e_p B_{pp} + 2f_p G_{pp} - e_p B_{pp} + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n (f_q G_{pq} - e_q B_{pq}) \tag{3.19}$$

(3.18) denklemindeki akımın imajiner bileşeni (3.19) denkleminde yerine konursa,

$$\frac{\partial P_p}{\partial f_p} = e_p B_{pp} + f_p G_{pp} + d_p$$

elde edilir. (3.14) denkleminde reaktif güç,

$$\begin{aligned}
 Q_p &= f_p (e_p G_{pp} + f_p B_{pp}) - e_p (f_p G_{pp} - e_p B_{pp}) \\
 &+ \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n \{ f_p (e_q G_{pq} + f_q B_{pq}) - e_p (f_q G_{pq} - e_q B_{pq}) \}
 \end{aligned} \tag{3.20}$$

$$p = 1, 2, \dots, n-1$$

elde edilir. J_3 'ün diagonalı dışındaki elemanlarının diferansiyeli,

$$\frac{\partial Q_p}{\partial e_q} = e_p B_{pq} + f_p G_{pq} \quad q \neq p$$

ve J_3 'ün diagonal üzerindeki elemanları ise,

$$\frac{\partial Q_p}{\partial e_p} = f_p G_{pp} - f_p G_{pp} + 2e_p B_{pp} - \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n (f_q G_{pq} - e_q B_{pq}) \tag{3.21}$$

(3.18) denkleminde akımın imajiner bileşeni (3.21) denkleminde yerine konursa,

$$\frac{\partial Q_p}{\partial e_p} = e_p B_{pp} + f_p G_{pp} - d_p$$

elde edilir. (3.20) denkleminde J_4 'ün diagonal dışındaki elemanları,

$$\frac{\partial Q_p}{\partial f_q} = -e_p G_{pq} + f_p B_{pq} \quad q \neq p$$

ve J_4 'ün diagonal üzerindeki elemanları ise,

$$\frac{\partial Q_p}{\partial f_p} = e_p G_{pp} + 2f_p B_{pp} - e_p G_{pp} + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n (e_q G_{pq} + f_q B_{pq}) \tag{3.22}$$

olarak elde edilir. (3.18) denkleminde akımın reel bileşeni (3.22) denk-



leminde yerine konursa,

$$\frac{\partial Q_p}{\partial f_p} = -c_p G_{pp} + f_p B_{pp} + c_p$$

elde edilir.

Bara gerilimleri için belirli bir başlangıç değerleri verilerek (3.14) denklemlerinden aktif ve reaktif güçler hesaplanır. Güçteki değişimler önceden belirlenen ve hesaplanan değerler arasındaki farka eşittir.

$$P_p^k = P_p \text{ (ön görülen) } - P_p^k$$

$$Q_p^k = Q_p \text{ (ön görülen) } - Q_p^k \quad p = 1, 2, \dots, n-1$$

Tahmini bara gerilimleri ve hesaplanan güçler jacobianin elemanlarını bulmak için bara akımlarının hesaplanmasında kullanılır. (3.15) lineer denklem takımı Δe_p ve Δf_p $p = 1, 2, \dots, n-1$ için direkt veya iteratif yöntemle çözülür. Bara gerilimleri için yeni tahmini değerler,

$$e_p^{k+1} = e_p^k + \Delta e_p^k$$

$$f_p^{k+1} = f_p^k + \Delta f_p^k$$

dır. Bütün baralarda ΔP_p^k ve ΔQ_p^k belirli toleranslar içinde kalana kadar işlem tekrarlanır.

Newton-Raphson yöntemi denklemlerin polar koordinatlarla ifade edildiği yük akışı problemlerinin çözümünde de kullanılabilir. Polar koordinatlarda,

$$E_p = |E_p| e^{j\delta_p} \quad \text{and} \quad Y_{pq} = |Y_{pq}| e^{-j\theta_{pq}}$$

yukarıdaki ifadeler (3.13) denkleminde yerine konduğunda P barasındaki güç,

$$P_p - jQ_p = \sum_{q=1}^n |E_p| |E_q| |Y_{pq}| e^{-j(\theta_{pq} + \delta_p - \delta_q)}$$

dir. $e^{-j(\theta_{pq} + \delta_p - \delta_q)} = \cos(\theta_{pq} + \delta_p - \delta_q) - j \sin(\theta_{pq} + \delta_p - \delta_q)$,

olduğundan, gücün aktif ve reaktif bileşenleri (3.23)'deki gibidir.

$$P_p = \sum_{q=1}^n |E_p| |E_q| |Y_{pq}| \cos(\theta_{pq} + \delta_p - \delta_q)$$

$$Q_p = \sum_{q=1}^n |E_p| |E_q| |Y_{pq}| \sin(\theta_{pq} + \delta_p - \delta_q) \quad p = 1, 2, \dots, n-1 \quad (3.23)$$



(3.23) denkleminde Jacobien elemanları aşağıdaki gibi hesaplanır.

J_1 için :

$$\frac{\partial P_p}{\partial \delta_q} = |E_p E_q Y_{pq}| \sin (\theta_{pq} + \delta_p - \delta_q) \quad q \neq p$$

$$\frac{\partial P_p}{\partial \delta_p} = - \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n |E_p E_q Y_{pq}| \sin (\theta_{pq} + \delta_p - \delta_q)$$

J_2 için :

$$\frac{\partial P_p}{\partial |E_q|} = |E_p Y_{pq}| \cos (\theta_{pq} + \delta_p - \delta_q) \quad q \neq p$$

$$\frac{\partial P_p}{\partial |E_p|} = 2|E_p Y_{pp}| \cos \theta_{pp} + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n |E_q Y_{pq}| \cos (\theta_{pq} + \delta_p - \delta_q)$$

J_3 için :

$$\frac{\partial Q_p}{\partial \delta_q} = -|E_p E_q Y_{pq}| \cos (\theta_{pq} + \delta_p - \delta_q) \quad q \neq p$$

$$\frac{\partial Q_p}{\partial \delta_p} = \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n |E_p E_q Y_{pq}| \cos (\theta_{pq} + \delta_p - \delta_q)$$

J_4 için :

$$\frac{\partial Q_p}{\partial |E_q|} = |E_p Y_{pq}| \sin (\theta_{pq} + \delta_p - \delta_q) \quad q \neq p$$

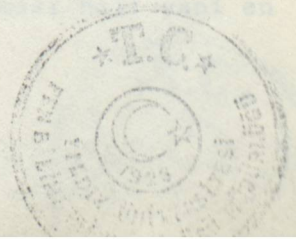
$$\frac{\partial Q_p}{\partial |E_p|} = 2|E_p Y_{pp}| \sin \theta_{pp} + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n |E_q Y_{pq}| \sin (\theta_{pq} + \delta_p - \delta_q)$$

Güçteki değişimlerin gerilimin genliği ve faz açısındaki değişimlerle arasındaki bağıntıyı gösteren denklem Newton-Raphson yöntemi için aşağıdaki gibidir.

ΔP	J_1	J_2	$\Delta \delta$
ΔQ	J_3	J_4	$\Delta E $

Newton-Raphson Yönteminde Yapılabilecek Basitleştirmeler :

Genel olarak bara geriliminin genliğindeki küçük değişimler için baradaki aktif güç çok az değişir. Benzer şekilde bara geriliminin faz açısındaki küçük değişimlerde reaktif güç çok az değişir. Dolayısı ile polar koordinatlar kullanılarak yük akış problemi J_2 ve J_3 alt matrisleri sıfır kabul edilerek çözülebilir (Carpentier 1963). Basitleştirilmiş matris denklemi,



$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & 0 \\ 0 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |E| \end{bmatrix}$$

dir.

Jacobien' in sadece ilk birkaç iterasyonda tekrar değerlendirilmesi ile başarılı çözümler elde edilir.

Dik koordinat sistemleri kullanıldığında Jacobien'in J_1 , J_2 , J_3 ve J_4 alt matrislerinin diagonal dışı elemanları ihmal edilerek yük akış problemi çözülebilir (Ward ve Hale, 1956). P barasında aktif ve reaktif güçteki değişimler için aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$\begin{aligned} \Delta P_p &= \frac{\partial P_p}{\partial c_p} \Delta c_p + \frac{\partial P_p}{\partial f_p} \Delta f_p \\ &= \Delta c_p (c_p G_{pp} - f_p B_{pp} + c_p) + \Delta f_p (c_p B_{pp} + f_p G_{pp} + d_p) \\ \Delta Q_p &= \frac{\partial Q_p}{\partial c_p} \Delta c_p + \frac{\partial Q_p}{\partial f_p} \Delta f_p \\ &= \Delta c_p (c_p B_{pp} + f_p G_{pp} - d_p) + \Delta f_p (-c_p G_{pp} + f_p B_{pp} + c_p) \end{aligned}$$

$p = 1, 2, \dots, n-1$

Bu denklemler Gauss-Seidel yöntemi kullanılarak da çözülebilir.

3.5 YÜK AKIŞ ANALİZİ ÇÖZÜM YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI:

Yük akış analizi çözümlerini elde etmek için geliştirilen yöntemlerde :

- 1 - İterasyonlu hesaplamada parametreleri elde etmede sistem giriş ve rileri için gerekli hesaplama zamanı.
- 2 - Bilgisayar programı ve hafıza ihtiyacı.
- 3 - İterasyon çözüm zamanı.
- 4 - Şebeke verilerini düzeltmek ve sistem çalışma değişkenlerine etki etmek için gerekli hesaplama zamanı.

bulunmalıdır.

Bütün yük akış yöntemlerinin 1. safhası, ele alınan şebekenin kodlanması ve uygun şebeke matrisinin elde edilmesidir. Bu şebeke matrisinin elde edilmesi Bölüm-II 'de detaylı olarak ele alınmış, en uygun bir yöntem ve bilgisayarla elde edilmiştir. Orada incelediğimiz şebeke de elemanlar arasında karşılıklı kuplajın olması hali yani en



genel hal dikkate alınmıştır. Şebeke elemanları arasında karşılıklı kuplajın olmaması halinde şebeke matrisi yani Y_{BARA} matrisi basitçe direkt olarak yazılabilir. Bu matrisin diagonal elemanı Y_{pp} , p barasına bağlanan şebeke elemanlarının admitanslarının toplamına eşittir. Diagonal dışındaki elemanı Y_{pq} ise, p barasını q barasına bağlayan şebeke elemanının admitansının ters işaretlisine eşittir. Bununla beraber, bara admitans matrisinin elemanlarının çoğu sıfır (sparse) olduğundan çok az sayıda elemanın hesaplanması gerekir.

Sıfır elemanlar hafızada bir yer işgal etmediğinden bara admitans matrisi bilgisayar hafızasında çok küçük bir yerde korunabilir. Bunun sağlanmasının bir yolu matrisin satır ve sütunlarına karşılık gelen bara numaralarının bir listesi ile sıfır olmayan elemanların hafızaya alınmasıdır.

Bara admitans matrisinin elde edilmesinde, matris inversi, nonsingular transformasyon veya algoritma kullanmak gerekir. Bara admitans matrisinin aksine bara empedans matrisi referans baraya tekabül eden satır ve sütun hariç sıfır olmayan elemanlardan meydana gelir. Bir barası referans alınan 101 baralı bir sistemde kompleks matrisin tamamını hafızaya almak için 20000 kelimelik bilgisayar hafızasının kullanılması gereklidir. Bara empedans matrisi, simetrik bir matris olduğundan yalnız diagonal elemanları ve diagonal dışı elemanların da yarısının hafızaya alınmasını gerektirir. Bu işlem hafıza ihtiyacını 10100 kelimeye düşürür. Bunun aksine, her bir bara için ortalama dört hattı olan bir 101 baralı sistemde, bara admitans matrisinin sıfır olmayan kompleks elemanlarının tamamını hafızaya almak için 1000 bilgisayar hafıza kelimesi gereklidir. Simetri gözönüne alındığında, hafızaya alma işlemi için 600 bilgisayar hafıza kelimesi yeterlidir. İlave olarak bara numaralama listesi içinde bir yer ayrılması gerekir.

Çevre admitans matrisi, ya singular transformasyon ile elde edilen çevre empedans matrisi veya nonsingular transformasyon ile elde edilen bölümlere ayrılmış çevre admitans matrisi kullanılarak matris inversiyonu ile elde edilir. Diğer bir alternatif olarak bara admitans matrisi teşkil edilir ve daha sonra çevre admitans matrisini elde etmek için algoritma kullanılabilir. Çevre admitans matrisi dolu bir matristir.

Yük akış analizi için öne sürülen yöntemlerin etkinliğini değerlendirmek için deneme bilgisayar programları geliştirilmiştir. Bu programlar gerçek enerji sistemlerinde yük akış analizleri elde etmek ve relatif çözüm sürelerini tayin etmek için kullanılmıştır.

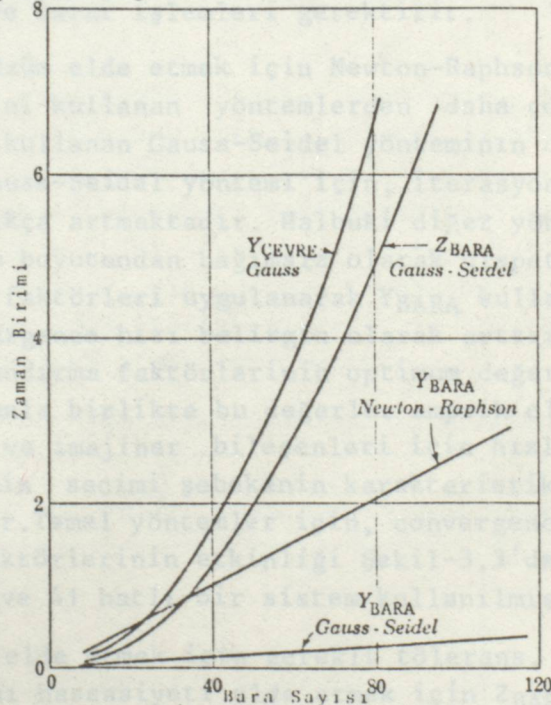


İteratif çözüm yapmak için gerekli bilgisayar zamanı :

- 1 - İterasyonu tamamlamak için gerekli aritmetik ve karar işlemlerinin sayısına.
- 2 - Çözüm yöntemlerinin bir noktaya yaklaşma hızına
- 3 - Enerji sistemlerinin boyutuna ve karakteristiklerine bağlıdır.

Bara admitans veya bara empedans matrisini kullanan Gauss yöntemi, Gauss-Seidel yöntemi ile karşılaştırıldığında çözümü elde etmek için ilave iterasyonlar gerektirir. Her iki yöntemde de her iterasyon için aynı süre gerekli olduğundan Gauss yöntemi detaylı olarak incelenmeyecektir. Bara admitans matrisini kullanan relaxation yöntemi daha fazla iterasyon ve her iterasyon için daha fazla zamanı gerektirdiğinden burada inceleme dışında bırakılmıştır.

Bara admitans matrisini kullanan Gauss-Seidel ve Newton-Raphson yöntemleri için bilgisayar programları geliştirilmesinde her iterasyon için aritmetik işlem sayısını azaltmak amacı ile şebeke matrisinin sparsity özelliğinden yararlanılmıştır. Gauss-Seidel yöntemi dik koordinatlar, Newton-Raphson yöntemi ise polar koordinatlar kullanılarak programlanmıştır.



Şekil-3.2 Yük Akış Yöntemleri için iterasyon başına zamanı gösterir.



Şekil-3.2'de başlıca yöntemler ile elde edilen iterasyon zamanları gösterilmiştir. Bara admitans matrisi kullanan Gauss-Seidel yöntemi, iterasyonu tamamlamak için çok az sayıda aritmetik işlem kullanır. Bunun sebebi şebeke matrisinin elemanlarının çoğunun sıfır olması ve çözüm yönteminin basit olmasıdır. Dolayısı ile iterasyon için çok az süre gerekir. Bara Adımtans matrisi kullanan Newton-Raphson yönteminde aritmetik işlemlerin sayısını azaltmak için şebeke matrisinin sparsity özelliğinden yararlanılır. Bununla birlikte her iterasyon için Jacobien elemanlarının hesaplanmasında ilave bilgisayar zamanı gereklidir. Her iki yöntemde de iterasyon için gerekli zaman, şebekedeki baraların sayısı ile artar. Bunun sebebi, her yeni bara için şebeke matrisine ilave edilen sıfır olmayan eleman sayısının yaklaşık olarak aynı olmasıdır.

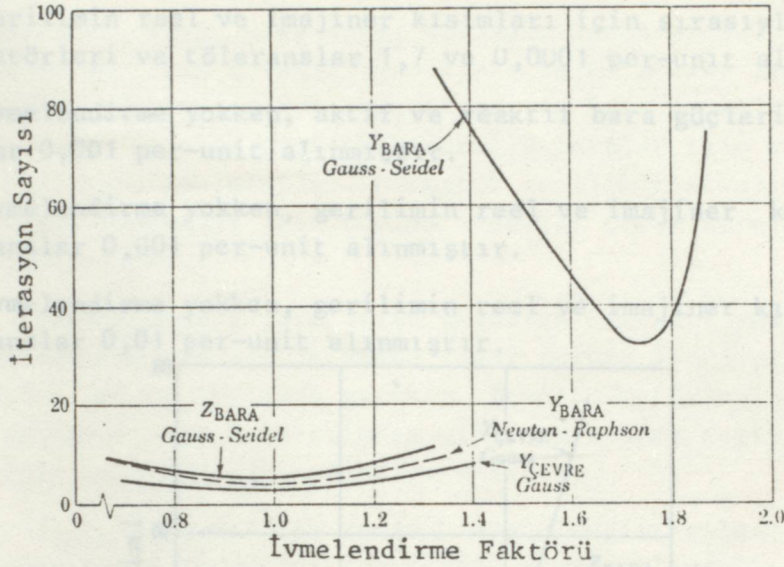
Bara empedans matrisini kullanan Gauss-Seidel yöntemi, nispeten basit çözüm uygulaması gerektirir. Bununla birlikte bu yöntemde her iterasyon süresi daha büyük ve yaklaşık olarak bara sayısının karesi ile orantılı olarak değişir. Bunun sebebi, bara empedans matrisinin dolu bir matris olmasıdır.

Çevre admitans matrisini kullanan Gauss yöntemi, iterasyon çözümü sırasında çevre ve bara değerlerini birbirine bağlamak için ilave aritmetik ve karar işlemleri gerektirir.

Bir çözüm elde etmek için Newton-Raphson ve Z_{BARA} veya $Y_{ÇEVRE}$ matrislerini kullanan yöntemlerden daha çok sayıda iterasyon gerektiren Y_{BARA} kullanan Gauss-Seidel yönteminin convergence hızı yavaştır. Ayrıca Gauss-Seidel yöntemi için, iterasyon sayısı şebekedeki bara sayısı arttıkça artmaktadır. Halbuki diğer yöntemler için iterasyon sayısı sistem boyutundan bağımsız olarak nispeten sabit kalmaktadır. Hızlandırma faktörleri uygulanarak Y_{BARA} kullanan Gauss-Siedel yönteminde, convergence hızı belirgin olarak arttırılabilir. Yük akış çözümü için hızlandırma faktörlerinin optimum değerlerinin hesaplanması güçtür. Bununla birlikte bu değerler amprik olarak belirlenebilir. Gerilimin gerçek ve imajiner bileşenleri için hızlandırma faktörleri α ve β değerlerinin seçimi şebekenin karakteristiklerine ve çözüm yöntemine bağlıdır. Temel yöntemler için, convergence hızı üzerine farklı hızlandırma faktörlerinin etkinliği Şekil-3.3'de gösterilmiştir. Bu analizde 30 bara ve 41 hatlı bir sistem kullanılmıştır.

Çözüm elde etmek için gerekli tolerans, farklı yöntemlere göre değişir. Aynı hassasiyeti elde etmek için Z_{BARA} veya $Y_{ÇEVRE}$ matrislerinin kullanıldığı yöntemlerden Y_{BARA} kullanan Gauss-Seidel yönteminde, daha küçük gerilim toleransı kullanılmalıdır. Testlerde





Şekil-3.3-Yük akış çözümlerinde, ivmelendirme faktörlerinin convergence hızı üzerine etkisi.

gerilimin hem gerçek ve hemde imajiner bileşenleri için 0,0001 per-unit gerilim toleransı kullanılmıştır. Aynı sonuçları elde etmek için Z_{BARA} kullanan Gauss-Seidel yönteminde gerilim toleransı 0,001 per-unit, Y_{ÇEVRE} kullanan Gauss yönteminde ise 0,01 per-unit olarak alınmıştır.

Y_{BARA} kullanan Newton-Raphson yönteminde, bir barada aktif ve reaktif güçler için toleransların belirlenme avantajı vardır. İstenen hassasiyeti belirleyen toleransın bir mana ifade etmesi bakımından rakamla ifade edilmesi uygundur. Test hesaplamalarında aktif ve reaktif bara güçleri için 0,001 per-unit tolerans kullanılmış ve benzer sonuçlar elde edilmiştir. Hızlandırma faktörleri ile beraber farklı boyuttaki sistemler için iterasyon sayısı ve her yöntem için kullanılan toleranslar Tablo-3.1'de özetlenmiştir.

Tablo-3.1 Yük akış çözümleri için iterasyon sayıları :

Bara Sayısı	Y _{BARA} Gauss-Seidel†	Y _{BARA} Newton-Raphson‡	Z _{BARA} Gauss-Seidel§	Y _{ÇEVRE} Gauss¶
14	24	4	5	4
30	33	4	5	4
57	59	4	6	6
92	80	4	5	7
113	92	4	5	-

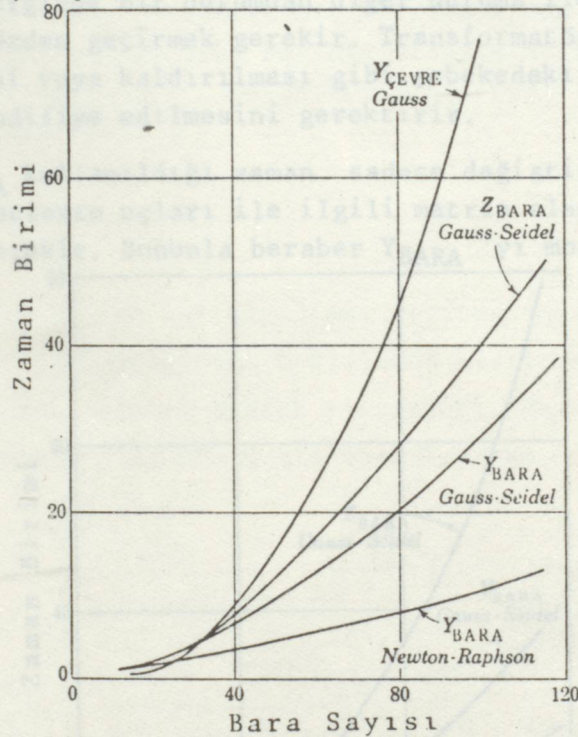


† -Gerilimin reel ve imajiner kısımları için sırasıyla ivmelendirme faktörleri ve toleranslar 1,7 ve 0,0001 per-unit alınmıştır.

‡ -İvmelendirme yokken, aktif ve reaktif bara güçleri için toleranslar 0,001 per-unit alınmıştır.

§ -İvmelendirme yokken, gerilimin reel ve imajiner kısımları için toleranslar 0,001 per-unit alınmıştır.

¶ -İvmelendirme yokken, gerilimin reel ve imajiner kısımları için toleranslar 0,01 per-unit alınmıştır.



Şekil-3.4 Gerilim kontrollü baraların etkileri dikkate alınmadığında, iteratif çözüm zamanı.

Yapılan bütün testler için başlangıç bara gerilimleri $1,0 + j0$ olarak kabul edilmiştir.

İterasyon çözümü için gerekli süre, Y_{BARA} kullanılan Newton-Raphson yönteminde en azdır. Belli başlı yöntemler için toplam iteratif çözüm süreleri Şekil-3.4 'de gösterilmiştir. Bu başlangıç testlerinde gerilim kontrollü baraların etkisi dahil edilmemiştir.

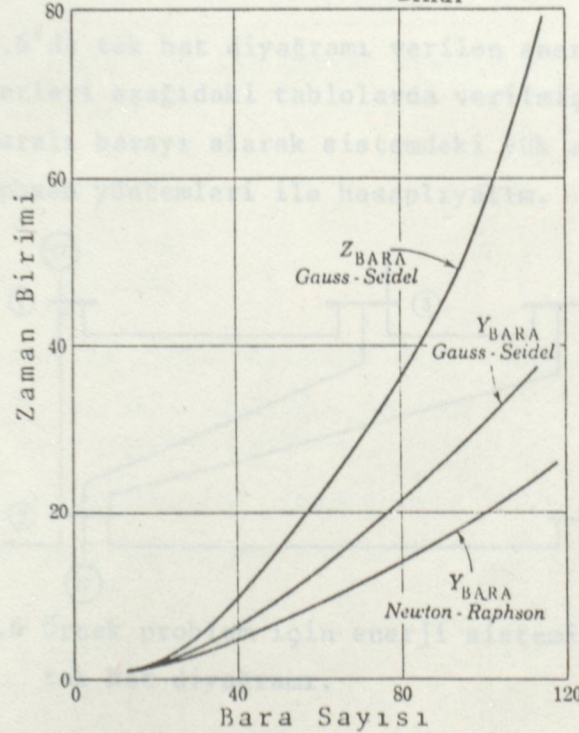
Gerilim kontrollü baraların etkisi dikkate alındığında, Y_{BARA} kullanan Gauss-Seidel yöntemi, çözümü elde etmede daha az iterasyon gerektirir. Bununla beraber, Y_{BARA} kullanan Newton-Raphson ve Z_{BARA} kullanan Gauss-Siedel yöntemleri için gerekli iterasyon sayısı biraz



daha fazladır. Y_{BARA} veya Z_{BARA} kullanan Gauss-Siedel yönteminde her iterasyon için gerekli süre ilave işlem sebebi ile artar. Newton-Raphson yönteminde ise, her iterasyon için gerekli süre biraz azalır. Bunun sebebi, gerilim kontrollü baralar için aritmetik işlemlerin sayısının azalmasıdır. Otomatik gerilim kontrollü baralar kullanılan temel yöntemler için toplam iteratif çözüm süreleri Şekil-3.5'de gösterilmiştir.

Farklı sistem şartlarını gösteren bir seri yük akış çözümleri elde edildiğinde bir durumdan diğer duruma ilerlemeden önce sistem verilerini gözden geçirmek gerekir. Transformatörlerin ve hatların ilave edilmesi veya kaldırılması gibi şebekedeki değişimler şebeke matrisinin modifiye edilmesini gerektirir.

Y_{BARA} kullanıldığı zaman sadece değiştirilen transformatörlerin veya hatların uçları ile ilgili matris elemanlarının tekrar hesaplanması gerekir. Bununla beraber Y_{BARA} 'yı modifiye etmek için



Şekil-3.5 Gerilim kontrollü baraların etkileri

dikkate alındığında, iteratif çözüm zamanı.

algoritma kullanmak lazımdır. Yeni bir giriş ilave edildiğinde şebekedeki değişimler şebeke matrisinin bütün elemanlarının modifiye edilmesini gerektirir. $Y_{ÇEVRE}$ matrisini modifiye etmek için bir algoritma geliştirilmesi gerekir.

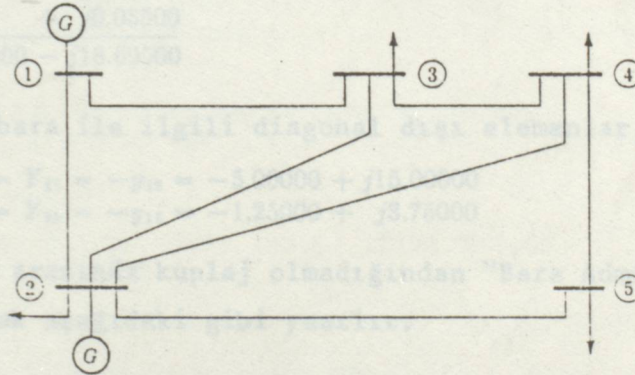


Bara gerilimleri için başlangıç değerlerin seçiminin çözüm süresi üzerine belirgin bir etkisi vardır. Bir seri yük akışı hesaplandığı zaman genel usul herbir durum için hesaplanan bara gerilimleri bir sonraki durum için başlangıç gerilimler olarak kullanılır. Bu bilhassa sistem şartlarında sadece küçük değişimler olduğu zaman iterasyon sayısını azaltır.

Yük akış çözümleri için gerekli gerçek bilgisayar süresi bilgisayar hızına ve programın etkinliğine bağlıdır. Karşılaştırma da kullanılan zaman birimleri bir bilgisayardan diğerine farklılık gösterir. Genel olarak orta boy bir bilgisayar için, her zaman birimi 1 saniye civarındadır. Büyük boy bilgisayar için 0,1 saniye veya daha düşük değerdedir.

ÖRNEK PROBLEM

Şekil.3.6'da tek hat diyagramı verilen enerji sisteminin karakteristik değerleri aşağıdaki tablolarda verilmiştir. Salınım barası olarak 1 numaralı barayı alarak sistemdeki yük akışını Gauss-Seidel ve Newton-Raphson yöntemleri ile hesaplıyalım.



ŞEKİL.3.6 Örnek problem için enerji sisteminin tek hat diyagramı.

Bara Kodu $p-q$	Taşıma Hattının	
	Seri Empedansı z_{pq}	Şönt Admitansı $y'_{pq}/2$
1-2	$0.02 + j0.06$	$0.0 + j0.030$
1-3	$0.08 + j0.24$	$0.0 + j0.025$
2-3	$0.06 + j0.18$	$0.0 + j0.020$
2-4	$0.06 + j0.18$	$0.0 + j0.020$
2-5	$0.04 + j0.12$	$0.0 + j0.015$
3-4	$0.01 + j0.03$	$0.0 + j0.010$
4-5	$0.03 + j0.24$	$0.0 + j0.025$



Bara Kodu $p-q$	Hat Admitansı Y_{pq}
1-2	$5.00000 - j15.00000$
1-3	$1.25000 - j3.75000$
2-3	$1.66667 - j5.00000$
2-4	$1.66667 - j5.00000$
2-5	$2.50000 - j7.50000$
3-4	$10.00000 - j30.00000$
4-5	$1.25000 - j3.75000$

Bara Kodu p	Toprağa Göre Admitans Y_p
1	$0.0 + j0.05500$
2	$0.0 + j0.08500$
3	$0.0 + j0.05500$
4	$0.0 + j0.05500$
5	$0.0 + j0.04000$

Bara Kodu p	Kabul Edilen Bara Gerilimleri	Üretim		Yük	
		MW	MVar	MW	MVar
1	$1.06 + j0.0$	0	0	0	0
2	$1.0 + j0.0$	40	30	20	10
3	$1.0 + j0.0$	0	0	45	15
4	$1.0 + j0.0$	0	0	40	5
5	$1.0 + j0.0$	0	0	60	10

Buradayı, 1 numaralı bara ile toprak arasındaki admitansların toplamıdır. Böylece Y_{11} ise,

$$\begin{aligned} & 5.00000 - j15.00000 \\ & 1.25000 - j3.75000 \\ & 0.0 + j0.05500 \\ \hline & 6.25000 - j18.69500 \end{aligned}$$

1 numaralı bara ile ilgili diagonal dışı elemanlar,

$$\begin{aligned} Y_{12} = Y_{21} = -y_{12} &= -5.00000 + j15.00000 \\ Y_{13} = Y_{31} = -y_{13} &= -1.25000 + j3.75000 \end{aligned}$$

Hatlar arasında kuplaj olmadığından "Bara Admitans Matrisi" direkt olarak aşağıdaki gibi yazılır.

Bara q \ Bara p	1	2	3	4	5
1	Y_{11}	Y_{12}	Y_{13}		
2	Y_{21}	Y_{22}	Y_{23}	Y_{24}	Y_{25}
3	Y_{31}	Y_{32}	Y_{33}	Y_{34}	
4		Y_{42}	Y_{43}	Y_{44}	Y_{45}
5		Y_{52}		Y_{54}	Y_{55}

	①	②	③	④	⑤
①	$6.25000 - j18.69500$	$-5.00000 + j15.00000$	$-1.25000 + j3.75000$		
②	$-5.00000 + j15.00000$	$10.83334 - j32.41500$	$-1.66667 + j5.00000$	$-1.66667 + j5.00000$	$-2.50000 + j7.50000$
③	$-1.25000 + j3.75000$	$-1.66667 + j5.00000$	$12.91667 - j38.69500$	$-10.00000 + j30.00000$	
④		$-1.66667 + j5.00000$	$-10.00000 + j30.00000$	$12.91667 - j38.69500$	$-1.25000 + j3.75000$
⑤		$-2.50000 + j7.50000$		$-1.25000 + j3.75000$	$3.75000 - j11.21000$



3.6.GAUSS-SEIDEL YONTEMI ICIN BILGISAYAR PROGRAMI

```
*****
*           Y I L D I Z   U N I V E R S I T E S I           *
*
*           ELEKTRIK TESISLERI VE SISTEMLERI BILINDALI       *
*****
*           GAUSS-SEIDEL ITERASYON YONTEMIYLE COZUM         *
*****
```

```
PROGRAM TEV(INPUT,OUTPUT,KARA1,KARA2,TAPE5=KARA1,TAPE6=KARA2)
COMPLEX SHTY(20),SERY(20),Y(20,20),KL(20),YL(20,20),E(20),SUM
COMPLEX S,R,FL(20),TOP(20),EOLD,SS,RR,SERZ(20)
REAL MAGV,EF(10,10)
INTEGER SB,EB
DIMENSION LINE(20),SB(20),EB(20),P(20),Q(20),ERR(10)
READ(5,8) NB,NL
3  FORMAT(2I1)
READ(5,10)(LINE(I),SB(I),EB(I),SERZ(I),SHTY(I),I=1,NL)
10  FORMAT(4(3I1,4F4.3))
WRITE(6,84)
84  FORMAT(///,T25,'SISTEM VERILERI',//,T10,'HAT',T16,'BARA KODU',T27
*, 'EMPEDANS',T40,'HAT YUKLEMESI',/T16,'P',T21,'Q',T30,'Z',T45,
* 'Y/2')
DO 44 I=1,NL
44  WRITE(6,99) LINE(I),SB(I),EB(I),SERZ(I),SHTY(I)
99  FORMAT(T7,3I5,2X,F4.2,'+J(',F4.2,')',2X,F3.1,'+J(',F5.3,')',/)
DO 17 L=1,5
DO 17 M=1,5
17  Y(L,M)=0
READ(5,9)(P(I),I=2,5),(Q(I),I=2,5),(E(I),I=1,5)
9  FORMAT(2(4F4.2),10F4.2)
WRITE(6,46)
16  FORMAT(//,T12,'GERILIM VE GUC KABULLERI',//T10,'BARA',T19,'GERILIM
*, T35,'GUC',//)
WRITE(6,47)(I,E(I),P(I),Q(I),I=1,NB)
47  FORMAT(10X,I2,4X,F4.2,'+J(',F3.2,')',2X,F5.2,'+J(',F5.2,')',/)
DO 2 I=1,NL
SERY(I)=1./SERZ(I)
L=SB(I)
M=EB(I)
Y(L,L)=Y(L,L)+SERY(I)+SHTY(I)
Y(M,M)=Y(M,M)+SERY(I)+SHTY(I)
Y(L,M)=Y(L,M)-SERY(I)
2  Y(M,L)=Y(M,L)-SERY(I)
WRITE(6,12)((Y(I,J),J=1,NB),I=1,NB)
12  FORMAT(//,T47,'Y BARA MATRISI'//,5(5(F8.4,'+J(',F8.4,')',3X),//))
ITER=0
100 ITER=ITER+1
DO 3 I=2,NB
KL(I)=CNPLX(P(I),(-Q(I)))/Y(I,I)
FL(I)=KL(I)/CONJG(E(I))
EOLD=E(I)
TOP(I)=CNPLX(0.0,0.0)
DO 30 J=1,NB
IF(J.EQ.I) GO TO 30
YL(I,J)=Y(I,J)/Y(I,I)
```


WILKINSON, CİTİSLERİ

```
TOP(I)=TOP(I)+YL(I,J)*E(J)
30 CONTINUE
E(I)=FL(I)-TOP(I)
ERR(I)=CABS(EOLD-E(I))
3 CONTINUE
DO 50 I=2,5
IF(ERR(I).GT.0.0001) GOTO 100
50 CONTINUE
SUN=CNPLX(0.0,0.0)
DO 4 I=1,NB
4 SUM=SUM+Y(I,I)*E(I)
WRITE(6,14)ITER
14 FORMAT(' ',T6,'ITERASYON SAY.',I3,'//',T16,'BARA',T16,'GERILIM',
1T30,'MUT. DEGERI',T42,'DELTA(DER.)',T57,'AKTIF GUC',T71,'REA.GUC'/)
DO 5 I=1,NB
P(I)=REAL(SUM*CONJG(E(I)))
Q(I)=-AIMAG(SUM*CONJG(E(I)))
DELTA=ATAN2(AIMAG(E(I)),REAL(E(I)))*57.29578
MAGV=CABS(E(I))
5 WRITE(6,15)I,E(I),MAGV,DELTA,P(I),Q(I)
15 FORMAT(I7,2X,F7.4,'+J(',F6.4,')',4X,F7.4,4X,F2.5,6X,F8.4,3X,'+J(',
*F8.4,')')
WRITE(6,16)
16 FORMAT(////T25,'YUK AKISI'///,T10,'HAT',T16,'SB',T21,'EB',T25,
1'AKTIF GUC',T42,'REAKTIF GUC'/)
WRITE(6,18)
18 FORMAT(T30,'MW',T44,'MVAR'/)
DO 6 I=1,NL
L=SB(I)
N=EB(I)
S=CONJG(E(L))*(E(L)-E(M))*SERY(I)+CONJG(E(L))*E(L)*SHTY(I)
R=CONJG(E(M))*(E(M)-E(L))*SERY(I)+CONJG(E(M))*E(N)*SHTY(I)
SSA=100.*REAL(S)
SSR=-100.*AIMAG(S)
RRA=100.*REAL(R)
RRR=-100.*AIMAG(R)
6 WRITE(6,26)LINE(I),L,M,SSA,SSR
WRITE(6,26)LINE(I),M,L,RRA,RRR
26 FORMAT(' ',T7,3I5,5X,F8.4,3X,'+J(',F8.4,')')
STOP
END
```



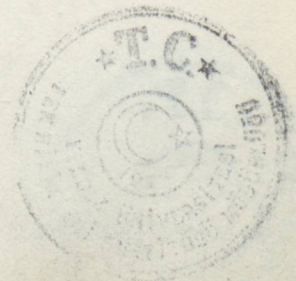
BİLGİSAYAR ÇIKIŞLARI

SİSTEM VERİLERİ

HAT	BARA KODU	EMPEDANS	HAT YÜKLEMESİ
P	Q	Z	Y/2
1	1	2	.02+J(.06)
			0.0+J(.030)
2	1	3	.08+J(.24)
			0.0+J(.025)
3	2	3	.06+J(.18)
			0.0+J(.020)
4	2	4	.06+J(.18)
			0.0+J(.020)
5	2	5	.04+J(.12)
			0.0+J(.015)
6	3	4	.01+J(.03)
			0.0+J(.010)
7	4	5	.08+J(.24)
			0.0+J(.025)

GERİLİM VE GÜÇ KABULLERİ

BARA	GERİLİM	GÜÇ
1	1.06+J(.00)	0.00+J(0.00)
2	1.00+J(.00)	.20+J(.20)
3	1.00+J(.00)	-.45+J(-.15)
4	1.00+J(.00)	-.40+J(-.05)
5	1.00+J(.00)	-.60+J(-.10)




```

I1=I+K
J1=J+K
GY=REAL(Y(I,J))
BY=-AIMAG(Y(I,J))
RJ(I,J)=E(I)*GY-F(I)*BY
RJ(I1,J)=E(I)*BY+F(I)*GY
RJ(I,J1)=E(I)*BY+F(I)*GY
RJ(I1,J1)=F(I)*BY-E(I)*GY
IF(I.EQ.J)GO TO 45
GO TO 6
45 C1=REAL(IA(I))
D1=AIMAG(IA(I))
RJ(I,J)=RJ(I,J)+C1
RJ(I1,J)=RJ(I1,J)+D1
RJ(I,J1)=RJ(I,J1)-D1
RJ(I1,J1)=RJ(I1,J1)+C1
6 CONTINUE
DO 100 I=2,10
DO 100 J=2,10
A(I-1,J-1)=RJ(J,I)
100 CONTINUE
CALL MATIN(A,N)
DO 7 I=1,N
DO 7 J=1,N
7 DEF(I+1)=DEF(I+1)+A(I,J)*DEF(J,I)
DO 8 I=2,NB
E(I)=E(I)+DEF(I)
F(I)=F(I)+DEF(I+K)
EL(I)=CMPLX(E(I),F(I))
8 EF(ITER,I)=EL(I)
DO 54 I=2,NB
54 DF(ITER,I)=CMPLX(DEF(I),DEF(I+K))
DO 33 I=1,10
33 DEF(I)=0.
IF(ITER-6)60,21,21
21 WRITE(6,67)
57 FORMAT(120(' '),//T38,'BARA GERILINI ERINDEKI DEGISIM',//5X,'ITERAS
*YON',T22,'BARA 2',T44,'BARA 3',T66,'BARA 4',T88,'BARA 5',//)
DO 22 I=1,ITER
WRITE(6,55)I,(DF(I,J),J=2,NB)
57 FORMAT(9X,12,3X,4(F8.6,'+J(',F8.6,')',2X,),//)
22 CONTINUE
WRITE(6,68)
57 FORMAT(//T38,'BARA GERILINI TRI',//5X,'ITERASYON',T22,'BARA 2',T44,
*BARA 3',T66,'BARA 4',T88,'BARA 5',//)
DO 69 I=1,ITER
69 WRITE(6,70)I,(EF(I,J),J=2,NB)
70 FORMAT(9X,12,3X,4(F8.5,'+J(',F8.5,')',2X,),//)
SUM=CMPLX(0.0,0.0)
DO 41 I=1,NB
41 SUM=SUM+Y(I,I)*EL(I)
WRITE(6,14)ITER
14 FORMAT(' ',T6,'ITERASYON SAY.',I3,//T6,'BARA',T16,'GERILIN',
IT30,'MUT. DEGERI',T42,'DELTA( DER. )',T57,'AKTIF GUC',T71,'REA.GUC'//)
DO 51 I=1,NB
P(I)=REAL(SUM*CONJG(EL(I)))
Q(I)=-AIMAG(SUM*CONJG(EL(I)))
DELTA=ATAN2(AIMAG(EL(I)),REAL(EL(I)))*57.29578
MAGV=CABS(EL(I))
51 WRITE(6,15)I,EL(I),MAGV,DELTA,P(I),Q(I)

```



BİLGİSAYAR ÇIKIŞLARI

```

15  FORMAT(I7,2X,F7.4,'+J(',F6.4,')',4X,F7.4,4X,F2.5,6X,F8.4,3X,'+J(',
    *F8.4,')')
    WRITE(6,16)
16  FORMAT(////T25,'YUK AKISI'///,T10,'HAT',T16,'SB',T21,'EB',T25,
    1'AKTIF GUC',T42,'REAKTIF GUC')
    WRITE(6,81)
81  FORMAT(T30,'MV',T44,'MVAR')
    DO 31 I=1,NL
    L=SB(I)
    N=ER(I)
    S=CONJG(EL(L))*(EL(L)-EL(M))*SERV(I)+CONJG(EL(L))*EL(L)*SHY(I)
    R=CONJG(EL(M))*(EL(M)-EL(L))*SERV(I)+CONJG(EL(M))*EL(M)*SHY(I)
    SSA=100.*REAL(S)
    SSR=-100.*AIMAG(S)
    RRA=100.*REAL(R)
    RRR=-100.*AIMAG(R)
    WRITE(6,26)LINE(I),L,N,SSA,SSR
61  WRITE(6,26)LINE(I),M,L,RRA,RRR
26  FORMAT(' ',T7,3I5,5X,F8.4,3X,'+J(',F8.4,')')
    STOP
    END
    SUBROUTINE MATIN(A,N)
    DIMENSION A(20,20)
    DO 50 K=1,8
    DO 20 I=1,8
    DO 20 J=1,8
    IF(I.EQ.K.OR.J.EQ.K)GO TO 20
    A(I,J)=A(I,J)-A(I,K)*A(K,J)/A(K,K)
20  CONTINUE
    A(K,K)=-1.0/A(K,K)
    DO 30 I=1,8
    IF(I.EQ.K)GO TO 30
    A(I,K)=A(I,K)*A(K,K)
30  CONTINUE
    DO 40 J=1,8
    IF(J.EQ.K)GO TO 40
    A(K,J)=A(K,J)*A(K,K)
40  CONTINUE
50  CONTINUE
    DO 60 I=1,8
    DO 60 J=1,8
    A(I,J)=-A(I,J)
60  CONTINUE
    RETURN

```



BİLGİSAYAR ÇIKIŞLARI

END

BARA GERİLİMLERİNDEKİ DEĞİŞİM

ITERASYON	BARA 2	BARA 3	BARA 4	BARA 5
1	0.055044+J(-.050841)	0.031761+J(-.091232)	0.031357+J(-.097467)	0.026518+J(-.112840)
2	-0.008806+J(-.000802)	-0.011545+J(-.001955)	-0.012273+J(-.002392)	-0.014504+J(-.003917)
3	-0.000039+J(-.000376)	0.000095+J(-.000088)	0.000088+J(-.000031)	0.000103+J(-.000109)
4	-0.000016+J(-.000016)	-0.000028+J(-.000021)	-0.000031+J(-.000022)	-0.000039+J(-.000026)
5	-0.000001+J(-.000001)	-0.000000+J(-.000000)	0.000000+J(-.000000)	0.000001+J(-.000000)
6	0.000000+J(-.000000)	-0.000000+J(-.000000)	-0.000000+J(-.000000)	0.000000+J(-.000000)

BARA GERİLİMLERİ

ITERASYON	BARA 2	BARA 3	BARA 4	BARA 5
1	1.05504+J(-.05084)	1.03176+J(-.09123)	1.03136+J(-.09747)	1.02652+J(-.11284)
2	1.04624+J(-.05164)	1.02028+J(-.08928)	1.01908+J(-.09508)	1.01201+J(-.10892)
3	1.04620+J(-.05127)	1.02031+J(-.08919)	1.01917+J(-.09504)	1.01212+J(-.10903)
4	1.04618+J(-.05128)	1.02028+J(-.08921)	1.01914+J(-.09507)	1.01208+J(-.10906)
5	1.04618+J(-.05128)	1.02028+J(-.08921)	1.01914+J(-.09507)	1.01208+J(-.10906)
6	1.04618+J(-.05128)	1.02028+J(-.08921)	1.01914+J(-.09507)	1.01208+J(-.10906)



BÖLÜM IV TRANSİENT - STABİLİTE ÇÖZÜM YÖNTEMLERİ

4.1 GİRİŞ

Bir enerji sisteminde, transien stabilite hesabının yapılmasında ilk karşılaşılan problem kargaşalardır. Bunlardan birincisi başlangıç şartları problemi ikincisi de dinamik problemdir. Başlangıç şartları problemi statik bir tarifleme cebirsel denklemler sisteminin çözümü ile bulunur. Dinamik problem ise, zamanla değişen diferansiyel denklemler sisteminin çözümü ile bulunur. Stabilite analizi, bu problemleri çözmek için yapılır. Bu bölümde, enerji sisteminin dinamik davranışını tanımlayan diferansiyel denklemler sisteminin çözümüne ilişkin bazı yöntemler ve sonuçları tartışılacaktır.

4.1.1 Enerji sisteminin dinamik modeli

4.1.2 Enerji sisteminin statik modeli

4.1.3 Enerji sisteminin dinamik modeli

4.1.4 Enerji sisteminin statik modeli

4.1.5 Enerji sisteminin dinamik modeli

4.1.6 Enerji sisteminin statik modeli

4.1.7 Enerji sisteminin dinamik modeli

4.1.8 Enerji sisteminin statik modeli

4.1.9 Enerji sisteminin dinamik modeli

4.1.10 Enerji sisteminin statik modeli

ITERASYON SAY. 6

PARA	GERİLİM	MUT. DEĞERİ	DELTA (DER.)	AKTİF GÜÇ	REA. GÜÇ
1	1.0600+J(0.0000)	1.0600	0.00000	40.3660	+J(156.1744)
2	1.0462+J(-.0513)	1.0474	-2.80635	47.3955	+J(152.1056)
3	1.0203+J(-.0892)	1.0242	-4.99697	51.9970	+J(146.9256)
4	1.0191+J(-.0951)	1.0236	-5.32914	52.8165	+J(146.5044)
5	1.0121+J(-.1091)	1.0179	-6.15026	54.6091	+J(144.9608)

HAT	SB	EE	AKTİF GÜÇ	REAKTİF GÜÇ
1	1	2	88.8639	+J(-8.5795)
1	2	1	-87.4534	+J(6.1487)
2	1	3	40.7230	+J(1.1584)
2	3	1	-39.5311	+J(-3.0139)
3	2	3	24.6943	+J(3.5464)
3	3	2	-24.3428	+J(-6.7840)
4	2	4	27.9361	+J(2.9620)
4	4	2	-27.4248	+J(-5.9276)
5	3	5	54.8229	+J(7.3430)
5	5	2	-53.6977	+J(-7.1672)
6	3	4	18.8739	+J(-5.2022)
6	4	3	-18.8383	+J(3.2124)
7	4	5	6.3350	+J(-2.2848)
7	5	4	-6.3023	+J(-2.8328)

YÜK AKISI

MVAR

MW

READY.



BÖLÜM IV

TRANSİENT - STABİLİTE ÇÖZÜM YÖNTEMLERİ

4.1.GİRİŞ

Bir enerji sisteminde,transient stabilite hesabının incelenmesinde iki çeşit problemle karşılaşılır. Bunlardan birincisi başlangıç şartlar problemi ikincisi de dinamik problemdir. Başlangıç şartlar problemi şebeke için tariflenen cebirsel denklem sisteminin çözümü ile bulunur.Dinamik problem ise, karmaşık diferansiyel denklem sisteminin çözümünü gerektirir. Stabilite analizi nümerik çözüm yöntemleri kullanılarak bilgisayarla yapılır. Bu bölümde gayemiz belli başlı çözüm yöntemlerini ele alınan örnek problem üzerinde göstermek ve her bir çözüm yöntemi için elde edilen sonuçları karşılaştırmaktır.

Konuya kısaca enerji sistemlerinin ve stabilitenin tanıtımı ile başlayalım.

4.2.ENERJİ SİSTEMLERİ

Bir elektrik enerji sistemi gözönüne alındığında böyle bir sistemin birbirine göre hareketli elemanların birleşmesinden meydana geldiği görülür. Özellikleri nedeniyle bu elemanları iki grupta toplamak mümkündür.

1. Güç elemanları: Mekanik enerji sağlayan tahrik sistemleri, üreticiler (senkron generatörler),transformatörler,enerji taşıma ve dağıtım hatları ve elektriksel yükler.
2. Kontrol elemanları: Tahrik sistemlerine ait mekanik regülatörler (hız regülatörleri), senkron generatörlere ait uyarma sistemi regülatörleri (gerilim ve açı regülatörleri), röleler ve açma kapama elemanları gibi.

Bu ayırımdan da anlaşılacağı gibi bir enerji sistemi,elektromekanik bir sistemdir. Bu nedenle sistemin işleyişinde ve analizinde elektriksel elemanların fonksiyonları yanı sıra, mekaniksel elemanların fonksiyonları da gözönüne alınmalıdır.

Enerji sistemlerinin en önemli elemanı,senkron generatörlerdir. Sistemin güvenilir bir şekilde işleyişi büyük ölçüde, sistemde bulunan senkron generatörlerin birbirine göre paralel (senkron) çalışmalarına bağlıdır. Bir senkron generatörün senkronizmadan ayrılması sonucu sistem gerilim ve akımında salınımlar meydana gelir ve enerji taşıma hattı istenmeyen bir bölgede otomatik olarak röleler vasıtasıyla devre dışı kalır. Böyle bir durumda, senkronizmadan ayrılan generatör devreden çıkartılarak tekrar senkron çalışma haline dönüştürüldükten sonra devreye alınarak yeniden yüklenir. Normal işletme şartlarında

senkron makinalar, çalışma ilkeleri nedeniyle kolaylıkla senkronizmadan ayrılmazlar. Yüklenme gereği bir senkron makina hızlanmaya ya da yavaşlamaya başlarsa, makinada meydana gelen senkronlayıcı kuvvetler makinayı senkronizmada tutarlar. Bununla beraber ani yüklemeler enerji taşıma hatlarındaki kısa devre arızaları gibi bazı durumlarda senkronlayıcı kuvvetler, bir senkron makina ya da bir kaç makina için yeterli olmayabilir.

Diğer taraftan elektriksel yükler, ideal olarak sabit bir gerilim ve sabit bir frekansla beslenmelidir. Başka bir ifade ile hem gerilim hem de frekans elektriksel yükün gerektirdiği değerlerde olmalıdır. Bunlardaki değişim belli bir toleransın içinde örneğin gerilimdeki değişim $\pm$ % 10, frekanstaki değişim ise bir kaç hertz içinde kalmalıdır.

İşte yukarıda açıklanan nedenlerden dolayı güvenilirlik ve kalite, bir enerji sisteminden istenilen en önemli iki özelliktir.

4.3.ENERJİ SİSTEMLERİNDE STABİLİTE

Elektrik enerjisi ihtiyacı, çağımızdaki gelişmeler ve artan dünya nüfusu ile orantılı olarak hızla artmaktadır. Günümüzde bu ihtiyaç giderek büyüyen büyük güçlü senkron generatörlerin geliştirilmesi ile sağlanmaktadır. Bunun yanında enerji üretim merkezlerinin yerleşim bölgelerinden uzaklarda kurulma gerekliliği, oldukça uzun yüksek gerilim iletim hatlarının kullanılması zorunluluğunu doğurmuştur. Ancak, enerji üretiminin ve buna bağlı olarakta dağıtımının büyümesi, önemli işletme ve kontrol sorunlarını birlikte getirmiştir. Öyle ki bu sorunlardan en önemlisi enerji sisteminin stabilitesi ile ilgili olanıdır. Enerji sistemlerinde stabilite bir bozucu etkiye maruz kalan sistemin bozucu etki sonrası tekrar bozucu etki öncesi çalışma şartlarına dönme yeteneği anlamındadır. Bir enerji sistemi ancak, sisteme ait mekaniksel giriş ve elektriksel çıkış enerjileri arasında sürekli bir uyum bulunması şartı ile kararlı olarak çalışabilir. Burada sözü geçen mekaniksel giriş enerjileri, sistemdeki senkron generatörlere ait tahrik sistemlerinin enerjileridir. Elektriksel yüklerin her biri ayrı ayrı düşünülürse, bunlarda olabilecek bir değişim sistem gücüne göre genellikle daha küçüktür. Bununla beraber, her bir elektriksel yük değişimi mekaniksel giriş enerjilerinde olabilecek karşı değişimlerle dengelenmelidir. Bunun sağlanmaması halinde, yukarıda da belirtildiği gibi sistem gerilim ve frekansı nominal değerlerinden saparlar. Büyük bozucu etki olarak tanımlanan ani yük değişimleri, enerji taşıma hatlarındaki kısa dev-



reler, açma kapama işlemleri ve enerji taşıma hatları ile yeraltı kablolarında meydana gelen kapasitif akımların söz konusu olduğu durumlarda daha büyük sorunlarla karşılaşılır. Bu gibi nedenlerle bir enerji sistemi, bozucu etki tipine bağlı olarak farklı davranışlar içinde bulunur. Öte yandan bilindiği gibi, sistemdeki senkron generatörlerin giriş enerjileri mekanik regülatörler ile ayarlanır. Elektriksel elemanlara göre daha büyük zaman sabitlerine sahip olan mekanik regülatörler, büyük bir bozucu etkiyi takip eden bir kaç saniyelik süre içinde hemen devreye giremezler. İşte, bir bozucu etki sonrası bir enerji sisteminin tam bir analizinin oldukça karmaşık olması bozucu etki tipi ve zaman, sistemin stabilite açısından analizinin sınıflandırılması gereğini ortaya koyar. Genellikle bu sınıflandırma;

1. Transient stabilite
2. Dinamik stabilite
3. Sürekli stabilite

şeklindedir.

4.3.1. Transient - Stabilite

Senkronizmanın ani olarak kaybının söz konusu olduğu ani yük değişimleri, enerji taşıma hatlarındaki kısa devreler gibi büyük bozucu etkilere sistemin cevabı "Transient Stabilite" olarak adlandırılır. Transient stabilite ile, bozucu etkiden sonraki bir kaç saniyelik süre için sistemin dinamik analizi yapılır. Analizin yapıldığı kısa zaman aralığında tahrik sistemlerinin verdiği mekanik gücün değişmeyip sabit kaldığı kabul edilir. Başka bir ifade ile bu süre boyunca mekanik regülatörlerin devrede olmadığı kabul edilir.

Enerji sistemi büyük bir bozucu etkiye maruz kaldığında sistemdeki senkron makinalara ilişkin rotor (yük) açılarındaki ilk salınımları büyük öneme sahiptir. Sistemin senkronizmada kalma yeteneği ya da stabil olarak çalışması, ilk salınımdan sonraki salınımların birincisinden daha küçük olmaları ile belirlenir. İlk salınımın ait gecici olayları etkileyen en önemli etkenler şu şekilde sıralanabilir;

- a) Bozucunun türünü, yerini ve süresini bildiren darbenin etkisi,
- b) Bir bozucu etki tarafından başlatılan gecici olay sırasında enerji taşıma sisteminin güçlü senkronlama sağlayabilme yeteneği,
- c) Türbin-generatör ve taşıma sistemi parametreleri.

Bu parametreleri etkileyen ön önemli sistem parametreleri ise,

1. Senkron makina parametreleri



- Eylemsizlik sabiti
- Boyuna eksen geçici reaktansı
- Boyuna eksen açık devre zaman sabiti
- Geçici olay sırasında uyarma sisteminin senkron makinanın akı değerine etkisi ile çıkış gücünü artırmadaki yeteneği.

2. Normal durumda, arıza sırasında ve arıza sonrasında enerji taşıma sistemi empedansları.

Arızalı kısım devre dışı bırakıldığı anda senkron makinalarla enerji taşıma sistemi arasında büyük transfer empedansları meydana geleceğinden arızalı kısmın devre dışı bırakılmasındaki esneklik çok önemlidir.

3. Koruyucu rölelerin özellikleri ve kullanılış yerleri.

Burada asıl gaye, enerji taşıma sistemindeki arızalı bölgenin en kısa zamanda belirlenip devre dışı bırakılmasıdır.

4.3.2. Transient stabilite Simülasyon Yöntemleri

Enerji sisteminin büyük bozucu etkilere maruz kalması halinde, daha önce belirtildiği gibi, transient stabilite söz konusudur. Böyle bir durumda sistemin matematiksel modeli, lineer olmayan diferansiyel denklemlerden meydana geleceği için lineer kontrol teorisinden bilinen stabilite analiz yöntemleri ile sistemin davranışı incelenemez.

Önceleri Transient Stabilite analizi alternatif akım devre analizatörleri ile yapıldı. Sonraları, sistemin davranışını tanımlayan diferansiyel denklemlerin elle adım adım çözümleri ile belirlenme yoluna gidilmiş ve 1960'lı yıllarda bilgisayar programcılığındaki gelişmeler sistem davranışına oldukça uyumlu matematiksel modelleri kullanma imkanını getirmiştir. Giderek artan gelişmeler sonucunda transient stabilite sorununun incelenmesinde oldukça etkin olan sayısal simülasyon yöntemleri ortaya çıkmıştır. Sayısal simülasyon yöntemleri, sistemin fiziksel davranışına oldukça uyumlu matematiksel modelleri kullanma imkanını getirdiğinden, geçici olay esnası ve sonrasında sistem davranışının tam olarak analizi imkanını vermiştir.

Sayısal simülasyon işleminde, ilk olarak bozucu etki öncesi sistemin sürekli haldeki yük akışı yapılır. Sonra, bütün çalışma koşullarını ihtiva edecek şekilde meydana getirilen sistemin matematiksel modelinin bilgisayarla çözümü ile sistemin stabilite analizi yapılır.

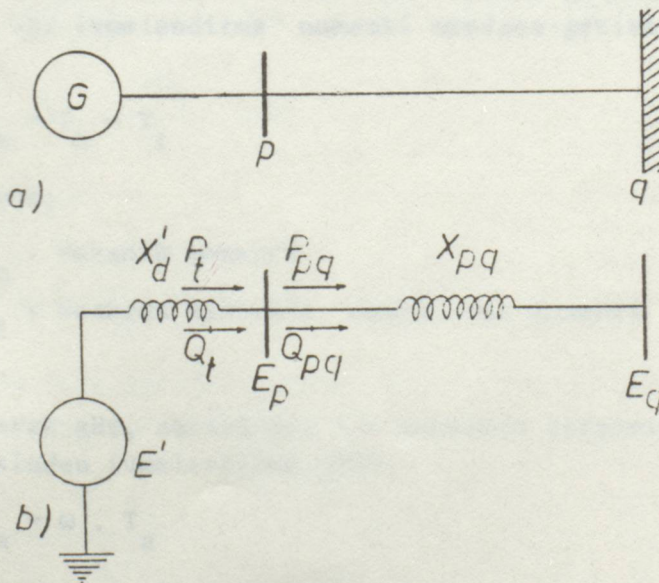
Bu çözüm işleminde sistemin stabil (kararlı) olup olmadığına, sistemdeki senkron makinalara ait δ rotor açılarının zamana göre davranışları ile karar verilir.

Simülasyon işleminde genellikle kullanılan nümerik analiz yöntemleri;

1. Euler yöntemi
2. Düzeltilmiş Euler Yöntemi
3. Runge-Kutte yöntemi.

ÖRNEK PROBLEM

Aşağıdaki şekilde gösterilen senkron makinanın üretim gücü 100 MW ve 50 MVar'dır. Sonsuz q barasının gerilimi $1,0 + j0$, dır. 100000 kVA bazına göre hattın reaktansı 0.05 per-unit, aynı baz'a göre makinanın transient reaktansı 0.20 ve atalet momenti sabiti 3,5 per-unit olarak verilmiştir. P barasında 0.10 saniye müddetle devam eden üç fazlı bir arıza için generatörün açısal hızı ve faz açısındaki değişimleri Euler, Düzeltilmiş Euler ve Runge-Kutta yöntemleri ile hesaplıyalım. (Zaman artımı olarak 0,02 saniye ve maksimum zaman için de 0,20 saniye alınacaktır.)



P_t = Generatörün aktif çıkış gücü

Q_t = Generatörün reaktif çıkış gücü

P_{pq} = Aktif güç akışı

Q_{pq} = Reaktif güç akışı

E' = Transient reaktans gerisindeki gerilim

E_p = p barasının gerilimi

E_q = q barasının gerilimi

X'_d = Transient reaktans

X_{pq} = Hat reaktansı

ŞEKİL-4.1 Basit bir enerji sisteminin,

(a) Tek hat diyagramını

(b) Empedans diyagramını gösterir.

4.4. SALINIM DENKLEMLERİ

Herhangi bir nedenle mekaniksel giriş ve senkron makinada endüklenen elektriksel momentler arasında meydana gelecek bir dengesizlik makinada bir ivmelendirme momenti meydana getirir. Bu ivmelendirme momenti:

$$T_a = T_m - T_t \quad (4.1)$$

dir. Burada,

T_m : Mekanik momenti N-m

T_t : Senkron makinada endüklenen momenti N-m

gösterir.

Genel olarak güç, açısal hız ile momentin çarpımına eşit olduğundan, watt cinsinden ivmelendirme gücü:

$$P_a = \omega \cdot T_a \quad (4.2)$$

olur. (4.1) ve (4.2) denklemlerinden,



$$P_a = P_m - P_t \quad (4.3)$$

elde edilir. Sürekli halde $P_m = P_t$ olduğundan ivmelendirme gücü $P_a = 0$ olur.

Diğer taraftan makinanın dönen kısımları ile ilgili aktif net moment, dönen cisimler ile ilgili mekanik kanunlardan,

$$T = J \cdot \alpha \quad (4.4)$$

dır. Burada,

J : Döner cismin atalet momenti

α : Döner cismin açısal ivmesi

dir. Bilindiği gibi senkron makinada θ elektriksel açı, mekanik açı θ_m ve çift kutup sayısı p' den aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\theta_e = p \cdot \theta_m \quad (4.5)$$

δ açısı, ω_o senkron açısal hızı ile döner referansa göre rotor konumunu belirleyen açı ise, rotorun açısal konumu:

$$\delta = \theta_e - \omega_o t$$

olur. Burada,

ω_o : Makinanın senkron açısal hızını

t : Zamanı

gösterir. Buradan referans eksene göre açısal hız veya kayma :

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{d\theta_e}{dt} - \omega_o$$

ve açısal ivme;

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{d^2\theta_e}{dt^2}$$

dir. (4.5) denkleminin zamana göre 2.türevi alınır ve yukarıdaki ifade de yerine konursa;

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{d^2\theta_e}{dt^2} = p \cdot \frac{d^2\theta_m}{dt^2}$$



olur. Burada,

$$\frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = \alpha$$

dır. Bu değer (4.4) denkleminde yerine konursa makinanın dönen kısımları ile ilgili atalet momenti:

$$T = J \cdot \alpha = J \cdot \frac{1}{p} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = J \cdot \frac{1}{p} \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} \quad (4.6)$$

olur. (4.2) denklemi ile verilen ivmelendirme gücü ise;

$$P_a = \omega_m \cdot T = \omega_m \cdot J \cdot \frac{1}{p} \frac{d^2 \delta}{dt^2} \quad (4.7)$$

şekline dönüşür. Genel olarak M açısai momentum :

$$M = \omega_m \cdot J \quad (4.8)$$

olduğundan (4.7) diferansiyel denklemi,

$$P_a = M \cdot \frac{1}{p} \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_t \quad (4.9)$$

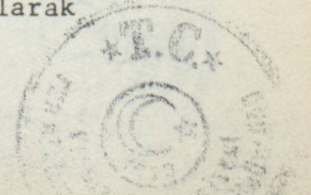
olur. Makinanın dönen kısımlarında depo edilen kinetik enerji ise;

$$W_k = \frac{1}{2} J \cdot \omega_m^2 \quad (4.10)$$

dir. $M = J \cdot \omega$ açısai momentumu, açısai hızın fonksiyonudur. Ancak bütün transient stabilite analizlerinde M sabit alınır. Bunun nedeni, transient stabilite analizlerinde makinaların senkronizma dışı olmadığı andan önceki zamanın düşünülmesidir. Diğer taraftan çok kısa olan geçici olay sırasında hızdaki değişme çok küçük olduğundan (4.10) denklemi:

$$W_k = \frac{1}{2} M \cdot \omega_m \quad (4.11)$$

olur. M açısai momentumun sayısal değerini bulmak için per-unit değerler kullanılır. Bu amaçla atalet momenti sabiti tanımlanır. H ile gösterilen ve saniye ile ölçülen atalet momenti sabiti, senkron makinanın dönen kısımları ile ilgili kinetik enerjisinin, senkron makinanın MVA olarak ölçülen görünen gücüne oranı olarak



tanımlanır.

$$H = \frac{W_k}{S_B} \quad (4.12)$$

(4.12) denkleminde makinanın dönen kısımlarında depo edilen kinetik enerji:

$$W_k = H \cdot S_B \quad (4.13)$$

olur. W_k yerine (4.11) denklemindeki değeri burada yerine konursa,

$$\frac{1}{2} M \cdot \omega_m^2 = H \cdot S_B \quad (4.14)$$

olur. Buradan,

$$M = \frac{2 \cdot H \cdot S_B}{\omega_m^2} \quad (4.15)$$

elde edilir. Böylece (4.9) denklemi;

$$\frac{2 \cdot H \cdot S_B}{\omega_m^2} \cdot \frac{1}{P} \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_t \quad (4.16)$$

olur. $\omega_o = P \cdot \omega_m$ olduğu dikkate alınırsa (4.16) denklemi;

$$\frac{2 \cdot H \cdot S_B}{\frac{\omega_o}{P}} \cdot \frac{1}{P} \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_t$$

şeklini alır. Yine ω_o senkron açısal hızın $2 \pi f$ olduğu da hatırlanırsa;

$$\frac{H \cdot S_B}{\pi \cdot f} \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_t$$

olur. Burada S_B senkron makinanın nominal görünen gücüdür. Bu güç değeri baz seçilirse mekanik ve elektriksel güçlerin per-unit cinsinden değerleri:

$$\text{per-unit } P_m = \frac{P_m}{S_B}$$

ve



$$\text{per-unit } P_t = \frac{P_t}{S_B}$$

olur. Bu değerler dikkate alınarak (4.16) denkleminin her iki tarafı S_B ile bölünürse;

$$\frac{H}{\pi \cdot f} \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_t \quad (4.17)$$

elde edilir. Bu denklemde artık P_m ve P_t değerleri per-unit cinsinden seçilmesi gerekir. (4.17) denklemi düzenlenirse makinanın salınım denklemi;

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{\pi \cdot f}{H} (P_m - P_t) \quad (4.18)$$

olur. Bu ikinci dereceden diferansiyel denklem iki birinci dereceden diferansiyel denklem olarak aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{d\omega}{dt} = \frac{\pi \cdot f}{H} (P_m - P_t) \quad (4.19)$$

ve

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{d\theta_e}{dt} - \omega_o \quad (4.20)$$

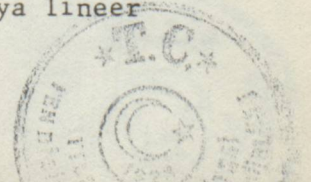
rad/s olarak senkron açısal hız $2 \pi \cdot f$ olduğundan (4.20) denklemi;

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - 2 \pi \cdot f \quad (4.21)$$

olur. Senkron makinaların bağıntılarından bilindiği gibi P_t endüklenenen gücü, δ rotor ya da yük açısının fonksiyonu olduğundan salınım denklemi lineer olmıyan bir diferansiyel denklemdir. Bu nedenle bu diferansiyel denklemin çözümünde lineer olmayan çözüm yöntemleri kullanılır.

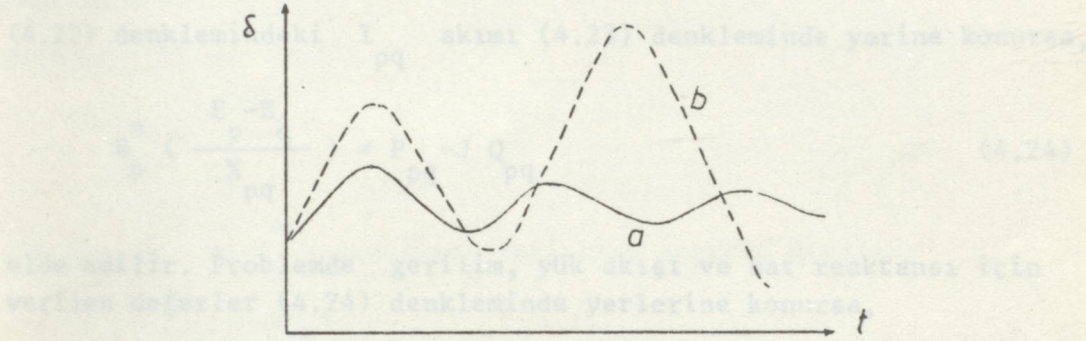
Elde edilen salınım denklemi için aşağıdaki sonuçlar yazılabilir.

1. δ açısı sonsuz büyük güçlü bir şebekeye bağlı olan bir senkron makina için güç açısıdır.
2. Çok makinalı sistemler için sistemdeki makinaların sayısı kadar salınım denklemine ihtiyaç vardır.
3. Salınım denklemi grafik olarak (eşit alan kriteri) veya lineer



olmayan çözüm yöntemleri ile çözülür.

4. Salınım denklemlerinin δ açısına bağlı olarak çizilen güç veya moment eğrilerine salınım eğrisi denir. Salınım eğrisi ulaşabileceği en büyük noktadan sonra sürekli azalıyorsa, sistem kararlıdır. Şekil (4.2a). Bunun tersi oluyorsa, yani sürekli artma söz konusu ise sistemin kararsız olduğu söylenir. Şekil-(4.2b)



Şekil-4.2 Salınım eğrileri

5. Salınım denklemlerinde sönüm (amortisman) momenti veya gücü ihmal edildiğinden (4.18) denkleminde bu momenti veya gücü göstermek için bir terim daha ilave edilir.

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} + D \frac{d\delta}{dt} = \frac{\pi \cdot f}{H} (P_m - P_t)$$

Ele alınan örnek sistemde :

1. Transient esnasında E_q geriliminin 1.00 per-unit ve sabit kaldığı.
2. Bütün şartlar altında şebeke frekansının sabit kaldığı ve E_q geriliminin referans alındığı.
3. Mekanik güç P_m 'nin sabit kaldığı.
4. Transient reaktans gerisindeki E' e.m.k 'nin genliğinin sabit kaldığı.
5. Sönüm (damping) momentinin ihmal edildiği kabul edilerek sonuçlar elde edilmiştir.

4.5.BAŞLANGIÇ HESAPLARI :

Çözümün ilk adımında yük akışı elde edilecektir. Bunun için hat akımı:



$$I_{pq} = \frac{E_p - E_q}{X_{pq}} \quad (4.22)$$

dır. Ve hattaki güç akışı

$$E_p^* \cdot I_{pq} = P_{pq} - j Q_{pq} \quad (4.23)$$

(4.22) denklemindeki I_{pq} akımı (4.23) denkleminde yerine konursa,

$$E_p^* \left(\frac{E_p - E_q}{X_{pq}} \right) = P_{pq} - j Q_{pq} \quad (4.24)$$

elde edilir. Problemde gerilim, yük akışı ve hat reaktansı için verilen değerler (4.24) denkleminde yerlerine konursa,

$$E_p^* \left[\frac{E_p - (1,0 + j0)}{j 0,05} \right] = 1,0 - j 0,5$$

$E_p = e_p + j f_p$ olarak alınır yukarıdaki denklemde yerine konursa,

$$\frac{(e_p - j f_p) [(e_p + j f_p) - (1,0 + j0)]}{j 0,05} = 1,0 - j 0,5$$

$$(e_p - j f_p) (e_p + j f_p) - (e_p - j f_p) = 0,025 + j 0,05$$

Buradan

$$e_p^2 + f_p^2 - (e_p - j f_p) = 0,025 + j 0,05$$

elde edilir. Sonuç denklemin her iki tarafındaki sanal kısımlar birbirine eşit olacağından $f_p = 0,05$ olarak elde edilir. Bu değer yukarıdaki denklemde f_p^2 'de yerine konursa denklemin reel bileşenleri:

$$e_p^2 + 0,0025 - e_p = 0,025$$

veya

$$e_p^2 - e_p - 0,0225 = 0$$



olur. Bu denklemin çözümünden $e_p = 1,022$ olarak elde edilir. Bu değer ve f_p değeri $E_p = e_p + jf_p$ olarak tariflediğimiz E_p 'de yerine konursa E_p için,

$$E_p = 1,022 + j 0,05$$

elde edilir.

Makinanın Akımı:

$$I_t = \frac{P_t - jQ_t}{E_p^*}$$

dir. P_t , Q_t ve E_p^* değerleri yerlerine konursa denklem:

$$I_t = \frac{1,0 - j0,5}{1,022 - j0,05}$$

Buradan,

$$I_t = 1,0 - j0,440$$

bulunur. Transient reaktans gerisindeki gerilim

$$E' = E_p + j X_d' I_t$$

dir. Bu denklemde I_t yerine yukarıda hesaplanan değeri konursa,

$$E' = 1,022 + j0,05 + j0,2 (1,0 - j0,440)$$

$$E' = 1,110 + j0,25$$

olur. Bu gerilimin genliği $|E'| = 1,138$ ve faz açısı da $\delta = 12,693^\circ$ dir.

Böylece arızadan önce, generatörün açısal hızının ve faz açısının başlangıç değerleri sırasıyla $\omega_{(0)} = 2\pi f = 376,990$ ve $\delta_{(0)} = 12,693^\circ$ olarak bulunmuş olur.

P barasındaki arıza, bu baradaki gerilim sıfıra eşit alındığındaki duruma benzetilir. Daha sonra, arızanın meydana geldiği anda generatörün aktif gücünü hesaplamak için sistemdeki yeni yük akışı elde edilir. Ele alınan problemde generatörün gücü, arıza generatör uçlarında meydana geldiğinden sıfırdır. O halde arıza meydana geldiği anda generatör gücü $P_{t(0)} = 0$ alınır.



$t + \Delta t$ anında generatörün açısal hızı ve faz açısı aşağıdaki diferansiyel denklemler çözülerek elde edilir.

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\pi f}{H} (P_m - P_t)$$

ve $\frac{d\delta}{dt} = \omega - 2\pi f$

Burada H per-unit cinsinden atalet momenti sabitini ve P regülatör etkisi yokken sabit kalan mekanik gücü gösterir. P_m Mekanik güç arızadan önceki generatör gücüne eşittir. Yani $P_m = 1,0$ dir.

4.6 EULER YÖNTEMİ İLE ÇÖZÜM :

İlk çözüm Euler yöntemi kullanılarak elde edilecektir.

Açısal hızdaki değişme miktarı:

$$\left. \frac{d\omega}{dt} \right|_{(0)} = \frac{\pi f}{H} (P_m - P_t) = \frac{60 \pi}{3,5} (1,0 - 0)$$

$$\left. \frac{d\omega}{dt} \right|_{(0)} = 53,856$$

$t = 0,02$ anındaki açısal hız:

$$\omega_{(0,02)} = \omega_{(0)} + \left. \frac{d\omega}{dt} \right|_{(0)} \Delta t$$

$$\omega_{(0,02)} = 376,990 + (53,856)(0,02)$$

$$\omega_{(0,02)} = 378,067 \text{ rad/s}$$

Faz açısındaki değişme miktarı :

$$\left. \frac{d\delta}{dt} \right|_{(0)} = \omega_{(0)} - 2\pi f$$

$$\left. \frac{d\delta}{dt} \right|_{(0)} = 0$$

$t = 0,02$ anında faz açısı:

$$\delta_{(0,02)} = 12,693^\circ$$



dir. Bu yeni faz açısı $\delta(0,02)$ generatör gücünü hesaplamak için yeni yük akışı hesabında kullanılır. $t = 0,02$ anında arıza devam ettiğinden, generatör gücü sıfırdır.

$t + \Delta t = 0,02$ için hesaplar tamamlanır. Daha sonra $t = 0,02$ alınır. ve $t + \Delta t = 0,04$ değerini elde etmek için işlem tekrarlanır.

$t = 0,02$ anında açısal hızın değişme miktarı:

$$\left. \frac{d\omega}{dt} \right|_{(0,02)} = \frac{60 \cdot \pi}{3,5} (1,0-0) = 53,856$$

$t = 0,04$ anında açısal hız:

$$\omega_{(0,04)} = \omega_{(0,02)} + \left. \frac{d\omega}{dt} \right|_{(0,02)} \Delta t$$

$$\omega_{(0,04)} = 378,067 + 53,856 (0,02)$$

$$\omega_{(0,04)} = 379,144$$

Faz açısındaki değişme miktarı:

$$\left. \frac{d\delta}{dt} \right|_{(0,02)} = \delta_{(0,02)} - 2 \pi f = 1,077 \text{ rad/s}$$

$t = 0,04$ anındaki faz açısı:

$$\delta_{(0,04)} = \delta_{(0,02)} + \left. \frac{d\delta}{dt} \right|_{(0,02)} \left(\frac{180^\circ}{\pi} \right) \Delta t$$

$$\delta_{(0,04)} = 12,693^\circ + 1,077 \left(\frac{180^\circ}{\pi} \right) \cdot 0,02$$

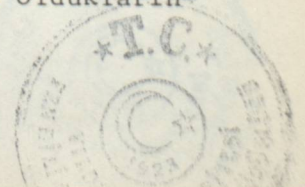
$$\delta_{(0,04)} = 13,927^\circ$$

olur.

$t = 0,06$, $t = 0,08$ ve $t = 0,10$ değerleri için benzer tarzda hesaplamaya devam edilir.

$t = 0,10$ saniyesinde arıza kaldırılmıştır. Generatörün aktif gücünün hesaplanması için, arızanın kalkması ile elde edilen yeni sistem şartlarında yük akışının hesaplanması gerekir.

Bu problemde makina akımı ve hat akımı birbirine eşit oldukların-



dan, makina akımı aşağıdaki denklemden hesaplanır.

$$I_t = \frac{E' - E_q}{J(X'_d + X_{pq})}$$

Burada $|E'|$ nin faz açısı $\delta_{(0,10)}$ dur. Bilinen bütün değerler yerine konursa,

$$I_t = \frac{1,0311 + j0,4815 - (1,0 + j0)}{j0,25}$$

$$I_t = 1,9260 - j0,1244$$

olur. Bundan sonra P barasındaki gerilim ise:

$$E_p = E' - jX'_d I_t$$

$$E_p = 1,0311 + j0,4815 - j0,2 (1,9260 - j0,1244)$$

$$E_p = 1,0062 + j0,0963$$

olarak bulunur.

Daha sonra, arızanın kaldırılmasını takip eden andaki generatörün aktif gücü aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$P_{t(0,10)} = \text{Re} (E_p^* I_t)$$

$$P_{t(0,10)} = \text{Re} [(1,0062 - j0,0963) (1,9260 - j0,1244)]$$

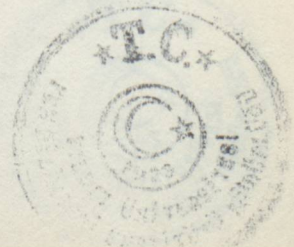
$$P_{t(0,10)} = 1,926$$

$t = 0,10$ anındaki açısal hızın değişme miktarı:

$$\left. \frac{d\omega}{dt} \right|_{(0,10)} = \frac{60 \pi}{3,5} (1,0 - 1,926)$$

$$\left. \frac{d\omega}{dt} \right|_{(0,10)} = -49,9$$

Buradan $t = 0,12$ anındaki açısal hız:



$$\omega_{(0,12)} = \omega_{(0,10)} + \left. \frac{d\omega}{dt} \right|_{(0,10)} \Delta t$$

$$\omega_{(0,12)} = 382,375 + (-49,9) (0,02)$$

$$\omega_{(0,12)} = 381,377$$

olarak hesaplanır.

Faz açısındaki değişme miktarı ise:

$$\left. \frac{d\delta}{dt} \right|_{(0,10)} = \delta_{(0,10)} - 2 \pi f = 5,385$$

Buradan $t = 0,12$ anındaki faz açısı ise:

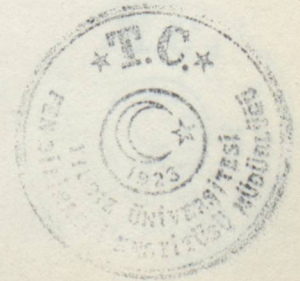
$$\delta_{(0,12)} = \delta_{(0,10)} + 5,385 \left(\frac{180^\circ}{\pi} \right) .0,02$$

$$\delta_{(0,12)} = 31,203^\circ$$

bulunur.

Son olarak, $t = 0,12$ anında generatörün aktif gücünü elde etmek için yeni bir yük akışı hesaplanır. Bu işleme her bir zaman artımında hesaplanan bir yük akışı ile devam edilir. $t = 0$ dan $t = 0,20$ ye kadar elde edilen bilgisayar sonuçları 4.6.2'de verilmiştir.

4.6.1. Bilgisayar Programı



YILDIZ UNIVERSITESI
8.4.1985

```
*****
* YILDIZ UNIVERSITESI
* ELEKTRİK TESİSLERİ VE SİSTEMLERİ BİLİMDALI
* 1985
*****
```

```
*****
* TRANSİENT STABİLİTE ÇÖZÜM YÖNTEMLERİ
*
*****
```

EULER YÖNTEMİ İLE ÇÖZÜM

COMPLEX EQ,EI(30),EP(30),IT(30),CSE,CSD
DIMENSION A(25),B(25),DA(25),DB(25),HEP(25),C(25),PT(25),D(25)
DATA HEP,C,PT/75*0./

FORMÜLLER

$DW/DT = P1 * F / H(PM - PT)$
 $DÇ/DT = W - 2 * P1 * F$

SABİTLER

F=60.
H=3.5
PI=3.141596
DT=0.02
B(1)=12.693
A(1)=376.990
PT(1)=0.
EP(1)=0.
C(1)=0.
PM=1.0
CONST=F*PI/H
DA(1)=CONST*(PM-PT(1))
DB(1)=A(1)-2*PI*F

2. KISIM SABİTLER

EQ=CMPLX(1.0,0.0)
CSE=CMPLX(0.0,0.2)
CSD=CMPLX(0.0,0.25)
FIO=1.138




```

TN=0.20
TA=0.10
C  TA: ARIZANIN KALKTIGI ZAMAN
M=(TN/DT)+1
N=(TA/DT)+1

C
C  HESAPLAMALAR
C
DO 10 I=2,M
A(I)=A(I-1)+DA(I-1)*DT
B(I)=B(I-1)+DB(I-1)*(180/PI)*DT
IF(I.LT.N)GOTO 203
D(I)=B(I)*PI/180.
EI(I)=CMPLX(EIO*COS(D(I)),EIO*SIN(D(I)))
IT(I)=(EI(I)-EQ)/CSD
EP(I)=EI(I)-CSE*IT(I)
HEP(I)=CABS(EP(I))
C(I)=(ATAN(AIMAG(EP(I))/ABS(REAL(EP(I)))))*180/PI
IF(REAL(EP(I)))100,400,400
100 IF(AIMAG(EP(I)))200,300,300
200 C(I)=-180.-C(I)
GOTO 400
300 C(I)=180.-C(I)
400 CONTINUE
PT(I)=REAL(CONJG(EP(I))*IT(I))
GOTO 203

C
C  203 DA(I)=CONST*(PM-PT(I))
DB(I)=A(I)-2*PI*F
IF(I.NE.N) GO TO 10
201 HEP(I)=0.
C(I)=0.
PT(I)=0.
10 CONTINUE

C
C  YAZMA BOLUMU
C
WRITE(6,22)
22 FORMAT(1H1,////,50X,'GENERATOR DEGERLERI ',30X,'P
*BARASI',/,3X,090(' '),10X,20(' '))
WRITE(6,23)
23 FORMAT(5X,'ZAMAN (I)',5X,'ACISAL HIZ (W)',5X,'GERILIM (IEI)
*',1X,'FAZ ACISI (C)',5X,'AKTIF GUC (PT)',5X,'GERILIM (IEPI)
*',5X,'FAZ ACISI (CP)')
WRITE(6,25)
25 FORMAT(5X,09(' '),5X,14(' '),5X,13(' '),8X,13(' '),5X,14(' ')
*,5X,14(' '),5X,14(' '),/)
Z=0.
DO 30 I=1,M
WRITE(6,33)Z,A(I),EIO,B(I),PT(I),HEP(I),C(I)
33 FORMAT(2X,F9.3,8X,F09.3,10X,F10.3,10X,F09.3,11X,F09.3,11X
* F9.3,11X,F9.3)
Z=Z+DT
30 CONTINUE
CALL GRAF(DT,M,A,B)
STOP
END
SUBROUTINE GRAF(DT,M,A,C)
DIMENSION A(25),C(25)
CHARACTER TABLO(50,90)*1,DUS(50)*6,DU(50)*6,DS(8)*6,DSD(13)*6
DATA DS/'384. +','382. +','380. +','378. +','376. +','374. +',
* '372. +','370. +'/

```




```

DATA DSD/' + 58.'/' + 54.'/' + 50.'/' + 46.'/' + 44.'/' + 40.'/'
*/' + 36.'/' + 32.'/' + 28.'/' + 24.'/' + 20.'/' + 16.'/' + 12.'/'
DATA DUS,DU/50*' I',50*'I '/'
DATA TABLO /4500*' '/'
IJ=0
DO 1 I=48,2,-7
IJ=IJ+1
1 DUS(I)=DS(IJ)
JI=0
DO 2 II=49,2,-4
JI=JI+1
2 DU(II)=DSD(JI)
NN=1
N=DT*100
DO 20 I=1,M
K=(A(I)-370.)*3.5+.5
L=(C(I)-10.)*.5
TABLO(K,NN)='*'
TABLO(L,NN)='0'
NN=NN+N*4
20 CONTINUE
WRITE(*,22)
22 FORMAT(8X,90(' '))
DO 30 K=50,1,-1
WRITE(*,21) DUS(K),(TABLO(K,L),L=1,90),DU(K)
21 FORMAT(2X,A6,90A1,A6)
30 CONTINUE
WRITE(*,23) (KL,KL=2,20,2)
23 FORMAT(8X,'-',11('-----+'),'---',/11X,4(4X,'0.0',11),6(4X,'0.'
*,12))
RETURN
END

```



4.6.2. Bilgisayar Çıktıları

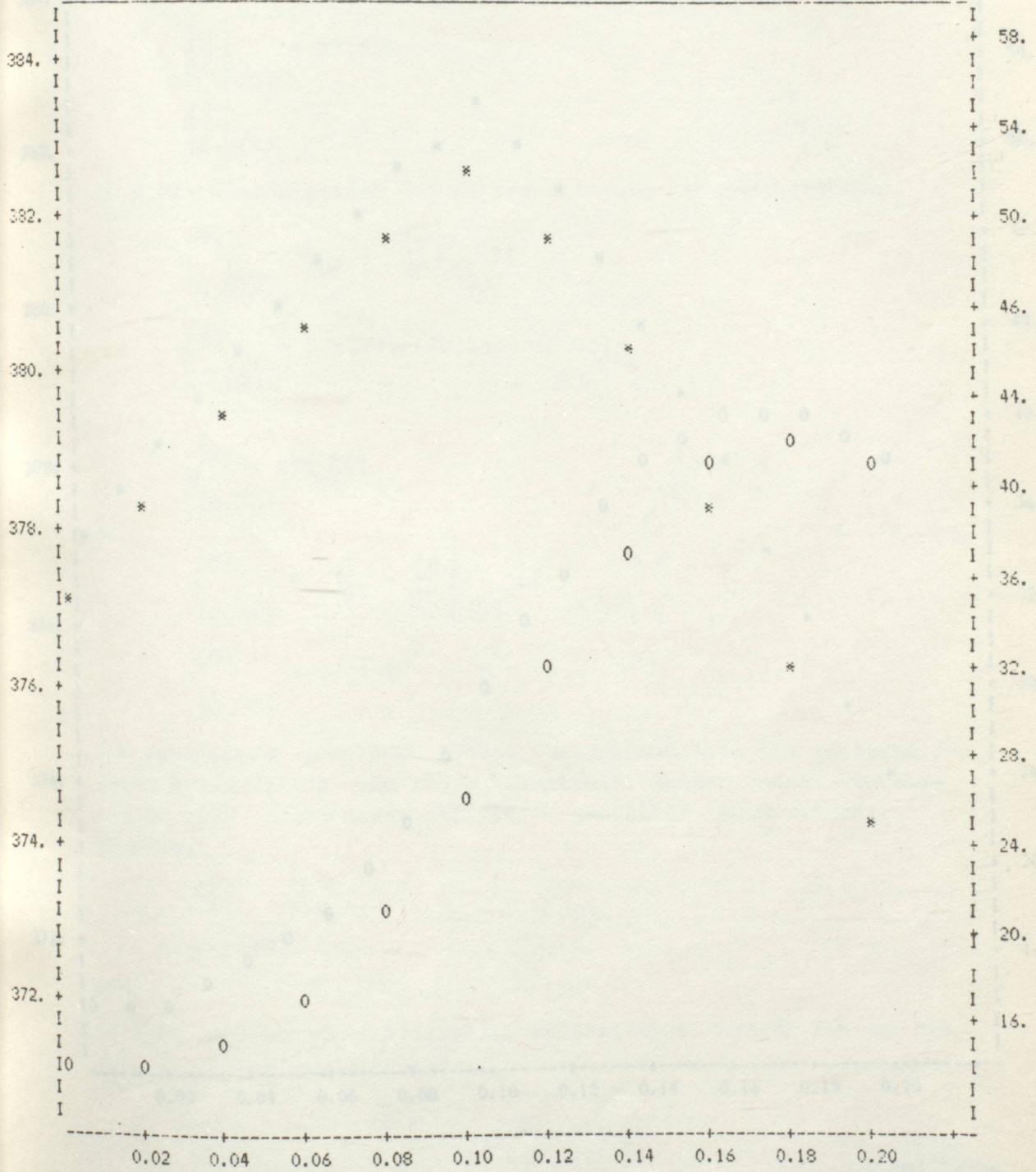
ZAMAN (I)	ACISAL HIZ (W)	GENERATOR DEGERLERI			P BARAKSI	FAZ ACISI (CF)
		GERILIM (IEI)	FAZ ACISI (C)	AKTIF GUC (PT)	GERILIM (IEPI)	
0.000	376.990	1.138	12.693	0.000	0.000	0.000
.020	378.067	1.138	12.691	0.000	0.000	0.000
.040	379.144	1.138	13.924	0.000	0.000	0.000
.060	380.221	1.138	16.391	0.000	0.000	0.000
.080	381.298	1.138	20.092	0.000	0.000	0.000
.100	382.376	1.138	25.027	0.000	0.000	0.000
.120	381.378	1.138	31.197	2.358	1.002	6.759
.140	379.916	1.138	36.224	2.690	.993	7.786
.160	378.096	1.138	39.575	2.909	.986	8.455
.180	376.049	1.138	40.840	2.977	.984	8.704
.200	373.920	1.138	39.760	2.911	.986	8.492
.220	371.193	1.138	37.423	2.752	1.008	6.459
.240	368.343	1.138	32.420	2.446	1.000	7.012
.260	375.507	1.138	34.799	2.592	.995	7.498
.280	376.379	1.138	36.733	2.722	.992	7.899
.300	377.465	1.138	36.174	2.813	.989	8.177
.320	376.596	1.138	35.054	2.676	.987	8.258
.340	375.371	1.138	39.434	2.891	.986	8.437
.360	374.568	1.138	39.257	2.877	.987	8.383
.380	373.568	1.138	36.397	2.827	.989	8.322
.400	373.368	1.138	31.007	2.740	.991	7.944



GENERATOR DEGERLERI					P BARASI	
ZAMAN (I)	ACISAL HIZ (W)	GERILIM (IEI)	FAZ ACISI (C)	AKTIF GUC (PT)	GERILIM (IEPI)	FAZ ACISI (CP)
0.000	376.990	1.138	12.693	0.000	0.000	0.000
.010	377.529	1.138	12.692	0.000	0.000	0.000
.020	378.067	1.138	13.000	0.000	0.000	0.000
.030	378.606	1.138	13.616	0.000	0.000	0.000
.040	379.144	1.138	14.541	0.000	0.000	0.000
.050	379.683	1.138	15.774	0.000	0.000	0.000
.060	380.221	1.138	17.316	0.000	0.000	0.000
.070	380.760	1.138	19.167	0.000	0.000	0.000
.080	381.298	1.138	21.326	0.000	0.000	0.000
.090	381.837	1.138	23.794	0.000	0.000	0.000
.100	382.376	1.138	26.570	0.000	0.000	0.000
.110	381.818	1.138	29.655	2.252	1.004	6.439
.120	381.143	1.138	32.420	2.440	1.000	7.012
.130	380.367	1.138	34.799	2.598	.995	7.498
.140	379.507	1.138	36.733	2.722	.992	7.889
.150	378.579	1.138	38.174	2.813	.989	8.177
.160	377.603	1.138	39.084	2.870	.987	8.358
.170	376.596	1.138	39.434	2.891	.986	8.427
.180	375.577	1.138	39.207	2.877	.987	8.383
.190	374.566	1.138	38.397	2.827	.989	8.222
.200	373.582	1.138	37.007	2.740	.991	7.944



4.6.3. Açısal Hız ve Faz Açısının Zamana Göre Değişim Eğrileri



4.7 DÜZELTİLMİŞ EULER YÖNTEMİ İLE ÇÖZÜM

Şimdi aynı problemi düzeltilmiş Euler yöntemi ile çözelim. Başlangıç koşullarından elde edilen başlangıç değerleri, aynı şekilde yük akışı kullanılarak, $t=0$ anında aktif hız ve faz açılarındaki değişim miktarları :

$$\left. \frac{dw}{dt} \right|_{(0)} = 53,856$$

$$\left. \frac{d\delta}{dt} \right|_{(0)} = 0$$

$\Delta t = 0,02$ anında aktif hız ve faz açısının ilk yaklaşımları:

$$w(0,02) = w(0) + \left. \frac{dw}{dt} \right|_{(0)} \Delta t$$

$$w(0,02) = 376,990 + (53,856)(0,02)$$

$$w(0,02) = 378,067$$

$$\delta(0,02) = \delta(0) + \left. \frac{d\delta}{dt} \right|_{(0)} \Delta t$$

$$\delta(0,02) = 12,6936$$

İlk yaklaşımda generatörün hesaplamak için ilk yaklaşım faz açısı kullanılarak yük akışı hesaplanır. Bundan sonraki adımlarda elde edilen sonuçlar generatörün aktif hız ve faz açısı olarak kullanılır.

İkinci yaklaşımda generatörün hesaplamak için ilk yaklaşım aktif hız ve faz açısı kullanılarak yük akışı hesaplanır. Bundan sonraki adımlarda elde edilen sonuçlar generatörün aktif hız ve faz açısı olarak kullanılır.

$\Delta t = 0,02$ anında ilk yaklaşımlar kullanılarak aktif hız ve faz

0.02 0.04 0.06 0.08 0.10 0.12 0.14 0.16 0.18 0.20

$$\left. \frac{dw}{dt} \right|_{(0,02)} = \frac{w(0,02) - w(0)}{\Delta t}$$



4.7 DÜZELTİLMİŞ EULER YÖNTEMİ İLE ÇÖZÜM

Şimdi aynı problemi düzeltilmiş Euler yöntemi ile çözelim. Başlangıç hesaplarından elde edilen başlangıç değerleri, arıza anında yük akışı kullanılarak, $t=0$ anında açısal hız ve faz açısındaki değişme miktarları :

$$\left. \frac{d\omega}{dt} \right|_{(0)} = 53,856$$

$$\left. \frac{d\delta}{dt} \right|_{(0)} = 0$$

$t=0,02$ anında açısal hız ve faz açısının ilk yaklaşımları:

$$\begin{aligned} \omega_{(0,02)}^{(0)} &= \omega_{(0)}^{(0)} + \left. \frac{d\omega}{dt} \right|_{(0)} \Delta t \\ &= 376,990 + (53,856) (0,02) \\ &= 376,990 + 1,077 \\ &= 378,067 \end{aligned}$$

$$\omega_{(0,02)}^{(0)} = 378,067$$

ve

$$\begin{aligned} \delta_{(0,02)}^{(0)} &= \delta_{(0)}^{(0)} + \left. \frac{d\delta}{dt} \right|_{(0)} \Delta t \\ &= 12,693^\circ \end{aligned}$$

İlk yaklaşımda generatör gücünü hesaplamak için ilk yaklaşım faz açısı kullanılarak yük akışı hesaplanır. Bundan önceki yöntemde olduğu gibi arıza devam ettiğinden generatör gücü sıfırdır. Böylece,

$$\begin{aligned} P_{(0,02)}^{(0)} &= 0 \end{aligned}$$

olur.

$t=0,02$ anında ilk yaklaşımlar kullanılarak açısal hız ve faz açısındaki değişme miktarları:

$$\left. \frac{d\omega}{dt} \right|_{(0,02)} = \frac{\pi f}{H} (P_m - P_{t(0,02)}^{(0)})$$



$$\left. \frac{d\omega}{dt} \right|_{(0,02)} = 53,856$$

$$\left. \frac{d\delta}{dt} \right|_{(0,02)} = \omega_{(0,02)}^{(0)} - 2 \pi f$$

$$\left. \frac{d\delta}{dt} \right|_{(0,02)} = (378,067 - 2 \pi f)$$

$$\left. \frac{d\delta}{dt} \right|_{(0,02)} = 1,077$$

Bundan sonra $t = 0,02$ anında açısal hızın ve faz açısının son yaklaşımları:

$$\omega_{(0,02)}^{(1)} = \omega_{(0)}^{(0)} + \left(\frac{\left. \frac{d\omega}{dt} \right|_{(0)} + \left. \frac{d\omega}{dt} \right|_{(0,02)}}{2} \right) \cdot \Delta t$$

$$\omega_{(0,02)}^{(1)} = 376,990 + \left(\frac{53,856 + 53,856}{2} \right) 0,02$$

$$\omega_{(0,02)}^{(1)} = 378,067$$

$$\delta_{(0,02)}^{(1)} = \delta_{(0)}^{(0)} + \left(\frac{\left. \frac{d\delta}{dt} \right|_{(0)} + \left. \frac{d\delta}{dt} \right|_{(0,02)}}{2} \right) \cdot \Delta t$$

$$\delta_{(0,02)}^{(1)} = 12,693^\circ + \left(\frac{0 + 1,077}{2} \right) \left(\frac{180}{\pi} \right) 0,02$$

$$\delta_{(0,02)}^{(1)} = 13,310^\circ$$

$t = 0,02$ anında generatör gücünü hesaplamak için faz açısının son yaklaşımı $\delta_{(0,02)}^{(1)}$ kullanılarak bir yük akışı elde edilir. Halen arıza devam ettiğinden generatörün gücü $P_{t(0,02)}^{(1)} = 0$ dır. Bu durum arıza kalkana kadar devam eder.

$t + \Delta t = 0,02$ için bu hesaplar tamamlandıktan sonra t yerine $0,02$ konarak $t + \Delta t = 0,04$ anındaki değerleri elde etmek için işlem tekrarlanır. Düzeltilmiş Euler yönteminin uygulanmasında, her bir zaman artımı için iki defa yük akışı hesaplanması gerekir. $t = 0$ anından $t = 0,20$ aralığı için hesaplanan bilgisayar sonuçları 4.7.2'de verilmiştir.

4.7.1. Bilgisayar Programı



*
*
* YILDIZ UNIVERSITESI
*
* ELEKTRIK TESISLERI VE SISTEMLERI BILIMHAI
*
* 1985
*

*I
*I
*I
*I TRANSIENT STABILITE COZUM YONTEMLERI
*I
*I
*I
*I

DUZELTILMIS EULER YONTEMI ILE COZUM

COMPLEX EQ,EI(25,2),EP(25,2),TIT(25,2),CSE,CSD
DIMENSION A(25,2),B(25,2),C(25,2),D(25,2),HEP(25,2),PT(25,2),G
*(25,2),E(25,2),JZH(10),ABC(11,10)

FORMULLER

DW/DT=PI*F/H(PM-PT)
DC/DT=W-2*PI*F

SABITLER

F=60.
H=3.5
PI=3.141596
DT=0.02
PM=1.0
EIO=1.138
EQ=CMPLX(1.000000,0.000000)
CSE=CMPLX(0.0,0.2)
CSD=CMPLX(0.000000000,0.250000000)
CONST=F*PI/H

BASLANGIC DEGERLERI

A(1,2)=53.856
B(1,2)=0.
C(1,2)=376.990
D(1,2)=12.693




```

C      HESAPLAMALAR
      TN=0.20
      TA=0.10
C      TA: ARIZANIN KALKTIGI ZAMAN
      M=(TN/DT)+1
      N=(TA/DT)+1
C
C      DO 10 T=2,M
      C(T,1)=C(T-1,2)+A(T-1,2)*DT
      D(T,1)=D(T-1,2)+B(T-1,2)*DT*180/PI
      IF(T.LE.N) GOTO 20
      E(T,1)=D(T,1)*PI/180
      EI(T,1)=CMPLX(EIO*COS(E(T,1)),EIO*SIN(E(T,1)))
      TIT(T,1)=(EI(T,1)-EQ)/CSD
      EP(T,1)=EI(T,1)-CSE*TIT(T,1)
      HEP(T,1)=CABS(EP(T,1))
      G(T,1)=(ATAN(AIMAG(EP(T,1))/ABS(REAL(EP(T,1)))))*180/PI
      IF(REAL(EP(T,1)))100,400,400
100  IF(AIMAG(EP(T,1)))200,300,300
200  G(T,1)=-180.-G(T,1)
      GOTO 400
300  G(T,1)=180.-G(T,1)
400  CONTINUE
      PT(T,1)=REAL(CONJG(EP(T,1))*TIT(T,1))
      GOTO 30
20  PT(T,1)=0.
30  A(T,1)=CONST*(PM-PT(T,1))
      B(T,1)=C(T,1)-2*PI*F
C
C      2. KISIM
C
      C(T,2)=C(T-1,2)+(A(T-1,2)+A(T,1))/2*DT
      D(T,2)=D(T-1,2)+(B(T-1,2)+B(T,1))/2*DT*180./PI
      IF(T.LT.N)GOTO 40
      E(T,2)=D(T,2)*PI/180.
      EI(T,2)=CMPLX(EIO*COS(E(T,2)),EIO*SIN(E(T,2)))
      TIT(T,2)=(EI(T,2)-EQ)/CSD
      EP(T,2)=EI(T,2)-CSE*TIT(T,2)
      HEP(T,2)=CABS(EP(T,2))
      G(T,2)=(ATAN(AIMAG(EP(T,2))/ABS(REAL(EP(T,2)))))*180/PI
      IF(REAL(EP(T,2)))102,402,402
102  IF(AIMAG(EP(T,2)))202,302,302
202  G(T,2)=-180.-G(T,2)
      GOTO 402
302  G(T,2)=180.-G(T,2)
402  CONTINUE
      PT(T,2)=REAL(CONJG(EP(T,2))*TIT(T,2))
      GOTO 50
40  PT(T,2)=0.
50  A(T,2)=CONST*(PM-PT(T,2))
      B(T,2)=C(T,2)-2*F*PI
10  CONTINUE
C
C      YAZMA BOLUMU
C
      PT(6,2)=0.0
      HEP(6,2)=0.0
      G(6,2)=0.0
      WRITE(6,22)
22  FORMAT(1H1,////,50X,'GENERATOR DEGERLERI ',35X,
      *'P BARASI',/,10X,085(' '),05X,35(' '))
      WRITE(6,23)
23  FORMAT(5X,'ZAMAN (T)',5X,'ACISAL HIZ (W)',5X,'GERILIM (IEI)
      *',1X,'FAZ ACISI (C)',5X,'AKTIF GUC (PT)',5X,'GERILIM (IEPI)
      *',5X,'FAZ ACISI (CP)')
      WRITE(6,25)

```




```

25 FORMAT(5X,09(' '),5X,14(' '),5X,13(' '),8X,13(' '),5X,14(' ')
*,5X,14(' '),5X,14(' '),//)
Z=0.
DO 32 T=1,11
WRITE(6,33)Z,C(T,2),EIO,D(T,2),PT(T,2),HEP
*(T,2),G(T,2)
33 FORMAT(2X,F09.2,8X,F09.3,10X,F10.3,10X,F09.3,11X,F09.3,11X,
* F9.3,11X,F9.3)
Z=Z+DT
32 CONTINUE
CALL GRAF(DT,M,C,D)
STOP
END
SUBROUTINE GRAF(DT,M,A,C)
DIMENSION A(25,2),C(25,2)
CHARACTER TABLO(50,90)*1,DUS(50)*6,DU(50)*6,DS(8)*6,DSD(13)*6
DATA DS/'384. '+'/'382. '+'/'380. '+'/'378. '+'/'376. '+'/'374. '+'/'
*'372. '+'/'370. '+'/'
DATA DSD/'+' 58.'/'+' 54.'/'+' 50.'/'+' 46.'/'+' 44.'/'+' 40.'/'
*'+' 36.'/'+' 32.'/'+' 28.'/'+' 24.'/'+' 20.'/'+' 16.'/'+' 12.'/'
DATA DUS,DU/50*' 1',50*'I '/'
DATA TABLO /4500*' '/'
IJ=0
DO 1 I=48,2,-7
IJ=IJ+1
1 DUS(I)=DS(IJ)
JI=0
DO 2 II=49,2,-4
JI=JI+1
2 DU(II)=DSD(JI)
NN=1
N=DT*100
DO 20 I=1,M
K=(A(I,2)-370.)*3.5+.5
L=(C(I,2)-10.)*.5
TABLO(K,NN)='*'
TABLO(L,NN)='0'
NN=NN+N*4
20 CONTINUE
WRITE(*,22)
22 FORMAT(8X,90(' '))
DO 30 K=50,1,-1
WRITE(*,21) DUS(K),(TABLO(K,L),L=1,90),DU(K)
21 FORMAT(2X,A6,90A1,A6)
30 CONTINUE
WRITE(*,23) (KL,KL=2,20,2)
23 FORMAT(8X,'-',11('-----+'),'---',/11X,4(4X,'0.0',11),6(4X,'0.'
*,12))
RETURN
END

```



4.7.2. Bilgisayar Çıktıları

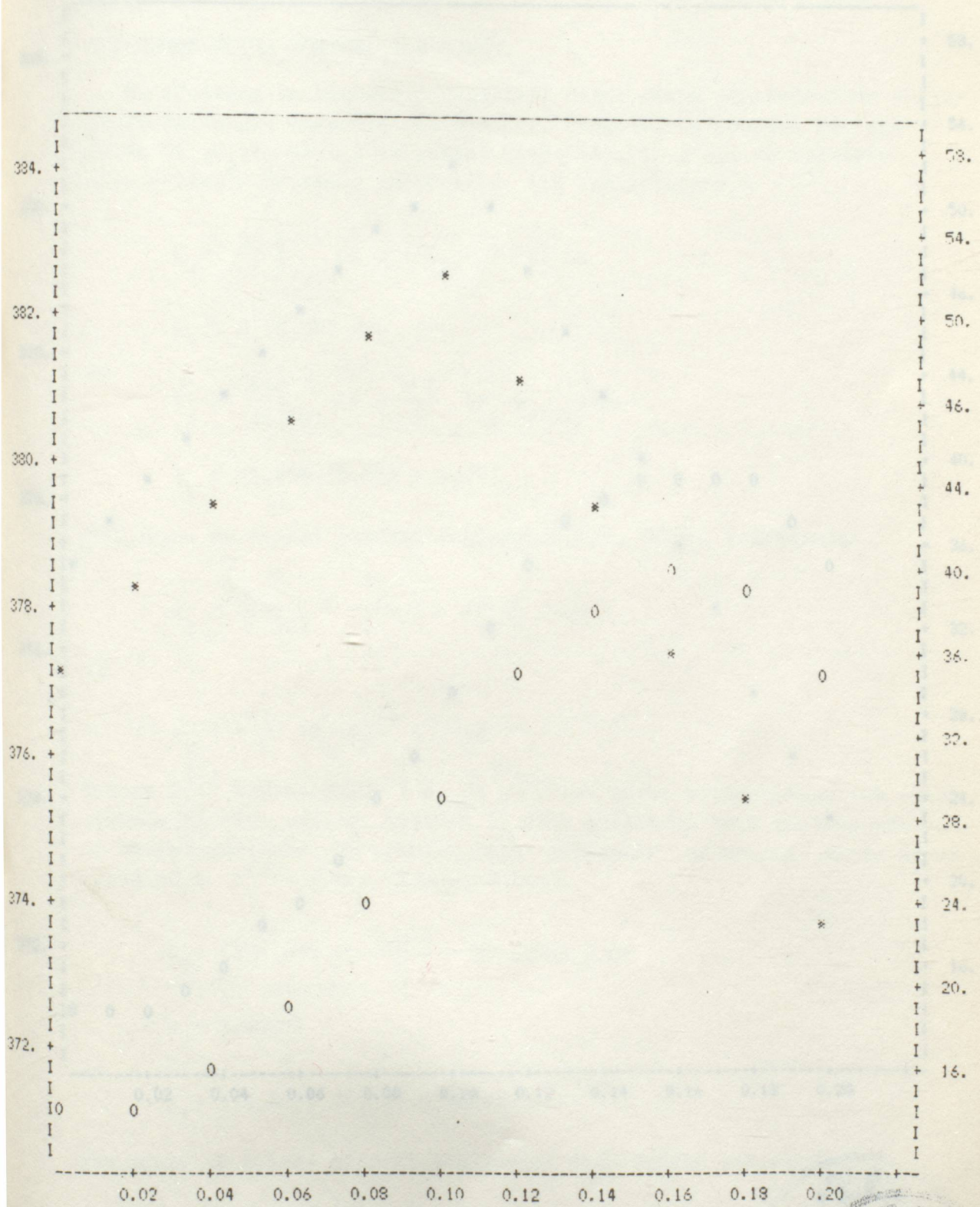
ZAMAN (T)	GENERATOR DEĞERLERİ					P BARASI	
	ACISAL HIZ (W)	GERİLİM (IEI)	FAZ ACISI (C)	AKTİF GÜÇ (PT)	GERİLİM (IEPI)	FAZ ACISI (CP)	
0.00	376.990	1.138	12.693	0.000	0.000	0.000	0.000
.02	378.067	1.138	13.309	0.000	0.000	0.000	0.000
.04	379.144	1.138	15.159	0.000	0.000	0.000	0.000
.06	380.221	1.138	18.243	0.000	0.000	0.000	0.000
.08	381.298	1.138	22.561	0.000	0.000	0.000	0.000
.10	382.376	1.138	28.114	0.000	0.000	0.000	0.000
.12	380.917	1.138	33.577	2.518	.998	7.249	7.249
.14	379.126	1.138	37.138	2.748	.991	7.970	7.970
.16	377.161	1.138	38.505	2.834	.988	8.243	8.243
.18	375.179	1.138	37.567	2.775	.990	8.056	8.056
.20	373.338	1.138	34.395	2.571	.996	7.416	7.416

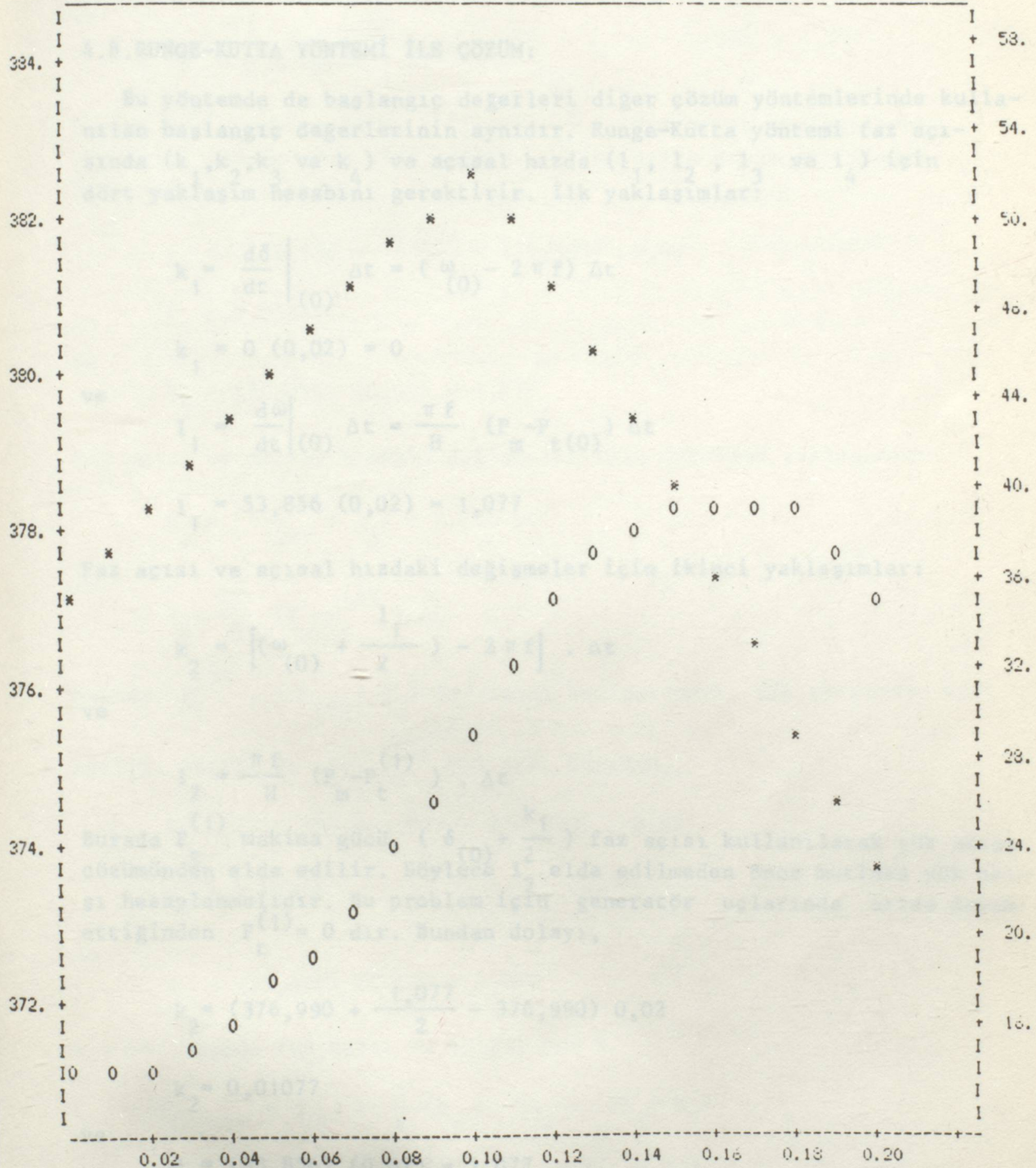


YAN (T)	GFNERATOR DEGERLERI				P BARASI	
	ACISAL HIZ (W)	GERILIM (IEI)	FAZ ACISI (C)	AKTIF GUC (PT)	GERILIM (IEPI)	FAZ ACISI (CP)
00	376.990	1.138	12.693	0.000	0.000	0.000
01	377.529	1.138	12.847	0.000	0.000	0.000
02	373.067	1.138	13.309	0.000	0.000	0.000
03	373.566	1.138	14.079	0.000	0.000	0.000
04	379.144	1.138	15.159	0.000	0.000	0.000
05	379.683	1.138	16.546	0.000	0.000	0.000
06	380.221	1.138	18.242	0.000	0.000	0.000
07	380.760	1.138	20.247	0.000	0.000	0.000
08	381.298	1.138	22.561	0.000	0.000	0.000
09	381.837	1.138	25.183	0.000	0.000	0.000
10	382.376	1.138	28.113	0.000	0.000	0.000
11	381.702	1.138	31.021	2.346	1.002	6.723
12	380.928	1.138	33.513	2.513	.998	7.236
13	380.073	1.138	35.534	2.646	.994	7.647
14	379.157	1.138	37.046	2.742	.991	7.952
15	378.197	1.138	38.018	2.804	.989	8.146
16	377.214	1.138	38.431	2.829	.988	8.228
17	376.227	1.138	38.276	2.820	.989	8.198
18	375.254	1.138	37.557	2.775	.990	8.054
19	374.316	1.138	36.288	2.694	.993	7.799
20	373.430	1.138	34.493	2.578	.996	7.436



4.7.3. Açısal Hız ve Faz Açısının Zamana Göre Değişim Eğrileri





4.8. RUNGE-KUTTA YÖNTEMİ İLE ÇÖZÜM:

Bu yöntemde de başlangıç değerleri diğer çözüm yöntemlerinde kullanılan başlangıç değerlerinin aynıdır. Runge-Kutta yöntemi faz açısında (k_1, k_2, k_3 ve k_4) ve açısal hızda (l_1, l_2, l_3 ve l_4) için dört yaklaşım hesabını gerektirir. İlk yaklaşımlar:

$$k_1 = \left. \frac{d\delta}{dt} \right|_{(0)} \Delta t = (\omega_{(0)} - 2\pi f) \Delta t$$

$$k_1 = 0 \quad (0,02) = 0$$

ve

$$l_1 = \left. \frac{d\omega}{dt} \right|_{(0)} \Delta t = \frac{\pi f}{H} (P_m - P_t(0)) \Delta t$$

$$l_1 = 53,856 \quad (0,02) = 1,077$$

Faz açısı ve açısal hızdaki değişmeler için ikinci yaklaşımlar:

$$k_2 = \left[(\omega_{(0)} + \frac{l_1}{2}) - 2\pi f \right] \cdot \Delta t$$

ve

$$l_2 = \frac{\pi f}{H} (P_m - P_t^{(1)}) \cdot \Delta t$$

Burada $P_t^{(1)}$ makina gücü, $(\delta_{(0)} + \frac{k_1}{2})$ faz açısı kullanılarak yük akışı çözümünden elde edilir. Böylece l_2 elde edilmeden önce mutlaka yük akışı hesaplanmalıdır. Bu problem için generatör uçlarında arıza devam ettiğinden $P_t^{(1)} = 0$ dır. Bundan dolayı,

$$k_2 = (376,990 + \frac{1,077}{2} - 376,990) 0,02$$

$$k_2 = 0,01077$$

ve

$$l_2 = (53,856) (0,02) = 1,077$$

Faz açısı ve açısal hızdaki değişmeler için üçüncü yaklaşımlar:

$$k_3 = \left[(\omega_{(0)} + \frac{l_2}{2}) - 2\pi f \right] \cdot \Delta t$$



ve

$$l_3 = \frac{\pi f}{H} (P_m - P_t^{(2)}) \Delta t$$

Burada $P_t^{(2)}$ makina gücü, $(\delta_{(0)} + \frac{k_2}{2})$ faz açısı kullanılarak yük akışı çözümünden elde edilir. Yine arıza devam ettiğinden $P_t^{(2)} = 0$ dır. Buradan,

$$k_3 = (376,990 + \frac{1,077}{2} - 376,990) \cdot 0,02$$

$$k_3 = 0,01077$$

ve

$$l_3 = (53,856) \cdot (0,02) = 1,077$$

Faz açısı ve açısal hızdaki değişmeler için dördüncü yaklaşımlar:

$$k_4 = [(\omega_{(0)} + l_3) - 2 \pi f] \cdot \Delta t$$

ve

$$l_4 = \frac{\pi f}{H} (P_m - P_t^{(3)}) \cdot \Delta t$$

Burada, $P_t^{(3)}$, $(\delta_{(0)} + k_3)$ faz açısı kullanılarak yük akışından elde edilir. Burada da yine $P_t^{(3)} = 0$ dır. Buradan,

$$k_4 = (376,990 + 1,077 - 376,990) \cdot 0,02$$

$$k_4 = 0,02154$$

ve

$$l_4 = (53,856) (0,02) = 1,077$$

$t + \Delta t$ anında faz açısı ve açısal hız :

$$\delta_{(0,02)} = \delta_{(0)} + \frac{1}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$$

$$\omega_{(0,02)} = \omega_{(0)} + \frac{1}{6} (l_1 + 2l_2 + 2l_3 + l_4)$$

hesaplanan değerler yerlerine konursa,

$$\delta_{(0,02)} = 12,693^\circ + \frac{1}{6} (0 + 0,02154 + 0,02154 + 0,02154) \cdot \frac{180^\circ}{\pi}$$

$$\delta_{(0,02)} = 13,310^\circ$$

$$\omega_{(0,02)} = 376,990 + \frac{1}{6} (1,077 + 2,154 + 2,154 + 1,077)$$

$$\omega_{(0,02)} = 378,067$$

elde edilir. $t = 0,02$ anında generatör gücünü hesaplamak için elde edilen $\delta_{(0,02)}$ faz açısı kullanılarak yük akışı elde edilir. Bu güç

$P_{0,02}^{(0)} = 0$ dır ve arıza kaldırılincaya kadar da sıfır olacaktır.

$t + \Delta t = 0,02$ için bu hesaplar tamamlanır. Runge-Kutta yöntemi her bir zaman artımı için dört defa yük akışı hesabı gerektirir. $t = 0$ dan $t = 0,20$ 'ye kadar bilgisayardan elde edilen sonuçlar 4.8.3'de gösterilmiştir.

4.8.1. Bilgisayar Programı

COMPLEX EQ.E1(20,4),EP(20,4),IT(20,4),CSE,CSD
DIMENSION CC(25),MFI(25,4),C(25),PT(25,4),Q(25),DD(25)
REAL K1,K2,K3,K4,L1,L2,L3,L4

FORMALLER

DN/DT=P1+F/NIMH-PT

DC/DT=N-2MP/F

SABITLER

DATA (PT(1,1),1-1,4)/390,0/
F=50,
N=3,5
P1=3,141594
DT=0,02
DD(1)=12,593



YILDIZ UNIVERSITESI
1985

YILDIZ UNIVERSITESI
ELEKTRIK TESISLERI VE SISTEMLERI RILINDALI
1985

TRANSIENT STABILITE COZUM YONTEMLERI

RUNGE KUTTA YONTEMI ILE COZUM

COMPLEX EQ,EI(30,4),EP(30,4),IT(30,4),CSE,CSD
DIMENSION CC(25),HEP(25,4),C(25),PT(25,4),D(25),DD(25)
REAL K1,K2,K3,K4,L1,L2,L3,L4

FORMULLER

$DW/DT=PI*F/H(FM-PT)$
 $DC/DT=W-2*PI*F$

SABITLER

DATA (PT(1,1),I=1.4)/4*0.0/
F=60.
H=3.5
PI=3.141596
DT=0.02
DD(1)=12.693




```

C(1)=376.990
CC(1)=0.
PM=1.0
CONST=F*PI/H
C
C      2. KISIM SABITLER
C
EQ=CMPLX(1.0,0.0)
CSE=CMPLX(0.0,0.2)
CSD=CMPLX(0.0,0.25)
EI0=1.138
C
TN=0.20
TA=0.10
C      TA: ARIZANIN KALKTIGI ZAMAN
M=(TN/DT)+1
N=(TA/DT)+1
C
C      HESAPLAMALAR
C
DO 10 I=2,M+1
K=I-1
IF(I.LE.N) GO TO 11
EI(K,1)=CMPLX(EI0*COS(D(K)),EI0*SIN(D(K)))
IT(K,1)=(EI(K,1)-EQ)/CSD
EP(K,1)=EI(K,1)-CSE*IT(K,1)
HEP(K,1)=CABS(EP(K,1))
PT(K,1)=REAL(CONJG(EP(K,1))*IT(K,1))
11 K1=(C(K)-2.*PI*F)*DT
L1=CONST*(PM-PT(K,1))*DT
K2=((C(K)+L1/2.))-2.*PI*F)*DT
IF(I.LE.N) GO TO 12
EI(K,2)=CMPLX(EI0*COS(D(K)+K1/2.),EI0*SIN(D(K)+K1/2.))
IT(K,2)=(EI(K,2)-EQ)/CSD
EP(K,2)=EI(K,2)-CSE*IT(K,2)
HEP(K,2)=CABS(EP(K,2))
PT(K,2)=REAL(CONJG(EP(K,2))*IT(K,2))
12 L2=CONST*(PM-PT(K,2))*DT
K3=((C(K)+L2/2.))-2.*PI*F)*DT
IF(I.LE.N) GO TO 13
EI(K,3)=CMPLX(EI0*COS(D(K)+K2/2.),EI0*SIN(D(K)+K2/2.))
IT(K,3)=(EI(K,3)-EQ)/CSD
EP(K,3)=EI(K,3)-CSE*IT(K,3)
HEP(K,3)=CABS(EP(K,3))
PT(K,3)=REAL(CONJG(EP(K,3))*IT(K,3))
13 L3=CONST*(PM-PT(K,3))*DT
K4=((C(K)+L3/2.))-2.*PI*F)*DT
IF(I.LE.N) GO TO 14

```




```

CALL GRAF(DT,M,C,DD)
STOP
END
SUBROUTINE GRAF(DT,M,A,C)
DIMENSION A(25),C(25)
CHARACTER TABLO(50,90)*1,DUS(50)*6,DU(50)*6,DS(8)*6,DSD(13)*6
DATA DS/'384. +','382. +','380. +','378. +','376. +','374. +',
*'372. +','370. +'/
DATA DSD/'+ 58.','+ 54.','+ 50.','+ 46.','+ 44.','+ 40.',
*'+ 36.','+ 32.','+ 28.','+ 24.','+ 20.','+ 16.','+ 12.'/
DATA DUS,DU/50*' 1',50*'1' '/'
DATA TABLO /4500*' '/'
IJ=0
DO 1 I=48,2,-7
IJ=IJ+1
1 DUS(I)=DS(IJ)
JI=0
DO 2 II=49,2,-4
JI=JI+1
2 DU(II)=DSD(JI)
NN=1
N=DT*100
DO 20 I=1,M
K=(A(I)-370.)*3.5+.5
L=(C(I)-10.)*.5
TABLO(K,NN)='*'
TABLO(L,NN)='0'
NN=NN+N*4
20 CONTINUE
WRITE(*,22)
22 FORMAT(8X,90(' '))
DO 30 K=50,1,-1
WRITE(*,21) DUS(K),(TABLO(K,L),L=1,90),DU(K)
21 FORMAT(2X,A6,90A1,A6)
30 CONTINUE
WRITE(*,23) (KL,KL=2,20,2)
23 FORMAT(8X,'-',11('-----+'),'---',/11X,4(4X,'0.0',I1),6(4X,'0.'
*,I2))
RETURN
END

```



4.3.2. Bilgisayar Çıktıları:

```

EI(K,4)=CMPLX(EIO*COS(D(K)+K3),EIO*SIN(D(K)+K3))
IT(K,4)=(EI(K,4)-EQ)/CSD
EP(K,4)=EI(K,4)-CSE*IT(K,4)
HEP(K,4)=CABS(EP(K,4))
PT(K,4)=REAL(CONJG(EP(K,4))*IT(K,4))
CC(K)=(ATAN(AIMAG(EP(K,1))/ABS(REAL(EP(K,1)))))*180./PI
IF(REAL(EP(K,4)))100,400,400
100 IF(AIMAG(EP(K,4)))200,300,300
200 CC(K)=-180.-CC(K)
    GOTO 400
300 CC(K)=180.-CC(K)
400 CONTINUE
14  L4=CONST*(PM-PT(K,4))*DT
    C(I)=C(K)+(L1+2.*L2+2.*L3+L4)/6.
    DD(I)=DD(K)+((K1+2.*K2+2.*K3+K4)/6.)*(180./PI)
    D(I)=DD(I)*(PI/180.)
    IF(I.NE.(N+1)) GO TO 10
    PT(K,1)=0.
    HEP(K,1)=0.
    CC(K)=0.
10  CONTINUE

C  YAZMA BOLUMU
C
    WRITE(6,22)
22  FORMAT(1H1,/////,50X,'GENERATOR DEGERLERI '.30X,'P
    *BARASI',/.3X,090(' '),10X,20(' '))
    WRITE(6,23)
23  FORMAT(5X,'ZAMAN (I)',5X,'ACISAL HIZ (W)',5X,'GERILIM (IEI)
    *',1X,'FAZ ACISI (C)',5X,'AKTIF GUC (PT)',5X,'GERILIM (IEPI)'
    *,5X,'FAZ ACISI (CP)')
    WRITE(6,25)
25  FORMAT(5X,09(' '),5X,14(' '),5X,13(' '),8X,13(' '),5X,14(' ')
    *,5X,14(' '),5X,14(' '),//)
    Z=0.
    DO 30 I=1,M
        WRITE(6,33)Z,C(I),EIO,DD(I),PT(I,1),HEP(I,1),CC(I)
33  FORMAT(2X,F9.3,8X,F09.3,10X,F10.3,10X,F09.3,11X,F09.3,11X.
    * F9.3,11X,F9.3)
        Z=Z+DT
30  CONTINUE
```



4.8.2. Bilgisayar Çıkışları

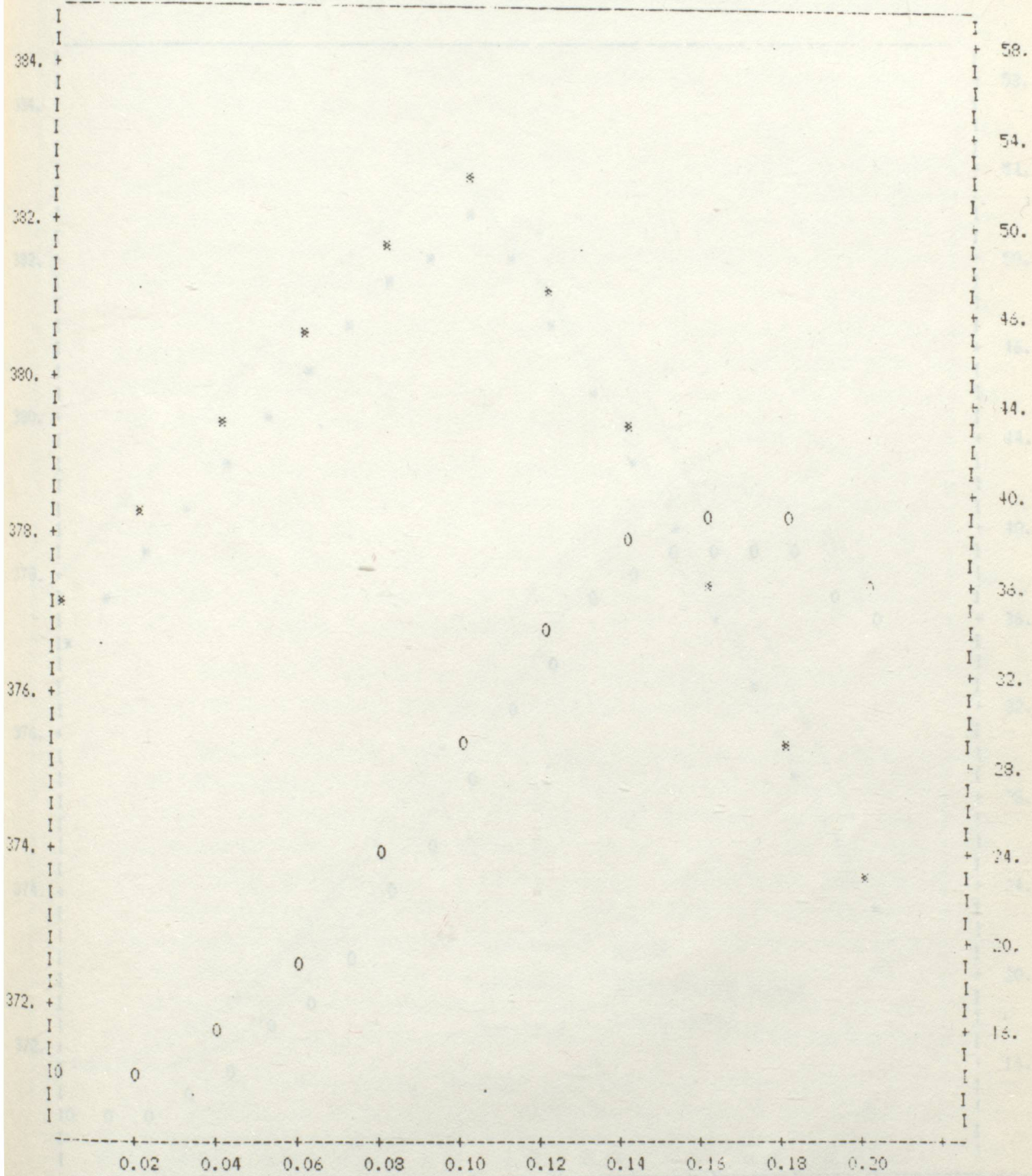
ZAMAN (t)	GENERATOR DEĞERLERİ				P BARASI	
	ACISAL HIZ (W)	GERİLİM (IEI)	FAZ ACISI (C)	AKTİF GÜC (PT)	GERİLİM (IEPI)	FAZ ACISI (CP)
0.000	376.990	1.138	12.693	0.000	0.000	0.000
.020	378.067	1.138	13.308	0.000	0.000	0.000
.040	379.144	1.138	15.158	0.000	0.000	0.000
.060	380.221	1.138	18.242	0.000	0.000	0.000
.080	381.298	1.138	22.560	0.000	0.000	0.000
.100	382.376	1.138	28.113	0.000	0.000	0.000
.120	380.933	1.138	33.493	2.512	.998	7.232
.140	379.188	1.138	37.022	2.741	.991	7.947
.160	377.233	1.138	38.417	2.829	.988	8.226
.180	375.280	1.138	37.569	2.775	.990	8.056
.200	373.460	1.138	34.545	2.581	.996	7.446



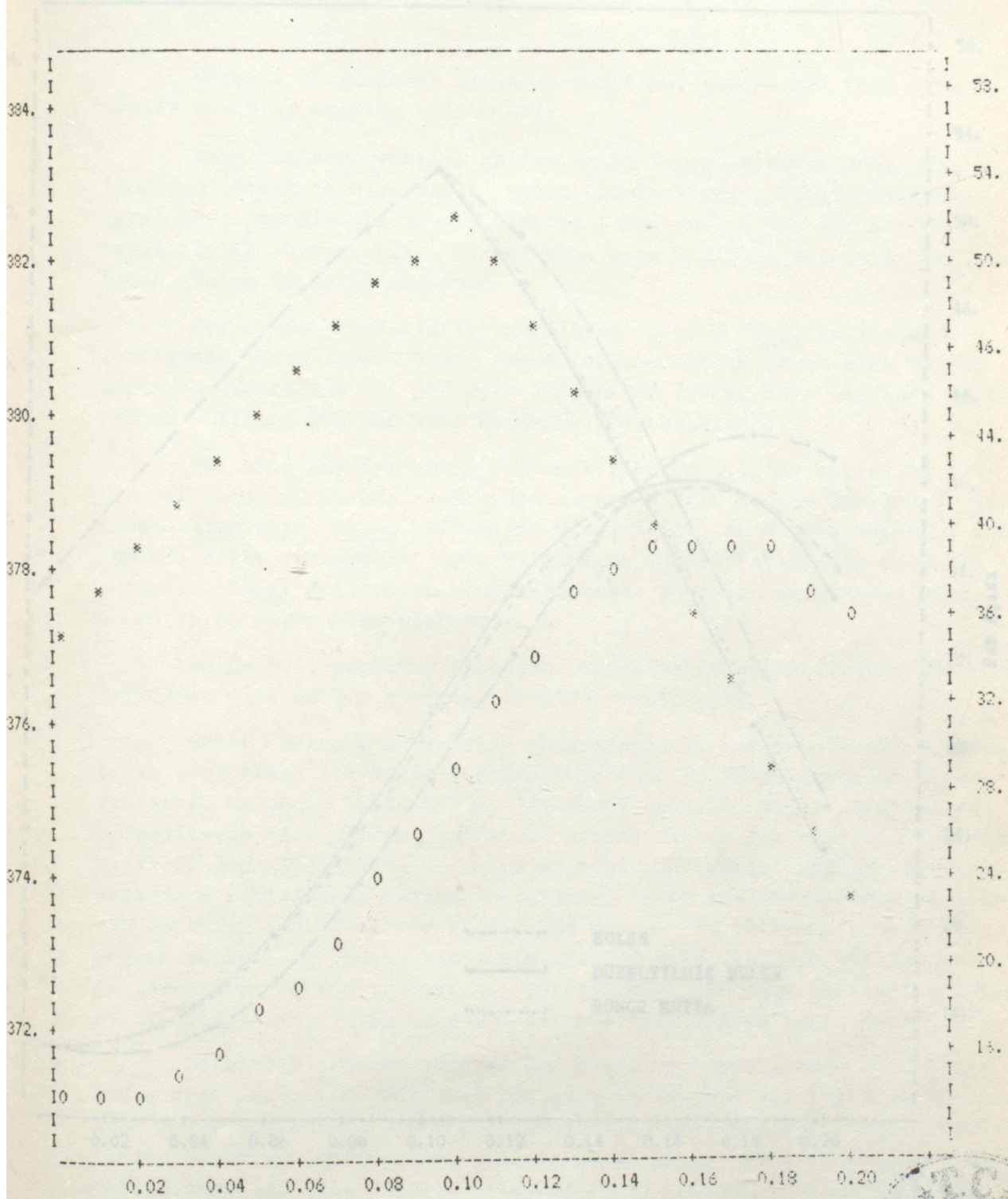
ZAMAN (I)	ACISAL HIZ (W)	GENERATOR DEGERLERI				P	BARASI
		GERILIM (IEI)	FAZ ACISI (C)	AKTIF GUC (PT)	GERILIM (IEPI)		
0.000	376.990	1.138	12.693	0.000	0.000	0.000	0.000
.010	377.529	1.138	12.846	0.000	0.000	0.000	0.000
.020	378.067	1.138	13.308	0.000	0.000	0.000	0.000
.030	378.606	1.138	14.079	0.000	0.000	0.000	0.000
.040	379.144	1.138	15.158	0.000	0.000	0.000	0.000
.050	379.683	1.138	16.546	0.000	0.000	0.000	0.000
.060	380.221	1.138	18.242	0.000	0.000	0.000	0.000
.070	380.760	1.138	20.247	0.000	0.000	0.000	0.000
.080	381.298	1.138	22.560	0.000	0.000	0.000	0.000
.090	381.837	1.138	25.182	0.000	0.000	0.000	0.000
.100	382.376	1.138	28.113	0.000	0.000	0.000	0.000
.110	381.704	1.138	31.010	2.345	1.002	6.721	6.721
.120	380.933	1.138	33.494	2.512	.998	7.232	7.232
.130	380.081	1.138	35.511	2.644	.994	7.642	7.642
.140	379.168	1.138	37.022	2.741	.991	7.947	7.947
.150	378.212	1.138	37.997	2.802	.989	8.142	8.142
.160	377.233	1.138	38.417	2.829	.988	8.226	8.226
.170	376.249	1.138	38.273	2.820	.989	8.197	8.197
.180	375.280	1.138	37.569	2.775	.990	8.056	8.056
.190	374.343	1.138	36.318	2.696	.992	7.805	7.805
.200	373.459	1.138	34.544	2.581	.996	7.446	7.446



4.8.3. Açısal Hız ve Faz Açısının Zamana Göre Değişim Eğrileri

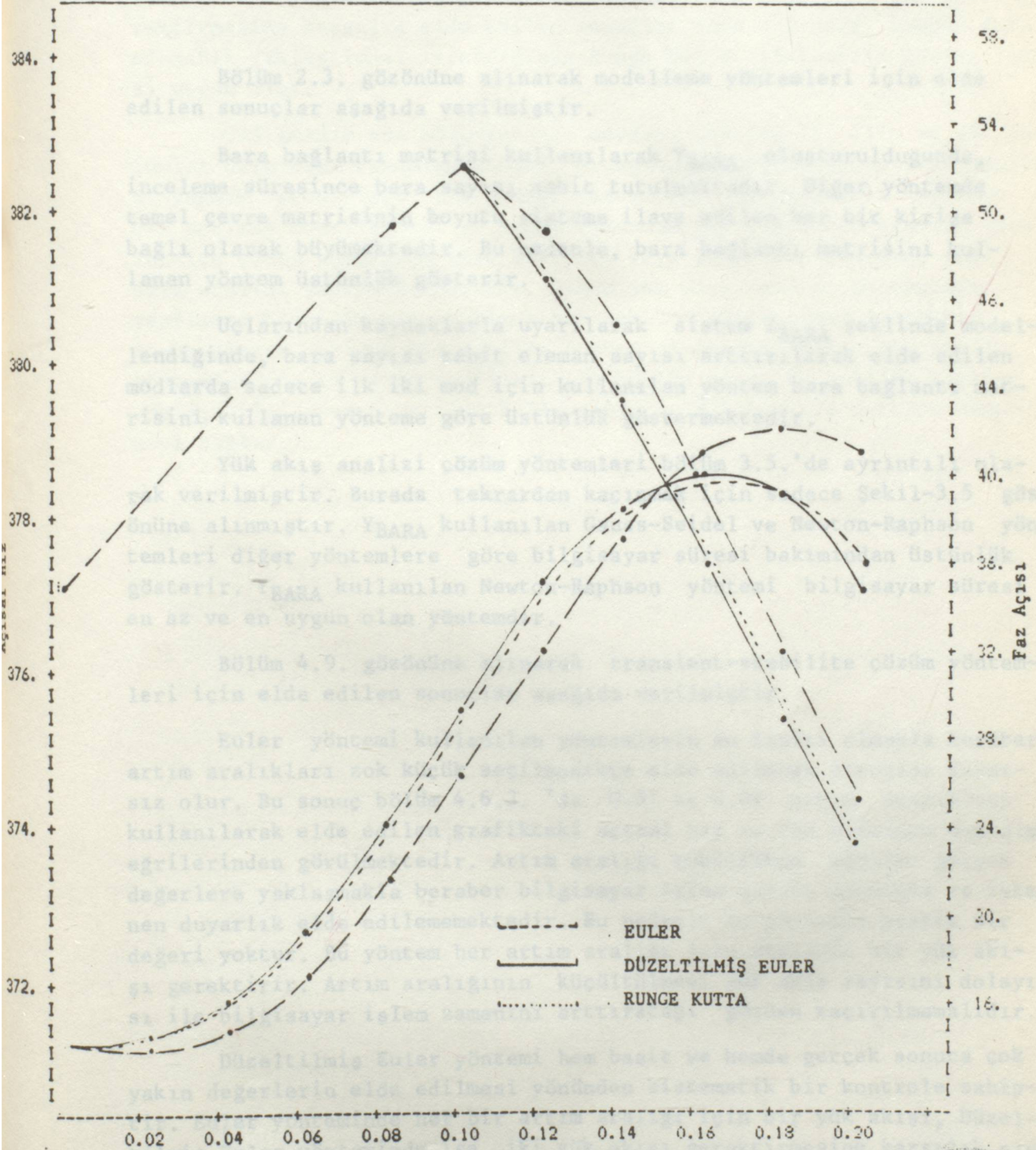


TRANSİENT STABİLİTE ÇÖZÜM YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI



4.9. TRANSİENT STABİLİTE ÇÖZÜM YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

BÖLÜM V SONUÇLAR



BÖLÜM V

SONUÇLAR

Bölüm 2.3. gözönüne alınarak modelleme yöntemleri için elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Bara bağlantı matrisi kullanılarak Y_{BARA} oluşturulduğunda, inceleme süresince bara sayısı sabit tutulmaktadır. Diğer yöntemde temel çevre matrisinin boyutu sisteme ilave edilen her bir kirise bağlı olarak büyümektedir. Bu nedenle, bara bağlantı matrisini kullanan yöntem üstünlük gösterir.

Uçlarından kaynaklarla uyarılarak sistem Z_{BARA} şeklinde modelendiğinde, bara sayısı sabit eleman sayısı arttırılarak elde edilen modlarda sadece ilk iki mod için kullanılan yöntem bara bağlantı matrisini kullanan yöntemle göre üstünlük göstermektedir.

Yük akış analizi çözüm yöntemleri bölüm 3.5.'de ayrıntılı olarak verilmiştir. Burada tekrardan kaçınmak için sadece Şekil-3.5 göz önüne alınmıştır. Y_{BARA} kullanılan Gauss-Seidel ve Newton-Raphson yöntemleri diğer yöntemlere göre bilgisayar süresi bakımından üstünlük gösterir. Y_{BARA} kullanılan Newton-Raphson yöntemi bilgisayar süresi en az ve en uygun olan yöntemdir.

Bölüm 4.9. gözönüne alınarak transient-stabilite çözüm yöntemleri için elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Euler yöntemi kullanılan yöntemlerin en basiti olmakla beraber artım aralıkları çok küçük seçilmedikçe elde edilecek sonuçlar duyarlı olmaz. Bu sonuç bölüm 4.6.3. 'de 0.01 ve 0.02 artım aralıkları kullanılarak elde edilen grafikteki açısal hız ve faz açısının değişim eğrilerinden görülmektedir. Artım aralığı küçüldükçe eğriler gerçek değerlere yaklaşmakla beraber bilgisayar işlem sayısı artmakta ve istenen duyarlılık elde edilememektedir. Bu nedenle bu yöntemin pratik bir değeri yoktur. Bu yöntem her artım aralığı için sistemde bir yük akışı gerektirir. Artım aralığının küçültülmesi yük akış sayısını dolayısıyla ile bilgisayar işlem zamanını arttıracak gözden kaçırılmamalıdır.

Düzeltilmiş Euler yöntemi hem basit ve hemde gerçek sonuca çok yakın değerlerin elde edilmesi yönünden sistematik bir kontrole sahiptir. Euler yönteminde her bir artım aralığı için bir yük akışı, Düzeltilmiş Euler yönteminde ise, iki yük akışı gerektirmesine karşılık elde edilen değerler daha duyarlı olmaktadır. Bu nedenle Düzeltilmiş Euler yöntemi pratik bakımından üstünlük gösterir. Transient-stabilite

analizinde yeterli hassasiyetle kullanılabilir.

Runge-Kutta yönteminde aritmetik işlem sayısı diğer iki yöntemden daha fazla ve her bir artım aralığı için dört defa yük akışı gerektirmesine karşılık elde edilen sonuçlar daha doğrudur. Sonuca daha sihatli yaklaşılmaması istendiğinde Runge-Kutta yönteminin kullanılması uygun olur.

Çalışmanın ana bölümlerini meydana getiren II, III. ve IV. bölümler birbirini tamamlamaktadır. Örneğin, transient-stabilite analizi yapmak istediğimiz bir enerji sisteminde önce sistemin optimum bir şekilde modellenmesi ve bunun ardından her bir artım aralığı için seçilen çözüm yöntemine göre bir, iki veya dört defa sistemde yük akış analizi yapılması gerekir. Uygun yük akış analizi yönteminin seçilmesi bilgisayarın optimum bir şekilde kullanılması demektir. Sonuç olarak optimum bir şekilde çözüme ulaşmamız kullanılan analiz yöntemlerinin en uygun seçilmesi ile mümkün olur. Bu şekilde yapılan seçim, bilgisayarın optimum kullanılmasını dolayısıyla istenen ekonomiyi sağlar.

- 8) Eaton, J.R., Cohen, E.: Electric Power Transmission Systems, Second Edition, New Jersey, Prentice-Hall, Inc., 1983.
- 9) Knight, W.C.: Power Systems Engineering and Mathematics, Second Edition, New York, John Wiley-Sons, Inc., 1975.
- 10) Knable, A.H.: Electrical Power Systems Engineering Problems and Solution, New York, Mc Graw-Hill, Inc., 1967.
- 11) Kimbark, R.W.: Power System Stability, New York, John Wiley and Sons, Inc., Volume I, 1968.
- 12) Kaymak, A.: Elektrik Şebekelerinin Çok-Uçlu Eleman Kavramı Yöntemi ile İncelenmesi, Doktora Tezi, 1981.
- 13) Stevenson, W.D.: Elements of Power System Analysis, Third Edition, Tokyo, Mc Graw-Hill Kogakusha, Ltd., 1975.
- 14) Stagg, G.W., El-Abiad, A.H.: Computer Methods in Power System Analysis, New York, Mc Graw-Hill, Inc., 1968.
- 15) Shipley, R.B.: Introduction to Matrices and Power Systems, New York, John Wiley and Sons, Inc., 1976.



analizinde yeterli hassasiyetle kullanılabilir.

Runge-Kutta yönteminde aritmetik işlem sayısı diğer iki yöntemden daha fazla ve her bir artım aralığı için dört defa yük akışı gerektirmesine karşılık elde edilen sonuçlar daha doğrudur. Sonuca daha sihatli yaklaşılmaması istendiğinde Runge-Kutta yönteminin kullanılması uygun olur.

Çalışmanın ana bölümlerini meydana getiren II, III. ve IV. bölümler birbirini tamamlamaktadır. Örneğin, transient-stabilite analizi yapmak istediğimiz bir enerji sisteminde önce sistemin optimum bir şekilde modellenmesi ve bunun ardından her bir artım aralığı için seçilen çözüm yöntemine göre bir, iki veya dört defa sistemde yük akış analizi yapılması gerekir. Uygun yük akış analizi yönteminin seçilmesi bilgisayarın optimum bir şekilde kullanılması demektir. Sonuç olarak optimum bir şekilde çözüme ulaşmamız kullanılan analiz yöntemlerinin en uygun seçilmesi ile mümkün olur. Bu şekilde yapılan seçim, bilgisayarın optimum kullanılmasını dolayısıyla istenen ekonomiyi sağlar.

- 8) H. H. C. : Algorithms for Direct Computation and Modification of Solution (Inverted) Matrices of Networks Including Mutual Impedances, 1972 Proc. Power Ind. Computer Appl. Conf.; Phoenix, Ariz., (1963), 150-166.
- 9) E. E. E. : Electric Power Transmission Systems, Second Edition, New Jersey, Prentice-Hall, Inc., 1983.
- 10) Knight, W. G. : Power Systems Engineering and Mathematics, Second Edition, New York, John Wiley-Sons, Inc., 1975.
- 11) Knable, A. E. : Electrical Power Systems Engineering Problems and Solutions, New York, Mc Graw-Hill, Inc., 1967.
- 12) Kieback, E. W. : Power-System Stability, New York, John Wiley and Sons, Inc., Volume I, 1948.
- 13) Koyuncu, A. : Elektrik Sistemlerinin Çok-Bölü Elemanlı Sistemler Olarak İncelenmesi, Doktora Tezi, 1987.
- 14) Stevenson, W. D. : Elements of Power System Analysis, Third Edition, Tokyo, Mc Graw-Hill Kogakusha, Ltd., 1975.
- 15) Stagg, G. W., El-Abiad, A. H. : Computer Methods in Power System Analysis, New York, Mc Graw-Hill, Inc., 1968.
- 16) Shipley, S. B. : Introduction to Matrices and Power Systems, New York, John Wiley and Sons, Inc., 1976.



KAYNAKLAR

- 1) Anderson, P.M. : Power System Control and Stability-Power System Dynamics Short Course, Iowa State University, 1973
- 2) Brown, H.: Solution of Laue Networks by Matrix Methods, First Editon, New York, John Wiley and Sons, Inc., 1975
- 3) Clarke, E.: Circuit Analysis of A.C Power Systems, Vol.1, New York, John Wiley and Sons, Inc. 1956
- 4) Çakır, H.: Güç Sistem Analizi, İstanbul, Ders Notları, Y.Ü. 1985
- 5) Çakır, H., Dinler, S.: Güç Sistemlerinde Bara Empedans ve Admitans Matrislerinin Hesaplanması, İstanbul, Y.Ü.Dergisi, 1985/2.
- 6) Elgerd, O.I.: Electric Energy Systems Theory : An Introduction, New Delhi, Tatd Mc Graw-Hill Publishing Company Ltd., 1979.
- 7) El-Abiad, A.H.: Algorithms for Direct Computation and Modification of Solution (Inverted) Matrices of Networks Including Mutual Impedances, IEEE Proc. Power Ind. Computer Appl. Conf.; Phoenix, Ariz., (1963), 150-166.
- 8) Eaton, J.R., Cohen, E.: Electric Power Transmission Systems, Second Edihon, New Jersey, Prentice-Hall, Inc., 1983.
- 9) Knight, U.G.: Power Systems Engineering and Mathematics, Second Edition, New York, Johu Wiley-Sons, Inc., 1975.
- 10) Knable, A.H.: Electrical Power Systems Engineering Problems and Solution.. New York, Mc Graw-Hill, Inc., 1967.
- 11) Kimbark, E.W. : Power System Stability. New York, John Wiley and Sons, Inc., Volume I. 1948
- 12) Kaypmaz, A.: Elektrik Şebekelerinin Çok-Uçlu Eleman Kavramı Yardımıyla İncelenmesi, Doktora Tezi, 1981.
- 13) Stevenson, W.D.: Elements of Power System Analysis, Third Editon, Tokyo, Mc Graw-Hill Kogakusha, Ltd., 1975.
- 14) Stagg, G.W., El-Abiad, A.H.: Computer Methods in Power System Analysis, New York, Mc Graw-Hill, Inc., 1968.
- 15) Shipley, R.B.: Introduction to Matrices and Power Systems, New York, John Wiley and Sous, Inc., 1976.



- 16) Stott, B., Tarkan. O.: Elektrik Şebekeleri Çözümlerinde Modern Metodlar, Ankara, O.D.T.Ü.Müh.Fakültesi, Yayın No.24, 1969.
- 17) Tokad, Y.: Foundations of Passive Elektrical Network Synthesis. Vol. I, Ankara, M.E.T.Ü.Faculty of Engineering Publication, Yayın No 41, 1972.
- 18) Weredy, B.M.: Electric Power Systems, Third Editon, New York, John Wiley and Sous, 1979.
- 19) Yu, Yao-nan.: Electric Power System Dynamics, London, Academic Press, Inc., 1983.
- 20) Bajpai, A.C., Mustoe, L.R., Walker, D.: Engineering Mathematics, London, John-Wiley and Sons, 1974.
- 21) Cornabun, B., Luther, H.A., Wilkes, O.J.: Applied Numerical Methods, New York, John Wiley and Sous, Inc., 1969.
- 22) Dervişoğlu, A.: Mühendislikte Bilgisayarla Analiz Yöntemleri İstanbul, Ders Notları, İ.T.Ü., 1983.
- 23) Hildebrand, F.B.: Introduction to Numerical Analysis, New York, Mc Graw_hill Book Co., 1956.
- 24) Hamming, H.E.: Numerical Methods for Scientists and Engineers, New York, Mc Graw-Hill Book Co., 1962.
- 25) Kreyszig, E.: Advanced Engineering Mathematics, Third Editon, New York, John-Wiley and Sous, Inc., 1972.
- 26) Lance, N.G.: Namerical Methods for Highspeed Computers, London, Hiffe and Sons, 1960.
- 27) Lewis, W.E., Pryce, D.G.: The Application of Matrix Theory to Electrical Engineering, Science Paperbacks.
- 28) Milue, W.E.: Numerical Solutions of Differential Equations, New York, John Wiley and Sous, Inc., 1953.
- 29) Mc Cormick, J.M., Salvodori, M.G.: Mumerical Methods in Fortron, New Delhi, Prentice-Hall of India Private Limited, 1968.
- 30) Martens, R.H.: Introduction to Systems Theory, Ohio Charles E. Werrill Publishing Co., 1969
- 31) Wylie, C.R.: Advanced Engineering Mathematics, New York, Mc-Graw-Hill Book Company, Inc., 1975.



TEŞEKKÜR

Her zaman ve her konuda destek ve yardımlarını gördüğüm
tez yöneticisi kıymetli hocam, Sayın Prof.Mehmet DALFES'e teşekkürü
bir borç bilirim.

Birlikte çalıştığım ve değerli fikirlerinden yararlandığım
hocam, Sayın Doç.Dr.H.Nusret YÜKSELER'e teşekkür ederim.



ÖZGEÇMİŞ

Hüseyin ÇAKIR 1948 yılında İskeçe'de doğdu. İlk, orta, lise (Maçka Erkek Sanat Enstitüsü) tahsilini İstanbul'da tamamladı. Daha sonra Yıldız Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümüne girdi. 1971 yılında Lisans ve 1972 yılında lisans üstünden Yüksek Mühendis olarak mezun oldu. Aynı yıl Elektrik Mühendisliği Elektrik Tesisleri Kürsüsüne asistan olarak atandı. 1976 yılında Yeterlik Çalışması yaptı. 1977-1978 yılları arasında A.B.D.'de George Washington Üniversitesi'nde araştırmalar yaptı. 1979 yılında Doçentliğe yükseltildi. 1982 yılı sonuna kadar Elektrik Tesisleri Kürsüsü Yöneticiliğini yürüttü. Elektrik Fakültesi Dekan Yardımcılığı ve Elektrik Mühendisliği Bölüm Başkanı yardımcılığı görevlerinde bulunan ve halen Elektrik Tesisleri ve Sistemleri Bilim Dalı Başkanı olan Hüseyin ÇAKIR evlidir.

